

Accuratezza e ripetibilità di blocchi APR con orientamento assistito da GNSS

Francesco Benassi^(a), Elisa Dall'Asta^(a), Fabrizio Diotri^(b), Gianfranco Forlani^(a), Umberto Morra di Cella^(b), Riccardo Roncella^(a), Marina Santise^(a)

^(a)Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, 43124 Parma, 0521 90{5934, 5972}
 riccardo.roncella@unipr.it, gianfranco.forlani@unipr.it

^(b)ARPA Valle D'Aosta, Località Grande Charrière, 44, 11020 Saint-Christophe, (AO),
 u.morradicella@arpa.vda.it, fabrizio.diotri@gmail.com

Riassunto

La fotogrammetria da sistemi APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) si avvale oggi di metodologie e applicativi che rendono l'intero processo di misura estremamente rapido e quasi completamente automatizzato. In molti frangenti l'onere maggiore per quanto attiene le misure in situ risiede ancora nella necessità di rilevare una rete di punti d'appoggio sufficientemente distribuita che garantisca una buona stabilità del blocco e quindi una soluzione di orientamento accurata ed affidabile. Il contributo illustra una serie di test empirici svolti per valutare l'accuratezza e la ripetibilità della piattaforma eBee RTK in caso di triangolazione aerea assistita da GNSS (GNSS-AT) effettuata utilizzando 3 differenti software (Agisoft Photoscan, Pix4D e MicMac) su 4 voli fotogrammetrici acquisiti sul medesimo campo prova ripetendo il medesimo piano di volo. Sono stati condotti diversi test variando la configurazione dell'appoggio; è stata inoltre esaminata l'incidenza del valore di deviazione standard assegnato alle posizioni dei centri di presa della camera. I risultati ottenuti sono estremamente soddisfacenti soprattutto in planimetria; l'accuratezza è invece lievemente peggiore in altimetria.

Abstract

UAV Photogrammetry today already enjoys a largely automated and efficient data processing pipeline. In many different scenarios the highest costs connected to the survey is still related to the ground control network required to georeference and grant the rigidity of the image block in order to achieve a final orientation solution accurate and reliable enough. This paper reports on the accuracy in object space obtained by GNSS-assisted orientation of four photogrammetric blocks, acquired by a senseFly eBee RTK and all flown according to the same flight plan at 80 m above ground over a test field. Block orientation has been performed with three software packages: PhotoScan, Pix4D and MicMac. Different tests have been considered changing the image block configuration and considering different weights for the camera position constraint. The results obtained so far are very promising especially for the XY components; slightly worst results have been experienced along Z direction.

1. Introduzione

Il rilievo fotogrammetrico con APR sta probabilmente avviandosi, dopo una fase pionieristica, su un percorso di standardizzazione delle procedure. Sono infatti numerosi i lavori in letteratura in cui vengono studiati la configurazione ottimale dell'appoggio a terra, il disegno delle strisciate, la calibrazione della camera. Anche se in molti casi la determinazione delle coordinate dei punti di appoggio con GNSS è operativamente semplice e veloce grazie alla diffusione di servizi NRTK, la prospettiva della georeferenziazione diretta resta assai attraente, laddove il terreno è disagiata o vi sono difficoltà di accesso o è pericoloso sostare nelle aree in cui andrebbero posti i *target*. Al tempo stesso, vista l'estrema rapidità delle operazioni di acquisizione dei fotogrammi, il rilievo d'appoggio, anche per estensioni di territorio relativamente contenute, rappresenta l'attività più onerosa nella grande maggioranza dei casi. Al momento tuttavia, l'evoluzione della sensoristica di bordo, almeno per il mercato dei droni più diffusi, sembra essere limitata al miglioramento della precisione e accuratezza del sistema GNSS di bordo, in particolare passando a ricevitori a doppia frequenza che offrono affidabilità e prestazioni migliori, da utilizzare per il *geotagging* delle immagini e quindi tipicamente in modalità RTK o addirittura NRTK. Grazie alle prestazioni degli algoritmi di orientamento automatico, infatti, l'affiancamento al GNSS di una piattaforma inerziale per misurare l'assetto della camera, che permetterebbe la georeferenziazione diretta delle immagini, non appare una vera necessità.

