

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PERUGIA

Facoltà di Ingegneria



Tesi di Laurea in Ingegneria Civile

Modellazione 3D ad alta densità di superfici tramite fotogrammetria non convenzionale

RELATORE :
Prof. Radicioni Fabio

LAUREANDA:
Porri Emanuela

CORRELATORE:
Ing. Raffaella Brigante

Anno Accademico 2011-2012

CAPITOLO 1

LE MURA DI AMELIA

1.1 AMELIA: CENNI STORICI

La città di Amelia, disposta su una rupe rocciosa che sovrasta le colline tra le velli del Tevere e del Nera, ha origini antichissime. Plinio il Vecchio nell'opera *Naturalis Historia*, scrive che secondo Catone *Ameria* fu fondata ben 963 anni prima della guerra contro Perseo, re di Macedonia, combattuta tra il 171 ed il 168 a. C. Da questa testimonianza, e dalla conferma che viene dai recenti ritrovamenti archeologici nel centro storico, si fa risalire la fondazione di Amelia al 1134 a.C., ben quattro secoli prima della fonazione di Roma.



Figura 1.1 - Panorama di Amelia da una cartolina storica

Per la sua posizione geografica di "zona di confine", Amelia ha avuto una grande rilevanza nell'evoluzione delle culture protostoriche tra Lazio e Umbria. Importanza testimoniata dai numerosi reperti archeologici rinvenuti nel territorio del comune e grazie ai quali è possibile coprire un arco temporale che va dal VII-VI sec. a. C. al II sec. d.C. Dall'interpretazione di tali reperti si può ritenere che Amelia nel periodo pre-romano avesse instaurato forti contatti con i vicini distretti italici e in particolare con la fiorente civiltà etrusca piuttosto che con l'entroterra

umbro.

L'insediamento delle popolazioni primitive si sviluppò probabilmente sull'Acropoli, la collina più alta e ben difesa dalla sua posizione naturale, dominante il sottostante territorio costituito da insediamenti sparsi. In seguito alla crescita della cittadina in risposta alla minaccia di invasione da parte delle popolazioni confinanti, si resero necessarie delle opere di fortificazione.

A difesa di questo centro furono erette le mura più antiche, note come *mura megalitiche*, i cui resti sono ben visibili all'interno dell'attuale centro storico tra il Teatro Sociale e Porta della Valle (indicato con la lettera A nella figura 1.2, di Franco Della Rosa dove è riportato lo sviluppo del centro storico di Amelia a partire dai primi insediamenti).

La cultura romana ha avuto una notevole influenza fin dal III sec. a. C., ma la definizione giuridica di Ameria come municipio risale circa al 90 a.C. La città si sviluppò sullo stesso sito precedentemente occupato dall'insediamento umbro nel corso del III a. C. e fondamentale in tal senso fu l'apertura della Via Amerina nel 240 a. C., che favoriva l'accesso da Roma verso nord (Figura 1.3). Il tracciato, che razionalizzava una viabilità più antica, costituiva il percorso più breve tra Roma e l'Umbria attraverso l'area falisca ed etrusca: l'importante arteria aveva origine nel territorio di Veio e, attraverso Nepi, Amelia, Todi e Perugia, confluiva a Chiusi nella Cassia.^[1]

Il municipio, che aveva una estensione di circa il doppio dell'attuale territorio comunale, durante la dominazione romana ha goduto di un periodo di magnificenza, come testimoniato dalle numerose emergenze archeologiche, incorporate nell'attuale centro storico (resti di terme, cisterne, edifici, mosaici e così via), molte delle quali reinserite nelle costruzioni di periodi successivi. L'attestazione ad Amelia di un teatro, di un anfiteatro e di un probabile campus, insieme alle numerose ville sparse sul territorio, attestano la fiorente economia e l'importanza

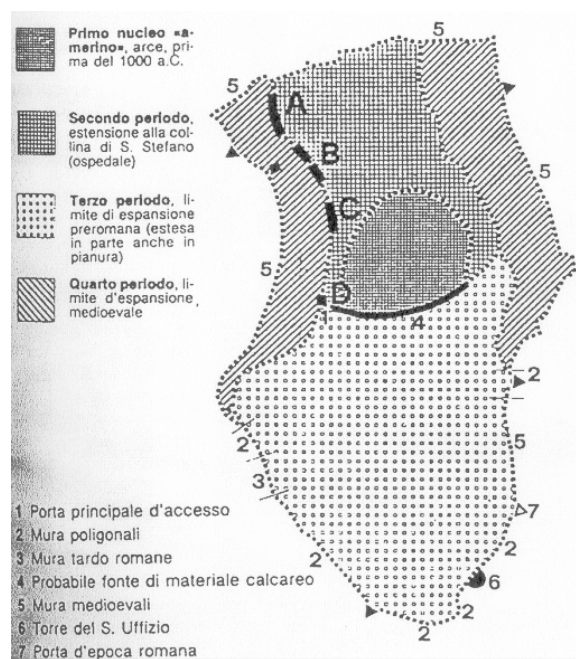


Figura 1.2 - Sviluppo di Amelia a partire dai primi insediamenti abitativi (Franco Della Rosa)



Figura 1.3 - Via Amerina in Umbria

del municipio romano. Tale prosperità traspare anche dal ritrovamento, nel 1963, della bellissima statua in bronzo raffigurante Germanico alta ben 2,14 m (Figura 1.4) ora ospitata nel Museo Archeologico- Ex Collegio Boccarini.

Amelia divenne sede vescovile intorno all'anno 363 con il vescovo Ortoduphus. Nel 548 Amelia fu saccheggiata dai Goti di Totila, successivamente fu dominata da Faraoldo I Duca longobardo di Spoleto (579) e poi passò ai Romano-Bizantini. Appartenne infine alla Chiesa, che provvide, sotto il pontificato di Leone IV, nel sec. IX, a restaurare la mura per far fronte alle frequenti incursioni dei saraceni (a lui è dedicata l'omonima porta nella zona est delle mura).^[1]



Figura 1.4 - Statua del Germanico

Non si conosce esattamente la data in cui Amelia divenne Comune, tuttavia è storicamente accertato che la città ha combattuto una guerra di comuni a fianco di Todi e Foligno contro Perugia, Orvieto e Gubbio nel 1065. Questo consente di affermare che all'epoca la città aveva una consistente organizzazione comunale.^[1]

Nell'ambito della lotta tra Papato ed Impero la città di Amelia, a causa della propensione nei confronti della Chiesa, nel 1240 ha subito un saccheggio ad opera delle truppe di Federico II. Da qui inizia la decadenza del Comune e il suo coinvolgimento nelle dispute tra Guelfi e Ghibellini.

Tra la fine del XIV e l'inizio del XV secolo Amelia incappò in un periodo di tremenda carestia, i cui effetti furono aggravati dai tributi imposti da Roma. L'11 novembre 1417 fu eletto Papa il Cardinale Ottone Colonna (Martino V), il quale avendo frequentato Amelia confermò i suoi privilegi verso la città la quale, da ciò confortata, iniziò a riprendersi.

Amelia, pur condizionata essenzialmente dallo Stato della Chiesa, continuava con alacrità a difendere i criteri di autonomia e di libertà comunale.

Agli inizi del '500 Amelia è tutta un cantiere, le residenze nobiliari si installano lungo il tracciato delle preesistenze antiche, da porta Romana alla croce di Borgo e vescovi e cardinali commissionano molti lavori come segno e manifestazione di una posizione ormai acquisita.^[1]

1.2 LE MURA E LE PORTE

Le mura in opera *poligonale* (*opus antiquum*) sono tra le architetture più sorprendenti dell'antichità. Realizzate a secco con enormi blocchi lapidei, le cui grandi dimensioni (anche 2 metri) gli valsero inizialmente l'appellativo di *ciclopiche* (ritenendo che fossero opera della

mitologica popolazione dei Ciclopi) sostituito poi dal termine *megalitiche*, sono presenti in varie zone d'Italia: Alatri, Ferentino, Guardea, san Felice Circeo, ecc. ma le mura amerine per lunghezza, forma, età e stato di conservazione sono considerate le più significative. Restano irrisolti alcuni interrogativi: CHI, COME e spesso anche QUANDO, tali opere siano state realizzate.

Le possenti mura dell'antica Ameria sono state erette in risposta alle minacce rappresentate dalle popolazioni confinanti: etrusca, umbra e romana. L'imponente cinta muraria cinge il centro da sud-est a sud-ovest e si interrompe nelle aree dove il colle presenta una difesa naturale alle incursioni nemiche: un impervio dirupo a nord, scosceso ai fianchi est e ovest dove i torrenti Rio Grande e Fosso di Macchie rappresentano un'ulteriore difesa. È ben evidente la presenza di due recinti murari, il primo e più antico può essere ricondotto ai rapporti coi popoli più antichi e circoscritto al VII-VI secolo a. C. mentre il secondo, dopo un notevole ampliamento dell'area urbana, può essere collegato alla minaccia di Roma e circoscritto ai secoli IV-III a. C.^[2]

Dalle varie e frammentate documentazioni a disposizione si ritiene che la prima cerchia muraria, i cui resti sono ben evidenti all'interno dell'attuale centro storico tra la chiesa di S. Angelo e Porta della Valle, sia opera dell'antichissimo popolo degli Umbri (si parla addirittura di periodo **pre-protostorico**). Si distinguono dalle altre mura per l'aspetto più grezzo e meno rifinito dei blocchi utilizzati (Figura 1.5).

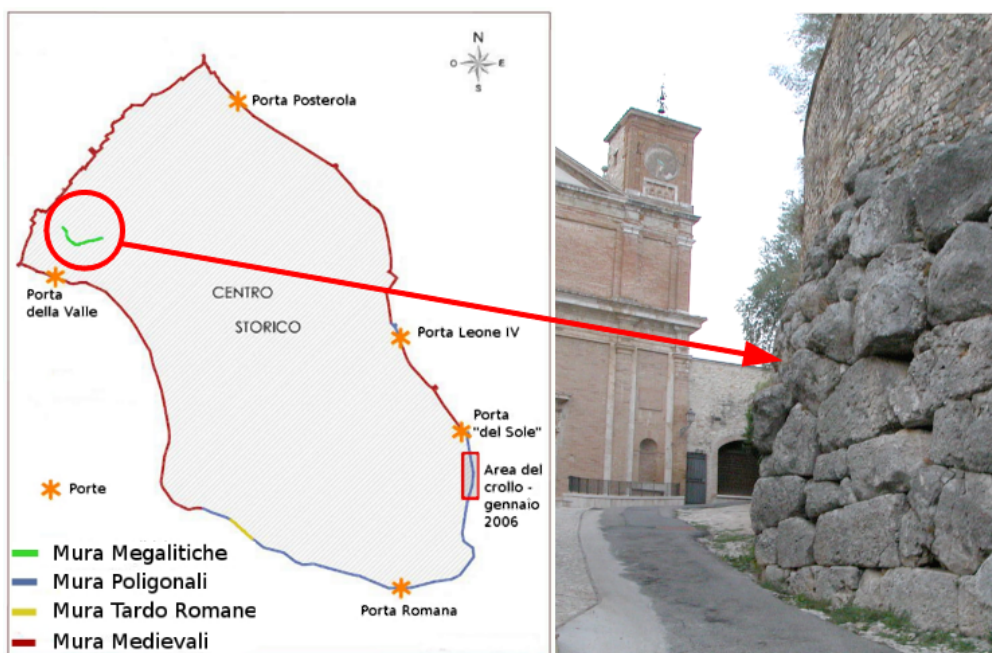


Figura 1.5 - Posizione delle mura megalitiche nel centro storico e immagine di scorcio

La scelta di una modellazione poligonale è, probabilmente, legata alla facilità di trasformare la pietra disponibile in natura o distaccata in cava in una forma di poligono più o meno regolare. Questa forma favorisce anche una sorta di *incastro naturale* tra i vari elementi conferendo maggiore stabilità all'intero paramento murario.

Le mura poligonali di Amelia si snodano per circa 2000 metri di lunghezza con una

profondità di circa 3,5 metri e con un'altezza variabile tra gli 8 ed i 15 metri, sono costituite da tratti lineari raccordati con speciali blocchi angolari realizzati con grande perizia (Figura 1.6). Si ritiene che queste mura siano il risultato di un semplice ed ingegnoso lavoro di compatta sovrapposizione effettuato da esperti costruttori probabilmente di origine locale che hanno sfruttato pietre calcaree della zona.



Figura 1.6 - Due esempi di raccordi angolari lungo le mura poligonali

Nel marzo 1984 Franco Della Rosa ha eseguito, presso l'Istituto di Geologia Applicata dell'Università di Roma, un'analisi geologica tramite sezioni sottili per lo studio delle mura e della roccia locale prelevando campioni in quattordici punti della città (mura, edifici, roccia viva all'interno ed esterno dell'abitato, Figura 1.7). Dallo studio al microscopio dei campioni eseguito insieme al prof. Odoardo Girotti si è potuto individuare la provenienza della pietra utilizzata per la costruzione delle mura megalitiche e poligonali: si è riscontrata la perfetta rispondenza dei materiali usati con la roccia locale ad eccezione del tratto di mura a ovest (di fattura romana) che risultano provenienti da giacimenti marini (Figura 1.8).^[2]

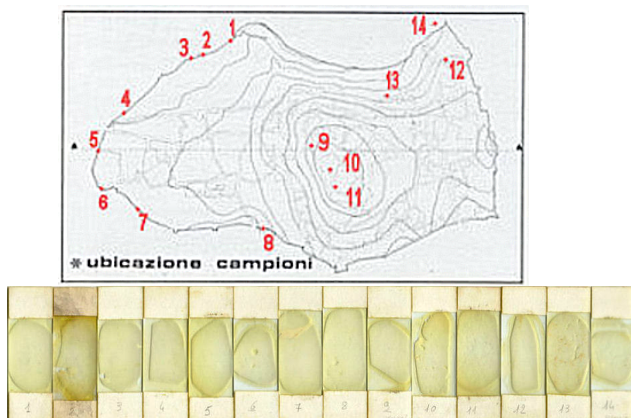


Figura 1.7 - Posizione dei 14 campioni prelevati e relative sezioni sottili (marzo 1984)



Figura 1.8 - Tratto di mura con pietra non locale

L'imponenza delle mura ha spinto gli abitanti a inglobarle nelle costruzioni successive rendendole parte integrante del tessuto urbano costruendoci sopra case, piazze, giardini, orti e terrazze. La stratificazione durante epoche successive si legge facilmente guardando la tessitura delle mura stesse.



Figura 1.9 - Mappa di Amelia e disposizione delle porte.

Le porte di accesso al centro abitato lungo le mura sono:

- ◆ **PORTA ROMANA** - È la porta centrale, quella principale e più maestosa della città. È anche la più recente, realizzata su progetto di Antonio da Sangallo il Giovane intorno al 1518 e reca alla sommità esterna una dedica votiva alla Madonna che salvò la città dal terremoto del 1703. E' sormontata da caditoia rinascimentale in mattoni. All'esterno il ponte della porta che negli anni cinquanta fu ridotto nella parte terminale ed allargato per permettere un più agevole transito. E' visibile tuttora sui cardini, l'antica porta lignea, mentre nel cielo voltato a botte appare l'affresco con lo stemma della città: A.P.C.A. in banda bianco argento su sfondo azzurro ("Antiani Populi Civitatis Amerie") che significa "GLI ANZIANI DEL POPOLO DELLA CITTA' DI AMELIA", ovvero l'organismo elettivo più importante del libero Comune, dal tempo degli Statuti del secolo XIV.



Figura 1.10 - Porta Romana e affresco dello stemma della città nell'intradosso dell'arco

- ◆ **PORTA LEONE IV** - Deve il suo nome al pontefice Leone IV che la ristrutturò. Dà accesso sull'omonima via e al quartiere Leone, uno dei più caratteristici della città per l'aspetto tipicamente medievale, rimasto intatto nelle piccole stradine che si intersecano tra loro e nel ricordo delle botteghe artigiane che la animavano fino a qualche anno fa. La porta si affaccia sul lato nord-orientale della città ed è contrassegnata da due archi: uno a tutto sesto sopra ad uno a sesto

ribassato. Ai lati della porta sono ben visibili resti di mura megalitiche (Figura 1.11).



Figura 1.11 - Porta Leone IV

- ◆ **PORTA POSTEROLA** - Costituita in effetti da due porte con incorniciatura in travertino e sormontata da archi a tutto sesto poggianti su mensole, risale al secolo XIII. Le due porte sono disposte perpendicolarmente l'una all'altra con lieve sfalsamento, formando una piazzola interna gestita all'epoca da un corpo di guardia che alloggiava nella torre a pianta quadrata inserita nella trama delle mura cittadine. Il suo compito era di far entrare in quello spazio carri commerciali, controllarne il carico, esigere un eventuale dazio. Non vi sono tracce, nella parte esterna, di difesa piombante trovandosi in posizione nettamente distaccata da terra e raggiungibile probabilmente solo con ponte levatoio.



Figura 1.12 - Porta Posterola

- ◆ **PORTA DELLA VALLE** - Si apre nel lato occidentale, al termine della via omonima. Le sue origini sono medievali con funzione di rilievo nell'accesso ad Amelia in quanto immetteva direttamente nel cuore della città, e costituiva altresì un punto di osservazione ottimale per il controllo della viabilità. Eccezionale il panorama che si può ammirare da questo punto di osservazione.^[3]



Figura 1.13 - Porta della Valle (da sinistra) vista da fuori ed entro le mura.

Nel tratto sud-ovest delle mura, in seguito ad interventi di consolidamento è stata trovata una antica porta dai tratti ben diversi da quelli di altre porte ad architrave dritto: questa presenta un architrave costituito da blocchi di pietre ricurve su massi laterali che fungono da pilastri. Attualmente sono in corso lavori di scavo per portarla completamente alla luce ed è oggetto di attento studio per capire la funzione di tale varco rispetto al centro abitato.

1.3 DAL CROLLO DEL 2006 AD OGGI

La cinta muraria nel tempo è stata messa a dura prova da vari fenomeni di dissesto, in particolare dal sisma che ha colpito l'Umbria nel 1997 e dalla presenza di falde acquifere, ma l'evento più drammatico è avvenuto alle 7.05 nella mattina del 18 gennaio 2006: con un grande boato crollava una parte rilevante delle mura ciclopiche nei pressi di piazza XX settembre, nella zona adiacente ai lavori in corso per il consolidamento delle mura stesse.



Figura 1.14 - Due viste del crollo avvenuto il 18 gennaio 2006

Il crollo ha interessato un tratto rilevante di mura poligonali nel versante est tra la Torre dell'ascensore e l'antica Porta del Sole: il cedimento di circa duemila metri cubi di materiale ha interessato un fronte di 25 metri per un'altezza di circa 15 metri (Figura 1.14).

Le cause del crollo sono imputabili probabilmente al maltempo e secondo *INGENIUM*, Periodico di informazione dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Terni, anche eventi legati alla storia di Amelia e alle popolazioni che l'hanno abitata negli ultimi 2500 anni.

In questo articolo Marco Tommasini e Christian Servi ritengono che anche altri fattori, oltre alle piogge, abbiano contribuito ad indebolire la struttura. Secondo la loro tesi con tutta probabilità gli antichi costruttori delle mura non conoscevano le proprietà del terreno di fondazione e le stesse mura, nate come difesa dalle invasioni, sono state indebolite da scelte inadeguate alla natura della struttura. In tempi di pace, infatti, sono state usate come terrazze,

muri di contenimento per avere orti coltivabili e dal medioevo in poi (dopo la scoperta della polvere da sparo) viene costruito un terrapieno per l'alloggiamento dei cannoni caricando ancor di più la struttura. Tutti elementi che, insieme alla spinta dell'acqua accumulatasi con le abbondanti piogge e al sovraccarico dato dai mezzi da lavoro del cantiere sovrastante, hanno dato un contributo non trascurabile a minare la stabilità delle mura culminando con il crollo del 18 gennaio 2006. ^[4]

1.3.1 COMMISSIONE TECNICO-SCIENTIFICA

Dopo il crollo del 2006 la Regione Umbria ha provveduto all'istituzione di una **Commissione di lavoro tecnico-scientifica** con il compito di promuovere e coordinare gli interventi necessari al recupero delle mura di Amelia nonché all'esecuzione di opere di restauro e consolidamento tutt'ora in corso (Figura 1.15).

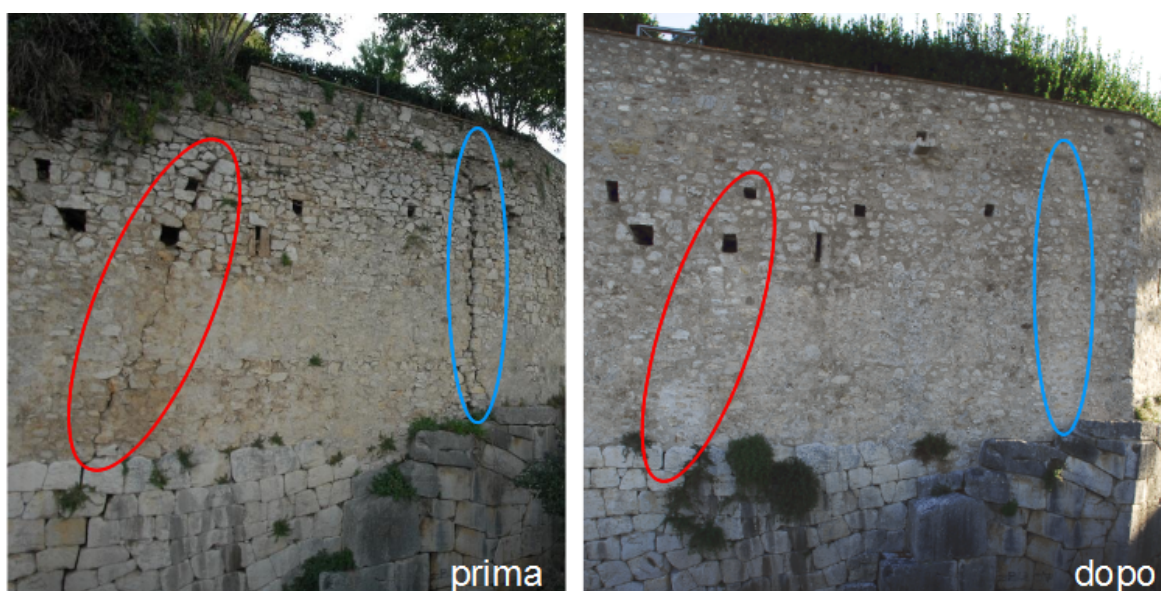


Figura 1.15 - Confronto dello stesso tratto di mura prima e dopo il restauro, si nota bene il recupero della parte superiore del paramento murario e sono evidenziate le lesioni “ricucite”

La commissione è costituita da esperti di chiara fama e specializzati in recupero e consolidamento di strutture murarie e da rappresentanti delle istituzioni coinvolte: Regione Umbria, Comune di Amelia, Soprintendenza dei Beni Archeologici per l'Umbria, Soprintendenza dei beni Architettonici, Associazioni culturali e docenti universitari. Gli interventi concordati dalla commissione vengono eseguiti nel rispetto dei vincoli imposti dalla tutela archeologica.

Da un documento della Regione Umbria si attesta che dai lavori della Commissione è emersa l'esigenza di progettare un sistema di monitoraggio delle mura ciclopiche per:

- verificare la verticalità delle mura a vista e con strumenti ottici di precisione;
- completamento indagini e sondaggi in corso per lo scavo a monte delle mura;
- posizionamento di accelerometri per la verifica di eventuali movimenti sismici;

- posizionamento in foro interno alle mura di spie estensimetriche;
- esecuzione di endoscopie nei fori esistenti;
- posizionamento di inclinometri di parete-posizionamento di fessurimetri.^[RU]

1.3.2 PROGETTO DI MONITORAGGIO DEL D.I.C.A.

Nell'ambito della Commissione tecnico-scientifica la Regione Umbria dai primi mesi del 2007 ha affidato all'Università di Perugia, nello specifico al D.I.C.A. (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale), la progettazione e l'esecuzione di un sistema di monitoraggio basato su tecniche geomatiche. Sulla base dei sopralluoghi, dei rilievi e della cartografia disponibile dell'area sono state fatte delle ipotesi progettuali e di ricerca per la realizzazione di un sistema di monitoraggio delle mura basato sull'integrazione di diverse tecnologie di rilievo innovative basate su rilevamenti periodici.

In questo modo è possibile rilevare con cadenza pari alla periodicità delle misure l'evolvere nel tempo dello stato deformativo della struttura sotto controllo e gli eventuali movimenti lenti. Non è possibile, invece, valutare in tempo reale i cinatismi rapidi e i crolli, cosa che si può realizzare solo con installazioni permanenti e trasmissione dei dati in tempo reale.

Le tecniche utilizzate in modo integrato per il monitoraggio sono:

- **GNSS** per realizzare una rete di inquadramento generale di tutti i rilievi in un unico ed omogeneo sistema di riferimento, definito mediante la rete regionale umbra di stazioni permanenti GNSS;
- **RETI TRIDIMENSIONALI LOCALI** misurate con stazione totale robotizzata di alta precisione per il monitoraggio topografico di deformazioni locali eseguito per punti con elevata affidabilità e accuratezza (1÷2 mm);
- **LASER SCANNER TERRESTRE** per il rilievo tridimensionale *quasi continuo* (perché è un rilievo per punti benché di altissima densità, tecnica approfondita nel Capitolo 2) della superficie delle aree da monitorare;
- **FOTOGRAMMETRIA DIGITALE TERRESTRE** per il rilievo tridimensionale *continuo* delle mura per l'analisi tridimensionale di deformazioni macroscopiche dell'ordine subcentimetrico e per la documentazione dello stato di fatto delle mura stesse. In questa tesi viene sperimentata una nuova tecnica di fotogrammetria non convenzionale basata sull'utilizzo di singole immagini acquisite con camere digitali comuni elaborate con uno specifico software della Menci Software di Arezzo (Capitolo 5)
- **GEORADAR:** Da novembre 2012 è stata usata una tecnica innovativa che utilizza il

georadar in collaborazione col Dipartimento di Geofisica dell'Università di Perugia. Tale tecnica consente di indagare le mura all'interno del loro spessore, riportando alla luce informazioni non riscontrabili con le altre modalità di rilievo finora effettuate. Per questo tipo di rilievo è stata scelta la Zona A che presenta una sezione verticale abbastanza omogenea, la strumentazione, infatti, deve essere tenuta il più possibile a contatto con la parete da rilevare (vedi tesi F. Capoccia, 2012).

Il sistema di monitoraggio è stato progettato per utilizzare in modo integrato le diverse tecniche così da trarre il massimo vantaggio dalle caratteristiche specifiche di ciascuna metodologia. Le tecnologie proposte sono tra le più avanzate e innovative attualmente disponibili e la loro applicazione è ancora in parte oggetto di ricerca.^[5]

1.3.2.1 AREE SOTTOPOSTE A MONITORAGGIO

Nella cinta muraria sono state individuate delle aree caratterizzate da un particolare stato di rischio, in un primo momento erano quattro, chiamate: Zona A, Zona B, Zona C, Zona D. Si sono però incontrate difficoltà che non hanno consentito di effettuare i rilievi nella zona D, per questo nel 2008, in accordo con la Commissione, si decise di escluderla dagli interventi. In sostituzione alla Zona D è stata individuata una nuova area di interesse: la Zona E. Oggi la Zona D è nuovamente accessibile per i rilievi, dunque le aree sotto controllo sono cinque.

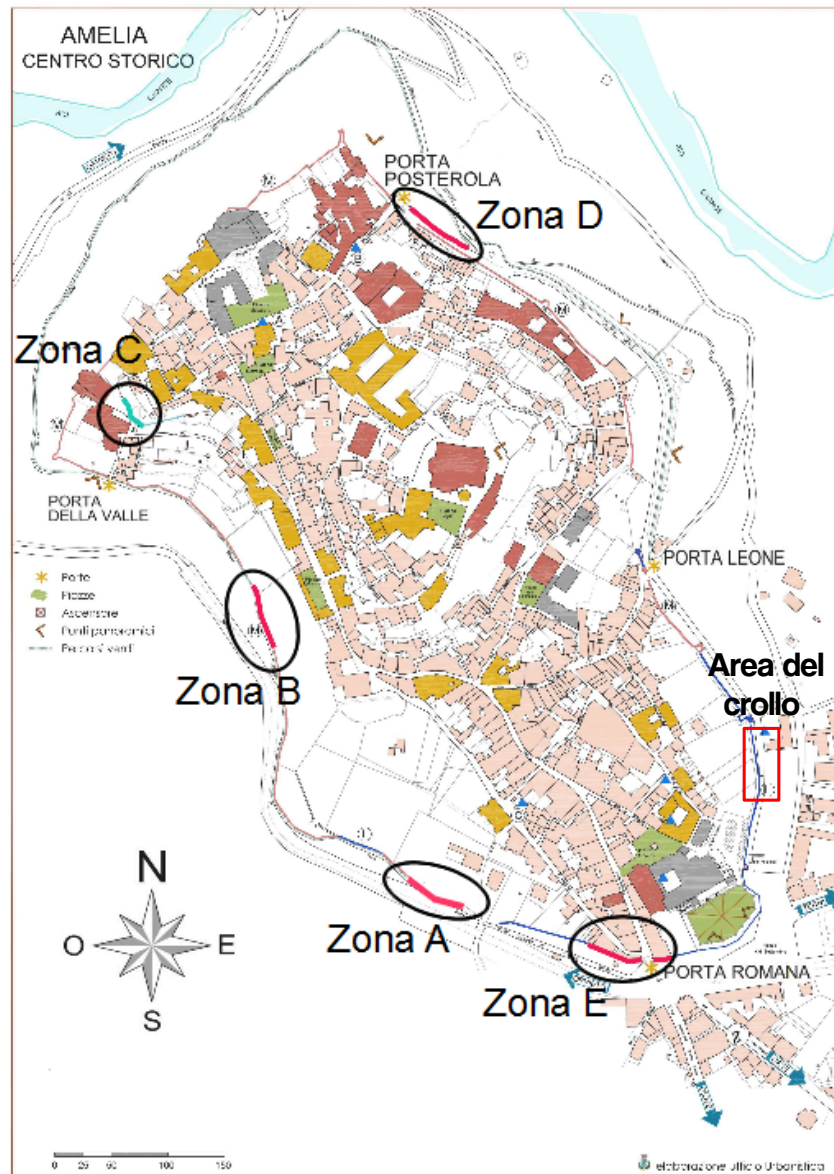


Figura 16 - Mappa di tratti di mura monitorati dal D.I.C.A.

- ◆ **ZONA A** – detta *giardini d'inverno*, è il tratto di mura a sostegno dell'orto Farrattini, ha esposizione a sud-ovest. Qui le mura sono di tipo poligonale (Figura 1.17);



Figura 1.17 - Zona A: *giardini d'inverno*.

- ◆ **ZONA B** – detta *la Valle* è un tratto di mura del periodo medievale che



Figura 1.18 - Zona D: *la Valle*.

raggiunge i 9 metri di altezza, si trova nel lato ovest della cinta muraria (Figura 1.18);

- ◆ **ZONA C** – detta Sant'Angelo, è il tratto della mura più antiche risalgono alla prima cerchia muraria, sono le mura megalitiche. Solo in questa zona, infatti gli enormi blocchi calcarei presentano una lavorazione “più primitiva” ovvero blocchi dalla superficie grezza e dalle forme più irregolari che in tutte le altre mura della città (Figura 1.18).



Figura 1.19 - Zona C: da via della Valle verso la porta.

- ◆ **ZONA D** – detta “salto della morte” per la sua posizione in cima allo sperone roccioso a nord della città. Le mura di quest'area risalgono al periodo medievale e sfiorano i 10 metri d'altezza. Quest'area ha presentato grandi impedimenti all'esecuzione dei rilievi tanto che si è deciso di sostituirla con la zona E (non prevista nel primo progetto di monitoraggio). Da settembre 2012 è stato possibile accedere all'area ed eseguire i rilievi.



Figura 1.20 - Zona D - vista da Via delle Mura è attualmente area di cantiere.

- ◆ **ZONA E** - Questo tratto di mura è sicuramente il più scenografico in prossimità della Porta. Appartiene al VI-IV secolo a. C. e si trova ai lati della porta più importante della città: Porta Romana. Le mura poligonali sono state inglobate nel tessuto cittadino (Figure 1.21 e 1.22).



Figura 1.21 - Zona E, lato a ovest di Porta Romana



Figura 22 - Lato a est di Porta Romana

1.3.2.2 MATERIALIZZAZIONE DEI VERTICI

Le materializzazioni dei vertici dei punti di controllo sono state realizzate con la massima cura sia per effettuare correttamente l'orientamento delle mire in modo che risultino ben visibili dai pilastri (punti di stazione previsti nel progetto del D.I.C.A.) sia per l'attenzione rivolta all'impatto ambientale e al contesto monumentale in cui si andavano ad inserire.

Dall'inizio del programma di monitoraggio ad oggi le aree sottoposte a controllo sulle mura amerine sono cambiate nel tempo per esigenze di varia natura e sono cambiate anche alcune materializzazioni dei vertici (vedi Paragrafo 1.3.2.1).

Le operazioni di materializzazione sono terminate nel luglio 2008 e dopo l'esecuzione delle prime misure sono state apportate alcune ulteriori varianti migliorative alle materializzazioni stesse. La prima variante ha riguardato i prismi di controllo fissati alla muratura: per aumentare l'accuratezza delle misure angolari è stato ricavato un riferimento di precisione costituito da un forellino di 1 mm di diametro realizzato con microtrapano nell'anello metallico della montatura di ciascun prisma, superiormente al prisma stesso (Figura 1.23).

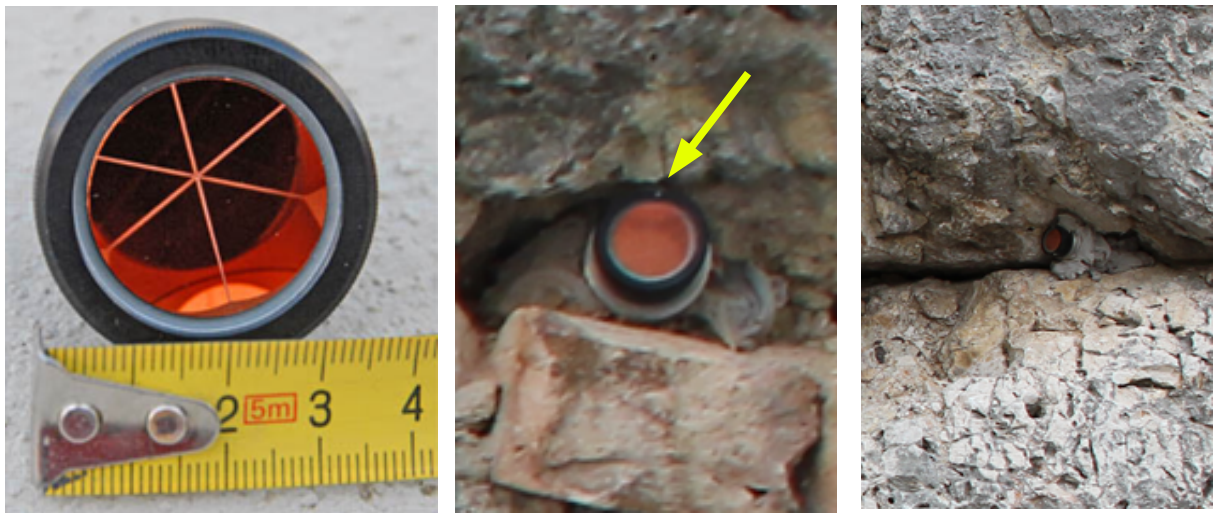


Figura 1.23 - Da sinistra: immagini del mini-prisma in dettaglio, particolare del microforo, incastonato tra le rocce

Una seconda variante migliorativa ha riguardato i dispositivi di centramento da avvitare inferiormente alle basette per il montaggio degli strumenti, con riscontro nei fori ricavati al centro delle piastre inox montate sui pilastri. I primi dispositivi sferici presentavano una tolleranza esecutiva che provocava un gioco che sia pur limitato a pochi decimi di mm, poteva ridurre l'accuratezza delle misure. I centramenti sferici sono stati pertanto sostituiti con nuovi dispositivi cilindrici muniti di due o-ring elastomerici, che minimizzano il gioco tra piastra e basetta (Figura 1.24).

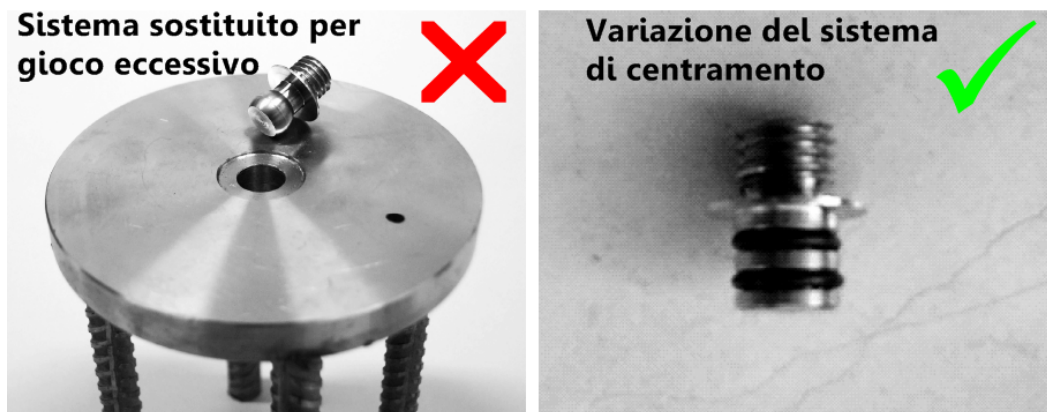


Figura 1.24 - A sinistra il sistema di centramento sferico, a destra la variante cilindrica

I vertici di stazione sono materializzati in modo diverso in relazione all'ambiente in cui si trova la zona da rilevare, ma sono caratterizzati tutti da una piastra di acciaio inox a centramento forzato in cui possono essere posizionati i vari strumenti del rilievo: mire mobili, stazione totale, antenna GPS, laser-scanner, ecc.

- **ZONA A** (giardini d'inverno) – 3 pilastri in calcestruzzo armato rivestiti di pietra locale con fondazione che su micropali, recanti in sommità una piastra di centramento in acciaio inox, come da progetto. I vertici sono denominati A100, A200 e A300; la piastra di centramento di ogni pilastro è protetta da un coperchio amovibile in lamiera

verniciata (Figure 1.25 e 1.26).



Figura 1.25 - I tre pilastrini della Zona A



Figura 1.26 - Pilastrini di stazione nella zona A

- **ZONA B** (La Valle) - 2 pilastrini in calcestruzzo armati rivestiti in pietra, con fondazione diretta su banco di roccia compatta affiorante, recanti in sommità una piastra di centramento in acciaio inox, come da progetto. I vertici sono stati denominati B100 e B200; la piastra sommitale di ogni pilastrino è protetta da un coperchio amovibile in lamiera verniciata.
- **ZONA C** (Sant'Angelo) – inizialmente sono stati disposti 3 vertici di stazione materializzati con altrettante piastre di centramento in acciaio inox realizzate come quelle delle zone A e B ma ancorate alla sommità del muro di cinta dell'edificio di proprietà comunale antistante il tratto di mura da controllare. Non è comunque stato possibile realizzare dei pilastrini come quelli della zona A perché sarebbero stati d'intralcio al passaggio dei veicoli nella stretta via della Valle.

Nel 2010 è stato necessario apportare una modifica alla rete locale di monitoraggio poiché sono stati eseguiti dei lavori di ristrutturazione sull'edificio antistante le mura della Zona C. In tale intervento è stato demolito il muro di cinta dell'edificio su cui erano state poste le piastre per le stazioni di monitoraggio. Su indicazione del Laboratorio di Topografia si è individuato e realizzato un nuovo punto di stazione: è posto su una mensola a sbalzo realizzata in corrispondenza di una finestra dell'edificio ristrutturato (Figura 1.27) da cui risultano ben visibili tutti i 12 prismi presenti sulle mura.



Figura 1.27 - Nuova materializzazione del vertice nella zona C (detta S. Agostino)

- **ZONA D** (salto della morte) - Sin dall'inizio del mandato per la realizzazione dei vertici della rete di controllo, in questa zona non è stato possibile effettuare le attività previste a causa dello stato dei luoghi: sia perché di proprietà privata, sia per la fitta vegetazione (bosco di Porta Posterola) con alberi alti fino a 30 metri in precarie condizioni di equilibrio che rendevano pericoloso l'accesso e l'esecuzione delle misure (Figura 1.28).



Figura 1.28 - Mura della Zona D prima del 2010

Si decise, dunque, di soprassedere agli interventi in tale zona e dopo i sopralluoghi, eseguiti congiuntamente ai tecnici della Regione, è stata individuata una nuova zona di monitoraggio, in sostituzione della zona D: il tratto adiacente Porta Romana (zona E).

È stato necessario stilare anche il progetto delle nuove opere di materializzazione da eseguire: un pilastro di stazione fondato su pali e installazione di 10 miniprismi

retroreflettenti).^[6]

Nel 2010 nell'area della zona D è stato avviato il cantiere per la realizzazione di un parcheggio e tre ascensori, pertanto l'area è stata disboscata risultando accessibile per le operazioni di rilievo (Figura 1.29). In data 18 settembre 2012, infatti, sotto la supervisione del capocantiere, ci è stato concesso l'accesso per effettuare le acquisizioni sia con la stazione totale Leica-TS06 sia con il laser-scanner Riegl LMS Z-420i (per approfondimenti vedere Capitolo 2 e tesi F.Capoccia 2012).



Figura 1.29 - Cantiere nell'area della Zona D (foto del 12-09-2012) e rilievo del 18-09-2012

- **ZONA E** (Porta Romana) – Le nuove opere di materializzazione nella zona E hanno richiesto tempi tecnici abbastanza lunghi, legati alla necessità di acquisire autorizzazioni e alla disponibilità dell'impresa ad eseguire i lavori. Sono state pertanto ultimate solo nell'estate 2011 (Figura 1.30).^[6]



Figura 30 - Materializzazione del vertice E100 nella zona E, a sinistra in fase di esecuzione e a destra a lavori ultimati

1.3.2.3 METODOLOGIE DI RILIEVO

I rilievi di monitoraggio, considerati come integrazione di varie tecniche geomatiche, hanno consentito di ottenere:

- rete GPS

- misure 3D
- nuvola di punti da laser scanner
- ortofoto dalla fotogrammetria
- permettono di ottenere un risultato sostanzialmente analogo: un rilievo geometrico tridimensionale pressoché continuo delle superfici di un manufatto, con accuratezza subcentimetrica, "vestito" per così dire con immagini digitali ad alta definizione.^[7]

Aniché considerare le varie tecniche una alternativa all'altra in una sorta di competizione tecnico-economica è più opportuno considerarle complementari, utilizzandole in sinergia alla ricerca della miglior combinazione in termini di prestazioni assolute e di rapporto costi/benefici.

Il risultato è un modello virtuale tridimensionale dell'oggetto, ad alta risoluzione sia geometrica che radiometrica, visualizzabile, esplorabile e misurabile su un video grafico, che resta a disposizione sia per finalità di semplice archiviazione, che per il monitoraggio del manufatto nel tempo o per la progettazione di interventi di restauro.^[7]

In questa tesi verranno trattate due tecniche in particolare: il laser scanning e la fotogrammetria digitale non convenzionale (rispettivamente nei Capitolo 2 e 4).

CAPITOLO 2

LASER-SCANNING

2.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Negli ultimi quindici anni tra le varie tecniche geomatiche per il rilievo di oggetti o del territorio si è affermato il *laser scanning*. Questa tecnica si basa sul metodo di misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche e viene comunemente chiamata LIDAR (*Light Detection And Ranging*).

La tecnologia laser scanning consente, con diverse modalità, di rilevare oggetti di varie forme e dimensioni, in maniera automatica e non invasiva, conducendo un rilievo indiretto.

La caratteristica principale della tecnologia *laser scanning* è l'acquisizione in autonomia di milioni di punti 3D in brevissimo tempo, per questo rappresenta un metodo molto efficiente per la digitalizzazione e la modellizzazione di oggetti e di porzioni di territorio di qualsiasi forma e dimensione. La digitalizzazione avviene in modo discreto e il risultato di una scansione è un insieme molto denso di punti, comunemente chiamato *nuvola di punti*, distribuiti sull'oggetto da rilevare, secondo un passo angolare regolare assegnato ma del tutto indifferente rispetto alla geometria dell'oggetto stesso.^[8]

Una nuvola di punti in sostanza è un insieme di coordinate tridimensionali in un sistema di riferimento comune che fornisce all'osservatore la comprensione spaziale di un soggetto o di un determinato sito. Può includere anche informazioni aggiuntive come l'intensità del segnale di ritorno al ricevitore o il valore RGB.^[9]

In una sessione di rilievo con il laser scanner i dati vengono acquisiti assai rapidamente ed in modo quasi del tutto automatizzato, l'intervento dell'operatore è richiesto solo per il posizionamento e l'accensione dello strumento, per inquadrare dell'area da rilevare e avviare la scansione. È nella fase successiva, detta di *post processamento*, che è richiesto l'intervento di un operatore esperto e per l'elaborazione dei dati attraverso software dedicati alla gestione delle nuvole i tempi sono ben più lunghi.

2.2 IL LASER SCANNER

I laser scanner sono strumenti in grado di misurare ad altissima velocità la posizione di centinaia di migliaia di punti con i quali è possibile ricostruire la superficie dell'oggetto del rilievo. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti molto denso, comunemente chiamato *nuvola di punti*, visualizzabile in un file grafico tridimensionale.

In questo tipo di rilievo si ottengono diverse informazioni:

- le tre coordinate del punto rilevato (informazioni geometriche)
- il valore della riflettanza, che assume valori diversi in base alla natura del materiale (la riflettanza esprime la capacità dei corpi di riflettere il raggio laser). Questo determina una variazione cromatica dei punti acquisiti che non corrisponde ai colori reali dell'oggetto, ma consente di distinguere i materiali di cui è costituito (Figura 2.1)

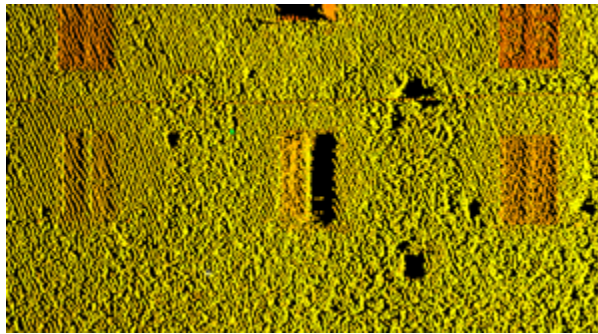


Figura 2.1 - Esempio di variazione cromatica in funzione dei diversi materiali

- informazione radiometrica di ogni punto (solo per gli strumenti più evoluti, molto costosi e poco diffusi): attraverso un particolare sensore laser sono acquisiti contemporaneamente sia dati geometrici sia l'informazione cromatica reale dell'oggetto. In questo caso si ottiene la nuvola con l'RGB reale dell'oggetto.

2.2.1 TIPOLOGIE

Esistono varie tipologie di laser scanner che permettono di rilevare sia oggetti piccoli ad elevatissima risoluzione e precisione, sia oggetti estesi a risoluzione più bassa. I laser scanner presenti sul mercato sono molti ed ognuno presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione, nella portata e nella velocità di acquisizione.

- ◆ **IN BASE AL PRINCIPIO DI ACQUISIZIONE** utilizzato si possono distinguere:

LASER SCANNER DISTANZIOMETRICI (O RANGING SCANNER)- sono considerati una sorta di stazioni totali ad elevata automazione. Questo perché la misura della posizione tridimensionale del punto avviene in coordinate sferiche, ovvero per ogni punto acquisito

sono misurati: un angolo azimutale (orizzontale), un angolo zenitale (verticale) ed una distanza inclinata (Figura 2.2).

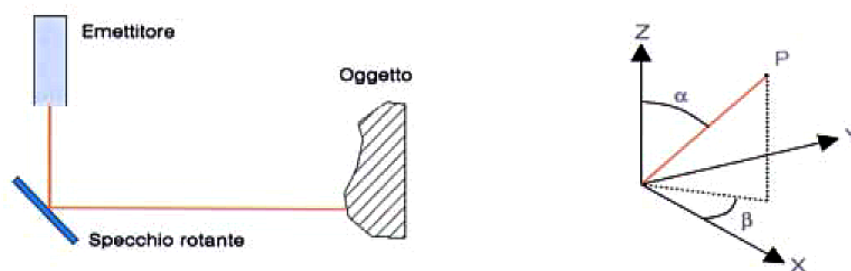


Figura 2.2: Schematizzazione dei Laser Scanner Distanziometrici

I due sistemi sono però ben diversi: con la stazione totale si effettua un rilievo topografico classico in cui vengono misurate le coordinate di punti particolari collimati sull'oggetto da rilevare, devono essere ben riconoscibili all'occhio e in genere ne definiscono la sagoma, come ad esempio spigoli, fessure, ecc.

Nel caso di un rilevamento laser scanning, invece, non ci sono punti da scegliere, ma è possibile definire solo l'area che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatizzata. Lo strumento, ruotando sul proprio asse misura tutti i punti che ricadono nel suo campo visivo (mediamente 10.000 punti al secondo). Il risultato del rilievo è una densa nuvola di punti distribuiti in modo casuale sull'oggetto.^[10]

Il range di azione di questi strumenti può variare da alcuni metri ad alcune centinaia di metri con un margine di errore molto ridotto: da pochi millimetri su distanze fino a 80m, a pochi centimetri su distanze dell'ordine di 2000 metri. Vengono impiegati, per questo motivo, nel rilievo di oggetti di grandi e medie dimensioni e i campi di applicazione sono molteplici: dall'architettura all'ingegneria civile, dal monitoraggio ambientale alla riproduzione della realtà virtuale ecc.^[11]

LASER SCANNER TRIANGOLATORI - Per la misurazione della posizione di punti, funzionano secondo il principio dell'intersezione in avanti. Lo strumento è costituito da un braccio, detto "base" ai cui estremi sono posizionati due diodi (comunemente la dimensione della base non supera il metro per motivi pratici e di maneggevolezza). Lo strumento calcola la posizione dei singoli punti in base agli angoli che si formano tra il raggio emesso, il raggio riflesso e la base (Figura 2.3).

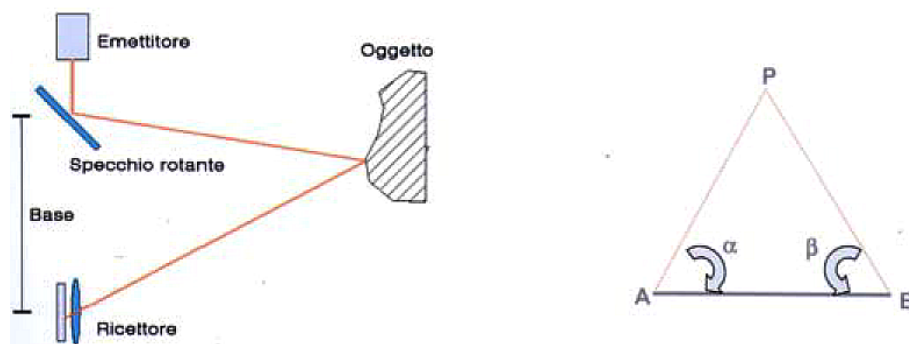


Figura 2.3 - Schematizzazione dei laser scanner a triangolazione

Anche in questo caso l'acquisizione è totalmente automatizzata. Tale geometria di acquisizione consente di ottenere precisioni molto elevate (sub-millimetriche) a fronte di portate limitate (dell'ordine di qualche metro) e tempi di acquisizione mediamente elevati.^[10]

Rispetto ai laser scanner distanziometrici hanno velocità di acquisizione minore, ma raggiungono precisioni di rilievo più elevate, dell'ordine del decimo di millimetro.

◆ **IN BASE AL SISTEMA DI MISURA** si distinguono in laser scanner:

- **A TEMPO DI VOLO** (o TOF=Time Of Flight): lo strumento emette un impulso laser a una frequenza di una decina di kHz, che dopo aver colpito il punto da rilevare, torna allo strumento stesso.

La misura dell'intervallo di tempo fra l'emissione e la ricezione del raggio riflesso, l'angolo di inclinazione del raggio emesso rispetto all'asse verticale dello strumento e l'angolo azimutale del raggio emesso rispetto ad un asse orizzontale preso come riferimento costituiscono le coordinate sferiche che consentono l'individuazione tridimensionale dei punti rilevati. Le coordinate vengono in una prima fase fornite in un sistema di riferimento cartesiano, che ha origine in un punto dello strumento e che, successivamente può essere georeferenziato in termini assoluti o relativi, anche con un sistema GPS.^[11]

- **A MISURA DI FASE** il loro funzionamento è simile a quello dei distanziometri a misura di fase: viene emessa una radiazione ottica con lunghezza d'onda corrispondente all'infrarosso vicino ($\lambda=0,78\mu\text{m}$) che viene modulata e trasmessa verso un prisma retro riflettore; quest'ultimo riflette una parte dell'onda verso l'apparecchio ricevente, che interpreta la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta.^[9]

2.2.2 IL RIEGL LMS-Z420I

Il laser scanner con cui sono stati effettuati i rilievi sulle mura di Amelia nelle zone E (ottobre

2011) e nella zona D (ottobre 2012) è il RIEGL LMS Z-420i.

Questo strumento fa parte della strumentazione del Laboratorio di Topografia; si tratta di un laser scanner ad impulsi e a lunga portata (può arrivare a 1200m dal punto di stazione), è prodotto dalla austriaca Riegl e corredato del software di base per l'acquisizione RISCAN PRO.

