

CORSO DI FOTOGRAMMETRIA E TELERILEVAMENTO

Prof. Riccardo Roncella

ORIENTAMENTO INTERNO



SOMMARIO

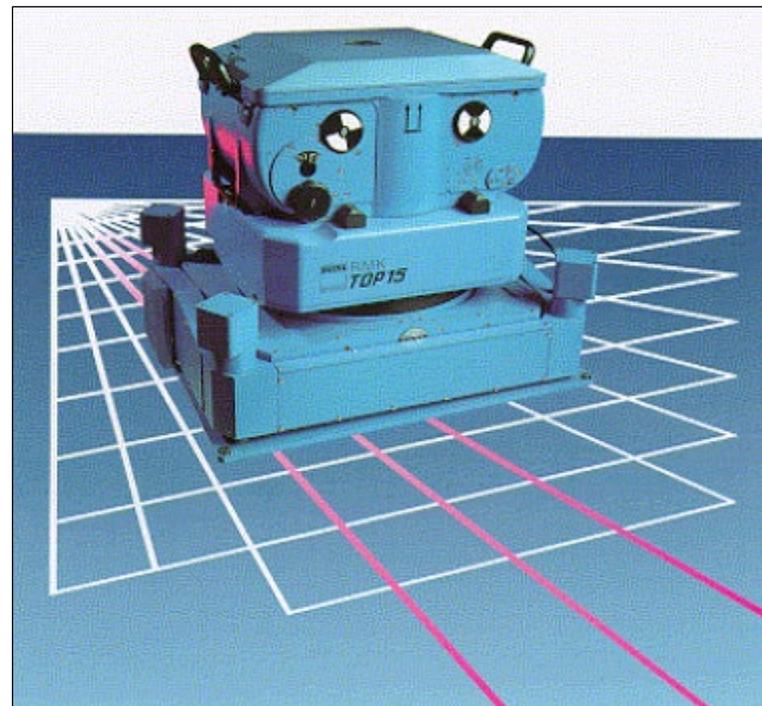
- Materializzazione del SdR immagine
- Orientamento interno ideale e reale
- Formazione dell'immagine
- Profondità di campo
- Fenomeni di distorsione
- Calibrazione in laboratorio e analitica



CAMERE AEREE ANALOGICHE

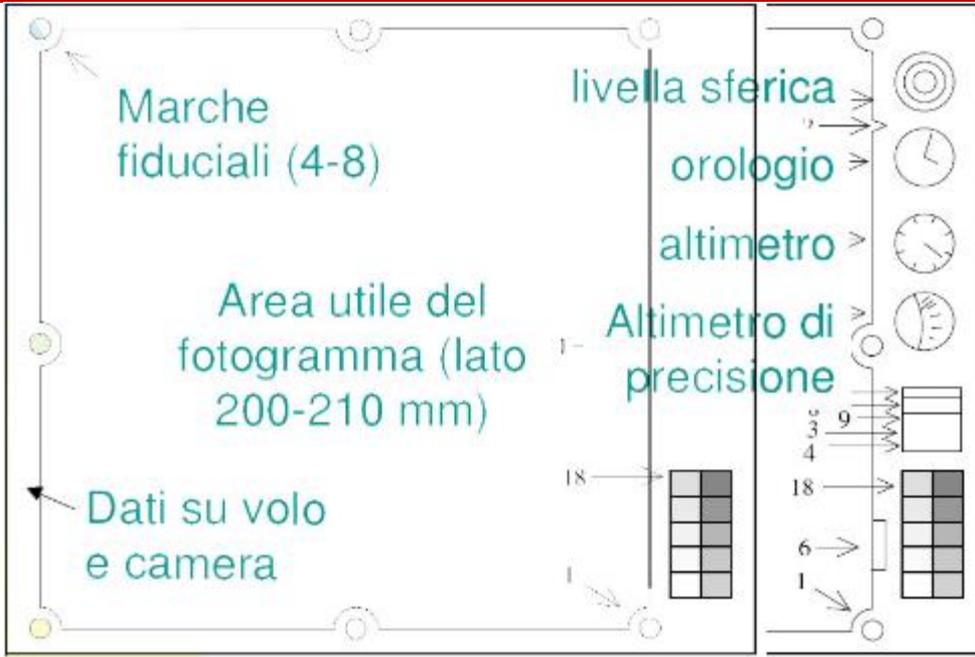
Sono camere metriche:

- ❑ A grande formato (230x230 mm).
- ❑ Elevata qualità dell'ottica (distorsioni limitate)
- ❑ Esistono anche in versione digitale
- ❑ La calibrazione avviene sempre in laboratorio e viene ripetuta ad intervalli di tempo regolari
- ❑ Hanno un sistema di marche fiduciali per definire il sistema di riferimento immagine.



Zeiss RMK Top

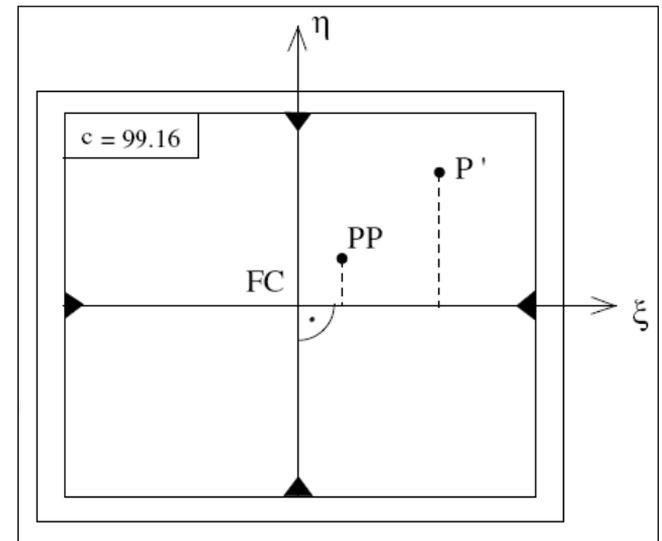
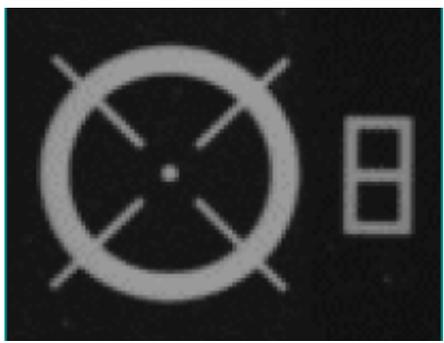
MARCHE FIDUCIALI



Le marche fiduciali hanno il compito di permettere la ricostruzione dell'orientamento interno.

Sono generalmente 4 o 8 distribuite sul bordo del fotogramma.

In parte possono permettere di correggere eventuali deformazioni del supporto (8 marche).



RIPRISTINO DELL'ORIENTAMENTO INTERNO

A seconda dei casi, in particolare del numero di marche fiduciali presenti sul fotogramma, si utilizzano trasformazioni da SdR strumentale a SdR immagine di tipo diverso:

8 MARCHE FIDUCIALI:

La trasformazione è un'affine:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

La trasformazione tiene in conto di possibili effetti di deformazione del supporto (o della scansione). In particolare è in grado di modellare:

- Differenti fattori di scala in direzione x e in direzione y
- Non ortogonalità dei due assi di riferimento.



RIPRISTINO DELL'ORIENTAMENTO INTERNO

4 MARCHE FIDUCIALI NEGLI SPIGOLI:

La trasformazione è una bilineare:

$$\begin{aligned}\xi &= a_{01} + a_{11}x + a_{12}y + a_{13}xy \\ \eta &= a_{02} + a_{12}x + a_{22}y + a_{23}xy\end{aligned}$$

4 MARCHE FIDUCIALI NELLE MEDIANE:

La trasformazione è una conforme 2D:

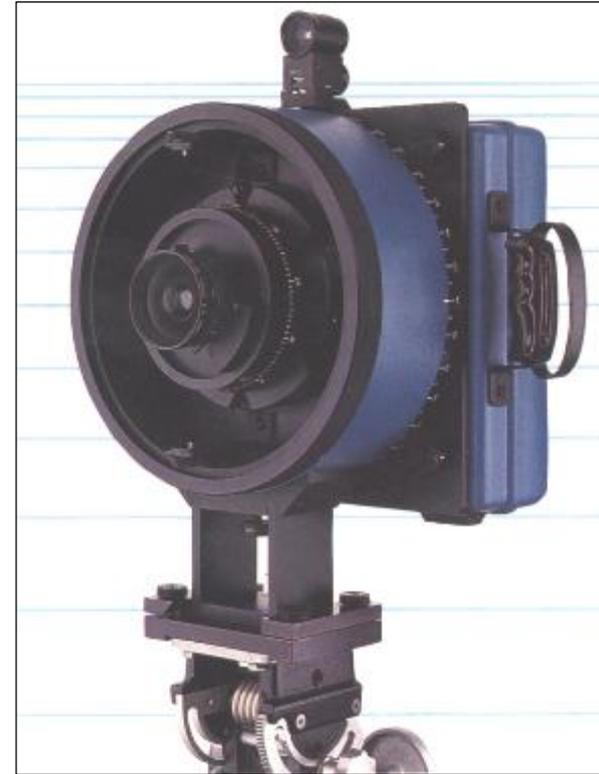
$$\begin{vmatrix} \xi \\ \eta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix}$$



