



LABORATORIO DI VISIONE ARTIFICIALE

Tel. 0382/391372

Telefax 0382/412881

Tecniche e Strumenti per l'Elaborazione
di Immagini ed il Riconoscimento di
Forme

Parte II: Livello Alto e Strumenti Disponibili

7.

24 Novembre 1989

c/o SPERONI Spa, Spessa Po

M. Ferretti

*Visione tridimensionale:
Stereometria, fotometria
"Shape from shading"*

Dipartimento di Informatica e Sistemistica,
Università degli Studi di Pavia

VISIONE 3D

- PROBLEMA DI "OTICA INVERSA"
- RICOSTRUZIONE delle PROFONDITA'
- RICOSTRUZIONE delle SUPERFICI
- RICOSTRUZIONE degli OGGETTI

VISIONE 3D

METODI PASSIVI

- viene acquisito il segnale di intensità con un sensore passivo (telecamera...) e la sorgente di luce è di più calibrata

METODI ATTIVI

- viene acquisito un segnale (ottico, acustico, elettromagnetico...) generato da un dispositivo (sorgente)
- strutturazione della luce
 - reticolo
 - lame di luce

VISIONE 3D

METODI PASSIVI

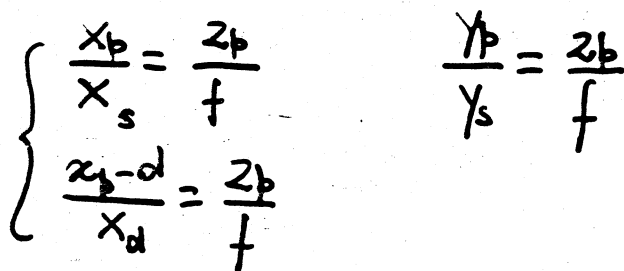
STEREOMETRIA

- Ricostruzione della PROFONDITA'
- Uso di ridondanza
2, 3, ... telecamere

TRIANGOLAZIONE

- ① CALIBRAZIONE delle telecamere
- ② CORRISPONDENZE di caratteristiche omologhe
E DISPARITA'
- ③ CALCOLO DI 2 gestione errori

TRIANGOLAZIONE

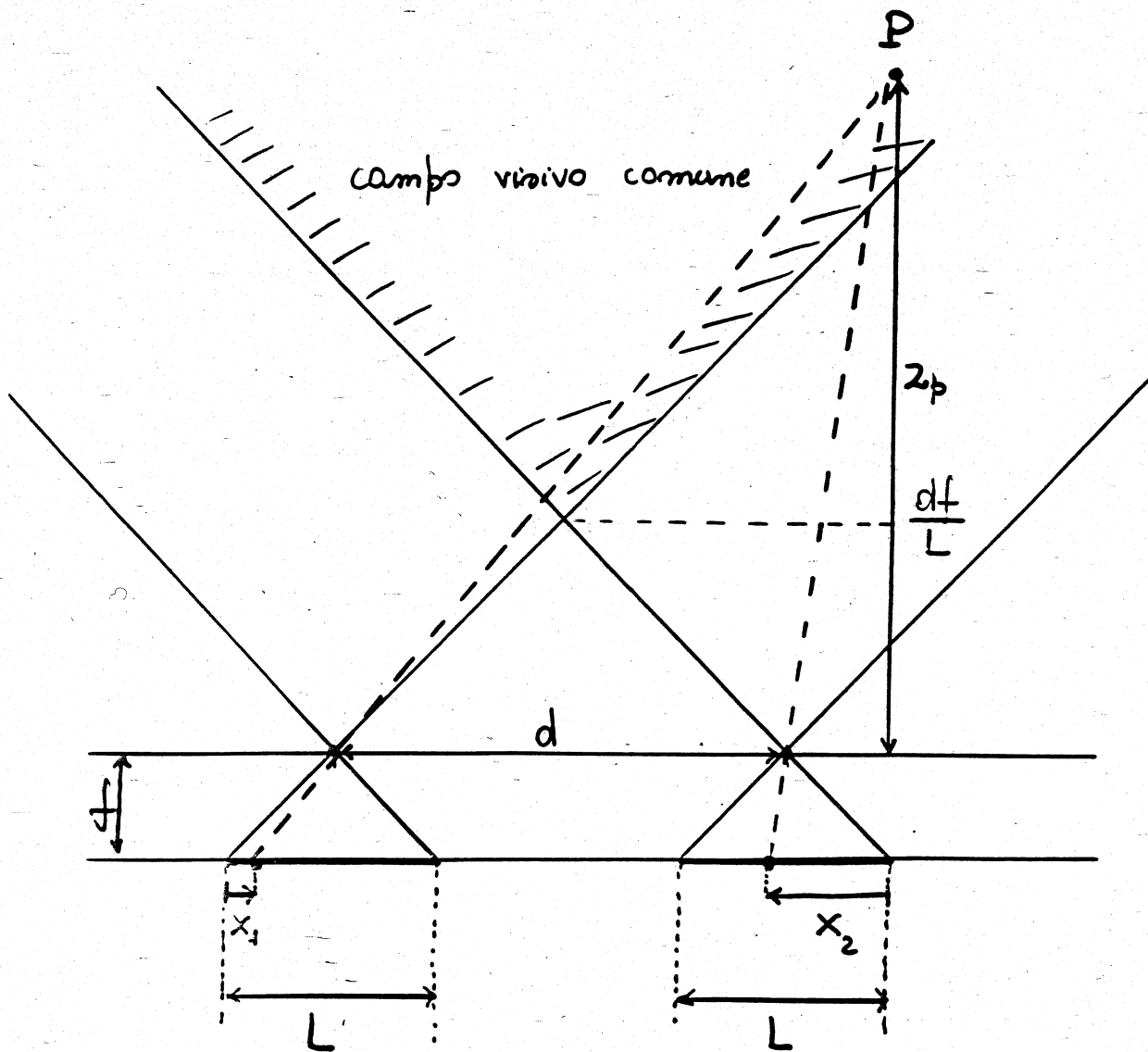


$$z_p = \frac{fd}{x_s - x_d} = \frac{fd}{\Delta x}$$

$$r = \frac{d \sqrt{f^2 + x_s^2 + y_s^2}}{x_s - x_d}$$

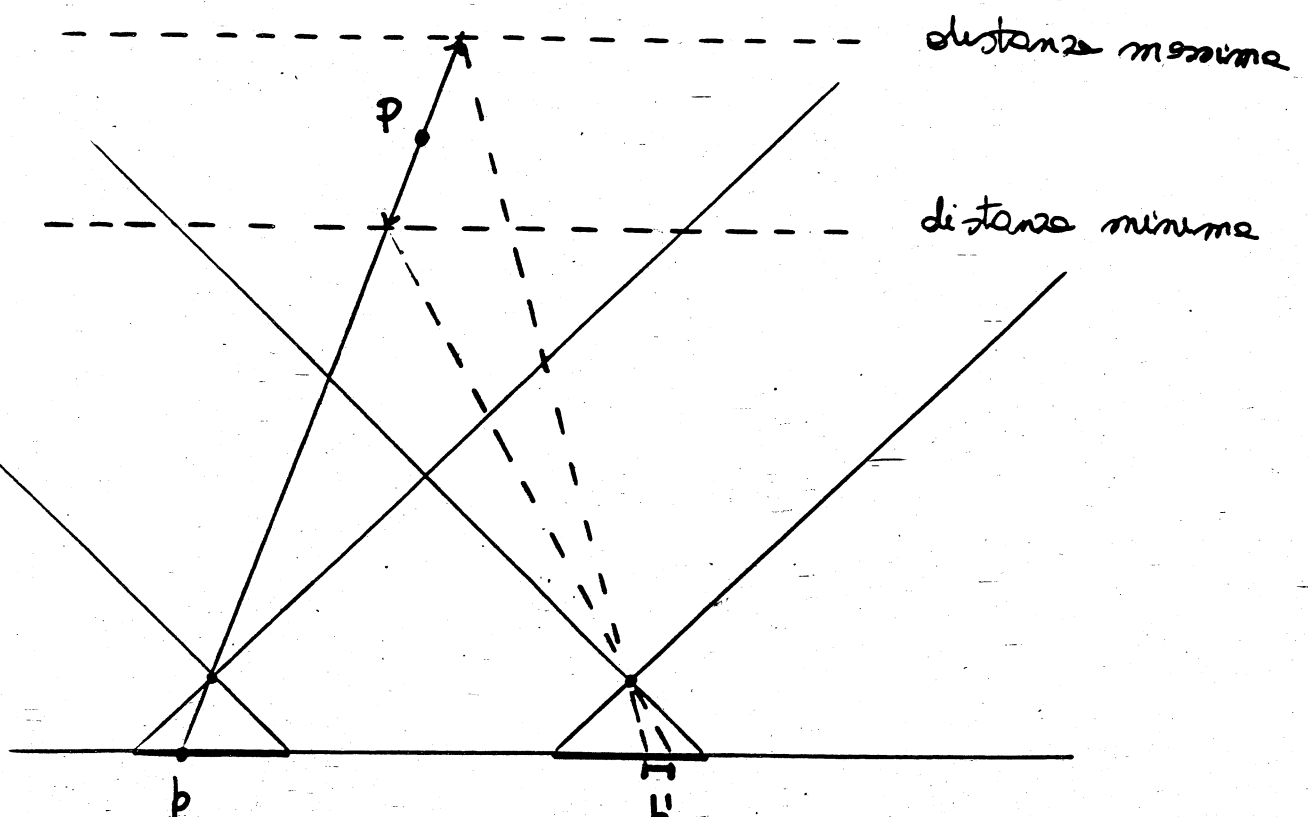
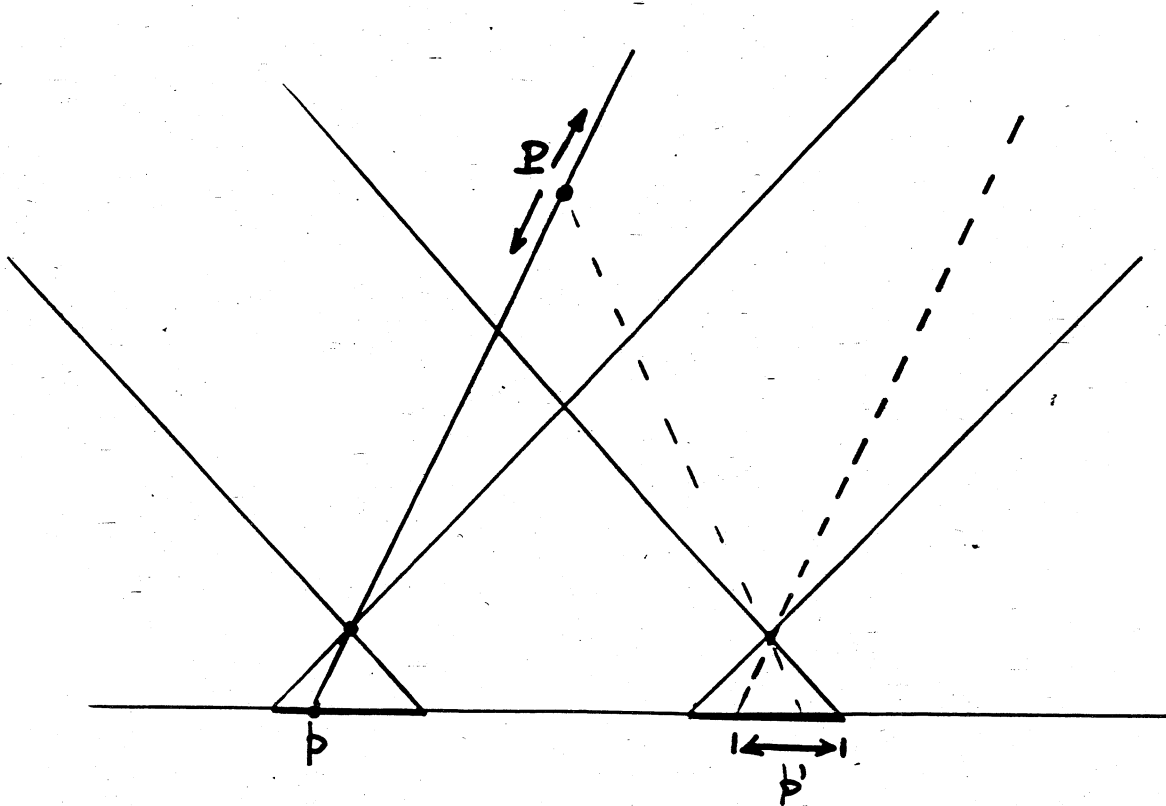
VISIONE 3D : STEREO METRIA

