

RISULTATI OTTENUTI NELL'AMBITO DELLA SESSIONE "BENCHMARK" - USO DI IMMAGINI UAV PER LA RICOSTRUZIONE 3D: ESPERIENZE CONDIVISE TRA UTENTI (61° CONVEGNO NAZIONALE SIFET, LECCE 8-10 GIUGNO 2016)

ACHIEVEMENT OF THE "BENCHMARK" SESSION - ON THE USE OF UAV IMAGES FOR 3D RECONSTRUCTION: A JOINT EXPERIENCE AMONG USERS" (HELD DURING THE 61th SIFET MEETING, LECCE, ITALY, JUNE 8-10, 2016)

F. Mancini^a, C. Castagnetti^a, P. Rossi^a, F. Guerra^b, M. Ballarin^b, D. Visintini^c, A. Garraffa^d, F. Stecchi^e, I. Aicardi^f, N. Grasso^f, F. Noardo^f, V. De Luca^f, M. Ratto Cavagnaro^g, G. Caroti^h, A. Piemonte^h, L. Pintoⁱ, M. Santise^l, V. Albano^m, M. Curuni^m, M. Cerratti^m, G. Abate^m

^a Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dip. di Ingegneria "Enzo Ferrari", via P. Vivarelli 10, 41125 Modena, Italy, (francesco.mancini, cristina.castagnetti, paolo.rossi@unimore.it)

^b Università IUAV di Venezia, Circe, s. croce 1624, 30125 Venezia, (guerra2, martinab)@iuav.it

^c Università degli Studi di Udine, Dip. Politecnico di Ingegneria e Architettura, via delle Scienze 206, 33100 Udine, Italy, domenico.visintini@uniud.it

^d Università degli Studi di Palermo, Dip. Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, viale delle scienze – edificio 8, 90128 Palermo, alessandra.garraffa@unipa.it

^e Adriarilievi, via Castel San Pietro 54, 48121 Ravenna - fstecchi@adriarilievi.com

^f Politecnico di Torino, Dip. di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino – ([irene.aicardi](mailto:irene.aicardi@polito.it), [nives.grasso](mailto:nives.grasso@polito.it), [francesca.noardo](mailto:francesca.noardo@polito.it))@polito.it

^f GEORES, via Marittima s.n.c., 03100 Frosinone - valerio.deluca@geores.it

^g Geometra professionista, Via Pian Mercato 28/4, 16044 Monleone di Cicagna (GE) - massimoratto.geometra@gmail.com

^h Università di Pisa, Dip. Ingegneria Civile e Industriale, largo Lucio Lazzarino 2, 56122 Pisa – ([gabriella.caroti](mailto:gabriella.caroti@unipi.it), andrea.piemonte@unipi.it)

ⁱ Politecnico di Milano, Dip. Ingegneria Civile e Ambientale, p.zza L. da Vinci 32, 20133 Milano - livio.pinto@polimi.it

^l Università di Parma, Dip. Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura,

Parco area delle scienze 181/a, 43124 Parma – marina.santise@studenti.unipr.it

^m Leica Geosystems S.p.A, via Codognino 10,26854 Cornegliano Laudense (LO) – ([valentina.albano](mailto:valentina.albano@leica-geosystems.com), [michele.curuni](mailto:michele.curuni@leica-geosystems.com), [marco.cerratti](mailto:marco.cerratti@leica-geosystems.com), giovanni.abate@leica-geosystems.com)

PAROLE CHIAVE: Sessione Benchmark, fotogrammetria da UAV, auto-calibrazione, action camera, frame camera

KEY WORDS: Benchmark session, UAV photogrammetry, camera self-calibration, action camera, frame camera

RIASSUNTO

Il lavoro riassume i risultati ottenuti da diversi partecipanti alla sessione "benchmark" - uso di immagini UAV per la ricostruzione 3D: esperienze condivise tra utenti, svoltasi nell'ambito del 61° convegno nazionale SIFET (Lecce 8-10 giugno 2016). L'iniziativa ha previsto l'elaborazione di un dataset comune, rappresentato da immagini acquisite tramite aeromobile a pilotaggio remoto, ai fini della ricostruzione tridimensionale di ambienti di pregio storico e culturale. Tra gli obiettivi principali vi era quello di confrontare i diversi approcci seguiti dai partecipanti nell'elaborazione dei dati, mettendo in luce le diverse potenzialità dei software disponibili, le possibili strategie relative all'uso dei punti di controllo e il livello di accuratezza raggiunto. Nonostante l'utilizzo di procedure consolidate nell'analisi dei dati, i risultati riportati dagli utenti evidenziano significative differenze nei livelli di accuratezza, verificabili dopo il confronto con i punti di controllo e con la nuvola di punti ottenuta con scansione laser terrestre.

ABSTRACT

This paper summarize the achievements of an experimental meeting session held within the 61th SIFET national meeting (Lecce, Italy, 6-10 June 2016). The session named "benchmark" introduced results achieved by users in the processing of a shared dataset, composed of images acquired from unmanned aerial vehicle (UAV), to reconstruct the three-dimensional properties of cultural heritage. Data, results provided by authors and validation strategies of outcomes from the photogrammetric processing of UAV images highlighted different level of spatial accuracy by the products. Despite the good level of automation introduced by the structure from motion approach to data processing, the users detected differences at cm-level in the accuracy of results after the use of available software.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito del 61° convegno nazionale SIFET, tenutosi a Lecce dal 6 al 10 Giugno 2016, si è svolta una sessione "benchmark" incentrata sulla fotogrammetria con immagini acquisite da sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) per la ricostruzione tridimensionale. L'iniziativa ha previsto la creazione di un dataset di fotogrammi acquisiti da SAPR, di punti di controllo utili nelle fasi di orientamento/verifica della qualità metrica dei prodotti oltre ad una serie di nubi di punti ottenuta con scansione laser terrestre che rappresenta un valido riferimento nella quantificazione del livello di accuratezza raggiunto. L'intero dataset è stato messo a disposizione della comunità SIFET e non. I risultati forniti dai partecipanti all'iniziativa sono stati presentati in una sessione dedicata e denominata "benchmark - uso di immagini UAV per la ricostruzione 3d: esperienze condivise tra utenti". Sperimentazioni di questo tipo, seppur rare, consentono di raccogliere le esperienze e competenze degli utenti nelle tecniche di elaborazione dei dati e di mettere a confronto le strategie adottate (Nex et al., 2015; Gerke et al., 2016). Hanno aderito all'iniziativa 32 utenti, suddivisi in egual misura tra enti universitari e aziende/studi professionali. Alla scadenza del termine indicato per la sottomissione dei risultati, sono pervenuti 20 contributi, di cui 12 in forma molto ben organizzata e corredati da informazioni complete sulle analisi condotte, sui risultati ottenuti e, talvolta, dei modelli 3D elaborati. Per ulteriori informazioni sulla partecipazione degli utenti e su come è stata impostata la procedura di distribuzione e raccolta dei dati si rimanda ad un breve resoconto pubblicato a margine del convegno (Mancini 2016).

