

POLITECNICO DI MILANO - SCUOLA' DEL DESIGN  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
PROGETTO E INGEGNERIZZAZIONE DEL PRODOTTO INDUSTRIALE  
(DESIGN & ENGINEERING)

**UNA METODOLOGIA DI OTTIMIZZAZIONE PER  
L'ACQUISIZIONE 3D AD ALTA RISOLUZIONE CON STRUMENTI  
LASER SCANNER PER ARCHITETTURA**

TESI DI:  
MARTINA SABATINI

Matricola 733781

RELATORE:  
GABRIELE GUIDI

CORRELATORE:  
MICHELE RUSSO

ANNO 2010 / 2011

# INDICE

<b>1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>5</b>
1.1	Obiettivo della tesi.....	8
1.2	L'area sacra di Mỹ Sơn.....	10
<b>2</b>	<b>Digitalizzazione.....</b>	<b>13</b>
2.1	Caratteristiche del raggio laser.....	14
2.2	Classificazione dei laser a scansione.....	15
2.2.1	Sistemi a triangolazione.....	15
2.2.2	Sistemi distanziometrici.....	18
2.2.2.1	Stima diretta: distanziometrici ad impulsi .....	19
2.2.2.2	Stima indiretta: modulazione AM.....	21
2.2.2.3	Stima indiretta: modulazione FM.....	22
<b>3</b>	<b>Risoluzione, accuratezza e incertezza.....</b>	<b>23</b>
3.1	Risoluzione.....	23
3.1.1	Risoluzione orizzontale.....	23
3.1.2	Risoluzione in profondità.....	25
3.2	Accuratezza e precisione.....	26
3.3	Incertezza di misura.....	27
3.3.1	Stima a priori.....	27
3.3.2	Stima a posteriori.....	27
3.4	Costruzione di un modello tridimensionale.....	29
3.5	Applicazioni del laser scanner.....	32
<b>4</b>	<b>Progetto di tesi.....</b>	<b>35</b>
4.1	Introduzione al progetto.....	35
4.2	Metodologia: Generale.....	38
4.3	Metodologia: Dettaglio.....	40

4.3.1	Registrazione.....	40
4.3.2	Filtraggio.....	44
4.3.3	Fusione.....	50
4.3.4	Editing.....	66
4.3.5	Ottimizzazione.....	70
<b>5</b>	<b>Casi studio .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	
<b>7</b>	<b>Riferimenti</b>	

## *ABSTRACT*

*Il Design sta assumendo importanza in molti campi d'applicazione La trasformazione che questa disciplina ha avuto negli ultimi anni ha reso possibile livelli di progettazione e visualizzazione degli stessi in maniera impensabile fino a pochi anni fa. In particolare il design ha usufruito delle radicali innovazioni nel settore del computer padroneggiando tali strumenti che sono diventati gli strumenti propri del designer. Questa situazione unita ad un aumento della professionalità della disciplina grazie a formazioni specifiche a permesso a questa professione di “entrare” in innumerevoli campi dalla produzione alla ricerca, in maniera importante e determinante. In questa tesi il design si “presta” al settore dei beni culturali fornendo un supporto nell’analisi finalizzata allo studio, alla conservazione e alla promozione di oggetti archeologici, e architettonici tramite il processo dell’acquisizione 3d con laser scanner a*

*Tempo di Volo.*



## INTRODUZIONE

Nell'immaginario collettivo lo studio dei beni culturali, artistici e archeologici rappresenta soprattutto un momento in cui uomini pieni di passione e senso artistico e a volte avventuroso, si cimentano con strumenti semplici e approssimativi a supporto della loro cultura tipicamente umanistica. Una vasta cinematografia ci ha reso noti trafficanti d'arte, restauratori pieni di talento e archeologi alla Indiana Jones.

In realtà nel corso degli anni, lo studio dell'arte, dei reperti architettonici e archeologici del passato, si è arricchito di metodologie scientifiche, sia a livello teorico che tecnologico, sempre più sofisticate, che rendono queste discipline sempre più una vera e propria scienza. Se piano piano l'indagine va assumendo comportamenti teorici scientificamente più elaborati, è indubbio che importanza notevole assumono le tecniche e soprattutto le nuove tecnologie di cui gli studiosi possono disporre a sostegno delle proprie indagini.

Molte tecnologie, come spesso accade, sono prese a prestito da altre discipline, sfruttandole spesso in campi diversi per cui sono nate. In questa commistione di indagini e metodologie, il Design con i suoi metodi di progettazione e i processi del Reverse Modeling e Virtual Prototyping forniscono un valido supporto nell'analisi finalizzata allo studio, alla conservazione e alla promozione di oggetti archeologici, artistici e architettonici.

A tal proposito merita ricordare l'importanza che il Design sta assumendo in molti campi d'applicazione anche molto diversi tra loro. La trasformazione che questa disciplina ha avuto negli ultimi anni ha reso possibile livelli di progettazione e visualizzazione degli stessi in maniera impensabile fino a pochi anni fa. In particolare il design ha usufruito delle radicali innovazioni nel settore del computer hardware e software padroneggiando tali strumenti che sono diventati degli strumenti fondamentali per il designer. Questa situazione unita ad un aumento della professionalità della disciplina grazie a formazioni

specifiche a permesso a questa professione di “entrare” in innumerevoli campi dalla produzione alla ricerca, in maniera importante e determinante. In particolare l'uso di software più completi e complessi ha reso il progetto “dinamico” nella sua visualizzazione in 3D, straordinariamente realistica da renderlo esauriente per molte applicazioni.

Il nostro interesse è proprio in questo campo, cioè nella digitalizzazione tridimensionale, tramite scansione laser e successiva trasformazione dei dati rilevati in artefatti virtuali.

La diffusione delle tecniche laser a scansione è relativamente recente e certamente è una delle tecnologie che sta trovando una forte affermazione.

L'acquisizione 3d permette di descrivere sia visivamente sia metricamente ogni tipo di oggetto, dalle forme e dimensioni più svariate. A seconda delle tipologie strumentali, l'ordine di grandezza può andare dal submetrico fino al chilometrico.

Le soluzioni tecnologiche, rese oggi disponibili anche dalle discipline della moderna Geomatica, offrono opportunità di grande interesse per il rilevamento nel settore dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda il momento primario del rilievo, cioè la fase di acquisizione del dato metrico, sia per quanto concerne la rappresentazione per oggetti di interesse archeologico, artistico e architettonico. In particolare quando si parla di beni culturali si intende una vasta gamma di manufatti appartenenti a moltissimi campi, dall'archeologia all'architettura, dalla scultura alla pittura ecc.

Spesso proprio per la diversità delle caratteristiche del bene, lo studio viene fatto con diversi metodi di ricerca sia per l'analisi di tipo storico sia per le caratteristiche geometriche e formali del modello utili per interpretare tale bene. Trova quindi sempre più spazio l'uso di strumenti e metodi basati su sistemi digitali di acquisizione, modellazione e visualizzazione. Il modello tridimensionale, ottenuto dalla scansione laser, è una vera e propria banca dati, che permette di estrapolare informazioni morfologiche, materiche e, con una risoluzione particolarmente elevata, su fenomeni di degrado.

In secondo luogo qualunque bene per poter essere correttamente studiato e compreso non va considerato solo come singola entità, ma va inserito nel contesto territoriale in cui si trova.

Le nuove tecnologie digitali offrono la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo dalle attività di rilievo, ma anche come sistema informativo per la divulgazione e fruibilità del singolo bene.

La caratteristica principale di quest'ultimo è quella di generare un database tridimensionale capace di essere oggetto della rappresentazione mediante i modelli digitali realizzati dalle scansioni laser.

Dal punto di vista dell'utente comune che vuole avvicinarsi ai beni artistici e culturali attraverso la

realtà virtuale, non è richiesta una precisione metrica spinta del modello rappresentato. È necessario invece porre l'opera in un contesto più ampio, che dia la sensazione all'utente di fare parte di ciò che sta guardando. Un esempio di ciò è il “museo virtuale” che rappresenta la creazione di un ambiente virtuale in cui integrare modelli di oggetti museali ottenuti da sistemi di scansione laser tridimensionale e consentire ad un utente comune di navigare all'interno della scena sentendosi parte di essa.

Naturalmente usare le tecniche già esistenti non fanno di questa disciplina una cosa scontata e semplice: il campo del rilevamento dei Beni Culturali è probabilmente il più emblematico e costringe spesso ad adottare un approccio multi-scala, che partendo dal rilievo del territorio arriva fino al singolo reperto, ponendo per ogni fase problematiche diverse, che richiedono strumentazioni distinte e che operano con precisioni non omogenee e differenti sistemi di riferimento, ma che devono alla fine riuscire a coesistere e comunicare.

L'acquisizione ed il processamento dei dati devono essere realizzati seguendo appropriate metodologie, prendendo in considerazione le caratteristiche di ogni tecnica sia in termini di capacità intrinseche, come ad esempio precisione, accuratezza e formato dei dati, sia allo scopo della mutua integrazione.

Si presenta così la necessità di elaborare tecniche di rilevamento ed elaborazione dei dati sempre più specialistiche, cercando di tener presente tutti i parametri e le diversità di ogni singola indagine, cercando di elaborare un metodo non univoco, ma che soddisfi il più possibile la totalità dei casi.

Soprattutto la difficoltà di avere rilevazioni in campo archeologico dove piccoli reperti si sommano a grandi opere da analizzare, e ciò comporta una ricerca metodologica che consenta soluzioni sostenibili e problematiche spesso complesse.

## 1.1 OBIETTIVO DELLA TESI

I problemi di acquisizione tridimensionale nel settore dei beni culturali in cui sia presente una forte variazione di scala, sono stati i presupposti di partenza per questa tesi.

Quando si parla di beni culturali si intende un'ampia varietà di manufatti con conseguente differenza di scala tra gli oggetti. Dalle architetture alle statue, dai capitelli alle monete.

Questa grossa variazione di scala si ritrova molto spesso all'interno dello stesso sito, e quindi sarebbero necessari più strumenti di rilievo tridimensionale per eseguire le riprese.

Gli scanner laser comunemente usati per questi rilievi sono di due tipi: a triangolazione che richiedono il buio completo ma che riescono facilmente a fornire l'elevata risoluzione necessaria e a elaborare dati sui reperti più piccoli, e scanner TOF, generalmente più ingombranti, ma più flessibili e adatti a lavorare anche in ambienti molto luminosi.

Sembrerebbe ovvio che per ottimizzare il risultato la soluzione più adatta comporterebbe l'uso di entrambi gli scanner, ma questo porterebbe a problemi di varia natura:

- Logistici e trasporto: occorre portare sul posto due apparecchi anziché uno e questo aumenta la difficoltà di lavoro per il peso e l'ingombro, soprattutto con quelli a triangolazione.
- Per il trasporto internazionale: un grosso problema è lo sdoganamento di apparecchiature complesse e voluminose come i laser scanner. Necessitano di essere spedite al luogo del rilevamento con mesi di anticipo, causando un lungo periodo di "fermo macchina". Poter usufruire di strumentazioni con un volume ridotto come un bagaglio a mano, semplifica l'iter di lavoro.
- Problemi per il sito archeologico di destinazione. Spesso di difficile accesso si presentano come vaste aree all'aperto (ricordiamo che invece la triangolazione vuole buio completo).
- Il costo: strumenti che costano tantissimo, e non sempre si ha la possibilità di comprare più strumentazioni. Inoltre la problematica specifica di questo caso fa riferimento a due tipi diversi di scanner, ma ci sono molte altre tipologie per i diversi usi, quindi non è sempre possibile avere lo strumento ideale per un determinato uso.
- Inoltre gli scanner TOF consentono di acquisire un vasto campo di ripresa per ogni singola scansione, riprendono infatti a quasi 360°, e a ottenere buoni risultati a distanze diverse, mentre i laser scanner a triangolazione hanno un campo visivo ridotto.

L'obiettivo della tesi è stato quindi riuscire ad utilizzare lo stesso strumento sia per le architetture che per i reperti più piccoli, al fine di massimizzare le risorse, il tempo e la logistica.

Lo strumento al quale si è pensato è sicuramente il TOF per ragioni di distanze. Mentre la triangolazione presenta un range di ripresa che va dai 50cm ai 2metri e quindi assolutamente inappropriati per le architetture, gli scanner TOF vanno da un 1 km a 1metro. La precisione non è equivalente perché a distanze di un metro il TOF ha una precisione intorno 1mm mentre quelli a triangolazione meno del decimo di mm.

Quindi se è vero che abbiamo una qualità inferiore rispetto a quelli a triangolazione la sfida sta nel tentare di adottare un metodo di elaborazione dei dati che ci permetta di recuperare una maggiore precisione sui piccoli reperti acquisiti con uno scanner TOF.

Inoltre la finalità gioca un ruolo importante in questa decisione: molte volte per i progetti nei beni culturali si ha la finalità di archiviazione (per creare una documentazione di quello che oggi è rimasto sul sito) e per i musei virtuali. O ancor di più per delle visite virtuali sul luogo a scopo conoscitivo, dove si può far vedere al turista la posizione originale di statue e reperti che spesso sono posizionati in posti differenti alla collocazione originale.

Il livello di precisione per tali scopi è sicuramente minore rispetto a quello richiesto per un applicazione di tipo ingegneristico.

Un caso molto frequente per tale tecnica di digitalizzazione è il reverse engineering dove l'oggetto deve essere riprodotto per la produzione industriale e ristampato con tecniche di rapid prototyping; si richiede per tali scopi elevata precisione, mentre le finalità qui sono diverse: sono un aiuto visivo e conoscitivo per il pubblico.

Con questa tesi proponiamo una metodologia per la modellazione dei reperti nei beni culturali con apparecchiature studiate per le architetture e parti di territorio.

Siamo andati quindi a studiare e a risolvere quei problemi che si sono verificati in fase di editing dal momento in cui il dato è stato acquisito con uno strumento improprio.

Si tratta ovviamente di sperimentare e mettere a punto un processo generico che possa valere in qualsiasi condizione con caratteristiche similari e non specifico per il sito preso in esame.

## 1.2 L'AREA SACRA DI MỸ SON

Come già detto l'argomento di questo lavoro è la metodologia di scanner e successiva analisi elaborata al computer, per fare ciò abbiamo preso in esame uno studio di un sito archeologico in Vietnam: l'area sacra di Mỹ Sơn. Merita adesso spendere qualche parola per presentare il sito.

Mỹ Sơn, una valle circondata da montagne, era stata scelta come sede per un centro religioso per la capitale del Regno Champa, sviluppato tra i secoli 4° e 13°, il quale deve la sua origine spirituale all'Induismo indiano.

L'area santuario è uno dei monumenti più famosi Champa per l'architettura e la scultura in Vietnam, e attualmente presenta i resti di 72 imponenti templi a torre.

Il sito rappresenta l'antico insediamento e la zona santuario; sono stati individuati otto gruppi di templi a torre che coprono un periodo che va dal 10° al 13° secolo, lungo intervallo di date che si riflette in diversi stili architettonici. I templi sono costruiti in cotto con pilastri in pietra e con decorazioni in pietra arenaria di bassorilievi raffiguranti scene della mitologia indù.

La torre principale (Kalan) simboleggia la montagna sacra (Meru) al centro dell'universo. Lo schema di costruzione dell'edificio è il seguente: la base quadrata o rettangolare (Bhurloka), che rappresenta il mondo umano, è costruita in mattoni o blocchi di pietra e decorata con rilievi. Sopra di questa si erge la torre principale (bhuvakola), costruita interamente in mattoni, con colonne e una finta porta verso est.

Gli interni sono semplici, con piccole nicchie per le lampade; il Shivalingam era situato su un basamento al centro e simboleggiava il mondo degli spiriti. La parte più alta delle torri ospitava un fregio decorato sormontato da un tetto che originariamente era coperto di foglia d'oro o d'argento. Lo stile predominante dell'architettura e la decorazione scultorea dei templi di Mỹ Sơn deriva direttamente dall'India.

Il lavoro svolto in questa tesi si occupa proprio delle formelle decorative di questi templi a torre le quali, ribadendo il concetto, sono state acquisite con uno scanner finalizzato alle riprese di edifici e di porzioni del territorio. La finalità del progetto è quello di rendere utilizzabili i dati che derivano dalla scansione passando per un processo di editing fino alla costruzione del modello 3d completo pronto per essere divulgato.

Le formelle nello specifico rappresentano dei e animali simbolici.

Va tenuto in considerazione che la realtà creatasi in questo contesto si presta ad essere declinata nelle

numerose realtà dei siti archeologici compresi quelli italiani.

La sperimentazione eseguita in questa tesi è quindi utile laddove ci si trovi a fare fronte ad analoghi problemi.

Sul piano delle tecnologie digitali, lo sviluppo di una rappresentazione virtuale del sito di Mỹ Sơn fornirà una serie di modelli 3D cui connettere sistemi informativi relativi alle diverse fasi della conservazione, nonché la base per presentazioni di carattere illustrativo per il pubblico.

Anche la scelta di ottimizzare la valorizzazione del sito e del suo contesto paesaggistico, dotandolo di strumenti di presentazione, comunicazione, fruizione per il pubblico, che siano adeguati a standard di qualità di livello internazionale, a maggior ragione trattandosi di sito ‘patrimonio dell’Umanità’, introduce un elemento di rinnovamento.



**Figura 1.1** *Area sacra di Mỹ Sơn: Portale di accesso seguito da edificio di raccoglimento preliminare all'accesso nel tempio*



*Figura 1.2* \_Area sacra di Mý Son: bassorilievo ricavato scolpendo gli spessi muri in laterizio.



## DIGITALIZZAZIONE

La diffusione delle tecniche laser a scansione è abbastanza recente e certamente è una delle tecnologie che troverà una maggiore espansione nel prossimo futuro.

Gli strumenti utilizzati per le scansioni tridimensionali sono comunemente chiamati laser scanner.

Un sistema laser a scansione fornisce come risultato diretto della sessione di misura, un insieme di coordinate tridimensionali, generalmente in un sistema di riferimento correlato con lo strumento, riferite ad un numero elevatissimo di punti che vengono colpiti dal raggio laser; la nuvola dei punti così generata descrive la superficie esterna dell'oggetto scansionato.

I sistemi di scansione laser operano in modo quasi completamente automatico e sono in grado di acquisire un numero notevolissimo di punti al secondo a volte anche nell'ordine delle migliaia.

Con il nome di laser scanner si intendono sia i sistemi basati su triangolazione che quelli a tempo di volo: i primi sono utilizzati su oggetti di piccole dimensioni mentre i secondi sono impiegati per rilievi di architetture o di porzioni di territorio.

I principi di funzionamento degli scanner 3d a triangolazione rispetto a quelli a tempo di volo sono completamente diversi anche se il dato che da essi si deriva è di tipo molto simile: una nuvola di punti che descrive la superficie dell'oggetto rilevato.

## 2.1 CARATTERISTICHE DEL RAGGIO LASER

Il termine laser. è l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation e si riferisce direttamente al principio di generazione del raggio laser. La scoperta fondamentale che ha permesso l'emissione della luce laser è dovuta ad A. Einstein nel 1917. Per giungere alla realizzazione pratica dello strumento furono necessari alcuni decenni: furono i fisici statunitensi Arthur Schawlow e Charles Hard Townes a brevettare nel 1958 il primo dispositivo laser, anche se a reclamare la paternità della scoperta fu il loro connazionale Gordon Gould.

Il laser trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio di radiazioni elettromagnetiche, come avviene per la luce naturale, ma mentre in questa i fotoni vengono emessi in tutte le direzioni e con lunghezze d'onda diverse, nel laser la luce è usualmente monocromatica, consistente cioè in una singola lunghezza d'onda, ed emessa con un raggio molto focalizzato.

Il raggio del fascio dipende dalla distanza percorsa dalla luce attraverso il mezzo.

Per quanto riguarda le caratteristiche del raggio laser si può dire che la distribuzione d'intensità della luce non è uniforme nella sezione del laser, ma è tipicamente maggiore al centro.

Un'altra caratteristica del fascio è la divergenza, cioè l'ampliarsi della sezione mentre il raggio si allontana dalla cavità in cui viene generato, con l'angolo di divergenza  $f$  dipendente dalla lunghezza d'onda del laser emesso  $l$ , dal diametro alla sorgente  $D$  e dalla distribuzione d'intensità secondo la seguente relazione:

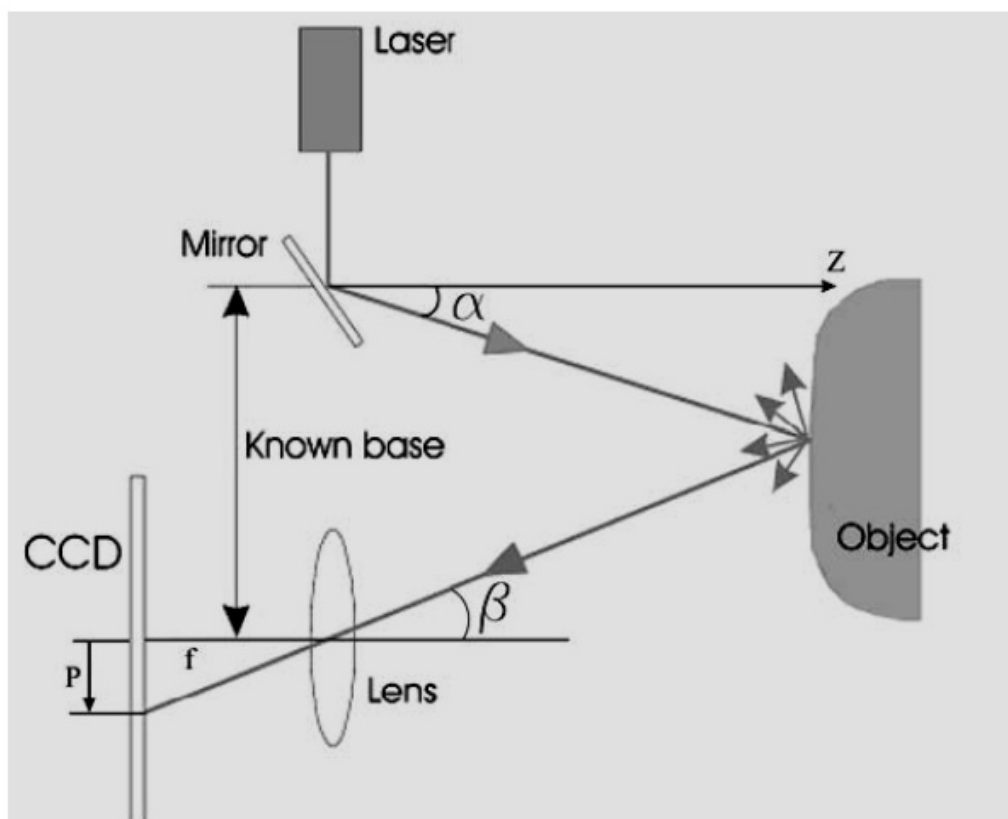
$$f = \text{sen}^{-1}\left(K \cdot \frac{1}{D}\right)$$

dove  $K$  è una costante prossima ad 1 che dipende dalla distribuzione dell'intensità della luce nella sezione.

