

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
D I C A M
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA GEOMATICA E DEI TRASPORTI
CICLO XXIII

RAGGRUPPAMENTO DISCIPLINARE: ICAR 06

RILEVAMENTO E MODELLAZIONE
TRIDIMENSIONALE PER OGGETTI DI
PICCOLE DIMENSIONI

Candidato:

Ing. FABRIZIO GIRARDI

Relatore:

Prof. Ing. GABRIELE BITELLI

Coordinatore:

Prof. Ing. GABRIELE BITELLI

Alla mia famiglia

Paolo, Dorina e Carla

...e ai miei nonni Michele e Angela

Parole chiave

FOTOGRAMMETRIA

MACROFOTOGRAFIA

CALIBRAZIONE

LASER SCANNER

MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

Riassunto

Oggigiorno le richieste di rilievi tridimensionali e di rappresentazioni 3D ad alta qualità sono sempre più frequenti, e coinvolgono un numero sempre maggiore di discipline e ambiti applicativi, quali quello industriale, medico, archeologico, forense, museale, ecc., con ulteriori prospettive di allargamento per quanto riguarda la natura ed il numero delle realizzazioni.

Il lavoro di ricerca svolto, di natura prevalentemente applicata, vuole andare ad investigare un settore, quello degli oggetti di medie, medio-piccole e soprattutto piccole dimensioni, che, a parere dell'autore, non è stato ancora investigato a fondo; di questo d'altra parte dà riscontro il numero relativamente limitato di lavori presenti in letteratura su questo tema.

Sebbene la metodologia di lavoro non sia concettualmente diversa da quella che si adotta comunemente in ambito close range, le problematiche che sono state incontrate nel corso dei diversi casi di studio analizzati nel periodo di dottorato hanno evidenziato la necessità di soluzioni tecniche e metodologiche specifiche, anche in funzione dei requisiti di precisione che competono ad oggetti di piccole dimensioni.

Nel corso degli anni, si è visto un allargamento della base di utenti che trovano nel prodotto 3D un importante strumento di lavoro; si pensi alla cinematografia, alla computer grafica, alle simulazioni virtuali a partire da modelli 3D realistici, ecc. Questo trend sembra, al giorno d'oggi, non trovare ancora una battuta d'arresto. Considerando il settore dei Beni Culturali, per esempio, si tratta di un campo di applicazione delle tecniche geomatiche abbastanza ristretto e sostanzialmente nuovo, in quanto le problematiche di documentazione e visualizzazione di beni mobili ed immobili sono in genere indirizzate prevalentemente ad oggetti a scala di edificio, porzione di edificio o elementi quali bassorilievi e statue, comunque con un ordine di grandezza che va da qualche metro alla decina di metri. Qualora, come detto in precedenza, si volesse aumentare ulteriormente la scala di indagine e di rappresentazione, devono essere adottate delle tecniche di rilievo che possano fornire un'adeguata precisione, con strumenti e tecnologie che possano adattarsi alle diverse configurazioni e caratteristiche geometriche.

Nella tesi viene dunque affrontata la problematica del rilievo e della modellazione tridimensionale, con alto livello di dettaglio, di oggetti di dimensioni che variano da qualche decina a pochi centimetri; una situazione di questo tipo può aversi in svariati ambiti, che vanno da quello industriale e del design a quello biologico e medico, dall'archeologia ed alla musealizzazione virtuale alle indagini forensi, ecc.

Concentrando l'analisi al campo dei Beni Culturali, oggi oggetto di importanti ricerche applicative che trovano impulso anche dallo sviluppo delle nuove tecnologie, sono molto numerose e varie le occasioni in cui operare con oggetti di altissimo valore e dimensioni molto ridotte: un esempio immediato è quello fornito dal rilievo di reperti archeologici, ma nell'ambito del restauro, dell'analisi dei materiali, delle indagini non distruttive, le potenzialità sono di grandissimo interesse.

Comunemente, fino a poco tempo fa, e soprattutto in ambito museale, la documentazione geometrica di un bene culturale mobile di piccole dimensioni si è limitata ad una rappresentazione fotografica, riportante magari elementi metrici minimali, come un righello posto di fianco all'oggetto, in grado di fornire una scala di lettura. Ciò che si è in genere tenuto in scarsa considerazione, ma in grado invece di dare al contenuto informativo quel qualcosa in più rispetto alla semplice fotografia, è l'adozione di metodologie per un rilievo rigoroso e metrico, metodologie che possono essere di grandissimo interesse non solo a fini di studio e divulgazione dell'oggetto (si pensi alla problematica della virtualizzazione della fruizione di beni museali) ma anche per scopi diversi quali la duplicazione e riproduzione di copie dell'oggetto (a scala identica al vero o a scala diversa). Di frequente, infatti, ci si trova di fronte a problematiche legate alla salvaguardia e conservazione dell'oggetto, in termini di accesso e visione da parte del pubblico, di mantenimento in particolari condizioni microclimatiche, di difficoltà di manipolazione a fini di studio e misura, ecc.

Nella tesi sono state prese in considerazione le due tecniche geomatiche che si prestano a soddisfare nel miglior modo possibile i requisiti di correttezza metrica e radiometrica che un rilievo ad elevata precisione richiede. Tali tecniche, rappresentate dalla fotogrammetria digitale con ottiche Macro e dal laser a scansione, in particolare del tipo a triangolazione, sono state sperimentate sul campo, in modo da poter valutarne le potenzialità, non solo alla luce dei risultati finali ottenuti, ma anche considerando i problemi al contorno che esse comportano.

Nel corso di numerose sperimentazioni in laboratorio e sul campo sono stati analizzati problemi quali la calibrazione di obiettivi macro e la realizzazione di reticoli

speciali atti allo scopo, la qualità dei DSM di origine laser e fotogrammetrica, l'estrazione di caratteristiche morfologiche di microrilievo, le conseguenze della compressione dei dati immagine, la calibrazione radiometrica ed il filtraggio delle immagini digitali, l'allineamento di nuvole di punti con algoritmi ICP.

Abstract

Nowadays, requests for three-dimensional reconstructions and high-quality 3D representations are even more frequent. These requests increase over the years in many disciplines and areas, such as industry, medicine, archaeology, forensic science, museums, etc., and they are expected to grow in size according to nature and number of applications.

The research, mostly based on selected case studies, aims to investigate the area of medium, and especially small-sized objects, which, according to the author's opinion, has not yet been deeply investigated, as confirmed by the limited number of examples in the literature.

Although the applied methodology is not conceptually different from that commonly adopted within close range applications, the nature of the problems that have been encountered by means of several case studies needed specific technical solutions and methodologies, in order to fulfill the accuracy requirements that small objects require.

The base of users which consider 3D products important business tools has broadened over the years; practical examples are easy to find by thinking to the cinema, computer graphics, virtual simulations based on realistic 3D models, etc. This trend seems, nowadays, not to be just a setback. Considering the Cultural Heritage area, for example, this is a quite small and essentially new field of the geomatic techniques, since the problems of documentation and representation of movable and immovable objects are generally directed mainly on items with a magnitude ranging between few meters and ten meters (items at a building scale, or portion of them, or elements such as bas-reliefs and statues). To increase further the scale of investigation and representation, surveying techniques providing adequate accuracy shall be taken into account.

The thesis address the topic of the survey and three-dimensional modeling, with a high level of detail of objects ranging between the medium and the small sizes, i.e. a few dozen to few centimeters. The case can be applied to different fields, ranging from industrial design to biology, passing through medical applications, virtual archeology, forensic investigations, etc.

VIII

In the Cultural Heritage field, the subject of applied researches, that give fresh impetus for the development of new technologies, are very frequent and stimulating, because they give exciting possibilities for operating with very small objects and of great interest: a strong example is provided by archaeological applications, but other samples are frequent in restoration, analysis of materials, non-destructive investigations.

Until recently, especially in museum applications, the geometric documentation of small sized objects was limited to a photographic representation showing even minimal metric elements, such as a ruler placed next to the object to provide a scale reading. To give something more than just photographic information to remote data, the adoption of a methodology for rigorous and relevant metric survey is needed; such a methodology may be of great interest not only for study and divulgation of the object information, but also for other purposes such as duplication and reproduction of copies of the object. Frequently we face issues related to preservation and conservation of delicate objects (e.g. objects that must be kept in particular microclimatic conditions), in terms of access and viewing by the public. For this reason, here two specific geomatic techniques were taken into account: they lend themselves to fulfil, as best as possible, the requirements for metric and radiometric high accuracy in surveys. These techniques, consisting in the digital photogrammetry with Macro lenses, and laser scanners, (in particular the triangulating type), have been tested in order to assess their potential in the Cultural Heritage field, not only considering the final results, but also keeping into account the problems associated with their use.

Lista delle tabelle

Tabella 2.1 Variabili fotogrammetriche.

Tabella 3.1 Metodo di valutazione della posizione dello spot luminoso in funzione della tipologia di sensore.

Tabella 3.2 Caratteristiche tecniche del sistema Mephisto Ex Micro della 4ddynamics.

Tabella 4.1 Confronto fra le coordinate oggetto con PP calcolato e PP posto nell'origine del sistema immagine.

Tabella 5.1. Specifiche tecniche del NextEngine 3D laser scanner HD.

Tabella 5.2 Indicatori di tessitura.

Tabella 5.3 Indicatori geometrici per i campioni analizzati (M=Macro, W=Wide).

Tabella 5.4 Indicatori statistici, risultati.

Tabella 5.5 Parametro di rugosità per le stazioni effettuate in sito.

Tabella 5.6 Indicatori statistici per la prova in sito.

Tabella 5.7 Coordinate e precisioni dei PFA [mm].

Lista delle figure

- Figura 1.1 Diagramma delle tecniche geomatiche di acquisizione tridimensionale.*
- Figura 1.2 Schema di impiego dei diversi sistemi attivi di misura.*
- Figura 1.3 Camere TOF. SR-4000 della Mesa Imaging, la C40 della Fotonic e la PMD CamCube 3.0.*
- Figura 1.4 Analisi calligrafica tramite olografia conoscopica.*
- Figura 2.1 Orientamento relativo.*
- Figura 2.2 Probes per l'orientamento esterno della Geodetic Services Inc.*
- Figura 2.3 Condizione di complanarità.*
- Figura 2.4 Sfera reticolare per la simulazione della posizione della seconda camera (Cronk S., 2006).*
- Figura 2.5 Orientamento interno.*
- Figura 2.6 Comparazione fra l'entità della distorsione radiale e tangenziale (Nikon D200 –focale 17mm).*
- Figura 2.7 Esempio di "blob" e "blob lines".*
- Figura 2.8 Raffinamento dei "blob".*
- Figura 2.9 Criterio pixel/area.*
- Figura 2.10 Esempi di accettazione (riquadro verde in alto) e rifiuto (riquadro rosso in basso) dei "blob".*
- Figura 2.11 CCD secondo lo schema di Bayer.*
- Figura 2.12 Aberrazione cromatica, differenti piani di messa a fuoco nei vari canali.*
- Figura 2.13 Sfalsamento dell'immagine nei tre canali RGB (Cronk S., 2007).*
- Figura 2.14 Target codificati della Photometrix, a sinistra i target colorati, a destra la nuova tipologia di target (basati sempre sul sistema a T, permettono tramite la variazione della "corona" circolare, di aumentare il numero di combinazioni possibili).*
- Figura 3.1 Metodi non distruttivi basati su radiazioni luminose non ionizzanti.*
- Figura 3.2 Metodi non distruttivi basati su radiazioni luminose ionizzanti (TAC) o su ultrasuoni.*
- Figura 3.3 Procedimento di creazione del raggio laser.*
- Figura 3.4 Spettro elettromagnetico e lunghezze d'onda.*
- Figura 3.5 Schema di un laser triangolatore.*
- Figura 3.6 Metodo di valutazione della posizione dello spot luminoso in funzione della tipologia di sensore.*
- Figura 3.7 Schema di un laser triangolatore ottimizzato per evitare le riflessioni.*
- Figura 3.8 Differenti scelte geometriche in fase realizzativa conducono a strumenti con caratteristiche diverse.*
- Figura 3.9 Principio di funzionamento dell'intersezione in avanti in un laser a triangolazione.*
- Figura 3.10 Considerazioni geometriche sulla risoluzione lungo l'asse y.*
- Figura 3.11 Considerazioni geometriche sulla risoluzione lungo l'asse z.*
- Figura 3.12 Sequenza "Gray code" comunemente impiegata nei sistemi a luce strutturata, nel riquadro in rosso si vede la codifica binaria per la sequenza data (00011...). A destra un esempio della deformazione del pattern su di un oggetto non piano.*

Figura 3.13 Esempi di sistemi trasportabili. In figura tre soluzioni della 4ddynamics (PICOScan, EOSScan, EX-Micro).

Figura 3.14 Rappresentazione del criterio di Rayleigh utilizzato per definire il limite di distinguibilità fra due punti vicini.

Figura 3.15 Fenomeno dello "speckle" laser.

Figura 3.16 Limitazione fisica nella risoluzione dei laser scanner in funzione della dimensione dell'oggetto inquadrato. La linea continua fa riferimento al piano xy, mentre quella tratteggiata alla profondità in z.

Figura 3.17 Reticolo impiegato per il test sugli effetti della transizione cromatica. Nella figura di sinistra i colori si riferiscono a diverse dimensioni del reticolo geometrico (espressi in mm abbiamo lati di: giallo 0.5, verde 1, blu 1.5, rosa 3, ciano 10). In quella di destra si notano le lame laser differientemente spaziate tra loro.

Figura 3.18 Risultato di tre diversi settaggi sulla potenza del laser, da sinistra a destra la potenza decresce. La linea rossa rappresenta un piano di sezionamento (vedi figura 3.21).

Figura 3.19 Rappresentazione tridimensionale di una superficie piana in virtù di forti transizioni della radiometria.

Figura 3.20 Spiegazione dell'effetto tridimensionale dovuto al salto radiometrico.

Figura 3.21 Profilo altimetrico del reticolo piano in corrispondenza dei salti radiometrici lungo un piano di sezione.

Figura 3.22 Andamento del profilo altimetrico a parità di condizioni di presa e piano di sezione con due settaggi del laser differenti.

Figura 3.23 Effetto del raggio laser su materiali traslucidi, con conseguente creazione di un alone di impronta molto ampio.

Figura 3.24 Effetti dell'illuminazione sui materiali: a sinistra un materiale scuro, a destra un materiale molto chiaro ed inoltre illuminato. La diversa sagoma che l'impronta del fascio laser assume influisce sulla precisione della misura (figura da Bradshaw G.,1999).

Figura 3.25 Situazione geometrica in cui una parte dell'oggetto impedisce la triangolazione del fascio laser, il segnale di ritorno non arriva al sensore creando una mancanza di dato.

Figura 3.26 Alla presenza degli spigoli non tutto il raggio laser collabora alla determinazione della posizione dello spot. In questo modo c'è una deviazione dalla posizione reale del baricentro dell'impronta registrata che provoca una piccola variazione di quota.

Figura 3.27 Superfici metalliche possono produrre riflessioni multiple che sono causa di errori di misura. È possibile mitigare tali effetti ricoprendo la superficie di sostanze quali il talco in modo da opacizzarla (figura da Bradshaw G.,1999).

Figura 4.1 Rapporti di ingrandimento di una fotocamera DSLR Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

Figura 4.2 Geometria di presa fortemente tridimensionale con carattere di omogeneità nelle tre direzioni.

Figura 4.3 Geometria di presa principalmente bidimensionale con ridotti sfalsamenti lungo la terza direzione.

Figura 4.4 Reticoli di diverse dimensioni.

Figura 4.5 Andamento della distorsione radiale, Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

Figura 4.6 Fattore di estensione della lunghezza focale.

Figura 4.7 Variazione della lunghezza focale, Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

Figura 4.8 Posizione del punto principale, Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

Figura 4.9 Effetti della diffrazione sull'immagine. Per diaframmi molto chiusi (alti valori di f) l'effetto produce un'immagine più "morbida".

Figura 4.10 Fotocamera montata su treppiede con slitta micrometrica ed effetto della diversa profondità di campo in funzione del valore di diaframma f .

Figura 4.11 In alto la classica configurazione fotografica, con i tre piani paralleli fra di loro. In basso la rappresentazione del principio di Scheimpflug.

Figura 4.12 Ingrandimento di un target che evidenzia le irregolarità nella sagoma dei cerchi neri.

Figura 4.13 Target ricavato da slide digitale, il pallino indicato dalla freccia ha dimensione di $20\ \mu\text{m}$. Nell'immagine di destra le tacche del righello corrispondono a mezzo mm.

Figura 4.14 Timeline di alcuni operatori di interesse.

Figura 4.15 Finestra di ricerca a 16 pixel impiegata dall'operatore FAST.

Figura 4.16 Diagramma di cromaticità CIE_xy ed illuminanti.

Figura 4.17 A sinistra la foto al momento dello scatto, le tonalità sono molto calde, possiamo dire quindi che la temperatura di colore è abbastanza bassa. A destra la correzione del colore dell'immagine sulla base dell'illuminante D65. In mezzo lo spazio colore con la rappresentazione della posizione delle tonalità del ColorChecker e un esempio di vettore di spostamento (per la tonalità violetta).

Figura 4.18 Diagramma di flusso del processo di scansione mediante un laser scanner.

Figura 4.19 Supporto girevole per oggetti di piccole dimensioni.

Figura 4.20 Operazione di filtraggio nel rilievo di una statua in bronzo: le parti in azzurro, non facendo parte dell'oggetto del rilievo, devono essere eliminate.

Figura 4.21 Esempio di triangolazione di una nuvola di punti strutturata.

Figura 4.22 Mesh disallineate.

Figura 4.23 Metodi di allineamento Punto–Punto e Punto Piano.

Figura 4.24 Flusso operativo di un algoritmo ICP.

Figura 4.25 Condizione di topologia "non manifold".

Figura 4.26 Sovrapposizione delle facce.

Figura 4.27 Ridondanza delle facce.

Figura 4.28 Inversione della normale.

Figura 4.29 Esempio di ottimizzazione della mesh (Prima e Dopo).

Figura 5.1 Laser scanner NextEngine e base rotante.

Figura 5.2 Strumentazione: a) Canon 5DmkII+100 mm b) Nikon D80+105mm c) Canon 350D+60mm.

Figura 5.3 Pilastro sottoposto a compressione, disposizione dei target e schema di acquisizione delle foto.

Figura 5.4 Grafico deformativo sotto le condizioni di carico a compressione. Cerchiate in verde sono evidenziate le posizioni delle diverse configurazioni di carico.

Figura 5.5 Vettori di spostamento sulla parete del pilastro [mm].

Figura 5.6 Fase di acquisizione tramite laser scanner.

Figura 5.7 Fasi della scansione: singole mesh, allineamento e fusione.

Figura 5.8 Modello testurizzato del sarcofago di S. Agricola.

Figura 5.9 Confronto fra il DSM fotogrammetrico (in rosso) e quello laser (in verde).

Figura 5.10 Provini sottoposti a scansione laser.

Figura 5.11 DSM dei provini analizzati. Da sinistra a destra: Usura, SMA e Drenante.

Figura 5.12 Confronto fra le due modalità di acquisizione: Wide (blu) e Macro (rosso).

Figura 5.13 Parametri di caratterizzazione della tessitura.

Figura 5.14 Curve di distribuzione dei tre campioni utilizzati.

Figura 5.15 Sperimentazione in sito su 3 sezioni stradali.

Figura 5.16 Distribuzione per le 6 stazioni effettuate in sito.

Figura 5.17 Piani secanti di allagamento ai livelli -3.6116 mm, -2.6116 mm, -1.1116 mm, 0 mm, 0.3884 mm rispetto al piano medio.

Figura 5.18 Risultato in presenza di una forte illuminazione.

Figura 5.19 Scansione del "Marsia"

Figura 5.20 Allineamento delle mesh.

Figura 5.21 In a) sono evidenziati gli artefatti dovuti alla natura del materiale, in b) gli effetti nelle zone di ridondanza e in c) come una selezione del dato produce una base di partenza più accurata.

Figura 5.22 Editing automatico vs editing guidato dall'operatore.

Figura 5.23 Confronto fra la mesh editata automaticamente e quella guidata dall'operatore.

Figura 5.24 Modello tridimensionale fiale del Marsia ed un esempio di riproduzione fisica tramite una stampante tridimensionale impiegante fogli di PVC dello spessore di 0.1 mm.

Figura 5.25 Esempi di cretule e sigilli sottoposti a scansione.

Figura 5.26 Esempi di utilizzo di sigilli in argilla, evidenziati in rosso.

Figura 5.27 Disposizione dei calibri per la scalatura del modello secondo le tre direzioni x,y,z .

Figura 5.28 Curve di distorsione radiale ottenute mediante una procedura di Full Field Calibration e Self Calibration.

Figura 5.29 PhotoModeler Scanner, DSM con passo di 0.13 mm ottenuto per via fotogrammetrica da foto in assetto pseudo normale (camere in rosso).

Figura 5.30 Scostamento fra la superficie ricavata tramite scansione laser e quella determinata per via fotogrammetrica. L'intervallo di tolleranza (zona in grigio) è stato assunto pari a 2σ del laser.

Figura 5.31 a) Operatore FAST applicato all'immagine originale; b) Immagine cui è stato applicato il filtro di Wallis; c) Operatore FAST combinato con il filtro di Wallis. L'operatore FAST è in entrambi i casi impostato con valore di soglia pari al 90%.

Figura 5.32 Generazione di un DSM a partire da immagini convergenti su due diverse monete (5c e 20c).

Figura 5.33 Moneta da 20c e 50c australiani, Z-range map, modello 3D senza texture e con texture con passo di 0.1 mm.

Figura 5.34 DSM del ciodolo: a) da laser; b) da Topcon ImageMaster; c) da SocetSet NGATE. [mm]

Figura 5.35 Confronto fra DSM: a) laser vs Image Master; b) laser vs SocetSet NGATE; c) Image Master vs SocetSet NGATE. L'intervallo di tolleranza (zona in grigio) è stato assunto pari a 2σ del laser [mm].

Indice

Parole chiave	I
Riassunto	III
Abstract	VII
Lista delle tabelle	IX
Lista delle figure	XI
Indice	1
1 Introduzione	7
1.1 Considerazioni sullo stato dell'arte nella modellazione tridimensionale per piccoli oggetti.....	7
1.2 Organizzazione della tesi.....	13
2 L'approccio fotogrammetrico	17
2.1 Calibrazione di una camera digitale amatoriale	17
2.1.1 L'orientamento relativo	19
2.1.2 Condizione di collinearità	20
2.1.3 Condizione di complanarità	22
2.1.4 Parametri di orientamento interno e termini d'errore.....	25
2.1.4.1 Caso di lunghe focali	30
2.2 Network design.....	33
2.3 Riconoscimento automatico dei target.....	33
2.3.1 Identificazione.....	34
2.3.2 Raffinamento	35
2.3.3 Filtraggio.....	36
2.3.4 Effetti dell'aberrazione cromatica.....	37
2.3.5 I target codificati	39

2.4	Macrofotografia	40
3	I sensori tridimensionali	43
3.1	Introduzione	43
3.2	Il L.A.S.E.R.....	46
3.2.1	Caratteristiche del fascio laser	48
3.2.2	Classificazione, rischi e precauzioni.....	49
3.3	Sistemi triangolatori a luce laser	51
3.3.1	Principio di funzionamento	57
3.3.2	Risoluzione strumentale	60
3.4	Sistemi a luce strutturata	63
3.5	I sistemi a misura di fase AM-CW	65
3.6	Caratteristiche tecniche, limitazioni e fonti d'errore	66
3.6.1	Fonti d'errore e limitazioni	69
3.6.1.1	Transizioni cromatiche	69
3.6.1.2	Tipologia del materiale	73
3.6.1.3	Forte illuminazione.....	74
3.6.1.4	Occlusioni.....	75
3.6.1.5	Effetti di bordo.....	75
3.6.1.6	Riflessioni multiple	76
4	Rilievo e modellazione 3D	79
4.1	Modellazione 3D per via fotogrammetrica.....	80
4.1.1	Studio del comportamento di una lente macro.....	80
4.1.1.1	Problematiche della macrofotografia	87
4.2	Preprocessing dell'immagine digitale.....	92
4.2.1	Filtro di Wallis	94
4.2.2	Operatore FAST	95
4.3	Calibrazione radiometrica	98

4.3.1	Lo spazio colore L*a*b*	99
4.3.2	Calibrazione tramite l'impiego di ColorChecker	100
4.4	Modellazione 3D tramite laser a scansione	101
4.4.1	Pianificazione e Acquisizione	102
4.4.2	Filtraggio e Meshing	105
4.4.3	Allineamento e Fusione	107
4.4.3.1	Procedure ICP	108
4.4.4	Editing	111
4.4.4.1	Gli errori topologici	112
4.4.4.2	La correzione delle lacune	113
4.4.4.3	Rumorosità e operazioni di lisciatura	114
4.4.5	Ottimizzazione ed Esportazione	114
5	Casi di studio	119
5.1	Hardware	119
5.1.1	Il laser scanner NextEngine HD	120
5.1.2	Fotocamere digitali e ottiche macro	121
5.2	Pilastro in pietra sottoposto a compressione	122
5.3	Sarcofago di S. Agricola	126
5.3.1	Il sarcofago	126
5.3.2	Rilievo laser e modellazione 3D	127
5.3.3	Il rilievo fotogrammetrico	129
5.4	Analisi di tessitura su campioni di manto stradale	132
5.4.1	Rilievo tramite laser a scansione	133
5.4.2	Problematiche riscontrate	140
5.5	Bronzetto "Marsia legato all'albero"	142
5.5.1	Rilievo e modellazione 3D	143
5.6	Cretule e sigilli dagli scavi in Turchia	147

5.6.1	Inquadramento storico	147
5.6.2	Operazioni di rilievo.....	149
5.7	Monete e ciondolo	154
6	Conclusioni	161
	Bibliografia	167
	Ringraziamenti.....	175

1

Introduzione

1.1 Considerazioni sullo stato dell'arte nella modellazione tridimensionale per piccoli oggetti

La rappresentazione di oggetti reali in tre dimensioni ha radici antichissime e ha trovato la sua massima espressione nel corso dei secoli attraverso la scultura. Questa forma di espressione artistica, però, presenta la caratteristica di deficere sotto l'aspetto metrico; infatti, essa è principalmente basata sulla percezione dello scultore. Un approccio scientifico al problema ha iniziato a prendere forma in seguito all'invenzione, ai primi dell'ottocento, della fotografia. Nel 1860 François Villème, sfruttando la posizione nello spazio di più fotocamere, inventò il processo della foto-scultura: 24 macchine fotografiche, dislocate nello spazio, ed in grado di riprendere a 360° la superficie dell'oggetto, permettevano la determinazione dei profili dello stesso, da riprodurre prima su lastra fotografica, ed in seguito da proiettare su un blocco d'argilla da "sgrossare". Ovviamente alcuni aspetti, come l'inapplicabilità a soggetti convessi, il numero esiguo di profili, o il comunque necessario intervento di rifinitura a mano da parte di uno scultore, hanno fortemente limitato la sua diffusione. La foto-scultura ha comunque rappresentato un primo tentativo di impiego di una tecnica, basata su mezzi ottici, verso la creazione di un modello tridimensionale di un qualcosa già esistente.

Solo con l'avvento dell'informatica e la diffusione capillare dei personal computer, oggi si può parlare su larga scala di modellazione tridimensionale, senza che l'interlocutore ignori totalmente cosa essa significhi. Si pensi ad esempio al suo massiccio impiego in ambito cinematografico, nel mondo dei videogames o in quello architettonico. Possiamo dire che la modellazione tridimensionale al giorno d'oggi è entrata a far parte di quel background tecnologico di base, acquisito con il progresso scientifico, che, anche grazie ad internet, ha prodotto dei risvolti pratici nelle attività

quotidiane sicuramente interessanti, permettendo di creare, gestire, simulare o testare una molteplicità di prodotti, azioni o scenari, con un costo relativamente ridotto rispetto alla controparte reale.

Per quanto riguarda il settore della Geomatica, ovvero quella disciplina che si occupa di individuare le tecniche e gli strumenti più appropriati per acquisire, integrare, trattare, analizzare ed archiviare i dati spaziali, l'acquisizione del dato tridimensionale segue essenzialmente due percorsi, quello che prevede l'impiego di tecniche comunemente definite passive e quello di tecniche definite attive (Figura 1.1). La discriminante fra una tecnica definita attiva o passiva fa riferimento al ruolo che la luce, o più in generale una radiazione elettromagnetica, recita all'interno del processo di misurazione.

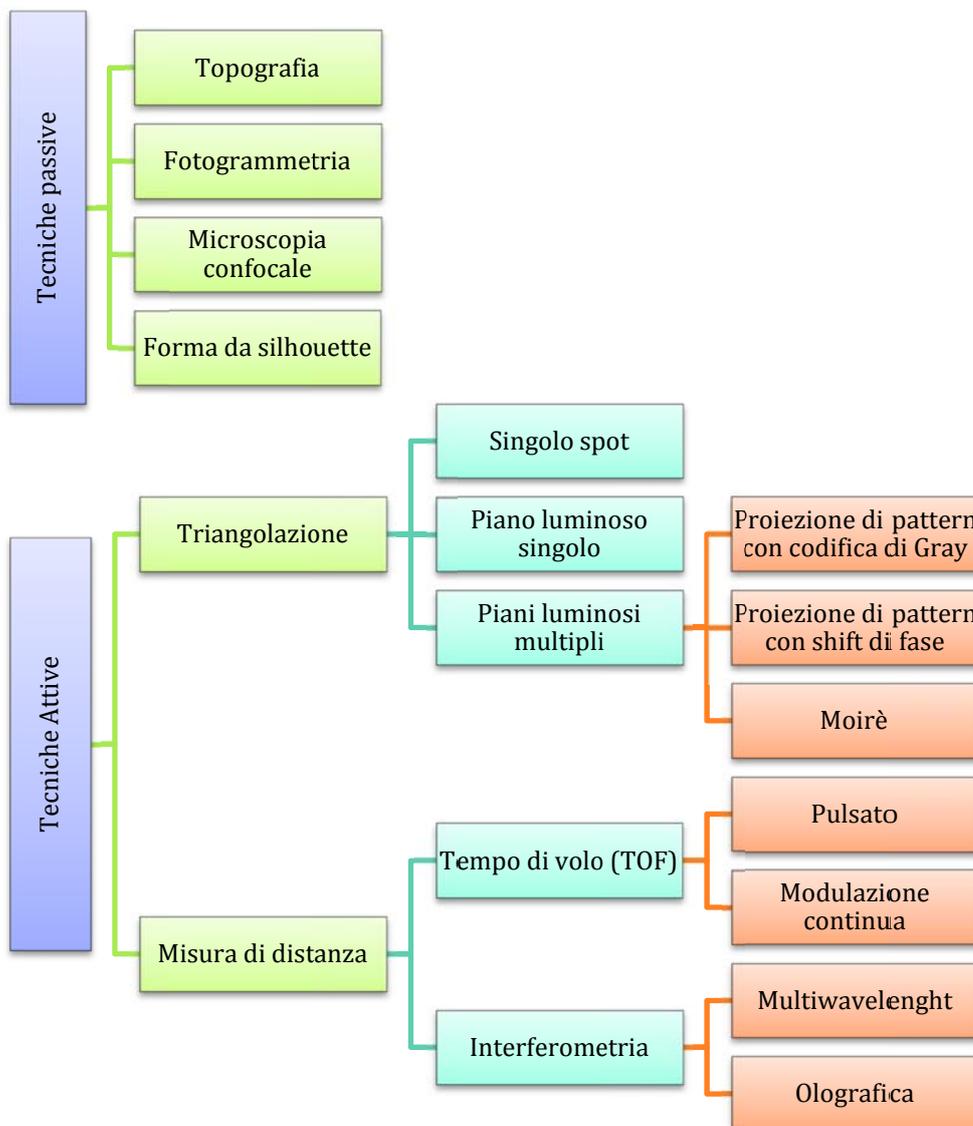


Figura 1.1 Diagramma delle tecniche geomatiche di acquisizione tridimensionale.

In riferimento allo schema generale di Figura 1.1, il lavoro di questa tesi si concentrerà su una parte ristretta di queste tecniche, ovvero su quelle che meglio si prestano ad applicazioni su oggetti di dimensioni medio piccole e piccole, e, fra queste, la fotogrammetria ed i sistemi a triangolazione ottica, in particolare quelli laser scanner.

Con tali tecniche è possibile realizzare modelli tridimensionali dotati di un elevato livello di dettaglio, aventi precisioni nell'ordine del decimo di millimetro, o comunque sub-millimetriche, capaci quindi di esprimere al meglio tutto il contenuto informativo geometrico in relazione alle dimensioni dell'oggetto stesso.

Oggi, i sistemi per la misura della distanza, detti *range based*, tra i quali rientra anche il laser a scansione, presentano sul mercato numerose tipologie di sensori e principi di acquisizione (a tempo di volo, a misura di fase, a triangolazione (laser, luce strutturata, ecc.)), che ne fanno sicuramente una tecnologia ormai matura. L'elevata produttività e la densità con cui tali strumenti riescono a caratterizzare le superfici, li ha visti protagonisti, in anni recenti, di una rapida e costante ascesa nel mondo della geomatica, conquistando una posizione di sicuro rilievo. Per contro, la loro scarsa flessibilità ed i costi, congiunti talvolta a problematiche logistiche nel loro impiego, ne limitano ancora l'adozione su larga scala, anche se importanti passi sono stati fatti in proposito.

Da questo punto di vista, le immagini costituiscono ancora una valida alternativa con costi nettamente più contenuti, ma, se il passaggio dalla fotogrammetria analogica a quella digitale può essere dato per assodato, la generazione automatica di modelli accurati e dettagliati di oggetti è un processo complesso ancora non completamente risolto. Le immagini, sebbene contengano tutte le informazioni sufficienti per la formazione di un modello 3D, vedono ancora, nell'intervento dell'operatore, un ruolo primario nel processo di estrazione e affinamento del modello e per il raggiungimento dell'accuratezza desiderata.

Per quanto riguarda lo stato dell'arte, esistono tuttavia altre tecniche impiegabili proficuamente nel rilievo e modellazione tridimensionale di oggetti di piccole dimensioni, e per alcune di esse sarà fatta una panoramica descrittiva. In Figura 1.2 è possibile avere un'idea di quelli che sono i range d'intervento e la relativa accuratezza per le tecniche a sensori attivi.

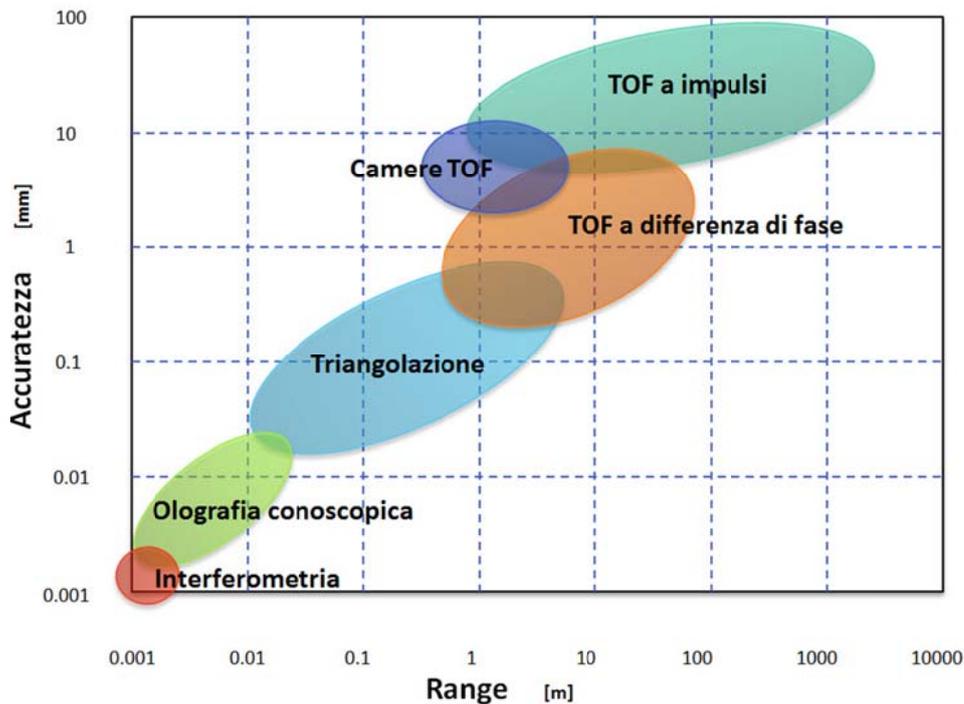


Figura 1.2 Schema di impiego dei diversi sistemi attivi di misura.

Sempre rimanendo in ambito laser c'è da evidenziare come recentemente siano stati introdotti sul mercato nuovi dispositivi che vanno a coprire la zona di vuoto strumentale presente fra gli strumenti ad impulsi basati sul tempo di volo (TOF) e quelli che sfruttano il principio della triangolazione ottica (Figura 1.2).

Questi nuovi sistemi sono caratterizzati da un'elevata densità di punti acquisiti e velocità di acquisizione; il principio di misura della distanza è basato sul metodo del tempo di volo, che però, a differenza dei sistemi ad impulso, non viene misurato direttamente, bensì ricavato per via indiretta, sfruttando la tecnologia a modulazione continua di ampiezza (AM-CW) o di frequenza (FM-CW).

Sono sistemi basati sulla stima di uno sfasamento nel segnale luminoso fra quello emesso e quello ricevuto; la radiazione luminosa è di tipo continuo (*Continuous Wave*, CW) e non ad impulsi. L'accuratezza di questi sistemi, al momento, è attorno al mm in ambito close range, e inferiore per acquisizioni molto ravvicinate, per cui si posiziona fra quella sub-millimetrica dei sistemi a triangolazione e quella sub-centimetrica dei sistemi terrestri a tempo di volo; per rilievi e rappresentazioni di oggetti di dimensioni medie e medio-piccole quali statue e bassorilievi essi possono essere sicuramente presi in considerazione.

Un'altra tecnica che ultimamente sta attirando l'attenzione da parte degli addetti al settore, è rappresentata dall'impiego di camere dette a tempo di volo (TOF). Il loro funzionamento, basato sull'emissione di impulsi, permette, grazie ad un array di sensori, di misurare contemporaneamente le informazioni radiometriche RGB e quelle di distanza dell'oggetto in tempo reale.



Figura 1.3 Camere TOF. SR-4000 della Mesa Imaging, la C40 della Fotonica e la PMD CamCube 3.0.

Anche se attualmente tali camere non sono in grado di competere in quanto a precisione con metodi quali il laser a scansione, la fotogrammetria o la TAC, sono comunque in grado di creare un modello tridimensionale con una precisione sub-centimetrica a qualche metro di distanza (ad es. la CamCube3.0 presenta un intervallo di ripetibilità $<3\text{mm}$ a 4m), per cui è ragionevole pensare che nell'immediato futuro questa tecnica possa essere perfezionata per raggiungere precisioni dell'ordine del millimetro (Figura 1.3)

Per precisioni micrometriche bisogna fare riferimento a tecniche quali l'olografia conoscopica o l'interferometria; al momento esse non trovano un largo impiego nel campo della modellazione tridimensionale, se non come controllo dimensionale.

La tecnica dell'olografia conoscopica si fonda sulla proprietà di alcuni cristalli birifrangenti che permette di dividere il raggio incidente in un raggio primario, che si propaga nel cristallo a velocità costante, e in un raggio secondario che si propaga a una velocità variabile che dipende dall'angolo di incidenza. Il raggio ordinario e quello secondario sono quindi caratterizzati da una differenza di fase. Qualora questi raggi siano monocromatici, la loro interferenza dà luogo ad un'immagine caratterizzata da frange concentriche il cui periodo è, in ultima analisi, proporzionale alla distanza tra sensore e superficie inquadrata. Le precisioni sono molto elevate, dell'ordine di qualche

micron, e permettono di riprodurre fedelmente la superficie di oggetti, aventi però uno sviluppo prettamente bidimensionale come le monete.

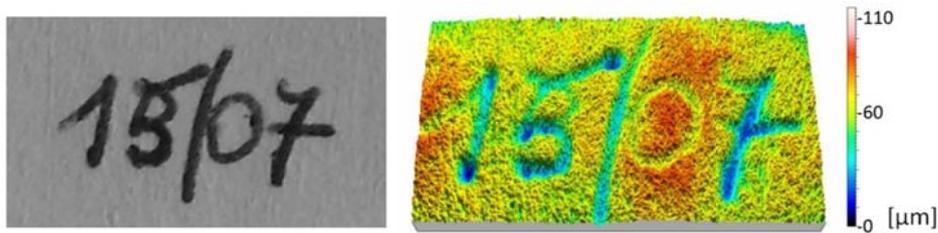


Figura 1.4 Analisi calligrafica tramite olografia conoscopica.

Sicuramente da menzionare, anche se non facente parte delle tecniche geomatiche, è l'applicazione di sistemi attivi ionizzanti, ovvero con frequenza d'onda inferiore a quello della luce visibile, che vanno sotto il nome di Tomografia Assiale Computerizzata a raggi-X (X-Ray TAC). Tale tecnica, nata nei primi anni '70 per applicazioni in campo medico, attualmente sta assumendo un ruolo di crescente importanza per la diagnostica nel settore dei Beni Culturali; essa rappresenta, infatti, una potente tecnica di indagine non distruttiva, capace di visualizzare, con una risoluzione di qualche decina di micron, in maniera tridimensionale il volume e la struttura interna degli oggetti investigati. Gli svantaggi di tecniche come questa sono rappresentati dalla sofisticata strumentazione, costosissima e non facilmente trasportabile in sito, anche per questioni logistiche di alimentazione, il che le relega al ruolo di tecniche prevalentemente da laboratorio.

Alla luce di quanto detto sopra, si vedrà dunque come un generico oggetto può essere ricostruito e modellato tridimensionalmente tramite l'impiego di sensori ottici attivi, siano essi sistemi laser scanner o a luce strutturata, oppure passivi, tramite l'impiego di immagini digitali. Le tecniche del primo tipo, presentano il vantaggio di fornire un dato subito fruibile, in quanto misurato direttamente, mentre le seconde, per poter estrarre informazioni a carattere tridimensionale da un dato che è invece bidimensionale, richiedono una fase di elaborazione preliminare.

1.2 Organizzazione della tesi

La presente tesi, incentrata sul rilievo e sulla modellazione tridimensionale per piccoli oggetti, vede l'approfondimento e l'applicazione di due tecniche in particolare, la fotogrammetria digitale, con particolare attenzione al settore della macrofotografia, ed il laser a scansione, con particolare attenzione ai sistemi triangolatori.

Dopo una introduzione su quelle che sono le tecniche impiegate nell'ambito di oggetti di piccole dimensioni, la tesi prevede l'articolazione del lavoro in 4 capitoli.

Il secondo capitolo è incentrato sulla tecnica image-based principe, la fotogrammetria digitale. Una parte si sofferma sulla parte analitica impiegata nelle procedure di autocalibrazione, evidenziando come il classico modello di Brown debba essere modificato nel caso di lenti a lunga focale, e, alla luce della flessibilità richiesta per questo tipo di procedure, viene trattato anche il funzionamento del riconoscimento automatico dei target. Una seconda parte è invece dedicata al principio di funzionamento dei target codificati largamente impiegate in applicazioni di fotogrammetria close range, soprattutto in fase di calibrazione

Il terzo capitolo è invece dedicato ai sensori tridimensionali, con particolare attenzione ai sistemi range-based, e, dato il loro range di utilizzo, ai sistemi laser triangolatori. Ne vengono presentati i principi, le caratteristiche e le possibili sorgenti di errore, che possono essere dipendenti da molteplici fattori, sia strumentali che ambientali.

Il quarto capitolo è dedicato alla tematica generale del rilievo e della modellazione tridimensionale, ed è diviso in due sezioni, una dedicata alla fotogrammetria, e l'altra al laser a scansione. È qui presentando il comportamento delle ottiche di tipo "macro" in termini di prestazioni e limitazioni, e gli interventi di preprocessing sulle immagini, come l'applicazione di filtri o operatori di interesse, che incrementano la qualità del dato tridimensionale estratto. Anche l'aspetto radiometrico viene affrontato, ponendo il problema di una corretta calibrazione del colore. Per quanto riguarda il laser a scansione, la gestione del flusso di lavoro è interamente descritta, dalla fase di progettazione del rilievo a quella di esportazione e fruizione del modello finale.

Il quinto capitolo è infine dedicato ai casi di studio, dove, sulla base della teoria trattata nei capitoli precedenti vengono presentate nel dettaglio le problematiche incontrate, le soluzioni proposte, ed i risultati ottenuti. La selezione dei casi presentati è

stata effettuata, per quanto possibile, con l'intenzione di coprire tutte le problematiche esposte.

2

L'approccio fotogrammetrico

La fotogrammetria, tecnica di rilievo che permette di coniugare le informazioni metriche con quelle fotografiche, consente lo studio e l'interpretazione dell'oggetto fotografato per mezzo di una strumentazione adeguata che ne fornisce il modello tridimensionale (con un procedimento che si basa sullo stesso principio della visione binoculare umana) e permette di ricostruire, con un'applicazione rigorosa della geometria analitica e della geometria proiettiva, la posizione di ogni punto dell'oggetto e di ricavarne informazioni numeriche e grafiche con precisione metrica che può essere anche molto elevata.

2.1 Calibrazione di una camera digitale amatoriale

Negli ultimi anni, grazie ai progressi dell'elettronica, al suo progressivo e rapido abbassamento dei costi, e non da meno alle innovazioni software, il mercato della fotografia digitale ha conquistato spazio, giorno dopo giorno, ad un ritmo talmente elevato che, ad oggi, la fotografia analogica è mantenuta in vita da una minoranza di appassionati.

Questa rapida espansione ha avuto dei riflessi anche nel settore della fotogrammetria, soprattutto nel campo del close-range, nel quale le camere semimetriche analogiche a medio formato hanno perso terreno a favore dei dispositivi digitali. Le ragioni sono più d'una: se da un lato le considerazioni principali sono legate al migliore rapporto costo/prestazioni e ad una maggiore flessibilità e maneggevolezza

delle camere digitali, va segnalato che in questo processo è stato essenziale l'innalzamento della risoluzione che questi dispositivi sono in grado di offrire. I sensori, oggigiorno, coprono una fascia che va dai 12–20 megapixel per camere che vanno da qualche centinaio di euro a poche migliaia; il rapporto qualità/prezzo rappresenta quindi un aspetto molto accattivante per le persone che si vogliono avvicinare a questa disciplina. Non ancora presenti sul mercato, ma comunque sviluppati ed in fase avanzata di test esistono sensori dalle elevatissime risoluzioni come il CMOS annunciato da Canon nell'agosto 2010 da ben 120 megapixel, dalle dimensioni di 29.2 x 20.2 mm.

Altri motivi per cui le camere digitali hanno trovato largo impiego anche in fotogrammetria sono rappresentati dalla possibilità di effettuare praticamente un numero illimitato di scatti, dal poter controllare immediatamente il risultato ed eventualmente variare i settaggi in fase di acquisizione. Un'ulteriore osservazione di certo non trascurabile è che il dato digitale risulta essere direttamente disponibile e durabile nel tempo, senza dover introdurre la fase intermedia di digitalizzazione tramite costosi scanner fotogrammetrici.

A differenza delle camere semimetriche, dotate di un certificato di calibrazione che ne modella il comportamento ottico in condizioni fisse, le camere amatoriali si presentano da questo punto di vista come un' assoluta incognita. La comunità scientifica internazionale, nel corso degli anni, ha cercato di trovare una soluzione a questo problema e sviluppato una serie di metodologie che permettono di determinare i parametri di orientamento interno della camera e caratterizzare dal punto di vista analitico il suo comportamento ottico. Queste procedure sono dette di autocalibrazione.

Comunemente la procedura di autocalibrazione viene indicata come *self-calibration bundle adjustment*, dove i parametri di orientamento interno e di distorsione sono determinati come parte integrante della triangolazione fotogrammetrica a stelle proiettive insieme ai parametri di orientamento esterno delle immagini (Fraser, 1997). Queste procedure prevedono una geometria di acquisizione con stazioni convergenti con rotazioni delle camere di $\pm 90^\circ$.

I parametri di orientamento esterno (OE) descrivono la posizione e l'orientamento nello spazio delle immagini acquisite, rispetto ad un sistema di riferimento oggetto. Per ognuna delle immagini considerate ci saranno sei parametri che la caratterizzano all'interno di questo sistema di riferimento: 3 traslazioni e 3 rotazioni.

In fotogrammetria close range, il calcolo dell'orientamento esterno (OE) di solito inizia con una sola coppia di immagini, tramite un processo noto come orientamento relativo (OR).

2.1.1 L'orientamento relativo

L'orientamento relativo (OR), illustrato in Figura 2.1, si riferisce alla procedura di determinazione dei parametri di una rototraslazione ($X, Y, Z, \omega, \varphi, \kappa$) di un'immagine relativamente ad un'altra; tali parametri vengono ricavati tramite l'impiego di un sufficiente numero di punti omologhi.

Inizialmente la rete fotogrammetrica non presenta un sistema di riferimento, per questo motivo risulta comodo, nella fase di orientamento relativo, assumere la terna nel centro di proiezione dell'immagine di sinistra (O_1), con l'orientamento degli assi secondo il suo sistema di coordinate immagine (è anche adottata una soluzione di tipo simmetrico, che non privilegia cioè uno dei due fotogrammi della stereo coppia).

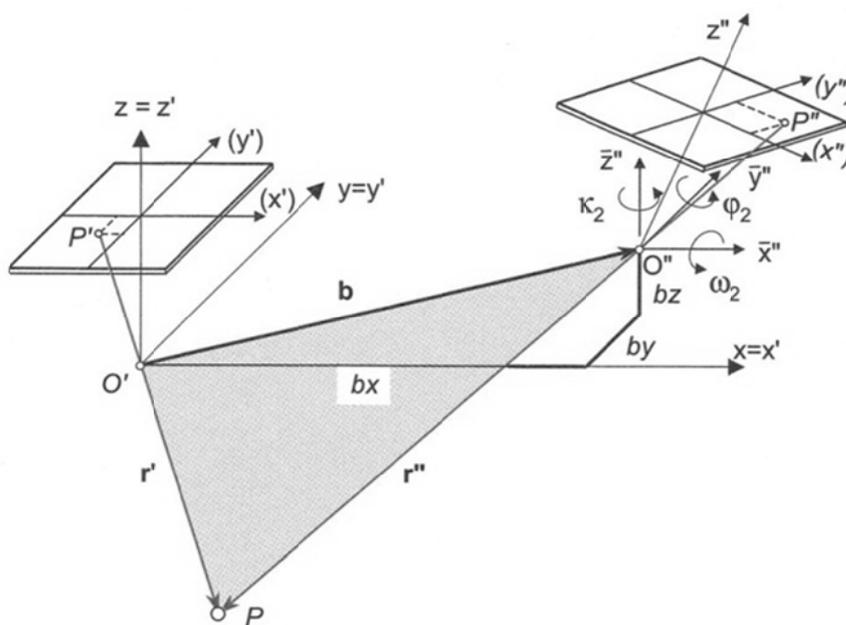


Figura 2.1 Orientamento relativo.

In questo modo i parametri di orientamento dell'immagine di sinistra assumono la seguente forma:

$$X_1 = 0 \quad Y_1 = 0 \quad Z_1 = 0 \quad \omega_1 = 0 \quad \varphi_1 = 0 \quad \kappa_1 = 0$$

L'immagine di destra risulta orientata rispetto alla precedente, ed i suoi parametri di orientamento sono espressi nel sistema di coordinate precedentemente definito. Il vettore b definisce la traslazione, mentre i tre angoli $\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$ definiscono la rotazione incognita:

$$X_2 = b_x \quad Y_2 = b_y \quad Z_2 = b_z \quad \omega_2 = ? \quad \varphi_2 = ? \quad \kappa_2 = ?$$

Esistono diverse tecniche per il calcolo dell'orientamento relativo, e, rimanendo in ambito fotogrammetrico senza scomodare quello della computer vision, sono generalmente basate sulle equazioni di collinearità o su quelle di complanarità.