Le principali case costruttrici di droni per uso fotogrammetrico offrono già versioni dotate di capacità RTK. Sembra quindi utile, come già coi primi esperimenti della fine degli anni '80 per la aerofotogrammetria tradizionale, verificare le prestazioni e studiare le caratteristiche degli attuali programmi di orientamento nell'adoperare per la compensazione della Triangolazione Aerea, invece dei punti a terra, le coordinate dei centri di presa.

Il presente contributo illustra i risultati di una prima campagna sperimentale realizzata con un eBee RTK SenseFly dell'unità di *Climate Change* di ARPA Valle D'Aosta, effettuando una serie di voli su un poligono approntato nel campus dell'Università di Parma. L'elaborazione è stata effettuata con tre diversi programmi (PhotoScan, Pix4D e MicMac). L'obiettivo è quello di mettere in luce le reali potenzialità del metodo, in particolare se confrontato con un orientamento del blocco tradizionale, basato sull'utilizzo di una rete di punti d'appoggio a terra. Altrettanto importante è evidenziare eventuali criticità, soprattutto dal punto di vista dall'affidabilità delle misure RTK: qualora non vengano rilevati punti di appoggio o di controllo (*check point*), tale aspetto sembra essere quello maggiormente rilevante. Nel seguito, per questioni di spazio, si presenta una sintesi dei risultati ottenuti, discussi in modo più approfondito in (Benassi et al, 2017) cui si rimanda anche per gli approfondimenti bibliografici.

2. Materiali e metodi

Il test si è svolto su un'area di circa 500 x 400 m, comprendente edifici di altezza tra 6 e 35 m, aree a parcheggio, a prato e tratti di strada interna al campus (Figura 1). Il piano di volo è stato impostato su 12 strisciate parallele, con ricoprimenti al suolo dell'85% longitudinalmente e dell'80%

trasversalmente, per un totale di circa 150 immagini; la quota relativa di volo è stata di 80m. La camera impiegata è una Sony Cyber-Shot DSC-WX220 (risoluzione 4896 x 3672 pixel) con focale di 4.5 mm (pari a un 35 mm-equivalente di 25.6 mm); il GSD (*Ground Sampling Density*) è di circa 2.3 cm. Il piano di volo è stato ripetuto 4 volte nel corso della medesima giornata; nel seguito, i singoli blocchi sono stati indicati come RTK1, RTK2, RTK3 e RTK4. Per verifiche e confronti tra appoggio tradizionale e TA assistita sono stati materializzati e misurati 26 *target* (Figura 1); ciascun punto è stato rilevato con GPS con almeno 3 ripetizioni con tecniche diverse: *stop&go* post-processato con stazione *master* locale, RTK con *master* locale e NRTK (rete Netgeo). La precisione empirica rilevata dal valore quadratico medio delle discrepanze tra le ripetizioni è stata di 7 mm per la planimetria e 11 mm per l'altimetria.



Figura 1 – Area coperta dai voli con evidenziazione dei punti noti a terra. In verde la disposizione dei *check-point* e in rosso quella dei GCP (*Ground Control Point*) del caso **12GCP**; al centro il punto 13, usato nella configurazione d'appoggio **RTK+1GCP**.

2.1 Influenza della procedura di calibrazione della camera

Uno dei problemi più rilevanti nella gestione della Triangolazione Aerea (TA) assistita da GNSS è l'affidabilità delle procedure di auto calibrazione della camera. Nel caso dell'appoggio tradizionale, infatti, eventuali errori di stima dei parametri di orientamento interno sono in larga parte assorbiti dai parametri di orientamento esterno, che sono incognite "libere" a tutti gli effetti. Con la TA assistita invece non vi è questa compensazione o, più esattamente, l'errore si scarica sempre sulle incognite "libere", che sono però in questo caso le coordinate dei punti terreno.

