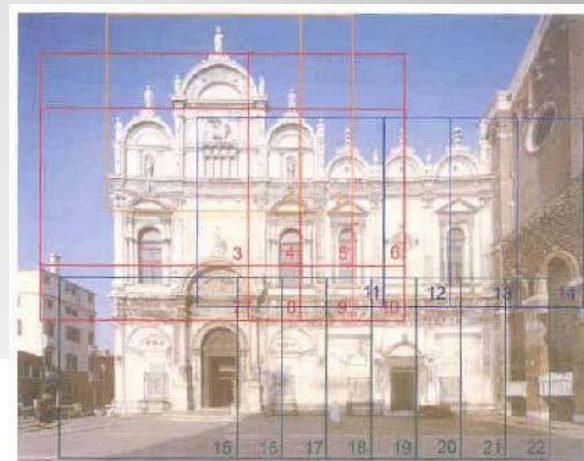
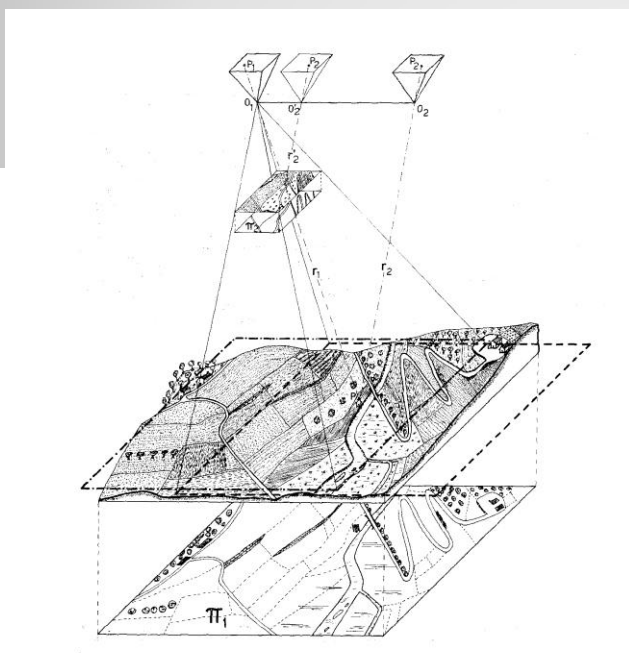
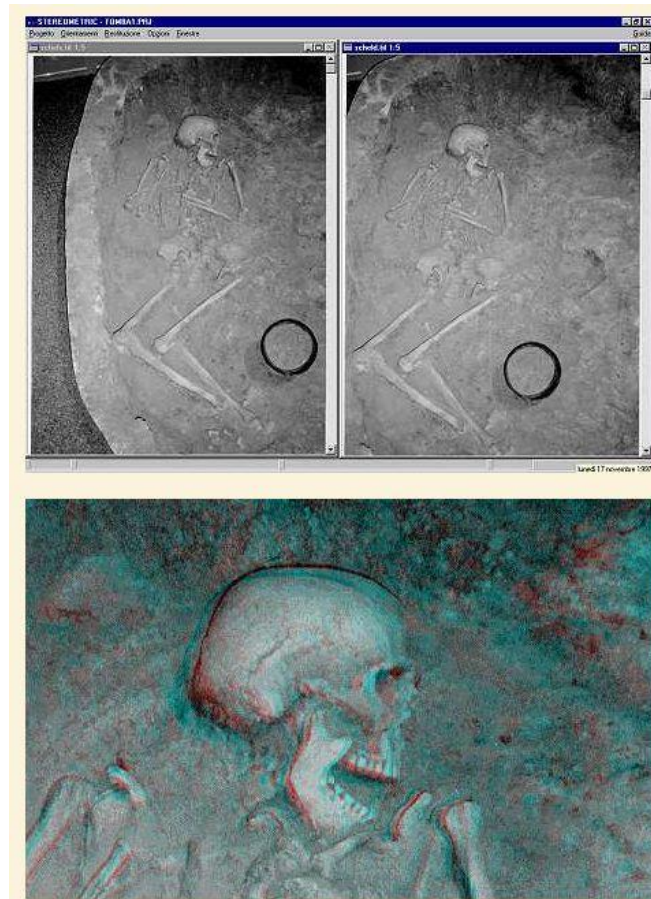


LA FOTOGRAMMETRIA CONVENZIONALE NEI RILIEVI TERRITORIALI INFORMATIZZATI



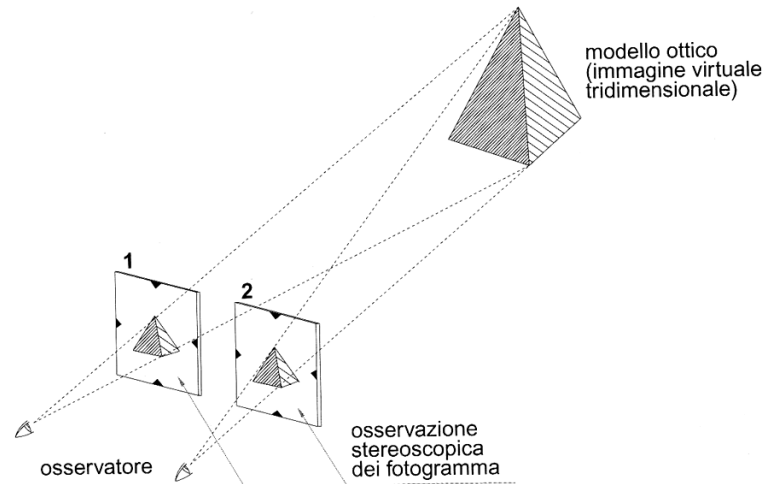
PRINCIPI TEORICI

La **fotogrammetria** è una tecnica di rilievo che permette di ottenere dati metrici di un qualsiasi oggetto (forma e posizione) tramite l'acquisizione e l'analisi di immagini fotografiche a prospettiva centrale dell'oggetto stesso.



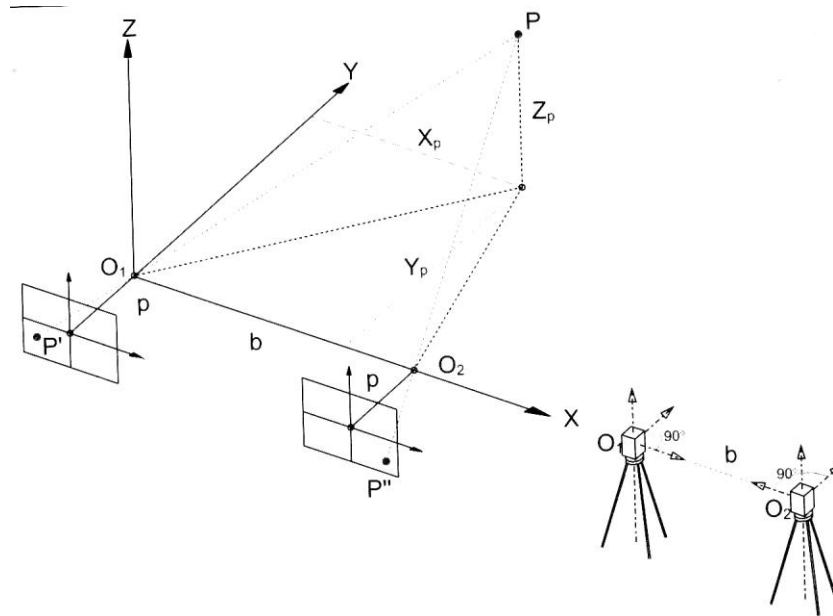
Più precisamente per poter determinare la posizione nello spazio del generico oggetto, è necessario avere due foto dello stesso scattate da due punti posti ad una distanza nota l'uno dall'altro.

Tale coppia di fotogrammi si definisce modello o stereogramma.



Lo schema ideale nel rilievo fotogrammetrico viene definito presa normale ed è caratterizzata dalla seguente geometria:

- base di presa orizzontale
- assi ottici perpendicolari alla base di presa
- angoli di rotazione nulli



I fotogrammi devono essere scattati con macchine fotografiche aventi particolari caratteristiche che possano permettere di definire l'orientamento interno delle foto.

Tali macchine si definiscono metriche, sono dotate di un certificato di calibrazione e si differenziano dalle comuni macchine fotografiche per le seguenti caratteristiche:

- la distanza fra il centro di proiezione ed il piano dell'immagine proiettata (distanza principale) è nota con la precisione del centesimo di millimetro;

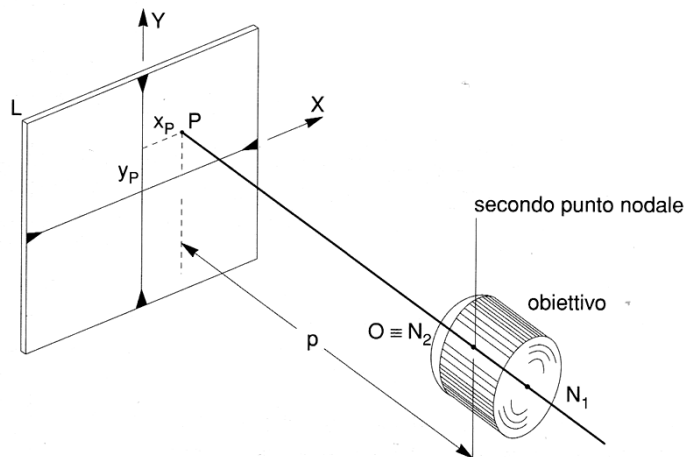
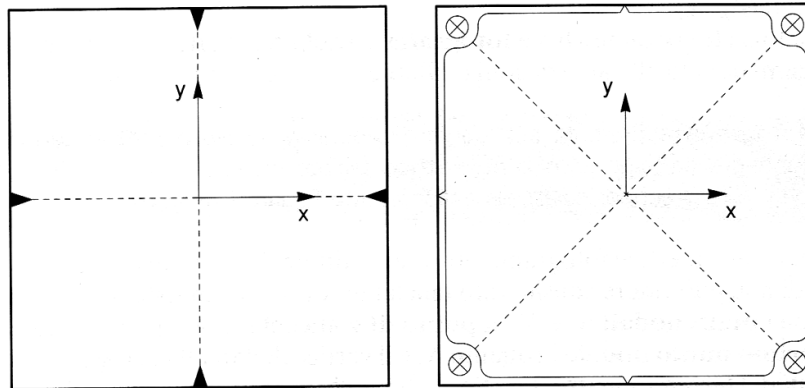


Fig. 4 - Camera terrestre universale Wild P31.

