

I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell'arte e applicazioni fotogrammetriche

Mauro Lo Brutto

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), Università di Palermo, viale delle Scienze, ed. 8, 90128 Palermo. mauro.lobrutto@unipa.it

Corso APC organizzato il 27 Marzo 2015 dall'Ordine dei Geologi della Regione Sicilia, con il patrocinio del Comune di Palazzolo Acreide (SR) dal titolo: "Instabilità e consolidamento dei terreni di fondazione e dei versanti: modello geotecnico, troni e case history"

RIASSUNTO

I Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) rappresentano la grande novità degli ultimi anni nell'ambito delle applicazioni per il rilievo e il monitoraggio del territorio. Molte ricerche sono state portate avanti per definire limiti e potenzialità di questi sistemi, ma ancora, non è possibile avere degli standard operativi sia per le accuratezze dei rilievi sia per l'affidabilità degli elaborati. L'articolo descrive le caratteristiche principali dei SAPR attualmente utilizzati per applicazioni professionali e le varie fasi che caratterizzano il rilievo fotogrammetrico con questi sistemi per la produzione di modelli 3D e di dati cartografici utili ai fini delle indagini geologiche/geomorfologiche.

ABSTRACT

The Remotely-Piloted Aircraft Systems (RPAS) are the great innovation of the last few years for the survey and the monitoring of the territory. Many researches have been carried out to define the limits and potential of these systems, but still now it is not possible to have effective standards for survey accuracy and metric reliability. The paper describes the main features of the RPAS currently used for professional applications and the various steps of the photogrammetric survey with these systems to produce 3D models and cartographic data useful for of geological/geomorphological purposes.

Introduzione

Il rilievo aereo di dettaglio di aree con estensioni variabili da pochi ettari a qualche chilometro quadrato è sempre stato piuttosto problematico per la mancanza di strumenti adeguati che consentano di colmare il gap tra i classici rilievi fotogrammetrici aerei e i rilievi terrestri (topografici, fotogrammetrici o laser scanner). Recentemente questo gap è stato superato grazie allo sviluppo dei Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) che consentono sia di eseguire rilievi aerei a bassa quota, generalmente in un range compreso tra i 20 e i 150 metri, sia l'acquisizione di dati metrici e qualitativi di estremo dettaglio (Eisenbeiss & Sauerbierl, 2011).

I SAPR, in genere conosciuti con il termine di “droni” e sviluppati inizialmente per applicazioni militari, sono ormai molto diffusi in ambito civile ed in particolare nel settore del rilievo architettonico, archeologico e geologico/geomorfologico. La loro popolarità è dovuta soprattutto alla possibilità di ottenere immagini aeree dell’area di interesse con numerosi vantaggi quali: rapidità nell’esecuzione del rilievo aereo, possibilità di riprendere aree difficilmente accessibili, risoluzione delle immagini maggiore rispetto alla tradizionale fotogrammetria aerea (anche con pixel < 1 cm), costi contenuti delle fasi di acquisizione, disponibilità di diverse soluzioni software user-friendly e low-cost per il processamento dei dati (Lo Brutto et al., 2014).

Molto spesso quando si parla di “droni”, e quindi di SAPR, si fa riferimento soltanto al velivolo trascurando tutte le altre componenti che costituiscono il sistema. In realtà, sarebbe opportuno distinguere il velivolo dall’insieme dei componenti che costituiscono il sistema necessario affinché questi mezzi possano effettivamente volare. Come è possibile notare anche nelle varie edizioni dei Regolamenti ENAC (Ente Nazionale per l’Aviazione Civile), che negli ultimi anni sono state redatte per normare l’attività di questi sistemi, è possibile fare una prima distinzione: con la terminologia di APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) si indicano tutti i velivoli caratterizzati dall’assenza del pilota a bordo e dalla possibilità di volare in volo automatico, pre-impostando una rotta di volo, o sotto il controllo remoto di un pilota che lo comanda da terra; con la sigla SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) si indica l’insieme costituito dal mezzo aereo (Aeromobile a Pilotaggio Remoto), dai relativi componenti necessari per il controllo e comando (stazione di controllo) da parte di un pilota remoto e dai sensori utilizzati per acquisire dati di varia natura.

In ambito internazionale, oltre al termine di “drone” in genere si fa riferimento al termine di *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) o di *Remotely Piloted Vehicle* (RPV) per indicare le piattaforme aeree; le denominazioni di *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), adottate per esempio dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti e dalla Autorità dell’Aviazione Civile Inglese, e di *Remotely-Piloted Aircraft Systems* (RPAS)

introdotta invece dalla International Civil Aviation Organization (ICAO), indicano invece quello che in Italia viene definito con l’acronimo SAPR.

