

IMPIEGO DI TECNICHE DI FOTOGRAMMETRIA DIGITALE SPEDITIVA A SUPPORTO DELLE OPERE PROVVISORIALI NEGLI INTERVENTI TECNICI IN EMERGENZA SISMICA

USE OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY TECHNIQUES FOR SUPPORTING PROVISIONAL STRUCTURES IN SEISMIC EMERGENCY RESPONSE

A. Calantropio^a, F. Chiabrando^a, A. Spanò^a

^aDAD – Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Viale Mattioli 39, 10129 Torino, Italia.
alessio.calantropio@polito.it, filiberto.chiabrando@polito.it, antonia.spano@polito.it

PAROLE CHIAVE: Modelli 3D, Sicurezza nei cantieri, Emergenza sismica, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Fotogrammetria, Rilievo speditivo, UAV.

KEY WORDS: 3D models, Safety in construction sites, Italian National Firefighters Corps, Seismic emergency, Photogrammetry, Rapid surveying, UAV.

RIASSUNTO

I disastrosi eventi sismici, occorsi in Italia negli ultimi anni, hanno indirizzato i recenti obiettivi di ricerca nel campo della Geomatica verso la definizione di nuove strategie per il rilievo speditivo in operazioni di *disaster management* e di *damage assessment*. Le possibilità offerte dalle tecniche di fotogrammetria digitale e i costanti miglioramenti negli algoritmi di *image-matching* costituiscono un importante supporto alla progettazione e alla realizzazione degli interventi tecnici urgenti di messa in sicurezza nell'immediato post-sisma. In un contesto operativo precario sotto molteplici aspetti, uno degli elementi cruciali è la pianificazione in sicurezza delle azioni di monitoraggio e di intervento sul patrimonio costruito. Data l'esigenza di ridurre i tempi di permanenza degli operatori nelle zone pericolose, l'oggetto di questa ricerca è stato sperimentare un'applicazione di fotogrammetria terrestre e da APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo metrico speditivo del patrimonio architettonico danneggiato, con lo specifico scopo di supportare il CNVVF (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco) fornendo una soluzione rapida ed affidabile per un efficace ed efficiente dimensionamento delle opere provvisorie.

ABSTRACT

The disastrous earthquakes, which have occurred in Italy in the recent years, have aimed the recent Geomatics research goals towards the development of new rapid surveying strategies in disaster management and damage assessment operations. The possibilities offered by the advances in digital photogrammetry techniques and the constant improvements in image-matching algorithms are an important support to the design and realisation of urgent technical measures in the immediate post-earthquake scenarios. In a broadly precarious operating environment, one of the key factors is the safe planning of monitoring and response activities on the built heritage. Given the need to reduce firefighters' stay time in hazardous areas, the object of this research was to test an application of terrestrial and UAV (Unmanned Aerial Vehicles) photogrammetry for the rapid metric surveying of damaged architectural heritage, in order to provide a fast and reliable solution aimed at the design of provisional structures for the Italian National Firefighters Corps.

1. INTRODUZIONE

Lo sciame sismico che ha interessato le regioni dell'Italia centrale a partire dal mese di agosto 2016 ha posto nuovamente l'attenzione sul tema della fragilità del patrimonio architettonico che insiste sul nostro territorio. Una delle richieste più pressanti che, a seguito di questi eventi, è stata indirizzata ai ricercatori che si occupano delle discipline nel campo della Geomatica, è stata quella di fornire tecniche speditive per la documentazione dei contesti danneggiati, riducendo al minimo la permanenza degli operatori sul campo e, di conseguenza, il rischio per gli stessi. I processi che impiegano sensori attivi e passivi per il rilevamento 3D, ovvero le tecniche TLS (*Terrestrial Laser Scanning* – Laser Scanning Terrestre) da un lato e le nuove frontiere della fotogrammetria digitale dall'altro, convergono sempre più strategicamente, laddove l'obiettivo e il contesto applicativo lo richiedano, verso una rapidità di metodi e tecniche associate a una efficienza e ottimizzazione dei dati in fase di elaborazione. (Mandlbürger, et al., 2017; Piras, et al., 2017).

Alla luce di queste esigenze si è deciso di sperimentare, nel lavoro qui presentato, un approccio *image-based* mediante un'applicazione di tecniche fotogrammetriche, con lo scopo di fornire non soltanto un supporto al rilievo dello stato in cui versano i manufatti danneggiati, ma anche per supportare il miglioramento delle condizioni, in termini di sicurezza e fattibilità operativa, in cui avvengono le operazioni di *damage assessment and management*. Nel dettaglio il presente contributo ha l'obiettivo di dare indicazioni in merito all'utilizzo di sistemi UAV a supporto della progettazione di opere provvisorie in interventi tecnici a seguito di emergenza sismica. (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010a).

Vengono riportati due casi studio basati sull'esperienza degli autori relativa ad una serie di campagne di acquisizione dati condotte dal Team DIRECT (*DISaster REcovery Team*) del Politecnico di Torino, nell'ambito di un complesso progetto che ha coinvolto l'Ateneo torinese (con la *task force* coordinata dal

Prof. Sebastiano Foti) per interventi speditivi d'emergenza finalizzati alla documentazione delle aree del centro Italia (1). Nelle zone più lontane dal cratere centrale il patrimonio costruito è stato infatti soggetto a meccanismi di danneggiamento minori, che hanno però richiesto in ogni caso azioni di monitoraggio ed intervento urgente.

Lo scopo della ricerca è quello di analizzare precisioni e accuratezze ottenibili generando modelli fotogrammetrici da prese aeree e terrestri, effettuando un *free-net adjustment* (Luhmann, 2010) con successiva assegnazione della scala del modello basata su distanze note.

Il motivo alla base di questa scelta metodologica è legato alla volontà di fornire, nell'ambito di una collaborazione attivata con il CNVVF, un metodo operativo, applicabile senza oneri economici nell'acquisto di ulteriore strumentazione di rilievo.

Esistono ovviamente molte soluzioni, sia *image-based* che *range-based*, che permetterebbero di evitare la necessità di dover materializzare lunghezze di riferimento in prossimità dell'oggetto da rilevare; alcune tra le più efficaci prevedono:

- L'utilizzo di piattaforme UAV che garantiscano un posizionamento molto accurato, sfruttando ricevitori GNSS-RTK (*Real-Time Kinematic*) a 2 frequenze, con precisioni nominali centimetriche (Gerke, et al., 2016);
- L'utilizzo di sistemi TLS o SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) che garantiscano la possibilità di rilevare, con precisioni e accuratezze millimetriche o centimetriche, oggetti molto distanti dall'operatore, con un conseguente aumento delle condizioni di sicurezza operative (Olsen, et al., 2010; Sammartano, et al., 2018).

