

Fotogrammetria Monoscopica

Definizioni generali:

La fotogrammetria è l'insieme dei processi di utilizzazione delle prospettive fotografiche centrali nella formazione di cartografie topografiche e nella documentazione architettonica. E' dunque l'arte e la scienza per rilevare e misurare oggetti per mezzo di immagini.

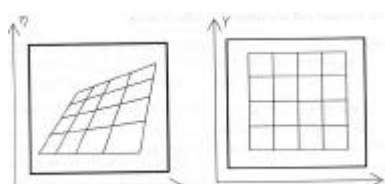
Tale materia si divide in due grandi branche: la fotogrammetria aerea e la fotogrammetria terrestre. Per la prima, detta anche fotogrammetria dei lontani, gli oggetti sono situati ad una distanza maggiore di 300 metri e per la seconda o fotogrammetria dei vicini (*close range*) gli oggetti interessati risultano ad una distanza inferiore a 300 metri circa.

Operare in questo settore significa eseguire indagini quantitative e qualitative sull'oggetto fotografato; i risultati delle misure fotogrammetriche possono essere numeri, disegni o immagini, tecnicamente dette coordinate, carte o ortofotoproiezioni. La fotogrammetria consente la ricostruzione degli oggetti e la determinazione di alcune loro caratteristiche senza richiedere il contatto fisico con gli stessi, consentendo la realizzazione di rappresentazioni grafiche in scala dell'oggetto esaminato.

Georeferenziazione di una immagine digitale:

Per qualsiasi operazione di misura o calcolo relativi ad una immagine digitale è necessario conoscere in maniera più o meno approssimata il rapporto di scala pixel-oggetto.

Questo risultato teoricamente si può ottenere mediante un calcolo basato sulla conoscenza dei sei parametri di orientamento assoluto della presa (coordinate x,y,z del centro del fotogramma e angoli di rotazione ω, ϕ, κ) oppure più frequentemente tramite la georeferenziazione dell'immagine digitale. Il termine georeferenziazione prende nome dal



*Fig. 1 – Raddrizzamento
Prospettico*

neologismo anglosassone Geo-Refer che significa riferire geometricamente. Tale operazione esprime la possibilità di stabilire una corrispondenza univoca tra i punti dell'oggetto rappresentato e quelli dell'immagine digitale, come si ha in una presa fotogrammetrica tradizionale in cui la legge di corrispondenza è data dalla trasformazione prospettica di tipo

affine. Questo criterio viene utilizzato per il raddrizzamento prospettico e l'ortofoto.

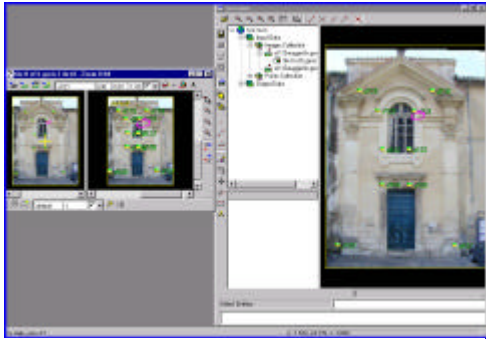


Fig.2 StereoView: Raddrizzamento prospettico

Una imposizione rigorosa si ha solo per immagini non otticamente deformate di oggetti perfettamente piani, tuttavia aumentando il numero dei punti di appoggio in funzione della morfologia dell'oggetto e procedendo per porzioni limitate di immagini si possono raggiungere risultati metricamente accettabili anche per oggetti con sviluppo tridimensionale.

Nel processo di georeferenziazione l'immagine digitale viene assoggettata a due trasformazioni:

- a) Ricampionamento = variazione di scala anisotropa e disomogenea stabilita mediante una relazione omografica basata generalmente su 4 punti.
- b) Scalatura = rideterminazione del rapporto pixel-oggetto che rende possibili le operazioni di misura sull'immagine stessa e di mosaicare immagini diverse riferite allo stesso oggetto.

L'affidabilità di un documento metrico che rappresenta una porzione di territorio o un oggetto è funzione della rigidità con la quale viene mantenuta la costanza del suo rapporto di scala rispetto agli elementi rappresentati, oltre che della qualità e della quantità delle informazioni fornite.

Il fotogramma possiede un vasto potenziale di informazioni metriche e qualitative che vengono rese disponibili a seguito dei trattamenti necessari di seguito indicati.

L'ortofotografia assicura sempre una moltitudine di informazioni e di dettagli topografici che non potrebbero mai essere rappresentati da una cartografia convenzionale tradizionale.

La scala di rappresentazione fotografica è in generale funzione esclusiva del rapporto fra la distanza principale f della camera metrica di presa e la distanza relativa h degli oggetti ritratti. Variando la morfologia degli oggetti stessi, per il loro sviluppo in profondità o in altezza, varia evidentemente la distanza relativa h e, con questa distanza, il valore del rapporto locale: $f/H=1/s$ che ne esprime la relativa scala di rappresentazione.

Per far risultare costante il rapporto f/H che deve rappresentare la scala media della nuova immagine raddrizzata, sarebbe indispensabile eliminare le variazioni di grandezza variando localmente le condizioni di riproiezione. Il risultato locale ottenuto attraverso questa operazione di riduzione o amplificazione differenziale determinerà una nuova immagine del terreno o dell'oggetto considerato, realizzata nel suo insieme tutta alla stessa scala di rappresentazione. Un risultato analogo si potrebbe ottenere portando il punto di presa a

distanza infinita, in maniera da rendere paralleli tra loro i vari raggi proiettanti: questo equivarrebbe ad effettuare una proiezione ortografica del terreno e dell'oggetto considerato.

Le deformazioni geometriche dell'immagine fotografica, indotte dall'inclinazione dell'asse ottico di presa e dalle variazioni in quota del terreno, possono essere eliminate ricorrendo al raddrizzamento differenziale delle prese areofotogrammetriche nadirali.

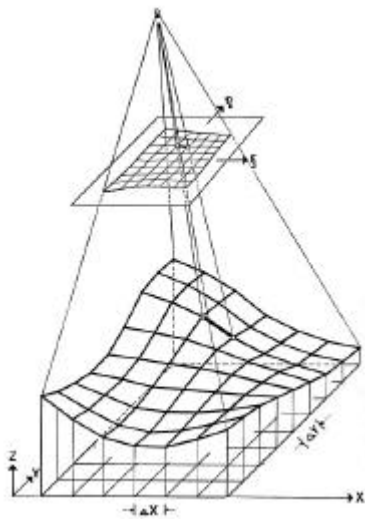


Fig. 3 - Ortofoto

Procedendo al raddrizzamento differenziale dei fotogrammi si può pervenire alla formazione di ortofotopiani o di ortofotocarte, a seconda delle necessità e disponibilità. Gli ortofotopiani si differenziano dalle ortofotocarte per il fatto che non riferiscono alcuna informazione altimetrica sul terreno rappresentato, espressa nelle ortofotocarte di norma dalle curve di livello. L'ortofotografia ha in più la possibilità di una lettura metrica dei vari elementi riferiti.

