

# Distretto ICT – LAB3D:

## Laboratorio di Acquisizione, Distribuzione e Visualizzazione di Modelli 3D Complessi

Enrico Gobetti, Fabio Bettio, Fabio Marton e Marco Agus

*Visual Computing Group - CRS4*

Ruggero Pintus, Gianmauro Cuccuru, Roberto Combet, Emilio Merella, Alex Tinti

*DISTRICT LAB3D - SardegnaRicerche*

December 2009

### 1.1 Introduzione

Il *Laboratorio di Acquisizione, Distribuzione e Visualizzazione di Modelli 3D Complessi* (LAB3D) del Distretto ICT della Regione Sardegna si interessa di tutta una serie di applicazioni al cui centro è la rappresentazione virtuale molto dettagliata di oggetti tridimensionali. In particolare, il laboratorio sviluppa ed applica tecnologie abilitanti per acquisire in maniera accurata forme e colori di oggetti sia microscopici che macroscopici, trasformare la massa di informazioni acquisite in modelli geometrici digitali degli oggetti di interesse, archiviare e trasmettere efficacemente questi modelli senza imporre limiti di scala e precisione e riprodurli sia fisicamente che virtualmente all'interno di applicazioni interattive. Il contesto di intervento è quello, più ampio della creazione, trattamento e esplorazione di enormi quantità di dati. Le tecnologie per affrontare questi problemi stanno diventando sempre più centrali nel settore dell'informatica. Una delle ragioni di fondo è il fatto che, in generale, le persone stanno diventando sempre più sommerse da dati da gestire ed analizzare in ogni tipo di attività. Anche se quasi tutti siamo consapevoli di questo aumento di informazioni da trattare, il loro enorme tasso di crescita non viene forse ancora immediatamente percepito. È interessante, al riguardo, far riferimento ad un recente rapporto 1.6, che ha stimato in 161 esabyte (miliardi di gigabyte) la quantità di informazione digitale creata nel 2006 e prevede che questa continui a crescere annualmente del 57%, per raggiungere ad esempio 988 esabyte nel 2010. Un risultato di questa crescita esponenziale è che si prevede che la quantità di dati prodotta nel prossimo futuro sia maggiore di tutta la quantità prodotta finora!

Perché questa notevole quantità di dati sia effettivamente utile, dobbiamo metterci in condizione di sfruttarla utilizzando al meglio le nostre capacità cognitive, sintetizzando i dati in informazioni che possano essere usate per accrescere la conoscenza, prendere decisioni, migliorare la produzione, e così via. Dato che il canale visivo rappresenta il percorso preferenziale per raggiungere il cervello, molte applicazioni enfatizzano tecniche visuali, le principali essendo quelle grafiche interattive. In molti casi, si tratta di generare rappresentazioni grafiche da una massa di informazioni di diverso genere. In molti altri, l'informazione è già intrinsecamente tridimensionale alla sorgente perché si tratta di esplorare al meglio rappresentazioni di oggetti fisici. È questo secondo caso il settore di intervento del laboratorio LAB3D.

La creazione e l'esplorazione interattiva di modelli tridimensionali molto complessi è diventata ormai da tempo una componente essenziale di molte applicazioni scientifiche ed ingegneristiche e sta diventando sempre più importante in numerosissimi altri campi. Alcuni settori importanti in cui i dati tridimensionali stanno crescendo esponenzialmente sono i seguenti:

- **Progetti ingegneristici a larga scala.** Oggigiorno, aeroplani completi, navi, macchine, ecc. sono progettati in modo puramente digitale. Di solito, più team in posizioni geografiche differenti sono coinvolti in tali complessi processi produttivi, che riguardano la creazione di migliaia di componenti differenti, modellate con la massima accuratezza possibile. Ad esempio il modello CAD dell'aeroplano Boeing 777 in Figura 1 consiste di 13000 pezzi separati ed è visualizzato utilizzando circa 400M triangoli. I dati non compressi occupano circa 12GB.
- **Simulazioni scientifiche.** Le simulazioni numeriche di fenomeni naturali possono produrre enormi quantità di dati che hanno bisogno di essere visualizzati per poter essere interpretati da un punto di vista scientifico. Esempi di questo tipo riguardano l'inversione sismica, le reazioni nucleari, la combustione all'interno di motori, e la fluido-dinamica, giusto per menzionarne alcuni. La crescita nell'accuratezza numerica delle simulazioni così come nella velocità dei calcoli produce oggi dataset dell'ordine del gigabyte o addirittura del terabyte. Ad esempio, l'isosuperficie in Figura 1, un singolo passo temporale di una simulazione dinamica, è rappresentata da quasi 400 milioni di triangoli. I dati non compressi occupano oltre 9GB.
- **Acquisizione e misurazione di oggetti del mondo reale.** Oltre alla modellazione e al calcolo numerico, un modo comune per acquisire dati di modelli reali consiste nella scansione di oggetti. Le moderne tecnologie di acquisizione digitale consentono di rilevare con una grande accuratezza oggetti tridimensionali di varie dimensioni, dalla scala microscopica, ad esempio attraverso tecnologie di microscopia elettronica, a quella macroscopica, attraverso tecniche di computer vision o laser scanning. Ad esempio, la ricostruzione del San Matteo di Michelangelo in Figura 1 contiene quattro punti per millimetro e consta di quasi 400 milioni di triangoli. I dati non compressi occupano circa 9GB.
- **Telerilevamento.** Le moderne tecnologie di acquisizione ci permettono di ottenere immagini dettagliate della terra. Questi dati sono in continua crescita. Google Earth, ad esempio, ha sfruttato 70TB di dati di immagini da satellite nel 2006 per produrre le sue visualizzazioni 1.6. La ricostruzione dell'Italia sviluppata da CRS4 in collaborazione con CGR presentata in Figura 1 contiene 4TB di dati solo per il colore.
- **Medicina.** Negli ultimi anni si è assistito ad una rapida evoluzione tecnica delle modalità di imaging medico, con importanti benefici per i metodi diagnostici. Il significativo miglioramento nella risoluzione spaziale dei dataset ha abilitato delle validazioni diagnostiche più dettagliate e nuove misurazioni multi-variabile hanno portato a possibilità di analisi senza precedenti. Oltretutto, i ridotti tempi di scansione permettono delle procedure che precedentemente erano impossibili, come ad esempio scansioni ad alta qualità del cuore durante i battiti. Il rovescio della medaglia di questo importante progresso è una crescita enorme nelle dimensioni dei data set, anche per gli esami di routine. In particolare, il volume di immagini raccolte sta crescendo di taglia

sulla base dell'avanzamento della tecnologia TAC multi-rilevatore, nello specifico gli scanner TAC a 64 rilevatori e più recentemente gli scanner a doppia sorgente. A seconda del tipo di acquisizione, i dataset possono raggiungere dimensioni di diversi gigabyte, con tempi di acquisizione misurati in secondi. Le acquisizioni dinamiche allo stesso modo stanno raggiungendo l'ordine del terabyte. Il modello volumetrico in Figura 1 contiene ad esempio oltre 2 miliardi di campioni a 16bit per componente.

I modelli così generati, essenziali per una vastissima gamma di applicazioni, risultano certamente molto dettagliati, ma, proprio per questo, difficili da gestire in maniera efficace. I problemi di base da risolvere includono la creazione di modelli tridimensionali realistici a partire da dati sorgente, l'archiviazione e distribuzione efficiente di questi modelli e la loro presentazione tramite visualizzazioni o riproduzioni fisiche. Tutti questi problemi sono tipicamente trattabili in casi ristretti, ma molto difficili da risolvere quando la massa di dati è molto grande, spesso superiore alla quantità di memoria disponibile su una singola postazione grafica. Per poterli affrontare, bisogna sviluppare ed applicare metodi specifici per gestire una massa di dati potenzialmente illimitata avendo a disposizione risorse limitate.

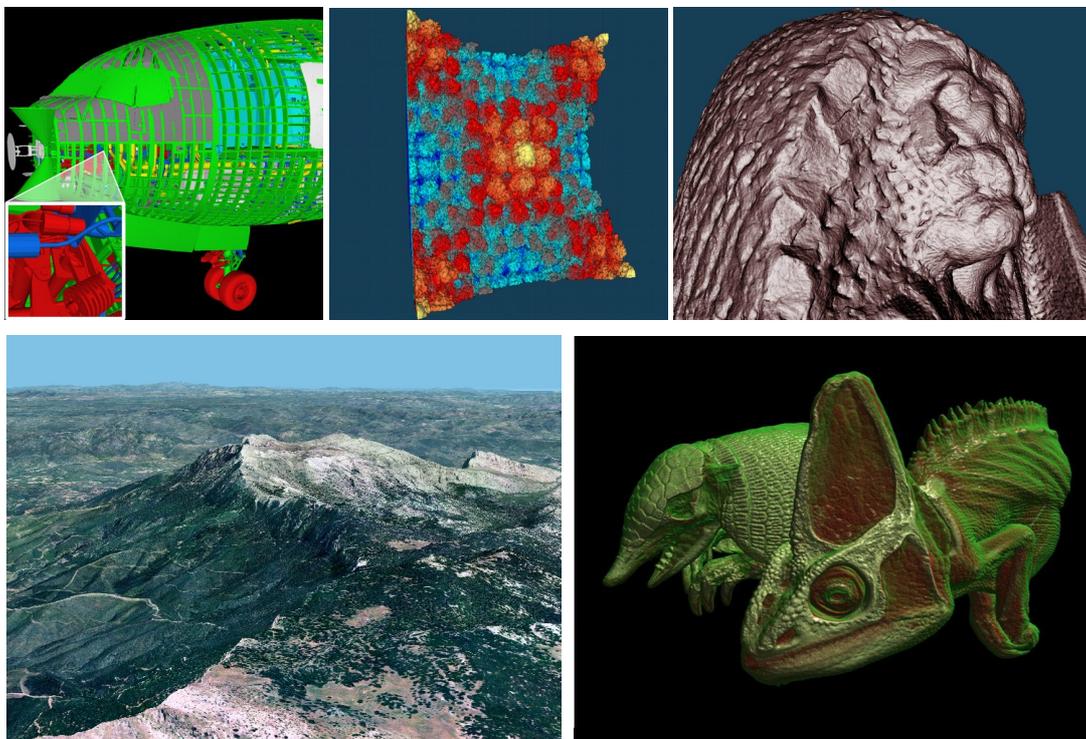


Figura 1 Alcuni esempi di modelli 3D complessi. Dall'alto a sinistra: modello del Boeing 777 (oltre 13'000 parti e 370'000 triangoli – Dati forniti da The Boeing Corporation); isosuperficie estratta da una simulazione di fluidodinamica (oltre 350'000 triangoli – Dati forniti da LLNL); ricostruzione del San Matteo di Michelangelo (oltre 350'000 triangoli – Dati forniti da Stanford University); particolare di una ricostruzione del territorio italiano (4TB di dati – Dati forniti da Blom CGR); visualizzazioni anatomiche derivanti da micro-CT (oltre 2 miliardi di voxels).

Lo sviluppo di metodi e sistemi per il trattamento di grossi moli di dati è un settore di ricerca molto attivo a livello internazionale, nel quale la Regione Sardegna può annoverarsi tra i poli di eccellenza a livello nazionale ed internazionale. In particolare, il *Visual Computing Group* del CRS4 (Centro di Ricerca, Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna) ha sviluppato una serie di metodi e tecnologie che sono considerati attualmente allo stato dell'arte dalla comunità scientifica. Il LAB3D si appoggia sull'esperienza acquisita dal CRS4 ed ha come fine

l'innovazione e il trasferimento tecnologico di risultati di ricerca attraverso attività di formazione, attività dimostrative e sviluppo e distribuzione di prototipi software.

## **1.2 Background: Il gruppo Visual Computing del CRS4**

Nell'ultimo decennio il *Visual Computing* si è affermato come una delle discipline chiave dell'informatica. Il suo ambito di ricerca riguarda la progettazione di metodi e sistemi per la modellazione geometrica e fisica, l'acquisizione e sintesi di immagini, la visualizzazione scientifica e la realtà virtuale.

