

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DISTART

**Dottorato di ricerca in
SCIENZE GEODETICHE E TOPOGRAFICHE**

**Raggruppamento disciplinare
ICAR 06**

**TECNICHE DIGITALI PER IL RILIEVO,
LA MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE
E LA RAPPRESENTAZIONE
NEL CAMPO DEI BENI CULTURALI**

**Tesi di Dottorato di :
Ing. VALENTINA ALENA GIRELLI**

**Relatore :
Prof. Ing. GABRIELE BITELLI**

**Coordinatore :
Prof. Ing. GABRIELE BITELLI**

Ciclo XIX

PAROLE CHIAVE

BENI CULTURALI
FOTOGRAMMETRIA DIGITALE
LASER SCANNER
CALIBRAZIONE
ORTOFOTO
MODELLAZIONE 3D
DOCUMENTAZIONE

INDICE

Indice	i
Riassunto	v
Abstract	vii
1. Introduzione	1
1.1 L'integrazione di Tecniche Geomatiche per il rilievo dei Beni Culturali: un approccio metodologico	2
1.2 Obiettivi e organizzazione della tesi	4
1.3 Descrizione dei casi di studio affrontati	6
2. L'acquisizione del dato metrico: metodi <i>image based</i>	10
2.1 Le immagini digitali: acquisizione e caratteristiche	10
2.1.1 La risoluzione radiometrica	12
2.1.2 La risoluzione geometrica	13
2.1.3 I sensori delle camere digitali	15
2.1.4 La formazione di immagini digitali a colori	17
2.1.5 L'acquisizione indiretta di immagini digitali tramite processo di scansione	20
2.1.6 Lo scanner fotogrammetrico Raster Master	22
2.1.7 La calibrazione dello scanner desktop Epson GT12000	25
2.1.8 Il processo Kodak Photo CD	27
2.2 La fotogrammetria nel rilievo dei Beni Culturali	29
2.2.1 Un sistema di acquisizione aerea a bassa quota per il rilievo di aree archeologiche	33

2.2.2 La fotogrammetria <i>close-range</i> : applicazioni al rilievo di edifici e oggetti di interesse storico – archeologico	38
3. L'acquisizione del dato metrico: metodi <i>range based</i>	44
3.1 Breve storia dei sistemi a sensori attivi	44
3.2 Origine, costruzione e caratteristiche del raggio laser	45
3.3 Classificazione dei laser a scansione	48
3.3.1 Sistemi a triangolazione	49
3.3.2 Sistemi distanziometrici	55
3.4 Accuratezza dei sistemi laser scanner	57
3.5 Considerazioni sulle procedure di rilievo e <i>data processing</i>	63
3.5.1 Tecniche di allineamento di nuvole di punti	67
3.6 La standardizzazione del dato	71
3.7 Laser a scansione e fotogrammetria	74
4. La calibrazione di camere digitali non metriche	78
4.1 Fondamenti analitici della calibrazione	79
4.1.1 Le equazioni di collinearità	80
4.1.2 La trasformazione lineare diretta	82
4.2 Il metodo del <i>bundle adjustment</i> e i parametri addizionali	85
4.3 Prove sperimentali di calibrazione	91
4.3.1 I software utilizzati per la calibrazione	91
4.3.2 Calibrazione tramite reticolo piano	94
4.3.3 Un confronto fra <i>Self calibration</i> e <i>Field Calibration</i>	99
4.3.4 La calibrazione delle immagini amatoriali della Stele di Tilmen Höyük	102
4.3.5 Distorsione radiale nei differenti canali di colore di un'immagine RGB	106
4.4 Considerazioni sui parametri addizionali	109
4.5 Considerazioni sulla geometria del progetto	111

5. La rappresentazione: prodotti vettoriali e raster	113
5.1 La restituzione: generalità	114
5.2 La restituzione vettoriale al tratto: esempi dalla Chiesa di san Giuseppe in Venola	116
5.3 Elaborati raster: il raddrizzamento della facciata ovest del monastero di Mesopotam	120
5.4 Elaborati raster: l'ortofoto	124
5.4.1 Generazione dell'ortofoto digitale	125
5.4.2 L'ortofoto del sito di Soknopaiou Nesos	127
5.4.3 La True Orthophoto: esempi in ambito aereo e terrestre ...	131
5.4.4 Ortofoto da DEM laser: esempi e confronti con ortofoto da fotogrammetria	133
5.5 Il ricampionamento di immagini digitali	136
6. La modellazione tridimensionale	142
6.1 La modellazione tridimensionale nel campo dei Beni Culturali	142
6.1.1 Fasi del processo	143
6.1.2 Generazione della superficie	144
6.1.3 Applicazione della <i>texture</i> e visualizzazione	146
6.2 La modellazione 3D <i>image based</i>	147
6.3 La correlazione di immagini	148
6.3.1 Terminologia e definizioni	149
6.3.2 Problemi fondamentali del <i>Image Matching</i>	150
6.3.2.1 Soluzioni al problema fondamentale di riduzione dello spazio di ricerca	153
6.3.2.2 Soluzione del problema dell'unicità dell'entità di <i>matching</i>	155
6.3.3 <i>Area based matching</i>	156
6.3.3.1 La correlazione ai minimi quadrati	159
6.3.3.2 Multi – foto <i>least square matching</i> geometricamente vincolato	162
6.3.4 <i>Feature based matching</i>	165
6.4 Applicazioni di modellazione tridimensionale	167

6.4.1 Il DEM del sito di Soknopaiou Nesos	167
6.4.2 La modellazione tridimensionale del muro di Tilmen Höyük	169
6.4.3 Il modello 3D della Stele di Tilmen Höyük	174
7. Conclusioni e sviluppi futuri	180
Bibliografia	184
Appendice A	
L'analisi dei residui normalizzati per la ricerca dei blunders	193
Appendice B	
Aziende che lavorano nel campo del laser a scansione	195
Appendice C	
Trasformazione fra sistema topografico e fotogrammetrico in ambito terrestre	199
Ringraziamenti	203

RIASSUNTO

Le soluzioni tecnologiche rese oggi disponibili dalle discipline della moderna Geomatica, offrono opportunità di grande interesse per il rilevamento nel settore dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda il momento primario del rilievo, cioè la fase di acquisizione del dato metrico, sia per quanto concerne la questione della rappresentazione per oggetti di interesse archeologico, artistico, architettonico.

Lo studio oggetto della presente tesi si propone, sulla base di numerose esperienze maturate nel corso del Dottorato dal Laboratorio di Topografia e Fotogrammetria del DISTART, di affrontare e approfondire le problematiche connesse all'utilizzo della fotogrammetria digitale e del laser a scansione terrestre per applicazioni nell'ambito dei Beni Culturali.

La ricerca condotta è prettamente applicata, quindi è stata primaria l'esigenza di avere a disposizione reali casi di studio su cui sperimentare le tecniche di interesse; è però importante sottolineare che questo è un campo in cui ogni esperienza presenta proprie caratteristiche e peculiarità che la rendono interessante e difficilmente descrivibile con schemi convenzionali e metodologie standardizzate, quindi le problematiche emerse hanno di volta in volta indirizzato e spinto la ricerca all'approfondimento di certi aspetti piuttosto che altri.

A tal proposito è stato evidenziato dalle esperienze effettuate che il campo dei Beni Culturali è forse il più emblematico delle potenzialità rese oggi disponibili dalle moderne tecnologie della Geomatica, e soprattutto dalle possibilità offerte da un approccio integrato e multi – disciplinare di tecniche e tecnologie diverse; per questo nell'Introduzione si è voluto sottolineare questo aspetto, descrivendo l'approccio metodologico adottato in molti lavori in contesto archeologico, che include generalmente diverse tecniche integrate tra loro allo scopo di realizzare in modo veloce e rigoroso un rilievo multi – scala che parte dal territorio, passa attraverso l'area del sito archeologico e degli scavi, ed arriva fino al singolo reperto; questo approccio è caratterizzato dall'aver tutti i dati e risultati in un unico e ben definito sistema di riferimento.

In questa chiave di lettura l'attenzione si è poi focalizzata sulle due tecniche che rivestono oggi nel settore in esame il maggiore interesse, cioè

fotogrammetria digitale e laser a scansione terrestre.

La struttura della tesi segue le fasi classiche del processo che a partire dal rilievo porta alla generazione dei prodotti di rappresentazione; i primi due capitoli, incentrati sull'acquisizione del dato metrico, riguardano quindi da un lato le caratteristiche delle immagini e dei sensori digitali, dall'altro le diverse tipologie di sistemi laser con le corrispondenti specifiche tecniche; sempre nei primi capitoli vengono descritte le caratteristiche metodologiche e tecnico – operative e le relative problematiche delle due tipologie di rilievo.

Segue un capitolo sulle procedure di calibrazione delle camere digitali non professionali, imperniato sull'utilizzo di software diversi, commerciali e sviluppati *in house* per questo scopo, prestando attenzione anche agli strumenti che essi offrono in termini di risultati ottenibili e di controllo statistico sugli stessi.

La parte finale della tesi è dedicata al problema della rappresentazione, con l'obiettivo di presentare un quadro generale delle possibilità offerte dalle moderne tecnologie: raddrizzamenti, ortofoto, ortofoto di precisione e infine modelli tridimensionali foto – realistici, generati a partire sia da dati fotogrammetrici sia da dati laser.

ABSTRACT

The technological solutions made today available by the disciplines of the modern Geomatic, offer very interesting opportunities in the field of Cultural Heritage survey, either for the primary moment of the survey, that is the phase of the metric data acquisition, either for the thematic of the representation for archaeological, architectural and historical objects.

The study of this thesis proposes, on the basis of numerous experiences led during the Ph. D. course by the Survey Laboratory of the DISTART Department, to face and deepen the problems connexes with the the use of digital photogrammetry and laser scanner methods in the field of Cultural Heritage.

The conducted research is moreover applied, so was primary the need of having some real cases of study, for the practice experiment of this techniques; but it's important underline that in this field every case of study presents peculiar characteristics that makes it interesting and not easily describable by conventional schemes and standardized methodologies, so the emerged problematics have every time adressed the research to some investigations rather than others.

With regard to this, the made experiences have underlined that the field of Cultural Heritage is the most emblematic of the potentialities today offered by the modern technologies of the Geomatic, and especially by an integrated and multi – disciplinary approach conducted using different techniques integrated together, with the aim of performing in a quick and rigorous way a multiscale survey from the territory to the site area and excavations, and finally to single objects, characterized by having all the data and results in a common well established reference system; this aspect was particularly pointed out in the thesis introduction, describing a methodologic approach adopted by the DISTART team in many works on archaeological context.

Starting from this point, the attention is focused on the two techniques that today hold in this sector the greater interest, that are digital photogrammetry and laser scanner.

The thesis structure follows the classical phase of the process that, starting from the survey, conducts to the generation of the final representation products; the first two chapters, centred on the acquisition of the metric data, consider so on one side the characteristics of the images and the digital sensors, on the other side the different kinds of laser systems with the correspondence technical specifications; in this part are also described the technical – operative methodologies and the problems connexes with the survey by means of this techniques.

One chapter is then dedicated to the consumer digital camera calibration procedures, experimenting different software, commercial and in house developed, making attention also to the tools that these systems offer in terms of obtainable results and statistical control about these.

The final part of the thesis is about the problem of representation, with the purpose to present a general summary of the possibilities offered by the new technologies: photoplans, orthophotos, true orthophotos and photo textured 3D models, generated by photogrammetry and laser scanner.

1.

INTRODUZIONE

Il campo dei Beni Culturali ha suscitato nel corso degli ultimi anni un interesse sempre più frequente da parte della comunità scientifica che fa riferimento alle scienze del rilevamento. L'UNESCO ed altre fra le maggiori agenzie ed autorità nel settore pongono ormai sempre maggiore attenzione alla documentazione metrica digitale accurata di siti archeologici, centri storici cittadini, complessi edificati d'importanza storico – architettonica, reperti archeologici; si è quindi andata sempre più diffondendo l'idea che la conoscenza di un bene non può riguardare solo la sua storia artistica, ma deve necessariamente comprendere anche le sue caratteristiche di posizione, forma e geometria.

Le scienze geo – topo – cartografiche hanno conosciuto negli ultimi anni un profondo rinnovamento ed un'importante evoluzione, e le possibilità oggi rese concrete dalle tecnologie elettroniche ed informatiche della moderna Geomatica, offrono nuove prospettive in tutte le applicazioni del rilevamento.

In questo senso il campo dei Beni Culturali è quello che più degli altri si presta ad un approccio complementare e integrato di tecniche e tecnologie diverse, tutte di grande interesse e in continuo sviluppo; in primo luogo perché in questo settore ogni situazione costituisce un caso a sé stante, con le proprie caratteristiche, problematiche e specificità, che spesso costringono ad abbandonare i classici schemi ed approcci del rilievo per cercare soluzioni nuove e diversificate; in secondo luogo qualunque bene per poter essere correttamente studiato e compreso non va considerato solo come singola entità, ma va inserito nel contesto territoriale in cui si trova e questo costringe spesso ad adottare un approccio multi – disciplinare e multi – scala, che partendo dal rilievo del territorio arriva fino al singolo reperto, ponendo per ogni fase problematiche diverse, che richiedono strumentazioni distinte e che operano con precisioni non omogenee e differenti sistemi di riferimento, ma che devono alla fine riuscire a coesistere e comunicare; in terzo luogo questo è un settore che interessa moltissime aree di studio, dall'archeologia all'architettura, dalla storia all'arte, dal rilevamento alle scienze strutturali, ed ogni studioso ha le proprie

esigenze in termini di procedure, dati di partenza, conoscenze necessarie e prodotti finali ottenibili, ma tutte queste aree di studio devono riuscire in qualche modo a colloquiare tra loro.

1.1 L'integrazione di Tecniche Geomatiche per il rilievo dei Beni Culturali: un approccio metodologico

Come già detto, il campo del rilevamento dei Beni Culturali è probabilmente il più emblematico delle possibilità oggi offerte dall'integrazione delle moderne tecniche della Geomatica, per prima cosa per le specificità presentate da ogni caso di studio ed inoltre perché spesso le condizioni di lavoro impongono che il tempo dedicato alle attività di rilievo e acquisizione sia breve, una richiesta che un approccio multi – disciplinare può oggi parzialmente affrontare e risolvere [Bitelli et al, 2005].

Le nuove tecniche e tecnologie digitali offrono, infatti, la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo dalle attività di rilievo, ma anche nella rappresentazione e nella visualizzazione, con lo scopo di avere una descrizione metrica accurata del territorio, strutture, edifici e reperti; esse costituiscono potenti strumenti per l'analisi degli oggetti ed a supporto delle attività di ricostruzione e restauro. L'acquisizione ed il processamento dei dati devono essere realizzati seguendo appropriate metodologie, prendendo in considerazione le caratteristiche di ogni tecnica sia in termini di capacità intrinseche, come ad esempio precisione, accuratezza e formato dei dati, sia allo scopo della mutua integrazione, con lo scopo di inserire tutti i prodotti in un comune *database*, utile per molte applicazioni: divulgazione, documentazione, studi di stabilità delle strutture, etc.

L'approccio metodologico che qui viene descritto è stato adottato in molti lavori in contesto archeologico, come il sito di Phoinike in Albania (2000), il sito di Soknopaiou Nesos in Egitto (2002), il sito di Tilmen Höyük in Turchia (2004), ed include generalmente diverse tecniche integrate tra loro allo scopo di realizzare in modo veloce e rigoroso un rilievo multi – scala che parte dal territorio, passa attraverso l'area del sito archeologico e degli scavi, ed arriva fino al singolo reperto [Bitelli et al., 2005]; questo approccio è caratterizzato dall'avere tutti i dati e risultati in un unico e ben definito sistema di riferimento.

La prima fase consiste in genere nella definizione di punti di riferimento o di una rete d'inquadramento pre – segnalizzata nell'area di interesse; questo generalmente implica l'adozione della geodesia spaziale, per esempio per la

connessione alla rete IGS di stazioni permanenti al fine di realizzare la georeferenziazione assoluta del sito, nel caso non esistano, come spesso accade, punti geodetici locali o dati noti al riguardo. Il sistema GPS può essere utilizzato anche in modalità cinematica per la descrizione della morfologia dell'area ed il rilievo delle strutture, talvolta accoppiato con altre tecniche, come rilievi topografici classici con *Total Station* e fotogrammetria aerea da bassa quota, anche con l'utilizzo di piattaforme non convenzionali, e terrestri; i risultati sono in ogni caso ottenuti in uno stesso sistema di riferimento.

Gli stessi punti già rilevati possono essere utilizzati per la georeferenziazione di immagini satellitari, utili per una descrizione del territorio circostante e come base per unire e sovrapporre tutti i rilievi e gli altri dati esistenti, oltre che per altri studi, come classificazioni e interpretazioni tematiche.

Rilievi topografici classici, laser a scansione terrestre e fotogrammetria *close – range* sono usati alla scala del sito per il rilievo di oggetti e strutture; tutte le metodologie richiedono la realizzazione preliminare dell'orientamento nel sistema di riferimento comune definito.

La fotogrammetria, da sola o integrata col laser a scansione, con i loro prodotti come le ortofoto, la restituzione vettoriale tridimensionale e i *Digital Surface Models* con o senza applicazione della *texture*, costituiscono importanti strumenti per lo studio visuale e le analisi strutturali, ad esempio a scopo di restauro, combinando un'accurata informazione metrica con una descrizione fotografica qualitativa di alta qualità.

Infine la conoscenza di un sito può essere facilitata grazie ad esplorazioni virtuali, utilizzando tecniche di realtà visuale basate su dati fotografici, come la tecnologia QTVR (*Quick Time Virtual Reality*) o su dati vettoriali e raster, come i prodotti in formato VRML, considerando anche che questo tipo di prodotti è altamente interattivo e può facilmente essere reso disponibile sul web.

Per singoli oggetti, lo studio può essere realizzato utilizzando differenti tecniche, secondo le caratteristiche di forma, dimensione e *location* dell'oggetto, e degli scopi del rilievo; in questo senso la fotogrammetria digitale è un'ottima soluzione, grazie alle sue caratteristiche di realizzare il rilievo senza contatto con l'oggetto ed in tempo breve, così da non richiedere l'interruzione delle attività di scavo per un lungo periodo; attualmente è inoltre possibile l'uso di camere digitali a medio – basso costo, che permettono l'acquisizione del dato metrico con semplicità, economicità e maneggevolezza, anche se in questo caso il processo fotogrammetrico diviene più difficile, richiedendo l'uso di algoritmi e procedure appropriate, specialmente per quanto riguarda la fase di calibrazione della camera.

Il laser a scansione terrestre è una tecnica emergente per la realizzazione di oggetti con una elevatissima densità di informazioni tridimensionali, e con la possibilità di accoppiare i punti acquisiti con i propri attributi radiometrici acquisiti da camere calibrate; la disponibilità di un laser a scansione terrestre durante gli scavi è ancora una possibilità non usuale, a causa di problemi logistici connessi con le difficoltà di portare uno strumento di questo tipo in molti paesi e a causa del costo ancora elevato di questa tecnologia; è tuttavia possibile eseguire un calco degli oggetti, da rilevare al termine della missione.

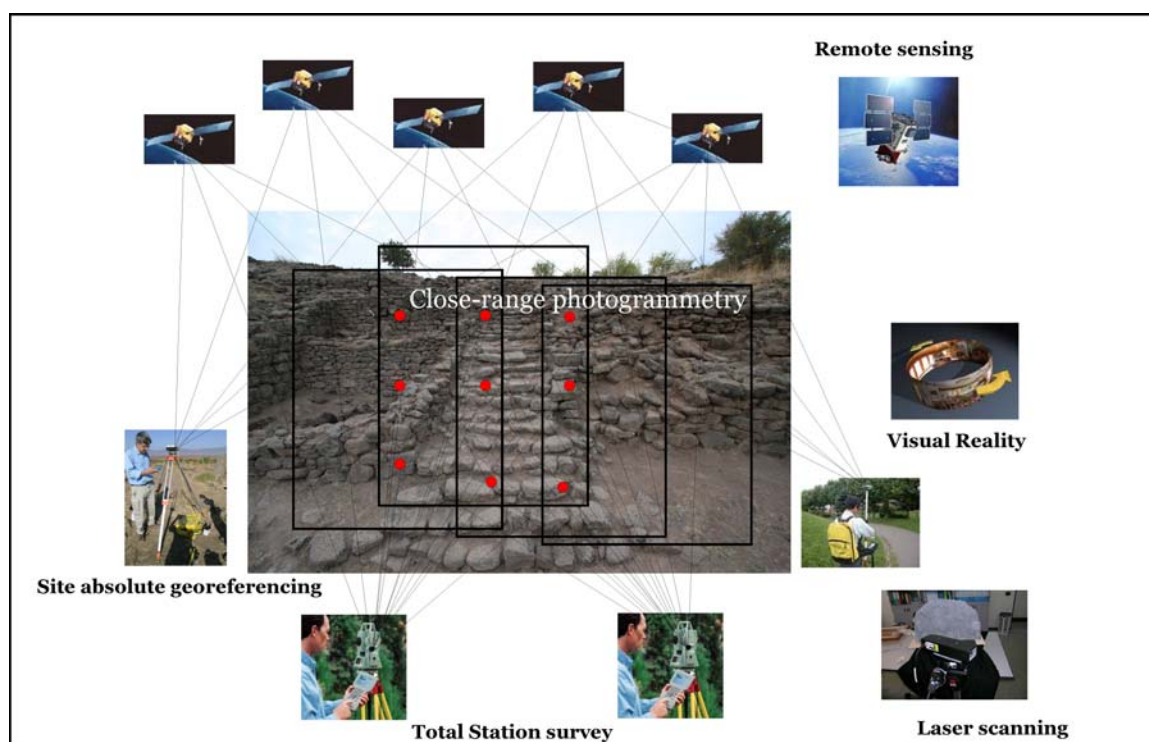


Figure 1.1-1. Uno schema della possibile integrazione di differenti tecniche geomatiche per il rilievo di un sito archeologico.

1.2 Obiettivi e organizzazione della tesi

La tesi risulta incentrata sull'approfondimento delle nuove tecniche digitali di rilievo applicate al campo dei Beni Culturali, in particolare fotogrammetria digitale e laser a scansione terrestre.

La struttura della tesi è così articolata:

- Nel primo capitolo, d'introduzione, si parla dell'approccio metodologico seguito per il rilievo di siti archeologici che vede l'integrazione di tutte le tecniche della Geomatica, consentendo un rilievo multi – scala dell'area di interesse che, partendo dalla georeferenziazione assoluta del sito, arriva fino alla restituzione di singoli oggetti.

- Il secondo capitolo affronta l'argomento dell'acquisizione del dato per i metodi cosiddetti *image – based*, cioè basati su immagini; dopo una descrizione sulle caratteristiche delle immagini e delle camere digitali, prendendo spunto dalle particolari soluzioni adottate in reali casi di studio affrontati nei tre anni di Dottorato, si trattano le caratteristiche metodologiche e tecnico – operative della tecnica fotogrammetrica nel campo del rilievo dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda l'utilizzo di tecniche non convenzionali di fotogrammetria aerea (palloncini e aquiloni) per il rilievo di aeree archeologiche e di edifici d'interesse storico-architettonico, analizzando anche le problematiche che tali tecniche determinano nell'elaborazione dei dati (ad esempio triangolazione aerea di blocchi non convenzionali), sia per quanto riguarda gli approcci possibili della fotogrammetria *close – range*.
- Il terzo capitolo riguarda la tecnica del laser a scansione terrestre; in particolare è dedicato ad un'analisi di questi sistemi, sia in termini dei prodotti disponibili nel mercato, sia in termini dell'elaborazione di cui necessitano i dati forniti da un laser scanner. In letteratura è oggi disponibile una notevole casistica d'utilizzo di questi strumenti, che sottolinea l'eccezionalità e la ricchezza di particolari del rilievo ottenuto mediante laser, ma contemporaneamente evidenzia la mancanza di definizione di uno standard specifico per questa tipologia di rilievo e la necessità di un ulteriore approfondimento riguardante la precisione che è possibile ottenere. Nel medesimo capitolo si approfondisce anche il legame esistente tra fotogrammetria e laser scanner, sottolineando pregi e difetti delle due metodologie e da cui risulta evidente il vantaggio ottenibile dal loro utilizzo integrato.
- Nel quarto capitolo si affronta la problematica della calibrazione delle camere digitali amatoriali, oggi sempre più utilizzate nel rilievo dei Beni Culturali per le loro caratteristiche di economicità e semplicità d'uso; in particolare dopo una descrizione dei modelli analitici di calibrazione più utilizzati, sono descritti alcuni reali casi di calibrazione, trattati evidenziando le problematiche incontrate ed effettuando test di comparazione fra software diversi, sia commerciali che *in house*.
- Nel quinto capitolo si approfondisce la tematica della rappresentazione con l'obiettivo di presentare un quadro generale delle possibilità offerte dalle moderne tecnologie: in particolare si affronta l'argomento della generazione di raddrizzamenti, ortofoto e ortofoto di precisione sia nel campo della fotogrammetria aerea che terrestre, e l'argomento connesso del ricampionamento di immagini digitali.

- Nell'ultimo capitolo della tesi si approfondisce il tema della generazione automatica di modelli digitali delle superfici, descrivendo le varie tecniche di *Image-Matching* ed esponendo le esperienze condotte; si riallaccia direttamente a questo argomento il tema della creazione di modelli tridimensionali foto-realistici per la rappresentazione di oggetti e reperti archeologici; in particolare sono evidenziate le differenze metodologiche e le problematiche riscontrate nei due approcci seguiti, *image-based* e *range-based*, ed eseguiti alcuni test di confronto sia sui risultati ottenuti con le due tecniche sia sulle precisioni raggiungibili con software commerciali e con software sviluppati ad hoc per tale scopo.

1.3 Descrizione dei casi di studio affrontati

La necessità di disporre di beni reali su cui sperimentare le tecniche e tecnologie oggetto della presente tesi, è nata dalla natura stessa della ricerca descritta, che è prettamente applicata; è però importante sottolineare che a loro volta, le problematiche caratteristiche di ogni caso affrontato, hanno spinto all'esigenza di trovare soluzioni specifiche, che hanno indirizzato e in qualche modo definito la ricerca stessa, portandola verso le tematiche approfondite.

I reali casi di studio affrontati vengono qui brevemente descritti:

- L'antica città di Soknopaiou Nesos risale al periodo greco-romano ed è ubicata nella regione del Fayyum, a nord del lago Birket Qarun. La campagna di rilievo, condotta nell'ambito della missione archeologica congiunta delle Università di Bologna e di Lecce (resp. Prof. S. Pernigotti e Prof. M. Capasso, direzione di scavo Prof. P. Davoli) si è svolta nel febbraio 2002 (Davoli, 2004).



Figura 1.3-1 La città di Soknopaiou Nesos.

- Il monastero di Mesopotam (Figura 1.3-2), la cui origine viene fatta risalire intorno al XIII secolo d.C. (Meksi, 1972), fa parte di un importante complesso che sorge a pochi chilometri di distanza dal sito archeologico di Phoinike su cui opera la Missione Archeologica dell'Università di Bologna in Albania, diretta dal Prof. Sandro De Maria. L'area si trova in Epiro, nell'antica regione della Caonia nel sud dell'Albania, di fronte all'isola di Corfù (De Maria et al, 2001).



Figura 1.3-2 La facciata nord del monastero di Mesopotam con l'attuale ingresso.

- Percorrendo la via Porrettana, dopo Marzabotto in località Venola, sulla sinistra provenendo da Bologna, ci si trova di fronte ai resti della Chiesa di San Giuseppe, proprio in fregio alla strada maestra. Questa chiesa fu progettata da Alfonso Rubbiani nel 1897 e costruita negli anni 1899-1902 per conto della Opera Pia Davia Bargellini che in quel luogo possedeva numerosi fondi ed aveva perciò necessità di assistenza religiosa per le famiglie coloniche e per gli abitanti delle case limitrofe durante i mesi estivi (Schiavina, 1981).

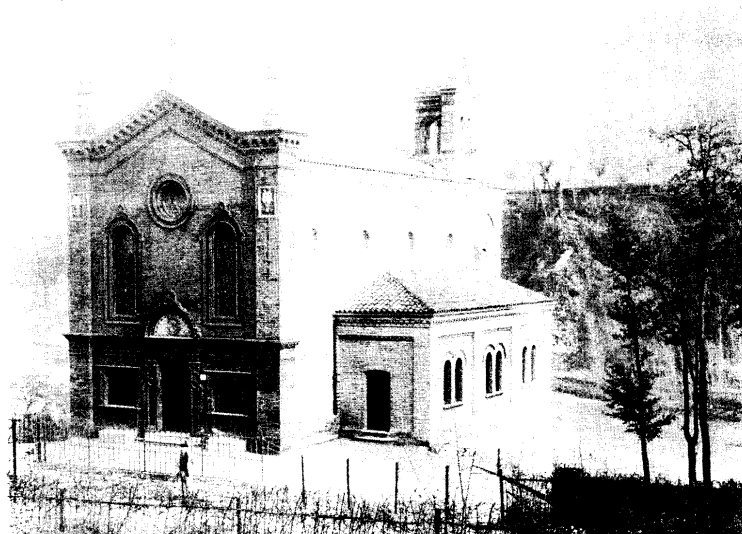


Figura 1.3-3 La Chiesa di Venola pochi anni dopo la costruzione, nel 1905 circa.

- La missione archeologica dell'Università di Bologna in Turchia, diretta da Nicolò Marchetti, è cominciata nel 2003 nell'antica città di Tilmen Höyük (Marchetti, 2004). L'area d'interesse è un antico insediamento ubicato 10 km ad est della città di Islahiye all'interno della provincia di Gaziantep nel sud – est della Turchia e datato nel 3400 a. C.



Figura 1.3-4 Il sito di Tilmen Höyük.

- La Basilica di Santo Stefano a Bologna è un complesso ultramillenario di grande interesse storico ed architettonico. La tradizione attribuisce la fondazione della Basilica a Petronio, vescovo di Bologna tra il 431 ed il 450 d.C.: Petronio volle erigere a Bologna un luogo di culto consacrato al martire Stefano sui resti di un preesistente tempio pagano dedicato ad Iside Vittoriosa. All'insediamento originario, nel corso dei secoli, furono aggiunte numerose nuove costruzioni fino a raggiungere nel XII secolo il complesso di forme e volumi quasi inestricabili ancora esistenti, e costituito da sette santuari da cui il nome di “Basilica delle Sette Chiese”.



Figura 1.3-5 La facciata della Chiesa di Santo Stefano.

- La Tomba di Rolandino dei Passaggeri, dedicata al fondatore della moderna pratica notarile, è situata nella piazza di San Domenico, a Bologna (Figura 1.3-6); costruita nel quattordicesimo secolo d. C., fu restaurata in seguito ai gravi danneggiamenti sofferti durante la seconda guerra mondiale.

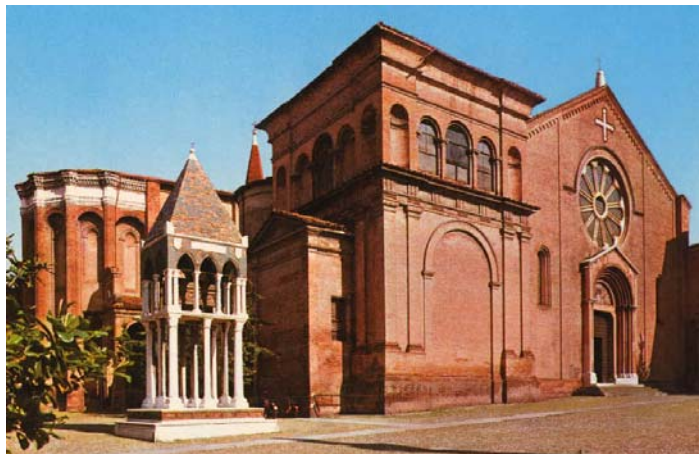


Figura 1.3-6 La piazza di San Domenico, con sulla sinistra la Tomba di Rolandino.

2.

L'ACQUISIZIONE DEL DATO METRICO: METODI *IMAGE BASED*

2.1 Le immagini digitali: acquisizione e caratteristiche

Un'immagine digitale è fondamentalmente una matrice di elementi, i *pixel* (da *picture element*, cioè elementi d'immagine), il cui contenuto radiometrico è espresso dalla funzione continua $g(i,j)$, dove i,j sono variabili spaziali; Il contenuto radiometrico può essere ad esempio il valore bianco o nero, un livello di grigio o un valore RGB (Red Green Blue).

Qualunque sia il metodo di acquisizione di un'immagine digitale, bisogna considerare che un'immagine di una scena naturale o una diapositiva non sono entità esprimibili con un'espressione analitica chiusa e quindi risulta necessario ricercare una funzione discreta che le rappresenti.

Il procedimento che converte una rappresentazione continua in una discreta si chiama digitalizzazione (*digitizing*), e avviene campionando le variabili spaziali e quantizzando i valori radiometrici corrispondenti.

Questo processo può avvenire in maniera diretta tramite l'utilizzo di una camera digitale o in maniera indiretta, cioè digitalizzando tramite uno scanner un'immagine diapositiva o negativa.

In entrambi i casi, il cuore dello strumento di digitalizzazione è un sensore allo stato solido di dimensioni variabili ed in grado di raccogliere e accumulare le informazioni trasportate dall'energia elettromagnetica, e renderle accessibili all'utente (Figura 2.1-1).



Figura 2.1-1 Il sensore CCD della camera digitale Canon EOS20D.

Il principio di formazione di un'immagine digitale è illustrato in Figura 2.1-2: il sensore misura la quantità di luce incidente, che viene convertita sottoforma di tensione elettrica con intensità proporzionale; quest'ultima a sua volta viene trasformata da un convertitore analogico/digitale (A/D) in digital number, cioè in bit di informazioni.

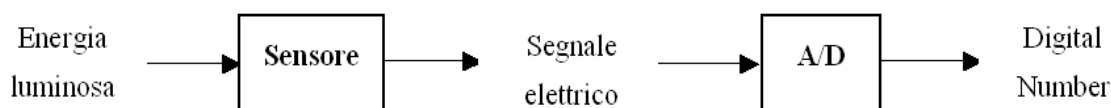


Figura 2.1-2 Formazione di un'immagine digitale.

Un'immagine digitale consiste, dunque, in una matrice $g(i,j)$ di *pixel* del tipo:

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{pmatrix} \quad (1)$$

dove:

- $i = 0, 1, \dots, C-1$ indice di riga
- $j = 0, 1, \dots, R-1$ indice di colonna
- R = massimo numero di righe
- C = massimo numero di colonne
- $g(x,y) = \{0,1,\dots,\max\}$ valori radiometrici

2.1.1 La risoluzione radiometrica

Il processo di formazione di un'immagine digitale consiste quindi in due operazioni, la quantizzazione e il campionamento, che sono direttamente legate alle due caratteristiche fondamentali di questo tipo di immagini: la risoluzione radiometrica e la risoluzione geometrica.

La risoluzione radiometrica è legata alla quantizzazione, cioè alla conversione dell'intensità del segnale luminoso (trasformata dal sensore in un valore reale di intensità elettrica) in un numero intero, che viene memorizzato in corrispondenza di ciascun *pixel* (Tabella 2.1.1-1).

Se l'intensità viene trasformata solo in due numeri, 0 e 1, significa che si possono rappresentare solo due livelli di radianza, il bianco (1) e il nero (0) e per misurare questa informazione si usa un solo bit.

Se l'intensità viene trasformata in 256 numeri, possiamo invece rappresentare 256 livelli di radianza compresi tra 0 (nero) e 255 (bianco) e avremo un'immagine a toni di grigio o a palette di colori. In questo caso l'immagine viene detta a 8 bit o a 1byte, in quanto un intero tra 0 e 255 può essere memorizzato in un byte (in rappresentazione binaria 8 cifre $0/1 = 2^8$ combinazioni di $0/1 = 8 \text{ bit} = 1 \text{ byte}$).

Le immagini a colori a tre canali, sono rappresentate dalla seguente relazione:

$$G_C = \{g_1(i, j), g_2(i, j), g_3(i, j)\}$$

nella quale le tre funzioni $g_1(i, j)$, $g_2(i, j)$, $g_3(i, j)$ possono indicare ad esempio i tre livelli Rosso, Verde, Blu (immagini RGB o *true color*) o Giallo, Ciano e Magenta (immagini YCM).

Per queste immagini si parla di matrice immagine a tre piani, in quanto, ad esempio nelle immagini RGB, ogni colore è la sovrapposizione dei tre colori fondamentali, in cui la saturazione di ognuno viene rappresentata da un valore compreso tra 0 e 255; la radiometria di un *pixel* è quindi rappresentata dai tre numeri che esprimono le saturazioni dei tre colori fondamentali, tre byte per ogni *pixel*.

Quando si converte un'immagine complessa in modalità Colore Tavolozza, dall'immagine dell'oggetto vengono selezionati i 256 colori che ne consentono la descrizione più accurata; ad ogni colore viene associata una 'etichetta' rappresentata da un intero compreso tra 0 e 255, che a sua volta è formato da tre livelli dei colori RGB; questo numero è il puntatore alla tavolozza che contiene le descrizioni dei 256 colori significativi.

L'immagine in modalità colore Tavolozza contiene quindi meno dati dell'originale e il file dell'immagine è di dimensioni inferiori.

n° bit	n° byte	DN	Tipo di immagine digitale
1	(1/8)	2	Bianco e Nero (B/N)
8	1	256	Toni di grigio o palette di colori
16	2	65536	64K colori
24	3	16777216	Red Green Blue (RGB)

Tabella 2.1.1-1 – Vari tipi di immagini digitali in relazione al proprio contenuto radiometrico.

2.1.2 La risoluzione geometrica

La risoluzione geometrica è legata all'operazione di campionamento, cioè fondamentalmente all'area di immagine corrispondente a ciascun elemento del sensore; poiché un'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale i cui elementi o *pixel* sono i contenitori dell'informazione, un'elevata risoluzione geometrica comporta la generazione di una matrice con un grande numero di righe e colonne, cioè un elevato numero di *pixel* molto piccoli.

La dimensione geometrica al suolo dei *pixel* influisce sulla riproduzione dei dettagli della scena (Figura 2.1.2-1) ed è determinata dalla distanza del sistema di presa e dalle sue caratteristiche di funzionamento.

Il parametro che indica il numero di *pixel* contenuti in un'unità di lunghezza e quindi la dimensione degli stessi, è la risoluzione geometrica, che solitamente è indicata in DPI, cioè *Dots Per Inch* (punti per pollice).

$$\text{dpi} = \frac{\text{n° pixel}}{\text{pollici}}$$

In alternativa la risoluzione viene espressa come dimensione d_{pix} del *pixel* espressa in μm . Le espressioni seguenti danno la relazione tra dpi e dimensione d_{pix} del *pixel*:

$$d_{\text{pix}} = \frac{25400}{\text{dpi}} \quad \text{dpi} = \frac{25400}{d_{\text{pix}}}$$

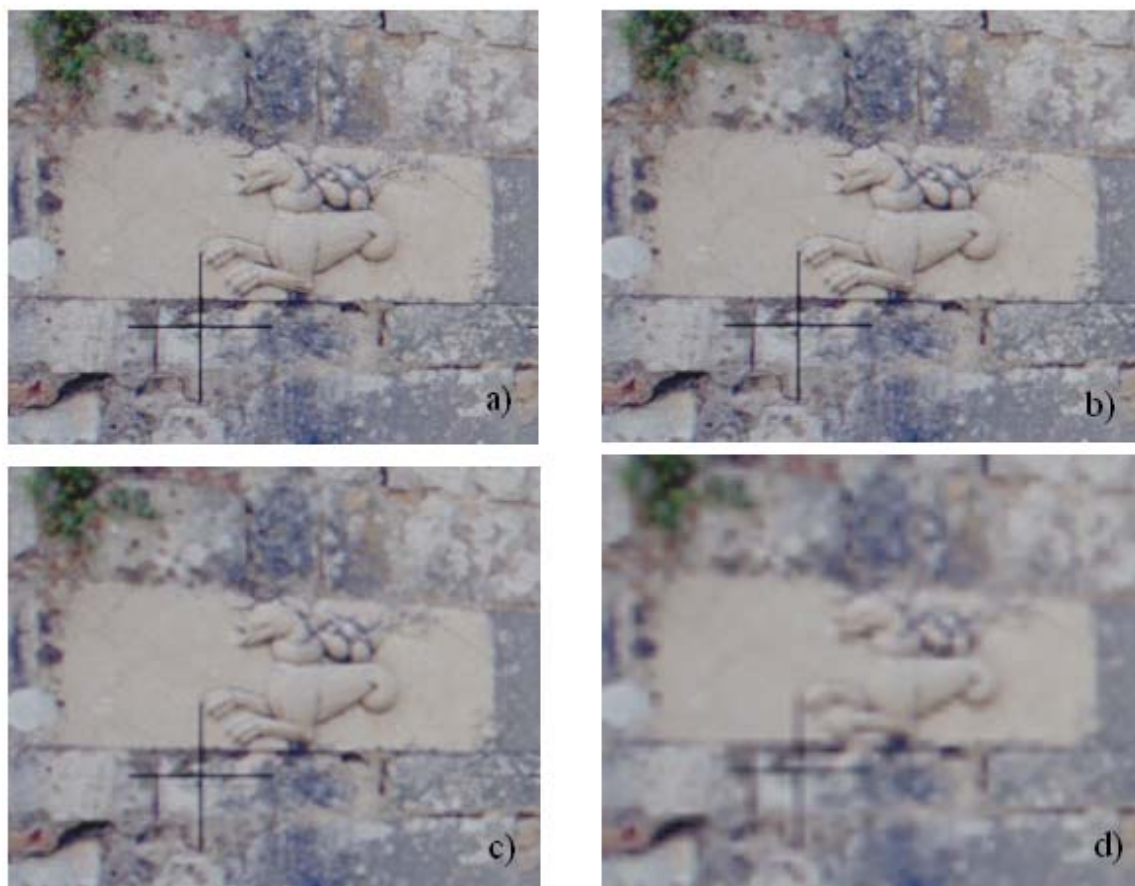


Figura 2.1.2-1 Immagine digitale a differente risoluzione: (a) 636x508 *pixel*, (b) 318x254 *pixel*, (c) 159x127 *pixel*, (d) 80x64 *pixel*.

In genere si usano *pixel* quadrati e quindi risoluzioni uguali nelle due direzioni del sistema di riferimento interno, comunque esiste un parametro addizionale detto *share factor* S_x che tiene conto dell'eventuale diversità della dimensione del *pixel* e che si può stimare durante il processo di calibrazione della camera (vedi Capitolo 4).

Direttamente legata alla dimensione del *pixel* è la definizione del sistema di riferimento interno dell'immagine; infatti se si vuole utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici, bisogna definire la relazione fra la posizione del *pixel* e il sistema di coordinate immagine.

In Figura 2.1.2-2 è mostrato il sistema di coordinate immagine con l'origine spostata di mezzo *pixel* all'esterno della matrice immagine; le coordinate immagine del centro di un *pixel* g_{ij} si ottengono moltiplicando il numero di indice per la dimensione del *pixel*.

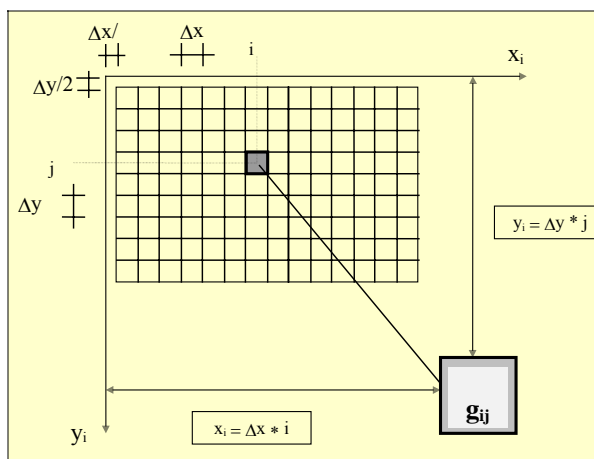


Figura 2.1.2-2 Contenuto metrico delle immagini digitali.

$$x_{i-\text{baricentro}} = i \cdot \Delta x_i$$

$$y_{j-\text{baricentro}} = j \cdot \Delta y_j$$

La tradizionale misura di coordinate è sostituita dall'individuazione del *pixel* all'interno della matrice immagine. Tale posizione si traduce in coordinate reali oggetto attraverso le relazioni analitiche della fotogrammetria.

Se i *pixel* sono convenientemente piccoli, si assumono gli indici riga e colonna come fossero le coordinate immagine e anche la distanza principale c può essere espressa in unità Δx e Δy .

2.1.3 I sensori delle camere digitali

Le comuni camere e video-camere digitali utilizzano principalmente due tipologie di sensori: il CCD (*Charged Coupled Device*: dispositivo a carica accoppiata) e il CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*: semiconduttore a metallo ossido complementare) (Figura 2.1.3-1).

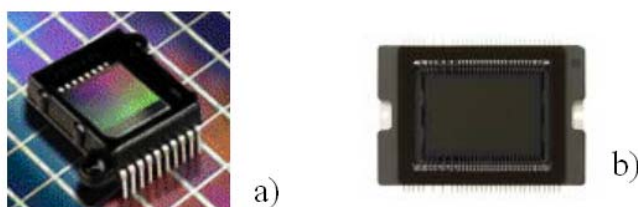


Figura 2.1.3-1 Immagine di un sensore CCD (a) e di un sensore CMOS (b).

Entrambi sono costituiti da elementi disposti in una linea o in una matrice bidimensionale, comprendenti fotodiodi capaci di convertire la luce in carica elettrica; ciò che differenzia i due tipi è la modalità con cui avviene la trasformazione della carica elettrica in tensione ed il suo trasferimento dal *chip*

alla camera (Figura 2.1.3-2): nei sensori CCD la carica di ogni *pixel* è trasferita ad un nodo di output (*chip*) per essere poi convertita tutta insieme in tensione, memorizzata ed inviata come segnale analogico alla camera, che poi lo trasferisce come *Digital Number*; nei sensori CMOS invece la trasformazione da carica elettrica a tensione avviene all'interno di ogni *pixel*, ed il chip trasferisce direttamente il *Digital Number*.

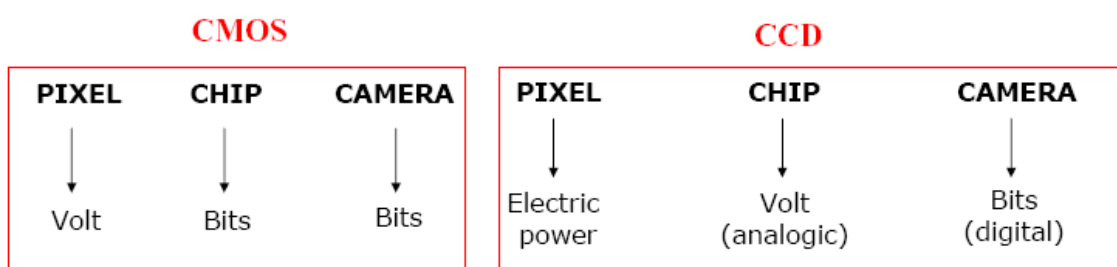


Figura 2.1.3-2 La conversione e il trasferimento del segnale digitale nei sensori CCD e CMOS.

Le principali caratteristiche del sensore CCD sono le seguenti:

- richiedono molta energia;
- non sopportano operazioni molto veloci, cioè presentano lentezza nelle operazioni *read in/out*;
- le cariche sono accumulate consecutivamente e trasferite insieme alla fase di conversione in segnale digitale;
- le immagini derivate sono di alta qualità (rispetto ad altri sensori);
- attualmente le dimensioni del più grande CCD in commercio sono: 9216 x 9216;
- attualmente le minori dimensioni del pixel di un CCD in commercio sono: 2.4 x 2.4 micron.

Le principali caratteristiche del sensore CMOS sono le seguenti:

- la carica è amplificata per ogni *pixel* (non contemporaneamente per tutti i *pixel* come nei CCD), quindi questi sensori presentano minore uniformità dell'output;
- possibilità di leggere solo una parte dell'immagine;
- ogni chip manda in output un segnale già digitale;
- l'area sensibile alle luce è minore che nei sensori CCD;
- la qualità dell'immagine è minore rispetto ai sensori CCD;
- consumano circa 1/5 dei normali CCD chip;
- l'acquisizione è molto veloce;
- attualmente le dimensioni del più grande CMOS in commercio sono 4096 x 4096;
- attualmente le minori dimensioni del *pixel* di un CMOS in commercio

sono 3.3 x 3.3 micron.

La maggior parte delle camere digitali amatoriali a medio e basso costo utilizza sensori CCD a matrice che impiegano la tecnologia *Interline Transfer*; la differenza principale rispetto alle camere digitali professionali, molto più costose, che invece utilizzano una tecnologia *Frame Transfer*, è mostrata in Figura 2.1.3-3.

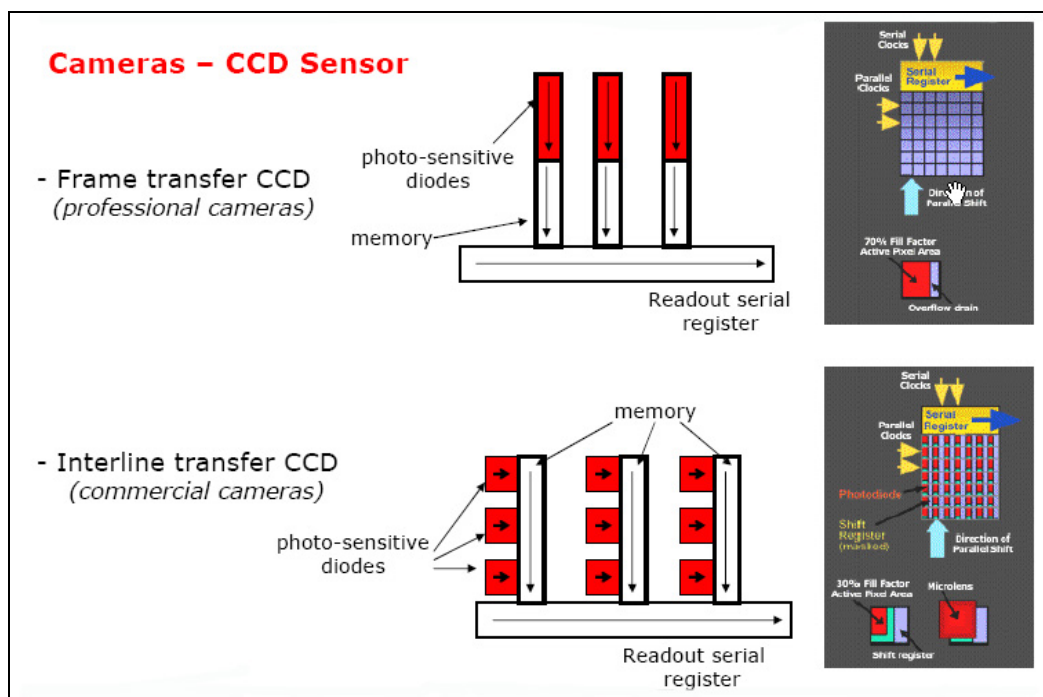


Figura 2.1.3-3 Differenza fra la tecnologia *Frame Transfer* e *Interline Transfer* per un sensore CCD.

In pratica nelle camere professionali in ogni diodo foto-sensibile c'è una memoria che serve per conservare e trasferire l'informazione acquisita, cioè la carica elettrica; nelle camere commerciali invece esiste un'unica memoria che immagazzina i dati corrispondenti a più diodi di una stessa riga del sensore e poi la trasferisce; questo determina uno *shift* temporale nella registrazione del dato.

2.1.4 La formazione di immagini digitali a colori

I fotodiodi, gli elementi sensibili del sensore di una camera digitale, sono monocromatici; per acquisire un'immagine digitale a colori RGB è necessario porre sopra ogni *pixel* un CFA (*Color Filter Array*) per scomporre la luce incidente nelle tre bande colorate (Figura 2.1.4-1).

Esistono numerose tipologie di filtri: ad esempio il filtro CYGM è composto da elementi che originano rispettivamente i colori *Cyan*, *Yellow*, *Green*, e

Magenta in quantità uguali; il filtro normalmente utilizzato nelle camere digitali commerciali è il filtro di Bayer, detto anche GRGB, in quanto dà origine al 50% di *pixel Green* ed al 25% di *pixel Red* e *Blue*.

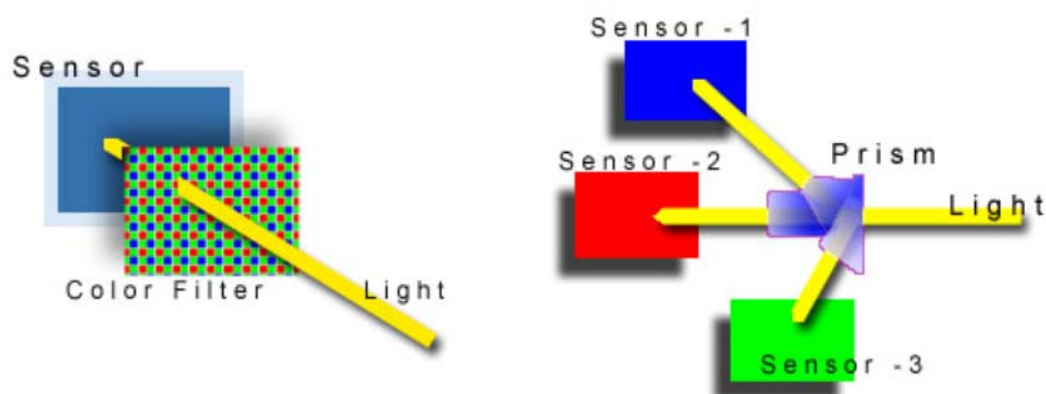


Figura 2.1.4-1 Schematizzazione della formazione di un'immagine digitale a colori.

Il principio di funzionamento del filtro è semplice: esso lascia passare al sensore solo una determinata banda di lunghezza d'onda della luce, corrispondente ad un ben determinato colore; in questo modo però solamente un colore viene “misurato” per ogni *pixel* del sensore, perciò la camera deve stimare i due colori mancanti in corrispondenza di ciascun *pixel*, effettuando un'operazione che viene detta demosaicizzazione (Figura 2.1.4-2). A questo punto si hanno a disposizione 3 immagini, la *Red*, la *Green* e la *Blue*, che sovrapposte danno origine all'immagine RGB. La stima dei colori mancanti in ogni *pixel* avviene sulla base dei *pixel* vicini, con un'interpolazione che può essere di tipo *nearest neighbour*, lineare o bilineare.

Questa operazione crea un effetto di aberrazione cromatica nelle immagini ed una riduzione nel contrasto dell'immagine, fattore importante quando si debbano discriminare e quindi collimare in modalità manuale o automatica particolari dell'immagine: di questi fattori è quindi necessario tenere conto quando l'immagine è utilizzata a scopi metrici. In questo senso si veda l'approfondimento della problematica nel Capitolo 4.

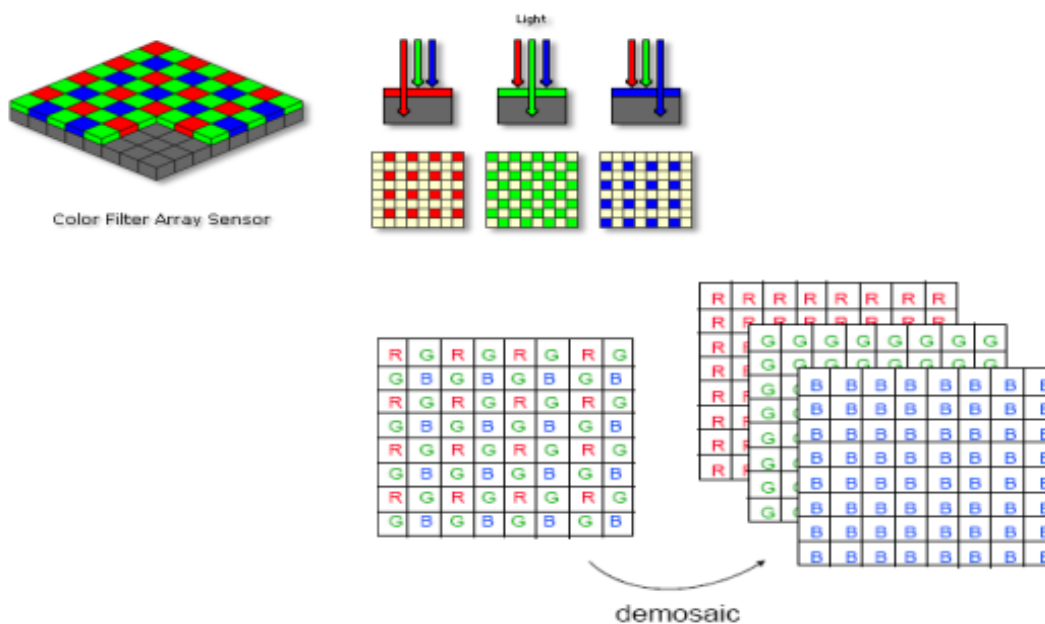


Figura 2.1.4-2 Funzionamento del *Colour Filter* e demosaicizzazione di un'immagine digitale.

Esiste attualmente una tecnologia differente, la *Foveon*, che utilizza tre layers filtranti sovrapposti per la misura dei tre colori primari; l'immagine così generata è la combinazione del risultato del triplice filtraggio e non necessita di demosaicizzazione, eliminando così i problemi esposti; questa tecnologia è però ovviamente più costosa e non è quindi di norma utilizzata nelle camere commerciali a medio-basso costo.

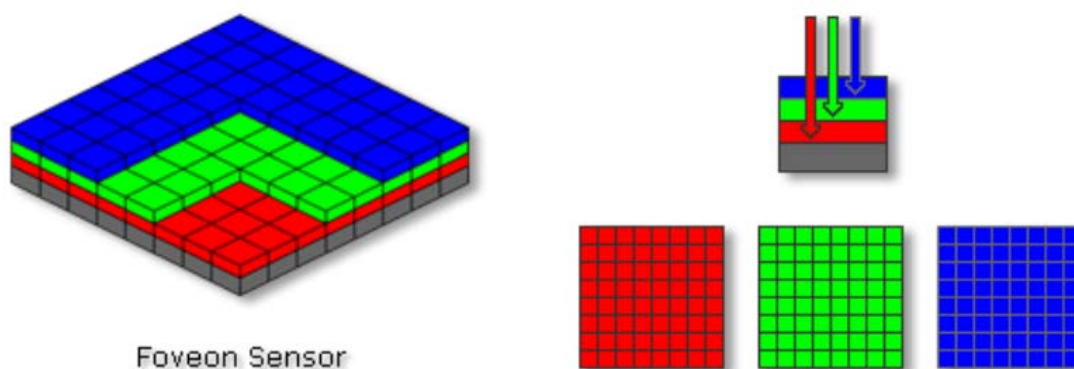


Figura 2.1.4-3 Funzionamento della tecnologia *Foveon* per la generazione di immagini digitali RGB.

2.1.5 L'acquisizione indiretta di immagini digitali tramite processo di scansione

La fotogrammetria digitale è nata in tempi assai recenti, e da allora le camere digitali hanno subito una rapida evoluzione ed il loro utilizzo in applicazioni fotogrammetriche si è diffuso molto velocemente.

Le nuove stazioni fotogrammetriche digitali, potenti e veloci grazie a componenti hardware e software sempre più sofisticati, specializzati nell'elaborazione delle immagini e che utilizzano algoritmi di calcolo raffinati, con la possibilità di automatizzare molte delle operazioni tradizionali legate alla fotogrammetria, hanno reso una realtà la *real-time photogrammetry*, cioè la cosiddetta fotogrammetria in tempo reale, in cui il tempo fra la presa e la produzione del risultato finale è brevissimo.

Nonostante questo incredibile sviluppo tecnologico, l'impiego di camere analogiche, soprattutto semimetriche e amatoriali, è ancora abbastanza diffuso nel rilievo dei Beni Culturali.

Perciò, se il lavoro richiede una precisione elevata o se non interessano operazioni in tempo reale, è necessario adottare altri metodi di acquisizione d'immagini digitali, cioè la fotogrammetria parte dalle consuete immagini fotografiche ed il processo di digitalizzazione è successivo allo sviluppo del film, tramite appositi dispositivi di registrazione raster, chiamati scanner (Figura 2.1.5-1).

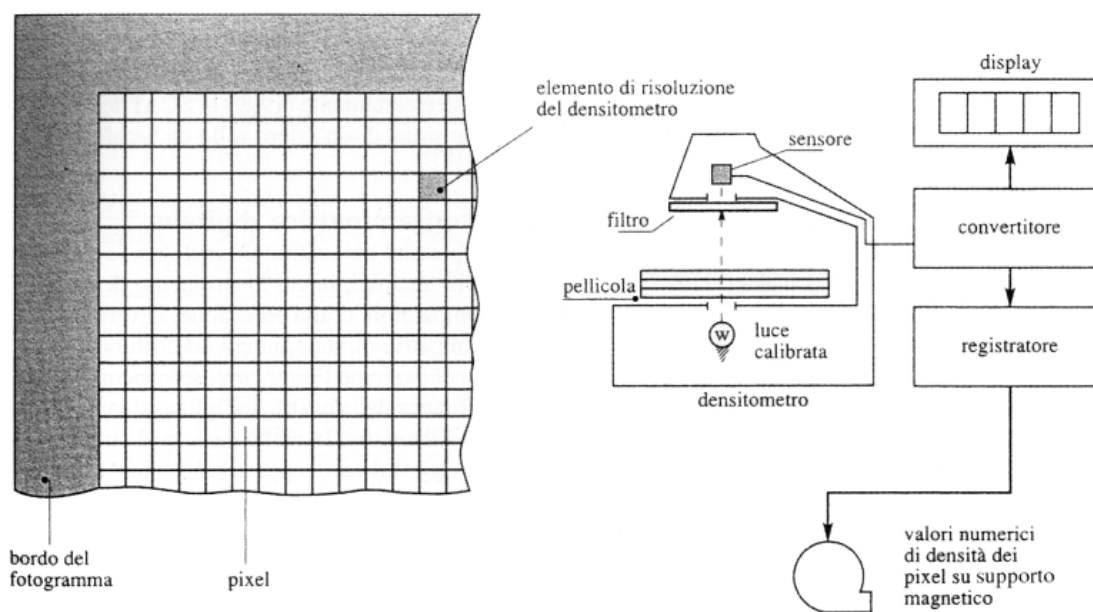


Figura 2.1.5-1 Schema semplificato di scansione di un fotogramma.

In commercio si trovano diverse tipologie di scanner, che possono essere

classificate in base alla funzione ed al campo di applicazione o in base al meccanismo di acquisizione.

Per quanto riguarda il primo criterio si possono individuare differenti categorie, ad esempio:

- scanner fotogrammetrici;
- scanner fotografici professionali;
- scanner per diapositive;
- scanner desktop;
- scanner per oggetti 3D;
- scanner per file di testo con software OCR;
- scanner multifunzionali, che inglobano scanner, fotocopiatrice e stampante;
- scanner con funzioni particolari, come ad esempio gli scanner per codici a barre.

In base al meccanismo di acquisizione si possono invece suddividere fondamentalmente in due categorie: scanner piani (*flatbed scanner*), in cui l'immagine fotografica è posizionata su un carrello piano, e scanner a tamburo rotante (*drum scanner*), in cui invece l'immagine è montata su un supporto cilindrico e al movimento dei sensori fotosensibili è anche associato il movimento di rotazione del supporto.

Ovviamente non tutti gli scanner presenti in commercio possiedono caratteristiche tali da poter essere utilizzati per scopi fotogrammetrici, per i quali devono rispondere a determinati requisiti.

Nella tabella successiva si riportano alcuni requisiti richiesti ad uno scanner fotogrammetrico.

Precisione geometrica	+/- 2 μm
Risoluzione geometrica	dimensione <i>pixel</i> 5-15 μm
Caratteristiche radiometriche	10-12 bit

Tabella 2.1.5-2 Requisiti geometrici e radiometrici richiesti ad uno scanner fotogrammetrico.

Della risoluzione geometrica e radiometrica di un sensore è stato già detto nei paragrafi precedenti, l'accuratezza è invece legata alla geometria dei *pixel*, cioè essi devono essere perfettamente equispaziati ed allineati, per garantire un'elevata precisione.

Gli scanner fotogrammetrici sono più costosi di circa uno o due ordini di grandezza rispetto ai diffusi scanner desktop, che sono comunemente utilizzati per digitalizzare fotografie e documenti. Questi tipi di scanner hanno senz'altro raggiunto caratteristiche notevoli per quanto riguarda la risoluzione ottica e le caratteristiche radiometriche, ma non assicurano l'accuratezza geometrica

richiesta dalla fotogrammetria di precisione; in talune applicazioni fotogrammetriche può tuttavia essere importante valutare l'opportunità di utilizzare queste tipologie di scanner, o in alternativa gli scanner fotografici professionali, anche per scopi metrici, considerandone la notevole convenienza economica.

Solo in pochi degli scanner in commercio si ottengono direttamente l'alta risoluzione e l'esatto posizionamento geometrico dei *pixel*. Nella progettazione di questo tipo di scanner si adottano tre differenti schemi di montaggio dei sensori fotosensibili:

- Sensore singolo, che acquisisce il fotogramma su singole linee.
- Fila di sensori (*CCD Linear Array*), che effettua la scansione del fotogramma per strisce. Le strisce possono anche essere due o tre. Il "Photoscan 2001", costruito da Zeiss e Intergraph, adotta questo principio; il sensore è trilineare, la dimensione del *pixel* è di 7 μm e la precisione di posizione è stata definita in $\pm 1 \mu\text{m}$.
- Matrice quadrata di sensori (*CCD Areal Array*), che acquisisce il fotogramma una porzione alla volta. Queste immagini parziali vengono riunite numericamente, a formare l'intero fotogramma, per mezzo di un reticolo (*reseau*) i cui nodi (crocicchi) hanno coordinate note. Lo scanner a reticolo RS1 di Rollei adotta questo principio.

Nel corso delle sperimentazioni descritte sono state utilizzate sia camere digitali che camere analogiche semimetriche e amatoriali, e per queste ultime la fase di digitalizzazione è stata eseguita principalmente con l'utilizzo di tre differenti tipologie di scanner, descritte nei paragrafi seguenti.

2.1.6 LO SCANNER FOTOGRAMMETRICO RASTER MASTER

Lo scanner fotogrammetrico professionale Raster Master (Wehrli e Associates Inc.), è un foto-scanner piano ad alta precisione.