Tra i vantaggi dell'ortofoto vi è la notevole riduzione dei tempi richiesti per il suo allestimento ed i relativi costi di produzione rispetto agli elaborati cartografici classici.

I lavori per la formazione di ortofotopiani e di ortofotocarte sono di norma regolati da specifiche prescrizioni tecniche che, articolando opportunamente il processo produttivo in fasi distinte e successive, ne assicurano la precisione metrica richiesta e la qualità fotografica relativa.

Nella figura 3 sono indicate le relazioni tra il fotogramma, il modello del terreno e l'ortofotogramma.

Una ricorrente preoccupazione è quella di ridurre la mosaicatura dei fotogrammi: essa può



Fig. 4 - StereoView: Mosaicatura

essere eliminata con una accorta copertura aerofotogrammetrica, operando in maniera che ad ogni elemento dell'ortofotopiano, o dell'ortofotocarta, corrisponda la copertura di un unico fotogramma centrato. La sovrapposizione dei fotogrammi deve allora raggiungere il 90%.

Sarebbe opportuno attenuare gli effetti indotti dalle variazioni della quota relativa di volo e dalle frequenti distorsioni di altezza degli edifici, inoltre utilizzare una distanza focale per gli obiettivi delle camere metriche

molto più lunghe di quelle normali.

La precisione richiesta è definita di volta in volta dalle tolleranze planimetriche ed altimetriche che ne regolano la formazione, e che vengono stabilite in funzione della scala di rappresentazione e delle finalità preposte. Le scale più idonee per questi documenti fotografici quando debbano essere utilizzati per ricerche preliminari, dovrebbero risultare quelle di 1:25000, 1:10000, e 1:5000. L'impiego di piani ortofotografici a grandissima scala cioè a 1:2000 e 1:1000, dovrebbe richiedere al confronto una maggior precisione metrica ed una risoluzione maggiore del fotogramma.

In sintesi il modello 3D viene proiettato su un piano, eseguendo in questo modo il processo inverso della proiezione centrale che contraddistingue l'immagine fotografica.

Fotogrammetria Stereoscopica

Richiami teorici:

La presa fotografica di un oggetto costituisce una corrispondenza univoca tra l'oggetto stesso e la sua immagine sul fotogramma, ma se ad ogni punto dell'oggetto corrisponde un punto sul fotogramma non possiamo affermare la stessa corrispondenza nel caso contrario. E' evidente quindi che un solo fotogramma non è sufficiente a determinare geometricamente un oggetto nel suo insieme. Nel caso si operi con due fotogrammi la corrispondenza tra i punti determinati sull'oggetto e le coppie di punti sui fotogrammi diviene biunivoca, rendendo così possibili le misure dell'oggetto attraverso la sua rappresentazione fotografica.

L'immagine tridimensionale virtuale ottenuta dall'osservazione binoculare di una coppia di immagini stereoscopiche prende generalmente il nome di modello stereoscopico o immagine plastica dello spazio interessato.

Analoga situazione è nella visione stereoscopica umana:

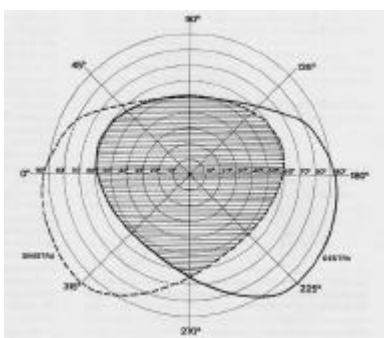


Fig. 5 - visione stereoscopica umana

Il processo della percezione visiva si sviluppa a partire dall'occhio e si conclude nel cervello che recepisce gli stimoli sensoriali e li elabora per trasformarli in un'immagine della stessa realtà oggettiva osservata. Il campo visivo dei due occhi umani raccoglie due immagini con una piccola differenza. Questa piccola differenza tra le due immagini raccolte produce la visione stereoscopica del campo interessato e fornisce conseguentemente la percezione della sua profondità spaziale e del relativo rilievo.

La camera da presa è l'elemento essenziale in un processo fotogrammetrico sia perchè costituisce l'elemento fondamentale per l'acquisizione delle prese sia per la ricostruzione

ottica del modello dell'oggetto. Le camere da presa fotogrammetrica, quando siano perfettamente noti gli elementi di orientamento interno, cioè i parametri geometrici-costruttivi,

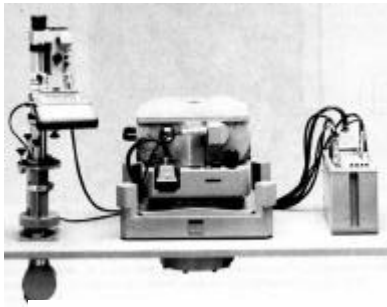


Fig. 6 - Camera metrica aerea

sono dette *camere metriche*. Questo accentua evidentemente la loro predisposizione alla misura, in contrapposizione a tutte le altre camere da presa fotografica non metriche, che non possono garantire, durante il loro impiego, una costante riproduzione degli elementi di orientamento interno al variare

delle condizioni di presa fotografica. Appare indispensabile, per assicurare l'affidabilità e la precisione richieste nei lavori di ripresa aerofotogrammetrica, sottoporre le camere metriche a periodici e sistematici controlli. La camera infatti per la sua pesantezza può danneggiarsi durante il trasporto; inoltre è soggetta a grandi variazioni di temperature e di pressione.

Un notevole vantaggio è apportato nell'uso di camere metriche digitali per economia, leggerezza e praticità d'uso.



Fig. 7 - Camera metrica terrestre

Le prese stereoscopiche sono coppie di fotogrammi aventi in comune un opportuno ricoprimento dell'area o degli oggetti da rilevare. Il modello rappresenta la parte di ricoprimento di una coppia stereoscopica di fotogrammi. La strisciata è costituita da un insieme di modelli consecutivi, su uno stesso asse di volo, concatenati tra loro attraverso un certo numero di punti.

Il fotogramma è l'immagine fotografica rigorosamente geometrica che costituisce una prospettiva centrale degli oggetti ritratti. Gli elementi geometrici che lo caratterizzano sono gli elementi di orientamento interno (centro di proiezione e distanza principale).

