

Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale

R. Scopigno¹

Laboratorio Visual Computing

Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" (ISTI-CNR), Pisa

Introduzione

La ricerca inerente i modelli tridimensionali per le applicazioni ai Beni Culturali (BC) si pone come obiettivo primario lo sviluppo e la sperimentazione di strumenti informatici che mettano a disposizione degli operatori del settore BC un nuovo mezzo di conoscenza: il modello digitale tridimensionale (3D) di un oggetto di interesse storico e/o artistico. Per modello 3D non si intendono, ovviamente, una o più immagini dell'oggetto o, tantomeno, un'animazione ottenuta "montando" opportunamente immagini fotografiche dello stesso (come è possibile realizzare con strumenti quali QuickTimeVR). Un modello 3D è una rappresentazione digitale fedele e misurabile dell'oggetto in esame ottenuta mediante la rappresentazione esplicita delle sue caratteristiche di forma e colore.

Le potenzialità della documentazione tridimensionale (3D) sono molteplici e non si limitano alla sola catalogazione dei beni artistici (si pensi, ad esempio, allo studio dei particolari più minuti, alla pianificazione del restauro, alla riproduzione automatica di parti o copie senza necessità di operazioni di calco, al monitoraggio nel tempo dello stato di degrado, ecc.). Il modello 3D rappresenta uno strumento di conoscenza la cui importanza è destinata a crescere di pari passo con: l'aumento sia delle capacità di calcolo e di visualizzazione grafica degli elaboratori che della banda delle reti di interconnessione; inoltre, una maggiore diffusione delle tecniche tridimensionali sarà indotta dalla prevedibile semplificazione ed automatizzazione delle procedure di creazione dei modelli tridimensionali e dalla sperabile riduzione del costo dei sistemi di acquisizione (3D scanner).

La creazione di un modello digitale di un oggetto di interesse storico e/o artistico è tuttora un processo abbastanza complesso che prevede l'impiego di strumentazione hardware e software adeguata e che non è ancora esente da interventi manuali di operatori esperti.

Le caratteristiche dei dispositivi hardware di scansione 3D sono descritte in modo molto succinto nella prima sezione del contributo. La seconda sezione descrive le caratteristiche tecniche della scansione 3D focalizzando sul processo di elaborazione software dei dati

¹ ISTI-CNR, v. Moruzzi 1, 56126 Pisa. Email: r.scopigno@isti.cnr.it

grezzi ottenuti con un qualsiasi dispositivo di scansione 3D, illustrando in dettaglio i singoli passi necessari per ottenere un modello digitale 3D da un oggetto reale. Infine, l'ultima sezione del contributo fornisce una panoramica delle possibili utilizzazioni ed applicazioni di dati 3D sviluppabili nel settore dei Beni Culturali, facendo riferimento ad una serie di esperienze maturate dal Visual Computing Lab di ISTI-CNR.

1. Sistemi di scansione 3D

Le metodologie proposte per l'acquisizione semi-automatica delle caratteristiche di forma e colore di oggetti tridimensionali sono molteplici. Una intensa attività di ricerca, sia accademica che industriale, ha prodotto un ventaglio molto ampio di possibili metodologie e corrispondenti dispositivi hardware [Curless 00].

Analogamente a quanto accade in altri campi, anche nel caso dell'acquisizione automatica non esiste una metodologia che possa essere applicata in modo indifferenziato a qualsiasi problema di acquisizione. Le caratteristiche dell'oggetto da acquisire infatti influenzano pesantemente tale scelta. Tra queste possiamo elencare:

- complessità di forma dell'oggetto (numero di componenti, presenza di buchi passanti o sezioni concave, ecc);
- caratteristiche della superficie dell'oggetto (riflettività, trasparenza, deformabilità, ecc);
- dimensione spaziale del manufatto;
- trasportabilità ed accessibilità del manufatto;
- necessità di acquisire altri attributi caratterizzanti della superficie (quali ad esempio il colore).

Inoltre, va considerata anche la specificità dell'applicazione che si prevede per il modello acquisito, che influirà su:

- grado di accuratezza richiesto al modello digitale 3D;
- complessità di descrizione del modello digitale ottimale per l'applicazione di riferimento;
- compatibilità del tempo e costo di acquisizione con il budget di progetto.

Le caratteristiche dell'oggetto da acquisire, le esigenze progettuali ed i vincoli esterni guideranno volta per volta la scelta del dispositivo ideale. In linea del tutto generica, le tecnologie esistenti si possono classificare nel modo seguente:

- **Sistemi a triangolazione** (sia laser che a luce strutturata): sono adatti all'acquisizione di oggetti a piccola o media scala (ad es. statue), forniscono accuratezze nell'ordine delle poche decine di micron, permettono di realizzare campionamenti molto densi (nell'ordine dei 4-10 sample per mm^2 di superficie), presentano tempi di scansione in genere molto bassi (ordine di pochi secondi per singola ripresa, con 200K-500K campioni rilevati).

- **Sistemi interferenziali (conoscopia):** sono adatti all'acquisizione di oggetti a piccola e piccolissima scala (spazio di lavoro di pochi cm²), forniscono accuratissime nell'ordine dei micron, permettono di realizzare campionamenti estremamente densi (nell'ordine dei 500 sample per mm² di superficie), presentano tempi di scansione medi (dipendenti dalle caratteristiche meccaniche del sistema di scansione XY adottato per far scorrere lo strumento sulla superficie campionata). Come svantaggio hanno il vincolo di dover lavorare a piccola distanza dalla superficie ed hanno campo di lavoro molto ridotto (pochi millimetri in Z); possono essere applicati quindi solo al caso di opere la cui superficie sia prevalentemente planare (come ad esempio le superfici pittoriche).
- **Sistemi a tempo di volo:** usano in genere tecnologia laser e sono adatti all'acquisizione di oggetti a larga scala (ad es. edifici, territorio); forniscono accuratissime nell'ordine di alcuni millimetri, permettono di realizzare campionamenti abbastanza densi date le estensioni usualmente trattate (nell'ordine di un campionamento per cm²), sono adatti all'acquisizione di oggetti a piccola o media scala, presentano tempi di scansione in genere abbastanza alti (ordine della mezz'ora per singola ripresa, con un milione di punti di campionamento rilevati).
- **Sistemi ibridi** (a tempo di volo e modulazione): permettono di raggiungere accuratissime molto alte (fino a valori prossimi di quelli degli strumenti a triangolazione), ma sono caratterizzati da un alto costo, maggiore lentezza nel campionamento rispetto ai sistemi a tempo di volo puro ed una maggiore difficoltà di gestione.
- **Sistemi a silhouette:** permettono di acquisire la forma di un oggetto per mezzo di un semplice processo di acquisizione fotografica dell'oggetto in rotazione controllata (piattaforma rotante controllata da computer); hanno una qualità ed accuratezza del modello prodotto media o bassa, e sono adatti unicamente all'acquisizione di piccoli oggetti. Lati positivi di questa tecnologia sono il basso costo dell'hardware richiesto (una normale macchina fotografica digitale) ed il fatto che l'acquisizione può essere realizzata in modo del tutto automatico, senza richiedere l'intervento di un operatore esperto.

2. Tecnologie per il processamento di dati da scansione 3D

Ad ogni modo dal punto di vista dell'utente, indipendentemente dalla particolare tecnologia utilizzata, la maggior parte degli scanner 3D producono lo stesso tipo di output: una **range map**, ovvero una matrice 2D di punti rilevati.

Tale matrice può essere gestita nel successivo processo di post-elaborazione come una **nuvola di punti** oppure come una **superficie triangolata** (vedi *Figura 1*).

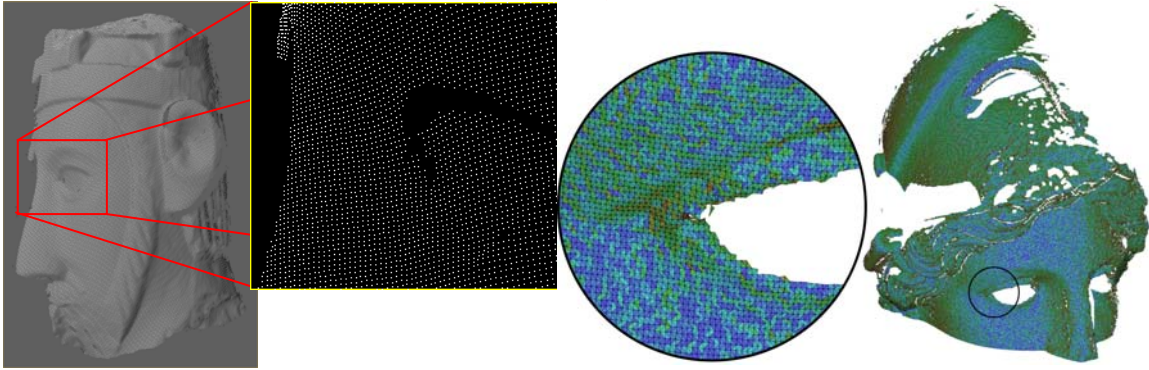


Figura 1: L'output di un sistema di scansione 3D è in genere costituito da una matrice 2D regolare di campioni rilevati, che possono essere gestiti nelle successive fasi di post-processamento e visualizzazione sia come nuvola di punti (vedi immagine a sinistra) che come una superficie triangolata (vedi immagine a destra).

2.1 La pipeline di scansione 3D

Come già evidenziato in precedenza, il processo di scansione 3D non è ancora un processo completamente automatizzato (come, ad esempio la normale scansione 2D di documenti cartacei), ma richiede spesso l'intervento di utenti esperti. In particolare, la scansione 3D può essere visualizzata come un processo composto da una serie di fasi da eseguirsi in cascata, una dopo l'altra, ovvero una *pipeline*.

Le fasi della pipeline di scansione 3D [Bernardini 02] possono essere riassunte nella seguente lista:

- Pianificazione della ripresa
- Acquisizione
- Registrazione delle range map
- Fusione delle range map
- Semplificazione geometrica
- Acquisizione e gestione del “colore”
- Archiviazione e conversione dati

Come vedremo in seguito, queste fasi operative trovano una implementazione negli strumenti di elaborazione sviluppati da ISTI-CNR [Callieri03], così come in alcuni sistemi software commerciali².

2.2 Pianificazione della ripresa

La maggior parte degli scanner 3D fornisce in output una singola range map, che tuttavia rappresenta esclusivamente una porzione – più o meno grande – di superficie dell'oggetto

² Tra i sistemi commerciali per la gestione di dati da scansione citiamo qui come uno dei più rappresentativi RapidForm di INUS Technologies (<http://www.rapidform.com/index.htm>).

acquisito, ossia un campionamento della porzione di superficie visibile dalla particolare inquadratura prescelta dall'utente. La metafora della ripresa fotografica si adatta bene anche al concetto di scansione: il processo di selezione di una specifica ripresa con lo scanner è del tutto simile al processo con cui si sceglie una vista con una macchina fotografica. Ciò significa che, per poter produrre un modello digitale 3D completo, è necessario catturare l'oggetto reale da molti diversi punti di vista, in modo da coprirne la superficie in modo completo.

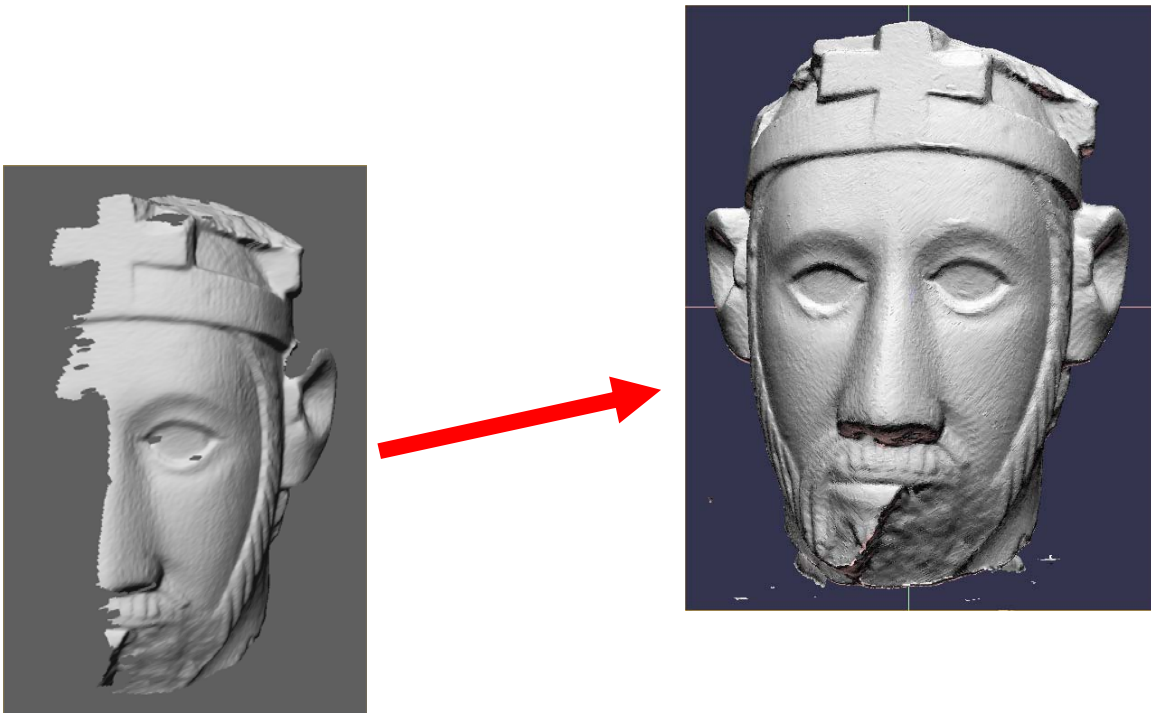


Figura 2. La singola ripresa (a sinistra) è solo un passo intermedio nel processo che permette di ottenere un modello 3D completo (a destra).

