

ESPERIENZE SULLA CALIBRAZIONE DEI SISTEMI GPS/IMU: VALIDAZIONE INDIPENDENTE E INCROCIATA, RISTIMA DELLA LUNGHEZZA FOCALE, VERIFICA DELLA STABILITÀ NEL TEMPO

V. Casella^a, M. Franzini^a

^a DIET, Università degli Studi di Pavia, via Ferrata, 1 Pavia, Italy
(vittorio.casella, marica.franzini)@unipv.it

KEY WORDS: Fotogrammetria, GPS/IMU, Georeferenziazione diretta, Calibrazione, Accuratezza

RIASSUNTO

Il presente lavoro illustra una selezione di risultati relativa ad un più vasto lavoro riguardante la calibratura di sistemi GPS/IMU e la valutazione della qualità della georeferenziazione diretta (GD) in fotogrammetria. Utilizzando il test-site di Pavia (PTS) ed una complessa struttura di voli realizzata sopra di esso, è possibile realizzare una validazione rigorosa ed indipendente di risultati. Ciò significa: la possibilità di calibrare su un volo e testare su un altro, totalmente indipendente; l'uso disgiunto di un due differenti set di punti di controllo a terra per la calibrazione e la validazione dei risultati della georeferenziazione diretta; l'analisi della stabilità di calibrazione nel tempo.

ABSTRACT

The paper concerns selected results from a vast work regarding calibration of GPS/IMU systems and quality of direct georeferencing in photogrammetry. Thanks to Pavia's Test Site (PTS) and to a complex structure of flights which were acquired above it, it is possible to perform rigorous and independent validation of results. This means: the possibility of calibrating on one flight and validating on another, totally independent; the usage of disjoint sets of points for calibration and for assessing the results of direct georeferencing; investigation of time stability of calibration.

1. INTRODUZIONE

La georeferenziazione diretta in fotogrammetria è una tecnica oggi largamente usata e, dal punto di vista concettuale, ben nota. Ciononostante, esistono alcuni aspetti di tale tecnologia che sono ancora oggetto di ricerca. Alcuni aspetti appartengono al livello applicativo e riguardano la definizione delle strategie ottimali per l'esecuzione dei voli e per la calibrazione dei sistemi GPS/IMU. Diversi problemi appartengono a questo primo gruppo: la frequenza di calibrazione dell'IMU, il modo di gestire il problema della lunghezza focale, il modello matematico da adottare per la calibrazione del sistema (uno o due passi, tre o sei parametri), la scelta del sistema di riferimento da usare (cartesiano locale o cartografico). Tutti questi aspetti sono già stati affrontati precedentemente ma, è nostra opinione che sia ancora necessario un attento studio analitico che porti a derivare conclusioni di validità generale.

Esistono altri problemi di livello intermedio: l'identificazione di errori sistematici e l'accertamento del loro peso nell'accuratezza finale; gli effetti legati al ritardo nella registrazione temporale dell'istante di apertura dell'otturatore ed i modi per eliminarli. Per ottenere conclusioni affidabili è necessario disporre di data-set completi dotati di una verità a terra molto buona: alcuni voli indipendenti, caratterizzati da diverse quote di volo e con strisciate volate in senso opposto e perpendicolare; molti CKP caratterizzati di una distribuzione densa e uniforme e ben rilevati.

Infine, esistono alcuni aspetti unicamente legati alla ricerca come lo studio del modello stocastico da utilizzare nei processi di calibrazione. Nella maggior parte dei casi, delle procedure attualmente utilizzate, la calibrazione dell'IMU è realizzata con una procedura cosiddetta a due passi in cui ad ogni immagine viene dato lo stesso peso. Anche se il filtro di Kalman produce le varianze dei parametri di orientamento esterno per ogni istante, varianze i cui valori differiscono significativamente, esse non vengono tenute in considerazione.

Il presente lavoro illustra una selezione dei risultati di un più vasto lavoro riguardante la calibrazione dei sistemi GPS/IMU e la valutazione della GD in fotogrammetria aerea.

Uno degli scopi del presente articolo è la *validazione rigorosa* dei risultati, realizzata utilizzando un set di punti di controllo a terra del tutto indipendente da quello impiegato per la calibrazione e tre blocchi fotogrammetrici volati a tre quote diverse. Un altro

importante aspetto è la *cross validazione* usufruendo i dati provenienti da due identici ma differenti e quindi indipendenti voli. Infine, un ulteriore aspetto analizzato, è la *stabilità nel tempo*, sebbene a breve termine.