Secondo la classificazione del 2011 della UVS (*Unmanned Vehicle System*) International ([www.http://uvs-international.org/](http://uvs-international.org/)) gli APR possono essere suddivisi in relazione a vari parametri come le dimensioni, il peso, la tipologia di motore, il payload (cioè il carico trasportabile), il range operativo, la quota e l’autonomia di volo. Secondo tali parametri è possibile distinguere tre grandi categorie di APR (Tab. 1): tattici, strategici e per operazioni speciali. All’interno della categoria degli APR tattici rientrano praticamente tutti i velivoli utilizzati per applicazioni in ambito civile (Fig. 1); in particolare, le piattaforme normalmente utilizzate nella stragrande maggioranza dei casi rientrano nella sotto-categoria dei mini APR, o, in qualche caso, anche dei micro APR. Tali piattaforme sono caratterizzate dal fatto di avere un range operativo (cioè una distanza massima di volo dalla stazione di controllo) sempre inferiore ai 10 km (anche se per la maggior parte delle piattaforme questa distanza non supera qualche chilometro), quote massime di volo intorno ai 250-300 metri, autonomie di volo inferiori ad 1÷2 ore e MTOW (Max Take-Off Weight - peso massimo al decollo) inferiore ai 30 Kg.

Attualmente i SAPR rappresentano una tecnologia innovativa che sta diventando sempre più presente nella vita di tutti i giorni, non solo nell’ambito del rilievo del territorio, ma anche in tanti settori che sfruttano la capacità di questi sistemi di acquisire informazioni dall’alto. Tra i tanti impieghi che si possono fare è però necessario distinguere l’uso prettamente “ludico” dei SAPR, finalizzato a tutte quelle applicazioni fatte esclusivamente per divertimento, e l’uso a scopo professionale, ovvero l’utilizzo di questi sistemi per eseguire un lavoro professionale o una attività di ricerca. Questa differenziazione è ben messa in evidenza nei Regolamenti ENAC tramite anche l’utilizzo di una diversa terminologia. Infatti, con il nome di Aeromodello vengono indicati tutti i SAPR che possono essere utilizzati soltanto per attività ricreative e con i quali non è possibile fare nessun tipo di attività professionale.

Tabella 1 - Classificazione degli APR secondo la UVS (Unmanned Vehicle System) International; in giallo le categorie maggiormente utilizzate in ambito civile.

Categoria	Acronimo	Range operativo [km]	Quota di volo [km]	Durata del volo [h]	MTOW [kg]
Tattici					
Nano	H	< 1	100	< 1	< 0,0250
Micro	μ	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150 - 300	< 2	< 30
Close Range	CR	10 - 30	3000	2 - 4	150
Short Range	SR	30 - 70	3000	3 - 6	200
Medium Range	MR	70 - 200	5000	6 - 10	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 - 9000	0,5 - 1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14000	24 - 48	1500
Strategici					
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2000	20000	24 - 48	12000
Operazioni speciali					
Unmanned combat aerial vehicle	UCAV	1500	10000	2	10000
Lethal	LETH	300	4000	3 - 4	250
Decoy	DEC	0 - 500	5000	< 4	250
Stratospheric	STRATO	> 2000	> 20000 & < 30000	> 48	Da definire
Exo-stratospheric	EXO	Da definire	< 30000	Da definire	Da definire
Space	SPACE	Da definire	Da definire	Da definire	Da definire



Figura 1 - Esempi di velivoli che rientrano nella categoria degli APR tattici.

Gli Aeromodelli, a differenza dei SAPR possono essere utilizzati senza sottostare al Regolamento ENAC; il loro utilizzo però è possibile solo se vengono rispettate determinate condizioni.

Componenti dei SAPR per l'uso in ambito professionale

I Mini e Micro SAPR sono costituiti da varie componenti come il velivolo, la stazione di controllo, il software di progettazione del volo, i sensori di navigazione, i sensori per l'acquisizione dati (Colomina, Molina, 2014).

I velivoli possono essere suddivisi in due principali categorie: i multirotori e i monoala detti anche ad ala fissa. I multirotori hanno una struttura a eliche caratterizzata dalla presenza di una o più eliche (in genere da un minimo di tre ad un massimo di otto), solitamente montate su bracci estraibili, che permettono al velivolo di comportarsi come un elicottero (Fig. 2a). Possono, infatti, mantenere ferma la posizione a mezz'aria (capacità di hovering), effettuare virate repentine, volare in direzione obliqua; i movimenti sono eseguiti controllando opportunamente spinta e coppia delle singole eliche. I monoala hanno



(a)



(b)

Figura 2 - APR multirotori (a) e ad ala fissa (b).

invece una struttura planare che li rende più simili agli aeroplani piuttosto che agli elicotteri; questi velivoli sono dotati soltanto di un'elica spingente che serve a fornire portanza e di grandi ali che consentono di sfruttare correnti e flussi d'aria (Fig. 2b). Come tutti gli aeroplani gli APR ad ala fissa non hanno capacità di hovering ma hanno una aerodinamica migliore che gli consente di avere una maggiore resistenza al vento.