2.1.2 Condizione di collinearità

La condizione di collinearità richiede che un punto oggetto, il centro prospettico di un'immagine ed il suo punto immagine corrispondente, debbano trovarsi tutti sulla stessa linea. Ovviamente questa è la condizione ideale in cui ci si trova se si ipotizza di usare il principio del foro stenopeico; nella realtà, a seguito dell'introduzione di elementi ottici, elettronici e delle relative procedure di assemblaggio, tale comportamento non è più garantito. In considerazione di ciò si rende necessario analizzare quali siano le fonti di eventuali perturbazioni dalla condizione di collinearità (ad esempio dovute al pacchetto ottico montato) in modo da poterle modellare matematicamente e determinare gli scostamenti Δx e Δy dalle vere posizioni del punto immagine. La condizione di collinearità caratterizza la proiezione prospettica di ogni singola immagine e può essere espressa nella forma:

$$\begin{pmatrix} x - x_p - \Delta x \\ y - y_p - \Delta y \\ -c \end{pmatrix} = \lambda R \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Tabella 2.1 Variabili fotogrammetriche.

x, y	Coordinate del punto immagine
x_p, y_p	Coordinate del punto principale
$\Delta x, \Delta y$	Correzioni alle coordinate immagine
R	Matrice di rotazione spaziale a partire dalle tre rotazioni principali ω, φ, κ
λ	Fattore di scala
X, Y, Z	Coordinate nello spazio oggetto
X_0, Y_0, Z_0	Coordinate oggetto della stazione

Sviluppando la relazione precedente le equazioni di collinearità diventano:

$$\begin{aligned} x - x_p - \Delta x &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y - y_p - \Delta y &= -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

dove i termini r_{ij} rappresentano gli elementi della matrice R .

Un settore dove le equazioni di collinearità hanno trovato e trovano largo impiego nel calcolo dell'orientamento esterno, è rappresentato dalla metrologia industriale. In questo ambiente vengono impiegati appositi target, detti "probes" (Figura 2.2) la cui forma tridimensionale è nota a priori con un elevato livello di accuratezza. Quando un'immagine viene acquisita, il suo orientamento esterno viene determinato tramite le equazioni di collinearità ed una resezione spaziale a partire dalla posizione che questi oggetti assumono nell'immagine. In questo modo è possibile eseguire delle misurazioni con i "probes" la cui punta ha una posizione stimata a partire dalle coordinate del target.



Figura 2.2 Probes per l'orientamento esterno della Geodetic Services Inc.

La necessità di conoscere delle informazioni appartenenti allo spazio oggetto comporta una limitazione, soprattutto nel campo della fotogrammetria close range, in

quanto i punti d'appoggio oppure gli speciali target visti in precedenza non sono sempre disponibili.

Un approccio alternativo molto impiegato in fotogrammetria terrestre prevede l'impiego della condizione di complanarità, presentando il vantaggio di non richiedere nel calcolo nessuna informazione relativa allo spazio oggetto.

2.1.3 Condizione di complanarità

La condizione di complanarità, illustrata in Figura 2.3, prevede che i cinque punti O_1 , O_2 , P_1 , P_2 e P giacciono sullo stesso piano.

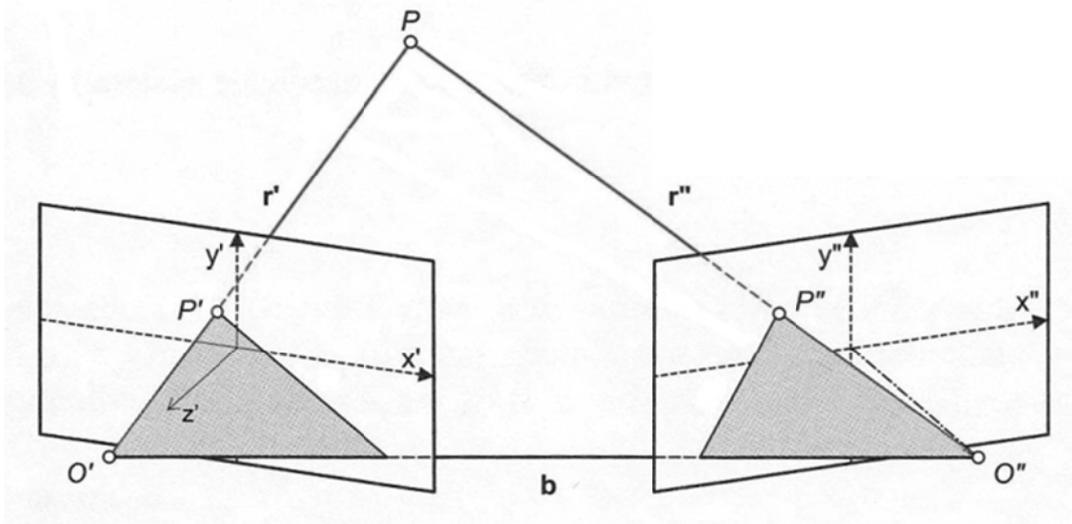


Figura 2.3 Condizione di complanarità.

Il piano epipolare è quindi definibile da 3 vettori: la base \bar{b} (di componenti b_x, b_y, b_z) collegante le due stazioni, ed i raggi proiettivi \bar{r}_1, \bar{r}_2 che collegano i centri di presa al punto oggetto P . La condizione di complanarità impone che il triplo prodotto scalare debba essere nullo, in modo che sia nullo il volume del parallelepipedo che definiscono, individuando così il piano epipolare. Quindi:

$$(\bar{b} \times \bar{r}_1) \bar{r}_2 = 0 \quad (2.3)$$

Per un orientamento relativo asimmetrico come quello descritto (dove una camera sta ferma e l'altra trasla e ruota), la condizione di complanarità in forma analitica si presenta come (Mikhail et al., 2001):

$$(x_1 - x_p \quad y_1 - y_p \quad -c)R_1 \begin{pmatrix} 0 & b_z & -b_y \\ -b_z & 0 & b_x \\ b_y & -b_x & 0 \end{pmatrix} R_2^T \begin{pmatrix} x_2 - x_p \\ y_2 - y_p \\ -c \end{pmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

dove $\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_2$ sono le coordinate immagine dei punti omologhi, c è la focale, b_x, b_y, b_z sono le componenti della traslazione, $R_1 = I$ e R_2 è la matrice di rotazione dell'immagine 2 rispetto all'immagine 1. Con l'orientamento relativo il fattore di scala non è determinabile, per questo motivo generalmente alla componente b_x viene assegnato un valore arbitrario (ad es. 1000).

Come accennato in precedenza, il calcolo dell'orientamento relativo tramite le equazioni di complanarità presenta il vantaggio di non richiedere informazioni relative allo spazio oggetto. L'equazione sopra scritta è di tipo non lineare, per cui per cercare una soluzione bisogna effettuare una linearizzazione e determinare dei valori approssimati per le tre rotazioni della matrice R_2 e per i termini b_y, b_z . Questa operazione, facile nel caso di una coppia stereo o poco convergente, presenta notevoli difficoltà nel caso della fotogrammetria close range. Dei dodici parametri dell'orientamento esterno delle due immagini, sette vengono fissati da una trasformazione di Helmert (3 rotazioni, 3 traslazioni e 1 fattore di scala), per cui, ai fini della determinazione dell'orientamento relativo, cinque equazioni di complanarità scritte per cinque punti omologhi sono sufficienti a determinare $b_y, b_z, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2$. Rimane comunque preferibile avere un numero maggiore di punti per una soluzione più precisa e per un controllo su eventuali errori.

Una corretta stima dei parametri iniziali rimane la condizione fondamentale per la buona riuscita del processo. Un metodo impiegato per la stima di tali valori fa riferimento alla strategia di Monte Carlo implementata nei software iWitness e Australis.

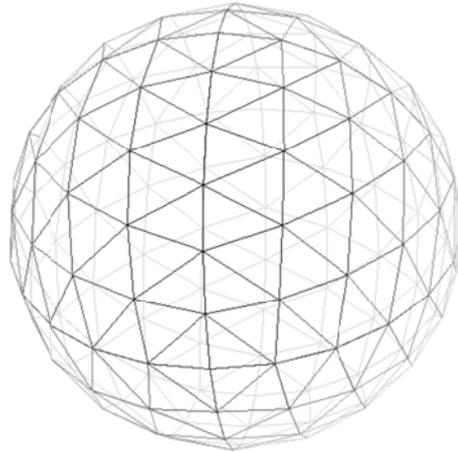


Figura 2.4 Sfera reticolare per la simulazione della posizione della seconda camera (Cronk S., 2006).

Il metodo prevede di simulare la seconda stazione sui vertici di una sfera reticolare (v. Figura 2.4), posti tutti ad una stessa distanza dal centro della sfera stessa nel quale è posizionata la prima stazione.

Ogni nodo rappresenta una posizione in cui vengono simulate le condizioni di complanarità e risolto l'orientamento relativo ai minimi quadrati. La soluzione presa in considerazione sarà quella che fra tutte ha presentato l'errore minimo rispettando alcune condizioni geometriche, come ad esempio che le coordinate oggetto non siano sul "retro" della camera. Una descrizione dettagliata è presente in Cronk (2006).

Una volta determinato l'orientamento esterno di una coppia di immagini, è possibile calcolare l'orientamento delle rimanenti immagini del set. Per fare questo è necessario ottenere dei valori approssimati delle coordinate oggetto. Tramite una procedura di intersezione spaziale che utilizza le equazioni di collinearità, è possibile determinare le coordinate nello spazio oggetto dall'intersezione dei raggi proiettivi appartenenti a due o più immagini. Quando solo una coppia di immagini è disponibile, per ogni punto immagine è possibile scrivere un totale di quattro equazioni, in tre incognite, e la soluzione si ottiene generalmente tramite il criterio dei minimi quadrati. Maggiore è il numero di punti disponibile, maggiore è il numero di raggi proiettivi che entrano nel processo di soluzione ai minimi quadrati, aumentando così la precisione, l'affidabilità e l'individuazione di eventuali errori.

2.1.4 Parametri di orientamento interno e termini d'errore

Riportiamo di seguito una breve descrizione dei parametri di orientamento interno e di cosa essi rappresentino, facendo riferimento allo schema di Figura 2.5.

Tramite la distanza principale e la posizione del punto principale è possibile definire la posizione spaziale del centro prospettico nel sistema di riferimento immagine. A questi vengono affiancati una serie di parametri aggiuntivi che definiscono il comportamento dell'ottica, andando a correggere le deviazioni che questa induce dal modello prospettico.

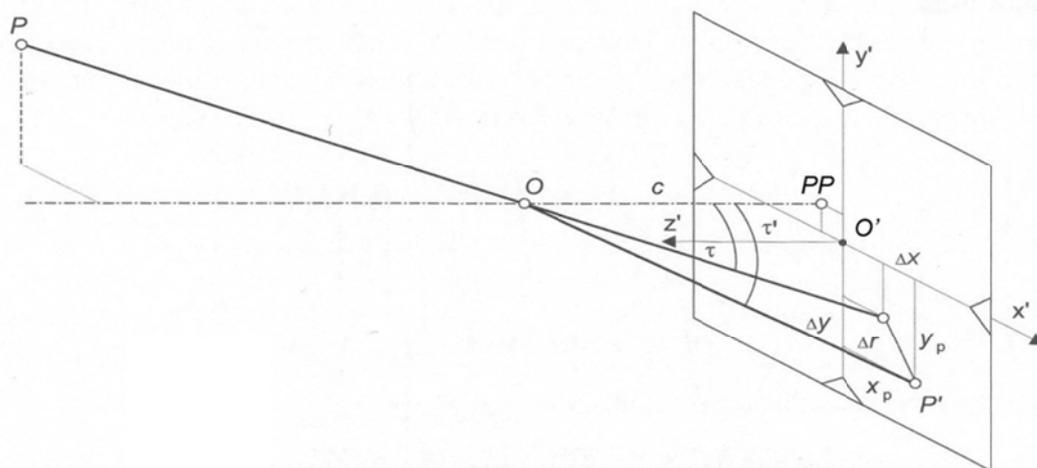


Figura 2.5 Orientamento interno.

Il punto principale PP , di coordinate x_p, y_p , è definito come la proiezione ortogonale alla superficie del sensore del centro di proiezione O e, in funzione della precisione costruttiva, è molto prossimo al centro del sensore O' .

La distanza principale, indicata con c , è la distanza lungo la normale che intercorre fra O ed il piano immagine.

I termini Δx e Δy rappresentano gli scostamenti dal modello di prospettiva centrale. In Figura 2.5 è possibile vedere come, in seguito all'attraversamento del pacchetto ottico, il raggio venga deviato, e l'angolo di incidenza entrante τ subisca una variazione diventando τ' . Δx e Δy sono dovuti alla simultanea presenza di diverse componenti, per cui la loro entità può essere vista come la somma di diversi contributi, comunemente chiamati APs (*Additional Parameters*). Di seguito verranno analizzati più in dettaglio:

- La distorsione simmetrica radiale rappresenta, in molti casi, il maggior contributo di errore. È attribuibile a variazioni di rifrazione di ognuna delle lenti dell'obiettivo e varia al variare della lunghezza focale e della distanza di messa a fuoco. Presenta un andamento molto pronunciato per obiettivi a corta focale, e si riduce al crescere di c . Ai bordi dell'immagine può arrivare ad assumere valori dell'ordine di qualche centinaia di pixel, per cui, se ignorata o mal stimata, rappresenta una significativa causa d'errore.

Generalmente viene espressa secondo il modello di Brown, una serie polinomiale i cui coefficienti K_1, K_2, K_3 ne controllano l'andamento.

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.5)$$

dove:

$$\bar{x} = x - x_p \quad , \quad \bar{y} = y - y_p$$

$$r = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}$$

da cui ricavo i termini

$$\Delta x_r = \frac{\bar{x}}{r} \Delta r \quad \Delta y_r = \frac{\bar{y}}{r} \Delta r \quad (2.6)$$

Al crescere della lunghezza focale i termini K_2, K_3 tendono generalmente ad avere un'incidenza minore, per cui per lunghe focali il solo K_1 è spesso sufficiente a caratterizzare l'andamento della distorsione radiale.

- La distorsione tangenziale è causata da un decentramento o da un disallineamento degli assi ottici delle lenti costituenti l'obiettivo. L'entità di questo tipo di errore rappresenta una parte meno significativa rispetto alla distorsione radiale, assumendo valori spesso di uno o due ordini di grandezza inferiori, e che, ai bordi dell'immagine, frequentemente risultano essere inferiori al pixel (Figura 2.6).

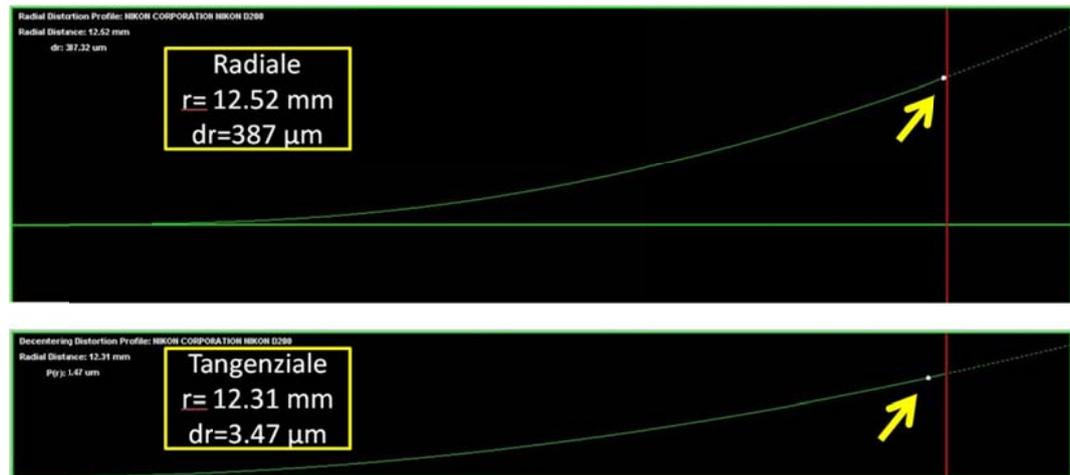


Figura 2.6 Comparazione fra l'entità della distorsione radiale e tangenziale (Nikon D200 –focale 17mm).

Il suo comportamento può essere modellato sempre secondo il modello di Brown tramite i parametri P_1, P_2 nel seguente modo:

$$\begin{aligned}\Delta x_t &= P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ \Delta y_t &= P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy\end{aligned}\tag{2.7}$$

dove

$$P(r) = r^2 \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$$

Esiste una forte correlazione fra i parametri P_1, P_2 e la posizione del punto principale x_p, y_p e, generalmente, nelle lenti a lunga focale la correlazione è maggiormente evidente rispetto a quelle grandangolari.

Una considerevole parte di questo tipo di distorsione è quindi compensata con lo spostamento del punto principale x_p, y_p , mentre la rimanente viene modellata attraverso i parametri P_1, P_2 (Fraser, 1997). Nonostante la sua entità risulti molto inferiore a quella del contributo dato dalla distorsione radiale, è un parametro che dovrebbe essere tenuto in considerazione per applicazioni dove è richiesto un elevato livello di accuratezza.

- Esistono altri fattori d'errore, come ad esempio la non perfetta ortogonalità del piano del sensore rispetto all'asse ottico, detta distorsione affine. In

questo caso, in seguito anche ad una minima inclinazione, i pixel del sensore di forma quadrata, risultano avere un diverso valore nelle direzioni di x e y . A questo si aggiunge che l'integrità geometrica dei sensori, garantita da processi produttivi che raggiungono precisioni di $0.1 \mu\text{m}$ nel posizionamento del pixel, non evita che componenti d'errore vengano introdotte da effetti elettronici, causanti una differenza di scalatura lungo gli assi x e y del piano immagine e una deviazione dall'ortogonalità fra gli assi (fattore di *shear*). Questi effetti sono dovuti a differenze di frequenza nei convertitori A/D e a "rumore" nell'elettronica del sensore. La modellazione per questo tipo di errore avviene introducendo due coefficienti B_1 e B_2 , dove il primo tiene conto della differente scalatura fra la direzione orizzontale e verticale ed il secondo considera la non ortogonalità fra gli assi x e y :

$$\Delta x_a = B_1 \bar{x} + B_2 \bar{y} \quad (2.8)$$

Questa tipologia di errore rappresenta un fattore minoritario, spesso trascurabile per moderni sensori appartenenti a camere di un certo livello qualitativo, mentre non lo è se si impiegano dispositivi come webcam, cellulari con fotocamera, o fotocamere di fascia economica, dove all'errore dovuto agli effetti elettronici si aggiunge anche quello dovuto ad una scarsa qualità costruttiva. In ogni caso quando il livello di accuratezza richiesto è elevato introdurre questo tipo di modellazione può portare dei benefici.

- Altra sorgente d'errore risulta essere la non perfetta planarità del sensore; la distorsione indotta da questo effetto è funzione dell'angolo di incidenza del raggio proiettivo. Per questa ragione lenti a lunga focale, che quindi hanno angoli di incidenza molto bassi, sono meno soggette a questo tipo di errore rispetto a quelle con corta focale (obiettivi grandangolari).

Nel caso dei moderni sensori CCD/CMOS apparentemente questo problema può considerarsi ovviato in quanto i processi produttivi hanno raggiunto elevatissimi standard di controllo e qualità che ne garantiscono la planarità. In ogni caso errori sistematici sulle coordinate immagine dovute alla non planarità del sensore possono permanere e risultare un fattore limitante nell'accuratezza di un processo fotogrammetrico. I motivi sono

essenzialmente di tipo pratico, ovvero una volta montato nel corpo macchina il sensore non è facilmente misurabile, inoltre l'esiguo spessore del wafer potrebbe subire effetti di "crinkling" (stropicciamento) che rendono estremamente difficile la misura della superficie "topografica" del sensore. Dato quindi che per compensare gli effetti di non planarità l'unica via è quella di effettuare misure dirette sulla superficie con particolari strumentazioni, i parametri di calibrazione che riguardano questi aspetti non sono deducibili tramite procedure di autocalibrazione.

Escludendo i termini B_1, B_2 , la combinazione delle fonti d'errore sopra descritte porta alla determinazione del modello standard a 8 parametri $(\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2)$:

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\Delta x_p - \frac{\Delta c}{c} \bar{x} + \bar{x}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2 \bar{x} \bar{y} \\ \Delta y &= -\Delta y_p - \frac{\Delta c}{c} \bar{y} + \bar{y}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2 + 2P_1 \bar{x} \bar{y}\end{aligned}\tag{2.9}$$

con

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - x_p \quad ; \quad \bar{y} = y - y_p \\ r^2 &= (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2\end{aligned}$$

La soluzione di tale modello consiste nello stimare i parametri addizionali (APs) oltre ai parametri di orientamento interno ed esterno.

Per ogni punto immagine possono essere scritte due equazioni di collinearità, e combinando tutte le equazioni di tutti i punti, si perviene al sistema di equazioni da risolvere. Le equazioni, non essendo lineari, dovranno essere linearizzate attorno a valori approssimati per poter essere risolte.

Considerando uno sviluppo di Taylor troncato al prim'ordine, raccogliendo i coefficienti delle derivate parziali in una matrice A , possiamo scrivere:

$$Ax = l - e\tag{2.10}$$

dove $l - e = w$ e rappresenta la discrepanza fra le coordinate immagine.

La determinazione del vettore delle incognite \hat{x} è eseguita tramite il criterio dei minimi quadrati e vale:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} (A^T P l) \quad (2.11)$$

dove P è la matrice dei pesi delle osservazioni.

Il problema viene risolto iterativamente, fino al raggiungimento della convergenza.

In riferimento alle equazioni di collinearità, le equazioni alle osservazioni da impiegare nel modello di autocalibrazione bundle-adjustment hanno la seguente forma:

$$A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + w = 0 \quad (2.12)$$

dove x_1 rappresentano i parametri di orientamento esterno della camera, x_2 le coordinate dei punti oggetto, e x_3 i parametri di calibrazione della camera. Le matrici A_1 , A_2 , A_3 , contengono le derivate parziali delle funzioni ai rispettivi parametri e w rappresenta il vettore delle discrepanze delle coordinate immagine.

La geometria della rete di presa (*network design*), gioca un ruolo fondamentale nella determinazione dei parametri di orientamento interno, esterno e di distorsione, soprattutto qualora richiedano di essere determinati con un elevato livello di accuratezza.

2.1.4.1 Caso di lunghe focali

In fotogrammetria l'impiego di obiettivi aventi una lunga focale può rivelarsi utile in applicazioni pratiche di diverso tipo, quali il monitoraggio di edifici o l'incidentistica stradale. Per il lavoro svolto nella presente tesi non sono stati impiegati dei teleobiettivi, bensì delle lenti macro, che però, dal punto di vista comportamentale, possono essere assimilate ai precedenti.

Le problematiche che coinvolgono questo tipo di strumentazione riguardano principalmente gli aspetti analitici dell'orientamento delle stazioni, la sovra parametrizzazione, il mal condizionamento della matrice dei coefficienti e la

conseguente instabilità del sistema di equazioni in fase di bundle adjustment. La ragione di questo è dovuta al fatto che, al crescere della focale, l'angolo visivo (FOV) diventa sempre più piccolo, portando il sistema dei raggi proiettivi ad essere più simile ad una proiezione ortogonale (con raggi paralleli fra di loro) che non ad una prospettiva (con raggi altamente convergenti). È stato dimostrato che il problema assume rilevanza e presenta problemi numerici quando l'angolo FOV scende sotto ai 10° in un formato 35 mm.

Il modello di Brown a 8 parametri visto in precedenza, funzionante nella quasi totalità delle applicazioni che coinvolgono la fotogrammetria close range, presenta delle anomalie di funzionamento nel caso di lunghe focali. In casi di questo tipo, bisogna prestare particolare attenzione al comportamento dei parametri, in quanto, al crescere della focale, cresce notevolmente anche la correlazione fra i parametri della camera e quelli di orientamento interno ed esterno.

Per quanto riguarda gli obiettivi a lunga focale, è noto in letteratura come il solo termine del terzo ordine, K_1 , sia sufficiente a descrivere il comportamento della distorsione radiale. Incogniti e da calcolare sono anche i termini dell'orientamento interno, ovvero la posizione del punto principale e la lunghezza focale. A seguito di queste considerazioni è stato considerato un modello ridotto rispetto a quello di Brown classico, costituito di soli 4 parametri atti a caratterizzare il comportamento fisico di un obiettivo a lunga focale.

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\Delta x_p - \frac{\Delta c}{c} \bar{x} + \bar{x} K_1 r^2 \\ \Delta y &= -\Delta y_p - \frac{\Delta c}{c} \bar{y} + \bar{y} K_1 r^2\end{aligned}\tag{2.13}$$

dove, analogamente a quanto visto in precedenza:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - x_p \quad ; \quad \bar{y} = y - y_p \\ r^2 &= (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2\end{aligned}$$

Ancora una volta le equazioni di collinearità dovranno essere linearizzate, in modo da determinare la matrice A contenente le derivate parziali rispetto alle incognite del modello.

Di solito in questo processo, impiegato dalla comunità scientifica da oltre 40 anni, si assume come valore dei coefficienti x_p, y_p il termine -1 . Tuttavia, considerato che l'impiego di lenti a lunga focale provoca, nel sistema di equazioni da sottoporre a bundle adjustment, un mal condizionamento, e quindi un'instabilità dell'intero sistema di equazioni, è utile fare un passo indietro e rivedere la determinazione delle derivate parziali necessarie al modello di correzione delle coordinate immagine, soprattutto per quanto riguarda le variabili x_p, y_p .

I valori comunemente impiegati:

$$\begin{matrix} & x_p & y_p \\ \frac{\partial x}{\partial y} & \left(\begin{array}{cc} \dots & -1 & 0 & \dots \\ & 0 & -1 & \dots \end{array} \right) \end{matrix} \quad (2.14)$$

diventano:

$$\begin{matrix} & x_p & & & y_p \\ \frac{\partial x}{\partial y} & \left(\begin{array}{cccc} \dots & -1 - K_1 r^2 - 2(x - x_p)^2 K_1 & & (x - x_p) r^2 & \dots \\ & (y - y_p) r^2 & & -1 - K_1 r^2 - 2(y - y_p)^2 K_1 & \dots \end{array} \right) \end{matrix} \quad (2.15)$$

Questa modifica della matrice dei coefficienti A migliora notevolmente la stima della posizione del punto principale nel caso di obiettivi dotati di lunghe focali, anche se K_1 presenta valori piccoli, dell'ordine di 10^{-5} (Stamatopoulos, 2010).

È quindi possibile affermare che se, in situazioni dove la correlazione fra i parametri della camera non risulta elevata (la maggioranza dei casi di fotogrammetria close range), la presenza di piccoli errori nei coefficienti della matrice A può non inficiare la stima dei parametri di orientamento interno, esterno e coordinate oggetto, non è altrettanto vero per quei casi dove si ha un ridottissimo campo visivo.

2.2 Network design

Implicitamente, nella procedura di autocalibrazione, si assume che la geometria delle prese, o *network design*, contribuisca significativamente alla ricostruzione dell'orientamento interno e dei parametri di distorsione.

In fase di acquisizione, e al fine di calibrare una fotocamera, è bene seguire alcune semplici indicazioni:

- L'accuratezza di una rete aumenta con l'aumentare dell'angolo di convergenza fra le immagini. Questo implicitamente migliora anche il rapporto base-distanza fra le immagini e l'oggetto.
- L'accuratezza migliora con il numero di immagini del progetto, cioè più raggi ottici "vedono" un punto, migliori e più affidabili saranno i risultati ottenibili;
- L'accuratezza migliora con il numero di punti collimati in un'immagine;
- I punti devono essere ben distribuiti su tutta l'immagine e devono essere rappresentativi di tutte le profondità presenti.
- E' indispensabile disporre di immagini ruotate di $\pm 90^\circ$, soprattutto se i punti collimati sono disposti su un piano.

Una geometria di presa di questo tipo è quella da adottare quando si vogliono effettuare misurazioni caratterizzate da un elevato valore di accuratezza, come ad esempio nel campo industriale.

2.3 Riconoscimento automatico dei target

L'impiego di target per il riconoscimento automatico dei punti omologhi risulta essere una risorsa molto utile in fase di calibrazione, soprattutto per la velocità con cui questa operazione viene portata a termine. Di seguito si fa una breve panoramica sul

principio di riconoscimento automatico dei target, con particolare riferimento alle soluzioni adottate nei software iWitness e Australis (Cronk S., 2007).

La scansione delle immagini alla ricerca di target, siano essi colorati o no, è un processo che può essere riassunto in 3 step:

- identificazione;
- raffinamento;
- filtraggio.

La prima di queste operazioni serve a diminuire essenzialmente l'area di lavoro, in modo da ridurla ad una frazione dell'immagine complessiva. In seguito ognuna delle aree di interesse individuate viene raffinata in modo da ottenere il massimo numero di informazioni corrette. Infine, tramite l'operazione di filtraggio, vengono individuati i singoli target.

2.3.1 Identificazione

Scelta una forma geometrica per i target (nel caso di studio di tipo circolare) il primo passo da compiere è cercare di individuare sull'intera immagine le zone interessate dalla loro presenza, in modo da limitare, nei successivi step, le operazioni di identificazione ad un'area molto più circoscritta. La procedura di identificazione prevede la scansione pixel per pixel dell'intera immagine procedendo linea per linea; le aree di interesse che compongono i potenziali target, definite "*blob*", sono composte da "*blob lines*", ovvero da gruppi di pixel classificati comparando i valori di saturazione e luminosità che sussistono fra un pixel ed il precedente.

Fissando un valore di soglia è possibile stabilire quando una "*blob line*" inizia e quando questa finisce. Se una "*blob line*" è già iniziata e la differenza fra due pixel successivi è compresa all'interno del valore di soglia, il secondo pixel viene aggiunto alla "*blob line*", se invece la differenza risulta essere inferiore del valore di soglia, la "*blob line*" viene terminata. Se invece una "*blob line*" non è stata nemmeno iniziata, una differenza inferiore al valore di soglia comporta un semplice ignoramento del pixel. Al termine del processo di scansione, quando l'intera immagine è stata analizzata, le singole "*blob lines*" vengono fuse tra loro dando origine ai vari "*blob*".

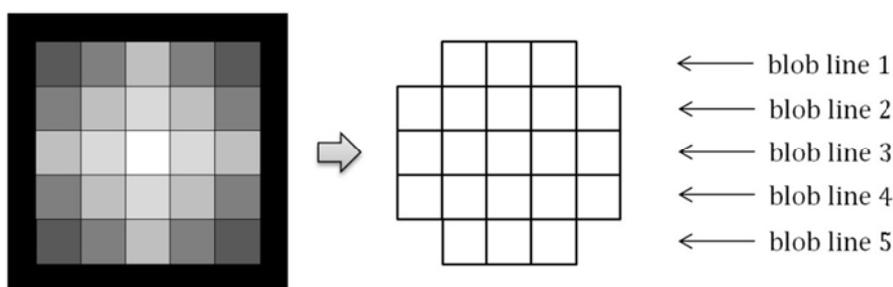


Figura 2.7 Esempio di "blob" e "blob lines".

2.3.2 Raffinamento

L'identificazione di potenziali target tramite la ricerca dei "blob" serve a ridurre drasticamente lo spazio di ricerca, in modo da ottimizzare tutto il processo, sia dal punto di vista dell'onere computazionale che da quello dei tempi di elaborazione. In un'immagine da 10 megapixels, la superficie coperta dai target può corrispondere ad esempio a circa un 1% del totale, quindi l'analisi si riduce ad un campione di 100.000 pixels.

L'operazione di raffinamento serve soprattutto a correggere le situazioni in cui nella fase iniziale più "blob" vengono fusi in uno unico più grande. Questa situazione si verifica quando i targets risultano essere molto vicini fra di loro, oppure in seguito all'impiego di flash in presenza di target retroriflettenti; in questo caso, una corona circolare luminosa dovuta al lampeggio del flash tende a far "avvicinare" i target fra di loro.

Agendo sui valori di soglia ed eseguendo una riscansione dell'immagine, è possibile (ma non sempre) risolvere questi problemi di sovrapposizione.



Figura 2.8 Raffinamento dei "blob".

2.3.3 Filtraggio

L'operazione di filtraggio viene eseguita su ogni "blob" sulla base di criteri sia radiometrici che geometrici.

Esistono diversi metodi per classificare un "blob" come target oppure per rigettarlo, alcuni dei quali possono essere anche combinati tra loro:

- Analisi sui pixel perimetrali: target circolari, se ripresi obliquamente, assumono una forma ellittica. Un'analisi sui pixel perimetrali permette di determinare l'ellisse di best-fitting. Elevati residui su questo criterio di forma indicano una forma non ellittica e quindi un rigetto del blob.
- Analisi sul rapporto n° pixel/area che circoscrive il blob: facendo riferimento alla Figura 2.9, se il rapporto fra l'area circoscrivente il blob ($2r^2$) e quella del blob (πr^2) equivale al valore di $\pi/4$, ne consegue un oggetto di forma circolare; è anche possibile, fissando dei valori di tolleranza, considerare ellissi più o meno schiacciate.

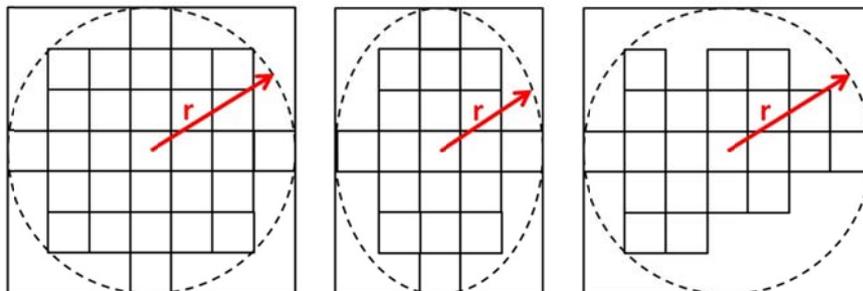


Figura 2.9 Criterio pixel/area.

- Analisi sullo "spessore" dei target, si confronta il rapporto larghezza/altezza, se uno di questi due termini è circa 3 volte l'altro, l'oggetto viene scartato.
- Se esistono "blob" di dimensioni molto maggiori o minori della media, questi possono essere scartati, e, allo stesso modo, se ce ne sono alcuni che presentano valori anomali di saturazione o luminosità.

Degli esempi di accettazione e rifiuto sono rappresentati in Figura 2.10.

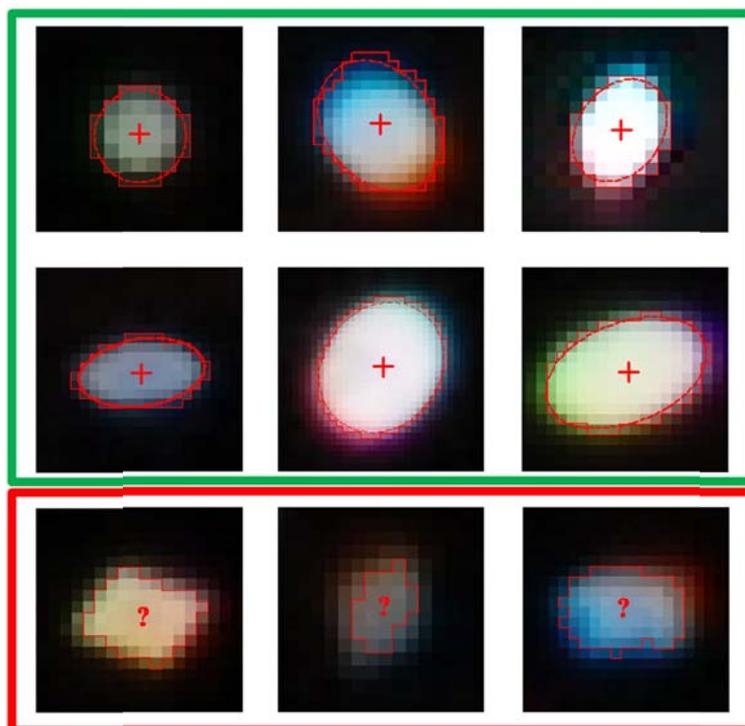


Figura 2.10 Esempi di accettazione (riquadro verde in alto) e rifiuto (riquadro rosso in basso) dei "blob".

Una volta terminato il percorso attraverso le fasi di *identificazione*, *raffinamento* e *filtraggio* i "blob" rimasti possono essere considerati come rappresentativi dei targets e si procede alla misurazione del loro centroide.

2.3.4 Effetti dell'aberrazione cromatica

I sensori CCD sono tipicamente costruiti adottando lo schema previsto da Bayer, con un 25% di pixel che assorbono nei canali B,R e un 50% nel G, data la maggior sensibilità dell'occhio umano al canale del verde.

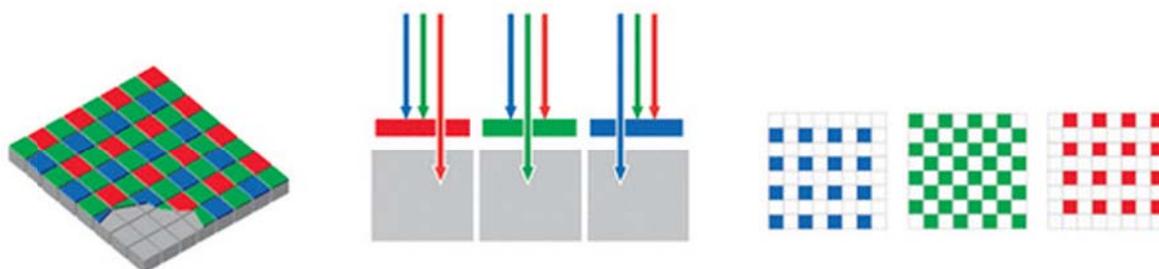


Figura 2.11 CCD secondo lo schema di Bayer.

Per questa ragione la distanza nominale di messa a fuoco è tarata sul canale del verde, comportando un leggero sfocamento dei canali rosso e blu. Questo fenomeno ottico è chiamato *aberrazione cromatica*.

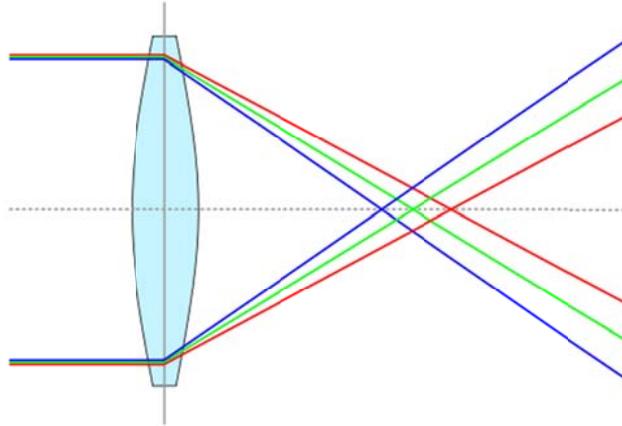


Figura 2.12 Aberrazione cromatica, differenti piani di messa a fuoco nei vari canali.

Le aberrazioni cromatiche sono una fonte d'errore nell'ambito della fotogrammetria close range. Le cause vanno individuate nei differenti valori che assumono la distanza principale ed i coefficienti della distorsione radiale nei diversi canali RGB. L'effetto è facilmente visibile zoomando su una porzione dell'immagine; spesso si assiste ad uno sfalsamento dell'immagine nei tre diversi canali che risulta essere sempre più pronunciato al crescere della distanza radiale (Figura 2.13).

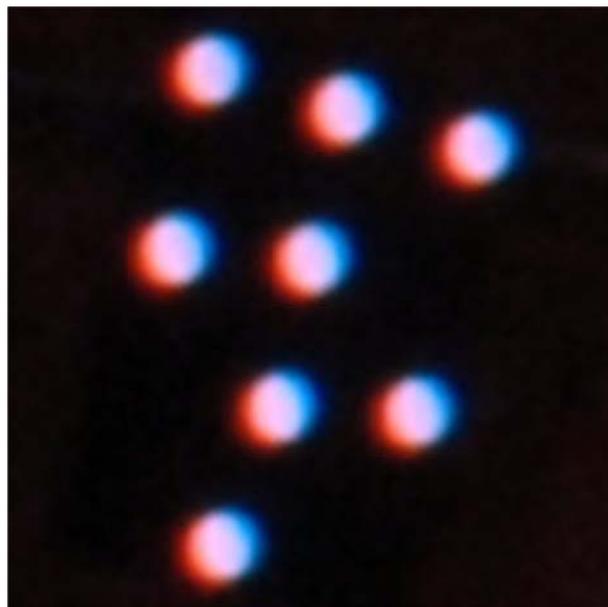


Figura 2.13 Sfalsamento dell'immagine nei tre canali RGB (Cronk S., 2007).

Gli effetti introdotti dall'aberrazione cromatica influenzano la corretta determinazione dei centroidi dei targets. Per mitigare tali effetti è possibile determinare differenti parametri di calibrazione per i differenti canali RGB: ogni immagine sarà quindi caratterizzata da 3 misurazioni per ogni target, ed in seguito le coordinate oggetto saranno determinate dalla media di 3 posizioni.

2.3.5 I target codificati

Requisito primario per un target codificato è quello di essere individuabile in maniera univoca. La soluzione adottata da PhotoMetrix per i software iWitness ed Australis è basata sulla disposizione a "T" di 5 target; tale scelta è stata giustificata dai seguenti motivi:

- la forma a "T" è univoca;
- entrambi i gruppi di 3 target formanti la parte "—" e quella "|" formano linee diritte, caratteristica che si mantiene anche in rappresentazioni prospettiche;
- i due gruppi presentano un punto in comune;
- i target sono equispaziati fra di loro;
- ogni target codificato contiene 5 o più elementi, incrementando il numero di punti e quindi di equazioni .

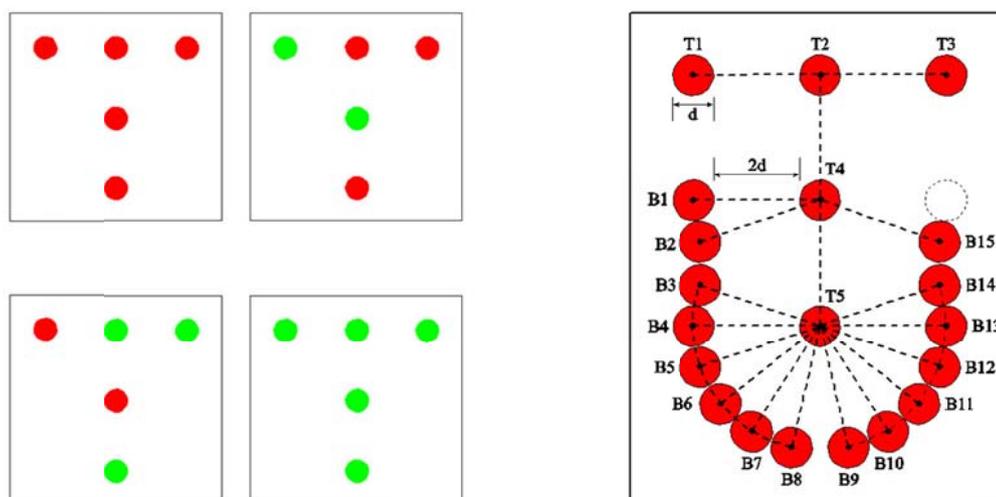


Figura 2.14 Target codificati della Photometrix, a sinistra i target colorati, a destra la nuova tipologia di target (basati sempre sul sistema a T, permettono tramite la variazione della "corona" circolare, di aumentare il numero di combinazioni possibili).

2.4 Macrofotografia

In fotografia c'è un particolare settore chiamato con il termine macrofotografia (a volte presentato anche come *close-up*) che si occupa di effettuare riprese ad alto livello di dettaglio di oggetti molto vicini. Proprio come l'occhio umano è in grado di effettuare il focamento solo fino a una certa distanza e non oltre, la stessa cosa vale anche per gli obiettivi fotografici; non tutti sono, infatti, caratterizzati dallo stesso valore di distanza minima di messa a fuoco o range di utilizzo. Nella maggior parte degli obiettivi tale distanza minima è progettata per rientrare nel range che va da uno o due metri, mentre per obiettivi a lunga focale tale valore sale ancora.

Ora, sulla base di queste basilari informazioni, si capisce come l'aspetto della distanza minima da interporre fra il soggetto da riprendere e la camera fotografica non sia d'aiuto se si vogliono effettuare delle inquadrature molto ravvicinate. Situazioni di questo tipo sono assai frequenti per soggetti appartenenti al campo dell'oreficeria, della numismatica, oppure in ambito naturalistico, medico o forense: in queste situazioni si rendono necessarie distanze minime di messa a fuoco molto più ridotte. Inoltre, l'optimum in questi ambiti sarebbe poter riempire completamente l'area di acquisizione del sensore o della pellicola con il soggetto.

Sarebbe restrittivo ricondurre il tutto alla semplice distanza fisica di presa, anche perché essa di per sé non determina quanto il soggetto riempirà il fotogramma e quindi l'immagine finale.

Per questo motivo per parlare di macrofotografia bisogna introdurre degli altri concetti e una terminologia specifica che chiarisca i vari punti in discussione. Il modo migliore per parlare di riprese ravvicinate non è quindi in termini di "quanto vicino", ma di ingrandimento del soggetto, e ciò perché si presenta la necessità di fare riferimento ad alcune costanti.

L'ingrandimento è il rapporto fra le dimensioni fisiche dell'immagine sul supporto (sensore digitale o pellicola a seconda che parliamo di fotografia digitale o analogica) e le dimensioni fisiche dell'oggetto fotografato. È da sottolineare che si fa riferimento esclusivamente alle dimensioni sul supporto, quindi a quanto è effettivamente grande l'immagine del soggetto sulla pellicola o sul sensore digitale, e non a quelle su stampa o, se in diapositiva, in proiezione.

La relazione fra le dimensioni reali del soggetto e le dimensioni della sua immagine sul supporto è detta "rapporto di riproduzione", o d'ingrandimento, e la si indica in

genere con una frazione. Frazioni inferiori a uno, come ad esempio 1:8, 1:4 o 1:2, indicano che l'immagine sul supporto è più piccola delle dimensioni reali del soggetto di rispettivamente 8, 4 o 2 volte. A volte il rapporto d'ingrandimento è scritto come un fattore decimale, ad esempio 0.25x 1.0x per indicare rispettivamente rapporti di 1:4 o 1:1. In un rapporto 1:1 l'immagine e il soggetto avranno la stessa dimensione: un soggetto grande un centimetro creerà sul supporto un'immagine grande un centimetro, per questo motivo tale valore è detto "a dimensioni reali" oppure "a grandezza naturale". Con frazioni maggiori di uno, per esempio 2:1, l'immagine sarà più grande del soggetto, si avrà quindi un suo reale ingrandimento sul supporto.

Un altro modo per visualizzare il concetto è di pensare che a dimensioni reali si stia inquadrando un'area del soggetto che ha le stesse dimensioni del supporto. Nel caso della pellicola 35 mm o sensori digitali *full frame* questo significa una superficie di dimensione pari a 24x36 mm, mentre più in generale nel campo della fotografia digitale bisogna fare riferimento di volta in volta alle dimensioni del sensore della fotocamera utilizzata.

Conoscere il rapporto d'ingrandimento vuol dire conoscere l'area che sarà fotografata, o viceversa. Un rapporto 1:10 ad esempio nel caso di pellicola a 35 mm significa inquadrare un'area grande 24x36 cm.

Tale valore è stato citato perché è quello cui la maggior parte degli obiettivi normali si fermano, è una sorta di barriera, oltre la quale bisogna ricorrere a soluzioni tecniche che fanno lievitare i costi e la complessità costruttiva per poter mettere a fuoco ancor più vicino.

Gli obiettivi macro sono otticamente progettati al fine di ottenere una resa più corretta delle superfici piane, per questo motivo sono, fra le tipologie di obiettivi, quelli otticamente più corretti.

Ai fini pratici il regno della fotografia a distanza ravvicinata può essere diviso in tre territori. Per riprese a basso ingrandimento, ovvero fino al rapporto di 1:10 di solito non serve alcun accorgimento particolare prima dello scatto, e si parla di ripresa a distanza ravvicinata. Dal rapporto 1:10 fino a circa il rapporto 1.5:1 ci si trova nel territorio della macrofotografia. In quest'ambito si inizia a necessitare di accorgimenti tecnici e strumentazione particolare. Oltre il rapporto 1.5:1 si entra nel terreno della macrofotografia spinta.

3

I sensori tridimensionali

3.1 Introduzione

La realizzazione di un modello tridimensionale può seguire, durante tutto il suo iter, percorsi diversi, in relazione ai fini ultimi del lavoro: gli approcci principali sono due e si differenziano principalmente a livello concettuale e metodologico. Il primo prevede che tutte le fasi della creazione di un oggetto 3D siano interamente gestite dentro ad uno spazio virtuale, sfruttando modelli parametrici che portano ad avere un modello 3D, ma che non trovano riscontro con un soggetto reale, se non nella eventuale e successiva fase di produzione; è il caso ad esempio della progettazione meccanica. Il secondo approccio, invece, prevede fin dalle prime fasi una relazione tra lo spazio reale e quello virtuale, in questo caso la rappresentazione tridimensionale; fa riferimento dunque ad una realtà che esiste prima del modello, e della quale il modello 3D è diretta conseguenza. Ai fini di questa tesi si fa riferimento al secondo approccio, dove appunto l'oggetto deve essere "trasferito" dal mondo reale a quello virtuale.

Per effettuare questo tipo di operazione vengono impiegati dei particolari strumenti che classifichiamo sotto il nome di "sensori tridimensionali". Sono chiamati in questo modo perché caratterizzati dalla capacità di estrapolare informazioni dalla scena inquadrata e di convertirle in informazioni o immagini 3D. Un esempio di immagine 3D può essere la rappresentazione della superficie esterna di un oggetto, oppure la rappresentazione di tutto ciò che ne sta all'interno. I metodi di misura che portano ad ottenere il dato geometrico possono essere poi ulteriormente distinti tra non distruttivi e distruttivi e includono tre classi di tecniche.

La prima classe di metodi, di tipo non distruttivo, non prevede il contatto fisico fra lo strumento e l'oggetto e l'acquisizione del dato avviene impiegando radiazioni luminose non ionizzanti che ne esplorano la superficie. Con il termine radiazioni luminose si

intende di solito la porzione visibile di tutto lo spettro elettromagnetico, ma questa definizione può estendersi ad alcune porzioni invisibili dello spettro, come per esempio il vicino infrarosso. All'interno di questa prima classe è possibile individuare due sottogruppi in funzione della luce impiegata per effettuare la misura. Se la luce proviene da sorgenti artificiali generiche oppure da una sorgente naturale come ad esempio il sole, i metodi di misura si dicono passivi. Al contrario, se la luce è codificata e nel processo di misura svolge un ruolo attivo, si parla di conseguenza di sensori attivi.

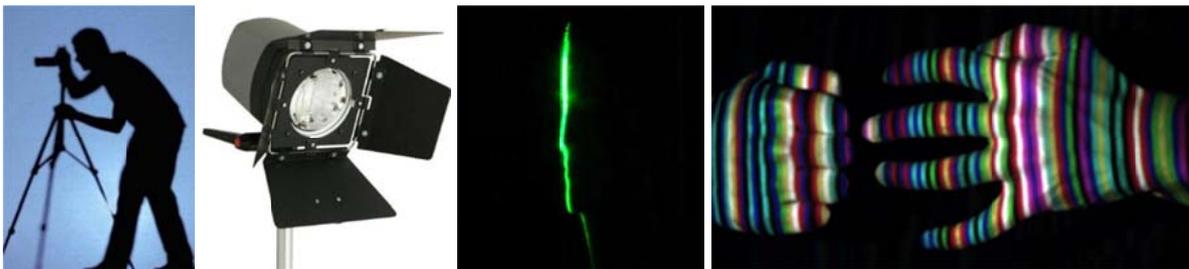


Figura 3.1 Metodi non distruttivi basati su radiazioni luminose non ionizzanti.

La seconda classe si differenzia dalla precedente per l'utilizzo di radiazioni ionizzanti, come i raggi-X, che avendo una potenza molto maggiore della luce visibile, possono penetrare all'interno dei materiali anche se dotati di uno spessore non trascurabile; tale tecnica prende il nome di Tomografia Assiale Computerizzata (TAC). Nella stessa classe trovano posto anche i metodi basati su energie radianti non elettromagnetiche come gli ultrasuoni, che sono costituiti da onde meccaniche ad alta frequenza capaci di penetrare corpi a bassa impedenza acustica, come quelli contenenti liquidi.

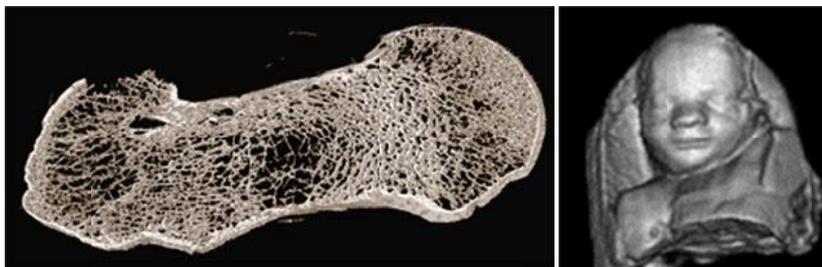


Figura 3.2 Metodi non distruttivi basati su radiazioni luminose ionizzanti (TAC) o su ultrasuoni.

