

Valutazione dell'accuratezza del sensore Leica GS18I nella modalità GNSS pura e in quella integrata GNSS-fotogrammetria

Vittorio Casella¹[0000-0003-2086-7931], Marica Franzini¹[0000-0002-3921-5178],
Ambrogio Maria Manzino²[0000-0001-9237-3047], Giuliano Gallerini³, Davide Parmigiani³

¹ DICAR - Università degli Studi di Pavia, (vittorio.casella, marica.franzini)@unipv.it

² Politecnico di Torino, ambrogio.manzino@polito.it

³ Leica Geosystems Italia, (giuliano.gallerini,davide.parmigiani)@leica-geosystems.com

Abstract: Leica Geosystems ha recentemente introdotto un sensore GNSS multi-costellazione denominato GS18I. Esso è in grado di eseguire la compensazione dell'inclinazione e dispone di una camera fotogrammetrica integrata che consente di misurare agevolmente punti non accessibili. Cosa notevole, grazie all'uso congiunto del sensore GNSS e degli accelerometri di cui dispone, lo strumento è capace di orientare direttamente i fotogrammi acquisiti, rendendo la misura fotogrammetrica rapida e semplice. Il Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia ha avuto lo strumento in prestito da Leica Geosystems Italia e ha condotto una validazione piuttosto estesa. L'articolo illustra il poligono test usato, i diversi scenari in cui la validazione è avvenuta e i risultati ottenuti.

Parole chiave: Integrazione, GNSS, Fotogrammetria, Orientamento diretto del sensore

1 Introduzione

Leica Geosystems ha recentemente introdotto un sensore GNSS multi-costellazione denominato GS18I [1]. Insieme alle usuali funzionalità di un moderno ricevitore GNSS, è in grado di eseguire la compensazione dell'inclinazione, grazie ad un sensore IMU (Inertial Measuring Unit); dispone inoltre, di una fotocamera integrata (Figura 1), che consente agli utenti di misurare punti inaccessibili. Si può dire che implementa l'integrazione fra il posizionamento GNSS e la fotogrammetria. A riprova di questo, Leica parla di *posizionamento visivo*.

Una caratteristica molto interessante è che il software di bordo installato nel controller è in grado di orientare le immagini acquisite nella modalità definita *direct georeferencing*, in gergo fotogrammetrico, oppure in italiano, *fotogrammetria diretta*. Per ottenere tale risultato, lo strumento integra le misure GNSS, con quelle provenienti dal sensore IMU e con le informazioni ottenute dal matching sulle immagini.

Il Laboratorio di Geomatica, dell'Università degli Studi di Pavia, ha inizialmente ottenuto in prestito lo strumento da Leica Geosystems Italia, per una prima valutazione,

acquistandolo in seguito. Il Laboratorio ha condotto una validazione piuttosto estesa e dettagliata, che è in parte illustrata nel presente articolo.



Fig.1: Il ricevitore GNSS Leica GS18I con la fotocamera, in primo piano

2 Letteratura di riferimento

Il rilevamento topografico integrato è uno dei temi di tendenza più importanti degli ultimi due decenni. Sono state sviluppate combinazioni di ricevitori GNSS, sistemi INS, dispositivi LiDAR e telecamere per supportare i MMV (Mobile Mapping Vehicles), gli UAV (Unmanned Aerial Vehicles) o la guida autonoma, creando nuove opportunità di rilevamento; la computer vision e l'intelligenza artificiale hanno ulteriormente migliorato la qualità dei risultati ottenibili da questi sistemi. Il ricevitore Leica GS18I si inserisce perfettamente in questa tendenza combinando un sistema GNSS / INS con una fotocamera all'interno di un unico dispositivo.

Analisi preliminari sull'uso integrato di un ricevitore GNSS e di un sistema multi-camera sono state proposte in [2, 3], in quello che è stato chiamato *imaging rover*. Gli autori hanno utilizzato questo approccio in una vasta serie di prove aventi diverse caratteristiche morfologiche e geometriche (archeologia, beni culturali, geologia, ecc.) trovando buoni risultati paragonabili a quelli ottenuti con le tecniche tradizionali ma con una riduzione dei costi in termini di logistica e tempo.

L'utilizzo fotogrammetrico delle immagini acquisite richiede una stima accurata dei sei parametri esterni: le posizioni 3D e l'assetto della telecamera ad ogni scatto dell'otturatore. Nel Leica GS18I ciò viene fatto combinando rispettivamente i dati GNSS e INS. Mentre la qualità della posizione 3D è un'informazione abbastanza nota, grazie all'enorme esperienza raggiunta nel posizionamento RTK [4–6], l'analisi degli angoli di orientamento rappresenta invece un possibile argomento di ricerca.

Solitamente i ricevitori misurano il tilt (collegata agli angoli di assetto) mediante accelerometri, per determinare l'inclinazione, e tramite la bussola elettronica, per stabilirne la direzione. Tuttavia, questa soluzione presenta alcuni problemi: il magnetometro all'interno della bussola è influenzato dall'inclinazione e necessaria, pertanto, una calibrazione in loco; le misurazioni possono essere influenzate da disturbi magnetici locali [7]. Per evitare tali inconvenienti, la soluzione di compensazione dell'inclinazione del Leica GS18I utilizza le misurazioni IMU ottenute da sensori

microelettromeccanici di livello industriale; i test presentati in [7] mostrano come la compensazione dell'inclinazione basata su IMU sia applicabile anche a grandi angoli di inclinazione (>30 gradi), per cui è ancora possibile ottenere una precisione di posizionamento 3D di 2 cm.

Nel Leica GS18I le informazioni sulla posizione e sull'assetto globale vengono quindi combinate con le immagini per misurare i punti nel cosiddetto *posizionamento visivo* [8]. Poiché tale sistema è stato introdotto sul mercato solo nella seconda metà del 2020, è disponibile solo poca letteratura riguardante le sue performance. Una di queste è presentata in [9] in cui gli autori presentano il principio di funzionamento e testano il ricevitore sotto diverse configurazioni, distanze fotocamera-oggetto e lunghezza delle traiettorie e geometria di acquisizione. Le qualità ottenuta è molto buona con RMS 2D e 1D di 2,9 cm e 2,5 cm, rispettivamente.

