

T2

La presa dei fotogrammi

TEORIA

- 1 Fotogrammetria aerea
- 2 Relazione tra scala dei fotogrammi e altezza di volo
- 3 Parametri del volo aereo fotogrammetrico
- 4 Gestione del volo fotogrammetrico
- 5 Fotogrammetria terrestre
- 6 Configurazione della presa terrestre
- 7 Progetto della presa terrestre
- 8 Operazioni di presa terrestre
- 9 La presa normale
- 10 Fotogrammetria terrestre non convenzionale

RIASSUMENDO

AUTOVALUTAZIONE



Nella presa aerea la camera viene alloggiata sul pavimento della fusoliera. L'immagine mostra una di queste camere, allestita per le operazioni di presa, già cablata ai dispositivi di controllo e ai portatili con cui viene monitorata costantemente l'evoluzione dell'operazione.

1. Fotogrammetria aerea

Da ormai un secolo la **fotogrammetria aerea** è l'unico strumento per la produzione **cartografica** di medio-grandi estensioni di territorio. In essa la presa avviene con **camere sofisticate** (illustrate nella precedente unità), dotate di numerosi **automatismi** e collocate sul pavimento dell'aereo in modo che il loro asse si mantenga il più possibile **verticale** e rivolto verso il basso per riprendere il terreno (**presa nadirale**).

Per soddisfare il principio basilare della fotogrammetria, quindi per poter ottenere la carta dai fotogrammi ripresi, è necessario che ogni generico punto A del terreno sia ripreso almeno da due fotogrammi consecutivi (► FIGURA 1).

Sui fotogrammi vengono registrate rispettivamente le due immagini A' e A'' , **omologhe** di A , le cui coordinate lastra, x'_A, y'_A sul primo fotogramma e x''_A, y''_A sul secondo fotogramma, verranno **misurate** in fase di restituzione e permetteranno il successivo posizionamento di A .

Lo schema della ripresa aerea è quello illustrato in ► FIGURA 1: in esso l'aereo segue una traiettoria **rettilinea** a **velocità costante**, a una certa **altezza media H** dal terreno; all'istante t_1 il **centro di presa** della camera si trova in O_1 e riprende il primo fotogramma, e all'istante t_2 (dopo aver percorso un certo spazio che costituisce la **base di presa B**) esso si troverà nella posizione O_2 dove riprenderà il secondo fotogramma.

L'aereo sorvola il terreno ripetendo lo schema precedente ed eseguendo le prese nell'ambito di una sequenza di **percorsi rettilinei affiancati** lungo **direzioni** parallele secondo lo schema illustrato in ► FIGURA 2.

I fotogrammi ripresi lungo uno **stesso percorso rettilineo** costituiscono una **strisciata**. L'insieme di più strisciate viene chiamato **blocco** di strisciate.

Oltre al **ricoprimento longitudinale μ** (in generale il 60%), è necessario che l'**interasse i** , tra due strisciate adiacenti, venga stabilito in modo che ci sia anche un **ricoprimento laterale ε** (*overside*) con valore compreso nell'intervallo 0,10-0,20 (10%-20%) dell'**abbracciamento L** del fotogramma, per evitare di avere «buchi» nella copertura del territorio (► FIGURA 3).

Le prese fotografiche del terreno devono avvenire in modo tale che tutta l'area da rilevare rimanga scomposta in **modelli stereoscopici** tali che ogni punto del terreno compaia, come detto, almeno su due fotogrammi. Sap-

FAQ

► Quale impiego ha la fotogrammetria aerea?

Prevalentemente quello di consentire la realizzazione della cartografia relativa a estensioni medio-grandi.

FAQ

► La strisciata è un percorso rettilineo?

No, è l'insieme di fotogrammi ripresi in corrispondenza di un percorso rettilineo dell'aereo.

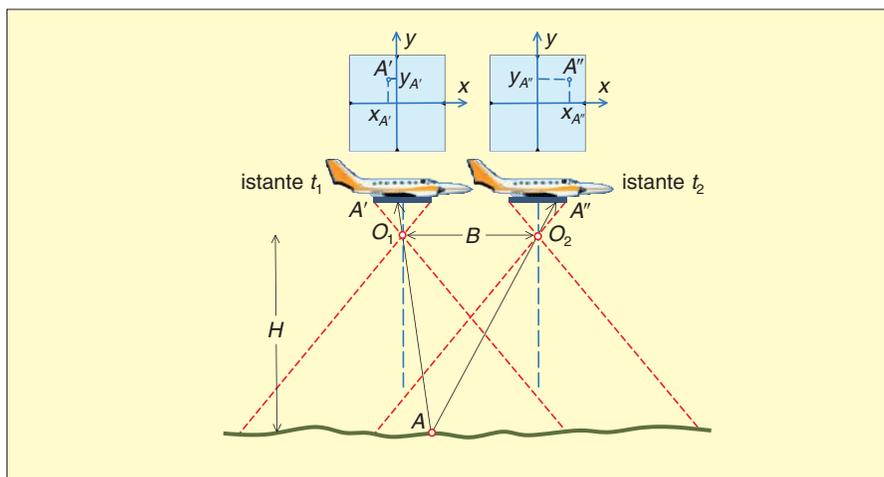


FIGURA 1 Schema della presa aerea nadirale. L'aereo segue una traiettoria rettilinea e a intervalli di tempo regolari apre l'otturatore della camera per registrare i fotogrammi. Ciascun punto A sul terreno deve venire registrato su almeno due fotogrammi consecutivi nelle due immagini omologhe A' e A'' , le cui posizioni sul piano della lastra consentiranno di stabilire la posizione di A .

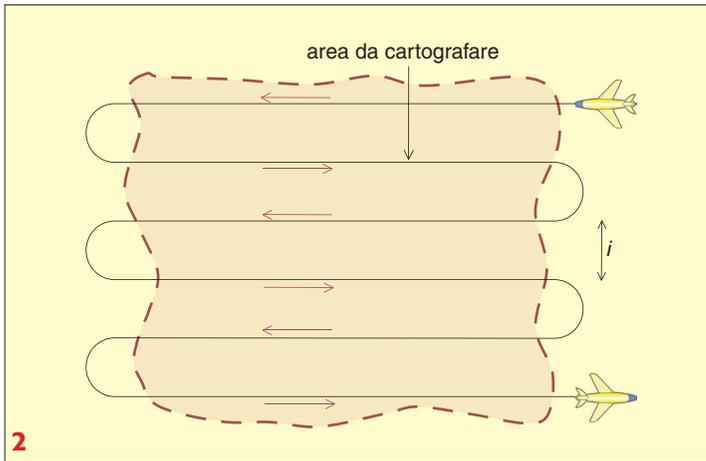


FIGURA 2 Schema di copertura del territorio con un volo fotogrammetrico organizzato in traiettorie rettilinee e parallele durante le quali viene preso un certo numero di fotogrammi detto strisciata.