Queste tecniche consentono di rivelare il contenuto interno degli oggetti tramite la generazione di immagini volumetriche.

La terza classe di metodi, questa volta di tipo distruttivo, prevede un sezionamento fisico dell'oggetto con sezioni piane ravvicinate tra loro, e l'acquisizione di un'immagine per ognuna delle sezioni generate. Elaborando tali immagini vengono riprodotti i contorni delle strutture interne ed esterne all'oggetto, che possono essere ricollocati nello spazio in un sistema CAD dando luogo ad un modello tridimensionale.

Il presente lavoro si concentrerà sulla prima di queste tre classi: porremo l'attenzione sul rilievo e sulla rappresentazione delle superfici degli oggetti, lasciando l'analisi di ciò che avviene al loro interno ad altre discipline.

Riprendendo quanto scritto in precedenza, ovvero in riferimento al ruolo che la sorgente luminosa gioca all'interno del processo di acquisizione, ci soffermiamo sui sensori catalogati come di tipo attivo.

Una delle limitazioni principali di una tecnica passiva come la fotogrammetria è quella di essere in grado di determinare in modo accurato la posizione tridimensionale dei punti solo se questi sono ben distinguibili rispetto al pattern radiometrico o geometrico che li circonda. Alcune situazioni critiche quali una superficie dotata di texture a tinta unita rendono impossibile la determinazione tridimensionale dei punti senza l'impiego ad esempio di target adesivi.

A questi problemi vengono in aiuto i sistemi dotati di sensori di tipo attivo, i quali tramite l'impiego di luce codificata oppure tramite l'impiego del laser, rendono l'acquisizione del dato geometrico indipendente dalla geometria di una superficie o dalla sua texture. Nel caso della scansione tridimensionale il dato principale che il sensore 3D deve acquisire è rappresentato dall'andamento spaziale della superficie da riprendere, ovvero le componenti x, y, z espresse in un opportuno sistema di riferimento. Il contenuto informativo legato al colore diventa in questo caso accessorio, può essere acquisito come no.

3.2 II L.A.S.E.R.

Il L.A.S.E.R., acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ("amplificazione della luce per mezzo dell'emissione stimolata di radiazioni") è un dispositivo per ottenere fasci intensi ed estremamente concentrati di radiazioni elettromagnetiche coerenti (cioè in relazione di fase non variabile sul tempo) nei campi dell'infrarosso, del visibile e dell'ultravioletto. Benché i fondamenti teorici dell'emissione stimolata di radiazione siano frutto di un'intuizione di A. Einstein e fossero contenuti nella teoria quantistica dell'emissione e assorbimento pubblicata nel 1917, le prime applicazioni pratiche si ebbero solo intorno agli anni '50 nell'ambito delle ricerche sui campioni di frequenza od orologi atomici, durante le quali si comprese che il mezzo attivo consentiva l'amplificazione di radiazioni per emissione stimolata. Il primo esemplare di laser funzionante è da attribuire al fisico statunitense T.H. Maiman e fu realizzato nel 1960.

A titolo informativo si dà di seguito una breve descrizione di quelli che sono i principi di funzionamento del laser.

Il funzionamento dei laser è basato sul fenomeno dell'emissione stimolata di fotoni da parte di atomi eccitati. Un atomo, tramite un apporto forzato di energia dall'esterno, può passare dallo stato fondamentale, corrispondente a un livello di energia E_1 , a uno stato eccitato, corrispondente a un livello di energia maggiore E_2 , assorbendo un fotone di frequenza $\nu = (E_2 - E_1)/h$, dove h è la costante di Planck. Lo stato eccitato non è stabile e l'atomo può tornare spontaneamente al livello fondamentale emettendo un fotone di energia pari a quella richiesta per portarsi allo stato eccitato: si ha in tal caso emissione spontanea. L'emissione spontanea da parte di diversi atomi di una sostanza è casuale, quindi i fotoni emessi successivamente non hanno alcuna relazione di fase, ossia sono incoerenti. Se invece su un atomo allo stato eccitato incide un fotone di frequenza opportuna, l'atomo si diseccita cedendo la sua energia sotto forma di fotone avente la stessa frequenza e la stessa fase di quello incidente, ossia coerente con esso: si ha così un processo nel quale l'atomo libera, per emissione stimolata, un fotone la cui energia si somma a quella del fotone incidente. In condizioni di equilibrio termico in una sostanza il numero di atomi che si trova allo stato fondamentale è superiore a quello degli atomi allo stato eccitato, quindi l'assorbimento dei fotoni prevale sull'emissione stimolata; se però si provoca la cosiddetta "inversione della popolazione", cioè si fa in modo che gli atomi allo stato eccitato siano più di quelli allo stato fondamentale, si ha prevalenza

dell'emissione stimolata sull'assorbimento. Il processo con cui si attua tale inversione prende il nome di pompaggio ottico.

Il materiale attivo è posto tra due specchi, di solito curvi per meglio concentrare il raggio laser, che formano una cavità risonante in cui il numero dei fotoni emessi viene moltiplicato; la consistenza dell'effetto a cascata cresce infatti con la distanza che la luce percorre attraverso il mezzo del laser. Muovendosi da uno specchio all'altro i fotoni colpiscono gli atomi eccitati, che a loro volta emettono nuovi fotoni con la stessa frequenza e fase dei fotoni già presenti, si ha così una cascata di emissioni stimolate. Parte della radiazione così ottenuta viene lasciata filtrare all'esterno e forma il fascio laser.

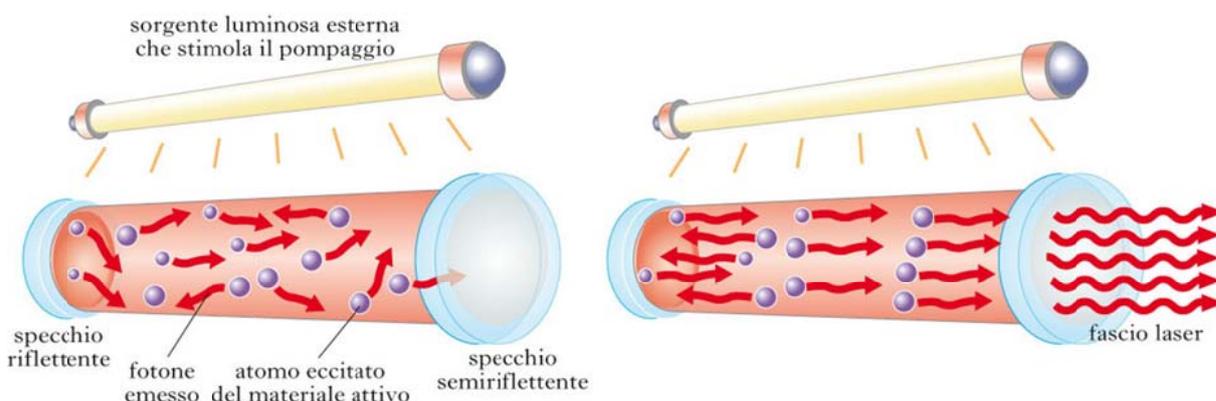


Figura 3.3 Procedimento di creazione del raggio laser.

Il fenomeno di emissione, rende la luce laser coerente e monocromatica e, come precedentemente detto, l'energia associata alla radiazione dipende dalla distanza tra il livello energetico di partenza e quello di arrivo.

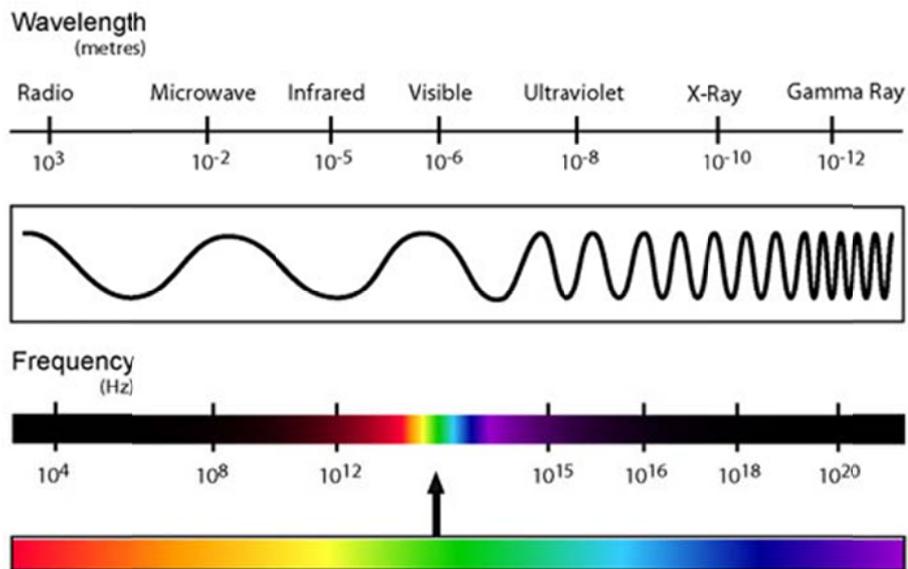


Figura 3.4 Spettro elettromagnetico e lunghezze d'onda.

3.2.1 Caratteristiche del fascio laser

La lunghezza d'onda caratterizzante il fascio laser è dipendente da diversi fattori, primo fra tutti il tipo di materiale utilizzato come "materiale attivo", ed in secondo luogo dal metodo impiegato per eccitare gli atomi e dalle caratteristiche dell'ottica utilizzata. In funzione dello stato di aggregazione del materiale attivo utilizzato possiamo distinguere:

- Laser allo stato solido, a cristalli e vetri o semiconduttori;
- Laser a liquidi;
- Laser a gas (ulteriormente suddivisi in laser ad atomi neutri, laser a ioni, laser molecolari, laser ad eccimeri e laser ad elettroni liberi);

Generalmente la lunghezza d'onda del laser varia in un intervallo che va dai 200 nm fino ai 700 nm, passando quindi dall'ultravioletto, al visibile fino all'infrarosso vicino.

Ciò che costituisce il laser è dunque energia elettromagnetica, come la luce naturale, ma mentre in questa i fotoni vengono emessi in tutte le direzioni e con lunghezze d'onda diverse, nel laser si riscontrano tre aspetti caratterizzanti:

- la luce è usualmente *monocromatica*, consistente cioè di una singola lunghezza d'onda; sebbene alcuni laser siano in grado di generare più di una lunghezza d'onda, l'onda è estremamente pura e consiste in una gamma spettrale molto ristretta.
- La *coerenza* dell'emissione di fotoni: a differenza di quella spontanea, nell'emissione stimolata ogni fotone ha la stessa fase del fotone che ha indotto l'emissione, e la fase viene mantenuta nel tempo e nello spazio.
- La *direzionalità*, ovvero, in riferimento alla dimensione del raggio emesso, il raggio laser presenta un "diametro" ed una divergenza estremamente piccola, è quindi in grado di viaggiare per lunghe distanze senza espandersi molto e di avere una "impronta" sull'oggetto molto ristretta.

3.2.2 Classificazione, rischi e precauzioni

I laser possono essere considerati tra i dispositivi più diffusi nel mondo se solo si pensa ai puntatori usati durante le presentazioni, ai lettori di codici a barre dei supermercati, e ai più disparati sistemi usati in centri estetici, ospedali e laboratori di ricerca.

L'impiego massiccio di diversi tipi di laser oramai esteso a tutti i livelli della sperimentazione scientifica porta ad accrescere l'attenzione per la sicurezza e per la prevenzione degli eventuali rischi collegati con il loro impiego.

Dal punto di vista legislativo si fa riferimento alla norma CEI EN 60825-1 che è la norma generale sulla sicurezza per le radiazioni laser e riguarda tutti i settori applicativi.

La grande varietà di lunghezze d'onda, energie e caratteristiche d'impulso dei laser e sistemi che includono laser, e delle applicazioni e dei modi di impiego di tali sistemi,

rendono indispensabile, ai fini della sicurezza, il loro raggruppamento in categorie, o classi, di pericolosità. E' risultato molto utile pertanto l'introduzione di un nuovo parametro chiamato Limite di Emissione Accettabile (LEA), che descrive i livelli di radiazione emergente da un sistema laser, la cui valutazione permette la collocazione dell'apparecchio nell'opportuna categoria di rischio. L'occhio, per la sua configurazione anatomico-funzionale e per il suo comportamento ottico, è l'organo più vulnerabile nei confronti della luce laser e rappresenta pertanto l'organo "critico" per eccellenza. A seconda della radiazione ottica e dell'intensità di dose si possono avere diversi tipi di danno a carico di questo organo. Si sono individuate 5 classi: 1, 2, 3A, 3B e 4, con indice di pericolosità crescente con il numero di classe:

- Classe 1: qui vengono raggruppati i laser cosiddetti intrinsecamente sicuri, poiché il livello di esposizione massima permesso non viene mai superato, o quei sistemi laser non pericolosi grazie alla loro progettazione ed ingegnerizzazione: involucri fissi e sicurezze intrinseche come ad esempio sistemi che bloccano definitivamente l'emissione in caso di guasto o di apertura involontaria o volontaria dell'apparato.
- Classe 2: sono quelle sorgenti o sistemi che emettono radiazione nell'intervallo 400 e 700 nm (cioè nel visibile) a bassa potenza. La protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalle reazioni di difesa, compreso il riflesso palpebrale.
- Classe 3A: comprende i laser con potenze di uscita non inferiori a 5 mW. La visione diretta è generalmente sicura.
- Classe 3B: i livelli, sia per radiazione visibile che per quella non visibile, non devono superare i 500 mW. La visione diretta è pericolosa, mentre generalmente non lo è quella delle riflessioni diffuse.

- Classe 4: sono i più potenti e pericolosi. La classe 4 comprende tutti quei sistemi che superano i livelli imposti alla classe 3B. Il loro uso richiede estrema cautela, sono pericolosi anche per riflessioni diffuse.

3.3 Sistemi triangolatori a luce laser

Grazie ai progressi compiuti dalla tecnologia negli ultimi decenni ed a ritmo ancora più sostenuto negli ultimi anni, soprattutto nel campo dell'elettronica allo stato solido e nell'informatica, è stato possibile realizzare diverse tecnologie e strumentazioni che permettono l'acquisizione della superficie degli oggetti in modo pressoché automatico ed estremamente veloce.

Gli strumenti attivi che vengono impiegati nella fase di acquisizione sono genericamente chiamati *range cameras*, in virtù della capacità di misurare la distanza, e facendo riferimento in particolare a quelli basati sul laser, sono chiamati *scanner 3D*.

Le applicazioni di questo tipo di strumentazione trovano spazio nei più disparati settori, che vanno dall'industria navale a quella civile, dalla meccanica alla medicina, dall'archeologia all'analisi forense, dal monitoraggio ambientale a grande scala al controllo dimensionale di un elemento singolo, dall'entertainment all'industria aerospaziale. Da questa prima panoramica sui campi applicativi emerge come non tutte le soluzioni tecniche siano applicabili indiscriminatamente all'oggetto da rilevare, bensì si evince come al variare delle dimensioni della zona o dell'oggetto di interesse ci saranno alcune variabili discriminatorie da tenere in considerazione, quali: principio di funzionamento, condizioni di applicabilità, costi, precisioni diverse in fase di output, ecc.

Per le proprietà descritte nel paragrafo precedente, la luce laser presenta la possibilità di generare spot luminosi estremamente focalizzati anche a distanze elevate, molto più di quanto non riescano altre tipologie di sorgenti luminose, di conseguenza è possibile discriminare con una maggior sensibilità la superficie da rilevare.

In generale per dimensioni medio piccole, dal metro in giù, il principio adottato è quello della triangolazione, mentre per oggetti di dimensioni maggiori o per scale di rilievo a livello ambientale, il principio utilizzato è quello del tempo di volo (TOF o Time of Flight).

Nell'ambito del rilievo il principio della triangolazione è quanto di più antico si possa trovare in ambito topografico, ne facevano ampio uso nell'antica Grecia, è stato impiegato nei primi rilievi topografici con il teodolite nel XVI° secolo e ancora oggi trova ampio utilizzo con le moderne stazioni totali. Il metodo della triangolazione si basa sulle proprietà trigonometriche dei triangoli, permettendo la determinazione di punti inaccessibili: è sufficiente che il punto P sia visibile, e si riesca a determinare i due angoli congiungenti tale punto da due stazioni la cui posizione reciproca è nota.

Una prima e più generale classificazione dei sistemi laser a triangolazione può essere fatta prendendo in considerazione le loro prestazioni e la destinazione d'uso. Possiamo quindi individuare due categorie: sensori di prossimità e sensori ad alta risoluzione. I primi sono abbastanza economici ed in genere vengono utilizzati per rilevare la presenza di un oggetto o utilizzati in applicazioni di conteggio; trovano applicazione, ad esempio, durante il processo produttivo seriale. I secondi invece sono tipicamente impiegati in applicazioni di monitoraggio della posizione o degli spostamenti, ovvero processi in cui l'esattezza e la stabilità del dato sono requisiti primari. Questi ultimi sono quelli che vengono presi in considerazione in questo lavoro.

Di seguito vengono descritte le caratteristiche dei sistemi ad alta risoluzione ed il loro principio di funzionamento.

I sensori laser a triangolazione contengono una fonte di luce laser allo stato solido e un sensore rilevatore che può essere del tipo PSD (*Position Sensing Detectors*) o CMOS / CCD (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor / Charge Coupled Device*). Il raggio laser viene proiettato sul bersaglio da misurare e una parte del fascio di ritorno viene riflesso attraverso ottiche di focalizzazione su di un sensore rilevatore. A seconda di come si sviluppa la superficie dell'oggetto rilevato, si sposta sul sensore l'immagine del raggio laser, come mostrato nella Figura 3.5.

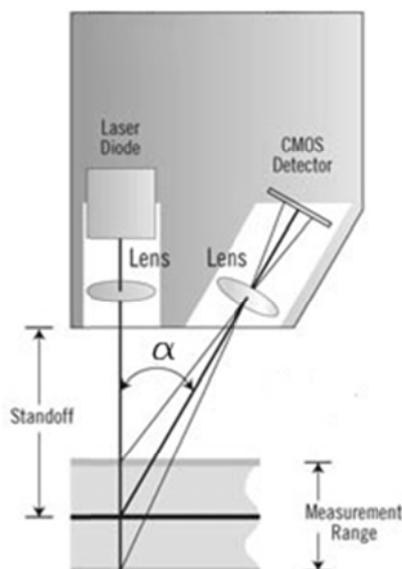


Figura 3.5 Schema di un laser triangolatore.

Il segnale proveniente dal sensore è utilizzato per determinare la distanza rispetto al bersaglio. Questa informazione è poi in genere disponibile attraverso un'apposita conversione in un formato di output.

Generalmente i sensori di tipo CMOS e CCD, al fine di identificare l'esatta posizione di destinazione, individuano la distribuzione di picco della quantità di luce sull'array di pixel del sensore. I sensori di tipo PSD, invece, calcolano la posizione utilizzando l'intero raggio di ritorno e ne determinano la posizione baricentrica, identificandola come la posizione del target. La distribuzione dell'intensità della luce è fortemente influenzata dalla tipologia di superficie del target, e questo può causare variazioni nei valori misurati. A causa di questo, i sensori di tipo PSD risultano essere più suscettibili alle riflessioni spurie date dal cambiamento delle condizioni di superficie, il che può ridurre la loro accuratezza. Tuttavia, quando si misurano finiture opache ideali, la loro risoluzione è ineguagliata. I sistemi CCD e CMOS sono in genere più accurati su una più ampia varietà di superfici rispetto ai precedenti; il motivo di ciò è che solo la più alta "carica" pixel dovuta al raggio riflesso viene utilizzata per calcolare la posizione. I pixel a carica minore sono di solito eccitati dai riflessi indesiderati dovuti a variazioni delle proprietà ottiche della superficie da misurare e possono essere facilmente ignorati durante l'elaborazione del segnale. Ciò permette ai sensori CCD o CMOS di essere utilizzati in una più ampia varietà di applicazioni. La Figura 3.6 mostra la differenza di distribuzione del segnale tra tecnologia CMOS e PSD, evidenziando il potenziale problema del grado di precisione con i sensori di tipo PSD.

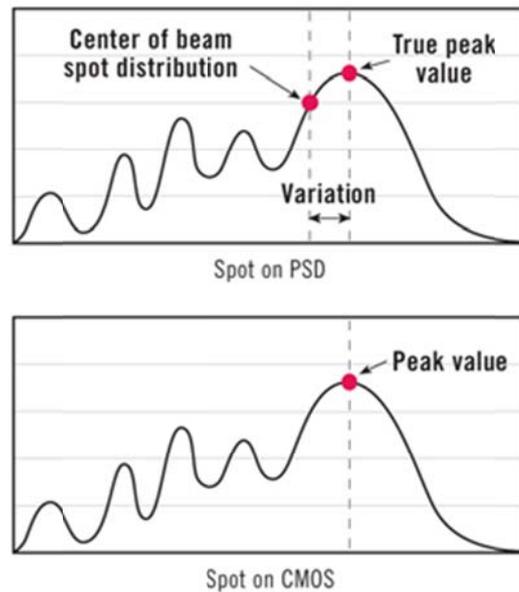


Figura 3.6 Metodo di valutazione della posizione dello spot luminoso in funzione della tipologia di sensore.

I sensori laser del tipo a triangolazione possono essere usati anche su superfici altamente riflettenti, comunemente indicate come speculari. Con queste superfici i sensori di triangolazione tipici, come mostrato nella Figura 3.5, non possono essere utilizzati, perché la luce laser rimbalzerebbe direttamente indietro seguendo il percorso di andata. In questi casi è necessario orientare il fascio verso il bersaglio con una certa angolazione. Il fascio si rifletterà sul bersaglio con un angolo uguale ma opposto e si concentrerà sul sensore. La Figura 3.7 mostra il principio di funzionamento di una testa laser speculare.

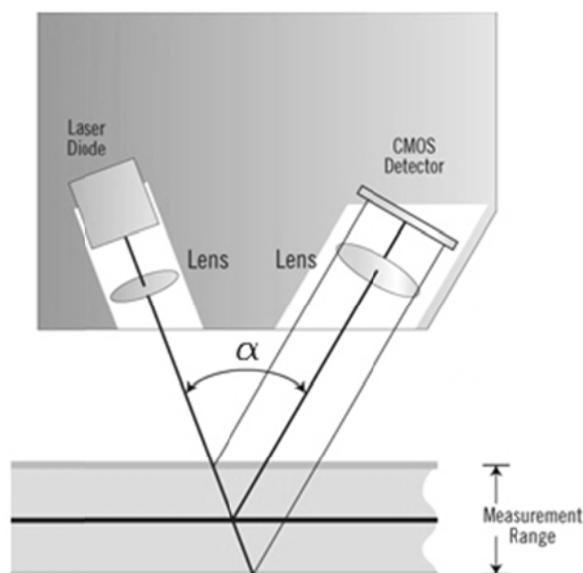


Figura 3.7 Schema di un laser triangolatore ottimizzato per evitare le riflessioni.

Come detto in precedenza, questi sensori per la misura degli spostamenti sono di tipo senza contatto, cioè sono in grado di misurare con precisione la posizione di un oggetto senza toccarlo. Come mostrato nella Figura 3.5, i sistemi di triangolazione laser hanno un ideale punto di funzionamento che viene talvolta definito come la distanza di *standoff*. In queste condizioni il laser raggiunge il suo massimo in nitidezza ed il suo punto di riflessione risulta essere centrato nel centro del sensore di ricezione. Al variare della posizione del target, il punto si sposta verso le estremità del sensore consentendo misurazioni in un intervallo specifico dato dalla dimensione del sensore. Sia la distanza di *standoff* che la dimensione dell'intervallo di funzionamento sono determinati dallo schema ottico progettuale. Le prestazioni ottimali si ottengono alla distanza di *standoff* perché l'impronta del raggio laser, quando raggiunge la distanza di messa a fuoco, risulta essere la più piccola possibile e molto concentrata sul sensore di ricezione; in ogni caso esistono algoritmi in grado di individuare e correggere eventuali inesattezze causate da un funzionamento leggermente fuori fuoco.

Per un dato sensore, definendo come angolo di accettazione (α) l'angolo sotteso dai piani di "emissione" e "ricezione" del raggio laser, possiamo dire che un angolo di accettazione minore offre un range di misura più grande e una maggiore distanza di funzionamento. Un angolo maggiore fornisce il contrario, ovvero un ridotto range di misura ed una più corta distanza di presa; in compenso permette una maggiore sensibilità che può essere ottenuta a causa della "leva ottica" (a parità di incrementi angolari, è possibile discriminare intervalli minori di profondità). La Figura 3.8 riporta uno schema semplificato che mostra la differenza tra due differenti sensori per un differente angolo di accettazione α .

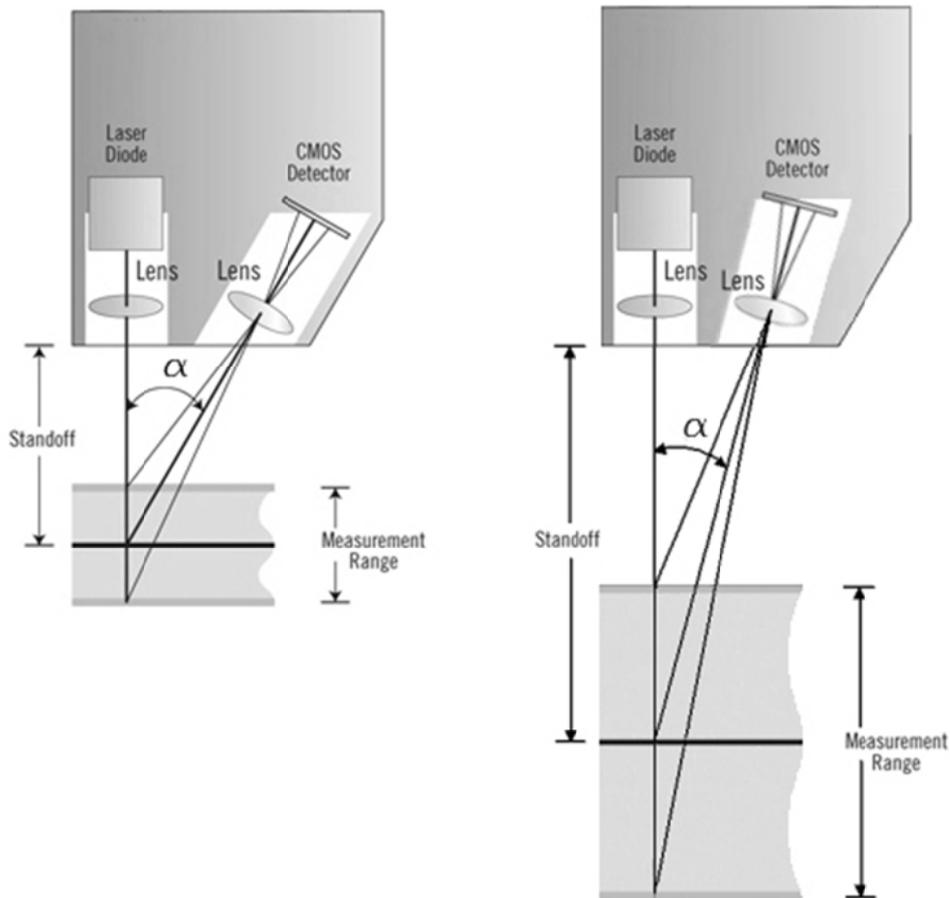


Figura 3.8 Differenti scelte geometriche in fase realizzativa conducono a strumenti con caratteristiche diverse.

Anche le condizioni ambientali giocano la loro parte negli errori di misura. Poiché i sistemi di triangolazione laser sono sensori di tipo ottico, è importante mantenere il percorso ottico pulito e libero da ostacoli o materiali estranei; infatti, sporcizia, polvere e fumo possono influenzare i risultati di misura e rendere i sensori completamente inutili.

Altra possibile causa d'errore di tipo ambientale molto comune, che può influenzare l'accuratezza di un sensore laser, è la temperatura. In seguito a forti variazioni termiche sono possibili contrazioni o espansioni dei componenti strumentali che possono provocare un'errata lettura della distanza del bersaglio. È quindi importante che i supporti su cui sono posizionati sia l'emettitore che il sensore di ricezione siano stabili; per questo motivo le case produttrici devono adottare soluzioni costruttive e materiali per cercare di garantire, all'interno di un intervallo termico coincidente con quello delle condizioni operative, una stabilità del dato di output.

3.3.1 Principio di funzionamento

Abbiamo visto come un laser scanner triangolatore possa essere schematizzato come una sorgente emittitrice rigidamente vincolata ad un sensore piano di ricezione. In riferimento allo schema rappresentato nella Figura 3.9 si assume un sistema cartesiano solidale allo strumento e posizionato con l'origine nel centro dello specchio, l'asse x congiungente quest'ultimo e il centro di proiezione del sistema ottico, ed infine l'asse z ortogonale ad x . Definiamo inoltre le seguenti grandezze:

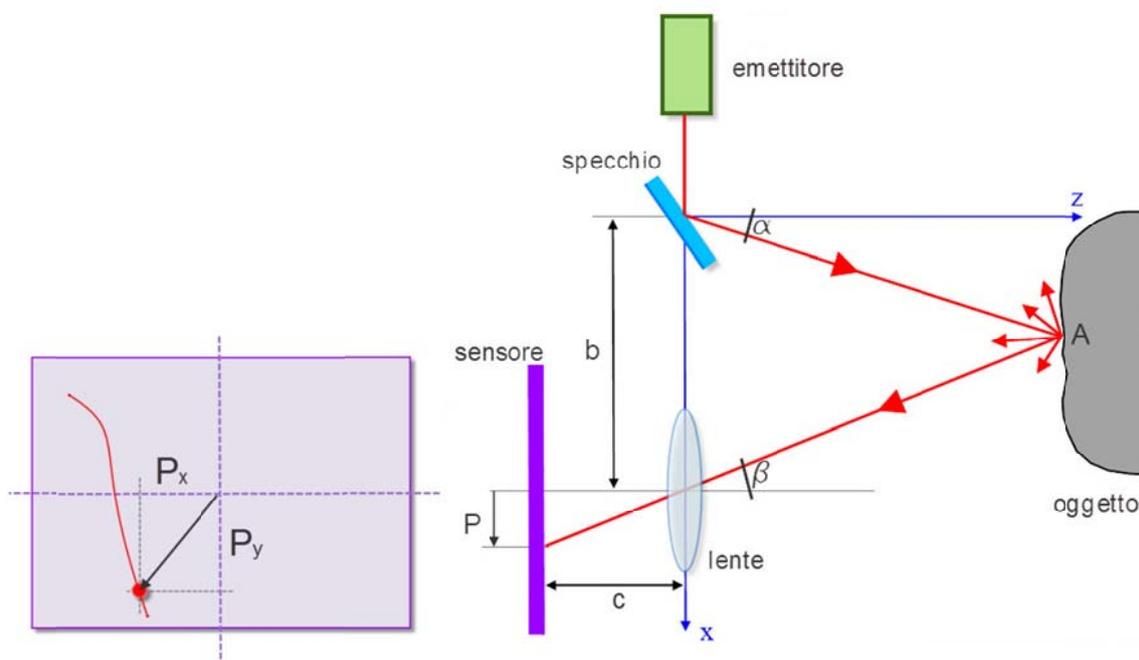


Figura 3.9 Principio di funzionamento dell'intersezione in avanti in un laser a triangolazione.

Tabella 3.1 Metodo di valutazione della posizione dello spot luminoso in funzione della tipologia di sensore.

α	Angolo di emissione
β	Angolo di ricezione
b	Baseline
c	Distanza focale
P	Distanza dal centro ottico
z	Distanza incognita fra strumento ed oggetto

L'emettitore laser produce un raggio che, grazie ad una preventiva calibrazione della rotazione dello specchio rotante, esce dallo strumento con un'angolazione pari ad α ,

nota, e va ad incidere la superficie dell'oggetto da misurare nel punto A . Il raggio laser subisce una riflessione la cui entità è funzione del tipo di superficie colpita, ed una parte del segnale riflesso viene ripresa dal sensore di ricezione posizionato ad una distanza nota dall'emettitore chiamata baseline (b). L'angolo β è incognito, è però possibile tramite la conoscenza della distanza focale e della posizione del segnale registrata nell'array dal sensore piano, applicare il teorema degli angoli opposti e risalire per via indiretta al valore dell'angolo:

$$\tan \beta = \frac{P_x}{c} \quad (3.1)$$

Al fine di determinare la posizione lungo l'asse z del punto misurato A , rivestono una particolare importanza la preventiva calibrazione dell'ottica montata davanti al ricettore, la conoscenza della geometria del sensore, nonché l'accurata misurazione della baseline. Tutte queste procedure vengono svolte dal costruttore e servono ad avere la condizione che nella topografia classica individua il metodo dell'intersezione in avanti: risoluzione di un triangolo tramite la conoscenza di un lato e dei due angoli alla base (b , $90 - \alpha$, $90 - \beta$).

Attraverso alcune semplici relazioni trigonometriche è possibile risalire alla distanza z del punto misurato:

$$z_A = \frac{b}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (3.2)$$

Se il punto A giace nel piano xz , nel caso di singolo spot la componente y risulta nulla, e quindi a definire il punto sono sufficienti le componenti z ed x :

$$x_A = z_A \tan \alpha \quad (3.3)$$

che una volta sostituita la z diventa:

$$x_A = \frac{b}{1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}} \quad (3.4)$$

Se introduciamo ora il concetto di lama laser, e quindi passiamo da una proiezione puntuale ad un piano luminoso, tutti i punti vengono valutati simultaneamente, per cui la coordinata y serve a distinguere i singoli punti in cui è possibile discretizzare il segmento proiettato.

Le relazioni scritte in precedenza restano valide, ed in maniera analoga è possibile risalire ai valori degli angoli di rotazione, β orizzontale e γ verticale a partire dai due contributi P_x e P_y :

$$\tan \beta = \frac{P_x}{c} \quad (3.5)$$

$$\tan \gamma = \frac{P_y}{c} \quad (3.6)$$

la coordinata y del punto A può essere calcolata tramite l'angolo γ :

$$y_A = z_A \tan \gamma \quad (3.7)$$

che dopo la sostituzione diventa:

$$y_A = \frac{b}{\frac{\tan \alpha}{\tan \gamma} + \frac{\tan \beta}{\tan \gamma}} \quad (3.8)$$

Sfruttando le presenti relazioni è quindi possibile, per tutti i punti del profilo, ricavare le tre coordinate x, y, z nel sistema di riferimento strumentale. Per ottenere una scansione dell'oggetto desiderato, e quindi un'immagine tridimensionale bisogna far muovere la lama laser in modo da "spazzare" l'intera superficie desiderata ad un angolo sufficientemente ampio che permetta di coprire l'intera superficie col minor numero di scansioni. Ovviamente il movimento rotatorio attorno ad un asse (generalmente verticale) è realizzato con la miglior precisione possibile. Tale movimento, effettuato meccanicamente con precisione micrometrica, permette generalmente di ottenere precisioni molto elevate, in quanto, in meccanica, la movimentazione di precisione è in grado di raggiungere precisioni anche del centesimo di millimetro di deviazione rispetto

al valore nominale della posizione. Lo svantaggio di questa strumentazione lo si riscontra nei costi finali dello strumento.

Sul mercato è possibile trovare strumenti dotati di più lame laser che si muovono simultaneamente sulla superficie, permettendo in questo modo con una sola scansione di avere un dato più accurato.

3.3.2 Risoluzione strumentale

Un ulteriore aspetto da approfondire riguarda il concetto di risoluzione, che si può definire come la capacità di discriminare il più piccolo dettaglio appartenente alla superficie da misurare.

Le componenti che influiscono su questa caratteristica della strumentazione dipendono da una molteplicità di fattori tra cui le componenti elettroniche, il tipo di ottica ed il tipo di servomeccanismo impiegato per far ruotare il raggio laser.

La componente x della risoluzione è dipendente dallo spostamento della lama laser generato dal servomeccanismo. Nel caso ideale, ovvero con una superficie equidistante dal perno di rotazione (si pensi ad una superficie cilindrica), la risoluzione Δx è funzione del minimo incremento angolare possibile $d\varphi$ (vedremo successivamente che c'è un altro fattore limitante) e pari a:

$$\Delta x = z d\varphi \tag{3.9}$$

Poiché questa è nella pratica una condizione quasi impossibile da soddisfare, bisogna tenere conto dell'incremento Δz per una superficie non disposta sulla circonferenza di rotazione. Per evitare eccessive variazioni di Δx si avrà cura di fissare un angolo di scansione φ_x massimo (FOV Field-of-View).

Per quanto riguarda la componente y , facendo delle considerazioni su triangoli simili come rappresentato in Figura 3.10, e considerando costanti i valori della focale c e della dimensione del pixel nel sensore Δy_s , otteniamo che la risoluzione Δy è funzione della distanza dell'oggetto secondo la relazione:

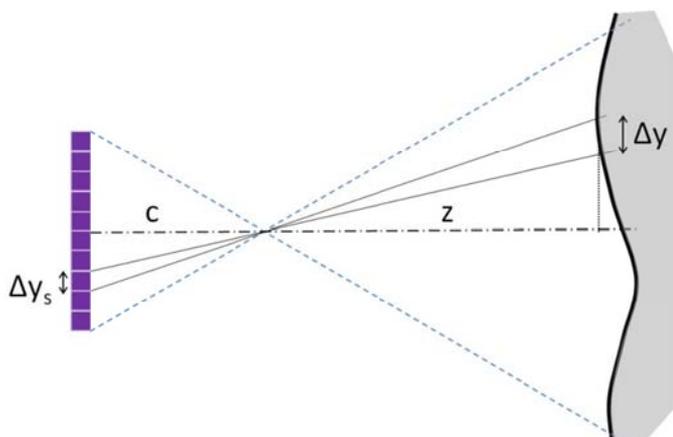


Figura 3.10 Considerazioni geometriche sulla risoluzione lungo l'asse y .

$$\Delta y = \frac{z}{c} \Delta y_s \quad (3.10)$$

L'ultimo contributo riguarda la risoluzione in profondità. È stato detto in precedenza che i laser triangolatori sfruttano il principio dell'intersezione in avanti dove, dei tre elementi (un lato ed i suoi due angoli sottesi) necessari alla risoluzione del triangolo, due sono noti ed uno calcolato. Facendo riferimento allo schema di Figura 3.11, si vede come una piccola indeterminazione ΔP sulla stima della posizione P sul sensore causa una variazione angolare $\Delta\beta$ e di conseguenza una differente stima della posizione della superficie.

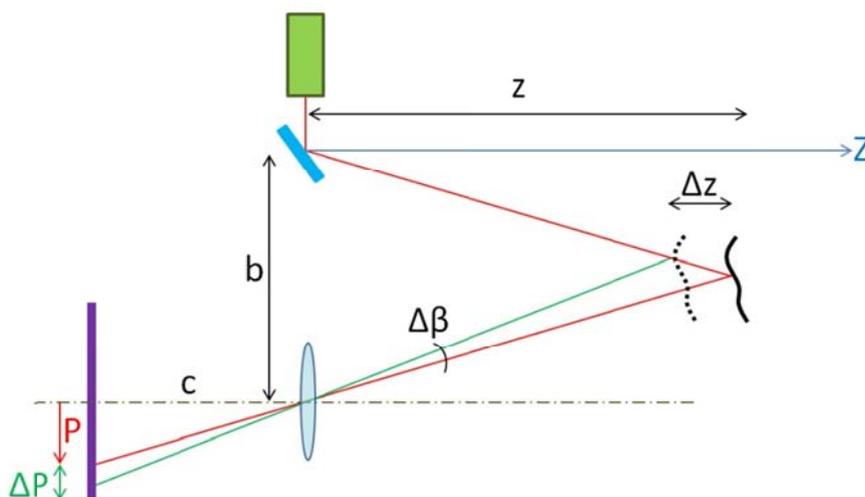


Figura 3.11 Considerazioni geometriche sulla risoluzione lungo l'asse z .

In quanto funzione di P , una piccola variazione ΔP produce una variazione su z pari a Δz :

$$\Delta z = \frac{\partial z(P)}{\partial P} \Delta P \quad (3.11)$$

svolgendo le derivate si ottiene:

$$\Delta z = \frac{z^2}{b c} \Delta P \quad (3.12)$$

dove si nota che la precisione nel determinare z diminuisce con il quadrato della distanza ed è direttamente proporzionale alla focale c e alla base b .

Per i sistemi a triangolazione comunemente si assume come angolo di scansione un FOV φ_x pari a:

$$\varphi_x = 2 \tan^{-1} \left(\frac{P}{2 c} \right) \quad (3.13)$$

Anche in questo caso, svolgendo le derivate, si perviene alla relazione:

$$\Delta z = \frac{b P}{z^2 2 \tan \left(\frac{\varphi_x}{2} \right)} \Delta P \quad (3.14)$$

Tenendo in considerazione le due espressioni relative a Δz , si vede come per un dato φ_x di progetto, per aumentare la risoluzione si debba intervenire sulla base, sulla lunghezza P del sensore e sulla focale, aumentandole, oppure sulla distanza strumento-oggetto, riducendola.

Sfortunatamente c e b non possono essere aumentati a piacimento: la base b ha come limitazione principalmente la meccanica strutturale, infatti al crescere di b aumentano anche le vibrazioni, e di conseguenza la stabilità dell'intero sistema decresce; a questo si aggiungono gli effetti delle zone d'ombra, non rilevate perché nascoste alla vista dalla stessa geometria dell'oggetto.

Se la stima di ΔP non si limita ad essere rappresentata con un numero intero, ma impiega un metodo di calcolo basato ad esempio sull'associare un peso in funzione dell'intensità registrata, è possibile effettuare un posizionamento sub-pixel.

3.4 Sistemi a luce strutturata

Una possibile soluzione alternativa al laser, che non prevede l'impiego di organi meccanici e quindi con un costo che può essere contenuto, è rappresentata dai sistemi a luce strutturata. Tali sistemi rientrano nella categoria dei sistemi di tipo attivo, in quanto la luce generata dallo strumento gioca un ruolo imprescindibile nel processo di formazione dell'immagine 3D.

Lo schema di questo tipo di strumentazione ricalca quello dei sensori laser, è quindi prevista la presenza di una sorgente emettitrice e di una ricettrice posti ad una distanza nota; l'elemento di differenza è dato dalla presenza di un videoproiettore al posto dell'emettitore laser.

Il principio di funzionamento è basato sulla proiezione di una sequenza di pattern codificati. Mentre per gli strumenti basati sul laser bisogna far sì che la "lama" spazzoli tutto il volume di ripresa per coinvolgere tutta la superficie del sensore CCD, nei sistemi a luce strutturata ogni pixel del sensore acquisisce ad ogni istante e determina una tripletta di coordinate x, y, z e per questo motivo sono detti a "campo intero".

La geometria dell'oggetto è, come nel caso precedente, ricavata sfruttando il principio della triangolazione, sulla base della deformazione che la superficie stessa induce sul pattern. Il pattern proiettato è generalmente composto da una sequenza di fasce verticali bianche e nere, dove la transizione fra la striscia bianca e quella nera è assimilabile alla lama laser vista in precedenza.

Tali sistemi, per poter funzionare e quindi distinguere fra loro le linee proiettate seguono una sequenza di proiezione chiamata *Gray code*, dove ad ogni proiezione segue una acquisizione da parte della camera digitale. Il processo di codifica è molto semplice, il primo step prevede una sola transizione bianco/nero, ovvero la proiezione di una metà bianca ed una nera, mentre i successivi prevedono un progressivo raddoppio delle fasce dimezzando la loro dimensione come rappresentato in Figura 3.12. Il processo termina quando si raggiunge la massima frequenza di alternanza bianco/nero. La risoluzione di questi sistemi dipende dalla risoluzione del sensore di acquisizione e da quella di proiezione del videoproiettore.

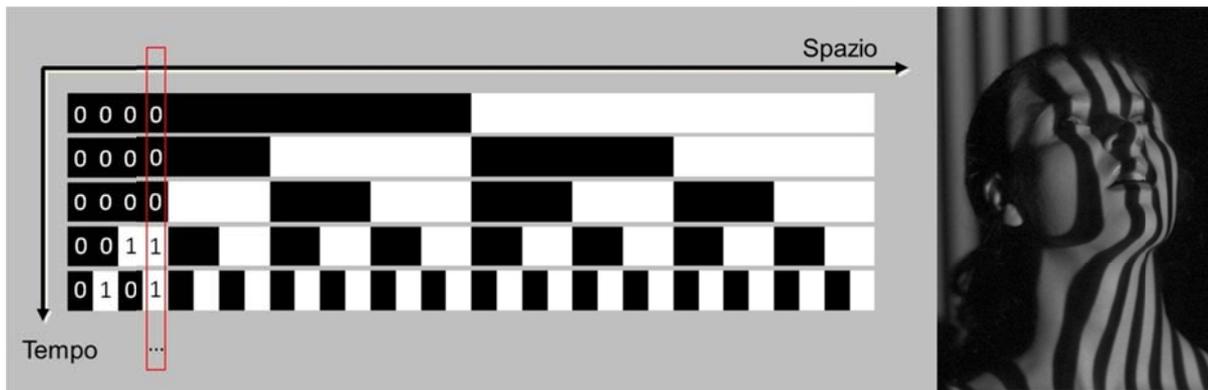


Figura 3.12 Sequenza “Gray code” comunemente impiegata nei sistemi a luce strutturata, nel riquadro in rosso si vede la codifica binaria per la sequenza data (00011...). A destra un esempio della deformazione del pattern su di un oggetto non piano.

Generalmente il numero di raffittimenti varia dalle 7 alle 10 volte, per cui il numero massimo di strisce verticali distinte oscilla tra $2^7 = 128$ e $2^{10} = 1024$.

Il risultato di una struttura di tipo “piramidale” di questo tipo consiste in una serie di codici di tipo binario che associati ai vari pixel del sensore, descriveranno la superficie dell’oggetto.

In commercio esistono soluzioni tecniche come quella 4ddynamics, che permettono una risoluzione elevata con range di utilizzo che variano dai 5 metri a qualche decina di centimetri, il che li rende molto versatili per quanto riguarda la trasportabilità e le condizioni di utilizzo. Le precisioni raggiungibili sono elevate ed assolutamente idonee ad oggetti di dimensioni medie, medio-piccole e piccole.

Un esempio di tali soluzioni è riportato in Figura 3.13 e le specifiche tecniche in Tabella 3.2.



Figura 3.13 Esempi di sistemi trasportabili. In figura tre soluzioni della 4ddynamics (PICOScan, EOSScan, EX-Micro).

Tabella 3.2 Caratteristiche tecniche del sistema Mephisto Ex Micro della 4ddynamics.

Camera	Reflex digitale (12.4 MP)
Risoluzione video	1920 x 1280 8 bits
Lente	18–35 mm
Risoluzione proiettore	1280 x 800
Range di lavoro (min)	0.1 m
Range di lavoro (max)	4.5 m
Tempo di acquisizione	0.3 – 1.5 s
Risoluzione “Point to Point”	0.03 – 2.8 / 0.14 – 0.85 mm
Accuratezza	0.01 mm

3.5 I sistemi a misura di fase AM–CW

I sistemi a misura di fase sono stati introdotti recentemente sul mercato e sono andati a ricoprire quel segmento di utilizzo lasciato scoperto dalle tecnologie laser basate sui sistemi ad impulso TOF e a triangolazione. Le precisioni dei sistemi terrestri a tempo di volo presentano range di utilizzo oscillanti da 1 m a qualche km, presentando nel migliore dei casi accuratezze di 4–5 mm. Dal lato opposto invece si posizionano i sistemi a triangolazione, che presentando precisioni dell’ordine dei decimi di millimetro o anche meno, riescono a coprire oggetti non superiori a qualche decina di centimetri. La zona intermedia a queste due soluzioni, ovvero capace di conciliare portate fino a un centinaio di metri con errori sul millimetro è stata coperta dagli strumenti che impiegano il metodo della misura di fase nel calcolo della distanza.

I sistemi ad onda continua con modulazione d’ampiezza (*Amplitude-Modulated Continuous Wave*, AM–CW) modulano la portante secondo un andamento sinusoidale o rettangolare. Il segnale di ritorno, una volta raggiunto il sensore, presenta uno sfasamento $\Delta\phi$ dovuto al tempo di volo Δt .

A differenza degli strumenti a tempo di volo, dove lo spazio è determinato come:

$$s = \frac{c}{2} \Delta t \quad (3.15)$$

e Δt misurato direttamente, negli strumenti a misura di fase, lo spazio tra lo strumento ed il sensore è proporzionale allo sfasamento $\Delta\phi$ e viene espresso come:

$$s = \frac{c}{2} \frac{\Delta\phi}{2\pi f} \quad (3.16)$$

dove f è la frequenza modulante. Qualora la lunghezza d'onda che definisce l'intervallo massimo compie più di un periodo, un valore N di ambiguità sulla lunghezza d'onda λ deve essere introdotto nella formulazione della distanza, che assume la forma:

$$s = \frac{1}{2} \left(N\lambda + \lambda \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) \quad (3.17)$$

con $\lambda = c/f$

La determinazione della distanza risulta essere dipendente non solo dal calcolo di Δt ma anche da quello dello sfasamento $\Delta\phi$. Il calcolo di s presenta maggiori precisioni quando sono impiegate alte frequenze oppure con un accurato calcolo di $\Delta\phi$. In letteratura si trova si trovano valori di precisione sulla determinazione di $\Delta\phi$ dell'ordine di $1/4000 \div 1/8000$ di λ . Generalmente, nel calcolo delle distanze, vengono impiegate più di una frequenza (in un range che va dai 100 kHz fino ai 700 kHz), la minore serve a definire il range di utilizzo strumentale e determinare in prima approssimazione la distanza s , mentre la maggiore serve a raffinarne il calcolo. Il raffinamento dell'informazione deve essere ottenuto operando salti di frequenza sufficienti a non introdurre ambiguità tra due incrementi successivi.

3.6 Caratteristiche tecniche, limitazioni e fonti d'errore

A monte di un rilievo 3D ci sono tutta una serie di caratteristiche tecniche e considerazioni, quali ad esempio la tecnologia del sensore, il ruolo della sorgente luminosa, la lunghezza d'onda impiegata, la natura fisica dell'oggetto rilevato, lo scopo del rilievo, l'ambiente in cui viene eseguito o le capacità dell'operatore che lo effettua, che portano a definire una serie di macro-caratteristiche che possono caratterizzare un sistema di acquisizione:

- Geometria di presa: campo visivo (Field-of-View, FOV), profondità di campo (Depth-of-Field, DOF), standoff e distanza di utilizzo.
- Discriminazione spaziale: risoluzione (più piccola variazione del misurando che può essere misurata), precisione (dispersione delle misure attorno alla loro media) e accuratezza (errore tra la misura di una quantità ed il suo valore vero).
- Costi: di acquisto, noleggio, riparazione e calibrazione.

Riprendendo un argomento trattato in precedenza solo dal punto di vista analitico, possiamo introdurre alcune precisazioni concernenti le situazioni di utilizzo reale. La massima risoluzione sul piano xy di un laser scanner è stata definita come la minima inter-distanza apprezzabile fra due punti distinti. Questo tipo di strumentazioni trova delle limitazioni legate non solo alla tecnologia impiegata in fase di costruzione (infatti è impossibile eliminare totalmente la divergenza di un raggio laser), ma anche legate alla fisica; un fattore molto limitante riguarda infatti la diffrazione della luce laser. Convenzionalmente si assume per un dato spot laser il criterio di Rayleigh che afferma che due spot possono essere considerati distinti quando il centro di uno dei due si sovrappone al primo anello scuro del pattern di rifrazione del secondo.

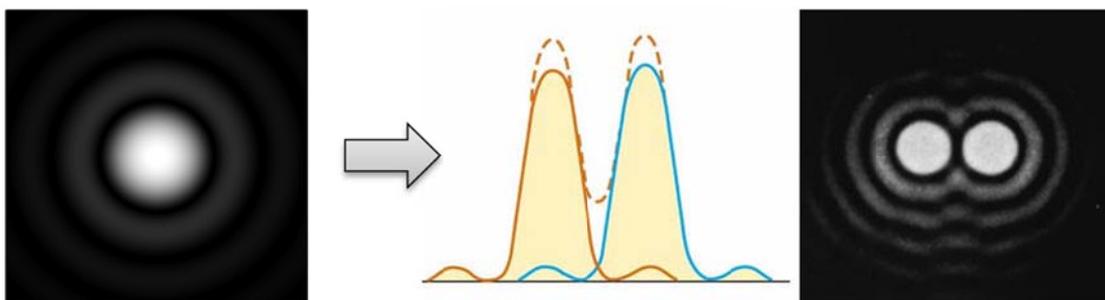


Figura 3.14 Rappresentazione del criterio di Rayleigh utilizzato per definire il limite di distinguibilità fra due punti vicini.