I multirotori rappresentano sicuramente gli APR più noti e più diffusi, anche perché sono quelli che vengono maggiormente utilizzati per attività ludiche/ricreative. Dal punto di vista delle problematiche di rilievo del territorio le due tipologie di velivoli si differenziano per operatività, autonomia di volo, quota di

volo, modalità di acquisizione (Lo Brutto et al., 2014). Il multirotori hanno, infatti, resistenza al vento inferiore, possono volare a quote di volo anche molto basse (10-20 metri), hanno una maggiore flessibilità in fase di acquisizione in quanto consentono di effettuare riprese sia nadirali che inclinate grazie alla possibilità di ruotare il sensore tramite un supporto mobile definito gimbal che può essere comandato dal pilota remoto in maniera indipendente dal velivolo. I velivoli ad ala fissa volano a quote sempre superiori ai 100 metri, consentono l'esecuzione soltanto di riprese nadirali secondo il classico schema di fotogrammetria aerea, hanno capacità di carico molto basse che limita notevolmente le tipologie di sensori che possono montare.



Figura 3 - Componenti della stazione di controllo a terra: radiocomando, tablet, notebook.



Figura 4 - Tipica schermata del software di controllo e progettazione del volo con indicato la posizione dei singoli waypoint e l'abbracciamento per ogni immagine.

Le due tipologie di velivoli, pur appartenendo alla stessa grande categoria dei mini APR, e pur avendo campi di applicazione simili, si differenziano anche per le finalità del rilievo e per le caratteristiche dei prodotti che possono essere ricavati dal loro impiego: rilievi a grandissima scala (pixel 1 o 2 cm, accuratezze del rilievo anche sub-centimetriche) di zone con estensione limitate nel caso dei multirotori, rilievi a grande scala (pixel circa 5 cm, accuratezze del rilievo centimetriche) di aree anche estese qualche chilometro quadrato per i velivoli ad ala fissa.

La stazione di controllo a terra rappresenta l'insieme di hardware/software per controllare e comandare l'APR (Fig. 3). È sicuramente un componente fondamentale dell'intero sistema in quanto costituisce l'interfaccia tra il pilota remoto e il mezzo. Generalmente è costituito da un radiocomando ed un ricevente montato sul velivolo; il radiocomando è un trasmettitore radio che invia una serie di impulsi che vengono ricevuti e scomposti dal ricevente. In questo modo è possibile pilotare in remoto il velivolo. Il radiocomando consente inoltre di controllare la telemetria del volo, cioè tutti quei parametri come posizione e assetto del velivo-

lo, velocità di spostamento, modalità di volo, stato dei motori, livello di carica delle batterie, ecc. che consentono di avere il controllo del mezzo. Per gestire meglio le informazioni sul mezzo remoto, in alcuni casi è possibile utilizzare come stazione di controllo a terra, parallelamente o anche indipendentemente (soprattutto per i velivoli ad ala fissa) al radiocomando, un PC o un tablet nel quale è installato un software di controllo e configurazione dei parametri di volo dell'APR.

Il software di controllo rappresenta anche il software per la progettazione del volo (Fig. 4). Tramite le funzioni disponibili è possibile progettare con cura la traiettoria di volo soprattutto in quei casi dove le missioni di volo vengono utilizzate per eseguire rilievi del territorio. Generalmente le missioni vengono progettate utilizzando come base cartografica i web map service tipo Google Maps o Microsoft Bing Maps. Le opzioni per la pianificazione del volo e della ripresa dipendono molto dal tipo di sistema che si utilizza e dal livello di sviluppo del software utilizzato.

I sensori di navigazione sono tutti quei sensori come il giroscopio, l'accelerometro, il barometro, il magnetometro e il GPS che consen-



Figura 5 - Tipici sensori utilizzati nei SAPR (da sinistra verso destra): camera fotografica, termocamera, camera multispettrale, camera iperspettrale e laser scanner.

tono all'APR di volare e di gestire autonomamente le missioni programmate. Il giroscopio è il sensore che permette al multirottore di mantenere l'assetto nei 3 assi nonostante eventi esterni tendano a modificarlo. L'accelerometro è il sensore grazie al quale il mezzo sa sempre qual'è l'orizzonte rispetto al suolo, riuscendo quindi a riposizionarsi automaticamente in maniera parallela al suolo. Il barometro rileva le variazioni di pressione dovute al cambio di quota e pertanto consente al sistema di conoscere e mantenere la quota relativa di volo. Il magnetometro è la bussola elettronica che viene usata in combinazione con il GPS per definire la posizione. Il GPS è il dispositivo che permette di conoscere la posizione del mezzo e di seguire traiettorie per gestire in maniera automatica le missioni programmate.

