

## T

# Fotogrammetria



**UNITÀ T1** Principi e strumenti della fotogrammetria

**UNITÀ T2** La presa dei fotogrammi

**UNITÀ T3** Orientamento e restituzione

Questo modulo, costituito da tre unità, tratta le problematiche relative al rilievo e alla rappresentazione del territorio mediante appropriate fotografie, prese da terra o in volo con opportune tecniche e adeguate camere da presa. L'obiettivo principale è quello di far acquisire allo studente una cultura fotogrammetrica di base finalizzata alla comprensione delle tecniche da utilizzare nel rilievo fotogrammetrico.

Nella prima unità vengono esposti i concetti basilari della fotogrammetria, sia aerea sia terrestre, e vengono descritte le camere per la presa fotogrammetrica con le loro caratteristiche peculiari. In questa fase, inoltre, vengono introdotte le prime problematiche connesse alla presa che saranno poi sviluppate nella terza unità.

La seconda unità illustra i procedimenti operativi inerenti la presa fotogrammetrica sia per i rilievi aerei a scopo cartografico, sia per quelli terrestri per la restituzione di edifici o di elementi architettonici.

La terza unità si occupa dell'orientamento dei fotogrammi, che costituisce una fase preliminare alla restituzione, con cui si ottiene il prodotto finale del rilievo fotogrammetrico, e della stessa restituzione. Nel suo ambito è necessario richiamare concetti di geometria dello spazio, spesso non familiari allo studente, ma ineludibili per un moderno approccio analitico alla fotogrammetria. In questo contesto viene anche illustrata la tecnica che consente di ottenere immagini raddrizzate utilizzando un singolo fotogramma.

## T1

# Principi e strumenti della fotogrammetria

## TEORIA

- 1 Definizione e classificazione
- 2 Principio di base della fotogrammetria
- 3 Le camere da presa
- 4 I fotogrammi
- 5 Problemi connessi alla presa
- 6 La visione stereoscopica
- 7 Il principio di collimazione della marca mobile

## RIASSUMENDO

## AUTOVALUTAZIONE



La fotogrammetria ha oggi un ruolo fondamentale nello studio e nella rappresentazione del territorio. Anche se storicamente la sua origine si confonde con la nascita della fotografia, a metà dell'Ottocento, è stato solo dai primi decenni del Novecento, parallelamente allo sviluppo della tecnologia aeronautica, che è divenuta la protagonista assoluta nella realizzazione di qualsiasi documento cartografico. L'immagine mostra il particolare di un fotopiano della città di Roma: in alto è visibile la Piazza del Campidoglio, con la sua caratteristica composizione geometrica.



## 1. Definizione e classificazione

Nella topografia tradizionale la rappresentazione del territorio si realizza rilevando una serie di **punti caratteristici** che vengono poi **restituiti** per via analitica e **disegnati** nella scala prescelta (*rilievo discreto o per punti*). Nonostante l'utilizzo dei moderni goniometri elettronici nelle operazioni di campagna e dei computer nelle operazioni di calcolo e disegno, il rilievo topografico tradizionale **per punti** presenta alcuni elementi critici:

- costi elevati per le operazioni di campagna, in quanto i punti devono essere rilevati **uno per uno**, in particolare se il territorio è di **ampie estensioni**;
- necessità di associare alle misure ottenute dal goniometro anche delle **annotazioni** che consentano, in tempi successivi alla misura, di riconoscere il punto a cui sono riferite;
- necessità di eseguire interpolazioni sia per la costruzione delle curve di livello sia per la rappresentazione planimetrica di elementi non lineari.

Dopo l'invenzione della fotografia, nel 1839, si pensò subito di affiancare al tradizionale **rilievo per punti**, quello realizzato con **fotografie** che permettessero poi il rilievo del terreno dall'ufficio.

Era nata così l'idea della **fotogrammetria**, cioè di una tecnica in cui le operazioni di campagna vengono effettuate con una *macchina fotografica* invece che con un *goniometro*. In questo modo il terreno, con le sue particolarità e i suoi infiniti punti, diventa sempre disponibile per le misure e le elaborazioni (**rilievo continuo**), senza richiedere la **presenza fisica** sugli elementi da rilevare. Si può quindi formulare la seguente definizione.

La **fotogrammetria** è quella tecnica che consente di definire la *posizione*, la *forma* e le *dimensioni* degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune **immagini fotografiche** degli stessi oggetti, riprese da **punti diversi** (► FIGURA 1).

Ciò è consentito dall'utilizzo di speciali **camere** che producono fotografie (dette **fotogrammi** per rimarcare la valenza metrica) sulle quali è possibile eseguire misure di precisione, e che con sufficiente approssimazione possono essere considerate **prospettive centrali**.

La *fotogrammetria* viene poi classificata sia in base al *tipo di presa* utilizzata, sia in base al *tipo di elaborazione*, sia, infine, in base al *tipo di fotografia* utilizzata. Possiamo sintetizzare tale classificazione con la ► TABELLA 1.



**FIGURA 1** La fotogrammetria consente il rilievo di oggetti tridimensionali senza avere alcun contatto fisico con essi, ma utilizzando immagini fotografiche effettuate da diversi punti di presa. In esse un punto dell'oggetto deve essere ripreso in entrambe le immagini e in differenti posizioni.

### FAQ

#### ► Che cos'è la fotogrammetria?

È una tecnica di rilievo in cui i dati di campagna vengono acquisiti con una macchina fotografica anziché con i goniometri. Le fotografie sono i «libretti di campagna» che consentono di effettuare la rappresentazione grafica dell'oggetto fotografato.

**FAQ**

► **Il prodotto finale di un rilievo fotogrammetrico è sempre un disegno?**

No, talvolta può essere un'immagine raster (per esempio un ortopiano), altre volte può essere un insieme numerico di coordinate riferite a punti del territorio.

**TABELLA 1** Classificazione della fotogrammetria

Tipo di presa	Tipo di elaborazione	Tipo di fotografia
<p><b>Fotogrammetria terrestre</b></p> <p>Le prese avvengono da <i>ter-ra</i>; in questo caso gli oggetti si trovano a distanze inferiori a 200 m; per cui si parla anche di <i>fotogrammetria dei vicini</i> (rilievo di <i>edifici</i>)</p>	<p><b>Fotogrammetria analogica</b></p> <p>La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con <i>dispositivi fisici</i> (bacchette metalliche, raggi luminosi) che riproducono all'<i>inverso</i> il fenomeno della presa</p>	<p><b>Fotogrammetria classica</b></p> <p>Le fotografie sono ottenute dallo <i>sviluppo</i> di emulsioni fotosensibili su <i>pellicola</i>, o su <i>lastre</i> di vetro (in negativo e in positivo)</p>
<p><b>Fotogrammetria aerea</b></p> <p>Le prese avvengono da un <i>aereo</i>; in questo caso il terreno si trova a distanze superiori a 200 m; per cui si parla anche di <i>fotogrammetria dei lontani</i> (rilievo del <i>territorio</i>)</p>	<p><b>Fotogrammetria analitica</b></p> <p>La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene elaborando numericamente (con moderni strumenti di calcolo) opportune <i>misure</i> effettuate direttamente sui fotogrammi</p>	<p><b>Fotogrammetria digitale</b></p> <p>Le fotografie sono ottenute sotto forma <i>numerica</i> e organizzate in un grigliato di pixel. Possono essere ottenute sia da una <i>macchina digitale</i>, sia per <i>scansione</i> di una fotografia tradizionale</p>

In ogni caso i «prodotti» finali ottenibili dalla fotogrammetria possono essere:

- **rappresentazioni grafiche**, cioè *carte topografiche*, o, più in generale, *disegni* degli oggetti;
- **rappresentazioni numeriche**, cioè *coordinate* di punti appartenenti agli oggetti rilevati;
- **ulteriori immagini**, cioè *fotografie elaborate* come le immagini *raddrizzate* o gli *ortofotopiani*.

■ **Sviluppo storico della fotogrammetria**

Nello sviluppo della tecnica del rilievo fotogrammetrico, è possibile riconoscere schematicamente le seguenti **fasi temporali**, grossomodo della durata di cinquant'anni, e legate a determinate tecnologie.

**Fase pionieristica** (1850-1900). La fotogrammetria fu fondata da *Aimé Laussedat*, che nel 1851 ne indicò i procedimenti, basati sostanzialmente su una **intersezione in avanti** in cui le misure venivano ottenute dai **fotogrammi**. La misura delle grandezze sul fotogramma era, però, fonte di notevoli errori dovuti alla **distorsione** degli obiettivi fotografici.

Fu *Ignazio Porro* che nel 1865 cercò di rimediare a tali errori, integrando questa nuova tecnica con il **fotogoniometro**, uno strumento che permetteva di misurare gli angoli delle direzioni che vanno dal centro dell'obiettivo ai punti dell'oggetto fotografato, dopo aver collocato la lastra nel posto che aveva al momento della ripresa e averla convenientemente illuminata.

**Fase analogica e stereoscopica** (1900-1960). La seconda età della fotogrammetria inizia nei primi anni del Novecento attraverso la **stereoscopia** (*C. Pulfrich*) e il principio della **marca mobile** (*F. Stoltz*), che permisero di superare le difficoltà dell'ambiguo riconoscimento dei punti omologhi su due **fotogrammi diversi**. Nel 1909, poi, il triestino *E. Von Orel* costruì lo **stereo-autografo**, per mezzo del quale fu risolto il problema di passare da una coppia di fotogrammi alla proiezione orizzontale, non attraverso il *calcolo* delle coordinate dei singoli punti, ma in maniera continua utilizzando elementi fisici di tipo **analogico**. Von Orel aprì l'era dei **restitutori analogici**; in questo campo i progressi furono abbastanza rapidi, soprattutto per opera di studiosi come *Wild*, *Nistri* e *Santoni*.

La prima guerra mondiale vide poi l'introduzione della **fotogrammetria aerea**. Oggi essa ha sostituito tutti gli altri metodi per la produzione di carte di media e



grande estensione, mentre la fotogrammetria **terrestre** viene impiegata nel rilievo degli edifici.

**Fase analitica** (dal 1960 in poi). L'impostazione *analogica* nella fotogrammetria era legata a epoche in cui i **limitati mezzi di calcolo** impedivano di sviluppare le procedure analitiche necessarie per passare dalla *prospettiva* (fotografia) alla *proiezione ortogonale* (carta).

A partire dagli anni '60, l'avvento dei **calcolatori elettronici** con grande capacità di calcolo (e piccole dimensioni) ha indirizzato lo sviluppo della fotogrammetria verso una impostazione **analitica** del problema. Essa prevede che il passaggio da una coppia stereoscopica di fotogrammi alla relativa proiezione ortogonale avvenga tramite lo **sviluppo numerico** di un certo numero di **equazioni** elaborate dal computer.

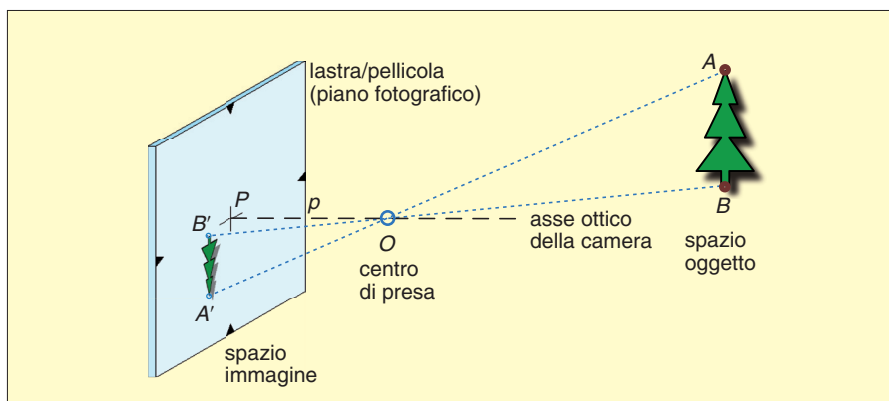
**Fase digitale.** A partire dagli anni '90 è stato possibile produrre e utilizzare immagini non fotografiche, ma **numeriche**, cioè immagini **digitali**, strutturate in una matrice di piccoli elementi detti *pixel*. L'impiego di queste immagini ha dato luogo alla fase **digitale** della fotogrammetria che svolge le procedure connesse attraverso un computer.

## 2. Principio di base della fotogrammetria

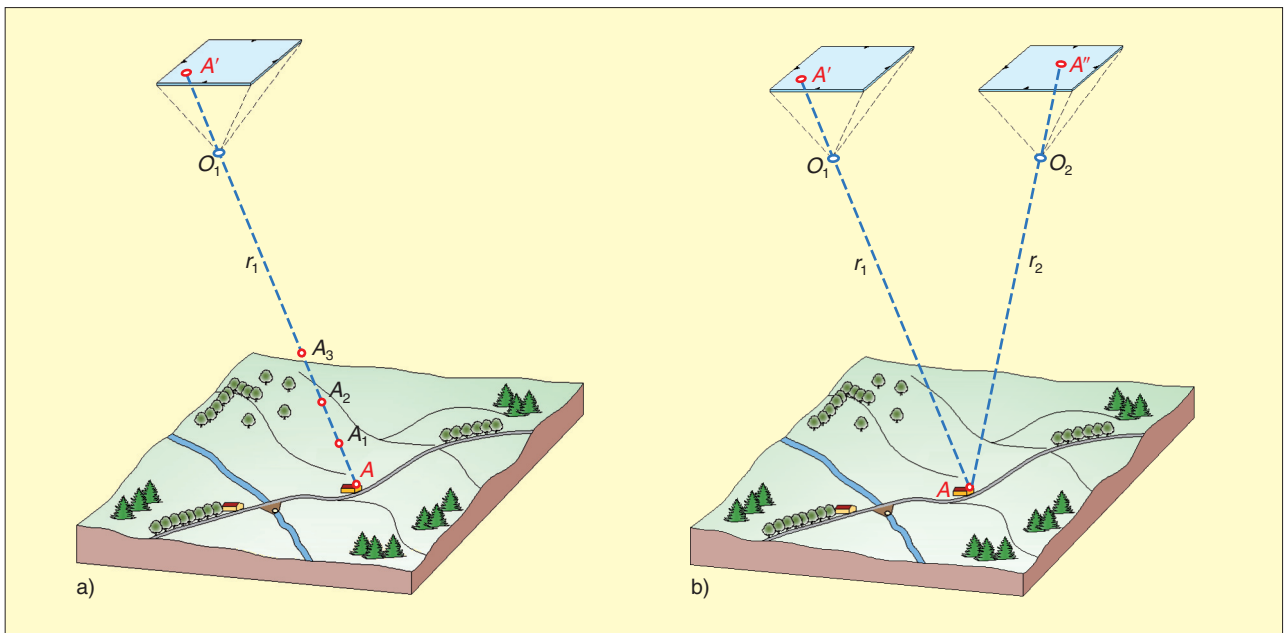
Per poter determinare le **posizioni** dei punti di un oggetto nell'ambiente reale del territorio utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulla **fotografia**, è necessario definire le *relazioni geometriche* fra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia (**lastra**). A ogni punto dell'oggetto tridimensionale  $A, B, \dots$  (*spazio oggetto*) corrisponde un punto **omologo**  $A', B', \dots$  sul piano della lastra (*spazio immagine*).

A questo proposito è possibile, con sufficiente approssimazione, pensare alla fotografia come a una **prospettiva centrale**, in base alla quale i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini (*stella proiettante*) si incontrano tutti in un punto  $O$ , distante pochi centimetri dal piano dell'emulsione fotografica (*lastra*), detto **centro di presa** (► FIGURA 2).

Il *centro di presa*  $O$  è un punto dell'**obiettivo** della camera, mentre la distanza di  $O$  dal piano della lastra è detta **distanza principale** e indicata con  $p$ . Essa, come vedremo, si mantiene **fissa** e può essere considerata (prescindendo dalla *distorsione*) uguale alla **distanza focale** dello stesso obiettivo ( $p = f$ ). Il punto di proiezione di  $O$  sul piano della lastra è detto **punto principale** ed è indicato con  $P$ , dunque  $PO = p$ .



**FIGURA 2** Schema della geometria della presa fotografica nella configurazione terrestre. È possibile considerare una fotografia come una prospettiva centrale di cui sono noti con precisione i relativi elementi geometrici.



**FIGURA 3** Una sola fotografia (a) non è sufficiente per definire la posizione dei punti sul terreno. Se si dispone di due fotografie che da due centri di presa contengono lo stesso oggetto (b), i suoi punti sono definiti univocamente dalla intersezione dei raggi omologhi  $r_1$  e  $r_2$  (configurazione di presa aerea).

Osserviamo subito che **una sola immagine** piana (come quella della fotografia) **non** contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale (lo sarebbe solo se anche l'oggetto fosse piano, come vedremo nella procedura di **raddrizzamento**). In effetti dalla ►FIGURA 3a si può osservare che il punto  $A'$ , sul piano di una sola *lastra* con centro di presa  $O_1$ , non è l'omologo del solo punto  $A$  sul terreno (oggetto), ma lo è anche per tutti gli infiniti punti  $A_1, A_2, \dots$  che si trovano sul *raggio proiettante*  $r_1$  ( $AO_1A'$ ), rendendo il problema indeterminato.