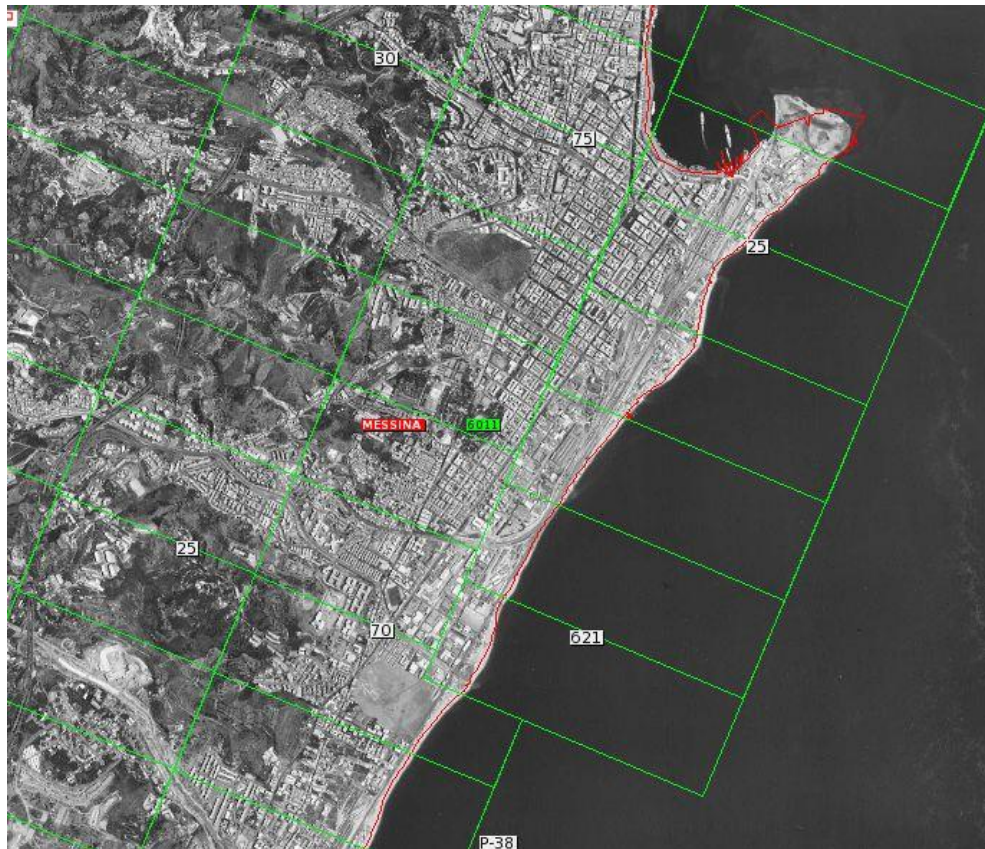
- l'obiettivo, oltre ad essere corretto per l'intero spettro visibile e per l'infrarosso, presenta un elevato potere risolutivo e una distorsione trascurabile;
- il quadro di appoggio, contro cui viene pressato il materiale sensibile, è munito di due o quattro riferimenti (marche), riproducibili sul fotogramma, che individuano con precisione il **punto principale**, cioè il punto intersezione del piano-fotogramma con la perpendicolare condotta dal centro di proiezione (raggio principale);



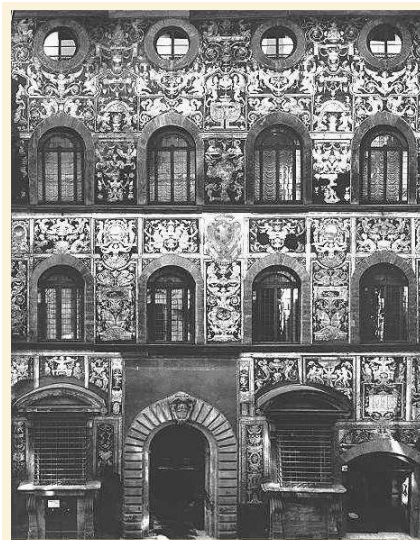
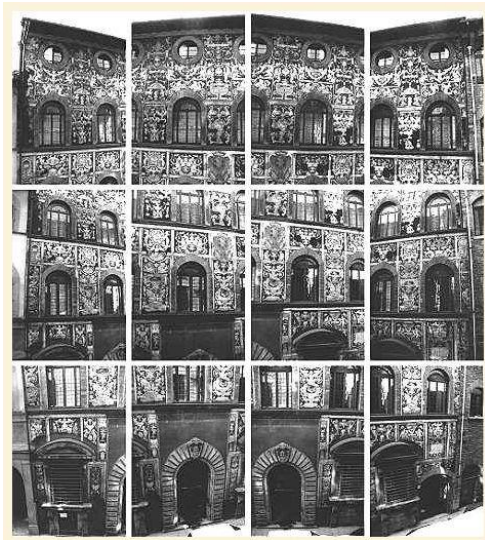
La **Fotogrammetria** si distingue in:

- **Terrestre**
- **Aerea**

Quella **aerea** è applicata per la realizzazione di cartografie o studi che riguardano il territorio ed i suoi cambiamenti.

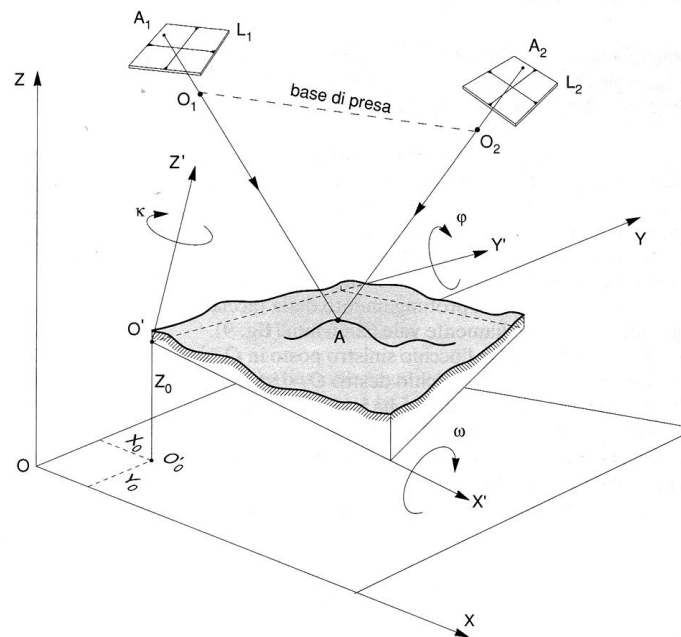


Quella **terrestre** è invece applicata sia in ambito architettonico, che per il rilievo di siti archeologici, di opere d'arte, di incidenti stradali.

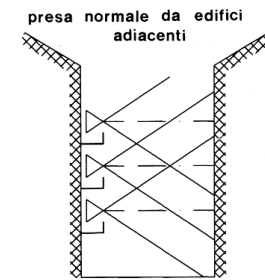
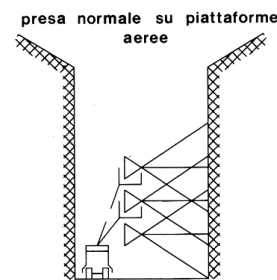
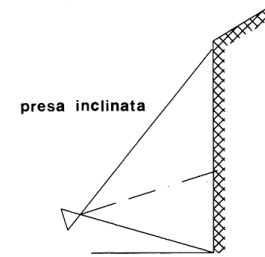
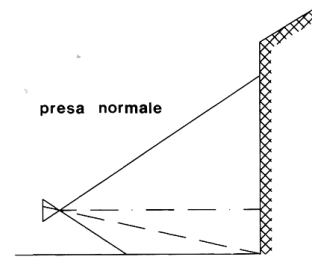
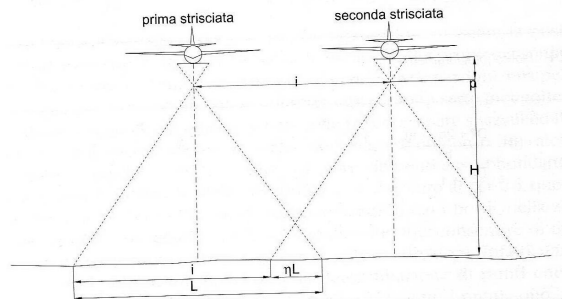
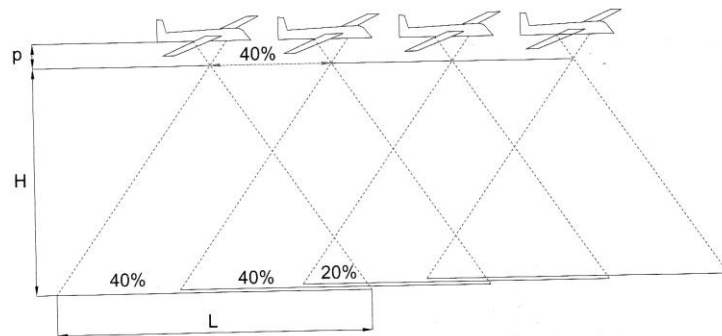


Le fasi operative del procedimento fotogrammetrico, in gran parte comuni sia alla fotogrammetria terrestre che a quella aerea, risultano:

- **LA PRESA**
- **IL RILIEVO DEI PUNTI DI APPOGGIO**
- **LA RESTITUZIONE**



LA PRESA: consiste principalmente nella determinazione del numero di strisciate e del numero di fotogrammi per ogni striscia e va accuratamente progettata a seconda se si tratta di fotogrammetria aerea (in tal caso si può chiamare anche piano di volo) o terrestre.