FIGURA 3 Due strisciate adiacenti devono presentare un interasse i tale da generare un ricoprimento laterale in ragione del 10-20% dell'abbracciamento L dei fotogrammi.

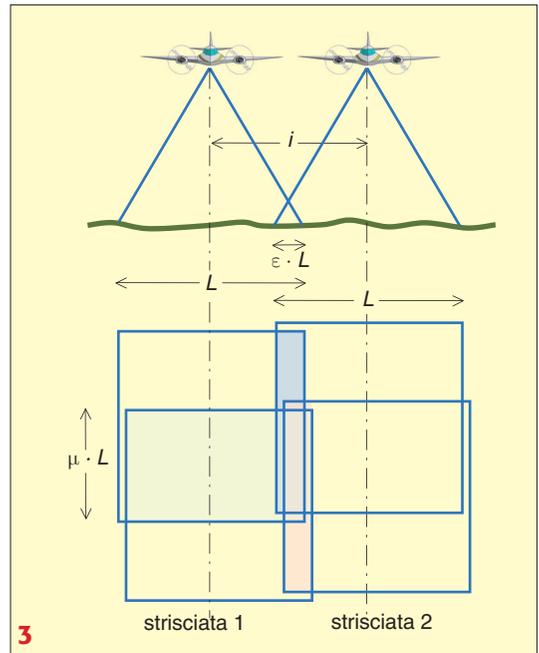
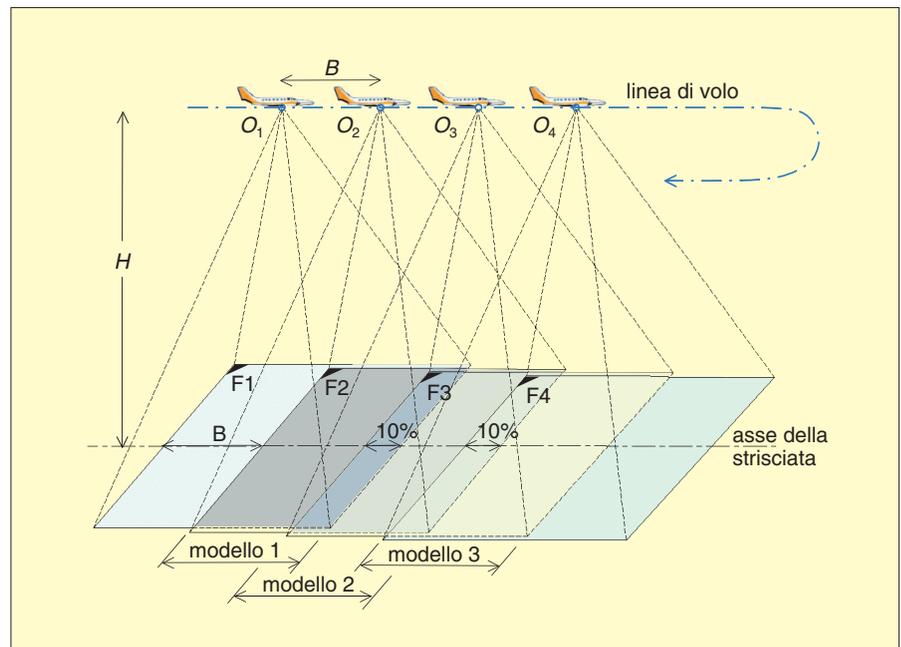
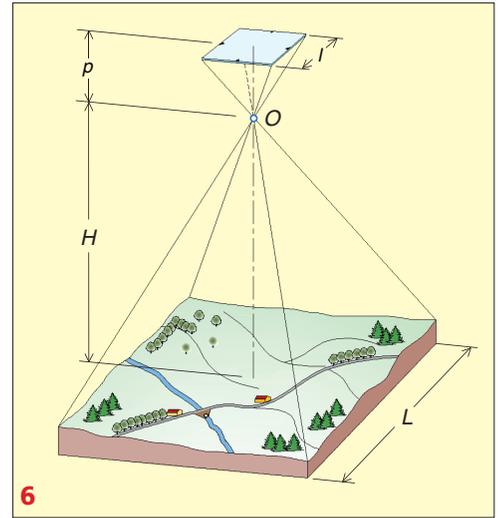
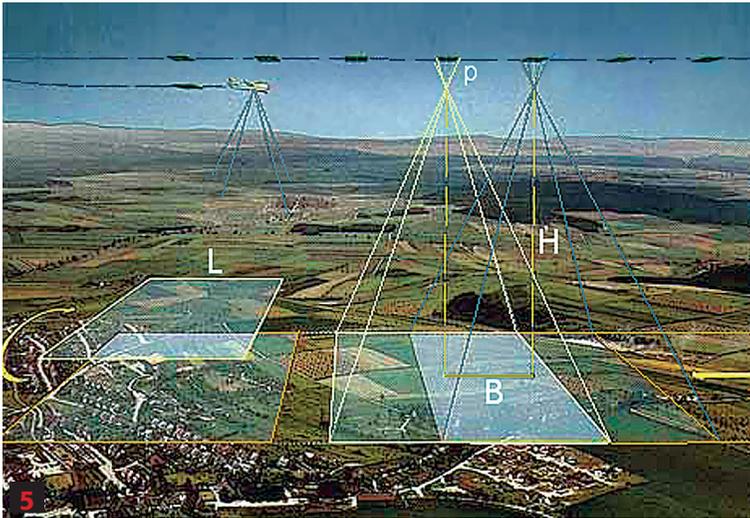


FIGURA 4 La necessità di rappresentare tutto il terreno in almeno due fotogrammi consecutivi è consentita dal ricoprimento longitudinale, che rappresenta la zona di sovrapposizione tra gli stessi fotogrammi e che, in generale, ha un valore del 60%. Esso permette la scomposizione ideale del terreno in tanti modelli stereoscopici che, a loro volta, presentano una sovrapposizione del 10% necessaria al loro concatenamento.



piamo che questa esigenza viene garantita dal **ricoprimento longitudinale** (*overlap*) dell'abbracciamento L del fotogramma; ciò produce due strisce di **sovrapposizione** del 10% anche nei *modelli stereoscopici* rispetto ai modelli adiacenti (► FIGURA 4) che permette il loro **concatenamento**.

