

METODI DI RILIEVO TRIDIMENSIONALE A CONFRONTO: AFFIDABILITA' METRICA E CAPACITA' DESCRITTIVE

Grazia TUCCI (*), Valentina BONORA (*), Fabrizio COSTANTINO (**), Daniele OSTUNI (**)

(*) DINSE, Politecnico di Torino, viale Mattioli, 39, tel. 011.564 4378, grazia.tucci@polito.it; valentina.bonora@polito.it
(**) Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, via Santa Marta, tel. 055.4796220 dostuni@dicea.unifi.it

Riassunto

La nuova rappresentazione digitale dell'architettura, quale prodotto del rilievo, deve, oggi, essere sostanziata non solo dalla conoscenza geometrica ma anche da quella tecnica, relativa sia alla fase di acquisizione che a quella di elaborazione. I dati acquisiti sono, nel rilievo strumentale, sempre tridimensionali e quindi costituiscono la base metrica per le successive operazioni di modellazione in cui si possono distinguere, in rapporto alle modalità di rilevamento, modelli ottenuti dall'uso di immagini e modelli ottenuti dall'elaborazione di range map. In entrambi i casi, le più attuali linee di ricerca oscillano tra il potenziamento della capacità di acquisire dati e la necessità di gestirli per fornire modelli, il più possibile con procedure automatiche. Rimane il fatto che alle differenti tecnologie utilizzate per esaminare gli aspetti morfologici di una architettura corrispondono diversi tipi di rappresentazione e che la scelta di uno specifico metodo di rilievo può fornire differenti interpretazioni di un oggetto.

E' la ragione per cui, nel caso esemplificativo qui riportato, fotogrammetria e laser scanner vengono posti a confronto per valutarne da un lato potenzialità e limiti nel rispondere alle due esigenze più richieste dalla modellazione e cioè *aumento dell'automazione e capacità di rappresentazione realistica*, dall'altro le effettive possibilità di integrazione delle due metodiche.

La struttura analizzata, il plesso transetto-abside di San Francesco al Prato, in Perugia, presenta una geometria complessa, derivata dalla sovrapposizione di elementi architettonici di fasi differenti, dalle anomalie generate da danni strutturali e dal degrado dei materiali. L'assenza di punti e linee caratteristiche univocamente interpretabili ne fanno un caso di rilievo archeologico che ben si presta all'uso congiunto di differenti tecniche di rilevamento. Gli interrogativi che derivano investono sia gli aspetti metrici che la fruibilità delle differenti rappresentazioni ottenute quando l'obiettivo di intervenire sul manufatto deve confrontarsi con un referente testuale sostitutivo del reale.

Abstract

The new digital representation of architecture, as a result of the survey, which today, has to be backed up not only by a geometric knowledge but by a technical one as well, related either to the acquisition or elaboration phase. The acquisition data, in the instrumental survey, are always 3D and therefore constitute the metric base for future modeling operations where they can be distinguished in relation to the surveying methods, models obtained by the use of images and model obtained by the elaboration of range map. In both cases, the most recent research studies fluctuate between the empowering of the data acquisition and the need to handle it in order to supply models, as much as possible in an automatic way. The fact remains that different kinds of representation correspond to the different technologies used to examine the morphological aspects of architecture and that the choice of one specific method can provide different interpretations of an object.

That is the reason why in the cases here described, photogrammetry and laser scanner are compared to evaluate the potentiality and limits in response to the two demands most requested by the modeling and that is the rise of the automation and the ability to have a realistic representation on one hand, and the actual possibilities of integration of the two methods on the other. The analyzed structure, the complex transept-apse of San Francesco al Prato, in Perugia, has an intricate geometry derived from the overlapping of architectonic elements of different phases, from the irregularities caused by structural damages and the decay of the materials. Due to the absence of points and characteristic lines unequivocally interpretable this case of archological survey is conducive to the joint use of different surveying techniques. The questions that arise involve both the metric aspects and the usability of the different representations.

Introduzione

A fronte delle esigenze degli utenti della modellazione, che spaziano da finalità divulgative a quelle di supporto per progetti esecutivi, le risposte della tecnologia applicata al rilievo si indirizzano sempre più verso un aumento dell'automazione in tutte le fasi che dall'acquisizione conducono alla rappresentazione. Gli output finali sono inoltre il prodotto di un progressivo affinamento delle tecniche di computer grafica che potenziano le capacità descrittive delle rappresentazioni.