CAMERE METRICHE TERRESTRI

Sono camere simili a quelle aeree:

- ❑ A grande formato (130x180 mm).
- ❑ Elevata qualità dell'ottica (distorsioni limitate)
- ❑ 4 marche fiduciali
- ❑ La calibrazione avviene solitamente in laboratorio e viene ripetuta ad intervalli di tempo regolari
- ❑ Hanno un sistema di spianamento della pellicola (come quelle aeree)



CAMERE SEMI-METRICHE TERRESTRI

Sono camere professionali a medio formato (60x60 mm) adattate per l'uso fotogrammetrico:

- ❑ Sono dotate di una lastra trasparente con sovrainpressi reseau (9 o 121 crocini) calibrati
- ❑ Buona qualità dell'ottica (distorsioni limitate)
- ❑ Per l'orientamento interno si utilizzano i reseau
- ❑ La calibrazione può avvenire in laboratorio e viene ripetuta ad intervalli di tempo regolari
- ❑ Esistono anche in versione digitale



CAMERE DIGITALI AMATORIALI

Sono camere nate per uso amatoriale o semi-professionale che possono essere utilizzate anche per scopi fotogrammetrici:

- Vari livelli di risoluzione
- Qualità dell'ottica variabile
- La calibrazione viene sempre effettuata per via analitica.
- A ottiche intercambiabili (reflex) o fisse.
- Con il continuo aumento di prestazioni i modelli di punta hanno sostituito le camere semi-metriche
- Il SdR immagine è legato direttamente al sensore CCD



RIPRISTINO DELL'ORIENTAMENTO INTERNO

Gli strumenti di restituzione (analitici o digitali) permettono di misurare le coordinate di punti immagine in un SdR legato allo strumento stesso.

Il SdR “strumentale” non coincide però con il SdR immagine ed è quindi necessario, prima di iniziare a misurare, determinare la trasformazione fra i due SdR.

Una volta determinata la trasformazione i punti misurati vengono trasformati:

1. Da SdR “strumentale” a SdR immagine (Orientamento interno);
2. Vengono eliminati gli effetti di distorsione (vd. dopo...);
3. Per mezzo delle equazioni di collinearità le grandezze misurate, grazie ai parametri di orientamento esterno, permettono di ricavare informazioni nel SdR oggetto.



ORIENTAMENTO INTERNO IDEALE

Finora abbiamo supposto che la condizione di collinearità fosse sempre verificata sia all'esterno del corpo ottico che al suo interno. In particolare abbiamo definito come parametri di orientamento interno:

CENTRO PRINCIPALE (o di presa)

Il punto al quale convergono tutti i raggi di proiezione

PIANO IMMAGINE

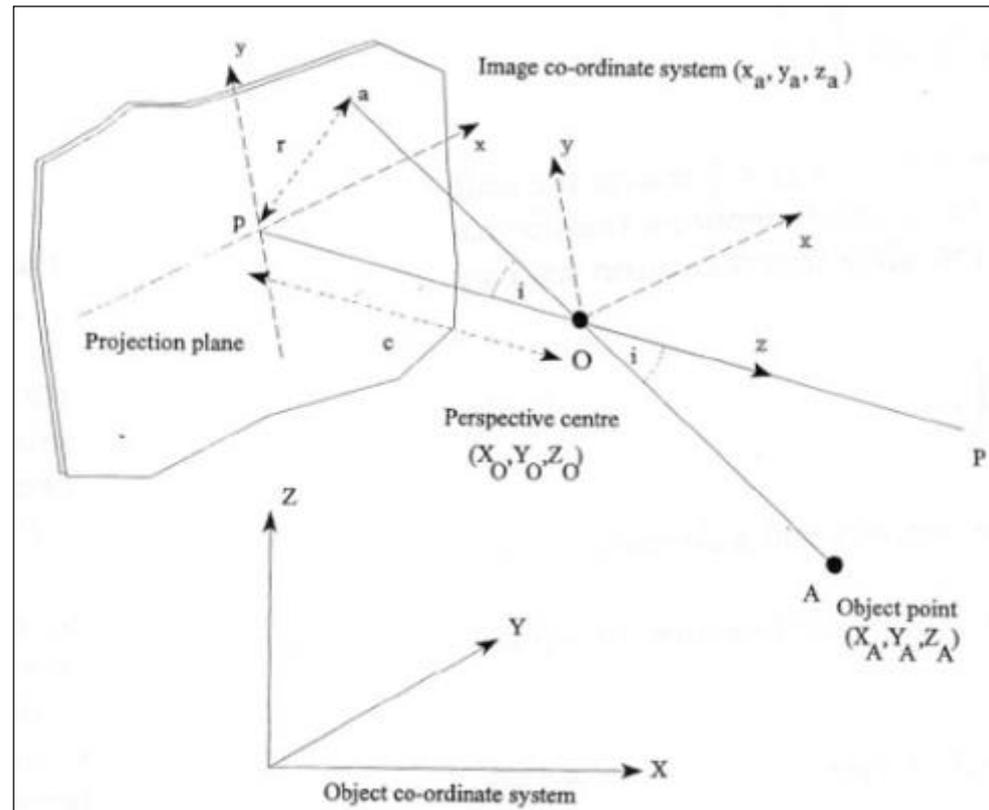
La superficie piana su cui si forma l'immagine

PUNTO PRINCIPALE

La proiezione del centro principale sul piano immagine

DISTANZA PRINCIPALE

La distanza fra il centro principale e il piano immagine



ORIENTAMENTO INTERNO REALE

Le definizioni appena fornite si basano su una serie di ipotesi che non sono strettamente verificate nella realtà:

CENTRO PRINCIPALE (o di presa)

Il corpo ottico può essere rappresentato con un punto?

PIANO IMMAGINE

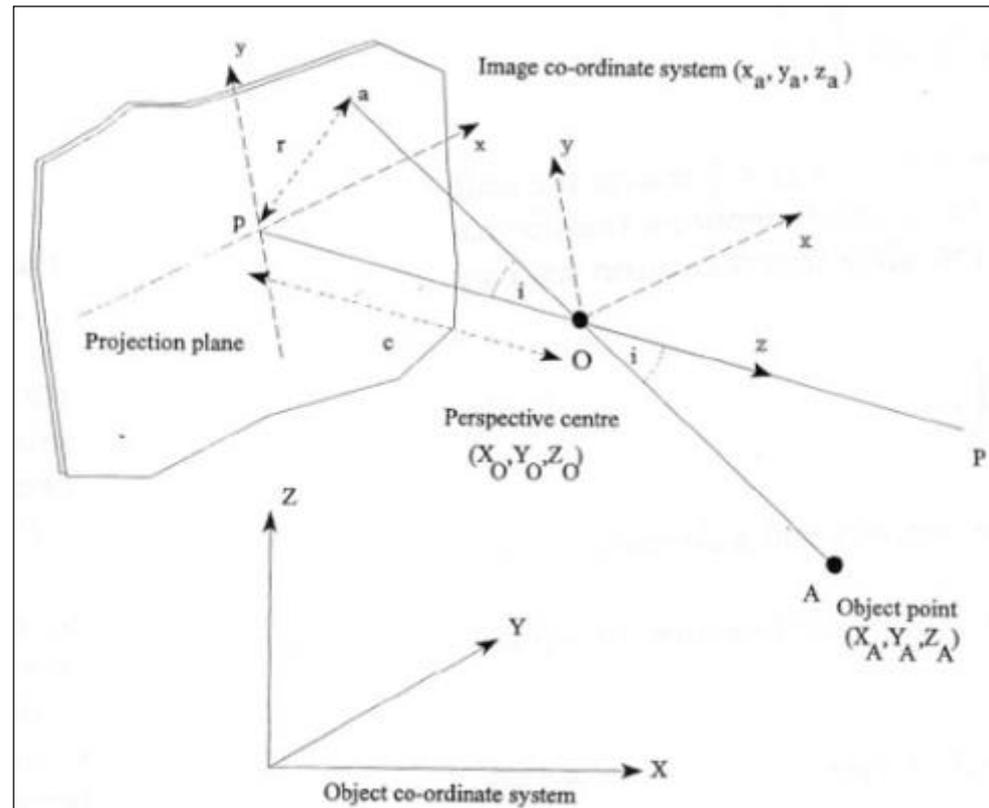
La superficie su cui si forma l'immagine è piana?