Tuttavia queste informazioni possono essere ottenute disponendo di **due fotografie** che riprendono lo stesso oggetto osservato da **due differenti punti di presa**  $O_1$  e  $O_2$  (in generale è un'unica camera che riprende l'oggetto in posizioni e in tempi diversi, prima da  $O_1$  e successivamente da  $O_2$ ).

In questo contesto al punto  $A$  del terreno corrisponde il punto *omologo*  $A'$  sulla prima fotografia e il punto  $A''$  sulla seconda fotografia. Conoscendo con precisione la **posizione** dei *punti omologhi*  $A'$  e  $A''$  sulle due fotografie, e la posizione spaziale delle due *lastre* e dei due *punti di presa*  $O_1$  e  $O_2$ , il punto  $A$  rimane geometricamente definito, in quanto punto di **intersezione** dei due *raggi proiettanti*  $r_1$  e  $r_2$  che congiungono i due punti omologhi con i centri di presa corrispondenti (►FIGURA 3b).

Le posizioni dei centri di presa  $O_1$  e  $O_2$  e l'*orientamento* delle lastre, però (salvo poche eccezioni), non sono note a priori. Tuttavia è possibile ottenere queste informazioni dalle stesse fotografie, se queste contengono un certo *numero* di **punti di appoggio** sul terreno le cui posizioni vengono ricavate da tradizionali **operazioni topografiche** (fase di *orientamento assoluto*).

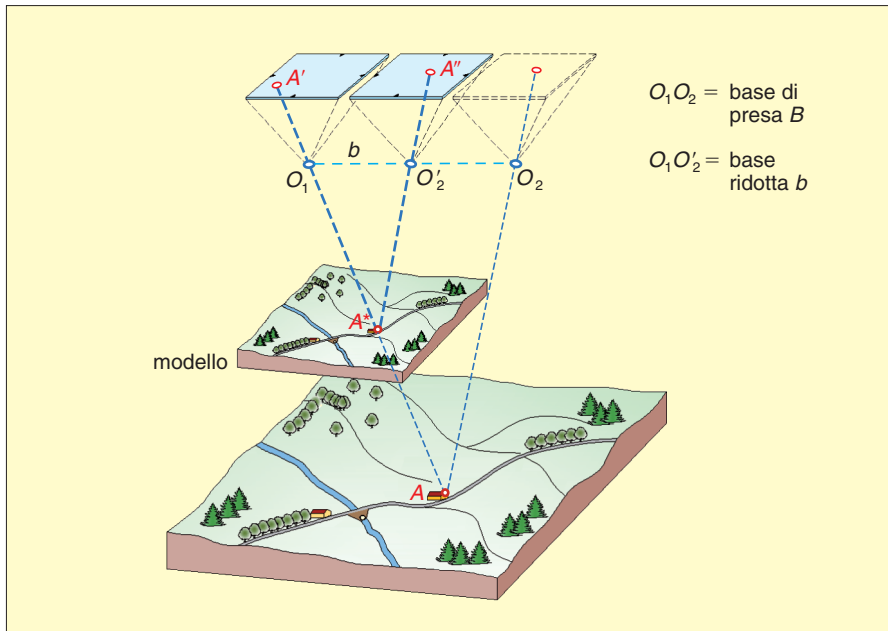
Oggi il problema fotogrammetrico viene risolto ottenendo le coordinate dell'intersezione nello spazio delle rette  $r_1$  e  $r_2$  con la risoluzione di un **sistema di equazioni** (dette di **collinearità**) ottenute da relazioni di geometria analitica (**fotogrammetria analitica**), mentre in passato le stesse operazioni venivano effettuate con strumenti meccanici (o ottici) di tipo analogico, che permettevano di stabilire la posizione del generico punto  $A$  nell'ambito di uno spazio oggetto ricostruito in **scala ridotta** detto **modello** (**fotogrammetria analogica**).

**FAQ**

► **Perché con un solo fotogramma non è possibile risalire alla forma e alle dimensioni dell'oggetto ripreso?**

Perché con una sola immagine fotografica a ogni punto su di essa corrispondono infiniti punti dello spazio reale, rendendo il problema geometricamente impossibile.





**FIGURA 4** In fase di ricostruzione, avvicinando i centri di presa lungo la loro congiungente si ottiene un modello del terreno in scala ridotta uguale al rapporto  $b : B$ . Tale tecnica veniva utilizzata negli strumenti della fotogrammetria analogica.

Ciò si otteneva avvicinando i centri di presa facendoli scorrere lungo la loro congiungente, mantenendo così immutato l'orientamento delle lastre; qualunque fosse la loro posizione, i punti di intersezione dei *raggi omologhi* generavano un **modello** spaziale che rappresentava il terreno in una **scala ridotta** fornita dal rapporto tra la distanza  $b = O_1O'_2$  utilizzata nella ricostruzione e la distanza  $B = O_1O_2$  tra i centri all'atto della presa ( $1 : N = b : B$ ) (► FIGURA 4).

## ■ Le fasi del rilievo fotogrammetrico

Nel rilievo fotogrammetrico si riconoscono sempre le seguenti fasi:

- **acquisizione:** operazioni riguardanti la **presa** delle immagini fotografiche, effettuate con opportune macchine fotografiche, dette **camere**, e opportune tecniche;
- **orientamento:** operazioni preliminari per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i *centri di presa* e le *lastre* con la stessa posizione nello spazio che avevano al momento della presa, quindi la **ricostruzione** della *forma* e delle *dimensioni* dell'oggetto ripreso;
- **restituzione:** operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando strumenti detti **restitutori**, in grado di produrre, come risultato finale, un *disegno*, un insieme numerico di *coordinate* o una *immagine raddrizzata*.

Per poter eseguire la fase conclusiva del rilievo, la *restituzione*, occorre che in precedenza i *raggi proiettanti* di ciascun fotogramma siano collocati con la stessa posizione nello spazio che avevano all'atto della presa; queste operazioni sono previste nella fase di **orientamento**, che a sua volta comprende le fasi sintetizzate nella ► TABELLA 2 (che saranno poi sviluppate nell'unità T3).

Nel seguito verranno approfonditi gli aspetti più significativi del **rilievo fotogrammetrico**, che, rispetto ai rilievi topografici classici, e per quanto detto finora, presenta i seguenti **vantaggi**:

- consente di determinare caratteristiche di oggetti senza avere contatto fisico con essi;
- è rilievo simultaneo di molti punti (grandi moli di informazioni);
- le misure vengono eseguite a posteriori sui fotogrammi, dunque possono essere *ripetute* in ogni momento;

### FAQ

#### ► Che cosa si intende per modello fotogrammetrico?

Si intende la ricostruzione dell'oggetto ripreso, in scala ridotta, ottenuta dall'avvicinamento ideale dei punti di presa dei due fotogrammi che generano lo stesso modello.

**TABELLA 2** Orientamento fotogrammetrico

<b>Orientamento interno</b>	Insieme di <i>parametri</i> che consentono di ricostruire la metrica della <i>proiezione centrale</i> , quindi delle stelle di <i>raggi proiettanti</i> . Essi sono uguali per tutti i fotogrammi del rilievo, in quanto legati alla camera utilizzata nella presa, e vengono forniti dal costruttore della camera in appositi documenti ( <i>certificati di calibrazione</i> ).	
<b>Orientamento esterno</b>	<b>Orientamento relativo</b>	Determina la posizione relativa dei due fotogrammi, realizzando l'intersezione dei <i>raggi proiettanti</i> , dunque del <i>modello</i> tridimensionale dell'oggetto, ma in una <i>scala arbitraria</i> e con una <i>giacitura spaziale generica</i> (quindi svincolato dal sistema di riferimento assoluto XYZ legato all'oggetto rilevato).
	<b>Orientamento assoluto</b>	Il <i>modello</i> ricavato nella fase precedente viene <i>rototraslato</i> e <i>scalato</i> , in modo da riferirlo al <i>sistema di riferimento assoluto</i> e dimensionarlo alla <i>scala desiderata</i> . In questa fase è necessaria la conoscenza della posizione di alcuni <i>punti di appoggio</i> al suolo.

- garantisce rapidità ed economicità nella produzione cartografica di superfici di estensione medio-grande;
- assicura uniformità di precisione per tutti i punti.

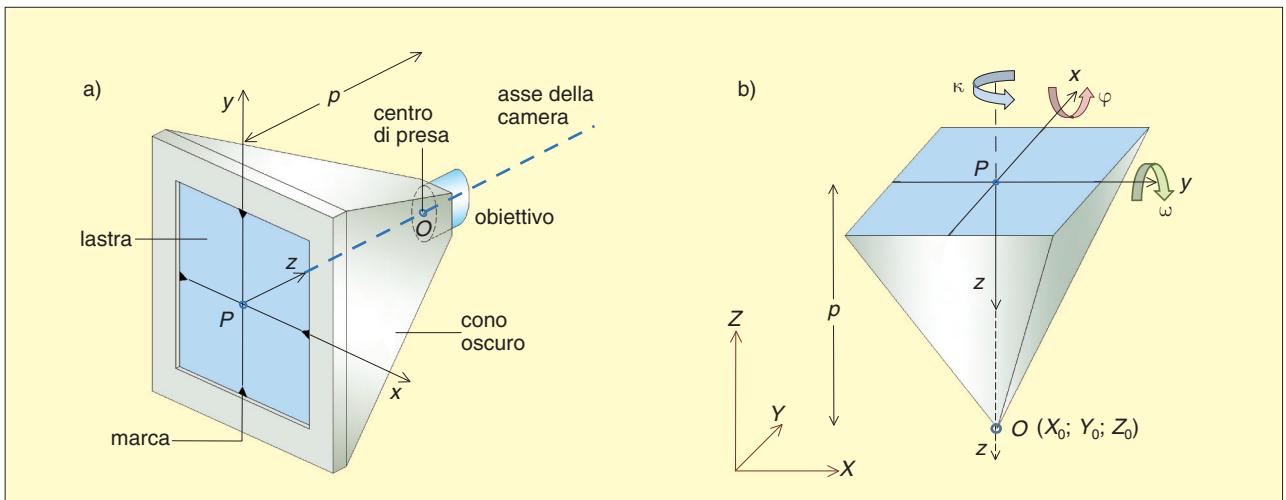
### 3. Le camere da presa

La camera da presa può essere schematizzata come un corpo rigido in cui l'**obiettivo** si trova in posizione **fissa** rispetto al piano della emulsione sensibile (*lastra o pellicola*) su cui si forma l'immagine, in modo che la **distanza principale**  $p$  rimane costante e ritenuta corrispondente alla sua *distanza focale* ( $p = f$ ).

**FIGURA 5** Schema della camera da presa (a) e assetto spaziale (b) del suo corpo rigido in configurazione nadirale (presa aerea).

Le componenti fisiche essenziali della camera sono le seguenti (► FIGURA 5a):

- **obiettivo**: sistema complesso di lenti a **fuoco fisso** ( $f = \text{costante}$ ). Non esiste comunque il problema della **messa a fuoco**, in quanto per prese eseguite a *grandi distanze* (già da poche decine di metri) le immagini si formano sempre





nel piano della *lastra*, mentre nella *fotogrammetria terrestre* può capitare di dover cambiare l'obiettivo oppure la **distanza della presa**;

- **lastra** o **pellicola**: sono il supporto fisico all'*emulsione fotosensibile*; su di esse si forma l'immagine fotografica e devono essere perfettamente **piane**;
- **cono oscuro**: elemento scatolare a forma piramidale che **collega** rigidamente obiettivo e lastra;
- **telaio** o **cornice** portalastra: sui suoi lati (o angoli) sono realizzate 4 (o 8) **piccole incisioni** che al momento della presa impressionano la lastra (o la pellicola) contestualmente all'oggetto ripreso (► FIGURA 6). Esse sono dette **marche fiduciali** (*reppers*) e hanno il compito (collegando ciascuna delle due coppie di marche opposte) di materializzare un *sistema di riferimento xyz* interno alla camera (detto **sistema lastra**), necessario per poter eseguire le misure delle **posizioni** delle immagini dei *punti omologhi* sul fotogramma, durante le operazioni di **orientamento** e di **restituzione**.

Le coordinate lastra delle 4 *marche fiduciali* vengono fornite dal costruttore, al centesimo di mm, nell'ambito del **certificato di calibrazione** della camera.

Nella camera, poi, possono poi essere definiti i seguenti elementi geometrici:

- **centro di presa**  $O$ : coincidente con il *secondo punto nodale* dell'obiettivo, e punto comune della stella dei *raggi proiettanti*;
- **asse della camera**: coincidente con l'asse del sistema ottico obiettivo; il costruttore deve disporlo in modo **perpendicolare** alla piano della lastra;
- **punto principale**  $P$ : intersezione dell'asse della camera con il piano della lastra (dunque anche **proiezione** di  $O$  sulla lastra). Il costruttore tenta di farlo coincidere con l'intersezione delle **coniugenti** delle marche fiduciali ( $x_p = 0$  e  $y_p = 0$ ), in ogni caso la sua posizione effettiva ( $x_p, y_p$ ) rispetto al *sistema lastra* deve essere nota, con precisioni del *centesimo* di mm, in quanto necessaria all'*orientamento interno* dei fotogrammi;
- **distanza principale**  $p$ : già definita nel paragrafo 2, di fatto è la lunghezza del segmento  $PO$  che si considera coincidente con la distanza focale dell'obiettivo:  $p = f$ . Anche questo parametro fa parte all'*orientamento interno* e deve essere noto con precisioni del centesimo di mm.

La camera può essere schematizzata, geometricamente, con una **piramide** la cui base è la *lastra*, il suo vertice il *centro di presa* e la sua altezza la *distanza principale*. La sua giacitura nello spazio è definita con **6 parametri** (uno per ogni grado di libertà), che si possono esprimere attraverso le 3 coordinate assolute  $X_O, Y_O, Z_O$  del *centro di presa*  $O$  (rispetto a un **sistema principale XYZ** solidale con il terreno e da non confondere con il *sistema lastra xyz*) e i 3 angoli  $\kappa, \varphi, \omega$  di assetto della camera (► FIGURA 5b).

Osserviamo poi che il *centro di presa* (dunque il *centro della proiezione*) si trova interposto tra la *lastra* e l'*oggetto* ripreso; ciò genera un'immagine **capovolta** rispetto alla disposizione dell'oggetto, detta **negativo**.

È sempre possibile ottenere un'immagine identica al *negativo*, ma **diritta** come l'oggetto, chiamata *positivo* (► FIGURA 7). Da un punto di vista teorico il **positivo** si formerebbe sulla lastra collocata davanti all'obiettivo della camera in posizione perfettamente *simmetrica* e speculare rispetto alla sua reale collocazione.

## ■ Classificazione delle camere

In relazione alle modalità e alla precisione con cui è nota la **geometria interna** della camera, che coincide con i parametri di *orientamento interno* ( $x_p, y_p, p$  e curve di *distorsione radiale*), le camere sono classificate in tre tipologie:

- **camere metriche**: appositamente costruite per scopi fotogrammetrici, sono dotate di costosi **obiettivi** in grado di limitare la **distorsione** radiale e, comunque,

### FAQ

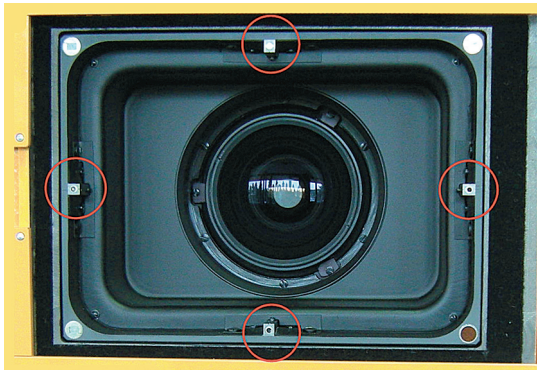
#### ► Quale funzione hanno le marche fiduciali visibili sui fotogrammi?

Quella di definire un sistema di riferimento cartesiano sul piano della lastra (sistema interno). A esso viene fatto riferimento quando si misurano le posizioni dei punti sugli stessi fotogrammi in fase di restituzione.

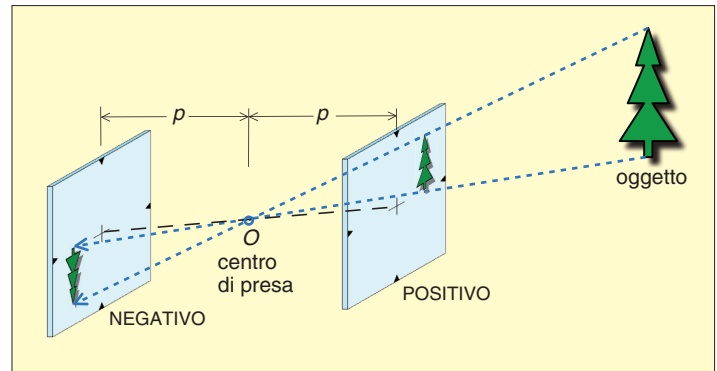
### FAQ

#### ► Nelle operazioni di restituzione vengono usati i negativi o i positivi?

I positivi; essi, in effetti, sono geometricamente identici ai negativi, ma rappresentano gli oggetti nella loro corretta collocazione, mentre nei negativi gli stessi sono speculari.