La stabilità della calibrazione del GPS/IMU è stata sinteticamente investigata da Michael Cramer (Cramer, 2002). Egli ha inoltre analizzato i problemi legati alla self-calibrazione della camera e all'accuratezza della fotogrammetria diretta; al contrario, non ha condotto uno studio del tutto rigoroso utilizzando lo stesso insieme di 21 punti sia GCP sia come CKP ed a assegnato la stessa varianza ad ogni orientamento esterno. Infine, non avendo a disposizione più altezze di volo, non ha potuto analizzare il problema legato alla ristima della lunghezza focale.

Il test OEEPE (ora EuroSDR) è ben noto e largamente usato come termine di paragone per gli studi relative alla georeferenziazione diretta in fotogrammetria. Nell'ambito del test, punti di appoggio e di controllo sono stati tenuti separati anche se lo stesso volo è stato utilizzato per calibrare e testare la tecnica, compromettendo così gli studi inerenti alla stabilità della calibrazione. Ciononostante, grazie alla presenza di due quote di volo, il problema della ristima della distanza principale è stato indagato: la presenza di una terza quota avrebbe però permesso un validazione indipendente dei risultati.

Tentativi di analisi approfondita del miglior modello stocastico da utilizzare sono stati compiuti da (Skaloud and Schaer, 2003) e (Pinto e alii, 2004). Il primo provando a modellare la correlazione tra soluzioni successive del filtro di Kalman; l'ultimo considerando le varianze degli orientamenti esterni determinate attraverso la triangolazione aerea (TA), ma non quelle provenienti direttamente dal processamento dei dati GPS/IMU; essi inoltre affrontano il problema della correlazione tra i vari passi del filtro di Kalman.

2. IL TEST-SITE ED IL DATA-SET

A partire dal 1999 è stato costituito e costantemente arricchito un test-site sulla città di Pavia. Nell'ambito del PRIN 2002, nuovi voli fotogrammetrici e nuovi punti di controllo a terra sono stati acquisiti, fornendo a Pavia uno dei più completi e complessi data-set fotogrammetrici presenti, anche a livello internazionale.

Volo	Data	Scala media	Lunghezza focale	Altezza relative di volo	Ricoprimento	Strisciate	Immagini
pv1	14/05/03	1:5000	150 mm	750 m	60/30	8	139
		1:8000	150 mm	1200 m	60/60	11	131
		1:18000	150 mm	2700 m	60/60	2	19
pv2	16/05/03	1:5000	150 mm	750 m	60/30	8	135
		1:8000	150 mm	1200 m	60/60	11	128
		1:18000	150 mm	2700 m	60/60	2	15
pv3	06/04/03	1:5000	300 mm	1500 m	60/30	8	146
		1:8000	300 mm	2400 m	60/60	11	145
pv4	17/03/03	1:8000	300 mm	2400 m	60/60	11	135

Tabella 1. Riassunto dei voli effettuati sopra Pavia

Più di 200 marker artificiali, costituiti da quadrati bianchi di 35 cm di lato direttamente dipinti sul terreno, e circa 60 punti naturali, costituiscono il poligono di calibrazione. Nella primavera del 2003, quattro differenti voli sono stati acquisiti sopra Pavia dalla Compagnia Generale Ripreseeree con un aereo equipaggiato con una camera Wild RC30 e un sensore Applanix POS/AV 510 (Tabella 1). Due di questi voli sono stati effettuati con una focale a 300 mm, mentre gli altri due con focale a 150 mm. Ogni volo è composto da un certo numero di blocchi volati a differenti quote e caratterizzati dalle scale 1:5000, 1:8000 e 1:18000. La struttura dei blocchi è estremamente complessa e costituita da strisciate volate in direzioni opposte e strisciate volate perpendicolarmente. Questa singolare configurazione dei blocchi è stata progettata ed adottata con lo scopo di decorrelare ogni possibile fonte di errore rendendo possibile un'analisi accurata e approfondita delle problematiche connesse alla fotogrammetria diretta (determinazione dei parametri di calibrazione, ristima dell'orientamento interno, errori di sincronizzazione temporale, etc.).

3. VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DELLE TRIANGOLAZIONI AEREE

Le triangolazioni aeree (TA) sono state effettuate per tutti i sei blocchi a disposizione con il programma BLUH dell'Università di Hannover. Gli AGCP sono stati separati in due insiemi: i veri e propri GCP, utilizzati per l'appoggio, e i CKP, usati per la validazione indipendente della qualità finale dei risultati. Le TA sono state eseguite in un sistema cartesiano locale, da cui l'utilizzo dei simboli e , n ed u per indicare le componenti.

Allo scopo di valutare la qualità delle misurazioni effettuate sulle immagini e per stabilire i limiti di accuratezza ottenibili dai nostri dati, è stata condotta una rigorosa validazione degli orientamenti esterni (OE) derivanti dalle TA: le coordinate oggetto dei CKP sono state determinate per via fotogrammetria e confrontate con quelle vere ottenute da rilevamenti GPS. In Tabella 2 sono riassunti i risultati: la seconda colonna riporta il numero dei CKP utilizzati, la terza il numero delle osservazioni, che rappresentano il numero di misure fotogrammetriche realizzate e testate; la procedura utilizzata implementa la restituzione a modelli singoli, normalmente adoperata nella restituzione cartografica, e quindi un certo punto può comparire più di una volta. Le colonne dalla 4 alla 6 riportano

le differenze medie tra coordinate restituite e coordinate vere. Infine, le colonne dalla 7 alla 9, le deviazioni standard delle stesse differenze.

Volo	Pts	Obs	μ_{Δ_e} [m]	μ_{Δ_n} [m]	μ_{Δ_u} [m]	σ_{Δ_e} [m]	σ_{Δ_n} [m]	σ_{Δ_u} [m]
pv1-5000	167	613	-0.007	0.005	0.012	0.038	0.037	0.055
pv1-8000	193	1139	0.006	-0.006	0.010	0.046	0.055	0.087
pv1-18000	132	341	0.016	-0.014	-0.021	0.094	0.104	0.163
pv2-5000	147	570	-0.005	-0.006	0.012	0.053	0.054	0.076
pv2-8000	185	1068	0.007	0.004	-0.011	0.050	0.057	0.101
pv2-18000	159	382	0.009	0.029	-0.048	0.086	0.111	0.209

Tabella 2. Accuratezze ottenute dagli OE derivanti dalle TA

4. LA CALIBRAZIONE DELL'IMU

La calibrazione del sensore IMU è stata realizzata sei volte, utilizzando tutti i blocchi considerati. Le TA di riferimento, come esposto precedentemente, sono state elaborate con BLUH, mentre i successivi passi, calibrazione, determinazione dell'orientamento diretto e validazione, sono stati eseguiti con procedure appositamente scritte dagli autori in ambiente Matlab.

In Tabella 3 sono riassunti i risultati ottenuti: la seconda colonna mostra il numero delle immagini usate; le successive tre contengono i valori dei *lever arm*, indicati con D ; le seguenti tre i valori dei *boresight misalignment*, indicati con M ; ed infine le ultime sei riportano le deviazioni standard per i sopraccitati parametri.

Le calibrazioni sono state realizzate con l'usuale procedura a due passi e i vettori D ed M determinati prendendo semplicemente in considerazione la media aritmetica delle differenze tra gli OE delle TA e quelli direttamente misurati dal sistema inerziale, una volta ricondotti allo stesso sistema di riferimento. La calibrazione condotta sull'1:18000 è meno affidabile rispetto alle altre a causa del limitato numero di immagini a disposizione. In generale i *misalignment* stimati sono molto buoni, come mostrato dal fatto che i valori sono molto prossimi a quelli forniti dalla casa produttrice, e abbastanza stabili tra una calibrazione e l'altra.

I *lever arm* stimati sono invece meno stabili. In linea di principio, se non ci fossero errori sistematici, tutti i valori delle colonne da 3 a 5 dovrebbero contenere la stessa quantità. Ma almeno un errore sistematico è presente legato all'errata lunghezza focale riportata nel certificato di calibrazione ed utilizzata per le TA; questo bias viene riassorbito dalla componente D_z stimata durante la calibrazione quindi, essendo gli effetti dell'errata distanza principale connessi con la quota di volo, è naturale aspettarci una variazione di tale parametro tra una altezza di volo e l'altra.

Variazione nelle componenti planimetriche di D e variazione delle componenti altimetriche tra voli diversi sono erano tuttavia aspettate. Le differenze osservate potrebbero essere causate da errori accidentali di misura, sicuramente presenti, e da altri errori sistematici, come ad esempio quelli connessi al time-recording. Futuri lavori analizzeranno più dettagliatamente il problemi legati alla presenza di errori accidentali tramite uno studio statistico rigoroso delle differenze tra le diverse calibrazioni.

