

# PROBLEMI DI TIME-RECORDING IN FOTOGRAMMETRIA DIRETTA: ALCUNE ANALISI SUL DATA-SET DI PAVIA

V. Casella, M. Franzini

<sup>a</sup> 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, Time-recording

## RIASSUNTO

L'articolo analizza i problemi connessi al time-recording nella fotogrammetria diretta esaminando i dati acquisiti sulla città di Pavia nell'ambito del PRIN 2002 dal titolo "Sistemi di posizionamento integrato in fotogrammetria aerea". Verranno esposte le problematiche connesse alla sincronizzazione temporale dei sensori presenti sull'aereo (camera, GPS ed IMU), sarà fornita una breve descrizione dei dati a disposizione e del test-site associato, ed infine sarà illustrata brevemente una procedura per l'eliminazione degli ritardi di memorizzazione.

## ABSTRACT

The purpose of the paper is to analyze the problems connected with time-recording delay in direct photogrammetry. It will be used a data-set acquired above Pavia within the PRIN 2002 "Integrated inertial positioning systems in aerial Photogrammetry". The paper will show the problems connected with the temporal synchronization of the sensor carried on the plane (camera, GPS and IMU), a short description of data-set and associated test-site, and the procedure for time-recording delay elimination.

## 1. INTRODUZIONE

La fotogrammetria diretta è una tecnica ormai ben nota ed è utilizzata ampiamente nella produzione cartografica; mediante l'utilizzo di sensori integrati GPS/IMU è possibile conoscere direttamente i parametri di orientamento esterno (OE) dei fotogrammi. Numerose sperimentazioni sia a livello nazionale che internazionale hanno, negli ultimi anni, analizzato le potenzialità ed esplorato i limiti di questa tecnologia.

La triangolazione aerea garantisce, da un lato le massime accuratèzze raggiungibili, ma, dall'altro, richiede oneri di tempo e di informazioni (in termini di punti di legame e di appoggio) non trascurabili. Con l'avvento dei sistemi inerziali, accoppiati a ricevitori GPS, è possibile invece ottenere direttamente i sei parametri di orientamento necessari per tutte le successive fasi della produzione fotogrammetrica (generazione di DTM, creazione di ortofoto o restituzione cartografica). La fotogrammetria diretta ha quindi il merito di avere reso possibile, ed economicamente vantaggioso, l'utilizzo di immagini aeree in tutte quelle zone in cui l'acquisizione di informazioni sul terreno è difficile o impossibile (zone impervie) e dove la ricerca di punti di legame risulta estremamente gravosa (terreni a bassa tessitura). Va altresì detto che la fotogrammetria diretta ha introdotto nuove problematiche connesse principalmente allo studio e alla valutazione delle migliori strategie per la calibrazione dei sistemi coinvolti.

La camera e il sistema GPS/IMU materializzano due distinte terne di riferimento, prossime, ma non coincidenti. Per ricondurre le posizioni e gli assetti misurati dal sistema inerziale ai noti parametri di orientamento esterno fotogrammetrico, è necessario conoscere i parametri che legano questi due sistemi di riferimento. La determinazione di questi parametri viene fatta attraverso la calibrazione del sistema: nella cosiddetta procedura a due passi, partendo dalla conoscenza degli orientamenti esterni ottenuti attraverso una classica triangolazione aerea, è possibile determinare i parametri di trasformazione. Calibrare, dunque, significa determinare i sei parametri sopra indicati. A livello internazionale le tre componenti del vettore posizione vengono definiti *lever arms* mentre i tre angoli vengono definiti *boresight misalignments*.

Calibrare il sistema significa anche ricondurre ad un unico riferimento temporale tutti le parti coinvolte nel sistema. La camera fotogrammetrica e il sistema GPS/IMU acquisiscono le informazioni ad istanti diversi; è necessario, quindi, sincronizzare in modo corretto i dati provenienti dalle due sorgenti.

In letteratura molti autori hanno affrontato in modo approfondito e rigoroso il problema della calibrazione dei sensori, prestando particolare attenzione alla determinazione dei sei parametri sopraccitati. Ciononostante alcuni aspetti del problema restano ancora aperti a più approfondite analisi. La ristima della lunghezza focale, la stabilità della calibrazione e la sincronizzazione temporale sono esempi di tematiche ancora aperte alla discussione. Il presente articolo è focalizzato sullo studio dei problemi connessi al *time-recording* analizzando i dati acquisiti sul test-site di Pavia.