Gli StereoRestitutori:

Lo stereorestitutore è lo strumento atto a "restituire" le coordinate geometriche tridimensionali "stereo" da una coppia di prese fotogrammetriche. In pratica realizzano il modello ottico tridimensionale dell'oggetto in esame e permettono la misura delle coordinate attraverso il puntamento stereo di una marca di collimazione. Gli stereorestitutori possono essere classificati in restitutori analogici, analitici o digitali a seconda che risolvano il problema

fotogrammetrico mediante soluzioni solamente ottico meccaniche, ottico elettroniche e per via informatica digitale.

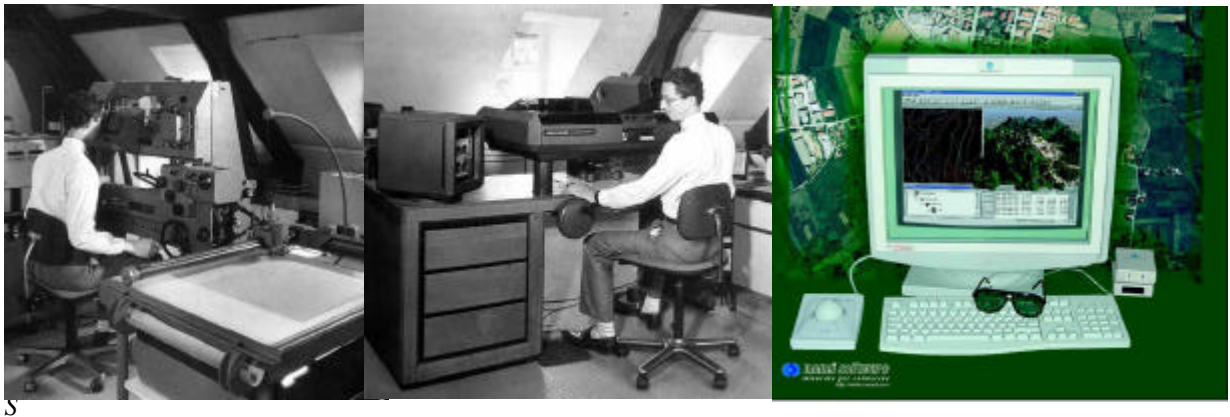


Fig.8 Stereorestitutore analogico Fig. 9 - Stereorestitutore analitico Fig. 10 - Stereorestitutore digitale

Nello stereorestitutore analogico la meccanica dello strumento riproduce il fenomeno puramente ottico dell'intersezione nello spazio dei raggi omologhi; degli ingranaggi consentono la trasmissione delle misure al tavolo da disegno.

Lo stereorestitutore analitico è lo strumento che invia i dati di misurazione spaziale dei fotogrammi ad un computer collegato.

Lo stereorestitutore digitale consente di adottare un PC standard per effettuare tutte le elaborazioni fotogrammetriche.

Fotogrammetria Digitale:

La fotogrammetria digitale prosegue ed amplia l'esperienza dell'utilizzo dei sistemi informatici nel campo della restituzione già maturata con i sistemi analitici nel corso degli anni passati.

I restitutori analitici infatti, per economia ed efficienza, segnarono il passo ai vecchi strumenti analogici, per i quali la precisione metrica era frutto di un insieme di accorgimenti e tecnologie ottico - meccaniche ad appannaggio esclusivo di alcune aziende leader nel mondo e di costo molto elevato.

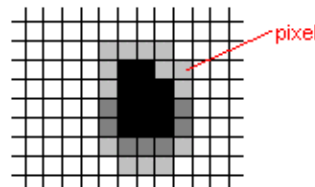
Se il passaggio dalle procedure analogiche a quelle analitiche è avvenuto a fatica nel corso di almeno quindici anni, il passaggio dall'analitico al digitale si pensa che assumerà le caratteristiche di una rapida rivoluzione caratterizzata da un cambiamento degli strumenti ma anche da un enorme sviluppo di algoritmi orientati alla gestione della parte radiometrica ed alla stereocorrelazione (image matching).

Caratteristiche delle immagini digitali:

Le caratteristiche fisiche delle immagini digitali costituiscono il vincolo più forte al quale il sistema di stereorestituzione digitale deve sottostare. La risoluzione geometrica e la calibrazione delle immagini sono fattori decisivi per la definizione della precisione del sistema. Nei successivi paragrafi affrontiamo questa problematica.

Risoluzione geometrica delle immagini

La digitalizzazione delle immagini è il processo mediante il quale la foto, di qualsiasi natura essa sia, viene acquisita tramite un apposito strumento denominato scanner mediante discretizzazione in un numero finito elementi monocromatici denominati pixel ed ordinati secondo un reticolo regolare rettangolare di cui il pixel costituisce l'unità elementare.



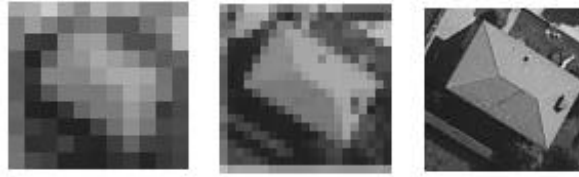
Ciascun pixel viene registrato all'interno del file di immagine in ragione del proprio valore cromatico; la sua posizione è univocamente determinata dalla collocazione all'interno del file. All'interno del file di immagine esiste una sezione dove vengono descritte le caratteristiche del file stesso, in particolare tra queste rivestono notevole importanza le seguenti:

- dimensioni in x;
- dimensioni in y (notare che il file di immagine è sempre rettangolare);
- numero di colori;
- nome del file;
- eventuale palette.

Al termine di questa inizia la sezione dei dati dove si succedono i valori cromatici di tutti i pixel dell'immagine.

Per visualizzare l'immagine letta da file sarà pertanto necessario riorganizzare i valori dei pixel in funzione della specifica posizione. Per conoscere il valore del pixel di coordinate (x,y) all'interno di una immagine di larghezza N e altezza M, dovrà essere letto il valore associato alla posizione $((y-1)*N+x)$ nella sezione dei dati.

Il numero di pixel in cui ciascuna immagine che viene discretizzata determina la qualità geometrica dell'acquisizione e quindi le dimensioni del più piccolo dettaglio leggibile sull'immagine.



50 dpi

100 dpi

400 dpi

La risoluzione di acquisizione si misura in dpi (dpi = dots per inch) o punti per pollice ed indica il numero di pixel contenuti nella misura lineare di 1 pollice.

Si ricorda che 1 pollice = 25.4 mm.

Nell'esempio della figura soprastante viene evidenziata la variazione della qualità delle immagini al variare della risoluzione di acquisizione. Il frammento di immagine in oggetto si riferisce ad una porzione di territorio avente una larghezza indicativa di 22 metri. Nel caso dell'acquisizione a 50 dpi la dimensione del pixel a terra è di circa 2 m; nel caso dell'acquisizione a 400 dpi è di circa 0,25 m. Si consideri che raddoppiando il valore in dpi quadruplica il numero di pixel. Specificamente, passando dalla risoluzione a 50 dpi a quella a 400 dpi, il numero di pixel diviene 64 volte più grande.