La casa costruttrice fornisce le seguenti specifiche dello strumento:

CARATTERISTICHE TECNICHE	
Laser	Classe 1 (protezione occhi) In accordo con la certificazione IEC60825-1:1993+A1:1997+A2:2001
Distanze misurabili	da 2 mt fino a 1200 mt (dipendenti dalla riflettività del materiale)
Ripetibilità delle misure	8 mm singola misura 4 mm misura con medie
Precisione	10 mm
Area di ripresa	80° verticale e 360° orizzontale (con supporto opzionale si coprono i 360° anche in verticale)
Velocità	da 11.000 p.ti/sec ad 8.000 p.ti/sec dipendente della modalità di scansione
Lunghezza d'onda laser	(vicino infrarosso)
Divergenza del raggio laser	0,25mrad (corrispondente ad un fascio laser di 25mm a 100mt)
Minimo passo angolare verticale	0,004°
Risoluzione angolare verticale	0,002°
Minimo passo angolare orizzontale	0,004°
Risoluzione angolare orizzontale	0,0025°
Dimensioni	463x210mm (lunghezza x diametro)
Peso	16 kg (completo di tutti gli accessori)
Interfaccia	TCP/IP (Ethernet); Porta Parallela ECP; Wi-Fi (opzionale) Strumento controllabile tramite Pc desktop o notebook
Alimentazione	12 - 28 Vdc
Assorbimento	6.5 A a 12V - 3,25A a 24V
Temperature operative	0°C + 40°C
Protezione	IP64 (protezione: acqua; polvere)
Interfacciamento con GPS e Piattaforma inerziale IMU	Opzionale
Sensore inclinometrico interno	Opzionale

Figura 2.4 - Scheda tecnica del Riegl LMS Z420i dalla brochure della casa costruttrice^[12]

Sulla testa dello strumento può essere montata una camera digitale per la ripresa di immagini ad alta risoluzione durante l'esecuzione delle scansioni. In questo modo si ottengono foto che possono essere perfettamente sovrapposte alla nuvola per rivestirla del dato RGB fornendo così un'informazione completa dell'oggetto rilevato e si facilita il compito di

generazione di ortofoto.

Con questa strumentazione oltre al laser scanner sono necessari:

- Treppiedi per lo stazionamento del laser,
- Batteria 12V per l'alimentazione dello strumento e relativi cavi,
- Computer portatile, per impostare i parametri della scansione tramite software correlato allo strumento (Riscan Pro) e registrare i dati dell'acquisizione, e relativo cavo usb di collegamento

(Scanner di altro tipo, invece, hanno batteria integrata, controllo da display e risultano analoghi ad una stazione totale).

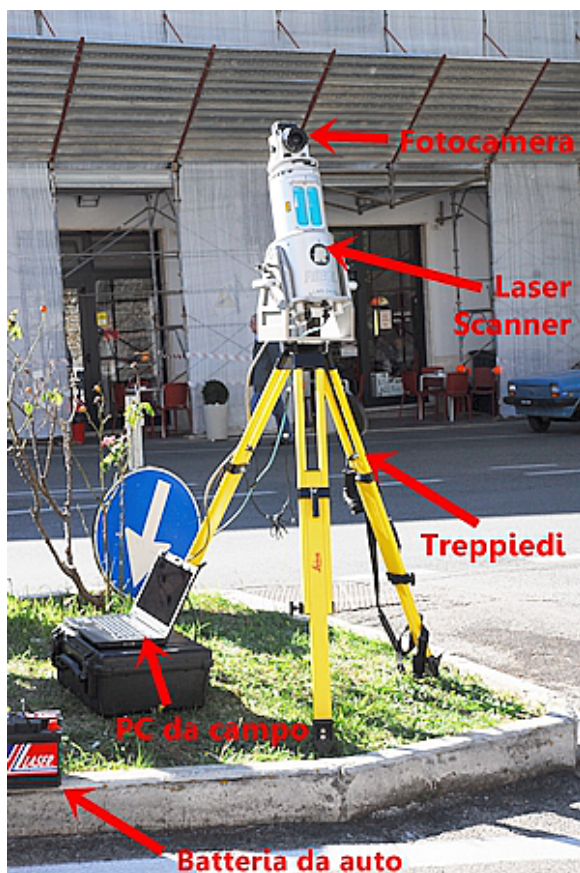


Figura 2.5 - Riegl LMS Z420i

2.3 ACQUISIZIONE DATI CON RISCANPRO

La strumentazione con cui ci si sposta sul campo è pesante ed ingombrante, il che rende poco agevoli gli spostamenti durante i rilievi. Per contro la fase di acquisizione dati in una

sessione di campagna richiede tempi molto rapidi. L'intervento dell'operatore è limitato all'impostazione dell'area e del passo della scansione, dopodiché il processo di acquisizione è completamente automatizzato.

Sebbene il laser scanner consenta di rilevare una grandissima quantità di punti, difficilmente si riuscirà ad avere un modello 3d completo dell'oggetto con una sola scansione. Questo è dovuto al fatto che da un solo punto di stazione possono crearsi delle ombre che diventano lacune nella nuvola (esempio lampante è l'edicola davanti alle mura della zona E, vedi figura 2.6). Sono dunque necessarie più scansioni effettuate in punti diversi per coprire tali lacune.

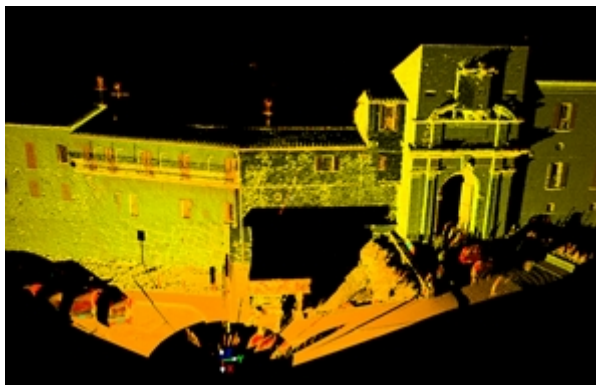


Figura 2.6 - Ombre proiettate sull'oggetto del rilievo (Zona E)

Dalle scansioni si ottengono delle nuvole di punti che dovranno avere necessariamente delle zone in comune per poter essere unite e allineate in un unico modello (REGISTRAZIONE DELLE SCANSIONI) in fase di postprocessing. Per agevolare il compito di registrazione delle nuvole, nella campagna di rilievo prima della scansione si dispongono dei target retroriflettenti distribuiti in modo uniforme su tutta l'area.

Una volta posizionato lo strumento nel punto di stazione si effettuano tutti i collegamenti del caso (alla batteria esterna e al pc). All'accensione il laser compie una *overview*, ossia una scansione a bassa risoluzione ruotando a 360° attorno al proprio asse z.

Il software Riscan Pro restituisce il live view dello strumento e da questa vista si verifica se è posizionato correttamente per riprendere l'oggetto, si impostano i parametri di risoluzione della scansione, sull'*overview* si seleziona la finestra di interesse e si avvia la scansione.

Riscan Pro durante ogni scansione identifica in automatico, oltre ai marker retroriflettenti di coordinate note (battuti con una stazione totale), anche tutti gli oggetti che hanno una elevata riflettività (ad esempio i segnali stradali o i fanali delle auto). Al termine della scansione questi elementi vengono selezionati, si fa compiere allo strumento una scansione rapida dei soli target che sono stati selezionati in modo da acquisirli come punti di controllo. Vengono salvati in un file txt e serviranno per l'allineamento delle nuvole nella fase successiva, quella di elaborazione dei dati con un software di modellazione.

Evidentemente i target selezionati avranno le coordinate nel sistema di riferimento solidale allo strumento e cioè: asse z coincidente con l'asse dello strumento, asse x in corrispondenza dell'origine del cerchio azimutale, asse y a completare una terna levogira (figura2.7).



Figura 2.7 - sistema di riferimento solidale allo strumento

2.4 RILIEVI AD AMELIA

In relazione all'accordo con la Regione Umbria per il monitoraggio di alcuni tratti delle mura, il Laboratorio di Topografia ha eseguito diversi rilievi.

2.4.1 ZONA E

Per la Zona E, quella inclusa di recente nel protocollo, la prima scansione è stata eseguita il 10 ottobre 2011 proprio con il Riegl LSM Z420i.

Le scansioni sono state effettuate in due posizioni: dal pilastrino creato ad hoc per il monitoraggio dell'area e da una piazzola spartitraffico antistante Porta Romana con stazione su un treppiede (Figura 2.8). In post processing ho elaborato queste due nuvole.



Figura 2.8- Seconda postazione di scansione

2.4.2 ZONA D

Il 18 settembre 2012 ho assistito personalmente ai rilievi eseguiti nella Zona D, in passato difficilmente accessibile e ora area di un cantiere per la realizzazione di un parcheggio.

Sono state realizzate 3 scansioni ciascuna di durata dai 20 ai 45 minuti, due all'interno del cantiere ed una in prossimità della piccola rotonda in via delle mura.



Figura 2.9 - Preparazione della strumentazione nel primo punto di stazione

Queste tre scansioni sono state elaborate per avere un unico modello tridimensionale georiferito. La descrizione dettagliata delle attività di questo rilievo, che vanno dall'acquisizione dati fino alla restituzione delle nuvole, sono oggetto della tesi di Francesca Capoccia (a cui si rimanda per approfondimenti).

2.5 ELABORAZIONI CON CYCLONE

I punti delle scansioni, in una prima fase, vengono forniti in un sistema di riferimento cartesiano, che ha origine in un punto dello strumento e che, successivamente può essere georeferenziato in un sistema assoluto o relativo.

Per l'elaborazione delle nuvole di punti si è utilizzato un programma della suite Cyclone 7.1.

Dei rilievi eseguiti ho effettuato delle elaborazioni sulle due scansioni della zona E.

In questi rilievi sono stati utilizzati come punti di controllo alcuni particolari ben riconoscibili presi direttamente sulle mura (ad esempio gli spigoli di finestre) con una stazione totale. Tali punti sono in un sistema di riferimento locale con asse z verticale.

Il primo passo per ottenere un modello unico dalle due scansioni è stato quello di importare le nuvole acquisite sul campo con Riscan Pro, ognuna orientata secondo il sistema di riferimento dello strumento (con asse z inclinato).

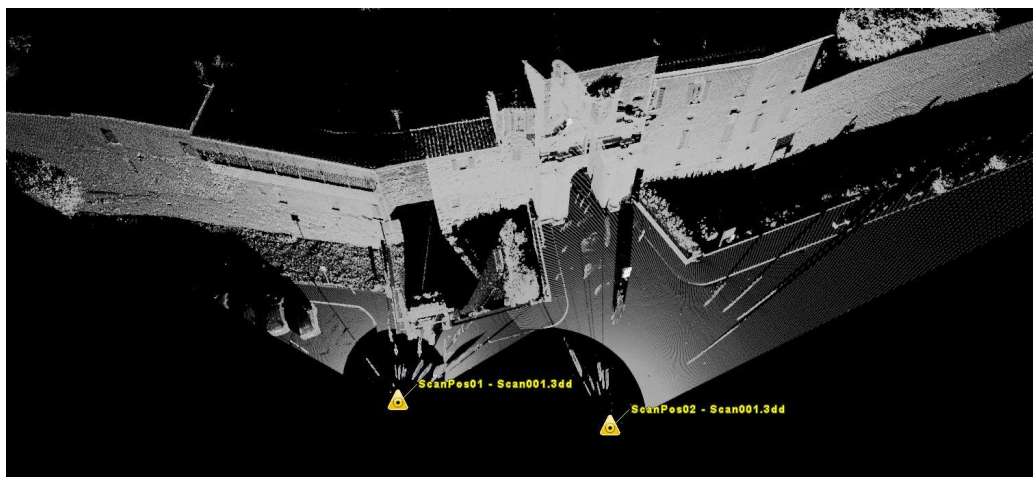


Figura 2.10 - Posizione delle scansioni con nuvole non ancora allineate

All'interno di Cyclone le due nuvole sono state allineate tra di loro: la seconda è stata rototraslata sulla prima fino ad ottenere una nuvola complessiva in un sistema di riferimento locale ancora con asse z inclinato (Figura 2.11).

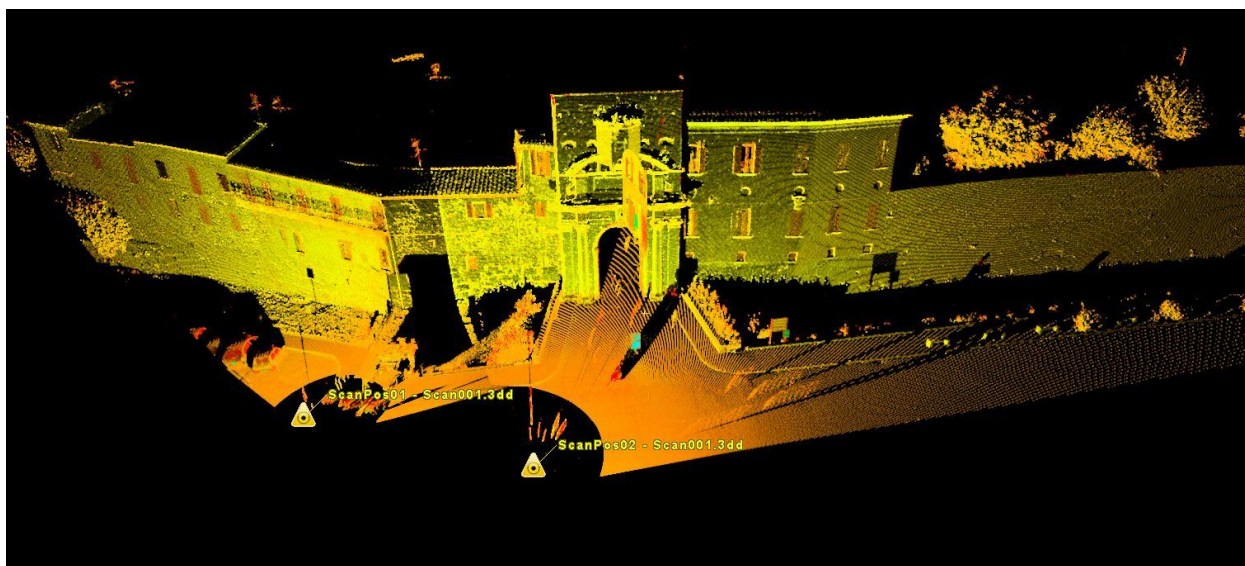


Figura 2.11 - Due scansioni allineate

Per orientare la nuvola in un sistema di riferimento con asse z verticale si sfruttano i punti di controllo rilevati con la stazione totale e individuati sulla nuvola, importati nel progetto come file ASCII.

Il modello 3D così ottenuto oltre ad essere navigabile può essere interrogato per estrarre

tutte le misure di interesse. Può essere ulteriormente elaborato per avere un modello solido, estrarre Dem o ortofoto.

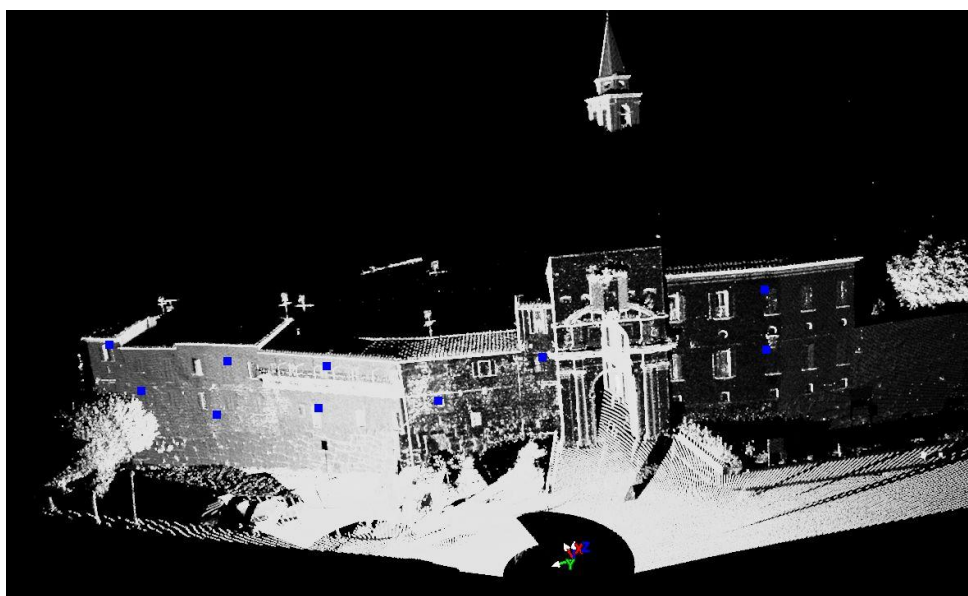


Figura 2.12 - Modello unico orientato con i punti d'appoggio (indicati in blu)

Il modello tridimensionale ricavato dalle scansioni può essere "rivestito" con immagini digitali. Quelle utilizzate sono state scattate con la fotocamera calibrata Nikon D200 con obiettivo AF 14mm f 2.8. Sono foto ad alta risoluzione e metricamente corrette, orientate sui punti d'appoggio utilizzati per le scansioni in modo da adattare il più possibile nuvola di punti e immagini (Figura 2.13).

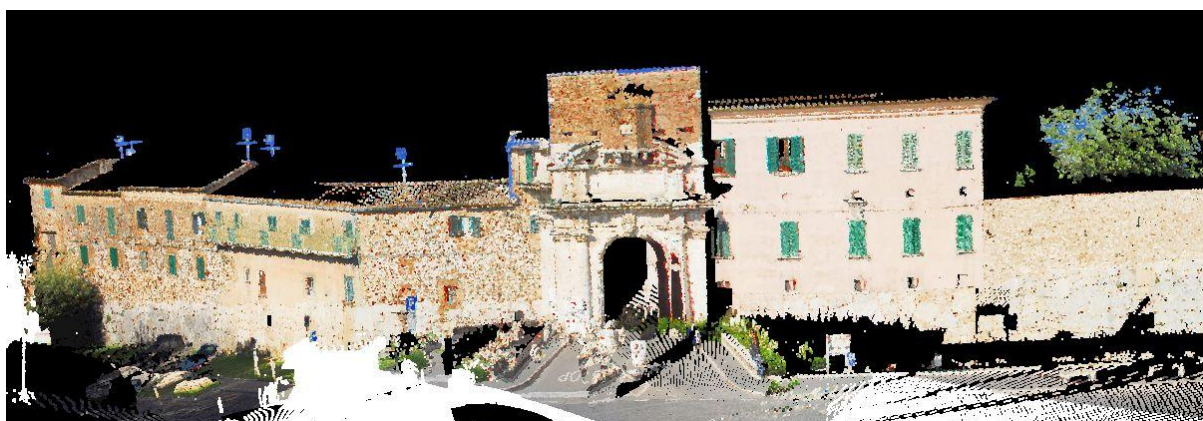


Figura 2.13 - Modello 3D rivestito con le immagini digitali.

Dalla nuvola di punti orientata in un sistema di riferimento con asse z verticale è possibile estrarre anche gli elaborati tipici della fotogrammetria, piante, prospetti e profili degli edifici, nonché Dem, ortofoto e ortomosaici.

2.6 PROBLEMATICHE

La tecnologia del laser scannig è ancora in fase di sviluppo, le sue enormi potenzialità sono poco sfruttate per problemi di varia natura che ne limitano l'utilizzo e la diffusione: in primo luogo i costi della strumentazione (si aggira sui 100.000 euro), inoltre il processamento dei dati è ancora complesso e con tempi ancora troppo lunghi sebbene si stiano studiando dei programmi in grado di snellire la procedura di elaborazione dei dati.

Oggi il laser scanner non è in grado di sostituire completamente le tecniche classiche di rilievo, e forse non lo farà mai, ma può supportarle e completarle diventando uno strumento molto efficace nel rilievo, conservazione e documentazione di un manufatto architettonico.^[11]

CAPITOLO 3

FOTOGRAMMETRIA TRADIZIONALE

3.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Con il termine fotogrammetria si intende l'insieme di tutti i procedimenti analitici, grafici e ottico-meccanici che tramite un adeguato numero di fotografie di un oggetto, prese in modo opportuno e da punti diversi, permette di ricostruire l'oggetto o determinate sue proiezioni. Si tratta di oggetti che necessitano di numerosi punti sia per una descrizione completa sia per una rappresentazione grafica in scala. Con questa tecnica si può eseguire il rilievo di oggetti di qualsiasi forma e dimensione.^[13]

La fotografia, da un punto di vista ottico-proiettivo, è assimilabile ad una proiezione centrale: tutti i raggi provenienti dal mondo esterno vengono convogliati, attraverso le lenti dell'obiettivo, in un punto e proiettati su un piano che li intercetta (lastra, pellicola, sensore). Si può, quindi, affermare che la fotografia con buona approssimazione è una vista prospettica della realtà.^[14]

Nota la prospettiva di un oggetto ed i procedimenti "inversi" per ricavarne le proiezioni ortogonali, dal punto di vista topografico della rappresentazione, la fotogrammetria serve a passare da prospettive centrali, che sono una rappresentazione legata alle immagini fotografiche, a proiezioni ortogonali. Il rilievo topografico serve per riferire il rilievo stesso al sistema di riferimento esterno. Si misurano coordinate (nel sistema di riferimento interno) di un punto P sulle immagini e si ricavano le sue coordinate (nel sistema di riferimento esterno) (X_p , Y_p , Z_p), poi si determinano le incertezze delle coordinate di quello stesso punto appoggiandosi al rilievo topografico (il tutto è avvenuto prima in modalità geometrica proiettiva, poi in modalità analitica ed infine digitale). Da qui è possibile ricavare informazioni metriche dalle rappresentazioni fotografiche.^[15]

La fotogrammetria dunque è un mezzo per giungere alle informazioni metriche che costituiscono il primo passo verso la conoscenza, la documentazione e la rappresentazione dell'oggetto; essa permette di sviluppare in maniera più dettagliata le successive operazioni di

monitoraggio e di analisi periodica dello stato di fatto per la salvaguardia e conservazione del bene rilevato, facilitando anche eventuali fasi di progetto e di intervento sul bene stesso (questa è una delle tante applicazioni possibili).

La tecnica fotogrammetrica appartiene alla famiglia del *rilievo indiretto* che è un metodo di rilievo in cui le misure vengono eseguite con strumenti ottici, meccanici o informatici di grande precisione. Tali misure richiedono una serie di calcoli ed elaborazioni più o meno complessi per poter ottenere una "traduzione grafica" degli oggetti rilevati all'interno di un sistema di coordinate spaziali.^[16]

Tutto il rilievo fotogrammetrico avviene dunque senza la necessità di un contatto diretto con l'oggetto poiché le misure possono essere eseguite su una sua rappresentazione. Proprio per questa sua peculiarità oggi la fotogrammetria viene utilizzata nei settori più disparati: dalla produzione cartografica al rilievo archeologico, dal restauro al campo biomedico, dalla geologia alle perizie giudiziarie, al rilievo geometrico di precisione in applicazioni meccaniche ed aeronautiche, ecc. in un elenco in continua evoluzione.

3.2 VANTAGGI RISPETTO AL RILIEVO DIRETTO

I vantaggi della tecnica fotogrammetrica rispetto al rilievo diretto sono numerosi e interessano diversi aspetti.

- Consente di rilevare oggetti di qualunque forma e dimensione anche in assenza di un contatto fisico diretto con l'oggetto stesso (in questo senso può essere considerato una sorta di telerilevamento).
- Consente l'acquisizione simultanea di molti punti (come coordinate di punti oggetto) e di una grande quantità di informazioni.
- Le misure vengono eseguite a posteriori, nella fase successiva al rilievo sul campo. Questo fa sì che le misure possano essere ripetute e controllate.
- Rapidità: il tempo effettivo di rilievo sul campo si limita alla durata dell'acquisizione delle immagini. Nella mia esperienza per questo lavoro di tesi si è trattato di poche ore per ciascuna zona da rilevare (per i dettagli vedere il Capitolo 5).
- Economicità: l'evoluzione tecnologica ha notevolmente ridotto i costi delle attrezzature per il rilievo fotogrammetrico. Questo aspetto è evidente principalmente nell'ambito della fotogrammetria non convenzionale, che utilizza comuni camere digitali (dotate necessariamente del certificato di calibrazione o dei valori dei parametri di orientamento interno, vedere il Capitolo 4).
- Produttività: grazie alla crescita del digitale e della Computer Grafica è possibile manipolare una grande quantità di dati in tempi relativamente brevi. Con software di elaborazione e post processing è possibile ottenere risultati considerevoli sia per grandi estensioni sia per scale medio-piccole.
- Uniformità di precisione.

Questi vantaggi hanno dato un importante contributo allo sviluppo e alla diffusione della fotogrammetria, tanto che questa metodologia di rilievo oggi viene impiegata nei settori più disparati.

La fotogrammetria rimane comunque una disciplina specialistica, che richiede competenze vaste e grande esperienza per poter essere applicata con risultati attendibili.^[17]

3.3 CENNI STORICI

Le origini della tecnica fotogrammetrica sono antecedenti all'avvento della fotografia, i suoi principi teorici derivano dalla geometria descrittiva ed in particolare dalla PROSPETTIVA CENTRALE: attraverso specifiche costruzioni geometriche consente di rappresentare in modo inequivocabile una realtà 3D in una realtà 2D.^[13]

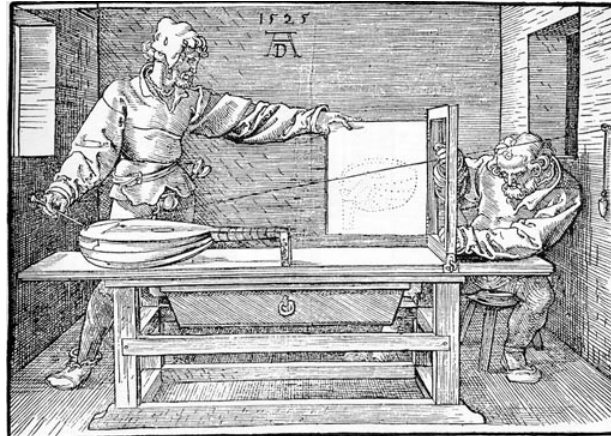


Figura 3.1 - Strumento per la costruzione di un'immagine prospettica

La storia della fotogrammetria che nei suoi principi teorici è legata alla storia della geometria descrittiva, in particolare alla teoria della prospettiva, nella sua applicazione è legata alla storia dell'ottica, della fotografia e alle relative scoperte tecnologiche. La fotografia, infatti, da un punto di vista ottico-proiettivo, è assimilabile ad una proiezione centrale.

La fotogrammetria, per poter essere correttamente applicata, ha dovuto pertanto attendere che si sviluppassero le conoscenze necessarie sia nell'ambito della geometria descrittiva sia nell'ambito della fotografia legando le due discipline: nota la prospettiva ed i procedimenti geometrici "inversi", per ricavare da essa le proiezioni ortogonali dell'oggetto reale, è stato possibile ricavare informazioni metriche dalle rappresentazioni fotografiche, prima in modalità geometrica proiettiva, poi in modalità analitica ed infine digitale.^[15]

Il colonnello francese Aimé Laussedat è considerato il padre fondatore della fotografia metrica ed ha fabbricato il primo fototeodolite. La prima restituzione fotogrammetrica è stata eseguita proprio da Laussedat con un processo detto "iconometria" che si basava sull'analisi delle immagini fotografiche riprese dai tetti degli edifici. Nel 1959 presentò a Parigi una relazione dove esponeva un metodo di determinazione delle coordinate dei punti di un oggetto, ricavate da una coppia di fotografie mediante intersezione spaziale di raggi.^[18] Gli studi eseguiti e i notevoli contributi originali a questa nuova tecnica valsero al colonnello Laussedat il titolo di "padre della fotogrammetria".

Il primo, però, ad applicare sistematicamente l'uso della fotografia al rilievo è

l'architetto e professore tedesco: Albrecht Meydenbauer, fondatore e direttore dell'Istituto Reale Prussiano di Fotogrammetria fino al 1909. Grazie a lui si inizia ad utilizzare la fotogrammetria per il rilievo dei vicini e non solo come applicazione della topografia per il rilievo dei terreni.^[19]

È lo stesso Meydenbauer a coniare il termine "fotogrammetria" definendola:
"Insieme dei processi di utilizzazione di prospettive fotografiche centrali nella formazione di cartografie topografiche e nella documentazione architettonica".

Da questo momento in poi l'uso del metodo fotogrammetrico per il rilievo architettonico comincia a diffondersi e svilupparsi, grazie soprattutto all'evoluzione tecnologica e strumentale che portò alla realizzazione di apposite camere monoscopiche o stereoscopiche e di specifiche strumentazioni per la restituzione.

La fotogrammetria è subito molto apprezzata per tutti i vantaggi che presentava rispetto al tradizionale metodo diretto: maggiore velocità di acquisizione dei dati in situ, possibilità di avere un solo operatore impegnato nella presa, possibilità di acquisizione anche in casi in cui non sia garantita l'accessibilità ed il contatto diretto con l'oggetto da rilevare.

La fotogrammetria è apprezzata soprattutto per la notevole quantità di informazioni contenute in un singolo fotogramma: valore metrico, morfologico e qualitativo, nonché una documentazione completa e continua sullo stato di consistenza del bene architettonico. Anche a livello di precisione ed attendibilità i risultati potevano essere paragonati a quelli del rilievo diretto effettuati con strumenti topografici tradizionali.^[19]

Nel 1909 l'invenzione dello "stereo-autografo" da parte di Edoardo Von Orel (Figura 3.3) consente il tracciamento continuo di linee planimetriche e di curve di livello.

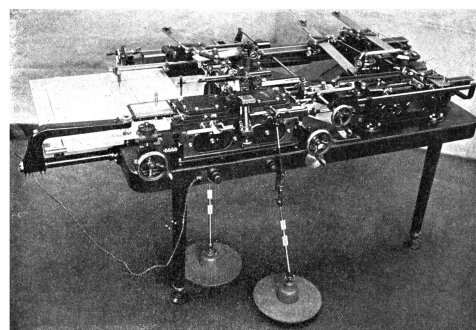


Figura 3.2 - Stereo-autografo di Von Orel (1909)

In questo modo sono scomparsi i numerosi calcoli e le meno precise operazioni grafiche. Il problema proiettivo per la fotogrammetria aerea, però, restava ancora troppo complesso.

L'introduzione della visione stereoscopica amplia decisamente l'applicazione della fotogrammetria nel campo cartografico, ma i modesti mezzi di calcolo di allora impediscono qualunque metodo pratico, che non fosse fatto per via grafica o ottico-meccanica, per passare dalla prospettiva alla proiezione ortogonale.

La fotogrammetria, dunque, è stata analogica dagli inizi del secolo fino agli anni sessanta. Per analogica si intende sia la presa che la restituzione: la presa veniva effettuata con particolari camere a lastra o a pellicola e la restituzione veniva condotta su dispositivi opto-meccanici chiamati, appunto, restitutori analogici.^[20]

Dalla fine degli anni sessanta, con l'avvento del calcolatore elettronico compaiono i primi stereocomparatori elettronici e successivamente i primi restitutori semi-analitici ottenuti aggiungendo una componente elettronica di misura ai tradizionali restitutori analogici.

A metà degli anni settanta lo sviluppo dell'elettronica e dell'informatica coinvolge anche la fotogrammetria: è la nascita della fotogrammetria analitica. Il supporto continua ad essere la tradizionale pellicola da sviluppare su carta o su negativo ma la misura e gli orientamenti sono gestiti da un calcolatore elettronico.



Figura 3.3 - Esempi di restitutore analogico (a sinistra) e restitutore digitale (a destra)

Nel 1981 il finlandese Tapani Sarjakoski introduce i primi concetti di fotogrammetria digitale, detta anche *soft photogrammetry*, mentre i primi strumenti digitali sono di qualche anno più tardi (Figura 3.4). Viene così raggiunta la possibilità di produrre e utilizzare immagini non fotografiche, bensì *numeriche*: le immagini digitali.

La fase di restituzione ha abbandonato gli stereorestitutori analogici di tipo ottico-meccanico e viene svolta interamente al computer, impiegando appositi software che gestiscono formati sia raster che vettoriale e favoriscono in questo modo un'immediata integrazione con altri dati di diversa provenienza.^[16]

Con la diffusione dei sensori CCD e della Computer Grafica inizia l'era della fotogrammetria digitale in cui le operazioni di orientamento interno, relativo ed assoluto (Paragrafo 3.8.1) vengono svolte attraverso un calcolatore. Il CCD segna anche la nascita degli scanner fotogrammetrici (Figura 3.5): dispositivi a distorsione controllata capaci di convertire una fotografia in una tabella numerica in cui ad ogni cella è associato un numero digitale proporzionale alla quantità di luce incidente sul foto-rivelatore.

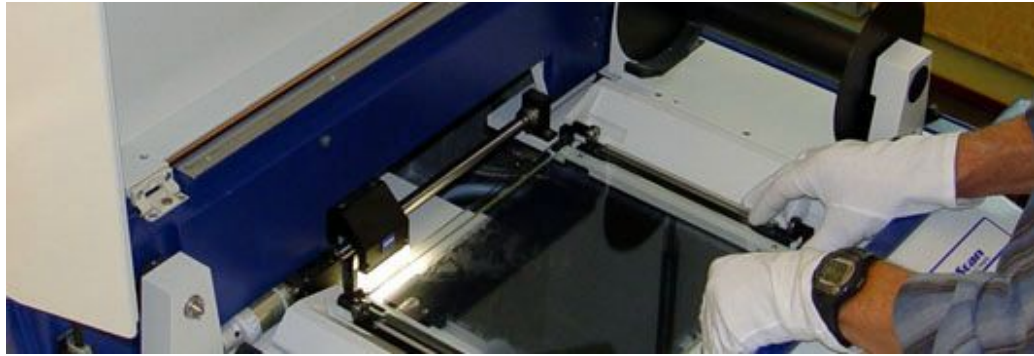


Figura 3.4 - Scanner fotogrammetrico

Un enorme passo avanti si deve all'uso della polarizzazione video: la restituzione vera e propria avviene direttamente tramite video con l'utilizzo di occhiali polarizzati che mostrano alternativamente i due fotogrammi ai due occhi (un esempio è mostrato nella Figura 3.6, per l'approfondimento sui restitutori si rimanda al paragrafo 3.7.1.2).

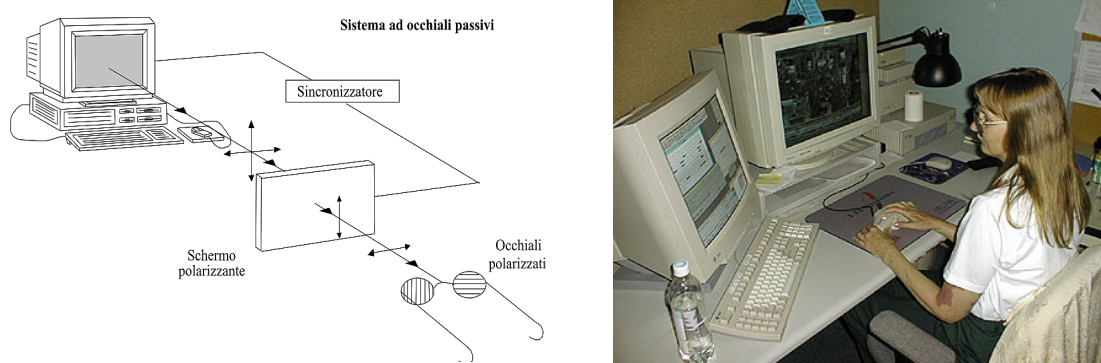


Figura 3.5 - Schema e foto di una tipica postazione fotogrammetrica digitale con l'uso di lenti polarizzate

Questa tecnologia ha rivoluzionato i sistemi digitali del momento portando finalmente il restitutore digitale ad essere paragonabile, in termini di precisione e facilità d'uso, ai precedenti strumenti analitici di ordine superiore. Negli anni novanta nascono le prime DPW, *Digital Photogrammetric Workstation*, veri e propri computer equipaggiati con un sistema di visione stereoscopica.

È interessante notare che la fotogrammetria digitale nasce molti anni prima della vera e propria "acquisizione digitale" delle immagini. Questa affermazione è giustificata dal fatto che la presa continua ad essere analogica e la conversione A/D avviene in una fase successiva.^[20]

Le tecnologie digitali hanno anche il merito di aver contribuito alla diffusione della fotogrammetria monoscopica che, sebbene meno rigorosa e affidabile della tradizionale fotogrammetria stereoscopica, ha il vantaggio di basarsi su procedure molto semplici e alla portata di tutti.^[16] L'avvento di nuove tecnologie, di calcolatori più potenti e di strumenti digitali ha abbattuto sensibilmente i costi, i tempi di elaborazione e la diffusione della fotogrammetria in vari campi d'applicazione.

È tuttavia riduttivo identificare la fotogrammetria digitale come la tecnica classica in cui l'unica differenza è nell'utilizzo di immagini digitali acquisite sul sensore anziché sulla pellicola:

la fotogrammetria digitale è una nuova tecnica che apre il campo d'applicazione a nuove discipline della misura e ad attività inedite.

L'ultima evoluzione tecnologica riguarda il passaggio dal video analogico (CRT) a quello digitale (LCD). Questo cambiamento ha comportato l'impossibilità di utilizzo dei sistemi a polarizzazione sia attiva che passiva, ormai da tempo perfezionati per la visione stereoscopica in ambito fotogrammetrico.

Da qui il ritorno al sistema dello "stereoscopio" (nella figura 3.7 è mostrato un esempio realizzato dalla Menci Software): un visore professionale che può essere adattato su comuni schermi LCD di costo contenuto.



Figura 3.6: Visore che consente la visione stereoscopica anche con monitor LCD

3.4 FASI DEL PROCESSO FOTOGRAMMETRICO

Il processo fotogrammetrico si articola in una serie di step consecutivi:

- **PROGETTO:** è la fase preliminare al rilievo vero e proprio ed ha un ruolo fondamentale. È il momento in cui si stabilisce lo scopo del rilievo e si studiano le caratteristiche dell'oggetto (morfologiche, geometriche, collocazione nel contesto e accessibilità). In questa fase si individuano i mezzi e le metodologie da utilizzare nel rilievo:
 - 1) ricognizione sul posto per acquisire informazioni utili ai fini della pianificazione;
 - 2) scelta della scala di restituzione per la rappresentazione finale;
 - 3) progetto del rilievo:
 - scelta della scala del fotogramma;

- scelta della strumentazione: camera e focale;
 - individuazione distanza media e base di presa ottimali;
- 4) progetto del rilievo topografico per la rete di appoggio;
- **ACQUISIZIONE:** detta anche *fase di presa*, è quella in cui si realizzano le foto che diverranno la fonte di dati. Nella fase di progetto si sono individuati i punti dove fare stazione, nonché le migliori posizioni e le possibili inclinazioni per gli scatti;
 - **APPOGGIO:** misura dei punti di appoggio mediante tecniche topografiche (ad esempio con una stazione totale). Questi punti (detti *punti oggetto*) saranno anche *punti di controllo*: avranno coordinate note nel sistema di riferimento prescelto;
 - **ELABORAZIONE** dei dati, avviene in laboratorio. In questa fase di *processing* si realizzano:
 - 1) orientamento dei fotogrammi (vedi Paragrafo 3.8.1);
 - 2) collegamento delle varie acquisizioni e inquadramento in una rete topografica (locale o più ampia);
 - 3) allineamento e/o unione delle nuvole di punti → creazione del modello stereoscopico da cui si estrarrà il modello digitale;
 - **RESTITUZIONE:** è fondamentale quanto la presa, consiste nella graficizzazione dei dati processati e nel calcolo delle coordinate dei punti di ogni modello ricostruito;
 - **RAPPRESENTAZIONE**, produzione di immagini raster geometricamente controllate (ortofoto e ortomosaici) e di immagini vettoriali (modellazione solida, disegni vettoriali in cad, ecc.), creazione degli elaborati finali e scelta del formato per la rappresentazione;
 - **INTEGRAZIONE** ed **EDITING:** integrazione con altro materiale ed altri dati in funzione dello scopo del progetto (ad es. nel caso della fotogrammetria aerea, dalla sovrapposizione dell'ortofoto con la CTR si può verificare la qualità della sovrapposizione tra le due, oppure se si vuole conoscere il tipo di vegetazione presente nell'area rilevata è necessaria l'integrazione di altri dati, ecc.); per editing si intende il filtraggio e l'analisi dei dati ottenuti (ad es. estrazione del DTM dal DSM).

Ogni fase richiede particolare attenzione, sia in sede di progettazione sia nella verifica, perché il flusso di lavoro è sequenziale: un errore in uno step condiziona negativamente tutte le fasi successive.

Il risultato dell'elaborazione dei fotogrammi è un modello stereoscopico 3D, ossia un modello dal quale possono essere estratte varie informazioni, metriche e qualitative, e possono essere ottenuti elaborati di varia natura come ad esempio DTM, DEM, ortofoto, ecc.

3.5 TIPI DI FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria può essere distinta in base ad alcuni criteri fondamentali:

1. **in funzione della distanza di presa;** il fotogramma può essere acquisito a distanze diverse e tale distanza caratterizza diverse famiglie. Ciascuna di queste categorie richiede per l'acquisizione differenti attrezzature, metodologie e competenze:
 - MICROFOTOGRAMMETRIA: utilizza stereoimmagini (foto tradizionali o digitali) ottenute con stereo-microscopi di base 6 cm. Trova applicazione in laboratorio, nei campi della medicina e chirurgia, delle scienze naturali, delle scienze fisiche (ad esempio nello studio dei provini di laboratorio), ecc.
 - FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE, detta anche FOTOGRAMMETRIA DEI VICINI (o *Close-Range Photogrammetry*): distanza dall'oggetto inferiore a 300 metri e prese effettuate da un punto fisso a terra. Trova impiego soprattutto in ambito architettonico, nella creazione di modelli 3D, nelle indagini strutturali, in ambito archeologico, del restauro e della tutela dei beni culturali, nella

descrizione di smottamenti e frane, ecc.

- FOTOGRAMMETRIA AEREA, detta anche FOTOGRAMMETRIA DEI LONTANI: la distanza dall'oggetto va dai 300 ai 20.000 metri a seconda dell'area da rilevare e della scala di rappresentazione richiesta. Il limite dei 300 metri è legato alla sicurezza di volo. L'acquisizione è effettuata da aeromobile, dunque il punto di presa è in movimento. Trova impiego soprattutto nella produzione di cartografia numerica e nel rilievo del territorio.
- FOTOGRAMMETRIA SATELLITARE, oltre i 20.000 metri di quota ci si avvale dei satelliti o di Space Shuttle. Questa tecnica si usa nei casi in cui le aree da rilevare siano molto estese.
- FOTOGRAMMETRIA DA UAV O APR (acronimi rispettivamente di *Unmanned Aerial Vehicle* e Aeromobile a Pilotaggio Remoto), si utilizza per aree non particolarmente estese, per il rilievo di infrastrutture o di coperture. Grazie alla possibilità di montare diversi sensori (termocamere, sensore multispettrale, infrarosso, ecc.) questo tipo di fotogrammetria è molto utilizzato anche in agricoltura, nel monitoraggio di impianti industriali, nel telerilevamento, ecc. ^[wf]

2. **in funzione del dato di output** del processo fotogrammetrico si distingue:

- FOTOGRAMMETRIA TRADIZIONALE: l'immagine è disponibile su pellicola da sviluppare su carta o su negativo ed è acquisita con camere metriche;
- FOTOGRAMMETRIA DIGITALE: l'immagine è resa digitale o registrata direttamente su supporto digitale, segue lo stesso processo della fotogrammetria tradizionale, utilizza camere metriche;
- FOTOGRAMMETRIA DIGITALE NON CONVENZIONALE: è una fase che si è sviluppata successivamente alla fotogrammetria digitale; non sono necessarie le *marche di riferimento*, si possono utilizzare comuni fotocamere, purché autocalibrate, si ha la possibilità di valutare il fotogramma già al momento dell'acquisizione.

Il notevole progresso nel campo della fotografia, dei sensori e della computer grafica suggerisce che il trend evolutivo riguarda in particolare la fotogrammetria digitale. Tuttavia le macchine da presa tradizionali hanno una definizione che è, ancora oggi, superiore a qualsiasi fotocamera digitale.

3. **in funzione del tipo di presa:**

- FOTOGRAMMETRIA STEREOSCOPICA: sfrutta il principio della stereoscopia, ovvero la sovrapposizione di almeno il 60% dei fotogrammi, la presa avviene con due camere metriche o semimetriche accoppiate su una base fissa, o con una singola camera che si muove su un binario (o guida metrica) in modo da avere una coppia stereoscopica da ogni posizione (Figura 3.8). La restituzione è tridimensionale;



Figura 3.7 - Esempi di camere per foto stereoscopiche

- FOTOGRAMMETRIA MONOSCOPICA: utilizza singoli fotogrammi scattati senza la necessità di avere una base di presa fissa ("presa libera") e dal singolo fotogramma si ricava a ritroso la proiezione ortogonale parallela alla superficie inquadrata; la restituzione è bidimensionale.

C'è anche un'altra distinzione, tipica dell'uso comune, che suddivide la fotogrammetria in FOTOGRAMMETRIA TOPOGRAFICA, quando si occupa di rilievi urbani e del territorio, e FOTOGRAMMETRIA NON TOPOGRAFICA, che riguarda rilievi architettonici e oggetti mobili.^[21]

3.6 GLI STRUMENTI

Le prime applicazioni fotogrammetriche sono state possibili grazie all'uso di fotocamere specifiche, progettate e costruite proprio per questo scopo: le *camere metriche*. Queste macchine presentano notevoli differenze in funzione del loro campo d'impiego. Nei paragrafi seguenti verranno analizzate le camere metriche impiegate nella fotogrammetria aerea e quelle usate nella fotogrammetria terrestre (Figura 3.9).



Figura 3.8 - Esempi di fotocamere metriche per riprese aeree (le tre in alto) e per riprese terrestri (le tre in basso)

Le camere metriche usate nella fotogrammetria aerea sono molto diverse da quelle usate nella fotogrammetria terrestre, ma le due tipologie presentano delle caratteristiche comuni:

- obiettivi di altissima qualità che producono distorsioni quasi nulle;
- presenza di marche fiduciali: elementi ben riconoscibili nel fotogramma che consentono di stabilire una relazione biunivoca tra fotogramma e posizione della lastra al momento della presa. In tal modo è possibile ricostruire la posizione del centro di proiezione anche dopo la presa, quando la lastra è stata rimossa o il supporto digitalizzato;
- vengono fornite con un certificato di calibrazione che specifica i parametri della camera: lunghezza focale, posizione del punto principale, parametri della funzione che corregge la distorsione, posizione delle marche fiduciali nel sistema di riferimento interno alla fotocamera.^[22]

3.6.1 CAMERE METRICHE AEREE

Le camere fotogrammetriche propriamente dette sono quelle usate nella fotogrammetria aerea, hanno obiettivi con distorsioni pressoché nulle e generano fotogrammi di 230mm di lato con riferimenti geometrici intrinseci che materializzano il sistema di riferimento interno.

Tale riferimento è individuato da quattro o più elementi situati sulla cornice dove poggia la pellicola al momento della presa, che lasciano le rispettive immagini impresse sul fotogramma (*marche fiduciali*, vedi Figura 3.11). Il sistema di riferimento, è definito da:

- origine coincidente con il centro dell'obiettivo,
- asse z coincidente con l'asse ottico,
- assi x ed y paralleli alle rette congiungenti le marche fiduciali (è consuetudine assumere l'asse x parallelo alla direzione di volo, Figure 3.10)

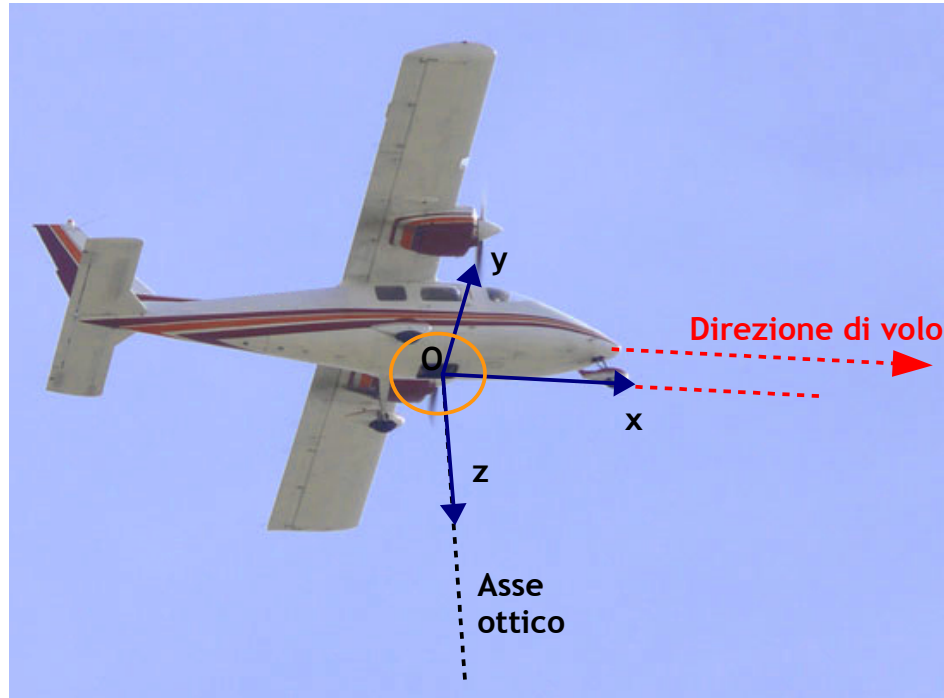


Figura 3.9 - Sistema di riferimento della camera fotogrammetrica sull'aereo

Le fotocamere aeree, date le grandi dimensioni della pellicola, sono dotate di un dispositivo pneumatico che la mantiene piana.

L'aereo che esegue riprese fotogrammetriche sorvola il terreno a quote di alcune centinaia di metri per cui la camera, che si trova a distanza *iperfocale* (Paragrafo) è dotata di obiettivo a fuoco fisso con focale che va dai 150mm ai 220mm o 300mm (queste ultime due focali sono una conquista recente, ma vengono impiegate solo per rilevamenti speciali).^[13]

Nel certificato di calibrazione, oltre alla distanza principale, sono riportati:

- coordinate immagine delle marche fiduciali,
- coordinate del centro fiduciale FC,
- distanza principale
- curva di distorsione media radiale
- data della calibrazione.^[13]

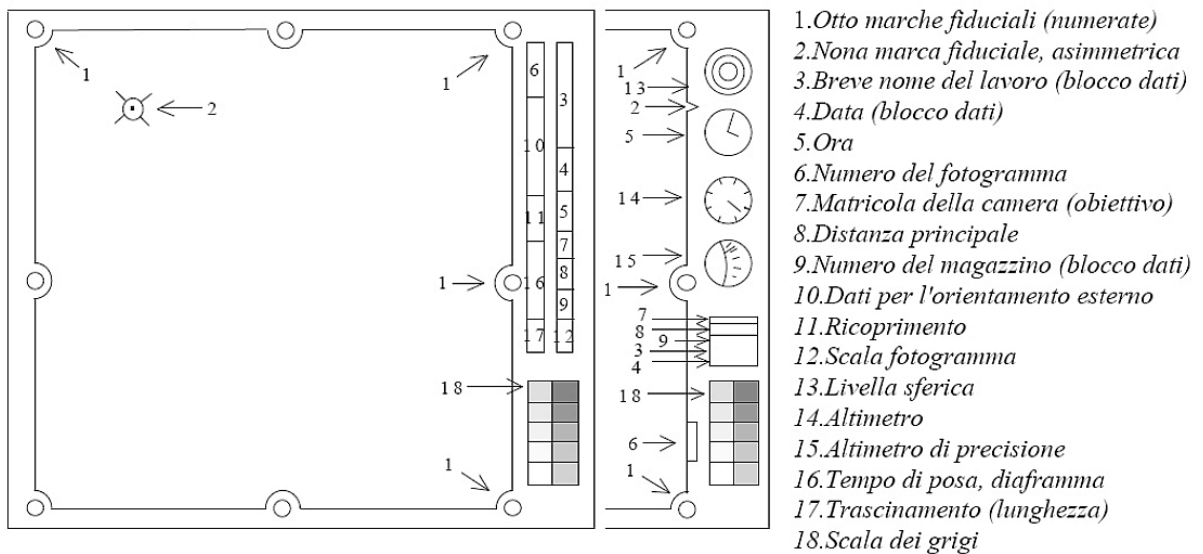
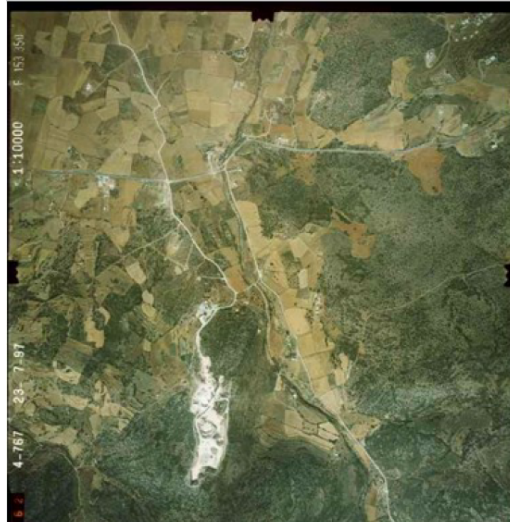


Figura 3.10 - Esempio di fotogramma metrico (in alto) e schema degli elementi di un fotogramma (in basso)^[13]

3.6.2 CAMERE METRICHE TERRESTRI

Le camere metriche usate per la fotogrammetria terrestre, possono essere di due tipi (nella figura 3.13 sono riportati alcuni modelli):

- singole o *monocamere*, usate per ottenere la massima precisione
- accoppiate o *bicamere*, due camere collegate da una base, generalmente di lunghezza di 1-1,2 metri, per riprese stereoscopiche più rapide.

