

SENSORI LOW-COST PER IL MAPPING SPEDITIVO DI BENI CULTURALI. PRIMI TEST SU DI UNA STEADYCAM LOW-COST.

LOW-COST SENSORS FOR RAPID MAPPING OF CULTURAL HERITAGE. FIRST TESTS USING A COTS STEADYCAM.

Alessio Calantropio^a, Giacomo Patrucco^a, Giulia Sammartano^a, Lorenzo Teppati Losè^a

^aDAD – Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Viale Mattioli 39, 10129 Torino, Italia.
alessio.calantropio@polito.it, giacomo.patrucco@polito.it, giulia.sammartano@polito.it, lorenzo.teppati@polito.it

PAROLE CHIAVE: Rilievo speditivo, Patrimonio costruito, Modelli 3D, Steadycam, SfM

KEY WORDS: Rapid Mapping, Built Heritage, 3D models, Steadycam, SfM

Questo articolo è la traduzione e il sunto della versione sottomessa per uno **SPECIAL ISSUE** di **APPLIED GEOMATICS** collegata al convegno **SIFET 2017**.

RIASSUNTO

La proposta di nuove strategie per il rilievo speditivo in diversi contesti e utilizzando soluzioni low-cost rientra tra i più recenti indirizzi di ricerca della Geomatica. Grazie alla continua implementazione degli algoritmi di image-matching e il loro utilizzo nei software SfM (Structure from Motion) risulta quindi possibile utilizzare nuovi sensori e testare nuove strategie per la generazione di modelli 3D tramite un approccio fotogrammetrico. Negli ultimi anni una sfida importante è stata quella di sviluppare nuove soluzioni per monitorare il patrimonio costruito utilizzando tecniche alternative. La ricerca che verrà presentata di seguito si è occupata di testare l'utilizzo di una steadycam COTS (*Commercial Off The Shelf*) come metodologia di *rapid mapping* per l'acquisizione speditiva di dati *image-based*, per la documentazione delle superfici di due distinti caratteristici soffitti che si presentano in differente stato di conservazione e sono inseriti in specifici contesti di criticità. I due manufatti architettonici, di elevato valore culturale sono: il soffitto a stucchi del Castello del Valentino a Torino (TO) e il soffitto ligneo della Basilica di San Nicola a Tolentino (MC). I dataset acquisiti tramite steadycam e successivamente elaborati sono stati confrontati con quelli derivati dall'utilizzo di tecniche di rilievo maggiormente consolidate: fotogrammetria close-range con camera DSLR (Digital Single Lens Reflex) e laser scanner terrestre. Il confronto tra tali prodotti ha permesso di validare e valutare i potenziali impieghi di questa nuova soluzione tecnologica, in una condizione ordinaria, il primo, e nel contesto di medio rischio post-evento sismico, il secondo.

ABSTRACT

One of the last and more pressing requests to the researchers working in the field of Geomatics is to research, validate and propose new strategies for the rapid mapping in different contexts, with low-cost solutions. The continuous implementation of image-matching algorithms and their use in Structure from Motion (SfM) software allow using new sensors and testing new strategies to produce 3D models, starting from a photogrammetric approach. In the last years, another central issue for the researchers has been related with the documentation of Cultural Heritage artefacts using different technological solutions. In the experience presented in this paper the attention was focussed on testing a COTS (Commercial Off The Shelf) steadycam as a rapid mapping method for the acquisition of image-based data for the 3D documentation of two surfaces belonging to different ceiling elements. The two Cultural Heritage artefacts were chosen in different state of conservation and insert in peculiar critical contexts: the stucco ceiling of the Castello del Valentino (Torino-TO) and coffered ceiling of the Basilica of San Nicola (Tolentino-MC). The metric products obtained with the steadycam were compared with those acquired using more consolidated techniques, such as Close-Range Photogrammetry (CRP) and Terrestrial Laser Scanner (TLS). The comparison between products derived from the different techniques were then evaluated and validated, and an overall assess of the use of this new solution was made in an ordinary condition, the former, and within a middle-risk context in post-seismic event the latter.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni gli indirizzi di ricerca nel campo della Geomatica applicata alla documentazione del patrimonio hanno orientato il loro interesse verso la sperimentazione di sensori low-cost finalizzati al rilievo speditivo (Kolev et al. 2014; Micheletti et al. 2014; Nocerino et al. 2017a; Zlot et al., 2014). In Italia, a causa dei recenti eventi sismici, l'attenzione della comunità scientifica si sta in parte indirizzando verso contesti post-emergenziali, dove il contributo della Geomatica si dimostra essenziale. Grazie alla rapidità di acquisizione dei dati e al costo contenuto, queste tecnologie possono essere applicate in diversi contesti, tra i quali il monitoraggio dei beni a rischio; in questo caso la documentazione deve osservare alcuni principi

riportati nelle carte ICOMOS, in particolare nella Carta di Sofia (1996), i cui contenuti sono stati riaffermati nella Convenzione europea del paesaggio del Consiglio d'Europa (2000). Infine, con le regole CIPA 3x3 è stata rimarcata la volontà di ottimizzare l'intero processo di documentazione del patrimonio costruito (Waldhäusl et al., 2013).

1.1 Approcci metodologici per il rapid mapping sul Patrimonio

Le occasioni di sperimentazione sugli sviluppi tecnologici si stanno concentrando verso la validazione di differenti soluzioni innovative basate su tecniche diverse *range-based* e *image-based*. L'uso di sistemi di Mobile Mapping riguarda ancora soluzioni tecnologiche spesso costose e complesse, basate sulla

fusione di sensori per la misura e la navigazione (LiDAR, camere, GNSS, sistemi inerziali, etc.) con vari gradi di maneggevolezza e differenti soluzioni di equipaggiamento su piattaforme terze (auto, veicoli a controllo remoto, trolley trainabili, zaini, etc.). La ricerca e l'innovazione stanno sicuramente avanzando verso la trasportabilità e la compattezza degli strumenti; tra questi, i laser scanner portatili di tipo SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) stanno emergendo per la mappatura speditiva di spazi ristretti e difficilmente accessibili o esterni complessi o particolarmente caratterizzati geometricamente. Le tecniche di ranging mobile mapping basate su varie implementazioni del metodo SLAM (Cadge, 2016; "CSIRO research" 2016; Riisgaard, 2005), utilizzano i dati acquisiti da un sensore di tipo LiDAR e sono in grado di determinare la posizione del dispositivo nello spazio grazie alla caratterizzazione geometrica dell'ambiente, che viene usata sia per stimare il suo progressivo movimento che per l'allineamento progressivo del dato in una ricostruzione 3D dello spazio mappato (Bosse & Zlot, 2009; Bosse et al., 2012) secondo un algoritmo di Iterative Closest Point (ICP-like, Bellekens et al., 2014). Alcune esperienze condotte di recente (Chiabrando et al., 2017b; Farella et al., 2016; Mandelli et al., 2017; Nocerino et al., 2017b; Sammartano, 2017; Thomson et al., 2013; Tucci et al., 2017) hanno approfondito gli aspetti legati all'utilizzo di questa tecnologia in diversi scenari, confrontandoli con i risultati ottenuti tramite metodi più consolidati.

