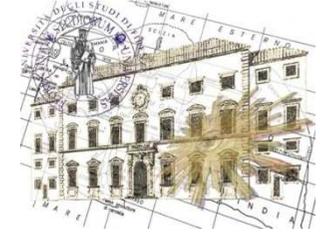




Università degli studi di Firenze
Facoltà di Lettere e Filosofia



TOPOGRAFIA E CARTOGRAFIA

a.a. 2010-2011

4. Cenni di fotogrammetria

Camillo Berti

camillo.berti@gmail.com

Argomenti

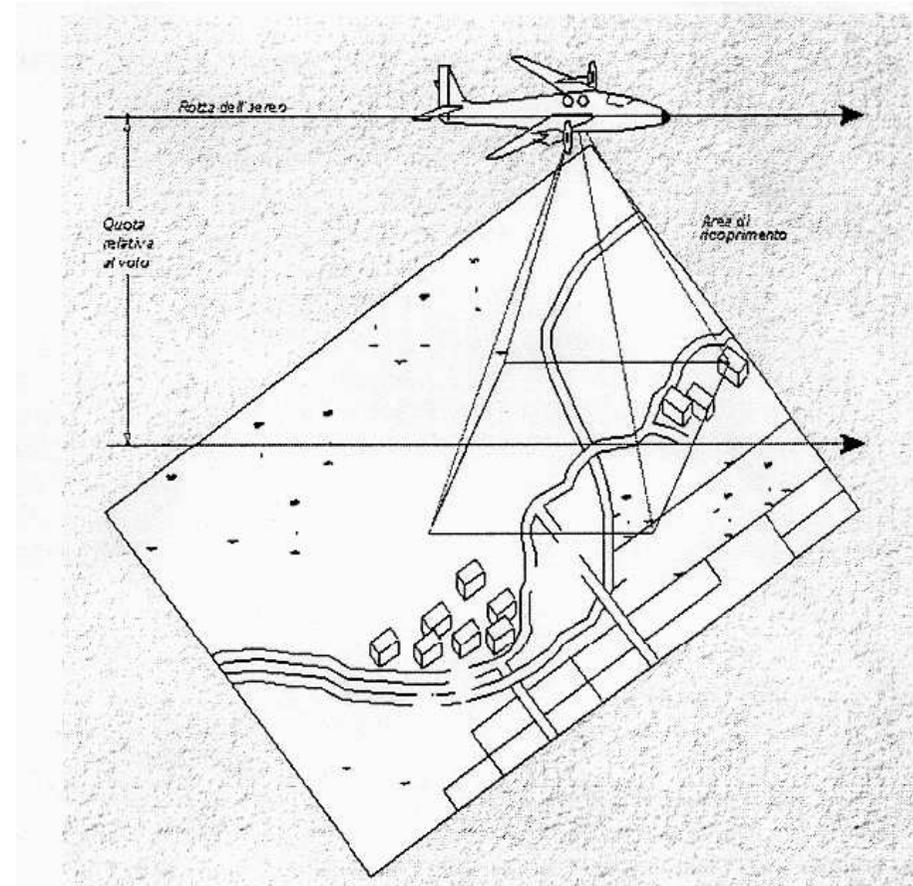
- Definizioni e scopi della fotogrammetria
- Camere e pellicole
- La ripresa aerea: piani di volo e strisciate
- Caratteristiche delle fotografie aeree
- La stereoscopia
- Dalla fotografia aerea alla carta:
 - Orientamento interno
 - Orientamento esterno
 - Stereorestituzione e fotointerpretazione
- Il futuro: fotogrammetria digitale e satellitare

Cos'è la fotogrammetria

La **fotogrammetria** è la tecnica che consente la rilevazione di **informazioni metriche** (forma e dimensione) di oggetti tridimensionali a partire da immagini fotografiche.

Per la produzione cartografica si utilizzano fotografie riprese da camere montate su aerei (**fotogrammetria aerea**).

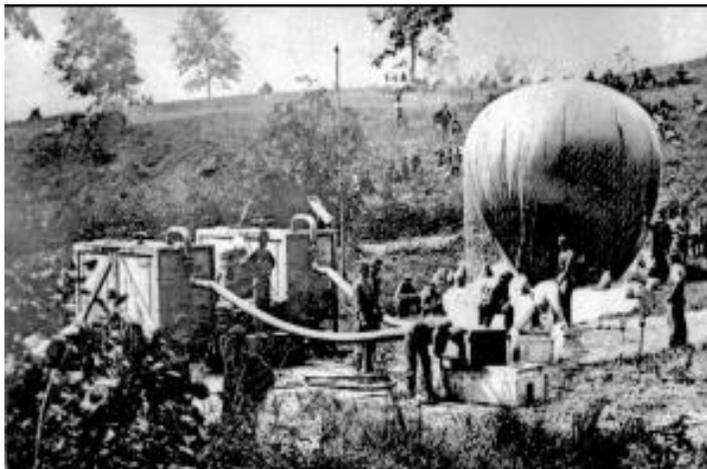
E' evidente come il rilievo aerofotogrammetrico semplifichi notevolmente la produzione di cartografia rispetto all'impiego del solo rilievo topografico.



Cenni storici

La complessità e la molteplicità delle entità presenti sulla superficie terrestre è tale da rendere estremamente laboriosa e costosa la produzione di cartografia sulla base dei rilievi topografici diretti, sia pure con l'uso dei GPS.

Si fa quindi ricorso alle tecniche basate ripresa fotografica della superficie terrestre con camere montate su aerei.



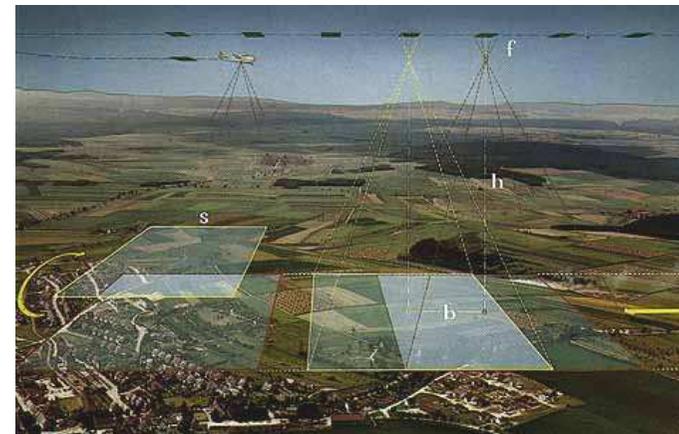
I primi rilievi aerei risalgono alla seconda metà dell'Ottocento (dapprima in Francia) e vennero effettuati per scopi militari con l'impiego di mongolfiere e palloni aerostatici, che venivano inviati oltre le linee nemiche, permettendo di supportare le decisioni dei comandi militari e guidare i lanci dell'artiglieria (ad esempio durante la guerra civile americana).

Rilievo aerofotogrammetrico

L'insieme delle operazioni finalizzate a ricavare informazioni metriche a partire da riprese fotografiche effettuate tramite apposite camere montate su aerei e rivolte allo studio e alla rappresentazione sulla carta si chiama **rilievo aerofotogrammetrico**.

Il processo è articolato in diverse fasi successive:

- Pianificazione della ripresa aerea
- Ripresa (**presa**)
- Individuazione di punti di riferimento a terra (**appoggio**)
- Ricostruzione della geometria dei fotogrammi (**orientamento**) e costruzione di un modello del terreno
- Derivazione di informazioni metriche dal modello
- Disegno delle entità (**restituzione**)



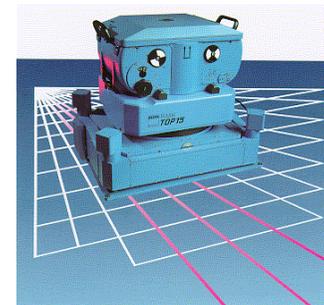
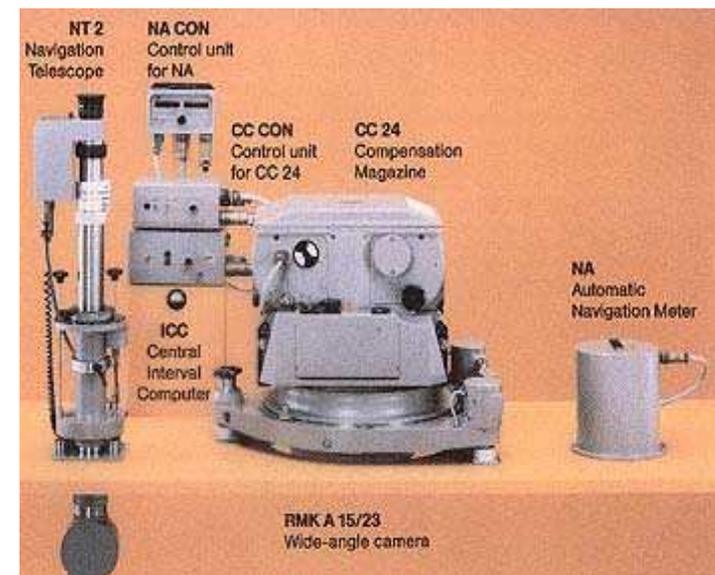
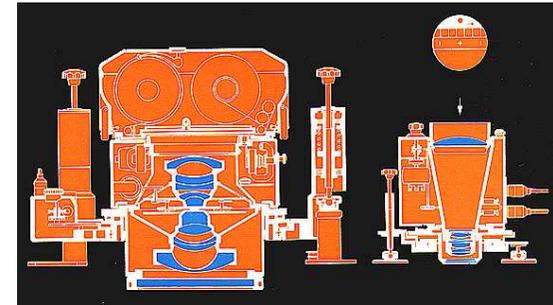
Camere aerofotografiche

Le macchine fotografiche per aerofotogrammetria hanno caratteristiche specifiche:

- robustezza e insensibilità alle vibrazioni,
- elevata velocità di scatto, con la possibilità di regolare la frequenza con cui i fotogrammi vengono scattati,
- ottiche di massima precisione, i cui parametri vengono misurati in laboratorio dopo la costruzione e durante interventi di controllo e manutenzione programmati (**calibrazione**).

Tipicamente le camere aerofotogrammetriche hanno le seguenti caratteristiche:

- lunghezza focale 88-300 mm
- dimensione negativo 23x23 cm



Pellicole aerofotografiche

Anche le pellicole hanno caratteristiche assolutamente particolari per garantire la realizzazione di immagini ottimali scattate in condizioni “non proprio ottimali”. Sono in genere caratterizzate da elevata sensibilità.

Possono essere utilizzate pellicole di diversi tipi, a seconda delle diverse applicazioni:

- pellicole **in bianco e nero**, maggiormente utilizzate per le riprese aerofotogrammetriche (sensibilità all'intero spettro della luce visibile);
- pellicole **a colori**, utilizzate soprattutto per fotointerpretazione e produzione di ortofoto
- pellicole **all'infrarosso** (in bianco e nero o a in falso colore), sensibili alla radiazione dell'infrarosso vicino, che consente di evidenziare determinati particolari naturali o antropici (es. vegetazione di latifoglie molto riflettente; acqua completo assorbimento).