Vengono montate su un cavalletto e sono a fuoco fisso, generano immagini con formato massimo pari a 130x180mm e sono orientabili sia in orizzontale sia in verticale. Il rapporto



Figura 3.12 - Vari esempi di fotocamere metriche terrestri

ridotto tra la distanza camera–oggetto e la distanza focale impone di fare in modo che tutte le parti dell'oggetto siano sufficientemente a fuoco: la profondità di campo si regola attraverso l'apertura del diaframma.^[13]



Nella fotogrammetria terrestre convenzionale le camere metriche, di cui sono noti con stabilità i parametri di orientamento interno, vengono montate sugli stessi treppiedi e basamenti utilizzati per le stazioni totali e le mire, consentendo così la relativa intercambiabilità (centramento forzato). In questo modo dallo stesso punto di stazione è possibile eseguire sia operazioni di presa fotografica, sia tradizionali misure topografiche per la misura della base di presa e dei punti di appoggio sull'oggetto da rilevare (Figura 3.14).^[23]

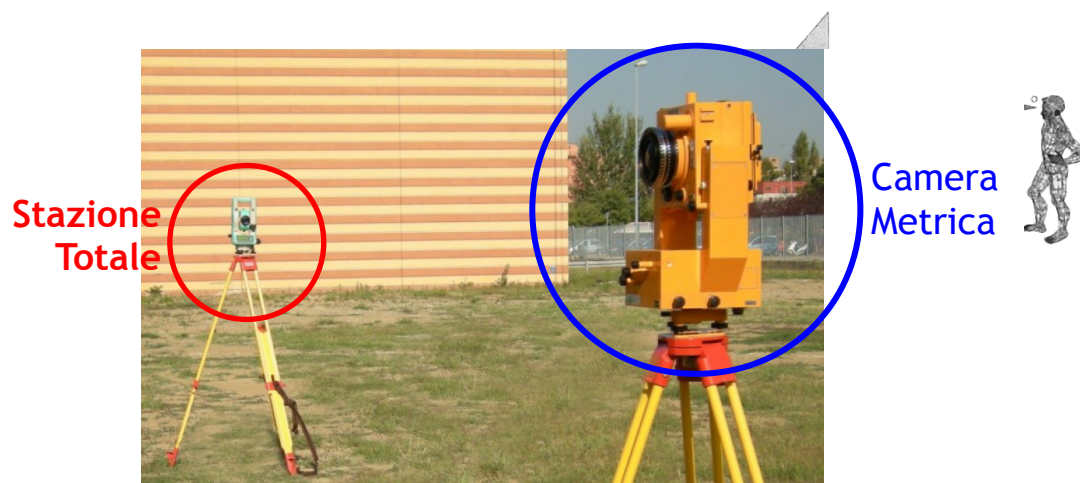


Figura 3.13 - Su uno dei due punti di presa, che costituiscono la base, è posizionata la stazione totale che inquadra topograficamente la posizione della camera, poi gli strumenti vengono invertiti .

3.7 PRINCIPÌ ANALITICI

Per poter ricostruire forma e posizione degli oggetti partendo da immagini fotografiche è fondamentale la conoscenza delle relazioni geometriche che vi sono alla base. Il problema di fondo è trovare delle relazioni tra lo spazio oggetto, 3D, con lo spazio immagine, 2D, in modo univoco così da far corrispondere nei due sistemi di grandezze alcuni punti discreti opportunamente scelti. Risolto questo problema sarà poi possibile collegare qualsiasi punto del continuo nello spazio immagine al corrispondente punto nello spazio oggetto.^[13]

L'acquisizione e la restituzione delle immagini prospettiche seguono le regole della geometria proiettiva ed analitica. Per garantire l'affidabilità metrica all'elaborato è necessario

che le immagini utilizzate abbiano rigore geometrico, si devono quindi ridurre, o ancor meglio eliminare, le possibili deformazioni che discostano le immagini fotografiche dal modello di prospettiva centrale.

Nella fase di restituzione si utilizza la visione stereoscopica che, in fotogrammetria, assicura una maggiore precisione e semplifica al massimo la visione dell'oggetto all'operatore.

3.7.1 LA VISIONE STEREOSCOPICA

La visione stereoscopica è quella che consente di cogliere la profondità e la distanza degli oggetti. E' il principio su cui si basa la percezione della tridimensionalità nella visione umana: uno stesso oggetto ripreso da due diversi punti di vista assume posizioni relative differenti.

Il processo fisiologico della visione stereoscopica si basa sul fatto che gli occhi costituiscono una coppia: nello spazio hanno posizioni differenti, distanti circa 65mm. Al cervello giungono contemporaneamente le immagini acquisite separatamente dall'occhio sinistro e dall'occhio destro e che per questo risultano leggermente diverse tra loro. Vengono elaborate per creare un'unica immagine che contiene una precisa percezione della profondità e di altre caratteristiche che determinano distanza, dimensione e posizione nello spazio dell'oggetto osservato (Figura 3.15).

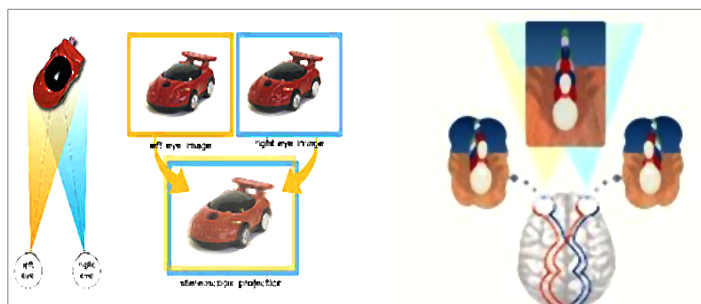


Figura 3.14 - Due esempi di composizione delle immagini nella visione stereoscopica umana

La fusione di

due immagini distinte nella visione stereoscopica avviene attraverso un processo inconscio che permette di unire fra loro due punti immagine provenienti dallo stesso punto oggetto, consiste nel fondere infinite coppie di punti omologhi. Sulle retine degli occhi si formano rispettivamente due immagini prospettiche differenti che tramite i nervi ottici passano, sotto forma di impulsi elettrici, al cervello dove vengono elaborate e ricomposte in un'unica immagine. Si tratta della *visione stereoscopica binoculare naturale*.

La visione stereoscopica è bene avvertita da vicino, ma risulta praticamente nulla da lontano, dove degenera in visione monoculare: all'infinito infatti i due raggi visivi sono meno convergenti e la parallasse angolare è quasi nulla (aspetti approfonditi nel Paragrafo 3.7.1.1).

Il potere visuale stereoscopico dell'uomo risulta comunque moderatamente accentuato a causa della vicinanza degli occhi rispetto alla distanza degli oggetti osservati.

In fotogrammetria la visione stereoscopica è *artificiale* e si ottiene con due fotogrammi scattati da posizioni distinte e su cui si andranno individuati i punti omologhi. La visione stereoscopica si otterrà nella parte comune ai due fotogrammi.

In fotogrammetria si tende a controllare e programmare il rapporto fra due grandezze molto importanti per la stereoscopia: *base* e *distanza di presa*, proprio per esaltare la tridimensionalità degli oggetti che si vogliono rilevare.

3.7.1.1 MODELLO GEOMETRICO

Partendo dalla geometria della stereoscopia nella visione umana, grazie all'analogia tra l'occhio umano e la fotocamera (Figura 3.16), si può comprendere quale sia il modello alla base della fotogrammetria stereoscopica e dei vari algoritmi di processing.

- **sistema ottico:**
cornea, umor acqueo, cristallino, umor vitreo → sistema di lenti dell'obiettivo
- **regolatore della luminosità:**
iride → diaframma
- **ricettore dell'immagine:** retina → pellicola o sensore

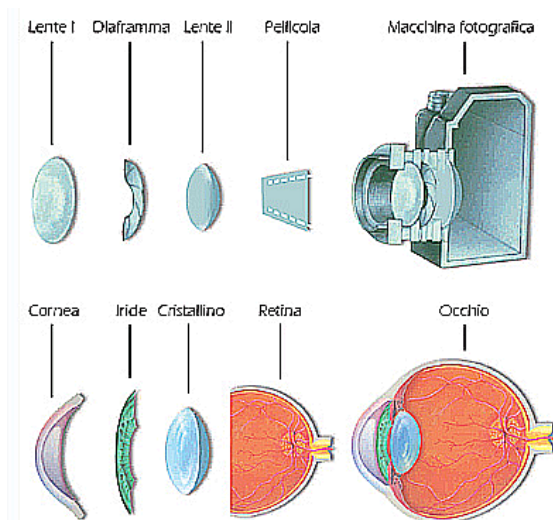


Figura 15 - Analogia tra occhio umano e fotocamera

Estendendo l'analogia alla visione binoculare con le coppie stereoscopiche, si può associare:

→ **base della presa**

distanza interpupillare

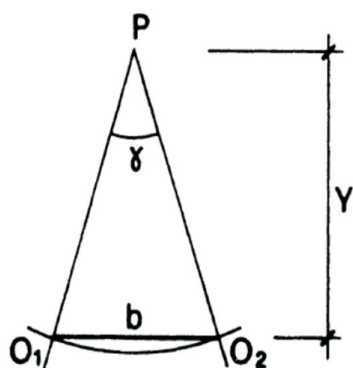


Figura 3.16 - Schema geometrico della visione binoculare

La distanza interpupillare, **b**, è generalmente 6 ÷ 7 cm; in condizioni fisiologiche "normali" la capacità di visione distinta inizia dai 25cm circa.

Con riferimento alla Figura 3.17, chiamiamo:

Y → distanza dal punto osservato: P,

b → distanza tra i due occhi.

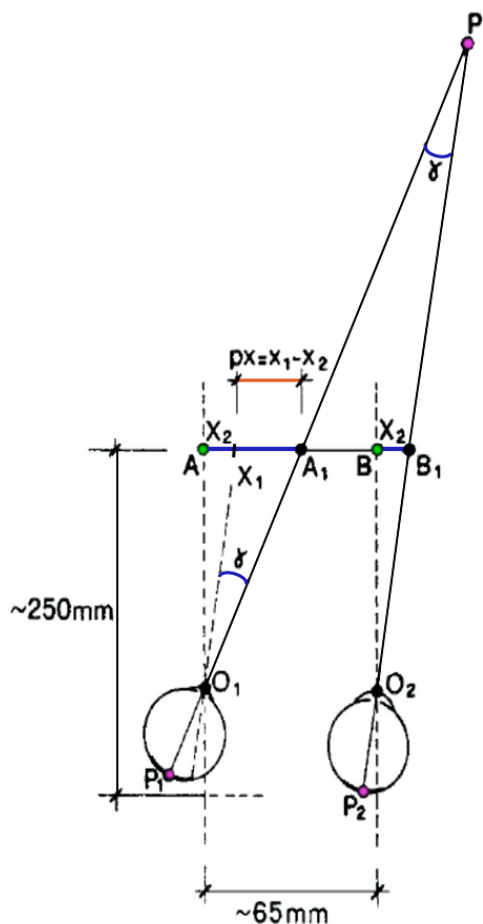


Figura 3.17 - Modello geometrico della visione stereoscopica naturale

Si definiscono di seguito alcune grandezze:

PARALLASSE ANGOLARE γ = angolo compreso tra le due visuali che dagli occhi vanno al punto P

La visione stereoscopica naturale, oltre che sulla parallasse angolare, si basa sulla corrispondente parallasse lineare P_x (fare riferimento alla figura 3.18).

PARALLASSE LINEARE P_x = differenza tra i segmenti X_1 e X_2 intercettati dai raggi delle visuali O_1P e O_2P sul piano della visione distinta ($A-B_1$) e relativamente al punto P osservato.

ACUITÀ STEREO SCOPICA = valore minimo di γ

Dati sperimentali indicano questo angolo pari a circa 16".

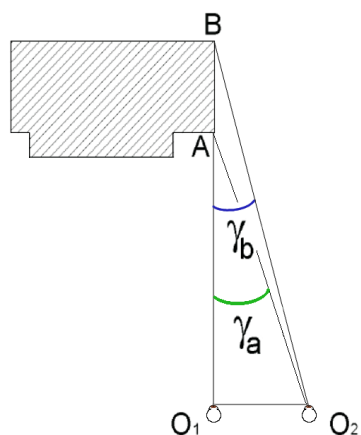


Figura 3.18 - Differente parallasse angolare per i punti A e B

La capacità di percepire la terza dimensione è legata proprio all'angolo di parallasse γ .

La distanza tra due punti A e B dall'osservatore è valutata in funzione della differenza tra i due angoli: $\gamma_a - \gamma_b$ (Figura 3.19)

Alla distanza della visione distinta, $25 \div 30$ cm, l'occhio è in grado di apprezzare allo stesso modo la posizione di un punto nelle tre direzioni: X, Y, Z. Questo valore corrisponde ad una base dell'intersezione avanti pari ad $1/3 \div 1/4$ della distanza dall'oggetto osservato.

Facendo riferimento alla Figura 3.20 si osserva come un punto che si allontani (in P) o che si avvicini (in R) dalla posizione originaria Q, per mantenere la collimazione provochi una variazione angolare della posizione di una delle due pupille. Da questo è immediato comprendere come non sia sufficiente la visione monoculare (o monoscopica) per apprezzare la terza dimensione: la profondità.

Quando l'oggetto si trova a distanze via via maggiori, la capacità di stimare tale distanza decade con una funzione quadratica della distanza stessa.

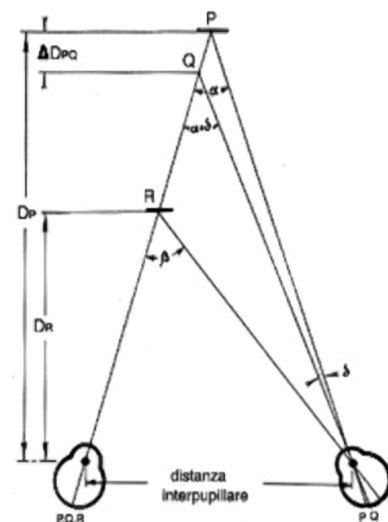


Figura 3.19 - Variazione dell'angolo di parallasse al variare della posizione del punto osservato

Con riferimento alla Figura 3.17 (vedi pagina precedente) si può scrivere:

$$\gamma \simeq \frac{b}{Y} \quad (3.1) \text{ differenziando questa relazione rispetto ad Y si ha:}$$

$$\frac{d\gamma}{dY} = -\frac{b}{Y^2} \quad \text{e separando le variabili diventa:} \quad dY = -\frac{Y^2}{b} d\gamma \quad (3.2)$$

Nella relazione 3.2 inseriamo: $b=0.065\text{m}$ → distanza interpupillare media;

$d\gamma = 16'' = 16''/206265$ radianti → acuità visiva;

la legge che regola la capacità di stimare la profondità in funzione della distanza diventa:

$$dY = -\frac{Y^2}{0.065} \cdot \frac{16''}{206265} = -0.00121 \cdot Y^2 \quad (3.3) \quad \text{Legame tra distanza e profondità percepita}$$

Dalla Tabella I si osserva come intorno agli 800m si perda la percezione della profondità non riuscendo più a distinguere quando un oggetto si trovi a distanza doppia rispetto ad un altro (in realtà ci sono elementi qualitativi che consentono tale distinzione, ad es. le ombre, il confronto con altri oggetti, ecc):^[17]

$Y[m]$	0,25	2,5	25	250	828
$dY[m]$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,75	75	828

Tabella I - Y = distanza dall'oggetto osservato in metri ; dY = profondità percepita espressa in metri

La percezione della profondità della visione umana è fortemente condizionata dalla distanza interpupillare costante ed risulta massima alla distanza di visione distinta. Chiamando d la distanza dell'oggetto osservato, si ha la massima percezione della distanza per $b=1/3d \div 1/4d$, ovvero, tenendo conto del valore medio di $b=0,065m$

$$d = 3b \div 4b = 0,195 m \div 0,260 m \quad (3.4) \quad \text{Distanza alla quale si ha la max percezione della profondità}$$

Quindi per avere una buona intersezione in avanti anche per le coppie fotogrammetriche, la base deve essere $1/3 \div 1/4$ della distanza dell'oggetto da rilevare.

La stereoscopia può essere generata anche attraverso due foto scattate da due posizioni leggermente differenti, purché siano soddisfatte le seguenti condizioni:

- gli assi di proiezione devono appartenere allo stesso piano;
- il rapporto tra la distanza dei due punti di vista e la distanza dall'oggetto deve essere $1/3 \div 1/4$;
- le immagini devono essere nella stessa scala.

In questo caso si parla di **VISIONE STEREOGRAFICA ARTIFICIALE**.

Per avere un effetto stereoscopico naturale basterà scattare i fotogrammi con una base pari alla distanza interpupillare: circa 6,5cm.

Tuttavia, in alcune circostanze, si potrebbe rendere necessario aumentare o diminuire tale distanza di presa (Figura 3.21).

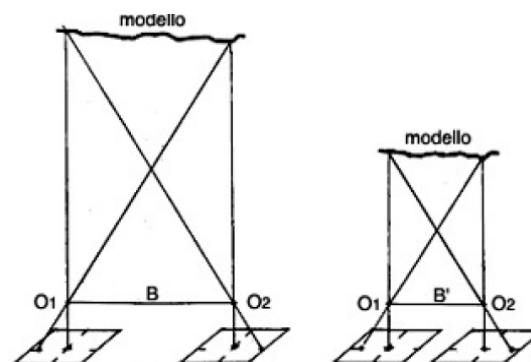


Figura 3.20 - Variazione della scala del modello in funzione della distanza di presa.

Per analizzare, ad esempio, delle deformazioni o per accentuare le concavità e convessità di un oggetto, si può aumentare la base. In questo modo si otterrà un effetto detto **iper-stereo** che accentua la percezione della profondità rispetto alla realtà, ma allo stesso tempo comporta una riduzione della scala dell'oggetto (è come se si riproducesse il punto di vista di un gigante).

Viceversa, se si volesse ingrandire l'oggetto rispetto alla realtà si dovrà diminuire la base rispetto ai 6,5cm della stereoscopia naturale. In questo modo si ottiene un effetto **ipo-stereo** (è come se si riproducesse il punto di vista di piccoli animali).

In fotogrammetria si tende a controllare il rapporto fra la base di presa e la distanza dagli oggetti osservati per adeguare la tridimensionalità degli oggetti al tipo di rilievo da effettuare e alle caratteristiche da esaltare in fase di restituzione e rappresentazione.

In genere, per avere una presa che vada bene nella maggior parte delle situazioni, è preferibile che la base sia compresa tra 1/5 della distanza del punto più vicino dell'oggetto e 1/20 della distanza dal punto più lontano dello stesso oggetto. Si può quindi scegliere come distanza di presa il valore: $b \approx 1/10d$ (Figura 3.22).

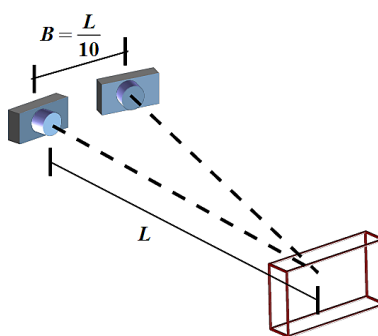


Figura 3.21 - Base generica per ottenere un effetto stereo.

Le foto di una coppia stereo hanno un differente centro di presa (*centro di proiezione*) per questo motivo le immagini dell'oggetto sui fotogrammi si troveranno in posizioni diverse.

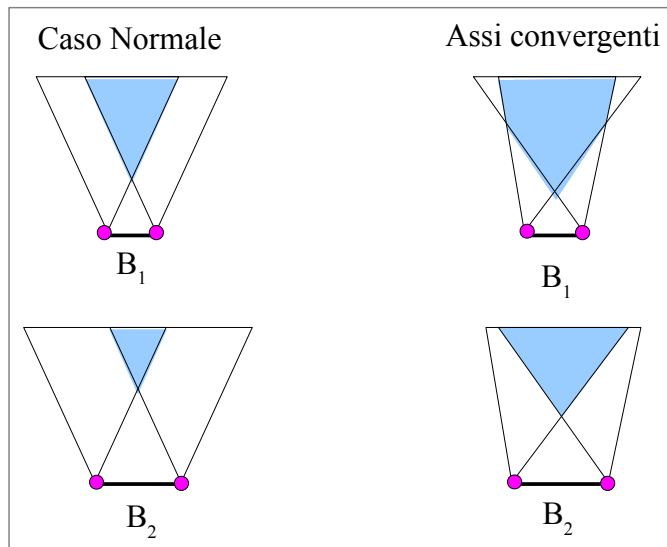


Figura 3.22 - Nell'area in azzurro si ha l'effetto stereoscopico.

Il modello 3D si ottiene nell'area comune ai fotogrammi della coppia stereoscopica come mostrato nella figura 3.23 (il ricoprimento deve essere almeno il 60% del fotogramma).

3.7.1.2 STRUMENTI PER LA RESTITUZIONE

Gli strumenti per le riprese stereoscopiche sono le bicamere: strumenti formati da un treppiede sul quale è disposto un braccio di lunghezza circa 1-1,2 m alle cui estremità sono collocate due camere metriche, oppure momocamere spostate ad ogni scatto di un adeguata base di presa. In entrambi i casi deve essere garantito:

- il parallelismo tra i due assi ottici;
- la perpendicolarità degli assi ottici rispetto alla base (restituzione analogica).

La messa in stazione è analoga a quella degli strumenti topografici (Figura 3.24).

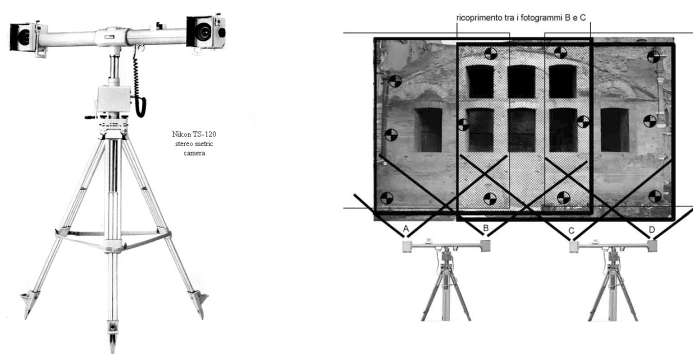


Figura 3.23 - Esempio di bicamera metrica e di prese stereoscopiche

Due fotografie di uno stesso oggetto scattate da punti di presa diversi avranno due centri di proiezione distinti, dunque le rispettive immagini prospettiche dell'oggetto risultano, sui due fotogrammi, in posizioni leggermente differenti tra loro. Per ottenere una visione stereoscopica

del soggetto basta osservare i due fotogrammi attraverso strumenti adeguati.

◆ **STEREOSCOPIO A LENTI**

Scelto un punto immagine in entrambi i fotogrammi che corrisponda al medesimo punto oggetto, si porta ognuno dei due punti al centro del campo visivo destro e sinistro in una posizione pari alla distanza interpupillare e ad una distanza dagli occhi corrispondente alla distanza della visione nitida (circa 25cm).

Con questo accorgimento gli assi visuali risulteranno paralleli (angolo parallattico nullo), come se stessero osservando due punti a distanza infinita, generando così l'immagine di un unico punto. Tutti gli altri punti che si trovano nell'intorno di quello scelto come riferimento (sull'una e sull'altra foto), daranno immagini viste sotto angoli parallattici differenti tra loro e diversi anche dall'angolo di parallasse con cui viene osservato il punto scelto come riferimento (ad es. il punto N_1 della figura 3.25 in alto).

Il cervello interpreta tali differenze angolari come parallassi stereoscopiche, per questo fonde i punti delle due foto in un'unica immagine tridimensionale dove essi appaiono avanti o indietro (o più in alto o più in basso) rispetto al punto scelto come riferimento. Per mantenere paralleli gli assi visuali sul punto di riferimento servono un certo sforzo e allenamento, ma per facilitare questo tipo di osservazione è sufficiente interporre tra gli occhi e le fotografie due lenti di adeguata lunghezza focale che consentono di vedere a fuoco le foto e di osservarle comodamente all'infinito (cioè con raggi visuali paralleli). Lo stereoscopio si basa su questo principio.^[15]

◆ **STEREOSCOPIO A SPECCHI**

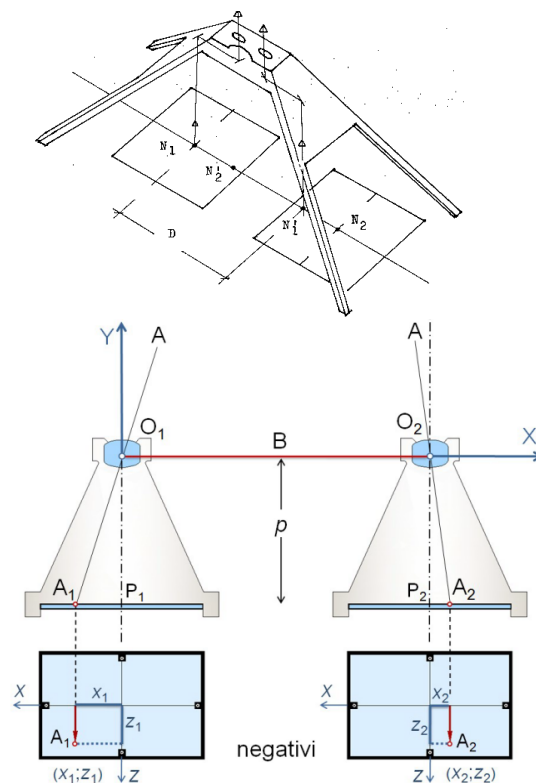


Figura 3.24 - Schemi e foto di uno stereoscopio; *immagina in alto: D=distanza tra i centri dei due campi visivi, corrisponde alla distanza tra le due foto*

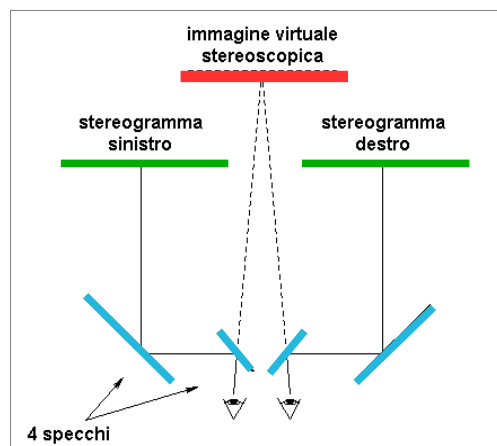


Figura 3.25 - Schema di funzionamento di uno stereoscopio a specchi

Con questo strumento i raggi di luce provenienti dai due fotogrammi sono resi paralleli dalla posizione degli specchi. In questo modo gli occhi possono guardare le foto con gli assi oculari comodamente paralleli (Figura 3.26).^[24]

Questi primi due strumenti, che appartengono alla categoria dei sistemi *a vista fissa* (basati sull'osservazione separata delle immagini, l'una con l'occhio destro e l'altra con l'occhio sinistro), sono restitutori di tipo *analogico*, ormai pressoché sostituiti da sistemi di tipo digitale.

◆ ANAGLIFE

Questo metodo sfrutta immagini illuminate o disegnate con colori complementari, come ad esempio il magenta-ciano (detti comunemente rosso-blu), per ottenere la visione stereoscopica nei restitutori analitici. Due radiazioni complementari sono tali che la loro somma dia luce bianca (questo vale solo per la somma di radiazioni e non di pigmenti!).

Osservando le due immagini ad occhio nudo si distinguono chiaramente le linee dei due colori, queste avranno distanza variabile in funzione della posizione spaziale da riprodurre.

Osservando, invece, l'immagine con occhiali dotati di filtri, ad esempio filtro rosso sull'occhio sinistro e filtro blu sull'occhio destro, quella che si ottiene è una visione stereoscopica: ciascun filtro permette all'occhio retrostante di vedere in nero il colore complementare e in sfumature di grigio le sue gradazioni, le linee dello

stesso colore del filtro "svaniscono". La conseguenza di questa selezione è che sulle retine si formano due immagini distinte dello stesso oggetto che verranno poi elaborate dal cervello, fuse in un'unica immagine e proiettate in uno spazio fittizio antistante l'osservatore. La visione anaglifica è la modalità con cui si ottiene la visione stereoscopica nei restitutori analitici.^[25]

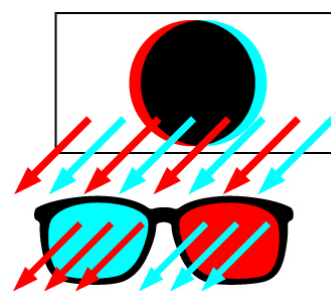


Figura 3.26 - Funzionamento delle lenti rosso-blu ed esempio di immagine anaglifica

◆ RESTITUTORE AD OCCHIALI PASSIVI

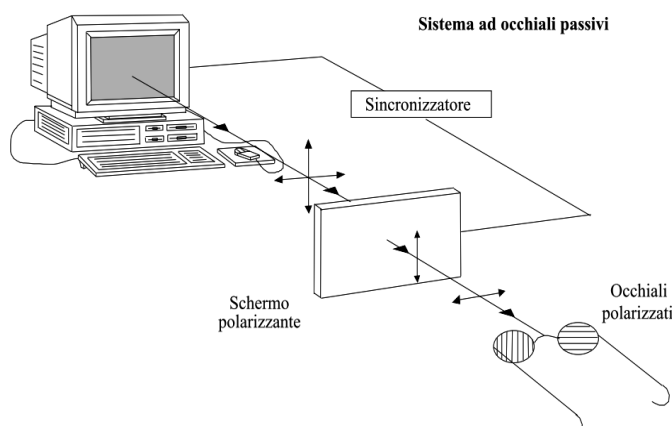
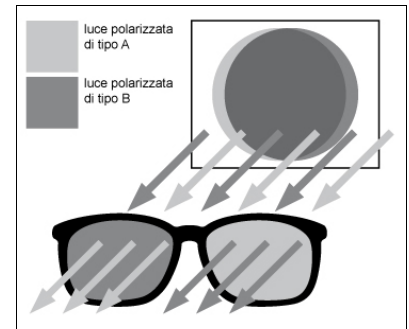


Figura 3.27 - Sistema di restituzione ad occhiali passivi e dettaglio del funzionamento delle lenti



In questo caso la restituzione è di tipo *digitale*. Sul monitor del computer le due immagini vengono proiettate in modo alternato, ma ciascuna immagine sfrutta solo metà delle righe presenti: una viene presentata sulle righe pari, l'altra sulle dispari in modo *interlacciato*. Uno schermo a cristalli liquidi posto davanti al monitor è sincronizzato con la presentazione delle immagini in modo da polarizzare in modo diverso l'immagine di sinistra e quella di destra. L'operatore lavora con occhiali polarizzati che consentono di vedere l'immagine di sinistra con l'occhio sinistro e l'immagine di destra con l'occhio destro (Figura 3.28).^[26]

◆ **RESTITUTORE AD OCCHIALI ATTIVI**

Nel metodo ad occhiali attivi le due immagini vengono ancora presentate sul video in modo alternato e interlacciato, ma l'utente usa degli occhiali che oscurano in modo alterno la vista all'occhio sinistro e all'occhio destro; la sincronizzazione tra la presentazione sul monitor dell'immagine di sinistra e l'oscuramento dell'occhio destro, e viceversa, avviene tramite un collegamento a raggi infrarossi tra il monitor e gli occhiali.^[26]

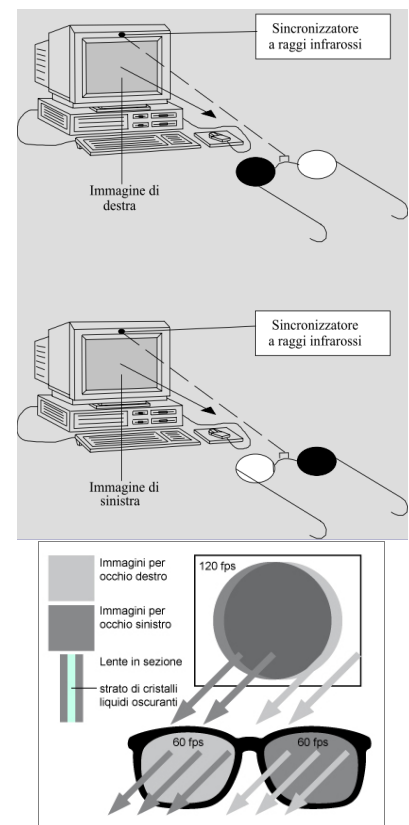


Figura 3.28 - Sistema ad occhiali attivi

3.7.2

EQUAZIONI DI

COLLINEARITÀ E RESTITUZIONE

Per ottenere la massima precisione possibile si deve tener conto degli inevitabili errori introdotti dall'obiettivo, dalla camera e dal fotogramma stesso. Per questo nei rilievi fotogrammetrici o si utilizzano camere metriche oppure si ricorre a procedure di calibrazione

quando si utilizzano fotocamere non metriche, così da avere note le correzioni da apportare all'immagine rendendola una proiezione centrale → fotogramma e non più fotografia.

Ipotesi semplificative, si suppone che:

- l'atmosfera non agisca sul percorso della radiazione,
- l'obiettivo sia una lente sottile,
- la superficie sensibile si trovi esattamente sul piano focale e sia perfettamente piana,

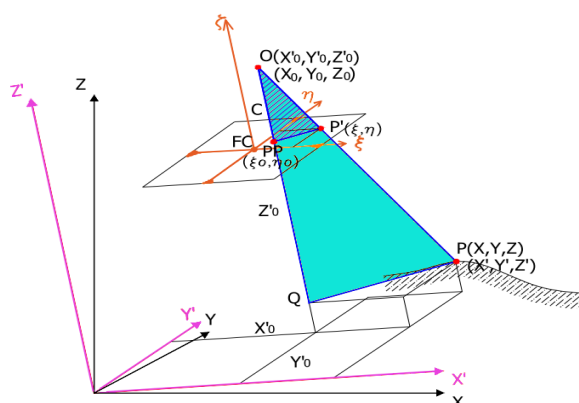
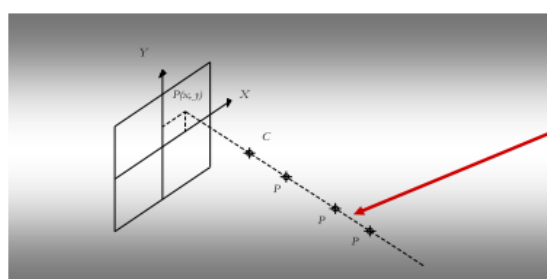


Figura 3.29 - Allineamento punto di presa, punto immagine e punto oggetto

si può ritenere che l'immagine di un punto dell'oggetto venga impressa sul fotogramma da un raggio *rettilineo* passante per il centro ottico dell'obiettivo. All'atto della presa, dunque, il punto oggetto P, il centro di presa O ed il punto immagine P' giacciono sulla stessa retta (Figura 3.30).



Al variare di Z ($\pm\infty$) il punto P descrive così una retta detta **retta proiettiva**

Figura 3.30 - Infiniti punti allineati sulla retta proiettiva

Introduciamo un sistema di riferimento terreno: X', Y', Z' , che sia parallelo al sistema di riferimento dell'immagine: ξ, η, ζ (tutti i punti immagine hanno $\zeta=0$) e che abbia origine coincidente col sistema di riferimento X, Y, Z (Figura. 3.30).^[13]

Dalla similitudine tra i triangoli $OP'P$ e OPQ possiamo scrivere:
$$\frac{P'P}{OP} = \frac{PQ}{OQ}$$

Partendo da queste relazioni, le condizioni di collinearità che esprimono l'allineamento dei tre punti: O-P'-P, esplicitate in funzione delle coordinate immagine, si scrivono:

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c \cdot \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} \\ \eta = \eta_0 - c \cdot \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} \end{cases} \quad (3.5)$$

Sia $R_{\omega\phi\kappa}$ la matrice di rotazione spaziale, le sue componenti sono:

$$R_{\omega\phi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\kappa & -\cos\phi \sin\kappa & \sin\phi \\ \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & -\sin\omega \cos\phi \\ \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (3.6) \quad \text{Matrice di rotazione spaziale}$$

dove ω , ϕ , κ rappresentano gli angoli di rotazione nello spazio, come mostrato in figura 3.32:

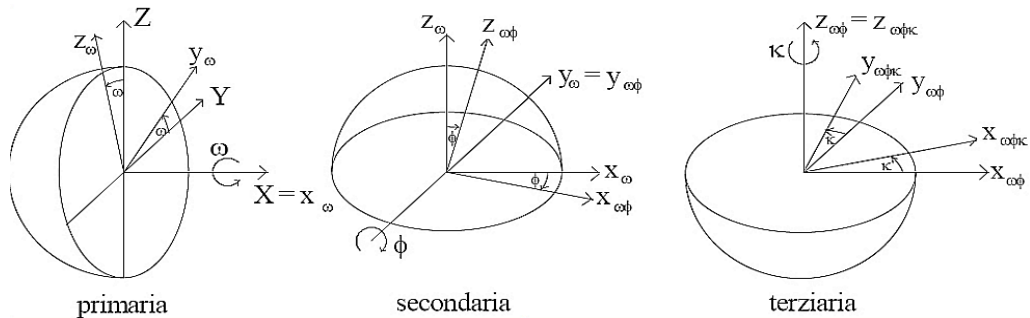


Figura 3.31 - Rotazioni attorno agli assi coordinati

Le coordinate X' , Y' , Z' del punto P e le coordinate X'_0 , Y'_0 , Z'_0 del centro di proiezione possono essere trasformate nel sistema X, Y, Z attraverso la matrice di rotazione spaziale:

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{pmatrix}$$

(3.8)

Moltiplicando a sinistra le ultime relazioni per la matrice $R^T = R^{-1}$ si ottengono le relazioni cercate tra le coordinate immagine e le coordinate terreno, le cosiddette *equazioni di collinearità*:

Da queste equazioni si evince che ad ogni punto oggetto di coordinate (X, Y, Z) corrisponde un punto immagine di coordinate (ξ, η) .

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta = \eta_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (3.9) \quad \text{Equazioni di collinearità}$$

I parametri che compaiono in queste equazioni sono chiamati:

- PARAMETRI DI ORIENTAMENTO INTERNO – ξ_0, η_0, c : sono costanti note che definiscono la geometria interna della fotocamera. Nel caso di camere metriche sono parametri determinati in laboratorio dal costruttore e riportati nel certificato di calibrazione; per le camere comuni tali parametri possono essere determinati da istituti preposti alla calibrazione oppure, possono essere ricavati tramite software specifici;
- PARAMETRI DI ORIENTAMENTO ESTERNO – X_0, Y_0, Z_0, r_{ik} : sono le coordinate oggetto del punto di presa e gli elementi della matrice di rotazione $R_{\omega\phi}$

I parametri r_{ik} dipendono dagli angoli ω, ϕ, k , che sono gli angoli di rotazione attorno ai tre assi coordinati (Figura 3.32) e definiscono l'assetto spaziale della fotocamera rispetto ad un sistema di riferimento tridimensionale.

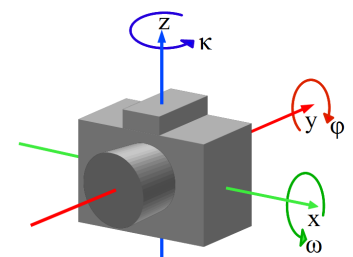


Figura 3.32 - Angoli di rotazione della camera attorno agli assi x, y, z

Dalle equazioni di collinearità ricaviamo le coordinate oggetto (X, Y) :

$$\begin{cases} X = X_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y = Y_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{cases} \quad (3.10) \quad \text{Coordinate oggetto}$$

Per ogni punto immagine (ξ, η) si scrivono 2 equazioni, ma per ogni punto oggetto le coordinate da determinare sono 3: $(X, Y, Z) \rightarrow 2$ equazioni in 3 incognite per ogni punto. Il problema risulta ipodeterminato.

Si tratta di una **corrispondenza univoca**: ad un punto 2D corrispondono infiniti punti 3D situati sull'allineamento tra centro di presa e punto immagine.

A causa della presenza della Z al secondo membro, infatti, per ogni punto immagine (ξ, η) esistono infiniti possibili punti oggetto (X, Y) come mostra chiaramente la figura 3.34.

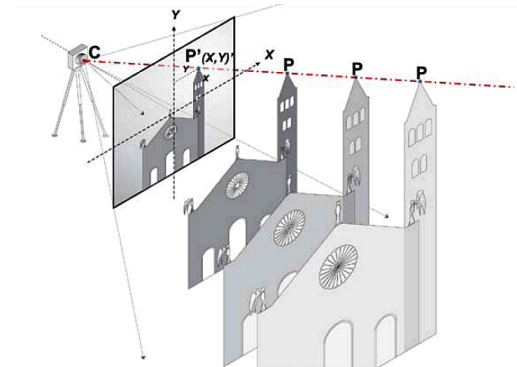


Figura 3.33 - Un solo fotogramma non è sufficiente per ricostruire la geometria spaziale di un oggetto

Per ricostruire la geometria spaziale di un oggetto servono necessariamente due fotogrammi (Figura 3.35).

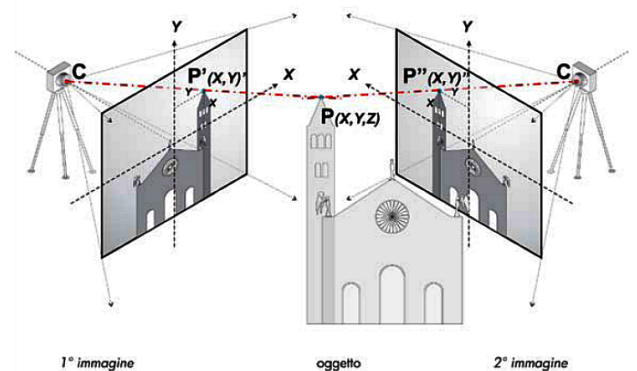


Figura 3.34 -Necessità di almeno due fotogrammi per ricostruire la geometria spaziale

Per determinare i 6 parametri di orientamento esterno, r_{ik} , servono almeno 3 punti di appoggio che siano visibili in entrambi i fotogrammi e dei quali siano note le coordinate oggetto. Ogni punto darà 2 equazioni \rightarrow 6 equazioni in 6 incognite. Il sistema ora è isodeterminato.

3.7.2.1 CASO PIANO

Consideriamo un oggetto piano, ad esempio la facciata di un edificio o una parete muraria, e supponiamo per semplicità, ma senza perdere di generalità, che sia $Z=0$.

Le equazioni di collinearità si semplificano rispetto al caso tridimensionale:

$$\begin{cases} X = \frac{a_1 \xi + a_2 \eta + a_3}{c_1 \xi + c_2 \eta + 1} \\ Y = \frac{b_1 \xi + b_2 \eta + b_3}{c_1 \xi + c_2 \eta + 1} \end{cases} \quad (3.11) \quad \begin{array}{l} \text{Equazioni di collinearità nel caso piano} \\ \text{o Equazioni di omografia} \end{array}$$

e per il caso piano prendono il nome di **EQUAZIONI DI OMOGRAFIA**.

Ora ci sono 8 nuovi parametri: a_i, b_i, c_i , che sono funzione dei parametri delle equazioni di collinearità:

$$\begin{aligned} a_1 &= X_0 r_{31} - Z_0 r_{11}; \\ a_2 &= X_0 r_{32} - Z_0 r_{12}; \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.12)$$

Gli 8 parametri indicati dalle 3.12 consentono di passare dal sistema di riferimento immagine al sistema di riferimento oggetto.

In questo caso particolare un solo fotogramma è sufficiente per ricostruire un oggetto piano. Dalla conoscenza delle coordinate immagine e oggetto di 4 punti di appoggio si calcolano gli 8 parametri che consentono di determinare le coordinate oggetto (X_i, Y_i) di un qualsiasi punto di cui si siano misurate le rispettive coordinate immagine (ξ_i, η_i) .

Considerando il piano del fotogramma parallelo al piano dell'oggetto ($Z = \text{cost}$ o anche $Z=0$), la matrice di rotazione si semplifica come segue:

$$R = \begin{pmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

e quindi le equazioni di collinearità nel caso piano, esplicitando i parametri, possono essere scritte anche come segue:

$$\begin{cases} X = X_0 + \frac{Z_0}{c} [(\xi - \xi_0) \cos \kappa - (\eta - \eta_0) \sin \kappa] \\ Y = Y_0 + \frac{Z_0}{c} [(\xi - \xi_0) \sin \kappa - (\eta - \eta_0) \cos \kappa] \end{cases} \quad (3.14)$$

Con le equazioni così scritte, al posto delle 2 variabili indipendenti Z_0 e c è sufficiente conoscere il loro rapporto:

$$\frac{Z_0}{c} = m_b \quad \text{detto FATTORE DI SCALA (Figura 3.36).}$$

Riscrivendo in forma matriciale le equazioni 3.14 si ha:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + m_b \begin{pmatrix} \cos k & -\sin k \\ \sin k & \cos k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Le equazione 3.15 esprimono una ROTOTRASLAZIONE CON VARIAZIONE ISOTROPA DI SCALA tra due sistemi di riferimento piani; in questo caso particolare, quindi, il fotogramma è simile ad una rappresentazione cartografica, cioè rappresenta il piano oggetto a scala ridotta (Figura 3.37).

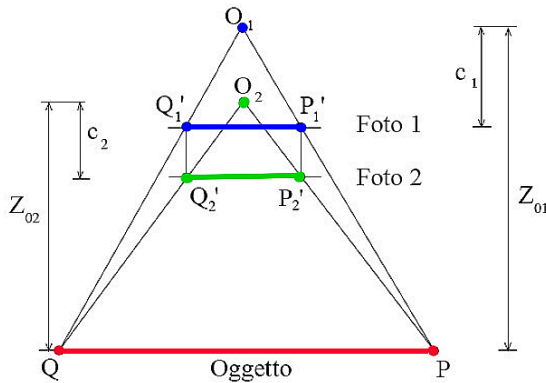


Figura 3.35 - Due fotogrammi con lo stesso fattore di scala Z_0/c

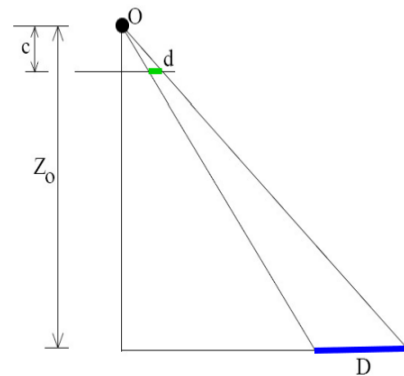


Figura 3.36 - Similitudine con la rappresentazione cartografica

3.7.2.2 CASO LINEARE

Senza perdere di generalità nella trattazione, esaminiamo la prospettiva centrale di una retta assumendo l'asse X coincidente con la retta oggetto e l'asse ξ ($\eta=0$) coincidente con la retta sul fotogramma.

Dalla prima delle due relazioni 3.11 ricavata nel caso piano, cioè:
$$X = \frac{a_1 \xi + a_2 \eta + a_3}{c_1 \xi + c_2 \eta + 1}$$

$$X = \frac{a_1 \xi + a_3}{c_1 \xi + 1}$$

si ottiene:

(3.16)

I 3 coefficienti che troviamo in quest'equazione: a_1 , a_3 , c , definiscono la PROSPETTIVA CENTRALE DI UNA RETTA e si possono calcolare a partire dalle coordinate note di tre punti di appoggio. Individuati questi coefficienti, si può calcolare la posizione X_i di qualsiasi punto oggetto a partire dai punti della retta immagine ξ_i .

3.7.3 CASO NORMALE

Questo è un caso particolare in cui sia la matrice di rotazione sia le equazioni di collinearità si semplificano notevolmente ed è rappresentato nella figura 3.38 con:

B = base di presa rappresenta la distanza tra i due punti di presa: O_1 e O_2

c = distanza principale, si assume uguale alla distanza focale dell'obiettivo

Z = distanza media del soggetto P dal punto di presa.

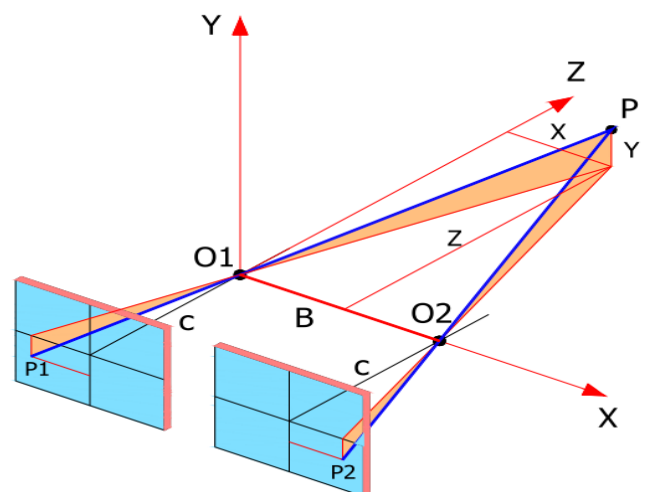


Figura 3.37 - Caso normale

Dalla schematizzazione nella figura 3.39 che rappresenta due fotogrammi nel caso di presa normale notiamo che:

$$X_{O1} = Y_{O1} = Y_{O2} = Z_{O1} = Z_{O2} = 0$$

$$X_{O2} = B$$

$$\xi_{O1} = \eta_{O1} = \xi_{O2} = \eta_{O2} = 0$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \phi_1 = \phi_2 = \kappa_1 = \kappa_2 = 0$$

$$\omega_3 = \phi_3 = \kappa_3 = 1$$

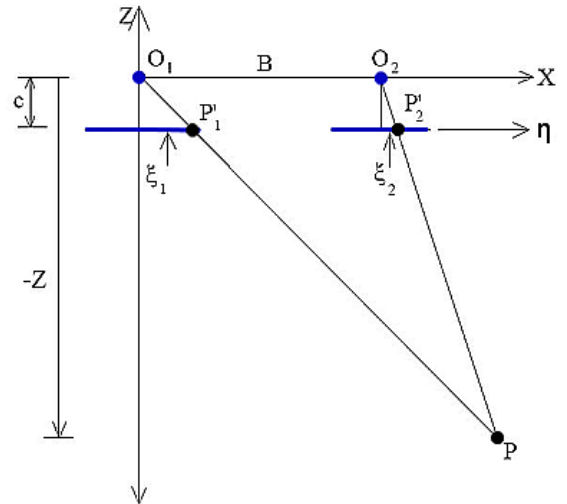


Figura 3.38 - Schema del caso normale

Sotto queste condizioni le equazioni di collinearità diventano:

$$\text{per la foto 1: } \begin{cases} X = Z \cdot \frac{\xi_1}{-c} \\ Y = Z \cdot \frac{\eta_1}{-c} \end{cases} \quad \text{e per la foto 2: } \begin{cases} X = Z \cdot \frac{\xi_2}{-c} \\ Y = Z \cdot \frac{\eta_2}{-c} \end{cases}$$

Dall'uguaglianza delle Y risulta $\eta_1 = \eta_2$

ovvero non c'è parallasse lungo η (Figura 3.40):

$$P_\eta = \eta_2 - \eta_1 = 0$$

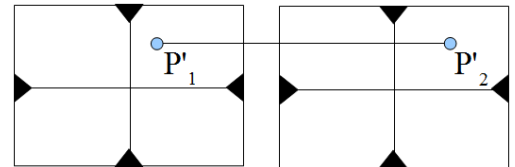


Figura 3.39 - Assenza di parallasse lungo

Dall'uguaglianza delle X, invece, risulta: $-Z \cdot \frac{\xi_1}{c} = B - Z \cdot \frac{\xi_2}{c}$

$$\Rightarrow Z = - \frac{c \cdot B}{\xi_1 - \xi_2} \quad (3.17)$$

con parallasse lungo ξ pari a:

$$P_\xi = \xi_1 - \xi_2 \neq 0 \quad (\text{Figura 3.41})$$

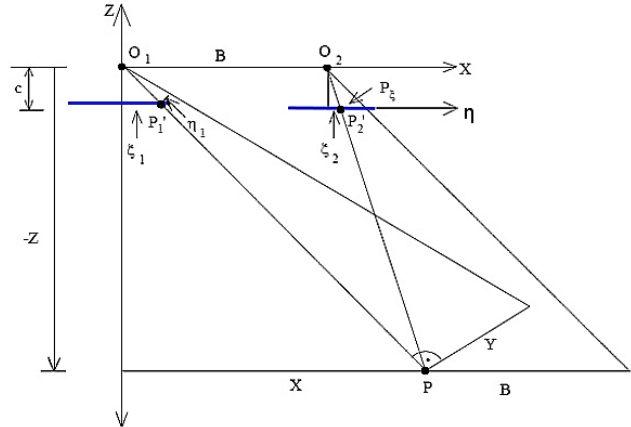


Figura 3.40 - Parallasse lungo ξ

Sostituendo la Z appena trovata nelle espressioni di X e Y delle equazioni di collinearità semplificate per il caso piano si ha:

$$\begin{cases} X = -Z \cdot \frac{\xi_1}{c} = \frac{c \cdot B}{\xi_1 - \xi_2} \cdot \frac{\xi_1}{c} = \frac{B \cdot \xi_1}{P_\xi} \\ Y = -Z \cdot \frac{\eta_1}{c} = \frac{c \cdot B}{\xi_1 - \xi_2} \cdot \frac{\eta_1}{c} = \frac{B \cdot \eta_1}{P_\xi} \end{cases} \quad (3.18)$$

Ovvero:

$$\begin{cases} X = \frac{B \cdot \xi_1}{P_\xi} \\ Y = \frac{B \cdot \eta_1}{P_\xi} \\ Z = -\frac{c \cdot B}{P_\xi} \end{cases} \quad (3.19) \quad \begin{array}{l} \text{Coordinate oggetto in funzione} \\ \text{della base di presa } B \text{ e della parallasse} \end{array}$$

Queste sono le coordinate oggetto espresse in funzione della base di presa B, della distanza focale c, della parallasse lungo ξ e della coordinata immagine in un fotogramma.

Il caso normale è una situazione ideale a cui ci si riferisce nelle prese fotogrammetriche.

3.8 IL FOTOGRAMMA

Dal punto di vista geometrico un fotogramma è un'immagine fotografica che può considerarsi, con buona approssimazione, una proiezione centrale o prospettiva dell'oggetto fotografato (Figura 3.42).