Dal punto di vista costruttivo è caratterizzato da un basamento extra-stabile, da un nuovo tipo di frizione, che supporta il bisogno di una velocità costante durante la scansione, che elimina i problemi di allineamento tra il dispositivo di azionamento e i binari guida, che materializzano le direzioni X e Y del sistema di riferimento dello strumento e da decodificatori lineari che controllano la posizione del basamento e azionano la camera lungo le direzioni X e Y (Figura 2.1.6-1).

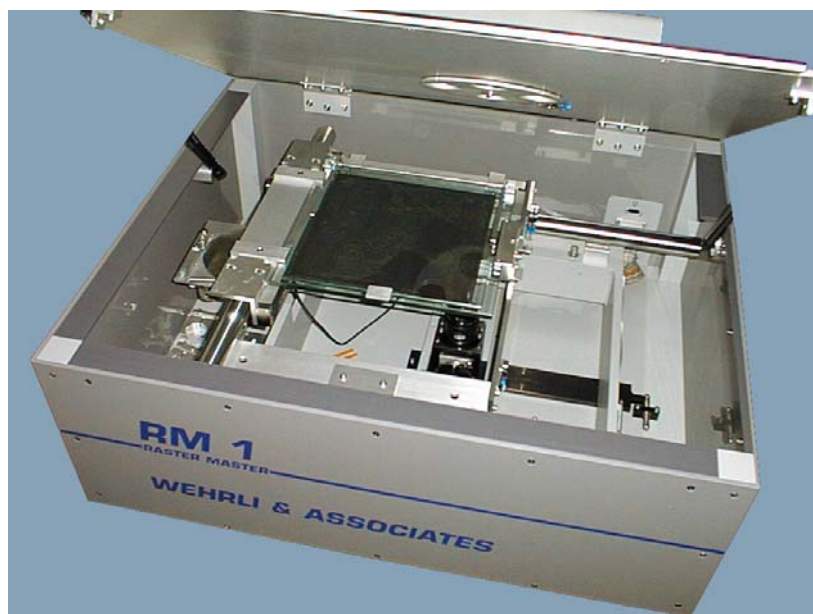


Figura 2.1.6-1 Lo scanner Raster Master.

Il Raster Master acquisisce diapositive o negativi alla risoluzione elevata di $12\ \mu\text{m}$ (2116 dpi). La finestra di scansione è di $250\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$. L'accuratezza geometrica è di $\pm 4\ \mu\text{m}$ sull'intera area di scansione, con la ripetibilità di $1\ \mu\text{m}$; è importante sottolineare che l'accuratezza geometrica è dovuta esclusivamente alle caratteristiche costruttive meccaniche e non deriva in nessun modo da un'eventuale ricampionamento dell'informazione fotografica o da un'elaborazione successiva alla scansione: tutti i dati digitalizzati vengono esclusivamente dalla sorgente originale.

Il Raster Master utilizza un sensore TDI (*Time Delay and Integration*); questo tipologia è assimilabile ad una normale linea di sensori, costituita però da ben 96×2048 elementi fotosensibili.

Il sensore TDI è stato scelto per la sua capacità di essere particolarmente sensibile alla luce; questo fatto permette di ridurre sensibilmente il rumore di fondo del sistema nonostante le elevate risoluzioni raggiungibili e fornisce una miglior definizione dell'immagine specialmente nelle aree caratterizzate da un basso valore del contrasto, come ad esempio le zone d'ombra. Una eccellente definizione dell'immagine è infatti molto importante nella fotogrammetria digitale, per l'interpretazione, la correlazione ed il riconoscimento e la definizione dei contorni.

In un normale scanner lineare, gli elementi rivelatori sono impressionati dall'immagine solo una volta, quando il sensore attraversa il fotogramma. Con la camera TDI del Raster Master, i *pixel* si muovono con l'immagine; per una data velocità di scansione, i *pixel* sono impressionati 96 volte più a lungo, quindi aumentano il tempo di integrazione e la sensibilità, e si riduce il rumore.

La densità del *pixel* è 12 bit (4096 livelli di grigio) e viene compressa in 8 bit (256 livelli di grigio) in tempo reale per mezzo di una LUT (*Look-up Table*), che è una tabella di configurazione generata da Adobe PhotoShop per rimappare i livelli di grigio nel file raster di output. La LUT può essere usata anche per invertire un'immagine (da positivo a negativo o viceversa), per eliminare rumori e difetti, per aggiustare luminosità e contrasto e applicare le correzioni nella gamma dei mezzi toni.

Questo scanner presta particolare attenzione alla densità radiometrica; un reostato permette di controllare e mantenere stabile e costante l'intensità della luce durante tutto il processo di scansione, regolandosi in base alle fluttuazioni della sorgente luminosa.

Un sensore opzionale SSM (*Sensor Stabilizing Module*) aiuta a tenere sotto controllo l'oscurità dell'immagine, che dipende in maniera esponenziale dalla temperatura e che, se lasciata destabilizzata, può degradare la ripetibilità radiometrica e conseguentemente l'accuratezza geometrica.

La larghezza di ogni passata, alla risoluzione di 12 μm , rappresenta 18.43 mm sul film; al fine di ridurre i difetti di banda, il Raster Master registra solo i 1536 *pixel* centrali, anche se il sensore TDI ha una linea di 2048 elementi fotosensibili.

Le scansioni a colori sono conseguite con filtri dicroici: rosso, verde e blu; quindi una scansione a colori richiede tre passaggi e il *pixel* dell'immagine finale ha una densità di 24 bit. I filtri dicroici prevedono una separazione ben definita del colore e la possibilità di selezionare una differente velocità di scansione per ogni banda di colore. Nel manuale non sono specificate le unità di misura di tali velocità, anche se appare piuttosto chiaro che esse mostrano il tempo di permanenza del sensore sull'immagine; la scelta di tali velocità viene solitamente effettuata in maniera empirica in base alla luminosità ed alle caratteristiche cromatiche delle immagini, come verrà meglio spiegato in seguito. È opportuno specificare che velocità troppo elevate possono causare spostamenti nelle linee di dati, con perdita di informazioni.

Dopo avere settato i parametri della scansione, è consigliabile effettuare un'analisi degli istogrammi. Un istogramma è la rappresentazione grafica del *range* di tonalità (livelli di luminosità e oscurità) in un'immagine; l'asse x dell'istogramma mostra i valori di intensità del colore dal più scuro (0) al più luminoso (255) andando da sinistra verso destra; l'asse y mostra il numero di *pixel* per ogni valore.

La distribuzione dei *pixel* può modificare in modo drammatico l'aspetto di un'immagine. Se un ampio range di livelli è utilizzato per descrivere un'area dell'immagine in realtà poco interessante, solo un range limitato è

effettivamente disponibile per le parti più importanti. Per potere ottenere il massimo di informazioni da un'immagine è necessario avere un istogramma pieno, dove cioè sono utilizzati tutti i livelli possibili; quindi è importante, agendo su di esso, scegliere la luminosità e il contrasto ottimale.

Se l'istogramma è troppo sulla sinistra, significa che non c'è abbastanza luce; se è troppo sulla destra, l'immagine eccede in luminosità.

L'analisi e la modificazione di un istogramma non sono operazioni facili per chi non abbia una grossa familiarità con lo scanner e una rilevante esperienza nel campo della manipolazione di immagini. Il consiglio dato dai produttori del Raster Master è di cercare di ottenere un istogramma il più "pieno" possibile agendo sulle velocità di scansione e sull'apertura del diaframma della camera: è possibile fissare il parametro f assegnandogli un piccolo valore, se è necessaria una grande apertura del diaframma e quindi più luce, viceversa un grande valore di f significa diaframma più chiuso e quindi meno luce. Analogamente una velocità di scansione elevata dà luogo ad un'immagine più scura e viceversa.

Questi sono ovviamente aggiustamenti grossolani, che permettono comunque di migliorare l'immagine in base alle esigenze specifiche di ogni caso.

2.1.7 La calibrazione dello scanner desktop Epson GT12000

Visto il notevole costo degli scanner fotogrammetrici professionali, spesso anche per applicazioni metriche di precisione nell'ambito del rilievo dei Beni Culturali, si utilizzano per l'acquisizione comuni scanner desktop; questi scanner però inducono deformazioni che possono essere anche notevoli e che devono essere valutate ed eliminate o ridotte tramite un processo di calibrazione.

Le cause di degradazione della risoluzione geometrica sono:

- mancato allineamento dei sensori CCD, nel caso di scanner a tre passate;
- vibrazioni lungo l'asse del sensore;
- distorsioni sull'ottica di acquisizione;
- discontinuità nell'acquisizione;
- deformazioni residue.

Le cause di degradazione radiometrica sono:

- rumore dovuto alle componenti elettroniche (variazioni termiche, differenze dimensionali dei singoli CCD);
- disomogeneità ed instabilità del sistema di illuminazione;

- anomalie nella risposta spettrale.

Nei casi di studio descritti è stato spesso utilizzato lo scanner Epson GT12000, uno scanner piano in formato A3 non professionale.

Per la calibrazione si è utilizzato un specifico programma, il quale corregge le deformazioni indotta dallo scanner effettuando la scansione di un reticolo calibrato (riportato su un supporto di plastica indeformabile), dalla cui immagine digitale vengono determinati in modo automatico, mediante *image matching*, le posizioni dei centri dei crocicchi; queste ultime vengono successivamente confrontate dal software con le posizioni teoriche note. Il risultato di questo primo processo è un file di rettifica in formato ascii, dove si riportano, oltre ad alcuni dati relativi alla scansione (data, nome dell'operatore, modello e tipo di scanner, risoluzione di acquisizione), il numero di nodi per riga e per colonna, assieme allo spostamento, in direzione X (orizzontale) e Y (verticale), subito da ogni crocicchio acquisito rispetto al corrispondente teorico.

Questo risultato viene anche visualizzato su schermo attraverso il diagramma di deformazione (Figura 2.1.7-1): sul reticolo teorico indeformato vengono visualizzati, in rosso, gli stessi punti acquisiti mediante lo scanner.

I crocicchi scansionati, di norma, non risultano coincidenti con le loro posizioni teoriche, proprio a causa degli errori dovuti al processo di scansione; lo spostamento relativo, tra ogni punto digitalizzato ed il corrispondente teorico, viene visualizzato mediante un vettore. Viene anche riportato, in micron, l'errore medio di posizionamento dei punti digitalizzati rispetto ai corrispondenti teorici, cioè la media delle distanze tra punto teorico e punto acquisito, dal cui esame per alcuni dei fotogrammi acquisiti è risultato che la deformazione introdotta dallo strumento è prevalentemente in senso longitudinale, nella direzione del motore che muove l'*array* di sensori CCD.

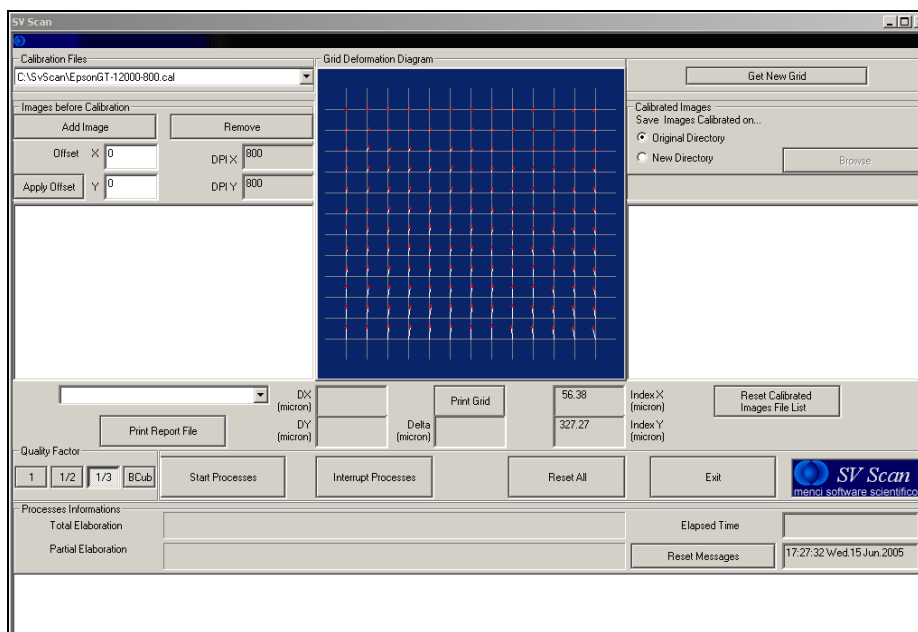


Figura 2.1.7-1. Il diagramma di deformazione relativo al reticolo scansionato (in rosso), dove i vettori indicano lo spostamento delle immagini dei crocicchi rispetto alla loro posizione teorica; sotto al diagramma viene riportato l'errore medio di posizionamento.

Sulla base del file di rettifica creato, il software valuta e corregge la deformazione subita dai fotogrammi, applicando la correzione calcolata mediante un ricampionamento digitale di immagine. Il risultato finale è costituito dai fotogrammi ricampionati non affetti da deformazioni.

2.1.8 Il processo Kodak Photo CD

Il processo Kodak Photo CD, introdotto dalla Kodak nel 1992, è un sistema di archiviazione, consultazione ed elaborazione di immagini digitali ottenute tramite scansione.

La flessibilità, la diffusione e l'efficacia hanno reso tale sistema uno standard per la creazione e la conservazione di immagini digitali di elevata qualità e a costi contenuti per utenza professionale e non.

Il processo di digitalizzazione avviene tramite speciali stazioni di lavoro: le PIW, ovvero le *Photogrammetric Photo CD Image Workstation*: queste sono costituite da uno scanner, un monitor a colori, una stampante, un masterizzatore, un'unità di back-up ed un sistema software. Il cuore del sistema è ovviamente lo scanner: genera le immagini digitali a diverse risoluzioni per facilitarne la memorizzazione, generando i file compressi nel formato Photo CD.

Il modello di scanner più utilizzato per applicazioni di fotogrammetria è il recente PCD4050, che può digitalizzare vari formati di pellicola, con l'opzione della scansione alla massima risoluzione. Il funzionamento è semplice: l'operatore monta il negativo o la diapositiva singolarmente su una maschera

metallica che viene inserita sul carrello; la pellicola viene bloccata sui quattro lati per la pressione di un foglio di materiale magnetico che aderisce alla parte metallica del supporto; la sorgente luminosa ed il sistema costituito dall'ottica e dai sensori sono fissi e posizionati da parti opposte rispetto al carrello mobile su cui è montata la pellicola.

Con un unico passaggio davanti al sensore, l'immagine viene acquisita a 24 bit in RGB e trasformata nel modello YCC, costituito da un canale che definisce la luminosità (Y) e da due canali che descrivono il colore (C_1 e C_2). Il sistema scompone poi l'immagine in una gerarchia di componenti a differente risoluzione (Tabella 2.1.8-1).

La consultazione delle immagini memorizzate su un Photo CD è estremamente agevole: tramite un software abilitato alla gestione di questo formato è possibile aprire l'immagine scegliendo la risoluzione voluta ed eventualmente convertirla in altri formati, come il Tiff o il JPEG.

I principali software di elaborazione di immagine, come Adobe Photoshop o Corel PhotoPaint, ne permettono la lettura, l'elaborazione e la conversione, mentre per la sola visualizzazione esistono numerosi programmi *freeware* o *shareware* disponibili in Internet.

Tipo	Grado di risoluzione	Dimensione immagine (pixel)	Risoluzione (micron)	Risoluzione (dpi)	Dimensione file
Base/64	Very low	64 × 96	366	69	18 Kb
Base/4	Low	128 × 192	183	139	72 Kb
Base/4	Low	256 × 384	92	278	288 Kb
Base	Medium	512 × 768	46	555	1.2 Mb
4 Base	High	1024 × 1536	23	1111	4.6 Mb
16 Base	Full	2048 × 3072	11	2222	18.4 Mb
64 Base	Professional	4096 × 6144	6	4444	76 Mb

Tabella 2.1.8-1 Caratteristiche principali del formato Photo CD relativamente a immagini 24 × 36 mm.

Il Photo CD costituisce un supporto economico, duraturo e di semplice accessibilità per l'archiviazione e la consultazione di immagini ad alta risoluzione. Il processo Kodak Photo CD nell'ambito delle applicazioni fotogrammetriche per i Beni Culturali può costituire quindi uno strumento ottimale per la conversione di fotogrammi analogici in forma digitale; da ciò è nata quindi la necessità di valutarne gli effetti sulla qualità geometrica delle immagini; studi sperimentali (Tini, 2001) hanno dimostrato che come avviene in molti scanner (vedi anche paragrafo precedente) le deformazioni maggiori si hanno nella direzione del movimento del carrello rispetto al sensore.

2.2 La fotogrammetria nel rilievo dei Beni Culturali

Il ruolo della fotogrammetria come moderna e rigorosa tecnica di rilievo nel campo dei Beni Culturali è indiscusso [Bitelli, 2002]; le possibilità offerte sono numerose ed estremamente flessibili, sia per quanto riguarda l'acquisizione del dato, che per le procedure di elaborazione e i prodotti finali ottenibili, e proprio la flessibilità è forse la caratteristica che più ne ha decretato il successo in questo campo di utilizzo, che può divenire complesso proprio per l'enorme varietà di casi e problematiche. Inoltre l'acquisizione delle immagini è rapida, non richiede contatto con l'oggetto e può oggi avvenire anche con camere a medio - basso costo, fattori questi importanti in questo settore, in cui talvolta le risorse economiche e temporali a disposizione sono scarse.

Le possibilità oggi offerte dal digitale hanno accresciuto la già ampia diffusione delle tecniche fotogrammetriche nel rilievo di aree, edifici ed oggetti di interesse storico – archeologico – architettonico, permettendo flessibilità di impiego, ottima precisione nella determinazione metrica della forma e della geometria di oggetti di ogni tipo ed una larga scelta nelle procedure e nei prodotti finali di rappresentazione.

Gli interventi di rilievo possono avvenire a scale diverse: si passa dall'utilizzo della fotogrammetria aerea a tutte le scale per il rilievo di siti archeologici, centri storici urbani, complessi monumentali e di fortificazione, edifici di interesse, fino a giungere alla descrizione di singole facciate di edifici, particolari architettonici, strutture e reperti grazie all'utilizzo della fotogrammetria *close – range*. Quest'approccio multi – scala permette quindi la lettura e la rappresentazione del caso di studio in esame non solo come oggetto a se stante, ma come elemento del contesto territoriale in cui si trova inserito, facilitandone lo studio e l'interpretazione storica.

Le tecniche e le sperimentazioni che negli ultimi anni sono esplose in ogni fase del processo fotogrammetrico sono numerosissime e difficili da catalogare ed elencare; le scelte che il fotogrammetra si trova ad affrontare di fronte ad ogni reale caso di studio talvolta non sono semplici e dipendono fortemente dalle specificità e caratteristiche dell'oggetto da rilevare, dalla tipologia e precisione dei prodotti finali che si desidera ottenere, dalle risorse a disposizione, dai vincoli organizzativi e logistici del rilievo stesso.

La fotogrammetria aerea riveste senza dubbio un ruolo fondamentale nella generazione di cartografie per centri storici urbani, aree archeologiche e complessi edificati più o meno estesi, ma le scale fotogramma tipiche della fotogrammetria da aereo o elicottero possono non essere sufficienti per un

accurato livello di dettaglio; in questi casi e qualora un rilievo classico non sia possibile per motivi logistici politici, militari o economici, possono essere usati per l'acquisizione delle immagini metodi meno convenzionali, ma di enorme efficacia, come gli aquiloni o i palloni, ma una scelta di questo tipo a sua volta comporta altre problematiche legate ad un'eventuale difficile geometria delle prese, dovuta ad esempio a problemi ambientali, come il vento, all'utilizzo di camere amatoriali, più leggere, invece che metriche o semimetriche, alla necessità di utilizzare per l'elaborazione strumenti software capaci di gestire progetti che si discostino dai classici rilievi nadirali aereo – fotogrammetrici.

Anche nel campo della fotogrammetria *close – range* l'approccio scelto varia in funzione delle condizioni in cui ci si trova ad operare ed in base alle esigenze di ogni singolo rilievo; se lo scopo del rilievo di una facciata di un edificio è la sola rappresentazione o documentazione, si potranno usare scale fotogramma di un certo tipo (ad esempio 1:50) e strumenti e pratiche di lavoro che consentano una buona leggibilità e strutturazione del prodotto finale, ma se lo scopo è anche il restauro o lo studio delle condizioni strutturali, il dettaglio e la precisione dovranno essere senz'altro maggiori e le scelte relative al tipo di camera, allo schema di acquisizione, allo strumento restitutore da utilizzare possono divenire più difficili e presupporre una certa cultura tecnica.

La vera esplosione di nuove tecnologie per i Beni Culturali si è assistita soprattutto nell'ambito della fotogrammetria terrestre.

Senza pretese di completezza, si elencano alcuni degli strumenti e procedure nel moderno rilievo fotogrammetrico terrestre; alcuni di essi sono stati utilizzati anche per alcuni reali casi di studio trattati e descritti in seguito.

Per quanto riguarda la strumentazione:

- Strumenti per l'acquisizione diretta:
 - Camere metriche terrestri a film e digitali (uso ridotto per problemi di maneggevolezza ed alti costi)
 - Camere semimetriche a film di piccolo/medio formato con reticolo (utilizzate sia nei rilievi da piattaforme aeree non convenzionali che terrestri, come anche le tre tipologie seguenti)
 - Camere amatoriali a film da sottoporre a calibrazione
 - Camere digitali metriche e semimetriche
 - Camere digitali a medio/basso costo da sottoporre a calibrazione (le più diffuse oggi)
- Strumenti per l'acquisizione indiretta:
 - Scanner fotogrammetrici

- Scanner non professionali
- Kodak Photo CD
- Restitutori:
 - Restitutori analitici
 - Restitutori digitali con approccio stereoscopico
 - Restitutori digitali con approccio monoscopico multi-immagine
- Supporti per i prodotti finali:
 - Stampe da stampanti e plotter alta risoluzione
 - CD Rom, DVD...

Dal punto di vista del *data processing*, le fasi del processo fotogrammetrico sono indicate nella Figura 2.2-1.

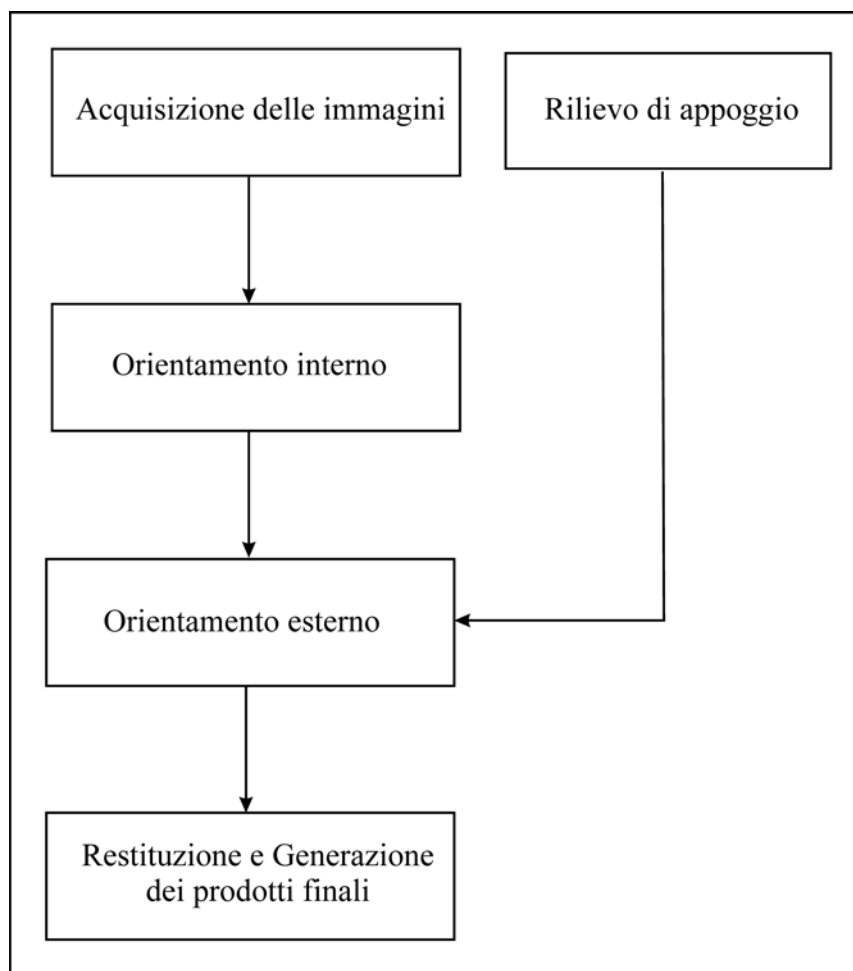


Figura 2.2-1 Le fasi classiche del processo fotogrammetrico.

In particolare quindi dal punto di vista procedurale si possono indicare le seguenti possibilità:

- Realizzazione delle prese:
 - Prese ad assetto normale con dispositivi emulanti le bicamere

- Prese a mano libera, sia ad assetto normale che ad assi convergenti
- Rilievo di appoggio:
 - Classico rilievo topografico con *Total Station* a onde o a impulsi
 - Segnalizzazione di punti tramite target o uso dei punti naturali
 - Misure dirette sull'oggetto per soluzioni semplificate come raddrizzamenti e scalature di modelli tridimensionali
- *Image Processing*:
 - Regolazione di luminosità e contrasto
 - Ripulitura
 - Filtraggi per enfaticizzazione della texture
- Orientamento interno:
 - Tecniche di autocalibrazione
 - Uso della DLT anche per la derivazione di parametri approssimati
 - Procedure automatiche o semi – automatiche per la collimazione delle marche e dei *reperes*
- Orientamento esterno:
 - Strumenti analitici
 - Strumenti digitali, con collimazione automatica di *tie points* per l'orientamento relativo e per la triangolazione aerea
 - Compensazione a fasci proiettivi, anche con l'utilizzo di vincoli geometrici

Anche sul fronte della rappresentazione e della generazione dei prodotti finali le possibilità offerte sono numerose:

- Restituzione:
 - Approccio stereoscopico, con possibilità di esplorazione e sovrapposizione della restituzione sul modello tridimensionale
 - Approccio monoscopico multi – immagine con supporto alla collimazione (ad esempio tramite geometria epipolare)
- Generazione di *Digital Surface Models*:
 - Manuale o parzialmente automatizzata sui restitutore analitici
 - Completamente automatica sui restitutore digitali, con possibilità di *editing* a posteriori e inserimento di *breaklines*
- Prodotti metrici *raster*:
 - Raddrizzamenti
 - Ortofoto
 - Ortofoto di precisione
- Creazione di modelli tridimensionali:

- Rappresentazioni tridimensionali foto – realistiche tramite texturizzazione
- Esportazione in formato VRML, ...

Relativamente alle metodologie elencate, si descrivono nei prossimi paragrafi, alcuni casi di studio affrontati e le soluzioni adottate.

2.2.1 Un sistema di acquisizione aerea a bassa quota per il rilievo di aree archeologiche

Nell'ambito del rilievo fotogrammetrico di aree di interesse archeologico è essenziale la disponibilità di immagini fotografiche a grande e grandissima scala. I siti archeologici e le zone di scavo sono talvolta aree di elevata estensione planimetrica che quindi devono essere rilevate dall'alto. D'altra parte per ottenere prodotti, come cartografia, ortofoto e modelli digitali del terreno, di sufficiente dettaglio, è necessaria una mappatura a grande scala della zona interessata ed i rilievi a terra spesso non sono in grado di garantire una completezza di informazioni ed una omogeneità nella precisione paragonabili a quelle fornite dai rilievi fotogrammetrici. A tale proposito è inoltre importante considerare che spesso il rilievo deve essere eseguito in breve tempo, sia per ovvie esigenze di tipo economico, in quanto le risorse in genere a disposizione delle attività archeologiche sono scarse, sia perché le aree di scavo sono talvolta difficilmente raggiungibili, accessibili a questo scopo solo in certi periodi dell'anno e dopo l'ottenimento di opportuni permessi da parte delle autorità competenti.

Alla luce di queste considerazioni risulta subito evidente quanto sia interessante e importante la disponibilità di fotografie dall'alto, che costituiscono con la loro ricchezza di informazioni, sia di tipo puramente descrittivo, sia di tipo metrico, uno strumento di indagine e documentazione di grande interesse e potenzialità.

Ovviamente le immagini sono normalmente acquisite da aeroplani o elicotteri, utilizzando camere metriche aeree per le quali l'intero processo fotogrammetrico è stato pianificato nel dettaglio in base allo scopo e ai risultati che si vogliono raggiungere, con particolare attenzione alla scala dei fotogrammi ed alla copertura stereoscopica in senso longitudinale e trasversale.

Sfortunatamente in alcuni casi l'adozione di queste tecniche ormai consolidate dal punto di vista teorico e operativo, incontrano difficoltà insuperabili di tipo economico, militare, politico, legate alle caratteristiche fisiche del sito, che possono impedire il loro svolgimento o fissare limitazioni

all'altezza minima del volo, normalmente limitata a qualche centinaia di metri.

Si è resa quindi necessaria l'introduzione di nuove tecniche atte allo scopo, come i treppiedi con zampe telescopiche a lunga estensione, già utilizzati con successo in archeologia (Georgopoulos et al., 1999), gli aquiloni e i palloni.

Importanti sperimentazioni al riguardo sono state compiute nel sito archeologico di Bakchias (El Fayyum, Egitto) nel 2000 nel corso dell'attività di rilievo condotta in collaborazione dalle Università di Bologna e di Lecce a partire dal 1993 (Bitelli e Vittuari, 2000); in questo caso è stato utilizzato un "treno" costituito da un numero variabile di aquiloni (da 1 a 5) collegati tra di loro, per potere adattare la forza in base alle condizioni del vento ed al peso della macchina fotografica usata di volta in volta, ed un sistema radio di controllo remoto in grado di controllare la rotazione della camera fotografica e di comandare gli scatti.

Nel corso della seconda campagna di scavo congiunta delle Università di Bologna e di Lecce nel sito di Soknopaiou Nesos svoltasi nel febbraio 2002, sono stati usati, per effettuare il "volo" fotogrammetrico, invece degli aquiloni, dei palloni in polietilene gonfiati con elio. Anche in questo caso infatti, come a Bakchias, si è presentato il problema di trovare un sistema alternativo all'aereo o all'elicottero, che fosse a basso costo, maneggiabile da una o due persone al massimo ed il più possibile adattabile alla situazione ambientale del luogo, tenuto conto del fatto che in zone come questa, al limitare dell'area desertica, diviene spesso necessario operare anche in condizioni di vento medio o forte. La risposta a queste esigenze è stato un pallone realizzato ad hoc (10 m^3), che sostiene una macchina fotografica.

Il sistema risulta costituito da tre componenti: il sistema di sollevamento, cioè il pallone, la culla di alloggiamento per la camera e l'apparato elettronico di controllo remoto.

L'altezza raggiungibile con questo sistema può essere al massimo di 400 metri, ma ai fini della fotogrammetria un buon compromesso tra l'area coperta dal fotogramma e la scala dello stesso, si ottiene in un range che va da 50 m. a 200 m. di altitudine, quindi per il range di altitudini considerate, con una macchina con obiettivo da 24 mm, si ottengono scale fotogramma rispettivamente pari a circa 1:2000 – 1: 8000, e una copertura di $50\text{ m} \times 70\text{ m}$ – $200\text{ m} \times 290\text{ m}$.

La culla di alloggiamento per la camera è costituita da una struttura in alluminio appositamente costruita, che permette di controllare la rotazione della camera rispetto a due assi (azimutale e verticale) mediante servomotori azionati da terra con un telecomando, che riporta i valori numerici delle due rotazioni

angolari in un display. Attraverso una microtelecamera montata a bordo della culla, è possibile trasmettere a terra l'immagine coperta dalla camera per mezzo di un link radio. Un monitor lcd posto nel telecomando permette di visualizzare tale immagine prima dello scatto. Il telecomando permette anche di attivare lo scatto e sullo stesso display appare il numero di prese effettuate.

Il collegamento della culla ai cavi di traino è realizzato mediante un dispositivo *Picavet*, che permette di alloggiare la camera fotografica sotto il pallone mantenendo l'asse ottico nella direzione verticale (Figura 2.2.1-2).

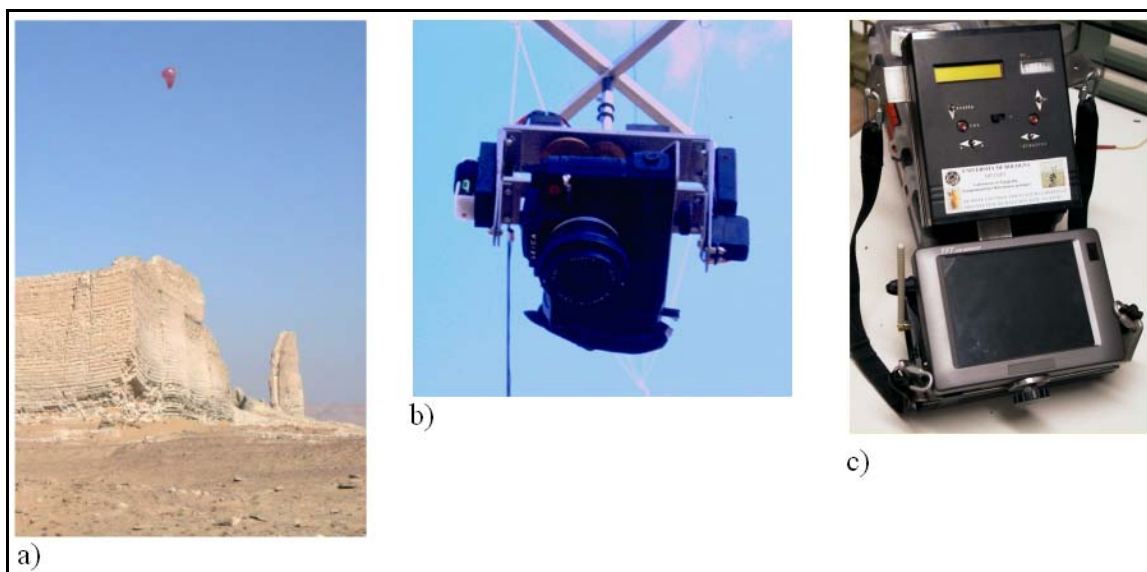


Figura 2.2.1-1 Il sistema di foto-acquisizione: a) Acquisizione di immagini da pallone sopra le strutture, b) La culla di alloggiamento della camera, c) Il telecomando.

Per quanto riguarda la camera, il sistema è stato progettato per utilizzare una macchina semimetrica, la LEICA R5; purtroppo ciò non è stato possibile, in quanto la disponibilità di elio in situ non era sufficiente a riempire i palloni in maniera da permettere agli stessi di sostenere il peso notevole della macchina semimetrica, considerando che un pallone di questo tipo riempito fino ad avere un diametro di 1,5 m. può supportare circa 1kg. In effetti i palloni avrebbero potuto contenere fino a 10 m³ circa di gas, ma la quantità disponibile era inferiore e non è stato possibile reperire ulteriore elio. Considerando quindi che i palloni erano stati riempiti solo parzialmente rispetto alla loro capacità (6 m³ di elio in ognuno), si è dovuto optare per una macchina più leggera, amatoriale, la CANON EOS500, con motore avvolgitore, obiettivo da 24 mm e focamento manuale bloccato in posizione infinito; la calibrazione della camera è stata realizzata in laboratorio con procedure di autocalibrazione.

In totale durante la campagna sono state acquisite, da una quota media di volo pari a 100 metri, 140 immagini alla scala fotogramma conseguente di circa 1:4000, considerata una soluzione accettabile per ottenere un buon livello di

dettaglio nei prodotti finali del processo fotogrammetrico (*Digital Elevation Model* e ortofoto); per la sperimentazione è stato selezionato un sottoinsieme di 14 immagini, al fine di coprire le aree del *temenos* e del *dromos*, ritenute le più significative ai fini della sperimentazione per la presenza di elevati di notevole altezza nel primo caso e di notevole estensione longitudinale nel secondo.

Il forte vento durante le operazioni di rilievo e il conseguente irregolare percorso seguito dal pallone durante il volo, hanno determinato una configurazione geometrica molto irregolare delle prese, con forti variazioni nella scala fra le immagini (Figura 2.2.1-2).

Al fine di inserire i rilievi in un sistema di riferimento assoluto (ITRF2000), durante la campagna del 2002 sono state condotte osservazioni GPS in modalità statica di lunga durata su due vertici di riferimento posti nell'area di lavoro, che hanno permesso il collegamento ai vertici della rete IGS (*International GPS Service*) di Matera, Noto, Ankara (Turchia), Nicosia (Cipro) Malindi (Kenia); l'accuratezza del posizionamento assoluto ha raggiunto un livello sub-decimetrico, largamente in eccesso rispetto alle comuni esigenze del rilievo archeologico.

Contemporaneamente un rilievo GPS con strumentazione di classe geodetica in modalità *Stop-and-Go* con post-processamento dei dati, ha permesso di acquisire le coordinate di 59 punti fotogrammetrici d'appoggio pre-segnalizzati e naturali (Figura 2.2.1-3).

Inoltre al fine di realizzare un DEM generale del sito, è stato effettuato un rilievo in modalità cinematica, seguendo percorsi che descrivessero la morfologia dell'area; in totale sono stati acquisiti circa 20000 punti con una buona accuratezza (dell'ordine di alcuni centimetri).

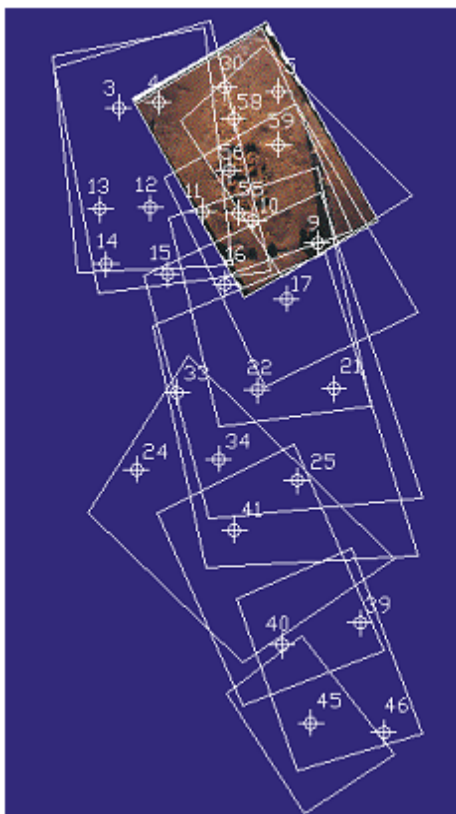


Figura 2.2.1-2 Copertura delle immagini e distribuzione dei punti fotogrammetrici d'appoggio nell'area selezionata.

Le immagini scelte, digitalizzate con lo scanner fotogrammetrico Raster Master (vedi paragrafo 2.1.6) alla risoluzione di 2116 dpi, sono state elaborate all'interno della stazione fotogrammetrica digitale Socet Set v5.1.1 (BAE Systems). L'orientamento interno, risolto con una trasformazione affine utilizzando i *corners* dei fotogrammi, ha presentato un residuo inferiore a un *pixel*; l'orientamento esterno, realizzato secondo il modello a stelle proiettive o *bundle adjustment*, ha raggiunto risultati soddisfacenti con residui massimi dell'ordine di 0.20 m sui punti d'appoggio, pur presentando problematiche legate alla non convenzionale configurazione geometrica delle prese: infatti l'irregolare sovrapposizione delle immagini non si adatta facilmente alle richieste del modulo di triangolazione del software, che richiede uno schema rigido di distribuzione dei *tie points* che connettono modelli e strisciate adiacenti.

La generazione, e le problematiche connesse, del DEM e dell'ortofoto dell'area in esame sono descritte nei Capitoli 5 e 6.

Ovviamente questo tipo di sistema può essere con successo applicato anche per il rilievo di parti alte di edifici di interesse storico – architettonico, come i tetti ad esempio, al fine di completare il rilievo delle facciate, eseguito con metodi di fotogrammetria terrestre (Figura 2.2.1-3).



Figura 2.2.1-3 Il rilievo da pallone della Chiesa di San Giuseppe in Venola (Bologna); acquisizione a sinistra e immagine della sacrestia dall'alto a destra.

2.2.2 La fotogrammetria *close – range*: applicazioni al rilievo di edifici e oggetti di interesse storico – archeologico

Negli ultimi anni la vera esplosione di nuovi metodi e tecnologie si è avuta soprattutto nel campo della fotogrammetria terrestre in quanto questa, a differenza dell'aerea, non è vincolata dall'acquisizione di immagini nadirali con camere speciali.

Le migliorie apportate al settore dei Beni Culturali dall'avvento del digitale sono un importante contributo per la documentazione, la conservazione, il monitoraggio e lo studio di questo patrimonio.

È importante sottolineare che dal punto di vista degli strumenti di *data processing* e restituzione, la scelta è tra due tipologie di sistemi; molto usati sono i sistemi stereoscopici digitali creati per la fotogrammetria aerea, come ad esempio Socet Set (Bae Systems) e Leica Photogrammetric Suite (Leica), che permettono l'automatizzazione di molte delle procedure di elaborazione e restituzione, ma che non sono stati sviluppati specificatamente per la fotogrammetria terrestre e che quindi incontrano difficoltà nel trattare immagini che presentano una geometria che si discosta da quella classica dei blocchi aerei, come immagini fortemente convergenti e con forti differenze nella scala fotogramma; l'alternativa è data dai sistemi di fotogrammetria digitale a basso

costo come i sistemi monoscopici multi – immagini, che godono di popolarità grazie ai minori requisiti in termini di risorse hardware ed ad una notevole semplicità d'uso; in essi la restituzione è però basata su collimazioni manuali di punti sparsi, ed è quindi necessario il supporto di software adeguati in cui tale fase viene semplificata, in quanto la mancanza della stereoscopia la rende già di per sé difficoltosa, soprattutto per oggetti di forme geometriche complicate e talvolta non ben definite come in campo archeologico – architettonico; questi sistemi, come ad esempio iWitness (Photometrix) o PhotoModeler (EOS Systems), sono però semplici da utilizzare e permettono di mixare nello stesso progetto immagini acquisite da camere differenti e di creare un ambiente metrico in cui è possibile fare misure, sezioni, vettorializzazione e modellazione 3D di forme geometriche regolari.

Gli approcci possibili per il rilievo fotogrammetrico terrestre di un edificio o di un oggetto sono sostanzialmente i seguenti:

- Approccio a singola immagine (Figura 2.2.2-1): con il procedimento del raddrizzamento si può effettuare la restituzione di un oggetto piano a partire da un singolo fotogramma, dato che in tal caso si ha una ben individuabile e biunivoca corrispondenza di tipo proiettivo fra punti immagine e punti del terreno; fra di essi esiste infatti una relazione prospettica con centro nel punto di presa, e fra i punti del terreno ed i punti sulla carta esiste una relazione prospettica con centro all'infinito (proiezione ortogonale sul piano di riferimento) ed una similitudine definita dalla scala della carta; ne deriva che fra i punti immagine sul fotogramma ed i punti della carta esiste una corrispondenza omografica o affine.

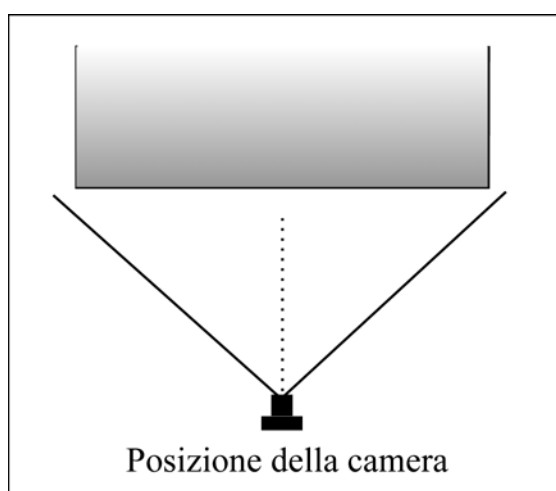


Figura 2.2.2-1 Approccio a singola immagine nella fotogrammetria terrestre.



Figura 2.2.2-2 Fotogramma originale della facciata di un edificio e fotogramma raddrizzato (Kasser & Egels, 2002).

- Approccio stereoscopico: per ogni lato dell'oggetto da rilevare vengono eseguite 2 o più prese in assetto normale o pseudo-normale (Figura 2.2.2-2).

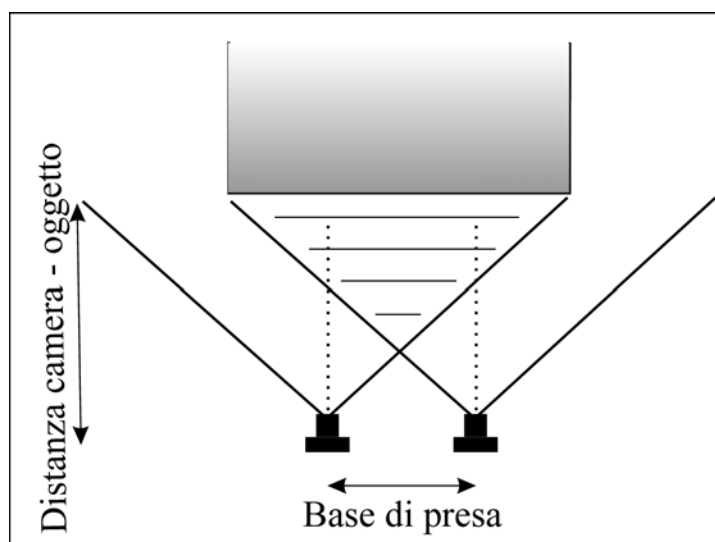


Figura 2.2.2-3 Prese ad assetto pseudo – normale.

Lo schema di presa deve essere accuratamente progettato; la relazione empirica che può essere utilizzata per eseguire un progetto di massima nel campo della fotogrammetria dei vicini è la seguente:

$$S_r = 4 \cdot S_f$$

dove S_r è la scala della rappresentazione e S_f è la scala fotogramma; fissata la scala dei prodotti finali è possibile quindi trovare la scala fotogramma necessaria ed in base a questa, fissata la focale della camera c che sarà utilizzata, la distanza Z fra camera e oggetto; a questo punto si può calcolare la base di presa B con la relazione:

$$\frac{B}{Z} = \frac{1}{3} \div \frac{1}{4}$$

Per farsi un'idea preventiva degli errori che si commetteranno sulla determinazione della componente di profondità Z dell'oggetto, avendo scelto una determinata distanza di presa e quindi fissato indirettamente un fattore di scala dei fotogrammi e di rappresentazione, è possibile applicare l'errore di graficismo:

$$\sigma_z = 0.2\text{mm} \cdot S_r$$

oppure è possibile stimare l'errore di restituzione σ_z in maniera più rigorosa applicando la legge di propagazione degli errori alle equazioni di collinearità nel caso normale:

$$\sigma_z = \frac{Z}{B} \cdot \frac{Z}{c} \cdot \sigma_{p_x}$$

dove σ_{p_x} è l'errore che si commette sulla determinazione della parallasse orizzontale dei punti immagine e può essere fissata in base alla dimensione del *pixel* dell'immagine.

Questo approccio veniva una volta materializzato con l'uso delle bicamere, che però oggi non si usano più; un dispositivo emulante la bicamera ed oggi molto utilizzato nel campo dei Beni Culturali, è il Cyclop (Menci Software), costituito da una barra metallica graduata sul quale scorre un carrello montante una sola fotocamera, rendendo così possibile l'esecuzione di prese normali, mantenendo fissa e nota la base e paralleli gli assi ottici (Figura 2.2.2-4); in questo modo sono noti i parametri di orientamento esterno e non è quindi necessario eseguire il rilievo topografico di appoggio.

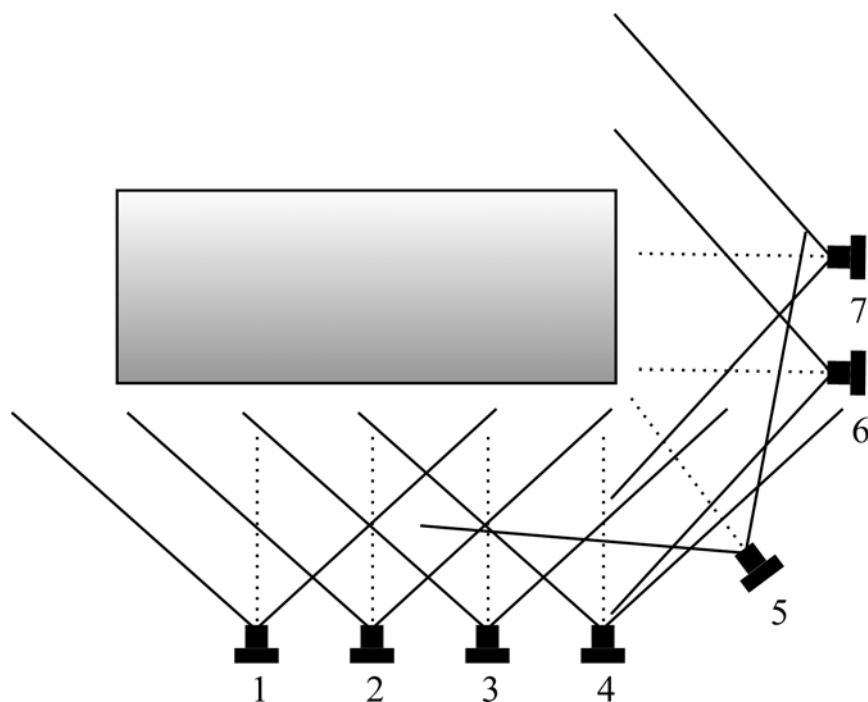
Risultati ottenibili con l'approccio stereoscopico sono:

- Ortofoto di facciate di edifici;
- *Digital Surface Models* e *3D wireframe* di oggetti;
- Restituzione vettoriale tridimensionale.



Figura 2.2.2-4 Il sistema Cyclop: acquisizione delle immagini del basamento della Chiesa di Mesopotam in Albania.

- Metodo dei fasci proiettivi o *bundle restitution*: spesso accade che l'oggetto da rappresentare sia troppo complicato come dimensioni o geometria per poter essere rilevato solo tramite prese stereoscopiche; in tal caso un gran numero di immagini da diversi punti di vista intorno all'oggetto e con assi convergenti, vengono acquisite ed orientate simultaneamente con il metodo della compensazione a fasci proiettivi (Figura 2.2.2-5).



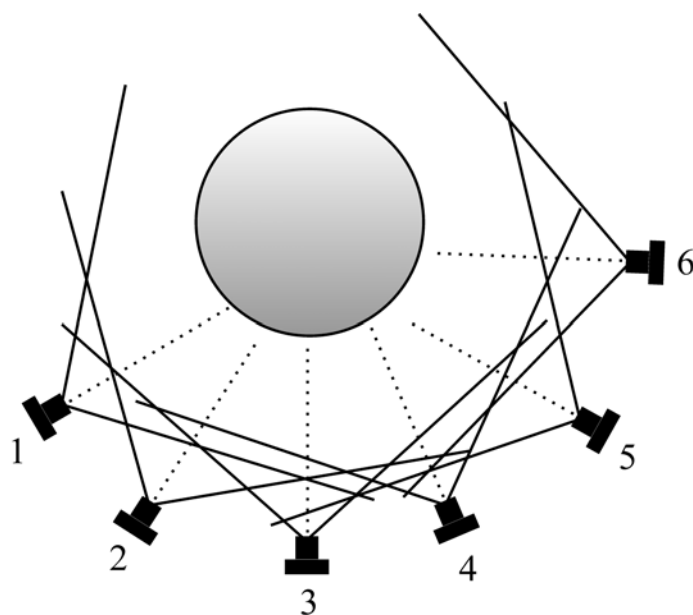


Figura 2.2.2-5 Esempi di possibili configurazioni per la *bundle solution*.

Per l'orientamento delle immagini possono essere utilizzati punti di controllo di coordinate note, vincoli geometrici di vario tipo, oppure il modello ottenuto può essere scalato tramite misure dirette di distanza prese direttamente sull'oggetto. L'alta ridondanza di osservazioni permette di raggiungere precisioni elevate e di individuare ed eliminare eventuali errori grossolani.

I più comuni software commerciali che utilizzano questo approccio permettono di ottenere coordinate di punti, restituzione vettoriale, sezioni, e modelli foto – texturizzati esportabili in formato VRML.

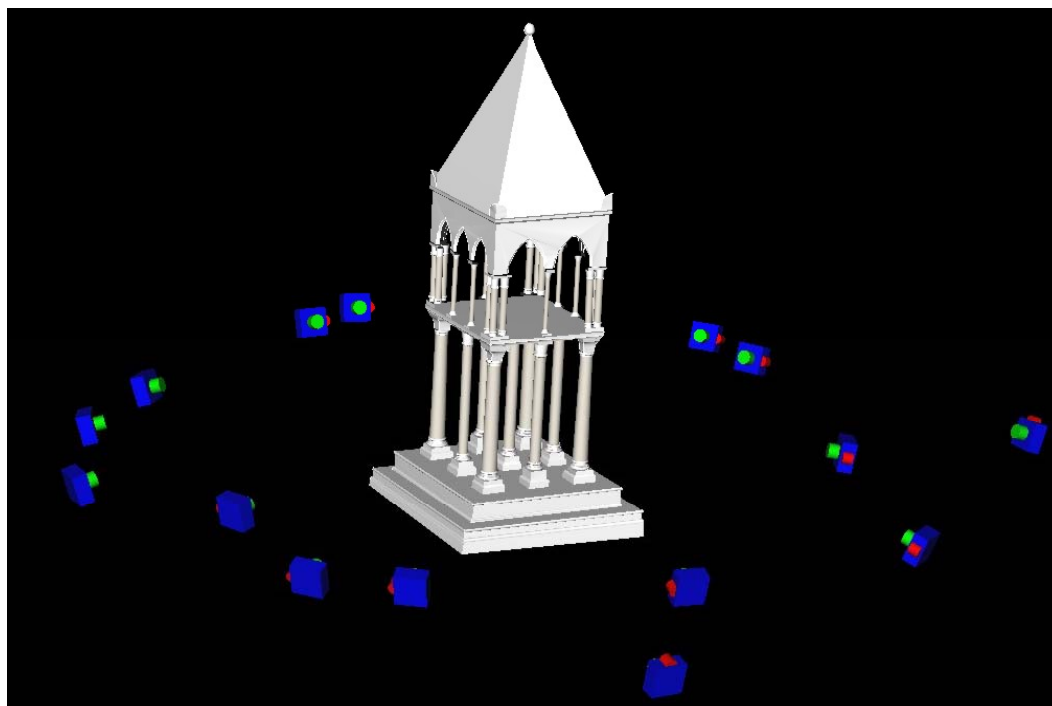


Figura 2.2.2-6 Metodo dei fasci proiettivi per la restituzione del modello tridimensionale della Tomba di Rolandino dei Passaggieri a Bologna; in evidenza i punti di presa.

3.

L'ACQUISIZIONE DEL DATO METRICO: METODI *RANGE BASED*

3.1 Breve storia dei sistemi a sensori attivi

Fra tutti i sistemi che realizzano ricostruzioni tridimensionali di oggetti, i sensori attivi, come ad esempio il laser a scansione, fanno parte del gruppo di sistemi basati su una vera e propria attività di rilievo, contrapponendosi in modo netto ai software di *Computer Animation* (Maya, 3D Studio Max) che invece non utilizzano misure sull'oggetto.

Basati sulle onde luminose come i metodi *image based* visti nel capitolo precedente, i sensori attivi realizzano come risultato diretto della sessione di misura un insieme di coordinate tridimensionali riferite ad un numero elevatissimo di punti in un sistema di riferimento correlato con lo strumento.

Le applicazioni di questi sistemi sono ampissime e spaziano dall'industria (progettazione di pezzi meccanici, controllo della qualità, sviluppo di prototipi, video games, automazione, monitoraggio del traffico) al campo della modellazione del corpo umano, trovando sempre di più largo utilizzo nell'ambito dei Beni Culturali.

La diffusione delle tecniche laser a scansione nel rilievo dei Beni Culturali è abbastanza recente e certamente è una delle tecnologie in più grande espansione; in questo caso non è il principio alla base del metodo ad essere nuovo, infatti la misura di distanza tramite triangolazione è vecchia di secoli, i Greci la utilizzavano per la navigazione e per gli studi astronomici, ma lo sviluppo pratico di questi sistemi segue da vicino la disponibilità di nuovi componenti, tecnologie e dispositivi.

Ciò che era pratica comune per i militari durante le due guerre mondiali, cioè la misura passiva di distanza tramite dispositivi ottici, è potuta diventare disponibile anche per i laboratori di ricerca prima e per gli utilizzatori poi, solo a partire dagli anni '80, con la disponibilità di dispositivi elettro – ottici e

computer a relativamente basso costo; già negli anni '70 in molti importanti laboratori scientifici statunitensi e canadesi sono noti i principi di funzionamento dei laser a proiezione di luce, e negli anni '80 il National Research Council (NRC) del Canada inizia uno studio approfondito sul mondo della tridimensionalità, focalizzando l'attenzione sullo sviluppo di sistemi a sensori attivi basati sul principio della triangolazione.

Il limite più grosso all'utilizzo pratico di questi sistemi è dovuto però al fatto che i dispositivi sensibili alla posizione erano ancora analogici: il sistema basato sulla *Lateral Effect Photodiode* (LEP) e la camera tipo Vidicon era utilizzato per convertire l'informazione ottica in un segnale elettrico allo scopo di estrarre informazioni sulla distanza, ma l'accuratezza raggiungibile con questi sistemi era limitata e la tecnologia difficile da usare e da calibrare.

L'avvento della tecnologia digitale ha costituito il vero spartiacque fra la sterile ricerca ed il reale utilizzo di questi sistemi; il primo prototipo di laser a triangolazione con tecnologia digitale sviluppato dal NRC utilizzava un sensore CCD a linea formato da 2048 elementi; i laser sono così diventati sempre più accurati nella misura di distanza, che è passata ad essere prima di uno poi di due ordini di grandezza più precisa rispetto ai sistemi analogici, veloci nell'acquisizione, relativamente economici; gli ultimi sviluppi nella tecnologia hanno in seguito riguardato la nascita dei laser basati sulla misura del tempo di volo, la ricerca di sistemi che fossero sicuri per l'occhio umano e per i materiali rilevati, l'introduzione di laser accoppiati a camere digitali e termiche; di pari passo si sono sviluppati i software per il trattamento dei dati.

3.2 Origine, costruzione e caratteristiche del raggio L.A.S.E.R.

Il termine L.A.S.E.R. è l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* e si riferisce direttamente al principio di generazione del raggio laser.

La luce che è possibile osservare in natura è costituita da fotoni emessi spontaneamente dagli atomi. Un atomo è composto da un nucleo che contiene protoni e da elettroni che ruotano attorno al nucleo stesso e che possono occupare solamente alcuni orbitali (posizioni). Quando viene aggiunta energia ad un atomo, gli elettroni si spostano, "saltano", in un orbitale più lontano rispetto al nucleo, in modo che il numero di elettroni che si muove e quale orbitale occuperanno dipende dalla quantità di energia applicata; in modo speculare, se un elettrone si avvicina al nucleo, l'atomo emette energia in forma di quanto elettromagnetico, cioè di fotone; l'energia trasportata dal fotone è pari

alla differenza di energia associata alle posizioni occupate.

Fotoni di diverse lunghezze d'onda trasportano quantità di energia differenti: in modo particolare, minore è la lunghezza d'onda, maggiore sarà la quantità di energia trasportata. Di conseguenza la lunghezza d'onda della luce emessa da un atomo dipende dalla quantità di energia associata con ogni possibile salto di elettrone. Normalmente gli atomi tendono a permanere nello stato ad energia minore, pertanto se l'elettrone di un atomo si trova ad un livello di energia più elevato rispetto al minore possibile, si lascia cadere al livello minore rilasciando energia (in forma di luce) e senza intervento esterno.

Per ottenere un'emissione stimolata di fotoni, è necessario utilizzare atomi eccitati, i cui elettroni si trovino quindi in uno stato di energia più elevato: si deve cioè in qualche modo alterare la distribuzione degli atomi cosicché vi sia un elevato numero di atomi eccitati, capaci quindi di emettere energia (processo di *population inversion*); irradiando questi elettroni mediante un fascio di luce, gli atomi rilasciano energia in forma di luce. Si pensi alla luce utilizzata per stimolare gli atomi come ad un fascio di fotoni, almeno uno di questi trasporta la stessa quantità di energia che verrà emessa dall'atomo eccitato quando passa ad un livello di energia inferiore. Quando questo fotone colpisce l'atomo eccitato, lo stimola a rilasciare energia in forma di luce. L'emissione luminosa indotta ha la stessa lunghezza d'onda e la medesima fase del fotone che l'ha generata, in altre parole, il fotone che colpisce l'atomo genera l'emissione di un secondo fotone ad esso identico. Il nuovo fotone colpirà un altro atomo eccitato causando l'emissione di un secondo fotone e così via; ciò che si ottiene è quindi una cascata di emissioni stimolate, cui si dà il nome di laser.

Come si può facilmente intuire, solo una porzione dei fotoni del fascio stimolante trasporta una quantità di energia tale da poter dare avvio all'effetto a cascata, mentre i fotoni rimanenti vengono assorbiti o convertiti in altre forme di energia, di solito in calore. La porzione di fotoni che ha le caratteristiche adeguate per dare avvio all'emissione di luce è strettamente correlata all'efficienza del laser.

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 la luce è usualmente monocromatica, consistente cioè di una singola lunghezza d'onda, ed emessa con un raggio molto ristretto.

Per capire come si genera il raggio laser si osservi la Figura 3.2-1; il mezzo che viene eccitato e libera i fotoni che formano il raggio laser, può essere la combinazione di due o più elementi, come elio e neon. Mediante il processo di

population inversion il mezzo diviene eccitato ed è quindi capace di emettere luce quando viene colpito da un fotone. La consistenza dell'effetto a cascata cresce con la distanza che la luce percorre attraverso il mezzo del laser, per questo motivo il materiale di supporto è costituito da una barra allungata attraverso cui viene emessa la luce. Inoltre per incrementare l'intensità del raggio vengono posizionati due specchi alle estremità della barra, in questo modo la luce è costretta a percorrere più volte la barra, incrementando la distanza percorsa prima di lasciare la barra stessa.

L'oscillazione della luce attraverso la cavità del laser causa la formazione di un fascio laser ristretto. Il raggio del fascio dipende dalla distanza percorsa dalla luce attraverso il mezzo.

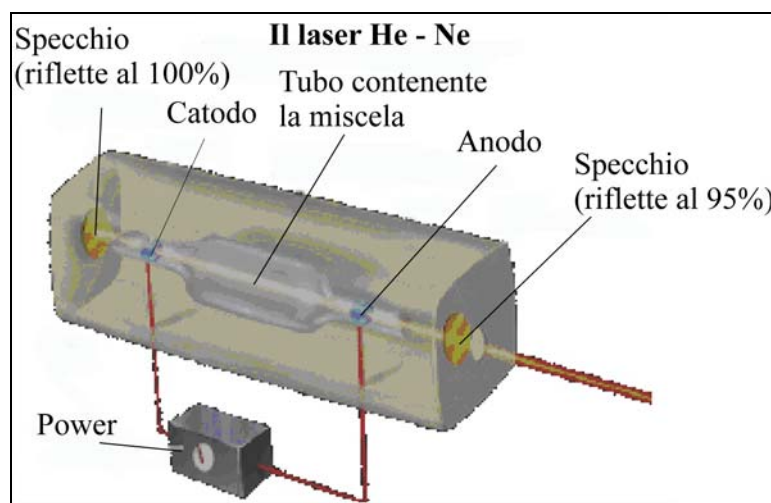


Figura 3.2-1 Esempio di creazione del raggio laser.

Gli specchi utilizzati nella cavità sono funzione dalla lunghezza d'onda del raggio laser e, in generale, lo specchio alla fine della barra è tale da riflettere completamente la luce incidente, mentre lo specchio frontale consente di riflettere solo una porzione della luce e di emettere l'altra parte. Entrambi gli specchi sono di solito curvi per meglio concentrare il raggio laser.

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

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

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

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

Riguardo alla lunghezza d'onda, infine, sono molti i fattori che influenzano questa caratteristica del raggio laser; in primo luogo il tipo di materiale utilizzato nella cavità, poi il metodo utilizzato per ottenere l'eccitazione degli atomi ed infine le caratteristiche dell'ottica utilizzata.

3.3 Classificazione dei laser a scansione

I laser a scansione si possono classificare in base a:

- Elementi utilizzati per la generazione del raggio, che possono essere:
 - Gas; i laser che utilizzano miscele di gas, tipicamente eccitate tramite scarica elettrica, costituiscono un gruppo piuttosto ampio e possono emettere sia in continuo che in modo intermittente.
 - *Solid state*, in cui gli atomi che emettono la luce sono dispersi in un materiale cristallino o vetroso mischiato ad altri elementi (il materiale capace di emettere luce risulta circa l'1% sul totale); questi laser hanno di solito l'aspetto di una barra di piccolo diametro, che consente di generare il raggio e contemporaneamente dissipare il calore prodotto.
 - Materiali semi – conduttori, la cui congiunzione attraversata da corrente permette di generare l'emissione della luce; a differenza delle categorie precedenti emettono il raggio soprattutto in modo pulsante per consentire la dissipazione del calore. Questa famiglia è forse quella che interessa di più la ricerca per lo sviluppo di nuovi sistemi.
- Sicurezza per gli occhi: il raggio laser può causare danni permanenti alla vista; per questo motivo tutti i laser vengono raggruppati in sei categorie in funzione del loro grado di pericolosità e pertanto delle precauzioni che devono essere assunte durante il loro utilizzo. Il rischio associato al laser è collegato all'energia che questo trasporta, dipendente dalla lunghezza d'onda, dall'energia trasportata da ogni impulso, dalla durata e dalla frequenza di quest'ultimo.
- Principio di funzionamento: in base al principio di funzionamento si possono distinguere fondamentalmente due tipologie, i laser triangolatori e i laser distanziometrici, approfonditi nei prossimi paragrafi.

3.3.1 Sistemi a triangolazione

Il principio di funzionamento di questi sistemi è molto semplice e del tutto analogo alla triangolazione in topografia.