Aerei

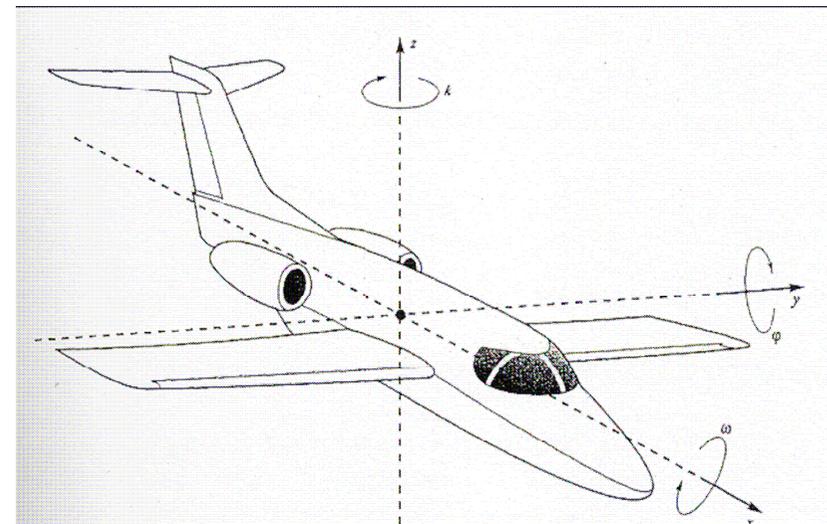
Gli aerei, ed i piloti, devono garantire la possibilità di percorrere le rotte preventivamente stabilite con la massima precisione, ad una quota praticamente costante, evitando il più possibile tutte le oscillazioni.

Tutte le variazioni di assetto dell'aereo (quota, rollio, beccheggio, deriva) vengono registrate da appositi strumenti (sensori inerziali) e sono parametri fondamentali per la ricostruzione della geometria dei fotogrammi.

Rollio – rotazione intorno all'asse x

Beccheggio – rotazione intorno all'asse y

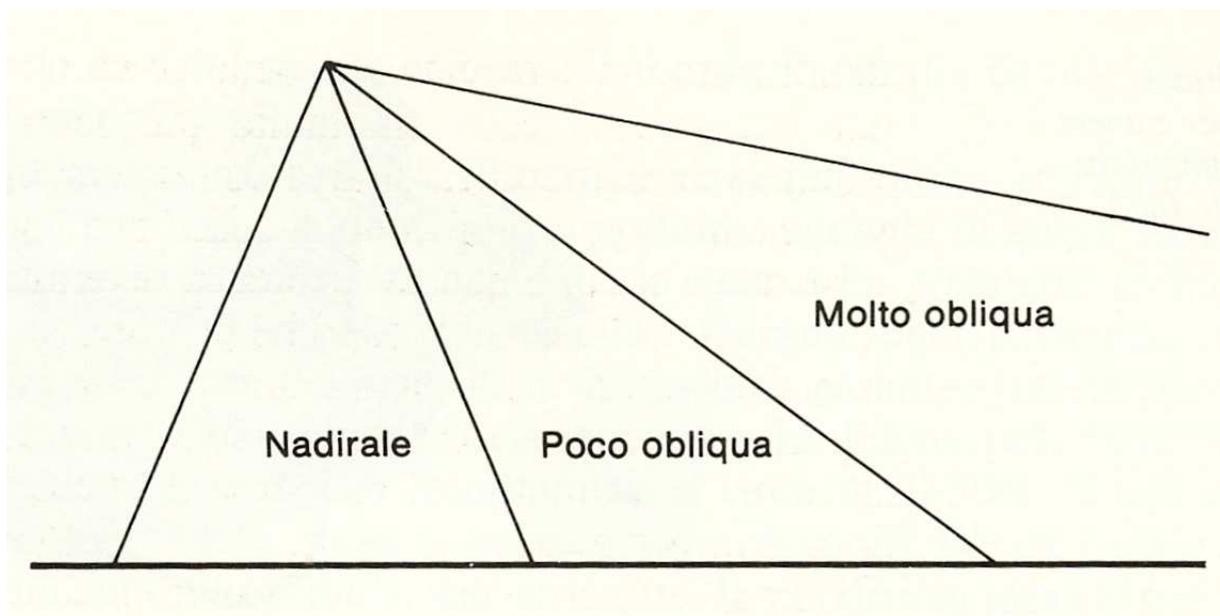
Deriva – rotazione intorno all'asse z



Tipi di riprese

In base all'inclinazione della ripresa rispetto all'andamento medio del suolo, si distinguono:

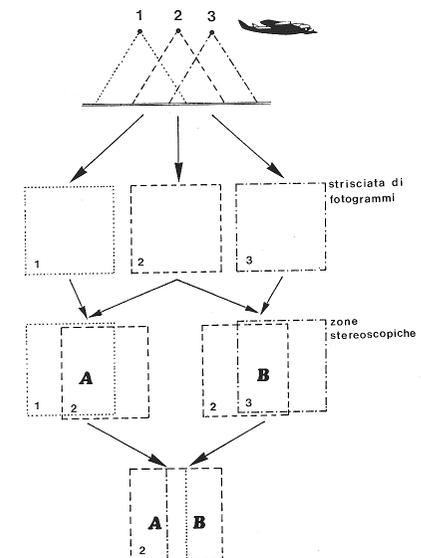
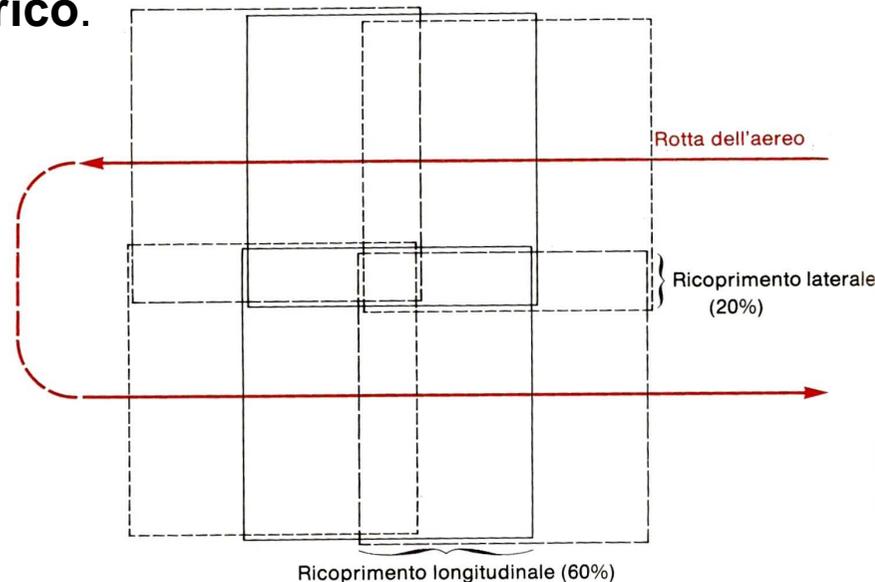
- **nadirali**, piano della ripresa parallelo al suolo
- **oblique**, piano della ripresa inclinato rispetto al suolo
- **molto oblique**, fino a comprendere la linea dell'orizzonte



Piano di volo

Considerate le caratteristiche indicate in precedenza, la ripresa aerofotogrammetrica avviene secondo rotte prestabilite (**piano di volo**) e in modo da assicurare la copertura completa del territorio.

Le foto vengono scattate in successione e ad intervalli regolari (**strisciata**) in modo da garantire una sovrapposizione di circa il 60% tra fotogrammi adiacenti (**ricoprimento longitudinale**). La sovrapposizione è necessaria per consentire la visione stereoscopica. Più strisciate contigue, con sovrapposizione compresa in genere tra il 20% e il 40% (**ricoprimento laterale**) formano un **blocco fotogrammetrico**.



Piano di volo

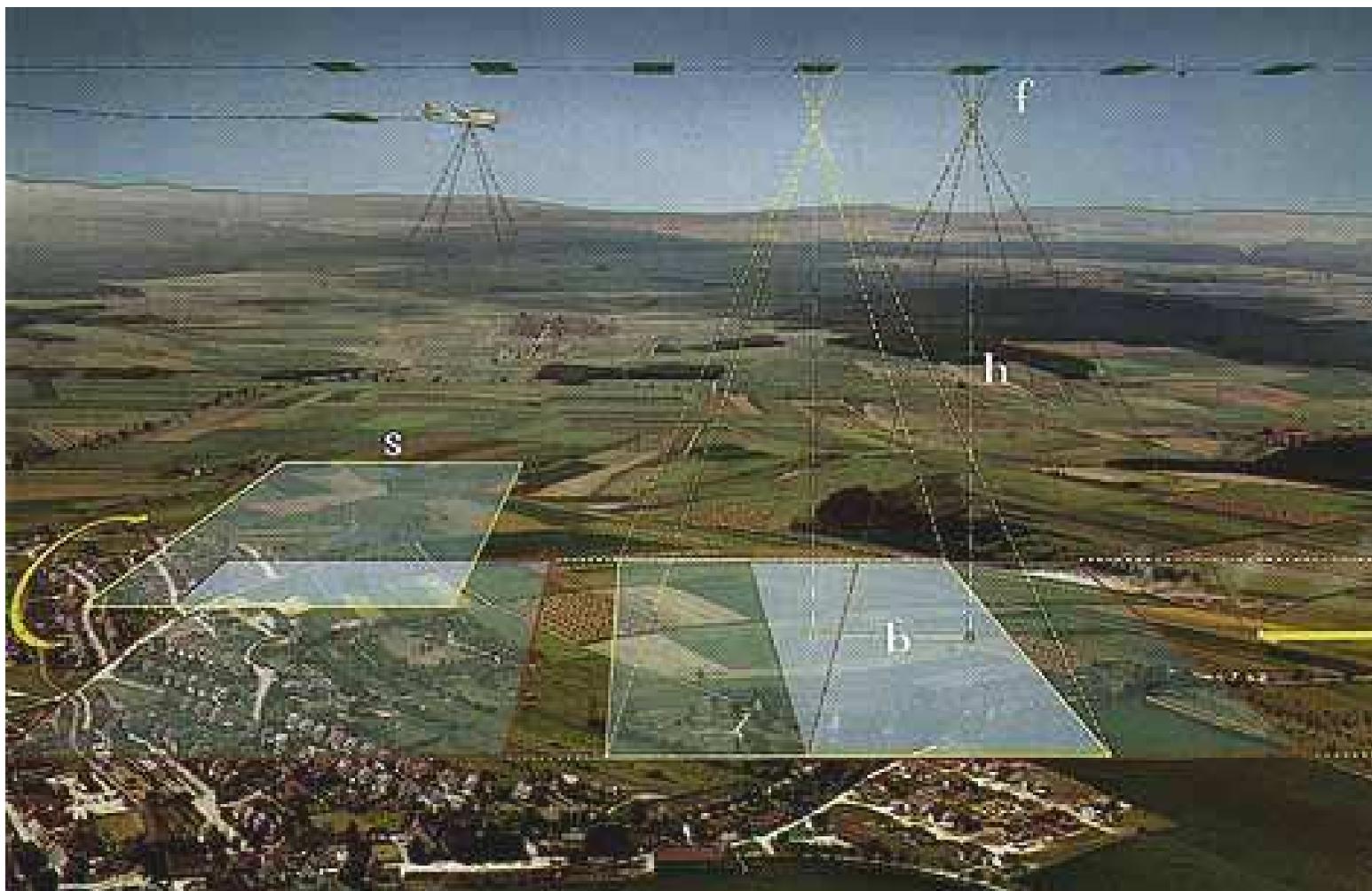
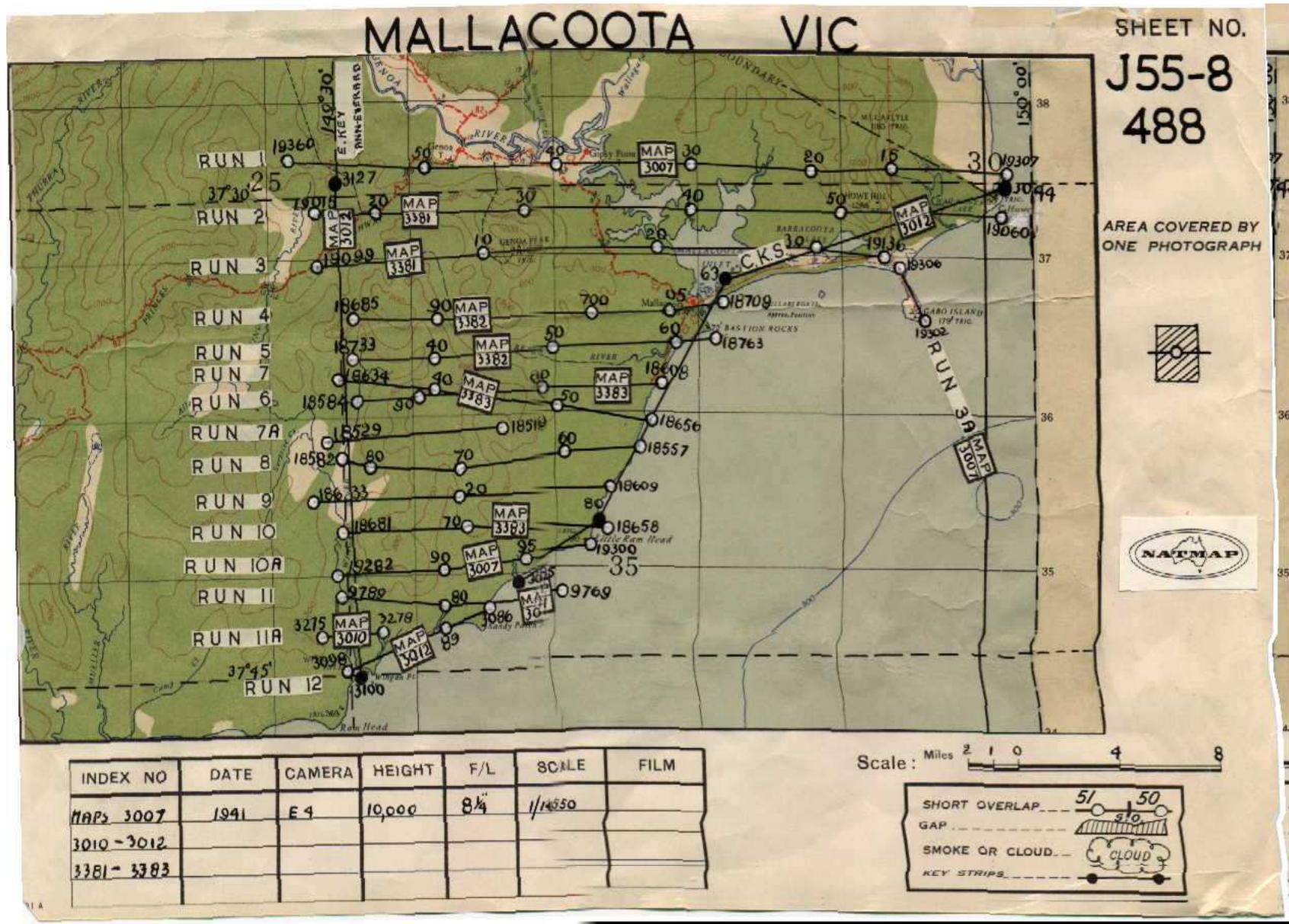


