

ESPERIENZE DI FOTOGRAMMETRIA DA UAV PER IL CALCOLO DI VOLUMI

PHOTOGRAMMETRIC EXPERIENCES FROM UAV FOR VOLUME ESTIMATION

M. Santise^(a), D. Passoni^(b), D. Pagliari^(b)

(a) DICATeA Università di Parma – Viale delle Scienze 181/a, 43124 Parma -
marina.santise@studenti.unipr.it

(b) Politecnico di Milano, DICA – Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano -
(daniele.passoni, diana.pagliari)@polimi.it

PAROLE CHIAVE: UAV, fotogrammetria digitale, DSM, calcolo volume, software di fotogrammetria e Computer Vision

KEY WORDS: UAV, Photogrammetry, DSM, Volume estimate, Image analysis, Computer Vision

RIASSUNTO

L'utilizzo di droni, anche noti con l'acronimo di UAV (Unmanned Aerial Vehicles), è sempre più frequente nei settori del monitoraggio ambientale e della protezione civile. Questi velivoli possono però trovare anche interessanti applicazioni nell'emergente ramo della geomatica forense, ad esempio per l'esecuzione di rilievi per il controllo dei volumi di cava, poiché permettono controlli speditivi e relativamente automatizzati del volume di inerti estratto (ghiaia, sabbia etc.). Essi possono quindi essere un valido aiuto nell'identificazione di fenomeni quali l'abusivismo o lo sfruttamento delle cave in modo non consono alle vigenti normative.

La grande varietà di tipologie di velivoli è accompagnata da un'altrettanta ampia offerta di programmi di produzione di ortofoto e DSM (Digital Surface Model) largamente automatizzati, in parte prodotti da ditte operanti da tempo in fotogrammetria, in parte da start-up universitarie di derivazione fotogrammetrica, o come accade ormai più spesso legate al mondo della Computer Vision (CV). Prendendo spunto dal confronto tra diverse procedure per il calcolo dei volumi di inerti a partire da immagini acquisite da drone, vengono presentati i risultati ottenuti da diversi pacchetti software. In particolare sono discussi i risultati ottenuti in alcune fasi intermedie dell'elaborazione dati, inclusa l'influenza di differenti configurazioni dei punti di appoggio, al fine di identificare le procedure più efficienti sia per tempo di realizzazione che per precisione raggiunta.

ABSTRACT

The use of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) is growing for environmental monitoring and emergency managing (floods, earthquakes and so on). These vehicles can be useful in the forensic geomatics as well. In fact, they allow almost completely automatic periodic inspections of the volumes of materials (gravel, sand, etc.) extracted. UAVs turn out to be a helpful instrument for identifying both the exploitation of quarries without permission and the extractions of quantities of materials larger than the ones allow by law. Side by side to the wide variety of UAV types, there is an equally wide range of software to generate DSMs and orthophotos, mainly in an automatic way. These packages are partly produced by companies, which have been operating for long time in photogrammetry and partly are produced by academic start-up companies, sometimes coming from the photogrammetric field but more often from Computer Vision (CV) community. In this work, different procedures for computing the material volume from UAV imagery were performed. The results obtained from several software packages are presented in order to identify the most efficient procedures in terms of processing time and achievable accuracies. The influence of different GCP (Ground Control Points) configurations is discussed too.

1. INTRODUZIONE

L'uso di piattaforme UAV (Unmanned Aerial Vehicles) si sta diffondendo sempre di più nell'ambito del rilievo fotogrammetrico grazie alla flessibilità che le contraddistingue. La possibilità di cambiare l'ottica, di variare la quota di volo agevolmente, di collegare sistemi di navigazione GNSS/IMU (Global Navigation Satellite System/ Inertial Measurement Unit), rende il rilievo con UAV un potente strumento di indagine del territorio in vari campi d'applicazione. Sono numerosi gli esempi di droni impiegati nell'ambito del monitoraggio ambientale (Colomina et al., 2008) a seguito di disastri naturali come frane (Bendea et al., 2008) e nella generazione di mappe di rischio immediato (Hirokawa et al., 2007), del monitoraggio agro-forestale (Berni et al., 2009; Gini et al., 2012). Gli UAV sono stati impiegati anche per scopi civili, inclusa la sorveglianza della pesca (Careless, 2005),

sicurezza nel confine tra Stati (Blazakis, 2004), applicazioni nella gestione del traffico (Mirchandani, 2003; Suman, 2004). Recente è stato il loro impiego per la ricostruzione tridimensionale di una cava di inerti e la relativa stima del volume (González-Aguilera et al., 2012), mostrando come il controllo remoto-non invasivo e la visione dall'alto rendano la piattaforma UAV ideale per l'obiettivo finale. A fronte di questo studio e dell'attenzione delle amministrazioni alla sorveglianza dei volumi estratti da cave, si è voluto impiegare un drone in questo ambito. Infatti le piattaforme UAV rappresentano in molti casi il giusto compromesso tra economia, precisione del rilievo e densità dei punti per la generazione di un modello digitale di superficie in aree di limitata estensione (Eisenbeiss, 2009), seppure si renda necessario un robusto sistema d'appoggio a terra del volo attraverso GCP, non potendo attualmente fare affidamento sui dati di navigazione per la georeferenziazione diretta (Chiabrando et al., 2013).

L'esecuzione e progettazione del volo ricalcano quello della fotogrammetria aerea tradizionale con alcuni limiti: il ridotto payload del drone costringe ad utilizzare macchine digitali compatte, producendo immagini di buona risoluzione ma affette da grave distorsione. Per assicurare la visione stereoscopica, si genera poi un'ingente quantità di fotogrammi di formato ridotto rispetto a un volo aereo tradizionale. Ciononostante, il drone volando a quote relative inferiori assicura una dimensione del pixel al suolo elevata, peculiarità che esalta questa tecnologia e ne aumenta la diffusione.

