

## SPERIMENTAZIONI SULL'UTILIZZO DI UAV PER IL RILIEVO DELLE EMERGENZE ARCHEOLOGICHE

Filiberto CHIABRANDO, Dario PIATTI, Fulvio RINAUDO

Politecnico di Torino - DITAG - Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie,  
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

### Riassunto

Di sempre maggiore interesse per le discipline del rilevamento sono i velivoli radiocomandati senza equipaggio o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), capaci di sorvolare ampie porzioni di territorio ed acquisire immagini nadirali utili alla documentazione ed al rilievo archeologico ed architettonico.

Tali sistemi di acquisizione associati alle tecniche di fotogrammetria digitale consentono di ottenere elaborati grafici e cartografici con le precisioni tipiche del rilievo a grandissima scala. L'esperienza eseguita dal gruppo di ricerca del DITAG del Politecnico di Torino è stata realizzata su un'evidenza archeologica venuta alla luce durante i restauri dei giardini della Reggia di Venaria Reale (Torino): la Fontana d'Ercole. L'elicottero radiocomandato utilizzato per il rilievo della fontana è dotato di una camera digitale amatoriale collegata ad una stazione di controllo a terra che permette di valutare la porzione di territorio ripresa e di eseguire l'acquisizione delle immagini. Sulla zona oggetto di studio sono state progettate più acquisizioni per il rilievo dell'intera struttura e di alcuni particolari. Le elaborazioni eseguite hanno riguardato la triangolazione aerea di alcune delle immagini acquisite, la creazione semi-automatica di modelli digitali del terreno, la produzione di ortofoto a grandissima scala e la restituzione fotogrammetrica.

Tali prodotti sono stati confrontati con un rilievo eseguito con metodi topografici tradizionali al fine di valutare le effettive precisioni ottenibili da tale sistema.

In questo articolo vengono presentati i primi risultati ottenuti: le elaborazioni grafiche e cartografiche, i problemi connessi all'acquisizione dei dati, quelli relativi alla realizzazione del modello digitale del terreno e i possibili elementi necessari al miglioramento dell'intero sistema di acquisizione.

### Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become more and more interesting for survey applications: they are able to fly over broad areas and to acquire nadir images useful for documentation and archeological and architectural survey.

These acquisition systems combined with digital photogrammetric techniques allow to obtain graphical and cartographic elaborates which have the typical precisions of large scale surveys.

The research group of DITAG (Politecnico di Torino) tested one of these acquisition systems on an archeological site which came to light during the restoration of the gardens of "Reggia di Venaria Reale" (Torino): the "Fontana d'Ercole". The remote-controlled helicopter employed for the survey of the fountain is equipped with a no-metric digital camera connected with a ground control station which allows to evaluate the shot scene and to acquire the images of interest. In the area of study many acquisitions for the survey of the entire structure and of some particulars were planned.

The realized data processing concerns the aerial triangulation of some of the acquired images, the semi-automatic generation of digital terrain models, the production of large scale orthophotos and the photogrammetric restitution.

These products were compared with a survey realized with traditional topographic techniques in order to evaluate the actual obtainable precisions with the system.

In this article the first results are presented: the graphical and cartographic data processing, the problems related to data acquisition, the problems concerning digital terrain model realization and possible elements necessary for the acquisition system improvement.

### **Introduzione**

Per il rilievo metrico e la documentazione di un bene culturale a carattere architettonico e/o archeologico con metodologie convenzionali, è in genere necessario svolgere a terra un notevole lavoro, tanto che, anche a seconda delle dimensioni dell'oggetto da rilevare, la fase di rilievo può protrarsi anche per parecchi giorni. Da tale aspetto si evince che le operazioni di misura rappresentano uno degli elementi principali per un corretto approccio alla rappresentazione e di conseguenza un'importante voce di spesa per il committente.

Una delle possibili soluzioni per limitare le operazioni sul terreno è quella che prevede l'utilizzo di metodologie fotogrammetriche convenzionali e non convenzionali per il rilievo e la documentazione dei beni architettonici ed archeologici. Grazie a tale approccio è possibile, acquisite le immagini ed i punti necessari per la realizzazione del processo fotogrammetrico, produrre sia ortofoto a grandissima scala sia, grazie alle operazioni di restituzione fotogrammetrica, tradizionali rappresentazioni numeriche utilizzate nella documentazione dei beni culturali.

