

Rapporti tecnici

INGV

**Studio per la verifica della bontà
di allineamento delle scansioni da
rilievo laser scanning:
metodologia sperimentale TLS - fase 1**

296



Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)

Luigi Cucci (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

Rapporti tecnici INGV

STUDIO PER LA VERIFICA DELLA BONTÀ DI ALLINEAMENTO DELLE SCANSIONI DA RILIEVO LASER SCANNING: METODOLOGIA SPERIMENTALE TLS - FASE 1

Arianna Pesci¹ e Teresa Caputo²

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano)

296

Indice

Introduzione	7
1. Esperimento e analisi	8
2. Risultati	12
3. Conclusioni	13
Ringraziamenti	15
Bibliografia	15

Introduzione

I sistemi laser a scansione terrestre, comunemente laser scanning (TLS), sono oggi molto utilizzati sia nel rilievo geologico che architettonico. Un rilievo TLS, in sostanza, è l'insieme delle nuvole di punti acquisite in ogni singola scansione e cioè un insieme di punti di cui sono misurate/calcolate le coordinate insieme ad un dato di intensità del segnale (dipendente dalla riflettanza del materiale alle frequenze utilizzate). Attualmente le tecniche TLS suscitano un interesse crescente in campo topografico in quanto consentono un'acquisizione rapida ed affidabile di nuvole di punti 3D a rappresentare tridimensionalmente gli oggetti rilevati e la qualità delle nuvole di punti 3D, collegata alla possibilità di automatizzare le successive post-elaborazioni dei dati, hanno esteso il potenziale applicativo dei laser scanner terrestri, aprendo la strada ad un ampio spettro di applicazioni in pieno campo [Teza and Pesci, 2013]. In particolare, il rilievo morfologico tramite TLS sta emergendo a livello scientifico come metodologia integrata anche per la rappresentazione, l'analisi, la tutela e la valorizzazione del territorio e dei beni culturali. Diversi sforzi sono stati fatti in tal senso, negli ultimi anni, soprattutto al fine di comprendere appieno le potenzialità ancora in larga parte inespresse di questa tecnologia [Pesci et al., 2011a; Bonali et al., 2013]. Lavori recenti pubblicati dall'INGV, in collaborazione con gli Atenei di Padova e Bologna, per esempio, hanno mostrato come sia possibile estrarre in modo rapido (quasi immediato) informazioni sullo stato deformativo di monumenti specifici danneggiati, alterati o comunque sollecitati da eventi sismici e come sia possibile definire in modo semplice un protocollo di lavoro e di intervento al fine di essere operativi anche in condizioni di grave emergenza. Il filo che collega geofisica e ingegneria sismica non è poi così sottile in quanto la capacità di leggere i dati TLS rilevati in modo critico e rigoroso mediante specifiche e dirette metodologie di analisi, unita alla conoscenza del territorio e delle strutture in esame soggette o che sono state soggette a sollecitazioni sismiche, può offrire certo un vincolo importante per la comprensione del danno e nell'ambito di indagini e valutazioni sulla vulnerabilità strutturale [Teza et al., 2014]. Tutto questo rientra, evidentemente, in un settore della ricerca che si avvicina alla sfera delle applicazioni per scopi di protezione civile [Pesci et al., 2013].

Nelle esperienze maturate tra il 2010 ed il 2014, arco di tempo nel quale si verificò anche il terremoto dell'Emilia Romagna (2012), è stato interessante e fonte di soddisfazione personale, essere riusciti, mediante il metodo sperimentale, a raggiungere obiettivi quali: (i) comprendere le reali risoluzioni delle scansioni e le loro implicazioni nella metodologia di rilievo; (ii) modellare il segnale TLS e la sua interazione con gli oggetti da scansionare al fine di creare anche realistiche nuvole di punti, ma sintetiche, utili per realizzare studi di fattibilità; (iii) comprendere gli effetti di *back-scattering* delle superfici fisiche e la loro influenza sul segnale laser retro diffuso; (iv) valutare la consistenza del dato di intensità in riferimento alle rugosità ed irregolarità delle superfici per rilievi geologici e architettonici; (v) stimare gli effetti sistematici potenzialmente indotti dal fenomeno di *spot-spreading*, cioè dallo sparpagliamento dell'impronta del fascio laser su una superficie se osservata con angoli di incidenza troppo elevati; (vi) ideare un sistema semi automatico per l'analisi delle nuvole di punti basato sulla estrazione della morfologia dei prospetti osservati al fine di identificare gli stati deformativi di un edificio; (vii) mettere a punto un sistema di lavoro e protocollo di intervento per l'analisi in tempo quasi reale dello stato deformativo di un monumento [Pesci et al., 2013, 2011, 2008abc; Franceschi et al., 2009].

Tutto ciò premesso, entrando più nello specifico dell'acquisizione e trattamento dati TLS, va ricordato che generalmente la nuvola di punti, o il modello 3D da essa ricavato, è composto dall'insieme delle scansioni acquisite che, integrate tra loro, contribuiscono a restituire una ricostruzione completa dell'oggetto di interesse. In particolare, le scansioni vengono allineate tra loro, cioè unite mediante una roto-traslazione che ponga due o più rilievi in uno stesso sistema di riferimento, assoluto o relativo non ha importanza ai fini delle analisi. Ovviamente queste operazioni avvengono mediante algoritmi basati sulla teoria dei minimi quadrati e, in linea del tutto generale, funzionano minimizzando la distanza tra tutti gli elementi comuni alle scansioni. Volutamente si è parlato di elementi poiché, a seconda della strategia di calcolo utilizzata, possono essere minimizzate le distanze tra i punti appartenenti a due scansioni oppure si possono minimizzare le curvature tra modelli relativi alle stesse e così via. Si ribadisce ancora una volta che la fase di allineamento delle scansioni è il cuore dell'analisi dati TLS poiché fase fondamentale e delicata che, se affrontata in modo frettoloso, senza controlli o con superficialità può compromettere inevitabilmente ogni passo successivo e portare a conclusioni e valutazioni errate nonché a gravissimi errori di interpretazione. I software per la gestione e l'analisi dati di tipo commerciale per quanto estremamente efficienti, largamente diffusi ed utilizzati non sono aperti, non è cioè possibile studiare le sorgenti dei programmi ed esaminare nello

