

Studio delle potenzialità delle piattaforme UAV nel campo del rilievo dei Beni Culturali

Mauro Lo Brutto (*), Paola Meli (*), Francesca Ceccaroni (**), Marco Casella (**)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali - Università di Palermo
Viale delle Scienze, 90128 Palermo

e-mail {mauro.lobrutto, paola.meli}@unipa.it

(**) Menci Software srl, loc. Tregozzano 87, 52100 Arezzo

e-mail {francesca.ceccaroni, marco.casella}@menci.com

Riassunto

L'uso di piattaforme aeree senza pilota a bordo (UAV) sta diventando sempre più frequente nel campo del rilievo fotogrammetrico soprattutto grazie ai numerosi vantaggi che tali sistemi presentano rispetto alle classiche riprese di fotogrammetria aerea. Il lavoro condotto descrive i primi risultati ottenuti utilizzando sistemi UAV per il rilievo di Beni Culturali. Lo studio è stato svolto acquisendo alcuni dataset relativi a siti archeologici; tali dataset presentano caratteristiche differenti in relazione ai velivoli utilizzati, alle caratteristiche dei voli ed all'estensione delle aree rilevate. Il lavoro ha permesso di eseguire delle prime valutazioni sulla precisione metrica degli orientamenti e sul livello di dettaglio ottenuto dai modelli 3D e dalle ortofoto.

Abstract

The use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is becoming very common for photogrammetric survey especially due to numerous advantages that present compared to classic aerial photogrammetry. The work carried out describes the first results obtained using different UAV systems for surveys in Cultural Heritage study. The work was carried out by acquiring some datasets relating to archaeological sites; these datasets have different characteristics in relation to the type of used vehicle, flight characteristics and extension of the surveyed areas. Some evaluations were also carried out about the metric precision of the images orientations and the level of detail obtained from 3D models and orthophotos.

Introduzione e stato dell'arte

Il rilievo di Beni Culturali, come siti archeologici o centri storici, che si sviluppano su aree di estensioni variabili, anche dell'ordine di qualche chilometro quadrato, è sempre stato abbastanza problematico per la mancanza di strumenti adeguati che permettono di colmare il gap tra i classici rilievi fotogrammetrici aerei e i rilievi terrestri (topografici, fotogrammetrici o laser scanner). Negli ultimi anni questo gap è stato colmato dallo sviluppo di piccole piattaforme aeree a pilotaggio remoto (micro e mini UAV o *Unmanned Aerial Vehicle*, detti anche "droni") che consentono sia di eseguire rilievi aerei a bassa quota, generalmente in un *range* compreso tra i 20 e i 200 metri, sia l'acquisizione di dati metrici e qualitativi di dettaglio (Eisenbeiss et al, 2011). Gli UAV, nati principalmente per applicazioni militari, si stanno infatti diffondendo molto rapidamente in ambito civile; la loro diffusione è dovuta principalmente alla possibilità di ottenere immagini dell'area di interesse con numerosi vantaggi quali rapidità nell'esecuzione del rilievo, possibilità di mappare aree difficilmente accessibili, risoluzione delle immagini maggiore rispetto a quella ottenibile dalla tradizionale fotogrammetria aerea, costi contenuti delle fasi di acquisizione.

Gli UAV possono volare autonomamente o attraverso controllo remoto e sono in grado di caricare una vasta gamma di sensori come ad esempio fotocamere digitali, termocamere o, in alcuni casi,

