

Stime rigorose di accuratezza e parallassi residue su blocchi acquisiti industrialmente

F. Sansò⁽¹⁾, G. Sona⁽¹⁾, B. Villa⁽²⁾, M. Lo Brutto⁽²⁾, G. Forlani⁽³⁾, L. Pinto⁽⁴⁾, V. Casella⁽⁵⁾, R. Galetto⁽⁵⁾, M. Franzini⁽⁵⁾, F. Radicioni⁽⁶⁾, S. Grassi⁽⁶⁾, A. Manzino⁽⁷⁾, M. Roggero⁽⁷⁾

⁽¹⁾ DIIAR – Politecnico di Milano – Sede di Como
email: fernando.sanso@polimi.it
giovanna.sona@polimi.it

⁽²⁾ DIRAP – Università di Palermo
email: bevilla@unipa.it
lobrutto@unipa.it

⁽³⁾ DICATA – Università di Parma
email: gianfranco.forlani@unipr.it

⁽⁴⁾ DIIAR – Politecnico di Milano
email: livio.pinto@polimi.it

⁽⁵⁾ DIET – Università di Pavia
email: vittorio.casella@unipv.it
riccardo.galetto@unipv.it
marica.franzini@unipv.it

⁽⁶⁾ DICA – Università di Perugia
email: topos@unipg.it
labtopo@unipg.it

⁽⁷⁾ DIGET – Politecnico di Torino
email: ambrogio.manzino@polito.it
marco.roggero@polito.it

RIASSUNTO

La nota descrive i primi risultati di un Progetto di ricerca italiano sul posizionamento inerziale in fotogrammetria. L'articolo riguarda in particolare la qualità ottenibile nelle misure fotogrammetriche con fotogrammi orientati direttamente e acquisiti in un contesto produttivo.

Anche se la fotogrammetria supportata da GPS/IMU è abbastanza diffusa e nota, è tuttora di grande interesse e attualità effettuare validazioni ampie e sistematiche della qualità ottenibile da tale modalità operativa. Inoltre è utile valutare tale tecno-

logia nelle condizioni operative ordinarie e non limitarsi a studiare dati acquisiti appositamente per scopi di ricerca.

Per conseguire tali risultati, sono stati presi in considerazione numerosi voli realizzati da una Ditta italiana, prima dell'inizio del Progetto, con scopi e modalità puramente industriali ed è stata eseguita la quantificazione rigorosa delle accuratèzze e delle parallassi residue. L'origine dei dati usati e la casistica vasta ed eterogenea – diversi voli, città e calibrazioni – rendono il test effettuato molto significativo e affidabile.

ABSTRACT

The paper describes one of the first outcomes of an Italian national research Project on inertial positioning in photogrammetry. The focus of the paper is on the quality which is attainable from direct photogrammetry in an industrial production context.

Even if GPS/IMU-aided photogrammetry is used rather widely, it is still useful to perform rigorous quality assessment of this method, because large and diverse case studies are necessary to prove and quantify the capability of a new methodology. Besides, it is necessary to evaluate such methodology in the ordinary operational conditions, rather than considering data acquired in a dedicated, special context.

To fulfil these requirements several different flights were considered, which were acquired by an Italian photogrammetric company before the beginning of the Project, purely for production aims, and rigorous quantification of accuracy and residual parallaxes was performed. The origin of the considered data, which is not research-oriented, and the vast and heterogeneous case study – different cities, different flights, different calibrations- make the described test very significant and reliable.

1. INTRODUZIONE

Il Progetto di Rilevante Interesse Nazionale *I sistemi inerziali integrati di posizionamento nella Fotogrammetria aerea*, coordinato dal prof. Riccardo Galetto dell'Università di Pavia, è stato cofinanziato dal MIUR per l'anno 2002 e si concluderà alla fine dell'anno 2004. Al Progetto hanno aderito sette Unità appartenenti ad altrettante Università; alcune sono composte da ricercatori che, pur appartenendo allo stesso Ateneo, operano in sedi diverse. In conclusione partecipano al Progetto nove Gruppi di ricerca operanti a: Como, Milano, Palermo, Parma, Pavia, Perugia, Sassari, Torino, Vercelli. Di questi, solo i sei indicati nella Tabella 1 hanno operato nella fase descritta nella nota.

Il Progetto è estremamente articolato (Galetto et alii, 2003) e ha, fra i numerosi obiettivi, quello di verificare la qualità degli orientamenti esterni misurati con un sistema GPS/IMU, in un *contesto di produzione industriale*.

Bisogna notare infatti che molti risultati discussi in ambito scientifico internazionale (Cramer, 2001; Heipke et alii, 2002) riguardano pochi voli realizzati appositamente

per la ricerca ed è legittimo il dubbio che tali voli siano stati effettuati con una cura e un'attenzione che probabilmente non si riscontrano nella pratica quotidiana. I dataset speciali e dedicati sono essenziali perché consentono di individuare quale sia il limite ultimo raggiungibile con una certa tecnologia, ma d'altra parte è di grande interesse valutare quali risultati siano ottenibili con un uso ordinario dei sensori e, a questo scopo, è dedicata la parte del Progetto descritta dalla presente nota.

Per svolgere tale fase, a ogni Gruppo è stato distribuito un blocco fotogrammetrico acquisito sopra la città in cui opera. Il materiale è stato prodotto dalla Compagnia Generale Riprese aeree prima dell'inizio del Progetto, nell'ambito del Programma Terraltaly City, il cui scopo è la produzione delle ortofoto ad alta risoluzione di più di cento città italiane. Insieme con le immagini digitali sono stati distribuiti i parametri di orientamento esterno misurati con un sistema Applanix POS/AV 510. I vari gruppi hanno condotto sui dati una sistematica attività di validazione i cui risultati sono esposti nella nota.

La Sezione 2 descrive i blocchi fotogrammetrici impiegati; la Sezione 3 illustra le misure effettuate dalle Unità e le elaborazioni svolte in modo unificato dall'Unità di Pavia; la Sezione 4 presenta e commenta i dati relativi ai singoli blocchi; la Sezione 5 presenta alcuni confronti fra i diversi voli; le Sezioni 6 e 7 concludono la nota e descrivono le ulteriori analisi che sono in corso di svolgimento e che saranno descritte in lavori successivi.

2. I FOTOGRAMMI IMPIEGATI E LE MISURE EFFETTUATE PER LA VALIDAZIONE

Ogni Gruppo ha ricevuto le immagini digitali relative a un blocco rettangolare di tre strisciate costituite da otto fotogrammi ciascuna. I fotogrammi sono stati acquisiti con una camera Leica RC30 con focale di 300 mm, accoppiata a un sistema Applanix POS/AV 510. Le immagini digitali sono state prodotte con uno scanner Zeiss SCAI e hanno un pixel di 14 micron. La Tabella 1 riassume le principali informazioni riguardanti i voli: vengono riportati la data di effettuazione del volo, il rapporto di scala medio dei fotogrammi e l'altezza relativa media di volo. Mediando su tutti i voli, si ha che la scala media dei fotogrammi è 1:9410 e l'altezza relativa media è pari a 2860 metri.

Nome	Data ripresa	Rapporto di scala	Altezza relativa media di volo
Como	22 agosto 2001	1:9630	2920 m
Palermo	6 ottobre 2001	1:9450	2870 m
Parma	6 settembre 2001	1:9000	2730 m
Pavia	23 agosto 2000	1:9250	2810 m
Perugia	24 luglio 2001	1:9800	2980 m
Vercelli	21 agosto 2001	1:9330	2830 m

Tabella 1 – Principali caratteristiche dei blocchi considerati nella sperimentazione

La Ditta ha consegnato due set di orientamenti esterni, per ogni blocco: quello ottenuto tramite *direct sensor orientation*, al quale sarà d'ora in poi associato l'acronimo di **APP**, e quello prodotto con una *light integrated sensor orientation*, associato all'acronimo **AAT**. Quest'ultimo è stato ottenuto mediante una triangolazione aerea digitale automatica le cui osservazioni erano esclusivamente le coordinate lastra di tie point, misurate automaticamente, e i valori di orientamento esterno dell'insieme **APP**. L'aggettivo *light* è stato premesso per sottolineare che non sono stati impiegati punti di appoggio a terra.

Coerentemente con la scelta di validare prodotti industriali, è stata usata la calibrazione del sistema effettuata a suo tempo dalla Ditta e la determinazione dei due set di orientamenti esterni è stata effettuata ancora dalla Ditta, usando il software Applanix per il calcolo di **APP**, e il programma Match-AT di Inpho per determinare **AAT**.

I Gruppi partecipanti hanno effettuato le seguenti operazioni:

- misura con GPS di alcune decine di punti di appoggio;
- misura manuale delle coordinate lastra di tutti i punti di appoggio;
- misura manuale delle coordinate lastra di due punti per ognuna delle nove zone canoniche che si trovano in una immagine, per un totale di 18 punti di legame per immagine.

Tutte le misure effettuate sono state salvate in file opportunamente strutturati, in modo che fosse possibile analizzare i vari blocchi con procedure software standard, appositamente preparate. La Figura 1 mostra il formato del file delle coordinate lastra le cui colonne contengono rispettivamente: nome del punto (univoco per tutto il blocco), fotogramma, strisciata, x-lastra e y-lastra.

r_558_2069_6	2067	558	-64.7277	-80.0434
r_558_2069_16	2067	558	-52.7686	-92.7396
r_558_2069_2	2067	558	-88.7617	3.5866
r_558_2069_12	2067	558	-87.5348	-10.7663
r_558_2069_4	2067	558	-78.5121	103.4934
r_558_2069_14	2067	558	-65.4211	87.0650
r_558_2068_6	2067	558	-1.1522	-84.1068
r_558_2068_16	2067	558	-6.8257	-98.1409
r 558 2068 2	2067	558	25.4884	11.2069

Figura 1 – Struttura del file delle coordinate lastra

Il file delle coordinate lastra contiene le collimazioni di tutti i punti su tutte le immagini. Un secondo file riguarda i punti di appoggio e la sua struttura è esemplificata dalla Figura 2 in cui sono visibili i campi nome, Est, Nord e h.

10	503931.355	5072573.348	429.947
29	507880.420	5072414.806	277.838
36	507748.382	5069922.357	364.688
48	501918.650	5070132.085	412.793
49	501931.047	5070987.790	418.490
56	504266.383	5068662.700	350.033

Figura 2 – Struttura del file dei punti di appoggio

Un terzo file riguarda infine l'orientamento esterno dei fotogrammi e ha la struttura esemplificata dalla Figura 3 in cui sono riconoscibili i campi: fotogramma, strisciata, Est, Nord e h del centro di presa; ω, φ e κ che descrivono l'assetto della camera, misurati in gradi centesimali.

2036	560	507618.901	5069526.830	3178.816	0.09696	1.73847	0.28572
2037	560	506918.607	5069504.154	3184.074	0.02016	0.95818	1.10374
2038	560	506204.585	5069481.622	3179.946	-0.17696	0.87688	0.59092
2039	560	505493.406	5069471.526	3178.818	-1.00577	1.24907	-0.31888
2040	560	504783.104	5069476.921	3178.342	-1.05470	1.30174	-2.41259
2041	560	504070.154	5069497.111	3180.289	-2.18870	1.48539	-1.68507

Figura 3 – Struttura del file degli orientamenti esterni

I diversi Gruppi hanno usato i programmi di fotogrammetria di cui dispongono esclusivamente come misuratori di coordinate lastra e il resto dei calcoli è stato effettuato con programmi scritti appositamente in ambiente Matlab, per una duplice motivazione.

- *Per garantire univocità nel calcolo.* Esistono diversi modi per calcolare le coordinate oggetto dei punti restituiti e stimare le parallassi residue, che forniscono risultati sostanzialmente equivalenti, ma non coincidenti. Per avere univocità si è deciso di definire preliminarmente un formalismo per la restituzione e la stima delle parallassi e di implementarlo in procedure software scritte ad hoc, che sono state usate per elaborare tutti i dati.
- *Per isolare rigorosamente le sorgenti d'errore.* La qualità delle coordinate restituite e l'entità delle parallassi residue dipendono, fissata la geometria del blocco, dalla qualità delle coordinate lastra e degli orientamenti esterni. Se si vuole isolare l'effetto dei vari OE considerati, è necessario applicarli allo stesso insieme di coordinate lastra. Ciò è possibile con le procedure usate, ma non lo sarebbe con la gran parte dei programmi commerciali, che richiedono, per ogni rideterminazione dei CKP, la loro ricollimazione.