La grande varietà di tipologie di velivoli è accompagnata da una altrettanto ampia offerta di programmi di produzione di ortofoto e DSM largamente automatizzati, in parte prodotti da ditte operanti da tempo in fotogrammetria, in parte da start-up universitarie di derivazione fotogrammetrica, o come accade ormai più spesso legate al mondo della Computer Vision (CV). Questo nuovo panorama di mondi a confronto sulla ricostruzione tridimensionale degli oggetti ha generato curiosità e domande su come approcci così diversi possano condurre al medesimo risultato in termini di completezza e precisione. Per questa ragione si è voluto impiegare l'una e l'altra tipologia di software con lo scopo di effettuare un confronto dei risultati ottenibili seguendo i due diversi approcci. Il lavoro condotto in questa esperienza ha previsto l'elaborazione delle immagini digitali con software commerciali e scientifici, provenienti sia dal mondo della fotogrammetria sia da quello della CV, al fine di valutare l'affidabilità, la completezza e i tempi dell'elaborazione dei risultati dell'una e dell'altra tipologia. Il primo software testato, proveniente dal mondo della CV, è Agisoft PhotoScan (PS). Tale software, che nasce contestualmente all'impiego di UAV in ambito fotogrammetrico, può orientare blocchi con centinaia di immagini, leggere i dati di telemetria del drone nella fase di orientamento, stimare i parametri di orientamento interno con self-calibration, produrre modelli digitali della superficie (DSM) e ortofoto.

Al contrario, i software di fotogrammetria sono vincolati nel loro flusso di lavoro alla conoscenza dei parametri di orientamento interno provenienti dalla calibrazione dell'ottica e di dati cartografici da parte dell'utente; in particolare, sono stati usati: il software EyeDEA, sviluppato presso il DICATeA dell'Università di Parma (Roncella et al., 2011) per la prima fase di estrazione dei punti omologhi su immagini prive di distorsione, il software commerciale PhotoModeler Scanner (PM) per la fase di bundle block-adjustment e infine il programma scientifico di DICATeA Dense Matcher (Re et al., 2012) per la produzione di modelli digitali. Per quanto riguarda PM si è deciso di valutare anche il modulo per l'estrazione automatica dei tie points e le sue performance per la creazione automatica di nuvole dense di punti.

2. AREA DI STUDIO E ACQUISIZIONE DEI DATI

L'area oggetto di studio è situata a Gossolengo, in provincia di Piacenza, in una cava di inerti da alveo fluviale (Fig. 1): in particolare è stato rilevato un deposito costituito da cumuli di materiale estratto per calcolarne il volume.

Una valutazione precisa del volume estratto è, infatti, un punto di cruciale interesse e non trascurabile in virtù del prezzo di mercato di un metro cubo di materiale (fino a circa 50 euro/m³ per alcuni tipi di ghiaia). La zona di deposito ha forma approssimativamente rettangolare e si estende per circa 7000 m², elevandosi fino a circa 8 m sul piano di campagna. Volendo una precisione sulla quota dell'ordine di 3-5 cm, considerazioni sulle caratteristiche dell'ottica, sulle strumentazioni a disposizione e sulla geometria della cava sono state necessarie

per la progettazione del volo. La camera compatta digitale utilizzata è una Nikon J1 a 10 MPixel, con focale fissa pari a 10 mm e sensore di 13x9 mm². A partire dalle specifiche tecniche della camera è stato eseguito un volo ad una quota di 27 m, tale da garantire un GSD (Ground Sample Distance) medio di 1 cm. Il blocco fotogrammetrico risulta costituito da 4 strisciate con una base di presa di circa 5 m, tale da garantire un ricoprimento longitudinale superiore all'80%.

L'UAV impiegato nel rilievo della cava è l'esacottero Mikrokopter (Fig. 3) della Sezione di Geodesia e Geomatica del dipartimento DICA del Politecnico di Milano. Il velivolo è dotato di un sistema di navigazione GPS capace di eseguire voli autonomi, mantenendo la quota di volo e muovendosi tra waypoints posti all'inizio e alla fine di ogni strisciata ed acquisendo immagini con una frequenza di scatto costante definita dall'operatore. La strumentazione GPS e gli accelerometri montati a bordo forniscono i dati di telemetria che possono essere utilizzati in una fase preliminare per l'orientamento esterno approssimato dei fotogrammi. Il volo è stato portato a termine con successo in un'unica missione ricoprendo l'intera area attraverso 8 way points. Le ottime condizioni meteorologiche, in particolare l'assenza di vento, hanno consentito il rispetto delle sovrapposizioni di progetto e la copertura dell'intera area con 101 foto, tutte impiegabili nelle successive elaborazioni.

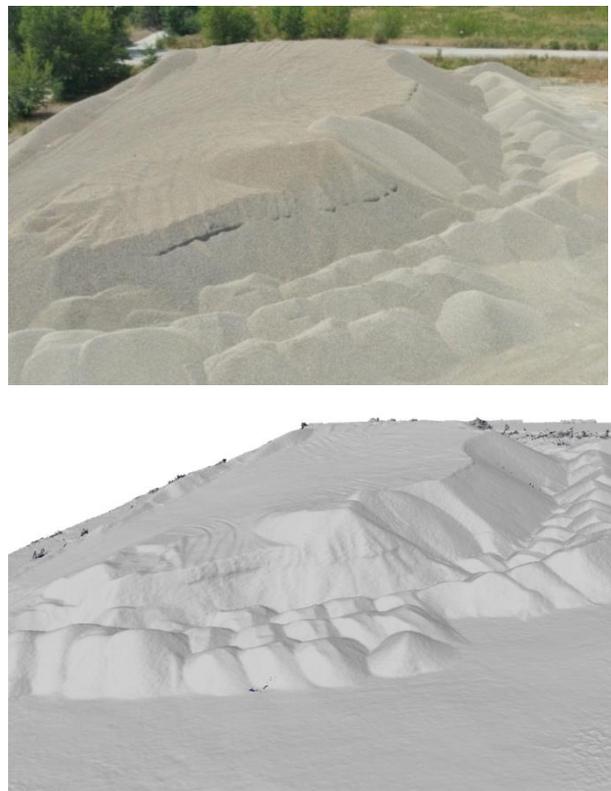


Fig. 1: Area oggetto di studio utilizzata per il calcolo del volume di inerti: immagine acquisita con il drone in una fase preliminare del volo (in alto) e modello 3D realizzato sulla base dei dati acquisiti durante il volo (in basso).

