

# **CAMERE FOTOGRAMMETRICHE, FOTOGRAMMI E ORIENTAMENTO INTERNO**

## **CLASSIFICAZIONE DELLE CAMERE**

- CAMERE METRICHE (costruite apposta per applicazioni fotogrammetriche, con o.i. stabile)
- CAMERE SEMI-METRICHE (con parametri di o.i. non stabili)
- CAMERE NON METRICHE (solo per rilievi di minor precisione)

## **METODO DI DETERMINAZIONE DELL'ORIENTAMENTO INTERNO:**

- MARCHE FIDUCIALI (imprese sull'immagine all'atto della presa)
- RETICOLO (RESEaux) (reticolo calibrato inciso su una sottile lastra di vetro che all'atto della presa si sovrappone all'immagine)
- TELAIO

## CARATTERISTICHE DELLE CAMERE METRICHE PER FOTOGRAMMETRIA AEREA

- **obbiettivo fisso** (c fisso)  
per foto prese a grandi distanze (dai 100m a  $n \times 1000m$ ) le immagini si formano sempre nel piano focale (non c'è il problema della profondità di campo; in fotogrammetria dei vicini, può essere necessario cambiare la distanza di messa a fuoco)
- formato grande : **23 cm x 23 cm**
- **marc** (reperes) sul piano immagine (4 o 8, illuminate)
- elevata **precisione** di realizzazione di ogni parte (ottica, meccanica; p.e.otturatori centrali)
- **automatismi** per spianamento della pellicola e correzione trascinamento e deriva
- **stabilità** riguardo forti vibrazioni, sbalzi di temperatura

per mantenere queste caratteristiche nel tempo richiedono **manutenzione continua**

classificazione delle camere fotogrammetriche in base all'**angolo di campo** dell'obbiettivo:

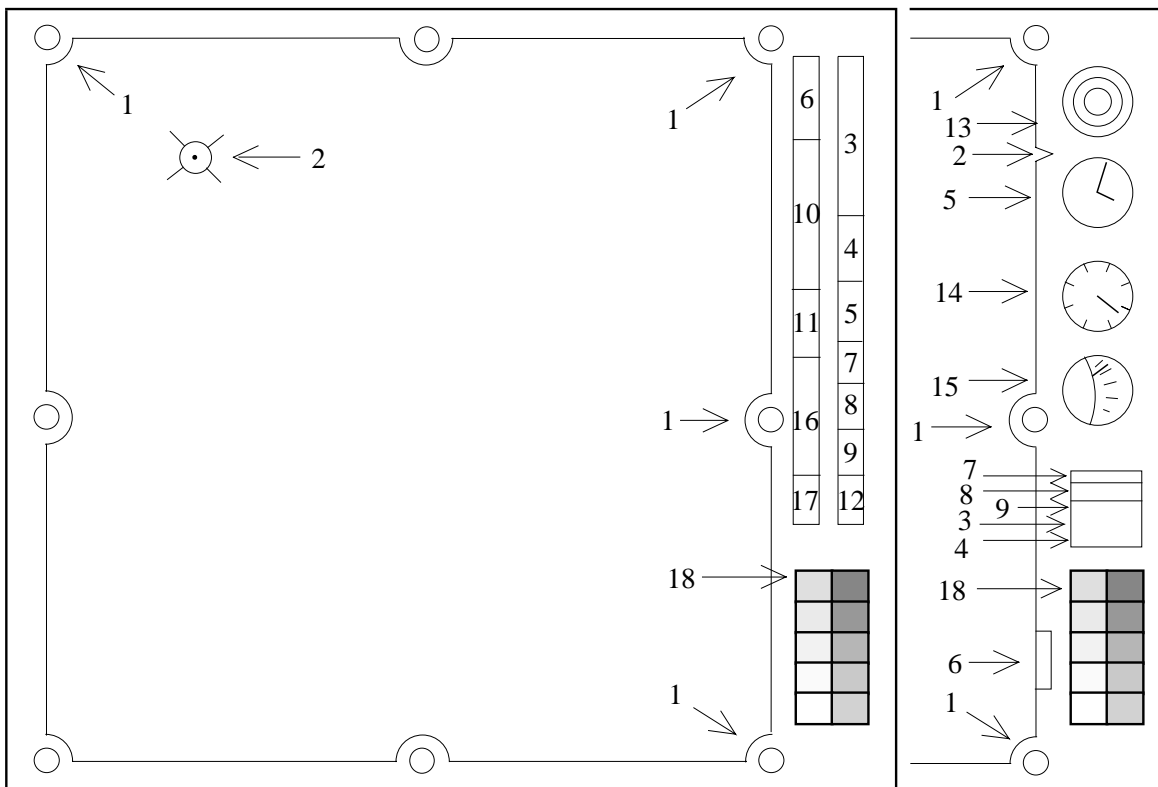
angolo che ha per vertice il centro di presa O e i cui lati passano per gli estremi della diagonale del formato dell'immagine

per il formato 230 mm x 230 mm:

	Normale Ridotto	Normale (N)	Grandangolare (W)	Supergrandangolare (SW)
Angolo di campo	30°	60°	90°	120°
Distanza principale c (mm)	600	300	150	90
Note	Rilievi a grande scala, es. rilievi urbani		E' il più usato per rilievi a media e grande scala	Rilievi a piccola scala

Per poter ricostruire l'ORIENTAMENTO INTERNO ogni fotogramma deve registrare (oltre ad altre informazioni):

- **Le marche fiduciali** (per determinare la posizione del punto principale)
- **La distanza principale della camera (focale)**



- **Il numero di matricola della camera** (per l'utilizzo del certificato di calibrazione corrispondente)

Dati ausiliari registrati sul fotogramma  
A sinistra numerici, a destra analogici.

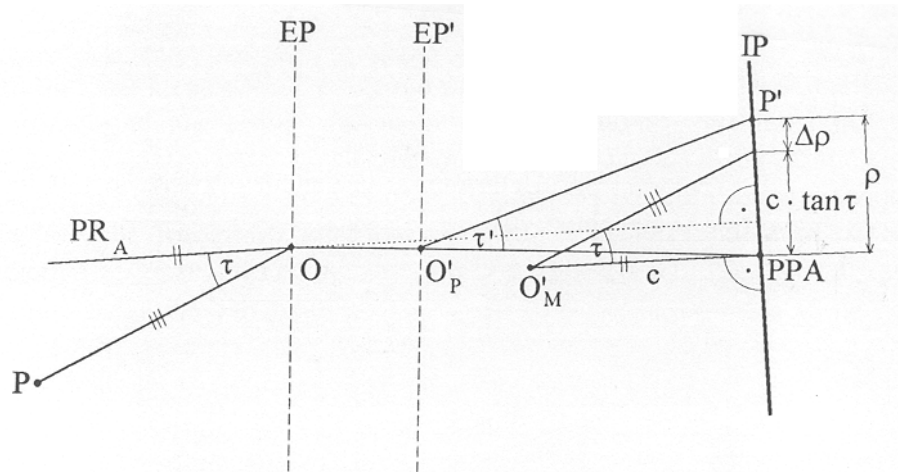
1. Otto marche fiduciali (numerate)
2. Nona marca fiduciale, asimmetrica
3. Breve nome del lavoro (blocco dati)
4. Data (blocco dati)
5. Ora
6. Numero del fotogramma
7. Matricola della camera (obiettivo)
8. Distanza principale
9. Numero del magazzino (blocco dati)

10. Dati per l'orientamento esterno
11. Ricoprimento
12. Scala fotogramma
13. Livella sferica
14. Altimetro
15. Altimetro di precisione
16. Tempo di posa, diaframma
17. Trascinamento (lunghezza)
18. Scala dei grigi

# DETERMINAZIONE DELL'ORIENTAMENTO INTERNO

L'**obbiettivo** della camera fotogrammetrica è un sistema ottico realizzato assemblando diversi tipi di lenti  
Il suo comportamento differisce da quello di un sistema ottico ideale, e ciò produce diversi tipi di distorsione nell'immagine

geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico reale



L'**obbiettivo fotogrammetrico reale** differisce dal modello ottico ideale

- l'asse ottico, dopo l'assemblaggio delle singole lenti e il montaggio dell'obbiettivo sulla camera, dovrebbe contenere esattamente i centri di tutte le lenti; in realtà si accumulano tanti piccoli errori, pertanto l'**asse ottico di riferimento** non è OA, ma un asse determinato in seguito a calibrazione, detto **raggio principale di autocollimazione**  $PR_A$  perpendicolare al piano immagine. Il suo prolungamento, passante per O' interseca il piano immagine nel **punto principale di autocollimazione PPA**
- $\tau'$  non è uguale a  $\tau$  (perché EP e EP' non coincidono con H e H')
- la distanza principale realizzata meccanicamente con l'assemblaggio della camera non coincide con la distanza principale ottica
- IP non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico OA e nemmeno al raggio principale di autocollimazione  $PR_A$

poiché  $\tau' \neq \tau$ , si definisce il punto  $O'_M$  (centro di prospettiva matematico) collocato a distanza  $c$  (distanza principale) da IP e quindi da PPA, tale da riprodurre gli angoli  $\tau$  il più fedelmente possibile.

Resta comunque una differenza fra la posizione che ha il punto immagine  $P'$  sul fotogramma e la posizione che dovrebbe avere.

La distanza fra queste due posizioni è un errore residuo detto **distorsione ottica**  $\Delta\rho$ .

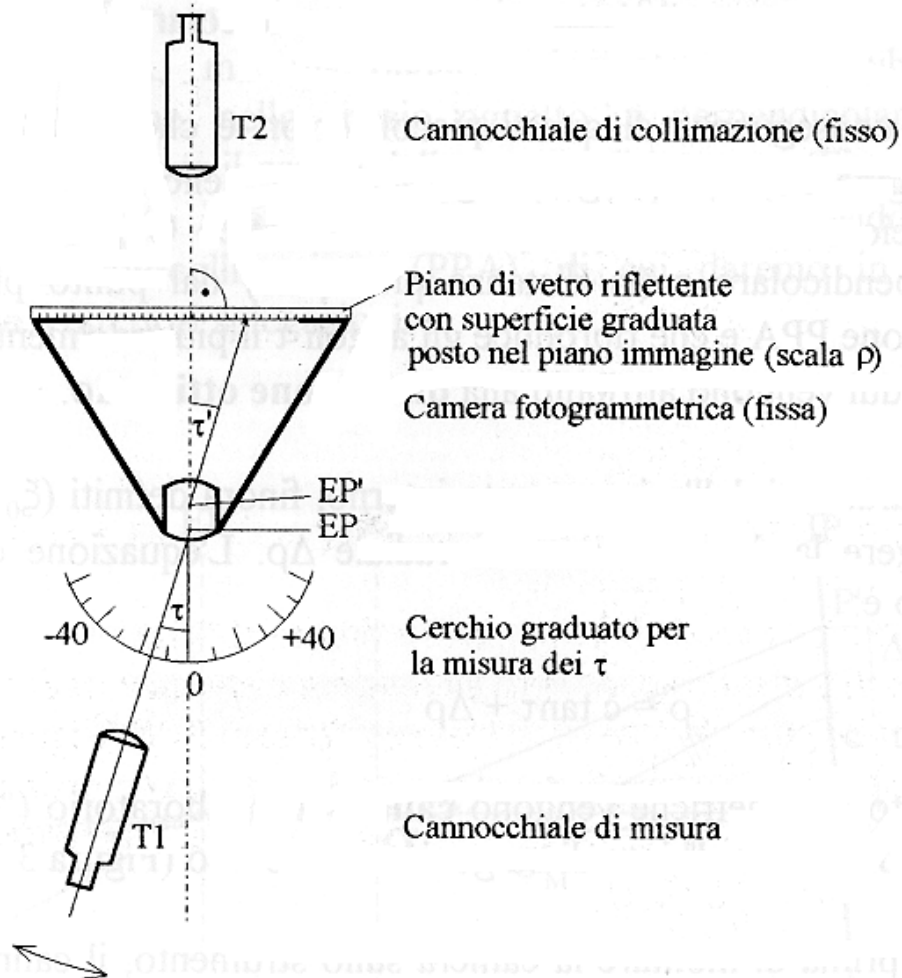
La parte predominante è data da un segmento in direzione radiale rispetto al PPA:  $\Delta\rho$  è quindi detta **distorsione ottica radiale**.

Esiste la seguente relazione tra la distanza radiale  $\rho$  del punto  $P'$  rispetto al PPA e la distorsione radiale  $\Delta\rho$  (sempre in  $P'$ ):  
**equazione dell'orientamento interno**

$$\rho = c \operatorname{tg} \tau + \Delta\rho$$

## CALIBRAZIONE

Le curve di distorsione radiale vengono determinate in fase di **calibrazione** della camera fotogrammetrica effettuata in laboratorio con fotogoniometro

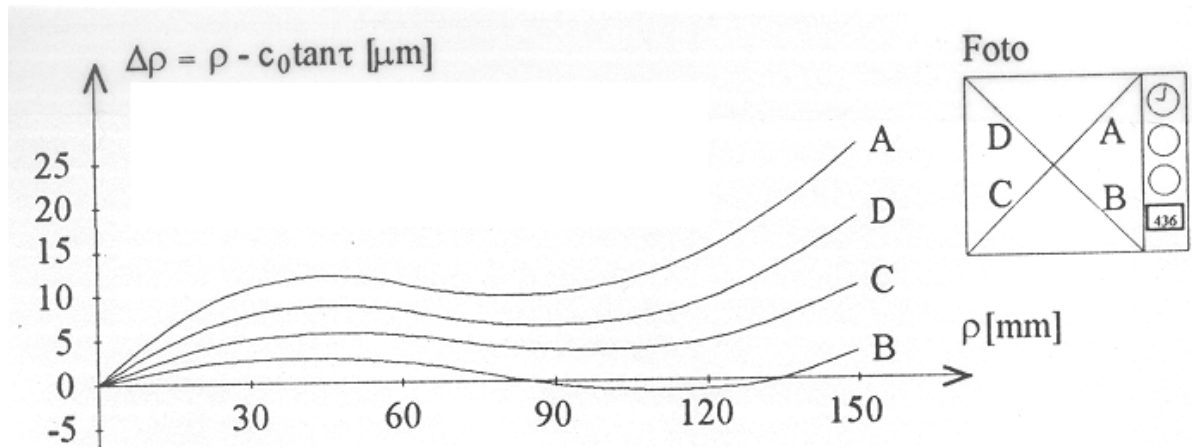


La calibrazione consente di determinare la posizione del PPA e la distorsione radiale lungo le quattro semidiagonali del formato quadrato dell'immagine.

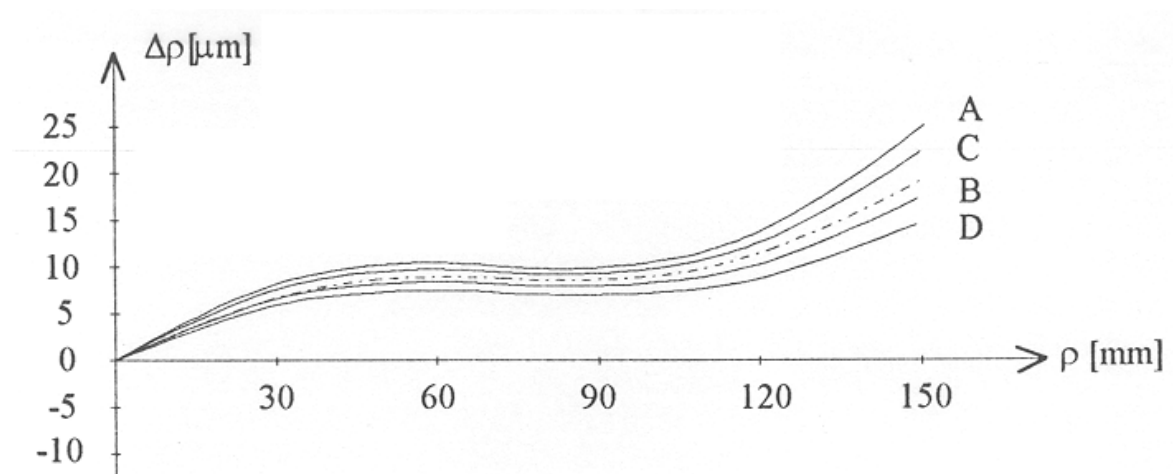
Sul piano immagine della camera viene posto un reticolo graduato con precisione; collimando le diverse graduazioni della scala  $\rho$  lungo ciascuna semidiagonale si misurano i corrispondenti angoli  $\tau$ .

Le differenze  $\rho_{oss} - ctg\tau = \Delta\rho$  ( $ctg\tau = \rho_{teor}$ ) sono le distorsioni ottiche radiali.

Le curve di distorsione non risultano simmetriche.



L'asimmetria si può fortemente ridurre scegliendo un altro asse ottico di riferimento: l'**asse principale di simmetria  $PR_S$** .  $PR_S$  passa per O e interseca il piano immagine IP nel **punto principale di simmetria PPS** (o **PBS** = Point of Best Symmetry).

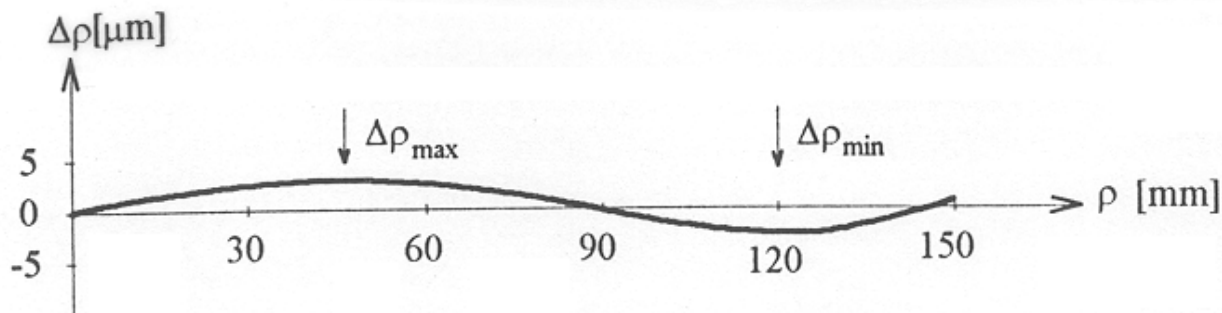


L'asse ottico di riferimento non è più  $PR_A$ , ma  $PR_S$

- $(\xi, \eta)$  sono riferite al PBS;
- il nuovo  $O'_M$  è a distanza  $c$  da PBS;
- i valori di distorsione radiale sono riferite a PBS.



Inoltre si calcola la **variazione**  $\Delta c$  che porta la curva media il più possibile a cavallo dell'asse  $\rho$  (valori vicini a zero) (variando la distanza principale  $c$  si provoca una rotazione delle curve di distorsione intorno all'origine)



- Nei vecchi obiettivi fotogrammetrici si aveva  $|\Delta\rho| \leq 30 \mu m$
- Nei moderni obiettivi si ha  $|\Delta\rho| \leq 5 \mu m$

Attualmente la distorsione radiale viene corretta solo nella fotogrammetria analitica di precisione (in tal caso si tiene conto anche della **distorsione tangenziale** e delle altre deformazioni dei fotogrammi)

Utilizzo della curva media di distorsione radiale:

note (misurate)  $\xi$  ed  $\eta$  si calcola  $\rho$  :

$$\rho = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$$

poi si ricava  $\Delta\rho$  dalla curva di distorsione .

$\Delta\rho$  viene scomposto nelle due componenti  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\eta$ :

$$\Delta\xi = -\frac{(\xi - \xi_0)}{\rho} \Delta\rho \quad \Delta\eta = -\frac{(\eta - \eta_0)}{\rho} \Delta\rho$$

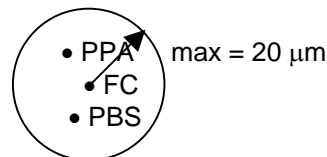
che sono le correzioni da apportare alle coordinate lastra misurate  $\xi$  ed  $\eta$ .

(Le camere fotogrammetriche terrestri vengono solitamente calibrate fotografando un poligono tridimensionale e usando appositi programmi di compensazione per il calcolo dei parametri di autocalibrazione)

# CERTIFICATO DI CALIBRAZIONE

Per definire materialmente il sistema di coordinate immagine si utilizzano su ogni fotogramma le **marche fiduciali**, in base alle quali si definisce il **centro fiduciale FC**, le coordinate immagine vanno però poi riferite al PPA.

Di solito, il PPA e il PBS si trovano a una distanza inferiore a  $20\ \mu\text{m}$  dal centro fiduciale.



Il certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica contiene:

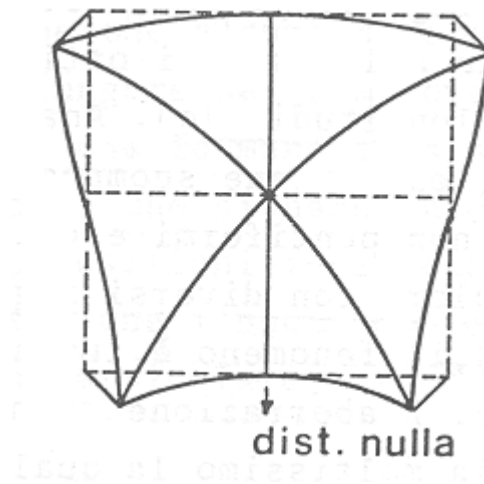
- le coordinate immagine delle marche fiduciali;
- le coordinate immagine di PPA o PBS;
- il valore della distanza principale  $c$ ;
- la curva di distorsione radiale media;
- la data di calibrazione;
- altre informazioni sulla risoluzione dell'immagine.

➔ In Italia è richiesto un certificato di calibrazione non più vecchio di  $2 \div 3$  anni da molti capitolati tecnici

## DISTORSIONE TANGENZIALE

Nei rilievi di elevata precisione, oltre alla distorsione radiale occorre considerare anche la **distorsione tangenziale**, che deriva dall'imperfetto centramento delle lenti che compongono il sistema ottico (difetto di assemblaggio).

Per effetto di tale distorsione, l'immagine risulta deformata e le rette vengono trasformate in curve.



Per ridurre il più possibile l'effetto di distorsione tangenziale occorre fare in modo che il centramento dei sistemi ottici (in particolare degli obiettivi delle camere) sia il più accurato possibile (e stabile nel tempo e rispetto a variazioni termiche).

> non può essere corretta otticamente o strumentalmente

Altre correzioni vanno aggiunte per tener conto della deviazione dalla geometria teorica della prospettiva centrale (deformazioni pellicola (reseaux, camere semi-metriche) effetti rifrazione, curvatura terrestre)

## CAMERE METRICHE AEREE

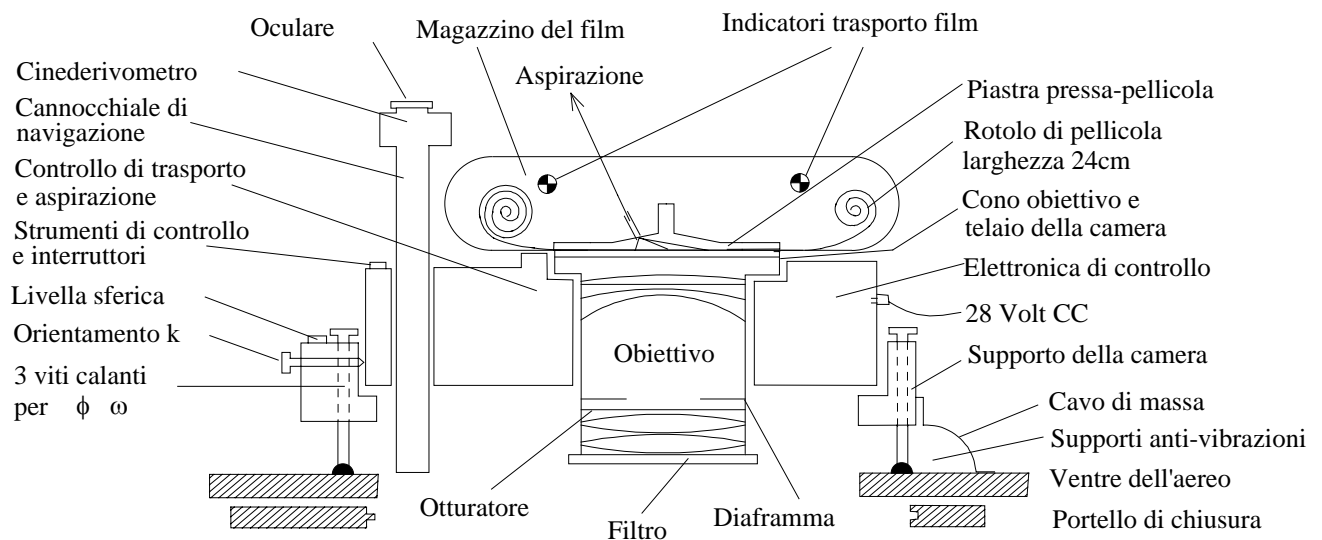
- notevoli dimensioni : ingombro circa 60x60x50 cm  
peso 70-90 kg
- magazzino portafilm 120-150m di pellicola (500-600 fotogrammi)
- montata su un aeroplano in modo conforme a norme di sicurezza
- soppressione radiointerferenze
- alimentata D.C. 28 V

## DEVE ESSERE POSSIBILE RICOSTRUIRE L'ORIENTAMENTO ESTERNO :

- Deve poter essere livellata tramite viti calanti.  
(le camere più moderne vengono orientate automaticamente per mezzo di due giroscopi e di sensori d'assetto)
- Deve essere montata su supporti che consentano la correzione della deriva (devono poter ruotare attorno al proprio asse all'interno di un supporto ad anello)
- E' necessario disporre di un sistema di navigazione per il mantenimento della rotta
- Deve avere un dispositivo regolatore del ricoprimento longitudinale per garantire il ricoprimento previsto anche in terreni montuosi  
(dispositivo di calcolo automatico dell'intervallo di scatto (intervallometro) e scatto automatico a intervalli previsti)
- Può essere dotata di un dispositivo di correzione del trascinamento
- Deve essere munita di un otturatore centrale per garantire tempi brevi di esposizione ( $1/150 \div 1/1000$  s e inferiori) e orientamento esterno uniforme sull'intero fotogramma
- L'esposizione (flash) delle marche fiduciali (incise sul telaio portafotogrammi) deve essere contemporanea all'apertura dell'otturatore (istante medio di esposizione)
- Deve essere dotata di un dispositivo pneumatico di spianamento della pellicola sul telaio

- Deve essere realizzata con materiali aventi lo stesso coefficiente di dilatazione termica

## Schema dei principali componenti di una camera aerea



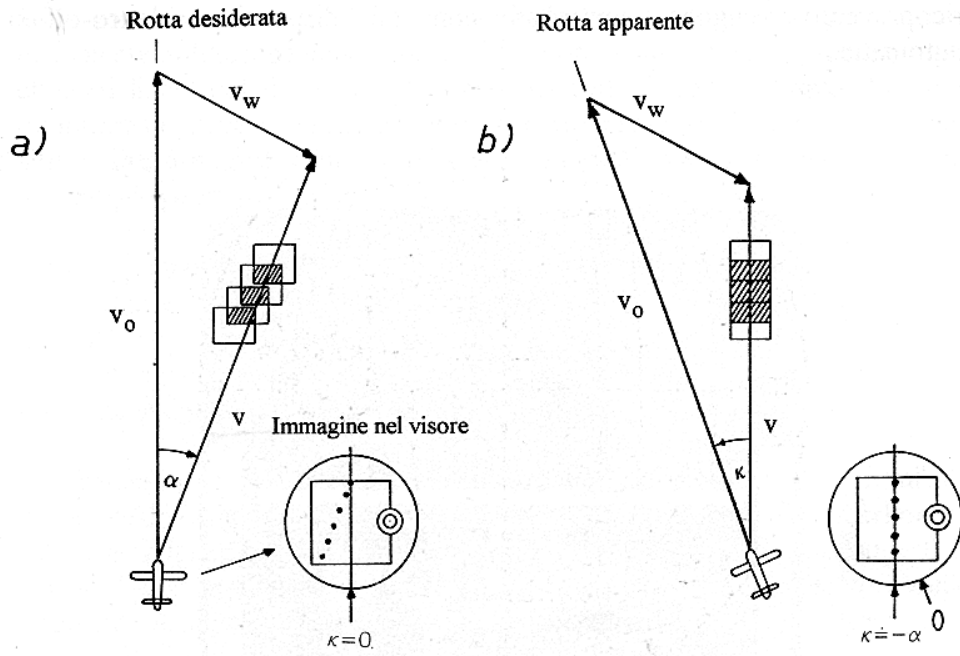
Sulla botola dell'aereo è montato il supporto livellato automaticamente dal cannocchiale di navigazione (per il controllo della deriva) o mediante giroscopi.

Sul supporto viene montata la camera che ruota attorno a un asse perpendicolare al piano di presa.

Per controllo deriva e puntamento si utilizzano:

- cannocchiale di puntamento (WILD)
- cinederivometro (ZEISS)
- puntatori speciali telecomandati dal navigatore-fotografo

# DERIVA



Il ciclo di presa è di circa 2 s (questo limita il minimo intervallo di scatto ottenibile)

Scatto 1° fotogramma

- esposizione (+FMC)
- sollevamento piastra e rilascio aspirazione
- scorrimento film
- incremento contatore
- aspirazione e pressione piastra spianamento nuovo scatto

Ciclo di presa manuale : l'operatore scatta per singoli fotogrammi mirati

Ciclo di presa automatico : comandato dal dispositivo di controllo del ricoprimento

(Segnale visivo di scatto per correggere rotta e assetto fra scatti successivi)



## Dati ausiliari registrati sul fotogramma

Dati di Orientamento Esterno: da sistema satellitare GPS, o da sistema di navigazione inerziale INS

Utili soprattutto in zone prive di cartografia

Coord. geografiche  $\phi$ ,  $\lambda$ , quota del punto di presa.

Angoli  $\omega$ ,  $\phi$

Rotta e deriva

## Equipaggio

Pilota, co-pilota, fotografo

ora molte cose sono telecomandate, o dotate di controllo automatico (p.e. controllo automatico di deriva e ricoprimento), per cui l'equipaggio puo' essere ridotto al solo pilota

## Camere semimetriche

Sono essenzialmente utilizzate per prese terrestri.

Sono dotate di un obiettivo calibrato montato su un corpo macchina amatoriale.

I problemi derivanti dalla non planità del film e dalle sue possibili deformazioni nel tempo sono recuperati a posteriori utilizzando l'immagine di un reticolo calibrato impressionato nell'istante della presa (reseau).

Le coordinate immagine vengono calibrate **immagine per immagine**



## Camere amatoriali

Sono le comuni camere fotografiche.

L'utilizzo delle immagini prodotte da questo tipo di camere richiede una preventiva autocalibrazione di tutti i parametri di orientamento interno ed esterno.



## DETERMINAZIONE DELL'ORIENTAMENTO INTERNO

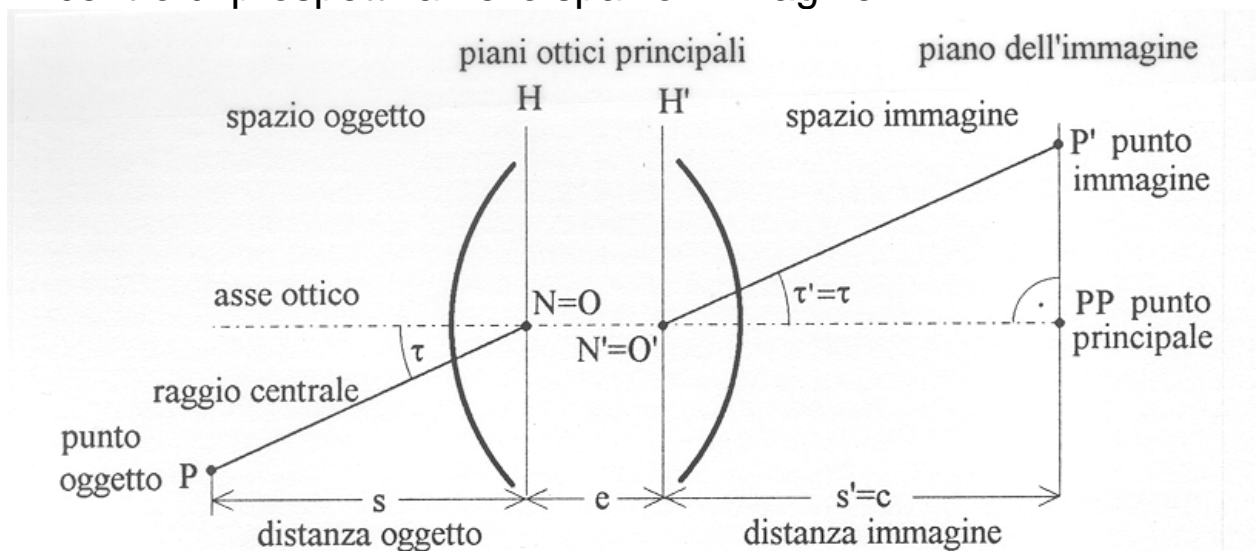
L'**obbiettivo** della camera fotogrammetrica è un sistema ottico realizzato assemblando diversi tipi di lenti

Il suo comportamento differisce da quello di un sistema ottico ideale, e ciò produce diversi tipi di distorsione nell'immagine

In un sistema ottico ideale esistono due piani particolari che godono di particolari proprietà: **piani principali** H e H' (nello spazio-oggetto e nello spazio-immagine)

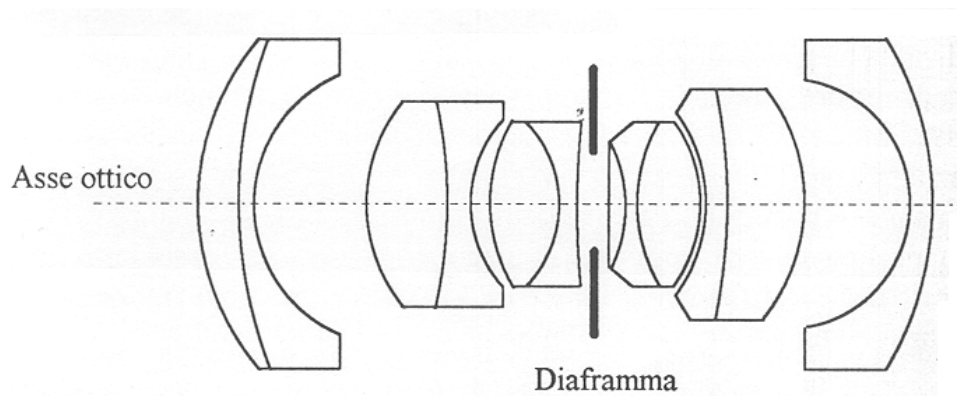
L'intersezione dei piani principali con l'asse ottico (OA) determina i **punti nodali** N e N'

- i raggi centrali passanti per N e N' formano lo stesso angolo  $\tau$  sia nello spazio-oggetto che nello spazio-immagine
- N è il centro di prospettiva nello spazio-oggetto e N' è il centro di prospettiva nello spazio-immagine.



geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale

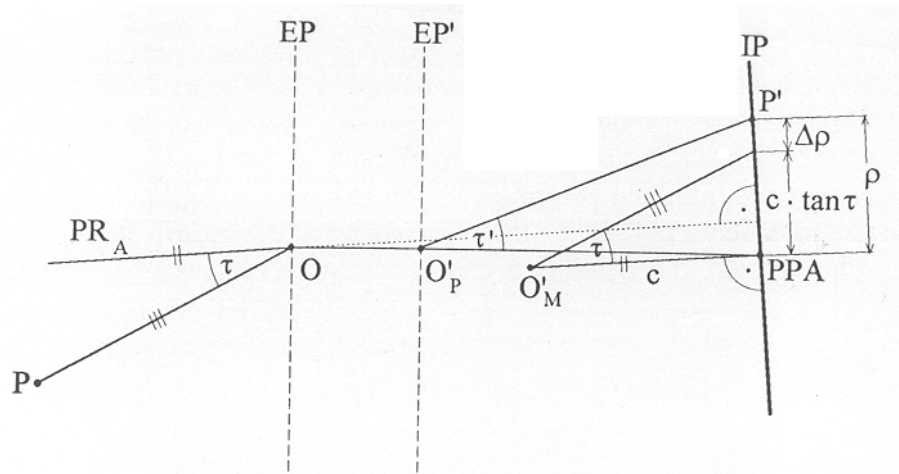
L'ottica delle camere fotogrammetriche è costituita da obbiettivi di notevole spessore, di solito **asimmetrici**



Le singole lenti sono ricavate da tipi differenti di vetro ottico, in modo da assicurare la migliore correzione possibile delle **aberrazioni**

Il **diaframma**, che non si trova esattamente al centro dell'obiettivo, limita l'effettivo fascio di raggi che dall'oggetto formano l'immagine; si definiscono la **pupilla d'entrata EP**, e la **pupilla d'uscita EP'**, i cui centri definiscono il reale centro della prospettiva nello spazio oggetto e nello spazio immagine, rispettivamente

## geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico reale



L'**obbiettivo fotogrammetrico reale** differisce dal modello ottico ideale

- l'asse ottico, dopo l'assemblaggio delle singole lenti e il montaggio dell'obbiettivo sulla camera, dovrebbe contenere esattamente i centri di tutte le lenti; in realtà si accumulano tanti piccoli errori, pertanto l'**asse ottico di riferimento** non è OA, ma un asse determinato in seguito a calibrazione, detto **raggio principale di autocollimazione PR<sub>A</sub>** perpendicolare al piano immagine. Il suo prolungamento, passante per O' interseca il piano immagine nel **punto principale di autocollimazione PPA**
- $\tau'$  non è uguale a  $\tau$  (perché EP e EP' non coincidono con H e H')
- la distanza principale realizzata meccanicamente con l'assemblaggio della camera non coincide con la distanza principale ottica
- IP non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico OA e nemmeno al raggio principale di autocollimazione PR<sub>A</sub>

poiché  $\tau' \neq \tau$ , si definisce il punto  $O'_M$  (centro di prospettiva matematico) collocato a distanza  $c$  (distanza principale) da IP e quindi da PPA, tale da riprodurre gli angoli  $\tau$  il più fedelmente possibile.

Resta comunque una differenza fra la posizione che ha il punto immagine  $P'$  sul fotogramma e la posizione che dovrebbe avere.

La distanza fra queste due posizioni è un errore residuo detto **distorsione ottica**  $\Delta\rho$ .

La parte predominante è data da un segmento in direzione radiale rispetto al PPA:  $\Delta\rho$  è quindi detta **distorsione ottica radiale**.

Esiste la seguente relazione tra la distanza radiale  $\rho$  del punto  $P'$  rispetto al PPA e la distorsione radiale  $\Delta\rho$  (sempre in  $P'$ ):  
**equazione dell'orientamento interno**

$$\rho = c \operatorname{tg} \tau + \Delta\rho$$



## Camera aerea RC30 (LH System) (Leica Herrbrugg)



**Pianificazione dei voli, navigazione e posizionamento preciso del centro di proiezione.**

**ASCOT** (Aerial Survey Control Tool) consente l'introduzione del piano di volo e fornisce al pilota un controllo in tempo reale della posizione dell'aereo e della camera rispetto al progetto del volo.

Fornisce in output le coordinate del centro di presa utile nelle successive operazioni di triangolazione fotogrammetrica.

Sono disponibili tre obiettivi (8.8, 15, 30 cm).

Apertura massima del diaframma f/4

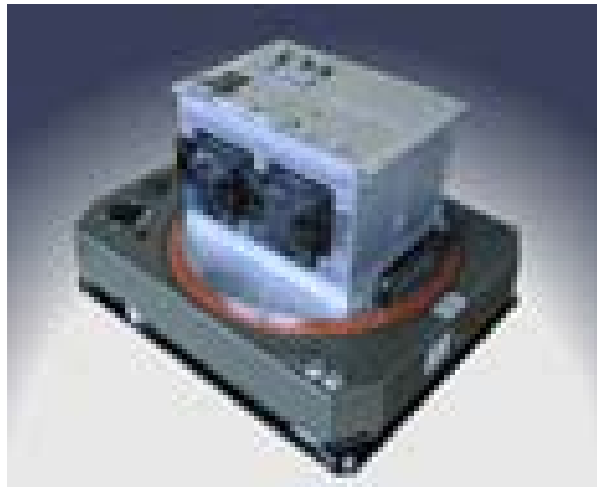
Tempi di scatto variabili da 1/100 s a 1/1000 s.

Compensatore del trascinamento (FMC)

Selezione personalizzata delle informazioni da riprodurre su ogni fotogramma (dati ausiliari ed esterni: GPS)



## Camera aerea digitale (LH System)



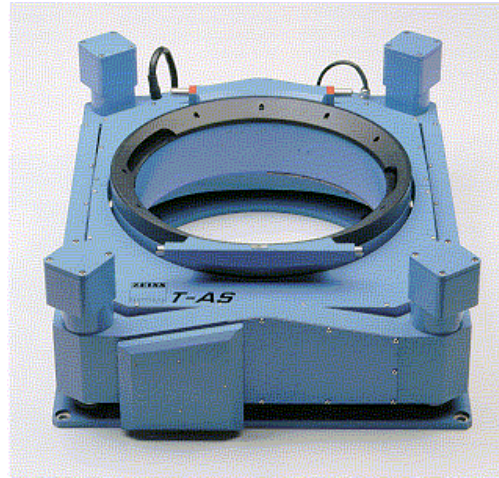
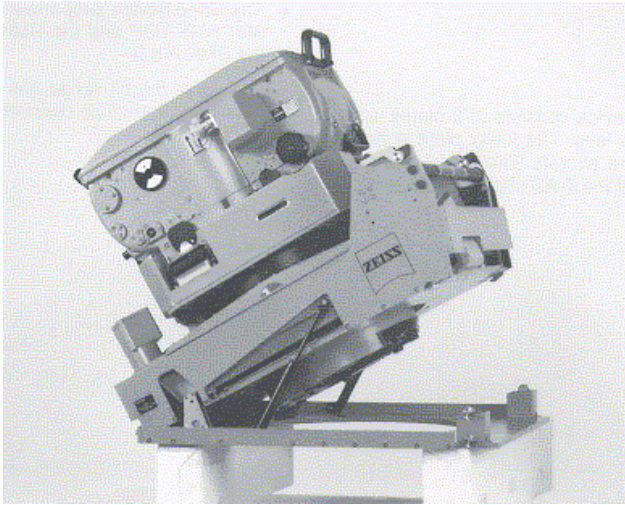
Primo esempio commerciale di sistema digitale di acquisizione da aereo.

E' dotato di un sensore lineare di 12.000 pixel.

Sono in corso i primi test di affidabilità.

E' completamente integrato con gli accessori della RC30.

## Camera aerea RMK TOP (terminal operated)(Zeiss)



Il basamento consente di attutire le vibrazioni (migliore qualità delle fotografie)

Obiettivi con focale da 15 cm e 30 cm.

Tempi di esposizione variabili da 1/50 s a 1/500 s

Compensatore del trascinamento (FMC)

Personalizzazione delle informazioni da registrare sul fotogramma.

Possibilità di controllo automatico deriva e ricoprimento

E' possibile controllare il volo mediante il sistema GPS e determinare con precisione la posizione dei centri di presa per le successive operazioni di triangolazione fotogrammetrica

Puo' quindi essere controllata in modo totalmente automatico dal solo pilota