Il CRS4 contribuisce in modo attivo a questo settore di ricerca, sfruttando a fondo il suo carattere multidisciplinare, che combina esperienze nella modellistica matematica, nella simulazione, nella visualizzazione e nella realtà virtuale. Le attività in questo settore sono iniziate da un piccolo nucleo orientato alla visualizzazione scientifica e si sono poi gradualmente estese a partire dal 1996 per coprire buona parte dello spettro applicativo del Visual Computing. Il gruppo Visual Computing è attualmente composto da 7 ricercatori e tecnici e svolge sia attività di ricerca che di supporto.

La rilevanza nazionale ed internazionale della ricerca svolta dal gruppo Visual Computing del CRS4 è evidenziata oltre che dal buon numero di pubblicazioni scientifiche importanti e dalla partecipazione attiva alla comunità scientifica, dalla sua costante presenza nei programmi di ricerca Italiani e della Unione Europea e dalla sua partecipazione a progetti industriali di ricerca e sviluppo. Come per ogni attività di ricerca di rilievo, i lavori si svolgono in un contesto internazionale. Tra le collaborazioni scientifiche attive citiamo qui solo quelle consolidate nel settore della visualizzazione di modelli complessi con The Boeing Corporation, University of North Carolina in Chapel Hill (UNC), Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Università di Zurigo e ISTI-CNR.

### **1.2.1 Esempi di attività di ricerca e sviluppo**

La ricerca e le attività di sviluppo tecnologico nel settore del Visual Computing sono principalmente orientate verso la grafica in tempo reale e la simulazione visiva. L'obiettivo è la creazione di ambienti tridimensionali interattivi caratterizzati da una stretta integrazione tra le componenti di acquisizione, modellazione, simulazione e visualizzazione, in contesti nei quali la complessità dei dati da trattare è molto grande. La necessità di fornire un adeguato input al sistema percettivo umano impone dei requisiti molto forti alle applicazioni, requisiti che possono essere solamente soddisfatti impiegando una combinazione di metodi specializzati, tra cui quelli *time-critical*, multirisoluzione e *out-of-core*, implementati su computer ad alte prestazioni, hardware specializzato e sistemi paralleli.

L'incremento della disponibilità e la rapida evoluzione dei componenti commerciali ad alte prestazioni di calcolo, grafica e I/O sta espandendo vertiginosamente l'applicabilità e la base degli utenti di queste tecnologie, fino a poco tempo fa destinate solo ad utenti specializzati. In particolare, i più recenti sviluppi nel campo dell'hardware grafico 3D di tipo commerciale hanno portato all'introduzione di pipeline grafiche parallele programmabili potentissime e a bassissimo costo. La programmabilità delle schede grafiche non consente solo di implementare via hardware molti algoritmi di visualizzazione e di calcolo, ma anche di sviluppare metodi completamente nuovi per migliorare le prestazioni di applicazioni in tempo reale che devono trattare dati molto grandi, con ricadute dirette in molti settori applicativi.

In passato, il CRS4 ha progettato e sviluppato metodi specializzati e sistemi interattivi che utilizzano tali tecnologie in molte aree tematiche, comprese la società dell'informazione, le scienze della vita, le scienze ambientali, e l'energia. Illustriamo qui brevemente alcune delle attività svolte in settori di ricerca di interesse diretto per il Distretto ICT e che, in quel quadro, sono oggetto di trasferimento tecnologico.

#### **1.2.1.1 Territorio ed ambienti urbani**

L'enorme successo di visualizzatori 3D ad ampia diffusione basati su tecnologie Web, come *Google Earth*, *NASA WorldWind*, o *Microsoft Virtual Earth* ha fortemente rinnovato negli ultimi anni l'interesse nelle tecnologie per la distribuzione e la visualizzazione di rappresentazione 3D ad alta risoluzione del territorio. Queste tecniche hanno una lunga storia, che nasce con i primi simulatori di volo. Molti approcci, basati su modelli multirisoluzione dinamici, sono stati proposti per gestire i problemi dovuti alla taglia enorme dei modelli di terreno. L'idea alla base di queste tecnologie è quella di costruire dinamicamente ed incrementalmente durante la navigazione una rappresentazione approssimata del terreno e visualizzarla al posto del modello completo.

Il CRS4 ha sviluppato in questo campo diverse tecnologie che sono ritenute allo stato dell'arte dalla comunità scientifica. Per quanto riguarda i terreni, visti come mappe di elevazione colorate, è stato introdotto uno dei primi metodi per generare rapidamente superfici a risoluzione variabile tramite assemblaggio di segmenti precalcolati 1.6. Questa tecnologia permette di sfruttare appieno le moderne architetture grafiche, massimizzando l'uso degli acceleratori grafici e minimizzando quello delle CPU. Alla sua introduzione, ha reso possibile un incremento di un ordine di grandezza nella velocità di disegno di terreni continui a risoluzione variabile. Il metodo, sfruttando la programmabilità delle schede grafiche, può inoltre assicurare un'accuratezza millimetrica nella visualizzazione a scala globale 1.6. Uno schema di compressione *wavelet* con garanzie di accuratezza permette inoltre di ridurre efficacemente i dati da trasmettere 1.6. L'efficienza dell'approccio è stata dimostrata in numerose applicazioni di visualizzazione e simulazione. Nel quadro di attività di trasferimento tecnologico, la regione Sardegna ha sviluppato su questa base i sistemi Sardegna3D ([www.sardegna3d.it](http://www.sardegna3d.it)) e Italia3D ([www.italia3d.it](http://www.italia3d.it)) per la presentazione online del territorio regionale e nazionale.

Mentre, tradizionalmente, i sistemi per la visualizzazione distribuita di rappresentazioni multi-risoluzione del pianeta si sono essenzialmente concentrati su terreni digitali con immagini applicata, l'interesse di ricerca ora si va spostando verso gli ambienti urbani, soprattutto per motivi legati alle opportunità economiche connesse. Questi ambienti sono molto più complicati da gestire efficacemente dato che non si tratta semplicemente di gestire semplici mappe di elevazione e colore come nel caso classico dei terreni. Per permettere l'esplorazione interattiva di modelli urbani molto dettagliati, è stata pertanto sviluppata, in collaborazione con ISTI-CNR, una nuova rappresentazione discreta per la codifica efficiente di insiemi di edifici 1.6 (vedi Figura 2). La rappresentazione permette di ottenere una visualizzazione approssimata di buona qualità e può servire da base per un modello multi-risoluzione completo di una città.

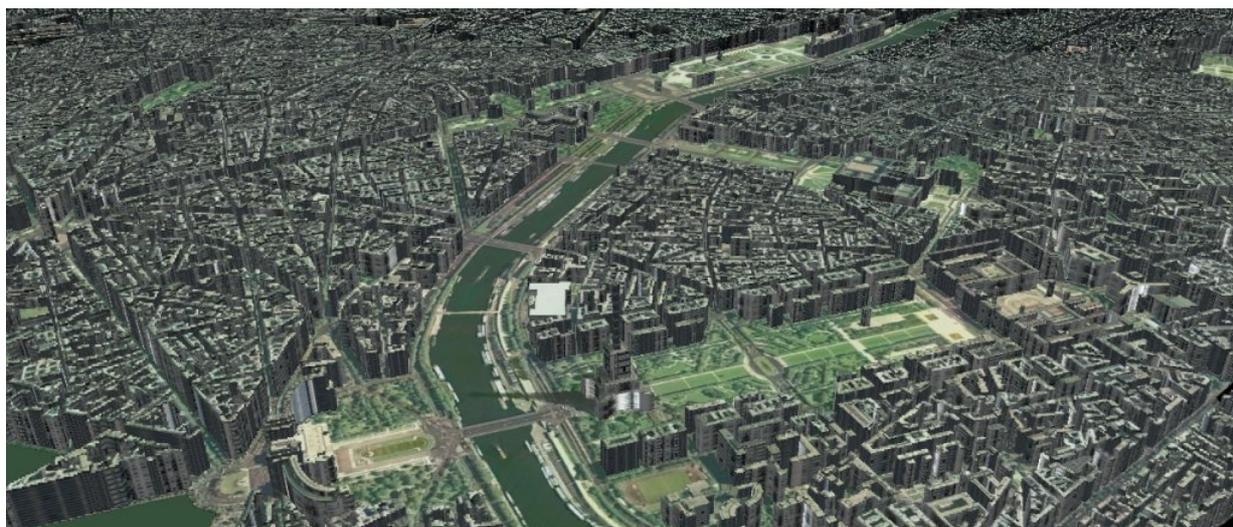
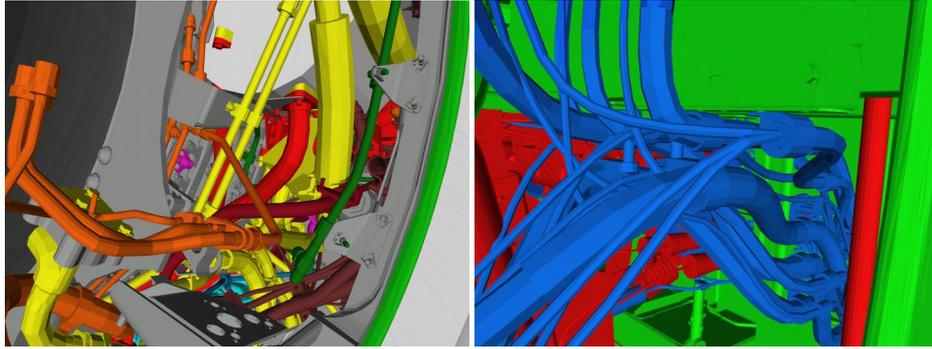


Figura 2 Visualizzazione della città di Parigi con il metodo BlockMap (Dati forniti da BLOM)

### 1.2.1.2 Modelli geometrici complessi

In numerosi settori applicativi, tra cui i beni culturali ed il *reverse engineering*, è richiesta la visualizzazione e l'ispezione accurata di scene di interesse. Le metodologie proposte per l'acquisizione semi-automatica delle caratteristiche di forma e colore di oggetti tridimensionali sono molteplici e, ormai, sta diventando comune avere rappresentazioni di oggetti o scene tridimensionali densamente campionate contenenti centinaia di milioni o miliardi di campioni. Come nel caso dei terreni, le superfici da visualizzare sono molto accurate e difficili da visualizzare a causa della loro mole, ma, inoltre, presentano caratteristiche topologiche e di forma che rendono il loro trattamento più complesso di quello necessario per visualizzazioni geografiche. Uno dei risultati principali del CRS4 in questo settore è stato l'introduzione di modelli scalabili basati sulla decomposizione volumetrica gerarchica, che hanno portato alle prime tecniche capaci di sfruttare appieno gli hardware grafici per esplorare grandi superfici triangolate e nuvole di punti 1.61.6. Le tecniche sono state utilizzate su numerosi casi test, tra cui i modelli del Digital Michelangelo Project.

Le simulazioni numeriche e la progettazione computerizzata generano modelli molto complessi, sia geometricamente che topologicamente, che sono molto più difficili da visualizzare di quelli tipicamente prodotti da scansioni di modelli reali. La loro gestione efficace è un campo di ricerca molto attivo e tuttora aperto. In questo settore, uno dei principali risultati del CRS4 è stato l'introduzione di un metodo volumetrico basato sulla modellazione multi-scala della risposta all'illuminazione piuttosto che su livelli di dettaglio geometrici 1.6. Il metodo è stato validato su numerosi casi complessi, inclusa l'ispezione dell'intero modello del Boeing 777 su un semplice PC a singolo processore. Più recentemente, tecniche simili sono state dimostrate per volumi semitrasparenti derivati da scanner medici 1.6.