I successivi parametri, tuttavia, mostreranno che le differenze riscontrate tra i vari parametri di calibrazione producono minimi effetti nelle accuratezze finali dei punti restituiti.

Volo	Photo	D_x [m]	D_y [m]	D_z [m]	M_x [grad]	M_y [grad]	M_z [grad]	σ_{D_x} [m]	σ_{D_y} [m]	σ_{D_z} [m]	σ_{M_x} [grad]	σ_{M_y} [grad]	σ_{M_z} [grad]
pv1-5000	80	-0.174	-0.048	-0.146	-0.7227	0.1521	-0.0614	0.053	0.064	0.034	0.0075	0.0042	0.0049
pv1-8000	76	-0.134	-0.113	-0.220	-0.7204	0.1553	-0.0609	0.075	0.081	0.031	0.0044	0.0039	0.0041
pv1-18000	8	0.027	-0.076	-0.400	-0.7253	0.1586	-0.0633	0.101	0.092	0.050	0.0024	0.0039	0.0029
pv2-5000	84	-0.166	-0.015	-0.154	-0.7253	0.1522	-0.0605	0.086	0.098	0.040	0.0082	0.0053	0.0059
pv2-8000	77	-0.173	-0.041	-0.156	-0.7240	0.1546	-0.0617	0.094	0.105	0.034	0.0047	0.0044	0.0040
pv2-18000	8	-0.215	0.028	-0.292	-0.7238	0.1570	-0.0672	0.203	0.182	0.110	0.0024	0.0071	0.0033

Tabella 3. Parametri di calibrazione ottenuti per i sei blocchi in esame

5. ACCURTEZZE DELLA GD CON CALIBRAZIONI OMOGENEE

Validazioni omogenee sono state eseguite per i sei blocchi considerati. Le validazioni sono state effettuate nello stesso modo descritto nel paragrafo 0, restituendo circa 160 CKP. Il termine *omogeneo* deriva dal fatto che validazione e calibrazione sono riferite alla stessa quota di volo, come specificato nella colonna 1 e 2 della Tabella 4: questa analisi, pur non essendo rappresentativa del normale procedura di elaborazione, ci permette, tuttavia, di definire le accuratezze migliori ottenute con la GD. Comparando la Tabella 2 e la Tabella 4, è possibile notare come le accuratezze ottenute nel secondo caso non siano così lontane da quelle raggiunte dalla TA, nel caso di dati omogenei preso in esame.

6. CROSS-VALIDAZIONI ALL'INTERNO DELLO STESSO VOLO

Inizialmente sono state effettuate anche delle cross-validazioni all'interno dello stesso volo. Per motivi di spazio vengono mostrate solo i risultati per il volo pv1 e, per lo stesso motivo, solo le calibrazioni relative ai blocchi pv1-5000 e pv1-8000.

I risultati sono riassunti in Tabella 5, le cui linee 1 e 5 coincidono con le linee 1 e 2 della Tabella 4. Passando dalla calibrazione omogenea a quella eterogenea, gli errori accidentali si mantengono, in generale, inalterati mentre, qualche volta, le componenti planimetriche si accrescono del 50% circa. Osservando gli errori sistematici, è chiaramente visibile un aumento del loro valore nella componente *up*: questo sottolinea come il valore di lunghezza focale usata, e ricavata dal certificato di calibrazione della camera, sia in realtà significativamente diversa da quella vera.

Calibrazione	Validazione	Pts	Obs	$\mu_{\Delta e}$ [m]	$\mu_{\Delta n}$ [m]	$\mu_{\Delta u}$ [m]	$\sigma_{\Delta e}$ [m]	$\sigma_{\Delta n}$ [m]	$\sigma_{\Delta u}$ [m]
pv1-5000	pv1-5000	167	613	0.054	-0.027	0.013	0.056	0.064	0.112
pv1-8000	pv1-8000	193	1139	0.055	-0.051	0.002	0.060	0.072	0.109
pv1-18000	pv1-18000	132	341	0.100	-0.068	0.065	0.107	0.138	0.219
pv2-5000	pv2-5000	147	570	0.085	-0.006	0.001	0.073	0.075	0.097
pv2-8000	pv2-8000	185	1068	0.097	-0.032	-0.007	0.057	0.073	0.109
pv2-18000	pv2-18000	159	382	0.182	-0.102	-0.142	0.099	0.144	0.288