Parallelamente gli approcci di tipo fotogrammetrico tramite sensori portatili e low-cost si stanno dimostrando come soluzioni sempre più accessibili e promettenti per gli sviluppi futuri del rapid mapping basato su dati close-range e da UAV. Anche lo sviluppo delle tecniche di ricostruzione 3D image-based ha subito un notevole incremento grazie ai seguenti fattori:

- l'introduzione sul mercato di nuovi strumenti a fianco alle più consolidate camere (DSLR e non) come smartphone e tablet equipaggiati con camere integrate sempre più performanti, camere 360° e action cam (Balletti et al., 2014; Calantropio et al., 2017a; D'Annibale et al., 2013; Fiorillo et al., 2016; Fissore et al., 2018; Gruen & Akca, 2008; Kwiatek et al., 2015; Markiewicz et al., 2017; Nocerino et al., 2017c; Shults, 2017);
- il continuo miglioramento degli algoritmi di image matching, implementati nei software che utilizzano l'approccio SfM/MVS per grandi dataset di immagini (Harwin & Lucieer, 2012; Luhmann et al., 2006; Remondino et al., 2017; Remondino et al., 2014).

L'interesse dei recenti sviluppi è stato ad oggi orientato verso la sperimentazione di queste nuove tecnologie per il rilievo speditivo del patrimonio costruito (Calantropio et al., 2017b; D'Annibale et al. 2013; Di Pietra, 2017; Fiorillo et al. 2016; Kossieris et al., 2017; Tucci et al., 2017) mentre l'utilizzo e la validazione della steadycam in questo settore di ricerca, come sensore atto ad acquisire immagini fotogrammetricamente efficaci, non è stato ancora approfondito, eccezion fatta per alcune esperienze in contesti agricoli (Das et al., 2015).

Nel lavoro che verrà qui presentato è stato quindi testato l'utilizzo di una steadycam COTS (Commercial Off The Shelf) come tecnologia low-cost per l'esecuzione di un rilievo speditivo volto alla documentazione di due elementi architettonici distinti, nello specifico, il soffitto voltato a stucchi del Gabinetto dei Fiori Indorato, all'interno del Castello del Valentino (Torino, TO) e il soffitto ligneo cassettonato all'interno della Basilica di San Nicola (Tolentino, MC). Gli oggetti del rilievo risultano di particolare interesse architettonico, nonché di elevato valore culturale, e sono inseriti all'interno di specifici contesti di criticità: il primo in un'area soggetta a potenziale rischio di inondazione, mentre il secondo in una condizione di

medio rischio legata ad un precedente evento sismico. Nel campo applicativo del rilievo speditivo del patrimonio costruito, ed in particolare quando sussiste una condizione di rischio dovuta alla precarietà del contesto in cui si opera, la possibilità di acquisire dati rapidamente e ad un costo contenuto sono aspetti determinanti nella definizione delle soluzioni operative, e che hanno quindi condotto alla scelta della steadycam come strumento da testare in quanto potenziale soluzione per il rilievo speditivo in contesti d'emergenza. Al fine di valutare l'impiego di questa metodologia, sono stati confrontati i prodotti metrici ottenibili utilizzando i fotogrammi estratti da video ad alta risoluzione registrati dalla steadycam, con quelli ottenibili da altri sensori il cui utilizzo è maggiormente consolidato, quali una camera DSLR e un laser scanner terrestre.

2. TEST SU UNA STEADYCAM COTS E CONFRONTI CON SENSORI DI USO CONSOLIDATO

Diverse sono state le tecniche e i sensori impiegati nell'ambito di questa ricerca, in particolare sono state utilizzate due fotocamere DSLR, una steadycam low-cost e un laser scanner a differenza di fase.

Steadycam. L'analisi della qualità metrica e radiometrica dei modelli fotogrammetrici ottenibili da steadycam è stata condotta su dati acquisiti tramite DJI OSMO+ (Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.). Tale strumento è composto da un sensore montato su una *gimbal* motorizzata a 2 assi che stabilizza il dispositivo, minimizzando i movimenti e le vibrazioni prodotte dall'operatore (Fig. 1). Le caratteristiche principali dello strumento sono riportate in Tabella 1.



Figura 1. DJI OSMO+ (a sinistra) e dettaglio (a destra).

Sensore	1/2,3" CMOS da 12,40 Mp
Lente	94° FOV 22mm f/2,8
Focale	4 mm (22-77 mm equivalente)
ISO	100-3200 (foto) 100-1600 (video)
Formato massimo foto	4000 x 3000 px
Formato massimo video	4096 x 2160 px 24 fps (4K)

Tabella 1. Specifiche principali della steadycam DJI OSMO+.

Camere DSLR. Nell'ambito della ricerca sono state utilizzate due diverse camere DSLR: una Canon EOS 5DS R da 50,6 Mpx, con dimensione immagine 7680x5120 (obiettivo 24-105 mm con focale bloccata su 30 mm), e una Canon EOS 5D Mark II, con dimensione immagine 5616x3744 (obiettivo 24-70 mm con focale bloccata su 24 mm).

Laser scanner. Le acquisizioni laser sono state realizzate utilizzando un laser scanner terrestre a differenza di fase, Faro Focus^{3D} della CAM2, avente un raggio d'azione compreso tra 0,6 e 30 m, con una precisione della distanza di ± 2 mm, campo visivo verticale/orizzontale di 305°/360°. È stata impostata una qualità di misura di 4x (valore ponderato dalla misura ripetuta sul punto per quattro volte). Le nuvole di punti acquisite con questo strumento sono state utilizzate come modello di confronto per valutare i dati ottenuti dagli altri sensori.

3. I CASI STUDIO

L'approccio multi-sensore è stato sperimentato su due oggetti architettonici distinti, e nello specifico sugli elementi architettonici corrispondenti ai loro soffitti: il soffitto voltato a stucchi del Gabinetto dei Fiori Indorato, all'interno del Castello del Valentino (Torino, TO) e il soffitto ligneo cassettonato all'interno della Basilica di San Nicola (Tolentino, MC). Entrambi i siti possiedono caratteristiche peculiari e un elevato valore culturale, e fanno parte del patrimonio costruito sottoposto, per ragioni differenti, a rischi di varia natura.

3.1 Dataset (A): Gabinetto dei Fiori Indorato, Castello del Valentino

Il castello del Valentino è una delle Residenze Reali della Casa Savoia in Piemonte (Fig. 2). È attualmente la sede della Facoltà di Architettura del Politecnico di Torino e ospita varie conferenze e manifestazioni. Questi fattori, oltre alla vicinanza del fiume Po (in un'area soggetta a potenziali inondazioni) e all'inevitabile degrado a cui sono intrinsecamente esposti i Beni Culturali, collocano il castello tra i siti soggetti ad un rischio di media entità. A partire dal 1977 il Castello del Valentino fa parte della lista UNESCO dei patrimoni dell'umanità.



