

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

Dottorato di Ricerca in

Ingegneria Meccanica-Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche

CICLO

XXVI

TITOLO TESI

**Strumenti e metodi per l'indagine e la ricostruzione tridimensionale di Beni
Archeologici e Culturali**

Settore Scientifico Disciplinare ING/IND-15

Coordinatore: Ch.mo Prof. Leonardo Pagnotta

Firma

Supervisore/Tutor: Ch.mo Prof. Maurizio Muzzupappa

Firma

Dottorando: Dott./ssa Carmela Ruggiero

Firma

Riassunto

Il lavoro di ricerca condotto in questi anni si è incentrato sulle problematiche di rilievo e visualizzazione digitale di Beni Archeologici e Culturali, a scopo di analisi diagnostico-conservativa, indagine storico-culturale e fruizione interattiva a diversi livelli.

I risultati apportati in ambito scientifico spaziano dalle soluzioni proposte per la gestione di grandi volumi di dati 3D, restituiti dalla completezza del laser scanner TOF, al fine di ottenere una ricostruzione tridimensionale dettagliata e fruibile in modo interattivo attraverso vari sistemi, per ciò che ha riguardato il lavoro condotto su larga scala di rappresentazione geometrica, agli interventi proposti per la ricostruzione tridimensionale ad elevata accuratezza di superfici a varia complessità geometrica e superficiale, relativamente alle problematiche emerse su piccola scala.

La ricerca condotta è stata prettamente applicata, sia per impiego sul campo che per attività di laboratorio, quindi si è resa primaria l'esigenza di individuare reali casi di studio che, riportando le problematiche individuate, permettessero di sperimentare l'impiego di soluzioni proposte. Per ogni caso affrontato, sono state ricercate tecniche hardware, strumenti software e procedure per l'ottimizzazione di ogni fase del processo e del risultato finale in termini di tempi, risorse e risultati.

L'attività condotta nella rappresentazione su larga scala ha spaziato tra rilievi architettonici estesi ed isolati a rilievi di strutture nel loro contesto morfologico e nel territorio urbano circostante, incentrandosi sulle problematiche di gestione ed elaborazione di grandi quantità di dati metrici in fase di modellazione ed in fase di visualizzazione per ambienti di navigazione virtuale e interattiva attraverso installazioni multimediali ed applicazioni real-time tramite web.

In particolare, nel lavoro di cui è oggetto la Chiesa di Santa Maria Nuova Odigitria (chiamata Patirion), localizzata su un'altura della Sila, i rilievi mediante laser scanner a tempo di volo hanno restituito i dati per l'estrazione di elaborati canonici da cui riportare una documentazione dello stato di conservazione del manufatto e, la loro integrazione con i dati fotogrammetrici, ha condotto a sviluppare una metodologia di ricostruzione che permettesse di realizzare un modello virtuale per la navigazione interattiva con un sistema stereoscopico di visualizzazione semi-immersivo.

Il progetto riguardante la ricostruzione 3D interattiva dell'area urbana intorno al Castello Ruffo di Scilla si è incentrato sull'integrazione di dati da scansione TOF con dati CAD ed informazioni planimetriche, per realizzare un modello che fosse geometricamente corretto e realistico nei dettagli, ed in cui l'integrazione di tecniche diverse permettesse di renderlo gestibile su applicazioni real-time, per onere computazionale, in modo da rispondere all'intento del progetto.

Infatti, lo scopo è stato quello di realizzare un modello fruibile in tempo reale attraverso un ambiente di navigazione interattiva che permettesse di concretizzare un fine mirato, ovvero creare una comunicazione allargata delle risorse territoriali che abbia riscontro positivo su più fronti.

Il prodotto sarà veicolato attraverso i canali di comunicazione più moderni, con l'intento principale di sviluppare un innovativo concetto di marketing territoriale basato su una diffusione del patrimonio culturale attraverso la ricostruzione virtuale del territorio e dell'ambiente storico-urbano calabrese, al fine di aumentare la competitività dell'intera filiera del sistema turistico. L'applicazione sarà fruibile grazie ad un plugin gratuito del browser.

L'attività incentrata su casi studio appartenenti alla piccola scala di rappresentazione, ha posto l'interesse sulle problematiche di acquisizione legate ad aree geometriche parzialmente nascoste e sulla ricostruzione ad alto livello di dettaglio di oggetti a varia complessità superficiale.

Oggetto di rilievo, nel caso di superfici non totalmente visibili per conformazione geometrica, è stato la mano destra del Bronzo "A" di Riace.

Lo scopo del rilievo è stata l'analisi morfologica del volume interno alla mano attraverso una valutazione geometrica, per poter avvalorare ipotesi su uno stato originario del bene in cui, la rappresentazione realizzata attraverso la creazione di queste figure, si componeva anche di altri elementi. La ricaduta dell'indagine eseguita, attraverso il rilievo geometrico, è di valore storico-culturale.

I dati geometrici, restituendo una morfologia dell'interno della mano, permettono di trarre deduzioni attraverso indicazioni di forme e quantificazione dei volumi, utili ad identificare l'oggetto originariamente impugnato. Questo dato è tra i passi di importanza fondamentale per l'individuazione dell'identità del Bronzo "A".

Tra tutte le attività svolte, l'acquisizione digitale di beni di gioielleria di piccola manifattura, è stata sicuramente pionieristica se si guarda allo stato dell'arte attualmente esistente.

I gioielli hanno sempre accompagnato il percorso storico dell'uomo: parlano di culture e tradizioni, sono un'espressione di stato sociale, di costume, innovazione ed evoluzione di varie epoche. Farne oggetto di attenzione e proporre la loro conoscenza tramite i canali di comunicazione non prescinde oggi dalle acquisizioni digitali, così come la loro documentazione e salvaguardia nel tempo.

La problematica associata al rilievo dell'arte orafa affrontata nell'attività sperimentale, prendendo in considerazione creazioni di varia manifattura per caratteristiche geometriche e superficiali, riguarda la difficoltà di rilevare, mediante tecniche aventi la precisione necessaria alla relativa scala di rappresentazione, creazioni in materiale metallico affette da riflessioni e costituite spesso da raffigurazioni artistiche di geometrie complesse.

Il lavoro condotto ha permesso di fornire indicazioni sulle scelte tecniche, strumentali e procedurali in relazione all'individuazione di determinate specifiche che possono essere distintive nella caratterizzazione di un bene.

Abstract

The research, described in this thesis, has focused on issues of surveying, modeling and visualization of Cultural and Archaeological Heritage. Diagnostic-conservative analysis, cultural-historical investigation and interactive use at different levels have been evaluated.

In this work, some case studies, reporting the identified issues, are described. Thanks to these examples, it was possible to experience the use (and the utility) of the proposed solutions. For each case dealt with, technical hardware, software tools and procedures have been researched to optimize each step of the process as well as the final result in terms of time, resources and results.

Two scenarios have been investigated:

- the management of large volumes of 3D data in order to obtain a three-dimensional reconstruction detailed and usable in an interactive way;
- the high accuracy geometric reconstruction of objects with various complexity of shape and surface.

The activity, carried out in the representation of large-scale surveys, has ranged between extended architectural blocks and pads morphological structures in their context and in the urban environment. The attention has been focused on the problems of management and processing of large amounts of data in metric modeling phase and in phase display for virtual environments and interactive navigation through multimedia installations and real-time applications via the web.

In particular, in the work which the subject is the St. Maria Nuova Odigitria's Church (called Patirion), laser scanner measurements returned data to extract documentation of the state of preservation of the building. The integration with photogrammetric data has led us to develop a methodology that would allow reconstruction to create a virtual model for interactive navigation system with a semi-immersive stereoscopic display.

The project on interactive 3D reconstruction of the urban area around the Castle of Scilla Ruffo, focused in integrating data from TOF laser scanner with CAD data and planimetric information to create a model that was geometrically accurate and realistic in detail. Indeed, the purpose was to create a model usable by providing an environment

for interactive navigation, exploration with a subjective, a product through which realize a targeted order, or who has an enlarged communication and feedback on several fronts. The product will be conveyed through modern communication channels, with the main aim to develop a new concept of territorial marketing innovation based on a spread of local cultural heritage through the virtual reconstruction of the territories and environments to increase the competitiveness of the whole chain of the tourism system thrived.

The research activity, about the small scale of representation, has placed the interest on issues related to acquisition of: partially hidden geometric areas and high level of detail of objects in varying superficial complexity. The object of the relief, in the first case, was the right hand of Bronze "A" Statues.

The purpose of the relief was the morphological analysis of the internal volume of the hand. In order to validate hypotheses on an original configuration, some geometric constructions have been realized. The fallout of the investigation carried out, through the geometric survey, is of historical value. The geometry data, returning a morphology of the interior of the hand, allow you to draw inferences through indications of shapes and quantification of the volumes, which serve to identify the object originally challenged. This figure is one of the crucial steps for finding the identity of the Bronze "A".

Among all the activities, the acquisition of digital small goods jewellery manufacturing was certainly ground-breaking (if you look at the state of the art currently exists). The jewels have always accompanied the historical journey of man: they speak of cultures and traditions are an expression of social status, customs, innovation and evolution of various ages.

Make it, the object of attention and bring their knowledge through the channels of communication today cannot be separated from the digital acquisitions, as well as their documentation and preservation over time.

The problems associated with the relief of the goldsmith experimental addressed in the activity, taking into account creations varies manufacture for geometric characteristics and surface, concerns the difficulty of detecting, by techniques which have the required accuracy relative to the scale of representation, creations metallic material affected by reflections and are often composed of artistic representations of complex geometries.

The work carried out has allowed us to provide guidance on technical, instrumental and procedural choices in relation to the identification of certain specifications that can be distinguished in the characterization of items.

Lista delle Figure

-	Figura 1.1. Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione 3D.....	11
-	Figura 1.2. Grafico delle differenti caratteristiche dei due sistemi di acquisizione tridimensionale attiva e relativo campo di applicazione. Con risoluzione si intende la risoluzione laterale (xy) e con incertezza quella in z.....	14
-	Figura 1.3. Grafico nel quale sono state unite le aree occupate dai due sistemi di acquisizione tridimensionale, evidenziando il miglioramento nella potenzialità del sistema integrato e del suo campo di applicazione.....	15
-	Figura 2.1. Schema del principio di funzionamento di uno scanner 3D a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser.....	43
-	Figura 2.2. Schema del principio di funzionamento di uno scanner a tempo di volo (TOF).....	44
-	Figura 2.3. Principio della collinearità (a): centro di proiezione, punto P' sull'immagine e corrispondente punto P nello spazio devono giacere su una linea retta. Principio della triangolazione fotogrammetrica o bundle adjustment (b) con immagini convergenti: le coordinate 3D dei punti P _i sono determinate intersecando i raggi omologhi provenienti dalle varie immagini.....	53
-	Figura 2.4. Tipologie di realtà virtuale.....	70
-	Figura 3.1. Chiesa di Santa Maria Nuova Odigitria (Patirion).....	79
-	Figura 3.2. Vista interna della Chiesa.....	79
-	Figura 3.3. Mosaico presente sul pavimento d'ingresso.....	80
-	Figura 3.4. Mosaico presente sul pavimento laterale.....	80
-	Figura 3.5. Fase di acquisizione.....	82
-	Figura 3.6. Posizionamento degli scanworlds (punti in blu) e dei punti di stazione (punti in rosso) per le acquisizioni interne ed esterne.....	83
-	Figura 3.7. Alcune tavole geometriche utili per la documentazione diagnostica dello stato di conservazione.....	85
-	Figura 3.8. Immagini termografiche.....	86
-	Figura 3.9. Unione delle scansioni generate con il laser TOF.....	87
-	Figura 3.10. Nuvola interna con 31 milioni di punti.....	87
-	Figura 3.11. Nuvola esterna con 56 milioni di punti.....	88
-	Figura 3.12. Modello del laser scanner TOF (a), ricostruzione 3D con tecnica multi-view stereo (b), modello unito (c).....	89
-	Figura 3.13. Creazione della texture. Ricostruzione mediante tecnica multi-view della facciata della Chiesa (a) e punti di stazione della camera orientate sul modello restituito dallo scanner laser (b). I quadrati rossi rappresentano le posizioni della camera.....	90
-	Figura 3.14. Texture mappata sul modello finale.....	91
-	Figura 3.15. Sistema per la fruizione.....	91
-	Figura 3.16. Immagini panoramiche della zona intorno al Castello.....	93
-	Figura 3.17. Immagini della fase di acquisizione.....	95
-	Figura 3.18. Modello complessivo generato dall'allineamento delle scansioni con il laser TOF.....	96
-	Figura 3.19. Schema riportante le fasi della procedura seguita.....	97
-	Figura 3.20. Vista sul modello delle parti da filtrare.....	98
-	Figura 3.21. Modello ripulito dagli elementi di interferenza nelle scansioni.....	100
-	Figura 3.22. Riduzione del modello ad 1 milione di vertici.....	101
-	Figura 3.23. Modello risultante dall'applicazione del filtro di Poisson, in cui sono stati eliminati i poligoni di raccordo tra i bordi esterni del modello.....	102

- Figura 3.24. Modello a cui sono state trasferite le proprietà originarie dei vertici dopo la ricostruzione di Poisson.....	103
- Figura 3.25. Modello importato nell'ambiente di lavoro di Modo.....	103
- Figura 3.26. UVMap del modello 3D.....	105
- Figura 3.27. Normal map del modello 3D.....	106
- Figura 3.28. Layer ridotto del modello 3D (modello lowpoly).....	107
- Figura 3.29. Modello lowpoly a cui è stata applicata la normal map.....	107
- Figura 3.30. Inserimento della planimetria del Castello per integrare le informazioni dei dati di scansione e costruire la geometria CAD.....	108
- Figura 3.31. Estrazione delle geometrie CAD del Castello.....	109
- Figura 3.32. Costruzione e texturizzazione del promontorio su cui si erge il Castello.....	109
- Figura 3.33. Dati riportati dallo scanner laser relativamente alla Chiesa Matrice.....	110
- Figura 3.34. Costruzione della geometria CAD della Chiesa Matrice.....	110
- Figura 3.35. (a) Modello texturizzato della Chiesa Matrice e (b) del percorso di accesso al Castello.....	111
- Figura 3.36. Ricostruzione e texturizzazione della scalinata frontale alla Chiesa Matrice e del percorso di navigazione urbano.....	111
- Figura 3.37. Modello 3D completo.....	112
- Figura 3.38. Modello ambientato in Unity.....	114
- Figura 3.39. Immagine dei Bronzi di Riace e particolare della mano.....	115
- Figura 3.40. Ipotesi storiche di ricostruzione delle parti mancanti del Bronzo "A".....	118
- Figura 3.41. I dettagli della mano del Bronzo "A".....	118
- Figura 3.42. Impugnature di lance in varie raffigurazioni storiche.....	119
- Figura 3.43. Posizioni della procedura di acquisizione.....	121
- Figura 3.44. Nuvole di punti registrate e modello poligonale della mano destra del Bronzo "A".....	121
- Figura 3.45. Volume della mano.....	122
- Fig. 3.46. Divisione in sezioni della mano e relative circonferenze massime inscrivibili in ciascuna di esse.....	123
- Figura 3.47. Viste del modello raffiguranti le parti relative alle sezioni con scostamento dalla configurazione anatomica.....	124
- Figura 3.48. Cilindro massimo inscritto contenuto all'interno del volume definito dalle 14 circonferenze e adiacente alle sezioni 1-7-10-13.....	125
- Figura 3.49. I dettagli delle sezioni 1-7-10-13 con il cilindro inscritto di 30 millimetri di diametro.....	126
- Figura 3.50. Conformazione del palmo della mano.....	126
- Figura 3.51. Le due ipotesi differenti: (a) una lancia, (b) la briglia di un cavallo.....	127
- Figura 3.52. Arte glittica: cammeo di Augusto.....	129
- Figura 3.53. Particolare di fibula etrusca con granulazione. Secolo VII a.C.....	130
- Figura 3.54. Anello ellenistico in oro con granati. I secolo a.C.....	130
- Figura 3.55. Talismano di Carlo Magno con al centro due zaffiri ovali contrapposti che racchiudono un pezzo di legno della croce di Cristo.....	131
- Figura 3.56. Spilla inglese, del periodo vittoriano, con turchesi.....	132
- Figura 3.57. Pendente in oro e smalti con diamanti, rubini e perle: gioiello di Canning, fine XVI secolo.....	133
- Figura 3.58. Spilla spagnola del XVII secolo, in oro e smeraldi.....	133
- Figura 3.59. Bracciale egizio con scarabeo in turchese appartenuto a Tut-ankh-amon.....	134
- Figura 3.60. Fibbia d'argento dorato di Renè Lalique, 1898.....	135
- Figura 3.61. Collana con zaffiro e diamanti di forma goccia e a navetta.....	135

- Figura 3.62. Modello ottenuto dalla tecnica: (a) a luce strutturata, (b) fotogrammetria multi-view, (c) fotogrammetria multi-view+focus stacking.....149
- Figura 3.63. Esempi di zone di riflessione presenti sui pezzi nonostante gli accorgimenti fotografici.....151

Lista delle Tabelle

- Tabella 1.1 Scale di lavoro archeologiche e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo.....	10
- Tabella 1.2. Sintesi delle caratteristiche di funzionamento relative alla tecnica fotogrammetrica e al laser scanner 3D.....	16
- Tabella 3.1. Fasi, strumenti e dati della metodologia applicata.....	81
- Tabella 3.2. Diametri delle circonferenze inscritte in ogni sezione della mano.....	124
- Tabella 3.3. Valutazione indicativa dei parametri di performance delle tecniche impiegate.....	137
- Tabella 3.4. Elenco e raffigurazione delle tipologie di gioielli per la sperimentazione del lavoro di ricostruzione.....	139
- Tabella 3.5. Principali caratteristiche geometriche e superficiali identificate per qualificare le tecniche di rilievo.....	139
- Tabella 3.6. Valutazione indicativa dell'influenza negativa di specifiche caratteristiche del gioiello sul risultato della ricostruzione. Valori maggiori indicano maggiore difficoltà nella ricostruzione della superficie.....	141
- Tabella 3.7. Valutazione dell'influenza delle problematiche di rilievo sui risultati ottenuti dalle tecniche impiegate.....	150

Indice

Riassunto.....	ii
Abstract.....	v
Lista delle figure.....	viii
Lista delle tabelle.....	xi

Introduzione

–Dalla larga scala alla piccola scala: rilievo, ricostruzione, diagnostica e visualizzazione nell’ambito dei Beni Archeologici e Culturali.....	1
–Obiettivi ed organizzazione della tesi.....	5

1. Stato dell'arte ed esame delle problematiche

1.1 3D su larga scala: integrazione dei metodi di rilievo e visualizzazione interattiva.....	7
1.1.1 Campi applicativi delle principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico.....	8
1.1.2 Limiti delle tecniche di rilievo tridimensionale e potenzialità dell’integrazione di dati.....	12
1.1.3 Finalità dell’integrazione.....	19
1.1.3.1 Integrazione per l’aumento delle informazioni.....	21
1.1.3.2 Integrazione per la verifica del modello.....	25
1.1.3.3 Integrazione per il miglioramento dell’accuratezza.....	28
1.2 Lavori scientifici più recenti nell’ambito della rappresentazione su larga scala.....	31
1.3 3D su piccola scala: ricostruzione ed analisi di aree geometriche parzialmente nascoste a partire dal rilievo della superficie visibile e ricostruzione ad alta precisione di oggetti a varia complessità superficiale.....	36
1.4 Lavori scientifici più recenti nell’ambito della rappresentazione su piccola scala...	39

2. Tecniche e metodi per il rilievo, la ricostruzione e la visualizzazione

2.1 Sensori ottici attivi: laser scanner aerei/terrestri e proiettori di frange.....	42
2.2 L’elaborazione dei dati raccolti con sensori ottici attivi: il Reverse Modeling.....	47

2.3 Sensori passivi: fotogrammetria.....	51
2.4 Tecnica fotogrammetrica multi-view stereo con ottiche macro per piccoli oggetti..	55
2.4.1 Multi-view stereo.....	55
2.4.2 Macro fotografia.....	56
2.4.2.1 Tecniche di fusione di immagini per una estesa profondità di campo.....	56
2.4.2.2 Il metodo Depth From Focus.....	58
2.4.3 Problemi relativi alla ricostruzione fotogrammetrica con obiettivi macro.....	58
2.5 L'elaborazione fotogrammetrica dei dati raccolti con fotocamere digitali.....	59
2.6 Virtual Heritage: le tecnologie dell'informazione applicate ai Beni Culturali.....	65
2.6.1 Realtà Virtuale: dalla CVR (Cultural Virtual Reality) al VRML (Virtual Reality Modeling Language), divulgazione e conoscenza.....	68
2.6.2 Virtual Archaeology: processo metodologico.....	73

3. Casi studio e risultati

3.1 Sviluppo di una metodologia integrata per la digitalizzazione, l'indagine e la visualizzazione della Chiesa di Santa Maria del Patire.....	77
3.1.1 Descrizione del caso studio.....	79
3.1.2 Fasi e strumenti della metodologia di ricostruzione 3D.....	81
3.1.3 Rilievo 3D e fase di allineamento delle scansioni.....	82
3.1.4 Analisi dei dati.....	84
3.1.5 Modellazione 3D.....	86
3.1.5.1 Rifinitura del modello 3D.....	89
3.1.6 Texturizzazione.....	90
3.1.7 Fruizione del modello virtuale.....	91
3.2 Ricostruzione 3D dell'area urbana intorno al Castello Ruffo di Scilla per applicazioni real-time.....	92
3.2.1 Il caso studio.....	93
3.2.2 Rilievo della zona urbana intorno al Castello.....	95
3.2.3 Elaborazione dei dati e creazione del modello.....	96
3.2.4 Fruizione virtuale.....	113

3.3 Studio morfologico completo della mano destra del Bronzo “A” di Riace.....	115
3.3.1 In Bronzi di Riace e gli interrogativi storici.....	115
3.3.2 Analisi visiva della mano destra del Bronzo “A”.....	117
3.3.3 Metodologia di ricostruzione 3D.....	120
3.3.4 Analisi del modello.....	122
3.4 Ricostruzione 3D di gioielli di arte orafa: impiego e confronto di tecniche e metodologie di reverse engineering.....	128
3.4.1 Il gioiello: espressione di periodi storici, tradizioni sociali e cambiamenti culturali nel tempo.....	129
3.4.2 Tecniche e metodi impiegati per la ricostruzione: caratteristiche distintive.....	136
3.4.3 Tipologie di gioielli: casi studio e problematiche.....	139
3.4.4 Impiego delle tecniche: fasi e soluzioni adottate nel processo sperimentale.....	141
3.4.4.1 Acquisizione con laser scanner a luce strutturata.....	142
3.4.4.2 Setup e scelte sperimentali per le tecniche fotogrammetriche.....	142
3.4.4.3 Acquisizione delle immagini macro con tecnica multi-view.....	145
3.4.4.4 Acquisizione delle immagini macro, per piani di fuoco, con tecnica multi-view.....	146
3.4.5 Elaborazione dei dati per la ricostruzione 3D.....	147
3.3.5.1 Ricostruzione 3D per la tecnica a luce strutturata	147
3.3.5.2 Ricostruzione 3D con tecnica multi-view.....	148
3.4.6 Analisi dei risultati e confronti delle superfici 3d relative alle diverse tecniche.....	149
Conclusioni.....	153
Bibliografia.....	155

Introduzione

–Dalla larga scala alla piccola scala: rilievo, ricostruzione, diagnostica e visualizzazione nell’ambito dei Beni Archeologici e Culturali

Nell’ambito dei Beni Archeologici e Culturali, la documentazione geometrica di un oggetto o di un sito può essere definita come l’azione di acquisizione, elaborazione, presentazione e memorizzazione dei dati necessari per la determinazione, in un dato momento, della posizione, della forma e delle dimensioni dell’oggetto o del sito rilevato nello spazio tridimensionale (UNESCO 1972).

Scopo della documentazione 3D attraverso tecnologie digitali è quindi quello di memorizzare il presente dei beni architettonici e archeologici, così come sono stati modellati nel corso del tempo e costituire il necessario background per gli studi sul loro passato, così come per gli studi sul loro futuro e la loro conservazione. Inoltre, il rilievo 3D serve per conservare digitalmente il patrimonio, soprattutto in caso di perdite o danneggiamenti.

Un rilievo metrico accurato, dettagliato e completo, richiede un approccio metodologico sistematico: impiegare le attrezzature più sofisticate non può prevenire errori senza un’attenta procedura e la mancata conoscenza delle funzionalità strumentali o dei software impiegati, così come l’accuratezza non prescinde dalla corretta esecuzione degli algoritmi di elaborazione che trasformano l’insieme dei dati in coordinate calibrate o misure che possono essere visualizzate ed analizzate.

In questa direzione l’English Heritage Metric Survey Team definisce il rilievo come la descrizione grafica di edifici e territorio tramite uno specifico standard, per fornire una base dati affidabile e ripetibile senza specifici input soggettivi.

L’idea chiave è che un bene culturale è protetto solo se adeguatamente rilevato, documentato, continuamente monitorato con il massimo rispetto dell’ambiente circostante e percepito da chiunque ne faccia oggetto di interesse. Gli strumenti di rilievo agiscono a livello preservativo del bene anche nel fornire materiale di valutazione diagnostica e di intervento preventivo.

La valorizzazione del bene diventa completa quando la descrizione metrica è affidabile ed esaustiva e tutte le informazioni rilevate sono standardizzate e catalogate in sistemi informativi che ne garantiscono l'interazione e la fruibilità a diversi livelli.

I canali mediatici stessi diventano oggetto di ricerca e vanno diversificati per proporre più soluzioni di divulgazione che vanno dall'interrogazione GIS/WebGIS, all'installazione multimediale di forte impatto comunicativo (virtuale ed immersiva). Sicuramente la comunicazione oggi non può prescindere dal considerare strumenti di conoscenza i dispositivi che si interfacciano attraverso la rete internet, dal cercare di veicolare i dati anche in una forma di visualizzazione permessa da applicazioni installabili sui comuni dispositivi mobili, e non di meno in un formato di dati condivisibile e scambiabile sui comuni social network.

La comunicazione, infatti, pur non essendo il rimedio per sciogliere le criticità legate alla salvaguardia dei beni archeologici, ha un ruolo importantissimo nella promozione del patrimonio artistico e culturale e determina il modo in cui il patrimonio stesso viene percepito, reso pienamente fruibile e sentito come bene da salvaguardare.

Quali sono le problematiche su cui bisogna intervenire quando si volge l'interesse alla salvaguardia e alla comunicazione del patrimonio culturale?

E' all'evidenza dei fatti che i beni culturali subiscono danni o mutamenti ad una velocità superiore a quella con cui si riescono a documentare. Eventi naturali, catastrofici e atti terroristici o guerre mettono continuamente a rischio i beni archeologici con modalità e conseguenze non prevedibili.

Il rilievo del bene deve essere perciò speditivo, spesso d'emergenza e in casi estremi (beni non più accessibili o scomparsi) possibile anche da materiale già disponibile (archivi storici, foto turistiche, documentazione panoramica, etc.). Inoltre, non sempre i luoghi che detengono patrimoni culturali da visitare possono essere raggiungibili: in alcuni casi per motivi morfologici, per cui il rilievo acquisisce potenzialità se realizzabile con strumentazione leggera, ma oggi, spesso, anche per motivi politici di chiusura verso altre nazioni.

L'inserimento nel contesto socio-economico del patrimonio culturale costituisce, oltretutto, uno strumento fondamentale per catalizzare l'interesse e garantirne efficienti strumenti di tutela.

Quindi, in relazione a diversi tipi di esigenze (turistiche, didattiche, conservazione, restauro), emerge sempre più la necessità di definire sperimentalmente metodi e tecniche di rilievo/ricostruzione al fine di produrre modelli confrontabili e accessibili, modelli che possano essere fruibili in modo partecipato, così da raggiungere e sensibilizzare diversificate fasce di utenti senza limiti spazio-temporali.

Le innovazioni tecnologiche, se da un lato stimolano la ricerca tecnico-scientifica ad approfondire le caratteristiche operative dei differenti strumenti e proporre tecniche di elaborazione dei dati, dall'altro generano un interessante confronto pluridisciplinare, orientato soprattutto ad indagare gli aspetti culturali generati dalla rivoluzione informatica, e ipotizzare possibili criteri di utilizzo delle nuove tecnologie.

La definizione della procedura di creazione di modelli 3D di artefatti archeologici, tiene conto essenzialmente delle caratteristiche degli oggetti da rilevare e delle finalità di utilizzo dei modelli stessi. I criteri per la definizione delle tecniche da utilizzare nella fase di rilievo possono essere specificatamente indicati in base al tipo di acquisizione.

Nel caso di acquisizioni di piccoli reperti le caratteristiche che vanno tenute in conto sono:

- complessità di forma dell'oggetto (particolarità geometriche, presenza di fori, sezioni concave, etc.);
- complessità superficiale (riflettività del materiale, riflessione diffusa uniforme o puntuale, trasparenza, livello di erosione ed estensione del degrado superficiale);
- presenza di rilievi, decorazioni, incisioni;
- colore ed uniformità della texture.

Nel caso di acquisizioni su larga scala, alle caratteristiche dell'oggetto da rilevare sopra riportate, si aggiungono altri criteri da considerare:

- dimensioni massime dell'oggetto;
- eventuale prevalenza di una dimensione rispetto alle altre;
- dettaglio minimo superficiale.

Allo stesso modo, la definizione della procedura di creazione dei modelli non può prescindere dalle caratteristiche dello strumento che si possono distinguere per:

- accuratezza e risoluzione;
- dimensioni dell'area di ripresa;

- raggio di azione;
- comportamento in funzione delle condizioni di illuminazione;
- comportamento in funzione di materiale con riflessione della luce non uniformemente diffusa;
- maneggevolezza dello strumento.

Inoltre, va considerata la specificità dell'applicazione che si prevede per il modello acquisito e le finalità documentative, ovvero:

- grado di accuratezza richiesto per il modello digitale 3D;
- complessità di descrizione del modello digitale, ottimale per l'applicazione di riferimento;
- compatibilità del tempo e costo di acquisizione con il budget di progetto;
- eventuale distinzione dei diversi livelli di dettaglio;
- tipo di canale di visualizzazione.

Non di meno, importanti fattori da considerare sono l'esperienza e la capacità dell'operatore nonché l'ubicazione dell'oggetto. Infatti, criteri incidenti di scelta sono anche le condizioni al contorno, rappresentate dalla disponibilità di aree di lavoro libere da ostacoli.

A seconda della tipologia/complessità del bene, della scala di rappresentazione (che definisce la precisione e la risoluzione finale) e del campo di applicazione/scopo del rilievo (documentazione, analisi specialistica etc.) è possibile scegliere la tecnica più adeguata o l'integrazione di più tecniche cercando sempre di ottimizzare tempi, risorse e risultati.

Recentemente molti studi si sono orientati all'utilizzo integrato di tecniche differenti, per aumentare il livello qualitativo dei modelli 3D.

Un tale approccio, che permette analisi di forma e dimensione ad altissima risoluzione, viene applicato soprattutto nei casi di oggetti complessi quali siti archeologici e architetture.

L'integrazione tra le metodologie di rilievo nell'approccio alla ricostruzione digitale 3D diventa necessario per una mirata mediazione tra la mole dei dati, la precisione richiesta e le necessità di visualizzazione.

Infatti, soprattutto nel caso di acquisizioni su larga estensione generate da sistemi che restituiscono un elevato dettaglio, come il laser scanner TOF, non si può prescindere dalla questione di visualizzazione del modello 3D.

I sistemi di visualizzazione permettono l'esplorazione e l'analisi dei modelli ricostruiti secondo specifiche caratteristiche geometriche e fotometriche.

E' importante, quindi, ottimizzare le quantità dei dettagli, geometrici o fotografici, in relazione ad un utilizzo performante dei sistemi di visualizzazione, cercando di mantenere il più possibile inalterate le qualità del risultato finale.

L'esperienza di interazione si differenzia in base alle soluzioni di visualizzazione passando dal semplice utilizzo del monitor, ai sistemi di navigazione in real-time e stereoscopia, agli attuali dispositivi mobili attraverso cui la comunicazione si canalizza ormai ad uno spazio di utenti molto esteso.

Le informazioni contenute in questa parte introduttiva vogliono fare da preludio a quelle che sono state le intenzioni della ricerca, ovvero produrre modelli 3D in grado di soddisfare più esigenze: dai rilievi di precisione, su larga e piccola scala di rappresentazione, per finalità di documentazione, indagine diagnostica o analisi storico-culturale, ad una modellazione le cui specifiche consentano una portabilità su diversi sistemi di visualizzazione, canali web o applicazioni mobili, finalizzata ad una comunicazione allargata.

– Obiettivi ed organizzazione della tesi

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo quello di affrontare particolari problematiche riscontrate nella ricostruzione tridimensionale di Beni Archeologici e Culturali su larga scala e piccola scala di rappresentazione, con lo scopo di proporre metodi e tecniche aventi le seguenti finalità:

- per la larga scala: creazione di modelli 3D a diverso livello di dettaglio di architetture complesse o di siti archeologici estesi, per la rappresentazione, l'indagine diagnostico-strutturale e la navigazione interattiva, mediante integrazione di dati 3D;

- per la piccola scala: ricostruzione 3D di superfici parzialmente nascoste a partire da dati 3D rilevati con strumentazione di elevata accuratezza, per analisi storico-culturale, e di oggetti a varia complessità geometrica e superficiale.

Nel capitolo 1 è stato fatto un ampio studio dello stato dell'arte esistente nell'ambito del progetto di ricerca, riportando principalmente i lavori che sono stati una base di riferimento all'inizio dell'attività e quelli che hanno accompagnato le ricerche condotte fino ad oggi.

Vengono descritti i campi applicativi delle principali tecniche e degli strumenti per il rilievo tridimensionale, i rispettivi limiti di impiego e le potenzialità derivanti da un uso integrato dei dati restituiti. Quindi è stata fatta una trattazione della tecnica di integrazione dei dati, descrivendone i benefici in termini di aumento delle informazioni, verifica del modello e miglioramento dell'accuratezza.

Nel capitolo 2 viene descritto il funzionamento delle tecniche di rilievo in fase di acquisizione ed elaborazione dei dati, con particolare attenzione ai problemi riscontrati nell'impiego della ricostruzione fotogrammetrica con obiettivi di tipo macro. Quindi è stata fatta una trattazione dei metodi che sono stati integrati per l'intervento sulle problematiche di impiego della tecnica e delle tecniche di realtà virtuale applicate ai Beni Culturali.

Nel capitolo 3 viene riportata la descrizione dei lavori scientifici realizzati nell'ambito della ricostruzione, l'indagine e la visualizzazione su larga e piccola scala di rilievo geometrico.

Stato dell'arte e problematiche

1.1 3D su larga scala: integrazione dei metodi di rilievo e visualizzazione interattiva

La continua evoluzione delle tecniche di rilievo e modellazione 3D basate sull'impiego di sensori e lo sviluppo di sistemi sempre più performanti per la visualizzazione di dati digitali, evidenziano il valore aggiunto dato dall'uso di questi strumenti nell'ambito archeologico. In particolare, appare sempre più chiaro il contributo attivo che tali tecnologie possono fornire nella fase interpretativa, nella conservazione ed archiviazione dei dati e nella valorizzazione del bene attraverso il web. Tutti questi aspetti portano verso un miglioramento generale dell'informazione e contribuiscono alla crescita della ricerca archeologica (Guidi, Russo, Beraldin 2010).

L'interesse mostrato alle diverse tecniche e metodologie di rilievo digitale e modellazione tridimensionale in ambito archeologico è evidenziato dalla crescita della richiesta, dal loro sempre più frequente impiego e dalla necessità di utilizzare sempre di più forme di registrazione e archiviazione digitale a differenti livelli di scala e risoluzione. Ovviamente l'uso di questi strumenti si inserisce all'interno di un processo conoscitivo ben codificato, nel quale particolare attenzione deve essere posta proprio alla fase di integrazione tra le metodiche tradizionali e quelle innovative.

La definizione di un sistema conoscitivo che integri tutte queste forme di analisi è il risultato di un processo nel quale vengono coinvolte differenti competenze e professioni che hanno la capacità di comunicare e condividere un obiettivo comune. Questo risultato può essere raggiunto grazie ad uno sforzo comune, profuso da un lato dagli esperti dell'imaging 3D nel cercare di comprendere ed interpretare le richieste degli archeologi, dall'altro dagli archeologi nel conoscere le potenzialità ed il funzionamento

di base di queste tecnologie, al fine di poterne valutare la reale efficacia ed utilità in relazione alla condizione di utilizzo.

In questa trattazione ci si propone di delineare, in maniera sintetica ma esaustiva, i metodi di applicazione ed i principi di funzionamento degli strumenti di acquisizione 3D più utilizzati in ambito archeologico, evidenziandone i pregi ed i difetti. In conclusione, viene descritto il metodo di rilievo multirisoluzione e multisensore come una possibile ed efficace strada per migliorare la capacità degli strumenti e poter rilevare al meglio le complesse informazioni geometriche e materiche presenti nei manufatti archeologici.

1.1.1 Campi applicativi delle principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico

I sensori tridimensionali sono strumenti che consentono di generare dati 3D della scena che inquadrano.

La classe di sensori a cui noi faremo maggior riferimento è quella basata sull'uso della radiazione luminosa, all'interno della quale si può fare un'ulteriore distinzione in funzione della natura della luce che viene impiegata per effettuare la misura. Se si tratta di luce naturale i metodi di misura si dicono "passivi" (tecnica fotogrammetrica, teodoliti, etc.); se invece la luce è codificata in maniera da svolgere un ruolo nel processo di misura, si parla di "sensori attivi" (laser scanner, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazioni totali, etc.).

La creazione di modelli tridimensionali reality-based, di manufatti o siti archeologici, può avvenire attraverso l'elaborazione di dati 3D generati da entrambe le tecnologie descritte, mentre, esistono tecniche di modellazione 3D basate su rilievi già esistenti, come piante di edifici o mappe, per le quali le strutture 3D vengono generate attraverso estrusioni a partire da tali dati o dall'applicazione di regole architettoniche (Müller et al. 2006; Yin, Wonka, Razdan 2009).

La scelta dei dati da impiegare o della tecnica di rilievo da utilizzare avviene in funzione della caratterizzazione della superficie da rilevare, del tipo di accuratezza e del dettaglio geometrico richiesti, delle dimensioni dell'oggetto, della collocazione spaziale, l'esperienza dell'operatore, i costi del progetto, etc.

I sensori ottici attivi (Blais 2004; Guidi, Russo, Beraldin 2010) permettono di ottenere direttamente la posizione spaziale della superficie o del punto rilevato, a volte accoppiata all'informazione del colore; quest'ultima può essere registrata dal sensore stesso o da una fotocamera digitale esterna ad integrazione dello strumento. Questa tipologia di strumenti attivi ha il principale pregio di acquisire direttamente, ed in poco tempo, grandi quantità di dati relativi ad una geometria complessa con un'accuratezza elevata. Per contro i sensori attivi sono molto costosi, normalmente voluminosi e definiti da una limitata flessibilità di utilizzo. L'insieme di tali caratteristiche rende questa tipologia di strumenti ideale per molte applicazioni, soprattutto nell'ambito dei Beni Culturali, ma non adattabile a tutte le condizioni ambientali e alle caratteristiche materiche dei manufatti (El-Hakim, Beraldin, Blais 1995).

L'utilizzo di questo genere di strumenti ha raggiunto la sua completa maturità già da diversi anni ed il processo di modellazione da dati range-based, oggi, è ben strutturato e definito (Cignoni, Scopigno, 2008), nonostante presenti ancora alcuni "colli di bottiglia" legati in particolare alla gestione delle grandi quantità di dati acquisiti.

Uno strumento attivo che impiega luce laser viene chiamato range camera o laser scanner 3D. Il principio di funzionamento di una range camera può variare a seconda delle dimensioni dell'oggetto da rilevare e, di conseguenza, a seconda della distanza tra sensore e oggetto (Tabella 1.1). Per volumi di misura medio-piccoli, indicativamente inferiori al metro cubo, gli scanner si basano sul principio di misura della triangolazione; per volumi di dimensioni superiori si utilizzano sensori detti a tempo di volo o Time Of Flight (TOF).

Tra i sensori attivi vanno anche ricordati i radar (strumenti montati su piattaforme aeree o terrestri, che acquisiscono immagini e consentono di rilevare informazioni 3D attraverso processi di interferometria), il GPS e le stazioni totali (strumenti in grado di restituire puntualmente coordinate e posizioni nello spazio).

Rilievo archeologico	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari Immagini aeree a piccola scala Radar Lidar GPS
Scala locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar Lidar Laser scanner TOF/CW Immagini terrestri Stazione totale GPS
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri Laser scanner a triangolazione Sistemi a luce strutturata

Tabella 1.1. Scale di lavoro archeologiche e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo.

I metodi basati sull'elaborazione metrica delle immagini (image-based) richiedono una ben precisa formulazione matematica (geometria proiettiva o prospettica) per trasformare i dati estratti dalle immagini in coordinate metriche 3D (Remondino, El-Hakim 2006). Le immagini contengono tutte le informazioni necessarie per riprodurre sia la geometria che la texture del manufatto fotografato, rendendo possibile la generazione di modelli tridimensionali con un contenuto informativo ottimale.

La ricostruzione virtuale di modelli 3D accurati e fotorealistici da immagini rimane, comunque, ancora un processo difficoltoso che richiede esperienza, soprattutto nel caso di acquisizione di grandi e complessi siti archeologici o nel caso in cui vengono utilizzate immagini non calibrate o molto separate tra di loro.

Questa tipologia di dati tridimensionali, proveniente dai sistemi image-based e range-based, può essere facilmente integrata con altre informazioni metriche provenienti da rilievi diretti e da mappe, al fine di ottenere una corretta georeferenziazione e scalatura del modello.

Anche se esistono diverse tecniche di rilievo e sensori che permettono di generare modelli 3D realistici, definiti da una buona qualità metrica e da un dettaglio coerente con le caratteristiche geometriche del modello (Figura 1.1), il migliore approccio per il rilievo consiste nella combinazione di differenti strumenti e tecniche di modellazione.

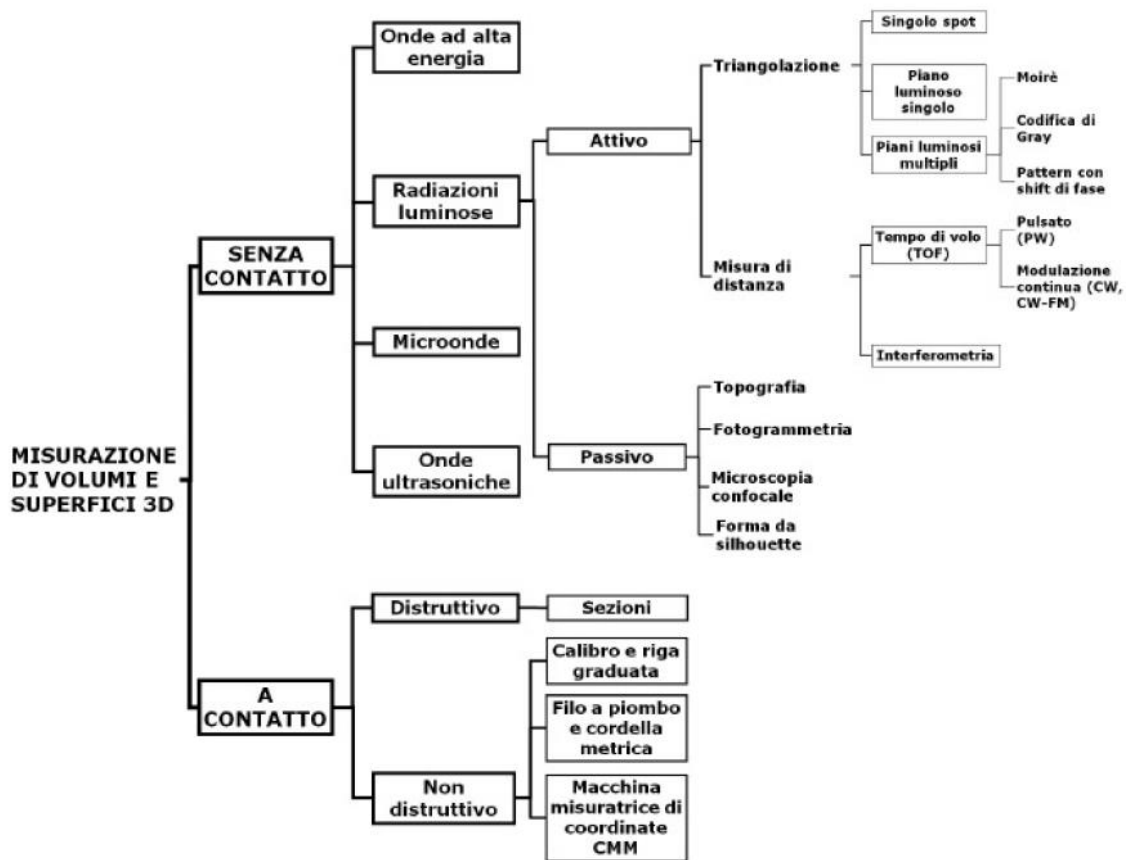


Figura 1.1. Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione 3D.

Infatti, l'uso di una sola tecnologia di rilievo 3D non permette, al momento, di arrivare ad un risultato soddisfacente in tutte le condizioni di lavoro ed in termini di accuratezza geometrica, portabilità, automatismo, fotorealismo e bassi costi, a parità di efficienza e flessibilità.

Per questo i dati provenienti da immagini e laser scanner vengono integrati per sfruttare appieno le potenzialità di ogni singola tecnica di misura (Guidi et al. 2003; Stumpf et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al. 2009).

1.1.2 Limiti delle tecniche di rilievo tridimensionale e potenzialità dell'integrazione di dati

In questa trattazione, ci si propone di mostrare:

- come i diversi sistemi di 3D imaging attivi e passivi, per le proprie peculiari caratteristiche, siano adatti a coprire diverse aree applicative;
- i vantaggi ottenibili dall'integrazione di sistemi di rilievo diversi, sfruttando al meglio la complementarità di determinate caratteristiche.

Negli ultimi anni si sono moltiplicate ricerche ed applicazioni, tese ad individuare modalità di integrazione tra sensori diversi e tali da offrire capacità di rilievo superiori alle singole tecniche prese singolarmente.

L'analisi condotta prende in esame principalmente l'integrazione fra la tecnica fotogrammetrica ed i sistemi di acquisizione tridimensionale attivi, con particolare attenzione ai laser scanner 3D.

La prima tecnica, possiede il grande vantaggio di essere potenzialmente molto economica, visto il basso costo e le alte prestazioni offerte oggi dalle fotocamere presenti sul mercato, ma il suo impiego restituisce un numero limitato di punti; questo fa della tecnica fotogrammetrica una tecnica ideale per i rilievi di inquadramento e per l'acquisizione di oggetti che siano caratterizzati da una bassa complessità formale.

I sistemi di acquisizione 3D attivi sono molto articolati e differenziati in funzione del tipo di funzionamento. In particolare, all'interno dei laser scanner, vi è la basilare distinzione tra gli scanner a triangolazione e gli scanner a tempo di volo; i primi coprono una distanza di misura variabile dalle decine di centimetri fino a qualche metro, mentre i secondi hanno un raggio d'azione che va dall'ordine del metro fino a molti chilometri. Questi strumenti sono molto sofisticati e permettono di acquisire superfici free-form attraverso il rilievo di una grande quantità di punti in pochissimo tempo. Al contrario uno dei principali limiti risiede nella faticosa acquisizione di vertici e spigoli e nel rilievo di superfici caratterizzate da un materiale otticamente non cooperante, ovvero un materiale che ridiffonde la radiazione luminosa incidente in tutte le direzioni.

Entrambe le categorie di strumenti ad acquisizione attiva sono caratterizzate da accuratezza, precisione e risoluzione molto differenti fra loro, per questo le applicazioni

nelle quali vengono utilizzati sono nettamente diverse e legate alla capacità dello strumento di potere acquisire o meno determinate superfici.

Proprio per queste differenti caratteristiche, è sempre esistito un intervallo, definito *zona di vuoto strumentale*, corrispondente alla distanza di acquisizione tra 2 e 10 metri. Questo è dovuto al fatto che, da un lato, i sistemi a triangolazione perdono molta precisione nei rilievi a distanza di presa maggiori di 2-2,5 metri e, dall'altro, i sistemi a tempo di volo che coprono tale intervallo, posseggono dei parametri di precisione inadeguati alle aspettative richieste a quella distanza.

Solo negli ultimi anni hanno iniziato a comparire strumenti che permettono di acquisire un dato 3D ad una distanza rilevante (fino ai 20-25 m) con una precisione paragonabile ad uno strumento a triangolazione. Questi strumenti sono basati su tecnologia TOF a onda continua, con modulazione di ampiezza (AM/CM) o di frequenza (FM/CW), che permettono di ottenere dati molto precisi anche a notevoli distanze. La comparsa sul mercato di questa particolare categoria di strumenti non solo dimostra la volontà di coprire un segmento di mercato poco sviluppato, ma avvalorata anche la necessità di colmare un vuoto particolarmente sentito da chi pratica rilievi di alta precisione su oggetti di grandi dimensioni.

Per evidenziare maggiormente questo vuoto è interessante confrontare i grafici relativi al rapporto tra l'incertezza dello strumento e la dimensione dell'area inquadrata (*C.I. – Campo Inquadrato*) espressa secondo la sua diagonale (Figura 1.2).

In particolare si evidenzia come il grafico relativo al laser scanner a triangolazione copra un intervallo dimensionale di tipo logaritmico, mentre lo scanner a tempo di volo è caratterizzato da una crescita dimensionale di tipo lineare. Questo differente comportamento è tale da evidenziare un range di parametri dell'uno e dell'altro strumento che non rispondono ai minimi requisiti di precisione per l'acquisizione di oggetti a distanza ravvicinata. Al di sotto di questo valore di soglia, determinato da un'incertezza di misura di 0.2 mm, si può dire che non esista nessuno strumento che risponda alle esigenze sopra citate.

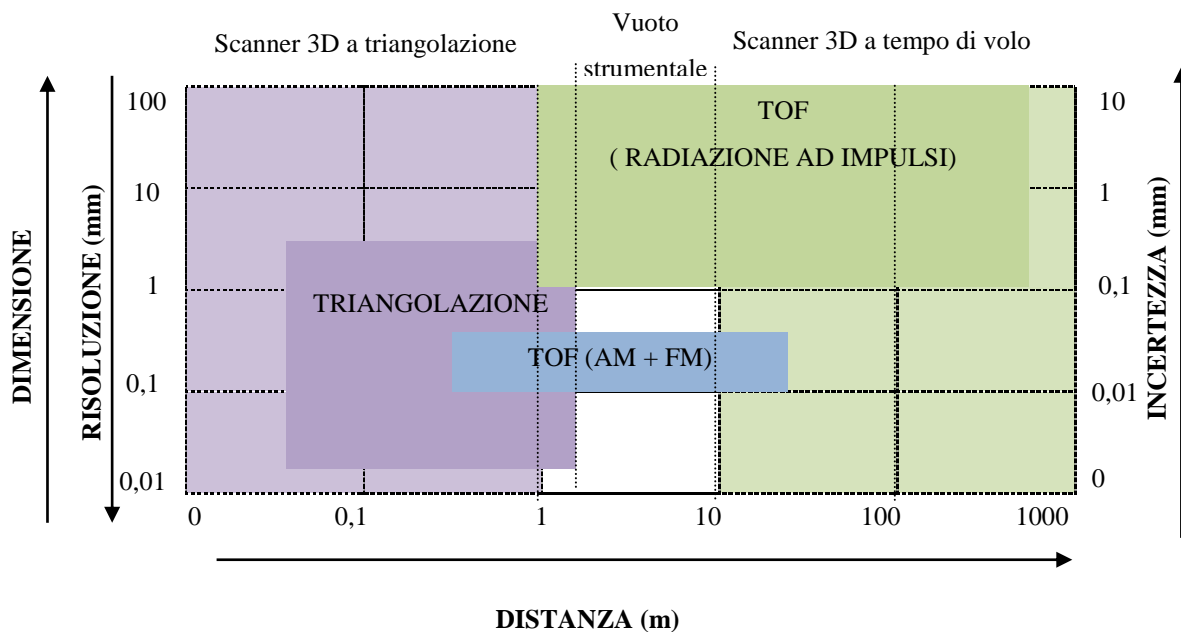


Figura 1.2. Grafico delle differenti caratteristiche dei due sistemi di acquisizione tridimensionale attiva e relativo campo di applicazione. Con risoluzione si intende la risoluzione laterale (xy) e con incertezza quella in z.