## 2. IL PROBLEMA DEL TIME-RECORDING

Il sistema GPS/IMU è in grado di fornire i sei parametri di orientamento esterno necessari per eseguire le misure fotogrammetriche. Se da un lato il sistema inerziale, per le alte frequenze utilizzate, registra praticamente in continuo la posizione e l'assetto dell'aereo durante il volo, dall'altro la camera memorizza unicamente, e del tutto indipendentemente, gli istanti corrispondenti all'apertura dell'otturatore. Per ricavare i parametri di OE, è quindi sufficiente andare a leggere sulla traiettoria disegnata dal GPS/IMU le informazioni di posizione ed assetto relative ad ogni istante di scatto memorizzato. E' quindi di fondamentale importanza che le informazioni temporali registrate dalla camera sia del tutto sincronizzate con l'effettivo istante di esposizione.

Nella tradizionale triangolazione aerea questo aspetto è del tutto trascurabile in quanto la corretta registrazione dell'istante di scatto non influenza in nessun modo i risultati finali: le registrazioni temporali non entrano in nessun modo in gioco nella determinazione dei parametri di OE. In fotogrammetria diretta, al contrario, un errore di memorizzazione implica un errore di determinazione dei corretti parametri di orientamento. Ritardare o anticipare la registrazione dell'istante di esposizione implica, dal punto di vista planimetrico ad esempio, assegnare al fotogramma in esame una posizione leggermente più avanzata o arretrata rispetto a quella vera. Un errore di time-recording comporta quindi un'errata assegnazione dei parametri di posizione ed assetto; errata assegnazione che, per le caratteristiche sopra descritte, si scarica principalmente nella componenti planimetriche dirette lungo la direzione di volo.

Se dal punto di vista teorico, il problema del time-recording è ben noto, dal punto di vista pratico esso non è sempre così facilmente identificabile. Esistono diverse fonti di errore strettamente legate tra loro che influenzano prevalentemente l'accuratezza planimetrica: l'eccentricità del sistema GPS/IMU rispetto al sistema camera, la posizione del punto principale di autocollimazione (PPA), gli errori di time-recording e, non da ultimo, gli errori accidentali di misura. Disponendo di voli dotati di strisciate volate in direzioni opposte e di strisciate cross, nonché di diverse quote di volo, è possibile decorrelare queste fonti di errore e procedere ad un'analisi approfondita dei problemi più strettamente connessi alla memorizzazione dei dati effettuata dai sensori.

Disponendo inoltre dei dati relativi alla traiettoria originale registrata dal GPS/IMU (memorizzata nel sistema Applanix in un file di tipo binario denominato SBET file), è possibile correggere gli errori indotti dal malfunzionamento del sistema di memorizzazione della camera; dall'osservazione degli errori planimetrici indotti dal time-recording è possibile ricavare l'errore temporale commesso dalla camera (come verrà più ampiamente mostrato nei successivi parametri) e quindi procedere ad una nuova rideterminazione dei parametri di OE.

## 3. IL DATA-SET DI PAVIA

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, ecc.).

#### 4. ANALISI SUL DATA-SET DI PAVIA

Le analisi presentate si riferiscono unicamente al volo pv1 effettuato nel maggio del 2003 e avente camera con lunghezza focale 150 mm. Le collimazioni sono realizzate monoscopicamente in ambiente Socet Set/Orima e le triangolazioni aeree (TA) compiute con il programma BLUH dell'Università di Hannover. Tutte le analisi per l'individuazione e l'eliminazione dei ritardi di registrazione sono state effettuate con programmi scritti appositamente dagli autori e realizzati in ambiente Matlab. Le TA sono state effettuate in un riferimento cartesiano locale e tutte i risultati riportati si riferiscono a tale sistema.

##### 4.1 Analisi condotte usando l'orientamento interno del certificato

Per analizzare in modo efficace le problematiche connesse con il time-recording verranno utilizzati i dati forniti dal sistema GPS/IMU non calibrati. La scelta adottata è motivata dal fatto che la calibrazione del sistema porterebbe ad un parziale riassorbimento degli errori di time-recording nei parametri di calibrazione, inficiando in questo modo la rigorosa valutazione dei risultati. Va altresì detto che la riduzione della posizione fornita dal GPS/IMU al centro di proiezione della camera è stato rilevato topograficamente in fase di installazione dei sensori ed è stata in questa fase applicata. Ulteriori correzioni al vettore eccentricità rilevato e i boresight misalignment rivestano importanza trascurabile in relazione ai vettori in gioco e verranno pertanto trascurati.