Purtroppo, il costo legato all'acquisto di questi strumenti risulta, ad oggi, molto elevato, ed il loro utilizzo non è ancora stato implementato nelle prassi operative attuali del CNVVF.

L'approccio che prevede l'impiego di elementi di lunghezza nota è, d'altro canto, una procedura più economica ed altrettanto consolidata, utilizzata sia per il controllo che per l'orientamento del blocco fotogrammetrico in applicazioni industriali (Luhmann, 2010), nel rilievo del patrimonio archeologico (Nocerino, et al., 2013), in studi paleontologici (Falkingham, 2011), nel monitoraggio di infrastrutture (Jiang, et al., 2010) e sullo studio dell'erosione del suolo (Rieke-Zapp, et al. 2005).

Le distanze per scalare il modello possono essere relative ad elementi che vengono appositamente introdotti nella scena ripresa (scale graduate per usi metrologici), o possono essere misurazioni effettuate sull'oggetto ripreso tramite rilievi diretti longimetrici. La dimensione di questi supporti, così come la loro sensibilità, deve essere proporzionata all'oggetto da rilevare, alla distanza di presa delle immagini, nonché al grado di precisione e accuratezza richiesti per le finalità specifiche del rilievo.

1.1 Opere provvisionali: le prassi operative attuali e le possibilità di impiego di sistemi di rilievo metrico avanzato

È compito dei Vigili del Fuoco, in coordinamento con il Dipartimento della Protezione Civile, effettuare le verifiche del danno e dell'agibilità delle strutture colpite dal sisma, oltre alla messa in sicurezza del patrimonio storico e artistico danneggiato mediante la realizzazione di opportune opere provvisionali.

Le opere provvisionali hanno non solo lo scopo di mettere in sicurezza gli edifici e ristabilire la circolazione veicolare e pedonale, ma anche quello di poter garantire le attività di soccorso di persone e del recupero degli effetti personali, permettendo anche l'accesso ad altri soggetti, come ad esempio i tecnici impegnati nella valutazione dell'agibilità e nella catalogazione dei beni (Grimaz, et al., 2016).

Anche se queste opere sono intrinsecamente concepite per resistere alle sollecitazioni delle scosse successive, la sicurezza degli operatori durante la loro realizzazione rappresenta un fattore cruciale. Una strategia fondamentale per la diminuzione dei rischi operativi è la riduzione del tempo di permanenza degli operatori nelle aree pericolose; di conseguenza la rapidità con cui devono essere eseguiti i lavori comporta l'adozione di precauzioni decisamente maggiori rispetto alle operazioni svolte in circostanze ordinarie. È necessario "*semplificare la fase realizzativa (preparazione e montaggio) cercando, per quanto possibile, di operare in condizioni di sicurezza, preferendo il pre-assemblaggio dell'opera, o di parti di essa, in zona di sicurezza*" (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010a).

È in queste situazioni che si configura lo scenario di utilizzo di sistemi di rilievo metrico avanzato e delle tecniche di fotogrammetria da drone; tali metodologie permettono di ridurre i tempi di esposizione degli operatori ai rischi di permanenza in zone pericolose durante le operazioni di rilievo e, al contempo, fornire una precisione maggiore rispetto alle operazioni di rilievo metrico tradizionale attualmente adoperate.

L'adozione di questi metodi andrebbe a ridurre al minimo l'intervento umano per il rilievo delle caratteristiche geometriche del manufatto, soprattutto negli scenari che richiedono lavori in quota o in contesti di sicurezza precaria.

1.2 Strategie image-based a supporto nella gestione dell'emergenza sismica

I droni rappresentano oggi una tecnologia emergente e che sta interessando diversi filoni di ricerca, alla luce della vastità dei campi applicativi a cui si presta, tra i quali ritroviamo oltre a quelli del monitoraggio ambientale e per la manutenzione ordinaria del patrimonio costruito, anche quelli relativi al *disaster management* e al *damage assessment*.

È ormai consolidato all'interno della comunità scientifica che i processi di generazione delle nuvole di punti a partire da blocchi fotogrammetrici georeferenziati forniscano ottimi risultati anche quando il dato di partenza non è un set di immagini acquisite con una camera fotogrammetrica calibrata (Cardenal, et al., 2004).

Proprio per questo motivo è possibile sempre di più sfruttare set di dati provenienti da sensori low-cost quali camere compatte, camere di media risoluzione montate su smartphone e steadycams, costituendo tali strumenti una valida alternativa, più economica e accessibile, rispetto alle fotocamere DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) professionali (Chandler, et al., 2005).

L'uso di droni equipaggiati con fotocamera, oltre ai dispositivi GNSS, è aumentato sia per le attività di documentazione che per quelle di rilievo metrico. Inoltre, questi sistemi si stanno dimostrando affidabili in condizione di emergenza, non solo per l'osservazione a distanza e la pianificazione delle attività a supporto degli operatori sul campo (Baicocchi et al., 2013), ma anche nel caso di monitoraggio e analisi multi-temporale di Beni Architettonici in contesti di rischio (Chiabrando, et al., 2017).

L'utilizzo di UAV permette di ridurre al minimo l'impiego di operatori all'interno degli edifici o su piattaforme di lavoro mobili elevabili (PLE); alcuni scenari in cui questo contributo può essere utile sono, ad esempio, gli interventi su torri o

¹ AA.VV., *L'esperienza interdisciplinare della Task Force del Politecnico di Torino per il terremoto del centro Italia (2016-2017). Sviluppi e prospettive*. Volume in pubblicazione.

campanili, in cui il rilievo a distanza garantisce la massima condizione di sicurezza per gli operatori.

In un approccio multi-scala, specialmente nel rilievo speditivo di Beni Culturali in contesti di rischio, è necessario adottare strategie differenti per raggiungere un elevato dettaglio delle aree di specifico interesse, e l'aumento dell'utilizzo dei droni per fotogrammetria aerea sta avendo un grande impatto anche in questi contesti (Boccardo et al., 2015; Fernandez Galarreta et al., 2015) creando sia nuove prospettive per la gestione di eventi futuri, sia occasioni per valutare nuove procedure operative.

1.3 Il caso studio: Il Duomo Vecchio di San Severino Marche

In questo articolo viene illustrata un'applicazione sperimentale connessa ad uno scenario operativo abbastanza consueto, in cui l'inaccessibilità del manufatto architettonico da rilevare possa giustificare l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche speditive a supporto delle operazioni di rilievo metrico finalizzate alla progettazione simulata di un'opera provvisoria.