I sensori per l'acquisizione dati rappresentano la componente essenziale affinché il SAPR diventi uno strumento di lavoro (Fig. 5). La maggior parte dei SAPR è equipaggiata con una camera fotografica che consente di fare foto e video. Questo ha determinato un crescente interesse per le applicazioni fotogrammetriche da parte di persone che sono interessate all'utilizzo dei SAPR. Il tipo di camera che può essere montato su un SAPR dipende principalmente dal mezzo che viene utilizzato e dal tipo di attività che deve essere svolta. Assieme alle normali camere fotografiche i SAPR possono essere equipaggiati con camere termiche, con camere multispettrali e con camere iperspettrali; in particolare, le camere multispettrali e iperspettrali consentono di svolgere tipiche procedure del telerilevamento satellitare utilizzando però immagini riprese da distanze ravvicinate (proximal sensing). Assieme ai sensori ottici i SAPR possono essere equipaggiati da sistemi LIDAR

(laser scanner aerei) costruiti appositamente per rilievi di prossimità. La loro diffusione è ancora abbastanza limitata a causa dei costi elevati della strumentazione per i sistemi più performanti, della necessità di utilizzare SAPR con payload di almeno 1.5÷2 kg e delle precisioni che non sempre possono essere considerate soddisfacenti per rilievi aerei eseguiti da quote di volo in genere molto basse.

Campi di applicazione dei SAPR

I SAPR sono di fatto un fenomeno "di massa" sia per quanto riguarda il loro utilizzo in ambito prettamente ludico, che per l'utilizzo in ambito professionale. Le applicazioni professionali dei SAPR rientrano per la maggior parte nel campo della **Geomatica** ovvero nel campo di "quelle tecniche e quelle metodologie utilizzate per l'acquisizione, l'elaborazione, la restituzione, l'analisi e la gestione di dati di natura metrica o tematica relativi alla superficie della Terra, alle infrastrutture e al patrimonio architettonico" (Gomarasca, 2004). Della Geomatica, infatti, fanno parte tutte quelle discipline come la Fotogrammetria, il Telerilevamento, il rilievo LIDAR, che da sempre utilizzano e gestiscono dati metrici e tematici ottenuti da immagini o da sensori di vario tipo. Le applicazioni in ambito geomatico riguardano la Cartografia, i Sistemi Informativi Territoriali (S.I.T.), l'Archeologia e i Beni Culturali, la Geologia e la Geomorfologia, l'Agronomia. Assieme però alle applicazioni tipiche del rilievo metrico e tematico è possibile anche individuare numerosi ambiti come le ispezioni di infrastrutture, le riprese aeree cinematografiche e fotografiche, il controllo di aree inaccessibili, le operazioni di ricerca e salvataggio, l'utilizzo per operazioni