**FIGURA 6** Vista interna, dal retro, del cono oscuro di una camera metrica terrestre: sono stati evidenziati con un cerchio i quattro dispositivi responsabili della registrazione sui fotogrammi delle quattro marche fiduciali.



**FIGURA 7** Il positivo è un'immagine identica al negativo, ma dritta. Teoricamente la si otterrebbe posizionando la lastra davanti all'obiettivo e in posizione simmetrica rispetto alla sua reale collocazione.

di cui deve essere nota la legge di variazione (*curva di distorsione*); i parametri di *orientamento interno* sono periodicamente verificati attraverso operazioni di calibrazione, i cui risultati sono contenuti nel relativo **certificato** allegato alla camera. Le camere per presa **aerea** sono sempre *metriche*;

- **camere semimetriche:** progettate per scopi non fotogrammetrici ma adattate a questi successivamente; in esse non tutti i parametri di *orientamento interno* sono **stabili** e **affidabili**, e l'obiettivo, meno complesso di quello delle camere metriche, presenta *distorsioni* più pronunciate, di cui deve comunque essere nota la relativa legge di variazione;
- **camere amatoriali:** di uso comune, vengono impiegate solo per applicazioni di scarsa precisione e associate a procedure operative **non convenzionali**. I parametri di *orientamento interno* non sono elementi noti, ma vengono calcolati nell'ambito della stessa procedura (*autocalibrazione*).

In relazione, poi, al modo di acquisizione dell'immagine fotografica, troviamo questi due tipi di camere:

- **camere analogiche:** in cui l'acquisizione dell'immagine avviene tramite *sviluppo* chimico di una emulsione fotosensibile il cui supporto può essere una **lastra di vetro** o una **pellicola** di poliestere;
- **camere digitali:** in cui l'acquisizione avviene tramite **sensore CCD** (che trasforma i *fotoni* in *segnali elettrici*) e memorizzata in file.

### ■ Camere analogiche per la presa aerea

Sono camere metriche a *fuoco fisso* di dimensioni, pesi (80-100 kg) e costi elevati per la *precisione* sia dei componenti ottici sia di quelli meccanici (► **FIGURA 8**). Dotate di opportuni **automatismi** e di strumenti accessori (**cinoderivometro** e il **periscopio di navigazione**), sono montate sul pavimento dell'aereo mediante un supporto regolabile a mezzo di grosse viti calanti. Richiedono **continue manutenzioni** per mantenere nel tempo la precisione.

La presa avviene in **movimento**, con intervalli di scatto tra due fotogrammi consecutivi di alcuni secondi, e questo genera un problema non trascurabile: il **trascinamento** (di cui si parlerà nella prossima unità).

Possiamo sintetizzare le caratteristiche delle camere per la presa aerea nel modo seguente:

- **supporto dell'emulsione:** pellicola di poliestere contenuta in un rullo intercambiabile (magazzino) contenente fino a 150 m di pellicola, da cui si possono ottenere circa 600 fotogrammi;



**FIGURA 8** Camera Zeiss Jena LMK (a) e blocco interno di una camera che mette in evidenza la lente terminale dell'obiettivo e, in primo piano, l'automatismo di apertura dell'otturatore (b).



- **formato immagine:** 230 mm × 230 mm (più di **60 volte** il comune formato 24 × 36 mm);
- **automatismo per apertura e chiusura dell'otturatore:** si tratta di un congegno che regola la durata dell'esposizione della pellicola alla luce; è del tipo a lamelle radiali ruotanti ed è allocato in posizione **mediana** tra le lenti dell'obiettivo (in prossimità del *centro di presa*). Può avere tempi di apertura da 1/100 a 1/1000 di secondo, tempi che incideranno sul **trascinamento** (v. unità T2);
- **automatismo** pneumatico per lo spianamento della pellicola, al fine di garantirne la planarità, ottenuta mediante una lieve **decompressione** sul retro del telaio portapellicola;
- **automatismo** per la correzione **della deriva** (rotazione assiale della camera);
- creazione del **data strip** sui **fotogrammi**, costituito da una striscia posta ai bordi su cui compaiono, riprodotte automaticamente, la *quota* del volo s.l.m., l'*ora* della ripresa, l'*immagine della livella sferica*, l'*esatta distanza focale*, il *numero d'ordine* del fotogramma e la sua posizione nell'ambito della *strisciata*.

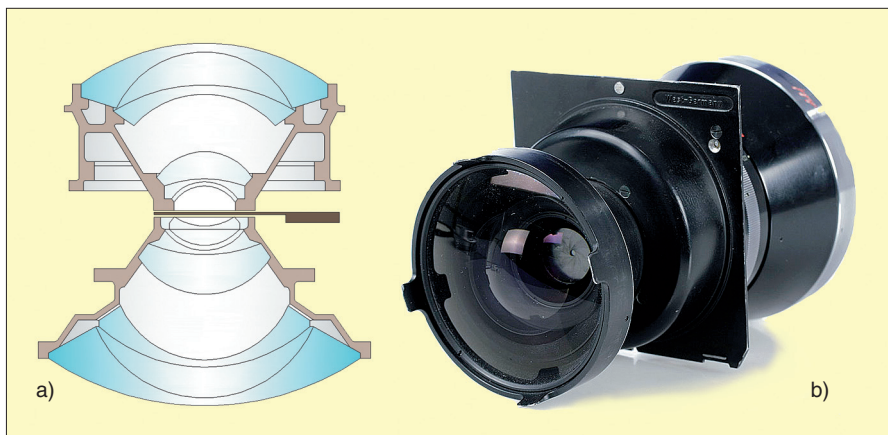
### • Obiettivi delle camere per presa aerea

Gli obiettivi fotogrammetrici sono formati da un complesso **sistema di lenti** (►FIGURA 9) montate su appositi **telai** di alluminio; le lenti hanno superfici con diverse *curvature* e sono costituite da vetri con *indici di rifrazione* opportuni, in modo da contenere le **aberrazioni** ottiche entro limiti compatibili con le misure che dovranno essere effettuate sul fotogramma.

Di fatto molte aberrazioni vengono corrette in modo soddisfacente da questi sofisticati *sistemi di lenti*, tuttavia una di queste, la **distorsione**, è particolarmente importante in ambito fotogrammetrico. In effetti, in questo contesto, non è sufficiente limitare tale aberrazione, ma di essa è necessario conoscere la sua **legge di variazione**, di cui parleremo in un prossimo paragrafo dedicato all'*orientamento interno* (unità T3).

Gli *obiettivi* delle camere per la presa aerea vengono classificati in base al valore dell'**angolo di campo**, indicato con  $\alpha$ , definito come angolo che ha per vertice il centro di presa  $O$  e i cui lati passano per gli estremi della **diagonale** del formato dell'immagine (230 × 230 mm). Il suo valore, dunque, dipende sia dalla **distanza focale** dell'obiettivo, sia dalle **dimensioni** della lastra (►FIGURA 10). Valori elevati di  $\alpha$  consentono di riprendere maggiori entità di territorio in ogni fotogramma, dunque riducono il loro numero e i relativi costi, ma accentuano i problemi della **distorsione**, dunque peggiorano la **qualità** dei fotogrammi.

In funzione del valore dell'*angolo di campo*, gli **obiettivi** delle camere per la *presa aerea* vengono **classificati** nelle tre categorie riportate nella ►TABELLA 3. Tra essi il più versatile, e il più utilizzato, è sicuramente l'obiettivo **grandangolare**.



**FIGURA 9** a) Schema di un obiettivo supergrandangolare. La parte scura rappresenta l'otturatore collocato in prossimità del *centro di presa*. b) Immagine di un obiettivo Zeiss; la lente lascia intravedere l'otturatore lamellare chiuso.

#### FAQ

► **Per quale ragione le camere per la presa aerea sono provviste di svariati dispositivi di automazione?**

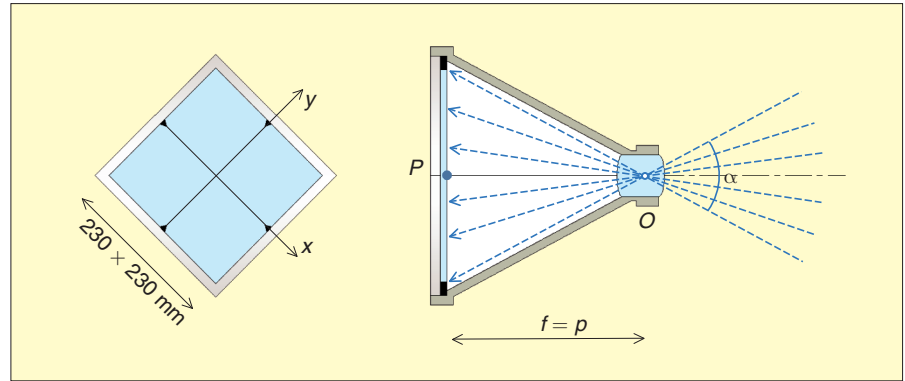
Perché la presa aerea avviene secondo un movimento veloce che non consente interventi manuali sistematici, ma solo interventi correttivi di aggiustamento.

#### FAQ

► **Qual è l'aberrazione più temibile negli obiettivi di camere fotogrammetriche?**

La distorsione; infatti essa produce uno spostamento dei punti immagine che, se non considerato, renderebbe le misure effettuate sul fotogramma inutilizzabili.

**FIGURA 10** L'angolo di campo  $\alpha$  dell'obiettivo consente di classificare gli stessi obiettivi in tre categorie: normali, grandangolari e supergrandangolari.



**TABELLA 3** Categorie di obiettivi per la presa aerea

	Normale	Grandangolare	Supergrandangolare
Angolo di campo $\alpha$	56°	93°	125°
Distanza focale	305 mm	153 mm	85 mm
Applicazioni	Rilievi in ambito urbano a grande scala	Rilievi a media e grande scala	Rilievi a piccola scala

Attenzione, però, a dare il giusto significato alla tabella; in effetti essa rispecchia unicamente l'esigenza di **classificare** gli *obiettivi* delle camere per **caratteristiche omogenee**, non significa affatto che tutte le camere della stessa categoria hanno la stessa *distanza focale* e lo stesso *angolo di campo* indicati nella tabella, ma che hanno lo stesso **ordine di grandezza** (per esempio, un obiettivo con  $f = p = 152,76$  mm è comunque un obiettivo **grandangolare**).

In effetti ogni obiettivo ha la sua propria e unica *distanza focale*, il cui valore viene rilevato nel *certificato di calibrazione* (rilasciato a seguito di verifiche periodiche) con la precisione del **centesimo** di millimetro.

### ■ Camere analogiche per la presa terrestre

Oltre alla classificazione vista in precedenza (*metriche, semimetriche, amatoriali e analogiche, digitali*) le camere per la presa terrestre possono essere classificate anche in relazione alla tecnica con cui viene definito il *sistema di riferimento interno* (**sistema lastra**). In effetti si possono avere:

- camere con **marche fiduciali**: come nelle camere per la presa aerea, incidono sui lati del fotogramma 4 *marche fiduciali* che definiscono il *sistema lastra* con grande precisione. Come già detto, le *coordinate lastra* delle 4 *marche fiduciali* sono necessarie per eseguire l'*orientamento interno*, e vengono fornite, al centesimo di mm, dal costruttore con il **certificato di calibrazione**;
- camere con **reticolo (reseau)**: in esse un *reticolo* formato da **piccole croci** a maglia regolare viene inciso su una *sottile lamina di vetro* che viene posizionata a contatto con la pellicola. Il *reticolo* rimane impresso sul fotogramma e, con appositi software, permette di correggere le **deformazioni** dell'immagine dovute a varie cause;
- camere con **telaio**: in esse l'immagine sul fotogramma presenta una **cornice nera** dai bordi nettamente delineati; di fatto gli spigoli di questa cornice fungono da *marche fiduciali indirette*.

### ● Camere metriche

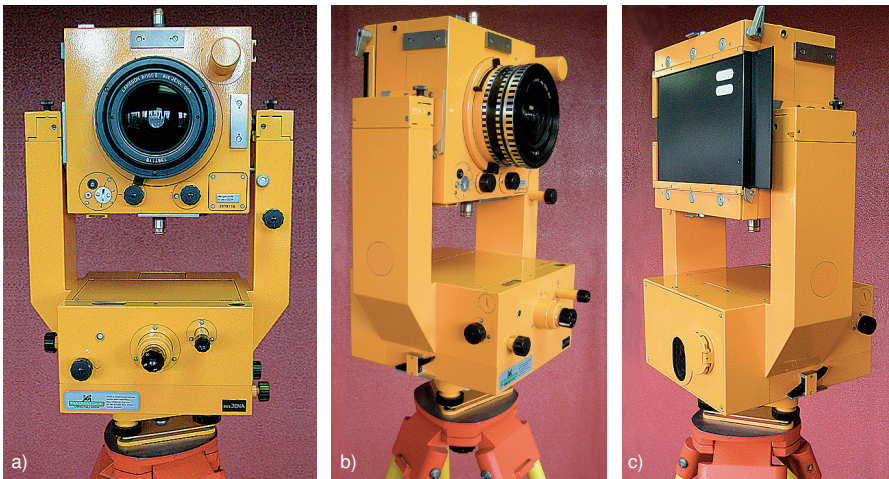
Le camere metriche per la *presa terrestre* (► FIGURE 11 e 12) si differenziano da quelle per la *presa aerea* fondamentalmente per i tre aspetti seguenti:

#### FAQ

#### ► Che caratteristiche hanno gli obiettivi supergrandangolari?

Sono obiettivi con angolo di campo di circa 125° ottenuto con una distanza focale dell'ordine di 85 mm, con i quali si ottengono fotogrammi che comprendono grandi entità di territorio ma con bassa risoluzione; pertanto essi sono impiegati nei rilievi a piccola scala di grandi estensioni di territorio.





**FIGURA 11** Camera metrica Zeiss UMK-10 vista di fronte (a), di fianco (b) e di retro (c). In quest'ultima si osserva la custodia protettiva della lastra di vetro con formato  $160 \times 115$  mm e, a fianco, in primo piano, la lamina metallica da estrarre per scoprire l'emulsione fotosensibile all'atto della presa.

- presa con camera **ferma** (e non in *movimento* come nella presa aerea);
- piccole **distanze** dall'oggetto (e non grandi come nella presa aerea);
- apertura dell'otturatore e sostituzione della lastra **manuali**.

Per questa ragione le camere per la *presa terrestre* non hanno gli *automatismi* che caratterizzano quelle per la *presa aerea*, sono dotate di *obiettivi* relativamente più semplici e hanno *dimensioni* e *pesi* decisamente inferiori.

Il fatto di eseguire la presa da **fermo**, consente anche l'impiego di **lastre di vetro** come supporto alla emulsione fotosensibile, con *formato* variabile ma di solito rettangolare. Esse garantiscono una migliore **planarità** rispetto alla *pellicola* in poliestere.

Nella maggior parte delle prese che si effettuano in fotogrammetria, la *distanza* dell'oggetto è sempre molto grande rispetto alla *distanza focale*, quindi più grande della distanza **iperfocale** (distanza oltre la quale l'immagine si forma sempre



**FIGURA 12** Camera metrica Wild P32: nella sua custodia (a), accoppiata al tacheometro T16 della stessa casa (b) e utilizzata in coppia con una camera identica su barra calibrata (bicamera) (c).



**FAQ**

► **Nelle camere semimetriche la presenza del *reseau* permette di eliminare gli effetti della distorsione degli obiettivi?**

No, in realtà in sede di restituzione le croci del *reseau* (tutte o solo una parte) devono essere digitate per contenere le deformazioni della pellicola e della stampa, oltre a quelle dovute alla mancata planarità della pellicola, ma non vengono contenute le deformazioni connesse alla distorsione dell'obiettivo.

sul piano della lastra). Per tale ragione le camere metriche hanno la *distanza focale*, rigidamente fissa e messa a punto dal costruttore, per riprendere all'**infinito**. Tuttavia tale situazione (sempre vera nella presa aerea), può avere qualche eccezione nella presa terrestre con oggetti molto vicini; per tale ragione, quando non è possibile allontanare la camera dall'oggetto, in alcuni casi si può sostituire l'obiettivo della camera con un altro caratterizzato da una iperfocale inferiore.

Le camere metriche nella presa terrestre sono collocate su appositi *cavalletti*, o sui **treppiedi** utilizzati nelle stazioni dei *teodoliti*, con cui possono condividere il *basamento*. In alcuni casi è possibile accoppiare la camera con un **teodolite** (in modo da orientare la camera e integrare il rilievo topografico con quello fotogrammetrico) (►FIGURA 12b), oppure utilizzare una **coppia di camere** montate su una **barra calibrata** (►FIGURA 12c).