I manufatti architettonici, costituenti i casi di studio di questa ricerca, si collocano in un contesto di medio rischio, e riguardano il portale principale e la bifora ovest del campanile appartenente al complesso del Duomo Vecchio di San Severino Marche (XIII-XV sec.), in provincia di Macerata (MC).

Il Duomo Vecchio fu costruito sulla sommità del Monte Nero, situato nella parte medievale della città di San Severino; l'attuale fabbrica fu eretta alla fine del XIII secolo in stile Gotico-Romanico e nel quindicesimo secolo fu aggiunto un chiostro adiacente il fronte nord-ovest dell'edificio preesistente.

2. ACQUISIZIONE DEI DATI

La raccolta dati è avvenuta nell'inverno del 2017 durante le attività di rilievo del Team DIRECT, che hanno previsto una campagna di misure multi-sensore e multi-scala del Duomo Vecchio e dell'adiacente Torre Smeducci (Calantropio, 2017) (2).

Nell'ottica di valutare un metodo di acquisizione rapido, economico, di facile applicazione, che riducesse al minimo la permanenza degli operatori sul campo, senza compromettere per questo la qualità dei dati acquisiti, si è deciso di confrontare il modello fotogrammetrico, generato effettuando un *free-net adjustment* con successiva assegnazione della scala del modello basata su distanze note, con il modello ottenuto mediante TLS.

La tecnica TLS, infatti, nonostante sia affetta da rumore imputabile al meccanismo di scansione, alle condizioni atmosferiche, alle proprietà intrinseche dell'oggetto rilevato e alla geometria scansionata, permette di acquisire misurazioni accurate nell'ordine del millimetro e fornisce buoni risultati in termini di qualità (Soudarissanane et al., 2011), e può venire dunque impiegata come *ground truth* per la valutazione del modello fotogrammetrico.

2.1 Rilievo TLS

Per la generazione di un modello 3D affidabile, che servisse da base per la valutazione del metodo adottato, è stato utilizzato un laser scanner terrestre a differenza di fase *Faro Focus3D X130*, commercializzato dall'azienda CAM2 (Tab. 1).

Sono state effettuate scansioni TLS della facciata sud del Duomo, per un totale di 15 acquisizioni (Tab. 2).

| | |
|-------------------------------|----------------|
| Range operativo | 0,6-130 [m] |
| Errore di portata | ± 2 [mm] |
| Campo visivo V/H | 305/306 [°] |
| Risoluzione camera integrata | 70 [Mpx] |
| Velocità di acquisizione max. | 976.000 [pt/s] |

Tabella 1. Specifiche tecniche del laser scanner terrestre Faro Focus3D X130.

| | |
|-----------------------|----------------------|
| N° Scansioni | 15 |
| Dimensione media | 415 MB |
| Media punti/scansione | 18 x 10 ⁶ |
| Risoluzione | 1 pt/6 mm a 10 m |
| Qualità | 4x ¹ |
| Area di scansione | 360° |

¹ Valore ponderato dalla misura ripetuta sul punto per quattro volte (tempo di misura di 8 µs per punto di scansione).

Tabella 2. Informazioni sul numero e sulle caratteristiche delle scansioni effettuate.

2.2 Rilievo fotogrammetrico terrestre e UAV

Le riprese fotogrammetriche aeree sono state effettuate utilizzando un drone DJI Phantom 4 PRO, equipaggiato con sensore DJI Zenmuse X4S da 20 Megapixel. Il dataset è stato integrato con alcune immagini riprese da terra con camera Nikon D800E dotata di obiettivo da 24 mm (Tab. 3).

Il numero di immagini acquisite da ciascun sensore, le caratteristiche dei dati raccolti ed i tempi di acquisizione sono riportati nella seguente tabella 4.

La configurazione geometrica del blocco fotogrammetrico è invece rappresentata nelle figure 1 e 2.

| | DJI Phantom 4 PRO | Nikon D800E |
|-----------------------------------|---|---|
| |  |  |
| Sensore | 1" CMOS 20 Mp | CMOS 35,9x24,0 mm 36,3 Mp |
| Lente | da f/2,8 a f/11 | da f/1,8 a f/16 |
| Focale (Focale 35 mm equivalente) | 3,6 mm (24 mm) | 24 mm |
| ISO | 100 - 3200 | 100 - 6400 |
| Formato foto (max) | 4000 x 3000 px | 7360 x 4912 px |
| Formato video (max) | 4096 x 2160 px | 1920 x 1080 px |

Tabella 3. Sensori utilizzati e relative specifiche tecniche principali.

| | DJI Phantom 4 PRO | Nikon D800E |
|-----------------------|-------------------|----------------|
| Numero immagini | 148 | 30 |
| Risoluzione immagine | 4000 x 3000 px | 7360 x 4912 px |
| Dimensione media | 9,6 Mb | 27,9 Mb |
| Tempi di acquisizione | 12 min | 4 min |

Tabella 4. Informazioni sul numero e sulle caratteristiche delle immagini acquisite.

² Tesi premiata da AiFOS (Associazione Italiana Formatori ed Operatori della Sicurezza sul Lavoro) come miglior tesi nei

temi della salute e sicurezza nei luoghi di vita e di lavoro (ambito tecnico-ingegneristico); concorso 2017.

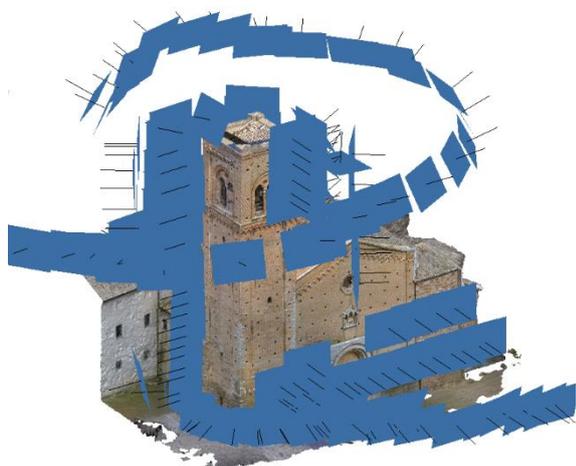


Figura 1. Struttura del blocco fotogrammetrico; in blu la posizione delle immagini stimata a seguito del processo di orientamento, in nero la direzione normale al piano del sensore.

