

5-Elementi di Fotogrammetria aerea

PREMESSA

La **Fotogrammetria** è passata dall'analogico (fase durata quasi un secolo), alla fase analitica (quasi due decenni), alla fase digitale attuale. In particolare gli ultimi sviluppi sono stati celeri ed impetuosi ed hanno modificato sostanzialmente strumentazioni e metodologie, specialmente nell'elaborazione ed utilizzazione dei dati (l'acquisizione è rimasta sostanzialmente invariata , ma con camere aeree digitali e ricche di accessori elettronici) .

Nel campo della realizzazione di cartografie, si ricorda che ha sostituito i procedimenti topografici tradizionali, per una serie di motivi : maggiore rapidità di esecuzione, indipendenza dalle condizioni atmosferiche limitative nel “lavoro di campagna”, maggiore oggettività nelle operazioni di rilievo.

Le pagine-schede di lezione riguardano in particolare la *Fotogrammetria aerea*, utilizzata nei processi cartografici. Ma è necessario ricordare anche la *Fotogrammetria terrestre*, in cui le operazioni di presa dei fotogrammi avvengono con strumenti situati a contatto della superficie terrestre o a poca distanza da essa. Si tratta della “close-range Photogrammetry” o Fotogrammetria del vicino, che riguarda i rilievi di piccoli oggetti, i rilievi di monumenti (archeologici e architettonici), i rilievi così detti industriali (impianti, carrozzerie, ecc.). Anche se i principi teorici sono gli stessi della fotogrammetria aerea, occorre tenere conto di differenti fattori operativi e di strumentazioni anche differenti (le camere da presa in particolare).

Oggi sono comparse strumentazioni speciali, più vicine a quelle topografiche, che creano una particolare concorrenza alle strumentazioni fotogrammetriche tradizionali di rilievo: si tratta degli **strumenti laser- scanner** , più vicini concettualmente ai distanziometri ad onde elettromagnetiche, che inviano e ricevono treni di onde laser che permettono, dalle misure di distanze, l'acquisizione di nuvole di dati (punti) la cui elaborazione per mette il rilievo di manufatti e superfici varie. Esistono strumenti sia per l'uso da terra ma anche dall'alto, cioè aereotrasportati.

5-Indice di Fotogrammetria

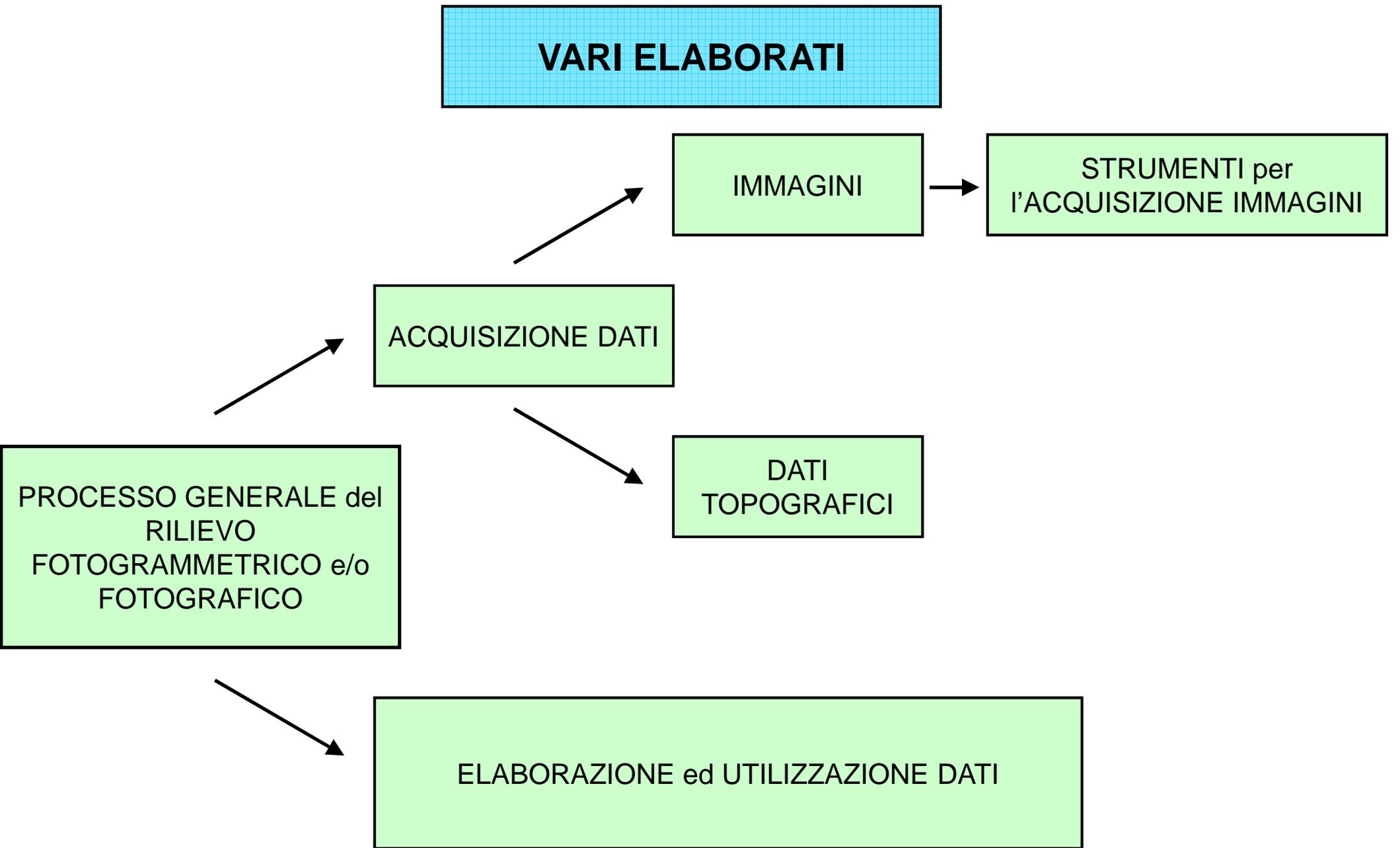
• Definizioni, elaborati, incidenze percentuali	4
• Equazioni fondamentali	9
• Voli, presa dei fotogrammi, calcolo della base	12
• Rapporti tra scala dei fotogrammi e scala della carta	16
• Intervallo di scatto. trascinamento e operazioni di appoggio topografico	18
• Elementi di ottica geometrica (lenti)	20
• Distorsioni pellicola	28
• Principi del raddrizzamento	31
• Strumentazioni di presa e di restituzione (analogiche, analitiche, digitali)	34
• Cenni alla fotogrammetria terrestre e/o del vicino (esempi di camere)	40
• Stazioni di lavoro	42
• Laser scanner : principi di funzionamento, caratteristiche e prestazioni.	44

DEFINIZIONE

Dopo l'invenzione della fotografia (~nel 1839), si pensò di sostituire il rilievo per punti sul terreno con una tecnica basata su essa che fornisse, in qualche modo, la prospettiva della zona da rilevare. Nasce così l'idea della *fotogrammetria*, cioè di una tecnica in cui i dati di campagna vengono rilevati con una macchina fotografica invece che con un goniometro.

Un *fotogramma* è una speciale fotografia (dunque una prospettiva centrale) su cui è possibile eseguire misure riferendole ad un sistema di assi cartesiani, ottenuti congiungendo le immagini delle *marche visibili sui negativi*. Queste misure (coordinate lastra) permettono la ricostruzione analitica tridimensionale dell'oggetto fotografato (terreno, manufatti, ecc.).

Uno strumento semplice ma fondamentale della fotogrammetria è lo *stereoscopio* che è una macchina che consente ad un osservatore la visione tridimensionale di un oggetto (o del terreno), attraverso l'osservazione di due fotografie che rappresentano lo stesso oggetto, riprese da due diversi punti di vista, in modo che ciascun occhio possa vedere una sola delle due fotografie. L'osservazione stereoscopica ne permetterà, con metodi e strumenti opportuni, la descrizione geometrica.



INCIDENZE PERCENTUALI in un'ANALISI COSTI di un RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

➤	Progettazione del rilievo	3 %
➤	Esecuzione riprese fotogrammetriche	15 %
➤	Sviluppo e stampa su pellicola e carta ed eventuali ingrandimenti	3 %
➤	Operazioni topografiche di appoggio e calcolo	20 %
➤	Operazioni di restituzione e disegno	46 %
➤	Operazioni di completamento e controllo sul terreno e disegno finale	10 %
➤	Operazioni di collaudo	3 %

SCHEMA di RIPRESA FOTOGRAMMETRICA AEREA

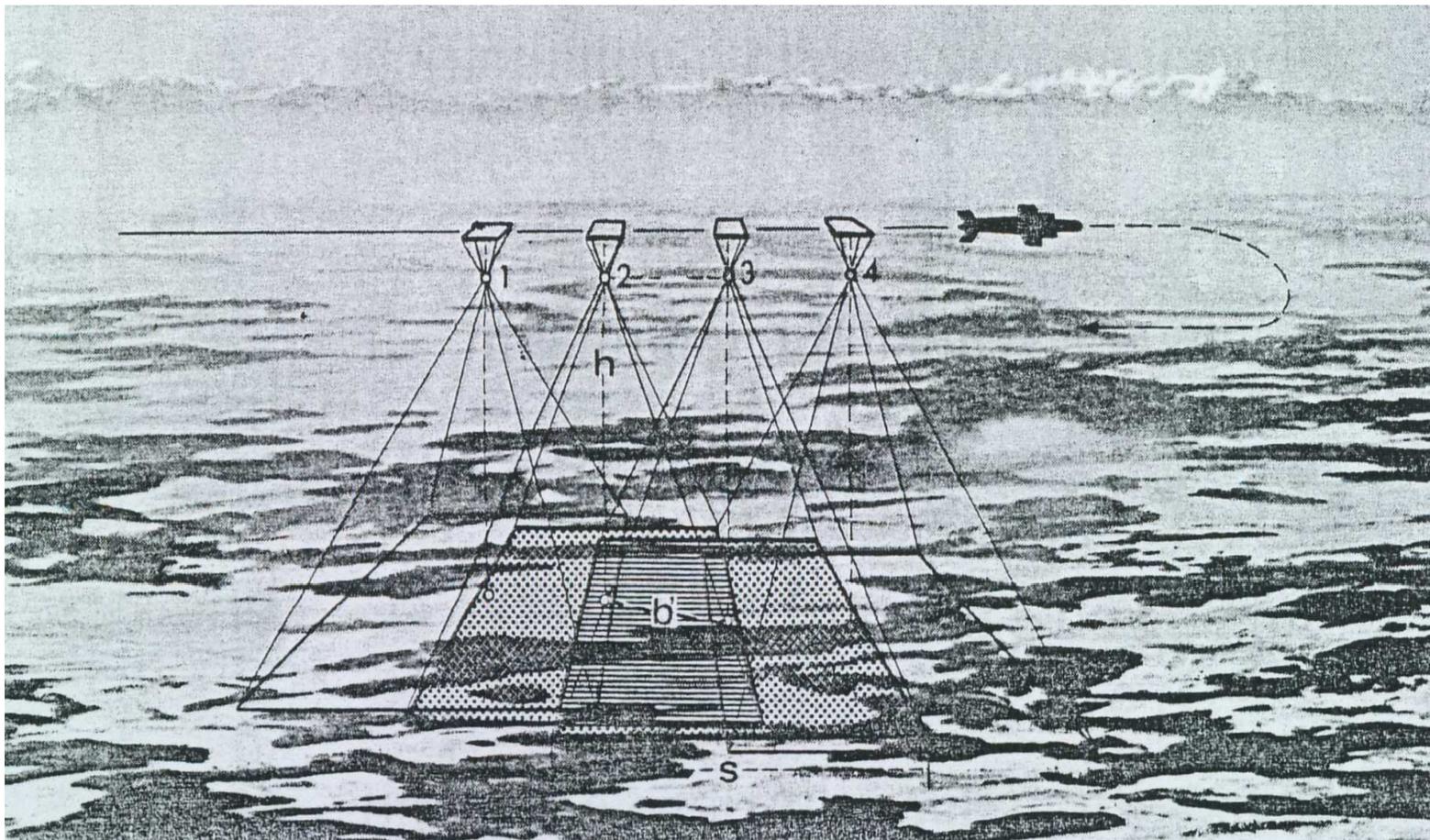
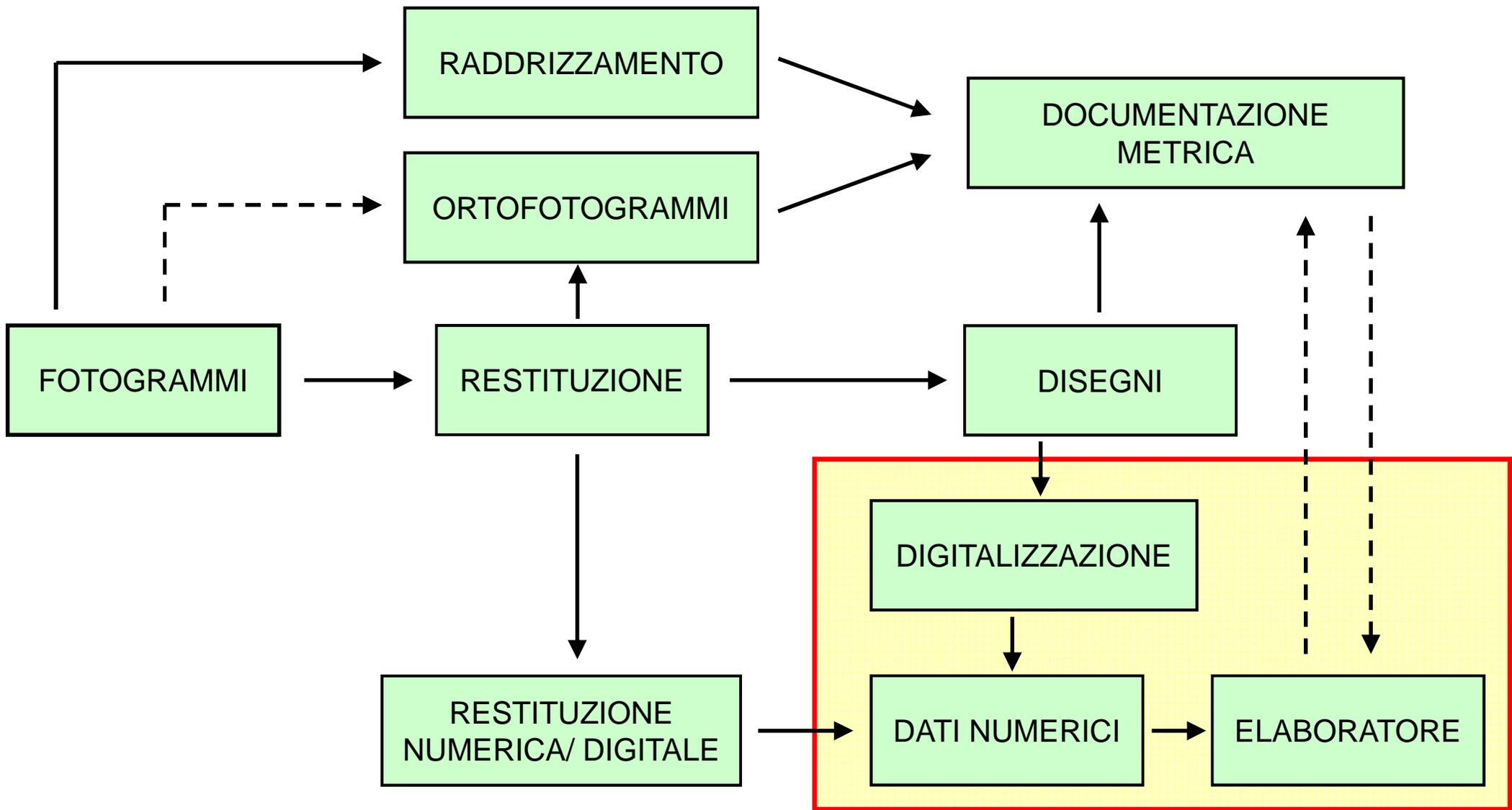