● **Camere semimetriche**

Le camere **metriche** terrestri, nonostante il minor impatto rispetto a quelle per la presa aerea, rimangono camere di *grande precisione*, dunque di **costi** comunque elevati. Pertanto, negli ultimi decenni, allo scopo di limitare tali costi e ampliare l'uso della fotogrammetria nel *rilievo dei vicini* (in particolare in quello architettonico) sono state adattate alla fotogrammetria macchine non concepite per questa funzione; esse sono classificate come **semimetriche** (►FIGURA 13).

Si tratta di camere dotate di un *obiettivo calibrato* che è stato montato su un corpo macchina di tipo amatoriale. Gli stessi obiettivi dispongono di un certo numero di «stop» per la messa a fuoco a diverse distanze, per ognuna delle quali viene fornita la calibrazione.

La **complanarità** dei punti immagine, necessaria per la ricostruzione delle stelle proiettive, è assicurata dallo schiacciamento della pellicola contro una lastra di vetro piana collocata davanti alla pellicola stessa.

Tuttavia può essere presente un **errore residuo di complanarità**, congiuntamente alle deformazioni che subisce la pellicola nelle fasi di **sviluppo**; questi errori sono compensati in fase di restituzione mediante la *digitazione del reseau* che è costituito, come detto in precedenza, da una griglia di croci disposte per file e colonne, la cui posizione è nota con alta precisione (1 micron) (►FIGURA 15). Lo scopo del *reseau*, quindi, non è finalizzata a conoscere la **distorsione** dell'obiettivo, in quanto esso si registra così come è sulla pellicola, che ci sia o non ci sia distorsione.

Queste camere sono legate all'uso di software «dedicati» e di particolari tecniche che vengono classificate come **fotogrammetria non convenzionale**.



**FIGURA 13** Camera semimetrica Rolleiflex 6006: vista frontale (a) e vista di retro (b).

### • Camere amatoriali

Sono comuni camere per le tradizionali fotografie. Il loro utilizzo produce immagini che richiedono una preventiva **autocalibrazione** di tutti i parametri di *orientamento* basata su opportuni punti presenti sulle immagini. Naturalmente il loro impiego viene limitato a lavori di *modesta precisione*.

## 4. I fotogrammi

Il termine **fotogrammi** si riferisce alle immagini realizzate con una camera *metrica* che, come visto, rappresentano **proiezioni centrali**; essi consentono di ricostruire accuratamente la **posizione** del piano dell'immagine rispetto al centro di presa. Nelle camere analogiche possono essere ottenuti in **negativo** o in **positivo** dallo sviluppo su *poliestere* della pellicola o dalla lastra di vetro impressionata durante la presa.

La pellicola, o la lastra di vetro, per le prese fotogrammetriche è costituita da uno strato di **emulsione**, sensibile alla luce e formato da **alogenuri**; l'emulsione è stesa su un **supporto** flessibile di poliestere. Fra l'emulsione e il supporto c'è uno strato che assicura l'adesione reciproca.

### • Formato e dati informativi

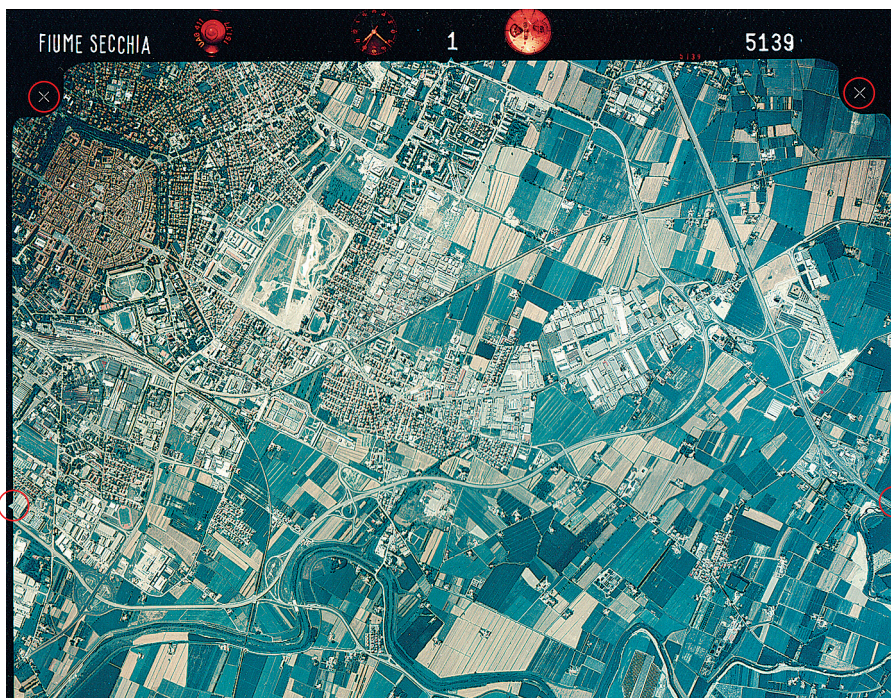
Il **formato** dei fotogrammi delle camere per **presa aerea**, come visto, si è standardizzato con le dimensioni  $230 \times 230$  mm, mentre non esiste un unico formato nelle camere da **presa terrestre**, per le quali sono disponibili vari formati:  $130 \times 180$  mm,  $115 \times 160$  mm,  $100 \times 130$  mm (tutti su supporto in *lastra di vetro*) e  $60 \times 60$  mm su rullino di pellicola in poliestere.

Al momento della presa, oltre alle **marche fiduciali**, vengono registrate sulla lastra le informazioni necessarie per poter ricostruire l'**orientamento interno** di ogni fotogramma.

### FAQ

#### ► Che differenza esiste tra una fotografia e un fotogramma?

In estrema sintesi un fotogramma viene ottenuto da una camera metrica che consente di effettuare su di esso misure di posizione dei punti immagine. Nelle fotografie normali non è consentita alcuna operazione di misura.



**FIGURA 14** Porzione di un fotogramma aereo dotato di 8 marche fiduciali (4 laterali e 4 angolari); nel bordo superiore è collocato il *data strip*. Nella figura sono evidenziate con un cerchietto rosso le marche (due angolari e due laterali) visibili nella porzione di fotogramma.



**FIGURA 15** Fotogramma generato dalla camera semimetrica Rollei 6006; è visibile il *reseau* che dovrà essere digitalizzato (in tutto o in parte) in fase di restituzione.



Nel caso delle camere da **presa aerea** (► FIGURA 14) queste informazioni sono contenute in una striscia (detta **data strip**), posta su uno o più bordi, su cui compaiono, riprodotte automaticamente: *tipo*, *focale* e *matricola* della camera, *quota* di volo, *ora* della ripresa, l'immagine della *livella sferica*, il *numero* d'ordine del fotogramma e la sua posizione nell'ambito della *strisciata*.

I fotogrammi generati dalle camere nelle **prese terrestri** non hanno un vero e proprio *data strip* (in quanto sono necessarie meno informazioni), ma, oltre alle marche o alla cornice del telaio, riportano gli elementi essenziali come la distanza focale dell'obiettivo.

Nel caso poi di **macchine semimetriche**, sui fotogrammi non sono presenti né *marche* né *data strip*, ma eventualmente, come nel caso della camera Rollei 6006 (► FIGURA 13), la griglia del *reseau* (► FIGURA 15).

## ■ La scala media dei fotogrammi

Come detto più volte, i fotogrammi rappresentano una vista prospettica centrale dell'oggetto, pertanto non è possibile in termini rigorosi parlare di **scala** del fotogramma, in quanto essa **varia da punto a punto** nella prospettiva.

Tuttavia è utile definire una **scala media** dei fotogrammi, intesa come **rapporto** tra la *dimensione massima del fotogramma*  $l$  e la corrispondente *dimensione reale*  $L$  dell'oggetto contenuto nella fotografia (detta *abbracciamento*):

$$\text{scala} = \frac{1}{N} = \frac{l}{L}$$

Non potendo essere nota quest'ultima dimensione, possiamo comunque ottenere il valore del rapporto precedente con un **rapporto equivalente** ricavato da una semplice valutazione geometrica. Considerando lo schema di una presa, osserviamo l'uguaglianza tra il **rapporto** delle parti opposte della sezione di piramide generata dalla stella proiettiva (► FIGURA 16a) e il rapporto fra la *distanza focale* dell'obiettivo (uguale alla *distanza principale*  $p$  della camera) e la *distanza media dell'oggetto* dal *centro di presa*  $O$ :

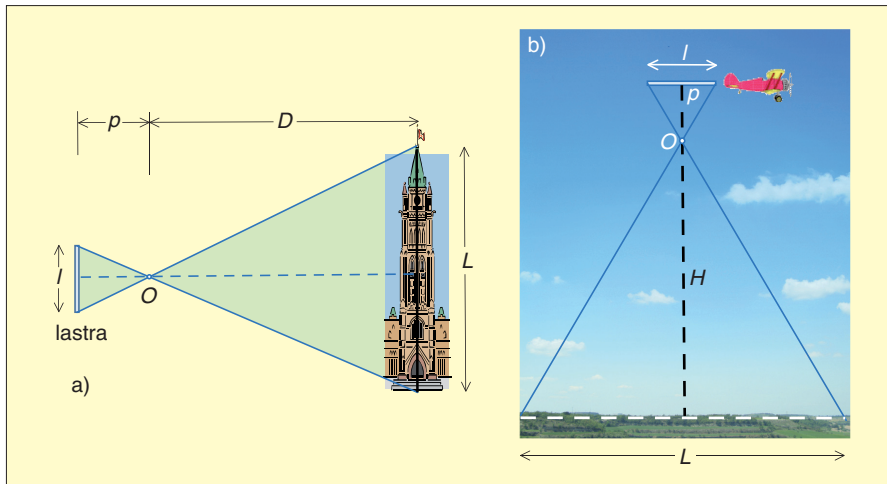
$$\frac{l}{L} = \frac{p}{D} \quad \text{quindi:} \quad \frac{1}{N} = \frac{p}{D} \quad (1)$$

### FAQ

#### ► Perché per i fotogrammi si parla di scala media e non semplicemente di scala?

Perché i fotogrammi sono immagini prospettiche in cui la scala varia da punto a punto. Per ovviare a ciò, si definisce una scala convenzionale, riferita all'intero fotogramma, detta *scala media*.





**FIGURA 16** Definizione della scala media dei fotogrammi in configurazione di presa terrestre (a) e di presa aerea (b).

Non potendo variare le caratteristiche della camera utilizzata ( $l$  o  $p$ ), per variare la **scala dei fotogrammi** (e ottenere il valore desiderato) occorre variare la **distanza  $D$**  della camera dall'oggetto ripreso.

Nel caso di *presa aerea* (►FIGURA 16b), la distanza media tra l'oggetto (il terreno) e il *centro di presa* della camera sull'aereo corrisponde all'**altezza del volo**, che in genere viene indicata con  $H$ . La precedente espressione, in questo caso, assume la seguente notazione:  $1 : N = p : H$ .

## ■ Relazione tra scala media dei fotogrammi e scala del disegno

Affinché gli elementi dell'oggetto ripreso possano essere riprodotti correttamente alla *scala di rappresentazione* desiderata, è necessario che essi siano **ben visibili** sul fotogramma. Per tale ragione è inopportuno utilizzare scale **troppo diverse** tra quella dei *fotogrammi* ( $1 : N$ ) e quella del *disegno* restituito ( $1 : N_{dis}$ ). L'esperienza consolidata ci suggerisce quale **relazione** devono avere le **due scale** sia in ambito del rilievo **cartografico**, con scale della carta inferiori a 1:500 (*prese aeree*), sia in ambito del rilievo **architettonico**, con scale del disegno superiori a 1:100 (*prese terrestri*).

Nel primo caso è disponibile una semplice *relazione* empirica, oppure apposite *tabelle*, che esamineremo della prossima unità. Nel secondo caso (*prese terrestri*), l'esperienza consiglia di mantenere, tra la scala dei *fotogrammi* e la scala del *disegno*, un **rapporto compreso tra 2 e 4** ( $N = (2 \div 4) \cdot N_{dis}$ ).

Per esempio, in un rilievo *terrestre* di un edificio da rappresentare in scala **1:100**, una *scala media dei fotogrammi* accettabile potrebbe essere **1:300** (adottando il valore medio 3 tra 2 e 4).

Pertanto la **scala dei fotogrammi** non è una scelta arbitraria, ma viene **ricavata** partendo dalla *scala di riproduzione* dell'oggetto (*scala della carta*) tramite un opportuno *rapporto*. Per ottenere *fotogrammi* con la *scala media* così determinata, occorre collocare la camera, per la presa, a una **distanza** dall'oggetto fornita dalla seguente espressione ricavata dalla (1):

$$D = N \cdot p \quad (2)$$

Rifacendoci all'esempio precedente, per ottenere *fotogrammi* con una *scala media* di 1:300, utilizzando una camera con *distanza principale* di 80 mm, questa dovrà essere collocata a una **distanza** dall'edificio di 24 m ( $300 \cdot 0,080$ ).

Quindi il **punto di partenza** del *rilievo fotogrammetrico* (peraltro come in quello topografico) deve essere la *scala del disegno* ( $1 : N_{dis}$ ) con cui rappresenta-

### FAQ

► **Come è possibile ottenere per i fotogrammi la desiderata scala media?**

Variando la distanza tra l'oggetto ripreso e la camera.

### FAQ

► **Come viene fissata la scala media dei fotogrammi?**

Valutando la scala del disegno (carta) e apportando a essa opportuni coefficienti riduttivi.

**FAQ**

► **Cos'è una presa normale?**

È un tipo di presa in cui gli assi della camera, nelle varie posizioni di presa, rimangono paralleli e perpendicolari alla base di presa.

re l'oggetto; da questa deriva la *scala dei fotogrammi* ( $1 : N$ ) e la conseguente *distanza di presa*  $D$  (o l'*altezza di volo*  $H$  nella presa aerea). Possiamo fissare questi passaggi con questo schema sintetico:

$$\text{scala del disegno } (N_{dis}) \Rightarrow \text{scala dei fotogrammi } (N) \Rightarrow \text{distanza di presa } (D \text{ o } H)$$

## 5. Problemi connessi alla presa

Gli aspetti e le tecniche della *presa fotogrammetrica* verranno illustrate nella prossima unità del modulo, tuttavia è opportuno fin da ora accennare agli elementi che occorre considerare per pianificarla.

Ricordiamo che **ogni punto** dell'oggetto da rilevare e rappresentare (*terreno o edificio*), deve essere presente in **almeno due fotogrammi**, di opportuna scala, presi da **punti di vista diversi**.

Nel caso dei rilievi *terrestri* ciò si ottiene eseguendo le *prese* dopo aver disposto la *camera* dinnanzi all'oggetto a una *distanza media* corrispondente alla **distanza di presa** (v. paragrafo precedente), spostandola poi via via, dopo ogni presa, parallelamente all'oggetto, di una opportuna quantità  $B$  detta **base di presa**, e corrispondente alla distanza tra i *centri di presa* della camera tra due posizioni consecutive.

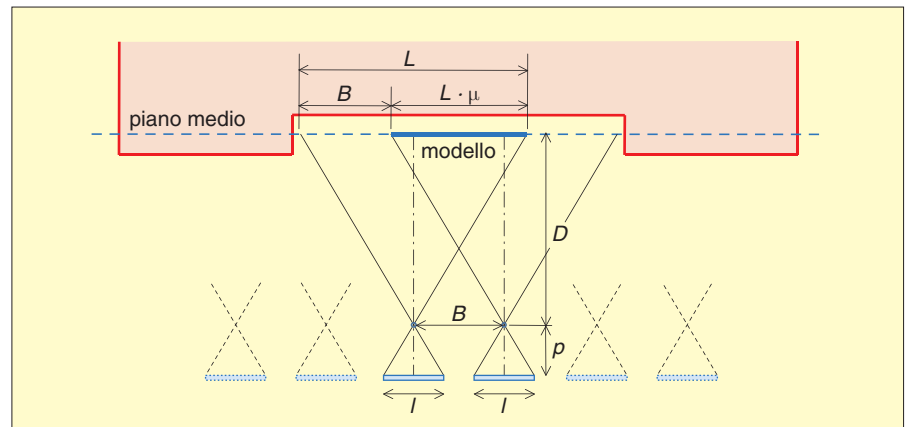
Nel caso della *presa aerea*, la camera viaggia a *velocità* e *altezza* costante sull'aereo e riprende il terreno sottostante eseguendo automaticamente le prese dopo un opportuno *intervallo di tempo* (pochi secondi); anche in questo caso la **base di presa**  $B$  corrispondente alla distanza tra i *centri di presa* della camera tra due scatti consecutivi.