Se il terreno da riprendere è **irregolare** e montagnoso, è necessario adottare per il *ricoprimento longitudinale* un valore più alto, fino al 75%. Naturalmente il **numero di fotogrammi** necessari alla copertura fotogrammetrica di una certa porzione di territorio, a causa del *ricoprimento longitudinale* e di quello *trasversale*, è decisamente più alto di quello che sarebbe necessario a una normale copertura fotografica.



I voli fotogrammetrici (► FIGURA 5) vengono effettuati in **condizioni meteorologiche** perfette (assenza di nubi, ma anche di foschia), e negli orari centrali della giornata, per sfruttare la massima **illuminazione** disponibile e per minimizzare l'influenza delle **ombre** al suolo. Ne consegue che sono pochissimi (mediamente 20-40) i giorni in un anno adeguati a svolgere questa attività.

Nelle figure precedenti, e in quelle che seguiranno, i simboli utilizzati hanno i seguenti significati:

- **H**: **altezza media** dal suolo mantenuta dall'aereo durante le strisciate;
- **L**: **abbracciamento**, cioè lato del quadro di terreno contenuto in un fotogramma;
- **B**: **base di presa**, distanza tra due centri di presa O_1 e O_2 consecutivi;
- **l**: **lato effettivo utile** del fotogramma (prossimo a 230 mm);
- **p**: **distanza principale** della camera, ritenuta uguale alla *distanza focale* dell'obiettivo;
- μ : **ricoprimento longitudinale**, sovrapposizione di due fotogrammi consecutivi; in generale il 60% di L ;
- ϵ : **ricoprimento laterale**, sovrapposizione di due strisciate adiacenti; in generale il 20% di L ;
- **i**: **interasse** delle strisciate, cioè distanza tra gli assi di due strisciate adiacenti.

2. Relazione tra scala dei fotogrammi e altezza di volo

Si è già visto (paragrafo 4 dell'unità T1) che i fotogrammi sono caratterizzati da una **scala media** (o semplicemente **scala**) definita nel seguente modo:

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

Considerando il terreno **pianeggiante** e regolare (tanto da poterlo approssimare con un piano), e la presa **nadirale**, il rapporto l/L può essere sostituito con il **rapporto equivalente** tra la **distanza principale** p della camera (uguale alla distanza focale dell'obiettivo) e l'**altezza media** H del centro di presa O dal terreno (► FIGURA 6); dunque si ha:

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

FIGURA 5 Vista schematica della presa aerea.

FIGURA 6 Schema geometrico della presa nadirale. Il terreno viene poi semplificato considerandolo ad andamento pianeggiante, dunque parallelo al piano della lastra.

FAQ

► **In che modo si ottiene la scala desiderata per i fotogrammi nella presa aerea?**

Variando l'altezza di volo in relazione alla camera utilizzata per la presa.

FAQ

► **Da cosa derivano le tabelle o le formule che mettono in relazione la scala dei fotogrammi con quella della carta?**

Dall'esperienza pratica consolidata da decenni di valutazioni nel merito.

Da quest'ultima relazione è evidente che, per ottenere il valore desiderato per la **scala dei fotogrammi** (utilizzando una camera con una data p), occorre variare l'**altezza di volo** H dell'aereo dal terreno.

In effetti, per ottenere i fotogrammi alla scala desiderata $1/N$, l'**altezza di volo** H dovrà essere:

$$H = p \cdot N \tag{2}$$

■ Relazione tra scala del disegno e scala dei fotogrammi

La **scala dei fotogrammi** $1/N$, tuttavia, non può essere fissata in modo arbitrario; essa, infatti, **dipende strettamente** dalla scala in cui deve essere rappresentato il rilievo (**scala del disegno** o della **carta**). Tanto più grande è la *scala del disegno* $1/N_{dis}$, tanto meglio dovranno essere riconoscibili i particolari topografici sull'immagine, e ciò si ottiene aumentando la scala media dei fotogrammi.

Pertanto, assegnata la **scala del disegno** (risultato finale del rilievo), occorre stabilire in primo luogo l'adeguata **scala dei fotogrammi**.

L'**esperienza** ci ha ormai insegnato a mettere in relazione ottimale la *scala del disegno* $1/N_{dis}$, a cui dovrà essere costruita la carta topografica, e la corrispondente, necessaria, *scala dei fotogrammi* $1/N$. In effetti il denominatore N di quest'ultima viene ricavato dalla seguente espressione empirica:

$$N = k \cdot \sqrt{N_{dis}} \tag{3}$$

in cui il coefficiente k assume i seguenti valori:

- $200 \div 300$ per scale del disegno $1/N_{dis}$ inferiori a 1:5000 (scale medio-piccole);
- $150 \div 200$ per scale del disegno $1/N_{dis}$ superiori a 1:2000 (scale grandi).

Come alternativa, rispetto alla formula precedente, è possibile dedurre i valori della **scala media dei fotogrammi** dalla ►TABELLA 1, elaborata dalla Commissione Geodetica Italiana. In essa sono state anche riportate, indicativamente, le conseguenti **altezze di volo** per camere con valori comuni di p .

In definitiva, per determinare l'altezza di volo H , occorre partire dalla *scala del disegno* ($1:N_{dis}$), passando per la *scala dei fotogrammi* ($1:N$), secondo questo schema sintetico:

$$1:N_{dis} \Rightarrow 1:N \Rightarrow H$$

TABELLA 1 Rapporto scala della carta, scala dei fotogrammi

Scala della carta	Scala dei fotogr.		Altezza volo H (per alcuni valori di p) (m)					
	min.	max.	$p = 300$ mm		$p = 152$ mm		$p = 88$ mm	
1:500	1:3000	1:2000	900	600				
1:1000	1:5000	1:3500	1500	1050	760	530		
1:2000	1:8000	1:6500	2400	1950	1220	1000		
1:5000	1:18 000	1:12 000	5400	3600	1730	1830		
1:10 000	1:27 000	1:20 000	8100	600	4100	3100	2210	1770
1:25 000	1:50 000	1:40 000			7600	6080	4520	3530
1:50 000	1:70 000	1:60 000			10 620	9130	6180	5310
1:100 000	1:90 000	1:80 000					7960	7070

3. Parametri del volo aereo fotogrammetrico

Prima di effettuare il volo aereo fotogrammetrico è necessario definire alcuni **parametri**, affinché i fotogrammi ripresi durante il volo abbiano le caratteristiche attese e siano funzionali alle esigenze della successiva restituzione. La definizione di questi parametri (nell'ipotesi di **presa nadirale** e **terreno pianeggiante**) si basa sulla conoscenza preventiva dei seguenti elementi:

- **H**: altezza di volo rispetto al terreno;
- **μ** : ricoprimento longitudinale (in generale 0,6);
- **ϵ** : ricoprimento laterale (in generale 0,2);
- **l**: formato effettivo utile del fotogramma (approssimativamente 230 mm);
- **p**: distanza principale della camera;
- **v**: velocità di crociera ottimale dell'aereo in m/s.