Per la georeferenziazione del blocco sono stati distribuiti 30 target, realizzati come cartelloni 40x40 cm², bianchi su sfondo nero, o come dischi con archi circolari alternati bianchi e neri (Fig. 2); la loro posizione è stata misurata con un rilievo GPS NRTK (utilizzando il servizio di rete ItalPos), condotto con un

ricevitore Trimble 5700, con una precisione di misura di circa 2-3 cm in planimetria e 3-5 cm in altimetria. È stata utilizzata questa modalità di rilievo poiché di rapida esecuzione e in linea con le precisioni ricercate. Una parte dei target è stata impiegata come punti d'appoggio a terra (GCP) per georeferenziare il blocco; i restanti sono stati utilizzati come punti di controllo (CP) per valutare il risultato della compensazione. I punti sono stati misurati due volte ripetendo lo stazionamento dopo circa 40 minuti, così da verificare la ripetibilità del rilievo NRTK. A seguito del confronto tra le coordinate, dei trenta punti rilevati solo ventuno, caratterizzati da differenze inferiori al centimetro, sono stati impiegati ai fini sopracitati.



Fig. 2: Target impiegato



Fig. 3: Workstation e Mikrokopter

Focale (mm)	10.4706	
Formato sensore (mm)	13.336	8.9256
Dimensione immagine (pixel)	3872	2592
Punto principale (mm)	6.6738	4.5339
Parametri di distorsione radiale		
K1	K2	K3
8.45E-04	7.82E-05	0.00
Parametri di distorsione tangenziale		
P1	P2	
-2.29E-06	3.33E-05	

Tabella 1 - Parametri di orientamento interno stimati con PM e utilizzati come calibrazione per tutte le elaborazioni

3. ORIENTAMENTO

Per ricostruire le informazioni geometriche della cava di inerti il flusso di lavoro eseguito è stato quasi parallelo per i diversi software: calibrazione della camera, estrazione di features con operatori di interesse, orientamento e georeferenziazione del blocco di immagini. Si è previsto di confrontare i risultati dell'orientamento ottenuti dai software a partire dal medesimo set di dati. Di seguito sono brevemente descritti i software utilizzati, i dati di ingresso e il loro funzionamento.

La calibrazione dell'ottica è stata realizzata seguendo la procedura implementata nel software commerciale PM (Tabella 1).

3.1 EyeDEA

In EyeDEA le immagini da cui estrarre le features nell'orientamento automatico sono state pre-processate con il filtro di Wallis (Wallis 1976): in base ai parametri di calibrazione dell'ottica sono state ricampionate in modo da renderle prive di distorsione attraverso un codice scritto presso il DICATeA. Per ogni immagine viene dapprima stimato il campo di deformazione applicando le formule di Brown (Brown, 1971); esso viene poi reinterpolato su una griglia regolare il cui passo dipende in modo inversamente proporzionale dall'entità massima della distorsione: ad una distorsione maggiore corrisponde quindi un passo della griglia inferiore. Infine, per ognuno dei pixel dell'immagine senza distorsione è individuato, tramite il ricampionamento indiretto, il pixel corrispondente sull'immagine originale. In questo modo i fotogrammi sui quali EyeDEA esegue l'estrazione dei punti omologhi sono immagini prive di distorsione.

Sfruttando l'operatore di interesse SURF (Speeded Up Robust Features – Herbert Bay et al., 2006) e la procedura di eliminazione di errori grossolani Ransac (Fischler et al., 1981) è possibile individuare, in EyeDEA, le corrispondenze tra le immagini e quindi i punti di legame tramite un approccio semplificato (Nister, 2004), in quanto si opera sulla matrice Essenziale, avendo noti a priori i parametri di orientamento interno. Il software scientifico lavora su sequenze di immagini e orienta la strisciata imponendo dapprima il vincolo epipolare e successivamente quello trifocale. La difficoltà operativa riscontrata nella fase di estrazione delle features, ha fatto supporre che la tessitura dell'oggetto del rilievo non fosse facilmente distinguibile da parte dell'operatore di interesse. Si è quindi intervenuto applicando il filtro di Wallis sulle immagini. I fotogrammi così corretti sono stati processati in EyeDEA, questa volta con successo. La fase successiva di orientamento a stelle proiettive avviene all'interno di PM (versione 6). Per poter utilizzare tale software è necessario utilizzare come input i parametri di calibrazione della camera impiegata, oltre che le coordinate dei punti d'appoggio e le coordinate immagine dei punti di legame estratti da EyeDEA.

Le strisciate orientate con le triplette di punti omologhi di EyeDEA sono state collegate tra loro nella direzione trasversale al volo, sfruttando un codice implementato presso il DICATeA. Esso, partendo dai parametri di orientamento interno ed esterno, riproietta le coordinate terreno dei punti sul set di immagini orientate, individuando, quindi, le foto in cui ogni punto ricade per poi procedere con la correlazione LSM (Least Squares Matching) delle diverse coppie di immagini. Per ognuna delle coppie viene identificata come immagine master quella in cui il punto assume posizione più vicina al punto principale, mentre la slave è di volta in volta un'immagine diversa che contiene lo stesso punto. Al termine dell'utilizzo dell'area-based matching si sono ottenuti nuovi punti immagine, da aggiungersi a quelli individuati dal feature-based matching di EyeDEA.

3.2 PhotoScan versione 0.9.0

Il programma PhotoScan, provenendo dal mondo della CV, sfrutta principi della Structure from Motion (SfM) e consente di ottenere simultaneamente parametri di orientamento interno ed esterno oltre che la ricostruzione della scena tridimensionale (Remondino et al., 2012). Nel nostro caso si è deciso di fornire come input i parametri di orientamento interno noti da calibrazione.