### ■ La presa normale

In entrambi i casi gli **assi della camera**, durante la presa, devono rimanere il meglio possibile **paralleli** e **perpendicolari** alla base di presa, in modo che anche i fotogrammi ottenuti nella presa possano essere ritenuti *paralleli*. Tale configurazione viene detta **presa normale** (► FIGURA 17). Essa verrà trattata più diffusamente nell'unità T2.

Eventuali piccole convergenze ( $4^\circ - 5^\circ$ ) dell'*asse della camera*, nelle sue diverse posizioni, possono essere tollerate. Tuttavia le differenze angolari tra gli assi di due **prese consecutive** non devono essere eccessive; questo, tra l'altro, comprometterebbe la **stereoscopia** delle immagini.

**FIGURA 17** Schema della presa normale in configurazione terrestre con la lastra nella camera collocata via via parallelamente al piano medio dell'oggetto, e a distanze opportune  $B$  dette basi di presa. Le parti di oggetto presenti in due fotogrammi consecutivi costituiscono un modello stereoscopico.



Esistono anche tecniche che rinunciano all'aspetto *stereoscopico* della fotogrammetria (per esempio nella **fotogrammetria non convenzionale**); in questo caso gli assi delle camere potranno anche essere tra loro *convergenti* e le prese verranno trattate con particolari *software* dedicati. Nella nostra trattazione, comunque, faremo riferimento alla configurazione fotogrammetrica convenzionale della *presa normale*.

### • Il ricoprimento longitudinale

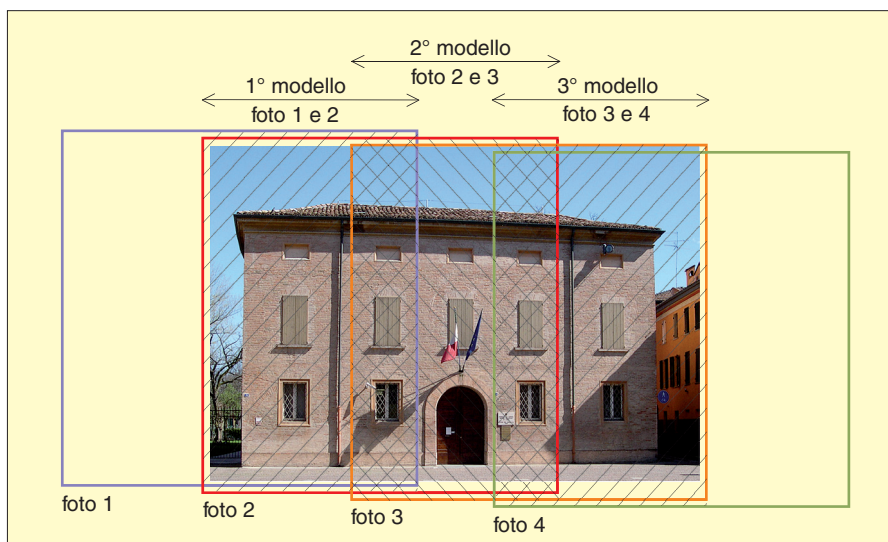
Affinché gli stessi punti dell'oggetto siano ripresi in **due fotogrammi consecutivi**, è necessario che questi presentino un'area (detta di **sovrapposizione**) in cui entrambi contengano la **stessa porzione di oggetto**. L'entità di questa **porzione di oggetto**, comune ai due fotogrammi consecutivi, rispetto all'intera parte di oggetto rappresentato nei fotogrammi, viene detta **ricoprimento longitudinale**; il suo valore, comunque inferiore a 1, di solito viene indicato con  $\mu$ .

La condizione precedente (tutti i punti siano ripresi in due fotogrammi consecutivi) è strettamente soddisfatta quando il *ricoprimento longitudinale* presenta il valore di  $\mu = 0,5$  (50%). Ciò significa che metà della parte di oggetto ripreso in un fotogramma è ripresa anche nel fotogramma successivo (naturalmente in **posizione differente**, avendo cambiato il centro di presa).

Tuttavia, per evitare che, a causa di piccole imprecisioni nelle operazioni di presa o per la complessità dell'oggetto, alcuni punti siano *visibili in un solo fotogramma*, si usa un valore maggiore del **ricoprimento**:  $\mu = 0,6 \div 0,7$  (60%  $\div$  70%) in relazione alla configurazione geometrica dell'oggetto. In particolare l'eventuale presenza di **aggetti** o **rientranze** rilevanti sulla superficie da rilevare, che possono causare delle perdite di informazioni sul fotogramma, consiglia l'**aumento** della percentuale del *ricoprimento longitudinale*.

Naturalmente il valore del *ricoprimento* incide direttamente sul **numero di fotogrammi**, dunque anche sui **costi**, necessari al rilievo fotogrammetrico.

Pertanto l'intero oggetto viene idealmente **scomposto** in tante *porzioni*, ciascuna ripresa in due fotogrammi consecutivi; queste porzioni sono dette **modelli stereoscopici** (► FIGURA 18). Essi, considerando un *ricoprimento longitudinale*  $\mu = 60\%$ , si sovrappongono a loro volta in corrispondenza di due fasce laterali del valore del 10% del formato del fotogramma. In entrambe queste fasce di sovrapposizione sono presenti punti rappresentati su tre fotogrammi consecutivi.



**FIGURA 18** Fronte di un edificio rilevato con quattro fotogrammi che generano 3 modelli stereoscopici in grado di coprire tutto l'oggetto. Questi modelli presentano zone di sovrapposizione dovute alla percentuale di ricoprimento adottata maggiore del 50%.

#### FAQ

##### ► Cosa si intende per modello stereoscopico?

Si intende una porzione di oggetto registrato su almeno due fotogrammi consecutivi. Ciò è reso possibile dall'adozione di un ricoprimento  $\mu$  maggiore del 50% (di solito  $\mu = 60\%$ ).



**FAQ**

► **È possibile che i modelli stereoscopici si sovrappongano?**

Certo, per una quantità corrispondente alla differenza  $\mu - 0,5$ .

• **La base di presa**

L'elemento che ci permette di ottenere il **ricoprimento longitudinale**  $\mu$  desiderato è la **base di presa**  $B$ . In effetti, a valori più piccoli di  $B$  (basi più corte) corrispondono valori maggiori del **ricoprimento**.

Osservando la geometria di due prese consecutive (► FIGURA 16) e indicando con  $L$  l'**abbracciamento** (dimensione reale dell'oggetto contenuto nel fotogramma) appare evidente che la *base di presa* può essere fornita dalla seguente relazione:

$$B = (L - L \cdot \mu) \quad \text{dunque:} \quad B = L \cdot (1 - \mu) \quad (3)$$

Considerando poi le (1) si ha:  $L = l \cdot N = l \cdot D/p$ , quindi la (3) diventa:

$$B = \frac{l \cdot D}{p} \cdot (1 - \mu) \quad (4)$$

Nel caso della *presa aerea* nella (4) al posto di  $D$  occorre utilizzare l'altezza di volo  $H$ ; in questo caso, essendo la camera in movimento, la base di presa determina l'intervallo di tempo di apertura dell'otturatore della camera.

Una volta calcolata la *base di presa*  $B$ , è opportuno controllare che il valore del suo **rapporto** ( $B/D$  o  $B/H$ ) con la *distanza di presa*  $D$  sia indicativamente uguale o maggiore dei seguenti valori derivati dall'esperienza:

Tipo di presa	Valore del rapporto $B/D$ o $B/H$
Aerea	1/4
Terrestre solo per prospetti	1/5
Terrestre per particolari architettonici	1/3

Se, per esempio, in un rilievo è stata determinata una *distanza* tra oggetto e camera di  $D = 24$  m, con quest'ultima dotata di obiettivo di *distanza principale*  $p = 80$  mm e formato  $60 \times 60$  mm, volendo ottenere un *ricoprimento longitudinale* del 60%, la base di presa dovrà essere:

$$B = \frac{0,06 \cdot 24}{0,08} \cdot (1 - 0,6) = 7,2 \text{ m}$$

Il rapporto base-altezza  $B/D$  è di 1/3,3, in linea con i valori contenuti nella tabella precedente.

## 6. La visione stereoscopica

Una fase essenziale della restituzione di un rilievo fotogrammetrico è costituita dall'operazione di **collimazione** dei *punti omologhi*  $A_1$  e  $A_2$ , dello *stesso punto oggetto*  $A$  su due fotogrammi consecutivi, e delle conseguenti misure effettuate su di essi.

Nella fase **pionieristica** della fotogrammetria (1850-1900), questa operazione avveniva **separatamente** sui due fotogrammi ( $A_1$  sul primo,  $A_2$  sul secondo), ma l'individuazione delle immagini dello stesso punto sui due fotogrammi (eseguita su strumenti detti **monocomparatori**) era tanto imprecisa da condizionare, in quel periodo, lo sviluppo stesso della fotogrammetria.

Il problema venne risolto con l'introduzione della tecnica di **visione stereoscopica**, che consente una **precisa** e rapida individuazione dei punti omologhi con **una sola collimazione** nel modello tridimensionale.

Essa, riproducendo quanto accade nella *visione stereoscopica naturale*, consente di ottenere, dai due fotogrammi, con diversi punti di presa, un'unica immagine tridimensionale (il **modello stereoscopico**) sulla quale è possibile la corretta e rapida individuazione del punto immagine, con un'unica collimazione e utilizzando il principio della **marca mobile** che descriveremo in seguito.

## ■ La visione stereoscopica naturale

Quando gli **occhi** dell'uomo, posti mediamente a una *distanza interpupillare*  $i$  di 60-65 mm, osservano un oggetto, sulle rispettive retine si formano due immagini *leggermente diverse* (in quanto cambia il punto di vista) che vengono elaborate dal cervello in modo da essere percepite come un'**unica immagine tridimensionale**. Il cervello umano esegue, pertanto, una sintesi delle due immagini, realizzando quella che viene detta **visione stereoscopica naturale** dell'oggetto e che dipende:

- dalla diversità dell'angolo  $\alpha$ , detto **parallasse stereoscopico**, sotto cui i punti dell'oggetto vengono osservati dai due occhi al variare della loro distanza dall'osservatore (► FIGURA 19);
- dalla percezione delle caratteristiche geometriche dell'oggetto;
- dall'esperienza pratica basata su elementi come ombre, colori, ecc.

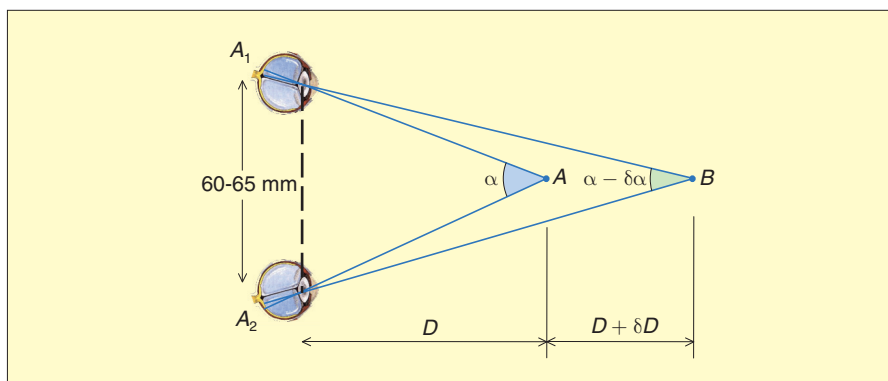
Soffermiamoci sul primo elemento (variazione dell'angolo  $\alpha$ ) in grado di influenzare la *visione stereoscopica naturale* (il secondo e il terzo elemento, peraltro, hanno carattere soggettivo). Esso può essere calcolato facilmente considerando la distanza interpupillare  $i$  come un *arco di cerchio* di raggio  $D$  (essendo  $i \ll D$ ) dalla seguente relazione:

$$\alpha^{\text{rad}} = \frac{i}{D} \quad \text{quindi:} \quad \alpha'' = \frac{i}{D} 206\,265$$

Quando si osserva un punto  $A$  a una distanza  $D$  (► FIGURA 19), i bulbi oculari ruotano in modo che le relative immagini  $A_1$  e  $A_2$  si formino sulla **fovea** (area più sensibile della retina) e le loro visuali formano l'angolo  $\alpha$  (*parallasse stereoscopica*). Immaginiamo di allontanare (o avvicinare) il punto portandolo in  $B$  a una distanza  $D + \delta D$ ; per mantenere la collimazione, i bulbi oculari cambiano la direzione delle visuali che pertanto formeranno l'angolo parallattico  $\alpha - \delta\alpha$ .

Il differenziale di *parallasse stereoscopica*  $\delta\alpha$  consente al cervello di recepire la differenza di distanza  $\delta D$  (detta **profondità di campo**) tra  $A$  e  $B$ , dunque di apprezzare la tridimensionalità degli oggetti.

Se nel campo visivo dell'uomo sono presenti più punti, collocati a diverse distanze, a essi corrisponderanno diverse variazioni di *parallasse stereoscopica*  $\delta\alpha$ , grazie alle quali si avrà la percezione delle distanze relative tra i punti osservati.



**FIGURA 19** La visione stereoscopica naturale consente la percezione tridimensionale degli oggetti. Essa dipende dal parallasse stereoscopico  $\delta\alpha$ , cioè dalla variazione degli angoli che formano le visuali di ciascun occhio al punto osservato.

### FAQ

#### ► Come viene utilizzato il fenomeno della stereoscopia nella fotogrammetria?

La stereoscopia consente di individuare i due punti omologhi (immagini dello stesso punto su due fotogrammi distinti) con una sola collimazione, migliorando in modo significativo le successive misure.

## FAQ

► Perché, aumentando la distanza degli oggetti osservati a occhio nudo, diminuisce la percezione del rilievo?

Perché all'aumentare della distanza diminuisce l'angolo  $\delta\alpha$ , detto acuità stereoscopica, da cui dipende la capacità del cervello di percepire i rilievi.

Tuttavia, affinché possa essere percepita la *profondità di campo*  $\delta D$  tra  $A$  e  $B$ , è necessario che il differenziale di **parallasse stereoscopico**  $\delta\alpha$  (o lo stesso angolo  $\alpha$ ) non scenda sotto un valore minimo, detto **acuità stereoscopica**, che mediamente è compresa nell'intervallo  $10'' < \delta\alpha < 15''$ . Al di sotto di tale valore non si ha più la sensazione del rilievo (visione appiattita).

L'effetto stereoscopico naturale, poi, **diminuisce all'aumentare della distanza**. In effetti, più grande è la distanza a cui si trovano gli oggetti osservati, maggiore deve essere la *profondità di campo*  $\delta D$  tra i punti per consentire la percezione dell'effetto tridimensionale.

## ■ La visione stereoscopica artificiale

In fotogrammetria sono disponibili coppie di fotogrammi, contenenti lo stesso oggetto, presi da due diverse posizioni, sui quali si dovranno individuare i punti omologhi. Possiamo allora pensare, per analogia, alle due **camere** fotografiche all'atto delle prese come agli occhi umani posti a una *distanza interpupillare* pari alla **base di presa**  $b$ .

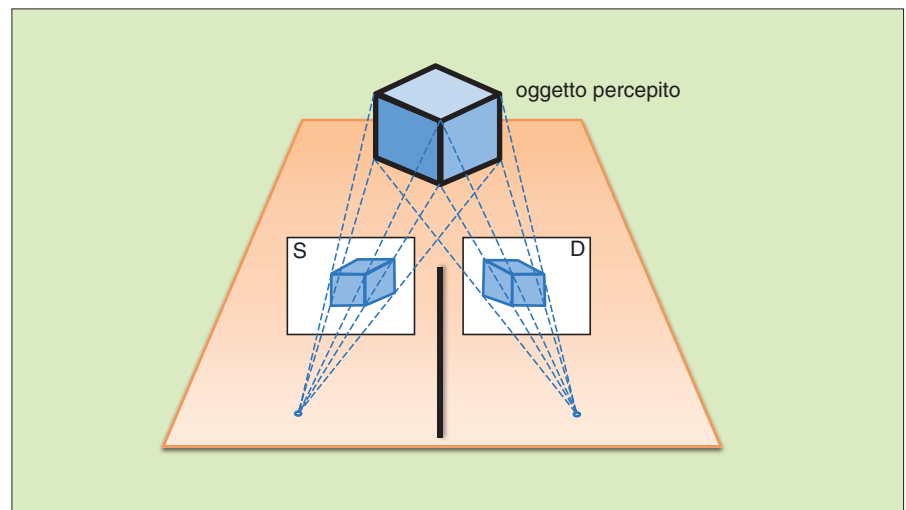
Se in qualche modo si riesce a mandare **separatamente** all'occhio sinistro l'immagine del primo fotogramma e all'occhio destro quella del secondo fotogramma (► FIGURA 20), a condizione che gli assi della camera durante le prese siano stati mantenuti grossomodo **paralleli** (presa **pseudo-normale**), e dopo piccoli aggiustamenti, il cervello **fonde entrambe le immagini** provenienti dai due occhi e percepisce la tridimensionalità dell'oggetto, come se i due occhi si trovassero tra loro alla distanza  $b$  della base di presa, dunque con un conseguente **incremento del potere stereoscopico** naturale (*esagerazione stereoscopica*).