Un'applicazione di metodologie fotogrammetriche non convenzionali per il rilievo archeologico è presentata nel seguente lavoro. In particolare, grazie all'utilizzo di un sistema UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), ovvero un veicolo aereo senza equipaggio, sono state sperimentate le potenzialità di acquisizione ed i possibili prodotti realizzabili attraverso tale sistema.

Gli UAV, fino a pochi anni fa utilizzati nella maggior parte dei casi come aerei ad uso militare (Eisenbeiss et al., 2005), suscitano attualmente un notevole interesse nella comunità scientifica che si occupa delle discipline tipiche del campo della geomatica per la possibilità di acquisire immagini nadirali, le quali, appositamente elaborate grazie ai moderni sistemi di fotogrammetria digitale, consentono di realizzare prodotti utili al rilievo ed alla documentazione dei beni culturali.

### **UAV utilizzato**

Per l'acquisizione delle immagini relative alla fontana D'Ercole nei giardini della Reggia di Venaria Reale (Torino) è stato utilizzato un elimodello amatoriale radiocomandato appositamente modificato per poter alloggiare nella parte sottostante una camera digitale amatoriale (figura 1).

Per l'acquisizione delle immagini, è stato progettato e realizzato un sistema ammortizzato a camera d'aria radiocomandato da terra capace di ruotare attorno a due assi: uno in direzione nadirale (rotazione  $k$ ) e l'altro nella direzione perpendicolare a quella di volo (rotazione  $\theta$ ) (figura 2 sinistra).



*Figura 1 - Elimodello Voyager G8 RR utilizzato per le riprese*

La camera utilizzata è la NIKON Coolpix 8400, dotata di sensore CCD da 8 megapixel; non è stato possibile utilizzare camere differenti (calibrate e/o con una risoluzione maggiore) in quanto il supporto può essere utilizzato solamente con la camera suddetta e non è modificabile per l'utilizzo di altri sistemi di acquisizione.

Durante il volo, grazie al collegamento in remoto tra la camera ed uno schermo a terra (figura 2 destra), è possibile visualizzare la parte di territorio sorvolato; tale sistema, integrato con un altimetro, consente di valutare la quota di volo più idonea per l'acquisizione della porzione di territorio definita in fase di progetto.



*Figura 2 - Supporto per il posizionamento della camera (sinistra) e sistema di controllo a terra per l'acquisizione delle immagini (destra)*

Per quanto riguarda l'acquisizione delle immagini, lo “scatto” avviene da terra grazie ad un radiocomando che aziona un apposito servo-controllo.

Sulla zona oggetto del rilievo sono state acquisite diverse immagini per valutare le effettive potenzialità del sistema per la realizzazione di prodotti utili al rilievo ed alla documentazione archeologica, quali ortofoto a grandissima scala, modelli digitali del terreno e rappresentazioni vettoriali.

### **Acquisizione ed elaborazione dei dati**

Il volo eseguito sull'area oggetto di studio ha consentito di acquisire diverse immagini, alcune utili alla sola documentazione fotografica del sito (immagini non nadirali), altre appositamente realizzate per l'esecuzione del processo fotogrammetrico (immagini nadirali). In particolare, per quanto riguarda le immagini nadirali, la quota relativa di volo per l'acquisizione è stata di circa 50 metri. Per una completa documentazione dell'oggetto di studio e per essere ragionevolmente certi di avere un numero sufficiente di immagini utilizzabili per il processo fotogrammetrico, in totale sono state acquisite venti immagini nadirali.

Per poter orientare correttamente le immagini acquisite e per avere un maggior controllo sui risultati ottenuti, prima del volo sono stati posizionati sull'oggetto ripreso quaranta *marker*. In figura 3 si riporta un fotografia relativa a due dei *marker* posizionati sull'oggetto di rilievo. Per una corretta referenziazione nel sistema di coordinate locale costituito da punti di inquadramento già esistenti, la posizione dei *marker* è stata misurata con l'utilizzo di una stazione totale.

