

---

## **Fotogrammetria diretta nell'area test della città di Pavia: metodi di determinazione delle accuratezze del sistema nell'ambito del progetto Cofin2002 – Unità di ricerca del Politecnico di Milano**

Luigi FREGONESE  
Dipartimento di Ingegneria Idraulica,  
Ambientale, Infrastrutture viarie,  
Rilevamento  
Politecnico di Milano  
Piazza Leonardo da Vinci, 32  
21133 Milano  
t 0223996533  
f 0223996550  
e [luigi.fregonese@polimi.it](mailto:luigi.fregonese@polimi.it)

**Parole chiave** > Fotogrammetria diretta, sensori digitali, triangolazione aerea, accuratezze fotogrammetria diretta

**Riassunto** > In questo lavoro sono illustrati i risultati della triangolazione aerea di controllo eseguita nell'ambito della ricerca sulla fotogrammetria diretta nell'area test della città di Pavia per il progetto Cofin2002 – Unità di ricerca del Politecnico di Milano. Lo scopo della ricerca è stata la valutazione delle accuratezze del sistema diretto: per fare questo sono state realizzate due triangolazioni aeree con diversa quota di volo sullo stesso poligono test, utilizzando gli stessi Ground Point per l'appoggio della T.A., mentre la determinazione e la segnalizzazione dei Tie points è avvenuta in modalità manuale. Le accuratezze del sistema sono state desunte dai punti di controllo forniti dall'Unità di ricerca di Pavia.

**Abstract** > In this job are illustrated the results of control aerial triangulation that was done for the research program COFIN2000 on test area of Pavia (Research unit of Politecnico of Milan). The aim of the research was the evaluation of direct system accuracy: it was made two aerial triangulation with different fly elevation on the same test area and using the same ground points for the T.A. The tie point collection was made manually. The accuracy was deduced from control points supplied from Pavia research unit.

### **1. Introduzione**

Il presente lavoro di ricerca illustra i primi risultati sviluppati dall'unità di ricerca del Politecnico di Milano nell'ambito del progetto di ricerca Cofin2002 (coordinatore nazionale prof. R. Galetto) dal titolo *I Sistemi inerziali integrati di posizionamento nella fotogrammetria aerea*, all'interno del quale, fra i suoi numerosi obiettivi, aveva quelli di determinare: la qualità degli orientamenti esterni misurati con un sistema GPS/IMU confrontandoli con i dati forniti da una tradizionale Triangolazione Aerea e l'utilizzo dei dati acquisiti con fotogrammetria diretta all'interno di software commerciali per la produzione di tipo industriale.

La terminologia fotogrammetria diretta fa riferimento alla conoscenza dell'orientamento esterno dei sensori di acquisizione di immagini, misurati direttamente durante la fase di rilievo e non dedotti successivamente in laboratorio. Le grandezze che vengono misurate direttamente dai sensori costituiscono i parametri dell'orientamento esterno ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ ) che compaiono esplicitamente nelle equazioni di collinearità. Tali parametri, come è noto, nel processo fotogrammetrico tradizionale devono essere stimati mediante processi di orientamento quali la Triangolazione Aerea che in ogni caso comporta un costo complessivo della produzione non ininfluenza (appoggio a terra dei fotogrammi, impostazione della triangolazione, etc.).

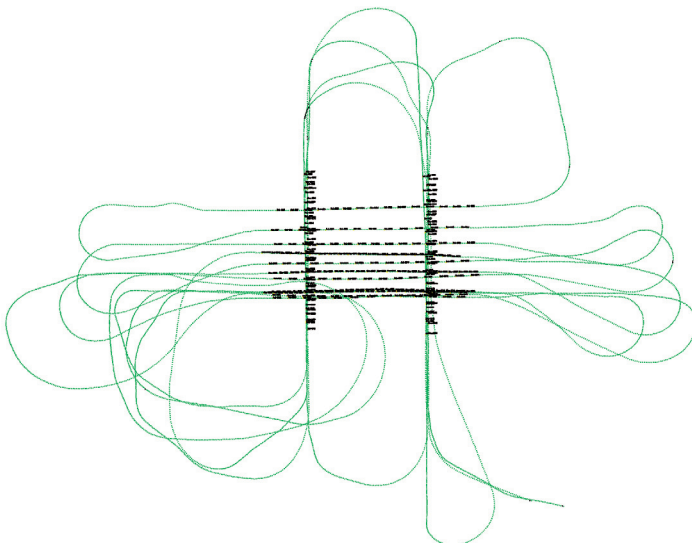
Con la Fotogrammetria diretta si è dimostrato (Cramer, 2001) in ambito scientifico internazionale come questa tecnica funzioni e quali siano i risultati ottenibili. Nel contesto italiano con l'introduzione dell'attrezzatura necessaria alla produzione, si è posto il problema del suo effettivo utilizzo, dei risultati ottenibili e dei software necessari per la produzione.