Figura 2. Il caso studio A: il Castello del Valentino. Vista della corte interna. Fonte: <http://castellodelvalentino.polito.it/>

3.2 Dataset (B): Basilica di San Nicola a Tolentino

La Basilica di San Nicola è stata oggetto di analisi a seguito dei recenti eventi sismici verificatisi in centro Italia a partire dall'agosto 2016 e che hanno interessato anche l'area nella quale insiste questo edificio (Fig. 3). La Basilica è uno dei più importanti complessi religiosi e culturali dell'Italia centrale ed è ancora oggi chiusa al pubblico per ragioni di sicurezza e per permetterle il restauro. Nella navata centrale è presente un soffitto ligneo composto da 21 cassettoni, divisi in 7 fasce, ospitanti alcuni bassorilievi in legno di Santi e di figure religiose (Mariano, 2008).



Figura 3. Il caso studio B: la Basilica di San Nicola. Facciata (a sinistra) e vista dall'alto (a destra).
Fonte: <http://www.iluoghidelsilenzio.it/> e foto degli autori.

4. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

I casi studio considerati presentano sia analogie che differenze legate alle loro caratteristiche architettoniche. La navata di San Nicola misura 13,5 x 38,5 m (quasi 520 m²); il gabinetto invece misura 5 x 4 m (quasi 20 m²). La differenza principale tra i due oggetti considerati è rintracciabile nella distanza che intercorre tra il pavimento e il soffitto (4 m nel caso del gabinetto e 15 m nel caso della Basilica). Entrambi i soffitti di questi ambienti sono riccamente decorati, ma con materiali diversi: il Gabinetto dei Fiori presenta stucchi verniciati, mentre il soffitto a cassettoni di San Nicola è in legno laccato. Ovviamente i due materiali reagiscono diversamente alla luce e questo aspetto è stato considerato durante l'acquisizione dei dati. Nello specifico, a San Nicola, l'illuminazione naturale era scarsa ed è stato pertanto necessario ricorrere al sistema d'illuminazione della chiesa; al contrario, la luce naturale presente nel Gabinetto dei Fiori era sufficiente e non è stata dunque utilizzata alcuna luce artificiale. Nella seguente Tabella 2 è riportata una sintesi dei tempi di acquisizione ed elaborazione dei dati in rapporto al sensore utilizzato. È necessario precisare che l'elaborazione dei dati laser, relativi al soffitto della navata, ha comportato un tempo elevato, attribuibile all'unione di diversi fattori: la dimensione media delle scansioni da gestire (circa 400 Mb ciascuna); il tempo necessario alla texturizzazione del modello; i tempi di esecuzione delle singole operazioni; l'utilizzo integrato delle funzioni di registrazione manuali e semiautomatiche, nei diversi approcci utilizzati.

		Laser scan	Steadycam	Camera DSLR
A	Acquisizione	52 min	2 min 20 sec	35 min
	Elaborazione	3 ore	8 ore	9 ore
B	Acquisizione	178 min	4 min 30 sec	80 min
	Elaborazione	12 ore	7 ore	9 ore

Tabella 2. Tempi di acquisizione ed elaborazione.

4.1 Scansioni laser

Le acquisizioni sono state progettate per raggiungere un buon ricoprimento di entrambi gli oggetti rilevati. Nella Basilica di San Nicola sono state eseguite n°17 scansioni; nel Gabinetto dei Fiori, n°5. Le scansioni sono state elaborate utilizzando il software Faro SCENE. Le nuvole di punti sono state registrate utilizzando un approccio *cloud-to-cloud* e, in un secondo momento, georeferenziate tramite l'uso di punti di controllo misurati con stazione totale, qui definito come "*target-based*" (Chiabrando et al., 2016). I risultati di questo procedimento sono riportati nella Tabella 3, per i dataset (A), soffitto a Stucchi del Castello del Valentino e dataset (B), soffitto ligneo cassettonato della Basilica di Tolentino.

SET DI DATI					
	n° scan	Dim. media	n° pt/scans	Risoluzione (Mpt)	Area scans.
A	5	440Mb	18mln	¼ (1pt/6mm a 10m)	180°
B	17	670Mb	24mln		360°
RISULTATI - Densità media [pt/m ²]					
A	4 042 363				
B	251 360				
CONTROLLO METRICO					
	Cloud-to-cloud			"Target-based"	
	Errore medio ICP (mm)	n° pt con errore medio <4mm	n° target	Errore medio (mm)	Dev. St. (mm)
A	1,55	79,9 %	25	7,24	11,25
B	3,10	60,40 %	51	4,57	2,35

Tabella 3. Specifiche delle scansioni e risultati di accuratezza.

4.2 Approcci fotogrammetrici a confronto

Di seguito verrà riportato il confronto tra le acquisizioni di dati effettuate mediante steadycam (S) e camera DSLR (C) su ciascuno dei due casi studio Dataset (A) e Dataset (B) (Fig. 4 e 5). In entrambi i casi una serie di target e punti naturali sono stati distribuiti e misurati topograficamente con stazione totale come GCPs (Ground Control Points) per il Bundle Block Adjustment (BBA). Per poter effettuare dei controlli metrici di verifica sui modelli sono stati estratti e in seguito utilizzati un set di CPs (Check Points) tra i target misurati. Le Tabelle 4 e 5 riportano i risultati riguardanti il controllo metrico, eseguito sui due modelli fotogrammetrici.

(S) Fotogrammetria digitale (steadycam).

Le acquisizioni con la steadycam OSMO+ sono state eseguite bloccando l'asse z della camera in modo che risultasse perpendicolare al soffitto e registrando video in 4k a 24 fps (*frame per seconds*). Il controllo motorizzato della *gimbal* ha permesso di stabilizzare la camera durante la ripresa. È necessario effettuare una preliminare calibrazione automatica su una superficie orizzontale, tuttavia si è riscontrata la necessità di ripetere tale operazione durante il corso dell'acquisizione con l'uso continuativo dello strumento. Si è scelto di mantenere una configurazione nadirale della camera e di non acquisire fotogrammi obliqui dato il contesto delle operazioni. Uno degli obiettivi era infatti quello di testare la massima rapidità e

Dataset (A) – volta del Gabinetto dei Fiori Indorato



Figura 4. Ingrandimento sulle immagini del soffitto del Gabinetto: Camera DSLR (a sinistra), steadycam (a destra).

operatività di tale strumenti in contesti di medio rischio. Successivamente, dai video sono stati estratti dei set di frame da utilizzare per le successive elaborazioni fotogrammetriche (basate su di un approccio di tipo SfM), tramite il software commerciale Agisoft® PhotoScan Pro V. 1.2.6. Per l'oggetto (A), il gabinetto, sono stati estratti 2 frame al secondo (314 frames), mentre per l'oggetto (B) è stato estratto 1 frame al secondo (328 frames): l'estrazione semiautomatica dei *frames* da video è stata eseguita con la funzionalità implementata nel software ContextCapture di Bentley®. L'unico contributo manuale che ha richiesto la procedura è stato il calcolo dell'intervallo di estrazione (circa 1 min) e il controllo dei *frames* una volta estratti (circa 5min).