Da questa prima analisi discendono due considerazioni generali. La prima è relativa alla necessità di definire un metodo di rilievo che possa colmare quel vuoto strumentale che attualmente, a meno di qualche eccezione, non risulta coperto. La seconda riguarda l'evidente complementarità tra le caratteristiche dei due sistemi di acquisizione, il laser scanner a triangolazione e il laser a tempo di volo: da un lato il primo sistema ha la capacità di acquisire superfici 3D con una risoluzione, accuratezza e precisione molto elevata, ma viene limitato dalla piccola distanza di lavoro e dal ridotto campo di presa, dall'altro il secondo sistema permette di rilevare informazioni spaziali a grande distanza ma con una risoluzione, precisione e accuratezza non coerente con un rilievo di dettaglio.

La fusione di queste due tecnologie (Figura 1.3) permette non solo di coprire l'area di vuoto strumentale, ma anche di ampliare notevolmente il campo di applicazione di entrambi gli strumenti sfruttando i vantaggi dati dai diversi principi di funzionamento.

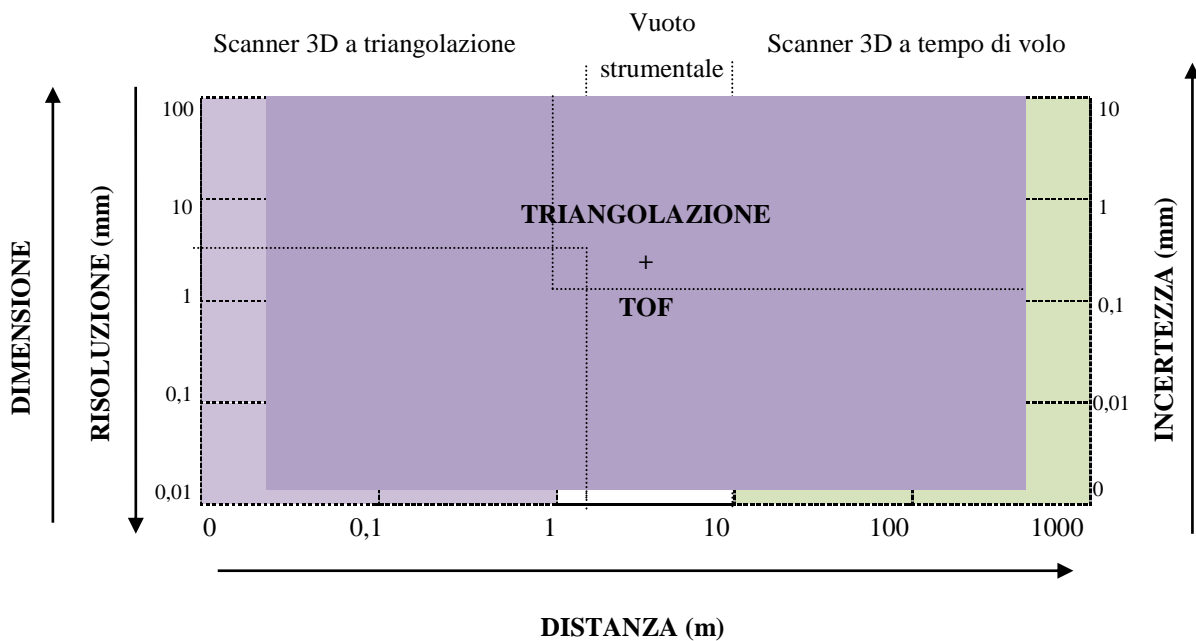


Figura 1.3. Grafico nel quale sono state unite le aree occupate dai due sistemi di acquisizione tridimensionale, evidenziando il miglioramento nella potenzialità del sistema integrato e del suo campo di applicazione.

Se a questa integrazione tra sistemi ottici aggiungiamo anche la tecnica fotogrammetrica, ampliamo ulteriormente il campo delle applicazioni nonché le modalità con cui possono venire impiegati i diversi strumenti.

Dalla descrizione delle due più importanti tecniche di rilievo 3D, quali i sensori ottici attivi e la tecnica fotogrammetrica, emerge un punto fondamentale: ogni singolo strumento o metodo di rilievo è definito da peculiarità che lo rendono unico sia nella modalità di acquisizione che nel tipo di dati rilevati (Tabella 1.2).

Questa forte caratterizzazione ne rappresenta da un lato il fattore distintivo, nel caso in cui l'applicazione ricalchi esattamente le prestazioni dello strumento. Nel contempo, però, ne limita fortemente l'uso esclusivo se le condizioni di rilievo risultano complesse e non esattamente coerenti con le potenzialità del singolo strumento (Beraldin et al. 2002).

Caratteristiche	Fotogrammetria (Image-Based Modeling)	Laser scanner (Range-Based Modeling)
Costo strumentazione (HW e SW)	Contenuto	Elevato
Maneggevolezza	Ottima	Sufficiente
Tempi per l'acquisizione dei dati	Minori	Maggiori
Tempi per la modellazione	Maggiori	Minori
Informazioni 3D	Da derivare	Dirette
Dipendenza dalla distanza	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalle dimensioni	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dal materiale	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalla luce ambientale	Dipendente	In parte/del tutto Indipendente
Dipendenza dalla geometria	Abbastanza dipendente	Indipendente
Dipendenza dalla texture	Dipendente	Indipendente
Scala/metricità	Assente/da fornire	Implicita (1:1 con dato reale)
Volume dei dati	Dipende dalla risoluzione delle immagini e dal tipo di misure	Nuvola di punti densa
Modellazione dei dettagli fini	Buona/ottima	Ottima
Texture	Inclusa	Assente/bassa risoluzione
Rilievo di spigoli	Ottimo	Abbastanza problematico
Analisi quantitative/statistiche	Per ogni punto calcolato	Globale
Software open-source	Molto pochi	Molto pochi

Tabella 1.2. Sintesi delle caratteristiche di funzionamento relative alla tecnica fotogrammetrica e al laser scanner 3D.

La diversa capacità di acquisire il dato tridimensionale e di estrarre dati 3D sotto forma di diverse rappresentazioni digitali dell'oggetto reale evidenzia una forte complementarità, più marcata tra alcuni particolari sistemi di acquisizione 3D, e la possibilità di sfruttare al meglio le potenzialità dei singoli strumenti. Accanto a questa evidenza ne viene posta un'altra: le condizioni di rilievo reali sono spesso molto complesse e richiedono un range prestazionale che i singoli strumenti difficilmente possono offrire da soli.

Si pensi ad esempio alla facciata di una Chiesa antica o ad un'ampia area archeologica che contiene diversi piccoli manufatti. In tutti questi casi l'integrazione fra i diversi sistemi di acquisizione tridimensionale permette di ottenere il miglior risultato possibile in termini di precisione del singolo dato, di accuratezza globale nonché di ottimizzazione dell'intero processo dal rilievo alla modellazione 3D.

Il tema dell'integrazione fra diversi sistemi di rilievo 3D rappresenta oggi, a distanza di più di dieci anni dalle prime sperimentazioni nell'ambito dei Beni Culturali, un argomento centrale di ricerca in diversi ambiti disciplinari, all'interno del quale si studiano nuovi metodi per risolvere i problemi di compatibilità tra le diverse tecnologie in maniera automatica o semiautomatica, esaltandone le potenzialità (Beraldin 2004).

L'approccio all'integrazione tra più sistemi di acquisizione coinvolge tre principali componenti: la *rappresentazione dell'informazione*, la *descrizione dell'incertezza* e l'*ottimizzazione del metodo*. Dal punto di vista operativo ciò si traduce nel fatto che esistono alcune principali finalità nell'applicazione integrata di due o più strumenti: aumentare le informazioni sull'oggetto e verificarne, o spesso migliorarne, il livello di accuratezza globale.

Nel primo caso il modello viene risolto attraverso una prima acquisizione spaziale che viene arricchita con aggiunte progressive che ne permettano una migliore leggibilità.

Il secondo, e più complesso aspetto, riguarda l'accuratezza complessiva del modello, tema molto delicato per chi si occupa di rilievo tridimensionale a fini di documentazione, restauro, replica e conservazione. La sua centralità dipende proprio dalla grande ed evidente differenza che passa tra la qualità e l'accuratezza del singolo dato rilevato rispetto all'accuratezza globale di un modello: mentre la prima è sostanzialmente legata al tipo di strumento e alla capacità del rilevatore, la seconda si ottiene solo al termine di un processo complesso nel quale intervengono molti fattori di criticità. In tal senso l'integrazione tra diversi strumenti può intervenire su due differenti livelli: da un lato verificare il livello di accuratezza del modello complessivo prodotto dalla fusione di più range map attraverso l'applicazione di strumenti che garantiscano un grado di accuratezza noto sulla misura globale; dall'altro migliorare l'accuratezza dell'intero modello evitando di incorrere in errori locali che si possono propagare sull'intera superficie del modello.

Sulla base di queste tre finalità, si può affermare che l'integrazione di dati tridimensionali provenienti da diversi strumenti si persegue acquisendo il maggior numero di informazioni compatibile con ogni metodologia impiegata, introducendo quindi una certa quota di ridondanza, ma minimizzando nel contempo l'impatto dell'incertezza di misura sia in fase di rilievo che in fase di creazione del modello digitale, e raccogliendo una quantità di dati geometrici adatta alla generazione di modelli a risoluzione variabile.

È evidente come il vantaggio nell'uso integrato degli strumenti risieda nella possibilità di sfruttare le potenzialità delle tecnologie impiegate per massimizzare il rendimento del sistema di rilievo, minimizzando i limiti dati dall'uso dei singoli strumenti. Si evidenzia

quindi come l'uso della tecnica fotogrammetrica si riveli vantaggiosa quando si ha una limitata possibilità di permanenza nel luogo del rilievo o se il manufatto è descrivibile in maniera esaustiva da soli punti e linee, mentre la grande mole di informazioni generata dallo scanner e il consistente tempo impiegato nella fase di acquisizione e, soprattutto, di post-elaborazione dei dati sono in parte compensati dalla completezza dei dati acquisiti e difficilmente ottenibili con la sola tecnica fotogrammetrica tradizionale (ad esempio il rilievo della deformazione di una facciata). Ma le differenze tra le tecniche di acquisizione non risiedono solamente nella qualità del prodotto finale, quanto anche nell'accuratezza del modello digitale e nel tempo impiegato nella fase di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Un altro tema riguarda la relazione esistente tra la dimensione del manufatto e i tempi di elaborazione dei dati acquisiti: mentre la durata di un'applicazione fotogrammetrica è legata alle dimensioni dell'oggetto in relazione al numero di foto da acquisire ed alle dimensioni (numero di pixel) delle immagini, il metodo che utilizza il laser scanner è estremamente legato alla dimensione del manufatto. Ad un aumento delle dimensioni corrisponde un aumento esponenziale del tempo di elaborazione dei dati. Il fattore dimensionale del manufatto condiziona quindi soprattutto le tecniche di rilievo attive ma, se oltre a questo si considera l'aspetto della caratterizzazione geometrica dell'oggetto, è interessante confrontare l'accuratezza prodotta dalle singole metodologie applicate a casi differenti per dimensione e caratterizzazione formale (Remondino, Guarnieri, Vettore 2005). Da questo confronto si evince ad esempio come la tecnica fotogrammetrica risulti alquanto accurata, soprattutto nel caso di manufatti di media e grande dimensione, ma l'uso del laser scanner porta solitamente ad un risultato più completo e aderente alla realtà riscontrabile nella definizione di piccoli oggetti.

In base a queste prime considerazioni di carattere generale appare evidente che le tecniche attive e passive non siano in competizione l'una con l'altra ma si completino, viste le diverse prestazioni di accuratezza e di controllo dell'acquisizione geometrica, particolarmente utili quando ci si deve confrontare con dinamiche dimensionali molto accentuate.

L'integrazione dei dati permette un altro approccio metodologico particolare che prevede l'uso di differenti strumenti di rilievo e restituisce dati metrici caratterizzati da

una risoluzione variabile, chiamato appunto “multirisoluzione”, in modo da ottenere un risultato metrico coerente con le diverse geometrie contenute nell’ambiente di rilievo.

La multirisoluzione è un metodo sempre più utilizzato sia nell’ambito del rilievo 3D che nel campo della visualizzazione, poiché permette di definire strutture gerarchiche di dati che possono essere alla base di differenti database informativi. Gli esempi più conosciuti in tal senso sono Google Earth e Microsoft Virtual Earth, ambienti virtuali nei quali è possibile passare da una risoluzione geometrica e di texture di centinaia di metri fino a pochi decimetri (solo per le texture). L’utente può navigare in una visualizzazione a bassa risoluzione e passare, quando è necessario, a immagini dettagliate ad alta risoluzione, spesso collegate a ulteriori informazioni 2D e 3D (testi, immagini, modelli di città, etc.).

1.1.3 Finalità dell’integrazione

Gli argomenti inerenti all’integrazione di dati sono, da anni, oggetto di studio approfondito da parte di alcuni gruppi di ricerca della comunità scientifica (Beraldin 2004).

Le tecniche di *sensor fusion*, basate sostanzialmente sull’unione di dati provenienti da differenti strumenti di rilievo, sono orientate al miglioramento del prodotto finale grazie all’impiego dei singoli strumenti in funzione della finalità del modello.

Per iniziare a valutare in maniera critica i vantaggi applicativi nell’integrazione fra sensori si può partire da un’interpretazione proposta da Lang Hong (1999), secondo cui: *“the benefit in which multisensor/information fusion are used can be grouped in two major categories: information augmentation and uncertain management.”*.

Con la prima categoria si intendono le situazioni in cui ogni singolo sensore provvede a fornire un solo tipo di informazioni, per cui l’integrazione fra più sensori aumenta la conoscenza dell’oggetto. La seconda, invece, è legata alla verifica di qualità del dato acquisito e al suo eventuale miglioramento grazie al rilevamento dello stesso da parte di sensori con caratteristiche diverse in termini di precisione e accuratezza.

L’approccio all’integrazione tra più sistemi di acquisizione coinvolge tre principali componenti:

- la rappresentazione dell'informazione, ovvero la ricerca del migliore formato e livello di dettaglio per la rappresentazione dell'oggetto;
- la descrizione dell'incertezza;
- l'ottimizzazione del metodo.

Rispetto all'interpretazione data da Hong si è deciso di differenziare ulteriormente la voce legata alla gestione dell'*incertezza*, evidenziandone due differenti finalità.

Quindi, dal punto di vista operativo, possono essere elencate tre principali finalità nell'applicazione integrata di due o più strumenti:

- aumentare le informazioni sull'oggetto, per cui il modello viene risolto attraverso una prima acquisizione spaziale che viene arricchita nel tempo con aggiunte progressive che ne permettano una migliore leggibilità;
- verificare il livello di accuratezza del modello complessivo prodotto dalla fusione di più range map attraverso l'applicazione di strumenti che garantiscano un grado di accuratezza noto sulla misura globale. Tale controllo è indispensabile nel caso siano coinvolti processi automatici di allineamento non vincolati, e rappresenta un momento di verifica che consente di valutare eventuali situazioni di errore nel processo di modellazione;
- migliorare l'accuratezza dell'intero modello evitando di incorrere in errori locali che si possono propagare sull'intera superficie del modello, introducendo vincoli geometrici in fase di modellazione che impediscano la fluttuazione della dimensione del modello finale rispetto all'originale fisico, oltre limiti noti.

Sulla base di queste tre finalità, si può affermare che l'integrazione di dati tridimensionali provenienti da diversi strumenti si persegue acquisendo il maggior numero di informazioni compatibile con ogni metodologia impiegata, introducendo quindi una certa quota di ridondanza ma minimizzando, nel contempo, l'impatto dell'incertezza di misura sia in fase di rilievo che in fase di creazione del modello digitale, e raccogliendo una quantità di dati geometrici adatta alla generazione di modelli a risoluzione variabile.

Dagli inizi degli anni '90 ad oggi, l'uso integrato di sistemi quali la fotogrammetria e lo scanner laser ha visto un progressivo aumento in molte applicazioni (Beraldin 2004) quali:

- rilievo e documentazione dello stato di fatto di strutture in mare aperto (piattaforme) per estrazione di petrolio o gas;
- studio nel processo di crescita della vegetazione;
- rilievo delle centrali nucleari;
- strutture architettoniche e siti archeologici;
- oggetti di design, con particolare attenzione alle automotive;
- esplorazione spaziale;
- Beni Culturali.

In relazione all'ampio spettro di applicazioni elencate, il concetto di complessità del rilievo è legato in particolar modo al settore architettonico e archeologico; proprio per questo, negli anni, l'attenzione si è rivolta alla necessità di applicare differenti approcci metodologici ad un problema complesso che difficilmente può essere risolto attraverso un unico processo interamente automatizzato guidato da una singola applicazione (El-Hakim 2001; El-Hakim et al. 2002).

1.1.3.1 Integrazione per l'aumento delle informazioni

I primi casi di integrazione fra diverse sorgenti informative sono emersi in ambiti come quello militare e nella robotica, finalizzati nel caso specifico all'analisi delle aree di guerra ed al riconoscimento automatico di target da parte delle armi intelligenti. Da queste discendono le applicazioni nel campo medico, nella robotica, nel monitoraggio dell'ambiente fino al campo dei Beni Culturali (Hall, Llinas 1997).

Nel campo della robotica, ad esempio, già nel 1999 avviene la creazione di un primo prototipo in grado di rilevare ambienti complessi integrando informazioni geometriche acquisite con uno scanner 3D e con la texture acquisita da una fotocamera. Questo sistema, conosciuto come *AEST/EST* (Autnomous/Environmental Sensor for Telepresence), si proponeva come soluzione al problema dell'acquisizione di ambienti caratterizzati da molte zone d'ombra, potendo gestire automaticamente alcuni processi quali la triangolarizzazione, l'integrazione fra dati geometrici e immagini 2D, la registrazione e la fusione delle diverse scansioni (Sequeira et al. 1999).

In ambito spaziale alcune importanti applicazioni hanno riguardato l'uso di sensori multipli applicati per ottenere la generazione di superfici a risoluzione adattiva.

L'utilizzo di scanner di grande precisione (Lidar) ha permesso di generare modelli digitali di grande precisione degli interni delle navicelle spaziali per poter completare alcune simulazioni, quali ad esempio ottimizzare la strumentazione di bordo (Johnson et al. 2002).

Le conoscenze sviluppate in questi ambiti si sono propagate in diversi settori di ricerca, divenendo terreno comune di studio. Una delle applicazioni più ricorrenti ha riguardato la costruzione di modelli fotorealistici, ovvero modelli digitali che integrano le informazioni geometriche ottenute da uno strumento per acquisizione tridimensionale, con texture ottenute da una fotocamera. In particolare, la sperimentazione si è rivolta alla ricerca di metodi per la generazione di immagini fotometriche che rappresentano il vero colore dell'oggetto da riprendere o BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) e per la proiezione e calibrazione automatica sul modello tridimensionale di immagini, grazie alla simultanea conoscenza dei punti sul piano immagine e dei corrispondenti punti nello spazio.

Questo genere di processi sono stati affrontati, per esempio, in uno dei primi pionieristici progetti di acquisizione 3D di una scultura, il rilievo della Pietà di Michelangelo conservata al Museo dell'Opera del Duomo di Firenze, ad opera dell'IBM Watson Research Center. Il lavoro, svolto tra il 1998 e il 1999 e distintosi per la complessità geometrica e materica del manufatto e per le grandi dimensioni, ha fatto uso di questo approccio integrato per catturare contestualmente alla geometria, tutti quei dati fotometrici necessari al rendering realistico del monumento (Bernardini et al. 2001).

L'uso delle immagini 2D integrate alla scansione può avere poi la duplice finalità di completare le informazioni carenti nella nuvola di punti e guidare la fase di acquisizione, evidenziando nelle immagini le parti che risultano più utili per la costruzione del modello tridimensionale. Se a questo si aggiunge la creazione di una libreria di elementi architettonici e la possibilità di inserirli facilmente nel modello attraverso l'analisi delle immagini e la verifica rispetto alla nuvola di punti, ne esce fuori in modello speditivo di modellazione architettonica (Dekeyser et al. 2003).

Accanto all'implementazione di nuovi metodi per l'integrazione fra dati eterogenei, esistono una serie di casi studio in ambito architettonico che descrivono nel dettaglio

tali applicazioni, evidenziando le potenzialità dell'integrazione come aumento dell'informazione geometrica.

Un caso emblematico in tal senso è il lavoro di rilievo di un mosaico romano collocato nei resti di una villa romana nell'ipogeo del Battistero di San Giovanni a Firenze. In tal caso un set di scansioni 3D ad alta risoluzione ottenute da una range camera a proiezione di pattern sono state posizionate in un riferimento geometrico assoluto, definito tramite un processo fotogrammetrico. L'insieme delle immagini 3D orientate è stato quindi allineato con una ripresa dell'intero ambiente ottenuta con uno scanner TOF per dare origine ad un modello a risoluzione variabile dell'intera zona (Guidi et al. 2002).

Analogo approccio è stato successivamente seguito nel rilievo dell'Abbazia di Pomposa (FE), nella quale coesistono una commistione di forme geometricamente semplici ed elementi decorativi complessi. Il rilievo di inquadramento del complesso è definito dall'applicazione mista di una tecnica fotogrammetrica terrestre e aerea, mentre i dettagli (rosoni, fregi, ecc.) sono rilevati attraverso uno scanner a triangolazione e inseriti all'interno delle facciate meno dettagliate, in modo da completare le informazioni riguardanti gli edifici (El-Hakim et al. 2003).

Da questo esempio è evidente come le due differenti tecniche di rilievo utilizzate forniscano dati complementari e utili per arricchire il sistema informativo dato dal modello digitale rilevato. In alcuni casi la complessità del manufatto può richiedere l'integrazione di un numero maggiore di strumenti e dati digitali, fondendo assieme informazioni di tipo vettoriale, immagini prese a differenti distanze e dati tridimensionali da range camera. E' il caso, ad esempio, del Castello di Stenico (TR), dove vengono integrate le informazioni derivanti dalla rete topografica di appoggio, dalle immagini acquisite con tecnica fotogrammetrica, i dati vettoriali esistenti e in previsione i dati 3D di dettaglio provenienti da range camera (El-Hakim et al. 2005).

Esistono poi molti esempi che hanno fatto uso di tecniche integrate per la definizione di un sistema di riferimento nel quale inserire i diversi modelli rilevati grazie alla conoscenza di un sistema di punti di riferimento comuni. In alcuni esempi in particolare, l'eterogeneità dei dati viene utilizzata per completare le parti mancanti che una o l'altra tecnica di rilievo non sono state in grado di acquisire correttamente, ottenendo al

termine del processo un modello digitale che conserva tutte le caratteristiche geometriche e di texture necessarie (Lingua, Rinaudo 2001; Kadobayashi 2004; Balzani et al. 2005; Guarnieri et al. 2006).

Accanto alle applicazioni di tipo architettonico e scultoreo ve ne sono alcune ibride, che pongono il problema dell'estesa dinamica di scala e del rilievo di precisione di grandi superfici. Un esempio emblematico è fornito dal rilievo del Plastico di Roma Antica conservato presso il Museo di Storia Romana a Roma (Guidi et al. 2005). In questo caso la complessità del modello fisico in scala, unita ai vincoli logistici imposti dal museo, hanno portato all'integrazione fra uno strumento molto sofisticato come il laser radar CW con uno scanner a triangolazione per completare le lacune generate dalla particolare forma geometrica del plastico e le condizioni obbligate del rilievo.

In campo archeologico, è particolarmente sentita questa variazione di scala, visto il passaggio da ampie aree di scavo o architetture (cripte, templi) ad elementi di dettaglio quali statue, mosaici ecc. In questi casi la risposta di rilievo ottimale è offerta dall'applicazione del sensor fusion, soprattutto per manufatti grandi ed ambienti complessi, finalizzato alla costruzione di modelli per applicazioni di tipo didattico o per analisi storico-scientifiche. Una soluzione a questa esigenza può essere fornita dall'integrazione fra range map, immagini 2D e tecniche per la generazione di immagini che prevedano la mappatura del modello 3D, l'uso integrato di immagini 2D e dei modelli di riflettenza; in questo modo è possibile arrivare ad una simulazione realistica del modello virtuale (Beraldin et al. 2002; Beraldin et al. 2005).

Sempre in questo ambito vengono proposti alcuni metodi di multi-risoluzione per ottenere diversi livelli di informazione, coerenti con la complessità multi-livello data dall'area archeologica e dai particolari elementi di pregio contenuti in essa. I metodi proposti sono finalizzati alla definizione della relazione esistente tra la densità di informazioni rilevate e l'importanza dell'area o la complessità geometrica, potendo avere nel contempo anche una verifica continua sull'accuratezza globale del rilievo.

In alcuni casi il livello di complessità è tale che bisogna ricorrere a molti sistemi di acquisizione tridimensionale per introdurre una ridondanza di informazione, cercando di proporre per ogni tipologia di manufatto la migliore forma di rappresentazione geometrica possibile in funzione della complessità geometrica e della finalità del

modello. In tal senso, un caso di riferimento è fornito dal rilievo e la modellazione tridimensionale del Foro di Pompei (Guidi et al. 2009).

In alcuni casi questa variazione di scala descritta è presente negli alzati architettonici, dove ad esempio l'analisi del quadro fessurativo deve venire integrato con il rilievo delle caratteristiche geometriche della facciata. In questi casi l'uso integrato di uno strumento di acquisizione 3D e di immagini 2D può risultare vincente; dal primo si può ottenere il modello di base sul quale, attraverso un sistema di estrazione automatica dei bordi e correlazione con le immagini, è possibile riportare tutte le informazioni 2D e 3D in un unico sistema di riferimento, sfruttando la maggiore capacità risolutiva delle immagini e la possibilità di individuare informazioni sulla texture del manufatto e i quadri fessurativi che la caratterizzano (Alshawabkeh, Haala 2004).

Queste informazioni sono ovviamente fondamentali per fare una valutazione sul comportamento strutturale dei vari elementi e sulla loro capacità resistiva.

L'esigenza di caratterizzare lo stato conservativo dei resti murari degli edifici rilevati oltre il loro aspetto visibile, ha indirizzato la ricerca verso l'integrazione delle informazioni ottenute con le indagini non distruttive con gli elaborati della rappresentazione geometrica.

La principale applicazione termografica in architettura (Seracini 1981; Rosina et al. 2004) è finalizzata all'individuazione di elementi morfologici dell'organismo edilizio non riscontrabili attraverso una semplice ispezione visiva. Sfruttando la risposta termica differente dei diversi materiali da costruzione, è possibile riconoscere la presenza e la tipologia di elementi funzionali non noti, celati alla vista da intonaci o parametri sovrastanti operando a distanza in maniera non distruttiva. Inoltre, l'indagine termografica è fondamentale per la caratterizzazione delle tipologie di degrado presenti.

1.1.3.2 Integrazione per la verifica del modello

In questo caso, l'integrazione viene finalizzata al controllo e al miglioramento dei parametri di acquisizione complessivi del modello e, anche per quest'applicazione, le prime sperimentazioni hanno riguardato le ricerche in campo spaziale e nella robotica.

Nel campo della robotica, già nel 1977 è stato messo a punto da parte dell'ente di ricerca NRCC-VIT una metodologia per verificare l'accuratezza dello strumento

prototipo *LRC* (Laser Range Camera). Questa analisi è avvenuta posizionando su un *ODS* (Orbiter Docking System) presente al centro spaziale Kennedy una serie di target, rilevati inizialmente con un sistema fotogrammetrico di alta precisione e poi con la range camera, in modo da verificare gli scarti esistenti tra la posizione spaziale dei target individuati dai due differenti strumenti di acquisizione ed individuare l'accuratezza del prototipo (Beraldin et al. 1997).

Un secondo sistema chiamato *DCR* (Data Collection and Registration) è stato invece progettato per integrare un sensore 3D con un sistema di sensori bidimensionali, applicati per il texture mapping. La conoscenza della posizione reciproca dei sensori pre-calibrati permette di registrare le informazioni catturate in un unico sistema di riferimento. Grazie ad un processo di bundle adjustment, le immagini acquisite nei diversi punti in cui si sposta il sistema DCR vengono registrate, mentre la conoscenza della posizione spaziale di una serie di target presenti nell'ambiente permette una verifica a posteriori della qualità della registrazione. Infine, le range map vengono registrate assieme sulla base del risultato ottenuto, costruendo un modello integrato al quale viene aggiunta l'informazione RGB per ottenere un effetto realistico dell'ambiente rilevato (El-Hakim et al. 1998).

Vista la finalità di ottenere sistemi che possano garantire una validità del rilievo globale rispettando la qualità del singolo dettaglio, è inevitabile che tali sperimentazioni avvengano soprattutto nell'ambito dei Beni Culturali, dove è evidente questa variabilità di scala dal dettaglio al modello complessivo.

Nel caso, ad esempio, dell'acquisizione tridimensionale degli apparati scultorei e dei possibili errori che si possono verificare in fase di allineamento generata dalle forme geometriche complesse, è indispensabile prevedere un sistema di verifica degli errori globali. Nel caso della Maddalena di Donatello si evidenzia come il materiale otticamente poco cooperante (legno scuro) e la forma della superficie molto caratterizzata, unita alle notevoli dimensioni della statua, abbiano portato alla necessità di acquisire più di 300 scansioni per ricoprire l'intera superficie; in questo caso una verifica fotogrammetrica sull'intera scultura è risultata fondamentale per stabilire l'errore tra il modello fisico e il modello digitale, ottenuto alla fine di una prima fase di allineamento non vincolato (Guidi et al. 2001a).

In generale proprio nel rilievo tridimensionale delle statue sono particolarmente evidenti i vantaggi nell'applicazione dei sensori attivi, capaci di rilevare velocemente ed in maniera automatica le superfici free-form rispetto ai sistemi fotogrammetrici.

Ma se l'uso della fotogrammetria avviene su piccole porzioni del modello, la possibilità di estrarre sezioni di riferimento per il modello tridimensionale costruito con lo scanner aiuta nella correzione degli eventuali errori commessi nella restituzione da immagine (Ioannidis, Tsakiri 2003; Hans de Roos 2004).

In ambito architettonico, uno dei primi esempi relativi a questo filone di ricerca riguarda il confronto fra due modelli tridimensionali ottenuti della facciata di un edificio dell'Università di Karlsruhe. Il primo modello è generato attraverso le immagini mentre, il secondo, tramite applicazione dello scanner a tempo di volo. Dal confronto sulla posizione spaziale di 60 punti caratteristici viene evidenziata la maggiore accuratezza complessiva ottenuta dal sistema fotogrammetrico, mentre dalla fusione dei due modelli viene generata una ortofoto della facciata (Demir et al. 1999).

Un altro esempio che sfrutta l'integrazione per la correzione di immagini è rappresentato dal rilievo della Chiesa dell'isola di Tilo, dove vengono confrontate due ortofoto ottenute da due differenti processi di elaborazione: il primo si basa sull'uso di un sistema software automatizzato, mentre il secondo si poggia sui punti della scansione prodotta con il laser scanner. Da tale confronto si evidenzia come i risultati ottenuti dall'uso di strumenti appositamente dedicati sono paragonabili a quelli ottenuti dall'integrazione, con la differenza che nel primo caso il DTM che si ottiene è meno preciso e di peggiore qualità rispetto a quello ottenuto attraverso il laser scanner (Georgopoulos et al. 2004).

Infine nel rilievo del pavimento mosaicato all'interno della Basilica di S.Marco a Venezia, viene proposto un sistema integrato per l'acquisizione e la creazione di una banca dati GIS del manufatto. Il modello 3D viene ricostruito attraverso la correlazione di più di 2000 immagini e la costruzione di un'ortofoto dalla quale è possibile estrarre particolari di dettaglio e DTM. A questo rilievo principale viene affiancata un'acquisizione di sezioni altimetriche con teodoliti ed un'acquisizione 3D con laser scanner a tempo di volo. I risultati ottenuti da questi ultimi due strumenti vengono usati come metodo di verifica del rilievo fotogrammetrico (Brumana et al. 2005).

Nell'uso integrato di sistemi ottici attivi e passivi, un particolare esempio è fornito dal sistema *IBIM*, definito dall'integrazione di un distanziometro laser ed una fotocamera con l'asse del laser coincidente con quello della fotocamera. La peculiarità di questo sistema consiste nel poter calcolare i parametri interni ed esterni della fotocamera senza ricorrere alla conoscenza della scala dell'oggetto rilevato o alla misura di punti di riferimento sulla scena. Una volta calibrata la fotocamera, è possibile utilizzarla per l'acquisizione dei punti 3D dell'oggetto (Ohdake, Chikatsu 2005).

1.1.3.3 Integrazione per il miglioramento dell'accuratezza

Ma l'integrazione è presente anche, in applicazioni fra strumenti ottici attivi e passivi, per migliorare l'accuratezza del modello complessivo ed evitare il verificarsi di errori di orientamento e posizionamento spaziale.

Anche in questo campo le prime sperimentazioni avvengono nel settore militare e spaziale. Ci sono esempi di sistemi per il posizionamento di un aereo in movimento, osservato contemporaneamente da un sistema radar impulsivo in grado di misurare la distanza dal target ma non gli angoli di puntamento, integrato da un sensore a infrarossi in grado di fornire il dato angolare mancante. Unito alla lettura radar, questo permette di completare la lettura radar e determinare la posizione nello spazio del velivolo (Hall e Llinas 1990). Un altro esempio riguarda lo strumento *SVS* (Space Vision System) utilizzato a bordo degli space shuttle per calcolare la posizione degli oggetti sulla navetta a partire dalla conoscenza di punti noti (target). Nel 1999 l'ente nazionale per la ricerca canadese (NRCC-VIT) ha messo a punto uno strumento a triangolazione che si può interfacciare al sistema *SVS* per migliorare la qualità dell'acquisizione. A seguito di tale sperimentazione è stato costruito un prototipo utilizzabile nello spazio, che combina un sistema a triangolazione, uno a tempo di volo e un sistema fotogrammetrico, mettendo assieme uno strumento che sfrutta immagini 2D ad alta risoluzione e immagini 3D per acquisire con precisione punti fino ad una distanza di 20 metri (Blais et al. 2000).

Per limitare l'errore dovuto allo "scivolamento" relativo tra range map in fase di allineamento con ICP, nel 2003 viene sviluppato un sistema basato sulla fotogrammetria e su speciali bersagli in grado di essere individuati con grande accuratezza sia dai

sistemi di scansione che da quelli fotogrammetrici, grazie al quale alcune prese chiave possono essere bloccate nello spazio e le rimanenti allineate con tale vincolo, imposto da un metodo di misura come la fotogrammetria dotato di accuratezza elevata (Guidi et al. 2003).

Altro esempio orientato all'ambito aeronautico è fornito dal sistema commerciale dell'azienda GOM, che prevede l'uso di un sistema di fotogrammetria e uno strumento a proiezione di frange al fine di aumentare l'accuratezza del sistema di acquisizione tridimensionale e generare modelli molto accurati (Colet 2003). Nell'acquisizione di dati da aereo, già nel 1999 viene proposto un confronto tra l'acquisizione e l'elaborazione di dati tridimensionali da parte di sensori ottici attivi, come il laser scanner d'aereo *ALS* (airborne laser scanning) e la fotogrammetria da aereo, evidenziando la complementarità delle due differenti tecniche per la generazione del *DTM* (Digital Terrain Model) e *DSM* (Digital Surface Model) (Baltsavias 1999).

Infine, in ambito industriale, va citato il metodo di fusione di (Wendt et al. 2002), in cui si opera la correzione di dati non omogenei con la finalità di aumentare l'accuratezza delle superfici ricostruite, definendo un approccio che porti all'elaborazione di dati provenienti da differenti strumenti e all'assegnazione di un diverso peso in funzione del sensore utilizzato, con un affinamento di dati non omogenei in modo da facilitare l'integrazione fra i sistemi.

Nel campo dei Beni Culturali la tecnica *general purpose* (Guidi et al. 2003) è stata sfruttata a supporto dell'acquisizione tridimensionale con range camera a luce strutturata della statua della Maddalena di Donatello. La tecnica adottata ha come finalità quella di sfruttare la maggiore accuratezza globale offerta dalla fotogrammetria unitamente all'elevata precisione locale sulle singole range map fornite dalla range camera. Grazie all'uso integrato delle due tecniche e di una serie di target posizionati sulla scena, alcune range map vengono posizionate e bloccate nello spazio, minimizzando la propagazione degli errori di allineamento e diminuendo l'errore finale di un ordine di grandezza (Guidi et al. 2004).

Nel campo dell'Industrial Design uno dei pochi esempi di utilizzo di tecniche integrate per la correzione e l'aumento dell'accuratezza complessiva è dato dal rilievo dello stampo di un gommone nel quale viene applicata una variazione adattata della

metodologia applicata sulla Maddalena di Donatello; la differenza consiste nel poter confrontare i risultati prodotti con un rilievo di riferimento (gold standard) offerto dall'applicazione del laser radar CW (Guidi et al. 2005).

Sia in questo caso che in quello della Maddalena, è importante sottolineare come l'integrazione di uno strumento a basso costo, come una fotocamera digitale, permetta di incrementare notevolmente le prestazioni del sistema a triangolazione fino ad essere paragonabili con quelle di uno strumento più costoso come il laser radar CW.

In campo archeologico sono da annoverare alcuni esempi interessanti. Il primo è offerto dal sistema *Thealasermetry* composto dall'integrazione di un teodolite, un sistema fotogrammetrico ed una range camera. L'applicazione di questo sistema è incentrato sull'uso di particolari target sferici riconoscibili dai tre sistemi che permettono di integrare i sistemi di acquisizione e minimizzare la propagazione dell'errore, garantendo un'accuratezza del modello complessivo a diversi livelli di scala. Il modello che si ottiene da questa metodologia condensa non soltanto i dati geometrici, ma anche la texture e gli spigoli estratti dalle immagini ed inseriti nel modello tridimensionale, fornendo un ulteriore strumento di correzione degli errori nella geometria rilevata dallo scanner (Borg, Cannataci 2002).

Un esempio analogo, che sfrutta l'integrazione fra tecniche topografiche e scanner tridimensionale, è quello proposto dal rilievo di una porzione delle mura della Montagnana (PD) in cui l'uso integrato di stazione totale e GPS permette la definizione di una rete di inquadramento molto precisa e verificabile, all'interno della quale vengono rilevati i target posizionati su entrambi i lati delle mura (Guarnieri et al. 2005). Per inciso, è importante sottolineare come all'interno di questo filone rientri anche l'integrazione tra modelli 3D ed immagini raddrizzate per la definizione delle ortofoto. Nonostante in questo caso l'integrazione sia indispensabile e l'ortofoto rappresenti a tutti gli effetti il prodotto di un'integrazione, solo in pochi esempi si fa uso di laser scanner all'interno di questo processo (Georgopoulos et al. 2004).

1.2 Lavori scientifici più recenti nell'ambito della rappresentazione su larga scala

Nella trattazione fatta sui limiti delle singole tecniche di rilievo e le potenzialità dell'integrazione di dati 3D provenienti da sensori diversi si è cercato di dare, attraverso vari casi studio, una panoramica a partire dalle prime applicazioni presenti in letteratura passando per gli apporti scientifici relativi all'inizio di questa attività di ricerca fino ad arrivare allo stato attuale dei lavori riportati.

In un lavoro di (D'Annibale 2011), è stata mostrata una ricerca che unisce la fotogrammetria sferica ad algoritmi di image-based modeling sviluppati all'interno del proprio laboratorio: si tratta di risultati incoraggianti, per lo meno nel case study sul Colosseo presentato, che mostrano come a partire dalla fotogrammetria sferica sia possibile ottenere immagini a prospettiva piana che hanno una migliore risoluzione per il metodo SfM, da cui si ottengono modelli 3D più precisi (misurazioni fatte con il laser scanner in altri contesti hanno consentito di verificare una buona valenza metrica per le mesh generate con questa tecnica), utilizzabili per la navigazione interattiva.

In (Carrozzino 2012) viene presentato un bell'esperimento dedicato alle piazze, dal motto "Be there - Be square": qui l'oggetto della ricostruzione 3D non è più il singolo edificio, ma lo spazio della piazza, con le facciate degli edifici e la disposizione delle varie strutture; l'obiettivo è stato quello di creare mondi navigabili in real-time dove l'utente, cliccando sui vari edifici, può accedere a livello informativi sullo stesso, in una sorta di information retrieving basato sulle queries di entità presenti nella scena.

Interessante il caso di studio di (Arrighetti, Casalini 2012) dove viene presentata un'analisi della stratigrafia architettonica attraverso lo studio di una fotorestituzione fotogrammetrica di una struttura a S. Gimignano: la nuvola di punti ottenuta con foto complanari alla superficie consente una migliore lettura della stratigrafia verticale da cui, con un attento studio, è possibile risalire potenzialmente a committenze e maestranze, mentre l'aspetto visuale ottenuto in 123D Catch è utile per comunicare il monumento a diversi target di pubblico senza sostanziale perdita di dati.

Il lavoro di (Abbott 2012) tratta delle interfacce collaborative a grande scala. Il caso studio riguarda la ricostruzione dell'environment della British Empire Exhibition del 1938 di Glasgow, i cui edifici sono stati nel tempo per lo più abbattuti, a favore del ritorno di prati e boschi: la documentazione per la ricostruzione delle architetture ha

richiesto una ricerca disseminata su migliaia di risorse e si è dovuta scontrare anche con l'evidenza che, in alcuni casi, la realizzazione finale differiva dal progetto iniziale. Agli oggetti sono state aggiunte notazioni semantiche in linea con gli standard CIDOC-CRM, in modo da aumentarne la comprensione. L'obiettivo è stato creare un ambiente di navigazione real-time della ricostruzione, per il quale si sono rese necessarie operazioni di ottimizzazione nel corso della modellazione e del texturing. Il sistema è stato disegnato su due target differenti: lo stereo lab 13x8 m del Digital Design Studio (Glasgow School of Art) per le grandi scene virtuali ed una versione dedicata ai pc desktop, tablet e laptop. E' stato così messo a punto un framework per l'annotazione semantica di ambienti virtuali, con un'interfaccia collaborativa compatibile con tutti i maggiori tipi di device ed utilizzabile per progetti culturali e di ricerca legata all'architettura.

Un team greco ha lavorato sulla ricostruzione 3D virtuale della Stoà di mezzo nell'Agorà di Atene (Kontogianni, Georgopoulos, Saraga, Alexandraki, Tsogka 2013), un edificio non più esistente, utilizzando dati provenienti da sorgenti e periodi diversi ed integrando la ricostruzione virtuale di pezzi rinvenuti e custoditi nei musei.

Interessante anche il progetto vietnamita al quale ha partecipato il Politecnico di Milano, sotto la guida di Gabriele Guidi, (Guidi, Russo, Angheluddu 2013) che ha mostrato un sapiente uso integrato di varie tecnologie: laser scanner TOF, modellazione tridimensionale, software come Autodesk 123DCatch e Photoshop, al fine di consentire una puntuale ricostruzione dell'antico edificio greco.

In oriente, nel lavoro di (Koska, Křemen 2013), si vede come laser scanner e Structure from Motion, unitamente alla modellazione di strutture scomparse (con Luxury MODO) in accordo con la documentazione storica a disposizione, hanno permesso di indagare le possibilità volumetriche degli edifici e proporre una ricostruzione architettonica, quanto più fedele possibile, all'indagine archeologica.

Dalla Spagna (De Matias, Berenguer, Cortés, De Sanjosé, Atkinson 2013) merita interesse un progetto sul ponte di Alcántara e la cattedrale di Coria in cui, a partire dalle geometrie ottenute da stazione totale (Faro LS840) e laser scanner (Leica C10), è stato possibile modellare in 3D superfici complesse in grado di restituire sezioni paragonabili

con i dati provenienti da rilievi storici, dai quali si sono ottenute informazioni come la tenuta statica e gli spostamenti nel tempo delle architetture.

Dall'Italia (Canciani, Falcolini, Saccone, Spadafora 2013) viene mostrato un algoritmo utile alla ricostruzione di forme a partire da nuvole di punti ottenute da laser scanner: nel caso della Chiesa di San Carlo alle Quattro Fontane, uno dei capolavori dell'architettura barocca firmato dal Borromini, è stato possibile paragonare, attraverso la tecnica del poligrafo, i disegni dell'architetto con l'effettiva realizzazione. Uno studio che consente di approfondire le conoscenze architettoniche oltre il semplice spoglio della documentazione storica.

Dal RomeLab dell'UCLA (Saldana, Johanson 2013) emerge un bel progetto su come, l'integrazione di dati geofisici all'interno di software procedurale possibile con l'accoppiata ArcGIS+City Engine di ESRI, offre la possibilità di generare ambienti virtuali navigabili all'interno di un game engine come Unity, così da replicare virtualmente la visione diacronica dell'evoluzione spaziale in antico a Magnesia sul Meandro.

In relazione alla modellazione parametrica, permanendo la difficoltà di sintetizzare l'architettura antica all'interno di formule matematiche, sono allo studio librerie in grado di facilitare l'inserimento in scena di oggetti complessi e non lineari, soprattutto nell'ottica dell'integrazione con processi di Building Information Modeling (BIM), nell'ottica della segmentazione semantica (Autodesk Revit) o ancora nel caso di applicazioni GIS (Hichri, Stefani, De Luca, Veron 2013).

Nel lavoro di (Garagnani, Manferdini 2013) viene presentato un prototipo (*GreenSpider*) che consentirà in futuro di gestire nuvole di punti all'interno di questi software nell'ottica di ricostruire dati spaziali utili alle strategie di documentazione del bene culturale.

Interessante il plugin *HBIM Façade*, utile per generare velocemente facciate di edifici aderenti al reale, magari per collegare informazioni storiche alla geometria (Previtali, Barazzetti, Brumana, Cuca, Oreni, Roncoroni, Scaioni 2013). D'altronde la necessità di avere modelli tridimensionali degli edifici storici si fa sempre più pressante proprio nell'ottica della loro manutenzione e amministrazione, e la necessità di poter consultare un dato preciso e aggiornato è di fondamentale importanza.

Così anche il progetto *3D-Antlers* portato avanti con hardware low-cost come il David Laser Scanner o l'Artec MH, per poter costruire un catalogo delle corna di cervo (Barba, Fiorillo, De Feo 2013).

Da notare anche un workflow pratico sul come giungere dal modello 3D, ottenuto da fotogrammetria e point cloud, al modello trattato per game engine attraverso processi di triangolazione della mesh, quad-poly, low-poly e tecniche di backing (Merlo, Sánchez Belenguer, Vendrell Vidal, Fanini, Aliperta 2013); l'utilizzo dei Level of Details (LoD), oggi reso semplice dagli Shader Model in versione 5.0, è attualmente il sistema migliore per bilanciare visualizzazioni realistiche e performance.

Molto interessante la possibilità di sfruttare tecniche di Shape from Shading (SfS) nell'analisi topografica, anche con la creazione di immagini RTi, ovvero Reflectance Transformation image (García Fernández 2013).

Dalla Francia, in particolare dal laboratorio guidato da Livio De Luca, (Manuel, Stefani, De Luca, Veron 2013) viene fatto conoscere un altro tool della loro suite dedicato all'annotazione semantica: il sistema si avvale di APERO per la triangolazione delle immagini, MicMac per la misura delle superfici, ed infine viene generata la cloud point; le annotazioni semantiche generate su un'immagine attraverso la "nuvola" vengono mappate sulle singole immagini attraverso un recupero delle coordinate 3D: ogni immagine, costruita pixel by pixel, subisce di conseguenza la propagazione delle annotazioni.

Permangono ancora alcuni problemi irrisolti, dovuti per esempio alle occlusioni che si verificano a causa del fatto che una porzione selezionata su un'immagine non è visibile su un'altra.

Nel campo del multi-view stereo è in arrivo dall'IFP di Stoccarda il nuovo SURE, algoritmo per il matching che parte si propone di stimare la profondità per ogni pixel dell'immagine, partendo dall'assunto che è sufficiente un piccolo angolo di intersezione per completare il matching, ma è richiesto un ampio angolo di intersezione per la precisione del modello (Wenzel, Rothermel, Fritsch, Haala 2013).

Dall'Italia (Toldo, Fantini, Giona, Fantoni, Fusiello 2013), 3DFlow ha messo a punto recentemente il nuovo programma SAMANTHA (free for non-commercial purposes) che calcola la mappa di profondità per ogni camera, ottenendo una fusione delle varie

mappe all'interno di uno spazio volumetrico: il vantaggio ottenibile è che può lavorare in totale assenza di riferimenti di camera, ovvero procede ad un orientamento completamente automatico e completamente autocalibrato delle immagini (a differenza di altri software come VisualSfM che si appoggiano ai dati EXIF delle foto, ove esistenti, per migliorare la qualità del matching).

Nel campo della ricostruzione urbana è in atto il tentativo di mappare su una scansione LiDAR le texture ottenute da un dense stereo matching da cui si è ottenuto un singolo DTM (Kuschik 2013).

Interessante un progetto greco che cerca di sfruttare il 3D come strumento di educazione e studio (Soile, Adam, Ioannidis, Georgopoulos 2013), che sia dunque otticamente perfetto e geometricamente accurato: è stato costruito un sistema di scansione che porta la nuvola di punti meshata all'interno di 3DS Max per un'esportazione in obj. Una procedura che richiede tempo, la cui qualità è basata sull'esperienza.

Ancora dall'Italia, dal PoliMI, (Fassi, Fregonese, Ackermann, De Troia 2013) una bella comparazione di CV, stazione totale e laser scanner su scenari a differente complessità: l'obiettivo è stato quello di ottenere una pipeline di generazione della mesh 3D completamente automatica, che non richiedesse l'uso di strumentazione, target o interventi umani. L'obiettivo è stato raggiunto con Agisoft PhotoScan, il cui modello comparato con una presa da laser scanner è risultato estremamente puntuale sotto il profilo metrico. Ciò che viene sottolineato in questo articolo è che "the image block should have the right number of images"; si può dire che esiste un "warning", ovvero la necessità di verificare sempre che il processo di CV sia accurato quanto necessario, ancorando il matching ottenuto all'interno di un sistema metricamente certo.

Dall'Università di Bologna prosegue, invece, il lavoro (Manferdini, Galassi 2013) sulla comparazione di differenti sistemi di ricostruzione 3D: ancora messo sotto torchio Autodesk 123DCatch, comparato con stazione totale e laser scanner. Quello che si è notato è che la stazione totale riscontra problemi in geometrie angolari, che gli algoritmi SfM incontrano notevoli difficoltà nel caso di ostacoli fissi e, nel caso di spazi chiusi, possono essere affetti dalla deformazione bidimensionale delle immagini. Per ora, il software Autodesk non soddisfa pienamente i criteri richiesti in archeologia, a differenza di altri software di medesimo tipo. Ne risulta che i sistemi range-based sono i

più accurati in termini metrici, mentre i sistemi SfM sono da preferirsi in termini radiometrici.

1.3 3D su piccola scala: ricostruzione ed analisi di aree geometriche parzialmente nascoste a partire dal rilievo della superficie visibile e ricostruzione ad alta precisione di oggetti a varia complessità superficiale

Nel campo dei Beni Culturali molte applicazioni riguardanti l'impiego di tecniche di ricostruzione 3D per fini diagnostici e di fruizione si sono, anche, incentrate sulla piccola scala metrica. I metodi e le tecnologie per la digitalizzazione 3D possono essere classificati in base alle dimensioni dell'oggetto e della complessità di forma (Pavlidis et al. 2007).