FIG.1

ELABORAZIONI



EQUAZIONI FONDAMENTALI della FOTOGRAMMETRIA

COLLINEARITÀ

$$\vec{OI} = \lambda \cdot \vec{OP} \quad \text{con } \lambda < 1$$

componenti di \vec{OP} rispetto a T:

$$(X_P - X_O; Y_P - Y_O; Z_P - Z_O)$$

componenti di \vec{OI} rispetto a T:

$$(U_x; U_y; U_z)$$

componenti di \vec{OI} rispetto a O:

$$(x, y, z)$$

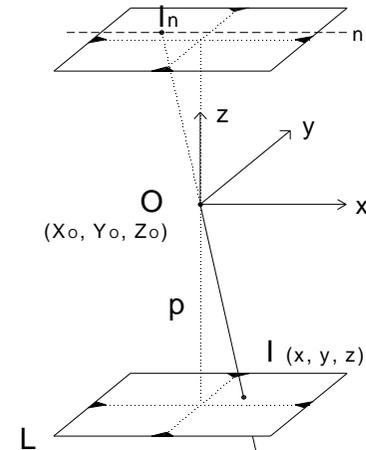
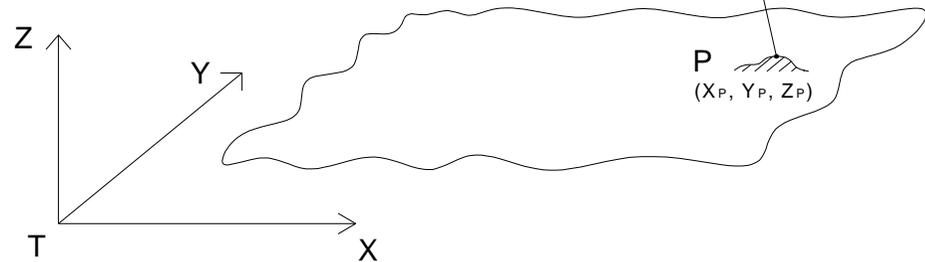


FIG.2



Quindi si può scrivere:

$$\begin{cases} U_x = \lambda \cdot (X_P - X_O) \\ U_y = \lambda \cdot (Y_P - Y_O) \\ U_z = \lambda \cdot (Z_P - Z_O) \end{cases}$$

Ma, in funzione dei coseni direttori, si ha:

$$\begin{cases} U_x = x \cos(xX) + y \cos(yX) + p \cos(zX) = \lambda(X_P - X_O) \\ U_y = x \cos(xY) + y \cos(yY) + p \cos(zY) = \lambda(Y_P - Y_O) \\ U_z = x \cos(xZ) + y \cos(yZ) + p \cos(zZ) = \lambda(Z_P - Z_O) \end{cases}$$

Facendo il rapporto tra prima e terza equazione e fra seconda e terza si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{X_P - X_O}{Z_P - Z_O} = \frac{x \cos(xX) + y \cos(yX) + p \cos(zX)}{x \cos(xZ) + y \cos(yZ) + p \cos(zZ)} \\ \frac{Y_P - Y_O}{Z_P - Z_O} = \frac{x \cos(xY) + y \cos(yY) + p \cos(zY)}{x \cos(xZ) + y \cos(yZ) + p \cos(zZ)} \end{cases}$$

I VOLI FOTOGRAMMETRICI

I voli fotogrammetrici per l'acquisizione delle immagini vanno programmati accuratamente tenendo conto di vari fattori fra i quali:

- Presa dei fotogrammi: funzione dell'intervallo di scatto
- Quota di volo: fissata la **scala dei fotogrammi**, la quota di volo viene calcolata a mezzo di un' opportuna formula nella quale H è l'altezza del volo rispetto al terreno. Poiché l'altimetro indica la quota di volo sul livello del mare, alla quantità H deve esser sommata la quota media del territorio sorvolato.
- Intervallo di scatto: dato che le foto contigue di una strisciata devono sovrapporsi almeno per il 60% (overlap), l'otturatore della camera, dovrà aprirsi ad intervalli regolari la cui durata è funzione dell'overlap, della velocità dell'aereo e della quota di volo.
- Trascinamento: per quanto piccolo sia il tempo di apertura dell'otturatore, il moto dell'aereo produrrà sempre un trascinamento dell'immagine sulla foto acquisita.

CALCOLO della BASE (F. AEREA)

DATI di PROGETTO:

- Scala del fotogramma
- Dimensioni del fotogramma
- Ricoprimento longitudinale e trasversale
- Distanza principale dalla camera
- Lunghezza delle strisciate
- Larghezza del blocco di strisciate
- Velocità di volo
- Quota di volo

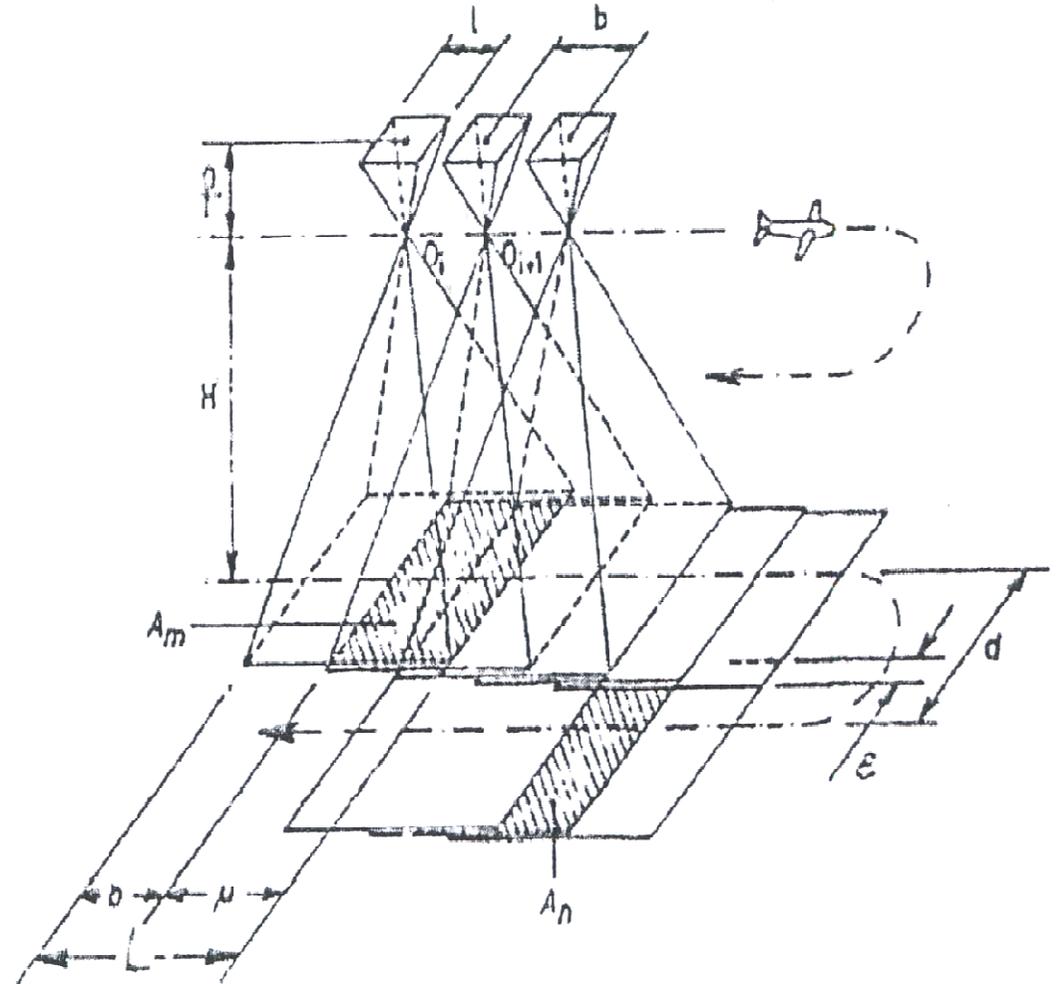


FIG.4

QUOTA di VOLO e SCALA FOTOGRAMMI

Per terreno piano e ripresa perfettamente nadirale:

$$\frac{f}{H} = \frac{l}{L} = \frac{1}{S_F}$$

f: distanza principale della camera

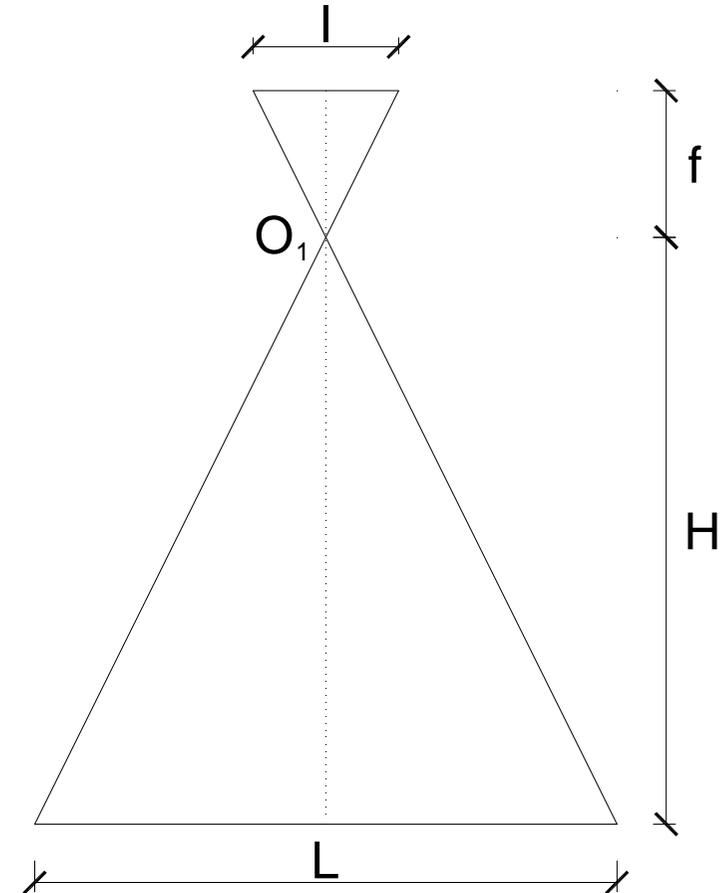
H: quota di volo

l: formato del fotogramma

L: copertura del fotogramma al suolo

$\frac{1}{S_F}$: scala del fotogramma

FIG.6



PRESA dei FOTOGRAMMI

Scala del fotogramma:

$$\frac{1}{n} = \frac{p}{H}$$

La lunghezza della base di ripresa è data da:

$$b = v \cdot t = (1 - \eta)L$$

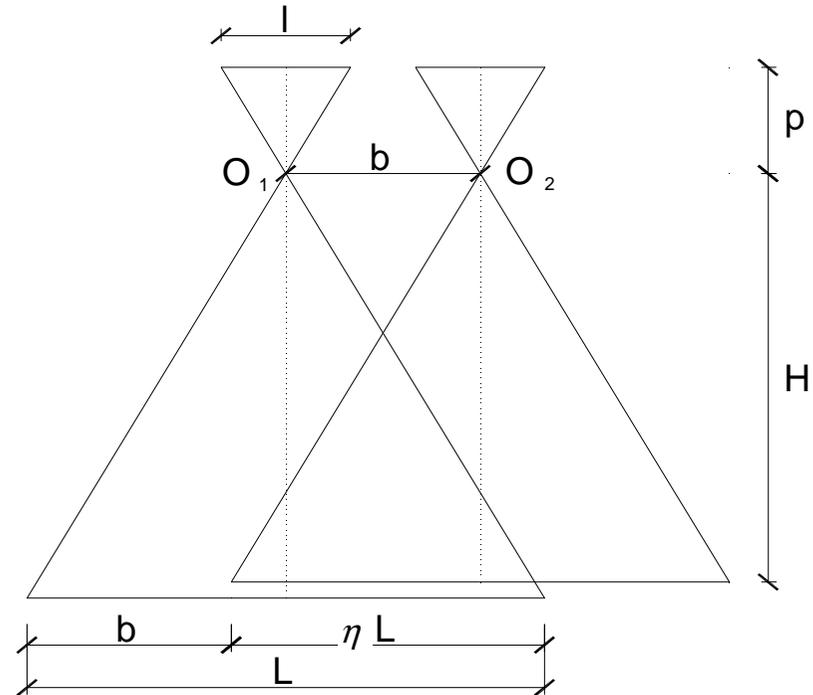
v: velocità media dell'aeromobile

η : ricoprimento longitudinale >0.6

t: intervallo di scatto così determinato:

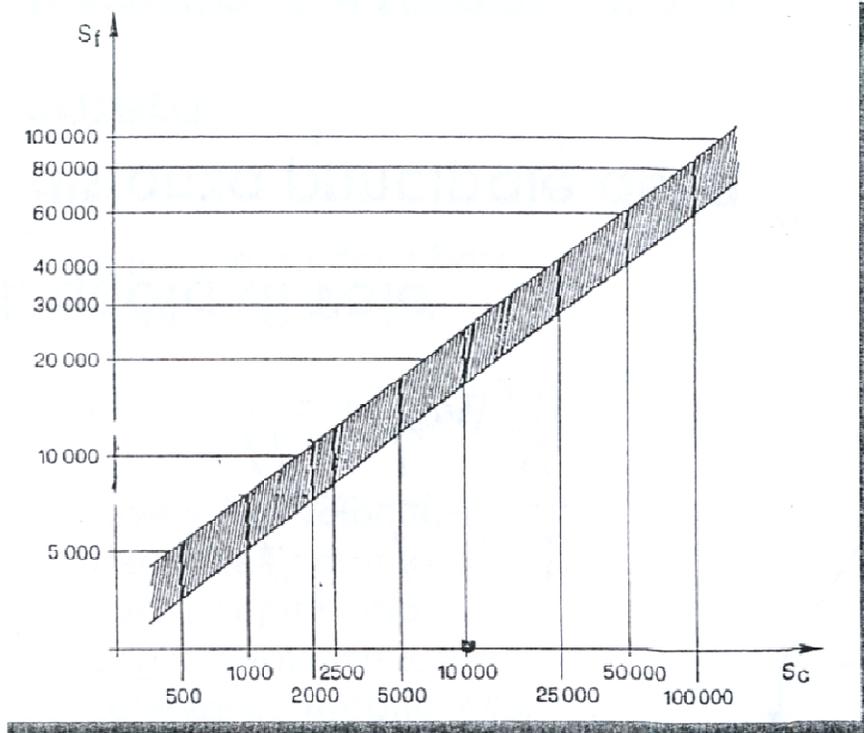
$$t = (1 - \eta) \frac{l \cdot h}{p \cdot v} = (1 - \eta) \frac{n \cdot l}{v}$$