3 Scopo e organizzazione dell'articolo

Lo scopo del presente articolo è validare la precisione e l'accuratezza delle misure fotogrammetriche eseguite dal sensore Leica GS18I. Come riferimento, vengono mostrati i risultati ottenuti da misure GNSS pure, per caposaldi accessibili.

In sintesi, il presente lavoro valuta due tipi di misure:

- Scenario 1 - le misurazioni GNSS-NRTK dei caposaldi accessibili, che sono state eseguite con la palina tenuta inclinata e la compensazione inserita; come già accennato, tali misure non sono l'obiettivo principale del presente articolo, ma vengono analizzate come confronto;
- Scenario 2 - misure fotogrammetriche di punti inaccessibili, che si trovano su una facciata di un edificio. Sono ottenute dalle immagini acquisite dal sistema GS18I e dai parametri di orientamento esterno determinati automaticamente dal ricevitore.

Il presente articolo è organizzato come segue. La sezione 4 descrive il sensore studiato e il suo principio di funzionamento. Le sezioni 5 e 6 descrivono il sito di prova utilizzato e il modo in cui sono state determinate le coordinate di riferimento. La sezione 7 illustra i due scenari considerati in questo documento: misurazione dei punti accessibili con il rover montato su una palina, e con la palina tenuta inclinata; misurazione di punti inaccessibili situati su una facciata, per mezzo della telecamera. Le sezioni 8 e 9 presentano i risultati per i due scenari presi in considerazione. Infine, la sezione 10 discute i principali risultati e fornisce alcuni suggerimenti sulle prossime attività pianificate.

4 Fondamenti sul principio di funzionamento di Leica GS18I

Il sensore Leica GS18I è un moderno ricevitore GNSS multi-costellazione, in grado di acquisire segnali da tutti i sistemi disponibili, ovvero GPS, Glonass, Galileo e Beidou.

Solitamente viene utilizzato montato sulla sommità di una palina, anche se è ancora possibile posizionarlo su treppiedi, tramite appositi adattatori. Può eseguire la

compensazione dell'inclinazione: anche se la palina non è verticale, quando viene misurato un punto, il sistema è in grado di compensare la relativa deviazione. Tale caratteristica si basa sull'utilizzo di un'unità IMU (accelerometri e giroscopi, più procedure SW per l'integrazione di misure istantanee), piuttosto che di inclinometri, che è la soluzione più diffusa per strumentazione simile.

L'adozione dell'unità IMU, al posto degli inclinometri, ha diverse conseguenze. In primo luogo, si può affermare che la qualità della compensazione dell'inclinazione è migliore. Inoltre, la misura è una sorta di processo dinamico e la compensazione dell'inclinazione è ottenuta mediante il filtraggio di Kalman; infatti, la palina deve essere spostata nella disposizione desiderata e la misura deve essere eseguita abbastanza presto, prima che si verifichino derive significative; pertanto, la durata della misura non è impostata dall'utente, ma determinata dal software di gestione, al fine di massimizzare la qualità. Infine, i dati provenienti dall'IMU possono essere utilizzati, insieme alle osservazioni GNSS, per stimare dinamicamente la posizione istantanea e l'orientamento del sensore. Queste vengono utilizzate quando è attiva la modalità fotogrammetrica, come illustrato nel paragrafo successivo.

Il sensore Leica GS18I è dotato di una fotocamera ArduCam AR0134 integrata [10], visibile nella Figura 1. Si tratta di una fotocamera RGB con otturatore globale, modello Bayer e con una risoluzione dell'immagine di 1,2 MP (1280 x 960). Il pixel pitch è 3,75 μ m e la lunghezza focale è 3,1 mm per la lente obiettivo che equipaggia il GS18I; tuttavia, il produttore della fotocamera offre molte altre opzioni per gli obiettivi. La risoluzione sull'oggetto è di 12 mm a una distanza di 10 m. La telecamera è in grado di acquisire diversi decimi di fotogrammi al secondo ma, quando è accoppiata all'antenna GNSS, viene utilizzata alla velocità di inquadratura di 2 Hz. La fotocamera è calibrata in modo che possa essere eseguito un uso fotogrammetrico completo. Il file EXIF riporta parametri fondamentali come la lunghezza focale calibrata e la posizione del punto principale della fotocamera; per quanto riguarda la distorsione della lente, si presuppone che le immagini non siano distorte dal controller durante l'elaborazione che avviene subito dopo l'acquisizione; quando le immagini vengono scaricate su un computer, come abbiamo fatto noi, vengono dichiarate non distorte.

Il principio di funzionamento è il seguente. Quando l'utente si trova di fronte a qualcosa che necessita di posizionamento visivo, come la facciata di un edificio o un fosso in una strada, avvia la procedura adatta e poi cammina davanti al bersaglio, avendo cura che la telecamera inquadri ciò che deve essere misurato. Il sistema acquisisce automaticamente una sequenza di immagini; mediante osservazioni GNSS e IMU, i parametri di orientamento esterno delle immagini (*exterior orientation parameters* - EOP) vengono determinati direttamente. Quando l'utente interrompe l'acquisizione, il sistema necessita di un certo tempo per memorizzare i dati e raffinare le EOP tramite i *tie point*, che vengono estratti automaticamente, e la regolazione del fascio. In [11], vengono mostrati diversi esempi di come l'antenna può essere utilizzata per acquisire edifici, strade o fossi.

Dopo la memorizzazione e la pre-elaborazione delle immagini, è possibile eseguire misure fotogrammetriche direttamente sul campo, tramite il controller: l'utente può cliccare su un particolare che è visibile su un'immagine della sequenza, e il sistema lo

cercherà automaticamente in altre immagini e visualizzerà le coordinate. Tuttavia, è possibile eseguire le misurazioni successivamente, a tavolino in ufficio.

Il sistema utilizza tipicamente quattro o cinque immagini per eseguire misure, anche se potremmo vedere esempi con meno o più misurazioni; in effetti, il criterio di guida sembra essere: utilizzare tutte le immagini in cui l'elemento selezionato può essere localizzato con una buona qualità. Inoltre, il sistema sembra abbastanza efficace nell'eseguire il rifiuto dei valori anomali e nello scartare le caratteristiche erroneamente abbinate. In effetti, non abbiamo effettuato uno studio sistematico di questo aspetto, ma l'osservazione di diversi esempi ci ha portato alla conclusione menzionata.