Scopo della fase di *pianificazione della ripresa* consiste proprio nel decidere quale debba essere l'**insieme (minimo) dei punti di vista** necessari per catturare l'intera superficie dell'oggetto. Tale fase è resa più complessa dal dover garantire i seguenti obiettivi:

- minimizzare il numero delle riprese permette di ridurre i costi, sia in termini di tempo che di costi connessi;
- poichè si desidera produrre un modello digitale finale privo di zone non campionate (cosiddetti *buchi*), è necessario cercare di acquisire in modo completo l'intera superficie dell'oggetto;
- per necessità intrinseche delle successive fasi di elaborazioni, dovrà essere sempre presente un sufficiente grado di sovrapposizione tra ogni ripresa e le altre che coprono aree limitrofe (nell'ordine del 20% dell'estensione della singola ripresa);
- date le caratteristiche degli scanner, per garantire massima accuratezza del processo di misura lo scanner dovrà inquadrare la superficie ripresa da una direzione il più possibile ortogonale alla superficie;

- si dovrà infine tener conto delle caratteristiche dello scanner (ad esempio distanza ottimale di ripresa dalla superficie) e delle possibilità di movimentazione dello scanner nello spazio circostante l'opera (evitare posizioni di ripresa in cui lo scanner collida con elementi esterni, quali ad es. pareti, o con porzioni della stessa opera ripresa, ad es. il braccio proteso di una statua).

Si può quindi intuire come la pianificazione della ripresa non rappresenti un compito facile. Al momento attuale non sussistono soluzioni assistite (automatiche o semi-automatiche) che possano dare all'operatore un valido supporto nella soluzione del problema. In genere, un operatore esperto valuta tramite documentazione fotografica o per analisi visiva diretta le caratteristiche spaziali dell'oggetto da acquisire e stabilisce in anticipo i principali punti di vista da cui effettuare le varie riprese. Tale pianificazione iniziale è poi raffinata durante l'acquisizione stessa.

Come esempio delle difficoltà del compito, in *Figura 3* sono riportate tutti i punti di vista prescelti per acquisire una statua di bronzo, la Minerva d'Arezzo, alta circa 155 cm.

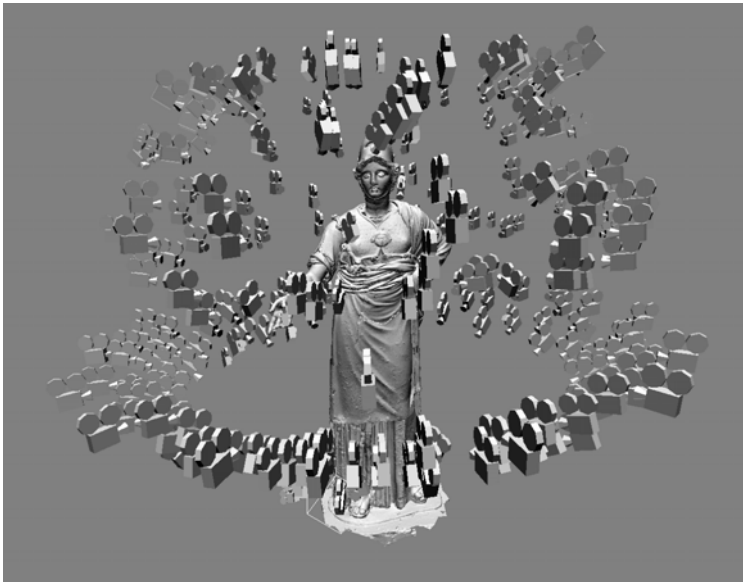


Figura 3. Per catturare completamente la superficie dell'oggetto mostrato, la Minerva di Arezzo, sono state necessarie 297 riprese, esemplificate nell'immagine dal posizionamento della camera di ripresa; la fase di acquisizione ha richiesto circa due giorni di lavoro.

2.3 Acquisizione

Durante la fase di acquisizione vengono effettuate in genere decine o centinaia di riprese, seguendo i punti di vista decisi nella fase di pianificazione ed, in genere, definendone di nuovi seguendo un approccio iterativo.

Ogni singola ripresa produce una range map, che viene salvata sul disco del computer che pilota lo scanner. Uno dei sistemi di ripresa in dotazione al nostro laboratorio è il Konica Minolta Vivid910 (uno scanner laser a triangolazione); per tale sistema abbiamo

sviluppato un nostro sistema software di pilotaggio e gestione della fase di acquisizione, denominato *Easy3D Scan* (vedi *Figura 4*).

Una caratteristica importante del sistema di gestione dello scanner è l'essere in grado di mostrare all'operatore lo stato corrente del processo di acquisizione. Ciò può essere un problema non banale ove si lavori ad un progetto di scansione complesso, per cui si siano acquisite parecchie decine di range map. Il sistema software dovrà essere in grado di mostrare interattivamente l'insieme di scansioni, in modo di permettere l'individuazione di possibili zone non campionate.

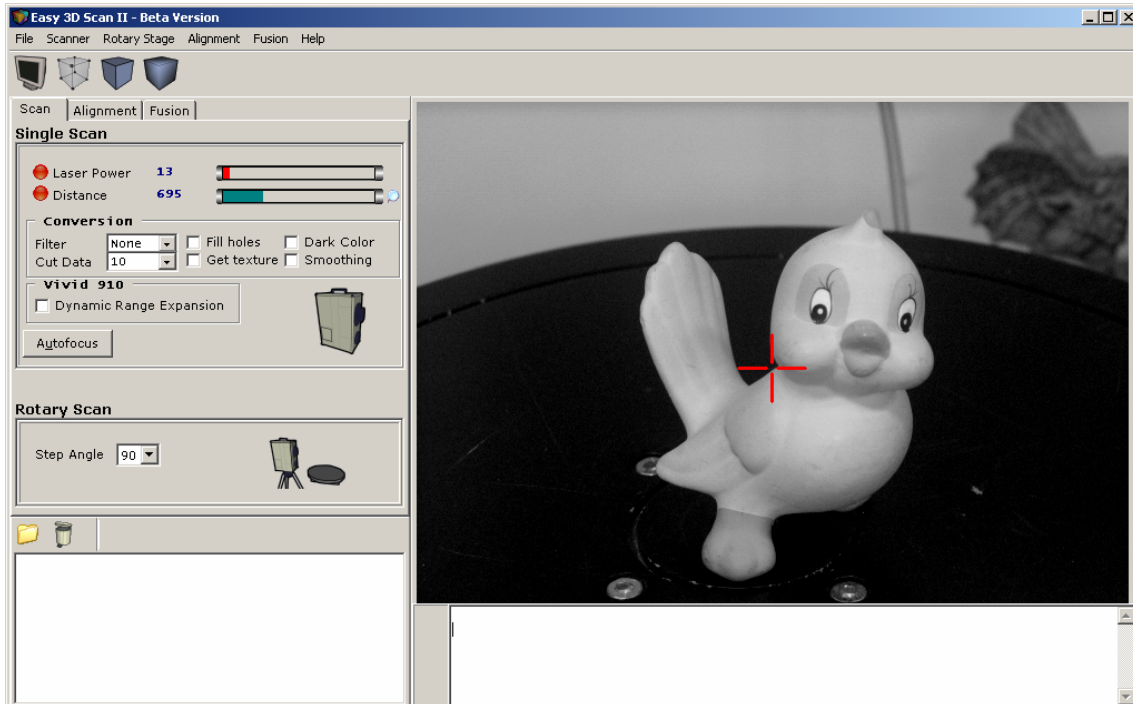


Figura 4. Easy3DScan, il software per l'acquisizione sviluppato da ISTI-CNR per pilotare lo scanner Konica Minolta Vivid 910 e visualizzare/processare i dati prodotti.

2.4 Registrazione (o Allineamento) delle range map

L'output finale della fase di acquisizione consiste in un insieme di range map, ciascuna delle quali campiona una porzione di superficie dell'oggetto. Tale insieme rappresenta, allo stato attuale, i pezzi di un puzzle non ancora ricomposto: le range map devono essere allineate tra di loro, in modo da congiungersi in modo accurato e ricomporre completamente l'intero oggetto. Questo poichè ogni range map è definita in uno spazio di coordinate che dipende dalla specifica locazione spaziale dello scanner selezionata durante la fase di acquisizione. Lo scopo della registrazione consiste quindi nel riportare tutte le range map in unico e comune sistema di riferimento (in coordinate cartesiane).

Esistono varie tecniche per realizzare tale registrazione, la maggior parte delle quali adotta un approccio semi-automatico. Il metodo più comune consiste nel lavorare per coppie, ossia allineare ogni range map ad ognuna di quelle a questa parzialmente

sovrapposta [Besl 92, Pulli 99]. L'allineamento a coppie viene realizzato in due distinte fasi:

- piazzamento iniziale manuale (*registrazione grezza*);
- raffinamento della registrazione (*allineamento fine*).

Piazzamento iniziale manuale

La prima fase consiste nel considerare una singola coppia di range map parzialmente sovrapposte ed eseguire un primo allineamento tra di esse. Questa fase viene definita anche *registrazione grezza*, poichè l'allineamento che vogliamo ottenere non deve essere molto preciso (in quanto verrà migliorato in modo automatico dal successiva fase di *allineamento fine*). Il piazzamento iniziale può essere effettuato tramite due modalità differenti (vedi Figura 5):

- posizionamento manuale;
- specifica di punti corrispondenti sulle due range map.

Attraverso il *posizionamento manuale*, l'operatore manualmente sposta e ruota una delle due range map nello spazio, in modo da allinearla (più o meno correttamente) con l'altra range map. Nella *specifica di punti corrispondenti* invece l'operatore seleziona almeno quattro punti in comune su entrambe le range map: attraverso queste quattro coppie di punti è possibile calcolare una matrice di roto-traslazione che allinea la prima range map con la seconda.

Ad ogni modo, le due modalità esposte risultano equivalenti, e vengono utilizzate dall'operatore a seconda delle difficoltà incontrare durante la fase di registrazione iniziale.

È da sottolineare che in ogni caso il *piazzamento iniziale* richiede che le due range map presentino una porzione di superficie **condivisa** (possibilmente, circa il 20-30% della superficie definita da una singola range map), affinché sia possibile definire con successo un primo allineamento. Questo dato, estremamente importante, deve essere perciò attentamente valutato e considerato anche nelle precedenti fasi di pianificazione e acquisizione.

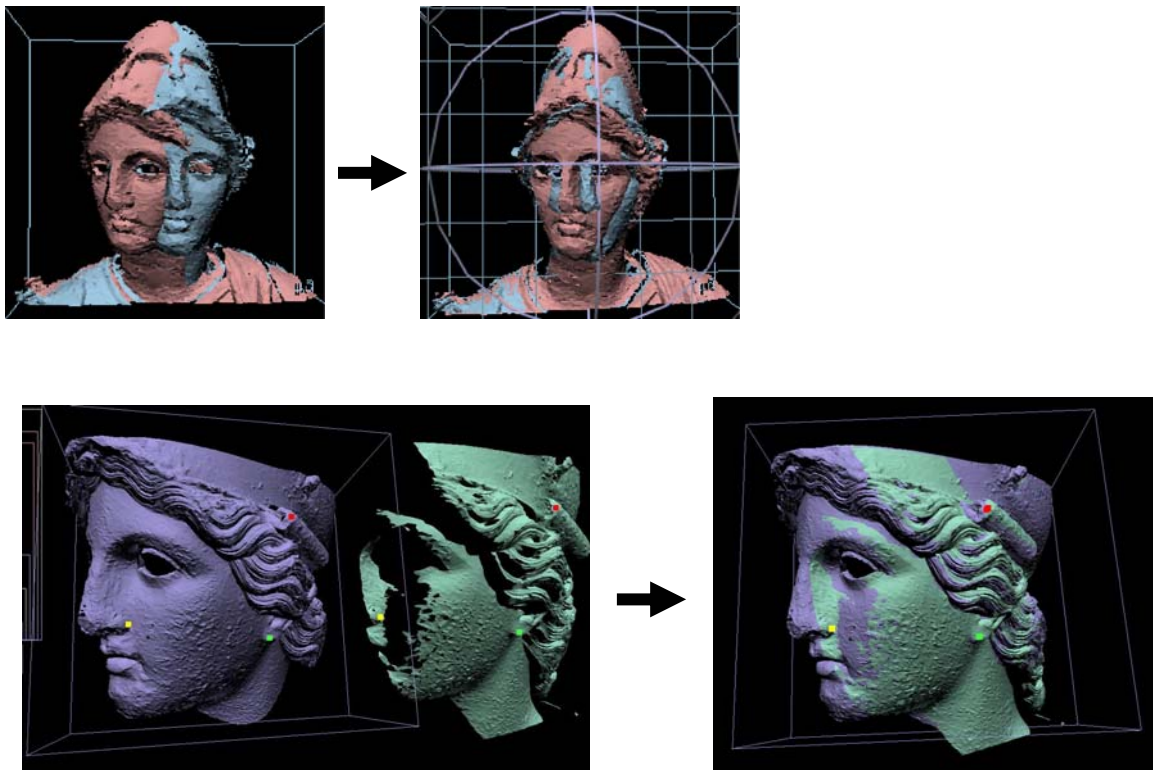


Figura 5. Le due modalità per il piazzamento iniziale: roto-traslazione manuale (in alto); selezione di coppie di punti corrispondenti (in basso).

