

INDIVIDUAZIONE DEGLI SPIGOLI SU UN MODELLO ARCHITETTONICO REALIZZATO DA SCANSIONI 3D

Valentina BONORA, Grazia TUCCI

DINSE - Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura 2, viale Mattioli 39, 10125 Torino
valentina.bonora;grazia.tucci@polito.it

Riassunto

La risoluzione di acquisizione e il conseguente livello di dettaglio di modelli architettonici ottenuti da scansioni tridimensionali si devono confrontare con le esigenze di gestibilità dei dati raccolti e dei modelli prodotti. La risoluzione del modello può risultare adeguata nelle zone prossime agli spigoli, ma è generalmente esuberante in corrispondenza delle superfici uniformi. A decimazioni anche non significative ai fini della gestibilità, corrisponde spesso un'inaccettabile perdita di capacità descrittiva. Il presente lavoro intende illustrare i risultati ottenuti applicando sistemi di analisi della curvatura e riconoscimento automatico degli spigoli. Introducendo, infatti, su un modello triangolato entità rappresentative delle principali discontinuità, è possibile applicare elevate percentuali di decimazione, conservando una soddisfacente interpretabilità del modello stesso, come evidenziato dal caso studio presentato. Valutazioni degli scarti prodotti rispetto ai dati originari hanno consentito di verificare le varie fasi operative e di quantificare l'attendibilità del modello finale, anche dal punto di vista metrico.

Abstract

Scanning resolution of architectural models (and, consequently, level of detail) should be compared to data management and final models need. In fact, models built by 3D scanning survey usually require large size files. Moreover, when 3D model's edges, creases and corners are well described, the corresponding level of detail in uniform surfaces is often excessive.

Feature lines are fundamental surface characteristics; unstructured mesh simplification systems may imply unacceptable geometrical approximation.

Surface segmentation based on edges detection allow to perform efficient mesh simplification and to preserve shape recognition.

We show results obtained on a case study: although high percentage reduction in faces number, the simplified model is very similar to the original one, thanks to its features preserved, and it keeps data size small too.

Introduzione

La descrizione della geometria di modelli tridimensionali può avvenire tramite superfici matematicamente definite (NURBS), oppure tramite mesh poligonali, generalmente di forma triangolare. Focalizzando l'attenzione esclusivamente sui modelli numerici che riproducono oggetti esistenti (costruiti quindi a partire da dati dimensionali acquisiti sull'oggetto originale) si può individuare un legame tra il tipo di dato metrico disponibile (e quindi gli strumenti e le tecniche di rilievo adottate) e la struttura geometrica più appropriata per la ricostruzione delle superfici:

- acquisizione dell'andamento di sezioni caratteristiche e generatrici di riferimento, con sistemi fotogrammetrici, topografici classici o profilometri laser;

- acquisizione più o meno fitta e più o meno uniformemente distribuita su tutte le superfici dell'oggetto, con sistemi di scansione 3D.

Nel primo caso possono essere definite delle superfici per "trascinamento": rivoluzione di una curva bidimensionale attorno a un asse, estrusione di una curva lungo un percorso definito da una seconda curva, superfici rigate.

Nel secondo caso, algoritmi di triangolazione applicati alla nuvola di punti acquisiti consentono di ottenere, tramite procedure automatiche, mesh che approssimano, con piccole porzioni di piano, l'andamento delle superfici in esame.

La risoluzione di acquisizione e il conseguente livello di dettaglio di modelli architettonici ottenuti da scansioni tridimensionali si devono confrontare con le esigenze di gestibilità dei dati raccolti e dei modelli prodotti. I più recenti strumenti di scansione 3D sono in grado di rilevare, con elevata precisione e in tempi sempre più limitati, una mole crescente di dati. Parallelamente, le versioni più aggiornate dei software dedicati all'elaborazione di nuvole di punti e superfici triangolate consentono la visualizzazione e l'elaborazione di modelli complessi costituiti da una grande quantità di poligoni. L'introduzione di opportuni livelli di sintesi non deve comunque essere considerata come un'inevitabile conseguenza degli attuali (e peraltro temporanei) limiti tecnologici, quanto un'importante scelta da operare in funzione delle finalità del prodotto che si sta elaborando.