In letteratura sono riportati esempi di digitalizzazione di dipinti bidimensionali e oggetti 3D di diversi materiali, come legno, pietra, marmo, ceramica e metalli (Marc 2000; Bernardini 2002; Beraldin 1999; Schindler 2003) e, nel campo della scansione 3D, vi è una vasta letteratura riportante studi condotti ed analisi basate su differenti tecniche ed applicazioni a vari tipi di reperti.

Svariati lavori si sono focalizzati sulla ricostruzione di manufatti a partire da un insieme di frammenti. Alcuni ricercatori hanno affrontato il problema cercando la migliore corrispondenza tra i bordi dei singoli frammenti, mentre altri hanno adottato approcci specifici per approcciare più efficacemente il problema (Leitão 2000; Üçoluk 1999; Papaioannou 2003; Kampel 2003; Willis 2003; Halíř 1999; De Napoli 2002).

La ricostruzione virtuale è stata applicata anche in campo archeologico per ricreare l'aspetto di personaggi storici (Wilkinson 2003) e mummie (Cesarani 2004; Gill-Robinson 2006). La combinazione di tecnologie non invasive come il laser 3D e lo scanner tomografico è usata in paleoantropologia per la ricostruzione 3D del cranio (Zollikofer 2005), di ossa rotte e frammenti mancanti (Ruff 2007a). Recentemente, sono stati condotti alcuni esperimenti per stimare e prevedere l'altezza e la massa del corpo di un individuo adulto partendo da frammenti ossei giovanili (Ruff 2007b). In (Grün 2004), gli autori descrivono la ricostruzione del Grande Buddha, che può costituire la base per una ricostruzione fisica delle statue colossali demolite dalle milizie del governo talebano.

Nel lavoro di (Granero 2009), è stato usato uno scanner a luce strutturata per ricostruire un frammento di una scultura in bronzo al fine di condurre uno studio antropomorfo della mano e del braccio dando come risultato la loro posizione rispetto all'intera statua. In (Dellepiane 2007), è stato utilizzato uno scanner laser insieme a tecniche di image-to-3D-model mapping, per valutare la plausibilità di un'ipotesi di attribuzione di un manufatto rinascimentale, un piccolo cavallo di bronzo, che è stato scoperto essere molto simile ad un disegno di Leonardo.

Alcuni casi di studio interessanti sono legati ad oggetti di piccole dimensioni come gioielli, monete e miniature, che nella maggior parte dei casi sono stati trattati solo per consentire la loro presentazione virtuale.

Un numero sempre crescente di applicazioni è relativo all'analisi della tipologia e dello stato del materiale, così come applicazioni di indagini non distruttive. Questo approccio è molto importante per gli studi diagnostici che devono affiancare le fasi preliminari di interventi di restauro. Infatti, negli ultimi decenni l'analisi diagnostica di processi di decadimento su oggetti di piccole dimensioni è divenuta sempre più importante per il restauro e la manutenzione di antichi reperti archeologici. Esso richiede l'esame dei materiali utilizzati ed un'attenta caratterizzazione dei prodotti di decadimento, al fine di valutare i processi degenerativi.

In un precedente lavoro, è stato utilizzato un microscopio a scansione elettronica (SEM) per l'analisi delle caratteristiche morfologiche e delle forme di degradazione presenti sui manufatti archeologici (Crisci et al. 2010). In questo caso i campioni sono stati analizzati in condizioni di sottovuoto (10-5 mbar di pressione) e sono stati rivestiti con un film sottile ed altamente conduttivo (grafite) per ottenere una buona immagine.

A tale scopo la ricostruzione 3D è utile per varie fasi analitiche: identificazione di forme di degradazione e determinazione di una mappa di distribuzione qualitativa, scelta e mappatura di punti di campionamento.

Purtroppo l'uso di scanner 3D standard, che sono ottimizzati per oggetti di medie dimensioni (ceramiche, statue, ecc), non permette ai ricercatori di affidarsi alla precisione riportata, sufficiente per un'analisi approfondita della forma dell'oggetto.

Comunemente le analisi di piccoli campioni sono effettuate su un'immagine catturata usando microscopi ottici o SEMs. Le immagini presentano una scala di riferimento per

eseguire le misurazioni degli elementi caratterizzanti e, in alcuni casi, è richiesto un approccio ancora più rigoroso. Poiché questo processo funziona su un'immagine bidimensionale, se l'elemento da misurare non è collocato su un piano ortogonale all'asse ottico della camera, le misurazioni saranno affette da errori.

L'adozione di una metodologia basata su misurazioni interattive eseguite su un modello tridimensionale del campione oggetto di studio, non solo potrebbe fornire un approccio più rigoroso per l'indagine ma potrebbe consentire di costruire modelli adatti per essere utilizzati in musei o duplicazioni virtuali.

Se l'approccio è rivolto solo al rilievo o allo studio morfologico di piccoli campioni, non è necessario portarsi all'ingrandimento spinto ottenibile mediante SEM.

Nello stato dell'arte, vi sono molte tecniche applicate con successo nel campo della ricostruzione 3D di piccoli oggetti, come l'applicazione di scanner laser, telecamere TOF (Time Of Flight), tomografia a raggi X, microscopia. Queste tecniche comportano generalmente l'uso di apparecchiature delicate, costoso e non molto versatili: l'uso di immagini fisse rappresenta un'alternativa valida ed economica, sebbene sia necessario l'intervento di un operatore per l'affinamento del modello 3D (Remondino, El-Hakim 2006).

Le immagini acquisite da due camere montate su un microscopio ottico stereo (Schreier et al. 2004) o su un microscopio elettronico a scansione (Cornille et al. 2003) possono essere utilizzate per estrarre informazioni 3D. Questo approccio non richiede l'uso di un target di calibrazione di precisione per la stima dei parametri della camera. Il microscopio può essere accuratamente calibrato con una comune tecnica di bundle-adjustment attraverso un semplice pattern speckle, e, successivamente, la nuvola di punti 3D dell'oggetto micro può essere ricostruita per mezzo di algoritmi di stereo matching.

Un approccio recente (Atsushi et al. 2011) dispone l'utilizzo della tecnica SFS (Shape From Silhouette) su una sequenza di immagini acquisite tramite un microscopio digitale. Questo sistema è in grado di ricostruire un modello poligonale di un micro oggetto con dimensioni che vanno da alcune centinaia di micron a diversi millimetri, con una precisione di circa lo 0,5% del bounding box.

In alternativa, una singola macchina fotografica dotata di un obiettivo macro, montata su una barra motorizzata a traslazione micrometrica (Tiano et al. 2009) può essere adatta a misurazioni 3D e ricostruzioni dense di piccoli oggetti, mediante l'applicazione di algoritmi di stereo matching su una tripletta di immagini. L'obiettivo principale di questo sistema è rappresentato dall'ottenere una analisi di superficie e misure di alta precisione di superfici planari, caratterizzate da una bassa complessità di forma ed uno spessore che non supera la profondità di campo (DOF) di un obiettivo macro.

Nel lavoro di (Bitelli, Girardi 2010), la ricostruzione 3D di oggetti di piccole dimensioni con tecniche fotogrammetriche è stata paragonata a quella ottenuta con uno scanner laser, per gli oggetti con una dimensione compresa tra i 5 ed i 10 centimetri. Le questioni relative agli usi di obiettivi macro, quali il valore molto piccolo del DOF che può raggiungere la frazione di un millimetro e le anomalie di calibrazione della fotocamera, sono state evidenziate mostrando come questo influenza la qualità del modello finale.

1.4 Lavori scientifici più recenti nell'ambito della rappresentazione su piccola scala

In un lavoro presentato all'International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (Oxholm, Nishino 2011) è stata puntata l'attenzione sulla possibilità di ricostruire forme sconosciute a partire da frammenti: esempio massimo in archeologia sono i vasi. Il sistema si basa sull'encoding dei contorni ottenuti dai 2D boundaries, il loro matching, l'allineamento (sistema basato sulle normali delle facce) e la context incorporation. In questo caso più che trovare il match tra due shape, si parla di ricostruzione volumetrica, con la presenza dunque di ulteriori parametri; naturalmente il grosso del lavoro è la scansione di ogni singolo frammento e la gestione del dato così realizzato, che su grandi collezioni può richiedere potenze elaborative e tempi non indifferenti. Ovviamente un sistema informatico non necessariamente risulta più efficiente di un essere umano: di fronte a vasi composti da molti frammenti, a volte l'occhio umano è più veloce nel trovare il match di quanto non lo sia il processo di scansione+gestione+analisi; in altri casi il tempo può risultare simile, così come in altre situazioni il vantaggio è notevole.

Il lavoro di (Zambarini, Kampel 2011) riguarda il progetto ILAC, ovvero *Image based Classification of Ancient Coins* (www.caa.tuwien.ac.at/cvl/research/ilac/): il grande scoglio nella lettura di una moneta storica che è sopravvissuta alle intemperie del tempo è la qualità di illuminazione, in grado di alterare anche sensibilmente la percezione della sua immagine; altra difficoltà è usare gli algoritmi di image matching per il riconoscimento delle immagini sulle monete, in particolare nella gestione della similarità, ovvero quei casi dove sulla moneta è presente una figura uniforme ed a cambiare è soltanto un elemento di contorno. Il sistema si basa su SIFT Flow, inizialmente nato per la classificazione di scene: vengono effettuati 4 passaggi, che riguardano la segmentazione della moneta, la loro normalizzazione (tutte le immagini ricampionate a 150x150 px), la generazione della SIFT image, infine la comparazione di quest'ultima con il database. La validazione avviene con il sistema 3-fold cross: rispetto al semplice SIFT matching il sistema risulta molto più accurato (69% vs 29% di precisione in totale, risultato mediato tra fronte e retro della moneta).

In (Castañeda et al. 2011), è stata studiata la possibilità di assemblare automaticamente frammenti di artefatti di diversa tipologia: gli approcci tipici a questa tipologia di lavori sono il “local assembly” e il “global assembly”, i quali entrambi condividono la difficoltà di lavorare su grosse quantità di frammenti, sui quali la generazione di ambiguità ed errori sistematici (in particolare falsi positivi) cresce al crescere del numero dei pezzi. Errori sistematici sono presenti anche quando i match sono corretti: infatti, non sempre il sistema individua le aree di sovrapposizione tra una serie di match giusti e continui tra di loro in alcune direzioni ma non in altre. Focus del progetto è cercare una soluzione per risolvere questi errori: attraverso l'uso di algoritmi di “Global Relaxation” è possibile ridurre la quantità, rendendo il sistema meno rigido nella collazione dei frammenti. In tal modo il processo diventa sostenibile per ricostruzioni bidimensionali corrette. Naturalmente l'aggiunta di ulteriori passaggi di relax e completion rispetto alla procedura tradizionale aumenta notevolmente i tempi di processamento, che vengono però in gran parte recuperati grazie all'elevato livello di precisione che acquista il sistema.

Nel lavoro (Schwartz et al. 2011) viene presentato un sistema integrato per l'acquisizione in alta qualità di geometria e texture dedicato ai Beni Culturali: partendo

dalla volontà di digitalizzare gli artefatti antichi per una fruizione allargata, è stata studiata l'acquisizione scientifica della loro "apparenza", cioè le qualità fisiche del materiale (come le riflessioni della luce incidente), e l'acquisizione in alta qualità della geometria nella sua struttura a livello macroscopico, mesoscopico e microscopico, con tecnologie come la luce strutturata. La BTF (Brightness Transfer Function) così ottenuta può essere utilizzata per rendering di buon livello ed essere facilmente distribuita su streaming. Terminata la campagna di acquisizione delle immagini, viene triangolata la mesh in alta definizione e parametrizzata con l'ABF++; la BTF viene espressa con orientamento locale. Con questo sistema, variando la luce all'interno del visualizzatore si può zoomare fino ad osservare il più piccolo dettaglio, renderizzando l'oggetto in real-time per una visualizzazione coerente con la realtà.

Con il sistema *Griphos*, (Brown 2011) è possibile, invece, riassemblare frammenti di dipinti murari crollati attraverso l'uso di tecnologie scanner e delle "proximity map". Su queste ultime è possibile operare delle scelte tipo "corretto", "scorretto", "possibile", per valutare la qualità del match. Questa metodologia si rivela tanto più decisiva quanto più sono vaste le collezioni di frammenti monocolori, che richiederebbero lunghissimi tempi di lavoro e grande esperienza per individuare le continuità, laddove un computer si basa soltanto sui confini di ogni frammento per trovare punti compatibili.

Tecniche e metodi per il rilievo, la ricostruzione e la visualizzazione

2.1 Sensori ottici attivi: laser scanner aerei/terrestri e proiettori di frange

Un sensore ottico attivo impiega una sorgente di luce per restituire le coordinate 3D della superficie misurata. I sensori ottici attivi più impiegati in architettura e archeologia sono i laser scanner (terrestri o aerei) ed i sistemi a proiezione di frange (o luce strutturata). Questi strumenti di misura sono costituiti da un relativo emettitore di luce e da un sensore per registrarne la risposta.

La maggior parte dei sistemi di acquisizione 3D attivi vengono calibrati dal produttore, tranne nel caso di alcuni particolari strumenti di alta precisione che richiedono calibrazione.

La forma di luce che per prima ha consentito di creare uno scanner 3D è la luce laser che, per le sue proprietà fisiche, permette di generare spot luminosi estremamente focalizzati su intervalli di distanza anche elevati. Una distinzione importante è legata alla tipologia di emissione e proiezione della luce, che può essere costituita da un singolo spot laser, una lama di luce laser in movimento o un pattern di luce proiettato a risoluzioni diverse.

Nel primo caso, la sorgente laser genera un sottile fascio di luce che produce un puntino luminoso sulla superficie da misurare. Attraverso un sensore da ripresa, quale ad esempio una videocamera digitale, spostato lateralmente rispetto alla sorgente di luce, viene ripresa l'immagine del puntino luminoso in maniera che la sorgente, il centro di proiezione sul sensore ed il punto luminoso riflesso dalla superficie vengano a formare un triangolo (Figura 2.1).

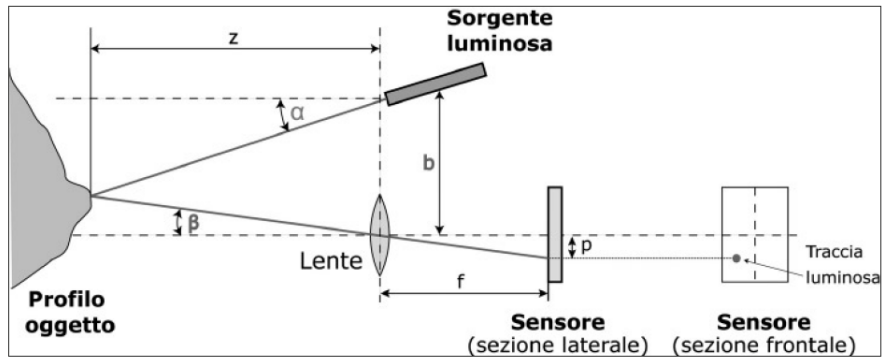


Figura 2.1. Schema del principio di funzionamento di uno scanner 3D a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser.

Attraverso la conoscenza di una serie di parametri noti a priori (baseline b , angolo α e lunghezza focale f) e grazie ad alcune semplici relazioni trigonometriche (Guidi, Russo, Beraldin 2010) è possibile risalire alla distanza z tra lo strumento e l'oggetto e, di conseguenza, alla posizione spaziale del punto sull'oggetto.

Lo schema di principio precedentemente illustrato può essere esteso da un singolo punto luminoso ad un insieme di punti allineati che vanno a formare un segmento (o lama). I sistemi attivi di questo genere, usano una lama di luce generata da un laser riflesso da uno specchietto rotante o da una lente cilindrica e registrata da una camera digitale disassata di una base b . Per ogni punto che forma il profilo luminoso si ottengono, in un'unica soluzione, le coordinate tridimensionali corrispondenti al segmento illuminato, analogamente a quanto detto per il sensore a spot singolo.

Per arrivare ad avere un'immagine tridimensionale relativa ad una porzione di un oggetto è necessario muovere tali sensori attivi in maniera meccanicamente controllata, il che porta al concetto di scansione, producendo come risultato una range map relativa ad un'area rettangolare la cui dimensione dipende dall'estensione del movimento (Beraldin et al. 2000).

Per quanto riguarda i sensori ottici attivi a luce strutturata (o a proiezione di frange), al posto dell'emettitore di luce laser viene impiegato un apposito proiettore che emette una luce strutturata, mentre l'immagine della superficie investita da questo pattern luminoso è acquisita da una camera digitale o una coppia stereo. Supponiamo che tale immagine sia una sequenza di strisce verticali alternate bianche e nere (pattern): l'immagine vista dalla fotocamera sarà ancora una sequenza di strisce se la proiezione avviene su un

piano, mentre, se l'andamento della zona su cui si proietta non è piana, queste tenderanno a distorcersi diversamente a seconda della forma della superficie sottostante. Ogni transizione da bianco a nero all'interno del pattern può quindi svolgere il compito della lama di luce laser. Calibrando opportunamente il sistema di misura, questo metodo consente di verificare con grande accuratezza l'andamento spaziale di una superficie (Sansoni, Carocci, Rodella 2000).

In sintesi, i sistemi a triangolazione permettono elevate prestazioni di misura, con risoluzioni sub-millimetriche ed una incertezza di misura di poche decine di micron. Per contro, sono sistemi che lavorano a distanze limitate (entro i 2 m) e con campi di inquadratura limitati. Per questo motivo, per il rilievo di oggetti più grandi come edifici, scavi archeologici e intere aree territoriali, si ricorre ad apparecchi ottici in grado di misurare con grande precisione la direzione di puntamento, a cui si aggiunge un distanziometro che prevede l'invio di impulso laser e la successiva misura del tempo impiegato dalla luce per andare sulla superficie e tornare fino allo strumento di misura (TOF). Tale intervallo di tempo consente di risalire alla distanza tra lo strumento e la superficie che, integrata con la conoscenza degli angoli, permette di definire le coordinate 3D della zona puntata dal laser. Uno scanner a tempo di volo automatizza l'operazione di puntamento usando un motore che modifica automaticamente la direzione di puntamento su una zona opportunamente programmabile.

Nella figura 2.2, in analogia a quanto visto per i sistemi a triangolazione, è rappresentato uno schema funzionale di un sistema attivo a tempo di volo.

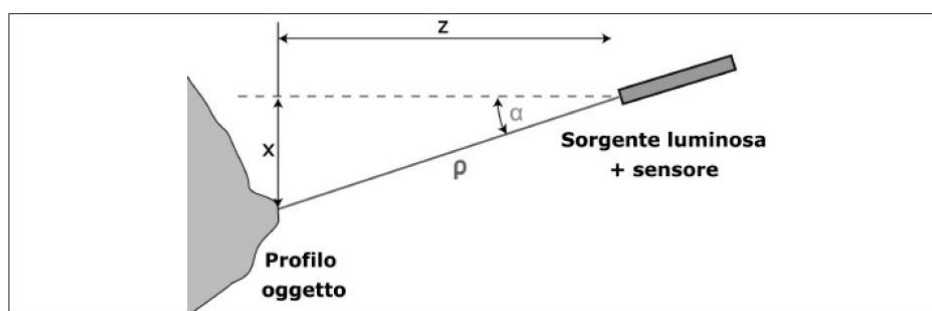


Figura 2.2. Schema del principio di funzionamento di uno scanner a tempo di volo (TOF).

L'elevatissima velocità della luce introduce un'aleatorietà nella stima del tempo di volo, che si traduce in un'incertezza di misura elevata: sistemi di questo genere, infatti, hanno

un'incertezza di misura che difficilmente scende sotto i 2 mm, circa 20 volte peggiore dell'incertezza di 0,1 mm di un sistema attivo a triangolazione.

Anche per questo motivo, i laser scanner a tempo di volo si utilizzano essenzialmente per oggetti di grandi dimensioni, per i quali un errore assoluto di qualche millimetro è relativamente piccolo.

I sistemi che si basano sul principio della misura di distanza sono in genere indicati come Laser Radar o LIDAR, acronimo di Light Detection And Ranging che sta ad indicare una pura funzione di misura di distanza tramite la luce. Nell'accezione corrente tale definizione è stata impropriamente attribuita ad una particolare categoria di laser scanner, quelli montati su aeromobile, la cui definizione più corretta è Airborne Laser Scanner (ALS).

Lo schema funzionale di uno scanner a tempo di volo prevede una sorgente luminosa movimentata ed un rivelatore incorporati all'interno della stessa unità.

Le strategie utilizzabili per misurare coordinate 3D sfruttando il ritardo di propagazione sono principalmente tre:

- l'invio di impulsi luminosi o Pulsed Wave (PW) sulla scena, e la misura diretta del ritardo tra impulso trasmesso e ricevuto (tempo di volo);
- l'invio di una radiazione luminosa continua a frequenza fissa o Continuous Wave (CW) e la misura indiretta del tempo di volo, attraverso la stima dello sfasamento tra segnale trasmesso e ricevuto;
- l'invio di una radiazione luminosa continua a frequenza variabile o Continuous Wave-Frequency Modulated (CW-FM) e la misura indiretta del tempo di volo, attraverso la stima dell'insieme degli sfasamenti tra segnale trasmesso e ricevuto alle diverse frequenze, e delle corrispondenti alterazioni delle ampiezze.

La prima categoria di strumenti (PW) è, per principio, adatta a misurare distanze anche molto lunghe (si può arrivare a coprire alcuni chilometri) con un'intrinseca limitazione nella velocità di acquisizione e nella precisione, che può andare da qualche decimetro a qualche millimetro.

Il principio di funzionamento della seconda categoria di strumenti (CW) implica una limitazione di distanza connessa alla lunghezza d'onda del segnale luminoso utilizzato, che impone una massima distanza di lavoro di alcune decine di metri. La precisione in

questo caso migliora fino a scendere sotto il millimetro e la velocità di acquisizione può salire fino a un milione di punti al secondo.

La terza categoria di strumenti (CW-FM) è molto sofisticata e richiede un livello di elaborazione del segnale che la rende estremamente costosa. Il principale vantaggio risiede nell'elevatissima precisione ottenibile, migliore di un decimo di millimetro. Per contro il sistema è piuttosto lento pur mantenendo un range di lavoro limitato a poche decine di metri.

Mentre i laser scanner a triangolazione vengono utilizzati strettamente per applicazioni terrestri, data la limitata distanza di lavoro, i laser scanner basati sul principio del tempo di volo possono essere impiegati sia per applicazioni terrestri che da aereo o elicottero per il rilievo del territorio.

La differenza sostanziale è che, nel primo caso, il posizionamento dei dati geometrici in un unico sistema di riferimento avviene utilizzando dati ridondanti e applicando un opportuno algoritmo di allineamento, mentre, nel secondo, si opta per l'integrazione tra lo scanner laser ed un sensore in grado di fornire la posizione e l'orientamento dello scanner.

I primi laser scanner da aereo furono realizzati negli anni sessanta ma solo negli anni novanta, con il miglioramento dei sistemi GPS e la loro combinazione con sistemi INS (Inertial Navigation Systems), si assiste alla crescita dei sistemi ALS e al loro impiego per rilevare il territorio in maniera rapida e precisa, attraverso la restituzione di modelli digitali del terreno (DTM) e di superficie (DSM).

La maggior parte dei sistemi LIDAR emettono luce nello spettro del vicino infrarosso (Near InfraRed o NIR) e sono, quindi, influenzati dalle condizioni atmosferiche come nuvole, neve, pioggia o umidità.

Il sistema è composto da un emittore/ricevitore laser che permette la misura della distanza fra l'apparecchio e il suolo ed un sistema integrato composto da un GPS (in modalità differenziale con una stazione a terra abbastanza vicina) e una piattaforma inerziale (INS), che consente in tempo reale il posizionamento e l'orientamento in un sistema di riferimento assoluto dello strumento di acquisizione 3D durante la misura. Conoscendo il tempo intercorso tra l'emissione dell'impulso ed il ritorno, è possibile risalire alla distanza del punto colpito sul terreno (Vosselman, Maas 2010).

I più recenti sistemi ALS permettono di registrare diverse riflessioni del segnale emesso, consentendo quindi di discriminare la superficie rilevata in terreno, vegetazione, urbanizzato, etc. In funzione della quota di volo e del sistema di scansione impiegato, un rilievo ALS può fornire nuvole di punti con densità che vanno da un punto per m² fino a 15-20 punti per m².

In sintesi, i sistemi a scansione terrestri o aerei basati sul principio del tempo di volo fanno della distanza di lavoro e del campo inquadrato il loro punto di forza, poiché sono in grado di rilevare oggetti anche a qualche chilometro di distanza e generare un campo di presa emisferico. Per contro, i sistemi a tempo di volo sono sistemi che raggiungono in generale una risoluzione e precisione superiore al millimetro, ovviamente in funzione della distanza strumento-superficie.

2.2 L'elaborazione di dati raccolti con sensori ottici attivi: il Reverse Modeling

Il processo che definisce il passaggio dall'acquisizione del dato reale fino alla generazione del modello poligonale digitale prende il nome di Reverse Modeling, a sottolineare il processo inverso rispetto a quello che viene normalmente compiuto in fase progettuale partendo dal modello (digitale e non) per arrivare alla sua realizzazione fisica (Guidi, Russo, Beraldin 2010).

La prima fase, ovvero quella di progetto del rilievo digitale, è la più delicata di tutto il processo. La sua importanza è data dalle scelte che vengono operate e dalle conseguenze che queste comportano in tutti i successivi passaggi fino alla generazione del modello digitale finale.

La prima valutazione riguarda la tipologia di strumento e i relativi parametri di rilievo (risoluzione, precisione, accuratezza) ed è dettata da un'analisi critica di dimensione, geometria, posizione e materiale del manufatto. A questa si aggiunge la pianificazione del "progetto di presa", che deve tenere conto del tipo di strumento, della complessità del modello e della possibilità di muoversi attorno ad esso, controllando le caratteristiche ambientali. Tutte queste valutazioni, fatte a priori, hanno la duplice finalità di ottimizzare il processo e, nel contempo, prevederne le possibili problematiche (Beraldin et al. 1998).

La fase di acquisizione tridimensionale rappresenta spesso uno dei passaggi più rapidi dell'intero processo. Nell'ipotesi si tratti di un'acquisizione con uno scanner a triangolazione, a causa del piccolo campo di vista dello strumento, bisogna prevedere un grande numero di prese tali da coprire l'intera superficie ed avere una sovrapposizione tra range map (o nuvole di punti) contigue dell'ordine del 30-40%. Questo permette di ottenere un rilievo completo e dettagliato dell'oggetto e di registrare correttamente le varie range map.

Diverso è il modo di procedere con uno strumento a tempo di volo, per cui sono necessarie molte meno scansioni e non è sempre fondamentale ottenere un'ampia sovrapposizione dei dati grazie all'utilizzo di target esterni nell'ambiente, che permettono di orientare le singole prese rispetto ai punti noti. È però molto importante dedicare una fase di rilievo all'acquisizione dei target, poiché da essa può dipendere la qualità dell'allineamento e di conseguenza l'accuratezza del modello finale.

I principali parametri legati alla misurazione tridimensionale sono la risoluzione geometrica, l'accuratezza e l'incertezza di misura (precisione) (Beraldin et al. 2007).

La risoluzione (massima) è definita dal minimo passo di campionamento spaziale utilizzabile, o, in altri termini, dalla massima capacità di catturare i dettagli di una superficie, dipendente a sua volta dall'insieme delle qualità ottiche, meccaniche ed elettroniche dello strumento (Guidi, Russo, Beraldin 2010).

Ogniquale volta si effettua la misura di una distanza, di un peso o di un qualunque altro parametro fisico, ciò che viene misurato non corrisponde esattamente al dato vero, ma ne rappresenta sempre un'approssimazione. La fluttuazione di una misura si compone di una "parte sistematica", prodotta dal sussistere di una prestazione di lavoro dello strumento diversa da quella teorica, e di una "parte casuale", originata da possibili fluttuazioni aleatorie di alcuni parametri che intervengono nel processo di misura.

La prima parte è descritta dal parametro dell'"accuratezza", che rappresenta l'errore tra la misura di una quantità e il suo vero valore (o il valore accettato per vero). È un errore che si sovrappone sistematicamente ai dati rilevati e che, a differenza del parametro di precisione, non è facilmente rilevabile, poiché il dato acquisito ed eventualmente mediato dovrebbe essere confrontato con un campione di misura, e non semplicemente con la sua media (Böhler, Marbs 2003).

La seconda parte, ovvero l'eventuale errore aleatorio residuo dello strumento dopo la calibrazione, è definita dalla deviazione standard che stima l'incertezza di misura (precisione) dello strumento. L'incertezza di misura è rappresentata dalla dispersione (σ) delle misure intorno alla loro media e permette di stimare la componente casuale dell'errore: considerando più misure ripetute, è valutata dallo scarto quadratico medio tra le singole misure e la loro media (Guidi et al. 2009).

Ogni singola scansione viene acquisita rispetto al sistema di riferimento locale dello strumento, quindi la fase di allineamento (o registrazione) delle prese è un passo fondamentale per la creazione del modello digitale finale.

Il processo di allineamento può contare su tre differenti approcci metodologici, basati su:

- allineamento tra prese adiacenti che prevedano un certo livello di ridondanza tramite l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point e le sue innumerevoli varianti);
- allineamento tra prese che contengano al loro interno target fissi o punti riconoscibili sulla scena visti da posizioni diverse;
- allineamento guidato da sensori esterni in grado di fornire al laser scanner la propria posizione e orientamento (ad es. laser scanner da aereo).

Il primo approccio coinvolge normalmente i dati provenienti da scanner a triangolazione e prevede una prima fase di allineamento grezzo di coppie di prese, identificando 3-4 punti in comune tra le due nuvole di punti ed una seconda fase di allineamento fine, in cui vengono minimizzate le differenze tra tutti i punti delle nuvole.

I target si usano invece solamente con i sistemi a tempo di volo per calcolare la rototraslazione necessaria per l'allineamento delle scansioni, applicando, in un secondo momento, i parametri della trasformazione all'intera nuvola da registrare. Il minor numero di punti coinvolti in questo metodo di allineamento non comporta necessariamente una diminuzione nella qualità del risultato, qualora l'identificazione dei target avvenga con un livello di sofisticazione superiore rispetto agli altri punti della scena.

L'allineamento basato su integrazione di sensori fornisce sicuramente un risultato più rapido per l'eliminazione della fase di post-elaborazione necessaria nei primi due approcci, sebbene la qualità dell'allineamento possa variare significativamente a

seconda della qualità del sensore esterno. Ad esempio in meccanica esistono laser scanner guidati da Coordinate Measurement Machines (CMM) con accuratezze migliori di 10 micrometri, mentre l'allineamento basato su GPS/INS può consentire al massimo accuratezze centimetriche.

La fase successiva all'allineamento consiste, normalmente, nella creazione di un'unica superficie poligonale (mesh) dalle diverse range map che compongono il modello, avendo cura di ridurre punti ridondanti o errati.

La superficie poligonale così ottenuta necessita di una prima elaborazione, che consiste nell'eliminazione di tutte le incoerenze topologiche presenti nella mesh. Quindi si passa alla "lisciatura" della superficie, utile nel caso si voglia migliorare le porzioni del modello caratterizzate da un andamento della superficie molto irregolare rispetto alla realtà, mentre è da evitare se si vuole preservare tale caratteristica. Infine il modello presenta quasi sempre delle lacune, generate dalla presenza di zone d'ombra, che possono essere chiuse se la natura del manufatto e l'applicazione per la quale viene rilevato lo consentono. In ambito archeologico questo è fortemente sconsigliato, per non introdurre artefatti geometrici negativi ai fini dell'interpretazione del manufatto.

La fase di ottimizzazione del modello poligonale dipende nuovamente dall'applicazione per la quale deve essere utilizzato. In generale la decimazione della mesh è indispensabile per migliorare la gestione informatica del modello e la relativa visualizzazione, ma se non controllata può apportare pesanti modifiche alla geometria del modello (Soucy, Laurendeau 1995). Accanto alla decimazione, il processo di remesh permette di regolarizzare la maglia poligonale, riordinandola dopo tutte le modifiche apportate nella fase di editing.

Infine il modello poligonale può essere texturizzato per una visualizzazione fotorealistica ed esportato in diversi formati, dall'STL considerato oramai uno standard de facto dei formati poligonali, all'OBJ fino al VRML. La scelta del formato dipenderà dall'applicazione per cui viene prodotto il modello poligonale (Lensch et al. 2001). Per la texturizzazione del modello poligonale, se vengono impiegate immagini acquisite da una camera esterna o separata allo strumento, è necessario identificare almeno 6 punti omologhi per poter registrare la mesh con i dati immagine (metodo della DLT: Abdel-Aziz, Karara 1971), oppure utilizzare il metodo delle proiezioni UV.

Per l'intera procedura di modellazione 3D con sistemi ottici attivi, è bene considerare in generale un rapporto di 1:5 tra tempi di acquisizione dei dati (singole scansioni) e tempi di allineamento, pulitura, generazione della mesh poligonale e texturing. Negli ultimi anni questo rapporto sta mutando, poiché l'introduzione dei sistemi TOF-AM permette di ridurre il tempo di acquisizione 3D a discapito della fase di elaborazione dei dati, che deve trattare una grandissima quantità di informazioni.

Il processo di acquisizione e modellazione 3D da range map, per quanto risulti strutturato e definito nei suoi passaggi principali, può variare in funzione dell'applicazione.

In alcuni casi ad esempio può risultare necessario, per ridurre al massimo il tempo e i costi del processo, incentrare l'intero processo non tanto sull'acquisizione 3D conforme alle caratteristiche geometriche del manufatto da rilevare (resolution-driven time frame) quanto sull'ottimizzazione del tempo di acquisizione (time-frame driven resolution), cercando di ottenere il massimo risultato nei tempi e costi previsti (Russo, Arya 2010). In altri casi invece il processo di acquisizione ed elaborazione viene strutturato in maniera da ottenere non un prodotto finale utilizzabile quanto uno "stampo digitale" di partenza per una fase di rimodellazione matematica di superfici e materiali.

2.3 Sensori passivi: fotogrammetria

La fotogrammetria (Mikhail, Bethel, McGlone 2001) è la scienza che consente di ottenere misure accurate da fotografie (immagini) acquisite con sensori terrestri, aerei o satellitari. Partendo da diversi punti omologhi individuati nelle immagini, la tecnica fotogrammetrica consente di determinare informazioni metriche sulle dimensioni, forma e posizione di un oggetto o scena.

La fotogrammetria pertanto stabilisce una relazione geometrica fra le immagini e la scena reale al momento della ripresa fotografica. Una volta ricostruita questa relazione mediante l'utilizzo del modello matematico della collinearità, è possibile ottenere informazioni metriche sull'oggetto attraverso l'impiego di almeno due immagini.

La fotogrammetria viene spesso associata al Remote Sensing, che però impiega immagini principalmente satellitari per l'analisi o il rilevamento di cambiamenti sul terreno o per la sua classificazione. Con l'avvento dei satelliti ad alta risoluzione

(risoluzione geometrica inferiore al metro) le due tecniche ovviamente si avvicinano sempre più, anche se la fotogrammetria rimane sempre dedicata al trattamento geometrico delle immagini.

In fotogrammetria, analogamente a quanto avviene nella visione umana, se un oggetto viene ripreso in almeno due immagini prese da punti di vista differenti, le diverse posizioni dell'oggetto nelle rispettive immagini (la cosiddetta parallasse) consentono di ottenere viste stereoscopiche e derivare informazioni 3D dalle aree di sovrapposizione.

La fotogrammetria è utilizzata in molti campi, dal tradizionale impiego industriale ai video giochi, alle produzioni cinematografiche, alla documentazione del patrimonio culturale sino al campo medico. La fotogrammetria è, per tradizione, considerata come una procedura lunga, manuale e ormai obsoleta, soprattutto dopo l'avvento dei laser scanner. Ma i recenti sviluppi di questa tecnologia ne hanno aumentato le prestazioni e automatizzato molte procedure di restituzione, riportandola come tecnica di base anche per il rilievo architettonico e archeologico.

Attualmente, per la restituzione di un modello completo, preciso e dettagliato, l'intervento manuale di un utente all'interno della pipeline di modellazione fotogrammetrica è ancora necessario. Se l'obiettivo è quello di creare un modello 3D da utilizzare per semplici visualizzazioni o per applicazioni di realtà virtuale, procedure completamente automatizzate (shape-from-motion) possono essere impiegate (cfr. ad esempio l'applicazione web-based Arc3D, Vergauwen, Van Gool 2006).

Paragonata ad altre tecniche image-based per ottenere informazioni 3D (come computer vision, shape from shading, shape from texture, etc.), la fotogrammetria non mira ad una completa automazione delle procedure di restituzione, ma ha come obiettivo primario l'acquisizione di informazioni metriche accurate (precise e affidabili) e dettagliate dal punto di vista geometrico.

Rispetto ai sensori attivi, i rilievi fotogrammetrici utilizzano immagini che contengono tutte le informazioni (geometria e tessitura) utili alla restituzione di modelli 3D. Inoltre con la fotogrammetria è possibile rilevare, impiegando immagini di archivio, oggetti o scene che non sono più disponibili o sono state danneggiate (Gruen, Remondino, Zhang 2004). Gli strumenti fotogrammetrici (camere e software) sono generalmente meno

costosi (è possibile utilizzare camere digitali commerciali, oltre che telefoni cellulari), portatili e semplici da utilizzare.

La fotogrammetria può essere applicata utilizzando una singola immagine (ad esempio per applicazioni quali il fotoraddrizzamento e il monoplotting), o coppie (stereo) o più immagini (bundle-block adjustment).

Per applicazioni di fotoraddrizzamento, una singola immagine viene rettificata rispetto ad un piano di riferimento utilizzando una trasformazione proiettiva e conoscendo le coordinate di almeno 4 punti. Il monoplotting è invece una tecnica di digitalizzazione che consente di restituire oggetti in 3D partendo da un'immagine (o ortofoto) ed il rispettivo modello digitale della scena.

La fotogrammetria si basa sul principio della collinearità (Figura 2.3) che stabilisce come il centro di proiezione della fotocamera, un punto P' sull'immagine e il suo corrispondente punto P nello spazio, devono giacere su una linea retta.

Quando molteplici raggi di collinearità vengono intersecati per calcolare le coordinate 3D di un punto identificato in almeno due immagini, si parla di triangolazione fotogrammetrica o bundle adjustment.

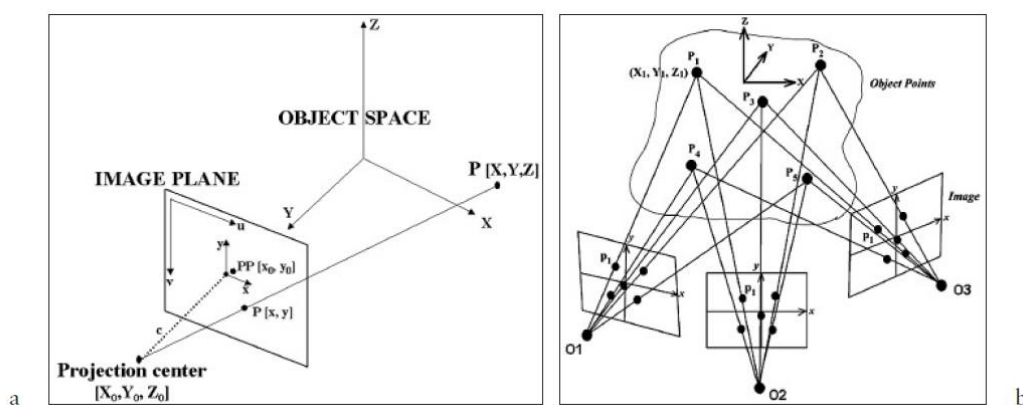


Figura 2.3. Principio della collinearità (a): centro di proiezione, punto P' sull'immagine e corrispondente punto P nello spazio devono giacere su una linea retta. Principio della triangolazione fotogrammetrica o bundle adjustment (b) con immagini convergenti: le coordinate 3D dei punti P_i sono determinate intersecando i raggi omologhi provenienti dalle varie immagini.

I sensori e le fotocamere digitali in grado di acquisire immagini sono normalmente utilizzati da terra oppure montati su piattaforme aeree (aeroplani, palloni, aquiloni, elicotteri, UAV, etc.) o satellitari (Ikonos, World-View, Spot, Quickbird, etc.).

Si possono, quindi, distinguere:

- fotocamere terrestri: attualmente sul mercato ci sono a disposizione diversi tipi di fotocamere (o macchine fotografiche) digitali. Le due principali tipologie di camere digitali terrestri sono denominate “compatte” (o amatoriali) e “reflex” (SLR professionali) che si distinguono a seconda del tipo di sensore (CCD o CMOS, a matrice o lineare), ottica (fissa o intercambiabile), stabilità, costo, utilizzo, etc. Esistono anche camere panoramiche (con sensori lineari) in grado di acquisire immagini sferiche ad alta risoluzione (geometrica e radiometrica);
- camere avio-trasportate: vengono normalmente distinte in piccolo, medio e grande formato e acquisiscono immagini con sensori digitali lineari oppure frame. Le camere aeree analogiche che acquisivano fotografie con le marche fiduciali sono ormai state completamente abbandonate;
- sensori montati su piattaforme satellitari: sono generalmente di tipo lineare, accoppiati ad un’ottica che permette di acquisire immagini da 400-700 km d’altezza con elevate risoluzioni geometriche (<1 m) e radiometriche (8-16 bit).

Nel caso di riprese terrestri, l’operatore deve cercare di acquisire le immagini in modo da ricoprire l’intera superficie dell’oggetto da rilevare, evitando le zone d’ombra e garantendo sempre un sufficiente grado di sovrapposizione tra le diverse immagini. Un punto viene restituito tridimensionalmente solo se è visibile (e misurabile) in almeno due immagini, riprese da punti di vista differenti. In applicazioni terrestri c’è molta più flessibilità nelle acquisizioni, mentre immagini aeree e satellitari sono tutte acquisite con assi di prese paralleli.

Una volta acquisite le immagini, l’intero flusso di lavoro per derivare informazioni metriche e 3D di una scena attraverso la procedura fotogrammetrica consiste in:

- calibrazione della fotocamera per determinarne l’orientamento interno;
- triangolazione delle immagini per determinarne l’orientamento esterno;
- restituzione 3D della scena per derivarne una nuvola di punti non strutturata;
- creazione di un modello geometrico 3D strutturato;
- texture mapping e visualizzazione del modello 3D finale fotorealistico.

2.4 Tecnica fotogrammetrica multi-view stereo con ottiche macro per piccoli oggetti

La tecnica stereo multi-view permette di avere una ricostruzione tridimensionale di un oggetto usando una semplice camera, e può essere applicata a differenti scale cambiando il tipo di ottica impiegata per l'acquisizione delle immagini. Una procedura basata su una soluzione open source, adottata per gli impieghi fotogrammetrici eseguiti, consiste nell'utilizzo di Bundler (Snavely et al., 2007) per la fase di structure from motion e PMVS2 (Furukawa & Ponce, 2007) per la fase di ricostruzione densa della nuvola di punti.

2.4.1 Multi view stereo

Negli algoritmi multi-view stereo (Seitz et al. 2006) il colore o la texture dell'oggetto vengono utilizzati per calcolare la corrispondenza fitta tra i pixel in diverse viste calibrate, quindi la profondità di un punto 3D nella scena può essere recuperata per triangolazione di pixel corrispondenti.

Gli algoritmi di image matching spesso non si riescono a trovare le perfette corrispondenze a causa delle ambiguità create da regioni prive di texture, problemi a causa di occlusioni o proprietà non-lambertiane della superficie.

Gli algoritmi di stereo matching rappresentano la forma dell'oggetto utilizzando le mappe di disparità, ovvero raffigurazioni della distanza d (disparità) tra un pixel $p_1(i, j)$ ed il suo corrispondente $p_2(i+d, j)$ lungo una linea epipolare. Questo è un problema di ricerca 2D, perché le immagini vengono precedentemente rettificate al fine di garantire che i pixel corrispondenti giacciono sulla stessa linea di scansione (linea epipolare).

Nel caso della tecnica multi-view la corrispondenza tra i pixel è rappresentata da una mappa di profondità, costituita dalle informazioni di profondità da una particolare prospettiva.

2.4.2 Macro fotografia

La macro-fotografia è un campo della fotografia caratterizzata da un altissimo livello di dettaglio. L'ingrandimento rappresenta il rapporto tra la dimensione dell'oggetto fotografato sul sensore di immagine e la sua dimensione fisica.

Ci sono differenti tecniche e attrezzature per scattare foto di tipo macro.

Lo strumento più comune per realizzare una fotografia macro è rappresentato dagli obiettivi, progettati per eseguire lavori in primo piano con un ingrandimento fino a 1:1. L'uso di tubi di prolunga o soffietti permette di aumentare la distanza tra l'obiettivo e il sensore, risultante in una distanza di messa a fuoco più ravvicinata, un ingrandimento superiore ed un'immagine meno luminosa (a parità di diaframma). Un'altra opzione è quella di montare una lente close-up (di messa a fuoco) di fronte dell'obiettivo, aggiungendo così diottrie al potere ottico della lente, riducendo la distanza minima di messa a fuoco ed aumentando l'ingrandimento. La qualità è fortemente ridotta, poiché la lente ausiliaria può provocare l'aberrazione cromatica e la perdita di nitidezza. Per rapporti di riproduzione fino a 10-20x, è possibile montare un obiettivo standard rovesciato (comunemente un obiettivo fisso con una focale di 50 mm) direttamente sul corpo macchina o sulla parte anteriore di una lente focale lunga normalmente montata (usato come un tubo di estensione, ma conservando tutti gli automatismi come il calcolo dell'esposizione e il controllo della messa a fuoco), con risultati di altissima qualità.

2.4.2.1 Tecniche di fusione di immagine per una estesa profondità di campo

Immagini macro, in particolare con ingrandimenti elevati, mostrano un valore molto piccolo del DOF. Per superare questa limitazione, è possibile acquisire una serie di sezioni ottiche (fette) dell'oggetto regolando continuamente il piano di fuoco. Nella letteratura sono stati proposti molti metodi di elaborazione di immagine relativi all'immagine-fusion (Pieper, Korpel 1983), con l'obiettivo di combinare tutte le informazioni in-focus di ogni fetta in una immagine focalizzata composita.

Questi algoritmi possono essere classificati in:

- algoritmo di varianza del pixel;
- algoritmo di rilevamento del bordo;

- algoritmi per la misurazione del contrasto;
- approcci basati sulla multi-risoluzione.

L'algoritmo di fusione basato sulla varianza del pixel è modellato su due approcci: un approccio basato sulle informazioni del punto ed un approccio basato sulle informazioni relative all'intorno del punto. Nell'approccio basato sulle informazioni del punto, i pixel con le stesse coordinate sono confrontate in tutta la pila di immagini usando un criterio di minimo o massimo per selezionare il pixel maggiormente a fuoco. Nel secondo caso, l'algoritmo si basa sul presupposto che le variazioni di intensità più grandi si verificano nella regione che circonda il pixel. Così sarà selezionato il pixel lungo l'asse z con la più grande varianza tra i pixel circostanti per l'immagine fusa.

Questo algoritmo è computazionalmente semplice, ma sensibile alle variazioni di luminosità che si riducono normalizzando la varianza attraverso la prima immagine (Eltoukhy, Kavusi 2003; Aggarwal, Ahuja 2000).

L'algoritmo di rilevamento del bordo si basa sul concetto che le aree a fuoco hanno un'alta intensità e quindi una grande variazione di luminanza tra pixel vicini, una volta che l'immagine è stata opportunamente filtrata. Sono disponibili un certo numero di filtri per fare questo, come gli operatori di rilevamento dei bordi di Sobel e il filtro Laplaciano.

Negli algoritmi per la misurazione del contrasto, come per i metodi di rilevamento del bordo, il contrasto viene misurato come la differenza di valori di luminanza tra pixel adiacenti. Varie misurazioni basate su questo approccio sono state proposte ed hanno il vantaggio di essere molto veloci nel calcolo, in quanto comportano solo semplici sottrazioni di valori di luminanza.

L'approccio basato sulla multi-risoluzione (Liu et al. 2001) considera il presupposto che le aree a fuoco contengono molti dettagli e pertanto componenti di alta frequenza.

In primo luogo, le immagini in ingresso sono decomposte con una tecnica multi-risoluzione e poi elaborate tramite la Discrete Wavelet Transformation, matematicamente molto simile alla Fast Fourier Transform (FFT), ma con caratteristiche migliori (Forster et al 2004; Valdecasas et al. 2001; Bradley, Bamdford 2004).

2.4.2.2 Il metodo Depth From Focus

Dato un insieme di immagini scattate regolando il piano fuoco, è possibile recuperare le informazioni di profondità (Nayar, Nakagawa 1990; Pentand 1982).

Supponendo che la lunghezza focale dell'obiettivo e la distanza dal soggetto siano conosciute, la distanza dalla lente può essere calcolata con la legge sulla lente. Le modifiche vengono operate nella sfocatura delle immagini, e riducendo al minimo la sfocatura, è possibile stimare la profondità attraverso l'equazione della lente sottile (Jacobson et al. 2000).

Diverse tecniche sono state proposte per quantificare lo sfocamento dell'immagine (Subbarao et al. 1993), basate sulla varianza di intensità dell'immagine (Yeo et al. 1993), gradienti di immagine (Sperling 1970) e l'operatore Tenengrad (Tenenbaum 1971). Nell'interessante lavoro di (Schechner, Kiryati 2000), le tecniche per risalire alla profondità di messa a fuoco (e sfocatura) delle immagini vengono confrontate rispetto alle tecniche stereo, mostrando che le apparenti differenze risiedono nella dimensione dei setup fisici.

2.4.3 Problemi relativi alla ricostruzione fotogrammetrica con obiettivi macro

Gli obiettivi macro sono caratterizzati da un altissimo livello di dettaglio, il che li rende ideali per applicazioni fotogrammetriche. Purtroppo, ci sono alcuni problemi fotogrammetrici relativi all'uso di lenti macro in termini di calibrazione della telecamera e profondità di campo (DOF).

Lavorare con obiettivi macro, il cui comportamento può essere assunto simile agli obiettivi a lunga focale (Girardi 2011), porta a problemi legati agli aspetti analitici del recupero dei parametri della fotocamera (in particolare per i parametri di orientamento interno ed esterno). All'aumento della lunghezza focale, il FOW (Field of View) diventa più piccolo, rendendo il modello di proiezione prospettica (con i raggi ottici convergenti) simile a un modello di proiezione ortogonale (con raggi paralleli) (Stamatopoulos et al. 2010). Il modello a otto parametri di Brown presenta alcune anomalie con gli obiettivi a lunga focale; in particolare, la correlazione tra i parametri della fotocamera e i parametri di orientamento interno ed esterno aumenta all'aumentare della lunghezza focale (Fraser, Al-Ajlouni 2006). Per un obiettivo macro, un

sottoinsieme di 4 parametri del modello di Brown è sufficiente a descrivere le proprietà ottiche e, in particolare, il terzo coefficiente ordine K_1 è sufficiente per descrivere il profilo di distorsione radiale (Wiley, Wong 1995; Yanagi, Chikatsu 2010).

La più grande limitazione degli obiettivi macro è rappresentata dal valore molto piccolo di DOF, che può essere all'interno di un mezzo millimetro per un ingrandimento unitario, e può raggiungere valori minori di 100 μm con ingrandimenti maggiori. Ciò significa che solo una piccola porzione dell'immagine appare sufficientemente nitida e può essere utilizzabile per la ricostruzione 3D. In particolare ci sono problemi nel recuperare i parametri della camera e l'orientamento della scena, perché gli algoritmi di image matching non possono lavorare su aree sfocate.