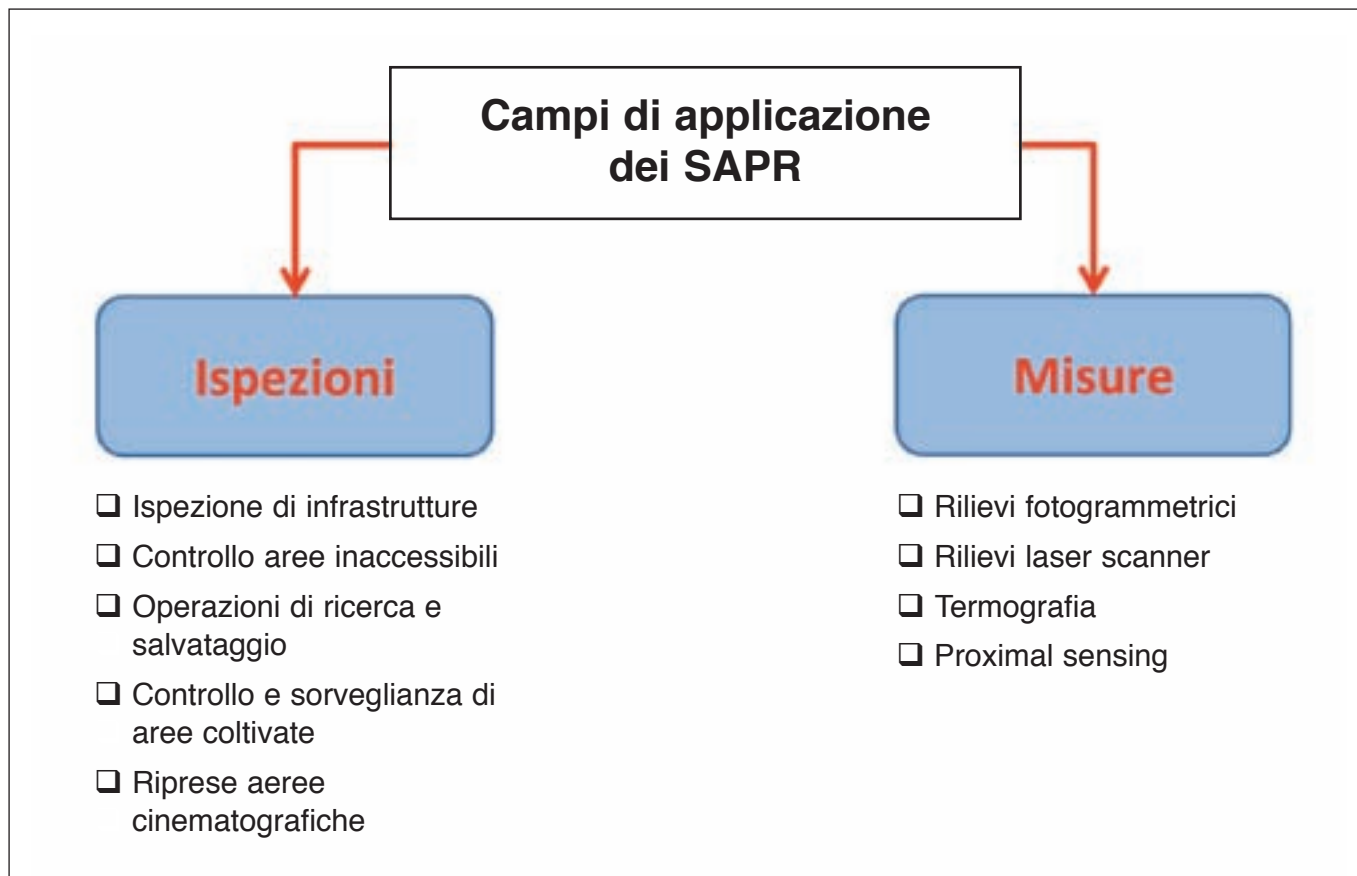


Figura 6 - Schema dei campi di applicazione dei SAPR.

nell'ambito della sicurezza e dell'emergenza, dove le finalità del lavoro effettuato con i SAPR sono molto diverse da quelle tipiche delle applicazioni geomatiche.

È pertanto possibile distinguere in maniera netta due principali ambiti di utilizzo professionale dei SAPR (Fig. 6):

- impiego del SAPR come strumento che consente di avere un punto di vista preferenziale per osservare un fenomeno o una situazione; tali applicazioni possono rientrare genericamente nel campo delle operazioni di "ispezione";
- uso del SAPR per rilevare dati di varia natura tramite un sensore montato a bordo; in questo caso le applicazioni possono genericamente essere definite come operazioni di "misura".

Le "ispezioni" in genere necessitano di voli eseguiti in modalità manuale (con controllo remoto del pilota) e pertanto richiedono soprattutto competenze avanzate per il pilotaggio del velivolo. Al contrario le "misure" prevedono voli per la maggior parte in moda-

lità automatica, secondo schemi ben definiti, e competenze avanzate soprattutto per la progettazione del volo e il processamento dei dati. Inoltre, nell'ambito delle "misure" possiamo distinguere due approcci ben diversi che fanno riferimento rispettivamente a misure di dati metrici, nel quale rientrano tutte le applicazioni da SAPR per il rilievo fotogrammetrico e laser scanner, e misure di caratteristiche fisiche, come quelle legate alle applicazioni con termocamera o al cosiddetto proximal sensing.

Dovrebbe essere abbastanza evidente che non sempre le figure professionali che utilizzano SAPR e che forniscono servizi in questo campo sono in grado di eseguire tutte le possibili applicazioni (come purtroppo spesso succede!). È vero, infatti, che la tecnologia dei SAPR può essere considerata a basso costo, e pertanto accessibile a molti, ma spesso, in questo campo viene totalmente dimenticata la necessità di possedere le competenze necessarie per la corretta acquisizione e l'adeguato processamento di informazioni e dati che rientrano nel campo delle "misu-

re”. In un recente editoriale dal titolo “Topografia liquida e Fotogrammetria solida”, il direttore della Rivista Geomedia, una delle principali riviste italiane di divulgazione scientifica in ambito geomatico, scrive proprio in relazione a questa situazione “... Una tecnica si basa su una scienza, della quale bisogna conoscere limiti e applicabilità. Il fatto che tecnologie avanzate facilitino l’uso di tecniche di posizionamento e di descrizione del territorio va preso con le molle e andrebbe normato per evitare errori gravi dovuti alla mancanza di conoscenza di limiti e ambiti di applicazione. Nel nostro mondo, ad esempio, un conto è fare fotografie dal cielo e un conto è fare aerofotogrammetria, quest’ultima fortunatamente ben sperimentata e normata da tempo per fornire descrizioni del territorio «sufficientemente accurate»” (Carlucci, 2015).