Una volta eseguite le misure, i vari Gruppi hanno anche calcolato la TA classica dei blocchi di loro competenza, in modo da determinare l'orientamento esterno dei fotogrammi con il miglior metodo disponibile. Per il calcolo della TA i punti di appoggio sono stati distinti in due sottoinsiemi disgiunti: i GCP, inseriti nel calcolo

della triangolazione, e i CKP, del tutto indipendenti, usati esclusivamente per validare i risultati. Va detto che non tutti i Gruppi hanno separato i GCP dai CKP e in alcuni casi tutti i punti di appoggio sono stati usati sia come GCP sia come CKP.

In sintesi sono stati presi in considerazione tre insiemi di OE di cui si richiamano le proprietà e gli acronimi con cui verranno indicati:

APP: dati misurati direttamente dal sistema GPS/IMU;

AAT: orientamenti esterni ottenuti da **APP** con una operazione di liscio mediante light integrated sensor orientation;

AT: orientamenti esterni determinati con triangolazione aerea manuale, in cui i TP e GCP sono stati scelti e misurati manualmente.

Nelle pagine seguenti le figure 4-9 mostrano la conformazione dei blocchi e la disposizione dei punti di appoggio (GCP, triangoli), di controllo (CKP, quadrati) e di legame (TP, punti). Nei casi in cui i GCP non siano stati distinti dai CKP, tutti i punti di appoggio sono mostrati come CKP.

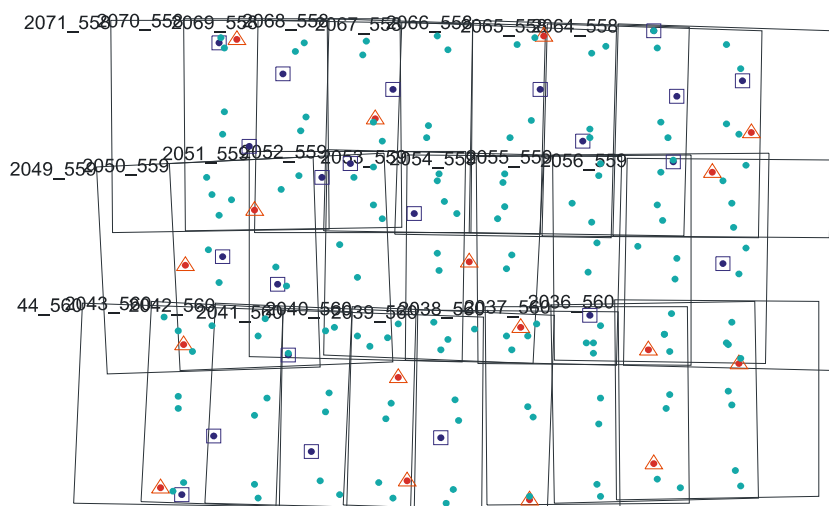


Figura 4 – Conformazione del blocco e disposizione di GCP, CKP e TP per Como

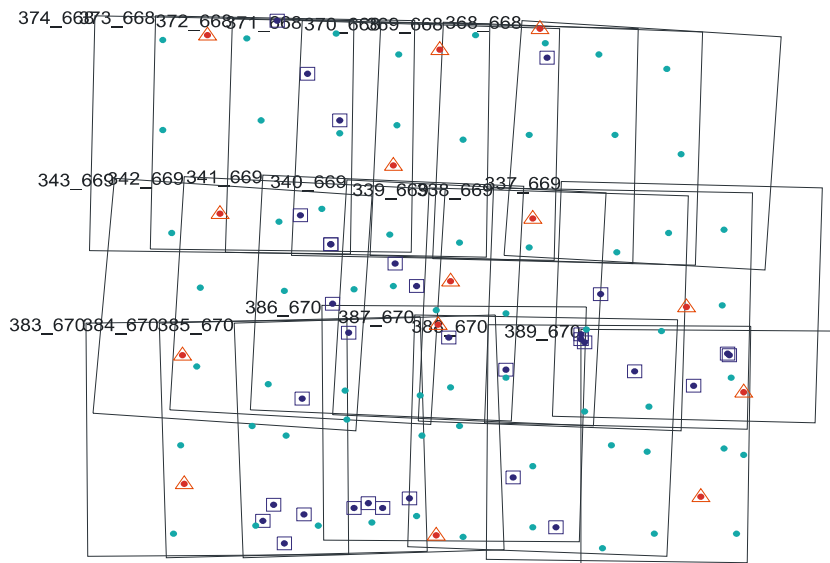


Figura 5 - Conformazione del blocco e disposizione di GCP, CKP e TP per Palermo

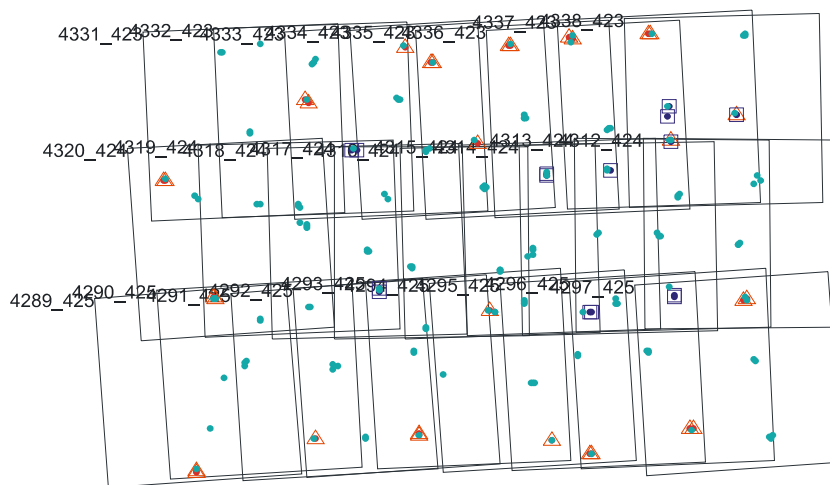


Figura 6 - Conformazione del blocco e disposizione di GCP, CKP e TP per Parma

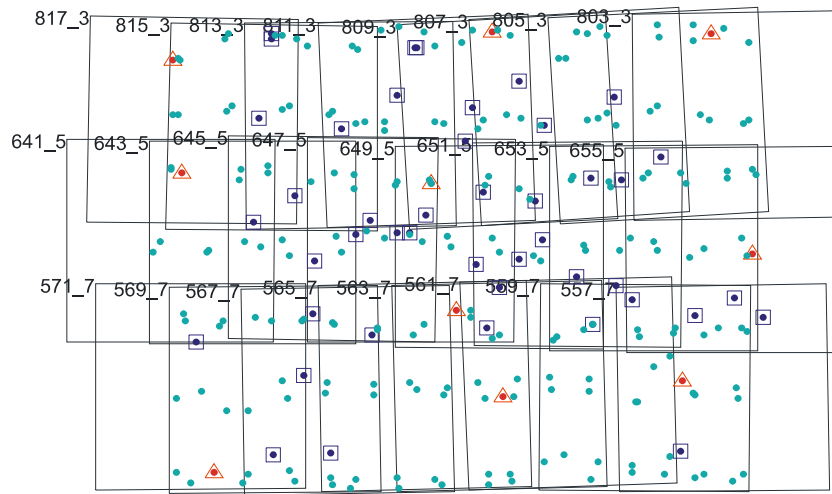


Figura 7 - Conformazione del blocco e disposizione di GCP, CKP e TP per Pavia

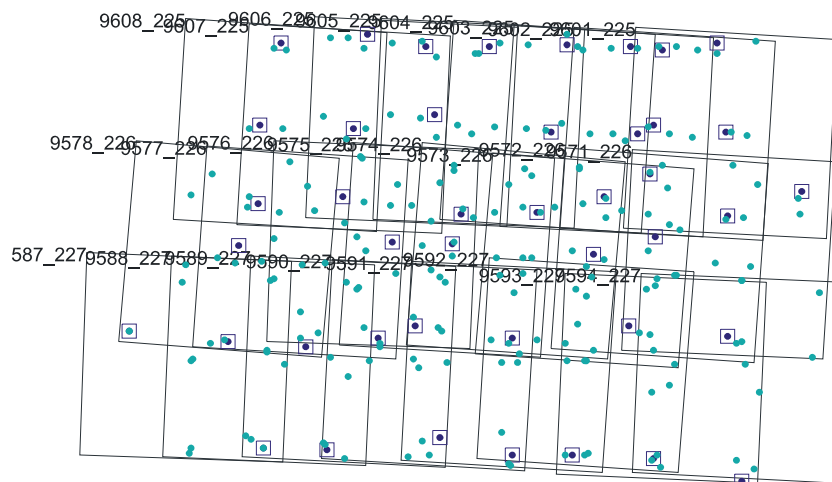


Figura 8 – Conformazione del blocco e disposizione di GCP, CKP e TP per Perugia

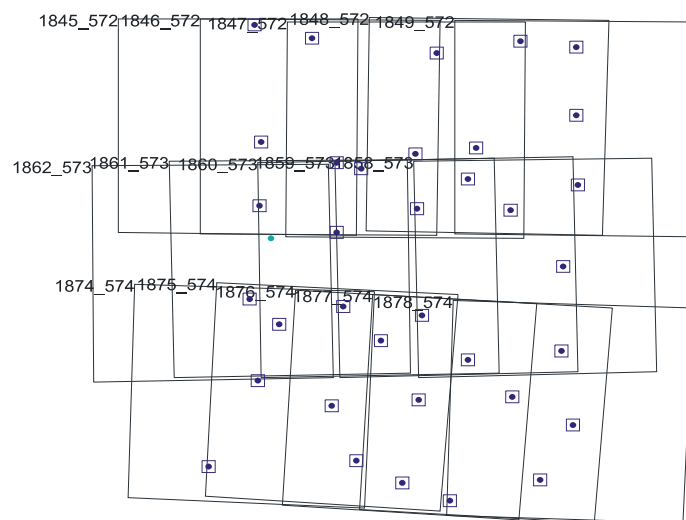


Figura 9 - Conformazione del blocco e disposizione di GCP, CKP e TP per Vercelli

3. LE ELABORAZIONI SVOLTE

L'analisi dei dati è stata condotta in termini di *accuratezza* e *parallassi residue*. Lo studio dell'accuratezza ha lo scopo di verificare se le coordinate dei CKP ottenute con la restituzione fotogrammetrica siano abbastanza vicine a quelle vere, determinate con GPS. Tale confronto serve ad accertare se i fotogrammi orientati direttamente siano adeguati per la produzione cartografica.

Le parallassi residue sono strettamente connesse alla qualità della visione stereoscopica: se esse presentano valori maggiori di una certa *soglia di buona visione*, la stereovisione è difficile o impossibile e la qualità della restituzione manuale è pregiudicata. Quando un blocco fotogrammetrico è orientato con un qualche tipo di TA, manuale o automatica, nel calcolo vengono inseriti numerosi tie point e gli orientamenti sono stimati in ultima analisi proprio minimizzando le parallassi, che quindi di norma risultano al di sotto della soglia di buona visibilità.

Quando si usa invece un sistema GPS/IMU, i fotogrammi vengono orientati direttamente e indipendentemente gli uni dagli altri e, di conseguenza, si verifica abbastanza spesso che le parallassi residue siano oltre la soglia, anche se l'accuratezza delle coordinate restituite è accettabile. Per maggiore precisione si dovrebbe forse dire che, nella fotogrammetria diretta, gli orientamenti esterni dei fotogrammi, determinati con il filtro di Kalman, sono stocasticamente correlati, ma *fotogrammetricamente indipendenti*. Vi è indubbiamente correlazione, in quanto le misure usate per orientare il fotogramma i concorrono all'orientamento del fotogramma $i+1$; una tale correlazione dipende dal tempo: è forte per fotogrammi acquisiti a breve distanza e tende invece ad attenuarsi se i fotogrammi sono separati da un intervallo lungo. Ciò spiega come mai coppie di fotogrammi appartenenti alla stessa strisciata abbiano un orientamento relativo migliore delle coppie costituite da

fotogrammi appartenenti a strisciate diverse. Vi è anche, altrettanto indubbiamente, indipendenza fotogrammetrica in quanto il filtro di Kalman non dispone di osservazioni di tie point e dunque non ha elementi per forzare l'intersezione dei raggi omologhi.

La riduzione delle parallassi residue nei fotogrammi orientati direttamente è un tema di grande attualità (Colomina 2002) e varie metodologie sono state proposte a tale scopo: ve ne sono di locali (Casella 2004) e di globali, come la light integrated sensor orientation, che la CGR applica regolarmente, utilizzando quindi orientamenti esterni di tipo **AAT**.

3.1 Metodologia per la stima delle parallassi residue

La stima delle parallassi residue in fotogrammi orientati direttamente pone anche un problema di tipo teorico in quanto le parallassi vengono in genere stimate come residui del calcolo dell'orientamento relativo effettuato ai MQ, ma, nel caso in questione, l'orientamento relativo è già stato implicitamente determinato e se ne vuole accertare la qualità. Il metodo implementato nelle procedure che sono state usate è basato sulla stima delle parallassi residue nello spazio oggetto (Casella, Franzini, 2003).