■ Quota media del volo

L'altezza di volo, determinata con la (2) del paragrafo precedente, rappresenta la distanza tra aereo (centro di presa) e terreno; tuttavia gli strumenti a bordo dell'aereo non rilevano questo parametro, ma forniscono la **quota ortometrica assoluta** Q_V (con determinazione barometrica).

Questo parametro, comunque, è facilmente ottenibile sommando all'altezza di volo H la **quota assoluta media** Q_M del terreno ripreso, dunque dalla seguente relazione:

$$Q_V = Q_M + H \quad (4)$$

La quota media del terreno Q_M viene ottenuta come **media aritmetica** di alcuni punti di **quota nota** presenti sul terreno. Osserviamo, a questo proposito, che Q_M può essere determinato con una certa approssimazione, in quanto anche errori di alcuni metri non modificano in modo significativo la **scala dei fotogrammi**.

■ Abbracciamento del fotogramma

In ciascun fotogramma di formato l , ottenuto all'altezza di volo H , è rappresentata una porzione quadrata (in quanto il formato è quadrato) di terreno di lato L , detto **abbracciamento** del fotogramma (► FIGURA 6). Il suo valore può essere ottenuto facilmente dalle (1) del precedente paragrafo:

$$L = \frac{l \cdot H}{p} \quad \text{equivalente a:} \quad L = l \cdot N \quad (5)$$

La larghezza della **sovrapposizione** del fotogramma con quello successivo (dunque la larghezza del **modello stereoscopico**) sarà fornita dal prodotto: $\mu \cdot L$.

Se, per esempio, poniamo: $l = 230$ mm, $p = 152$ mm e $H = 1200$ m, applicando la (5) si ottiene $L = 0,23 \cdot 1200 / 0,152 = 1816$ m. Dunque il terreno contenuto nei fotogrammi è un quadrato di lato 1816×1816 m, corrispondente a un'area di 3297856 m² (330 ha circa), e il modello stereoscopico generato da due fotogrammi consecutivi (per un ricoprimento del 60%) avrà una larghezza di $0,6 \cdot 1816 = 1090$ m.

■ Base di presa

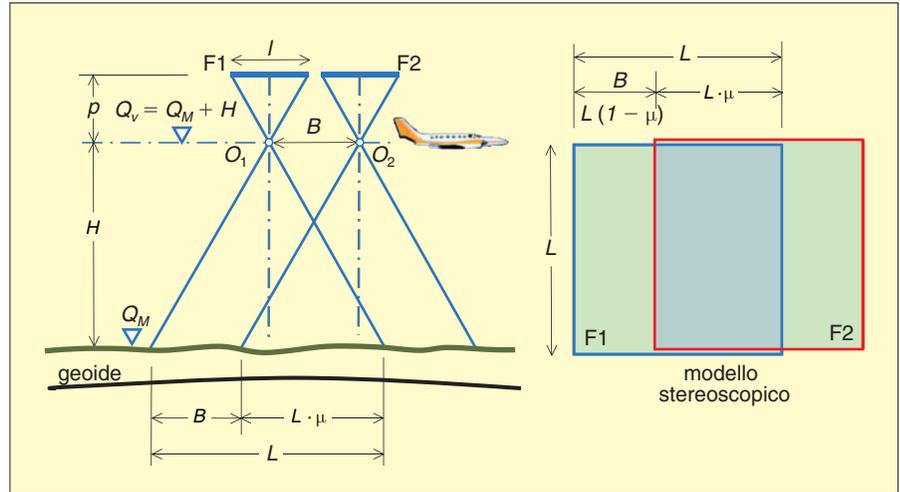
La lunghezza della **base di presa** rappresenta la distanza percorsa dall'aereo tra due scatti consecutivi dell'otturatore della camera. Essa corrisponde alla distanza tra i centri di presa O_1 e O_2 in corrispondenza della presa di due fotogrammi consecutivi della stessa strisciata.

FAQ

► **La quota del volo fotogrammetrico deve essere definita con grande precisione?**

No, differenze di quota di alcuni metri non condizionano in modo significativo la scala che è stata programmata per i fotogrammi.

FIGURA 7 La base di presa B consente di ottenere il valore desiderato del ricoprimento longitudinale, che, a sua volta, permette di generare appropriati modelli stereoscopici necessari alla restituzione del rilievo.



Il suo valore è molto importante, perché è con esso che si ottiene il valore del **ricoprimento longitudinale** μ , che in generale è 0,6 (60%), necessario alla generazione dei **modelli stereoscopici** che in sede di *restituzione* permetteranno la rappresentazione del terreno rilevato.

Osservando la ► FIGURA 7 si vede subito che

$$B = L - \mu \cdot L = L \cdot (1 - \mu)$$

Sostituendo a L il relativo valore fornito dalla precedente espressione (5), si ottiene:

$$B = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \mu) \quad \text{equivalente a:} \quad B = l \cdot N \cdot (1 - \mu) \quad (6)$$

Dopo avere calcolato la base di presa è bene controllare che il **rapporto** B/H si mantenga **maggiore** di 1/4.

■ Intervallo di apertura dell'otturatore della camera

A differenza della *presa terrestre*, in cui le prese successive sono eseguite con lo spostamento della camera e la **sostituzione manuale** della lastra, nella *presa aerea* occorre **automatizzare** sia l'avanzamento della pellicola, sia la ripresa dei fotogrammi, programmando un opportuno **intervallo** Δt di apertura dell'otturatore.