## 2.2 CLASSIFICAZIONE DEI LASER A SCANSIONE

I laser a scansione si possono classificare in base al principio di funzionamento: si distinguono fondamentalmente due tipologie, i sistemi a triangolazione e i sistemi distanziometrici, approfonditi nei prossimi paragrafi.

### 2.2.1 SISTEMI A TRIANGOLAZIONE



*Figura 2.1* \_Principio di funzionamento dei laser a triangolazione.

I laser scanner basati sul principio della triangolazione sono strumenti che, per la misurazione della posizione di punti, utilizzano le conoscenze di alcuni elementi di un triangolo.

Questi scanner sono costituiti da un raggio laser che, deflesso secondo un passo incrementale mediante uno specchio rotante, colpisce l'oggetto secondo una scansione regolare; il segnale riflesso (punto o linea laser) viene catturato da uno o più sensori d'immagine a stato solido CCD o CMOS, posti ad una distanza prefissata e calibrata (base) rispetto al punto da cui il laser viene inviato all'oggetto; il laser ed il sensore sono contenuti in un'unica unità chiamata scanner head.

La precisa conoscenza della geometria che lega il laser alla camera consente, attraverso l'applicazione dei teoremi geometrici di Talete, di determinare la posizione del punto dell'oggetto rilevato; in particolare la profondità  $z$  in funzione degli angoli  $\alpha$ ,  $\beta$  e della base nota  $d$ , vale:

$$z = \frac{d \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg} \alpha}$$

Si osservi che mentre  $\alpha$  viene misurata direttamente,  $\beta$  viene calcolato in modo indiretto misurando  $P$  (che viene rilevata su un sensore CCD o CMOS) ed essendo nota la focale  $f$  (caratteristica costruttiva della camera).

Ne consegue ovviamente un limite nella portata dello strumento. Per la determinazione della posizione del punto acquisito si utilizzano: la base (di entità nota in quanto caratteristica intrinseca dello strumento) e due angoli che sono misurati in fase di acquisizione ovvero: l'angolo che si forma tra il raggio emesso e la base dello strumento e l'angolo che si forma tra il raggio riflesso e la base.

In base alla forma del laser proiettato si possono avere nella categoria degli scanner a triangolazione, i laser a singolo spot, a lama di luce e a campo intero.

Nei sistemi a spot singolo, l'oggetto viene scannerizzato punto per punto. Il raggio luminoso generato dal laser viene inviato all'oggetto, dopo essere stato deviato da uno specchio, mentre una camera, composta da lenti e da un sensore di posizione, misura la posizione del punto illuminato sull'oggetto.

Questi sistemi dimostrano notevoli vantaggi: l'intera lunghezza del sensore CCD può essere ottimizzata per un certo volume di misure, consentendo di ottenere un'elevata risoluzione ed accuratezza; questi sono però sistemi molto costosi, poiché necessitano di dispositivi meccanici e componenti specializzati, come i galvanometri ed i sensori CCD lineari.

I laser a lama di luce, sono la naturale estensione dei sistemi a spot singolo e consentono di proiettare una linea laser e di collezionare simultaneamente l'intero profilo dell'oggetto.

Anziché utilizzare una moltitudine di punti singoli, con la necessaria tecnologia per scannerizzare un intero oggetto, un sistema lineare proietta un'intera linea sull'oggetto con un angolo misurato e ne acquisisce l'intero profilo, in funzione della distanza dell'oggetto dallo scanner.

Lo svantaggio di questa soluzione è dato dall'influenza della luce ambientale sul sistema; il rapporto segnale/rumore aumenta in quanto il sensore deve acquisire l'intera scena a causa della distribuzione della potenza del laser sull'intera linea.

I sistemi a proiezione di pattern fanno parte dei laser a campo intero, e si differenziano dai sistemi citati precedentemente in quanto ciò che viene proiettato sull'oggetto è una sequenza di luce di forme codificate, come ad esempio un grigliato di linee alternate di chiaro e scuro.

I sistemi di questo tipo possono essere di due modelli:

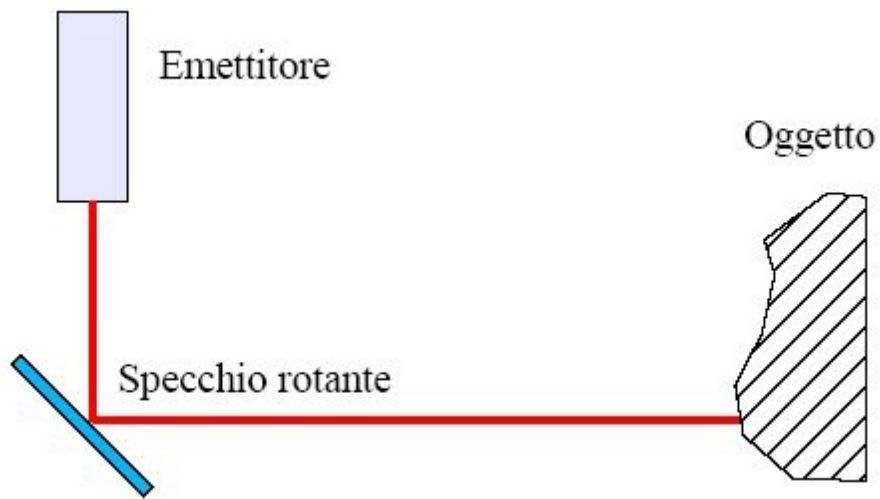
- a frange codificate, in cui immagini a codice binario multiplo sono create con risoluzione crescente. Tutte le linee proiettate sono numerate ed i numeri sono codificati con il cosiddetto "Gray - Code", in cui linee adiacenti differiscono esattamente per un bit (0/1): una linea chiara rappresenta uno "0" ed una scura un "1". Tutte le linee vengono proiettate in mezzo secondo;
- a tecnica di Moirè: due coppie di reticoli sono proiettati per modulare spazialmente l'ampiezza della luce proiettata; la camera demodula le frange sovrapposte le cui fasi sono proporzionali alla distanza dall'oggetto.

I laser a spot singolo possono essere utilizzati in settori industriali ove sia richiesta l'elevata produttività associata ad elevata precisione che può arrivare fino a  $2\ \mu\text{m}$  e può riprendere 5 milioni di punti al secondo. La velocità di acquisizione è intorno a 200.000 punti/s.

Per quanto riguarda i laser a lama di luce bisogna innanzitutto sottolineare che il volume di punti, acquisito da questi sistemi è molto inferiore rispetto ai sistemi laser a spot singolo.

I sistemi a proiezione di pattern consentono di appropriarsi di un'immagine 3D completa, senza la necessità di un apparato complesso, ma a parità di profondità forniscono un'accuratezza inferiore rispetto ai laser a singolo spot e a lama di luce.

## 2.2.2 SISTEMI DISTANZIOMETRICI



*Figura 2.2* \_Principio di funzionamento dei sistemi distanziometrici.

Sono detti distanziometrici i sistemi che hanno come risultato della misura la distanza fra il centro dello strumento e il primo punto che il raggio laser incontra.

Gli scanners TOF (*Time Of Flight*) sono apparecchi ottici dotati di traguardo in grado di misurare la direzione di puntamento, a cui si aggiunge un distanziometro che prevede l'invio di un impulso laser e la successiva misura del tempo impiegato dalla luce per andare sulla superficie e tornare fino allo strumento di misura (tempo di volo). A tale intervallo di tempo è associata anche una misurazione angolare di precisione, data dalla rotazione di due specchi rotanti attorno agli assi x e z (l'asse y è associato alla distanza e la z è la verticale).

La rotazione dello specchio, in funzione della risoluzione angolare impostata dall'operatore per la scansione, crea la spaziatura tra i differenti punti e genera la nuvola di punti relativa all'oggetto indagato.

Il risultato del rilievo è una nuvola molto densa di punti, tutti con coordinate note, distribuiti sull'oggetto a mo' di rete non strutturata ma generata da un movimento sferico.

Questi sistemi sono meno accurati dei sistemi a triangolazione, con un'incertezza di misura che va da

alcuni mm ad un paio di cm, ma offrono il vantaggio di operare in un range di distanze più ampio, adatto al rilievo di strutture architettoniche, per le quali un errore di qualche millimetro risulta relativamente piccolo.

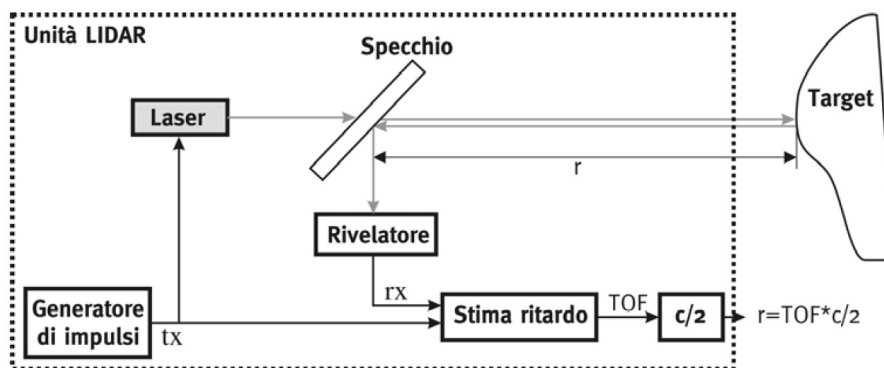
I tempi in gioco sono estremamente ridotti grazie all'elevata velocità della luce, ed è questa la principale causa d'incertezza della misura elevata.

Le strategie per misurare le coordinate 3D sfruttando il ritardo di propagazione sono diverse: la misura diretta del tempo di volo (tempo trascorso tra l'andata e il ritorno di un impulso) o la misura indiretta attraverso la modulazione dell'intensità luminosa e il calcolo degli sfasamenti di segnale tra l'onda emessa e quella ricevuta (sistemi detti a misura di fase).

### 2.2.2.1 STIMA DIRETTA

Le prime applicazioni della stima diretta del tempo di volo sono state realizzate in applicazioni aeree in ambito militare e nei sistemi di misura satellitari S.L.R. (Satellite Laser Ranging). In questo caso particolare l'impulso laser emesso possedeva una intensità tale da non essere utilizzabile in applicazioni terrestri in quanto costituiva un pericolo per la vista. La potenza emessa è oggi facilmente variabile e resa compatibile con l'esigenza delle applicazioni terrestri.

Un breve impulso luminoso viene inviato sulla superficie da misurare, il misuratore converte l'intensità luminosa vista dalla sua area attiva in un segnale elettrico proporzionale ad essa.



*Figura 2.1*\_Schema di principio della stima diretta del tempo di volo: struttura del sistema di ricetrasmisione dell'impulso laser

La misura del tempo necessario a coprire la distanza tra sensore e superficie avviene conteggiando le frazioni di secondo che intercorrono tra la partenza dell'impulso nota a priori al sensore e l'istante in cui l'elettronica preposta al riconoscimento del segnale ricevuto determina un valore luminoso che superi una soglia prefissata.

La distanza coperta dall'impulso luminoso per andare e tornare dal bersaglio è doppia rispetto a quella effettiva ( $r$ ) che lo separa dal sensore e che può essere facilmente espressa mediante la formula:

$$r = TOF * C / 2$$

dove  $c$  è la velocità della luce pari a  $3 \times 10^8$  m/sec e TOF è il tempo che l'impulso luminoso impiega per andare e tornare dal bersaglio.

La precisione della stima di distanza dipende direttamente dalla precisione nella stima del tempo di volo e non è estremamente elevata a causa della presenza di rumore sul segnale di ritorno, dovuto a numerose cause sia ottiche sia elettroniche.

Le cause ottiche dipendono dal fatto che la luce laser, essendo emessa come una radiazione coerente, una volta riflessa da una superficie che si allontana dal comportamento di uno specchio teorico, presenta contributi di luce sovrapposti, prodotti da percorsi multipli caratterizzati da lunghezze. Questa condizione genera un'interferenza tra i diversi contributi retrodiffusi non più esattamente coerenti e da origine ad irregolarità di intensità luminosa.

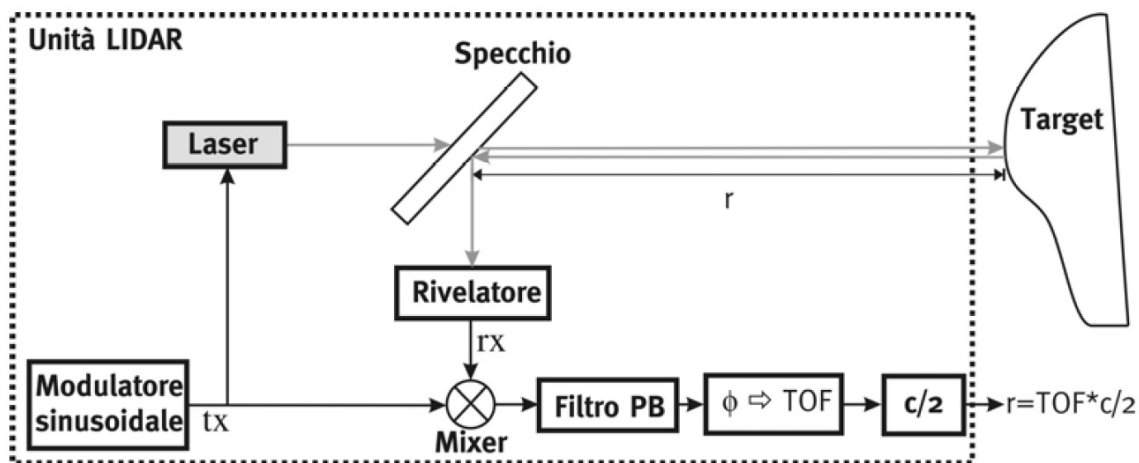
Dal punto di vista elettronico il blocco di stima del ritardo consiste in un contatore che è attivato dall'impulso trasmesso (tx) e fermato dall'impulso ricevuto (rx). Per definire un istante preciso corrispondente all'arrivo dell'impulso, si pone una soglia al 50% del massimo del segnale; il comando viene considerato valido quando il segnale (sia tx che rx) supera tale soglia. Ma mentre il superamento della soglia da parte dell'impulso tx è deterministico, quello del segnale rx, a causa del rumore, ha una certa quota di aleatorietà.

La velocità di acquisizione varia in base ai modelli e va da 1.000 a 100.000 punti /s.



## 2.2.2.2 STIMA INDIRETTA: MODULAZIONE AM

Questi sistemi sfruttano una codifica del segnale luminoso che consente l'identificazione di uno sfasamento. In questo caso l'invio di luce non è impulsivo, ma sfrutta una radiazione luminosa continua che viene modulata di intensità. La modulazione prevede l'impiego di una frequenza fissa e di un'ampiezza variabile nel tempo che viene indicata con AM (Amplitude Modulation) e che sfrutta la combinazione moltiplicativa di due sinusoidi sfasate, la quale permette di ottenere un feedback proporzionale all'entità dello sfasamento.



*Figura 2.1* Schema di principio della stima indiretta del tempo di volo tramite modulazione AM: struttura del sistema di ricetrasmisione del segnale laser

Il segnale si ripete periodicamente, perciò lo sfasamento non può oltrepassare un ciclo di sinusoide. Se la fase supera tale limite introduce un'ambiguità pari ad un periodo di ciclo. Perciò più è breve la periodicità, ovvero maggiore è la frequenza di modulazione, e tanto minore sarà la distanza oltre la quale si produce un'ambiguità.

La risoluzione spaziale è tanto migliore quanto più ampia è la frequenza di modulazione.

La velocità di acquisizione varia in base ai modelli e va da 50.000 a 1.000.000 punti /s.

### **2.2.2.3 STIMA INDIRETTA: MODULAZIONE FM**

Anche con questo sistema abbiamo una radiazione luminosa continua, in cui l'intensità viene alterata nel tempo secondo una modulazione di frequenza FM (Frequency Modulation), e la ricezione è basata su una demodulazione coerente.

La frequenza viene aumentata linearmente in un certo intervallo di valori; si determina un'onda triangolare.

Nel segnale luminoso trasmesso sono coinvolte tutte le frequenze dalla minima alla massima e con le frequenze massime aumenta il range di ambiguità.

Questi sistemi, recentemente perfezionati, hanno permesso di introdurre una nuova categoria di strumenti che, anche se inadatti a lavorare su lunghe distanze, consentono nelle misure comprese tra i 2 e i 20 metri di ottenere incertezze di misura inferiori al millimetro.

# **RISOLUZIONE, ACCURATEZZA E INCERTEZZA**

## **3.1 RISOLUZIONE**

Per definizione è la più piccola variazione del misurando che può essere stabilita.

È la capacità che ha un sistema di acquisizione di catturare i dettagli di una superficie; tale capacità dipende dall'insieme delle qualità ottiche, meccaniche ed elettroniche dello strumento.

Ciò vale per la risoluzione massima che può raggiungere lo strumento; tuttavia talvolta si utilizza una diversa configurazione per scegliere livelli inferiori: in questi casi per determinare la risoluzione si utilizza il passo di campionamento spaziale dello strumento.

La risoluzione dello scanner può essere diversa nello spazio tridimensionale e quindi lungo i tre assi, perciò si distingue tra la risoluzione orizzontale e la risoluzione in profondità.

### **3.1.1 RISOLUZIONE ORIZZONTALE**

La risoluzione orizzontale si riferisce al piano orizzontale che convenzionalmente è assunto come tale, mentre il piano ortogonale all'asse ottico della camera è il piano xy (ma nella realtà è spesso un piano verticale).

La risoluzione del piano xy è determinata dalla distanza dei punti acquisiti.

Per determinare la risoluzione occorre quindi, essere a conoscenza della dimensione della range map e dell'area inquadrata; possiamo quindi valutare la risoluzione lungo i due assi, dividendo la lunghezza di ogni lato per il corrispondente numero di punti.

Non sempre però la risoluzione è uguale nelle due direzioni di x e y, dipende dal tipo di scanner usato. Per gli scanner a triangolazione a lama di luce laser si può ottenere la risoluzione spaziale nel seguente modo:

Per quanto riguarda l'asse x, la soluzione dipende direttamente dallo spostamento meccanico della testa di scansione, che è noto a priori.

Per l'asse y invece, si parte dall'angolo sotteso dal fascio laser durante la "pennellata" per generare la lama di luce ( $\varphi$ ), ed il numero di punti ( $n$ ) con cui il sensore acquisisce l'immagine di un dato profilo:

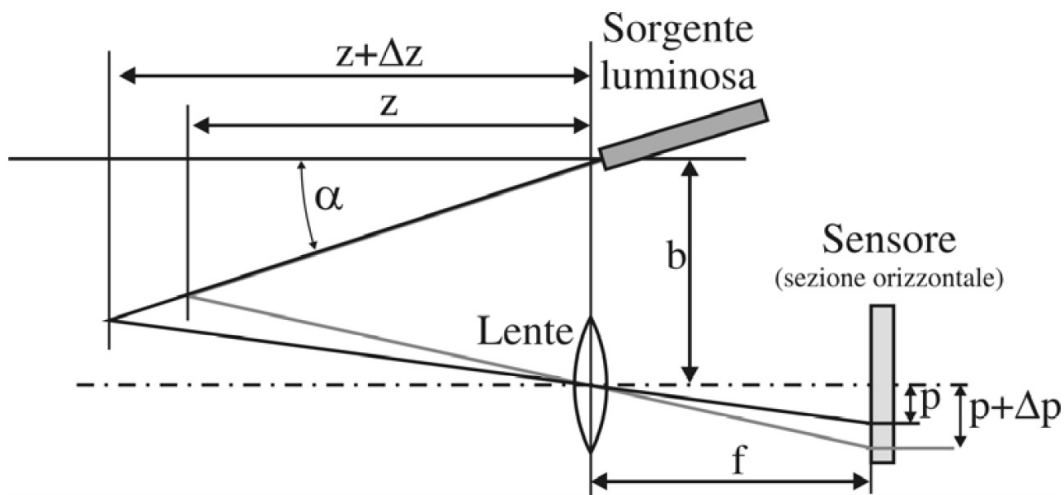
$$\Delta \varphi = \varphi / n$$

Va tenuto presente che al variare dell'orientamento della testa di scansione si verifica un aumento della distanza. Ciò è vero se la superficie da scansionare si trova all'interno di un cilindro. Se si superano tali distanze è opportuno prestare attenzione a non alterare i valori di risoluzione in fase di progettazione dell'acquisizione.