PUNTO PRINCIPALE

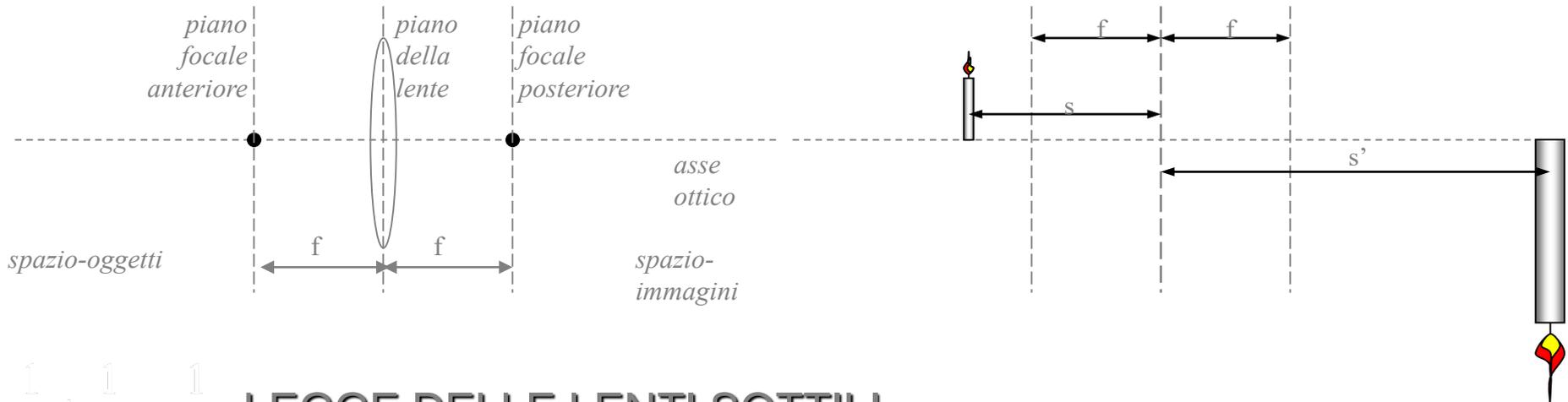
L'asse ottico è ortogonale al piano immagine?

DISTANZA PRINCIPALE

Vedi precedenti...

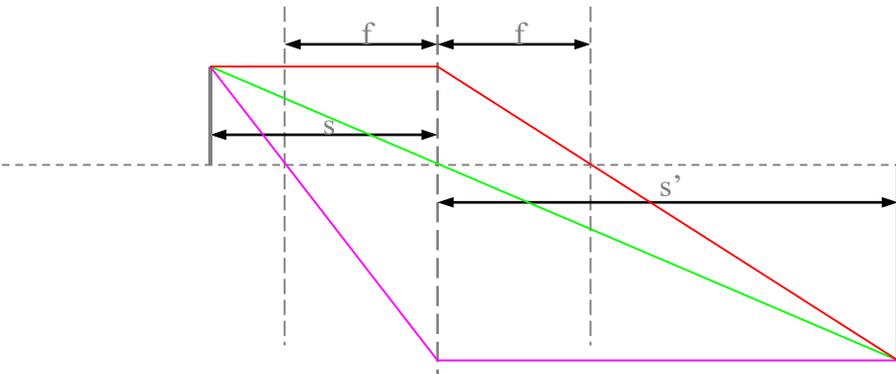


OTTICA GEOMETRICA



$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

LEGGE DELLE LENTI SOTTILI



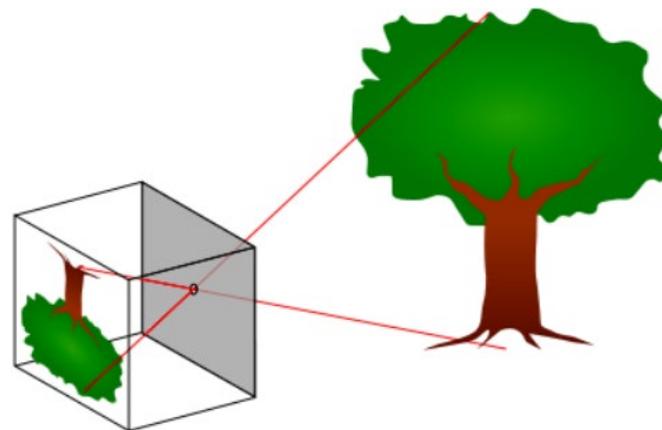
IPOTESI:

1. Lo spessore delle lenti è piccolo rispetto ai raggi di curvatura
2. Le caratteristiche ottiche sono indipendenti dalla posizione e dalla lunghezza d'onda
3. Gli angoli di incidenza e di rifrazione sono piccoli (pochi °)

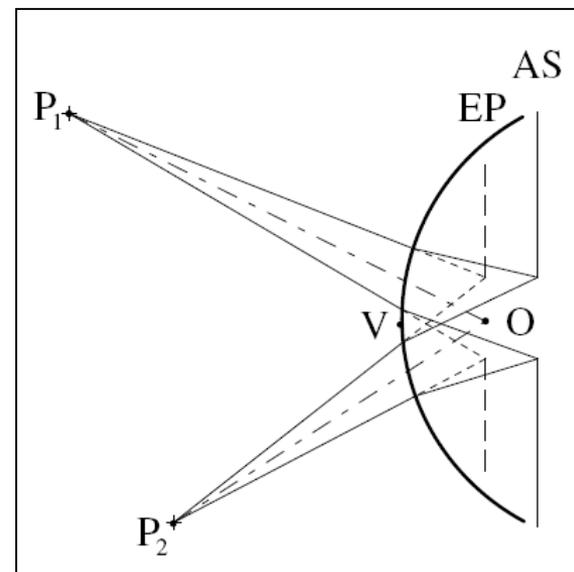
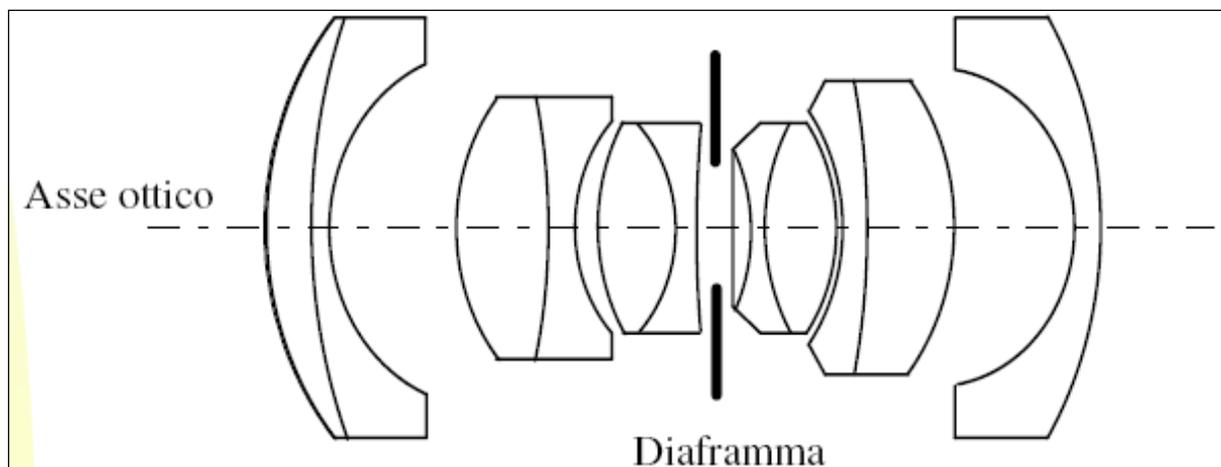


POSSIAMO PARLARE DI CENTRO DI PROIEZIONE?

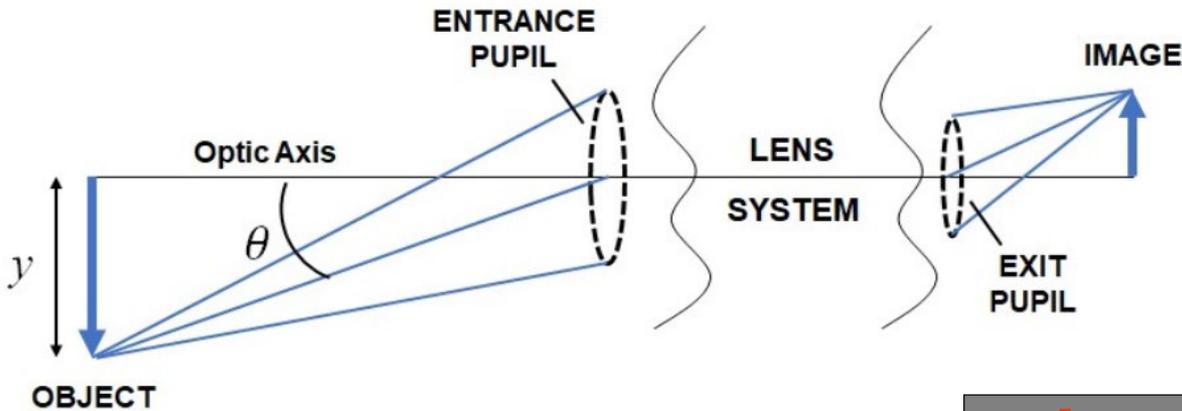
Esiste un punto per il quale passano tutti i raggi di proiezione?