L'utente può comunque correggere la selezione dei punti omologhi e ingrandire il set di immagini utilizzate per eseguire una determinata misura. Può persino identificare completamente manualmente i particolari nelle varie immagini.

A titolo di esempio, le sequenze di immagini acquisite per il nostro test erano tipicamente costituite da 30-35 frame, aventi una dimensione di memoria di 9,5 MB e richiedendo circa 60 secondi per essere elaborate, dopo la fine dell'acquisizione.

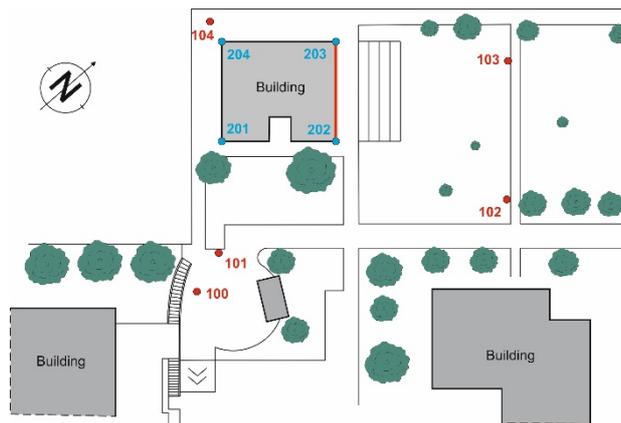


Fig.2: Una panoramica del sito di prova: i cinque punti topografici accessibili sono visualizzati in rosso, mentre i quattro angoli dell'edificio sono evidenziati in blu. La facciata dove si trovano i punti di controllo è evidenziata in rosso. I punti della facciata non sono visibili qui, ma sono mostrati nella Figura 3

5 Il test-site

È stato allestito un sito di prova presso il campus di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia. Esso è composto da punti appartenenti a tre categorie:

- cinque marker topografici accessibili (sui quali è possibile posizionare un treppiede), che sono mostrati nella Figura 2 in rosso e sono denominati 100, 101, 102, 103, 104;
- quattro angoli appartenenti all'edificio della reception; sono mostrati di nuovo nella Figura 2, con i nomi 201, 202, 203, 204; essi non saranno più presi in considerazione in questo articolo;

- dieci punti appartenenti alla facciata Nord-Est dello stesso edificio; sono visualizzati nella Figura 3 e hanno nomi 401-410.

Come evidenzia la Figura 2, diversi punti sono parzialmente o quasi completamente coperti da alberi; inoltre, il punto 100 si trova in prossimità di un muro abbastanza alto, che genera sicuramente un alto livello di multipath. Tutto sommato, il test-site selezionato non è l'ideale per ricevere il segnale GNSS, ma è rappresentativo di ciò che un topografo può incontrare nelle attività quotidiane.

I punti della facciata sono stati rilevati con una rete topografica ridondante; le misurazioni sono state elaborate mediante regolazione dei minimi quadrati e i valori di deviazione standard così stimati sono compresi tra 5 e 7 mm.



Fig.3: I dieci punti appartenenti alla facciata dell'edificio.

6 Sistema di riferimento

Le coordinate di riferimento sono state determinate dai caposaldi, in modo molto affidabile e preciso. I cinque punti accessibili 100 - 104 sono stati rilevati con un'indagine GNSS statica ridondante. La rete locale era collegata alla rete Leica Smartnet® di CORS (Continuously Operating Reference Stations), che supportava tutte le costellazioni GNSS disponibili. Dopo l'inizializzazione, le coordinate dei caposaldi erano disponibili con un'incertezza (deviazione standard) intorno a 1,2 mm a Est e Nord e 2,3 mm in altezza. Maggiori dettagli saranno forniti in un altro articolo più dettagliato, che sarà pubblicato a breve.

7 Misurazione ripetuta dei caposaldi

Per lo Scenario 1, tre topografi hanno ripetutamente misurato i punti 100-104. L'utente ha visitato tutti e cinque i punti in sequenza, senza spegnere il rover. In ogni punto, ha eseguito 10 misurazioni, inclinando la palina in diverse direzioni e da diverse angolazioni.

Alla fine del giro, l'antenna è stata scollegata dalla rete, in modo da eseguire una nuova inizializzazione. Il numero di misurazioni ripetute è riportato dalla Tabella.1, per ogni operatore e ogni caposaldo. Il numero totale è 2077.

Tabella 1: Sintesi delle misurazioni acquisite nello Scenario 1. Il report è raggruppato rispetto al caposaldo (100-104) e il topografo, qui denominato A, B e C

Surveyors/ points	100	101	102	103	104
A	151	144	146	147	145
B	138	138	138	141	140
C	128	129	130	131	131

Per lo Scenario 2, sono state eseguite misure fotogrammetriche ripetute di 10 caposaldi. Essi appartengono alla facciata contrassegnata in rosso in Figura 2 e sono rappresentate in Figura 3. Gli operatori hanno percorso la facciata a distanze diverse, comprese tra 4 e 12 metri dall'edificio. La linea seguita dagli operatori è mostrata nella Figura 2, proprio di fronte alla facciata, contrassegnata in rosso.

Ai tre operatori è stato chiesto di acquisire la facciata 10 volte per ciascuna delle cinque distanze previste. Hanno poi misurato i caposaldi, in ufficio. In totale, sono state eseguite 1436 misurazioni di punti; ogni utente ha misurato tra 445 e 496 punti; ogni caposaldo è stato misurato tra 138 e 145 volte; le varie distanze di acquisizione hanno numerosità compresa tra 283 e 290.

Tutte le misurazioni sono state eseguite in modalità NRTK, collegando l'antenna alla rete Leica Smartnet. Più precisamente, è stata selezionata la modalità iMAX, essendo una modalità Leica personalizzata, simile a VRS [12].

Le misure fotogrammetriche sono state eseguite in ufficio con il programma Leica Infinity. L'utente seleziona una sequenza e può quindi vedere le miniature delle immagini acquisite, come illustrato nella Figura 4. Può scegliere una sorta di immagine master e fare clic su un punto da misurare. Il programma abbinerà il template selezionato nelle immagini adiacenti e deciderà autonomamente se conservare o meno un'osservazione, se includere o meno un'immagine; l'utente è comunque abilitato a correggere o scartare le osservazioni e ad includere nuove immagini. A proposito, la Figura 4 mostra le strisce di plastica che abbiamo utilizzato per garantire che l'operatore si mantenga alla distanza pianificata.