Quando la risoluzione di un modello realizzato a partire da dati laser scanning risulta adeguata nelle zone prossime agli spigoli, è generalmente esuberante in corrispondenza delle superfici uniformi. A decimazioni anche non significative ai fini della gestibilità, corrisponde spesso un'inaccettabile perdita di capacità descrittiva. Possibili risposte a questo problema, attualmente oggetto di studio e valutazione, possono essere individuate in:

- organizzazione delle acquisizioni secondo criteri multi-risoluzione e multi-sensore;
- integrazione tra modelli di punti descrittivi dell'andamento delle superfici, provenienti da scansioni laser, e modelli vettoriali delle linee di discontinuità ottenuti da restituzioni fotogrammetriche;
- sistemi di analisi della curvatura e riconoscimento automatico degli spigoli.

Il presente lavoro intende illustrare i risultati ottenuti applicando quest'ultimo sistema. L'obiettivo perseguito è la valutazione della possibilità di introdurre su un modello triangolato entità rappresentative degli spigoli, al fine di rendere possibili elevate percentuali di decimazione, conservando una soddisfacente interpretabilità del modello stesso.

Semplificazione dei modelli

Procedure di decimazione dei dati, applicabili sia alla nuvola di punti che alla superficie triangolata, sono finalizzate a compensare l'esuberanza causata dall'acriticità del sistema di rilievo adottato.

Bisogna inoltre considerare che spesso gli elaborati che si intende ottenere in seguito ad un rilievo condotto con sistemi di scansione non sono costituiti solo dal modello 3D alla massima risoluzione ottenibile con i dati acquisiti: tramite ulteriori elaborazioni si possono derivare modelli a risoluzione differente (e quindi diverso livello di dettaglio) o altri elaborati grafici.

La riduzione del numero di poligoni impiegati per descrivere una superficie comporta l'aumento della superficie dei poligoni stessi, che diventano quindi un'approssimazione dell'oggetto sempre più grossolana quanto più è spinta la decimazione applicata.

Il riconoscimento sul modello di superficie delle zone che rappresentano angoli, spigoli e più in generale, significative discontinuità della geometria, e di conseguenza delle porzioni di superfici uniformi, consente invece di decimare i dati in modo selettivo: la riduzione dei poligoni operata esclusivamente, o perlomeno in modo più spinto, in corrispondenza delle superfici omogenee permette infatti di preservare la leggibilità dei modelli di superficie caratterizzati da forme complesse. Il problema può quindi essere ricondotto a quello della segmentazione e classificazione dei dati in base alla curvatura della superficie.

La segmentazione di dati tridimensionali è abitualmente affrontata nell'elaborazione di acquisizioni da laser scanner aereo. I sistemi che consentono di distinguere i dati acquisiti sulla superficie del terreno da quelli relativi a manufatti, vegetazione, ecc. si basano generalmente sull'analisi delle differenze di altezza. Per quanto la conformazione di alcuni ambienti urbani sia molto articolata, infatti, analisi condotte alla scala territoriale/urbana consentono di assumere come riferimento il piano con giacitura orizzontale (ovvero la direzione della verticale). La classificazione dei dati determina quindi l'individuazione di porzioni di superficie omogenee, sia dal punto di vista geometrico che per quanto riguarda l'appartenenza ad una predefinita classe di oggetti.

Elementi architettonici o scultorei, analizzati a grande e grandissima scala, sono invece solitamente caratterizzati da complesse conformazioni tridimensionali, che non consentono di individuare giaciture preferenziali.

La semplificazione di modelli numerici di superfici è peraltro oggetto di studio anche di computer vision e computer graphic: la crescente diffusione di sistemi di fruizione interattiva di modelli 3D via Web richiede infatti di trasmettere quantità di informazioni limitate e quindi modelli 3D "leggeri". La visualizzazione di un modello 3D attraverso una pagina Web è un'operazione che potrebbe richiedere lunghi tempi di caricamento; inoltre, in molti casi, l'utente non necessita di un elevato livello di dettaglio. Un'interessante soluzione è inoltre offerta da sistemi che consentono la pressoché istantanea visualizzazione di un modello a bassa risoluzione, per poi integrarlo, in base a pacchetti di informazioni trasmessi successivamente, fino a raggiungere il livello di dettaglio desiderato.