## 2. Area test e fotogrammi impiegati

Per la realizzazione dei test di precisione e di validazione dei dati acquisiti con fotogrammetria diretta, nell'ambito del progetto nazionale di ricerca si è realizzato un poligono appositamente predisposto sul territorio della città di Pavia in cui sono stati eseguiti diversi voli in date differenti e con camere aventi diverse focali (150 e 300 mm).

In particolare la ricerca ha analizzato il volo eseguito dalla Compagnia Generale Riprese aeree e realizzato con il sistema Applanix POS AV che prevede l'utilizzo integrato del GPS e di un sistema Inerziale INS Inertial Navigation System.

Figura 1 - Volo 3 del 6 aprile 2003, realizzato con camera Leica RC 30 con focale 300mm



Il volo oggetto della ricerca è stato effettuato con la camera Leica RC 30 con focale 300mm ed eseguito a due diverse altezze medie di volo: la prima ad una altezza di 1500m con una scala media dei fotogrammi di 1:5000 e la seconda ad una altezza media di volo di 2300m con una scala media dei fotogrammi di 1:8000. Sono stati analizzati per la scala 1:5000 complessivamente 146 fotogrammi in 8 strisciate di cui 4 longitudinali e 4 trasversali; di queste alcune sono state eseguite volando in direzioni opposte. Per la scala 1:8000 sono stati analizzati complessivamente 145 fotogrammi in 11 strisciate di cui 7 longitudinali e 4 trasversali volati in direzioni opposte.

Le immagini sono state digitalizzate mediante scanner fotogrammetrico Zeiss con una risoluzione di 14 micron.

Per il controllo dei voli sono stati resi disponibili le monografie di 256 punti distinti in PV\_AGCPxxx (195) e PV\_NGCPxxx (61) rispettivamente per i punti presegnalizzati a terra e quelli naturali, da utilizzarsi come punti di controllo GCP (Ground Control Point) o come punti di verifica (CP Check Point).

Per la determinazione dei blocchi di triangolazione si è preferito utilizzare esclusivamente i punti artificiali AGCP, per la loro maggiore accuratezza, mantenendo distinti le due classi in fase di verifica per ciascun volo (classe GCP, e classe CP) per eseguire una verifica sui punti CP indipendenti dalla fase di determinazione delle TA.

Per il trattamento dei dati, la misura delle coordinate lastra e il calcolo delle triangolazioni aeree è stato utilizzato il software commerciale Socet Set® prodotto dalla Bae Systems e importato in Italia dalla Geotop srl. Socet Set permette di importare i dati di un volo effettuato con sistema GPS/INS ottenendo quindi due set di dati di verifica (TA tradizionale, fotogrammetria diretta) per la fase di orientamento che quella di restituzione.

### **3. Volo alto con scala media 1:8000 (altezza media 2300m)**

Il volo alla scala minore è costituito da 145 fotogrammi e ricopre interamente il territorio della area test, sviluppato su 11 strisciate, 7 longitudinali (di cui 2 volate in direzioni opposte) e 4 trasversali (di cui 2 volate in direzioni opposte). Per il calcolo della Triangolazione Aerea sono stati utilizzati 59 GCP artificiali, sono stati restituiti 100 CP per il controllo e identificati per ogni modello 9 Tie Point geometricamente ben distribuiti e osservati manualmente: complessivamente sono stati individuati nell'intero blocco 309 punti.



Figura 2 - Volo 3 alto – scala media 1:8000 (quota media di volo 2300m) con indicazione dei centri di presa sovrapposti all'ortofoto prodotta dell'area test.