Raffinamento della registrazione

Una volta che l'intero set di scansioni è stato rozzamente allineato, è possibile passare al raffinamento della registrazione. Lo scopo di questa fase è far sì che i vari pezzi del puzzle combacino perfettamente, cercando contemporaneamente di minimizzare l'errore di allineamento precedentemente introdotto. L'algoritmo utilizzato in questa fase è il ben noto **ICP** (Iterative Closest Point), implementato nel nostro tool di allineamento, *MeshAlign v2*, rappresentato in *Figura 6*.

Tale tool è stato specificatamente progettato al fine di poter gestire centinaia di scansioni, fornendo al tempo stesso all'utente un'interfaccia estremamente semplice ed intuitiva. Il sistema garantisce una notevole efficienza, garantita sia dall'adozione di una rappresentazione multirisoluzione delle range map (che facilita la manipolazione interattiva e la convergenza del processo iterativo ICP) che l'uso di tecniche che permettono di minimizzare il numero di coppie di range map che devono essere esplicitamente allineate (la maggior parte degli allineamenti a coppie sono introdotti in modo automatico dal sistema).

Vengono fornite informazioni dettagliate sul risultato dell'allineamento, e l'operatore può intervenire sia a livello globale che locale, al fine di migliorare l'allineamento fine delle range map.

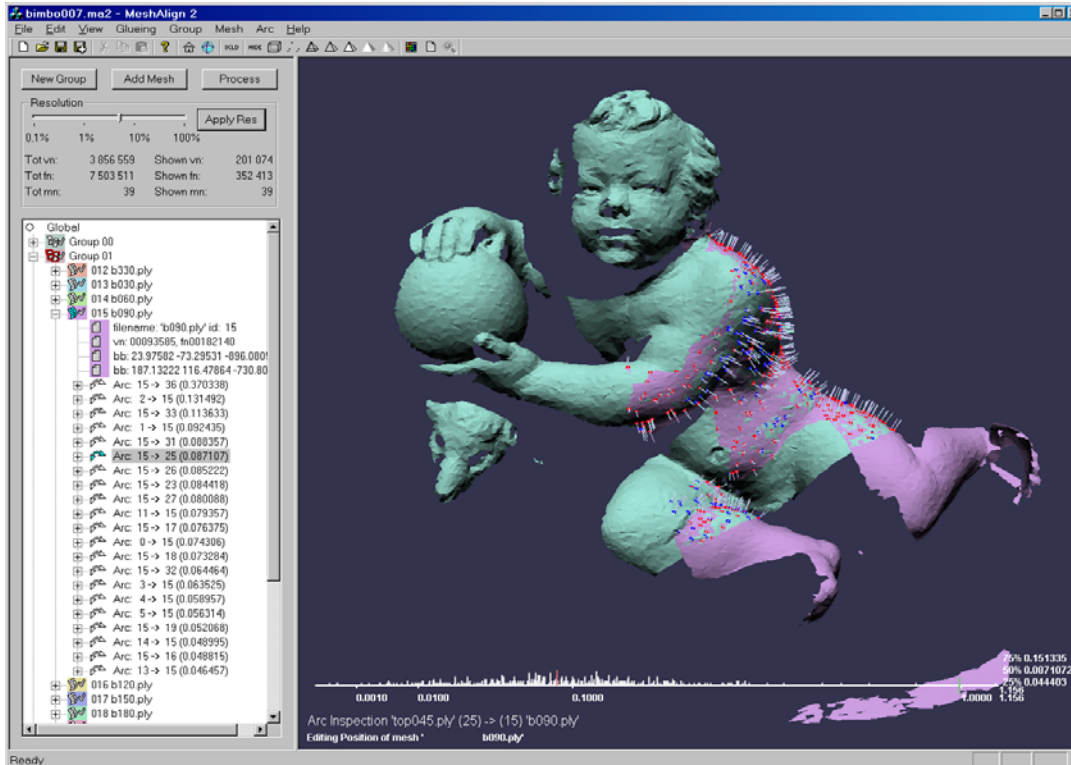


Figura 6. Il tool di allineamento sviluppato da ISTI-CNR, MeshAlign v2.

Registrazione mediante uso di target

Quanto detto finora vale in termini generali; il metodo descritto puo' essere applicato sia a dati rilevati con strumentazione a triangolazione (ad es. statue) che a dati rilevati con strumenti a tempo di volo (ad es. architetture).

Una seconda modalit  di lavoro molto comune nell'ambito del rilievo architettonico si basa sul posizionamento di target nella scena da scannerizzare e sul rilievo accurato delle coordinate spaziali dei target (usualmente realizzato con sistemi topografici). In questo secondo caso, creiamo per ogni ripresa una serie di punti a posizione nota che ci permettono di riportare i dati rilevati in un unico sistema di riferimento comune.

Il lato positivo di questo approccio   l'accuratezza che si riesce a garantire in ogni condizione, ammesso che si riescano a distribuire i target in modo corretto sulla superficie. Un lato critico della registrazione semiautomatica vista precedentemente   che questa   possibile solo se la superficie campionata   ricca di modellato o rilievo; su superfici piatte o prive di rilievo (come puo' capitare nel caso del rilievo architettonico o nel caso di oggetti di design o di produzione industriale) le proiezioni di range map parzialmente sovrapposte possono essere simmetriche e scivolare l'una sull'altra durante la fase automatica di allineamento (ICP).

Aspetti invece negativi dell'approccio che si basa su target sono la necessità di distribuire i target sulla scena ripresa (un processo non semplice, soprattutto nel caso di manufatti di notevole mole) e di doverne curare l'acquisizione topografica.

Registrazione automatica

Sono stati recentemente sviluppate delle metodologie che permettono di superare la fase manuale della messa a registro delle coppie di range map (vedere [Bendels 04, Brusco 05] ed altri lavori da questi riferiti). Alcuni degli approcci proposti in letteratura non sono in grado di gestire in modo robusto e con sufficiente efficienza grossi insiemi di range map, soprattutto ove ognuna di queste riprenda solo una piccola porzione del manufatto scannerizzato, e per cui non si abbia informazione di dettaglio sulla strategia di ripresa.

E' stato mostrato in un recente paper [Pingi 05] che un allineamento automatico robusto è possibile ove si accoppi un metodo di ricerca automatico della registrazione tra coppie di range maps ad un uso dell'informazione disponibile sulla strategia di ripresa (ossia il modo in cui le range map sono state acquisite).

Poter disporre di una metodologia automatica di allineamento è estremamente importante, poiché in questo modo riusciamo a eliminare la fase più onerosa in termini di tempo uomo dell'intero pipeline di acquisizione. Inoltre, poter eseguire l'allineamento delle riprese in modo automatico permette di far eseguire questa fase di processamento in background durante la fase di acquisizione stessa; in tal modo, è possibile ispezionare il materiale acquisito già immerso in uno spazio comune e direttamente a tempo di ripresa, redendo possibile la verifica di completezza della scansione e la selezione delle ulteriori riprese necessarie per coprire le zone non campionate.

2.5 Fusione delle range map

Il risultato finale della fase di allineamento consiste in un set di scansioni *allineate* tra di loro. Giunti a questo punto, il passo successivo è la produzione di un singolo modello 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*. Si usano in genere superfici triangolate come schema di rappresentazione finale in quanto queste supportano con maggiore semplicità ed efficienza operazioni di visualizzazione, estrazione di sezioni e misurazioni. Con la fase di fusione si ottiene quindi un *unico* modello 3D, ricostruito a partire dalle range map, e si eliminano i campioni ridondanti.

Le informazioni ridondanti sono rappresentate dall'insieme di sovrapposizioni delle range map: ove si acquisisca un numero elevato di range map, la percentuale di sovrapposizione e ridondanza può essere molto grande (nella nostra esperienza, è comune avere fattori di ridondanza che vanno da 4 a 6).

Per la fusione delle scansioni deve essere impiegato un opportuno metodo di ricostruzione; numerosi algoritmi sono stati proposti in letteratura. Una delle soluzioni più diffuse è quella che si basa sull'approccio *volumetrico* [Curless 96], ossia sulla ricostruzione di un campo discreto 3D di distanze (*distance field*) dall'insieme di range map. Per costruire il distance field dalle range map, si suddivide il volume di contenimento del manufatto scannerizzato con una maglia volumetrica composta da milioni di piccole celle cubiche (i cosiddetti voxel), e per ognuna di tali celle si calcola la sua distanza minima dalle range map acquisite. Una volta inizializzato il distance field, la rappresentazione digitale della superficie dell'oggetto campionato può essere ricostruita calcolando la isosuperficie che passa a distanza zero nel distance field. Tale ricostruzione viene operata usando il metodo Marching Cubes [Lorensen 87].

Per l'operatore gestire la fase di ricostruzione è estremamente facile: è sufficiente indicare al sistema la risoluzione con cui si vuole ricostruire (ossia, la dimensione della cella volumetrica); è in genere consigliato prescegliere in ricostruzione un valore simile alla distanza di campionamento usata in scansione. Ossia ad esempio, se ho acquisito range map che discretizzano la superficie campionando un valore ogni 0,3 mm, sarà opportuno usare una dimensione analoga per le celle del distance field usato in ricostruzione. Oppure, ove si voglia fare una prima ricostruzione approssimata (ad esempio per verificare la completezza del campionamento e la presenza/mancanza di zone non campionate), potrà effettuare una fusione usando una cella molto più grande del passo di campionamento, ad esempio un paio di millimetri; in quest'ultimo caso, scegliere un dominio discreto con celle più grandi ha come effetto l'ottenere una ricostruzione meno complessa, in cui le singole facce triangolari sono più grandi.

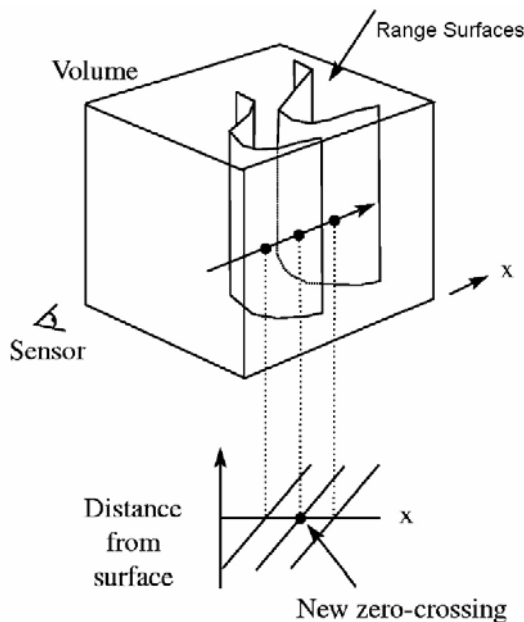


Figura 7. Il processo di costruzione di un campo di distanze, che integra l'informazione spaziale contenuta nelle range map.

2.6 Semplificazione geometrica

Il risultato della fusione produce un unico modello digitale 3D. Tuttavia tale modello risulta generalmente estremamente definito, e la quantità di informazioni da esso contenute può essere talmente grande da non poter essere visualizzato su di un comune PC. Se usiamo nella fase di fusione un passo analogo a quello usato nella scansione, sarà comune ottenere mesh triangolate descritte da una media di 10 facce triangolari per mm^2 (nel caso si sia usato uno scanner a triangolazione), originando quindi rappresentazioni 3D costituite da svariate decine 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 del modello ed di garantire una sufficiente accuratezza geometrica (vedi *Figura 8*). 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 [Callieri 03, Cignoni 03], *MeshSimplify*, si basa sul collasso di edge e sull'impiego di una struttura dati per la gestione su memoria secondaria della mesh (OEMM, Octree-based External Memory Mesh) che permette di eseguire la semplificazione 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 [Cignoni 03].

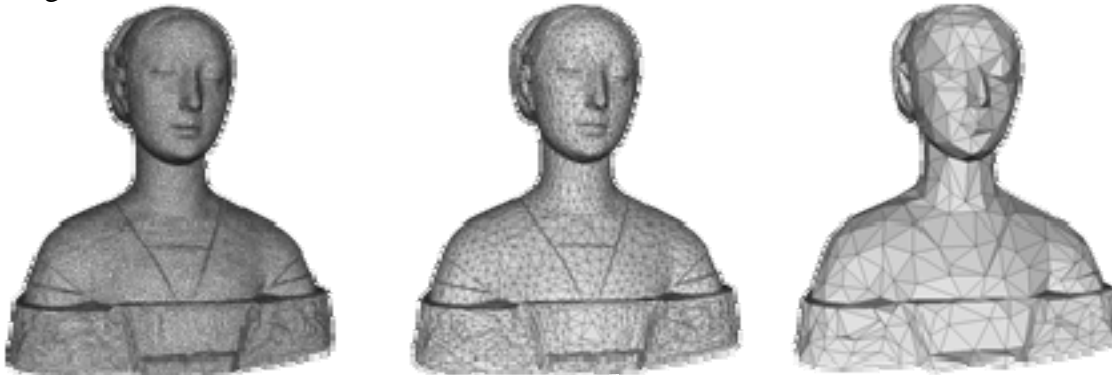


Figura 8. Esempi di progressiva semplificazione di una mesh triangolata.