Pertanto la distanza B , tra i centri di presa in cui vengono generati due fotogrammi consecutivi, dipende dalla **velocità di crociera** v dell'aereo (supposta idealmente costante) secondo la nota relazione del *moto uniforme*: $B = v \cdot \Delta t$, da cui segue: $\Delta t = B/v$. Quindi, sostituendo in quest'ultima l'espressione di B fornita dalla precedente relazione (6), è possibile determinare l'**intervallo** Δt (in secondi, essendo v espresso in m/s) a cui devono essere scattate le fotografie:

$$\Delta t = \frac{l \cdot H}{v \cdot p} \cdot (1 - \mu) \quad \text{equivalente a:} \quad \Delta t = \frac{l \cdot N}{v} \cdot (1 - \mu) \text{ (s)} \quad (7)$$

■ Interasse delle strisciate

L'interasse i tra gli assi di due strisciate adiacenti (► FIGURA 3) viene scelto in modo da ottenere per il **ricoprimento trasversale** ϵ il valore programmato, che in

FAQ

► **In quale modo, nella presa aerea, è possibile ottenere la corretta lunghezza della base di presa?**

Procedendo agli scatti di apertura dell'otturatore della camera a intervalli di tempo prestabiliti, in relazione alla velocità dell'aereo supposta costante.

generale è compreso nell'intervallo $0,10 \div 0,20$ (tra il 10% e il 20% di L), in funzione delle irregolarità presenti nel territorio da rilevare. Esso garantisce la **totale copertura** fotografica del terreno interessato al rilievo.

Osservando la ► FIGURA 3 appare evidente che l'interasse i è fornito dalla seguente relazione:

$$i = \frac{L}{2} + \frac{L}{2} - \varepsilon \cdot L$$

dunque:

$$i = L \cdot (1 - \varepsilon)$$

Sostituendo a L l'espressione fornita dalla (5), si ottiene:

$$i = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \varepsilon) \quad \text{equivalente a:} \quad i = l \cdot N \cdot (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

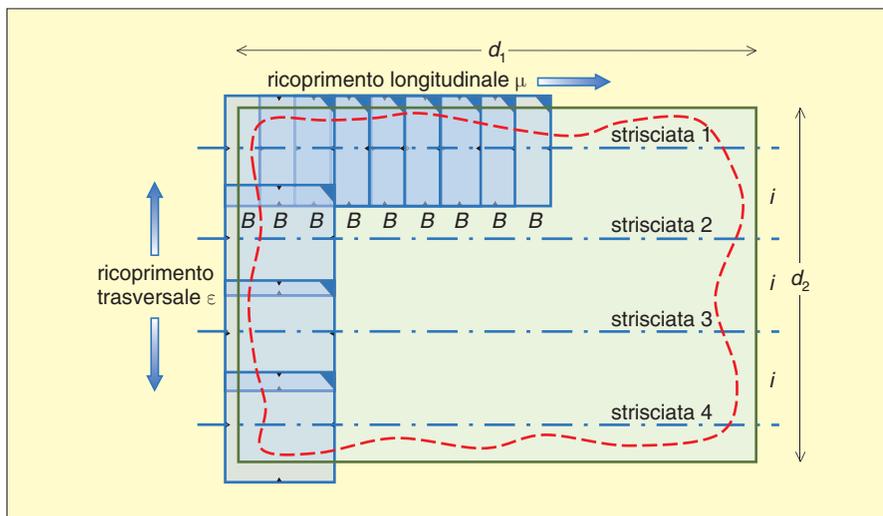
■ Numero dei fotogrammi del rilievo

Al fine di **stimare i costi** del rilievo, e di programmarne l'esecuzione, è necessario valutare con attendibilità, sia il **numero** n_f dei fotogrammi costituenti le **single strisciate**, sia il loro **numero** n_s delle strisciate stesse. Il prodotto dei valori precedenti costituisce il **numero complessivo** n_{tot} dei fotogrammi necessari a coprire stereoscopicamente tutto il territorio da rilevare.

È sempre possibile **racchiudere** il territorio da rilevare (che in generale presenta contorni irregolari), in un **rettangolo ideale** le cui dimensioni d_1 e d_2 corrispondano a quelle dell'**ingombro massimo** dello stesso territorio (► FIGURA 8). A esso si fa riferimento per determinare il numero n_s delle strisciate e il numero n_f dei fotogrammi presenti in ciascuna striscia, dunque anche il numero complessivo n_{tot} di fotogrammi.

La direzione secondo la quale si **sviluppano le strisciate** è quella (quando esiste) di maggior sviluppo del territorio, dunque, nel caso di ► FIGURA 8, quella secondo la dimensione d_1 .

Considerando la ► FIGURA 8 e le precedenti ► FIGURE 3 e 7, il numero n_s delle **strisciate** e il numero n_f dei **fotogrammi** presenti in ogni striscia sono forniti dalle seguenti espressioni:



FAQ

► **Per quale ragione occorre conoscere il numero dei fotogrammi necessari a coprire, con sicurezza e senza «buchi», l'area da cartografare?**

Perché i costi del rilievo sono direttamente proporzionali al numero di fotogrammi che verranno ripresi.

FIGURA 8 Il territorio da rilevare presenta un contorno (tratteggiato nello schema della figura) irregolare. Esso, tuttavia, può sempre essere circoscritto da un rettangolo ideale a cui fare riferimento per stabilire il numero delle strisciate e il numero dei fotogrammi necessari al rilievo.

FAQ

► **I parametri di pianificazione del volo fotogrammetrico hanno significato definitivo e invariabile?**

No, a essi occorre dare un significato indicativo; essi verranno poi verificati, ed eventualmente corretti, durante il volo, per tenere conto delle variabili che esso contempla.

$$n_s = \text{int} \left[\frac{d_2}{L \cdot (1 - \epsilon)} \right] + 1 \quad (9')$$

$$n_f = \text{int} \left[\frac{d_1}{L \cdot (1 - \mu)} + 1 \right] + 1 \quad \text{equivalente a} \quad n_f = \text{int} \left[\frac{d_1}{B} + 1 \right] + 1 \quad (9'')$$

In queste relazioni la funzione «int[]» fornisce il valore **intero** del suo argomento, mentre il «+1» arrotonda all'intero successivo. Il **numero complessivo** n_{tot} dei fotogrammi necessari al rilievo viene fornito dal prodotto dei precedenti valori:

$$n_{tot} = n_s \cdot n_f \quad (10)$$

L'esperienza consiglia poi di aumentare tale valore, indicativamente del 20%, per tenere conto delle **situazioni impreviste** che si possono verificare all'atto di esecuzione della presa.