In teoria pertanto la soluzione migliore sarebbe quella di avere una camera precalibrata, con parametri affidabili, in modo da non impiegare procedure di autocalibrazione. In pratica, date anche le caratteristiche di molte camere *consumer* impiegate sugli APR, il ricorso all'autocalibrazione, di norma nei rilievi con appoggio tradizionale, è praticamente necessario anche con la TA assistita. Nei test eseguiti inizialmente sono state considerate alcune

alternative (precalibrazione sul blocco vincolato usando tutti i punti di appoggio, scelta di un unico set di parametri per tutti i voli, ecc.) ma senza ottenere particolari benefici. In definitiva ogni volo è stato quindi autocalibrato, usando come parametri la focale, il punto principale, i parametri di distorsione radiale k_1 , k_2 e k_3 e di distorsione tangenziale P_1 e P_2 .

2.2 Influenza della precisione assegnata ai centri di presa

Nella TA assistita da GNSS di un blocco aerofotogrammetrico tradizionale si effettua la compensazione a minimi quadrati delle equazioni di collinearità relative ai *tie point* e delle osservazioni delle coordinate dei centri di presa, dove ogni osservazione è pesata in relazione alla precisione attribuita a priori. La precisione delle coordinate immagine è tipicamente assegnata per categorie (*tie point*, punti naturali o target); per i centri di presa in genere l'elaborazione dei dati GNSS fornisce stime, notoriamente assai ottimistiche, della precisione di ogni coordinata di ogni centro di presa. I programmi di *Structure from Motion* (SfM) non sempre implementano un *bundle block* tradizionale al termine del filtraggio degli errori e del calcolo dell'orientamento. Inoltre, specialmente per quelli commerciali, risulta difficile comprendere come vengano effettivamente utilizzate le precisioni a priori delle osservazioni nella soluzione del sistema di equazioni che fornisce l'orientamento. Tuttavia tale aspetto è determinante per la buona riuscita del rilievo, in quanto da esso dipende la maggior o minor aderenza della soluzione di orientamento ai dati di georeferenziazione (posizioni GNSS dei centri di presa) in contrapposizione alla configurazione di orientamento dalle immagini che, attraverso i punti di legame, minimizza i residui delle equazioni di collinearità. Per tale ragione un primo livello di sperimentazione è stato quello di variare la precisione assegnata alle coordinate dei centri di presa, da 1 a 20 cm in Est, Nord e da 2 a 40 cm in quota, e osservare l'andamento dell'errore planimetrico ed altimetrico sulle coordinate dei *check point*.

2.3 Verifica dell'accuratezza della georeferenziazione con eBee RTK

Per ognuno dei tre programmi impiegati, sono stati calcolati gli errori sui *check point* in tre diverse configurazioni di appoggio del blocco. La configurazione denominata **12GCP** permette la valutazione dell'accuratezza con appoggio tradizionale: sono state allora fissate le coordinate di 12 GCP ben distribuiti nell'area fotografata, ignorando ogni informazione sui centri di presa. Nella configurazione denominata **RTK** si misura invece l'accuratezza se l'appoggio è affidato esclusivamente alle coordinate dei centri di presa. Infine, nella configurazione **RTK+1GCP**, si valuta l'accuratezza con appoggio affidato alle coordinate dei centri di presa e ad 1 punto d'appoggio a terra, posto in posizione baricentrica.

3. Risultati

Per misurare l'errore si fa riferimento all'errore quadratico medio (RMSE nelle tabelle) rilevato sulle coordinate dei 14 check point. Va detto peraltro che, nelle configurazioni **RTK** e **RTK+1GCP**, anche estendendo a tutti i punti noti il calcolo dello RMSE, i valori variano al più di qualche mm.

3.1 Influenza della precisione assegnata ai centri di presa

Come anticipato, una prima verifica, necessaria anche per avere indicazioni operative su come svolgere il confronto fra configurazioni di georeferenziazione differenti, ha riguardato l'analisi della variabilità dei risultati a fronte di differenti precisioni a priori delle coordinate dei centri di presa.