1.1 Descrizione del dataset distribuito agli utenti

Il dataset, fornito ai partecipanti con alcuni mesi di anticipo, era composta da immagini relative all'area archeologica di *Saepinum* (CB). In particolare, i dati distribuiti sono relativi ad una porzione del foro romano che si presenta con pianta rettangolare e pavimentazione con lastroni in pietra lavorata. Le immagini sono state acquisite grazie a due voli distinti, entrambi con assetto nadirale della camera. Il primo volo è stato effettuato con esacottero MicroUAV (Figura 1a) equipaggiato con camera Canon PowerShot S100 (13 immagini acquisite). Il secondo utilizzando il modello di quadricottero Parrot Ar.Drone 2.0 GPS Edition (Figura 1b), con camera GoPro Hero 3 Black Edition e obiettivo fisheye (15 immagini acquisite). Le principali caratteristiche delle due camere sono elencate in tabella 1.

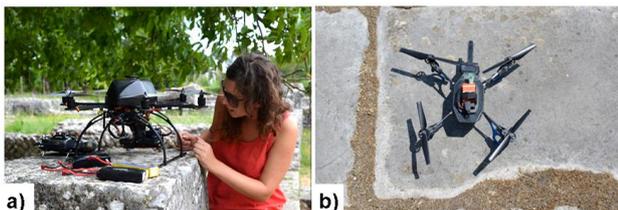


Figura 1. Alcune fasi di preparazione al volo con esacottero MicroUAV (a) e quadricottero Parrot Ar.Drone 2.0 GPS Edition (b)

In entrambi i casi tutti i punti dell'area rilevata ricadevano in almeno 5 fotogrammi.

Canon PowerShot S100	
Peso	198 gr
Sensore	Canon CMOS 12.1 MP 1/1.7" (4000x3000)
Focale utilizzata	5.2 mm (focale equivalente 24 mm)
Dimensione del sensore	7.44 x 5.58 mm
Dimensione del pixel	1.86 micron

GoPro Hero 3 Black Edition	
Peso	76g (camera con batteria)
Sensore	CMOS 12 Mp (4000x3000)
Focale utilizzata	2.77 mm (focale equivalente 16 mm)
Dimensione del sensore	6.20 x 4.65 mm
Dimensione del pixel	1.55 micron

Tabella 1. Principali caratteristiche delle camere Canon PowerShot S100 e GoPro Hero 3 Black Edition a confronto

La disponibilità di fotogrammi acquisiti con "frame camera" e "action camera" rappresenta una ulteriore opportunità di verifica della qualità dei prodotti in presenza di obiettivi caratterizzati da distorsioni panoramiche accentuate. Nella stessa sessione, le problematiche relative alla calibrazione di camere digitali compatte e *action camera* sono state oggetto di una relazione inviata e tenuta dal prof. Domenico Visintini (Università degli Studi di Udine). Ulteriori aspetti relativi alla progettazione della fase di acquisizione dei dati e alle modalità operative sono stati illustrati durante la sessione dalla dott.ssa Martina Ballarin (Università Iuav di Venezia).

Nella zona interessata dal benchmark erano disponibili 10 punti di controllo a terra (GCP) rilevati con GPS e riferiti ad un sistema locale di coordinate. Tali GCP saranno poi utilizzati sia nell'orientamento esterno sia nella verifica della qualità dei prodotti ottenuti. Per questi erano disponibili anche le relative monografie, utili per il riconoscimento e collimazione sulle immagini. Infine, per l'area era disponibile anche la nuvola di punti ottenuta grazie ad un rilevamento con laser terrestre a scansione (con strumentazione Faro Focus 3D). Quest'ultimo rappresenta un valido paragone nella verifica di qualità dei prodotti tridimensionali ottenuti. L'area di studio è rappresentata in Figura 2, dove il foro romano è stato ricostruito tramite allineamento di alcune scansioni laser. Le immagini distribuite agli utenti ricadono nel settore evidenziato in figura.

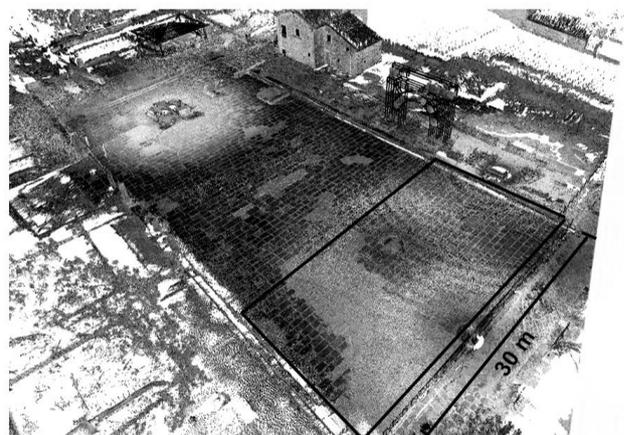


Figura 2. Area del foro romano attraverso l'unione di scansioni laser e delimitazione dell'area rilevata con immagini SAPR

I punti di controllo sono distribuiti in modo omogeneo nell'area come si può vedere in figura 3.

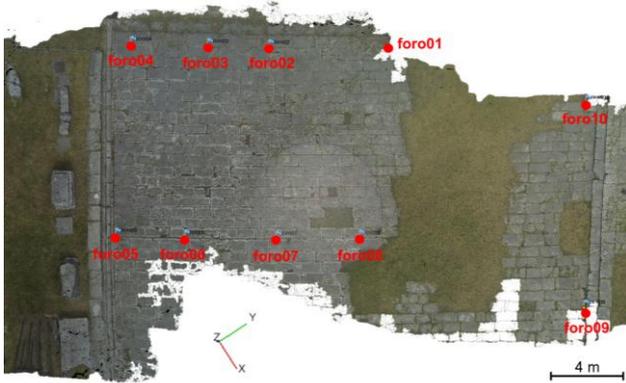


Figura 3. Distribuzione dei punti di controllo

Agli utenti sono stati indicati anche i software di più largo utilizzo nell'elaborazione di immagini acquisite da SAPR, molti dei quali basati sulla tecnica *Structure from Motion* (SfM) per l'orientamento interno e la creazione della nuvola sparsa (*sparse cloud*) e di quella densa (*dense cloud*). Per una panoramica su tali metodologie, sulle possibili applicazioni alla fotogrammetria da SAPR e sulle problematiche relative ai problemi dell'orientamento con camera tradizionale si vedano i lavori sullo stato dell'arte (Colomina e Molina, 2014; Dall'Asta et al., 2014; Eltner et al., 2016; Santise et al., 2014) mentre per una discussione di tali problematiche riferite a camere di tipo *wide angle* è possibile consultare Ballarin et al., (2015) e Hastedt et al., (2016).

2. RISULTATI DELLE DIVERSE ANALISI

2.1 Software utilizzati e analisi svolte

I software utilizzati per l'elaborazione dei fotogrammi acquisiti dalle due camere sono quelli più frequentemente utilizzati in ambito professionale e di ricerca: Agisoft Photoscan (Agisoft PhotoScan, 2104), Pix4D Mapper (Pix4D, 2016), Photomodeler, Visual SFM, MicMac e 3DF Zephyr Aerial. Le tipologie di analisi svolte sono invece riconducibili ai seguenti approcci:

- i. Valutazione delle qualità delle nuvole di punti in relazione a 1) software utilizzato, 2) alla camera con i relativi modelli di calibrazione e 3) all'uso dei punti di controllo (numero, distribuzione spaziale, accuratezza associata alle coordinate);
- ii. Valutazione delle qualità delle nuvole di punti ottenute con fotogrammetria da UAV tramite il confronto con la nuvola di punti ottenuta da laser a scansione terrestre.