All'interno della struttura indifferenziata costituita dalle maglie di una mesh, il riconoscimento delle principali discontinuità geometriche può essere operato analizzando la variazione della normale ad ogni faccia rispetto a quelle circostanti (con una finestra di ricerca le cui dimensioni possono essere modificate in funzione delle caratteristiche dell'oggetto). La conseguente segmentazione della superficie in porzioni omogenee permette di semplificarle in modo indipendente.

Caso studio

Il problema illustrato è stato affrontato nella modellazione della superficie interna del tempietto del Santo Sepolcro presso la Cappella Rucellai a Firenze.

L'oggetto analizzato è un sacello di piccole dimensioni, di pianta rettangolare, con pareti sostanzialmente piane e affrescate con scene della Deposizione, sulle quali si imposta una volta a botte ribassata priva di decorazioni plastiche. Lungo uno dei lati maggiori del sacello si trova un altare a testimonianza del sepolcro del Cristo.

Il software utilizzato per l'elaborazione del modello di superficie è Raindrop Geomagic Studio.

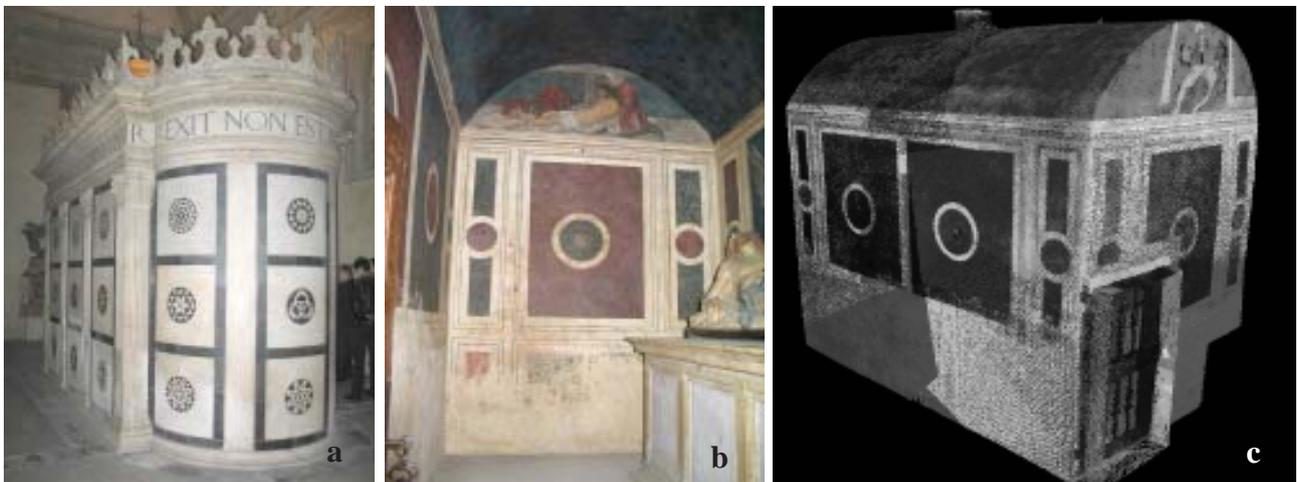


Figura 1 - Il Santo Sepolcro all'interno della Cappella Rucellai (Firenze): vista dell'esterno del sacello (a), vista dell'interno (b), nuvola di punti acquisita all'interno (c)

Prime elaborazioni del modello di superficie

In primo luogo, di ogni porzione sono stati chiusi i buchi di piccole dimensioni rimasti nella mesh, utilizzando generalmente patch piane.

Lo spazio estremamente ristretto all'interno del tempietto ha comportato che le acquisizioni effettuate con il laser scanner presentassero alcune zone d'ombra. In particolare non è stato possibile documentare in modo completo i due angoli in basso della parete di destra, entrambi nascosti dall'altare. Altre lacune sono state generate dalla battuta della porta sulla parete di ingresso. E' stato quindi necessario integrare le zone d'ombra negli spigoli della parete destra e dell'ingresso. A tal fine sono stati impiegati sistemi automatici di riconoscimento dei piani; a partire dall'analisi dei punti effettivamente rilevati si è estrapolata la giacitura delle superfici mancanti. La scarsa integrazione tra strumenti di gestione di geometrie di tipo mesh e NURBS ha complicato la ricostruzione degli spigoli ed evidenziato una delle maggiori debolezze del software impiegato.