Per riuscire a confrontare e omogeneizzare i dati provenienti dal software di CV, sono stati esportati i risultati dell'orientamento di PS in un formato leggibile da PM e, all'interno dello stesso, sono state estratte le statistiche per la loro valutazione. Tale scelta è stata supportata dalla necessità di interpretare i dati ottenuti all'interno di PS che, sebbene risulti molto speditivo e intuitivo nelle operazioni, è carente nella restituzione all'utente di statistiche e informazioni di tipo geometrico sulle immagini. Grazie a un codice scritto presso il DICATeA, l'esportazione da PS dei dati riguardanti coordinate immagine, orientamento esterno delle foto e parametri di orientamento interno della camera è stata tradotta in un file con formato idoneo all'importazione in PM. Come noto, tutti i programmi di Structure from Motion producono una quantità elevata di corrispondenze (oltre le centinaia di migliaia) che, in fase di bundle block adjustment, sono computazionalmente onerose da usare. Si è quindi operata una riduzione dei punti omologhi individuati prima di importarli in PM, sia per il software EyeDEA sia per PS, permettendo così una gestione più agevole. La decimazione è stata realizzata imponendo il valore massimo di punti immagine e punti terreno e garantendo allo stesso tempo la più elevata molteplicità possibile.

3.3 PhotoModeler Scanner

Infine si è deciso di valutare l'efficacia del tool SmartMatch di PM. Esso permette di estrarre in modo automatico delle features dalle immagini fornite come input, senza la necessità di apporre target per il riconoscimento automatico sull'oggetto del rilievo. Le features estratte sono poi utilizzate nella successiva fase di matching e di orientamento: di fatto il software esegue un free network adjustment e quindi solo in una seconda fase dell'elaborazione l'utente può inserire i punti d'appoggio e ottenere le coordinate di tutti i punti di legame nel sistema di riferimento terreno. PM è un software di tipo commerciale e non è perciò possibile conoscere esattamente quale sia l'operatore di interesse implementato al suo interno: sulla base delle indicazioni fornite nel manuale circa le metodologie consigliate per l'acquisizione delle foto e sulla base di alcuni test svolti con diverse immagini acquisite in condizioni diverse, gli autori ritengono che esso sia simile all'operatore SIFT (Lowe, 2004). Come detto, PM è un software commerciale, rivolto ad una ampia gamma di utenti, non necessariamente esperti nel settore della fotogrammetria: le impostazioni che l'utente può scegliere in fase di preparazione del progetto automatico sono poche. In particolare l'utente può specificare se il matching deve essere eseguito confrontando tra loro tutte le immagini oppure, nel caso di immagini acquisite secondo una sequenza ordinata, il numero massimo di foto che devono essere confrontate tra loro. Ulteriore parametro da impostare è la quantità di features da estrarre: la scelta qui però è limitata, poiché l'utente può solo scegliere tra le diciture "low" e "high". Nel caso di studio si è scelta una densità di punto di tipo "low", confrontando poi tra loro tutte le immagini poiché provenienti da blocco fotogrammetrico acquisito da UAV: questo permette di garantire che siano trovati punti di legame anche tra le diverse strisciate. L'orientamento assoluto è stato eseguito solo in una seconda fase, inserendo i punti d'appoggio.

3.4 Configurazione blocco e confronto statistiche orientamento

Con lo scopo di valutare l'influenza del numero e della distribuzione dei GCP sull'esito della fase di orientamento, sono state scelte due differenti configurazioni. Nel primo caso sono stati utilizzati dieci punti d'appoggio, distribuiti come in Fig.

4a, lasciando quindi a disposizione undici punti di controllo. Nel secondo caso i punti di appoggio sono solamente sei, tutti localizzati alla base del cumulo di ghiaia e, conseguentemente, il numero di punti di controllo è pari a quindici (Fig. 4b). Si è deciso di valutare gli effetti di una tale configurazione poiché non sempre la sommità del cumulo può essere accessibile: è quindi importante valutare quali possano essere gli effetti di una distribuzione dei punti d'appoggio non ottimale sulla stima del volume estratto di cava.

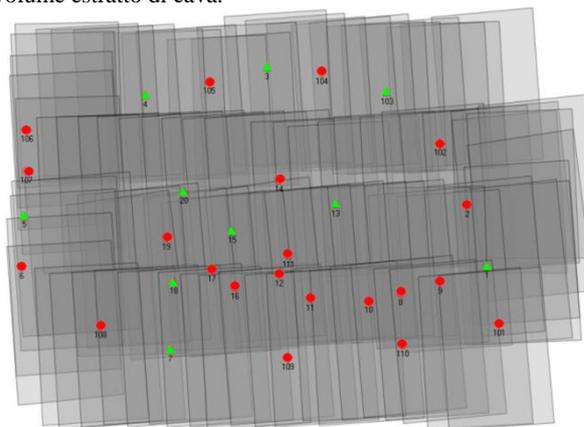


Fig. 4a: Distribuzione 10 GCP

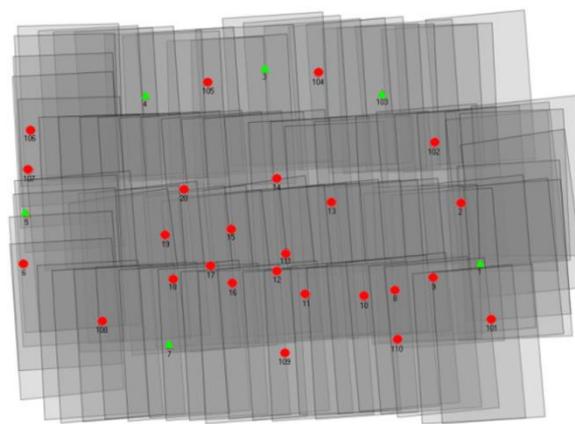


Fig. 4b: Distribuzione 6 GCP

Nell'analisi statistica svolta per confrontare tra loro i diversi software, sono stati presi come riferimento i seguenti parametri: il valore dell'errore medio del processamento σ_0 , il numero di foto elaborate, il numero di punti estratti dai due tipi di software. Sono stati poi valutati anche il minimo, il massimo e la media del numero di punti per foto, la copertura percentuale della foto, il numero dei raggi passanti per punto terreno e l'angolo di intersezione dei raggi (Tabella 2). In particolare, il parametro copertura foto indica la percentuale della superficie coperta da punti collimati in ogni foto. Un valore basso significa che PM fa più fatica a stimare l'orientamento del centro di presa associato a quella foto, fornendo di conseguenza un risultato poco preciso. Il numero di raggi 3D per foto indica quante volte lo stesso punto 3D è visto sulle foto. Infine l'angolo di intersezione dà informazione dell'angolo che si forma tra due raggi che intersecano lo stesso punto 3D (manuale di PhotoModeler 6).