Questa enfattizzazione della visione tridimensionale del modello stereoscopico, viene applicata con grande vantaggio nella **collimazione** di particolari dell'oggetto, che talvolta possono essere evidenziati solamente grazie alla *esagerazione stereoscopica*.

Tuttavia la visione separata di due immagini è ostacolata dalla natura degli occhi umani, che tendono a concentrarsi entrambi sullo stesso oggetto.

Il problema di **osservare separatamente** i due fotogrammi con i due occhi è risolto con l'aiuto di particolari dispositivi, o particolari tecniche, che garantiscono la cosiddetta **visione stereoscopica artificiale**.

Numerosi sono i dispositivi, o le tecniche, che consentono la visione *stereoscopica artificiale*, tuttavia nel nostro contesto sono generalmente utilizzati gli **stereoscopi** (semplici o a specchi).



**FIGURA 20** La visione stereoscopica artificiale si ottiene inviando agli occhi, separatamente, le due immagini piane dello stesso oggetto riprese da due punti di vista diversi.



## ■ Lo stereoscopio

È un dispositivo che consente ai raggi luminosi provenienti dai due fotogrammi di essere osservati **contemporaneamente**, ma **separatamente**, dai due occhi, consentendo la loro fusione tridimensionale nel cervello e creando così il *modello stereoscopico*.

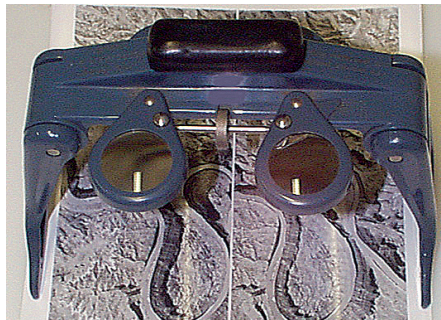
Esso è una componente dei **restitutori**, per l'effettuazione della *collimazione stereoscopica* sul modello tridimensionale; tuttavia sono anche disponibili stereoscopi come strumenti **autonomi** di osservazione e interpretazione dei fotogrammi.

Lo stereoscopio può essere **semplice** o a **specchi**. Nel primo caso (► FIGURA 21) la visione dei fotogrammi avviene direttamente tramite due piccole **lenti** convergenti (*oculari*) montate a una distanza regolabile per adattarla alla distanza interpupillare dell'utente. Sono strumenti compatti e leggeri (**tascabili**), ma trovano scarse applicazioni in fotogrammetria, in particolare perché non consentono la visione dell'intero modello stereoscopico contenuto nei due fotogrammi.

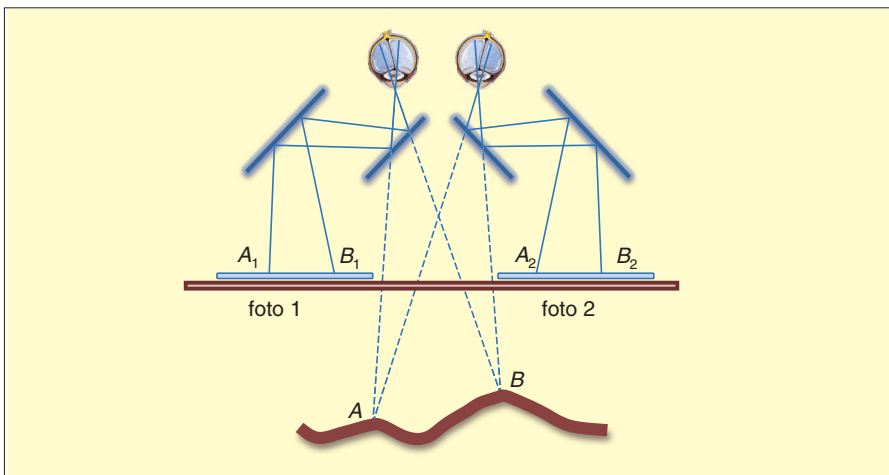
Questo problema è risolto dallo **stereoscopio a specchi** (► FIGURE 23 e 24); in essi un sistema di **specchi** interposti tra gli *oculari* e la sottostante *coppia dei fotogrammi*, permette di allargare la *distanza interpupillare* dell'osservatore ugualandola alla base di presa dei fotogrammi, consentendo un'**unica visione** del *modello stereoscopico*. Lo schema ottico di questi strumenti è illustrato in ► FIGURA 22.

Essi sono anche dotati di componenti ottiche aggiuntive (**binocoli**) che permettono *ingrandimenti* significativi di porzioni del modello stereoscopico.

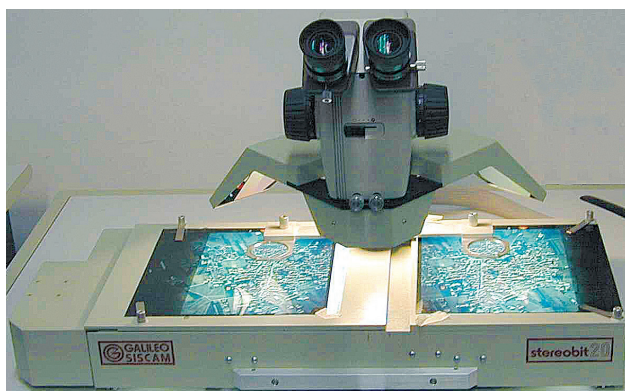
Con lo *stereoscopio a specchi* si ottiene un **aumento** della distanza di visione delle due immagini (rispetto alla distanza interpupillare), producendo un conseguente aumento della *acuità stereoscopica*; questa distanza viene detta **base dello stereoscopio**.



**FIGURA 21** Due immagini di stereoscopio semplice; si tratta di uno strumento leggero e compatto, ma scarsamente utilizzato in fotogrammetria.



**FIGURA 22** Schema di funzionamento dello stereoscopio a specchi. Una coppia di specchi intercetta ciascuno dei due percorsi ottici che giungono agli occhi, aumentando la distanza di visione dei due fotogrammi osservati. Ciò enfatizza l'effetto stereoscopico accentuando gli aspetti tridimensionali dell'oggetto.



**FIGURA 23** Stereoscopio a specchi montato su un piccolo restitutore analitico. Si notino i due fotogrammi in positivo su poliestere trasparente e le lastre circolari di vetro con le marche di collimazione.



**FIGURA 24** Stereoscopio a specchi da tavolo. In questo caso i fotogrammi da osservare sono stampati in scala reale su carta fotografica opaca.

La **base dello stereoscopio**, di norma, è fornita della casa costruttrice; tuttavia è possibile determinarla in via sperimentale tracciando su un foglio di carta bianca un segmento lungo  $30 \div 35$  cm e individuando, verso l'estremità di sinistra, un punto *A*.

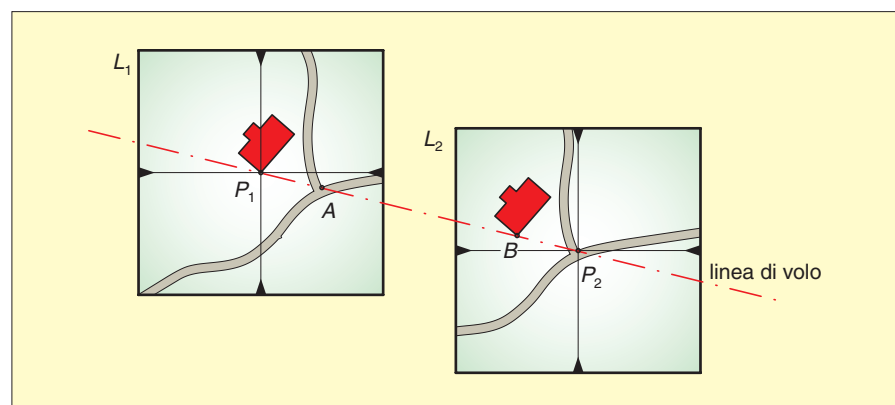
Si colloca poi il foglio sotto lo stereoscopio e, osservando solo col cannocchiale di sinistra, si sposta il foglio fino a far coincidere il punto *A* col il centro del campo del cannocchiale. Quindi si osserva con il cannocchiale di destra e si traccia, sulla retta, il punto *B* coincidente con il centro del campo del cannocchiale. Alla fine, per controllo, osservando con entrambi i cannocchiali, le immagini dei punti *A* e *B* devono essere coincidenti. La distanza *AB* è la *base dello stereoscopio*, che mediamente è compresa tra 25 e 30 cm.

### ■ Osservazione dei fotogrammi con lo stereoscopio a specchi

L'uso prevalente degli *stereoscopi a specchi* è relativo all'osservazione dei fotogrammi di **prese aeree**, e richiede inizialmente alcune manovre sui due fotogrammi da osservare, necessarie per il loro corretto **orientamento**. A differenza degli stereoscopi montati sui *restitutori*, che osservano direttamente i fotogrammi trasparenti sviluppati in **positivo**, con lo stereoscopio a specchi si osservano le loro **stampe** su carta fotografica opaca.

Le operazioni preliminari per orientare correttamente i due fotogrammi sono le seguenti:

- individuazione dei **punti principali**  $P_1$  e  $P_2$  su ciascun fotogramma utilizzando le congiungenti tra le coppie di *marche fiduciali* opposte (► FIGURA 25);



**FIGURA 25** Individuazione della linea di volo su due fotogrammi consecutivi. Essa è determinata dalla congiungente i punti principali  $P_1$  e  $P_2$  dei due fotogrammi e dei relativi punti omologhi.

- tracciamento sui fotogrammi della **linea di volo**. Per questo si individua, sul **primo** fotogramma, il punto  $A$  corrispondente al **punto principale**  $P_2$  del **secondo** fotogramma; analogamente si individua sul **secondo** fotogramma il punto  $B$  corrispondente al punto principale  $P_1$  del **primo** fotogramma (► FIGURA 25). I punti così individuati vengono segnati con una matita o per puntatura con uno spillo.

La **linea di volo** è la retta che congiunge i punti  $P_1$ ,  $A$  e  $B$ ,  $P_2$ ; la distanza  $P_1A = BP_2$  non è altro che la proiezione sulle foto della distanza tra i *centri di presa* al momento dello scatto, dunque la lunghezza della **base di presa**.

Ora si possono sistemare i due fotogrammi sotto lo stereoscopio in modo che le due *linee di volo* tracciate stiano sulla stessa retta (per far questo ci si può aiutare con un righello). Quindi si avvicinano o si allontanano i due fotogrammi finché i punti principali non siano a una distanza uguale alla *base dello stereoscopio*.

A questo punto, osservando con entrambi gli occhi, si deve vedere un'unica linea di volo, i punti omologhi devono apparire perfettamente sovrapposti e il *modello stereoscopico* dovrebbe apparire agli occhi dell'osservatore.

## 7. Il principio di collimazione della marca mobile

Nel rilievo fotogrammetrico la **posizione** dei punti dell'oggetto rilevato è ottenuta dalle **misure di precisione** effettuate sui punti omologhi presenti sui due fotogrammi. Attualmente l'individuazione dei *punti omologhi* non avviene separatamente su ciascun fotogramma, ma attraverso un'**unica collimazione** nel *modello tridimensionale*, utilizzando uno stereoscopio.

Per poter individuare con una *sola collimazione* entrambi i punti omologhi, è necessario che su ciascuno dei due **percorsi ottici** dello stereoscopio, che portano ai due fotogrammi (in prossimità dell'immagine o dell'oculare), sia visibile un piccolo **puntino nero** (o altro segnale come un cerchietto o una crocetta) inciso su una lastrina di vetro detto **marca**.

Nella visione stereoscopica, il cervello, che già percepisce i due fotogrammi come un unico modello tridimensionale, tende anche a fondere le immagini delle due *marche* in un'unica **marca**, che nel modello tridimensionale potrà essere collocata un po' sopra o un po' sotto il punto da collimare.

Il punto è **collimato** quando in entrambi i fotogrammi le **marche** si sovrappongono con esattezza al punto stesso. In questo caso l'osservatore avrà la sensazione che un'**unica marca** sia adagiata sul punto collimato.

La **marca** è detta **mobile** perché nella fase che precede la collimazione fluttua nello spazio del modello tridimensionale. Per comprendere meglio il suo funzionamento facciamo riferimento alla ► FIGURA 26.

Siano allora  $O_1$  e  $O_2$  gli occhi dell'osservatore e  $L_1$  e  $L_2$  i due fotogrammi trasparenti (**positivi**). Sui due fotogrammi siano  $A_1$  e  $A_2$  le immagini di un punto  $A$ . Osservando *stereoscopicamente* le due foto si vedrà un solo punto  $A$  posto sul punto d'incontro dei raggi  $O_1A_1$  e  $O_2A_2$  (modello stereoscopico di  $A$ ).

Ammettiamo ora di disporre sui due fotogrammi due segnali, detti **marche**, in modo che coincidano coi punti  $A_1$  e  $A_2$  (► FIGURA 26a); è ovvio che, di queste due marche, ne vedremo una sola coincidente con il punto  $A$ . Immaginiamo, a questo punto, di spostare una marca, per esempio quella di sinistra, nella posizione  $1'$  (► FIGURA 26b) mentre l'altra resta coincidente con  $A_2$ . Osservando allo stereoscopio si vedrà sempre una sola marca, non più coincidente con  $A$  ma più vicina. In modo analogo, spostando la marca nella posizione  $2'$  (► FIGURA 26c) il modello

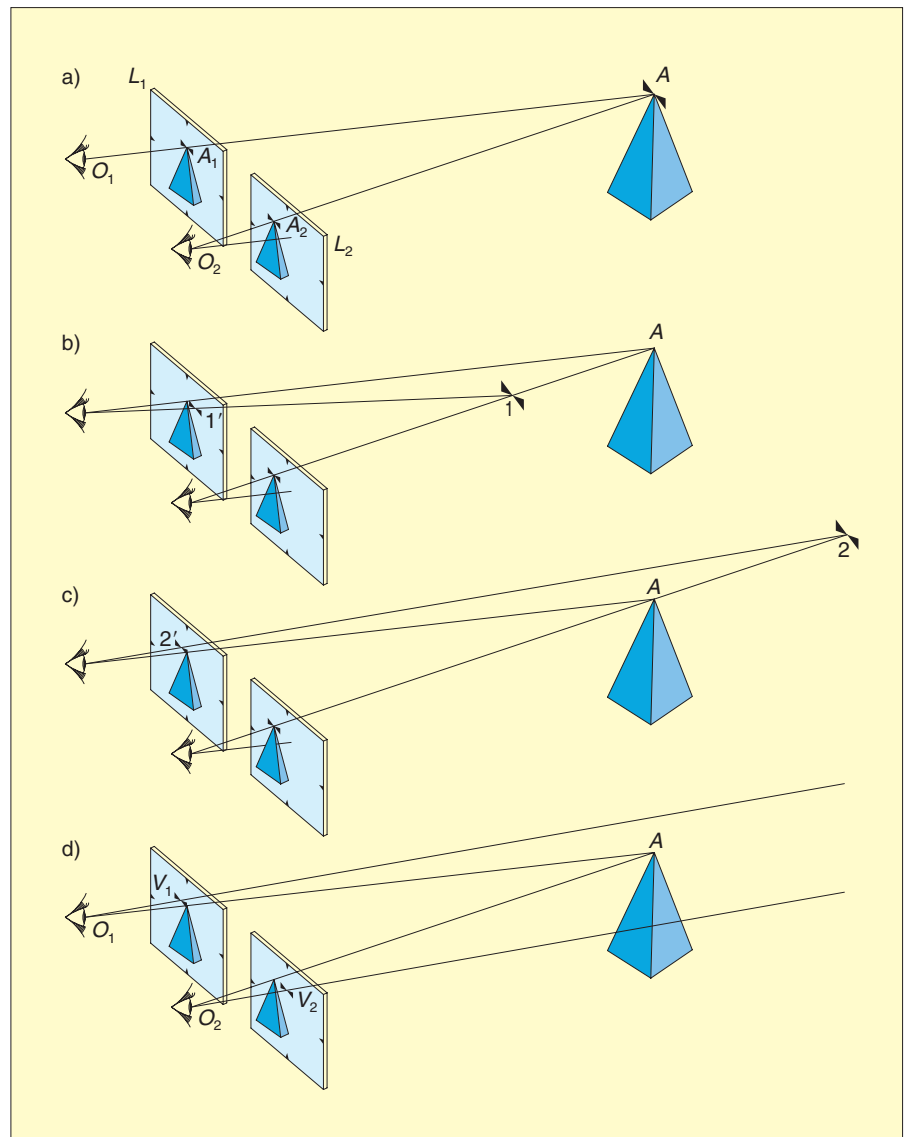
### FAQ

#### ► Da cosa è costituita la marca di collimazione stereoscopica?

È costituita da un piccolo punto nero inciso su due dischetti di vetro che intercettano i percorsi ottici dello stereoscopio, e che di solito sono collocati in prossimità di ciascun fotogramma (sono visibili in secondo piano nella ► FIGURA 23). Essa consente la collimazione unica di due punti omologhi in un modello tridimensionale.