2.7 Gestione delle caratteristiche di riflettanza della superficie (colore)

Il modello digitale 3D fin qui generato rappresenta una copia fedele dell'originale per quanto concerne dimensioni spaziali e proporzioni. Niente però è stato ancora detto riguardo all'*apparenza visiva*: ovvero, è desiderabile che il modello 3D rappresenti l'oggetto reale oltre che a livello quantitativo anche a livello *qualitativo*, riportando nella maniera più fedele possibile il comportamento della superficie dell'oggetto reale rispetto alla riflessione della luce.

Conoscere le proprietà di riflessione della superficie è necessario al fine di poter gestire visualizzazioni interattive del modello 3D in cui si simulino illuminazione sintetica e shading. I tool sviluppati da ISTI-CNR si basano essenzialmente su due tecniche:

- acquisizione del “colore riflesso” (od anche detto “colore apparente”, strettamente dipendente dalle condizioni di illuminazione esistenti a tempo di acquisizione) e suo collegamento alla superficie triangolata;
- acquisizione della BRDF (ossia delle caratteristiche di riflettanza proprie della superficie, che permettono di ricostruire un modello indipendente dall’illuminazione esistente a tempo di acquisizione e di simulare dinamicamente in modo accurato qualsiasi condizione di illuminazione virtuale).

Il primo metodo ha il vantaggi di essere abbastanza semplice e veloce da realizzare, però presenta lo svantaggio di non riportare fedelmente il colore dell’oggetto originale.

Viceversa, il secondo metodo riesce a definire con esattezza il comportamento del materiale di ogni singolo punto della superficie ma, d’altro anto, è molto più lento e complesso da applicare. La tecnica di acquisizione della BRDF è stata sviluppata dal gruppo di Computer Graphics del Max Planck Institute (Saarbruecken, Germany) e integrata nel sistema di visualizzazione di ISTI-CNR (*Virtual Inspector*).

In ogni caso, entrambi i metodi richiedono che le informazioni acquisite vengano successivamente *applicate* sul modello 3D precedentemente creato per mezzo di un processo di parametrizzazione e di *texture mapping*.

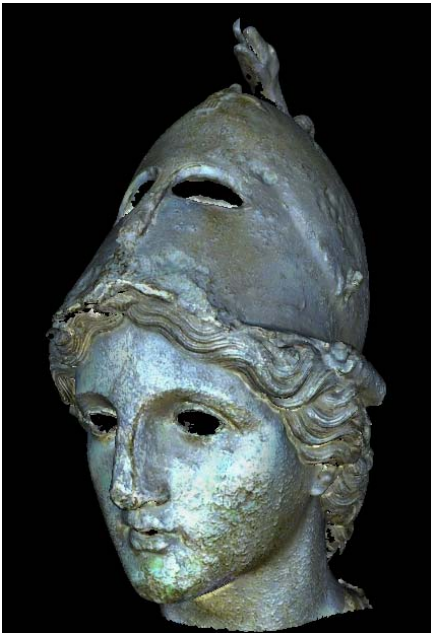


Figura 9. Un esempio di modello 3D (testa della Minerva di Arezzo) in cui un campionamento del *colore apparente* (ottenuto con strumentazione fotografica digitale commerciale) è stato mappato sulla mesh via texture mapping e quindi può essere visualizzato interattivamente. La corrispondente texture map è mostrata nell’immagine a destra.

Acquisizione e gestione del colore riflesso

Le informazioni inerenti il colore riflesso (o apparente) vengono acquisite sfruttando una comune macchina fotografica digitale. L'oggetto reale viene fotografato da numerosi punti di vista (in modo da riprenderne l'intera superficie), utilizzando possibilmente delle condizioni di luci naturali e sufficientemente diffuse. Per ciascuna foto effettuata viene calcolata la proiezione inversa sul modello 3D; per ogni triangolo del modello 3D viene selezionata la porzione di foto migliore (ovvero quella che introduce la minor distorsione), e viene costruita una singola tessitura che integra le varie immagini RGB in ingresso. Vengono inoltre eliminate le possibili discontinuità di bordo che si presentano tra una foto e l'altra. Questo approccio [Callieri 02] è stato implementato nel tool *Weaver* di ISTI-CNR.

Acquisizione e gestione della BRDF

Come già specificato in precedenza, questa tecnica permette di acquisire (e successivamente applicare) informazioni estremamente realistiche inerenti al comportamento del materiale dell'oggetto per quanto concerne l'illuminazione. In Figura 10 viene mostrato un setup per l'acquisizione della BRDF messo a punto dai colleghi del Max Planck Institute [Lensch 03], basato sull'acquisizione di multiple immagini in illuminazione controllata.

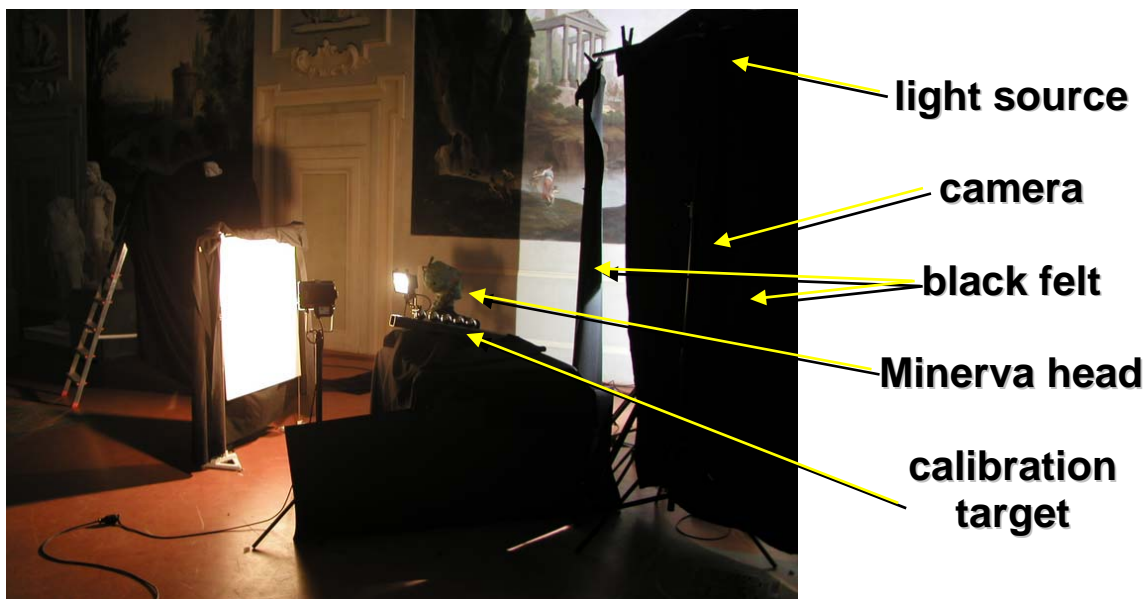


Figura 10. Setup necessario per l'acquisizione della BRDF.

Per acquisire il modello della BRDF della superficie di interesse sarà necessario organizzare un setup di ripresa in cui le fonti di luce siano accuratamente controllate; è necessario poter conoscere in maniera accurata la direzione di incidenza della luce presente nella scena, ed evitare interferenze da altre sorgenti durante l'acquisizione dei dati: per questi motivi è spesso necessario coprire con teli neri gli eventuali oggetti riflettenti presenti nell'ambiente. Nota la posizione relativa dell'oggetto ripreso e della sorgente di illuminazione (la cui geometria di emissione è anche nota, grazie ad un passo

di calibrazione [Tsai 86]), vengono quindi catturate immagini HDR (High Dynamic Range) dell'oggetto, che verranno poi allineate con la geometria 3D. Tali dati sono in seguito processati, al fine di poter stimare con esattezza le proprietà di riflessione dell'oggetto. L'idea di base è che nelle varie immagini riprese avremo, per ogni punto della superficie, vari campioni di riflettanza ottenuti con condizioni di illuminazione note; integrando i vari campioni saremo in grado di ricostruire la BRDF per ogni punto della superficie.

3. Acquisizione e gestione di dati 3D per le applicazioni ai Beni Culturali

In questa ultima sezione descriviamo succintamente la vasta gamma di applicazioni rese possibili nell'ambito dei Beni Culturali dall'esistenza di accurati modelli 3D, attraverso l'esposizione di una nutrita serie di esempi pratici. In tale contesto si parte dall'assunzione di avere disponibilità un modello 3D completo dell'opera di interesse (una statua, un quadro oppure un edificio), e di voler sfruttare tali dati a vantaggio dell'opera di analisi, studio, conservazione o restauro dell'opera stessa. Deve essere innanzitutto sottolineato come le esperienze qui presentate rappresentino il risultato dalle assidua e continua collaborazione che il VCLab ha con esperti del settore – quali restauratori, archeologi, storici dell'arte, etc. – nel corso dei vari progetti che sono stati intrapresi negli ultimi anni.

I settori applicativi che andremo ad esaminare sono i seguenti:

- Visualizzazione interattiva
- Catalogazione
- Riproduzione materica
- Computer Aided Restoration (CAR)
- Simulazione e ricostruzione virtuale
- Stampa su supporto cartaceo
- Supporto alla documentazione

3.1 La visualizzazione interattiva

Una prima naturale applicazione consiste nel fornire agli esperti del settore dei Beni Culturali strumenti di semplice uso che permettano di visualizzare interattivamente i modelli 3D. Il VCLab ha sviluppato due differenti applicativi software:

- *Easy3D View*
- *Virtual Inspector*

Easy3Dview

Easy3Dview è un sistema di visualizzazione completo, flessibile ed orientato ad utenti medio/esperti. Permette di visualizzare interattivamente il modello 3D, eventualmente con colore RGB e/o bump texture, di spostare la fonte di luce in maniera dinamica ed infine di effettuare delle semplici misurazioni metriche sul modello 3D. Tale strumento, efficace e leggero, rappresenta il mezzo ideale per una veloce visualizzazione di modelli 3D contenenti una quantità non eccessiva di informazioni (è in grado di gestire in modo interattivo su comuni PC la visualizzazione di mesh fino a 2-3 milioni di facce).

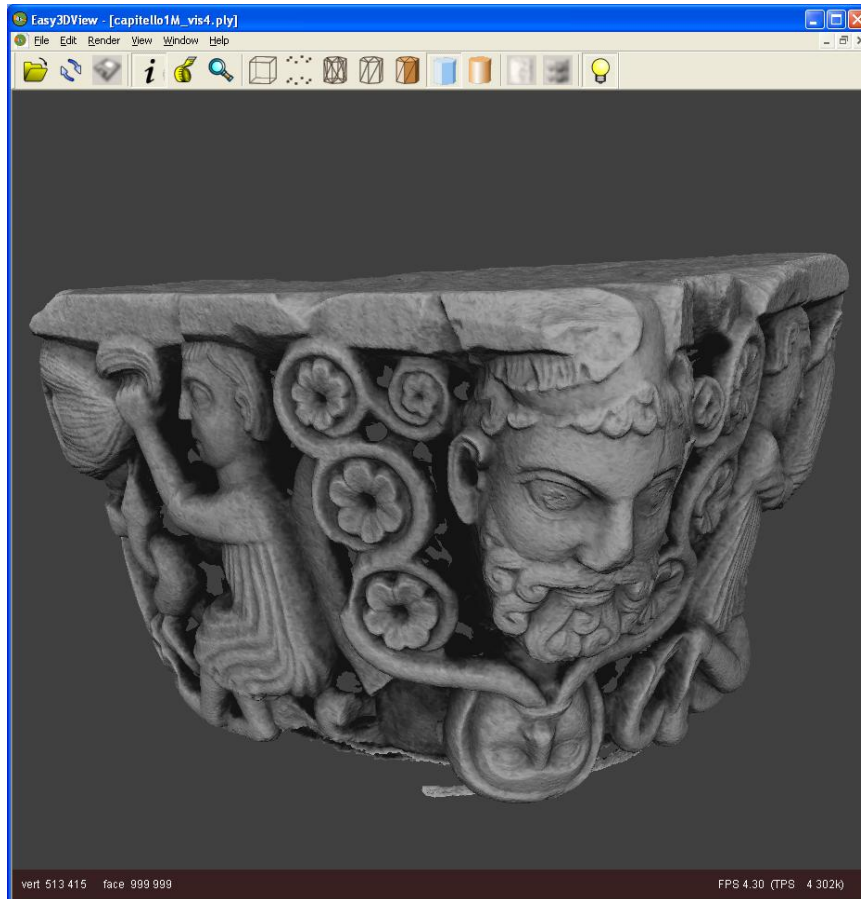


Figura 11. Il sistema di visualizzazione "Easy3DView", sviluppato da ISTI-CNR.

Virtual Inspector

Questo strumento di visualizzazione interattivo si differenzia dal precedente per due motivi fondamentali: in primo luogo, è stato progettato per la fruizione da parte di utenti poco esperti (o del tutto inesperti), quindi è adatto ad essere collocato in ambienti museali all'interno di chioschi multimediali. In secondo luogo, presenta una potente caratteristica: la possibilità di visualizzare il modello utilizzando attraverso l'impiego della multi-

risoluzione, e quindi di garantire la gestione di superfici triangolate estremamente complesse e risolte (fino a parecchie decine di milioni di facce triangolari) [Cignoni 04]. Tale peculiarità permette, in primo istanza, di poter visualizzare un'enorme quantità di dati su computer a basso costo. Questo significa poter fornire all'utente finale del prodotto un modello 3D quanto più completo possibile. Successivamente, ciò permette l'impiego di modelli 3D non semplificati, quindi è possibile osservare anche i più fini dettagli che altrimenti andrebbero persi.