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

La precisa conoscenza della geometria che lega il laser alla camera consente, con l'impiego dei teoremi geometrici di Talete, di determinare la posizione del punto dell'oggetto rilevato; in particolare la profondità z come funzione degli angoli α , β e della base nota, (Figura 3.3.1-1 e 3.3.1-2) vale:

$$z = \frac{d \cdot \cot \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \cot \alpha} \quad (2)$$

Si osservi che mentre α viene misurato direttamente, β viene calcolato in modo indiretto misurando P (che viene rilevata su un sensore CCD o CMOS) ed essendo nota la focale f (caratteristica costruttiva della camera):

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{f}{P} \quad (3)$$

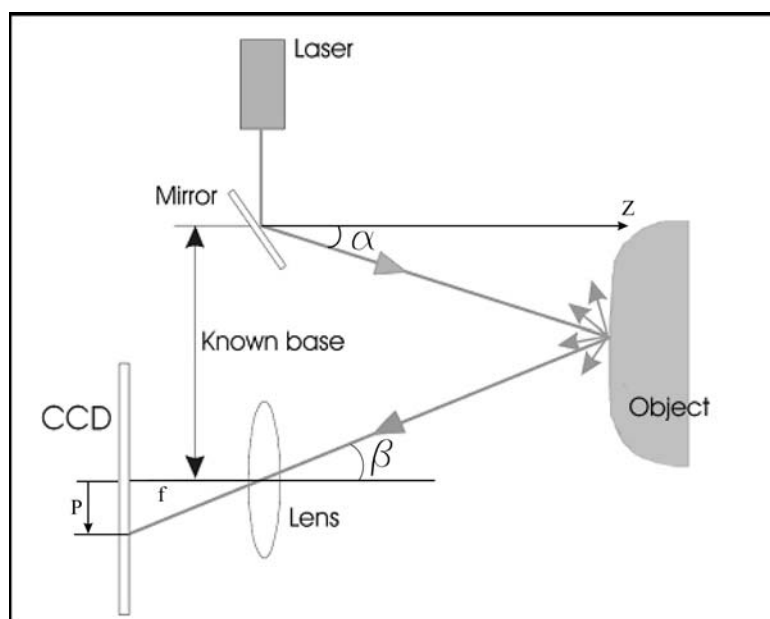


Figura 3.3.1-1 Principio di funzionamento dei laser triangolatori.

A parità di angolo di proiezione α , la differenza di profondità viene rilevata, all'atto della lettura sul sensore di posizione, con una correzione $\Delta\beta$ sul valore dell'angolo β .

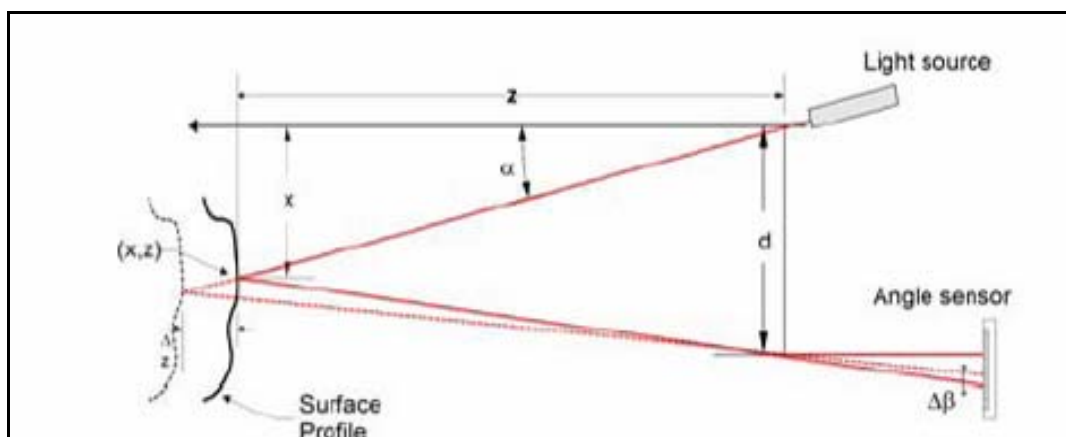


Figura 3.3.1-2 Nei laser triangolatori una differenza di profondità viene letta come una variazione di angolo.

All'interno di questa categoria si trovano strumenti molto differenti tra loro, che possono essere distinti considerando le diverse tipologie di laser e di fotodiodi ricevitori che utilizzano.

In base alla forma del laser proiettato si possono avere nella categoria degli scanner triangolatori i *single spot* e gli *slit scanner*.

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

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

Come già detto la tecnologia di questi laser è antica e dai sistemi più semplici si è giunti a sistemi sempre più evoluti, con sensori inclinabili per ottenere un'immagine sempre a fuoco nonostante la variazione della distanza (Figura 3.3.1-3), con doppia camera (Figura 3.3.1-4) o singola camera con maschera a due aperture (Figura 3.3.1-5).

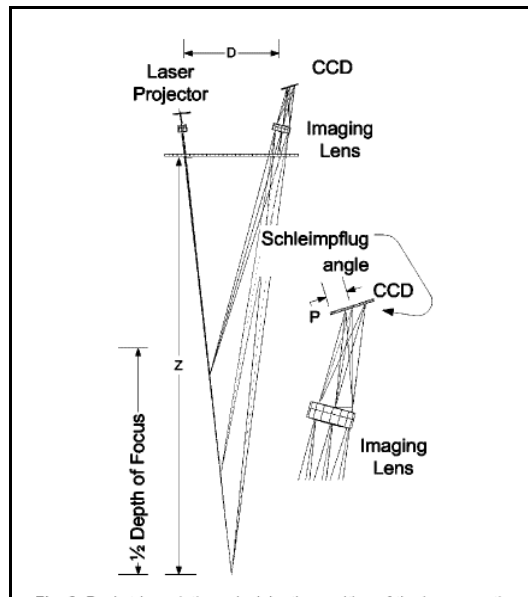


Figura 3.3.1-3 Particolare dell'angolo di Scheimpflug.

L'utilizzo del sistema con doppia camera consente di ottenere una sovrabbondanza di misure aumentando l'accuratezza della misura ed inoltre consente di eliminare l'interferenza del sole che può causare riflessioni speculari; infatti l'immagine del laser sarà simmetrica sulle due camere, mentre un'immagine estranea risulterà asimmetrica.

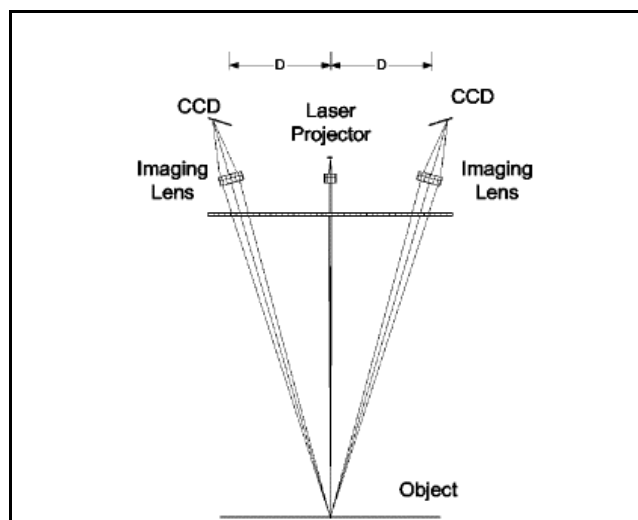


Figura 3.3.1-4 Sistemi triangolatori a doppia camera.

Gli stessi vantaggi si possono ottenere utilizzando una sola camera CCD con l'aggiunta di una maschera con due aperture, inserita vicino al diaframma; con questa soluzione la linea laser, prodotta con un *solid state laser* e lenti cilindriche, viene proiettata sull'oggetto mentre la camera CCD misura una doppia immagine della stessa linea. La separazione tra le due immagini è proporzionale alla distanza tra l'oggetto e la camera e fornisce informazioni dirette sull'aspetto e le dimensioni dell'oggetto.

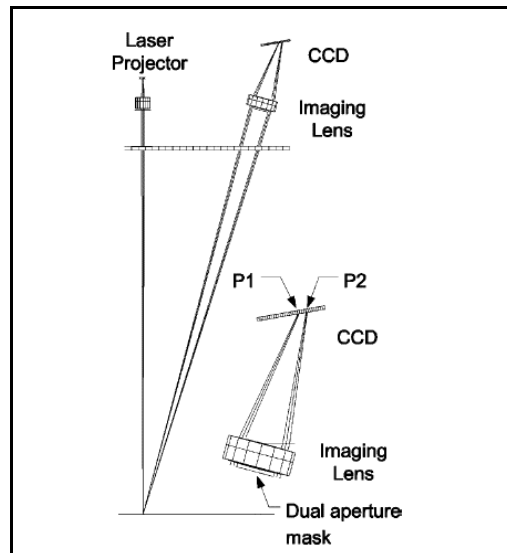


Figura 3.3.1-5 Sistema con camera dotata di maschera con due aperture.

Infine è opportuno sottolineare come i laser sincronizzati consentano di aumentare la precisione nella misura della componente di profondità, che combina un campo di azione più ampio, pur rimanendo piccola la base, che è un vincolo di tipo costruttivo; per un approfondimento riguardo questo si veda in particolare il paragrafo 3.4; ad essere sincronizzati sono l'emettitore laser e il fotodiode ricevitore, mentre la lunghezza focale delle lenti diviene funzione della profondità di campo che si vuole ottenere e non del campo di visibilità. Il miglioramento di questa tecnica ha condotto ad una diminuzione della *scanner head*, se paragonata ai sistemi tradizionali. La creazione della superficie 3D è ottenuta facendo deviare il raggio laser mediante due specchi oscillanti tra loro e ortogonali e registrando, mediante un fotodiode, la luce riflessa, in sincronia con gli specchi utilizzati per la proiezione (Figura 3.3.1-6).

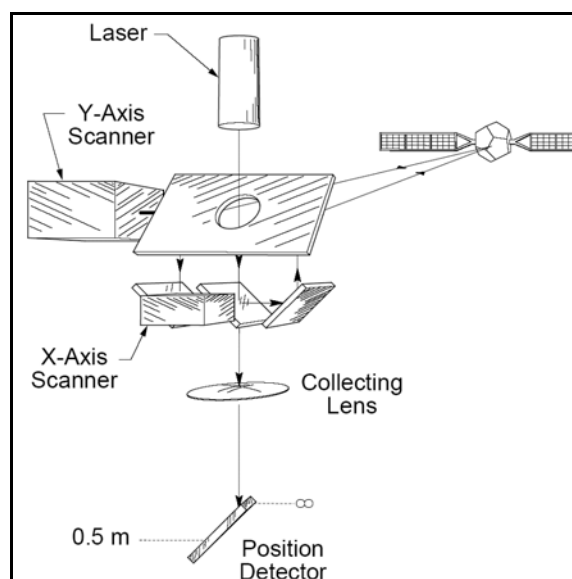


Figura 3.3.1-6 Laser scanner auto – sincronizzato.

Gli *slit scanners*, sono la naturale estensione dei sistemi *single spot* e consentono di proiettare una linea laser e collezionare simultaneamente l'intero profilo dell'oggetto.

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

Questa tipologia di laser sono molto utilizzati nel rilievo dei Beni Culturali, soprattutto per singoli oggetti o reperti; hanno un costo inferiore rispetto i *single spot*, soprattutto grazie all'avvento di sensori CCD e CMOS sempre meno cari.

Il maggior inconveniente di questo sistema è il compromesso necessario tra il campo di visibilità e la risoluzione nella componente di profondità. Il campo è nell'ordine dei 20-30 deg, per aumentare il quale sono state introdotte lenti anamorfiche, mediante le quali si può arrivare al massimo sino a 60 deg. Il secondo svantaggio è causato dall'influenza della luce ambientale sul sistema; il rapporto segnale/rumore aumenta in quanto il sensore deve acquisire l'intera scena ed a causa della distribuzione della potenza del laser sull'intera linea; nonostante l'introduzione di filtri per ridurre questo inconveniente, l'utilizzo di questi sistemi all'aperto è ancora critico.

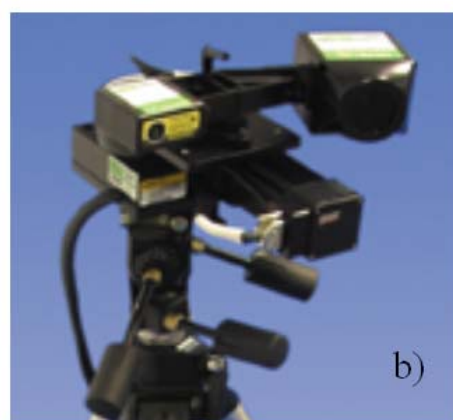
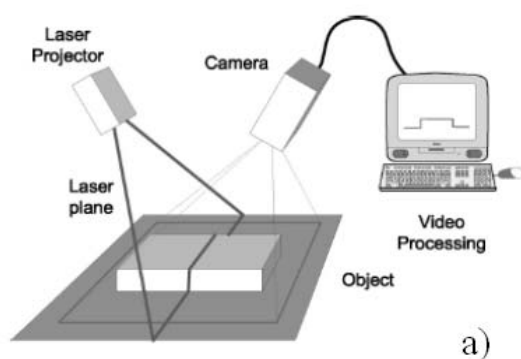


Figura 3.3.1-7 Funzionamento di uno *slit scanner* (a); esempio di uno *slit scanner*; il BIRIS della ShapeGrabber.

I sistemi laser a proiezione di luce strutturata fanno parte sempre dei laser triangolatori, ma si differenziano dai sistemi citati precedentemente in quanto ciò che viene proiettato sull'oggetto è una sequenza di luce di forme codificate, come ad esempio un grigliato di linee alternate chiare e scure; il proiettore può essere visto come l'equivalente della seconda camera in un approccio stereoscopico in fotogrammetria. La posizione dei punti viene determinata per triangolazione come negli *slit scanner*.

I sistemi di questo tipo possono essere di due modelli:

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

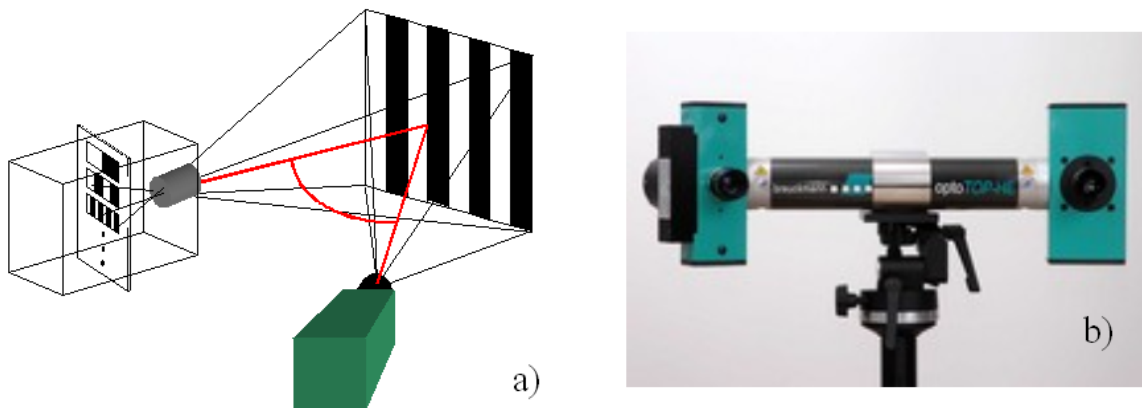


Figura 3.3.1-8 Funzionamento di un laser a proiezione di luce strutturata (a); esempio di questo tipo di scanner, opto TOP HE della Breuckmann.

In ragione dell'elevata precisione ottenibile mediante questi sistemi, è possibile trovarne applicazione in ambiti molto diversi, dal controllo di qualità sino all'ambito del rilievo dei Beni Culturali. In commercio è possibile trovare sia strumenti portatili che strumenti fissi. Per quanto riguarda quest'ultima categoria, alcuni scanner utilizzano un braccio meccanico per registrare la posizione della *scanner head* durante la scansione, altri si servono di guide magnetiche (*magnetic trackers*) che consentono il movimento dello scanner all'interno delle guide stesse.

Nel settore industriale gli scanner *single spot* possono essere utilizzati in settori industriali ove sia richiesta elevata produttività associata ad elevata precisione; ad esempio la RVSI Electronics ha sviluppato un sistema, utilizzato nell'industria dei semiconduttori, che consente una precisione nominale fino a $2,25 \mu\text{m}$ e può acquisire 5 milioni di punti tridimensionali al secondo.

Per quanto riguarda gli *slit scanners* bisogna innanzitutto notare che il volume di punti acquisito da questi sistemi è molto inferiore rispetto ai sistemi *single spot* e sono di solito montati su di un piatto traslabile proprio perché acquisiscono l'intero profilo; ad esempio sono disponibili strumenti in grado di scannerizzare l'intero corpo umano per misure antropometriche (Cyberware ha

creato un sistema che utilizza quattro teste ottiche montate su un lungo piano verticale di traslazione e che è in grado di scansionare un corpo umano in 17 secondi e con una precisione di 50 – 300 μm). Poche sono le case costruttrici che hanno costruito strumenti in grado di acquisire volumi consistenti; la Mensi ha sviluppato un sistema che utilizza una base molto larga, con correzione meccanica dei parametri (per es. la messa a fuoco) e di conseguenza una lenta velocità di acquisizione (100 Hz), ma consente di scannerizzare oggetti sino a 25 m e con una precisione di 0.2 – 0.6 mm; la Neptec ha invece utilizzato il principio di sincronizzazione, che consente di avere una lunghezza focale lunga, con un campo di visibilità elevato e velocità di acquisizione consistente (10 kHz); in questo caso la *scanner head* risulta di dimensioni più contenute, consentendo una stabilità meccanica migliore.

I sistemi *Pattern Projection* consentono di acquisire un'immagine 3D completa senza la necessità di un apparato complesso, ma a parità di profondità forniscono un'accuratezza inferiore rispetto agli *slit* e *single point scanners*.

Per quanto riguarda invece l'applicazione nei Beni Culturali, gli scanner triangolatori vengono utilizzati soprattutto per il rilievo di manufatti di piccole dimensioni e qualora sia necessaria un'elevata accuratezza del rilievo. In letteratura si trovano diversi esempi, il cui numero sta aumentando negli ultimi anni, sia per la quantità di strumenti che si trovano ora in commercio sia per l'evoluzione dei software necessari per il processamento dei dati. In quest'ambito la tipologia più utilizzata è indubbiamente quella dei *single spot scanner*, anche se si stanno sviluppando esempi di utilizzo dei *pattern projection scanner* [Remondino, 2006].

3.3.2 Sistemi distanziometrici

In questo gruppo si trovano due tipologie di sistemi che operano con principi di funzionamento molto diversi, ma che per l'utilizzatore presentano caratteristiche analoghe: gli scanner che operano con differenza di fase e con tempo di volo.

Entrambi sono detti distanziometrici in quanto come risultato della misura si ha la distanza fra il centro dello strumento e il primo punto che il raggio incontra; la distanza, insieme alla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio, consente di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione.

I sistemi laser che utilizzano la differenza di fase sono caratterizzati da un'elevata densità di punti acquisiti e velocità di acquisizione, all'incirca

625.000 punti al secondo. Operano in un range massimo di 100 m e con un'accuratezza che va dai 25 μm al centimetro. L'approccio di questo tipo di strumenti consiste nell'acquisire ogni particolare con la stessa risoluzione ed eventualmente sfoltire i punti nella fase di post-processo; l'elevata risoluzione consente di paragonarli ad un'immagine fotografica panoramica.

Gli scanner che operano con differenza di fase utilizzano un raggio laser, modulato con un'onda armonica, per scandire lo spazio punto per punto e calcolano la distanza del punto dal centro dello strumento mediante un circuito che determina la differenza di fase tra l'impulso emesso e quello riflesso e di conseguenza il tempo necessario all'onda per percorrere la distanza da calcolare.

Se $\Delta\phi$ è la differenza di fase, f_{AM} la modulazione di frequenza e c la velocità della luce nel vuoto, la distanza Z è determinata dalla relazione:

$$Z = \frac{c}{4\pi f_{AM}} \Delta\phi \quad (1)$$

L'elaborazione di questo dato è piuttosto complessa, motivo per cui il tempo richiesto per il calcolo è maggiore rispetto ad altri sistemi, ma consente di ottenere precisioni migliori. Un limite di questo principio è la necessità di avere un segnale di ritorno che sia dotato di adeguata potenza, con conseguente riduzione della portata dello strumento e la possibilità di avere, all'interno della griglia di acquisizione, un numero consistente di punti non definiti.

Sono strumenti nati all'incirca dieci anni fa per il rilievo di siti industriali, che attualmente stanno trovando un impiego anche nel rilievo dei Beni Culturali come chiese e castelli.

Negli scanners TOF (*Time Of Flight*), lo strumento è costituito, in linea generale, dai seguenti componenti: un laser, usualmente un *semi-conductor* laser, che emette impulsi di luce infrarossa, indirizzati e convogliati da una lente di emissione; un sistema di specchi rotanti, necessari per deflettere il raggio; una lente di ricezione che capta la parte del segnale di eco del raggio laser riflesso dalla superficie di impatto dell'oggetto; un diodo ricevitore chiamato *a valanche* (a valanga, poiché indica un processo cumulativo in cui un elettrone che si muove velocemente ne genera rapidamente degli altri per collisione) che produce un segnale di ricezione elettrico; un orologio stabilizzato al quarzo, che misura l'intervallo di tempo tra segnale emesso e riflesso.

È infatti la misura del tempo di volo che consente di stabilire la distanza del punto dal centro strumentale mediante un'operazione molto semplice:

$$z = c \times \frac{\tau}{2} \quad (2)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto, mentre τ è il tempo di volo.

Questi sistemi sono meno accurati dei precedenti (precisione da alcuni mm ad un paio di cm ed oltre), ma offrono il vantaggio di operare in un range più ampio, sino ai 1500 metri ed hanno una velocità di acquisizione dei punti elevata (all'incirca 12.000 punti al secondo).

Questa tipologia di strumenti trova la sua migliore applicazione nel rilievo di oggetti molto grandi, dal momento che riesce a garantire relativa accuratezza nella misura ad un range elevato, accuratezza che rimane relativamente costante per l'intero volume delle misure.

Gli esempi di utilizzo di questi strumenti nel campo dei Beni Culturali si stanno moltiplicando nel corso dell'ultimo decennio, in quanto gli strumenti TOF consentono di acquisire un'enorme mole di dati in tempi molto brevi senza danneggiare gli oggetti.

Il numero di ditte nel mondo che operano nel campo dei sensori attivi si è espanso enormemente nell'ultimo decennio, ed è quindi difficilissimo dare una panoramica completa ed esaustiva di tutti i sistemi in commercio e delle loro caratteristiche; la Tabella riportata in Appendice B vuole quindi fornire solo alcune indicazioni relative.

3.4 Accuratezza dei sistemi laser scanner

Quando si parla di accuratezza di un sistema laser a scansione è necessario parlare di ripetibilità, in quanto la valutazione dell'accuratezza non può prescindere dalla constatazione che uno strumento di questo tipo rileva l'oggetto per punti singoli, ma nell'unione di più scansioni difficilmente si può ottenere più volte la misura del medesimo punto. Ciò che si ottiene è quindi una ridondanza nella misura di una superficie, ma non nella misura del singolo punto. Per questo motivo ogni punto ha solo un valore di precisione determinato dalla propagazione degli errori di misura dell'angolo, della distanza e degli altri parametri che influenzano la singola misura.

I costruttori di laser scanner forniscono delle specifiche di accuratezza che non sono tra loro confrontabili, poiché vengono riferite ai propri test di laboratorio. Per questo motivo è molto difficile fondare la scelta di uno strumento su questo parametro.

Negli ultimi anni, alcuni autori [Böhler 2001; Blais, 2003] hanno proposto e talvolta realizzato dei test di controllo ad hoc per poter confrontare numericamente l'accuratezza dei diversi strumenti tra loro, introducendo anche alcune formule per la valutazione della precisione degli strumenti; è necessario tenere in considerazione che strumenti operanti con principi di funzionamento diversi hanno ambiti applicativi spesso non confrontabili tra loro e le formule utilizzate per la valutazione dell'accuratezza sono funzione del metodo utilizzato per effettuare la misura.

Negli scanner triangolatori (vedi paragrafo 3.3.1), la misura è effettuata mediante un sistema ottico (la camera CCD) ed è perciò limitata dalle leggi fisiche dell'ottica e della diffrazione.

Dall'analisi delle formule (2) e (3) del paragrafo 3.3.1 si ha che l'accuratezza del sistema è in pratica determinata dall'accuratezza della misura dell'angolo β , che deriva dall'immagine del laser sulla camera; infatti l'angolo α , che rappresenta la rotazione dello specchio deflettente il raggio laser, è noto con molta accuratezza e la base viene determinata mediante calibrazione. Pertanto se β non viene determinato correttamente, il punto viene localizzato in posizione scorretta lungo la linea che unisce il punto allo specchio deflettente.

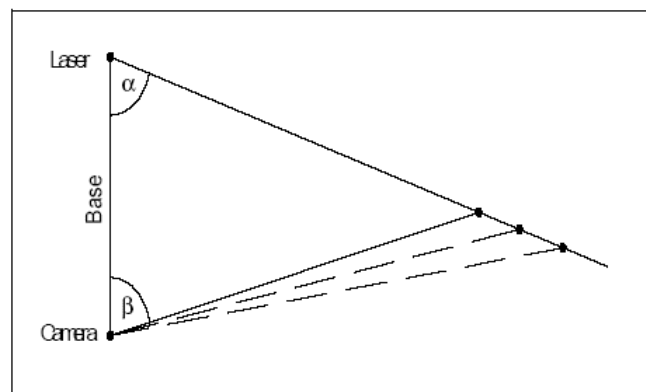


Figura 3.4-1 Incertezza sulla misura di profondità dovuta ad una scorretta misura dell'angolo β .

Dalle formule (2) e (3) del paragrafo 3.3.1 si ottiene che la profondità Z vale:

$$Z = \frac{d \cdot f}{P + f \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} \quad (1)$$

in cui f è la distanza focale della camera, d la lunghezza della base e P la distanza misurata sul sensore che consente di determinare β (vedi Figura 3.3.1-1).

L'accuratezza σ_Z sulla misura di Z è, per la propagazione della varianza, direttamente proporzionale al fattore:

$$\frac{\delta Z}{\delta P} = \frac{f \cdot d}{z^2} \quad (2)$$

da cui si evince che la precisione nel determinare Z diminuisce con il quadrato della distanza ed è direttamente proporzionale a f e d ; δP rappresenta l'accuratezza nella determinazione del pixel; per i sistemi a raggio laser è limitata dall'effetto "a macchia" (*speckle noise*), determinato dal fatto che la proiezione su una superficie otticamente scabra determina una variazione nell'immagine del raggio, introducendo quindi un errore nella determinazione del punto; per i sistemi a proiezione di luce strutturata è stato dimostrato invece che δP è linearmente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce stessa [Blais, 2003].

In una geometria convenzionale, il campo di vista del sensore è dato dalla formula:

$$\Theta = 2 \cdot \text{tg}^{-1}\left(\frac{P}{2f}\right) \quad (3)$$

da cui deriva la formula:

$$\frac{\delta Z}{\delta P} = \frac{d \cdot P}{z^2 \cdot 2 \text{tg}\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \quad (4)$$

da cui si evince che per aumentare l'accuratezza fissando il campo di vista dello scanner, è necessario aumentare la base d , la dimensione del *detector* P (ad esempio usando sensori lineari) o ridurre Z .

Dall'equazione (1) si ha che il rapporto fra range minimo e massimo è dato da:

$$\frac{1}{Z_{\min}} = \frac{1}{Z_{\max}} + \frac{P}{f \cdot d} \quad (5)$$

La sincronizzazione fra laser e fotodiode ricevente offre il vantaggio di avere lunghi *detectors* P mantenendo ridotto il campo di vista, pur essendo

piccola per ragioni costruttive la base, determinando così un aumento nell'accuratezza.

Negli scanner TOF, l'accuratezza è limitata dalla capacità dei componenti elettronici di determinare il tempo di volo.

Infatti se:

$$z = c \times \frac{\tau}{2} \quad (6)$$

è la relazione utilizzata per determinare la distanza, allora si ha che:

$$\delta z = 0.5 \cdot c \cdot \delta \tau \quad (7)$$

è l'espressione che ne determina la precisione.

Questi strumenti mostrano di solito la medesima accuratezza per distanze superiori ai 100 metri, indipendentemente dalla distanza stessa.

Un altro fattore che influenza l'accuratezza è la divergenza del raggio laser, che è proporzionale alla distanza percorsa dal raggio stesso; essa si può misurare con il fattore di espansione w , che partendo da un valore minimo w_0 , si espande secondo l'espressione:

$$w(\rho_w) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \rho_w}{\pi w_0^2} \right)^2}$$

dove ρ_w è la distanza percorsa dal raggio misurata dal punto in cui la divergenza assume il valore w_0 . L'espansione del raggio laser viene considerata lineare per grandi distanze, perciò spesso la divergenza viene indicata in termini di diametro iniziale cui viene sommato un fattore di espansione lineare espresso generalmente in mrad.

È importante sottolineare come, nonostante siano sempre di più le applicazioni di questi sistemi, non esista ancora una ben precisa standardizzazione delle procedure che determinino in modo univoco e confrontabile le caratteristiche dei sistemi in commercio per i vari campi utilizzo.

Ad esempio la risoluzione d'acquisizione è determinante nella valutazione della precisione dello strumento, poiché fornisce informazioni maggiori rispetto alla dimensione dell'impronta del raggio laser e della sua divergenza. A scopo

esemplificativo¹ si riportano i risultati di un test condotto dall'Institute for Spatial Information and Surveying Technology di Mainz (Germania) in cui vengono confrontati diversi strumenti utilizzando un unico target di riferimento, che è visibile in Figura 3.4-2. Gli strumenti sono stati posizionati a 6 metri e a 22 metri dal target e nelle tabelle sottostanti sono visibili i risultati ottenuti dagli esperimenti (a sinistra una sezione della nuvola, a destra i punti rilevati sul piano posteriore del target).

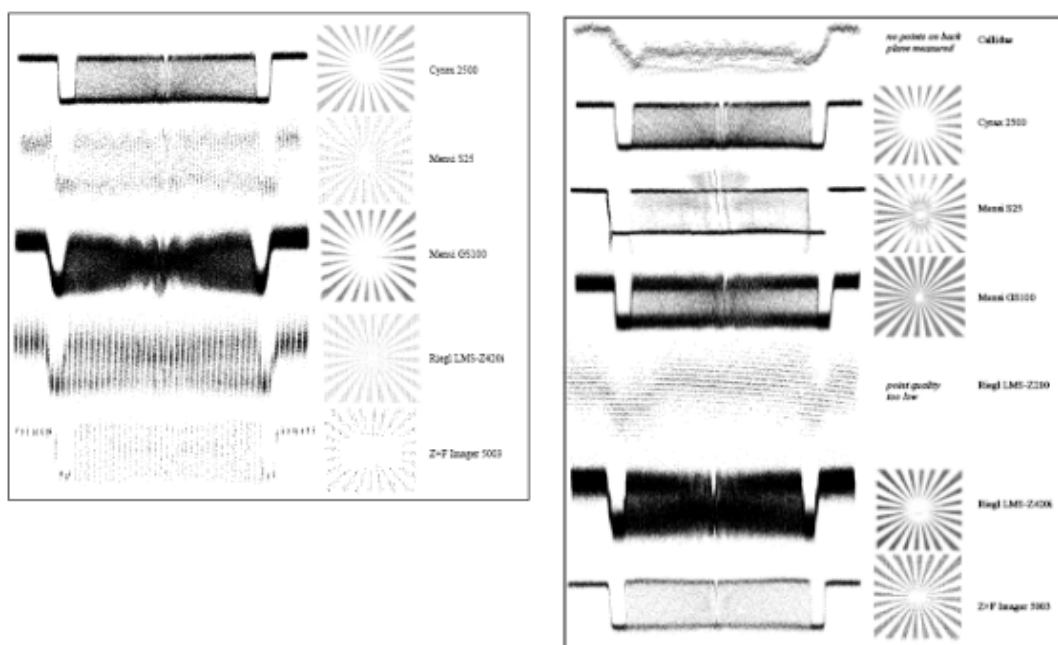
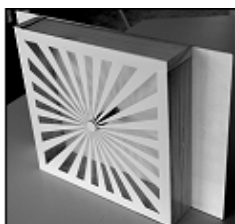


Figura 3.4-2 Test di risoluzione per diversi strumenti ottenuti usando lo stesso target (in alto).

Un altro risultato interessante, evidenziato dall'Istituto di Mainz durante i propri test, è l'effetto del laser sugli spigoli. Questo problema può causare errori il cui ordine di grandezza varia dal millimetro a svariati decimetri ed è inevitabile, a meno che la dimensione dell'impronta del laser non venga settata sulla dimensione del punto da rilevare.

¹ I dati, gli schemi ed i risultati riportati sono stati estratti da *Investigating laser scanner Accuracy*.

Manufacturer	Type	Edge quality
Callidus Prec. Syst.	Callidus	low
Cyra Technologies	Cyrax2500	average
Mensi	S25	average
Mensi	GS 100	average
Riegl	LMS-Z210	low
Riegl	LMS-Z420i	average
Zoller+Fröhlich	Imager 5003	low

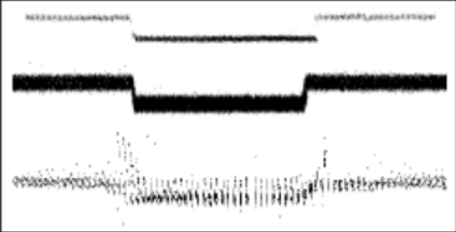


Figura 3.4-3 Test sull'effetto del laser sugli spigoli.

Nell'immagine di destra sono illustrati dei tipici esempi di qualità dello spigolo (in alto *high quality*, non raggiunto da alcuno scanner, al centro *average quality*, in basso *low*), mentre a sinistra sono riportati i risultati ottenuti per differenti sistemi.

I sistemi laser scanner dipendono dal segnale riflesso dalla superficie dell'oggetto all'unità ricevente nel caso siano distanziometrici, oppure alla camera nel caso di scanner triangolatori. In entrambi i casi l'intensità del segnale riflesso è influenzata tra i tanti fattori (distanza, condizioni atmosferiche, angolo di incidenza del raggio), ma anche dalla capacità riflessiva dell'oggetto. Le superfici bianche producono una forte riflessione, mentre le superfici nere riflettono debolmente il raggio; l'effetto delle superfici colorate dipende fortemente dalle caratteristiche del laser, mentre le superfici lucide sono di solito difficili da rilevare. È stato osservato che superfici costituite da materiali con differente riflettività causano errori sistematici nella distanza. Per alcuni materiali questi errori possono raggiungere valori molto superiori alla deviazione standard della singola misura, per questo motivo sono stati costruiti scanner dotati di dispositivi di apertura regolabili, che presentano solamente errori nei primi punti scannerizzati: dopo che il laser ha raggiunto un'area con riflettività molto diversa dalla precedente, viene applicata in modo automatico una correzione nella misura della distanza, raggiungibile solo dopo che alcune misure sono già state effettuate. Per oggetti costituiti da materiali differenti o dotati di colorazione diversa, l'operatore deve aspettarsi errori consistenti.

Anche le condizioni ambientali possono modificare la precisione di un rilievo. Infatti ogni scanner funziona correttamente solo in un certo range di temperatura ed anche all'interno di questo intervallo si possono osservare errori, soprattutto nella misura della distanza. Inoltre è necessario considerare che la temperatura interna allo scanner è sicuramente molto superiore a quella ambientale, sia per effetto della radiazione del sole sia per il calore che lo strumento sviluppa al suo interno.

Per quanto riguarda le condizioni atmosferiche è stato rilevato che sino a che vengono misurate distanze brevi, la propagazione del laser non risente dei

cambiamenti di pressione e temperatura, mentre un effetto simile a quello causato dagli spigoli viene rilevato in presenza di pulviscolo o vapore.

3.5 Considerazioni pratiche e operative sulle procedure di rilievo e *data processing*

Il primo passo nell'impostare un rilievo con laser scanner terrestre (*Terrestrial Laser Scanner*, TLS) consiste nella scelta del tipo di strumento; in un rilievo di tipo architettonico, si dovranno valutare la precisione richiesta, che a sua volta sarà determinata dalle dimensioni e dalla forma dell'oggetto.

Nonostante la possibilità di suddividere gli scanner secondo la loro portata, non esiste un criterio unico nella scelta del tipo di strumento, ma è necessario tenere in considerazione diverse caratteristiche operative, tra le quali assumono grande importanza, oltre alle inderogabili considerazioni riguardanti precisione e portata, anche parametri quali la velocità d'acquisizione, la risoluzione di scansione, la divergenza del raggio laser, la reale portata dello strumento in relazione ai materiali da cui è formato l'oggetto, il campo di misura, la possibilità di riconoscere automaticamente target e punti pre – segnalizzati, la presenza di sensori RGB accoppiati, l'autonomia operativa, e non ultimo il software necessario per il controllo dell'operazione di rilievo e per la gestione della nuvola di punti.

Effettuata la scelta dello strumento, è necessario compiere un'analisi preliminare dell'oggetto, in modo da stabilire quanti e quali saranno i punti di acquisizione al fine del rilievo completo dell'oggetto, senza buchi e zone nascoste.

Appare importante dunque per questi strumenti la considerazione che, mentre nel rilievo di tipo tradizionale l'accuratezza è il parametro predominante, in un rilievo con la tecnica laser scanner è necessario considerare anche altre caratteristiche, che possono influenzare, a volte anche in modo determinante, la realizzazione e la precisione del rilievo stesso.

In particolare in ambito architettonico e nel rilievo dei Beni Culturali, è spesso necessario unire alla descrizione della forma geometrica anche la descrizione materica dell'oggetto. In tal caso l'immagine fotografica rappresenta la miglior risposta a questa necessità, per questo motivo, alcuni strumenti TLS sono stati dotati di camere RGB calibrate ed in posizione nota rispetto allo strumento, mediante le quali è possibile ottenere un modello fotorealistico.

Oltre alle considerazioni già fatte occorre considerare altri fattori, come la trasportabilità e l'autonomia di alimentazione dello strumento. Dal momento che spesso è necessario compiere spostamenti anche con mezzi di trasporto diversi,

specialmente per il monitoraggio di Beni Culturali, lo strumento deve essere dotato di un contenitore in grado di proteggerlo sia meccanicamente sia termicamente durante il trasporto. Inoltre il rilievo avviene sovente in luoghi in cui non è disponibile una rete di alimentazione elettrica, pertanto gli scanner devono essere dotati di batterie in grado di fornire autonomia sufficiente per l'intera durata del rilievo.

L'elemento chiave per un uso proficuo del laser a scansione è sicuramente il software.

L'utilizzo di uno strumento laser scanner è inscindibile da un pacchetto software e da uno strumento hardware, che siano in grado di gestire l'enorme quantitativo di dati che questa strumentazione è in grado di rilevare. Attualmente è difficile trovare in commercio dei software in grado di gestire propriamente la nuvola dei punti ai fini di un rilievo architettonico, probabilmente perché i programmi disponibili ereditano una grande esperienza dalla modellazione solida meccanica, con procedure che tendono a modellare su superfici artificiali regolari e a riconoscere nell'oggetto primitive solide elementari (cilindri, quadrati, ecc) e solo parzialmente soddisfano le esigenze della modellazione architettonica.

Contemporaneamente, i software di modellazione 3D e di tipo CAD disponibili non sono in grado di elaborare la quantità di dati ottenuta con questi strumenti.

In generale le funzioni di base di un software ideale per il rilievo nei Beni Culturali sono:

- Controllo e gestione dell'acquisizione dei dati;
- Pretrattamento dei dati acquisiti (rimozione del rumore, filtraggio, registrazione delle scansioni)
- Trattamento dei dati filtrati (modellazione)
- Integrazione con altre informazioni (mappatura di immagini digitali).

Per quanto riguarda la prima fase, normalmente ogni sistema è fornito di un software progettato ad hoc per la gestione di questa fase.

In generale questi programmi consentono la definizione dei parametri generali dell'acquisizione, quali l'area di scansione ed il passo incrementale dello strumento, la visualizzazione in tempo reale del risultato della scansione, mediante una serie di immagini digitali che rappresentano le distanze misurate o la riflettività e l'eventuale immagine RGB registrata durante l'acquisizione. Al termine della scansione l'operatore può modificare il punto di vista della scansione e muovere nello spazio la nuvola di punti acquisiti in modo da

verificare il raggiungimento dell'obiettivo prefissato (verificare cioè che l'oggetto sia stato rilevato in modo completo).

I software forniti dalle case costruttrici sono generalmente molto efficienti e consentono una agevole esecuzione di questa fase, anche se talvolta il rendimento del software potrebbe essere migliorato implementando alcune funzioni come, ad esempio, la possibilità di utilizzare griglie di scansione con passo variabile a seconda delle zone dell'oggetto che si stanno rilevando (utilizzando per esempio una griglia ad alta risoluzione per gli spigoli).

I dati acquisiti, a seconda delle soluzioni fornite, possono essere scaricati direttamente su di un pc durante l'acquisizione, oppure memorizzati all'interno dello strumento e scaricati solo al termine della sessione di misura. I formati di memorizzazione possono essere quelli tipici del software oppure in formato testo o DXF, facilmente leggibili da qualsiasi software di visualizzazione.

Nella fase di pre – trattamento dei dati è possibile eseguire diverse operazioni: la visualizzazione, la pulizia del dato primario, con cui si eliminano eventuali punti errati, lo sfoltimento o il filtraggio dei dati, la fusione delle nuvole acquisite e l'eventuale assegnazione ad un sistema di riferimento oggetto.

Il *data cleaning* è un'operazione necessaria poiché molte sono le ragioni che possono causare la memorizzazione di punti che non appartengono all'oggetto.

Tra quelle già trattate in precedenza vi sono la parziale riflessione del raggio in corrispondenza degli spigoli, gli errori nel calcolo della distanza dovuti alla presenza di materiali dotati di diversa riflettività, i punti errati causati da oggetti molto brillanti e gli effetti atmosferici. A questi errori, vanno aggiunti i punti causati dalla riflessione di oggetti sullo sfondo, le riflessioni originatesi nello spazio tra scanner e oggetto (alberi od oggetti in primo piano, persone che si muovono o traffico) e le riflessioni multiple del raggio laser.

La maggior parte di questi punti errati può essere eliminata solo mediante procedimenti iterativi, poiché non esiste un metodo automatico che preveda tutte queste possibilità di errore; alcuni software assistono l'operatore in questo processo di *editing* tramite procedure semi – automatiche. Per esempio i punti sullo sfondo possono essere facilmente eliminati mediante l'introduzione di un intervallo di distanza, che consente contemporaneamente di eliminare le riflessioni multiple. Molto più difficili da eliminare sono i punti errati sugli spigoli.

All'interno delle procedure di pre – trattamento occorre inserire la registrazione delle scansioni eseguite. Si ricorda, infatti, che le coordinate dei punti scannerizzati vengono definite in un sistema di riferimento, dapprima

polare e poi cartesiano, con origine nel centro strumentale.

Questa operazione è chiamata registrazione e può avvenire secondo due modalità: utilizzando punti (presegnalizzati o meno), oppure correlando forme complesse.

Le tecniche di registrazione che si basano sull'utilizzo di punti prevedono che le scansioni adiacenti abbiano un sufficiente grado di ricoprimento (non meno del 30%) e che all'interno di questa fascia esistano punti presegnalizzati, o naturali e individuabili direttamente sulla nuvola, in numero sufficiente a garantire la stima dei parametri della trasformazione spaziale che permette di mettere tutte le scansioni nello stesso sistema di riferimento.

L'operazione di scelta dei punti di collegamento all'interno delle due scansioni e la definizione dei punti omologhi può avvenire in modo completamente manuale; più affidabile e preciso risulta l'uso dei punti presegnalizzati, mediante segnali catarifrangenti o di forma nota. L'utilizzo di questi punti è però possibile solo quando l'oggetto sia accessibile; in tal caso molti software consentono un'acquisizione automatica ad elevata risoluzione di questi *target* e quindi l'operatore è chiamato alla sola collimazione.

Riguardo un approfondimento sulle tecniche di allineamento di nuvole di punti, si veda il paragrafo 3.5.1.

La conoscenza, avvenuta per via topografica o fotogrammetrica, delle coordinate dei target o di punti visibili nelle nuvole in un certo sistema di riferimento consente infine la georeferenziazione dell'oggetto in un sistema di riferimento esterno, operazione questa fondamentale se si vuole utilizzare il rilievo in modo integrato con i dati acquisiti con altre metodologie.

L'operazione di modellazione vera e propria avviene con la trasformazione della nuvola di punti in una superficie continua, il modello 2.5D o realmente 3D, tramite la generazione delle *mesh*; nel caso di oggetti dotati di una geometria semplice, l'ottenimento del modello è un'operazione quasi automatica, ma nel caso di oggetti complessi caratterizzati da molte discontinuità (per esempio colonne, statue, nicchie...), ottenere un modello corretto richiede tempi di elaborazione più lunghi ed un notevole intervento da parte dell'operatore.

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

Solitamente i software in commercio consentono di effettuare l'operazione di segmentazione esclusivamente in modo manuale: l'operatore sceglie e

seleziona una porzione della nuvola di punti dallo schermo e lancia il *tool* di modellazione. Questa procedura richiede uno sforzo notevole da parte dell'operatore per identificare le porzioni di punti, soprattutto nel caso in cui il modello sia molto denso di informazioni e complesso nella forma.

Attualmente si nota un crescente impegno, nell'ambito della ricerca, per lo sviluppo di tecniche automatiche di segmentazione, che traggono origine dalle tecniche utilizzate per il trattamento dei dati ottenuti da laser scanner aerei.

Creato il modello è quindi possibile ricavare da esso i prodotti finali ottenibili.

Bisogna sottolineare che considerata l'enorme quantità di dati ottenibili mediante un rilievo laser scanner, una rappresentazione dell'oggetto con strumenti classici, come prospetti in ambiente CAD, è del tutto inappropriata e produce una perdita significativa di dati.

Per questo motivo la migliore rappresentazione che si può ottenere è mediante un modello tridimensionale che consenta di esplorare l'oggetto e da cui siano facilmente ricavabili misure e sezioni (normalmente i software in commercio consentono l'estrazione automatica di sezioni).

Il modello 3D, magari foto – texturizzato e navigabile dell'oggetto, è un prodotto facilmente ottenibile, ma può essere di difficile gestione per l'utilizzatore inesperto e richiede un supporto hardware piuttosto potente (scheda grafica dotata di acceleratore tridimensionale e processore adeguato). Il risultato è però di grande impatto sul pubblico e fornisce una descrizione dell'oggetto molto dettagliata, da cui è possibile ottenere informazioni metriche accurate.

Un altro prodotto metrico molto utile per analizzare in modo approfondito l'oggetto è l'ortofoto, ottenibile tramite integrazione fra le immagini dell'oggetto acquisite contestualmente o no al rilievo laser.

3.5.1 Tecniche di allineamento di nuvole di punti

In passato, soprattutto nell'area della Computer Vision, notevoli sforzi sono stati fatti riguardo la tematica della registrazione di nuvole tridimensionali di punti. Uno dei metodi più popolari, tuttora implementato nella maggior parte dei software commerciali che si occupano della gestione ed elaborazione di dati 3D, è l'algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), sviluppato da Besl e McKay, che sono considerati i pionieri della registrazione, in quanto sono riusciti a tradurre in modo formale l'allineamento di superfici [Besl & McKay, 1992]; il principio di funzionamento del primo algoritmo è stato poi variato e sviluppato, anche da

numerosi altri autori, nel corso degli anni.

L'algoritmo ICP applica in modo iterativo una roto-traslazione rigida nello spazio ad una delle due nuvole, considerata mobile, affinché si sovrapponga nel miglior modo possibile all'altra nuvola, considerata fissa.

Il metodo è un cosiddetto punto-punto, che si contrappone al metodo punto-piano sviluppato da Chen e Medioni [Chen & Medioni, 1992]. In entrambi i metodi adottati, la registrazione avviene tramite la ricerca del minimo di una funzione obiettivo.

Nel primo metodo (metodo punto-punto) questa funzione è data dalla somma dei quadrati delle distanze dei punti corrispondenti delle nuvole. I punti corrispondenti si definiscono come la coppia formata da un punto di una nuvola e quello più vicino appartenente alla nuvola opposta. Nel secondo metodo (punto-piano), pur rimanendo la stessa struttura della funzione obiettivo, sono da minimizzare però le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani di *best-fit* passanti per i punti dell'altra.

L'algoritmo procede in questo modo (Figura 3.5.1-1): date due superfici P e Q da allineare, si considera un punto di P indicato con p, e si cerca un punto particolare di Q, detto punto corrispondente q, che coincide con il punto più vicino (punto a distanza minima); in pratica per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati, all'interno della nuvola fissa, i punti contenuti all'interno di una sfera di un certo raggio (multiplo di un parametro introdotto dall'utente) e di questi viene tenuto il più vicino, che sarà considerato il punto corrispondente.

Questo avviene formalmente definendo un operatore "punto più vicino" (*Closest Point Operator*) C, secondo la relazione:

$$C : P \rightarrow Q / \forall p \in P \exists q \text{ tale che } \text{minimo}(\text{distanza}(p, q)) < \sigma$$

Fatto questo per tutti i punti della nuvola mobile e sommati i quadrati delle distanze relative, si ottiene il valore che sarà poi quello da minimizzare muovendo con delle rototraslazioni rigide la nuvola che si è scelta mobile.

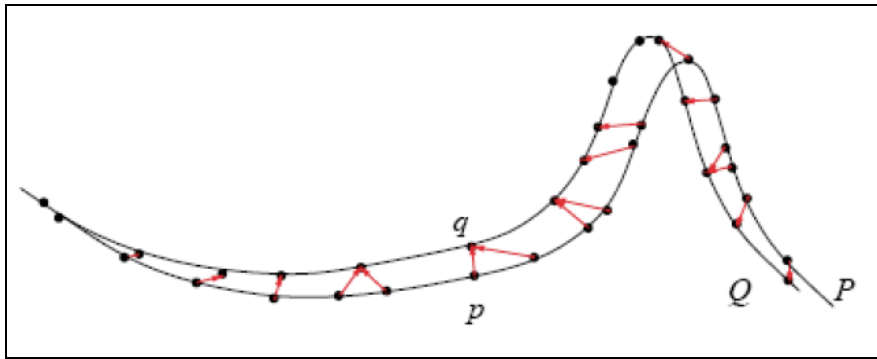


Figura 3.5.1-1 Metodo punto-punto.

Si nota come in una procedura di ricerca così fatta, vengano escluse automaticamente tutte le coppie di punti corrispondenti che risultano avere una distanza superiore al valore del raggio della sfera da noi definita. Questo valore deriva da un parametro inserito dall'operatore, dal quale dipenderà anche l'esito della registrazione. Tale parametro in letteratura è convenzionalmente stimato come il doppio della distanza media dei punti di una nuvola, tuttavia in caso di forti disallineamenti dovrà essere convenientemente aumentato.

Naturalmente dopo un primo tentativo di minimizzazione delle distanze dei punti corrispondenti, sarà molto improbabile che la registrazione sia andata a buon fine, infatti molte coppie di punti che si sono formate, risulteranno essere solo "fittizie" e non porteranno verso un vero allineamento.

Saranno necessarie quindi più iterazioni, all'interno delle quali ripetere le operazioni di ricerca dei punti corrispondenti e di minimizzazione delle distanze. La convergenza dell'intero processo si avrà quando la variazione della matrice di rototraslazione tra due iterazioni successive è minore di una certa percentuale (generalmente quando la differenza delle ultime due traslazioni e rotazioni è contemporaneamente minore dell'1%).

Le coppie di punti corrispondenti che si sono formate sono quelle all'interno della zona di sovrapposizione e in questo modo sono automaticamente esclusi tutti quei punti delle nuvole che non devono prendere parte al processo (punti di rumore o più generalmente fuori dalla zona di sovrapposizione).

Dopo aver creato le coppie si procede alla minimizzazione della funzione:

$$e = \sum_1^N \left\| q_i - (R_{p_i} + T) \right\|^2$$

con N numero di coppie corrispondenti che si sono formate, e R,T matrici di rotazione e traslazione.

Dopo aver trovato il minimo si ricomincia con un'altra iterazione calcolando i punti vicini. A questo punto però, viene ridotto di una certa percentuale il

raggio σ della sfera con la quale si esegue la ricerca (il criterio di questa riduzione varia a seconda degli autori).

Nel metodo di registrazione con minimizzazione delle distanze con metodo punto-piano, ad ogni punto della nuvola mobile viene associato un certo numero di punti dell'altra nuvola ottenuti scegliendoli tra quelli più vicini alla normale uscente dal punto della nuvola mobile. Questi punti vengono utilizzati per fare un *best-fit*, ossia trovare un piano che li approssima (col metodo dei minimi quadrati). Ogni punto della nuvola mobile si troverà così associato ad un piano (indicato con π) sulla nuvola fissa; la funzione obiettivo in questo caso è minimizzare la somma dei quadrati delle distanze punto-piano di tutti i punti della nuvola mobile (figura 3.5.1-2) ossia trovare il minimo di:

$$e = \sum_i^N \text{dist}(R_{p_i} + T, \pi_i)^2$$

A parte il diverso modo di intendere la funzione obiettivo, la struttura dell'algoritmo rimane essenzialmente la stessa di quella del metodo punto-punto. Questo metodo permette una convergenza con un numero di iterazioni di un ordine di grandezza minore, grazie al fatto che possiamo muoverci su un piano (quindi su due dimensioni) per trovare il minimo della funzione.

Sebbene il processo di *best-fit* dei piani risulti piuttosto oneroso dal punto di vista computazionale, il metodo punto-piano resta più veloce e più preciso di quello punto-punto.

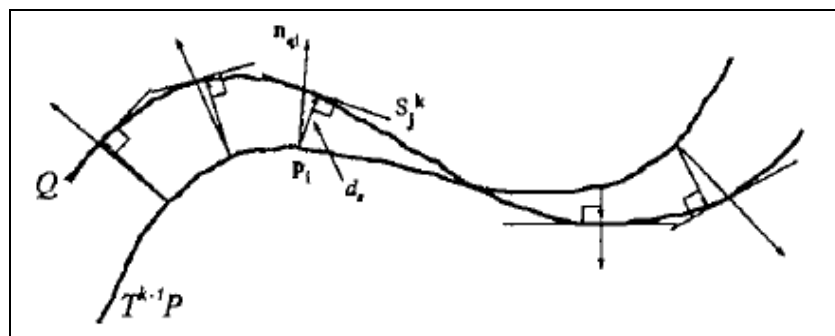


Figura 3.5.1-2 Metodo punto-piano.

L'algoritmo ICP originale è *pairwise based*, cioè l'allineamento avviene per due sole nuvole per volta; i software commerciali (ad esempio PolyWorks, Innovmetric; Geomagic Studio, Geomagic Inc.; RapidForm, INUS Technology) permettono di eseguire, dopo una prima fase di allineamento delle nuvole a due a due in cui ogni nuvola viene allineata con l'ultima ottenuta, un allineamento globale di tutte le nuvole insieme, allo scopo di ridistribuire e quindi

minimizzare l'errore residuo di registrazione fra tutte le scansioni.

L'algoritmo ICP assume che uno dei set di punti sia un sottoinsieme dell'altro; quando questa assunzione non è valida, sono creati falsi *matches* che influenzano la convergenza dell'ICP ad una corretta soluzione; inoltre non è in grado di gestire dati multi – scala.

Per questi motivi numerose variazioni dell'algoritmo sono state proposte da altri autori, al fine di ridurre questi problemi.

Un'alternativa a questo metodo è rappresentato dal 3D *Least Square Matching*, che rappresenta una evoluzione nella tridimensionalità del metodo del *Least Square Image Matching* [Grün, 1985]; per dettagli vedere in riferimento bibliografico [Akca & Grün, 2004]. In generale questo metodo stima i parametri della trasformazione spaziale fra due o più *patches* tridimensionali minimizzando la distanza euclidea fra le superfici per mezzo dei minimi quadrati. Questa formulazione dà l'opportunità di cercare la corrispondenza fra superfici orientate in modo arbitrario. Un'equazione alle osservazioni viene scritta per ogni elemento, per esempio per ogni punto del *patch* 3D selezionato e di cui si vuol trovare il corrispondente. La relazione geometrica tra i *patches* coniugati è definita da una trasformazione 3D spaziale a 7 parametri; i parametri incogniti di questa trasformazione sono trattati come quantità stocastiche, utilizzando pesi appositi.

3.6 La standardizzazione del dato

La tecnologia *laser scanner* terrestre si è evoluta nel campo del rilievo dei Beni Culturali soprattutto negli ultimi dieci anni e per questo motivo non è stata ancora predisposta una metodologia standard per le procedure ed il controllo di qualità di un rilievo di questo tipo.

In ambito anglosassone l'English Heritage, l'organismo responsabile della conservazione e della valorizzazione dei beni culturali inglesi, ha mantenuto uno standard di precisione per tutti i rilievi di tipo metrico effettuati negli ultimi otto anni.

Nell'ambito dei sistemi TLS (Terrestrial Laser Scanning) una standardizzazione è piuttosto complicata, soprattutto per la varietà dei sistemi in commercio. L'English Heritage si è occupato principalmente degli scanner distanziometrici ed in quest'ambito è interessante porre l'attenzione su questo studio per capire quali parametri sono stati considerati ed in che modo si è cercato di dare avvio ad una standardizzazione per questa nuova metodologia di rilievo.

Innanzitutto occorre evidenziare che per raggiungere una proposta soddisfacente sono stati rilevati più di 400 siti, sottoposti a tutela dell'English Heritage ed il procedimento di definizione si è evoluto mediante successive revisioni dei rilievi e consultando contemporaneamente sia i committenti che i rilevatori. Il risultato è stato pubblicato come "Addendum" al Metric Survey Specification for English Heritage.

Per ottenere un approccio strutturato, la progressione logica di un rilievo con laser scanner è stata suddivisa in tre segmenti tra loro correlati: acquisizione dei dati, utilizzo ed archiviazione.

Per quanto riguarda la fase di acquisizione dei dati, si può dire che questa è fortemente dipendente dallo strumento utilizzato, quindi è consigliabile richiedere un certificato di buon funzionamento dello strumento, oppure un test dettagliato eseguito nell'ultimo anno, che dimostri che lo scanner è in grado di fornire la precisione e l'accuratezza richieste.

La precisione e la densità di punti vengono stabilite durante la fase iniziale della progettazione del rilievo e possono essere definite secondo due modalità.

- Utilizzando la dimensione minima della caratteristica dell'oggetto che si vuole rilevare; l'English Heritage ha infatti introdotto il parametro di qualità Q , che vale:

$$Q = 1 - \left(\frac{m}{\lambda} \right)$$

dove Q rappresenta la qualità dei dati, mentre m è la densità dei punti sull'oggetto e λ è la dimensione minima. Con questo parametro è quindi possibile indicare a quale livello l'oggetto è stato scannerizzato: ad esempio un valore negativo di Q indica una densità di punti insoddisfacente a rappresentarlo in dettaglio.

- Basandosi sulla scala del rilievo, secondo la Tabella 3.6-1:

SCALA	EFFETTIVA DENSITA' DEI PUNTI	PRECISIONE	USI
1:10	2.0 mm	+/- 2.0 mm	Piccoli dettagli/oggetti (sino a 5m × 5m)
1:20	4.0 mm	+/- 4.0 mm	Grandi dettagli/oggetti (sino a 10m × 10m)
1:50	15.0 mm	+/- 15.0 mm	Piccole strutture (sino a 20m × 30m)
1:100	25.0 mm	+/- 25.0 mm	Grandi strutture (sino a 40m × 60m)

Tabella 3.6-1 Requisiti di un rilievo laser secondo la scala.

Affinchè l'acquisizione risponda ai requisiti richiesti dai committenti è necessario specificare, nella fase preliminare, quale sarà la dimensione dell'impronta del raggio laser, che non può superare il doppio della densità dei punti, il numero e la posizione delle scansioni, al fine di non ottenere delle lacune nei dati, il grado di sovrapposizione tra scansioni adiacenti ed in quale modo filtrare i dati per implementare le performance del software.

Eseguito il rilievo, per poter controllare l'accuratezza ottenuta, è possibile utilizzare dei punti di controllo, le cui coordinate, derivate dal modello tridimensionale ottenuto mediante TLS, vengano confrontate con le coordinate dei medesimi punti ottenute mediante strumenti topografici classici.

Per quanto riguarda l'utilizzo dei dati non vi sono ancora specifiche e standard sul tipo e sulle modalità dei prodotti ottenibili; vale ciò che è stato sottolineato nel paragrafo precedente, cioè che il disegno è un prodotto inappropriato per la rappresentazione di un rilievo laser scanner, mentre una corretta rappresentazione si può ottenere mediante un modello tridimensionale, animazioni e filmati, oppure mediante profili e sezioni.

La fase finale del processo è l'archiviazione del dato acquisito, che costituisce una parte vitale del processo di standardizzazione e deve garantire la consultazione dei rilievi anche a distanza di tempo. Il più grande ostacolo, attualmente, è la mancanza di un formato standard per i dati acquisiti, ma in tal senso l'English Heritage ha iniziato a fissare alcune convenzioni per i propri siti sia riguardanti i dati, sia i nomi, sia i metadati.

È da rilevare l'importanza di tutte quelle nozioni aggiuntive che rendono ripetibili nel tempo un rilievo ed un'elaborazione mediante TLS. Il progetto deve contenere informazioni riguardanti le varie fasi di elaborazione (filtraggio registrazione e modellazione) ma anche tutte le informazioni disponibili per

individuare correttamente i punti di stazione dello scanner e i punti di controllo, la precisione di tutti i parametri derivati dal processo di registrazione con i rispettivi residui, una descrizione completa della nuvola di punti e di tutte le lacune conosciute ed infine le note aggiuntive sul sito, come ad esempio le condizioni climatiche in cui è avvenuto il rilievo.

La generazione di queste informazioni può risultare onerosa per l'operatore, ma garantisce la leggibilità del rilievo nel tempo e la possibilità di utilizzare questo tipo di dati per un reale monitoraggio dei cambiamenti che il bene in esame subisce nel tempo.

In conclusione il lavoro di standardizzazione è ancora in fase di definizione, ma è molto utile per sottolineare la necessità di cooperazione con la committenza nel fissare tutti i requisiti che influenzeranno il rilievo e le relative operazioni di elaborazione che determineranno il prodotto finito.

3.7 Laser a scansione e fotogrammetria

Nei capitoli 5 e 6 verranno esposti alcuni casi di reale integrazione e confronto fra questi due sistemi di rilievo, entrambi di grande utilizzo e interesse nel campo dei Beni Culturali.

Si vogliono però qui esporre alcune considerazioni e valutazioni di carattere generale, a chiusura di questi due capitoli sull'acquisizione del dato metrico.

Sino a pochi anni fa la tecnica principalmente utilizzata per il rilievo di Beni Culturali era la fotogrammetria, unita al rilievo topografico di appoggio per l'acquisizione dei punti di controllo; sicuramente con l'avvento dei primi laser a scansione effettivamente utilizzabili in questo ambito, l'enorme quantità di dati acquisiti unitamente all'incredibile velocità di acquisizione ottenuti mediante questa metodologia, ha fatto in un primo tempo pensare ad una possibile sostituzione delle due tecniche.

Oggi, in seguito a svariate problematiche di rilievo affrontate, la comunità scientifica internazionale riconosce all'utilizzo integrato delle due tecniche la soluzione ottimale per un rilievo accurato dal punto di vista metrico e dotato della ricchezza di particolari necessaria per descrivere in modo completo un oggetto.

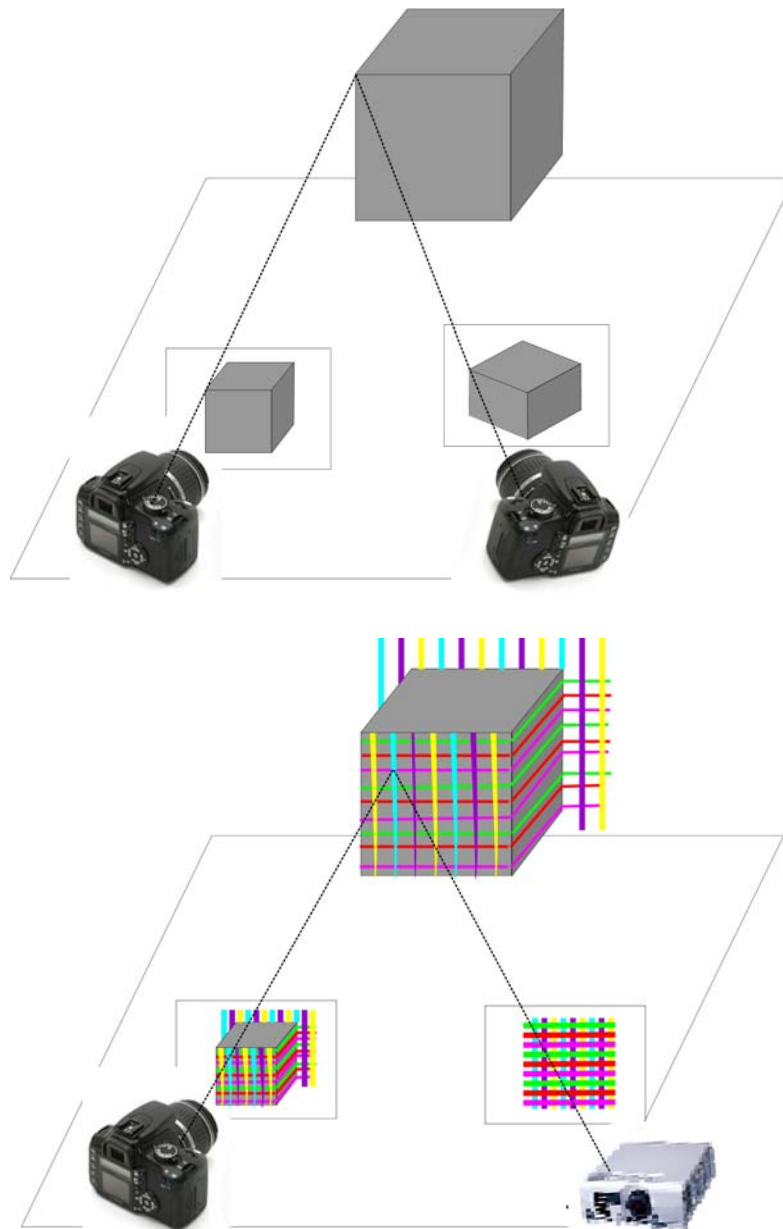


Figura 3.7-1 Confronto schematico fra l'approccio dei sensori passivi (in alto) e dei sensori attivi (in basso) nel rilievo.

La figura 3.7-1 schematizza i due metodi di rilievo.