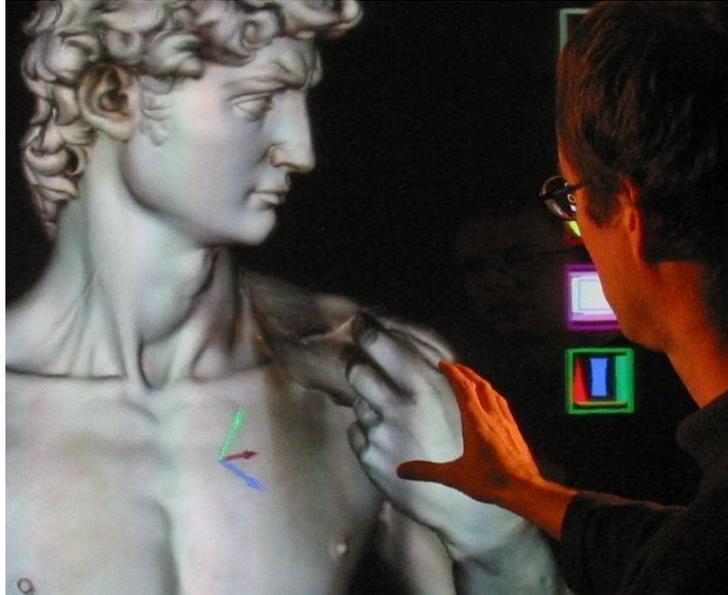
*Figura 3 Alcuni dettagli del Boeing 777. L'intero modello, visibile in Figura 1, ha oltre 13000 pezzi separati ed è visualizzato utilizzando circa 400M triangol (Dati forniti da The Boeing Corporation).*

### **1.2.1.3 Display 3D**

L'avanzamento della ricerca nell'elettronica e nella fotonica permette la realizzazione di display innovativi che superano le limitazioni dei monitor classici, essenzialmente bidimensionali. Negli ultimi anni hanno avuto in particolare grande sviluppo i sistemi auto-stereoscopici multi utente, in cui osservatori ad occhio nudo sono in grado di percepire gli oggetti come se galleggiassero in uno spazio virtuale tridimensionale.

Allo stato attuale, la tecnologia dei display ad alta risoluzione sta raggiungendo la maturità e alcuni sistemi sono in grado di riprodurre dei campi di luce sufficientemente naturali attraverso un controllo selettivo dell'emissione della luce 1.61.61.6. Il problema principale per questi tipi di display resta il rendering, che comporta la generazione di un numero elevato di fasci luminosi aventi adeguata origine, direzione e colore. Questa operazione è allo stato attuale complicata e computazionalmente onerosa. Oltretutto, le caratteristiche ottiche variabili dei display impongono dei metodi di visualizzazione particolari e specializzati.

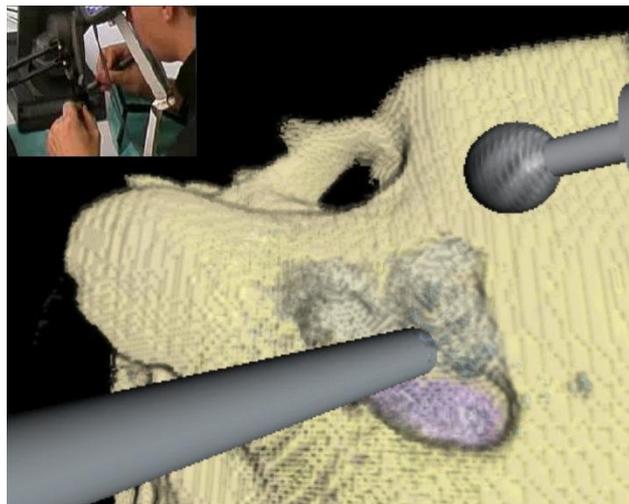
Il CRS4 si sta interessando allo sviluppo di tecniche efficienti per gestire le potenzialità dei nuovi display 3D. In particolare, in collaborazione con Holografika (Ungheria), che sviluppa un display 3D combinando proiettori e uno speciale schermo olografico, sono stati realizzati sistemi che, tramite il controllo opportuno della generazione dell'immagine, permettono di visualizzare oggetti che appaiono fluttuanti nello spazio a occhio nudo. Tramite l'adattamento dinamico della risoluzione basato sulle caratteristiche del display, è stata dimostrata la possibilità di interagire con enormi modelli di superfici e volumi 1.61.61.6.



*Figura 4 Visualizzazione interattiva su display 3D della ricostruzione del David di Michelangelo (Dati forniti da Stanford University)*

#### **1.2.1.4 Sistemi multisensoriali**

Oltre alla resa visiva, molte applicazioni avanzate hanno bisogno di gestire altri canali sensoriali, sia per simulare situazioni reali che per permettere un'interazione più efficace con modelli simulati. Uno dei settori in cui queste tecnologie sono di maggiore interesse è l'addestramento chirurgico. Al CRS4 sono state realizzate diverse tecnologie ed applicazioni innovative in questo settore. I risultati ottenuti finora includono tecniche innovative per la simulazione di fresatura di ossa, modelli semplificati per il trasporto di agenti di contrasto nei vasi umani, e tecniche per simulare la chirurgia alla cataratta. Moduli di simulazione e visualizzazione specializzati sono stati integrati in sistemi industriali per l'addestramento chirurgico 1.6.



*Figura 5 Simulatore chirurgico di operazione di mastoidectomia (Dati forniti da Università di Pisa)*

## 1.2.2 Esempi di trasferimento tecnologico

Le attività di ricerca svolte dal CRS4 nel settore del Visual Computing hanno ricadute sia indirette, in termini di aumentata conoscenza delle problematiche studiate e di divulgazione di queste nella comunità scientifica, che dirette, in termini di trasferimento tecnologico effettuato dai ricercatori coinvolti.

Tra i molti esempi di ricadute tecnologiche di ricerche nel settore Visual Computing citiamo qui due estremi sia in termini di tipo di tecnologia trasferita che in termini di entità coinvolte nel trasferimento tecnologico. Il primo caso è quello di un sistema di visualizzazione di dati geografici pubblici basato sulle metodologie di rappresentazione di terreni sviluppate al CRS4. Il secondo caso è quello di un sistema per l'addestramento chirurgico, nel quale la visualizzazione 3D di modelli complessi si accompagna ad un sistema di simulazione avanzato.

### 1.2.2.1 Sardegna3D: visualizzazione in rete di dati geografici

Gli enti pubblici, ed in particolare le Regioni, sono di gran lunga i maggiori produttori di dati geografici. Questi dati sono ormai fondamentali per tutti noi e metterli a disposizione dei cittadini nella maniera più efficace è sicuramente di grandissima utilità. L'interesse di sistemi centrati sulla visualizzazione distribuita di territorio basata su tecnologie Web è testimoniata dall'enorme successo di sistemi come *Google Earth*. È interessante notare che uno dei primi prototipi di questo genere è il sistema *Virtual Sardinia*, sviluppato da CRS4 nel 1994-1995 1.61.6. Più recentemente la regione Sardegna ha deciso di sviluppare, sulla base delle tecnologie di trasmissione, compressione e visualizzazione del CRS4, un visualizzatore capace di offrire la possibilità di accedere a rappresentazioni tridimensionali realistiche del territorio sardo arricchite da dati provenienti dai vari database regionali. Il sistema è stato poi esteso per coprire tutto il territorio nazionale. Il sistema è ormai *online* in maniera continuativa da oltre due anni. Nei soli primi tre mesi dalla pubblicazione l'applicazione è stata scaricata da oltre 100.000 utenti.

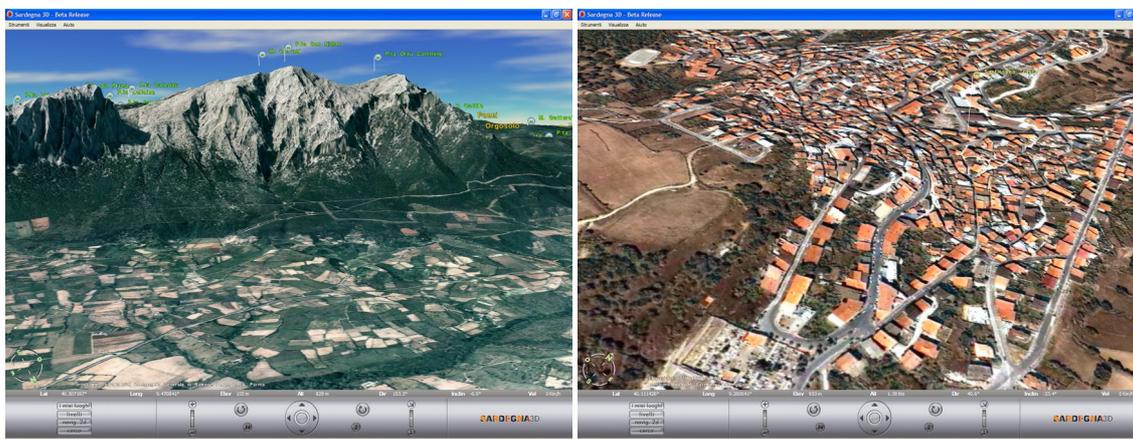


Figura 6 Due immagini del sistema Sardegna 3D

### 1.2.2.2 Eyesim: simulazione chirurgica

L'evoluzione delle modalità di addestramento del personale clinico e le emergenti necessità di aggiornamento e certificazione degli specialisti stanno negli ultimi anni portando ad una forte espansione della richiesta per sistemi di simulazione di procedure chirurgiche. Infatti, in analogia con quanto avviene nell'industria aeronautica, dove i simulatori sono da decenni

strumenti fondamentali nei processi di addestramento e certificazione dei piloti, l'utilizzo di questa tecnologia permette una notevole flessibilità nel calendario di addestramento, di graduare le difficoltà degli scenari di addestramento, di esporre l'addestrando ad eventi che nella pratica chirurgica sono rari, ma potenzialmente molto pericolosi per la vita del paziente, e di misurare quantitativamente le performance e le capacità chirurgiche dell'addestrando.

Purtroppo, a differenza di quanto succede nel campo aeronautico, i simulatori chirurgici basati su tecnologie di realtà virtuale stentano a raggiungere un elevato livello di realismo. Infatti, mentre in quest'ultimo caso il modello di interazione pilota-aereo è sostanzialmente semplice e la limitazione principale al realismo dei simulatori di volo è la velocità del rendering grafico, nel caso dei simulatori chirurgici il "realismo" è principalmente limitato dalla complessità del modello sottostante che descrive l'interazione virtuale tra gli strumenti manipolati dal chirurgo, gli organi e come questi ultimi reagiscono alle manipolazioni. Per quanto riguarda la realizzazione di un simulatore chirurgico, esistono sostanzialmente due problematiche di ricerca. La prima è legata al trovare nuove soluzioni tecnologiche per migliorare la fedeltà dei simulatori; la seconda è invece orientata a cercare come si possano meglio sfruttare le potenzialità offerte da questo tipo di addestratori per valutare in maniera quantitativa il livello di apprendimento dei suoi utilizzatori per scopo di addestramento o certificazione. Le due problematiche sono fortemente complementari ed esiste un consenso della comunità scientifica che esse siano tra i pilastri tecnologici fondamentali per lo sviluppo di un'attività industriale in questo settore.

Un esempio di piattaforma di realtà virtuale per l'addestramento chirurgico è il sistema EYE, sviluppato dal CRS4 per la società DIES, che opera nel settore della formazione medica in Italia ed all'estero. In questo sistema vengono simulate le fasi dell'intervento di estrazione della cataratta 1.6. In questo tipo di simulazione, la modellazione fisica è fondamentale per l'addestramento delle abilità manuali e per la familiarizzazione con gli strumenti chirurgici. Il sistema EYE contiene simulazioni fisiche accurate e rappresentazioni geometriche realistiche delle seguenti fasi dell'intervento:

- **incisione della cornea:** creazione di uno o più tunnel all'interno della cornea in modo da poter accedere al cristallino;
- **capsuloressi:** creazione mediante un forcipe di un'apertura circolare sulla membrana anteriore che incapsula il cristallino;
- **facoeulsificazione:** rottura e rimozione completa del cristallino mediante uno strumento ad ultrasuoni che funge anche da aspiratore.

Il sistema è in uso presso DIES per applicazioni di addestramento chirurgico. È utilizzato per corsi in oftalmologia orientati al trattamento del glaucoma e della cataratta. Il primo corso utilizzante il sistema è stato tenuto all'ospedale San Raffaele a Milano nel maggio 2006.