Nella presente sezione vengono illustrate relazioni di carattere generale e le coordinate oggetto dei punti vengono indicate con (X, Y, Z) , per omogeneità con quanto si trova nei testi di Fotogrammetria. Nel resto del lavoro si usa invece (E, N, h) perché tutte le elaborazioni sono state effettuate rispetto alle coordinate cartografiche Est e Nord e all'altezza ellissoidica h .

Consideriamo una coppia di fotogrammi e un punto-oggetto P le cui coordinate oggetto, incognite, sono (X_P, Y_P, Z_P) ; consideriamo anche i punti-immagine π_1 e π_2 , generati sui due fotogrammi da P ; indichiamo con $(x^{(1)}, y^{(1)})$ and $(x^{(2)}, y^{(2)})$ le coordinate immagine dei punti-immagine. Le equazioni di collinearità consentono di scrivere per il punto P quattro equazioni

$$\begin{aligned}
 X_P &= X_0^{(1)} + (Z_P - Z_0^{(1)}) K_x^{(1)} & K_x^{(1)} &= \frac{R_{11}^{(1)} x^{(1)} + R_{12}^{(1)} y^{(1)} R_{13}^{(1)} c}{R_{31}^{(1)} x^{(1)} + R_{32}^{(1)} y^{(1)} - R_{33}^{(1)} c} \\
 Y_P &= Y_0^{(1)} + (Z_P - Z_0^{(1)}) K_y^{(1)} & K_y^{(1)} &= \frac{R_{21}^{(1)} x^{(1)} + R_{22}^{(1)} y^{(1)} R_{23}^{(1)} c}{R_{31}^{(1)} x^{(1)} + R_{32}^{(1)} y^{(1)} - R_{33}^{(1)} c} \\
 X_P &= X_0^{(2)} + (Z_P - Z_0^{(2)}) K_x^{(2)} & K_x^{(2)} &= \frac{R_{11}^{(2)} x^{(2)} + R_{12}^{(2)} y^{(2)} R_{13}^{(2)} c}{R_{31}^{(2)} x^{(2)} + R_{32}^{(2)} y^{(2)} - R_{33}^{(2)} c} \\
 Y_P &= Y_0^{(2)} + (Z_P - Z_0^{(2)}) K_y^{(2)} & K_y^{(2)} &= \frac{R_{21}^{(2)} x^{(2)} + R_{22}^{(2)} y^{(2)} R_{23}^{(2)} c}{R_{31}^{(2)} x^{(2)} + R_{32}^{(2)} y^{(2)} - R_{33}^{(2)} c}
 \end{aligned} \tag{1}$$

La prima coppia di equazioni rappresenta una retta nello spazio, passante per i punti π_1 and $\mathbf{X}_0^{(1)}$ (il centro di presa della immagine 1). La seconda coppia di equazioni rappresenta una seconda retta, definita dai punti π_2 and $\mathbf{X}_0^{(2)}$. Sotto

l'ipotesi che le due rette non siano parallele e che la componente X della base $\mathbf{X}_0^{(2)} - \mathbf{X}_0^{(1)}$ sia prevalente, è possibile ricavare le coordinate oggetto di P , note le coordinate lastra di π_1 e π_2 e gli orientamenti esterni dei fotogrammi.

Le due rette sono proiettate nello spazio $X-Z$, dove necessariamente si intersecano: le componenti X e Z del punto P vengono definite come l'intersezione della proiezione delle rette omologhe sul suddetto piano. Formalmente la procedura descritta sopra equivale a risolvere le equazioni #1 e #3 del sistema (1)

$$Z_P = \frac{X_0^{(2)} - X_0^{(1)} - Z_0^{(2)}K_x^{(2)} + Z_0^{(1)}K_x^{(1)}}{K_x^{(1)} - K_x^{(2)}} \quad (2)$$

$$X_P = X_0^{(1)} + (Z_P - Z_0^{(1)})K_x^{(1)}$$

Ora si può considerare la retta di equazione

$$X = X_P$$

$$Z = Z_P$$

Essa interseca necessariamente le due rette omologhe, ma in due punti diversi, le cui componenti Y sono $Y_P^{(1)}$ e $Y_P^{(2)}$. Formalmente tali valori sono ottenuti sostituendo i valori (2) nelle equazioni #2 e #4 del sistema originario (1)

$$Y_P^{(1)} = Y_0^{(1)} + (Z_P - Z_0^{(1)})K_y^{(1)} \quad (3)$$

$$Y_P^{(2)} = Y_0^{(2)} + (Z_P - Z_0^{(2)})K_y^{(2)}$$

Questi due valori coinciderebbero se le linee si intersecassero esattamente e la loro differenza è un indicatore della loro *sghebitudine*. Nella restituzione si attribuisce a Y_P uno dei due valori indicati dalla (3) o la loro media. La differenza fra i due è stata assunta nel corso dell'analisi come stima della parallasse residua nello spazio oggetto secondo la definizione

$$P_Y := Y_P^{(2)} - Y_P^{(1)} \quad [m] \quad (4)$$

La parallasse residua, così definita, si misura in metri. Tale definizione si è dimostrata soddisfacente in quanto:

- è applicabile alle immagini orientate direttamente;
- ha una definizione chiara e un significato evidente;
- ha dimostrato di avere un buon grado di correlazione con la percezione visiva della parallasse residua.

Per rendere la stima (4) confrontabile con le usuali quantificazioni della parallasse, effettuate nello spazio immagine e misurate in micron, si possono proiettare i valori di P_Y nello spazio immagine usando il fattore di scala locale dell'immagine, ricavabile da

$$n = \frac{Z_0^{(1)} - Z_P}{c} \quad (5)$$

e definendo la parallasse nello spazio immagine come

$$p_Y := \frac{P_Y}{n} \quad [\mu m]$$

Un'ultima osservazione: se il modello preso in considerazione ha la base diretta come l'asse Y invece che X , le equazioni (1) possono essere risolte rispetto ad Y e Z , ottenendo per sostituzione due valori X .

3.2 Le analisi svolte

Si è proceduto anzitutto alla restituzione di tutti i punti, CKP o TP, su tutti i modelli in cui sono visibili, longitudinali e trasversali. La determinazione delle coordinate oggetto avviene *per modelli*, con la procedura descritta al punto 3.1; si è volutamente evitato di effettuare l'intersezione multipla in quanto durante la restituzione tale metodologia ridondante non viene applicata. Il primo risultato che viene generato è una tabella la cui struttura è mostrata nella Figura 10 in cui compaiono: un numero progressivo, il punto restituito, immagine e strisciata di sinistra, immagine e strisciata di destra, lunghezza della base di presa e suo orientamento prevalente, coordinate del punto ottenute con la restituzione, stima della parallasse nello spazio oggetto e in quello lastra; se il punto restituito è un CKP, di cui si conoscono le coordinate oggetto vere, vengono anche formate le differenze fra le coordinate fotogrammetriche e queste ultime. La restituzione descritta viene effettuata per tutti i tre OE presi in considerazione, **APP**, **AAT** e **AT** e i risultati sono memorizzati in altrettanti file come quello della Figura 10. Va sottolineato ancora una volta come *le diverse restituzioni usino le stesse coordinate lastra*, che sono state misurate una volta per tutte: tutte le differenze che le successive analisi evidenzieranno sono pertanto da addebitare esclusivamente ai diversi OE impiegati.

Una serie di programmi specifici consente di estrarre dall'insieme completo delle misure quelle appartenenti a una certa strisciata, a un certo modello o di filtrare secondo strategie più articolate. Altri programmi consentono di analizzare statisticamente i risultati. In particolare sono stati presi in considerazione nove diversi dataset:

whole: punti restituiti su tutti i modelli del blocco;

along60: punti restituiti sui soli modelli longitudinali aventi una base di presa corrispondente al ricoprimento longitudinale canonico del 60%;

along: punti restituiti sui tutti i modelli longitudinali; alcuni punti sono visibili su tre fotogrammi consecutivi e sono dunque restituibili non solo nei modelli canonici formati dai fotogrammi 1-2 e 2-3, ma anche nel modello formato dai fotogrammi 1-3, caratterizzato da una base di presa molto maggiore di quella canonica. Tali modelli rientrano nel dataset **along**, ma non in **along60** che ne rappresenta un sottoinsieme in senso stretto;

across: punti restituiti su tutti i modelli trasversali;

strip1: punti restituiti su modelli appartenenti alla strisciata 1;
strip2: punti restituiti su modelli appartenenti alla strisciata 2;
strip3: punti restituiti su modelli appartenenti alla strisciata 3;
across1/2: punti restituiti su modelli trasversali costituiti da immagini che appartengono alle strisciate 1 e 2;
across2/3: punti restituiti su modelli trasversali costituiti da immagini che appartengono alle strisciate 2 e 3.

9	PV_NGCP_13	561	7	647	5	2178	X	513334.618	5002520.807	103.022	0.640	69.18	0.303	-0.178	1.050
10	PV_NGCP_13	561	7	649	5	1642	Y	513334.434	5002520.717	101.939	0.293	31.68	0.119	-0.268	-0.033
11	PV_NGCP_13	561	7	651	5	1417	Y	513334.233	5002520.833	101.394	0.222	23.95	-0.082	-0.152	-0.578
12	PV_NGCP_13	563	7	565	7	759	X	513334.403	5002520.647	102.514	-0.002	-0.24	0.088	-0.338	0.542
13	PV_NGCP_13	563	7	647	5	1693	Y	513334.652	5002520.780	101.886	0.549	59.35	0.337	-0.205	-0.086
14	PV_NGCP_13	563	7	649	5	1431	Y	513334.484	5002520.748	102.041	0.199	21.54	0.169	-0.237	0.069
15	PV_NGCP_13	563	7	651	5	1601	Y	513334.369	5002520.863	101.496	0.013	1.43	0.054	-0.122	-0.476
16	PV_NGCP_13	565	7	647	5	1450	Y	513334.738	5002520.779	101.879	0.381	41.15	0.423	-0.206	-0.093
17	PV_NGCP_13	565	7	649	5	1589	Y	513334.548	5002520.746	102.035	0.071	7.67	0.233	-0.239	0.063

Figura 10 - Struttura del file delle restituzioni

4. RISULTATI RELATIVI AI SINGOLI BLOCCHI

La sezione illustra i risultati ottenuti per ciascuno dei sei blocchi. Vengono premesse alcune considerazioni relative alla teoria degli errori nel caso normale, al Par. 4.1, alla determinazione della soglia di buona visione per le parallassi residue, al Par. 4.2 e alla struttura del materiale presentato, al Par. 4.3. I successivi paragrafi sono organizzati a gruppi di due per ogni blocco considerato: il primo paragrafo riporta i risultati ottenuti organizzati in varie tabelle e grafici, come spiegato nel Par. 4.3, e il secondo contiene l'analisi e il commento.

4.1 Teoria degli errori nel caso normale

Un significativo termine di paragone, quando si vuole analizzare la precisione della fotogrammetria, è dato dalla teoria degli errori nel caso della presa normale. Si tratta di una ben nota idealizzazione nell'ambito della quale è possibile ricavare in forma chiusa la precisione delle coordinate restituite in funzione di pochi semplici parametri relativi alla geometria del volo e della precisione con cui vengono misurate le coordinate lastra. Nella presente nota sono stati assunti i valori indicati dalla Tabella 2

Altezza relativa di volo (media dei valori presenti nella Tabella 1)	Δh	2860 m
Lunghezza focale	c	303 mm
Ricoprimento longitudinale		65%
Base di presa	B	760 m
Errore nella misura delle coordinate lastra (metà del pixel)	σ	7 μm

Tabella 2 – Sintesi dei valori usati per la stima degli errori

e, usando le formule

$$\sigma_E = \sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{c} \sigma\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{c} \frac{1}{B/\Delta h} \frac{x_1}{c} \sqrt{2} \sigma\right)^2}$$

$$\sigma_h = \frac{\Delta h}{c} \frac{1}{B/\Delta h} \sqrt{2} \sigma$$

(dove a x_1 , ascissa-lastra del punto-immagine di sinistra è stato assegnato il valore 100 mm) si sono ottenuti i valori riassunti dalla Tabella 3

Errore nelle componenti Est e Nord delle coordinate oggetto dei punti restituiti	σ_E, σ_N	0,13 m
Errore nella componente h delle coordinate oggetto dei punti restituiti	σ_h	0,31 m

Tabella 3 – Valori ottenuti mediante la propagazione della varianza

La teoria degli errori del caso normale fornisce, come ben noto, delle sottostime degli errori, ma è comunque molto interessante perché indica il corretto ordine di grandezza degli errori di misura e consente di determinare il rapporto fra le componenti planimetriche e altimetriche degli errori, per una certa geometria di presa.