Nei sensori passivi:

- Il problema della corrispondenza dei punti omologhi è risolto con misure automatiche o semi – automatiche
- Ci sono vincoli geometrici fra i punti omologhi (ad esempio geometria epipolare)
- La ricostruzione 3D della coppia di punti omologhi avviene per triangolazione

Nei sensori attivi:

- Una delle camere è replicata da un emettitore di luce

- Il problema della corrispondenza è risolto cercando il pattern nella camera (decodificazione)

Entrando più in dettaglio, la fotogrammetria è una tecnica di rilievo che utilizza la luce ambientale (*Passive vision*), per fornire una descrizione completa della morfologia e delle caratteristiche di un oggetto. Grazie agli enormi sviluppi compiuti negli ultimi 20 anni dall'elettronica e dall'informatica, si utilizzano oggi prevalentemente camere digitali, ma il principio di funzionamento della fotogrammetria rimane la triangolazione, lo stesso principio utilizzato dagli scanner triangolatori. Proprio in ragione del principio di funzionamento, per ottenere una misura tridimensionale con questa tecnica sono necessarie almeno due immagini che ritraggano la stessa porzione di oggetto da due angolazioni differenti.

Si può quindi capire come il rilievo di strutture di grandi dimensioni richieda una fase di acquisizione molto lunga e ben progettata, al fine di ottenere una notevole sovrapposizione tra immagini adiacenti per una completa descrizione dell'oggetto.

Dal punto di vista dell'estrazione delle caratteristiche geometriche, poi, è richiesta una lunga fase di processamento dei dati e, nonostante l'elevato grado di automazione offerto dai più moderni pacchetti software, un notevole intervento da parte dell'operatore. Senza considerare la necessità di un rilievo topografico in situ, tale da garantire la georeferenziazione del modello tridimensionale ottenuto dal processo fotogrammetrico.

Come si è già ampiamente spiegato, gli strumenti laser scanner utilizzano il laser o la proiezione di luce strutturata (*Active vision*) per poter effettuare misure di punti. Il dato che si ottiene è da subito tridimensionale e, qualora fosse nota la posizione dello strumento, facilmente inseribile in un sistema di coordinate note.

D'altro canto gli scanner non forniscono le caratteristiche descrittive dell'oggetto (colori, materiali, stato di degrado, ecc), al più possono registrare l'intensità del segnale di ritorno, fornendo quindi una visione in toni di grigio, che è spesso di difficile interpretazione per l'operatore e non consente di descrivere l'aspetto prettamente visivo dell'oggetto rilevato.

Confrontando le due tecniche si può capire in quale modo il loro utilizzo integrato consenta di colmare le reciproche lacune.

Innanzitutto la maggior parte dei dati che possono essere raccolti mediante uno scanner sono ottenibili anche utilizzando la fotogrammetria dei vicini.

Analizzando i pro e contro delle due tecniche si può invece osservare che mentre per l'acquisizione fotogrammetrica è necessaria la presenza di *texture* e di opportune condizioni di illuminazione per poter determinare gli spigoli ed i

contorni di un oggetto, uno scanner determina gli stessi dati indipendentemente da questi requisiti. Per contro un rilievo fotogrammetrico è molto più flessibile, data la portabilità delle camere (molto più leggere di uno scanner) e l'opportunità di utilizzo senza treppiede. Inoltre gli scanner hanno un costo molto più elevato rispetto agli strumenti utilizzati in fotogrammetria e dotati della medesima precisione (il fattore di proporzione tra i costi è di 10/1).

La fotogrammetria, però, richiede una procedura di orientamento piuttosto complessa prima di poter estrarre informazioni tridimensionali da una coppia di immagini, mentre le differenti scansioni ottenute con un laser possono essere unite in modo molto semplice e rapido.

La creazione di un modello TIN, necessario per la visualizzazione dell'oggetto, avviene in maniera diretta e quasi automatica per dati ottenuti da laser, mentre le immagini fotogrammetriche richiedono una fase di *image matching* preventiva per poter creare un set di punti tridimensionali da utilizzare per la modellazione dell'oggetto.

Infine i laser scanner creano una “quasi – immagine” dell'oggetto, mentre le immagini fotogrammetriche forniscono la possibilità di creare un database di elevata qualità visiva, molto adatto per rivestire un modello 3D.

Entrambe le tecniche necessitano, in funzione dell'oggetto rilevato, di un consistente intervento da parte dell'operatore per convertire il dato tridimensionale in un vero e proprio modello 3D. Inoltre per arrivare ad una corretta interpretazione dei punti acquisiti con laser scanner, un operatore deve aver accesso ad un supporto visivo mediante video o fotografia.

In conclusione le due tecniche sono tra loro perfettamente complementari: mentre la fotogrammetria produce un modello facile da interpretare utilizzando le informazioni di colore, il laser è in grado di descrivere la geometria tridimensionale di un oggetto con elevata risoluzione ed in modo automatico. Proprio per questi motivi l'attuale tendenza dei produttori è di fornire dei laser scanner dotati di camere digitali calibrate ed in posizione nota, così da garantire una rapida e facile integrazione tra le due tipologie di dati.

4.

LA CALIBRAZIONE DI CAMERE DIGITALI NON METRICHE

Oggi, nelle applicazioni di fotogrammetria dei vicini e, più in generale, nel campo dell'Archeologia e del rilievo architettonico, l'utilizzo di camere semimetriche analogiche di medio formato è stato quasi completamente sostituito dall'utilizzo di camere digitali amatoriali. Le ragioni sono molteplici; innanzitutto esistono oggi in commercio camere digitali di elevata risoluzione relativamente economiche (nell'ordine del migliaio di euro per una camera da 8 Mpixel); questo tipo di camere permette l'immediata disponibilità delle immagini per l'elaborazione e l'analisi in una forma direttamente utilizzabile in un processo di elaborazione digitale; le immagini digitali restano immutate nel tempo e possono essere facilmente trasmesse dalla camera al computer; la misura delle coordinate immagine è univoca, essendo il sistema di riferimento dell'immagine definito dalla matrice di pixel che la costituisce; infine queste camere, per la loro leggerezza, maneggevolezza e trasportabilità, sono particolarmente adatte in quei campi in cui l'acquisizione del dato deve avvenire in breve tempo e in condizioni pratico – operative non sempre facili, come spesso avviene nel campo dei Beni Culturali.

L'utilizzo di una camera amatoriale, a causa della mancanza di un certificato di calibrazione, rende però la fase di calibrazione della camera stessa un pre-requisito necessario all'estrazione dalle immagini di informazioni metriche tridimensionali precise e affidabili.

In generale una camera è considerata calibrata se sono noti la distanza focale, l'offset del punto principale e i parametri di distorsione della lente.

Nel corso degli anni numerosi algoritmi di calibrazione sono stati riportati nella letteratura fotogrammetrica; questi algoritmi sono generalmente basati sui due modelli analitici delle equazioni di collinearità e della trasformazione lineare diretta, che saranno brevemente descritti nei prossimi paragrafi; i due approcci divenuti più popolari sono senz'altro quello della *self calibration* e

della *field calibration*, utilizzati nel contesto più generale della soluzione cosiddetta *bundle adjustment* o compensazione a stelle proiettive; in particolare il metodo della *self calibration* fu introdotto per la prima volta nella fotogrammetria dei vicini negli anni settanta, e dopo aver raggiunto come argomento di ricerca piena maturità e completezza nel corso degli anni ottanta, è ridivenuto di estremo interesse con l'avvento delle camere digitali e con il loro utilizzo in applicazioni come la ricostruzione di incidenti stradali e il rilievo dei Beni Culturali, in cui la geometria di acquisizione delle immagini talvolta non è adatta ad una procedura di calibrazione sul campo.

Nei parametri successivi viene presentato uno studio su tale tematica, allo scopo di presentare, oltre ai fondamenti teorici del problema, una sperimentazione condotta su differenti metodologie di calibrazione in relazione alle possibili condizioni di assetto ottico – geometrico della camera all'atto della presa e di diverse possibili condizioni pratico – operative.

4.1 Fondamenti analitici della calibrazione

Un fotogramma può essere considerato, con sufficiente precisione, una prospettiva centrale, geometricamente rigorosa, dell'oggetto fotografato. L'operazione di restituzione fotogrammetrica si basa proprio su questo fondamento per ricostruire la posizione di un punto, cioè le sue coordinate oggetto (X, Y, Z), partendo dalle coordinate immagine corrispondenti misurate su due o più fotogrammi.

Per fare questo è però necessario ricostruire l'orientamento interno del fotogramma, cioè si deve conoscere la posizione del centro di presa relativamente al piano dell'immagine; l'orientamento interno, come mostrato nella figura 4.1-1, è definito dalle coordinate immagine del punto principale e dalla distanza principale c .

Per potere ricostruire la geometria spaziale di un oggetto è però necessario conoscere anche la posizione e l'assetto della camera al momento della presa nel sistema di riferimento oggetto: queste informazioni definiscono l'orientamento esterno dell'immagine e richiedono la conoscenza di 6 parametri incogniti per ogni fotogramma.

La definizione della prospettiva centrale, rappresentata da un fotogramma, richiede quindi la determinazione di 9 parametri. I 3 dell'orientamento interno sono caratteristici della camera e vengono determinati o dal costruttore o con opportune procedure di calibrazione. I 6 parametri dell'orientamento esterno vengono determinati con metodi topografici, quando è possibile. In fotogrammetria aerea spesso non è facile raggiungere in questo modo una

precisione sufficiente e quindi si ricorre in alternativa a metodi indiretti, usando i punti d'appoggio: sulla base di un modello analitico che definisce la trasformazione tra spazio oggetto e spazio immagine, la stima dei parametri di orientamento esterno ed anche interno può essere eseguita, mediante una compensazione ai minimi quadrati, misurando le coordinate immagine di un opportuno numero di punti di coordinate note nel sistema di riferimento oggetto.

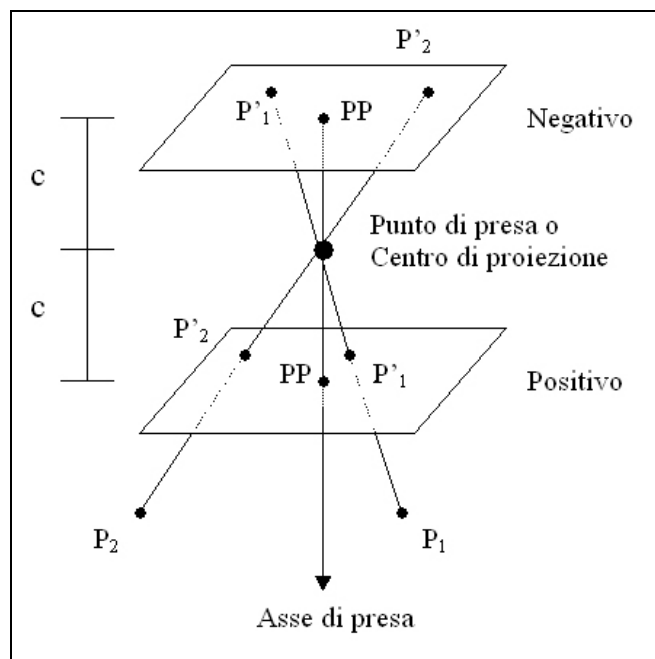


Figura 4.1-1 - Prospettiva centrale in un fotogramma.

La definizione della prospettiva centrale, rappresentata da un fotogramma, richiede quindi la determinazione di 9 parametri. I 3 dell'orientamento interno sono caratteristici della camera e vengono determinati o dal costruttore o con opportune procedure di calibrazione. I 6 parametri dell'orientamento esterno vengono determinati con metodi topografici, quando è possibile (ad esempio con un GPS e un sistema inerziale montati sull'aereo) o con metodi indiretti, usando i punti d'appoggio: sulla base di un modello analitico che definisce la trasformazione tra spazio oggetto e spazio immagine, la stima dei parametri di orientamento esterno ed anche interno può essere eseguita, mediante una compensazione ai minimi quadrati, misurando le coordinate immagine di un opportuno numero di punti di coordinate note nel sistema di riferimento oggetto.

4.1.1 Le equazioni di collinearità

Nell'ipotesi di una prospettiva centrale rigorosa, il punto oggetto, il centro di presa e il punto immagine corrispondente, sono allineati, cioè appartengono ad

una stessa retta (Figura 4.1.1-1).

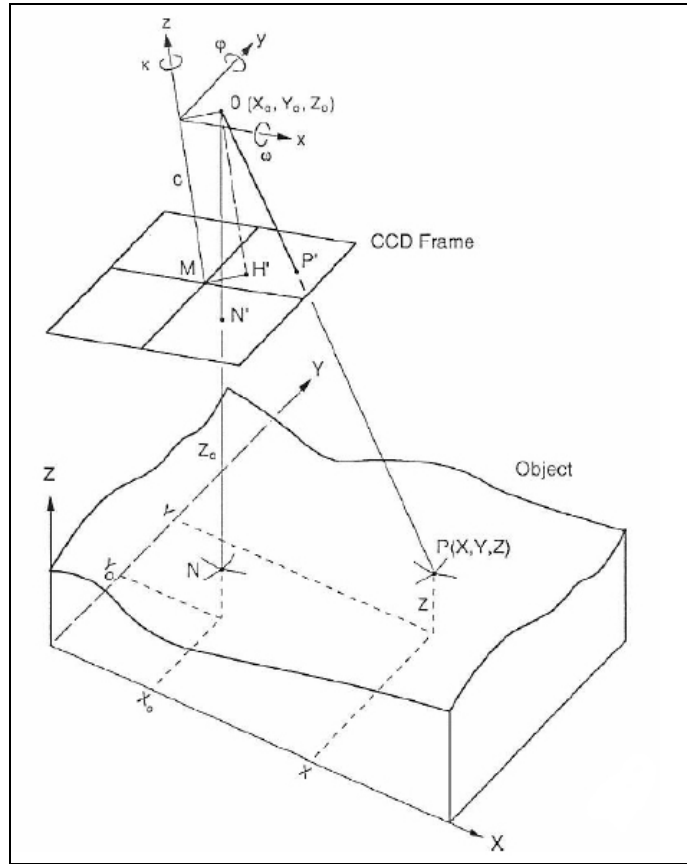


Figura 4.1.1-1 Le equazioni di collinearità

Le equazioni di collinearità definiscono la trasformazione proiettiva tra lo spazio immagine e lo spazio oggetto e contengono perciò implicitamente questa condizione geometrica:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \lambda_{ij} R_j \begin{bmatrix} x_{ij} - x_{0j} \\ y_{ij} - y_{0j} \\ z_{ij} - z_{0j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

con:

X_i, Y_i, Z_i Coordinate nello spazio oggetto di un punto P_i

X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j} ... Coordinate oggetto del centro di presa O_j

x_{ij}, y_{ij} Coordinate immagine misurate del punto P'_{ij}

x_{0j}, y_{0j} Coordinate immagine del punto principale H'_{ij}

c_j Distanza focale

R_j Matrice di rotazione fra lo spazio immagine e lo spazio oggetto

λ_{ij} Fattore di scala per il raggio immagine

$i = 1, \dots, n_p$ (numero dei punti oggetto)

$j = 1, \dots, n_f$ (numero delle immagini)

Nel sistema (1) l'orientamento interno dell'immagine digitale j è definito dai parametri x_{0j} , y_{0j} , c_j , mentre i parametri X_{0j} , Y_{0j} , Z_{0j} , R_j (ω_j , ϕ_j , κ_j) definiscono l'orientamento esterno, dove ω_j , ϕ_j , κ_j sono i tre angoli di rotazione che definiscono la matrice R_j .

Le tre equazioni del sistema possono essere ridotte a due, eliminando il fattore di scala λ_{ij} , e quindi espresse in accordo alle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} x_{ij} = -c_j f_{ij}^x + x_{0j} &= -c_j \frac{r_{11j}(X_i - X_{0j}) + r_{21j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{31j}(Z_i - Z_{0j})}{r_{13j}(X_i - X_{0j}) + r_{23j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{33j}(Z_i - Z_{0j})} \\ y_{ij} = -c_j f_{ij}^y + y_{0j} &= -c_j \frac{r_{12j}(X_i - X_{0j}) + r_{22j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{32j}(Z_i - Z_{0j})}{r_{13j}(X_i - X_{0j}) + r_{23j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{33j}(Z_i - Z_{0j})} \end{aligned} \quad (2)$$

dove r_{11j}, \dots, r_{33j} sono gli elementi di R_j .

Come noto, la formazione di un fotogramma si discosta da questo modello matematico – geometrico ideale e semplificato, perché la presenza inevitabile degli errori sistematici indotti dalla camera provoca uno spostamento del punto immagine dalla posizione teorica.

Per potere utilizzare le equazioni di collinearità è dunque necessario introdurre delle opportune correzioni alle coordinate immagine, per cui le equazioni (2) divengono:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= -c_j f_{ij}^x + x_{0j} + \Delta x_{ij} \\ y_{ij} &= -c_j f_{ij}^y + y_{0j} + \Delta y_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

dove i termini Δx_{ij} e Δy_{ij} sono per l'appunto i termini di correzione delle coordinate immagine x_{ij} , y_{ij} da applicare al fine di riportare la realtà fisica della geometria del sensore al modello teorico descritto.

4.1.2 La trasformazione lineare diretta

La DLT (*Direct Linear Transformation*) fornisce un valido algoritmo di trattamento del dato fotogrammetrico, in alternativa al modello classico della collinearità [Abdel-Aziz and Karara, 1971].

Dal punto di vista analitico il modello DLT rappresenta una trasformazione funzionale in grado di istituire una corrispondenza biunivoca tra spazio immagine e spazio oggetto prescindendo dalla fisica di acquisizione del sistema ottico – fotogrammetrico attraverso una relazione di tipo lineare, in funzione di 11 parametri caratteristici.

$$\begin{aligned} x_{ij} + \Delta x_{ij} &= \frac{L_{1j}X_i + L_{2j}Y_i + L_{3j}Z_i + L_{4j}}{L_{9j}X_i + L_{10j}Y_i + L_{11j}Z_i + 1} \\ y_{ij} + \Delta y_{ij} &= \frac{L_{5j}X_i + L_{6j}Y_i + L_{7j}Z_i + L_{8j}}{L_{9j}X_i + L_{10j}Y_i + L_{11j}Z_i + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

Queste equazioni sono ricavabili dalle equazioni di collinearità con opportune trasformazioni matematiche, da cui appare evidente che gli undici parametri indipendenti della trasformazione L_1, \dots, L_{11} sono fortemente legati alla fisica di acquisizione del dato fotogrammetrico, in quanto funzione sia degli elementi dell'orientamento esterno ($X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j$), sia degli elementi dell'orientamento interno (x_{0j}, y_{0j}, c_j).

Pertanto, almeno formalmente, la trasformazione lineare diretta assolve al medesimo scopo delle equazioni di collinearità; tuttavia il modello di collinearità ha carattere estremamente generale, a differenza della DLT, in quanto, come già detto, rappresenta una traduzione in termini matematici dello schema tipico della proiezione centrale con cui si acquisisce il fotogramma; come tali, le equazioni di collinearità si contraddistinguono per una estrema flessibilità applicativa nei più svariati ambiti fotogrammetrici, mentre il modello diretto lineare presenta ambiti applicativi più ristretti, in particolare l'ambito tipico di utilizzo è quello tipico della fotogrammetria dei vicini.

Senza entrare troppo specificatamente nell'argomento, è possibile mettere in luce le virtù applicative e gli svantaggi nell'impiego della trasformazione lineare diretta. Innanzitutto è possibile applicare la DLT a fotogrammi in cui la posizione del sistema di coordinate immagine sia del tutto arbitraria, quindi non v'è alcuna necessità di disporre di fotogrammi acquisiti con camere metriche, dotate di marche fiduciali; la linearità delle equazioni non richiede la determinazione di stime iniziali dei parametri e rende complessivamente l'elaborazione più veloce; infine è possibile esprimere le coordinate immagine in un sistema di riferimento non necessariamente ortogonale e con un fattore di scala anisotropo lungo i 2 assi coordinati, in quanto in effetti la trasformazione lineare diretta consente di modellare anche tali effetti.

Per contro esiste una casistica di situazioni e circostanze che rende

l'applicazione della trasformazione lineare diretta assai svantaggiosa, tra cui principalmente la necessità di un numero maggiore di punti di controllo, e la notevole sensibilità del modello alla configurazione geometrica delle prese e alla distribuzione e tipologia dei punti di appoggio, dovendo evitare prese ortogonali, spazi oggetto assimilabili ad un piano e sistemi di riferimento con origine molto lontana dall'oggetto stesso.

In particolare sul confronto fra il numero di parametri incogniti e il numero minimo di punti di controllo per innescare una procedura di compensazione nei due modelli descritti, si osservi la Tabella 4.1.2-1.

In questa tabella il termine "Standard" indica il modello in cui non sono presi in considerazione per il conto del numero dei parametri incogniti, i parametri di distorsione radiale e tangenziale, su cui torneremo nei prossimi paragrafi, e che sono secondo le espressioni più accreditate in letteratura in numero di 5 ed entrano nel calcolo delle correzioni delle coordinate immagine che nelle equazioni (3) e (4) sono state indicate con Δx_{ij} e Δy_i ; il termine "Modificato" sta invece ad indicare che tali parametri non sono nulli o noti e devono quindi essere calcolati nella procedura di calibrazione.

È evidente che la DLT richiede in entrambi i casi un numero di punti noti maggiore rispetto alle equazioni di collinearità.

Modello impiegato	Numero di parametri incogniti	Numero minimo di GCP	Ridondanza globale
DLT Standard	11	6	1
DLT Modificato	16	9	2
Proiezione centrale Standard	6	4	2
Proiezione centrale con autocalibrazione	14	8	2

Tabella 4.1.2-1 Rapporto tra numero di punti di controllo e parametri incogniti in funzione del modello impiegato

Riassumendo si può dire che i due modelli analitici brevemente descritti presentano differenti caratteristiche in termini di stabilità numerica, onere computazionale, covarianza dei parametri e spazio dei punti di controllo.

Di seguito verrà posta particolare attenzione ai requisiti ed alle caratteristiche del modello proiettivo, che è stato utilizzato per le prove sperimentali descritte.

4.2 Il metodo del *bundle adjustment* e i parametri aggiuntivi

Generalmente in fotogrammetria dei vicini, la calibrazione delle camere digitali utilizzate per l'acquisizione del dato, viene effettuata sulla base del modello analitico delle equazioni di collinearità (3) per mezzo del *bundle adjustment* o compensazione a stelle proiettive, descritto nel prossimo paragrafo; ovviamente si utilizza la forma modificata delle equazioni di collinearità, estese con i termini di correzione per la distorsione radiale e tangenziale.

Questo metodo è considerato il più flessibile, generale ed accurato ed è utilizzato da lungo tempo sia in fotogrammetria aerea che terrestre.

Con questo approccio l'entità elementare è costituita dal fotogramma e si calcolano direttamente le relazioni fra coordinate immagine e coordinate oggetto, senza introdurre le coordinate modello quale passaggio intermedio.

La figura 4.2-1 illustra il principio. I punti immagine e il centro di proiezione di ciascun fotogramma definiscono una stella di raggi nello spazio; i parametri di orientamento interno ed esterno dei fotogrammi vengono calcolati simultaneamente.

Le stelle proiettive vengono:

- traslate e
- ruotate

in modo che i raggi

- si intersechino al meglio in corrispondenza dei punti di legame e
- passino il più possibile per i punti d'appoggio.

In funzione dei parametri che di volta in volta sono da considerare incogniti o noti, le equazioni (3) possono essere utilizzate nei seguenti casi, riassunti nella Tabella 4.2-2:

(a) Metodo *Bundle adjustment* generale: è questo il metodo della cosiddetta *self calibration*, in quanto tutti i parametri dal lato destro delle equazioni (orientamento interno, orientamento esterno, coordinate oggetto dei punti) sono incogniti.

(b) Metodo *Bundle adjustment* per camere metriche: x_{0j} , y_{0j} , c_j sono noti, tutti gli altri parametri sono incogniti.

(c) Metodo della *Spatial Resection*:

(c_a) I parametri di orientamento interno e le coordinate oggetto dei punti

sono noti, i parametri di orientamento esterno sono incogniti.

(c_b) Solo le coordinate oggetto dei punti sono note, i parametri di orientamento esterno e interno sono incogniti.

(d) Metodo della *Spatial Intersection*: i parametri di orientamento interno ed esterno sono noti, le coordinate oggetto dei punti devono essere determinati.

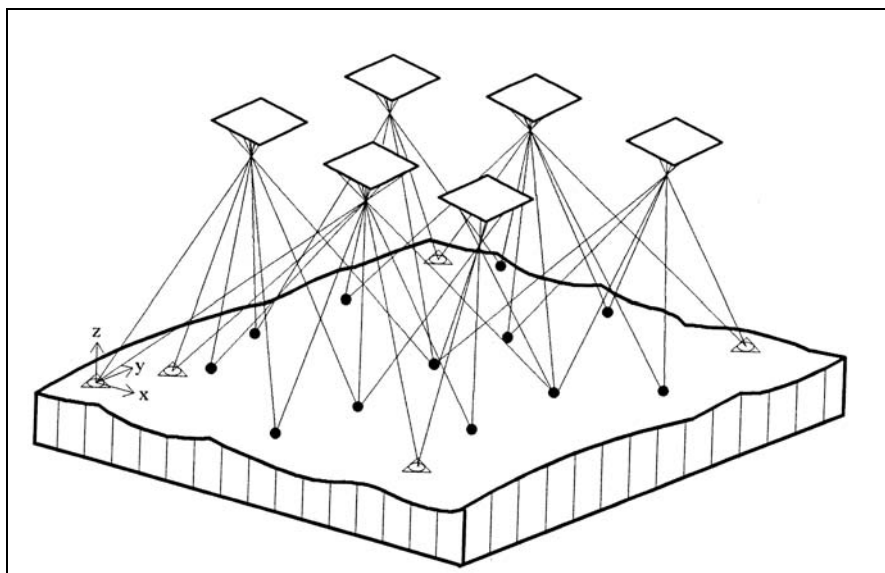


Figura 4.2-1 Schematizzazione del metodo *bundle adjustment*.

Procedura	Parametri noti	Parametri incogniti
<i>Bundle</i> generale	-	$IO_j; EO_j; (X, Y, Z)_i$
<i>Bundle</i> per camere metriche	IO_j	$(X, Y, Z)_i; EO_j$
<i>Spatial resection</i> (a)	$IO_j; (X, Y, Z)_i$	EO_j
(b)	$(X, Y, Z)_i$	$IO_j; EO_j$
<i>Spatial intersection</i>	$IO_j; EO_j$	$(X, Y, Z)_i$

Tabella 4.2-2 Procedure di orientamento e restituzione come casi particolari del metodo *Bundle adjustment*.

Da questa tabella è facile comprendere l'estrema flessibilità e generalità di questo metodo, all'interno del quale qualunque combinazione di queste procedure può essere trattata, comprese la parziale conoscenza di alcuni dei parametri di orientamento interno e/o esterno.

Come già detto precedentemente, il modello di collinearità deve essere esteso al fine di considerare gli errori sistematici dovuti al processo di acquisizione dell'immagine, conducendo alla procedura che nella tabella precedente è stata indicata come metodo più generale di *Bundle adjustment* con *Self – Calibration* [Grün and Beyer, 2001]; questi errori sono usualmente descritti dai termini Δx_{ij} e Δy_{ij} di correzione delle coordinate immagine, e sono considerati funzione dei cosiddetti parametri addizionali (APs).

Sono diversi in fotogrammetria i set di parametri addizionali che possono essere presi in considerazione; uno di questi [Brown, 1971], largamente utilizzato, consiste di 10 parametri che modellano l'orientamento interno della camera ($\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c$), l'incertezza sulla forma del pixel (*shape factor* S_x), un fattore che tenga conto della non ortogonalità del sistema di riferimento (*shear factor* A), i parametri della distorsione radiale simmetrica della lente (k_1, k_2, k_3) e i parametri della distorsione tangenziale della lente (p_1, p_2).

Le equazioni di collinearità estese assumono così la forma (3) già scritta nel paragrafo 4.1.1, dove i termini di correzione sono i seguenti (5):

$$\Delta x = -\Delta x_0 + \frac{\Delta c}{c} \bar{x} + \bar{x} S_x + \bar{y} A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{x} + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y}$$

$$\Delta y = -\Delta y_0 + \frac{\Delta c}{c} \bar{y} + \bar{x} A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{y} + 2p_1 \bar{x} \bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2)$$

$$\text{con } \bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0 \text{ e } r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$$

Le equazioni (5) sono chiamate “modello fisico”, in quanto tutti i componenti (APs) possono essere attribuiti a errori dovuti a cause fisiche.

Risolvere un *Bundle adjustment* con *Self – Calibration* significa stimare i parametri addizionali nelle equazioni (5) e contemporaneamente i parametri di orientamento esterno di ogni immagine e le coordinate oggetto dei punti, per mezzo della collimazione di un certo numero di punti omologhi in tutte le immagini. Combinando tutti le equazioni scritte per tutti i punti in tutte le immagini si compone un sistema certamente ridondante che può così essere risolto.

Le equazioni (3) sono in questo modo le equazioni alle osservazioni per la stima tramite metodo ai minimi quadrati dei parametri incogniti; il modello funzionale può essere scritto come:

$$l = f(x) \tag{6}$$

Le equazioni di collinearità devono essere linearizzate e necessitano quindi di valori approssimati delle incognite; a questo punto è possibile scrivere il modello funzionale della compensazione e introducendo la matrice disegno A e il vettore dei residui v , la (6) diventa:

$$l - v = Ax \quad (7)$$

dove:

$x = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa, AP_i]$ è il vettore delle incognite, in cui $\Delta X \dots \Delta \kappa$ sono le correzioni da applicare ai valori approssimati delle incognite;

A è la matrice disegno $n \times u$ (n è il numero delle osservazioni e u è il numero delle incognite);

l è il vettore delle discrepanze (osservazioni – incognite).

La stima del vettore delle incognite \hat{x} avviene per via iterativa e risulta:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} (A^T P l) \quad (8)$$

in cui P è la matrice dei pesi da associare alle osservazioni, e nella maggior parte delle applicazioni pratiche ha la forma $\sigma^2 I$, dove σ^2 rappresenta una misura globale della varianza delle coordinate immagine.

L'accuratezza della compensazione è data dai residui v delle osservazioni e dalla stima della varianza dell'unità di peso $\hat{\sigma}_0$, che valgono:

$$v = A\hat{x} - l \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - u}} \quad (10)$$

dove $n-u$ è la ridondanza (differenza fra il numero di osservazioni e il numero delle incognite).

Dall'inversa della matrice normale:

$$N = (A^T P A) \quad (11)$$

si ottiene la cosiddetta matrice non-scalata di covarianza:

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} \quad (12)$$

che viene scalata per mezzo della (10) dando luogo alla matrice di varianza-covarianza delle incognite:

$$K_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 Q_{xx} \quad (13)$$

in cui la funzione degli elementi della diagonale principale di K_{xx}

$$\hat{\sigma}_{kk} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{kk}} \quad (14)$$

rappresenta la deviazione standard di ogni singola incognita, mentre gli altri elementi della matrice rappresentano la covarianza fra l'incognita x_i e l'incognita x_j (con $i \neq j$).

Un elemento importante per la valutazione della bontà della compensazione è il coefficiente di correlazione esistente fra le incognite.

Un valore assoluto vicino a 1 di tale coefficiente, che si esprime con la relazione:

$$\rho_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii} \cdot q_{jj}}} \quad (15)$$

sta a significare un'elevata correlazione tra i parametri x_i e x_j , problema che in genere va risolto fissando o rimuovendo uno dei parametri dalle incognite.

Il passaggio dall'espressione (12) alla (13) è possibile solo se la matrice normale è invertibile; è quindi necessario eliminare il difetto di rango di tale matrice introducendo dei vincoli, cioè definendo un datum per la rete, fissando i 7 parametri (3 traslazioni, 3 rotazioni e un fattore di scala) di una trasformazione di similitudine nello spazio; usualmente in fotogrammetria questo viene fatto o tramite i punti d'appoggio (almeno 7 coordinate note) o fissando 7 parametri di orientamento esterno delle immagini.

I vincoli imposti alla rete influenzano il valore delle incognite stimate, la loro indeterminazione e tutte le grandezze derivate. Per questo soluzioni *free-net* (in tal caso per la soluzione del sistema normale (8) si utilizza la matrice N^+ pseudo-inversa di Moore-Penrosa) o a minimi vincoli sono frequentemente adottate in fotogrammetria in sostituzione alla soluzione a vincoli sovrabbondanti, soprattutto nel terrestre; in particolare l'approccio *free-net* permette di effettuare la calibrazione della camera senza alcuna informazione riguardo lo spazio oggetto e in tal caso la soluzione ottenuta è quella per cui la traccia della matrice di varianza-covarianza è minima.

Una soluzione alternativa alla conoscenza di punti d'appoggio è anche la possibilità di utilizzare vincoli geometrici; questo consente di aggiungere nel

modello funzionale equazioni addizionali che in qualche modo relazionano i parametri incogniti fra di loro e possono rendere più robusta la soluzione ottenuta.

I vincoli solitamente riguardano il fatto che alcuni punti giacciono sulla stessa linea [Habib et al., 2002] o sullo stesso piano oppure siano note le distanze fra due punti o fra le posizioni di due camere, come per esempio avviene nel caso di immagini acquisite da dispositivi emulanti la stereo-camera, come il Cyclop (Menci Software).

Riassumendo, all'interno del metodo del *Bundle adjustment* la soluzione del problema della calibrazione può essere trattata con diversi approcci:

1. Approccio *block invariant*: si considera un unico set di APs per tutte le immagini; questo è l'approccio più comune, ma ovviamente presuppone che tutte le immagini siano state acquisite con un medesimo assetto geometrico dell'ottica della camera e il set di parametri trovati è valido solo sotto la condizione scelta. In questo caso è frequente la soluzione *Self calibration* o con soli vincoli geometrici; alcuni software commerciali (PhotoModeler Pro 5, EOS System Inc.) utilizzano in particolare per questo approccio alcune immagini di un reticolo piano fornito insieme al programma; in questo caso la calibrazione può avvenire in modalità totalmente automatica, in quanto il software effettua sulla base di algoritmi di *image matching* la collimazione automatica di tutti i punti del reticolo su tutte le immagini disponibili e in seguito l'elaborazione dei dati.

2. Approccio *frame invariant*: si considera un set di APs per ogni immagine; questo approccio è necessariamente utilizzato in applicazioni multi-camera o quando ci sono effetti di zoom; spesso i software commerciali non permettono in questo caso la stima di tutti i parametri, ad esempio il PhotoModeler Pro 5 permette di determinare con il modulo detto *Inverse camera* solo la focale, la posizione del punto principale e la dimensione del sensore.

3. Approccio misto: alcuni parametri si considerano stabili in tutto il blocco (ad es. punto principale, *shear* e *shape factor*), mentre si assegnano la focale e i parametri di distorsione per ogni immagine.

Ovviamente la scelta fra questi approcci va effettuata caso per caso, e dipende fortemente dalle condizioni operative del rilievo. Alcune considerazioni importanti riguardo i parametri addizionali e la geometria del progetto saranno spiegate più avanti, dopo le prove sperimentali effettuate.

4.3 Prove sperimentali di calibrazione

In questo capitolo sono descritte alcune prove sperimentali di calibrazione eseguite su camere digitali amatoriali.

Il primo esperimento descritto riguarda la calibrazione della camera digitale Canon EOS350 D, caratterizzata da un sensore CCD da 8 MegaPixel (dimensioni sensore: 3456×2304 pixel, 22.2×14.8 mm) e il cui obiettivo è stato settato per la prova descritta ad una lunghezza focale pari a 22 mm con focamento a 1 metro (questo assetto della camera è stato utilizzato per il rilievo fotogrammetrico di un importante reperto archeologico che sarà descritto nel Capitolo 6).

Con la stessa camera, ma settando l'obiettivo ad una distanza focale di 10 mm con focamento all'infinito, è stato condotto un esperimento che permetta un confronto in termini di risultati ottenibili fra un approccio *Self Calibration* e un approccio *Field Calibration*, cioè calibrando la camera sulla base delle immagini di un oggetto di interesse utilizzate anche per la restituzione dello stesso.

In seguito viene descritto un caso di calibrazione eseguito su immagini digitali di un reperto archeologico acquisite a scopo descrittivo-informativo del bene, ma non a scopo metrico.

L'ultima parte del paragrafo riguarda un argomento di ricerca rimasto aperto nel campo della modellizzazione dei parametri interni di una camera digitale amatoriale.

4.3.1 I software di calibrazione utilizzati

Al fine di confrontare i risultati ottenibili con diversi pacchetti software, l'elaborazione delle immagini è stata eseguita con 3 diversi programmi:

- PhotoModeler Pro 5 (www.photomodeler.com)
- Australis (www.photometrix.com.au)
- SGAP, implementato dall'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria del Politecnico di Zurigo.

I primi due sono software commerciali, mentre SGAP è un software di *Bundle Adjustment* a riga di comando che gira su piattaforma Linux ed è stato sviluppato ad hoc dal gruppo di ricerca dell'ETH; è importante sottolineare che mentre PhotoModeler e Australis lavorano direttamente sulle immagini, SGAP accetta in input esclusivamente i file di testo delle coordinate immagine dei punti misurati su tutti i fotogrammi e necessita quindi precedentemente di un

altro software che permetta di eseguire tale operazione.

Il PhotoModeler Pro 5 è un programma di restituzione monoscopica di buona qualità in termini di efficacia, funzionalità e costo [Hanke, 1996]; è estremamente *user friendly* ed offre all'operatore strumenti semplici ed intuitivi per la verifica della precisione dei risultati, suggerimenti pratici nel corso del processamento e sistemi di supporto alla collimazione, come la geometria epipolare, rispondendo in modo adeguato ai requisiti di semplicità, flessibilità ed economicità delle applicazioni fotogrammetriche ai Beni Culturali.

Per quanto attiene l'impiego di immagini non metriche il PhotoModeler offre una notevole versatilità, permettendo di eseguire la calibrazione di camere amatoriali sulla base del modello analitico delle equazioni di collinearità; le modalità possibili sono tre:

- la modalità *Inverse Camera* realizza la calibrazione di singoli fotogrammi utilizzati insieme nello stesso progetto, ma acquisiti da camere diverse; il software associa ad ogni fotogramma una propria camera caratterizzata da propri parametri di orientamento interno, calcolando però esclusivamente la distanza focale, le coordinate del punto principale e le dimensioni del sensore;
- la modalità di elaborazione *Full Field Calibration* realizza la calibrazione della camera determinando un unico set di parametri valido per tutti i fotogrammi. La stima viene eseguita anche in assenza di dati di definizione dello spazio oggetto (*Self Calibration*);
- la calibrazione della camera a priori può essere eseguita in automatico nella modalità *PhotoModeler Calibration Project*, che realizza la calibrazione della camera sulla base delle immagini di un reticolo di calibrazione piano fornito col software.

Tutti i risultati del processamento sono riportati in modalità file di testo nel Project Status Report (Figura 4.3.1-1).

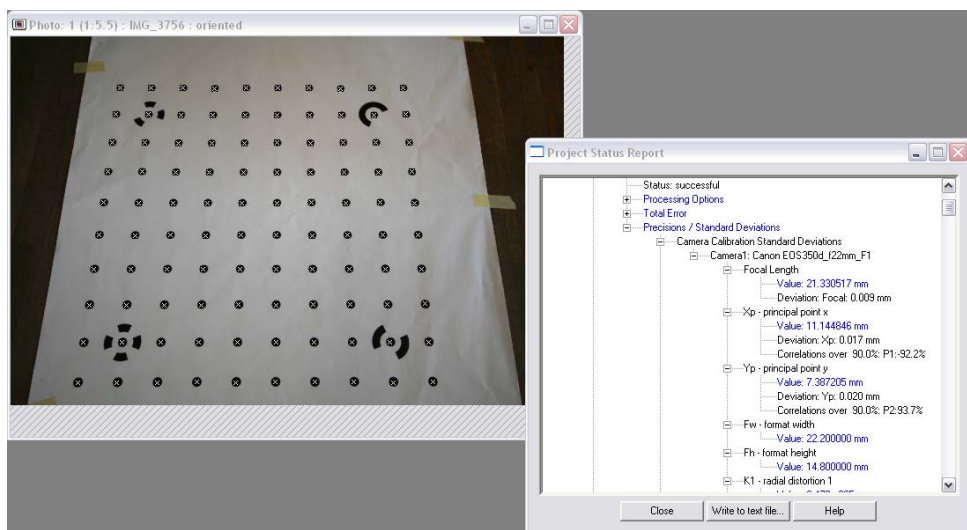


Figura 4.3.1-1 Il reticolo piano del PhotoModeler coi punti collimati in automatico e il *Project Status Report* della calibrazione.

Il software Australis, può utilizzare in input sia direttamente le immagini, sia dei file di testo che riportano, per ogni immagine del progetto, le coordinate immagine dei punti collimati.

Le funzionalità del software sono molteplici; ad esempio per quanto riguarda la calibrazione è possibile eseguire l'orientamento/triangolazione delle immagini e la calibrazione del sensore, utilizzando *targets* ad elevato contrasto e dispositivi di orientamento esterno (scale bar) acquistabili col software; la modalità è totalmente automatica.

Il software SGAP è un software a riga di comando che realizza il calcolo del Bundle Adjustment sulla base di alcuni file di testo che contengono tutti i dati di input necessari; la versione utilizzata gira su piattaforma Linux.

I passaggi successivi attraverso cui avviene il calcolo sono fondamentalmente tre ed a questo proposito è opportuno ricordare che il metodo della compensazione ai minimi quadrati presuppone la conoscenza dei valori approssimati iniziali delle incognite; per quanto riguarda le caratteristiche delle moderne camere digitali, alcune informazioni possono essere acquisite nel file *exif* associato ad ogni immagine, che è leggibile attraverso i più comuni programmi di grafica (ad esempio Photoshop).

I tre *steps* sono:

1. *Resection*: partendo dalle coordinate immagine di tutti i punti collimati in tutte le immagini e dalle coordinate oggetto approssimate degli stessi (eventualmente è sufficiente conoscere le coordinate oggetto solo di alcuni punti), si calcolano i valori approssimati dei parametri di orientamento esterno;
2. *Triangulation*: in questa fase si trovano i valori approssimati delle

coordinate oggetto dei punti (se non già disponibili);

3. *Bundle Adjustment*: questa è la fase del calcolo vero e proprio per iterazioni successive, partendo dai valori trovati nelle due fasi successive.

Nel caso del PhotoModeler la computazione comincia dopo la collimazione dei 4 target notevoli del reticolo, di cui è nota la posizione oggetto approssimata in un sistema di riferimento piano locale definito sul reticolo (Figura 4.3.1-2). A questo punto attraverso le fasi descritte si arriva al risultato finale.

Per quanto riguarda i test effettuati con Australis e SGAP sono stati utilizzati come dati di input i file di testo contenenti i valori approssimati delle incognite e delle osservazioni, ottenuti dal processamento delle immagini nel PhotoModeler.

I test riguardano il caso di *Bundle Adjustment* generale con *Self Calibration* e quindi i dati necessari in input sono:

- le coordinate immagine di tutti i punti collimati in tutte le immagini disponibili;
- le coordinate (approssimate) oggetto dei punti stessi;
- i valori (approssimati) dei parametri di orientamento esterno delle immagini
- i valori approssimati dei parametri addizionali.

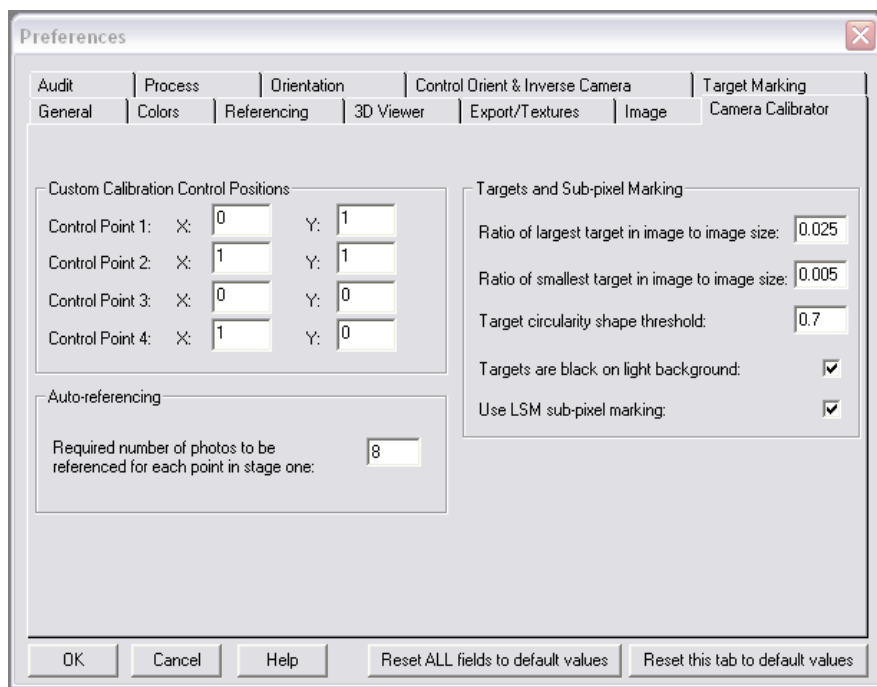


Figura 4.3.1-2 La finestra Camera Calibrator nelle impostazioni di progetto del PhotoModeler.

4.3.2 Calibrazione tramite reticolo piano

L'approccio scelto per la calibrazione è il *Bundle Adjustment* generale con

Self Calibration, cioè senza alcuna informazione riguardo lo spazio oggetto, utilizzando le immagini di un reticolo piano di calibrazione. Il reticolo è fornito con il software PhotoModeler Pro 5 ed è mostrato in Figura 4.3.2-1; le 16 immagini utilizzate per il processamento sono state acquisite includendo alcune immagini ruotate di $\pm 90^\circ$ secondo lo schema illustrato nella Figura 4.3.2-2.

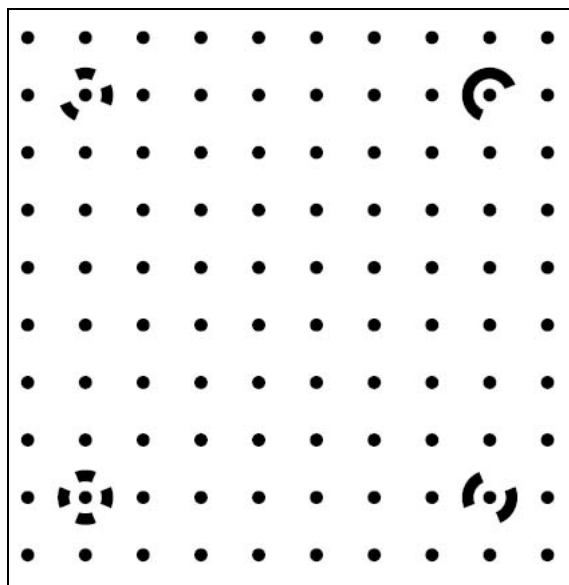


Figura 4.3.2-1 Reticolo piano di calibrazione fornito dal PhotoModeler Pro5.

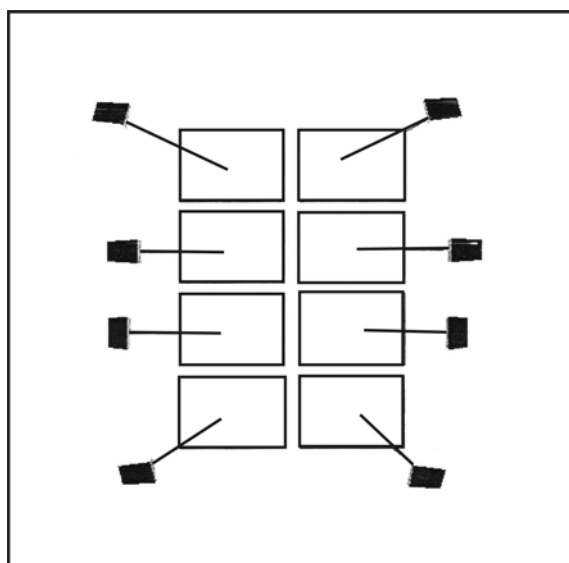


Figura 4.3.2-2 La geometria di acquisizione delle immagini per la calibrazione.

I risultati ottenuti sono mostrati nelle Tabelle 4.3.2-3 e 4.3.2-4.

Nel 1° test effettuato sono state impostate le seguenti opzioni:

- deviazione standard a priori dell'unità di peso: $\sigma_0 = 1$ pixel = 0,006 mm nel caso in esame;

- precisione a priori delle coordinate immagine: 0,25 pixel; se i punti sono collimati per *Image Matching* in automatico tale valore può anche essere

inferiore, fino a 1/10 del pixel, ma nel caso in esame si è scelto un valore più elevato in quanto è stata necessaria una consistente fase di correzione manuale della collimazione automatica eseguita dal PhotoModeler, specialmente ai lati del reticolo, probabilmente resa problematica dalla geometria di acquisizione delle immagini;

- APs incogniti: distanza focale c , coordinate del punto principale X_p , Y_p , K_1 , K_2 parametri della distorsione radiale, P_1 , P_2 parametri della distorsione tangenziale (il parametro K_3 , lo *shape factor* e lo *shear factor* sono stati fissati a 0 [Remondino and Fraser, 2006]).

- Il sistema di riferimento immagine ha centro nello spigolo in alto a sinistra dell'immagine, asse x verso destra, asse y verso il basso.

APs	PhotoModeler		Australis		SGAP	
	Valore (mm)	σ associato (mm)	Valore (mm)	σ associato (mm)	Valore (mm)	σ associato (mm)
c	21,330	9,0 E-03	21,257	9,0 E-03	21,264	9,4 E-03
X_p	11,144	1,7 E-02	11,143	1,7 E-02	11,140	1,8 E-02
Y_p	7,387	2,0 E-02	7,412	1,9 E-02	7,423	2,0 E-02
K_1	2,478 E-05	6,7 E-06	2,591 E-05	6,7 E-06	2,920 E-05	6,9 E-06
K_2	-3,379 E-07	5,3 E-08	-3,533 E-07	5,4 E-08	-3,890 E-07	5,6 E-08
P_1	-1,526 E-05	1,4 E-05	-1,672 E-05	1,4 E-05	-1,960 E-05	1,5 E-05
P_2	1,419 E-05	1,6 E-05	1,459 E-05	1,5 E-05	2,180 E-05	1,6 E-05

Tabella 4.3.2-3 Parametri aggiuntivi (1° Test) per la camera Canon EOS 350D e scarti quadratici medi associati, ottenuti con diversi software.

Software	σ_0 a posteriori (pixel)	RMS _{v_{xy}} (micron)	σ_{XYZ} (mm)
PhotoModeler	1.10	6.19	0.142/0.139/0.154
Australis	1.12	6.30	0.145/0.142/0.158
SGAP	1.16	6.48	0.114/0.107/0.127

Tabella 4.3.2-4 Valore della stima a posteriori della varianza dell'unità di peso, scarto quadratico medio dei residui sulle coordinate immagine dei punti (RMS_{v_{xy}}) e precisione teorica delle coordinate oggetto dei punti (σ_{XYZ}), ottenuti con diversi software.

Osservando i dati contenuti in queste due tabelle è possibile fare alcune iniziali considerazioni:

- I risultati ottenuti con i tre software sono tra loro paragonabili.
- La deviazione standard a posteriori dell'unità di peso è all'incirca pari a 1 pixel in tutte e tre le computazioni; questo è un primo indicatore della riuscita del processo.
- Riguardo i punti collimati è importante controllare i residui sulle coordinate immagine, cioè sulle osservazioni, per verificare la presenza di errori grossolani; l'osservazione affetta dall'eventuale errore grossolano va individuata tramite l'analisi dei residui normalizzati (vedi

Appendice A).

- Le σ_{XYZ} indicano che precisione si è raggiunta nella determinazione delle coordinate oggetto dei punti.
- Riguardo la determinazione dei parametri addizionali è evidente un problema che riguarda le coordinate del punto principale ed i due parametri della distorsione tangenziale; essi presentano infatti una deviazione standard associata che è dello stesso ordine di grandezza del parametro stesso, cioè il suo valore è indeterminato.
- L'analisi del coefficiente di correlazione fra i APs ha evidenziato una correlazione elevata, nel caso in esame superiore al 90%, fra X_p e P_1 (92%) e fra Y_p e P_2 (93%); questo fatto, insieme a quello evidenziato nel punto precedente, suggeriscono di eliminare dagli APs incogniti i parametri della distorsione tangenziale.

Tutte le informazioni indicate finora sono rese disponibili dai tre software in output alla fase di processing; un ulteriore test statistico sui APs è però raccomandato, specialmente quando la geometria di acquisizione delle prese non è ottimale per la calibrazione e quando vi è un'elevata correlazione fra i parametri addizionali [Remondino & Fraser, 2006].

Il software SGAP permette di ottenere in output i risultati di un test di significatività sui APs per ogni iterazione della compensazione¹; per l'ultima i risultati sono riportati nella Tabella seguente.

¹ Il test di significatività sui parametri addizionali avviene tramite un test statistico di Student, in cui l'ipotesi nulla è che "il parametro addizionale x non è significativo"; il test utilizza la variabile t:

$$t = \frac{\hat{x}_1}{\hat{\sigma}_i} = \frac{\hat{x}_1}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{ii}}} \quad (1)$$

dove:

\hat{x}_i = valore stimato del parametro addizionale i

$\hat{\sigma}_i$ = deviazione standard del parametro addizionali i

Fissato un certo livello di confidenza α , si può ricavare dalle tabelle della distribuzione di Student, il valore critico corrispondente t_α ; a questo punto si confrontano i due valori:

- se $t < t_\alpha$, il parametro non è significativo;
- se $t > t_\alpha$ il parametro è significativo.

Un test di Student ha valore se le variabili analizzate sono indipendenti fra di loro e questo è notoriamente non vero per i parametri addizionali; in realtà si dovrebbero quindi usare come riferimento distribuzioni diverse, ad esempio la Fischer, che è bi-dimensionale.

In realtà, se si sono già eliminati quei parametri che risultano correlati più del 90-95%, la distribuzione di Student può essere usata con buona affidabilità.

Parametro	Ratio	Significatività
X _p	2.3	Si
Y _p	1.1	No
Δc	78.7	Si
K ₁	4.2	Si
K ₂	6.9	Si
P ₁	1.3	No
P ₂	1.4	No

Tabella 4.3.2-5 Test di significatività sui parametri addizionali.

Come sottolineato nella tabella i risultati del test evidenziano ulteriormente un problema riguardante la determinazione dei due parametri della distorsione tangenziale, che si è scelto quindi di eliminare dal calcolo, e della coordinata Y_p del punto principale.

I risultati della calibrazione ottenuta fissando a 0 anche la distorsione tangenziale sono riportati nella Tabella 4.3.2-6, in cui risulta che la precisione associata alle coordinate del punto principale è aumentata di un ordine di grandezza rispetto al 1° Test:

APs	PhotoModeler		Australis		SGAP	
	Valore (mm)	σ associato (mm)	Valore (mm)	σ associato (mm)	Valore (mm)	σ associato (mm)
c	21,327	8,0 E-03	21,253	8,4 E-03	21,258	8,7 E-03
X _p	11,162	7,0 E-03	11,161	6,7 E-03	11,160	6,9 E-03
Y _p	7,405	7,0 E-03	7,394	6,8 E-03	7,397	7,0 E-03
K ₁	2,423 E-05	6,6 E-06	2,524 E-05	6,6 E-06	2,850 E-05	6,8 E-06
K ₂	-3,372 E-07	5,3 E-08	-3,524 E-07	5,4 E-08	-3,870 E-07	5,5 E-08

Tabella 4.3.2-6 Parametri addizionali (2° Test) per la camera Canon EOS 350D e scarti quadratici medi associati, ottenuti con diversi software.

Senza entrare in ulteriori dettagli è opportuno aggiungere che anche in questo 2° Test si è verificata la non significatività di Y_p; nel caso in esame quindi la scelta migliore riguardo tale parametro è quella di fissarlo a 7,4 mm, cioè nel centro dell'immagine.

Al fine di evidenziare l'importanza di una opportuna geometria delle prese, soprattutto quando la calibrazione avviene tramite un reticolo piano di punti, si sono condotti ulteriori esperimenti eliminando dal set delle immagini quelle ruotate di ± 90°. In questo caso si sono fissati per la camera 10 diverse posizioni del punto principale e come mostrato in Figura 4.3.2-7, per ognuna di queste l'algoritmo di *Bundle Adjustment* è riuscito ad "adattare" la soluzione ai dati

disponibili, dando sempre risultati paragonabili tra loro e con quelli dei due Test descritti precedentemente e accettabili in termini di deviazione standard a posteriori dell'unità di peso; questo significa che la determinazione del punto principale non può avvenire con certezza con una tale geometria di acquisizione.

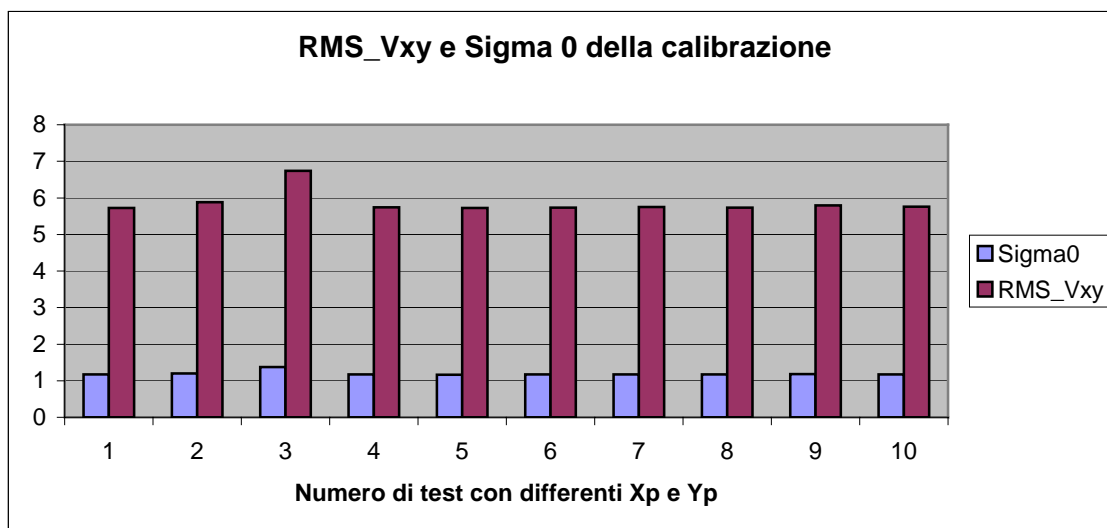


Figura 4.3.2-7 Valori della deviazione standard a posteriori dell'unità di peso e scarto quadratico medio dei residui sulle coordinate immagine dei punti, ottenuti settando 10 diverse posizioni del punto principale per una stessa camera.

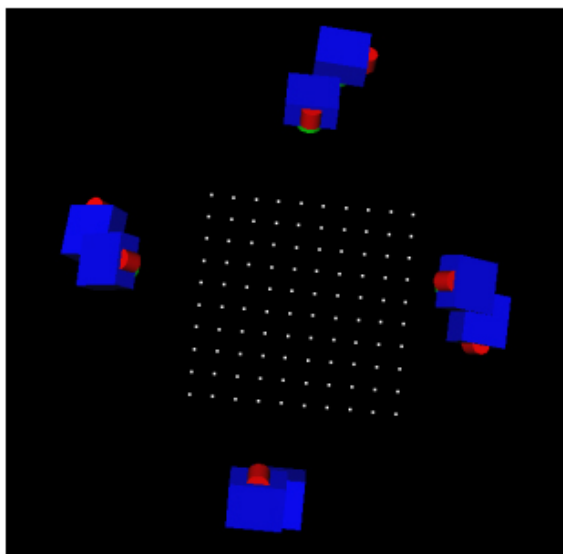
4.3.3 Un confronto fra *Self calibration* e *Field Calibration*

La calibrazione di una camera utilizzata a fini fotogrammetrici dovrebbe essere eseguita periodicamente, e questo a maggior ragione per le camere amatoriali che non hanno un sistema di fissaggio del focamento e che possono facilmente essere soggette a colpi. L'instabilità nell'orientamento interno delle comuni camere digitali è tale da consigliare la ripetizione delle calibrazione ogni qual volta ci si appresti ad un nuovo rilievo fotogrammetrico e l'acquisizione delle immagini del reticolo di calibrazione dovrebbe essere eseguita contemporaneamente al rilievo, evitando di spegnere la camera e variarne l'assetto ottico.

Al fine di evidenziare le problematiche e i risultati ottenibili in un approccio *Field Calibration* piuttosto che con la classica *Self Calibration* tramite reticolo piano, si è condotto un esperimento calibrando la camera sulla base delle immagini di oggetto di interesse acquisite anche per la restituzione.

La camera è sempre la Canon EOS350D, settata ad una distanza focale di 10 mm e focamento all'infinito, che inizialmente è stata calibrata in PhotoModeler tramite reticolo piano; in particolare si è scelto di fissare a 0 e non calcolare i parametri della distorsione tangenziale e il K_3 della distorsione radiale.

La geometria delle prese e i risultati ottenuti sono sotto riportati.



APs	PhotoModeler	
	Valore (mm)	σ associato (mm)
c	10,366	2,0 E-03
\bar{X}_P	11,164	8,4 E-04
\bar{Y}_P	7,318	1,0 E-03
K_1	1,266 E-04	2,8 E-06
K_2	-1,472 E-07	2,4 E-08

Figura 4.3.3-1 Geometria di acquisizione del reticolo e risultati della *Self Calibration* della Canon EOS350D con focale 10 mm.

La camera, con queste condizioni di focamento è stata utilizzata per il rilievo di un muro del sito archeologico di Tilmen Höyük in Turchia.

Le immagini acquisite sono state utilizzate per un processo di *Field Calibration* all'interno di PhotoModeler, utilizzando un approccio Bundle Adjustment generale con l'aggiunta di un unico vincolo geometrico, la distanza nota fra due punti.



Figura 4.3.3-2 Il muro di Tilmen Höyük coi punti e il vincolo geometrico utilizzati per la *Field Calibration*.

Ovviamente i risultati sulla sola calibrazione sono peggiori rispetto ai precedenti in termini di deviazione standard dei parametri addizionali, in quanto la geometria delle prese non è ottimale, tra l'altro non vi sono immagini ruotate di $\pm 90^\circ$, e i punti collimati non sono target presegnalizzati, ma sono punti

naturali individuati sull'oggetto.

APs	PhotoModeler	
	Valore (mm)	σ associato (mm)
c	10,286	1,3 E-02
X _p	11,152	2,2 E-02
Y _p	7,423	1,9 E-02
K ₁	1,741 E-04	1,1 E-05
K ₂	-1,6 E-07	6,4 E-08

Tabella 4.3.3-3 Risultati della *Field Calibration* della Canon EOS350D con focale 10 mm.

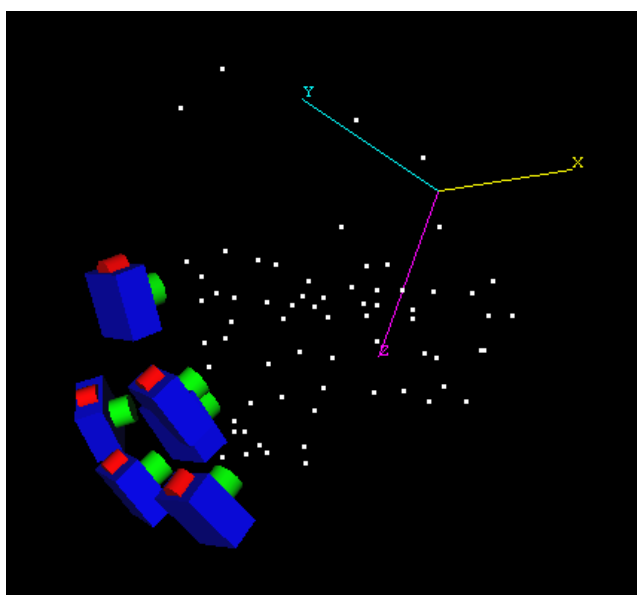


Figura 4.3.3-4 Geometria della prese per la *Field Calibration*.

Risulta immediatamente evidente che i parametri addizionali sono stati determinati con una precisione associata che è di un ordine di grandezza superiore (a parte il K₂) al caso di calibrazione con reticolo.

Al fine di verificare quanto i dati trovati nei due test si adattino al caso specifico in esame, si è scelto di confrontare i risultati ottenuti in termini di residui sulle coordinate immagine e di precisione sulle coordinate oggetto dei punti nel caso di *Bundle Adjustment* con *Field Calibration* e nel caso di *Bundle Adjustment* per camere metriche, utilizzando il certificato della camera determinato tramite calibrazione con reticolo.

Approccio	σ_0 a posteriori (pixel)	RMS _{v_{xy}} (mm)	σ_{XYZ} (mm)
Field calibration	0.625	0.509	3.59
Bundle Adjustment per camere metriche	0.906	0.510	3.97

Tabella 4.3.3-5 Confronto fra l'approccio *Field Calibration* e l'approccio *Bundle Adjustment* per camere metriche in termini di stima a posteriori della varianza dell'unità di peso, scarto quadratico medio dei residui sulle coordinate immagine dei punti (RMS_{v_{xy}}) e precisione teorica delle coordinate oggetto dei punti (σ_{XYZ}).

Dall'analisi della Tabella 4.3.3-5 si può vedere che nel primo caso i risultati sono leggermente migliori; è ovvio che senza pretese di generalità, si può affermare che in questo caso effettuare in un'unica fase le operazioni di calibrare la camera, orientare le immagini e restituire i punti oggetto può consentire di trovare un set di parametri che certamente non sono validi in assoluto, ma lo sono per il caso specifico, permettendo un adattamento generale e reciproco di tutti i dati del progetto.

4.3.4 La calibrazione delle immagini amatoriali della Stele di Tilmen Höyük

Nel paragrafo precedente sono state evidenziate alcune differenze fra una *Self Calibration* tramite reticolo e una *Field Calibration*, sottolineando l'importanza che la fase di calibrazione di una camera andrebbe sempre eseguita contemporaneamente al rilievo fotogrammetrico, soprattutto quando la camera utilizzata è una camera digitale amatoriale a basso costo, notoriamente instabile dal punto di vista del sistema ottico interno.

Una procedura di *Field Calibration* può essere eseguita con successo, ma richiede comunque che siano rispettate alcune importanti condizioni, in particolare riguardo la geometria di acquisizione delle prese.