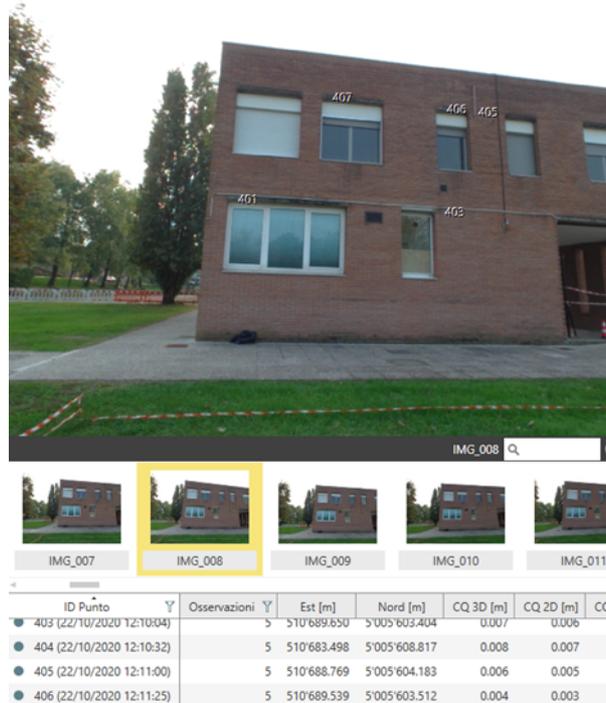


Fig. 4: Particolare dell'interfaccia del software Leica Infinity con cui sono state eseguite le misurazioni puntuali in ufficio.

8 Precisione di base della misurazione *tradizionale* GNSS dei caposaldi accessibili

Sebbene questo non sia l'obiettivo principale del presente articolo, vengono mostrati i risultati per lo Scenario 1, in quanto costituiscono una valida base per ulteriori considerazioni. Infatti lo Scenario 1 ha permesso di valutare l'accuratezza, ottenibile nell'area considerata, con la strumentazione descritta e utilizzando correzioni provenienti dalla citata rete GNSS. La parola *tradizionale* è in corsivo perché la compensazione dell'inclinazione era attiva e la durata delle misurazioni era gestita dal controller, piuttosto che dall'utente.

La Figura 5 mostra l'istogramma degli angoli di inclinazione (misurati in gons) che caratterizzano le misure acquisite nello Scenario 1. Esso evidenzia che c'è stato un numero significativo di misure nell'intervallo $[0, 30]$.

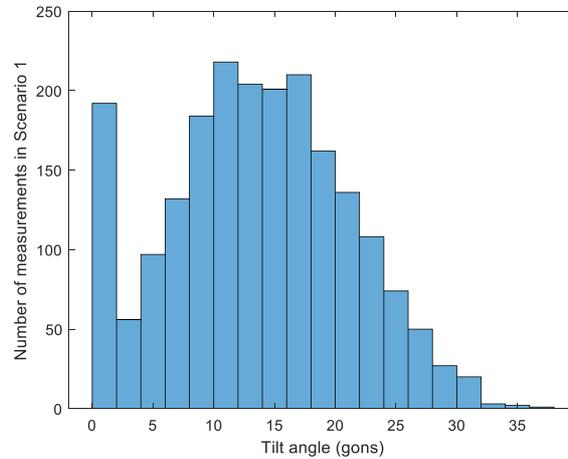


Fig.5: Istogramma che rappresenta gli angoli di inclinazione delle misurazioni acquisite nello Scenario 1

Il primo canale è più popolato rispetto ad altri adiacenti in quanto agli operatori veniva richiesto, ogni volta che visitavano un punto, di acquisire le prime misure mantenendo la palina verticale. La Figura 6 mostra il box plot dell'errore 3D per i singoli punti e per l'intero set di dati. Per risparmiare spazio, la variabile 3D è stata solo tracciata. Il box plot evidenzia che i caposaldi 100 e 102 presentano misure più disperse e quest'ultimo mostra un comportamento anche grave; gli altri caposaldi mostrano risultati comparabili.

Non siamo rimasti sorpresi di ciò che viene evidenziato dalla Figura 6, poiché il punto 100 ha un muro appena al di là di esso (vedi Figura 2) e il punto 102 ha un albero molto vicino, la cui chioma è significativamente sporgente sopra il punto.

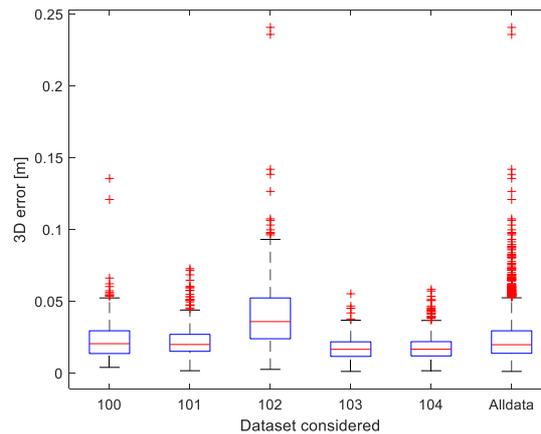


Fig.6: Box plot dell'errore 3D per singoli punti e per l'intero dataset.

La Figura 7 mostra l'istogramma dell'errore 3D per i singoli caposaldi e per l'intero set di dati. I valori anomali sono particolarmente visibili per il punto 102 e sono causati da occlusioni dovute alla presenza di un albero. Esistono valori anomali anche per il punto 100, e qui la causa è la presenza di un muro alto, molto vicino al punto.