È ottenuta proiettando i punti dell'oggetto da un punto esterno, detto *centro di proiezione* o *punto di vista*, su un piano chiamato *piano di proiezione*.^[13]

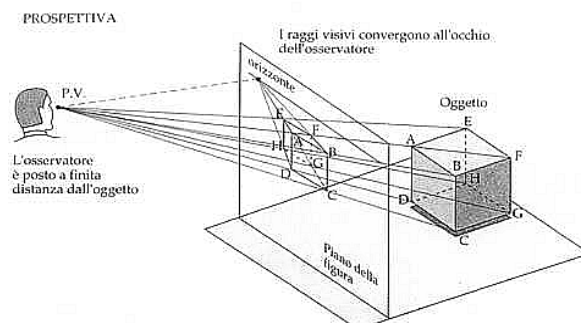


Figura 3.41 - Elementi della prospettiva

La rappresentazione è simile a quella che si realizza con la visione ottica, ma con rapporti dimensionali deformati: l'immagine che si forma sul quadro ha dimensioni diverse dall'oggetto reale e variano al variare della distanza fra centro di proiezione, quadro ed oggetto. Le intersezioni tra il fascio di rette proiettanti e il piano di proiezione rappresentano i *punti*

immagine.

È possibile associare: il piano di proiezione al piano della pellicola sensibile o del sensore nel caso di fotocamere digitali, il centro di proiezione ad un punto dell'obiettivo della camera fotografica e le rette di proiezione ai raggi luminosi che formano l'immagine piana dell'oggetto in questione.

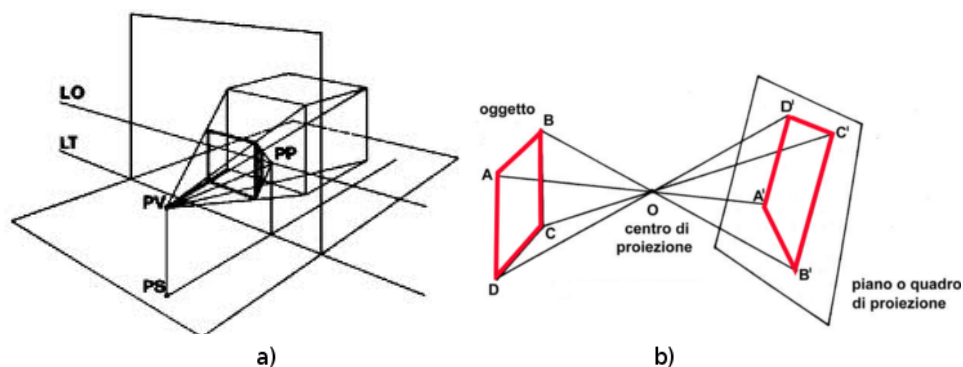


Figura 3.42: a) prospettiva centrale; b) foto come prospettiva centrale

Questi elementi geometrici sono noti come ELEMENTI DI ORIENTAMENTO INTERNO della fotocamera e la loro conoscenza è fondamentale per conferire valore metrico alle immagini fotografiche, che per questo vengono chiamate FOTOGRAMMI, mentre sono FOTOGRAFIE le immagini che danno solo un'informazione qualitativa dell'oggetto.

- Da qui in avanti con il termine foto o fotografia si intenderà: fotogramma -

Se l'obiettivo della fotocamera fosse costituito da una sola lente infinitamente sottile, il centro di proiezione coinciderebbe con il centro dell'obiettivo stesso e si avrebbe quindi un unico centro di proiezione proprio come nella prospettiva centrale. L'obiettivo fotografico è però costituito da un sistema ottico complesso e questo fa sì che il centro di proiezione non sia unico, anzi, si possono individuare due punti distinti allineati lungo l'asse ottico del sistema: i PUNTI NODALI (Figura 3.44). I raggi della radiazione luminosa proveniente dallo spazio esterno attraversano un mezzo di densità differente dall'aria e vengono deviati dando luogo a due fasci di raggi (il primo entrante, l'altro uscente dall'obiettivo), i cui centri sono proprio i punti nodali.

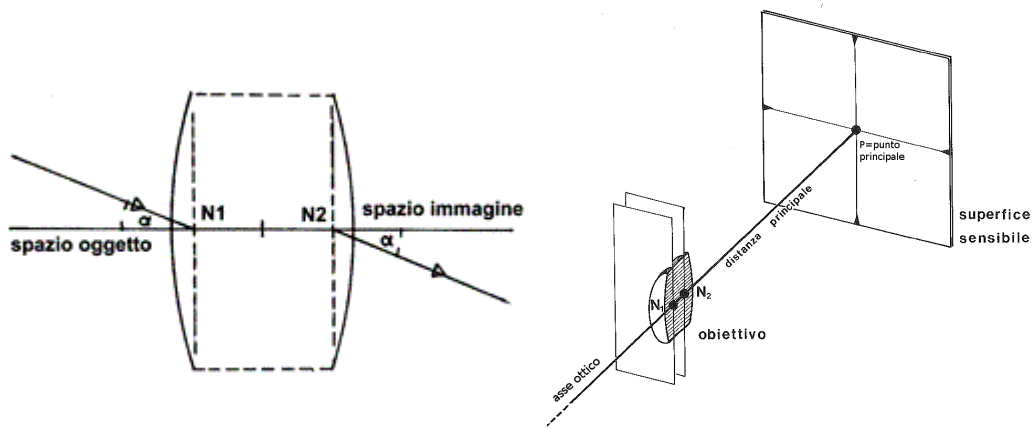


Figura 3.43 - Punti nodali: N_1 ed N_2

Come mostrato nella figura 3.44 i raggi passano dal primo punto nodale, N_1 (detto *punto nodale anteriore*), ed arrivano nello spazio interno alla camera fotografica passando dal secondo punto nodale, N_2 (detto *punto nodale posteriore*), in direzione parallela a quella che avevano nello spazio esterno, raggiungendo infine il piano della pellicola o del sensore.

Tuttavia possiamo ipotizzare $N_1 \equiv N_2$ e assimilare il punto nodale posteriore N_2 al centro di proiezione dell'immagine fotografica, esso individua così il punto dello spazio in cui la fotografia è stata scattata, noto anche come PUNTO DI PRESA.^[27]

Il piede della perpendicolare dal punto nodale N_2 al piano focale è detto PUNTO PRINCIPALE: esso ci dà un'indicazione sulla posizione del piano di proiezione rappresentato dalla superficie sensibile.

3.8.1 ORIENTAMENTO

Per poter ricostruire il modello tridimensionale di un oggetto occorrono due sue prospettive centrali differenti: due fotogrammi che ritraggono la stessa porzione di oggetto.

Come già visto nel paragrafo delle equazioni di collinearità (Paragrafo 3.5.1), risolvere un problema fotogrammetrico significa individuare le relazioni che legano in modo univoco le coordinate oggetto (X, Y, Z) dei punti dello spazio reale, con quelle bidimensionali (ξ, η) del fotogramma nello spazio immagine.

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta = \eta_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}$$

Equazioni di collinearità

I due sistemi di coordinate sono legati tra loro dai **parametri dell'orientamento**, cioè dalle caratteristiche della fotocamera e dalla sua posizione (e della pellicola o sensore) nei due spazi.

La camera è assimilabile ad un corpo rigido e ha 6 gradi di libertà: 3 traslazioni + 3 rotazioni. Per definire la sua posizione nello spazio, quindi, è necessario fissare 6 parametri:

- $X_0, Y_0, Z_0 \rightarrow$ tre parametri di traslazione, sono le coordinate del centro di proiezione al momento della presa (indicato con O nella figura 3.45),
- $\omega, \varphi, \kappa \rightarrow$ tre parametri di rotazione, indicano le rotazioni attorno agli assi coordinati determinando l'assetto della camera e del fotogramma rispetto al centro di proiezione.

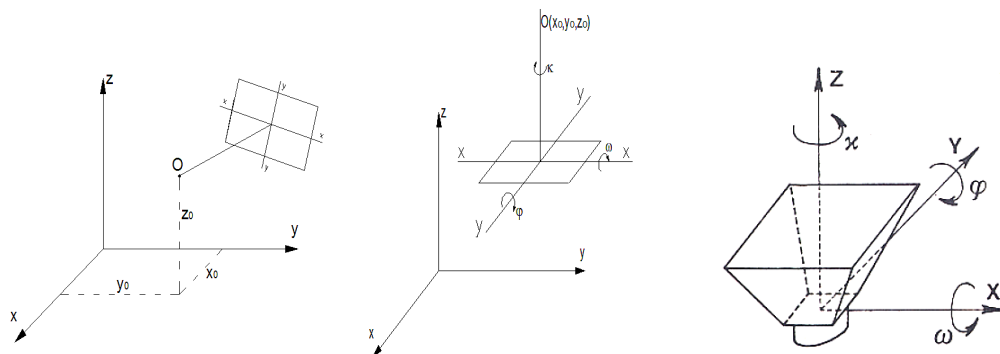


Figura 3.44 - Orientamento esterno: posizione del centro di presa O (a sinistra) e angoli di rotazione del fotogramma (al centro) coincidenti con quelli della camera (a destra).

La ricostruzione di un modello utilizzando un solo fotogramma è possibile solo se l'oggetto è piano poiché in questo caso s'instaura una corrispondenza biunivoca fra punti immagine e punti oggetto (Figura 3.46).

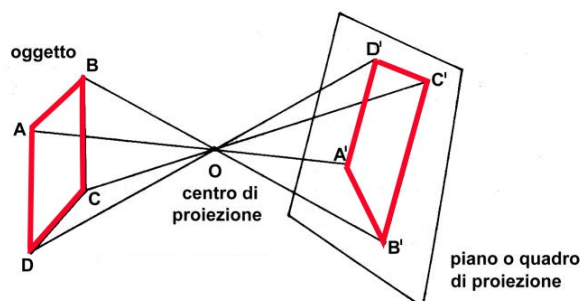


Figura 3.45 - Corrispondenza biunivoca tra punti del fotogramma e oggetto piano

Quando sono presenti differenze di quota, ad esempio nel caso del terreno o di un elemento architettonico che non possa essere considerato piano, la corrispondenza biunivoca viene a mancare poiché sull'immagine due punti a quote diverse potrebbero coincidere.

In tal caso per poter ricostruire il modello 3D di un oggetto è necessario avere una coppia di fotogrammi (stereoscopici) che lo riprendono da posizioni differenti (Figura 3.47, vedi anche Paragrafo 3.7.2).

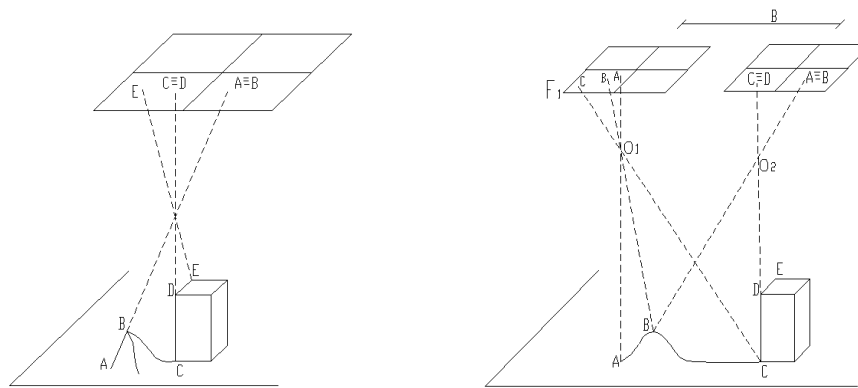


Figura 3.46 - Stesso oggetto ripreso con un fotogramma (a sinistra) e con due (a destra).

In realtà con ciò si otterrà semplicemente l'*effetto stereo*, ma per far sì che l'immagine dell'oggetto fotografato sia in scala, è necessario individuare la posizione spaziale dei fotogrammi, per ogni coppia dei quali si devono individuare **12 parametri**.^[27]

$$(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_1^{\text{scatto}}$$

$$(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_2^{\text{scatto}}$$

Conoscendo la posizione spaziale della camera al momento delle prese e ricostruendo le stelle proiettive, i raggi omologhi si intersecheranno in modo da individuare univocamente ogni punto dell'oggetto ricostruendo il modello.

La procedura di orientamento si basa su una serie di fasi successive:

- ORIENTAMENTO INTERNO, consiste nella ricostruzione della singola proiezione centrale: posizione del punto di presa rispetto al fotogramma e corretta geometria interna dell'immagine in relazione al sistema ottico che l'ha generata (correzione delle distorsioni ottiche delle lenti, eventuale deformazione dei supporti). Questa è la fase in cui vengono ricostruite le stelle proiettive;
- ORIENTAMENTO ESTERNO, consiste nella collocazione nello spazio oggetto dei fasci proiettivi ricostruiti in modo che siano nella stessa posizione che avevano all'atto della presa. Con l'orientamento esterno avviene la ricostruzione della posizione dell'asse di presa e, di conseguenza, del piano di formazione dell'immagine (pellicola, lastra o sensore) nello spazio. L'orientamento esterno, a sua volta, si divide in due fasi che possono avvenire contemporaneamente: nella prima si forma il modello stereoscopico, a partire dai due fotogrammi, in un sistema modello (x, y, z) ; nella seconda si orienta questo modello nel sistema oggetto (X, Y, Z) . Nello specifico le due fasi sono:

- 1) ORIENTAMENTO RELATIVO: si accoppiano i raggi omologhi (provenienti, cioè, dallo stesso punto oggetto) per complementarità dando luogo al modello, le cui

coordinate vengono calcolate attraverso le equazioni delle rette proiettive (o equazioni di collinearità). Le coordinate dei punti sono nel sistema di riferimento relativo del modello;

Al termine dell'orientamento relativo si ha una figura spaziale simile all'oggetto originale, ma con dimensioni diverse. Il dimensionamento corretto si ottiene tramite la fase successiva di orientamento assoluto.^[28]

Se al momento della restituzione le camere di proiezione venissero poste alla distanza originaria B della base al momento della presa, il modello sarebbe ricostruito in scala 1:1 (reale), se si riduce la base di presa a B/n il modello si ricostruirà in scala 1/n.^[29]

- 1) ORIENTAMENTO ASSOLUTO: si trasformano le coordinate modello in coordinate terreno tramite rototraslazioni con variazioni di scala. Qui avviene, dunque la MESSA IN SCALA del modello, fase in cui si deve conoscere la distanza tra i centri di proiezione delle due foto al momento della presa (=base della presa).

Il risultato finale è un file numerico in cui misurare tutte le coordinate modello/oggetto^[30]

Riassumendo, il numero di parametri da determinare durante le varie operazioni di orientamento è riportato nella seguente tabella:

OPERAZIONI		N. parametri da determinare	
Orientamento interno		3 parametri orientamento interno	
Orientamento Esterno	orientamento relativo	5	} 12 parametri orientamento esterno
	dimensionamento modello	1	
	orientamento assoluto	6	

Tabella II – Parametri da determinare durante le operazioni di orientamento dei fotogrammi

3.8.1.1 ORIENTAMENTO INTERNO

Il procedimento fotogrammetrico si sviluppa a partire dal fotogramma: un'immagine fotografica rigorosamente geometrica che, di fatto, è una prospettiva centrale degli oggetti ritratti. Nella foto i raggi proiettivi partono da ogni punto dello spazio oggetto e, attraversando il punto nodale della camera, che rappresenta il centro di proiezione, arrivano sulla superficie fotosensibile, posta a distanza c, dove formano l'immagine (Figura 3.48).

L'orientamento interno, quindi, è l'insieme dei parametri utili a descrivere la geometria interna della camera da presa. I parametri che definiscono tale orientamento sono:

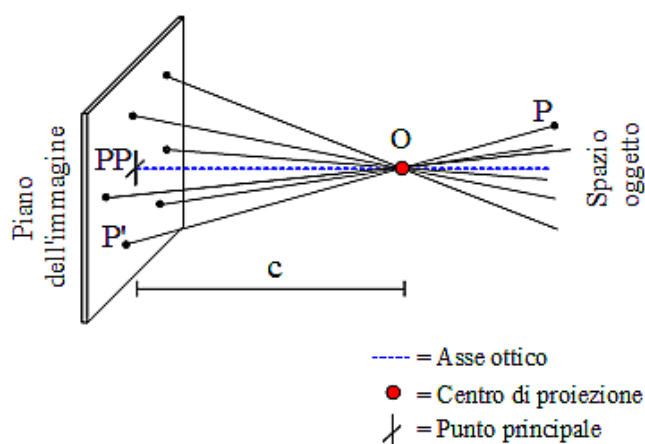


Figura 3.47 - Stella proiettiva e posizione della fotocamera

- ξ_0, η_0 = coordinate del punto principale nel sistema di riferimento del fotogramma,
- c = distanza principale della camera.

Essi definiscono la posizione del centro di proiezione O rispetto al sistema fiduciale definito sul piano del fotogramma. Individuato l'orientamento interno è possibile tracciare la stella delle rette che uniscono i singoli punti immagine con il centro di proiezione.

Nelle camere fotogrammetriche tali elementi geometrici (centro di proiezione e distanza dal quadro di proiezione, già indicati nel Paragrafo 3.9.1), detti appunto *elementi di orientamento interno*, devono essere perfettamente definiti. La loro conoscenza è indispensabile per attribuire valore metrico alle immagini e per consentire la successiva ricostruzione dei raggi proiettivi uscenti dai relativi oggetti.

La definizione teorica di questi elementi si riferisce ad una macchina fotografica perfetta dal punto di vista geometrico, dove l'obiettivo identifica il centro di proiezione e l'asse ottico risulta perfettamente normale al quadro di proiezione rappresentato dal piano focale che raccoglie l'immagine (pellicola o sensore).

Tuttavia questo modello rimane ideale poiché nei casi reali si deve tener conto delle inevitabili imperfezioni costruttive legate alla camera, all'obiettivo e allo stesso fotogramma, che non possono essere eliminate (aspetti approfonditi nel Capitolo 4).^[21]

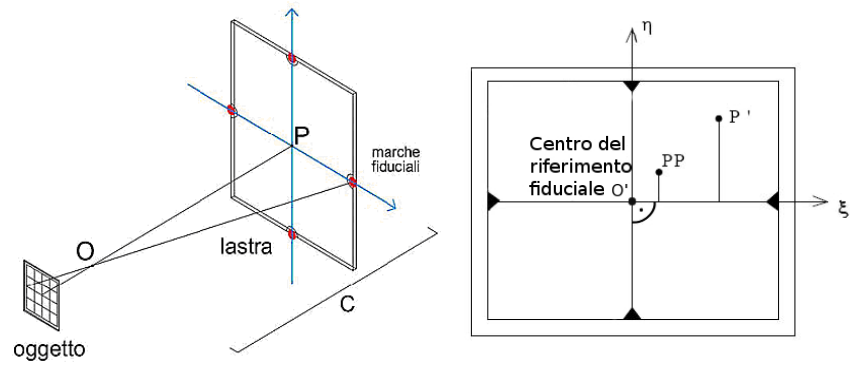


Figura 3.48 - Elementi di orientamento interno: centro di proiezione O , punto principale P , lunghezza focale C

Nei fotogrammi tradizionali (su lastra, pellicola o digitalizzati tramite scanner) la definizione di alcuni parametri avviene grazie alle marche fiduciali da cui è possibile ricavare le coordinate del punto principale nel sistema di riferimento del piano immagine (Figura 3.50).

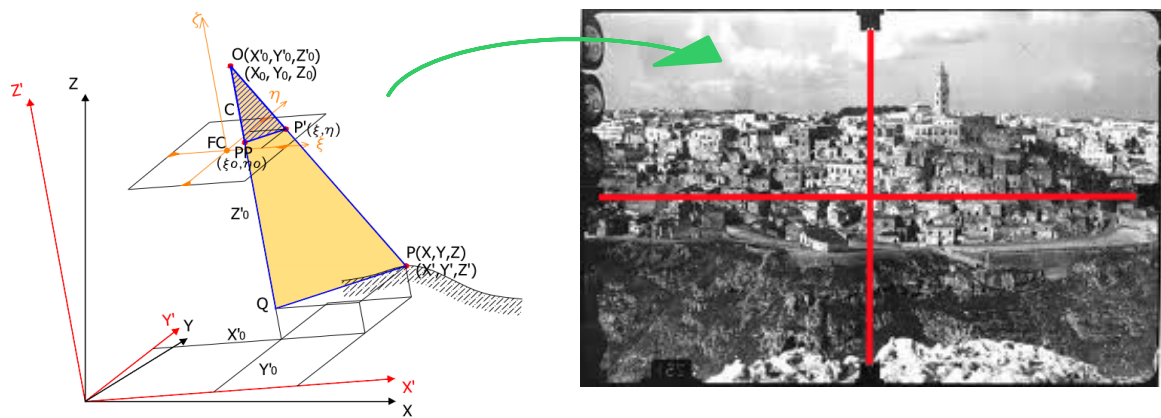


Figura 3.49 - Collimazione delle marche fiduciali e materializzazione del sistema di riferimento lastra

La distanza tra il punto nodale interno (che rappresenta il centro di proiezione) e il piano di proiezione, quando su questo l'immagine risulti nelle migliori condizioni di messa a fuoco, è denominata *distanza principale*, il piano in questione è chiamato *piano principale*.

La distanza principale è legata all'oggetto che si sta riprendendo, la focale, invece, è una caratteristica della camera. Spesso le due distanze vengono confuse, ma è importante precisare che si tratta di parametri distinti, le due lunghezze, infatti, sono messe in relazione dalla distanza D del centro di proiezione dall'oggetto (Figura 3.51).^[31]

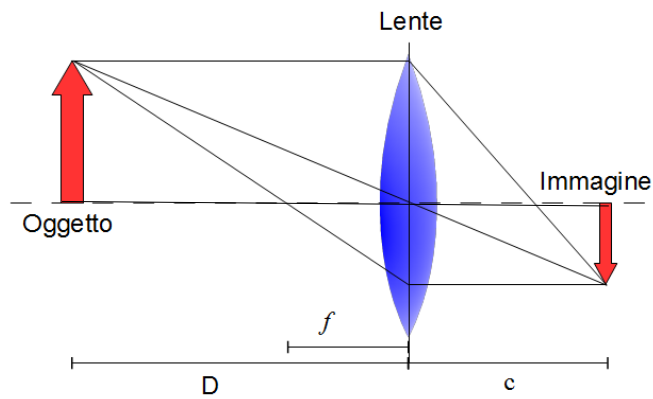


Figura 3.50 - Elementi di una presa

La distanza principale c , che è la distanza tra il centro di proiezione ed il piano della rappresentazione, è rigorosamente fissa, la distanza focale f , invece, può variare in funzione della distanza dell'oggetto per le operazioni di *messa a fuoco*.

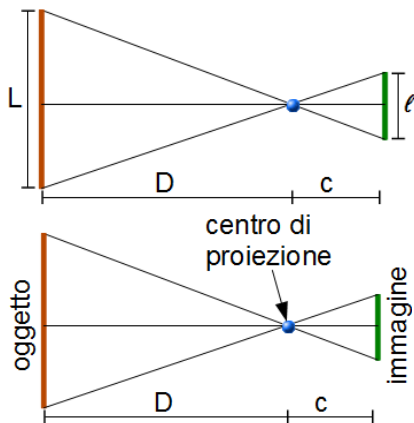


Figura 51 - Schematizzazione della distanza principale e della distanza oggetto

Per determinare la distanza principale, c , in virtù della similitudine dei due triangoli opposti al vertice (Figura 3.52), si usa la proporzione:

$$\frac{c}{D} = \frac{l}{L} \rightarrow c = \frac{l}{L} \cdot D \quad (3.20) \quad \text{Distanza principale}$$

Secondo la legge delle lenti sottili si ha che:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{c} = \frac{1}{f} \quad (3.21)$$

Se l'oggetto ripreso si trova alla massima distanza (D è all'*infinito*) allora c è minimo ed in particolare $\frac{1}{D} \rightarrow 0$ per cui dalla relazione 3.21 risulta: $\frac{1}{c} \approx \frac{1}{f} \rightarrow c \approx f$

Questo accade quando la distanza oggetto-fotocamera è molto più grande della distanza focale f della camera, è il caso tipico delle prese aeree in cui le fotocamere sono a fuoco fisso dato che la quota di volo è $H \gg f$.^[32]

Si definisce dunque DISTANZA FOCALE f la distanza tra l'obiettivo e la superficie sensibile che permette la creazione dell'immagine, su tale superficie (*piano focale*), quando l'oggetto da rilevare è posto ad una distanza infinita o molto superiore alla stessa distanza focale.

Le normali macchine fotografiche sono dotate di un dispositivo di messa a fuoco che permette di regolare la nitidezza delle immagini operando sulla distanza principale. Superato un certo valore della focale, l'immagine risulta sempre a fuoco; tale valore prende il nome di

distanza **iperfocale**.

Le camere metriche usate in fotogrammetria solitamente sono rigide, ovvero a fuoco fisso, avendo la focale superiore a quella iperfocale e potendo perciò fotografare oggetti posti all'infinito. A livello pratico solitamente la focale fornita dai costruttori di fotocamere non corrisponde a quella teorica, dovendo riferirsi ad un sistema più complesso di lenti, ma è una focale equivalente, ovvero quella che si avrebbe considerando una lente semplice nelle stesse condizioni. In altre camere da presa rigide è fornita invece la distanza focale calibrata, che rappresenta la focale con la quale si ottengono condizioni di focatura ottimali entro i limiti spaziali di utilizzo dello strumento.

Nella fotogrammetria terrestre la distanza dell'oggetto può essere comparabile con la lunghezza focale nel senso che non può essere considerato $c = f$ poiché il termine $1/D$ della relazione 3.21 non è più trascurabile.

Anche in questo caso, comunque, le fotocamere sono a fuoco fisso calibrate per una data distanza dall'oggetto (che generalmente è all'infinito) e si agisce sulla profondità di campo con regolazioni del diaframma. Quando c'è l'esigenza di uscire da questa profondità si interviene inserendo degli anelli distanziatori o lenti addizionali, ma la distanza principale resta nota con precisione (generalmente al centesimo di millimetro).

Le camere (fotografiche o digitali) utilizzate in fotogrammetria si possono classificare in funzione dell'orientamento interno, nel seguente modo:

- camere metriche: orientamento interno noto e costante nel tempo
- camere semimetriche: orientamento interno noto e variabile nel tempo
- camere amatoriali: orientamento interno incognito e variabile nel tempo.^[32]

3.8.1.2 ORIENTAMENTO RELATIVO

L'operazione di orientamento relativo consiste nel ricreare il luogo delle intersezioni tra le infinite coppie di raggi omologhi per ricostruire un modello ottico simile all'oggetto da rilevare.

Data una coppia di fotogrammi che riprendono la stessa porzione di un oggetto, il problema dell'orientamento relativo è determinare la posizione di una camera relativamente all'altra (ossia di un fascio proiettivo rispetto all'altro che viene considerato fisso) ricreando l'assetto reciproco che le due camere avevano al momento della presa.

È la fase di ricostruzione del modello. Se la distanza fra i due centri di proiezione fosse proprio quella della base di presa, la scala del modello sarebbe 1:1, in genere la scala del modello è invece data proprio dal rapporto tra la distanza della ricostruzione e la distanza

originale (se la base ricostruita è $B/n \rightarrow$ la scala del modello è $1/n$). Durante la fase di creazione del modello la scala non ha importanza, dunque i 6 parametri dell'orientamento (ovvero i sei gradi di libertà) si riducono a 5.^[33]

L'orientamento relativo dei due fotogrammi può essere *simmetrico* o *asimmetrico* in base a come viene fissato il sistema di riferimento:

- ASIMMETRICO quando si sceglie di fissare un sistema di riferimento relativo con origine nel primo centro di proiezione, i 3 parametri di traslazione sono quindi annullati. Inoltre si può fissare il sistema parallelo al sistema lastra in modo da annullare le rotazioni. Con questo metodo sono da calcolare solo le coordinate del secondo centro di presa (che sono le componenti della base, o meglio i due rapporti di due componenti rispetto alla terza che determina la scala del modello, osservando la figura 3.53 si evince che b_x non interferisce sull'intersezione dei raggi omologhi, ma solo sulla scala del modello) e le tre rotazioni del secondo fascio.

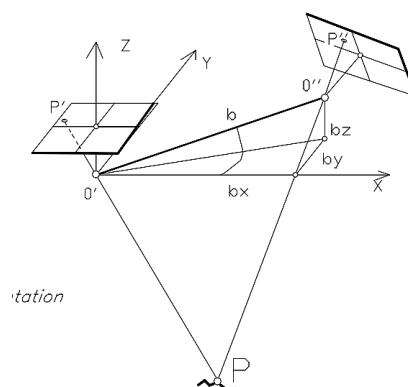


Figura 3.52 - Orientamento relativo asimmetrico

- SIMMETRICO quando si fissa l'origine del sistema di riferimento nel primo centro di proiezione con asse x passante per il secondo centro di proiezione. In questo modo si annullano le due componenti di traslazione del secondo centro di proiezione. Resta la possibilità di ruotare il sistema di riferimento per annullare una rotazione. I parametri incogniti sono, in questo caso, due rotazioni per un fascio e tre rotazioni dell'altro fascio (Figura 3.54).

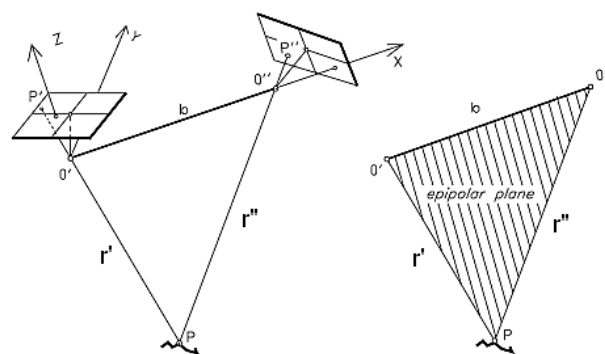


Figura 3.53 - Orientamento relativo asimmetrico

In entrambi i casi l'orientamento relativo è espresso dalla CONDIZIONE DI COMPLANARITÀ che si basa sull'ipotesi che una coppia di raggi omologhi e la base di presa appartengano allo stesso piano (figura 3.55).

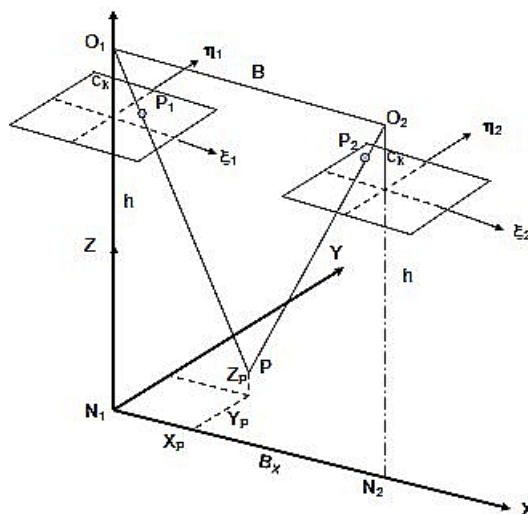


Figura 3.54 - Condizione di complanarità

Il concetto di complanarità è espresso dalla relazione: $\bar{b} \wedge \bar{r}_{1i} \cdot \bar{r}_{2i} = 0$ (3.22)

È dimostrabile che la complanarità non risente degli effetti di:

- una variazione di scala → 1 parametro
- una traslazione rigida → 3 parametri
- una rotazione rigida → 3 parametri

In questa fase si possono dunque determinare solo 5 dei 12 parametri già definiti nel Paragrafo 3.9.1, ma generalmente è preferibile usarne 9 a questi equivalenti: non si considerano le coordinate dei due centri di presa: $(X_0, Y_0, Z_0)_{Foto1} + (X_0, Y_0, Z_0)_{Foto2}$ è preferibile usare le componenti della base b: (b_x, b_y, b_z) sicché si passa da 12 → 9 parametri, che sono:

$$\{b_x, b_y, b_z, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2\} \quad \text{per i fotogrammi 1 e 2.}^{[28]}$$

L'operatore può selezionare i cinque parametri da determinare fra le sei rotazioni delle due camere e le tre traslazioni in cui è scomponibile la base di presa rispetto al sistema di riferimento solidale all'oggetto: x, y, z (in realtà bastano solo due traslazioni perché quella lungo x determina soltanto la variazione di scala del modello).^[32]

Dei 9 parametri: $\{b_{\xi}, b_{\eta}, b_{\zeta}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2\}$

dopo averne fissati 4 arbitrariamente, si determinano i restanti 5 svolgendo l'orientamento in uno dei due modi indicati precedentemente:

1) ORIENTAMENTO RELATIVO SIMMETRICO:

$$\text{si fissano arbitrariamente: } \begin{cases} b_{\xi} = b \\ b_{\eta} = 0 \\ b_{\zeta} = 0 \\ \omega_1 = 0 \end{cases} \quad \text{e si determinano: } \begin{cases} \varphi_1 \\ \kappa_1 \\ \omega_2 \\ \varphi_2 \\ \kappa_2 \end{cases}$$

2) ORIENTAMENTO RELATIVO ASIMMETRICO:

$$\text{si fissano arbitrariamente: } \begin{cases} b_{\xi} = b \\ \omega_1 = 0 \\ \varphi_1 = 0 \\ \kappa_1 = 0 \end{cases} \quad \text{e si determinano: } \begin{cases} b_{\eta} \\ b_{\zeta} \\ \omega_2 \\ \varphi_2 \\ \kappa_2 \end{cases}$$

Per ottenere le coordinate nel sistema modello è preferibile procedere con l'orientamento relativo simmetrico (eseguito in modo analitico o digitale) poiché in questo caso le equazioni di collinearità si semplificano molto.^[28]

Nella fase successiva, di orientamento assoluto, si determinano i rimanenti 7 parametri necessari a riportare il modello nel sistema di riferimento oggetto prescelto.

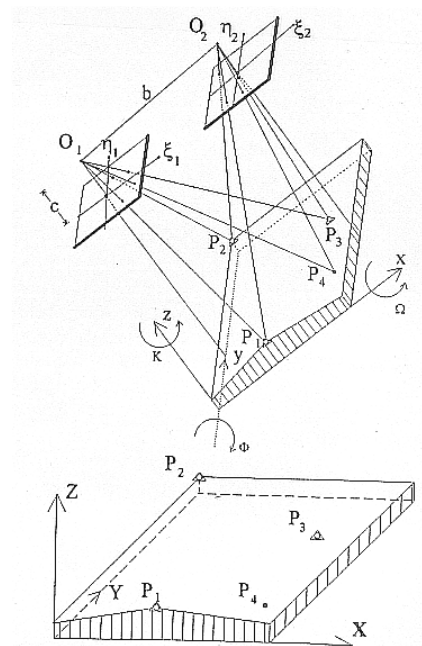


Figura 3.55 - Risultato dell'orientamento relativo

3.8.1.3 ORIENTAMENTO ASSOLUTO

L'operazione di orientamento assoluto è una trasformazione che consente di passare dalle coordinate modello alle coordinate oggetto tramite una *trasformazione conforme nello spazio*. Questa trasformazione è una rototraslazione con variazione di scala che coinvolge 7 parametri. Le equazioni della trasformazione conforme nello spazio (tre equazioni) possono essere scritte in forma matriciale come segue:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \cdot R_{\Omega\Phi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.23) \quad \text{Trasformazione conforme nello spazio}$$

Le equazioni 3.23 esprimono la trasformazione dalle coordinate modello (x, y, z) alle coordinate del terreno, o assolute (X, Y, Z), ma per definirla completamente si devono determinare i 7 parametri dell'orientamento assoluto:

$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$ → 3 parametri di traslazione, sono le coordinate nel sistema oggetto (o assoluto) dell'origine del sistema modello x, y, z (o relativo);

λ → 1 parametro che indica il fattore di scala del sistema modello;

$R_{\Omega\Phi\kappa}$ → 3 parametri di rotazione del sistema modello (x, y, z) rispetto al sistema oggetto (X, Y, Z) in funzione delle tre rotazioni Ω, Φ, κ , contenuti nella matrice di rotazione.

Per determinare questi parametri si deve disporre di un adeguato numero di punti del modello, che siano ben riconoscibili su due fotogrammi e che abbiano coordinate note in entrambi i sistemi di riferimento, immagine e oggetto. Questo tipo di punti sono detti PUNTI DI CONTROLLO o *control points*. In base alla natura dei punti di controllo si possono scrivere:

- 3 equazioni per ogni punto plano-altimetrico (x, y, z)
- 2 equazioni per ogni punto planimetrico (x, y)
- 1 equazione per ogni punto altimetrico (z)

Per risolvere il problema dell'orientamento assoluto è quindi necessario disporre di almeno:

- 2 punti plano-altimetrici + 1 punto altimetrico ($2 \cdot 3 + 1 = 7$);

oppure

- 2 punti planimetrici + 3 punti altimetrici non allineati ($2 \cdot 2 + 3 = 7$);

Si risolve così un problema isodeterminato di 7 equazioni in 7 incognite.

Se si hanno a disposizione più punti d'appoggio di quelli strettamente necessari, allora il problema presenta una ridondanza e si procede con una compensazione ai minimi quadrati.

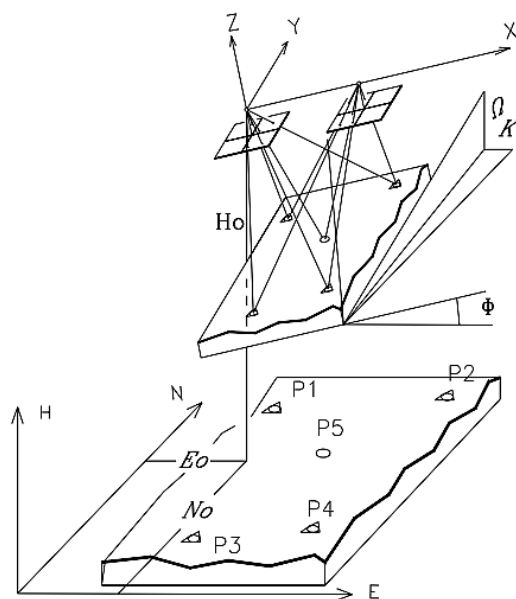


Figura 3.56 - Orientamento assoluto attraverso una rototraslazione del riferimento relativo rispetto al sistema di riferimento terreno

3.9 LA PRESA

Nella fotogrammetria convenzionale la base teorica e l'approccio stereoscopico della restituzione sono comuni sia nella fotogrammetria aerea sia nella fotogrammetria terrestre.

3.9.1 LA PRESA AEREA

La presa aerea è caratterizzata dal punto principale in movimento. La camera è posizionata su un velivolo ed è posizionata in modo da avere l'asse di presa rivolto verso il terreno e il più zenitale possibile (verticale). Per i principi analitici della fotogrammetria, già espressi nel Paragrafo 3.7, è necessario che un generico punto A sia presente in almeno due fotogrammi consecutivi. Facendo riferimento alla figura 3.59, le immagini di A nei due fotogrammi, A' e A'', dette IMMAGINI OMOLOGHE, hanno *coordinate lastra* che sono rispettivamente:

$$A' \rightarrow (x_{A'}, y_{A'}) \quad ; \quad A'' \rightarrow (x_{A''}, y_{A''})$$

Queste coordinate, misurate durante la restituzione, consentiranno di posizionare il punto A nel modello.

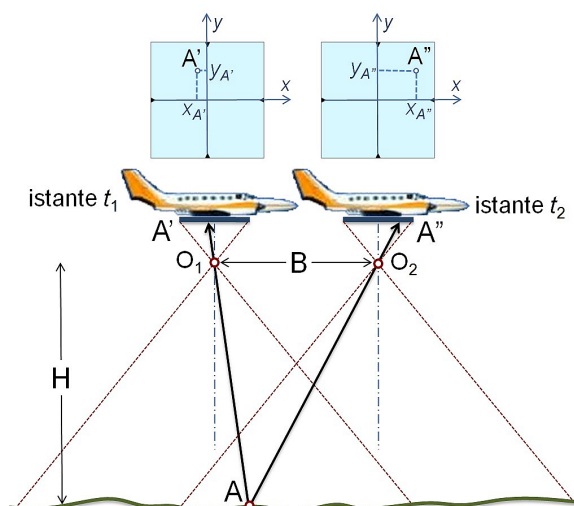


Figura 3.57 - Presa aerea zenitale del punto A in due fotogrammi

Si definiscono le seguenti grandezze (Figure 3.59 e 3.60):

- H = altezza media di volo durante le prese (ovvero distanza media dal suolo);
- L = abbracciamento = lato del quadro di terreno contenuto in un fotogramma;
- B = base di presa = distanza tra due centri di presa consecutivi O_1 e O_2 ;
- l = lato utile effettivo del fotogramma (circa 230mm);
- p = distanza principale della camera \approx distanza focale dell'obiettivo;
- μ = ricoprimento longitudinale = sovrapposizione di due fotogrammi consecutivi, generalmente $> 60\%$ di L ;
- ϵ = ricoprimento laterale = sovrapposizione di due strisciate adiacenti, in genere è il 20% di L ;
- i = interasse tra due strisciate consecutive = distanza tra due strisciate adiacenti.

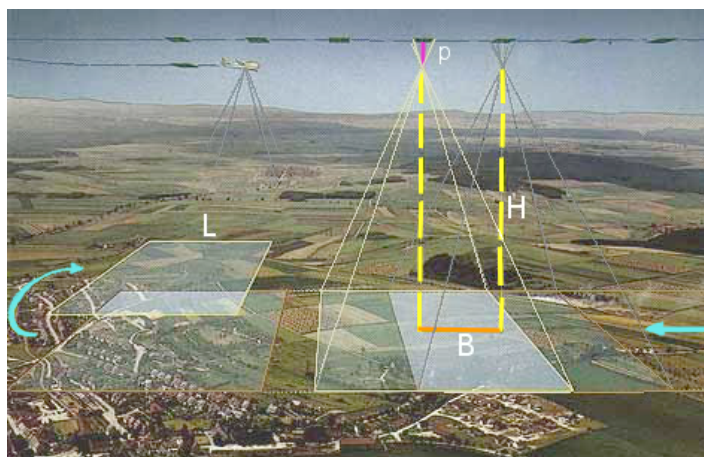


Figura 3.58 - Alcuni elementi caratteristici della presa aerea

Lo schema delle prese deve essere progettato in modo da garantire necessariamente il

rispetto di alcune condizioni specifiche (Figura 3.60):

- percorsi delle prese rettilinei e paralleli. I fotogrammi ripresi lungo uno stesso percorso rettilineo costituiscono una STRISCIATA, l'insieme di più strisciate prende il nome di BLOCCO DI STRISCIATE;
- RICOPRIMENTO LONGITUDINALE $\mu \geq 60\%$
- interasse i tra due strisciate adiacenti tale da avere un RICOPRIMENTO LATERALE ϵ che abbia un valore compreso tra $0,10 \div 0,20$ del lato L del fotogramma (detto *abbracciamento*) per non avere "buchi" nella copertura del territorio tra le varie strisciate.

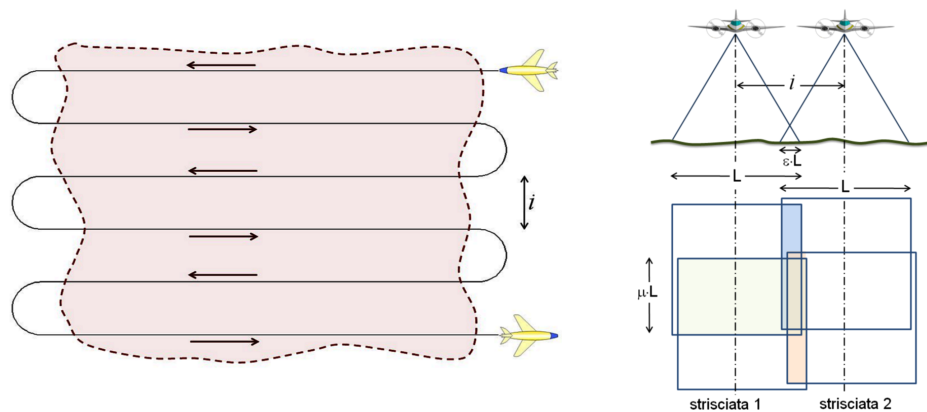


Figura 59 - Schema di volo di un blocco di strisciate e del ricoprimento laterale ϵL

È altresì fondamentale che ogni punto del terreno compaia su almeno due fotogrammi, in modo che tutta l'area da rilevare sia scomposta in modelli stereoscopici.

Questa esigenza è garantita dal RICOPRIMENTO LONGITUDINALE di ciascun fotogramma, la sovrapposizione del 10% anche dei modelli stereoscopici permette il loro concatenamento (Figura 3.61)

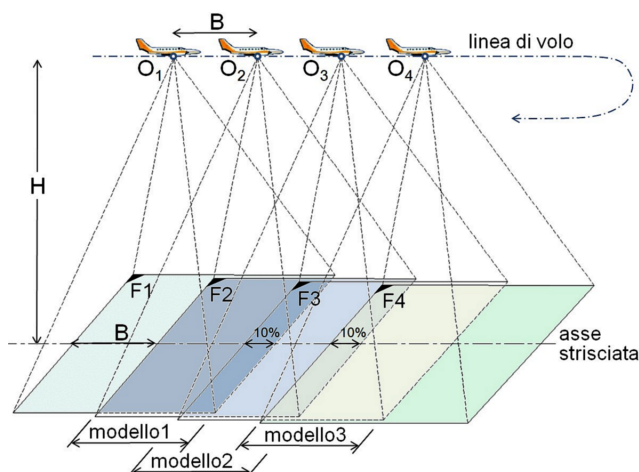


Figura 3.60 - La sovrapposizione dei fotogrammi crea modelli stereoscopici a loro volta sovrapposti del 10% coi modelli adiacenti

3.9.1.1 SCALA DEL FOTOGRAMMA E SCALA DELLA CARTA

Si definisce SCALA MEDIA DEI FOTOGRAMMA il rapporto tra la massima dimensione del fotogramma, l , e la corrispondente dimensione dell'abbracciamento, L :

$$\frac{1}{N} = \frac{l}{L} \quad (3.24)$$

Considerando il terreno regolare e pianeggiante, e la presa zenitale, il rapporto l/L può essere sostituito con il

$$\frac{l}{L} = \frac{c}{H}$$

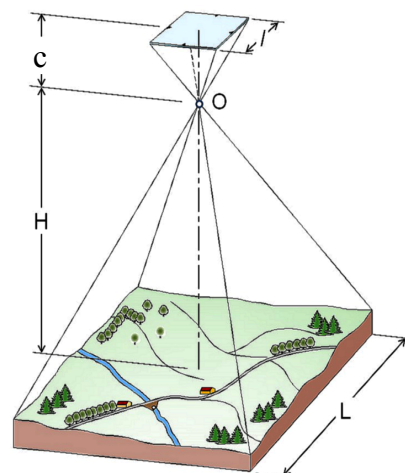


Figura 3.61 - Rapporto equivalente

rapporto tra distanza principale della camera, p , e l'altezza media del centro di presa, H , in virtù della similitudine delle figure geometriche (Figura 3.62):

$$(3.25) \quad \textit{Rapporto equivalente}$$

dunque la scala del fotogramma può essere scritta come:

$$\frac{1}{N} = \frac{c}{H} \quad (3.26) \quad \textit{Scala del fotogramma in funzione del rapporto equivalente}$$

La scala del fotogramma è strettamente connessa alla scala della rappresentazione sulla carta:

$$\frac{1}{N_{DIS}} \quad (3.27) \quad \textit{Scala del disegno o scala della carta}$$

Una regola empirica indica il rapporto ottimale tra la scala del disegno e la scala dei fotogrammi:

$$N = k \sqrt{N_{DIS}} \quad (3.28) \quad \textit{Regola empirica per la scala dei fotogrammi}$$

dove k è un coefficiente che dipende dalla scala del disegno:

scale medio-piccole (inferiori a 1:5.000) $\rightarrow k=200 \div 300$

scale grandi (superiori a 1:2.000) $\rightarrow k=150 \div 200$

In alternativa può essere usata la Tabella II dove in base alla scala della carta che si vuole ottenere si imposta la scala dei fotogrammi e viceversa:

SCALA DELLA CARTA	SCALA DEI FOTOGRAMMI	
	MIN	MAX
1:500	1:3.000	1:2.000
1:1.000	1:5.000	1:3.500
1:2.000	1:8.000	1:6.500
1:5.000	1:18.000	1:12.000
1:10.000	1:27.000	1:12.000
1:25.000	1:50.000	1:12.000
1:50.000	1:70.000	1:12.000
1:100.000	1:90.000	1:12.000

Tabella II - Rapporti ottimali tra la scala della carta e la scala dei fotogrammi, deriva dall'esperienza

3.9.1.2 PARAMETRI DEL VOLO

Una volta stabilite, in sede di progetto, la scala della carta e la scala media del fotogramma tramite la relazione 3.26, in base a questi valori si determinano i PARAMETRI DI VOLO:

Altezza relativa di volo: $H = N \cdot c$

Larghezza L del quadro contenuto nel fotogramma:

$$L = l \cdot N = \frac{l \cdot H}{c} \quad (3.29)$$

Lunghezza della base di presa B:

$$B = L \cdot (1 - \mu) = \frac{l \cdot H}{c} \cdot (1 - \mu) \quad (3.30)$$

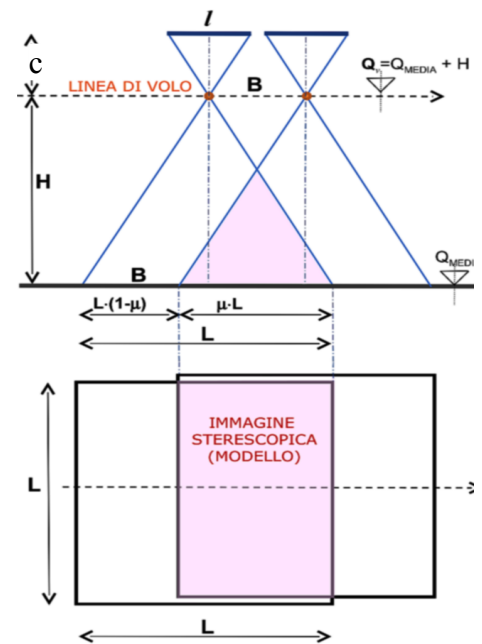


Figura 62 - Schema della presa aerea

Supponendo il moto rettilineo uniforme, dalla relazione: $t = \frac{B}{v}$,

controllando che sia $\frac{B}{H} \geq \frac{1}{4}$

l'intervallo tra due scatti, Δt , espresso in secondi con velocità di volo v espressa in m/s si scrive:

$$\Delta t = \frac{l \cdot H}{c \cdot v} \cdot (1 - \mu) \quad (3.31)$$

I parametri di volo sono valori *di massima* dato che non è possibile conoscere in anticipo e con esattezza le reali condizioni durante il volo, per diversi motivi:

- il terreno potrebbe non essere perfettamente piano e questo può causare una variazione di scala del fotogramma (Figura 3.64)

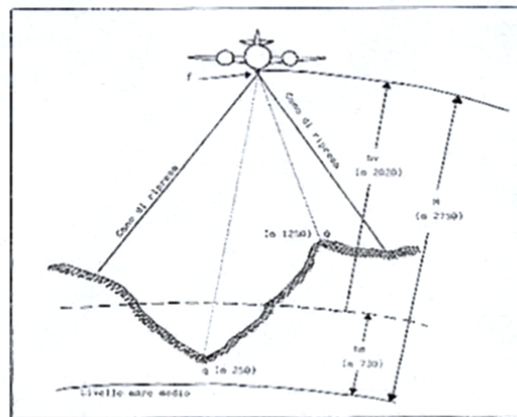


Figura 63 - Variazioni di scala del fotogramma per la non planarità del terreno

- la velocità di volo potrebbe non essere costante, questo condiziona le basi di presa B. Se si fosse stabilito per tutto il volo un intervallo di scatto Δt , calcolato considerando costante la velocità dell'aereo, si otterrebbero basi B diverse da quelle programmate e, a catena, ne risentirebbe anche il ricoprimento longitudinale, fondamentale per la formazione dei modelli stereoscopici, che sarebbe diverso da quello stabilito in fase di progetto.

In questo caso è necessario intervenire variando l'intervallo di scatto Δt durante il volo e per farlo si usa uno strumento semiautomatico detto *cinederivometro*.

- Il vento laterale potrebbe causare una deriva dell'aereo. Se la camera fosse tenuta in posizione fissa rispetto alla fusoliera si otterrebbe una strisciata di fotogrammi orientati in modo errato così come errato sarebbe il conseguente ricoprimento longitudinale (Fig. 3.65) . La correzione viene impostata automaticamente ruotando la camera attorno al proprio asse di un angolo pari all'angolo di deriva δ che viene misurato con il cinederivometro.

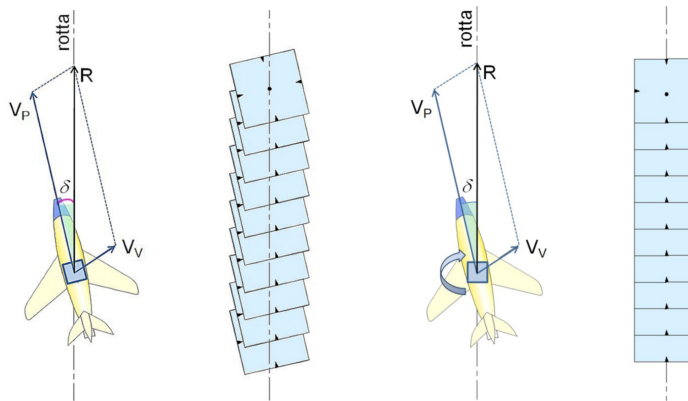


Figura. 3.64 - Effetto della deriva sulla strisciata a sinistra, derivata corretta

- L'apertura dell'otturatore della camera idealmente dovrebbe essere istantaneo. In realtà rimane aperto per un certo intervallo di tempo $\Delta\tau$ (espresso in frazioni di secondo, ed es. 1/1.000) per consentire alla luce di impressionare la pellicola o il sensore. Per quanto piccolo sia $\Delta\tau$, il moto dell'aereo produrrà sempre, sul fotogramma, l'effetto di trascinamento delle immagini. Durante quest'intervallo l'otturatore resta aperto ed il centro di presa si sposta dal punto O_1 al punto O'_1 percorrendo il tratto Δb , per cui il raggio di luce non registra il singolo punto A, bensì il tratto $\lambda = A'A^*$ (Figura 3.67).