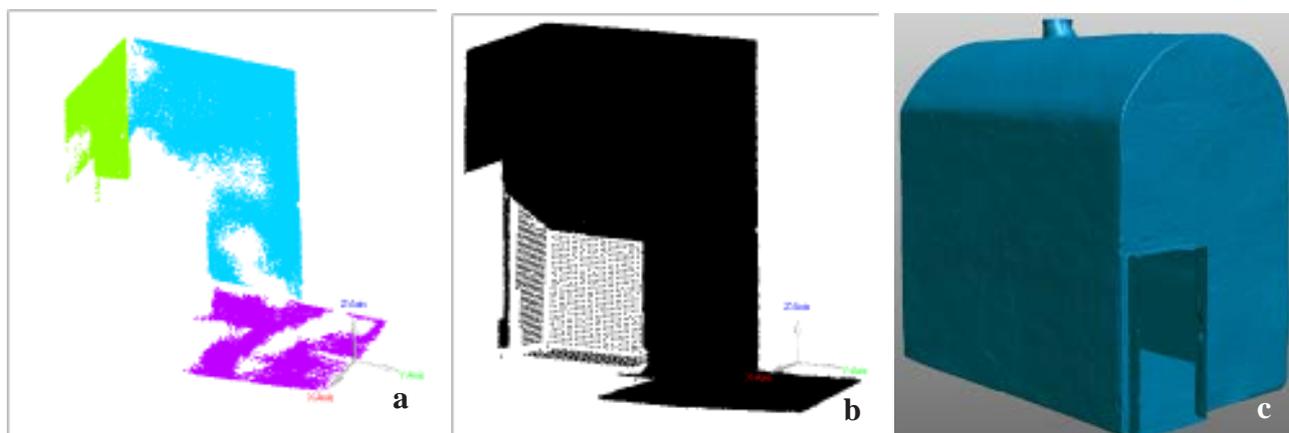


Figura 2 - Segmentazione automatica dei piani che concorrono a definire una porzione mancante (a); integrazione di punti per la ricostruzione della porzione in ombra durante le acquisizioni (b); modello di superficie ad alta risoluzione - 1.300.000 triangoli (c)

Costruzione degli spigoli

Al termine delle procedure di editing descritte si è ottenuto un modello completo, ma caratterizzato da un numero di poligoni esuberanti rispetto a quelli sufficienti per la descrizione di un oggetto così semplice. O meglio, la risoluzione della mesh risulta essere adeguata nelle zone prossime agli spigoli, mentre è eccessiva nelle ampie porzioni di superficie uniforme.

La soluzione a questo problema è stata individuata nella sostituzione della mesh costituita da triangoli tutti equivalenti, e quindi considerati tutti della stessa importanza al momento della loro riduzione, con una nella quale ad alcuni poligoni può essere attribuito un peso differente, che consente di non modificarne la geometria e la posizione. La procedura applicata integra sistemi automatici di riconoscimento della forma con ottimizzazioni manuali.

- Analisi della curvatura della superficie (elaborazione automatica,): con i colori più caldi sono evidenziate le zone caratterizzate da una maggiore variazione di curvatura, cioè quelle che è più probabile corrispondano agli spigoli dell'oggetto (Figura 3a).
- Individuazione degli spigoli (elaborazione automatica): tutte le principali discontinuità dell'oggetto analizzato sono state individuate, con qualche incertezza nel posizionamento quando più spigoli si trovano vicini tra loro (come nella zona della porta di ingresso). E' possibile generare delle curve la cui posizione e forma è vincolata dalle zone a maggiore curvatura, che funzionano come "attrattori" (Figura 3b).
- Editing delle curve individuate (elaborazione manuale): le linee individuate in automatico non convergono ovviamente sui vertici, dove la curvatura non è univoca. Con un'operazione manuale di editing sono quindi state raccordate le curve, il cui andamento è stato, in alcuni casi, ottimizzato