anche sensori laser scanner. Esistono diverse tipologie di velivoli classificabili in funzione del peso, delle caratteristiche del motore, del carico trasportabile (*payload*), della massima distanza percorribile, della quota di volo, del tipo di ala (fissa o rotante); in accordo con la classificazione effettuata dalla associazione internazionale *UAVS (Unmanned Aerial Vehicle) International* i velivoli possono essere suddivisi in tre grandi categorie: tattici, strategici e per scopi speciali (Remondino et al., 2011). Gli UAV utilizzati per scopi fotogrammetrici appartengono in genere agli UAV tattici ed in particolare alle sub categorie mini e micro UAV. Negli ultimi anni si è assistito alla loro diffusione soprattutto nel settore del rilievo architettonico ed archeologico (Pueschel et. al, 2008; Chiabrando et al., 2011; Seitz&Altenbach, 2011; Lo Brutto et al. 2012); una delle principali applicazioni in questo ambito è sicuramente quello per la realizzazione di modelli digitali del terreno (DTM o DSM) e di ortofoto con elevata accuratezza e risoluzione geometrica. Il flusso di lavoro viene in genere suddiviso in tre fasi: pianificazione del volo, acquisizione delle immagini e calcolo degli orientamenti e degli elaborati finali. Ciascuna fase presenta problematiche e caratteristiche proprie che dipendono da vari fattori. La pianificazione del volo dipende dalle caratteristiche della piattaforma da cui a sua volta dipendono il *payload*, che influenza la scelta del sensore da utilizzare, e l'autonomia di volo, che determina l'estensione dell'area da rilevare. La fase di acquisizione è influenzata dalla morfologia del sito, dalla presenza di “pericoli” per il volo (ostacoli), dalle condizioni meteorologiche (in particolare dalla presenza di venti). Il processamento delle immagini è fortemente influenzato dalla notevole irregolarità dei blocchi fotogrammetrici e dall'elevato numero di immagini necessarie per una completa copertura delle aree di studio. Diverse sperimentazioni sono state effettuate per quest'ultimo aspetto, mettendo a confronto software derivanti dalla Computer Vision e classici programmi fotogrammetrici (Neitzel 2011; Verhoeven et al., 2011; Lo Brutto et al., 2012).

L'attività svolta nel presente lavoro ha lo scopo di effettuare una prima valutazione sulle potenzialità delle piattaforme UAV nel campo del rilievo dei beni culturali attraverso l'analisi di diversi dataset che si differenziano per la tipologia dei velivoli utilizzati, per le caratteristiche dei voli e per l'estensione delle zone riprese. In particolare, in questo lavoro vengono espone le operazioni condotte per il rilievo di tre differenti aree: due aree di piccola estensione all'interno della Valle dei Templi di Agrigento e una abbastanza ampia nel sito archeologico di Selinunte (Trapani). I velivoli utilizzati per questa sperimentazione sono: un quadricottero della *Microdrones* con il quale sono state acquisite le immagini delle due aree all'interno della Valle dei Templi e un velivolo ad ala fissa della *Sensefly* utilizzato per il sito archeologico di Selinunte.

I velivoli utilizzati si differenziano per operatività, autonomia di volo, quota di volo, modalità di acquisizione. Il quadricottero, come tutti i velivoli a eliche, ha resistenza al vento inferiore e può volare a quote di volo anche molto basse (20 metri); inoltre, ha una maggiore flessibilità in fase di acquisizione in quanto consente di effettuare prese sia nadirali che inclinate grazie alla possibilità di ruotare la camera. Il velivolo ad ala fissa invece ha resistenze al vento maggiore, vola a quote sempre superiori (in genere intorno ai 100-120 metri) e consente l'esecuzione soltanto di prese nadirali secondo il classico schema di fotogrammetria aerea. I due velivoli, pur appartenendo alla stessa grande categoria dei micro UAV, e pur avendo campi di applicazione simili, si differenziano su alcuni aspetti principali relativi ai prodotti ottenibili: rilievi a grandissima scala (pixel 1 o 2 cm) di zone molto limitate nel caso del quadricottero, rilievi a grande scala (pixel circa 5 cm) di aree anche estese qualche chilometro quadrato per il velivolo ad ala fissa. Per tale motivo i due velivoli possono essere considerati come strumenti che si integrano nell'ambito delle problematiche del rilievo aereo di prossimità e potrebbero essere utilizzati su una stessa area per avere un rilievo generale a grande scala e dei rilievi puntuali e di dettaglio sugli elementi di maggiore interesse. Nel lavoro sono state anche condotte alcune analisi per valutare la precisione metrica degli orientamenti al variare dello schema di acquisizione delle immagini e sono stati analizzati i modelli 3D e le ortofoto prodotti.