Per limitare la quantità di energia luminosa che investe il sensore e per ridurre l'ampiezza (angoli) del cono di proiezione di un punto oggetto si introduce all'interno del corpo ottico un diaframma di ampiezza regolabile.



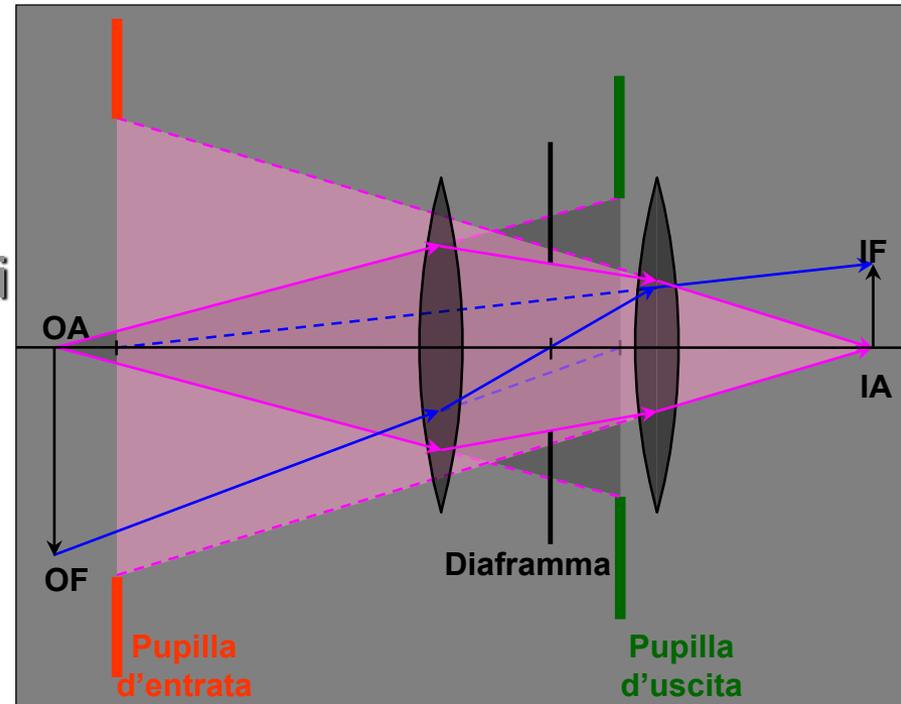
OTTICA GEOMETRICA



Considerare l'immagine del diaframma ci permette di ignorare la presenza delle lenti e considerare rettilineo il percorso dei raggi luminosi

Pupilla d'entrata: Immagine del diaframma nello spazio oggetto.

Pupilla d'uscita: Immagine del diaframma nello spazio immagine



OTTICA GEOMETRICA

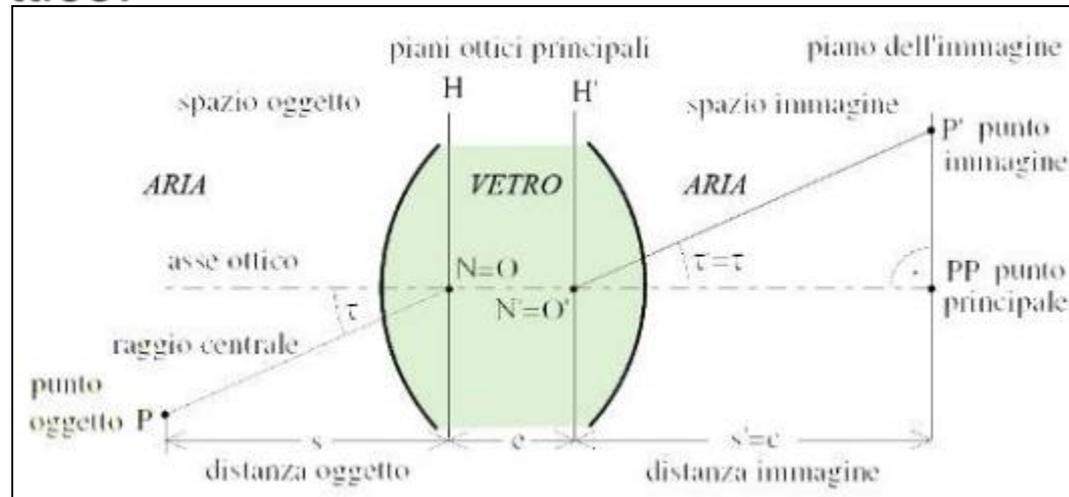
DEFINIZIONI:

Piani ottici principali: In un sistema ottico esistono due piani in cui, i raggi che attraversano il corpo di lenti, intersecano i piani alla stessa distanza dall'asse ottico.

Punti ottici principali: Punti di intersezione fra Piani ottici principali e asse ottico.

Punti nodali: In un sistema ottico esistono due punti t.c. un raggio passante per il primo passa anche per il secondo formando il medesimo angolo con l'asse ottico.

N.B. Se il mezzo che attraversa il raggio all'esterno della camera (aria) è lo stesso presente dopo il corpo ottico (sempre aria) punti nodali e punti principali coincidono.

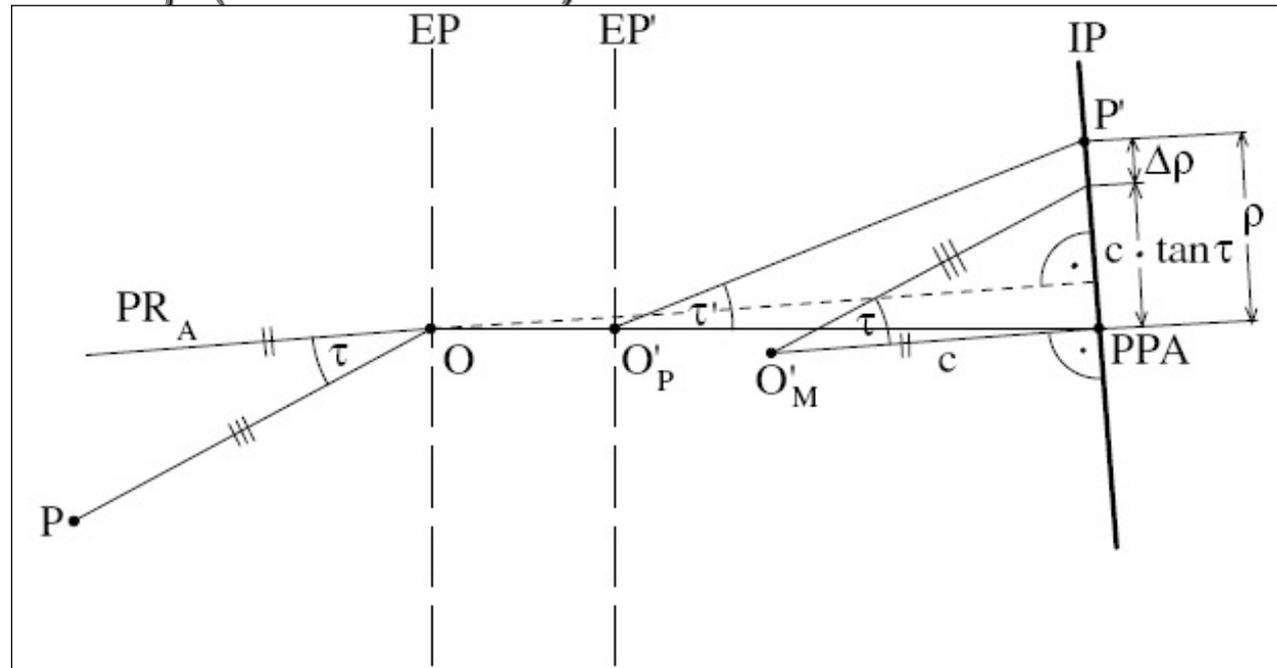


ELIMINAZIONE DELLA DISTORSIONE

Infine, per motivi costruttivi, l'asse principale del corpo ottico non è praticamente mai perfettamente ortogonale al piano immagine.

