

Piattaforma UAV per l'acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica di immagini di scavi archeologici e strutture architettoniche

Daniele Sarazzi (*), Lorenzo Mancon (*),
Francesca Julitta (*), Andrea Quartieri (**)

(*) Zenit s.r.l., Busto Arsizio (VA)
(**) Eye-Sky s.r.l., Bologna

Abstract

Nel 2007 Zenit s.r.l. ha introdotto sul mercato italiano l'applicazione di strumenti automatici per la ripresa aerea di prossimità, focalizzandosi in particolare sullo sviluppo di un sistema fotogrammetrico basato su una piattaforma UAV. Il sistema è caratterizzato da un velivolo VTOL-UAV (md4-200/md4-1000) dotato di software di navigazione sviluppato da microdrones GmbH che consente di realizzare con estrema precisione il piano di volo con i relativi scatti al fine di assicurare la copertura fotogrammetrica e di automatizzare tutte le procedure in volo. In questo modo la piattaforma può essere sollevata in volo e procederà autonomamente ad acquisire una copertura stereofotografica dalla quale è possibile estrarre con strumenti software modelli 3D e cartografia di dettaglio.

Questo tipo di fotogrammetria di prossimità applicato al rilievo di scavi archeologici e di strutture architettoniche permette di superare due dei maggiori limiti legati ai metodi tradizionali e al rilievo da stazione laser terrestre: tempi di esecuzione molto lunghi e rappresentazione piana della terza dimensione.

Il rilievo da micro UAV garantisce, infatti, una misurazione precisa di superfici e volumi, la restituzione di un modello 3D e permette di effettuare indagini multitemporali grazie alla ripetibilità dei voli, con identici parametri, in qualsiasi momento.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di sviluppare una metodologia al fine di realizzare un Modello Digitale della Superficie (DSM), misurazioni fotogrammetriche e volumetriche e modellazioni 3D delle aree indagate attraverso 3 steps principali:

- pianificazione del volo
- georeferenziazione speditiva
- elaborazione fotogrammetrica

Tale metodologia è stata raffinata nel corso degli anni assommando esperienze, casi di studio e confrontando metodi di ripresa e di restituzione. Nel presente lavoro viene trattata l'applicazione di tale metodologia per il rilievo di due siti archeologici e di una struttura architettonica.

Introduzione

Il presente lavoro di ricerca nasce dall'esigenza di realizzare rappresentazioni 3D degli scavi archeologici e di strutture architettoniche superando i limiti legati all'utilizzo di tecniche tradizionali che richiedono in genere tempi lunghi di acquisizione e rappresentazione piana (tramite isoipse) della terza dimensione con grave perdita di informazioni.

L'introduzione del laser scanner circa una decina di anni fa ha risolto solo parzialmente il problema, ma permangono i problemi relativi ai tempi lunghi di scansione e alle occlusioni. Pertanto il campo di applicazione di questa tecnica è limitato a contesti piuttosto elementari e soprattutto in cui non è richiesta una standardizzazione del processo.

Un ulteriore motivo che rende interessante l'utilizzo di questo tipo di piattaforma nell'ambito dei rilievi archeologici è dato dalla possibilità di effettuare indagini multitemporali, il volo, infatti, è ripetibile, con identici parametri, in qualsiasi momento.

Pertanto Zenit srl sta sviluppando una metodologia di automazione di ripresa aerea di prossimità, di acquisizione immagini ed elaborazione fotogrammetrica attraverso la piattaforma UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

La metodologia in seguito descritta è frutto di sperimentazioni condotte in diversi siti archeologici dal 2007 ad oggi (Pieve di San Pietro in Pava (SI), Parco di Veio (RM), San Piero ad Axo (SI) rispettivamente nel 2007/2008, 2009 e 2010) perfezionata di volta in volta grazie anche all'introduzione di significativi avanzamenti tecnologici che hanno permesso di ottenere risultati sempre più soddisfacenti in tempi sempre più ridotti.