specifico il tipo di algoritmo utilizzato. Esistono riferimenti e bibliografie [Bergevin, 1996] che permettono di comprendere qualitativamente il tipo di analisi e processing che viene messo in opera ma è comunque sempre necessario testarne l'efficacia. Ciò può avvenire utilizzando dati sintetici perfettamente conosciuti poiché generati in laboratorio ma, ancora meglio, seguendo una strategia semplice ma ingegnosa che preveda l'utilizzo di dati reali acquisiti nelle campagne di misura TLS. Tutto ciò, con lo scopo di comprendere quale errore sia eventualmente introdotto nell'allineamento delle nuvole di punti in relazione all'area di sovrapposizione delle scansioni.

In questo lavoro mostriamo un esperimento realizzato con l'utilizzo dei dati rilevati mediante lo strumento Optech ILRIS ER in area Ferrarese. Si tratta del rilievo di un prospetto della torre di Tieni. La torre in questione è stata rilevata nel 2012 nell'ambito di un esperimento mirato a comprendere l'effetto di "spot spreading" e conseguenze dirette sui modelli ottenuti in relazione all'angolo di incidenza [Pesci et al., 2013] ma lo stesso tipo di strategia era già stata proposta in un lavoro di Pesci et al. [2011] per dimostrare che il cambio di pendenza osservato nella parte sommitale di una torre di Bologna non dipendeva da un errore di allineamento bensì da un assetto risultante da fasi costruttive ed eventuali effetti di carico.

Lo scopo del lavoro è fornire una mappa metodologica per essere in grado di valutare in modo qualitativo e quantitativo l'errore potenzialmente indotto da una sovrapposizione non abbastanza elevata al fine di fornire, anche per i casi peggiori, valori di soglia per l'accettabilità o meno delle informazioni morfologiche estratte da modelli non perfettamente realistici e caratterizzati da sistematismi causati dall'analisi di un rilievo non ottimale.

Ancora una nota, per sottolineare che il pacchetto software utilizzato per le analisi TLS è il Polyworks (www.innovmetric.com) ma che è interesse degli autori, in un lavoro futuro e già in fase di attuazione, riproporre le analisi delle stesse scansioni impiegando altri programmi noti e diffusamente utilizzati quali Riscan Pro (www.riegl.com) e JCR 3D Reconstructor (www.gexcel.it) per capire come le differenze tra le procedure di calcolo (non aperte) a disposizione possono portare a differenze interessanti o meno della costruzione di modelli finali e, soprattutto, comprendere eventuali situazioni da evitare in fase di rilievo.

1. Esperimento e analisi

Il lavoro qui presentato si basa sull'analisi di due scansioni, una di riferimento ed una che sulla prima deve essere allineata utilizzando aree di *overlapping* variabili. La prima scansione riguarda il prospetto Ovest della Torre di Tieni acquisito con lo strumento in bolla da una distanza di circa 100 m. La seconda scansione, relativa allo stesso prospetto, è stata acquisita ad una distanza di circa 80 m. A tali distanze, considerando che lo strumento ILRIS ER (www.optech.com) opera utilizzando segnali nell'infrarosso vicino (1535 nm) e permette di rilevare un campo di $40^\circ \times 40^\circ$ per singola scansione, è possibile rilevare l'intero corpo della torre e quindi ottenere due nuvole di punti complete del prospetto in esame (fig.1). Le caratteristiche tecniche di maggior rilievo relative allo scanner utilizzato sono riportate in tabelle specifiche e fornite direttamente dai laboratori delle case costruttrici. Tra i dati di maggiore interesse è opportuno ricordare: la divergenza del fascio laser e la sua dipendenza dalla distanza secondo l'equazione $D(m) = 0.012 + 0.17 \cdot 10^{-3} \cdot r(m)$, dove D indica la divergenza (diametro dell'area illuminata) e r la distanza; il minimo passo di campionamento operabile ad una data distanza, secondo l'equazione $ss(m) = 0.02 \cdot 10^{-3} \cdot r(m)$, dove ss indica il passo e r la distanza. Quindi, per una distanza di circa 100 m vengono illuminate sulla superficie di interesse aree circolari di diametro 2.9 cm con un passo fino a 2 mm e possibilità di realizzare un abbondante sovra campionamento dei dati.