Un modo per estendere il DOF è quello di utilizzare un numero f più alto (diaframma più piccolo), ma, purtroppo, un diaframma più chiuso porta ad un tempo di esposizione più lungo, con il rischio di sfocamento dell'immagine dovuto ad un possibile movimento della fotocamera o dell'oggetto. Inoltre, la risoluzione ottica è fortemente ridotta per effetto di diffrazione della luce che deve passare attraverso una piccola apertura.

2.5 L'elaborazione fotogrammetrica di dati raccolti con fotocamere digitali

È necessario distinguere fra parametri di orientamento interno ed esterno delle fotocamere.

I parametri di orientamento interno vengono ottenuti mediante la procedura di calibrazione e consistono nella costante della camera (o lunghezza focale f), posizione del punto principale (x_0 , y_0) e alcuni parametri addizionali (AP) usati per modellare eventuali errori sistematici dovuti, ad esempio, alla distorsione della lente.

I parametri di orientamento esterno consistono nella posizione nello spazio della camera e nelle tre rotazioni del centro prospettico della camera rispetto all'origine del sistema di riferimento. Questi parametri vengono generalmente ottenuti utilizzando due immagini (orientamento relativo) o un set di immagini (soluzione bundle) e un modello matematico rigoroso (collinearità) o empirico (per esempio attraverso dei Polinomi Razionali).

Per poter utilizzare una camera o sensore digitale a fini metrici e per un'accurata e dettagliata restituzione 3D, deve essere eseguita una procedura detta di "calibrazione" (Remondino, Fraser 2006).

Sensori satellitari ed aerei vengono normalmente calibrati dal costruttore e i parametri d'orientamento interno vengono forniti al momento dell'acquisizione delle immagini.

Per camere terrestri (amatoriali, SLR o panoramiche) la calibrazione deve essere eseguita dall'operatore ad intervalli di tempo abbastanza frequenti.

La calibrazione delle camere digitali costituisce, quindi, un prerequisito per il rilievo metrico tridimensionale a partire da immagini. Una camera è calibrata quando sono note la sua lunghezza focale, la posizione del punto principale ed alcuni parametri aggiuntivi atti a modellare eventuali errori sistematici (ad esempio causati dalla distorsione della lente). In molte applicazioni, la fase di calibrazione delle camere consiste nella sola determinazione della lunghezza focale (che attualmente viene riportata nell'EXIF delle immagini), mentre per effettuare restituzioni più accurate vengono generalmente calcolati tutti i parametri di orientamento interno.

Quindi con la procedura di calibrazione si determina la deviazione geometrica fra la realtà (collinearità) e il sistema di acquisizione delle immagini.

Una restituzione 3D con una camera calibrata è in grado di riportare risultati con un'accuratezza fino a 10 volte superiore rispetto alla stessa restituzione operata senza calibrazione.

La procedura di calibrazione normalmente viene effettuata acquisendo immagini di un oggetto tridimensionale, costituito da punti segnalizzati (target) ben riconoscibili e misurabili automaticamente e con elevata precisione (inferiore a 1/10 di pixel) nelle immagini. I target possono avere coordinate 3D note (per esempio misurate con una stazione totale) e quindi essere utilizzati come punti di controllo nella soluzione del bundle adjustment. Si possono misurare anche punti naturali, ma la loro misura avrà una precisione inferiore rispetto ai target. Oggetti planari possono anche essere impiegati per calibrare una camera digitale, con l'accortezza di acquisire molte immagini convergenti e a distanze diverse dall'oggetto, per compensare le diverse correlazioni tra i parametri incogniti da calcolare all'interno del bundle.

L'algoritmo di bundle adjustment, generalmente accoppiato con il modello stocastico ai minimi quadrati di Gauss-Markov, restituisce simultaneamente tutti i parametri incogniti del sistema, oltre alla stima delle precisioni e delle correlazioni dei parametri stessi.

I parametri incogniti del sistema sono l'orientamento della camera (interno ed esterno), le coordinate 3D dei punti omologhi misurati nelle immagini e i parametri aggiuntivi (AP). Le osservazioni sono le coordinate bidimensionali dei punti omologhi misurati in almeno due immagini (ed eventualmente le coordinate di alcuni punti di controllo). Per ciascuna osservazione, viene scritta un'equazione di collinearità ed il sistema di equazioni, linearizzato e risolto iterativamente, fornisce le incognite cercate.

Il sistema del bundle adjustment, per essere risolto, necessita della definizione di un datum, che può essere fornito importando 7 informazioni esterne note (per esempio le coordinate di almeno 3 punti di controllo) oppure in modalità free-network, ovvero senza punti di controllo e fornendo almeno una distanza nota per restituire correttamente la scala.

Nel caso in cui siano disponibili punti di controllo, è possibile calibrare una camera anche utilizzando una sola immagine (resezione spaziale), ottenendo comunque un risultato qualitativamente molto inferiore rispetto al processo di bundle adjustment descritto precedentemente.

Per effettuare una calibrazione corretta, è preferibile fotografare un oggetto tridimensionale con una decina di immagini convergenti, riprese a differenti distanze dall'oggetto, ruotando anche la fotocamera di ± 90 gradi (per ridurre le correlazioni tra i parametri) e con una distribuzione uniforme e non coplanare dei punti nelle diverse immagini. Un progetto di ripresa fotografica che non rispetta questi requisiti può generare delle elevate correlazioni tra i parametri del sistema e determinare un'instabilità nella stima ai minimi quadrati. Inoltre l'uso inappropriato dei parametri aggiuntivi (AP) può influire negativamente sulla soluzione del sistema.

Una volta che i parametri di orientamento interno sono noti, si può passare alla fase di orientamento esterno, ovvero alla determinazione delle posizioni e rotazioni di ciascuna immagine che si sta utilizzando rispetto ad un particolare sistema di riferimento nello spazio. Di solito le fasi di calibrazione e di orientamento esterno sono distinte poiché la

geometria di presa più consona alla calibrazione di una camera è molto diversa rispetto alla geometria di presa di immagini utili per ricostruire in 3D un oggetto o una scena. Approcci in cui le due fasi di orientamento interno ed esterno vengono eseguite contemporaneamente portano a risultati poco interessanti dal punto di vista della precisione e qualità della restituzione 3D. Risulta quindi migliore calibrare una camera in laboratorio e poi acquisire le immagini in sito con gli stessi setting di calibrazione.

L'orientamento esterno delle immagini viene calcolato sempre attraverso la procedura di bundle adjustment ed il principio della collinearità, fissando però i parametri aggiuntivi (AP) calcolati nella fase di calibrazione. Le incognite del sistema, questa volta, sono solo i parametri esterni di ciascuna immagine e le coordinate 3D dei punti omologhi misurati nelle immagini. Ad ogni punto omologo corrisponde un'equazione di collinearità. Tali equazioni formano un sistema di equazioni che viene nuovamente risolto con il metodo iterativo dei minimi quadrati (Gauss-Markov) per determinare le incognite del sistema ed i rispettivi valori statistici della stima.

Come accennato precedentemente, il sistema di equazioni può essere risolto in maniera relativa o assoluta. In quest'ultimo caso, soprattutto per applicazioni di fotogrammetria aerea o satellitare, è necessario fornire ulteriori informazioni esterne, quali, ad esempio, dei punti di controllo sul terreno (almeno tre). In fotogrammetria terrestre, si può lavorare anche senza punti di controllo (soluzione free-network). Per avere un risultato metrico e correttamente scalato è però necessario definire una distanza nota fra due punti.

Una volta determinati i parametri di calibrazione e orientamento, è possibile iniziare la fase di restituzione 3D della scena attraverso ulteriori misure (manuali, semiautomatiche o automatiche) di punti omologhi tra le immagini. I punti vengono individuati nelle zone più salienti della scena da restituire, in modo da poterla poi definire attraverso linee e superfici (soprattutto per applicazioni architettoniche).

Misurazioni manuali o semiautomatiche vengono effettuate quando la geometria di un oggetto può essere ricostruita digitalmente utilizzando pochi punti, come ad esempio nel caso di edifici o semplici strutture architettoniche o archeologiche, in cui gli spigoli definiscono le forme geometriche principali. Procedure automatiche di restituzione (generalmente chiamate correlazione o image matching) vengono invece utilizzate

quando si devono restituire superfici irregolari con dettagli e discontinuità, come basso ed altorilievi, scavi, terreni, statue, etc.

I recenti sviluppi e risultati nel campo della correlazione automatica di immagini (image matching: Remondino et al. 2008) testimoniano le grandi potenzialità del metodo fotogrammetrico per derivare informazioni 3D dettagliate e precise alle diverse scale, paragonabili a quelle ottenute con sensori ottici attivi.

Una volta estratte le corrispondenze tra le immagini, le coordinate 3D dell'oggetto vengono calcolate utilizzando nuovamente le equazioni di collinearità e i parametri interni ed esterni ottenuti precedentemente. A seconda del numero e della densità di punti 3D restituiti, si derivano nuvole di punti dense o sparse. L'insieme di punti viene di solito segmentato (nel caso di strutture architettoniche restituite con nuvole sparse) o convertito direttamente in una superficie poligonale (mesh). Per una visualizzazione fotorealistica, il modello geometrico viene poi texturizzato, proiettando direttamente le immagini (in applicazioni terrestri) o creando un'ortofoto (nel caso di applicazioni aeree o satellitari).

Un metodo più flessibile è stato proposto da (Zhang 2000) e implementato in un toolbox da (Bouguet 2012). Si basa su una griglia di calibrazione planare che può muoversi liberamente, congiuntamente con la fotocamera. L'oggetto di calibrazione è rappresentato da una semplice scacchiera che può essere fissata su un bordo planare.

Questo metodo può essere molto tedioso quando si deve eseguire una calibrazione accurata di ampi sistemi multi-camera; infatti, la scacchiera può essere vista solo da un piccolo gruppo di camere per volta, così come un piccolo numero di camere può essere calibrato nello stesso tempo. Per cui è necessario unire i risultati di tutte le sessioni di calibrazione al fine di calibrare l'intera rete di camere.

Un nuovo metodo per la calibrazione della camera, basato sull'uso di un singolo punto come oggetto di calibrazione e rappresentato da un led luminoso che si muove intorno alla scena, è stato proposto da (Svoboda et al. 2005). Questo LED è visualizzato da tutte le camere e può essere usato per calibrare un grande volume.

Nonostante tutti questi metodi siano in grado di riportare risultati accurati, richiedono una fase di pre-calibrazione offline che è spesso impraticabile in alcune applicazioni. Inoltre, nel decennio scorso, significativi progressi sono stati compiuti nel

riconoscimento automatico delle feature e nella corrispondenza delle feature tra le immagini. Recentemente sono stati sviluppati metodi accurati di *structure from motion*, che permettono la ricostruzione di un modello 3D da sequenze di immagini non calibrate. Questi algoritmi di structure from motion possono essere impiegati con immagini video (Pollefeys et al. 2004), o con grandi collezioni di immagini non ordinate (Brown, Lowe 2005; Snavely et al. 2006).

La maggior parte delle tecniche di structure from motion usate per una sequenza di immagini provenienti da camere incognite, partono dalla stima della matrice fondamentale, se la corrispondenza viene eseguita in due viste, o del tensore trifocale nel caso di una corrispondenza in tre viste. Il sensore trifocale e la matrice fondamentale rappresentano lo stesso ruolo, rispettivamente nel caso di tre viste o due viste (Hartley, Zisserman 2005).

La maggior parte degli approcci usati per l'impiego della tecnica di structure from motion nella rappresentazione su larga scala, calcola in modo incrementale la ricostruzione delle camera e della scena, sebbene nello stato dell'arte siano presenti vari approcci che eseguono la ricostruzione simultaneamente (Sturm, Triggs 1996; Triggs 1996). Il processo di SFM sviluppato da (Pollefeys et al. 2004) parte da una prima ricostruzione creata attraverso due punti di vista, alla quale vengono poi aggiunte le viste delle altre camere in modo da eseguire una ricostruzione incrementale. Attraverso il bundle adjustment (Triggs et al. 1999) vengono affinati i parametri della camera e del punto 3D precedentemente calcolato, riducendo al minimo l'errore di riproiezione.

La ricostruzione ottenuta è determinata fino ad una trasformazione proiettiva arbitraria. Quindi è necessario un metodo che possa portare ad una ricostruzione metrica determinata fino ad una trasformazione euclidea arbitraria e ad un fattore di scala.

Questo può essere fatto attraverso l'imposizione di alcuni vincoli sui parametri intrinseci della camera (auto-calibrazione), seguita da un *Euclidean bundle adjustment* per determinare i parametri ottimali della camera.

2.6 Virtual Heritage: le tecnologie dell'informazione applicate ai Beni Culturali

Il filone di ricerca che va sotto il nome di Virtual Heritage si pone a metà strada tra le esigenze e le problematiche degli esperti culturali (termine generico con cui si vuole intendere tutte le figure con preparazione umanista che si occupano di Beni Culturali, dallo storico dell'arte allo studioso di storia della città) e gli strumenti di cui dispongono gli esperti di tecnologie dell'informazione.

Da questo confronto tra problematiche e tecnologie nasce un dibattito che porta in primo luogo all'individuazione di soluzioni basate sulla tecnologia per le problematiche culturali, ma anche ad una *cross-fertilization* tra i due campi che da un lato permette di far emergere nuove problematiche di studio a cui gli esperti culturali possono non aver dato attenzione e dall'altro porta alla formulazione di idee per lo sviluppo di nuove tecnologie legate alle particolarità del campo culturale.

Negli ultimi decenni il Virtual Heritage si è focalizzato su quattro principali tematiche: conservazione, restauro, studio e fruizione.

Le tecnologie dell'informazione applicate alla conservazione dei Beni Culturali hanno lo scopo di documentare con precisione lo stato delle opere (ad esempio pittoriche o scultoree) (Remondino 2011) in modo da poterne monitorare le variazioni nel tempo e predisporre gli interventi di restauro adeguati.

In questo contesto l'uso della tecnologia della rilevazione tramite scanner laser per la produzione di copie digitali è largamente utilizzata sia in campo archeologico che museale (Laing 2011).

Anche la fase di restauro delle opere può trarre vantaggio dalla tecnologia informatica; ad esempio utilizzando modelli di simulazione dei materiali e della loro interazione con solventi e altri materiali da restauro, è possibile testare l'esito degli interventi su copie virtuali delle opere prima di applicarli sulle opere reali (Barni 2000).

Lo studio del patrimonio culturale può trasformarsi in un'attività computazionale grazie alla disponibilità di immense banche dati (Haslhofer 2010), che possono essere esplorate da algoritmi di *data mining* alla ricerca di regolarità o relazioni di non immediata evidenza.

Infine, la fruizione del patrimonio artistico può essere migliorata grazie a ricostruzioni tridimensionali e alle guide elettroniche personalizzate in grado di funzionare su smartphone.

I modelli, una volta realizzati, presentano anche problematiche legate alla loro complessità computazionale. L'accuratezza della ricostruzione, ad esempio per modelli in applicazioni di conservazione, richiede un altissimo numero di dettagli che si riflette nella generazione di file di grandi dimensioni (Kos 2000) e lunghi tempi per la realizzazione di immagini dai modelli (rendering).

Negli ultimi anni molte tecniche sono state sviluppate per produrre modelli tridimensionali in maniera più veloce partendo da informazioni sematiche sullo stile dell'architettura (ad esempio, il Likelihood Principle (Bellotti 2010)), oppure impiegando procedure in grado di replicare modelli simili agli originali (Mueller 2006). Nel caso di ricostruzioni per la fruizione del patrimonio culturale, uno dei punti fondamentali da tenere in considerazione è l'utente finale del prodotto, che può ad esempio essere il turista (Booth 1998). L'aspetto importante in questo contesto non è solo il rigore scientifico della trattazione, ma anche il suo livello di intrattenimento. Nel caso di produzioni video da ambienti virtuali, vi sono dei vincoli sulla durata del filmato, sulla scelta di un'appropriata sequenza di eventi nella narrazione e sulla scelta di un'appropriata colonna sonora.

La realizzazione di un progetto di Virtual Heritage richiede la costruzione di un team multidisciplinare che coinvolga ingegneri dell'informazione, progettisti multimediali, storici, esperti culturali, musicisti e scrittori. Questo apre un insieme ulteriore di problematiche, in particolare nelle prime fasi della collaborazione. È necessario, infatti, costruire un linguaggio comune che permetta ai singoli esperti di comprendere anche campi del sapere molto lontani. Ad esempio, si rivela molto difficile per gli esperti di tecnologia rendere evidente agli esperti culturali la necessità di fare delle scelte e di limitare il dettaglio nelle ricostruzioni per non incorrere in problemi di eccessiva complessità computazionale richiesta per la fase di rendering.

Inoltre, quando un gran numero di persone (da differenti istituzioni) sono coinvolte nel progetto, si incorre nel rischio di avere lunghe fasi decisionali che incidono sui tempi per la predisposizione delle fonti, del materiale e degli incontri organizzativi. Questo è

un fattore critico, in quanto la creazione dei modelli è fondata sulla disponibilità delle fonti storiche.

Un altro problema si ha nelle fasi intermedie, quando immagini di test dei modelli possono apparire poco attrattive e piatte, ad esempio prima dell'applicazione delle texture, dell'aggiunta dei dettagli decorativi o degli effetti di luce (che sono elementi aggiunti nelle ultime fasi di costruzione dei modelli). Questo può portare i non esperti nel settore a dubbi sulla qualità del risultato che incidono sui tempi di sviluppo e sulle scelte da effettuare.

Nel campo dell'interazione con il patrimonio culturale, negli ultimi anni, si è imposto il nuovo concetto di Serious Game per aumentare il coinvolgimento dell'utente.

Con Serious Game si intende l'uso di tecnologie interattive normalmente usate dall'industria dell'intrattenimento (videogiochi, console, dispositivi di interazione) applicati a contesti di formazione e informazione, in particolare nei settori dell'educazione, della salute, delle politiche pubbliche, della comunicazione strategica e del Cultural Heritage (Bellotti 2011).

In questo contesto, i modelli virtuali del patrimonio culturale diventano la scenografia in cui avvengono esperienze ludiche per l'utente divenuto giocatore. L'aspetto esplicito delle applicazioni è quello dell'intrattenimento mentre, implicitamente, il contenuto fornito durante l'esperienza ha un valore culturale.

Questa modalità ha evidenziato ottime potenzialità, in particolare presso il target del pubblico giovanile, abituato a interagire con applicazioni video-ludiche. In questo modo si rende possibile portare un messaggio culturale utilizzando un mezzo consono all'ascoltatore. Inoltre, l'ascoltatore può diventare attore, dato che l'esperienza con l'ambiente virtuale può diventare interattiva. Il giocatore può costruire la sua conoscenza interagendo con il patrimonio culturale, almeno nella sua rappresentazione virtuale, ed essere situato in attività autentiche secondo il paradigma pedagogico del learning-by-doing.

2.6.1 Realtà Virtuale: dalla CVR (Cultural Virtual Reality) al VRML (Virtual Reality Modeling Language), divulgazione e conoscenza

La Virtual Reality (VR) è uno dei più recenti metodi di rappresentazione messa a disposizione dalla tecnologia per rispondere ad uno dei bisogni primari dell'essere umano, la conoscenza e, come tale, va considerato uno strumento che consente ad una qualsiasi persona in una qualunque parte del mondo di visitare luoghi, popoli, culture, architetture che per varie ragioni non potrà mai percepire attraverso tutti e cinque i sensi. Lo scopo della VR è quello di ricreare, mondi e oggetti che sono la trasposizione digitale di ambienti reali o di fantasia. Inoltre, studia i metodi di interazione tra l'utente e in mondo reale come i sistemi di navigazione, gli strumenti per la visione tridimensionale. Si tratta di una simulazione che viene percepita totalmente dai nostri sensi, in particolare dalla vista, seguita dall'udito e dal tatto.

Il termine Realtà Virtuale, nasce nel 1988, ad opera di Jaron Lanier, informatico, compositore e saggista statunitense: “la VR è una tecnologia usata per sintetizzare una realtà condivisa. Ricrea la nostra relazione con il mondo fisico in un nuovo piano. Non influisce sul mondo soggettivo e non ha niente a che fare direttamente con ciò che è nel cervello. Ha a che fare solo con cosa i nostri organi sensoriali percepiscono. Nella VR non c'è bisogno di una singola metafora, come accade per il computer. Siamo abituati a cambiare contesto nella vita reale: è normale comportarsi diversamente in luoghi diversi” (Jaron Lanier, Intervista: “A Portrait of the Young Visionary”, 1988).

La principale caratteristica che la contraddistingue, da altre forme di interazione col computer, è una risposta in "real time" alle modificazioni dell'ambiente introdotte dall'utente. Ciò che la caratterizza è quindi la sensazione psicologica e sensoriale, da parte dell'utente, di poter interagire in modo “naturale” con un ambiente di sintesi nelle sue dimensioni spazio-temporali (Varani 2004).

L'interfaccia grafica connotata da un forte senso di realtà aumentata, è caratterizzata da *tre elementi*:

1. **Immersione**: l'utente si sente inglobato nell'ambiente virtuale attraverso informazioni multisensoriali che lo estraniavano dal contesto reale; dà una misura della **percezione** del mondo virtuale come esistente;

2. Presenza: l'utente percepisce l'ambiente e gli oggetti virtuali come reali, questa sensazione è in funzione della qualità e quantità delle modalità sensoriali utilizzate e dell'interattività; dà una misura del **coinvolgimento**;
3. Interattività: è il processo di controllo e di feedback tra l'utente e l'ambiente virtuale che ne consente la navigazione e la manipolazione. Il livello di interattività è determinato dal tempo di intervallo tra l'azione e la risposta, dalla quantità di cambiamenti apportabili all'ambiente e dal tipo di metafora che collega le azioni alle risposte del mondo virtuale; dà una misura del **realismo** della simulazione.

Il livello e la qualità dell'interazione, che a loro volta determinano il grado di immersione e coinvolgimento, distinguono le due fondamentali tipologie di Realtà Virtuale:

1. RV Immersiva (*Immersive V. R.*)

Tramite l'uso di apposite attrezzature quali il casco, i guanti o addirittura la tuta, l'utente viene isolato dall'ambiente fisico reale per essere proiettato in una realtà di sintesi, inducendo la sensazione di essere in un altro luogo, in un "mondo" virtuale appunto.

La possibilità di interagire con movimenti di corpo, testa e arti aumenta la sensazione di presenza in quella dimensione. In questa categoria viene generalmente inserita anche la *Thirid Person V.R.*, con cui l'utente viene percepito dal computer attraverso un complesso sistema di telecamere, la sua azione nello spazio viene modellizzata all'interno della macchina attraverso complessi algoritmi. L'utente non entra dunque nella simulazione ma si vede all'interno di essa attraverso lo schermo del computer.

2. RV Non Immersiva (*Desktop V. R.*)

Con l'espressione "realtà virtuale da scrivania" si intende la simulazione di un ambiente che viene percepito dall'utente attraverso il video, senza alcun tipo di immersione e, dunque, senza l'eliminazione della percezione dell'ambiente fisico circostante.

Appartiene a questa la **Augmented Reality** (*AR*), che permette di sovrapporre le immagini generate dal computer a quelle reali aumentandone il contenuto informativo.

È evidente che queste caratteristiche ne fanno uno strumento molto utile per la comunicazione e la didattica. In particolare, le ricostruzioni di ambienti storici,

archeologici o, comunque, di contenitori espositivi tridimensionali offrono molteplici opportunità (Liguori 2008), consentendo:

- l'accesso a monumenti difficilmente raggiungibili perché situati in un luogo remoto oppure perché potrebbero essere danneggiati e, per questo motivo, sono chiusi al pubblico;
- la riproposizione di realtà e oggetti non più esistenti o dei quali sono rimasti solo frammenti o rovine;
- una fruizione senza confini, sia portando l'oggetto all'utente, sia radunando oggetti dispersi sul territorio e contrastando così il processo di frammentazione;
- una visione dinamica, senza vincoli spazio-temporali, proponendo punti di vista difficilmente ottenibili (es. a volo d'uccello) e spostandosi nel tempo per mostrare fasi diverse della realtà analizzata;
- la ricontestualizzazione degli oggetti;
- la presentazione di ipotesi scientifiche differenti.

La differenza fra Realtà Virtuale (VR) e Realtà Aumentata (AR) consiste nel primo caso, nell'osservazione su uno schermo, quindi della proiezione di un mondo totalmente fittizio e costituito interamente da oggetti virtuali. Nel secondo caso, invece, innanzitutto non si è vincolati ad una visualizzazione su schermo, ma qualsiasi superficie può diventare un supporto per visualizzare il flusso video in Realtà Aumentata; ciò che viene ripreso, inoltre, è un'integrazione fra immagini reali ed oggetti virtuali.

- Realtà Virtuale = mondo virtuale;
- Realtà Aumentata = mondo reale + oggetti virtuali.

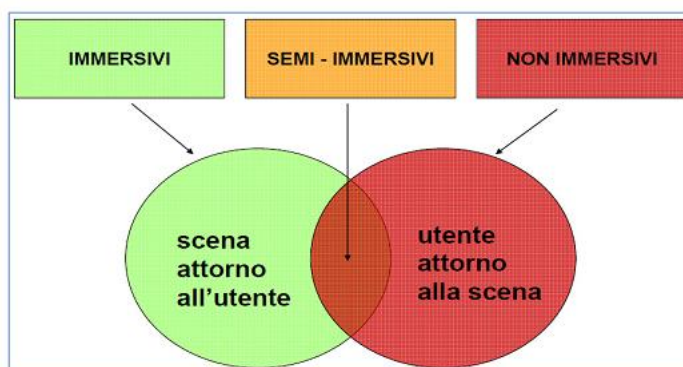


Figura 2.4. Tipologie di realtà virtuale.

Diversi sono i settori di applicazione in cui la Realtà Virtuale può interagire.

Per l'industria, i campi sono i più disparati (aerospaziale, automobilistica, entertainment e giochi, trasporto e logistica, militare, addestramento di personale, progetto e sviluppo di prodotti, studi ergonomici, test clinici); applicata alla medicina, viene usata per il trattamento di determinate patologie, riabilitazione funzionale, training, etc.

Applicata ai Beni Culturali, viene identificata con l'acronimo CVR (Cultural Virtual Reality) (Frischer 2002), e si riferisce all'uso di un sistema in VR per un contenuto specifico: la simulazione visiva di un bene culturale.

Si tratta di modelli interattivi immersivi ed in tempo reale, che permettono sei gradi di libertà. L'obiettivo di questo modello virtuale culturale, è quello di essere scientificamente corretto, e autentico.

Infatti, la CVR ha come oggetto la ricostruzione virtuale di siti architettonici od archeologici, dove l'intervento diretto non risulti possibile per molteplici cause di natura pratica, conseguentemente la ricostruzione di questi ambiti non può esulare da quella che è una fase di ricerca, la cui concretizzazione si ha tramite creazione di un modello 3D, che risulta essere autentico in quanto supportato da dati reali o da ipotesi aventi alla base una metodologia scientifica.

Nel momento in cui ci si confronta con la ricostruzione virtuale di un sito, sia esso in ambito archeologico o architettonico, si affrontano problematiche derivanti da un mezzo che nella sua pratica concretizzazione fornisce un'immagine ben definita del manufatto (Piersigilli 2006).

Una CVR non è quindi un mezzo per dimostrare la potenzialità della computer grafica, ma si presenta come una trasposizione geometrica di dati, che si concretizzano a mezzo di modelli tridimensionali e texture, che se visualizzati tramite dei supporti appropriati, vanno concepiti anche come un oggetto che deve trasmettere sensazioni tali da poter interpretare una materialità diversa da quella trasmessa da un qualsiasi supporto grafico: la CVR diventa uno strumento percettivo che si concretizza grazie all'ausilio delle interazioni e del fattore tempo (cioè la navigabilità dei modelli).

Il VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) è un linguaggio di descrizione di scene tridimensionali. Un file di questo tipo, è un file ASCII che contiene tutti i comandi necessari a descrivere un mondo virtuale. Questi comandi serviranno a descrivere la

forma dei singoli oggetti, il loro colore, le texture, ma anche a posizionare tali oggetti in uno spazio 3D. Detto in questo modo, sembra che non proponga nulla di diverso dai più diffusi tool di disegno 3D e di rendering che sono anche più performanti sia come velocità che come qualità delle scene prodotte.

Attualmente esistono due versioni di VRML: VRML 1.0 e VRML 2.0. La grossa differenza tra le due versioni sta nel fatto che la prima consente di descrivere soltanto mondi statici, mentre con la seconda possiamo definire la dinamica degli oggetti che compongono la scena e la modalità di interazione che questi possono avere con l'utente. Nella versione 2.0 è stata, inoltre, introdotta la possibilità di introdurre fonti audio e video in modo da rendere più realistiche le scene. I mondi VRML sono contenuti in file con estensione wrl. Il vantaggio è che è nato come standard per la rappresentazione di scene 3D su Internet e quindi ha un numero potenziale di utenti molto vasto. Per poter navigare nella scena tridimensionale di un file VRML, è necessario un browser specifico, che può essere un programma autonomo o più tipicamente un plug-in per i comuni Web browser come Netscape o Internet Explorer.

Sul web sono disponibili numerosi browser gratuiti, come ad esempio "Cortona 3DViewer" della Parallel Graphics. Un modello, che viene aperto in questo browser, è completamente navigabile, non presenta vincoli sui gradi di libertà e tramite l'utilizzo dei comandi preposti sulla barra principale, è totalmente esplorabile. E' possibile inserire tuttavia, delle limitazioni, inserendo dei percorsi definiti tramite elementi puntuali, che ne descrivono il cammino, e una sequenza di punti di riferimento dove inserire delle guide interattive predefinite. Inoltre gli oggetti presenti nella scena possono essere trattati come link ad altre pagine sul web e possono essere collocate delle guide interattive che accompagnano il percorso all'interno del modello e sono localizzate in specifici punti, ritenuti di particolare interesse. Inoltre, attraverso la programmazione in vrml, il software permette di implementare la partecipazione alla fruizione del modello, come ad esempio inserendo la funzione di poter aprire o chiudere delle porte presenti nella scena.

2.6.2 Virtual Archaeology: processo metodologico

L'area denominata "*Virtual Cultural Heritage*" fa riferimento all'uso di sistemi virtuali per generare, navigare ed esplorare ambienti ricostruiti d'interesse culturale.

Nel campo specifico dell'archeologia è oggi possibile fare riferimento ad un settore specifico, quello della "*Virtual Archaeology*" (Guidazzoli 2003).

Questo concetto è stato proposto per primo da Paul Reilly (1990) per indicare l'uso di modelli computerizzati 3D di edifici e manufatti antichi.

Il percorso metodologico–ricostruttivo (Forte, Beltrami 2000) prevede l'acquisizione dei dati sul campo, quando possibile, partendo da una serie di presupposti che richiamiamo di seguito.

Innanzitutto non è essenziale prevedere sempre ricostruzioni virtuali, ma è importante utilizzare tecnologie virtuali quando possiamo effettivamente ottenere significativi incrementi di informazione (realtà incrementata).

Bisogna definire preliminarmente gli obiettivi della ricostruzione virtuale e le ipotesi interpretative, fondamentale per avere un adeguato livello di comunicazione e rilevanti risultati scientifici.

La pre-elaborazione e la standardizzazione dei dati sul campo già in formato digitale è necessaria per pianificare le possibili ricostruzioni virtuali.

La scelta e la creazione delle mappature (texturing bidimensionale o tridimensionale) deve essere dedicata. Si deve prevedere cioè la creazione di texture archeologiche "percettive", studiando materiali e superfici per aumentare il livello di informazione (a volte anche a scapito del fotorealismo).

Della ricostruzione 3D si occupano archeologi, architetti, informatici, artisti grafici, esperti multimediali. La soluzione più idonea è quella di prevedere un lavoro multidisciplinare eseguito in team, con un coordinamento generale che deve spettare ai V-archeologist.

In un lavoro di VA, rispetto all'unica ricostruzione, si dovrebbe privilegiare il percorso ricostruttivo: il modello dovrebbe essere "trasparente", permettere cioè una modellazione gerarchica dei dati in modo da rendere intelligibile l'intero processo di virtualizzazione. Inoltre la ricostruzione deve essere intesa come metafora di navigazione ipermediale: in questo caso il modello di VA non è l'obiettivo finale, ma

una chiave di accesso a navigazioni più complesse. L'impatto fotorealistico è importante ma sempre secondario rispetto al reale incremento di informazione.

La creazione di interfacce di navigazione specifiche facilita l'alfabetizzazione virtuale e migliora i fattori interattivo-percettivi dei modelli.

L'approccio metodologico nella ricostruzione di modelli archeologici (Barcelò, Forte, Sanders, 2000) si può schematizzare in cinque classi principali:

- *Virtual find*: ricostruzione di reperti e relative funzioni.
- *Virtual intra-site*: a) ricostruzioni di strutture, siti o elementi architettonici;
b) ricostruzioni stratigrafiche.
- *Virtual context*: ricostruzioni multidimensionali che contengono i 3 tipi precedenti.
- *Virtual landscape*: ricostruzione di paesaggi informativi, sia on line che off line.
- *Mindscape (mind landscape)*: ricostruzione virtuale diacronica e multidimensionale di paesaggi archeologici. Procedendo a una libera navigazione nel paesaggio virtuale 3D (*flythrough, landscape navigation*) l'informazione diventa cognitiva (*mindscape*) attraverso la dinamicità del percorso e l'interazione con i modelli (geometrici, culturali, telerilevati, diacronici). Il fattore dinamico risulta quindi fondamentale per l'interpretazione; l'interpretazione, a sua volta, si anniderà in una sequenza di navigazioni mosse in tempo reale.

La metafora del *mindscape* ci aiuta a comprendere il valore semantico della navigazione orizzontale (spaziale-geometrica) e della navigazione verticale (attraverso il tempo) nell'ambito di un territorio caotico-frattale quale il paesaggio (in cui ogni traccia può diventare un elemento cognitivo).

Le fasi che caratterizzano il processo ricostruttivo del manufatto in VA, sono:

- studio delle fasi storiche;
- raccolta dei dati;
- interpretazione dei dati;
- ipotesi ricostruttive.

Ciò premesso, ricostruire un manufatto, significa:

- descrivere le evidenze;
- dimostrare le relazioni tra l'esistente ed il ricostruito;

- caratterizzare in modo significativo gli elementi presi come riferimento nelle ipotesi ricostruttive;
- affrontare problemi di semantica e di dialettica dal punto di vista architettonico.

L'individuazione di fasi e processi ricostruttivi, pone in essere l'utilizzo per una migliore conoscenza e divulgazione, di una simbologia che indichi in modo evidente ed esaustivo:

- cosa è stato ricostruito;
- cosa è stato omesso dalla ricostruzione in quanto le informazioni a disposizione erano poco significative per portare a delle ipotesi ricostruttive;
- cosa è impossibile ricostruire in quanto irrimediabilmente degradato.

Da qui, ne derivano **4 modelli**:

- a) il modello dell'**originale**;
- b) il modello dello **stato di fatto**;
- c) il modello per il **restauro**;
- d) il modello **ricostruttivo**.

Il modello originale, rappresenta solo la parte che attualmente esiste, di quella che era l'originale costruzione, senza contestualizzarlo nell'ambito in cui si trova e senza quelli che possono essere stati gli eventuali interventi di restauro.

Quello dello stato di fatto, contestualizza il precedente modello e si riportano tutte le aggiunte che nel tempo sono state realizzate. Nel modello per il restauro, si riporta il modello dell'originale ed in più si ricostruisce ciò che con il tempo è stato distrutto, distinguendo i vari periodi storici a cui si fanno risalire le parti ricostruite. Infine, il modello ricostruttivo, risulta essere molto simile al modello per il restauro, ma in esso si eliminano le parti che venivano rappresentate nel modello dell'originale; la distinzione tra modello ricostruttivo e modello per il restauro diventa significativa quando i resti del manufatto sono molto pochi e quindi le ipotesi che si fanno in fase ricostruttiva sono cospicue in numero, caratterizzando fortemente il modello che si va a creare.

Nella tradizionale elaborazione, o nella creazione, digitale delle immagini si dà molto peso alla qualità visiva dei risultati. I programmi di Rendering e di Ray Tracing impiegano ore, se non giorni, per elaborare una singola immagine.

L'utilizzo di più fotogrammi permette di creare animazioni che si possono ammirare negli effetti speciali dei film, nei videogiochi e nelle pubblicità.

Nella realtà virtuale, le immagini non sono calcolate in precedenza ma vengono generate in tempo reale. Per ottenere un effetto sufficientemente fluido, è necessario visualizzare almeno 25 fotogrammi al secondo; in caso contrario, i movimenti nel mondo virtuale risultano essere imprecisi e a scatti.

Per questo motivo, la qualità delle immagini è lontana dalla qualità fotografica ottenuta con le tecniche di animazione digitale. Gli oggetti vengono rappresentati con poligoni sui quali, se necessario, vengono applicate delle texture per la simulazione dei materiali. Un'altra differenza, non meno importante della precedente, è data dal meccanismo di interazione con l'utente. Nelle animazioni tradizionali, egli può decidere quale parte della sequenza di fotogrammi visualizzare, può spostarsi in avanti, ritornare all'inizio, decidere la velocità di scorrimento, ma ciò che vede è quello che è stato programmato in precedenza. Nella realtà virtuale, è l'utente che decide ciò che vuole vedere, può scegliere il punto di vista a lui più congeniale, può posizionarsi in un qualsiasi punto dello spazio, può selezionare un oggetto, ruotarlo, cambiarne le dimensioni, i colori, e, se abilitato, può interagire con tutto l'ambiente circostante. I vantaggi della realtà virtuale si scontrano con la necessità di generare almeno 20-25 fotogrammi al secondo in modo da ottenere animazioni fluide e prive di scatti.

Oggi disponiamo di hardware potente e di schede grafiche accelerate che consentono la generazione di grafica tridimensionale di buona qualità a costi abbordabili da quasi tutti gli utenti. Fino a qualche anno fa, per contenere i costi, i produttori di tool per lo sviluppo di ambienti virtuali, limitavano la dimensione dei quadri video a 320x200 o al più a 640x480 pixel. Oggi, con l'ausilio di schede grafiche con tecnologia 3D si arriva tranquillamente a 1280x1024 pixel.

Casi studio e risultati

3.1 Sviluppo di una metodologia integrata per la digitalizzazione, l'indagine e la visualizzazione della Chiesa di Santa Maria del Patire

Il lavoro si inquadra nella problematica di far coesistere fattori contrastanti nella realizzazione di una ricostruzione tridimensionale di un complesso architettonico e mira a dare una documentazione completa al livello strutturale e diagnostico.

Il caso in questione richiedeva che la ricostruzione fosse tale da permettere:

- a. un'analisi delle variazioni geometriche createsi nel tempo;
- b. una visualizzazione del complesso strutturale con diversi livelli di dettaglio;
- c. un modello digitale navigabile all'interno di un ambiente virtuale.

L'indagine ed il rilievo multiscala per un intero manufatto di complessità diversa nel suo insieme, può essere considerata una fase fondamentale ogni attività programmata riguardante il patrimonio culturale ed è fondamentale nel caso dei monumenti archeologici che hanno una geometria complessa, ricca di dettagli o di irregolare forma.

La procedura seguita ha previsto delle scelte strumentali e metodologiche. Sia l'aspetto diagnostico che la ricostruzione virtuale sono state eseguite attraverso l'integrazione di dati ottenuti da diversi strumenti.

Per il rilievo geometrico del complesso è stata impiegata la tecnologia laser scanner a tempo di volo e strumenti per la fotogrammetria.

L'analisi diagnostica è stata eseguita sulle informazioni derivate dai dati geometrici e termografici.

Il laser scanner è una soluzione versatile per l'acquisizione di grandi quantità di dati con tempi ridotti e precisione alta. Viene impiegato per la documentazione digitale del patrimonio culturale e per tutte le applicazioni ingegneristiche che richiedono alta risoluzione e densità spaziale di dati, grazie alla loro velocità di acquisizione ed alla precisione relativamente elevata, al fine di descrivere caratteristiche geometriche e

particolari di dettaglio dei monumenti storici in un contesto di indagine, conservazione e salvaguardia. Consente una descrizione dettagliata della geometria, anche se il lavoro di post-elaborazione dei dati per arrivare al risultato finale di creazione del modello è ancora eccessivamente oneroso.

E, come il rilevamento costituisce la prima indagine non distruttiva sul monumento in quanto mette in evidenza gli aspetti costruttivi e geometrici, quindi eventuali modifiche strutturali, decadimenti e degradi nel tempo, l'indagine termografica permette di restituire nel visibile le tecniche costruttive originarie, i materiali, le sconessioni ed i rifacimenti che sono avvenuti nel tempo sul manufatto.

La termocamera restituisce un'immagine relativa alla superficie del materiale, in cui si visualizza la radiazione infrarossa da esso emessa dopo essere stato sottoposto a sollecitazione termica; l'informazione ottenuta può essere riferita a qualche cm di profondità di materiale e consente di rilevare situazioni critiche quali la presenza di umidità, di elementi strutturali nascosti, distacchi, lesioni, aggrappi metallici, ecc.

Per il rilievo è stato utilizzato il laser scanner a tempo di volo Leica HDS3000 integrando i dati rilevati dalla stazione totale Leica TCR 407p, mentre per le operazioni di elaborazione si è scelta una procedura che permetta di tenere il dettaglio dei particolari architettonici pur procedendo alla decimazione necessaria per la navigabilità del modello virtuale, ottenendo così una diversificata scala di dettaglio. Viste e sezioni derivate dalla nuvola di punti permettono di fornire altre rappresentazioni geometriche del modello, mentre indagini riguardanti variazioni geometriche avvenute nel tempo e i dati forniti dalle immagini della termocamera ThermoCAM SC 3000 ne definiscono l'aspetto diagnostico.

Si ottiene quindi una ricostruzione su larga e piccola scala contemplata in un unico modello digitale navigabile e conoscitivo.

3.1.1 Descrizione del caso studio

La Chiesa di Santa Maria Nuova Odigitria (chiamata Patirion) è collocata a 605 m sopra il livello del mare, su una diramazione della Sila che scende sulla fascia costiera fra Rossano e Corigliano in provincia di Cosenza (Calabria-Italia). Fa parte di un complesso architettonico più ampio comprendente un antico monastero, di cui oggi rimane poco. È il risultato e l'emblema della fusione di tre civiltà, Bizantini, Arabi e Normanni.



Figura 3.1. Chiesa di Santa Maria Nuova Odigitria (Patirion).

Le origini vanno poste tra il 1101 ed il 1105, per opera del beato Bartolomeo da Simeri; nel 1672 l'abate commendatario card. Carlo Barberini restaura la Chiesa ed i lavori sono attestati da una targa in calcare murata a sinistra dell'ingresso laterale.

La Chiesa è a 3 navate con dimensioni di 27,20 x 14,35 m, orientata da Est a Ovest, con tetto a vista sorretto da capriate in legno; la navata centrale è divisa dalle laterali da 3 colonne per lato, con passo non costante, in conci di arenaria con base ionica e priva di capitelli. Sulle colonne si impostano, a diverse altezze, le arcate a sesto debolmente acuto, che sorreggono i muri d'alzato; la parte terminale della pianta presenta tre absidi in stile arabo-normanno poco profonde, con copertura a cupola.



Figura 3.2. Vista interna della Chiesa.

Il pavimento della chiesa è ancora oggi ciò che arricchisce l'intero complesso: nella navata centrale, davanti al portone d'ingresso rivolto ad Est, si trova un grande mosaico composto da quattro tondi dal diametro di 2,35 m, raffiguranti un centauro con testa e torace umano, un cavallo, un grifone alato ed un felino;



Figura 3.3. Mosaico presente sul pavimento d'ingresso.

nella navata laterale destra, davanti al portone laterale troviamo un altro mosaico, simile a quello posto nella navata centrale, ma di dimensioni ridotte, composto da quattro tondi, due interi e due a metà, raffiguranti un cervo a testa bassa, un centauro, un grosso felino senza testa e le gambe di un quadrupede; altre parti del mosaico presentano grandi formelle di differenti forme (rettangoli, rombi, poligoni, stelle e triangoli) e diverse combinazioni di colore.



Figura 3.4. Mosaico presente sul pavimento laterale.

La parte della chiesa in migliore stato di conservazione è quella esterna delle tre absidi, con le caratteristiche decorazioni dell'architettura normanna; ognuna presenta cinque archi a tutto sesto, sostenuti da lesene policrome. Sotto gli archi vi sono inseriti dei tondi che racchiudono una stella, ognuna costruita con proprio colore e geometrie.

3.1.2 Fasi e strumenti della metodologia di ricostruzione 3D

I paragrafi successivi forniscono una descrizione dettagliata delle differenti fasi del processo metodologico seguito (Tabella 3.1). I dati numerici riportati sono relativi al processo di ricostruzione esterno della chiesa.

Fasi	Attività	Hardware	Software	Dati
Acquisizione dei dati	Rilievo della geometria e delle immagini termografiche	TOF Laser Scanner Leica HDS3000 Total station Leica TCR 407p ThermaCAM SC 3000	Software dello strumento	Dati di scansione e immagini termografiche
Elaborazione dei dati	Integrazione dei dati relativi alle scansioni del laser scanner TOF ed alla stazione totale	Workstation con Intel® Core™ i7-2600 CPU @ 3.40 GHz, 8 GB Ram e sistema operativo a 64 bit.	Cyclone (Leica)	Nuvole di punti interne ed esterne allineate (56+31 milioni di punti)
Analisi dei dati	Estrazione delle tavole tecniche Analisi delle immagini termografiche	Workstation con Intel® Core™ i7-2600 CPU @ 3.40 GHz, 8 GB Ram e sistema operativo a 64 bit.	CloudWorx (Leica)	Valutazione diagnostica e strutturale
Modellazione 3D	Creazione del modello esterno triangolato derivante dalle scansioni laser; aggiunta di operazioni di rifinitura e decimazione	Workstation con Intel® Core™ i7-2600 CPU @ 3.40 GHz, 8 GB Ram e sistema operativo a 64 bit. Fotocamere digitali	Geomagic + Meshlab	10 milioni di punti
	Creazione del modello esterno triangolato da fotogrammetria e aggiunta di operazioni di rifinitura e decimazione		Bundler-PMVS2 + Meshlab	8 milioni di punti
	Integrazione dei dati		Meshlab	1 milione di punti
Texturizzazione	Correzione della prospettiva, ritaglio ed equalizzazione delle foto. Mappatura 3D delle foto sul modello	Fotocamere digitali (Nikon D90, D200 e D5000)	Gimp Bundler	200 immagini
Fruizione virtuale	Sviluppo di un'applicazione per l'esplorazione e la navigazione del modello 3D in un ambiente virtuale	Workstation da 50" 3D TV monitor- full HD	Virtools (Dassaults)	Modello 3D con 1.000.000 di poligoni completo di texture

Tabella 3.1. Fasi, strumenti e dati della metodologia applicata.

Vediamo, nel dettaglio, come è stata eseguita ognuna di queste fasi del lavoro.

3.1.3 Rilievo 3D e fase di allineamento delle scansioni

La metodologia di rilevamento adottata consiste nell'integrazione delle informazioni rilevabili mediante la tecnologia laser scanner ed il rilievo topografico strumentale, e vede l'impiego del laser scanner a tempo di volo Leica HDS3000 e della stazione totale Leica TCR 407p. Inoltre, viene impiegata la termocamera ThermaCAM SC 3000 per indagare sullo stato di conservazione e quantificare problematiche o particolarità strutturali non visibili.



Figura 3.5. Fase di acquisizione.

Le specifiche tecniche degli strumenti sono un punto di partenza e di riferimento di tutto il lavoro.

Il laser scanner impiegato può operare in un vasto campo di vista (360° H x 270° V) ed è capace di generare una nuvola di 1800 punti al secondo con un'accuratezza di ± 2 mm in un range di 1÷50 m. La stazione totale ha un'accuratezza angolare di 7" ed un range d'azione, per il raggio laser, di 200 m. La termocamera ThermaCAM SC 3000 della FLIR Systems ha una sensibilità termica di 0.03°C a 30°C , con una precisione di $\pm 2^\circ\text{C}$ fino a $+ 150^\circ\text{C}$ e risoluzione spaziale (IFOV) di 1.1 mrad.

Il fotorilevatore ad infrarossi è del tipo Quantum Well (QWIP), con una risoluzione dell'immagine di 320×240 pixel ed un campo spettrale compreso tra 8 e $9 \mu\text{m}$.

Il procedimento prevede la disposizione di punti di dettaglio numerati, target, che verranno ripresi sia con il laser che con la stazione totale. Le acquisizioni della stazione totale permettono di creare una griglia piano volumetrica che faciliterà l'operazione di posizionamento ed allineamento delle scansioni effettuate, riducendo di molto il tempo impiegato per questa completare questa fase di lavoro.

La grandezza dell'architettura ha portato ad una suddivisione del lavoro in diverse fasi e metodologie di rilevamento ed in più sezioni di lavoro giornaliere.

All'interno di ciascuna sezione di lavoro giornaliero, ed in particolare per la fase di acquisizione con laser scanner, si è sviluppata una poligonale aperta con punti di controllo aventi come vertici i punti di stazione e come punti di dettaglio i target (4 o 5

per ogni posizionamento del laser scanner) e diversi riferimenti sul posto, facilmente identificabili e riacquisibili nelle giornate successive (Figura 3.6).

Con il completamento delle operazioni di rilevamento, per meglio controllare la griglia dei target, si è realizzata, in una sessione indipendente ed a fine rilievo, una poligonale chiusa di collegamento tra i punti di riferimento presi sul posto, corrispondenti ai punti per i quali è stata tracciata la pianta dell'intero complesso. Tale poligonale è costituita da un numero di 5 stazioni.

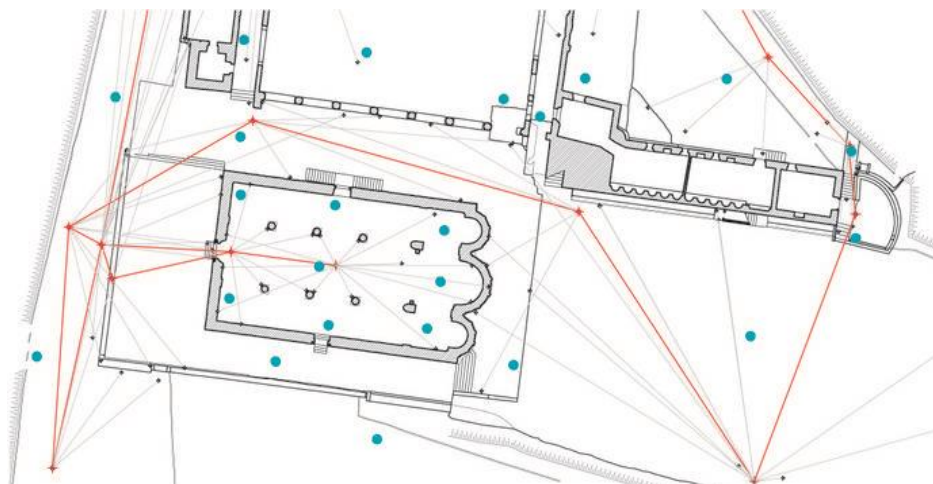


Figura 3.6. Posizionamento degli scanworlds (punti in blu) e dei punti di stazione (punti in rosso) per le acquisizioni interne ed esterne.

Per l'acquisizione della nuvola di punti della superficie esterna della chiesa sono stati necessari 10 scanworld (singolo posizionamento del laser); da ognuno di questi si sono fatti più scan (acquisizione con maglia più o meno fitta in funzione della parte da acquisire) e acquisiti un totale di 27 target. Durante la fase di acquisizione, si sono riportate in un libretto di campagna tutte le informazioni relative ad ogni posizionamento dello scanner e della stazione totale, con l'indicazione della posizione e numerazione dei target, del laser scanner e della stazione totale. Questo è utile nelle operazioni di post-processing, soprattutto nell'eventualità che queste operazioni possano essere eseguite a distanza di tempo dalla ripresa.