Materiali e metodi

Il sistema di rilievo utilizzato MD4-200 è un UAV della classe VTOL (*Vertical Take-off and Landing*), un elicottero quadrirotore senza pilota a bordo, radiocomandato, in grado di seguire automaticamente una rotta pianificata a priori; solo nelle fasi di decollo e atterraggio può essere necessario l'intervento di un operatore a terra attraverso un sistema di teleoperazione, inoltre decolla e atterra verticalmente da qualsiasi tipo di superficie slegandosi totalmente dalla necessità di avio superfici preparate allo scopo.

La struttura è in fibra di carbonio *water-protected*, che conferisce all'apparecchio robustezza e leggerezza, il peso complessivo è di 900 grammi, diametro inferiore a 1 metro, massima capacità di carico di 200 grammi. La propulsione è affidata a 4 motori elettrici *brushless* senza ingranaggi, il velivolo pertanto è estremamente silenzioso (<63dBA a distanza di 3m). Il sistema è alimentato da batterie Litio-polimero da 14,8 V e 2300 mAh che consentono un'autonomia di volo di circa 20 minuti c/a in condizioni standard.

Il drone è dotato di un ricevitore gps, di un magnetometro, accelerometri e giroscopi, l'integrazione di tutti questi sottosistemi consente di eseguire automaticamente un piano di volo pre-programmato su base cartografica, o se richiesto di mantenere precisamente la propria posizione. Il sistema di posizionamento GPS e i sensori di volo consentono inoltre di contrastare l'azione del vento in assenza di comandi da parte dell'operatore, migliorandone la stabilità.

Per quanto concerne le performance operative il drone ha sviluppo massimo della rotta di 2 km ad una quota massima di 500 m; le velocità sono comprese tra 0,1 – 5 m/s per la traslazione rettilinea orizzontale, 0,1 – 3 m/s per quella verticale, 10 – 90 deg/s per la rotazione intorno al proprio asse.

I *payloads* utilizzati nei casi di studio sono: una fotocamera Pentax Optio A40 a 12 megapixel calibrata per l'utilizzo aereo fotogrammetrico (4000 x 3000 pixel) con stabilizzazione dell'immagine e controllo dello scatto I/R. Tutti gli apparati di ripresa sono montati sul drone MD4-200 con un castello in fibra di carbonio dotato di un asse servo-assistito e controllabile da radiocomando con 100° di movimento di tilt, ciò rende possibili sia riprese nadirali che frontali.

Il sistema si completa con un datalink a 2.4 GHz che in tempo reale restituisce a terra, ad una GCS (*Ground Control Station*), l'inquadratura dei sistemi di ripresa e le telemetrie di volo per un costante monitoraggio del rilievo in corso.

| CARATTERISTICHE TECNICHE md4-200 | |
|---|----------------------------------|
| Peso a vuoto | 585 g |
| Carico massimo | 200 g |
| Peso al decollo | 1000 g |
| Diametro in assetto di volo | 100 cm |
| Alimentazione | LiPo 2300mAh |
| Eliche | Peso 8 g rotazione 1800/2100 rpm |
| Autonomia | 20 min |
| Distanza operativa | 500 – 2000 m |
| Sviluppo massimo della rotta | 2 km |
| Umidità | < 80% |
| Temperatura | 0 – 40 ° C |
| Velocità del vento | 4 m/s (per immagini di qualità) |
| Altitudine da terra | < 150 m |
| Quota massima di decollo | < 3000 m slm |
| Velocità di salita | 2,5 m/s |
| Velocità di discesa | 1,5 m/s |
| Velocità massima di traslazione | 5 m/s |
| Velocità massima di rotazione | 90 deg/s |

Tabella 1 – Tabella riassuntiva delle caratteristiche tecniche del microdrones md4-200.

La metodologia prevede come prima fase **l'identificazione dell'area** di studio, presupposto necessario alla fase di pianificazione del volo, da eseguire su base cartografica, in ambiente GIS.

Innanzitutto si delimitano i confini del sito e si determina l'estensione da rilevare, si caratterizza l'area di indagine nel modo più completo per poter procedere alla fase di pianificazione del volo: studio morfologico del terreno, copertura vegetale, presenza di eventuali ostacoli naturali o strutture antropiche che potrebbero interferire con il volo, scarti in quota ed ogni altra particolarità. Inoltre, tutte le informazioni altimetriche, a qualsiasi risoluzione vengono computate a generare un DEM dell'area.