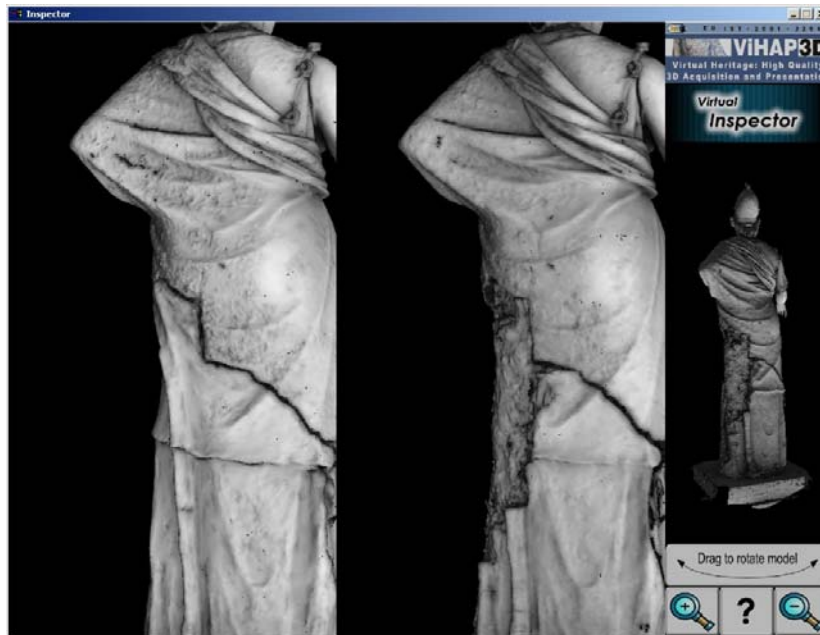


Figura 12. Il sistema di visualizzazione "Virtual Inspector", sviluppato da ISTI-CNR; sono visualizzati due diversi modelli della Minerva di Arezzo, digitalizzati in due diverse fasi intermedie del processo di restauro (restauro a cura della Soprintendenza Archeologica Toscana).

3.2 Catalogazione

L'introduzione di accurati modelli 3D nei cataloghi per i Beni Culturali permette di preservare nel tempo una descrizione "completa" delle caratteristiche di forma del bene: non solo è possibile conservare foto e documenti cartacei dell'opera in esame, ma anche una completa rappresentazione tridimensionale che ne faciliti lo studio, il riconoscimento od, eventualmente, la riproduzione. L'impiego di modelli 3D semplificati inoltre facilita la pubblicazione su web (vedi Figura 13), e quindi amplifica notevolmente la possibile diffusione dell'opera ad un maggior numero di utenti.

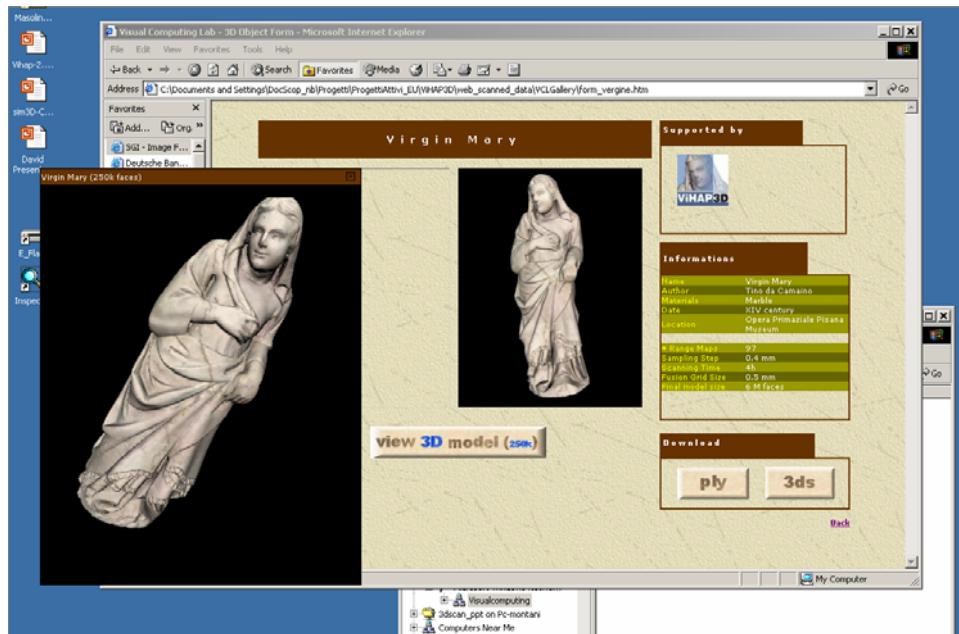


Figura 13. Presentazione interattiva di modelli 3D su web, realizzata adottando il browser commerciale Cult3D.



Figura 14. Un esempio di riproduzione materica ottenuta dal modello digitale 3D (tecnologia di riproduzione per "stereolitografia").

3.3 Riproduzione materica

La disponibilità di un modello digitale 3D rende possibile con le attuali tecnologie di realizzarne anche riproduzioni materiche in diversi materiali (materiali plastici, resine,

materiali lapidei, gesso, etc.). Queste tecnologie sono assolutamente non distruttive e permettono di ottenere un'elevata precisione di riproduzione (circa 0.2 mm).

La possibilità di poter riprodurre rapidamente un'opera qualsiasi facilita notevolmente la produzione di copie da sostituire all'originale (in caso di restauro, esposizione ad agenti inquinanti e così via). Tale tecnica è destinata a sostituire, nel futuro, l'impiego dei calchi in gesso. La riproduzione rapida presenta infatti i seguenti vantaggi rispetto alle consolidate tecniche di calco:

- Accuratezza più elevata
- Non-deformabilità (i calchi, normalmente prodotti con materiale siliconico, tendono a deformarsi col tempo, soprattutto nel caso che l'oggetto da riprodurre sia di grande formato)
- Possibilità di generare copie in qualsiasi scala di riproduzione
- È una tecnica non distruttiva e non invasiva (l'originale non viene *mai* toccato in alcuna maniera), mentre in vece sono noti gli effetti parzialmente distruttivi del calco in silicone (rimozione di patine o di porzioni di materiale non coerente)
- Non presenta linee di saldatura (come nel caso delle copie da calco, in corrispondenza alla giustapposizione tra le varie porzioni del calco in silicone).

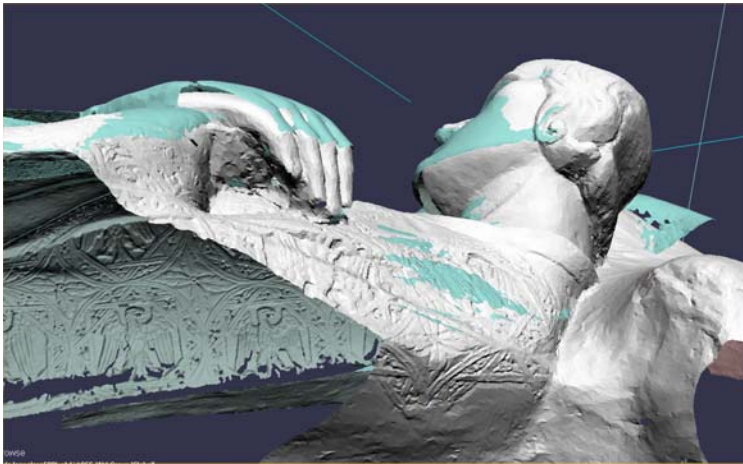


Figura 15. Acquisizioni 3D da calchi in gesso: nel caso di Arrigo VII giacente, la scansione sia dell'originale (modello colorato in verde) che del calco (modello grigio) ha evidenziato una deformazione del calco di alcuni centimetri (vedere ad esempio le mani o il cuscino); nel caso del busto di Laurana a destra, acquisito da calco, sono ben visibili nel modello digitale le linee di giuntura dei due gusci usati nel calco (linea di curvatura della superficie che va dalla spalla al collo).



Figura 16. Riproduzione materica in grande formato ottenuta dal modello digitale 3D di una parete graffita a Pompei, prodotta con dispositivi di riproduzione automatica (progetto diretto dalla Soprintendenza Archeologica di Pompei e dal centro DIAPREM della Fac. Architettura di Ferrara).

3.4 Computer Aided Restoration

La Computer Aided Restoration rappresenta un settore che si pone come obiettivo principale fornire strumenti di supporto al restauro di opere d'arte attraverso l'impiego di mezzi informatici. Le possibilità di uso di grafica 3D negli strumenti di ausilio al restauro sono notevoli: ad esempio, è possibile operare un restauro virtuale sul modello 3D, modificandone *forma ed apparenza* prima di intervenire sul modello originale. Oppure, tenere traccia – documentare – le varie operazioni eseguite dai restauratori sfruttando il modello 3D in maniera simile a quanto si fa nello studio e gestione del territorio con le tecnologie GIS (Geographical Information Systems). Ancora, è possibile sfruttare il modello 3D per visualizzare in maniera compatta ed efficace informazioni di diversa natura che siano state raccolte nella fase di analisi storico-artistica o scientifica pre-restauro.

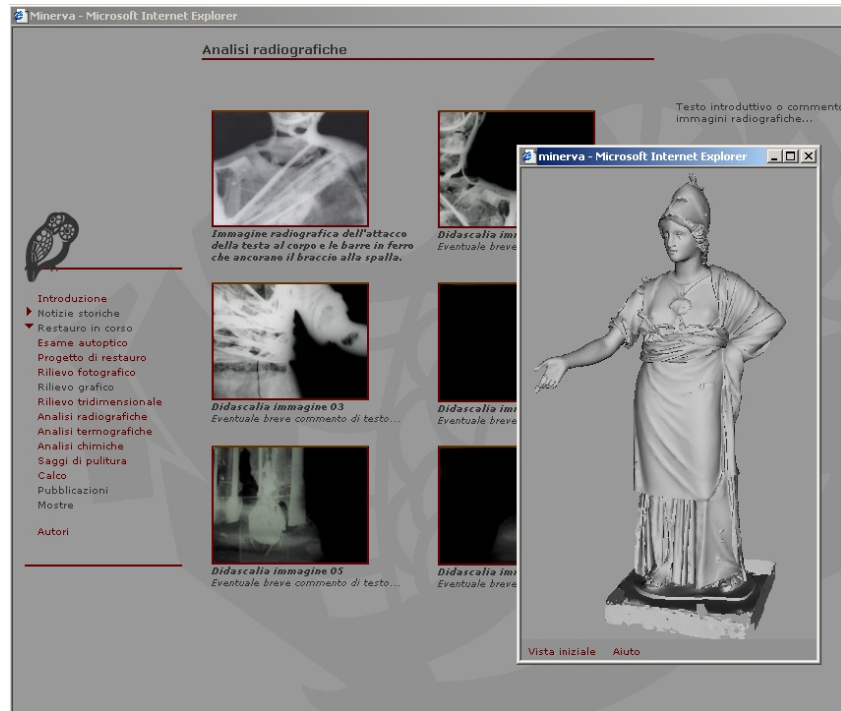


Figura 17. Una proposta per il sistema di documentazione del restauro della Minerva di Arezzo, sviluppato da ISTI-CNR.

Essenzialmente è possibile distinguere due principali modalità d'uso dei modelli digitali 3D nel supporto al restauro:

- Come *strumento di indagine*, ossia utilizzando i modelli digitali 3D come strumento diretto di lavoro nelle fasi di indagine e studio;
- Come *strumento di documentazione/presentazione*, ossia sfruttare i modelli digitali 3D come media ottimale per riferenziare spazialmente e presentare ogni altro tipo di informazione.

Di seguito riportiamo le esperienze effettuate dal VCLab durante la fase di restauro del David di Michelangelo, in modo da fornire degli esempi di possibile uso di tecnologia grafica 3D nel restauro.

Il restauro del David di Michelangelo

L'attività del nostro gruppo si è indirizzata su problematiche proposte direttamente dell'equipe di restauro e qui brevemente descritte. Il modello digitale è stato usato in due accezioni diverse ma complementari: come strumento con cui eseguire indagini specifiche, o come supporto per l'indicizzazione e l'integrazione dei risultati di altre campagne di indagine [Callieri04].