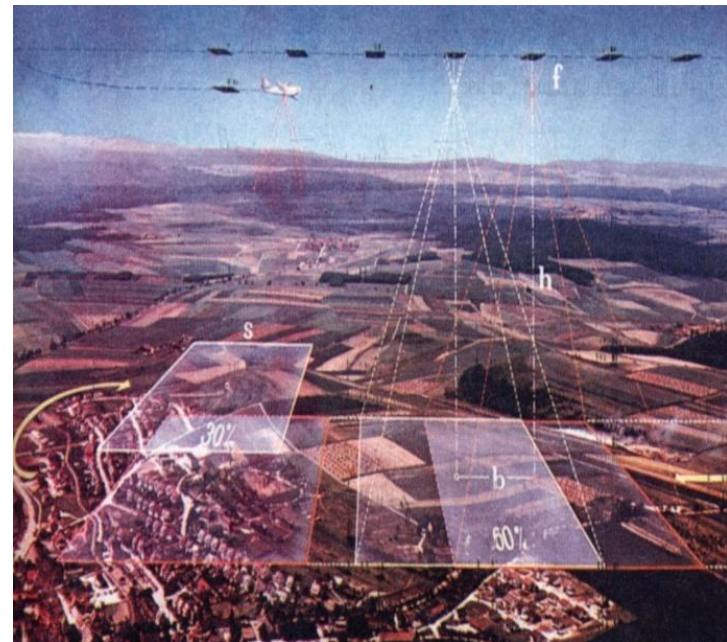
Progetto presa aerea: calcolo parametri del volo fotogrammetrico

Occorre preliminarmente stabilire la scala della carta topografica che si vuole ottenere.

In funzione di tale scala, dalle tabelle di corrispondenza tra scala carta e scala fotogramma, si può ricavare il valore "n" della scala media dei fotogrammi.

TABELLA DI CORRISPONDENZA
scala CARTA / scala FOTOGRAMMA

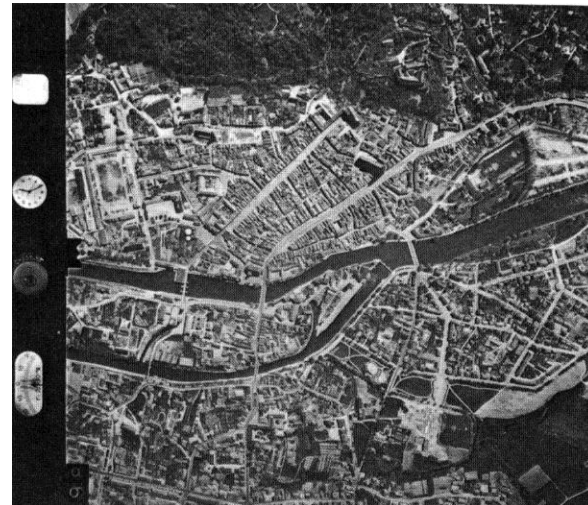
| denominatore SCALA CARTA | denominatore SCALA FOTO |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1.000 (x 5) | 5.000 |
| 2.000 (x 4) | 8.000 |
| 4.000 (x 4) | 12.000 |
| 5.000 (x 3) | 15.000 |
| 10.000 (x 2) | 20.000 |
| 20.000 (x 1,5) | 30.000 |
| 25.000 (x 1,6) | 40.000 |
| 50.000 (x 1) | 50.000 |
| 100.000 (x 0,8) | 80.000 |



Si stabiliscono quindi i parametri noti del volo e della camera da presa, quali:

- la quota media del territorio da rilevare: Hm
- la distanza principale (distanza focale) della camera da presa: p (210, 152, 115 mm)
- le dimensioni del lato della lastra: l (230 mm)
- il ricoprimento longitudinale (overlap): η (60%)
- il ricoprimento trasversale (overside): ε (20%)
- la velocità di crociera dell'aereo: v (da 150 a 250 km/h)
- l'apertura dell'otturatore della camera da presa: Δt (1/200 – 1/500 di sec)
- la dimensione dei granuli dell'emulsione fotografica: 0.01 mm
- la lunghezza del terreno da rilevare: Dl
- la larghezza del terreno da rilevare: Dt

Data strip di un fotogramma



Dalla relazione

$$p/H_r = l/L$$

con

$$l/L = 1/n$$

essendo

H_r = altezza relativa del volo

H_{ass} = altezza assoluta del volo

L = lunghezza lato ripreso

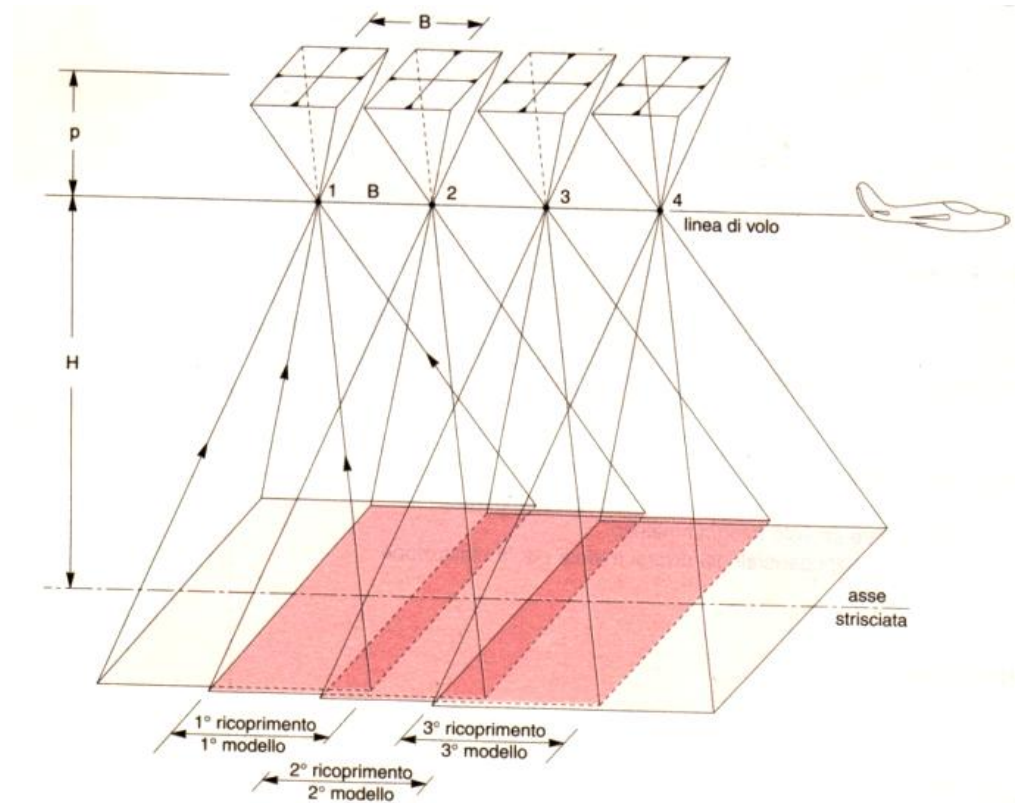
Si ha:

$$p/H_r = 1/n$$

$$H_r = n \times p$$

$$H_{ass} = H_m + H_r$$

$$L = n \times l$$



Lo spostamento longitudinale dell'aereo tra due scatti dell'otturatore, definito base di presa, risulta:

$$B = L * (1 - \eta)$$

Lo spostamento trasversale dell'aereo tra due strisciate risulta:

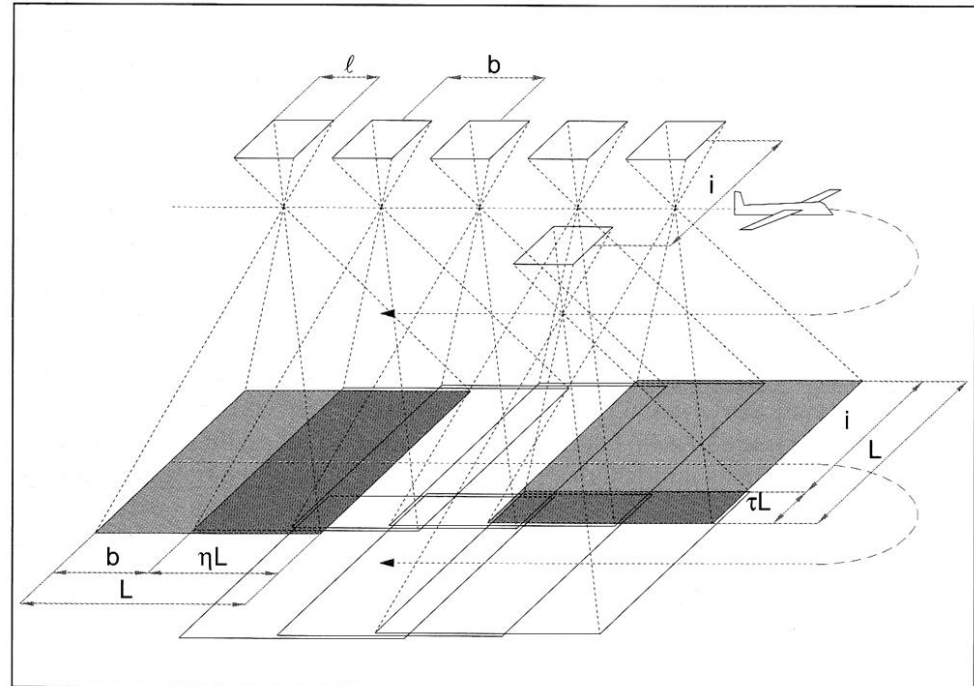
$$C = L * (1 - \varepsilon)$$

La superficie ricoperta da un fotogramma in ettari è quindi:

$$S = L * L / 10000$$

Mentre la superficie ricoperta da uno stereogramma è:

$$S = L * (1 - \eta) * L = B * L$$

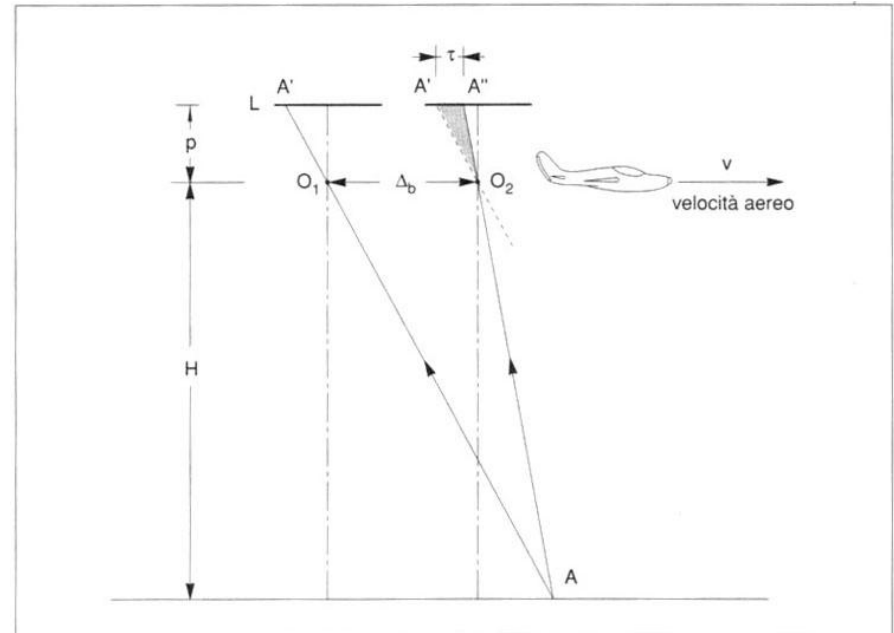


Occorre a questo punto stabilire l'intervallo di tempo tra due scatti successivi dell'otturatore, in funzione della velocità prefissata dell'aereo, e calibrarne il tempo di apertura, per evitare che il moto dell'aereo possa produrre un trascinamento dell'immagine sulla foto, e pertanto quest'ultimo che deve risultare dello stesso ordine di grandezza dei granuli dell'emulsione fotografica.

Il tempo tra due scatti successivi è:

$$t = B / v$$

$$\text{e quindi } \Delta b = v * \Delta t$$



Mentre il trascinamento, dalla similitudine dei triangoli $A' A'' O_2$ e $O_1 O_2 A$, $\tau/p = \Delta b/H$ e quindi:

$$\tau = (p \text{ [m]} / H \text{ [m]}) * v \text{ [mm/sec]} * \Delta t$$

Quest'ultimo, come detto, deve risultare inferiore alla dimensione minima dei granuli dell'emulsione fotografica, pari a 0.01 mm.

Il rapporto tra la base e l'altezza relativa del volo deve invece risultare $>$ di 1/4

$$B / H_r > 1/4$$

In prima approssimazione la lunghezza del territorio si può porre pari a:

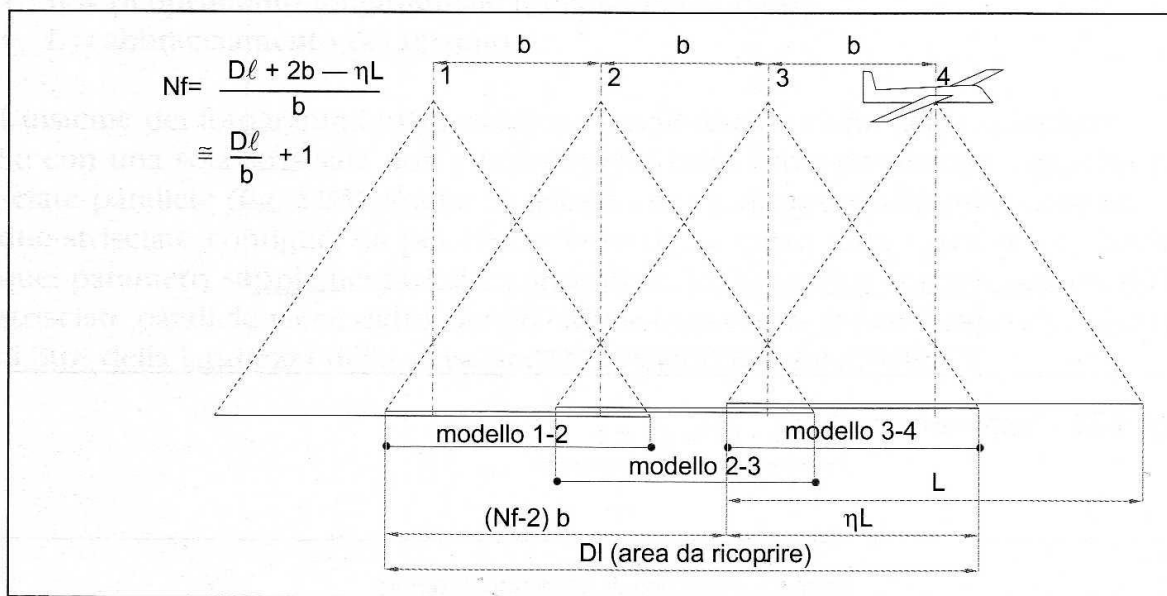
$$DI = B \times (Nf - 1)$$

da cui si può ricavare il numero di fotogrammi di una strisciata:

$$Nf = 1 + (DI/B)$$

Valore che si approssima per eccesso al numero intero superiore Nf^* , di conseguenza il numero di stereogrammi (modelli) di una strisciata risulta:

$$Nm = Nf^* - 1$$



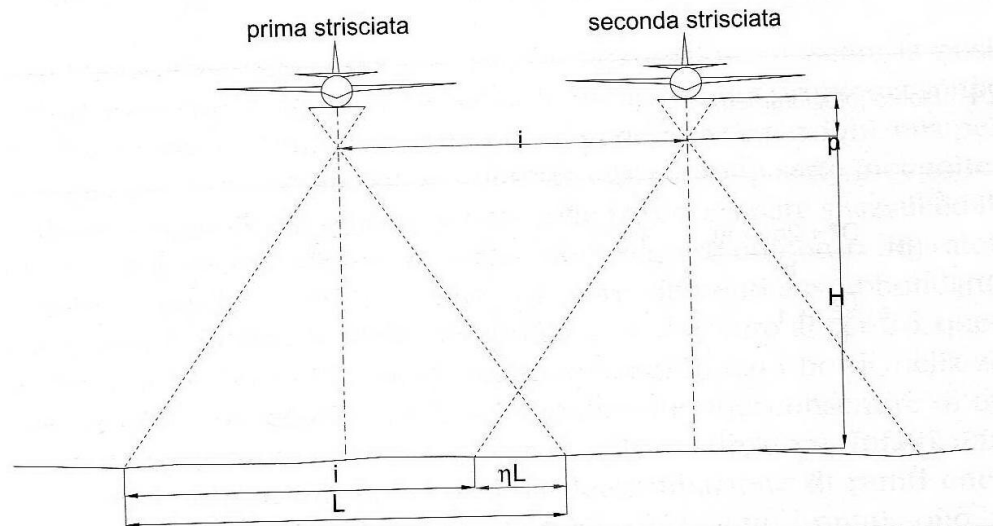
La stessa cosa vale per la larghezza del territorio che in prima approssimazione si può porre pari a:

$$Dt = C \times Ns$$

Da cui si ricava il numero di strisciate:

$$Ns = Dt / C$$

Valore anche questo che si approssima per eccesso al numero intero superiore Ns^*



Pertanto la lunghezza utile di terreno coperta dagli N_f fotogrammi risulta:

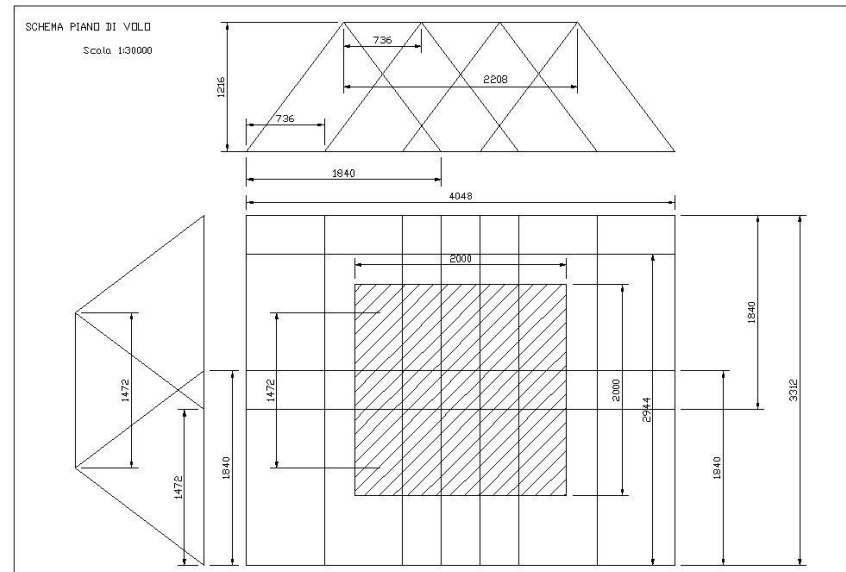
$$D_{lu} = B \times (N_f^* - 1)$$

Mentre la larghezza utile di terreno coperto dalle N_s strisciate risulta:

$$D_{tu} = C \times N_s^*$$

Ed infine la superficie utile del terreno coperta da N_f fotogrammi per strisciata e da N_s strisciate, risulta:

$$S_u = D_{lu} \times D_{tu} = B \times (N_f^* - 1) \times C \times N_s^*$$



Il progetto della presa aerea con il calcolo dei parametri di volo può essere infine implementato in un foglio di calcolo.