FIG.5

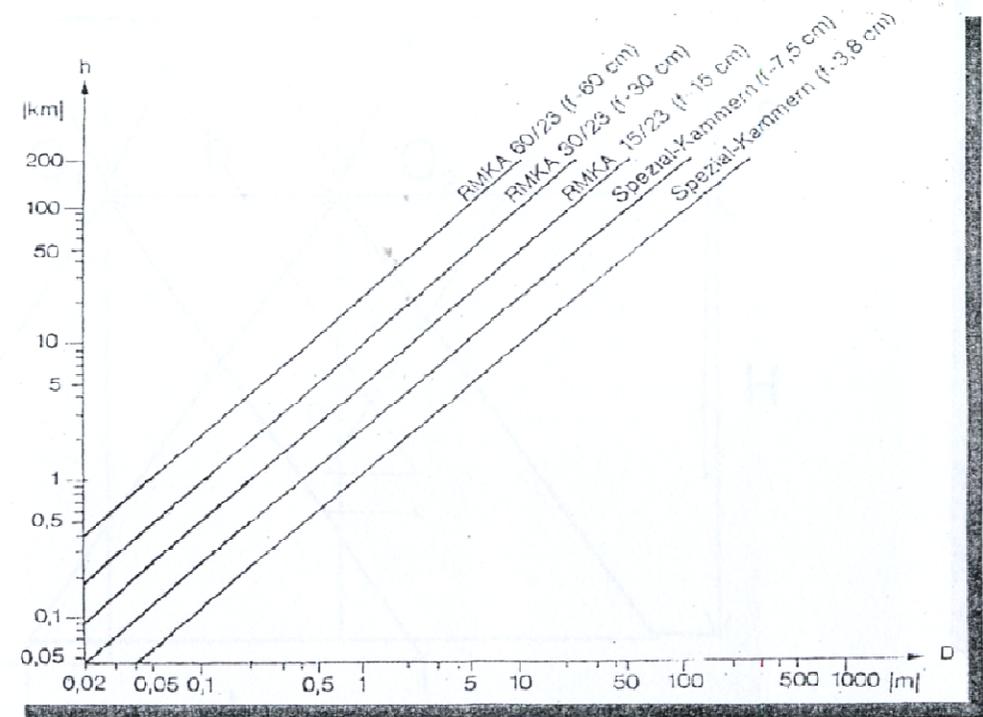


Con $\eta = 0,60$ $H = 1000m$
 $l = 0,23m$ $p = 0,15m$
 $v = 200km/h = 55m/s$ si ha $t = 11sec.$

RAPPORTI tra SCALA dei FOTOGRAMMI e della CARTA



Il riconoscimento dei dettagli sul fotogramma è legato alla scala della carta: essa determina quindi la scala del fotogramma.



Valori indicativi per la riconoscibilità dei dettagli D in dipendenza della lunghezza focale e della quota di volo H .

FIG.7

RAPPORTI PRATICI tra SCALA CARTA e SCALA MEDIA FOTOGRAMMI

SCALA CARTA	1/1.000	1/2.000	1/5.000	1/10.000	1/25.000
SCALA FOTOGRAMMI	1/3.000	1/5.000	1/12.000	1/20.000	1/35.000
	1/5.000	1/8.000	1/15.000	1/25.000	1/40.000

TRASCINAMENTO dell' IMMAGINE

Lo spostamento di un punto immagine è dato da:

$$\tau = \frac{p}{H} \cdot v \cdot t$$

O anche:

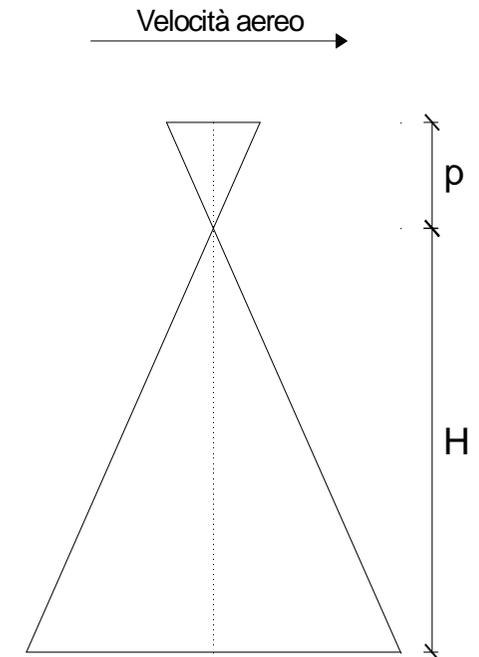
$$\tau = \frac{278 \cdot v \cdot t}{n}$$

Essendo: v = velocità dell'aereo in km/h
 t = tempo di scatto in s
 ζ = trascinamento in mm
 $\frac{1}{n}$ = Scala fotogramma

Il trascinamento non deve superare il limite di 0.02 mm

Alcune camere aeree dispongono perciò, di un dispositivo detto **FMC** (Forward motion Control) che impone alla pellicola una traslazione durante l'apertura dell'otturatore, proporzionale alla scala del fotogramma ed alla velocità.

FIG.9



$$\tau_{pratico} = \frac{150 \cdot v \cdot t}{n}$$

Operazioni di appoggio topografico.

Nelle incidenze percentuali dell'analisi dei costi, sono state citate le operazioni topografiche di appoggio.

Infatti nell'oggetto del rilievo (terreno, edifici, ecc.) è necessario avere alcuni punti di coordinate note, detti "*punti di appoggio*" (p.a.).

E' necessario vi siano *almeno 4 punti di coordinate note* per ogni modello, in posizioni opportune.

Non è quindi vero che la fotogrammetria non richieda di effettuare operazioni di campagna, anzi seppure siano esse brevi, ricoprono un ruolo fondamentale (orientamento assoluto) .

Si può ricorrere, in certi casi, ad operazioni di "*triangolazione aerea*" nel caso di blocchi numerosi di fotogrammi, per risolvere problemi di carenza di punti di appoggio, utilizzando programmi di calcolo appositi (questi programmi vengono di solito usati in fotogrammetria aerea, nella formazione di cartografia e per zone di difficile accesso).

Si aggiungono, per una più completa comprensione , alcuni

elementi di OTTICA GEOMETRICA

1-Principali aberrazioni delle lenti

Aberrazione di Sfericità: Caustica

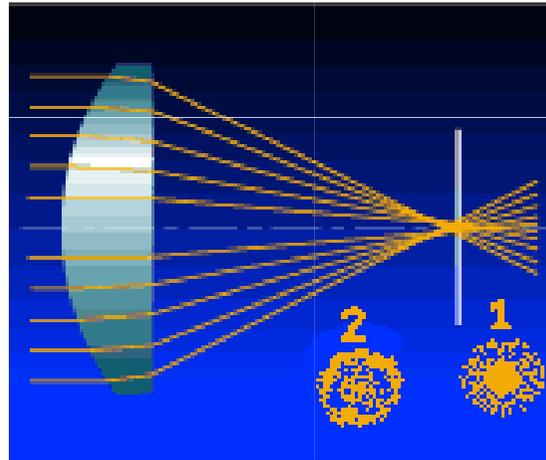


FIG.10

I raggi paralleli all'asse, invece di convergere in unico punto, incontrano l'asse nei punti di un segmento e involuppano una superficie C detta caustica. La sezione fatta in 1 è un disco luminoso al centro e sfumato alla periferia (fig.10). Nella sezione 2 si ha invece una corona luminosa, sfumata verso il centro.

Nella figura, l'apertura della lente è molto grande e quindi la caustica molto accentuata.

Coma

Quando il fascio di raggi incidenti non è parallelo all'asse, i raggi rifratti non inviluppano più una superficie simmetrica come la caustica, ma una superficie distorta, la cui sezione con un piano ha forme diverse tra cui una, (quella rappresentata in figura 11), a forma di virgola (dove il nome dell'aberrazione "*coma*").

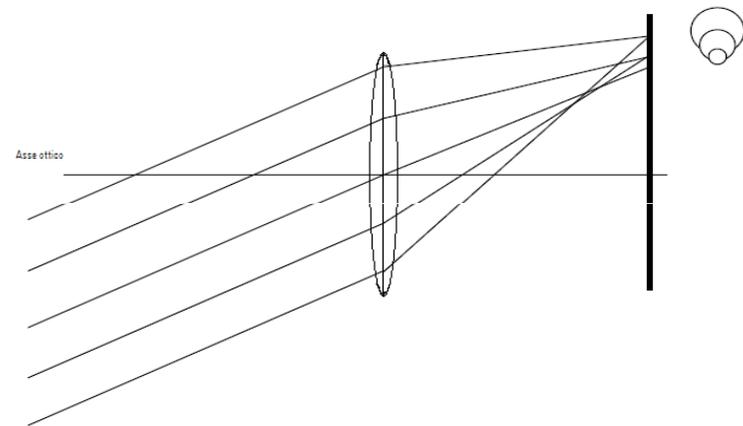
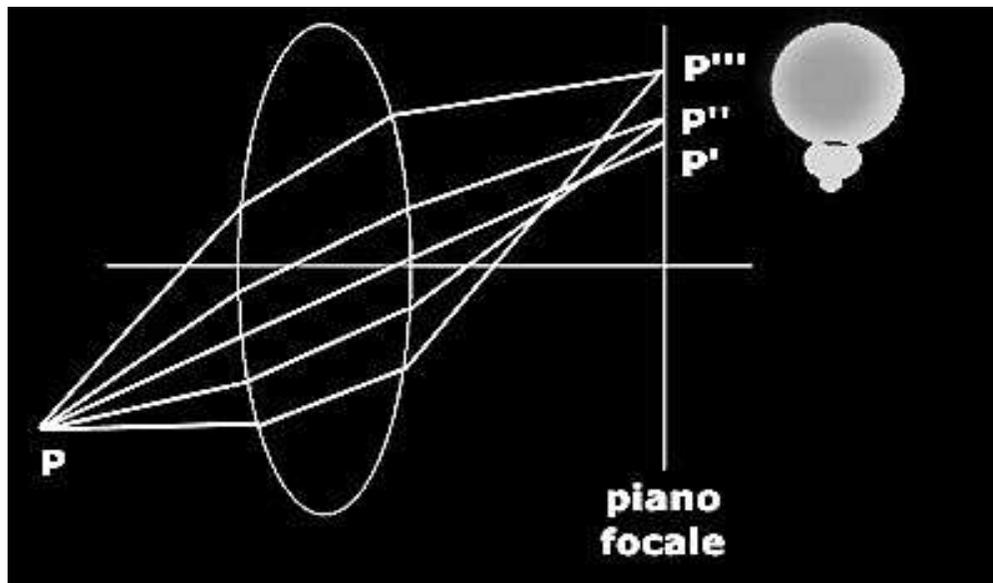


FIG.11

Aberrazione Cromatica

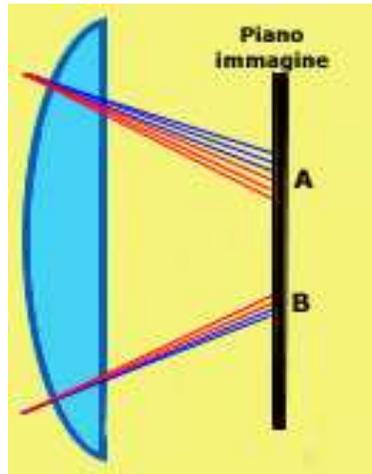
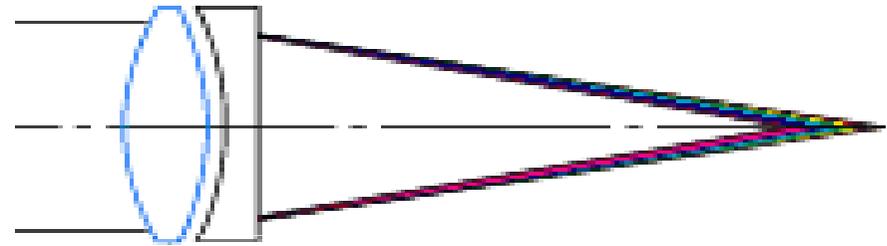
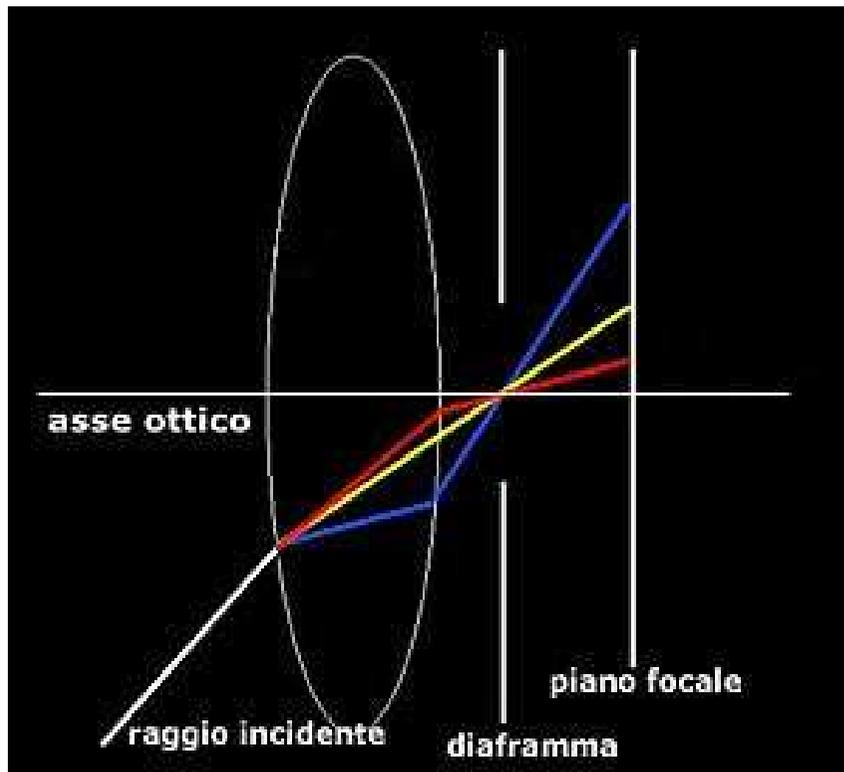


FIG.12



La luce bianca è composta da un grande numero di radiazioni di lunghezze d'onda diverse; ad ognuna di esse corrisponde un indice di rifrazione diverso. Ad ogni radiazione componente, corrisponde cioè una determinata distanza focale. Se raccogliamo quindi l'immagine di un punto luminoso su uno schermo, otteniamo un dischetto bianco in centro e colorato in periferia (fig.12). Gli obiettivi fotogrammetrici hanno aberrazione cromatica molto piccola.