In Figura 4 lo schema riassuntivo della casistica relativa alle possibili scelte da parte degli utenti nell'organizzazione del lavoro.



Figura 4. I possibili approcci seguiti nell'elaborazione dei dati

2.2 Stima dell'accuratezza dei prodotti 3D sulla base del software utilizzato e del numero di punti di controllo

Una delle analisi svolte dagli utenti ha riguardato la produzione della nuvola dei punti densa, utilizzando diversi software, e il suo orientamento sulla base della totalità o di un sottoinsieme dei GCP disponibili. Eventuali GCP non inseriti nella restituzione fotogrammetrica sono stati successivamente utilizzati dai partecipanti nella verifica di qualità dei prodotti 3D. Questi ultimi saranno definiti nel seguito del lavoro come *check points* (CP). Nella Tabella 2 si riporta una sintesi dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati per le due camere, vari software e due diversi scenari che prevedono un diverso utilizzo di GCP come vincoli nella procedura di BBA e CP. Nel primo scenario sono disponibili 4 GCP e 4 CP, nel secondo sono stati considerati 8 GCP e nessun CP.

In Tabella 2 i valori associati ai GCP rappresentano i residui dell'operazione di *bundle block adjustment* (BBA) mentre quelli associati ai CP derivano dal confronto fra le coordinate del punto note e quelle relative al modello orientato. I singoli valori dei residui associati all'uso della camera Canon PowerShot S100 sono in generale dell'ordine di pochi centimetri. In corrispondenza di alcuni CP i valori superano i 10 cm. Come lecito attendersi, i residui associati ai GCP si abbassano quando tutti i punti sono utilizzati come vincoli. Si nota anche un generale aumento dei residui nei prodotti ottenuti dal processing di immagini acquisite con camera GoPro Hero 3, attribuibili ad una maggiore difficoltà nella determinazione dei parametri dell'orientamento interno da parte dei software. In particolare, il software 3DF Zephyr Aerial non prevedeva un modello di orientamento interno per obiettivi fisheye e questo giustifica i maggiori residui riportati nella tabella. Per i dati pervenuti dai partecipanti non è sempre stato possibile verificare l'eventuale utilizzo di procedure di calibrazione delle camere del tipo "on the job" che sfruttano la triangolazione aerea (TA) su punti di controllo e ricalcolo dei parametri di orientamento interno. Ad esempio, il software 3DF Zephyr Aerial consente la scelta del peso associato alla confidenza dei vincoli utilizzati nella TA, con determinazione dei parametri della camera, oltre al valore stesso di confidenza (espresso in pixel). Tale procedura è stata impostata dai partecipanti secondo i valori di default. Questo non consente un confronto tra i risultati dei vari software in totale coerenza delle procedure utilizzate.

Scenario	Punto	Agisoft PhotoScan					Pix4D Mapper					3DF Zephyr Aerial					
		X(m)	Y(m)	XY(m)	Z(m)	Error(m)	X(m)	Y(m)	XY(m)	Z(m)	Error(m)	X(m)	Y(m)	XY(m)	Z(m)	Errore(m)	
Canon Power Shot S100 4GCP	GCP foro10	n/a	n/a	0,013	0,005	0,014	-0,005	0,006	0,008	-0,008	0,011	-0,008	0,013	0,015	-0,023	0,028	
	GCP foro04	n/a	n/a	0,017	-0,006	0,018	0,003	0,005	0,006	0,007	0,009	0,008	0,003	0,008	0,010	0,013	
	GCP foro05	n/a	n/a	0,014	0,005	0,015	0,010	-0,019	0,021	-0,038	0,044	0,008	-0,016	0,018	-0,032	0,036	
	GCP foro09	n/a	n/a	0,007	-0,005	0,009	-0,004	-0,006	0,007	0,010	0,012	-0,003	-0,010	0,011	-0,004	0,011	
				media	0,013	0,000	0,014	0,001	-0,004	0,011	-0,007	0,019	0,001	-0,003	0,013	-0,012	0,022
				RMSE	0,004	0,006	0,004	0,007	0,012	0,007	0,022	0,016	0,008	0,013	0,004	0,019	0,012
	CP foro01	n/a	n/a	0,068	0,120	0,138	-0,036	-0,052	0,063	-0,113	0,130	-0,037	-0,046	0,060	-0,138	0,150	
	CP foro02	n/a	n/a	0,023	0,096	0,099	0,011	-0,009	0,014	-0,096	0,097	0,011	-0,007	0,013	-0,118	0,119	
	CP foro07	n/a	n/a	0,044	0,132	0,139	-0,017	0,025	0,030	-0,153	0,156	-0,014	0,020	0,024	-0,180	0,182	
	CP foro08	n/a	n/a	0,065	0,152	0,165	-0,042	0,011	0,044	-0,171	0,176	-0,041	0,011	0,042	-0,198	0,203	
			media	0,043	0,101	0,11	-0,021	-0,006	0,038	-0,133	0,140	-0,020	-0,006	0,035	-0,159	0,163	
			RMSE	0,021	0,023	0,027	0,024	0,033	0,021	0,035	0,034	0,024	0,029	0,020	0,037	0,037	
Canon Power Shot S100 8GCP	GCP foro01	n/a	n/a	0,041	0,014	0,043	-0,017	-0,031	0,035	0,018	0,040	-0,021	-0,045	0,050	0,018	0,053	
	GCP foro10	n/a	n/a	0,027	-0,016	0,031	0,017	0,007	0,018	-0,001	0,018	0,006	0,004	0,008	0,006	0,010	
	GCP foro02	n/a	n/a	0,028	0,003	0,028	0,014	0,010	0,017	0,007	0,019	0,020	-0,004	0,021	0,017	0,027	
	GCP foro04	n/a	n/a	0,021	-0,010	0,023	-0,008	0,015	0,017	-0,027	0,032	0,003	0,004	0,005	0,007	0,009	
	GCP foro05	n/a	n/a	0,024	-0,017	0,030	0,014	-0,044	0,046	-0,045	0,064	0,011	-0,035	0,037	0,008	0,038	
	GCP foro07	n/a	n/a	0,025	0,013	0,028	0,000	0,017	0,017	0,003	0,017	-0,001	0,014	0,014	0,011	0,018	
	GCP foro08	n/a	n/a	0,041	0,019	0,046	-0,021	0,011	0,024	0,009	0,025	-0,026	0,010	0,028	0,015	0,032	
	GCP foro09	n/a	n/a	0,016	-0,008	0,018	0,005	0,000	0,005	-0,003	0,006	0,001	-0,004	0,004	0,011	0,012	
				media	0,028	0,000	0,031	0,001	-0,002	0,022	-0,005	0,028	-0,001	-0,007	0,021	0,012	0,025
				RMSE	0,009	0,014	0,009	0,015	0,023	0,013	0,021	0,018	0,016	0,021	0,016	0,005	0,016
GoPro Hero 3 Black Edition 4GCP	GCP foro01	n/a	n/a	0,049	0,012	0,051	-0,022	0,044	0,049	-0,022	0,054	-0,035	0,504	0,506	0,010	0,506	
	GCP foro04	n/a	n/a	0,074	-0,011	0,074	-0,005	0,018	0,019	-0,017	0,025	-0,137	0,048	0,146	-0,036	0,150	
	GCP foro05	n/a	n/a	0,059	0,012	0,060	0,016	-0,016	0,023	-0,005	0,023	-0,024	0,056	0,061	0,017	0,063	
	GCP foro08	n/a	n/a	0,039	-0,013	0,041	-0,018	-0,010	0,021	0,002	0,021	0,094	-0,007	0,095	-0,040	0,103	
				media	0,055	0,000	0,057	-0,007	0,009	0,028	-0,011	0,031	-0,025	0,150	0,202	-0,012	0,205
				RMSE	0,015	0,014	0,014	0,017	0,028	0,014	0,011	0,016	0,095	0,238	0,206	0,030	0,203
	CP foro02	n/a	n/a	0,052	-0,021	0,057	-0,021	0,052	0,056	-0,061	0,083	-0,255	0,333	0,419	-0,225	0,476	
	CP foro03	n/a	n/a	0,087	-0,036	0,094	-0,045	0,055	0,071	-0,035	0,079	-0,319	0,220	0,388	-0,214	0,443	
	CP foro06	n/a	n/a	0,028	-0,054	0,061	-0,017	0,030	0,035	0,026	0,043	-0,121	0,113	0,165	-0,090	0,188	
	CP foro07	n/a	n/a	0,039	-0,033	0,051	0,000	0,009	0,009	-0,014	0,016	-0,061	0,035	0,070	-0,150	0,166	
			media	0,052	-0,036	0,066	-0,021	0,036	0,042	-0,021	0,055	-0,189	0,175	0,261	-0,170	0,318	
			RMSE	0,026	0,014	0,019	0,018	0,021	0,027	0,037	0,032	0,119	0,130	0,170	0,062	0,164	
GoPro Hero 3 Black Edition 8GCP	GCP foro01	n/a	n/a	0,058	0,018	0,061	-0,026	0,008	0,027	0,004	0,027	-0,035	0,193	0,196	0,240	0,310	
	GCP foro02	n/a	n/a	0,025	-0,004	0,025	-0,002	0,015	0,015	-0,020	0,025	-0,055	0,063	0,084	-0,030	0,089	
	GCP foro03	n/a	n/a	0,056	-0,017	0,059	-0,017	0,024	0,029	0,002	0,029	-0,074	0,012	0,075	-0,052	0,091	
	GCP foro04	n/a	n/a	0,045	0,006	0,045	0,024	0,000	0,024	0,001	0,024	0,126	-0,073	0,146	0,068	0,161	
	GCP foro05	n/a	n/a	0,056	0,034	0,065	0,028	-0,031	0,042	-0,027	0,050	0,210	-0,072	0,222	-0,003	0,222	
	GCP foro06	n/a	n/a	0,019	-0,029	0,035	-0,002	0,012	0,012	0,017	0,021	0,001	0,046	0,046	-0,011	0,047	
	GCP foro07	n/a	n/a	0,031	-0,009	0,033	0,012	-0,009	0,015	-0,013	0,020	0,001	-0,065	0,065	-0,028	0,071	
	GCP foro08	n/a	n/a	0,047	0,003	0,047	-0,015	-0,024	0,028	-0,001	0,028	0,094	-0,118	0,151	0,113	0,188	
				media	0,042	0,000	0,046	0,000	-0,001	0,024	-0,005	0,028	0,033	-0,002	0,123	0,037	0,147
				RMSE	0,015	0,020	0,015	0,020	0,019	0,010	0,014	0,009	0,100	0,101	0,065	0,099	0,090