Grafico di volo



Epoca di volo

E' importante pianificare anche l'epoca delle riprese: è opportuno scegliere giornate limpide e senza nubi.

E' inoltre fondamentale tenere conto della posizione del sole rispetto al punto di presa e della sua altezza rispetto all'orizzonte, che determina la presenza di ombre e di zone sovrailluminate.

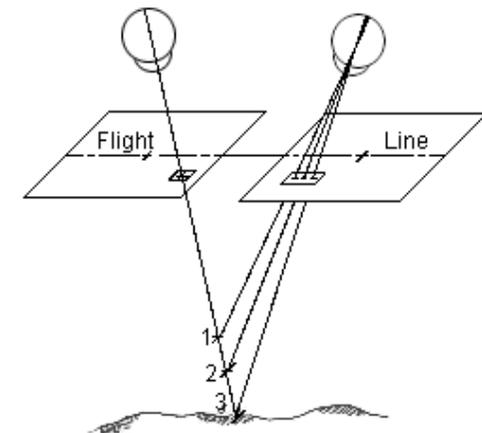
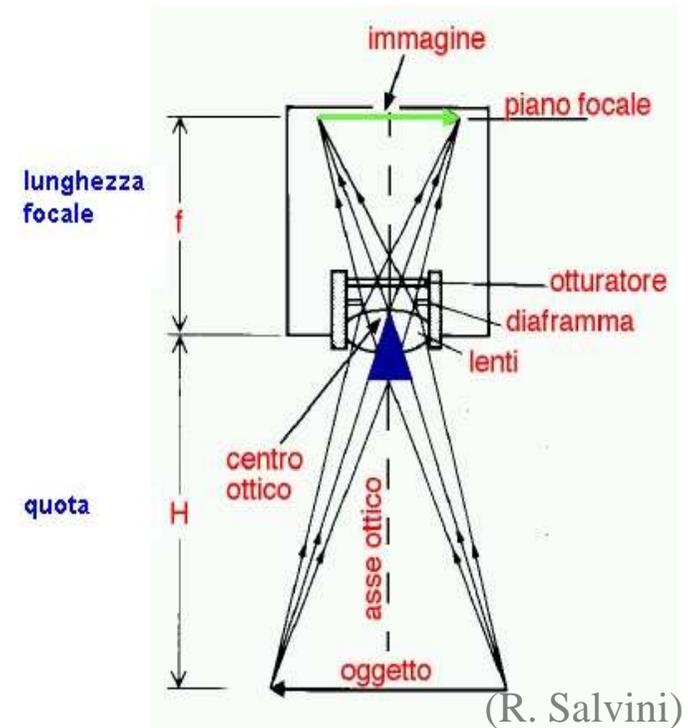
Caratteristiche delle fotografie aeree

- Una fotografia aerea è un'immagine prospettica. Il parametro più importante è la **lunghezza focale** dell'obiettivo della camera, cioè la distanza tra l'obiettivo e il **punto principale** dell'immagine fotografica.
- La lunghezza focale e la quota di ripresa determinano la **scala di un fotogramma**.

$$\frac{1}{s} = \frac{b'}{b} = \frac{f}{H}$$

f distanza focale dell'obiettivo
 H quota di volo.

- L'utilizzo di immagini che riproducono lo stesso territorio da punti di vista diversi consentono la ricostruzione delle differenze di quota al suolo e quindi la geometria degli oggetti (**stereoscopia**).



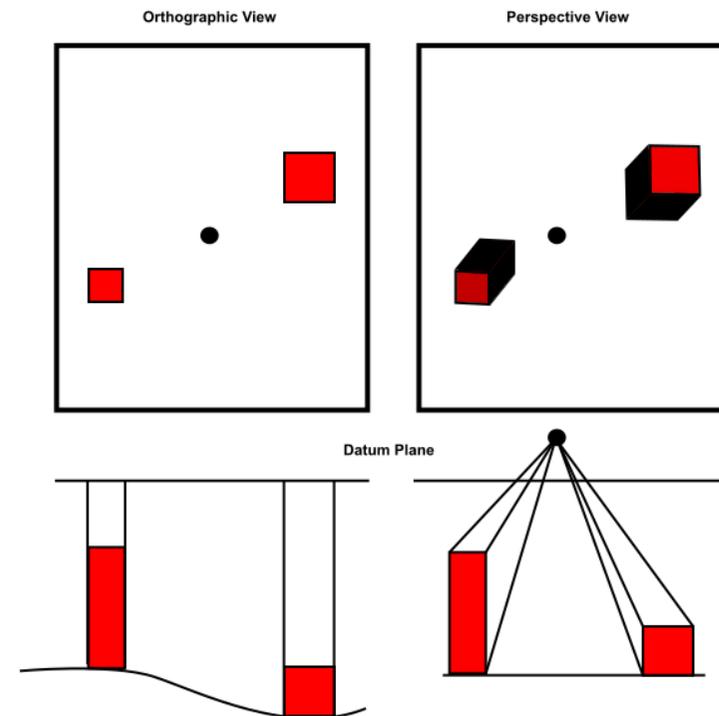
Caratteristiche dei fotogrammi

I fotogrammi, essendo immagini in prospettiva centrale, presentano alcune caratteristiche che è bene tenere presenti e che li distinguono geometricamente dalle carte (immagini in proiezione ortogonale):

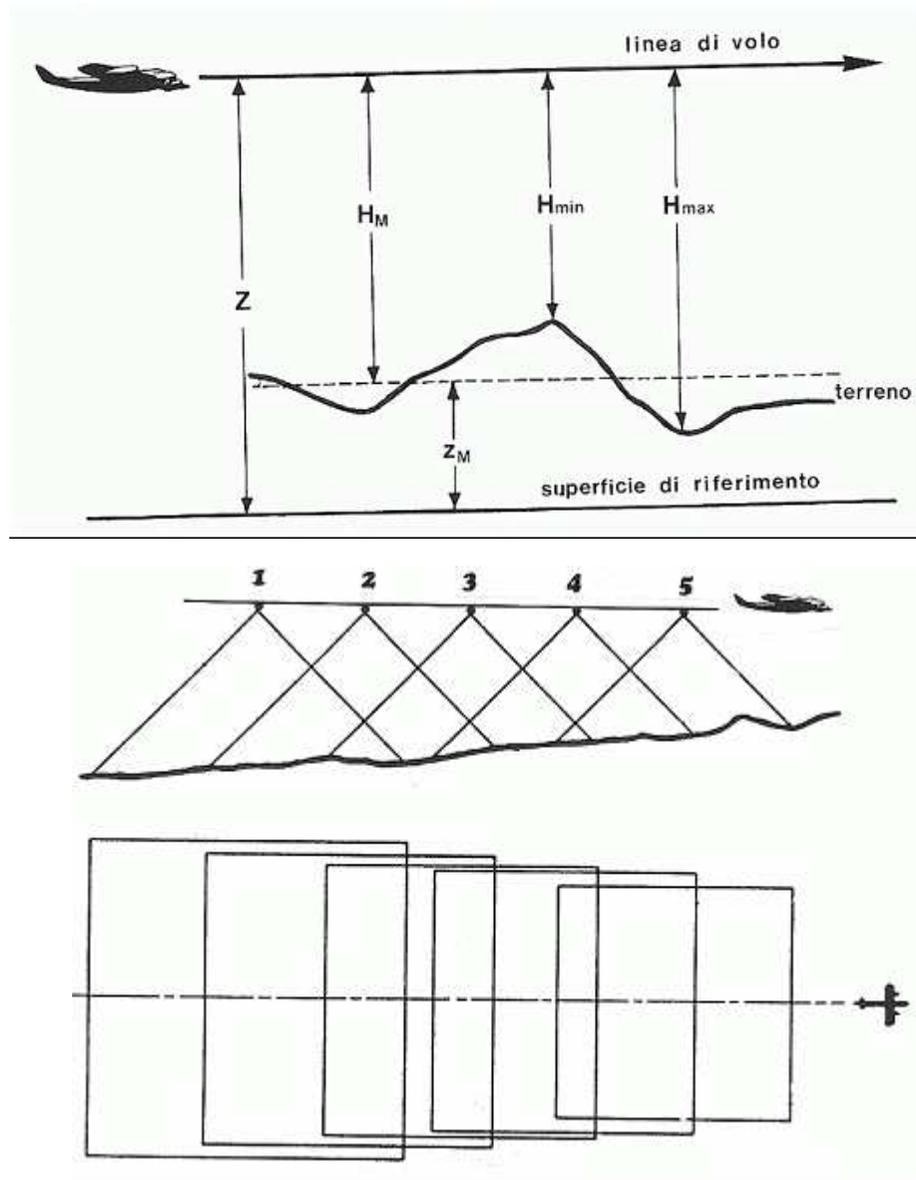
- Gli oggetti al suolo presentano deformazioni crescenti allontanandosi dal centro dell'immagine.
- La scala degli oggetti al suolo ripresi varia in funzione della loro quota.
- Le differenze di quota interne ad un fotogramma determinano spostamenti planimetrici degli oggetti ripresi.