CALCOLO DEI PARAMETRI DEL VOLO AEREO FOTOGRAMMETRICO

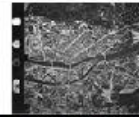


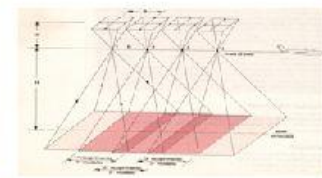
TABELLA DI CORRISPONDENZA
scale CARTA / scale FOTOGRAMMA

| denominatore SCALA CARTA | denominatore SCALA FOTO |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1.000 (x 5) | 5.000 |
| 2.000 (x 4) | 8.000 |
| 4.000 (x 4) | 12.000 |
| 5.000 (x 3) | 15.000 |
| 10.000 (x 2) | 20.000 |
| 20.000 (x 1,5) | 30.000 |
| 25.000 (x 1,6) | 40.000 |
| 50.000 (x 1) | 50.000 |
| 100.000 (x 0,8) | 80.000 |

Località: _____ Data: _____
 Oggetto: _____
 Sessione ordinaria 1986

ELEMENTI NOTI DEL VOLO FOTOGRAMMETRICO

| | | |
|--|----|------------|
| scala della carta = | 1: | 5000 |
| scala media fotogrammi n = | 1: | 15000 |
| quota media territorio da rilevare = | | 0 m s.l.m. |
| distanza principale (d.ist. focale) p = | | 152 mm |
| dimensione lato lastra l = | | 230 mm |
| ricoprimento longitudinale (overlap) η = | | 60 % |
| ricoprimento laterale (overside) ε = | | 20 % |
| velocità crociera v = | | 200 Km/h |
| apertura otturatore [sec] | 1/ | 500 |
| dimensione granuli emulsione | | 0,01 mm |
| lunghezza terreno da rilevare Dl = | | 2,7416 km |
| larghezza terreno da rilevare Dt = | | 1 km |



ELEMENTI CALCOLATI DELLA PRESA AEREA

| | |
|---|------------------|
| altezza relativa del volo Hr = n p = | 2.280 m |
| altezza assoluta del volo Hass = Hm + Hr = | 2.280 m s.l.m. |
| lunghezza lato ripreso L = n l = | 3450 m |
| spostamento longitudinale aereo tra due scatti dell'otturatore base di presa B = L (1 - η) = | 1380 m |
| spostamento trasversale aereo tra due strisciate C = L (1 - ε) = | 2760 m |
| superficie ricoperta da un fotogramma S = L ² / 10.000 = | 1190 ha |
| sup. ricop. da uno stereogramma S = L (1 - η) * L / 10.000 = B * L / 10.000 = | 476 ha |
| intervallo di scatto t = B / v = | 24,840 sec |
| trascinamento τ = p * v * Dt / Hr = | 0,007 mm <= 0,01 |
| rapporto base altezza B/Hr = | 0,522 > 0,25 |
| numero fotogrammi di una striscia Nf = 1 + Dl/B = | 3 |
| numero stereogrammi (modelli) di una striscia Nm = Nf - 1 = | 2 |
| numero strisciate Ns = Dt / C = | 1 |
| Numero totale fotogrammi Nfx Ns = | 3 |
| Numero totale stereogrammi utili Nm x Ns = | 2 |
| lunghezza utile di terreno coperta dagli Nf fotogrammi Dlu = B * Nm = | 2760 m |
| larghezza utile di terreno coperta dalle Ns strisciate Dtu = C * Ns = | 2760 m |
| Superficie complessivamente coperta dagli stereogrammi St = Dlu * Dtu = | 7,62 kmq |
| maggiore Superficie terreno da rilevare | 2,74 kmq |
| numero minimo di punti di appoggio Nm * Ns * 3 = | 6 |
| numero ottimale di punti di appoggio Nm * Ns * 5 = | 10 |

Ing. Michele Campo

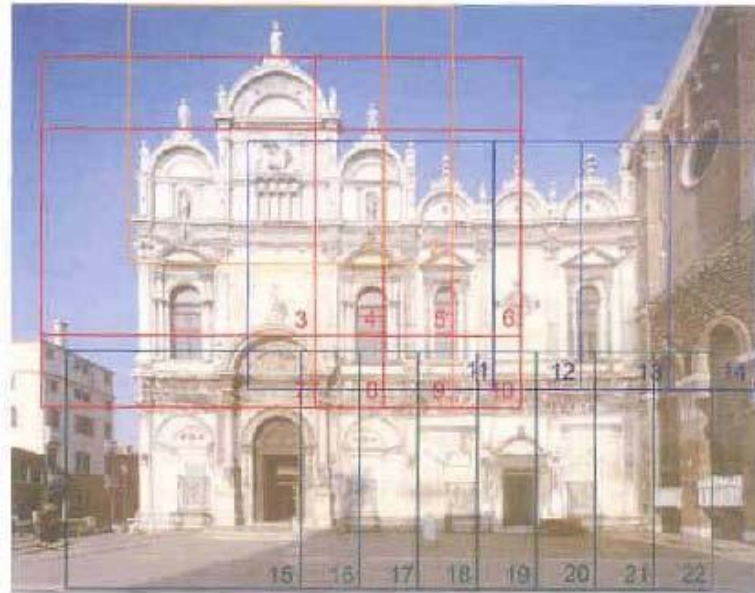
Progetto presa terrestre: calcolo parametri

Occorre preliminarmente stabilire la scala di rappresentazione del prospetto.

In funzione di tale scala, dalle tabelle di corrispondenza tra scala carta e scala fotogrammi, si può ricavare il valore "n" della scala media dei fotogrammi.

TABELLA DI CORRISPONDENZA
scala CARTA / scala FOTOGRAMMA

| denominatore SCALA CARTA | denominatore SCALA FOTO |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | da 1 a 2,5 |
| 50 | 125 |
| 100 | 250 |
| 200 | 500 |



Si stabiliscono quindi i parametri noti del rilievo e della camera da presa, quali:

- la distanza principale (distanza focale) della camera da presa: p (35, 50, 100, 350 mm)
- le dimensioni del lato della lastra: l (60 mm)
- il ricoprimento longitudinale (overlap): η (60%)
- il ricoprimento trasversale (overside): ε (20%)
- la lunghezza del prospetto da rilevare: Dl
- L'altezza del prospetto da rilevare: Ht
- Lo spazio utile antistante: $Dmax$

Dalla relazione

$$p/D = l/L$$

con

$$l/L = 1/n$$

essendo

D = distanza di presa

L = lunghezza lato ripreso

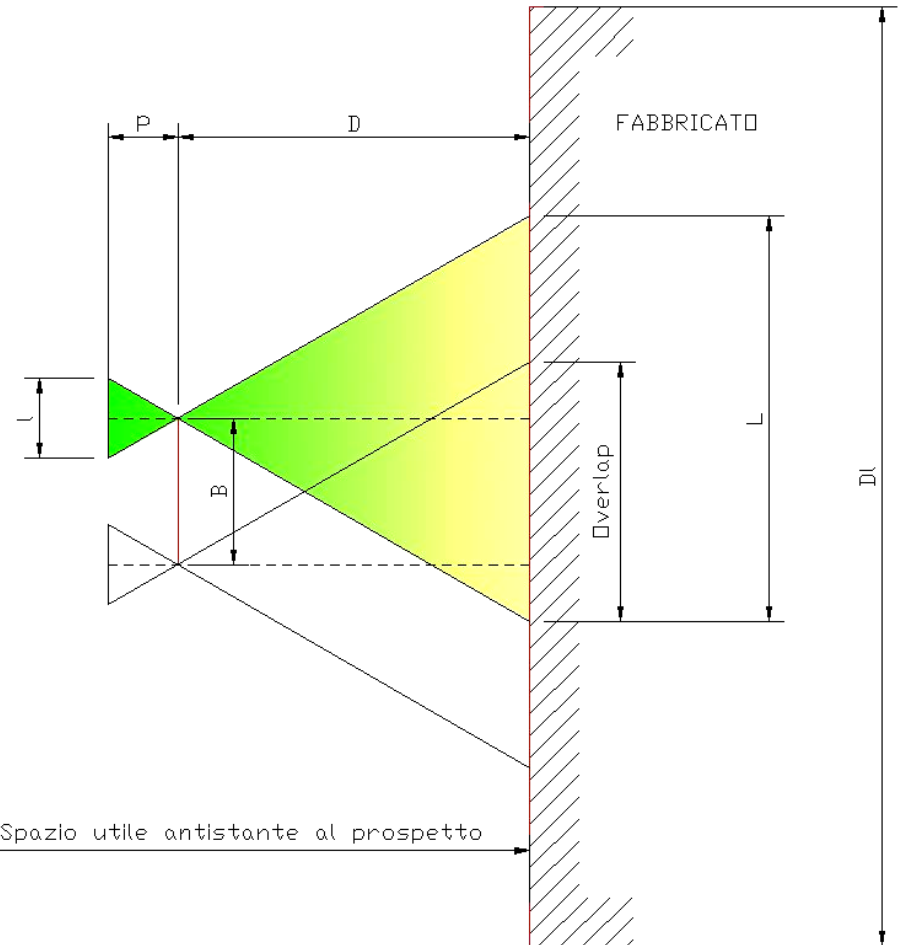
Si ha:

$$p/D = 1/n$$

e quindi

$$D = n * p$$

$$L = n * l$$



La base di presa longitudinale risulta:

$$B = L * (1 - \eta)$$

La base di presa verticale risulta:

$$C = L * (1 - \varepsilon)$$

La superficie ricoperta da un fotogramma è quindi:

$$S = L * L$$

Mentre la superficie ricoperta da uno stereogramma è:

$$S = L * (1 - \eta) * L = B * L$$

In prima approssimazione la lunghezza del prospetto si può porre pari a:

$$DI = B \times (Nf - 1)$$

da cui si può ricavare il numero di fotogrammi di una strisciata:

$$Nf = 1 + (DI/B)$$

Valore che si approssima per eccesso al numero intero superiore Nf^* , di conseguenza il numero di stereogrammi (modelli) di una strisciata risulta:

$$Nm = Nf^* - 1$$

In prima approssimazione l'altezza del prospetto si può porre pari a:

$$Ht = C \times Ns$$

Da cui si ricava il numero di strisciate:

$$Ns = Ht / C$$

Valore anche questo che si approssima per eccesso al numero intero superiore Ns^*

Pertanto la lunghezza utile del prospetto coperta dagli Nf^* fotogrammi risulta:

$$Dlu = B \times (Nf^* - 1)$$

Mentre l'altezza utile del prospetto coperto dalle Ns^* strisciate risulta:

$$Htu = C \times Ns^*$$

Ed infine la superficie utile del prospetto coperta da Nf^* fotogrammi per strisciata e da Ns^* strisciate, risulta:

$$Su = Dlu \times Dtu = B \times (Nf^* - 1) \times C \times Ns^*$$

Il progetto della presa stereoscopica terrestre con il calcolo dei relativi parametri può essere infine implementato in un foglio di calcolo.