Figura 3 - Volo 3 alto – Istogrammi residui delle coordinate determinati nelle componenti E, N, h dei GCP come differenza tra le coordinate compensate e quelle da monografia GPS

La compensazione della Triangolazione Aerea del blocco 1:8000 ha fornito sul dataset dei punti utilizzati come GCP (fig. 03), rispetto alle coordinate desunte dalle monografie dei vertici AGCP rilevate mediante misure GPS, i valori riportati nella seguente tabella 1.

Tabella 1 - Sintesi parametri statistici dei vertici GCP stimati in TA

N. 59 GCP	sqm compensazione			Residui con monografie		
	min (m)	max (m)	media (m)	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.013	0.017	0.015	-0.021	0.021	0.009
<b>Coordinata N</b>	0.013	0.017	0.015	-0.030	0.030	0.011
<b>Quota h</b>	0.019	0.020	0.019	-0.008	0.009	0.004

Il secondo dataset di vertici AGCP (composto da 100 punti) è stato utilizzato come verifica della TA, fornendo (fig. 4) rispetto alle coordinate desunte dalle monografie dei vertici GPS, i valori riportati nella seguente tabella 2.

Figura 4 - Volo 3 alto – Istogrammi residui delle coordinate determinati nelle componenti E, N, h dei Check Point come differenza tra le coordinate restituite e quelle da monografia GPS



Tabella 2 - Sintesi parametri statistici dei vertici CP restituiti in TA

N. 100 CP	Residui coordinate		
	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	-0.055	0.044	0.021
<b>Coordinata N</b>	-0.055	0.068	0.028
<b>Quota h</b>	-0.092	0.088	0.041

Il software utilizzato fornisce inoltre i dati dell'accuratezza dei punti individuati come Tie point. Sulla loro determinazione occorre precisare che tutti i 309 punti sono stati individuati e collimati manualmente dall'operatore al fine di aumentarne la precisione scegliendo particolari sui fotogrammi ben evidenti. La distribuzione geometrica dei punti segue la posizione ottimale di nove punti per fotogramma. La collimazione dei punti è avvenuta sia lungo le strisciate longitudinali, sia lungo le strisciate trasversali aumentando la ridondanza delle osservazioni (ad esempio alcuni punti sono stati collimati su 19 fotogrammi). La figura 5 rappresenta in veste grafica l'accuratezza dei TP ottenuta in triangolazione aerea, con evidente diminuzione di precisione ai bordi del blocco, rispetto la parte centrale in cui sono distribuiti i punti GCP.

Figura 5 - Volo 3 alto – Istogrammi sqm di compensazione delle coordinate nelle componenti E, N, h dei Tie Point

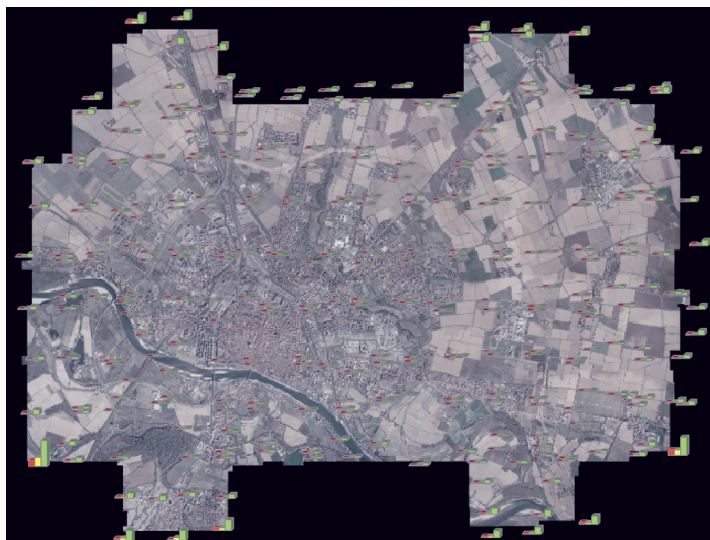


Tabella 3 - Sintesi parametri statistici dei vertici TP individuati in TA

N. 309 TP	sqm compensazione		
	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.015	0.463	0.041
<b>Coordinata N</b>	0.015	0.677	0.043
<b>Quota h</b>	0.049	1.938	0.158