La fase di **“Pianificazione del volo automatico”** viene anch'essa eseguita su base cartografica in ambiente GIS attraverso un software di pianificazione del volo (appositamente sviluppato) che richiede come dati in ingresso: dimensione e forma dell'area di indagine (nel formato di *shapefiles*), del *Ground Sample Distance* richiesto e dei parametri della fotocamera montata sul drone e relativi settaggi. A partire, quindi, dalla scala finale dell'immagine che si vuole ottenere e dalla distanza focale della camera viene derivata la quota di volo. A seconda del tipo di utilizzo che si intende fare delle immagini acquisite si impostano i valori di *Overlap* e *Sidelap*. Il software restituisce come output il numero e l'orientamento ottimale delle strisciate e dei *waypoints* che il drone deve percorrere per coprire completamente l'area indagata con il minor numero di immagini. L'output è uno script di volo caricato sul drone ed eseguito in completa autonomia, per garantire la massima precisione di posizionamento.

Il volo segue una serie di waypoints in corrispondenza dei quali ha luogo una serie di eventi programmati: semplice transito, stazionamento, variazione di quota e azimuth, osservazione di un

punto fisso in rotta circolare, scatto, regolazione dello zoom e dell'assetto della camera.

Il ricevitore gps, il magnetometro e gli accelerometri, situati nella calotta, permettono al drone di eseguire automaticamente il piano di volo pre-impostato e di mantenere la propria posizione, contrastando l'azione del vento in assenza di comandi da parte dell'operatore, migliorando la stabilità dell'apparecchio e la qualità delle riprese.

La pianificazione del volo automatico presenta una serie di vantaggi:

- ottimizzare il numero di scatti per coprire integralmente l'area, in funzione di overlap e sidelap (sovrapposizione tra fotogrammi e tra strisciate)
- minimizzare i tempi di intervento e programmare con precisione riprese complesse
- effettuare riprese zenitali e oblique, su superficie piana, su pendio e in rotta circolare intorno a un obiettivo fisso (edificio, campanile, ciminiera, ecc.)
- mantenere costante la footprint anche in condizioni di acclività (riprese su pendio)
- effettuare indagini multitemporali.
- è possibile sostituire immediatamente immagini di qualità non ottimale (a causa, ad esempio, dell'intrusione imprevista di altri soggetti, di variazioni improvvise di luce, ecc.)
- eseguire un volo più preciso di quello manuale, in caso di condizioni meteo sfavorevoli, in particolare con presenza di vento di una certa intensità.

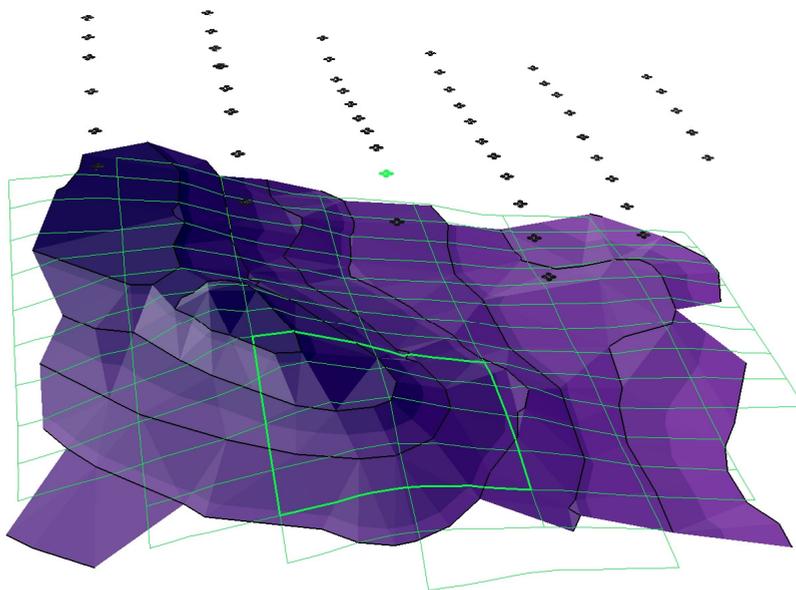


Figura 1 – Stazioni di scatto e copertura dei fotogrammi proiettata du DTM.