I parametri di calibrazione della camera sono stati stimati direttamente durante il processo di triangolazione aerea grazie all'utilizzo del software *Leica Photogrammetric Suite* (LPS) utilizzato per l'intero processo fotogrammetrico.



*Figura 3 Fotografia di due dei marker posizionati sull'oggetto di studio*

*Triangolazione aerea*

Per la fase di triangolazione sono state utilizzate cinque immagini con scala media pari a 1:200. Come esposto precedentemente, la fase di orientamento interno è stata eseguita direttamente all'interno del processo di triangolazione, grazie all'utilizzo di 29 *Ground Control Points* (GCP) ed 11 *Control Points* (CP). Inoltre, l'utilizzo di 77 *Tie Points* (TP), in parte collimati manualmente ed in parte generati automaticamente dal *software*, ha consentito di irrigidire ulteriormente il blocco fotogrammetrico e di ottenere dei risultati più che soddisfacenti al termine del processo di calcolo (tabella 1).

	$\sigma_{x \text{ medio}} \text{ [m]}$	$\sigma_{y \text{ medio}} \text{ [m]}$	$\sigma_{z \text{ medio}} \text{ [m]}$
GCP (29)	0.014	0.011	0.022
CP (11)	0.016	0.016	0.025

Tabella 1 - Risultati del processo di triangolazione aerea

Le fasi successive di elaborazione hanno riguardato la realizzazione ed *editing* del modello digitale del terreno (DEM), la produzione di ortofoto a grandissima scala ed infine la restituzione fotogrammetrica e la relativa rappresentazione vettoriale del manufatto oggetto di studio.

*Realizzazione ed editing del DEM*

Per la realizzazione del modello digitale del terreno sono stati utilizzati i punti misurati sul terreno integrati con la generazione automatica realizzata attraverso algoritmi di *image-matching* (direttamente implementati nel *software Leica Photogrammetric Suite*). Tale integrazione consente di ottimizzare il processo di calcolo ed in parte di migliorare il risultato finale.

I primi risultati ottenuti al termine della generazione del DEM (figura 4), tuttavia, non possono essere direttamente utilizzati per la realizzazione dell'ortofotoproiezione, a causa dell'elevato rumore del dato in alcune parti della struttura associato ad errori grossolani nella creazione del modello. Alla luce dei risultati ottenuti è stata realizzata un'accurata verifica della qualità del modello e, di conseguenza, le opportune operazioni di *editing*. Quest'ultime consentono di correggere gli errori commessi dal *software* durante la generazione automatica del DEM e di ottenere un modello digitale utilizzabile sia per il processo di ortofotoproiezione sia per modellazioni tridimensionali dell'oggetto rilevato. Anche l'*editing* del modello digitale del terreno è stato realizzato mediante l'utilizzo del *software Leica Photogrammetric Suite*.

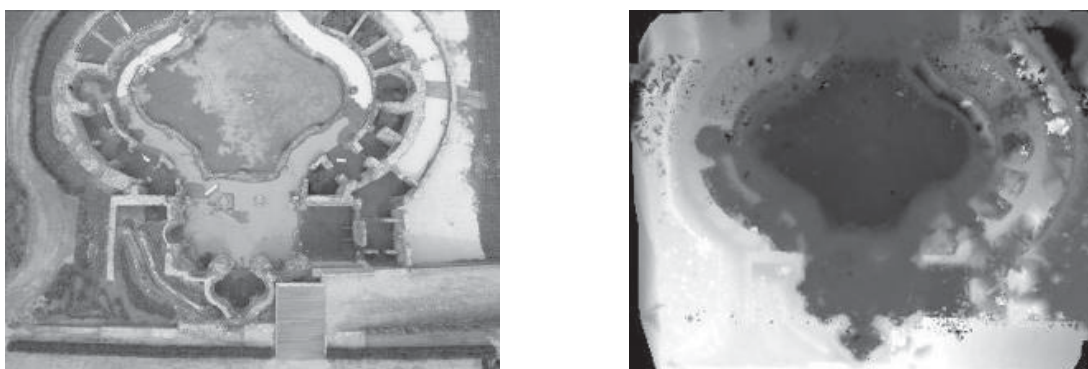


Figura 4 - Una delle cinque immagini utilizzate per la generazione del DEM (sinistra) e primi risultati dell'estrazione automatica del DEM mediante LPS (destra)