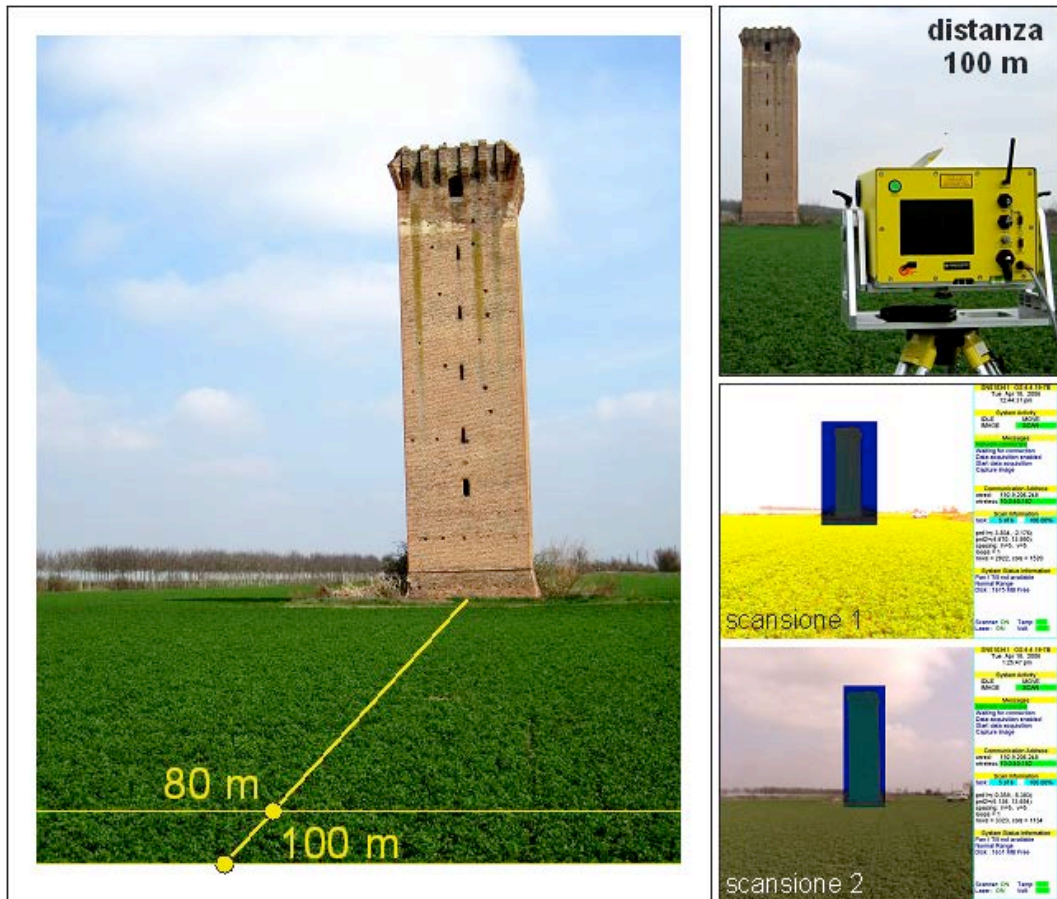


Figura 1. Figura rappresentativa della torre di Tieni (FE), torre medievale a base quadrata in mattoni, e delle acquisizioni effettuate da 100 m e 80 m. Lo strumento in bolla e le ROI per le due acquisizioni (rilievo del prospetto completato nell'ambito di un'unica scansione) sono mostrate nella parte destra della figura.

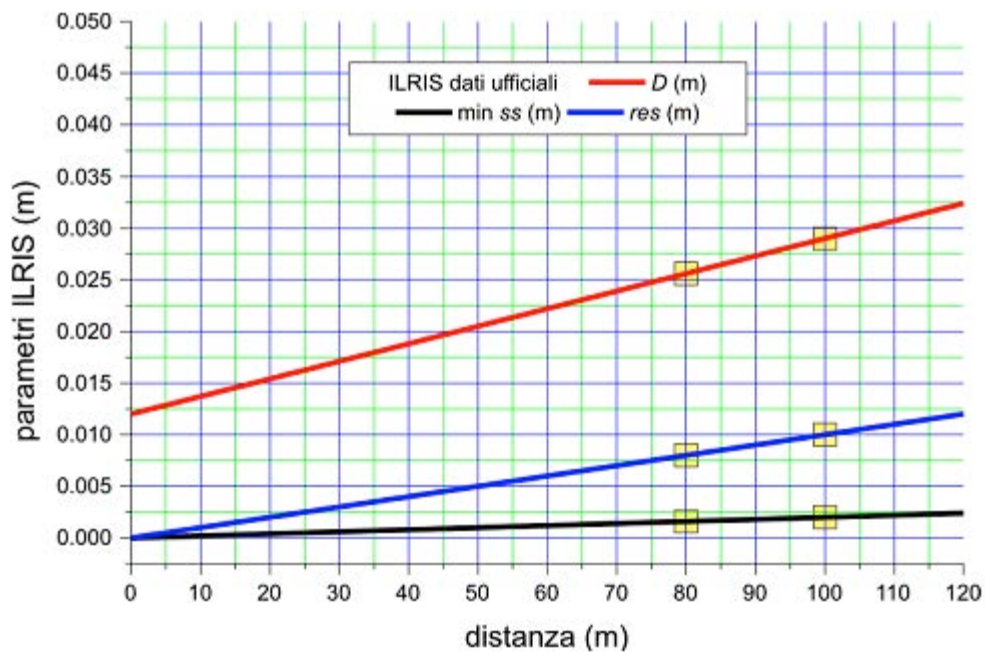


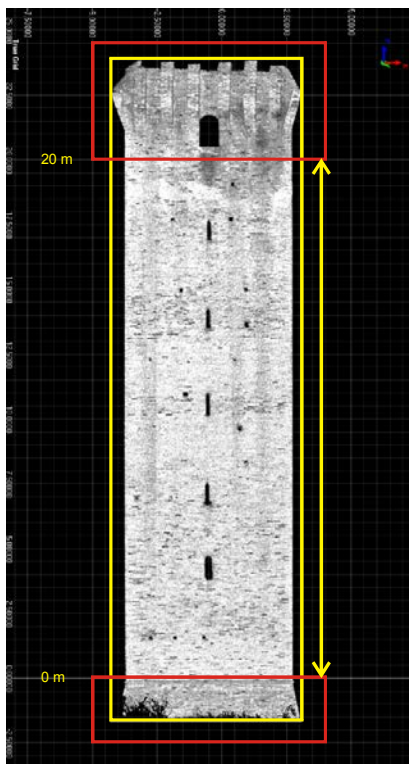
Figura 2. Dettagli tecnici di ILRIS ER: divergenza (D), passo di campionamento (ss) e risoluzione ottenibile (res) alle distanze considerate. I quadrati indicano i valori specifici utilizzati per il rilievo delle due scansioni.