Statistiche orientamento	EyeDEA			PS			PM		
σ_0	1.23			1.11			1.19		
Foto usate	101			101			97		
Punti usati	2751			664			3138		
	min	max	media	min	max	media	min	max	media
Punti per foto	19	246	153	6	238	102	22	428	294
Copertura foto (%)	31	95	81	2	92	57	19	82	70
# Raggi per 3D punto	3	21	6	2	21	15	2	17	3
Angolo intersezione	5	72	30	23	73	59	2	60	16

Tabella 2 – Statistiche dell'orientamento esterno

a) - DIFFERENZE TIE POINTS									
	EyeDEA			PS			PM		
	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
RMSE	0.006	0.006	0.024	0.013	0.020	0.033	0.018	0.028	0.036
b) - PRECISIONI TIE POINTS									
	EyeDEA			PS			PM		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
RMSE	0.013	0.021	0.052	0.004	0.004	0.010	0.033	0.021	0.101

Tabella 3 – TIE POINTS: a) Differenze delle coordinate dei Tie Points tra configurazione a 10 e a 6 GCP; b) Precisione di collimazione dei Tie Points nella configurazione a 10 GCP

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 3, si nota come l'errore medio del processo di orientamento sia simile tra i software, leggermente maggiore per EyeDEA. Il numero di punti per foto è in media maggiore per PM mentre la copertura del formato è migliore per EyeDEA, il numero di raggi passanti per un punto terreno e il valore dell'angolo di intersezione è in media maggiore in PS. Tale risultato è conseguenza della strategia di ricerca delle features dei vari software: EyeDEA lavora su triplette lungo la strisciata, PS e il tool SmartMatch di PM usano tutte le immagini contemporaneamente nella fase di ricerca delle corrispondenze.

EyeDEA assicura una molteplicità minima pari a 3, una buona distribuzione dei punti all'interno della foto e un angolo di intersezione discreto, visto che la ricerca di features avviene lungo la strisciata.

PS, a seguito dello sfoltimento operato, ha una media più bassa sia dei punti per immagine che del valore di copertura del formato rispetto agli altri software, mentre mantiene un angolo di intersezione ben maggiore con punti visti meglio su più fotogrammi (15 raggi per punto). Ciò può essere spiegato in ragione del fatto che nella fase iniziale si cercano corrispondenze tra tutte le immagini e che in fase di filtraggio sono preferiti punti con elevata molteplicità.

Nel caso del blocco fotogrammetrico compensato in modo automatico con PM non è stato possibile utilizzare tutte le 101 immagini; infatti, il software non è stato in grado di estrarre un numero sufficiente di punti di legame su alcune di esse. Si tratta però delle prime immagini sulla prima strisciata, quindi di fatto, ininfluenti al fine del calcolo del volume, in quanto non inquadrano il cumulo di ghiaia. In media con PM i punti estratti per foto sono più elevati rispetto a quelli individuati dagli altri software, ma molti di questi punti hanno una molteplicità pari a

2 (8320 su un totale di 11043 smart points estratti). Bisogna poi sottolineare come i punti oggetto estratti dal software siano in totale 11043, ma la maggior parte di essi sono classificati dal software stesso come punti di qualità intermedia e di fatto sono quindi utilizzati nella sola fase iniziale del processamento. Secondo il parere degli autori questi punti saranno probabilmente proprio quelli con molteplicità più bassa. I punti che il software riconosce come punti di elevata qualità e che utilizza in tutte le fasi del bundle block adjustment sono solamente 3138.

In Tabella 3 sono elencate le statistiche relative ai TiePoints: nella sezione a) differenze sono riportati i residui sulle coordinate delle collimazioni dei punti di legami tra le configurazioni a 10 GCP e a 6 GCP; nella sezione b) precisioni si trovano, invece, i valori di accuratezza nella collimazione dei punti di legame in X, Y e Z per il caso di blocco con 10 GCP.

Le differenze nelle coordinate dei tie points in planimetria sono dell'ordine di pochi centimetri per PS e PM e di millimetri per EyeDEA, mentre sono relativamente più alti gli scarti sulle quote: il più basso è il risultato di EyeDEA con 2 cm. In complesso le differenze sui punti di legame risultano in linea con le precisioni con cui sono stati misurati i punti d'appoggio in fase di rilievo e compatibili con le precisioni di collimazioni dei target.

Per quanto riguarda la precisione di collimazione dei punti, essa è dell'ordine dei millimetri in planimetria e di 1 cm in altimetria nel caso di PS: il software permette di ottenere questi risultati molto interessanti soprattutto in virtù della molteplicità dei punti, in media più alta rispetto agli altri software, e dell'approccio multimmagine. Valori maggiori di RMSE sono stati invece riscontrati per gli altri software, in particolare PM risulta meno preciso in quota.

DIFFERENZE CHECK POINTS						
RMSE	10 GCP – 11 CP			6 GCP – 15 CP		
	EyeDEA	PS	PM	EyeDEA	PS	PM
X (m)	0.019	0.032	0.030	0.020	0.031	0.043
Y (m)	0.018	0.026	0.035	0.019	0.037	0.043
Z (m)	0.041	0.056	0.086	0.039	0.050	0.083

Tabella 4 – Statistiche della differenza delle coordinate dei CP nelle configurazioni a 10 e a 6 GCP

Valutando le differenze sulle coordinate dei CP (Tabella 4), esse sono compatibili con le precisioni caratteristiche del rilievo GPS e imputabili all'errore di collimazione dei target commesso dall'operatore.

Si vede che nel caso di 10 GCP impiegati, per tutti i software gli scarti in planimetria varino tra 2 e 4 cm, mentre scarti più grossi si hanno sulla coordinata altimetrica, a partire da 4.1 cm per EyeDEA, 5.6 cm per PS fino a 8.6 cm per PM.

Per la configurazione a 6 GCP, gli scarti planimetrici sono consistenti sulle coordinate X e Y per ogni software. Per quanto riguarda l'altimetria, in questo caso gli scarti migliorano ulteriormente per EyeDEA, PS e PM ottenendo rispettivamente 3.9, 5.0 e 8.3 cm.