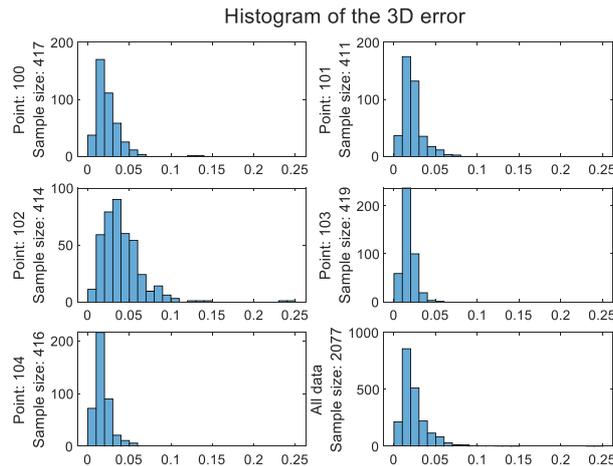


Fig.7: Iistogrammi degli errori 3D per i singoli punti e per tutte le misure insieme

L'istogramma complessivo suggerisce che quasi tutte le misure rientrano nel range $[0, 0.06]$, per il residuo 3D, mostrando quindi una prestazione molto buona: il 95 esimo percentile ha infatti valore 5,5 cm. Tuttavia, i valori anomali sono chiaramente rilevabili, di cui conosciamo l'origine, il che è indipendente dal comportamento intrinseco del ricevitore utilizzato.

Pertanto, il filtraggio dei dati è stato eseguito prima di estrarre i parametri di qualità. Per ogni componente, Est, Nord e altezza, la media robusta è stata stimata dall'operatore mediano. La deviazione standard robusta (std) è stata stimata sulla base della MAD scalata (Median Absolute Deviation): per i dati normalmente distribuiti $[x_i]$, è noto che

$$\text{std}([x_i]) = 1.4826 \text{ MAD}([x_i]) \quad 3$$

L'intervallo di confidenza robusto 3 è stato calcolato per ogni componente e un'osservazione è stata considerata un inlier se tutti e tre i componenti erano inlier. In questo modo sono state scartate 151 osservazioni, su 2077, corrispondenti al 7,27% del totale. Successivamente sono stati estratti parametri statistici descrittivi per l'intero dataset delle misure filtrate, senza raggrupparli secondo il punto considerato.

La Tabella 2 riporta le statistiche descrittive per i singoli componenti e per l'errore 3D. Viene qui considerato l'intero set di dati pulito, inclusi tutti i punti. Vengono mostrati i parametri usuali, min, max, media e deviazione standard; riportiamo anche RMSE, ovvero la radice quadrata della somma dei quadrati medi con std quadrato. Poiché std è la distanza media dal valore medio, RMSE è la distanza media dal valore vero, che è 0. Infatti, i residui sono stati calcolati formando la differenza tra la coordinata NRTK-determinata con quelle di riferimento, che sono state misurate con

alta precisione e accuratezza. I valori RMSE sono di circa 1 cm per le componenti planimetriche e di 1.8 cm per l'altezza.

Tabella 2: Statistiche descrittive per l'intero set di dati filtrato

	E [m]	N [m]	h [m]	d3D [m]
min	-0.367	-0.029	-0.047	0.001
max	0.024	0.028	0.057	0.061
mean	-0.006	-0.001	0.005	
std	0.010	0.010	0.017	
RMSE	0.012	0.010	0.018	
Perc(68.27)				0.024

Per la distanza 3D mancano alcuni indicatori. Avremmo potuto mostrarli, ovviamente, ma la loro interpretazione è diversa, infatti i singoli componenti dovrebbero essere distribuiti normalmente, mentre la distanza 3D ha chiaramente un'altra distribuzione, come confermano gli istogrammi riportati in Figura 7. Per i singoli componenti, RMSE può essere interpretato come la metà larghezza dell'intervallo avente una probabilità del 68,27%; in analogia con ciò, per l'errore 3D, abbiamo calcolato il limite superiore dell'intervallo avente una probabilità del 68,27% (il limite inferiore era impostato a 0); il valore corrispondente, paragonabile, in una certa misura, a RMSE, è di 2,4 cm ed evidenzia che le misure analizzate sono molto precise e accurate. Ovviamente si possono estrarre altri percentili: il 95 ° ha valore 4,3 cm, il che significa che il 95% delle misurazioni interne ha un errore 3D inferiore o uguale al valore riportato.

È stata studiata anche la dipendenza dell'incertezza dall'angolo di inclinazione. L'insieme degli angoli della palina, rappresentati nella Figura 5, è stato suddiviso in 10 intervalli disuguali aventi la stessa numerosità. Le misurazioni sono state suddivise di conseguenza ed è stato estratto il 68,27° percentile per la distanza 3D, per ciascun canale. La Figura 8 illustra i risultati e presenta, in ascissa, l'angolo di inclinazione medio per ciascun canale; in ordinata, viene riportato il 68,27° percentile di errore 3D. Inoltre, viene riportato l'intervallo di confidenza del 95%, ottenuto con il metodo statistico bootstrap. La curva riportata non è facilmente interpretabile e non conferma quanto previsto, ovvero la curva aumenta con l'angolo di inclinazione. Al contrario, diminuisce quando si considerano gli angoli, nell'intervallo [5, 15] gons. Per angoli oltre i 25 gons, è effettivamente visibile un certo aumento, ma il valore RMSE è di circa 2,8 cm, che non è troppo lontano dal valore medio complessivo di 2,4 cm. Si può anche osservare che, nell'intervallo [0, 22] gons, i risultati empirici sono compatibili con l'ipotesi che l'errore di misurazione 3D (al livello di probabilità 68,27) sia inferiore o uguale alla media complessiva, 2,4 cm. Tutto sommato, il rover sembra molto efficace nel compensare l'inclinazione della palina.

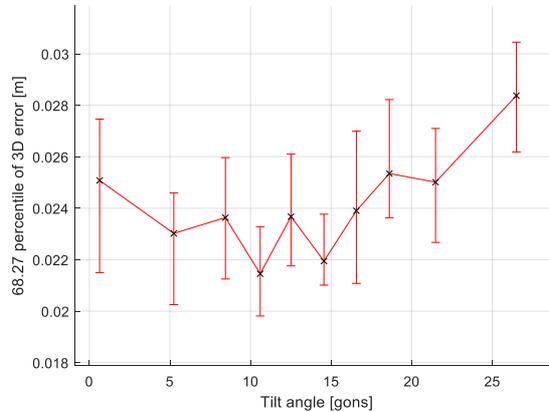


Fig.8: Errore 3D in funzione dell'angolo di inclinazione; più precisamente, si mostra il 68,27° percentile, di errore 3D, come spiegato nel testo.