■ Sintesi dei parametri del piano di volo

Allo scopo di facilitare lo studente nel suo lavoro di apprendimento, riteniamo utile sintetizzare nella ►TABELLA 2, e nella successiva applicazione numerica, i passaggi sequenziali che portano alla definizione dei **parametri** progettuali con i quali viene **pianificato il volo** aereo fotogrammetrico.

Nella costruzione della tabella si considerano noti: la *scala del disegno* (o della *carta*) $1/N_{dis}$, i parametri della *camera* l e p , i parametri di *ricoprimento* μ e ϵ , e la quota media Q_M del terreno.

TABELLA 2 Sintesi del calcolo dei parametri di volo

Fase	Parametro	Espressioni di calcolo		Rif. formule
		Estesa	Sintetica	
1	Denominatore della scala dei fotogrammi	$N = k \cdot \sqrt{N_{dis}}$		(3)
2	Altezza del volo	$H = p \cdot N$		(2)
3	Quota del volo	$Q_v = Q_M + H$		(4)
4	Abbracciamento	$L = \frac{l \cdot H}{p}$	$L = l \cdot N$	(5)
5	Base di presa	$B = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \mu)$	$B = l \cdot N \cdot (1 - \mu)$	(6)
6	Intervallo di scatto	$\Delta t = \frac{l \cdot H}{v \cdot p} \cdot (1 - \mu)$	$\Delta t = \frac{l \cdot N}{v} \cdot (1 - \mu)$	(7)
7	Interasse delle strisciate	$i = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \epsilon)$	$i = l \cdot N \cdot (1 - \epsilon)$	(8)
8	Numero di strisciate	$n_s = \text{int} \left[\frac{d_2}{L \cdot (1 - \epsilon)} \right] + 1$		(9')
9	Numero di fotogrammi per strisciata	$n_f = \text{int} \left[\frac{d_1}{L \cdot (1 - \mu)} + 1 \right] + 1$	$n_f = \text{int} \left[\frac{d_1}{B} + 1 \right] + 1$	(9'')
10	Numero di fotogrammi complessivi	$n_{tot} = n_s \cdot n_f$		(10)

APPLICAZIONE

Problema Per il rilievo in scala 1:2000 del territorio pianeggiante di un piccolo Comune, posto a una quota media di 23 m s.l.m., le cui dimensioni sono contenute in un rettangolo ideale di 35×20 km, deve essere programmato un volo fotogrammetrico con un aereo la cui velocità di crociera ottimale è di 250 km/h. Sull'aereo è montata una camera con obiettivo grandangolare di distanza focale 152,85 mm e pellicola con formato utile di 228×228 mm. Si vogliono determinare i parametri del volo facendo riferimento ai ricoprimenti longitudinale e laterale rispettivamente del 60% e del 20%.

Soluzione

Applicando in sequenza le formule sintetizzate nella precedente tabella, e adottando il valore 180 per il coefficiente k della formula empirica (3), otteniamo:

- denominatore della scala dei fotogrammi $N = 180 \cdot \sqrt{2000} = 8050$ (scala 1:8050)
- altezza del volo dal suolo $H = 0,15285 \cdot 8050 = 1230$ m
- quota assoluta del volo $Q_v = 23 + 1230 = 1253$ m
- abbracciamento $L = \frac{0,228 \cdot 1230}{0,15285} = 1835$ m
- base di presa $B = \frac{0,228 \cdot 1230}{0,15285} \cdot (1 - 0,60) = 734$ m
- intervallo di scatto $\Delta t = \frac{0,228 \cdot 1230}{0,15285 \cdot 69,44} \cdot (1 - 0,6) = 10,6$ s
- interasse delle strisciate $i = \frac{0,228 \cdot 1230}{0,15285} \cdot (1 - 0,20) = 1468$ m
- numero di strisciate $n_s = \text{int} \left[\frac{20\,000}{1835 \cdot (1 - 0,20)} \right] + 1 = 14$
- numero di fotogrammi per strisciata $n_f = \text{int} \left[\frac{35\,000}{1835 \cdot (1 - 0,6)} + 1 \right] + 1 = 49$
- numero di fotogrammi complessivi $n_{tot} = 14 \cdot 49 = 686$

FAQ

► **È realistico ipotizzare che le condizioni del volo si mantengano costanti per tutta la sua durata?**

No, in effetti le camere per la presa aerea sono dotate di dispositivi di controllo della presa e di apparati di manovra che consentono di modificare in volo i parametri che condizionano la presa stessa.

4. Gestione del volo fotogrammetrico

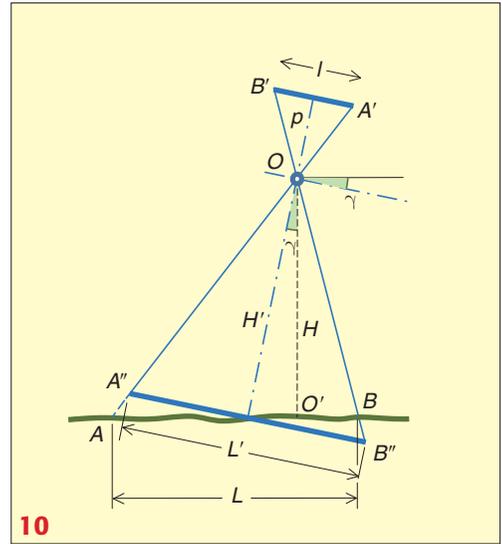
I parametri determinati nel paragrafo precedente sono essenziali per impostare correttamente il volo di presa, tuttavia essi devono essere considerati come una **programmazione di massima** dello stesso volo.

In effetti non è possibile prevedere l'**esatto svolgersi** degli eventi per tutto il tempo del volo, sia a causa delle *particolarità del terreno*, che potrebbero fare variare la scala del fotogramma, sia per le piccole ma inevitabili *variazioni della velocità* dell'aereo, sia, ancora, per i movimenti impressi all'aereo dai venti.

In conseguenza di ciò non è possibile affidare **completamente** l'operazione di presa agli **automatismi** di cui sono dotate le camere per la presa aerea, ma è necessaria la presenza, a bordo dell'aereo, di personale specializzato (► FIGURA 9) che gestisca la presa **controllando**, ed eventualmente **correggendo**, alcuni aspetti critici che di seguito verranno accennati. Possiamo affermare, pertanto, che la presa aerea è un'operazione **semiautomatica**.