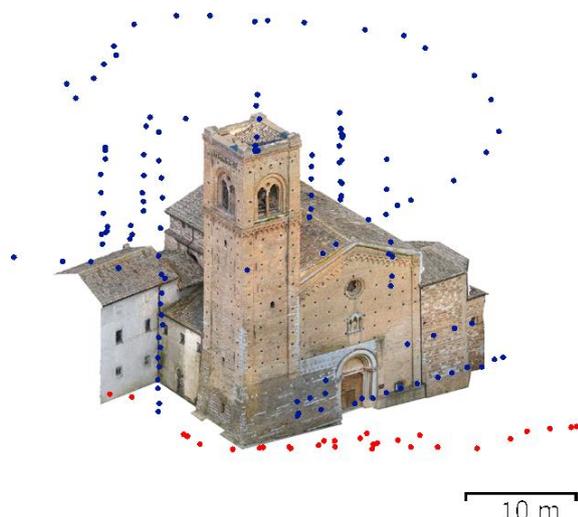


Figura 2. Posizione dei centri di presa del blocco fotogrammetrico, in blu le prese aeree, in rosso le prese terrestri.

3. ELABORAZIONE DEI DATI

3.1 Rilievo TLS

Utilizzando il software Scene (FARO Technologies), le nuvole di punti acquisite tramite TLS sono state inizialmente registrate per forma, ossia applicando una procedura di registrazione mediante algoritmo ICP – *Iterative Closest Points* (Besl & McKay, 1992), e successivamente georeferenziate, utilizzando 11 target della misura di 10x10 cm applicati sulla facciata della fabbrica oggetto del rilievo, precedentemente misurati per via topografica (Tabella 5).

| | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|------|
| Registrazione per forma (ICP) | Residuo medio dei punti [mm] | 2,5 |
| | Punti con residuo < 4 mm [%] | 67,7 |
| Georeferenziazione per punti | Residuo medio dei target [mm] | 7,0 |
| | Deviazione standard (σ) [mm] | 2,1 |
| | N° target | 11 |

Tabella 5. Risultati di accuratezza a seguito della registrazione delle nuvole di punti acquisite tramite scansioni TLS.

La nuvola di punti risultante dal processo di registrazione è stata utilizzata come modello per la valutazione dei dati ottenuti mediante il processo fotogrammetrico.

3.2 Rilievo fotogrammetrico terrestre e UAV

Per le operazioni di generazione del modello 3D, presentato in questo paragrafo, è stato utilizzato il software PhotoScan (Agisoft). È stato creato un dataset contenente l'integrazione dei dati raccolti dai due sensori fotogrammetrici. Successivamente, seguendo il workflow operativo del software, si è proceduto inizialmente all'orientamento dei fotogrammi e alla generazione della nuvola sparsa di punti, e successivamente alla generazione del modello 3D (nuvola densa di punti e relativo modello triangolato). Le caratteristiche relative ai parametri di elaborazione utilizzati dal software e le caratteristiche dei prodotti ottenuti sono sintetizzate nella tabella 6.

Nell'ottica di simulare una situazione emergenziale, la generazione del modello fotogrammetrico è avvenuta effettuando un *free-net adjustment* con successiva assegnazione della scala del modello, applicando il metodo dei minimi quadrati su 3 distanze note, misurate mediante bindella metrica alla base del campanile e della facciata (Tab. 7).

| | Dimensione | Parametro di sottocampionamento |
|---------------------|----------------|---|
| Nuvola sparsa | 1.130.242 pts | Nessun sottocampionamento ¹ |
| Nuvola densa | 36.493.335 pts | Sottocampionamento con fattore 4 ² |
| Modello triangolato | 7.298.656 tri | 1/5 della nuvola densa ³ |
| GSD medio | 3,5 mm/pix | - |

¹ Dimensione (in pixel) delle immagini originali.

² Dimensione (in pixel) delle immagini dimezzate, sia in altezza che in larghezza, rispetto al dato originale.

³ Numero massimo di poligoni generati nel modello finale pari a 1/5 del numero di punti della nuvola densa generata.

Tabella 6. Caratteristiche relative ai prodotti ottenuti.

| ID | Grandezze misurate con bindella [m] | Grandezze misurate sul modello [m] | Residui [mm] |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| a | 7,730 | 7,718 | -12 |
| b | 10,760 | 10,772 | 12 |
| c | 2,430 | 2,412 | -18 |
| Residuo medio assoluto | | | 14 |

Tabella 7. Grandezze misurate mediante bindella, misurate sul modello scalato e residui derivanti dalla differenza delle misure. La posizione delle tre distanze è illustrata in Figura 3.

Questa scelta è fortemente dipendente dal tipo di opera provvisoria che bisogna realizzare; considerando l'esigenza specifica di dover intervenire mediante interventi puntuali (centine lignee a supporto delle aperture danneggiate), la conoscenza della forma e delle dimensioni dell'elemento architettonico da tamponare sono elementi sufficienti all'efficace realizzazione dell'opera provvisoria.

Vi sono tuttavia alcuni casi in cui è richiesta la corretta conoscenza della condizione di verticalità degli elementi rilevati (come ad esempio la verifica di elementi strutturali fuori piombo). La valutazione del grado di fuori-piombo delle strutture è un'operazione indispensabile per la corretta progettazione degli elementi di supporto (puntellamenti); il loro dimensionamento (e la conseguente resistenza a compressione e trazione) non può prescindere dalla corretta scomposizione delle forze agenti lungo i 3 assi, attuabile solamente mediante un corretto orientamento della terna di riferimento del modello generato (Dolce, et al., 2006). Pertanto, nei casi in cui l'accuratezza della verticalità

dell'asse Z del modello 3D sia prioritaria rispetto all'accuratezza dell'assegnazione della scala dello stesso, è opportuno procedere preferibilmente realizzando una rete di punti d'appoggio topografici. In alternativa è possibile orientare il blocco fotogrammetrico sfruttando la posizione dei fotogrammi stimata a-priori, utilizzando le informazioni di *geotag* presenti nei dati *exif* delle immagini acquisite da droni con tecnologie di posizionamento che utilizzano le tecniche RTK (*Real-Time Kinematic*) e PPK (*Post-Processed Kinematic*) (Fazeli et al., 2016). L'utilizzo di droni dotati di sistema di posizionamento GNSS low-cost è da utilizzarsi solo come ultima alternativa, in quanto il ricevitore GNSS integrato, utilizzato prevalentemente per scopi di navigazione, non può garantire le precisioni di ordine centimetrico necessarie per un corretto rilievo alla scala architettonica, ottenibili invece mediante l'impiego di più costosi ricevitori RTK/PPK. Questa procedura (alternativa e complementare a quella illustrata in questo contributo) permette di ottenere modelli con una maggiore garanzia di verticalità dell'asse Z, a scapito però di un minor controllo sull'assegnazione della scala del modello, e a condizione che il blocco sia sviluppato in tutte le direzioni dello spazio, onde rendere più rigida e controllata la soluzione di orientamento. Considerando pertanto il tipo di opere provvisionali da progettare nello specifico caso studio affrontato in questo contributo, si è deciso di non considerare il *geotag* delle immagini, in quanto non è stato possibile garantire, in maniera sufficiente, l'accuratezza metrica del ricevitore GNSS a bordo del drone impiegato. La calibrazione delle ottiche utilizzate è avvenuta mediante procedura di auto-calibrazione implementata all'interno del software utilizzato, seguita da una ri-ottimizzazione dopo l'inserimento delle tre distanze precedentemente misurate.