Complessivamente EyeDEA mostra scarti più piccoli in entrambe le configurazioni (2 cm in planimetria e 4 cm in altimetria), seguito da PS. Sono peggiori invece i risultati ottenuti da PM con scarti in quota molto alti, specie nella configurazione a 6 GCP, il che lascia presupporre ripercussioni sulla ricostruzione del DSM e la stima del volume.

4. GENERAZIONE DEL DSM

A partire dalla ricostruzione geometrica del blocco sono state generate le nuvole di punti con i diversi software in entrambe le configurazioni previste a 10 e 6 GCP.

Dagli orientamenti dei blocchi di EyeDEA si è passati alla generazione delle nuvole di punti con il programma Dense Matcher (DM), (Re et al., 2012). Esso implementa l'algoritmo Least Squares Matching (LSM) di correlazione di immagini e permette di ricostruire la geometria dell'oggetto attraverso un'immagine di riferimento (master) e una in cui cercare corrispondenze (slave), ottenendo modelli come nuvole di punti per ogni coppia di immagini. Per l'elaborazione dei dati il software richiede di impostare la dimensione della finestra di ricerca che scorre l'immagine slave, ovvero la template, del valore del coefficiente di cross-correlazione NCC e il passo di griglia su cui estrarre punti. Dall'elaborazione di DM si ottengono le nuvole di punti (70) che sono state registrate, ossia interpolate e allineate tra loro. In questa fase sono stati riscontrati dei bias tra modelli, più o meno evidenti, che sono stati poi ridotti nella fase di triangolazione.

La creazione delle nuvole di punti con il software commerciale PM è stata realizzata utilizzando l'apposita funzione Create Dense Surface. Il tool permette di scegliere sulla base di alcuni criteri di qualità quali coppie di immagini utilizzare per la creazione della mesh; in particolare l'utente può impostare il rapporto base altezza, il massimo residuo sui punti ammissibile, il numero minimo di punti automatici di legame tra le coppie di fotogrammi e l'angolo massimo tra immagini adiacenti. A valle

della creazione della nuvola di punti si è resa necessaria una fase di editing manuale per eliminare alcuni evidenti errori grossolani.

Con lo scopo di determinare il volume del deposito di ghiaia si è proceduto alla generazione del DSM sulla base delle nuvole di punti prodotte dai diversi software oggetto di analisi.

Visto l'elevato numero di punti estratti, prima di eseguire l'interpolazione della mesh, si è deciso di decimare le stesse, in modo da ridurre il costo computazionale richiesto per la creazione del modello digitale della superficie attraverso il software MeshLab, considerando un punto ogni 10 cm. I punti sono stati quindi importati in ArcGis Desktop v10 e interpolati, pesando i contributi dei 12 punti più vicini in funzione dell'inverso del quadrato della distanza, creando un DSM in formato raster con passo pari a 2 cm.

In Fig. 5 è mostrato a titolo esemplificativo il DSM generato da DM. Da un confronto puntuale dei DSM generati emerge come quello di PS sia il più completo e liscio; quello di DM mostra qualche difetto di discontinuità della superficie, piccoli salti derivati dall'unione di più modelli, mentre il DSM di PM è invece molto frastagliato e rumoroso. Si evidenziano quindi problemi ben noti a chi produce DSM per correlazione di immagini: tipicamente le lacune di dati vengono riempite per interpolazione, a seguito della rimozione degli outlier. Il riempimento delle lacune è rimandato talvolta al software e talvolta a programmi di modellazione 3D. Evidentemente, PS ha un metodo interno di riempimento e lisciamiento, DM non prevede né filtraggio né riempimento al momento dei test eseguiti, altrettanto si ritiene sia valido per PM.

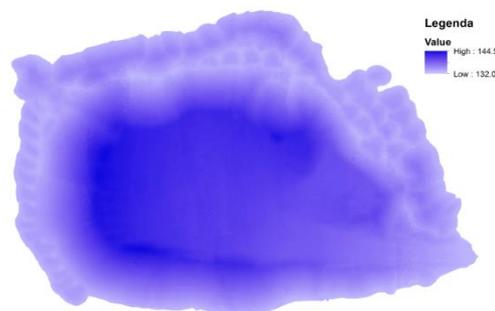


Fig. 5: DSM realizzato con Dense Matcher

Nella successiva Fig. 6 si possono osservare le differenze eseguite tra i DSM ottenuti con i diversi software con le due diverse configurazioni d'appoggio: emerge chiaramente come i modelli creati da PS risultino essere molto simili al variare della posizione dei GCP, differenze sempre al di sotto di 10 cm. Per quanto riguarda DM è invece evidente come siano individuabili le diverse nuvole di punti, in ragione proprio del metodo applicato dal software per la creazione degli stessi modelli. Nel caso di PM il modello risulta essere invece molto rumoroso, con zone diffuse caratterizzate da differenze superiori a 50 cm.

Combinazioni	ΔQuota media
	m
DM 10 - DM 6	0.011
PS 10 - PS 6	-0.011
PM 10 - PM 6	0.006

Tabella 5 – Valore della differenza della quota media valutato sui DSM generati da stesso software in configurazioni diverse di GCP

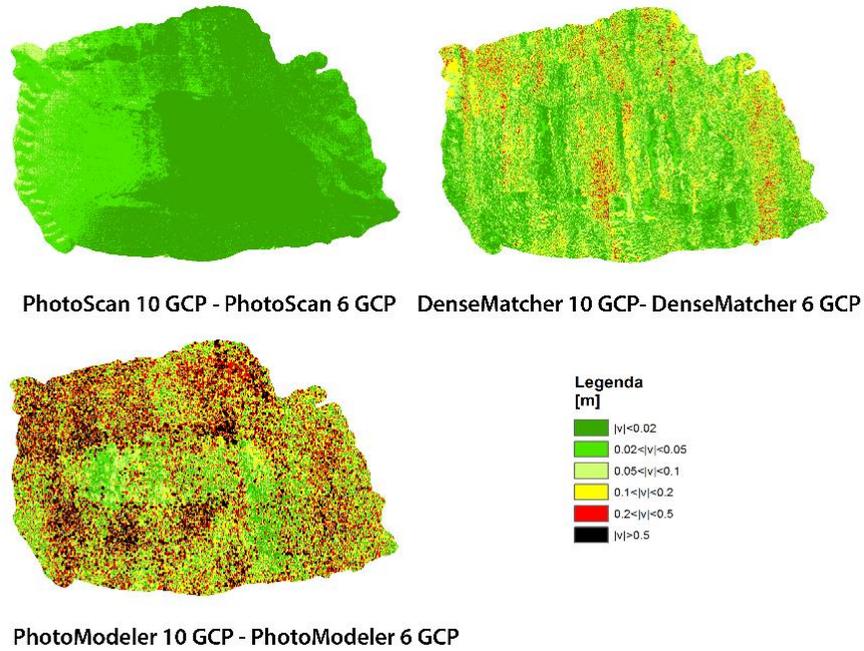


Fig. 6: Differenze dei DSM ottenuti con i diversi software al variare della configurazione d'appoggio