L'intervallo di campionamento per la scansione di riferimento (valore medio) è stato stimato in circa 10 mm alla distanza di 100 m e, per la seconda scansione, 8 mm alla distanza di 80 m. Quindi, il passo di campionamento è molto simile per le due scansioni e, si sottolinea, che piccole differenze sono “volute” per avere modo di lavorare su dati reali e rappresentativi di una situazione tipica di misura (fig. 2) con tutte le piccole differenze inevitabili e fisiologiche proprie di questo tipo di rilievo. In particolare, è interessante notare che (i) anche lo spot (divergenza o impronta a terra) del fascio laser non risulta molto differente per le distanze di rilievo considerate; (ii) l'angolo di incidenza è pressoché lo stesso e varia tra 90° e 75° dalla base alla cima della torre; (iii) le scansioni in esame coprono esattamente tutto il prospetto della torre quindi si possono considerare rappresentative della stessa superficie osservata.

La scansione di riferimento a 100 m (scan1), realizzata in bolla, viene bloccata nella sua posizione e si procede con l'allineamento della seconda scansione mediante gli algoritmi ICP disponibili nel pacchetto software utilizzato (si ricorda, Polyworks). Il primo allineamento viene realizzato utilizzando la superficie che riguarda quasi la totalità della torre e cioè tutto il corpo con l'esclusione della base, che risulta essere obliqua, e gli elementi sommitali che non giacciono su uno stesso piano. Scelta arbitraria, questa, che si basa sul non utilizzare elementi che possano favorire un agganciamento delle scansioni nelle parti che maggiormente differiscono da una disposizione monotona dei punti sulla superficie. Per comodità, inoltre, è stato deciso, in modo ragionevole seppur sempre arbitrario, di utilizzare solo l'area compresa tra 0 m e 20 m (nel sistema di riferimento della scansione 1), come in figura 3 e 4 semplicemente per agevolare le manovre di editing e gestione delle nuvole da parte dell'operatore.

Utilizzando quindi la quasi totale area di sovrapposizione si procede all'allineamento mediante l'algoritmo ICP disponibile della scansione 2 sulla scansione 1. L'operazione viene poi ripetuta restringendo via a via l'area di sovrapposizione in modo ordinato. In particolare si è scelto di ridurre l'*overlapping* con *step* di 2.5 m procedendo in verticale verso il basso come nello schema in figura 3 e 4. Le porzioni di corpo della torre considerate sono quindi contenute tra le altezze 2.5 m, 5 m, 7.5 m, 10 m, 12.5 m, 15 m, 17.5 m che corrispondono ad una percentuale di *overlapping* di: 12.5%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%, 75% e 87.5%. Ovviamente, per ognuno dei 7 casi l'applicazione degli algoritmi ICP per l'allineamento ha permesso di ottenere una matrice di roto-traslazione (figg. 3,4).

SCANSIONE 1



SCANSIONE 2

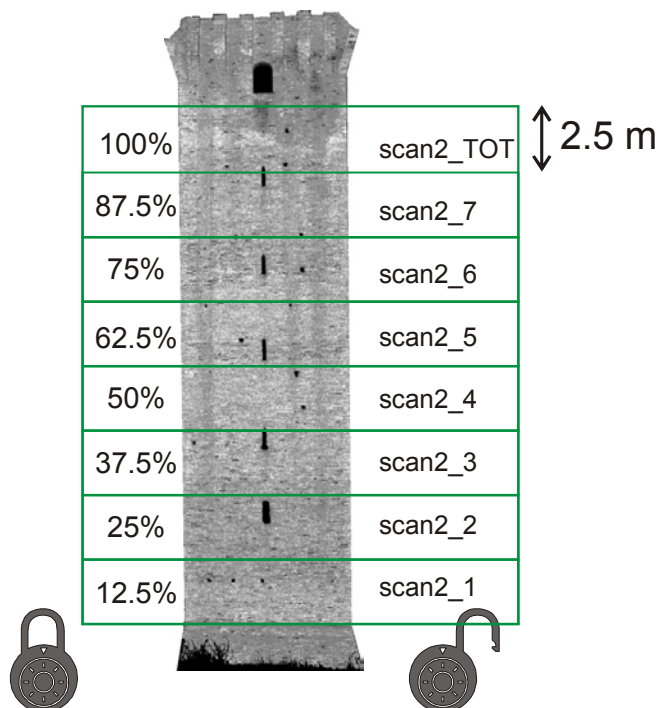


Figura 3. La scansione 1 di riferimento (scan1) e la scansione 2 (scan2). Scan1 è bloccata nella sua posizione originale di rilievo mentre scan2 è libera. Inoltre sono mostrati gli intervalli in altezza (lungo asse Z) di 2.5 m utilizzati per ridurre l'area comune tra scan1 e scan2_i.