### 3.1.2 RISOLUZIONE IN PROFONDITÀ

E' la risoluzione lungo l'asse z è legata a quella nell'asse x attraverso una relazione geometrica sintetizzata in figura e dalla formula:

$$z = b / (\tan \alpha + p / f)$$



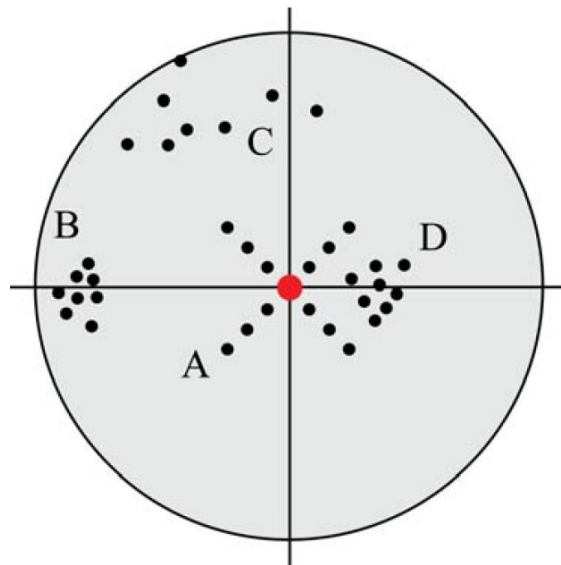
**Figura 3.1** Risoluzione lungo l'asse z in un sistema a lama di luce laser, qui visto in sezione orizzontale. L'allontanamento del bersaglio di  $\Delta z$  determina uno spostamento orizzontale della traccia laser di un valore  $\Delta p$

La distanza tra i pixel di una matrice CCD può andare da qualche micrometro a qualche decina di micrometri. Il valore  $\Delta p$  è dipendente da questo parametro e dalla modalità di identificazione sull'asse orizzontale del picco di luminosità della traccia laser.

## 3.2 ACCURATEZZA E PRECISIONE

L'accuratezza è l'errore tra la misura di una quantità e il suo vero valore (accertato per vero).

La precisione è la dispersione delle misure intorno alla loro media; permette di stimare la componente casuale dell'errore rappresentato dallo scarto quadratico medio tra le singole misure e la loro media.



*Figura 3.2\_Bersaglio con quattro gruppi di punti con caratteristiche di precisione e accuratezza diverse.*

Per comprendere meglio la differenza tra i due concetti si considerano i 4 gruppi di punti A,B,C,D. Ogni gruppo ha il suo baricentro, calcolato con la media aritmetica delle ascisse e delle ordinate, considerando il centro del bersaglio come punto da riprendere.

La distribuzione del punto A ha una forte dispersione e quindi una scarsa precisione, ma è molto accurata perché il baricentro del gruppo dei punti coincide con il centro del bersaglio.

La distribuzione di B è invece molto più precisa perché i punti sono molto vicini tra loro e quindi vicini al loro baricentro, ma è poco accurata perché è lontano dal centro del bersaglio.

Il gruppo C invece non è né preciso né accurato perché lontano dal centro e con i punti sparpagliati.

L'ultimo gruppo D, al contrario, è sia preciso sia accurato, in quanto è abbastanza vicino al centro e i

suoi punti sono tra loro abbastanza uniti.

La precisione dipende da fatti casuali e non correggibili, mentre l'accuratezza si può migliorare con la taratura dello strumento, in quanto tratta di errori sistematici.

### **3.3 INCERTEZZA DI MISURA**

Secondo il “Vocabolario Internazionale di Metrologia” (VIM) del 2007, per incertezza di misura si intende un parametro non negativo che caratterizza un intervallo di valori attribuiti a un misurando.

L'incertezza (o precisione) guarda la variazioni di distanza misurata rispetto alla distanza reale.

È quella parte dell'errore ascrivibile a variazioni di tipo aleatorio e quindi non correggibili con la taratura. Per individuare l'incertezza di misura si può fare una stima a priori o a posteriori:

#### **3.3.1 STIMA A PRIORI**

Viene fatta in alcune fasi della misura. Il funzionamento dello scanner può essere descritto da equazioni che descrivono la relazione che sussiste tra quello che misura la range camera (la posizione di una traccia luminosa) e le coordinate del punto sull'oggetto (le grandezze in uscita).

Questi parametri, non essendo determinabili con certezza, vengono trattati come delle variabili aleatorie e analiticamente determinati come una fluttuazione su ognuna di queste grandezze.

Questo permette di essere a conoscenza a priori della prestazione e di correggere eventualmente la lunghezza focale.

#### **3.3.2 STIMA A POSTERIORI**

Viene stimata applicando gli strumenti dell'analisi statica ad insiemi di misure omogenee con una caratteristica comune.

È valutata su un bersaglio di test di cui è nota la forma a priori; comunemente si può usare un piano rettificato. Si effettua una scansione dell'oggetto che dovrebbe rappresentare il piano teorico; si può

così stimare qual è l'entità della deviazione di ogni punto dall'andamento teorico, causata dall'incertezza di misura. Dalle coordinate 3D dell'oggetto è possibile calcolare il piano di "best-fitting", cioè quel piano dove viene minimizzata la somma del quadrato degli scarti tra ogni punto misurato e il riferimento planare. Una volta noto il piano di best-fitting viene eseguito il calcolo dello scarto quadratico medio che fornisce la varianza secondo l'asse z e la sua radice quadrata: la deviazione standard .



### 3.4 COSTRUZIONE DI UN MODELLO TRIDIMENSIONALE

Il primo passo nell'impostare un rilievo con laser scanner è la scelta dello strumento; nonostante sia sempre presente la possibilità di suddividere gli scanner secondo la loro portata, non esiste un criterio unico nella scelta ma è necessario tenere in considerazione diverse caratteristiche operative, tra le quali assumono grande importanza parametri tra i quali la velocità d'acquisizione, la risoluzione di scansione e la divergenza del raggio laser.

La descrizione completa di un oggetto richiede più acquisizioni da stazioni diverse; effettuata la scelta dello strumento, è quindi necessario compiere un'analisi preliminare dell'oggetto, in modo da stabilire quanti e quali saranno i punti di acquisizione per poter portare al termine un rilievo completo senza lacune (pianificazione prese).

Il prodotto della scansione è costituito da una o più nuvole di punti ad altissima densità - migliaia o centinaia di migliaia di punti - che descrivono con estremo dettaglio la superficie dell'oggetto e dell'estensione del campo di presa strumentale (molti strumenti sono in grado di scansionare a 360° in orizzontale e con campi di apertura in verticale molto ampi).

L'acquisizione del dato costituisce soltanto una prima fase del rilievo eseguito con il laser scanner; vi è una seconda parte del lavoro molto lunga e complessa, la fase di elaborazione, o post processing dei dati acquisiti che diventa l'elemento chiave per la costruzione di un modello poligonale corretto.

In questa operazione si possono riassumere tutti quei processi informatici, automatici e manuali, che consentono di passare dalla nuvola di punti "grezza", che costituisce l'output dello strumento, al prodotto grafico finale che si vuole ottenere.

I dati ottenuti durante la fase di rilievo vengono portati all'interno del computer tramite il software di elaborazione, dove vengono eseguite le principali operazioni di trattamento della nuvola di punti.

Le prime fasi di elaborazione dei dati riguardano le operazioni di pulizia degli elementi indesiderati presenti nella nuvola grezza, prodotta direttamente dallo scanner.

La pulizia dei dati è un'operazione necessaria poiché molte sono le ragioni che possono causare la memorizzazione di punti che non appartengono all'oggetto.

La maggior parte di questi punti errati può essere eliminata solo mediante procedimenti iterativi, poiché non esiste un metodo automatico che preveda tutte queste possibilità di errore.

Queste nuvole di punti però sono soggette anche ad un certo rumore di fondo, determinato

dall'accuratezza dello strumento e dall'incertezza di misura, che possono renderli di difficile utilizzazione.

Per ridurre questo effetto vi sono algoritmi che operano un filtraggio dei dati, migliorando la leggibilità e l'affidabilità della geometria ricavata, sono gli algoritmi di smoothing.

In generale possiamo dire che per ottenere un modello rigoroso delle superfici ricavate con il laser scanner bisogna operare una riduzione dei dati acquisiti, attraverso un filtraggio intelligente dei punti rilevati.

L'operazione successiva è l'allineamento, nella quale avviene la scelta dei punti di collegamento all'interno delle due scansioni e la scelta dei punti omologhi.

L'operazione di modellazione vera e propria avviene con la trasformazione della nuvola di punti in una superficie discreta tramite la generazione delle mesh; nel caso di oggetti dotati di una geometria semplice la creazione del modello avviene con un processo in cui l'operatore interviene in maniera minimale, mentre nel caso di oggetti complessi, caratterizzati da molte discontinuità (per esempio colonne, statue, nicchie...), ottenere un modello corretto richiede tempi di preparazione più lunghi ed un notevole intervento da parte dell'operatore.

Una mesh è una superficie frammentata in poligoni triangolari connessi mediante i loro bordi e vertici. La generazione ottimale di questa è un passo fondamentale per la corretta elaborazione della superficie. La creazione della mesh ricorre ad una procedura ottimizzata che fa uso dell'algoritmo di Delaunay che opera come se i dati fossero definiti secondo un 2.5D con l'aggiunta del parametro di profondità.

Vi sono anche altri algoritmi che a partire da generici punti sparsi ricostruiscono una superficie, come quelli di N.Amenta e H.Hoppe (fonte Wikipedia), ma in genere si ritiene che essi non siano paragonabili a quello di Delaunay sia in termini di affidabilità che di velocità.

Per gli oggetti complessi solitamente è necessario suddividere la nuvola di punti in porzioni appartenenti ad entità uniformi tramite la fase cosiddetta di segmentazione; ciascuna entità viene quindi modellata separatamente, mentre il modello complessivo è generato dall'unione delle singole entità modellate.

Terminata questa procedura è possibile ricavare il modello finale.

Bisogna sottolineare come l'enorme quantità di dati ottenibili mediante un rilievo laser scanner, rappresenti una forma di rappresentazione dell'oggetto più complessa rispetto alla restituzione classica da rilievo in ambiente CAD.

Per questo motivo una rappresentazione esaustiva che si può ottenere da un modello reale complesso è

il relativo modello tridimensionale, che consenta di esplorare l'oggetto ricavando misure e sezioni da qualsiasi punto o posizione dello stesso.

Il modello 3D texturizzato e navigabile dell'oggetto può essere una forma di comunicazione di grande impatto sul pubblico, fornendo una descrizione dell'oggetto molto dettagliata, da cui è possibile ottenere informazioni metriche accurate.

### 3.5 APPLICAZIONI LASER SCANNER 3D

Le applicazioni del laser scanner sono molteplici e investono numerosi campi di utilizzo, spaziando dall'ingegneria al design passando per la medicina.

Vogliamo qui dare una rapida panoramica dei maggiori impieghi di questo strumento.

In topografia e gestione del territorio il rilievo tramite scansione laser, grazie all'interfaccia diretta con il sistema GPS, permette una veloce georeferenziazione del rilievo 3D; esso consente infatti di rilevare in tempi velocissimi una quantità notevole di dati con altissimo dettaglio che può essere utilizzata per il calcolo di sezioni, curve di livello e volumetrie.

In geologia il laser scanner permette la creazione rapida di DEM (Digital Earth Model) con elevato dettaglio per la verifica della stabilità dei versanti e per il calcolo della caduta massi in condizioni di emergenza.

- l'ispezione di componenti a forma libera attraverso il controllo dimensionale ad alta precisione di componenti complessi;
- la valutazione e la calibrazione di macchinari; in particolare, poiché l'identificazione dei difetti dei componenti non sempre permette di determinare la causa del problema, una valutazione della macchina utensile responsabile della loro produzione può consentire di stabilire un'eventuale scarsa taratura. È possibile, inoltre, identificare rapidamente o persino preventivamente le cause dei difetti produttivi, consentendo di implementare la soluzione e minimizzare al contempo i tempi di fermo per guasti;
- il controllo delle deformazioni: documentazione dei processi di deformazione e monitoraggio delle contromisure;
- il monitoraggio degli scavi: controllo semplice ed esatto del volume e delle dimensioni di scavi di fondazione e fosse;
- la verifica e manutenzione delle strutture portanti, attraverso fasi di verifica rapida ed economica della capacità di carico e del grado di usura.

Il rilievo laser scanner inoltre è particolarmente adatto al rilievo di cave a cielo aperto grazie alla elevata portata di ripresa e alla velocità di acquisizione dei dati, capacità che consente di ottenere in breve tempo un modello DTM (Digital Terrain Model) del terreno, dal quale è possibile effettuare un calcolo di volumi, o superfici, o dal quale è poi possibile estrarre curve di livello già vettorializzate.

Il laser scanner, grazie alla velocità di scansione, permette di essere usato anche per applicazioni nelle quali la scansione viene fatta da mezzi in movimento (quad, auto, imbarcazioni, elicottero) grazie all'associazione di altri sensori come telecamere, fotocamere, Gps e piattaforme inerziali IMU (Inertial Measurement Unit).

La rapida evoluzione tecnologica degli ultimi anni nel campo della fotografia digitale e della navigazione satellitare di precisione ha permesso al cosiddetto MMS (Mobile Mapping System) di prendere sempre più campo per l'acquisizione di dati geospaziali.

Questa tecnologia, diversamente dallo scanner terrestre, sfrutta la potenzialità del movimento e della velocità del mezzo sul quale lo scanner è montato, per acquisire dati in modo più veloce e grazie poi all'interfaccia e alla sincronizzazione del flusso dei dati ad un sistema di posizionamento Gps e ad un sistema inerziale (IMU) per il controllo di rollio, beccheggio e imbardata, si raggiungono precisioni centimetriche.

In campo medico, il laser scanner è in grado di fornire modelli geometrici elettronici di protesi personalizzate, utilizzando la tomografia assiale computerizzata (TAC) o la risonanza magnetica (digitalizzatori fisici) per le misurazioni di parti della struttura corporea da sostituire.

Nel restauro, il rilievo propedeutico offre diversi vantaggi: oltre a garantire la completa misurabilità dell'oggetto architettonico attraverso la definizione di piani e sezioni trasversali, la misurazione di distanze e superfici, l'elaborazione di tali dati permette di produrre analisi dettagliate dei dissesti strutturali e degli stati di degrado delle superfici. Tali informazioni hanno costituito la base per lo sviluppo del processo di progettazione del restauro.

Per quanto concerne nel campo del design, la modellazione 3d basata sull'acquisizione, riveste oggi un ruolo fondamentale, oramai parte integrante della routine del processo industriale in tutte le sue forme.

La maggior parte dei prodotti industriali richiede infatti un prototipo e una mini serie per valutare sia il prodotto in sé (ergonomia, volume, pesi, maneggevolezza ecc...) sia per valutare proprio il processo di produzione durante il quale si possono verificare compressioni o dilatazioni del materiale e distorsioni metriche in grado di modificare anche in maniera consistente la forma: basti pensare a quei componenti nella meccanica di precisione dove pochissimi millimetri possono compromettere il funzionamento dell'oggetto.

In tali casi il laser può essere usato per scannerizzare il prototipo e confrontare le variazioni che si sono verificate durante il processo produttivo rispetto all'oggetto disegnato al computer correggendo eventuali discrepanze.

Una delle principali applicazioni consiste nell'acquisizione di un prodotto che per storia di produzione non ha un suo corrispettivo modello tridimensionale al computer ma solo disegni su carta. Si crea quindi il processo inverso a quello tipico nella progettazione del design; una volta acquisito in formato digitale si ha la perfetta conoscenza delle forme e delle misure e si può quindi modificare e riprodurre in serie.

Un'ulteriore applicazione del laser scanner permette di acquisire in formato digitale le informazioni di una maquette: molte volte per progettare si parte da un pezzo reale di materiale, lamiera, polistirolo o creta, e si inizia a generare una forma che solo successivamente si vuole trasformare in un disegno computerizzato; tramite laser scanner si può acquisire la maquette e ottenere il modello 3d, da cui ricavare i disegni tecnici e le sezioni 2d.

I sistemi a laser scanner sono poi molto usati nel processo di rapid prototyping.

Le tecniche di prototipazione rapida generano un pezzo reale in forma automatica a partire da un modello digitale, si utilizzano macchinari che operano per addizione di materiale, con la possibilità di ottenere forme anche molto complesse, aggiungendo materiale a strati. Si parla, infatti, di *layered manufacturing* (fabbricazione stratificata). I laser scanner sono spesso integrati a queste tecnologie permettendo di acquisire un oggetto esistente, di generarne il modello al computer e, dopo opportuna elaborazione, di stamparla direttamente sulle macchine di prototipazione.

Questo comporta grossi vantaggi nella produzione, in quanto si ottiene una significativa riduzione del time to market, ottimizzando il percorso dalla progettazione alla commercializzazione.

Quindi, riepilogando, nell'ambito del design si ottengono grossi vantaggi in fase di progettazione, verifiche e archiviazione.

Per tutto ciò la figura del designer riveste molta importanza perché la sua formazione ed esperienza professionale permettono di interpretare e rielaborare i dati acquisiti da apparati tecnologicamente avanzati in relazione al progetto in corso

## PROGETTO DI TESI

### 4.1 INTRODUZIONE AL PROGETTO

Come è stato già citato nell'introduzione, l'intera area di scena del sito di Mý Son è stata acquisita con un solo strumento, nonostante tali caratteristiche non avrebbero garantito un'acquisizione del dato geometrico coerente con tutte le forme presenti sul sito.

Quello che abbiamo fatto all'interno della tesi è stato di sviluppare una metodologia per trasformare i dati acquisiti da uno strumento per l'architettura per la creazione di modelli scultorei adatti per la catalogazione e la diffusione.

I problemi principali hanno riguardato la qualità del dato ricevuto della scansione; una nuvola densa e ricca di dati caratterizzata da un preminente “rumore di fondo” derivato dalle condizioni climatiche e ambientali e dalle problematiche intrinseche allo strumento.

L'obiettivo principale è stato quello di mettere appunto un metodo per togliere i dati errati e di porre in risalto le caratteristiche formali dei reperti archeologici, per restituirli nel migliore dei modi.

Il primo passo è consistito nella verifica dei limiti del laser scanner sul rilievo di elementi particolareggiati, verificando fin dove si poteva spingere lo strumento riuscendo effettivamente a scannerizzare correttamente ogni oggetto.

Un altro punto della procedura è stato il passaggio di trasformazione dalla nube di punti al modello costituito da superfici anche qui cercando di esaltare al massimo i dettagli e le caratteristiche geometriche dell'oggetto artistico. La procedura ha affrontato quindi l'intero percorso di editing del modello.

Quanto appena descritto è quello che caratterizza e diversifica la procedura qui proposta rispetto a una procedura standard di elaborazione dei dati.

Abbiamo usato come casi studio per descrivere e verificare la metodologia affrontata in questa tesi, delle formelle decorative di terracotta originariamente applicate sui templi a torre del sito archeologico

di Mý Son. Si è ritenuto che i modelli fisici scelti avessero delle forme geometriche e volumi tali da consentire di approfondire tutti gli aspetti utili all'analisi del processo. I manufatti scelti hanno una dimensione approssimativa di 50cm x 50 cm e presentano una ricchezza e varietà di particolari. Ognuna delle formelle rappresenta un simbolo della religione induista, dalla rappresentazione della divinità “suprema” maschile agli animali ritenuti sacri.

Per quanto riguarda l'acquisizione del dato RGB si è scelto di non rilevare tali informazioni poiché i bassorilievi in questione presentano uniformità di materiale, la terracotta priva di decorazioni pittoriche superficiali. Tipicamente il dato del colore risulta utile ad esempio in forme assialsimmetriche o forme che hanno una geometria indistinta, dove in fase di elaborazione dei dati il riconoscimento delle regioni corrispondenti risulta difficile, diversamente è invece con la presenza del colore.

La forte caratterizzazione delle forme dei reperti, oggetti di studio in questa tesi, costituisce di per sé un valido aiuto nella ricerca dei punti omologhi e quindi nell'ottenimento di un buon allineamento.

Il programma scelto per la sperimentazione è stato Geomagic (Raindrop s.r.l.) per la sua completezza in tutte le fasi del processo.

Dati molto significativi per lo sviluppo della metodologia sono stati la risoluzione, l'accuratezza e la deviazione standard dello strumento usato, Laser Scanner Focus 3D Faro®; per questo sono state fatte diverse prove di scansione di una superficie planare, verificando il comportamento dello strumento a diverse distanze e configurazioni di lavoro.

<b>Scala</b>	<b>Distanza (m)</b>	<b>Risoluzione (cm)</b>
Inquadramento/DTM	8 - 16	0,7 - 6
Architettonica	4 - 8	0,4 – 1,5
Dettaglio	1- 1,50	0,07 – 0,1

***Tabella 4. 1\_ Configurazioni ottimali dello strumento***

Al termine di una comparazione tra i dati ottenuti, sono state definite alcune configurazioni ottimali, da utilizzare durante tutto il rilievo per ottenere dati coerenti tra di loro in funzione della scala di acquisizione.