Le dimensioni del file di immagine sono chiaramente funzione del numero di pixel che lo costituiscono.

La condizione fondamentale per una buona riuscita del lavoro è la scelta della risoluzione ottimale di acquisizione. Questa deve essere preventivamente valutata in funzione dei seguenti fattori:

a) precisione di restituzione. E' bene che la dimensione modello del pixel, cioè la dimensione del pixel a terra, sia circa la metà della precisione che intendiamo ottenere.

Supponiamo di voler restituire il portale di una chiesa avente la larghezza indicativa di 4 metri con una precisione di 5 mm; sulla base di quanto detto dovremo ottenere una dimensione modello del pixel pari a 2,5 mm. Supponendo di aver realizzato le prese con un camera fotografica 6x6 cm e che il portale occupi circa l'80% del fotogramma si ha:

larghezza del fotogramma	$L_0 = 60 \text{ mm}$
larghezza del fotogramma relativa al portale	$L_1 = L_0 \times 0,8 = 60 \times 0,8 = 48 \text{ mm}$
larghezza in pixel del portale	$n_x = 4000 / 2,5 = 1600$
larghezza in pollici del fotogramma relativa al portale	$pol = L_1 / 25,4 = 48 / 25,4 = 1,89$
risoluzione	$ris = n_x / pol = 1600 / 1,89 = \mathbf{847 \text{ dpi ca}}$

La scelta della risoluzione cade usualmente sul valore arrotondato alle cento successive unità.

b) risorse hardware disponibili. Per quanto il software progettato consenta di ottimizzare le condizioni di lavoro in funzione del computer su cui viene svolto, è sempre

consigliabile misurarsi preventivamente con l'hardware di cui si dispone. Le condizioni ottimali di lavoro sono quelle per cui si disponga di una quantità di memoria RAM tale da contenere completamente i dati ed i programmi che si stanno utilizzando. La gestione di file eccessivamente ingombranti comunque, costituisce un aggravio dei costi di archivio, nonché un inevitabile aumento dei tempi e quindi dei costi di restituzione.

Tornando all'esempio precedente si valuta che ciascuna immagine della coppia 6x6 cm acquisita in toni di grigio a 900 dpi occupi uno spazio di memoria di circa 4,5 MByte. Le stesse immagini se acquisite a 1200 dpi (valore standard non preventivamente calcolato) avrebbero un ingombro superiore agli 8 MByte.

Risoluzione cromatica delle immagini

Un parametro fondamentale di cui si deve tener conto è la risoluzione o profondità cromatica delle immagini.

Quando un'immagine è campionata, i suoi valori di brillantezza sono rappresentati da un intero. In funzione delle capacità di lettura dello strumento di acquisizione e delle effettive necessità di lavoro, possono essere utilizzati da 1 a 24 bit per descrivere i valori cromatici dell'immagine stessa. Il numero di bit usato per descrivere i valori dei pixel si definisce in BPP o bit per pixel.

L'occupazione di memoria di un file di immagine (o raster), a parità di dimensioni in pixel, dipende dalla risoluzione cromatica che lo caratterizza. Le modalità più comuni, che sono poi quelle gestite dal nostro programma, sono le seguenti:

- B/N (bilevel);
- Toni di grigio (gray-scale);
- Palette;
- Toni di grigio a 12 bit;
- Toni di grigio a 16 bit;

Colori continui (True Color o Chunky).

Analizziamo in dettaglio queste modalità.

-B/N: ciascun punto può assumere il valore di bianco o nero che informaticamente sono associati a 0 ed 1. In pratica è sufficiente 1 bit per descrivere il colore di ciascun pixel.

-Toni di grigio: i pixel possono assumere tutti i valori compresi tra 0 e 255. A 0 corrisponde il nero, a 255 il bianco. I valori intermedi variano con continuità.

Un pixel avente valore 127 rappresenta un grigio che è esattamente la media tra il bianco ed il nero. In ogni caso esistono scale di grigio a 2, 4 e 6 bit, in ogni caso la scala a 8 bit è senz'altro la più comune. Questo è dovuto ad una serie di ragioni che sono le seguenti: 1)

agevole gestione informatica di 1 byte per pixel e 2) egregia rappresentazione di qualsiasi immagine in toni di grigio in quanto realizza 256 livelli distinti che sono sovrabbondanti rispetto ai meno di 200 livelli di grigio che è in grado di percepire l'occhio umano.

I valori possibili per ciascun pixel sono $2^8=256$; sono quindi necessari 8 bit per ciascun pixel.

-Palette: le immagini in palette rientrano tra le immagini a colori. La tecnica della palette consiste nella scelta di un determinato numero di colori (normalmente i 256 più frequenti) tra tutti quelli contenuti nell'immagine e sostituire il valore relativo a ciascun pixel con quello più simile appartenente alla palette.

Al momento in cui la palette viene creata, deve essere preventivamente valutata l'intera immagine per estrarre i 256 colori più frequenti; successivamente, nell'intestazione del file di immagine viene descritta la lista ridotta dei colori. A ciascun pixel viene associato l'indice relativo all'elemento della palette che per valore è più simile al colore del pixel stesso. Essendo 256 i colori possibili sono necessari 8 bit per ciascun pixel.

-Toni di grigio a 12 bit: come per i toni di grigio a 8 bit ma con la possibilità di avere $2^{12}=4096$ differenti valori. Ciascun pixel necessita di 12 bit.

-Toni di grigio a 16 bit: come per i toni di grigio a 8 e 12 bit ma con la possibilità di avere $2^{16}=65536$ differenti valori. Ciascun pixel necessita di 16 bit.

-Colori continui: è la risoluzione cromatica a colori per eccellenza. E' di norma la risoluzione standard per gli scanner a colori. Ciascun pixel viene descritto con 24 bit. In funzione della modalità di scrittura del file si hanno file RGB, CYM o altro. Nel caso di file RGB (sintesi additiva) vengono utilizzati 8 bit (256 valori) per il rosso, altrettanti per il verde e per il blu; in totale si hanno $2^{24}=16777216$ colori possibili per ciascun pixel. Di norma le immagini di questo tipo vengono utilizzate solo per scopi particolari, principalmente nell'editoria.

Riportiamo di seguito una tabella esplicativa di quanto sopra descritto.