Tabella 2. Residui associati ai GCP e CP (m) in due diversi scenari, considerati dagli utenti, che prevedono l'uso di 4 e 8 GCP per entrambe le camere.

La Figura 5 riporta un confronto fra i residui tri-dimensionali ottenuti con i tre software per GCP e CP relativamente al primo scenario presentato in tabella 2 (camera Canon Power Shot S100 e 4 GCP).

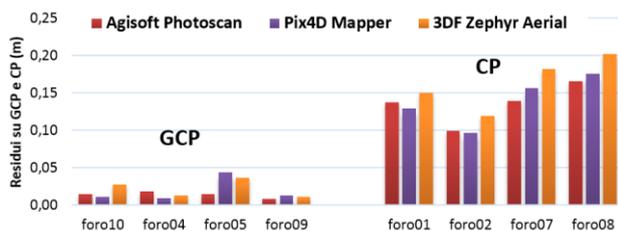


Figura 5. Residui (m) in corrispondenza di GCP e CP ottenuti dopo elaborazione con i tre software. Risultati ottenuti con camera Canon e 4 GCP comuni.

2.3 Stima dell'accuratezza nell'orientamento dei prodotti 3D sulla base della qualità e distribuzione dei GCP

I possibili effetti sull'accuratezza finale del modello dipendenti dal numero, qualità e distribuzione dei GCP sono stati valutati dai partecipanti attraverso la realizzazione di diversi scenari operativi. Tali valutazioni sono state effettuate anche per diversi software. Di seguito si riportano alcuni degli scenari realizzati dagli utenti per la sola camera Canon PowerShot:

- accuratezza dei GCP pari a 0,5 cm e 2,0 cm con utilizzo del software Agisoft Photoscan;
- accuratezza dei GCP pari a 0,5 cm e 2,0 cm ed uso del software Pix4D Mapper;
- utilizzo di varie configurazioni nell'uso di GCP e CP.

Tali analisi hanno consentito di verificare che i residui sui GCP e CP assumono valori tra loro molto diversi nelle varie configurazioni (da 1 fino a 20 cm), con valori ovviamente maggiori in corrispondenza dei CP, che rappresentano un

riferimento non utilizzato nella procedura di BBA. Le analisi mettono anche in luce un diverso comportamento dei software in relazione alla precisione assegnata ai GCP. Infatti, i prodotti generati con Agisoft Photoscan registrano dei residui maggiori nei progetti effettuati con una precisione pari a 2,0 cm mentre, in Pix4d Mapper non si nota un comportamento altrettanto chiaro. La dipendenza dell'accuratezza dalla distribuzione dei GCP e CP è stata valutata per le configurazioni riportate in Figura 6, dove la distribuzione dei punti disponibili, già introdotta nella Figura 3, viene rappresentata in forma schematica.

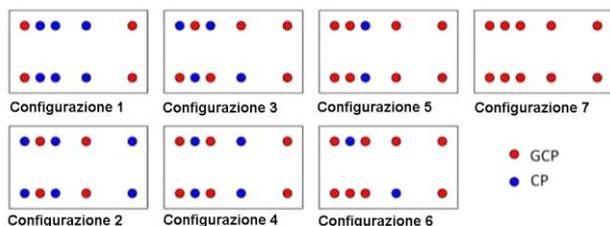


Figura 6. Le diverse configurazioni relative alla distribuzione dei GCP e CP utilizzate ai fini dell'orientamento del modello e della verifica dell'accuratezza

Come lecito attendersi, i blocchi maggiormente vincolati mostrano valori di residui ridotti rispetto alle configurazioni meno vincolate sia in corrispondenza dei GCP sia dei CP. Per un maggior dettaglio si veda la Tabella 3.