4.2 Determinazione della soglia di buona visione per le parallassi residue

E' stato svolto un lavoro abbastanza esteso di determinazione della *soglia di buona visione*, da intendersi: se, per un certo punto da misurare, la parallasse residua supera la soglia, la visione stereoscopica è fortemente disturbata. La conclusione raggiunta è che, per i fotogrammi considerati, tale soglia è situata a circa 25-30 μm , approssimativamente corrispondenti a due pixel. Assumendo che le parallassi massime siano dell'ordine di tre volte lo eqm, si può concludere che la soglia di buona visione vale, in termini di eqm, 8-10 μm .

4.3 Strutturazione dei dati

I paragrafi seguenti mostrano, per ciascuno dei sei blocchi analizzati, due tabelle e quattro grafici riguardanti l'accuratezza e le parallassi residue. L'accuratezza è stata studiata confrontando le coordinate dei CKP determinate con la fotogrammetria con quelle vere. Ciò è stato fatto per ciascun CKP e per tutte le sue determinazioni: poiché un CKP può comparire in diversi modelli, un certo punto può essere restituito anche 4 o 5 volte.

Per chiarezza, indichiamo con \mathbf{X}_{ij} la j -esima determinazione fotogrammetrica del i -esimo CKP; indichiamo con $\bar{\mathbf{X}}_i$ le coordinate vere del i -esimo CKP. Si possono formare le differenze

$$\Delta_{ij} = \mathbf{X}_{ij} - \bar{\mathbf{X}}_i$$

fra le coordinate restituite e quelle vere. Le elaborazioni presentate nella presente sezione sono costituite da analisi statistiche dei valori Δ_{ij} , pensati come estrazioni da un'unica variabile casuale Δ .

La *prima tabella* riguarda l'analisi di accuratezza ed è composta da nove righe principali che riguardano gli altrettanti dataset presi in considerazione: **whole**, **along**, ecc. Ciascuna delle righe principali contiene tre sottorighe che si riferiscono rispettivamente alle componenti Est, Nord e h. Compaiono inoltre tre colonne principali che si riferiscono agli OE **APP**, **AAT** e **AT**. Ciascuna di esse contiene cinque colonne riportanti il minimo, il massimo, la media, lo scarto quadratico medio (distanza media dalla media empirica) e l'errore quadratico medio (distanza media dal valore vero, cioè **0**) della Δ , per la componente a cui si riferisce. Compaiono anche due colonne semplici, nella parte sinistra, che indicano il numero di CKP osservati e il numero delle misure fotogrammetriche eseguite; il secondo è

significativamente maggiore del primo in quanto tiene conto della molteplicità con cui ogni CKP è stato misurato. Tutti i valori sono misurati in metri.

La *seconda tabella* riguarda le parallassi residue stimate nello spazio immagine e misurate in micron. E' basata sulla statistica delle osservazioni ρ_{vij} che indica la parallasse Y , misurata nello spazio immagine, della j -esima determinazione fotografometrica del i -esimo punto restituito, dove l'insieme dei punti considerati è in questo caso l'unione di CKP e TP. Analogamente a quanto fatto prima, si ipotizza che i valori ρ_{vij} siano estrazioni da un'unica variabile casuale ρ . La seconda tabella ha una struttura simile alla prima ma possiede solo nove righe semplici che si riferiscono ai dataset **whole**, **along**, ecc.

I *grafici* non possono prendere in considerazione tutte le grandezze statistiche riportate nelle tabelle, minimo, massimo, media, sqm e eqm, dunque è stata fatta la scelta di prendere in considerazione il solo eqm. I *primi tre* grafici riguardano l'accuratezza per le componenti Est, Nord e h, per tutti i dataset e per tutti gli OE. Il *quarto* grafico riguarda invece le parallassi residue.

Premessa. Mentre il contenuto dell'articolo è stato definito con il contributo di tutti gli autori, i Par. 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13 e 4.15, che commentano i risultati per i singoli blocchi, sono stati scritti autonomamente dagli autori che hanno lavorato sui dati: questo spiega alcune disomogeneità nella struttura e nel contenuto dei vari contributi.

4.4 Risultati per il blocco di Como

		Pti	Oss	APP					AAT					AT				
				Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
whole	ΔE	22	101	-1,02	0,98	-0,02	0,32	0,32	-0,28	0,40	0,01	0,15	0,15	-0,29	0,41	-0,01	0,15	0,15
	ΔN			-1,04	0,59	-0,30	0,43	0,53	-0,70	0,12	-0,17	0,16	0,23	-0,41	0,17	-0,07	0,13	0,15
	Δh			-2,98	3,20	0,41	1,40	1,46	-0,55	1,28	0,31	0,39	0,49	-0,37	0,85	0,12	0,30	0,32
along60	ΔE	22	44	-0,39	0,52	0,00	0,24	0,24	-0,28	0,40	0,00	0,17	0,17	-0,29	0,41	-0,03	0,18	0,18
	ΔN			-1,04	0,59	-0,37	0,53	0,65	-0,70	0,12	-0,20	0,19	0,27	-0,40	0,17	-0,10	0,14	0,18
	Δh			-0,32	1,76	0,45	0,43	0,62	-0,15	1,28	0,50	0,25	0,56	-0,37	0,85	0,15	0,29	0,33
along	ΔE	22	60	-0,45	0,52	-0,01	0,24	0,24	-0,28	0,40	-0,01	0,17	0,17	-0,29	0,41	-0,04	0,17	0,18
	ΔN			-1,04	0,59	-0,38	0,53	0,65	-0,70	0,12	-0,20	0,19	0,27	-0,41	0,17	-0,10	0,15	0,18
	Δh			-0,32	1,76	0,45	0,38	0,59	-0,15	1,28	0,49	0,23	0,54	-0,37	0,85	0,14	0,27	0,30
across	ΔE	6	41	-1,02	0,98	-0,02	0,42	0,42	-0,28	0,29	0,05	0,12	0,13	-0,16	0,22	0,02	0,10	0,10
	ΔN			-0,56	0,15	-0,17	0,18	0,25	-0,32	0,04	-0,13	0,11	0,17	-0,19	0,07	-0,04	0,06	0,07
	Δh			-2,98	3,20	0,34	2,16	2,19	-0,55	1,07	0,04	0,42	0,42	-0,33	0,70	0,09	0,33	0,35
strip 1	ΔE	13	27	-0,33	0,52	0,07	0,25	0,26	-0,28	0,40	-0,10	0,15	0,18	-0,25	0,41	-0,09	0,15	0,18
	ΔN			-1,01	-0,42	-0,70	0,17	0,73	-0,34	0,10	-0,14	0,12	0,19	-0,41	-0,03	-0,19	0,12	0,23
	Δh			-0,14	1,07	0,45	0,32	0,56	-0,15	1,14	0,49	0,26	0,55	-0,27	0,49	0,16	0,21	0,26
strip 2	ΔE	9	17	-0,45	0,13	-0,22	0,15	0,26	0,02	0,27	0,17	0,07	0,19	0,01	0,26	0,16	0,08	0,18
	ΔN			0,12	0,59	0,41	0,15	0,44	-0,46	0,12	-0,07	0,15	0,16	-0,36	0,17	-0,01	0,15	0,15
	Δh			-0,32	1,76	0,43	0,45	0,62	0,26	1,28	0,52	0,24	0,57	-0,13	0,85	0,32	0,32	0,45
strip 3	ΔE	6	16	-0,22	0,44	0,07	0,19	0,21	-0,18	0,15	-0,04	0,12	0,12	-0,29	0,00	-0,16	0,10	0,18
	ΔN			-1,04	-0,40	-0,69	0,16	0,71	-0,70	-0,32	-0,42	0,09	0,43	-0,18	0,15	-0,03	0,09	0,10
	Δh			-0,21	1,45	0,47	0,43	0,63	0,14	0,79	0,46	0,15	0,49	-0,37	0,17	-0,07	0,13	0,15
across 1/2	ΔE	4	23	-0,28	0,98	0,18	0,30	0,35	-0,10	0,21	0,09	0,08	0,12	-0,03	0,22	0,09	0,08	0,12
	ΔN			-0,56	0,10	-0,22	0,18	0,28	-0,21	0,04	-0,09	0,08	0,12	-0,19	0,02	-0,07	0,05	0,09
	Δh			-0,52	3,20	2,11	0,77	2,24	-0,27	0,85	0,26	0,23	0,35	-0,05	0,70	0,28	0,26	0,39
across 2/3	ΔE	2	18	-1,02	0,50	-0,27	0,41	0,50	-0,28	0,29	-0,02	0,14	0,14	-0,16	0,04	-0,06	0,06	0,09
	ΔN			-0,31	0,15	-0,11	0,16	0,19	-0,32	-0,01	-0,17	0,12	0,21	-0,07	0,07	0,01	0,03	0,03
	Δh			-2,98	0,04	-1,91	0,76	2,06	-0,55	1,07	-0,25	0,44	0,50	-0,33	0,49	-0,16	0,24	0,28

Tabella 4 - Accuratezze per il volo di Como, in metri

	Pti	Oss	APP					AAT					AT				
			Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
whole	169	504	-131,21	157,52	18,68	30,05	35,39	-41,07	71,09	0,20	13,57	13,57	-39,45	46,08	0,81	11,77	11,79
along60	169	303	-17,15	43,34	13,99	14,10	19,86	-13,64	14,25	-0,63	5,06	5,10	-11,67	13,37	-0,03	3,81	3,81
along	169	429	-30,40	69,18	18,09	18,15	25,63	-14,52	22,84	-0,70	5,86	5,90	-15,66	13,37	-0,03	3,98	3,98
across	19	75	-131,21	157,52	22,06	64,96	68,60	-41,07	71,09	5,31	31,78	32,22	-39,45	46,08	5,57	28,51	29,05
strip 1	59	141	6,75	69,18	32,64	14,62	35,77	-13,27	12,70	-2,59	4,75	5,42	-9,85	13,37	-0,12	3,81	3,81
strip 2	57	135	-30,40	28,19	2,44	11,79	12,04	-9,87	22,84	4,15	5,51	6,90	-15,66	10,47	0,02	4,78	4,78
strip 3	61	153	-9,35	57,74	18,50	13,95	23,17	-14,52	7,51	-3,25	4,26	5,36	-11,67	9,83	0,00	3,32	3,32
across 1/2	10	36	-26,27	148,44	46,76	46,45	65,91	-41,07	24,40	-20,89	12,84	24,52	-39,45	18,88	-21,59	12,46	24,93
across 2/3	9	39	-131,21	157,52	-0,74	71,54	71,54	-26,35	71,09	30,16	23,12	38,00	8,81	46,08	31,33	7,62	32,25