Nel campo dei Beni Culturali può però talvolta capitare di avere a disposizione immagini di un oggetto acquisite durante gli scavi non a scopo fotogrammetrico, ma esclusivamente a scopo di documentazione da personale non esperto; l'utilizzo di queste immagini a scopo metrico è possibile, ma presuppone l'utilizzo di procedure di calibrazione e di restituzione specifiche, col supporto di software spesso creati ad hoc per il caso in esame.

Nel caso della Stele di Tilmen Höyük, il più importante reperto del sito archeologico, solo alcune immagini acquisite dopo il ritrovamento dagli archeologi sono a disposizione dell'oggetto originale, attualmente conservato al Museo Archeologico della città di Gaziantep, in Turchia.

In Italia è stato quindi possibile portare solo un calco dell'originale fatto di una speciale resina, calco che nel 2005 riproduceva solo la parte superiore dell'oggetto e che è stato poi completato nell'anno 2006.

Riguardo le immagini originali alcune informazioni sono state recuperate dal file *exif* associato ad ognuna (Figura 4.3.4-1) e da cui è risultato che la camera utilizzata è stata la Nikon D70 da 6 Megapixel.

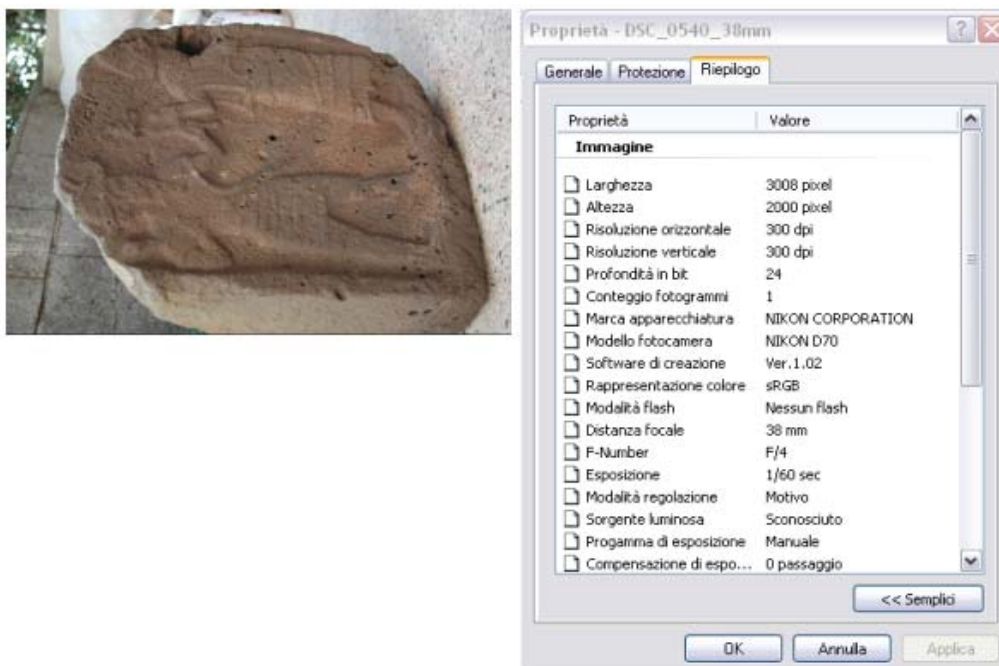


Figura 4.3.4-1 Una delle immagini della Stele e l'exif file associato.

L'analisi dettagliata di tutte le foto e degli *exif* files ha evidenziato un importante uso dello zoom durante le prese, risulta infatti una grande variabilità nelle distanze focali delle immagini, e lo spostamento della Stele tra una acquisizione e l'altra, per cui la corretta procedura sarebbe stata quella di calibrare singolarmente ogni immagine.

Al fine di poter disporre di punti d'appoggio individuabili sulla Stele, è stato condotto un primo rilievo del calco superiore, per il quale per eliminare l'onere del rilievo topografico, è stato utilizzato un reticolo tridimensionale di appoggio realizzato ad hoc per questo tipo di applicazioni.

Si tratta di un cubo rettangolare in lega di alluminio di lato pari a 46.5 cm. Le otto aste che definiscono gli spigoli del cubo sono costituite da profilati a sezione quadrata di 1.2 cm di lato. I nodi del reticolo sono realizzati serrando con viti apposite le aste a dei blocchetti metallici ricavati da un profilato di 5×5 cm. Su ciascuno spigolo laterale sono posizionate tre mire per ogni lato del profilato, mentre sulle aste formanti i quadrati di base e di sommità i *target* sono stati posti solo su tre lati. La posizione tridimensionale delle mire, ottenuta in seguito alla compensazione di misure eseguite con un calibro, è nota con una precisione di circa 1 mm (Figura 4.3.4-2).

La struttura reticolare così costituita ha un peso complessivo di circa 6 kg ed è caratterizzata, oltre che da una buona affidabilità in relazione alla conservazione delle dimensioni, da facilità di trasporto e montaggio che la rendono adatta sia per l'utilizzo in laboratorio che per l'uso in campagna.



Figura 4.3.4-2 Il calco della parte superiore della Stele di Tilmen all'interno del reticolo tridimensionale di punti.

Il rilievo fotogrammetrico del calco è stato condotto con la camera semimetrica Leica R5 con obiettivo da 50 mm; l'orientamento della stereocoppia acquisita è stato eseguito con la Stazione Fotogrammetrica Digitale Socet Set 5.3.0, portando a una precisione sui *target* del reticolo di circa 1 mm.

Il modello così orientato è stato utilizzato per misurare le coordinate di alcuni punti riconoscibili sia sul calco che sulle foto originali, utilizzati per la calibrazione di queste ultime. In realtà l'individuazione precisa di punti comuni si è rivelata molto difficile, ed essendo poche le informazioni disponibili non si è potuto procedere con successo alla calibrazione di più immagini singolarmente. Si è quindi deciso, studiando gli *exif* file delle immagini e gli sfondi delle stesse, di scegliere una tripletta con una buona configurazione geometrica di presa, in cui la Stele fosse stata tenuta fissa e che presentassero la stessa focale approssimata (Figura 4.3.4-3).

La stessa tripletta è stata usata anche per la creazione di un modello tridimensionale foto-texturizzato dell'oggetto (vedi Capitolo 6).



Figura 4.3.4-3 Le tre immagini della Stele selezionate per la calibrazione e per la creazione del modello tridimensionale.

La *Field Calibration* della camera associata alle tre immagini, per la quale è stato dato come valore approssimato della focale quello dell'*exif* file, è avvenuta con successo, collimando 58 *tie points* (Figura 4.3.4-4) e utilizzando come ulteriore vincolo geometrico la distanza fra due punti individuati sul modello del calco.

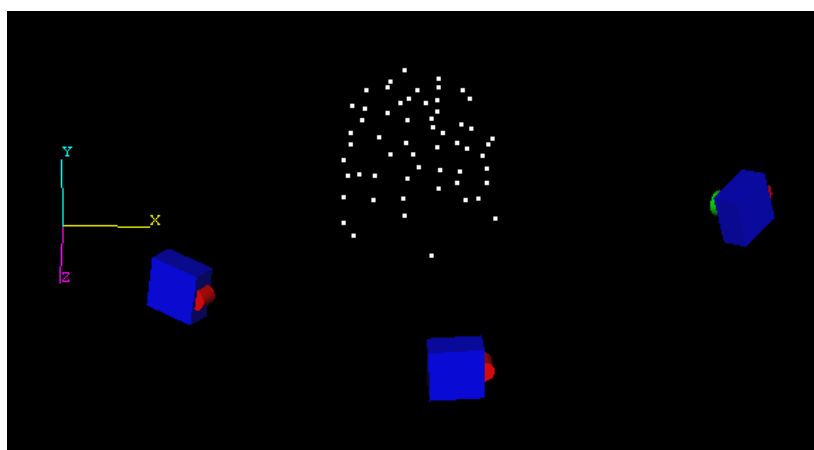


Figura 4.3.4-4 La posizione di acquisizione delle tre immagini e i punti collimati.

I risultati ottenuti sono mostrati nella Tabella seguente.

APs	PhotoModeler	
	Valore (mm)	σ associato (mm)
c	34,507	0,126
X _p	14,748	0,427
Y _p	7,504	0,241
K ₁	1,894 E-04	1,6 E-05

Tabella 4.3.4-5 I risultati della calibrazione delle immagini amatoriali della Stele.

Come si può notare la focale e le coordinate del punto principale sono stati determinati con una precisione che è di un ordine di grandezza superiore al test di *Field Calibration* riportato nel paragrafo precedente; tuttavia l'analisi degli

scarti quadratici medi sui residui delle coordinate immagine e la precisione sui punti collimati ha evidenziato il raggiungimento di una precisione nella procedura di *Bundle Adjustment* accettabile in paragone alla precisione teorica del rilievo fotogrammetrico, che data la focale calcolata e la scala fotogramma risulta pari a 0.5 mm.

RMS v_{xy} (pixel)	σ_{XYZ} (mm)
0.546	0.425

Tabella 4.3.4-6 Scarto quadratico medio dei residui sulle coordinate immagine dei punti (RMS $_v_{xy}$) e precisione teorica delle coordinate oggetto dei punti (σ_{XYZ}).

4.3.5 Distorsione radiale nei differenti canali di colore di un'immagine RGB

Nel Capitolo 2 è stato descritto il processo di formazione che porta alla creazione di un'immagine digitale RGB. Come è già stato evidenziato, questo tipo di immagini sono spesso affette da fenomeni di aberrazione cromatica detti anche di *color fringing* (vedi Figura 4.3.5-1). Questi effetti, particolarmente evidenti come aloni di colore lungo le linee di discontinuità fra dettagli di colore chiaro e di colore scuro, sono dovuti al fatto (vedi Figura 4.3.5-2) che la distanza focale varia con la lunghezza d'onda della luce (aberrazione cromatica assiale) e/o la lente ingrandisce in modo diverso differenti lunghezze d'onda (aberrazione cromatica trasversale).

Questi fenomeni sono maggiormente evidenti in immagini acquisite con obiettivi grandangolari.

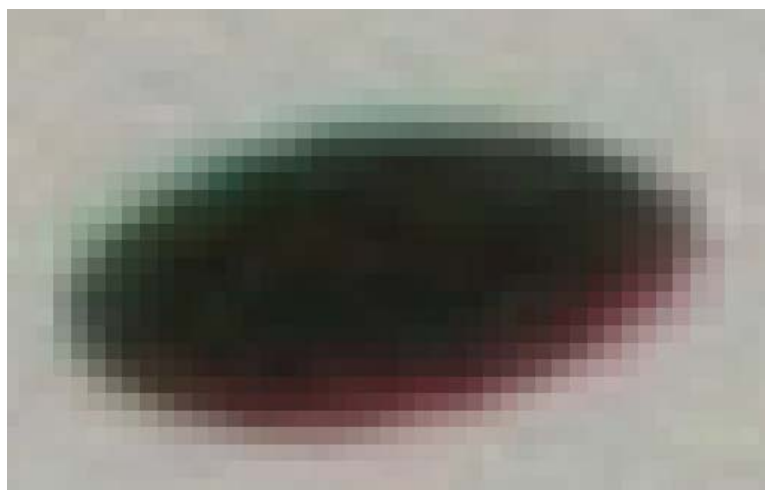


Figura 4.3.5-1 Effetto di “color fringing” in una delle immagine RGB del reticolo di calibrazione ($f=10\text{mm}$).

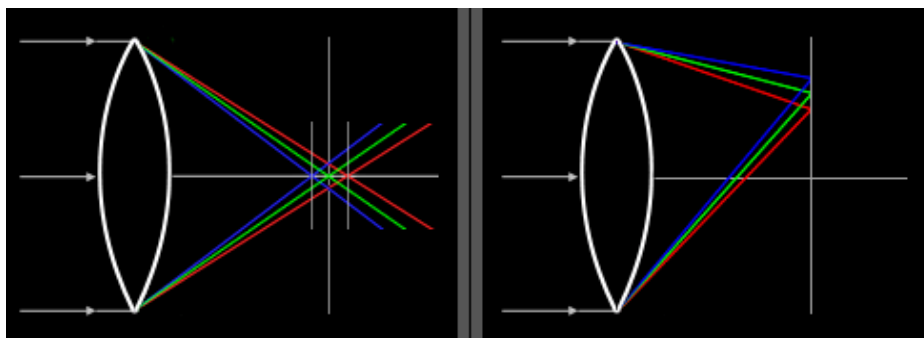


Figura 4.3.5-2 Aberrazione cromatica assiale a sinistra e trasversale a destra.

Dal punto di vista metrico il fenomeno descritto, unitamente al processo di formazione, detto di de-mosaicizzazione, di un'immagine RGB, si traduce anche in una variazione della distorsione radiale nei tre canali di colore [Remondino & Fraser, 2006].

Il processo di de-mosaicizzazione presuppone infatti, per le camere che utilizzano un filtro di Bayer, che all'interno di ogni pixel vengano stimati per interpolazione due valori di colore mancante; il processo di interpolazione però porta al fatto che lungo le linee di discontinuità ci siano righe o colonne con mancanza di pixel di un certo colore, come semplificato in Figura 4.3.4-3.

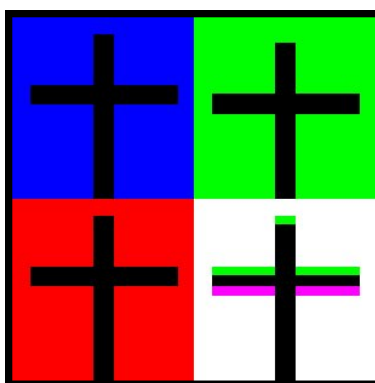


Figura 4.3.5-3 Effetto di *color fringing* lungo una linea di discontinuità orizzontale.

In tale immagine risulta evidente che l'alone verde è dovuto alla mancanza di pixel rossi e blu sopra la croce, mentre l'alone viola sottostante è dovuto alla mancanza di pixel verdi.

Per evidenziare le conseguenze di tale fenomeno sono stati condotti tre prove di calibrazione sulla Canon EOS350D, considerando per ognuna immagini del reticolo acquisite nei tre diversi canali di colore. Ovviamente questo è stato possibile in quanto il software della camera permette l'accesso anche ai file raw delle immagini, cosa non sempre possibile nelle comuni camere digitali amatoriali.

I risultati in termini della distorsione radiale sono mostrati nella Figura 4.3.5-4; il particolare evidenzia che la distorsione è risultata superiore per il

verde, mentre il valore inferiore è dato dal blu; la differenza agli spigoli del sensore è di circa 6,5 pixel.

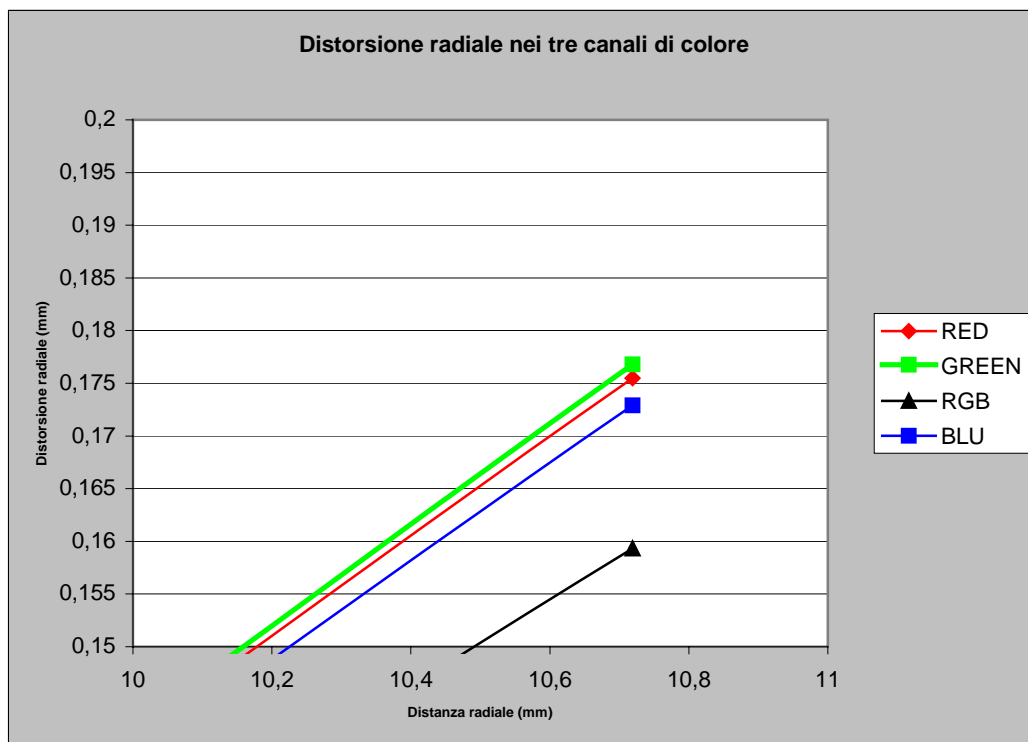
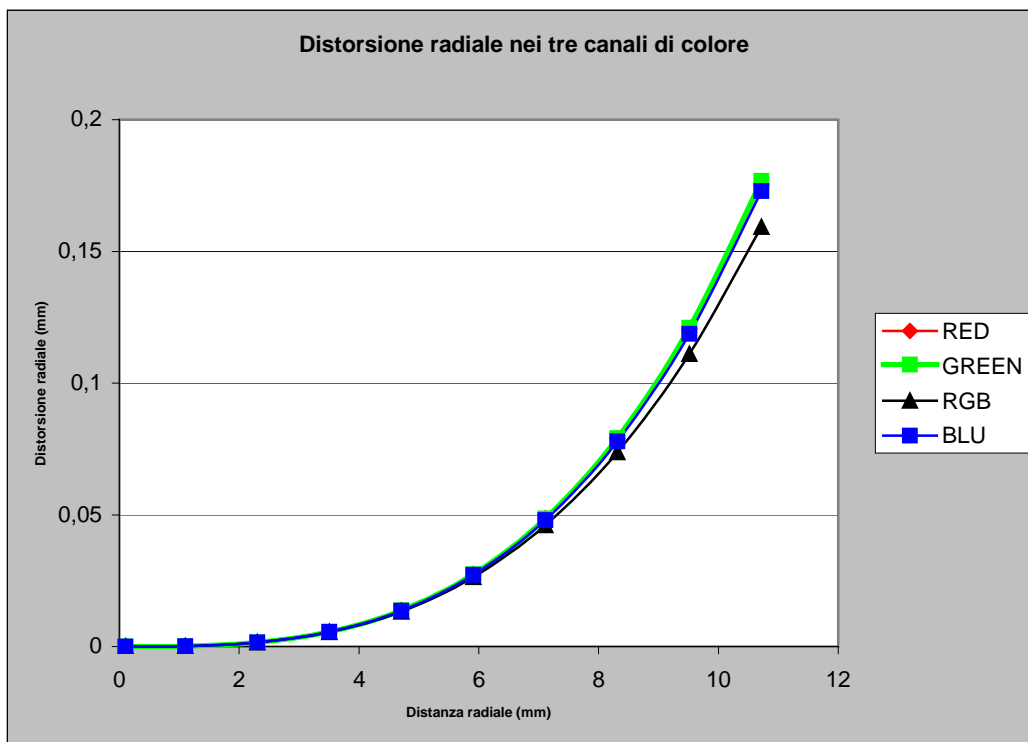


Figura 4.3.5-2 a) Distorsione radiale nei differenti canali di colore e per l'immagine RGB. (b) Particolare della distorsione radiale ai confini del sensore.

Il filtro Foveon, a differenza di quello di Bayer, non dà questo effetto, ma non è usato nelle camere digitali a medio/basso costo, perché è costruttivamente più complicato e costoso.

Alcune case produttrici, tipo la Fuji, per limitare il problema hanno pensato di ruotare le immagini di 45 gradi. Infatti a causa della gravità terrestre, in natura c'è una predominanza di linee verticali e orizzontali piuttosto che oblique. Registrando le immagini a 45 gradi si evitano interpolazioni difficili lungo queste direzioni, però, nella rotazione necessaria al raddrizzamento, si perde un po' di informazione. Il fenomeno andrebbe quindi indagato anche per questo tipo di camere.

Una delle soluzioni possibili a questo genere di problema potrebbe essere quella di correggere la distorsione in maniera specifica per ogni canale di colore prima della creazione dell'immagine RGB.

4.4 Considerazioni sui parametri addizionali

Come è stato descritto nei paragrafi precedenti, in un approccio *Bundle Adjustment* generale con necessità di effettuare anche la calibrazione della camera o addirittura di ogni immagine del blocco, può diventare consistente il numero di parametri incogniti da determinare. In particolare per quanto riguarda il set di parametri addizionali, uno dei rischi evidenziati dai test descritti è quello della sovra-parametrizzazione, che conduce ad un degrado del risultato finale; è quindi opportuno limitare i parametri da determinare a quelli “significativi”, cioè che presentano una evidente giustificazione fisica.

E' stato mostrato inoltre che questi parametri sono tra di loro correlati; una correlazione superiore al 90-95% va eliminata non considerando alcuni parametri o può essere ridotta con opportuni accorgimenti riguardanti la geometria delle prese.

A tal fine sono importanti alcune considerazioni:

- I tre APs usati per modellizzare la distorsione radiale Δr sono solitamente i parametri di un polinomio del tipo $\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7$, dove r è la distanza radiale del punto. I Grafici 1 e 2 della Figura 4.4.1-1 mostrano l'andamento della distorsione radiale per due diverse lunghezze focali (22 mm e 10 mm) di una stessa camera digitale, la Canon EOS350D utilizzata per i test statistici. Come si può notare la distorsione radiale varia con la focale, in generale diminuisce all'aumentare della lunghezza focale (Grafico 1). Inoltre è importante sottolineare che i tre k_i sono in genere altamente correlati, perciò per le comuni camere digitali amatoriali vengono generalmente presi in considerazione solo il termine $k_1 r^3$ e il $k_2 r^5$,

tralasciando k_3 . Dal Grafico 2 risulta inoltre evidente che l'influenza del parametro k_2 sulla curva della distorsione radiale cresce anch'esso con la focale, e può quindi essere tralasciato per le camere con una corta distanza focale.

- I parametri di distorsione tangenziale P_1 e P_2 presentano un'elevata correlazione con le coordinate del punto principale [Brown, 1971]; in generale comunque la distorsione tangenziale, essendo largamente inferiore, può essere considerata trascurabile in confronto alla radiale. Come mostra la Figura 4.4.1-2 la distorsione tangenziale diminuisce con la distanza focale e poiché la correlazione con le coordinate del punto principale aumenta per le focali lunghe (nei test precedenti: per $f=22\text{mm}$ è risultata mediamente maggiore del 90%, per $f=10\text{mm}$ minore del 90%), soprattutto per queste ultime può essere conveniente trascurare la distorsione tangenziale.

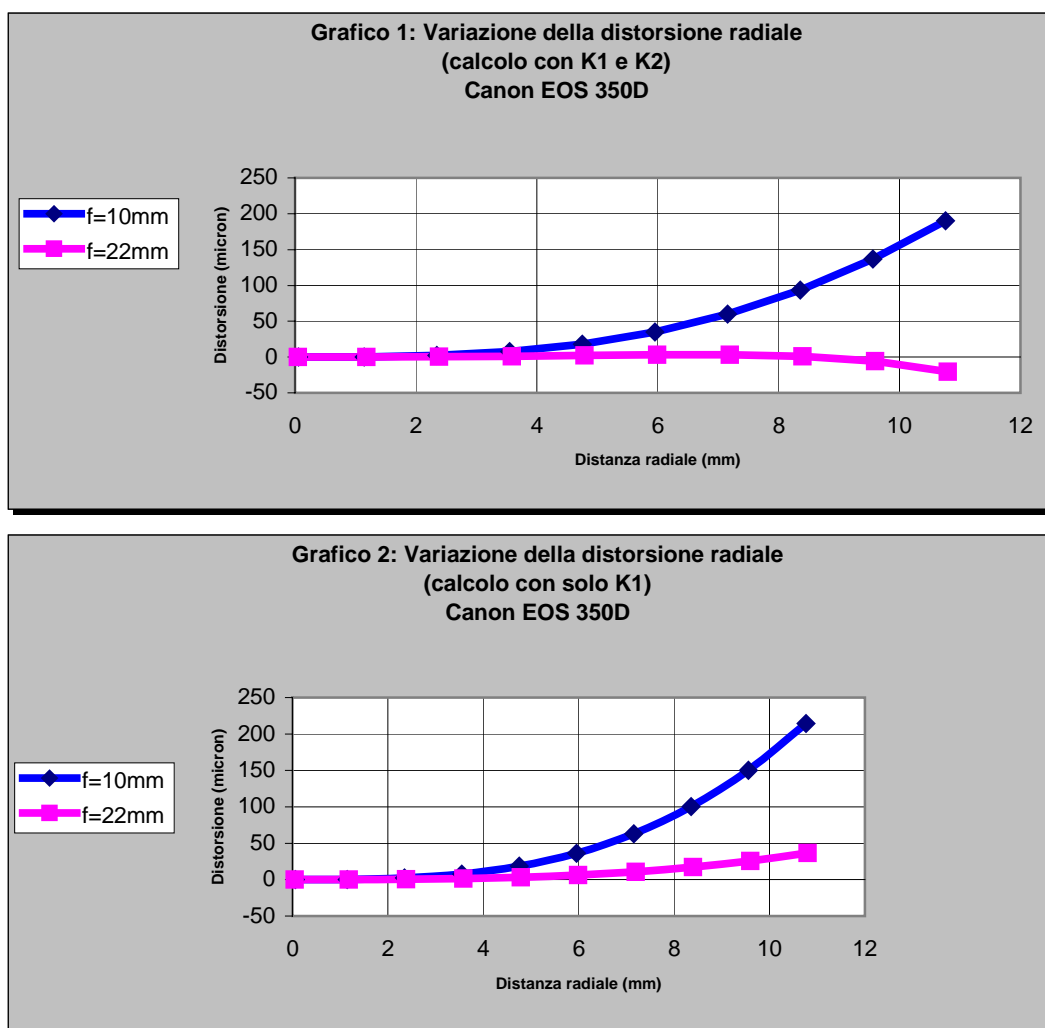


Figura 4.4.1-1 Distorsione radiale per una camera digitale settata a due differenti distanze focali.

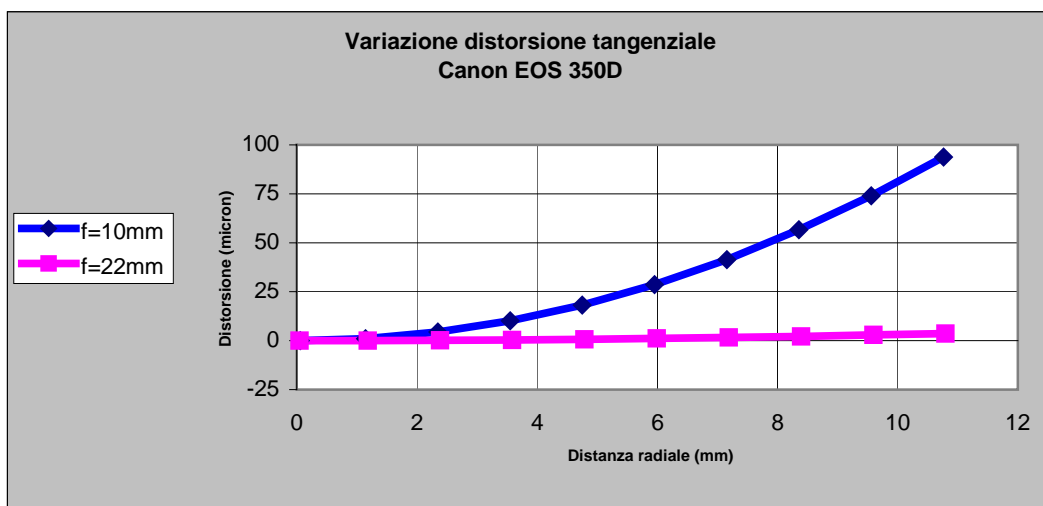


Figura 4.4.1-2 Distorsione tangenziale per una camera digitale settata a due differenti distanze focali.

4.5 Considerazioni sulla geometria del progetto

Gli esperimenti condotti hanno dimostrato che uno dei punti critici per il successo di una *Self Calibration* è la geometria del progetto.

Vari studi sperimentali nel campo della fotogrammetria terrestre [Fraser, 1996; Grün & Beyer, 2001; Remondino & Fraser, 2006] hanno dimostrato che:

- L'accuratezza di una rete aumenta con l'aumentare dell'angolo di convergenza fra le immagini. Questo implicitamente migliora anche il rapporto base fra le immagini-distanza dall'oggetto. Purtroppo alcuni dei moderni software commerciali, non essendo stati creati appositamente per la fotogrammetria terrestre ma per quella aerea, mal si adattano a lavorare con immagini convergenti; questo implica ad esempio che nel caso si voglia eseguire una *Full Field Calibration*, bisognerà acquisire un set di immagini per la calibrazione ed un set per la restituzione.
- L'accuratezza migliora con il numero di immagini del progetto, cioè più raggi ottici "vedono" un punto, migliori e più affidabili sono i risultati ottenibili; studi sperimentali hanno dimostrato che il numero ottimale di immagini è 8, aumentandolo la precisione in realtà non cresce in modo significativo.
- L'accuratezza migliora con il numero di punti collimati in un'immagine; inoltre i punti devono essere ben distribuiti in tutta l'immagine e, se l'oggetto è tridimensionale, devono essere rappresentativi di tutte le profondità presenti.
- Immagini ruotate di $\pm 90^\circ$ sono indispensabili soprattutto se i punti collimati sono disposti su un piano; i parametri addizionali sono infatti correlati tra di

loro e con i parametri di orientamento esterno delle immagini ed una geometria con immagini ruotate, convergenti e acquisite a differenti distanze dal reticolo di calibrazione aiuta a eliminare o ridurre tale problema.

5.

LA RAPPRESENTAZIONE: PRODOTTI VETTORIALI E RASTER

In architettura con il termine "rappresentazione" si fa riferimento ad un insieme di documenti aventi lo scopo di mostrare e far comprendere il bene oggetto di studio (Saint Aubin, 1999). Questo tipo di rappresentazione si presenta usualmente sotto un aspetto particolarmente sintetico che ha lo scopo di facilitare la percezione istantanea dell'oggetto.

E' sicuramente difficile poter catalogare e descrivere tutte le forme adottate nella rappresentazione architettonica, dal momento che questa comprende numerose forme espressive, alcune non propriamente di interesse per il rilevatore, come testi letterari e relazioni, pitture, incisioni, ed altre che invece sono di interesse per chi si occupa di rilievo, come stampe, piante, prospetti, raddrizzamenti e ortofoto, fino a veri e propri modelli tridimensionali in scala.

Rispetto al disegno di progetto, che mostra un universo ideale e immaginario, in quanto esprime un'idea non ancora concretizzata, la rappresentazione manifesta lo stato di fatto di un edificio, di un'area archeologica o di un reperto e quindi tutta l'imperfezione che c'è in un atto costruito, che in sé contiene le modificazioni, i rimaneggiamenti e i danni impressi dal tempo e dall'uomo.

Questo non deve essere dimenticato da chi si occupa di rilievo, a maggior ragione nell'ambito dei Beni Culturali; la rappresentazione costituisce infatti la fase ultima e fondamentale dell'intero processo, che parte dalla pianificazione del rilievo stesso e giunge alla generazione dei prodotti finali, che devono essere mirati, nella tipologia e nelle caratteristiche, allo scopo per cui il rilievo è stato condotto.

Quanto detto aiuta a comprendere perché la fotogrammetria abbia da sempre un ruolo fondamentale e indiscusso come moderna e rigorosa tecnica di rilievo

nel campo dei Beni Culturali; infatti il documento che si deve redigere come risultato del rilievo deve non solo fissare le forme dell'oggetto, le sue dimensioni e proporzioni e dichiarare le molteplici relazioni che legano tra loro le diverse parti dell'oggetto e che le riuniscono in un unico organismo, ma deve anche metterne in luce i dettagli dello stato di fatto e diagnosticarne il degrado, per poter chiamare in causa gli strumenti di intervento per la salvaguardia.

Dal punto di vista concettuale, il vantaggio che la fotogrammetria offre nella rappresentazione dei Beni Culturali è di unire la fotografia con il disegno metrico accurato.

L'immagine fotografica, raccogliendo una complessa quantità di informazioni, rappresenta senza dubbio uno strumento insostituibile per chi, nel campo dei Beni Culturali, si trova a dover studiare le forme, le tecniche costruttive e tutti i fenomeni che hanno attinenza con la storia, l'arte, la sociologia dell'ambiente e dell'urbanistica.

La fotografia però, pur prestandosi a molteplici analisi e costituendo una fonte mnemonica importante, è soggetta alle leggi della luce e delle deformazioni prospettiche, che le impediscono di essere utilizzata, così com'è, come strumento di misura e di reperimento di informazioni metriche accurate.

Il disegno invece seleziona e dà forma all'informazione geometrica, registrandola e rappresentandola in modo più o meno complesso a seconda dello scopo della rappresentazione.

Riunendo i vantaggi descrittivi della fotografia con la possibilità di ottenere diverse informazioni metriche, la fotogrammetria risulta indispensabile per documentare l'archeologia e l'architettura; inoltre non va dimenticato che un'immagine è una memoria globale di cui si può sempre disporre per produrre, attraverso un ampio ventaglio di elaborazioni numeriche e grafiche, un'analisi più o meno accurata delle forme, dimensioni e proporzioni di un oggetto, in certi casi senza simbolismi e interpretazioni soggettive, anche nel caso estremo in cui questo non esista più.

5.1 La restituzione: generalità

I prodotti classici della restituzione fotogrammetrica sono sostanzialmente di tre tipologie (Figura 5.1-1):

- Numeri: coordinate di punti oggetto codificate con criteri logici, suddivise in entità di tipo puntuale, lineare e areale e visualizzabili in vari formati, il più semplice è un file di testo che contiene per ogni riga le tre coordinate X, Y, Z dei punti (formato ascii);

- Disegni: carte topografiche rappresentanti piane e prospetti, particolari planimetrici, discontinuità, ecc.
- Immagini: fotografie rettificate (ortofoto) e mappe da esse derivate (ortofoto-carte).

Del primo tipo, che rappresenta nella sua forma classica il cosiddetto *Digital Elevation Model* (DEM) e che può essere rappresentato con una ampia scelta di modalità (curve di livello, *shaded map*, *wireframe restitution*, ecc), si parlerà nello specifico nel capitolo 6; qui l'attenzione si focalizzerà sulla classica restituzione vettoriale al tratto e sui prodotti raster, come raddrizzamenti e ortofoto.

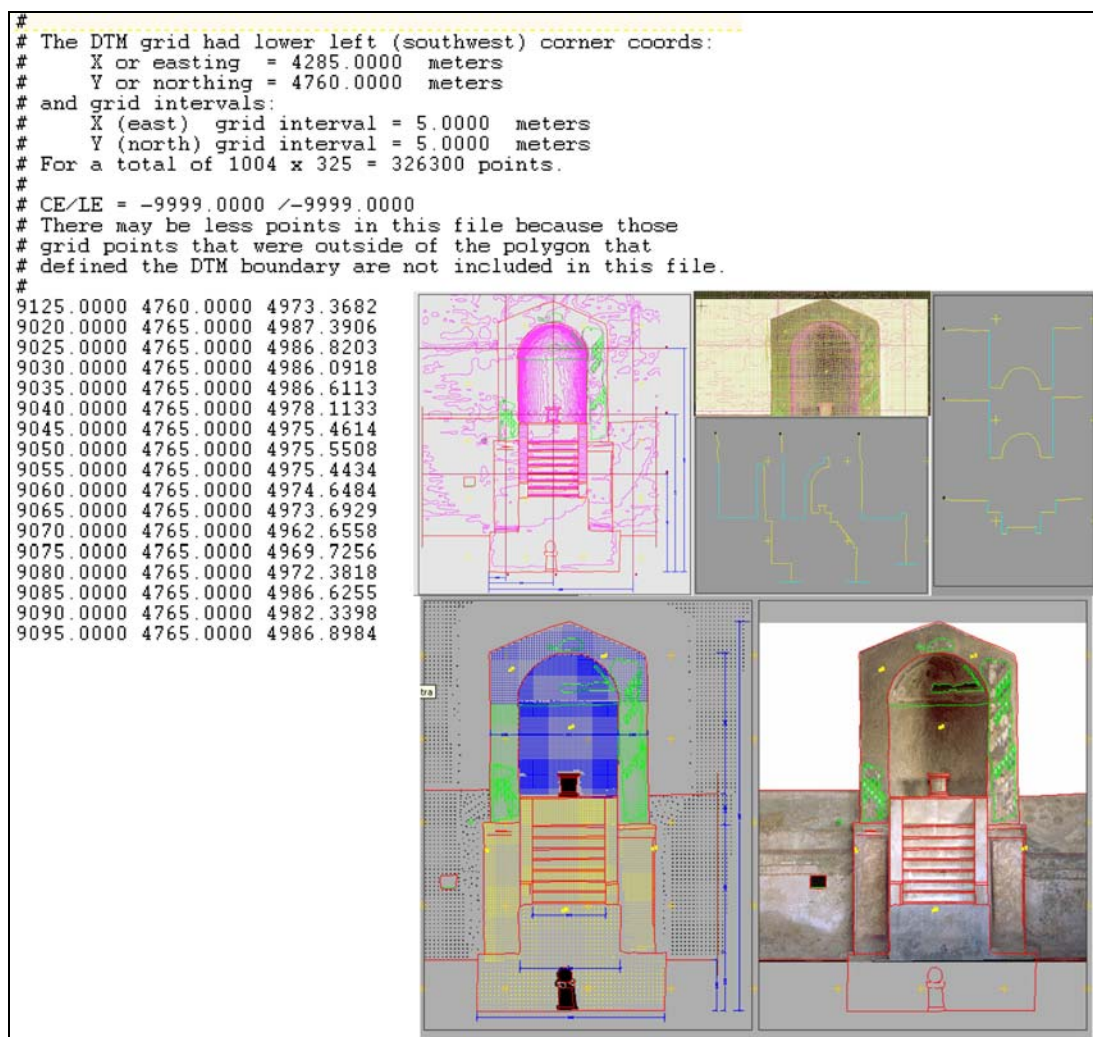


Figura 5.1-1 Esempi di restituzione fotogrammetrica: DEM in formato ascii e prodotti vettoriali e raster. (Bitelli & Zanutta, 2006).

5.2 La restituzione vettoriale al tratto: esempi dal rilievo della Chiesa di San Giuseppe in Venola (Bologna)

Anche se oggi i sofisticati algoritmi di *image matching* presenti nelle moderne stazioni fotogrammetriche digitali hanno reso semi – automatiche o automatiche sia alcune procedure di orientamento che alcune pratiche di restituzione, la classica restituzione vettoriale al tratto viene eseguita in modalità manuale dall'operatore che realizza la misura di coordinate, in modo da ricostruire la geometria dell'oggetto da rilevare, seguendo le discontinuità principali dell'oggetto, profili, sezioni, ecc. In ogni caso, a prescindere dalla metodologia adottata, ogni elemento "restituito" viene registrato mediante l'uso di una codifica in livelli logici, caratterizzati da attributi e parametri di vestizione caratteristici. Il risultato della restituzione vettoriale può essere un file di dati, un file disegno (gestibile in ambiente Cad) o può essere rappresentato su supporto cartaceo.

In particolare nell'ambito dei Beni Culturali e dell'archeologia la restituzione vettoriale sulla base delle informazioni offerte dai rilievi, fornisce una rappresentazione che può contenere numerose notizie (Figura 5.2-1):

- piante o prospetti che individuano i materiali o la cronologia storica: questa suddivisione in zone dei materiali e dei periodi cronologici costituisce generalmente la fase preliminare di una restituzione archeologica;
- restituzione archeologica: sulla base degli elementi ancora in opera, viene restituita in pianta ed in prospetto l'immagine delle costruzioni precedenti; a volte è possibile restituire la successione storica degli edifici sorti sullo stesso luogo, in questo caso è opportuno eseguire una rappresentazione per ogni periodo.

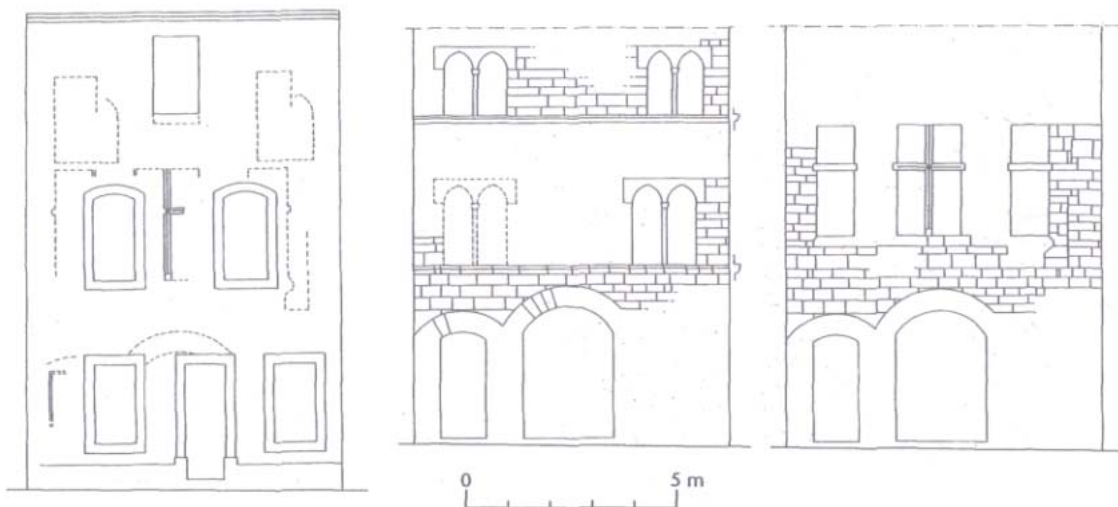


Figura 5.2-1 Esempio di restituzione archeologica: stato attuale (a sinistra); stato originario (al centro); stato rimaneggiato (a destra). (Saint Aubin, 1999).

Nei restitutori analogici e nei moderni restitutori digitali la restituzione vettoriale può essere eseguita direttamente in ambiente 3D: dopo aver eseguito le fasi di orientamento interno ed esterno dei fotogrammi, l'operatore può, muovendosi in stereoscopia sul modello tridimensionale orientato, effettuare le misure delle coordinate di punti.

Il risultato è un modello vettoriale tridimensionale che può essere esportato in formati standard per essere supportato da comuni programmi GIS e CAD.

Sulle restituzioni vettoriali è possibile per esempio effettuare:

- l'inserimento di nuove entità relative ad elementi difficili o impossibili da restituire;
- l'aggiunta di riempimenti o vestizioni particolari a entità di tipo chiuso;
- l'inserimento di scritte esplicative;
- la variazione di livello a particolari entità per classificarle diversamente;
- la modifica della tipologia e/o degli attributi (ad esempio codice identificativo, tipologia dell'entità, colore del tratto, tipo del tratto, spessore) ad entità specifiche;
- la realizzazione in maniera indiretta di sezioni, profili e misure.

Nel caso del rilievo della Chiesa di San Giuseppe in Venola, dopo la fase di rilievo nella fase di acquisizione delle immagini sia da terra (Figura 5.2-2) che da pallone (vedi paragrafo 2.2.1) e del rilievo topografico dei punti fotogrammetrici di appoggio su tutte le facciate dell'oggetto (Figura 5.2-3), è stata eseguita la pianta dell'edificio con alcune sezioni (Figura 5.2-4) e la restituzione tridimensionale al tratto dell'intero edificio, di cui quella del fronte e quella della sacrestia in Figura 5.2-5; il software utilizzato è il Socet Set v5.2.0 (Bae Systems).

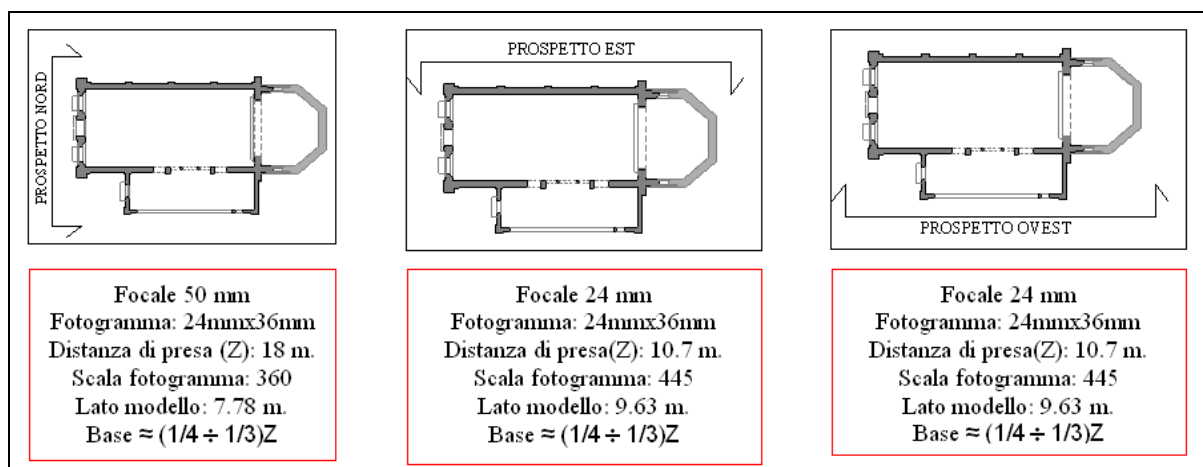


Figura 5.2.2 Caratteristiche delle prese da terra nelle tre facciate della chiesa.

A tale proposito è utile sottolineare che solitamente in fotogrammetria terrestre è necessario, soprattutto quando si lavora con l'approccio stereoscopico, che ogni facciata dell'edificio in oggetto venga orientata in un proprio sistema di riferimento locale, avente il piano XY vincolato sulla facciata e l'asse Z uscente, secondo la consueta regola della mano destra. Questo implica che si svolga una trasformazione nello spazio fra il sistema di riferimento topografico e il sistema fotogrammetrico e che la stessa trasformazione venga poi applicata all'indietro per portare tutti i prodotti della restituzione nello stesso sistema, quello topografico (vedi Appendice C).

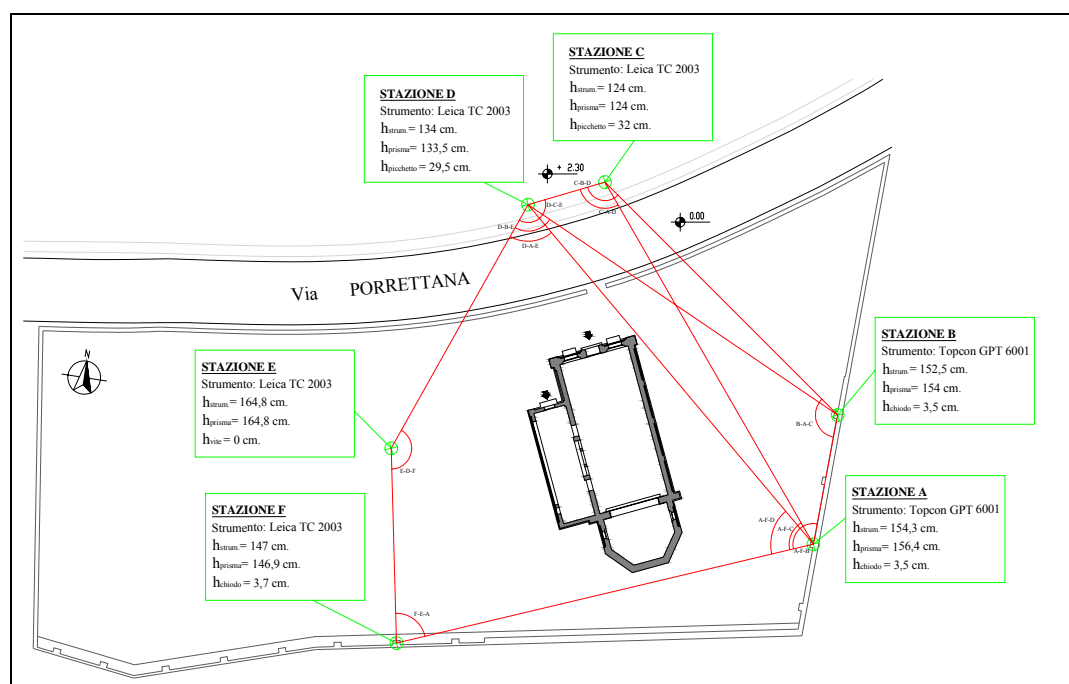


Figura 5.2-3 Schema della rete di inquadramento topografico per il rilievo dei punti d'appoggio.

È ovvio che ad ogni restituzione è associata una scala, che non è solo il rapporto dimensionale fra la rappresentazione dell'oggetto e l'elemento reale, ma rappresenta anche la precisione della restituzione; come per le carte topografiche questa è data dall'entità dell'errore di graficismo alla scala della rappresentazione; generalmente la scala che più si adatta alla rappresentazione dei grandi complessi architettonici è 1:100, che se da un lato limita il grado di informazioni offerto, dall'altro consente di ridurre la maggior parte degli edifici in formati facilmente archiviabili.

Il passaggio ad una scala maggiore viene riservato a quelle rappresentazioni di dettaglio in cui la quantità di elementi significativi e la loro densità dovessero rendere incomprensibili sia la rappresentazione che la sua leggibilità; in questo caso si scelgono scale di rappresentazione per esempio 1:20, 1:10 che agevolano la misura e il cui errore di graficismo si avvicina il più possibile all'errore di misura.

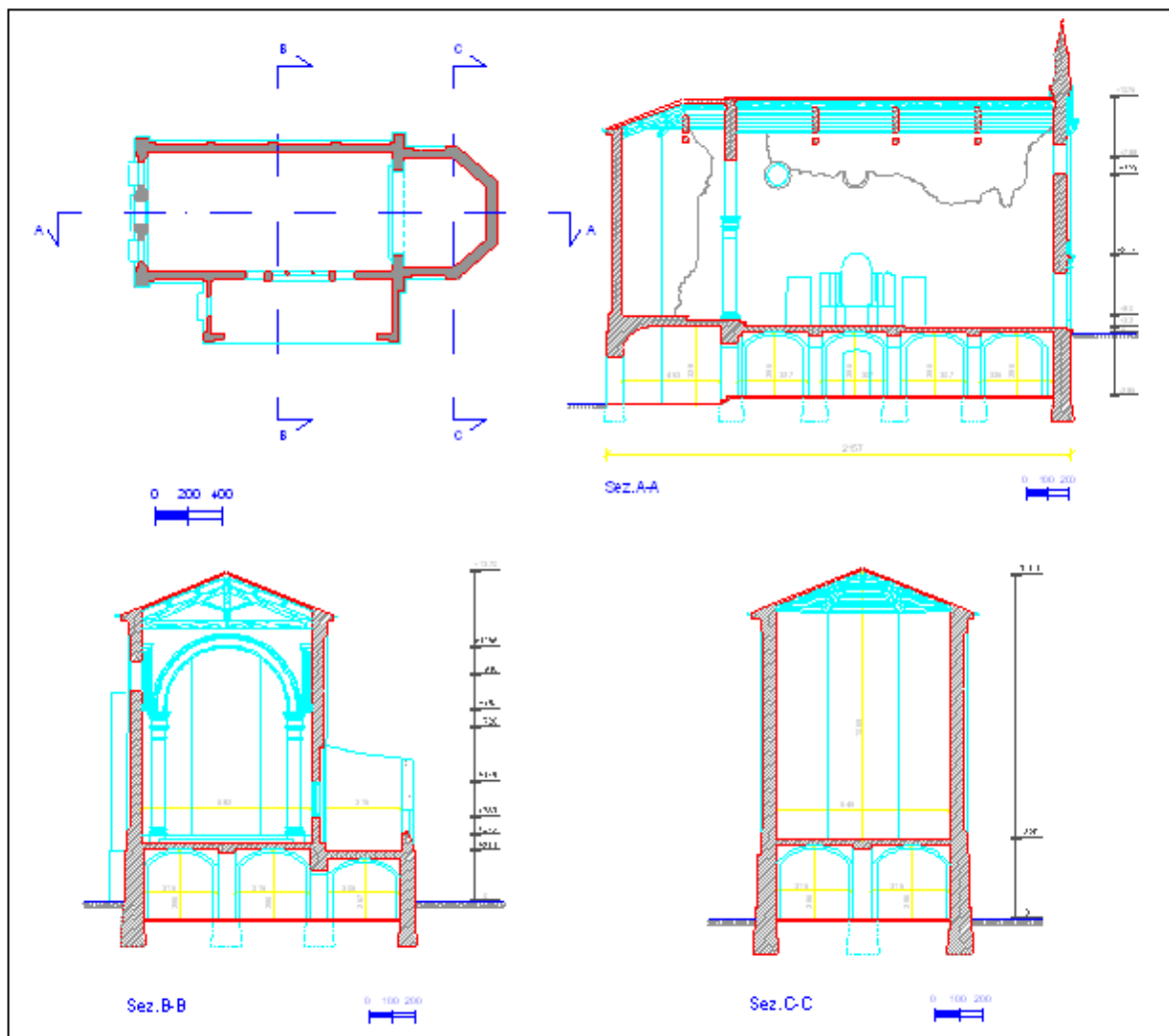


Figura 5.2-4 Pianta dell'edificio e sezioni.

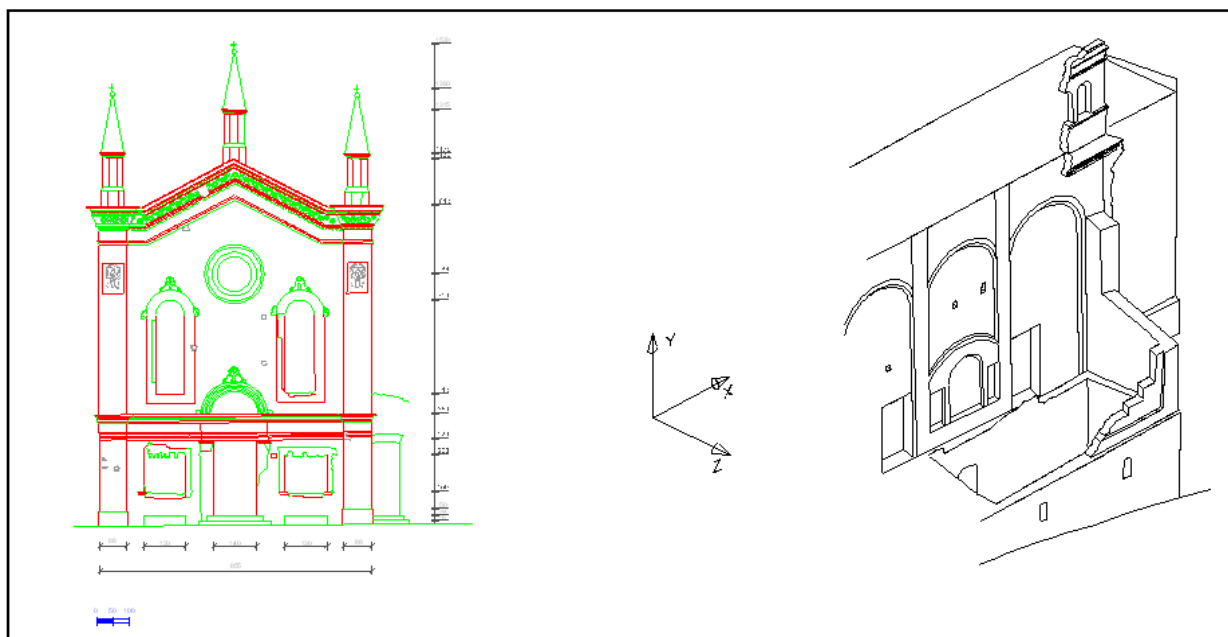


Figura 5.2-5 Restituzione del fronte e della sacrestia.

5.3 Elaborati raster: il raddrizzamento della facciata ovest del monastero di Mesopotam

Se l'oggetto da rilevare può considerarsi piano, l'elaborato raster più semplice da realizzare, a valenza metrica, è dato dal procedimento del raddrizzamento semplice. Con tale procedura si può effettuare la restituzione di un oggetto piano a partire da un singolo fotogramma, dato che in tal caso si ha una ben individuabile e biunivoca corrispondenza di tipo proiettivo fra punti immagine e punti del terreno; fra di essi esiste una corrispondenza omografica con centro nel centro di proiezione, le cui equazioni sono:

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + 1} \\ Y &= \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

Queste equazioni si possono facilmente ottenere con semplici operazioni matematiche dalle equazioni di collinearità, assumendo il piano oggetto come coincidente con il piano XY.

I nuovi parametri a_i , b_i , c_i sono funzioni dei parametri di orientamento esterno e possono essere facilmente calcolati se il riferimento xy è quello definito dalle marche fiduciali; più semplicemente questi otto parametri possono essere calcolati se si conoscono le coordinate immagine x_i , y_i di quattro punti e le corrispondenti coordinate topografiche X_i , Y_i , risolvendo un sistema lineare di otto equazioni in otto incognite.

Riguardo i punti fotogrammetrici di appoggio sono date le seguenti indicazioni:

- devono essere distribuiti sull'oggetto in numero superiore a quello minimo (+50%) in modo da poter stimare i parametri con il metodo dei minimi quadrati e valutare così l'incertezza dei risultati ottenuti;
- devono essere distribuiti esternamente all'area di interesse lungo il contorno del poligono che definisce l'area da raddrizzare, possibilmente a coppie, disponendone se possibile 1 o 2 al centro per controllo; per la loro determinazione è sufficiente la misura delle distanze relative (Figura 5.3-1).

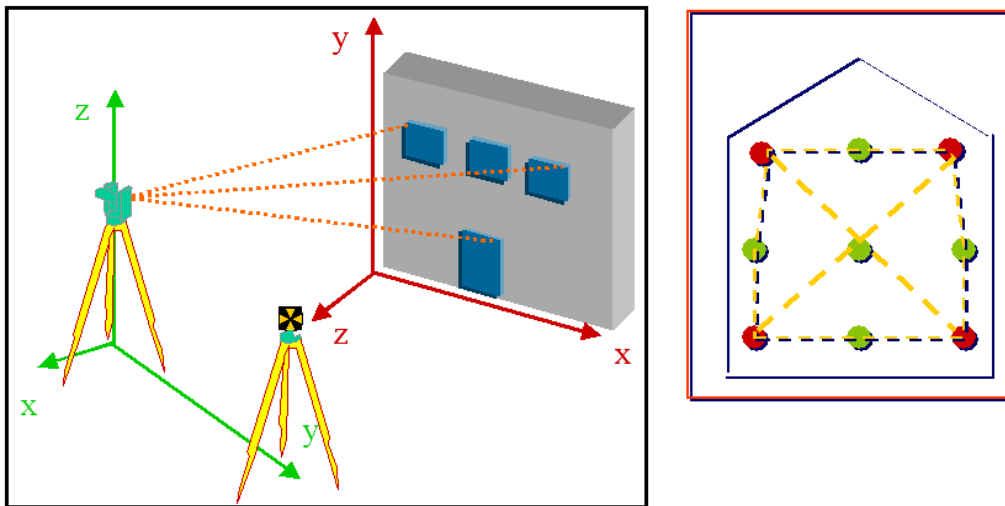


Figura 5.3-1 Determinazione dei punti di appoggio su una facciata per il raddrizzamento.

Dal punto di vista procedurale il raddrizzamento in ambiente digitale passa attraverso le seguenti fasi:

- Applicazione della procedura di orientamento interno volta alla eliminazione degli errori sistematici indotti dalla fase di presa ed eventualmente dal procedimento di scansione.
- Calcolo dei parametri di orientamento esterno attraverso il modello matematico della trasformazione omografica.
- Applicazione della trasformazione omografica per la definizione della nuova immagine digitale raddrizzata.
- Attribuzione dei valori radiometrici attraverso l'applicazione di un metodo di ricampionamento (vedi paragrafo 5.5).

Se si prescinde dagli errori derivanti dall'apparecchiatura di raddrizzamento e dalle deformazioni del fotogramma, la causa più rilevante degli errori sistematici nel raddrizzamento deriva dagli scostamenti della superficie effettiva dell'oggetto, rispetto al piano assunto come riferimento: le immagini dei punti che non giacciono esattamente sul piano oggetto risulteranno spostate in direzione del punto principale PP.

L'entità dello spostamento radiale Δr di questi oggetti dalla loro base (ad esempio gli edifici nelle foto aeree) si può ricavare dalla Figura 5.3-2:

$$\Delta r = \Delta R \frac{c}{H} = \Delta Z \frac{r}{H} = \Delta Z \frac{r}{c \cdot Sf} \quad \left(\text{con } \Delta R = \frac{R \cdot \Delta Z}{H - \Delta Z} \right) \quad (2)$$

L'equazione appena scritta è rigorosamente valida solo per fotogrammi perfettamente nadirali, ma può essere utilizzata con buona approssimazione anche per fotogrammi pseudo-nadirali.

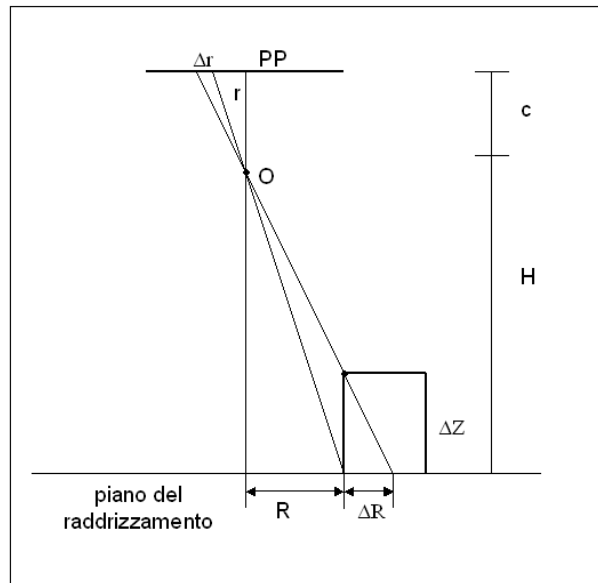


Figura 5.3-2 Errore nel raddrizzamento.

Per valutare fino a quale valore dell'oggetto è lecito il raddrizzamento, si impone un ΔR massimo \leq di una tolleranza che viene fissata in funzione dell'errore ammesso sul prodotto finale, e in base a questo si valuta, grazie alla formula (2), qual è l'oggetto tollerabile ΔZ per le diverse distanze di presa.

Nel caso del monastero di Mesopotam, la facciata ovest per la sua particolare morfologia prettamente piana consentiva una restituzione tramite raddrizzamento fotogrammetrico, per questo le prese effettuate sono state fatte il più possibile centrali e nadirali. L'acquisizione fotogrammetrica è stata eseguita con camera semimetrica Leica R5, dotata di reticolo calibrato con obiettivo 24 mm.

Il rilievo d'appoggio è stato eseguito con Total Station TOPCON GTS-212, utilizzando 5 punti segnalizzati sulla facciata con target adesivi di 6 cm di lato a cui si sono andati ad appoggiare i microprismi.

Il raddrizzamento è stato eseguito col software Rollei MSR v4.0; la dimensione del pixel selezionata per il prodotto finale è stata pari a 2mm. L'esecuzione effettiva del raddrizzamento, con relativo ricampionamento dell'immagine originale e sua proiezione sul piano prescelto ha richiesto un tempo molto breve.

Dalla tecnica e strumentazione adottata, nonché dalla verifica di distanze reali misurate in campagna con quelle rilevate sul fotopiano, si può considerare la precisione del prodotto finale compatibile con una scala nominale 1:50.



Figura 5.3-3 La facciata ovest del monastero con i punti d'appoggio utilizzati per il raddrizzamento.

Il fotopiano ottenuto costituisce una rappresentazione fotografica metrica che comprende vari aspetti dell'oggetto, come ad esempio il colore, i materiali, la presenza di macchie d'umidità o di parti d'intonaco danneggiato, ed ogni altra informazione sul danneggiamento della struttura, come crepe e cedimenti.

D'altra parte è altresì evidente che la classica restituzione vettoriale al tratto è una rappresentazione sintetica dell'oggetto in cui si possono mettere in risalto i principali elementi architettonici e strutturali, essendo anche organizzabile in livelli tematici differenti. Per realizzare la restituzione vettoriale il fotopiano è stato quindi importato in una piattaforma CAD Microstation J; la restituzione è stata effettuata cercando di mettere in evidenza le diverse tessiture e strutture che compongono la facciata e che possono rivelare in modo molto interessante il susseguirsi di diversi stili ed interventi nel tempo.

Nella Figura 5.3-4 si presenta una rappresentazione ibrida in cui vengono seguiti entrambi gli approcci.



Figura 5.3-4. Fotopiano della facciata ovest del monastero con parziale restituzione vettoriale.

5.4 Elaborati raster: l'ortofoto

Nel caso la tridimensionalità dell'oggetto non possa essere trascurata, si adotta il raddrizzamento differenziale: sulla base del DEM dell'oggetto e di almeno un fotogramma orientato dello stesso; il fotogramma originale viene geometricamente trasformato e ricampionato radiometricamente secondo criteri interpolativi (vedi paragrafo 5.5).

Il raddrizzamento differenziale dà luogo a un modello 3D raster dell'oggetto rilevato, di grande effetto per la sua caratteristica di conservare l'informazione radiometrica propria del fotogramma e quella metrica di una carta. Una proiezione sul piano dello stesso dà luogo all'ortofoto.

Rispetto ad una carta al tratto tradizionale l'ortofoto presenta dunque alcuni vantaggi fondamentali:

- Presenta maggiore livello d'aggiornamento;
- Presenta contenuto informativo superiore;
- È meno costosa;
- È di più veloce esecuzione;
- È una base ottimale per i Sistemi Informativi Geografici.

L'oggetto d'interesse è rappresentato così come esso appare nella realtà, senza l'introduzione di una codificazione o di una simbologia, e ciò permette inoltre la comprensione e la corretta lettura dell'ortofoto anche da parte di quegli utenti che, non possedendo una cultura tecnica, troverebbero difficoltà nella fruizione di una rappresentazione topo-cartografica tradizionale. Le caratteristiche di duttilità e facilità d'uso hanno dunque reso l'ortofoto un eccezionale strumento di comunicazione e conoscenza; nel campo territoriale l'ortofoto digitale a colori è divenuta ormai per efficacia, rapidità ed economicità, uno strumento indispensabile, anche come base di qualunque Sistema Informativo Territoriale; ad una diffusione simile, anche se con problematiche e fruizioni diverse, si sta assistendo anche nel settore dei Beni Culturali.