Tutte le tecniche di rilievo metrico (topografia, fotogrammetria, laser scanning) conducono alla definizione di modelli sintetici della realtà, ma con diversi approcci cognitivi, differenziati dalla successione cronologica delle fasi di raccolta delle osservazioni e della loro interpretazione critica: la fase di acquisizione in topografia e fotogrammetria richiede un processo preliminare di interpretazione, mentre tramite laser scanner si registrano dati ridondati e il processo di sintesi è posticipato alle fasi di trattamento.

Il risultato delle operazioni di misura inoltre, come noto, ha significato solo se si è in grado di conoscerne l'incertezza. Poiché, ad oggi, non esistono procedure standardizzate per la valutazione di accuratezza e ripetibilità degli strumenti a scansione tridimensionale è l'utente che deve, di volta in volta, verificare il livello di affidabilità dei dati misurati.

Tralasciando le operazioni di laboratorio, finalizzate ai controlli dei sensori e alla calibrazione attraverso l'uso di superfici note, si illustra un confronto tra procedure oramai consolidate, di rilievo fotogrammetrico e topografico e il rilievo effettuato con laser scanner di una struttura architettonica per valutarne l'affidabilità metrica.

La struttura analizzata, il plesso transetto-abside di San Francesco al Prato, in Perugia, presenta una geometria complessa, derivata dalla sovrapposizione di elementi architettonici di fasi differenti, dalle anomalie generate da danni strutturali e dal degrado dei materiali. L'assenza di punti e linee caratteristiche univocamente interpretabili ne fanno un caso di rilievo archeologico che ben si presta all'uso congiunto di differenti tecniche di rilevamento. Gli interrogativi che ne derivano investono sia gli aspetti metrici che la fruibilità delle differenti rappresentazioni ottenute quando l'obiettivo di intervenire sul manufatto deve confrontarsi con un referente testuale sostitutivo del reale.



Figura 1 - Rilievo topografico di dettaglio e di appoggio fotogrammetrico e restituzione dei 17 modelli orientati



Figura 2 - Vista di una porzione dell'abside e del transetto

Raccolta e registrazione dei dati quantitativi e qualitativi

Sostanzialmente è possibile individuare due categorie di dati che vengono acquisiti come input di partenza per le elaborazioni del modello: le immagini, sempre più spesso digitali, che associano un contenuto radiometrico a quello geometrico costituito dalla matrice di pixel; le range map, ovvero l'insieme dei punti acquisiti dalle singole scansioni, ognuna caratterizzata da terne di coordinate e da valori legati alla riflettanza della superficie misurata. In entrambi i casi si assiste ad una progressiva tendenza ad incrementare la risoluzione di acquisizione ponendo problematiche nuove di gestione, elaborazione e archiviazione.

Per il completo ricoprimento dell'area di interesse, in fase di progetto si deve, allo stesso modo, tener conto della geometria di presa, individuabile, approssimativamente in una proiezione centrale: sono quindi analoghi i criteri da seguire per la completa documentazione di spazi articolati, evitando o limitando le zone d'ombra.

L'origine numerica dei dati derivati sia dal laser scanner che da immagini orientate, ne accomuna anche le procedure di gestione e archiviazione: l'informatica, entrata in maniera significativa in tutti i settori tecnologici, individua sempre più percorsi automatizzabili, nel trattamento e nell'organizzazione, migliorando l'accessibilità, i tempi e la fruibilità delle informazioni. Anche la trasmissibilità e la riproducibilità sono una diretta conseguenza della dematerializzazione derivata dal passaggio da analogico a digitale.

La natura tridimensionale dei dati inoltre costituisce non solo una base metrica per la modellazione, che dà origine ad elaborati sempre esplorabili, ma anche una possibilità sempre aperta di estrarre, a posteriori, rappresentazioni bidimensionali.

La tendenza verso una descrizione sempre più "continua" dell'architettura, nei suoi aspetti geometrici e materici, è comunque avversata dalla natura "discreta" dei dati numerici che, per quanto più densi non sono sostitutivi del reale.

Strumenti e metodi di elaborazione del modello geometrico

Il rilievo fotogrammetrico

Ogni modello costituisce una rappresentazione, in vario modo e a differenti livelli, sintetizzata della realtà. Il contenuto informativo ed il livello di verosimiglianza sono influenzati dalla sua natura e dalle sue finalità. Il modello che nasce dall'osservazione contemporanea di una coppia stereoscopica contiene il più alto livello di verosimiglianza ottenibile: quello che si vede è esattamente quello che vedrebbe un osservatore posto in corrispondenza dei punti di presa. La restituzione vettoriale successiva è invece sempre una rappresentazione estremamente sintetica: linee di discontinuità, spigoli, curve di livello, non possono che essere significative selezioni operate sulla superficie continua dell'oggetto, ed è al restituitista che è demandata questa operazione, seguita peraltro da una, spesso onerosa, fase di editing finalizzata a verificare le congruenze geometriche, integrare le parti mancanti con ulteriori misure, aggregare in un solo elemento le entità logicamente connesse e ad organizzare le entità grafiche secondo codifiche concordate.