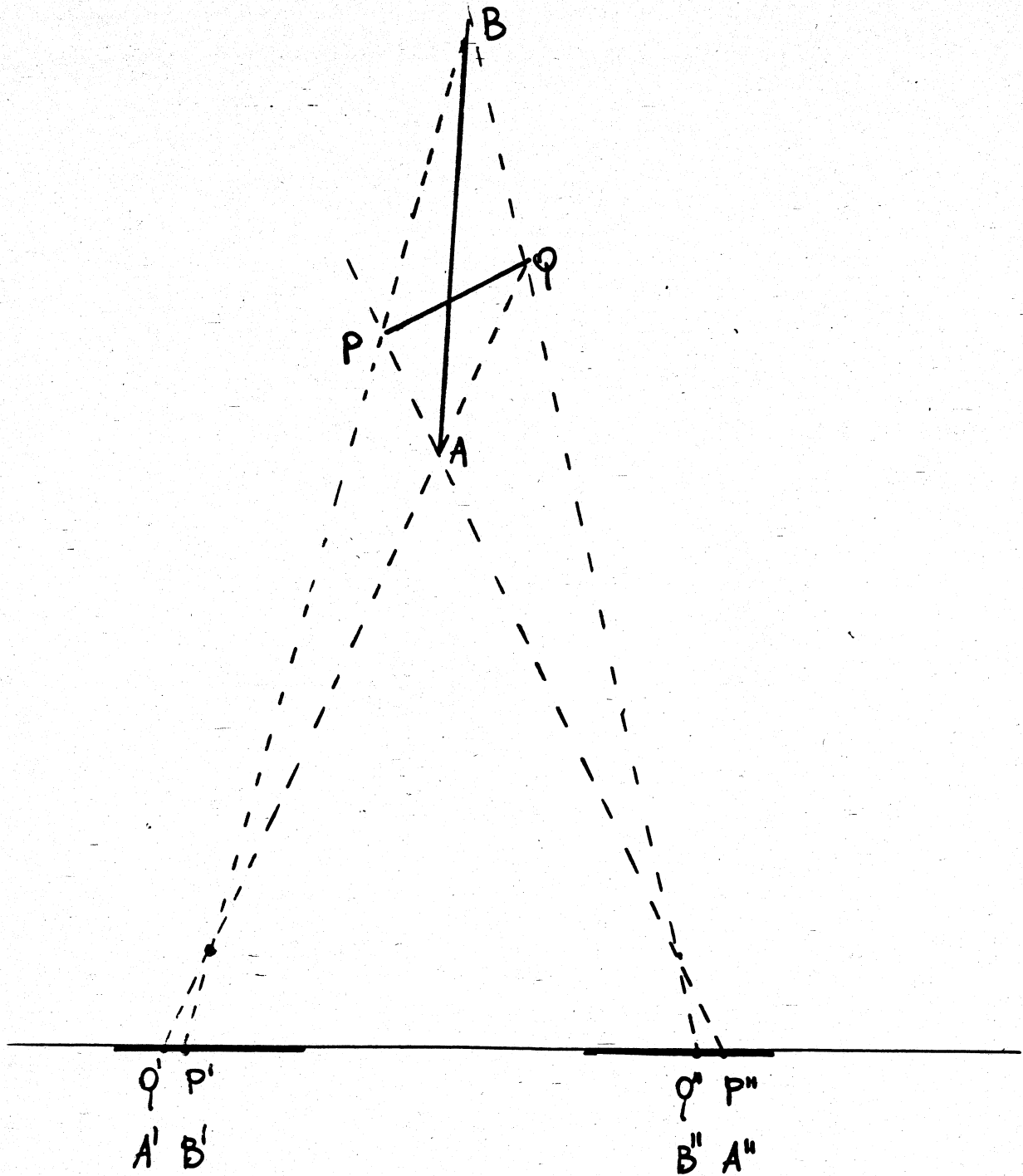
TRIANGOLAZIONE



$$z_p = \frac{fd}{L - (x_1 + x_2)}$$

TRIANGOLAZIONE : VINCOLI di POSIZIONE



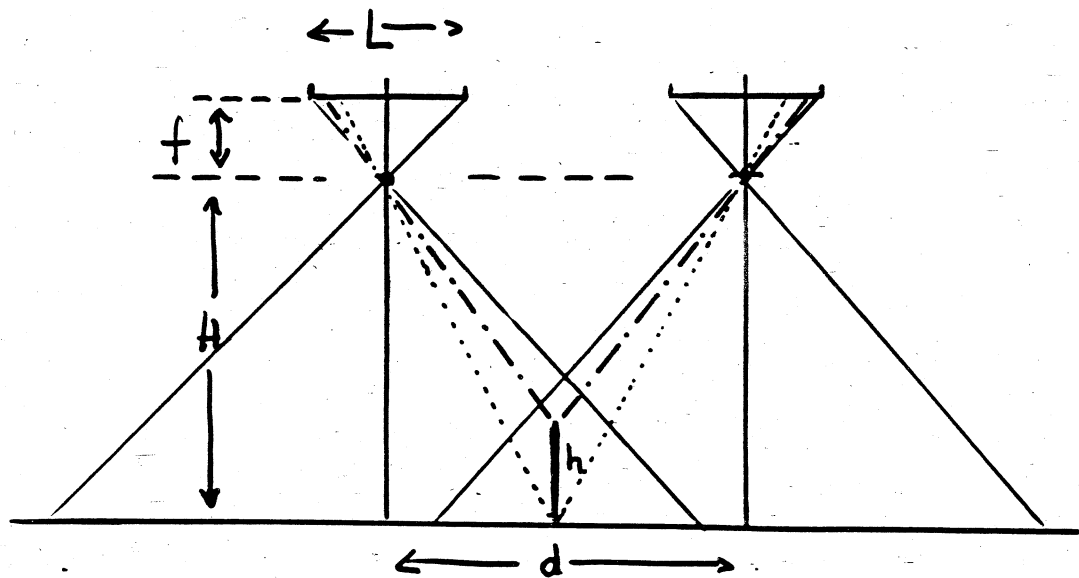


VISIONE 3D

STEREOMETRIA

TELEMETRIA $\times$ ALTEZZE

2 telecamere $\parallel$ al terreno



$$h = H \left(1 - \frac{dNf}{L\Delta} \right) = df \left(\frac{1}{\Delta_0} - \frac{1}{\Delta} \right) \frac{N}{S}$$

Δ_0, Δ in pixel

N/L in pixel/mm sulla pellicola

f in mm focale

h, H, d nella stessa unità (ad es. m)

Δ_0 disparità in pixel per $h=0$

TRIANGOLAZIONE : PRECISIONE

$$z = \frac{f d}{x}$$

$$z = z(f, d, x)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} f & \text{dist. piano imm.} \\ d & \text{okist. intercale} \\ x & \text{diff. punti corr.} \end{array} \right\}$$

Δz errore assoluto

$$\Delta z = \left| \frac{\partial z}{\partial f} \right| \Delta f + \left| \frac{\partial z}{\partial d} \right| \Delta d + \left| \frac{\partial z}{\partial x} \right| \Delta x$$