Astigmatismo

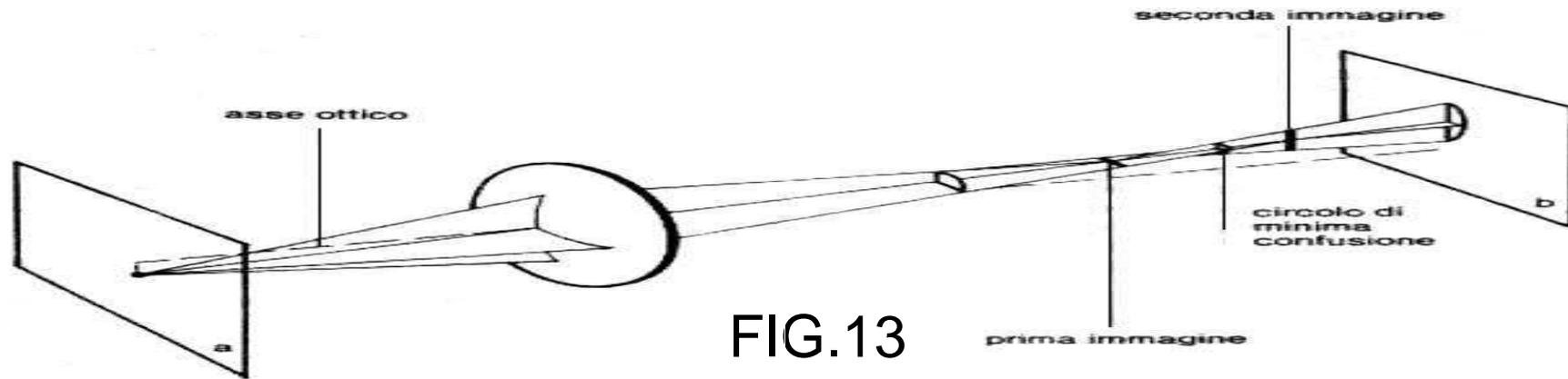
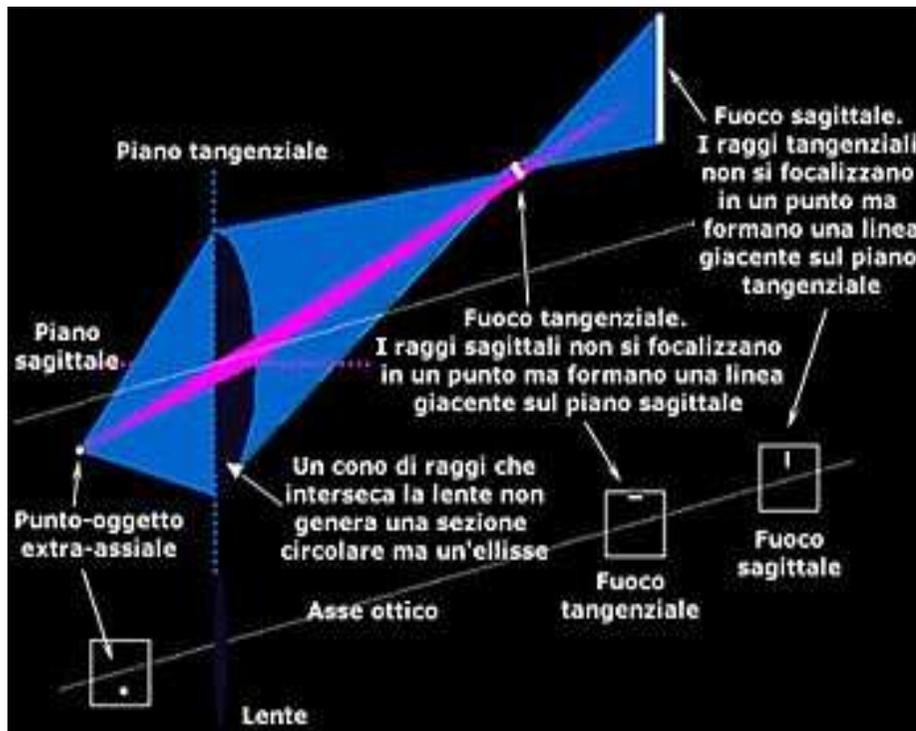
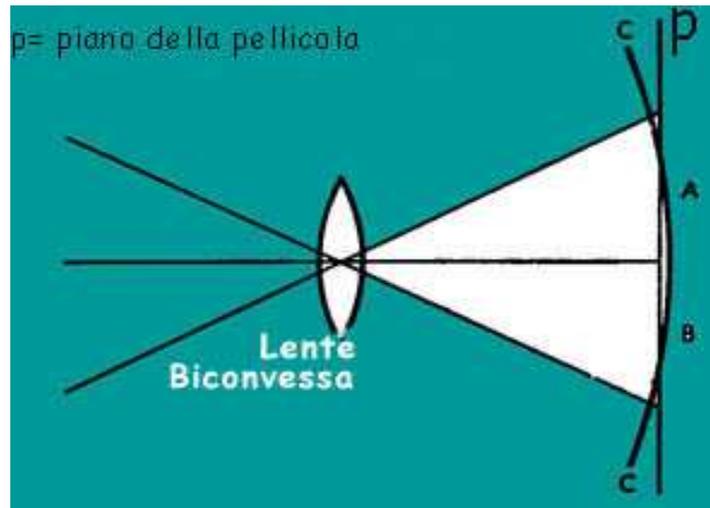


FIG.13



Difetto che si manifesta con le immagini dei punti situati fuori dell'asse, anche se si considerano pennelli luminosi di piccola apertura; come immagini, si possono osservare segmenti perpendicolari detti "immagine tangenziale" e "sagittale" rispettivamente. Tra le due immagini perpendicolari S e T si ottengono delle immagini ellittiche i cui assi variano e ruotano con continuità (fig.13).

Curvatura di Campo



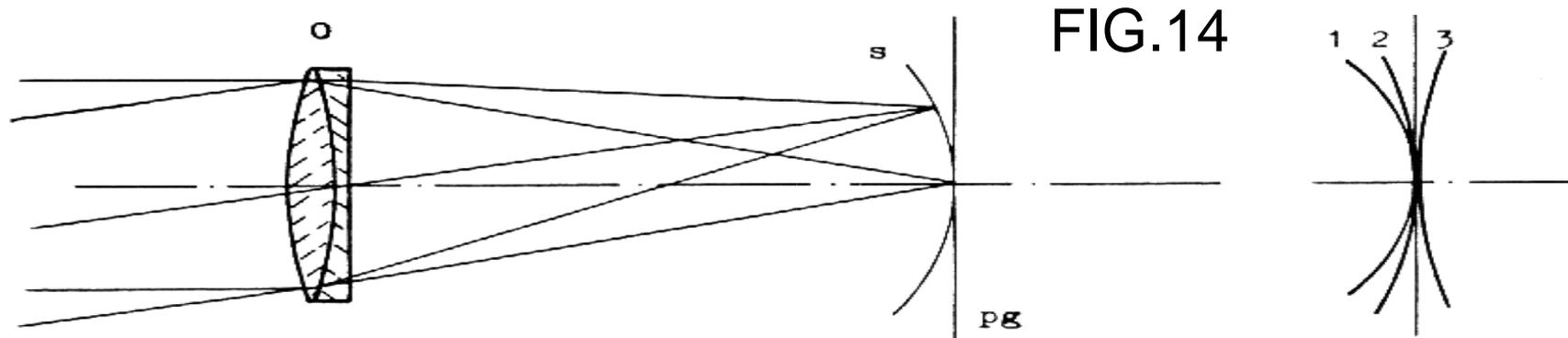
Facendo muovere il punto sopra un piano p normale all'asse, i due segmenti generano due superfici curve, a causa della curvatura di campo, denominate “superficie *sagittale*” e “*tangenziale*” (fig.14).

3: piano coniugato di a secondo la teoria gaussiana.

2: superficie sagittale.

1: superficie tangenziale.

Il fenomeno della curvatura di campo si manifesta con immagini nitide sull'asse e sfocate ai bordi

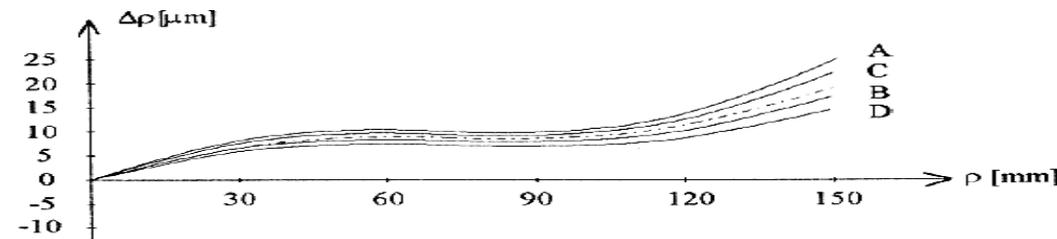
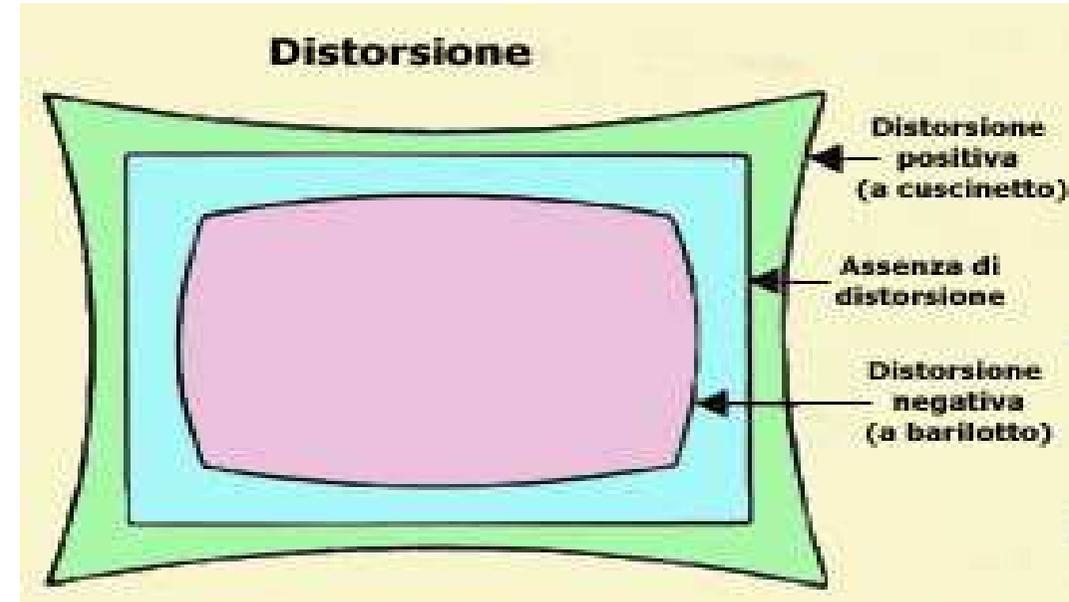




Distorsione Radiale

FIG.16

La distorsione radiale prodotta dall'obiettivo è rappresentata dalle curve A, B, C, D, calcolata sulla base della lunghezza focale equivalente gaussiana. La curva tratteggiata rappresenta una possibile calibrazione più favorevole, che richiede una piccola variazione nella lunghezza focale (che diventa così la LUNGHEZZA FOCALE CALIBRATA)



Distorsione Tangenziale

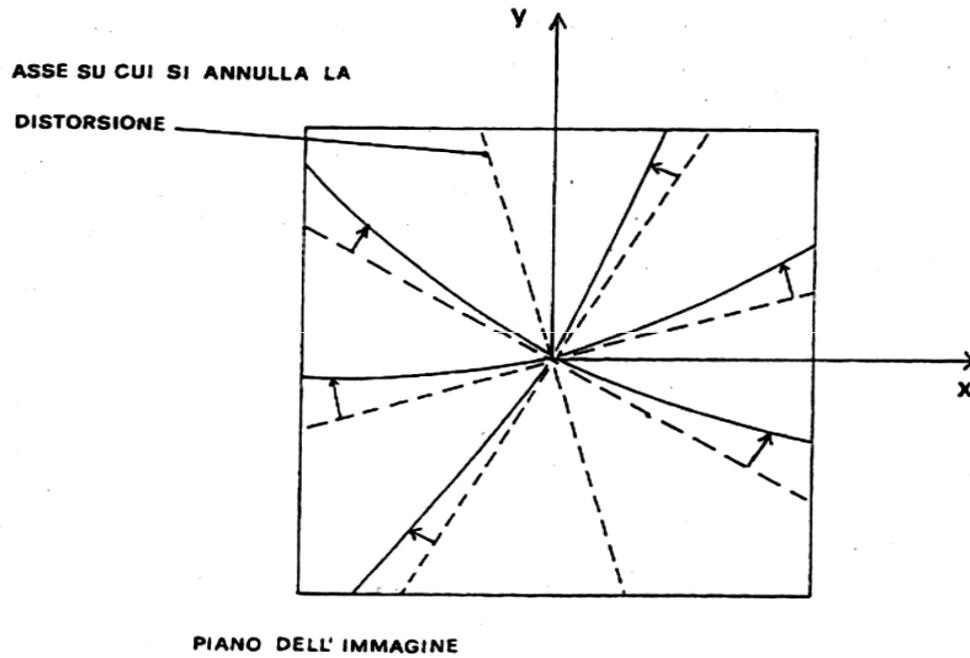
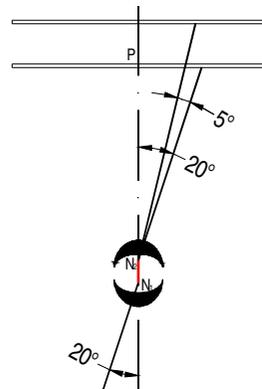
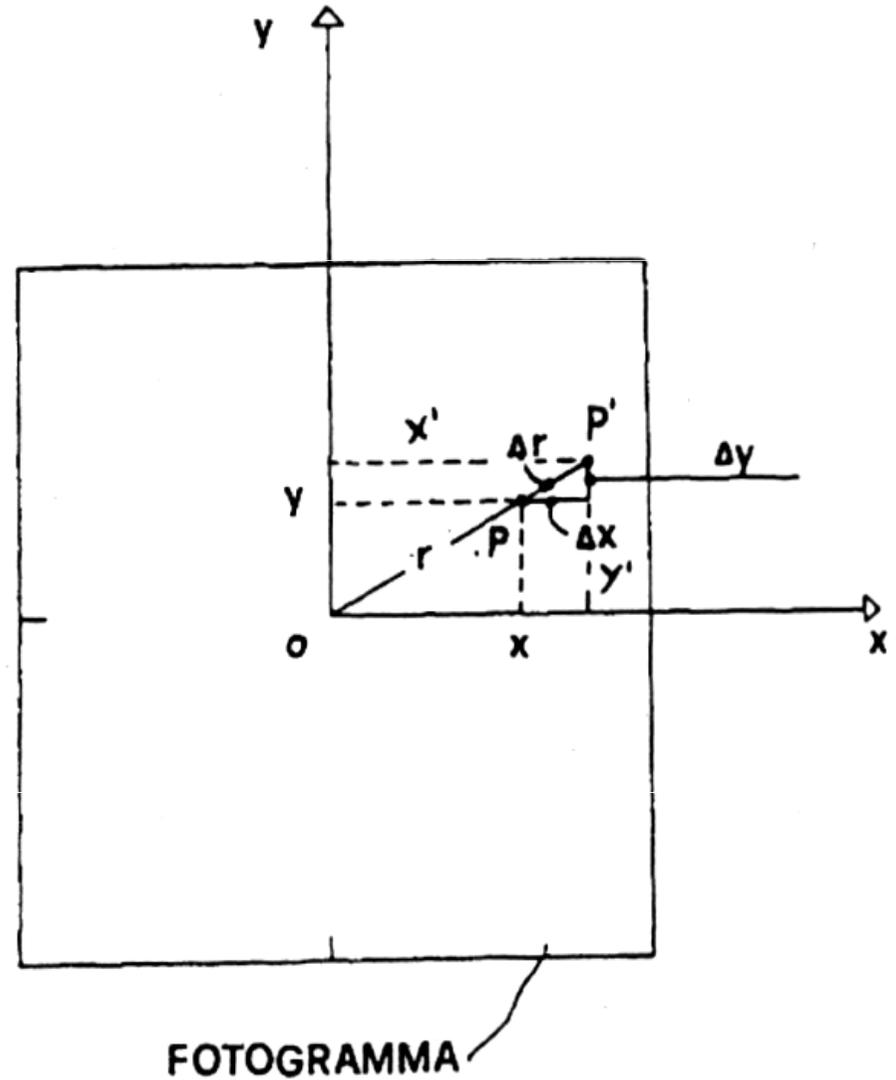