Successivamente si procede con **la fase di posizionamento e rilevamento di punti di controllo (GCP).**

A questo punto si è passa alla **fase di presa** con acquisizione dei fotogrammi durante l'esecuzione del volo.

Nella tabella sottostante sono riportati alcuni dati relativi al rilevamento per i diversi siti considerati.

| SITO | PAVA | VEIO I | VEIO II | MONTALCINO |
|----------------|-------------------------|--------------|----------------|-----------------|
| Anno rilievo | 2007/2008 | 2010 | 2010 | 2010 |
| Mese rilievo | Luglio Luglio/Agosto | - Aprile | Aprile | Luglio |
| Durata rilievo | 5 gg | 4 gg | 2 gg | 2 gg |
| Orario di volo | 7.00–8.00 am | 7.00–8.00 am | 7.00 – 8.00 am | 7.00 – 12.00 am |
| Quota di volo | 25m | 40m | 40m | 100m |
| n° immagini | 112 | 35 | 5 | 58 |
| n°GCP | 175 | 7 | 4 | 15 |
| Superficie | 55 x 52 m | 38 x 30 m | 27 x 9 m | 250 x 350 m |

Tabella 2 – Tabella riassuntiva dei casi diversi considerati.

Per ottenere la migliore qualità delle immagini acquisite è consigliabile eseguire il volo cercando di minimizzare i potenziali fattori di disturbo, quali: vento, termiche, ombre, presenza di persone e attrezzature nello scavo.

Al termine del volo è sempre possibile scaricare le immagini dal drone al PC e verificare le telemetrie che contengono le informazioni essenziali di assetto dell' UAV al momento dello scatto. Il software di gestione consente l'immediato trattamento delle informazioni raccolte e le immagini entrano immediatamente in un GIS.

E' possibile effettuare una **Georeferenziazione speditiva** delle immagini acquisite con accuratezza sufficiente ad avere una mappatura ed una contestualizzazione visiva delle entità dello scavo rappresentate in ambiente GIS.

Una volta acquisite le immagini di qualità e scala adeguate all'obiettivo preposto, è possibile trattarle con **elaborazioni fotogrammetriche** mediante procedura semi-automatica, per estrarre ortofoto, modelli digitali del terreno, modelli 3D, temi vettoriali, etc., di diverso dettaglio.

Il software utilizzato per effettuare questo tipo di elaborazione è Photomodeler Scanner, che normalmente è utilizzato per modellizzare oggetti di dimensioni più contenute e che permette di estrarre nuvole di punti a partire da blocchi fotogrammetrici ottenuti attraverso il riconoscimento di punti di legame tra le immagini.

Nell'ambito del presente lavoro i punti di legami sono posizionati manualmente da operatore esperto su più foto con la precisione del pixel. A seconda della complessità morfologica dell'area di studio e del contrasto di colore, varia il numero di punti da assegnare per assicurare una buona precisione; ciò ha permesso di assicurare un'elevata precisione del prodotto finale. Tuttavia sono in corso sperimentazioni per automatizzare il più possibile l'identificazione dei punti su base geometrica e spettrale al fine di velocizzare l'elaborazione a parità di risultato.

Successivamente il software orienta i blocchi fotogrammetrici con procedura automatica e si può procedere con la georeferenziazione ed ortorettifica.

Prima di procedere con l'estrazione delle nuvole di punti le immagini vengono trattate al fine di incrementare la qualità del risultato attraverso "idealizzazione" e quindi rimozione delle distorsioni dovute alla lente della fotocamera e all'eccentricità del sensore rispetto all'asse della lente e definizione delle "aree di Trim", ossia ritaglio del fotogramma in modo da escludere le porzioni non calibrate.