Applicazioni fotogrammetriche dei SAPR

Le applicazioni fotogrammetriche eseguite tramite SAPR rappresentano sicuramente un ambito di grande interesse per i Geologi perché consentono di acquisire prodotti di tipo cartografico, come modelli digitali del terreno (DTM – Digital Terrain Model) o modelli digitali delle superfici (DSM - Digital Surface Model) e ortofoto, che permettono di avere informazioni dettagliate della morfologia del territorio. Inoltre, tramite fotogrammetria è possibile ottenere anche modelli 3D fotorealistici che possono essere visualizzati ed analizzati con grande facilità tramite diversi software attualmente disponibili sul mercato. Le problematiche che meglio si prestano alle applicazioni fotogrammetriche da SAPR in geologia sono quelle relative allo studio di eventi franosi (Niethammer, 2012), di fenomeni erosivi (Pérez-Alberti, Trenhaile, 2014), di stabilità di pareti rocciose (Tucci et al., 2014, Danzi et al., 2013) e di monitoraggi multitemporali. Ovviamente la fotogrammetria da SAPR non deve essere intesa come alternativa ma piuttosto come tecnica complementare alla fotogrammetria aerea tradizionale, che grazie allo sviluppo ed evoluzione delle nuove camere metriche digitali in alcune situazioni consente risoluzioni di acquisi-

zioni molto prossime a quelle dei SAPR con una maggiore affidabilità dal punto di vista metrico. La fotogrammetria da SAPR ha sicuramente due grandi vantaggi come la rapidità nell’esecuzione del rilievo e i costi contenuti della fase di acquisizione, ma rispetto alla fotogrammetria tradizionale presenta ancora alcune problematiche sia relative alla fase di acquisizione che agli aspetti specifici del processo fotogrammetrico; tali problematiche dovrebbero essere sempre prese in considerazione nel momento in cui si inizia a lavorare con queste tecniche. In particolare, per quanto riguarda la fase di acquisizione si dovrebbe tenere conto dell’autonomia di volo, del payload e della stabilità in condizioni meteo non ottimali del mezzo, dell’irregolarità delle riprese, della disponibilità di ampi spazi per l’atterraggio (per APR ad ala fissa) e soprattutto dei limiti imposti dalla normativa vigente. Relativamente agli aspetti fotogrammetrici invece si dovrebbe considerare la configurazione del blocco, il numero, la disposizione e la precisione dei punti di appoggio, le problematiche di calibrazione della camera, l’effettiva accuratezza metrica dei risultati.

Il workflow del rilievo fotogrammetrico da SAPR può essere suddiviso in quattro fasi, ben note a chi si occupa di fotogrammetria:

- Progettazione ed esecuzione voli
- Rilievo topografico dei punti di appoggio
- Procedure di orientamento delle immagini
- Produzione degli elaborati.

Progettazione ed esecuzione voli

Tutte le volte che si esegue un rilievo fotogrammetrico è necessario progettare con attenzione l’esecuzione della ripresa. Nel caso di rilievi da SAPR possono presentarsi due differenti condizioni: prese stereoscopiche nadirali, effettuabili sia con sistemi multirotori che ad ala fissa, e prese inclinate e/o convergenti, realizzabili solo con multirotori. Le prese stereoscopiche nadirali sono progettate imponendo un ricoprimento tra le immagini, sia in senso longitudinale che trasversale; questo schema di presa è quello tipico della fotogrammetria aerea. Sostanzialmente il progetto viene redatto considerando due parametri: la distanza di presa, che va stabili-



Figura 7 - Esempio di progetto di prese con scatto in corrispondenza dei waypoint (*a sinistra*) e con scatto in continuo (*a destra*).

ta caso per caso in relazione alla precisione che si vuole ottenere, al livello di dettaglio delle immagini, all'estensione della zona di rilievo, alla tipologia di APR, alle condizioni logistiche, e la percentuale di ricoprimento, che in genere è abbastanza costante e nel caso dei SAPR viene mantenuta sempre intorno a valori tra 70% e 80% per il ricoprimento longitudinale e tra 40% e 70% per quello trasversale. Nel caso di prese stereoscopiche nadirali eseguite con multicottero è possibile valutare due procedure (Fig. 7): prese eseguite su waypoint predeterminati e scatto in continuo della camera. La prima è la procedura più affidabile per rilievi fotogram-

metrici perché consente di seguire meglio lo schema di progetto e di ottenere foto migliori. Presenta però l'inconveniente di aumentare i tempi di volo. La seconda è una procedura meno accurata perché può dare luogo a diversi inconvenienti (qualità scadente delle immagini, elevata sensibilità alle condizioni di vento, numero di immagini eccessive). Ha tuttavia il grande vantaggio di ridurre drasticamente i tempi di volo.

Le prese inclinate e/o convergenti rappresentano lo schema tipico della fotogrammetria terrestre che, nel caso dei SAPR, è in genere utilizzato soprattutto per rilievi fotogrammetrici in ambito architettonico (Fig. 8)



Figura 8 - Esempio di prese inclinate in ambito architettonico.

anche se in alcune situazioni in campo geologico/geomorfológico (si pensi al rilievo delle pareti rocciose) può risultare particolarmente utile. Le prese inclinate e/o convergenti presentano forti variazioni di scala e dovrebbero sempre essere eseguite calcolando con precisione le posizioni di presa e l'inclinazione della camera.