FIG. 17



sezione
(Annullamento con spostamento lastra)

2- Distorsione della Pellicola

Il film, supporto dell'emulsione, è soggetto a variazioni dimensionali che sono funzione del tipo di film, della temperatura, dell'umidità e del trattamento del film durante il processo di sviluppo.

Vari tipi di distorsione della Pellicola

Si distinguono due tipi principali di distorsione:

- Distorsione **sistematica** del film; l'errore di scala è costante. Questo errore può raggiungere e superare lo 0,2%.
- Distorsione **irregolare** nel film; un generico punto subisce uno spostamento **ds**. Di solito ds non supera 0,01÷0,02 mm. La distorsione irregolare non viene di solito eliminata

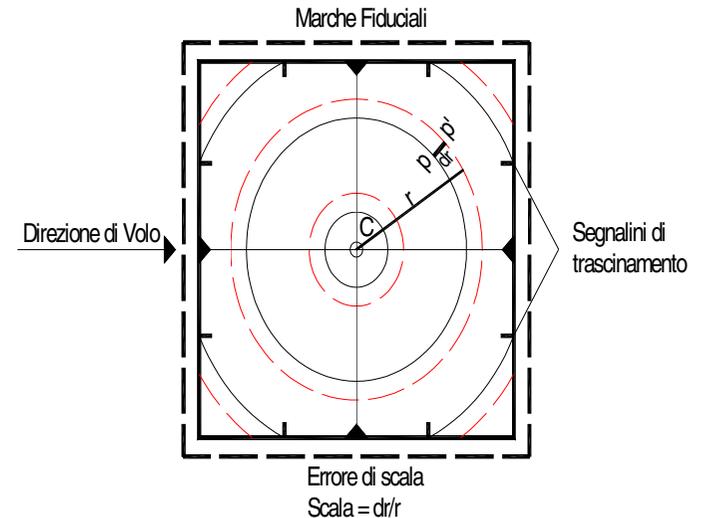


FIG. 18

3-Relazioni tra i vari elementi di una fotografia aerea

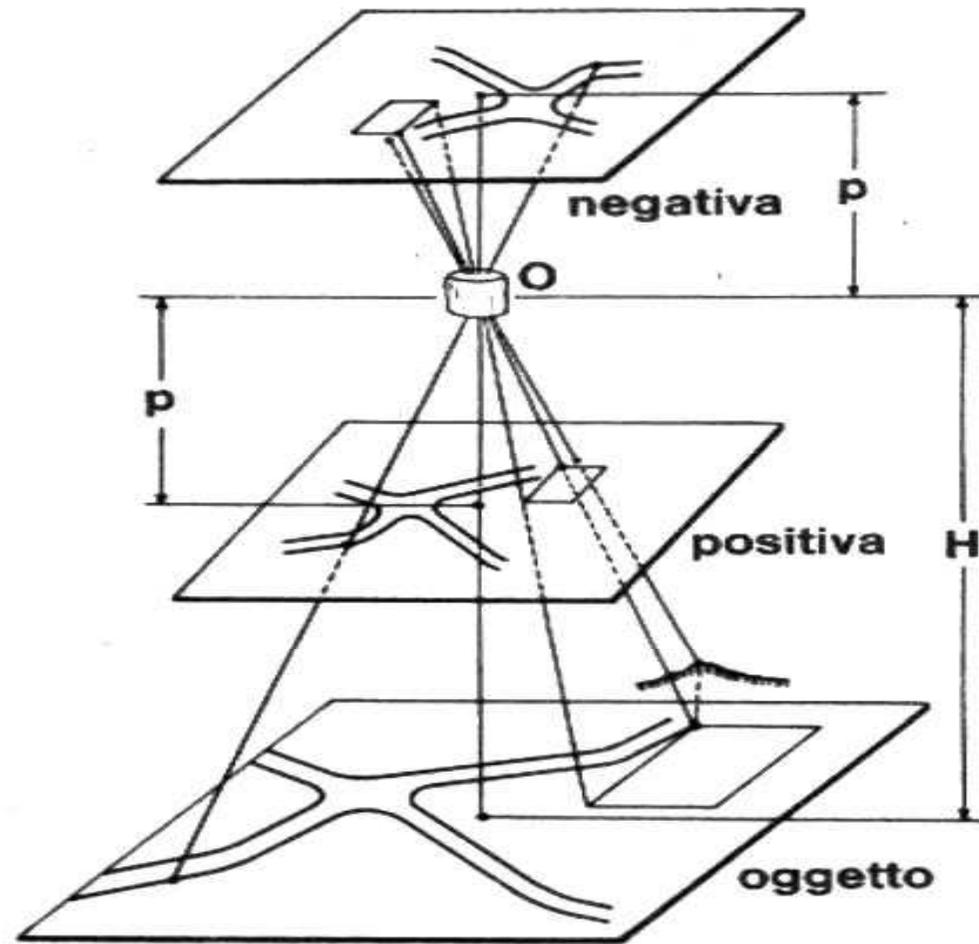
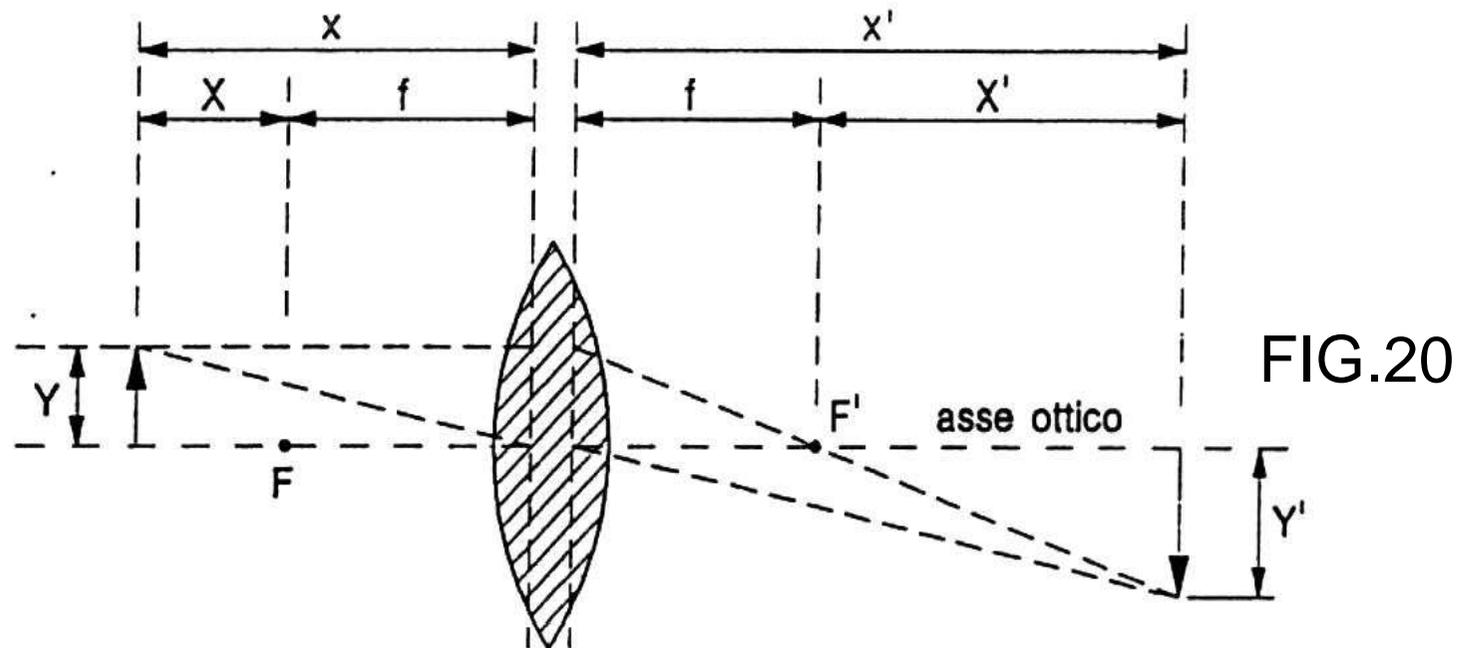


FIG.19

4-Equazioni fondamentali delle Lenti

(tenere presente la distinzione tra lenti convergenti e divergenti)