Descrizione delle piattaforme utilizzate

Per l'acquisizione dei dati sono stati utilizzati due velivoli aventi caratteristiche e prestazioni differenti. Il primo è il modello *md4-200* della *Microdrones*, un elicottero quadricotore con struttura in fibra di carbonio, dal peso complessivo di 900 gr, con un diametro inferiore a 1 metro (Figura 1a). Questo velivolo fa parte della classe VTOL (*Vertical Take-off and Landing*) ed è dotato di diversi sensori (accelerometri, giroscopi, magnetometro, barometro, GPS) che consentono l'esecuzione di voli programmati e gli conferiscono maggiore stabilità. Il velivolo, il cui sistema di propulsione è costituito da 4 motori elettrici, ha un carico utile di 200 gr, un raggio d'azione pari a circa 500 m e un'autonomia di volo di circa 20 minuti; può, inoltre, volare fino ad una velocità del vento non superiore a 4 m/s. Il sistema di controllo è composto da un computer su cui è installato il software proprietario (*mdCockpit*) che fornisce informazioni riguardo lo stato del velivolo, il livello della batteria, la posizione, l'altitudine, il numero di satelliti disponibili per il posizionamento GPS, velocità e tempo di volo. I sensori utilizzati per le riprese sono montati su di una struttura in fibra di carbonio che permette rotazioni rispetto all'orizzontale pari a 100° e quindi offre l'opportunità di effettuare riprese sia nadirali sia frontali.

Il secondo velivolo utilizzato è un drone planante *Swinglet CAM* di *Sensefly* del tipo ad ala fissa con struttura molto leggera, solo 500 gr, realizzata in polistirolo espanso con un'elica nel lato posteriore e una apertura alare di 80 cm (Figura 1b). Il velivolo vola in genere a una quota intorno ai 100-120 metri, ha un'autonomia di volo di 30 minuti e, in condizioni standard, può coprire un'area fino a 4 kmq in un unico volo. La dotazione di diversi tipi di sensori, GPS, giroscopio, accelerometri, etc. lo rende una piattaforma estremamente stabile e dal facile utilizzo. Il decollo viene eseguito tramite il lancio da parte di un operatore mentre l'atterraggio avviene automaticamente in una area libera avente un diametro di circa 40 m. Ha una stabilità al vento superiore rispetto al multicottero in quanto può volare fino a una velocità del vento che arriva ai 7 m/s. Il velivolo funziona tramite radiocontrollo da PC attraverso il software in dotazione (*eMotion*) che consente di pianificare, simulare, monitorare e controllare la traiettoria del velivolo sia prima che durante il volo.



(a)



(b)

Figura 1 – UAV utilizzati: *md4-200* della *Microdrones* (a), *Swinglet CAM* della *Sensefly* (b)

Descrizione delle aree di studio

Come detto precedentemente con i due velivoli in dotazione sono stati realizzati differenti dataset; in particolare, con il quadricottero *md4-200* della *Microdrones* sono state realizzate le riprese di due zone all'interno del Parco Archeologico della Valle dei Templi ad Agrigento. Le zone selezionate sono l'area del Tempio di Iside, scavata solo parzialmente, ed una parte del Quartiere ellenistico-romano, da cui si evince con chiarezza la struttura dell'impianto urbano (Figura 2). Le due zone sono tra i siti meno conosciuti dell'intero Parco Archeologico e quindi poco frequentati dai turisti.

Il Tempio di Iside presenta un podio e un triportico che delimita una piazza. L'interno racchiude una cella preceduta da un pronao e seguita da un avancorpo su podio, accessibile mediante due rampe laterali; il triportico era contraddistinto da sessantadue colonne e due mezze colonne terminali.

Il Quartiere ellenistico-romano, costituito da circa venti abitazioni, si dispone su terrazzi degradanti inseriti secondo un regolare schema urbanistico in tre isolati (*insulae*), definiti dall'incrocio delle vie principali est-ovest (*decumani*) con le strade minori nord-sud (*cardines*). Il rilievo da drone ha interessato soltanto una delle *insulae* e in particolare quella situata a sud-ovest.