Tabella 5. Parallassi residue per il volo di Como, in micron

Como - Delta E

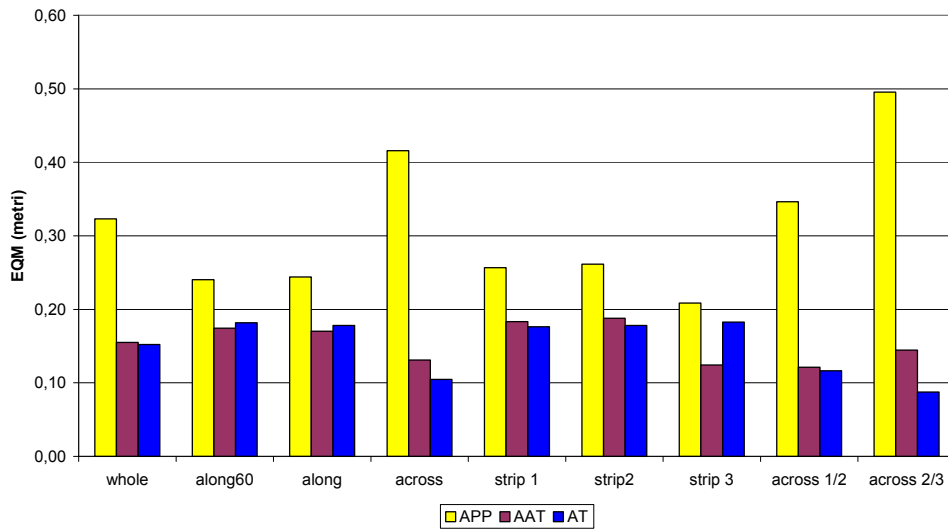


Figura 11 – Accuratezze per la componente Est del volo di Como, in metri

Como - Delta N

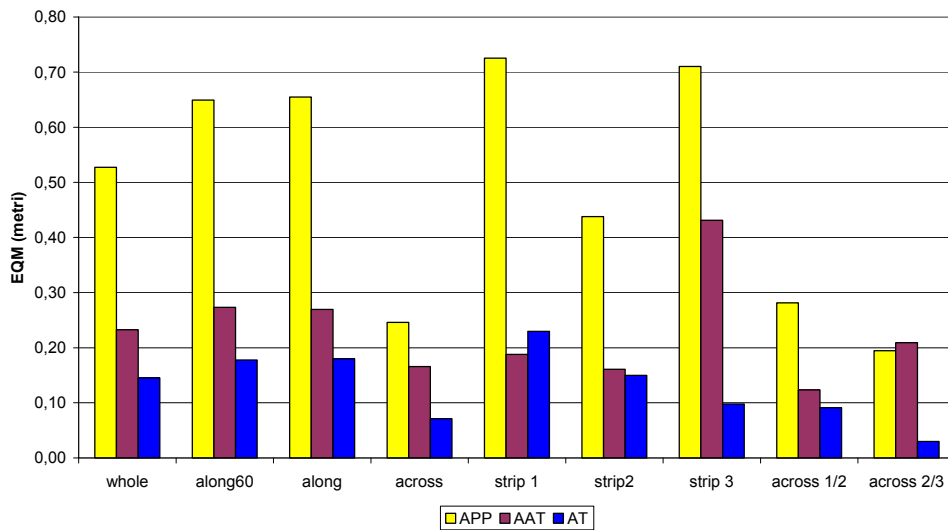


Figura 12 - Accuratezze per la componente Nord del volo di Como, in metri

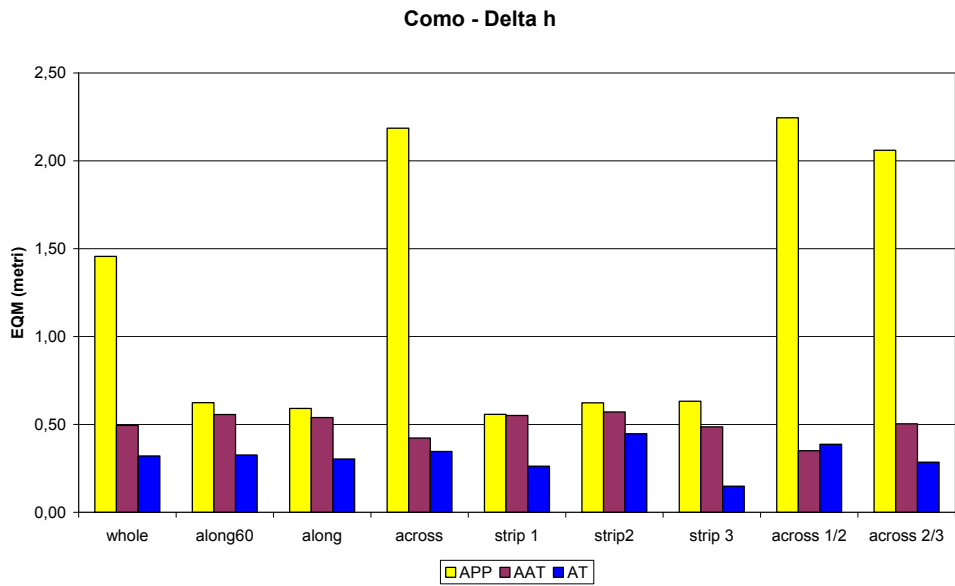


Figura 13 - Accuratezze per la componente h del volo di Como, in metri

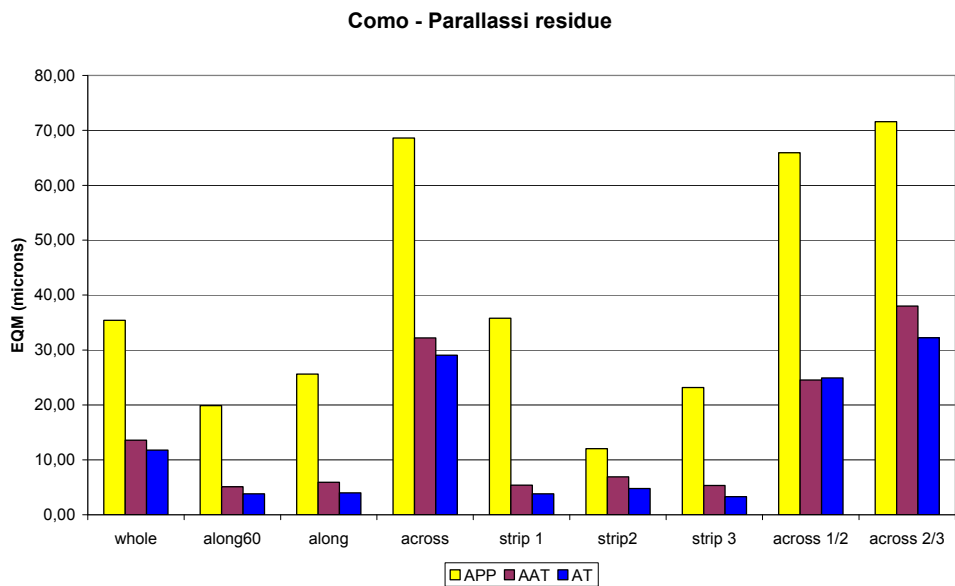


Figura 14 - Parallassi residue per il volo di Como, in micron

4.5 Analisi dei risultati per il blocco di Como

Con i soli parametri di OE **APP** non si ottengono dei risultati soddisfacenti: le parallassi arrivano ad avere valori di eqm di $36 \mu\text{m}$ e gli scarti sui punti a terra hanno valori di eqm pari a 32 cm in Est, 53 cm in Nord, ed arrivano a valori di 1,5 m in quota (60 cm se si considera solo **Along60**).

Utilizzando il dataset di OE **AAT** si ottengono risultati molto migliori, e decisamente simili a quelli ottenuti con **AT** tradizionale per quanto riguarda scarti planimetrici e parallassi residue. Gli scarti in quota, pur migliorando, restano fuori tolleranza (eqm=50 cm) con un $\sigma_{\Delta H}$ (**AAT**) superiore a $\sigma_{\Delta H}$ (**AT**) (39 cm, contro 30 cm), e sono affetti da un bias dell'ordine dei 20 cm (bias presente anche sulle singole strisciate).

Se ne deduce che la compensazione dei parametri di OE con il vincolo di punti di legame, pur senza l'utilizzo di punti a terra, rende geometricamente consistente il blocco, e permette di ottenere scarti sui check point paragonabili a quelli di **AT** per quanto riguarda la planimetria, non così in quota.

Dal confronto diretto dei tre set di parametri di OE risulta evidente che le differenze più grandi si riscontrano nei parametri angolari (principalmente in ω , ma anche in k) e che vi è maggior differenza tra i parametri angolari di **APP** e di **AT**, che tra **AAT** e **AT**. Infatti, mentre per **APP** si hanno differenze in ω , sulle singole strisciate, che vanno da 90cc a 220cc, nel confronto tra OE **AAT** e **AT** tali valori si riducono sensibilmente, (strip1 $\Delta\omega=52$ cc, strip3 $\Delta\omega=90$ cc) arrivando però ancora fino a valori di 170cc per $\Delta\omega$ della seconda strisciata.

Nel caso del volo di Como, l'utilizzo di punti di legame ha migliorato notevolmente la coerenza degli OE del blocco, con l'effetto di dare una migliore congruenza geometrica interna a tutto il blocco, lungo singole strisciate, ma soprattutto nei legami tra le strisciate.

L'analisi di dettaglio dei parametri statistici per i punti restituiti **along**, **across**, e per strisciate singole evidenzia che ad essere molto elevati sono i valori di parallassi e di scarti per punti appartenenti a modelli trasversali alle strisciate, che danno problemi anche con la tradizionale AT (il numero di tali punti è però molto piccolo rispetto al totale: solo 2 e 4 check point sono presi in considerazione, seppur osservati tutti da 6 fotogrammi).

Inoltre, dall'analisi degli istogrammi dei valori **across** risulta che parallassi residue e scarti assumono valori elevati ma di segno opposto per le sovrapposizioni tra le strisciate 1-2 e 2-3.

Considerando quindi i soli dati **along**, **along60**, o per singole strisciate, parallassi residue e scarti migliorano per tutti e tre gli OE, pur restando troppo elevati nel caso di **APP**, e invece entro i limiti richiesti e molto simili tra loro per **ATT** e **AT**, eccezion fatta per il bias in quota in **ATT**.

La soluzione **AAT** risulta comunque già più che soddisfacente, essendo ottenuta senza l'utilizzo di alcun punto a terra. L'aggiunta di punti di appoggio consente comunque di far rientrare anche gli scarti in quota entro i limiti previsti.

Occorre un ulteriore approfondimento delle cause di tali differenze, e di soluzioni ottimali nell'utilizzo dell'unità GPS/IMU durante i voli fotogrammetrici.

Una miglior comprensione, che può portare a ulteriori sviluppi nella fotogrammetria diretta, può derivare dallo studio delle equazioni di navigazione le cui soluzioni forniscono dati di posizione GPS e di assetto da giroscopi e accelerometri.

Risulta infatti chiaro dalle precedenti analisi, che i vincoli geometrici introdotti dai punti di legame sono indispensabili per ridurre gli errori nei parametri angolari, che, derivando dall'integrazione di equazioni differenziali del primo ordine (velocità angolari) hanno crescita esponenziale, e non vengono corretti a sufficienza dalla misura di posizione GPS.

4.6 Risultati per il blocco di Palermo

		Pti	Oss	APP					AAT					AT				
				Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
				ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh	ΔE	ΔN	Δh
whole	ΔE	31	291	-0.57	0.31	-0.11	0.16	0.19	-0.25	0.18	-0.05	0.08	0.10	-0.40	0.25	-0.06	0.09	0.11
	ΔN			-0.70	0.32	-0.17	0.14	0.22	-0.22	0.44	0.15	0.12	0.19	-0.39	0.52	-0.04	0.18	0.18
	Δh			-0.85	1.70	0.30	0.46	0.55	-0.57	1.00	0.30	0.25	0.39	-0.51	0.94	0.23	0.29	0.37
along60	ΔE	31	95	-0.57	0.26	-0.12	0.18	0.22	-0.22	0.15	-0.05	0.09	0.10	-0.23	0.12	-0.06	0.08	0.10
	ΔN			-0.70	0.32	-0.13	0.17	0.22	-0.14	0.44	0.16	0.13	0.21	-0.39	0.52	0.00	0.21	0.21
	Δh			-0.79	1.70	0.43	0.60	0.74	-0.32	0.99	0.25	0.27	0.37	-0.51	0.94	0.16	0.34	0.37
along	ΔE	31	158	-0.57	0.31	-0.11	0.17	0.21	-0.22	0.17	-0.05	0.09	0.10	-0.23	0.14	-0.06	0.08	0.10
	ΔN			-0.70	0.32	-0.15	0.16	0.21	-0.15	0.44	0.15	0.13	0.20	-0.39	0.52	-0.02	0.20	0.21
	Δh			-0.79	1.70	0.42	0.50	0.66	-0.32	0.99	0.25	0.24	0.35	-0.51	0.94	0.16	0.31	0.35
across	ΔE	14	133	-0.44	0.21	-0.12	0.14	0.18	-0.25	0.18	-0.05	0.07	0.09	-0.40	0.25	-0.07	0.11	0.13
	ΔN			-0.51	0.12	-0.21	0.11	0.23	-0.22	0.35	0.14	0.11	0.18	-0.39	0.30	-0.07	0.13	0.15
	Δh			-0.85	1.08	0.16	0.34	0.38	-0.57	1.00	0.36	0.26	0.44	-0.42	0.87	0.31	0.24	0.40
strip 1	ΔE	7	39	-0.19	0.31	0.05	0.14	0.15	-0.15	0.17	0.02	0.07	0.07	-0.21	0.14	-0.06	0.07	0.09
	ΔN			-0.34	0.05	-0.12	0.11	0.16	-0.15	0.26	0.06	0.10	0.11	-0.39	0.00	-0.17	0.09	0.19
	Δh			-0.37	0.89	0.28	0.26	0.38	-0.32	0.72	0.17	0.26	0.31	-0.27	0.94	0.30	0.31	0.43
strip 2	ΔE	17	65	-0.25	0.15	-0.07	0.10	0.12	-0.22	0.07	-0.10	0.07	0.12	-0.23	0.12	-0.08	0.07	0.11
	ΔN			-0.59	0.21	-0.20	0.14	0.25	-0.08	0.31	0.14	0.09	0.17	-0.31	0.11	-0.11	0.08	0.14
	Δh			-0.79	1.50	0.43	0.51	0.67	-0.25	0.75	0.26	0.21	0.33	-0.51	0.38	0.01	0.19	0.19
strip 3	ΔE	20	54	-0.57	-0.06	-0.28	0.11	0.30	-0.20	0.12	-0.05	0.09	0.10	-0.23	0.09	-0.03	0.08	0.09
	ΔN			-0.70	0.32	-0.09	0.19	0.21	-0.10	0.44	0.23	0.13	0.26	-0.23	0.52	0.21	0.17	0.27
	Δh			-0.43	1.70	0.51	0.61	0.79	-0.25	0.99	0.30	0.25	0.39	-0.50	0.86	0.24	0.35	0.43
across 1/2	ΔE	3	36	-0.17	0.21	0.04	0.09	0.10	-0.13	0.18	-0.03	0.08	0.08	-0.11	0.25	0.00	0.08	0.08
	ΔN			-0.51	-0.09	-0.26	0.10	0.27	-0.22	0.14	0.02	0.09	0.09	-0.39	-0.09	-0.18	0.09	0.20
	Δh			-0.85	0.30	-0.12	0.27	0.30	-0.57	0.76	0.12	0.25	0.28	-0.42	0.68	0.09	0.22	0.23
across 2/3	ΔE	11	97	-0.44	0.15	-0.17	0.11	0.20	-0.25	0.10	-0.06	0.07	0.09	-0.40	0.17	-0.09	0.11	0.14
	ΔN			-0.40	0.12	-0.19	0.11	0.22	0.00	0.35	0.19	0.08	0.21	-0.30	0.30	-0.03	0.12	0.12
	Δh			-0.55	1.08	0.27	0.30	0.41	-0.03	1.00	0.45	0.20	0.49	-0.36	0.87	0.40	0.20	0.44