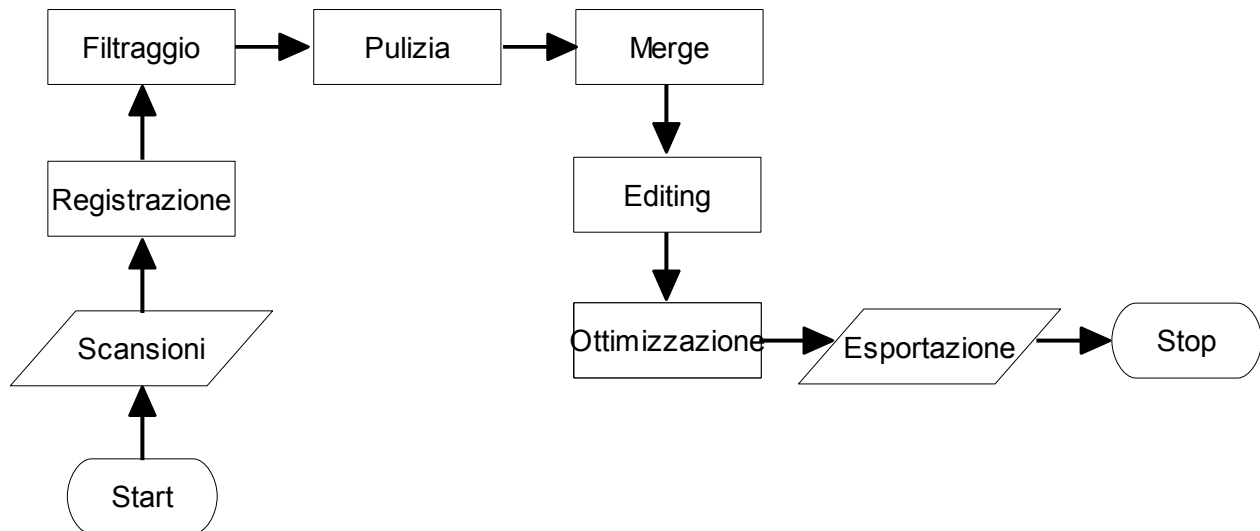


Per quanto riguarda la scansione dei reperti più piccoli abbiamo mantenuto una distanza tra un metro e un metro e mezzo ricavandone la risoluzione dello strumento che va da 0,7 mm a 1 mm e un valore di deviazione standard di 0,5 mm.

<b>Descrizione</b>	<b>Valori in mm</b>
Risoluzione	0,7 - 1
Deviazione Standard	0,5
Accuratezza	0.001

*Tabella 4. 2\_ Configurazioni dello strumento a distanze di metri 1 – 1,50*

## 4.2 METODOLOGIA: GENERALE



**Figura 4.1** *Diagramma di flusso del processo di elaborazione dei dati acquisiti con laser scanner TOF*

Lo schema mostra a livello generico il percorso della metodologia; in realtà è necessario scomporre in sottoinsiemi ogni blocco per spiegare correttamente la metodologia completa.

L'acquisizione del dato costituisce solo una prima fase del rilievo eseguita con il laser scanner; vi è una seconda parte del lavoro, molto lunga e complessa, per rendere utilizzabile il modello.

Il prodotto che si riceve dalla scansione è costituito da nuvole di punti che descrivono la superficie dell'oggetto. Segue quindi una pulizia automatica per togliere i dati che il laser scanner ha acquisito ma che sono estranei all'oggetto rilevato.

Il passaggio successivo è l'allineamento di tutte le prese e in seguito si prosegue con la registrazione globale.

È spesso poi necessario fare un'ulteriore pulizia per togliere gli elementi estranei che precedentemente si confondevano con i dati della scansione.

Si arriva alla lisciatura, passaggio che ha richiesto uno studio molto approfondito perché questa operazione rischia di eliminare dati utili della geometria dell'oggetto. Questo problema è causato da un

uso inadatto della range camera, la quale ha una risoluzione molto vicina alla dimensione dei particolari presenti sull'oggetto e quindi facilmente confondibili con gli elementi del rumore.

Il Merge rappresenta un passaggio molto importante che riunisce in se molte funzioni, che possono essere ulteriormente suddivise.

Il merge al suo interno racchiude l'unione della nube di punti, creando un sottile strato controllato, per poi arrivare alla mesh.

Si arriva da qui ad avere il modello poligonale grezzo dove è necessario effettuare una fase di editing, ovvero di correzione dei possibili errori che si sono verificati durante il processo di triangolazione.

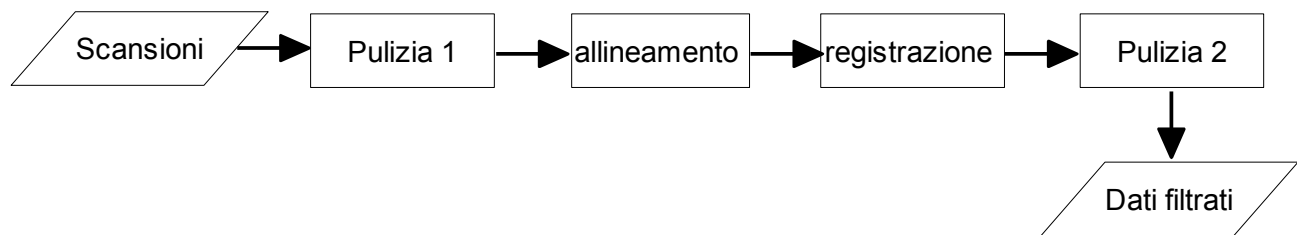
Infine, dopo una chiusura del modello si passa alla ottimizzazione, ovvero alla riduzione del numero totale dei triangoli che costituiscono la mesh ed una successiva esportazione.

La procedura può essere conclusa qui o si può importare l'oggetto in programmi di modellazione per l'aggiunta dei materiali e del render finale per completare l'oggetto e renderlo pronto per i suoi diversi utilizzi.

## 4.3 METODOLOGIA: DETTAGLIO

In questo capitolo viene spiegata la metodologia in modo dettagliato andando a scomporre ogni parte della schema generico e spiegando i motivi delle scelte effettuate.

### 4.3.1 REGISTRAZIONE

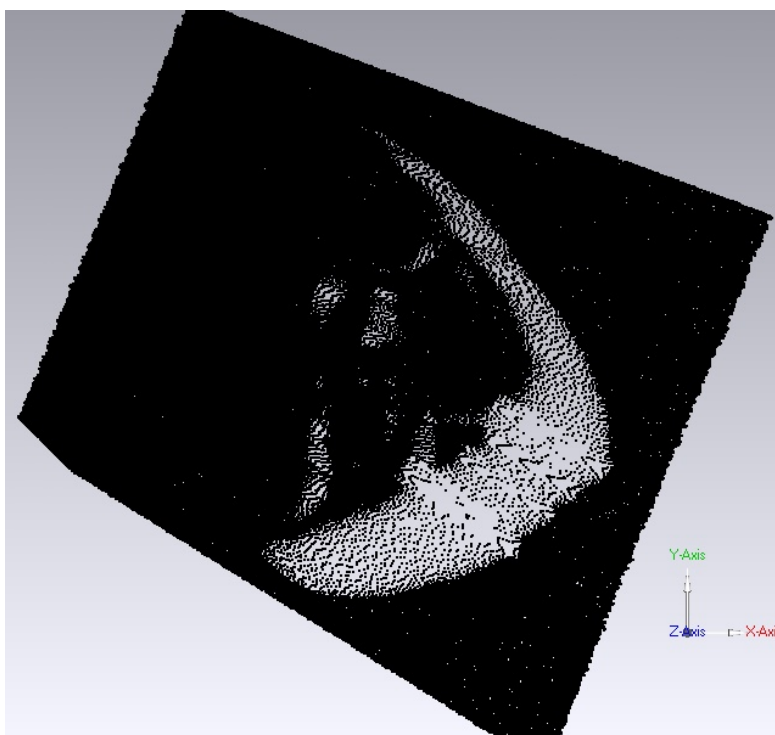


*Figura 4.2*\_Diagramma di flusso della fase di registrazione dei dati di oggetti acquisiti con scanner TOF

Come detto per costruire il modello sono necessarie più prese da diverse angolazioni. In questo caso, data l'omogeneità di dimensioni del manufatto, si è pensato ad un set di presa dove posizionare il reperto e individuare le diverse posizioni dello scanner, per cercare di ottenere un livello di precisione coerente tra i diversi manufatti. Le prese, sono state quattro per ogni reperto; questo schema è stato modificato solo per i manufatti molto complessi che hanno richiesto un numero maggiore di prese. Normalmente per un oggetto a tutto tondo sono richieste almeno 8 prese per ottenere una acquisizione coerente con la sua complessità geometrica, ma gli oggetti in questione sono molto simili a dei bassorilievi per i quali non è necessario il retro.

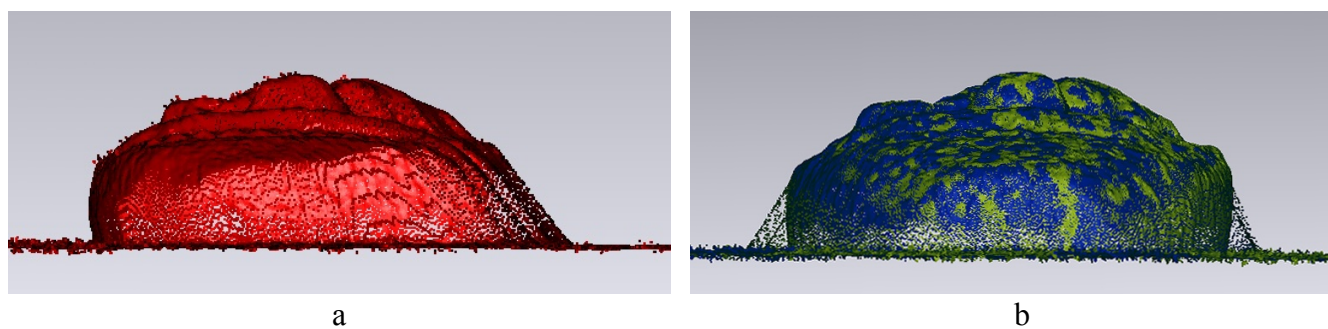
La prima cosa da fare, dopo l'importazione dei dati in un software adeguato, è controllare la scansione. Queste vanno analizzate su vari aspetti: a livello geometrico, formale e del rumore per verificare la qualità del dato stesso e progettare le operazioni successive. Questa prima analisi è prettamente visiva e viene fatta confrontandolo con l'oggetto reale o delle immagini di questo.

È possibile notare degli elementi estranei alla geometria rilevata, facilmente riconoscibili perché



*Figura 4.3* Esempio di come si presenta una scansione appena importata nel software di elaborazione dati

seguono una diversa curvatura rispetto al resto del modello. Questi punti sono chiamati spuri e sono generati dallo scanner quando l'angolo tra la direzione del laser e la normale alla superficie è prossima a  $90^\circ$  formando delle zone d'ombra sull'oggetto che non vengono acquisite. Questi valori anomali vanno tolti da ogni scansione.



*Figura-4.4* Elementi estranei alla geometria rilevata, facilmente riconoscibili perché seguono una diversa curvatura rispetto al resto del modello (spuri) a) singola range map; b) range map dopo la fase di allineamento

È opportuno quindi procedere con un filtraggio iniziale, cancellando definitivamente il dato estraneo alla geometria; ci sono degli strumenti di aiuto del software semiautomatici che vanno a selezionare quei punti che sono ad una data distanza dalla maggior parte degli altri.

A livello teorico una range map non dovrebbe ricorrere a questa fase, ma spesso sono presenti degli elementi estranei dovuti a numerose cause tra cui la scelta dello strumento più idoneo: in via logica segue che queste scansioni sono assai ricche di punti spuri.

Data quindi la massiccia quantità di rumore si utilizza un filtro per gli “*outliers*” con valori di sensibilità medio/alti. Valori bassi eliminano pochi punti indesiderati, mentre un valore eccessivamente alto rischia di andare a togliere anche delle parti della geometria dell'oggetto, che come vedremo in seguito, è facilmente confondibile con il rumore. Effetto diretto provocato da valori eccessivamente alti è la formazione di lacune nella nube.

Altrettanto utile in questa fase è la pulizia delle incoerenze di bordo.

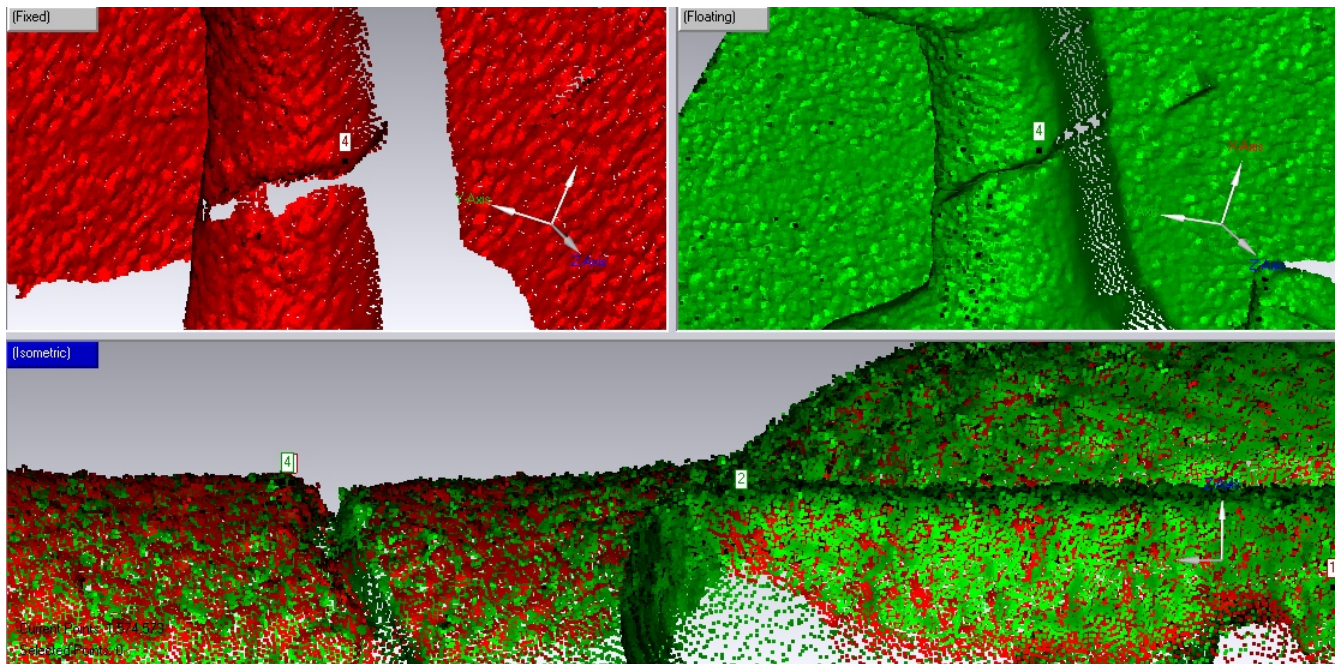
In questo passaggio è perciò molto importante guardare attentamente la scansione e cosa avviene dopo l'applicazione dei passaggi di pulizia.

La stessa procedura va naturalmente eseguita su tutte le range map con i medesimi valori.

Il passaggio successivo consiste nell'allineamento, che consente di trovare il posizionamento ideale tra le prese nello stesso sistema di riferimento. Una range map viene utilizzata come riferimento iniziale e una seconda adiacente come svincolata nello spazio. Si identificano le coppie di punti omologhi nelle regioni di sovrapposizione, meglio se tre o più e si avvia la procedura semiautomatica di ICP.

L'allineamento si fa tra due range map alla volta, si crea un gruppo di queste e si ripete l'intero processo sul gruppo appena creato (parte fissa) e la successiva range map.

Ogni allineamento di due prese fornisce dei valori: la deviazione standard dei punti appartenenti alle regioni in sovrapposizione dei due oggetti e la distanza media tra le due prese.



**Figura 4.5** \_Fase di allineamento: riconoscimento dei punti omologhi per trovare il posizionamento ideale tra le prese all'interno dello stesso sistema di riferimento.

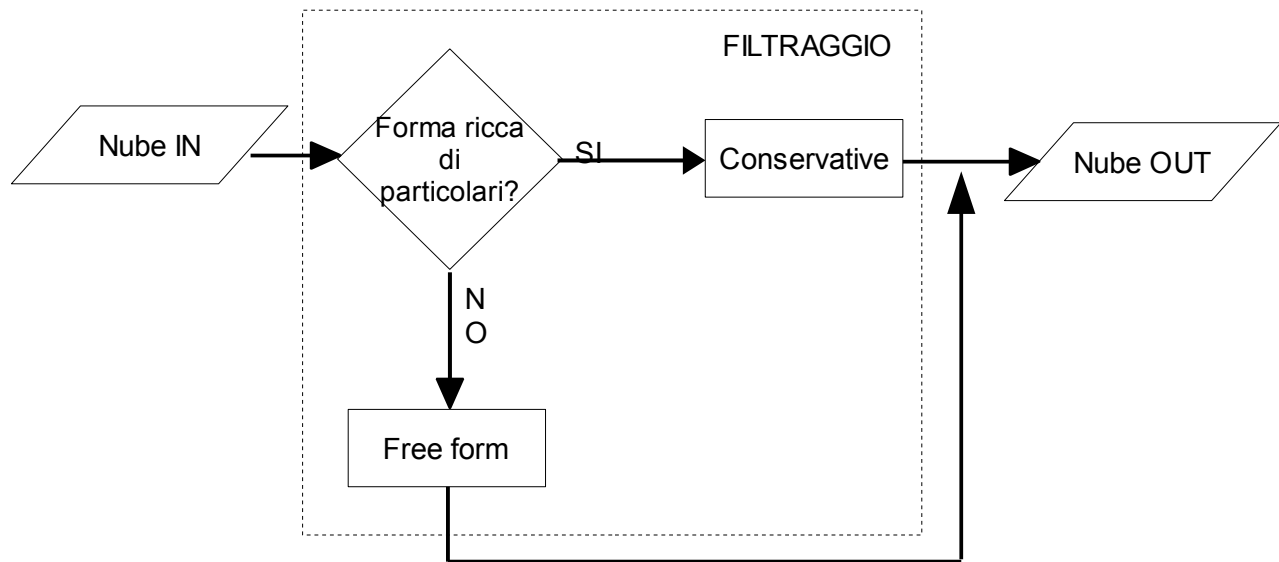
È molto importante che l'errore d'allineamento si mantenga intorno alla deviazione standard dello strumento, verificata nella fase di test su un piano rettificato; mantenersi su tale valore per l'allineamento di tutte le prese garantisce risultati migliori.

La distanza media tra le due range map deve essere invece sotto la risoluzione della range camera, misurata alla stessa distanza con cui si è acquisito il reperto archeologico (ovvero circa un metro). Superare il limite può tradursi in una perdita di dettagli e di coerenza sulla geometria.

al seguito di questa procedura si ha una registrazione finale di tutte le prese, ovvero il ri-orientamento di due o più scansioni che compongono un unico oggetto, in modo che le regioni identiche coincidano e venga completato il modello in tutte le sue parti.

La fase successiva è interamente manuale e consiste nell'eliminazione di porzioni della range map che non fanno parte dell'oggetto. Ne è un esempio il piano d'appoggio dall'oggetto. Si è scelto di fare questa operazione solo dopo l'allineamento per ridurre l'operazione a una sola anziché ripeterla per ogni singola range map qualora venga fatto insieme alla fase di filtraggio.

## 4.3.2 FILTRAGGIO



*Figura 4.6\_ Diagramma di flusso della fase di filtraggio*

La riduzione del rumore compensa l'errore dello scanner spostando i punti alle posizioni statisticamente corrette. Il risultato è una disposizione più uniforme di punti che possono essere triangolarizzati più agevolmente.

La difficoltà di questa parte sta proprio nel trovare la riduzione del rumore che definisca i contorni della scansione ripulendola dal rumore superficiale, ma che non porti via dati geometrici.

Nel software usato è possibile anche scegliere il tipo di riduzione del rumore in base alla forma: Free Form e Prismatic shape. La prima adatta a forme scultorie, liscia molto rispetto alla curvatura della superficie. Si tratta di una tecnica di riduzione aggressiva. La seconda invece aiuta a mantenere la forma ed è più indicata per prodotti rifiniti da spigoli vivi, presenti specialmente nell'ingegneria meccanica; quest'ultima è scomposta in due algoritmi: “conservative”, incentrato a lasciare invariata la caratteristica della forma, e l'algoritmo “aggressive” che mira a ripulire maggiormente la range map.

La scelta si è indirizzata su due delle tre tipologie di lisciatura presenti; “free form” e “forme



*prismatiche conservative*". Per arrivare a questa soluzione sono state necessarie molte prove e valutazioni per la difficoltà di trovare il giusto grado tra la conservazione della forma e la riduzione del rumore.

I valori che entrano in gioco sono principalmente il grado di lisciatura (smooth) e il numero di iterazioni (cioè i passaggi); genericamente più iterazioni vengono applicate e più si toglie il rumore. Più aumento il grado di "smooth" e maggiormente levigo la zona. Con il grado di smoot e il numero iterazioni si arriva a fare una scala per piccoli step di livelli di lisciatura.

La tabella 4.3 mostra quali risultati si ottengono sulla range map applicando i livelli di smooth e di iterazione diversi; in particolare come varia la deviazione standard cambiando la tipologia di algoritmo. I vari parametri indicano il distacco della nube trattata rispetto a quella grezza.

Il valore di distanza massima che ottengo è collegato al valore della deviazione limite che è possibile impostare pari alla risoluzione dello strumento (in questo caso è stata impostata pari a 1mm).

È stato preso come esempio significativo l'hamsa, uno dei casi studio della tesi, per la ricchezza e la diversità dei particolari sulla superficie, in modo tale da apprezzare l'algoritmo su parti diversificate.

Distanza massima: specifica il massimo scostamento riportato da questo spettro.

Distanza media: la distanza media che tutti i punti sono stati spostati e considerati accettabili.