Dimensioni(pixel)	B/N (kByte)	Grigio Palette (kByte)	True Color (kByte)	Risoluzione 300 dpi(mm)	Risoluzione 600 dpi (mm)
1000x1000	125	1000	3000	84,67x84,67	42,33x42,33
2000x2000	500	4000	12000	169,33x169,33	84,67x84,67

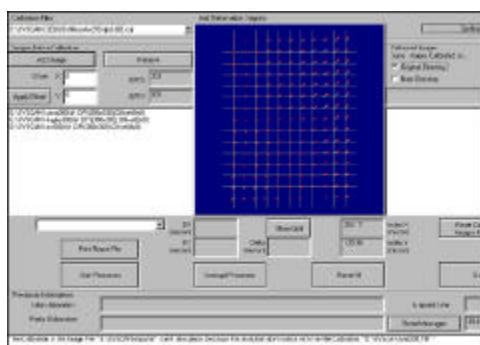
Scanner ed Acquisizione dei fotogrammi:

La procedura di digitalizzazione dei fotogrammi richiede particolare attenzione in quanto da essa dipende sia la qualità visiva del modello che la sua precisione metrica. È buona norma l'utilizzo di scanner fotogrammetrico; quando questo non sia possibile è comunque pressoché indispensabile operare la correzione geometrica della distorsione d'acquisizione. La

risoluzione di acquisizione dipende dall'uso che s'intende fare dei dati: a scopo documentario, tematico, archivistico o preminentemente metrico. La risoluzione dipende anche dalla dimensione delle immagini originali. In ogni caso non vi sono limiti all'uso di immagini comunque grandi. Di norma si lavora con risoluzioni dai 600 ai 4000 dpi. Le immagini vengono archiviate il formato raster proprietario crittografato o in TIFF standard.

Calibrazione della distorsione:

L'utilizzo di immagini digitali in luogo delle lastre fotografiche se da un lato evita di dover affidare puntamento e movimentazione a sistemi ottico-meccanici la cui precisione dipende dalle tolleranze costruttive, dall'altro aggiunge un passaggio consistente nel processo di acquisizione digitale. Il passaggio a scanner, specialmente nel caso di lettura di immagini di grandi dimensioni, può costituire una fase particolarmente delicata. Le ragioni, ancora una volta, risiedono nella componentistica meccanica di movimento dello strumento di acquisizione.



Alcune cause di imperfezione di acquisizione possono essere le seguenti:

- gioco trasversale sulle slitte di movimentazione;
- svirgolamento della barra sensibile (avanzamento non parallelo);
- avanzamento a velocità non costante.

L'entità degli errori indotti può essere talvolta, specialmente utilizzando scanner basso livello qualitativo, anche piuttosto importanti.

Fig. 11 - StereoView: correzione delle distorsioni dello scanner

di

L'acquisizione delle immagini dovrebbe preferibilmente essere effettuata attraverso scanner piani di verificata qualità. In tal senso sono state messe a punto procedure di calibrazione dello scanner in grado di correggere eventuali anomalie ottenute sull'immagine in fase di acquisizione.

Attraverso tali strumenti è possibile scansare immagini per riflessione o per trasparenza. Nel primo caso lo scanner proietta un fascio di luce sulla stampa fotografica ed elabora le onde luminose respinte dall'immagine, mentre nel secondo caso la luce viene proiettata sul retro del fotogramma trasparente (che può essere negativo o diapositivo) e vengono elaborate le onde luminose che attraversano il supporto fotografico.

Immagini digitali possono essere ottenute direttamente dall'utilizzo di camere digitali.

La grande flessibilità ed economicità delle camere fotografiche non metriche o semimetriche ha prodotto l'esigenza di studiare algoritmi di calcolo in grado di consentirne l'utilizzo nel campo della stereofotogrammetria. In generale le camere semimetriche sono considerate ad orientamento interno noto e definite da un certificato di calibrazione che riporta le caratteristiche geometriche dell'insieme ottico-meccanico al momento della calibrazione. Anche in questo caso, come in quello dei restitutori, la precisione del sistema è determinata dalle condizioni di progettazione, dalle tolleranze di accoppiamento, ma anche dalle condizioni di assemblaggio. Risulta evidente pertanto la necessità di riferire i certificati di calibrazione a specifici insiemi costituiti da corpo macchina, obiettivo e reticolo che, una volta disassemblati, perdono le loro caratteristiche metriche.

Le camere amatoriali, sia per costruzione che per utilizzo devono essere considerate come sistemi ad orientamento interno incognito e variabile. In tal caso ciascuna immagine deve essere calibrata separatamente mediante opportuni strumenti di calcolo.

La calibrazione di un immagine non metrica consiste nel determinare l'orientamento interno a priori incognito (lunghezza focale e punto principale) e, una volta ipotizzato un determinato modello matematico per le aberrazioni ottiche, individuare i parametri che caratterizzano tali aberrazioni. Le fasi di calibrazione sono piuttosto complesse e specifiche per l'immagine in esame.

I modelli di calibrazione più utilizzati sono le equazioni di collinearità e la trasformazione lineare diretta (DLT).

Le equazioni di collinearità si esprimono come:

$$x - x_p - D_x = -p \frac{a_{11}(X_p - X_c) + a_{12}(Y_p - Y_c) + a_{13}(Z_p - Z_c)}{a_{31}(X_p - X_c) + a_{32}(Y_p - Y_c) + a_{33}(Z_p - Z_c)}$$

$$y - y_p - D_y = -p \frac{a_{21}(X_p - X_c) + a_{22}(Y_p - Y_c) + a_{23}(Z_p - Z_c)}{a_{31}(X_p - X_c) + a_{32}(Y_p - Y_c) + a_{33}(Z_p - Z_c)}$$

dove x_p e y_p sono le coordinate del punto principale, a_{ij} sono i 9 coseni direttori dell'immagine in funzione degli angoli di assetto w, f, k .

La trasformazione lineare diretta si esprime come:

$$x_1 - D_x = \frac{L_1 X_p + L_2 Y_p + L_3 Z_p + L_4}{L_9 X_p + L_{10} Y_p + L_{11} Z_p + L_8} \quad L_5 X_p + L_6 Y_p + L_7 Z_p + L_8$$

$$y_1 - Dy = \frac{L_9 X_p + L_{10} Y_p + L_{11} Z_p + 1}{L_9 X_p + L_{10} Y_p + L_{11} Z_p + 1}$$

dove gli L_i sono i coefficienti della trasformazione.

La distorsione dell'obbiettivo deve essere tenuta in considerazione e, in via approssimativa, sotto l'ipotesi credibile di una distribuzione radialsimmetrica, può essere modellata mediante una funzione del tipo:

$$dr = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7$$

Sulla base di ricerche sperimentali (Karara-Aziz, 1974) si è concluso che la correzione della maggior parte degli errori sistematici possa essere corretta mediante l'utilizzo di un coefficiente che varia con il quadrato della distanza:

$$x = \frac{L_1 X_p + L_2 Y_p + L_3 Z_p + L_4}{L_9 X_p + L_{10} Y_p + L_{11} Z_p + 1} + x_1 \cdot K_1 \cdot r^2$$

$$y = \frac{L_5 X_p + L_6 Y_p + L_7 Z_p + L_8}{L_9 X_p + L_{10} Y_p + L_{11} Z_p + 1} + y_1 \cdot K_1 \cdot r^2$$

La soluzione di queste equazioni, non essendo lineari nelle incognite L_i, K_1 richiede una linearizzazione alle derivate parziali e calcolo iterativo.

Per conferire robustezza e flessibilità al calcolo, è stato inserito il condizionamento vincolare sull'orientamento interno. Questo significa che, in caso di utilizzo di camera non metrica (metodo di calcolo Autocalibrazione), il programma di calcolo effettua l'autocalibrazione su ciascuna immagine che porta alla conoscenza dei parametri di orientamento di calibrazione; in caso di utilizzo di camera metrica invece, la possibilità di inserire le condizioni vincolari in termini di distanza principale, punto principale e parametri di calibrazione, permette di sfruttare pienamente i vantaggi offerti dall'uso della camera metrica.

Fase di orientamento interno:

Una fotografia metrica può essere definita come una precisa proiezione centrale (prospettica), geometricamente rigorosa, in cui il centro di proiezione è situato ad una distanza c dal punto principale della fotografia. I parametri fondamentali di questo modello matematico-geometrico semplificato, chiamati *elementi dell'orientamento interno*, sono la *distanza principale* c e le *coordinate immagine* del punto principale della fotografia (X_{i0}, η_{a0}).

Il modello ideale non corrisponde esattamente alla realtà: gli inevitabili errori delle lenti, della camera e della fotografia devono essere considerati se si vuole raggiungere la massima

accuratezza. Le camere metriche sono calibrate in laboratorio con l'ausilio di un goniometro ottico.

Le coordinate di tutti i punti misurati sul fotogramma fanno riferimento ad un sistema cartesiano ortogonale avente origine nel punto di presa. Il *punto principale* PP, costituito dal piede della perpendicolare abbassata dal centro di proiezione o punto di presa O al piano del fotogramma o piano focale della camera, ha pertanto le coordinate PP $(0,0,-c)$. La distanza intercorrente tra il centro di proiezione ed il punto principale ($c=O-PP$) è detta *distanza principale* e coincide, per messa a fuoco all'infinito, con la focale dell'obiettivo. Questa risulta misurata sull'asse ottico dell'obiettivo che, coincidendo con l'asse di proiezione del sistema, risulta normale al quadro di rappresentazione, o piano focale dell'immagine.

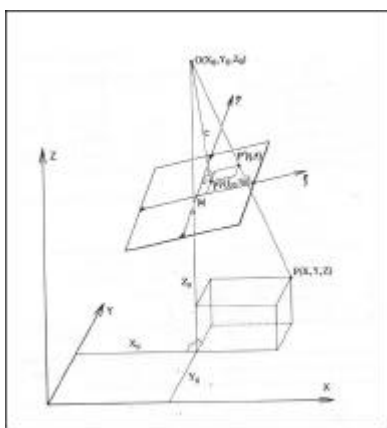


Fig. 12 - Schema di presa

Per la definizione fisica del sistema di coordinate dell'immagine ed il corrispondente centro di proiezione si fa uso delle marche fiduciali in ogni fotografia. L'intersezione delle linee congiungenti marche fiduciali opposte determina il *centro fiduciale FC*.

La materializzazione di questi indici non è standardizzata ma varia a seconda dei criteri costruttivi seguiti per la realizzazione delle diverse camere da presa fotogrammetrica, così come varia l'indicazione marginale della distanza principale e di tutte le altre indicazioni complementari.

La definizione del punto principale risulta diversificata: esso viene alternativamente individuato sia dal *punto principale di autocollimazione (PPA)*, sia dal *punto principale di simmetria (PPS)*, dato che la determinazione della sua posizione viene effettuata per via sperimentale.

Il *PPA* viene definito dall'immagine di un fascio di raggi paralleli all'asse ottico dell'obiettivo, provenienti dallo spazio oggetto e passanti attraverso l'obiettivo stesso in direzione normale al piano focale della camera.

Il *PPS* viene invece definito dal punto attorno al quale la distorsione residua dell'obiettivo presenta un optimum della simmetria nelle diverse direzioni diametrali.

Molte camere fotogrammetriche sono realizzate in modo che PPA (punto principale di autocollimazione) e PPS (punto principale di simmetria) giacciono all'interno di un cerchio che ha come centro FC con un raggio di +/- 20 micron.

E' necessario conoscere il centro di proiezione, detto anche punto di vista, il quadro di rappresentazione e la distanza principale per realizzare la rappresentazione prospettica

dell'oggetto e per attribuire valore metrico alle immagini fotografiche. La definizione teorica di questi elementi si riferisce ad una macchina fotografica perfetta dal punto di vista strettamente geometrico, ove cioè l'obiettivo identifica il centro di proiezione e l'asse ottico di presa risulta perfettamente normale al quadro di proiezione rappresentato dal piano focale che raccoglie l'immagine.

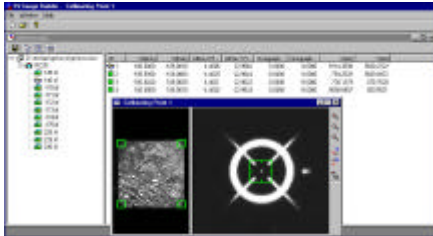


Fig. 13 - StereoView:
orientamento interno

Il *certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica* fornisce le seguenti informazioni riguardo l'orientamento interno:

- Le coordinate immagine delle marche fiduciali
- Le coordinate PPA, PPS e FC
- La distanza principale c
- La curva fondamentale della distorsione radiale

-La data di calibrazione

Fase di triangolazione:

Scopo della triangolazione aerea è la determinazione dei parametri di orientamento dei fotogrammi e, al contempo, delle coordinate terreno dei punti di passaggio individuati sui fotogrammi, sulla base della conoscenza di alcuni punti noti e delle caratteristiche metriche della camera fotografica.

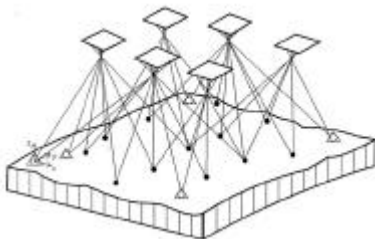


Fig. 13 - Bundle Block Adjustment

Per poter passare dal sistema immagini costituito da coppie di fotogrammi al sistema di rappresentazione della carta è necessario disporre delle coordinate x, y, z dei punti di controllo nelle coordinate terreno e di riconoscerli sul

fotogramma. L'abbinamento tra queste coordinate e le corrispondenti nel sistema immagine permette, attraverso l'operazione dell'orientamento assoluto di calcolare i

parametri di trasformazione tra i due sistemi.