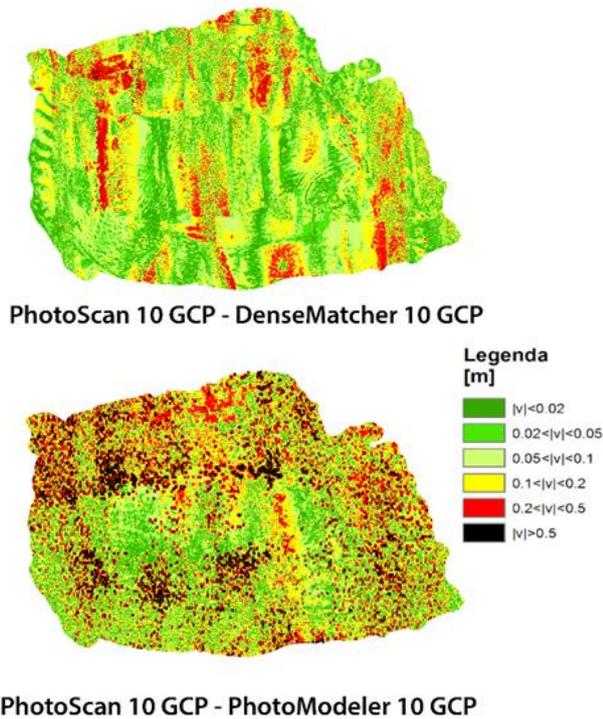


Fig. 7: Differenze tra il DSM di riferimento di PS nella configurazione a 10 GCP rispetto ai DSM realizzati nella medesima configurazione di DM (in alto) e di PM (in basso)

5. VOLUMI

Una volta ottenuti i modelli digitali di superficie è stata realizzata una maschera in ambiente GIS per isolare la sola zona del cumulo, permettendo quindi di calcolare il volume relativo alla medesima zona per tutti i DSM realizzati, a partire dalle nuvole di punti create dai diversi software.

Per il calcolo del volume è stato considerato un piano di riferimento pari alla minima quota tra quelle rilevate in corrispondenza dei target, poiché il cumulo di ghiaia è collocato al di sopra di una spianata artificiale: non avendo a disposizione poi un dato volumetrico di riferimento, proveniente da un rilievo indipendente è stata sviluppata un'analisi solo in termini di differenze relative.

DIFFERENZE TRA SOFTWARE			
Combinazioni	ΔVolume		ΔQuota media
	m ³	%	m
PS 10 - DM 10	-6.63	-0.03	-0.002
PS 10 - PM 10	602.32	2.89	0.144

Tabella 6 – Valore della differenza di volume in metri cubi e in percentuale tra i DSM generati da stesso software in configurazioni diverse di GCP



Grafico 1 – Stima dei valori di volume per ogni software, rispettivamente DM, PS, PM nelle configurazioni a 10 e 6 GCP

In base ai risultati in Tabella 5, Tabella 6 e Grafico 1 si può osservare come tutti i software forniscano stima dei volumi consistente nelle due configurazioni. Per quanto riguarda la differenza sulla stima del volume all'interno dello stesso software, i valori di volume stimati da DM e PS nelle due configurazioni sono piuttosto simili e si può presupporre che si avvicinino al reale valore di volume della cava che, si ricorda, non è noto. Inoltre è da tenere in considerazione che i DSM prodotti dai due software erano quelli per i quali l'orientamento esterno risultava migliore.

È poi evidente come la differenza del volume, espressa in termini percentuali e calcolata confrontando tra loro le soluzioni ottenute con il medesimo software variando la configurazione da 10 a 6 GCP, sia inferiore all'unità. Ciò dimostra che per i software testati è sufficiente utilizzare punti d'appoggio ben distribuiti alla base del cumulo e in testa alle strisciate.

Volendo poi valutare le variazioni di volume imputabili alla scelta di uno specifico software si è deciso di eseguire le differenze tra le stime calcolate a parità di configurazione del blocco. Per brevità sono presentate le differenze nella sola configurazione a 10 GCP tra PS e gli altri software. Si è scelto come riferimento PS poiché il modello da esso creato appariva più liscio e non soggetto alla presenza di errori grossolani. Le differenze sono riportate in Tabella 7: PM si discosta di circa 600 m³ rispetto al volume stimato da PS, mostrando una differenza della quota media rispetto al modello di riferimento di 14 cm. Ottima concordanza si ha, al contrario, tra il volume calcolato sul modello di DM e quello scelto come riferimento. A parità di accuratezza pare opportuno sottolineare come il pacchetto scientifico EyeDEA + DM sia molto meno automatizzato rispetto a quello di CV, motivo per cui i tempi di elaborazione si dilatano.

DIFFERENZE INTERNE AL SOFTWARE		
Combinazioni	ΔVolume	
	m ³	%
DM 10 - DM 6	44.26	0.21
PS 10 - PS 6	-44.08	-0.21
PM 10 - PM 6	24.45	0.12

Tabella 7 – Valore della differenza di volume in metri cubi e in percentuale tra il DSM di riferimento di PS e quelli generati da DM e PM nella stessa configurazione a 10 GCP.