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

Equazione delle lenti

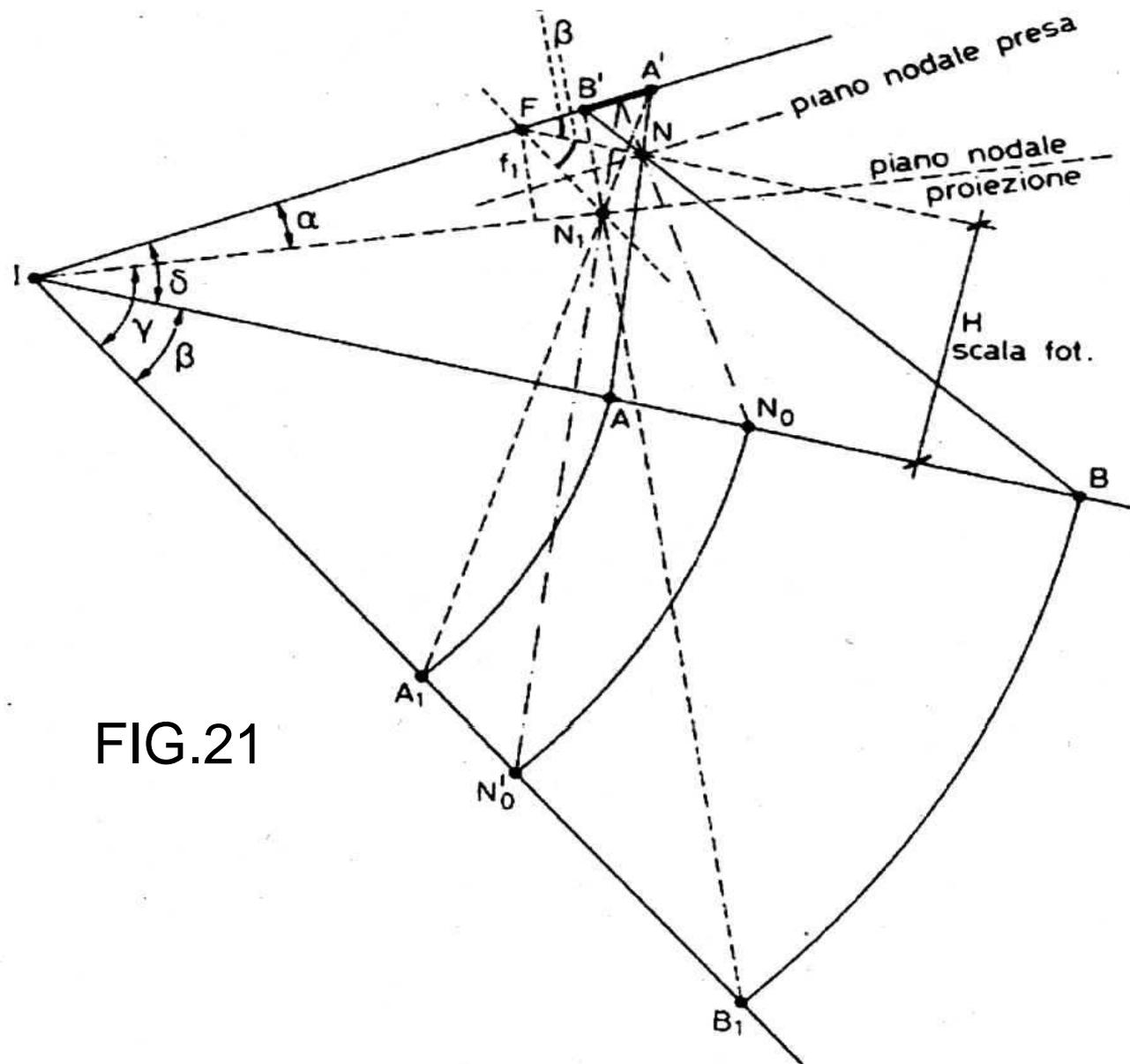
$$X \cdot X' = -f^2$$

Equazione di Newton

$$\beta = \frac{Y'}{Y} = \frac{x'}{x} = \frac{X'}{f}$$

Scala immagine

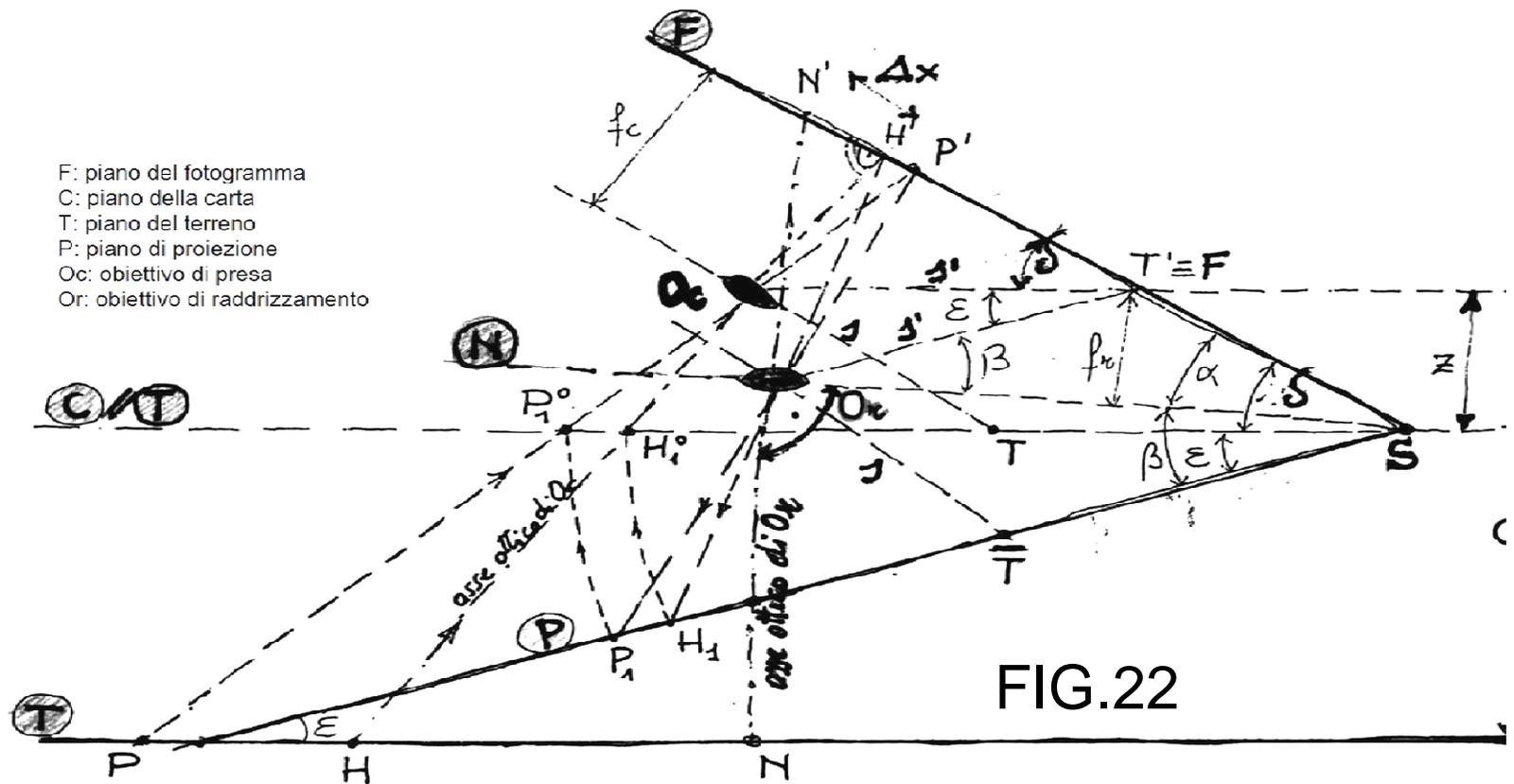
5-Relazioni geometriche nel Raddrizzamento



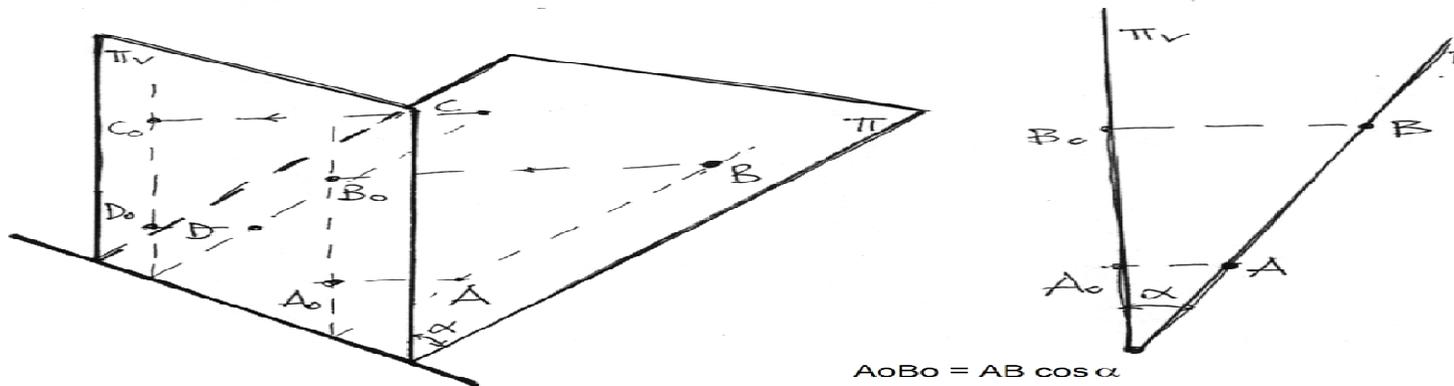
N: obiettivo di presa

N_1 : obiettivo di
raddrizzamento

FIG.21



Relazione tra piani



Errori nel Raddrizzamento

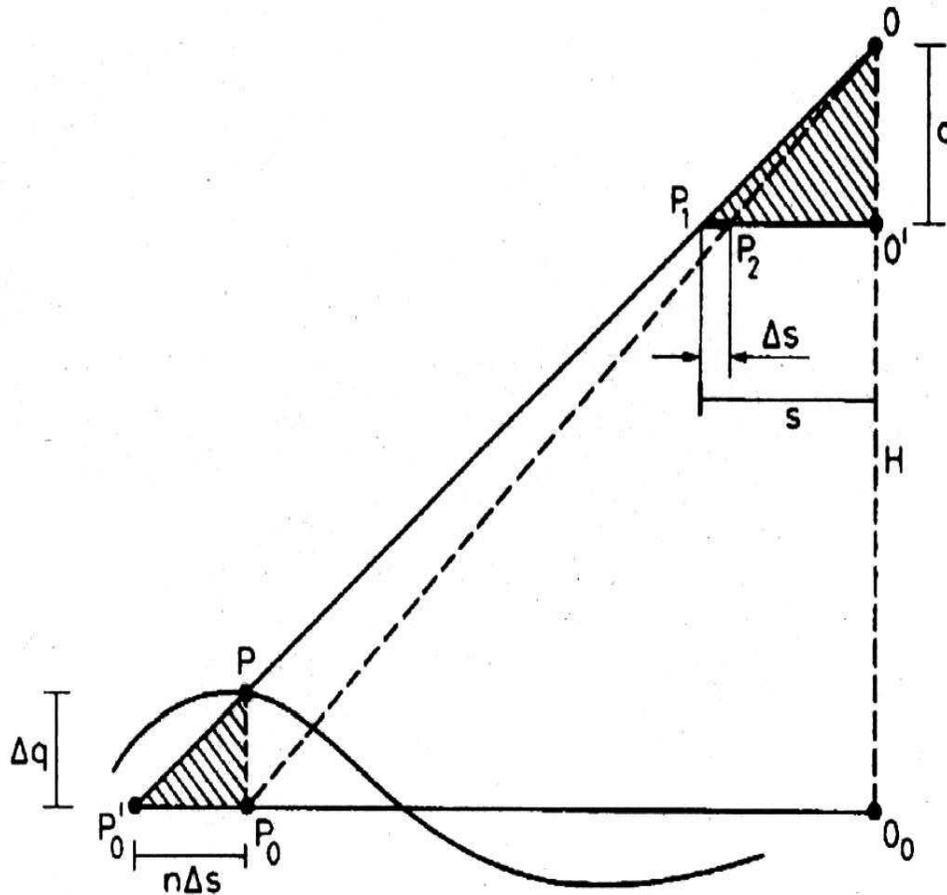


FIG.23

$$\Delta s = P_1 P_2$$

$$s = O' P_1$$

$$OO_1 = c$$

$$P'_0 P_0 = \eta \Delta s$$

$$PP_0 = \Delta q$$

$$n = \frac{H}{c}$$

Il punto P si proietta in P'₀ invece che in P₀

Strumentazioni

Nelle schede seguenti sono riportate alcune delle *strumentazioni* fondamentali (in particolare camere aeree ed apparati ausiliari per fotogrammetria). Per ultime, ma non per questo meno importanti, vengono brevemente descritte le *stazioni fotogrammetriche* in notevole evoluzione ed alcuni esempi sul loro utilizzo. Si riporta solamente un esempio di alcune camere di tipo terrestre, per non appesantire la presente trattazione (figg.30 -31).

PROCEDIMENTI OPERATIVI in restituzione

E' necessaria l'effettuazione iniziale dell'operazione di **orientamento interno** che impone le condizioni geometriche della camera da presa (distanza e punto principale, distorsione dell'obiettivo) e **dell'orientamento esterno**, distinguibile di solito in **orientamento relativo** e **orientamento assoluto** : nel **relativo** si fa avvenire l'incontro di 5 coppie di raggi omologhi (eliminazione della parallasse d'altezza) con formazione del *modello ottico*; mentre nell'**assoluto** si mette in scala il modello e lo si orienta con l' aiuto dei punti di appoggio topografici . Segue quindi *l'operazione di restituzione*.

(In fig.32 esempio di restituzione di una statua a curve di livello, con i metodi della fotogrammetria terrestre, a grandissima scala).

CAMERA AEREA ZEISS "RMK"

RMK TOP 15

Con grandangolo Pleogon A3, distanza principale 153 mm (6"), angolo di campo 93° (diagonale), diaframmi da f/4 a f/22 variabili continuamente, distorsione $\leq 3\mu\text{m}$

Otturatore: a disco rotante con tempo di acceso costante di 50 ms. Tolleranza del tempo di apertura: $\pm 2\%$. Tempi di esposizione: da 1/50 s a 1/500 s, variabili continuamente.

Marche fiduciali: 8 riferimenti posizionati agli angoli e sulle mediane, numerati, spazati 113 mm; diametro del punto immagine: 100 μm ; spessore delle crocette: 50 μm ; impressionate sulla pellicola con esposizione pari al valore medio del fotogramma.

DISPOSITIVI DI CONTROLLO

Terminale T-TI: Compact computer con tastiera alfanumerica, tasti funzione, display a 8 righe per 40 caratteri (alfanumerico-grafico) 1 MB RAM, 2 interfacce RS 232 per connessione a T-CU oppure PC.

T-CU control unit

Controller centrale con alimentatore e interfaccia con microprocessore. Tempo minimo di esecuzione per la ripresa di un fotogramma: 1,5 s

Rapporto v/h di funzionamento: 0 a 0.2 rad /s

Ricoprimento longitudinale: selezionabile tra 0 e 99% in passi dell'1%

Dati di volo registrati sul fotogramma:

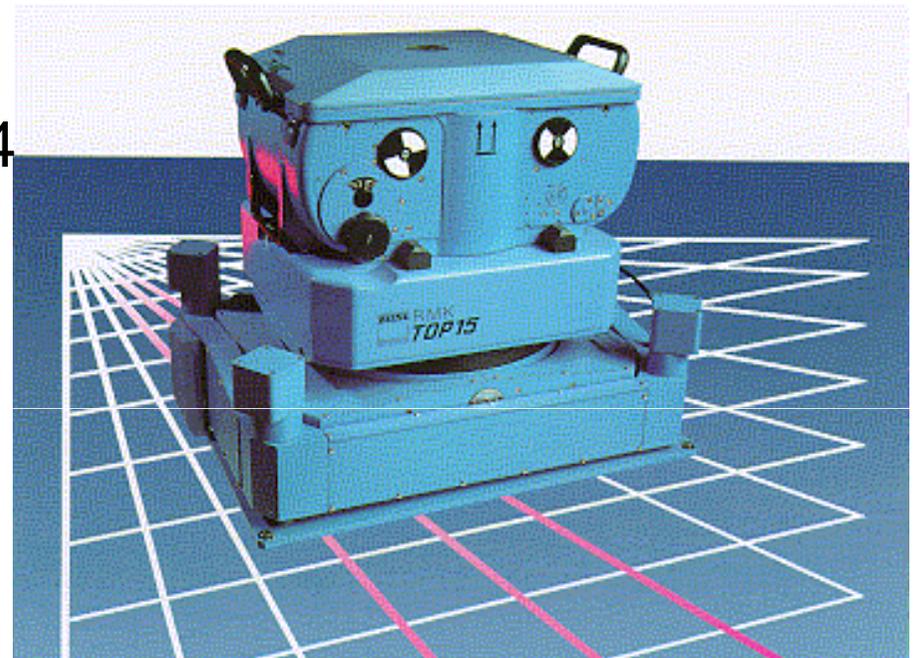
Area dati di 210 mm x 10 mm, posizionata all'inizio del fotogramma seguente;

- sovrapposizione dei dati della camera e dell'unità di controllo su 2 linee, ognuna di 48 caratteri alfanumerici, programmabile dall'utente; altezza caratteri: 4 mm
- Matricola del portalastra
- Riferimento per FMC
- Modello della camera e matricola
- Codice a 4 cifre, definibile dall'utente via terminale, altezza dei caratteri 4 mm.

