

Fotogrammetria diretta con RPAS

Prime considerazioni e possibili sviluppi futuri



di **Filiberto Chiabrando, Andrea Lingua e Marco Piras**

In questo lavoro si illustra una ricerca sulle prestazioni dei sistemi mini-RPAS, mediante alcuni test appositamente realizzati, con particolare attenzione alle applicazioni per la fotogrammetria diretta su grande scala.

Oggi l'utilizzo di sistemi RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) per applicazioni di tipo geomatico è molto vasto, ben descritto e documentato nella letteratura scientifica nazionale ed internazionale (Barazzetti et al, 2012;. Chiabrando et al, 2012; Haala et al, 2011; Lingua et al 2008; Remondino et al., 2011), in cui si valutano potenzialità, precisioni e possibili campi di applicazione. Nelle attività di tipo fotogrammetrico, gli RPAS vengono solitamente strumentati con camere digitali calibrate ad alta risoluzione con il fine di acquisire immagini per la generazione di ortofoto, modelli densi di superficie (Dense Digital Terrain Model, DDTM, Dense Digital Surface Model, DDSM) o modelli 3D, mediante l'utilizzo di approcci classici della fotogrammetria, con l'ausilio di punti a terra, oppure grazie

all'utilizzo di software e algoritmi legati al mondo della computer vision quali le procedure di Structure from Motion (SfM), che consentono di automatizzare quasi completamente il processo di elaborazione.

Tali algoritmi, al fine di ottenere risultati con una buona valenza metrica, richiedono un'alta percentuale di sovrapposizione (solitamente intorno all'80%), e un numero minimo di punti di controllo a terra (Ground Control Points, GCPs) utili (solitamente > 5) per orientare un blocco fotogrammetrico completo. Grazie a questi minimi requisiti è possibile ottenere buoni risultati in tempi rapidi con una procedura che potremmo definire semiautomatica. Un obiettivo è quello di limitare ulteriormente la componente "manuale" valutando se è possibile realizzare la fotogrammetria diretta con RPAS e quali siano gli attuali limiti operativi.

Attualmente sul mercato esistono un gran numero di sensori di navigazione (GPS / GNSS e Inertial Measurement Unit, IMU in versione Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS), che sono già impiegati a bordo di UAV, per effettuare il volo in maniera autonoma.

La soluzione di navigazione (posizione e assetto, vengono solitamente memorizzati in un file GPX) è stimata dal sensore interno all'UAV (precisioni metriche sulla posizione e circa di $\pm 2^\circ$ sugli assetti) può essere associata alle immagini acquisite e di conseguenza impiegata per la georeferenziazione diretta delle immagini stesse (Blaha et al, 2011;. Coppa et al., 2009). Alla luce di tali precisioni ne deriva che i sensori normalmente installati su piattaforma RPAS non sono in grado di fornire dati necessari per applicazioni fotogrammetriche di alta precisione, ma per applicazioni



Fig. 1 - Sistema RPAS impiegato (sinistra) e camera installata (destra).

cartografiche rimane comunque interessante analizzare le loro prestazioni stimandone accuratezza/precisione di posizionamento e orientamento del sistema e della camera utilizzata. Nei test svolti, i dati sono stati elaborati con il tradizionale approccio fotogrammetrico del bundle-block adjustment (BBA) per stimare la posizione e l'assetto corretto della camera, successivamente confrontandola con la soluzione stimata dall'RPAS. Per avere un ulteriore controllo e confronto tra i dati ottenuti dai sensori e quelli misurati con altre metodologie è stato eseguito un test dedicato nel quale è stata impiegata una stazione totale motorizzata automatica (TPS) in grado di inseguire e rilevare il sistema RPAS durante il volo al fine di confrontare le due traiettorie: RPAS e TPS. Il test è stato svolto con l'impiego di un particolare prisma, costruito presso il laboratorio di fotogrammetria, Geomatica e GIS e montato nella parte inferiore dell'RPAS. L'analisi è stata condotta considerando il sincronismo delle misure e un campionamento della TPS pari a 5Hz, ottenendo come risultato un'ampia ridondanza di punti utili per un accurato controllo.