La metodologia usata è quella del concatenamento in blocco dei fotogrammi. (Bundle Block Adjustment).

Concetti principali:

Coppia stereoscopica di fotogrammi: E' costituita da due fotogrammi consecutivi aventi un ricoprimento trasversale pari al 60% circa.

Punti di Controllo: Punti noti nelle coordinate X, Y, Z .

Punti di Passaggio: Punti scelti dall'operatore per aumentare il numero di punti e rendere più robusto il calcolo.

Modello: Rappresenta la parte di ricoprimento di una coppia stereoscopica di fotogrammi

Strisciata: E' costituita da un insieme di modelli consecutivi, su uno stesso asse di volo, concatenati tra loro attraverso un certo numero di punti.

Blocco: E' costituito da un insieme di strisciate concatenate tra loro attraverso un certo numero di punti.

Ricoprimento longitudinale: Rappresenta la parte in comune di due fotogrammi che costituisce un modello, in percentuale della larghezza del fotogramma. Di norma il valore è 60%.

Ricoprimento trasversale: Rappresenta la parte in comune di fotogrammi in strisciate differenti, in percentuale dell'altezza del fotogramma. Di norma il valore è 25%.

Tre sono le fasi principali dell'operazione:

- 1) La preparazione dei fotogrammi da trattare
- 2) Le misure dell'apparato di stereorestituzione
- 3) Elaborazione e compensazione dei dati.

1) Preparazione dei Fotogrammi.

La preparazione delle strisciate è di fondamentale importanza per conseguire risultati affidabili.

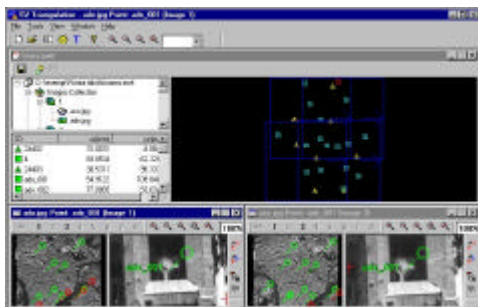


Fig. 14 - StereoView: collimazione stereoscopica

La precisione del metodo dipende dalla scelta dei punti di passaggio (o punti di riattacco), nonché dei punti di controllo, uniti all'identificazione degli errori. E' indispensabile la univoca interpretazione dei punti di passaggio tra le strisciate del blocco e la loro accurata collimazione.

Il metodo di triangolazione aerea richiede come minimo tre punti di controllo noti (di cui almeno due completi ed uno planimetrico) per ogni blocco di

stereomodelli.

I punti fotogrammetrici misurabili possono essere:

- punti segnalati prima di effettuare il volo
- punti "naturali" scelti sul territorio

2) Esecuzione delle Misure:

In un blocco costituito da strisciate di fotogrammi con una sovrapposizione circa del 60% ed un ricoprimento trasversale del 20% si calcolano direttamente le relazioni tra le coordinate immagine e le coordinate oggetto, senza introdurre la fase intermedia delle coordinate

modello. Per questo il fotogramma è l'unità elementare del concatenamento in blocco.

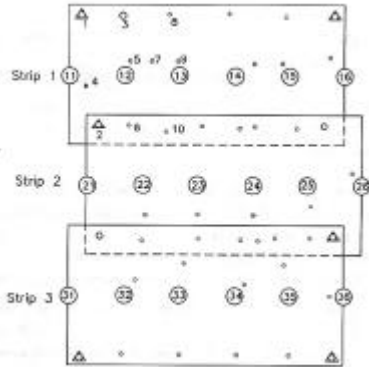


Fig. 15 – Concatenamento in blocco

Le coordinate dell'immagine definiscono un fascio di rette passante per il centro di proiezione. Gli elementi dell'orientamento assoluto di tutti i componenti del blocco vengono calcolati simultaneamente su tutti i fotogrammi.

I dati iniziali sono costituiti dalle coordinate immagine dei punti di passaggio (punti che giacciono su più di un fotogramma), dalle coordinate immagine e dalle coordinate oggetto dei punti di controllo.

Il principio del concatenamento si definisce in base alla disposizione (nelle 3 dimensioni: X0, Y0, Z0) del fascio di raggi, e la rotazione (nei tre angoli omega, phi, kappa) in modo che il fascio intersechi gli uni e gli altri nei punti di passaggio e passi più vicino possibile ai punti di controllo.

3) Elaborazione e Compensazione dei Dati.

La conclusione delle misure deve portare al riferimento di ciascun punto, osservato nei diversi modelli, ad un unico sistema di riferimento. Effettuato il riporto al sistema del primo modello

è possibile effettuare poi la trasformazione delle coordinate strumentali in coordinate del sistema di riferimento terrestre, sulla base dei punti di controllo utilizzati.

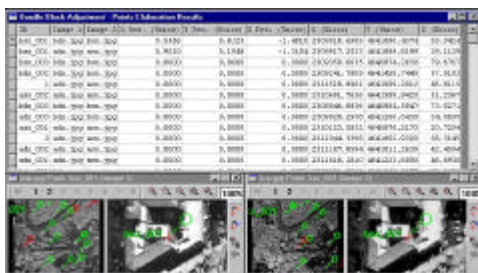


Fig. 16 – StereoView: Tavole dei calcoli di compensazione

Si consiglia di effettuare il calcolo di compensazione utilizzando la possibilità di escludere punti, fotogrammi e strisciate per individuare con attenzione i punti da raffinare nella collimazione.

Fase di restituzione in stereoscopia:

Terminate le fasi di orientamento è possibile gestire la restituzione direttamente sul modello stereoscopico orientato con la conseguente produzione di un modello numerico vettoriale.

La precisione con la quale vengono determinate le posizioni dei punti di appoggio, in fase di orientamento esterno, influisce in maniera determinante sulla precisione di calcolo e quindi di restituzione.

Con restituzione fotogrammetrica si intende il procedimento operativo che consente di pervenire dai fotogrammi alla rappresentazione grafica, o numerica dei diversi oggetti ritratti.

In generale, la restituzione di un solo fotogramma, quando non ricorrano le condizioni per un

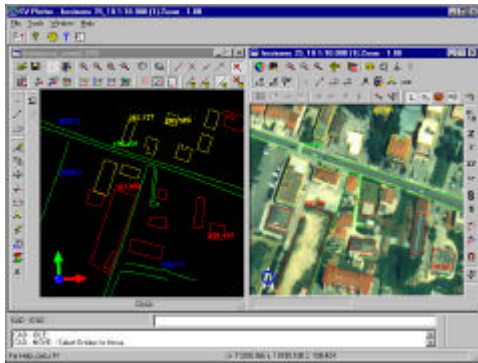


Fig. 17 - StereoView: Restituzione stereoscopica tridimensionale

suo raddrizzamento fotografico, viene sempre sviluppata mediante operazioni grafiche e di calcolo, facendo ricorso alle proprietà delle prospettive centrali.