4. ANALISI E CONFRONTO DEI DATI

Per le operazioni di gestione delle nuvole di punti, confronto e analisi presentate in questo capitolo, è stato utilizzato il software commerciale 3DReshaper (Technodigit-Hexagon). Con l'obiettivo di validare la qualità del modello 3D fotogrammetrico, la nuvola di punti generata mediante fotogrammetria è stata allineata alla nuvola di punti TLS effettuando una rototraslazione rigida; le due nuvole sono state allineate utilizzando l'opzione *best fit* del software 3DReshaper, la quale consente di effettuare un allineamento per forma mediante algoritmo ICP (applicato sulla totalità dei punti delle due nuvole). Successivamente è stata eseguita una verifica dell'accuratezza dell'allineamento automatico, osservando gli errori residui su 7 target della misura di 10x10 cm precedentemente misurati per via topografica (Figura 3). Questa operazione è stata effettuata con il solo scopo di verificare localmente, in punti di coordinate note, l'accuratezza dell'allineamento effettuato (mediante algoritmo ICP) sulla totalità dei punti delle due nuvole; tale operazione di sola verifica non ha comportato pertanto ulteriori rototraslazioni delle due nuvole, in quanto i punti in oggetto sono stati utilizzati solamente come *Check Points*. Questa scelta metodologica è legata al fatto che l'allineamento delle due nuvole mediante algoritmo ICP risulta essere più robusto rispetto ad un allineamento su soli sette punti, sui quali il valore di errore residuo a seguito dell'allineamento diminuirebbe sensibilmente, a scapito però di uno sbandamento complessivo, osservabile maggiormente nelle parti dei modelli distanti dai punti utilizzati per l'allineamento. Tale assunto è verificabile osservando i confronti, in falsi colori, delle distanze *Cloud to Cloud* per le due alternative metodologiche menzionate (Figure 4 e 5).

Le analisi sui residui medi a seguito dell'allineamento delle due nuvole sono altresì riportati in Tabella 8.



Figura 3. Distribuzione spaziale delle distanze utilizzate per scalare il modello fotogrammetrico (a, b e c) e dei punti di verifica utilizzati per l'analisi dei residui dopo l'allineamento della nuvola fotogrammetrica con la nuvola TLS.

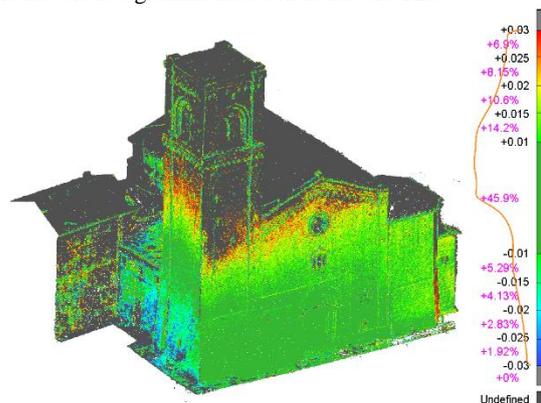


Figura 4. Confronto *Cloud to Cloud* tra la nuvola TLS e quella fotogrammetrica, che mostra lo sbandamento dei due modelli, qualora eventualmente si utilizzassero solamente i 7 punti misurati in facciata per effettuare la registrazione delle due nuvole. Questa metodologia di allineamento delle nuvole non è stata utilizzata in quanto risulta poco robusta.

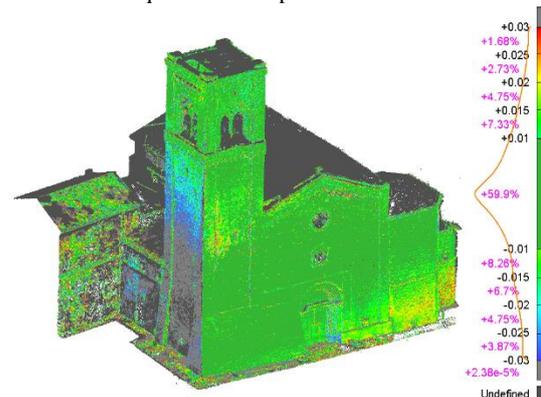


Figura 5. Confronto *Cloud to Cloud* tra la nuvola TLS e quella fotogrammetrica, eseguito dopo aver effettuato un allineamento delle due nuvole mediante algoritmo ICP. Questa metodologia di allineamento delle nuvole è stata adottata per validare la qualità complessiva del modello 3D generato mediante workflow fotogrammetrico.

Per poter considerare l'applicazione della procedura descritta durante le fasi emergenziali, vengono di seguito riportati alcuni

dati relativi ai tempi di acquisizione e di elaborazione dei test svolti (tabella 9).

| | | | | | | | | |
|------------------------|---------------------------------------|------|----|---|---|----|----|----|
| Allineamento per forma | Residuo medio dei punti [mm] | 57,6 | | | | | | |
| | Deviazione standard (σ) [mm] | 85,5 | | | | | | |
| Verifica sui punti | Residuo medio dei target [mm] | 13 | | | | | | |
| | Deviazione standard (σ) [mm] | 6 | | | | | | |
| | N° target | | | | | | | 7 |
| | ID target | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | Colore | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | Residui [mm] | 19 | 16 | 4 | 4 | 15 | 14 | 19 |

Tabella 8. Residuo medio e deviazione standard dei punti a seguito dell'allineamento per forma; Residuo medio e deviazione standard sui target a seguito della verifica dell'allineamento della nuvola fotogrammetrica sulla nuvola TLS.

| | TLS [min] | Fotogrammetria [min] |
|--------------|------------------|----------------------|
| Acquisizione | 152 | 16 |
| Elaborazione | 178 ¹ | 169 ² |

¹ Importazione dei file di scansione, allineamento per forma, georeferenziazione per punti, esportazione del risultato.
² Ricerca dei punti omologhi, orientamento delle immagini, calibrazione delle ottiche, ottimizzazione dell'orientamento, generazione della nuvola densa.

Tabella 9. Tempi di acquisizione dati ed elaborazione modelli 3D mediante tecniche di fotogrammetria e TLS a confronto.