(C) Fotogrammetria digitale (Camera DSLR).

Le acquisizioni fotogrammetriche tramite camera DSLR sono state eseguite in maniera tradizionale, utilizzando un treppiede fotografico per ridurre le vibrazioni in fase di acquisizione. Per entrambi i casi sono state realizzate diverse strisciate di acquisizioni di immagini, alcune con orientamento parallelo al soffitto ed altre con orientamento inclinato di $\approx 45^\circ$ (Chiabrando et al., 2017a; Chiabrando et al., 2017b) per ottenere una ricostruzione dell'oggetto il più completa possibile. Le foto sono state acquisite sia in formato RAW che JPG, per poter effettuare una correzione radiometrica a monte dell'elaborazione.

Dataset (B) - Soffitto della Basilica di San Nicola



Figura 5. Ingrandimento sulle immagini del soffitto della Basilica: Camera DSLR (a sinistra) e steadycam (a destra).

SET DI DATI								
	Area [m ²]	n°imm.	Lungh. focale	Config. Camera	Distanza di presa			
S	22	314	35	Nadirale	3,5 m			
C		65	30	Nad/obliqua				
RISULTATI								
	GSD [mm/px]	Tie points	Dense cloud [n°punti]	Densità media [pt/m ²]				
S	1,04	77 912	13 270 000	591 000				
C	0,50	320 000	50 560 000	2 300 000				
L				4 042 363				
CONTROLLO METRICO								
	n°13 GCPs RMSE [mm]				n°4 CPs RMSE [mm]			
	X	Y	Z	Err.	X	Y	Z	Err.
S	3,2	3,9	2,6	3,2	3,1	3,0	2,0	2,7
C	2,0	1,8	1,4	1,7	2,0	2,5	2,6	2,4

Tabella 4. Test (A): set di dati, risultati e controllo metrico di (S) OSMO+ steadycam e (C), camera Canon, confrontati con la densità della nuvola LiDAR (L).

SET DI DATI								
	Area [m ²]	N°imm.	Lungh. focale	Config. Camera	Distanza di presa			
S	560	328	35	Nadirale	13 m			
C		84	24		14 m			
RISULTATI								
	GSD [mm/px]	Tie points	Dense cloud [n°punti]	Densità media [pt/m ²]				
S	4,20	196 580	16 370 000	29 200				
C	3,30	171 000	28 300 000	50 500				
L				251 360				
CONTROLLO METRICO								
	n°13 GCPs RMSE [mm]				n°4 CPs RMSE [mm]			
	X	Y	Z	Err.	X	Y	Z	Err.
S	8,9	8,1	9,4	8,8	10,4	12,9	6,5	9,9
C	7,1	7,5	7,2	7,3	11,1	7,4	6,0	8,2

Tabella 5. Test (B): set di dati, risultati e controllo metrico di (S) OSMO+ steadycam e (C), camera Canon, confrontati con la densità della nuvola LiDAR (L).

4.3 Commento sui risultati

L'apprezzabile risoluzione del modello fotogrammetrico realizzato a partire dai dati acquisiti con la steadycam è strettamente legata alla configurazione geometrica dell'ambiente oggetto del rilievo e delle condizioni dell'acquisizione. Il modello del Gabinetto dei Fiori ha una risoluzione di 1 mm/px (circa il doppio rispetto al modello prodotto a partire dai dati della camera DSLR, 0,5 mm/px) mentre il GSD (Ground Sampling Distance) per il soffitto a cassettoni della Basilica è pari a 4,2 mm/px (circa 1,2 volte quella del modello della camera DSLR, 3,3 mm/px), a causa della maggiore distanza di presa e delle diverse caratteristiche dei sensori. Gli RMSE (Root Mean Square Error) sui GCPs e le valutazioni sul GSD indicano un buon risultato per quanto riguarda l'approccio fotogrammetrico basato sulla steadycam: 3,22 mm per il Gabinetto dei Fiori (circa 1,8 volte rispetto alla camera) e quasi 1 cm per il soffitto cassettonato della Basilica (1,2 volte rispetto alla camera).

Tutte queste considerazioni sono ovviamente da relazionare con la scala di rappresentazione architettonica, 1:20 per quanto riguarda il modello realizzato con i dati della camera, e quasi 1:50 per il modello della steadycam. I dati precedentemente commentati sono riportati in sintesi nella Tabella 6.

	GSD [mm/px]		RMSE sui GCPs [mm]	
	Dataset A	Dataset B	Dataset A	Dataset B
S	1,04	4,2	3,2	8,8
C	0,5	3,3	1,7	7,3

Tabella 6. Sintesi del GSD dei modelli 3D e degli RMSE sui GCPs per entrambi i sensori, per i casi (A) e (B).

5. VALUTAZIONE MULTI SCALA DEI MODELLI 3D: CONFRONTO GEOMETRICO E RADIOMETRICO

Con il duplice scopo di assumere un metodo di valutazione secondo il concetto di *validazione*, inteso come verifica del soddisfacimento di determinati requisiti per uno scopo prestabilito (ISO/IEC Guide 99:2007 & JCGM 200, 2007), e di confrontare tra loro i sensori, sono state svolte alcune analisi, riguardanti soprattutto i due approcci fotogrammetrici: il primo, più tradizionale, con camera DSLR e il secondo, sperimentale, con la steadycam OSMO+, entrambi successivamente rapportati alla nuvola di punti del laser scanner. Una prima valutazione è stata svolta in un'area ridotta dei due soffitti, mentre una seconda ha riguardato un piccolo dettaglio decorativo.

5.1 Orto-immagine e modello digitale

I due sensori sono stati confrontati per testarne il potenziale impiego in operazioni di documentazione di superfici architettoniche complesse; le ortoreimmagini e i modelli 3D generati sono stati rigorosamente confrontati dal punto di vista geometrico e radiometrico. Considerando che i differenti GSD illustrati in Tabella 6 dipendono dalla dimensione dei sensori e dalle distanze di acquisizione, si conferma un buon livello di dettaglio raggiunto dalla steadycam rispetto la camera DSLR. In Figura 7 e in Tabella 7 vengono riportate informazioni relative al DSM (Digital Surface Model) di ciascun caso studio.

Le criticità principali che emergono dalle analisi sul DSM della volta del Gabinetto dei Fiori sono legate alla geometria di presa rispetto alla curvatura della volta: il controllo metrico sul posizionamento dei punti di controllo conferma tali considerazioni. I punti in giallo sono infatti posizionati in una zona della volta con una marcata curvatura in contrasto con la

geometria di presa delle camere (nadirale), mentre i punti in verde e in arancio si distribuiscono in una zona dalla curvatura meno marcata.