È quindi questo il limite inferiore per la risoluzione lungo l'asse x , anche a fronte di un servomeccanismo capace di far ruotare la testa laser con una precisione maggiore.

Per quanto riguarda invece la risoluzione in z , il fattore limitante è da attribuire all'effetto di *speckle*. Questa situazione si presenta in presenza di un'onda coerente,

caratterizzata da un'unica fase durante tutta la sua propagazione, viene a colpire una superficie fisica reale. Per ovvie ragioni, in virtù della natura della materia di cui è composta, quest'ultima non è in grado di soddisfare l'omogeneità di riflessione che invece presenta una superficie ideale, si assiste in questo caso ad un disordine all'interno del fascio d'onda. Una serie di riflessioni si troveranno sfasate rispetto all'onda principale con conseguente diminuzione dell'intensità luminosa; se tale sfasamento raggiunge il valore di π , si assisterà ad un suo totale annullamento. L'effetto di tutto ciò è visibile in Figura 3.15, ovvero un'impronta laser punteggiata con zone a differente intensità, che fisicamente comporta un errore nella esatta determinazione dello spot laser con conseguente stima errata della posizione di z .

L'effetto del rumore dato dal fenomeno di *speckle* sull'indeterminazione della posizione del fascio laser è dato dalla formula empirica:

$$\Delta P = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \lambda F \quad (3.18)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del laser ed F è il valore di chiusura del diaframma dell'ottica di ricezione.

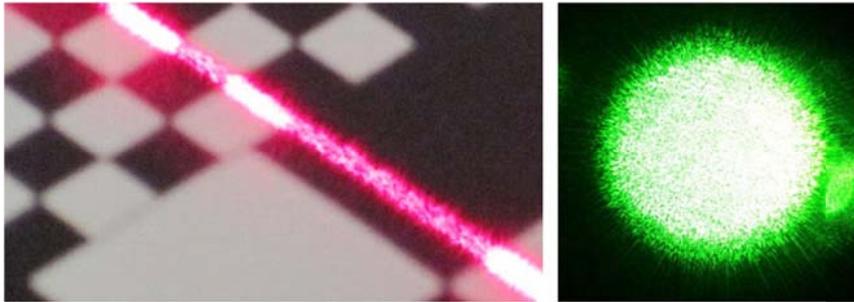


Figura 3.15 Fenomeno dello "speckle" laser.

Combinando queste due componenti, è possibile sapere in anticipo per un dato tipo di laser di data lunghezza d'onda λ quali siano le limitazioni sulla risoluzione in funzione della dimensione dell'area dell'oggetto da scansionare che viene ripresa.

Un esempio è riportato in Figura 3.16 dove sono stati graficati i valori per un laser rosso avente una lunghezza d'onda di 633 nm.

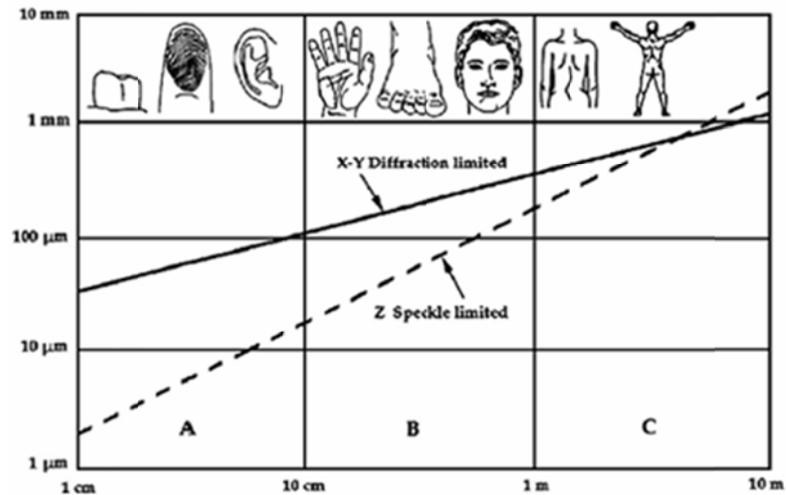


Figura 3.16 Limitazione fisica nella risoluzione dei laser scanner in funzione della dimensione dell'oggetto inquadrato. La linea continua fa riferimento al piano xy, mentre quella tratteggiata alla profondità in z.

3.6.1 Fonti d'errore e limitazioni

Nell'applicazione pratica spesso si verificano comportamenti strumentali non consoni alla situazione ideale, e che tendono a fornire un dato tridimensionale errato e quindi una stima della superficie non corretta.

Possiamo mettere in evidenza alcune di queste sorgenti d'errore, che come conseguenza portano alla creazione di artefatti, e vedere nello specifico da cosa esse dipendono.

3.6.1.1 Transizioni cromatiche

Scansionando una superficie piana a volte ci si trova di fronte ad una rappresentazione della stessa scena con la presenza di parti in rilievo o in depressione. Tale fenomeno è stato trattato e investigato da diversi autori, e in Figura 3.17 è rappresentato un reticolo piano che è stato stampato su di un foglio di carta ed applicato su di un supporto rigido in modo da poter realizzare una superficie piana da testare in laboratorio (precisione del laser in X,Y,Z di 0,127 mm)

Tale reticolo è caratterizzato da un pattern a diversa scala composto da quadrati neri su fondo bianco che realizzano la forte discontinuità cromatica utile ai fini del test.

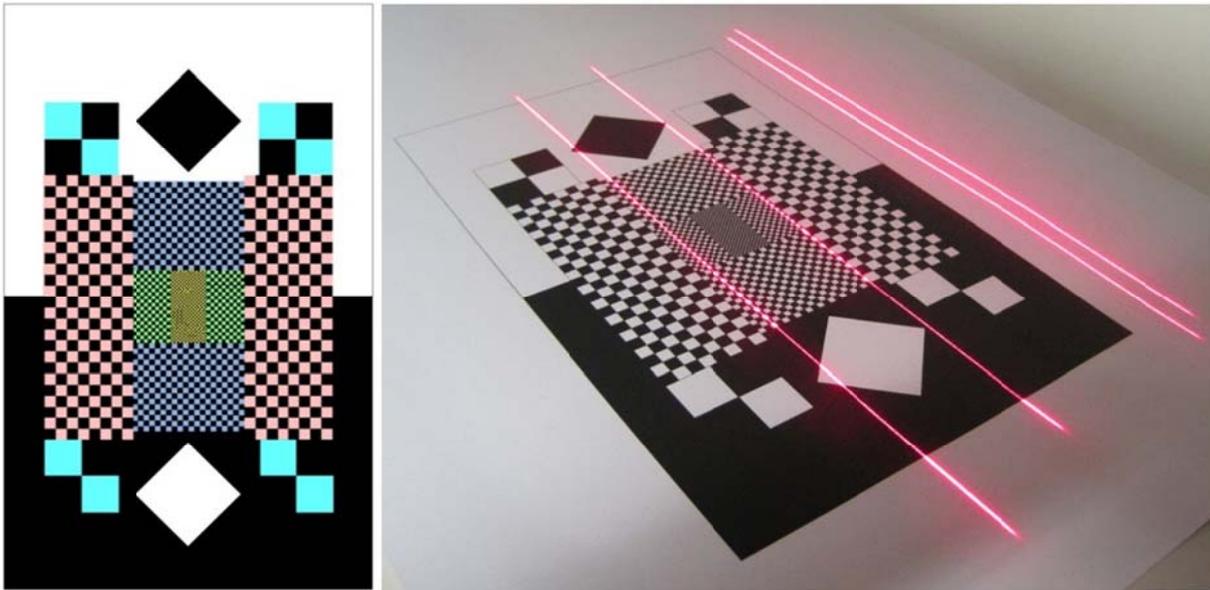


Figura 3.17 Reticolo impiegato per il test sugli effetti della transizione cromatica. Nella figura di sinistra i colori si riferiscono a diverse dimensioni del reticolo geometrico (espressi in mm abbiamo lati di: giallo 0.5, verde 1, blu 1.5, rosa 3, ciano 10). In quella di destra si notano le lame laser differientemente spaziate tra loro.

Si può osservare come a seconda delle impostazioni riguardanti la potenza del segnale alcune zone vengano a perdere il dato, specialmente nella situazione di maggior potenza del laser dove probabilmente la superficie bianca riflette talmente tanto il raggio laser da saturare il sensore di ricezione e quindi impedire la determinazione della posizione dei punti.



Figura 3.18 Risultato di tre diversi settaggi sulla potenza del laser, da sinistra a destra la potenza decresce. La linea rossa rappresenta un piano di sezionamento (vedi figura 3.21).

Nella figura successiva vediamo invece l'artefatto che si viene a creare in presenza della transizione cromatica, nel passaggio dalle zone chiare a quelle scure si assiste ad uno incremento del valore di z , e viceversa nel passaggio da quelle scure a quelle chiare si assiste ad un decremento di tale valore.

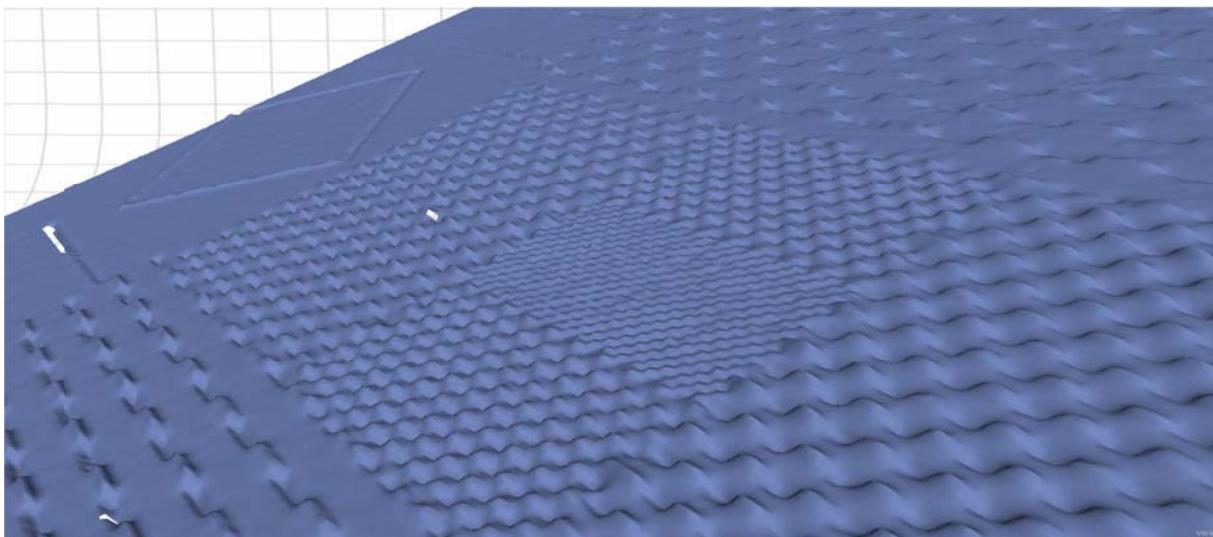


Figura 3.19 Rappresentazione tridimensionale di una superficie piana in virtù di forti transizioni della radiometria.

La presenza di questo tipo di artefatti trova la ragion d'essere nel principio della triangolazione. Come visto in precedenza, ad una variazione di ΔP nella stima della posizione dello spot laser corrisponde una variazione Δz in quota. Facendo riferimento alla Figura 3.20 seguente si vede come le zone di color chiaro, ad elevata riflettività, producano un segnale più intenso delle zone più scure dove l'energia riflessa è minore.

Nelle zone di transizione cromatica la risposta combinata produce, indipendentemente dal tipo di sensore impiegato (PSD o CCD/CMOS), una deviazione dalla simmetria della distribuzione energetica. A seconda che ci si trovi nella fase di transizione bianco/nero o nero/bianco abbiamo uno sbilanciamento rispettivamente a sinistra o a destra della posizione teorica dello spot, che spiega l'innalzamento o l'abbassamento del bordo rispetto al piano teorico.

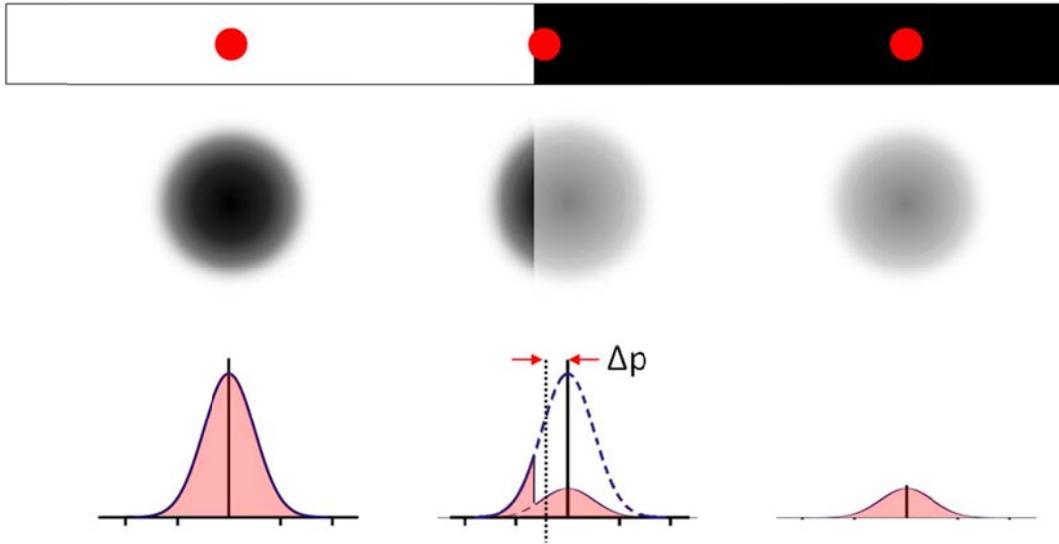


Figura 3.20 Spiegazione dell'effetto tridimensionale dovuto al salto radiometrico.

In Figura 3.21 è rappresentato il profilo altimetrico (riferito alla linea rossa di sezione della Figura 3.18) si assiste ad un comportamento asimmetrico a fronte di una simmetria del reticolo. Il comportamento evidenzia una crescita dell'errore in z (confrontando aree di reticolo uguali) all'aumentare dell'angolo α , causato probabilmente dal leggero aumento dell'area di impronta della lama laser e dall'aumento della difficoltà nella determinazione di angoli β molto piccoli. È possibile notare anche che, dove la transizione cromatica era molto rapida, quindi in presenza del pattern di piccolissime dimensioni, l'effetto risulta più contenuto e nell'ordine della precisione strumentale, come se fosse stata misurata una superficie di colore più omogeneo, come il grigio.

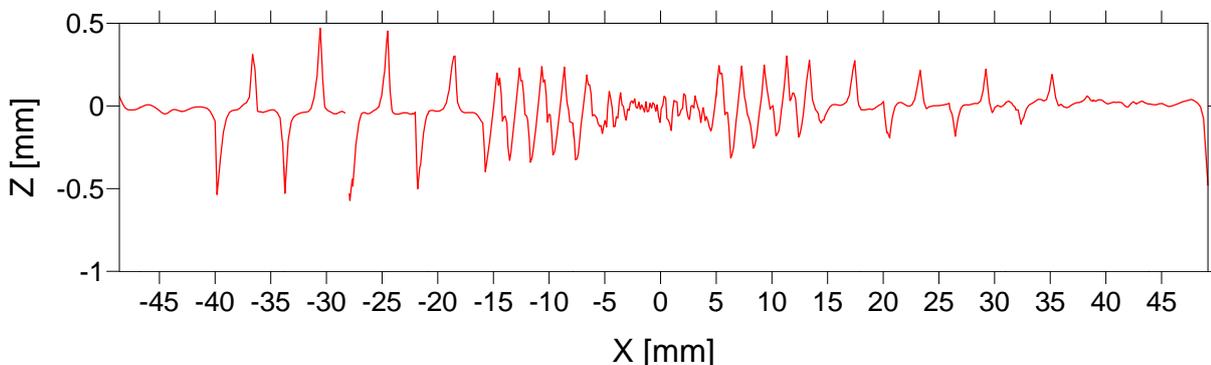


Figura 3.21 Profilo altimetrico del reticolo piano in corrispondenza dei salti radiometrici lungo un piano di sezione.

In Figura 3.22 sono state sovrapposte le sezioni ottenute dalla scansione effettuata in modalità standard-neutral (in rosso) con quella in modalità HD-light (in blu). Il trend precedentemente messo in evidenza è qui ancora più evidente e sottolinea come un settaggio sbagliato in fase di acquisizione porti ad ottenere valori fortemente errati con conseguente forte perdita di tempo (quando possibile) nella fase di post processing.

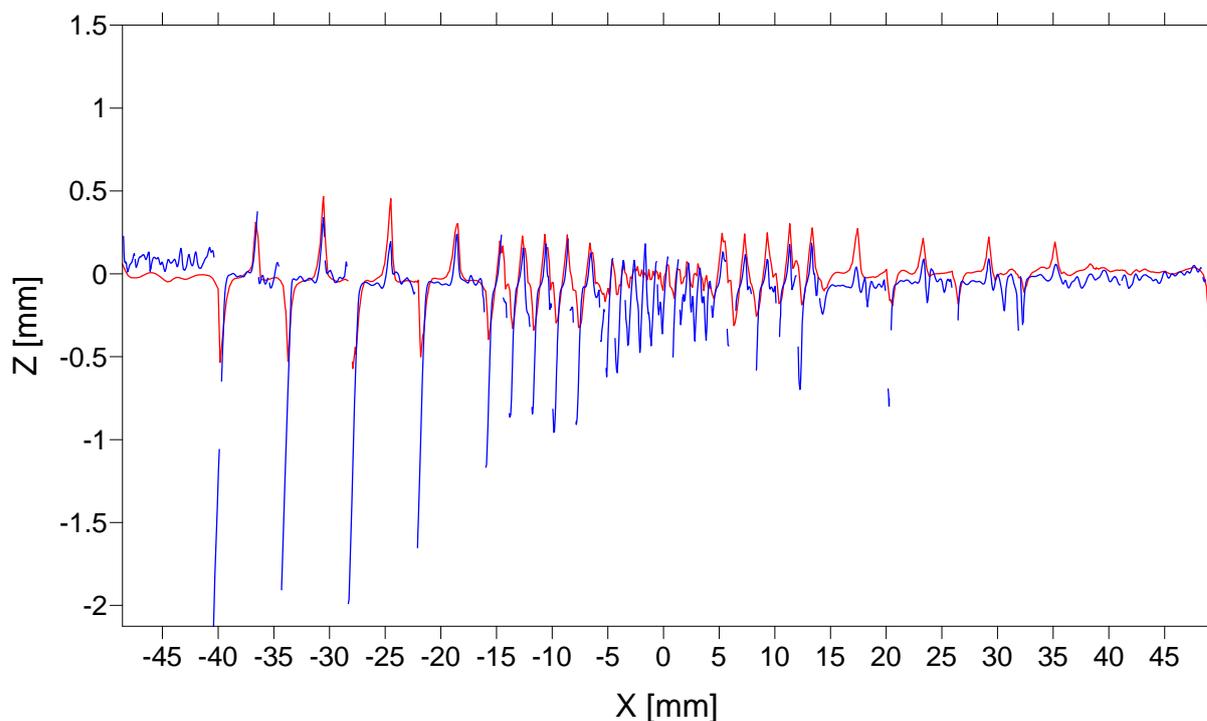


Figura 3.22 Andamento del profilo altimetrico a parità di condizioni di presa e piano di sezione con due settaggi del laser differenti.

3.6.1.2 Tipologia del materiale

La migliore risposta possibile in termini di prestazioni si ha quando il fascio laser colpisce una superficie che non provoca nel segnale di ritorno nessuna deviazione dal comportamento ideale. Questa situazione è realizzabile in laboratorio impiegando operazioni di pulizia, vernici e solventi particolari che ottimizzano la risposta strumentale, ma nella maggior parte delle condizioni operative non lo è e la natura del materiale rilevato può infatti risultare una sorgente d'errore.

Un esempio molto comune soprattutto nel settore dei Beni Culturali è rappresentato dal marmo (Godin G., et al. 2001). La sua natura cristallina permette la penetrazione del raggio laser sotto la superficie generando quindi una diffusione del segnale a diverse profondità, lo scattering che ne consegue provoca un alone sotto forma di disco come visibile in Figura 3.23. Le componenti d'errore sono quindi due, uno shift in profondità

del segnale dovuto alla penetrazione del raggio, ed un errato calcolo della posizione dello spot dovuto alla presenza dell'alone luminoso.

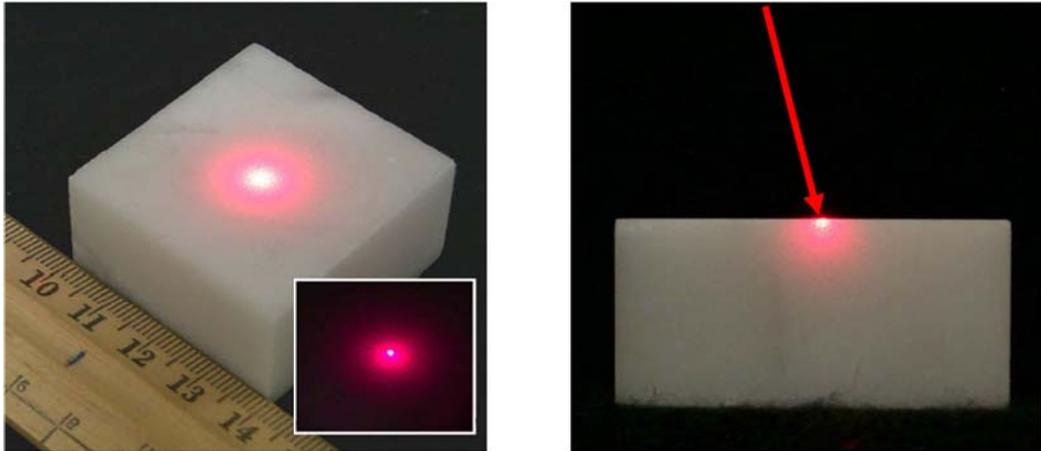


Figura 3.23 Effetto del raggio laser su materiali traslucidi, con conseguente creazione di un alone di impronta molto ampio.

3.6.1.3 Forte illuminazione

Questo tipo di problema si verifica quando la superficie da misurare è fortemente illuminata, tale effetto si accentua per superfici dotate di una texture molto chiara. Il risultato consiste in una forte diminuzione del contrasto sull'immagine, che provoca difficoltà nella separazione fra l'impronta del fascio laser e il colore di sfondo della superficie rilevata, con conseguente difficoltà nella stima della posizione. In Figura 3.24 a titolo di esempio sono rappresentate due condizioni operative, una con materiale a texture scura, ed un'altra molto chiara sottoposta ad illuminazione.

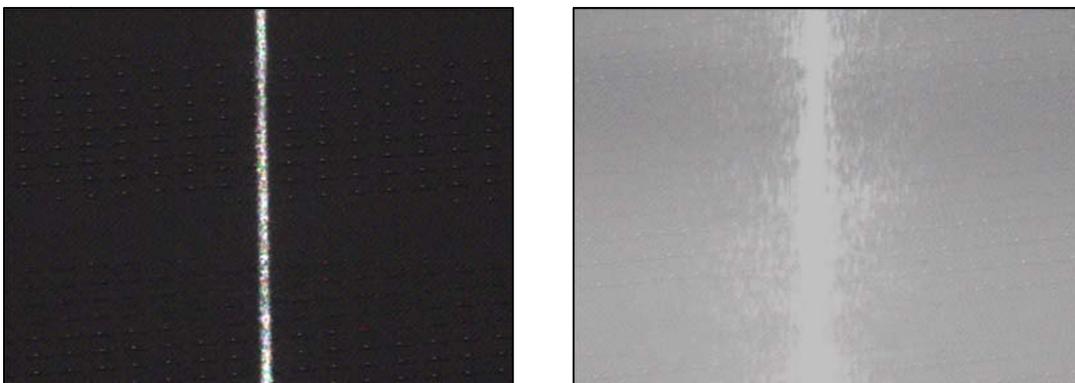


Figura 3.24 Effetti dell'illuminazione sui materiali: a sinistra un materiale scuro, a destra un materiale molto chiaro ed inoltre illuminato. La diversa sagoma che l'impronta del fascio laser assume influisce sulla precisione della misura (figura da Bradshaw G., 1999).

Per limitare questa situazione è possibile chiudere leggermente il diaframma del sistema ottico, in modo da aumentare il contrasto e ridurre l'effetto di *scattering*, oppure applicare un filtro e cercare di limitare l'apporto della sorgente luminosa.

3.6.1.4 Occlusioni

Affinché la superficie di un oggetto possa essere rilevata, una condizione necessaria è quella della completa visibilità dell'impronta laser durante il movimento sull'oggetto. Se la geometria della superficie presenta sporgenze o concavità che impediscono la continuità di ricezione del segnale si verificano mancanze di dato.

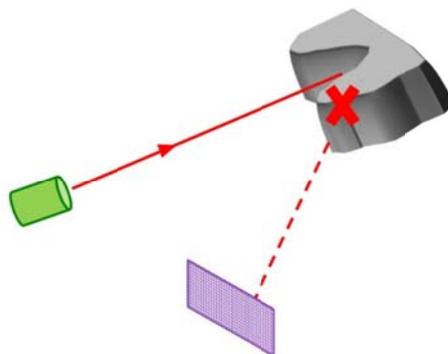


Figura 3.25 Situazione geometrica in cui una parte dell'oggetto impedisce la triangolazione del fascio laser, il segnale di ritorno non arriva al sensore creando una mancanza di dato.

3.6.1.5 Effetti di bordo

Un'altra sorgente d'errore nella ricostruzione della forma tridimensionale di un oggetto, è rappresentata dagli spigoli. Fino a quando la distribuzione dell'energia riflessa mantiene una conformazione simmetrica, possiamo considerare la rappresentazione tridimensionale fedele a quella reale (sempre rimanendo nell'intervallo d'errore strumentale). Avvicinandosi ai bordi, può succedere che l'intera impronta del fascio laser non giaccia sullo stesso piano, ma che una parte prosegua il suo percorso verso un'ulteriore superficie più in profondità. Tale comportamento è rappresentato in Figura 3.26, e analogamente a quanto spiegato per le transizioni cromatiche si assiste a uno shift del baricentro della porzione dello spot rispetto alla posizione teorica. Tale shift comporta una variazione in quota del profilo che genera la caratteristica forma smussata dei profili.

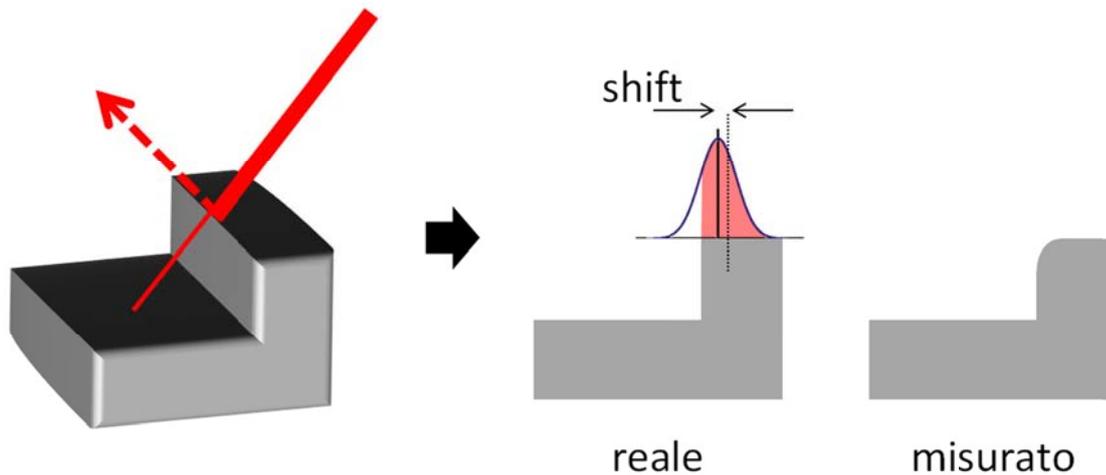


Figura 3.26 Alla presenza degli spigoli non tutto il raggio laser collabora alla determinazione della posizione dello spot. In questo modo c'è una deviazione dalla posizione reale del baricentro dell'impronta registrata che provoca una piccola variazione di quota.

3.6.1.6 Riflessioni multiple

Quando ci si trova alla presenza di superfici altamente riflettenti come quelle metalliche o che contengono elementi dotati di tale caratteristica, è possibile che il raggio laser venga riflesso e vada a illuminare altre parti dell'oggetto che però in quello specifico istante non appartengono al piano d'illuminazione del laser.

Questo può portare a errori nella determinazione delle coordinate oggetto, problema che può però essere evitato se sulla superficie è possibile applicare temporaneamente uno strato opacizzante.



Figura 3.27 Superfici metalliche possono produrre riflessioni multiple che sono causa di errori di misura. È possibile mitigare tali effetti ricoprendo la superficie di sostanze quali il talco in modo da opacizzarla (figura da Bradshaw G., 1999).

4

Rilievo e modellazione 3D

La produzione di un modello digitale prevede a monte una fase di preparazione che serve ad individuare la miglior strategia operativa. Come anticipato in precedenza esistono due filosofie operative: la prima prevede una generazione “virtuale” dell’oggetto, che prende forma grazie a strumenti propri degli ambienti CAD (*Computer Aided Design*) quali la parametrizzazione delle dimensioni, operazioni di geometria booleana, ecc., la seconda invece ha come requisito imprescindibile l’esistenza fisica dell’oggetto, il quale rappresenterà il punto di partenza per tutte le operazioni di rilievo e generazione del modello tridimensionale. Possiamo dire quindi che, mentre nella prima si parte dal modello virtuale e, eventualmente, si finisce con una sua riproduzione fisica, nella seconda si compie il percorso inverso, ovvero si parte dall’oggetto reale per arrivare a quello virtuale. La scelta fra i due approcci dipende principalmente dal tipo di settore in cui bisogna operare e dallo scopo per cui si vuole generare il modello tridimensionale. Di seguito faremo riferimento al secondo approccio, quello che prevede un’attività di rilievo sull’oggetto fisico, in considerazione degli ambiti applicativi nei quali sono state effettuate le sperimentazioni. I settori cui si fa riferimento sono quelli dell’Ingegneria Civile e dei Beni Culturali, questo perché sono molto frequentemente caratterizzati da elementi aventi superfici cosiddette *free-form*. Altri se ne possono affiancare, si pensi al collezionismo, all’archeologia, alla medicina fino alle indagini forensi, tutti settori in cui le geometrie degli oggetti non sono esprimibili per via parametrica se non operando delle drastiche semplificazioni.

Il requisito che si chiede ad una tecnica di rilievo in questo settore è di essere in grado di rilevare ed estrarre un numero discreto di punti sufficiente a caratterizzare la superficie desiderata, aspetto direttamente correlato allo scopo per cui il lavoro viene eseguito.

Le tecniche che si considereranno nel seguito sono la fotogrammetria digitale ed il laser a scansione: per esse verranno riportati i risultati di alcune sperimentazioni condotte per indagare su problematiche specifiche di questa scala di rilievo.

4.1 Modellazione 3D per via fotogrammetrica

4.1.1 Studio del comportamento di una lente macro

Le principali problematiche riscontrate dall'uso di obiettivi macro in fotogrammetria sono da riferirsi essenzialmente al comportamento ottico. Catalogate come lenti a focale fissa, esse hanno dimostrato, in seguito ai primi test di calibrazione, un anomalo comportamento della lunghezza focale. Gli obiettivi macro sono caratterizzati da un diverso potere di ingrandimento, indicato da indici. Come mostrato dalla Figura 4.1, ad ognuno di questi valori corrisponde un'area inquadrata del soggetto sempre più ristretta fino al caso limite, per un valore di 1:1, in cui l'area inquadrata è pari alle dimensioni del sensore CCD/CMOS. Uno degli scopi della sperimentazione è stato proprio quello di verificare il comportamento della lente con diversi fattori di ingrandimento (si sono usati quelli di Figura 4.1), che possono corrispondere ad un ampio campo di possibili applicazioni in funzioni delle dimensioni degli oggetti di interesse e del grado di risoluzione richiesto al rilievo.

Va osservato che le distanze di messa a fuoco, per ingrandimenti così spinti, sono inversamente proporzionali al rapporto di riproduzione (al contrario di quello che accade nelle ottiche comuni) e variano da infinito a circa 20–30 cm.

Il comportamento di una lente di questo tipo è stato indagato impiegando dei target codificati per valutare quale fossero i parametri di orientamento interno (OI) e di distorsione, e assumendo diverse geometrie di presa. I target impiegati rappresentano una miniaturizzazione, tramite stampa su carta, di quelli codificati e utilizzati in ambiente iWitness e Australis e denominati come B/W Codes (Black and White). Tali target sono nati per applicazioni close range speditive e adattabili alle situazioni al contorno, infatti non essendo retroriflettenti o colorati, è possibile stamparli alla dimensione ritenuta più opportuna per il rilievo da eseguire. La scala a cui sono stati stampati i target ha evidenziato i limiti della miniaturizzazione troppo spinta impiegata per il test di ottiche macro; per questo motivo in seguito si è cercato una soluzione alla

produzione di target che potessero conservare le loro caratteristiche geometriche anche a scala microscopica. La camera investigata consiste in una Nikon D80 dotata di un sensore CCD da 10 Megapixel, e un obiettivo Sigma 105 mm Macro.



Figura 4.1 Rapporti di ingrandimento di una fotocamera DSLR Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

In una prima fase è stata adottata una disposizione fortemente tridimensionale, sfruttando l'intersezione di tre piani ortogonali. Una geometria di questo tipo (Figura 4.2), caratterizzata da prese molto convergenti, con angoli di intersezione compresi in un intervallo fra i 30 ed i 70 gradi, ha messo in crisi il modello di bundle adjustment al raggiungimento dell'indice di ingrandimento pari a 1:2; da questo punto in poi la rete si è rivelata debole e non ha portato alla determinazione dei parametri di OI e di quelli relativi alla distorsione.

In considerazione delle difficoltà di convergenza, è stato adottato un altro tipo di geometria, sensibilmente meno tridimensionale, costituito da un frame prevalentemente bidimensionale con uno sfalsamento in quota, che potesse aumentare l'angolo minimo di intersezione fra le stazioni (Figura 4.3). La possibilità di estendere il campo di acquisizione da un angolo solido di 90° ad una semisfera, ha permesso di incrementare il minimo ed il massimo angolo di intersezione (ora mediamente sugli 80–90°) e ha consentito al processo di bundle adjustment di arrivare a convergenza.

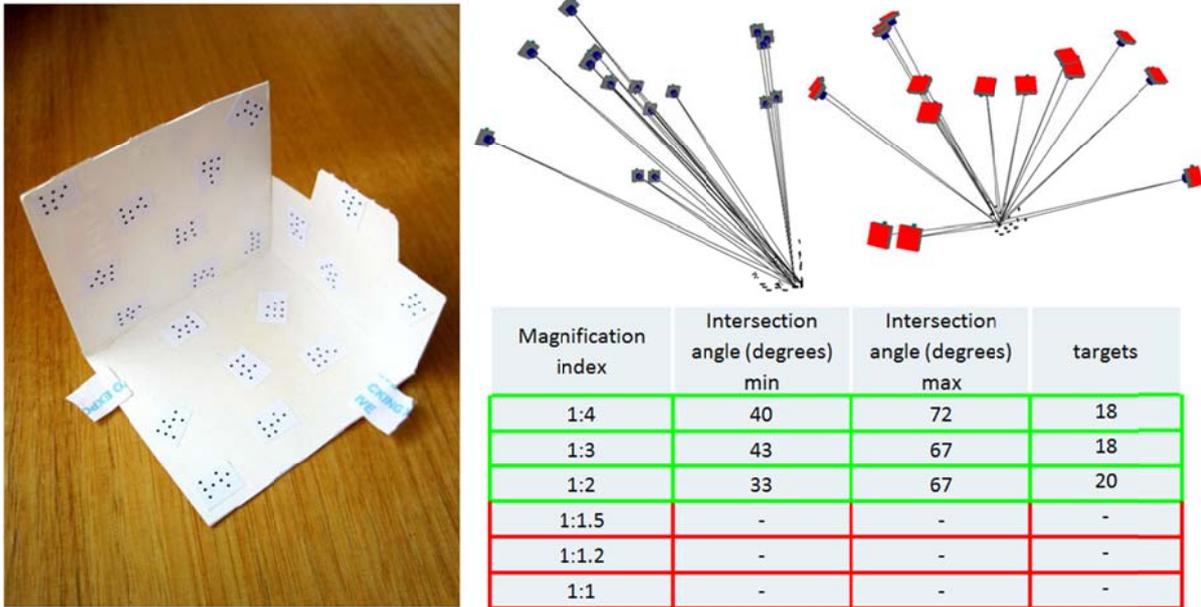


Figura 4.2 Geometria di presa fortemente tridimensionale con carattere di omogeneità nelle tre direzioni.

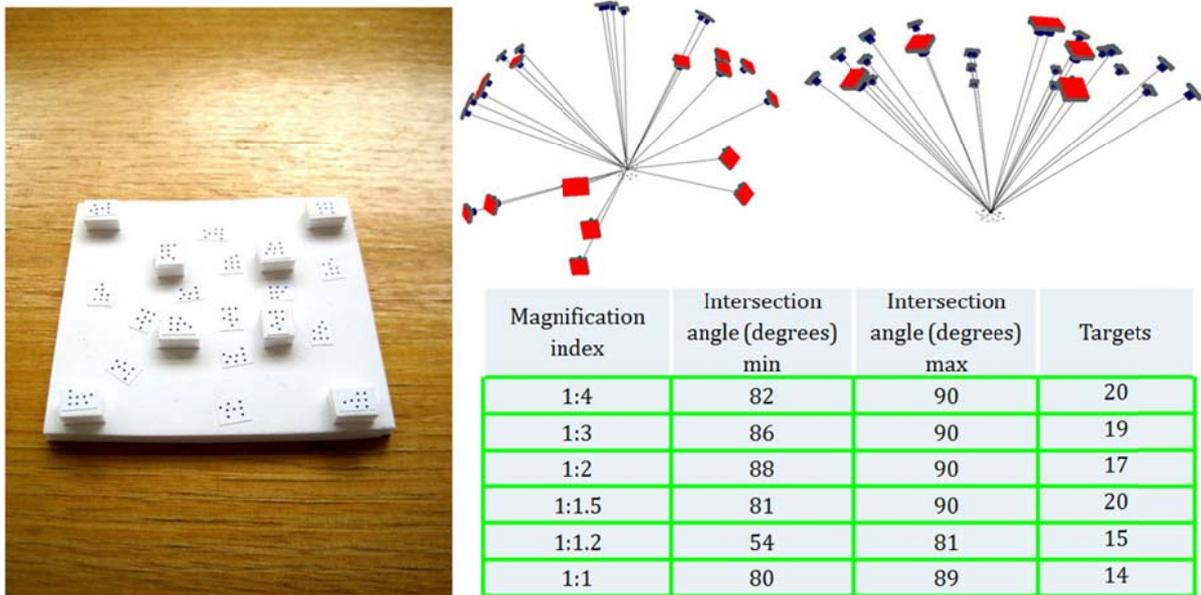


Figura 4.3 Geometria di presa principalmente bidimensionale con ridotti sfalsamenti lungo la terza direzione.

Una volta assodata quale sia la configurazione geometrica migliore, gli step successivi sono stati quelli di analizzare i risultati delle procedure di calibrazione effettuate per ognuno dei fattori di ingrandimento, nelle quali di volta in volta è stata impiegata una disposizione dei target realizzata secondo la geometria di figura 4.3 e con dimensioni opportune (Figura 4.4).



Figura 4.4 Reticoli di diverse dimensioni.

Considerando l'andamento presentato dalla distorsione radiale, la lente esaminata ha evidenziato un comportamento del tipo a "cuscino", presentando ai bordi valori dell'ordine di 60–80 micron, valori che, se confrontati con quelli di altri tipi di lenti comunemente impiegate in ambito fotogrammetrico, risultano essere molto contenuti, anche 3–4 volte inferiori. La distorsione tangenziale è risultata invece trascurabile con valori massimi oscillanti fra 1–5 micron, quindi inferiori al pixel che nel caso in oggetto ha un lato di 6 micron.

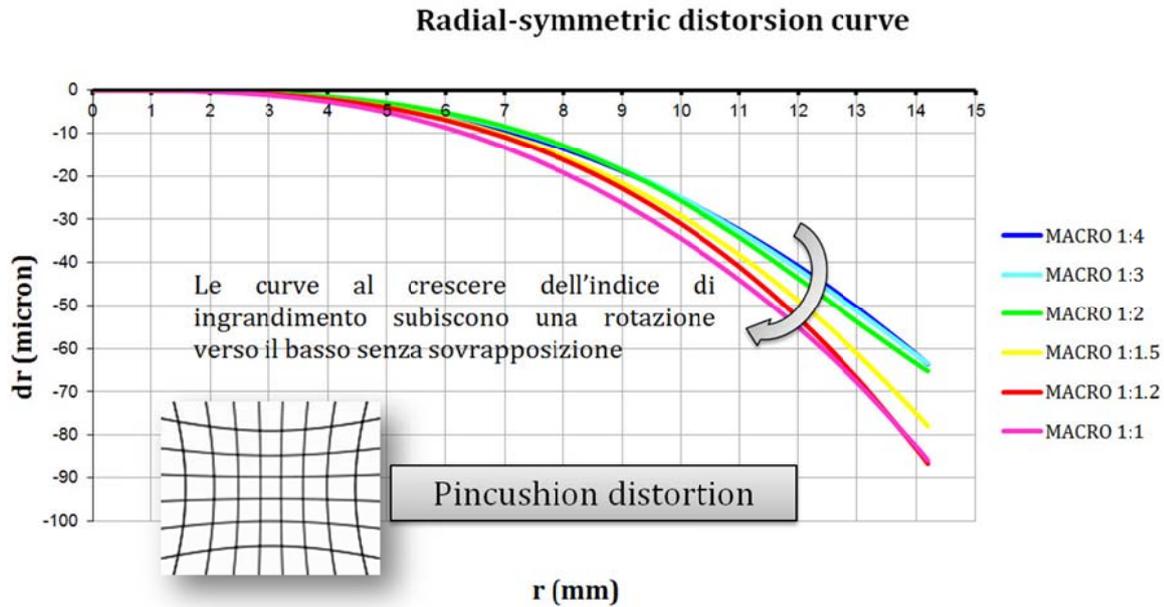


Figura 4.5 Andamento della distorsione radiale, Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

Riportando tutte le curve di distorsione su di un unico grafico, è stato evidenziato come al crescere della focale c'è una loro rotazione verso il basso, e che in virtù del loro andamento asintotico non si intersecano se non in una piccola porzione a ridosso dei bordi dell'obiettivo, dove, per l'assenza fisica di target, il loro andamento non è calcolato, ma bensì stimato (Figura 4.5).

Per poter ingrandire e mettere a fuoco l'immagine con la progressiva riduzione della distanza, il sistema di lenti sposta il centro di proiezione allontanandolo dal sensore; questo spostamento, definito come "estensione", influisce sul valore della lunghezza focale. Sebbene vengano vendute come lenti a focale fissa, questi obiettivi in realtà si comportano quindi come degli zoom.

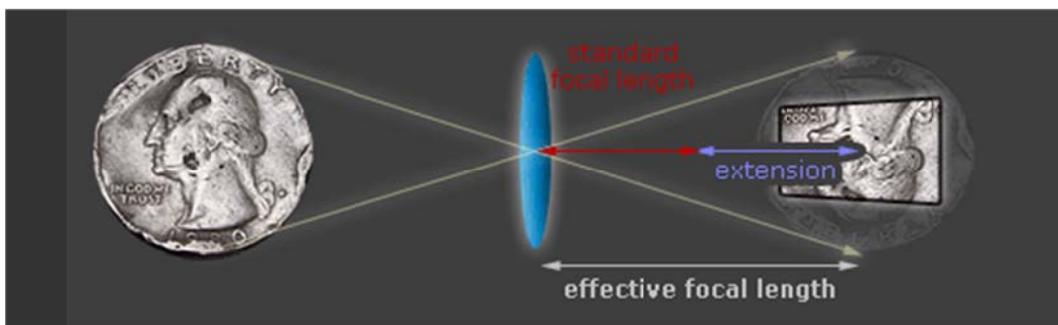


Figura 4.6 Fattore di estensione della lunghezza focale.

Al crescere dei rapporti di ingrandimento infatti si assiste ad una crescita proporzionale della lunghezza focale fino quasi a raddoppiarsi con il rapporto di 1:1 (Figura 4.7).

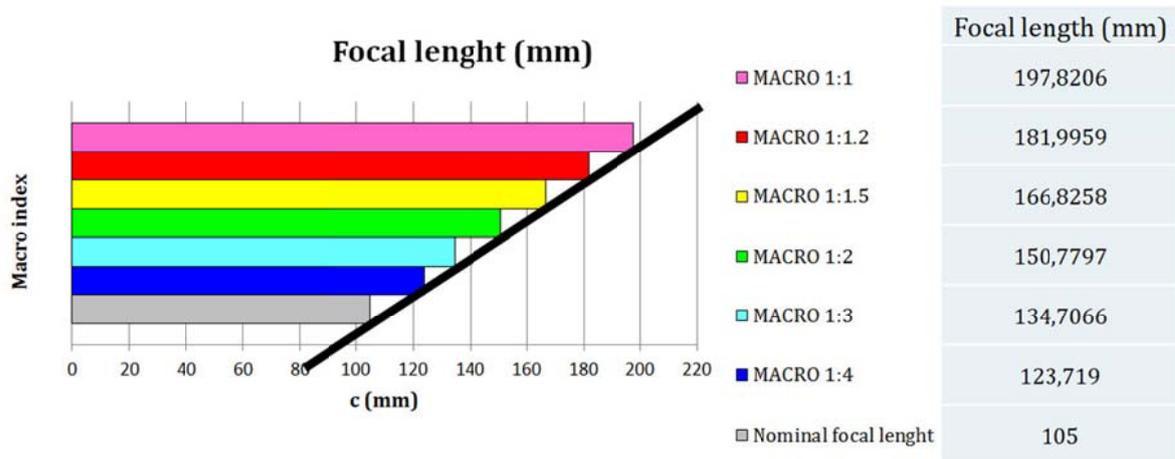


Figura 4.7 Variazione della lunghezza focale, Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

L'ultima considerazione riguarda il punto principale. Come spiegato nel paragrafo 2.1.4.1 il modello classico di Brown inizia a presentare instabilità numerica nel caso di campi visivi molto ristretti, tipici delle lenti a lunga focale. La posizione del punto principale, tramite le sue coordinate nel piano immagine, è risultata instabile a partire dal rapporto di ingrandimento 1:1.5. Anche fissando valori palesemente errati delle coordinate x_p , y_p si ottiene un valore di RMS comunque buono (inferiore ai 6 micron che rappresentano la dimensione del pixel), indice che nel processo di bundle adjustment gli errori associati alle coordinate x_p , y_p vengono assorbiti dagli altri parametri. Per questo motivo inizialmente, fino a che non è stata disponibile l'implementazione del bundle-adjustment modificato, si è preferito vincolare la posizione del punto principale nell'origine del sistema di coordinate immagine (Figura 4.8).

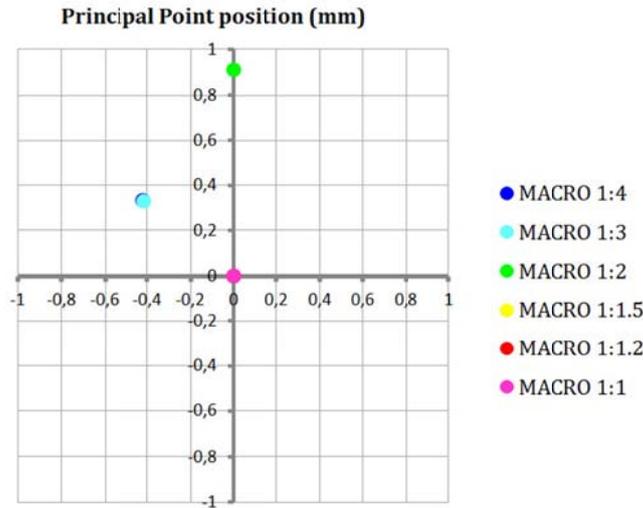


Figura 4.8 Posizione del punto principale, Nikon D80 – Sigma 105 mm Macro.

Si è quindi prestata attenzione allo spazio oggetto piuttosto che a quello immagine, cercando di valutare se, ai fini della ricostruzione metrica dell’oggetto, l’indeterminazione del PP avesse influenza sull’accuratezza delle coordinate; per questo si è fatto riferimento ai valori di distanza tra coppie di target del reticolo.

Per i vari indici di ingrandimento sono stati effettuati confronti incrociati fra distanze ottenute impiegando in un caso i valori di PP calcolati e nell’altro imponendo PP=0.

Tabella 4.1 Confronto fra le coordinate oggetto con PP calcolato e PP posto nell’origine del sistema immagine.

1:4	PP					PP=0					PP vs PP=0	
	x	y	z	delta		x	y	z	delta		delta	
	[cm]	[cm]	[cm]	target	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	target	[cm]	[micron]	[pixel]
BW1	3.7091	2.5426	0.4607	1-2	4.73483	3.7091	2.5426	0.4607	1-2	4.73483	0.00	0.00
BW2	1.5287	-1.6603	0.4704	2-3	4.63197	1.5287	-1.6603	0.4704	2-3	4.63196	0.00	0.00
BW3	-2.9205	-2.9486	0.4689	3-4	3.15095	-2.9205	-2.9486	0.4690	3-4	3.15092	0.31	0.05
BW4	-0.1563	-1.5096	0.0031	4-5	1.10286	-0.1563	-1.5097	0.0031	4-5	1.10277	0.94	0.15
BW5	0.2337	-2.5412	0.0049	5-6	3.37759	0.2337	-2.5412	0.0049	5-6	3.37759	0.00	0.00
BW6	-2.8560	-1.1767	0.0017	6-7	4.57658	-2.8560	-1.1767	0.0017	6-7	4.57658	0.00	0.00
BW7	1.3077	0.6645	0.4693	7-8	2.47406	1.3077	0.6645	0.4693	7-8	2.47406	0.00	0.00
BW8	3.3616	-0.6329	0.0011	8-9	7.16697	3.3616	-0.6329	0.0011	8-9	7.16683	1.36	0.22
BW9	-2.8356	2.9375	0.4620	9-10	3.77660	-2.8355	2.9374	0.4620	9-10	3.77643	1.72	0.28
BW10	-1.2947	-0.4796	0.0018	10-11	4.51648	-1.2948	-0.4796	0.0018	10-11	4.51665	-1.76	0.29
BW11	2.6862	1.6537	-0.0023	11-12	2.87817	2.6863	1.6537	-0.0023	11-12	2.87827	-0.92	0.15
BW12	0.0478	2.8038	-0.0041	12-13	3.05000	0.0478	2.8038	-0.0041	12-13	3.05000	0.00	0.00
BW13	-2.2780	0.8307	-0.0024	13-14	2.37002	-2.2780	0.8307	-0.0024	13-14	2.37002	0.00	0.00
BW14	-0.0022	0.1691	0.0000	14-15	2.16727	-0.0022	0.1691	0.0000	14-15	2.16727	0.00	0.00
BW15	2.1650	0.1520	-0.0009			2.1650	0.1520	-0.0009				
BW16												
BW17	3.4169	-3.2645	0.4733	17-18	5.98602	3.4168	-3.2645	0.4733	17-18	5.98595	0.76	0.13
BW18	-1.1476	0.6082	0.4689	18-19	2.47671	-1.1476	0.6082	0.4689	18-19	2.47679	-0.86	0.14
BW19	0.9903	-0.5517	0.0019	19-20	2.21620	0.9904	-0.5517	0.0019	19-20	2.21625	-0.49	0.08
BW20	-0.1038	1.3756	0.0000			-0.1038	1.3756	0.0000				
										DEV.STD	0.84	0.10

In Tabella 4.1 sono riportati i valori di confronto per il rapporto di ingrandimento 1:4, il test è stato eseguito anche per gli altri fattori ed i risultati hanno evidenziato uno scostamento medio subpixel in tutti i casi. Ai fini della ricostruzione tridimensionale di un oggetto, si può quindi concludere che vincolando il punto principale al centro dell'immagine per eliminare l'instabilità numerica in fase di bundle adjustment, non produce effetti significativi sulle coordinate oggetto. Tale comportamento è dovuto allo scarico dell'errore del punto principale sugli altri parametri dell'orientamento interno, che in qualche modo lo assorbono e lo mitigano, questo anche alla luce di considerazioni tecniche sul materiale utilizzato, infatti, considerando che le ottiche macro sono caratterizzate dalle più piccole distorsioni fra tutti le ottiche fotografiche, possiamo dire che variazioni minime di valori già di per se piccoli (riferendoci ai coefficienti K e P delle distorsioni radiali e tangenziali) non producono effetti significativi sulle coordinate oggetto.