FIGURA 9 Camera per la presa aerea montata sul pavimento dell'aereo. Il tecnico tiene sotto controllo l'operazione di presa attraverso il periscopio di navigazione e rimane sempre in contatto radio con il pilota per richiedere variazioni ai parametri del volo.

FIGURA 10 Schema geometrico della presa pseudo-nadirale: per i movimenti dell'aereo l'asse della camera non è perfettamente verticale. In generale questo inconveniente provoca variazioni di scala trascurabili sui fotogrammi.



■ Inclinazione dell'asse della camera

Si è detto che l'aereo durante la presa può essere sottoposto a perturbazioni che lo scostano dalla traiettoria ideale rettilinea e orizzontale. In particolare il **beccheggio** (rotazione attorno a un asse ortogonale al moto), provoca l'**inclinazione** dell'asse della camera, rispetto alla verticale richiesta (► FIGURA 10), che provoca variazioni della **scala media dei fotogrammi**.

Si tratta, di solito, di una piccola deviazione, tanto che tale situazione viene detta presa **pseudo-nadirale**.

Per verificare questa affermazione osserviamo che in presenza di un **angolo di deviazione** γ , formato dall'asse della camera e dalla verticale (nel caso di prese nadirali sarebbe $\gamma = 0^\circ$), cambia il valore dell'**abbracciamento** L del fotogramma. Pertanto, rimanendo immutato il formato l della lastra, cambia la **scala media** dei fotogrammi fornita dalla nota relazione $1/N = l/L$.

Per i modesti valori di γ , è ammesso **approssimare** l'**abbracciamento** $L = AB$ sul terreno con il segmento $L' = A''B''$ ortogonale all'asse della camera ($A''B'' \cong AB$). L'espressione della scala diventa:

$$\frac{1}{N} = \frac{l}{L} \cong \frac{l}{L'}$$

Considerando poi i due triangoli simili $A'B'O$ e $A''B''O$, si ha $l/L' = p/H'$. Ma, essendo $H' = H/\cos \gamma$, si può scrivere:

$$\frac{1}{N} \cong \frac{p}{H} \cos \gamma$$

Dunque la **scala del fotogramma** con asse della camera **inclinato** è, con buona approssimazione, uguale alla scala rigorosa moltiplicata per il coseno dello sbandamento γ rispetto alla verticale. Se si considera che la rotazione γ è sempre molto piccola, e non supera mai il valore di alcuni gradi, si può facilmente dedurre (per le proprietà della funzione coseno) che la variazione di scala del fotogramma nell'ambito della presa *pseudo-nadirale* è **trascurabile**. Infatti, se ipotizziamo uno sbandamento dell'asse di 4° , quindi con $\cos 4^\circ = 0,997$, la scala media del fotogramma diventa: $1/N \cong (p/H) \cdot 0,997$. Il coefficiente moltiplicativo 0,997, nel contesto, può essere del tutto trascurato.

■ Variazione dei tempi di scatto

Il calcolo dell'intervallo Δt di **apertura dell'otturatore** determinato con la (7) è un valore di riferimento funzionale alla **programmazione di massima** del volo. In effetti esso è stato calcolato immaginando che l'aereo mantenga idealmente una **velocità costante** v lungo le sue traiettorie; in realtà, le azioni del vento (pur limitate) causano **variazioni** della velocità dell'aereo.

Pertanto, se si mantenesse per tutto il volo l'*intervallo di scatto* Δt calcolato, si otterrebbero delle **basi di presa** B diverse da quelle programmate, e con esse la percentuale di **ricoprimento longitudinale** necessaria alla formazione dei *modelli stereoscopici*.

Dunque è necessario controllare, ed eventualmente variare, gli intervalli di scatto Δt durante il volo a mezzo di uno strumento *semiautomatico* detto **cinederivometro**, spesso incorporato al **periscopio di navigazione** (► FIGURA 11); con questo strumento vengono anche corretti gli effetti della **deriva** (da cui il nome *derivometro*).

Si tratta di un dispositivo, **separato** dalla camera ma cablato con essa, provvisto di un **visore** sul quale appare la stessa immagine del terreno ripresa dalla camera, a cui viene sovrapposta l'immagine di un **reticolo** che opera come *indice mobile* (► FIGURA 12). Per effetto del movimento dell'aereo è possibile osservare un apparente **movimento relativo** del terreno rispetto al *reticolo*.

All'operatore che controlla la presa viene richiesto di **variare progressivamente** la velocità del *reticolo* fino ad **annullare il movimento** relativo rispetto al terreno sottostante. A questo punto gli automatismi della camera impongono i corretti intervalli di scatto, per mantenere il **ricoprimento longitudinale** programmato.

■ Deriva

Per effetto del **vento laterale** che preme sull'*impennaggio verticale* della fusoliera, l'aereo non si muove secondo la direzione dell'asse della fusoliera, ma nella **direzione** della **risultante** R tra l'azione del vento V_v e la spinta di propulsione dell'aereo V_p .

Nel nostro contesto la **deriva** è l'angolo δ , compreso tra la direzione della risultante R (cioè la rotta dell'aereo) e l'asse della fusoliera dell'aereo.

Se la camera fosse tenuta in **posizione fissa** rispetto alla fusoliera, si otterrebbe una strisciata con fotogrammi male orientati, come quella rappresentata in ► FIGURA 13, in cui il ricoprimento longitudinale sarebbe errato. La parte superiore della camera (quella che contiene la lastra), però, può essere **ruotata** attorno al suo asse verticale per cui, misurato l'angolo di deriva con il **cinederivometro**, viene imposta automaticamente la rotazione δ alla camera in modo da ottenere la *strisciata corretta* (► FIGURA 14).

■ Trascinamento

L'effetto di *trascinamento* sui fotogrammi è un problema molto delicato, nell'ambito della fotogrammetria aerea, in quanto (a differenza della fotogrammetria terrestre), la presa avviene con la camera in **movimento**.

La circostanza ideale sarebbe quella in cui l'apertura dell'otturatore della camera fosse **istantanea**. In realtà esso deve **rimanere aperto** per un certo intervallo di tempo $\Delta \tau$ (espresso in frazioni di secondo) per consentire l'entrata di una **quantità di luce** sufficiente per permettere la reazione chimica dell'emulsione fotosensibile. Per quanto piccolo sia l'intervallo di tempo $\Delta \tau$ di apertura dell'ottu-



FIGURA 11 Camera aerea Wild RC30; in primo piano il periscopio di navigazione con incorporato il cinederivometro. La parte inferiore rettangolare della camera rimane fissa alla fusoliera; a quella superiore, che contiene la lastra, possono essere impresso rotazioni per eliminare gli effetti della deriva.

FIGURA 12 Aspetto del visore del periscopio di navigazione con il reticolo del cinederivometro e l'immagine della livella sferica della camera.

FAQ

► Su quali parametri del volo può intervenire il cinederivometro?

Sugli intervalli di scatto, adeguandoli alla reale velocità di crociera, e sulla deriva, imponendo piccole rotazioni assiali alla camera per mantenere i fotogrammi allineati correttamente.

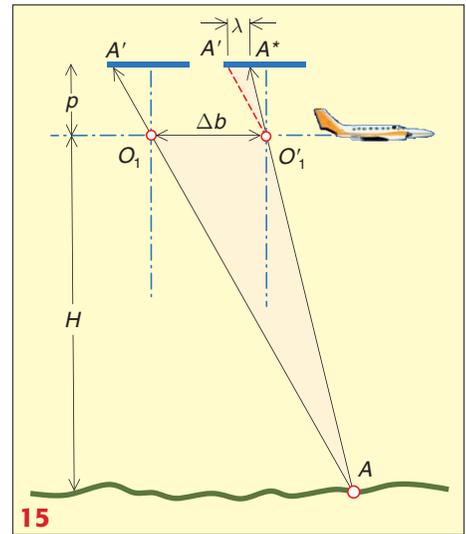
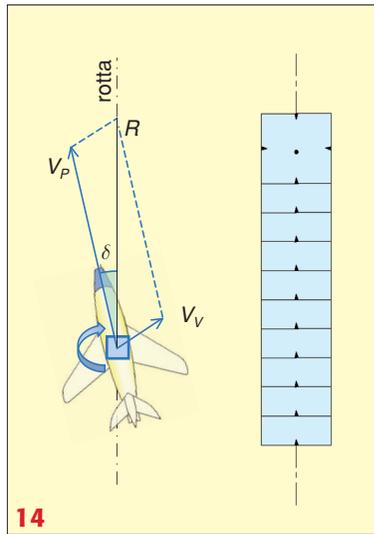
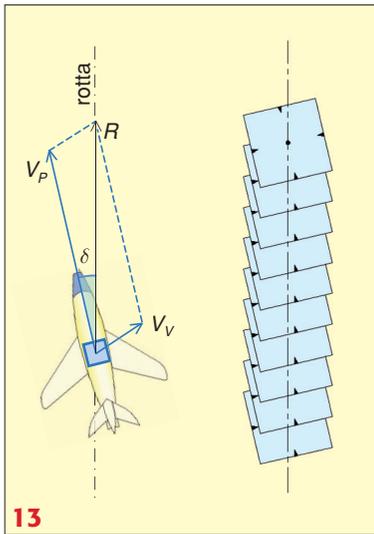


FIGURA 13 Effetto della deriva sui fotogrammi della strisciata senza la correzione della camera.

FIGURA 14 Gli effetti della deriva vengono corretti con rotazioni impresse alla parte superiore della camera (quella che porta la lastra), ottenendo il giusto posizionamento dei fotogrammi.

FIGURA 15 Per effetto del trascinamento l'immagine di un generico punto A sul terreno viene registrata sul fotogramma come un piccolo segmento di lunghezza $A'A^* = \lambda$.

ratore, il **moto dell'aereo** produrrà sempre, sul fotogramma, l'effetto di **trascinamento** dell'immagine.

In un dato istante la camera si trova, con il suo centro di presa O_1 , in una data posizione dello spazio (►FIGURA 15), mentre riceve un raggio luminoso uscito da un punto A sul terreno che va a colpire la lastra nel punto A' . Durante l'intervallo di **tempo** $\Delta\tau$ in cui l'otturatore **rimane aperto**, il centro di presa O_1 si sposta nella posizione O'_1 percorrendo il **tratto** Δb , per cui il raggio di luce ha impresso, non il singolo punto A' , ma il **tratto** $\lambda = A'A^*$. Come conseguenza, sul fotogramma, al posto del punto A verrà registrato un trattino lungo λ . Per la similitudine dei triangoli $A'A^*O'_1$ e $O_1O'_1A$ si può scrivere la relazione:

$$\frac{\lambda}{p} = \frac{\Delta b}{H} \quad \text{quindi} \quad \lambda = p \cdot \frac{\Delta b}{H}$$

Tenendo poi conto della **velocità** v costante dell'aereo (in m/s) e del **tempo** $\Delta\tau$ di apertura dell'otturatore della camera, si ha che $\Delta b = v \cdot \Delta\tau$, per cui si può scrivere:

$$\lambda = \frac{p \cdot v \cdot \Delta\tau}{H} \tag{11}$$

APPLICAZIONE

Immaginiamo di dover progettare un volo al fine di produrre una carta in scala 1:2000, con una camera avente $p = 150$ mm. In base alla ►TABELLA 1 la scala media dei fotogrammi dovrà essere 1:8000, da cui deriva un'altezza di volo dal terreno di $H = 1200$ m. Fissato un tempo di apertura dell'otturatore $\Delta\tau = 1/200$ di secondo e una velocità di crociera dell'aereo di 250 km/h, pari a circa $v = 69$ m/s, l'effetto del trascinamento calcolato con la (10) sarà

$$\lambda = \frac{0,150 \cdot 69}{1200 \cdot 200} = 0,000043 \text{ m} = 0,043 \text{ mm}$$

Tenendo conto che le **dimensioni** della «grana» dell'emulsione fotosensibile è di circa 0,01 mm, l'effetto del trascinamento risulta intollerabile. In questo caso è necessario ridurre il tempo di apertura dell'otturatore a $\Delta\tau = 1/500$ di secondo (ed eseguire la presa in condizioni di **illuminazione** compatibili con questo valore), col quale si avrebbe un valore $\lambda = 0,017$ mm, dello stesso ordine di grandezza della grana dell'emulsione, e quindi tollerabile.

FAQ

► **Per quale ragione l'otturatore della camera deve rimanere aperto per un certo intervallo di tempo causando il trascinamento?**

Per consentire l'entrata nella camera di una quantità di luce sufficiente a consentire l'attivazione dei fenomeni chimici di impressionamento della pellicola.