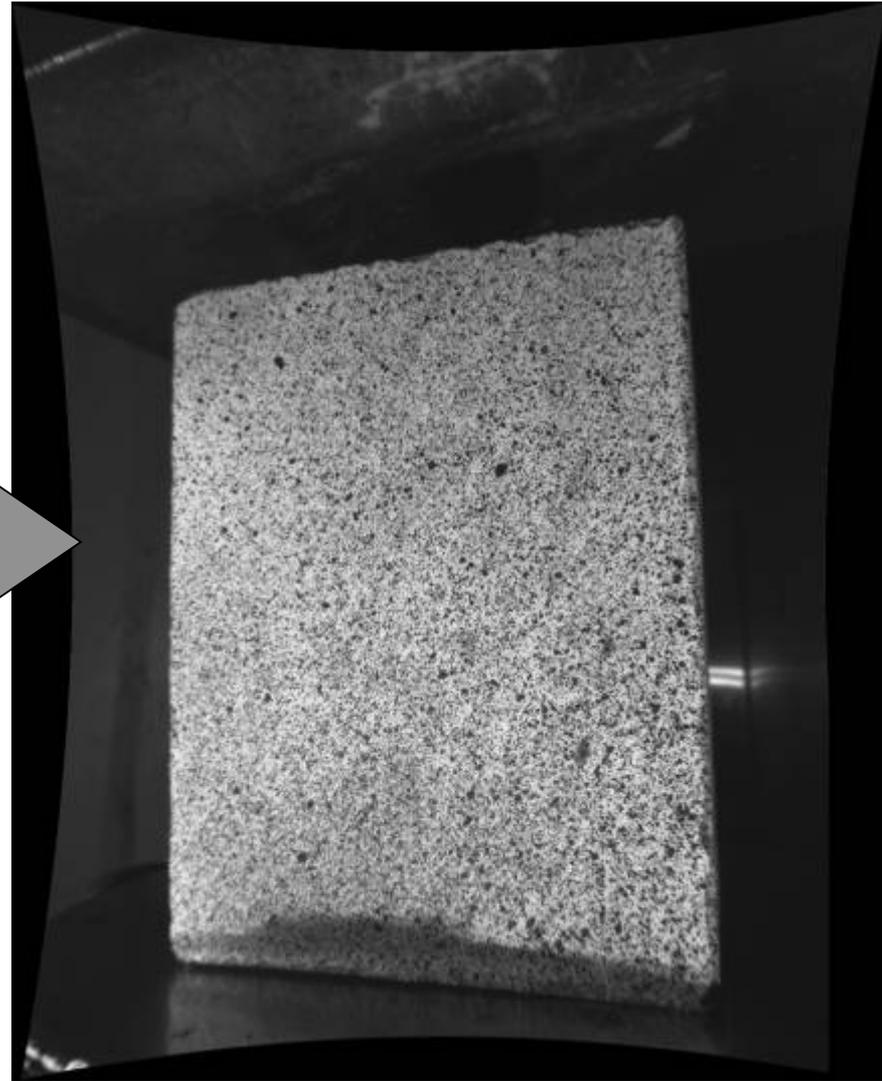
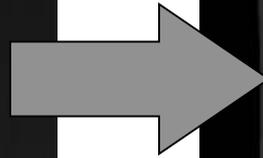
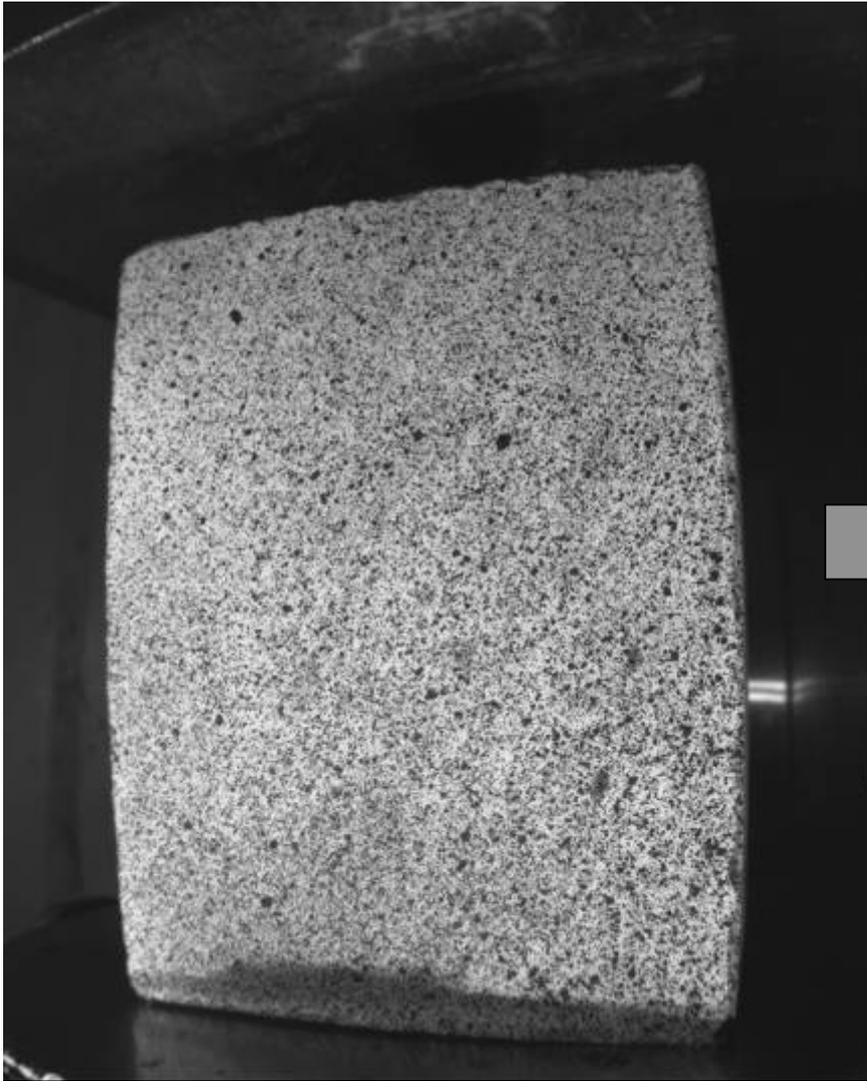
Definisco allora l'asse di riferimento immagine come la perpendicolare al piano del sensore e passante per il centro della pupilla d'entrata O (o meglio per il Punto Principale di Autocollimazione).

Per ricavare l'angolo τ devo correggere l'osservazione che ottengo sul fotogramma ρ di una quantità $\Delta\rho$ (DISTORSIONE).



$$\rho = c \tan \tau + \Delta\rho$$

ESEMPIO DI DISTORSIONE E SUA ELIMINAZIONE



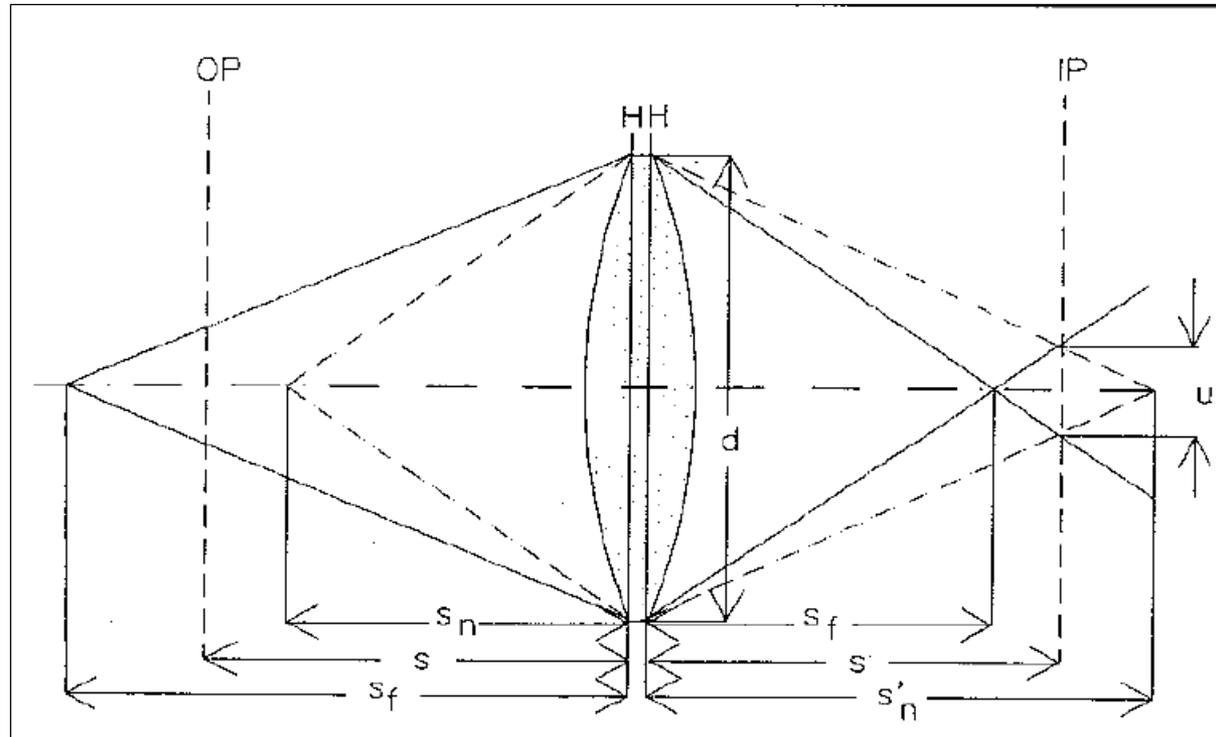
PROFONDITA' DI CAMPO

Dalla legge delle lenti sottili abbiamo che: $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$

In altre parole a seconda della distanza del punto dal centro di proiezione ($1/s$) la sua immagine viene messa a fuoco a distanze differenti. La messa a fuoco riguarda solo elementi ad una determinata distanza!

❑ Modificando l'apertura del diaframma posso restringere il cerchio di confusione u .

❑ N.B.: A ciascuna messa fuoco corrisponde una diversa distanza del piano immagine dal CP e quindi una diversa distanza principale.



DISTORSIONE RADIALE

Abbiamo visto che un primo effetto di distorsione introdotto dall'ottica nella formazione dell'immagine deriva da:

1. Spessore delle lenti non trascurabile
2. Raggi di proiezione non parassiali

Il che conduce a:

3. Spostamento del punto nodale rispetto al centro di proiezione e quindi insorgenza di effetti di distorsione.

L'effetto che produce la distorsione varia proporzionalmente alla distanza dal punto principale (per questo prende il nome di radiale) .

L'effetto complessivo può essere approssimato con lo sviluppo in serie di una funzione seno:

$$\Delta\rho = K_0\rho + K_1\rho^3 + K_2\rho^5 + K_3\rho^7 + \dots$$



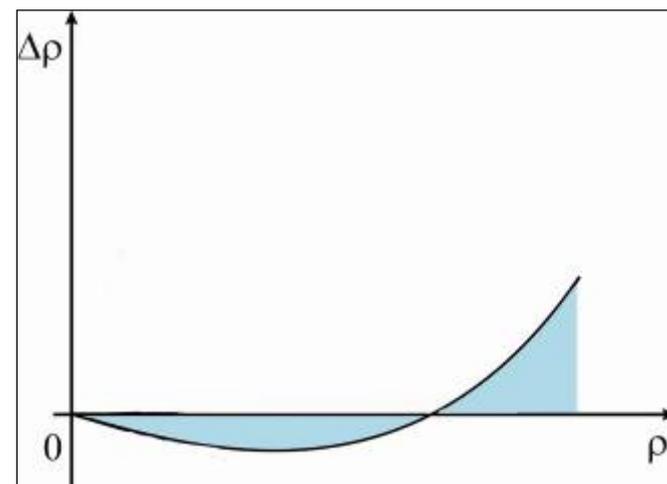
DISTORSIONE RADIALE

$$\Delta\rho = K_0\rho + K_1\rho^3 + K_2\rho^5 + K_3\rho^7 + \dots$$

Per il calcolo dei parametri K_0, K_1, \dots posso seguire due strategie differenti:

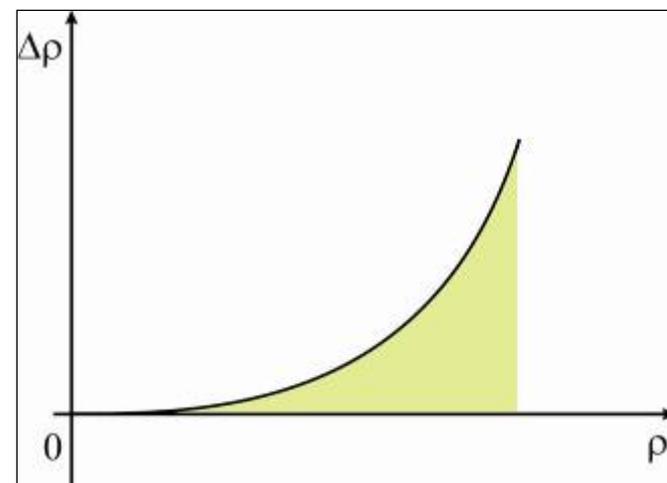
FORMULA BILANCIATA

1. Considero il primo termine (lineare) come la distorsione introdotta da una distanza principale differente da quella reale (vedi eq. a pag. 10) facendo in modo che la curva di distorsione abbia area negativa uguale a quella positiva.



FORMULA NON BILANCIATA

2. Trascuro il primo termine (la distanza principale è esatta o viene stimata) e considero solo i termini di ordine superiore.



DISTORSIONE RADIALE

$$\Delta\rho = K_0\rho + K_1\rho^3 + K_2\rho^5 + K_3\rho^7 + \dots$$

Vista la natura radiale della trasformazione la correzione da applicare alle coordinate immagine misurate può essere facilmente espressa sfruttando la similitudine fra triangoli:

$$\Delta\xi_r = \frac{\xi}{\rho} \Delta\rho = \xi(K_0 + K_1\rho^2 + K_2\rho^4)$$

$$\Delta\eta_r = \frac{\eta}{\rho} \Delta\rho = \eta(K_0 + K_1\rho^2 + K_2\rho^4)$$

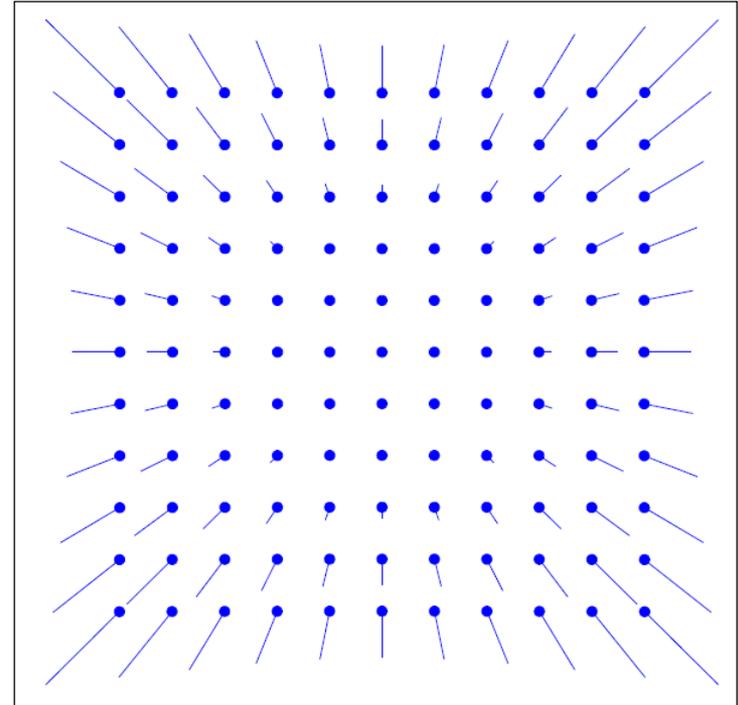
Possiamo notare che in realtà è importante conoscere il rapporto:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = K_0 + K_1\rho^2 + K_2\rho^4 + \dots$$

FORMULA BILANCIATA

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = K_1\rho^2 + K_2\rho^4 + \dots$$

FORMULA NON BILANCIATA



RIFRAZIONE ATMOSFERICA

Nel percorso oggetto-camera può succedere (fotogrammetria aerea) che l'indice di rifrazione dell'aria non sia costante (possono essere presenti variazioni di pressione, temperatura, umidità, etc.).

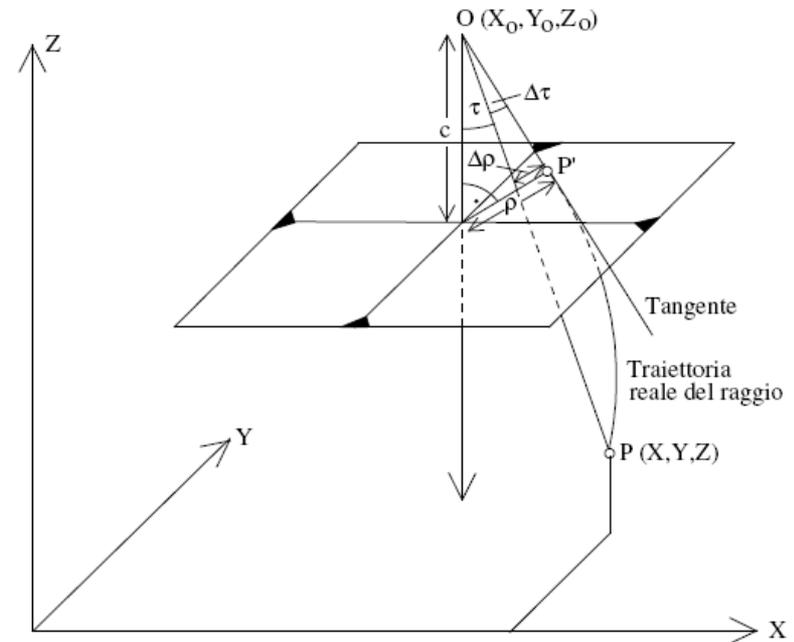
Il percorso del raggio di proiezione non è più rettilineo.

Si può approssimare il raggio di proiezione "corretto" considerando la direzione della tangente centrale del percorso curvilineo:

$$\Delta\tau = K \tan\tau = K \frac{\rho}{c}$$
$$\Delta\rho \approx \rho \left(1 + \frac{\rho^2}{c^2} \right) K$$

Quindi è assimilabile ad una correzione radiale.

$$K = 0.00241 \left(\frac{Z_0}{Z_0^2 - 6Z_0 + 250} - \frac{Z^2}{Z_0(Z^2 - 6Z + 250)} \right) \quad \text{Con l'ipotesi di strati d'aria paralleli}$$



DISTORSIONE TANGENZIALE

Il corpo ottico è costituito da un insieme di lenti.

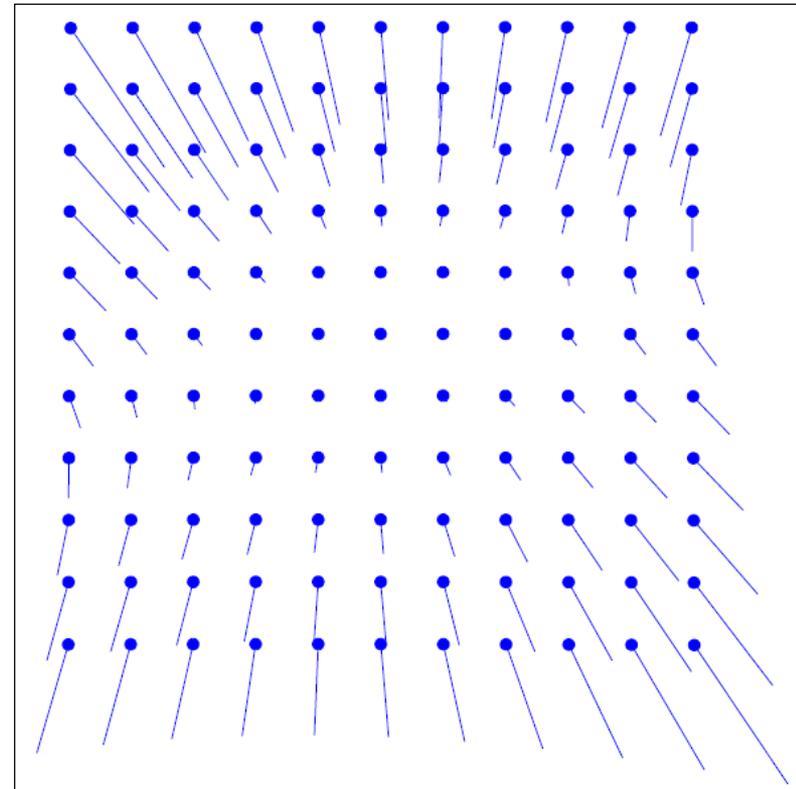
In termini costruttivi è impossibile assicurare che gli assi ottici di tutte le lenti siano coincidenti: questo dà luogo ad un altro tipo di distorsione, non più a simmetria centrale, che prende il nome di distorsione tangenziale.

La correzione da applicare alle coordinate misurate viene solitamente calcolata con la formula di Brown:

$$\Delta\xi_d = P_1(\rho^2 + 2\xi^2) + 2P_2\xi\eta$$

$$\Delta\eta_d = P_2(\rho^2 + 2\eta^2) + 2P_1\xi\eta$$

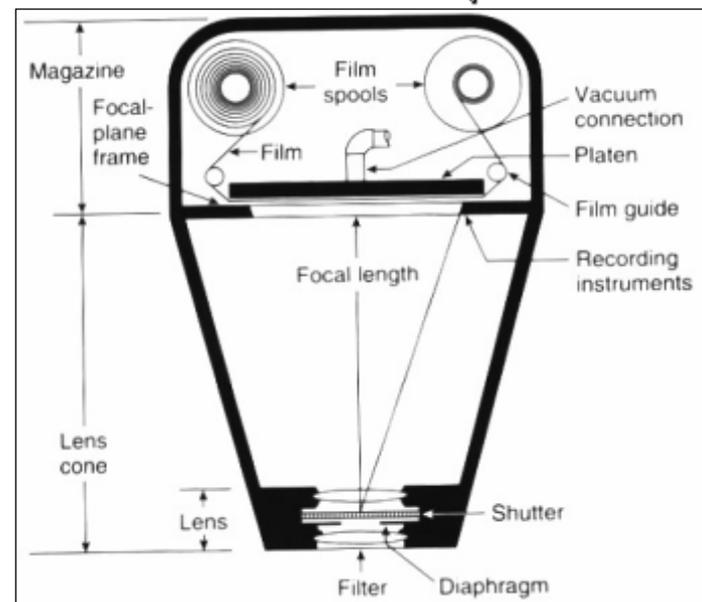
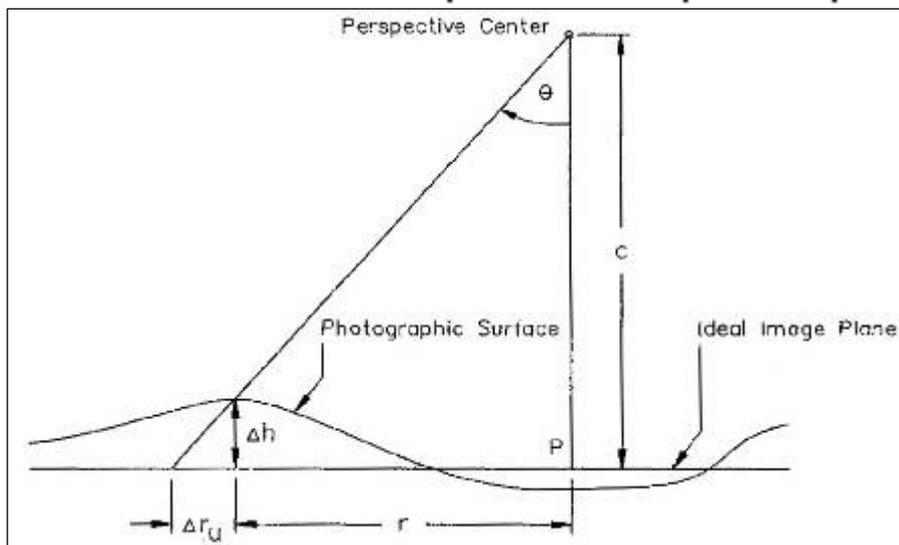
Solitamente, per ottiche non troppo “spinte” (teleobiettivi, obiettivi speciali etc.) il contributo della distorsione tangenziale è decisamente minore rispetto a quello della distorsione radiale e può in molti casi essere trascurato.



ALTRE CAUSE DI ERRORE

NON PLANEITA' DEL SUPPORTO FOTOGRAFICO (Pellicola o CCD)

Se il supporto su cui viene registrata l'immagine non è piano si ha un errore di posizionamento del punto immagine proporzionale all'entità del fuoripiano e della distanza del punto dal punto principale.



Per questo motivo, per pellicole di grande formato (come quelle utilizzate in fotogrammetria aerea, vengono introdotti particolari dispositivi all'interno della camera per "stendere" il supporto ed evitare questo tipo di effetti.

Per applicazioni di altissima precisione si può misurare la topografia del piano immagine (ammettendo che il supporto aderisca perfettamente ad esso) e calcolare le correzioni necessarie.

ALTRE CAUSE DI ERRORE

DISTORSIONE DEL SUPPORTO NEL SUO PIANO

La pellicola fotografica (i sensori CCD sono molto meno soggetti a questo tipo di problema) può anche subire deformazioni nel suo stesso piano a causa di vari effetti di tipo meccanico o chimico-fisico.

Per tenere in conto questi possibili effetti si può utilizzare una camera dotata di reseau (crocini) che una volta calibrati opportunamente possono mettere in luce eventuali deformazioni che ha subito il supporto dopo essere stato impressionato.

Per la correzione si calcola generalmente una funzione di interpolazione che riporti i crocini misurati sul fotogramma alla posizione originale e si spostano conseguentemente tutti i punti immagine misurati.



RICAPITOLANDO:

Quattro diversi fenomeni fisici fanno sì che la reale generazione dell'immagine sul supporto fotosensibile non corrisponda a quella ipotizzata per la determinazione delle equazioni di collinearità:

1. DISTORSIONE RADIALE
2. DISTORSIONE TANGENZIALE
3. NON PLANEITA' DEL SUPPORTO
4. DISTORSIONE DEL SUPPORTO NEL PIANO

La correzione complessiva da applicare alle coordinate immagine misurate risulta:

$$\begin{cases} \Delta\xi = \Delta\xi_r + \Delta\xi_d + \Delta\xi_u + \Delta\xi_f \\ \Delta\eta = \Delta\eta_r + \Delta\eta_d + \Delta\eta_u + \Delta\eta_f \end{cases} \quad \text{con} \quad \begin{cases} \Delta\xi_r, \Delta\eta_r = \text{correzioni distorsione radiale} \\ \Delta\xi_d, \Delta\eta_d = \text{correzioni distorsione tangenziale} \\ \Delta\xi_u, \Delta\eta_u = \text{non planeità del supporto} \\ \Delta\xi_f, \Delta\eta_f = \text{deformazioni nel piano del supporto} \end{cases}$$



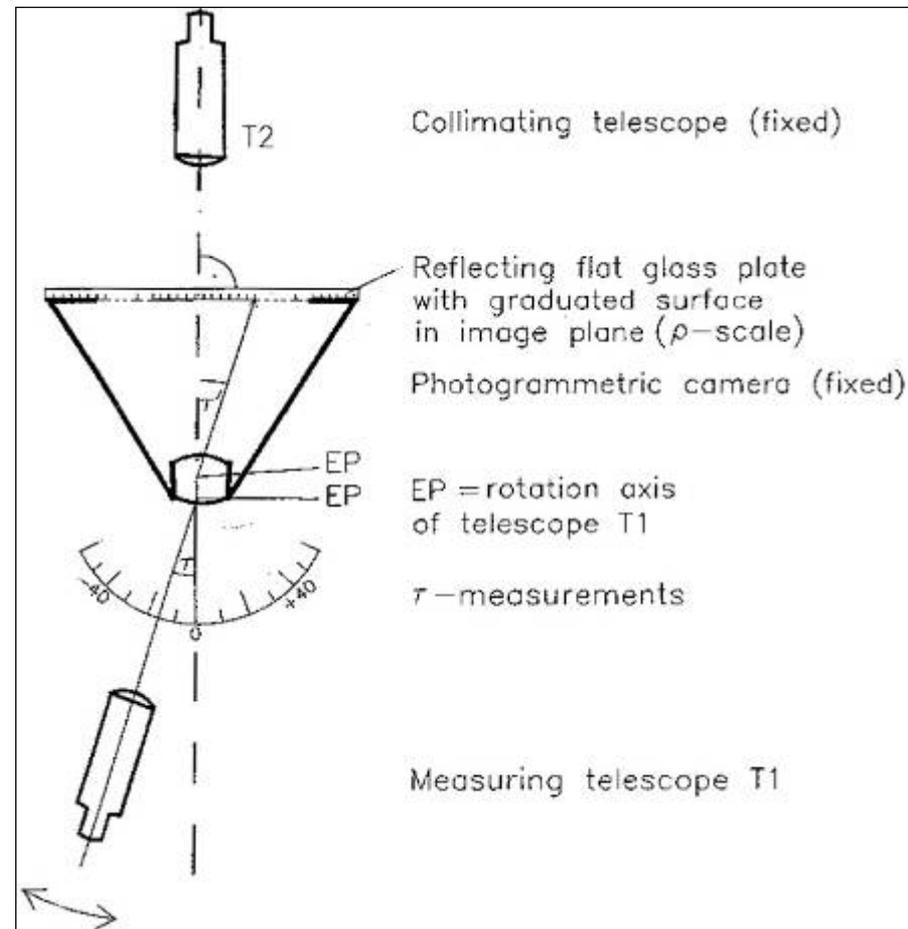
STIMA DEI PARAMETRI DI DISTORSIONE

D'ora in avanti consideriamo solamente la distorsione radiale e quella tangenziale.

 Come faccio a determinare le curve di distorsione (o i parametri K_1 , K_2 , P_1 , P_2 , ...?)

Calibrazione in laboratorio:

Mediante apposite apparecchiature calibro la camera misurando la posizione del punto immagine variando l'incidenza (controllata) di un raggio di proiezione. In altre parole misuro in maniera diretta le componenti di distorsione in una serie di punti discreti del formato. Volendo poi ricavo i parametri di calibrazione.



STIMA DEI PARAMETRI DI DISTORSIONE

Calibrazione analitica:

Prendiamo in considerazione ancora una volta le equazioni di collinearità:

$$x = \frac{-c[r_{11}(X_0 - X) + r_{12}(Y_0 - Y) + r_{13}(Z_0 - Z)]}{[r_{31}(X_0 - X) + r_{32}(Y_0 - Y) + r_{33}(Z_0 - Z)]} = f(c, x_0, X_0, Y_0, Z_0, \varpi, \varphi, \kappa)$$

$$y = \frac{-c[r_{21}(X_0 - X) + r_{22}(Y_0 - Y) + r_{23}(Z_0 - Z)]}{[r_{31}(X_0 - X) + r_{32}(Y_0 - Y) + r_{33}(Z_0 - Z)]} = f(c, y_0, X_0, Y_0, Z_0, \varpi, \varphi, \kappa)$$

Le coordinate immagine x e y sono però quelle che verificano la collinearità, quindi quelle in cui le correzioni per la distorsione sono già state applicate. Possiamo allora scrivere (considerando come parametri anche K_1, K_2, P_1, P_2)

$$x = f(c, x_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, X_0, Y_0, Z_0, \varpi, \varphi, \kappa)$$

$$y = f(c, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, X_0, Y_0, Z_0, \varpi, \varphi, \kappa)$$



STIMA DEI PARAMETRI DI DISTORSIONE

Calibrazione analitica:

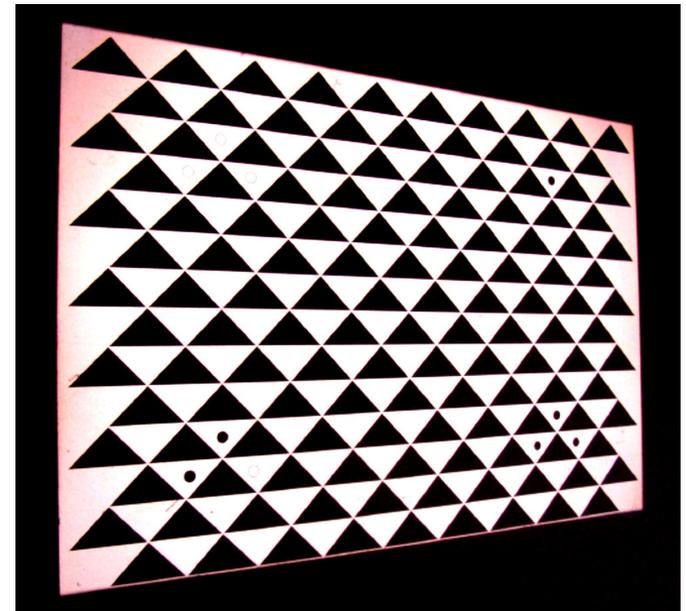
Considero un blocco fotogrammetrico altamente ridondante (molti punti, possibilmente d'appoggio, visti su tutti i fotogrammi del blocco).

Risolve un sistema a minimi quadrati in cui, oltre ai parametri di orientamento esterno, considero come parametri (cioè variabili incognite) anche i parametri di orientamento interno e quelli di distorsione.

Al termine della compensazione del blocco ho i parametri che definiscono le curve di distorsione.

N.B.: Per ottenere una buona stima dei parametri:

1. Avere almeno $12 \div 16$ immagini
2. Le immagini devono essere convergenti
3. Devono vedere il reticolo di punti da più angolazioni possibili
4. Immagini prese orizzontalmente e ruotate (disaccoppiamento dei parametri)



STIMA DEI PARAMETRI DI DISTORSIONE

CALIBRAZIONE FULL FIELD:

Considero i parametri di orientamento interno e di distorsione come costanti nel tempo ed uguali per tutti i fotogrammi. Effettuo una calibrazione preliminare su un campo di calibrazione apposito e uso i parametri in tutti i blocchi successivi.

CALIBRAZIONE ON-THE-JOB:

Effettuo una calibrazione con le stesse immagini che compongono il blocco considerandoli uguali per tutti i fotogrammi (o per gruppi di fotogrammi).

SELF-CALIBRAZIONE:

Ciascun fotogramma del blocco ha i suoi parametri di orientamento interno e di distorsione caratteristici. Al termine della compensazione ottengo un set di parametri per ciascun fotogramma. Da utilizzare (il meno possibile) quando i fotogrammi sono stati acquisiti con una fotocamera a focale non fissa e si ha il sospetto che i parametri siano effettivamente cambiati da uno scatto al successivo.



CORSO DI FOTOGRAMMETRIA

Dott. Ing. Riccardo Roncella

ORIENTAMENTO INTERNO

FINE