Nel confronto con i dati forniti dalla ditta che ha realizzato il volo, relativamente alla posizione dei centri di presa sono state determinate le componenti di spostamento E, N e h: la figura 6 restituisce in veste grafica tali spostamenti, mentre la tabella 4 sono riportati in forma sintetica i dati di spostamento. La ditta ha fornito per ogni volo due dataset di orientamento esterno: il primo, usato per il confronto (definito come set di precalibrazione), proviene dalla georeferenziazione diretta, il secondo non utilizzato in questi confronti era desunto da una calibrazione mediante triangolazione. Se il confronto si limita ai soli fotogrammi del blocco in cui sono distribuiti i punti di appoggio a terra gli scostamenti si riducono (tabella 5).

Tabella 4 - Sintesi parametri statistici dei centri di presa stimati in TA

N. 145 foto	sqm compensazione			Residui con pre-calibrazione		
	min (m)	max (m)	media (m)	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.177	0.633	0.284	-1.068	1.678	0.550
<b>Coordinata N</b>	0.169	1.025	0.294	-1.496	1.221	0.524
<b>Quota h</b>	0.038	0.396	0.083	-0.513	0.760	0.156

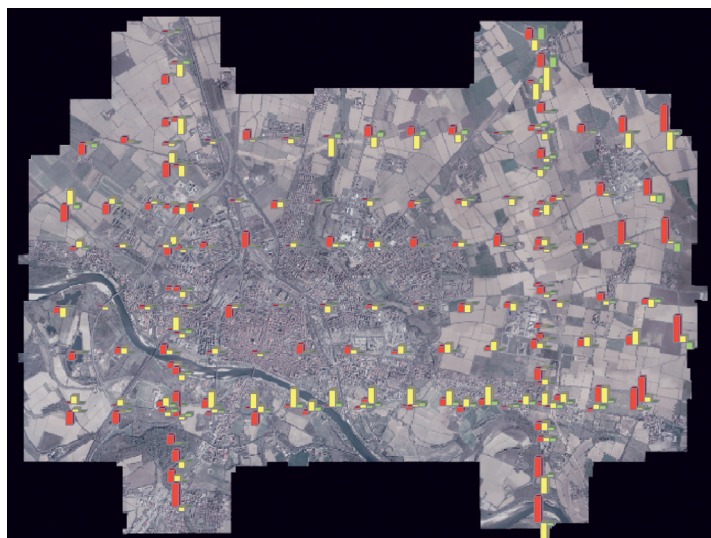


Figura 6 - Volo 3 alto – Istogrammi residui dei residui determinati nelle componenti E, N, h dei centri di presa come differenza tra la stima della TA e i valori di pre-calibrazione del sistema inerziale

Tabella 5 - Sintesi parametri statistici dei centri di presa stimati in TA del blocco centrale ridotto a 90 foto

N. 90 foto	sqm compensazione			Residui con pre-calibrazione		
	min (m)	max (m)	media (m)	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.177	0.296	0.230	-0.929	1.518	0.396
<b>Coordinata N</b>	0.169	0.339	0.233	-1.184	1.221	0.491
<b>Quota h</b>	0.038	0.077	0.052	-0.088	0.292	0.090

#### 4. Volo basso con scala media 1:5000 (altezza media 1500m)

Il volo alla scala maggiore costituito da 146 fotogrammi, ricopre parzialmente il territorio della area test, è sviluppato su 8 strisciate, 4 longitudinali (di cui 1 volata in direzione opposta) e 4 trasversali (di cui 2 volate in direzioni opposte). Per il calcolo della Triangolazione Aerea sono stati utilizzati 47 GCP artificiali, sono stati restituiti 81 CP per il controllo e identificati per ogni modello 9 Tie Point geometricamente ben distribuiti e osservati manualmente: complessivamente sono stati individuati nell'intero blocco 290 punti.



Figura 7 - Volo 3 basso – scala media 1:5000 (quota media di volo 1500m) con indicazione dei centri di presa sovrapposti all'ortofoto prodotta dell'area test.