**FIGURA 26** Schematizzazione del principio della marca mobile per l'individuazione dei punti omologhi con una sola collimazione nel modello tridimensionale.



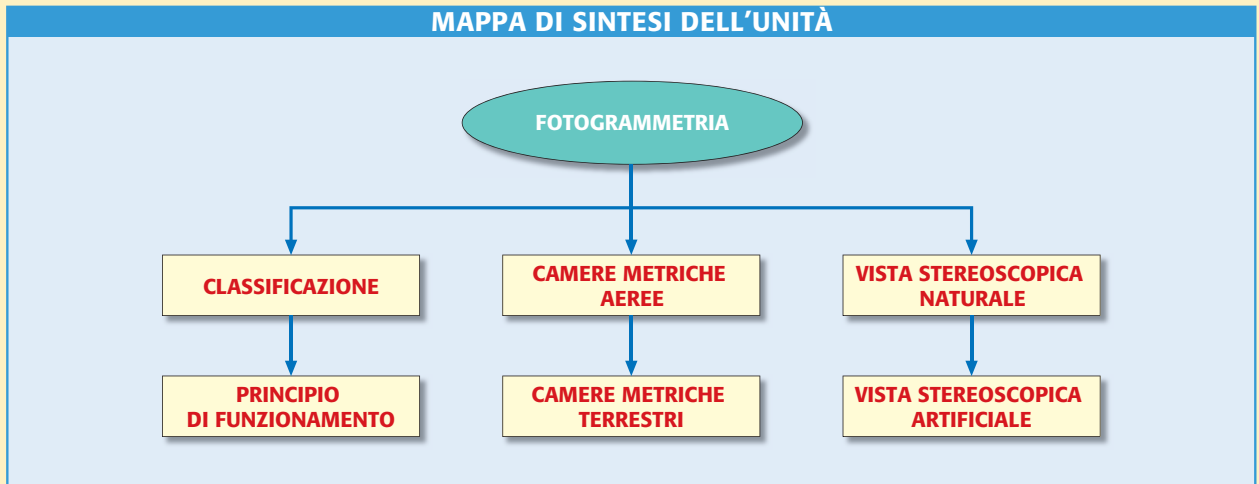
della marca andrà a cadere più lontano di  $A$ . Infine, se le marche vengono poste nei punti  $V_1$  e  $V_2$  (► FIGURA 26d), cioè in modo che i raggi  $O_1V_1$  e  $O_2V_2$  siano paralleli, vedremo sempre una sola marca ma proiettata all'infinito.

In definitiva basta portare il modello della **marca** in coincidenza del modello del punto osservato per essere sicuri di avere individuato con precisione, con una sola collimazione, i **due punti omologhi**  $A_1$  e  $A_2$  sui due fotogrammi.

Se l'immagine della marca viene vista più alta o più bassa del punto considerato, vuol dire che le due marche non individuano, sui due fotogrammi, due punti omologhi.

# Riassumendo

## MAPPA DI SINTESI DELL'UNITÀ

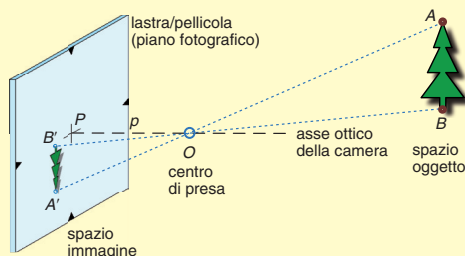


**Fotogrammetria:** è quella tecnica che consente di definire la *posizione*, la *forma* e le *dimensioni* degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune *immagini fotografiche*, degli stessi oggetti, riprese da *punti diversi*.

La *fotogrammetria* può essere *classificata* secondo i seguenti criteri.

- In base al tipo della presa:
  - *fotogrammetria aerea* (o dei lontani);
  - *fotogrammetria terrestre* (o dei vicini).
- In base al tipo di elaborazione:
  - *fotogrammetria analogica*;
  - *fotogrammetria analitica*.
- In base al tipo di fotografia:
  - *fotogrammetria classica*;
  - *fotogrammetria digitale*.

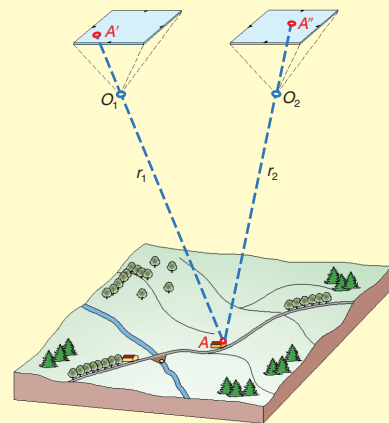
Un *fotogramma* è una *prospettiva centrale*, in cui i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini sulla lastra (*stella proiettante*) si incontrano tutti nel punto  $O$ , detto *centro di presa*.



**Una sola immagine piana** (come quella della fotografia) *non* contiene informazioni sufficienti a definire la *posizione* e le *dimensioni* di un oggetto tridimensionale.

Le informazioni necessarie a definire gli oggetti ripresi possono essere ottenute disponendo di *due fotografie* che riprendono gli stessi oggetti da *due differenti punti di presa*  $O_1$  e  $O_2$ .

Conoscendo l'esatta *posizione* dei punti omologhi  $A'$  e  $A''$  sulle due fotografie, e la posizione spaziale delle due *lastre* e dei due *punti di presa*  $O_1$  e  $O_2$ , il punto  $A$  rimane geometricamente definito in quanto punto di *intersezione* dei due *raggi proiettanti*  $r_1$  e  $r_2$  che congiungono i due punti omologhi con i centri di presa corrispondenti.

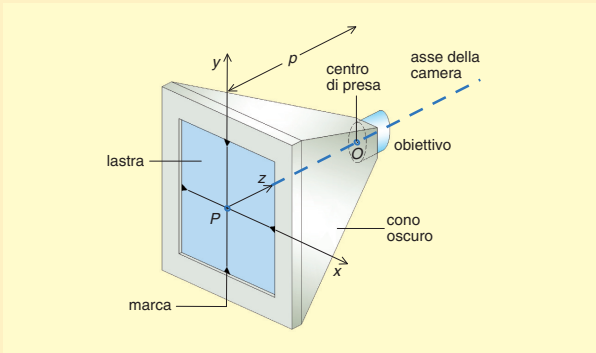


**Il rilievo fotogrammetrico** comprende le seguenti fasi:

- l'*acquisizione*: operazioni riguardanti la *presa* delle immagini fotografiche;
- l'*orientamento*: operazioni preliminari per la determinazione dei *parametri* che consentono di posizionare i *centri di presa* e le *lastre* con la stessa posizione nello spazio che avevano al momento della *presa*;

- la *restituzione*: operazioni che consentono la ricostruzione della *forma* e delle *dimensioni* dell'oggetto ripreso utilizzando strumenti detti *restitutori*.

La **camera da presa** può essere schematizzata come un corpo rigido in cui l'*obiettivo* si trova in posizione *fissa* rispetto al piano della emulsione sensibile (*lastra* o *pellicola*) su cui si forma l'immagine, in modo che la *distanza principale*  $p$  rimane costante e uguale alla sua *distanza focale*.

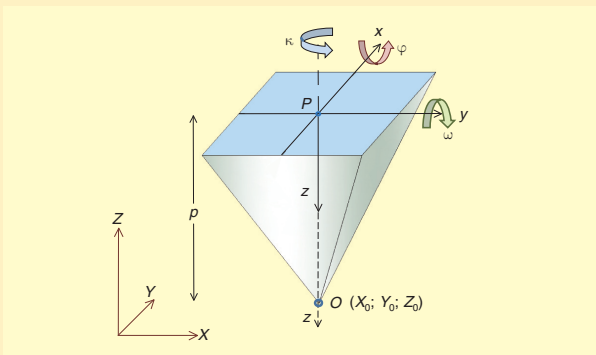


Le componenti essenziali della camera sono:

- *obiettivo*: sistema complesso di lenti a *fuoco fisso* ( $f = \text{costante}$ );
- *lastra* o *pellicola*: supporto fisico all'*emulsione fotosensibile*; devono essere perfettamente *piane*;
- *cono oscuro*: elemento scatolare a forma piramidale che *collega* obiettivo e lastra;
- *telaietto* o *cornice portalastra*: sui suoi lati sono realizzate 4 *piccole incisioni* che al momento della presa impressionano la lastra. Esse sono dette *marche fiduciali* (*repers*) e hanno il compito di materializzare un *sistema di riferimento xyz* interno alla camera (detto *sistema lastra*).

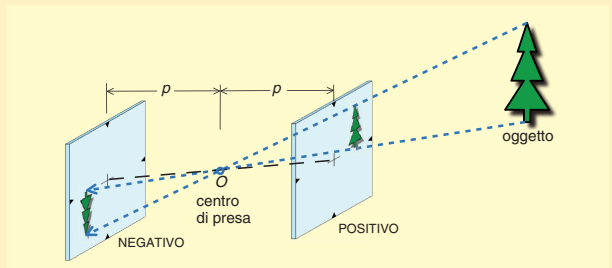
Nella *camera*, poi, possono essere definiti i seguenti *elementi geometrici*:

- *centro di presa O*: punto comune della stella dei raggi proiettanti;
- *asse della camera*: coincidente con l'asse del sistema ottico *obiettivo*; il costruttore deve disporlo in modo *perpendicolare* alla lastra;



- *punto principale P*: intersezione dell'asse della camera con il piano della lastra (dunque anche *proiezione* di *O* sulla lastra). Il costruttore tenta di farlo coincidere con l'intersezione delle *congiungenti* delle *marche fiduciali*; in ogni caso la sua posizione  $(x_p, y_p)$  rispetto al *sistema lastra* deve essere nota con precisione;
- *distanza principale p*: distanza di *O* dalla lastra (segmento *PO*) che coincide con la *distanza focale* dell'*obiettivo*:  $p = f$ .

Il **centro di presa** si trova interposto tra la *lastra* e l'*oggetto* ripreso; ciò genera un'immagine *capovolta* rispetto alla disposizione dell'oggetto, detta *negativo*. È possibile ottenere un'immagine identica al *negativo*, ma *dritta* come l'oggetto, chiamata *positivo*.



Le **camere** sono classificate in tre tipologie:

- *camere metriche*: appositamente costruite per scopi fotogrammetrici, di esse sono noti con precisione i parametri di *orientamento interno* riportati nel *certificato di calibrazione* allegato alla camera;
- *camere semimetriche*: progettate per scopi non fotogrammetrici, ma adattate a questi successivamente;
- *camere amatoriali*: di uso comune, vengono impiegate solo per applicazioni di procedure operative *non convenzionali*.

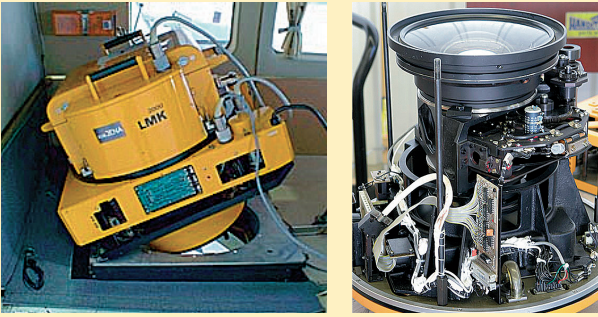
In relazione, poi, al modo di acquisizione dell'immagine fotografica, si possono distinguere:

- *camere analogiche*: in cui l'acquisizione dell'immagine avviene tramite *sviluppo* chimico di una emulsione fotosensibile il cui supporto può essere una *lastra di vetro* o una *pellicola* di poliestere;
- *camere digitali*: in cui l'acquisizione avviene tramite *sensore CCD* (che trasforma i *fotoni* in *elettroni*) e memorizzata in file.

La **presa aerea** avviene in *movimento*, con tempi di scatto tra due fotogrammi consecutivi di qualche secondo, utilizzando *camere* metriche con le seguenti caratteristiche:

- *supporto dell'emulsione*: pellicola di poliestere per circa 600 fotogrammi;
- *formato dell'immagine*:  $230 \times 230$  mm;
- *automatismo* per *apertura* e *chiusura dell'otturatore*: da 1/100 a 1/1000 di secondo;
- *automatismo pneumatico* per lo *spianamento* della pellicola;





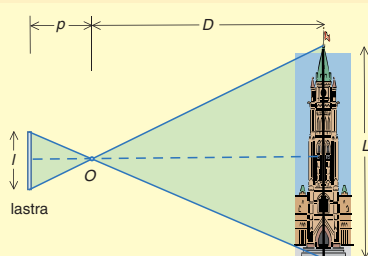
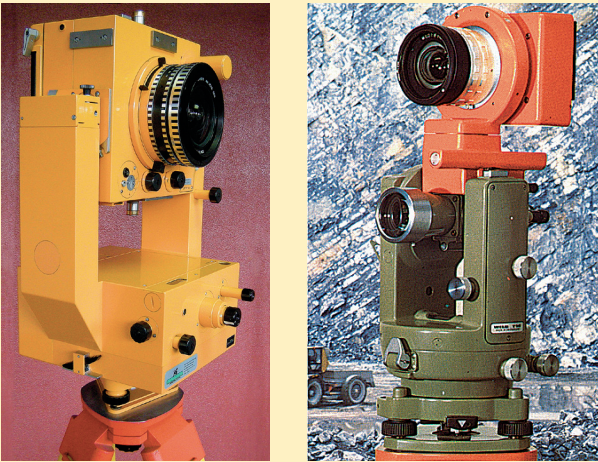
- *data strip*: striscia di dati registrati sul bordo dei fotogrammi all'atto della presa.

**Angolo di campo:** indicato con  $\alpha$ , è l'angolo che ha per vertice il centro di presa  $O$  e i cui lati passano per gli estremi della *diagonale* del formato dell'immagine. Questo parametro permette di classificare gli obiettivi delle camere aeree nel seguente modo:

- *normali*:  $\alpha = 56^\circ$ ,  $f = 305$  mm;
- *grandangolari*:  $\alpha = 93^\circ$ ,  $f = 153$  mm;
- *supergrandangolari*:  $\alpha = 125^\circ$ ,  $f = 85$  mm.

**Le camere per la presa terrestre** di tipo *metrico* sono più semplici e meno ingombranti di quelle per la presa aerea per i seguenti due aspetti:

- presa con camera *ferma*;
- piccole *distanze* dall'oggetto.



Le camere per la *presa terrestre* possono essere di tipo *simmetrico*. Si tratta di camere dotate di un *obiettivo calibrato* che è stato montato su un corpo macchina di tipo amatoriale. Gli errori di *complanarità* e di deformazione che subisce la pellicola nelle fasi di *sviluppo* sono compensati in fase di restituzione mediante la *digitazione* del *reseau*, che è costituito da una griglia di croci disposte per file e colonne di posizione nota.

**La scala media** dei fotogrammi ( $1 : N$ ) è il rapporto fra la *distanza focale* della camera (uguale a  $p$ ) e la *distanza media* dell'oggetto dal centro di presa  $O$ :

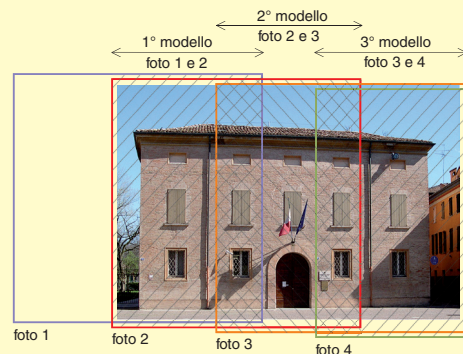
$$\frac{1}{N} = \frac{p}{D}$$

La *buona visibilità* dei particolari sul fotogramma richiede che la loro scala ( $1 : N$ ) sia condizionata da quella del *disegno* che verrà restituito ( $1 : N_{dis}$ ). L'esperienza consolidata ci fornisce *tabelle e formule empiriche* per passare dalla scala del disegno a quella dei fotogrammi. Per ottenere poi *fotogrammi* con la *scala media* così determinata, occorre collocare la camera, per la presa, a una *distanza* dall'oggetto fornita dalla seguente espressione:

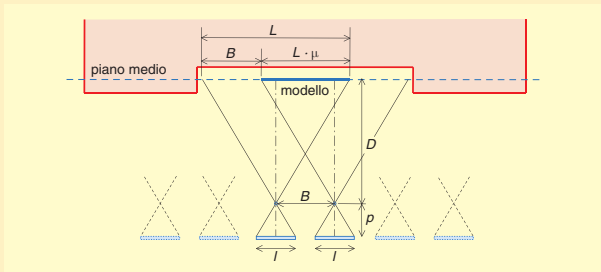
$$D = N \cdot p \quad \text{o} \quad H = N \cdot p$$

**La presa:** si ottiene dopo aver disposto la *camera* via via dinnanzi all'oggetto a una *distanza media* corrispondente alla *distanza di presa*  $D$ . Affinché i fotogrammi siano osservabili in *stereoscopia*, è necessario che gli assi delle camera siano paralleli (*presa normale*). La distanza tra due centri di presa consecutivi è la *base di presa*  $B$ .