Per ogni singolo fotogramma viene calcolata la differenza tra il centro di presa stimato durante le TA e quello fornito dal sistema inerziale. In Tabella 2, Tabella 3 e Tabella 4 sono riportati i risultati relativi alle tre altezze di volo per il volo in esame; vengono mostrate le medie e le deviazioni standard per l'intero blocco (es. pv1-5000) e per ogni singola strisciata (es. pv1-5000-1-N) volata con il muso dell'aereo rispettivamente in direzione Nord (N), Sud (S), Est (E) ed Ovest (O), come la lettera alla fine del nome sottolineato. Osservando le componenti dirette lungo la direzione di volo dell'aereo, x per quanto riguarda le strisciate E-O e y per le N-S (riportate in rosso nelle tabelle), si manifesta la presenza di un errore sistematico. Il fatto che ad un'immagine venga data una posizione della camera subito prima o dopo il reale momento dello scatto, si traduce quindi in un offset parallelo alla direzione di volo. Ad esempio la strisciata pv1-5000-1-N ha un valore di  $\mu_{\Delta y}$  pari a circa -17cm mentre la strisciata pv1-5000-2-S, volata in senso opposto, ha un  $\mu_{\Delta y}$  di circa +17cm. Analogamente per le strisciate volate in senso E-O, pv1-5000-3-E ha un  $\mu_{\Delta x}$  pari a circa -15cm e pv1-5000-4-O di circa +21cm. Quando viene infine esaminato l'intero blocco (pv1-5000) questo errore si traduce in un allargamento della deviazione standard.

E' dunque visibile la presenza di un bias legato presumibilmente al ritardo di memorizzazione. Il time-recording non è tuttavia l'unico fattore ad entrare in gioco nei dati esaminati; altre fonti di errore sono presenti, prima tra tutte la posizione del PPA, e devono essere scorporate al fine di poter valutare nel miglior modo possibile le problematiche oggetto del presente lavoro. Alcuni sistematismi lungo le direzioni perpendicolari al moto dell'aereo (ad esempio, righe 2 e 4, colonna 3 della Tabella 2) fanno supporre la presenza di altri fenomeni in gioco; tali sistematismi dovranno essere attentamente indagati e saranno oggetto di future ricerche.

	N. immagini	$\mu_{\Delta x}$ [m]	$\mu_{\Delta y}$ [m]	$\mu_{\Delta z}$ [m]	$\sigma_{\Delta x}$ [m]	$\sigma_{\Delta y}$ [m]	$\sigma_{\Delta z}$ [m]
pv1-5000	80	0,052	-0,028	0,145	0,149	0,121	0,034
pv1-5000-1-N	8	0,118	<b>-0,166</b>	0,130	0,036	0,024	0,016
pv1-5000-2-S	8	0,022	<b>0,169</b>	0,135	0,030	0,040	0,006
pv1-5000-7-N	9	0,128	<b>-0,231</b>	0,092	0,020	0,043	0,020
pv1-5000-8-S	4	0,006	<b>0,143</b>	0,121	0,032	0,041	0,029
pv1-5000-3-E	12	<b>-0,145</b>	-0,047	0,159	0,043	0,048	0,016
pv1-5000-4-O	13	<b>0,207</b>	0,056	0,147	0,046	0,040	0,017
pv1-5000-5-E	13	<b>-0,134</b>	-0,045	0,190	0,043	0,034	0,028
pv1-5000-6-O	13	<b>0,201</b>	-0,028	0,141	0,053	0,043	0,031