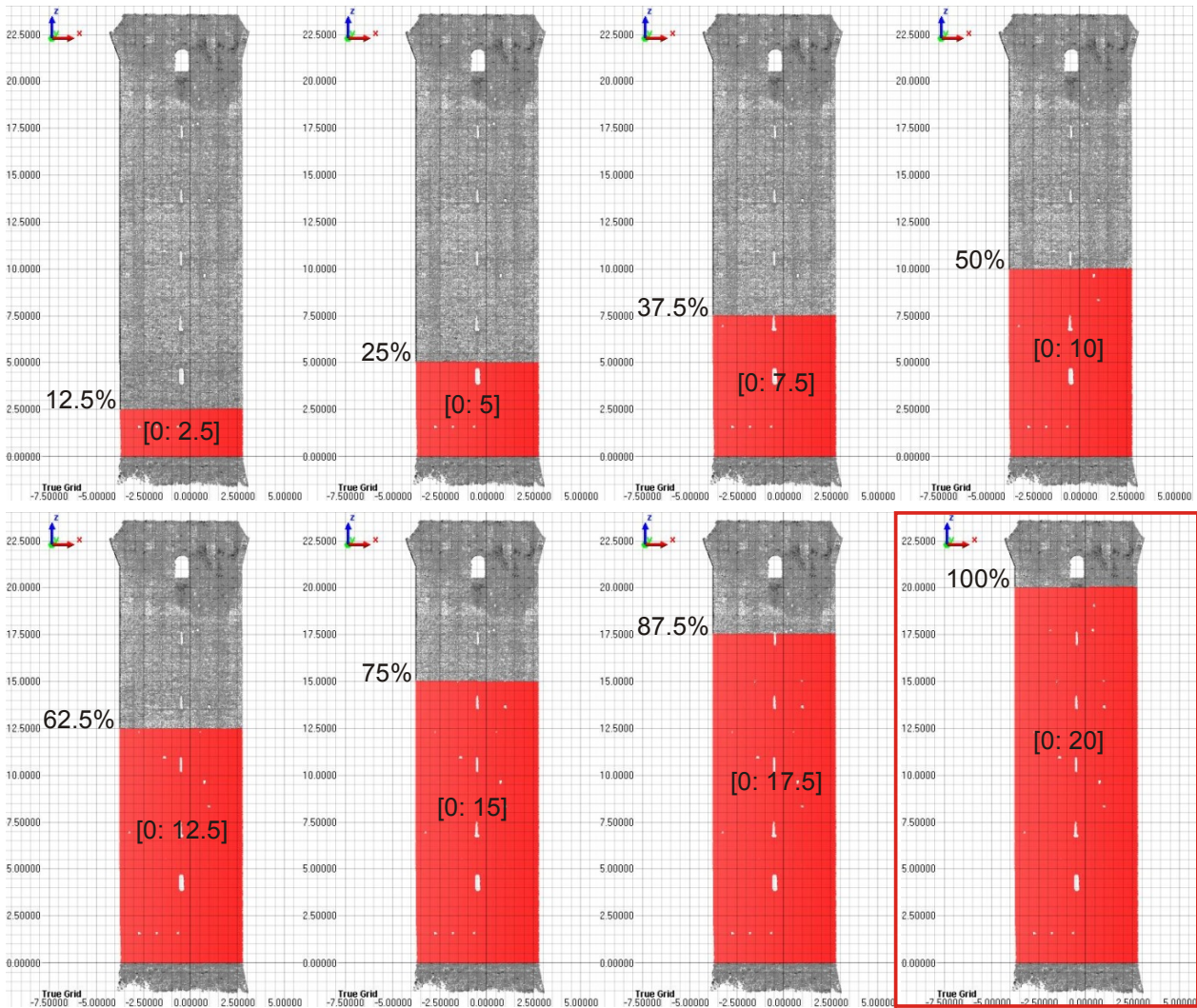


Figura 4. La selezione dei punti del prospetto su scan2 utilizzati per l’allineamento con scan1.

La prima fase del lavoro si conclude quindi con la creazione di 7+1 matrici di roto-traslazione con il cui uso si allinea la “scansione 2” sulla “scansione 1” a creare 7+1 nuove “scansioni 2”, scansioni cioè con lo stesso contenuto di informazione (punti 3D + intensità) ma posizionate in modo leggermente differente nel sistema di riferimento della “scansione 1” che, si ricorda, è stata tenuta bloccata nello spazio. Per semplicità, le scansioni roto-traslate saranno chiamate: scan2_1, scan2_2, scan2_3, scan2_4, scan2_5, scan2_6, scan2_7 e scan2_TOT. Quest’ultima rappresenta la scansione meglio allineata in quanto l’area di sovrapposizione era la massima possibile.

In generale è bene sottolineare che le procedure di allineamento vengono eseguite per unire tutte le scansioni al fine di costruire un modello completo delle superfici rilevate e si ottengono mediante due passaggi: un primo allineamento “grezzo” ottenuto mediante il riconoscimento di punti omologhi tra le scansioni, ovvero particolari riconoscibili su due distinte nuvole di punti ed un allineamento “raffinato” con speciali algoritmi [Bae e Lichti, 2008; Bergevin et al., 1996; Xie et al., 2010] che garantiscono di non introdurre errori e distorsioni nel risultato finale. Scelti almeno 3 punti ben distribuiti sulle aree comuni, si procede roto-traslando la scansione da allineare sulla scansione di riferimento. Una volta avvicinate le due nuvole di punti occorre procedere all’allineamento “raffinato” per garantire una unione priva di sistematismi, cioè per ottenere un modello privo di distorsioni indotte da una gestione poco precisa dei dati. A questo scopo vengono utilizzati degli algoritmi di allineamento atti a minimizzare la distanza tra i punti delle due scansioni nelle zone comuni mediante una procedura iterativa con l’impiego dei diffusi algoritmi ICP (Iterative Closet Points).

2. Risultati

La seconda fase del lavoro riguarda l'estrazione di informazione necessaria per valutare la bontà dell'allineamento. Per fare ciò si è proceduto a confrontare direttamente la scansione scan2_TOT con tutte le scansioni scan2_i. Tali confronti permettono di osservare, in realtà, solamente l'errore dovuto all'allineamento poiché, di fatto, si confronta scan2 con se stessa solo variata poiché leggermente rototraslata. I risultati sono forniti nella figura 5 come mappe delle differenze in cui la scala di colore varia da tonalità scure (viola) per i valori negativi a colori giallo-rosso per indicare differenze positive passando per il verde-giallo o verde-azzurro nelle zone di transizione in cui i valori sono prossimi allo zero. L'intervallo delle differenze è compreso tra -4 mm e +3 mm.

Le differenze sono calcolate nel modulo IMInspect del software Polyworks e consistono in vettori (x, y, z) di differenze tra i punti della scansione di riferimento e della scansione da confrontare. Trattandosi del confronto della stessa nuvola di punti ci si aspetta, nella mappa di colore, di osservare semplicemente i sistematismi dovuti al non perfetto assetto che risultano in variazioni di colore ordinati secondo una geometria chiara e precisa, come appunto nelle figure seguenti.