4.1 La bifora ovest del campanile

Con l'obiettivo di ricavare misure che potessero essere funzionali all'elaborazione di uno schema di progetto volto alla realizzazione di un'opera provvisoria sulla bifora ovest del campanile (sbadacchiatura o controventatura), i modelli TLS e fotogrammetrico, sovrapposti, sono stati ritagliati includendo solamente la porzione oggetto dell'analisi (Figura 6).



Figura 6. Foto da drone della bifora disassata (ovest) del campanile del Duomo Vecchio di San Severino Marche. Sono visibili i danni causati dal sisma del 2016.

A seguito di un *best-fit* mediante algoritmo ICP, limitato alla porzione in questione, è risultato un errore medio di 14 mm e una

deviazione standard di 19 mm. Si è proceduto quindi al confronto C2C (*Cloud To Cloud*) dei due modelli (Figura 7). È risultato altresì interessante il confronto di una sezione verticale, per analizzare puntualmente gli scostamenti (Figure 8 e 9).

I valori massimi di scostamento analizzati sono stati impostati, in questo caso, ad un limite di ± 3 cm. Gli stessi valori massimi risultano evidenziati con dei riquadri in ognuna delle sezioni generate (in blu e rosso in Figura 9).

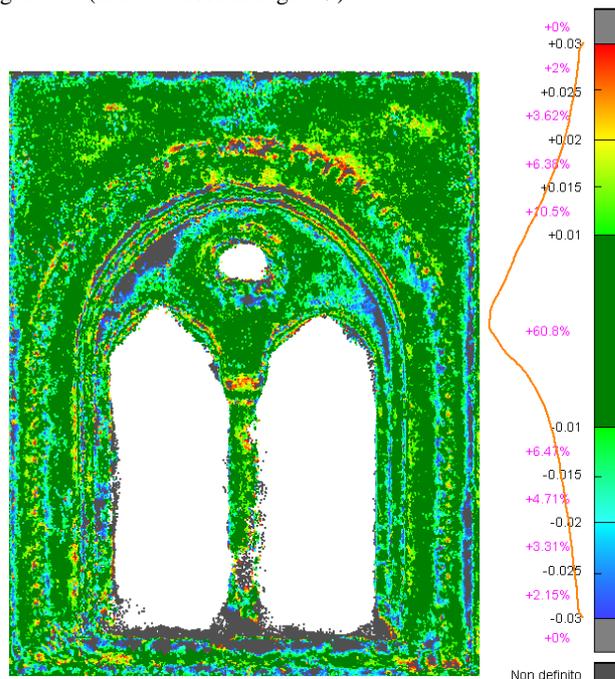


Figura 7. Confronto C2C tra le nuvole di punti generate mediante tecnica TLS e tecnica fotogrammetrica della bifora ovest del campanile del Duomo Vecchio.



Figura 8. Confronto tra sezioni verticali, che permette di analizzare puntualmente gli scostamenti tra i due modelli. Il riquadro indica il dettaglio rappresentato in Figura 9.

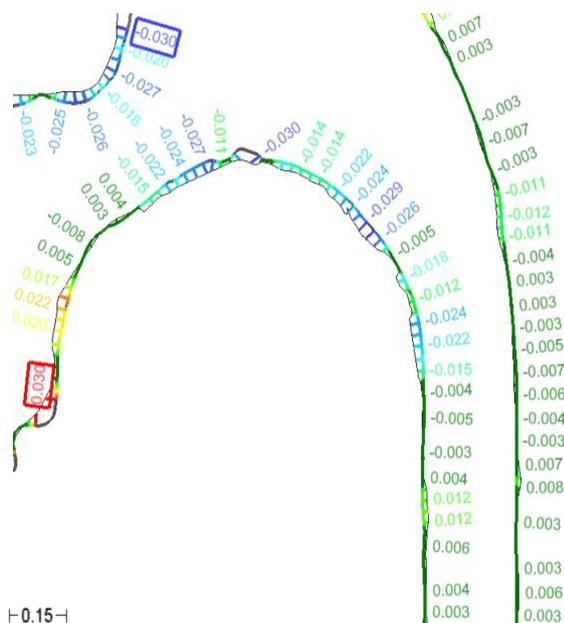


Figura 9. Dettaglio di un confronto tra sezioni della bifora, che permette un'analisi puntuale degli scostamenti tra i due modelli 3D, generati mediante TLS (*ground truth*) e fotogrammetria.

È importante chiarire che i valori stimati delle distanze puntuali tra i due modelli, nonostante siano calcolati in maniera molto accurata, potrebbero apparire (in alcuni casi) sovrastimati rispetto ai valori delle reali distanze. Questo è dovuto al fatto che il valore della distanza viene calcolato tra le coppie di punti delle due nuvole tra loro più vicini (*nearest neighbor distance*), e questa distanza risulta sempre maggiore rispetto alla minima distanza che si otterrebbe se i due modelli fossero infinitamente densi. Per questo motivo non bisogna considerare soltanto i valori delle distanze stimati in maniera puntuale, ma analizzare, piuttosto, l'andamento dello scostamento tra i due modelli a livello locale. Per mitigare il problema sopra esposto e sovrastimare al minimo possibile i valori delle distanze, la nuvola più densa (TLS) non è stata sottocampionata, ed è stata utilizzata come riferimento per le operazioni di confronto.

Poiché in alcuni punti della nuvola TLS il manufatto non è stato correttamente ricostruito, a causa di occlusioni dovute alla posizione di acquisizione dello strumento (piano stradale ai piedi del campanile), le analisi degli scostamenti tra i due modelli non sono state effettuate in alcune porzioni, come ad esempio il davanzale e la parte bassa della bifora.

Si può osservare come gli scostamenti tra i due modelli siano per il 60,8% inferiori a ± 1 cm; in questo caso il metodo descritto può essere considerato un supporto di elevato profilo al dimensionamento delle opere provvisionali. Questo risultato è molto apprezzabile se consideriamo che la parte di modello analizzata è posizionata sul campanile, ad un'altezza di 20 m da terra, cioè in una posizione piuttosto distante dai riferimenti utilizzati per l'assegnazione della scala. Per avvalorare questa considerazione si è deciso pertanto di condurre un ulteriore test sul portale principale del Duomo Vecchio, essendo quest'ultimo più vicino alle misure dirette utilizzate per l'assegnazione della scala del modello fotogrammetrico.