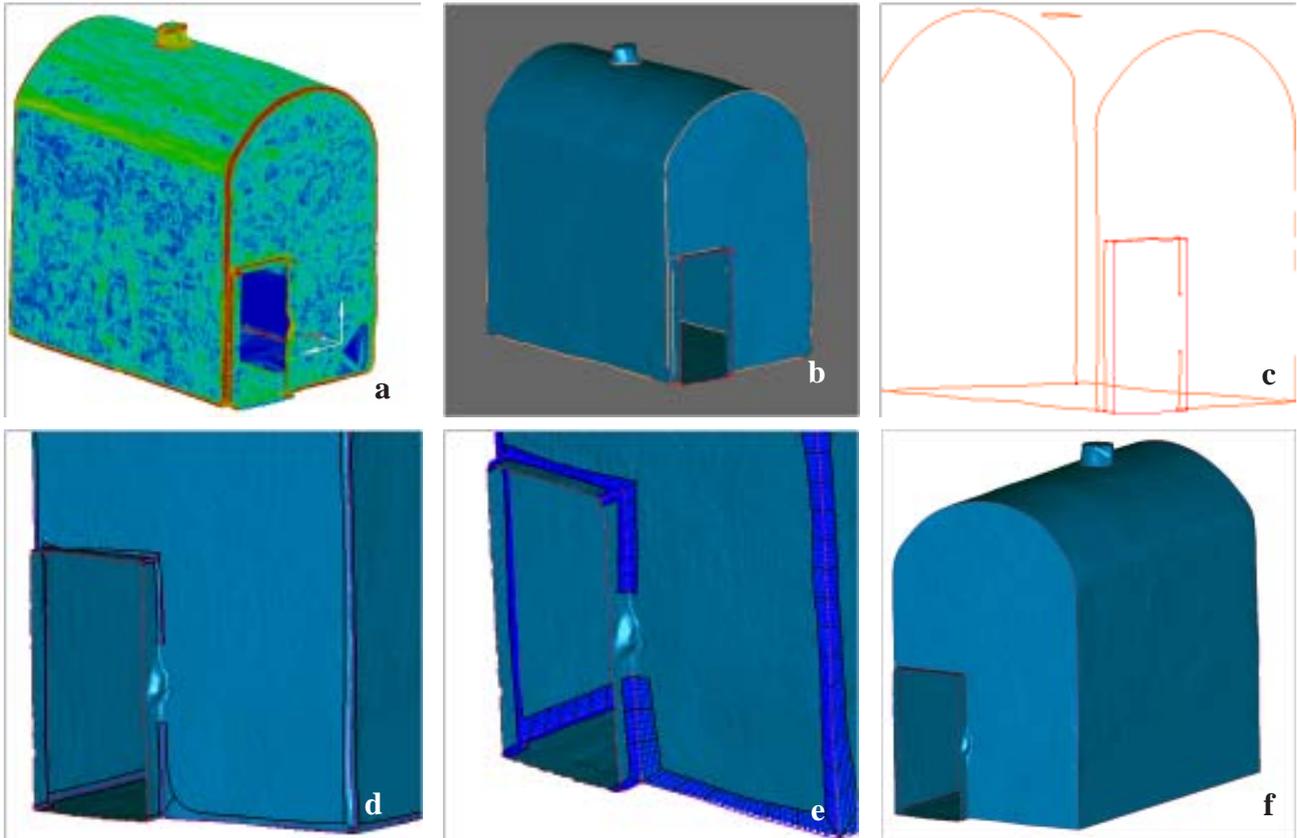


Figura 3 - Analisi della curvatura della superficie (a); individuazione degli spigoli (b); modello a filo di ferro ottenuto dall'editing delle curve precedentemente individuate (c); costruzione degli spigoli (d,e); modello finale superfici+spigoli (f)

modificando la posizione dei punti di controllo. Al termine di questa operazione si dispone, oltre che del modello di superficie, di uno a filo di ferro (Figura 3c).

