

IL RILIEVO LASERSCANNER TERRESTRE COME INTEGRAZIONE DEI SISTEMI INFORMATIVI DI DOCUMENTAZIONE STORICA E DI RESTAURO

Marcello BALZANI(*), Claudio MONTANI(**), Guido PREARO(*), Roberto SCOPIGNO(**),
Federico UCCELLI(*)

(*) Università degli Studi di Ferrara, Centro di Ricerca D.I.A.P.Re.M. c/o Dipartimento di Architettura, Via Quartieri, 8
44100 FERRARA, tel. 0532 293601, fax 0532 293630, email marcello.balzani@unife.it

(**) Visual Computing Lab, Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione (ISTI), Consiglio nazionale delle
Ricerche, Via G. Moruzzi 1, 56124 PISA, tel. 050 3152929, fax 050 3138091, email roberto.scopigno@isti.cnr.it

Riassunto

Il rilievo tridimensionale costituisce elemento essenziale per la localizzazione ed il *mapping* dei beni artistici nonché degli elementi e particolari che lo costituiscono. La conoscenza geometrica del bene è fondamento primo per gli interventi finalizzati alla diagnosi, al monitoraggio e alla sua tutela nonché all'eventuale costruzione di banche dati specifiche. L'evoluzione in tal senso della tecnologia per il rilievo automatico della geometria di manufatti, ha facilitato la costruzione di banche dati tridimensionali che costituiscono l'archivio fondamentale della memoria geometrica del bene necessaria a fini di tutela e conservazione e di eventuali processi di restauro o riproduzione. La possibilità infine di costruire modelli digitali tridimensionali permette di integrare la specifica spaziale con dati di tipo strutturale ed eventualmente colorimetrico, al fine di ottenere una completa rappresentazione digitale del bene in oggetto.

Nel contesto del progetto di ricerca in oggetto, l'acquisizione di modelli digitali della superficie con precisioni millimetriche (caratterizzazioni cromatiche e materiche, morfologia e alterazioni macroscopiche di degrado avanzato) ha consentito l'individuazione delle corrispondenze tra caratteri strutturali e riconoscibilità degli stati di alterazione e di degrado dal quadro ricognitivo esterno. Tali modelli avanzati si sono ottenuti grazie alla sovrapposizione di informazione colorimetrica proveniente da immagini digitali ad alta risoluzione alla superficie 3D rappresentative dell'oggetto ottenuta da rilievo laserscanner terrestre. In tal modo è stato possibile realizzare un modello digitale 3D misurabile che rappresenta il bene e ne costituisce elemento rappresentativo realistico da cui possono poi essere facilmente derivati sotto-prodotti finalizzati all'uso in ambienti di realtà virtuale, utili per la fruizione di massa in ambito museale, o per la gestione dell'informazione di restauro. L'attività di ricerca riportata nel seguito ha avuto l'obiettivo di sperimentare la tecnologia di scansione laser a tempo di volo e alcune recenti tecniche di post-elaborazione dei dati 3D al fine di realizzare di un modello tridimensionale completo dell'esterno del Duomo di Pisa. Il rilievo realizzato costituisce la base essenziale di una banca dati di tipo dinamico sulla quale inserire le informazioni di tipo storico, culturale e diagnostico, con l'obiettivo finale di integrare il modello digitale 3D al sistema informativo relativo alla documentazione di restauro, gestito ad oggi con un GIS bidimensionale. Sono inoltre state eseguite riprese fotografiche digitali ad alta risoluzione delle zone rilevate, sperimentando il collegamento di tali immagini alla geometria 3D per una visualizzazione integrata.

Abstract

This paper deals with the technologies needed to manage complex terrestrial laser scanner data, including data integration, reconstruction of a complete 3D surface, mapping of the color information sampled with digital photography and finally interactive navigation of the 3D model

obtained. Another goal of our work is to provide tools for the integration of sampled 3D models with databases for the restoration of monuments, usually based on GIS technology. GIS allows us to connect to the geometry all the information available on the story, the conservation status and the restoration process. The adoption of a GIS-based approach in the management of architectural heritage needs to extend those tools to full and efficient 3D data management, needed for the proficient integration of sampled 3D models (usually very complex and dense).

The present research has as well been focused on the implementation of innovative algorithms for surface reconstruction and management from the acquired 3D sample-based geometric information. Moreover, this paper proves the significance advances in the usability of the highly complex models produced by adopting efficient multiresolution rendering methods which make those complex data available in interactive time even with low cost PC technology. The presented approach has been assessed with the 3D terrestrial laserscanner survey of the Duomo of Pisa (Italy), with different datasets collected in the frame of a public financed research program.

1. Introduzione

Tra le problematiche principali relative all'utilizzo di *database* da rilievo *laserscanner* terrestre, quella relativa alla fase di ricostruzione e modellazione del dato risulta essere quella di maggior interesse di studio, soprattutto nell'ottica di ottimizzazione delle tempistiche di *post processing*. E' noto come l'acquisizione di un complesso architettonico sia effettuata per mezzo di numerose riprese indipendenti, che debbono essere messe a registro e integrate al fine di ottenere un modello digitale 3D completo. In particolare va ricordato come la ricostruzione delle superfici a scopi di restauro e conservazione sia principio fondante per una corretta fase di diagnosi tanto strutturale quanto dello stato conservativo. A differenza della fase di allineamento, che anche in questo caso di studio è stata tradizionalmente effettuata per la maggior parte grazie all'inserimento delle riprese in un unico sistema di riferimento geo-referenzato, per la successiva fase di ricostruzione sono stati utilizzati un innovativo metodo di ricostruzione da campioni e quindi un nuovo metodo di gestione multirisoluzione del modello digitale per superfici.

L'aspetto innovativo relativo alla presente attività di ricerca riguarda appunto quest'ultima fase, specificatamente condotta attraverso l'implementazione di tecniche di calcolo non tradizionali. La soluzione prescelta ha permesso di ricostruire la superficie partendo dall'insieme dei campioni, piuttosto che dall'insieme di *range map*, attraverso l'utilizzo di un algoritmo di interpolazione tra campioni (ossia, punti definiti in spazio 3D) basato sull'approccio *Moving Least Squares* (MLS). Tale soluzione migliora la qualità della ricostruzione per superfici rispetto alle alternative soluzioni che integrano le *range map*, riducendo lo smoothing e garantendo corretta interpolazione dei campioni. La superficie ottenuta, costituita da una mesh triangolata molto complessa è stata successivamente convertita in una rappresentazione multi risoluzione, che permette di manipolare e visualizzare in modo interattivo la rappresentazione 3D. Il modello finale è navigabile in tempo reale per mezzo del sistema *Virtual Inspector*, che ne supporta la fruizione da parte di ampie classi di utenza di modelli 3D per la successiva progettazione di chioschi multimediali.

2. Organizzazione del rilievo e processing dei dati

2.1 Acquisizione.

Particolare attenzione durante la fase di rilievo è stata posta sul paramento esterno del Duomo, che è stato eseguito Laboratorio D.I.A.P.Re.M. del Dipartimento di Architettura di Ferrara con il supporto del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di Firenze attraverso l'implementazione di procedure integrate topografiche e laser scanner 3D (Leica HDS 2500 e Leica HDS 3000®). L'acquisizione è avvenuta definendo una densità di maglia dal passo di circa 1 cm con infittimenti su particolari decorativi o strutturali della facciata e dell'abside con maglia di dettaglio pari a circa 6 mm. In Tabella 1 è riportata la struttura riassuntiva complessiva del rilievo, distinta in funzione delle singole stazioni di scansione realizzate. Si noti la consistente mole di dati acquisita, necessaria

non solo a coprire l'intera architettura, ma anche a fornire una base statisticamente robusta di campioni su cui condurre la sperimentazione.

Stazioni Laser Scanner Leica HDS 2500 (maglia di 1 x 1 cm)				Stazioni Laser Scanner Leica HDS 3000 (maglia di 1 x 1 cm)			
01	11.700.000	07	7.900.000	01	17.100.000	07	4.200.000
02	11.400.000	08	12.800.000	02	3.200.000	08	3.400.000
03	4.800.000	09	4.700.000	03	17.600.000	09	6.300.000
04	6.000.000	10	11.000.000	04	22.500.000	10	22.200.000
05	2.200.000	11	5.400.000	05	4.900.000	11	10.700.000
06	2.900.000			06	3.100.000		
Totale punti:		88.800.000		Totale punti:		115.200.000	

Tabella 1: struttura analitica del rilievo.

2.2 Data post processing.

I modelli digitali prodotti sono in grado di supportare la riproducibilità, la misurabilità, l'analisi dello stato di degrado e tutte le ulteriori informazioni desumibili dal modello geometrico, nonché la possibilità di realizzare simulazioni su potenziali futuri interventi di recupero. Il Centro Dipartimentale D.I.A.P.Re.M. ha realizzato, nell'ordine specificato, le seguenti procedure di geomatica computazionale:

- una scansione di tutto il monumento dai vari punti di osservazione compreso i punti accessibili dall'alto;
- un'ottimizzazione tramite rilievo topografico realizzato con stazione totale integrata Reflectorless Leica TCR1101 XR[®];
- una registrazione di tutte le scansioni con georeferenziazione. La seguente tabella illustra il numero di stazioni in rapporto al quantità di punti acquisiti durante il rilievo.

Quest'ultima operazione, effettuata durante l'acquisizione, ha portato le varie *range map* in uno stesso sistema di riferimento, requisito essenziale per il trattamento del *dataset*. Tuttavia, per alcune riprese, si è riscontrato un errore di allineamento di diversi centimetri, probabilmente dovuto a movimenti dello scanner avvenuti dopo il rilievo dei target. Tali difetti di allineamento hanno causato alcune iniziali vistose deformazioni della superficie ricostruita per integrazione delle singole riprese, che si è provveduto ad eliminare nell'ottica del raggiungimento di una corretta ricostruzione del modello. Per correggere questi errori si è dovuto lavorare in modo manuale partendo a ritroso dal modello ricostruito ed individuando le riprese non perfettamente allineate. Tali *range map* sono state quindi riportate nella corretta posizione tramite il software di allineamento standard utilizzato da ISTI-CNR, basato sulla selezione manuale di coppie di punti corrispondenti nelle due riprese che si intendono allineare e sul calcolo di una roto-traslazione ottimale.

Il risultato finale della fase di allineamento consiste quindi in un insieme di scansioni che sono sì allineate tra di loro, ma ancora registrate come entità separate. Le successive fasi di elaborazione sono state effettuate utilizzando i tool software sviluppati dal Laboratorio Visual Computing di ISTI-CNR, ossia nell'ordine:

- ricostruzione di una unica superficie dall'insieme di punti campionati (fusione);
- conversione del modello 3D in una rappresentazione multirisoluzione;
- collegamento dell'informazione di colore.

La produzione di un modello composto da una singola superficie permette di passare da una descrizione definita per punti (con un alto grado di ridondanza, visto che la medesima zona della superficie è in genere campionata da più *range map*), ad una descrizione definita da una singola superficie triangolata. Infatti, le superfici triangolate supportano con maggiore semplicità ed efficienza operazioni di visualizzazione, estrazione di sezioni e misurazioni. Nella fase di fusione si

ottiene quindi un unico modello 3D, ricostruito a partire dalle *range map* o direttamente dai *campioni* (nuvole di punti).

La prima fusione effettuata è servita principalmente come banco di prova; era infatti necessario avere informazioni sulle zone di scarsa copertura, sui problemi di allineamento e, in generale, sul livello di qualità da attendere come risultato finale. Il processo, effettuato alla risoluzione di 1 cm, ha richiesto più di una settimana (10 giorni) di tempo macchina e ha prodotto un modello di circa 390 milioni di triangoli. Detto modello ha evidenziato l'altissimo livello di dettaglio presente nel *dataset*.

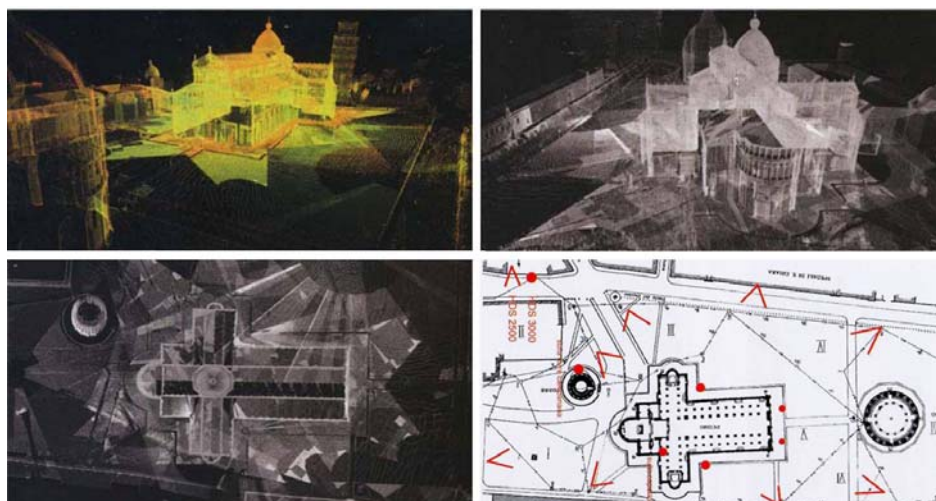


Figura 1: Una vista planimetrica della Piazza dei Miracoli (Pisa), generata dai dati del rilievo tridimensionale con al centro la cattedrale.

Successivamente alla prima ricostruzione, sono state effettuate le necessarie azioni di filtraggio ed elaborazione dei dati. La sequenza di procedure realizzate, ha ricalcato l'usuale standard di *post-processing*, strutturandosi come segue:

- individuazione e correzione i problemi di disallineamento;
- eliminazione di alcune aree delle *range map* contenenti rumore troppo elevato, ove però queste risultassero ridondanti rispetto alle altre *range map* coprenti la medesima porzione di superficie;
- eliminazione manuale di elementi estranei all'edificio, quali sagome umane o di animali, cavi di tensione o segnaletica stradale;
- correzione dei problemi di perdita di geometria dovuti a errori di conversione delle *range map* dal formato del produttore hardware al formato usato nel *post processing*.

3. L'algoritmo di ricostruzione da punti e la gestione multirisoluzione dei dati

L'implementazione di aspetti innovativi del presente lavoro di ricerca riguarda la fase di ricostruzione del dato utilizzata, a lungo sviluppata da ISTI-CNR. La soluzione usata, permette di ricostruire la superficie partendo dall'insieme dei punti campione, piuttosto che dall'insieme di *range map*; a tale scopo è necessario l'impiego di tecniche di interpolazione tra campioni che si basano sull'approccio *Moving Least Squares* (MLS).

I metodi più comunemente utilizzati per la generazione dei modelli sono detti "volumetrici" in quanto a partire dalle singole *range map* è possibile ricostruire uno spazio discreto volumetrico (ossia un campo discreto di distanze dall'ideale superficie campionata); a risultato di ciò vi è la superficie che in ogni punto meglio rappresenta le diverse superfici rappresentate dalle singole riprese.

La soluzione proposta, anziché lavorare sulle *range map*, considera come fonte di informazione direttamente i singoli campioni rilevati dallo scanner, andando a calcolare la superficie finale localmente sfruttando le informazioni dei punti campionati adeguatamente pesate (in base a densità,

angolo di ripresa e qualità di rilevamento). Tale approccio permette di interpolare in maniera più fedele ed accurata i campioni acquisiti anche in presenza di quantità sensibili di rumore e di forti disomogeneità di campionamento.

Nella fattispecie, si noti come sia stato possibile ricostruire una superficie continua anche quando, durante la fase di acquisizione alcune parti fossero state acquisite con minor accuratezza e densità o quando, a causa di vari problemi, le singole riprese non fossero ben allineate. Un ulteriore vantaggio della nuova soluzione è la maggior velocità (in quanto il calcolo è più locale) rispetto ai precedenti metodi volumetrici. L'utilizzo di tale nuovo *tool* ha quindi incrementato sensibilmente il livello di dettaglio ottenuto (a parità di risoluzione di campionamento) e diminuito i tempi di lavoro. A titolo di esempio, si consideri come la fusione completa del Duomo alla risoluzione di 0,7 cm abbia richiesto, con questa nuova soluzione software, solo 5 giorni di tempo macchina, ossia circa la metà del tempo di calcolo richiesto dal precedente metodo. Il modello 3D così prodotto è composto da più di 400 milioni di triangoli.

Un simile modello digitale risulta tuttavia difficilmente fruibile. La mesh di triangoli ottenuta è stata quindi ulteriormente processata, per ridurre la complessità e trasformarla così in un modello multirisoluzione che ne rende possibile la visualizzazione interattiva su macchine di fascia bassa (PC con scheda grafica 3D).

Lo scopo dell'operazione di semplificazione della geometria è quello di ridurre il numero di vertici e triangoli di cui è composto il modello, cercando di mantenere inalterate le caratteristiche topologiche dello stesso e di garantire una sufficiente accuratezza geometrica. Tuttavia, ove un modello per superfici venga semplificato, ciò porta da un lato ad una riduzione di complessità dello stesso, ma al contempo alla perdita di parte della ricchezza descrittiva (come avviene per le immagini compresse in *jpeg*). La riduzione di informazione comporta necessariamente l'introduzione di errore geometrico, di maggiore entità via via che il fattore di semplificazione aumenta.

Un discorso invece profondamente diverso si ottiene quando la semplificazione è accoppiata all'adozione di uno schema di rappresentazione multirisoluzione: in questo caso, tutto il processo di semplificazione può essere codificato in una struttura dati che rappresenta diversi livelli di risoluzione toccati durante il processo. Il sistema di visualizzazione può essere quindi implementato in modo da visualizzare tale modello multirisoluzione in maniera interattiva, producendo per ogni particolare vista l'insieme di triangoli che meglio rappresenta l'oggetto da quella specifica vista e che soddisfa al tempo stesso i vincoli di efficienza temporale specificati.

La sequenza riportata in Figura 2 mostra come il modello visto da una differenti posizioni sia rappresentato non come singola entità, bensì come un insieme di *patch* (porzioni di superficie triangolata), scelte dal sistema dinamicamente per ogni specifica vista corrente, al fine di fornire nella zona più vicina all'osservatore un alto dettaglio che va a decrescere man mano ci si allontana. Al variare del punto di vista infatti, il sistema è in grado di decidere quali zone debbano essere raffinate e quali ridotte caricando o scaricando dalla memoria secondaria le *patch* relative. Per questo scopo è stato utilizzato il sistema *Virtual Inspector* che implementa una serie di funzioni per la visualizzazione interattiva di modelli 3D rappresentati in modo multirisoluzione. Inoltre, punti di forza ulteriori di *Virtual Inspector* risiedono, oltre che nell'interfaccia user friendly, pensato per permettere la fruizione di modelli 3D complessi da parte di utenti poco esperti; nel supporto della progettazione di chioschi multimediali, in quanto il sistema può operare in modo integrato ad un browser web e fornisce la possibilità di definire punti interattivi (*hot spot*) sulla geometria 3D del modello rappresentato.

4. Collegamento dell'informazione colore

Per quanto infine concerne il collegamento dell'informazione colore, desunta da un campionamento fotografico ad alta risoluzione, è stato utilizzato un nuovo metodo di *mapping* per vertice. Anziché ricostruire una tessitura (*texture map*) evinta a partire dal dettaglio fotografico, l'approccio usato calcola il colore di ogni vertice del modello multirisoluzione. Il colore per vertice viene così

ricostruito come media pesata dei vari campioni presenti nelle immagini inquadranti la zona rappresentata dal vertice, tenendo in considerazione parametri geometrici e colorimetrici nel generare gli opportuni pesi per la funzione di blending.

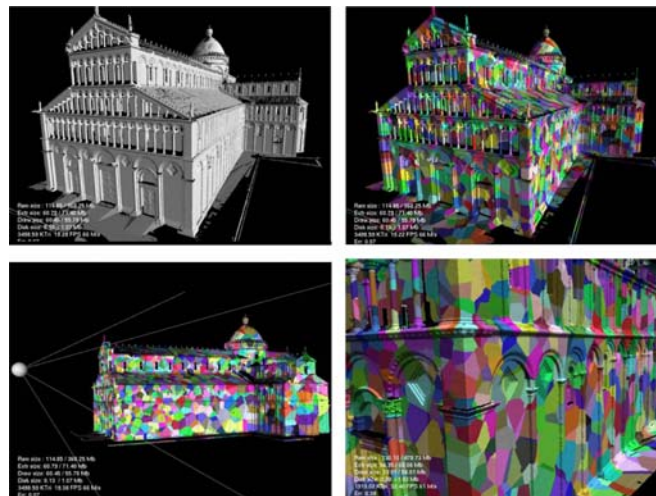


Figura 2: Ricostruzione del dato attraverso l'algoritmo di MLS.

In una prima fase di elaborazione, le immagini fotografiche sono state allineate al modello digitale 3D, al fine di ricostruire i parametri intrinseci ed estrinseci della camera (posizione di ripresa, ottica usata, deformazione dell'obiettivo, etc).

5. Conclusioni

Il lavoro ha ripercorso in modo sintetico le varie fasi richieste per il rilievo tridimensionale a tempo di volo ed alla formalizzazione delle metodologie per l'elaborazione dei dati rilevati e per la loro integrazione con le immagini (RGB), al fine di determinare una procedura operativa ripetibile che possa essere applicata in casi analoghi a quello oggetto del progetto in esame.

Bibliografia

- Cignoni, P., Montani, C., Rocchini, C., Scopigno, R., 2003. "External Memory Management and Simplification of Huge Meshes", *IEEE Trans. on Vis. and Computer Graphics*, vol. 9(4), Oct-Dic 2003, pp. 525-537.
- Cignoni, P., Ganovelli, F., Gobbetti, E., Marton, F., Ponchio, F., Scopigno, R., 2005. "Batched Multi Triangulation", *IEEE Visualization 2005 Conf.*, 2005., IEEE Press.
- Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M., Scopigno, R., 2006, "Masked Photo Blending: mapping many hi-res images on dense 3D models", submitted paper.
- Coren, F., Sterzai, P., 2005. Radiometric correction in laser scanning. In: *International Journal of Remote Sensing*, (in stampa).
- Prearo G., Balzani M., Coren F., Visintini D, Sterzai P., Zaltron N., 2005. Un modello geometrico di calibrazione terrestre, Relazione al 50° Convegno Nazionale della SIFET, Mondello - Palermo, 2005, Bollettino della SIFET, in stampa.

Ringraziamenti

Il progetto di rilievo della Cattedrale di Pisa (immersa nel contesto della Piazza dei Miracoli) nasce da una strategica collaborazione tra l'Opera della Primaziale Pisana, la Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio per il Patrimonio Storico, Artistico e Demoetnoantropologico per le Province di Pisa, Livorno, Lucca e Massa Carrara, il Centro Dipartimentale D.I.A.P.Re.M. dell'Università di Ferrara, il Visual Computing Lab dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione del CNR di Pisa, il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura dell'Università di Firenze e la Leica Geosystem SpA® di Milano.