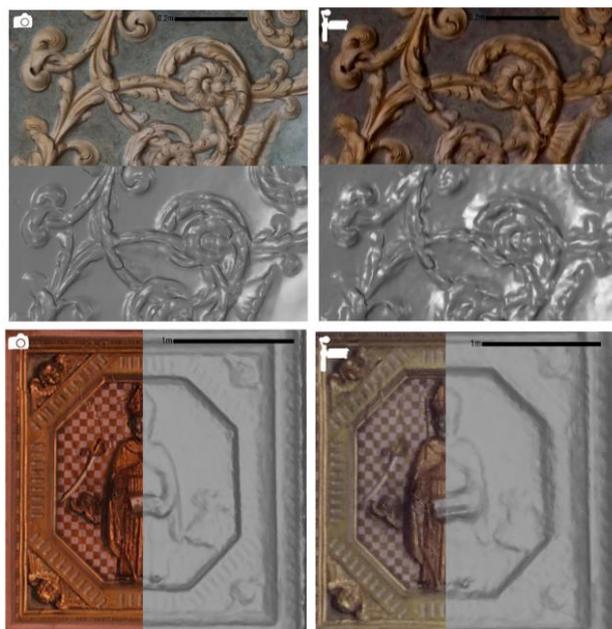


Figura 6. Dettagli del particolare decorativo del soffitto A (sopra) e B (sotto) confrontando il modello 3D texturizzato e non texturizzato (in grigio), generato da camera DSLR (sinistra) e steadycam (destra).

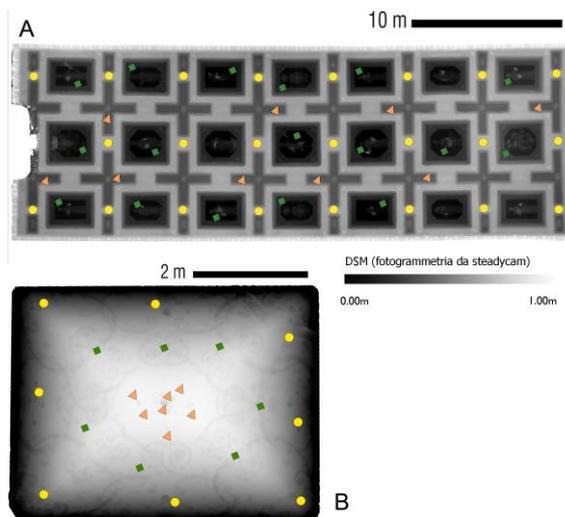


Figura 7. DSM, scala di colore per quota in legenda, e relativa distribuzione dei punti di controllo nel caso studio A e B, scelti manualmente sulla superficie dei soffitti.

		Media ass.	Dev. st.	min	Max
A	Tutti	0,0041	0,0041	0,0005	0,0214
	●	0,0057	0,0063	0,0011	0,0214
	◆	0,0024	0,0012	0,0005	0,0048
	▲	0,0040	0,0009	0,0027	0,0057
B	Tutti	0,0119	0,0079	0,0000	0,0359
	●	0,0086	0,0052	0,0000	0,0208
	◆	0,0173	0,0092	0,0015	0,0359
	▲	0,0103	0,0055	0,0028	0,0175

Tabella 7. Valori statistici sui punti di controllo rispetto alla loro distribuzione sul soffitto di (A) e (B).

Il soffitto cassettonato della Basilica di Tolentino ha una elevata tridimensionalità (almeno un metro di profondità); in questo caso i punti verdi sono distribuiti sulla porzione di apparato decorativo rappresentante i santi; i punti arancio sono invece distribuiti sui profili decorativi cruciformi. In Figura 8 sono illustrate, per ciascun caso studio, alcune sezioni trasversali

della superficie triangolata ad alta definizione; ciascuno dei tre profili corrisponde al modello generato dai dati raccolti da uno specifico sensore. Nell'immagine è possibile apprezzare le diverse capacità descrittive raggiunte sulle geometrie delle superfici dai singoli sensori.

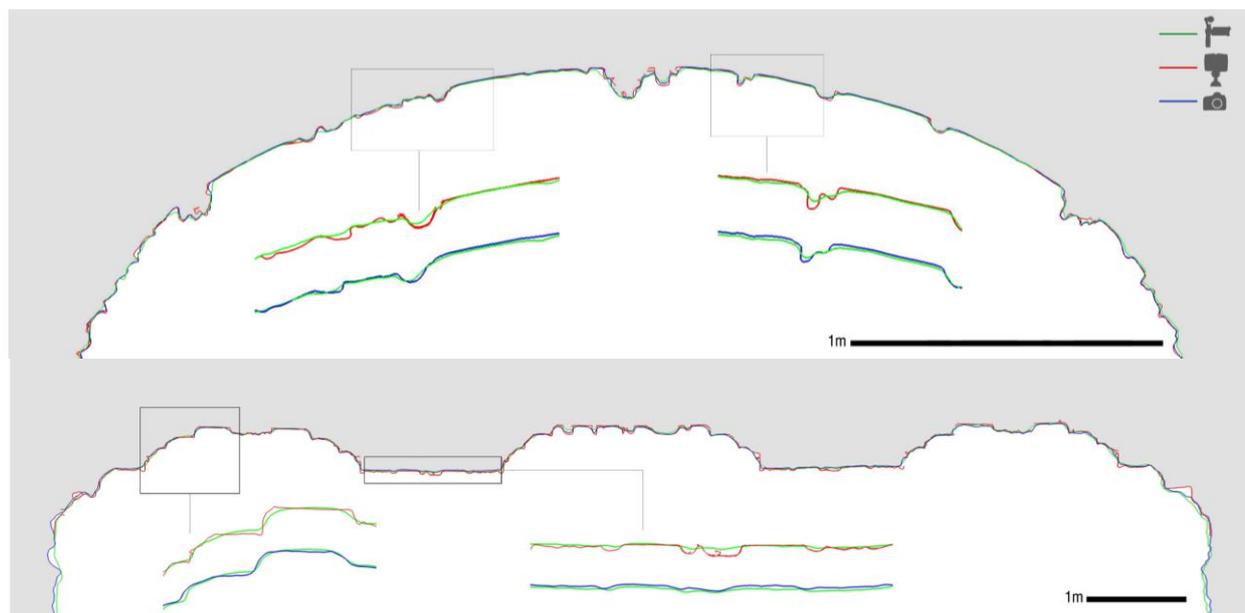


Figura 8. Profili di sezione del soffitto di A (sopra) e B (sotto). I riquadri tratteggiati identificano le aree a cui corrispondono i relativi ingrandimenti sottostanti.