E' stata condotta una campagna di riprese fotogrammetriche, realizzate con le camere semimetriche Rollei 6006 (f= 40 mm) e Nikon D1 (f= 24 mm). In particolare, con la camera Rollei, sono stati realizzati tre modelli stereoscopici relativi alla zona absidale, realizzando le prese con l'ausilio di ponteggi mobili; la scala media delle immagini è 1:350. Per la completa documentazione delle pareti del transetto sono stati necessari dodici modelli, organizzati secondo tre strisciate realizzate ad altezze differenti (scala delle immagini 1:250, ricoprimento longitudinale 80%, ricoprimento trasversale 40%). La presenza di un ponteggio strutturale predisposto per l'intervento di restauro ha consentito di realizzare le prese in condizione normale, assicurando un'ottimale visione stereoscopica. I fotogrammi sono stati orientati e restituiti sia con sistemi analitici (Stereorestitutore Digicart 40, Siscam) che digitali (StereoView, Menci Software). A tal proposito, dopo aver opportunamente predisposto una rete di inquadramento, sono stati misurati un centinaio di punti di controllo, naturali e artificiali sul transetto, 40 target sull'abside e 17 target predisposti per i dati da laser scanner.

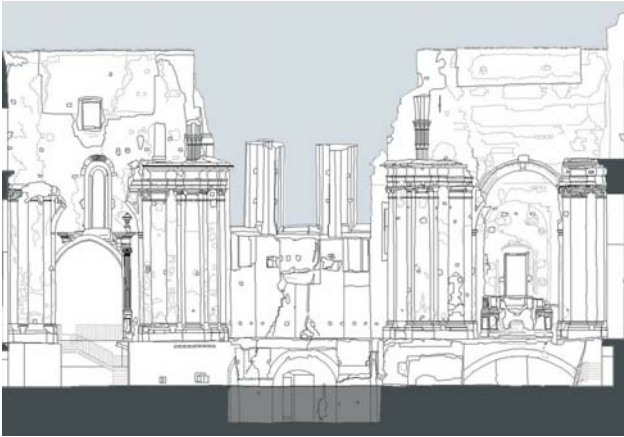


Figura 3 - Sezione sul transetto: editing della restituzione fotogrammetrica (originale in scala 1:50)

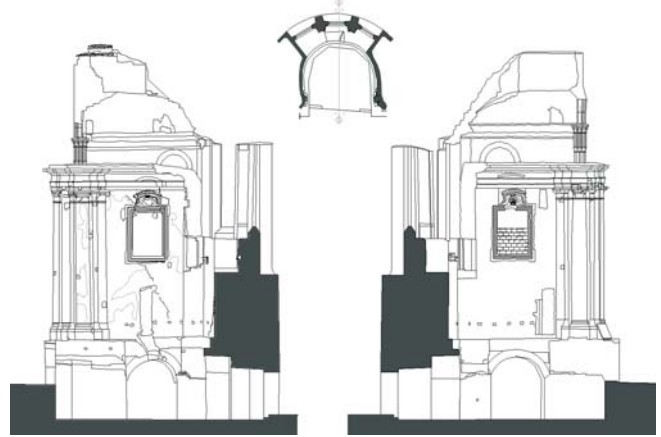


Figura 4 - Sezioni sull'abside: editing della restituzione fotogrammetrica (originale in scala 1:50)

Il rilievo con laser scanner

Nei rilievi laser scanner il sistema di registrazione delle osservazioni è completamente indipendente dalle caratteristiche morfologiche dell'oggetto analizzato: i punti vengono acquisiti secondo passi angolari predefiniti e costanti, ottenendo quindi informazioni pesantemente esuberanti in corrispondenza di porzioni piane o con curvatura uniforme e spesso carenti in corrispondenza delle zone di discontinuità (in particolare gli spigoli), proprio a causa della acriticità del sistema di rilievo.