Una volta estratte le nuvole di punti (Point Mesh) rappresentanti l'andamento della superficie tramite griglia a passo regolare (variabile a seconda del dettaglio che si vuole ottenere), si è reso necessario implementare una procedura che permettesse di trattare elevate densità di punti e mantenere alta la precisione.

Pertanto è stata sviluppata un'applicazione in Arcgis che permette di importare le Mesh in ambiente GIS da Photomodeler. Le singole nuvole di punti vengono sommate per ottenere un'unica nuvola totale con passo regolare stabilito dall'operatore. Questo avviene mediante l'applicazione di un tipo di interpolazione scelto sulla base delle caratteristiche della superficie indagata, a seconda dell'omogeneità della superficie in termini di copertura vegetale e di uso del suolo (presenza o meno di manufatti).

Il passaggio successivo è quello di creare un DSM (Digital Surface Model) 2D ½ e di renderlo disponibile per ulteriori elaborazioni come elemento raster georeferenziato in ambiente GIS; la semplice estrazione dell'ombreggiatura orografica permette di apprezzare il dettaglio della modellazione 2D ½.

Nel caso in cui si voglia estrarre un'ortofoto è possibile esportare la *Point Mesh* totale in Photomodeler Scanner e, a seguito di alcune elaborazioni, esportarla come file immagine.

L'ortofoto può essere importata in ambiente GIS, georeferenziata e sovrapposta al modello 2D ½. Questo procedimento permette di avere come risultato un dato riscontrabile sia in ambiente cartografico che nell'ambito della pianificazione tridimensionale dei voli.

| SPECIFICHE CAMERA | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| SITO | PAVA | VEIO I | VEIO II | MONTALCINO |
| Modello fotocamera | Pentax Optio A40 | Pentax Optio A40 | Pentax Optio A40 | Pentax Optio A40 |
| Risoluzione | 7Mp (3072x2304) | 12Mp (4000x3000) | 12Mp (4000x3000) | 12Mp (4000x3000) |
| Distanza Focale | 7.9 mm | 7.9 mm | 7.9 mm | 7.9 mm |
| tipologia sensore | 1/1.7"(7.600mm, 5,700mm) | 1/1.7"(7.600mm, 5,700mm) | 1/1.7"(7.600mm, 5,700mm) | 1/1.7"(7.600mm, 5,700mm) |
| Dimensione pixel | 1,9 micron | 1,9 micron | 1,9 micron | 1,9 micron |
| Livello di zoom | 1 X | 1 X | 1 X | 1 X |

Tabella 3 – Tabella riassuntiva delle caratteristiche della fotocamera impiegata nei rilievi.

Risultati

| RISULTATI | | | | |
|-------------------|-------|--------|---------|------------|
| SITO | PAVA | VEIO I | VEIO II | MONTALCINO |
| N° Mesh | 40 | 16 | 4 | 47 |
| Total Points Mesh | 42000 | 20000 | 70000 | 480000 |
| Pixel size | 30 mm | 20 mm | 20 mm | 75 mm |
| Root Mean Square | 0,429 | 0,538 | 0,355 | 0,585 |

Tabella 4 – Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti

Al termine del processo fotogrammetrico, a partire dalla nuvola di punti georeferenziati e quotati, attraverso tecniche di modellazione spaziale si sono estratti i modelli di rappresentazione 2D e ½ in ambiente GIS assegnando ad ogni punto a terra una quota mediante rappresentazione raster (ESRI GRID) e applicando la componente ombreggiatura come illustrato nella figura sottostante.

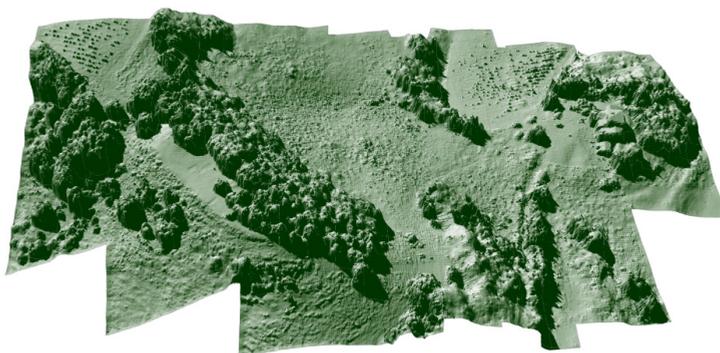


Figura 2 – Modello 2D ½ relativo al sito archeologico di S.Piero ad Axo.