Come verrà evidenziato nei successivi paragrafi i primi risultati ottenuti incoraggiano l'uso dei sistemi RPAS per applicazioni geomatiche, in quanto il costo e la qualità dei prodotti ottenuti come ormai ben noto sono molto interessanti sia dal punto di vista metrico sia per la documentazione e modellazione del territorio.

Come verrà analizzato nei successivi paragrafi, alla luce dei test eseguiti la qualità del posizionamento e dell'assetto dell'RPAS in termini di accuratezza e precisione consente di realizzare dei prodotti cartografici con l'impiego della fotogrammetria diretta, ma solo per produrre mappe a media scala (1: 10000-1: 25000). In particolare, la maggiore criticità emerge nell'accuratezza della stima della posizione della camera (X, Y, Z). Tale aspetto potrebbe essere risolto adottando un ulteriore ricevitore GNSS doppia frequenza ad uso esclusivo, senza cambiare la scheda di navigazione interna.

Di seguito verranno descritte le principali caratteristiche dell'RPAS utilizzato durante le prove, alcune analisi effettuate ed i primi risultati ottenuti. Saranno infine evidenziati i limiti e i possibili miglioramenti.

Descrizione del sistema RPAS usato

Il sistema utilizzato consiste in un mezzo aereo a basso costo a decollo e atterraggio verticale (*Vertical Take Off and Landing*) di architettura HexaKopter di produzione Mikrokopter, venduto dalla casa madre in kit da assemblare, in questo caso personalizzato da Restart di Luca Comolli. Come descritto dal nome, il velivolo è dotato di 6 rotori, pesa circa 1.2 kg comprese le batterie e permette di sollevare un carico (*payload*) massimo di 1 kg. La figura 1 mostra il sistema sopra descritto evidenziando alcuni dettagli tra cui la camera digitale utilizzata per finalità di presa fotogrammetrica e video. In questa applicazione è stata utilizzata la camera Sony Nex 5 con sensore CMOS di formato 23,5 x 15,6 mm (dimensioni APS-C), pixel di lato pari a 5 μm per un totale di 14 Mpixel, ottica *pancake* con focale 16 mm. Durante il volo, lo scatto può essere controllato in remoto secondo 3 modalità di cui 2 ad azionamento manuale mediante radiocomando (scatto singolo o sequenza temporizzata regolato dalla Flight Control, in seguito FC), la terza automatica con scatto in corrispondenza di un evento definito in fase di pianificazione del volo, per esempio il passaggio da *waypoint* regolato dalla NaviControl (NC). La camera digitale è montata su un sostegno servo-assistito che permette rotazioni controllate elettronicamente lungo 2 direzioni (attorno agli assi ω e φ disponendo la camera ad asse verticale). I movimenti del sostegno (e quindi della camera) sono regolabili manualmente mediante apposito controllo sul radiocomando o, automaticamente (dalla FC) compen-

sando le rotazioni delle camera durante il volo per avere l'asse sempre con la stessa direzione (per esempio sempre verticale), Le correzioni imposte al gimbal sono registrate in un file, rese così disponibili all'utente.

Questo sistema consente il volo autonomo, grazie ad un sistema interno integrato GNSS-IMU, installato sulla NC, che consente di inviare informazioni di posizione e assetto alla scheda di flight control (FC), che ha il compito di gestire la potenza dei singoli motori, al fine di garantire una buona e stabile navigazione. Il sistema GNSS installato a bordo è un u-blox 6H, connesso ad una antenna patch di ceramica. Le performance di questo sensore sono riportate di seguito (Piras et al., 2010): numero di canali 50, costellazioni GPS (L1), SBAS, GLONASS, GALILEO (Open Service), time to first fix 26s (cold start) - 1s (hot start), accuratezza orizzontale [m] 2.5 - 2 (con SBAS), Accuratezza heading [°] 0.5, Accuratezza velocità [m/s] 0.1, Sensitivity -162 dBm.