Tabella 2. Blocco pv1-5000

	N. immagini	$\mu_{\Delta x}$ [m]	$\mu_{\Delta y}$ [m]	$\mu_{\Delta z}$ [m]	$\sigma_{\Delta x}$ [m]	$\sigma_{\Delta y}$ [m]	$\sigma_{\Delta z}$ [m]
pv1-8000	76	0,001	-0,013	0,220	0,162	0,130	0,031
pv1-8000-1-N	4	0,034	<b>-0,092</b>	0,239	0,081	0,033	0,030
pv1-8000-2-S	6	-0,004	<b>0,125</b>	0,226	0,103	0,059	0,045
pv1-8000-10-S	6	-0,120	<b>0,121</b>	0,216	0,063	0,059	0,033
pv1-8000-11-N	6	0,209	<b>-0,123</b>	0,207	0,065	0,073	0,035
pv1-8000-3-E	8	<b>-0,129</b>	-0,162	0,253	0,071	0,023	0,018
pv1-8000-4-O	7	<b>0,168</b>	0,020	0,212	0,066	0,051	0,029
pv1-8000-5-E	9	<b>-0,155</b>	-0,081	0,196	0,098	0,038	0,030
pv1-8000-6-O	8	<b>0,153</b>	0,107	0,219	0,042	0,054	0,023
pv1-8000-7-E	9	<b>-0,108</b>	-0,144	0,224	0,103	0,057	0,022
pv1-8000-8-O	9	<b>0,141</b>	0,155	0,223	0,091	0,038	0,018
pv1-8000-9-E	4	<b>-0,213</b>	-0,098	0,199	0,034	0,055	0,029

Tabella 3. Blocco pv1-8000

	N. immagini	$\mu_{\Delta x}$ [m]	$\mu_{\Delta y}$ [m]	$\mu_{\Delta z}$ [m]	$\sigma_{\Delta x}$ [m]	$\sigma_{\Delta y}$ [m]	$\sigma_{\Delta z}$ [m]
pv1-18000	8	-0,045	-0,055	0,402	0,091	0,103	0,049
pv1-18000-1-O	4	<b>-0,069</b>	0,013	0,382	0,128	0,089	0,066
pv1-18000-2-E	4	<b>-0,021</b>	-0,124	0,421	0,035	0,067	0,013

Tabella 4. Blocco pv1-18000

#### 4.2 Analisi condotte dopo la ristima del PPA

Come esposto nel paragrafo precedente, il time-recording non è l'unico fattore a concorrere alla formazione di errori sistematici lungo la direzione di volo. Un altro elemento che deve essere valutato attentamente è la posizione del PPA.

Le coordinate del PPA riportate nel certificato di calibrazione non sono esattamente le coordinate effettivamente presenti durante le fasi di voli a causa delle diverse condizioni ambientali in cui la camera si trova ad operare rispetto alla sua taratura in laboratorio. Analogamente a quanto viene fatto per la ristima della lunghezza, occorre disporre di alcuni fotogrammi a due quote di volo differenti per poter rideterminare la posizione del punto principale. Il data-set in esame possiede tre differenti altezze di volo ed è quindi possibile procedere alla ristima del PPA utilizzando di volta in volta due blocchi differenti (1:5000-1:8000, 1:5000-1:18000, 1:8000-1:18000) ed impiegando congiuntamente le osservazioni fotogrammetriche (punti di legame e di controllo) e quelle GPS opportunamente pesate. Analizzando i risultati delle tre combinazioni si è infine arrivati alla determinazione della corretta posizione del PPA; con queste nuove informazioni sono state ricalcolate le TA e quindi i nuovi orientamenti esterni per i tre blocchi in esame.

In Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7 sono riportati i risultati analoghi a quelli presentati nel paragrafo precedente ma depurati del contributo del PPA. E' ancora evidente la presenza di un errore sistematico legato alla direzione di volo che, a differenza dei dati riportati nel paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, risulta essere più stabile lungo le varie strisciate. Per la natura del ritardo del time-recording, cioè l'errata memorizzazione del tempo di apertura dell'otturatore, l'errore sistematico indotto sulla posizione dei centri di presa dovrebbe mantenersi costante, in valore assoluto, alle diverse quote di volo. La residua variabilità mostrata dai risultati riportati in tabella può essere legata, innanzitutto, alla diversa velocità mantenuta dall'aereo lungo le varie strisciate e, inoltre, alla presenza di errori accidentali del tutto indipendenti dai fenomeni presi in esame in questo articolo. Come già evidenziato precedentemente, si manifestano ancora alcuni bias lungo le componenti perpendicolari alla direzione di volo e che non sono evidentemente legate alla posizione del PPA.