4.1.1.1 Problematiche della macrofotografia

Le caratteristiche ed i pregi relativi alle ottiche macro finora presentate, quali la ripresa ravvicinata e l'elevatissimo livello di dettaglio raggiungibile, di gran lunga superiore a quello delle ottiche comuni, sembrerebbe renderle adatte ad applicazioni di tipo fotogrammetrico. Ci sono tuttavia alcune problematiche che ne hanno impedito l'applicazione su larga scala, e sono essenzialmente di natura fotografica ancor prima che fotogrammetrica.

La più grande limitazione di questo tipo di obiettivi è rappresentata dalla ridottissima profondità di campo. Generalmente nelle applicazioni di tipo fotogrammetrico, anche nel campo close range, non si presta molta attenzione a questo fattore; quando si fotografa un edificio, una zona di scavo o una statua, l'operatore si trova ad una distanza tale dall'oggetto che fissando il punto di messa a fuoco all'infinito tutto si presenta nitido nell'immagine. Questa situazione è dovuta ad un'elevata profondità di campo che fa in modo di far apparire a fuoco gli oggetti in un ampio *range* di distanze dalla camera. Nel caso delle ottiche macro tale profondità risulta essere dell'ordine del millimetro o poco più, per cui, soprattutto nel caso di prese fortemente convergenti, solo una piccola porzione risulta essere utile all'operatore. Questa

situazione risulta essere fortemente problematica in fase di calibrazione dove, per poter orientare nello spazio le varie stazioni, si rende necessario poter vedere in maniera nitida tutti i target presenti nell'area inquadrata. Tale problema si presenta anche quando l'area inquadrata non coinvolge più solo i target impiegati per la calibrazione ma anche l'oggetto del rilievo di cui si vuole estrarre l'andamento della superficie. Ovviamente è possibile aumentare la profondità di campo, e questa operazione si esegue riducendo il valore di apertura del diaframma (aumentando il numero f); così facendo, però, la quantità di luce passante risulta essere notevolmente inferiore, con un conseguente incremento dei tempi di esposizione.

Un valore dell'apertura di diaframma molto chiuso, se da un lato migliora la profondità di campo, dall'altro degrada il potere risolvete dell'ottica a causa di problemi di diffrazione dovuti alla pupilla d'entrata molto piccola. Attualmente il valore $f/32$ è il diaframma più chiuso disponibile e, anche nel caso fossero presenti aperture minori, chiudere ulteriormente significherebbe aumentare considerevolmente l'effetto della diffrazione, penalizzando in maniera vistosa la qualità dell'immagine. Normalmente da $f/11$ compreso in poi (riferendosi al formato 35mm) la diffrazione diventa importante e il calo di qualità evidente (Figura 4.9).

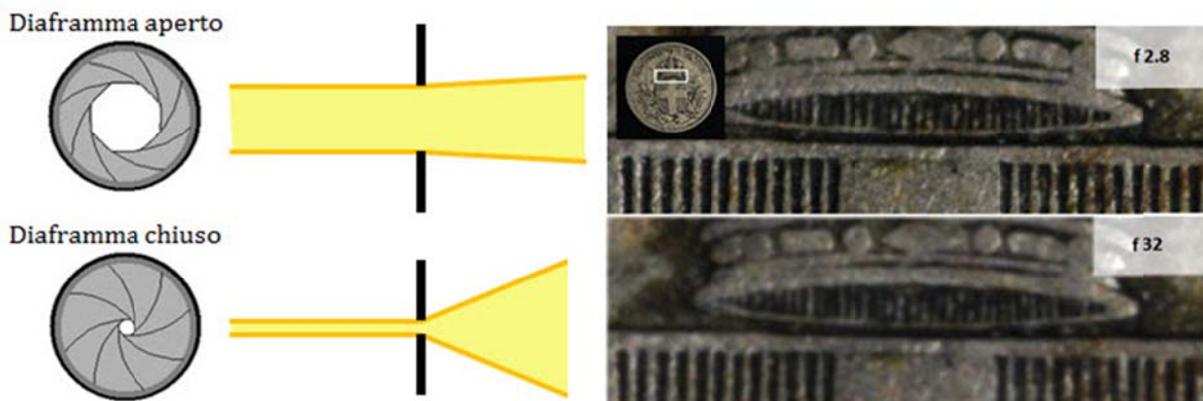


Figura 4.9 Effetti della diffrazione sull'immagine. Per diaframmi molto chiusi (alti valori di f) l'effetto produce un'immagine più "morbida".

In situazioni dove i tempi di esposizione sono molto lunghi, si rende quindi necessaria l'adozione di un cavalletto in modo da evitare l'effetto mosso, ed una slitta micrometrica per poter regolare la distanza ottimale di messa a fuoco in funzione della profondità di campo. Aspetto non secondario riguarda l'illuminazione ambientale; come detto, a parità di luce, un diaframma molto chiuso allunga i tempi di posa, quindi per poterli almeno rendere accettabili è necessario illuminare correttamente il set di lavoro.

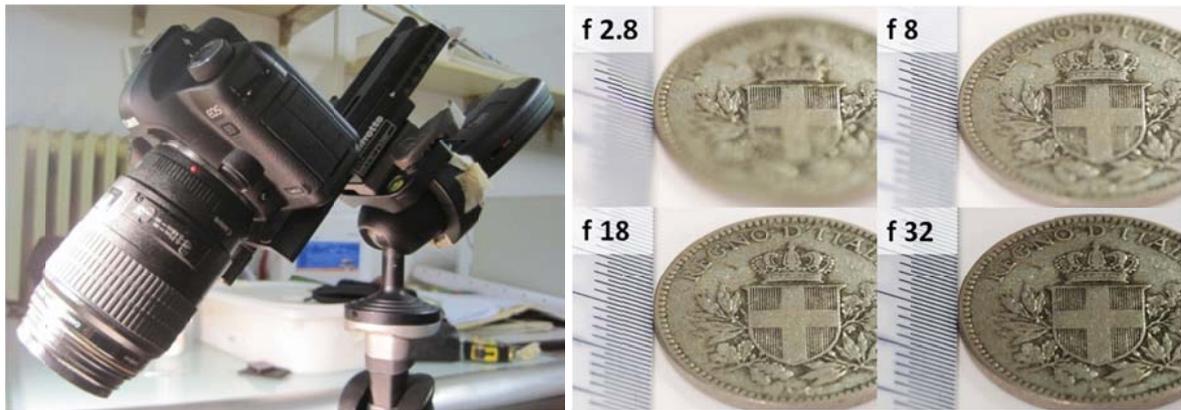


Figura 4.10 Fotocamera montata su treppiede con slitta micrometrica ed effetto della diversa profondità di campo in funzione del valore di diaframma f .

Lo svantaggio di uno scatto prolungato si presenta sotto forma di forte diminuzione della nitidezza dell'immagine, per cui i dettagli anche minuti e perfettamente nitidi con un diaframma molto aperto, ora si presentano riconoscibili, ma con un aspetto più impastato che può causare problemi agli algoritmi di image matching in fase di generazione di un DSM.

L'estensione della profondità di campo senza dover ridurre la chiusura del diaframma può essere realizzata tramite l'applicazione di alcune regole dettate da Theodor Scheimpflug, un capitano dell'esercito austro-ungarico che, all'inizio del '900, si pose il problema di come rendere cartograficamente corrette le riprese fatte da macchine portate in alto da palloni aerostatici. Dai suoi studi prese il nome la "regola di Scheimpflug", la quale sostanzialmente dice che "quando il piano su cui giace il soggetto, il piano nodale posteriore dell'obiettivo (piano immagine) e il piano focale si incontrano in un'unica retta, si ottiene la piena messa a fuoco del soggetto indipendentemente dal diaframma utilizzato, e tale retta prende il nome di linea di Scheimpflug" (Figura 4.11).

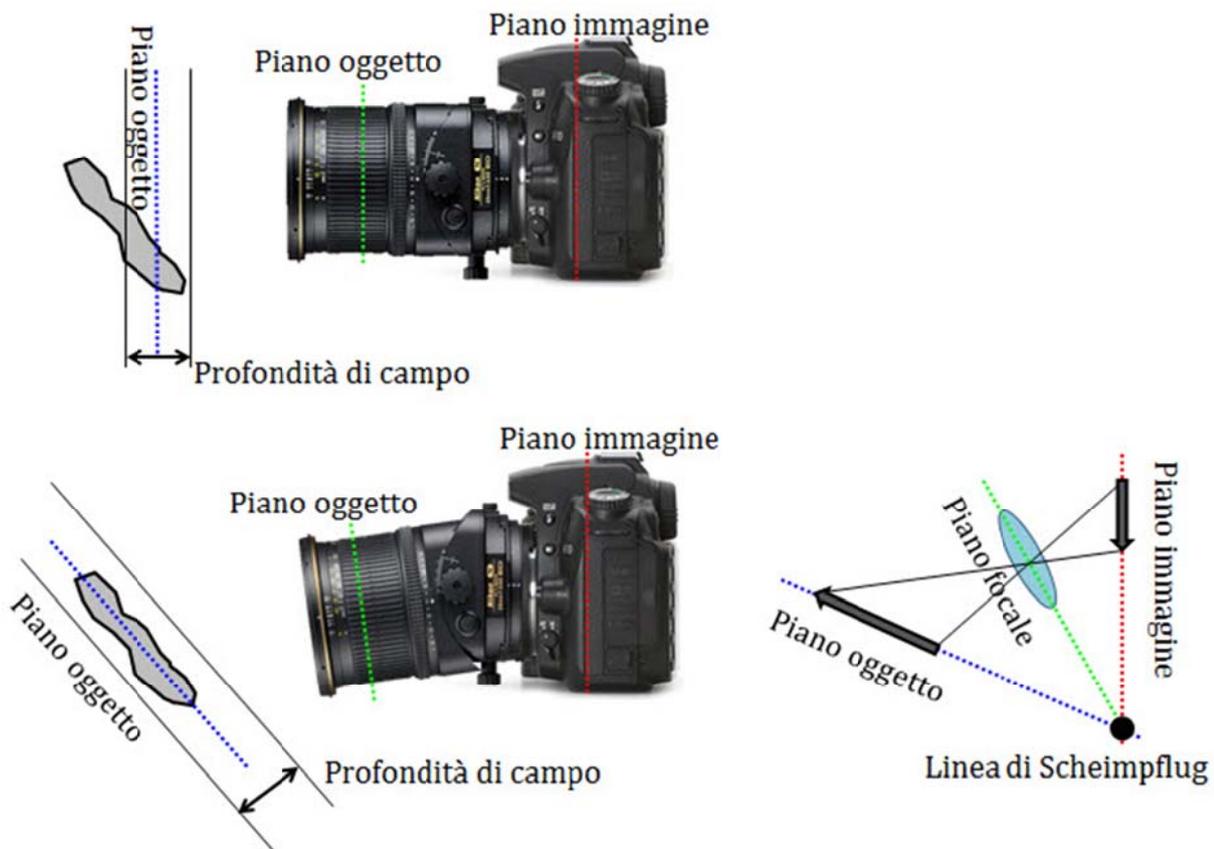


Figura 4.11 In alto la classica configurazione fotografica, con i tre piani paralleli fra di loro. In basso la rappresentazione del principio di Scheimpflug.

Tale condizione viene d'altronde diffusamente impiegata nei sistemi laser a triangolazione, dove il piano del sensore viene leggermente inclinato per estendere la profondità di campo senza dover perdere in luminosità. In ambito fotografico la realizzazione pratica avviene tramite particolari obiettivi detti "Tilt-Shift", anche se, al momento, la lunghezza focale di queste lenti vede escludere l'ambito della macrofotografia.

Un altro problema è stato riscontrato in fase di calibrazione, ed è strettamente legato al potere risolutivo di questo tipo di lenti. Solitamente i target impiegati per l'autocalibrazione sono stampati su supporti adesivi e presentano dimensioni dell'ordine dei 5–15 cm. Il supporto su cui vengono applicati non inficia la misura perché la sua struttura materica non rappresenta una sorgente d'errore. Nel caso di target di piccolissime dimensioni stampati su di un comune supporto come la carta, questo non è più corrispondente al vero. A rapporti di ingrandimento molto spinti si può osservare come la microstruttura di fibre di cellulosa che la compone si comporta come un tampone nei confronti dell'inchiostro causando delle sbavature che portano i target a perdere la loro forma circolare. Questo, per come è stato spiegato in precedenza,

provoca, nella fase di scansione delle immagini, al rigetto di “blob” corrispondenti a target reali, in quanto le condizioni geometriche preliminari di riconoscimento non risultano essere soddisfatte. La riduzione di target collimati porta ad un numero inferiore di equazioni all’interno della procedura di autocalibrazione, rendendo sicuramente più imprecisi i risultati finali. Una considerazione può essere fatta anche su quei target che superano i test di riconoscimento; infatti, la loro forma pseudo-circolare, spesso non simmetrica, porta all’errata determinazione del centroide e delle sue coordinate.

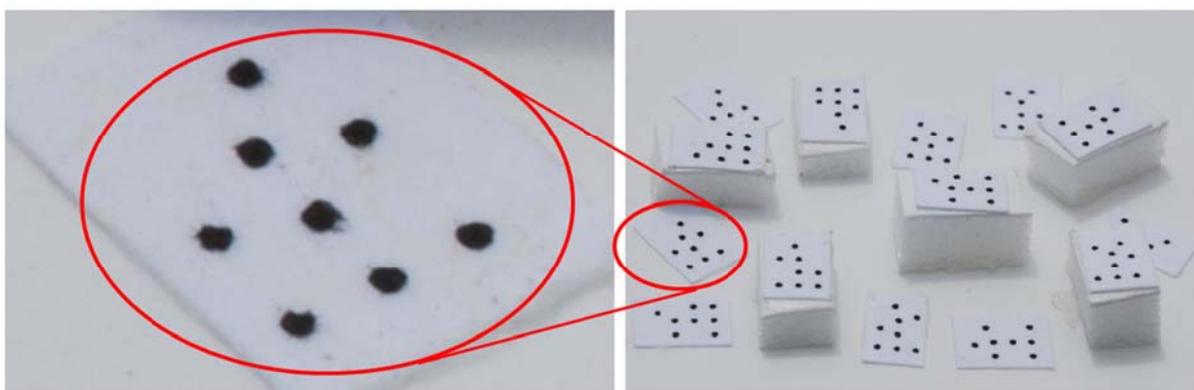


Figura 4.12 Ingrandimento di un target che evidenzia le irregolarità nella sagoma dei cerchi neri.

Per mantenere la sagoma circolare anche a questo livello di dimensioni è stato realizzato un negativo a partire da un file digitale di tutti i target codificati ed in seguito si è realizzata una stampa fotografica a contatto. In questo modo il supporto cartaceo e la dimensione dei granuli di alogenuro d’argento che si impressionano non hanno introdotto deformazioni geometriche sulla forma del target, come visibile in Figura 4.13.

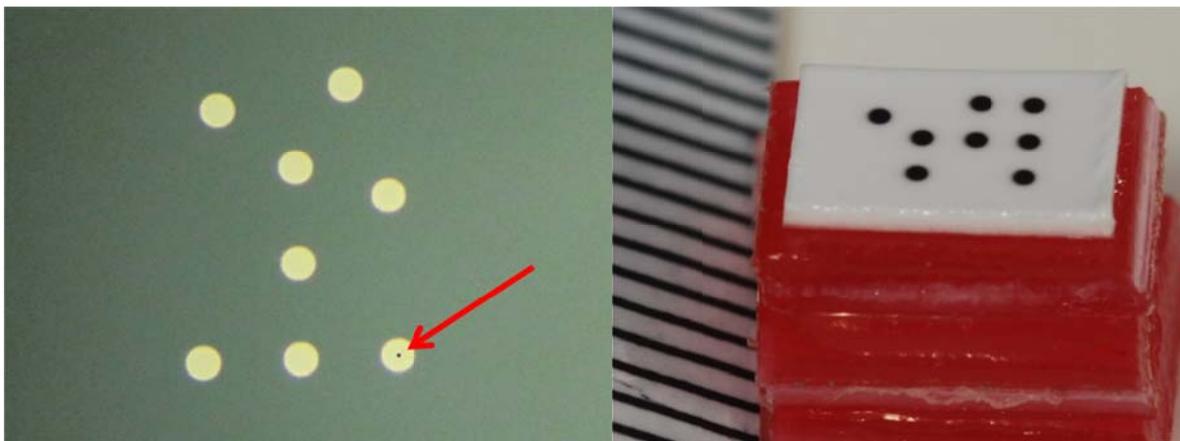


Figura 4.13 Target ricavato da slide digitale, il pallino indicato dalla freccia ha dimensione di $20\ \mu\text{m}$ Nell'immagine di destra le tacche del righello corrispondono a mezzo mm.

4.2 Preprocessing dell'immagine digitale

La fase di orientamento dei fotogrammi in genere non richiede un intervento sulle immagini, se non al più per regolazioni sul contrasto o sulla luminosità, ma in genere per via dell'intervento manuale dell'operatore e della sua sensibilità interpretativa, si preferisce non effettuare modifiche sostanziali. Se invece si impiegano software dove anche la fase di orientamento è gestita in maniera automatica e successivamente si desidera estrarre un DSM tramite algoritmi di ricerca di image matching, l'intervento di preprocessing può sensibilmente migliorare i risultati.

Sono stati eseguiti alcuni test impiegando una procedura che è in fase di sviluppo per essere integrata nel software iWitness, e che prevede la generazione di un DSM a partire da foto convergenti (Cap. 5.7). La procedura consiste nella triangolazione di una serie di punti, da n stazioni convergenti, individuati sulla superficie dell'oggetto senza l'ausilio di target, bensì tramite l'impiego dell'operatore di interesse FAST. In letteratura sono presenti numerosi lavori che dimostrino come il preprocessamento dell'immagine tramite il filtro di Wallis, comporti un sensibile innalzamento delle prestazioni fornite dagli operatori di interesse, e nel caso specifico dall'operatore FAST.

Ora, prima di affrontare la tematica del preprocessamento delle immagini ai fini della restituzione, è possibile fare un passo indietro e tornare ad una fase antecedente. Si è posto il problema del preprocessing delle immagini digitali anche in fase di calibrazione dal momento che i software di tipo fotogrammetrico lavorano impiegando come dato di

input il formato **jpg*, sviluppato nel 1986 dal Joint Photographic Experts Group. Tale formato per sua natura e concezione appartiene alla classe degli algoritmi di tipo “lossy” ovvero con perdita di dato rispetto all’originale (la trasformazione è basata sulla trasformata discreta del coseno). Variando alcuni parametri di compressione è possibile trovare diverse combinazioni che vanno a bilanciare la qualità dell’immagine in relazione alla dimensione del file. Con l’avvento delle moderne fotocamere DSLR, capaci di affiancare al prodotto **jpg* anche il suo originale, ovvero il file in formato *raw*; quest’ultimo è il formato grezzo derivante dall’acquisizione primaria, non direttamente visualizzabile se non previa elaborazione, che contiene tutte le informazioni catturate dal sensore al momento dello scatto. Ci si è posti il problema se fosse possibile avere un guadagno in termini di accuratezza tramite un’operazione di compressione controllata dall’operatore.

Per diversi set di calibrazione, appartenenti a diverse fotocamere e diverse lenti, sono stati acquisite contemporaneamente, al momento dello scatto, sia le immagini **jpg* che *raw* (**.cr2* per Canon e **.nef* per Nikon). In seguito, tramite probabilmente il più diffuso software di gestione di file *raw* (Adobe Camera RAW), sono stati generati file **jpg* settando i parametri di qualità al massimo valore possibile. Confrontando i risultati della calibrazione sulla base di entrambi i set (set-1 immagini generate direttamente dalla camera, e set-2 immagini generate tramite Adobe Camera RAW), si è notato come in termini percentuali, il set-2 fornisca delle precisioni oscillanti fra un minimo di 82% e un massimo di 92% rispetto al set-1, quindi è ragionevole pensare che il processo di generazione dei file **jpg* implementato all’interno delle fotocamere comporti una perdita di dati inferiore a quella ottenibile tramite un software di postprocessing. In quest’ultimo caso infatti si è notata una diminuzione dell’accuratezza globale del processo di autocalibrazione dell’ordine di un 10-20%, per cui i dati generati direttamente dalla camera possono essere considerati l’ottimale punto di partenza per le procedure di autocalibrazione. Ovviamente non è stato possibile verificare i risultati nel caso di impiego diretto del file *raw*, in quanto al momento non ci sono in commercio software che analizzino direttamente tale dato, è tuttavia ragionevole pensare che un incremento prestazionale sia ottenibile dall’analisi del dato grezzo su cui non sono intervenuti processi di rimaneggiamento.

4.2.1 Filtro di Wallis

IL filtro di Wallis si basa su un algoritmo nato per incrementare ed esaltare il contrasto all'interno di un'immagine.

Sviluppato nel 1976, è spesso impiegato per ottimizzare le immagini al fine di impiegare successivamente un operatore di interesse. In letteratura si possono trovare numerose esperienze che dimostrano come tali operatori riescano a trovare un numero di punti significativamente maggiore in immagini cui è stato applicato il filtro di Wallis.

Le azioni di miglioramento delle immagini che sono definite globali non producono simultaneamente e omogeneamente la stessa qualità di risultato in tutte le parti dell'immagine. Il motivo è da attribuire al fatto che gli stessi parametri vengono applicati sull'intera immagine in maniera generalizzata, quindi un'azione globale progettata per aumentare il contrasto in aree scure molto probabilmente provoca una saturazione di quelle chiare, e viceversa.

Il filtro di Wallis, invece, opera localmente, regolando la luminosità in modo che in queste aree la media e la deviazione standard siano compatibili con quelle definite dai parametri di progetto. L'espressione del filtro di Wallis è la seguente:

$$i_{Wallis}(x, y) = i_{originale}(x, y)r_1 + r_0 \quad (4.1)$$

dove,

$$r_1 = \frac{c \sigma_{originale}}{\left(c \sigma_{originale} + \frac{\sigma_{target}}{c}\right)} \quad (4.2)$$

$$r_0 = b m_{target} + (1 - b - r_1)m_{originale} \quad (4.3)$$

I termini i_{Wallis} e $i_{originale}$ presenti nell'espressione rappresentano rispettivamente l'immagine filtrata e quella originale, r_0 e r_1 sono due parametri additivo e moltiplicativo, $m_{originale}$, $\sigma_{originale}$, m_{target} , σ_{target} , sono la media e la deviazione standard dell'immagine originale e di quella filtrata, c e b due parametri rispettivamente di contrasto e luminosità.

Il filtro suddivide l'immagine di input in una serie di celle di cui vengono calcolate localmente le statistiche, la dimensione di tali blocchi è definita dall'utente in base alle esigenze finali in termini di contrasto e livello di dettaglio. Generalmente celle molto piccole (ad es. 5x5 pixels) producono un forte contrasto anche di elementi la cui importanza è trascurabile, provocando errori in una successiva fase di feature extraction. Per contro, celle troppo grandi (120x120 pixels) introducono una significativa perdita di dettaglio.

Agendo su questi parametri si produce un buon contrasto locale su tutta l'immagine, che risulterà essere in toni di grigio, riducendo e ottimizzando quello esistente fra le porzioni più chiare e quelle più scure.

4.2.2 Operatore FAST

Esistono diversi tipi di operatori di interesse: la loro funzione è quella di identificare alcuni elementi peculiari di un'immagine, quali punti, angoli, linee, o aree. Sviluppati agli inizi degli anni 70 all'interno della comunità della computer vision per il tracciamento e il riconoscimento di oggetti, da qualche tempo sono stati impiegati con profitto anche in ambito fotogrammetrico, grazie alla caratteristica di facilitare il matching multi-immagine.

Un punto di interesse, per poter essere definito tale, deve sapersi distinguere dal background di sfondo, essere indipendente da distorsioni geometriche o radiometriche, accurato dal punto di vista del posizionamento, stabile anche in presenza di rumore di fondo nell'immagine e, infine, unico, ovvero, riconoscibile da e fra tutti gli altri.

Come visibile in Figura 4.14, nel corso degli anni diversi autori hanno presentato soluzioni differenti, tutte con l'intento di migliorare aspetti come la ripetibilità, accuratezza, robustezza, velocità di calcolo, ecc. Non esiste un algoritmo universalmente definito come il migliore, ci sono punti di forza e debolezza in ognuno e che devono, quindi, essere tenuti in considerazione in fase preliminare di scelta; per questo motivo alcuni di loro hanno trovato e trovano tutt'ora largo impiego in ambito fotogrammetrico, come ad esempio Moravec, Förstner, Harris/Plessey, SUSAN, SIFT e FAST.

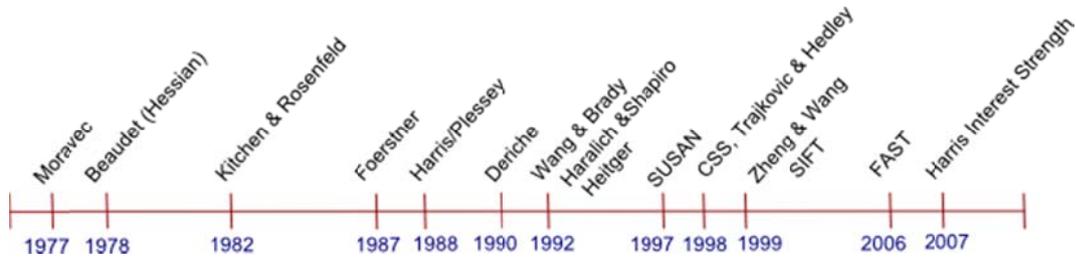


Figura 4.14 Timeline di alcuni operatori di interesse.

L'operatore di interesse impiegato in questo lavoro, come anticipato in precedenza è il FAST (Features from Accelerated Segment Test), sviluppato nel 2006 da Rosten e Drummond per applicazioni real-time; esso presenta come caratteristica principale la più alta velocità di calcolo tra quelli precedentemente menzionati. Altre caratteristiche significative sono la sua invarianza agli effetti di rotazioni e variazioni di scala.

Il principio di funzionamento è basato sull'analisi di un training site composto da una finestra circolare di 16 pixel di circonferenza, e sulla comparazione del valore di intensità che questi assumono in relazione a quello centrale.

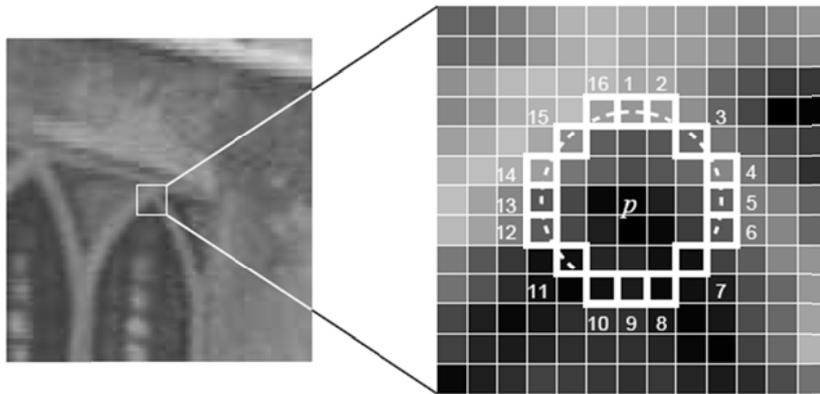


Figura 4.15 Finestra di ricerca a 16 pixel impiegata dall'operatore FAST.

Per ognuno dei pixel x appartenenti al cerchio si determina il suo stato $S_{p \rightarrow x}$, comparando il livello di intensità rispetto al pixel centrale p , tale valore può rientrare in una delle seguenti categorie: di intensità maggiore, minore o simile a quella di p .

$$S_{p \rightarrow x} = \begin{cases} d, & I_{p \rightarrow x} \leq I_p - t & \text{(darker)} \\ s, & I_p - t < I_{p \rightarrow x} < I_p + t & \text{(similar)} \\ b, & I_p + t \leq I_{p \rightarrow x} & \text{(brighter)} \end{cases} \quad (4.4)$$

Calcolando $S_{p \rightarrow x}$ per tutti i $p \in P$ dove con P si indicano tutti i pixel appartenenti ai *training sites*, è possibile partizionare P a sua volta in tre insiemi P_d, P_s, P_b a seconda del valore assunto dallo stato di p .

Si introduce ora una variabile booleana K_p , cui corrisponde lo stato di vero se p rappresenta un punto di interesse e falso in caso contrario. L'algoritmo inizia prendendo in considerazione il pixel x (dei sedici considerati che compongono la finestra circolare di ricerca) che presenta il maggior contenuto di informazioni sul fatto che il candidato pixel possa essere un punto di interesse, misurando l'entropia di K_p .

Il valore di entropia $H(P)$ di K per il set P è:

$$H(P) = (c + \bar{c}) \log_2(c + \bar{c}) - c \log_2 c - \bar{c} \log_2 \bar{c} \quad (4.5)$$

dove

$$c = |\{p \mid K_p \text{ è vero}\}| \quad (\text{numero di punti di interesse})$$

$$\bar{c} = |\{p \mid K_p \text{ è falso}\}| \quad (\text{numero degli altri punti})$$

La scelta di x produce:

$$H(P) - H(P_d) - H(P_s) - H(P_b) \quad (4.6)$$

Avendo scelto la x che presenta il maggior contenuto informativo, il processo viene applicato ricorsivamente su tutte e tre le partizioni di P (per una x_b selezionata si partiziona P_b in $P_{b,d}, P_{b,s}, P_{b,b}$; per x_s si partiziona P_s in $P_{s,d}, P_{s,s}, P_{s,b}$ e così via, prendendo delle x che massimizzano il contenuto informativo del set su cui vengono applicate). Il processo termina quando l'entropia del subset si annulla; in questo modo tutti i punti del sottogruppo presentano lo stesso valore di K_p , e possono essere considerati o tutti punti di interesse oppure non esserlo. L'output di questo processo consiste in un albero decisionale che permette di classificare tutti i punti individuati nei *training sites*.

L'algoritmo tende a determinare molti punti adiacenti tra loro, per questo motivo devono essere posti in una sorta di graduatoria, indice della loro qualità. Viene quindi calcolata per ogni punto individuato una funzione V ; esso verrà soppresso se, all'interno

di una finestra centrata in p di 3×3 pixels, c'è un punto di interesse adiacente con un valore di V maggiore. V è definita come la somma delle differenze di intensità, in valore assoluto, fra i pixels appartenenti all'arco contiguo di circonferenza ed il pixel centrale, quindi punti aventi una forte discordanza di intensità saranno maggiormente affidabili. Siccome la funzione V varia da immagine ad immagine è possibile, a discrezione dell'operatore, mantenere una percentuale dei punti totali fino a questo punto individuati, ad esempio è possibile utilizzare i 5-10-15% caratterizzati dall'aver il più alto valore della funzione V .

4.3 Calibrazione radiometrica

Il fenomeno della percezione del colore è alquanto complesso perché la sfera di interazione oggetto-uomo coinvolge diversi aspetti e discipline. Infatti possiamo attribuire alla fisica il compito di studiare l'interazione tra la radiazione penetrante nell'occhio e gli elementi fotosensibili presenti al suo interno; alla fisiologia lo studio dello stimolo prodotto da tale interazione e della sua propagazione; ed infine alla psicologia il compito di valutare le sensazioni tramite l'espressione di un giudizio a parole.

Si cerca, in questa parte di lavoro, di tralasciare gli ultimi due aspetti, fisiologico e psicologico, per concentrarsi sulla natura fisica del problema.

Il problema della aleatorietà di giudizio fra due persone riguardo ad un colore, specie se illuminato da diverse sorgenti luminose, pone il problema di individuare un metodo che permetta di identificare un colore in maniera univoca. A questo scopo è opportuno definire il concetto di temperatura di colore. Introdotto da Lord Kelvin nella seconda metà dell'800, esso è impiegato per quantificare la tonalità che una radiazione luminosa assume. Per arrivare a spiegare il concetto di temperatura di colore bisogna riferirsi al concetto di "corpo nero", ovvero un corpo capace di assorbire tutte le radiazioni elettromagnetiche incidenti e di restituirle sotto forma di energia termica. In natura non esiste un oggetto dotato di tale proprietà, ma è possibile realizzarne uno con buona approssimazione in laboratorio: praticando, infatti, un forellino in un corpo cavo le cui pareti interne sono nere, e sottoponendolo ad un aumento di temperatura, è possibile osservare come da quel forellino con il progressivo aumento di temperatura, si assisterà

alla fuoriuscita di raggi luminosi che varieranno di tonalità e in intensità. Per la legge di Wien, definendo la temperatura di emissione, si definisce anche il colore della radiazione emessa, tramite la sua lunghezza d'onda.

$$\lambda = b/T \quad (4.7)$$

dove T è la temperatura assoluta espressa in gradi Kelvin, λ è la lunghezza d'onda della radiazione emessa, e b è una costante.

Nel 1931, il CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) ha fissato dei valori numerici, quantificando le risposte dell'occhio umano medio a diverse lunghezze d'onda di luce, e ha inoltre definito la composizione spettrale degli illuminanti normalizzati noti come: illuminante A ($T=2856$ K, lampada ad incandescenza), illuminante B ($T=4870$ K, luce solare diretta), illuminante C ($T=6770$ K, luce media con cielo nuvoloso), illuminante D65 ed illuminante E (ad energia costante). In fase di calibrazione faremo riferimento al D65 che corrisponde alla luce media diurna ($T=6500$ K).

4.3.1 Lo spazio colore $L^*a^*b^*$

Con riferimento allo spazio colore definito dal CIE nel 1931, e indicato Figura 4.16, in uno spazio xy normalizzato, sono rappresentati, dentro alla campana, tutti i colori visibili e la loro frequenza d'onda; al suo esterno ci sono i colori non visibili o non distinguibili da quelli del perimetro esterno. All'illuminante D65 corrispondono le coordinate $x=0.3128$ e $y=0.3292$, assimilabile ad una luce "bianca".

A causa di alcune difficoltà nella rappresentazione dei colori con lo spazio CIE di Figura 4.16, è stato sviluppato, nel 1976, il metodo CIE- $L^*a^*b^*$, soprattutto in funzione del problema della variabilità della riproduzione del colore su diverse periferiche come monitor o stampanti. Lo spazio colore CIE- $L^*a^*b^*$ definisce un colore coerente indipendentemente dalla periferica utilizzata per creare o riprodurre l'immagine, sia essa un monitor, una stampante o un computer. I parametri che lo definiscono sono la luminosità L^* , oscillante fra i valori 0 (nero) e 100 (bianco) e due componenti cromatiche a^* , b^* , oscillanti fra due colori fra loro complementari ($-a^*$, verde e $+a^*$, rosso; $-b^*$, giallo, $+b^*$, blu).

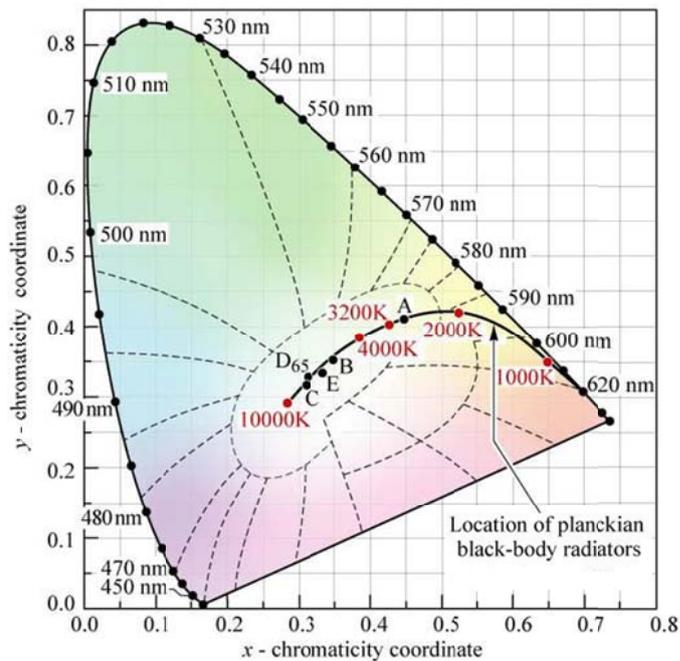


Figura 4.16 Diagramma di cromaticità CIExy ed illuminanti.

4.3.2 Calibrazione tramite l'impiego di ColorChecker

L'impiego nella pratica di numerosi dispositivi differenti, ognuno dei quali fa riferimento ad uno spazio colore personalizzato, fa sì che, per miscelare dati provenienti da sorgenti diverse, sia necessario disporre di un profilo colore unico ed indipendente dalla sorgente.

Ai fini di risolvere il problema della fedeltà di riproduzione del colore nei diversi dispositivi digitali, nel 1993, l'*International Color Consortium* (ICC) ha definito un profilo standard basato su tabelle che convertono da coordinate di periferica a coordinate assolute e viceversa. Tramite l'impiego dei ColorChecker, cartoncini su cui sono riprodotti diversi colori, è possibile eseguire il calcolo di un profilo ICC. La caratteristica di questi supporti è quella di avere un'ampia gamma di colori realizzati con pigmenti molto stabili, che non decadono con il tempo, e che sono in grado di riflettere la luce nello stesso modo in tutte le componenti dello spettro visibile, rendendo i tasselli uguali ai colori degli oggetti naturali indipendentemente dall'illuminazione e con qualsiasi processo di riproduzione colore. Tramite il ColorChecker è possibile determinare un profilo ICC da applicare ad un'immagine scattata sotto le stesse condizioni ambientali.

L'effetto di correzione cromatica è visibile in Figura 4.17 in cui le tonalità soggette da un illuminante diverso da quello di riferimento vengono spostate all'interno dello spazio colore fino a quando esse non corrispondono all'illuminante D65. Il tipo di illuminante assimilabile alla condizione di scatto non influisce in modo uguale e proporzionale su tutte le tonalità, per questo motivo la correzione che viene portata all'immagine è di tipo differenziale, ovvero ogni colore avrà un vettore di spostamento nello spazio colore diverso per direzione e intensità da qualsiasi altro.

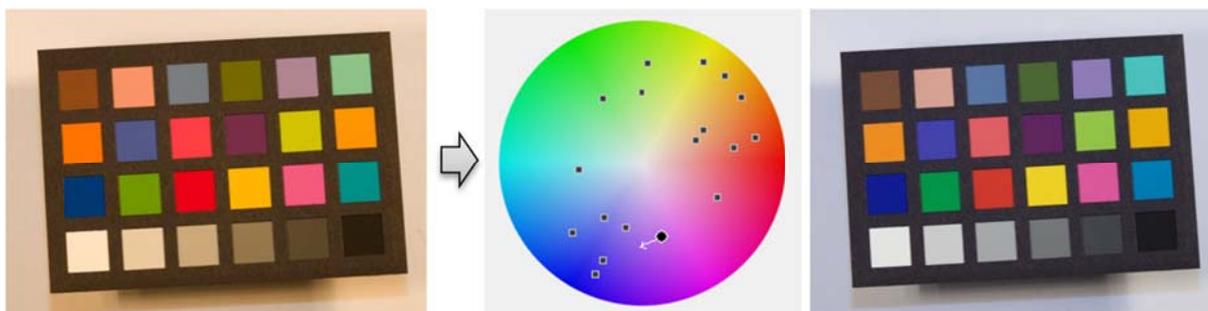


Figura 4.17 A sinistra la foto al momento dello scatto, le tonalità sono molto calde, possiamo dire quindi che la temperatura di colore è abbastanza bassa. A destra la correzione del colore dell'immagine sulla base dell'illuminante D65. In mezzo lo spazio colore con la rappresentazione della posizione delle tonalità del ColorChecker e un esempio di vettore di spostamento (per la tonalità violetta).

4.4 Modellazione 3D tramite laser a scansione

Negli ultimi anni si è assistito ad un drastico calo dei costi dei sistemi di acquisizione tridimensionale; di pari passo sono stati compiuti progressi a livello di hardware informatico che hanno permesso la gestione di una mole di dati fino a qualche tempo fa impensabile e, al contempo, di operare con strumentazioni che erano ad appannaggio solo delle strutture più avanzate ed economicamente solide.

Queste tendenze, insieme con l'aumento della larghezza di banda di Internet, stanno rendendo l'uso di modelli 3D, anche molto complessi, accessibile ad un pubblico molto più ampio, si pensi ad esempio alla diffusione dei musei virtuali o all'e-commerce.

La realizzazione di un modello tridimensionale prevede il susseguirsi di una serie di operazioni che partono da una fase puramente logistica, dove vengono prese alcune decisioni fondamentali quali il tipo di strumentazione da impiegare o lo scopo per cui il modello viene generato, passano per la fase pratica di acquisizione del dato ed infine terminano con le relative operazioni di elaborazione in post-processing.

Il diagramma di flusso rappresentato in Figura 4.18 rappresenta l'iter operativo da seguire per la scansione di un oggetto di dimensioni compatibili con quelle del volume di misura dello strumento.

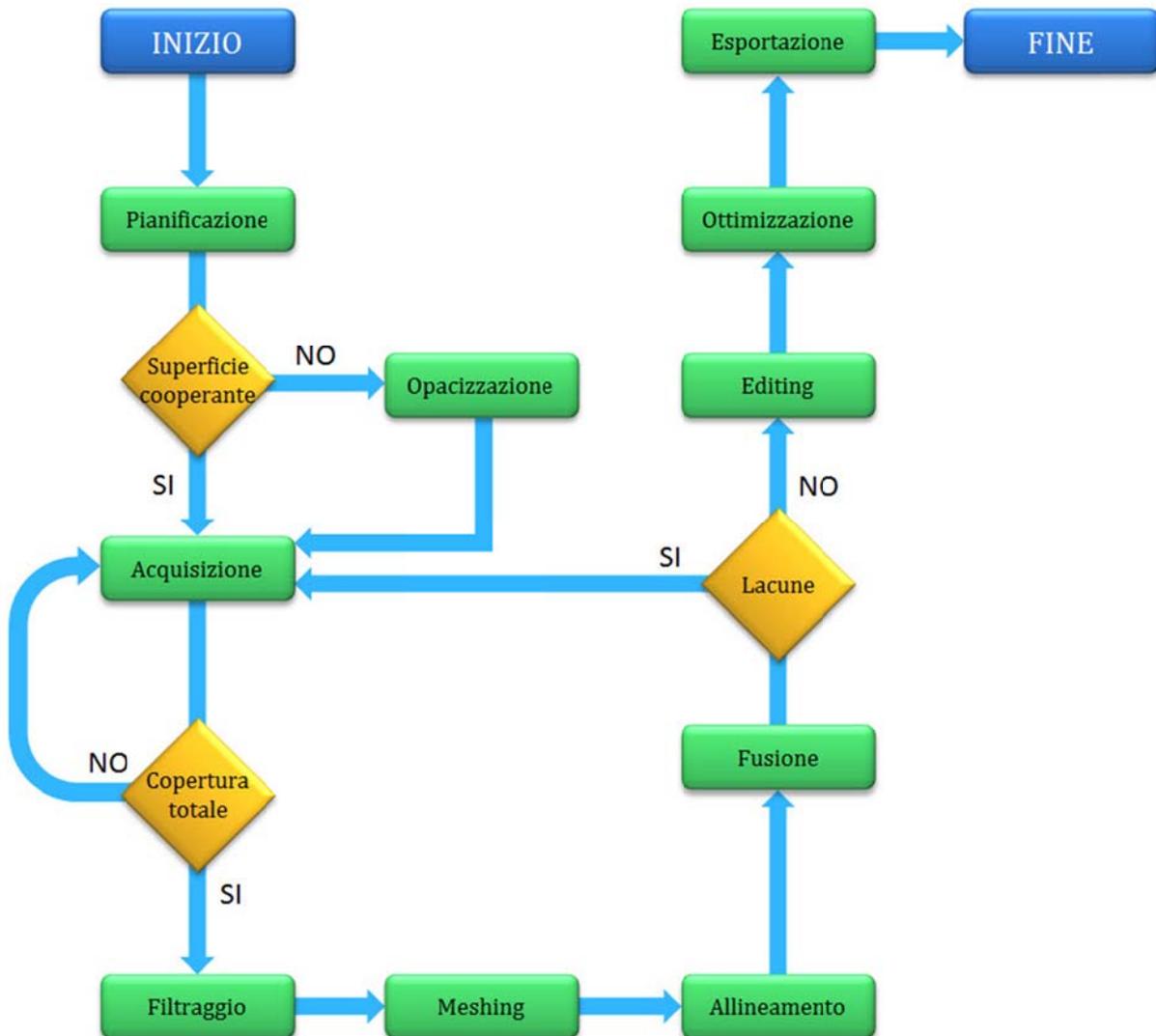


Figura 4.18 Diagramma di flusso del processo di scansione mediante un laser scanner.

4.4.1 Pianificazione e Acquisizione

La pianificazione di un rilievo è una fase molto delicata dalla quale dipendono fortemente gli esiti di tutto il lavoro. Come si è già illustrato nel capitolo dedicato ai sensori tridimensionali, ogni strumento è caratterizzato da un optimum, ovvero una condizione ideale di funzionamento, funzione di parametri quali, ad esempio, la profondità di campo, il range di utilizzo o il volume di area scansionabile. La prima

domanda che un operatore si deve porre è “qual è la finalità del rilievo?”: le risposte possono essere molteplici, si va dalla rappresentazione multimediale, dove una rappresentazione approssimata e dotata di texture è sufficiente per scopi didattici o divulgativi, alla rappresentazione ad alta fedeltà utile per ispezioni dimensionali o produzione di repliche.

In funzione delle caratteristiche geometriche e materiche dell’oggetto da rilevare è poi possibile restringere ulteriormente il campo a quegli strumenti che garantiscano la precisione e accuratezza desiderata. Oggetti di piccole dimensioni, che possono variare da qualche centimetro al metro, generalmente vengono acquisiti con strumenti basati sul principio della triangolazione.

Una volta deciso quale sia la strumentazione che meglio si adatta al tipo di rilievo che ci si accinge a fare sarebbe opportuno effettuare una calibrazione del sistema, analogamente a quanto si fa in fotogrammetria. Purtroppo tutte le soluzioni presenti in commercio si comportano come delle black-box, ovvero scatole chiuse di cui non è concesso conoscere i parametri e verificarne la stabilità nel tempo.

Esaurite queste prime fasi preliminari si passa alla pianificazione vera e propria del rilievo. Il numero di scansioni e la loro posizione può essere stimato a priori con un buon livello di approssimazione sulla base di alcune semplici regole pratiche, quali mantenere una zona di ricoprimento fra due scansioni adiacenti pari al 30–40%, o effettuare delle prese convergenti per evitar il problema delle occlusioni. Inoltre, sapere in anticipo, anche se in via approssimata, il numero e la posizione delle scansioni necessarie permette l’ottimizzazione della logistica, la stima delle tempistiche e dei costi.

Prima di procedere all’esecuzione delle scansioni, qualora la natura del materiale da rilevare presenti una superficie non otticamente cooperante si verificare può verificare se esiste il rischio di lacune evidenti. Situazioni di questo tipo sono molto frequenti ad esempio in presenza di parti metalliche lucide, o di elementi trasparenti come il vetro; è quindi necessario intervenire stendendo un velo di materiale opacizzante, facilmente rimovibile e che non danneggi l’oggetto al termine delle operazioni di rilievo (per questo scopo è generalmente impiegata una finissima polvere di talco).

La fase di acquisizione è caratterizzata da un certo numero di stazioni dalle quali si effettua la scansione. Tale operazione, visto il principio di funzionamento degli strumenti a triangolazione (rotazione della testa di scansione lungo la superficie

dell'oggetto, o proiezione dei pattern codificati) si vede protrarre nel tempo per un arco che varia da pochi secondi a qualche minuto. Ne consegue quindi che, per evitare vibrazioni o spostamenti del sistema di riferimento strumentale, si devono utilizzare dei supporti fissi stabili ed eventualmente orientabili, come ad esempio un cavalletto. Qualora gli oggetti siano di piccole dimensioni e rimovibili dalla loro sede (cosa non sempre possibile se si tratta di opere d'arte) è possibile impiegare dei supporti girevoli che, in maniera automatizzata, ruotano l'oggetto attorno ad uno o più assi, rendendo così più veloce ed omogenea la fase di scansione (Figura 4.19). Al fine di garantire una sufficiente zona di ricoprimento, per una oggetto da scansionare a 360° si effettuano dalle 8 alle 12 prese, quindi con un angolo di rotazione che varia dai 30° ai 45°.



Figura 4.19 Supporto girevole per oggetti di piccole dimensioni.

Durante le fasi di acquisizione, specialmente se si stanno acquisendo anche le informazioni relative alla radiometria dell'oggetto, è necessario prestare attenzione anche all'illuminazione di scena. Dal momento che il sensore di ricezione è spesso lo stesso che cattura anche il dato RGB, un'elevata intensità luminosa, che ecceda la soglia di funzionamento strumentale, può causare oltre a lacune sul dato 3D anche radiometrie fortemente discordanti fra un'acquisizione e la successiva. È quindi opportuno verificare la presenza di eventuali sorgenti luminose esterne che possano creare riflessi indesiderati, o, qualora ci si trovi all'esterno, adottare soluzioni per attenuare la luce solare, impiegando pannelli o teloni per creare zone d'ombra sull'oggetto da rilevare.

4.4.2 Filtraggio e Meshing

Una volta terminata la fase di acquisizione, avendo avuto cura di aver coperto tutte le superfici desiderate, si procede ad un filtraggio preliminare del dato. È utile in questa fase, anche per ridurre il successivo onere computazionale, eliminare tutte quelle parti che sono estranee all'oggetto del rilievo. In questa categoria si includono eventuali supporti atti a sostenere l'oggetto durante le fasi di acquisizione o oggetti presenti sullo sfondo. L'operazione può essere svolta manualmente dall'operatore o per via automatica tramite algoritmi in grado di rilevare ad esempio cluster isolati di punti.



Figura 4.20 Operazione di filtraggio nel rilievo di una statua in bronzo: le parti in azzurro, non facendo parte dell'oggetto del rilievo, devono essere eliminate.

Il passaggio da un insieme di punti grezzo ad uno filtrato è un'operazione che deve essere sempre effettuata: parti non facenti parte dell'oggetto e presenti solo su alcune scansioni potrebbero generare errori topologici in fase di creazione delle mesh o di allineamento fra queste.

Nei paragrafi precedenti è stato detto che il risultato di una scansione, sia essa laser che a luce strutturata, porta ad aver un insieme di punti nello spazio riferiti ad una terna cartesiana solidale allo strumento. Tale insieme di punti viene comunemente chiamato "nuvola di punti" (*Point Cloud*). Il passaggio che porta la trasformazione di questa nuvola

di punti sparsi ad una superficie poligonale è chiamato *meshing*. Al termine di tale operazione avremo una superficie composta da triangoli connessi fra loro, i cui vertici coincidono con i punti misurati.

Le fasi di creazione della mesh possono essere totalmente oscure all'operatore oppure rese semi-trasparenti grazie alla possibilità di parametrizzare alcuni passaggi. La discriminante in ogni caso risulta essere il dato di partenza. Una nuvola di punti può, infatti, essere definita come strutturata (basata su di una griglia tridimensionale cui è associato un valore della quota ad ogni cella, si parla in questo caso di 2,5D) o non strutturata (punti nello spazio non logicamente organizzati). Il principio dei sistemi laser triangolatori a lame laser o di quelli a luce strutturata porta ad avere una nuvola del primo tipo, in quanto i punti risultano equispaziati sul piano di proiezione, ciò che cambia è l'informazione sulla profondità. L'operazione di triangolazione risulta molto semplice in questo caso, basta collegare i punti della griglia con dei segmenti, ovviamente fissando alcuni criteri di esclusione rappresentati ad esempio da una soglia angolare o da un valore massimo per la distanza euclidea fra due punti adiacenti.

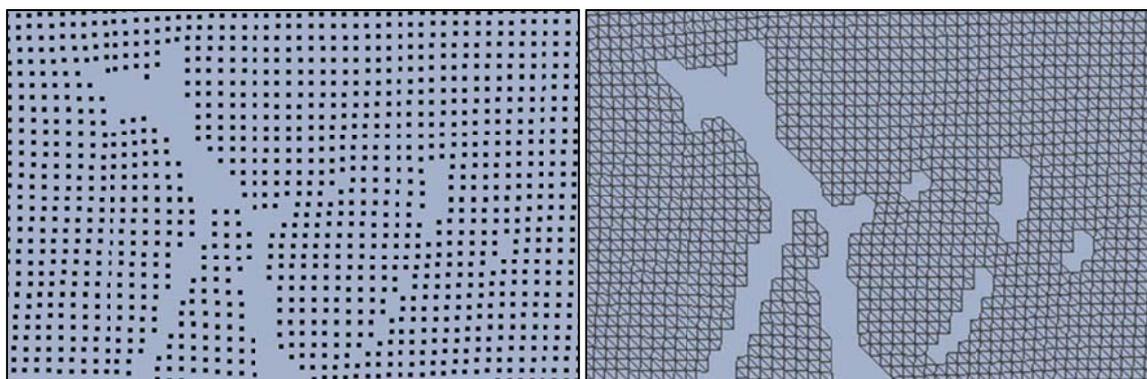


Figura 4.21 Esempio di triangolazione di una nuvola di punti strutturata.