Dalle analisi eseguite gli errori commessi dagli algoritmi di autocorrelazione riguardano in particolare sia parti relative alle zone riprese con immagini non perfettamente nadirali sia parti che presentano discontinuità poco accentuate in quota. Tali problematiche, riscontrabili soprattutto nel

caso di evidenze archeologiche o elementi architettonici, possono essere in parte ridotte utilizzando per l'estrazione del DEM un maggior numero di punti posizionati in prossimità delle discontinuità. Nel caso analizzato, dopo aver eseguito alcune prove inserendo alcune *breaklines* in corrispondenza delle discontinuità più "problematiche", si è passati all'*editing* del modello digitale mediante alcuni strumenti implementati nel *software* utilizzato. In figura 5 (sinistra) si riporta un'immagine del modello digitale ottenuto al termine delle operazioni di *editing*.

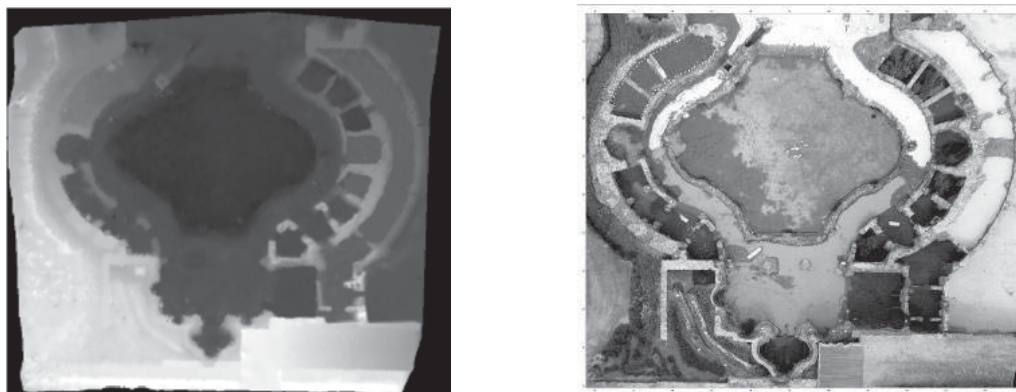


Figura 5 - Modello digitale ottenuto al termine delle operazioni di *editing* (passo pari a 10 cm) (sinistra) e ortofoto della Fontana D'Ercole (destra)

#### *Realizzazione dell'ortofoto*

Una volta ottenuto un modello digitale del terreno sufficientemente accurato, è stato possibile eseguire l'operazione di ortofotoproiezione. Dalle prime analisi eseguite su alcuni punti di coordinate note, il prodotto cartografico ottenuto dall'operazione di ortofotoproiezione rispetta le tolleranze tipiche di una rappresentazione in scala 1:100. L'ortofoto ottenuta è rappresentata in figura 5 (destra).

Si tratta di un prodotto di sicuro interesse per la documentazione e la rappresentazione archeologica in quanto l'ortofoto consente di associare informazioni metriche al contenuto radiometrico tipico delle immagini.

#### *Restituzione fotogrammetrica e rappresentazione vettoriale*

Oltre alla realizzazione dell'ortofoto dell'oggetto investigato è stata prodotta una rappresentazione numerica tradizionale (figura 6). Quest'ultima è stata realizzata mediante restituzione fotogrammetrica eseguita tramite il modulo PRO 600 implementato nel *software* LPS.

Tale operazione ha consentito inoltre di valutare le differenze rispetto ad uno stesso elaborato grafico eseguito attraverso un precedente rilievo con stazione totale.