Figura 8 - Volo 3 basso – Istogrammi residui delle coordinate determinati nelle componenti E, N, h dei GCP come differenza tra le coordinate compensate e quelle da monografia GPS

La compensazione della Triangolazione Aerea del blocco 1:5000 ha fornito sul dataset dei punti utilizzati come GCP (fig. 08), rispetto alle coordinate desunte dalle monografie dei vertici AGCP rilevate mediante misure GPS, i valori riportati nella seguente tabella 6.

Tabella 6 - Sintesi parametri statistici dei vertici GCP stimati in TA

N. 47 GCP	sqm compensazione			Residui con monografie		
	min (m)	max (m)	media (m)	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.012	0.017	0.015	-0.015	0.016	0.008
<b>Coordinata N</b>	0.012	0.017	0.015	-0.028	0.017	0.010
<b>Quota h</b>	0.019	0.020	0.019	-0.012	0.009	0.004





Figura 9 - Volo 3 basso – Istogrammi residui delle coordinate determinati nelle componenti E, N, h dei Check Point come differenza tra le coordinate restituite e quelle da monografia GPS

Il secondo dataset di vertici AGCP (composto da 81 punti) è stato utilizzato come verifica della TA, fornendo (fig. 9) rispetto alle coordinate desunte dalle monografie dei vertici GPS, i valori riportati nella seguente tabella 7.

Tabella 7 - Sintesi parametri statistici dei vertici CP restituiti in TA

N. 81 CP	Residui coordinate		
	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	-0.067	0.057	0.025
<b>Coordinata N</b>	-0.077	0.045	0.023
<b>Quota h</b>	-0.094	0.095	0.055

Il software Socet Set® fornisce i dati dell'accuratezza dei punti individuati come Tie point. Sulla loro determinazione occorre precisare che tutti i 290 punti sono stati individuati, come i precedenti Tie point del blocco 1:8000. La figura 10 rappresenta in veste grafica l'accuratezza dei TP ottenuta in triangolazione aerea, con evidente diminuzione di precisione ai bordi del blocco, rispetto la parte centrale in cui sono distribuiti i punti GCP.

Figura 10 - Volo 3 basso – Istogrammi sqm di compensazione delle coordinate nelle componenti E, N, h dei Tie Point

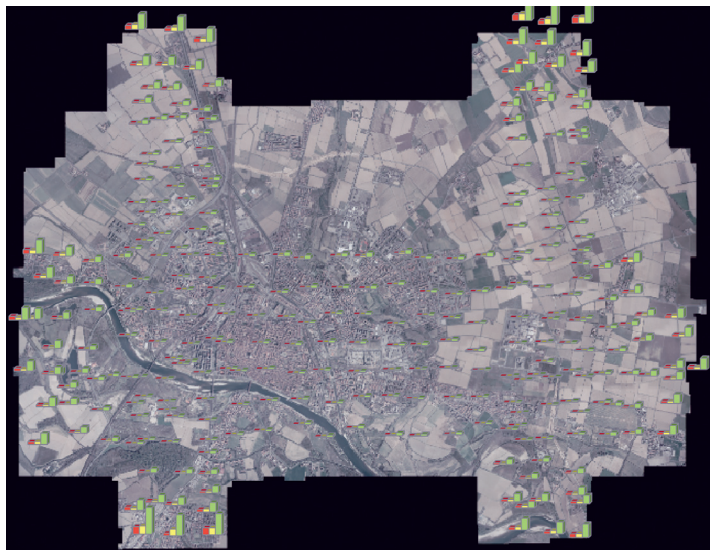


Tabella 8 - Sintesi parametri statistici dei vertici TP individuati in TA

N. 290 TP	sqm compensazione		
	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.014	0.311	0.047
<b>Coordinata N</b>	0.014	0.350	0.048
<b>Quota h</b>	0.042	1.120	0.186

Dal confronto dei centri di presa, desunti dalla Triangolazione con la posizione fornita dal dataset di precalibrazione della ditta esecutrice del volo, sono state determinate le componenti di spostamento E, N e h: la figura 11 restituisce in veste grafica tali spostamenti, mentre nella tabella 9 sono riportati in forma sintetica i dati di spostamento. Se il confronto si limita ai soli fotogrammi del blocco in cui sono distribuiti i punti di appoggio a terra gli scostamenti si riducono (tabella 10).