CALCOLO PARAMETRI PRESA STEREO SCOPICA DEL PROSPETTO DI UN FABBRICATO

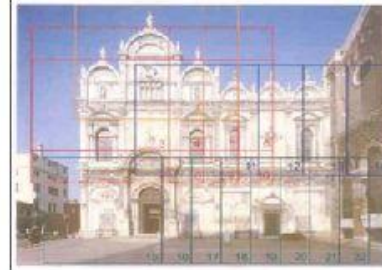
| | | | |
|-----------|--|-------|--|
| Località: | | Data: | |
| Oggetto: | | | |

TABELLA DI CORRISPONDENZA
scale CARTA / scale FOTOGRAMMA

| denominatore SCALA CARTA | denominatore SCALA FOTO |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | da 1 a 2,5 |
| 50 | 125 |
| 100 | 250 |
| 200 | 500 |
| Scala carta 1: | 50 |

ELEMENTI NOTI DELLA
PRESA STEREO SCOPICA

| | | |
|---|-----|--------|
| scala media fotogrammi n = | 1 : | 125 |
| distanza principale (dist. focale) p = | | 100 mm |
| dimensione lato lastra l = | | 60 mm |
| ricoprimento longitudinale (overlap) η_1 = | | 60 % |
| ricoprimento laterale (overside) ϵ = | | 20 % |
| lunghezza prospetto da rilevare Di = | | 30 m |
| altezza prospetto da rilevare Ht = | | 15 m |
| spazio utile antistante | | 20 m |



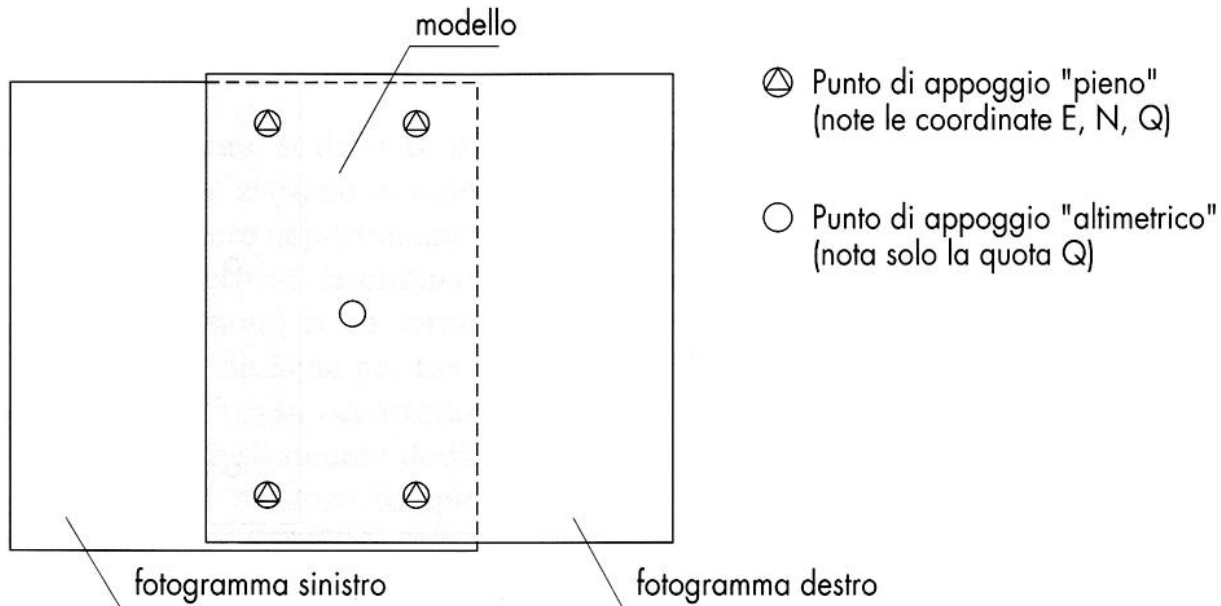
ELEMENTI CALCOLATI DELLA PRESA TERRESTRE

| | | |
|--|--------|------------|
| distanza di presa $D = n \cdot p =$ | 13 m | scartabile |
| lunghezza lato ripreso $L = n \cdot l =$ | 8 m | |
| base di presa longitudinale $B = L \cdot (1 - \eta_1) =$ | 3,00 m | |
| base di presa verticale $C = L \cdot (1 - \epsilon) =$ | 6,00 m | |
| superficie ricoperta da un fotogramma $S = L^2 =$ | 58 mq | |
| sup. ricop. da uno stereogramma $S = L \cdot (1 - \eta_1) \cdot L = B \cdot L =$ | 23 mq | |
| numero fotogrammi di una strisciata $Nf = 1 + Di/B =$ | 11 | |
| numero stereogrammi (modelli) di una strisciata $Nm = Nf - 1 =$ | 10 | |
| numero strisciate $Ns = Di / C =$ | 3 | |

| | |
|---|-----------|
| Numero totale fotogrammi $Nf \times Ns =$ | 33 |
| Numero totale stereogrammi utili $Nm \times Ns =$ | 30 |
| lunghezza utile prospetto coperta dagli Nf fotogrammi $Diu = B \cdot Nm =$ | 30 m |
| altezza utile prospetto coperta dalle Ns strisciate $Dtu = C \cdot Ns =$ | 18 m |
| Superficie complessivamente coperta dagli stereogrammi $St = Diu \cdot Dtu =$ | 540,00 mq |
| maggior | |
| Superficie prospetto da rilevare | 450,00 mq |
| numero minimo di punti di appoggio $Nm \cdot Ns \cdot 3 =$ | 90 |
| numero ottimale di punti di appoggio $Nm \cdot Ns \cdot 5 =$ | 150 |

Ing. Michele Campo

IL RILIEVO DEI PUNTI DI APPOGGIO: servono per l'orientamento esterno degli stereogrammi e degli stessi devono essere note le coordinate triortogonali determinate con metodi topografici. Tali punti devono essere minimo tre per ogni modello, ma si preferisce sceglierne almeno cinque, dislocati quattro ai bordi ed uno al centro.



LA RESTITUZIONE: consiste nella determinazione delle coordinate assolute dell'oggetto rilevato e nella successiva rappresentazione grafica.

Nella pratica la restituzione può essere eseguita per via **analogica**, **analitica** e **digitale**.

La restituzione analogica, attualmente poco utilizzata, consisteva nel collocare due fotogrammi su due organi di proiezione che venivano opportunamente orientati per realizzare la stessa situazione in scala ridotta della presa.

I fasci proiettanti potevano essere ricostruiti per via puramente ottica o con organi meccanici. I raggi omologhi dello stesso punto si incontravano su uno schermo mobile collegato ad un carrello con punta scrivente.

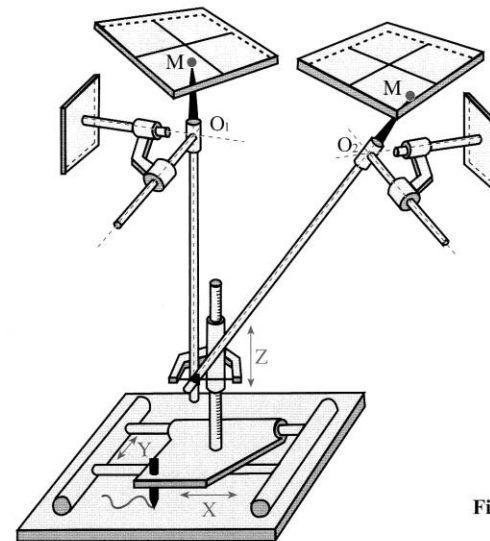
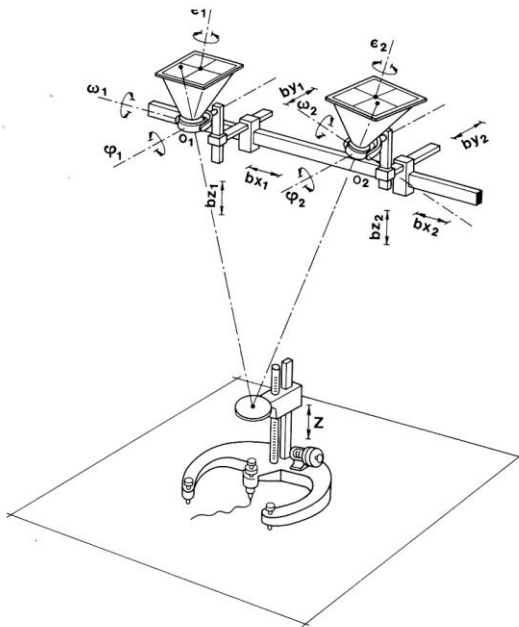


Fig. 16.97.

La restituzione analitica, viene generalmente eseguita misurando le coordinate lastra e la parallassi mediante uno stereorestitutore abbinato a un calcolatore elettronico .