Le immagini nelle quali sono stati corretti gli errori planimetrici dovuti alle differenze di quota si dicono **ortofotografie**.



Scala e quota di volo



La scala media dei fotogrammi, essendo legata alla quota dell'aereo rispetto al suolo al momento dello scatto, dipende da due fattori:

- **Inclinazione** dell'aereo
- **Variazioni topografiche**, che determinano anche variazioni della superficie coperta (abbracciamento).

Sta all'abilità del pilota e dei progettisti del piano di volo garantire la realizzazione di coperture fotografiche adeguate alle successive esigenze della stereorestituzione.

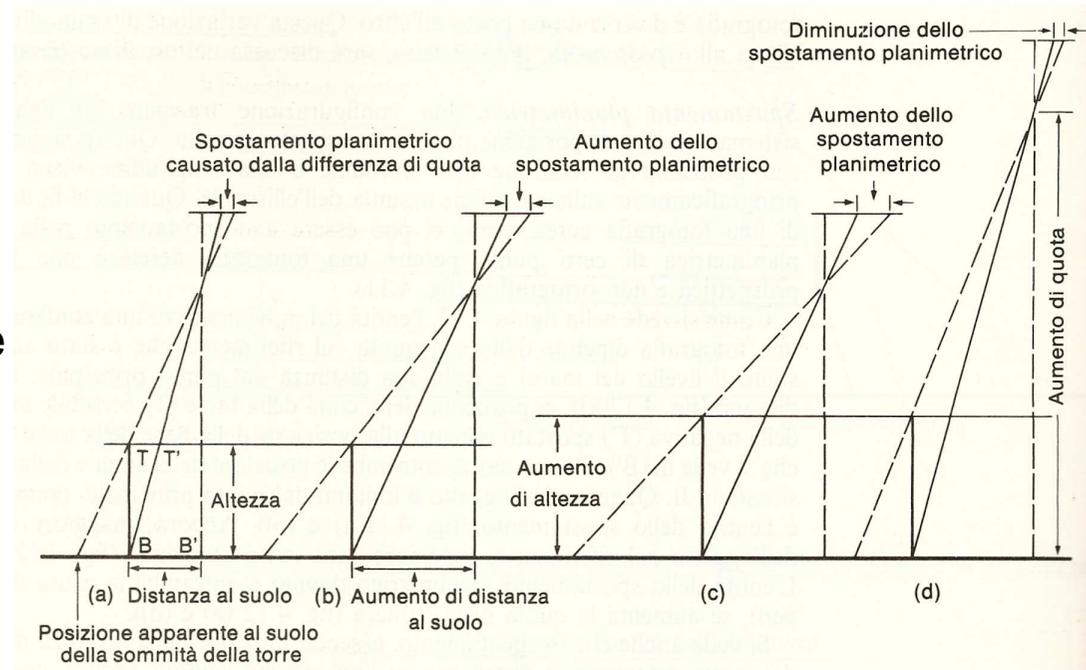
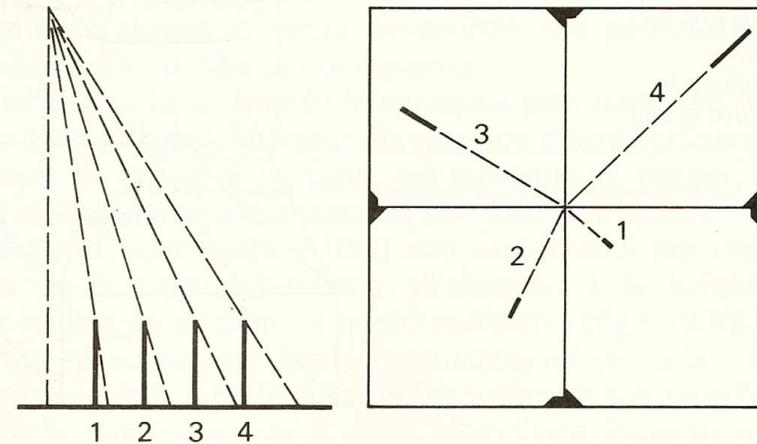
Spostamento planimetrico

Dato che una fotografia aerea è un'immagine in proiezione prospettica, la presenza di oggetti posti a quote più elevate determina uno spostamento planimetrico apparente di tali oggetti.

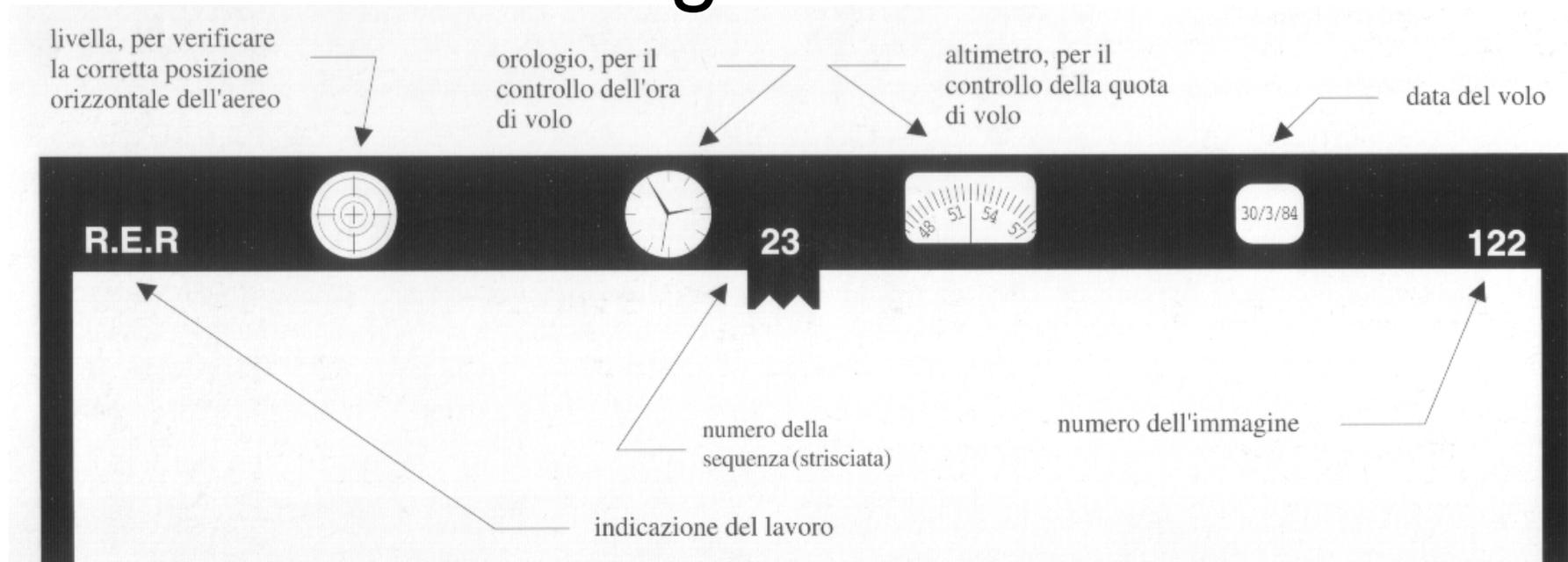
L'entità dello spostamento dipende:

1. dall'altezza dell'oggetto rispetto a quelli circostanti
2. dalla quota della ripresa
3. dalla distanza dell'oggetto dal punto principale della ripresa

In una carta, che è una proiezione ortogonale, due oggetti anche se posti a quote diverse coincidono sempre planimetricamente.



Fotogramma

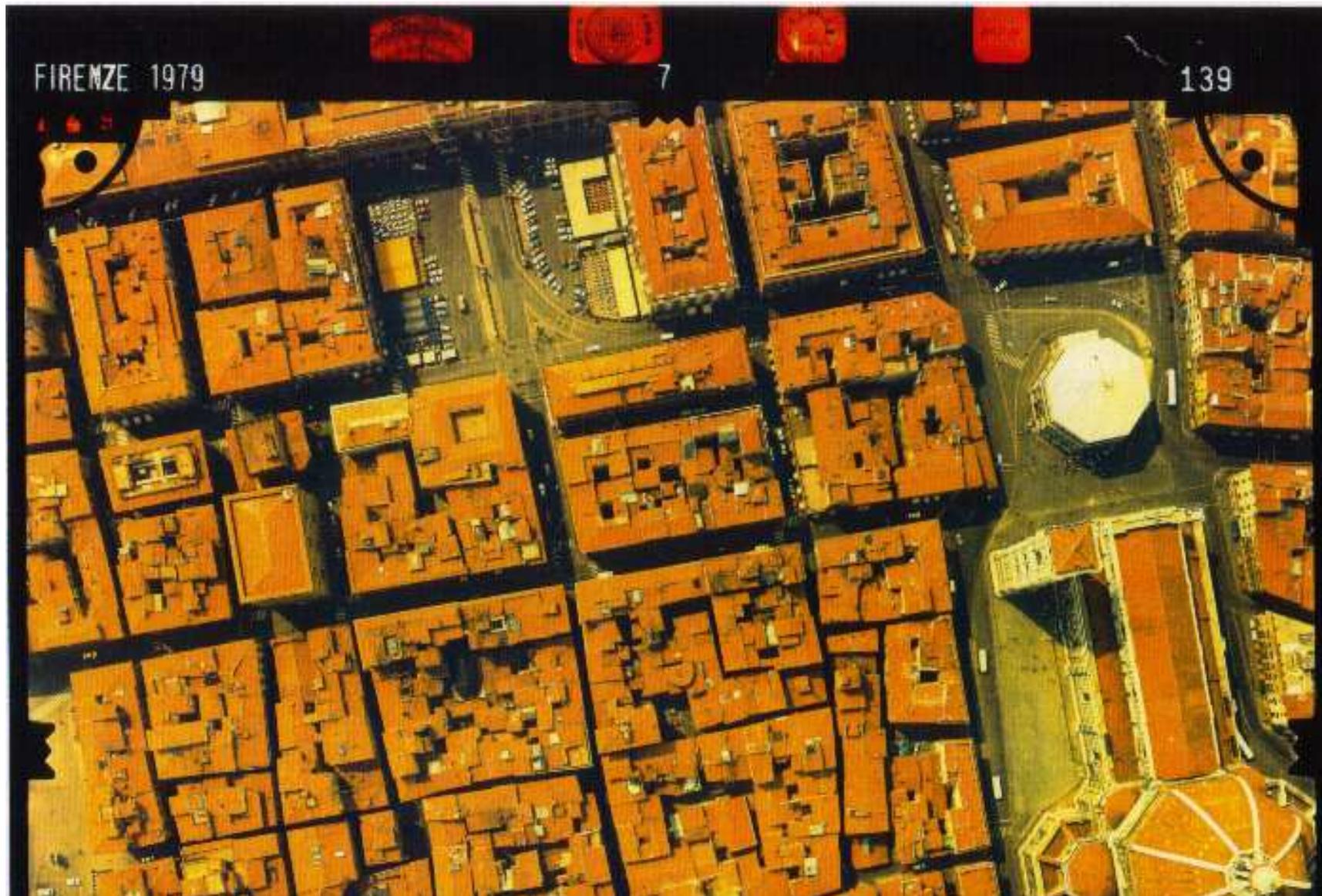


Ciascun fotogramma riporta:

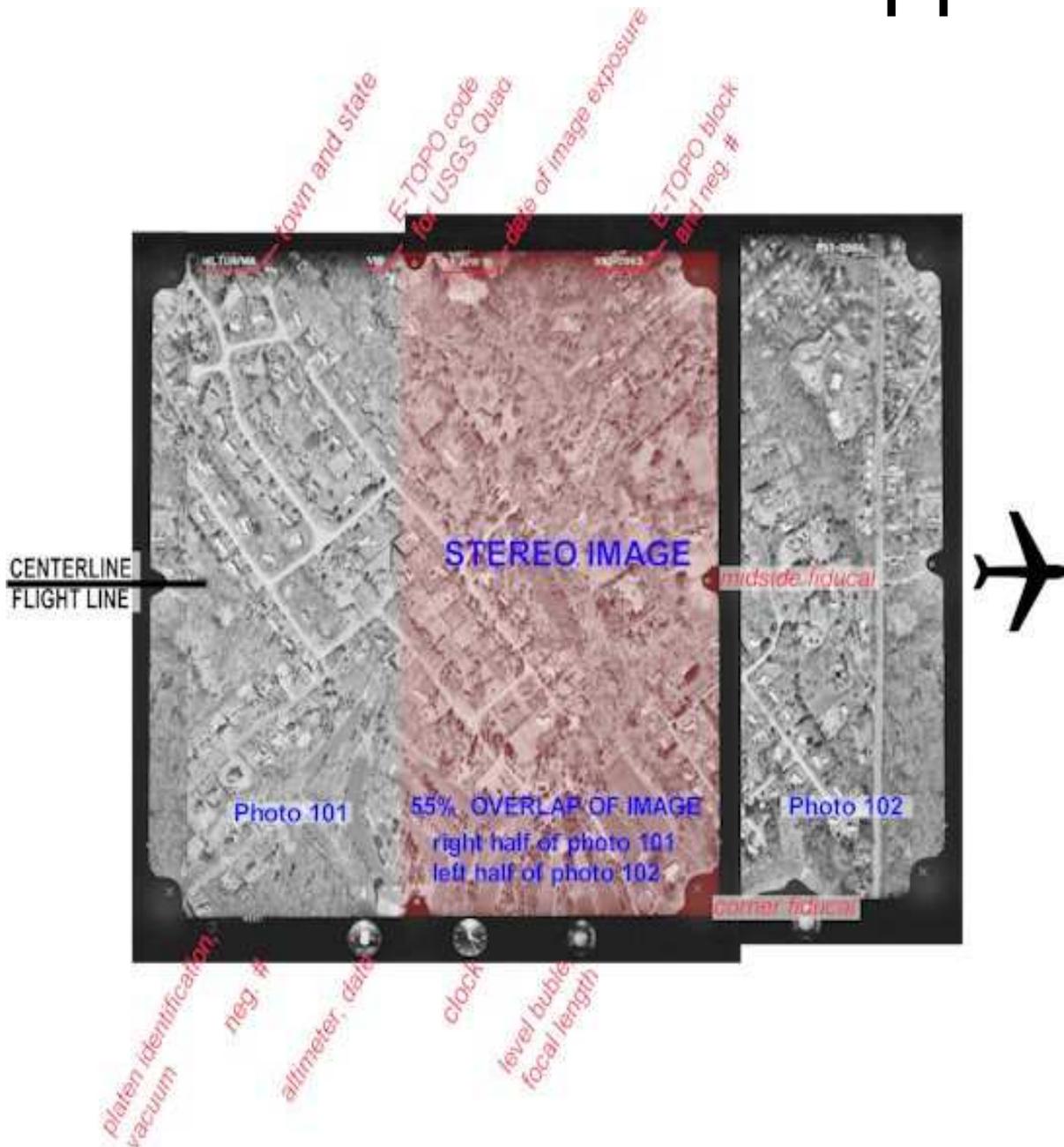
- **codici identificativi** del lavoro, della strisciata, del fotogramma;
- immagine di **livella** (inclinazione dell'aereo),
- **orologio** (ora di ripresa)
- **altimetro** (quota di volo).

Su ciascun fotogramma sono presenti 4 o 8 **marche fiduciali** (fiducial marks, repèes) in corrispondenza degli spigoli e/o dei punti mediani di ogni lato.

Fotogramma



Stereocoppia

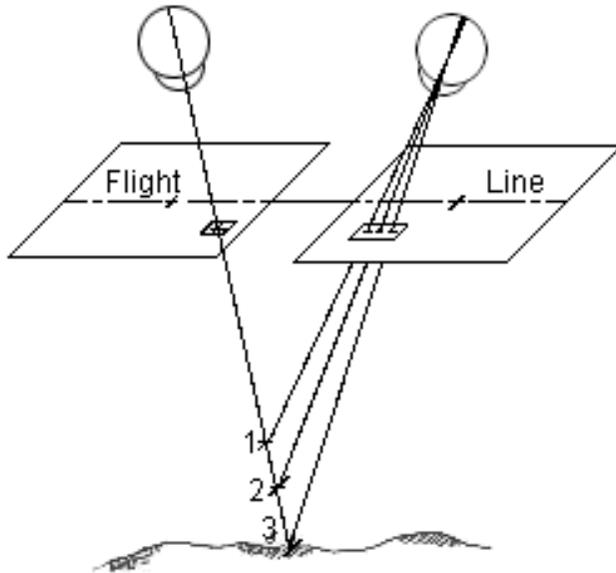
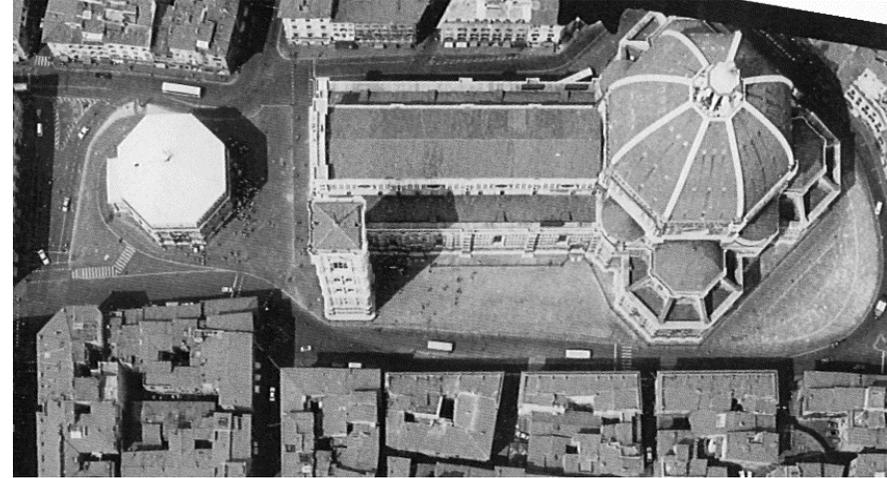


L'insieme di due fotogrammi successivi di una stessa strisciata si dice **stereocoppia**.

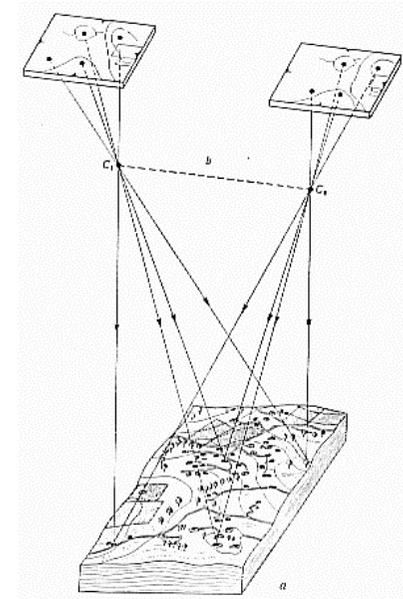
L'area di sovrapposizione tra un fotogramma ed il successivo è generalmente del 60%; l'area di sovrapposizione tra una strisciata e quella adiacente è generalmente del 30%.

L'area adeguata ad ottenere la visione stereoscopica è una porzione di quella di sovrapposizione.

Stereoscopia



La **visione stereoscopica** consente di percepire la profondità e la distanza degli oggetti (tridimensionalità). Si basa sul fatto che uno stesso oggetto ripreso da due diversi punti di vista assume posizioni relative differenti (**parallasse**). E' il principio su cui si basa la percezione della tridimensionalità nella visione umana.



Dalla fotografia aerea alla carta

Le informazioni presenti in una fotografia aerea possono essere analizzate ed “estratte” per essere trasposte sulla carta con modalità differenti e finalizzate a scopi diversi, nonostante alcune inevitabili sovrapposizioni:

- **fotogrammetria**

consente di derivare dai fotogrammi informazioni metriche sugli elementi presenti sulla superficie terrestre, finalizzate alla realizzazione di cartografia topografica

- **fotointerpretazione**

riguarda l'estrazione di informazioni relative a determinati tematismi (geologia, agraria, urbanistica, etc)

Fotointerpretazione

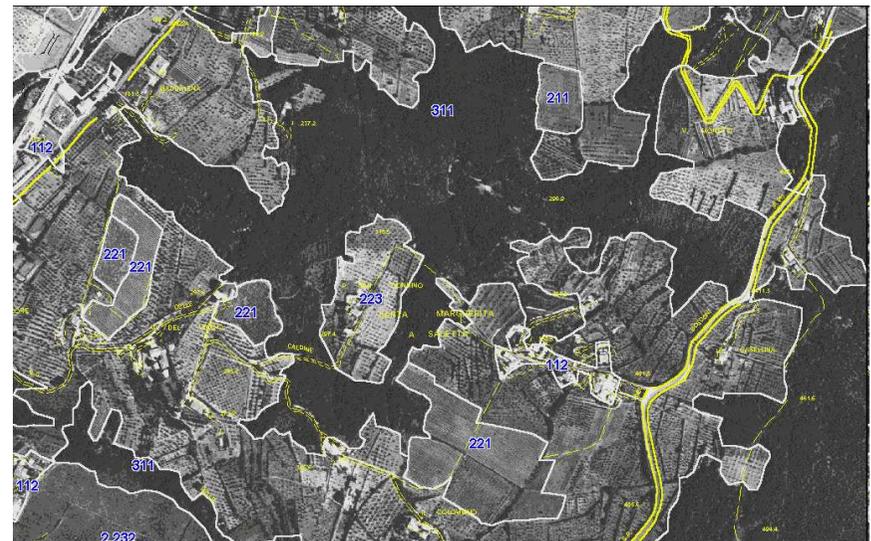
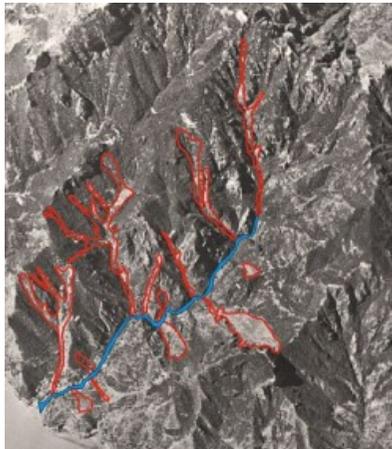
Si basa sul riconoscimento e l'identificazione delle forme naturali e delle strutture antropiche presenti sulla superficie terrestre finalizzati alle più disparate applicazioni.

Per distinguere le diverse tipologie di oggetti ci si basa sul confronto e la valutazione comparativa di diversi elementi, quali forma, colore, tessitura, tono, etc.

Si basa più sull'esperienza che su principi scientifici.

In ogni caso, il procedimento richiede un controllo delle verità a terra, da effettuare un campionamento casuale di punti in cui effettuare sopralluoghi.

Il confronto di fotografie riferite alla stessa area, riprese in tempi diversi, può consentire la valutazione dei cambiamenti intercorsi.