- Ricostruzione degli spigoli (elaborazione automatica e manuale): il modello a filo di ferro viene proiettato sulla superficie e attorno ad esso viene definita una "area di ricerca". E' l'andamento della superficie all'interno di quest'area che definisce la giacitura delle superfici che, una volta ricalcolate, convergono definendo degli spigoli. Anche in questo step sono state necessarie alcune operazioni di editing manuale per definire in modo adeguato la porzione di superfici da considerare per operare il successivo ricalcolo, in particolare in prossimità della zona di ingresso. Quando le variazioni di giacitura dei piani sono molto ravvicinate, si complica, infatti, la definizione delle aree di ricerca relative ad ogni spigolo. Le superfici comprese nelle aree individuate sono quindi ricalcolate in modo da definire degli spigoli vivi (Figure 3d, e, f).

Riduzione dei poligoni

A questo punto il modello non è più costituito solo da maglie triangolari tutte equivalenti, ma anche da elementi lineari che ne costituiscono un vincolo geometrico. Le successive operazioni di riduzione dei poligoni vanno quindi ad interessare esclusivamente le porzioni di superfici comprese tra gli spigoli, ma non gli spigoli stessi. In questo modo, le percentuali di decimazione applicate possono essere molto più elevate, pur conservando una buona capacità descrittiva della forma originaria. Al modello della superficie interna del tempietto sono infatti state applicate decimazioni via via più elevate, fino ad ottenere un modello costituito da meno del 1% dei poligoni del modello di partenza. Riducendo ulteriormente il numero dei triangoli il modello mantiene una qualità soddisfacente in corrispondenza delle pareti e del pavimento, ma l'eccessivo aumento di dimensione delle facce triangolari deforma rendendo fastidiosamente spigoloso l'andamento della volta.



Figura 4 - Decimazioni successive operate sul modello: 330.000 triangoli (a), 100.000 triangoli (b), 10.000 triangoli (c). Nonostante le significative percentuali di decimazione (fino a considerare meno dell'1% dei dati originari) i modelli conservano un'ottima riconoscibilità

Collaudo dei modelli a risoluzione differente

Una prima valutazione in merito alla qualità dei modelli ottenuti è possibile tramite l'osservazione del modello stesso. Le caratteristiche richieste ad una rappresentazione tridimensionale sono in primo luogo legate alla sua efficacia descrittiva. Una volta verificato che le semplificazioni apportate al modello di forma ne conservano in modo soddisfacente la capacità descrittiva, è necessario procedere a verifiche dimensionali che consentano di quantificare le semplificazioni apportate.

L'oggetto della valutazione metrica è, in questo caso, non l'attendibilità del modello ottenuto, ma l'entità delle semplificazioni occorse con le procedure di elaborazione descritte. Si è quindi assunto come riferimento iniziale la nuvola di punti costituita dalle scansioni registrate della zona in esame. L'omogenea distribuzione dei punti del modello di riferimento, sostanzialmente equivalente ai modelli che si intende collaudare (con la sola esclusione delle porzioni in ombra ricostruite successivamente) ha suggerito di adottare sistemi di confronto che analizzano l'andamento complessivo delle superfici. I risultati sono visualizzati come mappe di colore sui modelli stessi.

Sono stati collaudati cinque modelli, realizzati con un numero di poligoni progressivamente inferiore (da 1.300.000 a 10.000 triangoli).

I modelli a risoluzione più elevata evidenziano scostamenti rispetto ai dati originari concentrati in prossimità degli spigoli, cioè in quelle porzioni che, rispetto al primo modello di superficie, sono state ricalcolate nei modelli successivi. L'entità degli scarti è di circa ± 2 cm.

L'analisi dei modelli a risoluzione inferiore evidenzia che l'entità degli scostamenti operati sulle superfici rimane compresa nell'intervallo indicato, mentre aumenta, in modo direttamente proporzionale al livello di decimazione del modello considerato, la loro distribuzione.