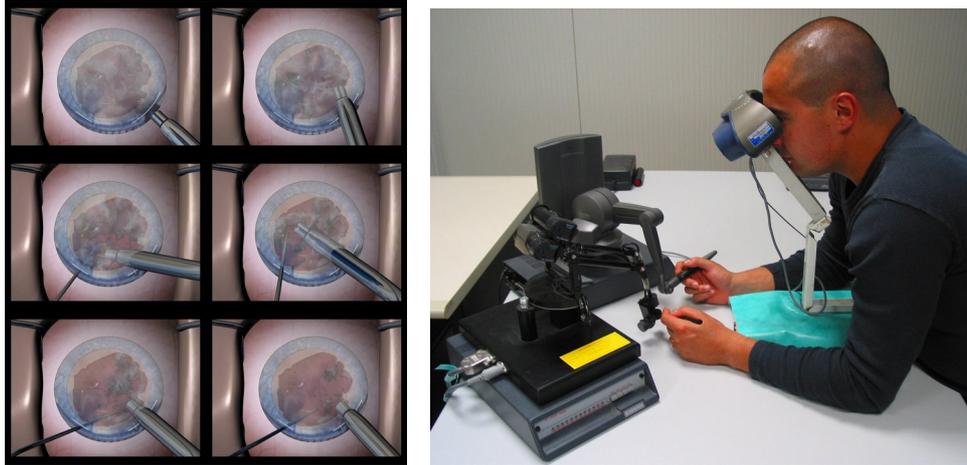


Figura 7 EYESIM: Un sistema per l'addestramento in oftalmologia

### 1.3 Il laboratorio DISTRICT LAB3D

Il LAB3D del Distretto ICT si appoggia sull'esperienza acquisita dal CRS4, che ne assicura la direzione. Data la struttura di realizzazione del distretto ICT, tutto il personale e le risorse del laboratorio fanno capo a SardegnaRicerche, che è l'ente che gestisce direttamente i laboratori. Il direttore del laboratorio Visual Computing del CRS4, ed, in maniera più informale, altro personale di ricerca CRS4 associato, supportano il laboratorio LAB3D garantendo sia la direzione operativa che la formazione del personale del laboratorio a tutti i livelli. Queste attività di direzione e supervisione sono svolte a titolo di servizio verso il parco scientifico e tecnologico. Il personale del gruppo Visual Computing del CRS4 partecipa inoltre anche alle attività del laboratorio *ICT per la medicina* del Distretto ICT, in particolare per quanto riguarda attività di trasferimento tecnologico nei settori della visualizzazione avanzata di dati medici e dei display innovativi.

Le attività del laboratorio LAB3D sono, in molti sensi, complementari a quelle svolte dal CRS4. Per prima cosa, il fine principale del laboratorio non è quello di effettuare ricerca di base, ma di supportare l'innovazione e il trasferimento tecnologico di risultati di ricerca attraverso attività di formazione, attività dimostrative e sviluppo e distribuzione di prototipi software. Inoltre, il laboratorio estende le attività svolte dal settore Visual Computing andando a coprire direttamente sia l'acquisizione del dato, attraverso tecniche di scansione, che la riproduzione dei modelli, attraverso tecnologie per la riproduzione materica.

I settori di intervento principali del laboratorio sono infatti le tecnologie di scansione 3D, l'archiviazione e distribuzione digitale di modelli 3D complessi, il processamento geometrico e la produzione di modelli tangibili. Nel quadro del distretto ICT, sono previste attività finalizzate all'allestimento del laboratorio con strumentazione allo stato dell'arte per acquisire, processare, distribuire, visualizzare e riprodurre modelli 3D complessi. Ulteriori azioni consentono la dimostrazione di sistemi derivanti da attività di ricerca per la scansione 3D, per l'archiviazione e distribuzione digitale di modelli 3D complessi, il processamento geometrico, la produzione di modelli fisici e la visualizzazione geografica.

### **1.3.1 Staff e infrastrutture**

Il personale di laboratorio è composto da un collaboratore senior, un collaboratore junior e tre partecipanti ad un percorso di professionalizzazione, selezionati tramite concorsi pubblici svolti a settembre 2007. Il primo personale ha preso servizio a partire da novembre 2007. La prima fase di attività si è concentrata sulla messa in opera dell'infrastruttura fisica del laboratorio e la formazione del personale interno.

Per quanto riguarda l'infrastruttura, l'obiettivo principale raggiunto è stato quello di dotare il laboratorio di sistemi allo stato dell'arte per la scansione di modelli con tecnologie di laser scanning e per la riproduzione materica. Per quanto riguarda l'acquisizione, il laboratorio è attualmente dotato di due laser scanner a basso costo NextEngine Desktop 3D scanner e di un laser scanner Minolta vi-9I, funzionanti per triangolazione ed appropriati per l'acquisizione di piccoli e medi oggetti e di un laser scanner a tempo di volo Leica HDS ScannerStation 2 appropriato per la scansione di edifici o siti. La riproduzione materica è realizzata con una stampante 3D a colori Z Corporation - Z450 funzionante a polvere di gesso.

L'aggiornamento professionale del personale interno ha incluso sia dei corsi formali di formazione all'uso delle varie strumentazioni di laboratorio (in particolare scanner e stampanti), che formazione svolta da personale CRS4 sui temi di ricerca e sviluppo affrontati e sulle varie piattaforme hardware e software utilizzate nei laboratori.

### **1.3.2 Settori di intervento principali**

Il laboratorio ha organizzato la sua attività in tre linee di attività principali, che rappresentano tre aspetti principali della pipe-line di trattamento dei dati 3D: le tecnologie di scansione 3D, le tecnologie di archiviazione, distribuzione e visualizzazione di modelli digitali 3D, e le tecnologie di riproduzione materica. Le attività in questi settori sono state svolte anche in collaborazione con i laboratori di *Telemicroscopia Industriale* e *ICT per la medicina* del Distretto ICT. Per ognuna di queste attività è stato attivato un "progetto cluster" per coinvolgere direttamente piccole e medie aziende locali nel settore.

Qui di seguito illustriamo brevemente per ogni linea di attività le motivazioni tecnologiche ed applicative relative al settore di intervento, le attività svolte ed i risultati ottenuti.

#### **1.3.2.1 Tecnologie di scansione 3D**

In numerosi settori applicativi è richiesta la realizzazione di un accurato rilievo della scena di interesse. Tale fase di acquisizione delle caratteristiche spaziali ed eventualmente colorimetriche è il primo passo in molte applicazioni, sia che vengano usate metodologie di presentazione classiche che innovative. Recenti miglioramenti nelle tecnologie di scansione 3D permettono di ottenere riproduzioni digitali fedeli ed accurate delle forme e dei colori delle superfici esterne di numerosi oggetti fisici sia microscopici che macroscopici. In particolare, i dispositivi di scansione laser hanno già dimostrato la loro utilità in molti settori applicativi grazie alle loro caratteristiche di alta accuratezza, alta densità di campionamento, combinazione di caratteristiche geometriche ed ottiche. I miglioramenti dei sistemi di acquisizione digitali delle immagini stanno inoltre permettendo anche a tecniche di computer vision di ottenere risultati molto accurati, rendendo queste tecnologie complementari a quella del laser scanning. Ad esempio, la fotometria stereo permette non solo di mappare in tre dimensioni l'oggetto di interesse, ma anche di acquisire le sue caratteristiche colorimetriche (albedo). Per quanto il

laser scanner e la fotometria ottica possano raggiungere livelli di dettaglio fino a poco tempo fa impensabili, rimangono comunque dei limiti fisici (e più precisamente ottici) al loro grado di precisione. Questi limiti vengono risolti passando dal campo dell'ottica a quello della microscopia elettronica. Numerosi studi dimostrano infatti come le tecniche fotometriche, con le dovute e semplici modifiche, possano ricostruire fedelmente un campione microscopico in tre dimensioni.

Tolta la scelta sensoristica, che può portare all'uso di una tecnica o dell'altra (oppure di più tecniche combinate), i problemi che si presentano dopo l'acquisizione del dato 3D sono comuni: pianificazione dell'acquisizione, allineamento di range-map (cioè di ricostruzioni parziali prese da un singolo punto di vista), fusione di più range map in un singolo modello, applicazione del colore, renderizzazione, distribuzione e visualizzazione real-time e/o stampa. In generale, tutto questo processo è, però, molto laborioso e lento.

Il laboratorio mira a mettere in piedi una pipe-line completa di acquisizione di modelli 3D basata su tecnologie a scansione, combinando sia software commerciale che software derivante da risultati di ricerca. La pipe-line coprirà sia la microscopia elettronica (fino a pochi micron di risoluzione), che la microscopia confocale (decina di micron di risoluzione), lo short range (oggetti di pochi cm), il medium range (oggetti fino a qualche metro) ed il long range (siti). Sulla base di queste pipe-line, applicazioni dimostrative sono state e saranno realizzate nel settore beni culturali, della microscopia e della biomedicina, anche in collaborazione con gli altri laboratori del distretto.

Dal punto di vista dell'innovazione, in collaborazione con ricercatori del CRS4, dell'Università di Cagliari, dell'Università di Zurigo e di HP Labs, il personale del laboratorio ha sviluppato soluzioni software derivanti da recenti risultati di ricerca per risolvere due problemi importanti nel settore: la ricostruzione accurata tramite metodi di fotometria stereo di modelli visti al SEM, e la ricostruzione accurata di superfici 3D a partire da dati acquisiti.

Nel caso della fotometria stereo, ci si è interessati a sviluppare una procedura automatica per la ricostruzione di oggetti 3D analizzati tramite microscopia elettronica. Il segnale elettronico che permette di acquisire l'informazione utile per effettuare la ricostruzione metrica del campione analizzato è quello prodotto dagli elettroni di Back Scattering (BSE). Tipicamente un SEM (scanning electron microscope) ha una configurazione standard che prevede un solo sensore per i BSE. Tuttavia, per misurare la terza dimensione occorre acquisire un minimo di tre immagini (tipicamente quattro) e per ciascuna di esse il sensore di BSE deve avere una differente posizione relativa al campione esaminato. Per far questo, si acquisiscono quattro immagini ruotando il campione per tre volte di 90 gradi. Le tecniche di fotometria classiche, però, partono dal presupposto che, fissata una coordinata nella prima immagine, nelle altre tre immagini il pixel che si trova alla medesima coordinata corrisponda allo stesso punto dell'oggetto da ricostruire. Questo presupposto può essere inficiato da un errore di asse di rotazione dovuto ai limiti della precisione meccanica del SEM. Per questo motivo, abbiamo sviluppato una tecnica che prevede due allineamenti durante la fase di acquisizione delle immagini: il primo, online, che cerca, prima della acquisizione dell'immagine SEM, di compensare l'errore agendo sui motori che si occupano di roto-traslare il campione, l'altro, offline, che raffina l'allineamento delle quattro immagini acquisite. Per la fase di allineamento si è deciso di usare un altro tipo di segnale elettronico, che genera delle immagini indipendenti dal valore di roto-traslazione del campione. Il risultato di questa attività è stata una applicazione che gestisce in maniera totalmente automatizzata questa procedura, comprendendo anche la fase di setting del SEM, e

si occupa di restituire all'utente del microscopio un file che contiene le informazioni relative alla misura tridimensionale dell'oggetto esaminato. Il valore aggiunto di questa applicazione risiede nel fatto che, nell'ambito della microscopia, all'utente di un SEM non è richiesta una competenza per la scelta dei parametri opportuni per una corretta acquisizione delle immagini. Questo lavoro è stato svolto in collaborazione col Laboratorio di TeleMicroscopia del Distretto ICT e un articolo sul soggetto stato recentemente presentato a *Microscopy and MicroAnalysis* 1.6. È interessante notare che queste tecniche di fotometria sono applicabili anche nel dominio del visibile. Nel quadro del lavoro del laboratorio le abbiamo tra le altre cose applicate alla ricostruzione di bassorilievi per un'applicazione di beni culturali.

Per quanto riguarda la ricostruzione di superfici 3D a partire da dati acquisiti, il personale del laboratorio, assieme a CRS4 e Università di Zurigo, si è interessato al problema della ricostruzione efficiente da nuvole di punti con normali e colori associati e abbiamo sviluppato un approccio basato su *streaming moving least squares*. Durante un passo di scansione dell'insieme di campioni in ingresso (posizioni, normali e colori) ordinati lungo un l'asse di maggiore estensione del modello 3D, una sottile fetta composta da celle di un octree viene fatta raffinare fino ad una risoluzione che in maniera adattiva tiene conto della densità locale dei punti. Viene quindi applicato un operatore di proiezione ai vertici contenuti nella regione interessata dell'octree per proiettarli sulla superficie definita dall'insieme locale di punti per generare un campo distanze scalare discretizzato e con segno. Sia i punti proiettati che il campo distanze sono sfruttati da un estrattore di isosuperfici che lavora su octree non vincolati. Il metodo genera una triangolazione di qualità vicina alla superficie definita dall'insieme di punti, consistente dal punto di vista topologico con i dati campionati e contenente un numero di triangoli appropriati alla risoluzione di campionamento. Dividendo poi il processo di ricostruzione in più processi, il metodo può lavorare in parallelo, sfruttando a pieno la potenza delle attuali architetture multi-core. I nostri risultati mostrano che il sistema è veloce, scalabile e accurato. Ad esempio, modelli con centinaia di milioni di punti sono processati in circa un'ora e superano in termini di accuratezza geometrica gli altri algoritmi rapidi di ricostruzione allo stato dell'arte basati su streaming.