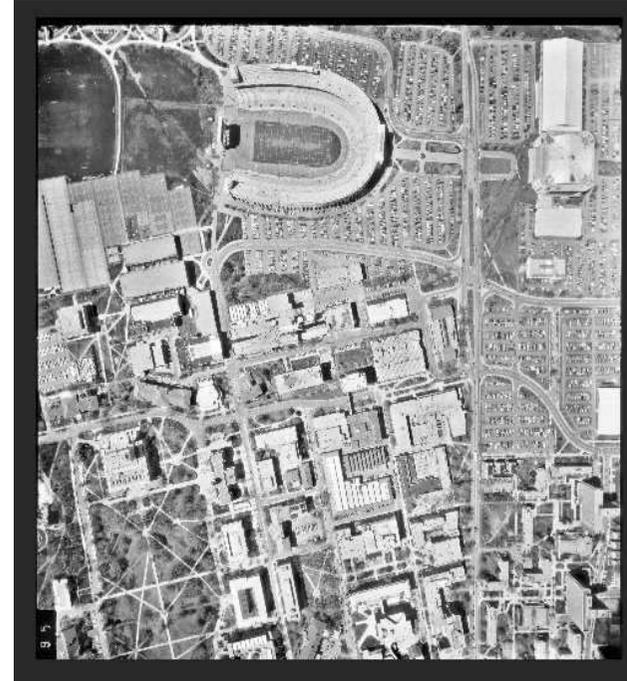
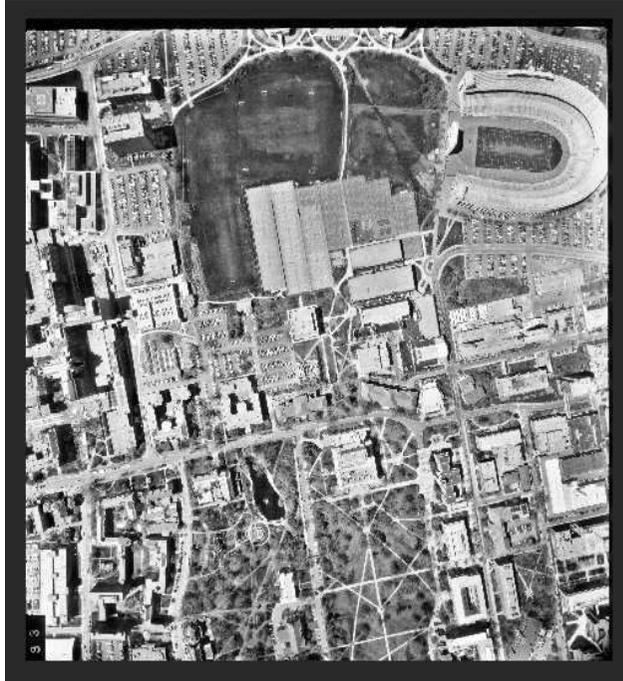


Fotogrammetria

Per arrivare alla trasposizione sulla carta topografica dei contenuti informativi delle fotografie aeree e delle loro caratteristiche metriche sono necessarie alcune operazioni preliminari.

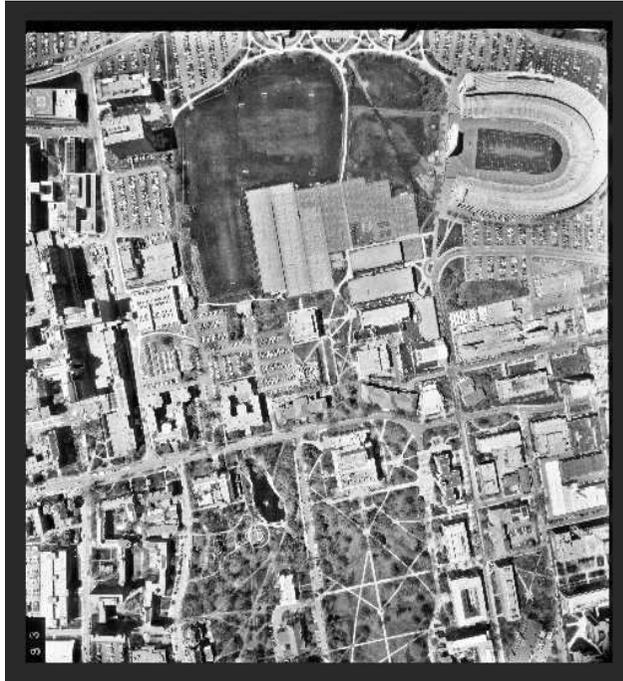
- **Orientamento interno:** ricostruzione della corretta geometria interna dell'immagine in relazione al sistema ottico che l'ha generata (correzione delle distorsioni ottiche delle lenti, eventuale deformazione dei supporti).
- **Orientamento esterno:** ricostruzione della geometria dell'immagine in relazione alla superficie terrestre, in altre parole è necessario determinare la posizione in cui è stata ripresa l'immagine (posizione della camera) rispetto al terreno (posizione del centro di presa, inclinazioni e rotazioni relative tra camera e oggetto).
- Obiettivo finale è quello di ricostruire il **modello stereoscopico**, cioè la descrizione in termini geometrici della posizione reciproca di due o più immagini tra di loro e in relazione al terreno.

Modello stereoscopico



Sfruttando la visione stereoscopica è possibile riconoscere la posizione relativa ed l'altezza di entità sul territorio. Questa possibilità è condizionata però al fatto che sia possibile ad orientare i due fotogrammi in modo da ricomporre la posizione reciproca al momento dello scatto (in pratica ricostruendo la posizione e l'orientamento assunti dall'aereo e dalla macchina fotografica nei momenti corrispondenti allo scatto dei due fotogrammi). Tale operazione, finalizzata alla ricostruzione del modello stereoscopico, parte dalla individuazione su ciascun fotogramma di particolari ben riconoscibili (**punti di appoggio**).

Modello stereoscopico



Sfruttando la visione stereoscopica è possibile riconoscere la posizione relativa ed l'altezza di entità sul territorio. Questa possibilità è condizionata però al fatto che sia possibile orientare i due fotogrammi in modo da ricomporne la posizione reciproca al momento dello scatto (in pratica ricostruendo la posizione e l'orientamento assunti dall'aereo e dalla macchina fotografica nei momenti corrispondenti allo scatto dei due fotogrammi). Tale operazione, finalizzata alla ricostruzione del modello stereoscopico, parte dalla individuazione su ciascun fotogramma di particolari ben riconoscibili (**ppppunti di appoggio**).

Orientamento esterno

Il processo di ricostruzione della geometria delle immagini in relazione alla superficie terrestre prende il nome di **orientamento esterno**. Scopo di tale procedimento è determinare la posizione in cui sono state riprese l'immagini (geometria di presa) rispetto al terreno, ricostruendo quindi posizione del centro di presa, inclinazioni e rotazioni relative tra camera e oggetto.

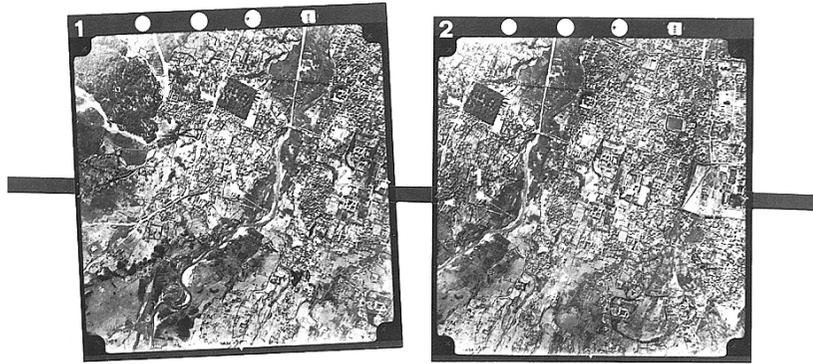
Per l'orientamento esterno si può procedere in vari modi. Uno dei procedimenti più usati prevede due fasi:

Orientamento relativo: ricostruzione della posizione reciproca delle due immagini.

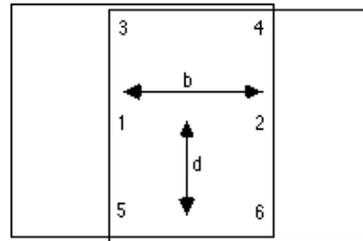
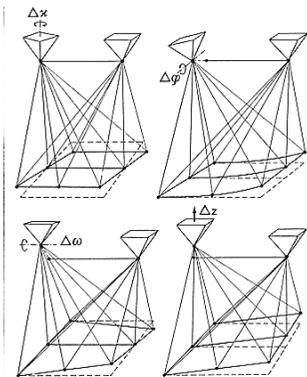
Orientamento assoluto: ricostruzione della posizione dell'insieme delle due immagini rispetto al terreno.

La **triangolazione aerea** è un procedimento che consente la ricostruzione simultanea dell'orientamento di un intero blocco fotogrammetrico, a partire dall'individuazione preventiva delle coordinate di una serie di punti di appoggio a terra presenti in più immagini del blocco.

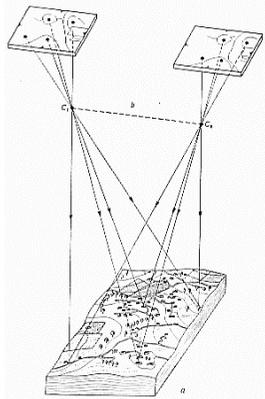
Orientamento relativo I



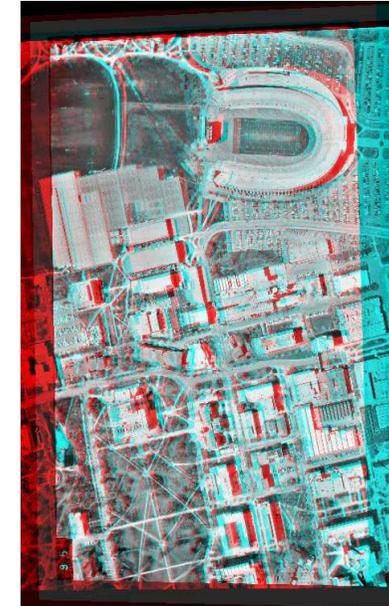
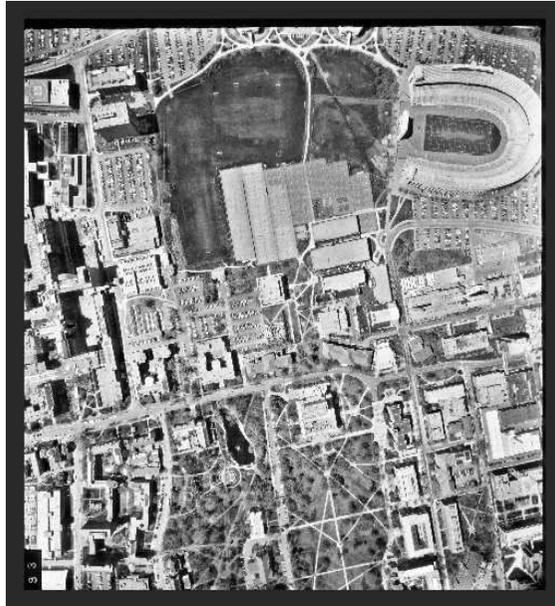
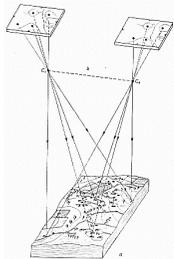
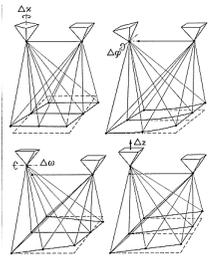
Avendo operato l'orientamento interno per ciascun fotogramma, possiamo a questo punto individuare punti facilmente riconoscibili sia sul primo che sul secondo fotogramma, derivandone le corrispondenti coordinate "immagine" nei due sistemi di riferimento (**punti di legame**). In genere si scelgono sei punti per fotogramma, disposti come nell'immagine a fianco.



E' possibile, a questo punto, ricavare un sistema di equazioni, basate sulla coincidenza dei punti espressi nei due sistemi di coordinate. In pratica saremo in grado di calcolare le coordinate sulla seconda lastra di un qualsiasi punto di cui si misurino le coordinate nella prima lastra, e viceversa. Nella pratica, ciò significa calcolare i 3 angoli e la traslazione che individuano lo spostamento relativo dell'aereo rispetto alla posizione avuta in concomitanza del primo scatto. Tali parametri, impostati su di un apposito strumento, consentono di ricostruire il modello stereoscopico.