In presenza di coppie di fotogrammi stereoscopici si raggiungono precisioni maggiori, potendo definire univocamente ciascun punto nella sua tridimensionalità.

I prodotti ottenuti dalla restituzione possono essere espressi sia mediante rappresentazioni grafiche degli oggetti interessati sia in forma esclusivamente

numerica attraverso una terna di numeri indicanti le coordinate spaziali X,Y,Z dei punti discreti restituiti.

Alcune tra le caratteristiche principali dello stereorestitutore digitale sono l'esplorazione dinamica del modello mono/stereoscopico, la visione contemporanea di piu' modelli mono/stereoscopici, la misura tridimensionale, la scelta e caricamento automatico delle coppie mono/stereoscopiche, il confronto stereoscopico contemporaneo di piu' modelli realizzati in epoche diverse/scale diverse/tecniche diverse. Inoltre la visualizzazione stereoscopica grazie ad un apposito apparato hardware mediante occhiali LCD o schermo LCD e occhiali passivi è confortevole e consentita su finestre multiple. La memoria del PC viene ottimizzata per la gestione contemporanea di numerosi fotogrammi di notevoli dimensioni.

Altre operatività del restitutore digitale:

In maniera automatica è possibile l'interpolazione di punti dati per la creazione di modelli digitali del terreno (DEM), la generazione di curve di livello, di superfici a maglia triangolare o rettangolare di un'area. Sono funzioni che servono dunque alla produzione di files che descrivano, mediante informazione altimetrica, la morfologia del territorio.

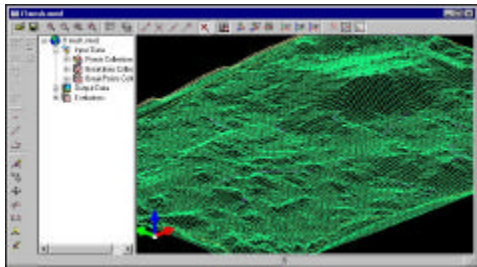


Fig. 18 - StereoView: mesh rettangolare

La rappresentazione è di grande ausilio per comprendere la configurazione tridimensionale del soggetto restituito.

DTM (Digital Terrain Model): Consente di creare un modello digitale del terreno, ovvero una semina di punti a passo regolare impostato.

3D Mesh surface: Consente di creare una superficie a maglia rettangolare che definisca l'oggetto. La costruzione della griglia si basa sul calcolo degli elementi finiti dell'insieme di punti selezionati.

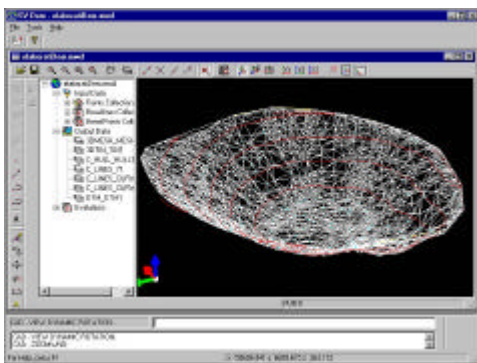


Fig. 19 - StereoView: tin e curve di livello

Si tratta quindi di polilinee 3D in quota.

3DTin surface: Consente di generare una superficie a maglia triangolare 3D. A differenza della mesh rettangolare la mesh triangolare di Delaunay passa per tutti i punti selezionati e definisce quindi una maglia irregolare.

Curve di livello: Il calcolo delle curve di livello permette la costruzione di polilinee 3D definite dall'intersezione tra piani orizzontali (paralleli al piano XY del sistema di riferimento globale) e il modello tridimensionale del terreno.

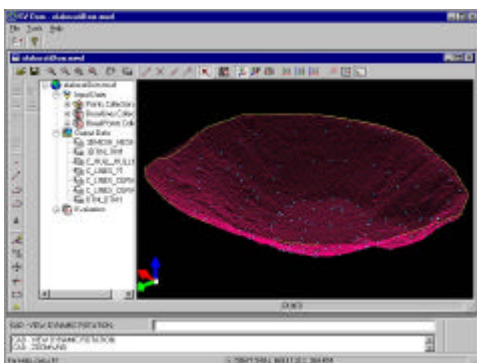


Fig. 20 - StereoView: generazione automatica DTM

In maniera automatica è possibile ottenere l'acquisizione di modelli digitali (DEM) facendo un'autocorrelazione di punti disposti su stereocoppie orientate.

Il generatore di modelli tridimensionali è in grado di generare automaticamente il modello tridimensionale sulla base di algoritmi di autocorrelazione mediante "image matching" a partire da una coppia di immagini digitali stereoscopiche e da punti di coordinate note.

L'utente ha la possibilità di selezionare le aree su cui effettuare la correlazione e di impostare i parametri relativi a dimensioni della griglia e soglie di confronto.

L'utilizzo dell'algoritmo di matching presenta il vantaggio di non richiedere l'intervento diretto dell'utente durante la fase di restituzione

Il matching delle immagini (ovvero il riconoscimento dei pixel omologhi sull'immagine sinistra e destra) viene effettuato secondo una griglia regolare sul modello, le cui dimensioni sono definite dall'utente. I punti che la costituiscono appartengono al sistema di riferimento globale e il passo della griglia è quindi registrabile in tale sistema di coordinate.

Vengono catturati punti con un coefficiente di correlazione compreso tra -1 e 1, corrispondenti rispettivamente ai valori minimo e massimo di correlazione.

I punti correlati vengono disegnati del colore scelto nell'apposita interfaccia ed i rispettivi punti 3D derivanti dalla correlazione vengono aggiunti nello specifico layer creato definendo il nome ed il colore. Il range di quote all'interno del quale ricercare i punti omologhi può essere comunque allargato o ristretto a discrezione dell'utente.

Conclusioni:

La restituzione stereoscopica di modelli tridimensionali partendo da coppie di fotogrammi opportunamente realizzate è da sempre stata privilegio di poche realtà produttive, sia per l'elevatissimo costo degli strumenti ottico-meccanici necessari al raggiungimento dello scopo, sia per la complessità delle operazioni necessarie all'orientamento dei fotogrammi, che richiedono la presenza di esperti operatori fotogrammetri. L'avvento e l'evoluzione della fotogrammetria stereoscopica digitale, il basso costo delle risorse informatiche e l'altissima diffusione del personal computer contribuiscono in maniera determinante alla semplificazione delle problematiche sopra citate.