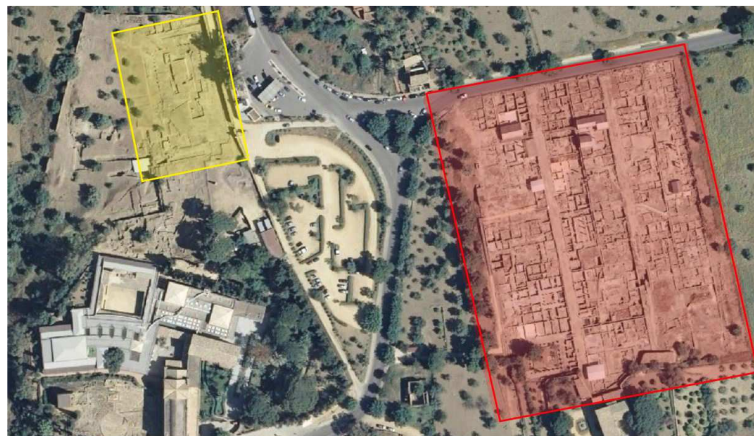


Figura 2 – Area del Tempio di Iside (in giallo) e del Quartiere ellenistico-romano (in rosso)

Con il drone planante *Swinglet CAM* della *Sensefly* è stata invece ripresa una zona nel Parco archeologico di Selinunte che, con i suoi 290 ettari, è uno dei siti archeologici più grandi d'Europa. Il sito è costituito da quattro differenti aree: la collina Gaggera a ovest con il santuario della Malophòros, l'acropoli fortificata, la collina Manuzza a nord con l'antico abitato di impianto ippodameo e l'area sacra ad est. Vista la notevole estensione dell'intero sito il rilievo fotogrammetrico ha riguardato soltanto la porzione dell'acropoli e l'impianto urbano nella collina Manuzza (Figura 3).



Figura 3 – Area archeologica di Selinunte con l'indicazione della zona di studio (in rosso)

Progettazione ed esecuzione dei voli

Per il rilievo delle zone di studio sono stati progettati voli con strisciate orientate lungo direzioni perpendicolari. In considerazione dello sviluppo delle aree da rilevare, le direzioni di volo sono risultate coincidenti approssimativamente con le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest. La scelta di volare su più direzioni è stata fatta per potere disporre di dataset che consentissero di eseguire più prove in relazione alla conformazione geometrica di volo. Tutte le riprese sono state progettate imponendo un classico schema di prese fotogrammetriche aeree (prese nadirali) e con un ricoprimento longitudinale sempre pari all'80% e un ricoprimento trasversale pari al 70% e all'80% rispettivamente per il rilievo con il quadricotter *md4-200* e per quello con il drone planante *Swinglet CAM*. Per entrambi i velivoli sono state utilizzate camere digitali compatte; il quadricotter *md4-200* era fornito di una camera Pentax Optio RZ18 da 16 Megapixel con un obiettivo a zoom variabile da 4.5 mm a 81 mm, mentre il drone planante *Swinglet CAM* era equipaggiato con una camera Canon IXUS 125 HS da 16 Megapixel e obiettivo a zoom variabile da

4.3 mm a 21.5 mm. In entrambe le camere è stata impostata la modalità wide (minima distanza focale) e messa a fuoco a infinito. Soltanto per la camera Canon IXUS 125 HS si disponeva dei parametri di orientamento interno e di distorsione ricavati da una precedente calibrazione.

Tutti i voli sono stati eseguiti in modalità automatica seguendo il piano di volo; inoltre, per le riprese con il quadricotter *md4-200* è stata eseguita l'acquisizione di due immagini per ciascun *waypoint*, in modo tale da avere una minima ridondanza di dati.

L'area del Tempio di Iside interessata dal rilievo presenta un'estensione di circa 0.57 ha ed è stata ripresa con due voli (uno Nord-Sud e l'altro Est-Ovest); le quote relative di volo sono risultate pari a circa 71 metri per la ripresa Nord-Sud e a circa 65 metri per quella Est-Ovest a cui corrispondono rispettivamente un GSD (*Ground Sample Distance*) di circa 1.9 cm/pix e di circa 1.6 cm/pix.