$\frac{\Delta z}{z}$ errore relativo

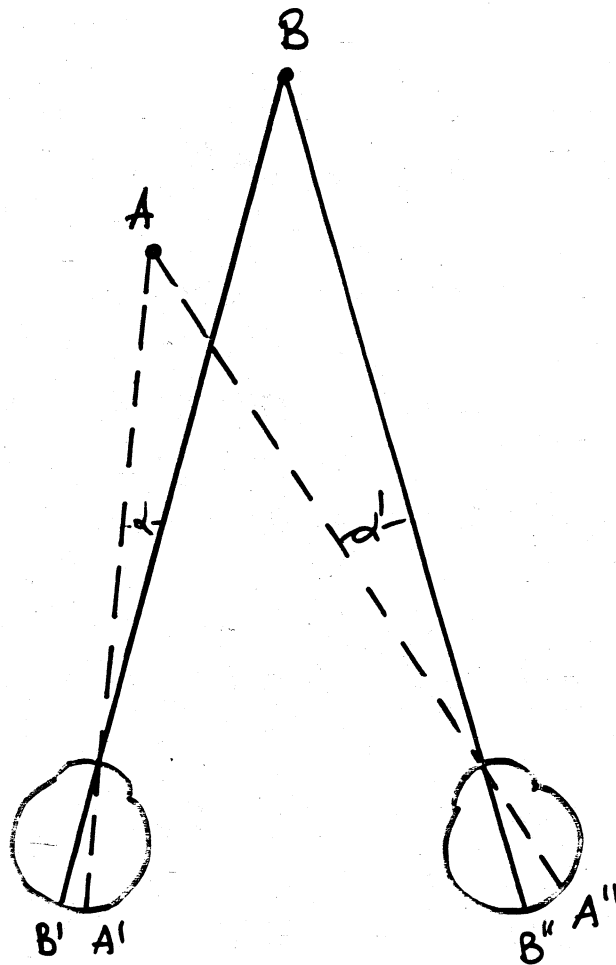
Δf e $\Delta d \rightsquigarrow$ calibrazione

$\Delta x \rightsquigarrow$ corrispondenza

$$\Delta z = \frac{z^2}{f d} \Delta x$$

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{z}{f d} \Delta x$$

STEREOMETRIA UMANA



α disparità
stereocuità

discriminazione di
profondità

$$\Delta z = 0.05 \text{ mm} \quad z \approx 50 \text{ cm}$$

$$\Delta z = 4 \text{ mm} \quad z \approx 5 \text{ m}$$

$$\alpha < 2''$$

PRECISIONE

TRIANGOLAZIONE

$$\Delta z = \frac{z^2}{f \cdot d} \Delta x$$

a) $f \cdot d = 50 \text{ mm} \cdot 1 \text{ m} = 5 \cdot 10^{-2}$

$z = 1 \text{ m} \quad \Delta z = 2 \cdot 10 \Delta x$

$\Delta x = 1 \mu \quad \Delta z = 20 \mu \quad \frac{\Delta z}{z} = 2 \text{‰}$

$\Delta x = 1 \text{ mm} \quad \Delta z = 2 \text{ cm} \quad \frac{\Delta z}{z} = 2\%$

$z = 10 \text{ m} \quad \Delta z = \frac{10^2}{5 \cdot 10^{-2}} \Delta x = 2 \cdot 10^3 \Delta x$

$\Delta x = 1 \mu \quad \Delta z = 2 \text{ mm} \quad \frac{\Delta z}{z} = 2 \text{‰}$

$\Delta x = 1 \text{ mm} \quad \Delta z = 2 \text{ m} \quad \frac{\Delta z}{z} = 20\%$

b) $f \cdot d = 50 \text{ mm} \cdot 10^{-1} \text{ m} = 5 \cdot 10^{-3}$

$z = 0.5 \text{ m} \quad \Delta z = 25 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^2 = 50$

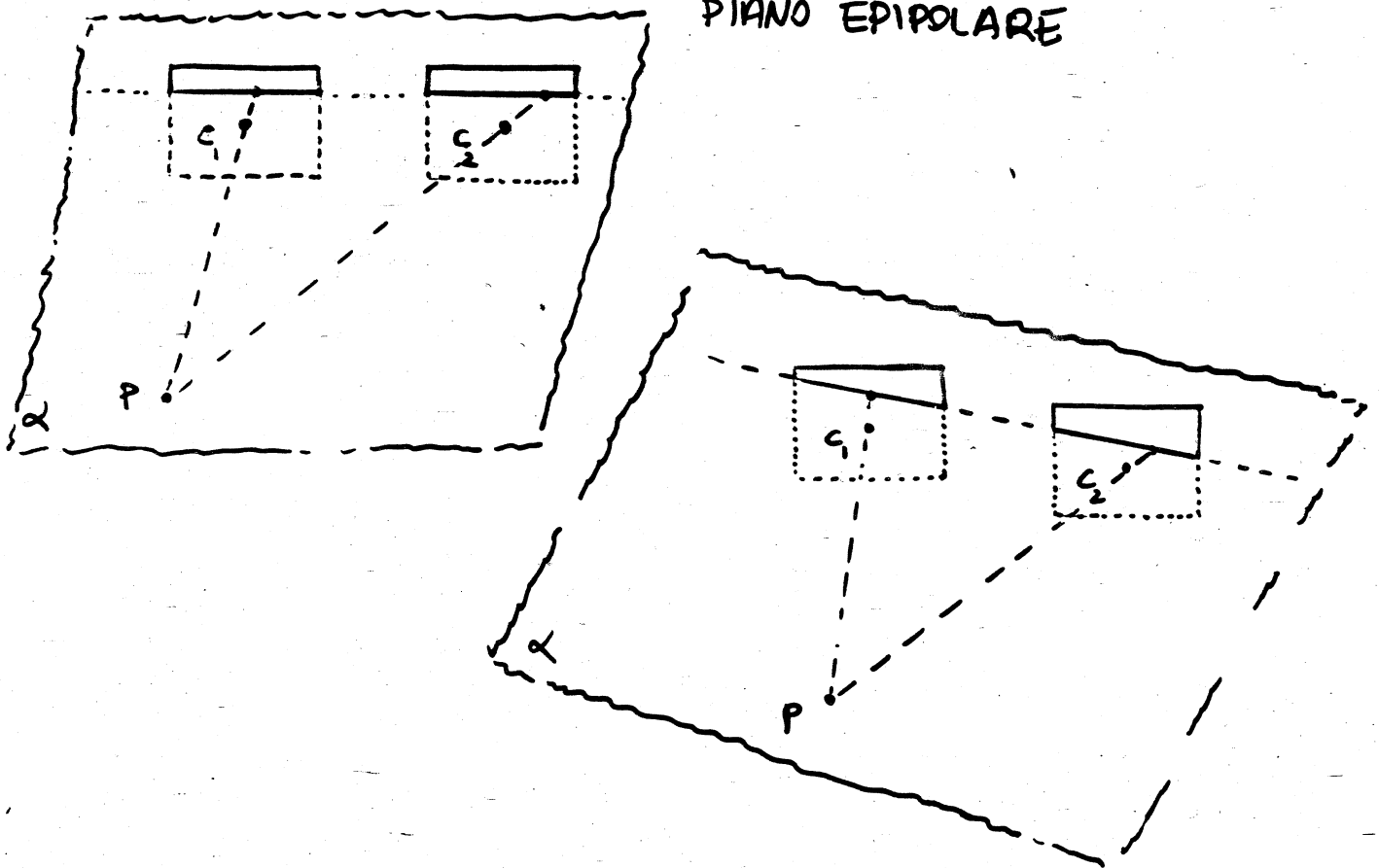
$\Delta x = 1 \mu \quad \Delta z = 50 \mu \quad \frac{\Delta z}{z} = 1 \text{‰}$

$z = 5 \text{ m} \quad \Delta x = 1 \mu \quad \Delta z = 5 \text{ mm} \quad \frac{\Delta z}{z} = 1 \text{‰}$