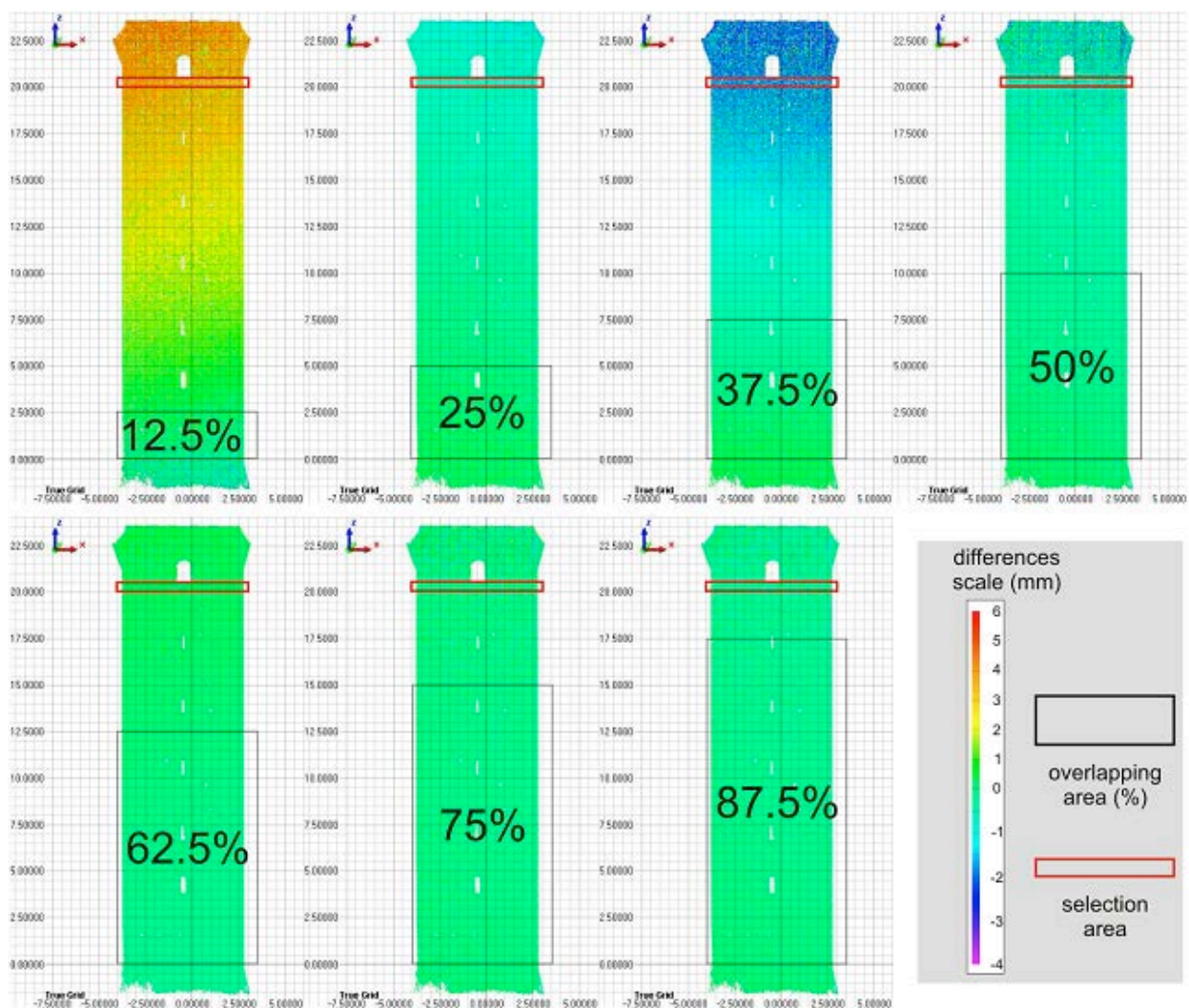


Figura 5. Mappe delle differenze e legenda. Il riquadro rosso mostra la parte da cui sono stati estratti i dati di “differenza delle coordinate” per le analisi successive.

Inoltre, al fine di comprendere meglio quale fosse l'entità di questi errori di allineamento sono stati estratti, direttamente dalle mappe delle differenze, i punti che giacciono nella parte di prospetto contenuto tra le altezze 20-20.25 m (circa), quindi fuori dall'area di massima sovrapposizione utilizzata in queste analisi.

Le coordinate dei punti e le differenze sono state analizzate secondo una semplice operazione statistica e sono stati forniti i valori medi e le deviazioni standard per ogni insieme di punti estratti (vedi fig. 6a). Inoltre, nella fig. 6b si mostrano i 3 casi corrispondenti agli allineamenti con 12.5%, 50% e 87.5% dove si può vedere il sistematismo indotto dalla scelta dell'area di sovrapposizione e, comunque, è immediato osservare che i valori, sopra al 25% di sovrapposizione, sono comunque accettabili trattandosi di differenze inferiori al rumore della misura, benché abbiano un carattere di errore sistematico. Le differenze osservate variano tra -1.5 mm e 0.5 mm, valori inferiori alla misura del singolo punto.