Agisoft Photoscan – precisione GCP = 0,005 m

	GCP				CP			
	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)
configurazione1	0,009	0,007	0,007	0,014	0,030	0,034	0,030	0,054
configurazione 2	0,003	0,004	0,001	0,005	0,074	0,072	0,027	0,107
configurazione 3	0,011	0,025	0,008	0,029	0,030	0,017	0,014	0,037
configurazione 4	0,009	0,014	0,009	0,019	0,028	0,032	0,013	0,044
configurazione 5	0,015	0,024	0,009	0,029	0,009	0,011	0,015	0,024
configurazione 6	0,011	0,021	0,010	0,026	0,029	0,025	0,008	0,039
configurazione 7	0,015	0,015	0,010	0,028	-	-	-	-

Pix4d Mapper – precisione GCP = 0,005 m

	GCP				CP			
	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)
configurazione1	0,003	0,004	0,005	0,006	0,027	0,026	0,122	0,128
configurazione 2	0,010	0,010	0,015	0,021	0,095	0,052	0,066	0,126
configurazione 3	0,012	0,022	0,015	0,029	0,021	0,014	0,025	0,036
configurazione 4	0,011	0,006	0,008	0,015	0,027	0,030	0,029	0,050
configurazione 5	0,014	0,021	0,014	0,028	0,018	0,012	0,021	0,030
configurazione 6	0,013	0,018	0,013	0,026	0,026	0,024	0,004	0,036
configurazione 7	0,015	0,019	0,013	0,027	-	-	-	-

Agisoft Photoscan – precisione GCP = 0,020 m

	GCP				CP			
	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)
configurazione1	0,027	0,032	0,012	0,044	0,047	0,026	0,014	0,055
configurazione 2	0,008	0,018	0,001	0,020	0,001	0,088	0,021	0,013
configurazione 3	0,023	0,032	0,012	0,041	0,050	0,024	0,014	0,057
configurazione 4	0,027	0,028	0,012	0,040	0,041	0,023	0,012	0,048
configurazione 5	0,015	0,024	0,009	0,029	0,015	0,012	0,015	0,024
configurazione 6	0,011	0,021	0,010	0,026	0,029	0,024	0,008	0,039
configurazione 7	0,012	0,020	0,007	0,024	-	-	-	-

Pix4d Mapper – precisione GCP = 0,020 m

	GCP				CP			
	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)	RMS X	RMS Y	RMS Z	Errore(m)
configurazione1	0,003	0,003	0,011	0,012	0,026	0,026	0,109	0,115
configurazione 2	0,018	0,018	0,031	0,040	0,017	0,033	0,056	0,067
configurazione 3	0,015	0,023	0,034	0,043	0,019	0,014	0,057	0,062
configurazione 4	0,011	0,007	0,018	0,022	0,024	0,031	0,043	0,058
configurazione 5	0,015	0,022	0,025	0,037	0,016	0,015	0,022	0,031
configurazione 6	0,021	0,010	0,026	0,035	0,024	0,008	0,039	0,046
configurazione 7	0,015	0,020	0,021	0,033	-	-	-	-

Tabella 3. Residui medi (m) per GCP e CP, nelle varie configurazioni, e relative precisioni. L'indagine è stata condotta per i Agisoft Photoscan e Pix4d Mapper.

Ulteriori indagini hanno dimostrato la dipendenza dei risultati dal modello di riferimento utilizzato nel calcolo dei parametri dell'orientamento interno. In particolare, per il software Agisoft Photoscan, è stato verificato l'effetto di tale scelta e, relativamente ai soli fotogrammi acquisiti dalla camera GoPro Hero 3, valutati i risultati nella doppia impostazione "frame camera" e "fisheye". La verifica è stata effettuata utilizzando tutti i punti disponibili come GCP e seguendo una procedura che ha comportato una prima fase di allineamento seguita da un nuovo allineamento, con ottimizzazione, oltre ad un'ultima operazione di allineamento, ottimizzazione e ri-allineamento. In Tabella 4 si riportano i residui in corrispondenza dei GCP relativi alle tre fasi citate.

Dopo allineamento

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)	Errore(m)	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z
foro01	1102.630	896.676	95.483	0.028	0.024	0.011	0.006
foro02	1098.728	890.428	95.461	0.021	-0.016	-0.013	-0.002
foro03	1096.762	887.331	95.472	0.041	0.003	-0.037	-0.016
foro04	1094.358	883.443	95.506	0.024	0.014	-0.014	0.014
foro05	1103.538	876.926	95.705	0.057	-0.043	0.033	0.018
foro06	1105.701	880.310	95.677	0.027	-0.005	-0.012	-0.024
foro07	1108.588	884.795	95.635	0.006	-0.001	0.004	-0.005
foro08	1111.218	888.896	95.621	0.039	0.025	0.028	0.010
Errore totale					0.024	0.015	0.016

Dopo allineamento e ottimizzazione

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)	Errore(m)	X RMSE	Y RMSE	Z RMSE
foro01	1102.630	896.676	95.483	0.016	0.014	-0.004	-0.007
foro02	1098.728	890.428	95.461	0.023	-0.005	-0.012	0.018
foro03	1096.762	887.331	95.472	0.029	0.012	-0.027	-0.003
foro04	1094.358	883.443	95.506	0.018	0.016	-0.004	-0.008
foro05	1103.538	876.926	95.705	0.060	-0.056	0.018	0.014
foro06	1105.701	880.310	95.677	0.037	-0.002	-0.032	-0.020
foro07	1108.588	884.795	95.635	0.008	0.003	0.006	0.005
foro08	1111.218	888.896	95.621	0.059	0.019	0.056	0.000
Errore totale					0.026	0.016	0.018

Dopo allineamento e ottimizzazione e ri-allineamento

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)	Errore(m)	X RMSE	Y RMSE	Z RMSE
foro01	1102.630	896.676	95.483	0.044	0.022	-0.035	0.013
foro02	1098.728	890.428	95.461	0.017	-0.006	-0.016	-0.003
foro03	1096.762	887.331	95.472	0.033	0.000	-0.025	-0.021
foro04	1094.358	883.443	95.506	0.014	-0.002	0.001	0.013
foro05	1103.538	876.926	95.705	0.065	-0.057	0.017	0.027
foro06	1105.701	880.310	95.677	0.035	0.001	-0.022	-0.027
foro07	1108.588	884.795	95.635	0.023	0.014	0.015	-0.010
foro08	1111.218	888.896	95.621	0.071	0.028	0.064	0.010
foro09	1122.415	897.559	95.667	0.000	0.000	0.000	0.000
Errore totale					0.017	0.021	0.012

Tabella 4. Residui associati ai GCP e relativi alle tre fasi descritte (camera GoPro Hero 3, modello di calibrazione fisheye)

La stessa indagine svolta con camera Canon PowerShot S100 e modello di riferimento *frame camera* evidenzia un comportamento analogo, con miglioramento dei parametri d'errore nella fase di allineamento e ottimizzazione. Infatti, nel passaggio fra la prima e la seconda fase, il valore dell'errore totale medio passa da 0,069 m a 0,025 m. La terza fase non comporta miglioramenti apprezzabili.