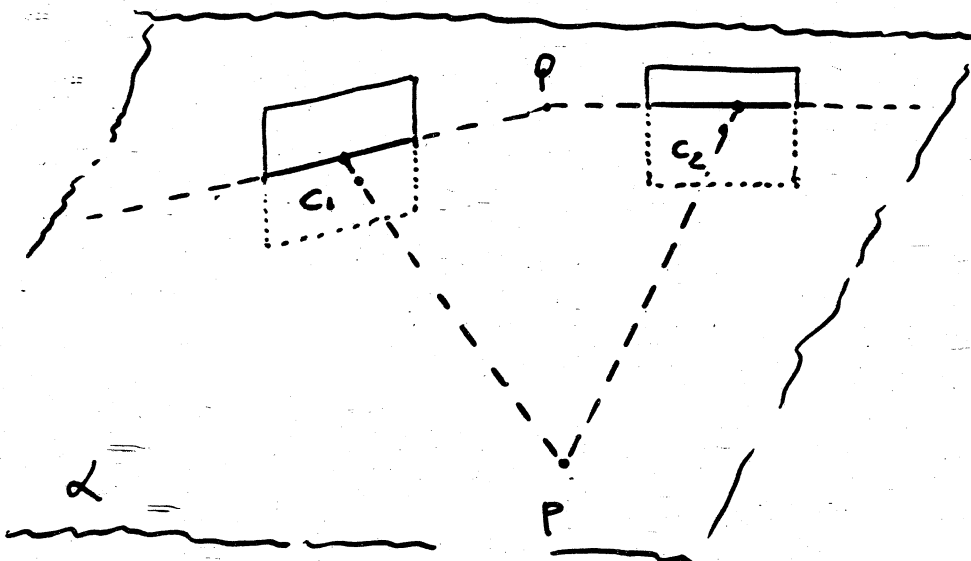
IL VINCOLO EPIPOLARE

- Il problema della corrispondenza è 1-D

PIANO EPIPOLARE

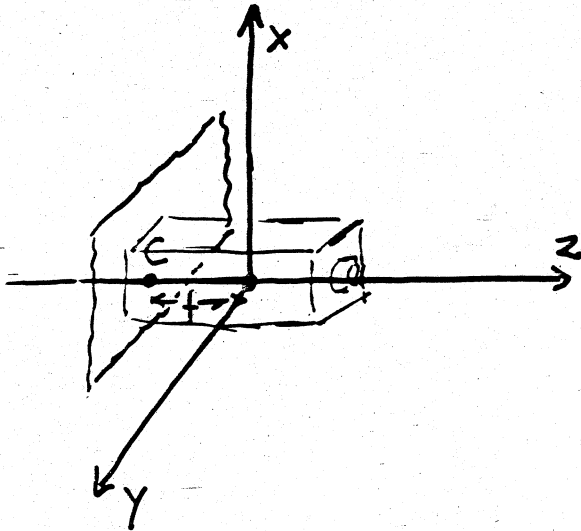


RETTE EPIPOLARI



TRIANGOLAZIONE : CALIBRAZIONE

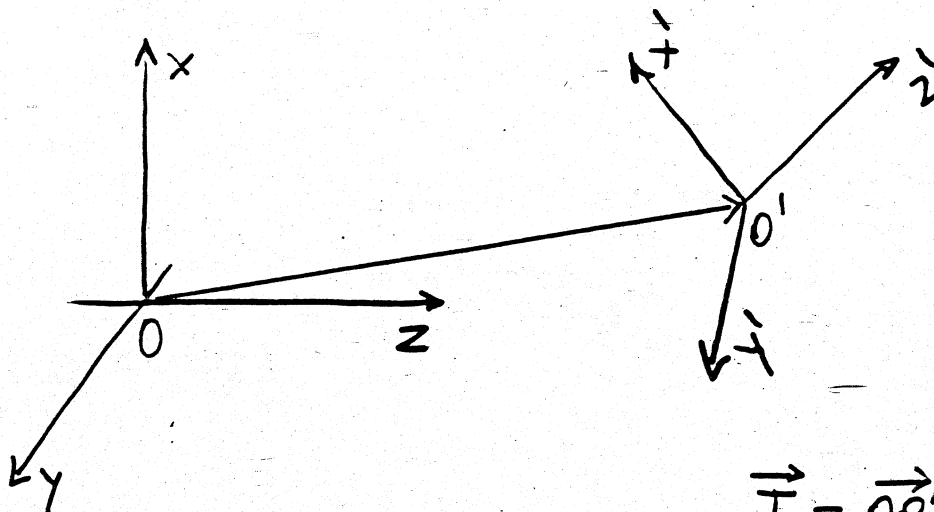
① PARAMETRI INTRINSECI



f distanza focale

C centro nel piano immagine

② PARAMETRI ESTRINSECI



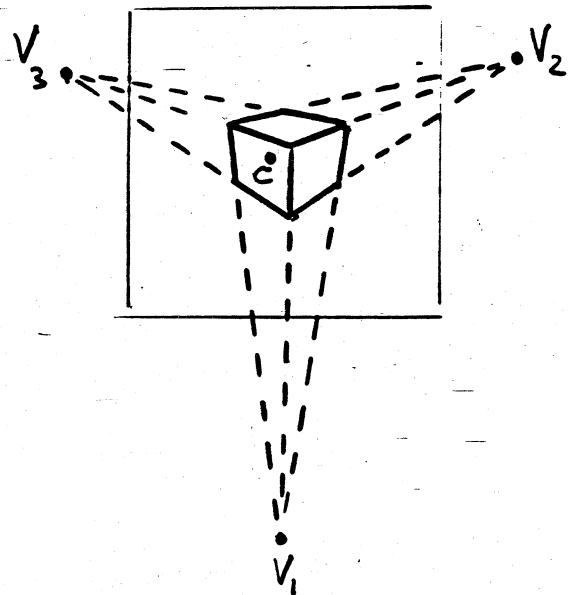
$$\vec{T} = \vec{OO'}$$

$$\theta, \phi, \psi$$

VISIONE 3D STEREOMETRIA

TRIANGOLAZIONE : CALIBRAZIONE PARAMETRI INTRINSECI

- immagini di reticoli a maglia quadrata di geometria nota con numerosi parametri stimati con il metodo dei minimi quadrati
- PUNTI DI FUSA



C è ortocentro di $\triangle V_1 V_2 V_3$

$$\vec{w}_1 = (x_1, y_1, -f)$$

$$\vec{w}_2 = (x_2, y_2, -f)$$

$$\vec{w}_1 \cdot \vec{w}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + f^2 = |\vec{w}_1| |\vec{w}_2| \cos \alpha$$

$$\vec{w}_1 \cdot \vec{w}_2 = \vec{w}_1' \cdot \vec{w}_2' \quad \text{e ruota le proiezioni
immagini}$$

$$f = |\vec{w}_1 \cdot \vec{w}_2|^{1/2}$$

VISIONE 3D

STEREO METRIA

TRIANGOLAZIONE: CALIBRAZIONE PARAMETRI ESTRINSECI

1) $\vec{T}, \theta, \phi, \psi$

6 parametri

6 punti non coplanari

- reticolo piano osservato da molteplici posizioni $\rightarrow$ minimi quadrati

2) $\vec{T}, [R]$ matrice di rotazione (ortogonale)

Stima di $[R]$

$$A = R A' \quad ; \quad R = A^t A'$$

$[A]$ e $[A']$ matrici ortogonali le cui colonne sono le componenti dei vettori delle tre direzioni mutuamente ortogonali associate ai 3 punti di fuga nei due sistemi di immagini

Stima di $\vec{T}$

da informazioni associate al pattern

(equidistanza di linee)

PRECISIONE $\approx R < 1\%$

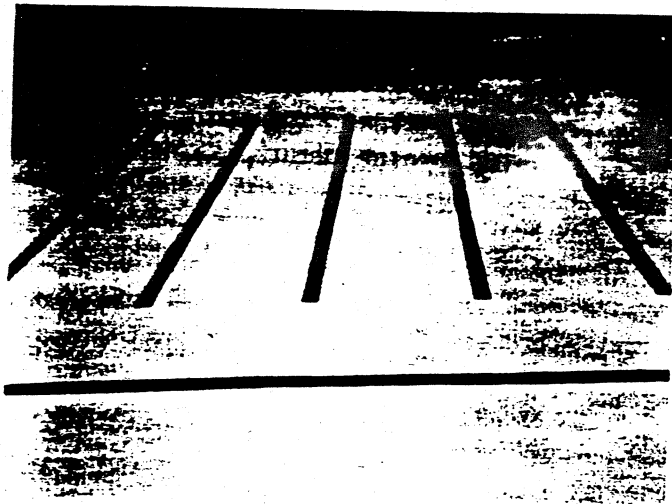
$\vec{T} \approx 1\%$

VISIONE 3D

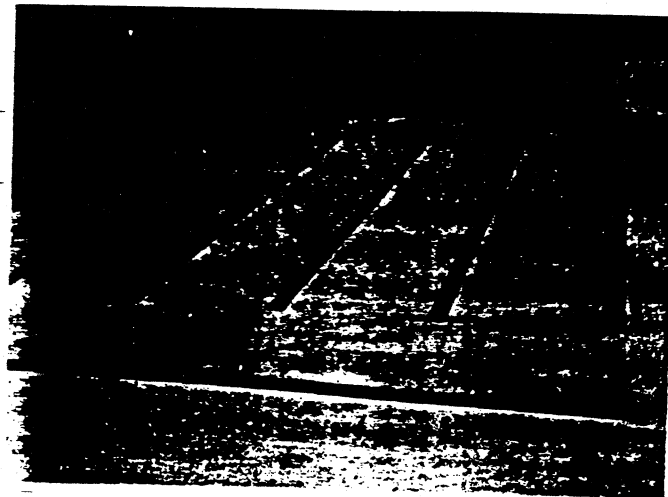
STEREOMETRIA

TRIANGOLAZIONE : CALIBRAZIONE

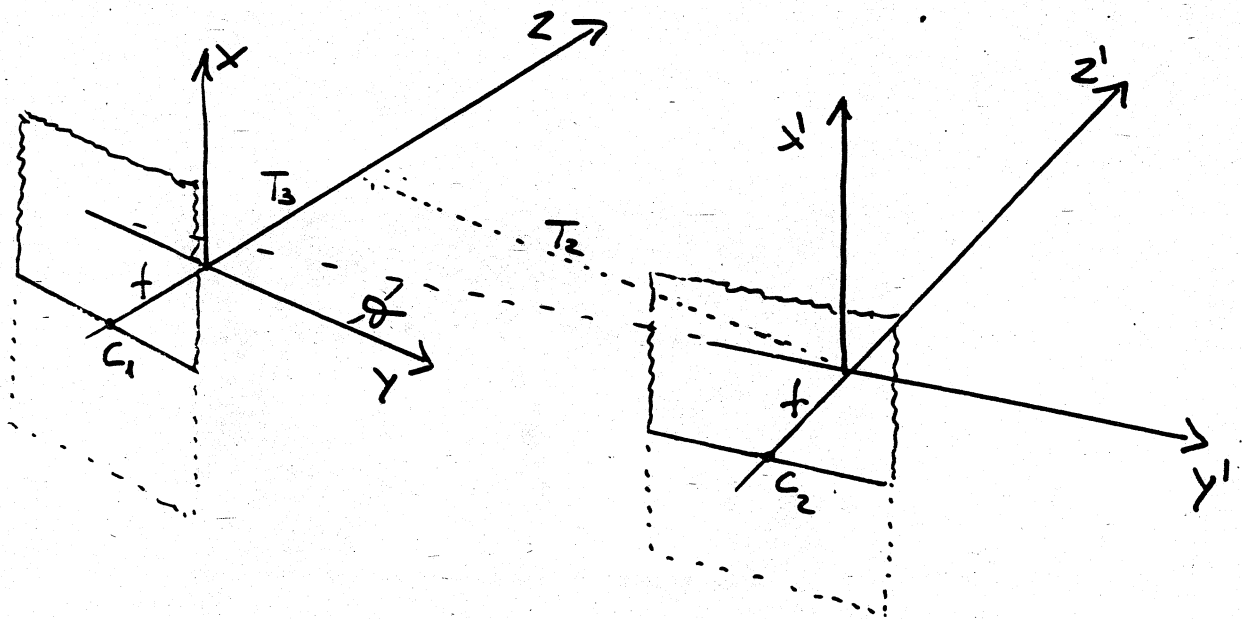
A



B



PRECISIONE TRIANGOLAZIONE



$$\Delta z = \frac{z^2}{f T_2} \Delta p + \frac{z}{f T_2} \Delta T_2 + \Delta T_3 + \frac{z^2}{T_2} \Delta \theta$$

In particolare, nell'intorno dei centri C_1, C_2

$$\frac{\partial z}{\partial \theta} \approx \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad \text{decrescente in } \theta$$

IL PROBLEMA DELLE CORRISPONDENZE
"MATCHING"

- Le differenze significative derivano dai diversi punti di osservazione, non da mutamenti della scena (immagine $\leftrightarrow$ immagine, non immagine $\leftrightarrow$ modello)
- I cambiamenti più grossi nella scena si hanno nell'intorno dei confini fra oggetti e spesso sono associati alle occlusioni
- Le corrispondenze fra i pixel individuali è difficile da ottenere, perché l'informazione di vicinanza associata al pixel è troppo poca per una corrispondenza affidabile

corrispondenze fra interi

MATCHING di AREA

MATCHING di CARATTERISTICHE

IL PROBLEMA DELLE CORRISPONDENZE

Per diminuire lo spazio di indagine e l'incertezza si fa ricorso ai seguenti VINCOLI