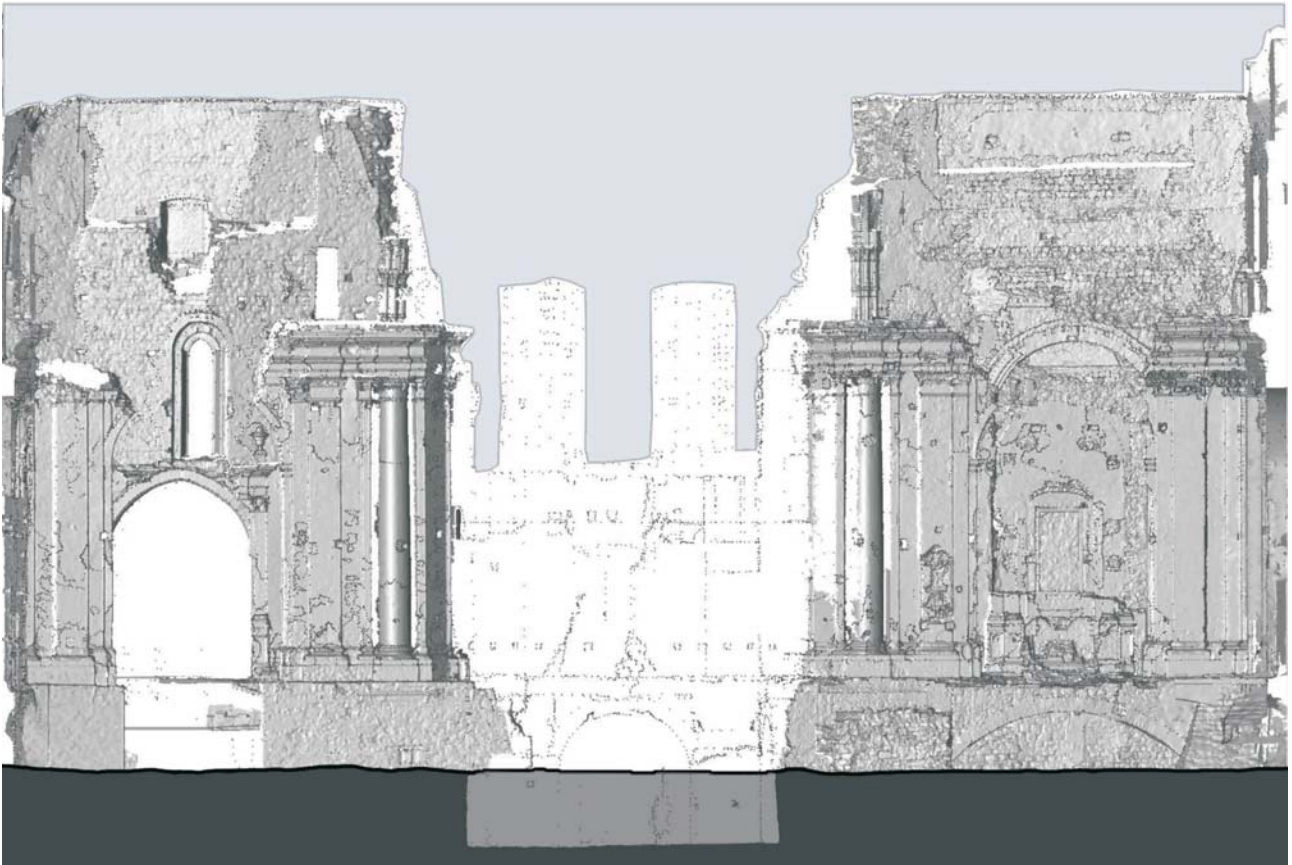


Figura 5 - Sezione sul transetto: integrazione del modello ottenuto dalle scansioni laser con la restituzione fotogrammetrica