Questo segmento deve essere contenuto entro certi *limiti ammessi* in relazione alla qualità del supporto fotografico; è espresso dalla formula:

$$\lambda = \frac{p \cdot v \Delta \tau}{H} \quad (3.32) \quad \text{Tratto di trascinamento sul fotogramma}$$

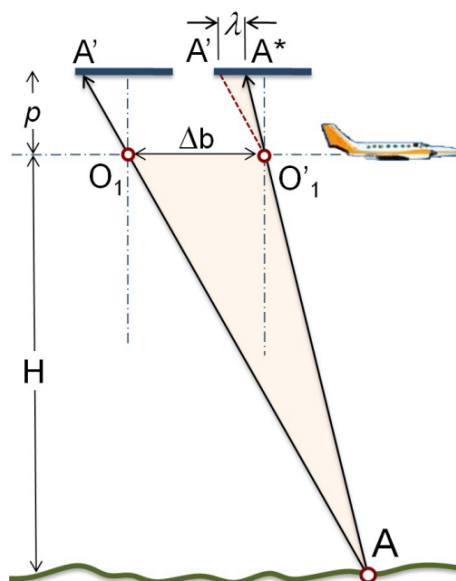


Figura 65 - Effetto del trascinamento sul fotogramma

3.9.2 LA PRESA TERRESTRE

La presa può essere di tre tipi:

- a) **presa normale** (o stereoscopica): gli assi della camera sono tra loro paralleli alla base di presa e perpendicolari alla superficie (Figura 3.67), è la presa ideale, indicata soprattutto per la stereoscopia. Questa particolare configurazione si riflette in una *soluzione analitica* molto semplice (vedi Paragrafo 3.7.3) e genera fotogrammi *uniformi* per la scala;

Quando gli assi di presa sono leggermente convergenti (max 4°-5°) la presa viene detta **pseudo-normale**, le prese sono

più rapide senza compromettere la stereoscopia. In questo caso, però, le operazioni di orientamento sono consentite da un insieme di punti d'appoggio sull'oggetto;

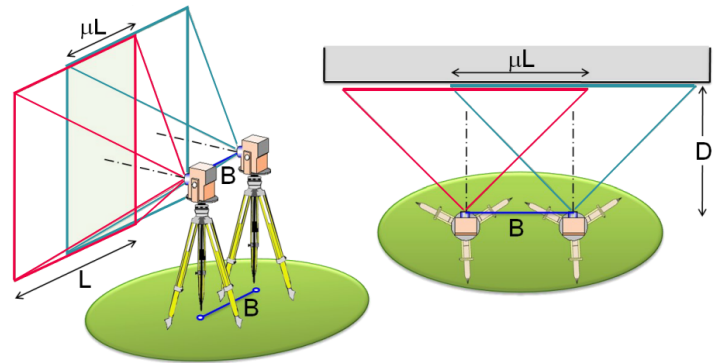


Figura 3.66 - Presa normale

- b) **presa convergente**: gli assi delle camere sono inclinati rispetto alla superficie e tendono formare un triangolo con la base di presa (Figura 3.68). Il rilievo con questo metodo è più rapido e necessita di un minor numero di fotogrammi, ma si perde l'aspetto stereoscopico. Per questo motivo la presa convergente viene usata solo nella fotogrammetria *non convenzionale* (Capitolo 4)

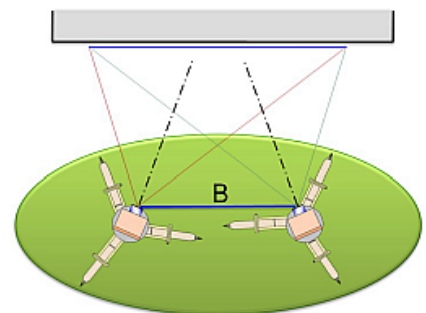


Figura 3.67 - Presa Convergente

- c) **presa inclinata** (o obliqua e parallela): gli assi della camera sono inclinati rispetto alla superficie,

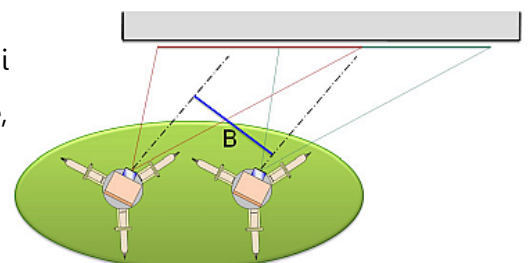


Figura 3.68 - Presa obliqua e parallela

ma restano paralleli tra loro (Figura 3.69). È una soluzione particolare, si utilizza quando la distanza tra camera e soggetto è molto piccola.

I parametri caratteristici della presa normale sono:

Scala dei fotogrammi: $N = (2 \div 4) \cdot N_{DIS}$

Distanza di presa: $D = c \cdot N$

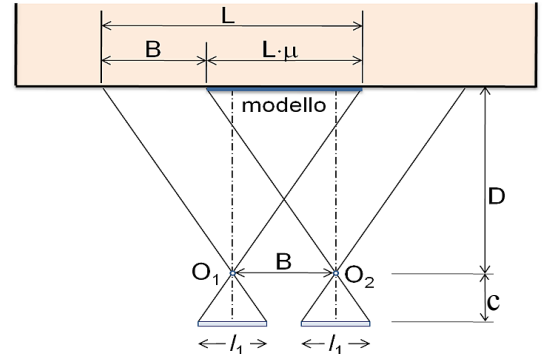


Figura 69 - Elementi della presa normale

Abbracciamento: $L = l_1 \cdot N$

Base di presa: $B = \frac{l_1 \cdot D}{c} \cdot (1 - \mu)$

Controllo: $\frac{B}{\Delta} = \frac{1}{3} \div \frac{1}{5}$

La superficie ripresa dalla fotocamera cambia in funzione della lunghezza focale, quindi per mantenere costante la superficie di ripresa si deve regolare la distanza della camera dal soggetto in relazione alla diversa lunghezza focale.

Nella fotogrammetria aerea e terrestre si cerca di approssimare il più possibile il caso normale, perché nella realtà intervengono diversi fenomeni che rendono solo ideale il modello teorico di prospettiva centrale.

Alcuni di questi fenomeni sono: le distorsioni radiali e tangenziali dell'obiettivo dovute all'imperfetto centramento delle lenti sull'asse ottico e alle aberrazioni presenti sulle lenti stesse; la non planarità della pellicola nella camera; le deformazioni subite dalla pellicola nella fase di sviluppo e stampa; le deformazioni del supporto causate da variazioni di temperatura ed umidità; la sfericità della terra; la rifrazione atmosferica.

CAPITOLO 4

FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

4.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Negli ultimi quindici anni l'evoluzione tecnologica ha compiuto passi enormi e gli effetti di queste innovazioni sono stati rilevanti in ambito fotogrammetrico. La fotogrammetria, infatti, è stata vista sempre come una materia complessa, che richiede attrezzature costose e personale altamente qualificato. Questo in parte è vero, ma i progressi in campo tecnico ed informatico, che riguardano sia la strumentazione sia i software, hanno ampliato molto i campi d'impiego di questa tecnica abbassando notevolmente i costi e i tempi delle elaborazioni.

La fotogrammetria di cui si è trattato nel Capitolo 3 è definita ANALOGICA, quando la trasformazione proiettiva avviene a partire dai fotogrammi per mezzo di strumenti ottico-meccanici, o ANALITICA quando la trasformazione proiettiva avviene per mezzo di strumenti gestiti dal computer. La fotogrammetria analogica, pur essendo ancora utilizzata, è destinata ad esaurirsi in quanto i cosiddetti strumenti analogici non vengono praticamente più costruiti.^[32]

La prima differenza tra la fotogrammetria analitica e quella digitale è nel dato iniziale: l'immagine fotografica è sostituita da un'immagine "digitale" registrata da dispositivi elettronici (sensori) anziché dalla classica emulsione. Se nell'uso di pellicola e supporto cartaceo la qualità del dato iniziale può subire delle alterazioni (o durante il processo di sviluppo o per deterioramento del supporto), l'uso dell'immagine digitale mantiene inalterata nel tempo la qualità dei dati acquisiti.

Questo aspetto è molto importante per la fotogrammetria perché rende disponibili nel tempo grandi quantità di dati in cui la posizione di un punto dello spazio è "fissata" rispetto alla sua posizione nell'immagine. Altra caratteristica importante è data dalla possibilità di archiviare ed elaborare un'enorme quantità di dati consultabili in modo semplice e flessibile.

Gli algoritmi classici di calcolo per gli orientamenti e la restituzione non presentano differenze tra fotogrammetria analitica e digitale. La grande novità, in termini di software per la

fotogrammetria digitale, è rappresentata dalla possibilità di individuare automaticamente alcuni punti caratteristici come marche fiduciali, punti pre-segnalizzati e punti omologhi. I vantaggi legati a queste automatizzazioni sono molti, in particolare non vi è più la necessità di disporre di operatori esperti, con conseguente diminuzione dei costi e di un ampliamento dell'utenza; di contro la progettazione del software è più complessa, si usano tecniche statistiche sofisticate e c'è la possibilità che l'utente non esperto usi questa tecnica in modo errato. Le operazioni di presa, appoggio e orientamento sono perciò da riservare sempre ad operatori esperti.^[30]

Grazie alla tecnologia digitale, dunque, la fotogrammetria si è sviluppata enormemente divenendo, oggi, una delle tecniche di acquisizione dei dati del territorio (per la creazione di carte topografiche, mappe del suolo, ecc.) tra le più affidabili, veloci e precise: a partire da un blocco di fotogrammi, attraverso una opportuna stazione fotogrammetrica digitale, in poco tempo si ottiene la ricostruzione tridimensionale del territorio fotografato, in un tempo molto ridotto rispetto a quello necessario fino a pochi decenni fa, quando esistevano solo restitutori analitici o analogici.

Con i nuovi restitutori digitali si può ottenere facilmente un prodotto fotogrammetrico, il cosiddetto Digital Terrain Model (DTM), utilizzabile in diverse applicazioni, tra le quali Sistemi Informativi Territoriali (SIT).^[34]

4.2 GLI ALGORITMI

La fotogrammetria digitale è il più recente sviluppo della metodologia fotogrammetrica classica: tutto il processo avviene per via digitale in quanto le immagini vengono acquisite direttamente in digitale e quelle su pellicola vengono convertite nel supporto numerico mediante appositi scanner fotogrammetrici.

In particolare, tramite degli algoritmi elaborati e perfezionati in questi anni, si cerca l'automazione nelle diverse fasi del progetto fotogrammetrico. I sistemi generalmente usati si chiamano *correlatori di immagini* poiché il loro scopo è quello dell'**image matching**, ovvero la ricerca di una corrispondenza tra i diversi insiemi di dati.

Nel processo fotogrammetrico digitale sono molte le fasi legate al matching, dall'orientamento esterno ed interno fino alla generazione di modelli digitali di terreno (DTM). Si cerca quindi di arrivare all'identificazione e alla misura automatica dei punti omologhi in due o più immagini.

I metodi più semplici utilizzano la correlazione di toni di grigio.

In generale il problema può essere scomposto nei seguenti passi:

1. selezionare un'entità su un'immagine;
2. trovare l'entità corrispondente su un'altra immagine;
3. calcolare la posizione 3D dell'entità nello spazio oggetto;
4. stabilire la qualità del matching.

4.2.1 FEATURE EXTRACTION E IMAGE MATCHING

I *feature extraction e image matching* sono algoritmi di **autocorrelazione** che permettono di riconoscere sulle immagini digitali segnali o forme prestabilite (primitive geometriche significative) mediante operazioni statistiche di confronto; il target da ricercare può essere costituito ad esempio da crocicchio di un reticolo di calibrazione, da un segnale utilizzato per la presegnalizzazione di punti di appoggio, da una marca fiduciale, oppure da uno spigolo di tetto o da un bordo di segnaletica stradale.^[raff]

I metodi di matching si dividono in :

- Area Based Matching (ABM),
- Feature Based Matching (FBM);
- Relational Matching (RM).

4.2.1.1 AREA BASED MATCHING (ABM)

I metodi ABM si basano sul confronto diretto della radiometria di zone omologhe delle immagini, tenendone una fissa e muovendo l'altra fino a trovare il miglior accordo in base ad un dato criterio. L'algoritmo utilizzato è semplice e si ha un'elevata accuratezza in regioni con densità non omogenea. Il metodo è però influenzato dai cambiamenti radiometrici dovuti ad esempio ad una variazione di illuminazione e vi è un gran volume di dati da trattare.

Fra gli ABM, la tecnica più semplice ed intuitiva di correlazione è quella che utilizza il coefficiente di correlazione fra i toni di grigio di una finestra rettangolare su di un'immagine di riferimento (template) e quelli di una finestra di uguali dimensioni su un'altra immagine (patch) fino a trovare la migliore corrispondenza.

La soluzione di questo problema di correlazione viene affrontata utilizzando il coefficiente di correlazione. Per semplicità, ma senza nulla togliere alla generalità del problema, si supponga di conoscere già la riga cui appartiene il pixel centrale della matrice sagoma nella matrice ricerca. Per tutte le posizioni possibili della matrice sagoma all'interno della matrice ricerca si calcola il coefficiente di correlazione lineare:

$$r = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} = \frac{\Sigma(g_1 - \bar{g}_1) \cdot (g_2 - \bar{g}_2)}{\sqrt{\Sigma(g_1 - \bar{g}_1)^2 \cdot \Sigma(g_2 - \bar{g}_2)^2}} \quad (4.1)$$

con: g_1 = la densità dell'immagine di riferimento (area sagoma);

g_2 = la densità dell'immagine estratta dalla matrice di ricerca che corrisponde all'immagine di riferimento;

\bar{g}_1, \bar{g}_2 = sono, rispettivamente, la media aritmetica della densità nell'immagine di riferimento (sagoma) e nell'immagine estratta da quella di ricerca;

σ_1, σ_2 = sono gli scarti quadratici medi della densità \bar{g}_1, \bar{g}_2

σ_{12} = è la covarianza tra le due densità .

Si assume, come posizione cercata, quella cui corrisponde il massimo valore di r.

4.2.1.2 FEATURE BASED MATCHING

La correlazione ai minimi quadrati è sicuramente un metodo di misura efficiente, tuttavia lascia aperti due problemi:

- come scegliere entro l'immagine dei punti che permettano un matching di buona precisione;
- scelti dei punti di un'immagine
- come stabilire la corrispondenza.

Metodi per la ricerca di punti sono stati sviluppati all'interno di un approccio alla correlazione più generale di quello signal-based, detto feature-based (correlazione tra caratteristiche).

I metodi FBM sono caratterizzati dall'individuazione nell'immagine di partenza di elementi caratteristici, i corrispondenti dei quali vengono poi ricercati in tutte le altre. Gli elementi caratteristici possono essere punti oppure spigoli (bordi, linee di confine, piccole e grandi regioni). Il successivo matching avviene sulla base di criteri che partono da misure di somiglianza e di coerenza. Oltre alla scelta del tipo di particolare da estrarre bisogna effettuare una scelta riguardo alla strategia, in modo che il matching risulti rapido, preciso ed affidabile.

Uno dei vantaggi che i metodi FBM hanno rispetto a quelli ABM è che è possibile ottenere una descrizione sia quantitativa che qualitativa, infatti i pixel non vengono confrontati solo sulla base delle differenze radiometriche.

Con gli algoritmi FBM vengono estratti in ciascuna immagine singolarmente punti, linee,

elementi di bordo, piccole regioni o altri elementi particolari prima del matching: la ricerca viene effettuata in termini di coordinate relative agli stessi oggetti caratterizzati da un set di attributi (lunghezza, dimensione, curvatura, luminosità media della regione, ecc.).

Per confrontare tutte le possibili coppie in modo da scegliere solo quelle con un sufficiente grado di somiglianza si può utilizzare il contenuto radiometrico (coefficiente di correlazione), il grado di unicità (coppie i cui elementi siano rari nell'immagine hanno elevata probabilità di corrispondenza), informazioni a priori (max valore della parallasse fra le due immagini o geometria relativa di presa) o altre misure di somiglianza.

La valutazione complessiva si quantifica poi assegnando un peso w a ciascuna coppia.

4.2.1.3 MATCHING “RELAZIONALE”

Può essere visto come un'estensione del FBM. Si discosta dai metodi ABM e, in generale, dai metodi statistici. Con questa metodologia si costruiscono strutture, cioè collezioni di elementi semplici tra loro connessi e, sulla base di relazioni di vario genere (spaziale, topologica, radiometrica, ecc.) si cercano le corrispondenze.

4.3 FORMAZIONE DELLE IMMAGINI

Il processo di formazione delle immagini attraverso un sistema ottico è descrivibile in termini di raggi, in particolare è strettamente legato al percorso del raggio luminoso all'interno del sistema ottico (fotocamera come l'occhio umano).

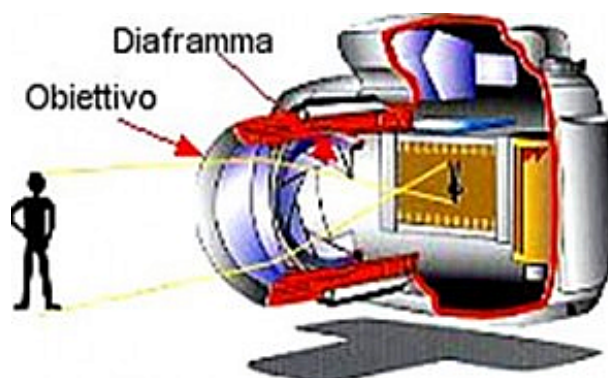


Figura 4.1 - Spaccato assonometrico di una camera reflex e dei raggi luminosi che attraversano il sistema ottico

4.3.1 LA LUCE

La luce è l'elemento primario sia della fotografia analogica sia della fotografia digitale, quello che cambia da un sistema all'altro è il modo in cui vengono catturate le radiazioni luminose riflesse dai soggetti ripresi: sfruttando gli alogenuri d'argento nel primo caso e attraverso un sensore nel secondo.

I due sistemi di ripresa hanno una differenza significativa nella sensibilità allo spettro luminoso (Figura 4.2):

- PELLICOLE PANCROMATICHE (quelle più comuni) → sono sensibili ad uno spettro di radiazioni paragonabile a quello dell'occhio umano (400 ÷ 700μ) con un leggero allargamento verso l'ultravioletto che viene debitamente filtrato (sia all'interno della pellicola stessa sia in fase di presa con un filtro UV davanti all'obiettivo)
- SENSORI → sono molto sensibili alle radiazioni infrarosse (>700μ) e questa caratteristica influenza la riproduzione tonale degli oggetti ripresi. Per questo anche per i sensori si rendono necessari interventi di filtraggio della luce.^[ftw]

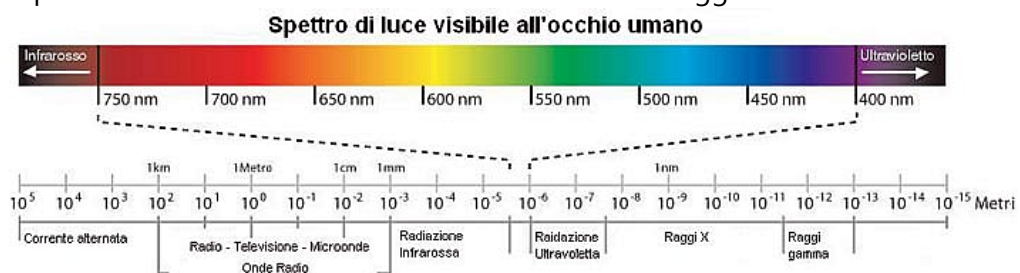


Figura 4.2 - Banda del visibile per l'occhio umano

4.3.2 DEFINIZIONI: BIT, BYTE, PIXEL

BIT= la parola "bit" è l'acronimo di Binary digiT: numero binario. È l'unità elementare dell'informazione trattata da un calcolatore, può assumere solo due valori: { **0** ; **1** }. La sequenza di 0 e 1 può assumere molti significati diversi. I bit presi singolarmente non hanno grande rilevanza, sebbene siano fondamentali per classificare i diversi tipi di immagine (vedi Paragrafo 4.3.5.5), ma sono molto importanti quando vengono raggruppati in sequenze di varia lunghezza per codificare informazioni più complesse. Il raggruppamento più importante è il *byte*.

BYTE= è formato dall'insieme di 8 bit, dunque un byte contiene 8 cifre che possono assumere valore 0 o 1 → $2^8=256$ valori diversi a ciascuno dei quali corrisponde una determinata combinazione di valori dei bit che lo compongono. Il byte è fondamentale per determinare la quantità di spazio occupato dall'immagine nella memoria del computer.

PIXEL=parola che deriva dall'unione di PICTure ELeMent: elemento d'immagine, rappresenta l'unità fondamentale delle immagini digitali di tipo *raster* o *bitmap* (mappa di bit). I pixel sono

aree infinitesime caratterizzate dalle dimensioni dX e dY detti PASSI DI CAMPIONAMENTO della digitalizzazione e indicano il numero di elementi per unità di lunghezza lungo X e lungo Y . Il sistema di riferimento (X,Y) su un'immagine digitale può essere relativo ad una metrica propria del supporto fisico dell'immagine sorgente o ad una metrica propria della scena rappresentata dall'immagine sorgente (ad es. m, cm, mm, km ecc.).

Si definisce **PIXEL RATIO** il rapporto tra larghezza e altezza del pixel; tale rapporto è spesso uguale a 1, ossia il pixel è quadrato

Questi numeri vengono memorizzati come serie di bit in un calcolatore al momento della digitalizzazione (se l'immagine è impressa su pellicola) oppure al momento dello scatto (nel caso di fotocamere digitali) e possono essere trasmessi e conservati nel tempo senza alterazioni (*immagine raster*). L'insieme ordinato di campioni in cui è suddivisa l'immagine assume l'aspetto di una **matrice** o tabella numerica composta da R righe e C colonne (Figura 4.3).^[6]

Ogni elemento g_{ij} della matrice, relativo ad un pixel, è individuato univocamente da due numeri interi che rappresentano la riga e la colonna del pixel all'interno della matrice stessa:

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{dove :} \\ R \text{ sono le righe, } C \text{ sono le colonne e} \\ g(x,y) = \{0,1,\dots,\text{max}\} \text{ i valori radiometrici.} \end{array}$$

Ricapitolando: l'immagine digitale è una matrice di pixel ciascuno dei quali è caratterizzato da tre numeri interi: due che indicano la sua posizione e uno che ne indica il valore radiometrico (Figure 4.3 e 4.6).

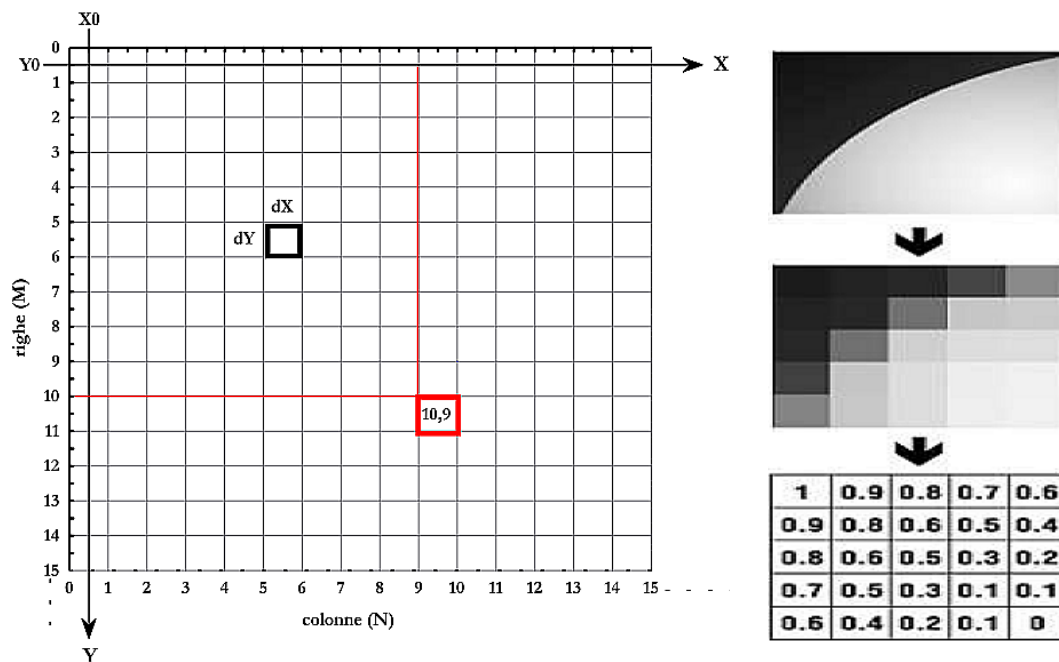


Figura 4.3 - Immagine digitale come griglia di pixel

4.3.3 LE IMMAGINI DIGITALI

Il termine *immagine digitale* potrebbe far pensare ad una stretta analogia all'immagine analogica con l'unica variante di essere visualizzata sul monitor di un computer o mediante qualche altro dispositivo elettronico, la differenza invece è più complessa.^[37]

Nelle fotografie analogiche la luce che arriva al piano immagine annerisce il negativo e, in base alle caratteristiche della pellicola e del processo di sviluppo, si ottiene un'immagine in cui il tono di grigio o di colore è praticamente *continuo*. Un'immagine fotografica di tipo analogico è composta da milioni di pigmenti (colorati o in B/W) molto piccoli e spazialmente irregolari (si parla di grana della fotografia), differentemente l'immagine digitale si forma tramite una serie di processi che trasformano in valori numerici la radiazione che giunge sul piano immagine (che è costituito dal sensore). In un'immagine digitale il livello di grigio o di colore risulta **DISCRETIZZATO**: il procedimento che converte una rappresentazione continua in una discreta si chiama digitalizzazione e avviene campionando le variabili spaziali e quantizzando i valori radiometrici corrispondenti.^[gir]



Figura 4.4 - Analogia dell'immagine digitale con i dipinti del movimento puntinista (opera di G. Seurat: *La grande Jatte*; 1884-1886)

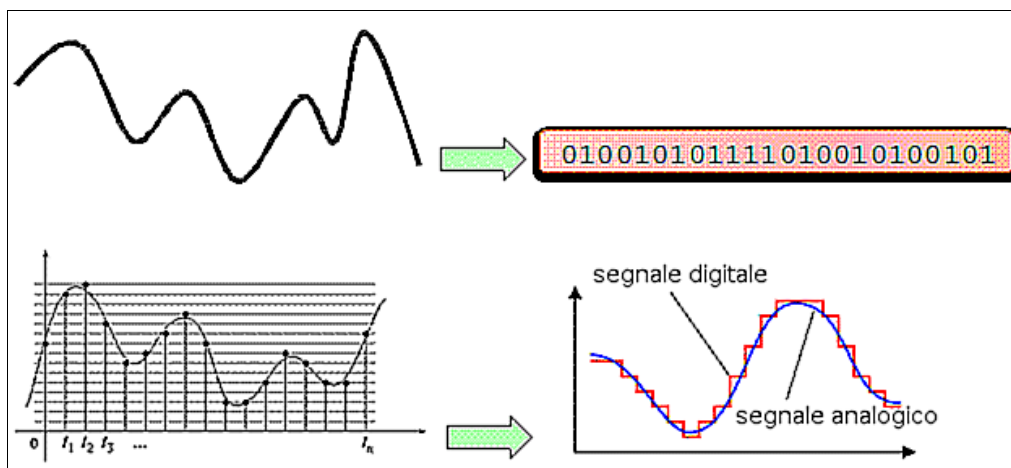


Figura 4.5 - Trasformazione del segnale da analogico a digitale

Per capire la differenza tra le due tipologie si può considerare l'analogico come una linea curva continua, un tratto che definisce un movimento, il digitale invece è rappresentato da una serie di numeri, un codice binario, che tenta di descrivere l'onda analogica tramite una serie di 0 e 1. La rappresentazione digitale di un'immagine è quindi un'approssimazione del dato analogico che, invece, è una copia della realtà (Figura 4.5).^[39]

L'immagine sul video di un computer o una fotografia, sono ambedue immagini analogiche. La differenza è che osservando una fotografia l'immagine che si forma sulla retina è il risultato dalla luce riflessa dalla fotografia stessa, invece l'immagine osservata sullo schermo di un computer è materializzata dalla diversa illuminazione dei pixel del video, ossia l'immagine che si crea sulla retina è il risultato di una luce emessa. Questi valori per essere nuovamente percepiti come immagine (nel senso comunemente attribuito al termine) devono subire un procedimento inverso di trasformazione dal numerico all'analogico. In entrambi i casi lo scopo è l'acquisizione dell'immagine, ciò che le distingue è la tecnica attraverso cui si raggiunge il risultato voluto.^[Gal_cd]

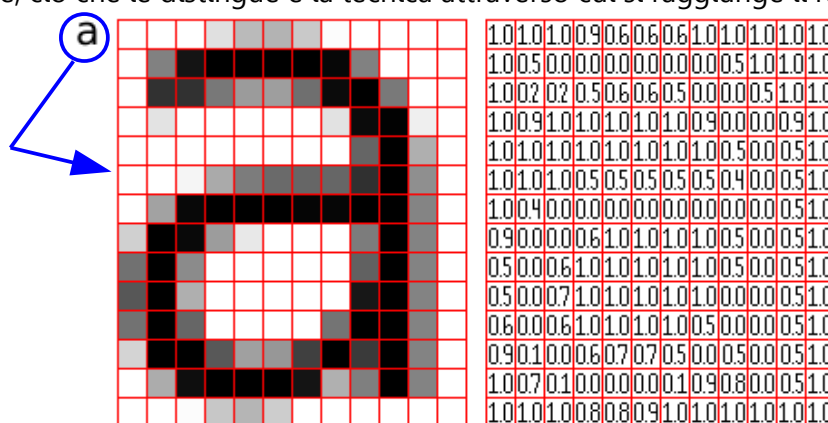


Figura 4.6 - Rappresentazione dell'immagine tramite una griglia di valori numerici

L'immagine digitale è dunque una matrice di numeri i cui elementi rappresentano la quantità di energia emessa o riflessa da un oggetto e che è in grado di produrre un'immagine percepibile dalla retina o di impressionare una pellicola (Figura 4.6).

4.3.3.1 IMMAGINI RASTER

Questo tipo di immagini sono anche dette *pittoriche* o *pixel oriented* dividono l'immagine in una griglia uniforme di pixel o punti di colore, come tessere di un mosaico. Per ogni pixel è registrata un'informazione di colore che dipende da quanti bit per pixel sono usati per immagazzinare il dato colorimetrico.

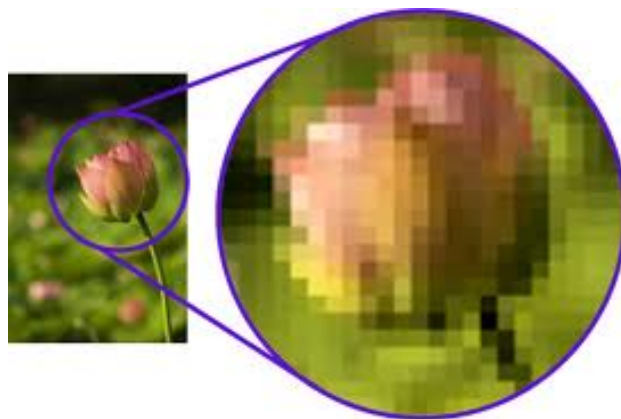


Figura 4.7 - Immagine raster e un suo ingrandimento dove sono ben visibili i pixel

Questo tipo di immagine è vincolata alla propria risoluzione: fino ad una certa dimensione i pixel non si percepiscono e l'immagine "appare come un continuo", ma sono ben visibili con l'ingrandimento (Figura 4.7).

4.3.3.2 IMMAGINI VETTORIALI

Sono dette *object oriented* e vengono generate da software per il disegno. Le unità base sono primitive, come ad esempio linee, punti, curve, combinati insieme per creare immagini più complesse.^[40]

Tali primitive sono definite attraverso equazioni matematiche, per questo le immagini vettoriali sono svincolate dalla risoluzione e possono essere scalate senza perdita di qualità. Per contro non sono indicate per rappresentare soggetti di tipo fotografico (a differenza delle immagini raster che sono usate per riprodurre in modo realistico immagini di tipo fotografico).

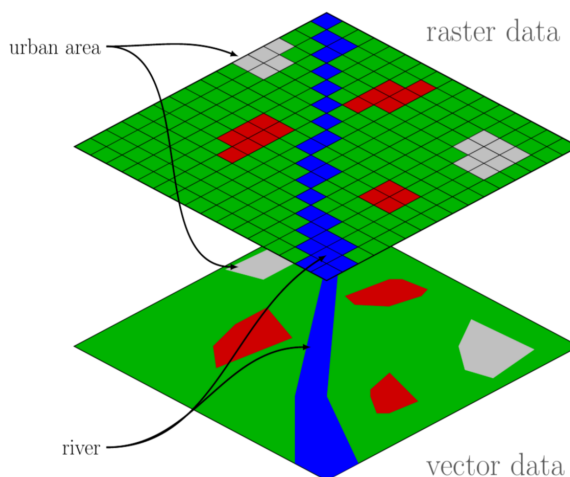


Figura 4.8 - La stessa area è rappresentata sia in formato raster che in formato vettoriale.

Nella figura 4.8 è ben evidente la differenza tra immagini raster e vettoriali.

4.3.4 DIGITALIZZAZIONE

L'immagine digitale è un insieme ordinato di numeri interi ottenuti da un'immagine analogica (sorgente), le immagini diventano digitali attraverso la scansione di un'immagine fotografica (digitalizzazione di un'immagine analogica) o per mezzo di fotocamere digitali (producono direttamente un'immagine digitale dalla scena ripresa). Il processo di digitalizzazione si compone di due fasi (Figura 4.9):

- 1) CAMPIONAMENTO SPAZIALE: le immagini vengono suddivise in un numero finito di pixel;
- 2) QUANTIZZAZIONE CROMATICA: ad ogni pixel è associato un valore numerico intero finito.

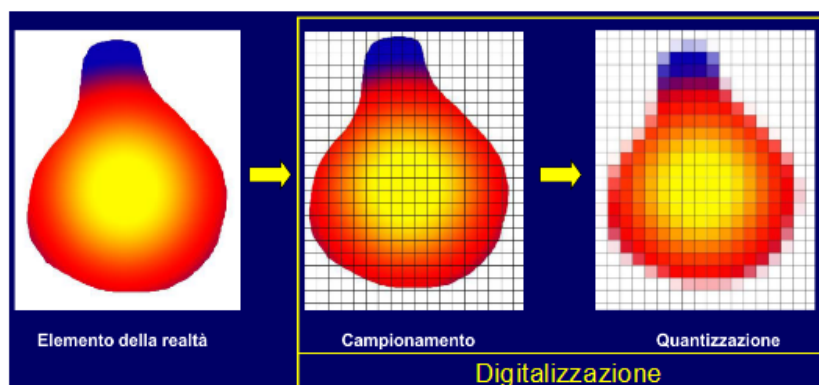


Figura 4.9 - Fasi della digitalizzazione di un elemento continuo

4.3.4.1 CAMPIONAMENTO SPAZIALE

In questa fase l'immagine viene suddivisa in aree regolari: i pixel. Il numero di pixel in cui essa viene suddivisa ne determina la **risoluzione spaziale**: più la griglia di campionamento è fitta e migliore sarà il risultato (e maggiore sarà il numero di pixel generati). L'effetto a quadrettatura si dice pixellatura (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Effetto della densità di campionamento dell'immagine.

4.3.4.2 QUANTIZZAZIONE CROMATICA

La quantizzazione è la conversione dell'immagine campionata in valori numerici, in questa

fase si associa a ciascun pixel uno o più valori numerici che ne definiscono il colore.^[40]

Con la quantizzazione l'immagine diventa un oggetto computabile.

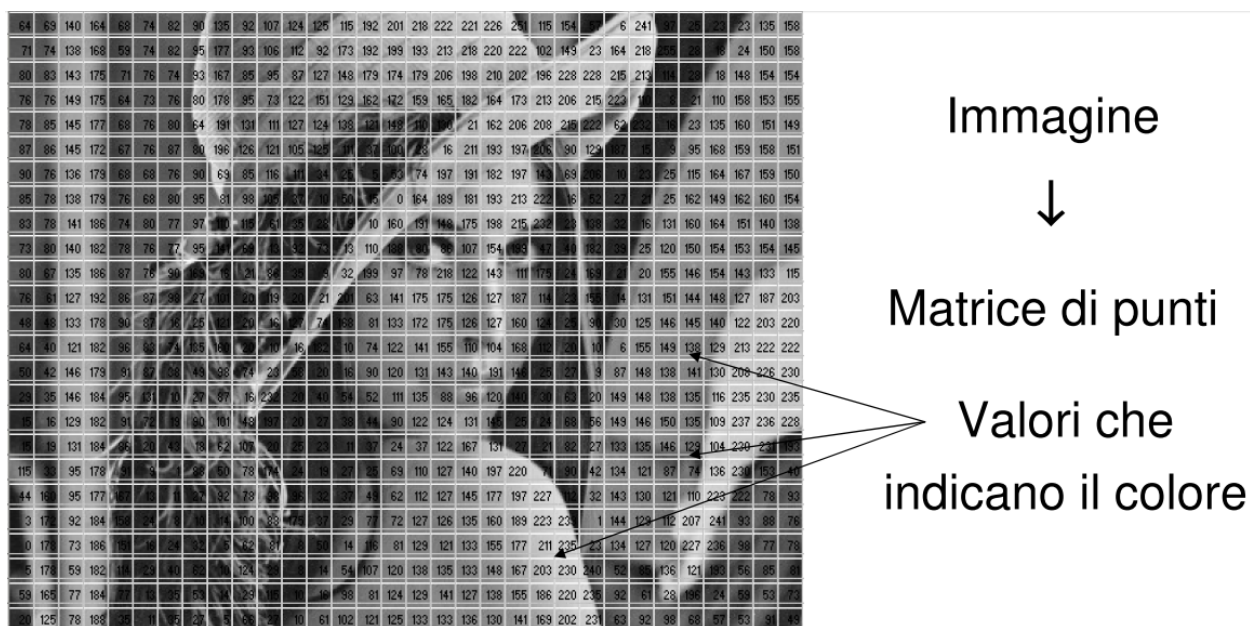


Figura 11 - Ad ogni pixel è associato un valore legato al valore radiometrico medio del colore in quell'area

4.3.5 CARATTERISTICHE DELLE IMMAGINI DIGITALI

Le due fasi del processo di digitalizzazione sono strettamente legate a due caratteristiche fondamentali: la risoluzione geometrica, legata al campionamento e la risoluzione radiometrica legata alla quantizzazione.

4.3.5.1 RISOLUZIONE GEOMETRICA E DIMENSIONE

La risoluzione geometrica è legata all'operazione di campionamento, poiché un'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale i cui 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.^[38]

La RISOLUZIONE GEOMETRICA o spaziale si può dunque considerare come la *densità* di pixel di un'immagine, SI MISURA IN NUMERO DI PIXEL PER UNITÀ DI LUNGHEZZA: *inch* (pollice) o centimetro.

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 si misura in pixel per pollice lineare e non per pollice quadrato e viene espressa in:

- ppi = pixel per inch = $\frac{n^\circ \text{ pixel}}{\text{pollice}}$
- dpi = dots per inch punti per pollice
- ppc = pixel per centimetro, ma è poco frequente.

Ad esempio un'immagine con una risoluzione di 300ppi avrà 300 pixel in orizzontale e 300 pixel in verticale per un totale di 90.000 pixel per ogni pollice quadrato dell'immagine.

$$300 \text{ dpi} = \frac{300}{2,54 \text{ cm/i}} = 118,11 \text{ ppc} \rightarrow \text{questo significa che per avere una linea lunga un}$$

pollice (=2,54 cm) servono 300 pixel o, equivalentemente, per averla di un centimetro di lunghezza servono 118,11 pixel.

La risoluzione geometrica è molto importante per calcolare la dimensione del pixel, infatti

$$\text{a } 300\text{ppi} \rightarrow 1\text{pixel} = \frac{1 \text{ pixel}}{118,11 \text{ pixel/cm}} = 0,008466 \text{ cm} \approx 0,085 \text{ mm}$$

$$\text{mentre a } 150\text{ppi} \rightarrow 1\text{pixel} = \frac{1 \text{ pixel}}{\frac{150\text{ppi}}{2,54 \text{ cm/i}}} = \frac{1\text{pixel}}{59,05 \text{ pixel/cm}} = 0,0169333 \text{ cm} \approx 0,17 \text{ mm}$$

La risoluzione geometrica e la dimensione del pixel influiscono sulle dimensioni dell'immagine come è ben evidente dalla figura sottostante.



Figura 4.12 - Un'immagine con lo stesso numero di pixel (225x300) appare molto diversa al variare della risoluzione geometrica poiché cambia la dimensione dei pixel.

La dimensione di una immagine, invece, è definita dal numero di pixel orizzontali e verticali; ad esempio nella figura 4.13 la stessa immagine è riproposta in tre dimensioni differenti, ma tutte con la stessa risoluzione geometrica di 96dpi.

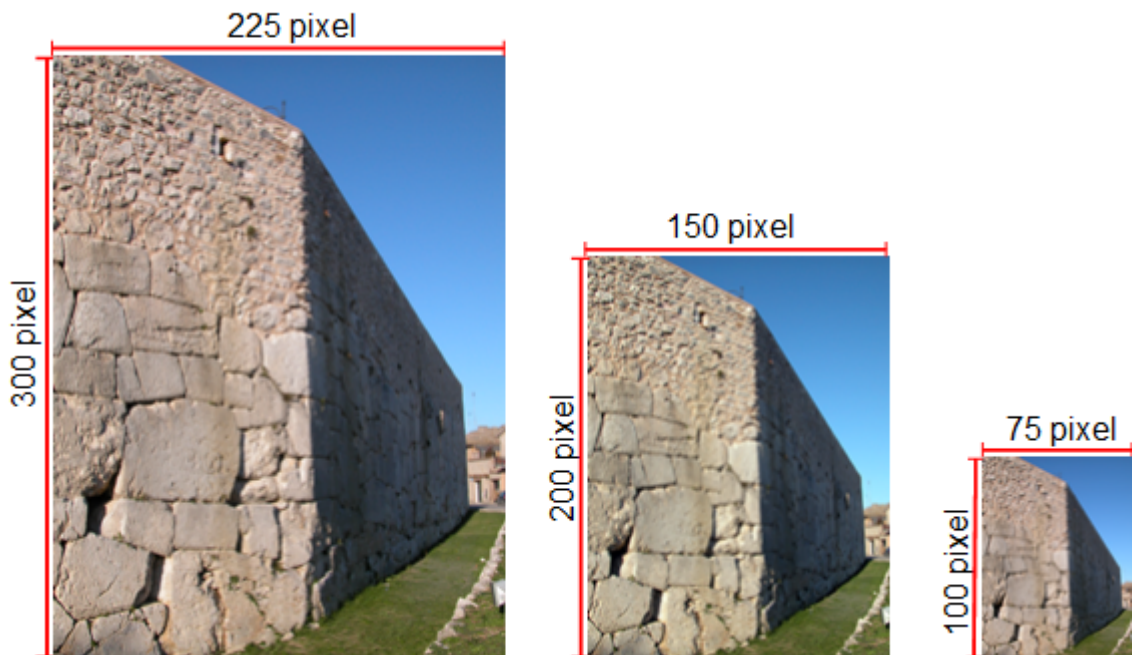


Figura 4.13 - Stessa immagine in tre "dimensioni" differenti: 225x300, 150x200, 75x100.

L'influenza della dimensione delle immagini raster in funzione della risoluzione geometrica sono ben evidenti negli ingrandimenti come mostrato nella figura sottostante:

Potendo immaginare i pixel come tessere di un mosaico appare evidente che suddividere l'immagine ad esempio in 8 milioni di punti può consentire di catturare un maggior numero di dettagli rispetto ad un'immagine suddivisa, ad esempio, in soli 2 milioni di pixel. La risoluzione rappresenta la *capacità di dettaglio*: maggiore è la risoluzione e migliore è la discriminazione dei dettagli.

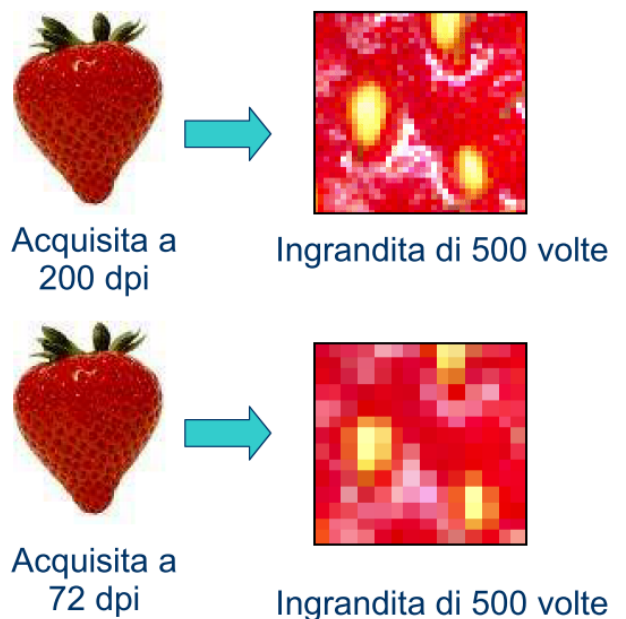


Figura 4.14 - Stessa immagine acquisita a due diverse risoluzioni e ingrandite dello stesso numero di volte.

In realtà la quantità di pixel non determina in modo assoluto la definizione dell'immagine, la qualità di dettaglio è infatti legata anche ad altre variabili: distanza di osservazione, fattore di ingrandimento dell'immagine rispetto all'originale, qualità richiesta dal supporto di riproduzione dell'immagine (stampante, video, proiettore, ecc.).

In altre parole c'è un rapporto diretto tra la quantità di pixel necessari a visualizzare correttamente un'immagine e la percezione dell'occhio umano di distinguere o meno i singoli elementi che compongono l'immagine stessa. Un esempio significativo è rappresentato dai cartelloni pubblicitari che si trovano per le strade: quando gli si è vicini si distingue bene il reticolo di punti che compongono l'immagine, ma più ci si allontana tanto più l'immagine verrà

percepita come un "tono continuo".^[35]

4.3.5.2 RISOLUZIONE RADIOMETRICA O PROFONDITÀ DI COLORE

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.

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.^[38]

A ciascun pixel può essere assegnato un solo valore, ma è la profondità di bit o di colore del dispositivo che determina quanti potenziali colori possono essere assegnati ai pixel.

L'informazione contenuta in un pixel viene espressa in bit: maggiore è il numero di bit e più sono i colori disponibili con una rappresentazione cromatica più accurata nell'immagine digitale.

La profondità di colore è il numero di bit riservati ad ogni pixel (1 bit, 4 bit, 8 bit, etc.). Se N è la profondità di colore il numero di possibili tonalità sarà $\rightarrow 2^N$.^[41]

1 bit $\rightarrow 2^1=2$ colori \rightarrow grafica *monocromatica*, ad es. bianco e nero (B/N o B/W);

2 bit $\rightarrow 2^2=4$ colori;

3 bit $\rightarrow 2^3=8$ colori;

4 bit $\rightarrow 2^4=16$ colori;

8 bit $\rightarrow 2^8=256$ colori \rightarrow Scala di grigi o Palette di colori;

16 bit $\rightarrow 2^{16}=65.536$ colori \rightarrow *hicolor*;

24 bit $\rightarrow 2^{24}=16.777.216$ colori \rightarrow *true color* o RGB (8bit Red + 8bit Green + 8bit Blue);

>24 bit si entra nell'ordine dei miliardi di colori e si parla di *deep color*.

Le immagini in *scala di grigio*, ad esempio, utilizzano una tavolozza di 256 diverse gradazioni descritte ognuna dalla combinazione di 8 bit in cui i valori vanno da 0=nero al 255=bianco. Nelle immagini a palette di colori si possono ottenere differenti effetti di colore sulla stessa immagine semplicemente cambiando la sua palette.

Più elevato è il numero di bit usati per registrare l'informazione del colore tante più sono le tinte e le sfumature che possono essere rappresentate nell'immagine. Aumentando il numero di bit per pixel aumenta anche la dimensione del file.

Un'immagine con pixel da 8 bit può essere interpretata come la

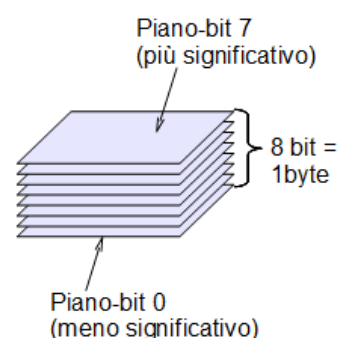


Figura 4.15 - Pacchetto di bit in un pixel

sovrapposizione di 8 piani immagine da 1 bit (Figura 4.15) dove quelli di ordine più elevato contengono la maggior parte dei dati visuali più significativi, mentre gli altri piani contribuiscono a definire i dettagli più fini dell'immagine originale come mostrano le immagini della figura 4.16:

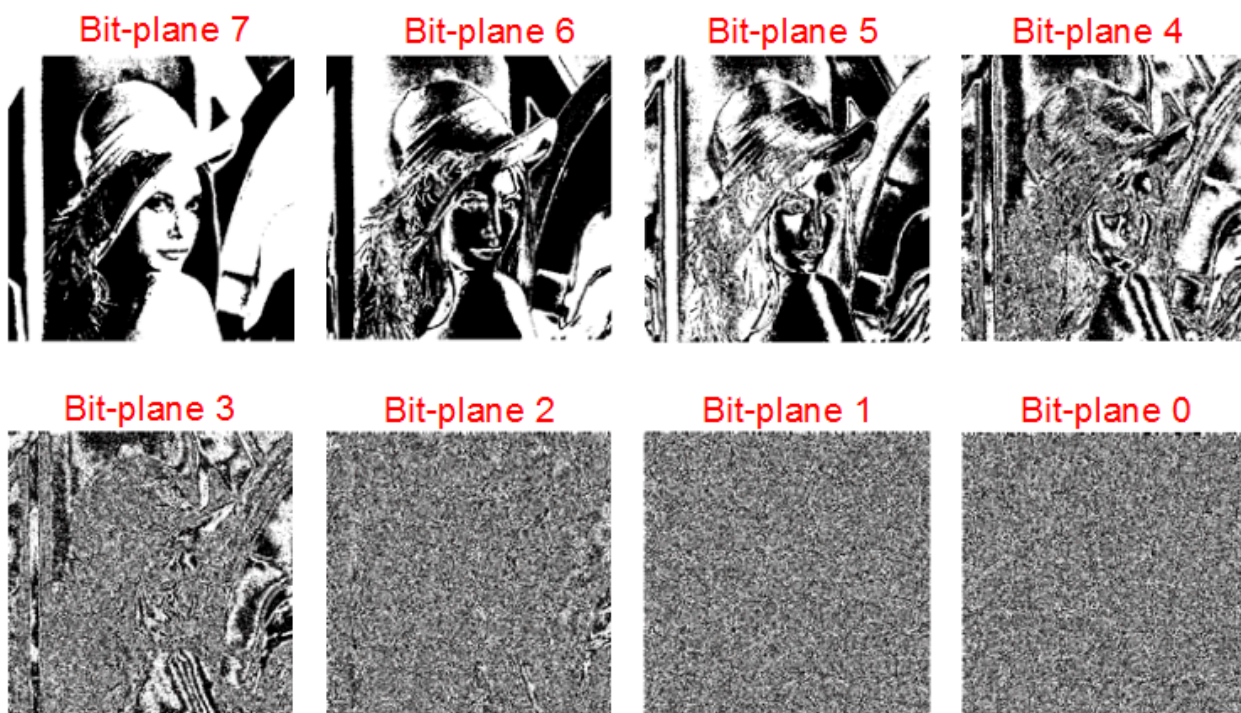


Figura 4.16 - Immagine in Scala di Grigio a 8 bit scomposta negli 8 livelli da 1 bit che la compongono

4.3.5.3 CONTENUTO METRICO DELL'IMMAGINE DIGITALE

■ Measurement distance and FOV(with standard 22mm lens)

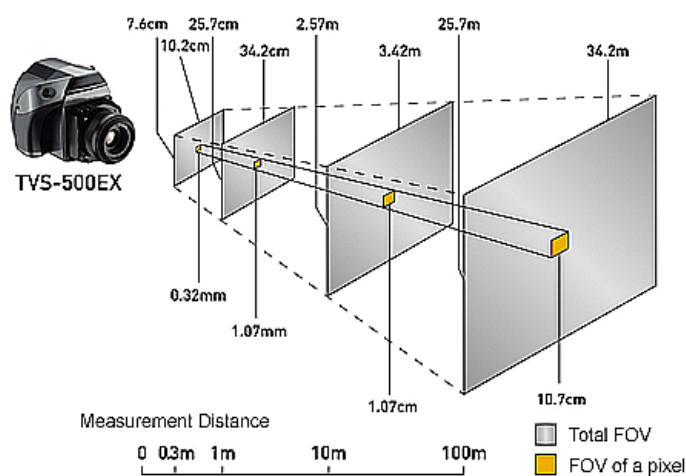


Figura 4.17 - Dimensione del pixel in funzione della distanza di presa.

La definizione del sistema di riferimento interno dell'immagine si lega direttamente alla

dimensione del pixel poiché se si vuole utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici, bisogna definire la relazione biunivoca fra la posizione del pixel e il sistema di coordinate immagine stessa.

La tradizionale misura di coordinate sull'immagine è dunque sostituita, nella fotogrammetria digitale, dalla identificazione del pixel all'interno della matrice immagine. La posizione del pixel nell'immagine è fissa per definizione ed è il sistema di acquisizione che associa a un determinato pixel il valore radiometrico corrispondente.