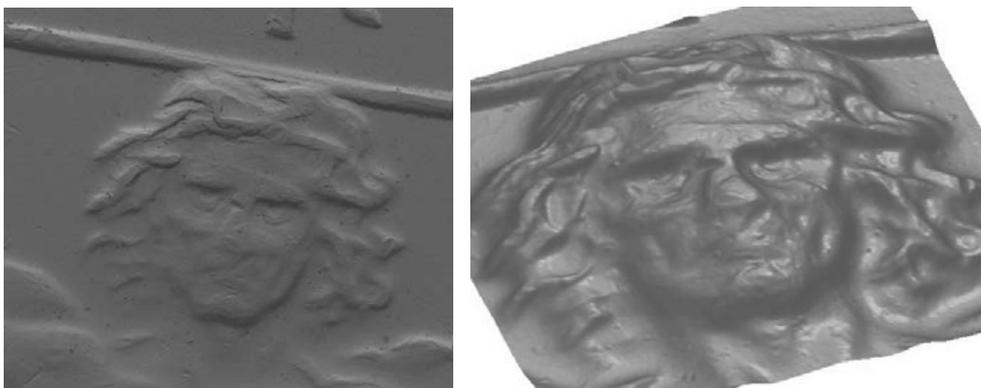


Figura 8 Dettaglio di una moneta da 1 Euro vista al SEM e sua ricostruzione 3D

Per favorire un rapido passaggio dall'attività di ricerca e sviluppo alla produzione, le tecniche sviluppate sono state trattate nel contesto delle attività del progetto cluster "Tecnologie di Scansione 3D", che ha coinvolto piccole e medie aziende locali interessate al settore. Le aziende che hanno manifestato interesse sono state sette. Le aziende sono distribuite in maniera uniforme nel territorio sardo e diversificati sono i settori in cui operano, che riguardano lo sviluppo software, la progettazione meccanica, la ricerca e la fornitura di servizi in ambito

archeologico, la fornitura di servizi informatici, l'edilizia, la fornitura di servizi informatici e la realtà virtuale. Una di queste aziende, inoltre, ha sede principale fuori dalla Sardegna, ma si è insediata al parco scientifico per giovare di questi servizi di trasferimento tecnologico.

Nel quadro del progetto, le aziende sono state messe a stretto contatto con il personale del laboratorio che ha fornito consulenze specifiche sull'uso delle tecnologie di scansione. Inoltre, sono state messe in atto parallelamente attività seminariali e dimostrative, nelle quali le aziende si sono potute confrontare e cimentare con le problematiche teoriche e con gli strumenti di acquisizione e costruzione di modelli 3D complessi. Alcune giornate tematiche sono state dedicate a tecnologie di acquisizione dati 3D, metodi di allineamento di range maps, metodi di assemblaggio e ricostruzione da nuvole di punti. Ricercatori del CNR di Pisa sono stati coinvolti in queste occasioni sui temi dell'allineamento e della gestione dell'attributo colore.

Gli strumenti acquisiti dal laboratorio hanno permesso inoltre una serie di attività di scansione, alcune delle quali hanno coinvolto anche le aziende che hanno potuto studiare test-case reali. Per quanto concerne la scansione di oggetti, sono state eseguite varie scansioni utilizzando principalmente il laser scanner medium range Minolta Vivid9i. Le scansioni sono state per lo più orientate alla acquisizione di beni culturali: tra queste:

- una cera anatomica risalente al 1800 in collaborazione con il dipartimento di citomorfologia dell'università di Cagliari;
- una mandibola di protosardo, in collaborazione con il dipartimento di scienze biomediche dell'università di Sassari;
- una vertebra di protosardo in collaborazione con una delle imprese che hanno aderito al cluster "Tecnologie di scansione 3D";
- tre bassorilievi siti nella basilica di Sant'Antioco, in collaborazione con la facoltà di archeologia dell'Università di Cagliari.

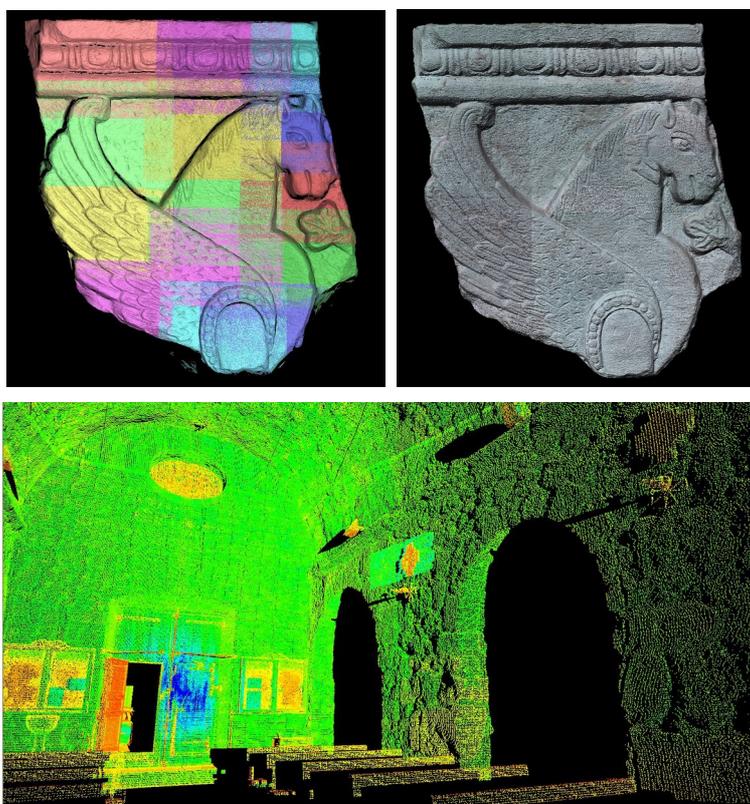
Inoltre, in collaborazione con il dipartimento di scienze biomediche dell'università di Sassari, è stata fatta una serie di scansioni per la ricostruzione 3D di arti inferiori umani, da utilizzare nell'ambito dello studio di cinematica delle articolazioni umane.

Anche le scansioni effettuate con il laser scanner a tempo di volo Leica ScanStation2 sono state orientate principalmente ad acquisizioni di beni culturali. Le principali acquisizioni hanno riguardato:

- gli scavi sotto la chiesa di S. Eulalia a Cagliari, in collaborazione con il dipartimento di archeologia dell'università di Cagliari;
- gli scavi della necropoli punica di Sant'Antioco in collaborazione con la soprintendenza per i beni archeologici di Cagliari e Oristano;
- la basilica di Sant'Antioco, in collaborazione con la facoltà di archeologia dell'Università di Cagliari.

È interessante far notare che l'attività di scansione è servita sia per mettere alla prova le diverse tecnologie, che per illustrare a soggetti terzi coinvolti vantaggi e limitazioni dei vari approcci alla scansione. Inoltre, i modelli acquisiti e ricostruiti servono come base per ulteriori attività. Oltre alla ricerca tecnologica, ad esempio sui metodi di ricostruzione da nuvole di punti, i modelli possono essere usati per applicazioni diverse, tra le quali l'archiviazione in biblioteche

digitali, il monitoraggio, la riproduzione, il restauro e la valorizzazione del bene attraverso applicazioni multimediali, visualizzazioni interattive, ecc. È previsto che tutti i modelli acquisiti dal laboratorio siano resi disponibili a terzi per sperimentazioni in tutti questi campi.



*Figura 9 Scansioni di oggetti e siti. Sopra: ricostruzione di un bassorilievo nella Basilica di Sant'Antioco effettuato con scanner a triangolazione Minolta Vivid9i. L'immagine di sinistra evidenzia le differenti scansioni con color diversi. Sotto: ricostruzione parziale della Basilica di Sant'Antioco effettuata con scanner a tempo di volo Leica ScanStation2.*

### **1.3.2.2 Archiviazione, distribuzione e visualizzazione di modelli digitali 3D**

Le moderne tecnologie di acquisizione digitale (3D laser scanner, fotometria stereo, microscopia elettronica e confocale) consentono di rilevare oggetti tridimensionali di varie dimensioni con una grande accuratezza. I modelli così acquisiti risultano certamente molto dettagliati, ma, proprio per questo, dotati intrinsecamente di una notevole mole di informazioni. Anche se le attuali tecnologie di storage consentono di archiviare in modo efficiente file molto grandi, la loro fruizione, in termini di distribuzione e visualizzazione interattiva 3D in tempo reale risulta invece essere un campo di ricerca ancora aperto. Al fine di risolvere questo problema, la classica soluzione è quella di semplificare il modello da visualizzare fino a renderlo di taglia accettabile per l'applicazione che lo deve utilizzare. Purtroppo, questo tipo di approccio non risulta essere applicabile nei casi in cui la perdita di informazione dovuta al processo di semplificazione non è accettabile (ad esempio, sistemi di visualizzazione industriali, nei beni culturali, nella medicina, e nella microscopia).

Negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche adattive che consentono di conservare la totalità dell'informazione del modello visualizzando o trasmettendo in modo incrementale solo ciò che è utile alla resa di una singola immagine. Tali metodi, combinati ad efficienti tecniche di

compressione dei dati, sono risultati particolarmente adatti sia all'archiviazione di dati che al caso della distribuzione via rete per la fruizione di grandi modelli.

Nel quadro del distretto ICT queste tecniche sono messe in opera e dimostrate su modelli a varie scale e complessità. Esempi di applicazione sono l'archiviazione e la visualizzazione in *streaming* di modelli acquisiti tramite laser scanning e la visualizzazione di modelli territoriali complessi.

In particolare, il personale del laboratorio ha sviluppato autonomamente un prototipo di visualizzatore remoto di modelli rappresentati da nuvole di punti. Il sistema è un'evoluzione della tecnica *Layered Point Clouds* introdotta da CRS4 nel 2004. Il sistema permette l'archiviazione di modelli accurati, contenuti anche centinaia di milioni di punti, in uno o più database resi visibili attraverso un'interfaccia web. I dati contenuti nel database sono creati da un'applicazione che, a partire dal modello originale, crea una rappresentazione multi-risoluzione compressa. L'applicazione client si collega con il database e visualizza rappresentazioni dettagliate dipendenti dal punto di vista caricando incrementalmente solo il dato necessario. Per quanto riguarda la visualizzazione di modelli territoriali complessi, il personale di laboratorio è stato coinvolto nell'adattamento della piattaforma software alla base dei visualizzatori Sardegna3D e Italia3D. Per ambedue i sistemi, è previsto un rilascio in rete sotto forma di software *open source*.

Per favorire un rapido passaggio dall'attività di ricerca e sviluppo alla produzione, le tecniche sviluppate sono state presentate nel contesto delle attività del cluster "Visualizzazione e distribuzione modelli 3D complessi". Lo scopo del cluster è quello di trasferire alle aziende una serie di competenze che possano permettere loro di visualizzare e distribuire ai loro clienti il risultato dell'attività di scansione che hanno effettuato in prima persona o acquistato come servizio da terzi. Le aziende che hanno manifestato interesse sono state sette. Le aziende sono distribuite in maniera uniforme nel territorio sardo e diversificati sono i settori in cui operano, che riguardano lo sviluppo software, la progettazione meccanica, la ricerca e la fornitura di servizi in ambito archeologico, la fornitura di servizi informatici, l'edilizia, la fornitura di servizi informatici e realtà virtuale.