Il comportamento dei tre programmi impiegati è assai poco omogeneo sia perché varia da programma a programma, sia perché differisce tra altimetria e planimetria sia, infine, perché varia da blocco a blocco. Per ragioni di spazio si riportano qui i soli grafici relativi ai 4 blocchi elaborati con PhotoScan (Figura 2) commentando comunque l'insieme dei risultati.

L'accordo migliore tra i programmi si registra in planimetria, dove le variazioni di RMSE tra i diversi blocchi sono al più di 2 cm (salvo nel blocco RTK1 con PhotoScan). Si può pertanto concludere che l'influenza della precisione assegnata ai centri di presa sull'accuratezza della restituzione planimetrica è assai modesta.

In altimetria, invece, si ha in generale un miglioramento dell'accuratezza al diminuire della precisione assegnata ai centri di presa; per valori di deviazione standard superiori a 10-15 cm l'accuratezza tende poi a stabilizzarsi. Non mancano tuttavia casi di comportamento contrario (l'accuratezza peggiora al diminuire della precisione). L'intervallo di variazione dello RMSE è inoltre ben superiore a quello osservato in planimetria: si arriva quasi a 10 cm per Pix4D e PhotoScan e fino a 30 cm per MicMac.

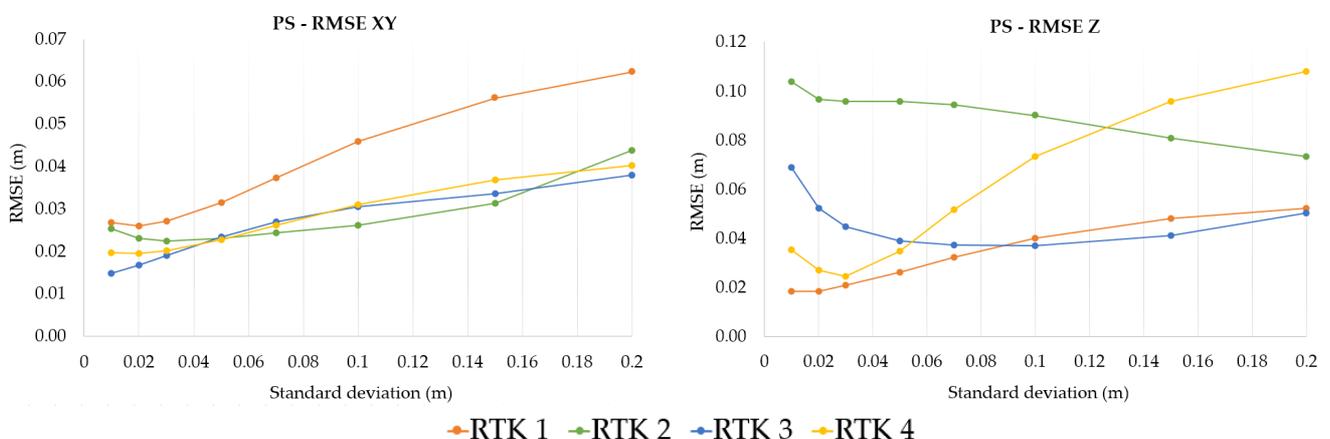


Figura 2 – Grafici degli errori quadratici medi planimetrici (sx) e altimetrici (dx) al variare della precisione (*standard deviation*) assegnata alle coordinate dei centri di presa. Elaborazioni con PhotoScan per i quattro voli.

Da un punto di vista pratico pertanto, sembra consigliabile adottare i valori di precisione forniti dal posizionamento RTK con un fattore di penalità e comunque effettuare un'analisi di sensibilità delle coordinate terreno dei *tie point* al variare della precisione in quota assegnata ai centri di presa.

3.2 Verifica dell'accuratezza della georeferenziazione con eBee RTK

Anche in questo caso i risultati sono differenti per planimetria ed altimetria. La Figura 3 riporta per ogni configurazione di appoggio i valori degli errori

quadratici medi sui *check point*, distinti per le tre coordinate, per ciascun blocco e *software* adoperato.