Tabella 6 - Accuratezze per il volo di Palermo, in metri

	Pti	Oss	APP					AAT					AT				
			Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
whole	95	694	-84,86	87,15	3,81	23,41	23,72	-44,37	55,55	4,32	13,91	14,56	-43,55	40,46	2,68	10,70	11,03
along60	94	250	-24,03	43,64	4,74	13,47	14,27	-29,00	30,57	-0,23	7,76	7,76	-25,41	40,46	-0,02	6,17	6,17
along	95	406	-34,91	49,38	6,53	14,69	16,07	-42,18	30,57	-1,49	10,05	10,16	-34,86	40,46	0,13	6,85	6,85
across	32	288	-84,86	87,15	-0,02	31,52	31,52	-44,37	55,55	12,52	14,46	19,13	-43,55	39,35	6,29	13,70	15,08
strip 1	31	133	-34,91	49,38	11,58	14,36	18,45	-42,18	30,57	-7,05	8,16	10,78	-34,86	40,46	1,63	7,91	8,07
strip 2	43	137	-23,10	47,42	2,70	14,66	14,91	-33,73	4,92	-6,50	5,95	8,81	-21,95	21,94	1,07	5,47	5,57
strip 3	50	136	-24,03	40,93	5,44	13,70	14,74	-5,72	27,35	8,99	5,99	10,80	-25,73	23,24	-2,29	6,36	6,76
across 1/2	12	110	-35,22	87,15	30,11	20,63	36,50	-8,27	31,72	8,38	8,66	12,05	-17,29	22,47	0,46	8,59	8,61
across 2/3	20	178	-84,86	36,13	-18,63	20,90	28,00	-44,37	55,55	15,08	16,60	22,43	-43,55	39,35	9,89	14,99	17,96

Tabella 7. Parallassi residue per il volo di Palermo, in micron

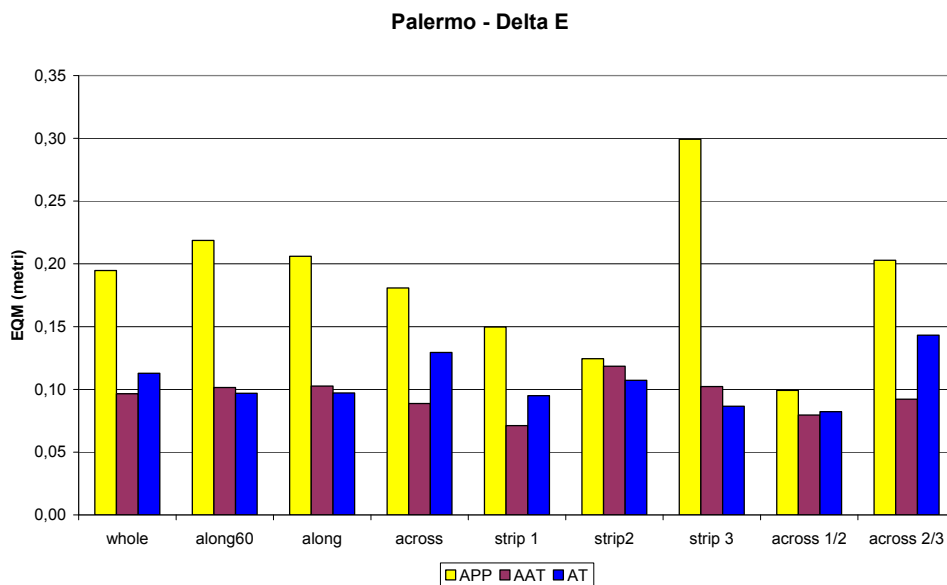


Figura 15 - Accurately per la componente Est del volo di Palermo, in metri

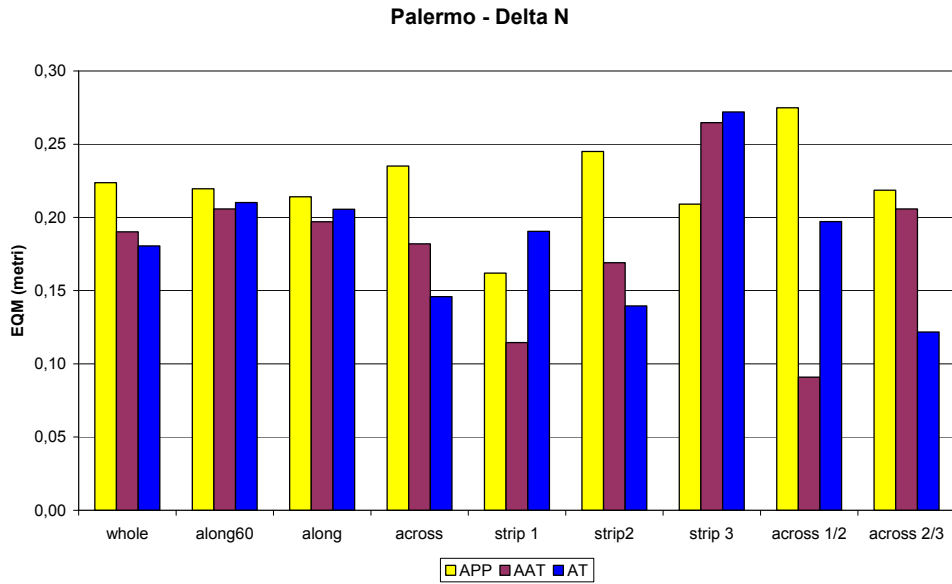


Figura 16 - Accuratezze per la componente Nord del volo di Palermo, in metri

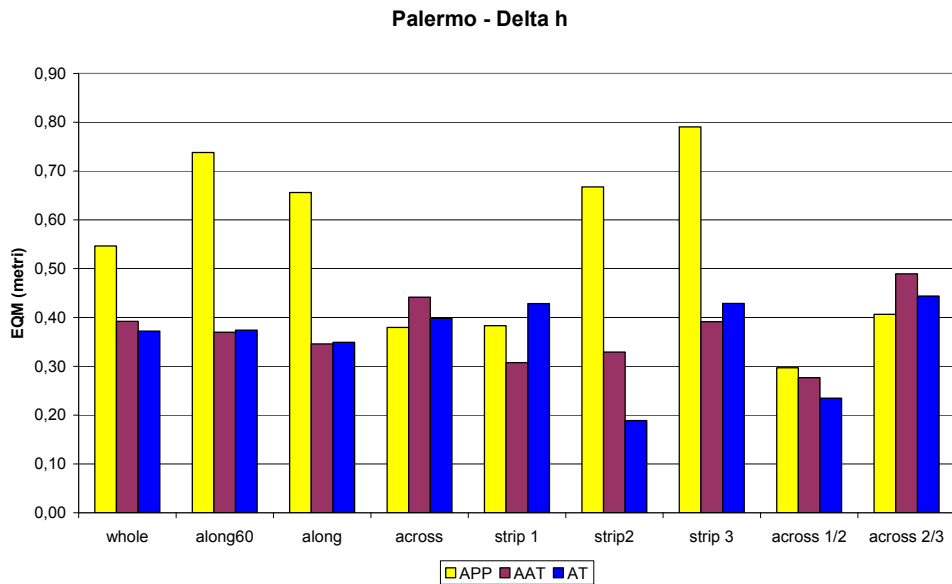


Figura 17 - Accuratezze per la componente h del volo di Palermo, in metri

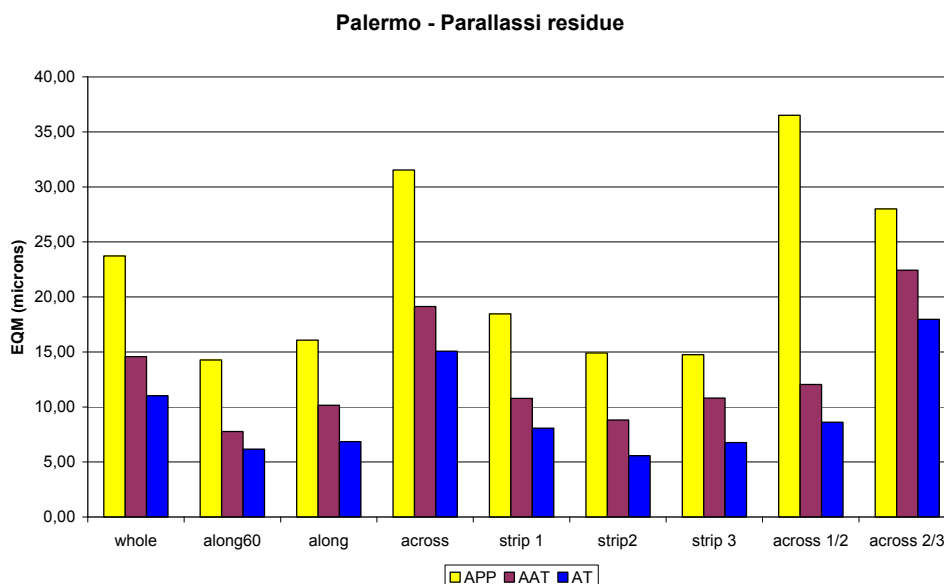


Figura 18 - Parallaxi residue per il volo di Palermo, in micron

4.7 Analisi dei risultati per il blocco di Palermo

Accuratezza – componente planimetrica. I risultati ottenuti per l'OE **APP** mostrano un eqm relativo al dataset **whole** di 19 cm per la componente Est e 22 cm per la Nord; tali valori, anche se più elevati del valore assunto come riferimento (errore nelle componenti Est e Nord delle coordinate oggetto dei punti restituiti nel caso della presa normale), sembrano essere abbastanza soddisfacenti. Gli ulteriori controlli eseguiti considerando tutti i fotogrammi, sia nel caso di modelli longitudinali (**along60**, **along**) che trasversali (**across**), evidenziano risultati praticamente analoghi. Prendendo in considerazione le singole strisciate, si notano invece differenze significative; in particolare, le strisciate 1 e 2 presentano un valore dell'eqm, in corrispondenza della coordinata Est, pari a circa la metà di quello ottenuto per la strisciata 3. Un risultato analogo viene evidenziato nel confronto fra il dataset **across1/2** e il dataset **across2/3**. Tali discrepanze potrebbero però essere dovute anche al differente numero di CKP utilizzati nei diversi dataset.

L'introduzione dei punti di legame (**AAT**) consente di ottenere risultati sostanzialmente migliori sia per quanto riguarda gli eqm che per i valori medi. Tale miglioramento si riscontra in maniera prevalente per la componente Est in quasi tutti i dataset considerati. In particolare, per i dataset **whole**, **along60**, **along** e **across**, si ottengono valori dell'eqm pari a circa 10 cm, per la coordinata Est, e a 20 cm per la Nord. Tali valori inoltre risultano essere praticamente uguali a quelli ottenuti con l'OE **AT**.

Il confronto tra gli OE **APP** e **AT** evidenzia risultati diversi in relazione alle differenti componenti planimetriche considerate. La coordinata Est, in quasi tutti i casi presi in esame, presenta un valore dell'eqm notevolmente superiore a quello ottenuto dalla triangolazione aerea tradizionale. Soltanto in due casi (**strip2** e **across1/2**) si ottengono valori simili tra **APP** e **AT** (Figura 15). La coordinata Nord presenta invece valori che generalmente si discostano di poco da quelli ottenuti con **AT** (figura16).