L'immagine seguente illustra il modello 2D e ½ a passo 3 cm relativo al sito archeologico di Pava (SI) rappresentante una superficie di 55 x 52 m con uno scarto quadratico medio pari a 0,429. Tale modello è stato ottenuto a partire dall'estrazione di 40 Mesh (a passo 3 cm), da cui sono stati estratti 8 milioni e mezzo di punti quotati sull'intera superficie per un numero di 112 immagini di partenza acquisite alla quota di 25 m.

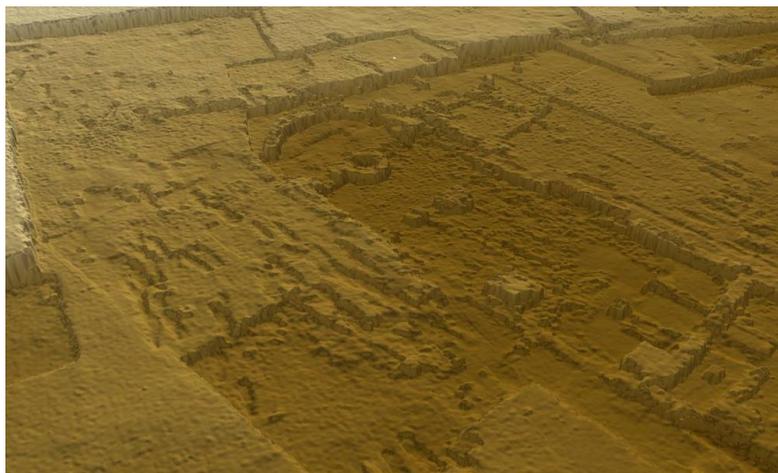


Figura 3 – Modello 2D ½ relativo al sito archeologico di Pava.

Il terzo caso di studio, che riguarda il Parco di Veio nei pressi di Roma (Italia), ha portato alla produzione di due modelli 2D e ½ e successivamente di due ortofoto rappresentanti due porzioni del sito di diversa dimensione, che pertanto sono stati elaborati in modo differente e hanno portato a risultati diversi data la differente scala di rappresentazione.

La porzione maggiore del sito occupa una superficie di 38 x 30 m che è stata ripresa da una quota pari a 40m con una copertura di 35 immagini. Sono stati estratti 5,5 milioni di punti quotati a partire da un totale di 16 Mesh per arrivare all'estrazione del modello finale a passo 2 cm. In questo caso lo scarto quadratico medio è di 0,538.



Figura 4 – Ortofoto estratta dal modello dell'area archeologica di Veio (area grande).

La porzione minore del sito occupa, invece, una superficie di soli 27x9 m ed è stata ripresa dalla medesima quota (40 m) con 5 immagini. E' stato elaborato il modello 2D e 1/2 a passo 2 cm a partire da 4 Mesh per un totale di 2,1 milioni di punti quotati e con uno scarto quadratico medio di 0,355 (ossia il valore in assoluto più basso tra i vari casi di studio considerati) ed è stata estratta l'ortofoto a passo 1 cm.



Figura 5 – Modello con applicata l'ortofoto relativo al sito archeologico di Veio, area piccola.

Attualmente si sta lavorando alla ricostruzione fotogrammetrica acquisendo immagini tramite UAV di strutture a sviluppo verticale come palazzi, torri, altri tipi di edifici o sculture che richiedano una vista “dall’alto” per poter avere una vista completa del manufatto.

Il progetto attualmente in lavorazione è la ricostruzione fotogrammetrica della torre di palazzo

d'Accursio a Bologna utilizzando gli strumenti citati per i casi precedenti, ma con diverso approccio allo schema di volo, questa volta a sviluppo verticale vista l'entità del soggetto da fotografare. Essendo ancora in fase di lavorazione non è possibile fornire dati precisi sulle precisioni ottenute dal modello, ma si può ipotizzare che l'errore massimo ottenuto sul modello finale sarà di circa 2cm.