I sistemi a tempo di volo (TOF), invece, dovendo far muovere meccanicamente un punto nello spazio, possono essere soggetti ad inerzie di movimento che per quanto minime possono tradursi in un'irregolarità della griglia di acquisizione. In questo caso il criterio adottato è quello di Delauney, che prevede la creazione di triangoli in modo che all'interno di ciascun cerchio che li circonda non siano presenti altri punti, massimizzando in questo modo l'angolo minimo di ogni triangolo, rendendo quindi il set composto da triangoli i più equilateri possibili.

4.4.3 Allineamento e Fusione

Una delle fasi più delicate dell'intero workflow è rappresentata dall'allineamento relativo fra le mesh. In questa fase possono sorgere errori che porteranno ad avere delle discrepanze geometriche fra il modello reale e la sua copia digitale. Le cause di errore che più comunemente incidono sono rappresentate dalla dimensione dell'area di sovrapposizione fra due mesh adiacenti e la loro caratterizzazione morfologica.

A questo punto del processo il dataset è composto da una serie di superfici poligonali orientate nello spazio. Tali superfici possono essere orientate fra di loro secondo dei parametri noti, situazione che si presenta con l'utilizzo delle basi rotanti dove il movimento relativo fra un'acquisizione e la successiva è noto e controllato, oppure possono essere orientate nello spazio in maniera totalmente casuale, come in Figura 4.22.

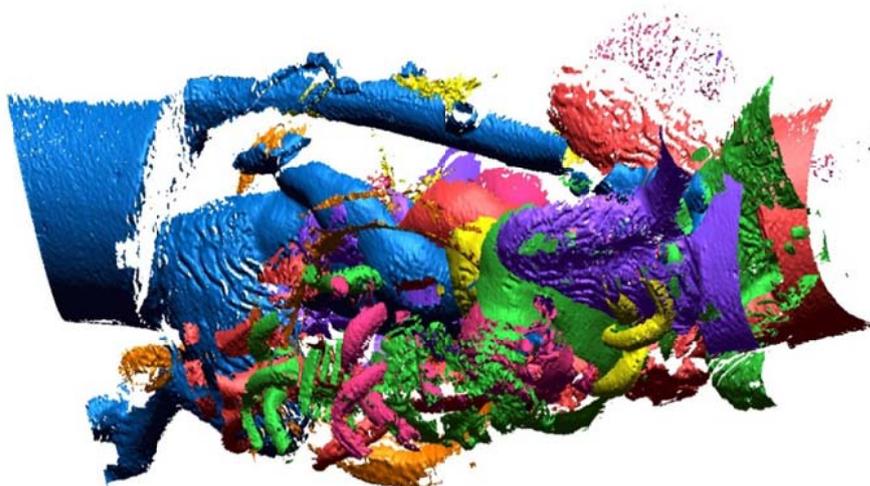


Figura 4.22 Mesh disallineate.

La procedura di allineamento prevede l'individuazione di una mesh di riferimento sulla quale poi portare tutte le altre. Gli step operativi sono generalmente due, la prima fase manuale prevede che l'operatore individui una serie di punti omologhi nelle due mesh, necessari a calcolare i parametri di una rototraslazione rigida richiesta per effettuare l'allineamento della seconda mesh rispetto alla prima. Il secondo step è invece

più automatizzato, consiste nel raffinamento della posizione relativa fra le mesh e prevede l'impiego di algoritmi e procedure atte a minimizzare iterativamente lo scarto quadratico medio fra tutte le mesh. Tali procedure vengono comunemente classificate come ICP (*Iterative Closest Point*) e verranno meglio descritte al paragrafo successivo

Perfezionata la fase di allineamento, si procede alla fusione delle mesh tra di loro in modo da creare un'unica mesh; quest'operazione permette di eliminare le informazioni ridondanti presenti nelle zone di sovrapposizione riducendo ulteriormente il numero di elementi che andranno a definire il modello finale. Non vi è intervento da parte dell'operatore in questa fase se non in un primo momento su alcuni parametri quali la densità finale desiderata o l'entità del filtraggio dei punti ridondanti. Nei software commerciali è possibile fare solo un controllo a processo ultimato per verificare l'eventuale presenza di anomalie morfologiche; in caso affermativo è necessario valutare la modifica di qualcuno dei parametri precedenti e ripetere l'operazione.

4.4.3.1 Procedure ICP

Sono procedure che, sfruttando la ridondanza del dato sulle zone di sovrapposizione, determinano dei parametri di rototraslazione, al fine di trovare la miglior corrispondenza geometrica fra le superfici. Come detto in precedenza coinvolgono una prima fase manuale ed una seconda automatica, nella quale l'algoritmo esegue una serie di passaggi iterativi atti a minimizzare una funzione obiettivo, rappresentata dal minimo scostamento possibile fra le diverse superfici. L'idea generale è che ad ogni iterazione la distanza tra le due scansioni venga ridotta, consentendo quindi una migliore identificazione delle vere coppie corrispondenti, e quindi una maggiore probabilità di un migliore allineamento alla successiva iterazione.

Facendo riferimento a due superfici, P e Q , dove la prima deve essere allineata alla seconda, in letteratura possono essere trovate principalmente due tipologie di algoritmo: Punto-Punto e Punto-Piano (Figura 4.23). Esse differiscono nel modo in cui gli accoppiamenti fra le coppie candidate fra le due superfici sono individuati, nella selezione delle coppie utilizzate nel calcolo della trasformazione rigida, e, infine, nel tipo di procedura di ottimizzazione utilizzata.

Nel corso degli anni sono state presentate numerose ottimizzazioni, mantenendo invariato il concetto di base. La formulazione originale della prima tipologia di algoritmo, detta Punto-Punto, fa riferimento a Besl e McKay (1992) e utilizza il punto più vicino, ovvero con la minor distanza euclidea; quindi, dato un punto $q \in Q$, fissato un raggio σ per la sfera di ricerca, si cerca il punto $p \in P$ che soddisfi tale condizione, e una volta individuato lo si considera come il candidato corrispondente.

$$\min(\text{dist}(p_i, q_i)) \leq \sigma \quad (4.8)$$

Una volta individuate tutte le coppie di punti, si minimizza la funzione e che corrisponde all'errore di allineamento:

$$e = \sum_{i=1}^n \|p_i - (Rq_i + T)\|^2 \quad (4.9)$$

dove n corrisponde al numero di coppie, mentre R e T sono rispettivamente la matrice di rotazione ed il vettore di traslazione. Ad ogni iterazione il raggio della sfera di ricerca viene ridotto, fino a che il valore di minimo fra due iterazioni successive non risulti inferiore ad una certa tolleranza.

La seconda tipologia, invece, presentata da Chen e Medioni (1992), e detta Punto-Piano, prende in considerazione la coppia data dalla distanza tra la posizione di un punto p ed il punto q appartenente alla tangente a Q passante per q' . Analogamente a prima, una volta individuate tutte le coppie, si procede alla minimizzazione di una funzione obiettivo che in questo caso presenta la forma:

$$e = \sum_{i=1}^n \text{dist}(Rp_i + T, q_i)^2 \quad (4.10)$$

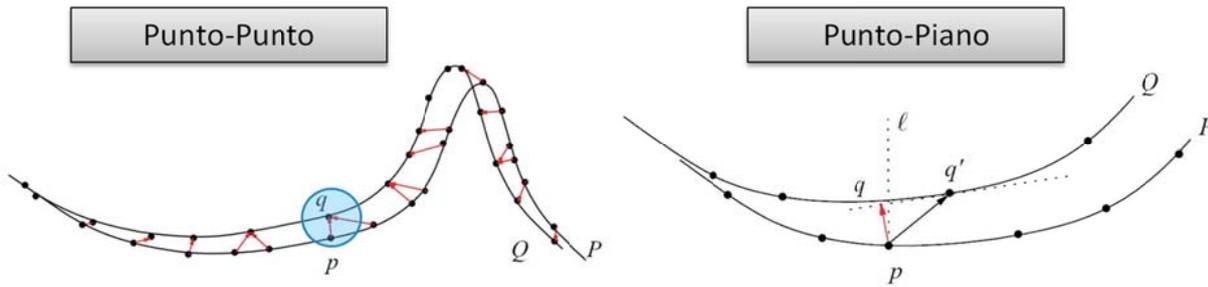


Figura 4.23 Metodi di allineamento Punto–Punto e Punto Piano.

Superfici presentanti particolari caratteristiche geometriche mettono in crisi queste procedure di allineamento; ad esempio, due superfici piane o caratterizzate da una curvatura costante come quelle sferiche o cilindriche, possono scorrere tra loro mantenendo comunque invariata la distanza fra i loro punti. Per questo motivo, nel corso degli anni, sono state implementate diverse soluzioni, che prevedono, ad esempio, l'analisi della texture e quindi anche l'informazione radiometrica, considerando quindi uno spazio a sei dimensioni (Johnson e Kang, 1997).

Ad esempio per i punti p_i e q_i , precedentemente visti, oltre alla tripletta di coordinate x, y, z che li caratterizza, se ne può introdurre un'altra con il contenuto RGB. In questo modo la distanza può essere scritta come:

$$d = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2 + \alpha_1(R_p - R_q)^2 + \alpha_2(G_p - G_q)^2 + \alpha_3(B_p - B_q)^2} \quad (4.11)$$

Dove $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sono dei coefficienti di peso per ridurre l'importanza del contenuto radiometrico rispetto alla componente geometrica.

Il flusso di lavoro di una procedura di allineamento ICP può essere rappresentato secondo lo schema di Figura 4.24.

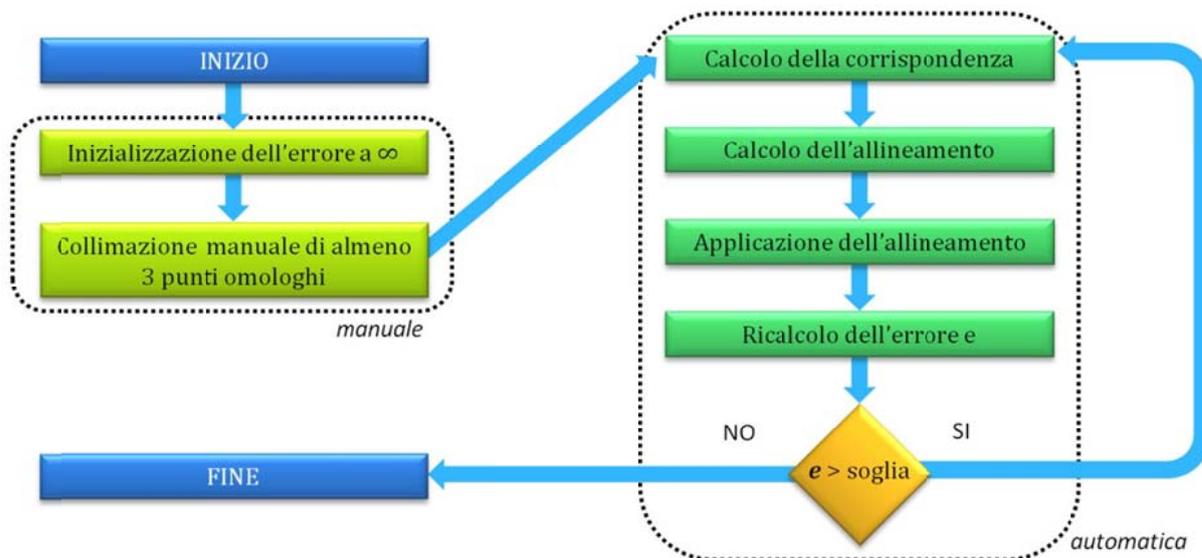


Figura 4.24 Flusso operativo di un algoritmo ICP.

In generale, maggiore è l'irregolarità della superficie, migliore è il funzionamento degli algoritmi, perché è più facile individuare una condizione univoca di allineamento rispetto a casi dove, per via della scarsa caratterizzazione morfologica dell'oggetto, o per la presenza di pattern geometrici regolari, si possono individuare più soluzioni.

Inoltre, superfici che si richiudono sono generalmente più affidabili, perché permettono una sorta di controllo dell'errore, sull'intero anello; invece, per sviluppi prevalentemente bidimensionali ci può essere una propagazione dell'errore non controllabile se non in presenza di un frame di posizionamento esterno all'oggetto, creato ad esempio per via fotogrammetrica.

4.4.4 Editing

Il processo di fusione permette per prima cosa di valutare se la superficie dell'oggetto del rilievo è stata integralmente coperta dal processo di acquisizione o almeno in una percentuale che l'operatore ritiene sufficiente. Per oggetti di forma complessa è pressoché impossibile riuscire a scansionare il 100% della superficie totale, questo può essere dovuto sia a limiti strumentali, se ad esempio la base di presa non è sufficientemente stretta, sia a limiti geometrici, come la presenza di cavità o zone d'ombra. Qualora la percentuale di ricoprimento non sia soddisfacente, è possibile

cortocircuitare la pipeline operativa e ritornare alla fase di acquisizione per integrare il dato con le parti mancanti, e ripetere gli step di filtraggio, allineamento e fusione. Questa fase non è sempre possibile; infatti, specie nel campo dei rilievi in ambito museale, è facile non poter disporre più dell'oggetto, per cui si sottolinea ancora una volta l'importanza della fase progettuale di un rilievo.

L'operazione di fusione comporta l'introduzione di un'ulteriore livello di filtraggio del dato; si devono infatti eliminare gli errori topologici (incongruenze fra le singole mesh), l'eventuale presenza di lacune e la rumorosità della mesh finale. La fase di editing serve quindi a correggere queste imperfezioni preservando per quanto possibile la geometria originale.

4.4.4.1 Gli errori topologici

Questi difetti consistono essenzialmente in 4 condizioni:

- condizioni di *non manifold* mesh: si presenta quando 3 facce condividono uno stesso lato.

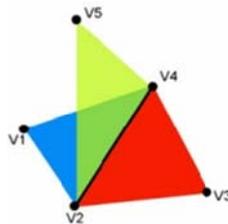


Figura 4.25 Condizione di topologia "non manifold".

- condizione di sovrapposizione delle facce: si verifica quando c'è un'intersezione fra alcune facce.

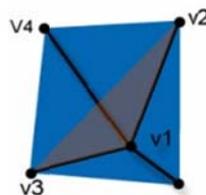


Figura 4.26 Sovrapposizione delle facce.

- condizioni di ridondanza delle facce: in ogni vertice il numero di lati e facce che vi convergono deve essere uguale.

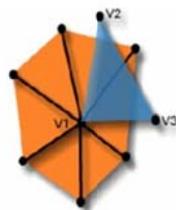


Figura 4.27 Ridondanza delle facce.

- normale della mesh invertita: la normale di un gruppo di facce è invertita rispetto a quelle adiacenti, la condizione di continuità non è quindi mantenuta.

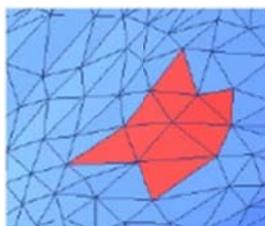


Figura 4.28 Inversione della normale.

4.4.4.2 La correzione delle lacune

Come è stato anticipato in precedenza, a causa di limitazioni strumentali, geometriche o legate alla natura del materiale, è pressoché impossibile per oggetti di forma complessa avere la scansione del 100% della superficie. Le lacune possono interessare aree più o meno estese, e un forte intervento manuale da parte dell'operatore può causare un notevole allungamento dei tempi di generazione del modello 3D. Per zone aventi un'estensione contenuta l'intervento automatico in genere risolve i problemi mantenendo una congruenza geometrica con l'oggetto reale. Se invece queste raggiungono un'estensione significativa, è molto probabile che gli algoritmi di ricostruzione da soli non siano in grado di ripristinare correttamente l'andamento della superficie, per questo motivo l'intervento dell'operatore tramite la creazione di ponti di poligoni è indispensabile per "guidare" il processo di ricostruzione.

È importante mettere in evidenza che queste procedure effettuano la ricostruzione della superficie mancante a partire dalle informazioni di bordo; per questo motivo è

importante che questa zona non sia affetta da errori. È preferibile a volte eliminare i poligoni di bordo affetti da anomalie creando una lacuna leggermente più estesa ma topologicamente più corretta.

4.4.4.3 Rumorosità e operazioni di lisciatura

Una delle operazioni più eseguite in fase di editing della mesh riguarda la lisciatura o *smoothing* della superficie. Essa serve ad eliminare la rugosità intrinseca dovuta alle caratteristiche tecniche della strumentazione impiegata. Come è stato detto in precedenza lo strumento presenta una risoluzione in profondità, e la nuvola di punti che viene acquisita rappresenta la miglior stima possibile della superficie sotto quelle condizioni tecniche. Se la strumentazione presenta un errore di $\pm 100 \mu\text{m}$ in profondità significa che la divergenza su di un piano reale può raggiungere il valore di $200 \mu\text{m}$. Questa differenza, fra punti vicini, produce un effetto rugoso sulla superficie misurata, anche quando questa è perfettamente liscia.

Gli algoritmi che vengono generalmente applicati operano per via iterativa, nei quali è possibile regolare l'intensità di smoothing da applicare. L'operazione di lisciatura, andando a spostare la posizione dei vertici della mesh in modo da ridurre il loro scostamento in "quota", rappresenta una fase molto delicata del processo. Un intervento eccessivamente invasivo in questa fase rischia di cambiare la geometria della mesh, perdendo preziose informazioni.

4.4.5 Ottimizzazione ed Esportazione

L'ultima parte del processo di produzione riguarda l'ottimizzazione del dato fino a questo momento elaborato. L'ottimizzazione può coinvolgere tre aspetti, il numero di vertici che compone la mesh, la loro organizzazione spaziale e la texture.

La decimazione del numero di vertici porta ad una riduzione anche dei poligoni con cui il modello verrà rappresentato. I criteri di applicazione sono generalmente basati su una quota percentuale del dato originario, sull'uniformità di distribuzione oppure definiti in base al raggio di curvatura nelle diverse zone della superficie. L'operazione di decimazione si rende utile soprattutto per applicazioni web, specialmente nell'ambito

delle mostre virtuali, dove un dato troppo pesante per la maggior parte delle connessioni internet presenti sul mercato, produce lentezza nella sua gestione con conseguente disinteresse da parte dei fruitori del servizio. Per applicazioni più legate alla metrica del dato, come le analisi dimensionali, la decimazione potrebbe risultare invece un aspetto negativo. La gestione di questa fase risulta quindi altamente dipendente dallo scopo per cui il modello tridimensionale è stato prodotto.

Il secondo aspetto riguarda invece l'organizzazione spaziale della mesh, che generalmente dopo le operazioni di fusione e di editing si presenta molto disordinata, per cui una redistribuzione dei poligoni permette di avere una superficie più regolare (Figura 4.29).

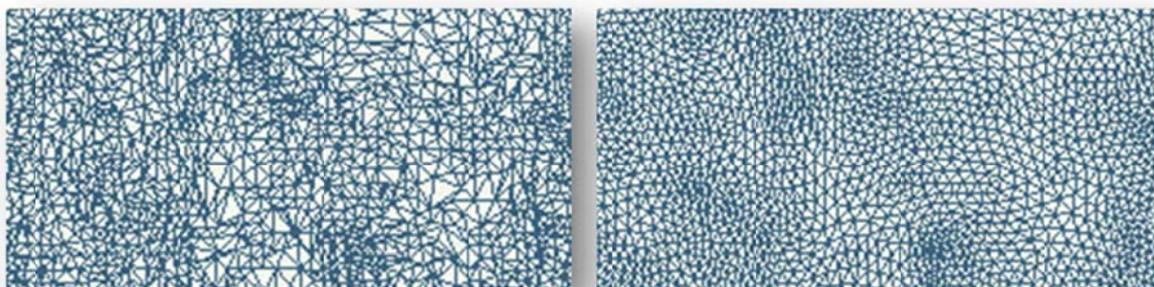


Figura 4.29 Esempio di ottimizzazione della mesh (Prima e Dopo).

Il terzo aspetto coinvolge la texture del modello: può capitare che fra un'acquisizione e le altre del lotto si presentino delle differenze cromatiche per cui, quando è possibile, è opportuno procedere con una calibrazione del colore ed un bilanciamento radiometrico sulle immagini che possono fornire un prodotto maggiormente somigliante all'originale.

L'ultimo step del flusso di lavoro prevede l'esportazione del dato per poter essere utilizzato dai software che dovranno gestire il modello 3D. I formati proprietari delle varie software house sono difficilmente interscambiabili fra di loro, per questo motivo per poter passare da una piattaforma software ad un'altra si ricorre a formati di pubblico dominio. I più comuni e largamente utilizzati sono il formato .OBJ, .STL, .VRML e ASCII:

- Il formato .OBJ è stato sviluppato dalla *Wavefront Technologies*, è un formato di file aperto e universalmente accettato. Il contenuto presenta le

informazioni relative alla posizione di ogni vertice della mesh, la direzione delle normali delle facce e la texture ad essa associata. Le normali e le informazioni sulla texture sono espresse tutte in funzione dei vertici.

- Il formato .STL, acronimo di *Standard Triangulation Language*, è un formato di file che contiene le coordinate X, Y, Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ciascun triangolo, ed un vettore descrivente l'orientazione della normale alla superficie.
- Il formato .VRML, acronimo di *Virtual Reality Modeling Language*, è un formato per applicazioni multimediali interattive su Internet. Questo formato permette di mantenere una serie di informazioni, vertici, spigoli, texture, gestione di livelli, materiali, ecc.
- Il formato ASCII permette di esportare la mesh come se fosse una nuvola di punti, il risultato è quindi un file di testo dove vengono riportate le coordinate X, Y, Z di ogni punto al quale è possibile associare anche del contenuto informativo extra come ad esempio i valori RGB.

5

Casi di studio

I casi che verranno presentati in questo capitolo sono una selezione di quelli trattati nel corso del dottorato e sono stati prescelti per poter mettere in evidenza quelle che sono state le maggiori problematiche riscontrate durante l'attività di ricerca. Si cerca di seguire un percorso logico ispirato al titolo di questa tesi, che appunto è rivolta alle tecniche di rilievo e modellazione tridimensionale per oggetti di piccole dimensioni. Come detto nei capitoli introduttivi, moltissime sono le applicazioni in letteratura che fanno riferimento a oggetti, in ambito close range, che si spingono fino alla media scala, ovvero oggetti con un'estensione dell'ordine del metro circa.

Di seguito si cerca, partendo da oggetti di queste dimensioni, di aumentare la scala di restituzione, e quindi il livello di dettaglio e di precisione fino a supportare il rilievo e la modellazione per oggetti di dimensioni centimetriche.

Di caso in caso è stata presa in considerazione la tecnica (o più d'una) che, per condizioni logistiche o scopo del rilievo, meglio si è prestata a soddisfare tali esigenze. I casi di studio vedranno diminuire le dimensioni dell'oggetto: si parte da un pilastro sottoposto a compressione, e, passando per un bassorilievo, dei campioni di pavimentazione stradale, una statuetta in bronzo, delle cretule e sigilli, per finire con il rilievo di piccoli ciondoli e monete.

5.1 Hardware

La strumentazione impiegata nell'ambito di questa attività di ricerca è da ritenersi, lavoro con una dotazione di risorse medie ed adeguata ai fini del lavoro, lo stato dell'arte al momento della stesura di questa tesi.

5.1.1 Il laser scanner NextEngine HD

Per le successive sperimentazioni faremo riferimento ad un sistema laser scanner del tipo a triangolazione. Il sistema impiegato è quello prodotto dalla NextEngine, si tratta di un sistema basato su quattro piani di scansione paralleli fra di loro, brevettato e chiamato MLT (Multistripe Laser Triangulation Technology).

È molto comune avere a che fare con oggetti caratterizzati da buchi, occlusioni o con una profondità che varia in maniera rilevante da zona a zona; questo potrebbe creare confusione in fase di interpretazione del dato per un sistema a scansione multilinea. La tecnologia MLT presenta una soluzione al problema: lo strumento è, infatti, in grado di verificare il corretto ordine, la direzione e i rapidi cambiamenti della superficie dell'oggetto grazie alla differente spaziatura tra le linee di scansione.

Lo strumento è composto da due unità, la prima consiste nello strumento vero e proprio e la seconda è una piastra rotante automatizzata. Le principali caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 5.1.

Tabella 5.1. Specifiche tecniche del NextEngine 3D laser scanner HD.

Dimensioni	224 x 91 x 277 mm	
	Modalità Macro	Modalità Wide
Campo visivo	13x10 cm	35x25 cm
Distanza di scansione	18 cm	40 cm
Accuratezza	±127 µm	±381 µm
Risoluzione	200 DPI	75 DPI
Densità della texture	400 DPI	150 DPI
Velocità di acquisizione	50000 punti/s	50000 punti/s

Lo strumento è in grado di operare secondo due diverse modalità, Macro e Wide, cui corrispondono due differenti basi di presa, ed è in grado, attivando la funzione HD di aumentare la densità dei punti fino a 4 volte. La scelta dipende sia dalle dimensioni dell'oggetto da scansionare che dalla precisione desiderata in fase di output. La testa di scansione è dotata di 8 emettitori allo stato solido (4 per ogni modalità) di classe 1M da 10mW di potenza cui corrisponde una lunghezza d'onda λ di 650 nm. L'unità è

completata da una coppia di sensori CMOS da 3.0 megapixel in grado di catturare anche l'informazione RGB e da degli illuminatori fluorescenti trifosforo integrati a luce bianca.

La base rotante è controllata dal software ScanStudio HD di gestione del laser, ha una limitazione di portata di 9 kg, permette di ruotare l'oggetto di 360° in maniera stabile secondo intervalli prestabiliti ed in maniera totalmente automatizzata.

Il sistema si collega ad un personal computer tramite un cavo USB 2.0 e necessita di essere alimentato esternamente.



Figura 5.1 Laser scanner NextEngine e base rotante.

5.1.2 Fotocamere digitali e ottiche macro

La strumentazione fotografica impiegata consiste in tre DSLR, e tre diverse ottiche specifiche per la macrofotografia.



Figura 5.2 Strumentazione: a) Canon 5DmkII+100 mm b) Nikon D80+105mm c) Canon 350D+60mm.

- **Canon EOS 5D Mark II:** fotocamera da 21,1 megapixel con sensore CMOS formato full frame (24x36 mm).
- **Nikon D80:** fotocamera da 10,2 megapixel con sensore CCD formato APS-C (23.6x15.8 mm).
- **Canon EOS 350D:** fotocamera da 8 megapixel con sensore CMOS formato APS-C (22.2x14.8 mm).
- **Sigma 105 mm EX DG Macro per Nikon:** ingrandimento fino ad 1:1.
- **Canon 100 mm EF USM Macro:** ingrandimento fino ad 1:1.
- **Canon 60 mm EF-S USM Macro:** ingrandimento fino ad 1:1.

5.2 Pilastro in pietra sottoposto a compressione

Sebbene le dimensioni dell'oggetto non possano essere considerate "piccole", l'applicazione della fotogrammetria in questo caso di studio è volta a determinare le piccole variazioni deformative che l'oggetto subisce in fase di compressione. Le precisioni richieste e che si desidera raggiungere sono dell'ordine del decimo di millimetro, quindi comparabili con quelle degli altri casi di studio. Il test, svolto in collaborazione con i colleghi strutturisti del Dipartimento DICAM, è stato rivolto ad un pilastro in muratura sottoposto a uno studio nell'ambito di una ricerca nel campo dei Beni Culturali relativa alle murature antiche, ma può essere replicato anche su elementi di dimensione minori, riducendo in questo modo la distanza dall'oggetto e aumentando il livello di precisione raggiungibile; ciò rappresenta uno dei futuri sviluppi di questo esperimento, ed in questo senso questo caso di studio viene inserito nella presente tesi.

Sono stati applicati circa 40 target retroriflettenti su un pilastro in muratura, e 13 target codificati al suo esterno, in modo da realizzare un *frame* che fosse invariante rispetto alle configurazioni di carico. Il confronto è stato effettuato sulla base dei valori registrati da dei "trasduttori di spostamento induttivo" (LVDT) applicati in corrispondenza dei 4 spigoli del pilastro ed in grado di registrare i movimenti della pressa con una precisione di 0.1 mm. A causa dei giochi che possono presentarsi in fase di contatto, a carico nullo, fra piastra e sommità del pilastro, si è optato per considerare

la condizione zero, ovvero di riferimento, quella pari a 20 kN. Al raggiungimento di ogni step sono state acquisite 7 foto convergenti secondo lo schema Figura 5.3.

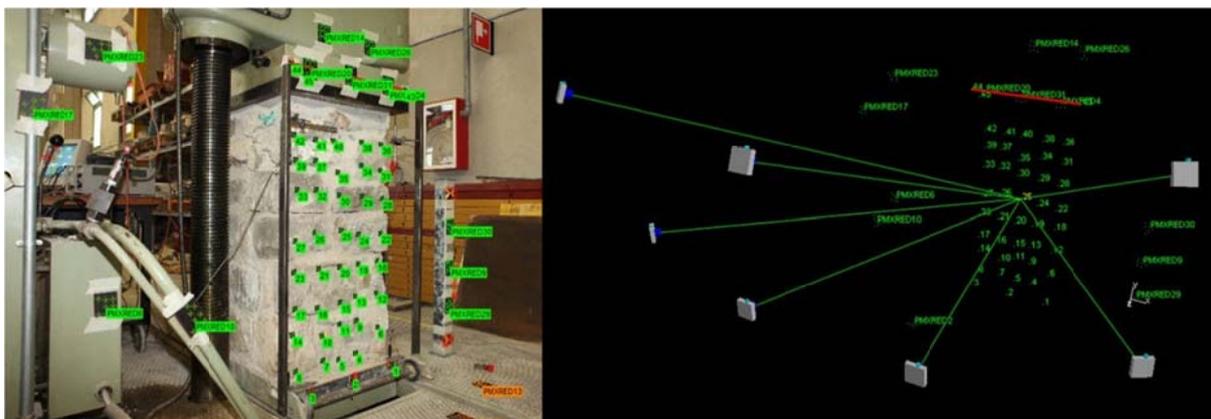


Figura 5.3 Pilastro sottoposto a compressione, disposizione dei target e schema di acquisizione delle foto.

Previa calibrazione dell'obiettivo, sono state determinate le coordinate oggetto dei target in un sistema di riferimento locale, in modo da verificare l'accuratezza e praticità del metodo fotogrammetrico, il quale, rispetto alle misure fornite dagli LVDT, riesce a mappare i vettori di spostamento sulla facciata del pilastro, individuando eventualmente direzioni preferenziali di rottura.

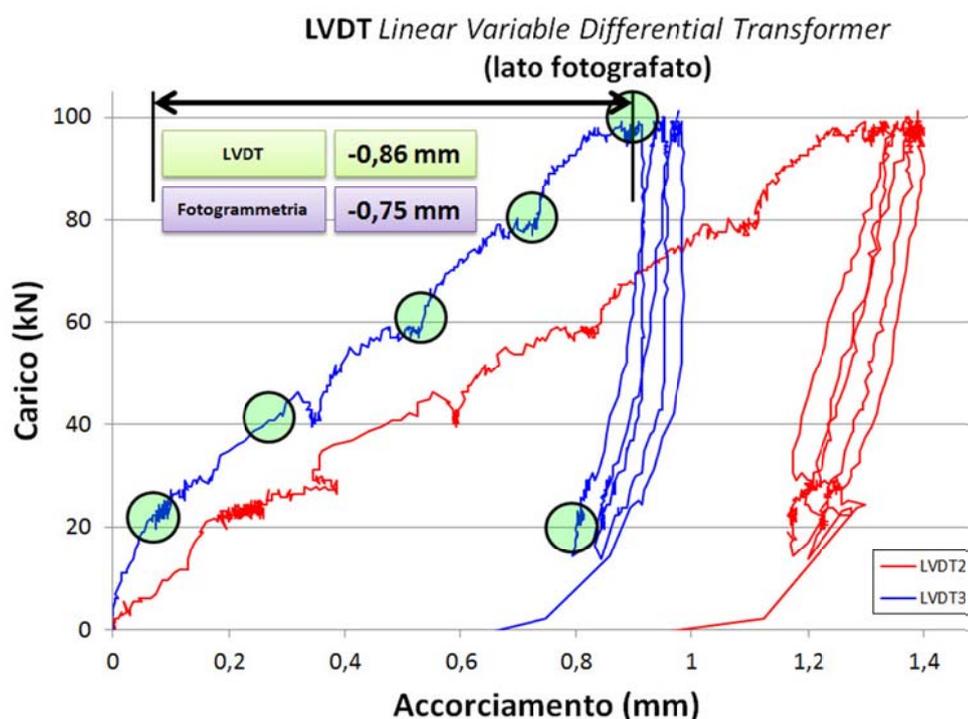


Figura 5.4 Grafico deformativo sotto le condizioni di carico a compressione. Cerchiate in verde sono evidenziate le posizioni delle diverse configurazioni di carico.

Grazie alla definizione del sistema di riferimento esterno al pilastro, è stato possibile tracciare i vettori di spostamento rispetto ad uno stato di riferimento. Nello specifico le condizioni di carico hanno seguito lo schema 0-20-40-60-80-100-20-100-20-100-0 kN in modo da verificare al termine un'eventuale deformazione plastica residua. La Figura 5.4 illustra il diagramma dell'andamento dello sforzo di compressione applicato al pilastro ed i relativi accorciamenti. L'operazione di compressione avviene tramite un martinetto idraulico, e quindi con un movimento continuo. In verde sono state evidenziate le zone di "stop" nelle quali l'operatore ha fermato il martinetto in modo da permettere l'acquisizione dalle 7 stazioni di presa; proprio per la natura manuale dello stop, bisogna tenere in considerazione la possibilità di un diverso posizionamento fra un ciclo di carico ed il successivo.

I risultati, come traspare dal dato riportato in tale figura, evidenziano come, per applicazioni di questo tipo, sia possibile rilevare e registrare valori di deformazioni anche per via fotogrammetrica compatibili con quelle misurate dai trasduttori LVDT.

È inoltre possibile, grazie alla disposizione dei target nello spazio oggetto, determinare una sorta di DSM a opportuni intervalli di tempo per poter ricostruire, in seguito agli incrementi di carico, eventuali comportamenti deformativi e linee di rottura preferenziali. Un esempio è dato in Figura 5.5 dove grazie alla maglia di target disposta sulla superficie del pilastro, è stato possibile determinare un grigliato dove il vettore spostamento assume valori noti, e in seguito interpolare le informazioni fra le celle adiacenti per poter esprimere un andamento deformativo della superficie.

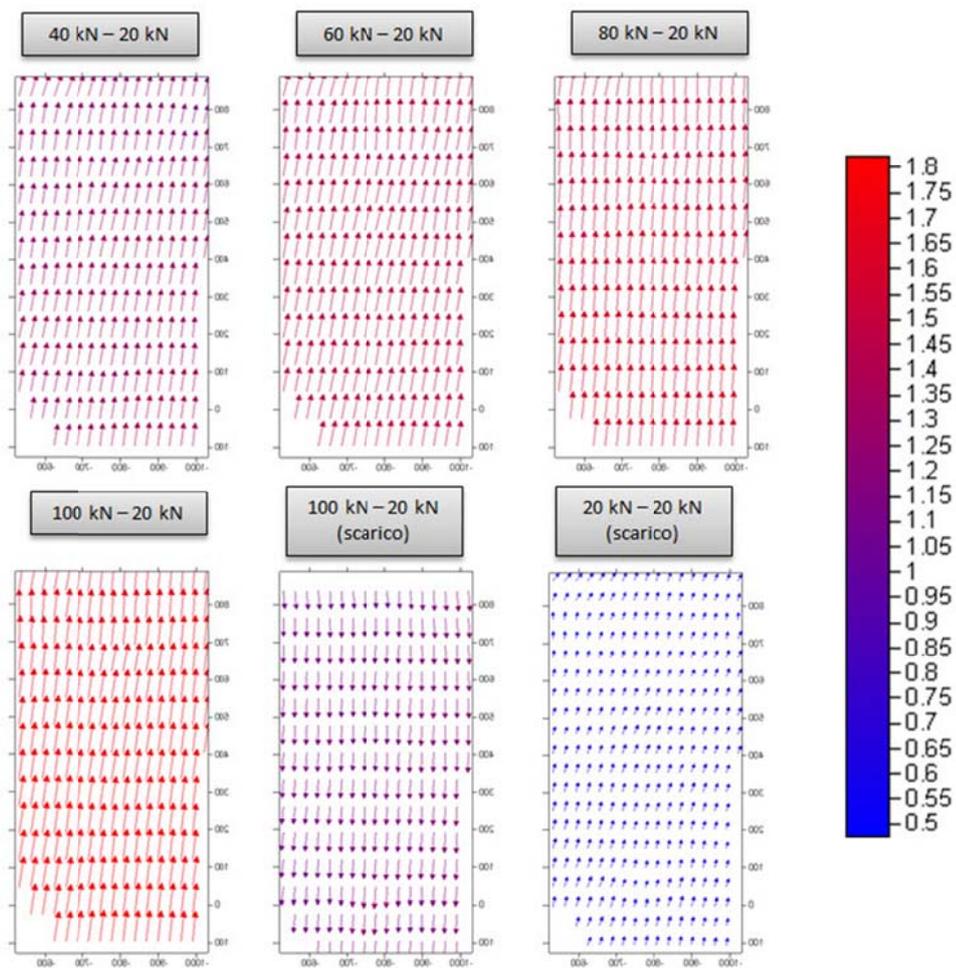


Figura 5.5 Vettori di spostamento sulla parete del pilastro [mm].

Il test si è fermato ad un carico di 100 kN, mentre la rottura del pilastro è ipotizzabile possa avvenire per valori intorno ai 1000 kN, per cui, se è possibile monitorare gli spostamenti per i valori di carico usati nel test, sicuramente è possibile farlo per carichi prossimi ai valori di rottura, dove le deformazioni raggiungono il loro massimo valore.

5.3 Sarcofago di S. Agricola

La presente sperimentazione si riferisce al rilievo tridimensionale di un lato del sarcofago di S. Agricola in Bologna. Alle radici della prima Chiesa bolognese vi è la figura di due martiri, distinti per classe sociale ma uniti dalla morte a causa della fede: Vitale e Agricola, servo e padrone, la cui testimonianza troverà riconoscimento al sorgere del libero Comune con il decreto di liberazione dei servi della gleba. Il culto dei due santi martiri si diffuse in Occidente grazie all'impulso dato da Ambrogio, vescovo di Milano, che, oltre a scrivere di loro, volle traslare a Milano parte delle reliquie e ne donò poi parte a Firenze. Numerosi vescovi si sentirono così spinti a richiederne per le loro cattedrali. Il culto mantenne comunque il suo epicentro a Bologna, dove una basilica fu edificata appositamente per custodire le loro spoglie, in seguito trasferite nell'adiacente cappella.

Poco si sa circa la vita dei due santi. Pare che Agricola fosse un cittadino cristiano di Bologna e Vitale il suo servitore. Questi aveva seguito il padrone anche nella sua religione e fu il primo a coronare la sua vita con il martirio: condotti infatti entrambi nell'arena, Vitale fu torturato in tutto il corpo sino alla morte. Gli aguzzini pensavano che alla vista delle sue sofferenze, Agricola avrebbe perso la sua determinazione nel dichiararsi cristiano, ma invece tutto ciò ebbe l'effetto inverso. Agricola fu infatti fortificato ed incoraggiato dalla morte del suo fedele servo ed affrontò con grande coraggio la crocifissione, testimoniando sino alla fine la sua fede cristiana. I loro corpi, riscoperti nel cimitero ebraico dal vescovo Eustasio, furono traslati da Ambrogio nel 393 alla Santa Gerusalemme stefaniana di Bologna.

5.3.1 Il sarcofago

Il sarcofago, realizzato in pietra, presenta tre lati su quattro ornati da incisioni, è disposto sulla navata destra della Basilica dei SS. Vitale ed Agricola, facente parte del complesso della Basilica di Santo Stefano, noto anche complesso delle "sette chiese".

Il lato maggiore del sarcofago vede stagliarsi, in un serto d'alloro, un angelo benedicente, verso il quale si dirigono un cervo ed un leone. Quattro volatili in posizioni inconsuete chiudono la monumentale composizione ispirata al tema escatologico. La scena è racchiusa da un duplice elaborato fregio vegetale che nella zona inferiore

dell'incorniciatura è sostituito da un'epigrafe ritenuta del XVI secolo: BEATISSIMUM MARTIREM AGRICOLAM HIC REQUIESCIT IN DEI NOMINE.

Sul lato opposto invece è presente, scritta con caratteri molto più antichi, un'epigrafe dedicatoria: BEATISSIM[O] MARTYRI AGRICOLE, inquadrata da due elementi a forma di "stemma". Anche questo lato è ornato da una bella incorniciatura, composta nella parte bassa da un morbido, elegante tralcio a volute comprendenti foglie e volatili. Negli altri due nastri ad ellissi, sono racchiusi fiori, croci ed un vivace campionario di animalletti.

Il lato minore del sarcofago è invece rappresentativo della storia bolognese: nobilitati da una cornice ad ovuli e palmette, vi campeggiano tre personaggi identificati dai loro nomi incisi: sant'Ambrogio, al centro, tra sant'Agricola, che regge la palma del martirio, e santa Tecla, la martire venerata da Ambrogio e dalla chiesa milanese. La scena visualizza circostanze ed eventi noti solo da fonti letterarie e richiama al ritrovamento delle reliquie, agli antichi legami tra le chiese di Bologna e di Milano, ed anche ad una tradizione ambrosiana locale già diffusa prima della metà del XII secolo. Nella parte interna di questo lato, una rozza scritta HOC ERA(n)T OSSA testimonia la presenza del martire prima della traslazione a Milano.

5.3.2 Rilievo laser e modellazione 3D

L'oggetto del rilievo è rappresentato dal lato corto del sarcofago, che, a causa della sua dislocazione, praticamente a ridosso della parte della navata, è difficile da scorgere ed apprezzare in modo pieno e completo.

Le dimensioni di quest'oggetto sono medio-piccole, circa 80x60 cm, e caratterizzate dalla densa presenza di simbolismi sia sulla cornice che nella raffigurazione dei santi.

Per il rilievo si è fatto ricorso al laser a scansione della NextEngine, le cui caratteristiche sono state riportate precedentemente. La modalità di acquisizione adottata è la "Macro", in modo da caratterizzare la superficie con il maggior livello di dettaglio possibile.



Figura 5.6 Fase di acquisizione tramite laser scanner.

Impiegando dei supporti modulari, una barra dotata di carrello scorrevole ed inclinabile, sono state eseguite 4 strisciate ognuna composta da 7 stazioni, più una serie di prese inclinate. I fattori di ricoprimento fra due scansioni successive e fra due strisciate adiacenti sono stati rispettivamente del 40 e 20%.

Come per tutti i lavori che prevedono l'impiego del laser scanner, la fase di elaborazione ha seguito le fasi descritte nel paragrafo 4.4: c'è stata una fase preliminare di allineamento delle mesh, poi una di fusione seguita da un trattamento di editing. Il problema riscontrato, e tipico dei rilievi laser scanner, è rappresentato dalla grande mole di dati e dall'onere computazionale. Il numero di scansioni acquisito (37) per un totale di oltre 20 milioni di poligoni ha necessitato di molte ore di lavoro sia uomo che macchina per poter elaborare il modello 3D.



Figura 5.7 Fasi della scansione: singole mesh, allineamento e fusione.

Il modello finale, cui è possibile applicare la texture (Figura 5.8), ha evidenziato come, per oggetti di questo tipo, scolpiti su materiali come la pietra che può subire nel corso degli anni un degrado della sua superficie, una rappresentazione a colori sintetici riesca a far risaltare ancor più i dettagli di quella naturale.

Un modello tridimensionale ad altissima fedeltà, come quello generato, può, tramite una sua conversione in una replica fisica, risultare un valido strumento di divulgazione culturale.



Figura 5.8 Modello testurizzato del sarcofago di S. Agricola.

5.3.3 Il rilievo fotogrammetrico

Un'applicazione di tipo fotogrammetrico è stata affiancata in parallelo alle operazioni di rilievo laser. Si è voluto testare le capacità dei software close-range monoscopici, che all'epoca del rilievo erano appena stati introdotti nel mercato e permettevano la generazione di nuvole di punti a partire da immagini in "assetto libero". È stato quindi effettuato un test sul particolare dell'angelo racchiuso da due rami d'alloro, presente sul lato lungo del sarcofago.

Sono state acquisite una serie di foto da diverse angolazioni, e coppie pseudo nadirali, le quali, previa calibrazione dell'obiettivo (un 24mm focato a 70cm) sono state orientate nello spazio e scalate sulla base di target rimovibili applicati sul sarcofago. La camera impiegata è una Canon 350D con un sensore CMOS da 8 Megapixel. In una seconda fase è stata generata una nuvola di punti tramite il software PhotoModeler Scanner sfruttando le coppie precedentemente menzionate. Il risultato è stato poi confrontato con il modello prodotto dal laser settato in modalità "Wide".

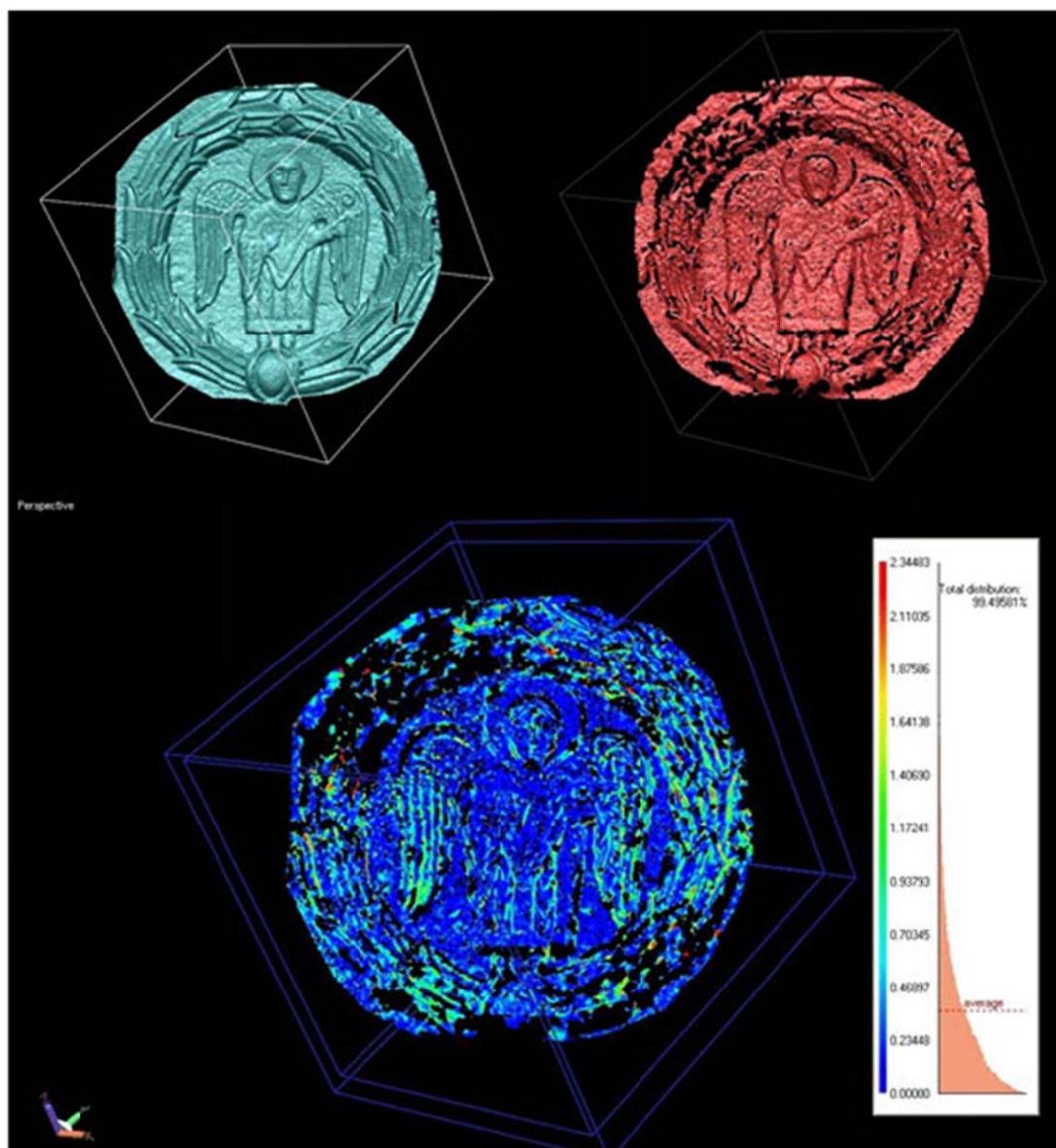


Figura 5.9 Confronto fra il DSM fotogrammetrico (in rosso) e quello laser (in verde).

Come è visibile dalla Figura 5.9, il DSM prodotto per via fotogrammetrica presenta un'elevata presenza di dato mancante in cui l'algoritmo di image matching non è riuscito

a determinare la posizione del punto ed inoltre sebbene la maggior parte dello scostamento fra le due superfici risulti essere contenuto entro il valore σ caratteristico del laser (pari a 0.127 mm), si può osservare come nei dettagli vi sia un effetto di smoothing, tipico dei DSM fotogrammetrici.

5.4 Analisi di tessitura su campioni di manto stradale

In questa sperimentazione, appartenente alla sfera dell'ingegneria civile e svolta in collaborazione con i colleghi dell'Area Strade del Dipartimento DICAM, la generazione del modello 3D assume una connotazione accessoria rispetto alle finalità del rilievo: infatti il modello non rappresenta il punto di arrivo, che si compie con un'eventuale ispezione virtuale o una replicazione fisica, bensì è da supporto al tecnico per un'analisi di tipo statistica e geometrica sul materiale.

E' noto come le caratteristiche della pavimentazione stradale, soprattutto per ciò che concerne lo strato superficiale, rivestano peculiare rilevanza in relazione al soddisfacimento di richieste primarie ed assolutamente generali quali la sicurezza della locomozione e l'ecocompatibilità del moto. Le caratteristiche prestazionali vengono oggi valutate e classificate tramite l'adozione di alcuni parametri che riguardano varie componenti del manto stradale, una delle quali è la tessitura superficiale. La tessitura di una pavimentazione stradale, definibile come la deviazione della superficie reale della pavimentazione da un ideale piano di riferimento, riveste particolare importanza per l'influenza che ha su svariate componenti della circolazione quali le performance del veicolo, la sicurezza della circolazione, il comfort di marcia, la resistenza al rotolamento, l'attrito pneumatico-pavimentazione, il rumore interno all'abitacolo, il rumore ambientale, ecc.

Alla tessitura di un pavimento sono legate le principali caratteristiche prestazionali del manto di usura, connesse al contatto pneumatico-superficie stradale. Fattori quali l'aderenza, la regolarità, il drenaggio, il rumore di rotolamento e le vibrazioni da traffico sono strettamente correlati con la rugosità del manto utilizzato. In particolare l'aderenza è dipendente dalla micro e macrotessitura: la prima è strettamente legata alla natura mineralogica dell'aggregato, mentre la seconda, oggetto di interesse in questa sperimentazione, è dovuta all'insieme delle asperità intergranulari, e dipende essenzialmente dalla composizione della miscela (curva granulometrica) e dalle modalità di messa in opera.

La dimensione della lunghezza d'onda della macrotessitura, che ha un range di variabilità compreso fra 0.5 e 50 mm, e ampiezze peak-to-peak fra 0.2 mm e 10 mm, fanno di un laser a triangolazione un ideale strumento per l'indagine di questo tipo di

materiali, consentendo un notevole passo in avanti rispetto alle strumentazioni tradizionali generalmente costituite da profilometri. Le finalità di questa sperimentazione, oltre a valutazioni di carattere metodologico-applicativo, per cercare di capire se è un metodo applicabile con profitto anche in situazioni lavorative operative reali, è quella di determinare la possibilità di estendere ad un carattere di tridimensionalità indici che fino ad oggi sono stati valutati con rilievi bidimensionali, aumentando in questo modo la loro rappresentatività.

5.4.1 Rilievo tramite laser a scansione

Sono stati scelti tre campioni del diametro di circa 15 cm e carotati da pavimentazioni di caratteristiche diverse, assimilabili ad uno strato d'usura, ad uno strato con le proprietà del tipo drenante e uno SMA.