Il sistema inerziale installato a bordo non è documentato, ma da alcuni test eseguiti in laboratorio si possono valutare le sue precisioni:

$$\sigma_{yaw} = \pm 6^\circ, \sigma_{pitch} = \pm 3^\circ, \text{St. } \sigma_{roll} = \pm 3^\circ, \sigma^{XY} = 3 \text{ m}, \sigma^Z = 6 \text{ m}.$$

Al sistema integrato GNSS-IMU può essere impostato un modello dinamico, in maniera da applicare un filtro di Kalman per la stima in tempo reale della soluzione di navigazione. Questo aspetto è particolarmente interessante perché tutte le informazioni fondamentali utilizzate per la fotogrammetria diretta (posizione e assetto) sono disponibili a ogni epoca. Sfortunatamente, al momento non è possibile acquisire i dati

grezzi dei singoli sensori, che sarebbero molto utili al fine di migliorare la qualità della soluzione di navigazione, mediante una post-elaborazione e una stima dei bias reali dei sensori utilizzati. Questo sistema RPAS consente di pianificare ed eseguire un volo autonomo caricando un piano di volo sul quale è possibile indicare i punti di presa e gli orientamenti della camera. Da un punto di vista del controllo del volo nell'ottica dell'orientamento diretto tale aspetto è molto importante in quanto è possibile già stabilire una soluzione approssimata della camera prima dell'esecuzione del volo vero e proprio.

Queste operazioni sono disponibili per mezzo di un sistema di comunicazione tra RPAS, pilota e stazione di controllo a terra.

Caso studio e risultati

Ogni sistema RPAS ha caratteristiche e specifiche diverse (sensori interni, durata di volo, caratteristiche camera fotografica etc.), quindi i test ed i risultati che verranno presentati si riferiscono al sistema sopra descritto ed utilizzato per le acquisizioni.

Prima di passare alle analisi sui dati estratti dalla piattaforma analizzata e la qualità della soluzione di navigazione per fotogrammetria diretta, è importante sottolineare che, come noto, la cartografia numerica ha una precisione garantita differente che dipende dalla scala nominale. Normalmente per valutare l'accuratezza di una carta viene preso in considerazione l'errore di graficismo che è funzione della scala di rappresentazione ed è considerato pari a 0,2 mm per la scala di rappresentazione. A titolo esemplificativo per una cartografia in scala 1:1000



Fig. 2 - Screenshot del risultato ottenuto al termine del BBA eseguito sull'area della Domus.

è considerata un'accuratezza pari a $\sigma_{XYZ} = 0.2 \text{ mm} \times 1000 = 20 \text{ cm}$.

Il test è stato eseguito sull'area della Domus dei Putti Danzanti, uno scavo archeologico presente nel comune di Aquileia (UD), all'interno del quale da diversi anni è attiva una collaborazione tra il Politecnico di Torino e l'Università degli Studi di Trieste per il rilievo e la documentazione dell'antica Domus e delle aree circostanti. In particolare nel test site preso in considerazione sono stati eseguiti e pianificati due voli fotogrammetrici. Il primo volo si sviluppa sui resti del cardo, a Est della zona di scavo, con un'altezza media di volo pari a circa 14 m che comporta un abbracciamento dei fotogrammi di 10 x 15 m². Il ricoprimento longitudinale è stato fissato al 75 % garantendo una base di presa di circa 4 m, mentre il ricoprimento trasversale è stato fissato al 30% per assorbire eventuali errori di inseguimento delle rotte fissate.