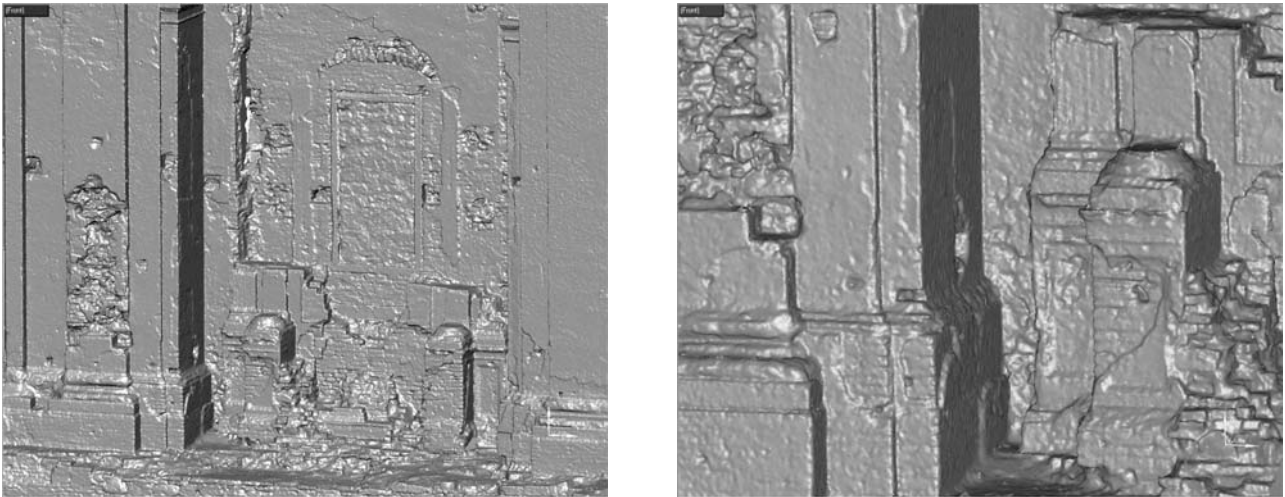


Figura 6 - Particolare del modello visualizzato a due fattori di scala differente

Il processo di selezione delle informazioni è, perlomeno parzialmente, automatico. Per esempio gli algoritmi di campionamento in funzione della curvatura della superficie analizzata, riducono le informazioni in modo differenziato preservando la forma del modello. La descrizione di superficie che si ricava è però sempre costituita da maglie, generalmente triangolari (mesh); l'organizzazione delle informazioni è quindi assolutamente indifferente alla partizione in elementi architettonici dell'edificio. Sistemi di segmentazione automatica possono essere impiegati proficuamente per il riconoscimento di geometrie semplici, come piani, cilindri, sfere, ma partizioni che richiedano criteri interpretativi più complessi devono essere realizzate in modo interamente manuale. Anche in altre fasi di elaborazione l'intervento manuale continua ad essere fondamentale: ad esempio nella pulizia iniziale dei dati dagli elementi di disturbo inevitabilmente acquisiti con le scansioni o nelle operazioni di editing della mesh.

Le superfici elaborate a partire dalle nuvole di punti sono in grado di descrivere non solo la dimensione e la giacitura degli elementi architettonici, ma dettagliarne la consistenza materica, rendendo leggibili apparecchiature murarie, degrado dei materiali, lesioni, ottemperando all'esigenza di produrre un modello in grado di evidenziare particolari tematismi.

Per i rilievi del transetto è stato utilizzato lo scanner Cyrax 2500 con il software di registrazione Cyclone (Cyra). Nelle zone più accessibili sono stati disposti dei target la cui posizione viene riconosciuta automaticamente dal software grazie alle specifiche caratteristiche geometriche e di riflettanza. Tali segnali sono stati impiegati generalmente per la referenziazione dell'intero rilievo, poiché misurati topograficamente. In una zona della chiesa di Perugia si sono confrontati i risultati ottenuti prima referenziando le singole scansioni nel sistema topografico in modo indipendente secondo i parametri ricavati dai target, poi collegando le scansioni successive senza utilizzare i segnali. I risultati ottenuti hanno suggerito, per i lavori successivi, di utilizzare i target esclusivamente per la referenziazione complessiva delle scansioni, registrate tra loro ricorrendo solo a vincoli relativi alla geometria. I risultati del calcolo sono pesantemente condizionati dalla morfologia della zona di ricoprimento: superfici all'incirca piane necessitano di ricoprimenti maggiori e/o di considerare nel calcolo una percentuale importante dei punti delle nuvole, mentre è sufficiente una zona in comune minore se la stessa è caratterizzata da geometrie più complesse. Ovviamente occorre considerare che la possibilità di contenere il ricoprimento tra scansioni adiacenti di oggetti con forme complesse si scontra con l'esigenza di documentare anche le zone di sottosquadro.