Filtri:

- 4 filtri interni, selezionabili via terminale:
 - KL clear glass
 - A2 cut-off wavelength 420 nm (haze)
 - B cut-off wavelength 490 nm (yellow)
 - D cut-off wavelength 535 nm (orange)
- Disponibili esecuzioni speciali a richiesta
- filtri esterni PLEOGON
 - KL 36 graded-density filter 35% center transmission
 - KL 60 graded-density filter 60% center transmission
 - Sandwich and special color filters with graded density

FIG.24



LH System RC30

Aerial Camera System

FIG.25



Camera aerea stabilizzata



FIG.26



Gyro-Stabilized Camera Mount

ESEMPI di STEREOSCOPIO e di RESTITUTORE ANALITICO

Fig. 28

Fig.29



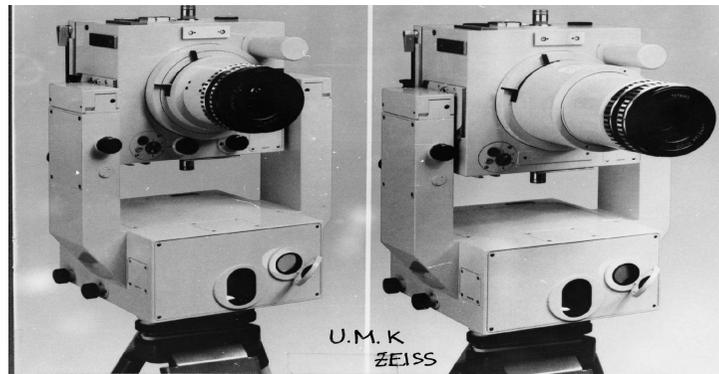
FIG.28



FIG.29

CAMERE FOTOGRAMMETRICHE TERRESTRI

Camera terrestre
TMK Zeiss



Camere metriche
varie (UMK Zeiss,
P32 Wild)

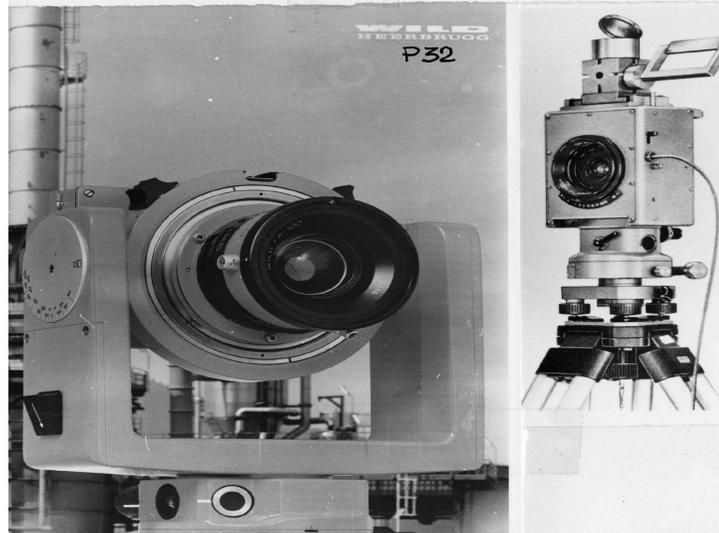


Fig.30

Fig.31

Esempio di restituzione di statua con metodi della **Fotogrammetria dei Vicini**
(Il colosso Sethi II – Museo Egizio di Torino, a scala 1/5 -prospetto frontale)

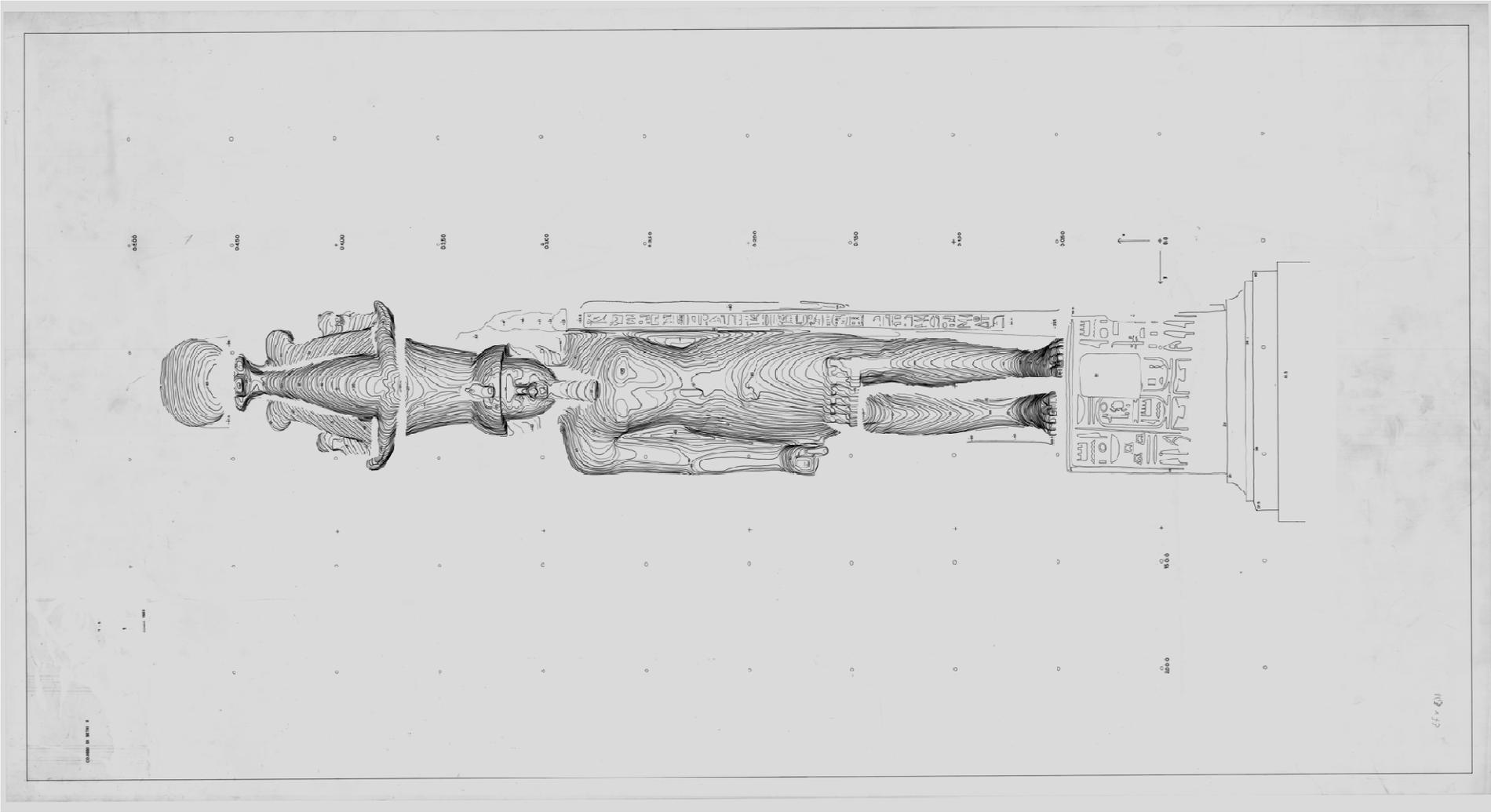


Fig.32

STAZIONI DI LAVORO FOTOGRAMMETRICHE

La tendenza è ormai quella di fare uso di personal computer di elevata potenza o di apposite stazioni denominate Workstation.

Visione tridimensionale delle coppie stereoscopiche : alcuni esempi di metodi usati.

- Visualizzazione, sul video diviso in due parti, delle immagini affiancate e osservazione con *stereoscopio a specchi*.
- Visualizzazione di una immagine composta, a due colori, sull'intero schermo e osservazioni mediante occhiali con filtri dei colori complementari (anaglifici)
- Visualizzazione alternata delle due immagini sull'intero schermo, ad una frequenza di circa 50 Hz e osservazione mediante occhiali che alternativamente lasciano passare o bloccano la luce. Per garantire la sincronizzazione è necessario che vi sia un cavo di collegamento tra schermo e occhiali (*ad esempio occhiali a cristalli liquidi*).
- Generazione alternata delle due immagini e osservazione attraverso un *filtro polarizzato* alternativamente in modo sincrono. L'operatore guarda il video (attraverso il filtro) con occhiali anch'essi opportunamente polarizzati.

ALCUNI ESEMPI

di stazioni di lavoro fotogrammetriche

Image station proposta dall' *Intergraph*, Huntsville, USA nel 1991: schermo di 1664 x 1248 pixel, 24 bit per pixel. Stereoscopia tramite occhiali a polarizzazione alternata (cristalli liquidi), con controllo a raggi infrarossi alla frequenza di 120 Hz, cioè 60 Hz per ciascuna immagine. Calcolatore costituito inizialmente da un processore a 14 MIPS, 256 Mbyte di memoria centrale, 1 Gbyte di memoria di massa.

DVP (Digital Video Plotter) della Leica, Heerburg, Svizzera 1991: il software è stato sviluppato alla Laval University, Quebec, Canada. Schermo a 1024 x 768 pixel, 8 bit per pixel. Sistema stereoscopico a semi-immagini osservate con stereoscopio a specchio. Calcolatore costituito da un PC iniziale con memoria centrale di 1.7 Mbyte.

Transfer T10, Matra, Francia, 1991: schermo e 1280 x 1024 pixel, 24 bit per pixel. Stereoscopia tramite polarizzazione con osservazione attraverso occhiali a cristalli liquidi, frequenza di 120 Hz. Processore di immagini con 8 Mbyte di memoria centrale e 600 Mbyte di memoria di massa, più una stazione Sun Sparc come calcolatore centrale (host computer)

Strumenti vari delle **Officine GALILEO** e della **OMI**, Italia : *analogici, analitici e*

digitali,

Introduzione ai LASER SCANNER

* Necessità di nuove procedure non fotogrammetriche per la creazione di modelli tridimensionali per:

- terreno;
- oggetti;
- architettura;
- archeologia.

* Nascita e sviluppo di tecnologie laser (laser scanner).

I vantaggi:

- velocità di acquisizione dei dati;
- elevato numero di dati acquisiti;
- elevato standard di precisione;
- possibilità di elaborare modelli tridimensionali a varie scale di dettaglio in base agli obiettivi da perseguire;
- rilievo di zone impervie difficilmente accessibili ai metodi fotogrammetrici classici.

I problemi:

- necessità di effettuare più scansioni per ogni oggetto a causa sia delle superfici nascoste, sia del ridotto campo visivo dello scanner (40° - 60°);
- il post-processamento dei dati richiede tempi lunghi di elaborazione;
- necessità di molti software per il post-processamento che presentano talvolta incompatibilità di formati;
- ottenimento di una informazione topologica complessa, ovvero mole di dati estremamente pesanti e difficili da gestire;
- costi elevati dello strumento: (120'000-130'000) €. (esistono attualmente strumenti anche meno costosi).

Funzionamento del laser scanner

Il laser scanner è uno strumento ottico – elettronico che utilizzando un impulso laser, misura la distanza tra il centro di emissione del raggio e l'oggetto colpito (punto di riflessione).

E' una strumentazione simile quindi ai distanziometri ad onde elettromagnetiche già viste.

Tipi di misurazione:

- il tempo di risposta (per oggetti grandi e distanti da 2 a 150 m);
- la triangolazione ottica (alta risoluzione per oggetti ridotti distanti da 0.6 a 25 m).

La risposta viene data dalla superficie colpita che riflette più o meno bene il raggio.

Fase di post-processamento dei dati

Si crea un numero molto alto di punti rilevati: non tutti questi punti sono significativi e quindi da questa nuvola di punti, occorre con procedure automatiche, fare scelte ed eliminare punti inutili.

Si effettuano quindi le seguenti operazioni:

- 1) allineamento delle scansioni e registrazione (ogni scansione ha zone comuni di sovrapposizione pari almeno al 30 %, con punti ben individuabili di aggancio sui quali si allineano le scansioni);
- 2) pulitura della nuvola di punti e filtraggio del rumore (prodotto dalla deviazione standard dello scanner);
- 3) triangolazione e costruzione della mesh;
- 4) chiusura dei buchi della mesh e correzione delle facce anomale;
- 5) decimazione (riduzione del modello a vari livelli di dettaglio e archiviazione dei progressivi processi di riduzione in modo che i dati non vadano persi);
- 6) applicazione della texture al modello 3D;
- 7) esportazione per l'uso richiesto (rendering, filmico, ecc..).



FIG. 33

Il laser scanner è caratterizzato da:

- Sensore terrestre di forma cilindrica costituito da due parti:
 - una fissa con distanziometro laser
 - una mobile con possibilità di ruotare su se stessa di 340° , con specchio oscillante per dirigere il raggio laser su una zona angolare di 80° .
- Messa in stazione mediante basetta dotata di livella sferica
- Collegamento con PC per controllo del movimento del sensore e acquisizione dati.
- Di solito, accoppiamento con camera fotografica digitale o camera per l'acquisizione di dati radiometrici.

