Georeferenziazione diretta per elaborazioni fotogrammetriche da dati UAV: limiti e potenzialità

Giordano C.M.[1[0009-0001-1901-7844]], Lambertini A.[1[0000-0002-5896-1088]], Mandanici E.[1[0000-0003-4822-1577]], Tini M.A.[1[0000-0001-7745-640X]], Girelli V.A.[1[0000-0001-9257-9803]], Zanutta A.[1[0000-0003-4872-5222]]

[1] Dipartimento DICAM, Università di Bologna, (carmenmaria.giordano, alessandro.lambertini, emanuele.mandanici, mariaalessandra.tini, valentina.girelli, antonio.zanutta)@unibo.it

Abstract. L'integrazione delle coordinate di scatto consente la georeferenziazione diretta del modello, senza tuttavia garantirne l'accuratezza. La geometria dei voli nadirali è infatti poco favorevole alla calibrazione della camera, soprattutto alla stima della distanza principale, con ripercussioni sulla componente altimetrica. Lo studio propone sottoinsiemi di calibrazione acquisibili rapidamente e integrabili automaticamente nelle missioni, con risultati comparabili all'impiego di punti di appoggio a terra.

Parole chiave: Fotogrammetria; UAV; calibrazione; georeferenziazione diretta.

1 Introduzione

L'impiego di *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) [1,2] equipaggiati con camere RGB per rilievi di media e piccola estensione è oggi ampiamente diffuso grazie alla rapidità di acquisizione, ai costi contenuti e alla qualità dei prodotti ottenibili.
Alcuni UAV integrano moduli GNSS (*Global Navigation Satellite System)* in modalità RTK (*Real-Time Kinematic*), NRTK (*Network Real-Time Kinematic*) o PPK (*Post-Processed Kinematic*), consentendo il posizionamento accurato del velivolo durante l'acquisizione, in tempo reale o in post-processing. Conoscendo la posizione del velivolo e la geometria relativa tra antenna GNSS, IMU (*Inertial Measurement Unit*), e sensore (*lever-arm offsets, boresight angles*), è possibile ricavare le posizioni di scatto e l'assetto della camera.
Ma qual è l'impatto dell'integrazione delle informazioni di posizione e/o assetto all'interno dell'elaborazione fotogrammetrica?
I software fotogrammetrici impiegati attualmente si basano sulla tecnica *Structure-from-Motion* (SfM), il cui vantaggio risiede nella possibilità di stimare i parametri di orientamento interno ed esterno anche in assenza di informazioni a priori. Sebbene la tecnica SfM non richieda informazioni di posizione a priori, la loro integrazione può migliorare sia l'efficienza computazionale, riducendo la ricerca dei punti di legame alle immagini spazialmente vicine, sia la robustezza del processo, vincolando il network fotogrammetrico. In aggiunta a questi benefici, l'integrazione delle posizioni di scatto consente un approccio di georeferenziazione diretta del modello, ovvero in assenza di punti misurati sull'oggetto; contrapponendosi alla georeferenziazione indiretta che

risulta unicamente basata sull'utilizzo di punti di appoggio (GCP - *ground control points*), e alla georeferenziazione integrata la quale è basata sulla compensazione di entrambe queste informazioni (coordinate dei GCP e coordinate di scatto) [3].
Data quindi la possibilità di conoscere, con buona accuratezza, le posizioni di scatto, e la fattibilità di introdurle nell'elaborazione, emergono alcune questioni operative:

(i) L'utilizzo di UAV in modalità RTK, NRTK, PPK rende inessenziale la misurazione dei GCP?
(ii) Qual è l'errore atteso da una procedura di georeferenziazione diretta?
(iii) Qual è la ripetibilità di questa metodologia?

In linea generale, l'accuratezza dei prodotti fotogrammetrici dipende sia dalle incertezze associate al posizionamento sia da quelle introdotte durante l'elaborazione. Tuttavia, la variabilità dei risultati riportati in letteratura, con errori spesso riscontrati nella componente altimetrica, è verosimilmente riconducibile a una calibrazione errata della camera. Le criticità associate alla stima dei parametri di orientamento interno sono ampiamente documentate, anche nell'ambito dei sistemi UAV, indagando diverse strategie di ottimizzazione [4–7], tra cui l'uso di calibrazioni preventivamente stimate, l'adozione di differenti modelli di distorsione, l'integrazione di immagini oblique e l'impiego di punti di appoggio opportunamente distribuiti. Nonostante queste conoscenze consolidate, nei moderni flussi di elaborazione basati sulla tecnica *Structure-from-Motion*, la possibilità di stimare automaticamente i parametri di orientamento interno (*self-calibration*) può indurre a sottovalutare l'importanza delle condizioni geometriche necessarie per una corretta calibrazione della camera [8]. Tale criticità assume particolare rilevanza alla luce della crescente diffusione di UAV nei quali la disponibilità di coordinate di scatto precise [9–11] può erroneamente essere interpretata come una garanzia dell'accuratezza complessiva della ricostruzione fotogrammetrica.