CONCLUSIONI

Dai test eseguiti, le piattaforme UAV si rivelano una tecnica fotogrammetrica di rilievo valida per il calcolo di volumi di cava, offrendo una soluzione veloce, economica e completa. L'influenza del numero e della distribuzione dei GCPs ha messo alla prova i programmi di fotogrammetria e di Computer Vision sulla ricostruzione della geometria del blocco e sulla generazione del modello digitale del terreno, mostrando punti di forza e debolezza. In particolare è emerso come PhotoScan, il pacchetto EyeDEA + DenseMatcher e PhotoModeler diano risultati tra loro molto coerenti: le differenze ottenute nelle stime dei volumi, con le due diverse configurazioni dei punti d'appoggio, sono inferiori al punto percentuale. Occorre poi, sottolineare la velocità di elaborazione del programma commerciale PhotoScan il quale è facilmente in grado di orientare il blocco di immagini e generare il Digital Surface Model (DSM) all'interno dello stesso ambiente. Il software è caratterizzato da un livello di automazione molto elevato e fornisce DSM completi e lisci. Esso è inoltre risultato, sulla base delle prove fatte, affidabile e accurato nei risultati tanto quanto i programmi scientifici EyeDEA e Dense Matcher, i quali, invece, richiedono maggiore intervento da parte dell'operatore nella fase di orientamento e nella generazione delle nuvole di punti. L'approccio a sequenza di immagini di EyeDEA, con il quale esso nasce, non ideale per un blocco acquisito da UAV, è stato superato grazie a un codice di calcolo scritto ad hoc che va a legare le strisciate ottenendo ottimi risultati. Per quanto riguarda Dense Matcher, lavora per coppie di immagini, generando una nuvola di punti paragonabile per completezza a quella di PS, il quale sfrutta, al contrario, un approccio multimmagine (Multiphoto Geometrically Constrained Matching, MGCM). Si prevede di migliorare questi aspetti al fine di rendere i software in-house maggiormente competitivi. Più macchinoso, oltre che meno affidabile, è invece l'uso del software PhotoModeler Scanner soprattutto per la generazione della nuvola di punti, in quanto è necessario editing manuale per la rimozione di outlier.

BIBLIOGRAFIA

- Bendea, H., Boccardo, P., Dequal, S., Giulio Tonolo, F., Marenchino, D. & Piras, M., 2008. Low cost UAV for post-disaster assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII. Part B8.
- Berni, J., Zarco-Tejada, P.J., Suarez, L. & Fereres, E., 2009. Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (3), pp. 722-738.
- Blazakis, J., 2004. Border Security and Unmanned Aerial Vehicles, CRS Report for Congress, Order Code RS21698, 2 January 2004. <http://www.epic.org/privacy/surveillance/spotlight/0805/rsjb.pdf>.
- Brown, D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866.
- Careless, J., 2005. *UAV provides NOAA with airborne eye*. In governmentvideo.com, September, Copyright © 2005 by CMP Information, Inc. Reprinted with permission from Government

- Video. 6170.<http://www.streambox.com/corporate/gv6170-final.pdf>.
- Chiabrando, F., Lingua, A., and Piras, M.: Direct photogrammetry using UAV: tests and first results, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 81-86, doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-81-2013, 2013.
- Colomina, I., Blázquez, M., Molina, P., Parés, M. & Wis, M., 2008. Towards a New Paradigm for high-resolution low-cost Photogrammetry and Remote Sensing. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, Vol XXXVII, Part B1, pp. 1201-1206.
- Dosso, P., Pinto, L., Sona, G., Gini, R. & Passoni D., 2013. Validazione di prodotti fotogrammetrici speditivi ottenuti con immagini da UAV. *Atti 17^a Conferenza Nazionale ASITA, 5-7 Novembre 2013, Riva del Garda (TN), Italia*.
- Eisenbeiss, H., 2009. *UAV Photogrammetry*. Ph.D. thesis No. 18515, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Switzerland, Mitteilungen Nr. 105, pp. 235.
- Fischler, M.A. & Bolles, R.C., 1981. Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 21: 381-395.
- Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G. & Dosso, P., 2013. UAV photogrammetry: block triangulation comparisons. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XL-1/W2, 157-162, *UAV-g 2013, 4-6 Settembre 2013, Rostock, Germania*.
- Gini, R., Passoni, D., Pinto, L. & Sona, G., 2012. Aerial images from an UAV system: 3D modeling and tree species classification in a park area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B1, 361-366, XXII ISPRS Congress, 25 Agosto - 1 Settembre 2012, Melbourne, Australia*.
- González-Aguilera, D., Fernández-Hernández, J., Mancera-Taboada, J., Rodríguez-González, P., Hernández-López, D., Felipe-García, B., Gozalo-Sanz, I. & Arias-Perez, B., 2012. 3D modelling and accuracy assessment of granite quarry using Unmanned Aerial Vehicle. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, pp. 37-42, 2012*.
- Hirokawa, R., Kubo, D., Suzuki, S., Meguro, J. & Suzuki, T., 2007. A small UAV for immediate Hazard map generation. *AIAA Infotech@Aerospace2007 Conference and Exhibit, 7 - 10 May 2007, Rohnert Park, California*.
- Lowe, D., 2004. Distinctive image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*.
- Mirchandani, P., Hickman, M., Angel, A. & Chandnani, D., 2003. *Application of Aerial video for Traffic Flow Monitoring and Management*. EOM Vol. 12, No. 4, pp.10-17.
- Nister, D., 2004. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Trans PAMI*. 26(6): 756-770.
- Re, C., Roncella, R., Forlani, G., Cremonese, G. & Naletto, G., 2012. Evaluation of area-based image matching applied to DTM generation with Hirise images. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol I-4, 209-214 (2012)*.
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P. & Troisi, S., 2012. *Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview. Lecture Notes in Computer Science*, Volume 7616, pp. 40-54, 2012.
- Roncella, R., Re, C. & Forlani, G., 2011. Comparison of two Structure and Motion Strategies. In *Proc. 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. Trento, Italy: ISPRS*. Available at: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W16/pdf/roncella_re_forlani.pdf
- Srinivasan, S., Latchman, H., Shea, J., Wong, T. & McNair, J., 2004. *Airborne Traffic Surveillance Systems – Video Surveillance of Highway Traffic*. VSSN'04, October 15, New York, New York, USA.
- Wallis, R., 1976. An approach to the space variant restoration and enhancement of images. *Proceedings of Symposium on Current Mathematical Problems in Image Sciences, Naval Postgraduate School, Monterey, California*. 326–34.