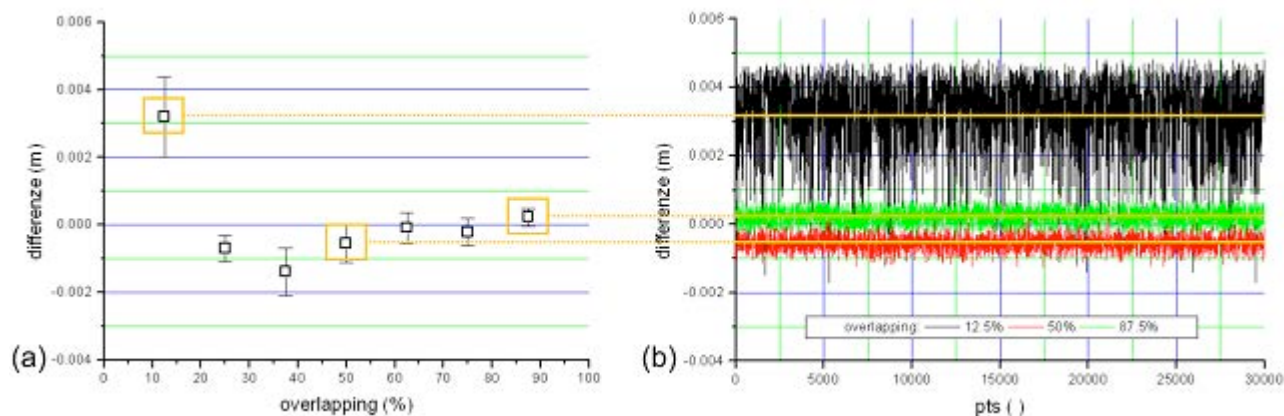


Figura 6. La media delle differenze (a) estratte dalla quota 20.00 m alla quota 20.25 m; dettaglio dei residui e relativo valore medio per gli allineamenti ottenuti con il 12.5%, 50% e 87.5%

È importante notare che le differenze si riferiscono al confronto della scansione 2 con se stessa ma le matrici di roto-traslazione sono calcolate confrontando la scansione 2 con la scansione di riferimento 1. Per questo motivo la progressione dei valori medi delle differenze (e deviazioni) non deve per forza avere un andamento di abbassamento costante poiché la morfologia della torre non è necessariamente perfettamente piana. Motivo per il quale variando l'intervallo di *overlapping* chiaramente possono crearsi differenze anche maggiori in relazione ad alcune parti della torre.

In termini quantitativi va tenuto presente che sia la media che la deviazione delle differenze messe in relazione con la percentuale di *overlapping* (fig. 6) sono ottenute estraendo e facendo una valutazione statistica dei valori su una banda orizzontale di circa 25 cm di altezza. Perciò i valori sono rappresentativi dell'area, cioè della fascia orizzontale compresa tra due quote vicine.

3. Conclusioni

Il metodo proposto permette di testare l'efficienza del software per l'allineamento delle scansioni e la qualità dei risultati in base alla percentuale di superficie di sovrapposizione in modo empirico. La scelta di tale approccio nasce dalla necessità di operare con dati veri, ottenuti in un rilievo con uno strumento specifico acquisendo da distanze leggermente diverse e con angoli di incidenza leggermente diversi ma ottenendo scansioni a tutti gli effetti paragonabili in termini di densità di punti e di divergenza del fascio laser sul prospetto in esame a simulare una tipica situazione nella quale, per esigenze logistiche, ci si trova a comparare scansioni ottenute con criteri simili e caratterizzate da differenze prevalentemente dovute a cause di natura strumentale e/o ambientale.

Premesso ciò, le procedure illustrate nel capitolo precedente prevedono una scansione fissa di riferimento ed una scansione da allineare ad essa utilizzando aree di sovrapposizione via via più strette per osservare le differenze. La strategia dell'intero lavoro consiste nel fissare ed utilizzare la scansione1 (scan1) come scansione di riferimento sulla quale allineare la scansione2 (scan2) utilizzando il 100% di sovrapposizione per poi ripetere l'intera procedura con aree di *overlapping* variabili ottenendo un numero di assetti per la scansione2 (scan2i) dipendenti dalla percentuale di area comune tra le due scansioni. Le nuvole di punti relativamente allineate secondo le matrici di rototraslazione ottenute (una per ogni scan2i) vengono

direttamente confrontate con la scansione2, che si ricorda essere allineata al 100% della sovrapposizione su scan1. In questo modo, trattandosi dello stesso insieme di coordinate seppure disposte in modo leggermente differente nello spazio, creando le differenze tra scan2 e le varie scan2i si può ragionevolmente supporre che tali valori siano imputabili esclusivamente ad eventuali imprecisioni di allineamento.

Avendo ricordato qui il carattere dell'esperimento e consapevoli che il risultato ottenuto si riferisce comunque ad una specifica parete di torre medievale per cui i valori non sono da considerarsi completamente esportabili ma comunque certo in parte legati al rilievo specifico, è bene precisare che le differenze sulla banda più alta considerata sono contenute in 1-1.5 mm e quindi ben al di sotto della risoluzione o della precisione strumentale. Il caso peggiore osservato comporta valori delle differenze di circa 3 mm. Anche in questo caso si è sotto alla soglia di rumore e risoluzione tipici per una scansione ottenuta con questo tipo di strumentazione e alla distanza di circa 100 m. Infine, per completezza di dettaglio, l'intera procedura è stata ripetuta anche con più casi cioè facendo variare l'*overlapping* da 0% a 100% con piccoli *step* percentuali (2.5%) ed il risultato corrisponde, seppur con maggior dettaglio, a quanto già mostrato nella figura precedente. Il grafico in figura, dato negli intervalli +/- 1 cm e +/- 3 mm come si nota non è caratterizzato da un trend lineare ma da una variazione che si riduce aumentando la percentuale di *overlapping* ma è soggetta a tendenze sia positive che negative. Questo non deve sorprendere perché nella fase di rilievo e analisi le matrici di *rototraslazione* sono state calcolate utilizzando un'area comune alle scansioni 1 e 2 che, per quanto simili e rilevate in condizioni solo leggermente differenti, ha delle disomogeneità. Si ricorda infatti che lo scanner non misura mai dei punti fisici ma traduce in coordinate una misura riferita alle impronte illuminate per cui due scansioni contengono la stessa informazione geometrica ma sono formate da punti matematici che non classificano in modo esatto i punti fisici che giacciono sul prospetto, più che altro li traducono in un insieme di coordinate che, nella sua totalità o comunque nella varie parti areali, rappresentano il prospetto osservato.