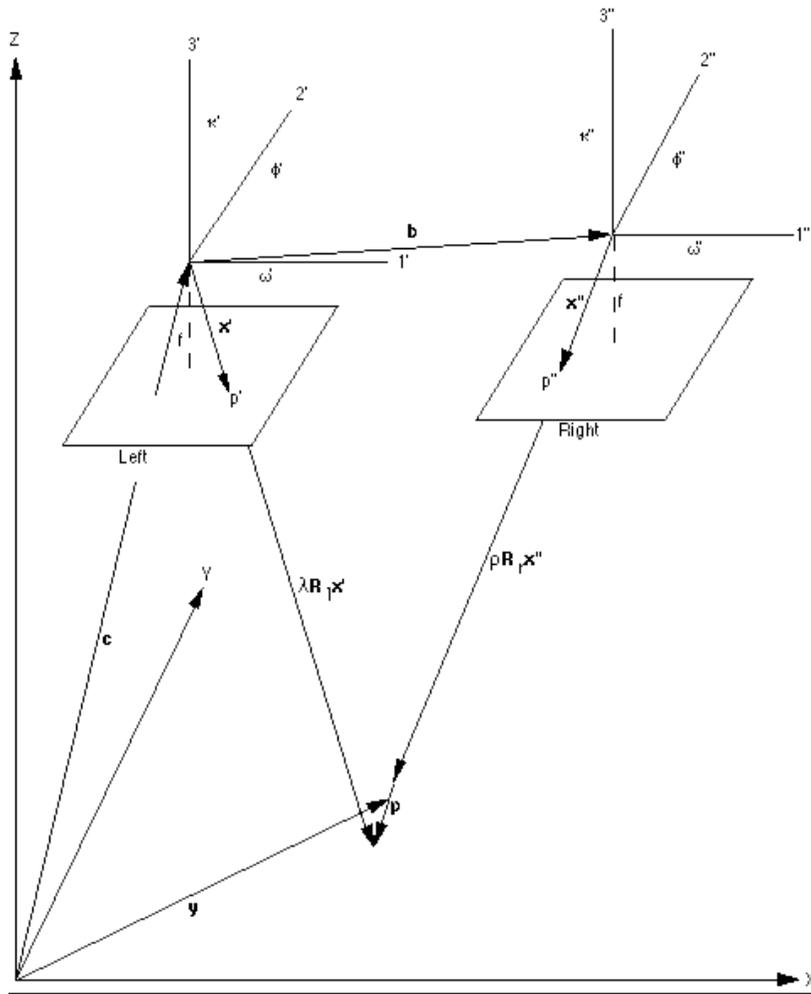


Orientamento relativo II



Con l'orientamento relativo dei due fotogrammi non è ancora possibile calcolare le coordinate terreno di un punto di cui misuriamo la posizione nel modello, ma consente comunque di realizzare una visione "stereoscopica" (ovvero tridimensionale) del territorio fotografato.

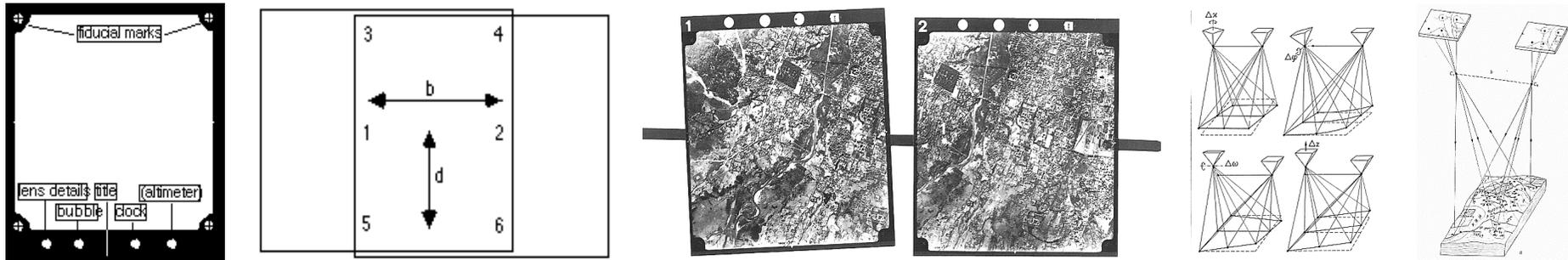
Orientamento relativo III



In pratica, sulla base di un sistema di equazioni che descrivono la relazione tra punti espressi in entrambi i sistemi di riferimento locali (**equazioni di collinearità**), si ottengono le rotazioni e le traslazioni da impostare sullo stereorestitutore per ricostruire la posizione relativa della fotocamera al momento degli scatti.

Più punti si rilevano, con maggior precisione si valutano i parametri cercati.

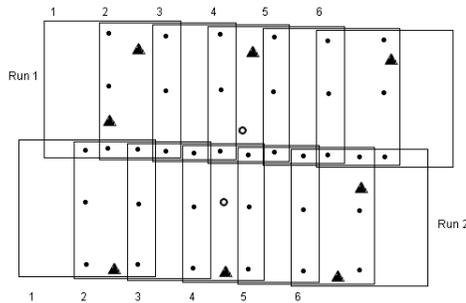
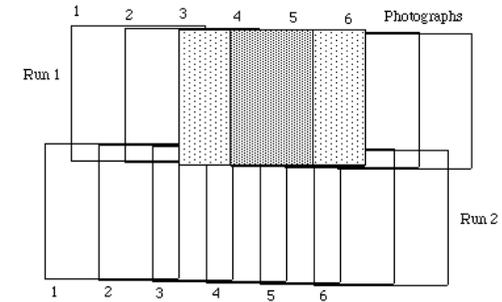
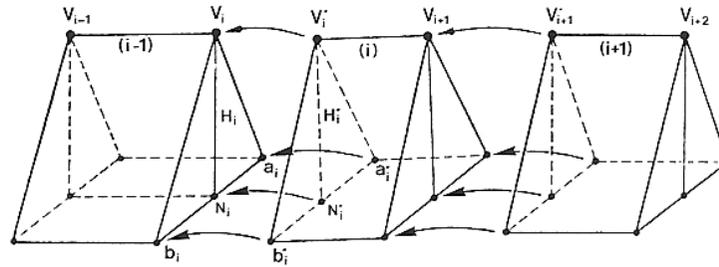
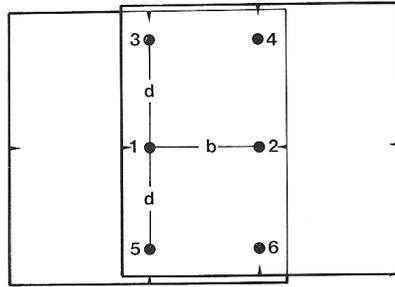
Orientamento assoluto



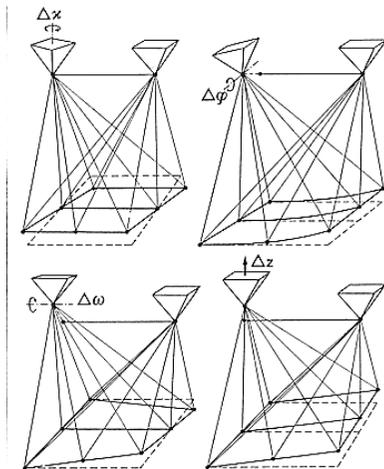
Se di alcuni dei punti (gli stessi, od altri differenti) individuati sulle immagini conosciamo anche le coordinate terreno (ad esempio ottenute mediante rilievi topografici), siamo in grado di ricavare l'orientamento assoluto del nostro modello stereoscopico.

L'orientamento assoluto consente di calcolare le coordinate terreno di un qualsiasi punto di cui misuriamo le coordinate "lastra" (nel modello stereoscopico, ovvero su ciascuno dei due fotogrammi, essendo noi in grado di esprimere le coordinate di un punto in uno qualsiasi dei sistemi di riferimento).

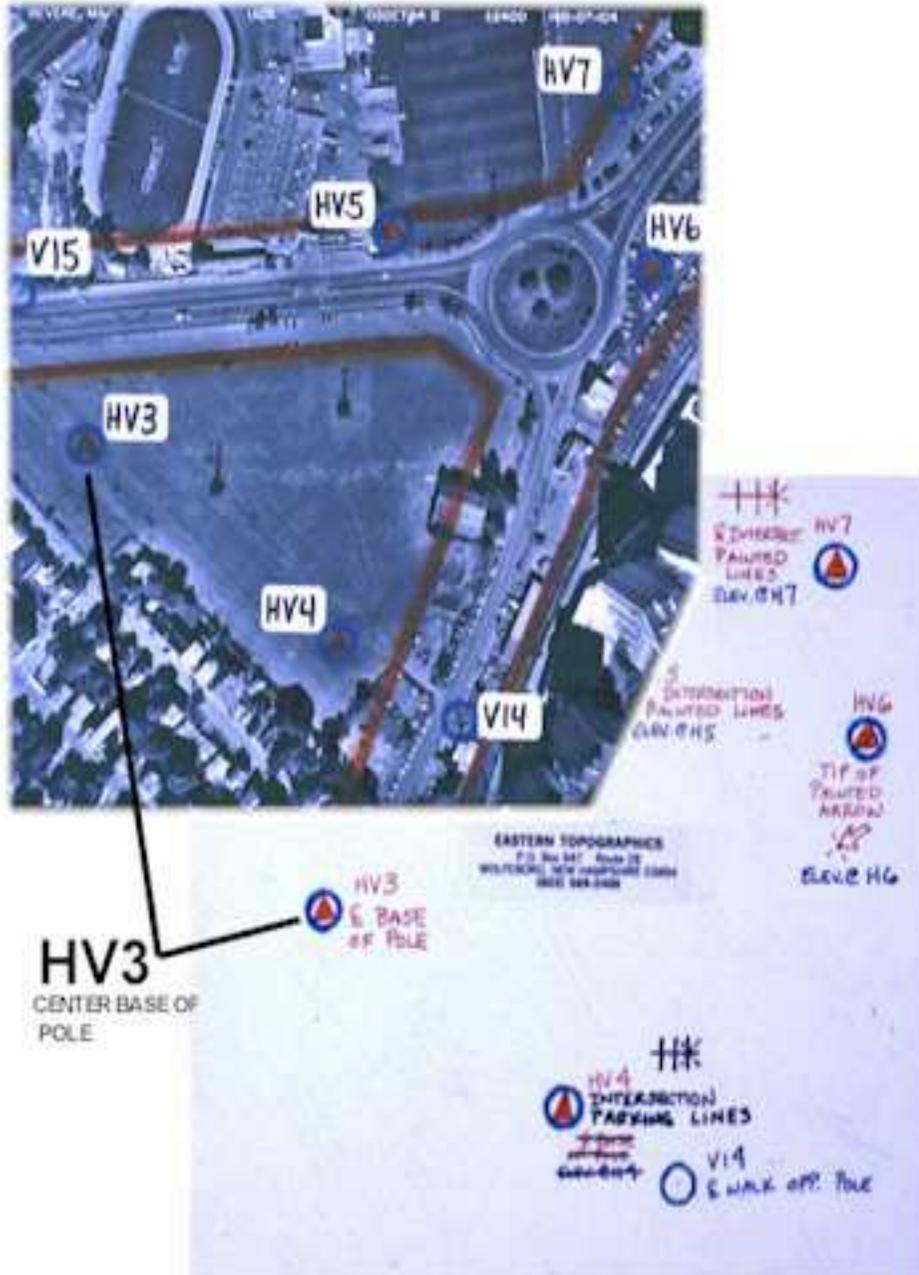
Triangolazione aerea I



Su alcuni fotogrammi individuiamo dei punti di cui commissionare al topografo il calcolo delle relative coordinate terreno. A questo punto siamo in grado di dare in pasto al programma di triangolazione aerea tutte le coordinate nei diversi sistemi locali (o “lastra”) dei punti di aggancio tra un fotogramma e l’altro, le coordinate lastra e terreno dei punti richiesti al topografo (in genere, per evitare fraintendimenti, si usa “forare” i punti sulle foto consegnate al topografo), più tutti i parametri noti del volo (focale dell’obiettivo, quota media di volo). L’elaboratore ci restituisce tutti i parametri per ricostruire sullo strumento (lo stereorestitutore) le posizioni relative dei due fotogrammi costituenti ciascuna coppia stereoscopica, oltre a quelli per trasformare in coordinate terreno i punti collimati nello strumento.