4.2 Il portale principale

Con l'obiettivo di ricavare misure che potessero essere funzionali all'elaborazione di uno schema di progetto volto alla realizzazione di un'opera provvisoria sul portale principale, i modelli TLS e fotogrammetrico, sovrapposti, sono stati ritagliati includendo questa volta la sola porzione relativa al portale

(Figura 10). Procedendo nuovamente con un *best-fit* (ICP), limitato questa volta alla porzione del portale, si riporta un errore medio di 12 mm e una deviazione standard di 18 mm. Si è proceduto quindi al confronto C2C dei due modelli (Figura 11). Anche in questo caso è stato effettuato il confronto delle sezioni verticali, per analizzare puntualmente gli scostamenti (Figure 12 e 13). Si può osservare come gli scostamenti tra i due modelli siano per l'88,5% inferiori a ± 1 cm. In questo caso il metodo speditivo può essere considerato ancora più idoneo, rispetto al caso della bifora, per il dimensionamento degli elementi delle opere provvisionali.

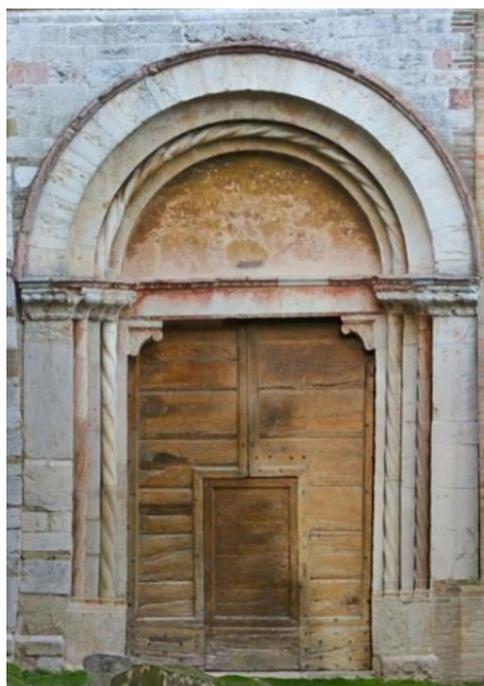


Figura 10. Foto del portale principale del Duomo Vecchio.

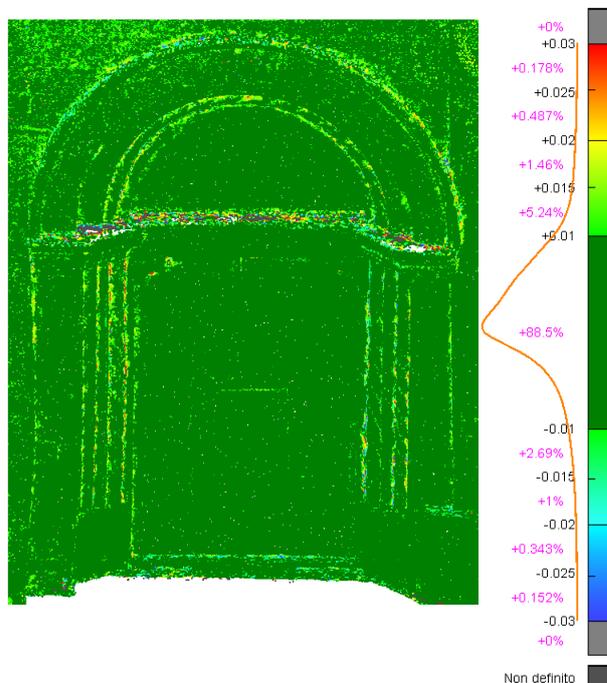


Figura 11. Confronto C2C tra le nuvole di punti generate mediante tecnica TLS e tecnica fotogrammetrica del portale principale del Duomo Vecchio.

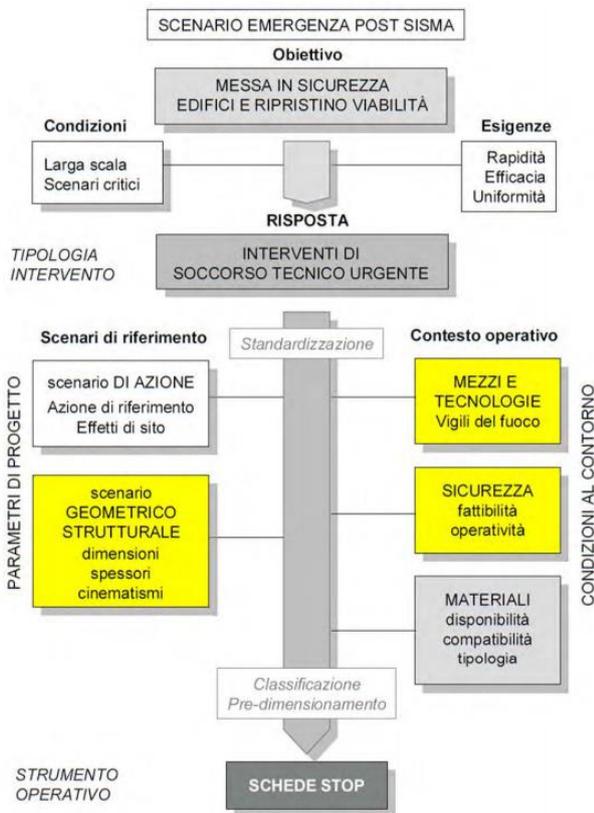


Figura 14. Schema dei criteri di progetto delle schede STOP, gli scenari di riferimento e i contesti operativi ai quali questo lavoro intende fornire un contributo sono stati evidenziati in giallo (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010b).

6.2 Tecniche di rilievo metrico integrato alternative e prospettive

L'uso di tecniche di fotogrammetria semplificata (raddrizzamento fotografico speditivo e rapida produzione di ortofoto) da un lato, e le tecniche avanzate di scansione con laser scanner (o le soluzioni SLAM più recenti) dall'altro, seppur possano apparire ad un primo giudizio assai più rapide e applicabili in situazioni di emergenza, risultano rispettivamente o troppo costose o poco precise, e non sono quindi state prese in considerazione per le finalità specifiche di questa ricerca, ossia quelle di fornire al CNVVF un metodo speditivo di rilievo metrico di opere in quota senza l'acquisto di ulteriore strumentazione metrologica, se non quella già a disposizione delle squadre che operano sul territorio (droni e bindelle metriche per misurazioni dirette longimetriche).

Laddove le esigenze operative lo richiedano, le tecniche TLS e la loro integrazione con tecniche fotogrammetriche costituiscono tuttavia la soluzione ideale per il rilievo metrico integrato multi-sensore. Ad oggi la tecnologia TLS è impiegata in questo scenario solamente per rilevati di geometria di elevata complessità, come ad esempio quelli effettuati dal MiBAC (Ministero dei Beni e delle Attività Culturali) nell'intervento richiesto ai VVF per il ripristino della cupola e del tamburo della Chiesa di Santa Maria del Suffragio a L'Aquila a seguito del sisma del 2009 (Figura 15).