**Ricoprimento longitudinale:** affinché gli stessi punti dell'oggetto siano ripresi in *due fotogrammi consecutivi*, è necessario che questi presentino un'area di *sovrapposizione* in cui entrambi contengano la *stessa porzione di oggetto*, la cui entità viene detta *ricoprimento longitudinale*. Il suo valore di solito è  $\mu = 0,6$  (60%).



**Base di presa:** è l'elemento che permette di ottenere il *ricoprimento longitudinale*  $\mu$  desiderato con la seguente

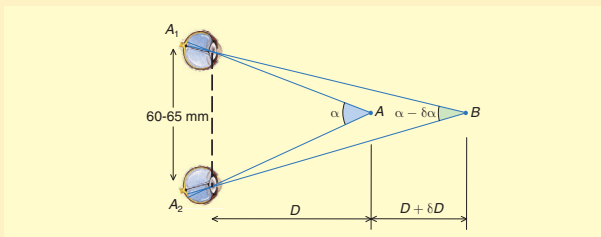


espressione ( $l$  = formato fotogramma,  $p$  = distanza principale):

$$B = \frac{l \cdot D}{p} \cdot (1 - \mu)$$

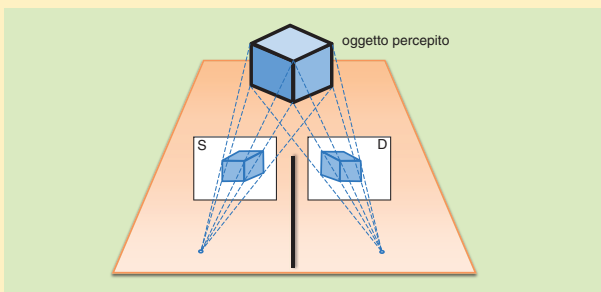
**Rapporto base/distanza:** l'esperienza insegna che per il buon funzionamento del rilievo fotogrammetrico esso si deve mantenere uguale o maggiore dei seguenti valori indicativi:

- 1/4 per prese aeree;
- 1/5 per prese terrestri di prospetti;
- 1/3 per prese terrestri di particolari.



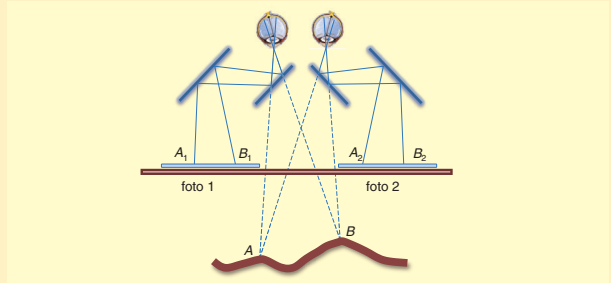
**Visione stereoscopica naturale:** è la *proprietà naturale* di vedere il mondo esterno in *tre dimensioni*, cioè la *capacità* di percepire il *rilievo* generato dalla *diversa distanza* tra gli *oggetti osservati*.

- Si ha soltanto quando si osserva un oggetto con *entrambi* gli occhi (*visione binoculare*) in quanto ciascuno ne fornisce una *immagine diversa* da quella dell'altro; le due immagini diverse si *fondono* nel cervello formando un'*unica immagine tridimensionale*.
- Si definisce *parallasse stereoscopica* l'angolo  $\alpha$  delimitato dalle *due semirette* con *vertice* entrambe sul *punto osservato* e con gli altri due *estremi* sulle *pupille* dell'osservatore.



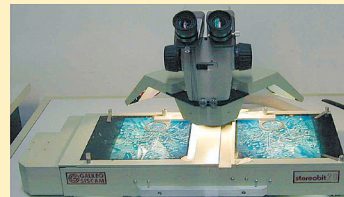
**Acuità stereoscopica:** è il *minimo valore*  $\delta\alpha$  della *differenza* tra gli *angoli di parallasse* (o dello stesso angolo  $\alpha$ ) al di sotto del quale non si ha più la percezione del rilievo. Mediamente il suo valore è di 10"-15".

**Visione stereoscopica artificiale:** consiste nel mandare *separatamente* ai due occhi due immagini di uno stesso oggetto preso da diversi punti. Ciò riproduce l'effetto *stereoscopico* per il quale il cervello fonde le due immagini ottenendo un *modello virtuale tridimensionale*.



**Stereoscopia a specchi:** strumento che riproduce artificialmente l'effetto *stereoscopico* utilizzando *due fotogrammi* dello stesso oggetto presi da *due punti diversi*, e osservati *simultaneamente* in modo che l'occhio destro non possa vedere la foto di sinistra e viceversa.

- L'effetto dello stereoscopia è quello di *enfaticizzare* la *sensazione del rilievo* consentito dall'*aumento* della distanza di visione delle due immagini (rispetto alla visione a occhio nudo) producendo un conseguente aumento dell'*acuità stereoscopica*. Questa distanza viene detta *base dello stereoscopia*.



**La visione stereoscopica in fotogrammetria** consente l'individuazione precisa e rapida dei *punti omologhi* su ciascun fotogramma, attraverso un'*unica collimazione* sul *modello tridimensionale*.

**Marca mobile:** per poter individuare con una *sola collimazione* entrambi i punti omologhi, è necessario che su ciascuno dei due *percorsi ottici* dello stereoscopia, che portano ai due fotogrammi (in prossimità dell'immagine o dell'oculare), sia visibile un piccolo *puntino nero* (o altro segnale come un cerchietto o una crocetta) inciso su una lastrina di vetro detto *marca*.

- Il punto è *collimato* quando in entrambi i fotogrammi le *marche* si sovrappongono con esattezza al punto stesso. In questo caso l'osservatore avrà la sensazione che un'*unica marca* sia adagiata sul punto collimato.

# Autovalutazione

## A. Verifica delle conoscenze

### QUESITI VERO/FALSO

- |  | V                        | F                        |  |   |
|--|--------------------------|--------------------------|--|---|
| <b>1</b> Per ricostruire un oggetto nello spazio sono sufficienti le informazioni di una prospettiva                       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>16</b> Le camere metriche possono essere dotate di reticolo di calibrazione ( <i>reseau</i> )                         | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>2</b> Le marche fiduciali di un fotogramma servono a materializzare un sistema di riferimento cartesiano                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>17</b> Gli obiettivi grandangolari hanno un angolo di campo di circa 93°  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>3</b> Il rilievo fotogrammetrico richiede l'accesso fisico all'oggetto  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>18</b> L'angolo di campo di un obiettivo dipende dalla sua distanza focale ma non dal formato della camera            | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>4</b> Il punto principale è la proiezione del centro di presa sul fotogramma  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>19</b> La scala media dei fotogrammi è condizionata dalla scala del disegno   | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>5</b> L'orientamento dei fotogrammi è una fase preliminare alla restituzione  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>20</b> La scala media dei fotogrammi si ottiene variando la base di presa   | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>6</b> L'angolo di parallasse stereoscopico è direttamente proporzionale alla distanza del punto osservato               | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>21</b> Il ricoprimento longitudinale non può mai superare il 60%  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>7</b> Lo stereoscopia consente la visione di due fotogrammi contemporaneamente e separatamente con ciascun occhio       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>22</b> Il parallasse stereoscopico è un parametro angolare  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| <b>8</b> L'effetto di uno stereoscopia è quello di aumentare la sensazione del rilievo che si avrebbe a occhio nudo        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>QUESITI A RISPOSTA SINGOLA</b>  |   |
| <b>9</b> Il fotogramma viene sempre realizzato su supporto flessibile (pellicola)  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>23</b> In quali modi è possibile classificare il rilievo fotogrammetrico?   |   |
| <b>10</b> L'otturatore regola la quantità di luce che colpisce la lastra   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>24</b> Elencare le fasi e i periodi in cui si è sviluppata la fotogrammetria?   |   |
| <b>11</b> I segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro immagini passano per il centro di presa della camera | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>25</b> A quale scopo vengono registrate le marche sui fotogrammi delle prese?   |   |
| <b>12</b> Sul <i>data strip</i> di un fotogramma aereo è riportata anche la velocità dell'aereo                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>26</b> Per quale ragione per rilevare un oggetto sono necessarie due fotografie effettuate da diversi punti di presa? |   |
| <b>13</b> La distanza principale è la distanza tra la camera e l'oggetto   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>27</b> Per quale ragione è lecito considerare uguali distanza principale e distanza focale?                           |   |
| <b>14</b> Il cono oscuro è un componente delle camere per fotogrammetria   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>28</b> Perché, osservando un oggetto con un solo occhio, cessa l'effetto stereoscopico naturale?                      |   |
| <b>15</b> Le camere per la presa aerea possono essere semimetriche   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <b>29</b> Come viene definito il punto principale di un fotogramma?  |   |
|  |                          |                          | <b>30</b> Enunciare le fasi in cui si sviluppa il rilievo fotogrammetrico.   |   |
|  |                          |                          | <b>31</b> Descrivere le parti che costituiscono la camera per riprese fotogrammetriche.                                  |   |
|  |                          |                          | <b>32</b> Come vengono classificate le camere per riprese fotogrammetriche?  |   |



- 33** Come vengono classificati gli obiettivi delle camere per riprese aeree, e per quali tipologie di rilievi sono utilizzati?
- 34** Come viene definito l'angolo di campo di un obiettivo fotografico?
- 35** Come viene fissata la scala media dei fotogrammi?
- 36** Come viene ottenuta la scala media dei fotogrammi durante la presa?
- 37** Come si ottiene il ricoprimento longitudinale desiderato tra due fotogrammi consecutivi?
- 38** Come si ottiene la visione stereoscopica artificiale, e quali strumenti sono in grado di realizzarla?
- 39** Descrivere il funzionamento di uno stereoscopio a specchi.
- 40** In cosa consiste e a cosa serve il principio della marca mobile?

**QUESITI A RISPOSTA MULTIPLA**

- 41** Quale tra i seguenti elementi è il prodotto finale di un rilievo fotogrammetrico?
- a carte topografiche  
 b insieme numerico di coordinate  
 c immagini  
 d tutti i precedenti
- 42** Quale delle seguenti classificazioni *non* si riferisce alle tipologie di rilievo fotogrammetrico?
- a fotogrammetria pionieristica  
 b fotogrammetria digitale  
 c fotogrammetria analitica  
 d fotogrammetria analogica
- 43** La distanza principale è la distanza tra il punto principale e
- a il centro del fotogramma  
 b le marche fiduciali  
 c il centro di presa  
 d l'origine delle coordinate lastra
- 44** Quale delle seguenti fasi *non* appartiene al rilievo fotogrammetrico?
- a orientamento       b calibrazione  
 c presa                     d restituzione
- 45** Qual è il parallasse stereoscopico di un punto osservato con una distanza interpupillare di 62 mm dalla distanza di 250 m?
- a 16"                       b 32"  
 c 51"                       d 58"

- 46** Quale delle seguenti classificazioni *non* si riferisce alle tipologie di camere fotogrammetriche?
- a semimetriche  
 b digitali  
 c analogiche  
 d nessuna delle precedenti
- 47** Quale tipo di distanza focale *non* appartiene alle tipologie di obiettivi per camere da presa aerea?
- a 75 mm  
 b 305 mm  
 c 153 mm  
 d nessuno dei precedenti
- 48** Quale tra le seguenti tipologie di obiettivi appartiene alle camere per la presa aerea?
- a supergrandangolare  
 b grandangolare  
 c normale  
 d tutte le precedenti
- 49** Una camera semimetrica ha un obiettivo con distanza focale di 50 mm e una pellicola di formato 6 × 6 cm. Qual è il suo angolo di campo?
- a 62°  
 b 40°  
 c 31°  
 d nessuno dei precedenti
- 50** Quale funzione ha l'impiego del principio della marca mobile?
- a consente di enfatizzare l'effetto stereoscopico  
 b consente collimazioni separate dei punti omologhi  
 c consente un'unica collimazione dei punti omologhi  
 d nessuno dei precedenti
- 51** Quale elemento condiziona la scala media dei fotogrammi?
- a dimensione dell'oggetto ripreso  
 b scala del disegno restituito  
 c base della presa  
 d nessuno dei precedenti
- 52** Quale tra i seguenti elementi viene riportato sul *data strip* dei fotogrammi aerei?
- a la quota di volo  
 b l'ora della presa  
 c la distanza focale dell'obiettivo  
 d tutti i precedenti
- 53** Quale elemento occorre variare per ottenere la scala media dei fotogrammi desiderata?
- a ricoprimento longitudinale  
 b distanza camera-oggetto  
 c base della presa  
 d nessuno dei precedenti

**54** Quale elemento consente di fissare la base di presa?

- a) scala media dei fotogrammi
- b) scala del disegno restituito
- c) ricoprimento longitudinale
- d) distanza camera-oggetto

**55** Qual è il valore ottimale del rapporto base/distanza nelle prese aeree?

- a) 1:3
- b) 1:5
- c) 1:4
- d) tutti i precedenti

## B. Verifica delle competenze

### ● Esercizi e problemi

**56** Calcolare la massima distanza a cui si percepiscono le profondità con la visione a occhio nudo (distanza interpupillare di 65 mm) assumendo per l'acuità stereoscopica il valore  $\delta = 0',0080$ . [517 m]

**57** A che distanza dall'oggetto da riprendere, in un rilievo fotogrammetrico terrestre, deve essere collocata una camera semimetrica con distanza focale  $f = p = 75,00$  mm, volendo ottenere una scala media dei fotogrammi di 1:200? [15 m]

**58** Un rilievo fotogrammetrico terrestre viene eseguito con una camera semimetrica, con distanza focale  $f = p = 52,08$  mm e formato della pellicola di 6 cm, collocata a 30 m dall'oggetto da riprendere. Quanto vale l'abbracciamento della presa (larghezza della parte di oggetto contenuta nel fotogramma)? [34,5 m]

**59** Una camera per presa aerea ha un obiettivo con distanza focale  $f = p = 152,33$  mm e pellicola con formato di 23 cm. Determinare l'angolo di campo dell'obiettivo. [93°44'52"]

**60** Una camera per presa aerea ha un obiettivo con distanza focale  $f = p = 151,68$  mm e un l'angolo di campo di 92°46'. Determinare la superficie del terreno contenuta nel fotogramma, sapendo che la sua scala media è di 1:3000. [456 128 m<sup>2</sup>]

**61** Un fotogramma aereo contiene un tratto di terreno pianeggiante ed è stato ripreso con una camera con obiettivo di distanza focale  $f = p = 152,28$  mm e formato della pellicola di 23 cm. Su di esso sono ricono-

scibili le immagini  $A'$  e  $B'$  di due vertici trigonometrici  $A$  e  $B$  di cui sono note le coordinate:

$$A \equiv (1\,598\,620,00; 4\,984\,842,00)$$

$$B \equiv (1\,598\,724,00; 4\,984\,893,00)$$

È stata misurata, sul fotogramma, la distanza tra i punti omologhi  $A'$  e  $B'$  che è risultata:  $A'B' = 25,60$  mm. Determinare l'altezza a cui è stato ripreso il fotogramma e l'angolo di campo dell'obiettivo. [689 m; 93°45'59"]

**62** I fotogrammi di un rilievo aereo fotogrammetrico sono stati effettuati a un'altezza di 420 m dal terreno sottostante considerato pianeggiante, realizzando un ricoprimento longitudinale del 60%. La camera utilizzata montava un obiettivo di distanza focale  $f = p = 153,06$  mm e angolo di campo di 90°26'00". Determinare la superficie del terreno che si sovrappone in due fotogrammi consecutivi. [211 670 m<sup>2</sup>]

**63** Una camera metrica, con obiettivo di distanza focale  $f = p = 99,70$  mm e formato della lastra di 13 cm, viene impiegata in un rilievo fotogrammetrico terrestre in cui la scala media dei fotogrammi deve essere 1:150 e il ricoprimento longitudinale del 60%. Quale deve essere la base di presa? [7,8 m]

**64** Con una camera semimetrica, con obiettivo di distanza focale  $f = p = 55,60$  mm e formato della pellicola di 6 cm, è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico terrestre con base di presa di 5,00 m, e in cui due fotogrammi consecutivi presentano una sovrapposizione corrispondente a una larghezza di una porzione di oggetto di 10,00 m. Determinare la percentuale di ricoprimento longitudinale e la distanza a cui è avvenuta la presa. [66%; 13,90 m]

### Risultati quesiti vero/falso

1F, 2V, 3F, 4V, 5V, 6F, 7V, 8V, 9F, 10V, 11V, 12F, 13F, 14V, 15F, 16F, 17V, 18F, 19V, 20F, 21F, 22V.

### Risultati quesiti a risposta multipla

41d, 42a, 43c, 44b, 45c, 46d, 47a, 48d, 49b, 50c, 51b, 52d, 53b, 54c, 55c.