Area		s _x [m]	s _y [m]	s _z [m]
Domus	GCPs (58)	0.004	0.005	0.012
	CPS (20)	0.006	0.009	0.012
Cardo	GCPs (30)	0.003	0.002	0.011
	CPS (15)	0.010	0.005	0.020

Tab 1 - Residui del BBA sui GCPs e CPS.

	DE [m]	DN [m]	DH [m]	Dw [gon]	Df [gon]	Dk [gon]
Media	1.377	0.556	-0.338	0.687	0.321	0.575
Sqm	1.781	2.103	4.223	1.888	1.601	4.254
Min	-0.078	-2.817	-6.252	-4.827	-3.155	-10.37
Max	3.188	5.211	7.168	5.697	5.091	12.30

Tab. 2 - Differenze tra risultati calcolati con il processo fotogrammetrico e dati acquisiti dal sensore a bordo del sistema RPAS.

In totale si è prevista l'acquisizione di 36 fotogrammi. Il secondo volo ricopre invece l'intera area interessata dallo scavo con un'altezza media di volo pari a 18 m che comporta un abbracciamento dei fotogrammi di 18 x 27 m. I ricoprimenti longitudinali e trasversali sono gli stessi utilizzati per l'esecuzione del primo volo. Come obiettivo le acquisizioni eseguite oltre al controllo dei parametri relativi ai centri di presa hanno avuto entrambe quello di realizzare l'ortofoto delle aree sorvolate grazie all'utilizzo di un processo fotogrammetrico che potremmo definire tradizionale (con software di fotogrammetria digitale semi automatico – Leica Photogrammetric Suite) e un numero sovrabbondante (78 punti sull'area della Domus e 45 sull'area del Cardo) di punti materializzati e misurati sul terreno utilizzati all'interno del processo di BBA come GCPs (Ground Control Points) e come CPs (Check Points). Nella figura 2 è riportato lo screenshot dell'orientamento delle immagini sull'area del cardo ed in tabella 1 i residui sui GCPs e sui CPs. Alla luce dei risultati ottenuti e grazie all'utilizzo di un DSM acquisito tramite strumentazione Laser in una precedente campagna di rilievo sono state seguite le ortofoto

delle due aree prese in considerazione.

Le scale di rappresentazione sono state rispettivamente 1:100 per l'area del Cardo ed 1:200 per quella dell'intera Domus. Nella figura 3 è riportata l'ortofoto realizzata sull'area della Domus dei Putti Danzanti.

Le successive analisi hanno consentito una prima valutazione delle differenze tra i dati di posizione (X,Y,Z) ed assetto (φ, ω, κ) ottenuti al termine del processo fotogrammetrico di triangolazione aerea che sono stati confrontati con quelli ricavati dai sensori (GPS e IMU) a bordo del sistema RPAS.

Nella tabella 2 sono riportati i risultati ottenuti.

Si può notare che è dunque ipotizzabile l'esecuzione di fotogrammetria diretta con i dati derivanti dai sensori, ma al momento non è ipotizzabile ottenere prodotti con la stessa scala nominale. Osservando i valori riportati in Tabella 2, le differenze sugli angoli di assetto indicano la possibilità di realizzare cartografia con scala pari a 1:1000-1:2000, mentre le differenze sulle coordinate dei centri di presa indicano la possibilità di arrivare a rappresentazioni

a media scala 1:25000. Valori troppo elevati anche in funzione della quota di volo decisamente bassa (< 20 m) alla quale sono state acquisite le immagini. Alla luce dei primi risultati un ulteriore controllo è stato eseguito sulla parte che risultava