Deviazione Standard: descrive la variabilità delle distanze.

tipo di riduzione rumore	livello di lisciatura	n° di iterazioni	distanza max (mm)	distanza media (mm)	deviazione standard (mm)	
Free form	1	3	1.00	0,48	0,33	a
Free form	2	3	1.00	0,52	0,33	b
Free form	3	3	1.00	0,54	0,34	c
Free form	4	3	1.00	0,58	0,35	d
aggressive	1	3	1.00	0,39	0,30	e
aggressive	2	3	1.00	0,44	0,32	f
aggressive	3	3	1.00	0,48	0,33	g
aggressive	4	3	1.00	0,49	0,33	h
conservative	1	3	1.00	0,23	0,24	l
conservative	2	3	1.00	0,35	0,29	l
conservative	3	3	1.00	0,44	0,32	m
conservative	4	3	1.00	0,46	0,32	n

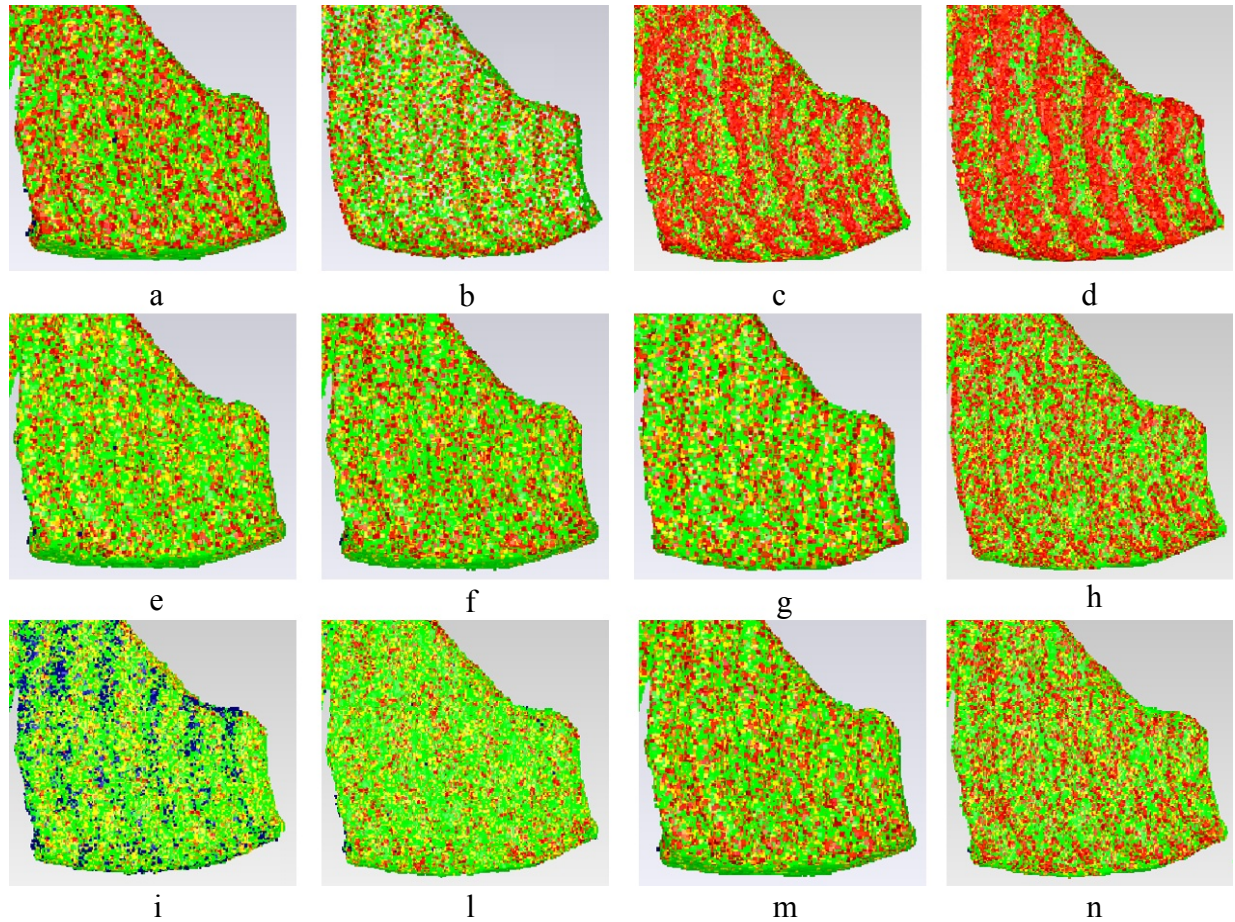
**Tabella 4.3** *Applicazione di livelli di lisciatura e di iterazione diversi sulla nube grezza; I vari parametri indicano il distacco della nube trattata con operazione di filtraggio rispetto a quella grezza. (La lettera minuscola a fianco fa riferimento alle lettere riportate anche in figura 4.7 che indicano graficamente la distribuzione della deviazione standard )*

Se si guarda esclusivamente i valori si nota che per la totalità sono dei valori ottimali che stanno al di sotto della risoluzione del laser scanner. In realtà ci sono alcuni gradi di livello di smooth che hanno dei valori ottimali, ma visibilmente è chiara la perdita di particolari.

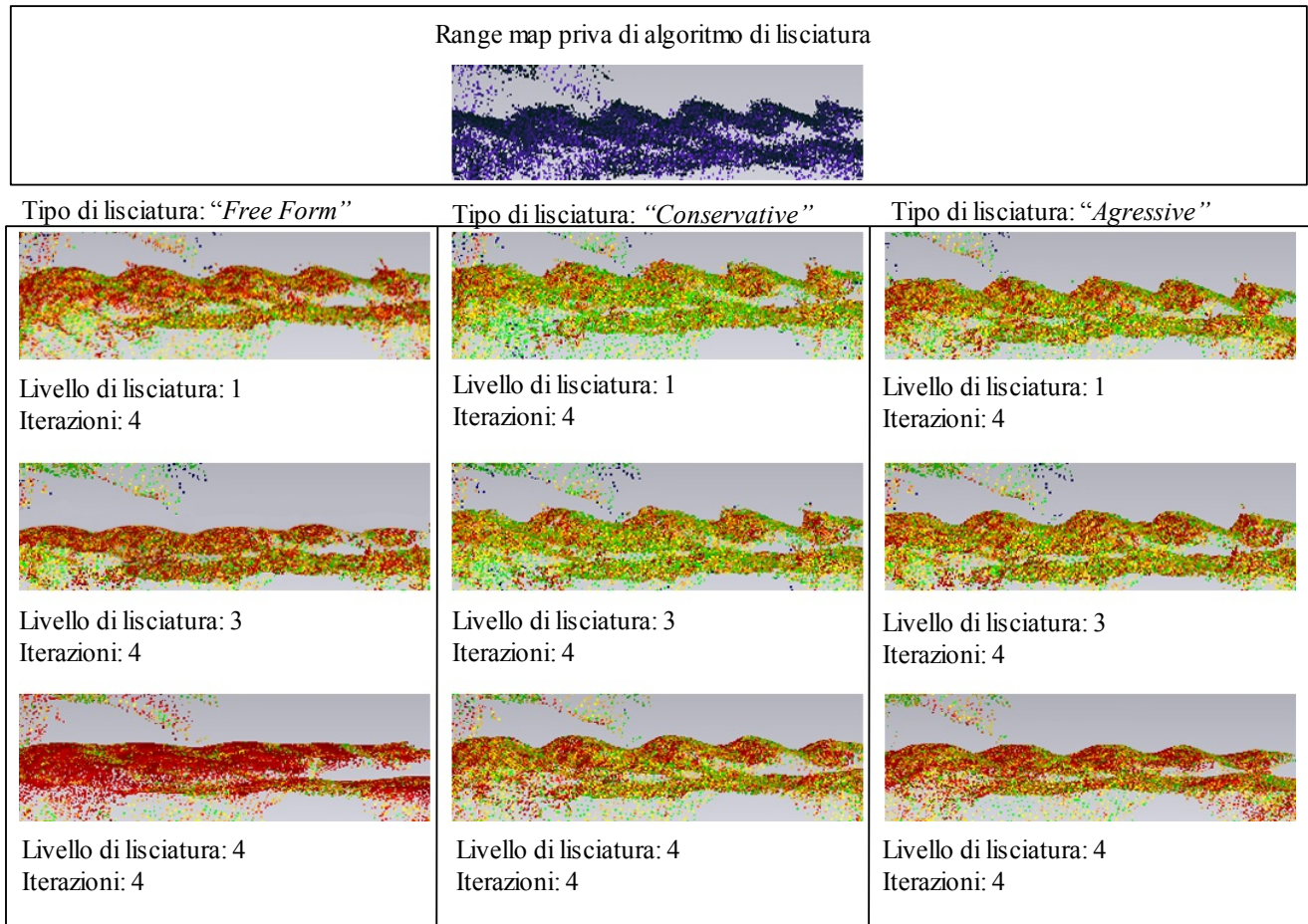
Perché si arrivi ad una conclusione, questi dati vanno quindi integrati ad una mappa di deviazione e ad un confronto visivo.

Il “*deviation spectrum*” è la rappresentazione grafica della riduzione del rumore che mostra le differenze tra la scansione prima e dopo l'applicazione dell'algoritmo.

Il deviation spectrum rappresenta l'assegnazione di colori al range di deviazione.



**Figura 4.7** Mappa di deviazione tra la nube grezza e la nube con l'applicazione degli algoritmi di lisciatura . Le zone di colore rosso indicano la deviazione massima, le aree in verde la deviazione stabilita come accettabile; valori intermedi occupano la colorazioni della scala cromatica tra il rosso e il verde. Il blu indica i punti che non hanno subito variazioni. (La lettera minuscola fa riferimento alle lettere riportate anche in tabella 4.3 che indicano il tipo di algoritmo applicato alla nube)



**Figura-4.8** *Algoritmi di lisciatura e numero di iterazioni*

Da questo confronto è importante notare che per alcuni valori di lisciatura l'algoritmo di smoothing liscia molto sulle parti curve provocando una eccessiva lisciatura dell'oggetto e una perdita di particolari formali. La mappa di deviazione deve essere uniforme proprio perché deve insistere solo sugli elementi che costituiscono il rumore che è distribuito su tutta la nube.

Questo anomalia si verifica perché è diverso l'algoritmo di calcolo dell'operazione di smoothing.

Perciò il "conservative" verrà usato dove si hanno incisioni o particolari fini, che col "free form" verrebbero inglobati nel processo di lisciatura. È stato valutato un valore dell'intaglio rilevabile dal laser scanner Faro intorno ai due millimetri, circa due volte sopra la sigma.

Mentre negli altri casi è stato applicato l'algoritmo "free form", in particolare dove prevale una

superficie molto levigata.

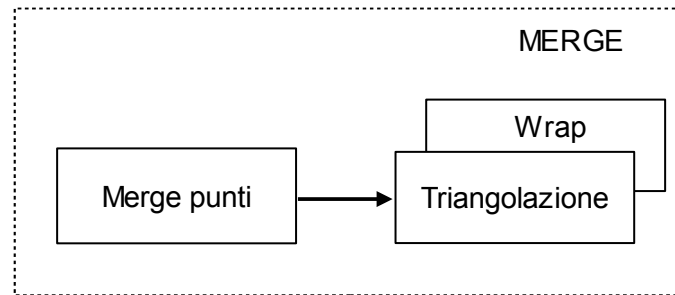
È stata scartata la tipologia dell'”*aggressive*” in quanto a livelli bassi si ottengono risultati molto simili al conservative ma con valori di deviazione standard e distanza media sensibilmente più elevati; mentre con livelli massimi di lisciatura e numero di iterazioni si ottengono similitudini con il free form e una discreta perdita di particolari.

Nella Figura-4.8 si nota anche che all'aumentare del numero di iterazioni migliora il livello di pulizia della range map. Genericamente è quindi consigliabile usare un numero elevato di iterazioni.

Infine è stato ritenuto valido l'algoritmo “*conservative*” con un livello di lisciatura medio-alto e un numero di iterazioni elevato poiché con tali combinazioni si riesce a mantenere un buon dettaglio di forma e ad ottenere una scansione sufficientemente ripulita dal rumore di fondo. Inoltre è stato valutato anche l'algoritmo “*free form*” con valori di lisciatura e numero di iterazioni al minimo per oggetti che hanno una forma scultoria e una superficie levigata priva di dettagli.

Dopo l'operazione della riduzione del rumore è necessario fare un'altra operazione di pulizia totale prima del passaggio alla triangolazione. I punti sparsi lasciati sulla scansione creano dei triangoli che non fanno parte del modello e applicare una pulizia sulla mesh è più complicato e richiede maggior tempo con risultati peggiori rispetto a una pulizia fatta su una nube di punti. In questa fase è opportuno spendere più tempo per una pulizia accurata soprattutto di tipo manuale.

### 4.3.3 FUSIONE



**Figura-4.9** \_Diagramma di flusso della fase del Merge.

Il passaggio del Merge riunisce in se molte funzioni. Al suo interno racchiude l'unione della nube di punti creando un sottile strato controllato (Merge punti) e la fusione di tutti gli oggetti in un reticolo poligonale (poligonalizzazione).

Si ha la possibilità di optare per due differenti percorsi che portano allo stesso risultato: la Triangolazione e il Wrap. Il primo ingloba al suo interno sia la fase di unione dei punti sia la successiva costruzione della mesh. Il secondo è invece scomposto in due comandi distinti, uno per la unione della nuvola, l'altro per la sua poligonalizzazione. La scomposizione di quest'ultimo è utile nei casi in cui si decide di esportare il modello non completo in un altro software o al contrario di importare un oggetto allineato e unito in un altro programma; è così possibile eseguire solo il *wrap*.

Parleremo in primo luogo della triangolazione e conseguentemente del Wrap comparando infine i risultati ottenuti in entrambi i metodi.

#### TRIANGOLAZIONE:

Nella fusione si ha quindi il passaggio dalla nube di punti a un poligono costituito da triangoli (mesh) costruiti secondo un algoritmo; è gestita completamente dall'elaboratore, per cui non è possibile eseguire verifiche durante il processo.

Si possono però impostare diversi parametri a monte dell'operazione. In primo luogo si può agire sulla deviazione che specifica la massima distanza tra i punti corrispondenti su range map diverse che deve



essere raggiunto prima che queste siano considerati completamente uniti.

Altro parametro è la spaziatura dei punti che specifica una ideale distanza tra i punti del modello risultante. In questo caso, come negli altri reperti di studio, si ha una spaziatura media di 0,6 mm.

Gli altri due parametri sono la riduzione del rumore locale e globale: la prima indica una riduzione del rumore fatta su ogni singola range map in modo analogo a quanto spiegato nel precedente Capitolo, mentre la seconda indica una riduzione del rumore fatta dopo l'unione.

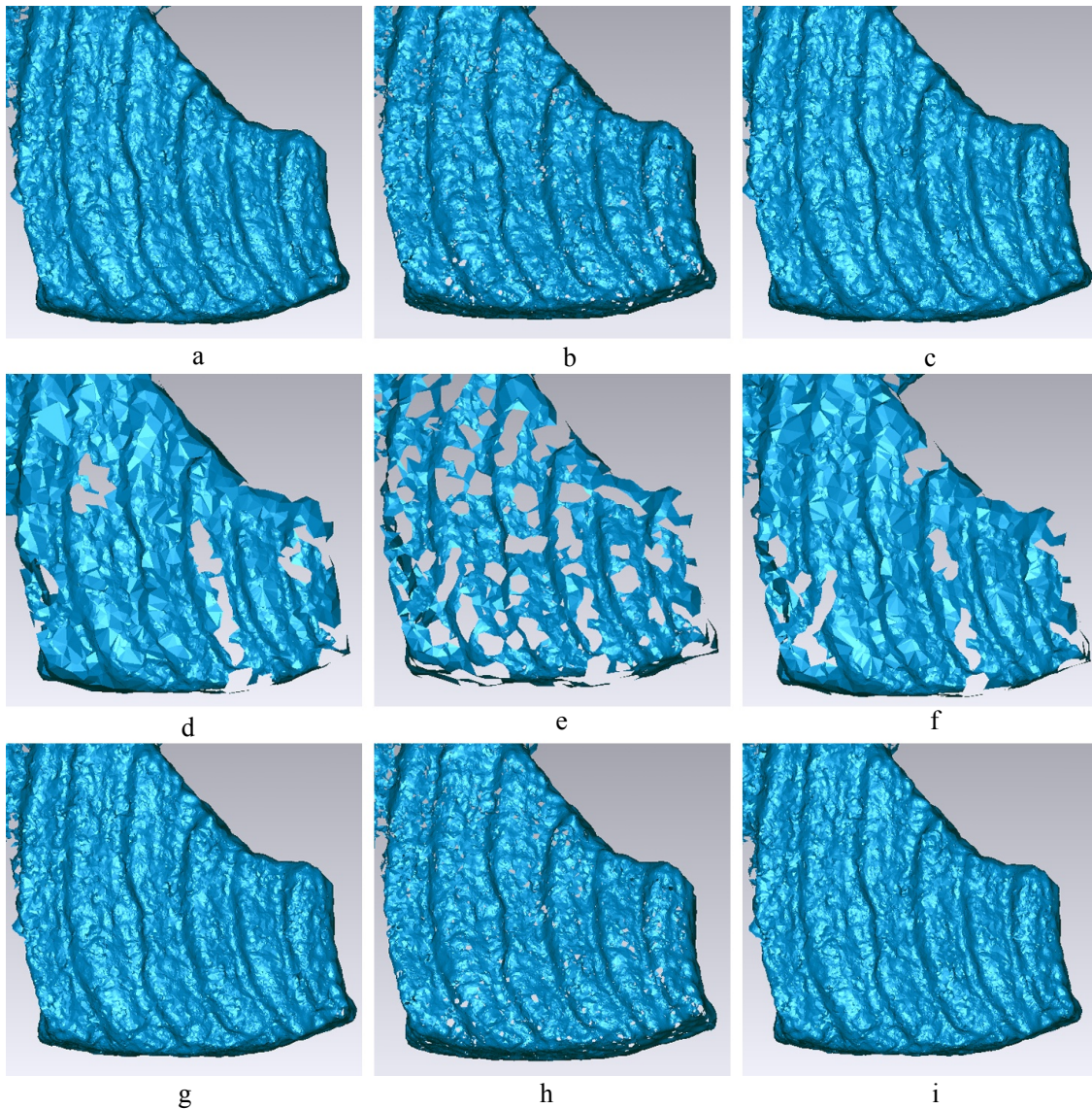


Figura-4.10\_ Risultati ottenuti eseguendo un test tra i parametri di massima deviazione e di spaziatura dei punti del Merge. Valori di quest'ultimi superiore alla media dello spazio tra i tutti gli elementi della nube determinano grosse lacune nel modello e una perdita dei particolari. (Le lettere sotto ogni immagine si riferiscono alla Tabella 4.4).

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>	<b>h</b>	<b>i</b>
<b>Deviazione massima (mm)</b>	1	0,6	0,001	1	0,6	0,001	1	0,6	0,001
<b>Spaziatura punti (mm)</b>	0,6	0,6	0,6	60	60	60	0,006	0,006	0,006
<b>Manifold edge</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Autointersezioni</b>	1284	67	1583	160	13	168	1594	56	1435
<b>Spikes</b>	3008	105	3302	220	13	225	3459	166	3542
<b>Fori</b>	30	10236	24	37	1755	47	36	11697	23

*Tabella 4.4: Errori topologici ottenuti dal test eseguito tra i parametri di massima deviazione e di spaziatura dei punti del Merge. (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Figura 4.10).*

Per comprendere l'interazione tra questi parametri e la riuscita del poligonale sono stati fatti dei test: nel primo si hanno i parametri di massima deviazione e di spaziatura dei punti, mentre nel secondo la riduzione del rumore locale e globale in funzione di questi. Tutte le prove descritte in seguito sono state fatte con un filtraggio “conservative” medio alto, per le ragioni descritte nel paragrafo precedente.

Il primo paragone è tra i valori della deviazione massima e la spaziatura dei punti, dove in base alla tabella 4.4 e alla immagine 4.10 risulta evidente che una spaziatura dei punti con un valore superiore (ovvero 10 mm) alla media provoca grosse lacune nel modello e una perdita dei particolari. Questo è facilmente comprensibile perché dal momento in cui si vanno a diradare in modo evidente i punti nella nube si perde la definizione della geometria e si ha una mesh grossolana con triangoli visibilmente sproporzionati alle caratteristiche formali dell'oggetto.

È stata fatta anche una verifica incrociata in cui si è confrontato per ognuno dei valori di deviazione massima (10 mm, 0,1 mm, 0,001 mm) una riduzione del rumore globale minima, media e nel caso non venga applicata.

Si denota chiaramente che in assenza di una riduzione globale si ottiene un poligono con una ingente quantità di lacune, che invece non si verifica negli altri due casi, dove si ha una notevole riduzione dei buchi e della loro dimensione; si passa da valori superiori a 10.000 unità a poche decine.