2.4 Valutazione delle qualità delle nuvole di punti tramite il confronto con i dati del laser a scansione terrestre

Il confronto fra le nuvole dei punti ottenuti con fotogrammetria da SAPR e la nuvola fornita dal rilevamento con laser a scansione terrestre consente la verifica dell'accuratezza del modello 3D nello spazio comune tra i due. Questo tipo di verifica è stato condotto da molti dei partecipanti con risultati

del tutto simili e, pertanto, si riporteranno solo alcuni dei confronti eseguiti. In particolare, per continuità del flusso di informazioni, si discuteranno alcuni casi relativi a configurazioni già discusse nelle sezioni precedenti. Nella Figura 7 si riporta l'istogramma di frequenza relativo ai valori di distanza fra nuvola ottenuta da fotogrammetria e nuvola laser per modelli fotogrammetrici già discussi: a) ottenuto da fotogrammi della camera GoPro e modello *fisheye* dopo allineamento, ottimizzazione e ri-allineamento; b) ottenuto da fotogrammi della camera Canon PowerShot S100 con almeno 4 GCP per fotogramma.

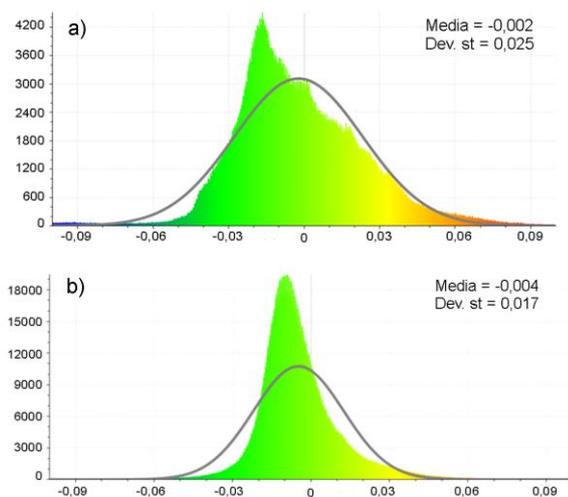


Figura 7. Distanza (cm) fra nuvole ottenute con fotogrammetria da SAPR e laser scanner terrestre. a) soluzione con camera GoPro (modello *fisheye*) dopo allineamento, ottimizzazione e ri-allineamento; b) soluzione con camera Canon PowerShot S100

Dall'analisi degli istogrammi di frequenza si notano valori di media e deviazione standard contenuti entro i 2,5 cm ed una forma dell'istogramma che risulta più affine alla distribuzione di Gauss nel caso b, quello relativo all'uso della camera Canon PowerShot S100.

Altro confronto effettuato è quello tra le soluzioni fornite da software diversi nella medesima configurazione. La Figura 8 riporta gli istogrammi di frequenza delle distanze fra i modelli forniti da Agisoft Photoscan (a) e Pix4D Mapper (b) elaborati nella configurazione 7 (vedi Figura 6) e la nuvola laser.

Gli istogrammi di Figura 8 evidenziano che nel caso a (Agisoft Photoscan) i valori assoluti delle differenze risultano inferiori rispetto al caso b (Pix4D Mapper). Questo comportamento è dimostrato anche dai parametri statistici di sintesi riportati nelle sette figure.

I contributi pervenuti durante l'organizzazione della sessione hanno consentito anche di approfondire l'effetto di alcuni parametri che devono essere impostati nei vari software e dei quali non è sempre facile comprendere l'effetto sulla qualità complessiva del prodotto tridimensionale. Ad esempio, il software Agisoft Photoscan prevede diverse configurazioni relative alla qualità/accuratezza nella fase di allineamento e creazione della nuvola sparsa (LST = lowest; L = low; M = medium; H = high). Uno dei rapporti pervenuti ha riguardato l'elaborazione della nuvola sparsa, da immagini della camera S100, con i vari livelli di qualità/accuratezza citati ed il

successivo confronto con la nuvola laser per il solo prodotto ottenuto con l'opzione M.

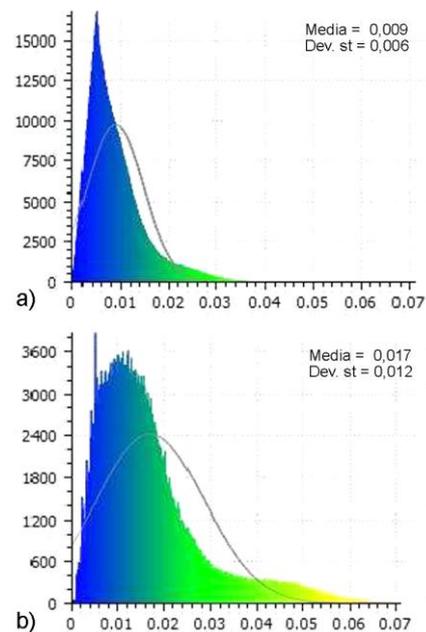


Figura 8. Valore assoluto delle distanze (cm) fra i dati laser e le nuvole dei punti forniti dai software Agisoft Photoscan (a) e Pix4D Mapper (b)

Dall'analisi della nube sparsa si nota l'atteso aumento dalla densità dei punti nel passaggio dall'opzione LST alla H, mentre la validazione (della nube sparsa ottenuta con opzione M) mostra residui che non superano i 4 cm. La successiva creazione della nuvola densa ed il suo confronto con i dati laser fornisce un valore medio delle distanze di 0,004 m (dev. st. = 0,022 m) con un aumento dei residui nelle zone periferiche del modello, dove la ridondanza di immagini diminuisce. Lo stesso test eseguito a partire dalle immagini acquisite con camera GoPro ha portato a valori leggermente maggiori (media = -0,006 m; dev. st. = 0,038 m). L'analisi approfondita di tali differenze evidenzia anche alcuni comportamenti che non sono imputabili ai soli modelli fotogrammetrici. Ad esempio, nel confronto fra le nuvole, si notano chiaramente le fughe del materiale tra le pietre. Tale effetto può essere attribuito a un diverso meccanismo di riflessione del fascio laser a contatto con i due materiali coinvolti. Con questo esempio si vuole sottolineare che, pur essendo il dato laser un affidabile termine di paragone, possono verificarsi casi in cui il dato fotogrammetrico risulta altrettanto importante.

Una verifica analoga alle precedenti è stata condotta per il prodotto 3D ottenuto grazie all'utilizzo delle immagini acquisite dalla camera GoPro ed elaborate con il software Pix4D Mapper. I risultati sono visibili nella Figura 9 dove, da sinistra verso destra, si riportano lo schema delle acquisizioni, la mappa delle distanze e l'istogramma di frequenza di queste ultime.

L'istogramma di frequenza mostra valori delle distanze inferiori agli 8 cm per la grande maggioranza dei punti, mentre valori maggiori si riscontrano in corrispondenza dei manufatti e di morfologie caratterizzate da una maggiore complessità.