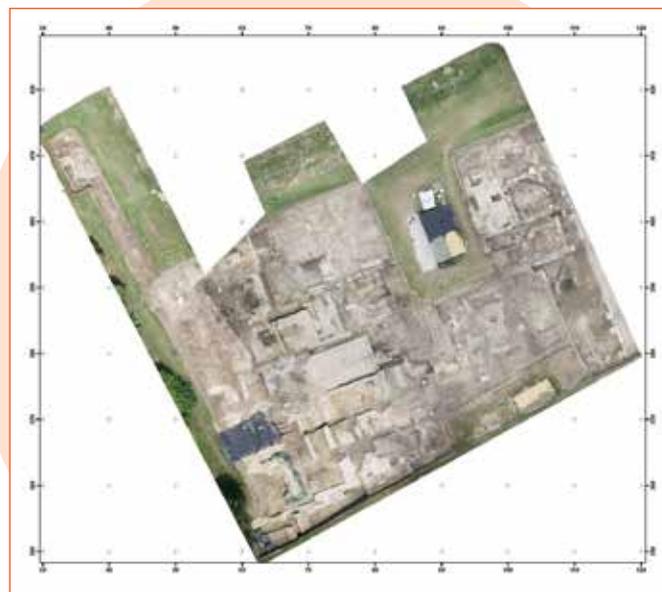


Fig. 3 - Ortofoto della Domus dei Putti Danzanti (agg. 2012) scala originale 1:200.

essere la più critica, ricorrendo all'utilizzo di una stazione totale motorizzata in grado di seguire il sistema RPAS sul quale era stato opportunamente installato un mini-prisma utile all'inseguimento ed alla misura della posizione. Il test è stato eseguito in campo volo e successivamente sono stati analizzati e confrontati i valori ottenuti dai due sistemi. Nella figura 4 sono riportati il sistema RPAS utilizzato e il mini prisma (cerchio rosso) ed un grafico (planimetria) con la traiettoria registrata dal sensore a bordo dell'UAV (verde) e quella misurati dalla stazione totale (rosso).



Fig. 4 - RPAS e mini prisma utilizzato per il tracciamento (sinistra), grafico con le traiettorie misurate dai sensori (verde) e dalla stazione totale (rosso) (destra).

Gli errori riscontrati nei primi test hanno indotto a tentare un post-processing sui dati originali dei sensori a bordo dell'elicottero, fornendo quindi una soluzione finale con l'ausilio di correzioni EGNOS che hanno consentito di migliorare la precisione relativa. Con tale approccio i residui medi in planimetria si attestano attorno ad un valore pari a 0.50 m ed s.q.m pari a 1.80 m. Risulta sempre peggiore anche se la qualità è migliorata rispetto ai dati del primo test la componente verticale per la quale i residui sono ancora attorno ai 5 m (l'offset tra sensore e prisma è naturalmente stato preso in considerazione).

Conclusioni e prospettive

Le prove effettuate ci permettono di affermare che, allo stato attuale, i sistemi RPAS testati non ci permettono di eseguire applicazioni

dirette di fotogrammetria alla grande scala; i parametri registrati dai sensori a bordo dei sistemi sperimentati possono essere utilizzati per applicazioni di fotogrammetria alla media scala, non interessante per applicazioni RPAS in quanto il dettaglio presente nelle immagini acquisite non giustificherebbe rappresentazioni a scala 1:25000 o minori.

Come si evince dai precedenti paragrafi il problema principale non riguarda la stima degli assetti ma la definizione della posizione del centro di presa. Tali parametri stimati attraverso sistemi GNSS e procedure in tempo reale non garantiscono le accuratezze richieste (che per applicazioni alla scala architettonica dovrebbero essere dell'ordine di alcuni cm).

L'unica soluzione al momento ipotizzabile, sulla quale da tempo il gruppo di ricerca sta eseguendo test e prove, è quella che riguarda

l'utilizzo di sistemi GNSS doppia frequenza che consentano di registrare le osservazioni in tempo reale. Tali dati opportunamente elaborati al termine del volo con tecniche tradizionali potranno dunque fornire le accuratezze congrue alla rappresentazione a grandissima scala. Infine una corretta integrazione con sistemi IMU potrebbe consentire il raggiungimento della fotogrammetria diretta da piattaforme RPAS. La tecnologia e le metodologie sono già oggi disponibili a costi ancora decisamente elevati ma alla luce della sempre maggiore richiesta di tali sistemi associata alla necessità di avere prodotti e cartografia in tempo reale porterà sicuramente nel corso di pochi anni ad un abbassamento dei prezzi ed alla conseguente diffusione di massa di tali sensori avanzati.