Tabella 9 - Sintesi parametri statistici dei centri di presa stimati in TA

N. 146 foto	sqm compensazione			Residui con pre-calibrazione		
	min (m)	max (m)	media (m)	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinata E</b>	0.155	0.863	0.290	-0.670	2.181	0.389
<b>Coordinata N</b>	0.137	0.938	0.313	-0.547	1.351	0.336
<b>Quota h</b>	0.036	0.599	0.117	-0.945	0.715	0.222

Tabella 10 - Sintesi parametri statistici dei centri di presa stimati in TA del blocco centrale ridotto a 91 foto

N. 91 foto	sqm compensazione			Residui con pre-calibrazione		
	min (m)	max (m)	media (m)	min (m)	max (m)	sqm (m)
<b>Coordinate E</b>	0.154	0.320	0.219	-0.670	0.564	0.232
<b>Coordinata N</b>	0.137	0.369	0.225	-0.547	0.834	0.252
<b>Quota h</b>	0.035	0.094	0.052	-0.071	0.234	0.066

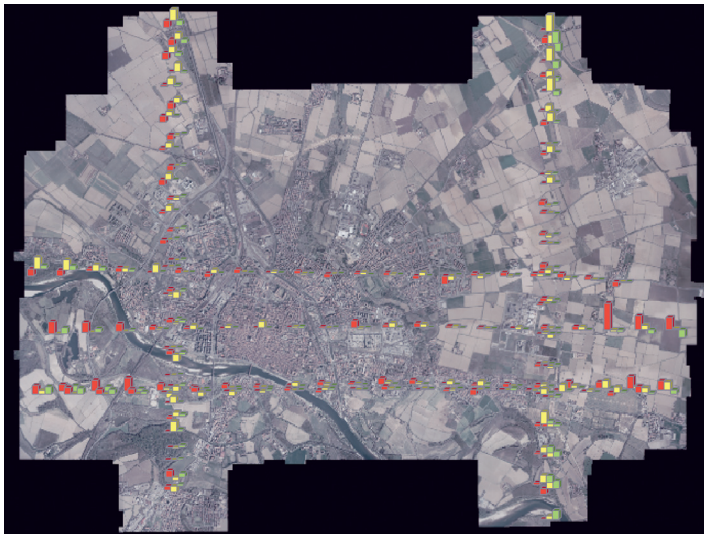


Figura 11 - Volo 3 basso – Istogrammi residui dei residui determinati nelle componenti E, N, h dei centri di presa come differenza tra la stima della TA e i valori di pre-calibrazione del sistema inerziale

## 5. Conclusioni

L'analisi condotta con il software Socet Set<sup>®</sup> sui dati acquisiti mediante fotogrammetria diretta conferma come questa tecnica funzioni e quali siano i risultati ottenibili, sia in termini di precisione metrica che soprattutto nella fase industriale della produzione come riduzione dei tempi di elaborazione. Si evidenzia inoltre, come è noto, che la Triangolazione Aerea introduce ai bordi dei blocchi un decadimento della precisione per la mancanza dei punti di appoggio a terra, mentre al contrario la fotogrammetria diretta nel suo complesso mantiene costanti le accuratezze di orientamento. Nell'analisi diretta del software utilizzato si è riscontrato un agevole impiego dei dati di orientamento esterno, facilitando di molto anche le fasi di controllo manuale da parte dell'operatore poiché tali dati permettono una navigazione diretta sui modelli. Fissato un punto è il sistema stesso ad individuare in quali fotogrammi tale vertice deve essere collimato.

La ricerca si svilupperà ulteriormente con la calibrazione del sistema inerziale mediante il software fotogrammetrico Bingo.

## Bibliografia

- Kraus K. (1994). Fotogrammetria. Levrotto & Bella, Torino.
- Heipke C., Jacobsen K., Wegmann H. (2001). OEEPE test on integrated sensor orientation. OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", Hannover.
- Cramer M. (2001). On the use of direct georeferencing in airborne photogrammetry. Proceedings of Illrd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo.
- Casella V., Franzini M., Forlani G., Galetto R., Manzino A., Radicioni F., Sona G., Villa B. (2004). Initial results of the Italian project on direct georeferencing in aerial Photogrammetry. Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, 12-23 Luglio 2004.
- Casella V. (2004). Methodologies for reducing parallaxes in directly oriented images. Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, 12-23 Luglio 2004.