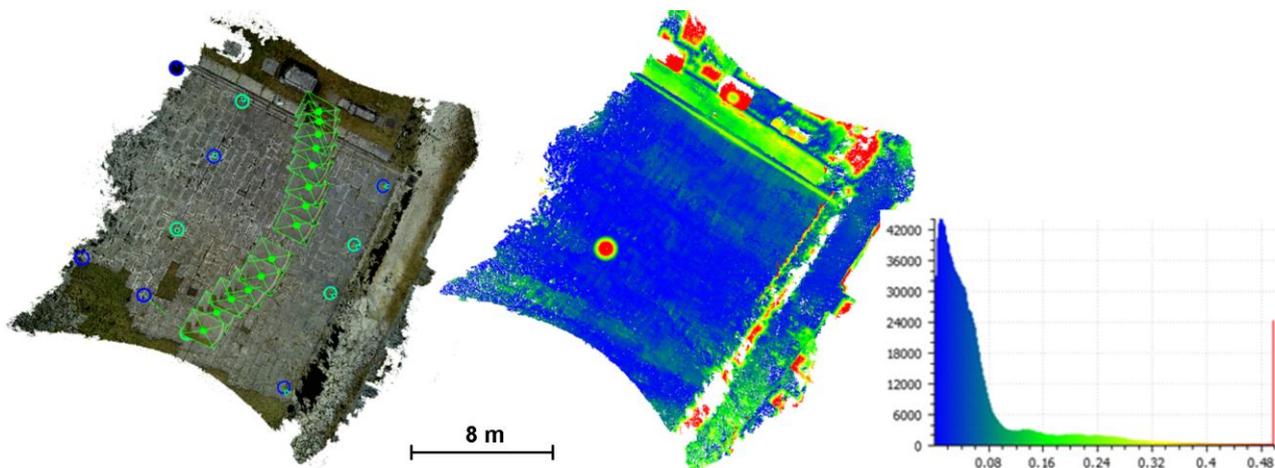


Figura 9. Prodotti del software Pix4D Mapper ottenuti con l'utilizzo delle immagini della camera GoPro. Da sinistra: geometria di acquisizione dei fotogrammi, mappa delle differenze e relativo distribuzione di frequenza

In modo del tutto analogo a questo esposto sopra, è stato utilizzato anche il software Visual SFM (di cui non si riportano nel dettaglio i risultati) che non prevede l'inserimento preliminare dei GCP. L'utilizzo di Visual SFM nell'elaborazione dei fotogrammi acquisiti da entrambe le camere ha prodotto modelli soggetti al classico "dome effect", con andamento concentrico, già riscontrate in altre applicazioni (Eltner e Schneider, 2015). Tale effetto è particolarmente evidente in questo studio visto l'andamento prevalentemente orizzontale della superficie da ricostruire.

Il confronto con la nuvola dei punti laser è stato effettuato anche per i prodotti 3D generati utilizzando tutti i CGP disponibili grazie al software MicMac (Deseilligny et al., 2011). In quest'ultimo caso, il confronto condotto per il prodotto ottenuto da immagini della camera GoPro ha portato ad un valore medio delle distanze assolute di 0,045 m (dev. st. = 0,043 m) mentre quello generato dalle immagini della camera S100 presenta un valore medio delle distanze pari a 0,036 m (dev. st. = 0,038 m). In Figura 10 il confronto fra la nuvola ottenuta dalle immagini della camera S100 e la nuvola di dati laser.

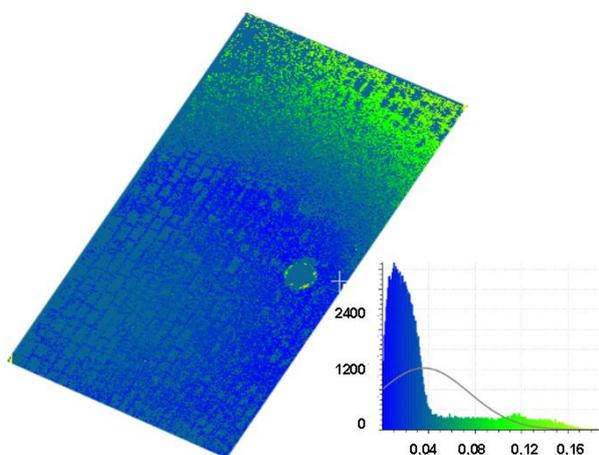


Figura 10. Confronto fra la nuvola ottenuta con il software MicMac dalle immagini della camera S100 e la nuvola di dati laser.

Dal confronto di Figura 10 si evidenziano differenze fra le nuvole al disotto dei 4 cm con leggeri incrementi nella porzione superiore, dove la densità dei GCP decresce. Anche in questo

caso il confronto porta alla luce le geometrie relative alla pavimentazione con lastroni in pietra lavorata. Con il software MicMac si ottengono risultati della stessa precisione anche per le immagini della camera GoPro. Questo su un'estensione leggermente ridotta vista la geometria di acquisizione utilizzata. Altro software utilizzato nella produzione di modelli tridimensionali basati su tecnica *Structure from Motion* è stato 3DF Zephyr Aerial con 8 GCP. In tal caso il confronto con la nuvola dei punti laser ha fornito un valore medio delle distanze pari a -0,004 (dev. st. = 0,092 m) per la camera S100 mentre per la camera GoPro, non essendo implementato al momento della sperimentazione l'algoritmo idoneo alla calibrazione della camera, non si ritiene significativo svolgere il confronto.

La valutazione della qualità complessiva dei prodotti disponibili è stata effettuata anche tramite una visualizzazione tridimensionale tramite *meshing* (in questo caso effettuata con il software 3D Reshaper 2016). In Figura 11 si mostra la superficie relativa alla medesima area del foro così come ottenuta dai dati laser (a), dalle immagini della camera S100 (b) e dalle immagini della camera GoPro (c).

La Figura 11 mostra alcuni aspetti interessanti che completano le valutazioni sulla qualità metrica dei prodotti descritte in precedenza. Infatti, nei modelli delle superfici ottenuti per via fotogrammetrica (Figura 11b e 11c) si nota una minore accuratezza nella ricostruzione della pavimentazione rispetto a quanto ottenuto dai dati laser (Figura 11a). In particolare, il modello di Figura 11b presenta una ricostruzione completa e definita dei lastroni in pietra lavorata nella sola porzione centrale del modello, dove è garantita la ridondanza delle immagini richiesta dal metodo, mentre quello di Figura 11c evidenzia una rumorosità che non necessariamente viene individuata o quantificata dalle sole verifiche effettuate sui GCP e CP.