Accuratezza – componente altimetrica. In altimetria, per l'OE **APP**, si ottengono generalmente valori dell'eqm sensibilmente più elevati del valore assunto come riferimento (errore in quota delle coordinate oggetto dei punti restituiti nel caso della presa normale). Per i dataset **whole**, **along60** e **along** si ottengono valori rispettivamente pari a 55, 74 e 66 cm. Nel caso dei dataset ottenuti per sovrapposizione trasversale si ha una diminuzione dei valori dell'eqm. Anche in questo caso, come per la planimetria, si osserva un differente andamento degli errori lungo le tre strisciate considerate; un valore di 38 cm per il dataset **strip1**, valori pari a 67 e 79 cm, rispettivamente, per i dataset **strip2** e **strip3**.

L'analisi delle medie, soprattutto per i dataset relativi a modelli longitudinali, evidenzia valori che si discostano di una quantità pari a circa +40 cm, facendo quindi supporre la presenza di un errore sistematico.

La componente altimetrica ha nel caso della configurazione **APP** una precisione minore di quella che si ottiene in funzione della configurazione **AT**. Si nota però che, considerando la restituzione dei punti tra strisciate trasversali, si ottengono valori di eqm paragonabili a quelli della **AT**.

Per quanto riguarda l'OE **AAT**, l'eqm relativo alla componente altimetrica migliora notevolmente rispetto ad **APP**, soprattutto se si considerano i dataset **whole**, **along60**, **along** per i quali i valori dell'eqm diminuiscono fino a 39, 37 e 35 cm, rispettivamente. Anche in questo caso, come per la planimetria, i risultati sono molto simili a quelli ottenuti con **AT**. Lungo la direzione trasversale non si verificano invece variazioni particolarmente significative.

I valori della media rimangono invariati per il dataset **whole**, mentre diminuiscono in tutti i casi di restituzione per sovrapposizione longitudinale, pur mantenendosi comunque abbastanza elevati.

Parallassi residue. Per quanto riguarda le parallassi residue per l'OE **APP**, i valori dell'eqm, in tutti i casi considerati, risultano superiori alla soglia di 8÷10 µm, ritenuta accettabile per i fotogrammi considerati. I valori più elevati ovviamente si manifestano nel caso dei punti restituiti per sovrapposizione trasversale.

L'influenza dei punti di legame (**AAT**) si manifesta anche in relazione alla parallasse residua; in particolare, considerando il dataset **along60** come la configurazione utile per effettuare la restituzione cartografica, i valori di eqm ottenuti sono perfettamente compatibili con quelli definiti in linea teorica per una corretta visualizzazione stereoscopica dei punti.

Passando al confronto con i risultati ottenuti mediante triangolazione tradizionale (**AT**), si può notare che i valori dell'OE **APP** risultano essere sempre più elevati, mentre quelli dell'OE **AAT** sono dello stesso ordine di grandezza.

Sintesi. Per quanto riguarda la planimetria, l'accuratezza ottenuta dai dati dell'orientamento diretto (**APP**) è accettabile in relazione alle tolleranze richieste per una cartografia alla scala 1:2000; in quota i risultati sono invece notevolmente peggiori. I valori delle parallassi residue inoltre non consentono una visione stereoscopica ottimale per la restituzione.

Il passaggio alla *light integrated sensor orientation* (**AAT**) migliora sostanzialmente l'accuratezza geometrica (sia planimetrica che altimetrica) e i residui sulle parallassi in modo da ottenere risultati compatibili con quelli raggiunti con l'orientamento tradizionale.

4.8 Risultati per il blocco di Parma

		Pti	Oss	APP					AAT					AT				
				Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
whole	ΔE	16	160	-0,80	0,71	-0,18	0,24	0,30	-0,44	0,20	-0,09	0,14	0,17	-0,25	0,18	-0,01	0,10	0,10
	ΔN			-0,75	0,89	0,04	0,37	0,37	-0,25	0,26	0,06	0,09	0,11	-0,37	0,17	-0,03	0,08	0,09
	Δh			-2,83	2,98	0,29	1,71	1,74	-0,83	0,74	0,08	0,29	0,30	-0,57	0,64	0,15	0,25	0,29
along60	ΔE	15	47	-0,45	-0,01	-0,19	0,10	0,21	-0,44	0,18	-0,09	0,18	0,20	-0,20	0,18	-0,01	0,10	0,10
	ΔN			-0,75	0,89	0,04	0,55	0,55	-0,25	0,26	0,05	0,12	0,13	-0,33	0,15	-0,05	0,10	0,11
	Δh			-1,04	1,06	0,34	0,50	0,60	-0,83	0,74	0,17	0,33	0,37	-0,38	0,64	0,19	0,25	0,31
along	ΔE	15	69	-0,45	0,09	-0,17	0,10	0,20	-0,44	0,18	-0,10	0,18	0,20	-0,20	0,18	-0,01	0,10	0,10
	ΔN			-0,75	0,89	0,02	0,54	0,54	-0,25	0,26	0,05	0,12	0,12	-0,37	0,17	-0,05	0,10	0,11
	Δh			-1,04	1,06	0,34	0,46	0,57	-0,83	0,74	0,17	0,30	0,35	-0,38	0,64	0,19	0,24	0,30
across	ΔE	13	91	-0,80	0,71	-0,18	0,31	0,36	-0,36	0,20	-0,09	0,12	0,15	-0,25	0,15	-0,01	0,10	0,10
	ΔN			-0,23	0,53	0,06	0,15	0,16	-0,04	0,25	0,06	0,06	0,09	-0,15	0,15	-0,02	0,07	0,07
	Δh			-2,83	2,98	0,25	2,24	2,25	-0,63	0,53	0,01	0,27	0,27	-0,57	0,55	0,12	0,26	0,28
strip 1	ΔE	7	15	-0,45	-0,13	-0,28	0,09	0,29	-0,03	0,18	0,10	0,07	0,12	-0,07	0,18	0,06	0,07	0,09
	ΔN			0,58	0,89	0,72	0,11	0,73	0,08	0,24	0,16	0,05	0,17	-0,13	0,03	-0,03	0,06	0,07
	Δh			-0,63	1,03	0,23	0,48	0,53	-0,33	0,41	0,10	0,18	0,20	-0,21	0,33	0,06	0,15	0,17
strip 2	ΔE	12	36	-0,24	0,09	-0,10	0,08	0,13	-0,44	-0,01	-0,22	0,13	0,26	-0,20	0,14	-0,02	0,11	0,11
	ΔN			-0,75	-0,26	-0,47	0,11	0,48	-0,25	0,26	0,02	0,11	0,12	-0,37	0,17	-0,05	0,12	0,13
	Δh			-1,04	1,06	0,19	0,44	0,48	-0,83	0,72	0,12	0,34	0,36	-0,38	0,63	0,20	0,25	0,32
strip 3	ΔE	6	18	-0,28	-0,15	-0,21	0,04	0,22	-0,15	0,12	0,00	0,10	0,10	-0,18	0,07	-0,03	0,09	0,09
	ΔN			0,19	0,68	0,41	0,16	0,44	-0,17	0,20	-0,01	0,08	0,08	-0,23	0,15	-0,05	0,10	0,12
	Δh			0,29	1,05	0,73	0,24	0,77	-0,19	0,74	0,34	0,23	0,41	-0,22	0,64	0,27	0,24	0,36
across 1/2	ΔE	7	37	-0,80	0,71	-0,17	0,39	0,43	-0,33	0,20	-0,06	0,11	0,13	-0,25	0,15	0,02	0,09	0,09
	ΔN			0,04	0,53	0,19	0,11	0,22	-0,02	0,25	0,08	0,07	0,11	-0,15	0,09	-0,03	0,07	0,07
	Δh			-2,83	-0,28	-2,36	0,54	2,42	-0,63	0,37	-0,21	0,21	0,29	-0,57	0,41	0,05	0,20	0,21
across 2/3	ΔE	6	54	-0,66	0,30	-0,19	0,24	0,30	-0,36	0,05	-0,11	0,12	0,16	-0,24	0,09	-0,02	0,10	0,10
	ΔN			-0,23	0,17	-0,03	0,11	0,11	-0,04	0,20	0,05	0,06	0,08	-0,10	0,15	-0,01	0,07	0,07
	Δh			0,29	2,98	2,04	0,56	2,12	-0,46	0,53	0,16	0,19	0,25	-0,36	0,55	0,16	0,29	0,33

Tabella 8. Accuratezze per il volo di Parma, in metri

			APP					AAT					AT				
	Pti	Oss	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
whole	182	939	-153,21	179,29	-1,66	45,65	45,68	-58,31	74,21	2,72	20,80	20,97	-33,91	28,52	1,01	8,60	8,66
along60	176	382	-71,55	42,44	-4,06	18,90	19,33	-34,63	32,07	-0,51	8,61	8,63	-25,20	23,42	-0,06	7,57	7,57
along	176	534	-71,55	45,68	-4,13	18,64	19,09	-34,63	32,07	-0,71	8,76	8,79	-25,20	23,42	-0,06	7,46	7,46
across	65	405	-153,21	179,29	1,61	66,04	66,06	-58,31	74,21	7,25	29,44	30,32	-33,91	28,52	2,43	9,73	10,03
strip 1	67	151	-34,64	42,44	1,90	13,35	13,48	-15,15	32,07	1,73	7,25	7,45	-15,84	20,79	0,54	6,58	6,60
strip 2	89	231	-71,55	36,87	-11,39	21,04	23,93	-34,63	26,69	-1,93	9,37	9,56	-25,20	23,42	-1,28	7,51	7,62
strip 3	74	152	-47,00	45,68	0,92	15,25	15,28	-26,94	24,21	-1,29	8,75	8,84	-19,64	19,83	1,21	7,96	8,05
across 1/2	37	202	-153,21	179,29	2,12	78,64	78,67	-22,90	74,21	32,16	15,00	35,49	-30,60	23,64	2,09	8,45	8,71
across 2/3	28	203	-122,99	101,79	1,09	50,66	50,68	-58,31	53,78	-17,55	16,46	24,06	-33,91	28,52	2,76	10,86	11,21