5.4.1 Generazione dell'ortofoto digitale

Dal punto di vista procedurale, le fasi della generazione di un'ortofoto in ambiente digitale sono riassunte nel diagramma 5.4.1-1.

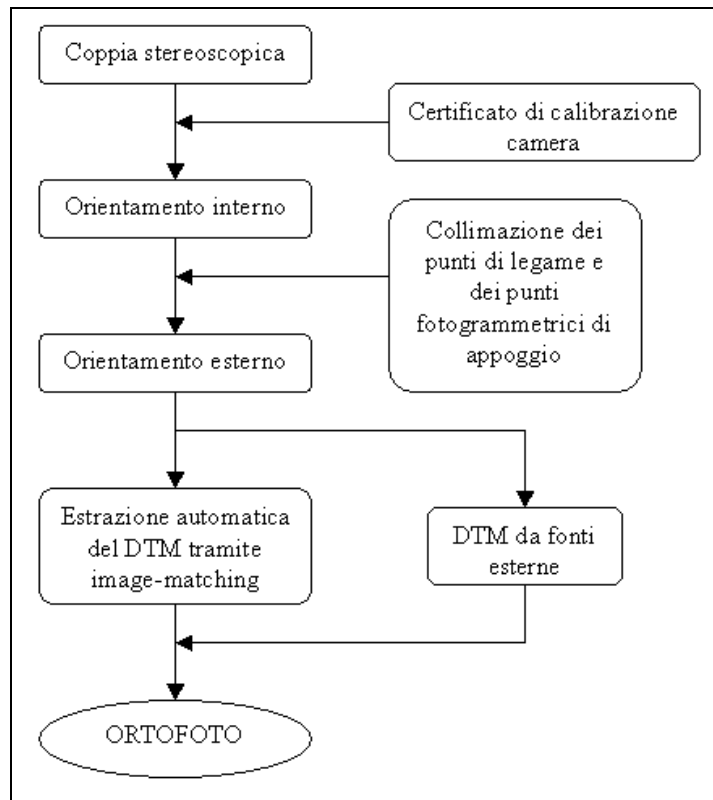


Diagramma 5.4.1-1 Diagramma di generazione di un'ortofoto digitale.

La procedura di generazione di un'ortofoto digitale passa attraverso le fasi seguenti:

- Definizione della matrice dell' orto-immagine, in cui ad ogni pixel corrisponde un elemento del piano sul terreno.

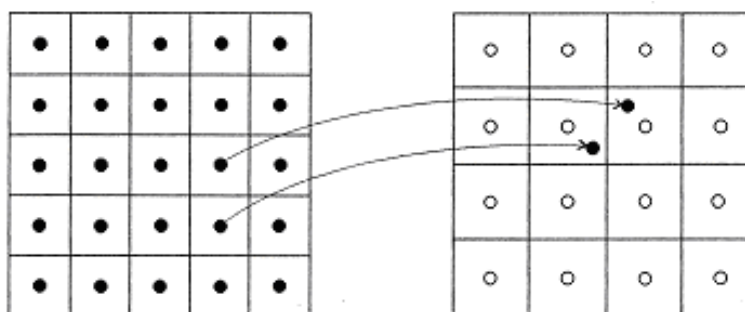


Figura 5.4.1-2 Relazione fra la matrice orto-immagine e la matrice immagine di partenza.

- Per ogni pixel dell'orto-immagine, avente univoche coordinate assolute \overline{XY} , si procede così:

- Si estrae un valore della quota \bar{Z} dal DEM;
- Si proietta il punto terreno 3D tramite le equazioni di collinearità (devono quindi essere noti per l'immagine i parametri di orientamento interno ed esterno) ottenendo le coordinate fotogramma xy;
- Si trasformano le coordinate fotogramma xy nelle coordinate immagine ij (indice di riga e colonna nella matrice immagine) tramite una trasformazione affine (bi-dimensionale);
- Si trova sull'immagine, per interpolazione, il valore di densità corrispondente alle coordinate ij calcolate;
- Si assegna tale valore di densità al pixel sull'orto-immagine mediante uno dei metodi di ricampionamento descritti nel paragrafo 5.5.

Bisogna notare che l'estrazione di un valore della quota dal DEM è basato sull'interpolazione, in quanto la risoluzione dell'orto-immagine è solitamente maggiore di quella del DEM; questa soluzione ha però lo svantaggio che le equazioni di collinearità devono necessariamente essere risolte per ogni pixel dell'ortofoto.

Una soluzione più economica dal punto di vista computazionale, ma ovviamente meno precisa, è fornita dal cosiddetto "metodo-ancora". In tale metodo solo i punti del modello digitale del terreno sono trasformati nella matrice dell'immagine originale, e l'interpolazione di tutti gli altri punti viene eseguita successivamente nello spazio immagine.

Come descritto, l'ortofoto si genera a partire da un'immagine digitale e dall'informazione altimetrica fornita dal DEM; delle caratteristiche che deve avere un DEM al fine della produzione di ortofoto si parlerà nel capitolo 6; si danno qui alcune informazioni sulle immagini digitali.

Nel processo di generazione dell'ortofoto, i fattori concernenti l'immagine digitale di partenza che maggiormente influenzano la qualità del prodotto finale, sono la scala dell'immagine e l'intervallo di scansione, ovvero la risoluzione dell'immagine se essa è stata acquisita in maniera diretta.

La scelta di questi parametri dipende dai seguenti criteri:

a) Il teorema del campionamento dice che per trasferire sull'immagine digitale tutte le informazioni dell'immagine originale, l'intervallo di scansione deve essere di $7 \mu\text{m}$. Bisogna comunque tenere in considerazione che una riduzione della dimensione del pixel aumenta il rapporto segnale-rumore, un parametro che caratterizza la qualità del sensore. Gli scanner attuali presentano un rapporto segnale-rumore accettabile con una dimensione del pixel pari a $10 \mu\text{m}$.

- b) La dimensione è un fattore decisivo nella produzione di immagini digitali.
- c) Se l'ortofoto digitale finale deve essere prodotta su pellicola, può essere usato un ingrandimento dall'immagine originale all'ortofoto pari a 4× (assumendo una risoluzione fotografica di 50 lp/mm nell'originale ed un intervallo di scansione pari a 7 µm).
- d) Se l'ortofoto digitale deve essere stampata, è usuale assumere una risoluzione di stampa di 70 linee/cm, corrispondente ad una dimensione del pixel nell'ortofoto stampata di 143 µm; questa risoluzione permetterebbe un ingrandimento dall'originale all'ortofoto finale di 5×, corrispondente ad una dimensione del pixel nell'originale di 29 µm.
- e) Se l'ortofoto digitale deve essere inserita come livello autonomo di informazione in un GIS, diviene un fattore di particolare interesse l'incertezza di definizione degli oggetti, che entra in gioco quando si hanno dimensioni del pixel a terra superiori a un valore che va da 25 cm a pochi metri, in base alla natura del territorio e all'accuratezza richiesta. La Tabella 5.4.1-3 mostra le scale immagine e gli intervalli di campionamento appropriati per una dimensione del pixel a terra di 25 e 50 cm.

1:m _b	Intervallo di scansione	
	25 cm	50 cm
1:30000	8 µm	17 µm
1:15000	17 µm	33 µm
1:5000	50 µm	100 µm

Tabella 5.4.1-3: Scala immagine e intervallo di scansione per una dimensione del pixel a terra di 25 e 50 cm.

La Tabella 5.4.1-3 mostra che, per ortofoto digitali, scale immagine fra 1:15000 e 1:30000 sono appropriate se le immagini originali sono state digitalizzate ad un intervallo di circa 20 µm. Se l'ortofoto digitale deve essere utilizzata per l'analisi di micro-strutture, come ad esempio può accadere in fotogrammetria terrestre, dovrebbe essere assunta una scala immagine significativamente più grande ed un intervallo di scansione più piccolo, in linea con quanto detto ai punti a) e b).

5.4.2 L'ortofoto del sito di Soknopaiou Nesos

Le immagini aeree da pallone del sito di Soknopaiou Nesos descritte nel capitolo 2, una volta orientate, sono state utilizzate per estrarre un DEM dell'area di interesse e per la generazione di un'ortofoto digitale a colori,

l'elaborazione è stata eseguita con la stazione Fotogrammetrica Digitale Socet Set v5.2.0.

Dell'estrazione automatica del DEM, della successiva fase di editing, e di alcuni test condotti sul dato ottenuto si parlerà diffusamente nel prossimo capitolo; qui si vuole porre l'attenzione sulle problematiche di generazione dell'ortofoto.

Le ortofoto digitali costituiscono, come già detto, un prodotto economico, di facile lettura ed efficiente al fine di fornire in modo geometricamente corretto la rappresentazione fotografica di qualunque oggetto. La procedura di creazione dell'ortofoto risulta semplice e raggiunge risultati soddisfacenti nei casi in cui la forma dell'oggetto sia regolare e la proiezione sia fatta su un piano.

Difficilmente ciò accade nel campo dell'Architettura e dell'Archeologia, in cui la superficie che modella l'oggetto presenta forme irregolari e complesse ed in cui punti aventi le medesime coordinate planimetriche possono presentare quote differenti, non descrivibili in modo completo ed efficace da un DEM regolare. In queste situazioni la soluzione più frequentemente adottata risulta l'integrazione di DEM ad alta densità con la restituzione di numerose *breaklines*, al fine di definire e controllare il comportamento delle superfici in termini di regolarità e continuità.

In particolare ai fini della generazione di una corretta ortofoto sono risultate problematiche le aree caratterizzate da brusche variazioni della quota, come ad esempio tutto il perimetro della cinta muraria del *temenos*, che presenta muri di altezza di una decina di metri. Per queste ultime situazioni, in particolare, si è resa necessaria l'introduzione manuale di numerose *breaklines* sia alla base che alla sommità dei muri, operazione non semplice a causa delle ombre e delle zone coperte, problematiche queste imputabili alla non facile controllabilità della piattaforma di acquisizione che ha determinato la non nadiralità di molte immagini.

L'analisi dell'ortofoto – mosaico ottenuto (Figura 5.4.2-1) permette di evidenziare alcune delle problematiche spesso riscontrabili nelle ortofoto, sia aeree che terrestri:

- Il problema cosiddetto “*stretch* del pixel” (Figura 5.4.2-2) che si presenta qualora il raggio ottico della presa sia tangente al DTM, con la conseguenza di una successione di pixel dell'ortofoto che presentano la stessa radiometria; questo problema è spesso risolvibile con l'introduzione di corrette *breaklines*.

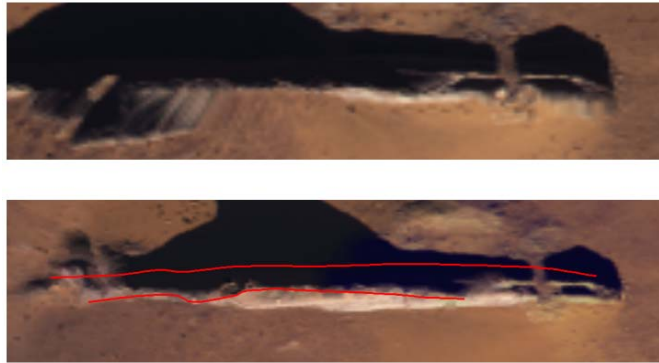


Figura 5.4.2-2 Particolare di un tratto di muro a sud del Temenos: senza *breaklines* in alto e con *breaklines* in basso.

- Il problema della disomogeneità radiometrica delle immagini; questo problema si può risolvere con una fase di pre – processamento delle immagini in programmi di computer grafica e *image enhancement* al fine di renderle omogenee; molti software commerciali di fotogrammetria digitale permettono comunque il bilanciamento automatico, manuale e semi – automatico dei mosaici prodotti, al fine di eliminare o ridurre questo problema.
- L’effetto di *double mapping* è dovuto al fatto che, essendo l’ortofoto prodotta a partire da una sola immagine, se in questa mancano a causa degli effetti prospettici causati dal processo di acquisizione le informazioni radiometriche dei pixel appartenenti alle zone nascoste, il software nell’ortofoto “riempe i buchi” duplicando i pixel a disposizione; questo effetto si può eliminare con la procedura di *True Orthophoto*, approfondita nel prossimo paragrafo.

L’ortofoto – mosaico definitivo, ottenuto usando una trasformazione bilineare come metodo di ricampionamento e caratterizzato da una dimensione del pixel pari a 20 cm, è compatibile con una scala nominale 1:1000.

La disponibilità di questo prodotto potrebbe integrare e completare il rilievo terrestre; la Figura 5.4.2-3 mostra la sovrapposizione fra un particolare dell’ortofoto e la restituzione vettoriale eseguita dagli archeologi sulla base di un tradizionale rilievo terrestre, entrambi nello stesso sistema di riferimento, e conferma la capacità dell’ortofoto aerea di rendere visibili strutture non facilmente identificabili da terra.



Figura 5.4.2-2 Ortofotomosaico dell'area comprendente il *temenos* e il *dromos*.



Figura 5.4.2-3 Sovrapposizione fra disegno vettoriale e ortofoto – mosaico; dettaglio per un'area vicina al *temenos*.

5.4.3 La *True Orthophoto*: esempi in ambito aereo e terrestre

Se si osserva la Figura 5.4.3-1, si può notare che a causa della prospettiva centrale che dà origine al fotogramma, si ha, nella zona nascosta dall'edificio (zona campita), un effetto detto di *double mapping*, in quanto il punto immagine Q' viene rappresentato sull'ortofoto dai punti Q_0 e P_0 .

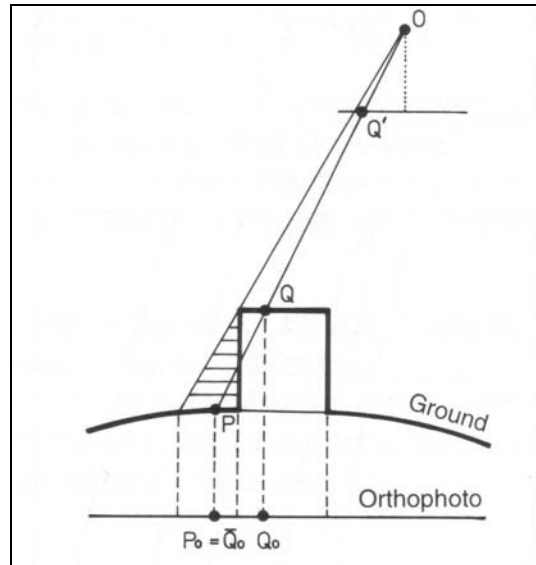


Figura 5.4.3-1 Ortofoto, problema relativo alle *hidden areas*.

Questo errore può essere eliminato solo con la procedura di generazione dell'ortofoto di precisione o *True Orthophoto*, che prevede l'ortorettifica a partire da più immagini; i dettagli mancanti nelle aree nascoste possono quindi essere presi da fotogrammi acquisiti da altri punti di vista (Figura 5.4.3-2).

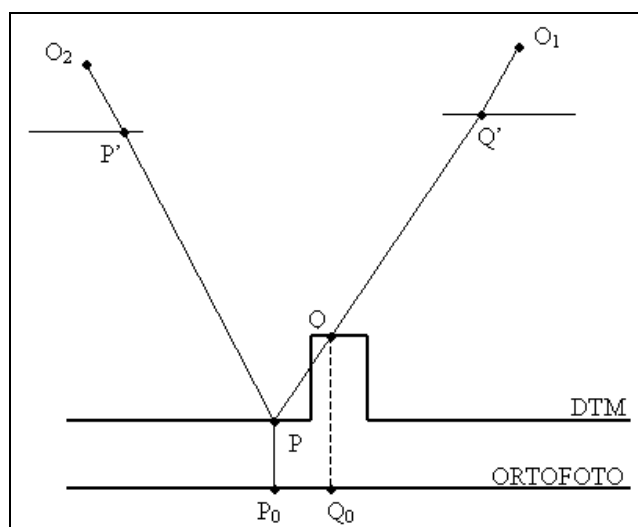


Figura 5.4.3-2 Processo di orto-rettifica multi-immagine.

Nel caso dell'ortofoto – mosaico di Soknopaiou Nesos questo problema si è riscontrato in corrispondenza di alcuni tratti della cinta muraria, anche a causa delle difficoltà di acquisizione da pallone, che non essendo facilmente manovrabile anche per la presenza di forte vento nella zona, ha impedito prese nadirali.

Si noti a tale proposito l'effetto di *double mapping* riscontrabile nel tratto di muro a sud – ovest del *temenos* (Figura 5.4.3-3, a); con il modulo di generazione della *true orthophoto* di Socet Set l'effetto è scomparso (Figura 5.4.3-3, b), grazie alla presenza di un'immagine del muro acquisita da un altro punto di vista.

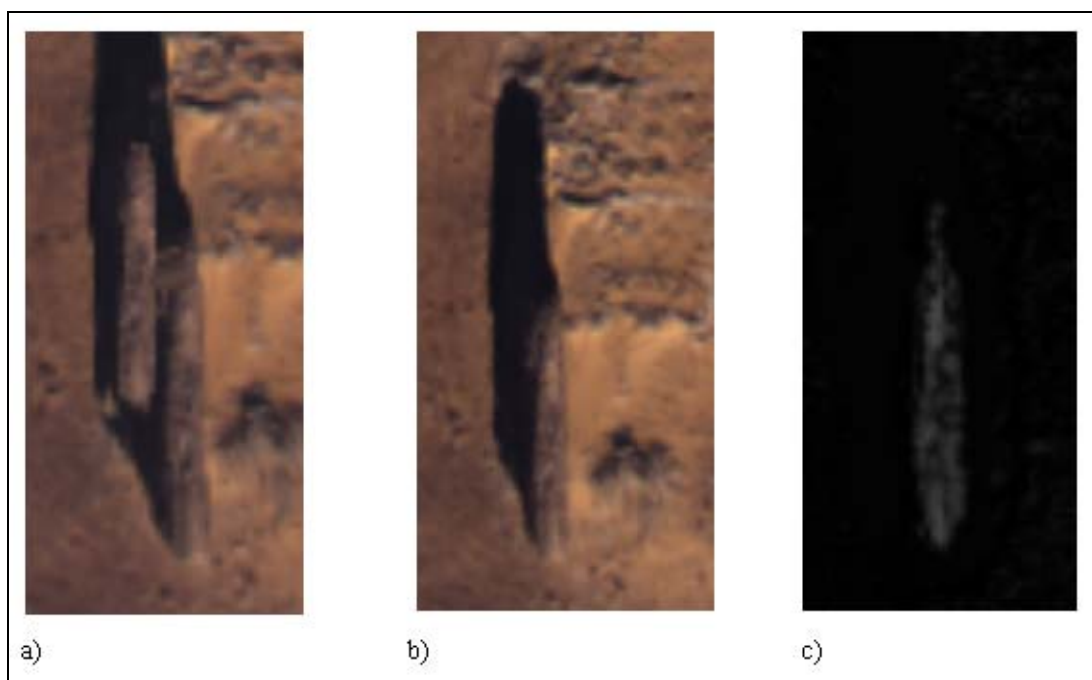


Figura 5.4.3-3 Effetto di Double Mapping presente nell'ortofoto originale (a), corretto nella *True Orthophoto* (b); nell'immagine c) è visibile la differenza presente fra le due immagini (procedura di *Change Detection*).

La procedura di ortofoto di precisione è stata eseguita anche per l'elaborazione di un prodotto raster per la facciata sud del monastero di Mesopotam, particolarmente indicata vista la sua particolare morfologia caratterizzata da sporgenze e aggetti.

Il processo fotogrammetrico è stato effettuato sempre con la stazione fotogrammetrica digitale Socet Set v5.2.0, a partire da una coppia stereoscopica della facciata caratterizzata da una scala fotogramma pari a 1:600.

Dopo le fasi di orientamento interno ed esterno, realizzate rispettivamente con una trasformazione affine e con un modello analitico di triangolazione a stelle proiettive (residui sui punti d'appoggio nell'ordine di 1 cm), è stato estratto il DEM della facciata con spaziatura media fra i punti di 5 cm; tale

modello è stato poi usato per la produzione di un'ortofoto di precisione (Figura 5.4.3-4), realizzata con ricampionamento bilineare; la dimensione del pixel è 0.02 m. A tal fine è stato necessario effettuare un leggero editing preliminare del DSM, con l'introduzione di *breaklines* sulla sommità e alla base del contrafforte centrale.

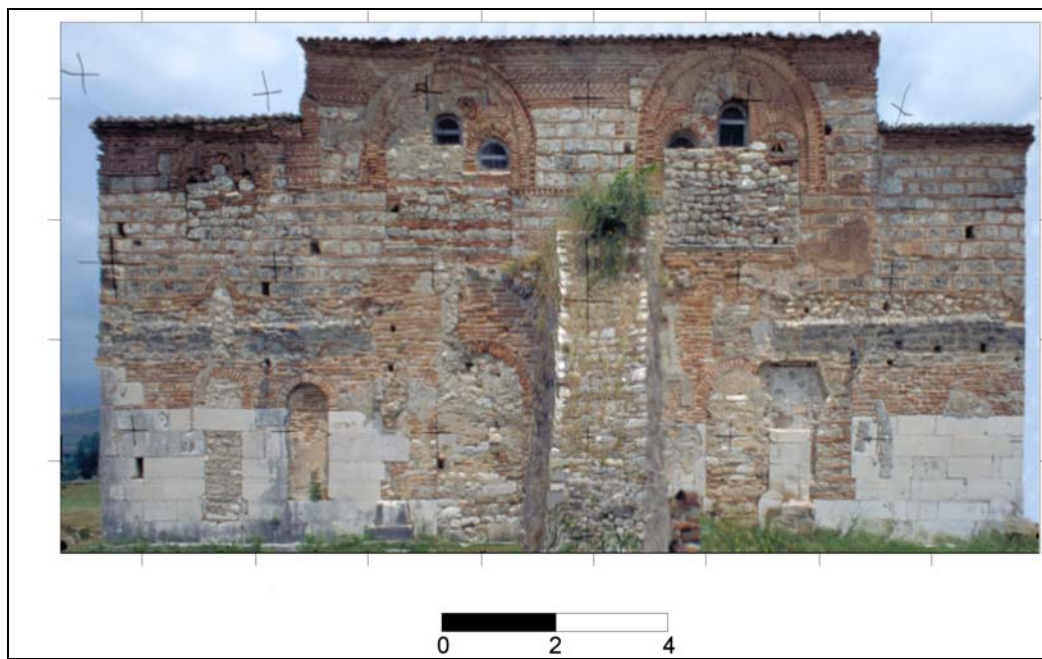


Figura 5.4.3-4 Ortofoto di precisione della facciata sud del monastero.

5.4.4 Ortofoto da DEM laser: esempi e confronti con ortofoto da fotogrammetria

Sena soffermare l'attenzione sul rilievo con laser a scansione terrestre della facciata della Chiesa di Santo Stefano eseguito nel 2003, qui si vogliono esaminare alcune tematiche relative alla produzione di ortofoto da DEM laser ed effettuare alcune considerazioni e confronti con l'ortofoto prodotta da DEM fotogrammetrico.

Contestualmente al rilievo laser è stato infatti condotto un rilievo fotogrammetrico della facciata della basilica; l'acquisizione delle immagini è stata eseguita con la camera semimetrica 6×6 Rolleiflex 6008, con obiettivo da 40 mm. Le prese sono state effettuate ad una distanza dall'oggetto di circa 16 m, con una scala fotogramma intorno a 1:400. Le immagini sono state scansionate con lo scanner fotogrammetrico Vexcel Ultrascan 5000 alla risoluzione di 868 dpi cui corrisponde un *pixel size* di 29 μm .

Il rilievo topografico di appoggio è stato eseguito con una stazione totale a

impulsi (Topcon GPT 6001, con precisione nominale di 1" per le misure angolari e di $\pm 3\text{mm} + 2\text{ ppm}$ per la distanza). In particolare sono state rilevate le coordinate di 9 punti naturali omogeneamente distribuiti sulla facciata della chiesa in un sistema di riferimento locale; lo schema adottato è quello dell'intersezione in avanti spaziale con un elevato numero di misure sovrabbondanti (56 osservazioni e 30 incognite). La compensazione della rete ha fornito per i punti d'appoggio ellissi d'errore al 95% di probabilità aventi semiassi maggiori di pochi mm. L'elaborazione delle immagini è stata eseguita con la stazione fotogrammetrica digitale Socet Set v5.2.0.

Il DEM fotogrammetrico sulla facciata consta di oltre 350000 punti. L'intervento dell'operatore in fase di editing a posteriori si è reso necessario soprattutto per eliminare i punti all'interno delle aperture della porta e delle finestre, e per correggere gli errori di correlazione in corrispondenza di parti della facciata particolarmente difficili, ma di grande interesse architettonico, come il cornicione superiore e il pulpito, dove la morfologia della superficie e la presenza di ombre ha determinato notevoli problemi (Figura 5.4.4-1). Inoltre, l'inserimento manuale di alcune *breaklines* ha consentito una migliore definizione dei pilastri. A partire dal DEM corretto e da una delle immagini della stereocoppia, è stata prodotta un'ortofoto digitale a colori della facciata della chiesa (Figura 5.4.4-2), caratterizzata da un *pixel size* di 0.02 m, compatibile con una scala nominale di 1:100; il metodo di ricampionamento scelto è stato il bilineare.

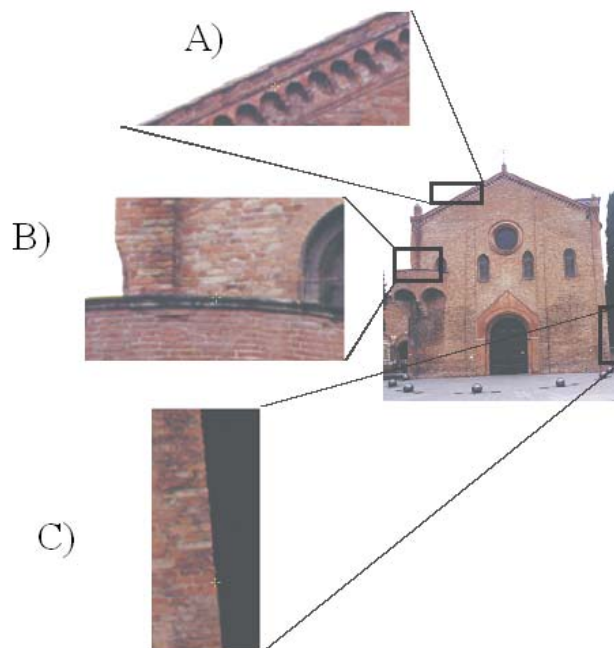


Figura 5.4.4-1 Particolari delle zone problematiche ai fini della generazione dell'ortofoto: A) cornicione, B) sopra il pulpito, C) discontinuità in corrispondenza del pilastro.

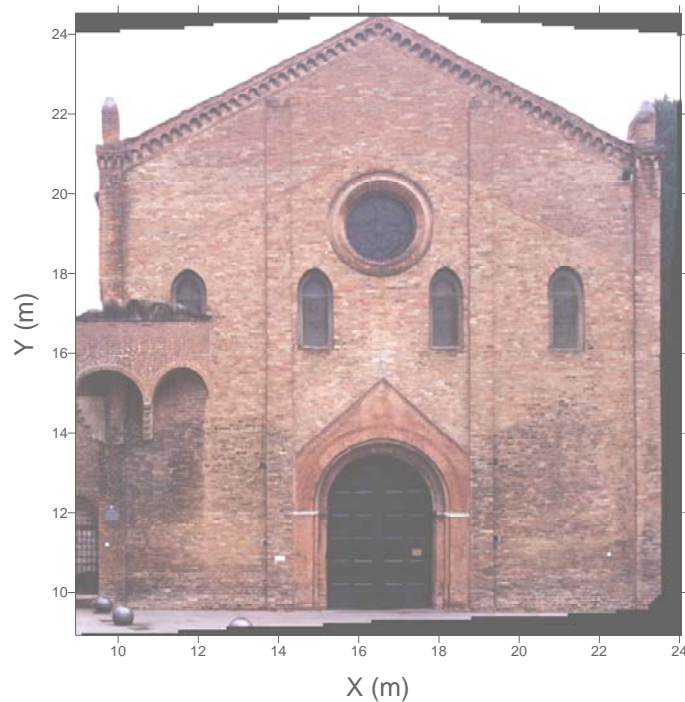


Figura 5.4.4-2 Ortofoto della facciata della Chiesa di santo Stefano.

Un'ortofoto con le stesse caratteristiche è stata generata anche a partire dal DEM laser acquisito; il risultato ha mostrato le stesse problematiche riscontrate nell'ortofoto da DEM fotogrammetrico. Osservando dei particolari architettonici ben precisi si può però riscontrare che mentre nelle zone dalla geometria non complessa (si veda l'esempio di una delle finestre nella Figura 5.4.4-3) il risultato è assolutamente paragonabile, nelle zone problematiche come ad esempio i pilastri, anche il DEM da laser necessita di una fase di *editing*, che la visione stereoscopica del modello da fotogrammetria può rendere più agevole; come è stato già accennato nel capitolo 3 i software di elaborazione di dati laser prevedono la pulitura della nuvola di punti o della *mesh* in modalità manuale, ma questa procedura può non essere semplice senza il supporto fornito da immagini, da ortofoto e soprattutto da visione stereoscopica.



Figura 5.4.4-3 Particolare dell'ortofoto da DEM laser a sinistra e da DEM fotogrammetrico a destra.



Figura 5.4.4-4 Particolare dell'ortofoto da DEM laser (sinistra), da DEM laser editato tramite visione stereoscopica (centro) e da fotogrammetria (destra).

5.5 Il ricampionamento di immagine digitale

Consideriamo un'immagine digitale e una seconda immagine definita in un altro sistema di riferimento di cui si conoscono solo le dimensioni geometriche e supponiamo di conoscere la trasformazione piana che lega i sistemi di riferimento delle due immagini (Figura 5.5-1).

Ricampionare un'immagine significa determinare il valore radiometrico di ogni pixel dell'immagine ricampionata attingendone il valore dall'immagine iniziale; questa procedura interessa diverse operazioni fotogrammetriche e di *image processing*.

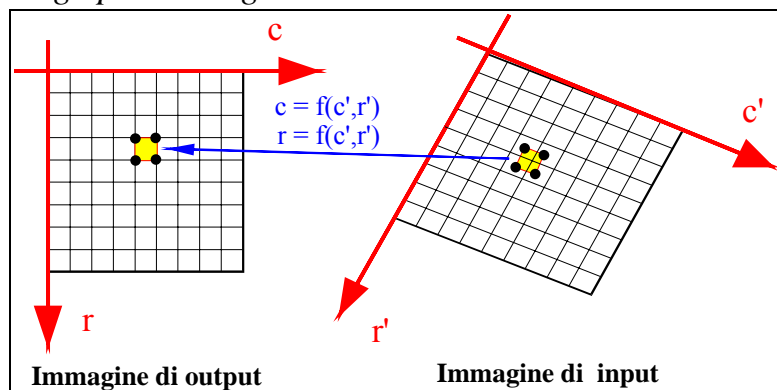


Figura 5.5-1 Schematizzazione del ricampionamento.

In generale, quando si effettua una trasformazione di dati, si adotta un metodo diretto; nella trasformazione di immagini si adotta invece in genere il metodo indiretto, perché la trasformazione diretta potrebbe dare infatti origine a numeri reali, mentre le coordinate pixel sono date da interi, e inoltre potrebbero esistere pixel nell'immagine finale con valore radiometrico non assegnato.

I metodi di ricampionamento sono divisi in due gruppi; tra questi ci

soffermeremo sul primo gruppo, in quanto questi sono i metodi più utilizzati nei comuni software commerciali di elaborazione fotogrammetrica.

I metodi del trasporto del baricentro sono:

- **Semplice trasporto:** Consideriamo una generica trasformazione piana tra il sistema di riferimento dell'immagine iniziale e quello dell'immagine ricampionata e supponiamo di conoscere anche la trasformazione inversa.

Trasformiamo le coordinate del baricentro del primo pixel dell'immagine ricampionata nel sistema dell'immagine iniziale. Questo punto cadrà all'interno di un pixel di tale immagine: leggiamo il valore radiometrico e lo "copiamo" nel pixel da cui siamo partiti.

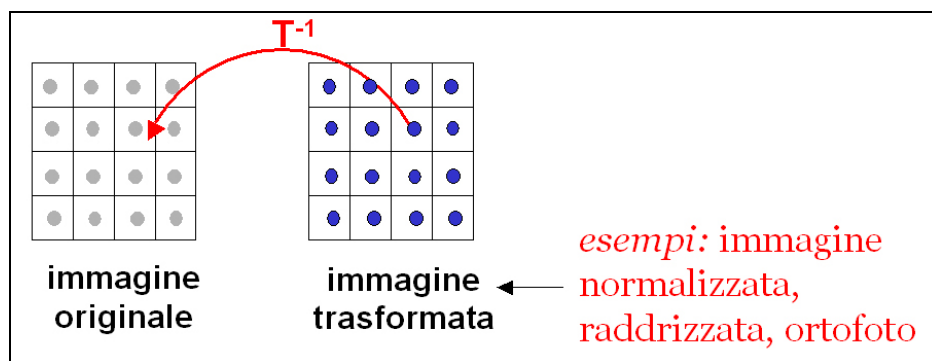


Figura 5.5-2 Applicazione della trasformazione inversa per effettuare il ricampionamento.

Questo metodo presenta velocità di esecuzione, ma crea il problema dell'effetto *blocking*: i baricentri di alcuni pixel dell'immagine ricampionata, una volta trasformati, possono cadere all'interno di un medesimo pixel dell'immagine iniziale creando gruppi di pixel contigui che hanno il medesimo valore radiometrico. La soluzione al problema è data da alcune strategie interpolative, descritte di seguito.

- **Metodo delle zone di influenza:**

Il pixel dell'immagine iniziale in cui cade il punto da interpolare viene suddiviso idealmente in 9 zone; il valore radiometrico estratto varia in funzione della zona occupata dal baricentro trasformato (Figura 5.5-3).

Il valore radiometrico dipende dall'area in cui cade il punto trasformato:

- Se giace nell'area interna (5), il valore radiometrico ricampionato VR è dato dal valore radiometrico del pixel in cui cade il punto $V_{i,j}$;

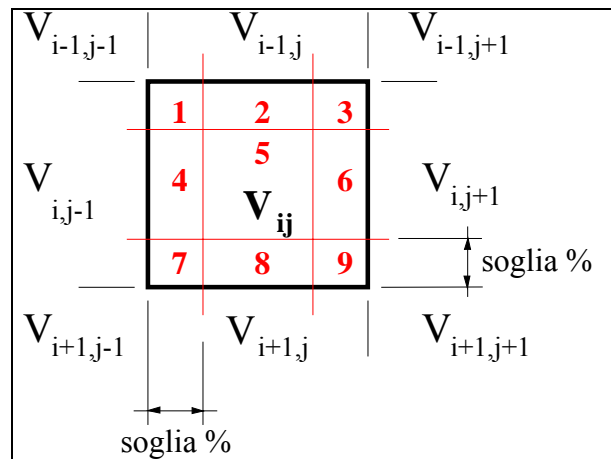


Figura 5.5-3 Divisione del pixel nel metodo delle zone di influenza.

- Se giace nelle aree lungo i lati del pixel (2, 4, 6, 8), VR è dato dalla media dei valori radiometrici dei due pixel adiacenti, secondo le formula:

$$V_{R2} = \frac{V_{i-1,j} + V_{i,j}}{2}$$

$$V_{R4} = \frac{V_{i,j-1} + V_{i,j}}{2}$$

...

- Se giace nelle aree attorno ai vertici dei pixel (1, 3, 7, 9), il valore radiometrico ricampionato VR è dato dalla media dei valori radiometrici dei quattro pixel adiacenti il vertice considerato, secondo le formule:

$$V_{R1} = \frac{V_{i-1,j} + V_{i,j} + V_{i,j-1} + V_{i-1,j-1}}{4}$$

$$V_{R3} = \frac{V_{i-1,j} + V_{i,j} + V_{i,j+1} + V_{i-1,j+1}}{4}$$

...

- Metodo delle distanze pesate:

Si costruisce una griglia passante per i baricentri dell'immagine di input e ad ogni nodo si associa il valore radiometrico del pixel corrispondente. Il baricentro trasformato cadrà all'interno di quattro nodi (Figura 5.5-4).

Il valore radiometrico interpolato è la media dei quattro valori radiometrici più vicini, pesata con le distanze tra il baricentro trasformato e i quattro nodi considerati.

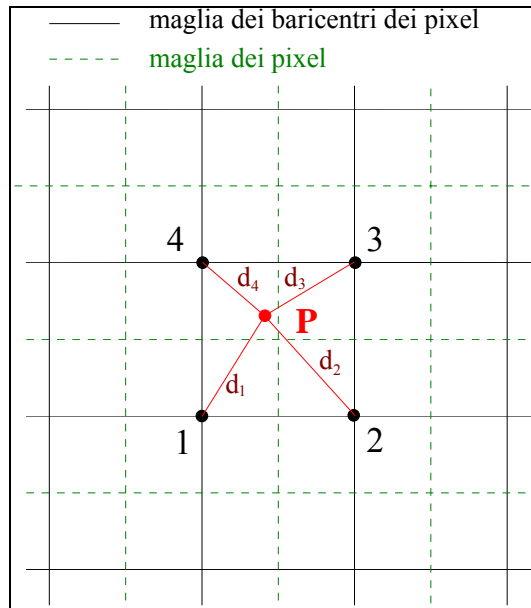


Figura 5.5-4 Metodo delle distanze pesate.

$$V_P = \frac{\frac{V_1}{d_1} + \frac{V_2}{d_2} + \frac{V_3}{d_3} + \frac{V_4}{d_4}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

■ Interpolazione bilineare:

Tale metodo sfrutta la stessa griglia del metodo precedente. Si considerano i quattro valori radiometrici associati ai nodi più vicini al baricentro trasformato (Figura 5.5-5).

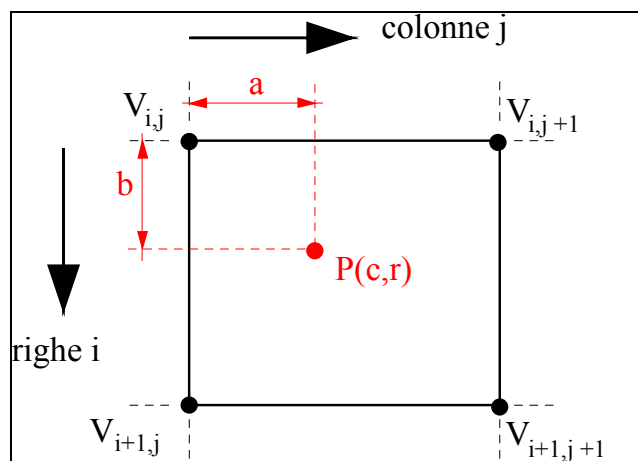


Figura 5.5-5 Metodo dell'interpolazione bilineare.

Il valore radiometrico interpolato V viene ricavato con una interpolazione bilineare:

$$V = (1 - a)(1 - b)V_{i,j} + a(1 - b)V_{i,j+1} + b(1 - a)V_{i+1,j} + abV_{i+1,j+1} \text{ Interpolazione}$$

bicubica:

Si usa ancora la griglia prima definita, ma si considerano i 16 nodi più vicini alla posizione del baricentro trasformato e si interpola il valore radiometrico da associare al pixel dell'immagine ricampionata mediante una interpolazione bicubica.

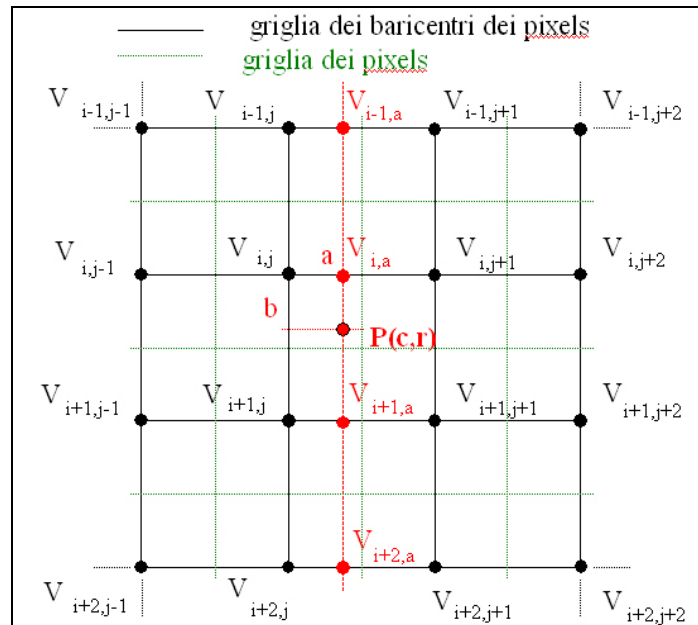


Figura 5.5-6 Metodo dell'interpolazione bicubica.

La procedura si divide in due parti:

- Si interpola mono-dimensionalmente lungo le quattro righe ottenendo quattro valori di V allineati sulla colonna passante per il punto da interpolare P :

$$V_{r,a} = a(a - a^2 - 1)V_{r,j-1} + (1 - 2a^2 + a^3)V_{r,j} + a(1 + a - a^2)V_{r,j+1} + a^2(a - 1)V_{r,j+2}$$

(con $r = i - 1, i, i + 1, i + 2$; $a = c - j$; V = valori radiometrici dei nodi e dei punti necessari);

- Si interpola mono-dimensionalmente lungo la colonna passante per il punto P i cui nodi sono stati determinati nel passo precedente; l'equazione risultante è solo funzione di b :

$$V_P = b(b - b^2 - 1)V_{i-1,a} + (1 - 2b^2 + b^3)V_{i,a} + b(1 + b - b^2)V_{i+1,a} + b^2(b - 1)V_{i+2,a}$$

Per quanto riguarda il secondo gruppo di metodi ricampionamento, si accenna brevemente al metodo di trasporto dei vertici.

- Trasporto dei vertici:

Il metodo prevede come prima fase, il trasporto dei vertici di ogni pixel

dell'immagine rettificata (output) sull'immagine fotografica digitale (input) secondo una data trasformazione geometrica. I quattro punti trasformati definiscono una certa area A sull'immagine di input, caratterizzata da forma e dimensione variata rispetto a quella del grigliato dell'immagine rettificata. Tale area A, contiene varie porzioni di pixel dell'immagine di input; di ognuna di queste porzioni viene calcolata l'estensione. Il valore radiometrico ricampionato risulta essere la media dei valori radiometrici dei pixel contenuti nell'area A, pesati in funzione delle estensioni delle porzioni dell'area che essi racchiudono.

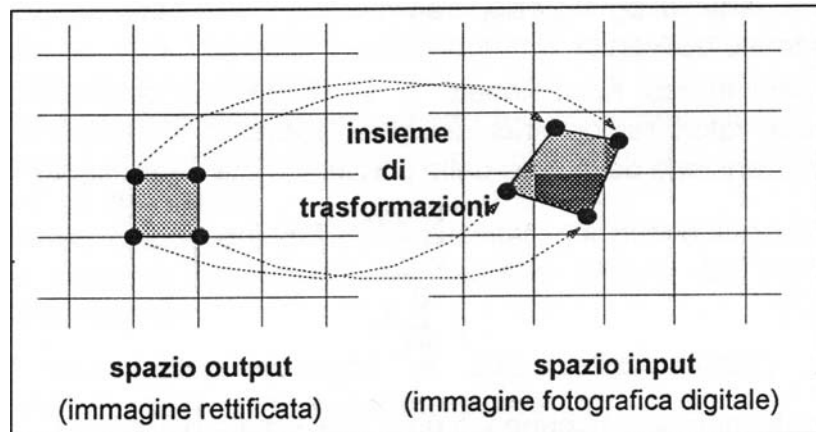


Figura 5.5-6 Principio base del metodo di trasporto dei vertici.

Per quanto riguarda la scelta fra i metodi, si può dire che i fattori chiave sono:

- La qualità del risultato;
- Il tempo di elaborazione.

I tempi di elaborazione dipendono da diversi fattori, quali: la dimensione dell'immagine digitale; la funzione di trasformazione tra spazi bidimensionali e le caratteristiche hardware del computer impiegato (tipo di processore e RAM).

Il ricampionamento genera comunque sempre un'immagine ricampionata con un effetto di sfocamento rispetto all'immagine originale.

L'interpolazione bicubica è quella che rende minimo questo effetto, annullando completamente il *blocking*: i tempi di elaborazione non sono proibitivi e quindi questo metodo è da consigliare nei lavori in cui è necessario restituire una elevata nitidezza dell'immagine ricampionata.

Se è necessario ridurre i tempi di elaborazione anche l'interpolazione bilineare fornisce risultati soddisfacenti.

6.

LA MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

6.1 La modellazione tridimensionale nel campo dei Beni Culturali

Con il termine modellazione 3D si intende quel processo che parte dall'acquisizione del dato metrico e finisce con un modello virtuale in tre dimensioni visibile in modo interattivo su un computer; il termine comprende quindi un concetto più ampio di quello che si intende usualmente, cioè il passaggio da una nuvola di punti ad una superficie continua, che costituisce quindi in realtà solo uno degli *steps* dell'intero svolgimento.

La modellazione 3D di oggetti e scene è oggi una tematica di grande interesse non solo nell'industria, nella robotica, nella navigazione e nel *body scanning*, ma anche nell'ambito dei Beni Culturali. Le motivazioni possono essere molte: la documentazione in caso di distruzione o danneggiamento, la creazione di musei e turismo virtuale, la didattica, gli studi strutturali, ecc.

Le richieste di questo particolare ambito sono varie: l'alta precisione e la capacità di riprodurre fedelmente i dettagli sono caratteristiche indispensabili, ma ci sono altri requisiti come il basso costo, la maneggevolezza, l'alto livello di automazione nel processo.

Diversi sono i tipi di approccio con cui si può affrontare tale tematica; quelli che più interessano chi si occupa di rilievo sono fondamentalmente i seguenti:

- *Metodi image based*: in questo approccio sensori passivi (camere e video camere) producono immagini da cui è possibile tramite un modello matematico ben preciso (in fotogrammetria le equazioni di collinearità o la DLT) ricavare le coordinate 3D dell'oggetto in esame. Questo metodo è ampiamente usato per la modellazione delle città e per le applicazioni architettoniche; i sensori possono essere anche a basso costo e il processo di elaborazione dei dati metrici è fondamentalmente interattivo e richiede, nonostante lo sviluppo di numerosi algoritmi che permettono l'estrazione automatica di DEM da immagini orientate (vedi paragrafi successivi),

l'intervento dell'operatore, che è ancora fondamentale per la generazione di precisi e affidabili modelli tridimensionali.

- **Metodi *range based*:** in questo approccio sensori attivi permettono l'acquisizione diretta di dense nuvole di punti sulla superficie dell'oggetto, ed effettuano la ricostruzione accurata di ogni dettaglio. Delle varie tipologie di sensori attivi si è parlato nel Capitolo 3. Questi strumenti, solitamente costosi, sono divenuti uno strumento usuale nella comunità scientifica, ma anche per professionisti non esperti di rilievo come ad esempio gli archeologi. È importante sottolineare però che è tuttora ancora problematico per motivi economici e logistici pensare di poter portare su uno scavo archeologico uno di questi strumenti per acquisire oggetti e reperti; inoltre ognuno di questi sistemi ha caratteristiche specifiche che lo rendono adatto a certi ambienti e a certi materiali, ma inadatto ad altri. Alcuni di questi laser presentano una camera digitale accoppiata allo strumento, in modo da registrare contemporaneamente *texture* e dato metrico, ma questo approccio potrebbe non portare ai migliori risultati poiché la condizione ideale di acquisizione delle prese potrebbe non coincidere con quella del laser; quindi spesso la generazione di un modello 3D foto – realistico è spesso supportata dall'acquisizione di immagini tramite camere ad elevata risoluzione. In genere più scansioni dell'oggetto sono necessarie al fine di riprodurre l'intera geometria senza buchi e zone nascoste, e nonostante la precisione vari da laser a laser, questi sistemi possono incontrare problemi nell'acquisizione degli spigoli.
- **Metodi integrati fra i due sistemi:** la fotogrammetria e il laser a scansione possono essere con successo integrate, soprattutto per la ricostruzione di complessi e grandi edifici, in cui ogni metodo usato singolarmente non permette di ottenere risultati accurati; in questi casi si può usare la fotogrammetria per una ricostruzione generale e il laser per i dettagli architettonici più complicati.

6.1.1 Fasi del processo

Le fasi del processo di modellazione tridimensionale per i metodi visti, sono riassunte nella Figura 6.1.1-1.

Dell'acquisizione del dato metrico e del processamento si è parlato nei capitoli 2 e 3.

Qui ci si soffermerà sulla fase di misurazione dei punti oggetto per quanto riguarda la fotogrammetria (vedi paragrafo 6.3) e sulle fasi successive, in

particolare la fase di passaggio dalla nuvola di punti prodotta dalle immagini o acquisita col laser ad una superficie continua, a cui segue la fase di *texturing*.

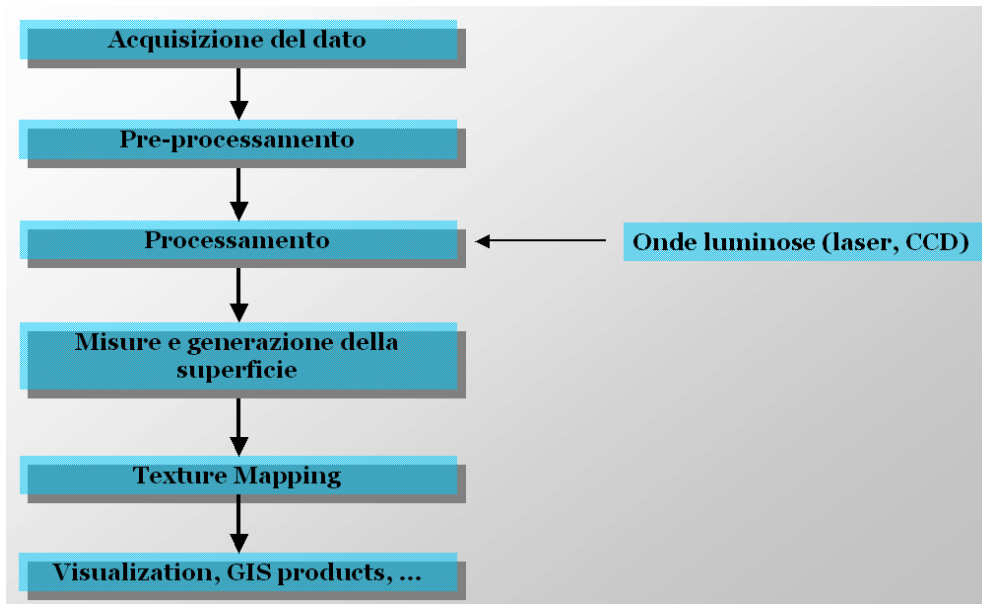


Figura 6.1.1-1 Diagramma di flusso della modellazione 3D.

6.1.2 Generazione della superficie

Quando l'oggetto ha una forma semplice, ricostruibile tramite elementi semplici come superfici piane e cilindriche, si pensi ad esempio alla ricostruzione di edifici nel campo del *city modeling*, pochi punti uniti da poligoni sono sufficienti a rappresentare i risultati delle misurazioni.

Nel campo del rilievo dei Beni Culturali si ha però spesso a che fare con oggetti dalla geometria molto complessa e quindi con dense nuvole di punti, da cui la generazione della superficie è un processo complicato che richiede algoritmi specifici.

Lo scopo della triangolazione fondamentale è trovare la superficie S' che meglio approssima quella reale e sconosciuta S su cui giacciono i punti della nuvola misurati sull'oggetto. Essendo finito il numero di punti conosciuti, è impossibile ricostruire l'esatta S , ma se i punti sono numerosi e la spaziatura sufficiente, è possibile, anche grazie ad altre informazioni sulla superficie come ad esempio le *breaklines*, trovare una superficie S' topologicamente corretta che ben approssima la S reale; la spaziatura deve essere caratterizzata in base all'oggetto, cioè i punti dovrebbero essere più densi nelle zone che presentano altimetria varia e complessa e aree curve, e meno densi nelle aree piane.

Caratterizzare e strutturare correttamente il DEM è quindi un fattore chiave nella ricostruzione tridimensionale, cioè decidere la corretta spaziatura fra i punti, la struttura (TIN o GRID) più adatta, quali elementi devono far parte del

DEM oppure no, sono questioni fondamentali che meriterebbero specifiche standard ben precise a seconde delle applicazioni.

Questo è stato fatto ad esempio per i DEM da cui originare ortofoto¹, ma non per la modellazione tridimensionale, probabilmente perché questo è ancora un ambito di ricerca poco applicato soprattutto in archeologia, per molte ragioni: (i) l'alto costo del 3D; (ii) la difficoltà per i non esperti nella produzione di modelli 3D accurati; (iii) la considerazione che il 3D è ancora un fattore prettamente estetico; (iv) la difficoltà di integrare il 3D con altri dati 2D.

Le fasi classiche della generazione di una superficie da una nuvola di punti sono già stati citate nel capitolo 3 a proposito dell'elaborazione dei dati laser; molti pacchetti commerciali (RapidForm, Geomagic, Polyworks) eseguono queste fasi in modo semi o completamente automatico.

La fase di triangolazione è il cuore di ogni programma di ricostruzione tridimensionale. A partire dai dati di input vengono generati vertici, spigoli, e facce (rappresentanti la superficie analizzata) che si incontrano negli spigoli condivisi. Metodi agli elementi finiti sono utilizzati per discretizzare il dominio delle misure dividendolo in tanti piccoli elementi, tipicamente triangoli o quadrilateri in due dimensioni e tetraedri in tre dimensioni. I vertici dei triangoli possono essere i punti stessi o altri punti extra, detti punti di Steiner, inseriti per creare una *mesh* migliore.

La triangolazione può essere eseguita in 2D o in 3D, in accordo con la geometria dei dati in input:

- Triangolazione 2D: tramite il criterio di Delauney², dal dominio in input,

¹ Nel 2001 il Gruppo di Lavoro DTM e ortofoto istituito dal Comitato Tecnico di Coordinamento sui Sistemi Informativi Geografici dell'Intesa Stato, Regioni, Enti Locali, sotto la direzione del Prof. Otto Kölbl del Politecnico di Losanna, ha redatto un documento sui requisiti e metodi di produzione di modelli digitali del terreno per varie applicazioni, tra cui la produzione di ortofoto. In base a queste considerazioni sono state proposte una serie di specifiche per la caratterizzazione di DTM di differenti livelli di precisione, in relazione alle principali applicazioni:

	Precisione in quota	Distanza di griglia	Breaklines	Applicazioni
“Livello 0”	± 10 m	20 m	Linee di costa	Ortofoto 1:10000, 1:5000 da immagini satellitari
“Livello 1”	± 5 m	20 m	Linee di costa, viadotti, salti del terreno > 4.0 m, strade, ponti...	Ortofoto 1:10000
“Livello 2”	± 2 m	20 m	Linee di costa, viadotti, salti del terreno > 2.0 m, dighe, strade, ponti...	Ortofoto 1:10000, 1:5000
“Livello 3”	± 1 m	10 m	Linee di costa, viadotti, salti del terreno > 0.6 m, dighe, strade, ponti...	Ortofoto 1:5000, 1:2000
“Livello 4”	± 0.3 m	5 m	Linee di costa, viadotti, salti del terreno > 0.3 m, dighe, strade, ponti...	Ortofoto 1:1000, 1:500
“Livello 5”	± 0.15m	5 m	Linee di costa, viadotti, dighe, strade, ponti...	Ortofoto 1:500

² Il criterio di Delauney assicura che non ci siano vertici che giacciono dentro l'area di ognuna delle circonferenze circoscritte ai triangoli della rete.

fatto da punti giacenti su un piano, sono generati vertici e triangoli che si intersecano solo agli spigoli comuni.

- Triangolazione 2.5D: i dati in input sono un set di punti P che giacciono su un piano e ad ognuno dei quali corrisponde uno e un solo valore della quota, cioè per ogni punto p di P di coordinate planimetriche (x, y) esiste una funzione $f(x, y)$ unica che definisce la quota di p ; la triangolazione crea una funzione lineare F che interpola P e definita in modo che per ogni punto p di P , $F(p)$ sia la media pesata delle quote dei vertici del triangolo che contiene p ; in accordo coi dati il modello viene detto TIN o GRID;
- Triangolazione 3D: è chiamata anche tetraedralizzazione, che è una partizione del dominio in input in una collezione di tetraedri che si incontrano solo nelle facce condivise (vertici, spigoli o triangoli).
- Superfici generiche per modelli 3D: i dati in input sono un set di punti in R^3 , ma non sono ristretti a un piano, quindi la funzione quota $f(x, y)$ non è unica; questo tipo di dati è il più complesso per una corretta generazione delle *mesh*.

6.1.3 Applicazione della *texture* e visualizzazione

Dopo la generazione della superficie, il modello può essere visualizzato in modalità *wireframe*, *shaded* o *textured* model. Nel caso di un DEM altri tipi di visualizzazione sono le curve di livello, *shaded maps* o *slope maps*.

Nella comunità fotogrammetrica i primi esperimenti sulla visualizzazione di modelli 3D riguardavano oggetti (ad es. automobili) in modalità *wireframe* e restituzioni architettoniche visualizzate con ortofoto statiche; poi con l'avvento di software e computer più veloci e potenti anche dal punto di vista grafico, si è giunti alle moderne rappresentazioni tridimensionali foto – realistiche.

Con la fase di *texturing*, le immagini a colori sono mappate sopra la superficie geometrica 3D; conoscendo i parametri di orientamento interno ed esterno delle immagini, le corrispondenti coordinate immagine sono calcolate per ogni vertice di un triangolo sulla superficie 3D; quindi i valori di colore RGB all'interno del triangolo proiettato sono attaccati alla faccia dello stesso. Nel caso di *texture* multi – immagine si fa generalmente una media dei valori RGB trovati.

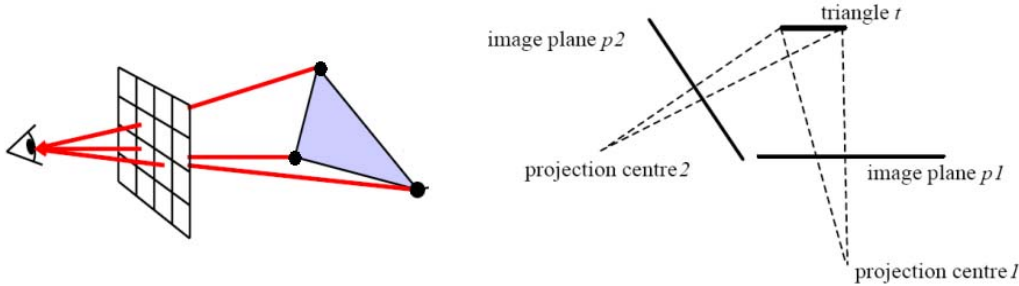


Figura 6.1.3 Schematizzazione del *photo texturing* in un approccio a singola o multi – immagine.

Le problematiche in questo processo possono essere diverse e sono dovute a:

- Distorsioni radiometriche nelle immagini, dovute ad acquisizioni con differenti camere, da differenti posizioni e con differenti condizioni di luce;
- Distorsioni geometriche dovute a scorrette procedure di orientamento;
- Occlusioni dovute ad oggetti fermi o in movimento, alberi, auto, ecc. davanti all'area in esame, da rimuovere in fase di pre – processamento;
- Le immagini digitali possono presentare spesso per le foto degli ambienti interni problemi di basso *range* dinamico, cioè, per veder le zone scure si deve sovrapporre e quindi si saturano le zone illuminate e viceversa per vedere le zone illuminate si deve sottoesporre, rendendo nere le zone non illuminate; la soluzione sono le immagini cosiddette *high dynamic range*, che combinano in una unica immagine le informazioni di radianza di una sequenza di immagini standard.

6.2 La modellazione 3D *image based*

La modellazione 3D *image based* realizza per definizione misure e modelli 3D da immagini.

I moderni software commerciali monoscopici multi – immagini, come ad esempio PhotoModeler o iWitness permettono di eseguire l'orientamento interno ed esterno dei fotogrammi in modalità interattiva o semi – automatica ed eseguono poi la generazione del modello tridimensionale in modalità *wireframe* o *textured* (Figura 6.2-1), tramite la collimazione assistita di un gran numero di punti, linee e superfici geometriche semplici (Figura 6.2-2).

Le stazioni fotogrammetriche digitali con approccio stereoscopico consentono invece la generazione automatica di modelli digitali delle superfici tramite algoritmi di *image matching* (vedi paragrafi seguenti), dopo le fasi di orientamento; un processo di *post – editing* dell'operatore è sempre richiesto, per eliminare gli errori dovuti ad un *matching* errato; la fase di modellazione e texturizzazione deve però essere eseguita con software dedicati.

Software commerciali specificatamente studiati per la modellazione tridimensionale di oggetti complessi da immagini non esistono, soprattutto in ambito terrestre; questo ha spinto alcuni gruppi di ricerca a creare algoritmi sviluppati ad hoc per questo scopo, che utilizzano combinandoli insieme in modo opportuno e studiato, i metodi di *matching* descritti di seguito [Grün et al, 2001; Grün et al, 2004].

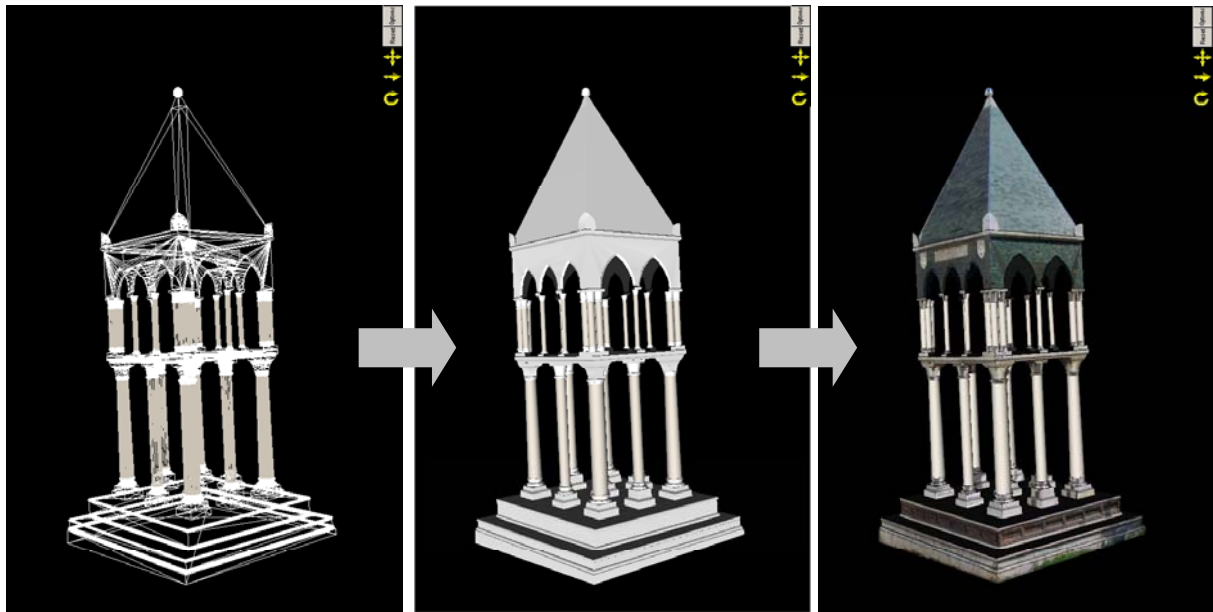


Figura 6.2-1 Modello *wireframe*, *shaded map* e *photo – textured* della tomba di Rolandino dei Passaggieri.

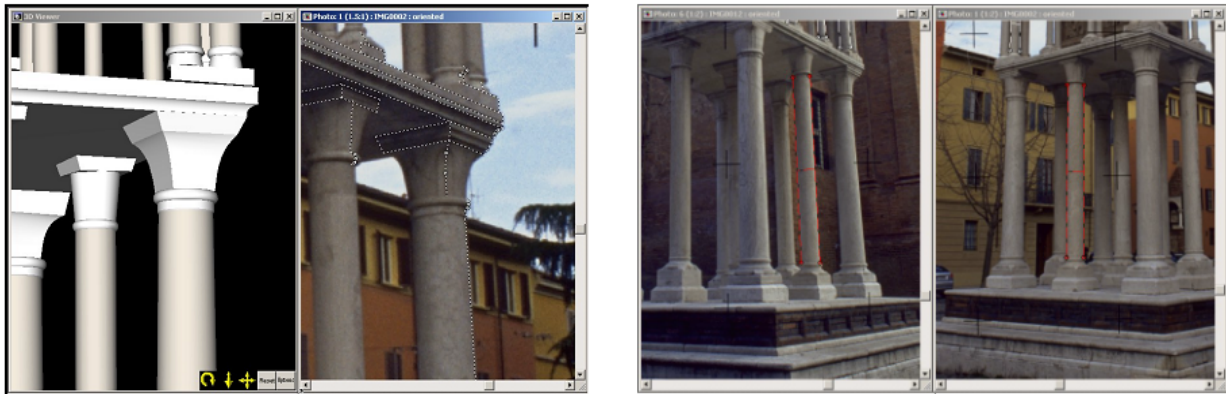


Figura 6.2-2 Modellazione di elementi architettonici semplificati.

6.3 La correlazione di immagini

Uno dei processi fondamentali della fotogrammetria è l'identificazione e la misura di punti coniugati in due o più fotogrammi sovrapposti. La stereofotogrammetria dipende interamente da punti coniugati. Nella fotogrammetria analogica ed analitica l'identificazione di punti coniugati viene effettuata da un operatore; nella fotogrammetria digitale si tenta di risolvere il problema

automaticamente, con il processo conosciuto come *image-matching*.

Dal punto di vista storico questo processo nasce negli anni cinquanta con i primi esperimenti in campo analogico, con l'introduzione di correlatori che mettevano a confronto i livelli di grigio di due immagini. La prima vera presentazione di questi strumenti avvenne però solo nel 1968, quando Wild Heerbrugg, leader nel settore dell'equipaggiamento fotogrammetrico, introdusse un correlatore in occasione di un importante congresso; lo strumento non ebbe però grande successo, sia per la sua scarsa flessibilità ed affidabilità, sia perché la comunità scientifica era sostanzialmente piuttosto scettica nei confronti di questo nuovo concetto.

Tuttavia la ricerca proseguì negli anni seguenti: Kreiling (1976) fu il primo vero pioniere ad applicare la correlazione di immagini digitali allo scopo di generare DEMs ed ortofoto. Ulteriori sforzi continuarono per aggiungere tecniche di correlazione agli strumenti, come ad esempio Helava (1978) e Hobrough (1978).