Tabella 4. Accuratezza della GD con calibrazioni omogenee

Calibrazione	Validation	Pts	Obs	$\mu_{\Delta e}$ [m]	$\mu_{\Delta n}$ [m]	$\mu_{\Delta u}$ [m]	$\sigma_{\Delta e}$ [m]	$\sigma_{\Delta n}$ [m]	$\sigma_{\Delta u}$ [m]
pv1-5000	pv1-5000	167	613	0.054	-0.027	0.013	0.056	0.064	0.112
pv1-5000	pv1-8000	193	1139	0.052	-0.051	0.076	0.065	0.076	0.114
pv1-5000	pv1-18000	132	339	0.100	-0.088	0.283	0.165	0.190	0.220
pv1-8000	pv1-5000	167	613	0.052	-0.027	-0.061	0.061	0.073	0.114
pv1-8000	pv1-8000	193	1139	0.055	-0.051	0.002	0.060	0.072	0.109
pv1-8000	pv1-18000	132	340	0.111	-0.086	0.199	0.109	0.221	0.202

Tabella 5. Accuratezze della GD con cross-calibrazioni, all'interno dello stesso volo

Calibrazione	Validazione	Pts	Obs	μ_e [m]	μ_n [m]	μ_u [m]	σ_e [m]	σ_n [m]	σ_u [m]
pv2-5000	pv1-5000	167	613	0,054	-0,028	0,007	0,057	0,064	0,112
pv2-8000	pv1-8000	193	1139	0,057	-0,052	0,068	0,064	0,073	0,113
pv2-18000	pv1-18000	340	132	0,114	-0,077	0,162	0,218	0,226	0,211
pv1-5000	pv2-5000	147	570	0,086	-0,006	0,008	0,073	0,075	0,097
pv1-8000	pv2-8000	185	1068	0,096	-0,033	-0,071	0,063	0,076	0,110
pv1-18000	pv2-18000	158	380	0,182	-0,090	-0,233	0,221	0,217	0,286

Tabella 6. Accuratezze della GD con cross-calibrazioni, utilizzando voli differenti

7. VALIDAZIONI INCROCIATE UTILIZZANDO VOLI DIFFERENTI: STABILITÀ NEL BREVE PERIODO

Le cross-validazioni sono state eseguite tra il volo pv1 ed il volo pv2 e i risultati riassunti in Tabella 6. I risultati sono sorprendentemente buoni, ma bisogna anche considerare che i due voli analizzati sono separati da sole 48 ore. Nel volo alla scala 1:8000 appaiono errori sistematici, nella componente altimetrica, più codesti. Questo fenomeno deriva dal fatto che la lunghezza

focale ristimata per i due voli a una differenza di circa 10 micron. In altre parole, la componente D_z del lever arm, stimata entro il blocco con la stessa quota di volo, ma in due giorni differenti, mostra una sostanziale differenza (Tabella 3).

8. RISTIMA DELLA LUNGHEZZA FOCALE

La ristima della lunghezza focale è stata effettuata per entrambi i voli pv1 e pv2. La correzione di c è stata calcolata per ogni blocco tramite TA utilizzando congiuntamente le usuali osservazioni fotogrammetriche e la misure del centro di presa della camera fornite dal GPS; questo ha richiesto un attento studio della strategia da utilizzare per pesare opportunamente le diverse informazioni.

E' noto che la variazione alla lunghezza focale cambia in relazione alla quota per cui non è strettamente corretto assegnare un unico valore per l'intero volo. Per motivi di semplificazione, però, all'interno del presente paragrafo, un unico valore di correzione per c è stato stimato ed applicato. Mediando i diversi risultati ottenuti per il data-set pv1, è stato stabilito che la correzione da applicare al valore nominale della lunghezza focale, è di circa 30 micron.

Dopo la correzione di c , una nuova calibrazione del sistema GPS/IMU è stata realizzata; solo il blocco pv1-8000 è stato preso in considerazione per motivi di spazio, i risultati sono riportati in Tabella 7. Confrontando i nuovi parametri di calibrazione con quelli precedentemente determinati, e contenuti nella terza riga di Tabella 3, l'unica significativa differenza è rappresentata, come era prevedibile, dal valore di D_z .