Per le riprese dell'*insula* del Quartiere ellenistico-romano, avente un'estensione maggiore di quella del Tempio di Iside (0.67 ha), è stato necessario, per rientrare nei venti minuti dell'autonomia del velivolo, eseguire quattro voli (due per ogni direzione di volo). Le riprese sono state eseguite da una quota relativa di volo di circa 45 metri a cui corrisponde un GSD di 1.2 cm/pix.

Anche per il rilievo all'interno del Parco Archeologico di Selinunte ciascuna ripresa (Nord-Sud ed Est-Ovest) è stata suddivisa in due voli separati per rientrare nei trenta minuti dell'autonomia del velivolo. La quota di volo si è attestata attorno ai 160 metri consentendo di ottenere un GSD di circa 5 cm/pix. I voli sono stati eseguiti impostando uno scatto ogni 3 secondi. In considerazione della maggiore estensione dell'area (92 ha) è stato ottenuto un numero abbastanza elevato di immagini. Nella tabella 4 sono riassunte le caratteristiche principali dei voli.

Dataset	Estensione [ha]	Direzione voli	Ricoprimento longitudinale	Ricoprimento trasversale	Quota relativa di volo [m]	N. immagini	GSD [cm/pix]
Tempio di Iside	0.57	N-S	80%	70%	71	24	1.9
		E-O	80%	70%	65	27	1.6
Quartiere ellenistico-romano	0.67	N-S	80%	70%	45	56	1.2
		E-O	80%	70%	45	65	1.2
Selinunte	92	N-S	80%	80%	160	372	5.0
		E-O	80%	80%	160	320	5.0

Tabella 4 – Caratteristiche dei voli

Contestualmente alla ripresa sono stati posizionati e rilevati topograficamente dei target opportunamente dimensionati per le due aree (di dimensioni pari a 20 cm x 20 cm per le zone del Parco archeologico di Agrigento e di 40 cm x 30 cm per il Parco Archeologico di Selinunte) (Figura 5). A causa dell'elevato numero di immagini che normalmente vengono acquisite in queste applicazioni e dell'irregolarità dei blocchi fotogrammetrici, è spesso necessario misurare un numero di punti di appoggio piuttosto elevato. Ciò comporta l'utilizzo di tecniche di rilievo sufficientemente rapide, come il rilievo in RTK o NRTK, che prevedono precisioni nell'ordine di qualche centimetro. In realtà, tali precisioni possono essere anche peggiori a causa di errori che possono verificarsi durante la fase di rilievo e che non sempre possono essere evidenziati dai parametri di acquisizione (errori di centramento dovuti al fatto che in genere l'asta con l'antenna viene tenuta a mano da un operatore, cattive configurazioni satellitari, ecc.). Nel lavoro svolto le coordinate dei target sono state ricavate tramite rilievi RTK nel sistema di riferimento UTM-WGS84ETRS2000 utilizzando sempre una stazione master posizionata all'interno delle aree di rilievo, per non superare mai la distanza di un chilometro tra master e rover. Una prima valutazione sulla precisione è stata effettuata attraverso il calcolo degli s.q.m. ottenuti durante la fase di rilievo. Tale valore è risultato pari a circa $\pm 1 \div 2$ cm, come era prevedibile aspettarsi. Inoltre per avere una stima più precisa dell'accuratezza media delle coordinate dei punti di appoggio, si è scelto di misurare le coordinate dei target del dataset del Quartiere ellenistico-romano due volte in due giorni differenti. Il risultato del confronto tra le coordinate dei due rilievi ha consentito di calcolare uno

s.q.m. pari a ± 1.2 cm sia per la planimetria che per l'altimetria, con errori massimi soprattutto in quota anche nell'ordine dei 4 cm. Tale verifica, anche se statisticamente non rigorosa, da un'idea più realistica delle accuratezze dei punti di appoggio e delle precisioni massime ottenibili dal rilievo fotogrammetrico.