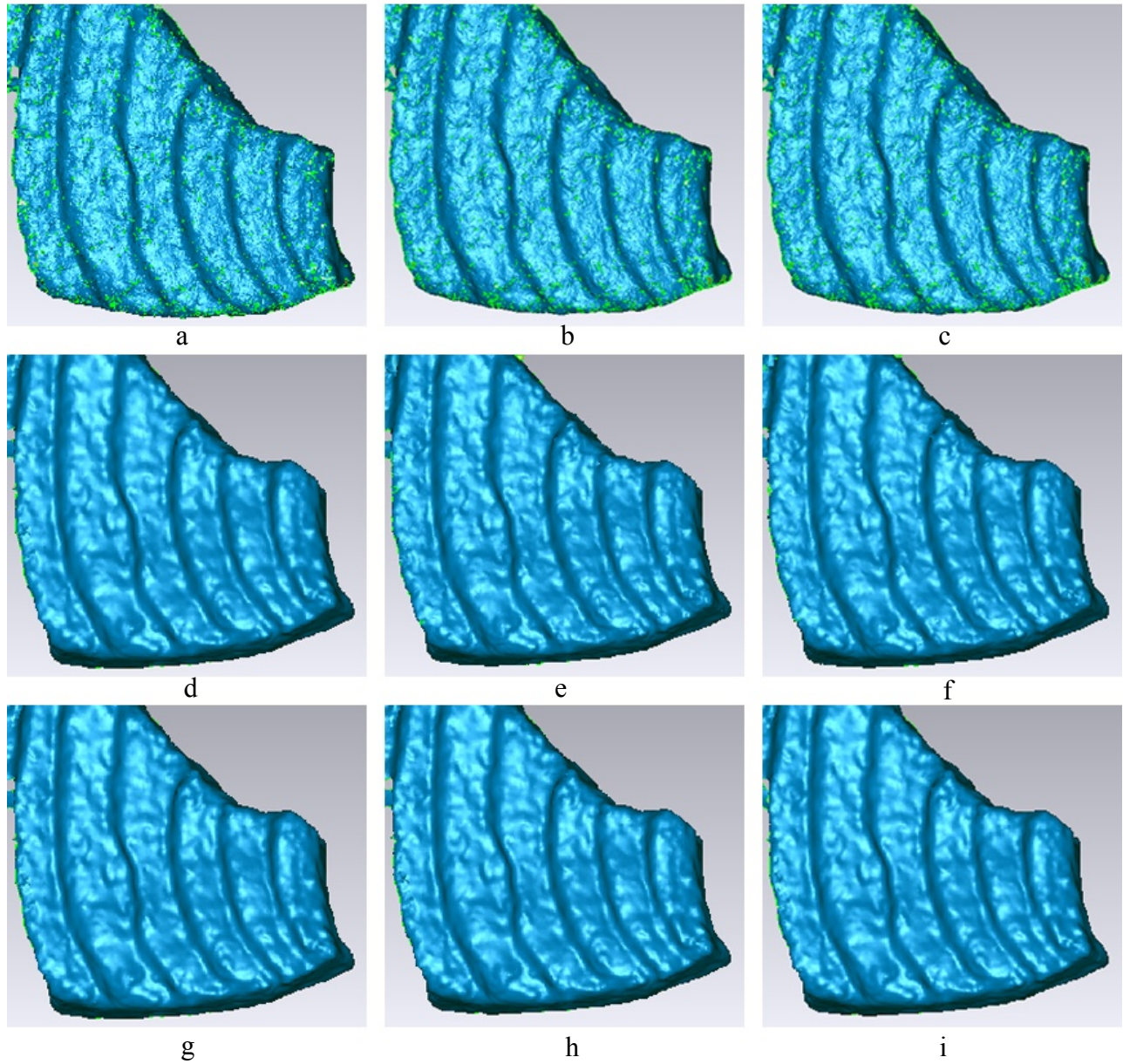
Si ha un chiaro riscontro delle immagini del particolare della mesh, dove i tratti in verde indicano la presenza di lacune.



Per quanto riguarda gli altri due casi non c'è una sostanziale differenza: in entrambi si hanno errori topologici in minime quantità e non sussiste una perdita dei particolari.

Riduzione rumore locale	Riduzione rumore globale	Deviazione massima	Distanza punti	Lacune	Autointersezioni	
assente	assente	0.001	0,6	10314	75	<b>a</b>
assente	assente	0.1	0,6	10314	75	<b>b</b>
assente	assente	10	0,6	10335	62	<b>c</b>
assente	minimo	0.001	0,6	17	94	<b>d</b>
assente	minimo	0.1	0,6	17	94	<b>e</b>
assente	minimo	10	0,6	14	60	<b>f</b>
assente	medio	0.001	0,6	16	95	<b>g</b>
assente	medio	0.1	0,6	16	95	<b>h</b>
assente	medio	10	0,6	7	102	<b>i</b>

**Tabella 4.5** *Confronto tra i valori di deviazione massima (10 mm, 0,1 mm, 0,001 mm) e una lisciatura globale minima, media e nel caso non venga applicata. In assenza di una riduzione globale si ottiene un poligono con una ingente quantità di lacune. (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Figura 4.11)*



*Figura 4.11* Confronto visivo tra i valori di deviazione massima (10 mm, 0,1 mm, 0,001 mm) e una lisciatura globale minima, media e nel caso non venga applicata. In assenza di una riduzione globale si ottiene un poligono con una ingente quantità di lacune. (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Tabella 4.5)

Per completare il test è stata fatta anche una comparazione tra il poligonale ottenuto in risposta ai valori assegnati (test) e la nube grezza priva di qualsiasi filtraggio se non della pulizia (reference).

È stata generata una mappatura codificata dal software e se ne ricava la deviazione standard (è la più breve distanza dal test a qualunque punto del riferimento) e la distanza media.

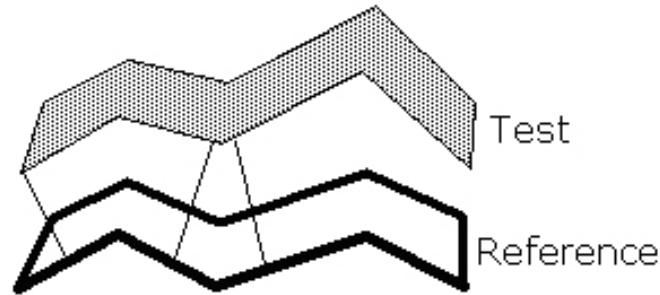


Figura 4.13\_Schema di come avviene la comparazione tra il poligonale e la nube grezza.

Lisciatura locale	Lisciatura globale	deviazione massima	distanza punti	deviazione standard	distanza media	
assente	assente	0.1	0,6	0.45	0.037	<b>a</b>
assente	minimo	0.1	0,6	0.46	0.037	<b>b</b>
assente	medio	0.1	0,6	0.46	0.038	<b>c</b>

Tabella 4.6\_Risultati ottenuti modificando I livelli di lisciatura globale.: deviazione standard e distanza media tra la nube grezza e il poligonale. (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Figura 4.12).

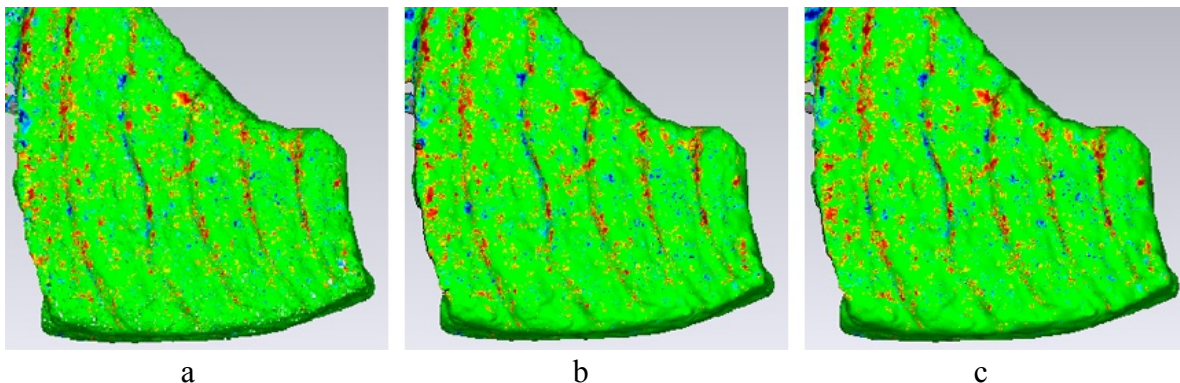


Figura 4.12\_Risultati ottenuti modificando I livelli di lisciatura globale: rappresentazione cromatica della deviazione. (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Tabella 4.6).



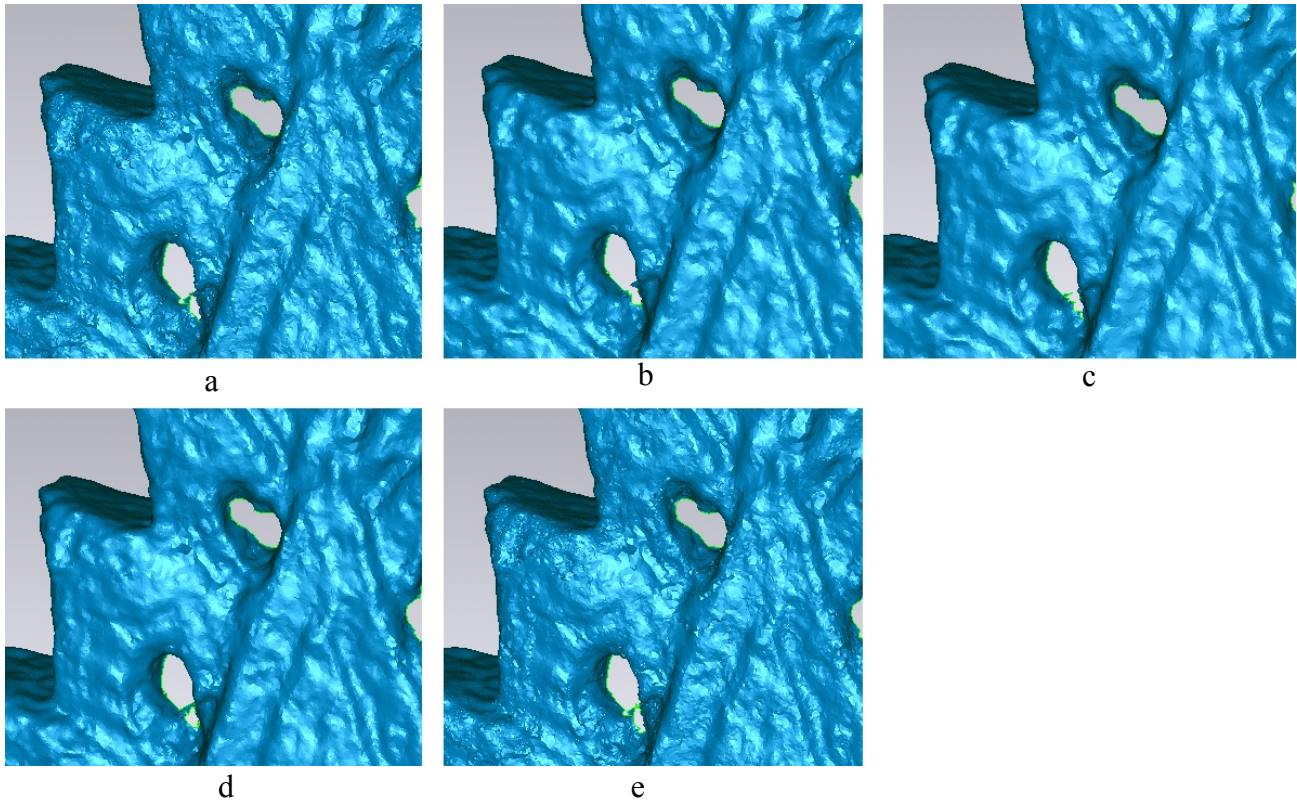
Anche la deviazione standard (Figura 4.12 e Tabella 4.6) non si distacca molto tra i due casi; si può affermare che è necessaria una riduzione globale, ovvero eseguita dopo l'unione della nube e come mostrato nell'esempio seguente dell'*alberello*, uno dei casi studio di questa tesi, e che non occorre una riduzione del rumore locale in quanto già eseguita e approfondita nel Capitolo precedente.

Uno studio specifico per i valori della riduzione globale e locale è stato fatto sull'*alberello*.

Anche qui l'assenza totale di lisciatura provoca molti errori topologici e una superficie ruvida; stesso risultato si ottiene se si applica una lisciatura esclusivamente locale.

Situazione analoga si ha invece per la lisciatura globale a livello sia minimo che medio.

Analogamente è stato fatto per altri reperti, che hanno confermato i risultati appena descritti per gli aspetti globali.

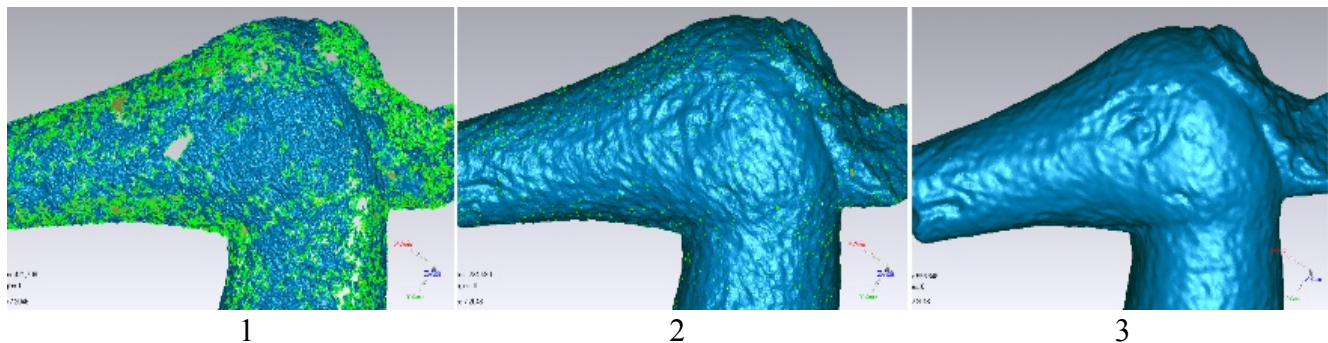


**Figura 4.15** Risultati ottenuti modificando i livelli di lisciatura globale e locale. Tutti i test sono stati eseguiti con una spaziotatura dei punti di 0,6 mm . (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Tabella 4.7)

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>
<b>local</b>	nessuna	nessuna	nessuna	minima	minima
<b>global</b>	nessuna	minima	media	minima	nessuna
<b>Autointersezioni</b>	573	182	108	111	624
<b>Punte</b>	1140	127	107	97	1297
<b>Fori</b>	33	12	11	12	31

**Tabella 4.7** *Errori topologici ottenuti modificando i livelli di lisciatura globale e locale. Tutti i test sono stati eseguiti con una spaziotatura dei punti di 0,6 mm . (Le lettere in corsivo si riferiscono alla Figura 4.15).*

Alcune prove hanno dimostrato che è differente applicare una riduzione del rumore locale esclusivamente in questo passaggio del Merge anziché nel precedente poiché questo crea una nube di punti peggiore. Questo perché dopo la lisciatura è necessaria un'accurata pulizia della mesh che non è possibile eseguire se si opta per una lisciatura all'interno di questo comando che opera in maniera automatica. Inoltre si ha un notevole aumento degli errori topologici, come mostrano i tratti verdi nell'immagine.



**Figura 4.14** *1) Assenza di filtraggio sulla nuvola di punti e nel merge, 2) filtraggio solo nel passaggio del Merge a livello alto, 3) filtraggio applicato sia a livello di punti sia nel Merge*

lo spazio tra i punti, in automatico il software cancella degli elementi con frequenza regolare. Nel caso in cui si decide invece di ridurre lo spazio tra i punti il programma inserisce vertici secondo una griglia virtuale applicata sull'oggetto. Sono quindi parti estranee al modello inserite, se pur con una logica, casuale.

Nonostante un valore di spaziatura dei punti inferiore a quello standard generi una mesh con meno lacune, ne segue che non sia la soluzione migliore dal punto di vista di conservazione dei dettagli formali.

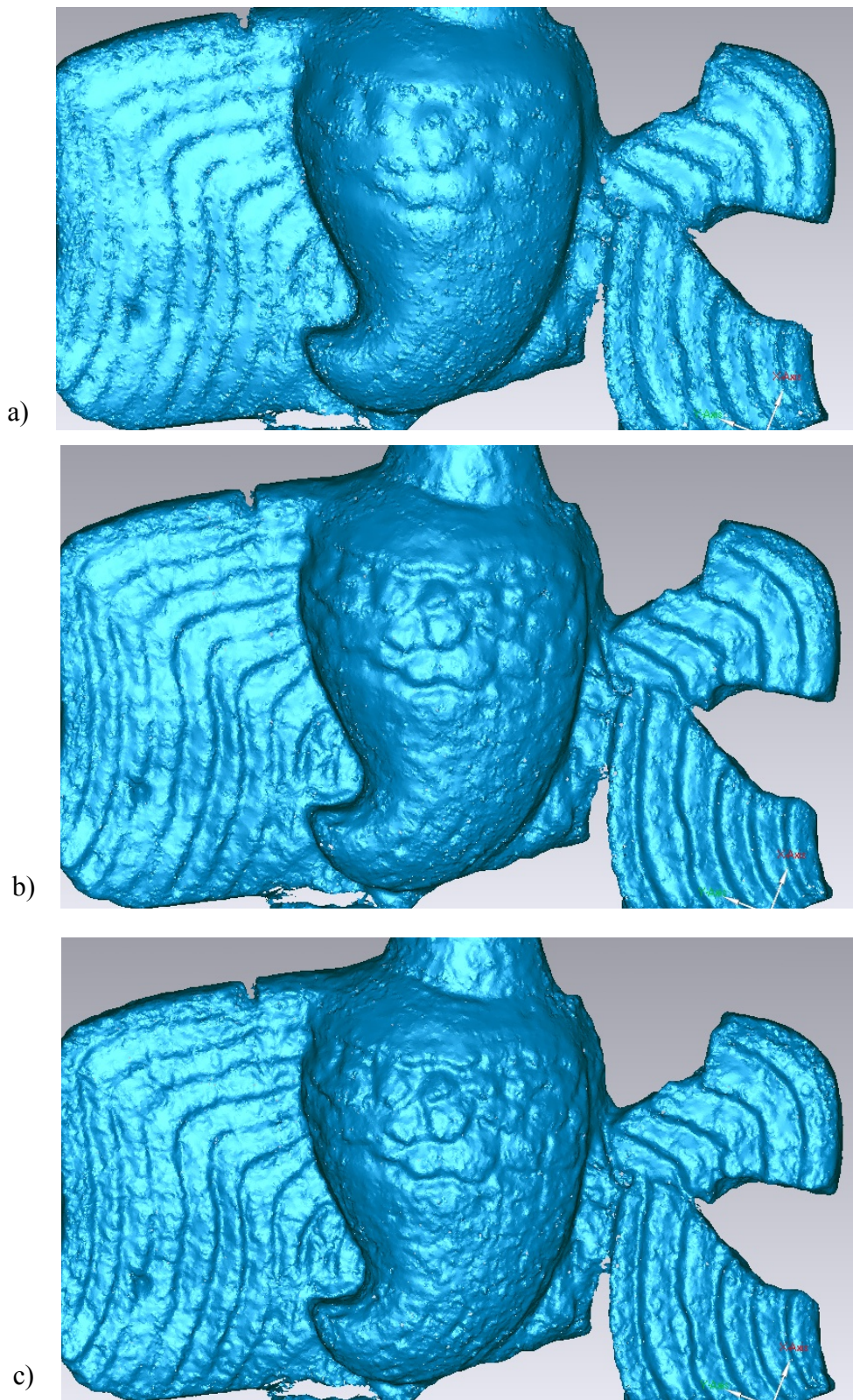
Ricordo infine che una spaziatura dei punti con un valore superiore allo standard genera grosse lacune nel modello e una perdita dei particolari (vedi inizio Capitolo).

È sicuramente meglio lasciare la spaziatura standard dei punti e applicare, come è già stato dimostrato, un filtro globale minimo o massimo, per ovviare al problema delle lacune sulla superficie.

Tutte le prove descritte in questo Capitolo sono state fatte con un filtraggio “*conservative*”, ma per meglio comprendere la differenze tra le varie tipologie di filtraggio descritte in dettaglio nel Capitolo precedente, è stato fatto un poligonale per ogni tipologia. Come si vede dalle immagini con una applicazione dell' algoritmo “*free form*” a valori massimi di livello e di iterazioni si ottiene una vistosa perdita di particolari, così come accade per l’ “*aggressive*”.

Si ottiene infine il poligonale grezzo.





**Figura 4.16** \_ Poligonali eseguiti con le diverse tipologie di filtraggio;  
a) Free form, b) Aggressive, c) Conservative

WRAP:

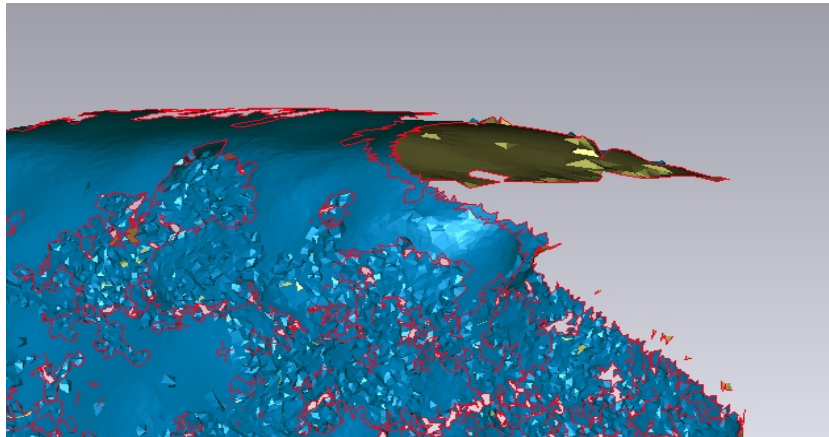
Il secondo metodo, sostitutivo al metodo della Triangolazione, è suddiviso in due parti: il “*Merge punti*” e il “*Wrap*”. La prima riguarda la fase dell'unione della nube di punti, mentre la seconda riguarda la poligonalizzazione.

Ci sono 2 metodi per eseguire il Wrap: “*Superficie*” e “*Volume*”.

La modalità per superficie viene usata quando i dati sono sufficienti e uniformi con assenza di sottosquadri. La modalità per volume è utile quando i dati sono radi o il metodo per “*superficie*” dà risultati non corretti. Si utilizza anche quando l'oggetto presenta curve critiche o il modello contiene i dati che rappresentano superfici interne.

Prima di fare qualsiasi operazione di wrap occorre quindi fare l'unione dei punti; questa è una procedura completamente automatica, nella quale non è possibile impostare limiti di deviazione standard come è possibile nel *Triangolazione*.

Nella maggior parte dei casi studio questo ha causato un errore nella fase di *wrap superficie*; con la triangolazione si forma un doppio strato di poligoni in quelle regioni di sovrapposizione delle range map dove si ha un distacco maggiore.