L'interesse delle aziende è stato sia per applicazioni remote (visualizzazioni via internet) che per applicazioni locali quali installazioni museali. Oltre alle aziende, un forte interesse è stato espresso da enti pubblici. In particolare, i metodi e sistemi sviluppati e divulgati dal laboratorio sono di estremo interesse per tutte le attività pubbliche e private articolate attorno alla tematica delle "digital library", in cui la Regione Sardegna svolge un ruolo importante. I sistemi di visualizzazione geografica sviluppati da CRS4 ed estesi dal laboratorio ICT sono già in uso presso la regione Sardegna, che si sta operando per trasferirli anche ad altre regioni nel quadro di operazioni di riuso. I sistemi di visualizzazioni remote di scansioni sono di interesse sia per la digital library della regione Sardegna che per tutte le entità interessate alla visualizzazione di modelli (varie società di servizi, università). Dal punto di vista della divulgazione dell'informazione, giornate tematiche sono state organizzate per illustrare lo stato dell'arte nella visualizzazione 3D di modelli complessi (sulla base dei tutorials preparati per convegni internazionali quali SPM, SIGGRAPH e Eurographics), per illustrare l'implementazione delle tecniche di point rendering sviluppate all'interno del laboratorio, per illustrare la loro implementazione in un contesto distribuito, e per illustrare le applicazioni di telemicroscopia sviluppate nel laboratorio di TeleMicroscopia.

La tematica della visualizzazione interattiva di modelli digitali 3D complessi è, inoltre, strettamente collegata a . Il laboratorio ed i ricercatori CRS4 coinvolti hanno pertanto fornito le loro competenze al laboratorio “Media Center” per l’organizzazione di un workshop sull’interazione uomo macchina. Un seminario specifico ha avuto come tema la “Computer Graphics & Realtà Virtuale”. In questo contesto è stato presentato un sunto dello stato dell’arte del settore e due *case study* pratici nel campo della simulazione chirurgica e la realizzazione di musei virtuali 1.6.

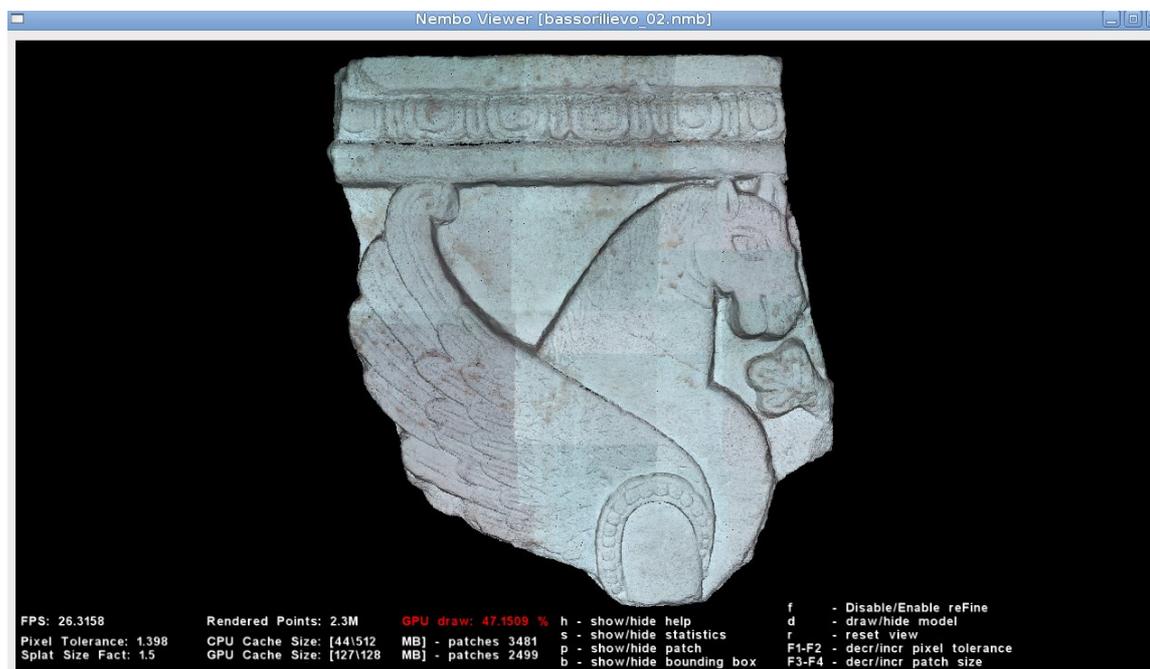


Figura 10 Visualizzazione in streaming della ricostruzione di un bassorilievo della chiesa di S. Antioco

### 1.3.2.3 Processamento geometrico e riproduzione materica

Le tecniche di prototipazione rapida sfruttano una grande varietà di tecniche di base per creare una riproduzione reale di modelli 3D digitali. Queste tecniche vanno da quelle additive (come la classica stereolitografia a polimerizzazione e la deposizione di polveri o di cera), a quelle sottrattive o basate su incisione. Fino a poco tempo fa la tecnologie che erano capaci di produrre copie reali di oggetti digitalizzati erano però particolarmente lente e costose. Recentemente, invece, nuove strumentazioni si sono affacciate sul mercato di quelle che vengono chiamate "stampanti 3D", con il risultato che i costi e i tempi di produzione e la facilità di utilizzo sono stati drasticamente ridotti. Si pensi che negli ultimi anni i costi in euro per la ricostruzione di un oggetto di dimensioni 30x30x30 cm circa sono passati da mezzo migliaio di euro a meno di 50 euro, e il tempo di stampa 3D è passato dall'ordine di grandezza di giorni od ore a quello di decine di minuti. Inoltre le stampanti di ultima generazione permettono la riproduzione di modelli con una vasta gamma di colori.

Le possibilità che si aprono grazie a queste tecnologie sono numerosissime e decisamente diversificate. Tra le più importanti è d'obbligo citare, nell'ambito dei beni culturali, la creazione di copie reali di opere d'arte, per motivi di studio, didattici o di fruizione tattile. Le tecniche di prototipazione rapida si sono rivelate di particolare interesse per numerose ragioni nello specifico campo dei beni culturali. Prima di tutto, quando si affiancano con la scansione 3D,

queste tecniche forniscono una alternativa contactless e più sicura rispetto ai tradizionali calchi, che spesso possono causare degradazione o avere un impatto significativo sulle condizioni dei dettagli della superficie originale. La possibilità di produrre copie esatte, qualunque sia la scala e il numero di repliche, è spesso considerata una importante caratteristica delle tecnologie di prototipazione rapida. Inoltre, anche se le interfacce interattive e di grafica 3D si sono evolute in maniera incredibile, il senso reale dato da un oggetto solido che può essere manipolato ed esplorato in un modo naturale è qualcosa che non è ancora stato raggiunto da questi strumenti di visualizzazione/interazione. Questa considerazione è particolarmente vera nel contesto dei beni culturali, dove un grande numero di professionisti del settore non posseggono le competenze di base per esplorare ed interagire opportunamente con i modelli 3D digitali attraverso le interfacce 3D standard. Altri esempi di possibilità offerte dalla tecnologia includono la stampa di oggetti microscopici acquisiti in 3D tramite tecniche di microscopia elettronica (es. campioni biologici), abbattendo l'inarrivabilità delle capacità sensoriali nei confronti del mondo microscopico e la possibilità, ad esempio in campo medico, di fare test su repliche reali dell'oggetto in esame.

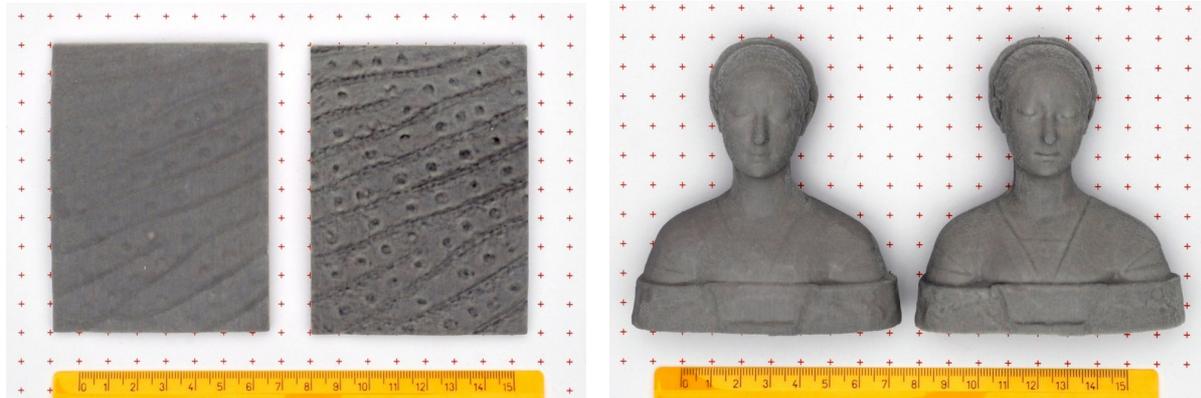
Nel quadro del distretto ICT, il laboratorio si è dotato di tecnologie all'avanguardia per la prototipazione fisica e realizza e dimostra tecnologie di processamento geometrie e colore derivanti da attività di ricerca. In particolare, durante questo primo periodo, il laboratorio si è interessato allo sviluppo di tecniche per migliorare la resa visiva delle riproduzioni materiche.

Partiamo dalla semplice osservazione che molti dei materiali reali non sono perfettamente opachi, e quindi la loro percezione dipende dalla dimensione dell'oggetto. In altre parole, le persone sono in grado di stimare la grandezza di un oggetto semplicemente guardando come esso appare. Una delle cause più importanti di questo comportamento è il fenomeno del sub-surface scattering, cioè nel comportamento che la luce ha quando penetra all'interno di una superficie non completamente opaca. In questo tipo di oggetti translucidi, la luce riflessa, interagendo internamente con il materiale, ha un punto di uscita differente dal punto di ingresso. La quantità di luce che viene riflessa e rifratta all'interno dell'oggetto dipende dalla scala dell'oggetto stesso. Quindi, se una stessa forma viene costruita con lo stesso materiale ma a diverse scale, cambierà il modo in cui la luce interagisce con la superficie. In particolare, l'effetto di sub-surface scattering ha la fastidiosa proprietà di rendere difficile la percezione dei dettagli di un oggetto.

Nel quadro del nostro lavoro, il laboratorio ha sviluppato, assieme a CRS4 ed ISTI-CNR, una tecnica che permette di simulare questi problemi modificando opportunamente il colore delle superfici stampate. Il nostro obiettivo è quello di cambiare il colore base della superficie in modo da controbilanciare l'effetto di ombreggiatura dovuto al sub-surface scattering. In pratica, rendiamo più scure le regioni che sono rese più luminose dal sub-surface scattering, riportando alla percezione quei dettagli fini che a causa di questo comportamento della superficie si erano persi. Il lavoro è stato recentemente presentato a VAST 1.6. L'applicazione a modelli derivanti da microscopia elettronica è stata inoltre presentata a EMC 1.6. Le tecniche di processamento necessarie sono state inserite nel software open source MeshLab.

Come per gli altri temi di interesse del laboratorio, è stato costituito un cluster di aziende interessate alla tematica e sono state organizzati incontri e sperimentazioni comuni. Lo scopo delle attività è stato quello di far conoscere le problematiche relative alla stampa e le potenzialità che questo strumento può fornire nell'ambito della fruizione di un modello 3D, in maniera particolare nell'ambito specifico dei beni culturali. Il centro di prototipazione di

SardegnaRicerche ha contribuito illustrando risultati ottenuti con prototipatori di vario tipo pensati per applicazioni industriali. Le aziende che hanno manifestato interesse sono state sei. Le aziende, tutte operanti in Sardegna, si occupano di sviluppo software, progettazione meccanica, fornitura di servizi in ambito archeologico, e fornitura di servizi informatici ed per l'edilizia. Un'azienda in particolare si occupa di applicativi per la valorizzazione dei beni culturali ed è stata coinvolta in sperimentazioni relative alla stampa di modelli in scala utilizzando le tecniche di processamento del colore per aumentare i dettagli.