Figura 5 – Target utilizzati per il rilievo di Agrigento (a sinistra) e di Selinunte (a destra)

Procedure di orientamento

Le operazioni di orientamento delle immagini sono state condotte anche per effettuare alcune iniziali verifiche sulle potenzialità del rilievo fotogrammetrico da drone. I voli relativi alle due aree di studio (Tempio di Iside e Quartiere ellenistico-romano da una parte e acropoli di Selinunte dall'altra) sono stati processati e valutati separatamente in relazione al diverso velivolo utilizzato per la ripresa. Per quanto riguarda i dataset Tempio di Iside e Quartiere ellenistico-romano prima di procedere con la fase di orientamento è stata condotta per ogni *waypoint* una selezione delle immagini migliori, dal punto di vista radiometrico e di geometria di presa. Il processamento delle immagini è stato effettuato con il software Photoscan della Agisoft che prevede una sequenza di operazioni totalmente automatiche per l'orientamento delle immagini, il calcolo del modello 3D e la generazione dell'ortofoto. I parametri di orientamento interno e di distorsione della camera sono stati ricavati con Photoscan durante la fase di orientamento delle immagini. Il calcolo dell'orientamento esterno è stato eseguito prima sui singoli blocchi NS e EO e poi su un unico blocco fotogrammetrico con tutte le immagini. I risultati dei differenti dataset sono riportati nella tabella 6.

		N. Immagini	SQM X [m]	SQM Y [m]	SQM Z [m]	SQM Pixel [pix]	N. CGP
Tempio di Iside	Volo NS	24	0.021	0.015	0.033	0.76	13
	Volo EO	27	0.024	0.025	0.032	0.82	13
	Volo NS+EO	51	0.017	0.016	0.012	1.03	13
Quartiere ellenistico- romano	Volo NS	56	0.025	0.018	0.047	0.61	10
	Volo EO	65	0.021	0.025	0.048	0.61	10
	Volo NS+EO	121	0.012	0.016	0.044	0.63	10

Tabella 6 – Risultati degli orientamenti per i dataset del Tempio di Iside e del Quartiere ellenistico-romano

L'orientamento delle immagini relative al dataset di Selinunte è stato invece eseguito con il software APS sviluppato dalla nota azienda italiana Menci Software. Tale programma è in grado di eseguire in completo automatismo il processo di triangolazione aerea, così come la produzione di

ortofoto, DSM e *point cloud*. Il programma è ottimizzato per importare le telemetrie di volo dei differenti droni, ed in particolare dello *Swinglet CAM*, in maniera tale da poter disporre delle posizioni approssimate del centro di presa e di assetto per ogni immagine che risultano fondamentali per velocizzare e migliorare la ricerca dei punti di legame. Per il dataset di Selinunte è stato eseguito soltanto il processamento del volo Est-Ovest. Considerando il numero di immagini utilizzate (314) e l'estensione dell'area (circa 1 kmq) le prove condotte sono state finalizzate a ricercare una configurazione ottimale dei punti di appoggio. In particolare, sono state utilizzate tre differenti configurazioni con 27, 14 e 7 punti di appoggio. I risultati sono riportati nella tabella 7.

<i>Selinunte</i>	N. Immagini	SQM X [m]	SQM Y [m]	SQM Z [m]	SQM Pixel [pix]	N. CGP
Volo EO [27 GCP]	314	0.014	0.013	0.044	0.68	27
Volo EO [14 GCP]	314	0.018	0.011	0.055	0.70	14
Volo EO [7 GCP]	314	0.037	0.019	0.049	0.71	7

Tabella 7 – Risultati degli orientamenti per il dataset Selinunte

Calcolo modello 3D e ortofoto

Dai differenti progetti realizzati è stato possibile calcolare i modelli 3D e le ortofoto. Per quanto riguarda il Tempio di Iside e il Quartiere ellenistico-romano sono stati calcolati dei modelli 3D di estremo dettaglio. La densità di punti è risultata variabile da circa 2000 punti per mq a circa 6000 punti per mq, in funzione del livello di dettaglio selezionato (low, medium, high) durante la procedura di calcolo e del numero massimo di triangoli imposto (Figura 8). Le ortofoto sono state calcolate imponendo una risoluzione di 2 cm.