9 Precisione delle misure fotogrammetriche

Sono state valutate anche le misurazioni fotogrammetriche dei punti mostrati nella Figura 3. In via preliminare, è stata eseguita la conversione delle coordinate ed è stato adottato un sistema di riferimento cartesiano locale. Il nuovo asse x è orizzontale e parallelo alla facciata rilevata; aumenta spostandosi verso destra. Anche l'asse y è verticale e parallelo alla facciata; in aumento verso l'alto. L'asse z è definito in modo da formare un sistema di coordinate destrorso e aumenta quando ci si sposta dalla facciata al rover.

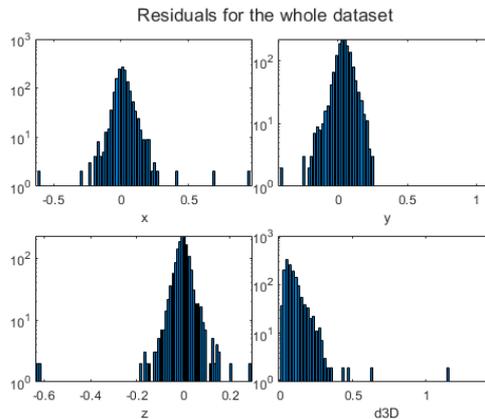


Fig. 9: Istogrammi dei residui dell'intero dataset (tutti gli utenti, tutti i punti, tutte le distanze); La scala y è logaritmica, in modo da rendere visibili i contenitori poco popolati.

La Figura 9 mostra gli istogrammi dei residui per l'intero dataset, inclusi tutti gli utenti, tutti i punti e tutte le distanze (da 4 a 12 metri). Per rendere visibili i bin poco popolati, è stata impostata la scala logaritmica per l'asse delle ordinate. A causa delle

proprietà della funzione logaritmo, i conteggi dei canali sono stati incrementati di 1; i canali visibili più in basso hanno una numerosità di 1.

Essendo presenti valori anomali, chiaramente, il loro filtraggio è stato eseguito applicando la stessa metodologia descritta nella Sezione 8. Su 1436 misurazioni, 137 sono state scartate, corrispondenti al 9,5% del totale. Le immagini e i risultati mostrati da qui in poi sono relativi solo agli inliers.

È stata preliminarmente eseguita l'analisi esplorativa dei residui che sono stati ottenuti sottraendo le coordinati di riferimento a quelle misurate. La Figura 10 riporta il grafico a dispersione per il caposaldo 401: nella figura a sinistra, sono mostrate le componenti x-y; nella figura a destra, viene visualizzato il piano x-z.

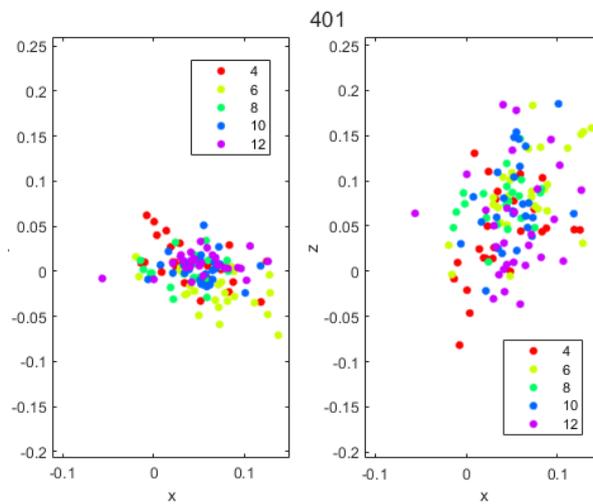


Fig. 10: Grafico a dispersione dei residui per il caposaldo 401, per tutti gli operatori e per tutti i valori di distanza rover-facciata considerati.

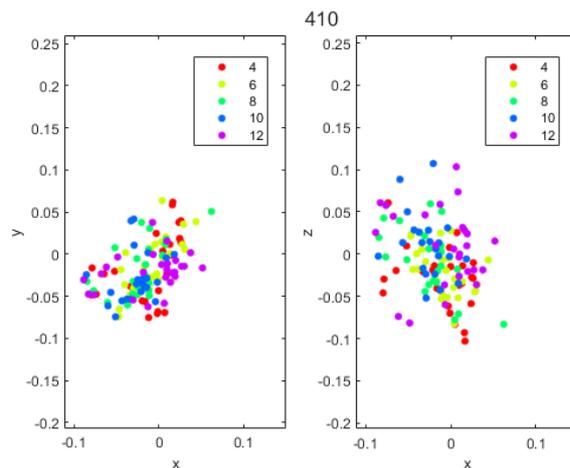


Fig. 11: Grafico a dispersione dei residui per il caposaldo 410, per tutti gli operatori e per tutti i valori di distanza rover-facciata considerati.

Le misure acquisite da tutti gli operatori e a tutte le distanze vengono unite; tuttavia, i punti sono colorati in base alla distanza rover-facciata (tra 4 e 12 metri, con passi di 2), come mostra la legenda. Abbiamo potuto constatare che la performance dei tre operatori coinvolti è comparabile, mentre c'è una moderata dipendenza dalla distanza, come verrà mostrato più avanti nel presente articolo.

La Figura 10 a sinistra evidenzia che la dispersione in x è maggiore che in y; la Figura 10 a destra mostra che la dispersione in z è maggiore che in x. Si tratta di un comportamento generale, come confermato dalla Figura 11, che è relativa al punto 410 e dalla Figura 12 che fa riferimento all'intero dataset.

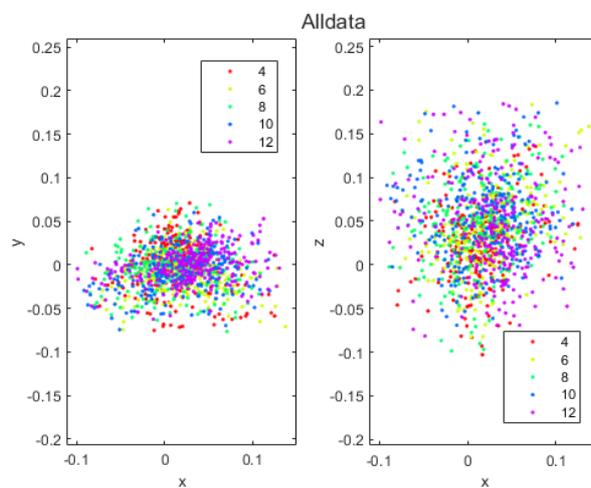


Fig. 12: Grafico a dispersione dei residui per tutti i capisaldi, tutti gli operatori e tutti i valori di distanza rover-facciata considerati.