5.2 Area campione dell'apparato decorativo

È stata selezionata un'area campione in entrambi i casi studio: un modulo composto da tre cassettoni per la Basilica, e la porzione centrale della volta a padiglione per il Gabinetto del Castello. In questa fase sono state confrontate analiticamente le nuvole di punti originate dai dati raccolti dai tre sensori.

In particolare, sono stati effettuati confronti statistici relativi alle distanze assolute residue del modello 3D generato dall'OSMO+ rispetto alle nuvole di punti derivate dalla camera DSLR e dal LiDAR tramite funzione C2C (*Cloud to Cloud*), implementata in *CloudCompare* (Fig.9 e Tab.8). Inoltre, è stata condotta anche un'analisi del rumore delle nuvole di punti limitatamente ad un dettaglio, tramite funzione *Roughness*, anch'essa implementata in *CloudCompare*. Tale funzione analizza e mappa errori di rumore sulla nuvola ovvero le distanze di deviazione di campioni di punti contenuti in un intorno stabilito con $r=0.1m$ rispetto al piano medio che approssima i punti in quell'intorno (Fig.10 e Tab.9).

Nel caso (A) l'impostazione del progetto di documentazione in uno spazio ridotto, con condizioni di illuminazione ottimali, ha condotto a risultati eccellenti in termini di risoluzione radiometrica e definizione geometrica. I risultati ottenuti dall'OSMO+ si sono rivelati molto competitivi nonostante l'alto livello di dettaglio ottenuto dai dati range-based. Nel confronto tra sensori la deviazione standard dei modelli si attesta su $\pm 1cm$. Il caso (B) presenta un cambiamento di scala: infatti la distanza dal soffitto è triplicata rispetto al caso (A). Questo fattore, unito alla spiccata tridimensionalità dei cassettoni e alla scarsità di illuminazione, penalizza la definizione della superficie del soffitto. Le analisi condotte, confrontando i modelli 3D del soffitto della Basilica, permettono di valutare complessivamente la nuvola di punti dell'OSMO+ come sufficientemente dettagliata nella definizione delle geometrie dei particolari

dell'oggetto d'interesse. Tale definizione è sicuramente inferiore rispetto a quella generata dal dataset LiDAR, ma in ogni caso meno affetta da rumorosità di quest'ultima. Nel confronto tra le nuvole da camera DSLR e quelle LiDAR, la densificazione risente di una precisione inferiore nelle aree limite del soffitto, in corrispondenza delle pareti.

Come ultima analisi sono stati confrontati due elementi decorativi, aventi area di circa $1 m^2$, al fine di esaminare il livello di dettaglio raggiungibile da ciascuno strumento qualora fosse necessario mappare degradi o fessurazioni superficiali: in tale situazione le informazioni metriche e radiometriche sono egualmente importanti ai fini interpretativi (Tab. 9 e Fig. 10).

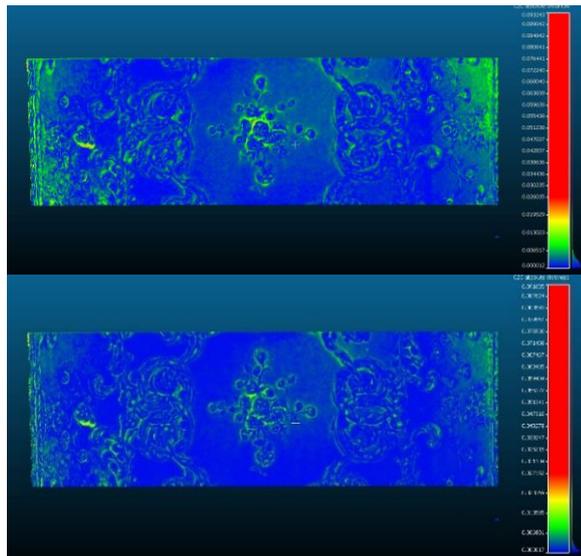
6. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Il lavoro presentato sintetizza, nella Tabella 10, alcune considerazioni d'insieme sulla validazione dei dati metrici ottenibili da ciascun sensori e sulle performance dei diversi metodi di misura. Il confronto è stato condotto in modo da massimizzare l'efficacia dei vari sensori impiegati, selezionando dunque le impostazioni che, per ogni dato strumento e per ogni contesto, massimizassero a priori il rapporto costi-benefici, tra la qualità dei risultati e i tempi di acquisizione ed elaborazione. Il rilievo LiDAR, ad esempio, rientra in questa casistica: infatti il bilanciamento tra qualità e quantità dell'informazione registrata dallo strumento, e relativi tempi di acquisizione è stato valutato simulando le scelte operative il più similmente possibile a quelle richieste dalle condizioni operative di quel contesto.

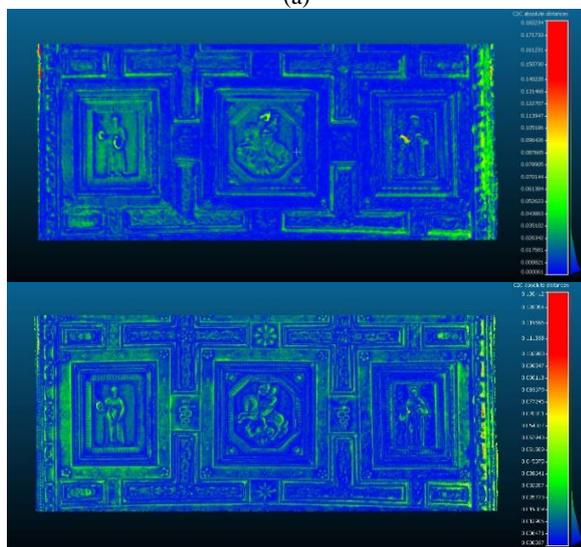
La rapidità nell'acquisizione dei dati, la facilità di utilizzo, la maneggevolezza e il costo contenuto sono gli aspetti che concorrono a definire la steadycam come una soluzione efficace per il rilievo speditivo in contesti d'emergenza o comunque precari, di limitata accessibilità. Di contro, il FOV (*Field of*

View) piuttosto ridotto, la limitata autonomia della batteria e la necessità di dover ricalibrare spesso la *gimbal*, sono aspetti critici che l'operatore deve tenere in considerazione per un proficuo impiego dello strumento.

operativo emergenziale (medio rischio) il rapporto tempi/costi, l'accuratezza metrica e l'attendibilità delle caratteristiche radiometriche sono parametri importanti per garantire una corretta attività di documentazione, e la steadycam si è rivelata all'altezza delle aspettative, fornendo in ultima istanza dei risultati decisamente competitivi.



(a)



(b)

Figura 9. Distanze assolute nell'area campione dei dataset A e B (m). (a) dataset A: alto, steadycam-DSLR; basso, steadycam-LiDAR. (b) dataset B: alto, steadycam-DSLR; basso, steadycam-LiDAR. (Valori in Tabella 8).