Tabella 9. Parallassi residue per il volo di Parma, in micron

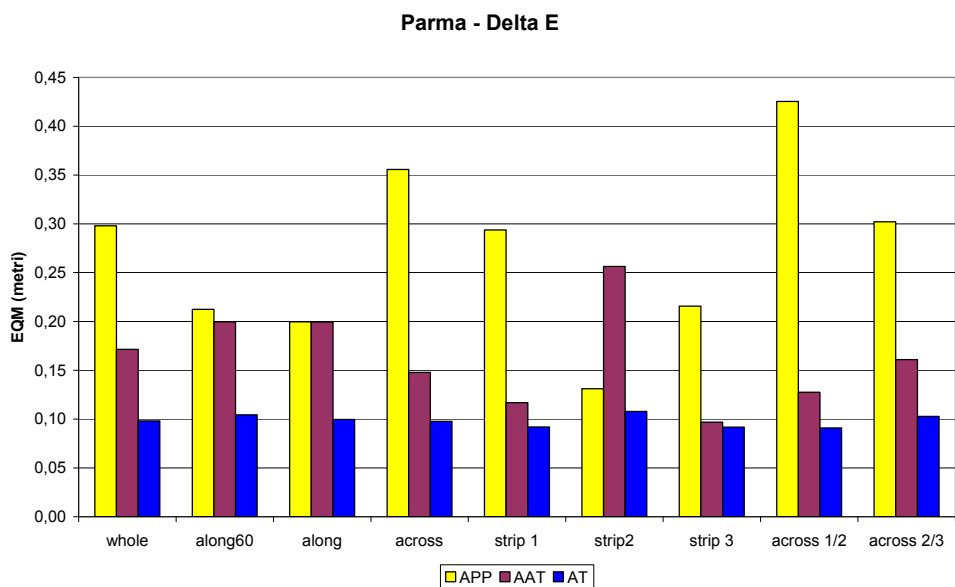


Figura 19 - Accuratezze per la componente Est del volo di Parma, in metri

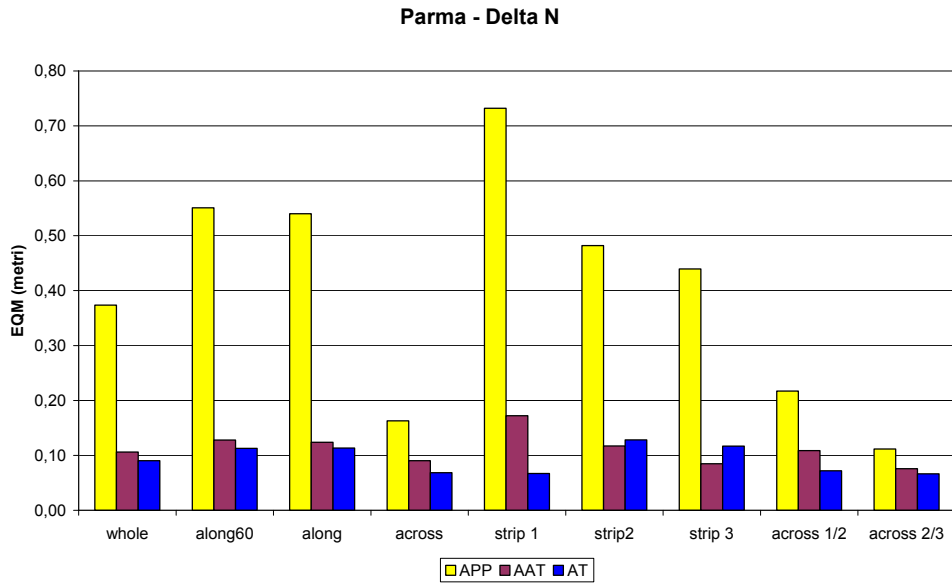


Figura 20 - Accuratezze per la componente Nord del volo di Parma, in metri

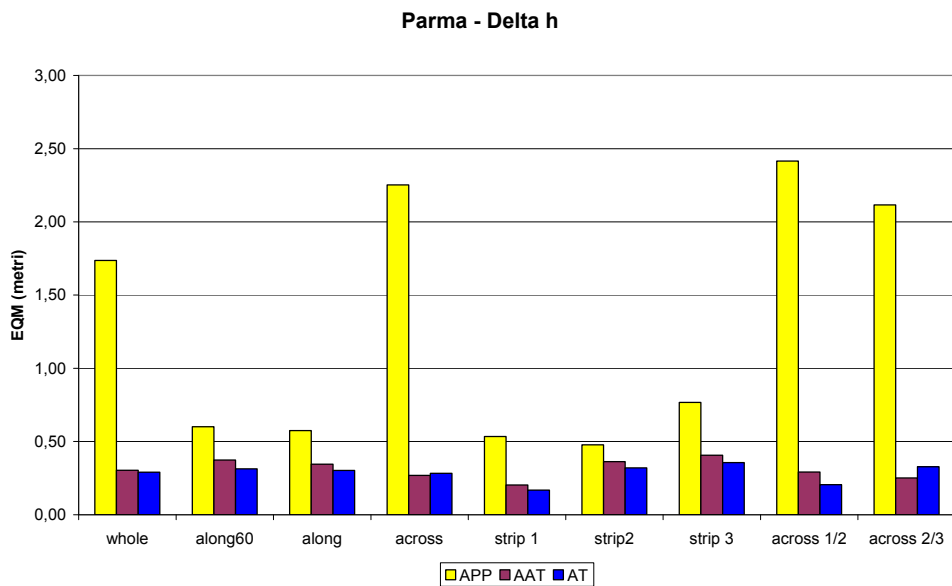


Figura 21 - Accuratezze per la componente h del volo di Parma, in metri

Parma - Parallaxi residue

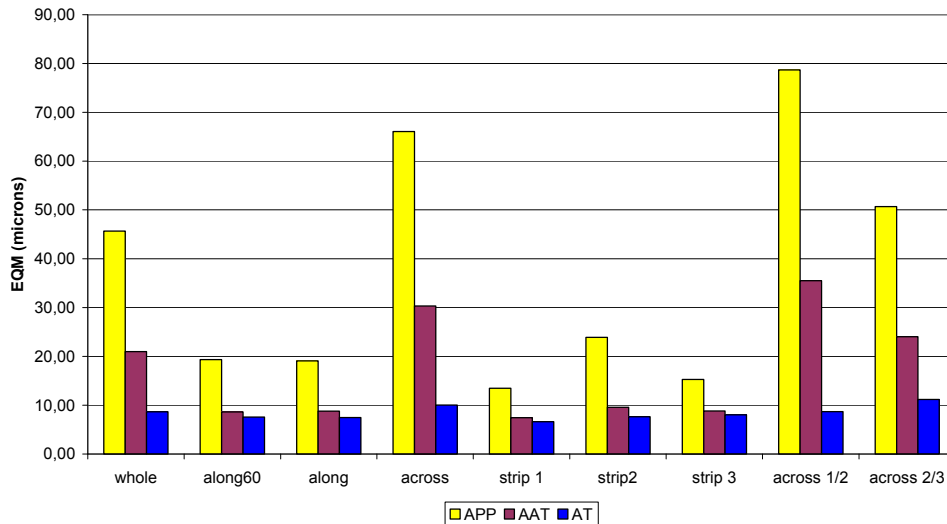


Figura 22 - Parallaxi residue per il volo di Parma, in micron

4.9 Analisi dei risultati per il blocco di Parma

Il blocco di Parma (Forlani et alii, 2003) comprende 50 punti GPS, disposti in larga maggioranza a coppie. La distanza fra i punti della coppia varia da qualche decina a un paio di centinaia di m; questo permette un controllo locale di errori di associazione del punto (costituito quasi sempre da strisce di delimitazione di aree di parcheggio) ma riduce il numero effettivo di check point a disposizione per la verifica del blocco. Nonostante il numero di tie point abbastanza elevato (166), da prove effettuate si è verificato che il blocco manifesta una certa instabilità senza un appoggio denso. Pertanto il numero di check point e la loro disposizione non sono ideali, essendo stati limitati alla fascia centrale del blocco (non sarebbe stato corretto d'altra parte suddividere le coppie, ovvero utilizzare come check point punti troppo vicini ad un control point!).

Accuratezza – componente planimetrica. Dall'analisi della Tabella 8 e dei grafici relativi si hanno con **APP** errori medi da 2 a 4 volte maggiori di quelli del caso normale. Si ha poi un comportamento duale tra **along** e **across**: rispetto al blocco totale in **along** gli errori crescono in direzione Nord e calano in Est; in **across** accade il contrario; non si è tuttavia trovata una spiegazione convincente di tale comportamento. Con l'ausilio della **AAT**, i risultati sono invece ottimi, attestandosi su valori appena superiori alle precisioni della restituzione stereo del caso normale. Le differenze di comportamento tra **along** e **across** divengono infatti non apprezzabili, a conferma di una generale coerenza planimetrica degli OE.

Accuratezza – componente altimetrica. La georeferenziazione diretta è affetta da errori prevalenti in quota. Poichè questi calano drasticamente nelle strisciate longitudinali prese a sé stanti (**along**) e sono invece massimi considerando solo modelli trasversali (**across**), sembra esservi un problema di coerenza interna degli OE, buona solo lungo le strisciate, ovvero nel breve periodo (una causa potrebbe essere ad esempio la variazioni della costellazione GPS). Nel caso del blocco di Parma, essendo i CKP situati a centro blocco, è particolarmente evidente l'incongruenza altimetrica tra strisciate: i massimi errori (circa 2 e 3 m) si riscontrano infatti su 3 coppie di punti di solo legame trasversale. L'impiego della **AAT** migliora notevolmente il risultato, che scende al livello della **AT**, di poco superiore al caso normale. I punti legame trasversale di cui sopra hanno qui errori massimi di 30 cm, in linea con la precisione nel caso normale.

Parallassi residue. Per quanto riguarda le parallassi (Tabella 9) vi sono forti differenze tra **across** e **along**, con valori superiori alla soglia di buona visibilità. Si ha un calo generalizzato nel passare da **APP** ad **AAT**, coi valori di **along** che praticamente rientrano sotto la soglia mentre si nota che quelle **across** restano significativamente maggiori. Ciò sembra indicare una certa debolezza della **AAT** nella individuazione dei punti di legame trasversale, dal momento che questo non avviene per la **AT** manuale.

4.10 Risultati per il blocco di Pavia

		Pti	Oss	APP					AAT					AT				
				Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM	Min	Max	Media	SQM	EQM
whole	ΔE	46	243	-0,35	0,63	-0,07	0,16	0,17	-0,38	0,48	0,14	0,16	0,22	-0,39	0,38	0,00	0,15	0,15
	ΔN			-0,53	0,28	-0,02	0,14	0,15	-0,85	0,48	-0,06	0,23	0,24	-0,61	0,37	0,02	0,15	0,15
	Δh			-0,97	1,34	0,32	0,37	0,49	-1,27	1,49	0,11	0,52	0,53	-1,21	0,87	-0,02	0,36	0,36
along60	ΔE	45	93	-0,32	0,63	-0,07	0,18	0,19	-0,29	0,41	0,15	0,16	0,22	-0,39	0,37	-0,01	0,17	0,17
	ΔN			-0,53	0,28	-0,02	0,16	0,17	-0,85	0,48	-0,05	0,27	0,28	-0,61	0,37	0,01	0,17	0,17
	Δh			-0,97	1,34	0,34	0,44	0,56	-0,75	1,10	0,40	0,37	0,55	-1,21	0,63	-0,05	0,34	0,34
along	ΔE	45	125	-0,32	0,63	-0,07	0,17	0,18	-0,29	0,46	0,15	0,16	0,22	-0,39	0,38	0,00	0,17	0,17
	ΔN			-0,53	0,28	-0,02	0,16	0,16	-0,85	0,48	-0,05	0,27	0,27	-0,61	0,37	0,02	0,17	0,17
	Δh			-0,97	1,34	0,34	0,40	0,52	-0,75	1,10	0,40	0,34	0,52	-1,21	0,63	-0,04	0,30	0,31
across	ΔE	22	118	-0,35	0,46	-0,07	0,14	0,16	-0,38	0,48	0,13	0,17	0,21	-0,33	0,37	0,01	0,12	0,12
	ΔN			-0,39	0,18	-0,03	0,13	0,13	-0,72	0,22	-0,07	0,18	0,19	-0,31	0,25	0,03	0,13	0,13
	Δh			-0,53	1,10	0,30	0,34	0,45	-1,27	1,49	-0,20	0,49	0,53	-1,02	0,87	0,01	0,41	0,41
strip 1	ΔE	21	39	-0,09	0,63	0,10	0,16	0,19	-0,15	0,41	0,11	0,14	0,18	-0,27	0,31	-0,10	0,12	0,16
	ΔN			-0,53	0,22	-0,11	0,17	0,20	-0,22	0,48	0,17	0,18	0,24	-0,61	0,07	-0,15	0,17	0,22
	Δh			-0,97	0,89	0,24	0,37	0,44	-0,75	1,07	0,34	0,42	0,54	-1,02	0,63	0,01	0,33	0,33
strip 2	ΔE	25	57	-0,32	0,06	-0,17	0,10	0,20	0,06	0,46	0,27	0,08	0,28	-0,02	0,38	0,14	0,10	0,17
	ΔN			-0,37	0,27	0,03	0,13	0,14	-0,40	0,28	-0,02	0,13	0,13	-0,14	0,37	0,10	0,09	0,13
	Δh			-0,37	1,34	0,43	0,39	0,58	-0,27	1,10	0,45	0,28	0,54	-0,71	0,60	-0,06	0,24	0,25
strip 3	ΔE	15	29	-0,24	0,15	-0,09	0,11	0,14	-0,29	0,20	-0,01	0,13	0,13	-0,39	0,01	-0,15	0,12	0,19
	ΔN			-0,32	0,28	0,02	0,15	0,15	-0,85	0,11	-0,40	0,21	0,45	-0,23	0,31	0,08	0,11	0,14
	Δh			-0,53	1,31	0,28	0,44	0,52	-0,54	1,08	0,36	0,32	0,48	-1,21	0,42	-0,07	0,37	0,38
across 1/2	ΔE	10	59	-0,20	0,46	0,00	0,15	0,15	-0,24	0,46	0,13	0,15	0,20	-0,21	0,37	0,01	0,13	0,13
	ΔN			-0,39	0,11	-0,07	0,14	0,15	-0,33	0,22	0,02	0,11	0,11	-0,31	0,15	-0,03	0,14	0,14
	Δh			-0,53	1,10	0,38	0,32	0,50	-1,27	0,99	-0,19	0,47	0,50	-0,86	0,87	0,20	0,35	0,41
across 2/3	ΔE	12	59	-0,35	0,12	-0,14	0,10	0,17	-0,38	0,48	0,12	0,18	0,22	-0,33	0,30	0,01	0,12	0,12
	ΔN			-0,35	0,18	0,01	0,11	0,11	-0,72	0,15	-0,15	0,19	0,24	-0,21	0,25	0,09	0,08	0,12
	Δh			-0,53	0,98	0,22	0,34	0,40	-1,19	1,49	-0,22	0,52	0,56	-1,02	0,61	-0,18	0,37	0,41

Tabella 10. Accuratezze per il volo di Pavia, in metri