- vincolo epipolare

- vincolo di continuità

alla risoluzione alla quale è possibile la stereometria, l'immagine rappresenta quasi ovunque porzioni di superfici continue $\rightarrow$ punti contigui nell'immagini "sono" contigui nello spazio $\rightarrow$ correlazione

- tecnica multirisoluzione

- tecnica "sequenze"

acquisizione di molte viste in sequenza

VISIONE 3D

STEREOMETRIA

IL PROBLEMA DELLE CORRISPONDENZE

HATCHING di AREA

- Sfrutta il vincolo di continuità
- un intorno di forma regolare del punto P di I_1
- correlazione con intorno sulla retta (segmento) epipolare in I_2
- la scelta di P è di solito basata sui risultati di un "operatore di interesse" che identifica zone in I_1
 - con elevate varianze in direzione // retta epipolare
 - con autocorrelazione 2-D che esibisce un picco notevole
 - con elevate varianze in 4 direzioni

IL PROBLEMA DELLE CORRISPONDENZE

MATCHING di CARATTERISTICHE
(FEATURES)

- feature "semantiche" (derivanti da proprietà fisiche e/o geometriche note)
- feature di "intensità" (discontinuità che non hanno necessariamente valore fisico)
- complessità punti, lati, segmenti
dimensioni
contrasto
contenuto semantico
frequenza di presenza
facilità di misura delle caratteristiche
- lati
- linee

IL PROBLEMA DELLE CORRISPONDENZE

HATCHING di LINEE

- le linee, come caratteristiche, sono molto più affidabili dei singoli elementi sede di lato

① estrazione di linee (raggruppamento di punti sede di lato con gradiente simile; uso della trasformata di Hough)

② generazione di ipotesi di corrispondenza

- scelta di un segmento L in I_1
- calcolo del punto medio m_L
- calcolo della retta epipolare in I_2 corrispondente a m_L
- determinare in I_2 tutti i segmenti R che soddisfanno i criteri

a) intersezione

b) $|\text{dis}(L, R_i)| < \text{dis}_{\max}$

c) $|\text{length}(L) - \text{length}(R_i)| < \delta_e$

⋮

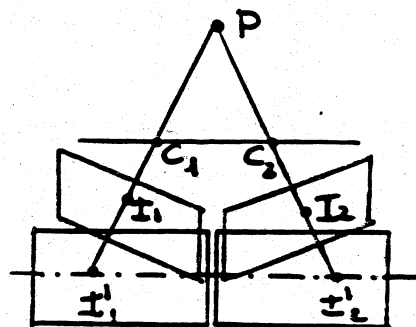
③ arricchire la descrizione delle rette con relazioni spaziali (prof) e operare sulle strutture a prof per ridurre gli minimi di corrispondenze

VISIONE TRINOCULARE

- La terza telecamera riduce le ambiguità nelle corrispondenze fra segmenti di retta

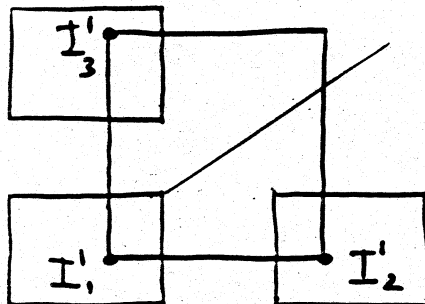
① Rettificazione delle immagini

così 2 telecamere



paralleli a $\overline{C_1 C_2}$

così 3 telecamere

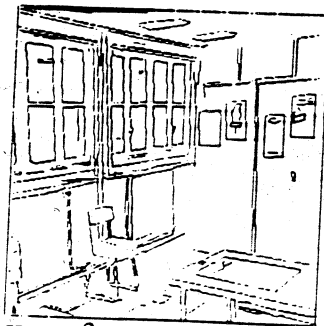


immagini 1-2

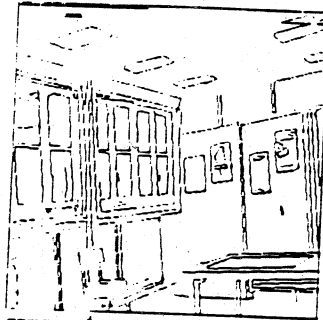
epipolari orizzontali

immagini 1-3

epipolari verticali



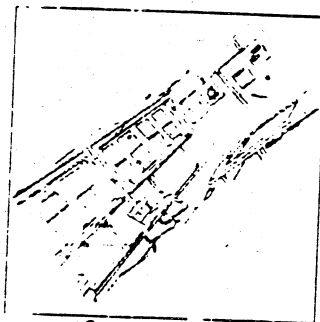
camera 3



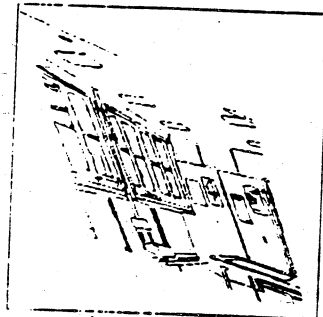
camera 1



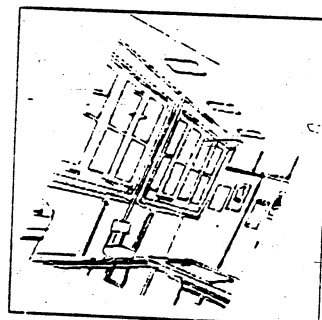
camera 2



camera 3



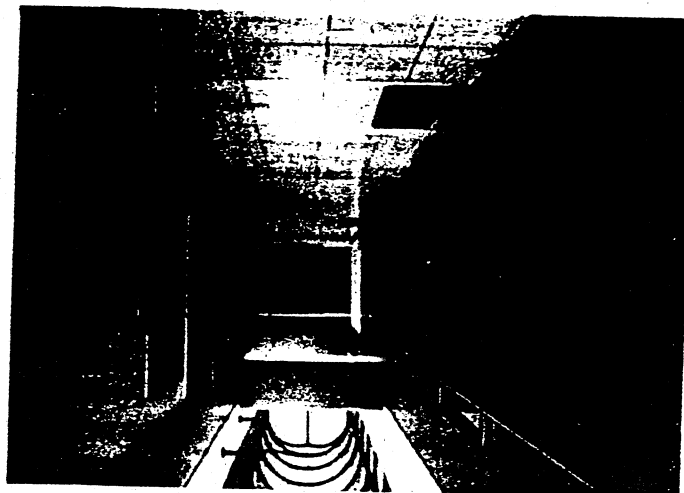
camera 1



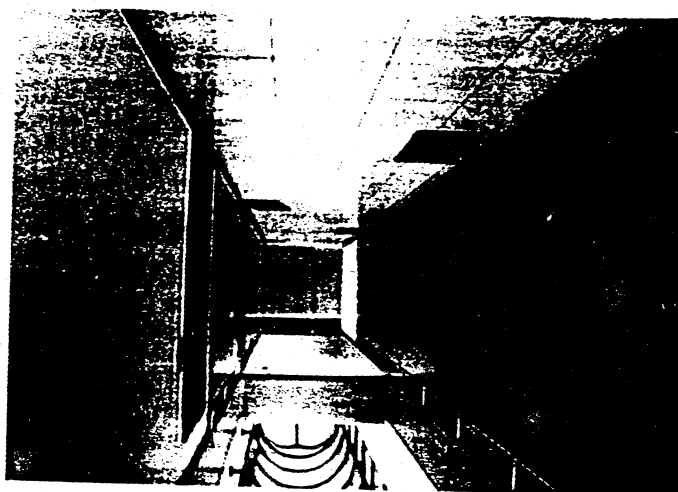
camera 2

VISIONE TRINOCULARE

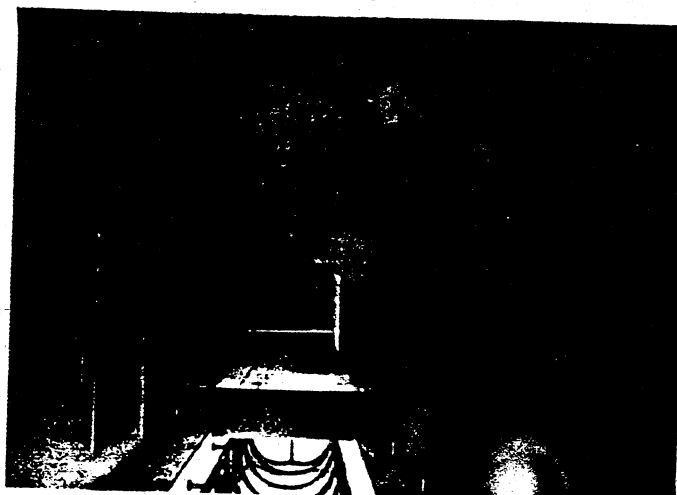
- ② I punti di fuga (3 per ogni immagine) sono invarianti per traslazione.
Sulle 3 immagini rettificate coincidono
- ③ segmenti omologhi sono suddivisibili in 4 CLASSI
- 3 direzioni parallele alle direzioni di fuga
 - 1 direzione diversa
- ④ si cerca per ogni segmento della prima immagine l'omologo della stessa classe di intersechi la retta epipolare coniugata e si usa la terza immagine per verifica