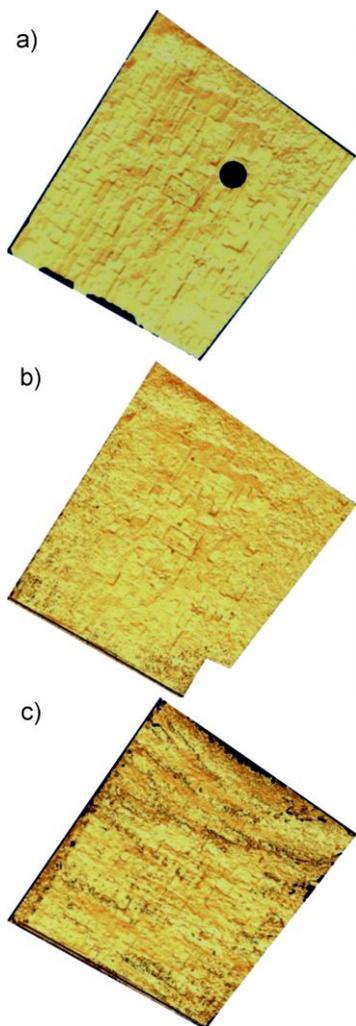


Figura 11. Visualizzazione tramite *mesh* di una porzione della superficie rilevata tramite dati laser (a), immagini della camera S100 (b) e immagini della camera GoPro (c) ottenuta con il software 3D Reshaper. Il cerchio nero presente nella superficie ottenuta da dati laser rappresenta il punto di stazionamento dello strumento.

3. CONCLUSIONI

Di seguito, si riportano alcune considerazioni generali che sono deducibili in base ai contributi degli utenti:

- i) I prodotti mostrano livelli di accuratezza di ordine centimetrico che, tuttavia, differiscono in base ai software ed alle impostazioni utilizzate. Infatti, come evidenziato in Figura 5, differenze dell'ordine di 5 cm si possono riscontrare in corrispondenza dei CP quando la stessa analisi viene condotta con strategie simili nei diversi software;
- ii) I blocchi maggiormente vincolati mostrano valori di residui ridotti rispetto alle configurazioni meno vincolate sia in corrispondenza dei GCP sia dei CP;
- iii) I prodotti 3D ottenuti con immagini della camera S100 sono, in generale, di migliore qualità metrica rispetto a quelli ottenuti a partire da immagini della camera GoPro;
- iv) I modelli ottenuti dai fotogrammi acquisiti con camera GoPro presentano, in corrispondenza dei punti di

controllo e di verifica, residui dell'ordine di vari cm che possono essere tollerabili in operazioni di rilevamento aereo che non richiedono la massima accuratezza e di supporto per scale di rappresentazione di 1:250 circa. Pertanto anche tale configurazione può essere di una certa utilità, soprattutto nell'ottica di un miglioramento nelle procedure di correzione degli effetti distorsivi introdotti dalle ottiche *fisheye*;

- v) Si notano dei benefici dall'introduzione di procedura di maggiore qualità/accuratezza nella fase di allineamento delle immagini;
- vi) Si notano dei benefici nell'uso di GCP di elevata accuratezza e si sottolinea, quindi, l'importanza del rilievo d'appoggio e utilizzo di target che consentano una collimazione di precisione (anche automatica);
- vii) Si ribadisce l'esigenza di validare i risultati con modelli di riferimento o attraverso l'uso di *checkpoints* per verificare l'esistenza di deformazioni del modello 3D dovute a difetti nella geometria di acquisizione delle immagini o a problemi nella numerosità/qualità dei GCP;
- viii) Le superfici ottenute con le camere tradizionali (seppur di basso costo) risultano meglio definite e maggiormente affini al modello di superficie ottenibile dai dati laser. La ridondanza delle immagini richiesta dalla procedura *Structure from Motion* deve essere garantita.

RINGRAZIAMENTI

Un doveroso ringraziamento al Comitato Scientifico della SIFET che ha promosso l'iniziativa e al prof. Francesco Guerra (Università Iuav di Venezia) per avere messo a disposizione i dati utilizzati in questa iniziativa. La raccolta dei dati e l'organizzazione della sessione è stata curata dal prof. Francesco Mancini (Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia).

Si ringraziano tutti i partecipanti che hanno contribuito alla sessione con un impegno a favore di tutta la comunità della SIFET. Oltre agli autori di questo lavoro, che hanno contribuito con i propri prodotti di elaborazione, occorre ringraziare tutte le società, enti e aziende che hanno aderito e contribuito a questa esperienza in vario modo: Liceo Galilei (CT), Università degli Studi di Palermo, Università di Firenze, CIRGEO - Università di Padova, Università di Pisa, SP Studio (Pisa), EVE srl – Spin-off Università Politecnica delle Marche, geom. Ciro Sugameli, Università degli Studi di Udine, Rosadini consulting, ALPINA S.p.A, Adriarilievi, Università degli Studi di Torino, Università degli Studi di Parma, Leica Geosystems S.p.A., Planetek Italia, Politecnico di Torino, Politecnico di Milano, Università degli Studi di Bologna, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Render It, Università di Napoli Parthenope, geom. Ratto Cavagnaro, Artificio Digitale Snc, Studio R3D, GEIS srl, Studio associato Perigeo, SAL Engineering srl, GEORES, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale.

BIBLIOGRAFIA

Agisoft Photoscan, 2014, User Manual: Professional Edition. Version 1.1. Agisoft LLC: Petersburg, Russia.

Ballarin M., Balletti C., Guerra F. 2015, Action cameras and low-cost aerial vehicles in archaeology. In SPIE Optical Metrology. International Society for Optics and Photonics, 952813-952813.

Colomina I., Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

Dall'Asta E., Perini L., Thoeni K., Roncella R., Giacomini A. 2014. Metric comparison of automatic orientation techniques. Bollettino SIFET 2014, 14 pp.

Deseilligny M.P., Clery I. 2011, Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. In Proceedings of the ISPRS Symposium, 3DARCH11, 269277.

Eltner A., Schneider D. 2015, Analysis of different methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. The Photogrammetric Record, 30(151), 279-299.

Eltner A., Kaiser A., Castillo C., Roc, G., Neugirg F., Abellán A. 2016, Image-based surface reconstruction in geomorphometry—merits, limits and developments. Earth Surf. Dynam., 4, 359–389.

Gerke M., Nex F., Remondino F., Jacobsen K., Kremer J., Karel W., Hu H., Ostrowski W. 2016, Orientation of oblique airborne image sets-experiences from the ISPRS/EUROSDR benchmark on multi-platform photogrammetry. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41.

Hastedt H., Ekkela T., Luhmanna T.. 2016, Evaluation of the Quality of Action Cameras with Wide-Angle Lenses in UAV Photogrammetry. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 851-859.

Mancini F. 2015, Rapporto sulla sessione “benchmark” - uso di immagini UAV per la ricostruzione 3D: esperienze condivise tra utenti. Bollettino SIFET 1, 1-3, Sezione Vita.

Nex F., Gerke M., Remondino F., Przybilla H. J., Bäumker M., Zurhorst A., 2015, ISPRS Benchmark for multi-platform photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(3), 135.

Pix4D, 2016, UAV mapping software. Pix4D SA: Lausanne, Switzerland, 2016. Available online: <https://pix4d.com>

Santise M., Passoni D., Pagliari D. 2014. Photogrammetric experiences from UAV for volume estimation. Bollettino SIFET 2014, 9 pp.

SITOGRAFIA

www.agisoft.com

<https://pix4d.com>

<http://www.3dflow.net>

<http://www.micmac.ign.fr>

<http://www.3dreshaper.com>

<http://ccwu.me/vsfm>

www.photomodeler.com