2 Approccio metodologico e principali risultati

Nei moderni workflow SfM, i parametri di orientamento interno vengono generalmente stimati simultaneamente a quelli esterni (*self-calibration*). Tuttavia, ciò non garantisce necessariamente l'affidabilità della calibrazione, poiché non tutti gli schemi di presa risultano geometricamente adeguati. Un corretto calcolo dei parametri di orientamento interno richiede una geometria di presa robusta, includendo immagini convergenti, variazioni di scala e differenti orientamenti [12,13]. Questa assunzione si contrappone alla praticità di impiego, in numerosi contesti applicativi, di voli con camera in assetto nadirale, caratterizzati tuttavia da una geometria di presa debole, soprattutto ai fini della stima della lunghezza principale.
Il caso di studio in esame è servito quindi per due questioni:

(i) Analizzare e quantificare, sia dal punto di vista empirico che teorico, gli effetti di una non corretta calibrazione della camera sul modello finale;
(ii) Sperimentare un approccio operativo volto a mitigare gli errori di calibrazione della camera, garantendo al contempo il rispetto dei requisiti di automazione e rapidità, così da preservare l'efficienza operativa dei sistemi UAV.

Il dataset utilizzato per i test corrisponde all'acquisizione di un lembo lungo la costa adriatica ravennate [14,15] di estensione circa 100 x 1500 m. La porzione è acquisita tramite piattaforma DJI Matrice 300 RTK equipaggiata con camera P1 ed ottica da 24 mm. L'acquisizione è stata eseguita tramite volo automatico controllato via software DJI Pilot (v.9.0.5.5) con sovrapposizione longitudinale e trasversale rispettivamente dell'80% e 60%, ad una altezza di volo di 45 m, risultando in un GSD (*Ground Sampling Distance*) di circa 0.82 cm. Il posizionamento del velivolo è stato controllato in campo in modalità RTK, con base installata nell'area, ma i dati sono stati poi processati con approccio PPK, in modo da rimuovere, preliminarmente all'elaborazione fotogrammetrica, errori derivanti da una temporanea perdita di comunicazione [16] tra base, stazione di controllo e velivolo.
In aggiunta al dataset nadirale, lo stesso giorno è stato acquisito un sottoinsieme di scatti, eseguibile automaticamente via software UgCS (v. 5.1.2), composto da immagini acquisite a diverse altezze sia in assetto nadirale che convergente, con uno scarso impatto sul costo operativo (circa 3 minuti).
L'elaborazione fotogrammetrica è stata eseguita via Metashape (v. 2.2.2), andando ad integrare il sottoinsieme di calibrazione secondo due approcci: (1) integrazione dei dataset (nadirale + calibrazione); (2) integrazione dei soli parametri di calibrazione, derivanti dal sottoinsieme. Successivamente, i risultati delle diverse elaborazioni sono stati analizzati secondo diverse modalità: (1) RMSE su check point indipendenti; (2) analisi della stima della distanza principale; (3) analisi delle correlazioni fra i parametri di calibrazione; (4) analisi dei plot dei residui.
I risultati sui check point possono fornire una indicazione sulla bontà dei test, però in questo caso offrono solo una limitata rappresentazione del problema. Infatti, essendo gli errori legati alla calibrazione della camera, risulta essenziale in primo luogo analizzare sia la stima della lunghezza principale che le correlazioni fra i parametri di calibrazione. In particolare, quest'ultima analisi permette di evidenziare come negli approcci meramente nadirali ci sia generalmente un'alta correlazione fra i parametri di calibrazione, e quindi maggiore incertezza nella loro definizione. Tra questi un punto critico è appunto la stima della distanza principale il cui errore si propaga nella componente verticale seguendo in buona approssimazione la seguente formula:

$$\sigma_Z = \pm m \cdot |\sigma_c| \tag{1}$$

L'errore sulla componente verticale (σ_Z) risulta proporzionale all'errore di stima della distanza principale (σ_c) e al fattore di scala del fotogramma (m).
Questa formulazione cela due criticità:

(i) La correlazione con il fattore di scala del fotogramma implica che la deviazione non si manifesti necessariamente come un bias sistematico, ma possa, in presenza di variazioni di profondità e quindi della distanza di presa, compromettere non solo l'accuratezza della ricostruzione altimetrica assoluta, ma anche quella relativa, con conseguenze negative sull'affidabilità di analisi morfologiche e volumetriche.

(ii) L'errore nella stima della lunghezza principale non è quantificabile a priori; pertanto, solo un controllo basato su misure indipendenti consente di verificare l'eventuale presenza di errori sistematici.

Tuttavia, nel caso in esame, tali criticità risultano significativamente attenuate grazie all'integrazione del sottoinsieme di immagini dedicate alla calibrazione. In particolare, questa integrazione si dimostra efficace nel ridurre le correlazioni tra i parametri di calibrazione della camera, garantendo una maggiore stabilità nella stima della distanza principale, dei prodotti dell'elaborazione e dei valori riscontrati di RMSE sui punti di controllo, in modo comparabile a risultati ottenibili mediante l'impiego di punti di appoggio a terra.

3 Conclusioni

L'integrazione delle informazioni di scatto nelle elaborazioni fotogrammetriche consente di ridurre l'onere computazionale, incrementare la robustezza del calcolo e, soprattutto, adottare un approccio di georeferenziazione diretta, che prescinde dalla disponibilità di misurazioni sull'oggetto. Tuttavia, la sola conoscenza della posizione del velivolo non è sufficiente a garantire l'accuratezza della ricostruzione tridimensionale, poiché la corretta calibrazione della camera riveste un ruolo centrale. In particolare, errori nella stima della lunghezza principale possono introdurre deformazioni sistematiche nel modello. In questo contesto, i tradizionali voli con camera in assetto nadirale, pur risultando particolarmente efficienti dal punto di vista operativo, presentano una geometria di presa poco favorevole alla calibrazione, rendendo necessaria l'adozione di strategie volte a mitigare tali criticità. Una soluzione diffusa consiste nell'integrare acquisizioni oblique al volo nadirale, così da rafforzare la geometria di presa e migliorare la stima dei parametri di orientamento interno. Tale approccio comporta, tuttavia, un incremento dei tempi di acquisizione ed elaborazione. In alternativa, il presente studio propone l'impiego di sottoinsiemi di immagini rispondenti ai crismi della calibrazione, rapidamente integrabili nelle missioni automatiche e nei successivi processi di elaborazione, consentendo di ottenere risultati comparabili a quelli raggiungibili mediante l'impiego di punti di appoggio a terra.

Sebbene il ricorso a misure indipendenti rimanga fondamentale per la validazione dei prodotti fotogrammetrici in numerose applicazioni, contesti emergenziali [17] o aree difficilmente accessibili possono rendere necessario adottare strategie di rilievo prive di punti di appoggio a terra, senza tuttavia compromettere la coerenza geometrica e spaziale dei modelli ricostruiti. In tali circostanze, la georeferenziazione diretta rappresenta una soluzione necessaria, la cui affidabilità dipende non soltanto dall'accuratezza delle informazioni di posizionamento del velivolo, ma anche dalla corretta determinazione dei parametri di calibrazione della camera. Sebbene l'effettiva presenza di errori sistematici possa essere accertata esclusivamente attraverso il confronto con misure indipendenti, l'analisi dei risultati della calibrazione e delle correlazioni tra i parametri stimati può fornire indicazioni sulla robustezza della geometria di presa e, di conseguenza, sull'affidabilità della stima dei parametri di orientamento interno e possibilità di presenza di deformazioni nel modello.