L'interno della chiesa è stato ripreso con 8 scanworld; tale numero si è reso necessario per il superamento delle varie zone d'ombra e per evitare di fare acquisizioni con un'inclinazione radente del raggio laser (angoli inferiori a 30°); il passo teorico della

maglia di scansione è di 1 x 1 cm, scendendo ad un passo minimo teorico di 0,5 x 0,5 cm per i dettagli (colonne, archi, portali e il mosaico). Per controllare il corretto allineamento e l'unione degli 8 scanworld dell'interno della chiesa si è eseguito anche uno scanworld d'insieme, con lo strumento posto in posizione centrale.

Gli scanworld sono stati allineati per mezzo di una serie di target battuti da una poligonale d'appoggio chiusa realizzata con la stazione totale Leica TCR 407p e successivamente usando il software Cyclone 5.2 della Leica, raggiungendo un errore di allineamento massimo pari a 6 mm. Le singole piante (e quindi la configurazione planimetrica generale), l'assetto d'insieme dei prospetti e le sezioni sono state ottenute dalle nuvole di punti. La consistenza materica dei prospetti è stata disegnata sia sulla base di immagini raddrizzate delle nuvole di punti che da foto raddrizzate.

Al fine di creare la texture delle aree interne ed esterne, sono state acquisite più di 500 immagini utilizzando differenti camere ad alta risoluzione.

3.1.4 Analisi dei dati

Per la restituzione degli elaborati canonici (piante, prospetti e sezioni) si è seguita una procedura che consente di ottenere delle sezioni piane direttamente dalla nuvola di punti, lavorando nell'ambiente CAD di un applicativo di Cyclone: CloudWorx.

In tale ambiente di lavoro, sistemi ed piani di riferimento sono creati e salvati nel database.

La gestione della grande quantità di informazioni ottenute dalla scansione risulta estremamente facilitata in quanto si può visualizzare solo la fascia di punti attraverso cui si intende generare la sezione. Con questo metodo, procedendo sui vari piani lungo la nuvola di punti, si ottengono piante, prospetti e sezioni sempre sullo stesso file CAD e con gli stessi sistemi di riferimento, rendendo semplice l'elaborazione del modello vettoriale di ciò che si sta rilevando (Figura 3.7).

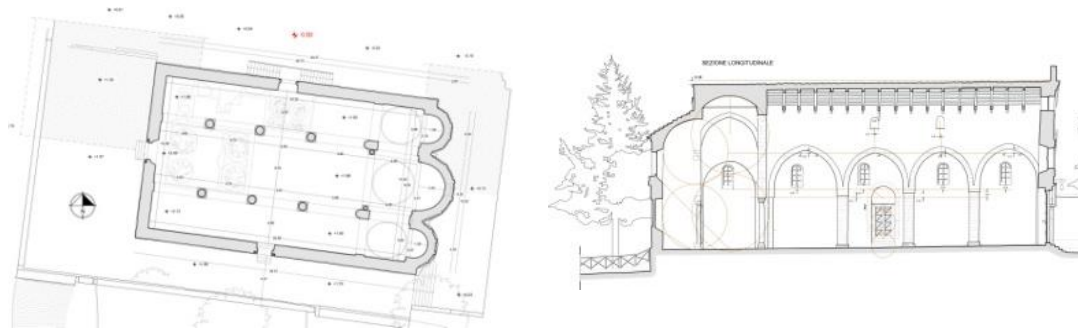


Figura 3.7. Alcune tavole geometriche utili per la documentazione diagnostica dello stato di conservazione.

L'aspetto diagnostico è derivabile ed analizzabile sia tramite le informazioni fornite dal modello geometrico che dalle immagini ottenute dalla termocamera.

Dall'esame dei rilievi estratti si riscontrano una serie di evidenze:

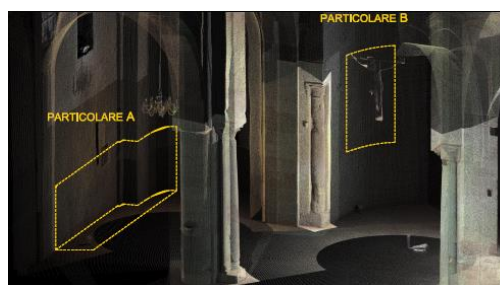
- un difetto di orizzontalità del cornicione di coronamento dell'abside centrale pari a 23 cm;
- l'abside centrale presenta un cedimento verso sud di circa 11 cm;
- la parte laterale sinistra dell'abside centrale presenta un fuori piombo verso l'esterno di circa 10 cm;
- la muratura presente al di sopra dell'abside centrale presenta una concavità circa 22 cm;
- le mensole che sorreggono il cornicione risultano poco rifinite e differenti tra loro;
- La pendenza del pavimento è rivolta verso le absidi riportando una differenza di quota tra le parti estreme della navata di 31 cm;
- gli assi dei portali Nord e Sud discostano tra loro di 15 cm;
- le aperture perimetrali presenti a quota media di +6.70 m non sono in asse con le arcate e si trovano ad altezza variabile, presentano inoltre sguinci asimmetrici;
- nessuna apertura è in asse con quelle sottostanti;
- inoltre, dal un esame del rilievo laterale si nota che l'edificio presenta un abbassamento graduale rispetto al livello del terreno se si fa riferimento all'altezza costruttiva della facciata posteriore.

La termografia infrarossa trasforma l'energia termica emessa da un oggetto nella banda infrarossa dello spettro elettromagnetico in un'immagine visibile.

L'informazione ottenuta è relativa a qualche cm di profondità di materiale e consente di rilevare situazioni critiche quali la presenza di umidità, di elementi strutturali nascosti, distacchi, lesioni, aggrappi metallici, ecc.

La termografia ha permesso di evidenziare due aspetti (Figura 3.8):

– dalle immagini in scala di grigio, analizzando la morfologia e la tessitura degli elementi costruttivi si è potuta rilevare la presenza di una finestra nascosta dalla muratura nella zona bassa della cupola centrale;



– utilizzando un termogramma in falsi colori si è riscontrata la presenza di umidità diffusa nella parte anteriore di una delle navate laterali, con un livello ed una distribuzione indicati secondo una scala di temperature apparenti associata a dei colori.

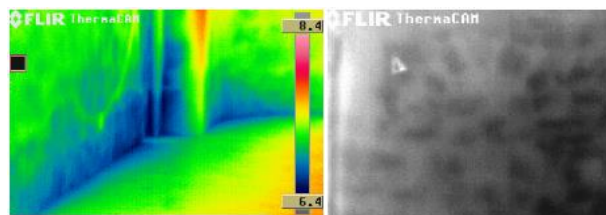


Figura 3.8. Immagini termografiche.

3.1.5 Modellazione 3D

Per la registrazione dei molteplici scanworld in un unico sistema di riferimento, è stato assunto come sistema di riferimento fisso quello relativo alla stazione totale. Le coordinate dei target ripresi con la stazione totale e riportanti un identificativo assegnato al momento dell'acquisizione, importati in Cyclone, restituiscono una nuvola di punti che permette di allineare, in modo automatico, i singoli scanworld tramite i target presenti nelle scansioni per corrispondenza di identificativo.

Si ottiene un unico file costituito dall'insieme delle scansioni, perfettamente allineate e posizionate rispetto al riferimento fisso.

Il risultato è una singola nuvola di circa 87 milioni di punti, che integra scansioni interne ed esterne della Chiesa e può essere elaborato in Geomagic procedendo con un'esportazione da Cyclone con una conversione di formato (ptx).

Il modello ottenuto, nonostante restituisca un'immediata percezione dell'intero complesso architettonico, risulta ingestibile: ogni operazione sulla nuvola sarebbe molto lenta impedendo qualunque interazione in tempo reale (Figura 3.9).

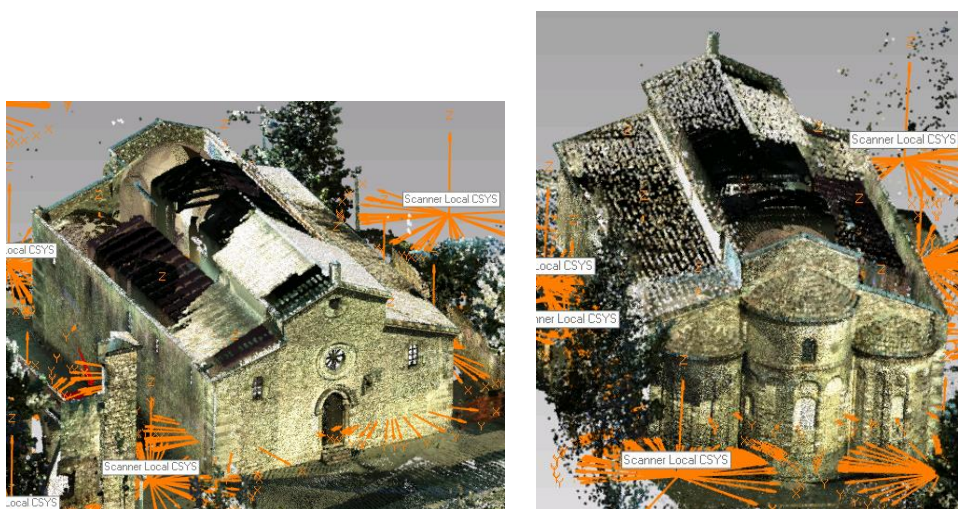


Figura 3.9. Unione delle scansioni generate con il laser TOF.

Il primo passo è stato quello di distinguere in separati file di lavoro le scansioni appartenenti alla parte interna ed esterna dell'edificio ottenendo così, rispettivamente, nuvole pari a 31 milioni di punti (Figura 3.10) ed 56 milioni di punti (Figura 3.11).

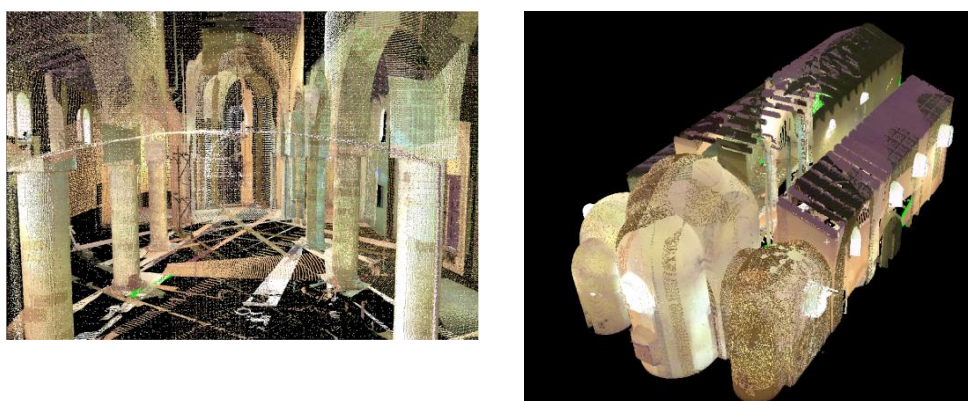


Figura 3.10. Nuvola interna con 31 milioni di punti.

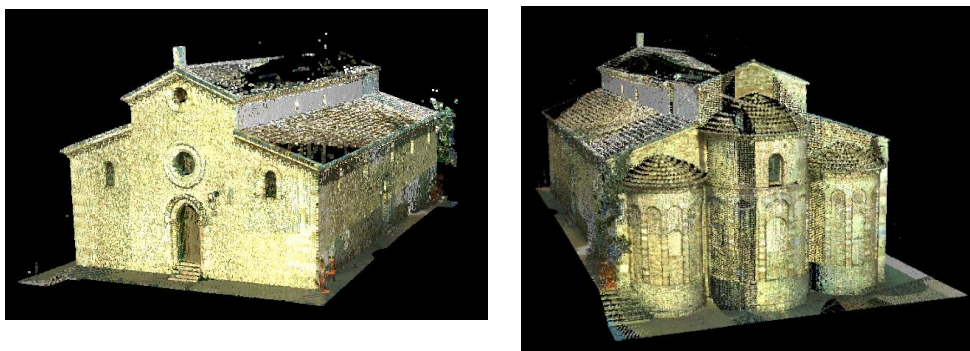


Figura 3.11. Nuvola esterna con 56 milioni di punti.

Entrambi i modelli presentano delle zone fitte di punti ma anche zone di scarsa acquisizione; quest'ultime sono concentrate in parti di accentuata curvatura e dettaglio che avrebbero richiesto delle scansioni mirate o legate a parti otticamente poco raggiungibili dalle posizioni di scansione a causa della conformazione orografica dell'area intorno alla chiesa.

Queste zone sono, precisamente, il tetto della chiesa e le rientranze presenti nei particolari architettonici, come le absidi ed il rosone esterno così come i capitelli e gli archi interni.

Lo scopo principale del progetto è quello di alleggerire il modello portandolo ad una quantità di dati ideale alla navigazione virtuale ma, allo stesso tempo, lasciare inalterate le zone in cui una densità maggiore permette di avere un dettaglio dei particolari architettonici.

La creazione del modello è stata realizzata solo per l'esterno della Chiesa, al fine di sperimentare la metodologia proposta.

Le operazioni di mesh processing sono state effettuate utilizzando il software open source MeshLab. Dopo una prima pulitura del rumore dovuto all'acquisizione, la nuvola è stata filtrata dei punti di ridondanza, in modo da ridurre la quantità di dati senza perdere la qualità di dettaglio.

Queste operazioni hanno reso la nuvola di punti iniziale, costituita da 56 milioni di punti, pari a 10 milioni di punti. Successivamente, mediante l'algoritmo di Poisson per la ricostruzione superficiale incluso nel software MeshLab, abbiamo ottenuto una mesh triangolare di circa 20 milioni di poligoni.

3.1.5.1 Rifinitura del modello 3D

La superficie ricostruita mediante i dati acquisiti con lo scanner laser è affetta da rumore dovuto alle proprietà superficiali, alle condizioni di illuminazione così come per alcune aree perse a causa di occlusioni. Inoltre, alcuni elementi sono stati modificati dopo l'intervento di restauro, come le scale sul lato sinistro della chiesa (Figura 3.12-a).

Così abbiamo deciso di integrare il modello ricostruito dai dati dello scanner laser, con una superficie ricostruita utilizzando una tecnica fotogrammetrica stereo di tipo multi-view su una sequenza di immagini scattate con lo scopo di estrarne le texture. E' stato utilizzato Bundler, un sistema di SFM (Structure from Motion), per calcolare la posizione della camera nello spazio 3D. A questo punto, è stato utilizzato il software multi-view PMVS2 per creare un modello di circa 8 milioni di punti e di 15 milioni di poligoni (Figura 3.12-b). Il modello è creato sulla base di un fattore di scala sconosciuto, quindi è stato necessario scalare la nuvola di punti 3D ottenuta dalle immagini utilizzando, come riferimento, una misura nota.

Il passo successivo prevede l'allineamento dei nuovi dati 3D a quelli ottenuti con lo scanner laser, utilizzando l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point). Infine, per le operazioni di pulizia e di creazione della mesh, sono stati utilizzati strumenti di MeshLab, al fine di riempire i buchi e rimuovere tutti i difetti superficiali sul modello risultante dalla fusione dei dati 3D (Figura 3.12-c).

Il modello che ne risulta consiste di circa 30 milioni di poligoni, sul quale si procede con una decimazione per ottenere un modello costituito da 1 milione di poligoni, che risponde allo scopo di avere una ricostruzione 3D che sia navigabile in tempo reale mantenendo una buona accuratezza.

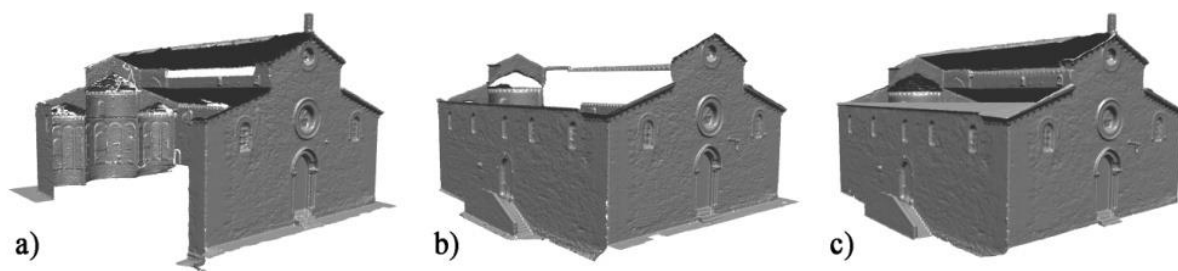


Figura 3.12. Modello del laser scanner TOF (a), ricostruzione 3D con tecnica multi-view stereo (b), modello unito (c).

3.1.6 Texturizzazione

Ogni scanner acquisisce immagini RGB mediante la propria fotocamera integrata, ma la qualità di esse non è tale da essere usata per la creazione di un modello fotorealistico.

Per questo motivo è stato necessario utilizzare una fotocamera digitale ad alta definizione per ricostruire tutti i dettagli in modo affidabile. Sono state acquisite circa 200 immagini per la parte esterna della Chiesa e su di esse sono state applicate procedure di correzione di colore, esposizione, illuminazione e contrasto.

La procedura di texture mapping è basata su un processo fotogrammetrico, che restituisce automaticamente l'orientazione delle camere senza l'impiego di camere calibrate o di punti di controllo. In particolare, è stato usato il software Bundler di SFM per calcolare le posizioni della camera e restituire una ricostruzione sparsa della scena acquisita, che è stata scalata e allineata con il modello rifinito (Figura 3.13-a).

Una volta note le posizioni della camera, è stato possibile mappare le immagini sulla mesh rifinita mediante un processo di projection mapping (Figura 3.13-b), facendo in modo di evitare possibili artefatti sulla struttura risultante a causa di cambiamenti di illuminazione e del punto di vista.

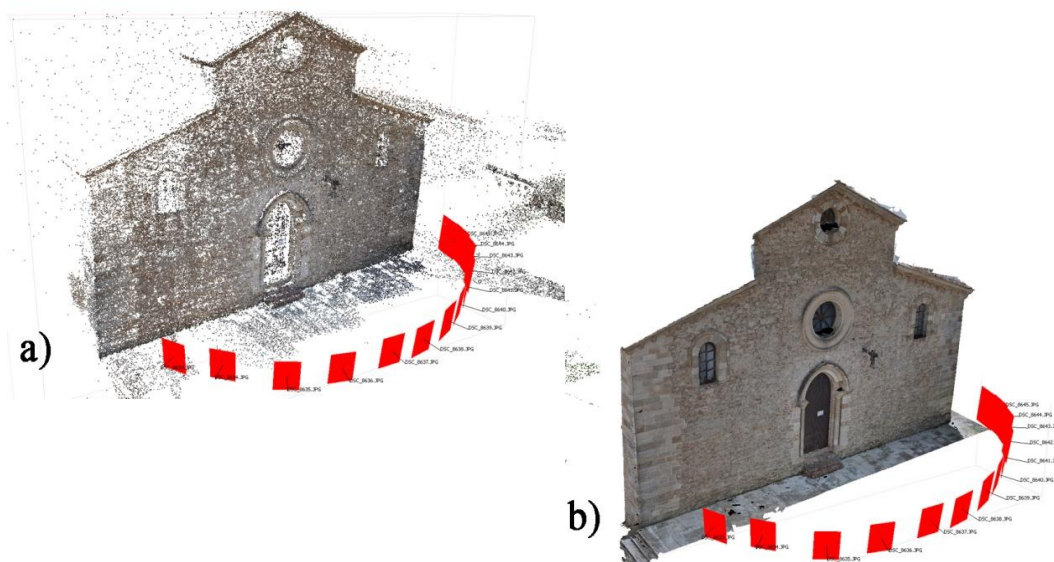


Figura 3.13. Creazione della texture. Ricostruzione mediante tecnica multi-view della facciata della Chiesa (a) e punti di stazione della camera orientate sul modello restituito dallo scanner laser (b). I quadrati rossi rappresentano le posizioni della camera.

Con questo metodo, non è stato necessario trovare manualmente i punti di controllo sia sulle immagini che sul modello 3D.

La figura sottostante (Figura 3.14) mostra il risultato finale del modello mappato con una texture di elevata qualità.



Figura 3.14. Texture mappata sul modello finale.

3.1.7 Fruizione del modello virtuale

Il modello 3D texturizzato, è stato esportato in formato VRML per mantenere il texture mapping all'interno dell'ambiente di visualizzazione.

L'applicazione è stata sviluppata utilizzando il pacchetto di Virtools (Dassaults) ed è stata eseguita su workstation collegata ad un monitor stereo attivo 50" full HD (Figura 3.15). L'interfaccia utente è costituita da una trackball e quattro pulsanti.



Figura 3.15. Sistema per la fruizione.

L'utente può scegliere tra un sistema di navigazione manuale e automatico in prima persona. Con la navigazione manuale, l'utente può decidere la direzione in cui muoversi, traslando e ruotando la camera virtuale. Il sistema utilizza il Collision Detection per evitare che la navigazione passi attraverso le superfici. La navigazione automatica, invece, fa in modo che la camera segua un percorso predefinito in un ciclo finché l'utente decide di tornare alla navigazione manuale.

3.2 Ricostruzione 3D dell'area urbana intorno al Castello Ruffo di Scilla per applicazioni real-time

Il lavoro realizzato è parte di un progetto di ricerca proposto da Enjoy Calabria, cofinanziato da PON 2007-2013 e promosso dal MIUR.

Enjoy Calabria, configurata nelle persone fisiche di Annalisa Murrieri e Antonio Soluri, nasce dall'idea di creare un prodotto che possa unire l'anima community tipica del social network con un nuovo concetto di marketing territoriale innovativo basato sulla ricostruzione virtuale dei territori e degli ambienti, il tutto attraverso il perseguimento di obiettivi di carattere sociale: comunicazione, condivisione, valorizzazione e conoscenza. L'iniziativa è quella di rappresentare la Calabria come se fosse un'unica città, in cui i quartieri sono costituiti dalle città calabresi che hanno deciso di aderire al progetto.

Come zona pilota del progetto è stata scelta Scilla. All'interno della creazione virtuale di questo ambiente, arricchito di dati informativi su tradizioni e cultura, l'utente ha la possibilità di interagire con altri utenti utilizzando un avatar, passeggiare ed esplorare varie zone, acquistare dei prodotti, informarsi sulle località e sulle tradizioni, etc.

Enjoy Calabria si pone come obiettivo la risoluzione di specifiche problematiche sociali, tra cui il miglioramento della competitività del sistema turistico.

La Calabria ha un patrimonio culturale e paesaggistico di inestimabile valore, anche se i dati riguardanti il flusso turistico vedono la regione fare fatica a portarsi avanti rispetto alle più dirette concorrenti. Questa situazione competitiva, tra le altre cose, è data dalla difficoltà di perfezionare l'intero sistema turistico.

Tale lacuna, causata soprattutto dell'insufficienza di strumenti incisivi di comunicazione, tenta di essere colmata da Enjoy Calabria che, attraverso la creazione di percorsi esperienziali vissuti tramite ambientazione virtuale dei punti di maggiore attrattiva locale, si propone di aumentare la competitività dell'intera filiera del sistema turistico calabrese.

Sarà possibile inserire layer di informazioni, contenuti e funzionalità sugli elementi 3D delle scene (case, attività commerciali, monumenti, etc.).

L'applicazione sarà fruibile grazie ad un plugin gratuito del browser.

Il progetto è stato realizzato dalla società Dynematica, che ha ottenuto l'incarico da Enjoy Calabria, con la quale il nostro interesse collaborativo è stato a scopo di ricerca.

Dynematica è una società formata da giovani appassionati di arte e tecnologia che propongono soluzioni all'avanguardia nei settori dell'archeologia e dei beni culturali, così come nell'intrattenimento e nella televisione, nella prototipazione di prodotti commerciali, applicazioni interattive per il web e rendering architettonico.

3.2.1 Il caso studio

Il Castello Ruffo di Scilla, talvolta noto anche come *Castello Ruffo di Calabria*, è un'antica fortificazione situata sul Promontorio Scillèo, proteso sullo Stretto di Messina.

Il Castello costituisce il genius loci della cittadina di Scilla; a circa 20 km a nord di Reggio Calabria, è



sicuramente uno degli elementi più caratteristici e tipici del paesaggio dello Stretto e del circondario reggino.

Da fonti storiche risulta che il sito fu utilizzato come postazione strategica già dagli Etruschi (VII secolo a.C), per divenire poi oggetto di opere di



fortificazione durante il periodo magno greco quando, come riferisce Strabone, venne munito di strutture difensive da Anassila,

Figura 3.16. Immagini panoramiche della zona intorno al Castello.

tiranno di Reggio, in seguito ampliate nel periodo romano. Le prime strutture murarie rintracciate dagli scavi risalgono all'impianto del monastero di San Pancrazio, edificato intorno alla metà del IX secolo dai Padri Basiliani per difendersi dalle incursioni dei Saraceni provenienti dalla Sicilia.

Nel 1060 Scilla fu conquistata da Roberto il Guiscardo, che attestò sulla rocca un presidio militare.

Nel XIII secolo il Castello fu ulteriormente fortificato da Carlo d'Angiò e nel 1469 fu concesso da Ferrante I a un cavaliere vicino alla corte aragonese, Gutierre De Nava, che fece eseguire nuovi interventi di ampliamento e di restauro.

Nel 1533 il Castello fu acquistato da Paolo Ruffo che restaurò anche il palazzo baronale annesso; nel 1578, i Ruffo ottennero il titolo di principe.

Il 5 febbraio 1783 fu danneggiato da un forte sisma e nel 1810 fu restaurato; subì gravi danni anche a causa del terremoto del 1908.

Dal 1808 il Castello è di proprietà demaniale dello Stato. Negli anni 1970-1980 è stato adibito a Ostello della Gioventù e, recentemente, dopo essere stato nuovamente restaurato è diventato un importante centro culturale (Centro regionale per il recupero dei centri storici calabresi) e sede di mostre e convegni.

La struttura sorge su un promontorio roccioso che divide le due marine, Maria Grande e Chianalea. L'edificio presenta una pianta irregolare con parti databili a diverse epoche ma, nel complesso, conserva tutt'oggi la configurazione abbastanza omogenea di una fortezza dotata di cortine, torrioni e feritoie.

L'ingresso è preceduto dal ponte che conduce all'edificio il cui ambiente principale è caratterizzato dal portale di pietra costruito con arco a sesto acuto, sui cui campeggiano lo stemma nobiliare dei Ruffo e la lapide che celebra il restauro del Castello eseguito nel XVI secolo.

Superato l'androne a volta ribassata si apre un cortile, e da qui, percorrendo il grande scalone, si giunge all'ingresso della residenza. Questa è dotata di ampi saloni, essendo stata di proprietà di una delle più ricche e importanti casate del regno di Napoli.

3.2.2 Rilievo della zona urbana intorno al Castello

I rilievi sono stati eseguiti dalla Mea Servizi S.n.c., che ha impiegato un laser scanner terrestre ad alta velocità (TLS), Focus^{3D}.

Lo scanner presenta un errore di linearità fino a ± 2 mm, fornisce scansioni contenenti milioni di punti e dettagliate immagini a colori di geometrie su larga scala grazie ad un'integrata fotocamera HD avente una risoluzione di 70 megapixel.

Ogni posizione di scansione è localizzata tramite coordinate GPS, al fine di creare un modello di elevata precisione composto da singole scansioni in un unico sistema di riferimento.

Inoltre, in ogni scansione, sono stati acquisiti alcuni riferimenti fisici posizionati in modo da essere visibili da ciascuna acquisizione relativa ad una posizione di rilevamento. In aggiunta, ogni riferimento fisico è stato localizzato con specifiche coordinate GPS in modo di aumentare la precisione di allineamento nel processo di registrazione tra le scansioni.

Le posizioni di rilevamento sono state pianificate in modo da essere disposte su diverse quote, prendendo gran parte dell'area urbana fino ad arrivare al punto più alto del Castello.



Figura 3.17. Immagini della fase di acquisizione.

3.2.3 Elaborazione dei dati e creazione del modello

La ricostruzione della zona urbana che conduce al Castello di Scilla è stata effettuata attraverso l'integrazione di dati 3D ottenuti da procedure diverse.

Il modello da realizzare copre un'ampia area per cui, per ottenere un modello computazionalmente leggero (il peso computazionale di un modello 3D in un ambiente real-time dipende per lo più dal numero di poligoni di cui è composta la mesh), i dati di scansione laser sono stati filtrati tenendo un alto dettaglio per alcune zone di interesse e solo i dati essenziali per altre zone in cui verranno integrati dati di tipo CAD. Queste ultime zone sono rappresentate dagli elementi di geometria più semplice, quali il Castello e la Chiesa Matrice.

La procedura seguita ha permesso di rendere la realizzazione del modello 3D di un'area così vasta adatto alla navigazione interattiva.

Sono state condotte 28 posizioni di rilievo, eccedenti rispetto ai punti di acquisizione programmati, ma aggiunte in virtù della velocità di scansione dello scanner che ha permesso di eseguire il lavoro in poche ore della giornata, ritagliata per tale fase operativa.

Le prime elaborazioni sulle scansioni sono state eseguite dalla Mea Servizi S.n.c. che, attraverso operazioni di filtraggio dei dati, registrazione di scansioni multiple e georeferenziazione, ha restituito un modello complesso di circa 30 milioni di poligoni.

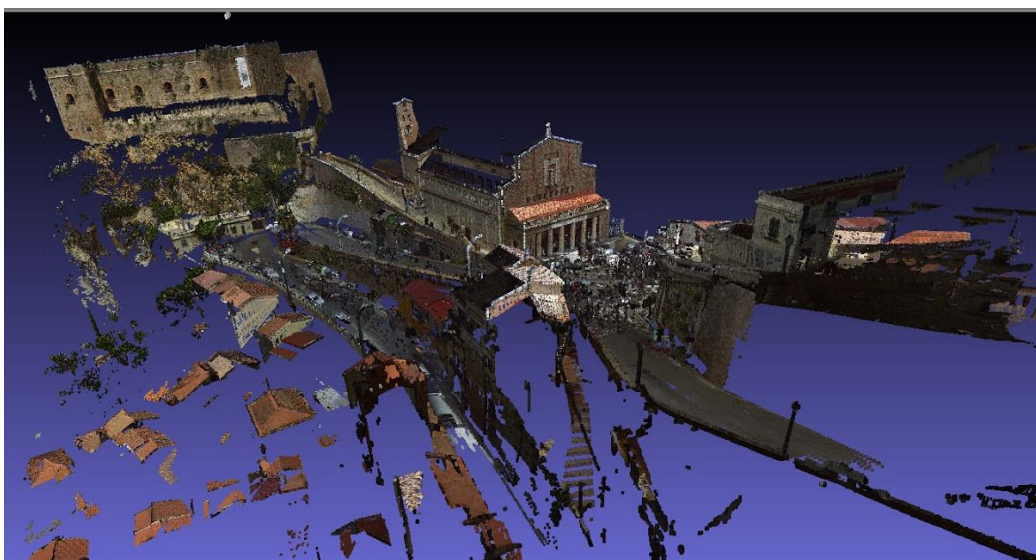


Figura 3.18. Modello complessivo generato dall'allineamento delle scansioni con il laser TOF.

Per avere una visione immediata di quello che è stato il processo iterativo di creazione del modello 3D, i software impiegati e l'output risultante dall'esecuzione dei vari passaggi, riportiamo lo schema seguente:

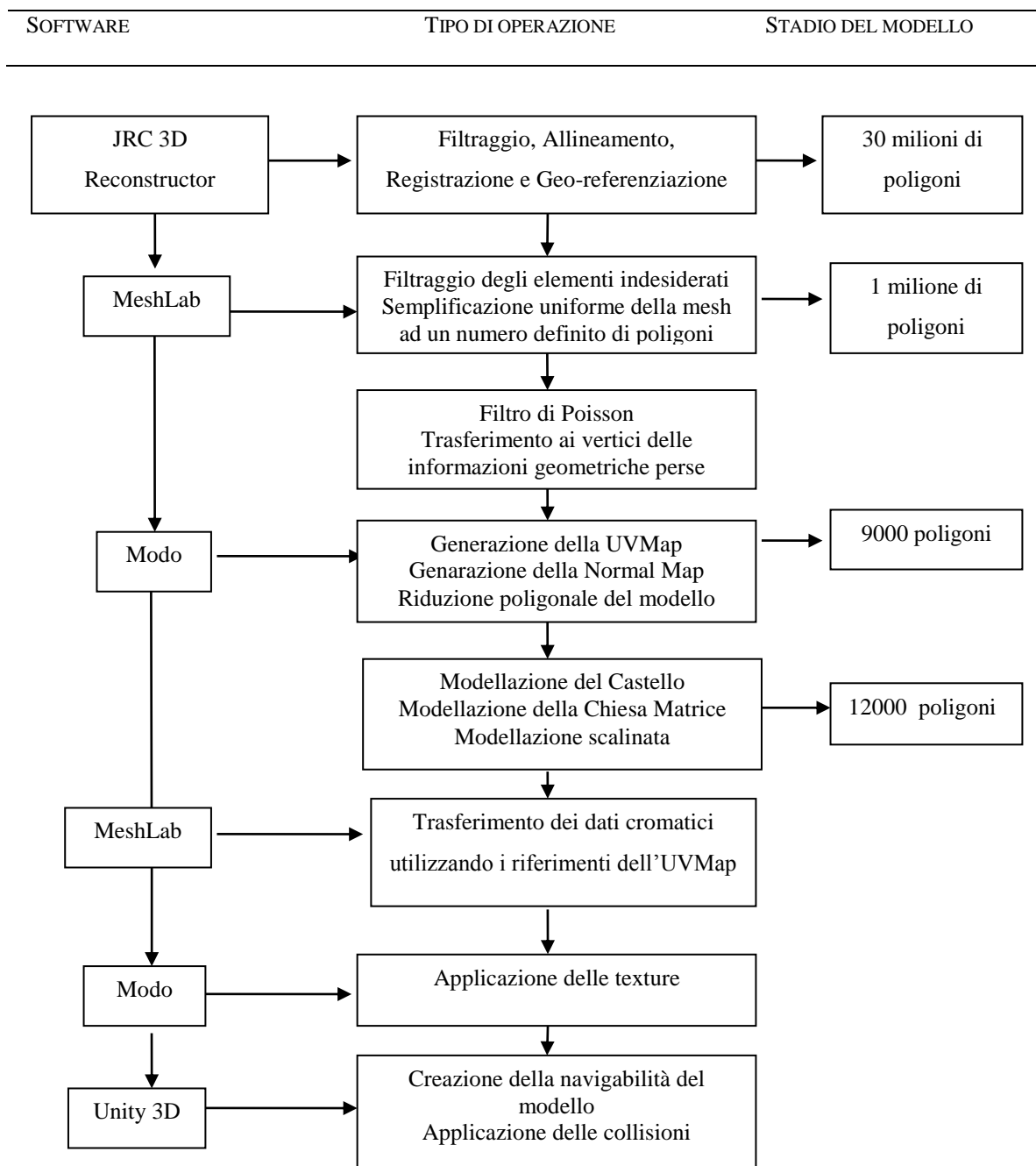


Figura 3.19. Schema riportante le fasi della procedura seguita.

Affinché fosse possibile lavorare su un modello così complesso, è stato necessario disporre di un hardware relativamente potente. E' stato utilizzato un computer Intel® Dual Xeon Quad-Core con processore CPU X5365 @ 3.0 GHz, sistema operativo a 64 bit, 16 Gb di Ram e scheda video AMD Radeon HD 6900 Series.

I dati restituiti dallo scanner laser a tempo di volo, oltre ad essere parte fondamentale della ricostruzione 3D, forniscono informazioni di quota relative alla morfologia del promontorio, le dimensioni geometriche degli edifici e la misura delle proporzioni tra ciascuno di essi. Queste informazioni sono necessarie per l'integrazione con i dati CAD, alle quali è stata aggiunta la planimetria del Castello.

In prima analisi il modello presenta: zone di dati ancora sovrabbondanti, zone che sono rientrate nelle aree di acquisizione ma che non interessano la ricostruzione, elementi relativi alla circolazione urbana (transito o stazionamento di pedoni e autovetture) che non si è potuta interrompere o veicolare diversamente (Figura 3.20).

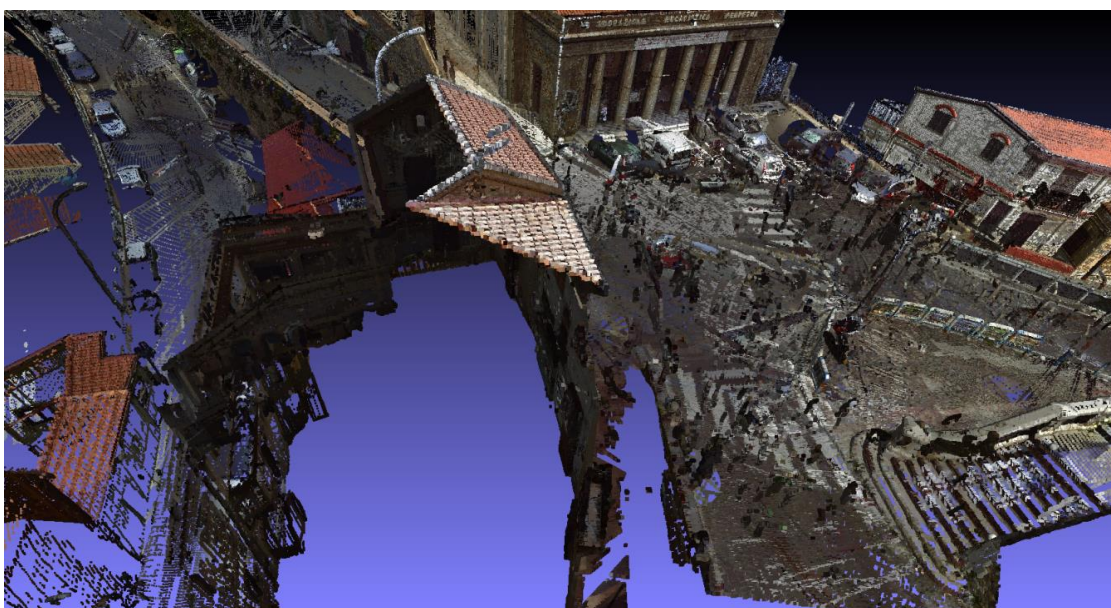


Figura 3.20. Vista sul modello delle parti da filtrare.

Vengono applicati, quindi, interventi operativi di diverso tipo. Si procede, inizialmente, con operazioni di filtraggio e pulizia all'interno dell'ambiente di lavoro di MeshLab, un software open source che è stato sviluppato dal CNR e dall'università di Pisa, che ha permesso di snellire la massiccia mole di dati risultanti dalla scansione.

L'ambiente di lavoro di MeshLab ha permesso di eseguire due fasi fondamentali del processo di ricostruzione del modello:

- la creazione di parti di mesh in aree mancanti mediante l'esecuzione del filtro di Poisson;
- il trasferimento degli dati colorimetrici di ogni vertice su una texture.

L'ultima operazione si rende necessaria per utilizzare le informazioni cromatiche restituite dai rilievi.

La mappatura del modello è stata realizzata integrando texture fotografiche e texture ricavate dalle scansioni laser. La selezione è stata fatta in base alla qualità ottenuta nel processo di acquisizione.

C'è da notare che, poiché il lavoro di rilievo ha coperto una fascia oraria di circa 10 ore (7am÷17pm) e poiché le condizioni del cielo erano variabili, l'esposizione ha subito notevoli sbalzi e ciò è stato registrato nell'acquisizione del contenuto colorimetrico delle scansioni.

Il processo di integrazione e fusione delle scansioni in un unico modello ha combinato le informazioni restituendo una texture che varia e dall'aspetto artificiale.

Quindi, in zone poco sature o di scarsa qualità visiva, si è scelto di sostituire delle texture ricavate da immagini fotografiche.

Il modello deve necessariamente essere mappato da texture, perché gli ambienti di sviluppo impiegati per realizzare navigazioni interattive non sono in grado di leggere i dati colorimetrici memorizzati nei vertici, ma necessitano che questi dati siano trasferiti su delle texture per poter visualizzare i valori RGB su un oggetto tridimensionale.

Quindi, una volta importato il modello tridimensionale in MeshLab, mediante l'ausilio di filtri è stato possibile ripulire l'ambiente da porzioni di mesh piccole ed isolate e da poligoni costituiti da più di un certo numero indicato di vertici.

Inoltre, applicando un filtro di selezione degli elementi disconnessi dalla mesh più piccoli di un dato valore, ricercato per tentativi, è stato possibile ripulire il modello dai dati del traffico urbano e da aree limite al modello che sono rientrate parzialmente nelle acquisizioni (Figura 3.21).

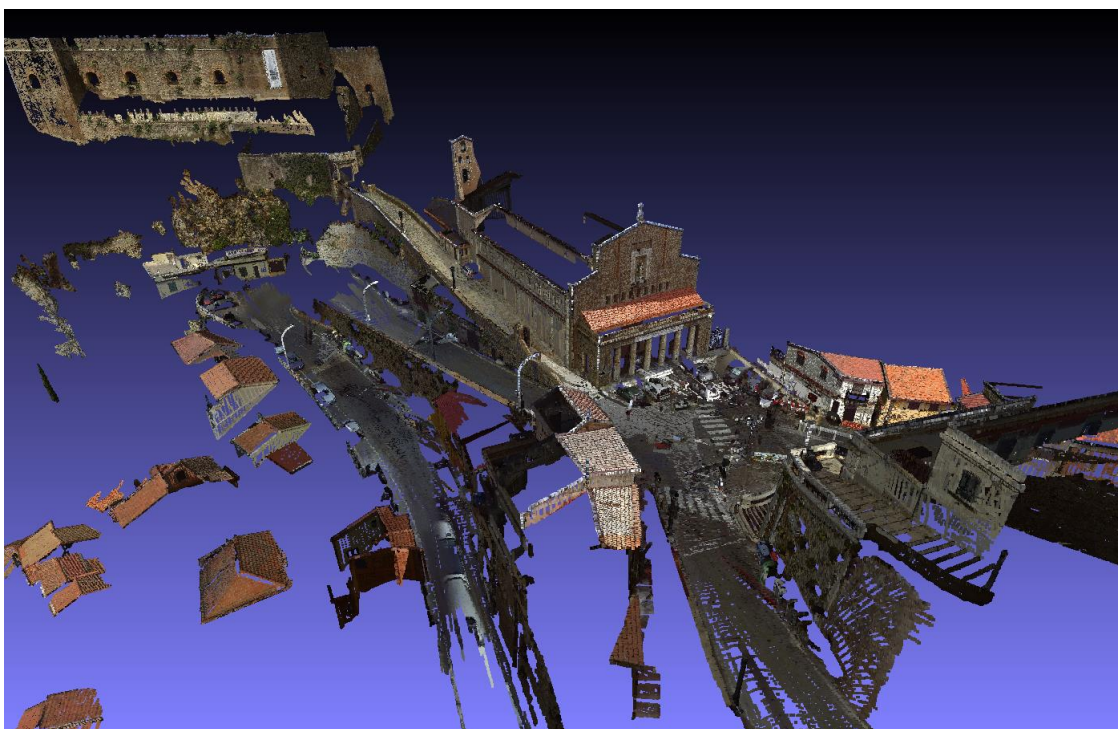


Figura 3.21. Modello ripulito dagli elementi di interferenza nelle scansioni.

Poiché il laser TOF restituisce scansioni aventi una distribuzione millimetrica di dati, sovrabbondanti per lo scopo del progetto, viene fatta una sottosemplicazione della mesh in modo da avere una distribuzione di dati più uniforme. Questo processo ci permette anche di poter stabilire la quantità di dati a cui si vuole portare il modello alla fine dell'operazione.

Dopo aver eseguito l'operazione più volte al fine di ricercare un valore che restituisse una mesh essenziale e completa, si è deciso di portare il modello ad un milione di vertici. Il risultato è quello che si può notare in figura 3.22.

Sia l'area urbana che i pezzi architettonici sono costituiti da elementi semplici, per cui il dettaglio derivante da una fitta scansione è eccedente per ricreare le geometrie esistenti. Una distribuzione di poligoni più rada e meno ridondante permette di velocizzare le operazioni di modellazione e di dare una prima impronta alla creazione di un modello complesso per un ambiente di navigazione interattivo in real-time.

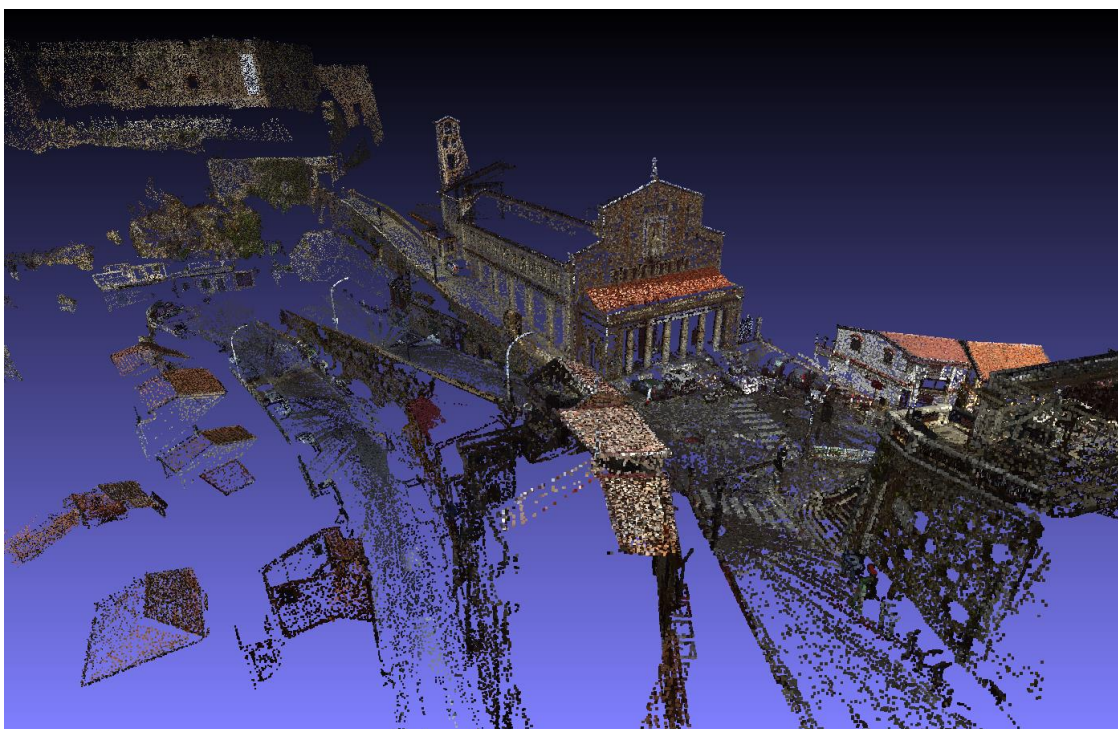


Figura 3.22. Riduzione del modello ad 1 milione di vertici.

Il passo successivo è stato quello di effettuare una ricostruzione superficiale, applicando al modello il filtro che esegue l'operazione secondo l'algoritmo di Poisson.

Questo tipo di ricostruzione ha l'inconveniente di andare a chiudere la ricostruzione utilizzando i contorni estremi del modello; poiché questo viene fatto creando dei poligoni di grande lato, possono essere facilmente eliminati attraverso una selezione dei poligoni il cui lato è maggiore di un valore minimo di lunghezza indicato.

Tale valore è stato opportunamente ricercato per tentativi come quel valore che permette di selezionare l'area che si intende rimuovere.

Al termine di questo intervento, il modello presenta una ricostruzione aggiuntiva di aree mancanti calcolate dall'algoritmo sulle informazioni dei dati presenti nell'intorno di queste zone ma, si presenta con superfici dall'effetto molto arrotondato che restituiscono la percezione di un aspetto poco realistico, soprattutto in considerazione del fatto che è costituito da elementi architettonici con geometrie a spigoli vivi, da murature e percorsi stradali (Figura 3.23).

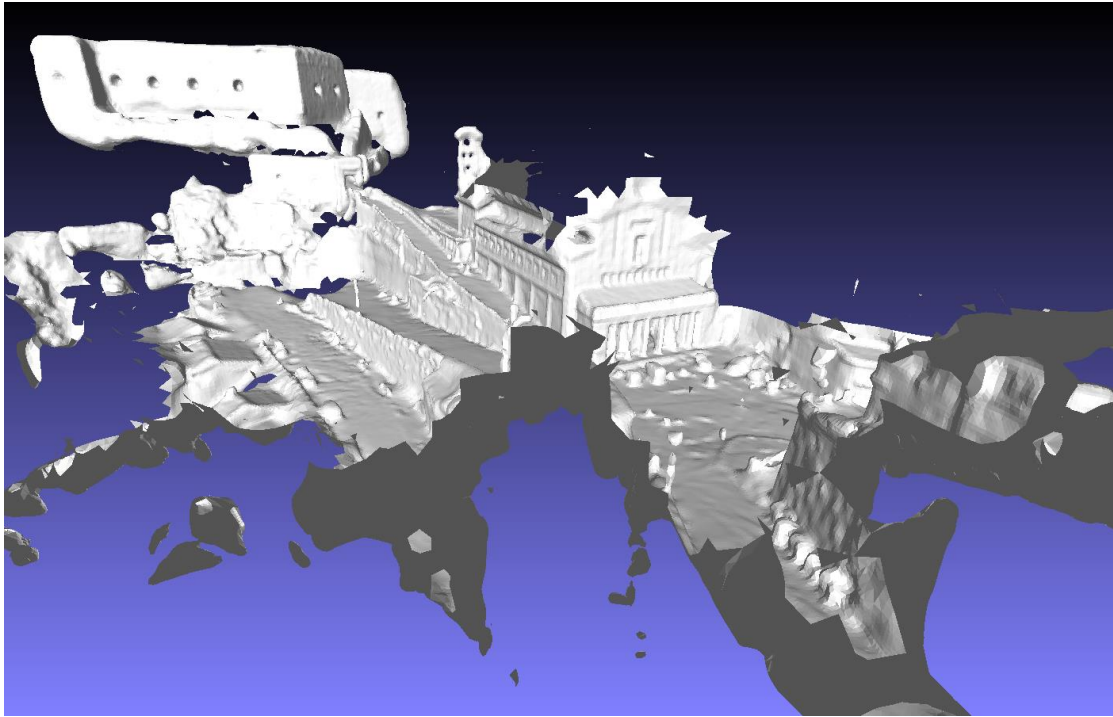


Figura 3.23. Modello risultante dall'applicazione del filtro di Poisson, in cui sono stati eliminati i poligoni di raccordo tra i bordi esterni del modello.

Questo tipo di alterazione sul modello, è reversibile se si esegue un filtro che permette di ritrasferire ai vertici i dati e le proprietà geometriche modificati nel processo di creazione delle superfici.

Ciò può essere fatto perché MeshLab mantiene il modello di base, ovvero il modello esistente prima dell'applicazione del filtro di Poisson, salvandolo in un layer separato.

L'algoritmo che permette di effettuare questo trasferimento di dati, assume che le due mesh siano simili ed allineate, per cui deve essere eseguito prima di ogni altro intervento successivo.

Si può notare la percezione più realistica che viene restituita alla mesh grazie a tale ripristino di proprietà e informazioni puntuali (Figura 3.24).