BIBLIOGRAFIA

- Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., Brumana, R., 2012. Fully automatic UAV image-based sensor orientation, *LAPRS&SIS*, Beijing (China).
- Bendea, H., Chiabrandò, F., Giulio Tonolo, F., Marencino, D., 2007. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The Augusta Bagiennorum test site. *XXI CIPA International Symposium*, Athens, Greece, 1–6 October 2007.
- Blaha, M., Eisenbeiss, H., Grimm, D., Limpach, P., 2011. Direct georeferencing of UAVs. *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, Zurich, Switzerland, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Chiabrandò, F., Lingua, A., Rinaudo, F., Spano, A., 2012. Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. *ISPRS Archives*, Vol. XXXIX, no. B5, pp. 583–588.
- Coppa, U., Guarneri, A., Pirotti, F., Vettore, A., 2009. Accuracy enhancement of unmanned helicopter positioning with low cost system. *Applied Geomatics*, 1(3), pp. 85–95.
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., Tritler, M., 2011. Performance test on UAV-based photogrammetric data collection. In: *ISPRS Archives*, Vol. XXXVIII-1/C22.
- Lingua, A., Marencino, D., Nex, F., 2009. Automatic Digital Surface Model (DSM) generation procedure from images acquired by Unmanned Aerial Systems. *Proceedings of GeoCad 2009*, Alba Iulia, Romania.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling – current status and future perspectives. *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, Zurich, Switzerland, Vol. XXXVIII-1/C22.

ABSTRACT

Nowadays, the RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) or UAV (Unmanned Aerial Vehicle) are often used, with onboard calibrated digital camera for photogrammetric purpose such as DTM and DSM, orthophotos and map realization etc., combining the digital images with a minimum sufficient number of ground control points using semi-automatic image-matching techniques combined with traditional bundle-block approach (Barazzetti et al, 2012; Chiabrandò et al, 2012; Haala et al, 2011; Lingua et al 2008; Remondino et al., 2011).

In this case, the RPAS performances allows to obtain high quality product, considering the pixel size and the accuracy of the DTM/DSM which could be obtained with automatic procedures.

This is a good condition for semi-automatic procedure using a bundle-block photogrammetric approach. But is it possible to realize a direct photogrammetry? And what are the limits?

Several navigation sensors (GPS/GNSS e IMU-MEMS) are embedded onto RPAS in order to realize an autonomous flight. The quality of these sensors, in term of accuracy, depends on the model of RPAS and its purpose. The navigation solution (position and attitude) is estimated by the internal RPAS sensor and can be employed to directly georeferencing the images, in order to produce an easy and quick description and analysis of the overlooked area.

In this paper, the authors describes an investigation over the limits of some commercial RPASs, defining a dedicated procedure to evaluate their performance, especially considering the use of RPAS for direct photogrammetry. The first results encourage the use of RPAS for geomatic applications, because the cost and the quality of the obtained product are quite interesting.

PAROLE CHIAVE

FOTOGRAMMETRIA DIRETTA; GNSS/INS; MEMS; DTM/DSM; UAV

AUTORE

FILIBERTO CHIABRANDO
FILIBERTO.CHIABRANDO@POLITO.IT

ANDREA LINGUA
ANDREA.LINGUA@POLITO.IT

MARCO PIRAS
MARCO.PIRAS@POLITO.IT
POLITECNICO DI TORINO
DIATI, C.SO DUCA DEGLI ABRUZZI 24,
TORINO