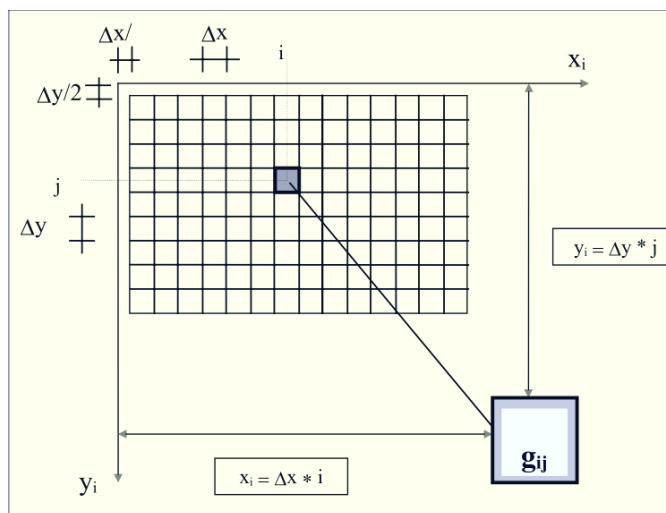


Figura 4.18 - Coordinate di un pixel nella matrice immagine

In Figura 4.18 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.

In tale sistema il pixel ha dimensione finita e le sue coordinate corrispondono a quelle del proprio baricentro:

$$\text{per ogni pixel si ha: } \begin{cases} x_{i-\text{baricentro}} = i \cdot \Delta x_i \\ y_{j-\text{baricentro}} = j \cdot \Delta y_j \end{cases} \rightarrow \begin{cases} i = \text{int} \left(\frac{x_i}{\Delta x_i} + 0.5 \right) \\ j = \text{int} \left(\frac{y_j}{\Delta y_j} + 0.5 \right) \end{cases}$$

La tradizionale misura di coordinate è sostituita dall'individuazione della posizione del pixel all'interno della matrice immagine (i, j).

Tale posizione si traduce in coordinate reali oggetto attraverso le relazioni analitiche della fotogrammetria. Se i pixel sono convenientemente piccoli, si assumono gli indici di riga e colonna come fossero le coordinate immagine e anche la distanza principale c può essere espressa in unità Δx e Δy .

4.3.5.4 LA COMPRESSIONE DELLE IMMAGINI

Una delle caratteristiche più importanti delle immagini digitali è quella di supportare, in fase di codifica, una considerevole compressione dei dati.

Scopo di tutti gli algoritmi di compressione è l'eliminazione delle "ridondanze" presenti nell'immagine. Ogni processo di compressione deve essere invertibile

Esistono due tecniche di compressione:

- LOSELESS = senza perdita di informazione. Un algoritmo loseless prevede che l'immagine compressa sia identica all'originale
- LOSSY = con perdita di informazione, ovvero di qualità. Un algoritmo lossy, a seconda del livello di compressione scelto, sacrifica alcune informazioni, a partire da quelle meno significative. Con questo tipo di compressione dall'immagine compressa si ricava un'informazione simile a quella originale. Si usa in alcuni tipi di file in cui si può tollerare una limitata perdita di informazione.

Alcuni degli algoritmi più usati sono:

- RLE: insieme di coppie di valori (numero di occorrenze, valore) ;
- Ricorsivi/Frattali: suddivisione ricorsiva dell'immagine in aree omogenee;
- Codifica di Huffman basato sulla probabilità delle ricorrenze dei simboli nell'immagine;
- LZW (Lempel Zev Welch) - costruzione di una tabella di simboli che si adatta all'immagine da comprimere;

4.3.5.5 FORMATI DELLE IMMAGINI DIGITALI

Un'immagine raster è una matrice di pixel, ciascuno caratterizzato da un proprio colore. Memorizzare un'immagine raster significa, in prima approssimazione, memorizzare il colore di ogni pixel. Ci sono diversi metodi di memorizzazione del colore.

I dati numerici che rappresentano l'immagine digitale devono essere memorizzati con ordine e secondo un'organizzazione che consenta di ricostruire fedelmente l'immagine. L'insieme delle regole che governano la memorizzazione viene denominato FORMATO. Il formato per registrare un'immagine digitale deve:

- garantire la minima occupazione di memoria;

- prevedere la possibilità di una compressione;
- essere di pubblico dominio;
- consentire la memorizzazione di tutte le convenzioni radiometriche.

I diversi formati del file immagine (BMP, TIFF, JPEG, GIF, PNG, ecc) corrispondono proprio ad un diverso modo in cui il colore viene registrato sui pixel.

I formati più diffusi in ambito fotogrammetrico sono il TIFF e il JPEG.

- ◆ **TIFF** = *Tagged Image Format File* è un formato raster le cui specifiche furono per la prima volta pubblicate nel 1986.

È un formato molto versatile, in grado di rappresentare immagini con risoluzioni radiometriche variabili da 1 a 24 bit per pixel, monocromatiche, a livelli di grigio, a colori. Consente di memorizzare in un unico file più di una immagine (immagini piramidali) e permette di utilizzare diversi metodi di compressione, come RLE, LZW.

Un file di tipo TIFF è costituito da tre componenti principali:

- 1- un *header* (intestazione) che fornisce alcune informazioni sull'immagine come ad esempio ordinamento dei byte, versione del formato, ecc...
- 2- un *image file directory* che contiene le informazioni circa i campi che sono presenti nell'immagine memorizzata (es. il tipo di compressione usata, la data, informazioni sull'autore, ecc.)
- 3- i dati dell'immagine vera e propria, che possono essere registrati in modo compresso o non compresso

- ◆ **JPEG** = *Joint Photographics Experts Group* è un formato standardizzato per la compressione dell'immagine: è progettato per comprimere immagini a colori e a scale di grigio. Il JPEG è stato concepito per funzionare su immagini a "tono continuo", realizza un algoritmo di compressione con perdita, cioè l'immagine decompressa risulterà differente da quella originale anche se il livello di compressione è parametrizzabile dall'utente e fino a fattori di compressione di circa 20-25% l'immagine ricostruita risulta praticamente indistinguibile da quella originale. Questo formato sfrutta l'incapacità dell'occhio umano di distinguere piccoli dettagli di colore o brusche variazioni di luminosità.^[40] Può memorizzare le immagini digitali secondo due classi operative:

- 1- *LOSSY* ovvero con perdita di informazione basata sulla trasformazione DCT (*Discrete Cosine Transformation*) senza una visibile perdita della qualità dell'immagine ricostruita;
- 2- una tecnica *LOSSLESS* ovvero senza alcuna perdita di informazione come la tecnica LZW utilizzata nel formato TIFF.

Il degrado geometrico conseguente a una compressione *LOSSY* si manifesta con effetti di sfocamento dei bordi radiometrici o con spostamenti di oggetti all'interno

dell'immagine.

Tali effetti possono essere locali o globali e la loro entità è fortemente commisurata alle variazioni di intensità luminosa dell'immagine e, ovviamente, al rapporto di compressione selezionato.^[30]

4.3.6 IL COLORE

I metodi di codifica del colore sono basati sulla percezione umana, è possibile rappresentare una grande quantità di colori come somma di tre colori primari.

Per questo motivo i colori possono essere considerati come vettori in uno "spazio colore" (spazio tridimensionale) in cui coordinate sono espresse con una terna di numeri XYZ.

Si possono avere diverse rappresentazioni dello spazio colore in base alla terzina di colori primari che sono:

- RGB (Red-Green-Blue) o sintesi additiva;
- CMYK (Cyan-Yellow-Magenta-black) o sintesi sottrattiva;
- HSB (Hue / Saturation / Brightness) o
HLS (Hue / Lightness / Saturation) o
HSV (Hue / Saturation / Value)
- Colori codificati (es. Pantone)

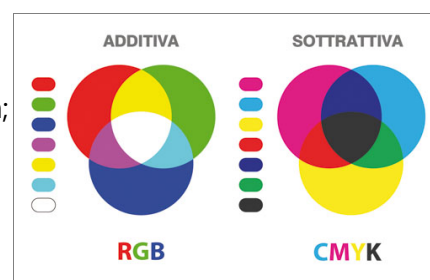


Figura 4.19 - Confronto tra i modelli RGB e CMYK

I software grafici consentono di passare da una rappresentazione all'altra tramite apposite formule di conversione perché quando si lavora a video si usano prevalentemente i modelli RGB e HDB mentre per la stampa il modello di riferimento è il CMYK.

4.3.6.1 IL MODELLO RGB

Nel modello RGB (detto anche di sintesi additiva) i colori primari sono il Rosso il Verde e il Blu. Dalla loro sovrapposizione si ottengono i colori secondari: il Ciano, il Magenta e il Giallo. Sovrapponendosi in intensità diverse si otterranno tutti gli altri colori (è una

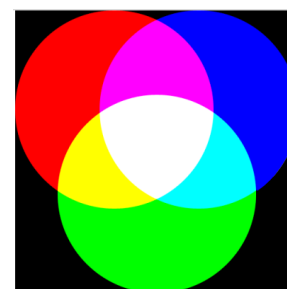


Figura 4.20 - Modello RGB

sovrapposizione di radiazioni luminose).

Dall'unione dei tre colori primari si ottiene il Bianco, poiché tutte le lunghezze d'onda sono ritrasmesse all'occhio umano.

Le tre componenti RGB possono essere viste come coordinate in un sistema di assi cartesiani. Lo spazio colore è un cubo poiché i valori delle coordinate sono limitati tutti 0÷255.

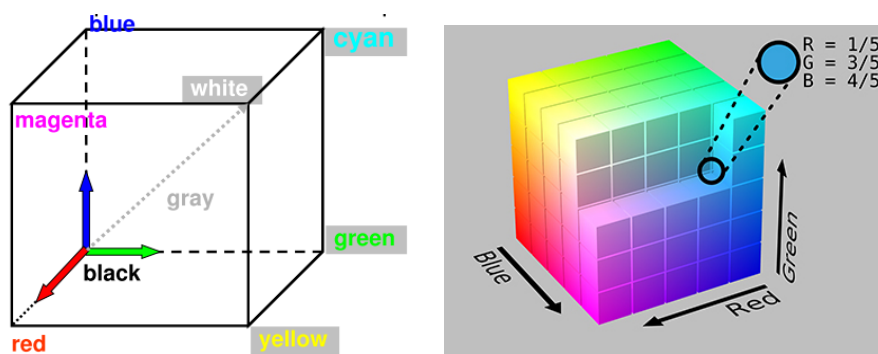


Figura 4.21 - Due rappresentazioni dello spazio colore RGB

L'RGB è un metodo che non ha nessuna corrispondenza con la percezione umana, fattore che rende spesso problematiche le operazioni di ritocco fotografico.

4.3.6.2 IL MODELLO HSB

È un metodo percettivo, definisce i colori in base a tre parametri: tonalità (Hue), saturazione (Saturation) e luminosità (Brightness).

La tonalità (Hue) è il colore riflesso o trasmesso da un oggetto. Viene calcolata come posizione sulla ruota dei colori ed è espressa in gradi, da 0 a 360.

La saturazione (Saturation) è l'intensità o la purezza del colore. Sulla ruota del colore, la saturazione aumenta dal centro al bordo.

Rappresenta la quantità di grigio rispetto alla tonalità ed è calcolata come percentuale da 0% (grigio) a 100% (saturazione completa).

La luminosità (Brightness) è la chiarezza o scurezza relativa del colore ed è generalmente calcolata come percentuale da 0% (nero) a 100% (bianco).

La modifica del colore di un'immagine è molto intuitiva, dato che c'è una corrispondenza diretta con la percezione umana, e si applica variando i valori delle tre scale. Aumentando il valore di B (Luminosità), per esempio, l'immagine sarà sempre più chiara, così come diminuendo il valore di S (Saturazione) l'immagine avrà colori sempre meno forti e decisi.

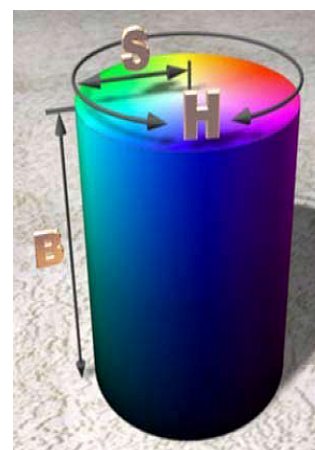


Figura 4.22 - Modello HSB

4.3.6.3 IL MODELLO CMY

Questo modello è detto anche di sintesi sottrattiva, i colori primari sono il Ciano, il Magenta e il Giallo. È uno spazio colorimetrico che si basa sull'assorbimento della luce da parte dei pigmenti /inchiostri.

Dalla sovrapposizione di questi colori si ottengono i colori secondari: Rosso, Verde e Blu. Sovrapponendosi con densità diverse si otterranno tutti gli altri colori.

Dalla sovrapposizione dei tre colori primari alla densità massima, quando cioè tutta la luce viene assorbita, si ottiene il Nero. In realtà gli inchiostri non riescono ad assorbire tutta la luce e il Nero che si crea non è un Nero assoluto. In fase di stampa si aggiunge allora il quarto colore Black, identificato con K per non confonderlo con B di Blue.

Il valore (0,0,0,0) indica il bianco mentre il valore (100%,100%,100%,100%) indica il nero.

Questo metodo è utilizzato nella stampa tipografica in quadricromia.

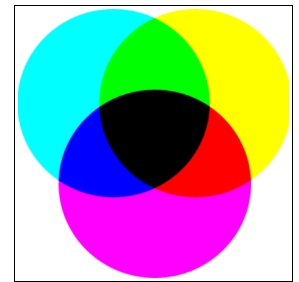


Figura 4.23 - Modello sottrattivo CMYK

4.4 FOTOCAMERE DIGITALI

Le fotocamere tradizionali e quelle digitali lavorano sullo stesso principio: entrambe registrano la scena sfruttando la luce attraverso un mutamento del materiale fotosensibile presente al loro interno. Questo mutamento viene poi intensificato allo scopo di rendere visibile l'immagine catturata (con un processo chimico per la pellicola ed elettronico per i sensori).

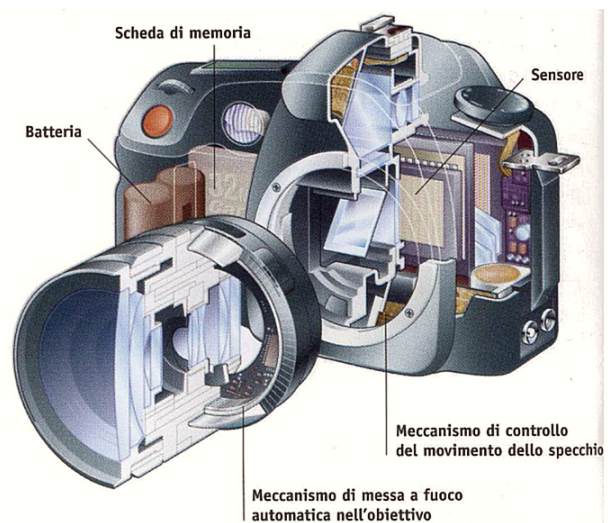


Figura 4.24 - Elementi della fotocamera digitale

Mentre in una macchina fotografica tradizionale la luce viene raccolta dalla pellicola e tutti i processi di elaborazione e archiviazione avvengono all'esterno (servendosi di un'apposita camera oscura e di particolari agenti chimici), in una macchina fotografica digitale, invece, la luce viene raccolta da un sensore elettronico e tutte le principali fasi di registrazione, acquisizione ed elaborazione, hanno luogo all'interno della macchina stessa.

4.4.1 IL SENSORE

Il sensore è l'elemento sensibile delle camere digitali ed è posizionato dove nell'analogico è posta la pellicola, ovvero sul piano focale dell'obiettivo.

Il sensore è costituito da una piastrina di silicio di forma quadrata o rettangolare (difficilmente supera i 3 o 4 centimetri di lato), è formato da milioni di microscopici componenti sensibili alla luce: i pixel. Durante lo scatto di una ripresa, la luce che colpisce ogni micro-componente del sensore viene trasformata in energia: a maggiore intensità luminosa corrisponde una più alta carica emessa dal componente. L'insieme dell'energia emessa da ogni singolo componente del sensore viene poi trasferita in un circuito che si occupa di misurare le singole letture, convertirle in una serie di numeri e in seguito memorizzarli. Per convertire in forma digitale le informazioni catturate dal sensore, i segnali diventano numeri attraverso un convertitore analogico/digitale (A/D) e un processore.

Volendo schematizzare al massimo, un sensore è un collettore di fotoni a cui sono collegati dei circuiti elettronici che hanno il compito di "leggere" l'intensità luminosa per ogni componente cromatica delle tre di base, tradurla in segnali elettrici (una carica o un livello di tensione a seconda della tipologia di sensore) interpretabili da un processore che ha il compito di ricostruire l'immagine finale.

Questo processo prende il nome di *interpolazione* ed è fondamentale per la qualità dell'informazione registrata. I progressi della fotografia digitale sono legati soprattutto al miglioramento del processore, ancor più che dal miglioramento dei sensori stessi.

Avvenuta l'interpolazione dei dati ricevuti dalle singole celle, la fase di acquisizione dell'immagine è terminata. I valori di tutti i pixel ordinati insieme creano l'immagine, determinando anche formato e struttura del file che vengono registrati su una memory card all'interno della fotocamera stessa.^[47]

Il sensore è in grado di recepire solo la quantità di luce che colpisce il pixel. Delle microlenti filtrano la luce incidente e sfruttando i tre colori RGB, combinati con la luminanza (ovvero l'intensità luminosa registrata) a fare da funzione peso, è possibile ricavare tutti gli altri colori.

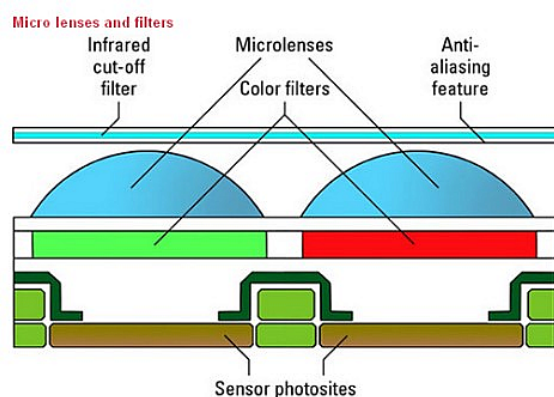


Figura 4.26 - Struttura tipo di un sensore

Il sensore vero e proprio dunque, è quello al di sotto della maschera. Esso cattura l'intensità

luminosa e la maschera fornisce le informazioni sul colore, filtrando le componenti indesiderate. Praticamente la maschera non fa altro che permettere alle componenti del colore indicato per ogni subpixel, di attraversarla per raggiungere il sensore, riflettendo tutte le altre componenti (per questo motivo si schematizza con quadratini rossi, blu e verdi).^[48]

4.4.1.1 TIPOLOGIE DI SENSORI

Ci sono varie tipologie di sensori e una prima distinzione può essere fatta indipendentemente dalla tecnologia adottata e dalla forma dei pixel. In questo caso si distinguono due categorie: i sensori a matrice bayer e quelli che adottano la tecnologia X3 di Foveon.

- ◆ **SENSORI A MATRICE BAYER:** presentano una disposizione dei 3 colori RGB sullo stesso piano. Ogni pixel è composto da 4 elementi sensibili ai colori primari: 2 al verde, 1 al rosso ed 1 al blu. La presenza di due elementi sensibili al verde è dovuta al fatto che l'occhio umano è particolarmente sensibile alla luce verde (quindi è opportuno che su quelle frequenze l'informazione catturata sia massima).^[49]
- ◆ **SENSORE X3:** questo rivoluzionario fotosensore (ideato dallo scienziato di fisica quantistica Carver Mead) presenta una disposizione stratificata, con il blu a comporre lo strato superiore con a seguire il verde ed il rosso.

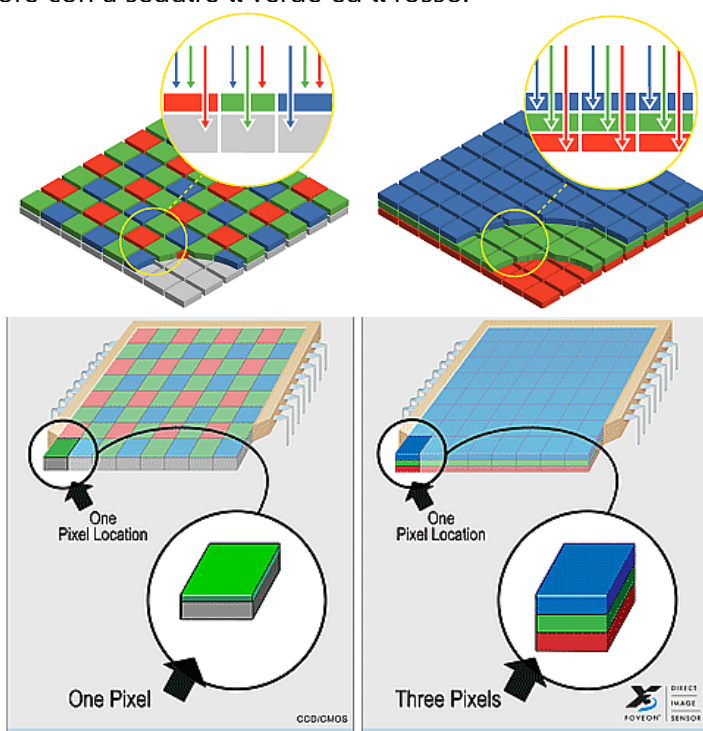


Figura 4.27 - Sensori a matrice di Bayer (a sinistra) e X3 di Foveon (a destra)

Un'altra distinzione può essere fatta considerando la tecnologia alla base dei sensori, in questo caso le famiglie principali sono due: i sensori CCD e CMOS.

- ◆ **CCD**: acronimo di Charge Coupled Device, ovvero dispositivo ad accoppiamento di carica. Il nome deriva dal modo in cui vengono lette le informazioni provenienti dal sensore una volta registrata l'immagine: la carica viene trasportata attraverso tutto il chip da una riga di fotositi a quella adiacente. Al bordo del sensore la carica viene trasferita in uno speciale registro di output e poi letta da un convertitore A/D. Il processo viene temporizzato da un *segnale di clock* (sincronia) generato da circuiti esterni al chip del sensore. Le righe già lette vengono scartate così al termine della lettura le cariche sul sensore sono completamente azzerate.^[50]

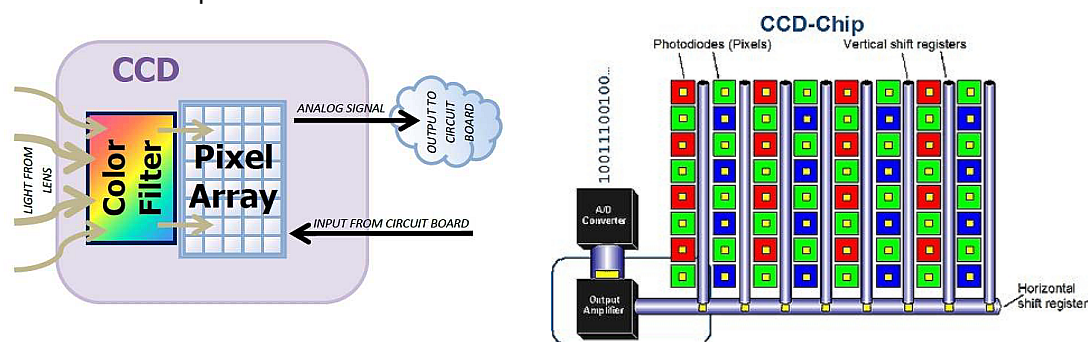


Figura 4.28 - Schema di funzionamento di un CCD e dettaglio del chip

Per il loro particolare funzionamento questo tipo di sensori richiedono molta energia (circa 100 volte più di uno CMOS), ma per l'alta qualità costruttiva sono meno soggetti a fenomeni di disturbo (rumore) e forniscono immagini di alta qualità.

- ◆ **CMOS**: acronimo di Complementary Metal Oxide Semiconductor. Questo tipo di sensore presenta alcuni vantaggi quando si scattano immagini con risoluzione molto alta. I sensori CMOS sono molto più economici da produrre rispetto ai CCD poiché utilizzano la stessa tecnologia produttiva dei normali microprocessori (CPU) e dei chip dei computer. Questo rende anche semplice integrare circuiti accessori per diverse operazioni direttamente sul chip del sensore.

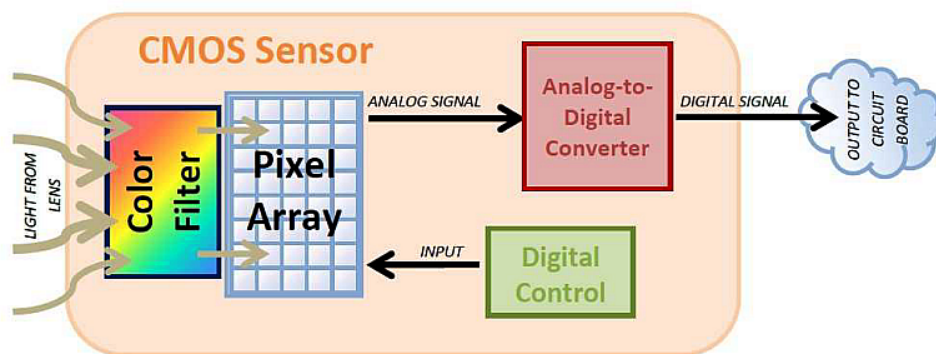


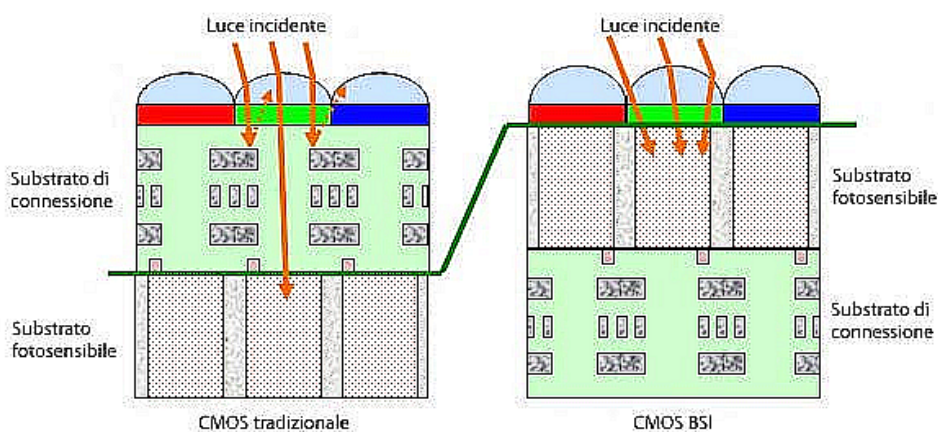
Figura 4.29 - Funzionamento di un sensore CMOS

D'altra parte, però, la presenza dei circuiti accanto ad ogni fotosito, "ruba" un po' di spazio pertanto il sensore risulta, in generale, meno sensibile alla luce rispetto ad un analogo sensore CCD. La percentuale utile dell'area di un fotosito per raccogliere la luce

viene detta *fill factor* (fattore di riempimento). Un sensore CCD ha un fill factor del 100% contro il 60% di un sensore CMOS standard. Per ovviare a questo problema sopra ogni fotosito possono essere utilizzate delle microlenti aggiuntive.

Dal 2008 i sensori CMOS sono stati migliorati invertendo la sequenza degli strati che costituiscono il fotodiiodo: lo strato di silicio (elemento fotosensibile) che prima era posto in basso è stato spostato in alto limitando la dispersione della luce (Figura 4.30). Questa evoluzione (identificata dalla sigla BSI=Back Side Illuminated per distinguerli dai tradizionali CMOS detti FSI=Front Side Illuminated) presenta il vantaggio di avere i micro-elementi fotorecettori nella parte anteriore del sensore stesso, direttamente a contatto delle microlenti. Nei sensori CMOS tradizionali, invece, tra le microlenti e i fotorecettori c'è uno strato intermedio in cui sono micro-litografati alcuni elementi di connessione; per quanto sottile, questo strato assorbe una quota della luce incidente sul sensore (Figura 4.30).^[51]

Figura 4.30 - Schema generico della costruzione di un sensore CMOS e confronto tra uno tradizionale con uno BSI dove i componenti fotosensibili sono "davanti" allo strato dell'elettronica di connessione e possono quindi raccogliere una maggiore quantità di luce (e di informazioni).



Per migliorare la qualità delle immagini sono stati sviluppati dispositivi che utilizzano due sensori (1 per il verde +1 per rosso e blu) o tre sensori (1 verde+1rosso+1blu, Figura 4. 31).

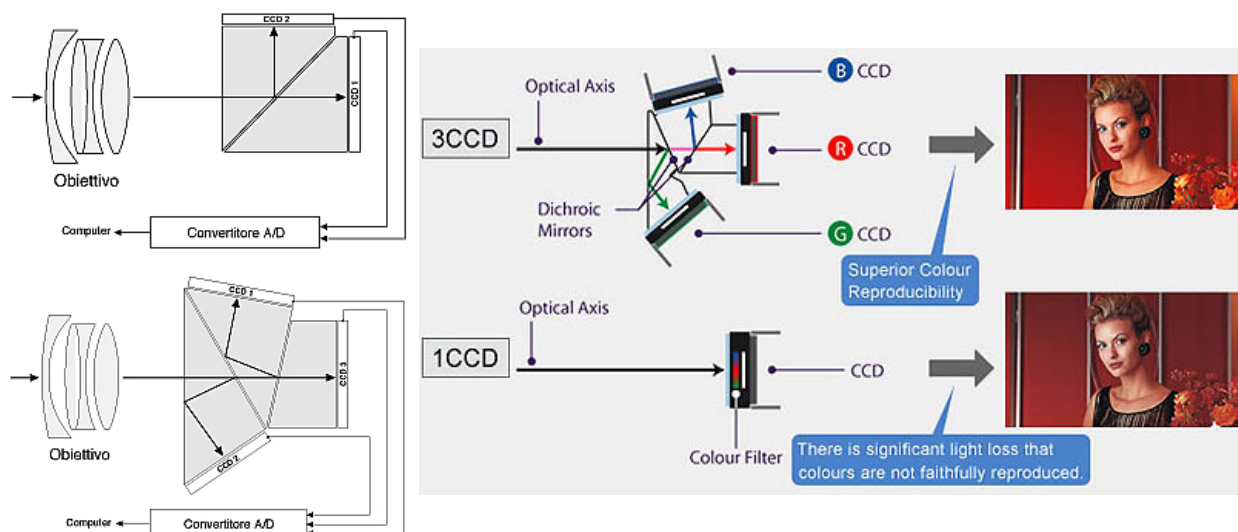


Figura4. 31 - Sistemi a 2 o 3 sensori (a sinistra) e principio di funzionamento (a destra)

4.4.2 IL SISTEMA OTTICO (OBIETTIVO)

Nell'occhio umano parte del sistema ottico è rappresentato dal cristallino che convoglia le immagini sul piano focale rappresentato dalla retina, il "sensore" del nostro apparato visivo.

Con il termine generico di **obiettivo** si descrive un dispositivo ottico centrato formato da una o più lenti in successione. Le proprietà di una lente o di un obiettivo vengono considerati alla stessa stregua e possono riferirsi ad uno schema ottico ideale, rappresentato in figura 4.32

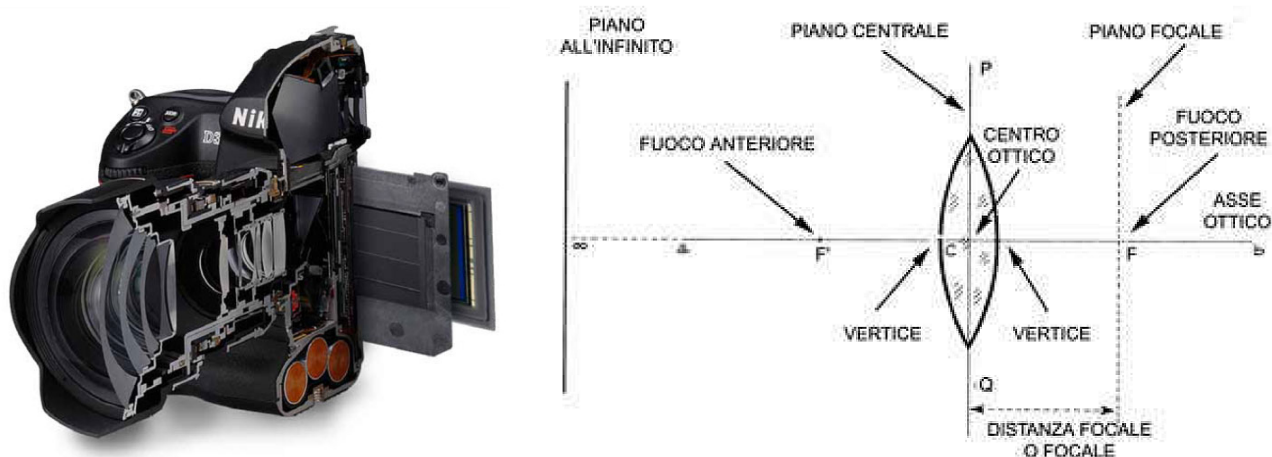


Figura 4.32 - Schema di un sistema ottico

L'**asse ottico** è la retta che congiunge i centri di curvatura delle superfici limite della lente. Negli obiettivi di uso più comune, tutti i centri di curvatura delle lenti che li compongono sono allineati sull'asse ottico. La caratteristica dell'asse ottico è che il raggio che attraversa le lenti secondo questo asse non viene deviato ed interseca il piano immagine formando un angolo retto in un punto chiamato punto focale f o **punto principale** (PP).

Per ogni altra direzione, esiste una retta detta **asse principale**, la cui direzione non viene alterata dal gruppo di lenti, e per ogni lente viene definito un **centro ottico** del sistema.

Il centro ottico ha due importanti proprietà:

- 1) ogni raggio luminoso che passa per esso (raggio principale) non viene deviato;
- 2) i raggi diversi da quelli principali vengono rifratti e, per ogni direzione, fatti convergere

in un unico punto.^[52]

Il risultato è che per ogni *punto oggetto* dello spazio tridimensionale è individuato un unico *punto immagine*.

I parametri che caratterizzano internamente la fotocamera sono quindi il punto principale $PP \equiv (x_0, y_0)$ dato dall'intersezione dell'asse ottico con il piano immagine, ed f ...

4.4.2.1 DISTORSIONI

Il sistema ottico è condizionato dalle imperfezioni di costruzione delle singole lenti che lo compongono e di montaggio degli obiettivi stessi, tutto questo produce distorsioni nelle immagini che bisogna compensare prima di poter utilizzare le immagini stesse ai fini metrici.

Quando l'inclinazione del raggio incidente supera un certo angolo limite il risultato è che alla distanza di un punto oggetto corrisponde nel piano immagine una distanza effettiva diversa da quella attesa. Le distorsioni introdotte dalle lenti sono tipicamente non lineari e la deformazione legata all'obiettivo può essere scomposta in due componenti: una radiale ed una tangenziale.

La distorsione radiale causa una traslazione delle coordinate rispetto al centro ottico e varia man mano che ci si allontana da esso, mentre la distorsione tangenziale trasla in modo perpendicolare a quella radiale.

L'effetto della distorsione radiale è quello di far apparire curve le linee rette presenti nella scena. L'entità della distorsione è tanto maggiore quanto più ci si allontana dal centro dell'immagine. Tale distorsione sposta i punti fuori dal centro ottico ed è causata principalmente da deviazioni dei raggi ai bordi della lente ed è di due tipi: *barrel* (a barilotto) o *pin-cushion* (a cuscino).

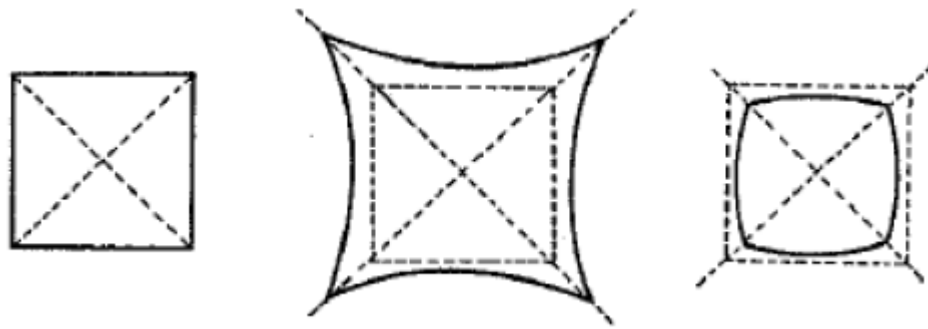


Figura 4.33 - Distorsione delle immagini: in basso gli esempi di distorsione a cuscino e a barilotto

La deformazione tangenziale viene generalmente trascurata, in quanto di diversi ordini di grandezza inferiore a quella radiale.

È possibile correggere questo tipo di distorsioni utilizzando opportune funzioni matematiche che modellizzano tali aberrazioni:

- Distorsioni radiali

$$\Delta x_{RLD} = K_1 (r^2 - 1) x + K_2 (r^4 - 1) x + K_3 (r^6 - 1) x$$

$$\Delta y_{RLD} = K_1 (r^2 - 1) y + K_2 (r^4 - 1) y + K_3 (r^6 - 1) y$$

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

e K_1, K_2, K_3 sono parametri di distorsione radiale;

- Distorsioni tangenziali

La distorsione tangenziale delle lenti è causata dal cattivo allineamento degli elementi che compongono il sistema ottico. Questi errori possono essere modellati con equazioni di correzione (Brown, 1966) del tipo:

$$\Delta x_{DLD} = P_1 (r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy$$

$$\Delta y_{DLD} = P_1 (r^2 + 2y^2) + 2P_2 xy$$

con P_1 e P_2 parametri di distorsione decentrica.

4.5 FOTOGRAMMETRIA NON CONVENZIONALE

In questi ultimi 15 anni si è avuto un'ulteriore sviluppo della tecnica fotogrammetrica sfruttando tutti i vantaggi del digitale (elevato grado di dettaglio, tempi e costi ridotti, presenza sul mercato di camere amatoriali ad alta definizione, sviluppo di software specifici per il trattamento delle immagini, ecc.); si tratta della fotogrammetria "**non convenzionale**", utilizzata soprattutto per il rilievo di architetture, con la quale si ha la possibilità di effettuare una ricostruzione metrica dell'oggetto da rilevare anche utilizzando camere amatoriali, immagini monoscopiche e non rigorose, svincolando le posizioni di presa da tutte le regole su posizione di scatto e inclinazione dell'asse di presa imposte dalla stereoscopia.

4.5.1 CARATTERISTICHE

- Si basa sull'uso di comuni camere digitali (non metriche, ma calibrate);
- trova largo impiego per il rilievo delle architetture (dai beni culturali all'archeologia);
- sfrutta sistemi MONOSCOPICI per ricostruzioni MULTI-IMMAGINE;
- Richiede la **CALIBRAZIONE DELLE CAMERE** per determinare i parametri dell'orientamento interno della camera (fondamentali per risolvere le equazioni di collinearità)
- **RADDRIZZAMENTO DELLE IMMAGINI**

La ricostruzione degli edifici può così essere realizzata utilizzando sistemi *monoscopici multi-immagine*, con procedure di elaborazione e restituzione quasi totalmente automatizzate. Ovviamente i punti oggetto necessari per la creazione del modello devono essere materializzati o devono coincidere con particolari di facile individuazione sui singoli fotogrammi (spigoli di tetti, di finestre, incroci tra mattoni, ecc).

Inoltre è necessario che ciascun punto oggetto compaia sul maggior numero di fotogrammi possibile e i raggi omologhi non si intersechino con angoli troppo stretti.

La compensazione di una rete di questo tipo si effettua con il metodo delle stelle proiettive.^[13]

4.6 CALIBRAZIONE

Le immagini ottenute con camere amatoriali vengono sottoposte a delle procedure di **calibrazione**, ovvero determinazione dei parametri di orientamento interno, compresa la distorsione, concepibile come *inversione* del problema della restituzione fotogrammetrica. Non si tratta più quindi di ricavare le coordinate oggetto dei punti rappresentati sui fotogrammi, noti i parametri di orientamento interno ed esterno, ma di ottenere i parametri incogniti di

orientamento interno con stima ai minimi quadrati, conoscendo il valore delle coordinate oggetto dei punti raffigurati sul fotogramma (GCP), ovviamente in numero sovrabbondante e distribuiti uniformemente.^[13]

Le procedure analitiche alla base della calibrazione possono essere basate sulle equazioni inverse di collinearità, oppure sulle DLT (Direct Linear Transformation).

Le equazioni inverse di collinearità (vedi Capitolo 3) si presentano nella forma:

$$\begin{cases} \xi - \xi_0 = -c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta - \eta_0 = -c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}$$

Le incognite del problema sono 9, 3 per l'orientamento interno e 6 per l'orientamento esterno: si ha quindi bisogno di conoscere almeno 5 punti di appoggio che forniscono 10 equazioni di collinearità.

Questo modello teorico nella realtà non si verifica, perché intervengono numerosi fattori non eliminabili (distorsione radiale e tangenziale dell'obiettivo, non planarità del materiale sensibile, deformazione introdotta durante le fasi di sviluppo e stampa, deformazioni introdotte durante le operazioni di misura) che determinano uno spostamento della posizione dell'immagine rispetto a quella teorica. Il problema fondamentale consiste quindi nella scelta degli errori da modellizzare e nelle modalità di determinazione di tali parametri.

Si impostano perciò dei modelli matematici per correggere tali errori introdotti nelle equazioni proiettive e basati su equazioni i cui coefficienti vengono determinati contemporaneamente ai parametri di orientamento interno del fotogramma e alle coordinate assolute dei punti incogniti, mediante una compensazione ai minimi quadrati. Tale procedimento si definisce AUTOCALIBRAZIONE, in quanto il sistema fotogrammetrico viene calibrato nel momento in cui si elaborano i dati. Con questo metodo si ottengono i valori da assegnare alle coordinate immagine (ξ_i, η_i) di un generico punto per ripristinare il modello di prospettiva centrale prima menzionato.

Le equazioni di collinearità, perciò, si modificano nel modo seguente:

$$\begin{cases} \xi_i - \xi_0 - \Delta \xi = -c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta_i - \eta_0 - \Delta \eta = -c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}$$

$$\text{con: } \xi = \xi_i - \Delta\xi \quad \text{e} \quad \eta = \eta_i - \Delta\eta$$

Le equazioni di trasformazione lineare diretta (DLT), costituiscono un altro modello di calibrazione delle immagini non metriche più rapido, perché trasformano direttamente le coordinate dal comparatore in coordinate nel sistema di riferimento oggetto, eliminando il passaggio a coordinate nel sistema lastra. Questo metodo è però meno preciso rispetto alla procedura basata sulle equazioni di collinearità. Le equazioni DLT si presentano nella forma:

$$\xi_1 - \Delta\xi = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

$$\eta_1 - \Delta\eta = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

con: $L_1 \div L_{11}$ = coefficienti della trasformazione;

ξ_1, η_1 = coordinate immagine del generico punto P nel riferimento interno.

Anche in questo caso $\Delta\xi, \Delta\eta$ rappresentano la differenza tra le coordinate immagine nell'ipotesi di prospettiva centrale perfetta e nella situazione reale.

Le espressioni linearizzate delle DLT sono le seguenti:

$$L_1 \cdot X + L_2 \cdot Y + L_3 \cdot Z + L_4 - L_9 \cdot \xi_1 \cdot X - L_{10} \cdot \xi_1 \cdot Y - L_{11} \cdot \xi_1 \cdot Z - \xi = 0$$

$$L_5 \cdot X + L_6 \cdot Y + L_7 \cdot Z + L_8 - L_9 \cdot \eta_1 \cdot X - L_{10} \cdot \eta_1 \cdot Y - L_{11} \cdot \eta_1 \cdot Z - \eta = 0$$

Da queste si ottengono soluzioni non precise per una buona ricostruzione della geometria di presa, ma possono essere usate per trovare i valori iniziali da inserire nelle compensazioni ai minimi quadrati.

Diversi software commerciali consentono di ricostruire la geometria di presa e di ottenere i parametri di calibrazione di una camera sconosciuta o di una camera amatoriale a partire da un solo fotogramma; in generale questa tecnica è conosciuta con il nome di *INVERSE CAMERA* e consente di ricostruire metricamente l'oggetto fotografato anche a partire da immagini non metriche (come foto storiche o d'archivio).

Dopo aver ricostruito la geometria delle prese per ogni immagine disponibile, queste possono essere inserite in un progetto unitario di cui però, a questo punto, sono noti i parametri di orientamento interno.

La calibrazione ha senso però solo se la ripresa fotografica verrà eseguita con la stessa configurazione che la camera aveva in fase di calibrazione (messa a fuoco,...). Queste conoscenze sono utilizzate da qualche anno per effettuare delle analisi di tipo metrico-qualitativo anche su fotografie d'archivio. L'immensa quantità di documentazione fotografica di

architetture o di altri beni culturali, rappresenta così un grande patrimonio utilizzabile per restauri o ricostruzioni o, in generale, per la creazione di un archivio di beni artistici.^[30]

4.7 RILIEVO FOTOGRAMMETRICO^[53]

La fotogrammetria è divenuta ormai un metodo spesso utilizzato nei rilievi architettonici grazie anche alle nuove tecnologie che ne semplificano molto le procedure (sia di presa che di elaborazione) escludendo la più complessa analisi stereoscopica.

La FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE NON CONVENZIONALE, che si utilizza ad esempio per il rilievo delle facciate degli edifici, prevede l'uso di una fotocamera non metrica. Le moderne macchine fotografiche digitali, a tale scopo, divengono strumento indispensabile ed economico. La presa fotografica può essere comunque disposta nello spazio. Se l'oggetto che si vuole rappresentare è contenuto tutto nello stesso piano, si può utilizzare una sola foto, altrimenti sono necessarie più fotografie.

Sempre facendo riferimento al rilievo di facciate di edifici, la restituzione, cioè la trasformazione in proiezione ortogonale, avviene mediante il raddrizzamento, che consiste nell'individuazione dei punti di appoggio sulla facciata riscontrabili nell'immagine corrispondente. Tali punti, che individuano il fotopiano di raddrizzamento, generalmente sono rilevati per intersezione in avanti o tramite metodo celerimetrico diretto con o senza il miniprisma se lo strumento è dotato di lettura no-prisma.

I punti di appoggio devono essere in numero adeguato con un minimo di quattro per ogni foto. Se si utilizza un numero maggiore di punti il risultato è più attendibile in quanto il programma di raddrizzamento fotografico esegue una compensazione degli errori. Le coordinate calcolate dei punti di appoggio devono essere fatte corrispondere sulla fotografia con le rispettive coordinate in pixel immagine mediante collimazione. Il software elabora i dati e genera un fotopiano ortogonale ricostruendo i singoli pixel dell'immagine in funzione della risoluzione finale scelta dall'utente.

L'immagine così raddrizzata può essere stampata in scala in formato raster od utilizzata in ambiente CAD per la trasformazione in formato vettoriale. Nel caso di facciate estese è ovviamente necessaria una sovrapposizione dei fotogrammi, individuando dei punti in comune rintracciabili in due fotografie contigue.

La mosaicatura, ovvero l'unione di più ortofoto affiancate, avviene automaticamente a cura del software od anche manualmente a cura del tecnico. Ad ogni modo le foto raddrizzate vengono salvate dal programma con le coordinate note dei quattro vertici nel sistema di riferimento scelto dal topografo per quel determinato lavoro. Ne consegue che l'inserimento in

ambiente CAD dell'immagine risulta estremamente semplice in quanto, conoscendo le coordinate assolute dei vertici della foto, è sufficiente inserire la stessa per uno qualsiasi dei vertici digitandone le rispettive coordinate sulla tastiera e scalando successivamente in modo tale da rispettare le coordinate del vertice opposto.

Se tutta la procedura di fotoraddrizzamento è stata eseguita correttamente si avrà sempre una perfetta rispondenza tra immagini raddrizzate ed elaborato vettoriale prodotto, in quanto il sistema cartesiano di riferimento è sempre lo stesso.

Le sempre più performanti workstation hanno anche permesso una grande evoluzione nel campo della grafica tridimensionale. La modellazione 3D è quindi utilizzata in quei casi in cui è necessario avere un'idea più globale e fedele possibile dell'oggetto in questione:ricostruzione in wireframe, modellazione solida, mappatura dei materiali, tecniche di global illumination e HDRI, rendering, compositing, fotoinserimenti, animazioni e walkthrough sono comunemente utilizzati, globalmente o parzialmente, per valutazioni di impatto ambientale, strutture architettoniche ed ambientazioni di interni, scavi archeologici, prototipizzazione rapida.

4.8 FOTOPIANI DIGITALI

Una delle applicazioni usuali nel rilievo delle architetture è costituita dalla realizzazione di fotopiani digitali con procedimento grafico.

In altre parole una delle applicazioni "non convenzionali" della fotogrammetria che ha recentemente conosciuto un notevole sviluppo è quella dei fotopiani e dei fotomosaici.

Si tratta di un processo, che pur non offrendo lo stesso livello di precisione della fotogrammetria classica e nonostante i notevoli limiti applicativi, risulta spesso insostituibile nella documentazione del costruito architettonico, specialmente nel settore beni culturali. Diviene talvolta anche uno strumento progettuale e di programmazione degli interventi.

Data una presa fotografica, (ovvero una proiezione centrale), dove sia ripreso e facilmente individuabile un elemento piano, è possibile operare una trasformazione, (detta impropriamente anche "raddrizzamento"), che porti questo piano dalla sua configurazione prospettica ad una proiezione ortogonale.

L'immagine fotografica così trasformata mantiene quasi inalterate le sue caratteristiche qualitative, la sua densità di informazioni e può essere riprodotta in scala come fosse una rappresentazione grafica architettonica del piano medesimo.

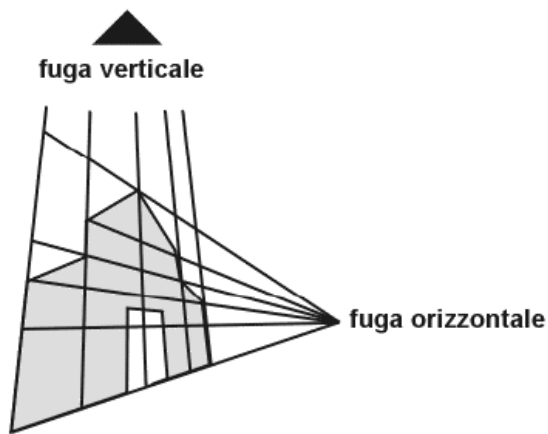


Figura 34: Presa fotografica di un prospetto di una costruzione: schema

In altre parole, da una immagine fotografica che rappresenti, ad esempio, la facciata esterna di un edificio in proiezione centrale, è possibile ottenere, con una speciale trasformazione, una immagine dove il piano di questa facciata appare in prospetto. Tale processo viene definito con svariate terminologie:

- raddrizzamento di prese inclinate;
- restituzione fotogrammetrica con applicazione dell'omografia;
- trasformazione omografica;
- raddrizzamento fotogrammetrico;
- ortogonalizzazione;
- trasformazione prospettica.

Dal punto di vista geometrico si illustra la trasformazione in maniera semplificata: data una figura piana con reticolato ortogonale di riferimento, (vedi Figura 6.2), questa assume generalmente nella proiezione centrale (= presa fotografica) una conformazione dove le rette parallele hanno direzione convergente verso fughe orizzontali e verticali. Nel procedimento di "raddrizzamento" l'immagine fotografica può essere trasformata ripristinando la corretta geometria della figura ripresa ed annullando, relativamente a quel piano, gli effetti della proiezione centrale che, oltretutto, impediscono una misura ed un proporzionamento immediato del soggetto.^[30]

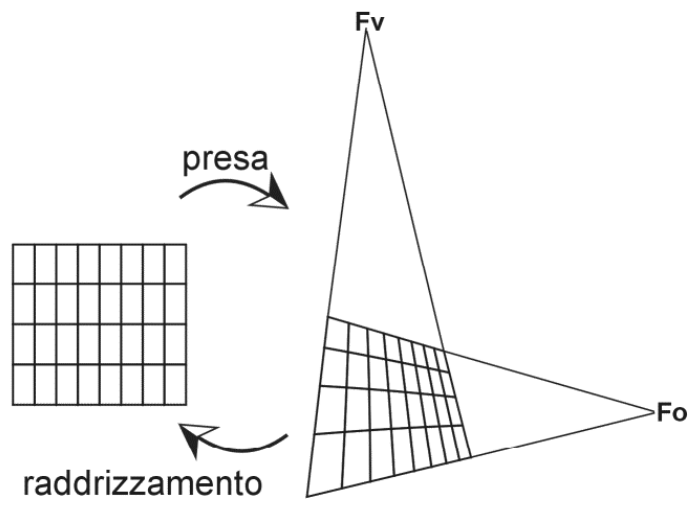


Figura 35: Schema che illustra graficamente la procedura della presa fotografica e del raddrizzamento.

CAPITOLO 5

SPERIMENTAZIONE E APPLICAZIONI

5.1 INTRODUZIONE

Nei capitoli precedenti si è parlato del progetto di monitoraggio del D.I.C.A sulle mura di Amelia attraverso l'uso di tecniche geomatiche integrate (vedi Capitoli 1).

In questa tesi sono stati analizzati il laser scanner (Capitolo 2) e la fotogrammetria digitale quali metodologie di rilievo, nello specifico si è approfondita la fotogrammetria non convenzionale (Capitolo 4) che in questi ultimi anni ha visto una notevole evoluzione grazie ai progressi dell'informatica e della tecnologia, tanto da consentire la ricostruzione fedele di modelli tridimensionali direttamente da fotografie digitali.

Queste tecniche offrono un valido supporto non solo per lo studio ed il monitoraggio del territorio, ma anche per il recupero e la salvaguardia dei beni architettonici e più in generale del patrimonio culturale.

Con il laser scanner è possibile registrare in modo quasi completamente automatico sia informazioni geometriche sia i valori di riflettività dei materiali visualizzabile sulla nuvola come variazione cromatica (Figura 5.1).

Negli ultimi tempi la fotogrammetria si è orientata verso la restituzione di modelli tridimensionali degli oggetti ti per mezzo di fotografie bidimensionali sfruttando i principi della fotogrammetria monoscopica digitale (*fotomodellazione*).