Tali tipologie sono state scelte in modo da verificare la validità della misura su conglomerati bituminosi tra loro diversi in termini di percentuale dei vuoti, con l'usura tradizionale più chiuso ed il drenante più poroso (Figura 5.10).

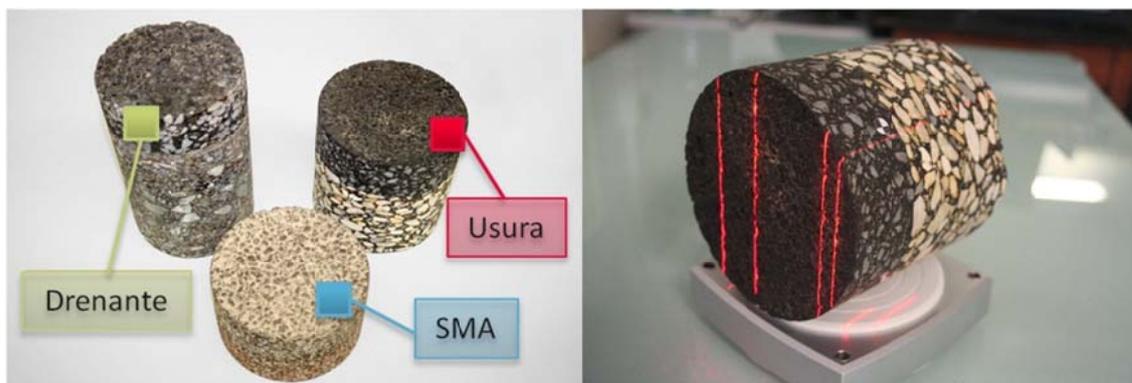


Figura 5.10 Provini sottoposti a scansione laser.

Una volta raccolti in letteratura e in normativa gli indici attualmente utilizzati in ambito stradale è stato eseguito un rilievo tramite il laser scanner NextEngine, prodotta una copia digitale della superficie dei campioni ed in seguito analizzata.

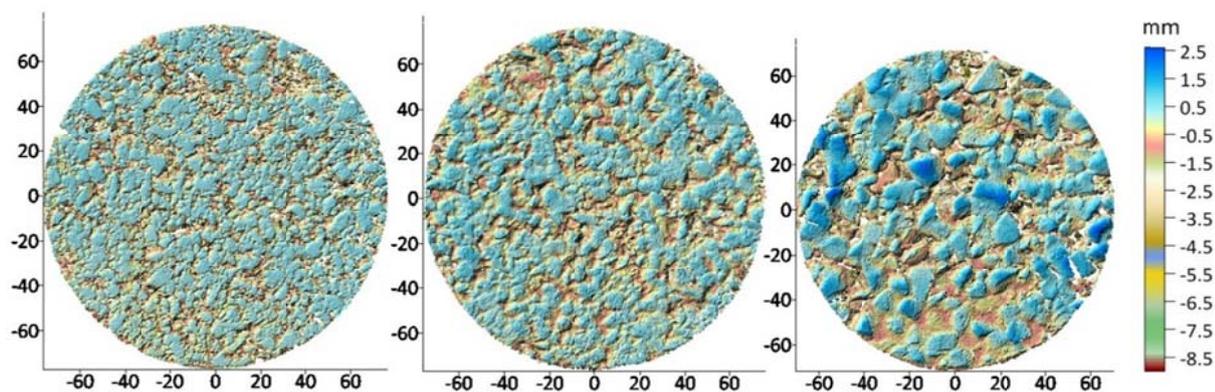


Figura 5.11 DSM dei provini analizzati. Da sinistra a destra: Usura, SMA e Drenante.

I tre campioni sono stati sottoposti a scansione secondo entrambe le modalità permesse dallo strumento: “Macro” e “Wide”, per cercare di capire quale fosse la risposta dello strumento in termini di velocità di esecuzione, elaborazione del dato. Date le dimensioni dei campioni, in modalità “Macro” è stato necessario effettuare più scansioni, che in seguito sono state allineate e fuse fra loro. La modalità “Wide” ha invece permesso di rilevare l’intera superficie con una sola acquisizione.

Il confronto fra le superfici acquisite con entrambe le modalità evidenziano sicuramente una maggior dettaglio in quelle riprese in modalità “Macro” ma gli scostamenti, contenuti in un range di 0.1–0.2 mm, mostrano come, se da un punto di vista sperimentale la caratterizzazione della superficie in laboratorio è maggiormente accurata, anche una in modalità “Wide” di tipo speditivo e più adattabile alle esigenze e tempistiche dei lavori in sito, possa fornire risultati attendibili.

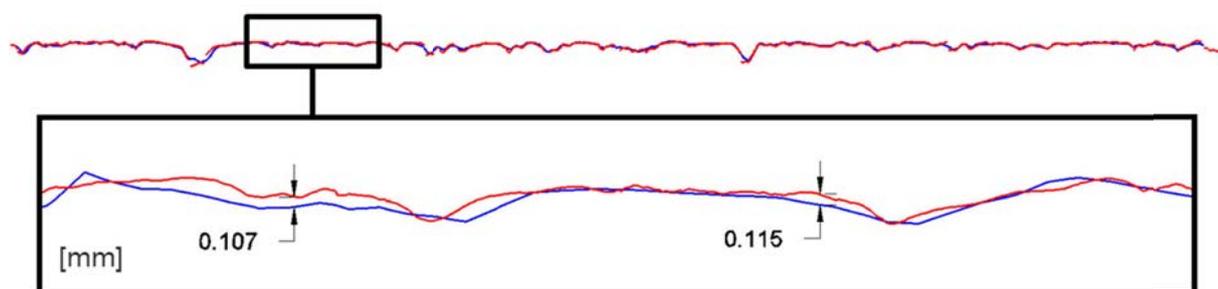


Figura 5.12 Confronto fra le due modalità di acquisizione: Wide (blu) e Macro (rosso).

Gli indici prestazionali presenti in Tabella 5.2 derivano da una ricerca in letteratura ed in normativa, e sono stati individuati come quelli che maggiormente potessero

caratterizzare la tessitura di una pavimentazione stradale. Sono divisibili in tre macro categorie: geometrici, prestazionali (da prove meccaniche) ed infine statistici.

Tabella 5.2 Indicatori di tessitura.

Indicatore	udm	Descrizione	Classe
MPD	[L]	Profondità media del profilo	Geometrici
R_a	[L]	Rugosità media	
R_u	[L]	Profondità livellamento	
R_m	[L]	Massima distanza linea media concavità	
R_t	[L]	Distanza massima sommità incavo	
HS	[L]	Altezza in sabbia	Prestazionali
BPN		Grip Number	
MTD	[L]	Mean Texture Depth	
VAR	[L ²]	Varianza	Statistici
R_{ms}	[L]	Scarto quadratico medio	
R_{sk}		Asimmetria (skewness)	
R_{ku}		Curtosi (kurtosis)	

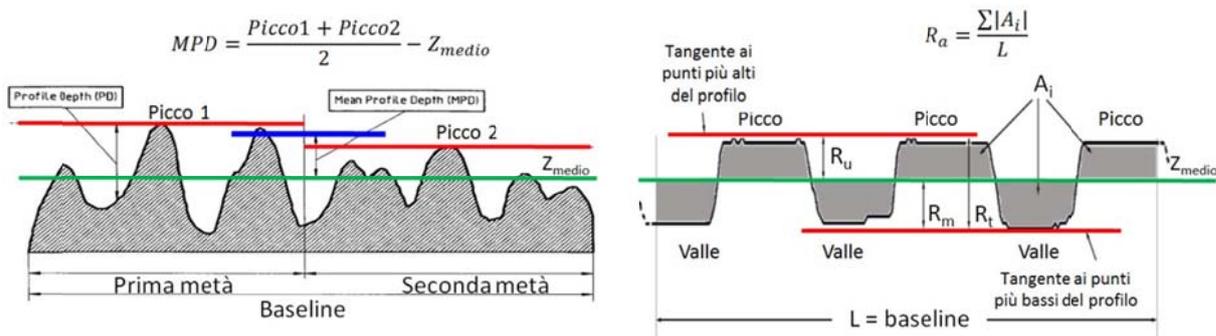


Figura 5.13 Parametri di caratterizzazione della tessitura.

Ogni tipologia di pavimentazione stradale è caratterizzata da un range di valori per ognuno dei parametri riportati in tabella, tali valori sono frutto generalmente di prove eseguite su profili, per cui, simulando il comportamento di un profilometro sono stati calcolati i valori per gli indici classici e comparati a quelli eseguiti su una superficie tridimensionale (ad es. $R_a = Area/Lunghezza$ e $R_{a'} = Volume/Area$). I dati di Tabella 5.3 evidenziano come indifferentemente dalla modalità di rilievo usata, “Macro” o “Wild” i parametri determinati trovino un riscontro nei range di variabilità per la categoria.

Tabella 5.3 Indicatori geometrici per i campioni analizzati (M=Macro, W=Wide).

Indicatore [mm]	Drenante		SMA		Usura		Range di variabilità	
	M	W	M	W	M	W	Drenante	Usura
MPD	1.54	-	0.97	-	0.65	-	1.5÷4.0	0.3÷2.0
Ra	0.79	-	0.51	-	0.41	-	1.0÷2.0	0.2÷0.5
Rt	11.22	10.94	6.26	5.94	6.13	6.03	6.0÷12	1.5÷3.0
Ra'	0.80	0.79	0.50	0.49	0.46	0.45		
Ru	2.58	2.48	1.44	1.33	1.02	0.99	2.0÷4.0	0.3÷2.0
Rm	8.63	8.46	-4.86	-4.61	-5.11	-5.04	5.0÷7.0	1.0÷1.8

Per quanto riguarda invece gli indicatori di tipo statistico, riportati in Tabella 5.4 e in Figura 5.14 non fanno altro che confermare le caratteristiche fisiche delle diverse tipologie di pavimentazione stradale:

- la simmetria all'interno del campione tra picchi e valli intorno alla propria media, e misurata dal parametro di asimmetria (skew) evidenzia come vi sia una prevalenza di "valli" dato il valore negativo che assume tale parametro.
- il parametro di curtosi, che costituisce una misura dello "spessore" delle code di una funzione di densità, è indice di quanto sia l'appiattimento della curva rispetto alla distribuzione normale. Un valore positivo, come quello riscontrati nei tre campioni, comporta curve leptocurtiche aventi quindi forma più appuntita rispetto alla normale. Analizzando i valori ottenuti si osserva che l'altezza delle asperità per il drenante e per l'usura, anche se dissimile come range di valori, è uniforme all'interno del campione stesso, mentre lo SMA ha una distribuzione più varia che porta al valore di curtosi inferiore.
- la deviazione standard è un indicatore di dispersione delle altezze rispetto al piano medio (valore atteso), quindi un valore più elevato rappresenta una maggior varietà della pezzatura, come nel caso del conglomerato drenante.

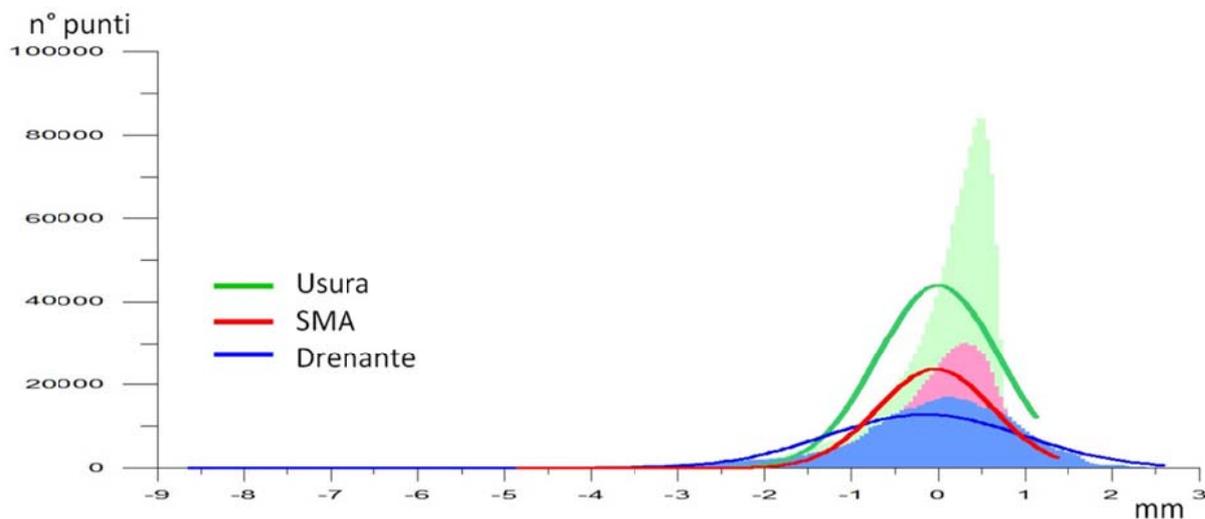


Figura 5.14 Curve di distribuzione dei tre campioni utilizzati.

Tabella 5.4 Indicatori statistici, risultati.

Parametri	Usura	SMA	Drenante
Numero di valori	1550523	785611	726897
Min [mm]	-4.96	-4.84	-8.63
Max [mm]	1.15	1.40	2.58
Varianza (VAR) [mm ²]	0.49	0.44	1.28
Deviazione standard (R_{ms}) [mm]	0.70	0.66	1.13
Asimmetria (R_{sk})	-2.01	-1.20	-1.44
Curtosi (R_{ku})	5.31	2.07	4.18

L'affidabilità del metodo è stata confermata da esperienze effettuate in sito dove per una sezione stradale, come visibile in Figura 5.15. Lungo la "variante Asolana" nel comune di Colorno (PR) sono state individuate, prima dell'apertura al traffico, 6 stazioni disposte su 3 sezioni intervallate di 2 m.



Figura 5.15 Sperimentazione in sito su 3 sezioni stradali.

Per ognuna delle stazioni sono stati determinati gli indicatori sia geometrici che statistici, riportati in Tabella 5.5 e in Tabella 5.6, che mettono in evidenza come ci sia una omogeneità all'interno del campione soprattutto se vengono considerati valori mediati su più aree, sicuramente più rappresentative di singoli profili. L'omogeneità di comportamento è meglio visibile in Figura 5.16 dove sono state sovrapposte le distribuzioni corrispondenti alle sei stazioni di acquisizione, risultando praticamente sovrapposte fra di loro.

Tabella 5.5 Parametro di rugosità per le stazioni effettuate in sito.

MACRO		Ra	Ra'	WIDE		Ra	Ra'
Sezione 1	A	0.315	0.314	Sezione 1	A	0.267	0.290
	B	0.316	0.311		B	0.299	0.324
Sezione 2	A	0.322	0.320	Sezione 2	A	0.329	0.305
	B	0.261	0.293		B	0.316	0.300
Sezione 3	A	0.328	0.329	Sezione 3	A	0.314	0.336
	B	0.266	0.322		B	0.328	0.313
Media		0.301	0.315	Media		0.309	0.311

Tabella 5.6 Indicatori statistici per la prova in sito.

MACRO	Sezione 1A	Sezione 1B	Sezione 2A	Sezione 2B	Sezione 3A	Sezione 3B
Numero di valori	2568867	2568867	2552485	2523141	2568867	2597950
Rm[mm]	-4.88	-4.00	-4.30	-5.97	-4.58	-4.01
Ru[mm]	1.24	1.27	1.25	1.38	1.84	1.41
MPD	0.61	0.68	0.66	0.53	0.74	0.68
Varianza[mm ²]	0.18	0.17	0.18	0.16	0.19	0.18
Scarto q. medio[mm]	0.42	0.42	0.42	0.40	0.44	0.43
Asimmetria(Rsk)	-2.35	-2.06	-2.09	-2.48	-2.17	-2.18
Curtosi(Rku)	8.77	6.47	6.40	10.35	7.16	6.74

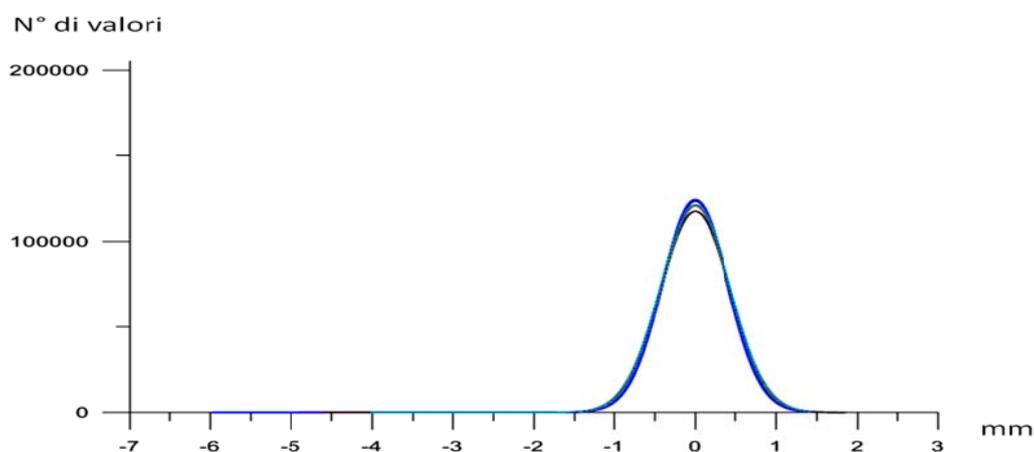


Figura 5.16 Distribuzione per le 6 stazioni effettuate in sito.

Una forte potenzialità del dato tridimensionale, è il prestarsi a simulazioni di varia natura. Nel caso di applicazioni stradali, sicuramente la più interessante riguarda la simulazione di un evento piovoso e l'analisi dei coefficienti di sicurezza, soprattutto per quanto riguarda l'aderenza pneumatico-pavimentazione, strettamente legata al quantitativo di pavimentazione non sommersa dall'acqua(Figura 5.17).

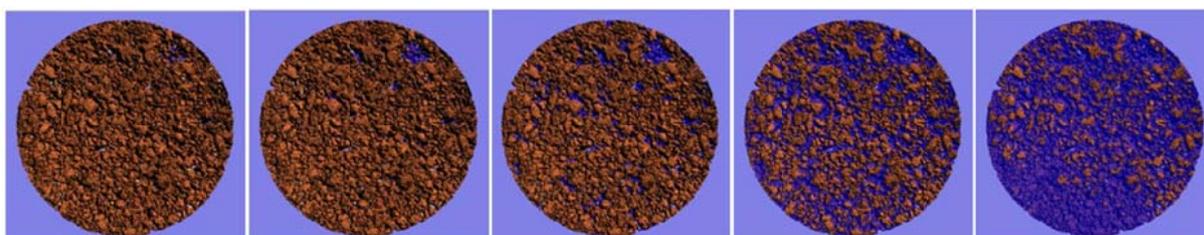


Figura 5.17 Piani secanti di allagamento ai livelli -3.6116 mm, -2.6116 mm, -1.1116 mm, 0 mm, 0.3884 mm rispetto al piano medio.

5.4.2 Problematiche riscontrate

Le problematiche prevalentemente riscontrate in fase di scansione del conglomerato bituminoso, fanno riferimento all'elevatissima presenza di microgole, che, data la loro forma, molto stretta in rapporto alla profondità, causa sulla mesh un elevato quantitativo di dato mancante. Sicuramente questo è un aspetto negativo della scansione effettuata con un laser a triangolazione, ma il fatto di riferirsi ad un'area e non più ad una sezione, dove sicuramente una lacuna risulterebbe sensibilmente inficiante, fa in modo che l'estensione del dato vada a mitigare la presenza di queste situazioni. Il problema, per poter essere risolto, richiederebbe uno strumento con una base di presa inferiore a quelle utilizzate, in modo da aumentare la capacità di penetrazione in geometrie molto strette e profonde; ciò potrebbe d'altra parte comportare problemi pratici in un contesto operativo che richieda tempi ridotti nell'esecuzione dei rilievi. Un altro problema, per applicazioni di questo genere, riguarda la difficoltà di allineamento delle mesh se non impiegando anche le informazioni della texture: l'elevata irregolarità e presenza di buchi nella mesh rende difficile l'interpretazione e la ricerca di punti omologhi solo sulla base della geometria, per cui l'ausilio delle informazioni RGB per quanto poche (il materiale ha un colore grigio-nero abbastanza omogeneo) è fondamentale nella fase di allineamento. Le problematiche ambientali, dovute alla forte luminosità esterna, descritte nel paragrafo 3.6.1.3, sono risultate un fattore limitante notevole per applicazioni in sito. In Figura 5.18 si nota come la forte illuminazione ambientale abbia provocato una forte perdita di dato ed un'errata acquisizione delle informazioni RGB; per questo motivo si è reso necessario creare un involucro che contenesse l'intera strumentazione in fase di acquisizione, per creare il buio e quindi la condizione di funzionamento ottimale.

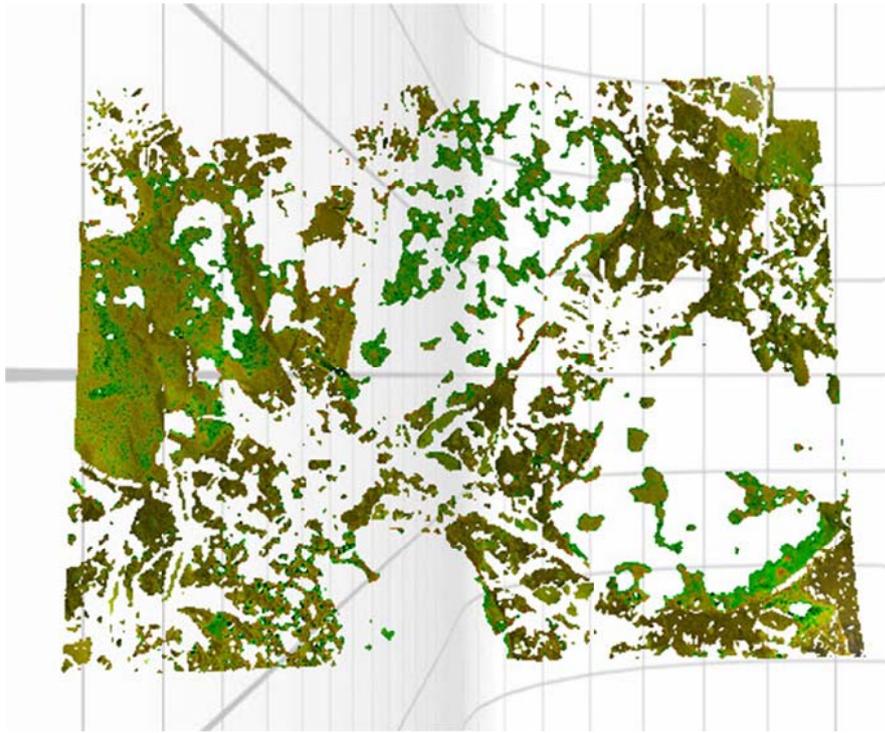


Figura 5.18 Risultato in presenza di una forte illuminazione.

5.5 Bronzetto “Marsia legato all’albero”

Andrea Briosio, detto Riccio verosimilmente a causa dei riccioli della sua capigliatura, è considerato uno dei più prolifici scultori del Rinascimento. Il Riccio nacque a Trento nel 1479, figlio dell'orefice milanese Ambrogio, attestato a Trento con prestigiose cariche; si formò in questa città ma già da giovane si trasferì a Padova dove operò per ben 30 anni e dove sarebbe rimasto fino alla morte, avvenuta nel 1532.

Il Riccio rappresenta, per gli storici dell'arte, uno degli scultori rinascimentali più affascinanti e non c'è manuale di storia dell'arte che non lo citi o ne pubblichi una sua scultura bronzea. Dalle sue mani uscirono centinaia di statue stupende, ispirate a soggetti classici (putti, divinità, centauri), che si trovano oggi nei più importanti musei del mondo.

Di seguito viene presentata l'opera di rilievo e ricostruzione di un modello tridimensionale di una delle sue opere, il “Marsia legato all'albero”, un bronzetto conservato al Museo Civico Medievale di Bologna; la sperimentazione è stata svolta in collaborazione con il Museo. Si è adottata la scansione laser con lo stesso strumento già presentato in precedenza; in questo caso, la statuetta di circa 10 cm di altezza, in virtù del materiale metallico, nello specifico bronzo e la geometria di particolare complessità dell'oggetto, sia per la presenza di decori, che per porzioni interessate da occlusioni prospettiche, hanno complicato notevolmente le operazioni di rilievo.

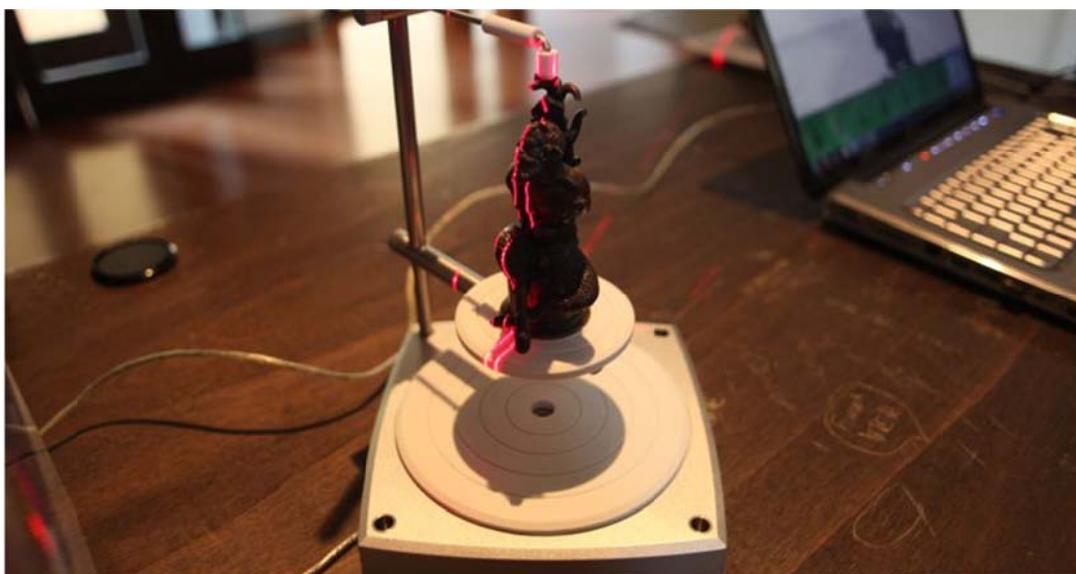


Figura 5.19 Scansione del "Marsia"

5.5.1 Rilievo e modellazione 3D

Data la geometria dell'oggetto a tutto tondo, la fase di scansione ha previsto l'impiego della base rotante, in modo da effettuare acquisizioni in posizioni controllate ed equispaziate. Sono state eseguite 12 rotazioni, una ogni 30°, cui sono state affiancate altre 16 scansioni eseguite da diverse angolazioni in modo da coprire il più possibile la superficie ed evitare occlusioni in una geometria complessa come quella del caso in questione.

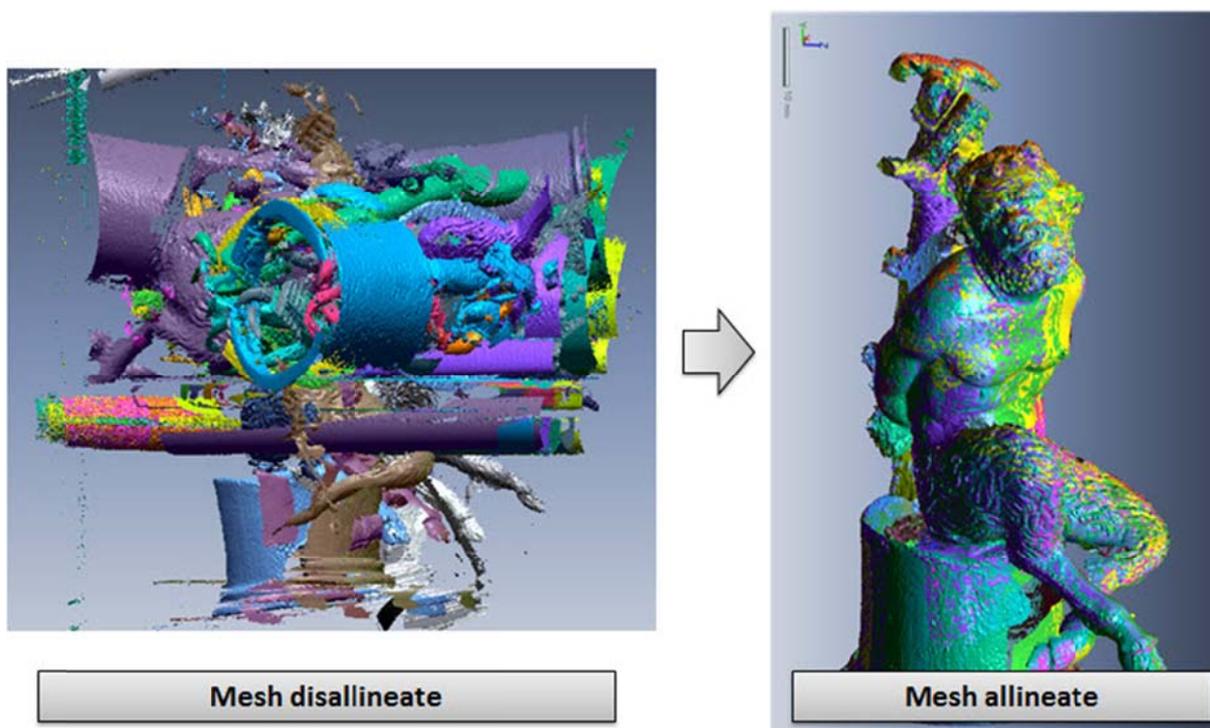


Figura 5.20 Allineamento delle mesh.

L'elevatissimo numero di punti acquisito, con una media di 300.000 per scansione per un totale di circa 8.5 milioni, ha causato una ridondanza nelle zone di sovrapposizione talmente elevata che alcuni errori di acquisizione rischiavano di inficiare il risultato finale. La geometria a tutto tondo e la natura del materiale metallico, nello specifico bronzo, dotato di elevata riflettività, ha provocato degli artefatti, con sfalsamenti in "quota" della geometria della superficie. Per ovvie ragioni dovute all'importanza storica del manufatto, non è stato possibile applicare uno strato di materiale opacizzante, per cui l'effetto di scattering, con un conseguente aumento della rumorosità della misura, si è verificato soprattutto nella zona in cui la normale alla superficie si presentava ortogonale, o prossima a tale condizione, allo strumento.

Per questo motivo, si sottolinea l'importanza di un'accurata selezione preventiva del dato da parte dell'operatore; questa, se da un lato allunga i tempi di preprocessing, dall'altro permette la creazione di un modello "grezzo" maggiormente corretto su cui eseguire una fase di editing più contenuta, come nel caso esaminato.

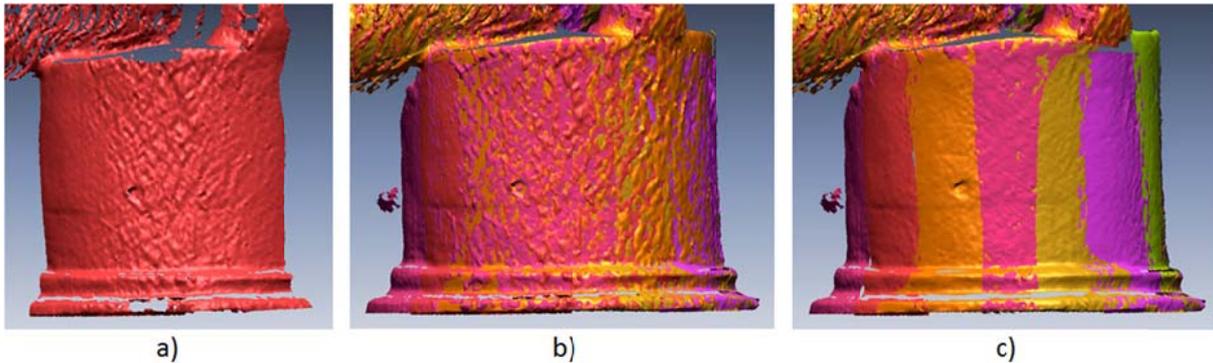


Figura 5.21 In a) sono evidenziati gli artefatti dovuti alla natura del materiale, in b) gli effetti nelle zone di ridondanza e in c) come una selezione del dato produce una base di partenza più accurata.

Oggetti molto complessi, dotati di molti aggetti o forme che si richiudono su sé stesse, rendono molto difficoltosa la fase di acquisizione. A volte non è possibile coprire l'intera superficie dell'oggetto, per cui, la successiva fase di editing assume un ruolo più importante all'interno del processo di creazione del modello. Le lacune generalmente sono di piccola entità, spesso numerose ma poco estese; in casi come quello analizzato, invece, si possono presentare lacune molto estese e non risolvibili con i soli strumenti di ricostruzione automatica della mesh. Per questo motivo, in questa fase, l'intervento dell'operatore non si limita all'individuazione della lacuna e all'uso dei tools per la loro chiusura, ma deve guidare il processo tramite la creazione di ponti che creino una sorta di telaio su cui basare l'operazione di ricostruzione.

Nel caso di studio è possibile notare un esempio di quanto appena detto: la parte interna delle gambe e l'interno del basamento hanno presentato forti lacune che hanno necessitato la loro ricostruzione. È possibile osservare in Figura 5.22 come la ricostruzione automatica porti ad un'assurdità fisica: la parete interna deborda infatti rispetto a quella esterna, compenetrandola. L'intervento manuale che ha partizionato la superficie da ricreare ha prodotto un risultato più verosimile. La stessa cosa si può osservare anche nello zoccolo del fauno.

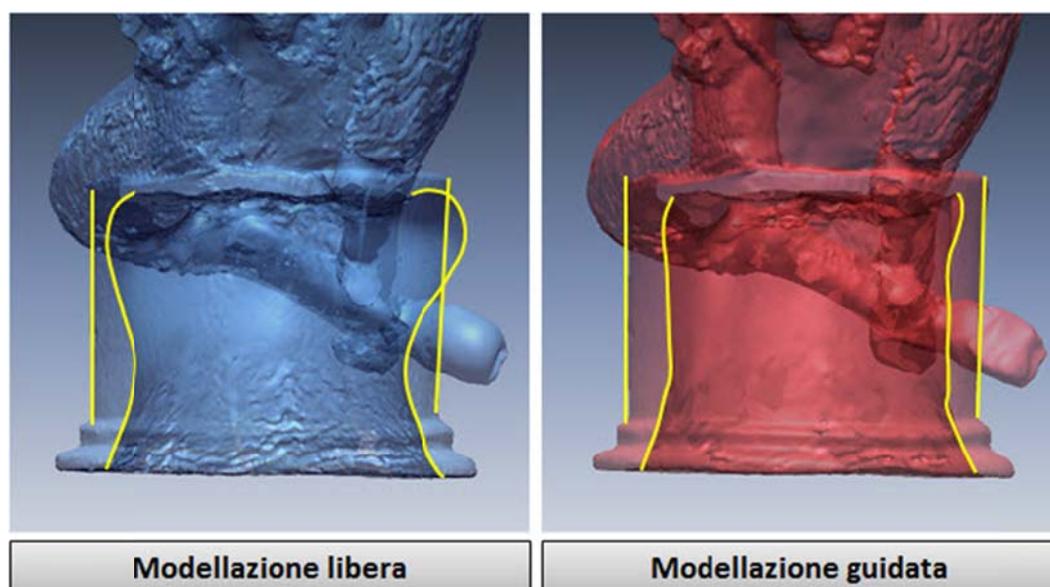


Figura 5.22 Editing automatico vs editing guidato dall'operatore.

Il confronto numerico fra il modello editato senza e con l'intervento dell'operatore, evidenzia come ci possano essere scostamenti significativi dell'ordine di alcuni millimetri, che sottolineano come una corretta e ragionata procedura di editing sia fondamentale per una efficace modellazione tridimensionale (Figura 5.23).

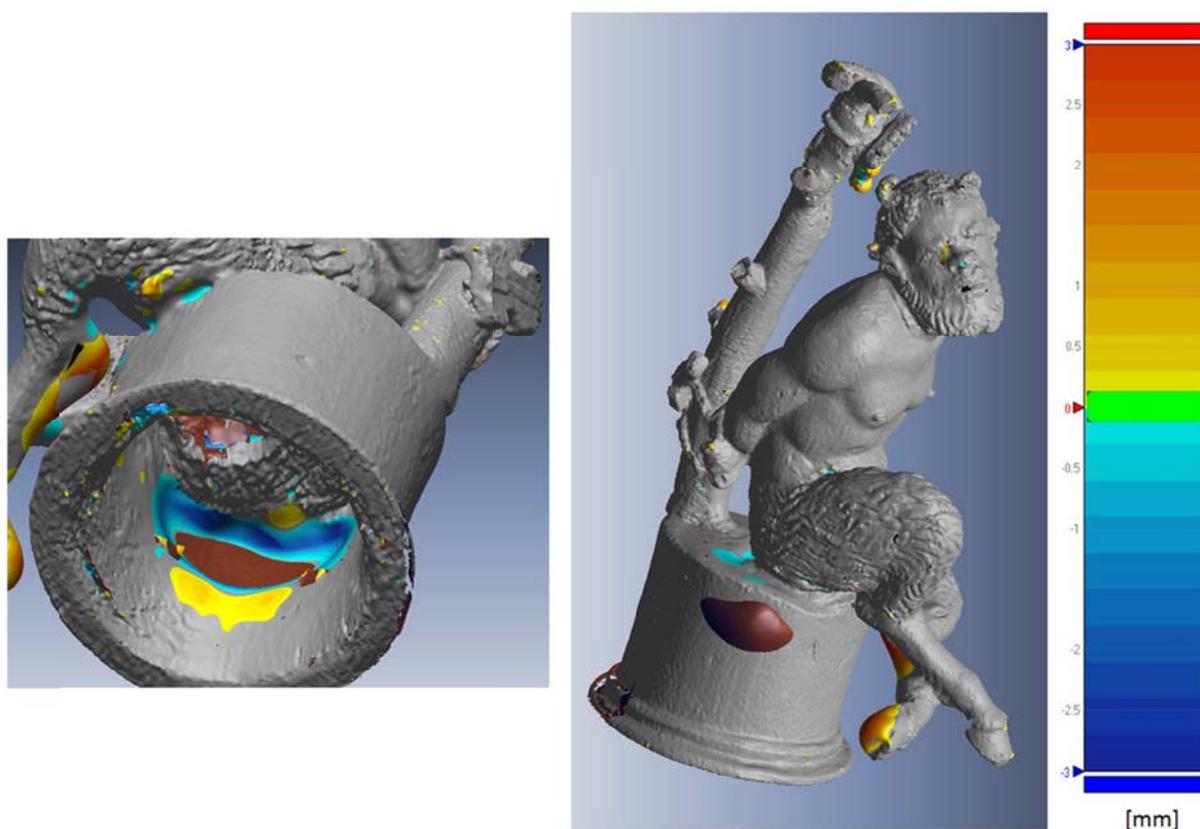


Figura 5.23 Confronto fra la mesh editata automaticamente e quella guidata dall'operatore.

Una volta terminate le operazioni di editing, e di ottimizzazione della mesh, il modello finale composto da 900.000 punti, può essere testurizzato e impiegato per navigazioni virtuali sul web, oppure può essere impiegato per riproduzioni fisiche come quella visibile in Figura 5.24.

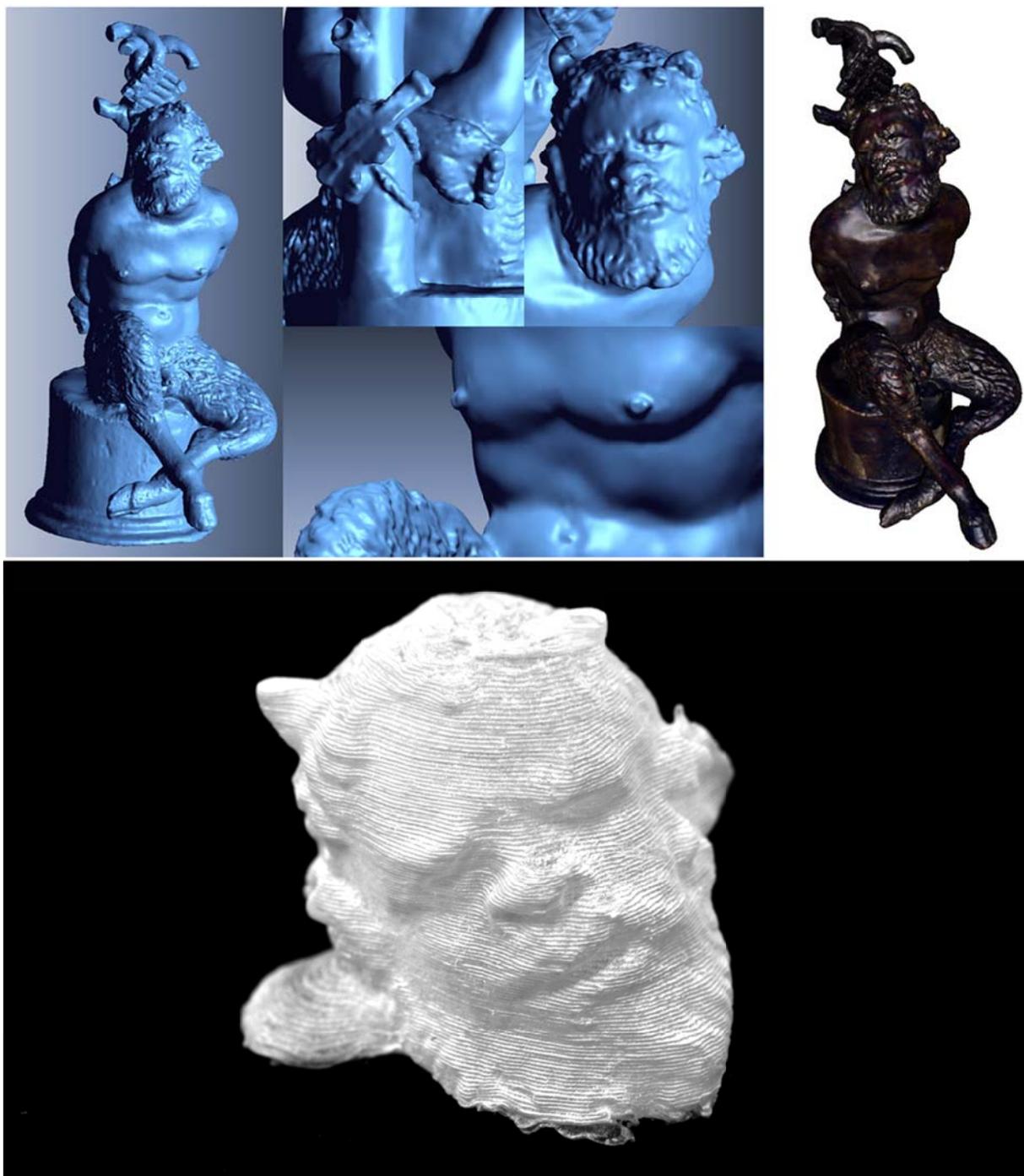


Figura 5.24 Modello tridimensionale fiale del Marsia ed un esempio di riproduzione fisica tramite una stampante tridimensionale impiegante fogli di PVC dello spessore di 0.1 mm.

5.6 Cretule e sigilli dagli scavi in Turchia

5.6.1 Inquadramento storico

Il caso di studio che verrà affrontato e che ha permesso di sottoporre a rilievo una serie di impronte moderne di sigilli cilindrici e di calchi eseguiti su cretule antiche, è frutto della lunga collaborazione, tutt'ora proficuamente in corso, con il Dipartimento di Archeologia dell'università di Bologna.

Dal 2003 è attiva una missione archeologica congiunta turco-italiana che ha ripreso l'esplorazione di un'antica capitale dell'Età del Bronzo, del III e II millennio a.C., in Turchia sud-orientale, nella regione di Gaziantep. La città di Tilmen Höyük, alle cui pendici scorre il fiume Kara Su, sorge nella piana di Islahiye, una fertile valle orientata nord-sud e delimitata ad ovest dalle alte catene dell'Amano, a nord da quelle del Tauro e a est dal Kurt Dağ, mentre a sud si collega alla depressione dello 'Amuq.

Il sito di Tilmen Höyük venne scoperto nel 1958 dalla spedizione turca guidata da Bahadır Alkım nell'ambito della ricognizione archeologica di superficie della Cilicia orientale e fu poi scavato, con un'interruzione di tre anni, fino al 1972. Dopo cinque campagne dei nuovi scavi si dispone di un'imponente messe di nuovi dati, sia per quanto riguarda l'urbanistica, sia per la caratterizzazione e lo studio della cultura materiale. È in fase di avvio inoltre un progetto di studio territoriale su scala regionale.

La zona di interesse è stata suddivisa, nel corso delle varie campagne, in settori, e nel 2007, nel corso della quinta campagna di scavo, in una nuova zona (Q) istituita nella zona nord-est dell'acropoli, su di un versante eroso, sono venuti alla luce i resti di quello che poi è stato confermato essere una fortezza in mattoni crudi, distrutta da un incendio e datata al XIX sec. a.C. (Marchetti 2009; 2010). Al suo interno è stato rinvenuto un gruppo omogeneo di 18 cretule recanti impronte antiche che appartengono a sigilli cilindrici di vari stili: geometrico (Figura 5.25d), paleosiriano e paleobabilonese (un'impronta reca anche in caratteri cuneiformi il nome di un funzionario del re di Babilonia Sumulael (Figura 5.25c)). I sigilli, invece, provengono da contesti diversi e si datano variamente tra 1800 e 1600 a.C. (quello di Figura 5.25a risale al 1650-1600 a.C.)

Le cretule venivano impiegate come chiusure in argilla di contenitori e di porte, alcuni esempi sono raffigurati in Figura 5.26, in modo da certificare in modo ufficiale,

mediante l'impiego congiunto dei sigilli in dotazione ai funzionari del re, attività di carattere fiscale o economico. Si pensi ad esempio alla gestione dei granai: tramite la conservazione dei sigilli che di volta in volta venivano rotti e ripristinati all'apertura delle porte, era possibile mantenere traccia degli approvvigionamenti alimentari. La scoperta di questi oggetti ha aperto nuovi scenari storici, infatti, il loro impiego suggerisce l'esistenza nella regione di una rete commerciale aderente a Sippar/Babilonia parallela, ma più a sud, a quella che collega Aššur con l'Anatolia centrale.

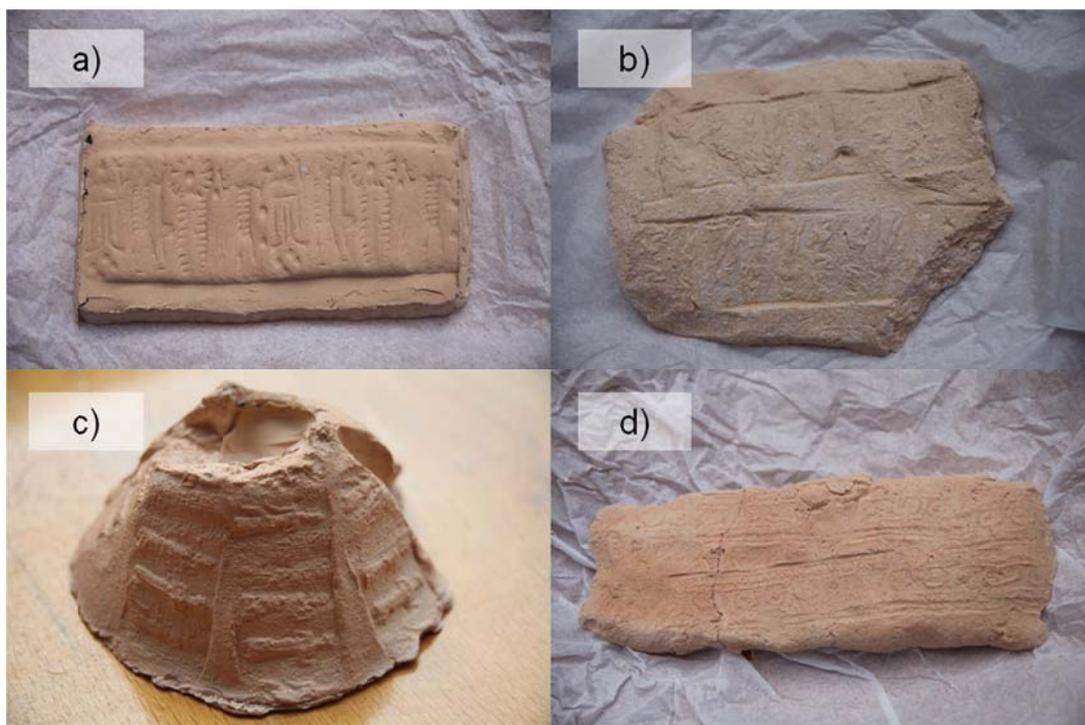


Figura 5.25 Esempi di cretule e sigilli sottoposti a scansione.

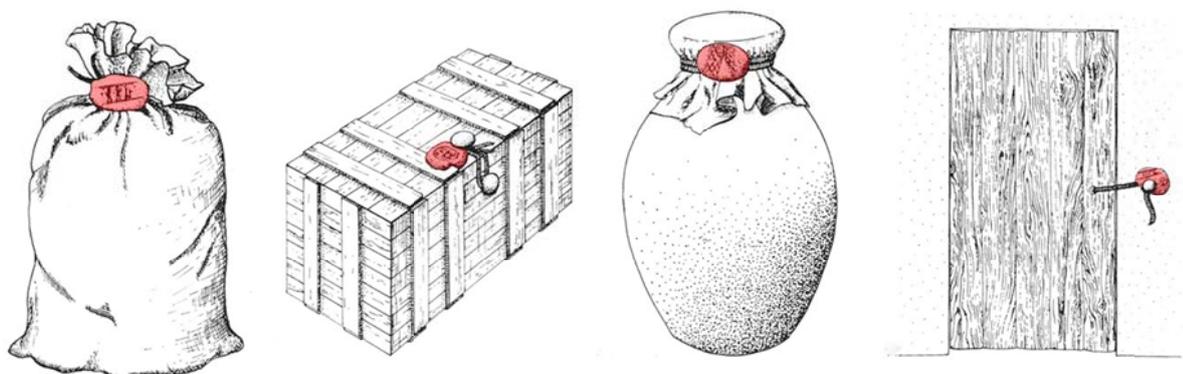


Figura 5.26 Esempi di utilizzo di sigilli in argilla, evidenziati in rosso.

5.6.2 Operazioni di rilievo

Dal momento che gli originali delle cretule sono depositati in museo l'uso dei calchi in fase di rilievo si è reso necessario e ha rappresentato l'unica soluzione percorribile al fine di ottenere un prodotto tridimensionale.

I sigilli e le cretule sono stati sottoposti a scansione ed a rilievo fotogrammetrico. Per quanto riguarda la scansione tramite il laser scanner triangolatore, l'operazione non ha presentato particolari difficoltà tecniche per oggetti di queste dimensioni e forma; infatti, per la maggior parte degli stessi è stata sufficiente una sola scansione per acquisire il modello 3D. Alcuni oggetti invece, dato il loro sviluppo "cilindrico", come quello di Figura 5.25c, hanno richiesto l'acquisizione di più nuvole di punti e tutte le operazioni che ne conseguono (allineamento, filtraggio, ottimizzazione, ecc.). Per quanto riguarda invece la parte fotogrammetrica le difficoltà presentatesi coinvolgono la geometria di presa ed il modello classico di "bundle adjustment".

L'obiettivo, un Canon 60 mm Macro è stato montato sulla Canon EOS 350D, ed è stato calibrato mediante un primo set di foto dove i target codificati del software Australis sono stati disposti sull'intera area inquadrata dal sensore. Un secondo set, invece, contenente le immagini dell'oggetto del rilievo, li ha visti, per la loro distribuzione non ottimale, esclusi dalla procedura di autocalibrazione ma impiegati come punti fotogrammetrici di appoggio.

Data l'impossibilità di realizzare un rilievo "topografico" con una precisione sufficiente agli scopi del lavoro, si è proceduto a determinare le coordinate oggetto di una serie di punti, nella pratica poi corrispondenti ai target codificati, tramite scalatura sulla base di distanze misurate con elevata precisione. Per la misura di tali distanze sono stati impiegati dei calibri fissi, affiancati all'oggetto in modo da poter scalare lungo due direzioni ortogonali fra loro (x e y), e un supporto fotografico su cui è stato misurato, tramite un restitutore analitico, la distanza fra due target posto in modo tale da scalare l'oggetto anche lungo la direzione z . In questo modo si è cercato di non privilegiare una direzione particolare e distribuire in maniera omogenea il coefficiente di scalatura (Figura 5.27). Le precisioni con cui sono state misurate queste distanze sono dell'ordine del pixel. Al fine di ottimizzare la condizione di lavoro, sono state adottate tutte le soluzioni tecniche presentate nel Capitolo 4.1, ovvero l'impiego di una corretta illuminazione, calibrazione radiometrica (anche se nel caso di un calco ha un'importanza relativa), target di piccolissime dimensioni stampati ad altissima definizione, ecc.