Nonostante gli sforzi considerevoli, non furono trovate soluzioni generali fino a tempi recentissimi (primi anni ottanta), soprattutto per il fatto che la visione umana trova facilmente punti coniugati, senza la correlazione dei livelli di grigio delle immagini, e senza difficoltà coscienti; il problema fondamentale per gli scienziati era quindi quello di sottostimare la questione.

6.3.1 Terminologia e definizioni

Il processo del *image-matching* è talvolta chiamato anche *automatic stereo matching* o semplicemente correlazione.

Altri termini chiave sono:

- entità coniugate: è un termine più generale di punti coniugati, e comprende anche linee ed aree;
- entità di *matching*: è l'oggetto che viene messo a confronto nelle due immagini per trovare entità coniugate; possono essere livelli di grigio, rappresentazioni estratte e descrizioni simboliche;
- misura di similarità: è la misura quantitativa di quanto bene le entità di *matching* si corrispondono le une alle altre. Generalmente il grado di similarità si misura con una funzione, che nelle sue forme più semplici è il coefficiente di autocorrelazione o la deviazione standard nel *matching* ai minimi quadrati;
- metodo di *matching*: esegue la misura di similarità delle entità di *matching*. Le varie metodologie prendono il nome delle entità considerate, così si hanno il *area based matching*, il *feature-based matching* ed il *relational*

(*symbolic*) *matching*;

- strategia di *matching*: si riferisce al concetto globale della soluzione del problema del *image-matching*: comprende l'analisi dell'ambiente di *matching*, la selezione del metodo scelto ed il controllo della qualità del processo.

La Tabella 6.3.1-1 mostra le relazioni fra questi termini. La prima colonna mostra i tre fondamentali metodi di *matching*. Il *area-based matching* è associato al *matching* dei livelli di grigio, cioè viene messa a confronto la distribuzione dei livelli di grigio di piccole aree delle due immagini, dette *image patches*, e la similarità è misurata con una semplice correlazione o con la tecnica ai minimi quadrati. Nel primo caso il metodo è chiamato anche correlazione, nel secondo metodo *least-squares*.

Il *area – based matching* è abbastanza popolare in fotogrammetria. Gli altri due metodi sono il *feature – based matching*, in cui si selezionano nelle immagini degli elementi caratteristici (punti, linee, spigoli) e se ne cercano i corrispondenti nelle altre ed il *relational matching*, in cui si costruiscono strutture, cioè collezioni di elementi semplici tra loro connessi, e sulla base del tipo di relazioni (spaziale, topologica, radiometrica, ecc.) fra di essi , si cercano le corrispondenze.

Metodo di <i>matching</i>	Misura di similarità	Entità di <i>matching</i>
area-based	correlazione, minimi quadrati	livelli di grigio
feature-based	funzione	margini, regioni
symbolic	funzione	descrizione simbolica

Tabella 6.3.1-1 Relazioni tra i metodi di *matching* e le relative entità.

6.3.2 Problemi fondamentali del *image matching*

I passi fondamentali del processo di *image matching* possono essere descritti come i seguenti:

- Selezionare un'entità di *matching* in una delle immagini;
- Trovare l'entità corrispondente nell'altra immagine;
- Elaborare la posizione in 3D dell'entità nello spazio oggetto tramite le equazioni di collinearità;
- Valutare la qualità del *matching* effettuato.

Ovviamente il secondo passo è il più difficile da risolvere, ma anche gli altri sollevano importanti ed interessanti questioni: in quale delle due immagini di una stereo – coppia, ad esempio, si dovrebbe selezionare l'entità? Qual è l'entità

migliore da selezionare e come deve essere determinata?

I due fondamentali problemi che si possono incontrare nel processo di *matching* sono la complessità di calcolo e l'ambiguità.

Il primo problema si verifica quando la misura di similarità tra le entità di *matching* viene calcolata sull'intero modello; il secondo quando l'entità scelta non è caratteristica (unica) sufficientemente.

Ipotizziamo di avere a che fare con una coppia stereoscopica di immagini con un ricoprimento longitudinale del 60% e aventi una risoluzione di $7 \mu\text{m}$; scegliamo nella prima immagine il pixel localizzato nella posizione i_p e j_p e caratterizzato da un livello di grigio g_p ; la ricerca del pixel coniugato nella seconda immagine prevede un numero di operazioni pari a $\approx 6.4 \cdot 10^8$. Se inoltre nell'immagine ogni livello di grigio è presente con la stessa frequenza, allora si avrà un numero di *match* pari a $2.5 \cdot 10^6$; aggiungendo un livello di rumore di ± 5 livelli di grigio, si avranno alla fine 10^7 soluzioni potenziali delle quali però solo una è corretta.

La prima mossa da fare per risolvere il primo di questi problemi è restringere lo spazio di ricerca; la funzione di similarità, che si vuole rendere massima, ha un andamento non-monotono, e per assicurare una convergenza senza troppe iterazioni, è necessario che la ricerca sia limitata ad uno spazio ristretto (pochi pixels) intorno alla vera posizione coniugata; solo partendo da un piccolo spazio di ricerca è possibile assicurarsi una buona approssimazione.

Un altro metodo per ridurre lo spazio immagine è imporre dei vincoli di tipo geometrico; un esempio tipico, che verrà trattato più approfonditamente nei paragrafi seguenti, è il fatto che il centro di proiezione, i punti coniugati ed il corrispondente punto oggetto, giacciono tutti su uno stesso piano, il piano epipolare.

In definitiva il problema è duplice:

- ottenere una buona approssimazione;
- trovare un buon bilanciamento tra i vincoli imposti e la generalità della soluzione.

Nel caso teorico ideale illustrato nella figura 6.3.2-1, i due *patches* centrati nella loro vera posizione coniugata sono identici; nella realtà ciò non accade a causa di rumori, cambiamenti di illuminazione e proprietà di riflessione delle immagini, che provocano differenze nei livelli di grigio. Ci sono inoltre da considerare le distorsioni geometriche dovute a differenze di scala ed a rotazioni angolari fra le due immagini, agli effetti di superfici ruotate o in rilievo.

Nel caso ideale si prende in considerazione una stereocoppia e i *patches* delle due immagini, ognuno di 5×5 pixels, centrati nelle loro posizioni coniugate; se le due immagini e l'area fotografata corrispondente al *patch*

considerato sono paralleli alla base di presa, allora ogni coppia di pixel coniugati corrisponde allo stesso punto nello spazio oggetto. Qualunque allontanamento da questa condizione ideale provoca distorsione geometrica.

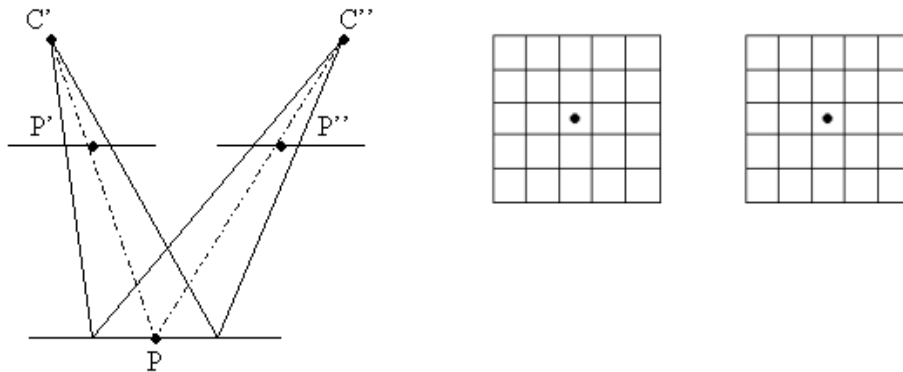


Figura 6.3.2-1 *Patches* corrispondenti identici nel caso ideale.

Nel caso di immagini a scale diverse in seguito a differenti distanze di acquisizione o nel caso di immagini ruotate, ci si discosta da questa condizione ideale ed il risultato è che lo stesso pixel nei due *patches* si riferisce a differenti posizioni nello spazio oggetto.

Nelle due figure seguenti si mette in evidenza questo fenomeno, mostrando la proiezione dei due *patches* coniugati sulla superficie oggetto; si noti dove il pixel dell'angolo in alto a sinistra viene a trovarsi nello spazio oggetto.

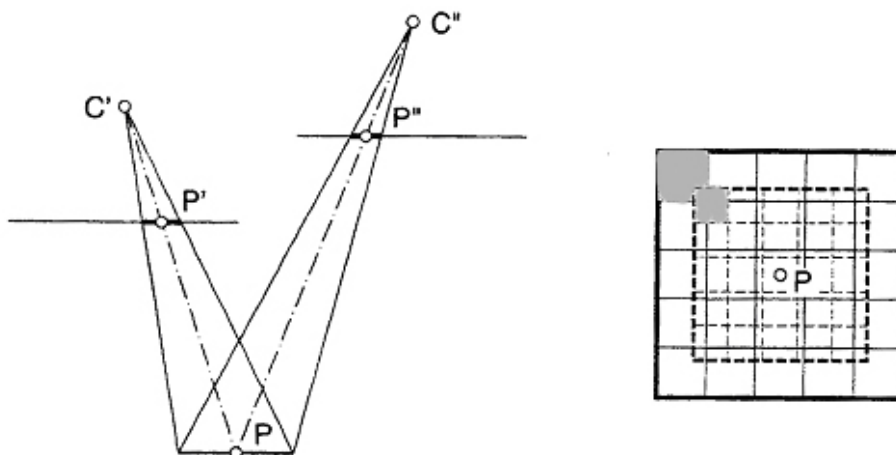


Figura 6.3.2-2 Proiezione sulla superficie oggetto dei *patches* coniugati di una stereocoppia con differenti scale immagine.

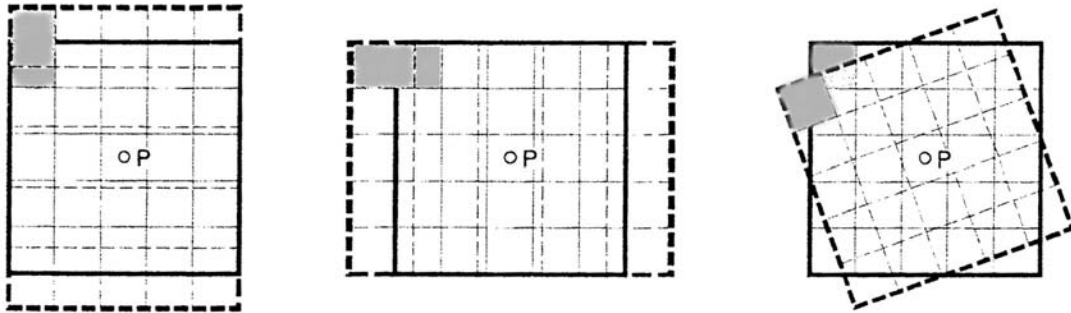


Figura 6.3.2-3 Effetto della rotazione (intorno agli assi x, y e z rispettivamente) fra due immagini di una stereocoppia.

Nella realtà la superficie che si fotografa non è piana, ma presenta differenti elevazioni. Come nei casi precedenti i *patches* immagine vengono proiettati sopra la superficie oggetto nella loro posizione coniugata. Come si vede dalla figura 6.3.2-4 i pixel evidenziati non sono coniugati anche nel caso di una stereocoppia perfettamente radicale; i pixel che sarebbero coniugati, coprono aree differenti nello spazio oggetto, quindi non sono coniugati.

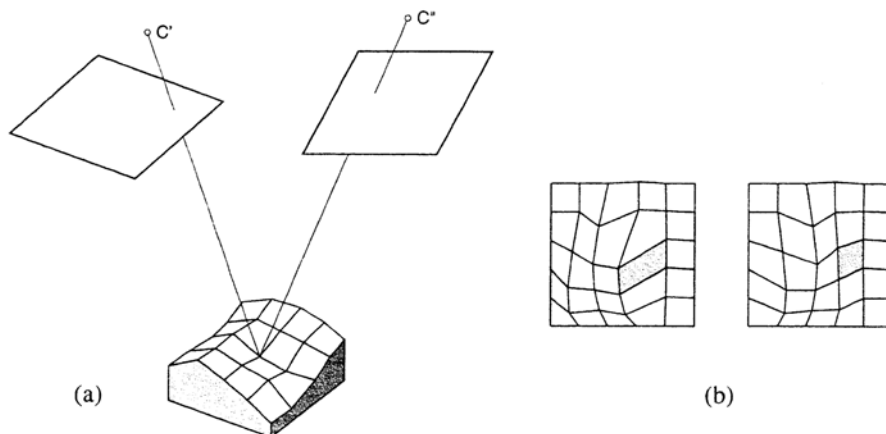


Figura 6.3.2-4 – Effetto del rilievo sulla misura di similarità in un *area-based matching*.

6.3.2.1 Soluzioni al problema fondamentale di riduzione dello spazio di ricerca

Come è stato già sottolineato nei paragrafi precedenti, per assicurare una buona approssimazione al processo di *matching*, è fondamentale, soprattutto nel *area-based*, ridurre lo spazio immagine di ricerca.

Per potere fare questo si possono utilizzare diverse tecniche; le tre più utilizzate sono la linea epipolare, il *vertical line locus* e l'approccio gerarchico.

- Il piano epipolare è definito dai due centri di proiezione C' e C'' e dal punto oggetto P . Le linee epipolari e' e e'' sono le intersezioni del piano epipolare

con le immagini. Il piano epipolare contiene i punti coniugati, che devono giacere sulle corrispondenti linee epipolari. Spesso è conveniente trasformare le immagini in modo che la linea epipolare diventi parallela ai bordi delle immagini digitali. Queste immagini sono dette in assetto normale o normalizzate, ed hanno un ruolo importante nella fotogrammetria digitale, poiché esse riproducono le stesse condizioni geometriche, relative ad elementi omologhi delle due immagini, che ritroviamo nella visione umana. Il principio su cui si basa la visione computerizzata coincide pertanto con quello della visione umana. Le due immagini normalizzate contengono solo parallassi orizzontali e non quelle verticali. Pertanto il procedimento di correlazione può essere limitato ad una dimensione, poiché si dà per scontato che i punti omologhi abbiano la stessa ordinata immagine. La figura 6.3.2.1-1 illustra il concetto.

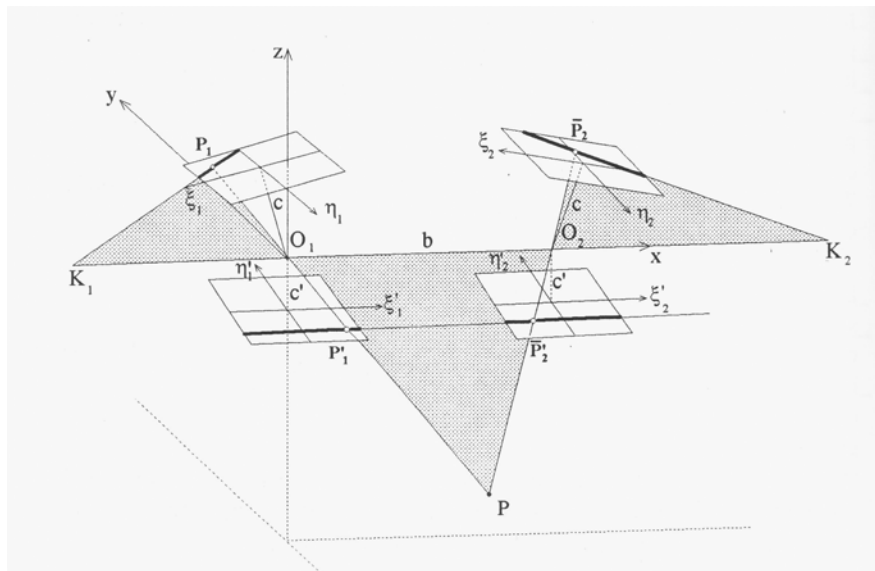


Figura 6.3.2.1-1 Immagini originali e normalizzate, con i punti epipolari e i raggi epipolari.

- Il *vertical line locus* è un altro metodo per introdurre vincoli di tipo geometrico allo scopo di ridurre lo spazio di ricerca. Una volta stimata la quota del punto oggetto P viene stabilito un intervallo di incertezza in quota all'interno del quale si trovi tale punto (vedi Figura 6.3.2.1-2). I segmenti $L'U'$ e $L''U''$ di proiezione della linea verticale LU sulle due immagini definiscono i vincoli all'interno dei quali deve essere condotta la ricerca delle entità coniugate.

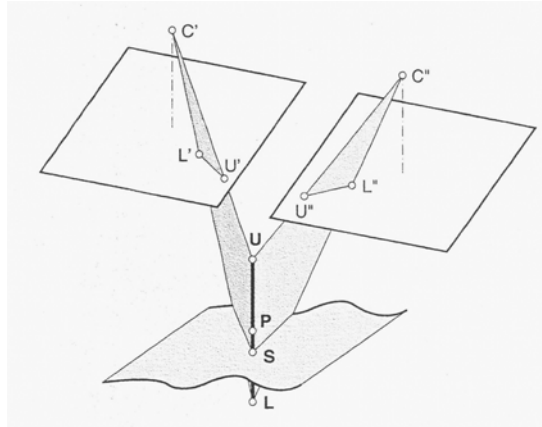


Figura 6.3.2.1-2 Concetto del *vertical line locus*.

- L'approccio gerarchico serve a ridurre ulteriormente lo spazio di ricerca dopo l'utilizzo delle due tecniche sopradescritte; ciò che si fa è fondamentalmente ingrandire le dimensioni del pixel, cioè il *matching* parte da un'immagine di non elevata risoluzione e successivamente si proietta il risultato sull'immagine a risoluzione più elevata e così via fino alla risoluzione originale. Il processo di *matching* deve essere ripetuto su ogni livello per ridefinire la posizione coniugata. I punti trovati con il *matching* vengono usati sul livello successivo come centro della finestra di ricerca. L'intero processo è realizzato al meglio tramite la generazione di un'immagine piramidale, come illustrato nella figura 6.3.2.1-3.

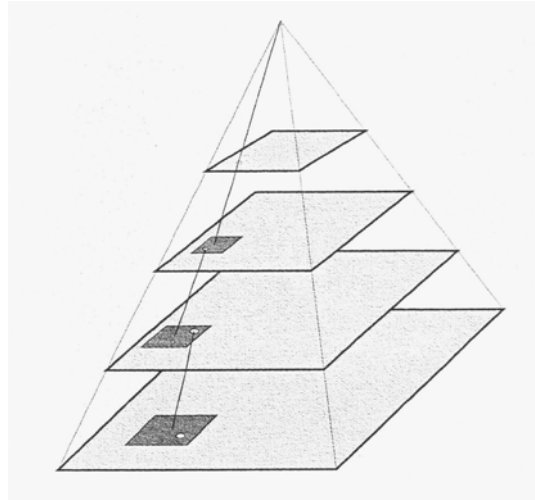


Figura 6.3.2.1-3 Percorso del *matching* nei livelli piramidali di un'immagine.

6.3.2.2 Soluzioni del problema dell'unicità dell'entità di *matching*

Se i livelli di grigio sono utilizzati come entità di *matching*, allora l'unicità dei *patches* immagine aumenta con la sua grandezza; sfortunatamente aumentano di pari passo le distorsioni geometriche. Il vero problema è quindi

trovare un compromesso tra questi due fattori in conflitto.

Per misurare l'unicità di un'entità di *matching* si usano diversi metodi:

- la varianza dà una misura di quanto differenti siano i livelli di grigio nelle due immagini: una piccola varianza indica un'immagine omogenea, piuttosto piatta, mentre una grande varianza segnala una distribuzione di livelli di grigio su di un ampio intervallo;
- l'autocorrelazione stabilisce una misura di auto-comparazione fra i due *patches*: un alto fattore di autocorrelazione indica *patterns* ripetitivi all'interno dell'area considerata, cioè una scarsa unicità;
- l'entropia misura il rumore dell'immagine: un'elevata entropia, ad esempio 8 per un'immagine a $2^8 = 256$ livelli di grigio, indica un elevato grado di rumore.

È importante notare che l'unicità dell'entità dipende dalla sua locazione nell'immagine, e quindi dovrebbe essere determinata per ogni nuova posizione.

6.3.3 Area – based matching

Questo metodo viene detto anche *signal based*, in quanto in esso vengono confrontati direttamente i *gray values* di zone omologhe delle immagini, tenendone una fissa e muovendo l'altra, fino a trovare il miglior accordo in base ad un dato criterio (cross – correlazione, *least square matching*).

Le entità nel *area – based matching* sono i livelli di grigio; il *matching* avviene mettendo a confronto i livelli di grigio di una piccola area della prima immagine, il cosiddetto *patch*, con la sua controparte nell'altra immagine della stereocoppia. Si veda la figura 6.3.3-1; il *template* è il *patch* immagine, che di solito resta in una posizione fissa in una delle immagini; la *search window* è lo spazio di ricerca all'interno del quale i livelli di grigio vengono comparati per trovare il *patch* coniugato.

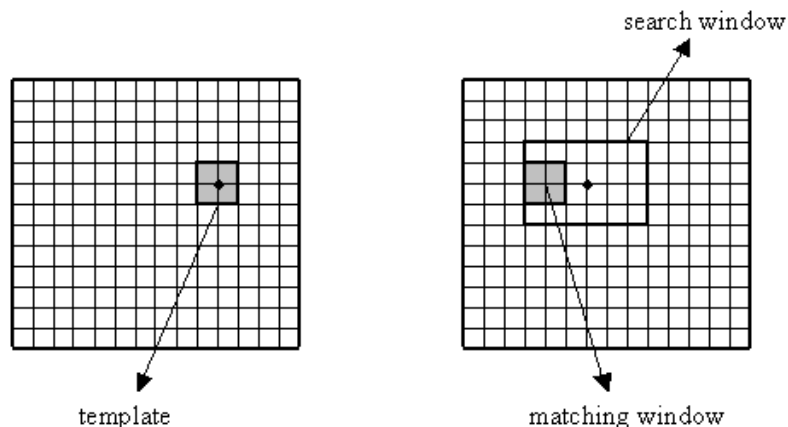


Figura 6.3.3-1 L'area – based matching.

Le questioni più importanti da affrontare al di là della scelta del metodo di misura di similarità sono:

- Posizionamento del *template*: questo parametro può influenzare in maniera importante la riuscita del *matching*; in particolare ci sono condizioni che possono causarne il fallimento, ad esempio posizionare il *template* in un'area che non è visibile nell'altra immagine o in un'area con un pattern ripetitivo.
- Dimensione del *template*: come è stato già sottolineato, aumentandone la dimensione, aumenta l'unicità dei livelli di grigio, ma, dall'altra parte aumentano le distorsioni geometriche; per trovare un buon compromesso fra questi due fattori si potrebbe per esempio calcolare una misura di unicità diversa per ogni dimensione del *template*.
- Posizionamento e dimensione della finestra di ricerca: di questi due parametri, quello veramente cruciale ai fini di una buona approssimazione nel *matching*, è il primo, anche perché tale necessità pone un limite solo alla dimensione di poche pixel; come è stato già sottolineato, una strategia di *matching* ad approccio gerarchico assicura una buona approssimazione.
- Criteri di accettabilità: il risultato ottenuto tramite la misura di similarità fra il *template* e la finestra di ricerca deve essere analizzato; quindi è fondamentale determinare dei criteri di accettabilità, che in generale potranno essere diversi anche per diverse parti di una stessa immagine.
- Controllo della qualità: esso comprende una dichiarazione riguardo l'accuratezza e l'attendibilità delle posizioni coniugate; la consistenza della soluzione trovata deve ovviamente essere confrontata con tutte le informazioni e conoscenze che si hanno dello spazio oggetto.

L'idea di base è quella di misurare la similarità fra il *template* e la finestra di *matching* tramite il valore assunto dal coefficiente di correlazione.

Il coefficiente di correlazione ρ è definito come:

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R} \quad (1)$$

dove:

σ_L è la deviazione standard della funzione densità $g_L(x, y)$ del *patch* immagine L (*template*);

σ_R è la deviazione standard della funzione densità $g_R(x, y)$ del *patch* immagine R (*matching window*);

σ_{LR} è la covarianza fra le due densità stesse;

\bar{g}_L, \bar{g}_R sono le medie delle funzioni densità $g_L(x, y)$ e $g_R(x, y)$ e valgono:

$$\bar{g}_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_L(x_i, y_j)}{n \cdot m}$$

$$\bar{g}_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_R(x_i, y_j)}{n \cdot m}$$

Per le altre grandezze si ha:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_L(x_i, y_j) - \bar{g}_L)^2}{n \cdot m - 1}}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)^2}{n \cdot m - 1}}$$

$$\sigma_{LR} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_L(x_i, y_j) - \bar{g}_L)(g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R))}{n \cdot m - 1}$$

Il coefficiente di correlazione (1) viene determinato per ogni posizione riga r , colonna c della finestra di *matching* all'interno della finestra di ricerca; il problema seguente è determinare la posizione u, v che lo rende massimo.

Il fattore di auto-correlazione, se normalizzato, può assumere valori nell'intervallo ± 1 . Il valore 1 si ottiene se il *template* e la finestra di correlazione sono identici; se non c'è correlazione tra i due *patches* immagine, allora si ha $\rho = 0$; il valore -1 indica invece una correlazione inversa, che può accadere nel caso si mettano a confronto una diapositiva e un negativo della stessa immagine.

Se la finestra di ricerca è vincolata alla linea epipolare, allora i valori assunti dal fattore di correlazione possono essere graficati, ed inserendo una linea di tendenza, ad esempio una polinomiale, si può determinare il pixel che rende massimo tale fattore, come nella figura seguente.

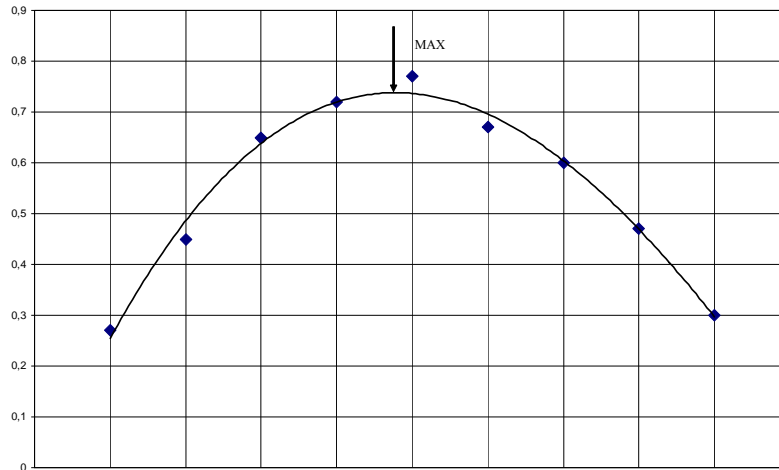


Figura 6.3.3-2 Esempio di un possibile andamento del fattore di auto-correlazione e ricerca del massimo.

In seguito a questa analisi, si assume, come posizione cercata, quella cui corrisponde il massimo valore di ρ .

Questa considerazione solleva il problema della correlazione sub-pixel, descritto nel prossimo paragrafo.

6.3.3.1 La correlazione ai minimi quadrati

Più versatile ed efficiente della semplice correlazione è il cosiddetto *least square matching*, ovvero la correlazione ai minimi quadrati [Grün, 1985].

Il metodo di confronto è analogo al precedente, in quanto anche in questo caso si prendono in considerazione i *gray values* (g. v.) $f(i, j)$ del *template* e si cerca una zona nell'altra immagine i cui g. v. $g(i, j)$ sono simili a quelli della finestra fissa. La differenza sostanziale sta nel modo in cui si misura il grado di somiglianza, cioè tramite la somma dei quadrati delle differenze dei valori radiometrici dei pixel delle due finestre; la posizione ottimale viene determinata imponendo:

$$\sum_i \sum_j (f(i, j) - g(i, j))^2 = \min \quad (2)$$

A differenza del metodo di correlazione basato sul calcolo di ρ come da formula (1), vengono qui inseriti in modo esplicito nella funzione da minimizzare una serie di parametri che permettono di variare forma e contenuto della finestra mobile. I parametri utilizzati esprimono le assunzioni del modello funzionale sulle differenze locali fra le due immagini, legate, come descritto nel paragrafo 6.3.2, alla geometria e alla radiometria.

Per capire la struttura dell'algoritmo si parte dal caso ideale già descritto ed esemplificato in Figura 6.3.2-1.

Indicando con (x_1, y_1) e (x_2, y_2) rispettivamente le coordinate pixel di due punti omologhi nelle due immagini, con $f(x_1, y_1)$ i g. v. della *template* e con $g(x_2, y_2)$ quelli della *patch*, avremo:

$$f(x_1, y_1) = g(x_2, y_2) \quad (3)$$

Se Δx e Δy sono gli spostamenti in x e y della finestra mobile rispetto al punto iniziale, assegnate la posizione dell'origine della finestra fissa (x_{01}, y_{01}) e quella iniziale (x_{02}, y_{02}) della finestra mobile, si vogliono determinare Δx e Δy in modo tale che:

$$f(x_{01} + u, y_{01} + v) = g(x_{02} + \Delta x + u, y_{02} + \Delta y + v) \quad (4)$$

dove u, v sono le coordinate pixel locali di ciascuna finestra.

Le osservazioni sono dunque i valori radiometrici della finestra fissa; la finestra mobile viene spostata, a partire da una posizione approssimata del punto omologo per migliorare l'accordo fra i propri valori radiometrici e quelli della finestra fissa. L'equazione è non lineare nei parametri incogniti, in quanto le variazioni di grigio nelle immagini sono descrivibili come funzioni non lineari di (x, y) : pertanto occorre linearizzate in corrispondenza della posizione approssimata di ciascun pixel omologo $(x_{02} + u, y_{02} + v)$.

$$f(x_{01} + u, y_{01} + v) = g(x_{02} + u, y_{02} + v) + \frac{\partial g}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial \Delta x} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial \Delta y} \Delta y \quad (5)$$

Per questi motivi il procedimento iterativo converge alla soluzione corretta solo quando la posizione iniziale della finestra è prossima di qualche pixel alla soluzione: è ovvio che se la *patch* nella sua posizione iniziale non contiene pixel simili a quelli della *template* non si può avere convergenza; inoltre la convergenza alla soluzione esatta non è garantita, poiché nel corso delle iterazioni, ci si può fermare su minimi locali, cioè in zone radiometricamente simili; ovunque ci sia sufficiente similarità fra le finestre vi può essere la soluzione, che quindi non viene determinata in modo univoco.

Un modello funzionale più realistico include una trasformazione lineare per le differenze di radiometria:

$$f(x_1, y_1) = c_0 + c_1 g(x_2, y_2) \quad (6)$$

e una trasformazione affine per le differenze geometriche :

$$\begin{pmatrix} x_1 + u \\ y_1 + v \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x_{02} + \Delta x \\ y_{02} + \Delta y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (7)$$

da cui:

$$f(x_{01} + u, y_{01} + v) = c_0 + c_1 g(x_{02} + \Delta x + uc_2 + vc_3, y_{02} + \Delta y + uc_4 + vc_5) \quad (8)$$

Linearizzando attorno a valori approssimati :

$$\begin{aligned} c_0 &\approx c_0^0 + dc_0; & c_1 &\approx c_1^0 + dc_1; & c_2 &\approx c_2^0 + dc_2; \\ c_3 &\approx c_3^0 + dc_3; & c_4 &\approx c_4^0 + dc_4; & c_5 &\approx c_5^0 + dc_5 \end{aligned}$$

per ogni coppia di pixel omologhi si ottiene:

$$\begin{aligned} f(x_{01} + u, y_{01} + v) &= c_0^0 + dc_0 + \\ &(c_1^0 + dc_1)g(x_{02} + \Delta x + uc_2^0 + vc_3^0, y_{02} + \Delta y + uc_4^0 + vc_5^0) + \\ &c_1^0 \frac{\partial g}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial \Delta x} \Delta x + c_1^0 \frac{\partial g}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial \Delta y} \Delta y + \\ &c_1^0 \frac{\partial g}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial c_2} dc_2 + c_1^0 \frac{\partial g}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial c_3} dc_3 + c_1^0 \frac{\partial g}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial c_4} dc_4 + c_1^0 \frac{\partial g}{\partial y_2} \frac{\partial y_2}{\partial c_5} dc_5 \end{aligned} \quad (9)$$

Complessivamente si scrivono n^2 equazioni, che vengono risolte ai minimi quadrati; le osservazioni sono considerate di precisione uniforme ed indipendenti fra loro; dopo ogni iterazione la finestra mobile viene traslata, ruotata e variata in scala rispetto alla sua precedente posizione nell'immagine, in accordo coi valori dei parametri c_i calcolati.

Dalla struttura dell'equazione (9) e da quanto detto precedentemente si possono trarre alcune considerazioni:

- Con il *least square matching* si raggiungono precisioni di posizione fino a $1/20 - 1/50$ della dimensione del pixel, molto maggiore del metodo basato sul solo coefficiente di correlazione;
- Il fatto di raffinare il modello introducendo la trasformazione affine (7)

implica che la porzione di oggetto rappresentata nella finestra sia piana; questa è ovviamente un'approssimazione, che però può essere necessaria sia per motivi di onere computazionale sia perché l'utilizzo di altre trasformazioni può generare sovra – parametrizzazione e la presenza di parametri non significativi;

- Se l'immagine ha zone radiometricamente simili, non può essere raggiunta la soluzione in quanto i gradienti dei livelli di grigio sono nulli nella (9); elevate variazioni nella radiometria invece portano ad una stima più precisa delle incognite, quindi può essere talvolta conveniente pre – processare le immagini con filtri che permettano di enfatizzare la tessitura radiometrica delle immagini;
- La dimensioni della finestra condiziona l'esito del *matching*; con finestre grandi il numero di osservazioni è più elevato e di conseguenza le stime della correlazione ai minimi quadrati sono più precise; ma al crescere della finestra diventano meno realistiche le ipotesi alla base del modello, cioè ad esempio che la porzione di oggetto considerata sia piana; una finestra piccola però può non contenere abbastanza informazioni per la convergenza del modello.

6.3.3.2 Multi – foto *least square matching* geometricamente vincolato

La correlazione ai minimi quadrati lavora essenzialmente su coppi di punti quindi:

- Non si sfruttano nel processo di stima altre immagini, per aumentare l'affidabilità;
- Manca ogni interazione con la ricostruzione dell'oggetto.

Il metodo *Multi – Photo Geometrically Constrained Matching* (MGCM) [Baltsavias, 1991] considera contemporaneamente tutte le finestre omologhe in cui è presente un dato punto e compensa congiuntamente le equazione del *matching* e le equazioni di collinearità usate come vincolo: pertanto le coordinate immagine vengono determinate dal *matching* in modo che i relativi raggi proiettanti si incontrino in uno e uno solo medesimo punto oggetto.

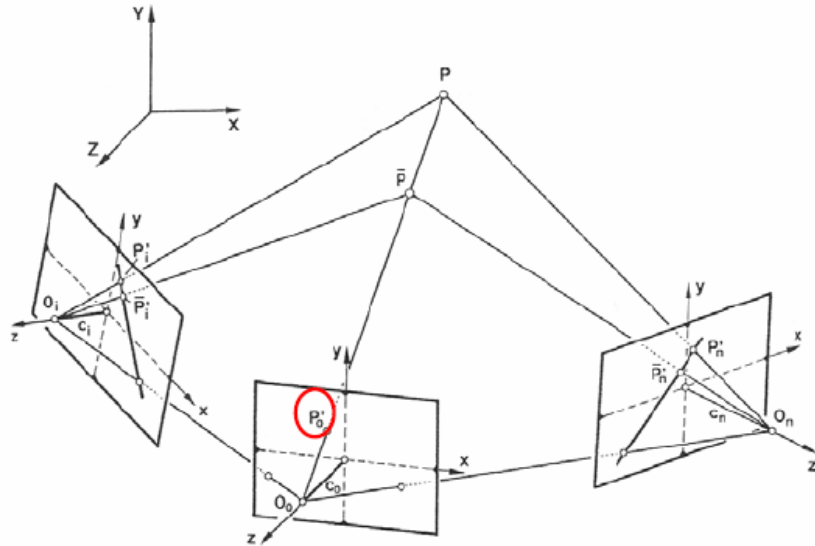


Figura 6.3.3.2-1 Compensazione multi – foto per combinare *image matching* e *point positioning*.

Siano date le coordinate immagine di un punto in uno dei fotogrammi, che assumiamo come *template*; siano poi note le posizioni omologhe approssimate del punto nelle altre immagini.

Consideriamo le equazioni di collinearità relative al punto $P(X, Y, Z)$ osservato nel k -simo fotogramma:

$$x_k = -c \frac{r_1^t (X - X_{0k})}{r_3^t (X - X_{0k})} = -F_k^x \quad (10)$$

$$y_k = -c \frac{r_2^t (X - X_{0k})}{r_3^t (X - X_{0k})} = -F_k^y \quad (11)$$

dove:

- X = vettore delle coordinate incognite del punto oggetto;
- X_{0k} = vettore delle coordinate note del punto di presa del k -simo fotogramma
- R_k = matrice di assetto nota del k -simo fotogramma contenente gli elementi r_i^t
- c = distanza focale

Assumiamo di conoscere dei valori approssimati per le coordinate immagine del punto P nel fotogramma k :

$$\begin{aligned} x_k &= x_k^0 + \delta x_k \\ y_k &= y_k^0 + \delta y_k \end{aligned} \quad (12)$$

dove δx_k e δy_k sono i valori di cui correggere le coordinate immagine.

Supponendo che gli assi delle coordinate pixel siano paralleli a quelli immagine definiti dall'orientamento interno, allora detti p_x e p_y le dimensioni dei pixel in x e y si ha che:

$$\begin{aligned}\delta x_k &= p_x \Delta x_k \\ \delta y_k &= p_y \Delta y_k\end{aligned}\tag{13}$$

da cui, sostituendo in (10) e (11) si ottiene:

$$\begin{aligned}x_k^0 + \delta x_k + F_k^x &= 0 \\ y_k^0 + \delta y_k + F_k^y &= 0\end{aligned}$$

Linearizzando rispetto ai parametri incogniti, ovvero le coordinate terreno dei punti, si ha:

$$\begin{aligned}\delta x_k + \frac{\partial F_k^x}{\partial X} dX + \frac{\partial F_k^x}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_k^x}{\partial Z} dZ + F_k^{x(0)} + x^{(0)} &= 0 \\ \delta y_k + \frac{\partial F_k^y}{\partial X} dX + \frac{\partial F_k^y}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_k^y}{\partial Z} dZ + F_k^{y(0)} + y^{(0)} &= 0\end{aligned}\tag{14}$$

Dato un punto oggetto quindi per ciascun fotogramma in cui esso appare si può scrivere una coppia di equazioni (14). Indicata con B la matrice dei coefficienti e t il vettore termine noto, avremo:

$$e_t = Bx + t; \quad e_t = N[0, \sigma_0^2 Q_{tt}]$$

Assumendo osservazioni indipendenti, si ha:

$$Q_{tt}^{-1} = s^{-2} I$$

dove s^2 definisce il peso dei vincoli, cioè quanto efficacemente viene imposta l'intersezione dei raggi omologhi in $P(X, Y, Z)$. Essendo A la matrice dei coefficienti e l il termine noto delle equazioni radiometriche con matrice dei pesi P , la soluzione è data dalla consueta:

$$\mathbf{x} = \left(\mathbf{A}^t \mathbf{P} \mathbf{A} + \frac{\mathbf{B}^t \mathbf{B}}{s^2} \right)^{-1} \left(\mathbf{A}^t \mathbf{P} \mathbf{l} - \frac{\mathbf{B}^t \mathbf{t}}{s^2} \right)$$

in cui vengono determinate le coordinate di P, oltre ai parametri della trasformazione.

Le osservazioni sul metodo sono:

- Per ciascun punto oggetto osservato in n immagini, si hanno 3 + 6n incognite. Se N² è il numero di pixel della finestra di *matching*, si scrivono (n - 1) × N² equazioni radiometriche e 2n equazioni geometriche.
- L'efficacia dei vincoli di collinearità è legata alla qualità dell'orientamento esterno.
- Il metodo trasforma la ricerca del punto omologo sulle altre immagini da 2D a 1D, limitandolo alla retta epipolare. Proprio per questo tutti i punti immagine relativi al medesimo punto oggetto sono vincolati a muoversi contemporaneamente, ciascuno lungo la propria retta epipolare, mantenendo un punto di intersezione comune sul terreno.
- L'approccio multi - immagine permette di ridurre i *blunders* dovuti a convergenza su minimi locali, in quanto questi dovrebbero presentarsi in più fotogrammi.

6.3.4 Feature – based matching

Con questo metodo si cercano nelle immagini elementi distintivi, di tipo:

- puntuale (spigoli, estremi di linee, punti di massimo del gradiente)
- lineare (rette, segmenti, poligoni chiusi)
- areale (zone omogenee, forme assegnate)

eventualmente raggruppandoli in strutture, cioè collezioni di elementi semplici, caratterizzati da attributi e relazioni, definiti attraverso vari elementi:

- posizione: centro, estremo...
- geometria; orientamento, curvatura...
- radiometria: statistiche dei livelli di grigio...
- tessitura: omogeneità...
- topologia: sopra/sotto, contenuto in, parallelo...

Fondamentalmente la correlazione fra entità, ovvero il riconoscimento di elementi omologhi in due o più immagini, si realizza attraverso i seguenti passi:

- selezione di entità distinte in tutte le immagini (*feature extraction*);

- costruzione di una lista preliminare di coppie corrispondenti, sulla base di misure di similarità fra le entità: in questa lista saranno comprese anche coppie erroneamente ritenute tali;
- elaborazione della lista definitiva delle coppie, selezionate in base alla loro coerenza con un modello dell'oggetto.

Al termine della selezione otteniamo una lista di elementi per ogni immagine esaminata, con elementi presenti anche in più immagini. Si tratta allora di confrontare tutte le possibili coppie, scegliendo solo quelle che raggiungono un grado sufficiente di somiglianza, usando diversi criteri: contenuto radiometrico, grado di unicità di ciascun elemento nella coppia, ecc.

L'ultima fase richiede una descrizione approssimata (modello) dell'oggetto, una misura della compatibilità fra osservazioni e modello ed un algoritmo di calcolo sufficientemente robusto, perché la soluzione non sia deviata dalle osservazioni errate.

La fase di estrazione delle *features*, cioè la scelta delle entità, è fondamentale per la successiva analisi dell'immagine, e viene fatta in base ad opportuni criteri:

- Caratterizzazione rispetto agli oggetti circostanti;
- Invarianza rispetto alle distorsioni geometriche e radiometriche;
- Insensibilità al rumore: poiché l'oggetto deve comparire in più immagini, il *noise* non deve impedirne il riconoscimento;
- Rarità: i punti dovrebbero avere caratteristiche distinte, altrimenti l'affidabilità del riconoscimento è bassa;
- Interpretabilità: il principio di selezione dovrebbe dare indicazioni sul tipo di *feature* selezionata (spigolo, confine fra aree diverse di grigio, elemento circolare, ecc.).

In pratica il *feature-based matching* fornisce un metodo di scelta per ottenere una lista di candidati, cui applicare il *least-squares matching*, che sia possibilmente numerosa e contemporaneamente gestibile (cioè assai meno numerosa del numero di pixel dell'immagine).

Gli elementi puntuali vengono selezionati dai cosiddetti *interest operators* (ad esempio Harris, Förstner, Susan), quelli lineari dagli *edge detectors* (Sobel, Prewitt, Roberts, Laplacian, Hough-transform, Canny Operator).

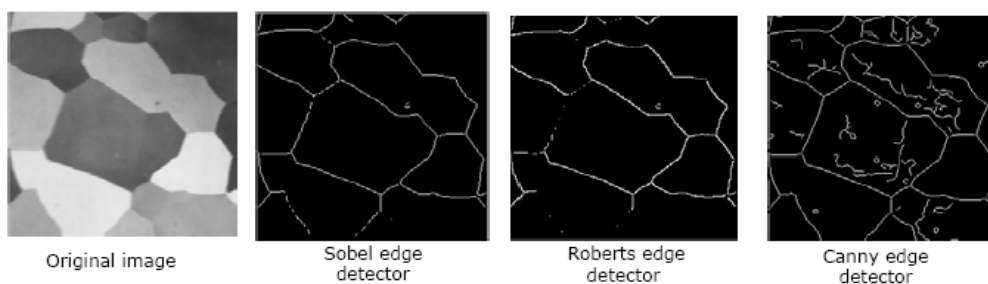


Figura 6.3.4-1 Esempi di individuazione di elementi lineari tramite differenti *edge detectors*.

6.4 Applicazioni di modellazione tridimensionale

Nei prossimi paragrafi sono descritti dei casi reali di modellazione tridimensionale di oggetti nel campo dei Beni Culturali. Questa non vuole essere una semplice casistica, ma si vuole evidenziare che gli esperimenti condotti hanno di volta in volta portato all'evidenza di problematiche che si è cercato di approfondire, spiegare e in qualche modo risolvere in linea con le risorse hardware e software disponibili.

6.4.1 Il DEM del sito di Soknopaïou Nesos

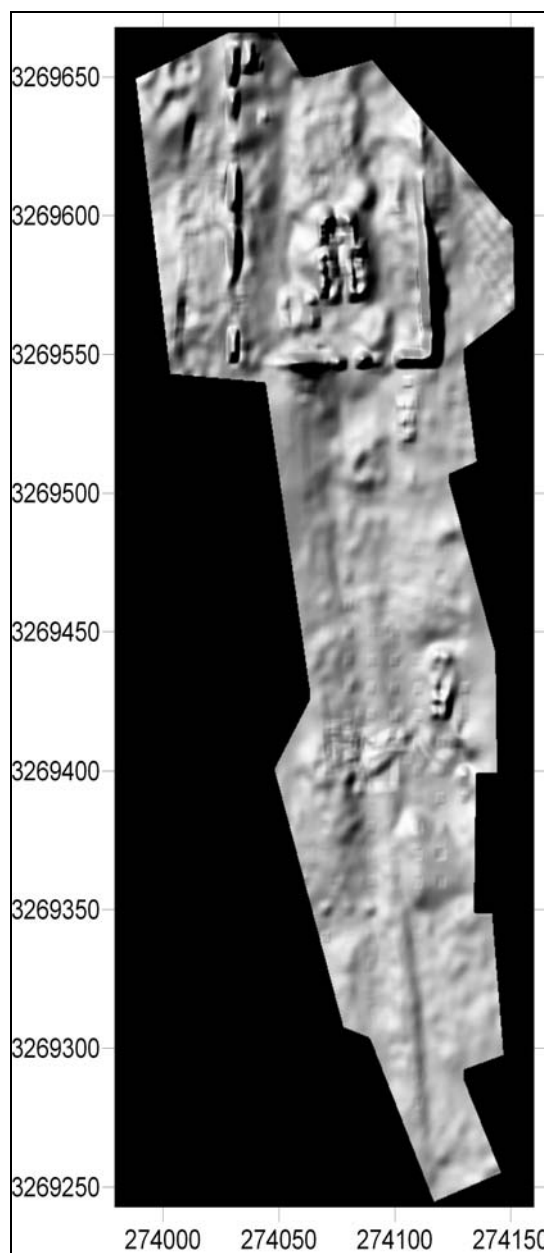


Figura 6.4.1-1 *Shaded map* del DEM di Soknopaïou Nesos.

Dalle immagine da pallone descritte nel capitolo 2, è stato estratto tramite l'algoritmo di *image matching* del Socet Set v5.2.0 un DEM in formato TIN con spaziatura media dei punti di circa 40 cm (Figura 6.4.1-1); i software commerciali, creati per fare produzione e necessitando quindi di tempi computazionalmente bassi, utilizzano solitamente un approccio *area – based least square matching*.

Il DEM estratto in automatico è stato confrontato con un DEM prodotto manualmente al fine di verificare l'efficacia dell'algoritmo.

Un particolare (riguardante l'area del *temenos*) dei risultati del confronto numerico è mostrato in Figura 6.4.1-2; complessivamente si è verificato che l'81% dei punti mostra una differenza dal DEM manuale di circa ± 30 cm, tolleranza fissata in base alla dimensione del pixel delle immagini, alla base di presa e alla scala immagine.

Le zone non in tolleranza corrispondono agli elevati, caratterizzati da brusche variazioni nella quota (i muri a sud del *temenos* raggiungono i 10 m di altezza) e alle zone sabbiose, caratterizzate da eccessiva omogeneità radiometrica; come spiegato riguardo l'*area – base matching*, un basso valore del gradiente radiometrico può impedire la convergenza del *matching* ad una corretta soluzione.

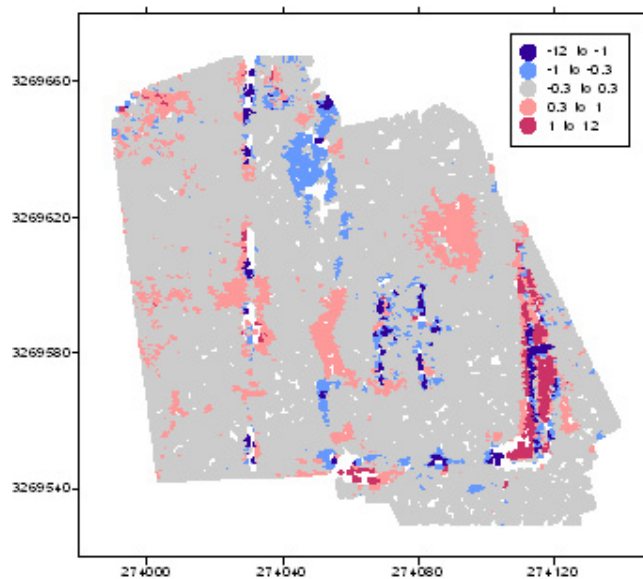


Figura 6.4.1-2 Plot dei residui fra DEM automatico e manuale (automatico – manuale); l'unità di misura è metri.

Al fine di evidenziare la possibilità di ridurre il più possibile l'intervento dell'operatore in fase di *post – editing*, si è valutata in termini di efficacia l'opportunità di usare un *seed* DEM come base di partenza del *matching*; scegliendo quindi una zona test corrispondente ad una zona problematica, un muro a ovest del *temenos*, si sono plottati i residui tra DEM automatico e

manuale in tre casi:

- a) senza *seed* DEM;
- b) partendo da un DTM derivato da un rilievo GPS cinematico (solo dati riferiti al terreno);
- c) partendo da un DEM manuale spaziato 3 m.

I risultati sono riportati in Tabella 6.4.1-3 (unità di misura metri); come si può notare l'utilizzo di un *seed* DEM nei casi b) e c) ha determinato esclusivamente una diminuzione del massimo valore dei residui sia in positivo che in negativo, ma le proprietà statistiche restano sostanzialmente invariate.

Nello specifico caso in esame quindi è in ogni caso necessario un intervento manuale dell'operatore per circa il 20% dei punti estratti.

	a)	b)	c)
Minimum	-1.89	-0.54	-0.94
Maximum	3.04	3.00	2.53
Mean	0.34	0.36	0.33
Standard deviation	0.39	0.37	0.35

Tabella 6.4.1-3 Sommario statistico sui residui fra DEM automatico e manuale nei tre test effettuati.

6.4.2 La modellazione tridimensionale del muro di Tilmen Höyük

Il DEM del sito di Soknopaiu Nesos nasceva sostanzialmente per esigenze di generazione di un'ortofoto corretta dell'area in esame; in particolare nel paragrafo 5.4.2 si è discussa questa tematica.

Se però il DEM è creato allo scopo di generare un vero e proprio modello tridimensionale dell'oggetto, non solo a scopo documentativi, ma che permetta analisi specifiche, le problematiche possono essere diverse; per indagare questo argomento, si è svolta una sperimentazione su un tipico esempio di oggetto archeologico, un piccolo muro del sito di Tilmen Höyük (Figura 6.4.2-1), a scopo sia di documentazione, ma che potrebbe essere interessato anche da analisi di tipo strutturale; questo fine necessita quindi di un modello 3D capace di ricostruire accuratamente la geometria dell'oggetto.

Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito con una camera digitale a medio – basso costo, la Canon EOS 350D da 8 Mpixel, calibrata in laboratorio tramite *Self Calibration* con reticolo piano (vedi paragrafo 4.3.2).

Il modello 3D generato da una nuvola di punti estratta in modalità automatica da un software commerciale di fascia alta, è riportato in Figura 6.4.2-2. La spaziatura media dei punti è 5 mm.

Come si può notare non è stata rappresentata in modo completo e accurato la morfologia dell'oggetto; la superficie appare liscia, senza una ben precisa definizione delle forme, non si avverte l'alternanza di pieni e vuoti che caratterizza il muro, e non è possibile individuare le singole pietre che lo compongono; nonostante un piccolo intervento di *editing* dell'operatore quindi il processo di generazione non è avvenuto con successo.



Figura 6.4.2-1 Il muro sottoposto a sperimentazione.

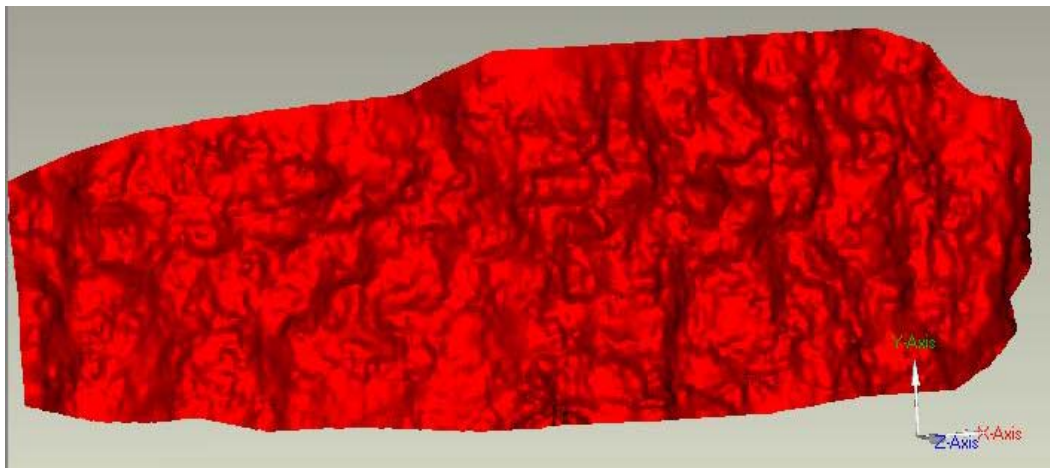


Figura 6.4.2-2 Modello 3D del muro generato da software commerciale.

Per verificare la necessità per questi tipi di applicazione di algoritmi e procedure specifici, si è estratto un DEM con lo stesso formato e la stessa spaziatura tramite un software creato ad hoc dal gruppo di ricerca dell'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria dell'ETH di Zurigo [Remondino & Zhang, 2006].

Il flusso di lavoro seguito dal software è riportato in Figura 6.4.2-3.

Il software è stato creato per l'elaborazione delle immagini satellitari, ma è stato in seguito modificato per supportare anche immagini satellitari e terrestri; esso esegue in modalità automatica il *matching* di immagini terrestri convergenti con approccio *least square* multi – foto geometricamente vincolato [Remondino & Zhang, 2006].

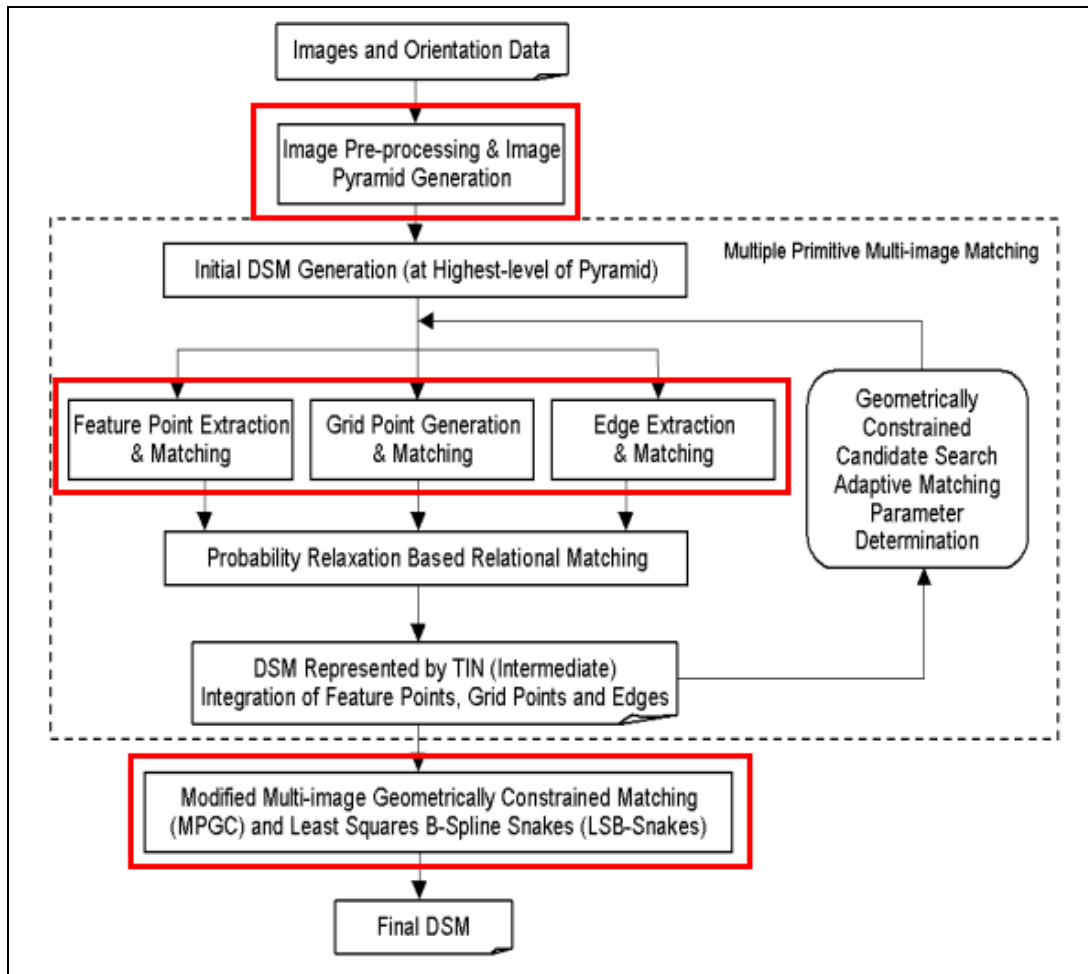


Figura 6.4.2-3 Funzionamento del software del politecnico di Zurigo.

Il software dopo le fasi di orientamento delle immagini, esegue una fase di pre – processamento che genera le immagini piramidali filtrate con il filtro di Wallis [Wallis, 1976]; questo passaggio permette di enfatizzare i contrasti locali della tessitura delle immagini, pur preservandone i dettagli, e di “leggere” meglio nelle zone d’ombra.

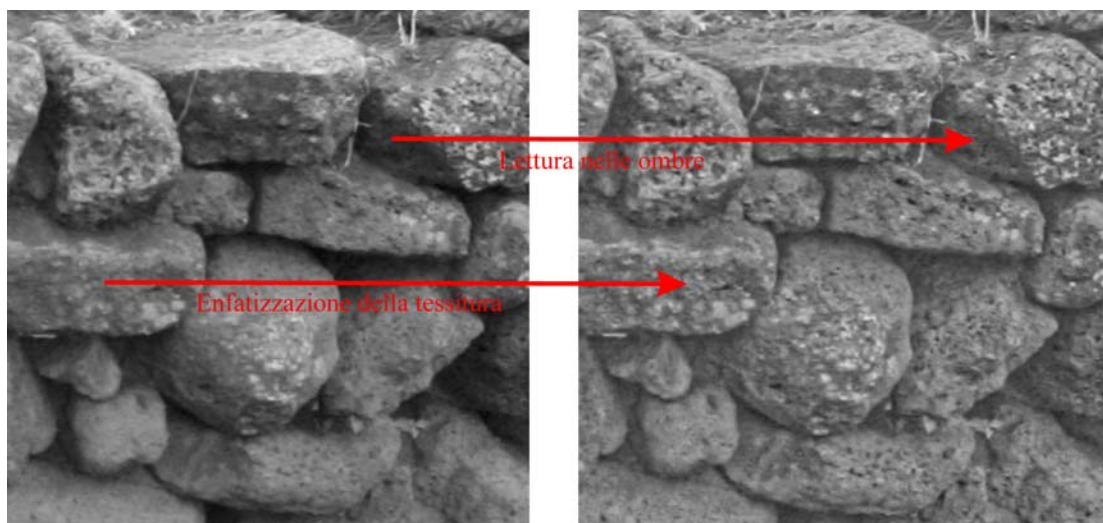


Figura 6.4.2-4 Effetti del filtraggio con filtro di Wallis.

A questo punto viene estratto il DEM; il *matching* avviene in modo simultaneo per tutte le immagini, a differenza di quanto eseguito nei software commerciali, in cui il *matching* avviene per singole stereocoppie e i risultati vengono poi mediati, provocando effetti di *smoothing* della superficie.

Primitive come *features*, punti e spigoli sono estratti utilizzando insieme e a cascata *area based*, *feature based* e *relational based matching*. Inoltre ad ogni livello piramidale è generato un TIN DEM dalle entità estratte e utilizzato per vincolare la ricerca nel livello successivo, come mostrato nel paragrafo 6.3.2.1.

Questo permette di generare un modello della superficie veramente accurato e caratterizzato da un elevato livello di dettaglio.

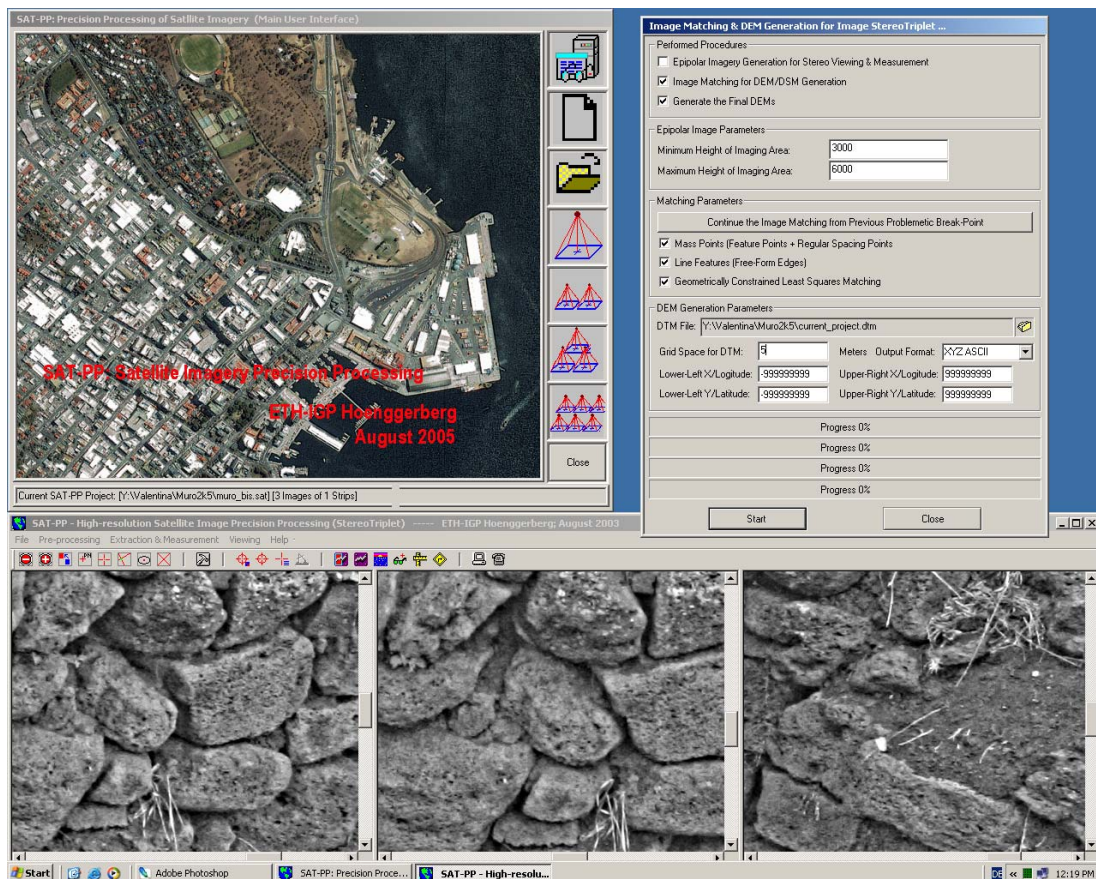


Figura 6.4.2-5 Generazione del DEM.

I punti estratti sono stati 200.000 circa. L'elaborazione della nuvola è stata fatta nel software RapidForm (INUS Technology); sono state generate in particolare circa 450.000 *mesh* nella fase di triangolazione; la Figura seguente mostra il modello 3D ottenuto dopo texturizzazione, eseguita in automatico dal software, che sulla base di punti comuni collimati dall'operatore fra la superficie generata e l'immagine, esegue gli orientamenti e la texturizzazione; nella Figura sono mostrate anche alcune semplici operazioni di misura (distanze e sezioni) che è possibile eseguire immediatamente sull'oggetto.