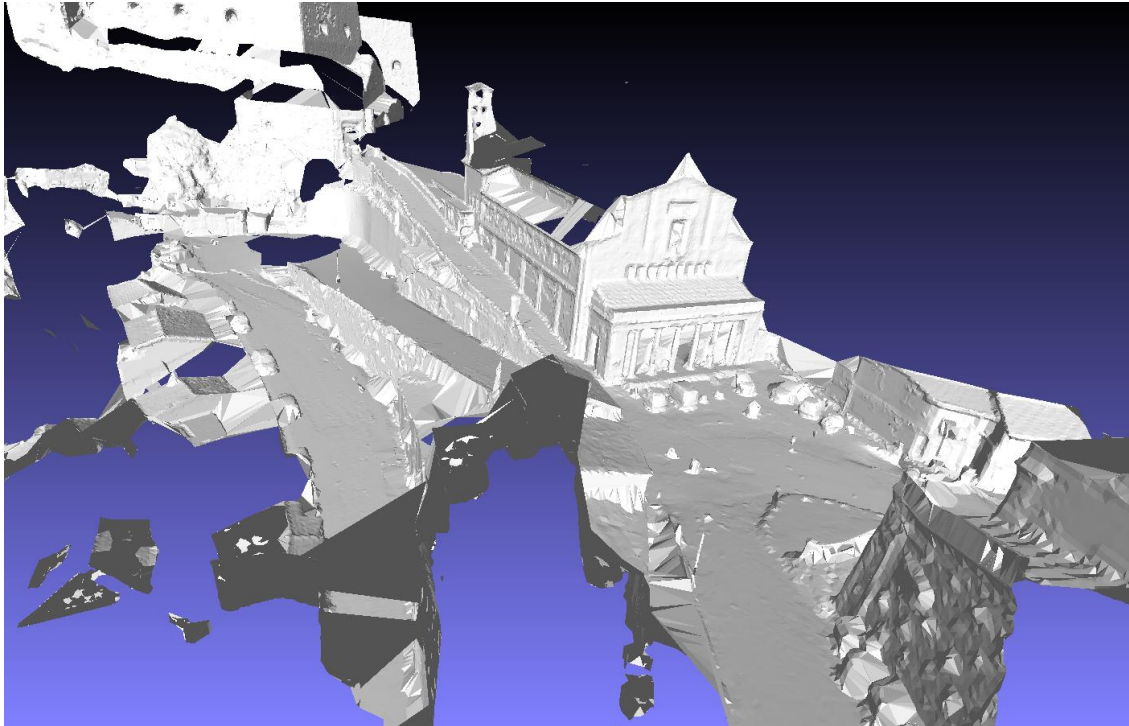


Figura 3.24. Modello a cui sono state ritrasferite le proprietà originarie dei vertici dopo la ricostruzione di Poisson.

Il passaggio successivo è quello di esportare il modello da MeshLab in formato obj per essere caricato nell'ambiente di lavoro del software Modo (versione trial di Luxology).

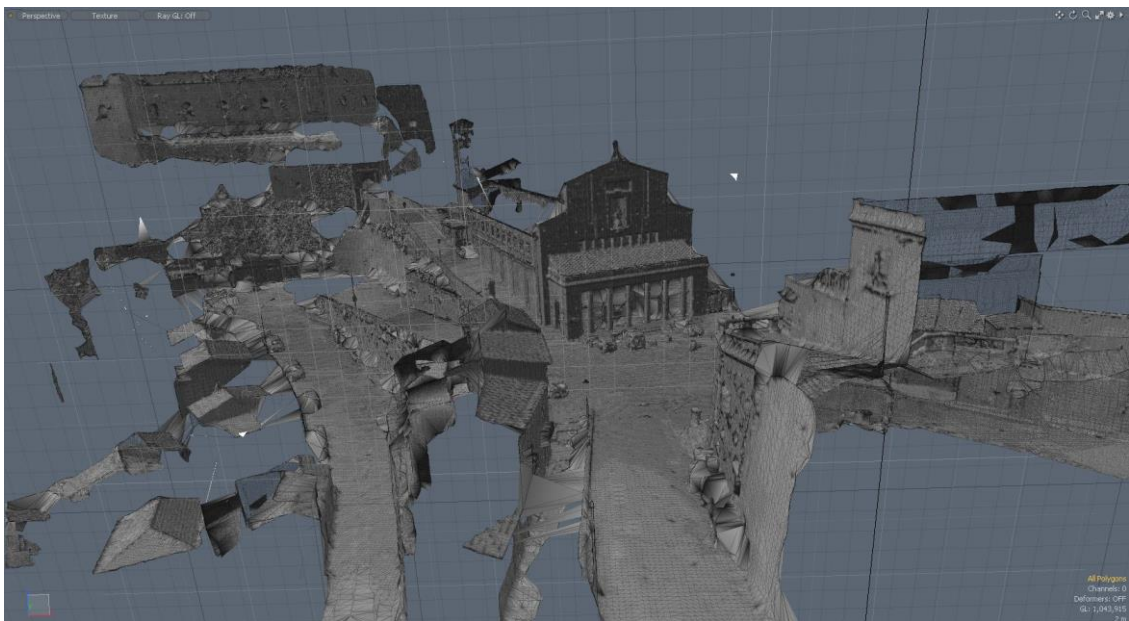


Figura 3.25 . Modello importato nell'ambiente di lavoro di Modo.

Qui verranno create geometrie di tipo CAD per le zone mancanti, sulla base della geometria esistente, verranno applicati ulteriori interventi di pulitura e di alleggerimento dei dati e verranno eseguite le operazioni di mappatura.

L'applicazione delle texture non è stata unica per ogni parte del modello. Alcune texture sono state ricavate da foto acquisite, con operazioni di ritaglio e correzioni prospettiche, altre sono state ricavate dai dati colorimetrici puntuali.

Prima di procedere con la creazione delle geometrie, operazione che è stata fatta per le aree mancanti ma anche per elementi o zone in cui le acquisizioni col laser TOF erano costituite più da punti di rumore che dati necessari, sono state eseguite delle operazioni di riduzione del numero di vertici con l'impiego di una particolare tecnica grafica che consente di limitare i calcoli computazionali richiesti dai sistemi di rendering.

I sistemi grafici tridimensionali in real-time, ovvero i sistemi in cui le immagini vengono elaborate e presentate con una velocità tale da fornire l'illusione del movimento, hanno bisogno che il processo di visualizzazione dei modelli non richieda un'elaborazione che impedisca di rispettare la soglia minima di fps (frame per secondo) che permette di avere tale percezione.

Il frame rate, o frame per secondo, indica quante immagini vengono prodotte o visualizzate al secondo. Mentre nel campo cinematografico tale valore è costante e standardizzato, e si aggira sui 25 fps, nei calcolatori esso è completamente variabile, funzione non solo della complessità della scena che si intende visualizzare, ma in maggior misura, dell'efficienza degli algoritmi utilizzati e della resa grafica desiderata.

Poiché è dimostrato che la percezione del movimento si ottiene con un valore minimo di 30 fps, è compito del progettista del sistema grafico garantire tale valore in ogni situazione. Tuttavia a causa del diverso sistema di produzione delle immagini (particolarmente per il fatto che le immagini artificiali sono in genere prodotte indipendentemente l'una dall'altra, senza alcun meccanismo di impressionamento di una pellicola), le immagini prodotte da un calcolatore risultano più "fredde" (statiche) con la conseguenza che la soglia minima si sposta dai 30 fps ad almeno 40-50 fps.

Quindi, dovendo utilizzare il modello per la grafica in tempo reale, è fondamentale ridurre la complessità della scena da visualizzare minimizzando il numero di poligoni.

Nonostante per questo problema si siano tentate varie strade nel tempo, fino ad ora i modelli semplificati (lowpoly) sono molto lontani dall'aspetto realistico e dettagliato dei modelli originali (highpoly).

Una soluzione adottata è quella di utilizzare mappe di normali per simulare le forme di un modello highpoly su modelli più semplici, in modo da migliorare la qualità di questi ultimi quando si è obbligati a ridurre il numero di poligoni.

Per rendere possibile ciò, viene creata una UVMap dal modello importato mediante un tipo di proiezione bidimensionale automatica del modello3D.

La creazione dell'UVMap servirà anche come riferimento per riportare i dati colorimetrici derivati dalle scansioni laser sul modello, operazione che viene eseguita in Meshlab.

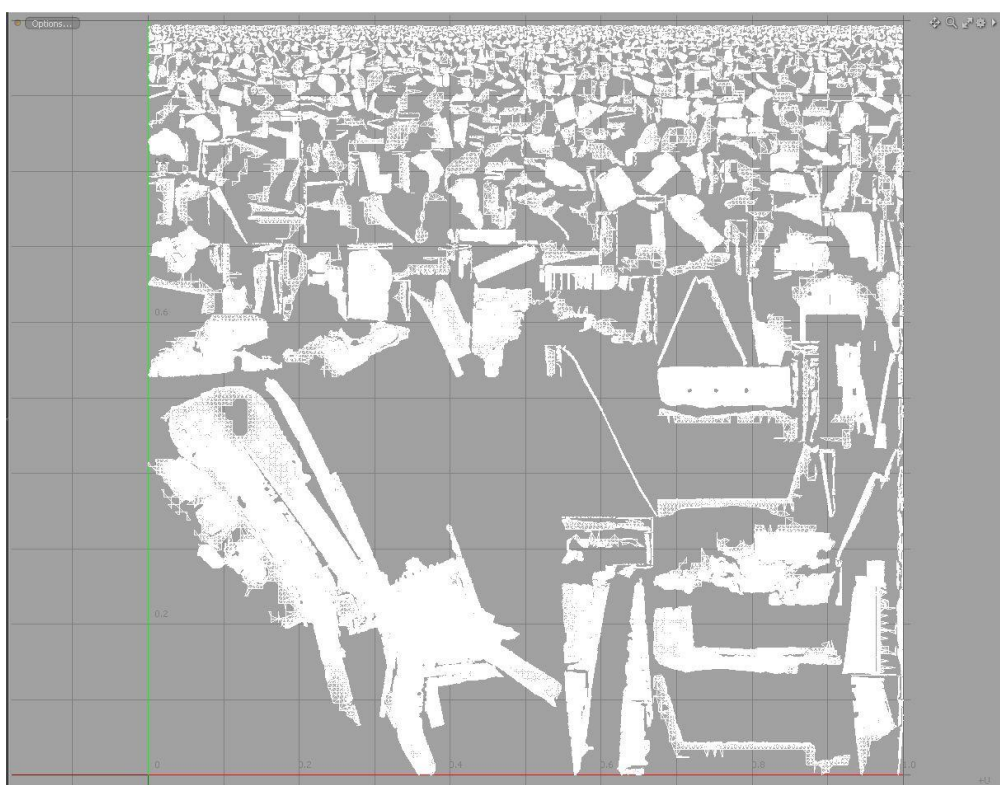


Figura 3.26. UVMap del modello 3D.

Una volta generata l'UVMap del modello, si passa alla creazione della normal map.

Una normal map è una mappa di normali, cioè un'immagine 2D in RGB che descrive, traducendole in colori specifici, le normali di tutte le facce che compongono una geometria di tipo mesh.

Essendo un'immagine 2D in RGB, la normal map rappresenta per ogni punto tutti e tre i vettori X, Y e Z; quindi, viene usato il rosso per l'asse orizzontale X, il verde per l'asse verticale Y e il blu per l'asse di profondità Z. Ogni pixel della mappa corrisponde al valore e all'orientamento di una normale del modello.

Tipicamente le normal map si ricavano da modelli ad alta risoluzione e si applicano a versioni poligonalmente ridotte degli stessi modelli. La normal map, attribuita al modello a bassa risoluzione tramite un materiale shader, simula visivamente lo stesso dettaglio delle geometrie originarie ad alta risoluzione. Si tratta evidentemente di un effetto visivo illusorio, ma molto efficace e largamente impiegato nella grafica 3D per applicazioni in real-time.

Quindi la soluzione migliore è partire da un modello poligonalmente più dettagliato e creare una normal map, che rappresenta ogni singolo dettaglio poligonale e lo traduce in dati da passare al pixel shader e che verrà poi mappata usando le coordinate UV sul modello con un numero inferiore di poligoni.

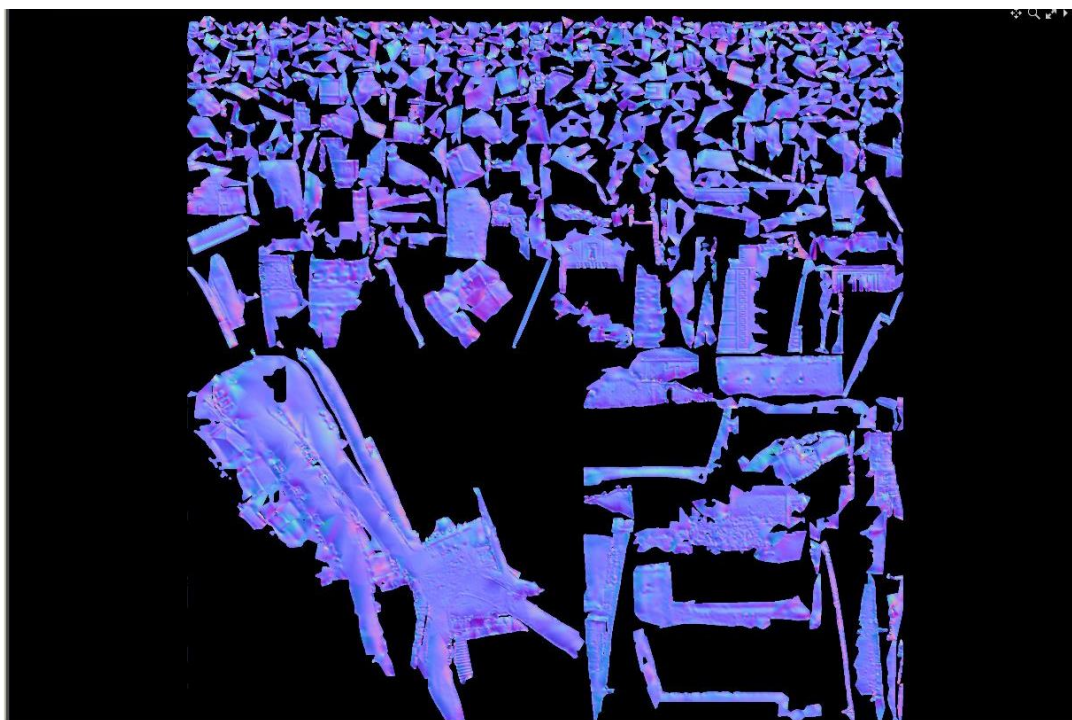


Figura 3.27. Normal map del modello 3D.

Per poter compiere ciò, la mesh viene duplicata e su una di esse viene applicato un filtro di riduzione per decimazione percentuale che ci ha permesso di rendere il modello meno complesso, in termini di calcolo computazionale, portandolo a circa 9000 poligoni.

Il layer rimasto inalterato servirà, invece, per la creazione della normal map.

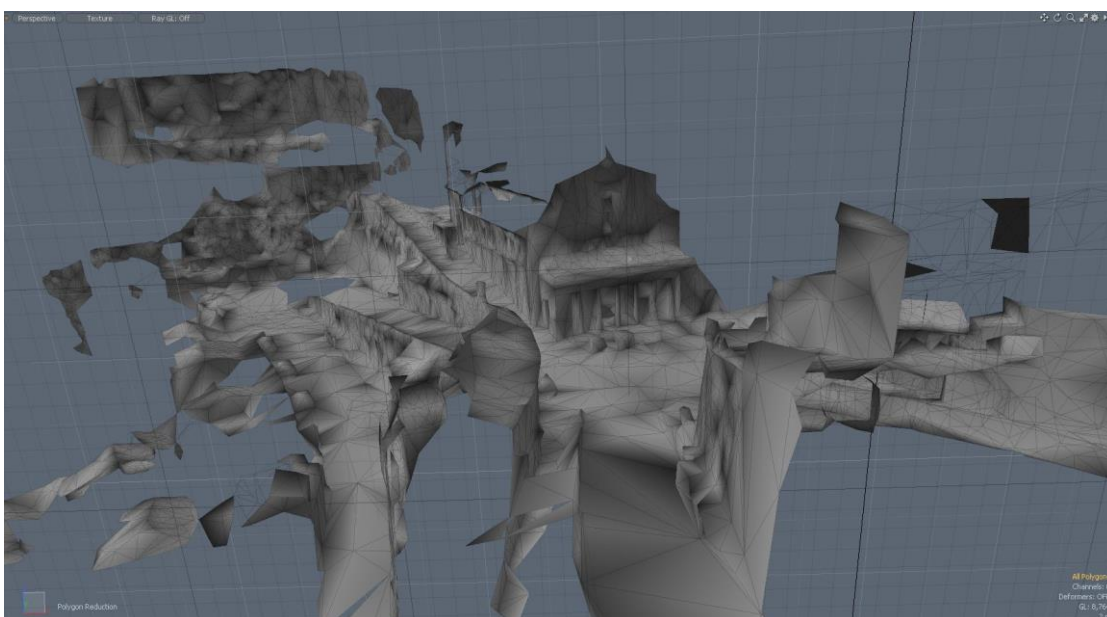


Figura 3.28. Layer ridotto del modello 3D (modello lowpoly).

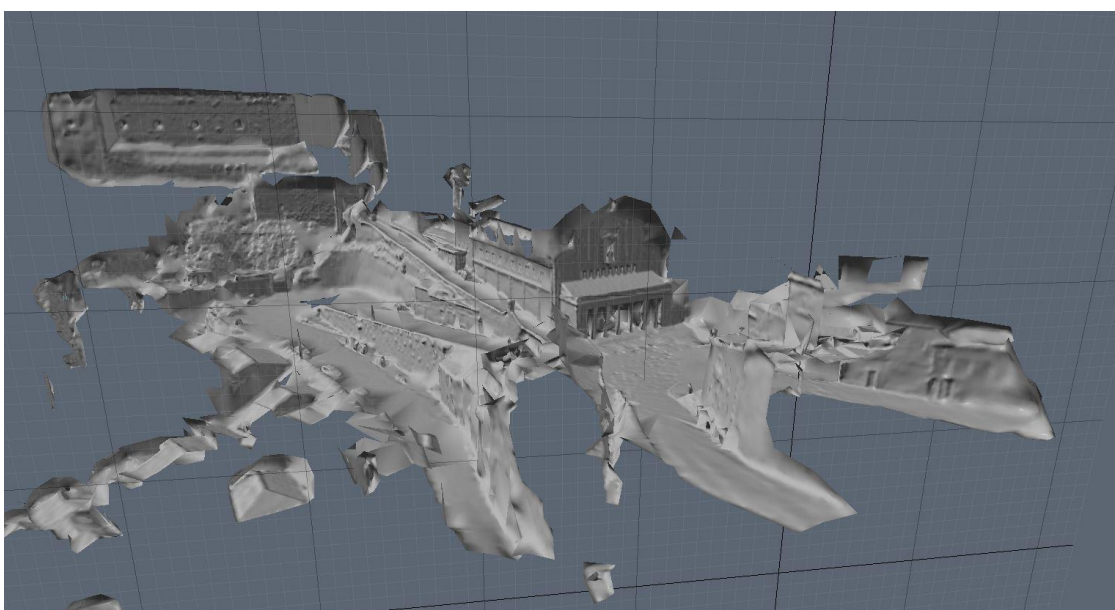


Figura 3.29. Modello lowpoly a cui è stata applicata la normal map.

Torniamo sul modello per passare al suo completamento geometrico.

Per la modellazione del Castello, che si è scelto di non acquisire totalmente col laser scanner per non avere dati eccessivi di un modello a geometria semplice, ne è stata richiesta la planimetria al Comune di Scilla.

La planimetria viene disposta in modo da far combaciare le geometrie degli elementi esistenti nella mesh con le corrispondenti misure riportate sulla tavola (Figura 3.30).

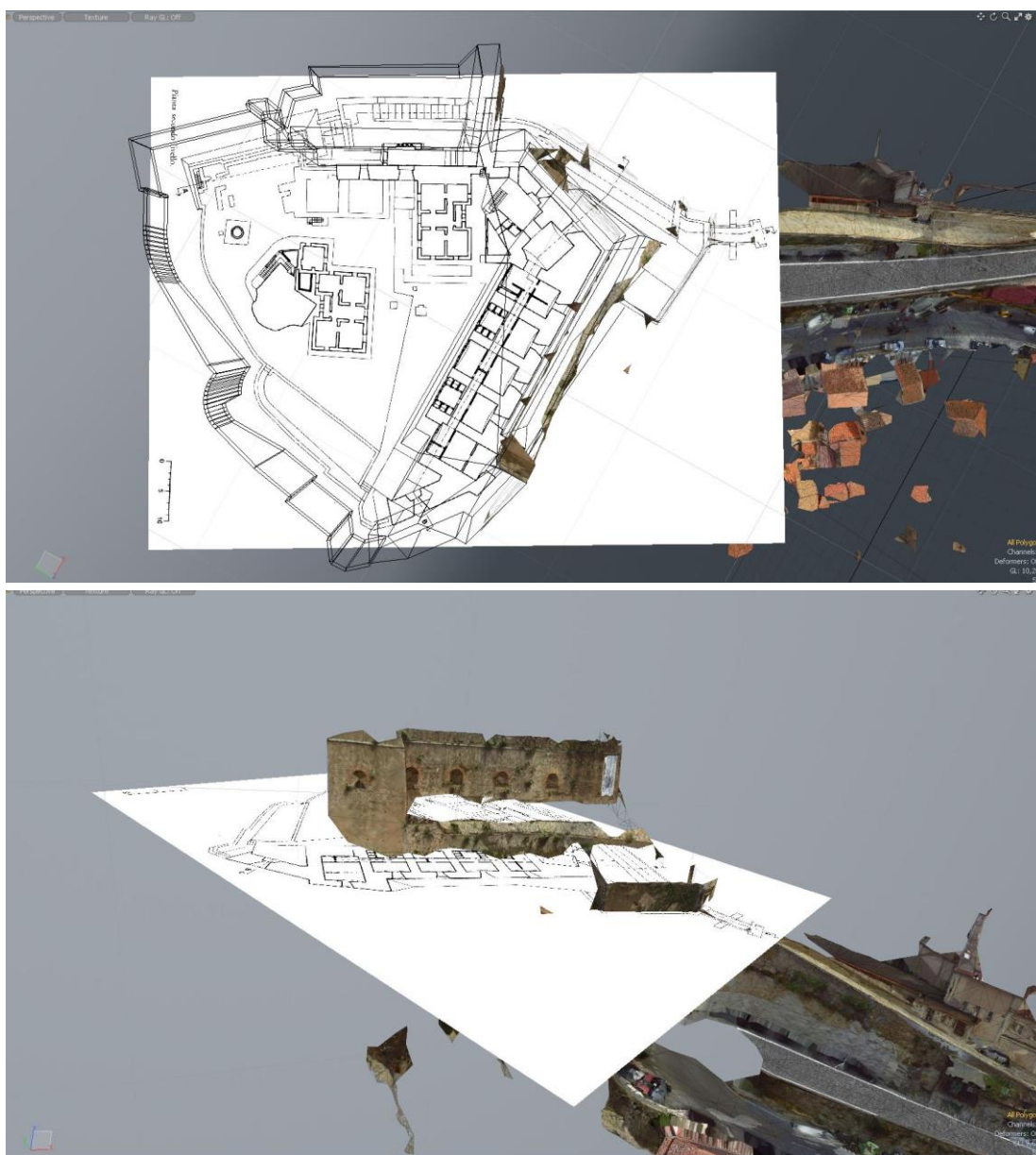


Figura 3.30. Inserimento della planimetria del Castello per integrare le informazioni dei dati di scansione e costruire la geometria CAD.

Dalle informazioni sulle altezze delle murature del Castello, si può procedere alla costruzione CAD delle parti mancanti.

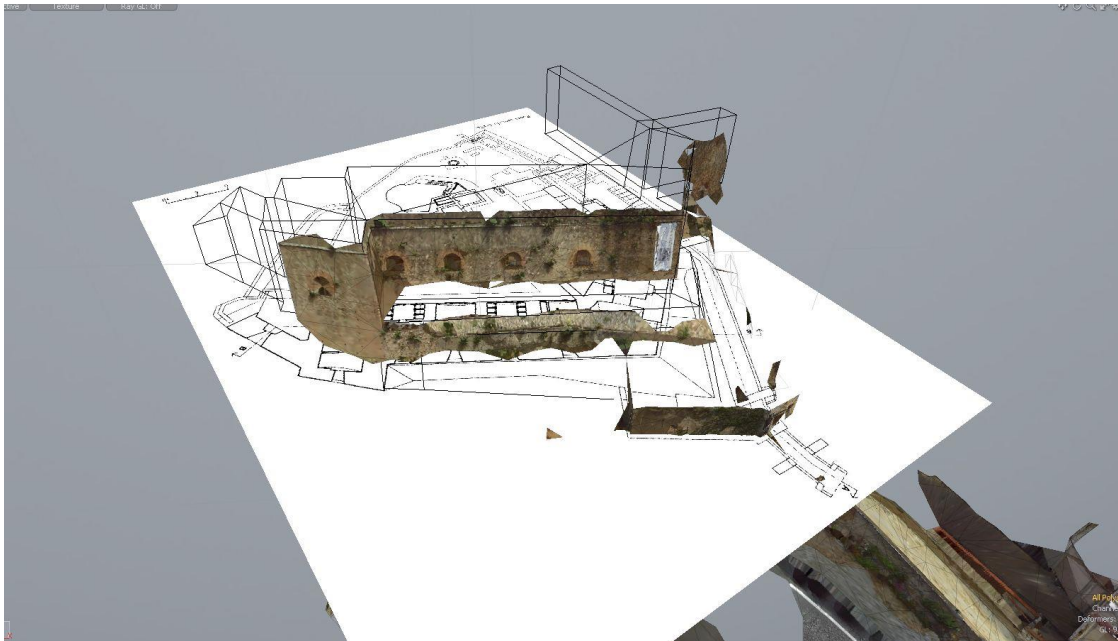


Figura 3.31. Estrazione delle geometrie CAD del Castello.

Importando i dati di scansione laser acquisiti dalla zona del porto, a cui vengono applicati i processi di filtraggio e di restituzione di un dato numero uniforme di vertici, si aggiunge la parte del promontorio su cui si erge il Castello.

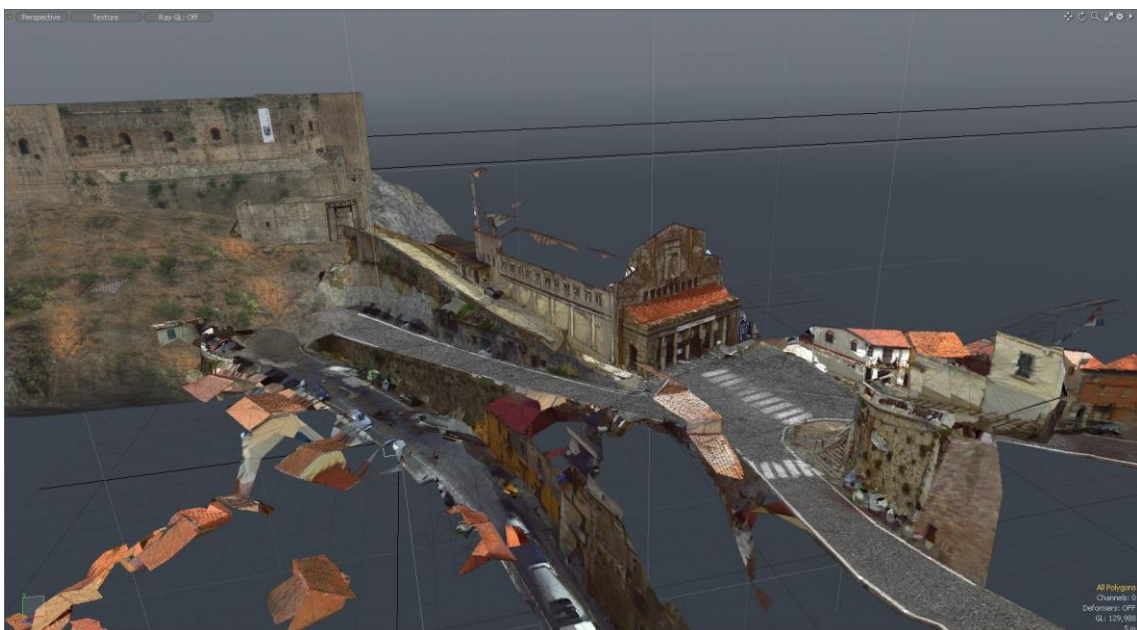


Figura 3.32. Costruzione e texturizzazione del promontorio su cui si erge il Castello.

A questo punto si passa alla ricostruzione architettonica della Chiesa Matrice.



Figura 3.33. Dati riportati dallo scanner laser relativamente alla Chiesa Matrice.

A partire dalle geometrie esistenti e sfruttando le informazioni sulle altezze dei vari elementi dell'edificio, si ricompone la struttura sul lato acquisito specchiando poi la costruzione in modo simmetrico.

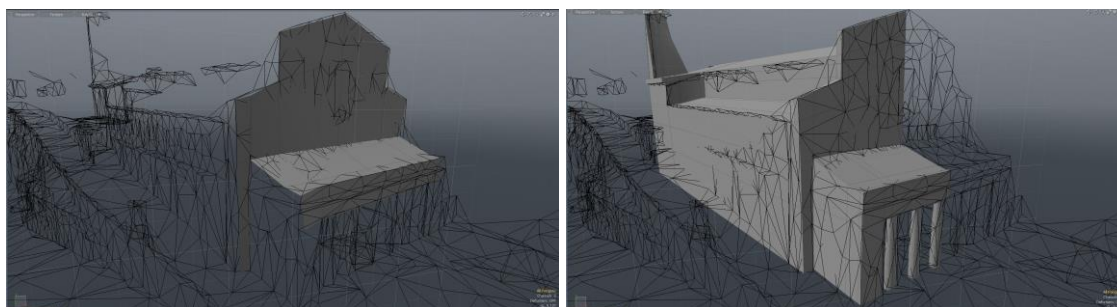


Figura 3.34. Costruzione della geometria CAD della Chiesa Matrice.

La parte interna del portico della Chiesa era affetta da molto rumore di acquisizione, a causa del tipo di geometria. Quindi è stata ripulita dagli elementi creati per errore geometrico e sono state definite e completate le colonne.

L'ultimo passo ha riguardato l'applicazione delle texture su tutto il modello ed una successiva correzione di tonalità e saturazione dei colori per rendere uniformi i diversi modelli (Figura 3.35).

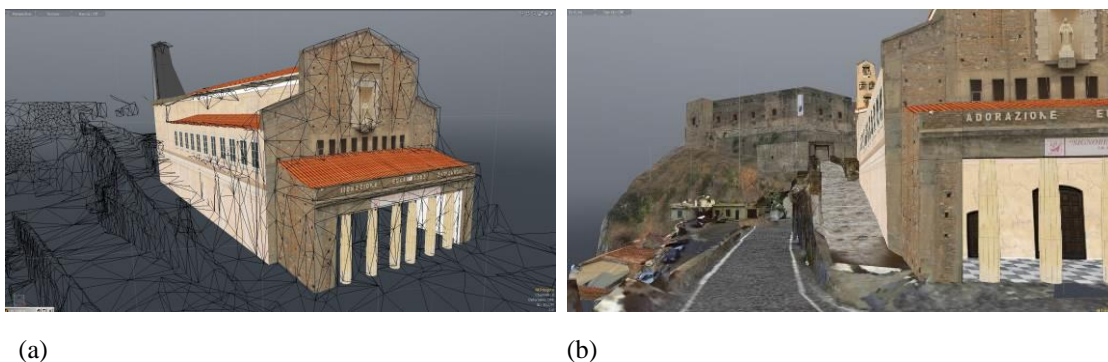


Figura 3.35. (a) Modello texturizzato della Chiesa Matrice e (b) del percorso di accesso al Castello.

Le operazioni descritte nella modellazione della Chiesa, sono indicative del procedimento seguito nella ricostruzione dei vari elementi che hanno costituito l'ambiente. Passaggi simili, infatti, sono stati eseguiti anche sulla scalinata frontale alla Chiesa che, insieme alle due diramazioni urbane che la fiancheggiano, costituisce il percorso di collegamento pedonale con la parte alta del paese.



Figura 3.36. Ricostruzione e texturizzazione della scalinata frontale alla Chiesa Matrice e del percorso di navigazione urbano.

Con l'aggiunta di tutte le geometrie CAD, si arriva ad un modello finale di circa 12000 poligoni.

Una volta completata la modellazione e la texturizzazione di ogni parte (Figura 3.37) che si intende rendere visualizzabile e navigabile, il modello viene esportato nel formato fbx per essere caricato nell'ambiente di navigazione (Unity 3D).

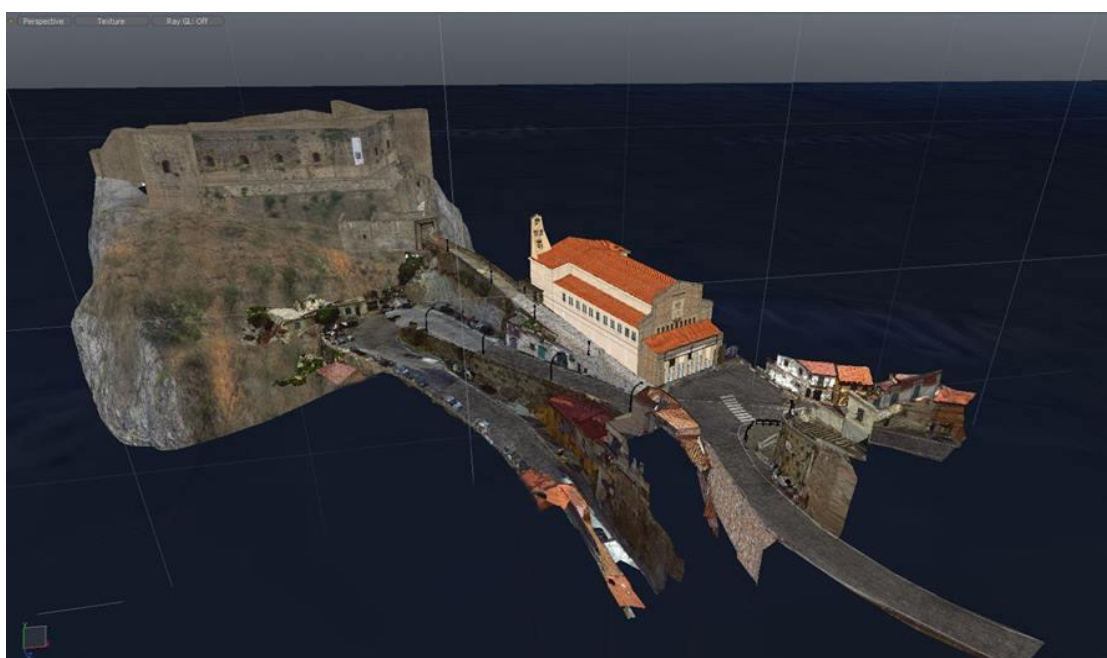


Figura 3.37. Modello 3D completo.

3.2.4 Fruizione virtuale

Per poter fruire del modello mediante un semplice browser web è stato utilizzato il software di sviluppo Unity. Unity è uno strumento di authoring integrato multiplatforma per la creazione di videogiochi 3D o altri contenuti interattivi, quali visualizzazioni architettoniche o animazioni 3D in tempo reale. Consente di utilizzare sia un editor per lo sviluppo o la progettazione di contenuti, sia un motore di gioco per l'esecuzione del prodotto finale.

Una volta importato il modello nell'ambiente di navigazione, si è proceduto con la programmazione del percorso di esplorazione inserendo i punti di collisione per le zone in cui la navigazione è impedita.

Nelle immagini di figura 3.38 è possibile osservare l'ambientazione del modello in Unity, in una prova di navigazione del modello in fase di completamento.

Nel sistema, l'utente potrà:

- creare il proprio avatar attraverso un apposito editor;
- scegliere quale zona visitare, tra quelle disponibili;
- muovere il proprio avatar all'interno della scena 3D;
- visualizzare informazioni (immagini, testi) riguardanti i punti di maggiore interesse, come castelli, statue, ecc.;
- interagire con gli altri utenti presenti, attraverso una chat.

Il sistema sarà accessibile tramite web player dedicato. Il web player di unity con il modello realizzato permette una navigazione in tempo reale tra i 60 fps e i 110 fps (dati ancora in fase di testing).

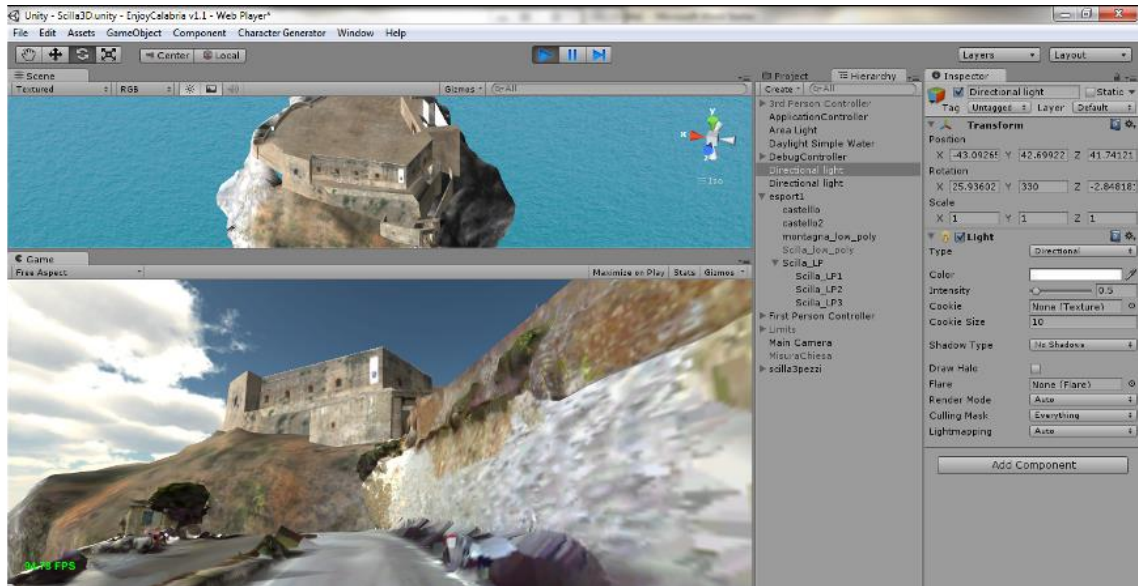
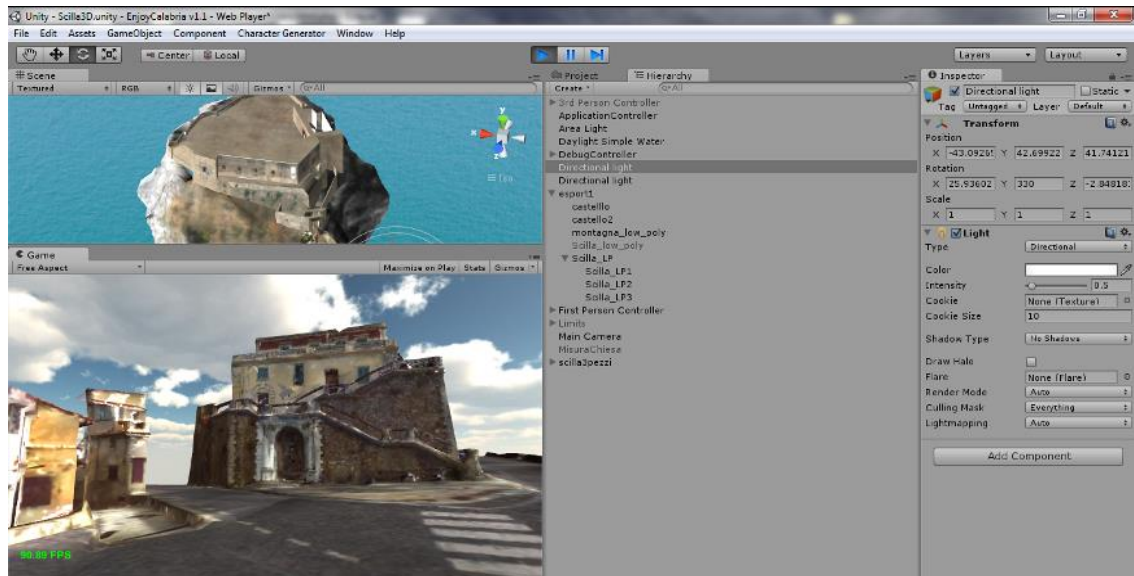


Figura 3.38. Modello ambientato in Unity.

3.3 Studio morfologico completo della mano destra del Bronzo “A” di Riace

Il lavoro condotto ha avuto l'intento di fare un'analisi geometrica e morfologica della parte interna della mano destra del bronzo “A” di Riace, al fine di restituire una documentazione per l'estrazione o il confronto di ipotesi storico-culturali relative ad uno stato originario del bene.

Il caso studio in esame è specifico per la difficoltà di dover risalire ad una morfologia superficiale, ed il volume racchiuso in essa, di un'area nascosta in quanto racchiusa all'interno dell'atto di impugnatura raffigurato rilevando solo le parti visibili.

L'utilizzo di una tecnica ad elevata precisione, quale la scansione a luce strutturata, ha aggiunto la difficoltà scaturita dall'interazione del fascio di luce proiettato con il materiale scuro e lucido nei tratti in cui la placcatura del materiale è ancora intatta.



Figura 3.39. Immagine dei Bronzi di Riace e particolare della mano.

3.3.1 I Bronzi di Riace e gli interrogativi storici

I Bronzi di Riace rappresentano uno dei più importanti capolavori dell'archeologia della Magna Grecia, e di tutto il patrimonio artistico mondiale.

I Bronzi, rinvenuti nel 1972 nei pressi di Riace (RC), e sottoposti ad operazioni di restauro dal 1975 al 1980, si trovano attualmente al Museo Nazionale della Magna Grecia di Reggio Calabria.

I Bronzi, oltre che per la loro squisita fattura, sono interessanti anche per i misteri che circondano la loro storia. Le innumerevoli ipotesi circa la loro identità, l'origine e gli autori sono supportate da numerosi studi di carattere storico e iconografico.

Lo studio condotto mira a fornire una serie di dati geometrici che saranno utili per identificare l'oggetto che originariamente stringeva il Bronzo A. Questo interrogativo è, infatti, uno dei punti fondamentali per l'individuazione dell'identità del Bronzo A.

Possono essere collocati in uno dei periodi più floridi della civiltà greca e della cultura dell'intera umanità, epoca in cui l'arte fiorì in forme estremamente evolute e la creatività ed il genio si spinsero a cercare i connotati dell'armonia e della libertà. Non è ancora certo chi fu l'autore (o gli autori) di questi capolavori, se uno dei più famosi artisti greci, Fidìa, Polykleitus, Myron o semplicemente un anonimo scultore della Magna Grecia.

Era certamente un artigiano altamente qualificato ed un artista sensibile, che quasi certamente è vissuto nel V secolo a.C.

D'altro canto, resta un mistero anche chi siano i personaggi che le due statue rappresentano. Essi possono essere Castore e Polluce, i gemelli mitologici figli di Giove e di Leda, o possono raffigurare personaggi realmente vissuti come Armodio e Aristogitone, o, più semplicemente, simboleggiano due guerrieri, armati di lancia e scudo, opliti dal fiero aspetto, uno sguardo orgoglioso ed un profilo greco.

Secondo l'ipotesi di Paolo Moreno, storico dell'arte greca e romana, il bronzo "A", il giovane, potrebbe raffigurare Tideo, un eroe della mitologia greca, figlio di Eneo, re di Calidone, e di sua figlia Gorge (o forse di Peribea, sua seconda moglie).

Tale studio è confortato da alcuni documenti storici, relativi al greco Pausania, che aveva redatto tra il 160 e il 177 d. C., una vera e propria guida turistica dei luoghi e monumenti della Grecia.

Pausania ha riferito che nella Polis di Argo c'era un monumento dedicato ai "Sette contro Tebe". Il monumento ad Argo comprendeva una quindicina di statue, delle quali facevano parte i due Bronzi di Riace, adornate di lance, elmi, spade e scudi.

L'archeologo Sandro Stucchi ipotizza che il bronzo "A" potrebbe rappresentare Euthymos di Locri, ritratto come guerriero vincitore a Temesa. Stucchi ritiene che la statua è opera del grande scultore Pitagora di Reggio. Secondo Paribeni, il bronzo "A" potrebbe essere il ritratto di un eroe, forse Aiace il Minore, figlio di Oileo, e sostiene l'autore sia un artista del Peloponneso. Paribeni trae queste conclusioni dalla maestria del Bronzo "A", che è, a suo parere, chiaramente non attica.

Lo studioso si allinea alla corrente di coloro che vedono tra il Bronzo A e quello B una distanza cronologica molto elevata, ritenendo il bronzo A opera di stile severo e quello B appartenente allo stile classico maturo.

Secondo recenti studi, i bronzi potrebbero ritrarre Castore e Polluce; le statue non erano sul fondo del mare a seguito di un naufragio, ma sono stati sepolti intenzionalmente. Ogni anno, nella seconda domenica di maggio, la popolazione di Riace cammina in processione fino alla scogliera dove sono state trovate le statue: le reliquie dei Santi Cosma e Damiano, patroni della città, sono immerse in acqua.

Lo studioso Giuseppe Roma, afferma che questa tradizione è un tipico esempio di continuità tra paganesimo e cristianesimo. Egli ricorda inoltre che, come dimostrato da Stanley, alcuni secoli fa la costa sarebbe potuta essere circa 400-500 metri più ampia di quella attuale.

Se si considera, inoltre, che nessuna traccia di nave è mai stata trovata nella zona dove sono stati scoperti i Bronzi, si potrebbe supporre che le statue sono state sepolte in tempi antichi.

3.3.2 Analisi visiva della mano destra del Bronzo "A"

La semplice analisi visiva delle statue permette solo alcune osservazioni generali.

I segni riconoscibili sulle due statue di bronzo hanno portato più di un ricercatore ad individuare per ciascuna di esse tre elementi venuti meno nel corso delle vicende che le hanno viste protagoniste. In particolare per il Bronzo A esistono alcune ipotesi di ricostruzione degli elementi mancanti che prevedono:

- un elmo corinzio portato rialzato sulla fronte,
- uno scudo oplitico,
- una lancia.

In figura 3.40 sono mostrate due possibili rappresentazioni del Bronzo "A", presenti in letteratura, contenente i tre elementi mancanti.

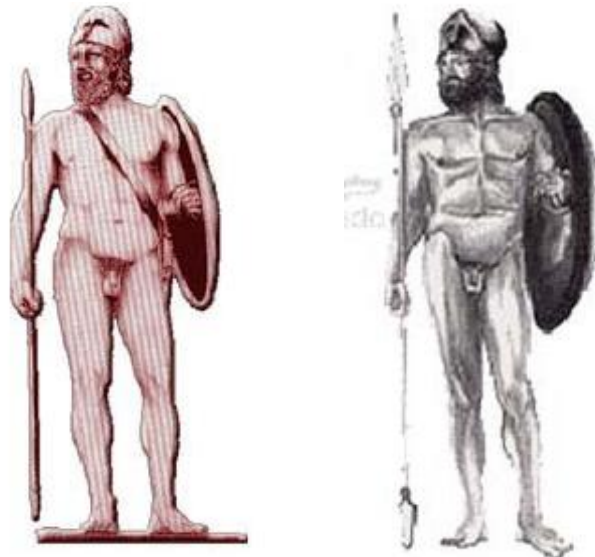


Figura 3.40. Ipotesi storiche di ricostruzione delle parti mancanti del Bronzo "A".

Per quanto concerne l'elemento tenuto dal Bronzo A nella mano destra, è possibile evidenziare quattro zone della mano che, discostandosi dalla configurazione anatomica naturale, si possono considerare significative in riferimento ad un possibile oggetto impugnato.

Tali zone sono collocate presso il muscolo abditore breve del pollice, il dito mignolo, il dito anulare e il dito medio. L'ipotesi che il Bronzo tenga in mano una lancia è, di fatto, avvalorata dalla presenza sul dito medio di una marcata deformazione, approssimabile da una forma cilindrica (Figura 3.41).



Figura 3.41. I dettagli della mano del Bronzo "A".

Si nota che l'atto di impugnare del Bronzo è alquanto particolare: la mano destra è estesa in avanti, in posizione supina sul piano orizzontale e rivolta verso l'interno, le

dita sono flesse e il dito indice è abdotto, tra lo stesso dito ed il dito medio è inserita l'asta della lancia e con le altre dita è avvolta e impugnata l'arma.

In definitiva, l'indice ed il medio condizionano la direzione della cuspid e le altre tre dita mantengono ferma l'asta. Tale impugnatura, se può risultare insolita ai nostri giorni, sembra invece essere alquanto diffusa nelle rappresentazioni pittoriche e scultoree del periodo greco-romano. Molte di esse, infatti, mostrano guerrieri o personaggi illustri nell'atto di impugnare lance, scettri e bastoni con questa particolare modalità (Figura 3.42).



Figura 3.42. Impugnature di lance in varie raffigurazioni storiche.

La tecnica, utilizzata per impugnare la lancia, determina un insieme di vantaggi tecnico-dinamici di estremo interesse. L'arma si direziona in avanti in maniera naturale, gli assetti articolari si ritrovano perfettamente allineati e nel momento dell'impatto, il contraccolpo si scarica sulle grandi articolazioni scapolo-omeroale e coxofemorale, senza arrecare traumi. L'allineamento degli assetti articolari consente ai guerrieri di sprigionare anche con gli arti inferiori la massima potenza sulla cuspid e della lancia mantenendo il corpo in perfetto equilibrio. Con questa impugnatura, la lancia può essere trasportata con sicurezza e agevolmente per lunghi tragitti.

Tutte le ipotesi presenti in letteratura sono supportate da studi iconografici e/o fonti storiche.

Questa ricerca vuole invece fornire agli studiosi una serie di conferme oggettive sui dati geometrici, che non sono facilmente misurabili sulle statue in modo diretto. Per cui, vengono condotte scansioni 3D per la ricostruzione e l'indagine delle parti anatomiche più interessanti, che potrebbero fornire dati oggettivi per lo studio sull'identità dei personaggi raffigurati.

3.3.3 Metodologia di ricostruzione 3D

La tecnica impiegata per la ricostruzione della superficie interna della mano del Bronzo impiega la luce strutturata per restituire informazioni geometriche puntuali di elevata precisione ($10^{-6}\mu\text{m}$).

Un fascio di luce proietta sull'oggetto frange orizzontali e verticali e, per il principio della fotogrammetria, le immagini riprese da due camere stereo sono interpolate restituendo una densa nuvola di punti. Lo scanner utilizzato in questo processo è stato un laser scanner a luce strutturata prodotta da *ScanSystems Srl*.

La difficoltà principale è stata non solo quella di rilevare un'area racchiusa, ma è derivata anche dal fatto che il palmo fosse orientato verso il corpo del Bronzo occultando gran parte della geometria esterna. Ciò ha creato notevoli problemi se si considera che, per eseguire l'acquisizione, lo scanner necessita di osservare un punto contemporaneamente con entrambe le telecamere.

La mano è stata acquisita da varie posizioni, in modo da ottenere quante più parti possibili dell'oggetto, soprattutto prossime alla parte interna della mano (Figura 3.43).

Adottando posizioni multiple di scansione, le acquisizioni sono riuscite a coprire circa il 95% della mano, limitando la parte mancante solo al 5% della superficie in modo da essere ricostruita per interpolazione.

Questo ci permette di affermare che la fedeltà del modello ricostruito è adeguato per svolgere analisi quantitative su di esso.

In totale, sono state effettuate 25 operazioni di scansione, ottenendo 2.473.171 punti.

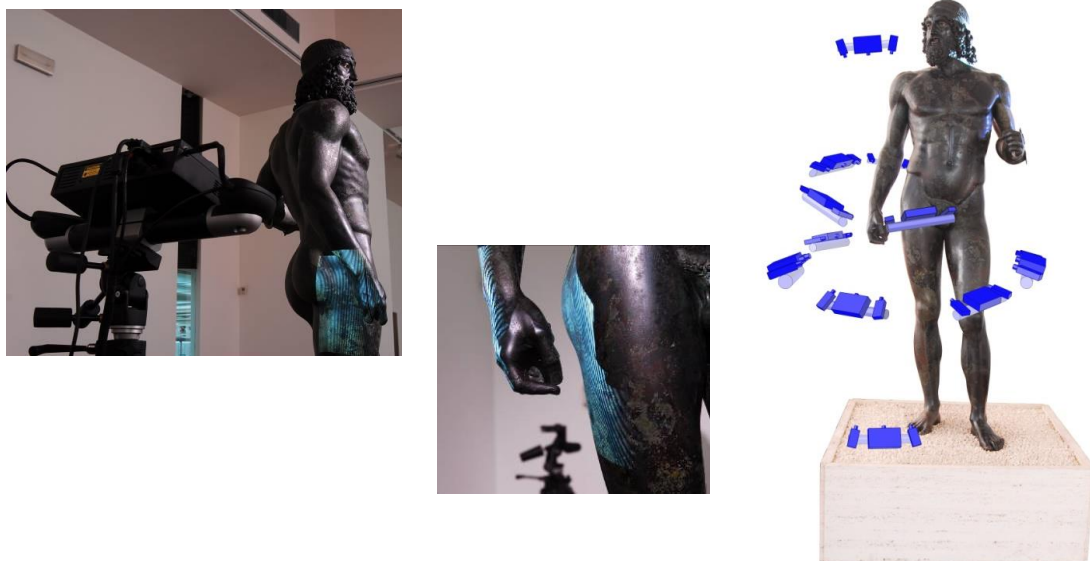


Figura 3.43. Posizioni della procedura di acquisizione.