Verifica dell'affidabilità metrica

Per analizzare l'affidabilità di questa tecnica di misura occorre considerare non solo la precisione relativa al singolo punto, dichiarata dal costruttore. Infatti la restituzione grafica finale di un rilievo realizzato con laser scanner prevede numerose elaborazioni sia sulla nuvola di punti che sul modello a superficie. La precisione del modello non è dunque dipendente solo dalla precisione di acquisizione, ma è anche influenzata dalle procedure di elaborazione adottate. Per confrontare tra loro dati elaborati in modo differente (mesh vs. mesh) o confrontare i dati originali con gli stessi dopo varie elaborazioni (mesh

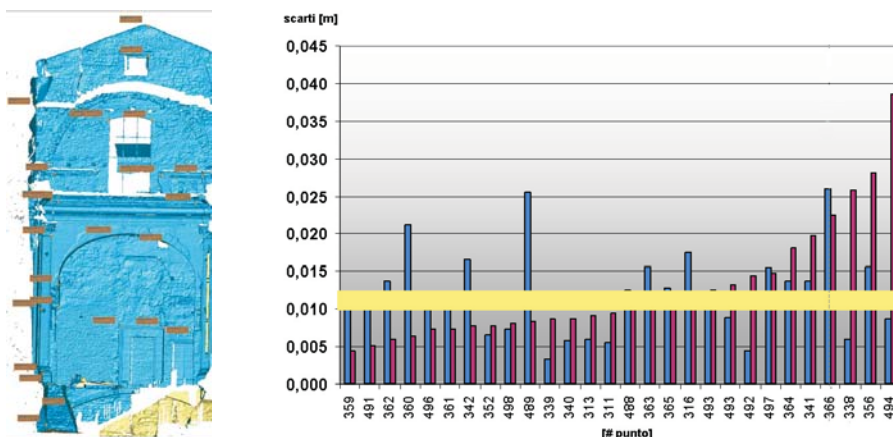


Figura 7 - Collaudo del modello tramite confronto con punti misurati per via topografica: distribuzione dei punti analizzati e scarti ottenuti

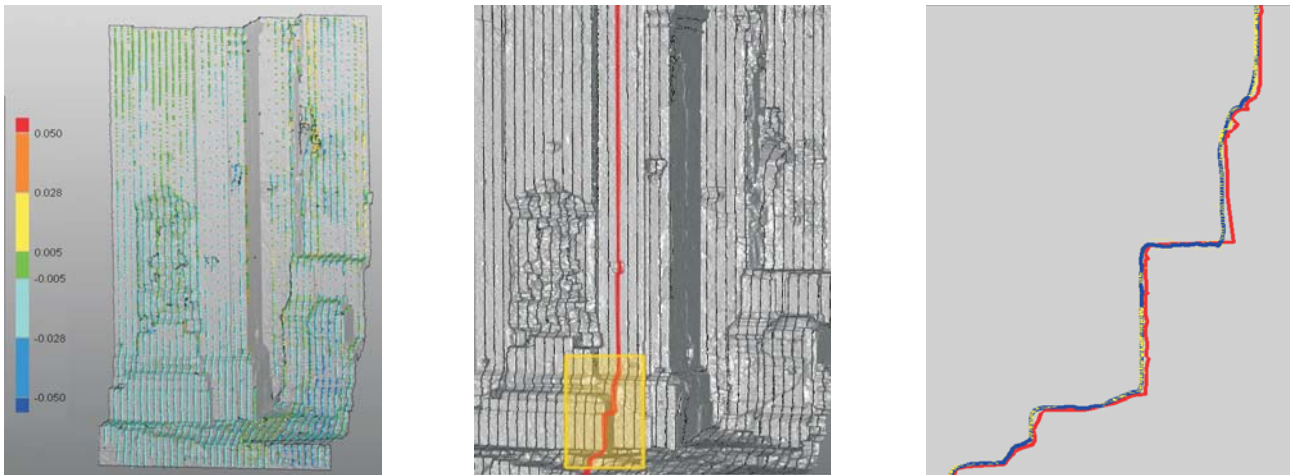


Figura 8 - Confronti tra sezioni (fotogrammetriche e scansioni laser). A sinistra la mappa di colori rappresenta gli scarti tra la restituzione fotogrammetrica e la superficie del modello. Al centro e a destra sono riportate contemporaneamente la restituzione (in rosso), i punti acquisiti con le scansioni (in giallo), la sezione ricavata dal modello triangolato (in blu)

vs. nuvole di punti) diventa talvolta necessario definire nuovi criteri che, a procedure di verifica a campione di elementi puntuali, affianchino valutazioni statistiche degli scostamenti tra superfici tridimensionali. Nel collaudare i risultati ottenuti è importante ricordare che misure effettuate con tecniche topografiche o fotogrammetriche sono normalmente riferite proprio a quegli elementi (spigoli, cornici, ecc.) definiti con maggiore difficoltà tramite scansioni laser. E' quindi opportuno esprimere le valutazioni degli eventuali scostamenti riferendole non ai punti di discontinuità (il cui grado di approssimazione andrà comunque valutato) ma all'andamento delle superfici che li generano.

- verifiche di scostamenti tra elementi puntuali individuati sul modello e gli stessi misurati per via topografica o fotogrammetrica. Gli scarti ottenuti dal confronto di circa trenta punti distribuiti in maniera uniforme hanno valori poco superiori a ± 1 cm;
- confronto tra sezioni verticali ottenute tramite restituzione fotogrammetrica, con passo di 10 cm, e le corrispondenti sezioni ricavate sia dalla nuvola di punti che dal modello elaborato. Come si osserva nella figura 8, gli scostamenti rimangono coerenti con i risultati ottenuti nella verifica puntuale, mentre si evidenzia una differente accuratezza nella descrizione della forma. I tratti morfologicamente più complessi risultano meglio descritti dalla restituzione fotogrammetrica, dove c'è stata una selezione dell'operatore nell'interpretazione della forma. Anche i punti acquisiti dallo scanner seguono l'andamento della superficie dell'oggetto, ma le sezioni ottenute dal modello triangolato risentono delle elaborazioni necessarie alla costruzione delle superfici interpolanti. Gli scostamenti maggiori si rilevano in prossimità delle zone con discontinuità più accentuate.

Considerazioni sulle capacità descrittive dei modelli ottenuti

La fotogrammetria fornisce rappresentazioni grafiche nelle quali la descrizione dello spazio e degli elementi architettonici è interamente affidata al "contorno", privato di tutte le informazioni contenute al suo interno, come dei quelle sui materiali in opera e sulla presenza di eventuali patologie. La restituzione costituisce quindi un fondamentale documento di sintesi capace di supportare le successive elaborazioni relative ai vari tematismi nonché alla stesura del progetto di conservazione.

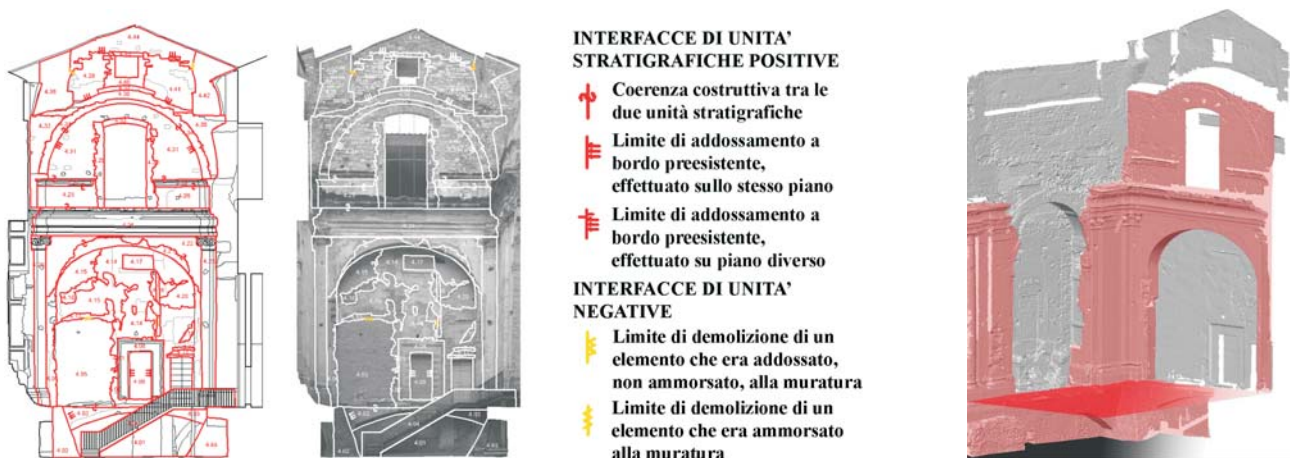


Figura 9 - Unità Stratigrafiche Murarie rappresentate sia sulla restituzione fotogrammetrica che sui fotopiani. A destra, sono evidenziati i resti dell'intervento carattoliano: si osservi come il modello tridimensionale aumenti la leggibilità di un palinsesto architettonico così complesso. La rappresentazione della stratigrafia sul modello consente di evidenziare le relazioni topologiche tra le Unità

La capacità descrittiva di tali rappresentazioni può essere significativamente arricchita integrando le linee di discontinuità che descrivono le geometrie fondamentali dell'architettura con le informazioni provenienti da immagini fotografiche. Per assicurare la necessaria validità metrica anche ai dati raster, nelle superfici considerabili con sufficiente approssimazione piane, sono stati realizzati dei raddrizzamenti fotografici controllati da punti misurati topograficamente. Tali elaborati costituiscono un utile supporto per la realizzazione di mappature tematiche; ad esempio, nel caso in esame sono stati impiegati come base per il rilievo critico, fondato sull'individuazione di porzioni di murature caratterizzate da omogeneità di materiali e tecniche costruttive (Unità Stratigrafiche Murarie). Definendo la relazione sincronica o diacronica di ogni U.S.M. con le altre è possibile definire la sequenza cronologica delle differenti porzioni di edificio tutt'ora esistenti; integrando le informazioni provenienti dall'edificio con la documentazione storica disponibile è infine possibile assegnare delle datazioni (assolute e relative) alle principali fasi della fabbrica.

Seppur supportata dall'importante valore aggiunto dell'informazione fotografica, la mappatura delle USM sui fotopiani si scontra, nelle porzioni di edificio più complesse ed articolate, con il vincolo geometrico di dover rappresentare porzioni di piano. In queste circostanze è importante disporre non solo della proiezione su di un piano dei principali spigoli dell'edificio e della immagine fotografica rettificata delle porzioni di piano che tra essi sono comprese, ma di un modello realmente tridimensionale della fabbrica.

La descrizione della superficie del modello costruito a partire dalle scansioni laser è sufficientemente dettagliata da consentire la corretta individuazione ed interpretazione delle differenti tessiture murarie. Ai fini del riconoscimento delle differenti USM non è dunque risultato indispensabile realizzare la texturizzazione del modello.

La necessità di rappresentare tematismi relativi a porzioni morfologicamente complesse impone di ricorrere ad un supporto tridimensionale, reale o virtuale: si rammenta l'esempio di Vanvitelli che dopo aver adattato e aggiornato il modello ligneo della cupola di San Pietro vi riporta il rilievo del quadro fessurativo, oltre alle indicazioni per il rinforzo della struttura.

Ringraziamenti

Il lavoro fa parte del progetto di ricerca "Fotogrammetria digitale per l'integrazione con tecniche di scansione ottica tridimensionale applicata al rilievo archeologico" (COFIN 2002, unità locale coordinata dal prof. Bruno Astori)

Le indagini storico-documentarie e la lettura stratigrafica degli elevati sono state condotte, per conto della Soprintendenza di Perugia, dal prof. Giuseppe Cruciani Fabozzi in collaborazione con l'arch. Andrea Ugolini.

Si ringrazia l'ing. Marco Nardini (Leica Geosystems) per la disponibilità nell'uso dello scanner.

Riferimenti bibliografici

Tucci G., Algostino F., Bonora V., Chiabrando F. (2003), "3D modeling and restoration: from metric to thematic survey. The case study of San Francesco al Prato in Perugia", *Proceeding of CIPA International Symposium*, Antalya

Bonora V., Chiabrando F., Spanò A., Tucci G. (2003), "Fruibilità e precisione di modelli architettonici multiscala da rilievi laser scanner", *Atti della 7° Conferenza Nazionale ASITA*, Verona

Benoit F., Devriendt, Debie J. D., Goossens R. (2003), "Research for the possibilities of digital photogrammetric methods for close range stereoscopic photographs, applied on the ruins of transept and cancel of the church of Aulne Abbey (Thuin, Belgium)", *Proceedings of CIPA International Symposium*, Antalya

Guidi G., Tucci G., Beraldin J.-A., Ciofi S., Ostuni D., Costantino F., El-Hakim S.F. (2002), "Multiscale Archaeological Survey Based on the Integration of 3D Scanning and Photogrammetry", *International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording - Complementing or Replacing Photogrammetry*, Corfu, Greece

Lichti D. D., Gordon S. J., Stewart M. P., Franke J., Tsakiri M. (2002), "Comparison of digital photogrammetry and laser scanning", *Proceedings of CIPA WG6 International Workshop on scanning for cultural heritage recording*, Corfu, Greece

Bitelli G., (2002), "Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali", *Atti della 6a Conferenza Nazionale ASITA*, Perugia

Boehler W., Heinz G., Marbs A. (2001), "The potential of non-contact close range laser scanner for cultural heritage recording", *Proceedings of CIPA International Symposium*, Potsdam

Guidi G., Ostuni D., Costantino F., Pieraccini M., Tucci G., Beraldin J.-A. (2001), "Photogrammetry and 3D scanning: assessment of metric accuracy for the digital model of Donatello's Maddalena", *Italy-Canada Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling Applications of: Heritage, Industry, Medicine & Land*, Padova (on CD ROM)