Si definisce fotomodellazione la restituzione di modelli metrici 3D per mezzo di fotografie bidimensionali sfruttando i principi della fotogrammetria monoscopica digitale. Questa tecnica permette di ricostruire strutture architettoniche attraverso la proiezione, in uno spazio

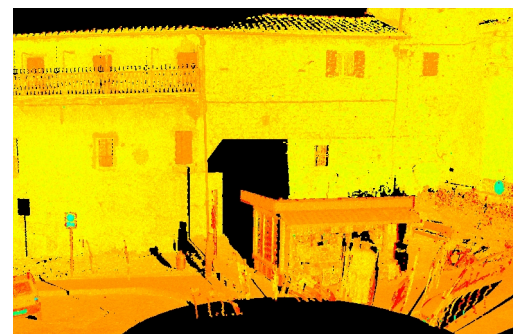


Figura 5.1 - Differenze cromatiche dei punti acquisiti con il laser scanner

tridimensionale, di punti e linee generate dal calcolo dell'intersezione delle linee ottiche provenienti da ogni foto.

Il risultato ottenuto dall'impiego di queste tecniche è la costruzione di modelli geometrici scalati, e georiferiti se si conoscono le coordinate di alcuni punti di controllo, completi di textures ortorettificate, esportabili in qualunque formato digitale.^[43]

La fotomodellazione presenta diversi vantaggi: facilità e velocità di acquisizione dei dati, rapidi tempi di elaborazione e notevole quantità di informazioni (qualitative e quantitative) registrate con una singola campagna di rilievo, possibilità di accrescere o diminuire il livello di dettaglio dell'oggetto in base alle necessità del caso. Per contro gli svantaggi di questa tecnica sono legati alle problematiche tipiche della fotografia, quindi alla messa a fuoco, ai rapporti luce/ombra.

I programmi più evoluti per la fotomodellazione sono in grado di calcolare automaticamente la posizione spaziale di tutti i pixel delle coppie di fotogrammi che riproducono la superficie dello stesso oggetto da posizioni differenti generando nuvole di punti nello spazio analoghe a quelle dei laser scanner (*dense surface modeling*).^[42]

È proprio sulla fotomodellazione che si è voluta porre l'attenzione in questo lavoro di tesi. La mia esperienza si focalizza sull'apprendimento di una tecnica innovativa che consente la ricostruzione di modelli tridimensionali in modo rapido, –con procedure quasi totalmente automatiche, utilizzando fotografie digitali acquisite con una comune fotocamera calibrata. Per i rilievi di questa tesi è stata utilizzata una Canon EOS 600D con obiettivo 24mm.

Tutto questo è stato possibile grazie ai software originali e alla strumentazione che la ditta Menci Software di Arezzo mi ha gentilmente messo a disposizione per l'intero periodo della tesi.

I programmi utilizzati, il modus operandi di questa tecnica e la mia esperienza sono descritti in dettaglio nei paragrafi seguenti.

5.2 PRODOTTI DELLA MENCI SOFTWARE

La Menci Software è un'azienda leader nella produzione di programmi per la Fotogrammetria (aerea e terrestre) e la Computer Vision. Opera nel settore dal 1996 ed è specializzata nell'elaborazione di metodi di misura da immagini, nella ricerca e nello sviluppo di software sempre più semplificati, efficienti ed automatici per la gestione dei dati e delle immagini stesse.

I campi di applicazione della Menci Software sono innumerevoli: dalla cartografia aerea al rilievo architettonico e industriale, dal monitoraggio di siti naturali alla geologia, dai beni

culturali al restauro e all'archeologia fino alle perizie giudiziarie. Si occupa anche di disegno e mappatura cartografica, nei suoi laboratori viene effettuato il servizio di calibrazione di strumenti fotografici. Vanta numerose partnership con le maggiori aziende attive nel settore, con enti di ricerca come il MIBAC, CNR, e varie Università.

La Menci Software ha creato uno strumento innovativo che permette di ottenere una nuvola di punti colorata, a densità parametrizzabile, direttamente dalle immagini fotografiche in modo semplice ed intuitivo.^[44]

Per il rilievo delle mura di Amelia i programmi utilizzati, approfonditi nei paragrafi seguenti, sono quelli compresi nel sistema EVO e Z-Map Photo.

5.2.1 Z-SCAN EVO

Z-Scan Evo è una suite che si avvale delle più recenti innovazioni di Menci Software nell'ambito della ricostruzione 3d da immagini, apportando un notevole contributo nel campo della fotomodellazione in termini di qualità della ricostruzione, semplificazione e automazione dei processi (con possibilità di personalizzazioni).

Il programma è in grado di ricavare dalle foto nuvole di punti RGB ad alta densità: non si tratta di nuvole "rivestite" di immagini, bensì di punti colorati direttamente con il valore RGB estrapolato dalle foto.

Il nome Evo fa riferimento all'*EVOLuzione* del sistema precedente: Z-Scan. Quest'ultimo è una soluzione *a base fissa* e rappresenta una tecnica di elaborazione fotogrammetrica multimagine il cui risultato finale è un modello 3D ottenuto utilizzando contemporaneamente serie di tre immagini (*triplette*) dello stesso oggetto.^[ZS_2011]

Questo sistema è composto da una fotocamera digitale reflex calibrata impostata su di una barra in alluminio con slitta di precisione agganciata ad un treppiede professionale e dal relativo software di elaborazione. Esso si basa sulle *triplette* ossia tre foto scattate da tre posizioni diverse lungo la guida, il minimo indispensabile per questo software per poter ricostruire un modello tridimensionale.

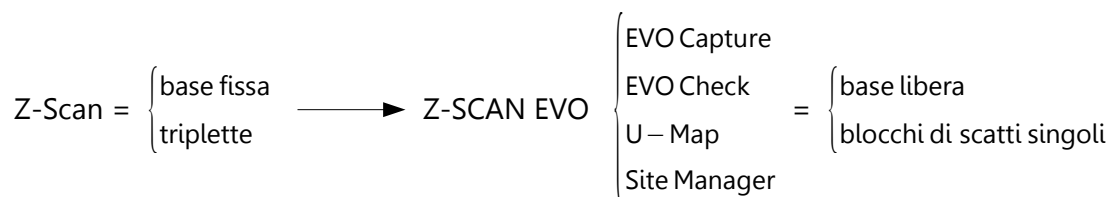
ZScan Evo, invece, svincola l'operatore dall'utilizzo della slitta di precisione e quindi dalla base fissa, infatti è in grado di gestire immagini acquisite a mano libera. Fornendo al sistema strisciate aventi adeguata sovrapposizione (almeno il 60% tra le immagini) è possibile ottenere un modello 3D completo, destinato sia ad attività di analisi che di documentazione.^[46]



Figura 6.2 - Z-Scan: kit di presa

Evo rappresenta dunque una soluzione innovativa per la modellazione 3D che, attraverso processi completamente automatici, consente di creare nuvole di punti a partire da blocchi di immagini. I modelli ottenuti si prestano a tutte le elaborazioni tipiche in campo fotogrammetrico: generazione di DEM, ortofoto, ortomosaici, profili, curve di livello, georeferenziazione ecc.

Il sistema ZScan Evo, consentendo un'acquisizione morfologica 3D, geometrica e fotografica dell'oggetto di interesse, può essere a tutti gli effetti considerato come uno strumento di conoscenza oltre che di restituzione grafica.^[42]



5.2.1.1 STRUMENTAZIONE

Il kit in dotazione col pacchetto Z-Scan EVO comprende vari elementi: fotocamera Canon D600 calibrata, asta topografica estensibile fino a 5 m con manfrotto su cui viene montata la fotocamera, tablet **modello** e cavo usb di 5m per collegare la fotocamera al tablet. Nel periodo di formazione alla Menci Software ho potuto eseguire delle prove pratiche in cui mi è stato messo a disposizione il kit completo (Figura 6.3).

Il tutto è facilmente trasportabile: con pochissimo ingombro ci si può spostare agevolmente da una zona di rilievo all'altra. Un solo operatore può svolgere tutto il lavoro senza difficoltà ed eseguendo una opportuna progettazione delle prese, i tempi dei rilievi diventano molto rapidi (si tenga conto che nella mia esperienza ho impiegato qualche ora nel caso più difficile).

Nel dettaglio il set della strumentazione è così composto:

- fotocamera Canon EOS 600D calibrata con obiettivo Canon EF 24mm/f 2.8, è dotata anche di telecomando per scattare in remoto

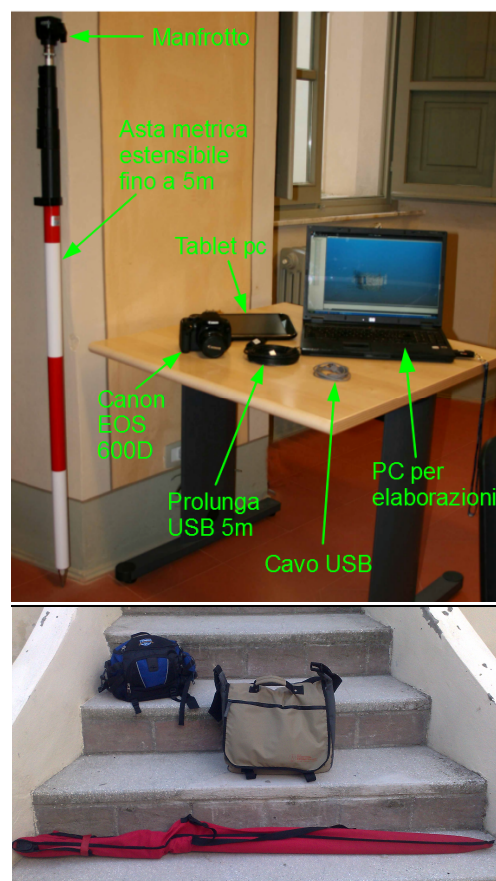


Figura 6.3: Strumentazione per i rilievi: dettaglio e kit nelle custodie per il trasporto



Figura 5.4 - Corpo macchina e obiettivo usati per i rilievi di questa tesi e telecomando della camera

- asta topografica estensibile fino a 5,60 metri, dotata di bolla sferica e testa Manfrotto con attacco idoneo per fissare la fotocamera;
- tablet pc per il controllo remoto della fotocamera, è alloggiato sull'apposito supporto fissato all'asta (Figura 5.5), è collegato alla fotocamera tramite cavo usb. Le foto si scattano direttamente dal tablet grazie al programma Evo Capture;
- fettuccia per misurare la distanza di presa, nastro isolante colorato da apporre all'occorrenza sull'oggetto con la funzione di marker, nastro carta, in una delle zone del rilievo mantenere il più uniforme possibile la distanza di presa durante gli scatti (Figura 5.6).

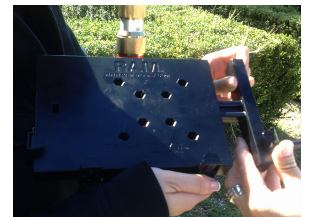


Figura 5.5 - Supporto per tablet fissato all'asta



Figura 5.6 - Riferimenti a terra per mantenere uniforme la distanza di presa

Per quanto riguarda la mia esperienza, durante le sessioni fotografiche per i rilievi delle mura di Amelia, ho utilizzato solo l'asta, la fotocamera ed il telecomando prestando attenzione alle regole della fotogrammetria classica: sovrapposizione delle foto maggiore del 60% e prese il più possibile normali. L'uso del tablet e del programma Evo Capture possono essere considerati opzionali ai fini del rilievo, ma sono sicuramente un valido supporto sia per chi abbia poca confidenza con la fotogrammetria, sia per eseguire rilievi speditivi. (Nel mio caso la scelta è stata dettata da motivi essenzialmenti pratici).

5.2.1.2 EVO CAPTURE

È il software associato al tablet e nasce per l'utilizzo sul campo. Consente di visualizzare il *live view* della fotocamera e di memorizzare direttamente sull'hard disk del tablet gli scatti, verificando in tempo reale che le foto acquisite soddisfino i requisiti minimi per l'utilizzo. Per questo l'uso del tablet è un valido supporto anche per l'utente "meno esperto" → **scatto remoto e validazione dei dati**.

Per iniziare l'acquisizione ci si deve posizionare nella parte più esterna dell'area di interesse in modo che anche gli estremi del soggetto siano ripresi in almeno tre scatti, e si verifica che la

camera sia connessa al tablet.

L'inquadratura deve essere il più possibile frontale/zenitale e occupare almeno i 2/3 della finestra di visualizzazione. Si procede quindi con la sessione di scatti, realizzati con un semplice click nel live view, fino a rilevare l'intero soggetto, avendo cura di spostarsi sempre della stessa distanza e mantenendo una percentuale di sovrapposizione tra le immagini dell'80% in orizzontale e del 50% in verticale. È il programma stesso che subito dopo lo scatto comunica se la foto appena acquisita si lega alla precedente: in caso affermativo la memorizza nel blocco di foto della sessione in corso, in caso contrario la foto è contrassegnata da una x rossa e non viene memorizzata, pertanto è necessario ripetere lo scatto correggendo i difetti della presa.^[42]

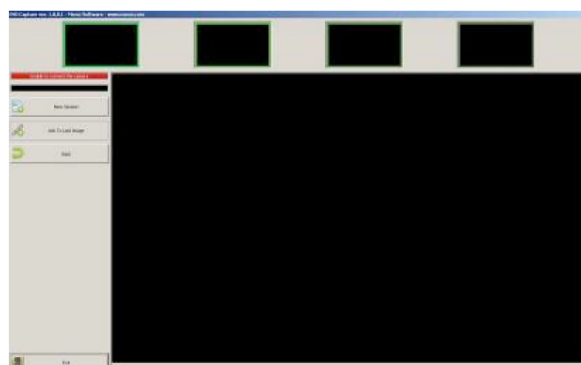


Figura 5.7 - Interfaccia di Evo Capture

5.2.1.3 EVO CHECK

È un software installato sul notebook o PC da campo, da utilizzare per la verifica preliminare della nuvola di punti ottenuta. Garantisce in tempi rapidi la verifica del corretto legame delle immagini catturate prima di lasciare la zona di rilievo → **pre-processamento e validazione delle immagini sul campo.**

Una volta acquisite, le immagini vengono importate nel software e processate, avendo preliminarmente definito il certificato di calibrazione della camera utilizzata.

Più nello specifico, le operazioni eseguite in modo completamente automatico, sono: *Finding Features*, la correlazione automatica di *Matching Image* e la compensazione a stelle proiettive (*Bundle Adjustment*). Terminato il processo è possibile visualizzare una prima nuvola di punti con la ricostruzione di tutti i centri di presa (Figura 5.8); le *Bundled Images*, correttamente processate che hanno contribuito alla costruzione della nuvola e le *Free Images*, che invece non sono state legate.

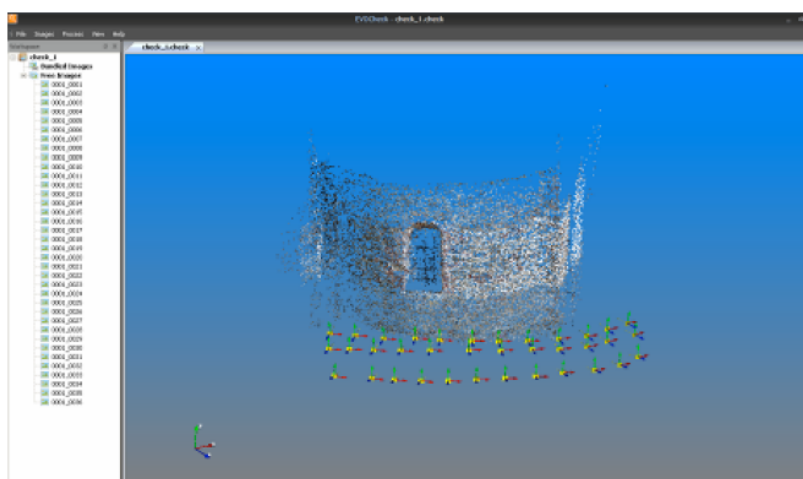


Figura 5.8 - Interfaccia di Evo Check

Con i comandi da tastiera e mouse è possibile cambiare la visualizzazione, ruotare e

zoomare la nuvola di punti.^[42]

5.2.1.4 U-MAP

È il software dedicato al processamento e alla ricostruzione finale delle nuvole di punti RGB a densità parametrizzabile. Per ogni modello viene prodotta una texture RGB ad alta definizione. Il work flow di U-Map è lo stesso di Evo Check, ma con criteri più stringenti che consentono di restituire punti *meno sporchi* e soprattutto con l'aggiunta della funzione di Reconstruction successiva al bundle (Figura 6.9).

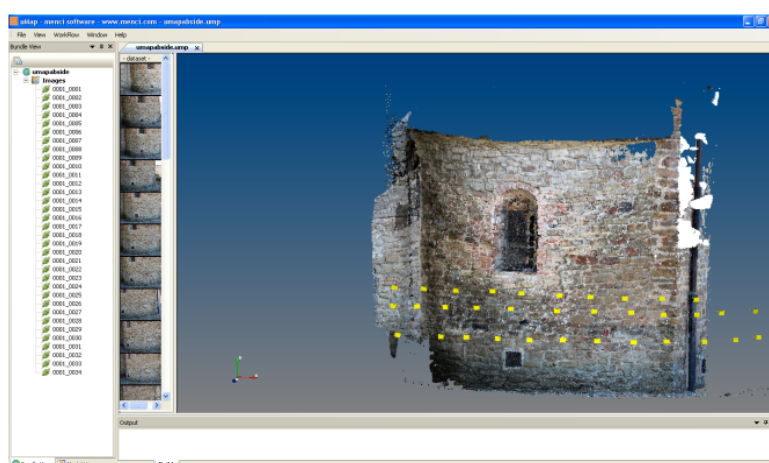


Figura 6.9 - Interfaccia di U-Map.

La ricostruzione può essere applicata a tutte le immagini o ad una selezione di esse nel caso vi sia molta sovrapposizione, per evitare ridondanze e tempi lunghi di esecuzione. I valori di ricostruzione (*accuracy level* e step di ricostruzione) sono parametrizzabili: si può impostare la densità di ricostruzione in base alle necessità del caso.

È inoltre possibile collimare dei punti di controllo (*Ground Control Point*) per scalare e georiferire il modello in un prescelto sistema di riferimento. I GCP sono punti facilmente riconoscibili poiché si collimano sulle foto e hanno coordinate note (ad esempio battute con una stazione totale), al limite per avere un modello solo in scala è sufficiente conoscere la distanza tra due punti. È anche possibile generare la *mesh* di alcuni o tutti i modelli → **processi automatici per la ricostruzione di modelli 3D da immagini**

Si definisce MESH la superficie frammentata di tasselli triangolari connessi mediante i bordi. La generazione ottimale della mesh è un passo fondamentale per la corretta elaborazione della superficie. (MENCI-CABRUCCI 2001)^[42]

È importante ricordare che il passo della ricostruzione, che stabilisce la densità della nuvola,

può essere impostato a seconda delle esigenze del rilievo.

Dopo la ricostruzione si ottengono modelli con estensione *.VTP che possono essere ulteriormente elaborati con il programma Z-Map per ottenere DEM, profili, ortofoto, ortomosaici, secondo le funzionalità descritte nel paragrafo 5.2.4.

Ultima, ma non meno importante, è la funzionalità più recente aggiunta a U-Map: la possibilità di **autocalibrazione** di una fotocamera digitale. Pur non disponendo di una fotocamera dotata di certificato di calibrazione è possibile comunque ottenere ricostruzioni soddisfacenti. Il software è in grado di risalire all'orientamento interno della fotocamera attraverso una serie di scatti debitamente eseguiti (avendo cura cioè di rispettare il criterio di sovrapposizione tra le immagini e scegliendo delle superfici consone come paramenti murari o comunque geometrie semplici). È evidente che in questo caso non si può pretendere di ottenere un modello con la stessa accuratezza di quella ottenuta utilizzando immagini provenienti da una macchina dotata di certificato di calibrazione generato in laboratorio.

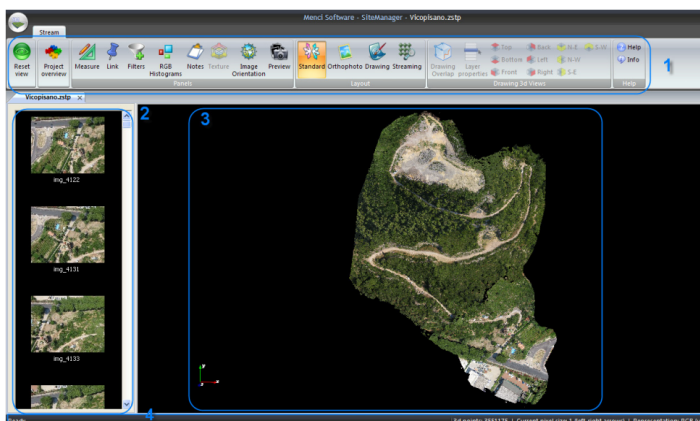
5.2.1.5 SITE MANAGER

Site Manager è un software per la gestione e la presentazione deidati relativi ai modelli 3D.

Site Manager consente di arricchire il risultato finale integrando i dati provenienti dalle singole immagini originali e dal relativo modello 3D generato. Tramite semplici link disposti direttamente sul modello, è possibile avere un collegamento diretto con materiale documentario di varie tipologie come ad esempio video, ortofoto, disegni vettoriali, monografie di punti, documenti di testo, ecc.

Figura 5.10 -
Interfaccia di Site Manager:

- 1) Toolbar;
- 2) Elenco delle miniature delle immagini di progetto;
- 3) Finestra di visualizzazione del modello 3D e dei dati ad esso collegati;
- 4) Barra di visualizzazione: stato di lavoro/quiete dell'applicazione, del numero di punti 3D visualizzati nel sito, rappresentazione e pixel size correnti.



La forza di Site Manager è proprio nella nella sua natura che offre diverse in funzione della necessità dell'utente finale:

- generazione dei data stream gestiti da Site Manager sia da file ASCII *.txt sia da file binari *.vtp. Un data stream può essere convertito nuovamente in vtp, formato open

source per dati 3d;

- gestione dei dati di progetto tramite database interno;
- esecuzione di misure 2D/3D sui modelli;
- selezione del tipo di rappresentazione dei modelli 3D (RGB, elevazione, intensità, ecc.) e variazione della dimensione del pixel a schermo;
- possibilità di collegare il modello 3D con link a risorse Web, altri modelli, testi, media, immagini, ortofoto e vettoriali CAD;
- visualizzazione, filtraggio e selezione delle immagini orientate relative al dato 3D, per un rapido abbinamento modello-immagine;
- visualizzazione di istogrammi, note e orientamenti delle immagini incluse nel progetto;
- visualizzazione di texture raster ad alta definizione in sovrapposizione al modello 3D nuvola di punti;
- possibilità di esaminare ortofoto e vettoriali relativi al progetto. I vettoriali possono essere proiettati e visualizzati contestualmente al modello 3D;
- gestione intuitiva dei layout delle finestre.

Dunque la possibilità di fondere insieme le informazioni contenute in modelli 3D, link a risorse web, immagini, ortofoto, vettoriali CAD e media di vario tipo rendono il dato finale completo e chiaro per qualunque tipo di rappresentazione.^[46]

5.2.2 RICOSTRUZIONE DEI MODELLI CON U-MAP

Per i rilievi eseguiti in questa tesi è stata utilizzata una fotocamera dotata di certificato di calibrazione (Canon EOS 600D) di cui sono noti i parametri di orientamento interno e le correzioni da apportare per eliminare le distorsioni del sistema ottico.

5.2.2.1 IMPORTAZIONE DELLE FOTO

Le foto importate nel programma sono scatti liberi eseguiti secondo le regole della fotogrammetria classica: sovrapposizione di almeno il 60% tra i fotogrammi e prese il più possibile zenitali, dopodiché il software, in modo del tutto automatico determina l'orientamento esterno ricostruendo i centri di presa nello spazio per ciascuna delle immagini importate.

5.2.2.2 BUNDLE

I processi che portano alla ricostruzione del modello si basano sul riconoscimento delle caratteristiche comuni alle foto importate secondo tre step consecutivi:

- Finding feature= ricerca di punti comuni;
- Matching feature= correlazione dei punti in comune individuati;

- Bundle adjustment=compensazione automatica (triangolazione).

.Al termine del processo di *bundle* si ottiene l'insieme dei *tie points* cioè dei punti comuni alle foto che risultano legate tra loro (*bundled images*, Figura 5.11). Questa è la fase preliminare alla ricostruzione.

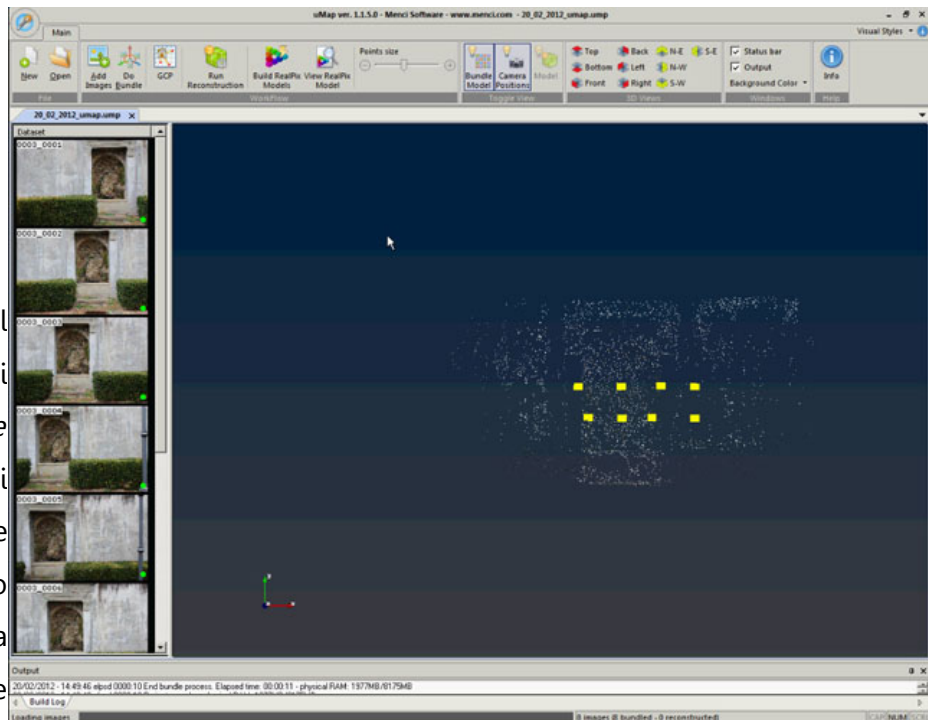


Figura 5.11 - Interfaccia al termine della fase di bundle

5.2.2.3 PUNTI DI CONTROLLO

Continuando a seguire l'ordine dei processi mostrati dalle le icone dei comandi che si attivano in modo sequenziale all'avanzamento dei processi, dopo il bundle il viene richiesto l'inserimento dei Ground Control Points per poter scalare e georiferire il modello.

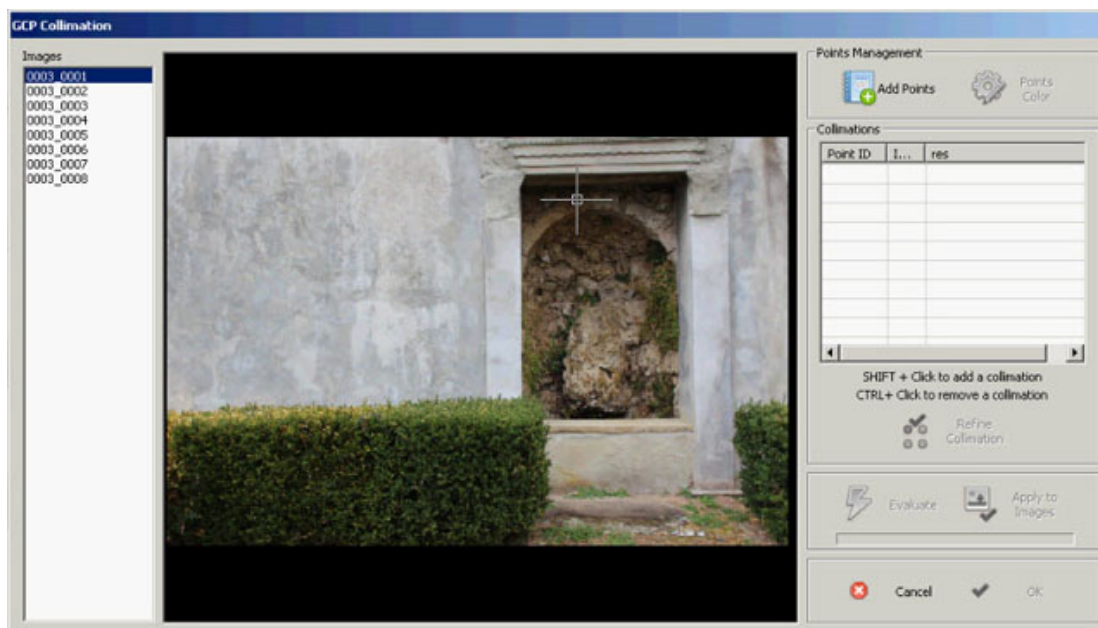


Figura 5.12 - Interfaccia per l'inserimento dei GCP

I punti possono essere caricati come lista di coordinate da un file txt e poi collimati sulle foto: ciascun punto viene collimato su una foto, dopodiché il software li riconosce automaticamente nelle altre foto in cui tale punto è visibile. L'operatore in qualsiasi momento effettuare un controllo sui punti omologhi individuati automaticamente.

Terminata la collimazione dei punti si procede alla valutazione dei residui.

Se sono ritenuti accettabili ai fini del rilievo si applica la collimazione a tutte le immagini e si prosegue, altrimenti si può ridefinire la collimazione oppure possono essere scartati i punti coi residui più alti e ripetere il calcolo dei valori residuali. Per georiferire il modello è necessario avere almeno 3 GCP non posizionati sullo stesso asse e non concentrati in una zona dell'area da ricostruire ma anzi distribuiti il più uniformemente possibile..

5.2.2.4 DIMENSIONE DEL PIXEL A TERRA

Per poter stabilire il passo della ricostruzione, ovvero la densità della nuvola, è fondamentale conoscere la dimensione del pixel a terra: il cosiddetto *Ground Sample Distance* (GSD).

Il pixel è l'unità elementare in cui è suddivisa un'immagine digitale, la sua dimensione ne indica la risoluzione geometrica. L'area dell'oggetto reale proiettata in un singolo pixel, supposto quadrato, corrisponde proprio al GSD.

Per questo legame tra pixel e *ground sample distance* si potrebbe pensare che al diminuire del lato del pixel corrisponda un GSD più piccolo, dunque un incremento della qualità della ricostruzione.

In realtà il GSD non è funzione solo della dimensione del pixel.

Detti: **D**=distanza di presa; **f**=focale della camera; **L**=dimensione del lato del pixel, la dimensione del GSD è data dalla relazione:

$$GSD = D \cdot \left(\frac{L}{f} \right) \quad (5.1) \quad \textit{Funzione che esprime la dimensione del pixel a terra}$$

Pertanto il GSD è funzione dei tre parametri **D**, **L** ed **f**.

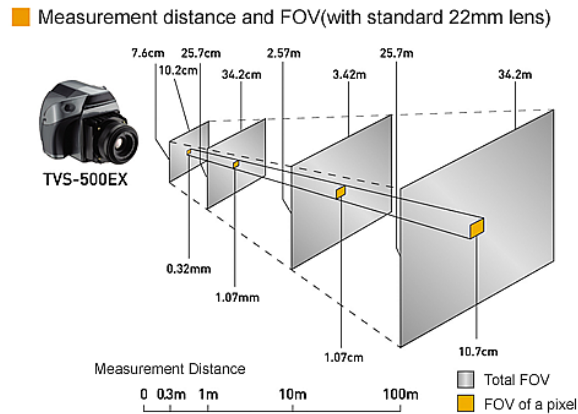


Figura 5.13 -

Conoscendo le dimensioni del sensore e la sua risoluzione geometrica (ovvero la dimensione del pixel), al variare della focale utilizzata, tramite un semplice foglio di calcolo, è immediato determinare il GSD in funzione della distanza di presa. È possibile calcolare anche altre grandezze correlate, come ad esempio la copertura orizzontale e verticale che si ottiene con un fotogramma, l'area a terra ricoperta dal fotogramma stesso.

Per i rilievi sulle mura di Amelia ho utilizzato sempre la stessa fotocamera con obiettivo 24mm, pertanto nelle ricostruzioni il GSD assume dimensioni molto differenti in funzione della distanza di presa, anche all'interno dello stesso rilievo (zona E e Porta Romana) come mostra la tabella sottostante:

Canon EOS 600D		focal length	24	
		sensor pixel size (mm)	0,0043065201	
		sensor pixel width	5184	
		sensor pixel height	3456	
Object distances (mm)	GSD (mm)	Horz covering (mm)	Vert covering (mm)	Covering Area (mm²)
1000,00	0,18	930,21	620,14	0,58
2.000,00	0,36	1.860,42	1.240,28	2,31
2.500,00	0,45	2.325,52	1.550,35	3,61
3.000,00	0,54	2.790,63	1.860,42	5,19
3.500,00	0,63	3.255,73	2.170,49	7,07
4.000,00	0,72	3.720,83	2.480,56	9,23
4.500,00	0,81	4.185,94	2.790,63	11,68
5.000,00	0,90	4.651,04	3.100,69	14,42
5.500,00	0,99	5.116,15	3.410,76	17,45
6.000,00	1,08	5.581,25	3.720,83	20,77
6.500,00	1,17	6.046,35	4.030,90	24,37
7.000,00	1,26	6.511,46	4.340,97	28,27
10.000,00	1,79	9.302,08	6.201,39	57,69
12.000,00	2,15	11.162,50	7.441,67	83,07
12.500,00	2,24	11.627,60	7.751,74	90,13
15.000,00	2,69	13.953,13	9.302,08	129,79
15.500,00	2,78	14.418,23	9.612,15	138,59
18.000,00	3,23	16.743,75	11.162,50	186,90
20.000,00	3,59	18.604,17	12.402,78	230,74
22.500,00	4,04	20.929,69	13.953,13	292,03
25.000,00	4,49	23.255,21	15.503,47	360,54

Tabella 5.III: Variazione del GSD in funzione della distanza (camera Canon Eos 600D con obiettivo 24mm)

Si consideri la stessa fotocamera, Canon EOS 600D, con quattro focali differenti, 20mm, 24mm; 35mm e 55mm. Il GSD cambia molto a parità di distanza come mostrato nella Tabella II:

	= GSD (mm)	FOCALE UTILIZZATA			
		20 mm	24 mm	35 mm	55 mm
DISTANZA DI PRESA (mm)	3000	0,65	0,54	0,37	0,23
	3500	0,75	0,63	0,43	0,27
	4000	0,86	0,72	0,49	0,31
	5000	1,08	0,90	0,62	0,39
	6000	1,29	1,08	0,74	0,47
	8000	1,72	1,44	0,98	0,63
	10000	2,15	1,79	1,23	0,78

Tabella 5.IV - Dimensione del Ground Sample Distance in funzione di focale e distanza di

Se, invece, si considerano due fotocamere diverse: a parità di L (cioè stessa dimensione dei pixel), e a parità di distanza D, è evidente che il GSD dipenderà dalla focale f utilizzata; ma parità di distanza D non è sufficiente conoscere solo il lato del pixel per dire quale delle due fotocamere produca un GSD minore.

AD ESEMPIO: a parità di distanza di presa dall'oggetto: una camera dotata di un sensore con pixel di 10 μm di lato e con focale di 100 mm produce immagini con un GSD minore di quello

dato da una camera con pixel di $8 \mu\text{m}$ di lato ma con focale di 60 mm .^[37]

Il GDS, infatti, a parità di distanza è funzione del rapporto L/f :

$$\left(\frac{8 \mu\text{m}}{60 \text{ mm}}\right) = 1,33 \cdot 10^{-4} > \left(\frac{10 \mu\text{m}}{100 \text{ mm}}\right) = 1 \cdot 10^{-4}$$

Tutto questo porta alla conclusione che intervenendo sulla distanza di presa e sulla scelta della focale, si possono eseguire rilievi molto dettagliati, con precisioni anche submillimetriche. Unico limite è l'estensione dell'oggetto, più è esteso maggiore è il numero di scatti che saranno necessari per riprenderlo completamente e con la giusta sovrapposizione tra le strisciate, sarà necessario anche adottare degli accorgimenti per far in modo che gli scatti siano il più possibile normali all'oggetto (servendosi ad esempio dell'asta estensibile fino a $5,60\text{m}$ oppure ricorrendo a trabattelli o cestelli elevatori, Figura 5.14)

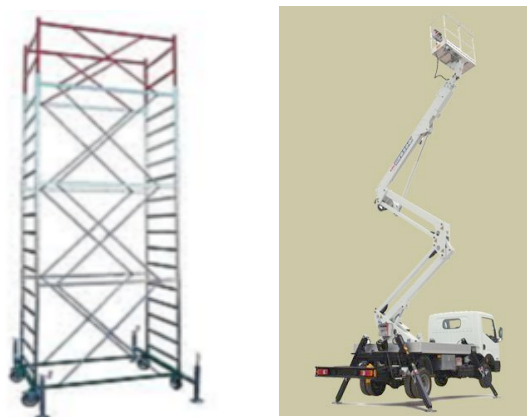


Figura 5.14: Esempio di trabattello e cestello elevatore

5.2.3 Z-MAP PHOTO

Zmap Photo è una piattaforma software per l'uso di immagini aeree, terrestri e satellitari, oltre che sensori digitali, nell'ambito dei tradizionali processi fotogrammetrici; permette inoltre la gestione di dati provenienti da laser scanner sia aereo che terrestre.

Z-Map Photo integra in modo efficiente informazioni raster e vettoriali anche di grandi dimensioni e consente una gestione rapida di:

- DTM densi, indipendentemente dalle tecnologie con cui sono stati acquisiti;
- foto aeree di grandi dimensioni;
- foto da satellite;
- ortofoto rettificate;
- modelli stereoscopici;
- cartografia vettoriale con i relativi tematismi.

L'architettura del sistema, basata su un database proprietario di tipo CAD, è molto versatile

grazie alle sue numerose funzioni di editing.

PRINCIPALI CARATTERISTICHE:

- La procedura di orientamento interno ed esterno è completamente automatica. Sono disponibili vari algoritmi per l'orientamento esterno non verranno approfonditi in questa sede.
- Il DEM viene generato in modo automatico e immediato;
- Le breaklines e le curve di livello vengono gestite efficacemente tramite algoritmi di sfoltimento vertici e aggiunta di spline. Sono possibili la generazione e l'esportazione di profili di superfici e il calcolo di volumi su DEM (Figura 5.15.).



Figura 5.15 - Esempio di profilo e curve di livello

- La vettorializzazione, sia monoscopica che stereoscopica, si avvale degli snap ad oggetto 2d e 3d. La messa in quota sul modello, gestita attraverso una TrackBall USB, è facilitata da una funzione automatica che porta il cursore sulla quota del DTM o del Modello, a seconda che si lavori in modalità monoscopica o stereoscopica.

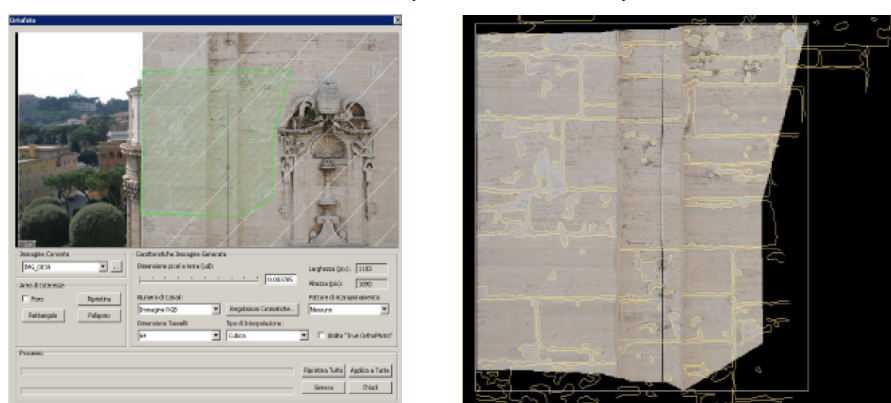


Figura 5.16 - Finestra dell'ortofoto

- La generazione di ortofoto e di ortomosaici si avvale di innovativi algoritmi di taglio automatico e ortomosaico che garantiscono grande produttività e precisione. L'assemblaggio delle diverse immagini e la scelta ottimale delle linee di taglio per la giunzione di più fotogrammi ortorettificati, sono gestiti in automatico con l'interazione di

metodi di image-matching e di tecniche di programmazione dinamica.

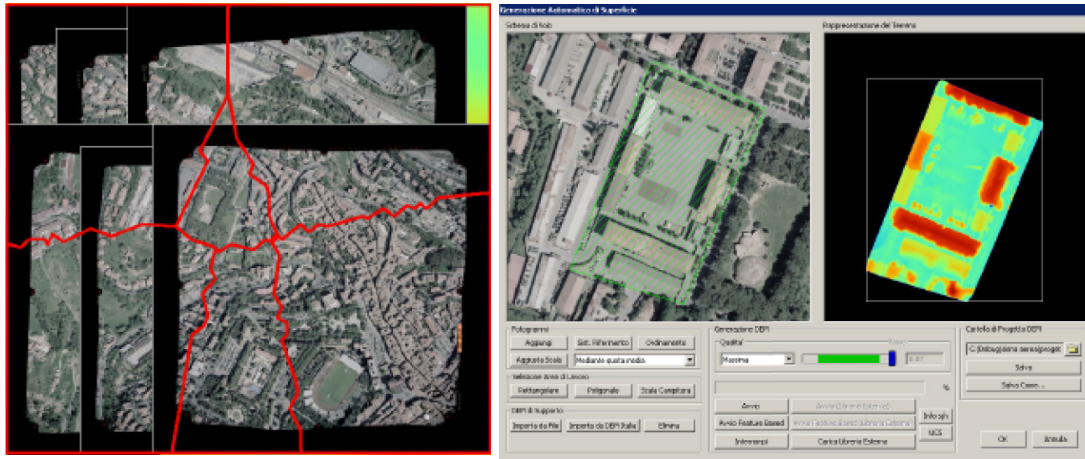


Figura 5.17 - Esempi di ortomosaico e DEM

- La rapidità di calcolo è dovuta alla minima richiesta di parametri di controllo e al rapido accesso alle immagini garantito dal motore raster. I DEM possono essere creati da immagini o da entità. E' inoltre disponibile un DEM generale d'Italia con passo di risoluzione medio di 80 metri.
- In Z-Map c'è la possibilità di programmare comandi CAD personalizzati tramite apposite API. E' inoltre possibile l'utilizzo di algoritmi esterni, diversi da quelli predefiniti, nel calcolo dell'autocorrelazione per la generazione del DEM da immagini.

5.2.4 (BASI DI) Z-MAP

Il software Z-Map consente di lavorare anche con nuvole di punti acquisite da laser scanner previa conversione di tali modelli nel formato vtp che è quello riconosciuto e gestito da software (Figura 5.18).

Ottenuto il modello in formato vtp ed inserito nell'ambiente CAD di Z-Map sono possibili numerose operazioni

Una volta inserito il modello apparirà sulla finestra CAD in un layer omonimo e sarà trattato come una semplice entità sulla quale si potranno eseguire diverse operazioni, potrà ad esempio essere suddiviso e ripulito attraverso una selezione inclusiva o esclusiva che non produce cambiamenti sull'originale, ma ne modifica solo la visualizzazione.

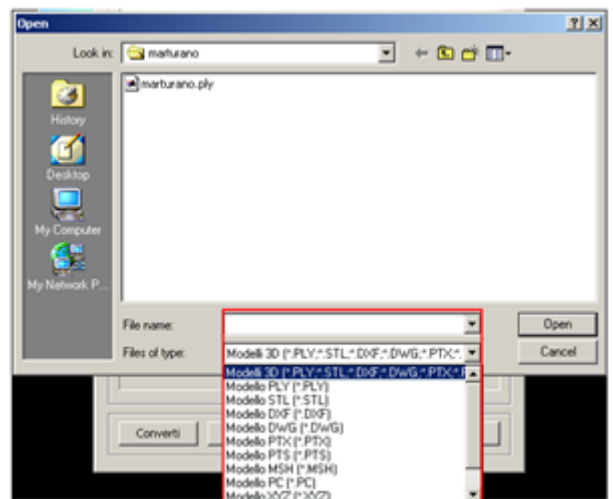


Figura 5.18 - Finestra di conversione del file esterno

5.2.4.1 DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM)

Il DEM (*Digital Elevation Model*) è una rappresentazione cromo-altimetrica raster delle quote di una superficie. In ZMap può essere generato da immagini, da un insieme di entità CAD poste a quote diverse o da modelli 3d, dopo aver definito un UCS e averlo posto come corrente. L'UCS (*User Coordinate System*) consente di impostare all'interno del file dei sistemi di riferimento locali, allineandoli ad un qualunque oggetto (BIANCHINI 2008). Questo spostamento facilita il lavoro su determinati piani, specie quando entriamo nella terza dimensione.^[42]

Per generare il DEM dal modello, questo deve prima essere sottoposto a triangolazione, in modo che siano stabilite interconnessioni tra i punti. I parametri da impostare oltre al passo, ossia alla risoluzione con la quale sono rappresentati i punti del DEM, sono: il fattore Alpha, che definisce il valore del diametro massimo del cerchio che circonda ciascun triangolo formato da tre punti; il valore di tolleranza, espresso in metri, che definisce la distanza minima tra due punti del modello affinché siano considerati distinti, per evitare triangolazioni ridondanti laddove il modello presenti molti punti vicini tra di loro. Una volta generate, le superfici possono essere ulteriormente elaborate, creando curve di livello o profili.^[42]

Le informazioni contenute nei DEM possono essere poi utilizzate per proiettare ortofoto, disegnare sulle immagini, collimare punti di controllo, comparare superfici, ecc.

5.2.4.2 ORTOFOTO E ORTOMOSAICO

Una ortofoto è una fotografia di cui si conoscono le coordinate di riferimento spaziali associate ad ogni pixel, ottenibile grazie ad un raddrizzamento prospettico o ad una proiezione.

^[42]

Il **raddrizzamento prospettico** è un metodo di generazione di ortofoto basato su una trasformazione omografica bidimensionale della fotografia 48 che è in grado di deformare l'immagine come se fosse stata eseguita perpendicolarmente all'oggetto da rilevare, annullando l'effetto prospettico della fotografia. Per avviare la procedura è sufficiente aver posto i punti di controllo tra DEM o nuvola di punti e immagine e aver definito l'UCS rispetto al quale si vuol rettificare l'immagine. Trattandosi di una trasformazione bidimensionale, però, ogni particolare nella foto sarà modificato secondo la scala e la prospettiva necessaria per il raddrizzamento sul piano di riferimento definito, il che significa che applicato a superfici con dislivelli, il procedimento fornirebbe risultati inconsistenti per scala o prospettiva.

La **proiezione** invece è una trasformazione tridimensionale di un'immagine rispetto ad una superficie (DEM) che produce quindi ortofoto dalle caratteristiche geometriche più rigorose. Sono necessarie al calcolo le informazioni contenute nell'orientamento interno ed esterno,

occorre poi impostare alcuni parametri di proiezione quali la dimensione del pixel a terra, le regolazioni cromatiche, il fattore di ricampionamento etc.

Dalla composizione di più ortofoto deriva un ortofotomosaico. Poiché vengono assemblate immagini diverse, occorre trovare il percorso ottimale tra le loro linee di giunzione, attraverso gli algoritmi LPV e PPD a seconda che le immagini siano terrestri o aeree (Figura 5.19)

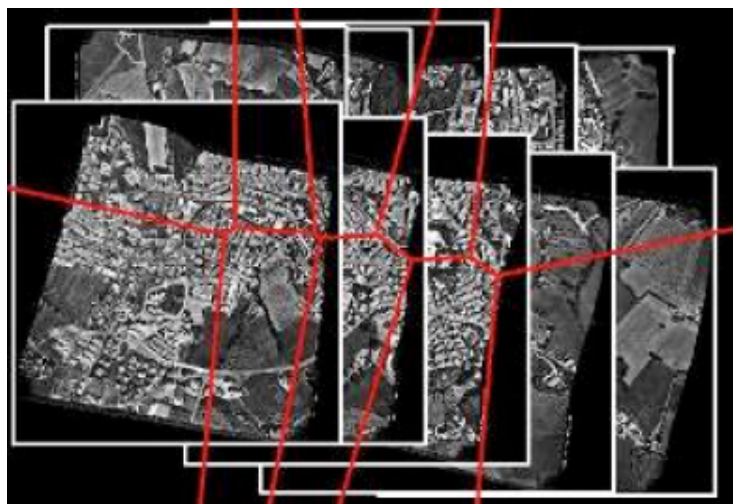


Figura 5.19 - Esempio di ortomosaico, in rosso le linee di giunzione

Z-Mzp offre anche la possibilità di scegliere un'immagine di riferimento per il bilanciamento del colore e per rendere il modello ancora più omogeneo è utile uniformare anche la risoluzione e la dimensione del pixel a terra delle singole ortofoto.

5.3 LA “FORMAZIONE” ALLA MENCI SOFTWARE

Durante il periodo di studio e di ricerca sulla fotogrammetria non convenzionale ho seguito l'intervento della Dott.ssa Ceccaroni (amministratore del settore commerciale e vendite della Menci Software) al convegno ASITA 2011. sono stata colpita dalla semplicità e dal livello di dettaglio garantiti dal loro software, da qui ho deciso di approfondire l'argomento cercando maggiori informazioni sul loro sito. Data la disponibilità della Menci Software a collaborare nella stesura di tesi di laurea inerenti ai rilievi fotogrammetrici e laser, in accordo col Professor Radicioni ho iniziato un periodo di formazione nella loro sede di Arezzo, da settembre a dicembre.

In un incontro preliminare ho illustrato alla dottoressa Ceccaroni l'intenzione di sperimentare il loro software Z-Scan Evo per il rilievo delle mura di Amelia. In questo briefing si è deciso di suddividere il mio percorso formativo in tre step: una prima parte teorica, seguita da un'ampia parte applicativa per acquisire padronanza della tecnica prima del rilievo in autonomia, e

l'ultima fase dedicata all'elaborazione e presentazione dei modelli.

5.3.1 FORMAZIONE TEORICA

La prima parte della formazione, di circa due settimane è stata dedicata alla conoscenza della ditta, dei settori in cui opera e dei loro prodotti

Lo studio del materiale disponibile sul loro sito e la documentazione che mi hanno messo a disposizione, sono serviti capire le potenzialità dei loro software nati dai principi fondamentali della fotogrammetria. I vari programmi sono stati creati e sviluppati per semplificare al massimo le procedure di acquisizione snellendo le elaborazioni per giungere ad avere un modello tridimensionale con elevati livelli di dettaglio (addirittura millimetrici per rilievi architettonici, submillimetrici per parti più piccole in cui è richiesto un maggiore livello di dettaglio).

In questo periodo c'è stata anche l'introduzione alle tecniche di presa per il rilievo.

5.3.2 FORMAZIONE PRATICA

Dopo aver acquisito le fondamentali conoscenze teoriche sono iniziate le applicazioni pratiche sotto la supervisione della dottoressa Debora Caldarelli (Promotion Manager e tecnico EVO), con l'obiettivo di apprendere le competenze necessarie ad effettuare in modo autonomo i rilievi ad Amelia (dettagli nei paragrafi seguenti).



Figura 5.20 - Vista del giardino di Villa Guillichini (sinistra) e momento del rilievo (destra)

Il primo approccio pratico con la strumentazione di Z-Scan (vedi Paragrafo 6.2.1.1) è avvenuto il 17 settembre 2012 per il rilievo della fontana situata nel giardino all'italiana di Villa Guillichini ad Arezzo, sede della Menci Software (Figura 5. 21).

Per poter ricostruire il modello in scala, sono stati materializzati due punti tramite dei marker fissati al muro, con una fettuccia metrica è



Figura 5.21 - Particolare della fontana

stata presa la misura tra questi e si è stabilita una distanza di presa ottimale di 4m. L'attrezzatura è stata montata in pochi minuti, e in quest'occasione è stato testato, con esito favorevole, l'uso di un e-pc al posto del tablet.

Con Evo Capture sono stati eseguiti 20 scatti suddivisi in 2 strisciate da 10 foto ciascuna con basi di presa di circa 50cm.

I tempi di presa sono stati rapidissimi: in soli **20 minuti** è stata ultimata la sessione di rilievo, dall'apposizione dei target al termine degli scatti.

I tempi di processamento con Evo Check e di ricostruzione con U-Map sono stati altrettanto brevi, con risultati notevoli già dalla prima prova (Figura 5.22)

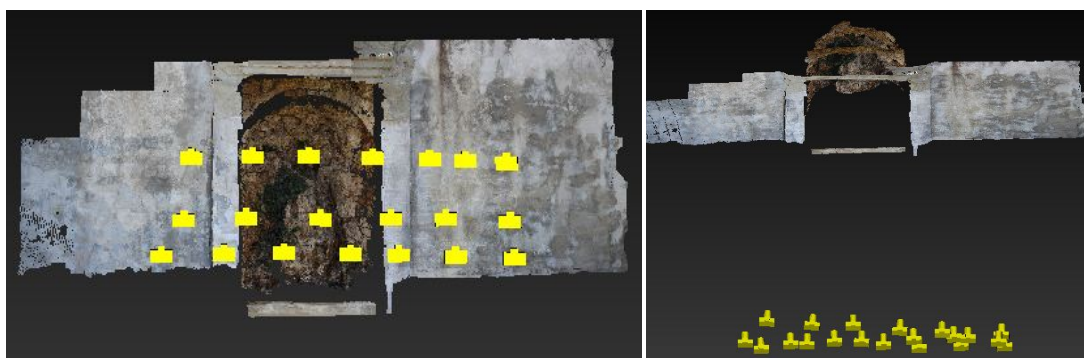


Figura 5.22 - Vista frontale della ricostruzione e dettaglio della profondità della fontana

Verificata sin dal primo utilizzo la semplicità e l'efficacia di questa tecnica, nelle settimane successive ho potuto cimentarmi in altre prove pratiche eseguite in varie zone di Arezzo, ciascuna con caratteristiche e problematiche differenti ai fini del rilievo.