Riferimenti bibliografici

1. Nex, F.; Armenakis, C.; Cramer, M.; Cucci, D.A.; Gerke, M.; Honkavaara, E.; Kukko, A.; Persello, C.; Skaloud, J. UAV in the Advent of the Twenties: Where We Stand and What Is Next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2022**, *184*, 215–242, doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006.
2. Colomina, I.; Molina, P. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2014**, *92*, 79–97, doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
3. Eltner, A.; Sofia, G. Chapter 1 - Structure from Motion Photogrammetric Technique. In *Developments in Earth Surface Processes*; Tarolli, P., Mudd, S.M., Eds.; Remote Sensing of Geomorphology; Elsevier, 2020; Vol. 23, pp. 1–24.
4. Elias, M.; Isfort, S.; Eltner, A.; Maas, H.-G. UAS Photogrammetry for Precise Digital Elevation Models of Complex Topography: A Strategy Guide. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2024**, *X-2–2024*, 57–64, doi:10.5194/isprs-annals-X-2-2024-57-2024.
5. Martin Štroner; Urban, R.; Seidl, J.; Reindl, T.; Brouček, J. Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without GCPs. *Remote Sensing* **2021**, *13*, 1336, doi:10.3390/rs13071336.
6. Losè, L.T.; Chiabrando, F.; Tonolo, F.G. Boosting the Timeliness of UAV Large Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **2020**, *9*, 578, doi:10.3390/ijgi9100578.
7. Cledat, E.; Cucci, D.A.; Skaloud, J. CAMERA CALIBRATION MODELS AND METHODS FOR CORRIDOR MAPPING WITH UAVS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2020**, *V-1–2020*, 231–238, doi:10.5194/isprs-annals-V-1-2020-231-2020.
8. Fraser, C.S. Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **2013**, *79*, 381–388, doi:10.14358/PERS.79.4.381.
9. Zhang, H.; Aldana-Jague, E.; Clapuyt, F.; Wilken, F.; Vanacker, V.; Van Oost, K. Evaluating the Potential of Post-Processing Kinematic (PPK) Georeferencing for UAV-Based Structure- from-Motion (SfM) Photogrammetry and Surface Change Detection. *Earth Surface Dynamics* **2019**, *7*, 807–827, doi:10.5194/esurf-7-807-2019.
10. Kim, H.; Hyun, C.-U.; Park, H.-D.; Cha, J. Image Mapping Accuracy Evaluation Using UAV with Standalone, Differential (RTK), and PPP GNSS Positioning Techniques in an Abandoned Mine Site. *Sensors* **2023**, *23*, 5858, doi:10.3390/s23135858.
11. Pilartes-Congo, J.A.; Simpson, C.; Starek, M.J.; Berryhill, J.; Parrish, C.E.; Slocum, R.K. Empirical Evaluation and Simulation of GNSS Solutions on UAS-SfM Accuracy for Shoreline Mapping. *Drones* **2024**, *8*, 646, doi:10.3390/drones8110646.
12. Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Boehm, J. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*; 4th ed.; De Gruyter: Berlin, 2023; ISBN 978-3-11-102935-1.
13. Remondino, F.; Fraser, Cl. Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons. *ISPRS Archives* **2006**, *XXXVI*, 266–272, doi:10.3929/ethz-b-000158067.
14. Del Bianco, F.; Avellini, G.; Marucci, F.; Costantini, F.; Pezzolesi, L.; Silvestri, S.; Giambastiani, B.M.S.; Guerrini, F.; Turicchia, E.; Franchini, M.; et al. *Baseline Report.*

Deliverable 2.1 of the LIFE NatuReef Project: Nature-Based Reef Solution for Coastal Protection and Marine Biodiversity Enhancement. LIFE22-NAT-IT-LIFE-NatuReef/101113742; Zenodo, 2024;

15. Giordano, C.M.; Girelli, V.A.; Lambertini, A.; Tini, M.A.; Zanutta, A. UAV Data Collection Co-Registration: LiDAR and Photogrammetric Surveys for Coastal Monitoring. *Drones* **2025**, *9*, 49, doi:10.3390/drones9010049.
16. Giordano, C.M.; Girelli, V.A.; Lambertini, A.; Mandanici, E.; Tini, M.A.; Archetti, R.; Ponti, M.; Zanutta, A. Evaluating Direct Georeferencing of UAV-LiDAR Data Through QGIS Tools: An Application to a Coastal Area. *Remote Sensing* **2026**, *18*, 7, doi:10.3390/rs18010007.
17. Chiabrando, F.; Giulio Tonolo, F.; Lingua, A. UAV DIRECT GEOREFERENCING APPROACH IN AN EMERGENCY MAPPING CONTEXT. THE 2016 CENTRAL ITALY EARTHQUAKE CASE STUDY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2019**, *XLII-2-W13*, 247–253, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-247-2019.