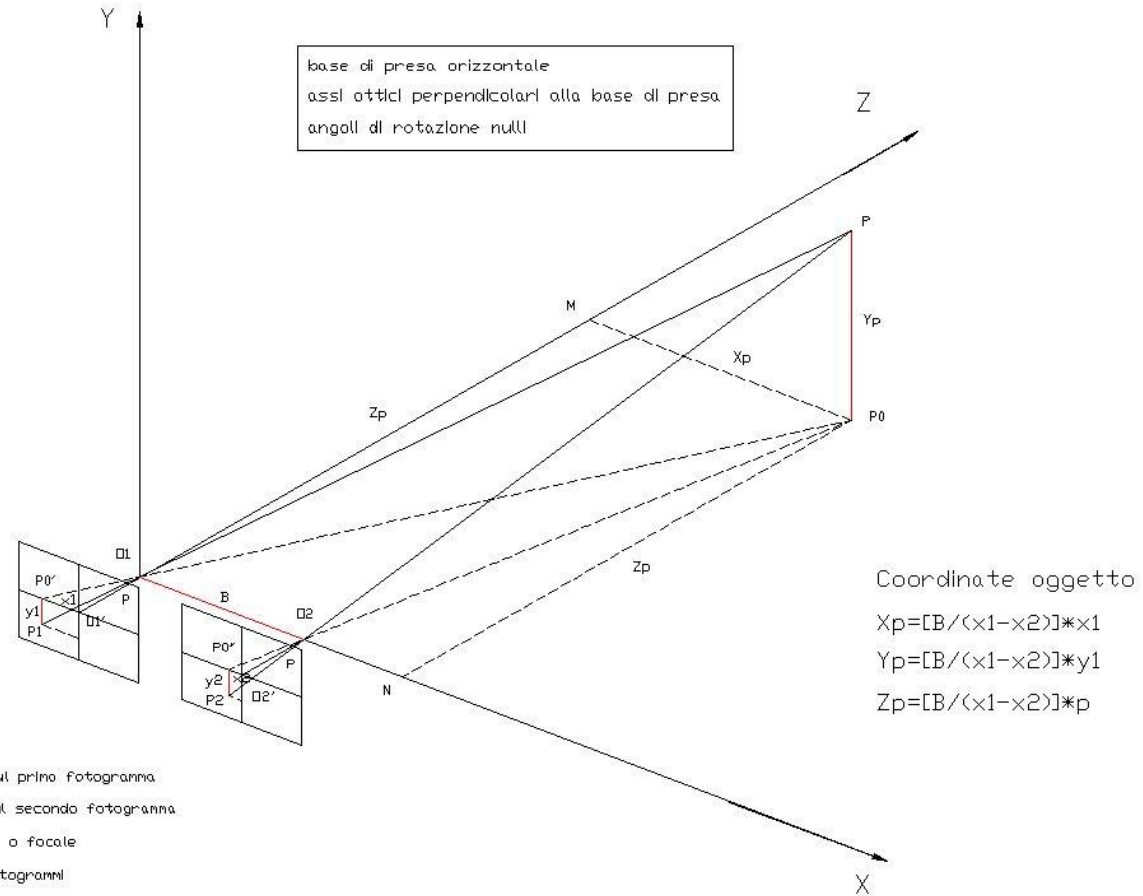
In pratica lo stereorestitutore supporta i due fotogrammi che costituiscono la coppia stereoscopica, situandoli in posizione tale da consentire la relativa osservazione stereoscopica e la misurazione delle coordinate x_1 e y_1 , relativi al primo fotogramma, e x_2 e y_2 , relativi al secondo fotogramma, di uno stesso punto P_i .

I programmi applicativi consentono poi la determinazione analitica delle coordinate assolute del punto, supportata dalla rappresentazione grafica sul monitor e dalla memorizzazione del file di restituzione per una successiva editazione, correzione ed integrazione con programmi CAD.



Relazioni analitiche tra coordinate lastra e coordinate oggetto nella presa fotogrammetrica normale

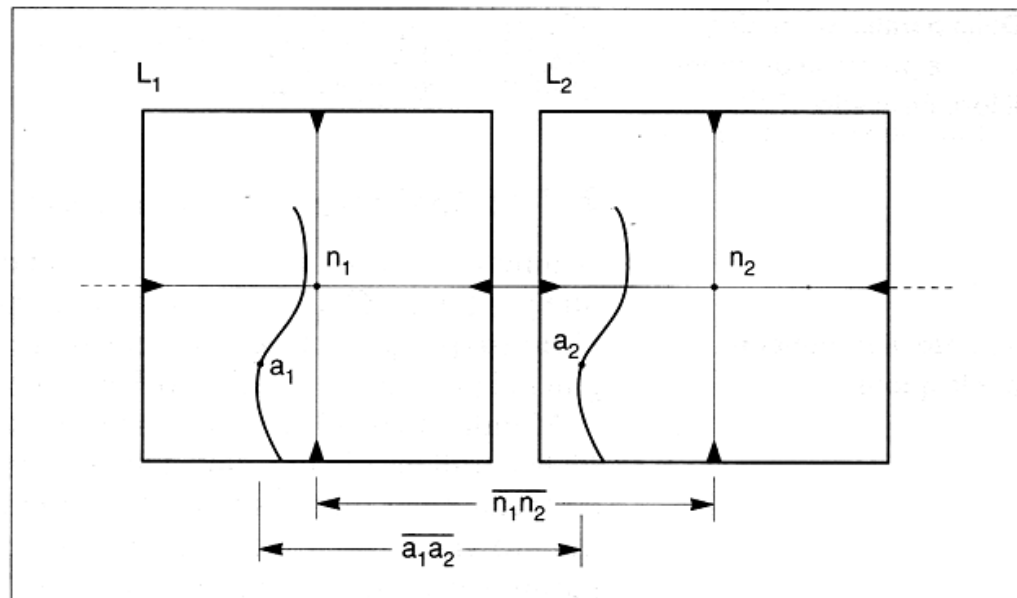
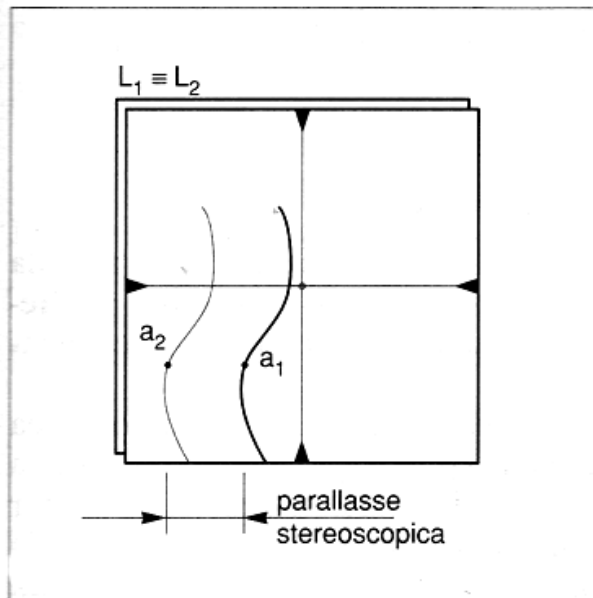
SCHEMA DI PRESA FOTOGRAMMETRICA NORMALE



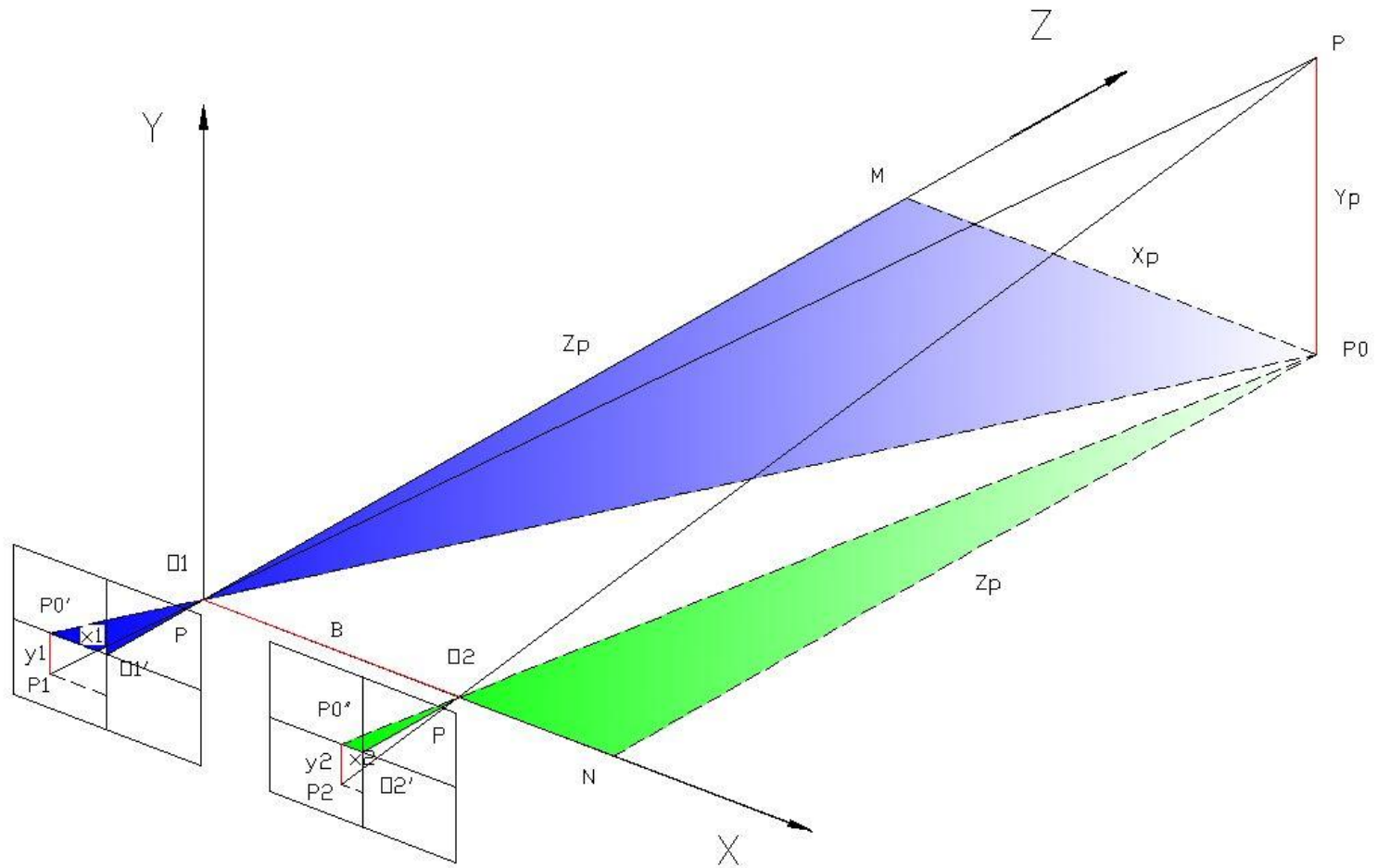
- x1 e y1 coordinate di P sul primo fotogramma
- x2 e y2 coordinate di P sul secondo fotogramma
- p distanza principale o focale
- B base tra i due fotogrammi
- x1-x2 parallasse stereoscopica fra le due immagini dello stesso punto