E' stato utilizzato il software proprietario *Scanprobe* per l'acquisizione di immagini 3D e la registrazione tra le nuvole di punti.

Lo stesso software è stato impiegato per la riduzione del rumore e la triangolazione mentre, per rifinire la ricostruzione e risalire alle parti mancanti è stato utilizzato il software opensource *MeshLab*. Al termine di questa fase, il numero di punti è stato 191.952. Infine, il modello CAD è stato completato della relativa texture (Figura 3.44).



Figura 3.44. Nuvole di punti registrate e modello poligonale della mano destra del Bronzo "A".

3.3.4 Analisi del modello

Una volta ottenuto il modello virtuale della mano, siamo stati in grado di effettuare una serie di analisi, al fine di determinare la forma e le dimensioni della cavità interna della mano destra del Bronzo “A”.

La creazione del modello, oltre a costituire una base di studio analitico, ha permesso agli archeologi di poter apprezzare la possibilità di poter eseguire una libera rotazione dell'oggetto, consentendone l'osservazione da angolazioni che, a causa della vicinanza della mano con il corpo, sarebbe stato impossibile ottenere direttamente.

Vediamo quali sono state le deduzioni possibili dalla valutazione geometrica del modello.

Il box che contiene le superfici di ricostruzione della mano racchiude un volume pari a 182x101x105 mm (Figura 3.45).

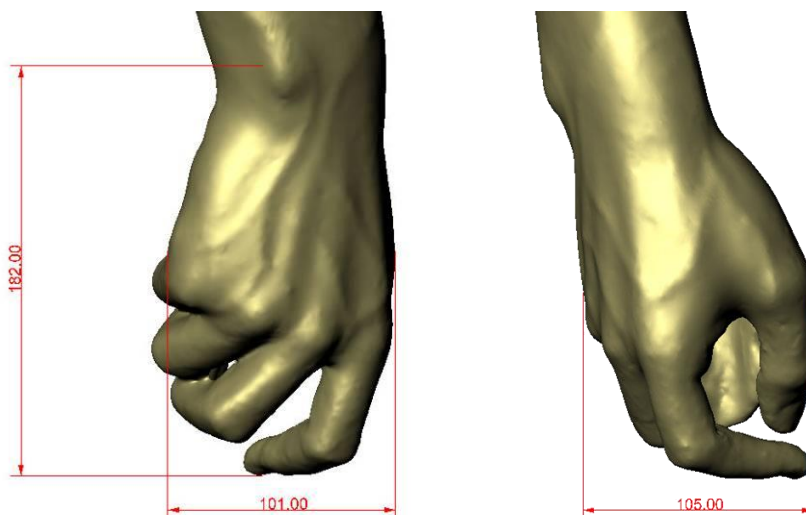


Figura 3.45. Volume della mano.

La prima analisi riguarda una parte del dito medio, che presenta un appiattimento evidente: il suo profilo appare come un arco di cerchio. In prossimità di questo appiattimento abbiamo definito il cilindro massimo inscrivibile e, a partire dalla base del suo asse, il modello 3D è stato sezionato secondo una serie di piani paralleli, ottenendo 14 sezioni con offset di 10mm. Tale suddivisione ha permesso di determinare le circonferenze massime inscrivibili in ciascuna sezione e quindi il volume all'interno del quale è possibile ipotizzare la presenza di un oggetto (Figura 3.46).

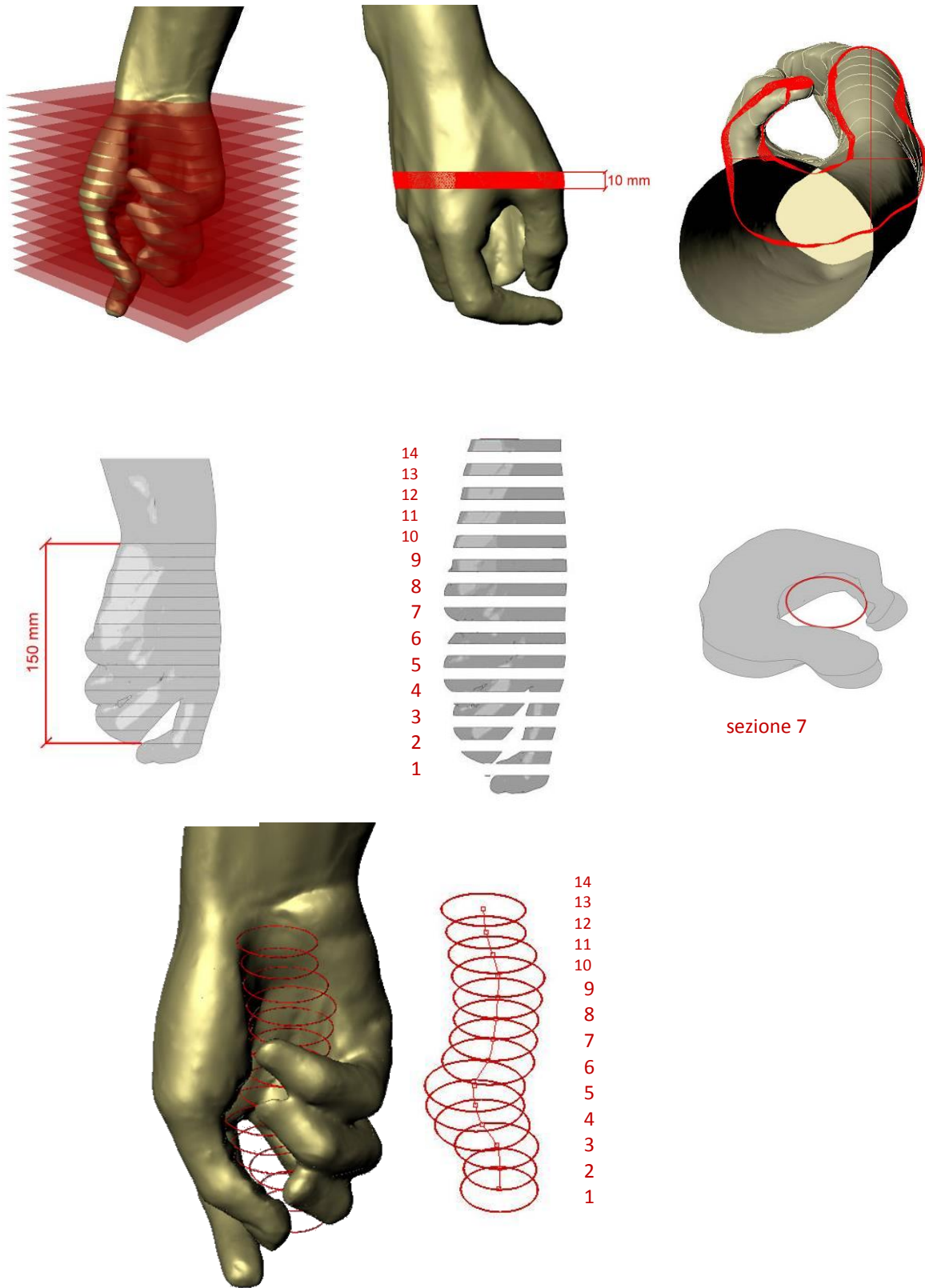


Figura 3.46. Divisione in sezioni della mano e relative circonferenze massime inscrivibili in ciascuna di esse.

In tabella 3.2, sono riportati i 14 diametri relativi alle circonferenze ottenute in ogni sezione.

Sezione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Diametro max (mm)	33,8	31,6	36,1	41,1	41,6	42,8	38,3	37,1	34,6	36,1	37,9	35,3	32,3	32,8

Tabella 3.2. Diametri delle circonferenze inscritte in ogni sezione della mano.

In corrispondenza delle 4 sezioni della mano, in cui si riscontra un evidente discostamento del palmo dalla configurazione anatomica, i diametri corrispondenti risultano essere rispettivamente:

- 1) 33,8 mm – per la sezione corrispondente al dito medio (sezione n° 1).
- 2) 38,3 mm – per la sezione corrispondente al dito anulare (sezione n° 7);
- 3) 36,1 mm – per la sezione corrispondente al dito mignolo (sezione n° 10);
- 4) 32,3 mm – per la sezione corrispondente al muscolo abductore breve del pollice (sezione n° 13).

Possiamo notare questi punti di maggiore scostamento evidenziati sul modello nelle figure sottostanti (Figura 3.47).

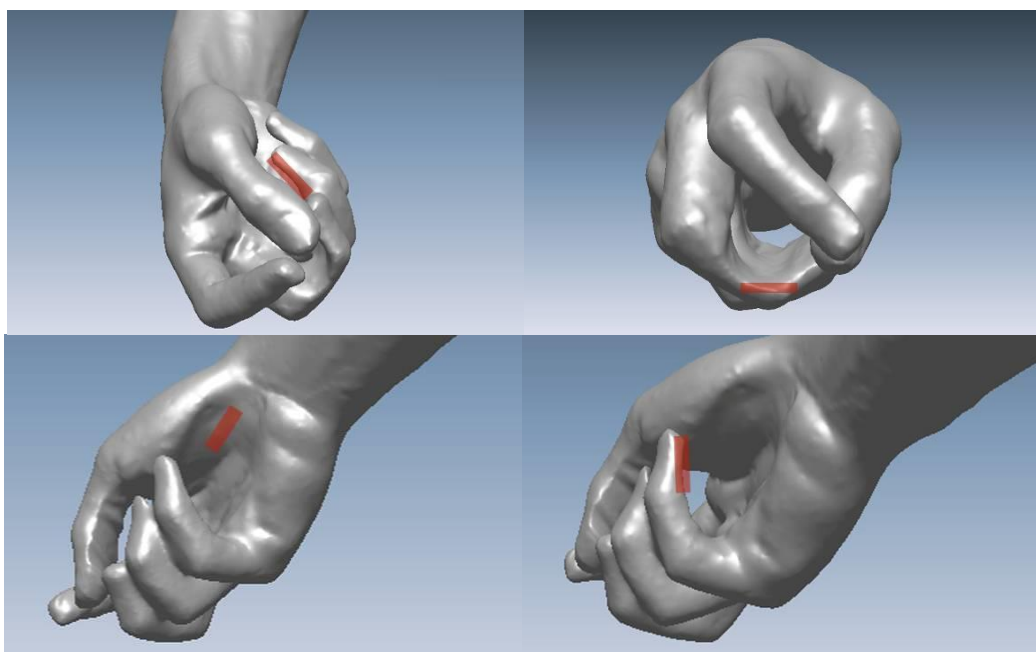


Figura 3.47. Viste del modello raffiguranti le parti relative alle sezioni con scostamento dalla configurazione anatomica.

Tali rilievi consentono di individuare un elemento cilindrico, di diametro massimo pari a circa 30 mm, sempre contenuto all'interno del volume individuato dalle 14 circonferenze nonché adiacente ai punti della mano corrispondenti alle deformazioni che si discostano dalla configurazione anatomica naturale (Figura 3.48).

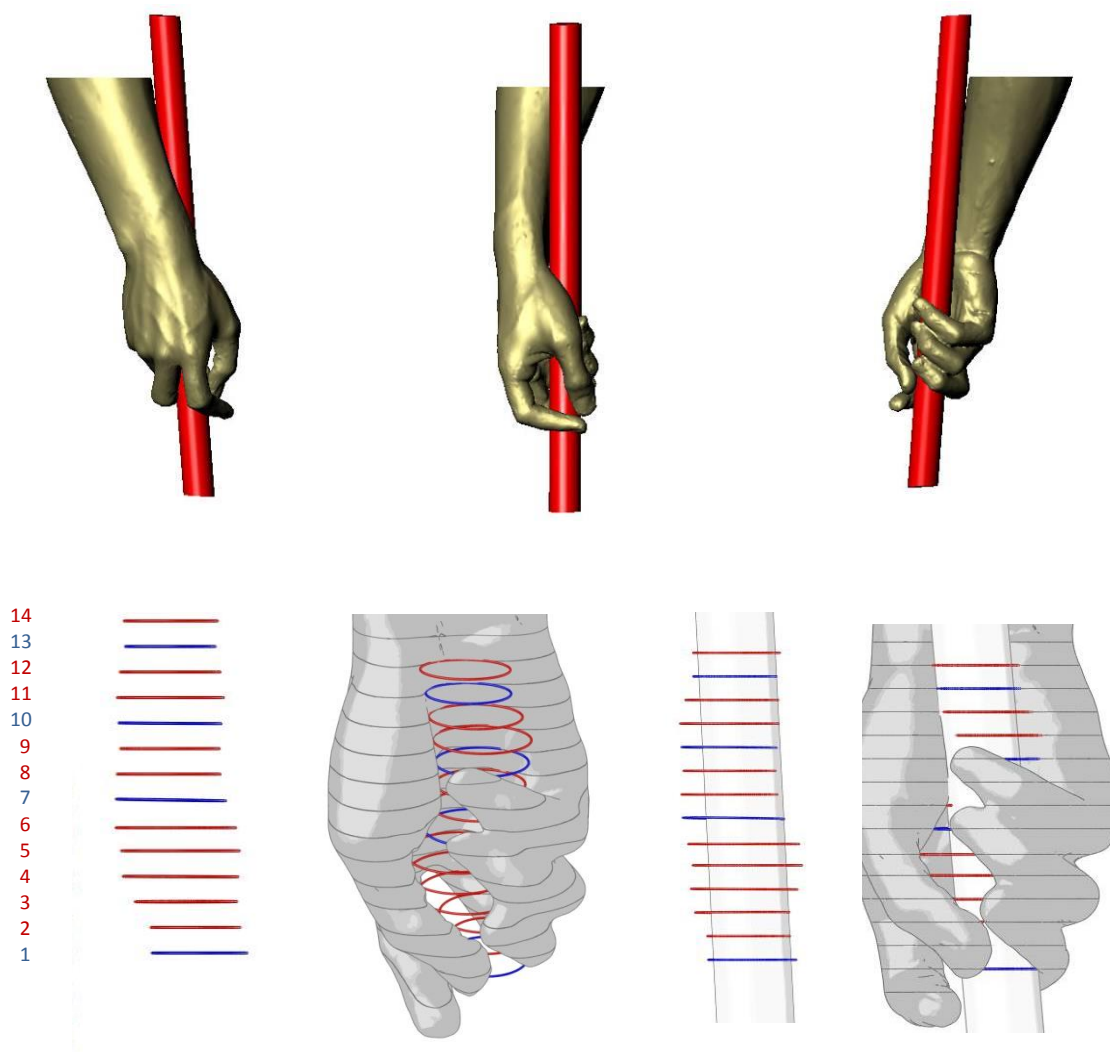


Figura 3.48. Cilindro massimo inscritto contenuto all'interno del volume definito dalle 14 circonferenze e adiacente alle sezioni 1-7-10-13.

Per completare, aggiungiamo la vista dall'alto delle sezioni della mano, con l'elemento cilindrico e la circonferenza massima tangente al palmo delle sezioni significative per l'analisi (Figura 3.49).

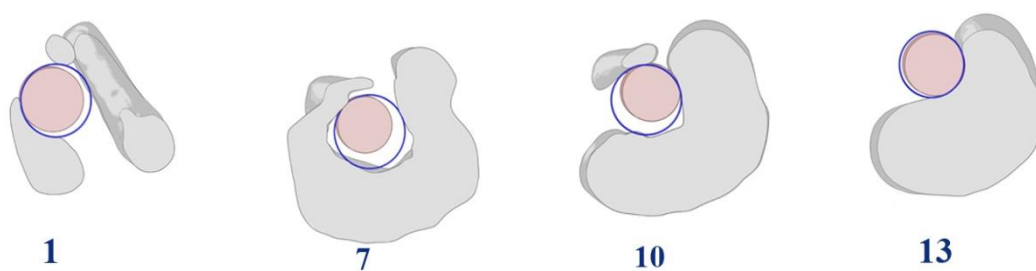


Figura 3.49. I dettagli delle sezioni 1-7-10-13 con il cilindro inscritto di 30 millimetri di diametro.

Se andiamo a sezionare la mano escludendo la parte che ne chiude la vista, possiamo notare la precisione della ricostruzione interna ottenuta a partire dai rilievi eseguiti (Figura 3.50).



Figura 3.50. Conformazione del palmo della mano.

Ovviamente, è sempre possibile ipotizzare la presenza di un oggetto, con un asse non rettilineo o con una forma non cilindrica, contenuta all'interno del volume del palmo della mano.

Nella figura sottostante sono mostrate due possibili ricostruzioni:

- l'ipotesi più probabile derivante dall'analisi eseguita è l'originaria presenza di una lancia, di circa 2 m di lunghezza con un diametro di 30 mm (Figura 3.51-a);
- è meno probabile l'altra ipotesi secondo cui il bronzo avrebbe avuto in mano le redini di un cavallo (Figura 3.51-b).

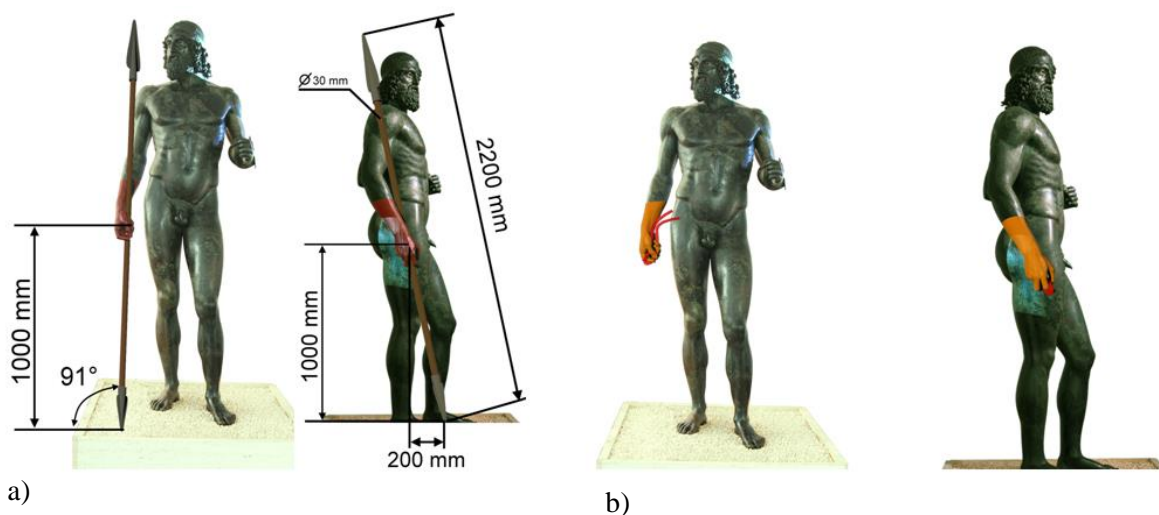


Figura 3.51. Le due ipotesi differenti: (a) una lancia, (b) la briglia di un cavallo.

Senza entrare nel merito circa l'individuazione dell'identità del Bronzo "A" possiamo assumere che, per l'analisi condotta, la deduzione che se ne trae risponde ad una rappresentazione in cui il bronzo teneva originariamente nella mano destra una lancia di 30 mm di diametro e circa 2200 millimetri di lunghezza.

3.4 Ricostruzione 3D di gioielli di arte orafa: impiego e confronto di tecniche e metodologie di reverse engineering

Il lavoro prende in considerazione la problematica di creare il modello 3D di oggetti in cui la ricostruzione di forma può essere significativamente alterata da fattori che possono determinare una piccola percentuale di errore di acquisizione sulla superficie dell'oggetto.

Tali fattori, nel caso delle ricostruzioni di gioielleria, sono costituiti da caratteristiche geometriche e superficiali, quali particolarità di forma e riflessione del materiale. La sperimentazione condotta ha riportato una valutazione della loro influenza sulla ricostruzione confrontando l'impiego di tecniche attive e passive.

Gli oggetti su cui è stata condotta la sperimentazione sono stati selezionati cercando di fornire una casistica per tipo di geometria, marcatura dei profili superficiali, colore e lucidatura del materiale, prediligendo creazioni di arte orafa, con l'intento di dare delle indicazioni sulla creazione di modelli geometrici di superfici quali quelle di alcune tipologie di monili che hanno accompagnato le diverse civiltà e che fanno parte dei beni di bagaglio culturale.

A varie epoche spesso vengono fatti risalire oggetti preziosi di ornamento personale o di sfarzo decorativo degli ambienti del tempo, né sono rari i ritrovamenti di oggetti di oreficeria nei corredi di sepoltura.

I gioielli, nell'antichità così come nel mondo di oggi, sono un richiamo ad una cultura ma sono altresì l'espressione di valori affettivi, economici, tecnici, storico-artistici.

La loro documentazione digitale e la valorizzazione sono strumenti di conoscenza e comunicazione.

Tutt'oggi gli artigiani orafi che ripropongono la creazione di preziosità antiche creano uno stile che si distingue e prevale in eleganza, qualità e gusto.

Per il lavoro in questione, sono stati selezionati dei gioielli in cui risaltano delle caratteristiche particolari, in modo da poter valutare quanto ognuna di queste influenze il risultato nell'impiego della tecnica.

La precisione delle tecniche impiegate è legata alle performance dei dispositivi utilizzati, ai parametri di impiego settati, al principio di funzionamento su cui si basano e, non di meno, alle capacità e all'esperienza dell'operatore.

Le tecniche scelte per il tipo di rilievo, uno scanner a luce strutturata e due diverse tecniche di fotogrammetria multi-view ad alta risoluzione, sono specifiche per il livello di dettaglio che si vuole ottenere e consentono di ottenere risultati confrontabili. Tutte le tecniche si basano sul principio fotogrammetrico delle acquisizioni stereo; inoltre, per far fronte alla precisione dello scanner a luce strutturata (10^{-6} μm), nel caso dell'impiego fotogrammetrico è stata utilizzata una camera reflex Nikon D7000 dotata di un sensore d'immagine CMOS DX (23,6x15,7 mm) da 16,2 MP ed un obiettivo per macrofotografia del tipo AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED in modo da avere immagini dettagliate e ad alta risoluzione.

3.4.1 Il gioiello: espressione di periodi storici, tradizioni sociali e cambiamenti culturali nel tempo

I gioielli hanno sempre accompagnato la storia dell'uomo: parlano di culture e tradizioni, sono un'espressione di stato sociale, di costume, innovazione ed evoluzione di varie epoche.

La tradizione dell'arte orafa che ha radici profonde e gelosamente custodite da millenni di storia. L'uomo ha sempre cercato, fin dai tempi più remoti, di adornarsi con oggetti la cui rarità o la difficile reperibilità conferivano personalità, importanza e prestigio, nell'ambito di una comunità che esigeva l'istituzione di gradi gerarchici o l'attribuzione di incarichi preminenti.

L'arte orafa, oltre che essere espressione di posizione e prestigio sociale, ha anche avuto una funzione apotropaica, religiosa e artistica. Nelle figure sono riportati alcuni oggetti riferibili a varie epoche.

Si sono ritrovati gioielli risalenti all'età del bronzo in numerosi siti archeologici; indossati servivano da amuleti e da oggetti magici per infondere il coraggio, la forza e la strategia necessarie per la caccia.

Per iniziare la storia del gioiello, così come viene riportata, dobbiamo trasferirci nel Mediterraneo orientale nel 2000-2200 a.C.



Figura 3.52. Arte glittica: cammeo di Augusto.

Con l'avvento della scrittura, o meglio, da quel periodo in cui l'uomo cerca di tradurre, con segni, immagini e poi con lettere, il messaggio fonetico, termina la fase preistorica e inizia l'interesse dell'uomo verso i minerali di origine secondaria e cioè alluvionale: l'oro.

L'età dell'oro inizia cinquemila anni a.C. in Egitto e, durante la quarta dinastia (2500 a.C.) si inizia a fondere il metallo con fornelli alimentati dall'afflusso d'aria. Per gli egizi l'oro rappresentava la carne di Ra, dio del sole. Per le religioni orientali, come per alcune altre, prevale il carattere votivo dell'oro.

Una leggenda indiana narra che il nostro mondo ha origine da un uovo d'oro. Non di meno sono stati i Maya e gli Incas che pur appartenendo al continente americano hanno instaurato un profondo legame tra i loro dei e l'oro. L'uomo trova presto il desiderio di ornarsi per motivi religiosi o artistici. Il sacro, il bello e il feticcio si confondono nel gioiello. Poi sembra che prenda il sopravvento la funzione estetica dell'ornamento. A tale scopo sono interessate le tecniche di lavorazione applicate 2000 anni a.C. dagli egizi, come il sistema della fusione con il procedimento della "cera persa". Una tra le più antiche tecniche di lavorazione è quella della granulazione, iniziata 3000 anni a.C. dai Sumeri, e poi sviluppata dagli etruschi (VII-VI secolo a.C.). Si tratta di ornamenti costituiti da piccolissime sfere saldate in modo invisibile sulla superficie dell'oggetto. Nell'antichità non esisteva solo l'oggetto plasmato in oro ma anche arricchito di pietre, smalti e ceramiche.

Anche a quei tempi le mode cambiavano e la sobrietà o la ricchezza degli ornamenti si alternavano seguendo l'evoluzione delle civiltà. Ad esempio, durante l'età classica greca (461-336 a.C.) venivano prodotte oreficerie dalle semplici linee cioè un poco spoglie, mentre durante l'età ellenistica (327-274 a.C.) venivano usati raffinatezza e splendore nella



Figura 3.53. Particolare di fibula etrusca con granulazione. Secolo VII a.C.



Figura 3.54. Anello ellenistico in oro con granati. I secolo a.C.

realizzazione degli oggetti. La civiltà romana fu la prima ad utilizzare l'anello come segno di fidanzamento oltre alle funzioni di sigillo e talismano. Importante fu l'arte glittica praticata da Greci e Romani la cui tecnica di lavorazione sfrutta i minerali che presentano diverse stratificazioni di diverso colore e che offrono la possibilità di ottenere bassorilievi di grande pregio. Marco Polo, dal suo viaggio da Venezia al regno di Kublai Khan, ebbe modo di raccogliere impressioni e documenti sull'Estremo Oriente e in particolare sull'India, terra di provenienza dei diamanti.

Questi, in occidente, vennero subito apprezzati per le loro caratteristiche di estrema durezza tali da conferire un alone di invincibilità a chi lo portasse. Le superstizioni e credenze spinsero a possedere gemme che potessero assicurare poteri quasi soprannaturali. Altri oggetti fungevano da talismano. Il più celebre è il ciondolo di Carlo Magno (Figura 3.55) costituito da due zaffiri cabochon trasparenti, tra i quali è stato posto un pezzetto della croce del Cristo (814). Fino al Medioevo le ricchezze rappresentate dalle gioie di case reali servivano a scopi politici di rappresentanza (ricchezza e potere) e a sancire il principio che la gemma-gioiello era un diritto divino dei monarchi. Non di rado servivano quale garanzia per procurarsi finanziamenti utili alle compagnie militari. Il loro uso è sempre stato limitato alle particolari cerimonie imposte dalla tradizione. Sono di esempio i gioielli della

Corona d'Inghilterra che vengono indossati solo in occasione dell'apertura del Parlamento. Un'ordinanza di San Luigi (1214-70) stabiliva che le donne non potevano indossare un diamante, nemmeno se principesse o regine, poiché l'unica donna degna era la Santa Vergine. Carlo VII di Francia, invaghito dal fascino di Agnès Sorel, appartenente alla nobiltà di provincia, ruppe la tradizione regalando ogni varietà di gioielli compresi quelli con diamanti (metà del XV secolo). E' così che la professione del gioielliere riuscì ad emergere dal vincolo che la legava alla sola

produzione di oggetti sacri e di ornamenti reali. Iniziò una nuova moda. Cosimo I de'Medici (1519-74), mecenate munifico, riservò le botteghe di Ponte Vecchio agli



Figura 3.55. Talismano di Carlo Magno con, al centro, due zaffiri ovali contrapposti che racchiudono un pezzetto di legno della croce di Cristo.

orafi, ai gioiellieri e agli argentieri, dando impulso e prosperità a queste arti. Iniziarono formazioni professionali ben distinte di artisti: battiloro, tiratori, filatori, doratori, scultori, orafi. Ovunque, l'orafo godeva di privilegi e protezione. Nascono le corporazioni ben regolamentate. Ci furono, ad esempio, gli orafi del Grand Pont a Parigi e quelli del Ponte Vecchio a Firenze che fecero parte di dette corporazioni. In seguito la specializzazione prenderà corpo dando agli orafi l'esecuzione di oggetti con l'eventuale arricchimento di pietre la cui funzione rimane di accessorio ornamentale, mentre ai gioiellieri il compito di creare oggetti per i quali la gemma sarà il motivo essenziale.

Il Rinascimento cambiò e diede all'uso dei gioielli un impulso diverso. Esisteva in Europa un'atmosfera ispirata dalla voglia di vivere e di adornarsi di preziose gioie. La maggior disponibilità di "pietre preziose" servì a soddisfare le aumentate esigenze da parte dei nobili.

Inizia la ricerca degli abbinamenti tra gioiello e abbigliamento dando corso ad un parallelismo di stili, gusti ed evoluzioni. L'unico fattore negativo del Rinascimento fu quello del continuo mutare della moda la cui dinamica comportava il rifacimento del gioiello lasciandoci poche testimonianze di quell'epoca.

La gioielleria entrò ormai affermata nel mondo dell'arte. Famosi pittori e scultori entrarono da giovani apprendisti nella bottega orafa. Alcuni esempi li troviamo anche in Italia, come Donatello, il Botticelli, il Ghirlandaio e il Brunelleschi. La capacità dei gioiellieri ebbe modo di esprimersi nelle varie forme e temi. Nulla valse il dire del poeta Pierre de Ronsard: a che serve indossare tanti rubini e diamanti quando la sola bellezza è il tuo solo ornamento? Vediamo un esempio nel ritratto di Elisabetta I d'Inghilterra che appare appesantita di perle, diamanti e gemme.

L'oggetto più apprezzato in quel periodo era il pendente, un accessorio della catena già usatissima nel medioevo. Altro oggetto di ornamento legato al folklore e al costume delle tradizioni locali è l'orecchino, collegato anche a tante leggende, stravaganze e miti.



Figura 3.56. Spilla inglese, del periodo vittoriano, con turchesi.

Alla donna serve per armonizzare i propri lineamenti, i propri capelli ed il colore dei propri occhi. La moda delle acconciature era orientata a lasciare le orecchie scoperte per dare la possibilità di mostrare e far apprezzare i bellissimi pendenti; questo a dimostrare come la gioielleria può influire sulla moda.

I pendenti venivano sempre più arricchiti di gemme così da creare dei grappoli a cascata su diversi piani, chiamati girandoles con riferimento ai lampadari di Versailles. Molto diffusi erano pure gli anelli che erano portati, come del resto succede ora, su ogni dito.

Nel XVI secolo l'uso dei bracciali si era un poco rarefatto a causa del bordo terminale della manica (solitamente pizzo) che rendeva difficile il suo impiego, mentre nel secolo successivo si diede un nuovo impulso al gioiello

grazie alla moda delle maniche con spacco che permetteva di evidenziare i polsi.

Il Veneziano Peruzzi, nel secolo XVII realizza per primo il taglio a brillante (58 faccette), dando al diamante maggior splendore rispetto a quello in uso detto Mazarino (32 faccette). La richiesta di gemme aumentava in continuazione. Il topazio, l'ametista, lo zaffiro e l'olivina si alternavano nell'impiego dettato dalla moda che a quel tempo era instabile.

Il gioiello più o meno importante aveva, ed ha tuttora, la funzione di rappresentare nell'atto del dono la propria stima, considerazione o il proprio ringraziamento.

Serviva per accattivarsi la simpatia dei regnanti con la scelta appropriata di un soggetto unico, raro o di gran pregio, in ogni modo adatto all'uopo. Alla corte di Luigi XIV esisteva una tale movimentazione di doni che richiedeva una contabilità particolare, anche per l'ammontare dei costi, che Colbert, Ministro delle Finanze, in punto di morte disse: "Mi sono dannato a causa di quell'uomo".



Figura 3.57. Pendente in oro e smalti con diamanti, rubini e perle: gioiello di Canning, fine XVI secolo.



Figura 3.58. Spilla spagnola del XVII secolo, in oro e smeraldi.

Le forme decorative subirono evidenti cambiamenti realizzando composizioni ornamentali con un diversificato rocaillè, superando la rigorosa simmetria del barocco e preparando il rococò, con linee volubili, per poi approdare al neoclassico. Una particolare influenza alla gioielleria la diedero le cinque favorite ufficiali di Luigi XV. Riuscirono ad alimentare una sfrenata concorrenza con altre ambiziose aristocratiche, portando un forte incremento al lavoro delle botteghe di gioielleria di Parigi.

Anche tra l'alta borghesia si diffuse sempre più la richiesta di gioielli. Nel 1767, a Parigi esistevano ben 314 gioiellieri che operavano, per soddisfare le innumerevoli richieste, anche con pietre false.

Con l'avvento della rivoluzione, e per tutto il periodo del Direttorio, l'importanza del gioiello si adeguò ai tempi, orientando la produzione verso oggetti in oro con smalto e perle e trascurando i diamanti perché ritenuti poco "democratici". La bellezza dei gioielli ricomparve con l'impero, quando i nuovi personaggi politici vollero far risaltare l'importanza delle loro cariche. Caratteristica del

XIX secolo fu l'eclittismo nel riproporre vecchi stili in un carosello alternativo tra architettura gotica, rinascimentale e la moda dei gioielli degli antichi egizi. Nel 1837 iniziò il periodo vittoriano che vide l'introduzione di nuovi materiali e tecniche artigianali. Tra queste merita di essere accennata la placcatura, ideata dall'italiano Brugnatelli, che permise di ricoprire ogni oggetto di una sottile

pellicola d'oro. Furono migliorate le produzioni delle imitazioni delle gemme introducendo nuovi composti trovati da Joseph Strasser. La regina Vittoria ebbe una gran passione per i gioielli di tipo "sentimentale" che, dopo la morte del principe consorte Alberto, si trasformarono in quelli da lutto. A tale scopo fu utilizzato il giasietto (nera e compatta varietà di lignite) e lo smalto nero. Ritornò, con maggior vigore, la tradizione di mettere la ciocca di capelli della persona cara nell'apposita custodia a ciondolo o a spilla. Nel 1870, la scoperta dei giacimenti diamantiferi sudafricani creò una nuova atmosfera quasi a credere che i diamanti fossero alla portata di tutti.



Figura 3.59. Bracciale egizio con scarabeo in turchese appartenuto a Tut-ankh-amon.

Crearono montature dove il metallo fu reso meno visibile a vantaggio delle gemme. Alla fine del secolo nacque l'art nouveau, giudicata uno stile decadente e nuovo con nulla a che fare con le caratteristiche di quelle dei secoli precedenti. Questa espressione artistica trovò origine da motivi floreali e animali realizzati con smalti di nuove cromie. Nata negli anni venti, l'art déco realizza un modo nuovo di esprimere il proprio senso artistico. Le forme armoniche e morbide dell'art nouveau sono sostituite con le forme geometriche legate al cubismo.

Negli anni successivi non esiste più un susseguirsi di stili ma un alternarsi di mode che offrono il gioiello chiamato "bianco" perché realizzato in platino oppure in oro bianco con diamanti. Ci troviamo negli anni trenta.

Il mondo moderno è differente nei gusti e si sente libero di seguire i propri gusti forse anche guidati da un'efficiente moda imposta.

La montatura che il gioielliere vuole creare a volte può essere condizionata dalla bellezza della gemma. Per ovviare a questo il creatore si può avvalere della collaborazione dei designer, degli incisori, degli smaltatori, degli incassatori, ecc. Si deve stabilire se la gemma deve avere un ruolo dominante oppure condividere con altre pietre la bellezza del gioiello. In altre parole si va alla ricerca dei vari fattori che possono contribuire alla creazione, pur tenendo conto del fattore economico che può determinarne la realizzazione.

E' questo un problema che ha toccato ogni tempo.

Oggi abbiamo anche la moda che va alla ricerca del nuovo, la ricerca dell'originalità e della firma.



Figura 3.60. Fibbia d'argento dorato di René Lalique, 1898 (Art Nouveau).



Figura 3.61. Collana con zaffiro e diamanti di forma goccia e a navetta.

Nel mondo della gioielleria esistono i creatori di gioielli d'autore, i designer, che lavorano in proprio o presso importanti laboratori, grossi fabbricanti e l'artigiano che segue personalmente tutte le fasi della lavorazione.

Nel produrre un gioiello si seguono due direttive: o si ha il disegno e si devono procurare le pietre adatte alla realizzazione, oppure si hanno le pietre e si cerca la soluzione idonea alla tipologia del materiale a propria disposizione.

Le capitali del gioiello le troviamo a Parigi, New York, Tokio, Roma, Milano e Valenza. L'Italia è il maggior produttore ed esportatore mondiale di gioielleria.

3.4.2 Tecniche e metodi impiegati per la ricostruzione: caratteristiche distintive

La scelta di tecniche e procedimenti da utilizzare è stata fatta in base a delle specifiche volute per la ricostruzione 3D ed il risultato è stato valutato sulla stima dei seguenti criteri:

1. grado di completamento della ricostruzione geometrica;
2. livello di definizione e ricostruzione dei dettagli e delle parti complesse;
3. tempo di rilievo e di processamento dei dati;
4. facilità di impiego;
5. costo dell'attrezzatura e disponibilità di software open source.

Per valutare questi parametri sono state impiegate delle tecniche stereo, ottiche e non invasive:

1. la tecnica fotogrammetrica multi-view applicata ad una sequenza di immagini acquisite, con un obiettivo macro, alla distanza di messa a fuoco dell'oggetto;
2. la tecnica di scansione a luce strutturata;
3. la tecnica fotogrammetrica multi-view applicata ad una sequenza di immagini acquisite, con un obiettivo macro, alla distanza di messa a fuoco dell'oggetto ma con l'impiego di un metodo fotografico (focus stacking) per intervenire sulle sfocature create dal limite di profondità di campo degli obiettivi macro; ogni immagine è ottenuta per accatastamento ed elaborazione delle strisce d'area di

messa a fuoco registrate su ogni immagine scattata per spostamento del piano di fuoco, dal punto più vicino al punto più distante dell'oggetto dalla camera.

Per la valutazione delle tecniche, bisogna tenere in conto anche di alcuni parametri, quali: il tempo di impiego per l'acquisizione, il tempo di elaborazione e di post-processing dei dati, i costi di attrezzatura di dispositivi e software necessari per l'utilizzo della tecnica, nonché la dipendenza di impiego legata ad un corretto utilizzo da parte dell'operatore sulla base di conoscenze ed esperienza (Tabella 3.3).

TECNICA	Tempo di impiego per l'acquisizione	Tempo di processamento delle immagini acquisite	Post-processing dei dati	Costo di strumentazione Hardware/Software	Influenza delle competenze dell'operatore
Scansione stereo in luce strutturata	Basso (sec.)	Basso (sec.)	Medio/Alto	Elevato/ Elevato	Basso
Fotogrammetria stereo multi-view con ottica macro	Basso (min.)	Medio/Alto (ore)	Medio/Basso	Medio/ Disponibilità open source	Media
Fotogrammetria stereo multi-view+focus stacking con ottica macro	Molto Alto (ore)	Medio/Alto (ore)	Medio/Basso	Medio/ Disponibilità open source	Alta

Tabella 3.3. Valutazione indicativa dei parametri di performance delle tecniche impiegate.

L'impiego di una tecnica a luce strutturata permette di ottenere dati 3D di alta precisione e accuratezza, un'immediata visualizzazione dell'area di scansione, ma comporta alti costi di strumentazione hardware e software.

La tecnica fotogrammetrica multi-view può essere impiegata attrezzandosi semplicemente di una fotocamera e di un software open source, ma la performance della tecnica in termini di precisione e accuratezza è minore e la visualizzazione dei dati 3D è possibile solo successivamente alle fasi di allineamento e di processamento delle foto.

Per aumentare il dettaglio nei rilievi fotogrammetrici, le foto sono state acquisite con un obiettivo di tipo macro posizionando l'oggetto ad una distanza di messa a fuoco; questo ha permesso di restringere l'immagine sull'oggetto ma, la presenza di parti non

perfettamente nitide creata dal tipo di obiettivo, ciò comporta la presenza di rumore sulla ricostruzione.

L'intervento che si può adottare per migliorare la qualità della ricostruzione derivante dall'impiego della tecnica fotogrammetrica, oltre a particolari scelte dei parametri di scatto, è quello di aumentare il numero di immagini acquisite e quindi ridurre l'angolo di acquisizione tra uno scatto e il successivo: questo permette di aumentare l'area di sovrapposizione tra un'immagine e l'altra, e quindi di avere più punti di matching tra le immagini. Poiché il tempo di ogni singolo scatto è limitato a pochi secondi, questo arbitrio non comporta un incremento del tempo di acquisizione, anche nell'eventualità in cui si decidesse di aumentare significativamente il numero di scatti.

Integrando la tecnica fotogrammetrica con il metodo del focus stacking, in modo da ottenere un'immagine macro dell'oggetto senza punti di sfocatura, si aggiunge una fase di elaborazione sulle immagini: ovvero, è necessario acquisire una serie di sezioni ottiche dell'oggetto corrispondenti allo slittamento del piano di messa a fuoco sull'immagine, ed elaborarle utilizzando un algoritmo di fusione di immagini per estendere la profondità di campo alla dimensione dell'immagine. In poche parole, le informazioni riportate sui vari piani di fuoco vengono riportate, integrate ed elaborate in un'unica immagine. Questo processo viene ripetuto per ogni immagine che andrà ad identificare una posizione della camera nella tecnica fotogrammetrica.

Tale metodologia permette di ottenere un miglioramento dell'accuratezza e della densità di punti ottenuti rispetto alla tecnica fotogrammetrica, ma i tempi di impiego sono notevolmente maggiori e sono necessari più fasi intermedie prima di ottenere la ricostruzione 3D.

La possibilità di poter avere una perfetta messa a fuoco di un'immagine ad alta risoluzione sui dettagli millimetrici, migliora un'altra problematica che è particolarmente presente nel reverse engineering degli artefatti di gioielleria attraverso la fotogrammetria: l'uniformità della texture degli oggetti.

Infatti, in tal modo, le immagini ottenute per “fusione delle aree di fuoco” permettono di rendere maggiormente evidenti i particolari presenti nelle texture al fine di estrarre, in modo più preciso, profili e dettagli.

3.4.3 Tipologie di gioielli: casi studio e problematiche

I gioielli che hanno costituito i casi studio della sperimentazione, sono stati selezionati in base a delle caratteristiche geometriche e superficiali. La grandezza massima della geometria di ognuno di essi si posiziona nell'intervallo di misura tra 2÷3 cm.

I gioielli rilevati sono:





Casi studio			
Gioiello 1 (medaglione)	Gioiello 2 (medaglia realizzata da G.Sacco)	Gioiello 3 (maschera realizzata da G.Sacco)	Gioiello 4 (stella marina)
			

Tabella 3.4. Elenco e raffigurazione delle tipologie di gioielli per la sperimentazione del lavoro di ricostruzione.

Le caratteristiche identificate determinano una propria influenza sull'impiego della tecnica di ricostruzione. Nella tabella riportata di seguito, sono elencate per ciascun gioiello le specifiche che influenzano il risultato dei diversi processi nell'estrazione del profilo.

Casi studio			
Gioiello 1 (medaglione)	Gioiello 2 (medaglia realizzata da G.Sacco)	Gioiello 3 (maschera realizzata da G.Sacco)	Gioiello 4 (stella marina)
<ul style="list-style-type: none"> rilievo impresso in un tondo di materiale con marcatura variabile riflessione localizzata nelle zone chiare del metallo 	<ul style="list-style-type: none"> rilievo impresso in un tondo di materiale con marcatura debole e uniforme riflessione localizzata sul bordo lucidato 	<ul style="list-style-type: none"> profilo estratto di forma geometrica complessa per la presenza di parti concave e fori interni riflessione localizzata sulle parti chiare del materiale e bordo lucidato 	<ul style="list-style-type: none"> pezzo pieno di forma geometrica complessa per la presenza di parti staccate tra loro e allungate verso l'esterno, con rilievo superficiale debolmente impresso riflessione accentuata della luce legata al colore molto chiaro del materiale

Tabella 3.5. Principali caratteristiche geometriche e superficiali identificate per qualificare le tecniche di rilievo.

La differenza immediata che si riscontra tra i gioielli è che, mentre per i primi due il soggetto del gioiello è impresso a rilievo sul materiale, nel gioiello 3 e 4 il soggetto è espresso nella forma geometrica.

Come si evince dalla tabella le caratteristiche dei gioielli scelti sono essenzialmente legate a:

1. riflessione superficiale: lucidatura del materiale, colore e stato di conservazione della superficie;
2. rilevanza delle lavorazioni interne: presenza di dettagli e altezza dei rilievi;
3. complessità geometrica di forma esterna;
4. presenza di fori interni alla superficie e parti concave.

Tali caratteristiche identificano di fatto due aspetti: quello legato alla complessità superficiale e quello legato alla complessità geometrica.

Le *complessità superficiali* sono relative principalmente ai problemi di riflessione legati al tipo di materiale ed al grado di conservazione del gioiello. Superfici molto riflettenti, dovute al fatto di avere materiali più o meno lucidati e di colore più o meno chiaro, hanno un'influenza negativa sulle ricostruzioni proprio a causa del fatto che si utilizzano tecniche ottiche. Quest'ultima problematica si riscontra maggiormente nel caso della tecnica attiva a luce strutturata, dove dei pattern codificati sono proiettati sull'oggetto da un fascio di luce, ed è una problematica che si fa presente in tutti gli oggetti in quanto superfici metalliche. D'altra parte, la presenza di parti annerite o consumate dall'uso o dal tempo, sono elementi che influenzano positivamente la possibilità di effettuare un rilievo corretto.

L'altro aspetto determinante nella ricostruzione è la *complessità geometrica* dell'oggetto. Sono di ostacolo ad una buona ed efficace ricostruzione: i profili esterni del gioiello (in particolare le parti molto sottili), la presenza di fori interni alla superficie e di parti concave che rendono poco visibili delle zone superficiali. Tali caratteristiche hanno un'incidenza molto negativa soprattutto per la tecnica a luce strutturata mentre risultano determinanti nella valutazione della precisione delle tecniche fotogrammetriche impiegate. Un'altra caratteristica superficiale che deve essere presa in

considerazione è la presenza di decori. In altre parole, l'altezza di un rilievo impresso su una superficie piatta, la presenza di molti dettagli e decori permette una buona ricostruzione dell'oggetto, mentre superfici piatte e poco lavorate restituiscono modelli 3D spesso incompleti.

La tabella, riportata di seguito, ha due chiavi di lettura: se letta in verticale, permette di avere una valutazione indicativa dell'influenza negativa di ciascuna caratteristica sulla ricostruzione 3D, mentre, in orizzontale dà una percezione immediata della **complessità** di ricostruzione del pezzo.

Casi studio	Complessità superficiali	Complessità geometriche			Indice di complessità
	Presenza di riflessi	Mancanza di marcati rilievi superficiali	Presenza di profili esterni complessi	Presenza di fori interni e parti concave	
Gioiello 1 (medaglione)	*	*	*	/	3
Gioiello 2 (medaglia G.Sacco)	**	***	*	/	6
Gioiello 3 (maschera G.Sacco)	***	**	***	****	12
Gioiello 4 (stella marina)	****	****	****	/	12

Tabella 3.6. Valutazione indicativa dell'influenza negativa di specifiche caratteristiche del gioiello sul risultato della ricostruzione. Valori maggiori indicano maggiore difficoltà nella ricostruzione della superficie.

3.4.4 Impiego delle tecniche: fasi e soluzioni adottate nel processo sperimentale

Ogni tecnica di ricostruzione richiede interventi e scelte di impiego da parte dell'operatore, relativamente al caso studio di interesse.

Nell'utilizzo di un laser scanner l'operatore si limita a scegliere la risoluzione, le condizioni di illuminazione, le posizioni di presa e la quantità delle scansioni, per cui la sua funzione è più sulla "conoscenza d'uso" dello strumento e l'acquisizione può essere eseguita anche senza una conoscenza del principio di funzionamento della tecnica.

Nella fotogrammetria, è fondamentale che l'operatore proceda con una certa conoscenza delle riprese da eseguire per ottenere un risultato corretto dall'impiego della tecnica; la restituzione, infatti, è legata al rispetto di precise indicazioni che riguardano le posizioni relative tra camera e oggetto e le caratteristiche dell'immagine. Si tratta di una procedura impegnativa che richiede un impegno meticoloso da parte dell'operatore in questa fase, ed è fondamentale per ottenere un alto livello di precisione. Infatti, tutto dipende dal suo *modus operandi*.

Vediamo quali sono state le procedure adottate nelle fasi di acquisizione e di ricostruzione per ciascuna delle tecniche.

3.4.4.1 Acquisizioni con scanner a luce strutturata

Le acquisizioni in luce strutturata sono state eseguite nelle condizioni ideali di utilizzo della tecnica, in un ambiente privo di illuminazione se non quella del fascio di proiezione dei pattern per il rilievo, evitando vibrazioni e moderando l'intensità di luce di proiezione in modo da limitare le riflessioni ma, al contempo, avere un adeguato contrasto dei pattern di frange proiettati per il riconoscimento di forma dell'oggetto.

Sono state eseguite più scansioni, ruotando la base di appoggio dell'oggetto, in modo da cercare di acquisire parti non rilevate in altre orientazioni. Il tempo impiegato è di una frazione di minuto per ogni scansione.

3.4.4.2 Setup e scelte sperimentali per le tecniche fotogrammetriche

Le acquisizioni fotogrammetriche, adottando un'ottica di tipo macro per la necessità di avere un elevato dettaglio, hanno richiesto delle scelte procedurali necessarie a compensare le problematiche dovute al loro impiego in fotogrammetria.

A causa della ridotta distanza di ripresa, la profondità di campo è estremamente limitata. La più grande limitazione degli obiettivi macro è, infatti, rappresentata dal valore molto piccolo della profondità di campo (DOF), che può essere all'interno di un mezzo millimetro per un ingrandimento unitario, e può raggiungere valori minori di 100 micrometri con ingrandimenti maggiori. Ciò significa che solo una piccola porzione

dell'immagine appare sufficientemente nitida e può essere utilizzabile per la ricostruzione 3D.

In particolare, i problemi che si riscontrano sono nel recupero dei parametri della fotocamera e di orientamento esterno, causati dalla difficoltà creata agli algoritmi di image matching nell'estrazione di questi parametri da immagini con aree sfocate.

La profondità di campo è la zona attorno al piano di messa a fuoco che è considerabile di nitidezza sufficiente per la visione umana. Il piano a fuoco è, infatti, otticamente solo uno ed è limitatissimo nello spazio. L'occhio attribuisce a una zona estesa prima e dopo questo piano una sufficiente nitidezza, detta "profondità di campo a fuoco".

L'estensione di questa zona dipende da diversi fattori: lunghezza focale, distanza di ripresa ed apertura del diaframma.

Rapportando le dipendenze, si può dire che la profondità di campo è direttamente proporzionale alla distanza di ripresa e al numero $f/$ di apertura del diaframma, mentre è inversamente proporzionale alla lunghezza focale. La macrofotografia porta a scattare in una situazione critica: breve distanza dal soggetto, focale medio-lunga e spesso diaframmi aperti per mantenere tempi di scatto brevi.