La validazione di questo nuovo set di parametri è stato realizzato per tutti e tre i blocchi del volo pv1 ed i risultati sono riportati in Tabella 8. Per le combinazioni omogenee di calibrazione e validazione, niente è cambiato, come la linea 3 della Tabella 8 e la linea 3 della Tabella 4 mostrano. Quello che è veramente interessante è che le cross-validazioni mostrano errori sistematici in quota molto ridotti: questi piccoli errori sono dovuti a differenze residue tra le lunghezze focali alle varie quote di volo.

Volo	Foto	D_x [m]	D_y [m]	D_z [m]	M_x [grad]	M_y [grad]	M_z [grad]	σ_{D_x} [m]	σ_{D_y} [m]	σ_{D_z} [m]	σ_{M_x} [grad]	σ_{M_y} [grad]	σ_{M_z} [grad]
pv1-8000	76	-0.131	-0.111	0.019	-0.7204	0.1554	-0.0609	0.075	0.08	0.03	0.0043	0.0040	0.0041

Tabella 7. Calibrazione del sistema GPS/IMU per il volo pv1-8000, dopo la correzione della lunghezza focale

Calibrazione	Validazione	Pts	Obs	μ_e [m]	μ_n [m]	μ_u [m]	σ_e [m]	σ_n [m]	σ_u [m]
pv1-8000	pv1-5000	167	623	0,051	-0,027	0,026	0,061	0,073	0,115
pv1-8000	pv1-8000	193	1139	0,055	-0,051	0,002	0,060	0,072	0,108
pv1-8000	pv1-18000	132	340	0,110	-0,082	-0,088	0,110	0,225	0,209

Tabella 8. Accuratezza della GD, dopo la correzione della lunghezza focale

9. CONCLUSIONI

Vari aspetti della calibrazione del sistemi GPS/IMU e della valutazione della qualità della georeferenziazione diretta sono stati affrontati. Alcune combinazioni di voli sono state utilizzate per le calibrazioni e le validazioni. L'accuratezza della tecnica è stata valutata utilizzando sia la lunghezza focale nominale che quella ristimata; è stata studiata inoltre, la stabilità nel breve periodo.

Future attività sulle stesse tematiche saranno affrontate: l'applicazione sistematica delle metodologie illustrate sull'intero data-set disponibile, studi sulla stabilità nel tempo della lunghezza focale ristimata, l'analisi della variazione della lunghezza focale in relazione alla variazione dell'altezza di volo, la valutazione degli errori indotti dai ritardi nel time-recording.

10. BIBLIOGRAFIA

- Cramer M., 2002. Investigations on long term stability of system calibration for direct georeferencing. Final project study, Institute for Photogrammetry and Remote Sensing (ifp), Stuttgart, Germany. http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2002-/IGL_final_report.pdf (accessed 4 Apr. 2005).
- Heipke C., Jacobsen K., Wegmann H., 2002. Analysis of the results of the OEEPE test "Integrated Sensor Orientation". Test Report and Workshop Proceedings, Official Publication n°43, Werbedruck Schereckhase, Spangenberg, pp.31-45.
- Honkavaara E., Ilves R., Jaakkola J., 2003. Practical results of GPS/IMU/camera system calibration. Proceedings of International Workshop (WG I/5) "Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation, Castelldefels, Spain, published on CD.
- Skaloud J., Schaer P., 2003. Toward a more rigorous boresight determination. Proceedings of International Workshop (WG I/5) "Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation, Castelldefels, Spain, published on CD.

Galetto R., Casella V., Spalla, A., Franzini, M., 2004. An Italian research project on direct photogrammetry. Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, published on DVD.

Pinto L., Forlani G., Passoni D., 2004. Experimental tests on the benefits of a more rigorous model in IMU/GPS system calibration. Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, published on DVD.

11. RINGRAZIAMENTI

La ricerca presentata nell'articolo utilizzata parte dei dati acquisiti nell'ambito del PRIN dal titolo "Sistemi di posizionamento integrato in fotogrammetria aerea", cofinanziato dal MIUR per l'anno 2002, e coordinato dal prof. Riccardo Galetto. Si ringrazia inoltre Compagnia Generale Ripreseeree per aver messo gentilmente a disposizione ulteriori dati.

Gli autori ringraziano i tecnici del *Laboratorio di Geomatica* dell'Università di Pavia, Giuseppe Girone e Paolo Marchese, che hanno eseguito molte delle misurazione utilizzate nella ricerca descritta.