Nella prima accezione, i dati 3D sono stati utilizzati per:

- Caratterizzare le diverse classi di *esposizione della superficie* del David ad agenti precipitativi esterni, quali pioggia o polveri. Una simulazione ha permesso di ottenere una serie di risultati, qualitativi e quantitativi, che permettono di descrivere spazialmente come siano distribuite le aree della superficie del David sottoposte in misura maggiore all'impatto di agenti precipitativi esterni. L'insieme delle possibili direzioni di caduta degli agenti è stato definito come un cono verticale rovesciato, di ampiezza definibile nella simulazione come angolo di incidenza massimo con l'asse verticale della statua, e con direzioni di caduta distribuite in modalità random all'interno del conoide. Un esempio dei risultati è presentato in *Figura 18*. Le superfici mostrate sono state anche misurate e categorizzate in forma tabellare.
- Calcolare grandezze fisiche, tra cui particolare importanza hanno assunto il *baricentro*, la sua *linea di caduta* verticale ed il *volume* della statua, poichè ritenute informazioni estremamente importanti per una valutazione delle condizioni statiche dell'opera. Tali misurazioni sono state effettuate dal VCLab direttamente sul modello digitale, dopo opportune elaborazioni (messa a piombo, eliminazioni di buchi relativi ad aree non coperte dal rilievo digitale 3D, semplificazione della geometria, etc.). Le grandezze misurate sono: la posizione spaziale del **baricentro** della statua, localizzato in prossimità dell'inguine, all'interno del bacino (vedi *Figura 19*); la **proiezione verticale** del baricentro sul basamento della statua: la linea di proiezione verticale (visualizzata in blu in *Figura 19*) esce dalla parte alta posteriore della coscia sinistra, per poi rientrare nel marmo sul dorso del piede destro (vedi *Figura 20*). Infine, si è calcolato il **volume** della massa marmorea (inclusa la parte scolpita del basamento), che è risultato essere di 2,098 m³.

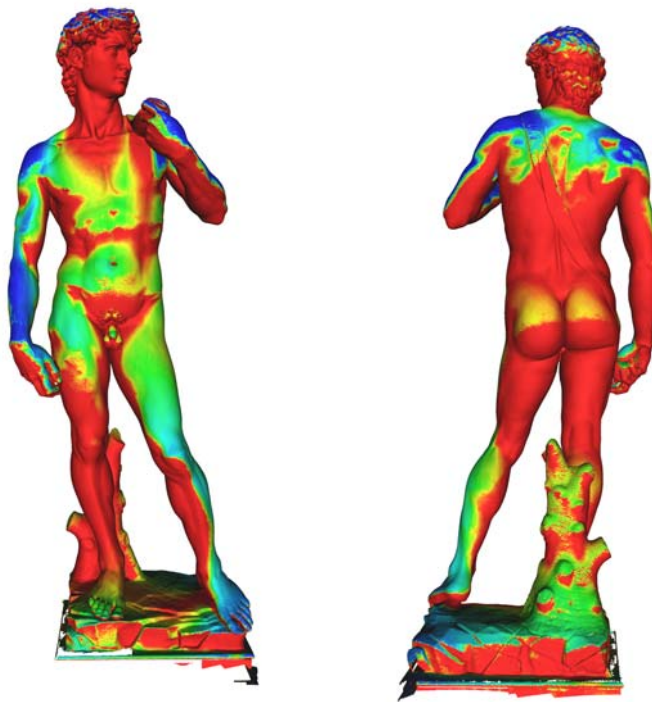


Figura 18. Esposizione della superficie del David a ricaduta di polveri od altri contaminanti. La visualizzazione presenta in una scala in falso colore le differenti classi di esposizione risultanti dalla simulazione (rosso: assenza di ricaduta, blu: massima densità di ricaduta), con un angolo di caduta di +/- 10 gradi dalla verticale.

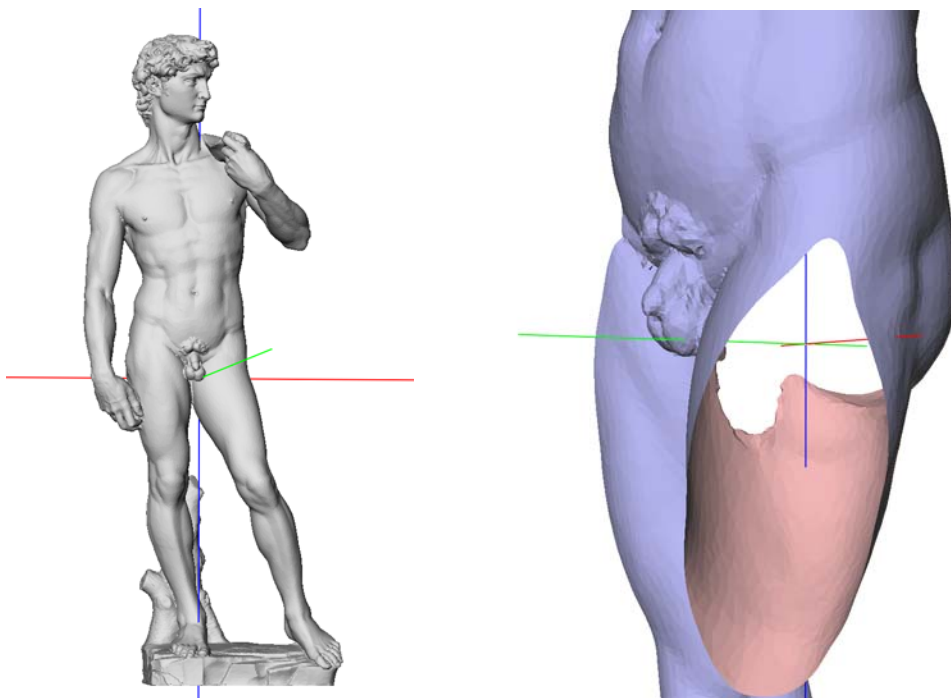


Figura 19. Calcolo della posizione spaziale del baricentro del David e della linea di proiezione verticale (in blu).

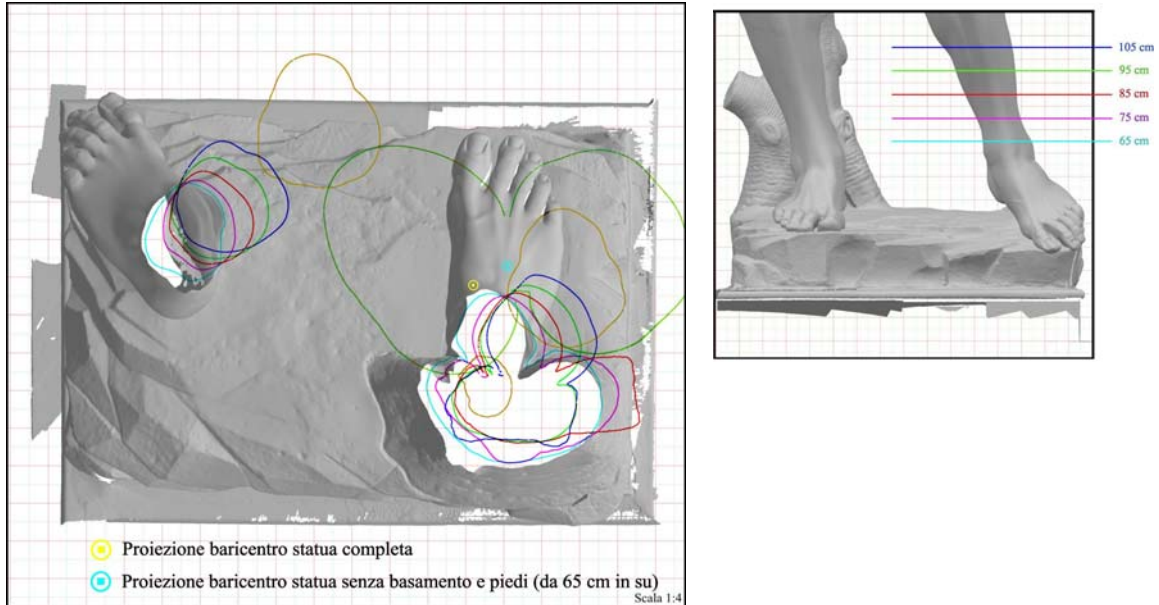


Figura 20. Visualizzazione della linea di proiezione in pianta e di alcuni profili di sezione (caviglie, ginocchia e inguine); la mappa in scala è stata realizzata con l'applicativo **Cavalieri** sviluppato nell'ambito del progetto.

Come accennato precedentemente, una seconda importante modalità di utilizzo dei modelli 3D è come strumento di documentazione, organizzazione e presentazione dei dati relativi al restauro. La campagna di restauro del David è stata preceduta da una completa e sofisticata fase di indagini scientifiche (da ripetere nel tempo per monitorare la condizione di conservazione dell'opera) ed una puntuale mappatura delle condizioni della statua prima del restauro effettuata dalle restauratrici. Usando tecnologia informatica, è possibile organizzare questa complessa mole di informazioni per mezzo di un sistema di gestione che ne permetta facile consultazione e confronto. In questo ambito, il modello digitale 3D è stato usato sia per indicizzare i dati (e rendere evidente la loro referenziazione sulla superficie della statua) che per mappare direttamente sulla superficie 3D alcune informazioni direttamente correlate (come ad esempio il rilievo del colore ripreso pervia fotografica, le immagini riprese in illuminazione UV dall'Opificio delle Pietre Dure che evidenziano la presenza di tracce di materiali organici sulla superficie dell'opera, o alcune caratterizzazioni della superficie). Il Laboratorio Visual Computing sta contribuendo alla realizzazione di tale sistema informativo avendo responsabilità della parte relativa alla gestione dei modelli 3D ed al loro uso a fini di indicizzazione o mapping.

Come primo esempio, mostriamo in *Figura 21* una immagine del modello 3D arricchito dal campionamento in luce UV realizzato su supporto fotografico dai tecnici dell'Opificio delle Pietre Dure; le varie immagini in luce UV sono state mappate sulla rispettiva zone della statua digitale, in modo da rendere possibile una visualizzazione interattiva in cui tutte le immagini siano visibili in modo integrato e referenziato alla superficie.



Figura 21. Mapping di una immagine UV sulla corrispondente sezione del modello digitale della statua.

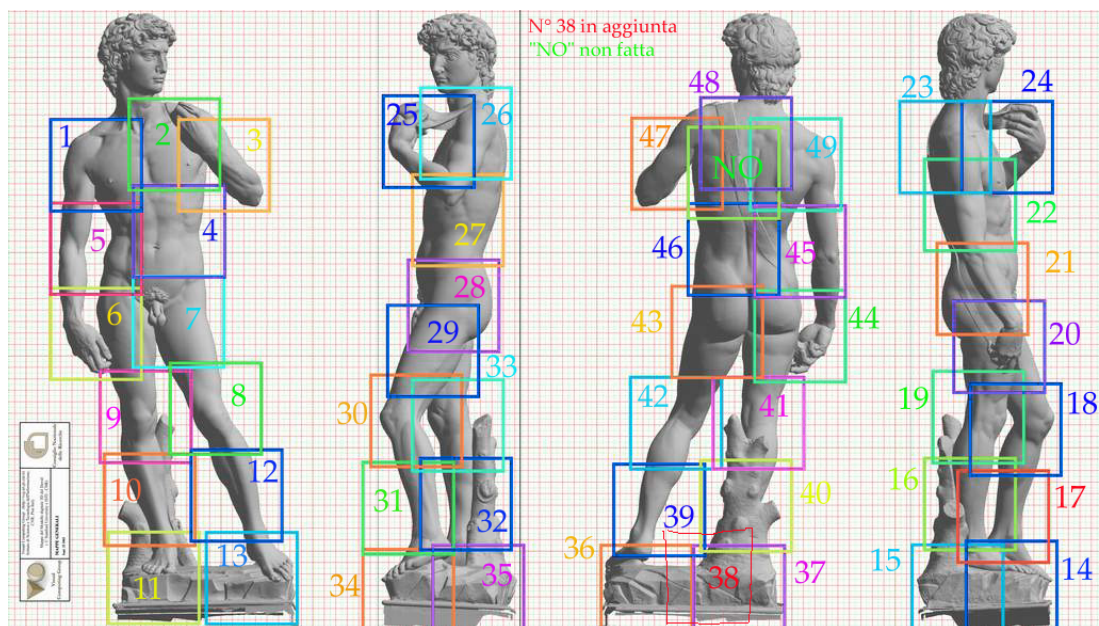


Figura 22. Il piano di ripresa per il rilievo fotografico del David, realizzato sia prima che dopo l'azione di restauro.

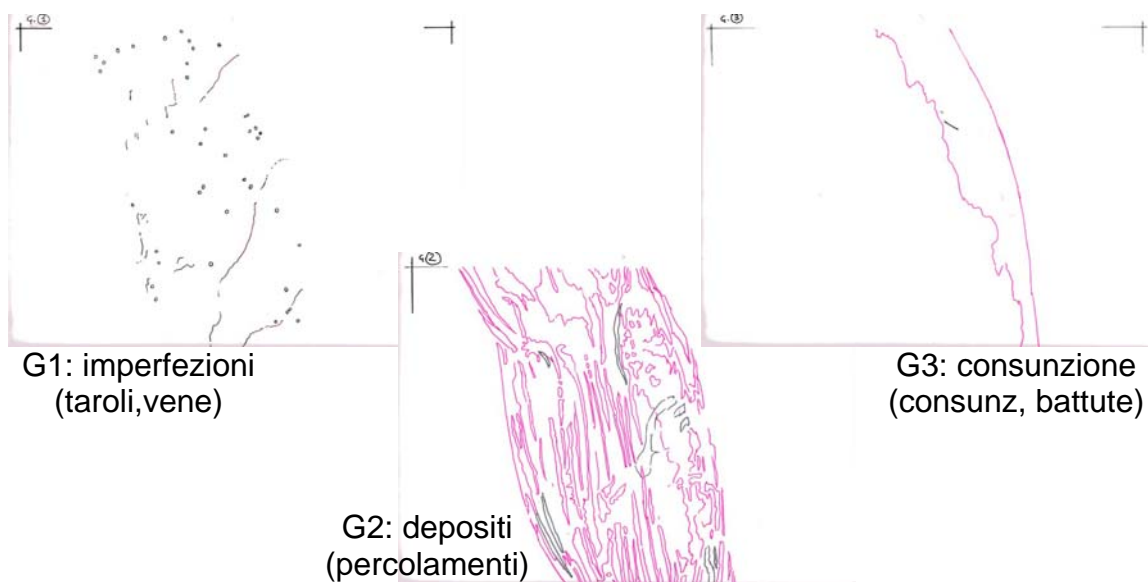


Figura 23. Alcuni esempi di rilievi prodotti dai restauratori del David per documentare lo stato di conservazione e degrado della superficie della statua.