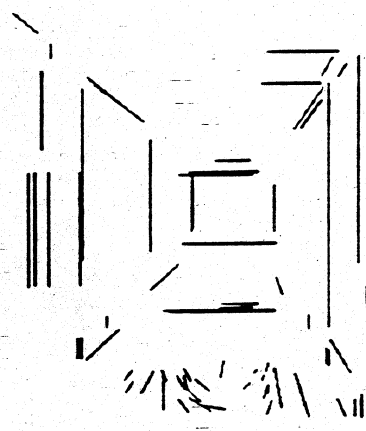
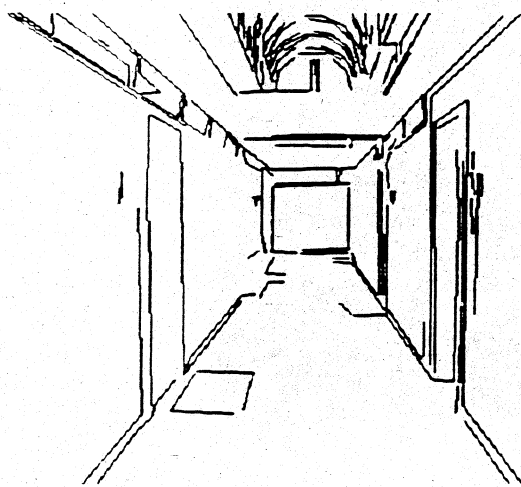
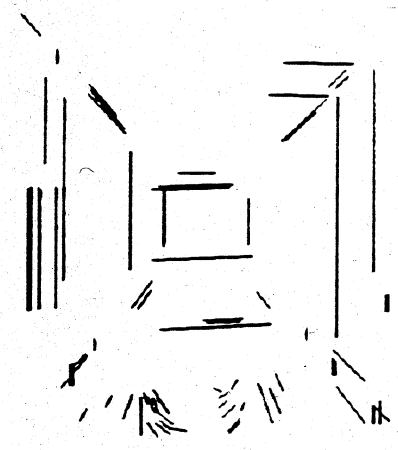
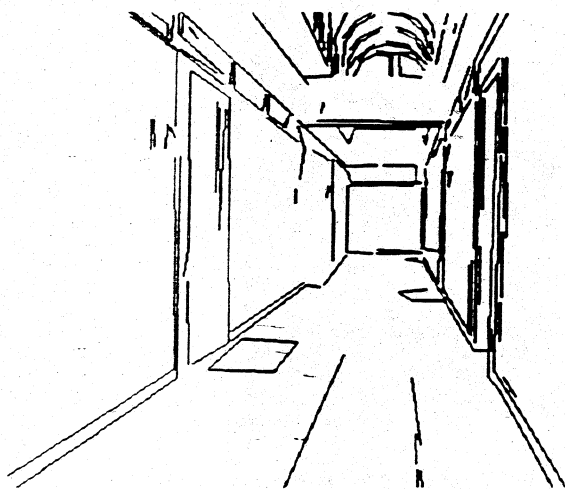
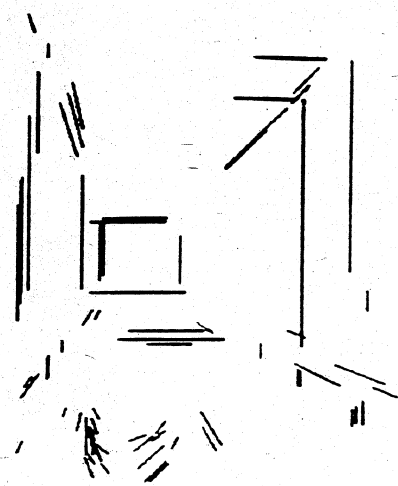
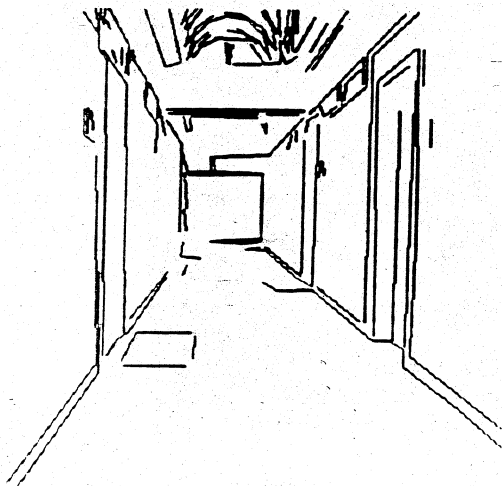
C



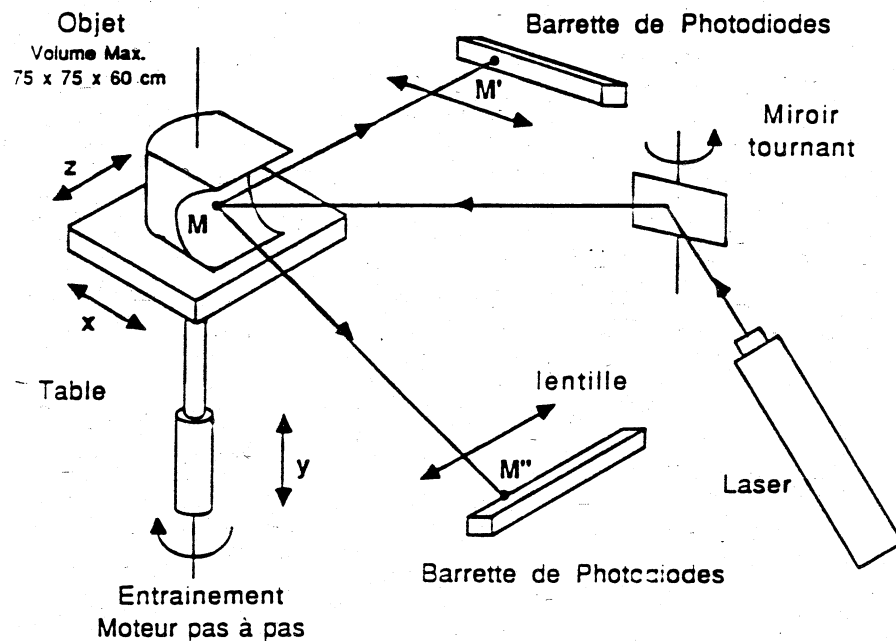
B



A



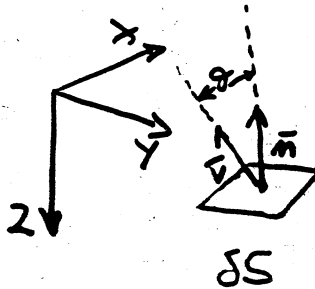
TRIANGOLAZIONE ATTIVA



- il fascio laser è abbastanza concentrato per dar origine a immagini "puntiformi" (per angoli $\neq \pi$)
- si evita così il problema delle "corrispondenza"
- geometrie ($\rightarrow$ errori) identica caso passivo

METODO FOTOMETRICO

DEFINIZIONI



Irradianza

$$E = \frac{dP}{dS}$$

potenza incidente
su elemento di superficie

Radianza

$$L = \frac{d^2P}{dS \, d\omega \, \cos\theta}$$

quantità emessa
per unità di area e
per unità angolo solido

Riflettività
(Riflettanza)

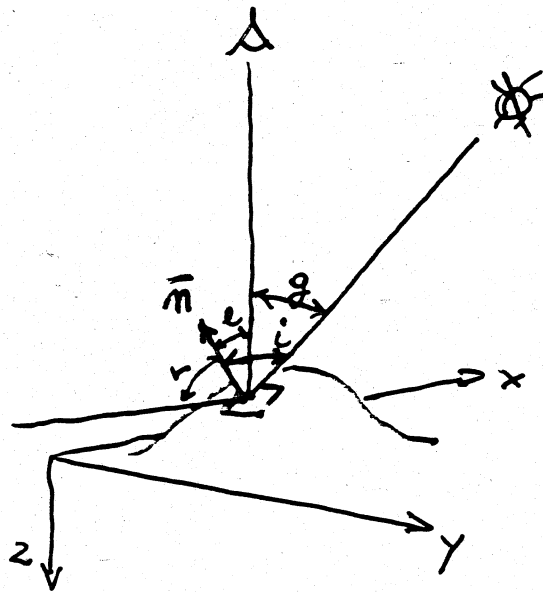
$$\phi(\vec{v}_i, \vec{v}_e) = \frac{dL(\vec{v}_e)}{dE(\vec{v}_i)}$$

quantità emessa nella
direzione $\vec{v}_e$ quando
l'elemento di superficie
è illuminato da $\vec{v}_i$

METODO FOTOMETRICO

Ricostruzione della SUPERFICIE a partire
da un modello della RIFLETTIVITA' del
materiale

- sorgenti puntiformi
- proiezione ortografica



- $\bar{n}$ normale alla superficie
- i angolo di incidenza
- r angolo di riflessione
- g angolo di ρx
- e angolo di emergenza

In generale la riflettività ϕ dipende da
 i, e, g

$$\phi = \phi(i, e, g)$$

METODO FOTOMETRICO

Modelli di RIFLETTIVITA'

- legge di LAMBERT diffusore perfetto
emette in tutte le direzioni uniformemente

$$\phi_1 = \begin{cases} \cos i & -\frac{\pi}{2} < i < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

- materiali speculari

la radiazione è emessa in maniera predominante lungo l'angolo di riflessione r (legge del riflettore perfetto)

$$\phi_2 = \begin{cases} \cos^n(r) & -\frac{\pi}{2} < r < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

combinazione lineare.

$$\phi_3 = a \phi_1 + b \phi_2 + c$$

↑ componente di fondo

METODO FOTOMETRICO

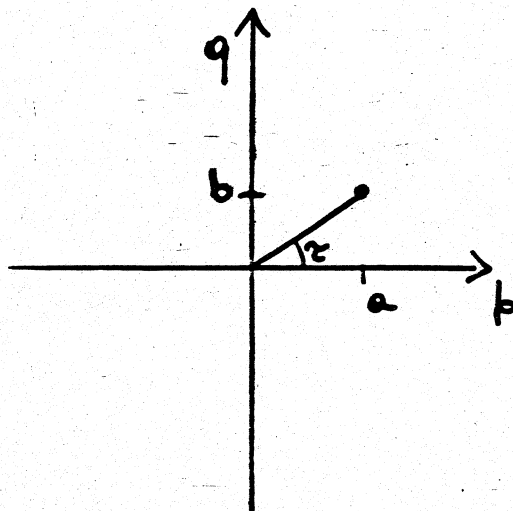
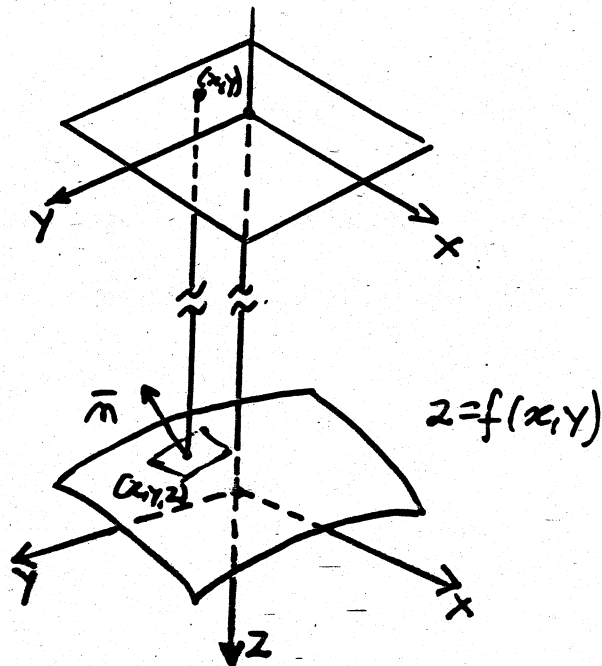
LO SPAZIO GRADIENTE