*Figura 11 Riproduzioni materiche con trattamento dell'attributo colore. A destra, due immagini di un modello di impronta digitale derivato da microscopia elettronica. A sinistra, due immagini di un modello derivato da scansioni laser. Nei due casi, l'immagine in cui il colore è stato trattato col nostro metodo mostrano più chiaramente i dettagli a piccola scala.*

## 1.4 Ricadute e prospettive

L'attività del laboratorio mira ad avanzare lo stato dell'arte della *best practice* nei settori di intervento attraverso attività di ricerca, sviluppo, ed innovazione coordinate. Tra i risultati attesi, oltre alla messa in opera del laboratorio, vanno citati lo studio e sviluppo di nuove tecnologie per prodotti, processi e servizi innovativi basati su modelli 3D complessi, con particolare riferimento al settore della visualizzazione del territorio e dei beni culturali, la realizzazione di prototipi hardware e software basati sulle suddette tecnologie e la loro dimostrazione, l'organizzazione di percorsi formativi ad elevato contenuto scientifico e tecnologico funzionali alla creazione del capitale umano per le imprese e i centri di ricerca, il trasferimento verso il contesto pubblico ed industriale di metodi e tecnologie innovative attraverso il coinvolgimento di enti pubblici e delle piccole e medie imprese del territorio nell'attività del laboratorio.

Nel quadro di questo primo periodo di attività, i risultati principali possono essere considerati la realizzazione di un'infrastruttura allo stato dell'arte, la formazione di personale specializzato, la produzione di nuova conoscenza nei settori di intervento, la realizzazione di prototipi software innovativi, la generazione di alcuni modelli accurati, ed un trasferimento di conoscenze sia al contesto locale che a quello più ampio della comunità tecnica e scientifica.

### 1.4.1 Realizzazione di un'infrastruttura

La messa in opera del LAB3D ha permesso di realizzare in Sardegna un laboratorio con componenti hardware e software per coprire la pipe-line di acquisizione, ricostruzione, distribuzione, visualizzazione e riproduzione di siti ed oggetti. La particolare struttura di

governance dei laboratori dei distretti, che suddivide responsabilità tra varie entità e affida il processo di acquisizione a SardegnaRicerche, una struttura amministrativa che manca di personale tecnico e di un ufficio acquisti adeguato, ha reso il processo di acquisizione più lento e laborioso del previsto. Nonostante questo, sia le componenti di acquisizione che quelle per la riproduzione possono considerarsi attualmente allo stato dell'arte. È importante notare che, grazie ad un'accurata pianificazione degli acquisti, queste componenti permettono di rafforzare laboratori locali già presenti sul territorio che possiedono componenti complementari. All'interno del distretto ICT, le maggiori sinergie sono con i laboratori di Telemicroscopia industriale e di ICT per la medicina, che estendono le possibilità di acquisizione con device applicabili al settore microscopico. Oltre il contesto del distretto ICT, e spostandosi più verso il settore della ricerca, il laboratorio di Visual Computing del CRS4 si è già dotato in passato di componenti per la visualizzazione di buon livello e, in alcuni casi, di prototipi sperimentali unici a livello internazionale (in particolare, i sistemi di display quasi-olografici). Inoltre, per limitarci a centri che hanno collaborato all'attività del distretto, il dipartimento di scienze biomediche dell'Università di Sassari è dotato di strumentazione all'avanguardia per l'acquisizione di movimento, ai quali i sistemi di scanning laser del laboratorio offrono un complemento capace di offrire alta precisione per acquisizioni statiche. Spostandosi invece verso il settore dei servizi all'impresa, il laboratorio di prototipazione rapida di SardegnaRicerche possiede strumentazioni per la stampa rapida pensate per il settore industriale, che sono complementari alla stampante in gesso utilizzata nel progetto.

Questa concentrazione di laboratori con strumentazioni all'avanguardia, e già con una storia di collaborazione scientifica tra loro, permette di creare un polo locale di rilievo sia nel settore dell'acquisizione dati che nel settore della loro visualizzazione. Questo polo permette un rafforzamento sia sotto il profilo scientifico-tecnologico, in termini di maggior competitività dei gruppi di ricerca locali, che sotto il profilo del trasferimento di conoscenze e competenza all'industria ed al settore dei servizi, in termini di possibilità di sperimentare soluzioni allo stato dell'arte. Inoltre, la proprietà pubblica di strumentazioni di acquisizione allo stato dell'arte, e la disponibilità di personale formato al loro uso, rende potenzialmente possibile, se non auspicabile, la messa in opera di campagne di acquisizione di utilità pubblica, ad esempio nei settori dei beni culturali o della protezione ambientale.

#### **1.4.2 Formazione di personale specializzato**

L'attività del laboratorio è stata portata avanti da personale assunto appositamente da SardegnaRicerche attraverso concorsi pubblici, i primi dei quali svolti a settembre 2007, ed una buona parte dell'investimento in questo primo anno di lavoro è consistito nella formazione di questo personale. La formazione è avvenuta attraverso percorsi di professionalizzazione che hanno combinato formazione avanzata sulle tematiche di intervento del laboratorio attraverso tutoring da parte di ricercatori CRS4, formazione tecnica specialistica riguardante la gestione e l'uso di strumentazioni specializzate per l'acquisizione e la riproduzione, formazione pratica riguardante la messa in opera di un laboratorio e lo svolgimento di campagne di acquisizione e di sviluppo di applicazioni specialistiche.

Sia per il discreto livello di specializzazione richiesto, che combina conoscenze matematiche, di hardware e di software, che per carenze più generali nella formazione universitaria nel settore dell'informatica/ingegneria informatica, è difficile reperire personale senior e la formazione di base del personale junior nei settori di intervento è molto limitata, come evidenziato direttamente a livello di selezioni di personale. Per limitarci al livello più basso, su 35 idonei

per il percorso di professionalizzazione, solo 4 sono stati ammessi alla prova orale, avendo superato un semplice test di conoscenze nel settore informatico e di informatica grafica.

La formazione che è stata data, pertanto, dal punto di vista della crescita del personale, è, oltre che quella specificamente settoriale, anche di innalzamento delle conoscenze e capacità dal punto di vista informatico, in particolare per quanto riguarda il design, lo sviluppo e la modifica di applicazioni software complesse. Riteniamo che investire in questo settore, anche attraverso modalità più ampie di formazione e riqualificazione del personale per favorire la partecipazione di tecnici esterni a progetti specifici, possa essere una delle modalità più valide di fare del trasferimento tecnologico.

### **1.4.3 Produzione di nuova conoscenza**

Il LAB3D del Distretto ICT è principalmente orientato al miglioramento della *best practice* nel suo settore di intervento. Anche se la struttura dei laboratori, gli orizzonti temporali dei progetti che sono portati avanti, e l'orientazione alla ricaduta diretta immediata verso imprese partecipanti a cluster non permettono la focalizzazione su obiettivi di ricerca a medio o lungo termine, per garantire il mantenimento delle attività a livello di stato dell'arte a livello internazionale, le attività di ricerca, sviluppo, ed innovazione devono essere coordinate. Limitarsi ad una partecipazione o supporto a progetti di sviluppo molto focalizzati, rischierebbe di trasformare il supporto all'innovatività in un supporto allo status quo. Sarebbe difficile in quei casi differenziare l'attività dei laboratori dall'attività standard di servizio tecnologico all'impresa. Per questa ragione, in particolare, si è deciso di non attivare i cosiddetti "progetti di innovazione" su attività proposte da specifiche aziende, ma concentrare piuttosto le attività congiunte pubblico-privato su progetti cluster rivolti a gruppi di imprese.

È pertanto essenziale, oltre a garantire un legame col tessuto produttivo, mantenere anche un collegamento del laboratorio con attività di gruppi di ricerca attivi a livello internazionale, e, per quanto possibile, far partecipare direttamente il personale del laboratorio a progetti di ricerca tecnologica di più ampio respiro, mirati all'acquisizione di nuove conoscenze. Confrontarsi con lo stato dell'arte a livello internazionale permette anche di mantenersi aggiornati ed avere una maniera di valutare il livello di avanzamento locale delle conoscenze. È significativo pertanto che personale del laboratorio in questo anno abbia partecipato a progetti, in collaborazione con CRS4, Università di Cagliari ed ISTI-CNR, che hanno prodotto risultati innovativi nei settori della ricostruzione fotometrica 1.61.6, della ricostruzione di superfici da nuvole di punti e delle riproduzioni materiche 1.6. Per il futuro, riteniamo utile rafforzare il più possibile il collegamento tra il distretto ICT e le attività dei gruppi di ricerca attivi nel settore e sfruttare il laboratorio per garantire un passaggio rapido dalla ricerca alla produzione, attraverso attività di formazione mirata e messa in opera di prototipi software innovativi.

### **1.4.4 Realizzazione di prototipi software innovativi**

Il settore di intervento del laboratorio, quello dell'acquisizione, gestione e visualizzazione di modelli complessi, è in rapida evoluzione. Una delle ricadute dirette principali del lavoro svolto è stata la partecipazione del personale di laboratorio alla realizzazione di prototipi software innovativi per varie componenti della pipe-line di acquisizione e processamento di modelli 3D.

Questi prototipi sono stati o stanno per essere resi disponibili al pubblico come software open source. In particolare, sono state realizzate componenti software per la visualizzazione geografica, lo streaming di modelli basati su punti, l'elaborazione del colore per riproduzioni a

stampa e la stereo-fotometria. Per garantire una ricaduta diretta immediata, i metodi e sistemi impiegati per la realizzazione di questi software sono stati illustrati alle varie aziende locali che hanno partecipato ai progetti cluster. La successiva divulgazione in termini di software open source garantisce un impatto più ampio.

Riteniamo lo sviluppo di componenti open source, più che la semplice focalizzazione sulla divulgazione del concetto di open source o di componenti pre-esistenti, come uno dei settori su cui focalizzarsi per garantire un effettivo trasferimento tecnologico dalla ricerca alla produzione, incentivando enti pubblici e privati di ricerca a pubblicare software sperimentali derivanti dalle loro attività di ricerca. Uno degli obiettivi del LAB3D nel futuro è visto pertanto nel continuare lo sforzo di tradurre le attività di ricerca interne e fatte in collaborazione con altri enti in componenti software riutilizzabili. Per incentivare l'impatto locale, vanno favoriti il contatto diretto con gli sviluppatori ed il coinvolgimento di tecnici esterni a progetti specifici.

#### **1.4.5 Produzione di ricostruzioni digitali accurate di oggetti 3D complessi**

Le apparecchiature di acquisizione del laboratorio sono state utilizzate per campagne di acquisizione ed hanno avuto come risultato la produzione di ricostruzioni digitali accurate di oggetti 3D complessi, principalmente nel campo dei beni culturali. Questi modelli saranno resi disponibili per essere usati in attività di ricerca, sviluppo, divulgazione, valorizzazione.

#### **1.4.6 Trasferimento di conoscenze**

Il trasferimento di conoscenze è avvenuto sia attraverso la produzione di articoli scientifici e rapporti tecnici 1.61.61.6 e software open source, che attraverso il coinvolgimento diretto di aziende locali ed enti pubblici nelle attività del laboratorio. Tra queste ultime, si possono citare sia attività dirette di trasferimento di conoscenza, quali l'organizzazione di giornate tematiche, seminari e dimostrazioni, che attività più pratiche che hanno visto il coinvolgimento di personale esterno in sperimentazioni effettuate nei laboratori (ad esempio, per l'uso di sistemi di proiezione stereoscopica o la riproduzione materica). Oltre a queste ricadute dirette, ci sono anche da sottolineare tutti gli aspetti che riguardano i meccanismi derivati di animazione tecnologica, che potranno portare le aziende e gli enti pubblici e privati con i quali il laboratorio è venuto a contatto a valutare l'opportunità di una modifica di alcune procedure di lavoro per integrare nuove tecnologie. Allo stesso tempo, l'attività di trasferimento tecnologico svolta potrà anche permettere ai ricercatori coinvolti di identificare ulteriori temi di ricerca di interesse diretto.