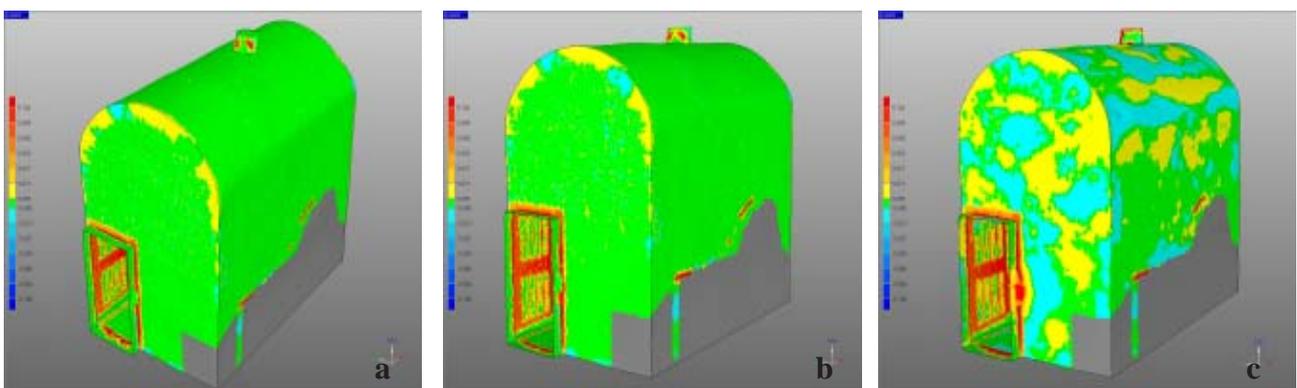


Figura 5 – Confronto tra i modelli presentati in Figura 4 e i dati originari

Le pareti dell'interno del tempietto, che ad una prima osservazione possono apparire pressoché uniformi, sono in realtà caratterizzate da una superficie tutt'altro che piana, a causa della scarsa uniformità dello strato di intonaco sul quale è stata affrescata la decorazione. I modelli ad alta risoluzione documentano in modo accurato anche queste ondulazioni, mentre quelli più leggeri sacrificano tali variazioni approssimando le pareti con superfici progressivamente più prossime a piani.

Si può quindi concludere che il sistema di modellazione adottato ha consentito di ottenere sia un modello che descrive accuratamente l'andamento leggermente ondulato delle superfici, sia uno notevolmente semplificato che oblitera tale informazione conservando però una soddisfacente rappresentatività della geometria fondamentale dell'oggetto.

Completamento del modello, texturing, esportazione in formato VRML

Il linguaggio VRML viene applicato da oltre un decennio nel campo della visualizzazione grafica tridimensionale in grado di interoperare con il Web. Anche se negli ultimi anni è stato affiancato da nuovi standard, come X3D, è attualmente uno dei formati più diffusi e consolidati, tanto che può essere generato dalla maggior parte degli strumenti di modellazione e authoring 3D.

Questo tipo di formato si è però prestato bene alla realizzazione di un modello che, conservando l'informazione relativa alla texture fotografica applicata, fosse esplorabile in tempo reale dall'utente attraverso un browser. Sono evidenti le potenzialità divulgative di questi modelli, in particolare quando, come nel caso del Santo Sepolcro, l'oggetto reale è praticamente inaccessibile.

La possibilità di rendere disponibili prodotti di questo tipo via Web impone di valutare attentamente la dimensione dei file che costituiscono sia la geometria del modello che la texture; la procedura di semplificazione del modello descritta ha comunque consentito di raggiungere risultati piuttosto soddisfacenti da questo punto di vista, anche se ancora non ottimali in vista di una fruizione on line. Il modello delle superfici interne del Santo Sepolcro occupa infatti circa 1.2MB, oltre a circa 400kB di texture fotografiche.