	N. immagini	$\mu_{\Delta x}$ [m]	$\mu_{\Delta y}$ [m]	$\mu_{\Delta z}$ [m]	$\sigma_{\Delta x}$ [m]	$\sigma_{\Delta y}$ [m]	$\sigma_{\Delta z}$ [m]
pv1-5000	80	0,054	-0,035	0,142	0,247	0,195	0,035
pv1-5000-1-N	8	0,133	<b>-0,292</b>	0,134	0,037	0,022	0,018
pv1-5000-2-S	8	0,006	<b>0,296</b>	0,131	0,031	0,039	0,007
pv1-5000-7-N	9	0,148	<b>-0,357</b>	0,086	0,022	0,042	0,023
pv1-5000-8-S	4	-0,008	<b>0,272</b>	0,118	0,035	0,040	0,029
pv1-5000-3-E	12	<b>-0,272</b>	-0,065	0,157	0,044	0,049	0,017
pv1-5000-4-O	13	<b>0,333</b>	0,075	0,144	0,048	0,040	0,017
pv1-5000-5-E	13	<b>-0,259</b>	-0,061	0,185	0,043	0,036	0,027
pv1-5000-6-O	13	<b>0,325</b>	-0,010	0,139	0,052	0,044	0,030

Tabella 5. Blocco pv1-5000

	N. immagini	$\mu_{\Delta x}$ [m]	$\mu_{\Delta y}$ [m]	$\mu_{\Delta z}$ [m]	$\sigma_{\Delta x}$ [m]	$\sigma_{\Delta y}$ [m]	$\sigma_{\Delta z}$ [m]
pv1-8000	76	-0,017	-0,007	0,217	0,314	0,217	0,031
pv1-8000-1-N	4	0,070	<b>-0,288</b>	0,236	0,080	0,033	0,030
pv1-8000-2-S	6	-0,043	<b>0,322</b>	0,222	0,102	0,060	0,045
pv1-8000-10-S	6	-0,148	<b>0,320</b>	0,213	0,065	0,059	0,035
pv1-8000-11-N	6	0,236	<b>-0,323</b>	0,205	0,068	0,073	0,035
pv1-8000-3-E	8	<b>-0,329</b>	-0,192	0,250	0,071	0,026	0,018
pv1-8000-4-O	7	<b>0,369</b>	0,051	0,209	0,066	0,052	0,029
pv1-8000-5-E	9	<b>-0,355</b>	-0,107	0,194	0,097	0,040	0,030
pv1-8000-6-O	8	<b>0,351</b>	0,137	0,216	0,043	0,054	0,023
pv1-8000-7-E	9	<b>-0,308</b>	-0,160	0,220	0,103	0,057	0,023
pv1-8000-8-O	9	<b>0,339</b>	0,185	0,221	0,092	0,038	0,018
pv1-8000-9-E	4	<b>-0,412</b>	-0,123	0,196	0,034	0,055	0,028

Tabella 6. Blocco pv1-8000

	N. immagini	$\mu_{Ax}$ [m]	$\mu_{Ay}$ [m]	$\mu_{Az}$ [m]	$\sigma_{Ax}$ [m]	$\sigma_{Ay}$ [m]	$\sigma_{Az}$ [m]
pv1-18000	8	-0,043	-0,066	0,389	0,452	0,171	0,050
pv1-18000-1-O	4	<b>0,372</b>	0,079	0,368	0,126	0,089	0,068
pv1-18000-2-E	4	<b>-0,458</b>	-0,210	0,411	0,034	0,065	0,010

Tabella 7. Blocco pv1-18000

### 4.3 Stima dell'errore di sincronizzazione

La Tabella 8 mostra l'analisi dei risultati ottenuti nel paragrafo precedente in relazione alla velocità media dell'aereo durante la fase di acquisizione dei dati. Per ogni strisciata di ogni blocco (colonna 1) sono riportate: la velocità media dell'aereo all'interno della strisciata, la differenza tra i centri di presa diretti ottenuti dal GPS/IMU e quelli ricavati dalle triangolazioni aeree (ricavati nel paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), il ritardo medio di time-recording (in valore assoluto), ottenuto dividendo semplicemente l'offset riportato in colonna 3 per la velocità media di colonna 2.