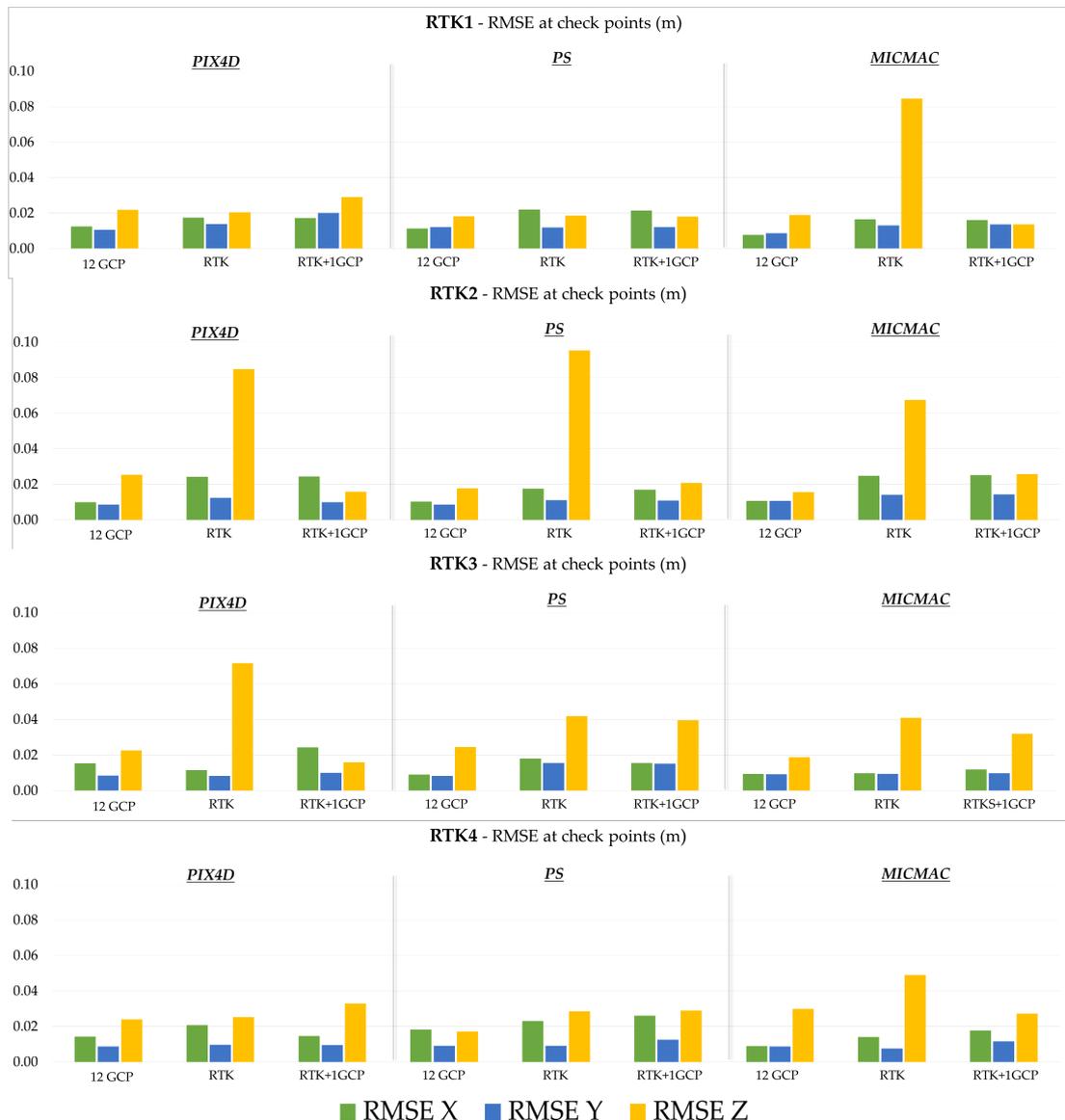


Figura 3 – Errori quadratici medi sui 14 *check point* per ciascuna delle tre configurazioni di appoggio del blocco. I valori sono distinti per blocco e, all'interno, per coordinata e per software impiegato.