Schema dimensionale di scanner

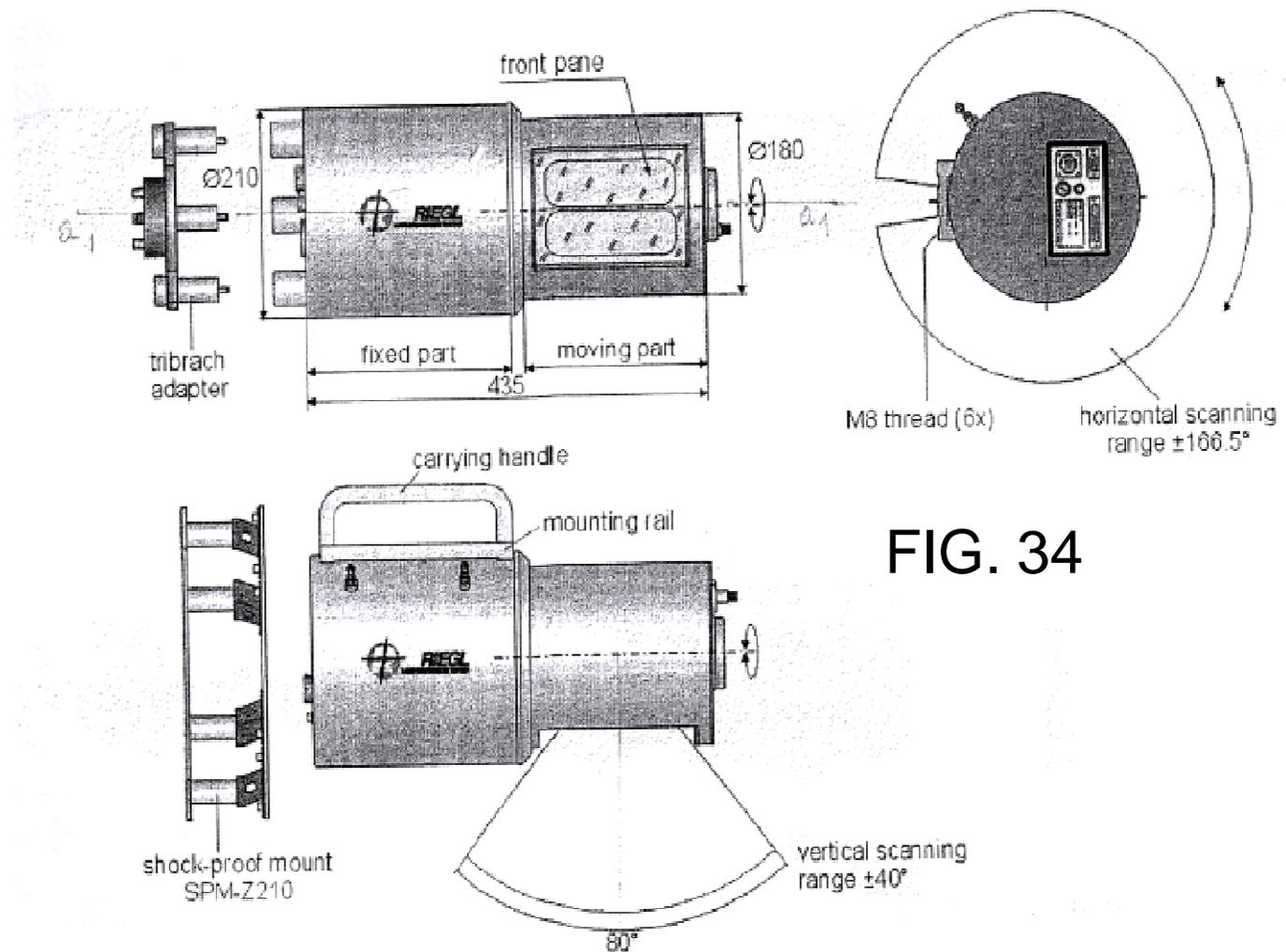


FIG. 34

Schema di funzionamento

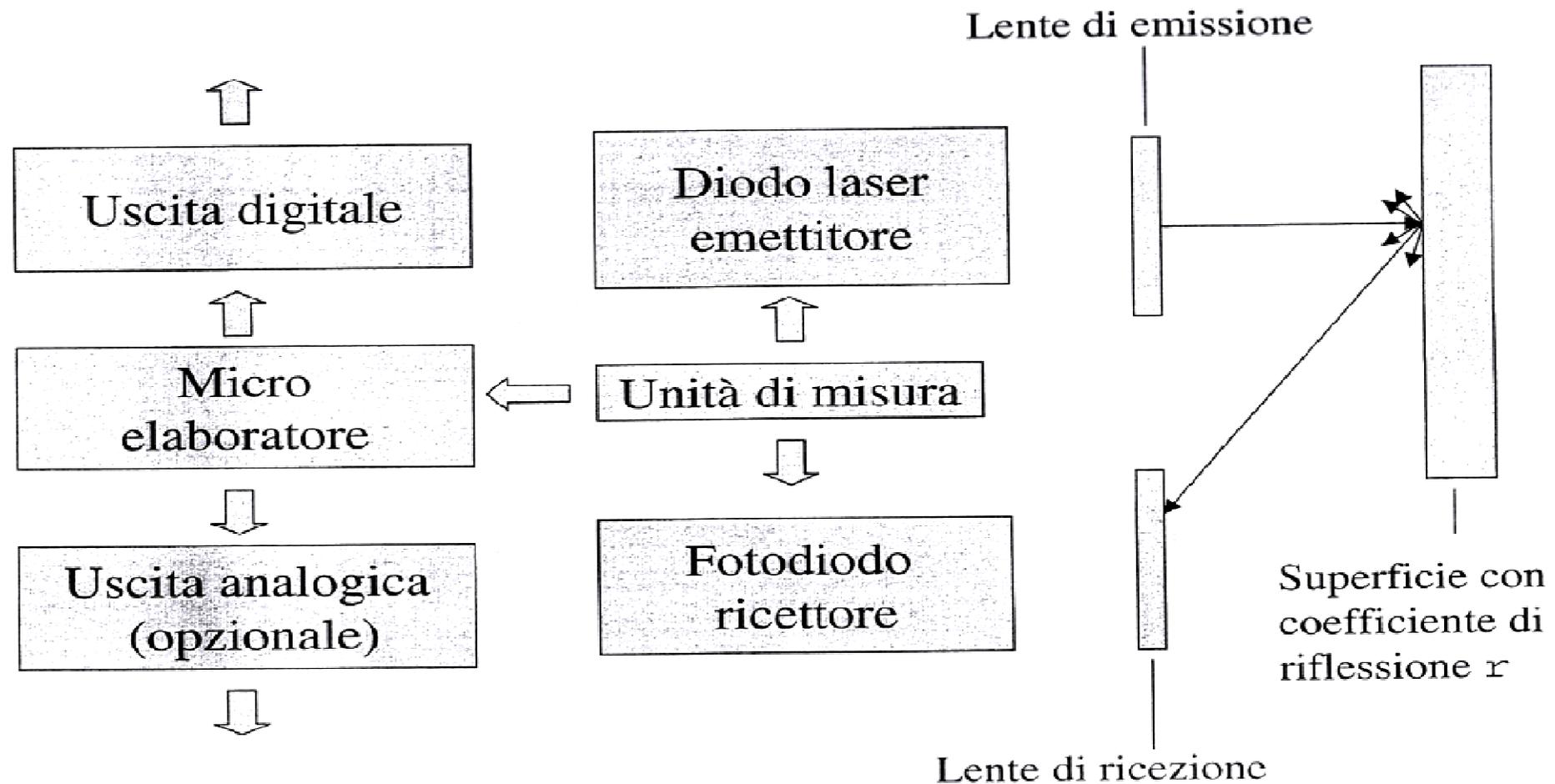


FIG. 35

Diode: è il componente elettronico che permette il passaggio della corrente in un'unica direzione. Realizzato per giunzione di due elementi di silicio trattate attraverso drogature opposte (polo P positivo ed N negativo). Esso crea un campo elettrico di intensità

$$E = \frac{V_0}{d_0} = 0,8 \frac{V}{1m} \quad m = 10^6 \frac{V}{m}$$

e di direzione permanente che consente l'emissione del raggio laser.

Raggio laser: a differenza di un raggio di luce che si indebolisce sempre di più man mano che avanza in un mezzo materiale, il raggio laser contiene un quantitativo di energia maggiore in grado di attraversare più oggetti e generare fino a quattro echi.

Prestazioni **dello scanner in studio** (di tipo terrestre)

- Distanza massima: 350 m
- Distanza minima: 2 m
- Abbracciamento massimo: 80°x340°
- Tempo di acquisizione: 18 sec - 12 min
- Precisione nominale:
 - +/- 2.5 cm per le distanze
 - +/- 0.01 gon per gli angoli
 - +/- 1 per i toni radiometrici
- Lunghezza d' onda del raggio: $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$

Esistono anche ***scanner laser per riprese aeree.***

Post processamento dei dati

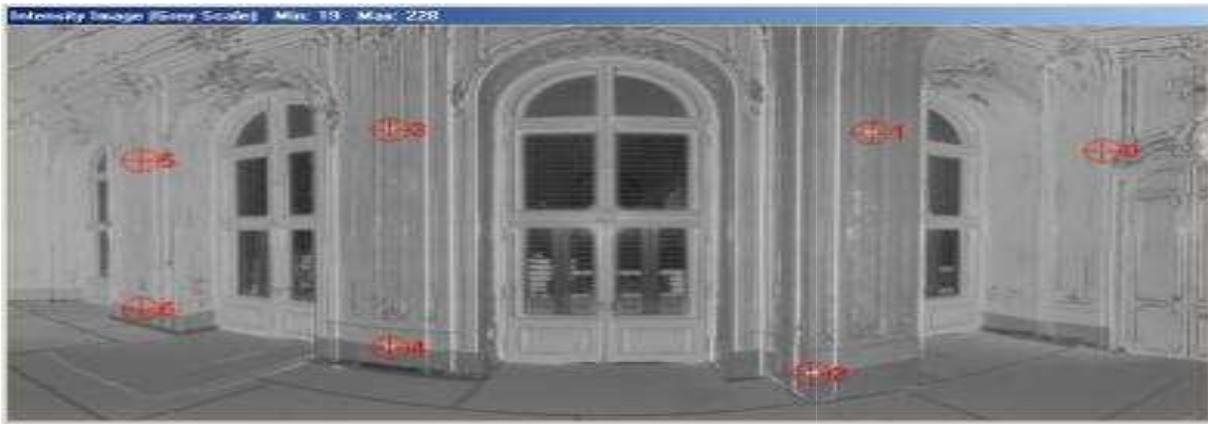
Fase successiva alla correzione dei dati grezzi.

Obiettivo: ricostruzione 3D dell'oggetto.

FASI

1) Individuazione di punti di legame naturali o artificiali (presegnalizzati con appositi adesivi applicati sull'oggetto)
[operazione completamente automatica]

2) Impostazione di coordinate 3D in un dato sistema di riferimento nei confronti di punti individuati
[operazione con apporto di operatore]



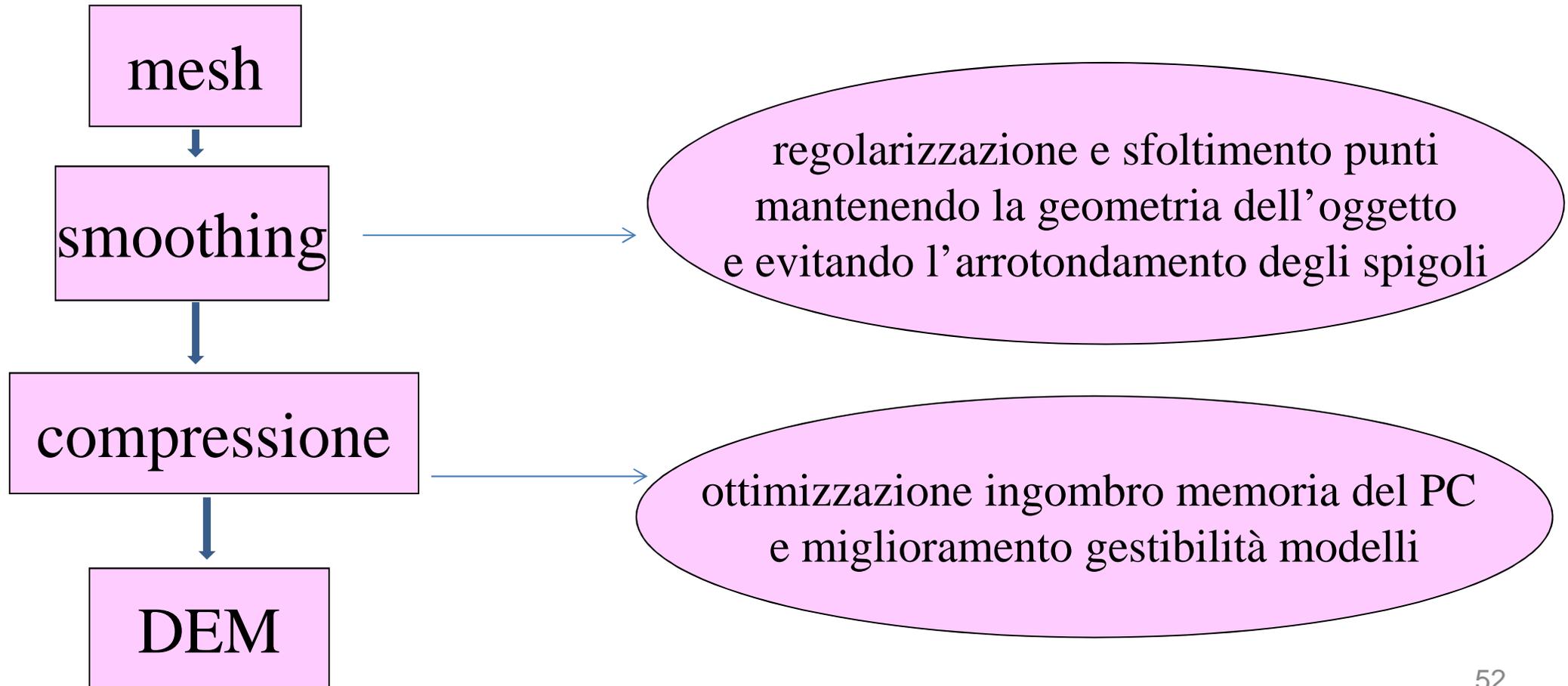
Individuazione dei marker

FIG. 36

Creazione immagini 3D

Tutte le operazioni di interpolazione, riduzione, assemblaggio vengono svolte su superfici rappresentate mediante una “*mesh*”

mesh=superficie frammentata in tasselli triangolari connessi mediante i loro bordi



DEM

(Digital Elevation Model)
Rappresentazione 3D di oggetti
o porzioni di territorio

DSM

(Digital Surface Model)
Descrizione della superficie del
terreno e degli oggetti su di esso

DTM

(Digital Terrain Model)
Descrizione della sola superficie
del terreno



FIG .37

Sviluppi applicativi

- Ortofoto di precisione
- Visualizzazioni 3D di tipo digitale
- Stereofotomodelli
- Sezioni, prospetti, viste di vario tipo in
- formato AutoCad

Ortofoto di precisione

- Prodotto cartografico che conserva i contenuti fotografici dell'oggetto correggendo le deformazioni prospettiche dovute alle *discontinuità* presenti sulla superficie del territorio o di un'infrastruttura (edifici, ponti, ecc...)
- Eliminazione degli errori mediante impiego di un programma per un corretto utilizzo del modello a punti digitali

Stereofotomodello

- Prodotto della fotogrammetria digitale
- Conserva informazioni geometriche 3D dell'oggetto (*stereo*)
- Conserva l'immagine fotografica dell'oggetto (*foto*)
- Individua il contenuto cartografico dell'oggetto (*modello*) fornendo informazioni georeferenziate
- Permette di muoversi sul modello 3D senza i classici sistemi stereoscopici (posizionamento in quota) tramite elaborazione completa delle tre coordinate spaziali

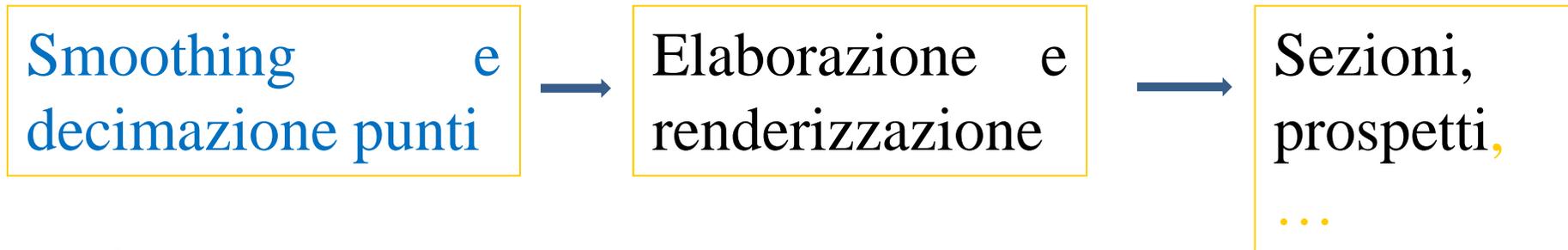
Sezioni, prospetti, viste di vario tipo in formato AutoCad

Generazione di modelli solidi e superfici mantenendo le principali linee descrittive dell'oggetto, tramite un apposito pacchetto informatico (ad esempio Cirrus AC)

Caricamento modello
3D (DEM)



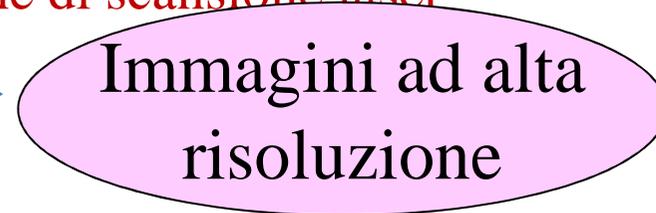
Triangolazione dei punti spaziali
attraverso piani medi di riferimento



Caratteristiche principali:

- Creazione automatica di modelli 3D per la descrizione della forma degli oggetti rilevati
- Ottenimento automatico di sezioni, profili, curve di livello e caratteristiche dimensionali degli oggetti rilevati
- Incompletezza delle informazioni della sola tecnologia laser (scarsa risoluzione della modalità true color) + affiancamento della tecnologia fotogrammetrica
- Prospettive future: evoluzione delle tecniche di scansione laser

Grande quantità di punti



Si tralascia di considerare il **settore del telerilevamento e/o “remote sensing”**, che ha avuto notevoli sviluppi in questi ultimi anni e che costituisce disciplina a parte della fotogrammetria, anche se nel medesimo gruppo disciplinare.