L'esecuzione della ripresa fotogrammetrica deve tener conto dell'autonomia di volo e del payload del mezzo che si sta utilizzando. Questi due parametri sono tra di loro correlati in quanto l'utilizzo di sensori con maggior peso diminuisce l'autonomia del mezzo. In genere i multirotori hanno autonomie effettive di volo (che consentono cioè di volare sempre in sicurezza) di circa 8÷10 minuti, mentre i sistemi ad ala fissa possono tranquillamente arrivare a 30÷40 minuti. Il payload è costituito dalle varie tipologie di camere digitali disponibili a partire dalle action camera, per poi passare a camere compatte, camere mirrorless e camere reflex. Ovviamente l'utilizzo di un tipo di camera rispetto ad un altro comporta un aumento del peso del sensore (dai 100 grammi circa di una action camera fino a circa ad 1 kg per le reflex) che, come detto influisce sull'autonomia di volo, ma anche una variazione dal punto di vista qualitativo delle immagini (che migliorano utilizzando camere mirrorless o meglio ancora camere reflex).

Rilievo topografico dei punti di appoggio

Per eseguire correttamente un rilievo fotogrammetrico è indispensabile effettuare la misura topografica dei punti di appoggio. Gli aspetti che debbono essere presi in considerazione per questa fase sono le modalità di materializzazione dei punti, il loro numero e la loro disposizione nell'area del rilievo, la scelta della tecnica di misura e della modalità di rilievo topografico da utilizzare (Stazione totale, GPS statico, GPS RTK o NRTK). La misura dei punti di appoggio può avvenire su punti naturali o su punti pre-segnalizzati tramite opportuni target (Fig. 9). Le misure eseguite con la stazione totale o il GPS in modalità statica sono sicuramente quelle che consentono di ottenere le migliori precisioni sulle coordinate dei punti di appoggio (centimetriche o

anche sub-centimetriche); hanno però l'inconveniente di essere molto più onerose sia dal punto di vista operativo che dei tempi di rilievo. Per questo motivo la maggior parte dei rilievi topografici dei punti di appoggio viene eseguita tramite GPS in modalità RTK o NRTK. Le precisioni con queste modalità di misura possono essere molto variabili da circa 2 cm fino a circa 5 cm in funzione delle condizioni del rilievo topografico.

Le modalità di rilievo e le precisioni delle coordinate dei punti di appoggio rappresentano uno degli aspetti maggiormente sottovalutati dagli operatori di SAPR che non hanno una formazione di tipo geomatico. Tale condizione porta a situazioni talvolta paradossali, dove rilievi fotogrammetrici aerei eseguiti da SAPR presentano precisioni peggiori di rilievi fotogrammetrici aerei tradizionali eseguiti da quote di volo di migliaia di metri soltanto perché non si è stati in grado di eseguire un corretto rilievo topografico dei punti di appoggio! I punti di appoggio sono il vincolo metrico fondamentale di un rilievo fotogrammetrico e pertanto devono essere rilevati con precisioni adeguate alle finalità del rilievo e alle scale fotogrammetriche delle immagini. Nell'individuazione dei punti di appoggio sulle immagini possono poi presentarsi alcune problematiche dovute per esempio ad un non corretto dimensionamento dei target (in genere non dovrebbero mai essere minori di 5 pixel sulle immagini) o alla scarsa visibilità del target per insufficiente contrasto o per la bassa qualità radiometrica delle immagini, soprattutto quando queste sono eseguite con action camera o con camere compatte.

Procedure di orientamento delle immagini

Per potere utilizzare le immagini in un processo fotogrammetrico è indispensabile effettuare quell'operazione che prende il nome di orientamento esterno. Questa fase consente di determinare quei parametri, definiti di orientamento esterno, che consentono di calcolare la posizione e l'assetto della camera nell'istante dello scatto della fotografia. In questo modo è possibile ricostruire in maniera rigorosa le relazioni geometriche tra l'immagine e l'oggetto fotografato, ed applicare



Figura 9 - Esempi di punti d'appoggio pre-segnalati.

le relazioni analitiche della fotogrammetria (equazione di collinearità) per potere effettuare le misure sull'oggetto a partire dalle corrispondenti misure sulle immagini. Durante le procedure di orientamento esterno dei rilievi con SAPR vengono in genere contestualmente determinati sia i parametri di orientamento interno (distanza principale, posizione del punto principale) e di distorsione dell'obiettivo della camera sia i parametri di orientamento esterno di ogni singola immagine. La procedura di orientamento esterno si basa sulla misura nelle immagini di punti di legame (*tie point*), calcolati automaticamente, e di punti di appoggio misurati manualmente. I prodotti finali del processo di orientamento, oltre ai parametri di orientamento interno ed esterno di tutte le immagini, sono rappresentati anche da una "nuvola di punti" sparsa che descrive in modo approssimato l'oggetto in

3D e da parametri per la stima delle precisioni del rilievo (Fig. 10).