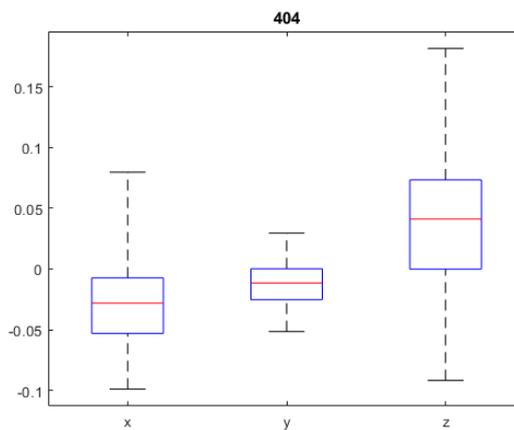


Fig. 13: Boxplot per le componenti residue x, y e z, per il punto 404.

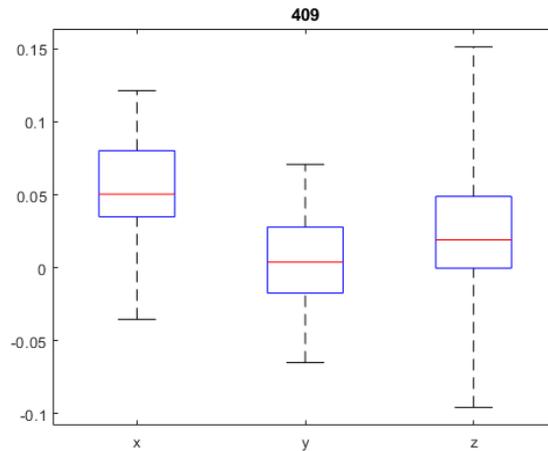


Fig.14: Boxplot per i componenti x, y e z e per il punto 409.

Sono stati inoltre generati boxplot per tutti i punti. Di seguito verranno presentati solo un paio di esempi.

La Figura 13 concerne il punto 404, che mostra un comportamento paragonabile a quello generale, in termini di dispersione delle misure, che è riportato dall'altezza del box. Infatti, x è più disperso di y e z è lo di più di x.

Ci sono delle eccezioni, ovviamente, e il punto 409 ne è un esempio. Infatti, come illustra la Figura 14, la dispersione dei tre componenti è approssimativamente la stessa.

I parametri statistici descrittivi sono stati determinati per tutte le misure interne, come riportato nella Tabella.3. Come già riportato, 1299 inliers su 1436 misurazioni. Le misure sono considerate come valori limite se tutte e tre le componenti si trovano all'interno dell'intervallo di confidenza robusto 3, dove robusto significa che il valore centrale è stimato dalla mediana e l'ampiezza è tre volte la MAD scalata (median absolute deviation-deviazione assoluta mediana); il MAD scalato è, a sua volta, il MAD effettivo moltiplicato per 1,4826, ovvero, per fenomeni normalmente distribuiti, il fattore di conversione tra MAD e deviazione standard.

Tabella 3: Statistiche descrittive per l'intero dataset delle misure fotogrammetriche.

	E [m]	N [m]	h [m]	d3D [m]
ntot	1436	1436	1436	1436
nin	1299	1299	1299	1299
min	-0.010	-0.077	-0.103	0.004
max	0.138	0.071	0.185	0.222
mean	0.020	-0.004	0.043	
std	0.041	0.025	0.050	
RMSE	0.045	0.025	0.066	
Perc(68.27)				0.086

Concentrandosi sul RMSE, essendo la distanza media rispetto al valore di riferimento, i valori stimati sono di 45, 25 e 66 mm, per l'intero dataset, inclusi tutti i

punti, gli operatori e le configurazioni, in termini di rover- distanza facciata. Sono visibili anche le sistematiche, di dimensioni limitate. Non vengono ulteriormente analizzati nel presente articolo.

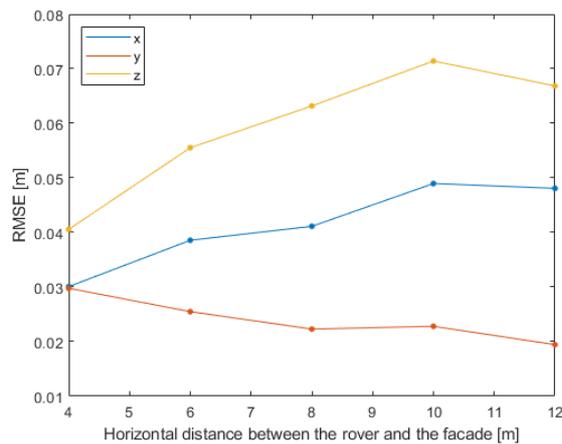


Fig.15: Valori RMSE per le componenti x, y e z, in funzione della distanza dal rover.

Potrebbe sorgere una domanda, ovvero perché sono stati estratti gli indici di accuratezza complessivi, quando è ben noto che la qualità delle misurazioni fotogrammetriche dipende linearmente dalla distanza fotocamera-oggetto. Sicuramente approfondiremo questo aspetto, in ulteriori articoli. Allo stesso tempo, non pensiamo che, in scenari pratici, gli utenti saranno in grado di garantire che la distanza sia costante. Per poter usufruire del rover GS18I, essi devono essere liberi di misurare qualsiasi punto compreso nel range consigliato, da 4 a 10 metri.

Come ultima indagine, è stata studiata la dipendenza di RMSE dalla distanza fotocamera-oggetto. Le misure sono state raggruppate in base a quel parametro e i parametri di qualità sono stati estratti come prima, per ciascuno dei valori disponibili, 4, 6, 8, 10 e 12 metri.

La Figura 15 mostra le curve determinate ed evidenzia alcuni fenomeni interessanti, alcuni controintuitivi. RMSE (x) e RMSE (z) aumentano con la distanza, anche se le curve si abbassano o diminuiscono tra 10 e 12 metri. D'altra parte, RMSE (y) diminuisce con la distanza e questo è sorprendente.