Quindi, un modo per estendere la profondità di campo è quello di utilizzare un numero più alto di f (corrispondente ad un diaframma più piccolo), ma questo comporta delle ricadute: si va incontro ad una perdita di nitidezza dovuta alla diffrazione della luce attraverso un diaframma più chiuso, e ad una dilatazione del tempo di esposizione che potrebbe comportare un offuscamento dell'immagine per un eventuale movimento della fotocamera o dell'oggetto. E' noto, infatti, che ogni obiettivo perde in contrasto e quantità di dettagli visibili (risoluzione lineare) quando il diaframma viene chiuso, proprio a causa della diffrazione.

Un'altra problematica sono le riflessioni sull'oggetto che, soprattutto se interessano la superficie in modo più che puntuale, compromettono in modo incisivo la qualità del rilievo geometrico.

Su di esse si è intervenuto isolando l'illuminazione esterna, utilizzando un tipo di luce diffusa e gestendo l'esposizione con una compensazione che permettesse di avere sufficiente luce sull'oggetto.

L'impiego di sola luce ambiente non diretta, con opportuna regolazione del diaframma ad una maggiore apertura (che consentisse di fare arrivare maggior luce al sensore ma comunque con un valore all'interno di un intervallo conveniente per il problema della messa a fuoco) non ha permesso di ricavare delle foto in cui si distinguesse l'oggetto in quanto troppo povere di luce.

Uno dei cavalli da battaglia della fotografia macro è sempre stato il Micro-Nikkor 105 mm, una focale medio-lunga, che arriva al rapporto di ingrandimento 1:1. A corredo del Micro-Nikkor 105 mm c'è una tabellina della profondità di campo che, per una distanza di ripresa di 40 cm (rapporto di ingrandimento 1:2) al valore di f/16 per l'apertura di diaframma, assegna 1 cm di estensione della profondità di campo.

Dopo aver introdotto le problematiche, loro dipendenze e le ricadute di alcuni tipi di intervento, possiamo indicare quali sono state le scelte adottate per l'impiego della tecnica.

E' stato disposto un setup sperimentale che consiste nell'utilizzo di:

1. un softbox fotografico, per avere sull'oggetto un'illuminazione diffusa e limitare le riflessioni;
2. un treppiede di appoggio per la fotocamera, una base stabile di appoggio per la disposizione dell'oggetto e del softbox, modalità di scatto controllata da pc e modalità di esposizione posticipata in modo da evitare vibrazioni ed avere un'acquisizione stabile.

Per quello che riguarda il tempo di esposizione, esso è legato all'illuminazione della scena e deve essere mantenuto fisso durante l'intero processo di acquisizione per cui si è isolata l'illuminazione esterna e tenere solo un'illuminazione artificiale. Il valore di apertura del diaframma adottato è stato f/16, per sfruttare l'estensione della profondità di campo indicata dalla tabella dell'obiettivo impiegato, lavorando a priorità di diaframma A per evitare le modifiche alla dimensione dell'immagine create da una variazione del diaframma.

E' stato utilizzato un unico obiettivo per entrambe le tecniche fotogrammetriche per non inserire differenze di distorsione della lente tra una tecnica e l'altra e perché, utilizzare un obiettivo che restituisse un ingrandimento inferiore ma una migliore messa a fuoco

avrebbe comportato minore visibilità dei dettagli e difficoltà di impiego della tecnica fotogrammetrica che, con immagini che inquadrano una scena più ampia in cui bisogna acquisire un piccolo oggetto, presenta difficoltà nello scorgere la variazione della scena tra un'immagine e l'altra compromettendo la fase di matching.

Inoltre, si è scelto di non applicare il filtro di Wallis (Wallis, 1976), che regola la luminosità e il contrasto in porzioni dell'immagine (finestre) in modo che media e deviazione standard locali rispettino i valori specificati dall'utente. Il filtro di Wallis, infatti, è un filtro adatto ad immagini in toni di grigio nelle quali siano presenti significative aree di toni chiari e scuri e, visto che non tutti i pezzi rispettano tale caratteristica, l'applicazione del filtro non avrebbe avuto la stessa influenza positiva sulle immagini degli oggetti.

3.4.4.3 Acquisizioni delle immagini macro con tecnica multi-view

Per la prima delle due tecniche fotogrammetriche si è posizionato l'oggetto ad una distanza tale da essere inquadrato per intero dalla fotocamera, regolando manualmente la distanza di messa a fuoco ad un valore intermedio tra i due valori di messa a fuoco per i punti a distanza massima ed i punti a distanza minima della superficie dell'oggetto. Il valore del rapporto di ingrandimento tenuto è stato intorno al valore di 1:1.9, considerando che la dimensione massima degli oggetti è compresa nell'intervallo tra 2÷3 cm, mentre la distanza tra sensore ed oggetto è stata di circa 39 cm.

Le posizioni e le orientazioni dell'oggetto e della fotocamera hanno seguito le impostazioni di presa della fotogrammetria.

L'oggetto è stato disposto in modo orizzontale su un supporto piano, mentre la fotocamera è stata posta con una posizione di presa inclinata rispetto al suo asse verticale.

Per ogni caso studio sono state acquisite foto a 360 gradi intorno all'oggetto. Per la ricostruzione in fotogrammetria, le foto devono essere effettuate almeno ogni 10-15 gradi di rotazione dell'oggetto e, idealmente, deve essere mantenuto un 50-75% di area di sovrapposizione tra le immagini durante l'acquisizione.

L'angolazione tenuta tra le pose della fotocamera, nella pratica, è stata minore e variabile in relazione alla dimensione dell'oggetto ed alla complessità della forma.

La durata delle acquisizioni ha coperto un intervallo di 5-10 minuti per un numero di foto variabile tra le 40 e le 70 immagini, in base alla complessità di dettagli dell'oggetto.

3.4.4.4 Acquisizioni delle immagini macro, per piani di fuoco, con tecnica multi-view

L'impiego integrato della tecnica multi-view e della procedura fotografica di costruzione di un'immagine macro perfettamente a fuoco (focus stacking), deriva dal voler superare i limiti generati, nell'impiego della tecnica fotogrammetrica, dalla presenza di piccole zone sfocate a causa della limitata profondità di campo.

La metodologia proposta permette di evidenziare meglio i particolari del pezzo ridonando all'immagine, per mezzo di operazioni aggiuntive, una messa a fuoco completa sull'oggetto. Il rapporto di ingrandimento è stato impostato in modo da mantenere per intero l'oggetto all'interno dell'immagine, per non rendere questo processo eccessivamente lungo, ed alla sua dimensione. Si è tenuto un rapporto di ingrandimento intorno al valore di 1:1.9, regolato in base alla dimensione dell'oggetto acquisito.

La metodologia si compone di più fasi, con diversi gradi di automazione.

E' stato utilizzato il software Control My Nikon v4.0 per la regolazione del:

1. piano di fuoco di partenza;
2. passo di avanzamento dello stacking per i piani di fuoco successivi;
3. numero di slice (affettamento dell'immagine) da eseguire sull'immagine dell'oggetto.

Il software permette, dopo aver impostato i parametri di scatto ed eseguito un bilanciamento del bianco con le stabilite condizioni di illuminazione, di avviare una fase automatica di acquisizione delle immagini secondo i parametri impostati nel box del focus stacking.

Per ogni posizione viene, quindi, registrata una cartella di immagini a diversi piani di fuoco che scorrono lungo la superficie dell'oggetto.

Il numero di immagini acquisite in ogni cartella, dipende dai parametri adottati per il processo di focus stacking e dalla grandezza dell'oggetto. Impostando un valore di step (numero di giri del motore per spostare il gruppo di messa a fuoco) pari a 50, calcolato per un obiettivo con una profondità di campo pari a 1 mm, il numero di foto necessarie per far scorrere sull'oggetto il piano di fuoco è compreso nell'intervallo tra 25÷30 immagini.

Il numero e le posizioni di presa rimangono quelle regolate dalle condizioni di impiego della tecnica. Anche in questo caso le posizioni di acquisizione sono state tra 40 e 70, in base alla complessità di dettagli dell'oggetto.

Il passo successivo è quello di elaborare ogni gruppo di foto all'interno di un algoritmo di fusione di immagini. Nello specifico è stato utilizzato il software Zerene Stacker, per ottenere una singola immagine con un esteso DOF (stacked image).

Prima di iniziare la pipeline automatica di ricostruzione 3D, su ogni immagine risultante è stata operata manualmente la rimozione dello sfondo al fine di evitare problemi dovuti a particolari corrispondenti nelle immagini che, nelle acquisizioni, rimangono fissi rispetto alla telecamera. Ciò permette, inoltre, di velocizzare il processo di ricostruzione e di incrementare la qualità del modello finale.

3.4.5 Elaborazione dei dati per la ricostruzione 3D

La fase di elaborazione si differenzia in relazione al tipo di tecnica impiegata.

Per la fotogrammetria è un tempo di calcolo ed estrazione di dati 3D, a partire dall'acquisizione di una sequenza di immagini orientate sull'oggetto. Per la tecnica di scansione rappresenta, essenzialmente, una fase allineamento e registrazione dei dati 3D riconducibili a posizioni e/o orientazioni relative tra scanner ed oggetto.

3.4.5.1 Ricostruzione 3D per la tecnica a luce strutturata

Il processo di ricostruzione in questo tipo di tecnica, a partire dai dati 3D di scansione per ogni orientamento dell'oggetto rispetto allo strumento, consiste in operazioni di pulitura e nell'allineamento e registrazione delle nuvole di punti.

Le scansioni dei gioielli che hanno costituito la sperimentazione hanno riportato dei dati che non hanno permesso di eseguire tali passaggi in quanto:

- nei gioielli 1 e 2, costituiti da ciondoli a forma di medaglie raffigurate di diversa grandezza, la scansione frontale restituisce completamente i dati 3D relativi alla superficie planare mentre il bordo del gioiello non è rilevabile né dalla scansione frontale né da diverse angolazioni e resta una parte che lo scanner non riesce ad acquisire se non mediante trattamento opacizzante superficiale (cosa che, nel caso dei gioielli, abbiamo escluso);
- nei gioielli 3 e 4, costituiti da un ciondolo di maschera apotropaica e da un ciondolo a forma di stella marina, la scansione restituisce punti sparsi e discontinui che danno solo una vaga comprensione del pezzo acquisito per cui i dati 3D non sono utilizzabili.

3.4.5.2 Ricostruzione 3D con tecnica multi-view

L'elaborazione di un set orientato di immagini attorno ad un oggetto per ricavare i dati 3D corrispondenti, è composta da due fasi: una prima fase di estrazione dei parametri di orientamento interno della camera e di creazione di una nuvola di punti sparsa ed una successiva fase di creazione di una nuvola densa di punti.

L'orientamento delle immagini è realizzato individuando i punti corrispondenti sulla texture naturale dell'oggetto mediante un algoritmo di estrazione delle caratteristiche (come ad esempio SIFT, Harris o SURF), mentre per la creazione di una fitta nuvola di punti dalla sequenza di immagini può essere usato uno dei pacchetti commerciali o dei software di ricerca open source. Inoltre, sono disponibili diversi servizi online di ricostruzione 3D (come My3dscanner, CMP SFM, ARC 3D), in grado di restituire la nuvola di punti desiderata.

La nuvola di punti densa può essere letta da molti software CAD (quali MeshLab), all'interno dei quali la nuvola può essere filtrata e triangolata.

Poiché la ricostruzione 3D viene effettuata sulla base di un fattore di scala sconosciuto, è necessario scalare il modello alle dimensioni reali. A tal fine può essere usato, come

misura di riferimento, un oggetto con dimensioni note incluso nella scena oppure utilizzare due punti facilmente identificabili di cui sia nota la distanza.

3.4.6 Analisi dei risultati e confronti delle superfici 3d relative alle diverse tecniche

Se mettiamo in sequenza le ricostruzioni di ogni pezzo relativamente alle diverse tecniche, possiamo visualizzare i risultati.



Figura 3.62. Modello ottenuto dalla tecnica: (a) a luce strutturata, (b) fotogrammetria multi-view, (c) fotogrammetria multi-view+focus stacking.

Nell'impiego delle tecniche non sono stati inseriti ritocchi fotografici o geometrici, per cui i risultati prescindono da interventi pre e post elaborazione.

Poiché, da quanto viene riportato in letteratura, la tecnica fotogrammetrica impiegata permette di ottenere risultati paragonabili in termini di precisione a quelli di un laser scanner, soprattutto a valle delle alte performance qualitative dei dispositivi fotografici impiegati, la valutazione dei risultati può prescindere dal confronto della tecnica in termini di errori di misura, anche perché nessuna di esse può costituire un riferimento.

Dalla valutazione di influenza delle problematiche di rilievo sui risultati, si possono fare le seguenti considerazioni.

Il fattore relativo alla presenza di riflessi (**complessità superficiali**) è altamente incisivo nell'impiego della tecnica a luce strutturata perché è accentuato dalla combinazione della luce incidente di proiezione. E, mentre la mancanza di marcati rilievi superficiali (**complessità geometriche**) può influire sul livello di definizione di questo nella ricostruzione, la presenza di profili esterni complessi (come assottigliamenti e piegature) e la presenza di fori interni e parti concave (quest'ultime non adeguatamente raggiunte dal fascio di luce) costituisce una discontinuità per la proiezione dei pattern e comporta la presenza di rumore ed errori geometrici nel rilievo.

Di seguito viene, invece, riportata una tabella valutativa dell'influenza dei fattori critici sui risultati ottenuti dalle diverse tecniche.

Fattori di influenza		Tecniche		
		Scansione stereo in luce strutturata	Fotogrammetria stereo multi-view con ottica macro	Fotogrammetria stereo multi-view+focus stacking con ottica macro
Complessità superficiali	Presenza di riflessi	Molto Alto	Alto	Medio/Alto
Complessità geometriche	Mancanza di marcati rilievi superficiali in oggetti con texture uniforme	Medio/Basso	Alto	Alto
	Presenza di profili esterni complessi	Alto	Medio/Alto	Medio
	Presenza di fori interni e parti concave	Alto	Medio/Alto	Medio

Tabella 3.7. **Valutazione dell'influenza** delle problematiche di rilievo sui risultati ottenuti dalle tecniche impiegate.

Le acquisizioni mediante laser scanner hanno permesso la ricostruzione di soli due oggetti, il medaglione e la medaglia, mentre nelle scansioni della maschera e della stella marina manca gran parte della geometria per i profili esterni, problema accentuato nella maschera a causa della presenza di fori interni.

Nel caso dei primi due pezzi, la luce strutturata risulta essere la tecnica migliore per combinazione di tempi di acquisizione ed elaborazione in quanto la mesh ottenuta

deriva da un'unica scansione ed i dettagli dei rilievi sono ben visibili. L'unico problema rimane l'acquisizione del bordo riflettente dei pezzi, che non perviene nel rilievo, così come le parti riflettenti negli ultimi due pezzi che non vengono rilevate o sono costituite principalmente da rumore.

Quello che si può notare, valutando tutte le ricostruzioni, è che la fotogrammetria permette di avere il modello 3D di ogni pezzo.

L'analisi della ricostruzione, nel caso della tecnica fotogrammetrica, parte dall'analisi delle foto utilizzate nel processo di costruzione della geometria.

Una problematica riscontrata in tutte le immagini acquisite, e che ha influenzato le ricostruzioni fotogrammetriche, è data dal fatto che, nonostante i parametri di scatto impostati permettessero di ottenere un giusto compromesso tra la nitidezza dell'immagine sull'oggetto acquisito e la riduzione dei riflessi creati dalle superfici, le immagini derivate dal processo denotano zone di riflessione ancora accentuata sull'oggetto su parti in cui, durante la rotazione, si vengono a creare concentrazioni di illuminazione.

In particolare, possiamo vedere alcuni esempi su ogni tipologia di gioiello.



Figura 3.63. Esempi di zone di riflessione presenti sui pezzi nonostante gli accorgimenti fotografici.

Ciò che sicuramente ha influenzato la ricostruzione è stato il tipo di illuminazione dell'area di acquisizione che, essendo diffusa, ha sottratto una notevole percentuale di influenza alla problematica dei riflessi presenti. L'effetto più evidente si può notare nel fatto che le ricostruzioni dei pezzi maggiormente complessi, quali la maschera e la stella marina, sono state praticamente impedita con l'impiego della luce strutturata.

Nonostante ciò, si notano imprecisioni geometriche sulle superfici dovute a zone di riflessione più o meno estese che hanno influenzato con importanza diversa la ricostruzione. I problemi che si evidenziano vanno, infatti, dall'alterazione puntuale localizzata ai difetti di matching riportati soprattutto nel caso della stella marina.

E' evidente il miglioramento sulla precisione del rilievo e dei particolari geometrici nella fotogrammetria combinata alla tecnica fotografica del focus stacking, ma rimane oneroso il tempo di impiego.

Conclusioni

Sulla base dell'esame dello stato dell'arte esistente ed in considerazione di esigenze e problematiche rilevate, il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la messa a punto di tecniche e metodologie relative al rilievo ed alla visualizzazione di Beni Archeologici e Culturali, al fine di rispondere con determinate soluzioni riportandone potenzialità e limiti.

Le applicazioni delle tecniche di rilievo e delle metodologie presentate in questo lavoro, sia come interventi correttivi in fase di acquisizione, sia come definizione di specifiche metodologie di acquisizione che come procedimenti di elaborazione, sono sempre state risolutive in tutti i casi studio affrontati: nello specifico sono state affrontate problematiche relative al rilievo di superfici estese ed oggetti di piccole dimensioni.

Per quanto concerne l'acquisizione di oggetti di piccole dimensioni si è ritenuto utile definire procedure ed effettuare comparazioni al fine di individuare strumenti e procedimenti più adatti in relazione al tipo di reperto/bene da acquisire.

Nel caso dell'acquisizione della mano del Bronzo, la semplice adozione di una tecnica ottica attiva (a luce strutturata) per il rilievo è stata integrata con una metodologia di ricostruzione che ha permesso di superare la problematica di impiego di una tecnica ottica su una superficie per la maggior parte nascosta ottenendo un rilievo talmente accurato da poter sottoporre la geometria acquisita ad analisi morfologica.

In un altro caso studio sono state, invece, comparate diverse tecniche di rilievo su oggetti di piccola scala con forti problematiche legate alla geometria ed alla superficie: i gioielli. La stessa ricerca bibliografica svolta ha evidenziato da una parte la necessità di mettere a punto metodologie in grado di acquisire una tale tipologia di oggetti e d'altra parte ne ha evidenziato le grandi difficoltà. Il caso studio affrontato ha permesso riportare i risultati relativi all'applicazione di tecniche basate su principi di funzionamento diversi e di valutare gli effetti di interventi correttivi sull'influenza delle problematiche riscontrate, fornendo un significativo apporto sperimentale ad un campo applicativo quasi inesplorato.

Nelle problematiche affrontate per quanto concerne il rilievo di ampie superfici, quali la gestione dei dati da rilievi ad elevato dettaglio per la ricostruzione e la visualizzazione sia interattiva che per applicazioni real-time, sono state individuate soluzioni indicando delle metodologie di integrazione di dati.

Nel caso studio del Patirion di Rossano l'integrazione della tecnica TOF con la tecnica fotogrammetrica ha consentito di filtrare dalle tecniche, esclusivamente i dati che costituiscono i vantaggi legati al principio di funzionamento di ognuna. Il risultato finale è un modello 3D in grado di restituire un'elevata completezza metrica (tipica delle acquisizioni TOF) ed al contempo un modello facilmente fruibile e realistico grazie alla giustapposizione delle texture sul modello. L'integrazione con i dati fotogrammetrici ha permesso di creare un modello visualizzabile a diversi livelli di dettaglio e di adottare un metodo meno complesso per la creazione delle texture.

Sempre nell'ambito delle acquisizioni di oggetti di grandi dimensioni, nel caso studio della ricostruzione dell'area urbana intorno al castello di Scilla (RC), l'integrazione tra dati da rilevazioni TOF e dati di modellazione CAD ha consentito di ottenere una maggiore leggerezza computazionale nella creazione di un modello 3D di una zona di ampia estensione per un'applicazione WEB di navigazione in tempo reale. In questo caso sono particolarmente interessanti i risultati in termini di metodologia proposta.

Le diverse strategie illustrate nel lavoro di tesi ben descrivono come poter raggiungere i risultati ottenuti e si candidano, quindi, come possibili approcci metodologici per successivi casi simili.

Bibliografia

- Abbott D., Bale K., Gowigati R., Pritchard D., Chapman P. (2011). Linking Evidence with Heritage Visualization using a large Scale Collaborative Interface. VAST 2011: 121-128.
- Abdel-Aziz Y.I., Karara H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, in Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, 1-18.
- Aggarwal M., Ahuja N. (2000). On Generating Seamless Mosaics with Large Depth of Field. ICPR 1588-1591.
- Alshwabkeh Y., Haala N. (2004). Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation, International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, Vol. 35 (5).
- Arrighetti A., Casalini E. (2012). The 4D Survey: from records to modelling in the Building Archaeology, Proceedings of the “Conference of Decennale MIMOS”, 9-11 ottobre 2012, Roma.
- Atsushi K., Sueyasu H., Funayama Y., Maekawa T. (2011). System for reconstruction of three-dimensional micro objects from multiple photographic images. Computer-Aided Design 43(8) 1045-1055.
- Baltsavias E.P. (1999a). A comparison between photogrammetry and laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, N. 54, pp.83-94.
- Balzani M., Callieri M., Caputo G., Cignoni P., Dellepiane M., Montani C., Pingi P., Ponchio F., Scopigno R., Tomasi A., Uccelli F. (2005). Using multiple scanning technologies for the 3D acquisition of Torcello’s Basilica, Proc. of the ISPR Working Group V/4 Workshop 3DARCH’05, Mestre, Venice.
- Barba S., Fiorillo F., De Feo E. (2013). 3D-Antlers: virtual reconstruction and three-dimensional measurement. International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences. Vol. XL-5/W1, WG V/4. Pag.15-20 ISSN: 2194-9034.

- Barceló J., Forte M., Sanders D. (eds.) (2000). *Virtual Reality in Archaeology*, BAR International Series S 843, Oxford, Archaeopress.
- Barni M., Bartolini F., Cappellini V. (2000). Image processing for virtual restoration of artworks, «IEEE Multimedia», 7 (2): 34-37.
- Bellotti F., Berta R., Cardona S., De Gloria A. (2010). The architectonic-style likelihood principle for procedural development of Cultural Heritage Virtual Worlds, Proceedings of FOCUS K3D Conference on Semantic 3D Media and Content, Nice-Cannes: INRIA Sophia Antipolis, France.
- Bellotti F., Berta R., De Gloria A., et. al. (2011). Designing Serious Games for Cultural Heritage Purposes, VAST International Symposium on Virtual Reality Archaeology and Intelligent Cultural Heritage Short and Project Papers, Continuum, <http://www.mendeley.com/research/serious-games-cultural-heritage-gala-activities/>.
- Beraldin J.-A., Cournoyer L., Rioux M., Blais F., El-Hakim S., Godin G. (1997). Object model creation from multiple range images: acquisition, calibration, model building and verification, First Intern. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Ont. May 12-15, pp.326-333.
- Beraldin J.A., Blais F., Cournoyer L., Rioux M., Bernier F., Harrison N. (1998). Portable digital 3-D imaging systems for remote sites, in Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 488-493.
- Beraldin, J.A., Blais, F., Cournoyer, L., Rioux, M., El-Hakim, S.H., Rodella, R., Bernier, F., Harrison, N. (1999). Digital 3D imaging system for rapid response on remote sites. In Proc. of 3DIM 1999, pp. 34-42.
- Beraldin J.A., Blais F., Boulanger P., Cournoyer L., Domey J., El-Hakim S., Godin G., Rioux M., Taylor J. (2000). Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures, «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 55, 4, 230-250.
- Beraldin J.A., Picard M., El-Hakim S., Godin G., Valzano V., Bandiera A., Latouche C. (2002). Virtualizing a Byzantine crypt by combining high-resolution textures with laser scanner 3D data, in Vsmm 2002. Proceedings of the Eighth International

- Conference on Virtual Systems and Multimedia, Creative and Digital Cultur, Gyeongju, Korea, Kiwisoft Company Ltd, 3-14.
- Beraldin J.A. (2004). Integration of laser scanning and close-range photogrammetry. The last decade and beyond, in Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Commission VII, Istanbul, 972-983.
 - Beraldin J.-A., Picard M., El-Hakim S., Godin G., Valzano V., Bandiera A. (2005). Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment, Videometrics VIII, San Josè, CA, 108-118.
 - Beraldin J.A., Blais F., El-Hakim S., Cournoyer L., Picard M. (2007). Traceable 3D imaging metrology: Evaluation of 3D digitizing techniques in a dedicated metrology laboratory, in The 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich, National Research Council Canada, 310-318.
 - Bernardini F., Martin I.M., Rushmeier H. (2001). High-quality texture reconstruction from multiple scans, IEEE Transactin on Visulization and Computer Graphics, Volume 7, Issue 4, pp.318-332.
 - Bernardini, F., Rushmeier, H., Martin, I.M., Mittleman, J., Taubin, G. (2002). Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta. IEEE Computer Graphics Application, 22 (1), pp. 59–67.
 - Bitelli G., Girardi F. (2010). Problematiche nel rilievo e modellazione tridimensionale di oggetti di piccole dimensioni nel campo dei Beni Culturali. Atti 14a Conferenza ASITA, Brescia, Italy, 9-12 nov. 2010, pp 285-290.
 - Blais F., Beraldin J.-A., El-Hakim S. (2000). Range Error Analysis of an Integrated Time-of-Flight, Triangulation and Photogrammetry 3D laser Scanning System, Proc. of SPIE Aerosense, Orlando, FL, Vol. 4035, pp.236-247.
 - Blais F. (2004). A review of 20 years of range sensors development, «Journal of Electronic Imaging», 13, 1, 231-240.
 - Böhler W., Marbs A. (2003). Investigating laser scanner accuracy, «The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 34-5/C15, 696-701.
 - Booth B. (1998). Understanding the information needs of visitors to museums, «Museum Management and Curatorship», 17 (2): 139-157.

- Borg C.E., Cannataci J.A. (2002). The lasermetry: a hybrid approach to documentation of sites and artefacts, Proc. of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, pp. 93-104.
- Bouguet Y-J. (2012). Camera Calibration Toolbox for Matlab, <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/>. (accessed on September 2012).
- Bradley A. P., Bamford P. C. (2004). A one-pass extended depth of field algorithm based on the over-complete discrete wavelet transform. in Proc. Image and Vision Computing, 2004, pp. 279–284.
- Brown B., Funkhouser T., Shin H., Toler-Franklin C., García Castañeda A., Dobkin D., Rusinkiewicz S., Weyrich T. (2011). Learning How to Match Fresco Fragments, Eurographics Area Paper.
- Brown M., Lowe D.G. (2005). Unsupervised 3d object recognition and reconstruction in unordered datasets. In 3DIM '05: Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pages 56–63, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- Brumana R., Monti C., Monti G., Vio E. (2005). Laser scanning integrated by photogrammetry for reverse engineering to support architectural site and restoration of the mosaic floor inside St. Mark's Basilica in Venice, Atti del CIPA XX International Symposium, Torino.
- Canciani M., Falcolini C., Saccone M., Spadafora G. (2013). From point clouds to architectural models: Algorithms for shape reconstruction. ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, pp. 27-34.
- Carrozzino M., Evangelista C., Neri V., Bergamasco M. (2012). “Be there or be square: virtual reconstruction of famous squares as a knowledge tool”, in MIMOS- II Decennale, Roma.
- Cesarani F., Martina M.C., Grilletto R., Boano R., Donadoni Roveri A.M., Capussotto V., Giuliano A., Celia M., Gandini G. (2004). Facial reconstruction of a wrapped Egyptian mummy using MDCT. Am. J. Roentgenology 183, 755–758.

- Cignoni P., Scopigno R. (2008). Sampled 3D models for CH applications: A viable and enabling new medium or just a technological exercise?, «ACM Journal on Computing and Cultural Heritage», 1,1, 1-23.
- Colet P. (2003). Imaging System Measures Space Vehicle Surface, *Advanced Imaging Magazine*, pp.18.
- Cornille N., Garcia D., Sutton M.A., McNeill S.R., Orteu J.J. (2003). Automated 3-D reconstruction using a scanning electron microscope. In: *Proceedings of SEM 2003 annual conference on experimental and applied mechanics*, Charlotte, North Carolina, USA.
- Crisci G., La Russa M., Macchione M., Malagodi M., Palermo A. Ruffolo S. (2010). Study of archaeological underwater finds: deterioration and conservation, *Applied Physics A* (2010) 100: 855–863.
- D’Annibale E., (2011). Image Based Modeling from Spherical Photogrammetry and Structure For Motion. The case of the Treasury, Nabatean Architecture in Petra, XXIIIIRD International CIPA Symposium, Prague (Czech Republic).
- Dekeyser F., Gaspard F., De Luca L., Florenzano M., Xin Chen, Leray P. (2003). Cultural heritage recording with laser scanning, computer vision and exploitation of architectural rules, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV, Part 5/W12.
- Dellepiane M., Callieri M., Fondersmith M., Cignoni P., Scopigno R. (2007). Using 3D scanning to analyze a proposal for the attribution of a bronze horse to Leonardo da Vinci, in *Proceedings of The 8th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST* (2007).
- De Matias J., Berenguer F., Cortés J.P., De Sanjosé J.J., Atkinson A. (2013). Digital Reconstruction of an archaeological site based on the integration of 3D data and historical sources. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 51-56.
- Demir N., Bayram B., Alkis Z., Helvacı C., Cetin I., Vögtle T., Ringle K., Steinle E. (1999). Laser scanning for terrestrial photogrammetry, alternative system or combined with traditional system?, *Photogrammetric Measurement, Object Modeling*

- and Documentation in Architecture and Industry, WG V/2 & 5, Thessaloniki, Greece.
- De Napoli L., Luchi M. L., Muzzupappa M., Rizzuti S. (2002). Recognition and Classification of Fragments from Ceramic Artefacts. In Proc. of CAA 2002, Heraklion, Crete, Greece, April 2-6.
 - De Roos H. (2004). The Digital Sculpture Project Applying 3D Scanning Techniques for the Morphological Comparison of Sculptures. Computer and Information Science, Vol. 9 No. 2, (n.d., 2004), pp. 85, ISSN 1401-9841
 - El-Hakim S., Beraldin J.A., Blais F. (1995). A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems, in E.A. Fedosov (ed.), SPIE Proceedings, Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing, 2646, St. Petersburg, 14-25.
 - El-Hakim S., Brenner C., Roth G. (1998). A multi-sensor approach to creating accurate virtual environments, ISPR Journal for Photogrammetry and Remote Sensing, N. 53(6), pp. 379-391.
 - El-Hakim S. (2001). 3D Modeling of complex environment, SPIE Proceeding, Electronic Imaging, Videometrics and Optical Methods for Shape Measurement VII, San José, CA, USA, 21-26 January.
 - El-Hakim S., Beraldin J.-A., Picard M. (2002). Detailed 3D reconstruction of monuments using multiple techniques, ISPR-CIPA Workshop, Corfù, pp.13-18.
 - El-Hakim S.F., Beraldin J.-A., Picard M., Vettore A. (2003). Effective 3D Modeling of Heritage Sites, Proceeding of International Conference on 3D Imaging and Modeling (3DIM'03), Banff, Alberta, Canada, 6-10 October, pp.302-309.
 - El-Hakim S., Beraldin J.A., Picard M., Godin G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques, «IEEE Computer Graphics and Application», 24, 3, 21-29.
 - El-Hakim S., Whiting E., Gonzo L., Girardi S. (2005). 3-D Reconstruction of Complex Architectures from Multiple Data, Proc.of the ISPR Working Group V/4 WorkShop 3-D Arch, Venice, Mestre.

- Eltoukhy H. A., Kavusi S. (2003). A Computationally Efficient Algorithm for Multi-Focus Image Reconstruction. Department of Electrical Engineering, Stanford University.
- Fassi F., Fregonese L., Ackermann S., De Troia V. (2013). Comparison between laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage areas. ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, pp.73-80.
- Forster B., Van de Ville D., Berent J., Sage D., Unser M. (2004). Complex wavelets for extended Depth of Field: A new Method for the Fusion of Multichannel Microscopy Images. *Microscopy Research and Technique*. (2004) 65 33-42.
- Forte M., Beltrami R. (2000). A proposito di Virtual Archaeology: disordini, interazioni cognitive e virtualità. In “Archeologia e Calcolatori”. n.11, pp.287-288.
- Fraser C. S., Al-Ajlouni S. (2006). Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(2006) 9 1017-1026.
- Frischer B. (2002). “Il Cultural Virtual Reality Laboratory: storia, missione, progetti”. In “Ut Natura Ars”. Atti della giornata di studi. 2002. A cura di Antonella Coralini e Daniela Scagliarini. Pag. 53.
- Furukawa Y., Ponce J. (2007). Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Garagnani S., Manferdini A.M. (2013). Parametric accuracy: building information modeling process applied to the cultural heritage preservation. ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, pp. 87-92.
- García Castañeda A., Brown B., Rusinkiewicz S., Funkhouser T., Weyrich T. (2011). Global consistency in the automatic assembly of fragmented artefacts. In: Dellepiane, M and Niccolucci, F and Pena Serna, S and Rushmeier, H and Van Gool, L, (eds.) 12th international symposium on virtual reality, archaeology, and cultural heritage. (pp. 73 – 80). Eurographics Association: Goslar, Germany.

- García Fernández J. (2013). Interpretation of topographic data from ‘shape from shading’ method, application in Villagarcía de Campos Castle. ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, pp. 93-97.
- Gill-Robinson H., Elias J., Bender F., Allard T.T., Hoppa D.R. (2006). Using image analysis software to create a physical skull model for the facial reconstruction of a wrapped Akhmimic mummy. *J. Comput. Inf. Technol* 14, 45–51.
- Granero L., Díaz F., Domínguez R., Hervás J., Simon S., Perez E., Olcina M. (2009). Documentation of the roman bronze hand found in the site of "El Tossal" in Lucentum in Proceedings of 3D-ARCH 2009, 25-28 February 2009, Trento, Italy, Volume XXXVIII-5/W1.
- Grün A., Remondino F., Zhang L. (2004). Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan Authors. *The Photogrammetric Record* (19)-107.
- Guidazzoli A. (2003). “L’esperienza del CINECA nel campo della Virtual Archaeology”. Pag.1.
- Georgopoulos A., Tsakiri M., Ioannidis C., Kakli A. (2004). Large scale orthophotography using dtm from terrestrial laser scanning, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Commission V, pp. 467-472, Istanbul, Turkey.
- Girardi F. (2011). Survey and 3D modeling for small sized objects. PhD thesis, University of Bologna, Italy.
- Gruen A., Remondino F., Zhang L. (2004). Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afganistan, «The Photogrammetric Record», 19, 107, 177-199.
- Guarnieri A., Pirotti F., Pontin M., Vettore A. (2005). Combined 3D surveying techniques for structural analysis application, Proc. of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3DARCH’05, Mestre, Venice.
- Guarnieri A., Remondino F., Vettore A. (2006). Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling, «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 36, 5, on CD-Rom.

- Guidi G., Ostuni D., Costantino F., Pieraccini M., Tucci G., Beraldin J-A. (2001a). Photogrammetry and 3D scanning: assessment of metric accuracy for the digital model of Donatello's Maddalena, Italy-Canada Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling Applications of: Heritage, Industry, Medicine & Land, Padova.
- Guidi G., Tucci G., Beraldin J.-A., Ciofi S., Ostuni D., Costantini F., El-Hakim S. (2002). Multiscale Archeological Survey Based on the Integration of 3D Scanning and Photogrammetry, Proc. of Intern. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording-Complementing or Replacing Photogrammetry, Corfù, Greece, pp.58-64.
- Guidi G., Beraldin J-A., Ciofi S., Atzeni C. (2003). Fusion of range camera and photogrammetry: a systematic procedure for improving 3D model metric accuracy, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics, Vol. 33-4, pp. 667-676.
- Guidi G., Beraldin J-A., Atzeni C. (2004). High accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 13-3, pp. 370-380.
- Guidi G., Frisher B., Carosso L., Cioci A., De Simone M., Grasso T., Micoli L.L., Russo M., Spinetti A. (2005). Virtualizing Ancient Rome: 3D acquisition and modeling of a large plaster-of-Paris model of imperial Rome, in E.H. Berald, W. Gruen (eds.), Videometrics VIII, 18-20 jan 2005, Sg. Josè, California, SPIE, 5665, 119-133.
- Guidi G., Frischer B., Russo M., Spinetti A., Carosso L., Miccoli L.L. (2005a). Three dimensionale acquisition of large and detailed cultural heritage object, Machine Vision and Application, Special issue on 3D acquisition technology for cultural heritage, Volume 17, Number 6, pp. 347-426.
- Guidi G., Micolli L.L., Russo M. (2005a). Boat's hull modeling with low cost triangulation scanners, Proc. of the Videometrics VIII, part of the IS&T/SPIE Symposium Electronic Imaging 2005, San Josè Convention Center, California, USA, 17-20 gennaio, Vol.5665, pp. 28-39.
- Guidi G., Remondino F., Russo M., Menna F., Rizzi A., Ercoli S. (2009). A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas, «International Journal of Architectural Computing», 7, 1, 39-55.

- Guidi G., Russo M., Beraldin J.A. (2010). *Acquisizione e modellazione poligonale*, Milano, McGraw-Hill.
- Guidi G., Russo M., Angheluddu D. (2013). Digital Reconstruction of an archaeological site based on the integration of 3D data and historical sources. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 99-105.
- Halř R. (1999). “An automatic estimation of the axis of rotation of fragments of archaeological pottery: a multi-step model-based approach”, In *Proc. of WSCG99*, volume 2 pp. 381-387.
- Hall D.L., Llinas J. (1997). An introduction to Multisensor Data Fusion, *Proc. of the IEEE*, 85(1), pp.6-23.
- Hartley R., Zisserman A. (2005). *Multiple View Geometry in Computer Vision*, volume 23. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Haslhofer B., Momen E., Gay M., Simon R. (2010). Augmenting Europeana content with linked data resources, *Proceedings of I-SEMANTICS 2010*, 40: 1-3, september 2010.
- Hichri N., Stefani C., De Luca L., Veron P. (2013). Review of the «As-built BIM» approaches. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 107-112.
- Ioannidis C., Tsakiri M. (2003). Laser scanning and photogrammetry for the documentation of a large statue-experience in the combined use, *Proc. of CIPA XIX International Symposium*, pp. 517-523.
- Jacobson R. E., Ray S. F., Attridge G. G., Axford N. R. (2000). *The Manual of Photography: Photographic and Digital Imaging*, 9th ed. Focal Press (2000).
- Johnson A.E., Manduchi R. (2002). Probabilistic 3D data fusion for adaptive resolution surface generation, *Proc. of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pp. 578-587.
- Kadobayashi R., Kochi N., Otani H., Furukawa R. (2004). Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(5), pp. 401-406.

- Kampel M., Sablatnig R. (2003). An automated pottery archival and reconstruction system. *J. Visual. Comput. Animat.* 14, pp. 111-120.
- Kontogianni G., Georgopoulos A., Saraga N., Alexandraki E., Tsogka K. (2013). 3D virtual reconstruction of the Middle Stoa in the Athens Ancient Agora. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 125-131.
- Kos J. R. (2000). The City that doesn't exist: Multimedia Reconstruction of Latin American Cities, «*IEEE multimedia*», 7 (2): 56-60.
- Koska B., Křemen T. (2013). The combination of laser scanning and structure from motion technology for creation of accurate exterior and interior orthophotos of St. Nicholas Baroque church. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 133-138.
- Kusch G. (2013). Large scale urban reconstruction from remote sensing imagery. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 139-146
- Laing R., Scott J. (2011). 3D high-definition scanning: Data recording and virtual modelling of the built heritage, «*Journal of Building Appraisal*», 6:201–211.
- Lang Hong (1999). “Sensor Your World Better: Multisensor/Information Fusion, *IEEE CSS Newsletter*, Vol. 10, No. 3, pp. 7-8, 12-15, 28.
- Leitão H. C. G., Stolfi J. (2000). A multi-scale method for the re-assembly of fragmented objects. In *Proc. British Machine Vision Conference*, vol. 2, 705-714.
- Lensch H.P.A., Goesele M., Kautz M., Seidel H.P. (2001). A framework for the acquisition, processing, transmission, and interactive display of high quality 3D models on the web, in *Tutorial Notes for DAGM 2001, München*.
- Liguori M. C. (2008). “Muvi. Museo virtuale della vita quotidiana nel secolo XX evoluzione di un progetto”. In: *Storia e Futuro. Rivista di storia e storiografia*. n. 18, ottobre 2008. Pag. 3.
- Lingua A., Rinaudo F. (2001). The Statue of Ramsete II- Integration of digital photogrammetry and laser scanning technique for 3D modeling, *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage*, Vol. XVIII, Potsdam, Germany, pp. 206-211.

- Liu Z., Tsukada K., Hanasaki K., Ho Y.K., Dai Y.P. (2001). Image fusion by using steerable pyramid. *Pattern Recognit. Lett.*, 22(2001) 929–939.
- Manferdini A. M., Galassi M. (2013). Assessments for 3D reconstructions of cultural heritage using digital technologies. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 167-174.
- Manuel A., Stefani C., De Luca L., Veron P. (2013). Distribution of semantic annotations towards a set of spatially-oriented photographs. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 175-180.
- Marc L., Rusinkiewicz S., Ginzton M., Ginsberg J., Pulli K., Koller D., Anderson S., Shade J., Curless B., Pereira L., Davis J., Fulk D. (2000). The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In *Proc. of ACM SIGGRAPH, AddisonWesley*, pp. 131–144.
- Merlo A., Sánchez Belenguer, Vendrell Vidal E., Fantini F., Aliperta A. (2013). 3D model visualization enhancements in real-time game engines. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp.181-188.
- Mikhail E.M., Bethel J.S., McGlone J.C. (2001). *Introduction to Modern Photogrammetry*, New York, Wiley.
- Müller P., Wonka P., Hägler S., Ulmer A., Van Gool L. (2006). Procedural modeling of buildings, «*ACM Transactions on Graphics – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006*», 25, 3, 614-623.
- Nayar S. K., Nakagawa Y. (1990). Shape from focus: an effective approach for rough surfaces. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH. 1990 pp 218-225.
- Ohdake T., Chikatsu H. (2005). 3D modeling of high relief sculpture using image-based integrated measurement system, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W17).

- Oxholm G., Nishino K. (2011). Reassembling Thin Artifacts of Unknown Geometry. In Proceedings of the International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage. pp 1-8.
- Papaioannou G., Karabassi E.-A. (2003). On the automatic assemblage of arbitrary broken solid artifacts. *Image and Vision Computing*, 21, pp. 401–412.
- Pavlidis G., Koutsoudis A., Arnaoutoglou F., Tsioukas V., Chamzas C. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage* 8 (2007) 93-98.
- Pentland A. P. (1982). Depth of Scene from Depth of Field. Proceedings of the Image Understanding Workshop, 1982 pp. 253-259.
- Piersigilli E. (2006). “Realtà Virtuale”.
- Pieper R. J., Korpel A. (1983). Image processing for extended depth of field. *Appl. Opt.* 22 (1983) 10 1449–1453.
- Pollefeys M., Van Gool L., Vergauwen M., Verbiest F., Cornelis K., Tops J., Koch R. (2004). Visual modeling with a hand-held camera. *Int. J. Comput.Vision*, 59(3):207–232.
- Previtali M., Barazzetti L., Brumana R., Cuca B., Oreni D., Roncoroni F, Scaioni M. (2013). Automatic facade segmentation for thermal retrofit, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W1, 25-26 February 2013, Trento, Italy.
- Remondino F., Guarnieri A., Vettore A. (2005). 3D modelling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning?, in J.-A. Beraldin, S.F. El-Hakim, A. Gruen, J.S. Walton (eds.), *SPIE Proceedings: IS&T Electronic Imaging, Videometrics VIII*, 5665, San Jose (CA), 216-225.
- Remondino F., El-Hakim S. (2006). Image-based 3D modelling: A review, «*Photogrammetric Record*», 21, 115, 269-291.
- Remondino F., Fraser C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons, «*International Archihves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*», *ISPRS Commission V Symposium, Dresden*, 36, 5, 266-272.

- Remondino F., El-Hakim S., Gruen A., Zhang L. (2008). Turning images in 3-D models. Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects, «IEEE Signal Processing Magazine», 25, 4, 56-65.
- Remondino F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning, «Remote Sensors», 3 (6): 1104-1138.
- Rosina E., Grinzato E., Morandotti D. (2004). La percezione oltre l'apparenza: l'architettura all'infrarosso. Alinea Editrice.
- Ruff C. (2007a). Body Size Prediction from Juvenile Skeletal Remains. Am. J. Of Physical Anthropology 133:698–716.
- Ruff C. (2007b). 3D Reconstruction of Highly Fragmented Bone Fractures. In Proc.of the SPIE, Volume 6512, pp 65121P.
- Russo M., Arya D.A. (2010). Time constraints effects in 3D acquisition and data processing: The case of “Villa delle Vignacce”, in Proceedings of 37th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Williamsburg (<http://www.caa2009.org/Papers/Proceedings.cfm/>).
- Saldana M., Johanson C. (2013). Procedural modeling for rapid-prototyping of multiple building phases. ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, pp. 205-210.
- Sansoni G., Carocci M., Rodella R. (2000). Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light, «IEEE Trans. in Instrumentation and Measurement», 49, 3, 628-636.
- Schechner Y. Y., Kiryati N. (2000). Depth from Defocus vs. Stereo: How Different Really are They? International journal of Computer Vision, 39(2000) 2 141-162.
- Schindler K., Grabner M., Leberl F. (2003). Fast on-site reconstruction and visualization of archaeological finds. In Proc. of CIPA Symposium, Antalya, Turkey.
- Schreier H. W., Garcia D., Sutton M.A. (2004). Advances in light microscope stereo vision Exp. Mech. 44(2004) 278-88.
- Schwartz C., Weinmann M., Ruiters R., Klein R. (2011). Integrated high-quality acquisition of geometry and appearance for cultural heritage. In Proceedings of the

International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage. 25--32.

- Seitz S. M., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R. (2006). A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In CVPR '06: Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 519–528, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- Sequeira V., Ng K., Wolfart E., Gonçalves J.G.M., Hogg D. (1999). Automated reconstruction of 3D models from real environment, ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (1), pp. 1-22.
- Seracini, M. (1981). La termovisione come strumento di indagine non invasiva nella diagnostica architettonica. In: Atti del I congresso nazionale Assirco, Verona.
- Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R. (2006). Photo tourism: Exploring photo collections in 3d. In SIGGRAPH Conference Proceedings, pages 835–846, New York, NY, USA. ACM Press.
- Snavely N., Seitz S.M., Szeliski R. (2007). Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision.
- Soile S., Adam K., Ioannidis C., Georgopoulos A. (2013). Accurate 3D textured models of vessels for the improvement of the educational tools of a museum. ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, pp. 211-217.
- Soucy M., Laurendeau D. (1995). A general surface approach to the integration of a set of range views, «IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 4, 17, 344-358.
- Sperling G. (1970). Binocular vision: A physical and a neural theory. Amer. J. Psychol.. 83 (1970) 461-534.
- Stamatopoulos C., Fraser C., Cronk S. (2010). On the self-calibration of long focal length lenses. ISPRS, XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Stumpfel J., Tchou C., Yun N., Martinez P., Hawkins T., Jones A., Emerson B., Debevec P. (2003). Digital reunification of the Parthenon and its sculptures, in D.B.

- Arnold, A. Chalmers, F. Niccolucci (eds.), VAST 2003. The 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, Brighton (UK), Eurographics Association, 41-50.
- Sturm P., Triggs B. (1996). A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion. In *ECCV*, pages 709–20, Cambridge, England, apr 1996. Springer-Verlag.
 - Subbarao M., Chio T., Nikzad A. (1993). Focus techniques. *Optical engineering*, 2824-2836.
 - Svoboda T., Martinec D., Pajdla T. (2005). A convenient multi-camera selfcalibration for virtual environments. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4):407–422, August 2005.
 - Tenenbaum J. M. (1971). Accomodation in computer vision. PhD dissertation, Standford University.
 - Tiano P., Salvo P., Ceccaroni F. (2009). The microphotogrammetry as a portable diagnostic tool for monumental surface monitoring. In *DGaOProceedings*, 2009.
 - Toldo R., Fantini F., Giona L., Fantoni S., Fusiello A. (2013). Accurate multiview stereo reconstruction with fast visibility integration and tight disparity bounding. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp. 243-249.
 - Triggs B. (1996). Factorization methods for projective structure and motion. In *CVPR*, San Francisco, June 1996.
 - Triggs B., McLauchlan P. F., Hartley R., Titzgibbon A. (1999). Bundle adjustment – a modern synthesis. *Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice*, Corfu, September 1999.
 - Üçoluk G., Toroslu I. H., (1999). Automatic reconstruction of broken 3-D surface objects. *Computers & Graphics*, 23, pp. 573-582.
 - UNESCO (1972). *Photogrammetry applied to the survey of Historic Monuments, of Sites and to Archaeology*, UNESCO editions, 1972.
 - Valdecasas A. G., Marshall D., Becerra J. M., Terrero J. J. (2001). On the extended depth of focus algorithms for bright field microscopy. *Micron* 32(2001) 6 559-569.

- Varani A. (2004). “Realtà virtuale, apprendimento e didattica”. In *Informatica & Scuola* n. 3. Pag. 2.
- Vergauwen M., Van Gool L. (2006). Web-based reconstruction service, «*Machine Vision and Applications*» 17, 6, 411-426.
- Vosselmann G., Maas H-G. (eds.) (2010). *Airbone and Terrestrial Laser Scanning*, Dunbeath, Caithness Scotland, Whittles Publishing.
- Wallis, K.F. (1976). Seasonal adjustment and relations between variables *Journal of the American Statistical Association*, 69(345) pp. 18-31.
- Wendt A., Rosing C., Weisensee M. (2002). Comparison of different sensor types and validation of an approach for multi sensor fusion, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS), Commission V, Working Group V/1, Corfu, Greece*.
- Wenzel K., Rothermel M., Fritsch D., Haala N. (2013). Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, pp.251-258.
- Wiley A. G., Wong K.W. (1995). Geometric calibration of zoom lenses for computer vision metrology. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61(1995) 1 69-74.
- Wilkinson C., Neave R. (2003). The reconstruction of a face showing a healed wound. *J. Archaeol. Sci.* 30, 1343–1348.
- Willis A., Orriols X., B. Cooper D. B. (2003). *Accurately Estimating Sherd 3D Surface Geometry with Application to Pot Reconstruction*. VPR Workshop Madison, Wisconsin.
- Yanagi H., Chikatsu H. (2010). Performance evaluations of macro lenses for digital documentation of small objects. *SPIE Videometrics, Range Imaging, and Applications X Proceedings Paper*, San Diego, CA, USA.
- Yeo T.T.E., Ong S.H., Jayasooriah, Sinniah R. (1993). Autofocusing for tissue microscopy. *Image and Vision Computing*, 11(1993) 10 629-639.
- Yin X., Wonka P., Razdan A. (2009). Generating 3D building models from architectural drawings, «*IEEE Computer Graphics and Applications*», 29, 1, 20-30.

- Zambanini S., Kampel M., Vondrovec K. (2011). "The ILAC Project – An Automatic Image-Based Classification System for Historical Coins", 39th Annual International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology - CAA2011, Beijing, China.
- Zhang Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(11):1330–1334, 2000.
- Zollikofer C. P. E., Ponce De Leon M S., Lieberman D. E., Guy F., Pilbeam D., Likius A., Mackaye H. T., Vignaud P., Brunet M. (2005). Virtual cranial reconstruction of *Sahelanthropus tchadensis*, *Nature*, Vol 434, 7 April 2005.