Dai primi confronti è emerso che le due metodologie utilizzate per la redazione dei disegni (stazione totale e rilievo fotogrammetrico con UAV), sono in grado di fornire un prodotto con le stesse caratteristiche metriche; in entrambi i casi si sono riscontrate in fase di collaudo tolleranze tipiche per una



Figura 6 - Primi risultati della restituzione fotogrammetrica

rappresentazione in scala 1:100 ( $\pm 4$  cm). Alla luce delle precedenti considerazioni, per quel che riguarda la rappresentazione numerica dell'oggetto rilevato, si evince che le due metodologie seguite forniscono risultati equivalenti e quindi la scelta di una o dell'altra è funzione soprattutto dei tempi e costi di realizzazione delle misure e dell'accessibilità alla zona di interesse. Un vantaggio del metodo fotogrammetrico che è bene tener presente consiste nel fatto che, a differenza del rilievo celerimetrico, è possibile misurare le coordinate di tutti i punti presenti nelle immagini acquisite senza dover tornare in un secondo tempo sulla zona del rilievo.

### **Conclusioni e sviluppi futuri**

Alla luce dell'esperienza condotta, è possibile affermare che per la realizzazione di un rilievo con l'utilizzo di UAV, senza considerare il breve tempo necessario per l'esecuzione del volo, i tempi necessari per l'acquisizione dei punti a terra da utilizzare come GCP sono sicuramente minori rispetto a quelli necessari per le operazioni di misura e redazione di eidotipi richiesti da un accurato rilievo celerimetrico. Inoltre, l'utilizzo del metodo fotogrammetrico consente di ottenere prodotti, quali ortofoto a grandissima scala e modelli digitali, non ottenibili con il solo rilievo celerimetrico. Tali prodotti consentono sicuramente una miglior lettura e documentazione dell'oggetto architettonico e/o archeologico rispetto agli elaborati ottenibili con il solo rilievo celerimetrico.

I risultati presentati confermano le notevoli potenzialità degli UAV per il rilievo, la rappresentazione e la documentazione archeologica. Per quanto riguarda l'elimodello utilizzato, durante la sperimentazione sono state riscontrate alcune problematiche, quali la ridotta flessibilità del sistema di supporto della camera (non è possibile utilizzare camere diverse da quella impiegata in questo lavoro) e l'assenza di sistemi di *autopilot* che consentirebbero di gestire al meglio la fase di volo pianificata in fase di progetto (Patias et al., 2007). Tali sistemi, già ampiamente sperimentati nell'ambito della comunità scientifica (Bendea et al., 2007), potrebbero consentire di pianificare tutte le fasi del volo, anche con la possibilità di memorizzare i dati relativi alla posizione del velivolo durante l'acquisizione delle immagini.

Per quanto riguarda il modello utilizzato, un'ottima scelta è stata la realizzazione di un supporto della camera in grado di ruotare attorno a due assi e quindi di acquisire immagini sia in direzione parallela sia in direzione perpendicolare a quella di volo. Di particolare utilità risulta essere anche il sistema per l'acquisizione delle immagini, gestito da terra mediante una stazione di controllo dotata di monitor per la visualizzazione dell'area ripresa della camera.

In conclusione, si può affermare che i miglioramenti sopra citati potrebbero aumentare la precisione dei risultati ottenibili in campo fotogrammetrico del UAV utilizzato, probabilmente però a discapito dell'obiettivo sempre più perseguito della realizzazione di sistemi a basso costo per il rilievo e la documentazione archeologica e architettonica.

### **Riferimenti bibliografici**

- Bendea H., Chiabrando F., Giulio Tonolo F., Marenchino D., (2007), "Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the *Augusta Bagiennorum* test site", XXI International CIPA Symposium, 01-06 October 2007, Athens, Greece, pp. 117-122
- Eisenbeiss H., Lambers K., Sauerbier M., Li Z., (2005) "Photogrammetric Documentation of an Archaeological Site (Palpa, Peru) Using an Autonomous Model Helicopter", *CIPA XX International Symposium*, Torino, Italy, pp. 238-243
- Patias P., Saatsoglou-Paliadeli Chr., Georgoula O., Pateraki M., Stamnas A., Kyriakou N., (2007) "Photogrammetric documentation and digital representation of the Macedonian Palace in Vergina-Aegeae", XXI International CIPA Symposium, 01-06 October 2007, Athens, Greece, pp. 562-566

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano l'Arch. Luca Debernardi per il supporto durante le fasi di acquisizione e trattamento dati, il Dott. Diego Farina per le acquisizioni con l'elimodello e l'F.T Studio di Peveragno per le misure topografiche per l'appoggio fotogrammetrico.