Come si evince dalla tabella, la velocità assunta dall'aereo durante l'acquisizione varia notevolmente da strisciata a strisciata in relazione alle condizioni in cui il mezzo si trova ad operare. La presenza del vento ed altri fattori di disturbo causano delle sensibili variazioni; osservando ad esempio le velocità delle strisciate del blocco 1:8000 volate in direzione E-O (strisciate dalla 4 alla 9) si evidenzia come l'aereo volando in direzione ovest incontri un vento contrario che ne rallenta il moto (~80 m/s) e come invece volando in direzione est ne venga favorito (~88 m/s).

Conoscendo la velocità dell'aereo e l'errore sulla posizione del centro di presa presumibilmente indotto dal ritardo di registrazione, è possibile stimare quantitativamente tale offset temporale, mostrato nell'ultima colonna di Tabella 8. Come si evince dai risultati, il ritardo registrato rimane estremamente stabile durante tutto l'arco di volo confermando la presenza di un problema nella registrazione dell'istante di scatto del fotogramma, relativamente al volo oggetto dello studio. L'analisi dei risultati a permesso di quantificare l'entità di questo ritardo in circa quattro millesimi di secondo.

Nome strisciata	Velocità media [m/s]	$\mu_{Ax/y}$ [m]	Ritardo (ABS) [s]
pv1-5000-1-N	85,53	-0,292	0,003
pv1-5000-2-S	87,82	0,296	0,003
pv1-5000-7-N	75,20	-0,357	0,005
pv1-5000-8-S	81,09	0,272	0,003
pv1-5000-3-E	88,07	-0,272	0,003
pv1-5000-4-O	79,64	0,333	0,004
pv1-5000-5-E	84,73	-0,259	0,003
pv1-5000-6-O	80,88	0,325	0,004
pv1-8000-1-N	80,85	-0,288	0,004
pv1-8000-2-S	88,67	0,322	0,004
pv1-8000-10-S	87,53	0,320	0,004
pv1-8000-11-N	81,86	-0,323	0,004
pv1-8000-3-E	87,95	-0,329	0,004
pv1-8000-4-O	80,45	0,369	0,005
pv1-8000-5-E	88,82	-0,355	0,004
pv1-8000-6-O	80,40	0,351	0,004
pv1-8000-7-E	88,48	-0,308	0,003
pv1-8000-8-O	80,34	0,339	0,004
pv1-8000-9-E	88,23	-0,412	0,005
pv1-18000-1-O	73,69	0,372	0,005
pv1-18000-2-E	94,44	-0,458	0,005

Tabella 8. L'errore di sincronizzazione per ogni strisciata

## 5. CONCLUSIONI

Utilizzando il data-set acquisito sul test-site di Pavia, si è analizzata una problematica poco considerata della fotogrammetria diretta: gli errori indotti dal ritardo di memorizzazione temporale dei dati, nell'assegnazione dei parametri di orientamento esterno forniti dal GPS/IMU. Diverse TA sono state effettuate sui tre blocchi, a quote differenti, del volo preso in esame. Analisi approfondite delle

varie fonti di errore sono state condotte sui dati a disposizione; sono state analizzati i problemi connessi al time-recording in relazione ad altri aspetti quali la posizione del punto principale e la velocità dell'aereo.

Ulteriori indagini dovranno essere portate a termine per lo studio degli errori sistematici sulle componenti perpendicolari alla direzione di volo e per la ricerca di una corretta metodologia per l'eliminazione dei ritardi di time-recording. Infine ulteriori analisi sulla stabilità nel tempo di questi fenomeni saranno effettuate utilizzando un secondo volo acquisito pochi giorni dopo a quello in esame.

## 6. 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](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.

Pinto L., Forlani G., Passoni, D., 2002. Integrated INS/GPS Systems: Calibration and Combined Block Adjustment. Test Report and Workshop Proceedings, Official Publication n°43, Werbedruck Schereckhase, Spangenberg.

Galetto R., Spalla A., Casella V., Franzini M., 2003. Il Progetto di ricerca Cofin2002 sull'uso di sensori inerziali integrati in Fotogrammetria aerea. Atti della VII Conferenza ASITA, pagg. 1911-1923, Verona, Italia, 28-31 ottobre 2003.

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.

Galetto R., Casella V., Spalla A., Franzini M., 2004. An Italian research project on direct photogrammetry. Proceedings of XX<sup>th</sup> ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, published on DVD.

## 7. 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 misurazioni utilizzate nella ricerca descritta.