Infine, è stata progettata una ripresa fotografica completa dello stato della superficie marmorea (vedi Figura 22) e per ognuna di tali aree le restauratrici hanno prodotto degli elaborati grafici su trasparente che riportano lo stato della superficie stessa (presenza di

vene o taroli, macchie o depositi, consunzione della superficie). Questi elaborati grafici sono stati successivamente digitalizzati (per scansione 2D) e resi proiettabili sulle corrispondenti immagini fotografiche. Un sistema di browsing interattivo permette quindi di analizzare una qualsiasi delle immagini e mappare selettivamente uno o più dei rispettivi rilievi (vedi Figura 24).

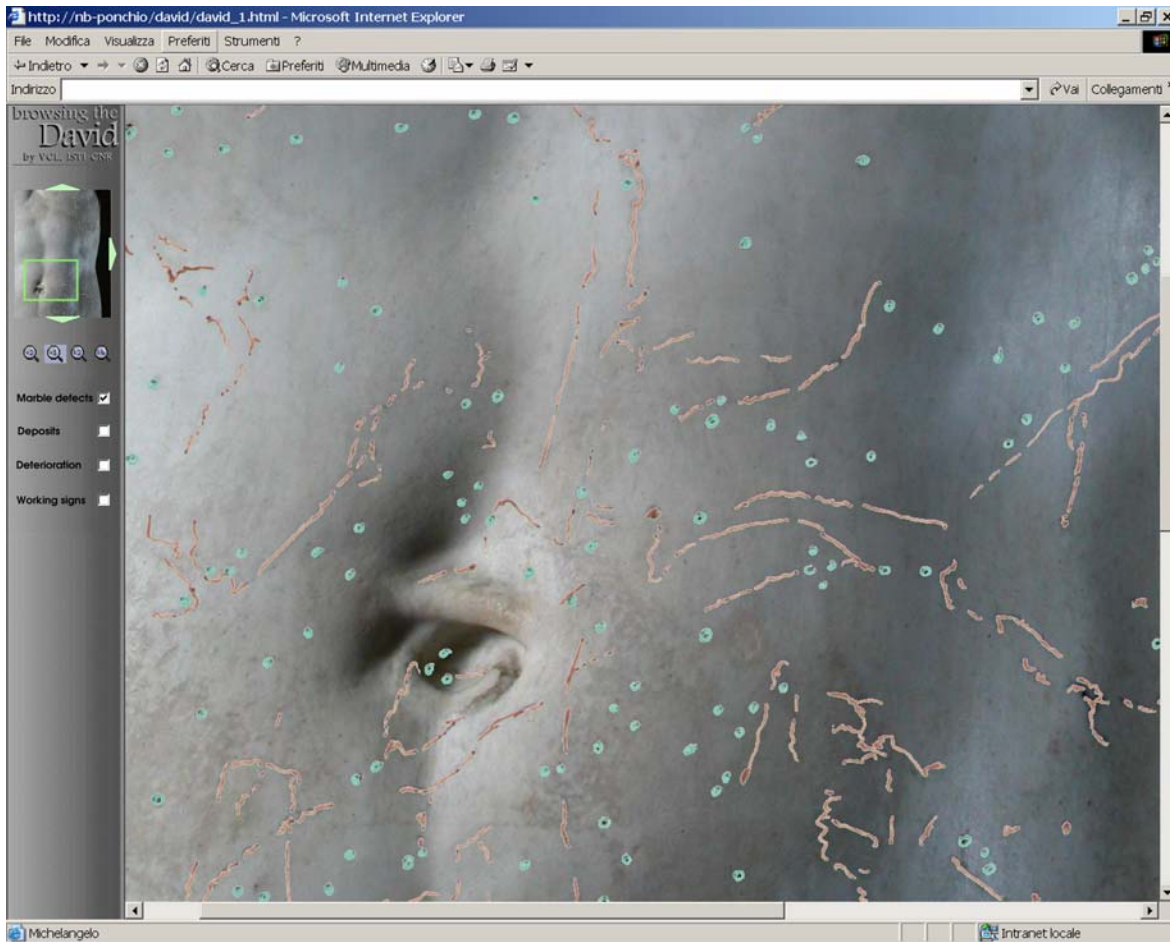


Figura 24. Una immagine del sistema interattivo per il browsing delle immagini fotografiche e dei rilievi prodotti dai restauratori del David.

3.5 Simulazione e ricostruzione virtuale

Un ulteriore utile impiego dei modelli 3D consiste nel ricostruire e simulare virtualmente l'aspetto originale di opere d'arte ormai parzialmente perdute, smembrate o distrutte. Un calzante esempio è fornito da un nostro recente progetto: la ricostruzione del monumento funebre di Arrigo VII, scolpito da Tino di Camaino all'inizio del XIV secolo e situato originariamente all'interno del Duomo di Pisa. Tale monumento, composto da almeno 15 statue (vedi Figura 25), fu smantellato pochi anni dopo la sua inaugurazione.

Si è quindi persa memoria storica dell'architettura di tale monumento. La ricerca storico/artistica ha permesso di riconoscere alcune opere come facenti parte del monumento funebre e varie ipotesi ricostruttive sono state proposte in letteratura. I modelli 3D ottenuti per scansione digitale di tutte le statue del monumento (vedi Figura 25) sono stati utilizzati in collaborazione con un'equipe di esperti per studiare sia le ipotesi ricostruttive esistenti in letteratura che per produrre nuove ipotesi, e quindi per riportare virtualmente la celebre opera d'arte di Tino da Camaino nella sua originale struttura architettonica (Figura 26).

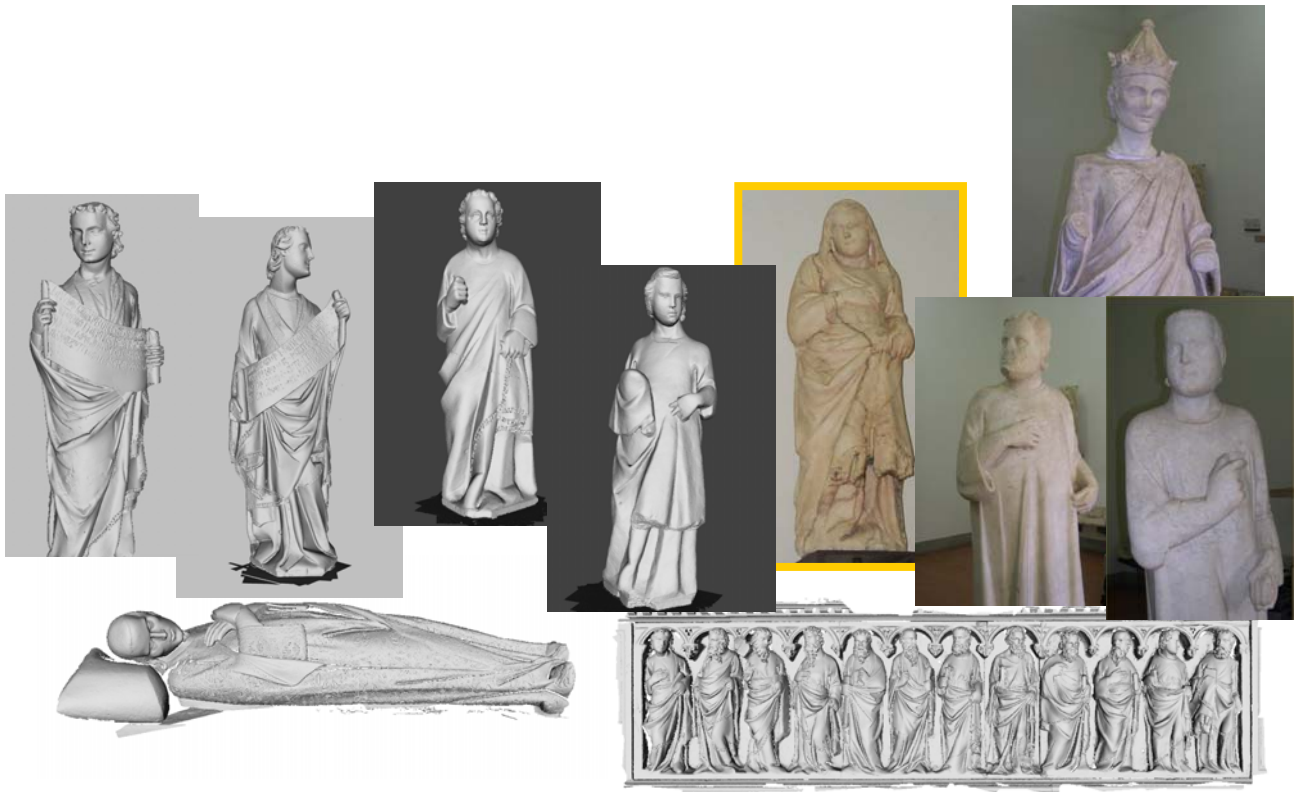


Figura 25. Le opere scultoree facenti parte del sepolcro di Arrigo VII (Pisa, Opera Primaziale Pisana), digitalizzate in 3D da ISTI-CNR (2003-2004).

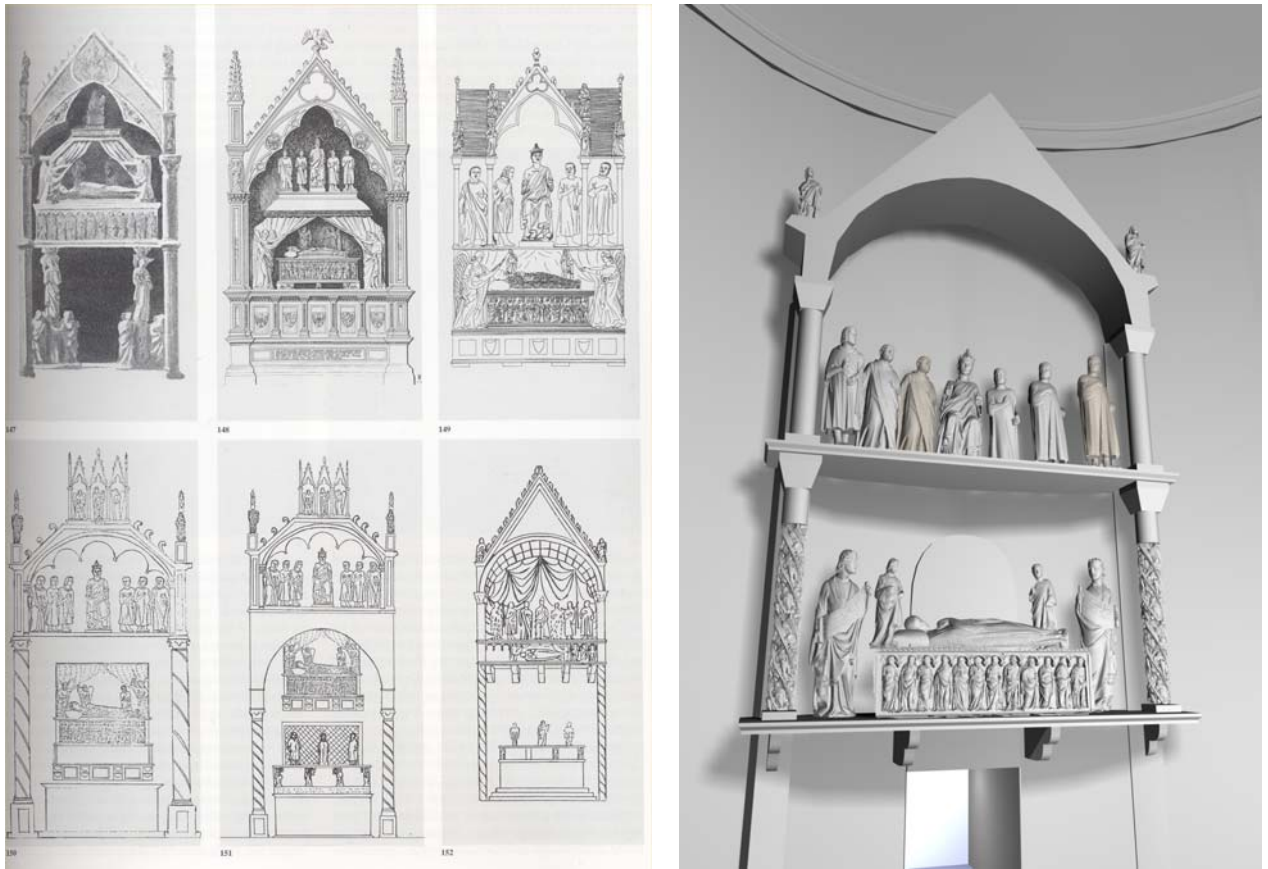


Figura 26. Ipotesi ricostruttive relative al sepolcro di Arrigo VII (Pisa, Opera Primaziale Pisana).