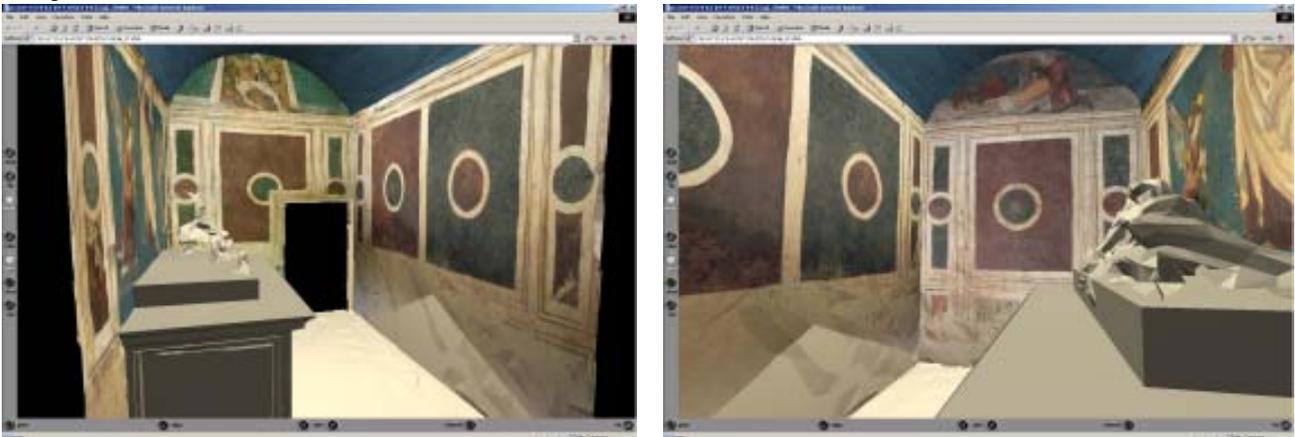


Figura 6 - Viste del modello VRML (il modello è disponibile sul Web seguendo il link <http://www.geomaticaeconservazione.it/modelli>)

Conclusioni

Una restituzione grafica sintetica dell'oggetto richiede l'individuazione delle linee di discontinuità (spigoli, retti o curvi, delimitazione dei contorni di superfici omogenee).

Il sistema illustrato integra il modello di superficie costituito da elementi triangolari con entità lineari; le elaborazioni successive possono essere condotte su un elemento o sull'altro. E' quindi possibile ridurre in modo significativo il numero di poligoni senza modificare gli spigoli del modello e quindi la sua riconoscibilità. Il limite alle decimazioni applicate è stato posto dall'aspetto via via più segmentato delle superfici curve.

I risultati ottenuti sono molto soddisfacenti in relazione al caso studio proposto, caratterizzato da geometrie semplici e poche linee di discontinuità tra ampie superfici omogenee. Dovrà essere valutata la sua applicabilità a modelli di superficie con conformazioni geometriche più complesse.

Bibliografia

Bonora V., Tucci G., Vaccaro V. (2005), "3D data fusion and multi-resolution approach for a new survey aimed to a complete model of Rucellai Chapel by Leon Battista Alberti in Florence", Proceedings of CIPA International Symposium, Torino, 26 settembre-1 ottobre

Berti G., Bonora V., Costantino F., Ostuni D., Sacerdote F., Tucci G. (2005), "DEM generation with digital photogrammetry and laser scanning in architectural structures survey", Proceedings 2° Workshop Italy-Canada "Applications of 3D Digital Imaging and Modelling", Padova, 17-18 maggio

Bonora V., (2005) "Dalla nuvola di punti al modello: potenzialità dei sistemi a scansione 3D nel rilievo architettonico. La Cappella Rucellai e il Santo Sepolcro a Firenze", Tesi di Dottorato in Disegno e rilievo per la tutela del patrimonio edilizio e territoriale, XVII ciclo, Politecnico di Torino

Hildebrandt K., Polthier K., Wardetzky M., (2005), "Smooth feature lines on surface meshes", Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing, M. Desbrun and H. Pottmann editori

Nardinocchi C., Forlani G., Zingaretti P. (2003), "Classification and filtering of laser data", Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop 3-D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data, Dresden, Germany 8-10 ottobre, H.-G. Maas, G. Vosselman, A. Streileine editori

Chen B. Y., Nishita T., (2003), "An efficient mesh simplification method with feature detection for unstructured meshes and Web Graphics", Proceedings of Computer Graphics International 2003, California: IEEE Computer Society, pp. 300-303

Sun Y., Page D. L., Paik J. K., Kpschan A., Abidi M. A. (2002), "Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive smoothing", Proceedings of International Conference on Image Processing ICIP02, Rochester, N.Y., USA, 22-25 settembre, Vol. III, pp. 825-828

Il lavoro presentato è stato realizzato nell'ambito del progetto di ricerca PRIN2005 "La carta del rischio del patrimonio culturale: rilievo, georeferenziazione, monitoraggio e modellazione multiscala", coordinatore scientifico prof. C. Monti, responsabile dell'Unità Locale ("Fotogrammetria e 3D scanning per un modello digitale finalizzato alla conservazione programmata di strutture architettoniche") arch. G. Tucci, e del progetto CNR - giovani ricercatori "Modellazione metrica tridimensionale per la tutela del patrimonio culturale", responsabile arch. V. Bonora.