$$f(x,y) - z = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy - dz = 0 \quad \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, -1 \right) \cdot (dx, dy, dz) = 0$$

$$(p, q, -1)$$

$$p = \frac{\partial f}{\partial x} \quad q = \frac{\partial f}{\partial y}$$



$$ax + by + c - z = 0 \quad \text{piano}$$

$$(b^2 + q^2)^{1/2} \quad \text{slant}$$

$$\tan \alpha = \frac{q}{p} \quad \text{tilt}$$

METODO FOTOMETRICO

Le mappe di riflessione

- $R(p, q)$ esprime la radianza di una superficie in funzione del gradiente superficiale
- Rende esplicita la relazione tra l'orientazione superficiale e l'intensità che si possono registrare
 - di certi oggetti
 - di un dato materiale
 - visti da una particolare geometria
 - illuminati da una particolare sorgente
- Calcolabile
 - analiticamente se è nota la radianza nel sistema centrato sull'osservatore mediante trasformazione in p, q
 - sperimentalmente per calibrazione di elementi superficiali del materiale in esame

METODO FOTOMETRICO

Le mappe di riflessione

$$z = f(x, y) \quad \text{normale} \quad \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, -1$$

$$\text{piano gradiente} \quad p = \frac{\partial z}{\partial x} \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}$$

$$\text{mappe di riflessione} \quad R(p, q)$$

ricavabile analiticamente nei modelli di
riflettività $\phi(x, y, z)$

Posto p_s, q_s la direzione della sorgente $\vec{n}_s$

$$\cos(i) = \frac{\vec{n} \cdot \vec{n}_s}{|\vec{n}| \cdot |\vec{n}_s|} = \frac{1 + pb_s + q q_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}}$$

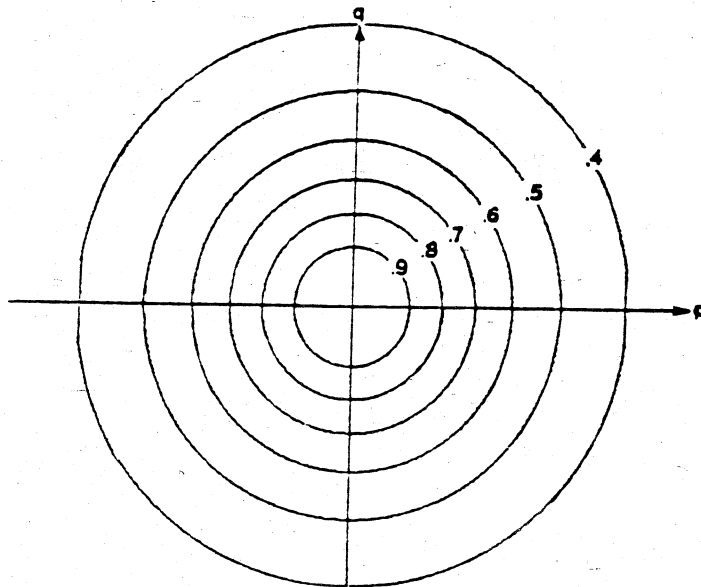
$$\cos(e) = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}}$$

$$R(p, q) \quad \text{Lambertiano}$$

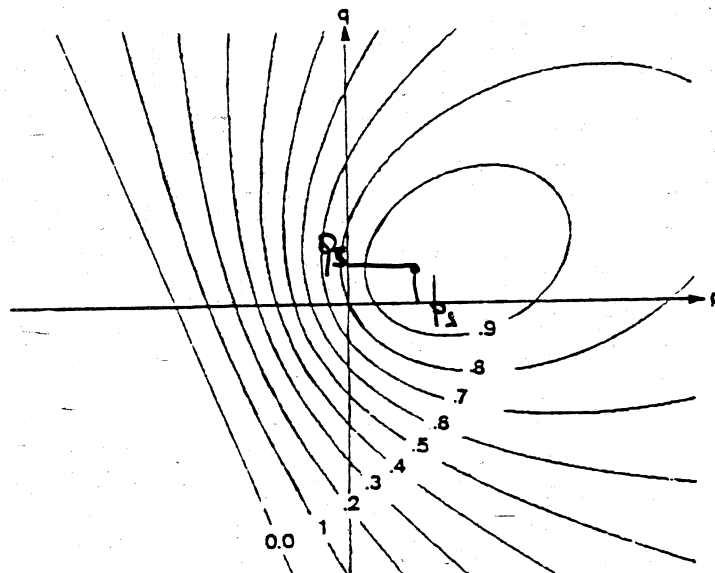
$$R(p, q) = \rho \cos i = \rho \frac{1 + pb_s + q q_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}}$$

MAPPE DI RIFLESSIONE

R. F. 21

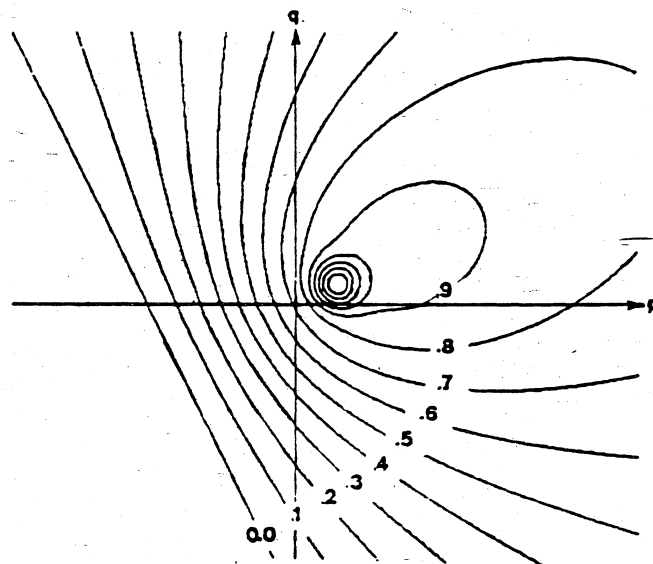


convergenza
sorgente allineata
con osservatore



convergenza

P_1, P_2



maximo

METODO FOTOMETRICO

EQUAZIONE DI IRRADIANZA

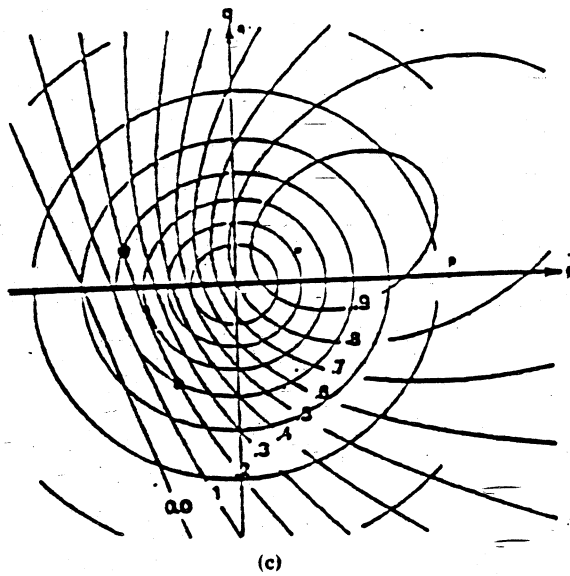
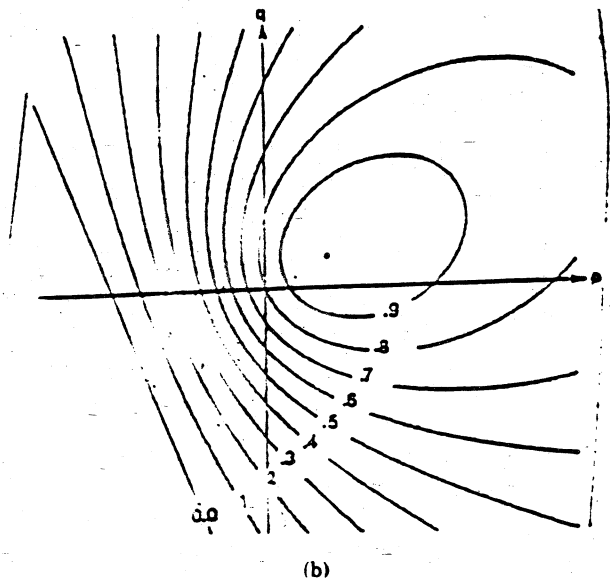
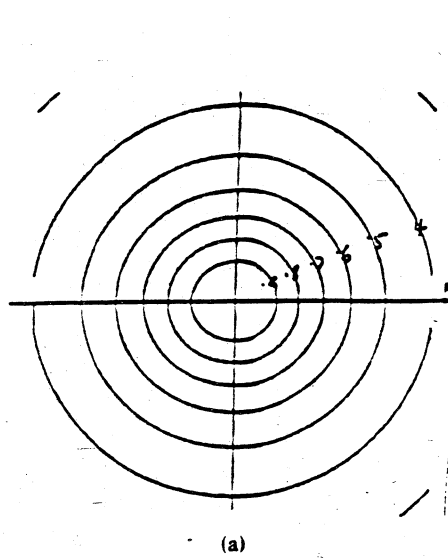
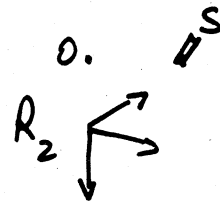
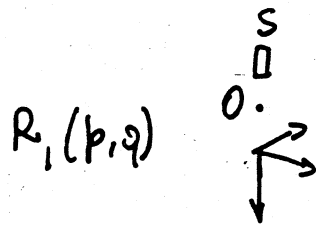
- $R(p, q)$ dipendenza della radianza dalla direzione della superficie
- L'irradianza $E(x, y)$ misurata in ogni pixel dell'immagine è proporzionale (albedo) alla radianza del punto corrispondente sulla superficie, quindi a $R(p, q)$