Figura 15. Rilievo laser scan del tiburio e inserimento dei telai metallici per il ripristino della continuità dei setti crollati (Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010a).

Le attuali direzioni di ricerca e sviluppo nel campo della documentazione dei beni culturali mirano infatti a una completa integrazione tra tecniche fotogrammetriche e TLS (Remondino, 2011). L'integrazione delle due tecniche permette, infatti, di compensare reciprocamente le criticità di ciascun approccio.

La difficoltà nell'ottenimento dei dati relativi alle parti poco raggiungibili dell'oggetto rilevato (come ad esempio tetti o gronde), non facilmente acquisibili da TLS, può essere colmata mediante tecniche di fotogrammetria UAV, integrando i dati ottenuti nella nuvola di punti finale.

Quando invece c'è la necessità di realizzare un modello 3D molto accurato, è possibile utilizzare i dati TLS per la fase di *meshing*, e successivamente applicare la texture ottenuta dai dati fotogrammetrici, poiché le immagini acquisite dai sensori RGB integrati nei TLS comunemente in commercio offrono solitamente prodotti a una risoluzione più bassa rispetto a quelli fotogrammetrici.

L'integrazione completa dei dati consente quindi di ottenere prodotti che soddisfano i requisiti generali di un'indagine connessa alla documentazione architettonica, quali l'utilizzo di apparecchiature a basso costo, il controllo di precisione e di accuratezza, l'affidabilità del rilievo e il successivo livello di dettaglio raggiungibile.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro di ricerca ha potuto beneficiare della collaborazione del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco; si ringraziano specialmente gli ingegneri Ciro Bolognese, Marco Cavriani, Emanuele Gissi e Luca Ponticelli. Un sentito ringraziamento va a tutti i membri del Team DIRECT per il supporto tecnico fornito durante le fasi di raccolta dei dati, e al Comune di San Severino per la disponibilità accordataci. Si ringrazia inoltre la task force operativa del Politecnico di Torino, coordinata dal Prof. Sebastiano Foti, per il supporto finanziario per la missione in centro Italia.

BIBLIOGRAFIA

Baiocchi, V., Dominici, D., Mormile, M., 2013. UAV Application in Post-Seismic Environment. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Settembre, Volume XL-1/W2, 2013, pp. 21-25.

Boccardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F., Lingua, A., 2015. UAV Deployment Exercise for Mapping Purposes: Evaluation of Emergency Response Applications. In: *Sensors*, 15(7), pp. 15717-15737.

- Besl, P. J., & McKay, N. D., 1992. Method for registration of 3-D shapes. In: *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, Vol. 1611, pp. 586-607. International Society for Optics and Photonics.
- Calantropio, A., 2017. *L'utilizzo dei droni per la sicurezza nei cantieri e negli interventi tecnici in emergenza sismica*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- Cardenal, J., Mata, E., Castro, P., Delgado, J., Hernandez, M. A., Perez, J. L., Ramos, M., Torres, M., 2004. Evaluation of a digital non metric camera (Canon D30) for the photogrammetric recording of historical buildings. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5), pp. 564-569.
- Chandler, J. H., Fryer, J. G., Jack, A., 2005. Metric capabilities of low- cost digital cameras for close range surface measurement. In: *The Photogrammetric Record*, 20(109), pp. 12-26.
- Chiabrandò, F., Di Lolli, A., Patrucco, G., Spanò, A., Sammartano, G., Teppati Losè, L., 2017. Multitemporal 3d Modelling For Cultural Heritage Emergency During Seismic Events: Damage Assesment Of S. Agostino Church In Amatrice (RI). In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Dolce, M., Liberatore, D., Moroni, C., Perillo, G., Spera, G., Cacosso, A., 2006. *Manuale delle opere provvisionali urgenti post-sisma*. Dipartimento Protezione Civile Ufficio Servizio Sismico Nazionale e l'Università degli Studi della Basilicata.
- Falkingham, P. L., 2011. Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. In: *Palaeontologia electronica*, 15(1), pp. 1-15.
- Fazeli, H., Samadzadegan, F., Dadrasjavan, F., 2016. Evaluating the potential of RTK-UAV for automatic point cloud generation in 3D rapid mapping. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 221.
- Fernandez Galarreta, J., Kerle, N., Gerke, M., 2015. UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, pp. 1087–1101.
- Gerke, M., & Przybilla, H. J., 2016. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. In: *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2016(1), pp. 17-30.
- Grimaz, S., Malisan, P., Bolognese, C., Ponticelli, L., Cavriani, M., Mannino, E., Munaro, L., 2016. The Short-Term Countermeasures System of the Italian National Fire Service for post-earthquake response. In: *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 57(2).
- Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010a. *Manuale. Opere provvisionali. L'intervento tecnico urgente in emergenza sismica*. Roma: Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco - Ministero dell'Interno.
- Gruppo di Lavoro NCP, S. Grimaz coord., 2010b. *Vademecum STOP. Schede tecniche delle opere provvisionali per la messa in sicurezza post- sisma da parte dei Vigili del Fuoco*. Roma: Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco - Ministero dell'Interno.
- Jiang, R., & Jauregui, D. V., 2010. Development of a digital close-range photogrammetric bridge deflection measurement system. In: *Measurement*, 43(10), pp. 1431-1438.
- Luhmann, T., 2010. Close range photogrammetry for industrial applications. In: *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(6), pp. 558-569.
- Mandlbürger, G., Wenzel, K., Spitzer, A., Haala, N., Glira, P., Pfeifer, N., 2017. Improved Topographic Models Via Concurrent Airborne Lidar And Dense Image Matching. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
- Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Saleri, R., 2013. Accuracy and block deformation analysis in automatic UAV and terrestrial photogrammetry-Lesson learnt. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5/W1), pp. 203-208.
- Olsen, M. J., Cheung, K. F., Yamazaki, Y., Butcher, S., Garlock, M., Yim, S., McGarity, S., Robertson, I., Burgos, L., Young, Y. L., 2012. Damage assessment of the 2010 Chile earthquake and tsunami using terrestrial laser scanning. In: *Earthquake Spectra*, 28(S1), pp. S179-S197.
- Piras, M., Di Pietra, V., & Visintini, D., 2017. 3D modeling of industrial heritage building using COTSs system: Test, limits and performances. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 281.
- Remondino, F., 2011. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. In: *Remote Sensing*, 3(6), pp. 1104-1138.
- Rieke- Zapp, D. H., & Nearing, M. A., 2005. Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. In: *The Photogrammetric Record*, 20(109), pp. 69-87.
- Sammartano, G., Spanò, A., 2018. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. In: *Applied Geomatics*, 10(4), pp. 317-339.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4), 389–399.