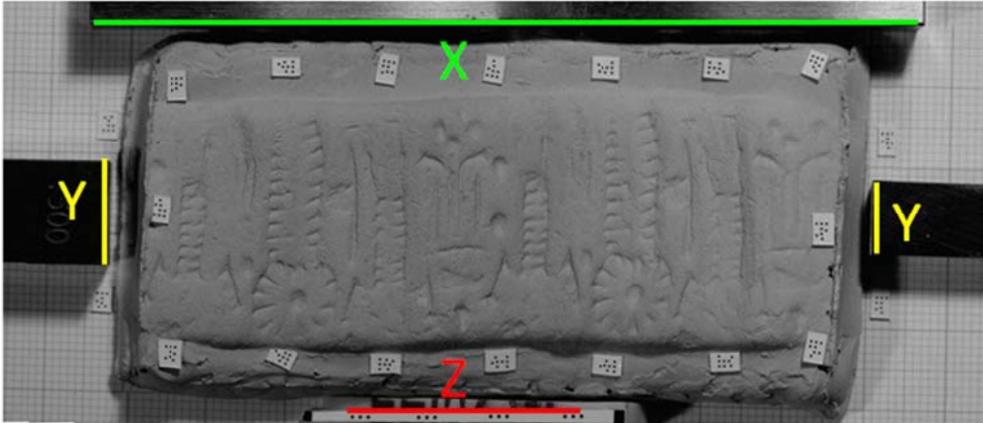


Figura 5.27 Disposizione dei calibri per la scalatura del modello secondo le tre direzioni x,y,z.

Tabella 5.7 Coordinate e precisioni dei PFA [mm].

TARGET	X	Y	Z	SX	SY	SZ
BW1	86.7725	7.6305	-7.3024	0.0015	0.0024	0.0021
BW2	67.9744	0.5450	-0.0616	0.0009	0.0014	0.0012
BW3	26.7894	35.8864	-1.5697	0.0008	0.0012	0.0010
BW4	0.8976	33.6180	-0.1814	0.0012	0.0019	0.0014
BW5	-7.6591	28.8631	-8.3122	0.0016	0.0030	0.0022
BW6	78.9393	2.3974	1.3331	0.0010	0.0014	0.0014
BW7	14.5404	0.2595	-1.1868	0.0012	0.0019	0.0014
BW8	-0.9784	18.0636	0.9269	0.0011	0.0016	0.0015
BW9	39.6443	35.4800	-1.8132	0.0008	0.0013	0.0010
BW10	78.5749	36.7473	0.3060	0.0010	0.0015	0.0012
BW11	-8.1572	7.0465	-8.3922	0.0022	0.0045	0.0031
BW12	66.3790	35.9935	-0.4531	0.0010	0.0015	0.0012
BW13	14.5888	35.7971	-0.9860	0.0010	0.0014	0.0012
BW14	87.2990	28.0243	-7.2391	0.0018	0.0031	0.0032
BW15	54.1261	-0.2813	-1.3695	0.0009	0.0014	0.0011
BW16	27.0575	-0.4736	-1.8896	0.0009	0.0013	0.0011
BW17	41.4514	0.0471	-1.9531	0.0008	0.0012	0.0010
BW18	79.5090	16.6894	0.8576	0.0010	0.0014	0.0012
BW19	0.6215	0.7699	-0.0401	0.0010	0.0016	0.0014
BW20	53.4040	35.9717	-1.1597	0.0009	0.0013	0.0010

L'orientamento dei fotogrammi ha portato a precisioni elevate nella determinazione delle coordinate dei punti fotogrammetrici d'appoggio e, come è visibile in Tabella 5.7 Coordinate e precisioni dei PFA [mm], esse sono risultate essere dell'ordine di qualche micron; i punti sono stati impiegati nel processo di bundle adjustment di un subset di immagini, acquisite in assetto pseudonormale e con un'apertura del diaframma inferiore, in modo da migliorare, per quanto permesso dal limite della profondità di campo, il livello di dettaglio e nitidezza delle immagini. È stata eseguita anche una procedura di Full Field Calibration direttamente sulle immagini da processare in modo da avere un controllo, mediante un set di punti collimati a mano dall'operatore, sui valori dei parametri di orientamento interno ottenuti con la più speditiva procedura di Self Calibration.

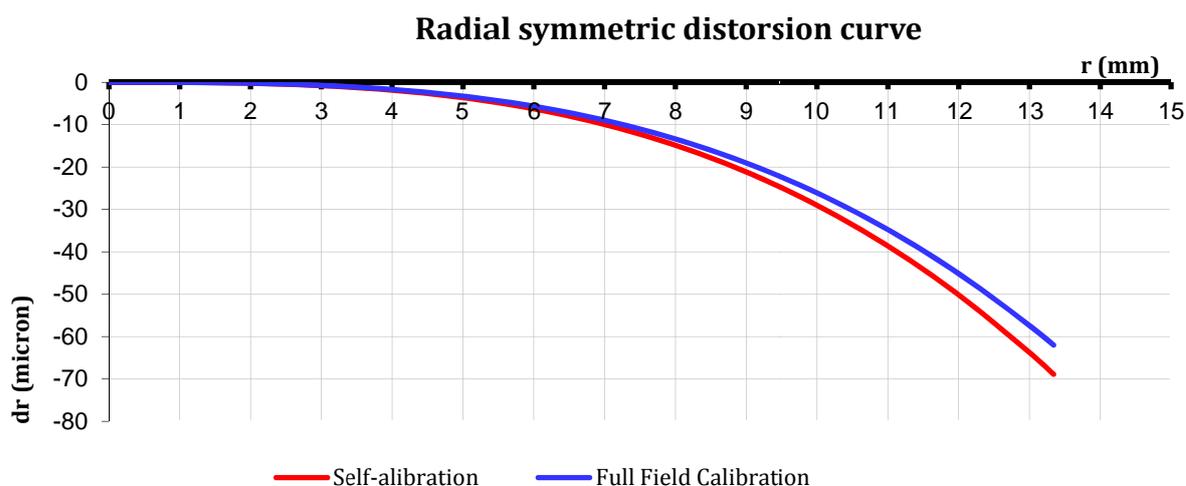


Figura 5.28 Curve di distorsione radiale ottenute mediante una procedura di Full Field Calibration e Self Calibration.

I valori ottenuti possono essere considerati intercambiabili: all'estremità del sensore gli scostamenti fra le due curve sono equivalenti ad un pixel (Figura 5.28), per cui la procedura di autocalibrazione garantisce affidabilità e velocità di esecuzione. In Figura 5.29 è possibile osservare la configurazione di presa che ha permesso l'ottenimento del modello digitale della superficie realizzato con il software PhotoModeler Scanner.

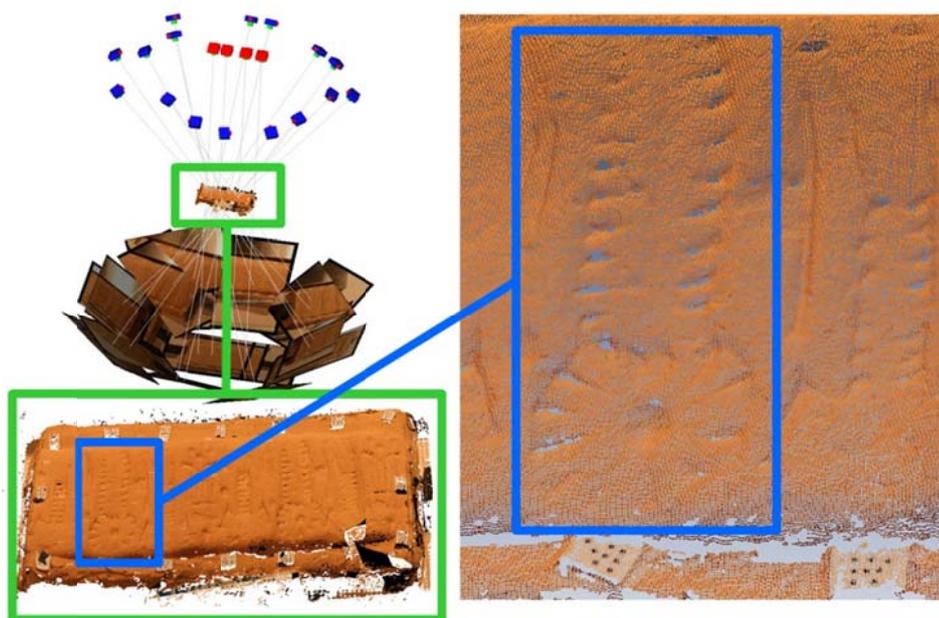


Figura 5.29 PhotoModeler Scanner, DSM con passo di 0.13 mm ottenuto per via fotogrammetrica da foto in assetto pseudo normale (camere in rosso).

Il confronto con il DSM ottenuto dal laser a scansione, evidenzia sicuramente un vantaggio a favore di quest'ultimo, soprattutto in termini di rumorosità della superficie.

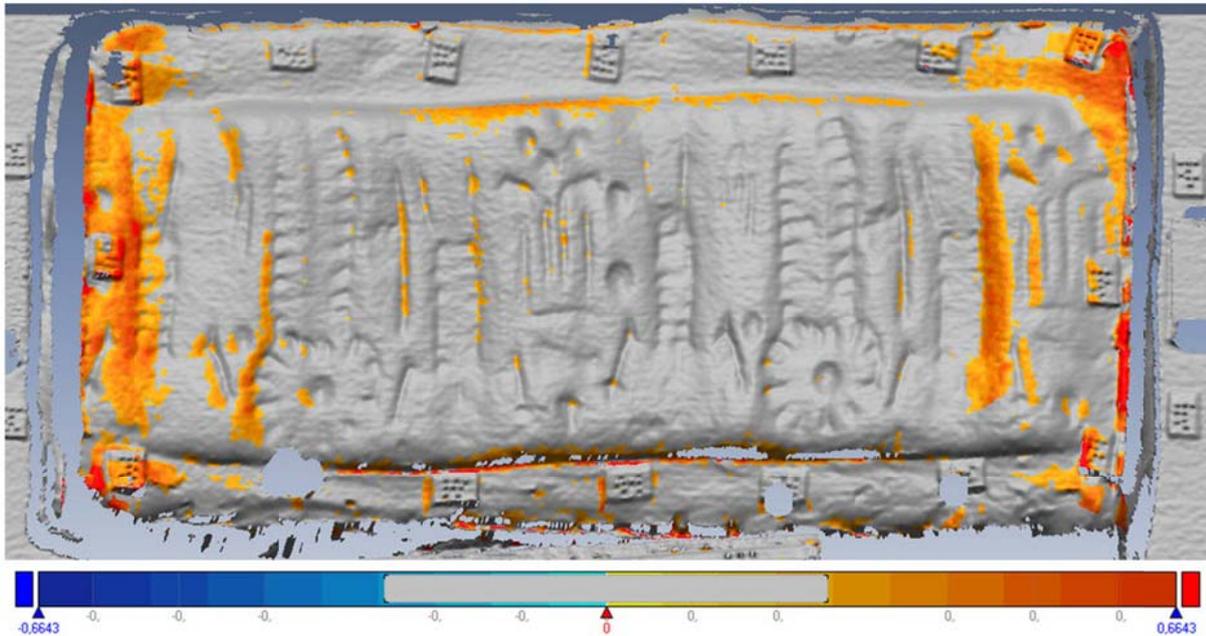


Figura 5.30 Scostamento fra la superficie ricavata tramite scansione laser e quella determinata per via fotogrammetrica. L'intervallo di tolleranza (zona in grigio) è stato assunto pari a 2σ del laser.

C'è da sottolineare, però, che la forte componente di rumore è probabilmente funzione anche della natura del materiale costituente le cretule. In quanto calchi degli originali, queste sono state realizzate con una resina sintetica che presenta un colore omogeneo sull'intera superficie, caratteristica che ha sicuramente creato difficoltà agli algoritmi di image matching. I maggiori scostamenti fra i due modelli sono visibili alle estremità dell'oggetto dove i due fotogrammi di bordo presentano una maggior labilità all'interno del blocco.

In ogni caso, per valutare la bontà dei risultati ottenuti, è possibile stimare l'errore di restituzione in maniera rigorosa applicando la legge di propagazione degli errori alle equazioni di collinearità nel caso normale, in modo da determinare il valore di indeterminazione nella componenti di profondità dell'oggetto (σ_z) sotto i vincoli geometrici dettati dalla configurazione di presa applicata.

$$\sigma_z = \frac{Z}{B} \frac{Z}{C} \sigma_{pxl} \quad (5.1)$$

Considerando in questo caso una distanza dall'oggetto pari a 300 mm, una base di presa di 25–30 mm, una focale calibrata di 83 mm, ed un errore sul pixel pari alla sua dimensione $\sigma_{pxl}=6.4 \mu\text{m}$, otteniamo dalla (5.1) una stima di σ_z che va da 0.23 a 0.27 mm.

Sebbene sia possibile spingersi a risoluzioni elevatissime in termini di qualità immagine ed in termini di GSD (Ground Sampling Distance), si pensi che per rapporti di ingrandimento pari a 1:1 sarebbe possibile far lavorare gli algoritmi di image matching su immagini avente un GSD di 6 micron, e quindi ottenere, in linea teorica, dei modelli di superficie caratterizzati da risoluzioni notevolmente superiori ai migliori sistemi a triangolazione (laser o luce strutturata) presenti in commercio. Purtroppo, i vincoli geometrici imposti dal rapporto di base e del fattore di scala, continuano a condizionare fortemente le precisioni. Purtroppo per migliorare le precisioni ottenibili bisognerebbe essere in grado di ridurre in maniera drastica la minima distanza di messa a fuoco, in modo da limitare la componente Z, che come si vede nella formula, viaggia con il quadrato del suo valore. Ad oggi non è possibile con le ottiche in commercio ridurre ulteriormente la distanza minima di messa a fuoco, di fatto le precisioni cui ci si può spingere sono dell'ordine di 0.15-0.3 mm, comunque comparabili con la strumentazione comunemente impiegata nel campo dell'archeologia o dei Beni Culturali.

5.7 Monete e ciondolo

Aumentando ancora la scala di rappresentazione e quindi diminuendo le dimensioni degli oggetti da rilevare è possibile spingere le ottiche Macro a fattori prossimi alla scala reale, ovvero ad una ripresa in scala 1:1. Questa parte di attività di ricerca è stata svolta in parte durante il periodo di ricerca all'estero svolto presso il Dipartimento di Geomatica dell'Università di Melbourne (Australia). Come precedentemente spiegato, qualora le focali superino una certa soglia (generalmente attorno al valore di 200 mm, cui corrisponde un FOV < 10°) è opportuno apportare ai coefficienti delle derivate parziali del sistema di bundle adjustment delle correzioni che permettano la stabilità numerica del processo di calibrazione.

Valori di scala prossimi ad 1:1 implicano la presenza di oggetti veramente piccoli, soprattutto considerando che la porzione di immagine ripresa corrisponde alle dimensioni del sensore di acquisizione, e quindi per dare dei valori concreti, pari a 24x36mm nel caso di utilizzo di camere full frame, o circa 16x24 nel caso di sensori in formato APS-C. Si capisce come anche un oggetto di pochi centimetri richiederebbe una pianificazione analoga a quanto accade nel caso aereo, con organizzazione del rilievo in strisciate aventi ricoprimenti longitudinali e trasversali sufficienti a garantire la copertura stereo dell'intera superficie.

Oggetti che ben si prestano a applicazioni di questo tipo, per dimensioni e natura della loro superficie, prettamente bidimensionale, sono individuabili in monili, ciondoli o monete. Sono state prese in considerazione alcune monete ed un ciondolo, ed analogamente a quanto effettuato per le cretule ed i sigilli, sono stati impiegati i target codificati per effettuare sia la calibrazione che la determinazione di un opportuno set di punti d'appoggio.

Per oggetti di questo tipo, su cui non è possibile porre dei target, per non creare un effetto invasivo sulla texture, si è optato per integrare i punti d'appoggio ottenuti tramite degli altri individuati mediante l'impiego dell'operatore di interesse FAST. A causa della natura altamente riflettente del materiale, per alcune monete, al fine di migliorare il suo funzionamento, è stata eseguita una fase di preprocessing applicando il filtro di Wallis, che permette di individuare un numero di punti, a parità di settaggi, notevolmente superiore (Figura 5.31).

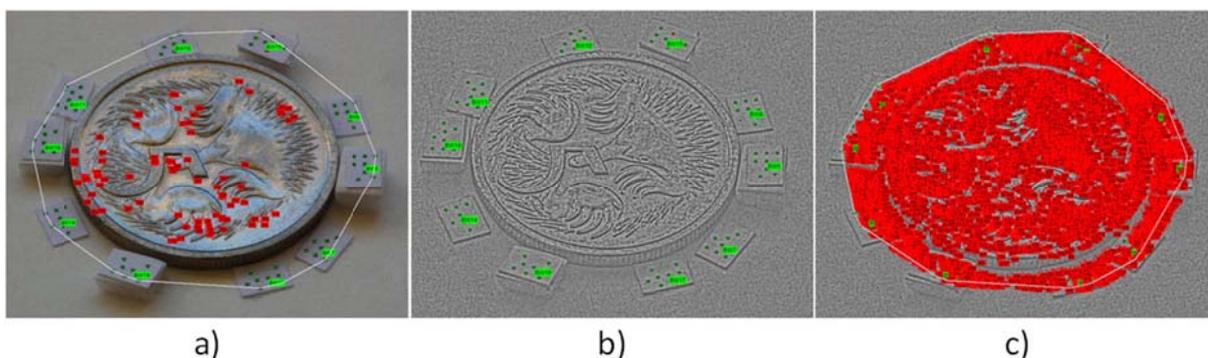


Figura 5.31 a) Operatore FAST applicato all'immagine originale; b) Immagine cui è stato applicato il filtro di Wallis; c) Operatore FAST combinato con il filtro di Wallis. L'operatore FAST è in entrambi i casi impostato con valore di soglia pari al 90%.

Sfruttando i punti di interesse individuati dall'operatore FAST, è possibile arrivare a ricostruire la superficie dell'oggetto mediante il loro inserimento all'interno del processo di bundle adjustment e tramite la successiva triangolazione e texturizzazione, un esempio è riportato in Figura 5.32. Approfondimenti su questa procedura si possono trovare in Jazayeri, 2010.

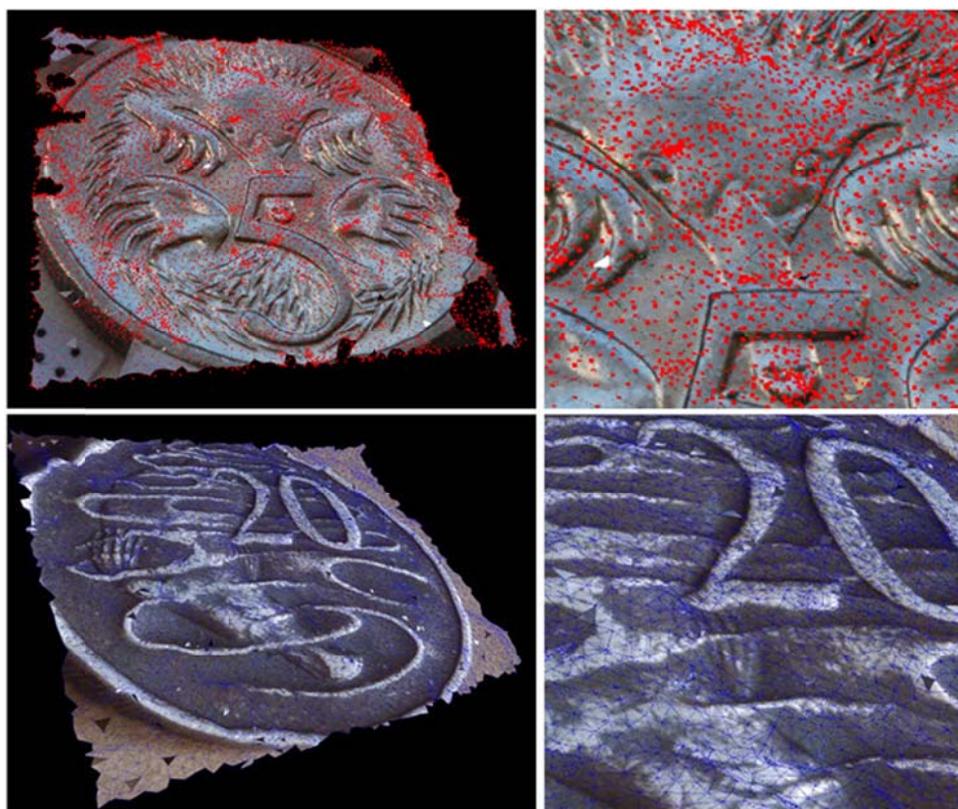


Figura 5.32 Generazione di un DSM a partire da immagini convergenti su due diverse monete (5c e 20c).

Un DSM ottenuto in questo modo, allo stato attuale dell'implementazione del codice, sebbene presenti il vantaggio non indifferente di produrre un modello tridimensionale a partire da immagini convergenti, non è però sufficientemente accurato e soprattutto denso per effettuare rappresentazioni ad alta fedeltà. Qualora si volesse generare un DSM sufficientemente denso da poter individuare tutte le asperità delle incisioni, è necessario ricorrere a coppie stereo, per questo motivo il set di immagini convergenti è stato affiancato anche da alcuni scatti presi in assetto pseudonormale.

A partire da questa configurazione è stato possibile, tramite procedure di image matching, ricavare un modello 3D della superficie che sia in grado di individuare le asperità infinitesime tipiche di oggetti come le monete.

Nella Figura 5.33 sono messi in evidenza, ad esempio di quelli che sono i risultati ottenibili, i DSM estratti da un rilievo effettuato con ottiche Macro (previa calibrazione della lente). Nella parte alta della figura (moneta da 20c) si vede la ricostruzione 3D ottenuta a partire da una coppia stereo tramite il software Image Master della Topcon, mentre nella parte bassa (moneta da 50c) il modello ottenuto a partire da 2 coppie pseudonormali tramite il software PhotoModeler Scanner.

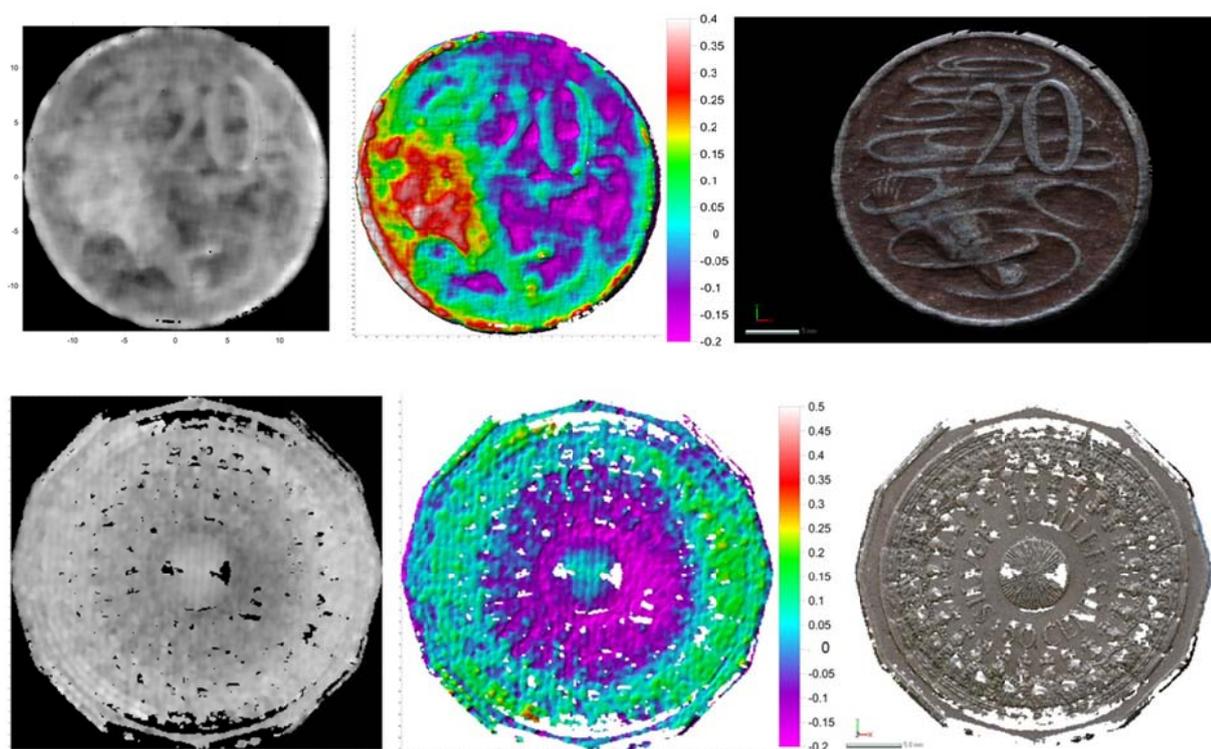


Figura 5.33 Moneta da 20c e 50c australiani, Z-range map, modello 3D senza texture e con texture con passo di 0.1mm.

La stessa procedura è stata applicata anche ad un ciondolo di circa 3 cm di diametro, per il quale sono state generate tre diverse superfici 3D e confrontate fra loro. I DSM

sono stati generati a partire da una scansione laser, tramite un software fotogrammetrico monoscopico (Topcon Image Master) ed una stazione fotogrammetrica digitale (SocetSet con modulo NGATE).

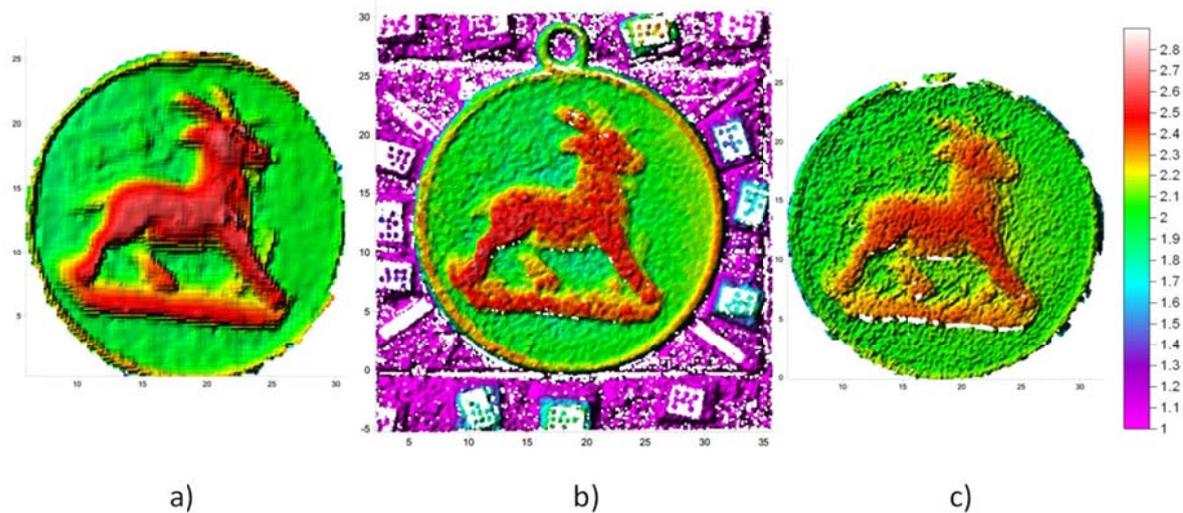


Figura 5.34 DSM del ciodolo: a) da laser; b) da Topcon ImageMaster; c) da SocetSet NGATE. [mm]

In riferimento alla formula (5.1) per la stima dell'incertezza sulla coordinata Z , avendo una distanza oggetto–sensore di 323 mm, una base di presa di 21 mm, una focale calcolata in 215 mm ed un pixel di $6.4 \mu\text{m}$, si ottiene una $\sigma_z=0.147$ mm, quindi comparabile con quella del laser scanner impiegato nei precedenti casi di studio.

Il DSM generato dal laser è stato tenuto come parametro di riferimento nella generazione della mappa degli scostamenti visibile in Figura 5.35, nelle figure a) e b) è possibile notare come lo scostamento maggiormente significativo si sia verificato in corrispondenza dell'occhio dell'animale, che però non trova un riscontro fisico nella realtà dell'oggetto, in questo punto un errore della stima della posizione del segnale di ritorno sul sensore ha prodotto un rilievo "virtuale".

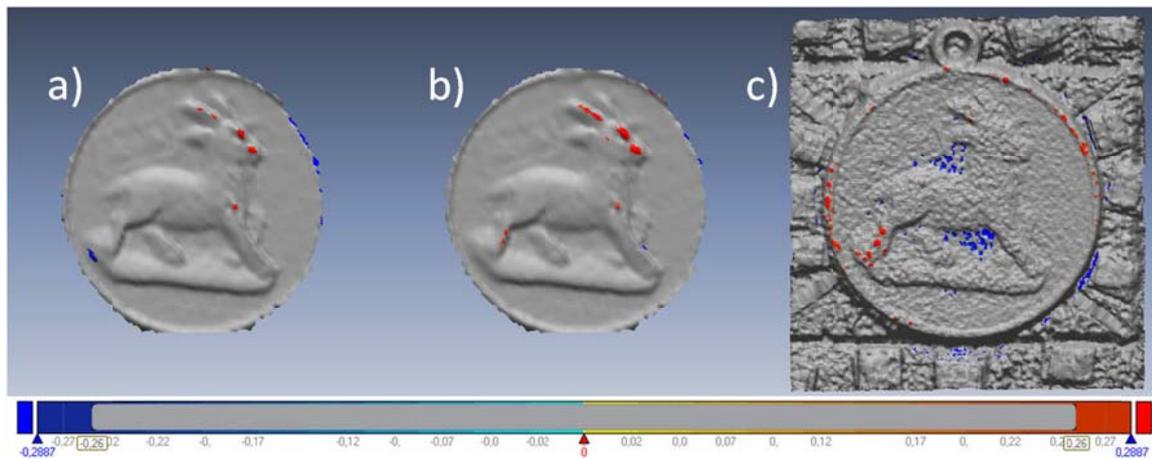


Figura 5.35 Confronto fra DSM: a) laser vs Image Master; b) laser vs SocetSet NGATE; c) Image Master vs SocetSet NGATE. L'intervallo di tolleranza (zona in grigio) è stato assunto pari a 2σ del laser [mm].

Per quanto riguarda invece il confronto fra i DSM ottenuti per via fotogrammetrica, ma la considerazione può essere estesa anche ai confronti fotogrammetria-laser, si può osservare come la ridotta estensione delle zone fuori tolleranza ($\text{toll} = \pm 0.26\text{mm}$) siano comunque comprese fra un valore massimo e minimo che la eccede di soli 29 micron, per cui in generale possiamo considerare attendibile i modelli ottenuti a prescindere dalla tecnica utilizzata, che ovviamente dipenderà dalle specifiche per cui si richiede un rilievo.

6

Conclusioni

La ricerca presentata in questa tesi ha cercato di presentare e studiare le tecniche che meglio si sposano con il rilievo tridimensionale di oggetti di piccole dimensioni. La tesi è stata sviluppata durante il dottorato di ricerca in Ingegneria Geomatica e dei Trasporti grazie al quale sono state possibili anche interessanti opportunità di interazione con strutture d'eccellenza straniere, come testimonia il periodo di ricerca svolto al Dipartimento di Geomatica dell'Università di Melbourne.

La struttura della tesi si è articolata su due aree tematiche, ovvero i sistemi image-based, tra i quali rientra, e su cui ci si è soffermati, la fotogrammetria, e quelli range-based, in particolar modo quelli di tipo laser a triangolazione. Il percorso seguito è stato volto ad analizzare ed approfondire i principi teorici ed i risvolti pratici di queste tecniche, mettendo in evidenza le principali difficoltà e proponendo in corrispondenza opportune metodologie operative.

Per quanto concerne la fotogrammetria digitale, è emerso come la geometria di presa e il comportamento ottico delle lenti usate in questo lavoro, ovvero dedicate alla macrofotografia, non sempre possano mutuare direttamente i modelli matematici classici della fotogrammetria presenti in letteratura, ma bisogna invece apportarvi alcune modifiche al fine di mantenere la stabilità computazionale durante il processo di bundle adjustment. Sebbene i modelli classici possano essere validi nella quasi totalità delle applicazioni aeree o terrestri, grazie all'uso di lenti che generalmente spaziano fra la tipologia "grandangolare" o "normale" (focali comprese fra i 20 e gli 80 mm per pellicole o sensori 24x36), caratterizzate da un'elevata divergenza dei raggi ottici proiettivi, lo stesso non si può dire per obiettivi con lunghe focali, dove la piccolissima divergenza ($FOV < 10^\circ$), fa sì che il classico modello prospettico si avvicini di più ad uno di tipo proiettivo, con raggi che quindi tendono ad disporsi quasi in maniera parallela fra

di loro. Inoltre, dal momento che una sovrapparametrizzazione del comportamento ottico ha evidenziato una maggior instabilità del modello, per questo tipo di applicazioni, data l'elevata correlazione esistente fra alcuni parametri, quali ad esempio x_p e y_p con P_1 e P_2 , oppure alcune assunzioni che possono essere fatte, quali il solo impiego del coefficiente K_1 per la distorsione radiale, si può osservare che un modello a meno parametri è sicuramente più stabile e meglio si adatta al caso di lunghe focali. Considerando la dimensione degli oggetti più piccoli analizzati, il problema principale è risultato essere la generazione prima di un "poligono" di calibrazione e poi di un rilievo d'appoggio, per poter definire con una precisione adeguata, in questo caso risultata essere di qualche micron, una rete di punti di coordinate note da impiegare nell'orientamento dei fotogrammi. La soluzione è venuta dall'impiego di target codificati, che però per poter essere miniaturizzati garantendo la preservazione delle caratteristiche geometriche, sono stati convertiti in un supporto fisico tramite procedure impiegate nella cinematografia, che prevedono la creazione di negativi a partire dal contenuto digitale (generalmente il flusso di lavoro è l'inverso, si parte dall'analogico per la conversione del dato in digitale). Questo ha permesso il mantenimento della geometria dei target e quindi un corretto funzionamento degli algoritmi automatici per la loro individuazione, e quindi è stato possibile arrivare all'ottimale stima del loro baricentro, cosa che non accade impiegando target stampati su normale supporto cartaceo. Anche l'aspetto radiometrico è stato tenuto in considerazione, osservando come comunemente sia una componente del rilievo che passa in secondo piano, mentre invece, quando si opera su oggetti caratterizzati da un contenuto radiometrico di rilevante importanza come nell'ambito dei Beni Culturali, l'adozione di sistemi di calibrazione del colore e l'impiego di ColorChecker riescono a dare maggiore fedeltà al lavoro di rilievo e restituzione.

Per quanto riguarda invece il laser a scansione, avendo impiegato una sola tipologia di strumento, non è stato possibile realizzare dei confronti sui risultati finali ottenibili in funzione dei diversi principi di funzionamento, per cui l'attenzione si è spostata più sul metodo e sulla gestione del flusso di lavoro, mettendo in risalto quelle che sono state le criticità dei diversi casi di studio. Sicuramente, un aspetto da tenere in considerazione per questo tipo di strumentazione è l'onere computazionale che viene richiesto dall'elevata mole di dato in genere acquisito. Per quanto riguarda il flusso di lavoro, è stato messo in risalto come le operazioni di pianificazione rivestano un'estrema importanza e influenza su quello che sarà il dato finale. Una mancanza di dato dovuta ad

un errato calcolo delle posizioni di acquisizione può a volte non essere ripristinata con gli strumenti forniti dai software di modellazione tridimensionale, oppure una troppo elevata ridondanza di dato, oltre ai rallentamenti nelle operazioni di lavoro, può mascherare la “verità” dietro a numerose altre scansioni affette da errore, fenomeno che spesso accade in presenza di materiali particolari come quelli metallici se non opportunamente trattati. Sempre parlando di gestione del dato acquisito, è stato messo in evidenza come le operazioni di intervento sulla nuvola di punti o sulla mesh, quali ad esempio il filtraggio, la fusione o l’editing, siano operazioni che risentono della sensibilità dell’operatore. Configurazioni diverse nella scelta dei parametri, conducono a risultati diversi, e quindi, considerando che comunque il modello 3D finale risulta essere la miglior approssimazione possibile della superficie dell’oggetto che lo strumento impiegato riesce a produrre in base alle sue specifiche tecniche, la modellazione tridimensionale non deve essere frutto di operazioni automatiche svolte in maniera asettica, ma bensì frutto di un’analisi della situazione esistente e svolte in maniera ragionata.

I casi di studio affrontati mettono in evidenza come, sebbene i requisiti in termini di accuratezze, tempi e costi di modellazione 3D possano presentare significative differenze tra di loro, i flussi di lavoro del rilievo e della modellazione tridimensionale nei settori analizzati (quello dell’ingegneria civile e dei Beni Culturali), non differiscono molto da quelli impiegati comunemente anche per oggetti di dimensioni maggiori; bisogna però spostare l’attenzione su diversi problemi correlati alla scala dell’oggetto, che presentano nel caso di oggetti di piccole dimensioni un’incidenza maggiore sul prodotto finale. Come di frequente accade, non è possibile stabilire se una tecnica sia migliore di un’altra, però si può affermare che per velocità di acquisizione, possibilità di serializzazione del processo, la strumentazione laser presenta una valida soluzione al problema del rilievo speditivo archeologico nel campo dei Beni Culturali (ma non solo) con alto livello di dettaglio. La fotogrammetria digitale che prevede l’uso di ottiche Macro, se da una parte rappresenta una valida alternativa low cost a strumenti costosi e non sempre facilmente trasportabili in sito, deve sottostare comunque ai vincoli fisici nella costruzione delle ottiche che ne controllano la distanza di messa a fuoco e profondità di campo, e altri fotogrammetrici che regolano i rapporti base/altezza, come facilmente visibile dalle relazioni che esprimono le accuratezze nel caso normale. Nonostante le ottiche Macro siano in grado di raggiungere un livello di dettaglio superiore a quello di qualsiasi altro tipo di lente, si è potuto verificare che al momento

non esiste ancora sul mercato una procedura di generazione di DSM da immagini fortemente convergenti. Per questo motivo i modelli digitali non riescono a spingersi a precisioni comparabili con quelle che la risoluzione della coppia lente-sensore è in grado di produrre, sebbene possano essere confrontate con quelle del laser a scansione. La “macrofotogrammetria” digitale può quindi essere di grande utilità per analisi diagnostiche e morfologiche su una varietà di oggetti che coinvolgono diversi settori e ambiti applicativi; presenta però svantaggi in termini di competitività con il laser scanner per quanto riguarda l’applicabilità a grandi dataset per via dell’elevato intervento manuale ancora richiesto per questo tipo di tecnica.

Bibliografia

- Al Kheder S., Al Shawabkeh, Y., Haala N., (2009) – Developing a Documentation System for Desert Palaces in Jordan Using 3D Laser Scanning and Digital Photogrammetry – Journal of Archaeological Science, Volume 36, Issue 2, pp.537-546.
- Artese G., De Napoli L., Rizzuti S., Trecroci A., (2003) – Calibrazione di un laser a scansione e confronto con tecniche fotogrammetriche e tastatore meccanico – Atti del convegno "VII Conferenza Nazionale ASITA", Verona.
- Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., (2009) – Ricostruzione automatica di oggetti terrestri con immagini digitali – Atti del convegno "XIII Conferenza Nazionale ASITA", Bari.
- Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., (2010) – Automation in 3D reconstruction results on different kinds of close range blocks – ISPRS, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Beraldin J.A., Blais F., Cournoyer L., Godin G., Rioux M., (2000) – Active 3D sensing, Modelli e Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica – Scuola Normale Superiore, Pisa 10: 22– 46.
- Bernardini F., Rushmeier H., (2002) – The 3D Model Acquisition Pipeline – Computer Graphics Forum, Vol. 21, No. 2.
- Besl P. J., McKay N. D., (1992) – A method for registration of 3D shapes – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2):239–256.
- Bitelli G., Girardi F. (2010) – Problematiche nel rilievo e modellazione tridimensionale di oggetti di piccole dimensioni nel campo dei beni culturali – Atti XIV conferenza nazionale ASITA – Brescia 9-12 Novembre 2010, pag 285-290.
- Bitelli G., Simone A., Girardi F., Lantieri C. (2009) – Caratterizzazione di superficie e tessitura del manto stradale mediante tecniche a scansione laser – Bollettino SIFET (società italiana di fotogrammetria e topografia) n.3 anno 2009.

- Blais F., Beraldin J.A., Cournoyer L., Christie I., Serafini R., Mason K., McCarthy S., Goodall C., (2000) – Integration of a Tracking Laser Range Camera with the Photogrammetry based Space Vision System – Acquisition, Tracking, and Pointing XIV, Proceedings of SPIE's Aerosense 2000 Vol. 4025, p. 219-228,(2000), Orlando, FL.
- Borangiu T., Dogar A., Dumitrache A. (2008) – Modeling and Simulation of Short Range 3D Triangulation-Based Laser Scanning System – International Journal of Computers Communications & Control, ISSN 1841-9836, Volume:3, Supplement: Suppl.S pp:190-195.
- Bradshaw G. (1999) – Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques – Dublin, Trinity College Dublin, Department of Computer Science, TCD- CS- 1999- 46, pp26
- Brigante R., Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A. (2009) – Confronto e integrazione fra tecniche geomatiche per la documentazione e il monitoraggio dei beni culturali – Atti della XIII Conferenza Nazionale ASITA, Bari.
- Bührer T., Li Z., Grün A., Fraser C., Ruther H., (2001) – Photogrammetric reconstruction and 3D visualisation of Bet Giorgis, a rock-hewn church in Ethiopia – Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Geodesy and Photogrammetry (2001). doi:10.3929/ethz-a-005714093.
- Chen Y. and Medioni G. (1992) – Object modeling by registration of multiple range images – Image and Vision Computing, 10(3):145-155.
- Chiabrando F., Nex F., Piatti D., Rinaudo F. (2010) – Integration between calibrated time-of-flight camera data and multi-image matching approach for architectural survey – ISPRS, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Clarke T. A., Fryer, J. G., (1998) – The Development of Camera Calibration Methods and Models – The Photogrammetric Record, 16: 51-66. doi: 10.1111/0031- 868X.00113.
- Clarke T. A., Wang X., Fryer J. G., (1998) – The Principal Point and CCD Cameras – The Photogrammetric Record, 16: 293-312. doi: 10.1111/0031-868X.00127.
- Cronk S. – Automated methods in digital close range photogrammetry – Thesis PhD, 2007

-
- Cronk S., Fraser C., Hanley H., (2006) – Automated metric calibration of colour digital cameras – The Photogrammetric Record, 21: 355-372. doi: 10.1111/j.1477- 9730.2006.00380.x
- Crosilla F., Visintini D., Prearo G., Fico B., (2005) – Esperienze di filtraggio, classificazione, segmentazione e modellazione di dati spaziali da rilievo laser aereo – Relazione invitata al 49° Convegno Nazionale della SIFET, Chia Laguna (CA), Bollettino della SIFET, n. 1, pp. 13-51
- D’Amelio S., Lo Brutto M., (2007) – Valutazione delle procedure di calibrazione di camere digitali non metriche per il rilievo di beni architettonici – Convegno Nazionale SIFET, Arezzo 27-29 Giugno 2007.
- D’Amelio S., Lo Brutto M., (2009) – Analisi e comparazione di modelli di superficie di reperti archeologici realizzati tramite laser scanner e fotogrammetria – Atti della XIII Conferenza Nazionale ASITA (pp.841-846), Bari.
- Fantini M., (2007) – Strumenti e metodi per la progettazione industriale applicati alla conservazione e valorizzazione dei beni culturali – Tesi di dottorato, 2007.
- Forest Collado J. (2004) – New methods for triangulation-based shape acquisition using laser scanners – Thesis PhD, 2004.
- Fraser C. – Digital camera self-calibration – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 52, issue 4, pp. 149-159.
- Fraser C. S., Cronk S., (2009) – Hybrid Measurement Scenarios In Automated Close-Range Photogrammetry – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 64, Issue 3, Pages 328-333.
- Fraser C., Hanley H., (2006) – Off-the-shelf Digital Cameras Systems Calibration Performance – International Summer School “Digital Recording and 3D Modeling” Aghios Nikolaos, Crete, Greece, 24-29 April 2006.
- Fregonese L., 2003a – Usability and potential use of the high resolution digital camera in the determination of 3D digital model – CIPA 2003 XIX International Symposium “New Perspectives to save the cultural heritage”. CIPA, Turkey. pp. 275-27.
- Fujii Y., Takahashi M., Hori S., (2007) – Three-dimensional topography of fracture surfaces obtained by a digital photogrammetric technique –International Journal of the JCRM vol.3 (2007) pp.31-36.

Gang L., Opas C., Hui F., (2001) – Experimental Study on Nonuniformity of Line Jitter in CCD Images – Appl. Opt. 40, 4716-4720.

Gatta G., (2010) – Valorizzazione di cartografia storica attraverso moderne tecniche geomatiche: recupero metrico, elaborazione e consultazione in ambiente digitale – Tesi di dottorato, 2010.

Girelli V. A. – Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali – Tesi di dottorato, 2007.

Godin G., Beraldin J. A., Rioux M., Levoy M., Cournoyer L., (2001) – An assessment of laser range measurement on marble surfaces – Proceedings of the 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, pp. 49- 56.

Guidi G., Remondino F., Morlando G., Del Mastio A., Uccheddu F., Pelagotti A., (2007) – Performances evaluation of a low cost active sensor for cultural heritage documentation, 8th Optical 3D, Zurich, 9-12 Luglio 2007.

Guidi G., Russo M., Beraldin J. A. – Acquisizione 3D e modellazione poligonale – McGraw-Hill Companies (2010), ISBN: 9788838665318.

Jazayeri I., (2010) – Image- Based modelling for object reconstruction – Thesis PhD, 2010.

Jazayeri I., Fraser C. S., (2008) – Interest operators in close-range object reconstruction – Vol. XXXVII. Part B5. Beijing.

Jazayeri I., Fraser C.S., Cronk S. (2010) – Automated 3D object reconstruction via multi-image close-range photogrammetry – ISPRS, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.

Karabork H., Yildiz F., Yakar M., Altuntas, Karasaka L., (2007) – Modeling and visualization using laser scanner in documentation of cultural heritage – XXI international CIPA symposium, Athens.

Kauhanen H., Heiska N., Kurkela M., (2009) – Long focal length imaging for photogrammetric reconstruction – ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2009 "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures" - Trento, Italy, 25-28 February.

-
- Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H., (2006) – Poisson Surface Reconstruction – Eurographics Symposium on Geometry Processing, Cagliari, Italy.
- Kil Y.J., Mederos B., (2006) – Laser scanner super-resolution – Eurographics Symposium on Point-Based Graphics (2006).
- Kulur S., Yilmaztürk F., (2005) – 3D Reconstruction of small historical objects to exhibit in virtual museum by means of digital photogrammetry – XX CIPA Symposium -Turin, ITALY - 26 September - 1 October 2005.
- Kyle S., (2004) – Using Parallel Projection Mathematics To Orient An Object Relative To a Single Image – The Photogrammetric Record Volume 19, Issue 105, pages 38-50, March 2004.
- Lerma J.L., Navarro S., Cabrelles M., Villaverde V., (2009) – Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation, the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study – Journal of Archaeological Science, Volume 37, Issue 3, March 2010, Pages 499-507
- Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., (2006) – Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications – Wiley, John & Sons, ISBN: 0470106336.
- Majid Z., Setan H., Chong A., (2008) – Integration Of Stereophotogrammetry And Triangulation-Based Laser Scanning System For Precise Mapping Of Craniofacial Morphology – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008
- Menna F., (2009) – Metodologie e tecniche per la modellazione tridimensionale inversa – Tesi di dottorato, 2009.
- Okamoto A. (1992) – Ultra-Precise Measurement Using Affine Transformation – ISPRS XVIIth Congress, Washington, USA, 2-14 August 1992
- Ono T., Akamatsu S., Hattori S., (2004) – A Long Range Photogrammetric Method with Orthogonal Projection Model – International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, Vol 35; Part 3, pp. 1010-1015.
- Ono T., Hattori S., (2002) – Fundamental Principles of Image Orientation Using Orthogonal Projection Model – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.31, B3/1, pp.611-615.

- Patias P., Tsioukas V., (1999) – Multi-image Matching for Architectural and Archaeological Orthoimage Production – XVII CIPA Symposium, Recife/Olinda Brasil.
- Remondino F., Fraser C., (2006) – Digital camera calibration methods: considerations and comparisons – ISPRS volume Vol. XXXVI, Dresden, Germany.
- Remondino F., Guarnieri A., Vettore A., (2004) – 3D Modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning? – Proceedings of the SPIE, Volume 5665, pp. 216-225 (2004).
- Rinaudo F., Chiabrando F., Piatti D. (2010) – SR-4000 TOF camera: further experimental tests and first applications to metric survey – ISPRS, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Rosten E., (2006) – High performance rigid body tracking – Thesis PhD, 2006.
- Rova M., Robson S., Cooper M.A.R., (2008) – Multistation bundle adjustment with a machine vision parallel camera system, an alternative to the perspective case for the measurement of small objects – ISPRS Congress Beijing 2008, Proceedings of Commission V.
- Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F., (2009) – State of the art and Applications of 3D Imaging Sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation – Sensors 9, no. 1: 568-601.
- Stamatopoulos C., Fraser. C., Cronk S., (2010) – On the self-calibration of long focal length lenses – ISPRS, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Tsioukas V., Patias P., Jacobs P.F., (2004) – A novel system for the 3D reconstruction of small archaeological objects – ISPRS Congress Istanbul 2004, Proceedings of Commission V
- Yanagi H., Chikatsu H., (2010) – 3D Modeling of small objects using macro lens in digital very close range photogrammetry – ISPRS, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- 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 Deigo, CA, USA
- Yemez Y., Schmitt F., (2004) – 3D reconstruction of real objects with high resolution shape and texture – Image and Vision Computing, Volume 22, Issue 13, 1 November 2004, Pages 1137-1153.

Zhang Z. (2000) – A flexible new technique for camera calibration – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330–1334, 2000.

Zhang Z., (1999) – Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations – International Conference on Computer Vision (ICCV'99), Corfu, Greece, pages 666-673, September 1999.

Zheng J., Yuan W., QuinHong S., (2008) – Automatic reconstruction for small archeology based on close-range photogrammetry – Vol. XXXVII. Part B5. Beijing

Ringraziamenti

Di seguito una serie di ringraziamenti “istituzionali” rivolti alle persone ed enti che mi hanno dato l’opportunità di lavorare e produrre questa tesi:

Ringrazio sentitamente il Prof. Gabriele Bitelli che mi ha dato l’opportunità di cimentarmi in un settore affascinante come quello della Geomatica, e per la guida costante e sempre presente in questi tre anni di dottorato.

Ringrazio tutti i colleghi e amici del dipartimento DICAM area Topografia, con i quali ho condiviso momenti intensi di lavoro, campagne di rilievo, esami ed esercitazioni che hanno fatto sì che il mio interesse verso questo settore non venisse mai a mancare.

Ringrazio il dipartimento di Geomatica dell’Università di Melbourne che mi ha ospitato durante il periodo di ricerca all’estero, specialmente nella persona del Prof. Clive Fraser, che mi ha seguito e guidato durante i mesi trascorsi presso la loro struttura, e, cosa non da meno, fatto sentire come parte integrante dello staff. Ringrazio anche i miei colleghi e compagni di avventura, Christos Stamatopoulos, Ida Jazayeri, Sheelan vaez, Eldar Rubinov, Grant Hausler e il dott. Simon Cronk, con i quali non solo ho potuto liberamente confrontarmi e avere nuovi spunti su cui lavorare, ma con cui ho condiviso dei mesi stupendi e da cui è nata anche una sincera amicizia.

Ringrazio il Dott. Nicolò Marchetti del Dipartimento di Archeologia dell’Università di Bologna per aver messo a disposizione del prezioso e importante materiale su cui effettuare dei test diventati parte integrante di tale tesi.

Ringrazio il Museo Civico Medievale nella figura del suo Direttore e dello staff, per la disponibilità a mettere a disposizione un importante e prezioso manufatto ai fini della mia ricerca.

Ringrazio i colleghi della sezione di Strade del dipartimento DICAM per la proficua ed interessante collaborazione svolta all’insegna della multidisciplinarietà, cosa che al giorno d’oggi dovrebbe essere incentivata maggiormente.