10 Discussione, conclusioni e altre attività

È stata eseguita una prima valutazione del rover Leica GS18I. È stato creato un test-site presso l'Università di Pavia. Esso comprende 5 punti accessibili e 10 punti appartenenti a una facciata. Le loro coordinate di riferimento sono state determinate con metodologie di rilevamento accurate e ridondanti. Il sito di prova è molto impegnativo, a causa della presenza di sorgenti e ostacoli multi-percorso.

I punti accessibili sono stati determinati mediante normali misurazioni NRTK, in cui la palina era variamente inclinata. In totale, sono state acquisite ed elaborate 2077

misurazioni. Il rover si è dimostrato altamente capace di compensare l'inclinazione; complessivamente, le precisioni medie sono 12, 10 e 18 mm, per le componenti Est, Nord e altezza, in termini di valori RMSE.

I punti sulla facciata sono stati misurati mediante fotogrammetria. È stata considerata un'intera serie di distanze fotocamera-oggetto, comprese tra 4 e 12 metri. I valori RMSE medi sono di 45, 25 e 66 mm, per x, y e z (rispetto a un sistema di riferimento locale), comprese tutte le distanze e tutti i punti. In generale, pensiamo che questo sia sufficiente per l'ambito del posizionamento visivo.

Indubbiamente, alcuni aspetti sono difficili da spiegare, in termini di regole fotogrammetriche generali. La precisione è significativamente diversa per x e y. Inoltre, RMSE (y) diminuisce all'aumentare della distanza, mentre le altre due componenti si comportano come previsto.

Tali aspetti delicati verranno indagati eseguendo un'elaborazione fotogrammetrica completa delle immagini acquisite. In effetti, il rover GS18I esegue la fotogrammetria in una sorta di scatola nera. Si dice che la telecamera sia calibrata, ma i parametri del modello non sono accessibili; si dice che le immagini scaricate non siano distorte e così sembrano, ma non abbiamo potuto verificarlo finora. Inoltre, si dice che il controller estrae i punti di collegamento ed esegua la regolazione del fascio, ma non vengono fornite informazioni su questo processo. Infine, i punti sono stati misurati in ufficio utilizzando il metodo standard: l'utente fa clic su un certo particolare su un'immagine e il programma lo abbina in molte altre. Per il presente articolo, le corrispondenze eseguite dal software fornito dai produttori non sono state verificate, ma semplicemente accettate: possiamo solo assicurare che l'identificazione del punto eseguita dall'utente è stata attenta e cauta.

Nelle prossime attività verrà eseguita l'elaborazione fotogrammetrica completa. Diversi altri GCP saranno misurati sulla facciata e i fotogrammi acquisiti saranno orientati mediante la normale e completa regolazione del fascio. Inoltre, se necessario, verrà eseguita una simulazione dettagliata mirata a due obiettivi principali:

- accertare qual è l'effettivo budget di errore, ovvero qual è il peso delle varie fonti di errore: misura diretta dell'orientamento esterno, corrispondenza dei punti omologhi, consistenza e qualità dei punti di legame;
- per verificare se la qualità della misurazione ottenuta è la più alta ottenibile, data la strumentazione disponibile o può essere migliorata, ad esempio, tramite una raffinata calibrazione della telecamera, una migliore estrazione dei punti di ancoraggio o una diversa gestione della regolazione al volo del fascio.

Acknowledgement. Il presente articolo è stato preparato nell'ambito del progetto di ricerca CE4WE (Circular Economy for Water and Energy), ID-1139857, finanziato dalla Regione Lombardia, Italia. Leica Geosystems Italia viene qui ringraziata per averci prestato lo strumento che abbiamo utilizzato per la prima parte dei test. Ulteriori attività, incluse anche in questo articolo, sono state eseguite con il nostro sensore, dopo averlo acquistato. Tre studenti dell'Università degli Studi di Pavia hanno eseguito le misure, nell'ambito delle attività relative alla preparazione della tesi di laurea: Marco Raniolo, Davide Lodigiani e Alessandro Filippi. L'attività degli studenti è stata

attentamente seguita dagli autori e anche da Paolo Marchese, tecnico del Laboratorio di Geomatica, dell'Università degli Studi di Pavia.

Riferimenti bibliografici

1. Leica GS18I, <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18i>
2. Baiocchi, V., Piccaro, C., Allegra, M., Giammarresi, V., Vatore, F.: Imaging rover technology: Characteristics, possibilities and possible improvements. In: Journal of Physics: Conference Series. p. 12008. Institute of Physics Publishing (2018)
3. Cera, V., Campi, M.: Evaluating the potential of imaging rover for automatic point cloud generation. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. pp. 147–154 (2017)
4. El-Mowafy, A.: Performance Analysis of the RTK Technique in an Urban Environment. Aust. Surv. 45, 47–54 (2000). <https://doi.org/10.1080/00050353.2000.10558803>
5. Feng, Y., Wang, J.: GPS RTK Performance Characteristics and Analysis. J. Glob. Position. Syst. 7, 1–8 (2008). <https://doi.org/10.5081/jgps.7.1.1>
6. Luo, X., Schaufler, S., Branzanti, M., Chen, J.: Assessing the benefits of Galileo to high-precision GNSS positioning – RTK, PPP and post-processing. Adv. Sp. Res. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.08.022>
7. Luo, X., Schaufler, S., Carrera, M., Celebi, I.: High-Precision RTK Positioning with Calibration-Free Tilt Compensation. In: FIG Congress (2018)
8. Schaufler, S.: GNSS Visual Positioning, <https://share.vidyard.com/watch/W5tQo7Dv1iGe5vmETzHTjR?>
9. Schaufler, S., Fischell, M., Boffi, G., Luo, X., Rtk, G.: An Innovative Image-Based Surveying Approach for Globally Referenced Remote Point Measurements An Innovative Image-Based Surveying Approach for Globally Referenced Remote Point Measurements (10354) Stefan Schaufler , Michele Fischell , Geo Boffi , Xiaog. 10–14 (2020)
10. Arducam AR0134, <https://www.arducam.com/product/arducam-cmos-ar0134-1-3-inch-1-2mp-color-camera-module-2/>
11. Visual Positioning and Leica GS18 I, <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18i/of-visual-positioning-gs18-i>
12. Takac, F., Zelzer, O.: The relationship between network RTK solutions MAC, VRSTM, PRS, FKP and i-MAX. In: 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2008. pp. 2231–2238 (2008)