Per l'area archeologica di Selinunte è stato calcolato un DSM con una risoluzione di 15 cm e circa 24 milioni di punti; è stata inoltre realizzata l'ortofoto con una risoluzione di 5 cm (Figura 9).

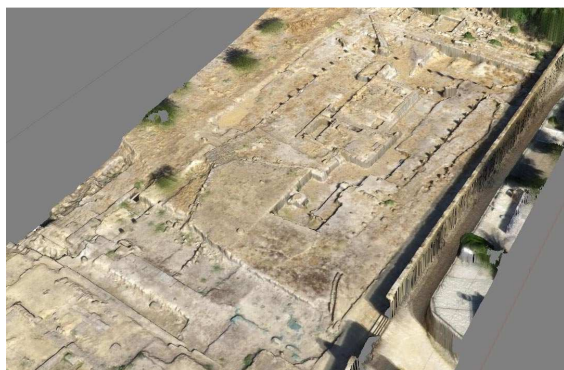


Figura 8 – Modelli 3D fotorealistici per il Tempio di Iside (a sinistra) e per il Quartiere ellenistico-romano (a destra)



Figura 9 – Modello 3D e ortofoto di una zona dell'acropoli di Selinunte

Conclusioni

Il lavoro presentato rappresenta un primo step sull'indagine delle potenzialità del rilievo tramite UAV. Alcuni primi risultati possono già essere evidenziati anche se molti aspetti richiedono ulteriori e più approfondite ricerche. In particolare, le prime verifiche eseguite sul calcolo degli orientamenti evidenziano che utilizzando blocchi fotogrammetrici con molte immagini, anche riprese con differenti direzioni di volo, si ottiene una diminuzione degli scarti sui punti di appoggio. Inoltre, si è osservato che, nel caso di blocchi fotogrammetrici molto grandi come quello di Selinunte, il numero di punti di appoggio potrebbe anche non essere molto elevato. Tali risultati dovrebbero essere confermati da test che prevedano anche l'utilizzo di checkpoint per una verifica sull'effettiva accuratezza.

I prodotti realizzati (modelli 3D e ortofoto) sono risultati con un livello di dettaglio molto alto che consente di eseguire studi ed analisi molto accurate. Le procedure seguite sono state abbastanza rapide grazie anche all'elevato livello di automazione raggiunto dai programmi utilizzati (Photoscan della Agisoft e APS della Menci Software nel nostro caso).

Ringraziamenti

Si ringrazia l'ente "Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento" e l'ente "Parco Archeologico di Selinunte e Cave di Cusa", per la disponibilità concessa ad accedere nelle aree oggetto dei rilievi; il Consorzio Ticonzero per l'esecuzione dei voli dell'area archeologica della Valle dei Templi.

Bibliografia

- Chiabrando F., Nex F., Piatti D., Rinaudo F., (2011), UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy), *Journal of Archaeological Science*, 38: 697-710.
- Eisenbeiss H., Sauerbier M., (2011), Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26(136): 400-421.
- Lo Brutto M., Borruso A., D'Argenio A., (2012), UAV Systems for photogrammetric data acquisition of archaeological sites, *Journal of Heritage in the Digital Era*, 1, Supplement 1: 7-13.
- Neitzel F., Klonowski J., (2011), Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-1/C22: 39-44.
- Pueschel H., Sauerbier M., Eisenbeiss H., (2008), A 3D model of Castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVII-B6b: 93-98.
- Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D., (2011), UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling- current status and future perspectives, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-1/C22: 25-31
- Seitz C., Altenbach H., (2011), Project archeye – the quadcopter as the archaeologist's eye, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-1/C22: 297-302.
- Verhoeven G., Doneus M., Briese C., Vermeulen F., (2011), Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs, *Journal of Archaeological Science*, 39(7): 2060-2070.