Posto

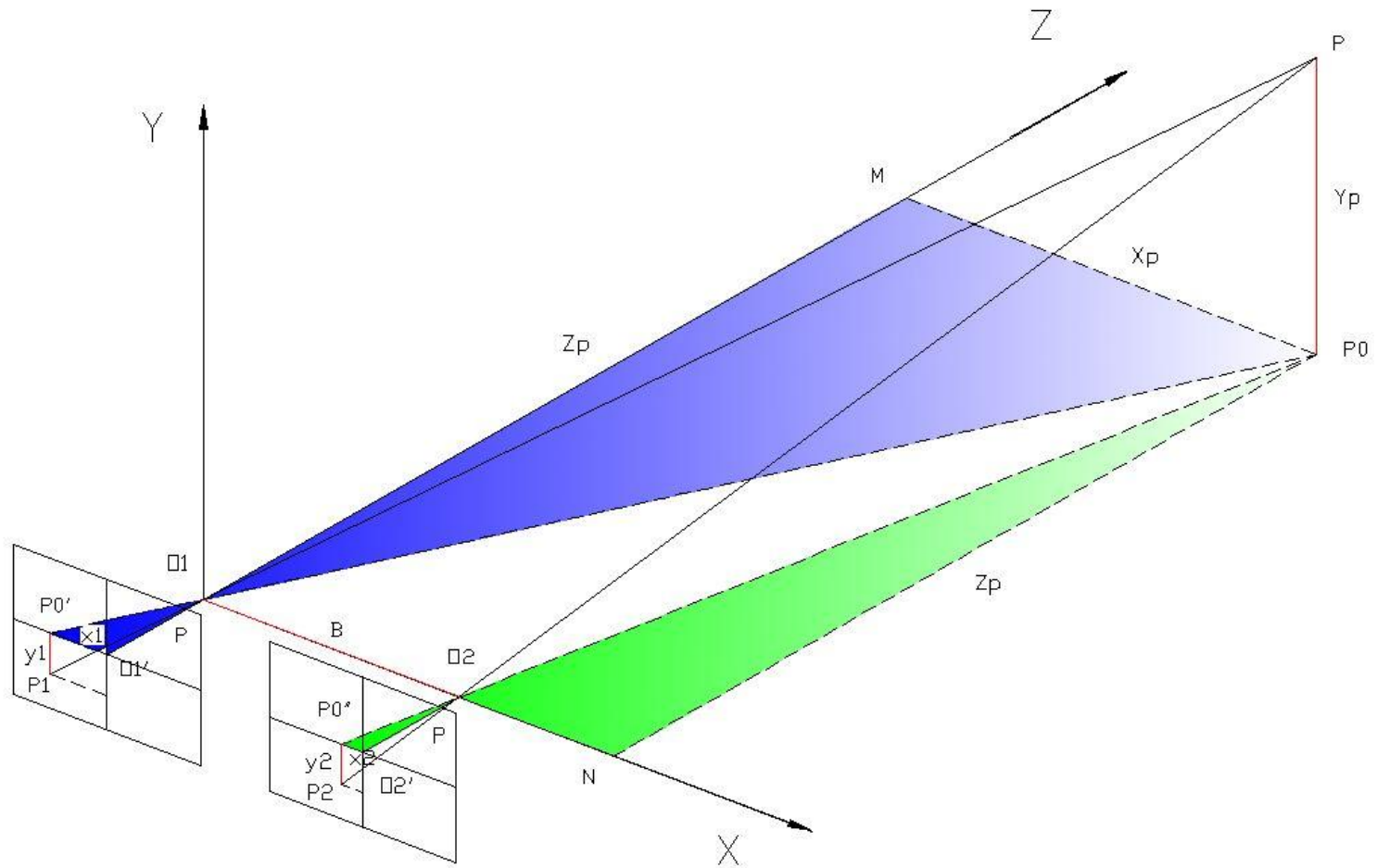
$x_1 - x_2$ = parallasse stereoscopica tra le due immagini dello stesso punto



Dai triangoli simili (in violetto) $O_1 M P_0$ e $O_1 O_1' P_0'$ si ha:
 $X_p/x_1 = Z_p/P$ da cui
 $X_p = Z_p (x_1/P)$



Dai triangoli simili (in verde) $O_2 N P_0$ e $O_2 O_2' P_0''$ si ha:
 $O_2 N / Z_p = x_2 / P$ da cui
 $O_2 N = Z_p (x_2 / P)$ ovvero $X_p - B = Z_p (x_2 / P)$



Sottraendo membro a membro le relazioni precedentemente determinate

$$X_p = Z_p (x_1/P)$$

$$X_p - B = Z_p (x_2/P)$$

Si ha:

$$X_p - X_p + B = (Z_p/P) (x_1 - x_2)$$

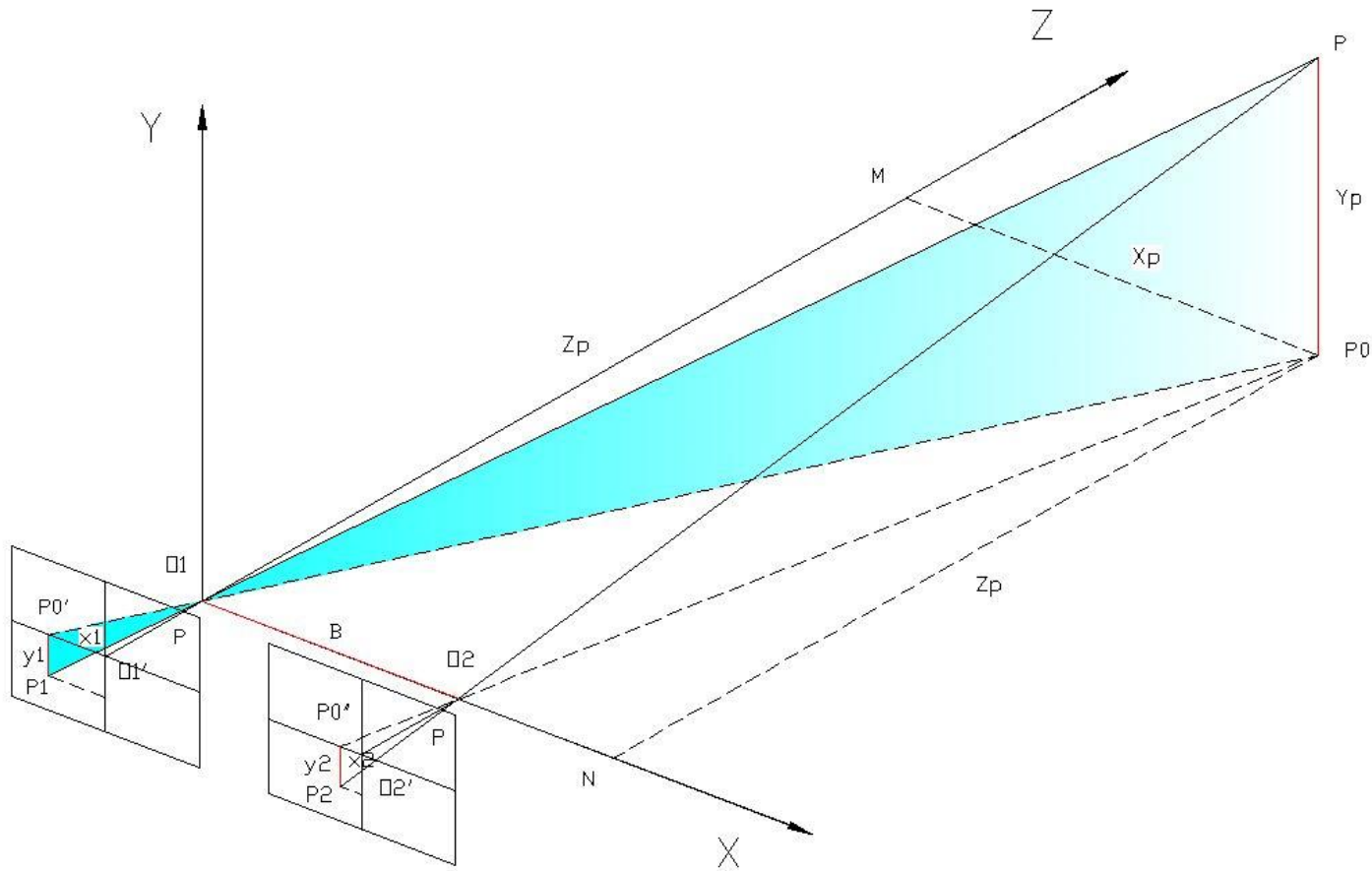
Ovvero

$$Z_p = [B/(x_1 - x_2)] * P$$

E quindi sostituendo

$$X_p = [B/(x_1 - x_2)] * x_1$$

Dai triangoli simili $O_1 P_0 P$ e $O_1 P_0' P_1$ si ha:
 $Y_p/y_1 = O_1 P_0 / O_1 P_0'$ ma essendo
 $O_1 P_0 / O_1 P_0' = Z_p / P$ ovvero $Y_p/y_1 = Z_p/P$



E quindi

$$Y_p = (Z_p/P) * y_1$$

e sostituendo a Z_p la relazione già determinata

$$Z_p = [B/(x_1 - x_2)] * P$$

Si ottiene

$$Y_p = [B/(x_1 - x_2)] * y_1$$

Riassumendo le relazioni che legano le coordinate lastra alle coordinate oggetto risultano in definitiva:

$$\mathbf{X_p = [B/(x_1 - x_2)] * x_1}$$

$$\mathbf{Y_p = [B/(x_1 - x_2)] * y_1}$$

$$\mathbf{Z_p = [B/(x_1 - x_2)] * P}$$

La restituzione digitale è concettualmente simile a quella analitica ma i fotogrammi sono sostituiti da immagini digitali e l'osservazione stereoscopica avviene attraverso un monitor e degli occhiali a cristalli liquidi polarizzati, pilotati da un dispositivo montato sullo stesso monitor, in modo tale da ogni occhio sia visibile una sola delle due immagini, ottenendo così la visione tridimensionale dell'oggetto osservato.



Fig. 4.6.3