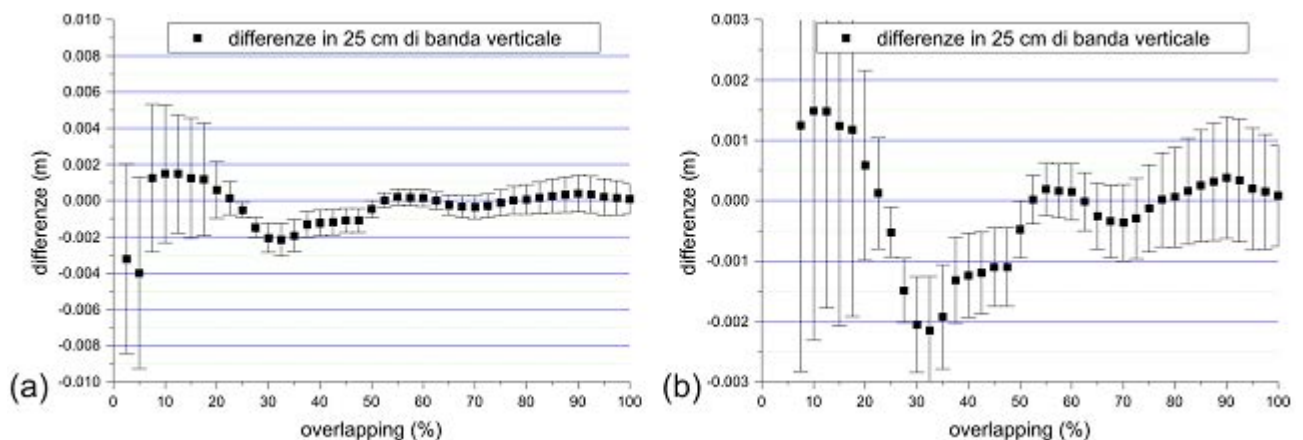


Figura 7. (a) Esperimento ripetuto con una variazione percentuale di *overlapping* più stretta (2.5 %) al fine di evidenziare con più dettaglio il risultato. Si nota che i risultati sono pressoché identici oltre la soglia del 20-25%. (b) Zoom del grafico per una lettura più semplice nell'intervallo di valori +/- 3mm.

Il risultato pieno mostrato nella figura 7 comprende i valori medi delle differenze, che ovviamente mettono in evidenza l'eventuale sistematismo quando non centrati sul valore di zero, e la deviazione standard che, nei casi in cui le percentuali di *overlapping* sono inferiori al 20% degradano il risultato. Va comunque ancora ribadito che le parti analizzate, cioè quelle più in alto rispetto al corpo della torre, risentono al massimo di un errore di allineamento per cui il risultato rappresenta di certo un limite superiore. Considerando che ogni scansione è composta da circa 3.5 M punti distribuiti in modo regolare sul prospetto, dei quali (escluse le parti irregolari alla base e sulla sommità) se ne sono utilizzati circa 2.8 M, ogni *step* percentuale di 2.5% consiste in circa 70 mila punti.

Gli autori informano che questo Rapporto Tecnico è stato prodotto per mostrare nel dettaglio uno dei modi possibili di realizzare un esperimento per ottenere informazioni interessanti sulle prestazioni TLS e

modalità di analisi, un modo semplice ma completo che fornisce valori chiari sull'affidabilità di allineamento. Inoltre si anticipa, con questa esperienza, una fase sperimentale per la verifica e indagine sulle reali caratteristiche dello strumento REIGL VZ-1000 [Caputo et al., 2014], in dotazione alla Sezione INGV di Napoli, per testarne le potenzialità a livello strumentale e valutare le prestazioni del software Riscan Pro (www.riegl.com) ad esso dedicato per il *post-processing*.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Giordano Teza ed Elena Bonali per il contributo importante relativo al rilievo ed all'analisi dati e per la fase successiva di confronto tra i software di allineamento che è attualmente in corso d'opera. Un ringraziamento ai revisori per l'aiuto fornito al fine di migliorare questo lavoro.

Bibliografia

- Bae, K-H., Lichti, D.D., (2008). *A method for automated registration of unorganised point clouds*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(1), 36–54.
- Bergevin, R., Souci, M., Gagnon, H., Laurendeau, D., (1996). *Towards a general multi-view registration technique*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18(5), 540–547.
- Bonali, E., Pesci, A., Casula, G., Boschi, E., (2013). *Deformation of Ancient Buildings inferred by Terrestrial Laser Scanning methodology: the Cantalovo Church (Northern Italy) Study Case*. Archeometry, 56(4), 703–716.
- Pesci, A., Teza, G., (2008a). *Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach*. Annals of Geophysics, 51(4), 839–848.
- Pesci, A., Teza, G., Ventura, G., (2008b). *Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy)*. Annals of Geophysics, 51(4), 633–653.
- Pesci, A., Teza, G., (2008c). *Terrestrial laser scanner and retro-reflective targets: an experiment for anomalous effects investigation*. International Journal of Remote Sensing, 29(19), 5749–5765.
- Pesci, A., Bonali, E., Galli, C., Boschi, E., (2011a). *Laser scanning and digital imaging for the investigation of an ancient building: Palazzo d'Accursio study case (Bologna, Italy)*. Journal of Cultural Heritage, 13(2), 215–220.
- Pesci, A., Casula, G., Boschi, E., (2011b). *Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings*. Journal of Cultural Heritage, 12, 117–127.
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., (2011c). *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*. Remote Sensing, 3(1), 167–184.
- Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S., (2009). *Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6), 522–528.
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., Casula, G., Boschi, E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 79, 185–198.
- Teza, G., Pesci, A., (2013). *Geometric characterization of a cylinder-shaped structure from laser scanner data: development of an analysis tool and its use on a leaning bell tower*. Journal of Cultural Heritage, 14(5), 411–423.
- Teza, G., Pesci, A., Trevisani, S., (2014). *Multisensor surveys of tall historical buildings in high seismic hazard areas before and during a seismic sequence*. Journal of Cultural Heritage, DOI: 10.1016/j.culher.2014.06.008, in press.
- Xie, Z., Xu, S., Li, X., (2010). *A high-accuracy method for fine registration of overlapping point clouds*. Image and Vision Computing, 28(4), 563–570.

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia