

SALONE DEL RESTAURO 2006 – Catalogo

Ferrara, 30 Marzo – 2 Aprile 2006

La Cattedrale di Pisa nella Piazza dei Miracoli

Un rilievo 3D per l'integrazione con i sistemi informativi di documentazione storica e di restauro

Marcello Balzani, Federico Uccelli, Roberto Scopigno, Claudio Montani



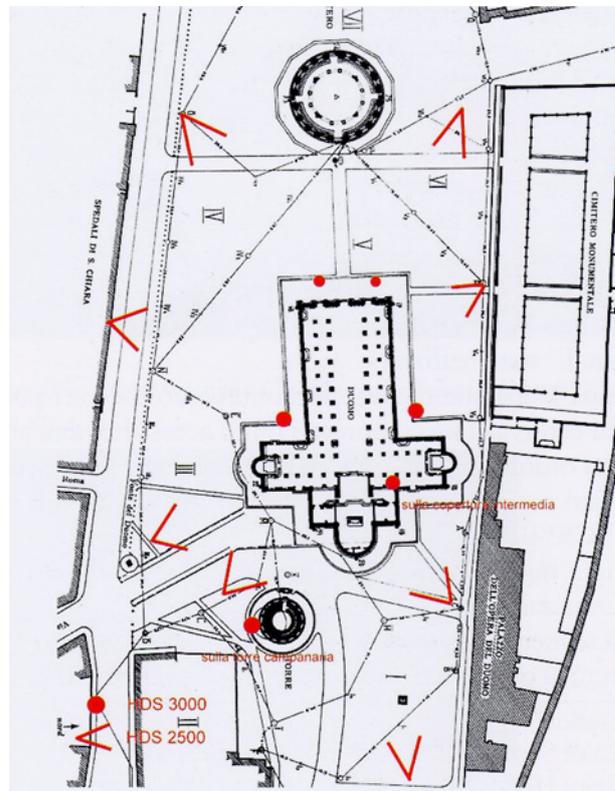
Il progetto di rilievo della Cattedrale di Pisa (immersa nel contesto della Piazza dei Miracoli) nasce da una strategica collaborazione tra l'Opera della Primaziale Pisana, la Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio per il Patrimonio Storico, Artistico e Demoetnoantropologico per le Province di Pisa, Livorno, Lucca e Massa Carrara, il Centro Dipartimentale DIAPReM 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. Questi enti e strutture di ricerca hanno stipulato un accordo per la realizzazione di un progetto innovativo che prevede

l'uso di strumentazione Laser Scanner per la costruzione di modelli tridimensionali di elementi architettonici. La collaborazione fa perno su precedenti sperimentazioni eseguite in piazza dei Miracoli tra il 2002 e il 2003 nel Battistero (completo rilievo 3D esterno ed interno eseguito dal Dipartimento di Progettazione Architettonica di Firenze e dal DIAPReM di Ferrara per l'Opera della Primaziale Pisana) e nella zona absidale (rilievo 3D effettuato dal CNR/ISTI di Pisa e dalla Soprintendenza per i Beni Architettonici di Pisa). Ciascuna struttura di ricerca ed ente ha offerto il proprio contributo in termini di personale, attrezzature, supporto logistico e tecnico allo svolgimento del progetto, che è iniziato nel 2005 dal rilievo del volume esterno delle architetture di piazza dei Miracoli per completare entro il 2006 un innovativo data base integrato. Infatti l'attività di collaborazione ha principalmente lo scopo di sperimentare la tecnologia di scansione laser a tempo di volo per realizzare un modello tridimensionale dell'esterno del Duomo di Pisa e (in futuro) di parte del prospetto interno sviluppando il collegamento con i Sistemi Informativi relativi alla documentazione storica e di restauro già esistenti o in corso di definizione presso l'Opera della Primaziale Pisana e/o presso la Soprintendenza.

Il rilievo realizzato del Duomo e della Piazza costituisce dunque la base essenziale di una banca dati di tipo dinamico sulla quale inserire le informazioni di tipo storico-culturale, diagnostico e in generale sullo stato attuale e passato del bene. Sono inoltre state eseguite riprese digitali ad alta risoluzione delle zone rilevate. Si sta sperimentando il collegamento di tali immagini

alla geometria 3D per permettere una visualizzazione integrata. Il risultato sarà quindi una rappresentazione tridimensionale misurabile che conterrà sia l'informazione quantitativa (geometrica) che quella qualitativa (colore reale degli elementi e dettaglio dell'immagine digitale, nelle zone coperte dal rilievo fotografico). È convinzione di tutti i partecipanti al progetto che il rilievo tridimensionale costituisca elemento essenziale per la localizzazione e la mappatura di un bene artistico nonché di ogni elemento e particolare di cui esso è costituito e che la conoscenza geometrica del bene sia il fondamento per gli interventi finalizzati alla diagnosi, al monitoraggio e alla sua tutela nonché all'eventuale costruzione di una banca dati specifica. L'evoluzione della tecnologia per il rilievo automatico della geometria di manufatti facilita inoltre la costruzione di banche dati tridimensionali che costituiscono un archivio fondamentale della memoria geometrica del bene necessaria a fini di tutela e conservazione e di eventuali processi di restauro o riproduzione. La costruzione di modelli digitali tridimensionali permette quindi una facile integrazione con dati di tipo strutturale ed eventualmente colorimetrico per una completa rappresentazione del bene in oggetto.

L'acquisizione di modelli digitali della superficie con precisioni millimetriche (caratterizzazioni cromatiche e materiche, morfologia e alterazioni macroscopiche di degrado avanzato) consente oggi l'individuazione delle corrispondenze tra caratteri strutturali e riconoscibilità degli stati di alterazione e di degrado dal quadro ricognitivo esterno. Tali modelli avanzati sono in genere ottenuti grazie alla sovrapposizione di informazione colorimetrica proveniente da immagini digitali ad alta risoluzione alla superficie 3D che rappresenta l'oggetto (normalmente, una superficie triangolata ricostruita dalle nuvole di punti prodotte dallo strumento di scansione). In tal modo si ottiene 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 virtual reality, utili per la fruizione di massa in ambito museale, o per la gestione dell'informazione di



Organizzazione del rilievo laser 3D con il Leica HDS 2500 e il Leica HDS 3000 e la stazione totale integrata Leica TCRI101 XR.

restauro.

Tali modelli digitali 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. L'Opera della Primaziale Pisana riconosce in questa sperimentazione un prodotto di grande interesse per i suoi fini istituzionali e in particolare per le attività di tutela e di restauro dei monumenti di sua proprietà nell'area della piazza del Duomo, in Pisa. E' interesse delle parti promuovere i risultati del progetto, nelle sue diverse fasi, con seminari e giornate di studio finalizzate alla divulgazione del metodo di rilievo, 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

potrà essere applicata in casi analoghi a quello oggetto del progetto in esame.

Organizzazione del rilievo

Il rilievo del paramento esterno del Duomo è stato eseguito in pochi giorni dal DIAPReM di Ferrara con il supporto del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di Firenze. Sono state applicate procedure integrate topografiche e laser scanner 3D (Leica HDS 2500 e Leica HDS 3000). L'acquisizione è avvenuta definendo una densità di maglia di circa 1 cm con infittimenti su particolari decorativi o strutturali della facciata e dell'abside con maglia di dettaglio di circa 6 mm. E' stata realizzata:

- 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.

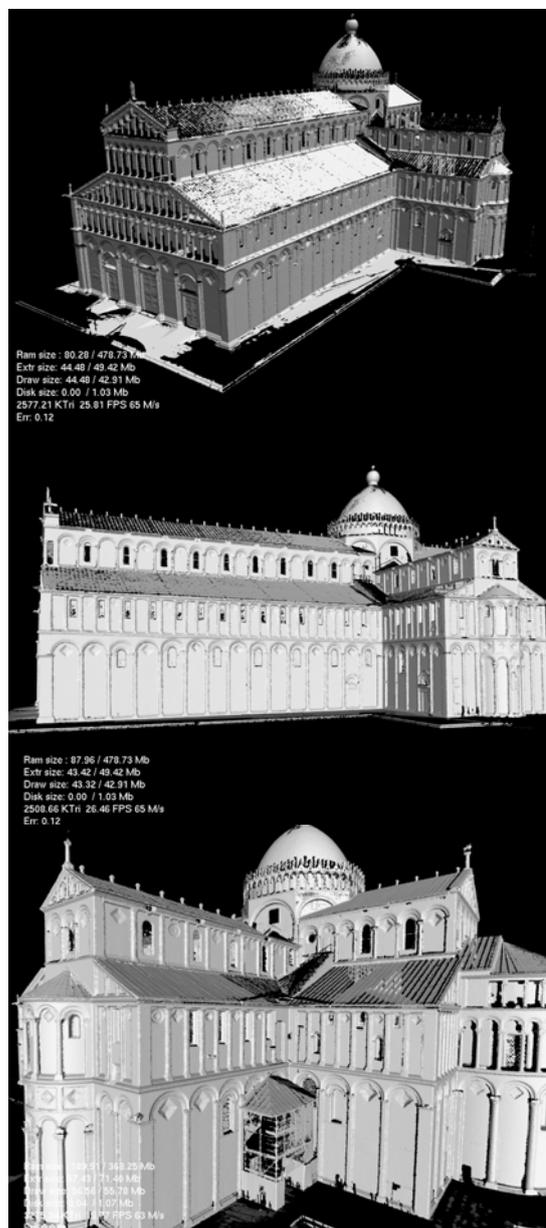
La seguente tabella illustra il numero di stazioni in rapporto al quantità di punti acquisiti durante il rilievo:

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

Processing dei dati

I dati acquisiti sono stati elaborati dal Laboratorio Visual Computing di ISTI-CNR (Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione del CNR di Pisa); attraverso software sviluppati interamente

dall'Istituto sono state registrate, fuse e semplificate tutte le scansioni, al fine di generare un'unica superficie triangolata.



Il modello completo visualizzato nel sistema multirisoluzione.

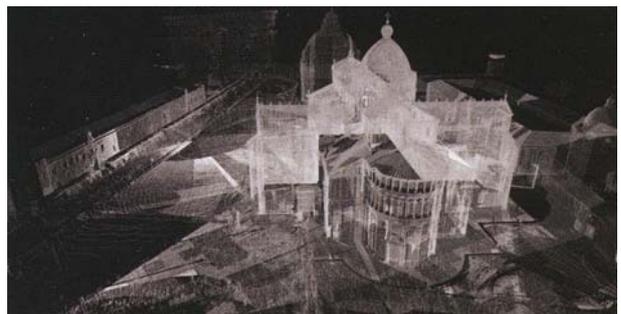
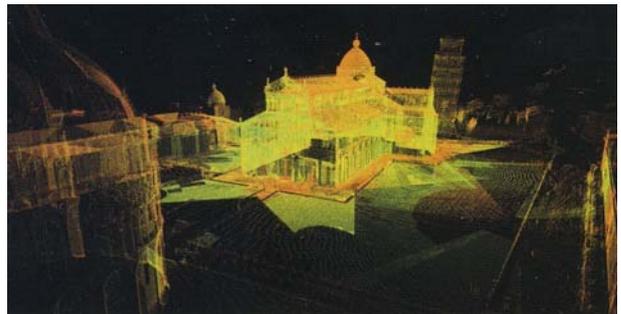
La fase di allineamento è stata effettuata per la maggior parte grazie all'inserimento delle riprese in un unico sistema di riferimento geo-referenziato, come descritto precedentemente. Questa

operazione, effettuata durante l'acquisizione, ha portato le varie range map in uno stesso sistema di riferimento, requisito essenziale per il trattamento del dataset.

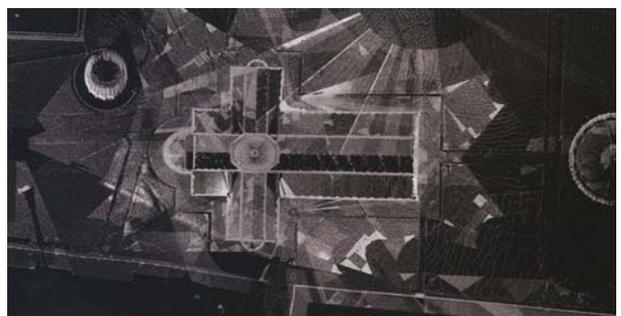
Tuttavia, per alcune riprese, si è riscontrato un errore di allineamento di diversi centimetri, probabilmente dovuto a movimenti dello scanner avvenuti dopo il rilievo dei target. Questi difetti di allineamento causano vistose deformazioni della superficie e devono essere eliminati per poter ottenere una corretta ricostruzione. 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.

Il risultato finale della fase di allineamento consiste in un insieme di scansioni che sono sì allineate tra di loro, ma ancora entità separate. Il passo successivo è la produzione di un modello composto da una singola superficie che permetta 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 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, e si eliminano i campioni ridondanti.

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 1cm, ha richiesto più di una settimana (10 giorni) di tempo macchina e ha prodotto un modello di 390 milioni di triangoli. Questo modello ha evidenziato l'altissimo livello di dettaglio presente nel dataset, ma anche i suoi problemi (come i disallineamenti sopra citati).



Le due principali viste della Piazza dei Miracoli nel modello 3D generato dalla registrazione in Cyclone delle nuvole di punti.



Una vista planimetrica della Piazza dei Miracoli generata dai dati del rilievo tridimensionale con al centro la cattedrale. Sono visibili, dall'infittimento dei dati e dai punti di stazione, le fasi di acquisizione secondo il programma di rilievo.

Dopo la prima ricostruzione sono state necessariamente effettuate azioni di filtraggio e/o elaborazione dei dati:

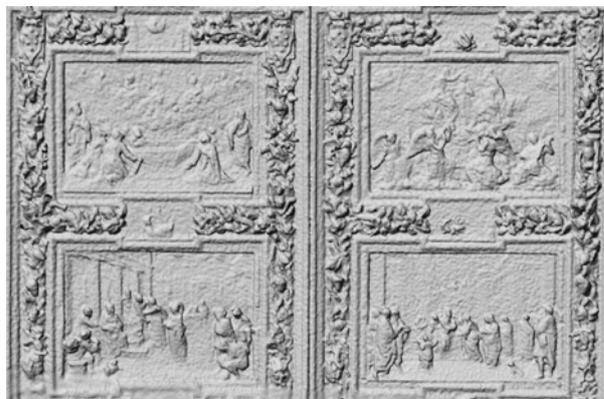
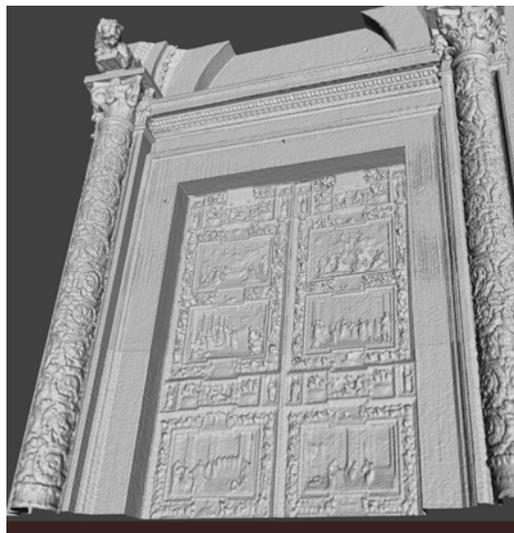
- individuati e corretti i problemi di disallineamento;
- eliminate alcune aree delle range map contenenti rumore troppo elevato, solo se ridondanti rispetto alle altre range map che coprivano la medesima porzione di superficie;

- eliminati manualmente elementi estranei all'edificio, come persone, piccioni, cavi elettrici e cartelli;
- corretti problemi di perdita di geometria dovuti a errori di conversione delle range map dal formato del produttore hardware al formato usato nel processing.

Per la successiva fase di ricostruzione abbiamo utilizzato un nuovo metodo di ricostruzione da range data recentemente sviluppato da ISTI-CNR. La soluzione usata permette di ricostruire la superficie partendo dall'insieme dei punti campione, piuttosto che dall'insieme di range map; si impiegano 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 le singole riprese vengono inserite in uno spazio discreto volumetrico e quella che viene calcolata come risultato è la superficie che in ogni punto meglio rappresenta le diverse superfici rappresentate dalle singole riprese. La nostra nuova soluzione, anziché lavorare sulle range map come superficie, considera come fonte di informazione 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). Questo 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. E' stato possibile ricostruire una superficie continua anche quando durante l'acquisizione alcune parti erano state acquisite con minor accuratezza e densità o quando, a causa di vari problemi, le range map risultanti non erano ben allineate. Un ulteriore vantaggio della nuova soluzione è la maggior velocità (il calcolo è più locale) rispetto ai precedenti metodi volumetrico.

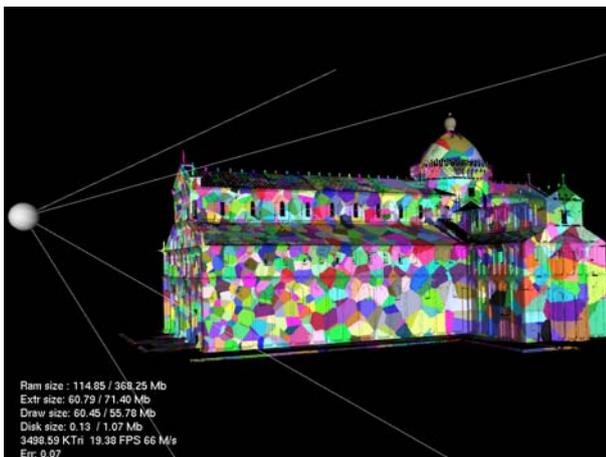
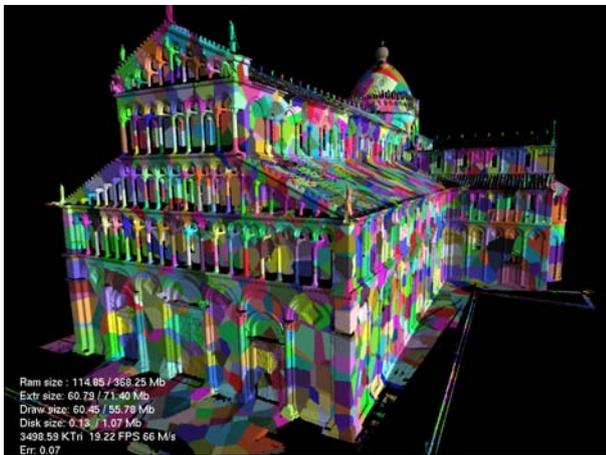
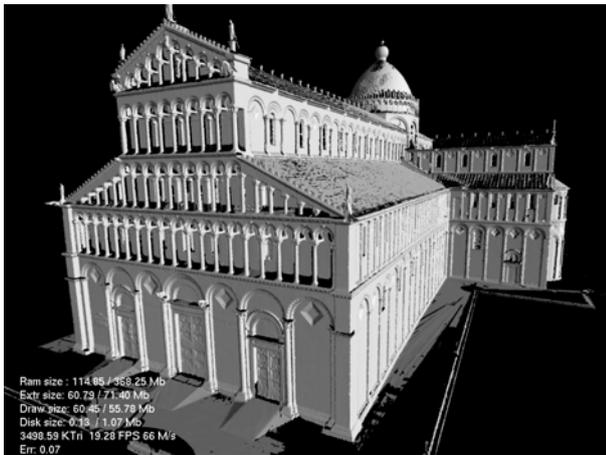
L'utilizzo del nuovo tool ha quindi incrementato sensibilmente il livello di dettaglio ottenuto (a parità di risoluzione di campionamento) e diminuito i tempi di lavoro. Una fusione completa del duomo alla risoluzione di 1cm ha richiesto con questa nuova soluzione software solo 5 giorni di tempo macchina, ossia circa la metà del tempo di

calcolo richiesto dal precedente metodo. Le dimensioni del modello 3D prodotto sono risultate anche in questo caso molto alte, in quanto il modello grezzo e' composto da più di 400 milioni di triangoli.



Particolari del modello a massima risoluzione.

Dalle figure relative alla porta principale è possibile apprezzare l'alto livello di dettaglio presente nei particolari, i singoli conci dell'edificio risultano spesso visibili e il modellato (fregi e decorazioni) risulta perfettamente leggibile. La mesh di triangoli ottenuta è stata quindi processata per ridurne la complessità e trasformarla in un modello multirisoluzione che ne rende possibile la visualizzazione interattiva su macchine di fascia bassa (PC con scheda grafica 3D).



Rappresentazione multirisoluzione. Fissato un punto di vista (sinistra) il sistema manipola un insieme di patch (centro) la cui risoluzione è ottimizzata per quel punto di vista (destra). Alla modifica del punto di vista il sistema adegua automaticamente le patch per mantenere l'interattività con il modello.

Il risultato della fusione produce un unico modello digitale 3D, spesso ad un livello di definizione tale che la quantità di informazioni da esso contenute risulta non facile da manipolare e visualizzare. Se usiamo nella fase di fusione un passo analogo a quello usato nella scansione (ad es. 1 cm sull'intera superficie dell'edificio campionato), otteniamo facilmente rappresentazioni 3D costituite da svariate centinaia di milioni di facce triangolari. Lo scopo del passo di semplificazione consiste quindi nel 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. La riduzione di informazione comporta necessariamente l'introduzione di errore geometrico, ed è per questo che risulta necessario eseguire una semplificazione controllata.

Il tool realizzato da ISTI-CNR si basa sul collasso di edge e sull'impiego di una struttura dati per la gestione su memoria secondaria della mesh che permette di eseguire la semplificazione e conversione in modello multirisoluzione di modelli molto grandi su architetture di calcolo di classe PC e con una efficienza notevole, mantenendo al tempo stesso un ottimo livello di accuratezza.

La semplificazione può essere eseguita mantenendo via via informazione sui vari stadi intermedi, e organizzata al fine di produrre non un singolo modello semplificato bensì una struttura dati che rappresenti il modello a diversi livelli di risoluzione. Un particolare sistema di visualizzazione, sviluppato da ISTI-CNR, è poi in grado di visualizzare questi dataset multirisoluzione in maniera interattiva, aggiornando a tempo di esecuzione l'insieme di triangoli da visualizzare. La sequenza in figg. *Multi1 Multi2 Multi3* mostra come il modello visto da una ogni posizione (fig. *Multi1*) sia rappresentato non come singola entità ma come un insieme di patch (fig. *Multi2*); queste patches sono 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, come visibile in Figura *Multi3*. Se il punto di vista cambia, il sistema deciderà quali zone dovranno essere raffinate e quali ridotte e di conseguenza caricherà

e scaricherà dalla memoria secondaria le patch adeguate. La rappresentazione multirisoluzione permette quindi di manipolare e visualizzare in modo interattivo la rappresentazione 3D. Abbiamo adottato a tal fine il sistema *Virtual Inspector*, sviluppato da ISTI-CNR al fine di permettere la fruizione, da parte di utenti poco esperti (o del tutto inesperti), di modelli 3D complessi e di rendere semplice la progettazione di chioschi multimediali. *Virtual Inspector* permette di visualizzare un'enorme quantità di dati su computer a basso costo. Questo significa poter fornire all'utente finale un modello 3D completo e risoluto, rendendo possibile osservare anche i più fini dettagli che altrimenti andrebbero persi. Inoltre, permette di introdurre link sulla superficie del modello 3D che consentono di attivare pagine descrittive specificate in HTML; l'inter-operatività con i comuni browser web permette quindi di sviluppare soluzioni multimediali ricche in cui la visualizzazione 3D e l'analisi della forma del manufatto può essere messa in relazione con il corredo descrittivo standard (immagini, testi, etc.).



Close-up della suddivisione in patches.

Crediti

OPA - Opera della Primaziale Pisana: Francesco Pacini (Operaio Presidente), Giuseppe Bentivoglio (responsabile scientifico), Gianluca De Felice.

SBAPPSAD - 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: Guglielmo Maria Malchiodi (Soprintendente), Clara Baracchini (responsabile scientifico), Marta Ciafaloni.

CNR-ISTI - Visual Computing Lab, Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo", Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa: Roberto Scopigno, Claudio Montani (responsabili scientifici e coordinatori), Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Paolo Pingi, Paolo Cignoni, Federico Ponchio, Valentino Fiorin (software di gestione).

DIAPReM - Centro dipartimentale per lo sviluppo di procedure automatiche integrate per il restauro di monumenti, Dipartimento di Architettura - Università degli Studi di Ferrara: Marcello Balzani (responsabile scientifico e coordinamento), Federico Uccelli (rilievo 3D), Alessandro Grieco, Guido Galvani, Cecilia Traina, Stefano Settimo (rilievo topografico e collaboratori al rilievo 3D), Federico Uccelli (registrazioni e elaborazioni data base).

Dipartimento di Progettazione dell'Architettura - Università degli Studi di Firenze: Marco Bini (responsabile scientifico), Stefano Bertocci (coordinamento), Giorgio Verdiani, Francesco Tioli, Mauro Giannini.

Leica Geosystem SpA, Milano: Marco Nardini, Gabriele Del Fra.