È da notare che la gran parte delle imprese coinvolte nel distretto sono micro-imprese, che, salvo poche eccezioni, hanno scarsa propensione all'attività di ricerca e sviluppo tecnologico per ovvi motivi di dimensione, tipologia di attività e mercati di riferimento. Il coinvolgimento di queste imprese in attività di cluster, la formazione e riqualificazione di personale e l'acquisizione di know-how difficilmente acquisibile altrimenti è forse una delle ricadute del distretto maggiori in termini di trasferimento verso il settore produttivo, sia quello strettamente collegato all'ICT, che quello, più ampio, relativo ai settori applicativi di intervento. Per limitarci al settore dei beni culturali, appare ancora più chiaro quanto possa essere fondamentale il know-how tecnologico data la vastità ed importanza del patrimonio artistico e storico regionale e, più generalmente, italiano. La dimostrazione di nuove tecnologie di rilevamento dati che il laboratorio ha attuato verso gli operatori del settore archeologico e culturale ha avuto come scopo primario quello di fornire nuovi strumenti per l'acquisizione e

l'indagine del bene artistico e culturale, che, tramite la sua totale digitalizzazione, può essere non solo archiviato (preservazione digitale contro eventi di usura e decadimento del bene reale), ma anche studiato in maniera più semplice e meno invasiva (visualizzazione e misurazioni tramite software della riproduzione digitale) e, soprattutto, condiviso tramite strumenti di visualizzazione e misura in rete, in maniera tale da poter mettere, qualora sia voglia e sia possibile, quel bene culturale a disposizione di un vasto pubblico oltre che della comunità scientifica. Considerazioni simili sono valide per tutti gli altri settori di intervento in cui le tecniche di acquisizione, visualizzazione e stampa di modelli 3D rappresentano un valore aggiunto di estrema importanza strategica. Tra questi, vanno citate le attività che ruotano attorno alla rappresentazione di territorio (ambiente, urbanistica, informazione al cittadino, turismo) e quelle collegate a metodi innovativi di scansione nei settori dell'edilizia, del monitoraggio e del rinnovo dell'impiantistica industriale, nella progettazione di un prodotto oppure nel suo controllo di qualità.

## 1.5 Conclusioni

In questo contributo, abbiamo brevemente presentato le attività del *Laboratorio di Acquisizione, Distribuzione e Visualizzazione di Modelli 3D Complessi* (LAB3D) del Distretto ICT della Regione Sardegna nel corso dell'anno 2008. Il LAB3D, pur se strutturalmente parte di Sardegna Ricerche, si appoggia sull'esperienza acquisita dal CRS4, che ne assicura la direzione e supervisiona le attività che, in molti sensi, sono complementari a quelle svolte direttamente dal CRS4, ed in particolare dal gruppo Visual Computing. Il laboratorio copre infatti sia l'acquisizione di dati, attraverso tecnologie di scansione 3D, che la riproduzione dei modelli, attraverso tecnologie per la riproduzione materica. Inoltre, l'attività si focalizza, più che sulla ricerca, sul supporto all'innovazione e al trasferimento tecnologico di risultati di ricerca. Tra i risultati raggiunti in questo periodo sono da segnalare: la realizzazione di un'infrastruttura allo stato dell'arte che rafforza un polo locale pre-esistente orientato sia alla ricerca che al servizio alla produzione; la formazione di personale specializzato ed il trasferimento di conoscenze sia al contesto locale che a quello più ampio della comunità tecnica e scientifica; il contributo alla produzione di nuova conoscenza nei settori di intervento attraverso la partecipazione ad attività di ricerca svolte in collaborazione con enti di ricerca esterni; la realizzazione di prototipi software innovativi distribuiti in open source e la generazione di una base dati di modelli digitali accurati utilizzabili in vari settori di intervento.

## 1.6 Riferimenti bibliografici

- [1] John F. Gantz, David Reinsel, Christopher Chute, Wolfgang Schlichting, John McArthur, Stephen Minton, Irida Xheneti, Anna Toncheva, Alex Manfrediz, *The Expanding Digital Universe*, International Data Group, 2007.
- [2] Paolo Cignoni, Enrico Gobbetti, Ruggero Pintus, and Roberto Scopigno. *Color Enhancement Techniques for Rapid Prototyping*. In *The 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, December 2008.
- [3] Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Paolo Cignoni, Marco Di Benedetto, and Fabio Ganovelli. *C-BDAM - Compressed Batched Dynamic Adaptive Meshes for Terrain Rendering*. *Computer Graphics Forum*, 25(3): 333-342, September 2006. *Proc. Eurographics 2006*.
- [4] Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, and Giovanni Pintore. *High-quality networked terrain rendering from compressed bitstreams*. In *Proc. ACM Web3D International Symposium*. Pages 37-44, April 2007. ACM Press. New York, NY, USA.

- [5] Renato Pajarola and Enrico Gobbetti. Survey on Semi-Regular Multiresolution Models for Interactive Terrain Rendering. *The Visual Computer*, 23(8): 583-605, 2007.
- [6] Paolo Cignoni, Marco Di Benedetto, Fabio Ganovelli, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, and Roberto Scopigno. Ray-Casted BlockMaps for Large Urban Models Visualization. *Computer Graphics Forum*, 26(3), September 2007. Proc. Eurographics 2007.
- [7] Marco Agus, Enrico Gobbetti, José Antonio Iglesias Guitián, Fabio Marton, and Giovanni Pintore. GPU Accelerated Direct Volume Rendering on an Interactive Light Field Display. *Computer Graphics Forum*, 27(3), 2008. Proc. Eurographics 2008.
- [8] Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, and Giovanni Pintore. Scalable Rendering of Massive Triangle Meshes on Light Field Displays. *Computers & Graphics*, 32(1): 55-64, February 2008.
- [9] Ruggero Pintus, Simona Podda, and Massimo Vanzi. 3D Sculptures From SEM Images. In EMC 2008 14th European Microscopy Congress 1-5 September 2008, Aachen, Germany. Pages 597-598, 2008. Springer.
- [10] Ruggero Pintus, Simona Podda, and Massimo Vanzi. Improvements in automated photometric stereo 3D SEM. *Microscopy and Microanalysis*, 14(Suppl. 2): 608-609, 2008. Extended abstract of a paper presented at Microscopy and Microanalysis 2008 in Albuquerque, New Mexico, USA, August 3 - August 7, 2008.
- [11] Enrico Gobbetti, Fabio Marton, and José Antonio Iglesias Guitián. A single-pass GPU ray casting framework for interactive out-of-core rendering of massive volumetric datasets. *The Visual Computer*, 24, 2008. Proc. CGI 2008.
- [12] Paolo Cignoni, Fabio Ganovelli, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Federico Ponchio, and Roberto Scopigno. BDAM - Batched Dynamic Adaptive Meshes for High Performance Terrain Visualization. *Computer Graphics Forum*, 22(3): 505-514, September 2003. Proc. Eurographics 2003.
- [13] Paolo Cignoni, Fabio Ganovelli, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Federico Ponchio, and Roberto Scopigno. Planet-Sized Batched Dynamic Adaptive Meshes (P-BDAM). In *Proceedings IEEE Visualization*. Pages 147-155. IEEE Computer Society Press, October 2003.
- [14] Paolo Cignoni, Fabio Ganovelli, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Federico Ponchio, and Roberto Scopigno. Adaptive TetraPuzzles - Efficient Out-of-core Construction and Visualization of Gigantic Polygonal Models. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3): 796-803, August 2004. Proc. SIGGRAPH 2004.
- [15] Enrico Gobbetti and Fabio Marton. Layered Point Clouds - a Simple and Efficient Multiresolution Structure for Distributing and Rendering Gigantic Point-Sampled Models. *Computers & Graphics*, 28(6): 815-826, December 2004.
- [16] Enrico Gobbetti and Fabio Marton. Far Voxels - A Multiresolution Framework for Interactive Rendering of Huge Complex 3D Models on Commodity Graphics Platforms. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3): 878-885, August 2005. Proc. SIGGRAPH 2005.
- [17] Tibor Balogh, Tamas Forgacs, Tibor Agocs, Olivier Balet, Eric Bouvier, Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, and Gianluigi Zanetti. A Scalable Hardware and Software System for the Holographic Display of Interactive Graphics Applications. In *EUROGRAPHICS 2005 Short Papers Proceedings*, 2005.
- [18] Tibor Balogh, Tamas Forgacs, Olivier Balet, Eric Bouvier, Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, and Gianluigi Zanetti. A Scalable Holographic Display for Interactive Graphics Applications. In *Proc. IEEE VR 2005 Workshop on Emerging Display Technologies*, 2005. CD ROM Proceedings.
- [19] Tibor Agocs, Tibor Balogh, Tamas Forgacs, Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, and Gianluigi Zanetti. A Large Scale Interactive Holographic Display. In *Proc. IEEE VR 2006 Workshop on Emerging Display Technologies*, 2006. CD ROM Proceedings.
- [20] Tibor Balogh, Zsuzsa Dobranyi, Tamas Forgacs, Attila Molnar, Laszlo Szloboda, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Fabio Bettio, Giovanni Pintore, Gianluigi Zanetti, Eric Bouvier, and Reinhard Klein. An Interactive Multi-User Holographic Environment. In *SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies Proceedings*. ACM SIGGRAPH. Addison-Wesley, August 2006.
- [21] Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, and Giovanni Pintore. Multiresolution Visualization of Massive Models on a Large Spatial 3D Display. In *Proc. Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*, May 2007.
- [22] José Antonio Iglesias Guitián and Marco Agus. Interfacce uomo-macchina nella Realtà Virtuale. In *HCIM*, September 2008.
- [23] Marco Agus, Enrico Gobbetti, Giovanni Pintore, Gianluigi Zanetti, and Antonio Zorcolo. Real Time Simulation of Phaco-emulsification for Cataract Surgery Training. In *Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPHYS 2006)*, November 2006. Eurographics Association. Conference held in Madrid, Spain, November 6-7.

- [24] Enrico Gobbetti, Andrea Leone, and Alberto Marini. Virtual Sardinia: a Hypermedia Fly-through with Real Data. In E. Binaghi, P. A. Brivio, and A. Rampini, editors, *Proceedings of the International Workshop on Soft Computing in Remote Sensing Data Analysis*. Pages 253-260, 1995.
- [25] Enrico Gobbetti and Andrea Leone. Virtual Sardinia: a Large-Scale Hypermedia Regional Information System. *Computer Networks and ISDN Systems*, 28(7--11): 1539-1546, September 1996.
- [26] Wilson C. Hsieh, Deborah A. Wallach, Mike Burrows, Tushar Chandra, Andrew Fikes, Robert E. Gruber, Fay Chang, Jeffrey Dean, Sanjay Ghemawat. Bigtable: A Distributed Storage System for Structured Data, 7th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI), 2006, pp. 205-218.
- [27] Enrico Gobbetti, Dave Kasik, and Sung-eui Yoon. 2008. Technical strategies for massive model visualization. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Solid and physical modeling (SPM '08)*. ACM, New York, NY, USA, 405-415. DOI=10.1145/1364901.1364960 <http://doi.acm.org/10.1145/1364901.1364960>
- [28] Andreas Dietrich, Enrico Gobbetti, Sung-Eui Yoon, "Massive-Model Rendering Techniques: A Tutorial," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol.27, no.6, pp.20,34, Nov.-Dec. 2007 doi: 10.1109/MCG.2007.154
- [29] Enrico Gobbetti and Fabio Marton. 2004. Layered point clouds. In *Proceedings of the First Eurographics conference on Point-Based Graphics (SPBG'04)*, Marc Alexa, Markus Gross, Hanspeter Pfister, and Szymon Rusinkiewicz (Eds.). Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 113-120. DOI=10.2312/SPBG/SPBG04/113-120 <http://dx.doi.org/10.2312/SPBG/SPBG04/113-120>
- [30] Sung-eui Yoon, Enrico Gobbetti, David Kasik, and Dinesh Manocha. Real-time Massive Model Rendering. Volume 2 of *Synthesis Lectures on Computer Graphics and Animation*, Morgan and Claypool, August 2008.
- [31] Fabio Bettio, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Alex Tinti, Emilio Merella, and Roberto Combet. 2009. A point-based system for local and remote exploration of dense 3D scanned models. In *Proceedings of the 10th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST'09)*, Kurt Debattista, Cinzia Perlingieri, Denis Pitzalis, and Sandro Spina (Eds.). Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 25-32. DOI=10.2312/VAST/VAST09/025-032 <http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST09/025-032>
- [32] Marco Agus, Fabio Bettio, Andrea Giachetti, Enrico Gobbetti, José Antonio Iglesias Guitián, Fabio Marton, Jonas Nilsson, and Giovanni Pintore. An interactive 3D medical visualization system based on a light field display. *The Visual Computer*, 25(9): 883-893, 2009.
- [33] Gianmauro Cuccuru, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, Renato Pajarola, and Ruggero Pintus. 2009. Fast low-memory streaming MLS reconstruction of point-sampled surfaces. In *Proceedings of Graphics Interface 2009 (GI '09)*. Canadian Information Processing Society, Toronto, Ont., Canada, Canada, 15-22.