In planimetria, qualunque sia il *software* usato, tutti i blocchi nella configurazione **12GCP** hanno errori compresi tra 1.1 cm e 2 cm (pari a 0.5-0.8 GSD), ottenuti componendo quadraticamente gli errori in Est e Nord. In quota invece gli errori sono circa una volta e mezza peggiori (0.7-1.3 GSD).

L'accuratezza planimetrica (RMSE) nel caso **RTK** è sempre migliore di 2.8 cm, il che rappresenta un risultato di rilievo in termini assoluti e certamente incoraggiante, visto che è stato ottenuto su più voli elaborati con programmi differenti. Rispetto all'appoggio a terra, l'accuratezza varia ora tra 0.6-1.2 GSD, per cui la differenza rispetto all'appoggio tradizionale è modesta in termini assoluti, anche se non trascurabile in termini relativi.

In altimetria invece l'accuratezza nel caso **RTK** oscilla in un intervallo più ampio, tra 2 e 10 cm, ovvero tra valori che nei casi migliori sono del tutto confrontabili con l'appoggio a terra ma arrivano ad essere fino a 3 volte peggiori. Si noti che il peggioramento, laddove si verifica, è sempre di tipo sistematico, ovvero dovuto un errore medio rilevante; lo sqm delle discrepanze resta infatti praticamente invariato. La ragione di questa prestazione meno soddisfacente dell'altimetria è probabilmente, almeno in parte, legata alla difficoltà di stimare correttamente la focale: a conferma di questo, le stime della focale per il medesimo volo da parte dei tre *software* sono differenti e le loro variazioni, nel passare dal caso **12GCP** al caso **RTK**, hanno entità tale da giustificare buona parte dei sistematismi in quota.

Nel caso **RTK+1GCP** l'accuratezza planimetrica resta praticamente invariata rispetto al caso RTK. In quota, laddove era presente un forte sistematismo (tra 7 e 10 cm) esso viene annullato o più che dimezzato dalla presenza del punto di appoggio; dove invece la componente media dell'errore era trascurabile, non si hanno praticamente miglioramenti.

L'indicazione pratica che se ne trae è che, laddove l'accuratezza in quota sia importante, è opportuno comunque inserire almeno un punto noto in quota.

In figura 4 si riportano i plottaggi degli errori planimetrici e altimetrici sui check point, per ciascun blocco, ottenuti col software PhotoScan.