Per quanto riguarda l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, i risultati sono molto competitivi rispetto all'approccio close-range tradizionale con fotocamera DSLR, così come il livello di accuratezza metrica raggiunto. Nello specifico contesto

Distanze assolute (m)		media	Dev. st.	min	Max
A	Steadycam vs. DSLR	0.003	0.002	0.000	0.093
	Steadycam vs. LiDAR	0.002	0.002	0.000	0.092
B	Steadycam vs. DSLR	0.014	0.010	0.000	0.182
	Steadycam vs. LiDAR	0.012	0.009	0.000	0.136

Tabella 8. Distanze assolute nell'area campione dei dataset A e B.

		LiDAR	Camera DSLR	Steadycam	
B	N° punti	170 438	32 056	20 311	
	Rumorosità	Media	0,0076	0,0040	0,0034
		Dev. St.	0,0073	0,0035	0,0028
A	N° punti	3 461 344	1 085 839	314 647	
	Rumorosità	Media	0,0036	0,0047	0,0041
		Dev. St.	0,0062	0,0071	0,0062

Tabella 9. Indice di rumorosità nel dettaglio dei dataset (A e B).

Sensore		LiDAR	DSLR	Steadycam
Costo		●●●●	●●●	●●
Acquisizione	Autonomia	●●	●●●	●
	Tempi	●●●	●●	●
	Lav. utente	●●	●●●	●
Elaborazione	Lav. PC	●●	●●●	●●●
	Lav. utente	●●●	●●	●●
	Tempi	●●●●●	●●●	●●●
Risultati	Dettaglio	●●●	●●●	●●
	Rumore	●●●	●●	●

Tabella 10: Panoramica delle caratteristiche dei sensori usati.

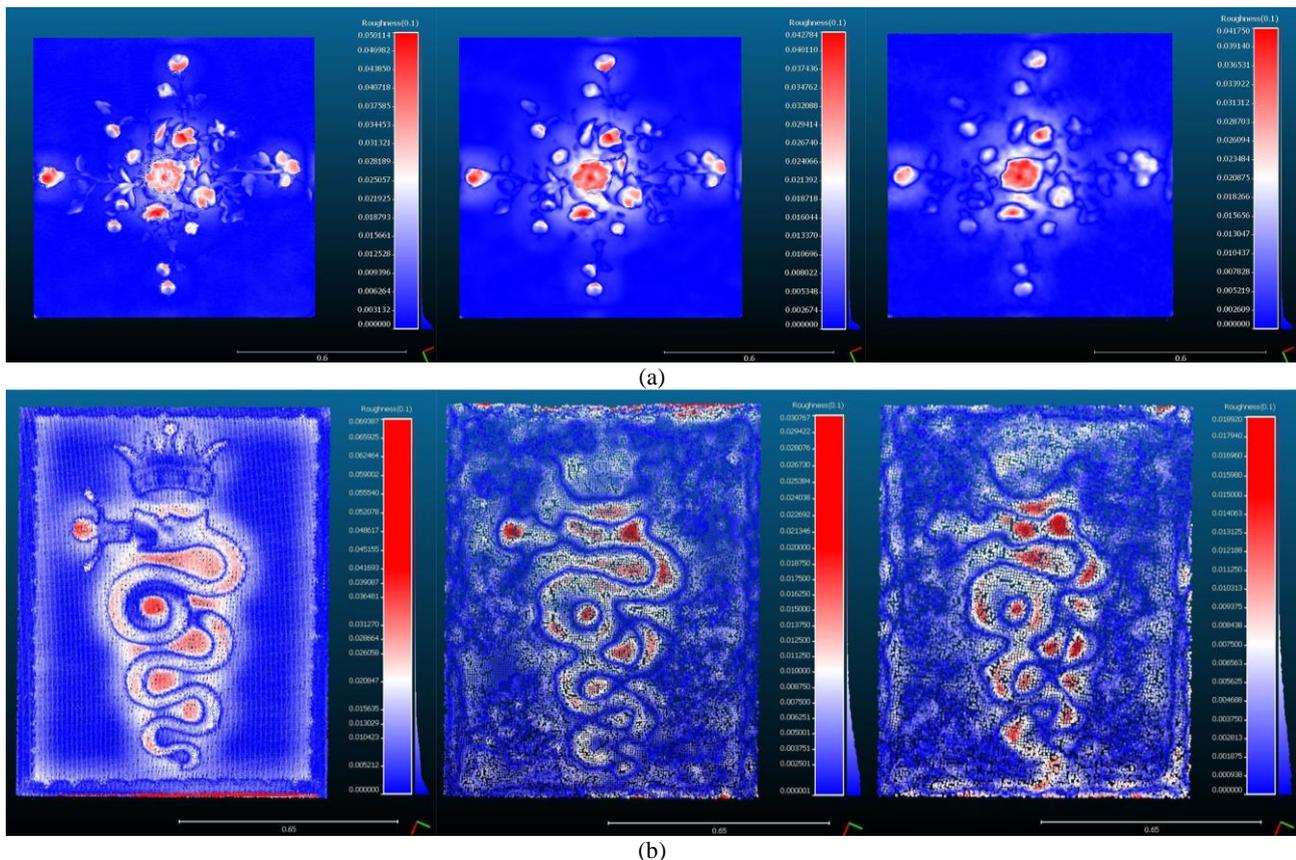


Figura 10. Indice di rumorosità nel dettaglio del dataset A (a) e B (b) riferito ai tre sensori. Da sinistra: LiDAR, DSLR, steadycamera.

BIBLIOGRAFIA

Balletti, C., Guerra, F., Tsioukas, V., & Vernier, P. (2014). Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes. *Sensors*, 14(9), 17471–17490. <https://doi.org/10.3390/s140917471>

Bellekens, B., Spruyt, V., & Weyn, M. (2014). A Survey of Rigid 3D Pointcloud Registration Algorithms. *AMBIENT 2014, The Fourth International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*. 2014., (c), 8–13.

Bosse, M., & Zlot, R. (2009). Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4312–4319). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152851>

Bosse, M., Zlot, R., Flick P. (2012). Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3D Range Sensor with Application to Mobile Mapping, *IEEE Transactions on Robotics*, 28 (5), 1104 - 1119.

Cadge, S. (2016). Welcome to the ZEB REVOLUTION. *GEOmedia*, pp. 22–26.

Calantropio, A., Colucci, E., & Teppati Losè, L. (2017a). Rapid mapping for built heritage at risk using low-cost and COTS sensors. A test in the Duomo Vecchio of San Severino Marche. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W8, pp. 59–66. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-59-2017>

Calantropio, A., Patrucco, G., Sammartano, G., Teppati Losè, L. (2017b). Low-cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadycamera. *Applied Geomatics*. <https://doi.org/10.1007/s12518-017-0199-6>

Chiabrando, F., Lingua, A., Maschio, P., Teppati Losè, L. (2017a). The influence of flight planning and camera orientation in UAVs photogrammetry. A test in the area of Rocca San Silvestro (LI), Tuscany. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W3, pp. 163–170. - ISSN 2194-9034.