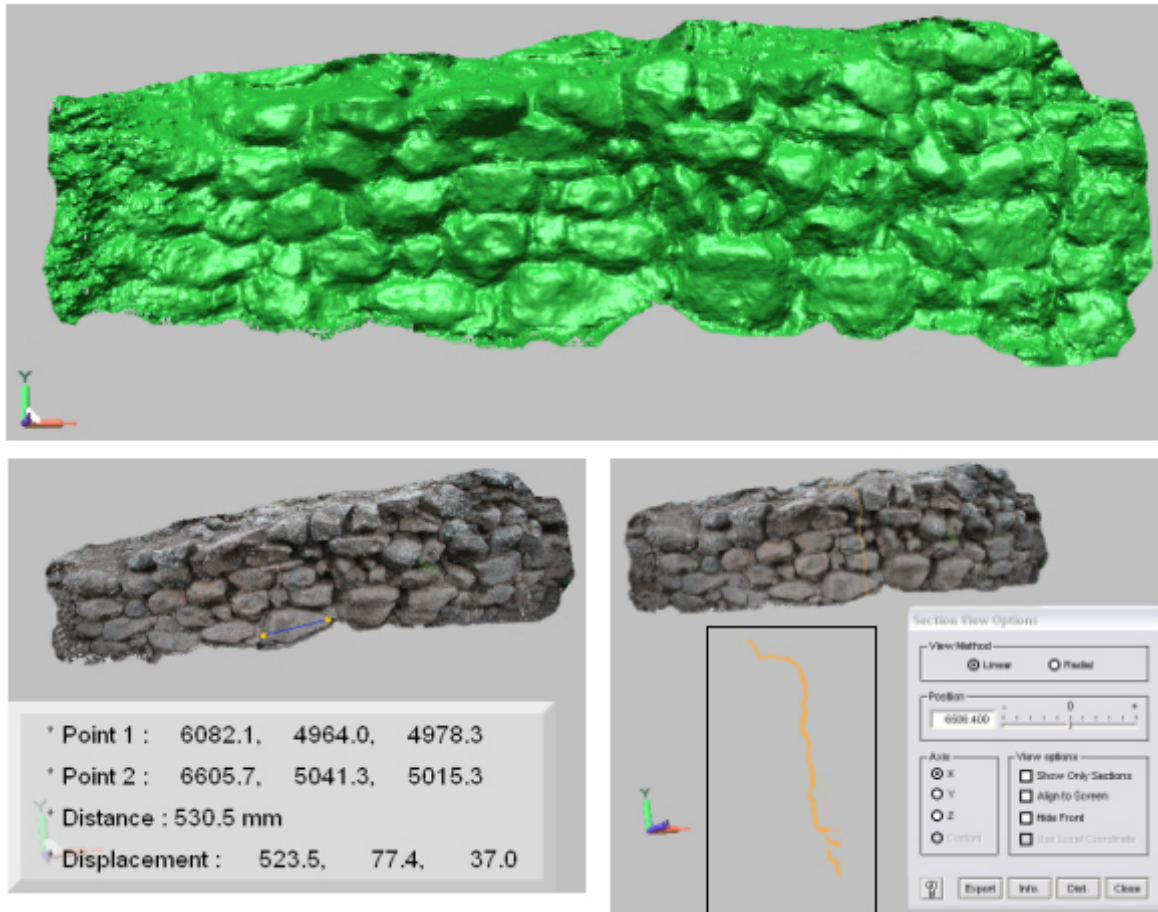


Figura 6.4.2-6 Il modello 3D del muro da software dedicato.

Già dalla semplice visualizzazione è possibile cogliere l'effetto di *smoothing*, cioè di lisciamento della superficie, determinato dall'estrazione del DEM tramite software commerciale. Questo effetto negativo è dovuto essenzialmente al principio a base dell'*area based matching*, che assume che gli elementi omologhi estratti siano piani e, come detto precedentemente, alla mancanza di *matching* multi – fotogramma.

Un nuovo DEM estratto tramite il software commerciale con risoluzione inferiore per valutare la possibilità di ridurre il problema, non ha determinato alcun cambiamento nel risultato ottenuto; in particolare la spaziatura più piccola elaborabile dal software è risultata quella di 3.6 mm, corrispondente a 2 volte la dimensione del pixel al suolo nelle immagini. Il risultato assolutamente identico, indica però che imporre una spaziatura inferiore al DEM non significa necessariamente ridurre la dimensione della finestra di ricerca nel *matching*, ma che semplicemente il software interpola i dati ottenuti, rendendo possibile così l'introduzione di nuovi errori.

Essendo i due DEMs estratti nello stesso riferimento assoluto, è stato anche possibile effettuare un confronto numerico, eseguendo la differenza fra le

componente Z di profondità dei punti. La media delle differenze è risultata di circa 2 mm; se ci si focalizza su un particolare, ad esempio, una singola pietra, si evidenzia l'effetto di *smoothing*; si veda a tale proposito la Figura seguente, che mostra un mappa delle differenze; la zona verde è dove la differenza è nell'ordine dei 3 mm, tolleranza fissata in base alla precisione del rilievo, mentre la zona gialla corrisponde ad una differenza di circa 1 cm, con DEM da software commerciale inferiore: come si può notare il contorno della pietra è stato estratto correttamente, mentre la superficie interna è stata completamente lisciata.

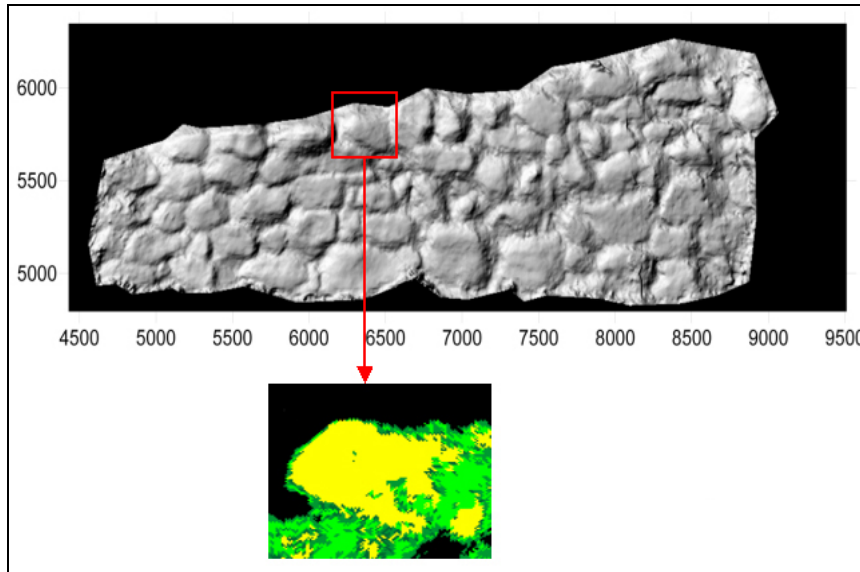


Figura 6.4.2-7 Particolare del confronto fra i due DEMs.

6.4.3 Il modello 3D della Stele di Tilmen Höyük

La Stele ritrovata nel corso della campagna di scavo del 2004 nel sito di Tilmen Höyük, è probabilmente il reperto più importante dell'intero sito; attualmente si trova custodita nel Museo Archeologico di Gaziantep, in Turchia, e dell'originale sono disponibili solo alcune immagini digitali acquisite dagli archeologi della cui calibrazione si è discusso nel paragrafo 4.3.4.

Da queste immagini è stato estratto con il software dell'ETH di cui si è parlato nel paragrafo precedente un modello 3D, non completo ai bordi a causa dell'eccessiva convergenza delle immagini; nonostante questo, il buon risultato ottenuto permette di affermare che, se da un lato è oggi possibile utilizzare camere digitali a basso costo per la produzione di modelli 3D da immagini acquisite anche da personale non esperto, è altresì importante sottolineare che sono indispensabili per raggiungere accuratezza geometrica e affidabilità dei risultati procedure e strumenti software dedicati allo scopo, sia per la fase di calibrazione che per quella di estrazione dei punti della superficie, che permettano di ridurre l'influenza di una cattiva geometria delle prese e della

mancanza di certificato di calibrazione della camera.

Nell'anno 2004 è stato fatto con una resina speciale un calco fedele dell'oggetto, prima della sola parte superiore per mancanza di tempo, poi completato nel 2005.

Dell'intero è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico con camera Canon EOS350D da 8 Mpixel (Figura 6.4.3-1), con focale da 22 mm e fuoco a 1 m, calibrata in laboratorio con procedura di *Bundle Adjustment* con *Self Calibration* tramite reticolo piano (vedi paragrafo 4.3.2).



Figura 6.4.3-1 La stereocoppia del calco della Stele.

I modelli ottenuti sono mostrati in figura 6.4.3-2.

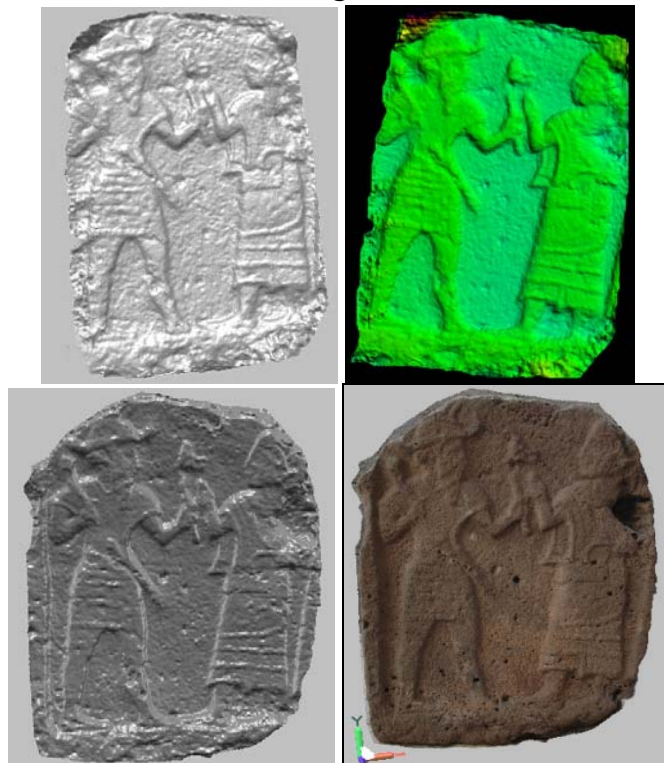


Figura 6.4.3-2 I modelli 3D image – based della Stele:

In alto quello prodotto da immagini amatoriali in modalità shaded (destra) e color shaded (sinistra); in basso quelli dalle immagini del calco in modalità shaded (destra) e foto – textured (sinistra).

Un modello 3D della parte superiore del calco è stato prodotto anche da dati acquisiti da un laser a scansione terrestre.

Come già menzionato, i sensori attivi terrestri sono divenuti comuni e pratici in differenti situazioni di modellazione 3D. Inoltre i moderni software di elaborazione dati consentono di eseguire in modalità automatica molte delle fasi classiche di elaborazione ed in particolare l'allineamento delle scansioni, permettendo di raggiungere un errore finale globale inferiore ai 100 μm .

Il rilievo della metà superiore del calco della Stele (il rilievo dell'intero è in fase di elaborazione) è stato realizzato con un prototipo di *slit* laser ottico a triangolazione. Il sensore BIRIS ha una camera, la Twinline Vitana *range* camera, sviluppata dal gruppo V.I.T. (Visual Information Technology) del Consiglio Nazionale delle Ricerche del Canada, in Ottawa. Il dispositivo permette di misurare l'informazione 3D con una precisione di circa 50 μm per distanze che vanno dai 30 ai 50 cm.



Figura 6.4.3-3 Il sensore BIRIS.

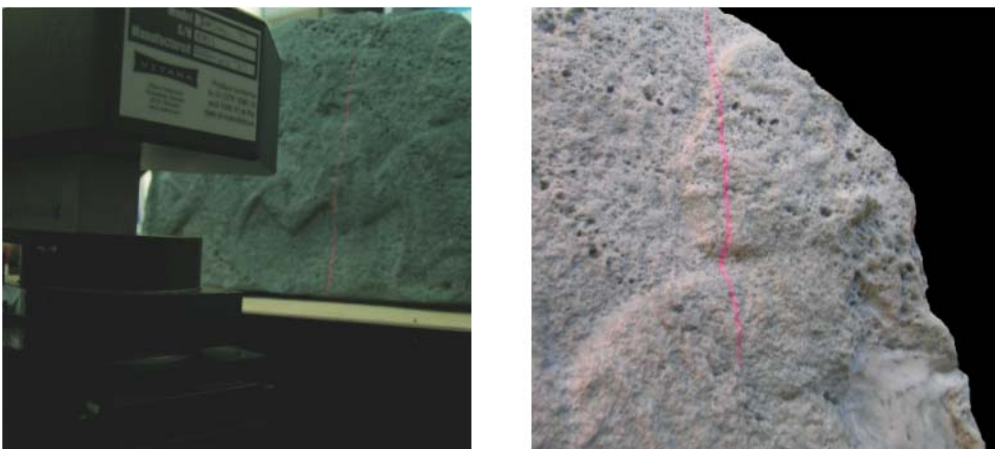


Figura 6.4.3-4 Particolare della fase di scansione.

Per potere ottenere senza buchi ed aree nascoste l'intero modello della Stele

sono state acquisite 25 nuvole da differenti punti di presa intorno all'oggetto, da una distanza di circa 35 cm, settando i parametri del laser in modo da ottenere una spaziatura dei punti di circa 1mm.

L'allineamento delle nuvole è stato eseguito con il software PolyWorks (InnovMetric), applicando l'algoritmo ICP; l'operazione ha portato ad un errore residuo di registrazione di 74 μm .

La nuvola di punti ottenuta, dopo le operazioni di ripulitura, riduzione e filtraggio nelle aree di sovrapposizione, consta di circa 2.000.000 di punti.

Anche in questo caso l'elaborazione della nuvola è stata eseguita con il software RapidForm; la superficie generata, dopo un ulteriore filtraggio necessario per gestire la mole di dati, comprende circa 1.000.000 di *mesh*; il modello finale texturizzato è mostrato nella Figura seguente.

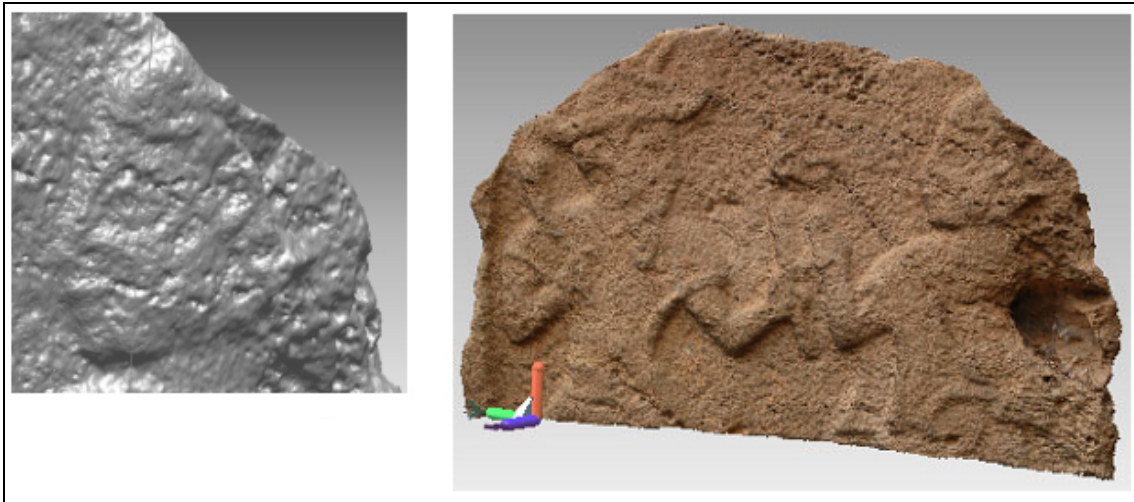


Figura 6.4.3-5 Un particolare dello *shaded* model (sinistra) e il modello finale texturizzato a destra.

Allo scopo di valutare i modelli 3D ottenuti coi diversi approcci, è stata condotta un confronto e un'analisi fra i modelli. In particolare è stato confrontato il modello ottenuto dal laser col modello ottenuto dalle immagini amatoriali, ovviamente considerando assolutamente fedele al reperto il calco.

Già da una prima analisi visuale, appare evidente che il laser è più adatto per la ricostruzione di tutti i piccoli particolari e dettagli dell'oggetto, come per esempio i piccoli buchi caratteristici della superficie (Figura 6.4.3-6). Ma è evidente dai risultati mostrati nella Figura 6.4.3-2, che la modellizzazione tramite metodi fotogrammetrici, se supportata da algoritmi di calibrazione e *matching* sviluppati ad hoc e da alta risoluzione delle immagini, è capace di produrre accurati modelli 3D di oggetti.

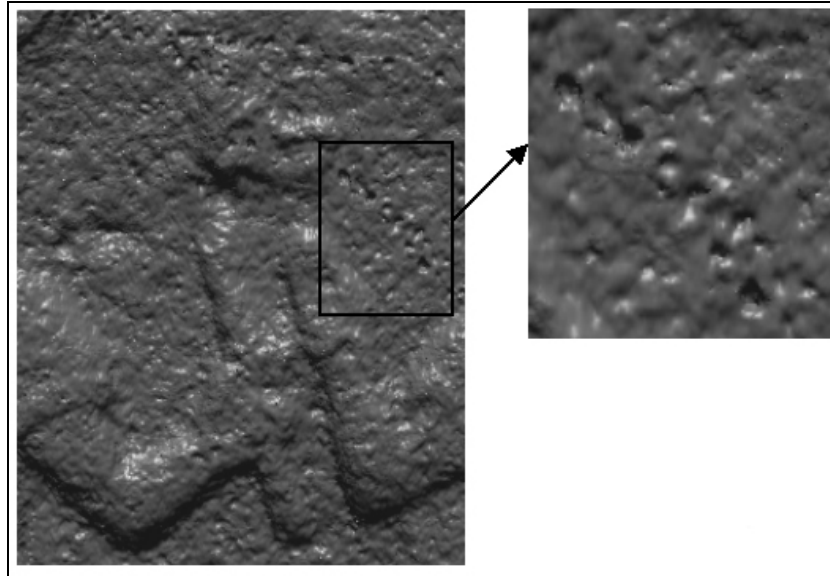


Figura 6.4.3-6 Un particolare del modello 3D da laser con in evidenza piccoli dettagli della superficie.

Per eseguire un confronto quantitativo, considerando il diverso sistema di riferimento dei due modelli, è stato eseguito con il software RapidForm un allineamento globale delle due nuvole, usando lo stesso principio che permette la registrazione di due scansioni. In seguito è stata mappata la differenza nella componente Z fra le due *shells*, mostrata in Figura 6.4.3-7. I residui sono risultati nell'ordine di 1 mm nell'area in comune e considerando che la fotogrammetria ha nel caso in esame una precisione teorica di 0.7 mm, il 70 % dei punti è in un range di accettabilità. I punti con discrepanze elevate giacciono per lo più lungo i bordi.

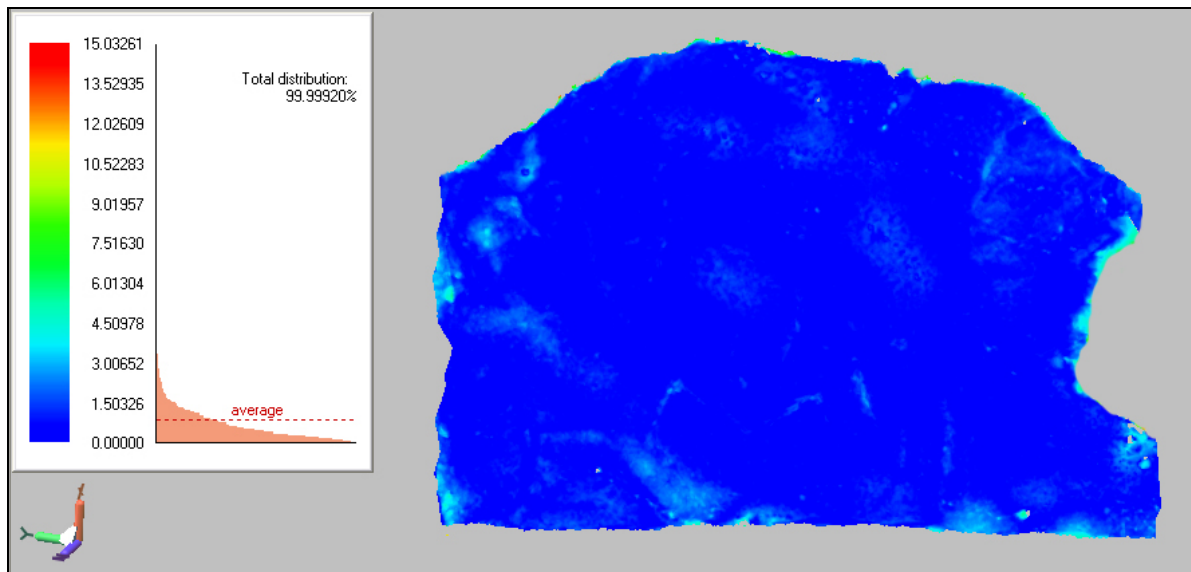


Figura 6.4.3-7 Mappa dei residui (mm) tra laser e fotogrammetria (laser-fotogrammetria).

Gli esperimenti condotti confermano che laser scanner e fotogrammetria sono entrambi approcci validi per questo tipo di applicazioni. È evidente che

l'uso di un laser non è realistico direttamente sugli scavi, sia per questioni logistiche che economiche. In questo senso l'uso della fotogrammetria diventa fondamentale, ma come mostrato nei casi studiati, l'uso di camere non metriche e di geometrie di acquisizione non totalmente adatte, presuppone l'utilizzo di procedure e software specifici, in quanto persino software commerciali di fascia alta possono non riuscire in questi casi ad ottenere prodotti accettabili, soprattutto se lo scopo va oltre la semplice documentazione, ma si spinge fino alla possibilità di studi strutturali e di generazione di repliche degli oggetti in esame.

7.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Grazie alle esperienze condotte durante lo svolgimento del Dottorato, sono stati analizzati nella tesi diversi aspetti relativi alle moderne tecniche di rilevamento nel settore dei Beni Culturali, con particolare riguardo per la fotogrammetria digitale ed il laser a scansione terrestre; gli aspetti esaminati sono relativi soprattutto al momento dell'acquisizione del dato metrico ed alle modalità di modellazione e rappresentazione, e sono stati documentati nel lavoro con la discussione di casi di studio opportunamente scelti.

Riguardo alla fotogrammetria, si è ritenuto in primo luogo interessante un approfondimento sulle caratteristiche costruttive e tecniche dei sensori montati sulle comuni camere digitali a medio/basso costo; le sperimentazioni condotte hanno evidenziato alcune problematiche direttamente connesse con la calibrazione di questa tipologia di camere, come ad esempio il processo di formazione delle immagini a colori RGB. E' stato analizzato anche il processo di acquisizione indiretta di immagini digitali tramite scanner, ponendo l'attenzione anche sulla calibrazione di questi dispositivi; l'utilizzo di camere analogiche semimetriche e amatoriali è ancora diffuso nel settore dei Beni Culturali, ma è strettamente legato alla possibilità di digitalizzazione dei supporti tramite scanner che uniscano l'accuratezza geometrica con l'elevata risoluzione, sia radiometrica che geometrica. Gli scanner, di tipo fotogrammetrico oppure dotati di specifico software di calibrazione, debbono garantire in particolare quest'ultimo requisito, al fine di supportare al meglio la produzione dei prodotti finali, in particolare dei modelli tridimensionali foto – realistici.

All'interno di un'analisi sulle possibilità offerte dall'avvento del digitale in ogni ambito del processo fotogrammetrico, si è data particolare enfasi ai dispositivi speciali per l'acquisizione richiesti in questo campo applicativo, descrivendo in particolare un sistema di acquisizione a bassa quota per il rilievo di aeree archeologiche ed edifici; questo sistema, basato su palloni che

sostengono una camera calibrata e su un apparato elettronico di controllo appositamente realizzato, ha mostrato grandi potenzialità sia in termini di risultati ottenuti che per le sue caratteristiche di maneggevolezza, relativo basso costo e flessibilità d'uso, specialmente in quei contesti in cui non sia possibile eseguire voli tradizionali da aereo o da elicottero. Le sperimentazioni effettuate hanno evidenziato anche le difficoltà connesse con l'utilizzo di questo tipo di piattaforme, molto sensibili alle condizioni ambientali, nonché le problematiche legate alla non convenzionale configurazione geometrica delle prese: l'irregolare sovrapposizione delle immagini non si adatta facilmente alle richieste del modulo di triangolazione dei software commerciali, che, creati specificatamente per la fotogrammetria aerea classica, richiedono uno schema rigido di distribuzione dei *tie points* che connettono modelli e strisciate adiacenti, e mal si adattano alla gestione di blocchi fotogrammetrici con uno schema irregolare delle immagini all'interno delle strisciate. Questo tipo di sistema può essere con successo applicato, come evidenziato da un caso di studio, anche per il rilievo di parti alte di edifici di interesse storico – architettonico al fine di completare il rilievo delle facciate eseguito da terra con metodi fotogrammetrici consueti.

Per quanto riguarda in particolare la fotogrammetria *close – range*, in cui negli ultimi anni si sta assistendo ad una vera esplosione di tecniche e sperimentazioni, l'analisi degli approcci perseguibili per il rilievo di edifici, strutture e oggetti, ha evidenziato la carenza o la mancanza, nei software commerciali di restituzione, di prodotti specifici che uniscano la flessibilità e la semplicità d'uso dei sistemi multi – immagine monoscopici con l'alto livello di automazione raggiunto dai sistemi ad approccio stereoscopico; questi ultimi sono stati in genere creati per la fotogrammetria aerea ed incontrano difficoltà nel trattare immagini che presentano spesso configurazioni geometriche largamente diverse.

D'altra parte, l'utilizzo sempre più spinto di camere digitali a medio – basso costo per l'acquisizione diretta delle immagini, pone di primaria importanza la problematica della calibrazione; il raggiungimento di un'elevata accuratezza geometrica nella restituzione presuppone che sia realizzata la calibrazione completa della camera, determinando quindi non solo la focale (della quale un valore approssimato è in genere oggi memorizzato all'interno della struttura file), ma anche i parametri che permettono di compensare gli errori sistematici. La sperimentazione condotta ha riguardato l'utilizzo sia di diversi software, commerciali e non, che di diversi approcci (*Self Calibration* e *Field Calibration*). Ne sono emerse diverse considerazioni riguardo al numero e alla tipologia di parametri da calibrare e alla geometria del progetto; in particolare si evince l'importanza di un controllo statistico sui parametri ottenuti, al fine di

eliminare quelli non significativi ed evitare così il pericolo di una sovra – parametrizzazione che vada a degradare la qualità del risultato, e la necessità di acquisire le immagini per la calibrazione a differenti distanze dal reticolo e con schema convergente che comprenda immagini ruotate di $\pm 90^\circ$ al fine di ridurre o eliminare le correlazioni presenti fra i parametri.

Per quanto riguarda il laser a scansione terrestre applicato al settore dei Beni Culturali, state analizzate le fasi operative del rilievo e del data processing; risulta evidente la velocità di acquisizione che questo tipo di strumenti consente, insieme con l'enorme quantità di dati che è possibile generare, ma si è confermata, soprattutto a causa della geometria spesso complessa degli oggetti rilevati, la necessità di un pesante intervento dell'operatore nella gestione dei dati acquisiti, con la conseguente esigenza di lunghi tempi di elaborazione e di software capaci di gestire la modellazione di superfici irregolari.

La seconda parte della ricerca si è incentrata sulla restituzione, sulla rappresentazione e sulla modellazione delle superfici. Le sperimentazioni condotte sulla generazione di prodotti *raster* come fotoraddrizzamenti e ortofoto hanno evidenziato la loro importanza nella documentazione dei Beni Culturali, ma anche la necessità, in contesti come quelli esaminati in cui gli oggetti hanno geometria complessa, di trovare nuove soluzioni, che coniughino l'elevata accuratezza geometrica con la possibilità di uno studio flessibile, interattivo e su più livelli dell'oggetto. Esempi interessanti sono costituiti a questo proposito dall'ortofoto di precisione, che permette di eliminare o ridurre molti degli errori tipici dell'ortofoto classica, e soprattutto dai modelli tridimensionali foto – realistici, che stanno divenendo sempre più importanti e diffusi in questo settore.

Le sperimentazioni condotte sulla correlazione d'immagini con un software commerciale e con uno creato *ad hoc*, hanno evidenziato l'importanza che l'algoritmo di *matching* ha nella generazione di Modelli Digitali delle Superfici, adatti allo scopo dell'ortorettifica di immagini e della modellazione tridimensionale; in particolare si è evidenziato che nei software commerciali, nonostante l'elevato livello di automazione raggiunto, è sempre necessaria una fase di *post – editing* del modello creato, con l'introduzione di numerose *breaklines*, soprattutto al fine della generazione di una corretta ortofoto. Per quanto riguarda invece la generazione di modelli tridimensionali, si è constatato che, soprattutto nel campo del *close – range*, gli algoritmi *area – based* ai minimi quadrati implementati nei software commerciali non sono talvolta sufficienti alla generazione di nuvole di punti che permettano la creazione di modelli tridimensionali *image – based* corretti e accurati.

In questo campo il laser a scansione si dimostra sicuramente il prodotto vincente in termini di capacità di ricostruzione della geometria completa

dell'oggetto, ma le prove effettuate con un software dedicato riguardo alla modellazione di oggetti di interesse archeologico dimostrano che, se supportata da procedure e algoritmi specifici sia per quanto riguarda la calibrazione sia per quanto riguarda la creazione del DSM, la fotogrammetria permette di raggiungere risultati assolutamente paragonabili in termini di accuratezza e precisione nella rappresentazione dei dettagli morfologici, con in più la possibilità di un'acquisizione del dato più semplice, più veloce e più economica.

Ciò che appare fondamentale sottolineare è la ricchezza che un approccio integrato fra le due tecniche può portare, in termini di maggiore accuratezza e leggibilità dei prodotti finali; la fotogrammetria può aiutare la comprensione del dato laser e facilitare la pulitura del rumore e di quei dati che non possono essere eliminati in modo automatico dal software; la possibilità di texturizzare il modello con una foto orientata dell'oggetto permette dall'altra parte di unire dato metrico e descrittivo.

Il futuro delle scienze del Rilevamento nel campo dei Beni Culturali risiede probabilmente in un approccio multi – disciplinare e multi – tecnica; la fusione di dati provenienti da diverse tecniche (fotogrammetria, laser scanner, GPS, telerilevamento,...), consentita in primo luogo dalla condivisione di un unico sistema di riferimento, permette la lettura e la comprensione di ogni oggetto di interesse non solo in sé, ma nel contesto in cui esso si trova, approfondendone le possibilità di studio e comprensione.

La possibilità di utilizzare i modelli tridimensionali anche per scopi diversi dalla semplice documentazione e rappresentazione, come ad esempio per valutazioni di tipo strutturale o legate alla diagnostica dei materiali e allo stato di degrado, apre un'importante finestra sull'adozione nel *close – range* di metodi di *data fusion* e di analisi di immagine propri per esempio del telerilevamento satellitare, affiancando all'informazione data dai sensori operanti nel campo ottico quella derivante da altri, quali le camere termiche o in genere multispettrali, oppure gli strumenti del rilievo geofisico. Questo pone però numerose problematiche sia riguardo l'acquisizione, e quindi la calibrazione di questi sensori, sia riguardo il trattamento del dato; sono da valutare anche le possibilità di applicare in questo contesto tematiche come l'interpretazione e la classificazione automatica e semi-automatica congiunta di immagini e dati di altra natura.

Infine, a complemento di queste nuove opportunità, non va tralasciata la possibilità, certamente favorita dalle tecniche digitali, di adottare metodiche per il recupero a fini metrici della fotogrammetria d'archivio, per uno studio oggettivo e rigoroso delle trasformazioni che un oggetto ha subito nel tempo mediante l'utilizzo di foto storiche, opportunamente calibrate ed elaborate.

BIBLIOGRAFIA

I riferimenti bibliografici sono in ordine alfabetico. Sono utilizzate le seguenti abbreviazioni:

ISPRS: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing

ASPRS: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing

IAPRS: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing

CIPA: International Committee for Architectural Photogrammetry

SIFET: Società Italiana Fotogrammetria e Topografia

ASITA: Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e ambientali

BAR: British Archaeological Reports

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

PRS: Photogrammetry and Remote Sensing

SPIE: International Society for Optical Engineering

IS&T: Society for Imaging Science and Technology

AA. VV., “An addendum to the metric survey specifications for English Heritage – The collection and archiving of point cloud obtained by terrestrial laser scanning or other method”. Sul sito web: www.english-heritage.org.uk

Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, H.M., 1971: “Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry”. Proceedings Symposium on Close-Range Photogrammetry, ASPRS, Falls Church, Virginia.

Akca, D., Grün, A., 2004: “Least squares 3d surface matching”. Proceedings IAPRS, Vol. 34(5/WG16), Dresden, Germany,

Akca, D., Remondino, F., Novak, D., Hanusch, T., Schrotter, G., Grün, A., 2006: “Recording and modeling of cultural heritage objects with coded structured light projection systems”. Proceedings of 2° International conference on Remote Sensing in Archaeology, BAR International Series 1568, pp. 375-382, Roma.

- Baarda, W., 1968: "A testing procedure for use in geodetic networks". Netherlands Geodetic Commission, Publication on Geodesy, 2(5).
- Baltsavias, E., P., 1991: "Geometrically constrained multiphoto matching", *Mitteilungen* Nr. 49, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland.
- Baratin, L., Bitelli, G., Unguendoli, M., Zanutta, A., 2000: "Digital orthophoto as a tool for the restoration of monuments", *IAPRS*, 33(5), pp. 62-69.
- Beraldin, J.-A., El-Hakim, S.F., Blais, F., 1995: "Performance Evaluation of Three Active Vision Systems Built at the National Research Council of Canada". *Proceedings of the Conference on Optical 3-D Measurements Techniques*, Vienna, Austria, pp. 352-361.
- Beraldin, J.-A., Picard, M., El-Hakim, S., Godin, G., Latouche, C., Valzano, V. and Bandiera, A., 2002: "Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry". *Proceedings of ISPRS/CIPA Int. Workshop Scanning for Cultural Heritage Recording*. Corfù, Greece, pp. 65-72.
- Beraldin, J.-A., Picard, M., El-Hakim, S., Godin, G., Valzano, V. and Bandiera, A., 2005: "Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment". In *Videometrics VIII*, Beraldin/El Hakim/Grün/Walton (Eds), SPIE Vol. 5665, pp. 108-118.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992: "A method for registration of 3-d shapes". *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(2), 239-256.
- Besl, P. J., 1988: "Active, optical range imaging sensors". *Machine Vision and Applications*, 1(2), pp. 127 – 152.
- Bitelli G., Vittuari L., 1999: "Il contributo della geomatica per l'archeologia. Esempi dal rilevamento del sito di Bakchias". Congedo editore, Bologna.
- Bitelli, G., Vittuari, L., 2001: "Un sistema a controllo remoto per l'acquisizione di immagini fotogrammetriche mediante aquilone". In *Bakchias VIII – Rapporto preliminare della campagna di scavo del 2000*, a cura di S. Pernigotti, M. Capasso, P. Davoli, 91-98, La Mandragora.

- Bitelli, G., Capra, A., Zanutta, A., 2001: "Photogrammetric surveying of "Nymphaea" in Pompeii". Proceedings of the XVIIIth CIPA International Symposium Potsdam, Vol. XXXIV, 5/C7, pp 236-242.
- Bitelli, G., Unguendoli, M., Vittuari, L., 2001: "Photographic and photogrammetric archaeological surveying by a kite system". Proceedings 3rd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin, 538-543, Elsevier, Paris.
- Bitelli, G., Capra, A., Zanutta, A., 2002: "Digital Photogrammetry and Laser Scanning in Surveying the "Nymphaea" in Pompeii". Proceedings CIPA WG6 International Workshop on "Scanning for Cultural Heritage Recording", Corfù, pp 115-120, Thessaloniki.
- Bitelli, G., 2002. "Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali". Relazione invitata, Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Vol.1, IX-XXIV, Perugia.
- Bitelli, G., Girelli, V.A., Tini, M.A., Vittuari, L., Zanutta, A., 2003: "Laser a scansione terrestre e fotogrammetria digitale nel rilevamento dei Beni Culturali: esempi dalla Piazza di S. Stefano in Bologna". Atti 7° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 1, pp. 345-350, Verona.
- Bitelli, G., Girelli, V.A., Tini, M.A., Vittuari, L., 2004: "Low-height aerial imagery and digital photogrammetrical processing for archaeological mapping". Proceedings of ISPRS 2004 (dvd ISSN 1682-1777), Istanbul, Turkey.
- Bitelli, G., Girelli, V.A., Tini, M.A., Vittuari, L., 2004: "Utilizzo di un sistema non convenzionale di fotogrammetria aerea per la produzione di ortofoto a grande scala in ambito archeologico". Atti 8° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 1, pp. 443-448, Roma.
- Bitelli, G., Girelli, V.A., Tini, M.A., Vittuari, L., 2005: "Integration of geomatic techniques for quick and rigorous surveying of cultural heritage". Proceedings of CIPA 2005 (cd rom ISSN 1682-1777), Torino.
- Bitelli, G., Girelli, V.A., Vittuari, L., 2005: "Il rilievo del monastero di Mesopotam con tecniche geomatiche integrate". In Phoinike III, pp. 211 – 218, Ante Quem, Bologna.

- Bitelli, G., Girelli, V. A., Guarnieri, A., Vittuari, L.,: “Accurate survey of the stela from Tilmen Höyük by laser scanning technique”. In “Festschrift Refik Duru” – O. Belli, Ö. Bilgi, G. Umurtak and Ş. Dönmez (Eds.), Istanbul (In stampa).
- Bitelli, G., Zanutta, A., 2006: “Esperienze di rilevamento con moderne tecniche geomatiche in Pompei”. Atti del Convegno “Rilievo, modellazione e restauro di murature antiche. Il caso dell’Insula del Centenario a Pompei”, Bologna.
- Blais, F., 2003: “A Review of 20 Years of Range Sensor Development”. Videometrics VII, Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen, James S. Walton, Editors, Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 5013.
- Boccardo, P., Dequal, S., Lingua, A., Rinaudo, F., 2001: “True digital orthophoto for architectural and archaeological applications”, ISPRS Archives, Vol.XXXIV – 5/W1, pp. 50-55.
- Böhler, W., Heinz, G., Marbs, A., 2001: “The potential of non contact close range laser scanners for cultural heritage recording”. Proceedings CIPA WG6 Int. Symposium, Potsdam.
- Böhler, W., Bordas Vincent M., Marbs, A., 2003: “Investigating laser scanner accuracy”. Proceedings of CIPA XIX International Symposium, Antalya, Turkey, pp 696-702.
- Böhler, W., 2005: “Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques”, in ‘Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage’ - E.Baltsavias, A.Gruen, L.Van Gool, M.Pateraki (Eds), Taylor & Francis / Balkema, ISBN 0 415 39208 X, pp. 89-99, May 22-27, Ascona, Switzerland.
- Brown, D., 1971: “Close-range camera calibration”. Photogrammetric Engineering, Vol. 37(8), pp. 855-866.
- Cerasetti, B., Girelli, V. A., Luglio, G., Rondelli, B., Zanfini, M., 2006: “From monument to town and country: integrated techniques of surveying at Tilmen Höyük in south-east Turkey”. Proceedings of 5° International Conference on the Archaeology of the Ancient Near East, Madrid, Spain. (In

- stampa).
- Chen, Y., and Medioni, G., 1992: "Object modeling by registration of multiple range images". *Image and Vision Computing*, 10 (3), 145-155.
- Colombo, L., 1994: "Dalla rappresentazione fotogrammetrica ai modelli raster tridimensionali". *Bollettino SIFET*, St.Vincent, Aosta.
- D'Amelio, S., Emmolo, D., Lo Brutto, M., Orlando, P., Villa, B., 2005: "3D Techniques for the survey of Cultural Heritage". *Proceedings of CIPA 2005* (cd rom ISSN 1682-1777), Torino.
- Davoli, P., 2004. "New Excavation at Soknopaiou Nesos: 2003 Season". *Proceedings Int. Symp. Tebtynis und Soknopaiou Nesos-Leben im römischerzeitlichen Fajum, Sommerhausen bei Würzburg*.
- De Maria, S., Giorni, E., Lepore, G., 2001. "Phoinike". *Color Dimension*, Bologna.
- Dubbini, M., Girelli, V.A., Zanutta, A., 2005: "Rilievi fotogrammetrici non convenzionali per la valutazione dell'evoluzione storico-architettonica e recupero della chiesa di S. Giuseppe in Venola". *Atti Convegno Nazionale SIFET* (cd rom ISBN 88-901939-1-3), Palermo.
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J.-A., Blais, F., 2003: "Critical factors and configurations for practical 3D image-based modeling". *6th Conference on 3D Measurement techniques*, Zürich, Switzerland, Vol. II, pp. 159-167.
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J.-A., Picard, M., Godin, G., 2004: "Detailed 3D reconstruction large-scale heritage sites with integrated techniques". *IEEE Computer Graphics and Application*, 24(3), pp. 21-29.
- EOS Systems Inc., 2004: "PhotoModeler Pro 5 users manual". Canada.
- Fangi, G., 1996: "Note di Fotogrammetria", Clua Edizioni, Ancona.
- Fraser, C. S., 1996: "Network design". In *Close-range Photogrammetry and Machine Vision*, Atkinson (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp. 256-282.

- Fraser, C. S., 1997: "Digital self calibration". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 52(1997), pp. 149-159.
- Georgopoulos, A., Karras, G.E., Makris, G.N., 1999: "The Photogrammetric survey of a prehistoric site undergoing removal". *Photogrammetric Record*, 16(93): 443-456, National Technical University of Athens, Greece.
- Gesafidis, S., Kambourakis, A., Karras, G.E., Lymperopoulos, E., Madani, M., Mavrelis, G., Mavromati, D., 1999: "Digital orthophotography in archaeology with low-altitude non-metric images". *IAPRS*, 32(5W11): pp. 8-11.
- Girelli, V.A., Tini, M.A., Zanutta, A., 2005: "Traditional and unconventional photogrammetric techniques for metrical documentation of cultural heritage: the example of the "Rolandino dei Passaggieri" tomb (St. Domenico square) survey in Bologna". *Proceedings of CIPA 2005* (cd rom ISSN 1682-1777), Torino.
- Grün, A., 1985: "Adaptive least square correlation: a powerful image matching technique". *South African Journal of PRS and Cartography*, Vol. 14(3), pp. 175-187.
- Grün, A. and Beyer, H., 2001: "System calibration through self-calibration". In Grün/Huang (Eds.), *Calibration and orientation of cameras in Computer Vision*, Springer, Vol. 34.
- Grün, A., Remondino, F., Zhang, L., 2004: "Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of bamiyan, Afghanistan". *The Photogrammetric Record*, 19 (107), pp. 177-199.
- Grün, A., Remondino, F., Zhang, L., 2005: "The Bamiyan project: multi-resolution image-based modeling", in 'Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage', E.Baltsavias, A.Gruen, L.Van Gool, M.Pateraki (Eds), Taylor & Francis/Balkema, ISBN 0 415 39208 X, pp. 45-54, May 22-27, Ascona, Switzerland.
- Grussenmeyer, P., Hanke, K., Streilen, A., 2002: "Architectural Photogrammetry". In M. Kasser and Y.Egels: "Digital Photogrammetry", Taylor & Francis Inc., New York, USA.

- Guarnieri, A., Remondino, F., Vettore, A., 2004: "Photogrammetry and round – based laser scanner: Assessment of metric accuracy of the 3D model of Pozzoveggiani Church". FIG Working Week 2004. TS on "Positioning and measurement Technologies and Practices II – Laser Scanner and Photogrammetry.
- Guarnieri, A., Vettore, A., 2004: "Validazione di dati laser scanner per applicazioni di metrologia close-range". Atti 8° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 2, pp. 1261-1266, Roma.
- Kraus, K., 1993: "Photogrammetry". Dümmler Verlag, Volume 1, Bonn, Germany.
- Kraus, K., 1997: "Photogrammetry". Dümmler Verlag, Volume 2, Bonn, Germany.
- Krupnik, A., 2003: "Accuracy prediction for ortho-image generation", Photogrammetric Record, 18(101), 41-58.
- Habib, A., Y. Lee, and M. Morgan, 2002: "Bundle adjustment with self-calibration using straight lines". Photogrammetric Record Journal, 17(100): 635-650.
- Hanke, K., 1996: "Accuracy study project of EOS System's PhotoModeler – Final Report". IAPRS, 30 (5), Innsbrück, Austria.
- Marchetti, N., 2004: "La cittadella regale di Tilmen Höyük. Palazzi, templi e fortezze del II millennio a. C. in un'antica capitale dell'Anatolia sud-orientale (Turchia)" In "Scoprire. Scavi del Dipartimento di Archeologia", M. T. Guaitoli, N. Marchetti, D. Scagliarini (Eds.), Studi e Scavi nuova serie, 3, Edizioni Antequem, Bologna.
- Marchetti, N., "A Late Old Syrian Stela from Temple M at Tilmen Höyük", in 'Festschrift Refik Duru' - O. Belli, Ö. Bilgi, G. Umurtak and Ş. Dönmez (Eds.), Istanbul (In stampa).
- Mavromati, D., Petsa, E., Karras, G. E., 2002: "Theoretical and practical aspects of archaeological orthoimaging", ISPRS Archives, Vol. XXXIV – 5/W1, pp. 413-418.

- Ortin, D., Remondino, F., 2005 “Generation of occlusion-free images for texture mapping purposes”. IAPRS, 36(5/WG17), on CD-Rom.
- Pasquini, S., 2002: “Applicazione di tecniche geomatiche in archeologia: esempi dai siti di Pompei e Mesopotam”. Tesi di laurea, Università di Bologna.
- Patias, P., 2001: “Photogrammetry and Visualization”. Technical Report, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH, Zürich, Switzerland. Disponibile sul sito web: www.photogrammetry.ethz.ch/research/guest.html
- Photometrix, 2004: “Australis users manual”, Australia.
- Remondino, F., 2006: “Image - based modeling for object and human reconstruction”. Mitteilungen Nr. 91, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland.
- Remondino, F. and Fraser, C., 2006: “Digital camera calibration methods: consideration and comparisons”. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.36(B5), Dresden, Germany.
- Remondino, F. And L. Zhang, 2006: “Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling”. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.36(B3), Bonn, Germany.
- Remondino, F. And S. El-Hakim, 2006: “Image-based 3D modeling: a review”. The Photogrammetric Record, 21(115).
- Roffarè, B., 2007: “Utilizzo integrato di sistemi laser a scansione e fotogrammetria digitale nel rilevamento dei Beni Culturali: il caso della Chiesa di Casalecchio”. Tesi di laurea, Università di Bologna.
- Saint Aubin, J. P., 1999: “Il rilievo e la rappresentazione dell’architettura”. Moretti & Vitali (Eds), Bergamo.
- Schenk, T., 1999: “Digital Photogrammetry”, Ed. TerraScience, Volume 1, Laurelville, Ohio.

Schiavina, E., 1981: “La chiesa di S. Giuseppe a Venola”. Strenna Storica Bolognese, Comitato Bologna Storico Artistica.

Tini, M. A., 2002: “Fotogrammetria e realtà visuale per la documentazione metrica, la rappresentazione e la gestione dei dati in archeologia”. Tesi di Dottorato, Università di Bologna, Italia.

Vettore, A., 2000: “3D Laser scanner BIRIS”, Bollettino SIFET.

Wallis, R., 1976: “An approach to the space variant restoration and enhancement of images”. Proceedings of Symposium on Current Mathematical Problems in Image Science, Naval Postgraduated School, Monterey, California.

Wehrli & Associates Inc., 1994: “RasterMaster PHOTOSCANNER Windows-NT user manual”, U.S.A.

Siti web consultati:

www.photodeler.com

www.photometrix.com.au

www.socetset.com

www.leica-geosystems.com

www.menci.it

www.innovmetric.com

www.geomagic.com

www.rapidform.com

www.shapegrabber.com

www.ing.unian.it/strutture/fimet/fangi/home.html

www.intesagis.it per il documento “Specifiche tecniche per la produzione dei Modelli Digitali del terreno” del Gruppo di Lavoro guidato dal Prof. Otto Kölbl dell’EPF di Losanna.

www.world-heritage-tour.org

APPENDICE A

L'ANALISI DEI RESIDUI NORMALIZZATI PER LA RICERCA DEI *BLUNDERS*

Il metodo della compensazione ai minimi quadrati non è una tecnica robusta di stima, in quanto osservazioni errate presenti nei dati possono impedire la convergenza del sistema e/o condurre a risultati errati. Per questo motivo è importante “testare” le osservazioni per identificare eventuali errori grossolani (*blunders*) presenti, ad esempio si pensi in fotogrammetria alla possibilità di aver collimato come omologhi due punti che in realtà corrispondono a punti oggetto distinti.

L'approccio comune per l'individuazione dei *blunders* è un test effettuato sui residui v delle osservazioni (vedi equazione (9) del Capitolo 4), la tecnica del *data snooping* sviluppata da Baarda [Baarda, 1968].

Nel caso del *Bundle Adjustment* nella sua forma più generale le osservazioni sono le coordinate immagine dei punti collimati in tutte le immagini. Una volta che la compensazione è stata effettuata si possono calcolare i residui v delle osservazioni inserendo nel modello funzionale il vettore delle incognite trovate; in pratica i residui sono la differenza fra le coordinate immagine misurate e quelle ottenute dalle equazioni di collinearità utilizzando le coordinate oggetto compensate, una volta calcolati anche i parametri di orientamento interno ed esterno.

Per ogni osservazione i , sotto l'ipotesi nulla che l'osservazione sia distribuita in modo normale, il coefficiente w_i dato da:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \quad (1)$$

dove $q_{v_i v_i}$ è l' i -simo elemento della diagonale della matrice Q_{vv} :

$$Q_{vv} = P_{\parallel}^{-1} - A(A^T P_{\parallel} A)^{-1} A^T \quad (2)$$

w_i è detta variabile standardizzata e segue una distribuzione normale standard $N(0,1)$; l'ipotesi che non siano presenti errori grossolani è che:

$$H_0: E\{w_i\} = 0, \quad w_i \sim N(0,1)$$

A rigore dalla compensazione si ottiene solo una stima $\hat{\sigma}_0^2 Q_{VV}$ della matrice di varianza dei residui, e la statistica v_i/σ_{v_i} che si ottiene segue una distribuzione τ di Thompson, che se il numero delle osservazioni è elevato, può essere replicata con la distribuzione di Student.

Baarda ha dimostrato che se è presente nei dati un solo errore grossolano, il residuo normalizzato corrispondente assume il massimo valore fra tutte le osservazioni.

La procedura di analisi dei residui è la seguente:

- si fissa a priori un livello di confidenza α che individua il valore critico w_α ;
- si calcola il residuo normalizzato di ogni osservazione e si considera il valore massimo w_{\max} ;
- se $w_{\max} > w_\alpha$, si rifiuta l'ipotesi H_0 e si elimina l'osservazione relativa ripetendo la compensazione.

La procedura termina quando tutti i residui normalizzati sono inferiori al valore critico.

APPENDICE B

AZIENDE E PRODOTTI CHE LAVORANO NEL CAMPO DEL LASER A SCANSIONE

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione dich.
Steintek (www.steintek.de)	Braccio su struttura meccanica multi – asse	10 – 77 cm	20 – 300 µm
ShapeGrabber (www.shapegrabber.com)	Piano di luce su supporto traslante o ruotante	40 – 650 mm	25 – 200 µm
Cyberware (www.cyberware.com)	Vari prodotti per diversi utilizzi		50 – 200 µm
3Dscanners – Model Maker (www.3dscanners.com)	Laser portatile a mano su braccio meccanico		
RVSI/Abante automation (www.rvsi.com)	Sistemi per l'indagine di semiconduttori elettrici		2.25 µm
Minolta – Vivid systems (www.konicaminolta-3d.com)	Vari prodotti per diversi utilizzi	50 mm – 2.5 m	100 µm – 7 mm
Kreon (www.kreon3d.com)	Slit scanner per macchine CMM/CNC ¹	50 – 100 mm	10 – 25 µm
Cyberoptics (www.cyberoptics.com)	Sistemi per l'indagine di semiconduttori elettrici		
Integrated Vision Products (www.ivp.se)	Slit scanner molto veloci		
Virtek Vision International (www.virtekvision.com)	Laser a linee multiple per prodotti industriali	25 mm	100 µm
Hamamatsu – Body scanner Usa.hamamatsu.com	Sistemi per il body scanning completo	0.5 – 2 m	
Virtual 3d Tech (3d.itri.org.tw)	Slit scanner	400 mm	0.1 – 0.2 mm

¹ CNC = Computer Numerical Control

CMM = Coordinate Measuring Machine

Continua...

Metris (www.metris.be)	Slit scanner a braccio per macchine CMM/CNC	100 mm	5 – 12 µm
Nagoya Inst. Of Technology (hilbert.elcom.nitech.ac.jp)	Slit scanner	300 mm	1 – 2 mm
DLR (www.robotic.dlr.de)	Single spot a testa rotante per applicazioni di robotica		
GIE Tech. – Laser Vision (www.gietech.com)	Slit scanner a proiezione multipla per applicazioni stradali		
Servo Robot Inc. (www.servorobot.com)	Indagini industriali		
Arius3D (www.arius3d.com)	Sistemi ad alta precisione		
Laser Design In. – Surveyor (www.laserdesign.com)	Linea di prodotti dai portatili a montati su macchine CMM		
Trimble (www.trimble.com)	Sistemi a base larga	Fino a 25 m	0.2 – 0.6 mm
Vitronic (www.vitronic.com)	Dalle indagini industriali al body scannino		
Polhemus (www.polhemus.com)	Scanner portatili a mano e leggeri		
Nextec (www.nextec-wiz.com)	Bracci per macchine CMM		
3D Digital Corp (www.3ddigitalcorp.com)	Slit scanner	300 – 900 mm	15 – 120 µm
Perceptron (www.perceptron.com)	Laser portatili a mano o per macchine CMM		
Scantech (www.scantech.com)	Slit scanner a doppia camera	40 – 400 mm	20 – 200 µm
Micromesure (www.micromesure.de)	Slit scanner		
Roland – Picza	Per oggetti su tavola rotante		
Metricvision (www.metricvision.com)	Slit scanner	65 – 195 mm	8 – 20 µm
Steinbichler Optotechnik (www.steinbichler.de)	Slit scanner portatili a mano		
Wolfbeck (www.wolfbeck.com)	Braccio ad apertura circolare		
Dipix (www.dipix.com)	Indagini in linea sul cibo industriale		
LMI Technology (www.lmint.com)	Vari prodotti per tutte le applicazioni		
Acuity Research (www.acuityresearch.com)	A braccio	6 mm – 16.5 m	
Taicaan (www.taicaan.com)	Braccio singolo con supporto traslante	2.5 mm	2 µm
Steintek (www.steintek.de)	Slit scanner	100 – 600 mm	200 µm

Tabella B-1 Aziende che producono sistemi laser a triangolazione.

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione dich.
[TC] ² Body Measurement Sys. www.tc2.com	Proiezione di luce bianca per body scanning		1 mm
InSpeck Inc. (www.in speck.com)	Proiezione di frange sinusoidali	1150 m	
Symcad (www.symcad.com)	Body scanning		
Virtual 3d Tech (3d.itri.org.tw)	Random pattern	800 m	2 – 20 µm
Gom (www.gom.com)	Proiezione di frange multiple	800 m	20 – 100 µm
Wicks and Wilson Limited (www.wwl.co.uk)	Proiezione di luce bianca per body scanning		2 – 8 mm
Capture 3D (www. capture3d.com)	Vedi GOM	800 m	20 – 100 µm
Steinbichler Optotechnik (www.steinbichler.de)	Sistemi a proiezione di frange	420 – 1700 mm	
Optonet (www. optonet.com)	Sistemi a proiezione di frange		
Eyetrionics – ShapeSnatcher www.eyetrionics.com)	Sistemi a proiezione di grigliati – sistemi a doppia camera per face scanning		
Voxelan (www.voxelan.co.jp)	Sistemi a pattern multipli		
Genex (www. genextech.com)	Sistemi a luce strutturata con colori random	35 – 300 mm	
MiiC Opton (www.opton.co.jp)	Sistemi basati sulla proiezione di Moirè – portatili a mano per macchine CMM	130 mm	10 – 25 µm
ABW GmbH (www.abw-3d.de)	Sistemi a proiezione codificata		
RVSI/Abante automation (www.rvsi.com)	Indagini superveloci sui semiconduttori		2.25 µm
Taicaan (www.taicaan.com)	Sistemi a proiezione di frange	350 µm	
Steintek (www.steintek.de)	Sistemi a proiezione di frange		2 µm
3DMD – 3Q (www.3dmd.com)	Sistemi a pattern multipli – fino a 144 camere		20 – 250 µm

Tabella B-2 Aziende che producono sistemi laser a proiezione strutturata.

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione dich
Zöller + Fröhlich GmbH (www.zf-laser.com)	A specchio rotante	Fino a 79 m	1 – 2.5 mm
Basis Software Inc. – SurPhaser (www.surphaser.com)	Per elevate precisioni	0.40 – 7 m	25 – 150 µm
Faro (www.faro.com)	A specchio rotante	20 – 250 m	1 – 3 mm
[TC] ² Body Measurement Sys. (www.tc2.com)	A differenza di fase	1 – 50 mm	

Tabella B-3 Aziende che producono sistemi laser a differenze di fase.

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione dich.
Optech (www.optech.on.ca)	Laser radar a lungo raggio	500 – 4000 m	5 – 25 cm
Leica (www.leica.com)	Laser radar ad elevata precisione	300 m	4 mm
Riegl – LMS-Z210 (www.riegl.co.at)	Laser a lungo raggio	100 – 650 m	6 – 15 mm
Noptel (www.noptel.fi)			2.5 mm
Acuity Research – AR 4000		16.45 m	2.5 mm
Mensi (www.mensi.com)			
Metric Vision (www.metricvision.com)	Laser radar a frequenza modulata	1 – 24 m	16 – 240 μ m
IQSun GmbH (www.iqsun.com)	Laser radar con compensazione interna della temperatura	50 m	2 – 5 mm
Bushnell (www.bushnell.com)	Applicazioni sportive	0.40 – 7 m	25 – 150 μ m

Tabella B-4 Aziende che producono sistemi laser a tempo di volo.

APPENDICE C

TRASFORMAZIONE FRA SISTEMA TOPOGRAFICO E FOTOGRAMMETRICO IN AMBITO TERRESTRE

C.1 La rotazione nello spazio

Consideriamo un punto P in un sistema xyz; si vogliono trovare le coordinate di P in un sistema XYZ ruotato rispetto al primo, ma con la stessa origine.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ con } R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

La rotazione nello spazio è definita da tre rotazioni antiorarie indipendenti ω , φ e κ .

Se si assume come rotazione primaria ω quella intorno ad X, come rotazione secondaria φ quella intorno a Y e come rotazione terziaria κ quella intorno a Z, si ottengono le matrici:

$$R_{\omega} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix};$$

$$R_{\varphi} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix};$$

$$R_k = \begin{pmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dal prodotto delle tre matrici relative alle rotazioni elementari si ottiene la matrice di rotazione R:

$$R = R_\omega \cdot R_\varphi \cdot R_\kappa$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos k & -\cos \varphi \sin k & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin k + \sin \omega \sin \varphi \cos k & \cos \omega \cos k - \sin \omega \sin \varphi \sin k & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin k - \cos \omega \sin \varphi \cos k & \sin \omega \cos k + \cos \omega \sin \varphi \sin k & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

C.2 La traslazione nello spazio

Dato un sistema di riferimento cartesiano ortogonale XYZ, si traslino gli assi portando l'origine nel punto O' di coordinate (X₀, Y₀, Z₀). Il passaggio fra il sistema di riferimento XYZ e il nuovo sistema xyz è regolato dalle seguenti equazioni:

$$\begin{cases} X = x + X_0 \\ Y = y + Y_0 \\ Z = z + Z_0 \end{cases}$$

C.3 Trasformazione fra sistema topografico e fotogrammetrico

In ambito terrestre, i software commerciali presuppongono per la restituzione di un oggetto, un sistema di riferimento fotogrammetrico xyz vincolato all'oggetto stesso così composto: il piano xy sull'oggetto con asse x verso destra e asse y verso l'alto, e l'asse z uscente verso l'osservatore secondo la regola della mano destra.

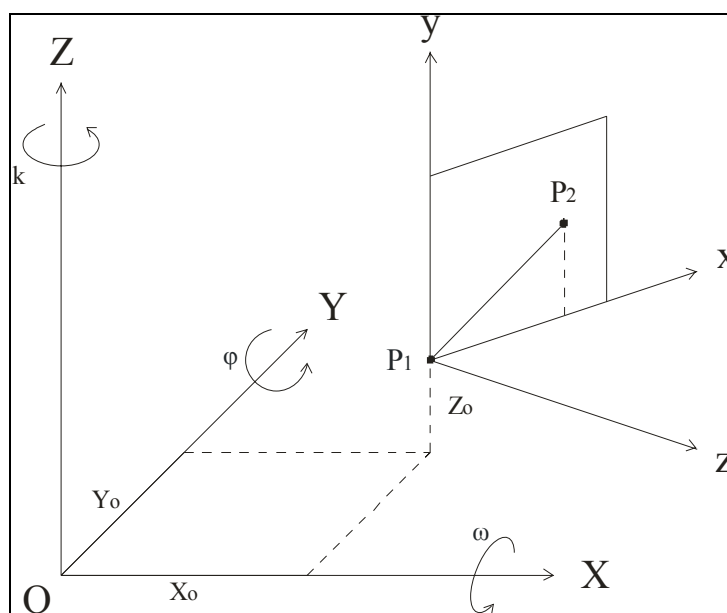


Figura C-1 Relazione fra le coordinate di un generico punto nel sistema fotogrammetrico e in quello topografico in fotogrammetria terrestre.

Qualunque sia il sistema topografico XYZ, è necessario quindi effettuare una trasformazione nello spazio dei punti d'appoggio perché sia possibile l'elaborazione delle immagini; i prodotti della restituzione devono poi essere riportati nel sistema topografico; se per esempio stiamo restituendo le varie facciate di un edificio, ognuna di esse dovrà essere nel proprio sistema e tutti i prodotti dovranno poi essere riportati nello stesso sistema, quello topografico, per essere fra loro integrati.

Adottiamo un cambio di sistema di riferimento per passare dal sistema di riferimento topografico a quello fotogrammetrico, effettuando una rotazione e una traslazione nello spazio.

Consideriamo la rotazione k intorno all'asse Z come rotazione primaria, la rotazione ω intorno ad X come rotazione secondaria e la rotazione φ intorno ad Y come rotazione terziaria:

$$R = R_k \cdot R_\omega \cdot R_\varphi$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos k \cos \varphi - \sin k \sin \omega \sin \varphi & -\sin k \cos \omega & \cos k \sin \varphi + \sin k \cos \varphi \sin \omega \\ \sin k \cos \varphi + \cos k \sin \omega \sin \varphi & \cos k \cos \omega & \sin k \sin \varphi - \cos k \cos \varphi \sin \omega \\ -\cos \omega \sin \varphi & \sin \omega & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Ponendo $\omega = 90^\circ$ e $\varphi = 0^\circ$, si ottiene:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos k & 0 & \sin k \\ \sin k & 0 & -\cos k \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ e } \mathbf{R}^T = \begin{pmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin k & -\cos k & 0 \end{pmatrix}$$

Quindi in forma estesa:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin k & -\cos k & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \text{ e}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos k & 0 & \sin k \\ \sin k & 0 & -\cos k \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Ponendo $a = \cos k$ e $b = \sin k$ si ha:

$$\begin{cases} x = a(X - X_0) + b(Y - Y_0) \\ y = Z - Z_0 \\ z = b(X - X_0) - a(Y - Y_0) \end{cases}$$

Per determinare k risolviamo il sistema:

$$\begin{cases} b = \frac{x(Y - Y_0) + z(X - X_0)}{(Y - Y_0)^2 + (X - X_0)^2} \\ a = \frac{x - b(Y - Y_0)}{X - X_0} \end{cases}$$

da cui:

$$k = \arccos(a) = \arcsen(b)$$

RINGRAZIAMENTI

Questa tesi è il frutto non solo del mio lavoro, ma anche di quello di molte persone che qui è d'obbligo ringraziare, quindi:

*Grazie al **Prof. Bitelli** per essere stato un continuo esempio di professionalità, integrità e passione; grazie per gli insegnamenti, e per la gentilezza e la disponibilità dimostratami sempre.*

*Grazie al **Prof. Vittuari**, per la piacevolezza delle ore di lavoro condivise, per avermi sempre spronato e incoraggiato a combattere la superficialità, sia nel lavoro che nel privato, e per essere stato il compagno perfetto di tanti viaggi e tante avventure.*

*Grazie al **Dr. Antonio Zanutta** per avermi dato fiducia ed avermi così insegnato l'importanza di essere autonoma nel lavoro e per avermi coinvolto in tanti progetti interessanti e stimolanti.*

*Grazie all'**Ing. Maria Alessandra Tini** per aver condiviso con me le gioie e le fatiche di tante ore di lavoro e per avermi trasmesso il suo sapere, sempre col sorriso.*

Il merito è anche di tutte le persone che hanno condiviso con me questo lavoro, ogni giorno:

*Grazie a **Marco** e **Pino**, la vera allegria di ogni giorno, gomito a gomito nella nostra stanzetta, Marco, perché riesci sempre a farmi ridere e Pino, tu sei il mio angelo custode!*

*Grazie a **Chiara**, tu sei l'anima del nostro Laboratorio, senza te saremmo perduti, e l'impegno che metti nell'organizzazione dei momenti "ludici e mangerecci" ci tiene tutti uniti.*

*Grazie agli altri dottorandi che hanno condiviso con me anche solo un pezzetto del cammino... **Michela, Michaela, Claudio, Simonetta, Alessandro M., Luca, Giorgia, Alessandro B., Veronica, Cristian...** abbiamo vissuto insieme tanti momenti di studio, lavoro, divertimento, dialogo, confronto... siete stati un esempio e uno stimolo continuo di impegno, tenacia e caparbia... qualità indispensabili nella "strada" che abbiamo scelto!*

*Grazie al **Dr. Fabio Remondino**, per avermi accolto in terra "straniera" e avermi fatto sentire a casa e per avermi insegnato tanto, con semplicità, concretezza e praticità.*

*Grazie a **Maretta** e a **Catta**, le pietre miliari del Dipartimento, per l'aiuto in tutte le questioni burocratiche e per l'infinita disponibilità che sempre mi avete dimostrato.*

*E infine grazie a tutti i "miei" laureandi di questi anni: **Fabrizio, Michele, Arturo, Paola, Denise, Gianluca, Maria Chiara, Belinda, Emanuele...** il vostro lavoro e impegno è stato fondamentale per l'elaborazione dei casi di studio trattati in questa tesi, e anche se a volte mi sono spazientita, è stato sempre un piacere lavorare con voi!*

Ed ora i ringraziamenti personali:

Grazie ai miei genitori e a mio fratello... voi siete il terreno solido e fisso sotto i miei piedi, la mia rete di salvataggio.

*Grazie alle mie "sorelle" acquisite, **Francesca e Paola**, voi siete la prova vivente che il bene vero è davvero incondizionato, che l'amicizia con la A maiuscola si preoccupa, si arrabbia, gioisce, ride, ma non giudica mai.*

*Grazie alla mia piccola **Lisa**, che "dall'alto" dei suoi otto anni mi osserva implacabile obbligandomi ad essere migliore e col suo ditino teso mi insegna ogni giorno cosa conta davvero.*

*E, dulcis in fundo, grazie a **Ernesto...** non lo sapevo, ma ti stavo aspettando, e ora sei qui.*