Figura 6 – Nuvole di punti estratte per la torre di palazzo D'Accursio.

Discussione - Conclusioni

Dal 2007 sono stati eseguiti diversi rilievi fotogrammetrici su diversi siti archeologici al fine di restituire immagini e modelli tridimensionali utili alle indagini archeologiche. I rilievi sono stati eseguiti utilizzando una piattaforma UAV, cioè un mezzo senza equipaggio controllato da remoto in grado di acquisire immagini autonomamente (Eisenbeiss, 2008). Equipaggiando l'UAV con una fotocamera di piccole o medie dimensioni è possibile considerarlo a tutti gli effetti uno strumento per eseguire rilievi fotogrammetrici da corta o media distanza, in grado di fornire risultati rapidamente apprezzabili contenendo costi e una valida alternativa ai classici strumenti di misurazione utilizzati nell'archeologia.

Nei casi sopra descritti è stata utilizzata una delle piattaforme prodotte da Microdrones, il quadrotore Md4-200, che è in grado di raggiungere aree difficilmente accessibili, di effettuare voli preimpostati in modo autonomo e preciso, di ripetere lo stesso volo più volte a distanza di giorni, e di fornire immagini e telemetrie in tempo reale trasmettendole alla base-station a terra oltre ad essere facile da utilizzare anche da un solo operatore e facilmente trasportabile.

Per quanto riguarda il rilievo fotogrammetrico ed il modello tridimensionale ricavato dalle immagini si può affermare che il livello di dettaglio è elevato e adatto al rilievo di vaste aree di scavo. Il punto di forza nell'impiego dell'UAV è la velocità nella copertura fotogrammetrica di vaste aree, ripetibile giorno per giorno, ottenendo uno storico dei progressi dello scavo con modelli tridimensionali a medesima scala e quindi perfettamente confrontabili mantenendo i costi contenuti. Affiancando il drone alle metodologie classiche di rilievo archeologico come il laser scanner ed accorpando i dati ottenuti con le due tecniche in un unico progetto è possibile ricavare modelli tridimensionali completi, accurati e dettagliati.

In conclusione a partire dai primi rilievi ed elaborazioni del 2007 la qualità dei risultati è migliorata

grazie a sviluppi da un punto di vista tecnologico, determinati soprattutto da una migliore stabilità del drone durante le riprese, e sotto il profilo metodologico grazie all'ottimizzazione della pianificazione del volo. Attualmente risulta notevolmente migliorata la qualità e l'efficacia dei risultati in termini di dettaglio e ottimizzati i tempi e conseguentemente i costi delle operazioni di rilievo.

Riferimenti Bibliografici

- Barazzetti L., Roncella R., Forlani G., Remondino F., Scaioni M., *Orientamento automatico di blocchi fotogrammetrici in ambito close-range: stato dell'arte e prospettive della ricerca*; Geomatica, le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto, 10-11 Febbraio, Pavia.
- Campana S., Francovich R. 2005. *Seeing the Unseen. Buried Archaeological Landscapes in Tuscany*, Taylor & Francis, The Netherlands, pp.67-76.
- Colomina I., Blázquez M., Molina P., Parés M.E., Wis M., 2008. *Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008, pp 1201-1206.
- Eisenbeiss, H., 2008. *UAV photogrammetry in plant sciences and geology*, in 6th ARIDA Workshop on "Innovations in 3D Measurement, Modeling and Visualization", Povo (Trento), Italy.
- Eisenbeiss H., Lambers K., Sauerbier M., Li Z., 2005. *Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter*, in CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy.
- Püschel H., Sauerbier M., Eisenbeiss H., 2008. *A 3D model of castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images*. ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology), Institute of Geodesy and Photogrammetry
- Schiaparelli, L. 1929-1933, *Codice Diplomatico Longobardo*, Roma.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti di Siena con cui Zenit collabora dal 2007 sui rilievi nei siti archeologici.