$$E(x, y) = R[p(x, y), q(x, y)]$$

ipotesi di proiezione ortografica
sorgente irradia da un'unica direzione

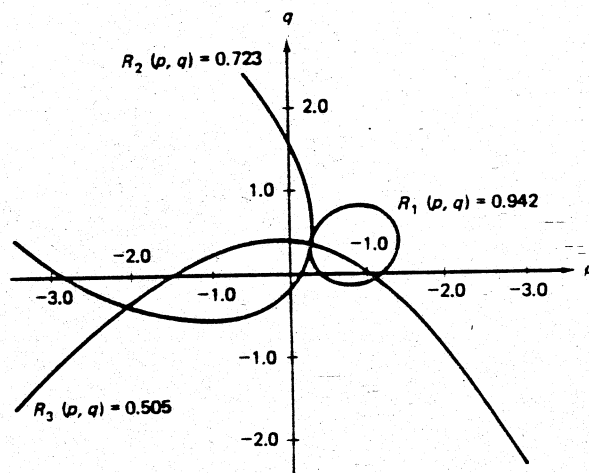
- E' un'equazione, non lineare, in 2 incognite
 - ① più equazioni $\rightarrow$ stereofotometria (standard)
 - ② conoscenza di "condizioni iniziali"
 z e p, q in un insieme di punti (curve) $\rightarrow$ espansione strisce

METODO STEREO-FOTOMETRICO



METODO STEREO-FOTOMETRICO

- 1) La mappa di riflessione, per una data sorgente, ci dà tutti gli orientamenti possibili della normale $\bar{n}$ per un determinato valore di intensità di immagine.
- 2) Teoricamente, l'intersezione di tre mappe di riflessione definiscono unico orientamento possibile.



Metodo STEREO - FOTOMETRICO

- I modelli teorici di riflettività sono inaffidabili nella pratica
- Nelle applicazioni reali è utile procedere alla costruzione di TABELLE di TARATURA utilizzando campioni di materiale REALE
- Per ogni orientamento del campione misurare la riflettività con 3 sorgenti diverse

i_1	i_2	i_3	$\bar{n}$
.			

Fase ON-LINE

Acquisite l'immagine REALE nelle 3 condizioni di illuminazione, con un procedimento di look-up sulle tabelle si determina immediatamente $\bar{n}$, cioè (p, q)

Analisi del mono (p, q) per la segmentazione

METODO STEREOFOTOMETRICO

EQUAZIONE DI IRRADIANZA E METODO DELLE STRISCE CARATTERISTICHE

$$\begin{cases} E(x, y) = R[p(x, y), q(x, y)] & \text{equazione} \\ P_0(x_0, y_0, z_0) ; p(x_0, y_0) ; q(x_0, y_0) & \text{condizioni iniziali} \end{cases}$$

- ipotesi di "regolarità" di $z(x, y)$
- Il metodo estende la soluzione, nota in P_0 , in punti contigui $P_0 + dP = P_1$; $P_1 + dP = P_2$ creando così una curva nello spazio, detta striscia caratteristica
- Si basa sull'ipotesi di poter calcolare anche in $P + dP$ la proporzionalità e il gradiente sfruttando l'espressione di intensità $E(P, dP)$
- Il piano è ricostruito dall'insieme delle strisce emananti da una curva iniziale di condizioni iniziali che deve essere nota

METODO STEREO FOTOMETRICO

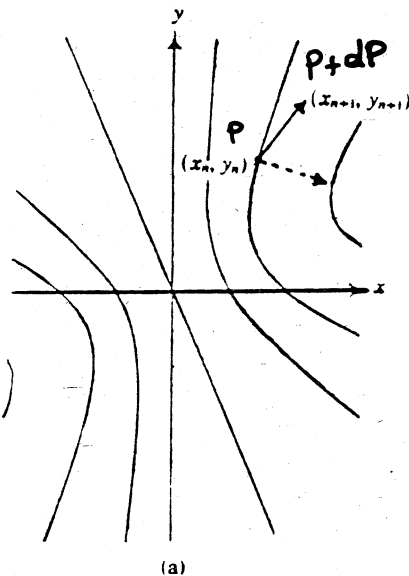
STRISCE CARATTERISTICHE

$$dP = (dx, dy) \quad \begin{aligned} dx &= R_p ds \\ dy &= R_q ds \end{aligned} \quad ; \quad P = P + dP \quad \text{dove } E(x, y) \text{ dove } E(x, y) \text{ dove } E(x, y) \text{ dove } E(x, y)$$

gradiente in R

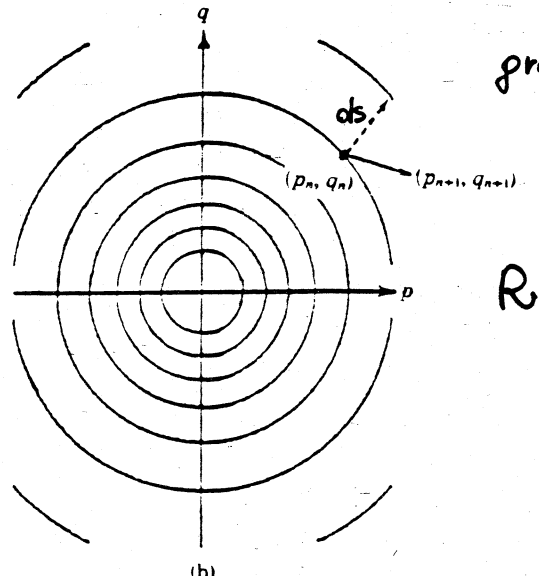
$$\begin{aligned} dp &= E_x ds \\ dq &= E_y ds \end{aligned}$$

$I \approx E$



(a)

Curve di isolivello



(b)

gradiente in

R



IMMAGINE GAUSSIANA ESTESA (EGI)

- punti di una superficie $\xrightarrow{N:1}$ sfera unitaria
- superfici convesse, e curvatura positiva; la corrispondenza è invertibile
- EGI è l'istogramma sulle sfere unitarie delle direzioni superficiali locali
- Un punto nullo EGI ha un valore pari all'area delle superficie orientate quell'orientamento
- La rappresentazione dell'EGI ha parecchie proprietà utili, soprattutto nel caso di oggetti prevalentemente costituiti da superfici piatte

COSTRUZIONE DELL' E9I

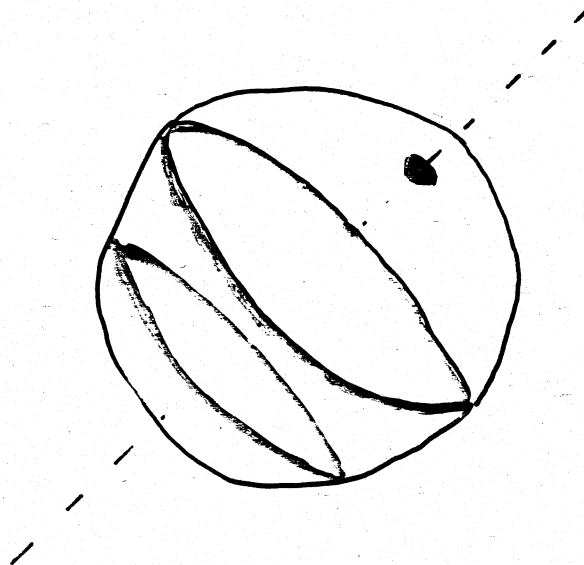
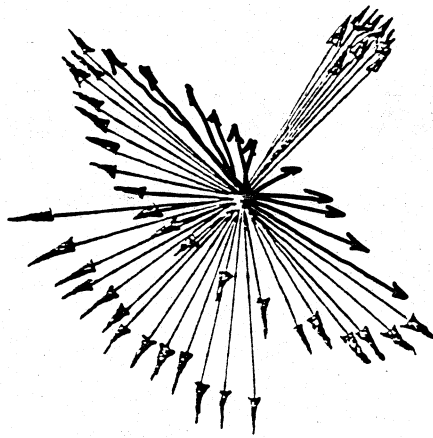
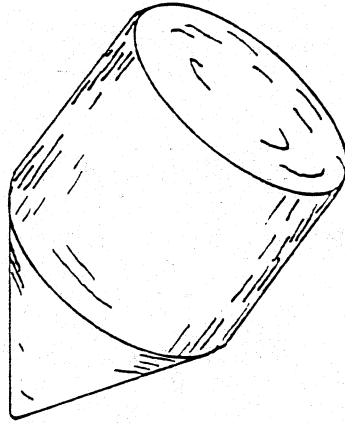
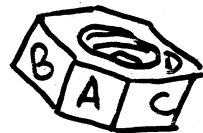
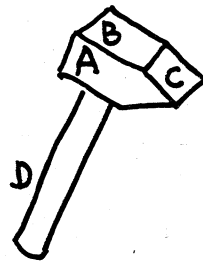


IMMAGINE GAUSSIANA ESTESA

convesso



concave

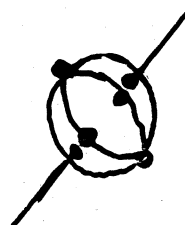
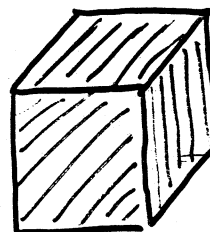
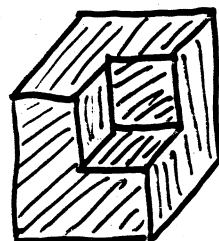


IMMAGINE GAUSSIANA ESTESA

PROPRIETA'

- Ad una rotazione dell'oggetto corrisponde un'identica rotazione nell'ESI

tutte

- La "massa" dell'ESI è pari alla superficie dell'oggetto

- L'area di una sezione di un oggetto relativa ad una data direzione è uguale alla proiezione della massa dell'emisfero dell'ESI visibile nella direzione data in un piano normale per l'origine

solo
convessa

- La sezione rilevata nell'emisfero complementare è la stessa
- I due punti precedenti valgono per qualsiasi direzione, quindi il centro di massa dell'ESI è il centro della sfera