Chiabrando, F., Spanò, A., Sammartano, G., Teppati Losè, L. (2017b). UAV oblique photogrammetry and LiDAR data acquisition for 3D documentation of the Hercules fountain. In: *VIRTUAL ARCHAEOLOGY REVIEW*, vol. 8 n. 16, pp. 83-96. - ISSN 1989-9947.

Chiabrando, F., Di Pietra, V., Lingua, A., Maschio, P., Noardo, F., Sammartano, G., Spanò, A. (2016). TLS models generation assisted by UAV survey. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B5, pp. 413-420 - ISSN 2194-9034.

Convenzione Europea del Paesaggio, Council of Europe and MiBACT, Firenze, 20 ottobre 2000

GeoSLAM, “CSIRO research,” 2016, <http://geoslam.com/slam/csiro-research/>

Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd. OSMO 22 Specifications, FAQ, videos tutorials, manuals, Reimagine

- Movement - DJI. Retrieved June 8th, 2017, from DJI - The Future Of Possible: <http://www.dji.com/osmo>.
- D'Annibale E., Tasseti, A. N., Malinverni, E. S. (2013). From panoramic photos to a low-cost photogrammetric workflow for cultural heritage 3D documentation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W2, pp. 213-218.
- Das, J., Cross, G., Qu, C., Makineni, A., Tokekar, P., Mulgaonkar, Y., Kumar, V. (2015). Devices, Systems, and Methods for Automated Monitoring Enabling Precision Agriculture. *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 462-469.
- Di Pietra, V. (2017). Terrestrial photogrammetry and tablet technology in post-earthquake scenario: case study of Sant'Agostino church in Amatrice, *Bollettino SIFET*, n°2, 2017
- Farella, E., Menna, F., Nocerino, E., Morabito, D., Remondino, F., & Campi, M. (2016). Knowledge and valorization of historical sites through 3D documentation and modeling. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B5, pp. 255–262. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-255-2016>
- Fiorillo, F., Limongiello, M., Fernández- Palacios, B. J. (2016). Testing GoPro for 3D model reconstruction in narrow spaces. *Acta IMEKO*, vol. 5, n° 2, September 2016
- Fissore, F., Masiero, A., Piragnolo, M., Pirotti, F., Guarnieri, A., & Vettore, A. (2018). Towards Surveying with a Smartphone (pp. 167–176). *Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56218-6_13
- Gruen, A., & Akca, D. (2008). Metric accuracy testing with mobile phone cameras. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII-B5, pp. 729-736
- ICOMOS, 1996. Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites, 1th ICOMOS General Assembly in Sofia, October 1996.
- ISO/IEC Guide 99:2007 & JCGM 200, 2007
- Harwin, S., Lucieer, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, 4(6), pp. 1573-1599.
- Kolev, K.; Tanskanen, P.; Speciale, P.; Pollefeys, M. (2014). Turning Mobile Phones into 3D Scanners. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3946-3953.
- Kossieris, S., Kourounioti, O., Agrafiotis, P., & Georgopoulos, A. (2017). Developing a low-cost system for 3D data acquisition. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W8, pp. 119–126. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-119-2017>
- Kwiatk, K., Tokarczyk, R. (2015). Immersive Photogrammetry in 3D Modelling. *Geomatics and Environmental Engineering*, vol. 9, n° 2, pp. 51-62.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). Close range photogrammetry: principles, techniques and applications. *Whittles Publishing*.
- Mariano, F. (2008). Soffitto Ligneo. La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia. A cura del Centro studi "Agostino Trapè", *Biblioteca Egidiana*, pp. 63-65.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., Lane, S. N. (2014). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, pp 473-486.
- Mandelli, A., Fassi, F., Perfetti, L., & Polari, C. (2017). Testing different survey techniques to model architectonic narrow spaces. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W5, pp. 505–511. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-505-2017>
- Markiewicz, J. S., Łapiński, S., Bienkowski, R., and Kaliszewska, A. (2017). The example of using the Xiaomi cameras in inventory of monumental objects - first results, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W8, pp. 133-140. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-133-2017>, 2017
- Nocerino, E., Lago, F., Morabito, D., Remondino, F., Porzi, L., Poiesi, F., Rota Bulò, S., Chippendale, P., Locher, A., Havlena, M., Van Gool, L., Eder, M., Fötschl, A., Hilsmann, A., Kausch, L., Eisert, P. (2017a). A smartphone-based 3D pipeline for the creative industry – the REPLICATE EU project. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W3, pp. 535-541.
- Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., & Rodríguez-González, P. (2017b). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. In F. Remondino & M. R. Shortis (Eds.), *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, edited, SPIE 2017 (p. 103320I). <https://doi.org/10.1117/12.2270761>
- Nocerino, E., Poiesi, F., Locher, A., Tefera, Y. T., Remondino, F., Chippendale, P., and Van Gool, L. (2017c) 3D reconstruction with a collaborative approach based on smartphones and a cloud-based server, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W8, pp. 187-194, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-187-2017>, 2017.
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W5, pp. 591–599. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), pp. 144–166. <https://doi.org/10.1111/phor.12063>
- Riisgaard, S. (2005). SLAM for Dummies: A tutorial approach to Simultaneous Localization and Mapping. <https://doi.org/10.1017/S0025315400002526>

Sammartano, G. (2017). Optimization of 3D multi-sensor models for damage assessment in emergency context: first tests on rapid mapping in the 2016 Italian earthquake. In: Remondino, F., Georgopoulos, A., Gonzalez-Aguilera, D., Agrafiotis, P., (Eds.), *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modeling*. MDPI.

Shults, R. (2017). new opportunities of low-cost photogrammetry for culture heritage preservation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-5/W1, pp. 481–486. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-481-2017>

Thomson, C., Apostolopoulos, G., Backes, D., & Boehm, J. (2013). Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-5/W2, pp. 289–293. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W2-289-2013>

Tucci, G., Bonora, V., Conti, A., & Fiorini, L. (2017). Digital Workflow for the Acquisition and Elaboration of 3D Data in a Monumental Complex: the Fortress of Saint John the Baptist in Florence. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W5, pp. 679–686. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-679-2017>

Waldhäusl, P.; Ogleby, C. L.; Lerma, J. L.; Georgopoulos, A. (2013). 3x3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture. URL: http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2017/02/CIPA__3x3_rules__20131018.pdf

Zlot, R., Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckes, E., & Roberts, J. (2014). Efficiently capturing large, complex cultural heritage sites with a handheld mobile 3D laser mapping system. *Journal of Cultural Heritage*, 15(6), 670–678. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.009>.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano esprimere la loro gratitudine ai membri e ai tutor del team DIRECT, in particolare a Nannina Spanò e Filiberto Chiabrande per la loro costante attenzione e guida. Grazie al Comune di Tolentino, alla Facoltà di Architettura del Politecnico di Torino e alla task force operativa del Politecnico per il supporto finanziario per la missione in centro Italia.