*Figura 4.17\_ Parte di oggetto dove si vede il doppio strato di poligoni*

Un altro problema derivato dal non poter fissare dei valori limiti nell'unione della nube di punti si ha nella formazione di grosse lacune nella mesh. Per ottenere un poligonale confrontabile con quello ottenuto dal processo della “*Triangolazione*” è necessario invertire l'ordine di sequenza dei passaggi che riguarda il filtraggio. Come riportato nella Figura 4.1, la riduzione del rumore viene fatta a cavallo



tra la registrazione dell'oggetto e il Merge. Potendo qui scomporre il merge è opportuno slittare la riduzione del rumore dopo la completa unione delle range map e quindi dopo il *Merge punti*.

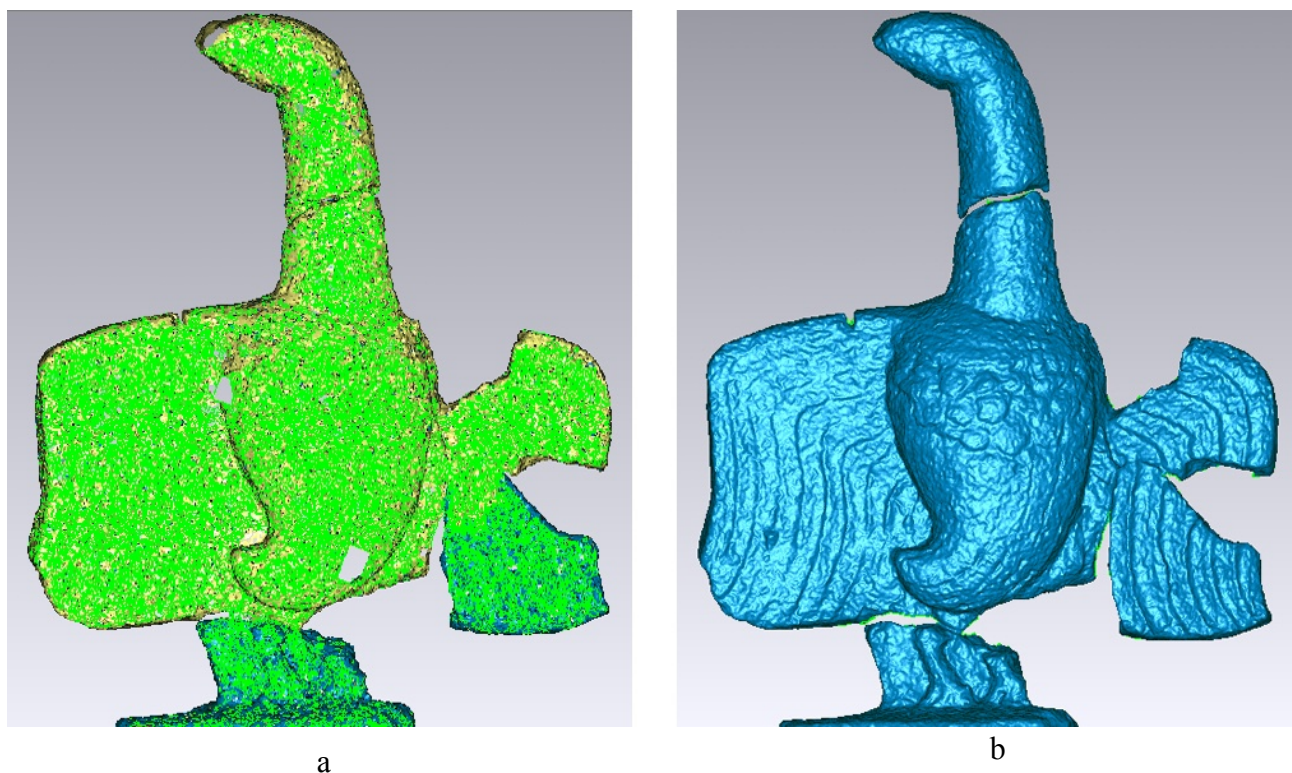


Figura 4.18\_a) Riduzione del rumore **prima** del merge punti, b) Riduzione del rumore **dopo** il merge punti,

Nonostante ciò questo procedimento da risultati peggiori rispetto al metodo Merge. È però utile nei casi in cui si decide di esportare il modello non completo in un altro software o al contrario di importare un oggetto allineato e unito in un altro programma; è così possibile eseguire solo il *wrap*.

SCHEDA DI CONFRONTO TRA IL “METODO MERGE” E IL “METODO WRAP”



*a*



*b*



*c*

**Hamsa**

**Metodo Merge**

Autointersezioni	386
Punte	831
Fori	16

**Metodo Wrap**

Autointersezioni	186
Punte	190
Fori	8

**kala**

**Metodo Merge**

Autointersezioni	56
Punte	315
Fori	21

**Metodo Wrap**

Autointersezioni	67
Punte	115
Fori	18

**doe**

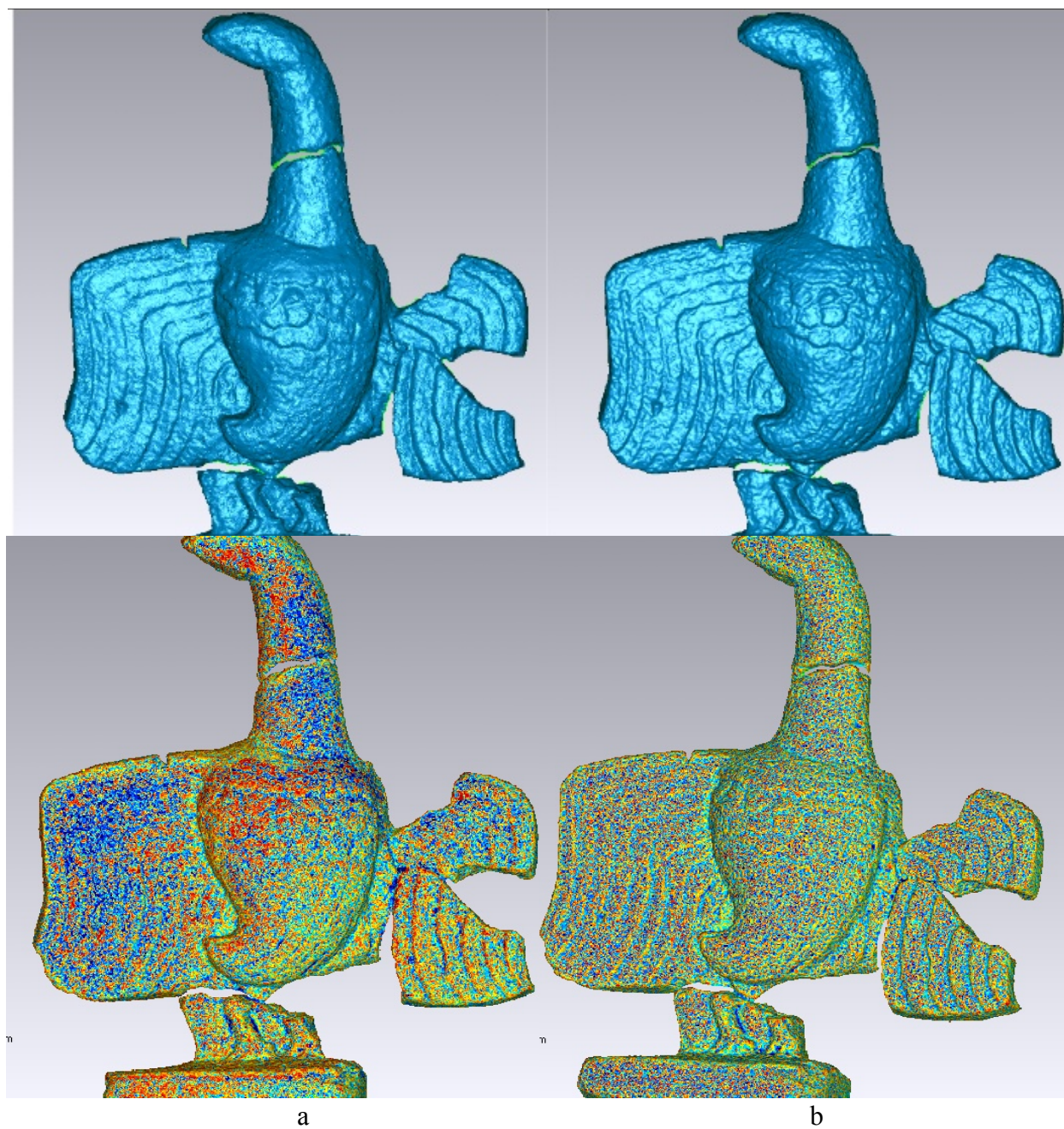
**Metodo Merge**

Autointersezioni	219
Punte	564
Fori	12

**Metodo Wrap**

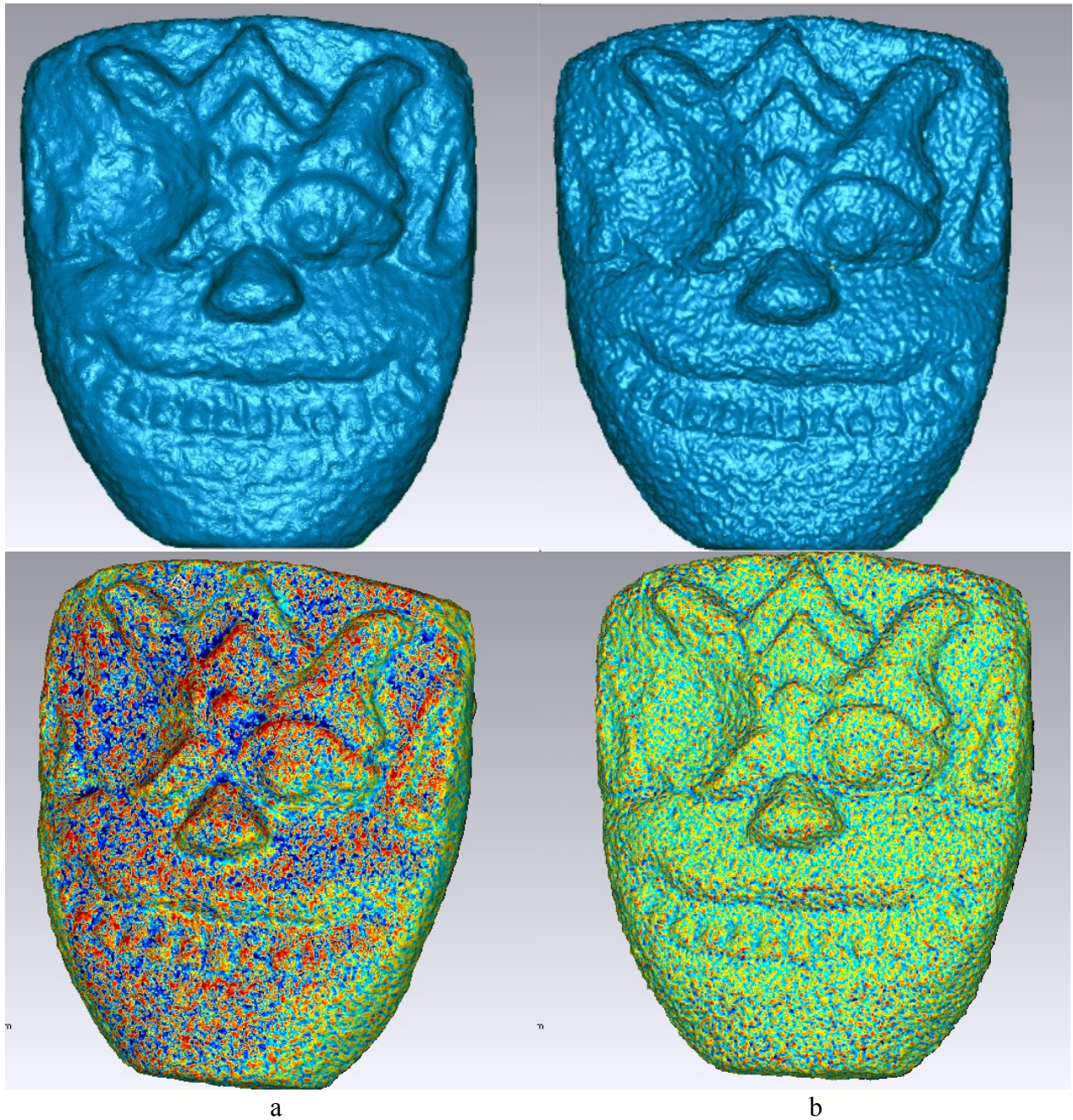
Autointersezioni	181
Punte	320
Fori	8

Tabella 4.10 \_Errori topologici derivati dal “metodo Merge” e dal “metodo Wrap” eseguiti su tre casi studio: a) Hamsa, b) Kala, c) Doe



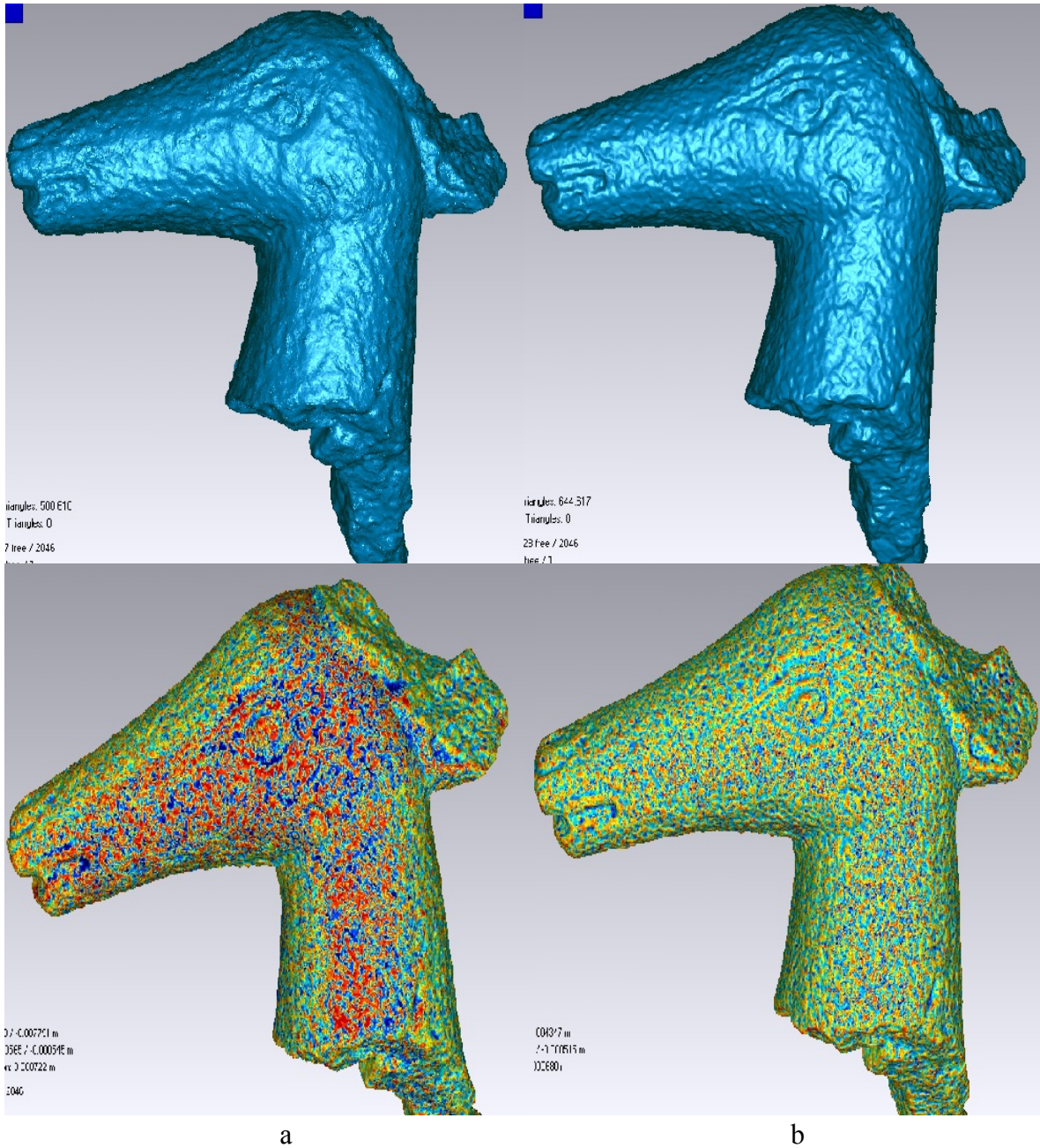
**Figura 4.19** *Comparazione tra il metodo Merge e il metodo Wrap: la colonna a mostra il metodo Merge e la colonna b il metodo wrap. Sono rappresentate l'immagine del poligonale (sopra) e la mappa di deviazione standard (sotto)*





**Figura 4.20** *Comparazione tra il metodo Merge e il metodo Wrap: la colonna a mostra il metodo Merge e la colonna b il metodo wrap. Sono rappresentate l'immagine del poligonale (sopra) e la mappa di deviazione standard (sotto)*





**Figura 4.21** \_Comparazione tra il metodo Merge e il metodo Wrap: la colonna a mostra il metodo Merge e la colonna b il metodo wrap. Sono rappresentate l'immagine del poligonale (sopra) e la mappa di deviazione standard (sotto)

### 4.3.4 EDITING

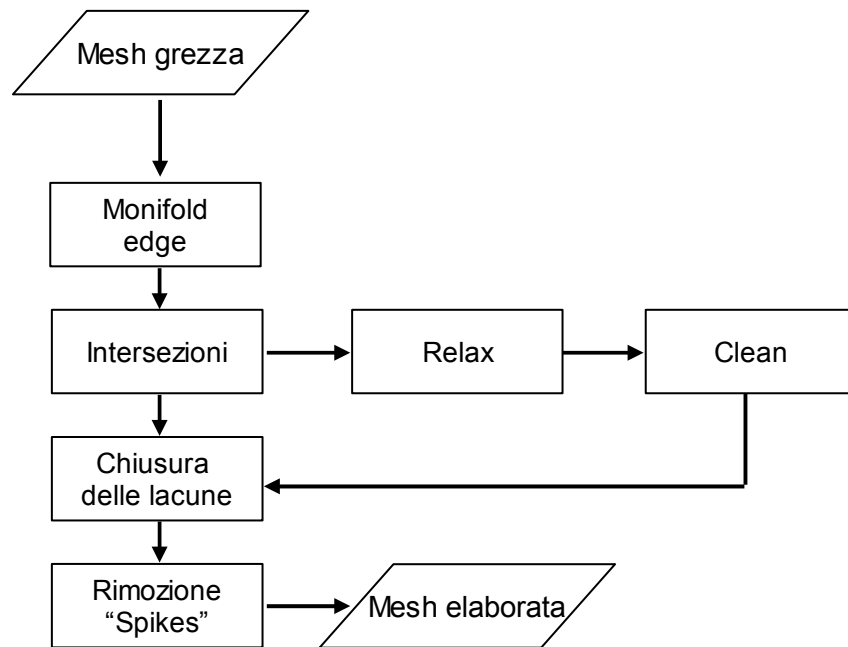


Figura 4.22 \_diagramma di flusso della fase dell'editing

La prima verifica da svolgere dopo il processo di fusione è sulla topologia del modello, ovvero sulle connessioni tra i poligoni; il processo di poligonalizzazione infatti provoca degli errori e delle lacune sulla mesh che devono essere corretti.

Tipicamente gli errori topologici più frequenti sono:

- non-manifold face (o degenerate edge), ovvero quando più di due facce condividono lo stesso bordo del triangolo.
- Intersection (o crossing face), sono quei triangoli che si intersecano con la mesh, ma che non sono direttamente collegati ad essa.

I triangoli individuati possono essere trattati con il comando automatico “*relax*” e “*clean*”, che assume diversi nomi in base al software usato, che cerca di cancellare i triangoli intersecati e di spostare i vertici dei triangoli restanti per correggerli rispetto alla condizione iniziale.

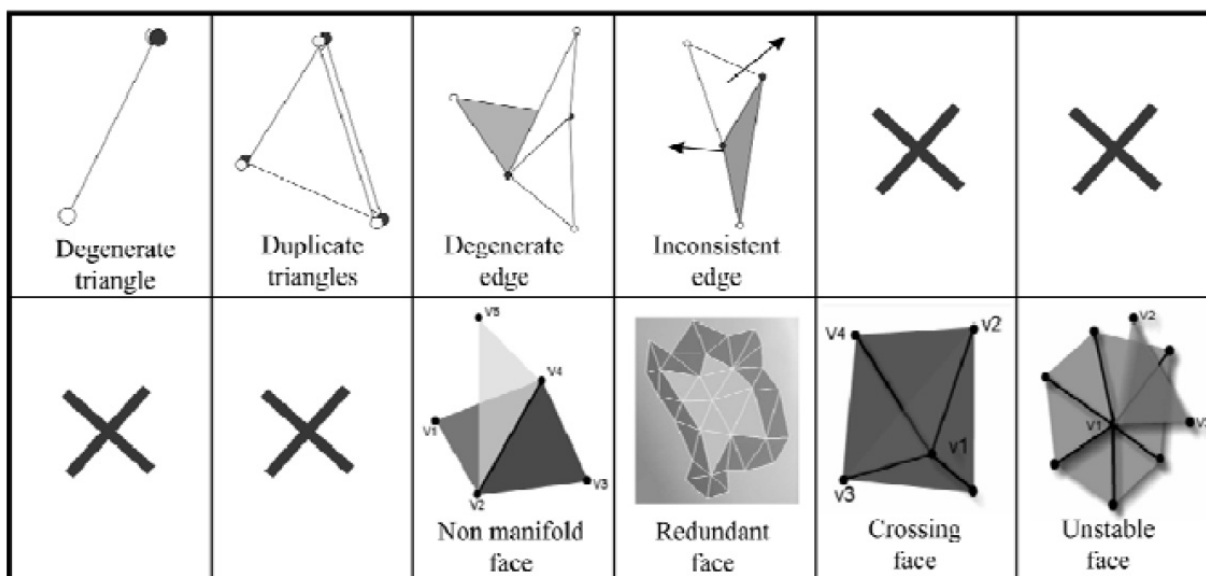


Figura 4.23 \_ Confronto tra diverse tipologie di errori topologici.