Molti software commerciali e open source sono attualmente disponibili per eseguire in maniera automatica le procedure di orientamento; la maggior parte integra strategie di calcolo per la ricerca automatica dei punti di legame che derivano dalla Computer Vision; e che sono definite Structure From Motion (SFM). Questo aspetto ha sicuramente giovato all'intero processo fotogrammetrico perché ha permesso di automatizzare quasi del tutto (tranne che per la misura dei punti di appoggio) la fase più importante dell'intero workflow. Di contro, l'eccessiva semplicità di molti software ha portato anche ad un loro utilizzo senza avere una chiara visione dal punto di vista teorico di quello che si sta facendo e quindi non comprendendo appieno i limiti delle procedure eseguite.

del terreno senza vegetazione o strutture antropiche. Il DSM e il DTM sono degli elaborati di tipo raster che possono essere utilizzati per creare l'ortofoto o gestiti all'interno di programmi GIS per il calcolo di pendenze, volumi, sezioni, ecc..

Le ortofoto rappresentano degli elaborati cartografici e pertanto dovrebbero sempre rispettare limiti di precisione stabiliti dalle scale nominali di rappresentazione. In genere è possibile ottenere ortofoto con risoluzioni geometriche centimetriche (o in alcuni casi anche sub-centimetriche) e scale nominali tipiche dei rilievi tecnici (1:100 ÷ 1:200).

Conclusioni

I SAPR sono strumenti molto utili in ambito professionale soprattutto nell'ambito geologico/geomorfologico dove è possibile eseguire applicazioni fotogrammetriche per scopi cartografici e di modellazione 3D. Tutte le applicazioni che richiedono un controllo nel tempo e nello spazio sono applicazioni potenziali dei SAPR che rappresentano dei sistemi strategici per il monitoraggio e il controllo dell'ambiente e del territorio in caso di frane, fenomeni erosivi, eventi di inquinamento, ecc. ma anche per le infrastrutture come linee e tralicci alta tensione, pannelli solari, ferrovie, dighe, ecc. o per eventi estremi come alluvioni o terremoti.

L'acquisizione e il processamento per scopi fotogrammetrici fornisce buoni risultati in molte situazioni e per numerose applicazioni ma alcuni importanti aspetti, spesso poco considerati da chi non possiede una formazione specifica nel campo del rilievo, possono pregiudicare la qualità e l'affidabilità dei risultati (es. geometria e qualità del blocco fotogrammetrico, precisione punti di appoggio)

Alcune problematiche molto importanti per migliorare le prestazioni dei SAPR sono ancora argomenti di ricerca ed è possibile che nel breve periodo ci possano essere significativi miglioramenti per esempio relativamente all'aumento dell'autonomia di volo o del payload, che rappresentano dei fattori critici dal punto di vista operativo, o alla realizzazione di sensori multipli integrati per l'acquisizione contestuale di dati di varia natura.

Attualmente l'evoluzione dei sistemi ha portato alla produzione in alcuni SAPR multirotori e ad ala fissa di sistemi GPS integrati con moduli RTK per il calcolo in tempo reale delle coordinate corrette dei centri di presa delle immagini fotografiche.

Inoltre dovrebbe essere necessario procedere quanto prima alla definizione di soglie di accuratezza dei differenti sistemi (multirotori vs ala-fissa), anche in relazione ai sensori utilizzati, e di standard e linee guida per i processi e per i prodotti ottenibili con questa tecnologia. Fondamentale sarebbe certamente anche una normativa ENAC con regole chiare e stabili nel tempo che consenta a tutti gli operatori del settore di programmare ed organizzare le proprie attività lavorando nel rispetto delle regole e in conformità a standard di sicurezza ben definiti.

Bibliografia

- Carlucci R. (2015). Topografia liquida e Fotogrammetria solida. GEOmedia, n. 6, 2015.
- Colomina I., Molina P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, pp. 79-97.
- Danzi M., Di Crescenzo G., Ramondini M., Santo A. (2013). Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys in rockfall instability studies. *Rend. Online Soc. Geol. It.*, Vol. 24 (2013), pp. 82-85.
- Eisenbeiss H., Sauerbier M. (2011). Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26(136), pp. 400-421.
- Gomasasca M.A. (2004). Elementi di Geomatica. Ed. Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Lo Brutto M., Garraffa A., Meli P. (2014). UAV platforms for cultural heritage survey: first results. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, pp. 227-234.
- Niethammer U., James M.R., Rothmund S., Travalletti J., Joswig M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, pp. 2-11.
- Pérez-Alberti A., Trenhaile A. S. (2014). An initial evaluation of drone-based monitoring of boulder beaches in Galicia, north-western Spain, *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, pp. 105-111.
- Tucci G., Bonora V., Korumaz A.G., Salvadori M., Orlandini S. (2014). Fotogrammetria digitale e sistemi UAV: applicazioni al monitoraggio ambientale. *Atti 18ª Conferenza Nazionale ASITA*, 14-16 ottobre 2014, Firenze.
- UAS Yearbook (2011). UAS: The Global Perspective. 9th Edition. Blyenburgh & Co, June 2011.