I modelli 3D sono anche stati utilizzati per progettare e realizzare un applicativo multimediale [Baracchini 04] che, installato nella sala dedicata a Tino di Camaino nel Museo dell'Opera del Duomo di Pisa, permette di ripercorrere la storia dell'autore e del monumento e di mostrare interattivamente le varie statue facenti parte del complesso (vedi Figura 27).



Figura 27. Alcune immagini del chiosco multimediale realizzato da ISTI-CNR per presentare al pubblico del Museo dell'Opera del Duomo di Pisa la storia del sepolcro di Arrigo VII.

3.6 Stampa su supporto cartaceo

Una necessità di natura estremamente pratica che è sorta nell'ambito delle nostre collaborazioni con enti di tutela e restauro è l'essere in grado di fornire stampe ad alta risoluzione e scala di riproduzione nota degli oggetti digitalizzati. Tali stampe in genere vengono utilizzate per pianificare e documentare il processo di restauro.

Produrre elaborati su carta da modelli 3D molto risolti non è semplice con software commerciale di disegno assistito (CAD), in quanto i sistemi commerciali non sono progettati (ad oggi) per gestire in modo efficiente mesh triangolate composte da decine di milioni di facce triangolari. Per questi motivi abbiamo sviluppato un tool, *Cavalieri*, in grado di sopperire alle necessità richieste dai restauratori.

Questo tool software (vedi la interfaccia in Figura 28) è in grado di produrre stampe ad alta risoluzione su plotter: in scala di riproduzione nota, utilizzando modelli 3D ad alta risoluzione, producendo sia viste prospettiche/assonometriche prodotte da qualsiasi punto di vista che sezioni generiche (piani di taglio sia ortogonali agli assi che posizionati in modo generico dall'utente).

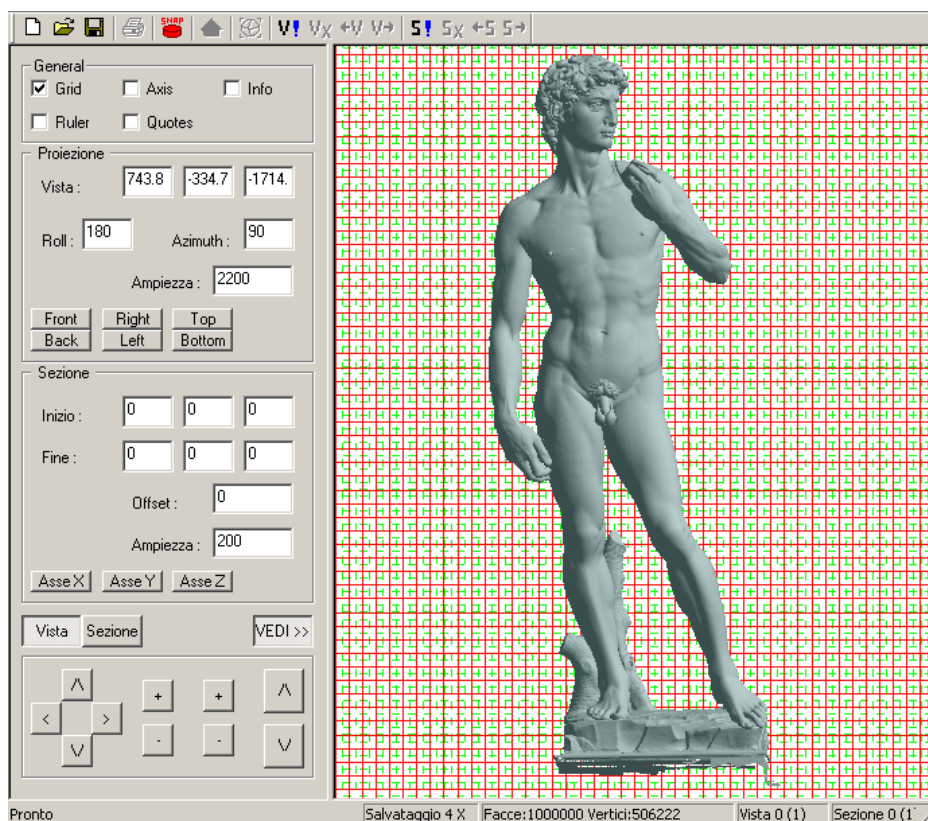


Figura 28. Interfaccia del sistema "Cavalieri" di ISTI-CNR (produzione di elaborati su carta da modelli digitali 3D).

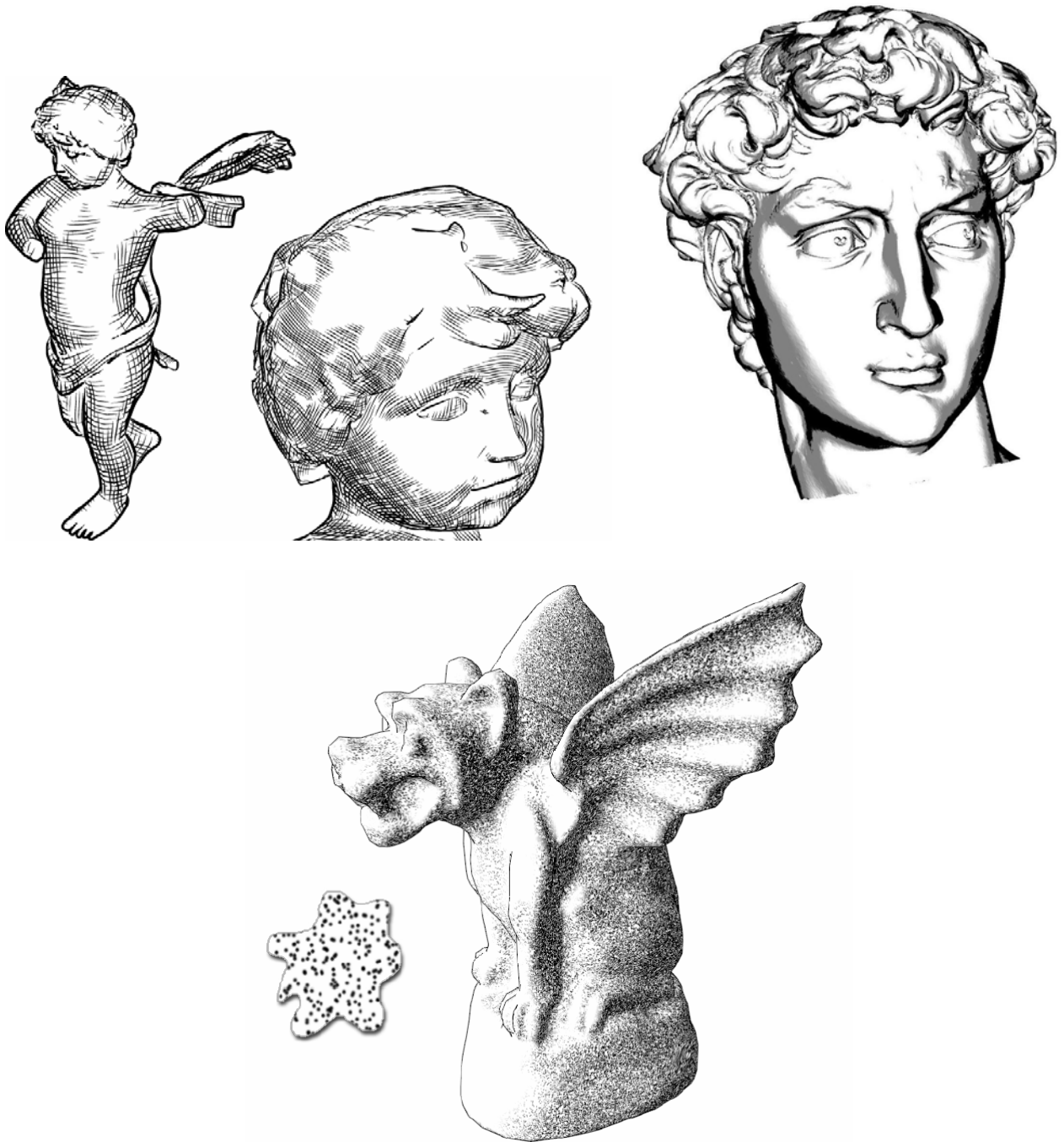


Figura 29. Esempi di tecniche di visualizzazione cosiddette “non-fotorealistiche”, ossia che tentano di simulare le classiche metodologie di disegno manuale.

Sempre in ambito di presentazione visiva, spesso insorge la necessità di fornire stampe per cataloghi e brochure. In questi casi, è desiderabile poter fornire anche rappresentazioni *non-fotorealistiche* del modello 3D. Per rappresentazioni *non-fotorealistiche* si intendono quelle tecniche di rendering che permettono di generare

immagini in cui l'oggetto non sia presentato in modo realistico (ossia, in modo simile a come appare in fotografia), ma bensì cercando di emulare le tecniche di disegno manuale. Le tecniche di disegno manuale infatti non solo garantiscono la produzione di elaborati esteticamente più gradevoli, ma anche hanno insita la capacità di isolare nel disegno le caratteristiche salienti dell'oggetto stesso. Nel rappresentare ad esempio la forma di un oggetto, nel disegno manuale spesso tracciamo solo le linee costruttive essenziali, fornendo una rappresentazione sintetica e semanticamente ricca pur nella sua sinteticità. Nel settore della grafica 3D interattiva si è aperto recentemente un nuovo filone di studio, volto alla progettazione di algoritmi che permettano di realizzare tecniche di presentazione visiva non fotorealistiche. Un esempio di tali tecniche è riportato in *Figura 29*.

Bibliografia

- [Baracchini 04] C. Baracchini, A. Brogi, M. Callieri, L. Capitani, P. Cignoni, A. Fasano, C. Montani, C. Nenci, R. P. Novello, P. Pingi, F. Ponchio, R. Scopigno, "Digital reconstruction of the Arrigo VII funerary complex", VAST 2004 Conf. Proc., Dic. 7-10, 2004, pp. 145-154.
- [Bendels 04] G. Bendels, P. Degener, R. Wahl, M. Kortgen, R. Klein, "Image-based registration of 3d range data using feature surface elements", 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2004) (December 2004), Chrysanthou Y., Cain K., Silberman N., Niccolucci F., (Eds.), Eurographics, pp. 115-124.
- [Bernardini 02] F. Bernardini, H. E. Rushmeier, "The 3D Model Acquisition Pipeline", Computer Graphics Forum, Vol. 21(2), 2002, pp. 149-172.
- [Besl 92] P. J. Besl, N. D. McKay, "A method for registration of 3D shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence 14, 2 (Feb. 1992), 239-258.
- [Brusco 05] N. Brusco, M. Andreetto, A. Giorgi, G. Cortellazzo, "3D registration by textured spin-images", in 3DIM'05: Fifth Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modelling (June 13-16 2005), IEEE Comp. Soc., p. (in press).
- [Callieri 02] M. Callieri, P. Cignoni, R. Scopigno, "Reconstructing textured meshes from multiple range and RGB maps", *Vision, Modeling and Visualization 2002*, Int. Conf., Erlangen, Germany, November 20 - 22, 2002, pp. 419-426.
- [Callieri03] M. Callieri, P. Cignoni, F. Ganovelli, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, "VCLab's Tools for 3D range data processing", 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage (VAST2003), Brighton (UK), 5-7 November 2003, pp. 13-22.
- [Callieri04] M. Callieri, P. Cignoni, F. Ganovelli, G. Impoco, C. Montani, P. Pingi, F. Ponchio, R. Scopigno, "Visualization and 3D data processing in David's restoration", *IEEE Computer Graphics & Applications*, IEEE Comp. Soc., 24(2), March/April 2004, pp. 16-21.
- [Cignoni 03] P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, R. Scopigno, "External Memory Management and Simplification of Huge Meshes", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 9(4), 2003, pp. 525-537.

- [Cignoni 04] P. Cignoni, F. Ganovelli, E. Gobbetti, F. Marton, F. Ponchio, R. Scopigno, "Adaptive TetraPuzzles: Efficient Out-of-Core Construction and Visualization of Gigantic Multiresolution Polygonal Models", *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH 2004)*, Vol. 23(3), 2004, pp. 796-803.
- [Curless 96] B. Curless, M. Levoy, "A volumetric method for building complex models from range images", *Comp. Graph. Proc., Annual Conf. Series (SIGGRAPH 96)*, ACM Press, 1996, pp. 303-312.
- [Curless 00] B. Curless, S. Seitz, "3D Photography", in *ACM SIGGRAPH 2000 Course Notes, Course No. 19* (August 24th 2000).
- [Lensch 03] H. P. A. Lensch, J. Kautz, M. Goesele, W. Heidrich and H.-P. Seidel, "Image-Based Reconstruction of Spatial Appearance and Geometric Detail", In *ACM Transactions on Graphics*, 22(2), 2003, pp. 234-257.
- [Lorensen 87] W. E. Lorensen, H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 87 Proceedings)*, Anaheim, California; 27 - 31 July 1987, pp. 163-170.
- [Pingi 05] P. Pingi, A. Fasano, P. Cignoni, C. Montani, R. Scopigno, "Exploiting the scanning sequence for automatic registration of large sets of range maps", *Computer Graphics Forum*, NCC Blackwell, Vol. 24(3), 2005 (in press).
- [Pulli 99] K. Pulli, "Multiview registration for large datasets", *Proc. 2nd Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, IEEE, 1999, pp. 160-168.
- [Tsai 86] R. Y. Tsai, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision", *Proceedings CVPR '86 (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, June 22--26, 1986)*, IEEE Publ. 86CH2290-5, pp. 364-374.