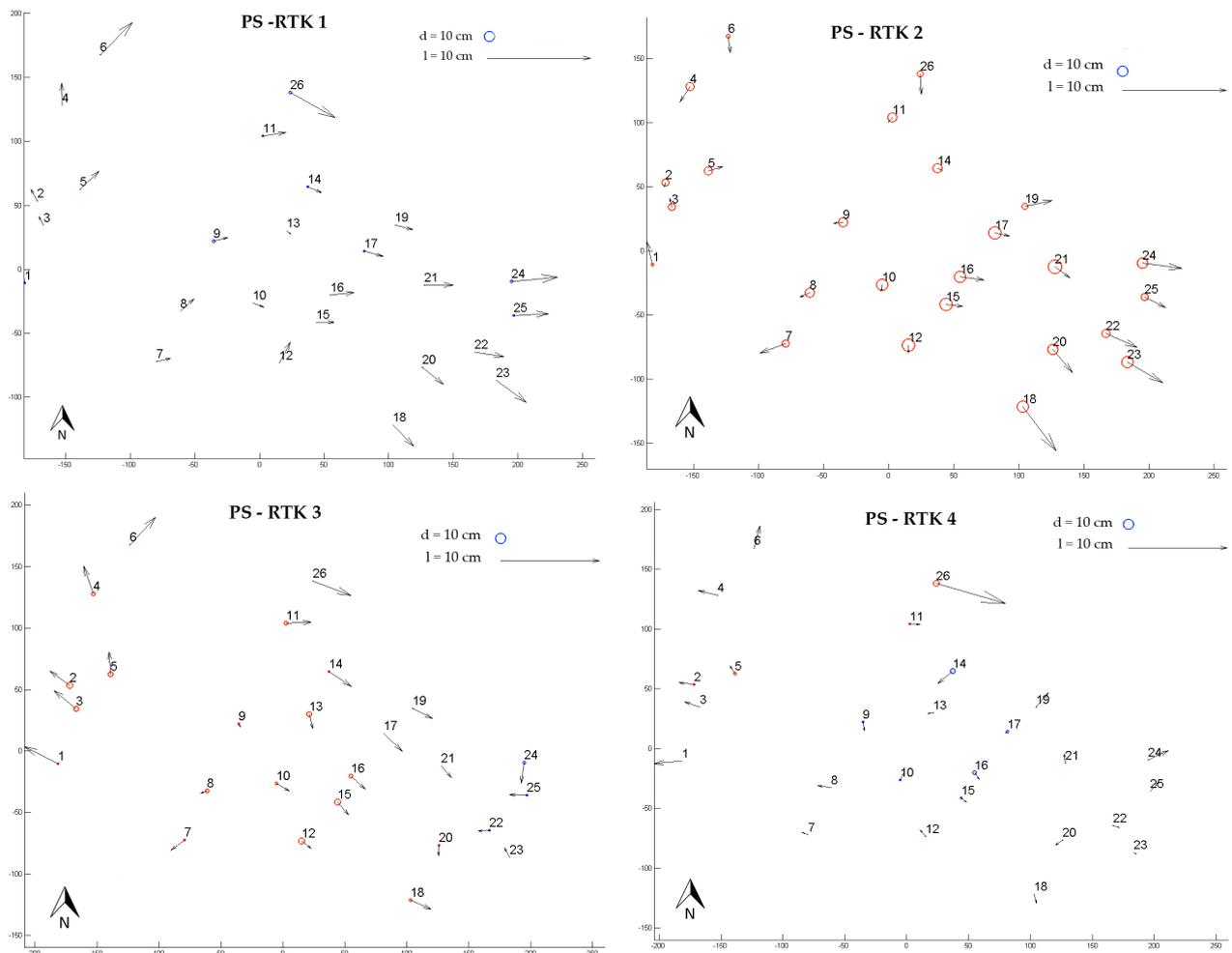


Figura 4 – Rappresentazione degli errori planimetrici ed altimetrici sui *check point* per i quattro voli elaborati con PhotoScan. Le frecce rappresentano la componente planimetrica e i cerchi l'errore in quota, in rosso se negativo e in blu se positivo.

Come si vede dalla Figura 4, sono presenti delle componenti sistematiche di errore in planimetria che a prima vista sembrano ripetersi in più di un blocco; tuttavia un'analisi più attenta mostra che hanno entità differenti e coinvolgono gruppi di *target* diversi; nel blocco RTK4, inoltre, sono del tutto assenti. Per quanto riguarda l'altimetria non appare evidente alcuna somiglianza tra i *pattern* di errore dei blocchi.

Conclusioni

La sperimentazione con l'eBee RTK ha dimostrato una accuratezza planimetrica di restituzione, sia pur per target ottimali e collimazioni multiple, poco superiore a 2 cm, comparabile a quella dell'appoggio a terra. In altimetria l'accuratezza può essere marcatamente inferiore, per l'incertezza di stima della focale; l'impiego di almeno un GCP riporta però gli errori in quota al disotto di 4 cm, valori non lontani da quelli conseguiti usando i GCP.

La sperimentazione su tre diffusi software ha messo in luce diversità di comportamento nella compensazione congiunta del blocco, in particolare in relazione all'autocalibrazione, e una dipendenza dell'accuratezza in quota dalla precisione a priori assegnata ai centri di presa.

Ringraziamenti e riconoscimenti

Il presente lavoro è stato finanziato nell'ambito del progetto Interreg V-A "PrevRiskHauteMontagne" No. 427, cofinanziato dal Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale, programma ALCOTRA Francia-Italia 2014-20.

Bibliografia

Benassi F., Dall'Asta E., Diotri F., Forlani G., Morra di Cella U., Roncella R., Santise M. (2017), Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation, *Remote Sensing*, 9(2)172, DOI: 10.3390/rs9020172.