Front of photo



Back of photo

Triangolazione aerea II

Sul fotogramma accanto vediamo come vengono segnalati i punti di cui si vuole che il topografo procuri le coordinate terreno, per consentire poi l'orientamento assoluto del blocco di strisciate mediante il processo di triangolazione aerea.

Punti di appoggio fotografico

"A picture is worth a thousand words..."

Ground Control

An inexpensive digital camera captures more information in less time than sketches or field notes. Images can be e-mailed along with an ASCII coordinate file of the ground control points.

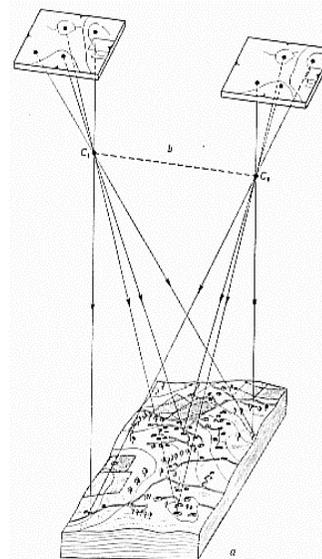
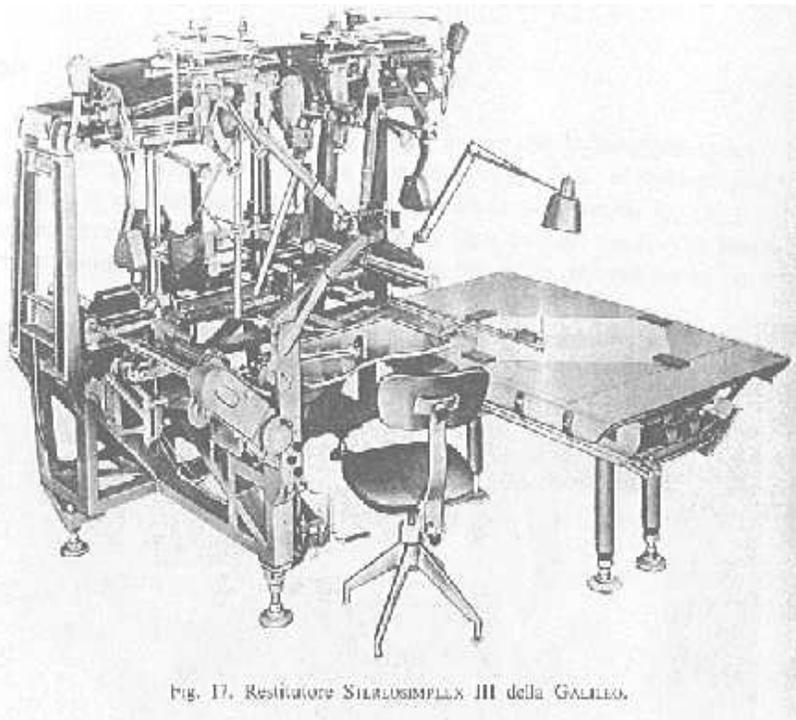
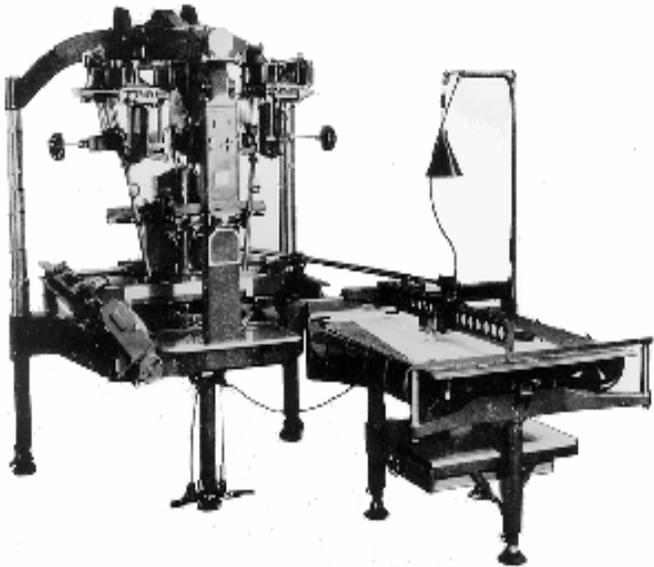
An aerial photograph of a city street scene. A green circle highlights a specific point on the street labeled 'HV1234'. Two green lines extend from this point to the corners of a rectangular inset photograph. The inset photograph shows a person in a yellow safety vest and blue pants standing in a parking lot, with a white building and a blue car in the background. The inset photo is positioned over the ground control point on the aerial image.

e-topo.com Earth Topography

Per ciascuno dei punti segnalati dallo stereorestitutista il topografo provvede a rendere disponibili le corrispondenti coordinate terreno.

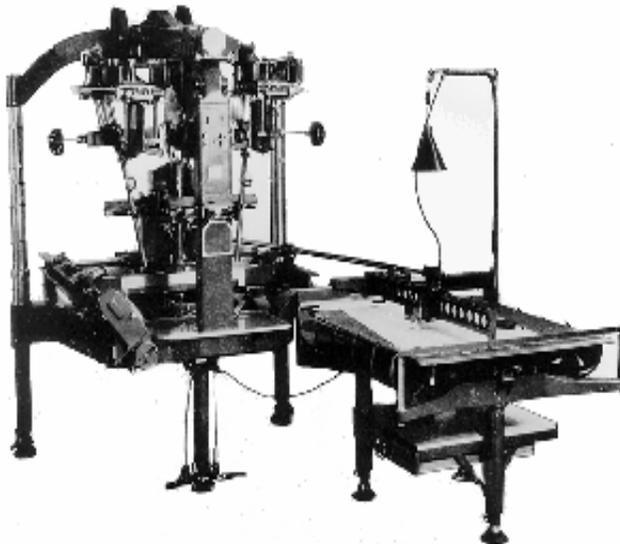
Stereorestitutore

Lo stereorestitutore è quello strumento che consente di ricostruire il modello stereoscopico e, a partire da questo, di disegnare (nella corretta posizione planimetrica) le entità che si vedono nelle fotografie.



Stereorestitutore analogico

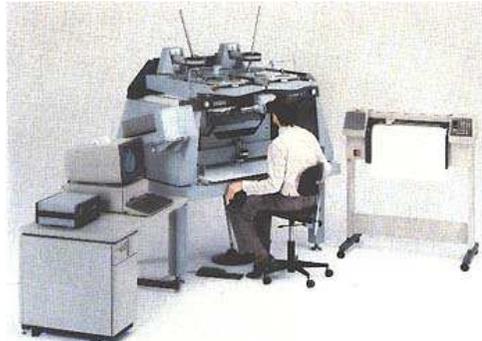
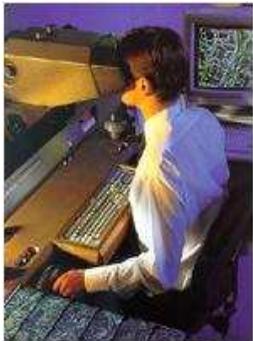
I primi stereorestitutori, quelli analogici, consentono di riprodurre meccanicamente l'orientamento relativo dei fotogrammi della coppia stereoscopica, operando su leveraggi e viti micrometriche per imporre ai carrelli porta-lastra quelle rotazioni e quelle traslazioni indicate dal processo di triangolazione aerea. In pratica, l'orientamento dei fotogrammi risulta, fatto salvo il rapporto di scala, "analogo" a quello che aveva la pellicola nel momento in cui le foto erano state scattate. Questi strumenti posseggono una complessità ottica e meccanica notevole. Tra i progettisti di simili strumenti vi sono tecnici quali Ermenegildo Santoni, che ha dato origine ad una fortunata serie di strumenti prodotti dalle Officine Galileo, e diffusi in tutto il mondo.



Stereorestitutore analitico

Con l'avvento dei computer, è stato possibile delegare ad un apposito programma il compito di simulare l'orientamento relativo dei fotogrammi, e quindi la ricostruzione del modello stereoscopico. In pratica lo strumento ha sempre tutta la parte meccanica ed ottica di interazione con l'operatore, ma ciò che questi vede nel binoculare è il risultato di elaborazioni effettuate al volo su porzioni di fotogrammi riprese da apposite telecamere (una per lastra). In pratica si è spostata tutta la complessità di ricostruzione meccanica dell'orientamento dei fotogrammi nel software a corredo dello strumento.

Tra i vantaggi degli stereorestitutori analitici vi è anche quello di ottenere come dati numerici (e non solo come disegno tramite il pantografo), memorizzati sul computer, il contorno e la localizzazione delle entità rilevate dall'operatore. Tali dati potranno poi subire operazioni di editing grafico per le correzioni ed integrazioni a seguito del controllo in campo da parte del topografo, e il successivo ridisegno tramite plotter.



Evoluzione della fotogrammetria

Fotogrammetria digitale

Tutto il processo prima svolto tramite gli stereorestitutori, dall'orientamento delle immagini al disegno delle entità cartografiche, viene svolto tramite appositi software, grazie alla maggiore potenza di

Stereosc

Evoluzione della fotogrammetria

Fotogrammetria digitale

Tutto il processo prima svolto tramite gli stereorestitutori, dall'orientamento delle immagini al disegno delle entità cartografiche, viene svolto tramite appositi software.

Stereoscopia satellitare

Si applicano ad immagini satellitari ad alta risoluzione le tecniche fotogrammetriche.

Bibliografia

- J. Campbell, *Introduzione alla cartografia*, Bologna, Zanichelli, 1989, pp. 85-123.
- S. Perego, *Appunti di cartografia ad uso degli Studenti di Scienze Geologiche e Scienze Naturali*, Parma, Santa Croce, 1999, pp. 37-43.
- P. Malagoli, *Fotointerpretazione. Arte divinatoria o attendibile fonte informativa?*, in *L'evoluzione della geografia dalla carta geografica al digitale in nove passi descritti dai maggiori esperti del settore*, Roma, MondoGIS, 2004, pp. 59-71.
- M. Trevisani, *Appunti per il corso di Cartografia e Cartografia Numerica*, 2005, <http://sira.arp.at.toscana.it/sira/documenti/Dispensa_Cartografia.pdf>, 1/12/2009.

Foto aeree sul web

IGMI, *Catalogo foto aeree*,
<<http://www.igmi.org/voli/>> (23/04/2011).

Regione Toscana, *Repertorio. Foto aeree*,
<<http://www.rete.toscana.it/sett/territorio/carto/repertorio/foto/foto.htm>>
(23/04/2011).



Attribuzione-Non commerciale-Condividi allo stesso modo 2.5 Italia

Tu sei libero:



di riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare quest'opera



di modificare quest'opera

Alle seguenti condizioni:



Attribuzione. Devi attribuire la paternità dell'opera nei modi indicati dall'autore o da chi ti ha dato l'opera in licenza e in modo tale da non suggerire che essi avallino te o il modo in cui tu usi l'opera.



Non commerciale. Non puoi usare quest'opera per fini commerciali.



Condividi allo stesso modo. Se alteri o trasformi quest'opera, o se la usi per crearne un'altra, puoi distribuire l'opera risultante solo con una licenza identica o equivalente a questa.

- Ogni volta che usi o distribuisi quest'opera, devi farlo secondo i termini di questa licenza, che va comunicata con chiarezza.
- In ogni caso, puoi concordare col titolare dei diritti utilizzi di quest'opera non consentiti da questa licenza.
- Questa licenza lascia impregiudicati i diritti morali.