Gli errori generati dal processo del merge vanno quindi cancellati; esistono delle operazioni di correzione in modalità automatiche simili nei vari software.

Nella mesh sono anche tipicamente presenti delle lacune, generate dalle zone d'ombra o dalla riflessione del materiale dell'oggetto. La chiusura della lacune è una delle operazioni più lunghe e dove è richiesta maggior presenza dell'operatore. Per le lacune di piccole dimensioni (nell'ordine dei millimetri) l'operazione è automatica. I fori invece più complessi richiedono una pulizia del bordo spesso rifinito da triangoli intersecanti o con un repentino cambio di direzione che rendono la chiusura difficoltosa.

Inoltre se la lacuna è particolarmente ampia e in una zona ricca di dettagli la sua chiusura genera l'inevitabile perdita di questi ultimi. Se la lacuna è invece in corrispondenza degli spigoli, si può tentare di usare delle operazioni di fitting che seguono l'andamento dei bordi adiacenti e tentano di ricostruirne la superficie. Purtroppo nelle statue di piccole dimensioni non è raro trovare un cambio di curvatura tra i due bordi della lacuna; in questi casi è molto improbabile ricostruire la mesh nel modo ottimale. Per evitare di trovarsi in questa situazione nella fase di editing è possibile agire a livello della nube. Spesso in queste situazioni ci si trova ad avere una zona con sporadici punti dove oltre a quelli spuri si hanno dei punti che seguono il corretto andamento della curvatura del modello. Una volta finita la fase di

allineamento e individuato questo tipo di zone è possibile andare ad aggiungere una griglia di punti che parte dai bordi e si “appoggia” a quei pochi punti nella zona “vuota” appartenenti al modello. La fase di poligonalizzazione generalmente tenderebbe a valutare questi punti “lontani” (poiché ad una distanza maggiore rispetto alla media degli altri) e quindi come punti esterni al modello, non considerandoli nella fase di triangolarizzazione. Andando invece ad agire sulla nube di punti con un riempimento si ovvia al problema. La ricostruzione delle lacune in fase di punti anziché a posteriori sui triangoli della mesh assicura un risultato migliore e sicuramente più omogeneo.

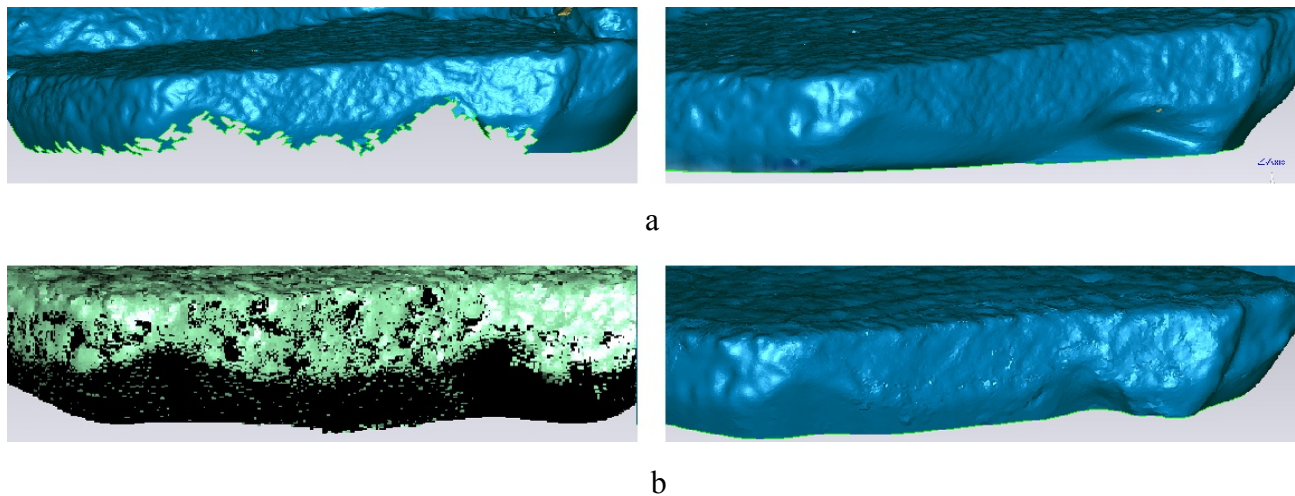


Figura 4.24\_Chiusura delle lacune: a) riempimento esclusivamente sul poligono e successivo risultato , b) riempimento in fase di nube con l'aggiunta punti e risultato ottenuto.

La quantità e la tipologia degli errori topologici e delle lacune è stato uno dei parametri che ha influito sulla scelta dei valori ideali di fusione e nella riduzione del rumore.

L'ultima operazione da svolgere per finire la correzione del modello è la rimozione delle punte (*spikes*). Non tutti i programmi permettono di eseguire questa operazione, che consiste in una lisciatura delle sole punte presenti sulla mesh.

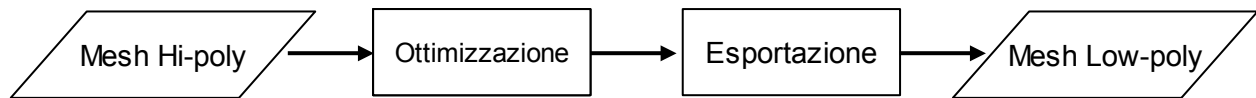
Questa lisciatura è molto interessante perché va ad agire esclusivamente su quel particolare “rumore” del modello evitando una applicazione globale dell'algoritmo.

È possibile scegliere tra più livelli di intensità, dove un intensità maggiore implica che la lisciatura leviga maggiormente il picco.



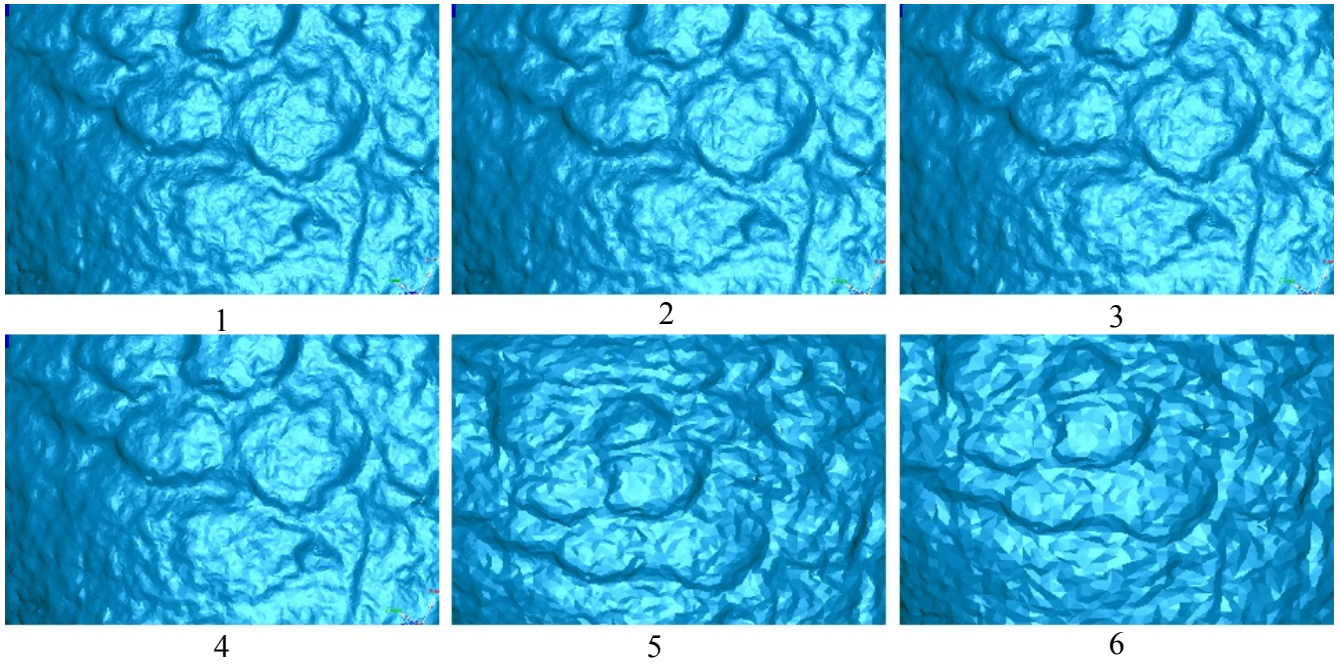
Infine il modello deve essere chiuso; è opportuno eseguire il comando “*relax*” del contorno e un successivo taglio dei bordi con un piano di fitting per uniformarli. Lo stesso piano di taglio forma la superficie di chiusura.

### 4.3.5 OTTIMIZZAZIONE ED ESPORTAZIONE

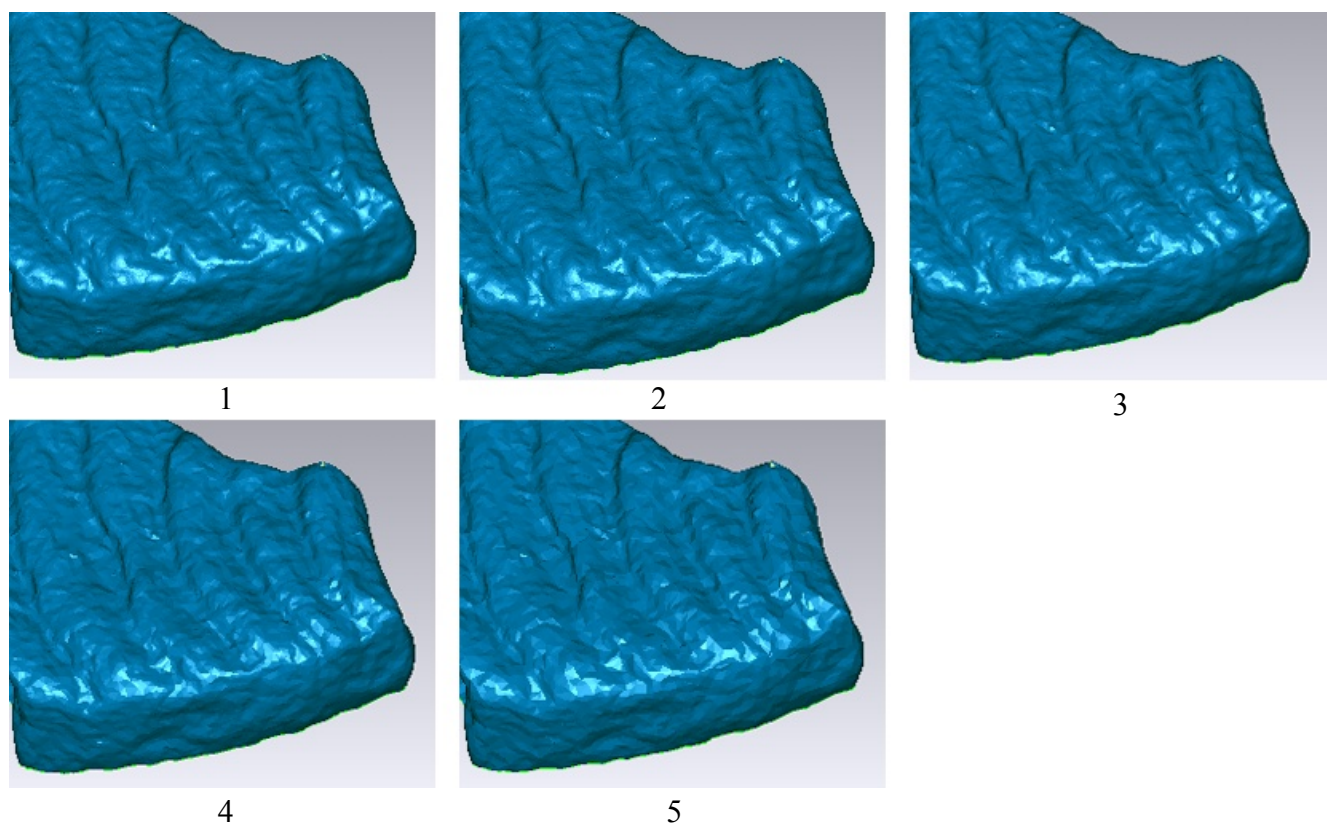


Il modello che ne risulta è un modello con una grossa quantità di poligoni che appesantiscono molto il modello e lo rendono inutilizzabile per applicazioni interattive. È opportuno quindi eseguire la decimazione, che consiste nella riduzione del numero complessivo di triangoli. È possibile scegliere su quali zone andare maggiormente ad insistere, sia applicando una selezione manuale sia in modalità semi-automatica. In quest'ultima si ha una distinzione tra le zone planari e quelle con curvatura specificando valori differenti per i due casi; questo permette di mantenere inalterati i particolari formali e di insistere maggiormente sulle zone planari o con lieve curvatura. Il metodo semiautomatico è utile ai fini di una prima riduzione generica su tutto il modello, se pur con intensità diversificata in base alle zone; favorendo nel contempo una forte diminuzione della pesantezza del file.

I valori di percentuale di riduzione in questa fase si aggirano intorno al 75% globale e a un ulteriore 10-15 sulle zone planari; percentuali più alte di riduzione costituiscono un modello che subisce degradazione, come evidenziato nella Figura 4.25 e 4.26



*Figura 4.25\_Riduzione del numero di poligoni che costituiscono il modello; riduzione in percentuale del: 1) originale, 2) 50% , 3) 80% , 4) 90%, 5) 95%, 6) 97%*



*Figura 4.26\_Riduzione del numero di poligoni che costituiscono il modello; riduzione in percentuale del: 1) originale, 2) 80% , 3) 90%, 4) 95%, 5) 97%*

La procedura di elaborazione dati di può concludere a questo passaggio oppure si può importare l'oggetto in programmi di modellazione per l'aggiunta dei materiali, rendendo il modello pronto per il suo utilizzo. Il file di esportazione può essere un comune \*.STL binario o un \*.WRL.

## CASI STUDIO

## GAJASIHMA



*Figura 5.1\_Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Gajasihma; Gaja vuol dire elefante e simha leone
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	207000
Dimensione kB	8000
Bounding box	0.557 x 0.454 x 0.096 (m)
N° di scansioni iniziali	4



## LAKSHMI



*Figura 5.2\_ Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Lakshmi: e' la dea dell'opulenza e della ricchezza.
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	168000
Dimensione kB	8,409
Bounding box	0.337 x 0.422 x 0.098 (m)
N° di scansioni iniziali	4

# ALBERELLO



*Figura 5.3\_Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Alberello
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	164828
Dimensione kB	8245
Bounding box	0.323 x 0.343 x 0.084 (m)
N° di scansioni iniziali	4

## ACROTERIO\_A



*Figura 5.4\_Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Acroterio A
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	216636
Dimensione kB	10,833
Bounding box	0.617 x 0.308 x 0.099 (m)
N° di scansioni iniziali	4



## ACROTERIO\_B



*Figura 5.5\_Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Acroterio B
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	180490
Dimensione kB	9,027
Bounding box	0.961 x 0.582 x 0.105 (m)
N° di scansioni iniziali	5

## DOE



*Figura 5.6\_ Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Doe è il daino
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	74,206 (500,000 prima di fare la decimazione)
Dimensione kB	3,710
Bounding box	0.331 x 0.225 x 0.113 (m)
N° di scansioni iniziali	4

# HAMSA



Figura 5.7\_ Oggetto reale e modello tridimensionale

Rappresentazione simbolica	Hamsa: è un oca, l'animale su cui Brahma cavalca. Il Brahma è uno degli aspetti di Dio della Trimurti (chiamata anche <i>Trinità indù</i> , composta da Brahma, Vishnu e Shiva)
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	250000
Dimensione kB	9000
Bounding box	0.633 x 0.519 x 0.095 (m)
N° di scansioni iniziali	4



# KALA



*Figura 5.8\_ Oggetto reale e modello tridimensionale*

Rappresentazione simbolica	Kala: letteralmente "Tempo"; è una maschera che rappresenta la soglia tra il tempo e l'eternità. Si trova sopra ingressi del tempio, porte e nicchie.
Numero di poligoni che costituiscono la mesh	203112
Dimensione kB	10,158
Bounding box	0.255 x 0.277 x 0.082 (m)
N° di scansioni iniziali	4

## CONCLUSIONI

All'inizio di questo percorso di studio siamo partiti dall'idea di risolvere dei bisogni pratici che si presentavano nello studio delle opere d'arte e archeologiche.

Pur senza una profonda innovazione, abbiamo dato un contributo in uno stadio dell'analisi di reperti artistici.

In particolare sentivamo l'esigenza di semplificare la ricerca nella rilevazione dei dati metrici e morfologici di strutture artistiche soprattutto in presenza di siti archeologici dove la molteplicità dei reperti e delle loro forme e dimensioni rendeva l'acquisizione dei dati più complicata.

Il bisogno di semplificare al massimo l'uso di strumenti di lavoro, e la sua quantità, ci ha fatto supporre di poter usare solo un tipo di strumento, lo scanner laser TOF, che essendo più leggero e usabile anche in condizioni di luce normali risulta più pratico nell'uso quotidiano della ricerca. Dovevamo però cercare tramite uno studio nell'elaborazioni dati, di risolvere quei problemi che lo stesso strumento ci dava: e cioè la mancanza di chiarezza, precisione e dettagli che in un'uso non appropriato è il limite di questo laser.

Quindi il nostro obiettivo era riuscire ad acquisire dati con il minimo di strumenti e riuscire poi ad avere un'elaborazione computerizzata soddisfacente nella precisione di punti, e un buon rendering finale.

L'unica via che ci sembrava percorribile era di intervenire nei passaggi standard dell'elaborazione dei programmi di sviluppo dei dati acquisiti dal laser.

Abbiamo deciso di procedere con il programma Geomagic(toglierlo), che ci sembrava il più adatto, e abbiamo deciso di intervenire cercando di analizzare il processo standard in tutti i suoi passaggi per rendere l'oggetto in 3d, per vedere se agendo nel processo di utilizzo potessimo ottenere dei risultati.

Ci siamo accorti che con piccoli accorgimenti e l'aggiustamento di alcuni parametri potevamo ridurre le imperfezioni dell'acquisizione del laser per ottenere un giusto compromesso tra i due principi che ci eravamo proposti: l'uso di un solo strumento e un risultato finale soddisfacente.

Ovviamente nel corso di questa tesi abbiamo delineato la tecnica in maniera esaustiva, qui ci preme solo ribadire che dati i propositi iniziali di questo studio, siamo arrivati a concludere di avere centrato l'obiettivo prefissato.

Il metodo ci appare efficace per numerose applicazioni nel mondo dell'arte, delle sculture e architetture e infine nel mondo dell'archeologia, e quindi un valido supporto per chiunque si cimenti in queste discipline con l'uso della grafica computerizzata.

## RIFERIMENTI

### LIBRI

Bassanello G. (2007). La tecnica del laser a scansione nel rilevamento di strutture: un caso di studio. - Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Girelli A.V. (2007) Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali. - Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Guidi G., Russo M., Beraldin J.A. (2010). Acquisizione 3D e modellazione poligonale. - McGrawHill

Sacerdote F. Tucci G. (2007). Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio.- Alinea Editrice

Trupia L. (2007). Scansione di oggetti 3d: guida metodologica e casi di studio. - Università degli Studi di Catania

### SITI INTERNET

Abate D., Baracca M.C., Ciavarella R., Furini G., Migliori S., Pierattini S. (2006). Laser Scanner Technologies and 3D Models- Integration: Analysis and Methodological Approach  
[http://www.cresco.enea.it/Documenti/web/presentazioni/ProceedingsCatania2009/10%29Articolo\\_ID\\_72.pdf](http://www.cresco.enea.it/Documenti/web/presentazioni/ProceedingsCatania2009/10%29Articolo_ID_72.pdf)

Balletti C., Guerra F., Vernier P. (2008). La memoria digitale della forma geometrica: scanner 3d e fotogrammetria digitale per la realizzazione di modelli virtuali, per la riproduzione, per la conservazione e per la riattualizzazione di oggetti. - Università IUAV di Venezia  
[http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Laboratori2/laboratori/pubblicazi/2008\\_memoria-digitale.pdf](http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Laboratori2/laboratori/pubblicazi/2008_memoria-digitale.pdf)

Caprioli - Il rilievo con laser scanner 3d – Politecnico di Bari  
[http://www2.poliba.it/Ricerca/Dipartimenti/Vie\\_e\\_Trasporti/dispense/caprioli/laserscanner.pdf](http://www2.poliba.it/Ricerca/Dipartimenti/Vie_e_Trasporti/dispense/caprioli/laserscanner.pdf)



Conforti A., Massari G., Potleca M. - Nuove tecnologie di rilevamento nella protezione civile: il laser scanner terrestre. [www.protezionecivile.fvg.it](http://www.protezionecivile.fvg.it)

Peloso D., Baratin L. (2010). Un'applicazione multimediale per l'analisi e la conservazione dei Beni Culturali. Università degli Studi di Urbino  
<http://laurabaratin.com/wp-content/uploads/congressi/interventoBaratin.pdf>

UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization  
<http://whc.unesco.org/en/list/949>

Usai A. Sensori laser di distanza. Università di Roma – La Sapienza  
[http://labsis.dis.uniroma1.it/~usai/index.php?option=com\\_jombib&Itemid=30](http://labsis.dis.uniroma1.it/~usai/index.php?option=com_jombib&Itemid=30)