Dal 24 settembre al 2 ottobre ho eseguito i test su:

- tratti di mura della scalinata da Porta Stufi alla Passeggiata del Prato;
- tratto di mura della Fortezza Medicea;
- resti di mura romane adiacenti la Fortezza,
- abside della chiesa di S. Mustiola in località Pieve a Quarto (paragrafi seguenti).

In tutti i casi i modelli tridimensionali sono stati ricostruiti solo in scala, non georiferiti, perché in quel momento l'interesse era rivolto all'apprendimento della tecnica di presa e all'uso del software. In ogni caso c'è sempre la possibilità di georiferire ciascun modello in un secondo momento inserendo i punti di controllo (GCP).

5.3.2.1 MURA DELLA SCALINATA CHE PORTA AL PRATO

Per le prime prove si è scelto un breve tratto delle mura che da Porta Stufi salgono fino alla

Passeggiata al Prato I test condotti su questo tratto di mura sono stati finalizzati a valutare se sia meglio scattare le foto mantenendo l'orizzontalità delle strisciate o piuttosto seguire il naturale pendio del terreno.

Sono stati realizzati 3 sessioni di scatti a mano libera di cui due seguendo l'andamento della scalinata ed uno mantenendo la strisciata suborizzontale.

SET 01 → 22 foto, distanza di presa 3,5m. strisciate secondo la pendenza del terreno. Modello scalato in metri, passo di ricostruzione 10 con GSD=0,01m. Punti=649.351; tempo di elaborazione: 23minuti.

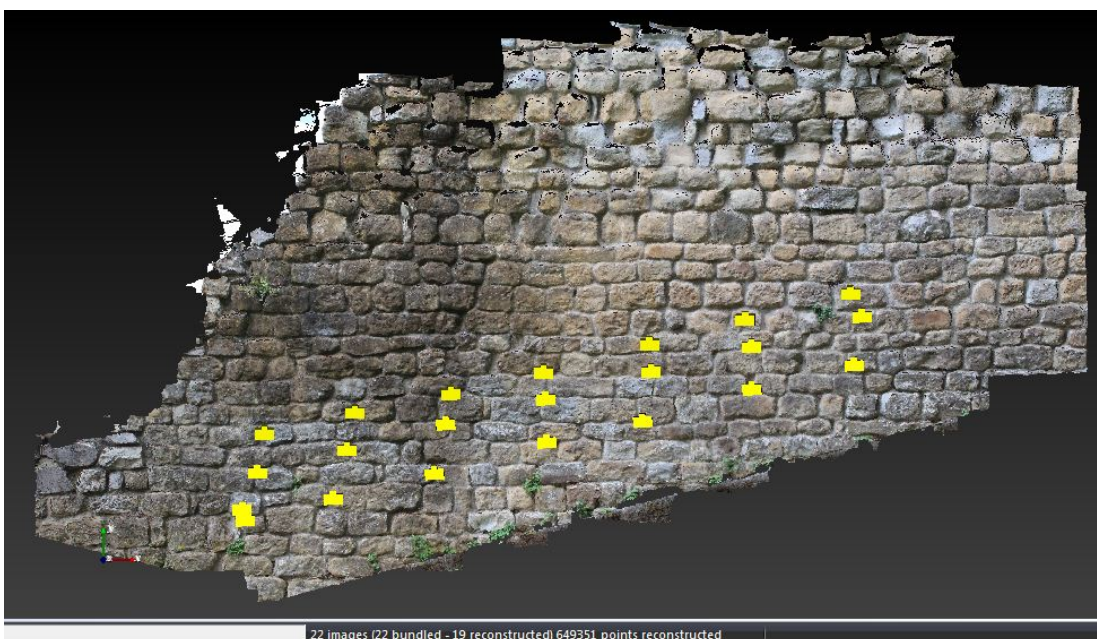


Figura 5.23 - Set 1: ricostruzione di un tratto delle mura della scalinata verso Porta Stufi.

- SET 02 → 23 foto, distanza di presa 2,5m; strisciate secondo l'andamento del terreno. Modello scalato in metri, ricostruzione passo 10 con GSD=0,01m. Punti=511.062; tempo di elaborazione: 23 minuti.



Figura 5.24 - Set 2: ricostruzione di un tratto di mura della scalinata verso Porta Stufi

- SET 03 → 23 foto, distanza di presa 2,0 m; strisciate suborizzontali.
Modello scalato in metri, ricostruzione passo 8 con GSD<0,01 m
Punti=518.530; Tempo di elaborazione: 8 minuti

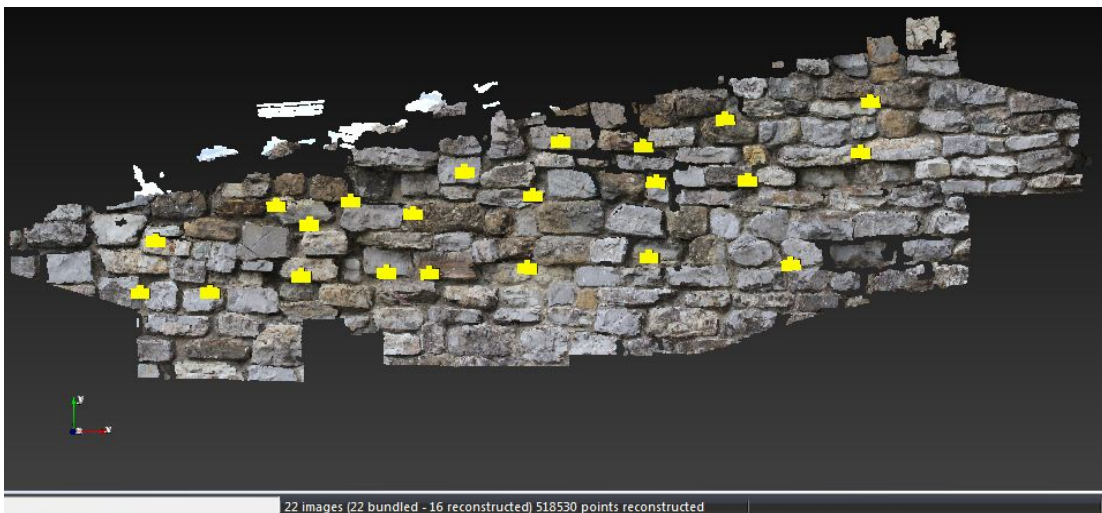


Figura 5.25 - Set 3: ricostruzione di un tratto delle mura verso Porta Stufi

Questi test sono stati utili per comprendere in modo pratico come muovermi nel caso di terreno con pendenza (come nella Zona C di Amelia): sicuramente la considerazione risultante è quella di assecondare l'andamento del terreno.

5.3.2.2 MURA DELLA FORTEZZA MEDICEA

Caratteristica di questo rilievo è l'estensione. Per superare questo problema basta scomporre il rilievo in blocchi più piccoli che possono essere riuniti nell'ambiente CAD di Z-Map. Sono state eseguite tre sessioni di scatti per un totale di 159 foto in un'ora e trenta, distanza di presa 5÷5,50m. Le due elaborazioni hanno richiesto circa trenta minuti ciascuna (Figura 6.25).

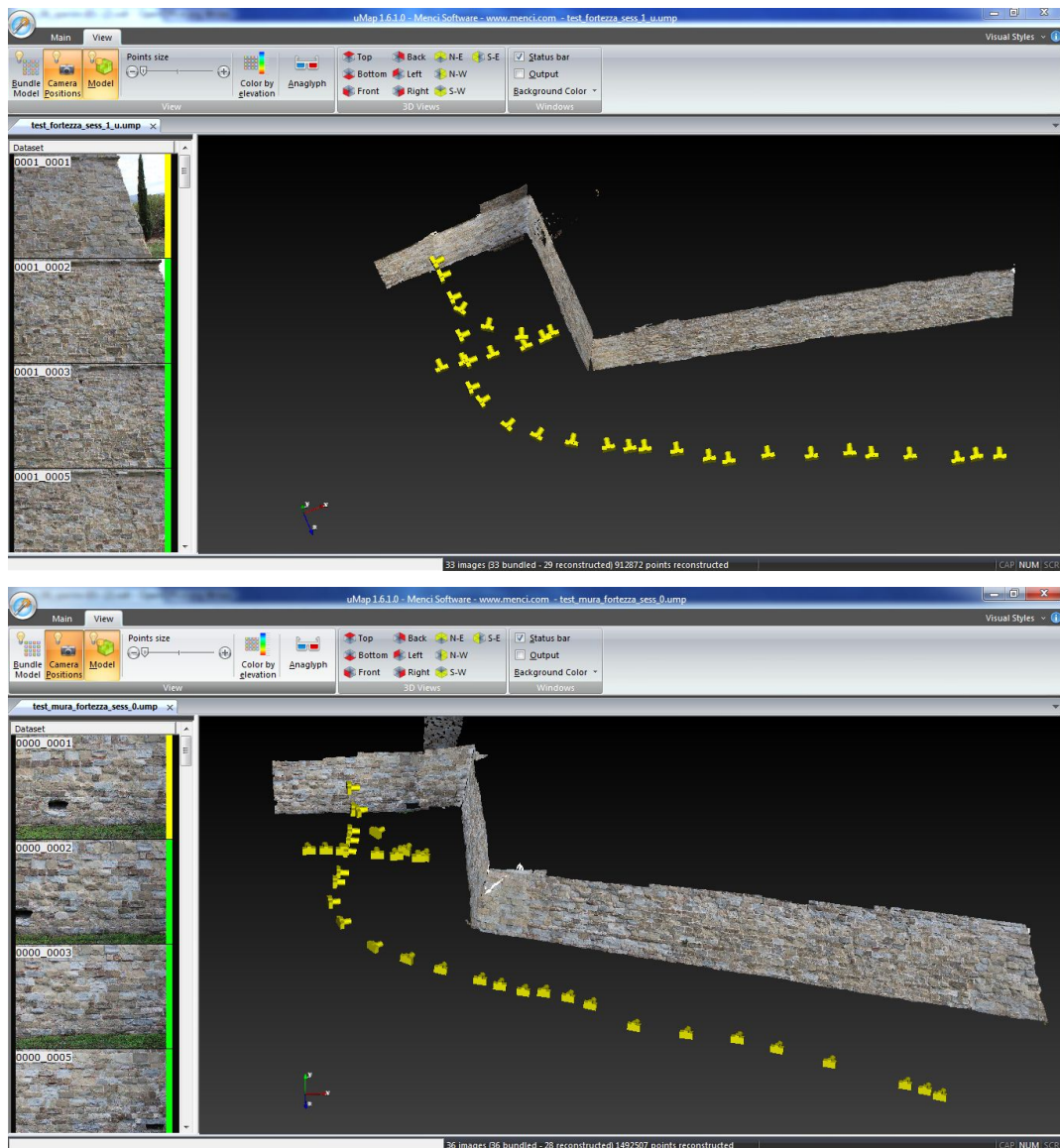


Figura 5.26 - Ricostruzione della parte superiore delle mura della Fortezza Medicea (in alto) e ricostruzione della parte inferiore delle stesse (in basso).

5.3.2.3 RESTI ROMANI ADIACENTI LA FORTEZZA

Nei pressi della Fortezza Medicea si trovano i resti di antiche mura di epoca romana, il 24 settembre sono state scelte come oggetto di un'altra prova pratica

Questo rilievo rispetto ai test precedenti è caratterizzato da distanza di presa variabile, ma comunque molto ravvicinata (in alcuni tratti meno di 2m), presenza di angoli e variazioni di quota.

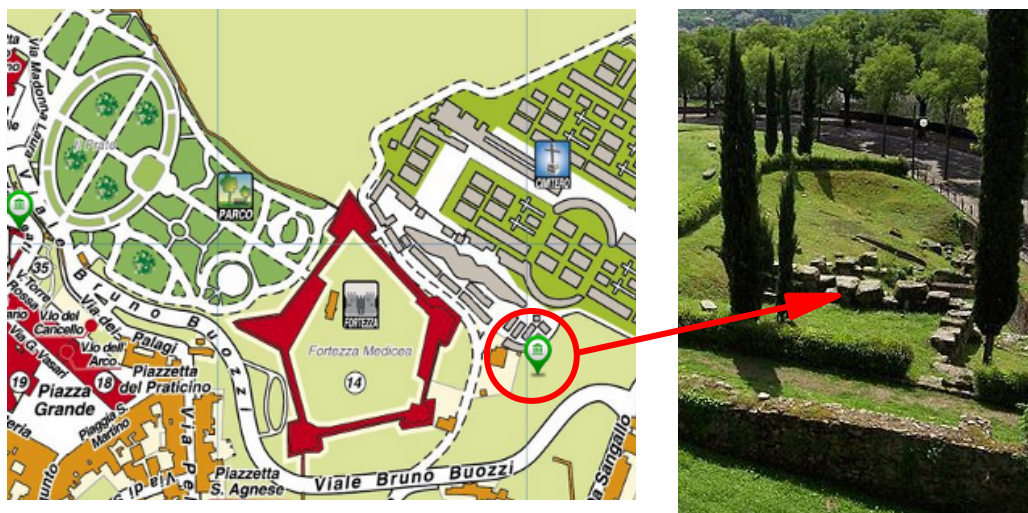


Figura 5.27 - Posizione dei resti delle mura romane rispetto alla Fortezza.

Sono stati apposti dei marker in modo da coprire omogeneamente l'area da riprendere ed è stata presa una misura significativa tra due di questi punti di riferimento per poter scalare il modello ricostruito.

Le immagini sono state scattate tramite il tablet, ovvero attraverso il software Evo Capture. Questo ha assicurato la sovrapposizione tra le immagini dell'80% in orizzontale e di circa il 60% in verticale.

Dalla sessione fotografica sono state acquisite 144 foto che sono state importate in blocco in un unico progetto.

Il numero ridondante di foto, sebbene possa rallentare i tempi di elaborazione, avvantaggia il riconoscimento dei punti in comune tra le immagini (*image matching*).

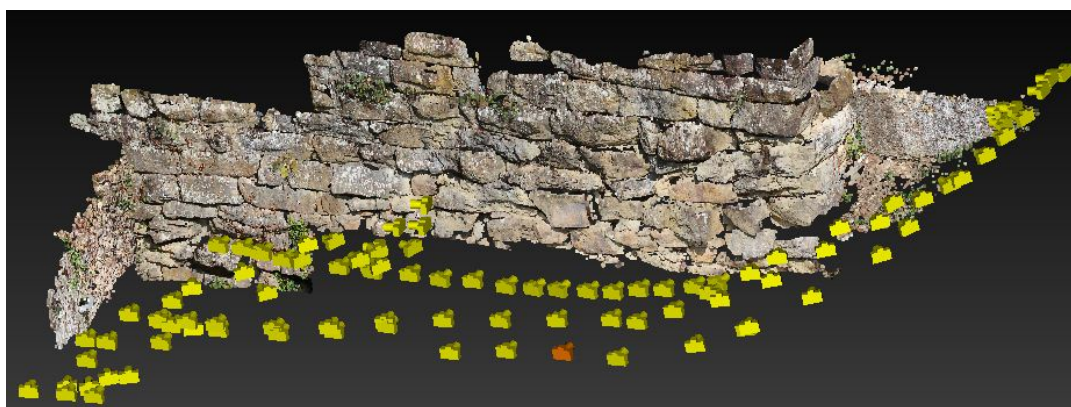


Figura 5.28 - Posizione dei centri di presa ricostruiti al termine del bundle.

In fase di elaborazione il software U-Map ha impiegato circa 40 minuti per eseguire le tre fasi del processo di bundle (*finding feature, image matching, bundle adjustment*) in cui sono stati individuati 54806 *tie points* (Figura 5.28).



Figura 5.29 - Bundle del blocco di 144 foto. L'area delle mura è estremamente densa.

Al termine del bundle il modello è stato scalato inserendo come GCP (*Ground Control Points*) la distanza tra due marker.

Per la ricostruzione si è scelto un passo 10. Sicuramente è eccessivo per il tipo di rilievo in quanto produce una nuvola molto densa: più di 2.400.000 punti ricostruiti in 3 ore di elaborazione. L'output è una nuvola che per la sua densità sembra la ricostruzione di una superficie. Bisogna zoomarla molto per individuarne i punti (Figure 6.29 e 6.30).



Figura 6.30 - Dettaglio ingrandito della nuvola. Notare l'importanza dell'RGB originario.



Figura 5.31 - Zoom sui punti della nuvola

5.3.2.4 ABSIDE DI S. MUSTIOLA

Questo test è stato particolarmente problematico per le condizioni dell'area di pertinenza dell'abside: la presenza di ulivi vincola la distanza di presa che deve essere adattata alla lunghezza minore, la breve distanza di presa fa sì che per riprendere tutta l'abside servano molte foto ed è necessario estendere al massimo l'asta su cui è montata la fotocamera. Ulteriore ostacolo è rappresentato dai cavi elettrici che attraversano il campo del rilievo (Figura 5.32) e che in alcuni punti hanno condizionato la posizione di presa con l'asta completamente alzata



Figura 5.32 - Area adiacente l'abside della chiesa di S. Mustiola

Per la ricostruzione sono state importate 107 foto scattate con obiettivo 20mm ad una distanza di presa di circa 6 metri. La ricostruzione a passo 15 ha richiesto circa 40 minuti ed ha prodotto una nuvola di 636.179 punti.

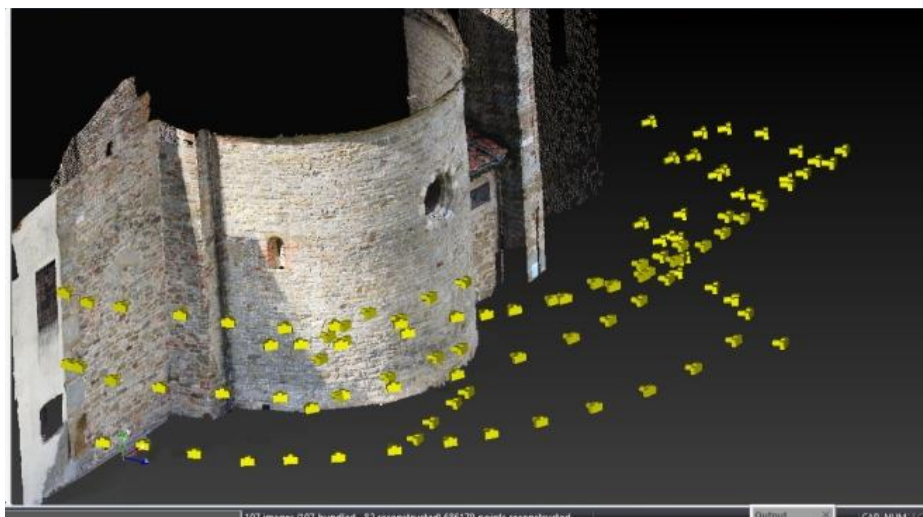


Figura 5.33: Ricostruzione dell'abside di S. Mustiola a Pieve a Quarto (Ar)

5.3.2.5 PRODOTTI DELLE ELABORAZIONI

In definitiva, le varie elaborazioni eseguite con i software sopra descritti portano ad ottenere

- Da U-Map si ottiene la nuvola → modello 3d
Plus: nuvola con RGB originario ⇒ non c'è bisogno di "rivestire" la nuvola
 - Da Zmap: ambiente Cad che consente di elaborare le nuvole di punti si possono generare
 - DEM
 - Ortofoto
 - Ortofotomosaico
- } Uso metrico delle immagini
- Brevetto Menci per il taglio delle foto nel mosaico

5.4 RILIEVO DELLE MURA DI AMELIA

Durante il periodo delle applicazioni pratiche (sia sul campo, sia in sede per le elaborazioni con U-Map e Z-Map), ho acquisito le competenze basilari per poter eseguire autonomamente i rilievi ad Amelia.

Per quanto riguarda la strumentazione, durante le sessioni fotografiche per i rilievi delle mura ho rinunciato all'uso del tablet e ai programmi Evo Capture ed Evo Check → solo asta +

fotocamera come specificato in precedenza.

In particolare ho applicato l'innovativa tecnica Evo alle zone A, C ed E, Porta Romana compresa.

Nel corso dei numerosi rilievi ad Amelia ho potuto mettere alla prova il software U-Map sia con blocchi di foto molto corposi (>100), sia con foto che non rispettavano rigorosamente i criteri della presa fotogrammetrica o i principi della stereoscopia (in alcune foto si hanno variazioni di scala piuttosto che di base), ciononostante ho sempre ottenuto ricostruzioni tridimensionali di qualità.

Della tre zone: A, C, E, ho approfondito le elaborazioni della zona A di cui era disponibile una maggiore quantità di elaborazioni precedenti. .

5.4.1 ZONA A

L'area è caratterizzata da prese normali e prese inclinate effettuate dal marciapiedi che fiancheggia la strada parallela alle mura stesse.

Lunghezza 40m × 10,50m di altezza.

Le prese: distanza di presa 6,5 ÷ 10,5m.

Per questo modello sono state utilizzate 87 foto.



Figura 5.34 - Zona A

GSD=1,17 ÷ 1,88mm ; **ricostruzione**=step 10= 0,01 ÷ 0,02m → nuvola densa

Tempi: il rilievo di questa zona ha richiesto 45minuti. L'elaborazione è durata meno di due ore per avere una nuvola molto densa: 1.876.865 punti.

Problematiche:

- Luci-ombre molto marcate sin dal mattino per via della posizione e dell'andamento delle mura. I pini a bordo strada proiettano le loro ombre marcate sulle mura per tutto il pomeriggio (Figura 6.34). La condizione ideale per le prese è quella di cielo coperto, con illuminazione diffusa.



Figura 5.35 - Ombre sulle mura creano problemi alla ricostruzione

- Le foto sono scattate dalla strada, a metà altezza del paramento murario. Per via di questa posizione molte prese sono state effettuate con inclinazione rilevante: all'incirca 30° (Figura 5.36).



Figura 5.36 - Vista delle posizioni della camera in ciascun fotogramma

- Distanza di presa variabile ma obbligata dal contesto (Figura 6.36).

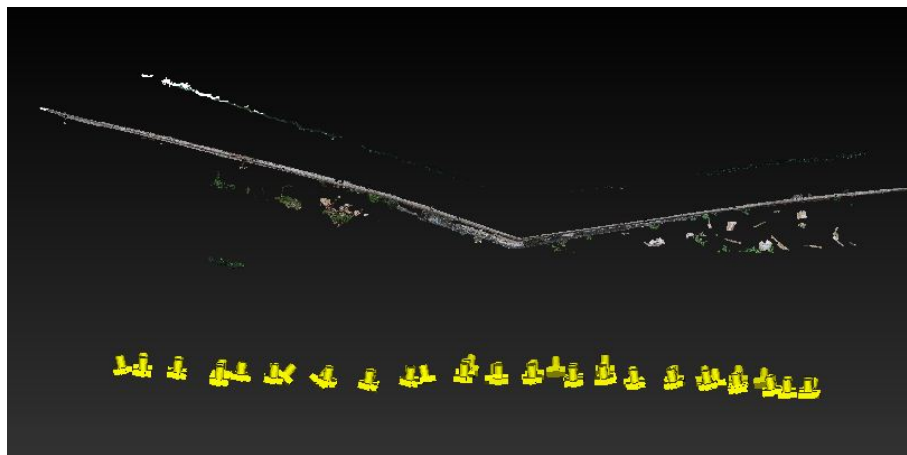


Figura 5.37 - Distanza di presa in una vista dall'alto della ricostruzione

Progetto: il modello della zona A è stato ricostruito in un'unica elaborazione, non c'è stato bisogno di suddividerlo in aree più piccole da unire successivamente in Z-Map. Anche questo modello è stato georiferito.

5.4.1.1 FASI DELLA RICOSTRUZIONE

Il flusso di lavoro per la ricostruzione della nuvola di punti con il software U-Map è sequenziale, le icone sulla toolbar si attivano solo quando l'azione precedente si è conclusa.

- **IMPORTAZIONE:** si selezionano le foto migliori tra quelle scattate durante la sessione di rilievo, ne sono state importate 87. Terminata l'importazione si accende l'icona del bundle.
- **BUNDLE:** la fase di bundle è quella in cui vengono legate le foto tramite l'*image matching*. Riconosciuti e collimati i punti comuni si ottiene la ricostruzione di tutti i centri di presa. Per questo processo il software ha impiegato poco meno di 20 minuti ed ha individuato 65.564 *tie points*.
- **GCP:** ricostruito l'orientamento esterno di ciascun fotogramma è possibile inserire i punti di controllo per scalare e georiferire il modello. Per la zona A sono stati utilizzati come GCP dei punti ben riconoscibili sulle mura rilevati con una stazione totale.

Importato il file txt con il nome e le coordinate dei punti questi vengono collimati sulle immagini. Individuato il punto in un'immagine, il software riconosce automaticamente lo stesso punto sulle altre foto. La collimazione può essere rifinita manualmente. Al termine della collimazione si avvia il calcolo dei residui. Se i valori sono ritenuti accettabili si passa alla ricostruzione, altrimenti si può scartare il punto coi residui maggiori e ripetere il calcolo fino ad un valore dei residui ritenuto accettabile. Servono almeno 5 punti per poter georiferire il modello.

- **RICOSTRUZIONE:** dopo aver inserito i GCP, i punti estratti al termine del bundle vengono processati per la ricostruzione. Il passaggio fondamentale per stabilire la densità della nuvola è la scelta del passo di ricostruzione in funzione del GSD (*Ground Sample Distance*=dimensione del pixel a terra).

Meno densa è la ricostruzione richiesta più è veloce la ricostruzione, viceversa al diminuire dello step di ricostruzione si avrà una nuvola più densa che però richiede

tempi di elaborazione più lunghi.

- **MODELLO 3D:** l'output della ricostruzione è una nuvola di punti con l'RGB estratto direttamente dalle immagini. Tale modello è navigabile e fornisce informazioni metriche. Possibile effettuare diverse viste del modello, compresa quella anaglifica.

La nuvola ottenuta con U-Map può essere elaborata con Z-Map per estrarne i principali prodotti fotogrammetrici: DEM, profili, ortofoto e ortomosici.

5.4.1.2 DEM E SEZIONI

Il DEM (*Digital Elevation Model*) è una rappresentazione cromo-altimetrica raster delle quote di una superficie. In ZMap può essere generato da immagini, da un insieme di entità CAD poste in quote diverse o da modelli 3d, dopo aver definito un UCS e averlo posto come corrente.

Il modello 3D ottenuto dall'elaborazione delle immagini con U-Map viene importato nel software preposto all'elaborazione delle nuvole di punti: Z-Map.

Il modello 3D ottenuto con U-Map è stato rototraslato su una nuvola di punti generata da laser scanner Topcon GLS 1000 nel 2009 (vedi tesi G. Menichelli – 2009). Dal confronto qualitativo è emersa una buona corrispondenza tra i due modelli, le differenze si notano nelle zone dove il raggio laser è più inclinato (punti più radi vs punti uniformi per tutto il modello con EVO), nelle cavità (il raggio laser genera punti fin dove riesce a colpire l'oggetto, con EVO i punti sono ricostruiti fin dove c'è sufficiente illuminazione, le aree con ombre dense non vengono ricostruite) e nelle aree che hanno subito modifiche tra un modello e l'altro (presenza di vegetazione stagionale che nel modello 2009 non c'era, nel 2010 il paramento murario è stato restaurato e sono stati inseriti dei gocciolatoi assenti nel 2009).

Escludendo tali differenze i due DEM sono risultati praticamente sovrapponibili.

Si sono confrontate qualitativamente anche le sezioni effettuate sulla nuvola del laser scanner (v. tesi G. Menichelli – 2009) con quelle realizzate sulla nuvola generata con U-Map. Si è riscontrata anche in questo caso una notevole corrispondenza (vedere Allegato).

5.4.1.3 ORTOFOTO E ORTOMOSAICO

Le ortofoto generate dal DEM consentono di effettuare misurazioni direttamente dalle immagini: la verifica è stata fatta attraverso il confronto tra la misura tra due prismi realizzata da Menichelli e la misura tra gli stessi prismi eseguita sull'ortofoto generata dal DEM di Z-Map.



Figura 5.38 - Ortofoto



Figura 5.39 - Esempio di ortomosaico della zona A

5.4.2 ZONA C

La zona C si trova all'interno dell'attuale centro storico, tra la chiesa di S. Angelo e porta della Valle. In questa zona è presente il tratto di mura più antiche di tutta la cinta amerina.

L'area del rilievo si estende per circa 30m di lunghezza e 8m di altezza. È stata suddivisa in 8 sotto-aree. Gli 8 modelli sono stati poi riuniti in Z-Map.

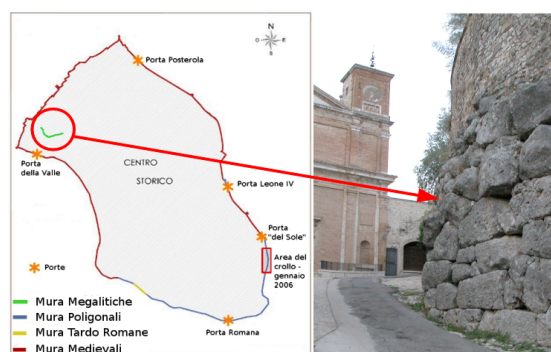


Figura 5.40: posizione della zona C

Le prese: Canon EOS 600D con EF 24mm f 2.8, asta metrica e telecomando, distanza di presa variabile tra 3m ÷ 3,50m.

Il totale delle immagini utilizzate per avere il modello completo è di 794 foto.

GSD= 0,54 ÷ 0,63mm ; **ricostruzione**=step 10 ÷ 15 = 5,4 ÷ 9,4 mm

Tempi: le elaborazioni dei singoli modelli hanno richiesto circa un'ora ciascuno, per l'acquisizione ho eseguito sessioni in giorni diversi, ma ciascuna ha richiesto circa un'ora e mezza.

Problematiche per il rilievo:

- Area molto estesa con distanza di presa ravvicinata per la presenza di un edificio antistante le mura stesse (figura 6.33): 3m→ dal rapporto distanza/estensione del soggetto consegue la necessità di un elevato numero di foto e nonostante l'asta a tutta altezza, per riprendere anche la sommità del muro è stato necessario inclinare la camera di almeno 20°.

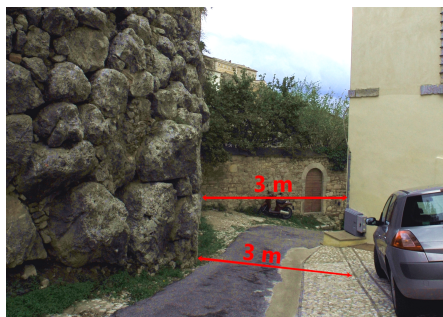


Figura 6.41 - Breve distanza di presa

- Condizioni di luce sfavorevoli hanno condizionato l'esecuzione delle prese: il rilievo è stato eseguito a metà ottobre, periodo in cui per l'esposizione della zona (S-O) l'area risultava tutta in ombra solo dalle 15 e 20 circa, con repentina diminuzione dell'illuminazione ambientale.



Figura 5.42 - Lacune dovute alle ombre

Durante le sessioni di rilievo ho dovuto adeguarmi ai cambiamenti di luce: per ovviare al poco tempo a disposizione per eseguire le prese ho eseguito numerose campagne di rilievo per avere a disposizione un elevato numero di foto tra cui selezionare quelle con esposizione migliore. L'area verso porta della Valle è quella che viene ripresa per ultima e, per la bassa esposizione, le ombre marcate tendono a creare delle lacune nella ricostruzione.

- Presenza di vegetazione sulle mura crea delle lacune ben visibili nella ricostruzione del modello tridimensionale (Figura6.). Il software ha difficoltà a ricostruirla perché tra uno scatto e l'altro le foglie subiscono spostamenti per effetto del vento (che in quell'area è molto forte) e in alcuni casi presentano anche un effetto di riflessione che crea disturbo alla ricostruzione (come le superfici riflettenti quali pavimenti lucidi, vetri, ecc.)

Progetto: Il modello è georiferito in un sistema di riferimento locale.



Figura 5.43 - Modello 3D della zona C (Z-Map).

5.4.3 ZONA E CON PORTA ROMANA

Questa è l'area più estesa fra tutti i rilievi da me eseguiti: si tratta delle mura poligonali che si estendono ad ovest di porta Romana per oltre trenta metri .

L'area si estende per più di 40m in lunghezza con altezza variabile tra i 6 e i 15m. Come per la Zona C, anche qui è stato necessario parzializzare la ricostruzione. Sono stati creati e poi uniti 11 modelli.

Le prese: con Canon EOS 600D con EF 24mm f 2.8, asta metrica e telecomando; distanza di presa variabile: dai 4,50÷20m. Questo rilievo rappresenta indubbiamente un caso estremo per il software U-Map.

Per l'intero modello sono state utilizzate più di 900 immagini.

GSD= 0,81÷3,59mm ; **ricostruzione**=step 10= 8÷36mm

Tempi: questo è un caso complesso per cui i singoli modelli hanno richiesto tempi di elaborazione molto variabili: dai 30 minuti alle 2 ore e 30 minuti. In un test è stato ricostruito il modello di Porta Romana con sole 10 foto ed un'elaborazione durata pochi minuti

Problematiche:

- Porta Romana presenta diverse difficoltà per presa delle foto: ha dimensioni notevoli (alta circa 15m), si trova in un'area cruciale per il traffico cittadino (in una sessione fotografica è servito l'aiuto dei vigili per non creare intralcio al traffico). Nonostante la possibilità di estendere l'asta fino a 5m è stato necessario inclinare la fotocamera (con tutte le implicazioni che questo comporta: presa non normale, viste scorciate creano zone in ombra,ecc.)
- l'esposizione a sud condiziona le prese, in particolare la combinazione luce-ombra. L'orario migliore per avere ombre accettabili, sebbene a volte fossero comunque

marcate, coincideva con l'ora di punta per il traffico: 12,00 ÷ 14,00.

- Distanze di presa molto differenti per coprire tutta l'area: un range così ampio è dovuto a molti fattori che hanno messo a dura prova il software per la ricostruzione: superfici senza rilevanti differenze cromatiche (muri con intonaco), superfici riflettenti (vetri delle finestre), elementi sottili e traforati (come la ringhiera del balcone, questo ha causato la lacuna più grande nel modello, come mostrato in figura 5.44)



Figura 5.44 - Lacune nella ricostruzione per la presenza di elementi sottili e traforati

Progetto: il modello è scalato e georiferito in un sistema di riferimento locale.



Figura 5.45 - Ricostruzione della zona E e dell'area di Porta Romana e dettagli dei modelli

CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è voluta testare una nuova tecnica di fotogrammetria non convenzionale applicata ad un caso già analizzato in precedenti sperimentazioni e riguardano le mura megalitiche di Amelia.

Il modello 3D ricostruito con il programma Zscan EVO della Menci Software ha dato risultati molto soddisfacenti: sia in termini di qualità dei prodotti ottenuti dalle elaborazioni (confrontati qualitativamente con quelli di precedenti sperimentazioni eseguite nell'ambito del progetto di monitoraggio delle mura di Amelia a cura del Laboratorio di Topografia) sia in termini di rapidità, semplicità e automazione delle varie fasi di lavoro.

Considerate le criticità relative a ciascuna area di cui è stato effettuato il rilievo ed il fatto che io stessa ho eseguito l'acquisizione dei dati e le elaborazioni in modo autonomo e senza aver mai avuto una precedente esperienza in questo ambito, Z-Scan EVO ha evidenziato tutta la forza innovativa di questa tecnica.

- Confronto tra la tecnica LIDAR e Z-Scan EVO -

Il Laser Scanner può essere utilizzato per eseguire rilievi anche a grandi distanze ed in qualunque condizione di luce, anzi al buio il raggio laser ha il massimo della resa. Per contro è uno strumento molto costoso (ordine di prezzo attorno ai 100.000 euro) e richiede grandi competenze tecniche per l'utilizzo, soprattutto in fase di post processing.

Le foto alla base della tecnica EVO, invece, devono essere acquisite in modo da rispettare diverse condizioni:

- è preferibile un'illuminazione diffusa, es. con cielo coperto,
- evitare ombre marcate o zone in luce e altre in ombre,
- condizioni di illuminazione costanti tra una foto e l'altra o tra una sessione e l'altra per non avere problemi durante la ricostruzione (il software non identifica un punto come omologo se questo è illuminato in modo diverso in foto diverse) oppure per non avere discromie quando si deve ricomporre un modello che è stato suddiviso in modelli più piccoli e facilmente gestibili. Questo caso si è presentato in un modello della zona E, ovvero il tratto di mura adiacente a Porta Romana: sulla stessa parete si hanno colori differenti perché è stata ripresa da sessioni fotografiche scattate in momenti diversi.

Il metodo Evo ha però il vantaggio di essere un sistema decisamente economico (il costo del kit completo e del software di elaborazione si aggira sui 6.000 euro) e non richiede grandi

competenze tecniche se non le conoscenze basilari della fotogrammetria visto che il sistema è quasi completamente automatizzato in fase di elaborazione.

Dunque la nuvola generata con il sistema EVO è sicuramente paragonabile alla nuvola del Laser scanner in termini di risoluzione e accuratezza, con il vantaggio di avere un modello con RGB nativo (non c'è bisogno di un passaggio successivo per "rivestire" la nuvola come accade per alcuni modelli di Laser Scanner).

È stato possibile ottenere ortofoto di grande dettaglio.

Le due tecniche, però, non possono essere considerate una alternativa all'altra: entrambe presentano dei punti di forza e dei limiti per cui l'optimum sarebbe utilizzarle in sinergia come tecniche complementari, in questo modo si può avere il meglio di ciascuna tecnica a tutto vantaggio della qualità e della completezza del rilievo e della presentazione degli elaborati.

CAPITOLO 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] - Comune di Amelia: www.comune.amelia.it - ultima consultazione il 18-12-2012;
- [2] - Franco Della Rosa, "Muratura in opera poligonale - Opus antiquum", 2002, Gruppo Ricerca Fotografica sito: www.grupporicercafotografica.it ;
- [3] - www.amelia.it - ultima consultazione il 18-12-2012;
- [4] - Marco Tomassini, Christian Servi, *Considerazioni sul crollo delle mura ciclopiche - la ferita di Amelia*, in INGENIUM, gennaio-marzo 2006;
- [5] - Università degli Studi di Perugia DICA - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale; *Utilizzo di Metodologie innovative per l'acquisizione e l'approfondimento di conoscenze tecnico-scientifiche sullo stato della cinta muraria di Amelia*, Relazione Tecnica, 2007;
- [6] - Università degli Studi di Perugia DICA - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale Laboratorio di Topografia, Attività di monitoraggio integrative (2009-2011), Relazione tecnica, 2012;
- [7] - Raffaella Brigante, Donatella Dominici, Guido Fastellini, Fabio Radicioni, Aurelio Stoppini, *Confronto e integrazione fra tecniche geomatiche per la documentazione e il monitoraggio dei beni culturali*, 2009, Convegno Nazionale ASITA;
- [8] - Francesco Guerra, Luca Pilot, Paolo Vernier , *Fotogrammetria e Laser Scanning: alternativa?*, 2004, Università IUAV di Venezia - CIRCE Laboratorio di Fotogrammetria, sito web: www.iuav.it/SISTEMA-DE/Laboratori2/laboratori/pubblicazi/precedenti/2004_fotogrammetria.pdf
- [9] - Valentina Gagliardini, *Modellazione 3d di cumuli di materiale sciolto con l'utilizzo di sistemi LIDAR: stima delle grandezze geometriche e della loro indeterminazione*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Perugia, Facoltà di Ingegneria, A.A 2010- 2011;
- [10] - L. Bornaz, *La Tecnica del Laser Scanning Terrestre* , 2004, dal sito web: [http://circe.iuav.it/labfot/Adami/TOPO/Materiali/l%20sistemi%20a%20scanione%20laser%20\(L.Bornaz\).pdf](http://circe.iuav.it/labfot/Adami/TOPO/Materiali/l%20sistemi%20a%20scanione%20laser%20(L.Bornaz).pdf)
- [11] - Prof. M. Campi, Arch. V. Cappellini, "Metodologie innovative per il rilievo architettonico: lo scanner laser I" , dal sito web: www.federica.unina.it/architettura/rilievo-

[12] - Scheda tecnica laser scanner RIEGL LMS-Z420i.

Sito internet: <http://www.microgeo.it/Laser-scanner/pdf/LMS-Z420i.pdf>

[13] - Radicioni Fabio, Brigante Raffaella, "*Appunti di fotogrammetria digitale*", Dispense del corso di metodologie topografiche per l'ingegneria, Università degli studi di Perugia, Facoltà di Ingegneria A.A. 2007-2008;

[14] - Gianmarco Lazzeri, sito web: <https://sites.google.com/site/gianmarcolazzeri/clients>

[15] - Arch. Manfredo Romeo, "*Architettura digitale-tecnologie ed applicazioni informatiche per l'architettura*", Università di Firenze, facoltà di architettura, General Engineering div.di a.b.c. s.a.s., edizione n°02, Piazzale Donatello 4 - 50132 Firenze , 26/02/02;

[16] - Marco Bianchini, "*Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*", Ed. Aracne – 2008, dal sito web: www.rilievoarcheologico.it - ultimo aggiornamento 04/2012;

[17] - Andrea Piemonte, Facoltà di Architettura-Università degli studi di Trieste, 2012, sito web: www.dic.unipi.it/andrea.piemonte/.../081110%20Fotogrammetria.ppt

[18] – <http://it.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetria> , ultima visita 10/11/12;

[19] - Paolo Clini, "*Il rilievo dell'architettura*", 2008, Alinea Editrice, Firenze, via Pierluigi da Palestrina, 17-19.. ISBN:978-88-6055-291-4

[20] - Davide Emmolo, "*I Nuovi Sensori Digitali Aviotrasportati*", 2008, Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche XIX Ciclo, Università degli Studi di Napoli "Parthenope",

[21] - Mario Fondelli, "*Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*", 1992, Editori Laterza, prima edizione;

[22] – <http://www.tridmetrix.com/metriccamnote.htm>

[23] - Principi di Fotogrammetria dal sito web: <http://www.lbalberti.it/public/AS2011-2012/classi/5AETA/Varie/Principi%20fotogrammetria%201.pdf>

[24] - Valentina Aprile, Elisa Bartolini, Mattia De Agostino, "*Relazione sulla restituzione fotogrammetrica del portale della basilica di Sant'Andrea in Vercelli*", 2005, seconda facoltà di ingegneria-sede in Vercelli, Politecnico di Torino;

[25] - Alfonso Tortora, Tesi di Laurea "Fotogrammetria numerica ed elaborazione di immagini per produzione di cartografia tematica forestale" dal sito: www.web.tiscali.it/alfonsotortora/TESI_alf.htm

[26] Prof. Anna Spalla, Dispense del corso "*Geomatica e GIS - Fotogrammetria digitale*", Università di Pavia - Facoltà di Ingegneria,

- [27] - Francesco Di Lauro – tesi di laurea dal sito web:
<http://rilievo.stereofot.it/studenti/tesi/diLauro/corso/tesi/fotogrammetria.html>
- [28] - Federica Migliaccio, "Topografia e Geomatica", 2009, Università di torini – Facoltà di Agraria, dal sito web:
<http://www.dispenseagrariatorino.it/forestale/difesadelsuolo/difesadelsuolo1livello/2anno/topografiaegeomatca/Fotogrammetria/bozza.file.pdf>
- [29] – <http://ww2.unime.it/ingegneria/new/materiale/fotogrammetria.doc>
- [30] - Arash Beikjzani, "La fotogrammetria digitale nel rilievo dell'architettura", 2008, Università degli studi di Perugia - Facoltà di ingegneria;
- [31] - Angelo Marzocca, "*Il rilevamento fotogrammetrico dell'architettura*", Politecnico di Bari - Dipartimento ICAR, Laboratorio di Fotogrammetria,2009;
- [32] - Balletti - Guerra - Fregonese – Monti , "*Appunti di fotogrammetria*", 2011, CIRCE-IUAV, dal sito web: <http://circe.iuav.it/labfot/Adami/TOPO/Materiali/dispensa%20fotogram.pdf>
- [33] - "il rilievo fotogrammetrico" dal sito web:
http://circe.iuav.it/labfot/LabCons/materiali_lab/rilievo%20fotogrammetrico.pdf
- [34] - Gaetano Ciaramella, "*La tecnica fotogrammetrica d'archivio per l'analisi delle variazioni multi temporali superficiali di corpi franosi*", Università di Bologna - Ing. per l'ambiente ed il territorio, A.A.2007-2008,
- [35] - "*come si forma l'immagine digitale*", dal sito web:
[www.fototue.it/wiki/Come si forma l'immagine digitale](http://www.fototue.it/wiki/Come_si_forma_l'immagine_digitale) , ultima visita 21-12-12;
- [36] - Carlo Jacobs, "*scene, immagini analogiche e immagini digitali*", 2004, dal sito web: www.arch.unipi.it/jacob/ebook/cap1.pdf ;
- [37] - Riccardo Galetto, "CAMERE DIGITALI PER RIPRESE AEREE E TERRESTRI", Dipartimento di Ingegneria Edile e del Territorio – Università di Pavia , 2007;
- [38] - Valentina Alena Girelli, "*Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*", Dottorato di ricerca in SCIENZE GEODETICHE E TOPOGRAFICHE , Università di Bologna, 2007;
- [39] - "Fotografia: analogico vs digitale", dal sito web:
http://www.teclab.lu.usi.ch/medina/courses/cm09/group3/pages/poc.php?ID_POC=32&ID_Lang=1&ID_PathWay=5 consultato il 28-11-2012;
- [40] - Paolo Vernier, "*Le immagini digitale*", IUAV- Università di Venezia, 31-03-2010;
- [41] - Umberto Castellani, "*Lezione 6: Immagini digitali (1)*", Informatica Multimediale", dal sito web: http://profs.sci.univr.it/~castella/StrumentiGiornalisti/Lez06_El_1.pdf ;

[42] - Debora Caldarelli, " ZSCAN EVO: uno strumento innovativo per il rilievo 3d in archeologia", Master Universitario di II livello in sistemi informativi territoriali e telerilevamento(SITT), A.A 2010-2011;

[43] - Virtual Heritage lab - CNR, "Fotomodellazione", dal sito web: http://www.vhlab.itabc.cnr.it/Tech_Fotomodellazione.htm , ultima visita: 12-01-13;

[44] - Maria Cristina Manzetti, "La modellazione 3d applicata ai beni archeologici attraverso la fotogrammetria", Master Universitario di II Livello in Geotecnologie per l'Archeologia GTARC, A.A. 2010-2011;

[45] - "Nuove tecnologie per la conoscenza e la comunicazione di Lucca romana" Archeologia e Calcolatori n21, 2010, pp 49-73, dal sito web: www.menci.com ,

[46] - www.menci.com

[47] - <http://pensieriarte.wordpress.com/2010/02/21/corso-di-fotografia-2-analogico-vs-digitale-parte-1/>

[48] - <http://www.appuntidigitali.it/5934/strumenti-di-cattura-delle-immagini-introduzione-ai-sensori-digitali/>

[49] - Giuseppe Nardella - "corso fotografico - il sensore", Circolo Fotografico Sarzanese, 31-08-2011

[50] - Massimo Borri, "Il sensore digitale", dal sito web: http://digilander.libero.it/wgiocoso/sito/tavole/.../sensori_ccd_cmos.htm

[51] - Francesco Pignatelli, "Compatte di FujiFilm, Nikon, Olympus e Sony: sensori BSI e CMOS a confronto", del 13-04-2012, dal sito web: <http://www.tomshw.it/cont/articolo/compatte-di-fujifilm-nikon-olympus-e-sony-sensori-bsi-e-cmos-a-confronto/36597/1.html>

[52] - Fabio Chigiotti, "Realizzazione di un sistema robusto di calibrazione di fotocamere digitali", Tesi di laurea, Università degli studi di Milano - Facoltà di scienze matematiche, fisiche e naturali corso di laurea in Informatica, A.A. 2003

[53] - http://www.sti-group.it/stigroup_072.htm

Indice generale

LE MURA DI AMELIA	1
1.1 Amelia: cenni storici.....	1
1.2 Le mura e le porte.....	3
1.3 Dal crollo del 2006 ad oggi.....	8
1.3.1 Commissione tecnico-scientifica.....	10
1.3.2 Progetto di monitoraggio del D.I.C.A.....	11
1.3.2.1 Aree sottoposte a monitoraggio.....	12
1.3.2.2 Materializzazione dei vertici.....	15
1.3.2.3 Metodologie di rilievo.....	19
LASER-SCANNING	21
2.1 Caratteristiche generali.....	21
2.2 Il laser scanner.....	22
2.2.1 Tipologie.....	22
2.2.2 Il RIEGL LMS-Z420i.....	24
2.3 Acquisizione dati con RiscanPro.....	26
2.4 Rilievi ad Amelia.....	28
2.4.1 Zona E.....	29
2.4.2 Zona D.....	29
2.5 Elaborazioni con Cyclone.....	29
2.6 Problematiche	32
FOTOGRAMMETRIA TRADIZIONALE.....	33
3.1 Caratteristiche generali.....	33
3.2 Vantaggi rispetto al rilievo diretto.....	35
3.3 Cenni Storici.....	36
3.4 Fasi del processo fotogrammetrico.....	40
3.5 Tipi di fotogrammetria.....	42
3.6 Gli strumenti.....	44
3.6.1 Camere metriche aeree.....	45
3.6.2 Camere metriche terrestri.....	47
3.7 Principi analitici.....	48
3.7.1 La visione stereoscopica.....	49
3.7.1.1 Modello geometrico.....	50
3.7.1.2 Strumenti per la restituzione.....	55
3.7.2 Equazioni di collinearità e restituzione.....	58

3.7.2.1	Caso piano.....	62
3.7.2.2	Caso lineare.....	64
3.7.3	Caso normale	65
3.8	Il fotogramma.....	68
3.8.1	Orientamento.....	70
3.8.1.1	Orientamento interno.....	73
3.8.1.2	Orientamento relativo.....	77
3.8.1.3	Orientamento assoluto.....	81
3.9	La presa.....	83
3.9.1	La presa aerea.....	83
3.9.1.1	Scala del fotogramma e scala della carta.....	86
3.9.1.2	Parametri del volo.....	88
3.9.2	La presa terrestre.....	91
FOTOGRAMMETRIA DIGITALE.....		92
4.1	Caratteristiche generali.....	92
4.2	Gli algoritmi.....	93
4.2.1	Feature extraction e image matching.....	94
4.2.1.1	Area Based Matching (ABM).....	94
4.2.1.2	Feature based matching.....	95
4.2.1.3	Matching "relazionale"	96
4.3	Formazione delle immagini	96
4.3.1	La luce.....	97
4.3.2	Definizioni: bit, byte, pixel.....	97
4.3.3	Le immagini digitali.....	99
4.3.3.1	Immagini raster	101
4.3.3.2	Immagini vettoriali.....	101
4.3.4	Digitalizzazione.....	102
4.3.4.1	Campionamento spaziale.....	102
4.3.4.2	Quantizzazione cromatica.....	102
4.3.5	Caratteristiche delle immagini digitali.....	103
4.3.5.1	Risoluzione geometrica e dimensione.....	103
4.3.5.2	Risoluzione radiometrica o profondità di colore.....	106
4.3.5.3	Contenuto metrico dell'immagine digitale.....	107
4.3.5.4	La compressione delle immagini.....	109
4.3.5.5	Formati delle immagini digitali.....	109
4.3.6	Il colore.....	111
4.3.6.1	Il modello RGB.....	111

4.3.6.2Il modello HSB.....	112
4.3.6.3Il modello CMY.....	113
4.4 Fotocamere digitali.....	113
4.4.1Il sensore.....	114
4.4.1.1Tipologie di sensori.....	115
4.4.2Il sistema ottico (obiettivo).....	118
4.4.2.1Distorsioni.....	119
4.5 Fotogrammetria non convenzionale.....	121
4.5.1Caratteristiche.....	121
4.6 Calibrazione.....	121
4.7 Rilievo fotogrammetrico[53].....	124
4.8 Fotopiani digitali.....	125
SPERIMENTAZIONE e APPLICAZIONI	128
5.1 Introduzione.....	128
5.2 Prodotti della Menci Software.....	129
5.2.1Z-Scan EVO.....	130
5.2.1.1Strumentazione.....	131
5.2.1.2Evo Capture.....	132
5.2.1.3Evo Check.....	133
5.2.1.4U-Map.....	134
5.2.1.5Site Manager.....	135
5.2.2Ricostruzione dei modelli con U-Map.....	136
5.2.2.1Importazione delle foto.....	136
5.2.2.2Bundle.....	137
5.2.2.3Punti di controllo.....	137
5.2.2.4 Dimensione del pixel a terra.....	138
5.2.3Z-Map Photo.....	141
5.2.4(Basi di) Z-Map.....	143
5.2.4.1Digital Elevation Model (dem).....	144
5.2.4.2Ortofoto e ortomosaico.....	144
5.3La "formazione" alla menci software.....	145
5.3.1Formazione teorica.....	146
5.3.2Formazione pratica.....	146
5.3.2.1Mura della scalinata che porta al prato.....	147
5.3.2.2Mura della Fortezza Medicea.....	149
5.3.2.3Resti romani adiacenti la fortezza.....	150
5.3.2.4Abside di S. Mustiola.....	153

5.3.2.5Prodotti delle elaborazioni.....	154
5.4Rilievo delle mura di Amelia.....	154
5.4.1Zona A.....	155
5.4.1.1Fasi della ricostruzione	157
5.4.1.2Dem e sezioni.....	158
5.4.1.3Ortofoto e ortomosaico.....	158
5.4.2Zona C.....	159
5.4.3Zona E con Porta Romana.....	161
CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI.....	165
BIBLIOGRAFIA.....	167