



# UNIVERSITÀ DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA  
INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

TESI DI LAUREA

## **Tecniche di mappatura dell'ambiente subacqueo a mezzo di sensori ottici e acustici**

**Candidato:**

**Alessandro Rossini**

**Relatori:**

**Prof. Ruggero Reggiannini**

**Prof. Filippo Giannetti**

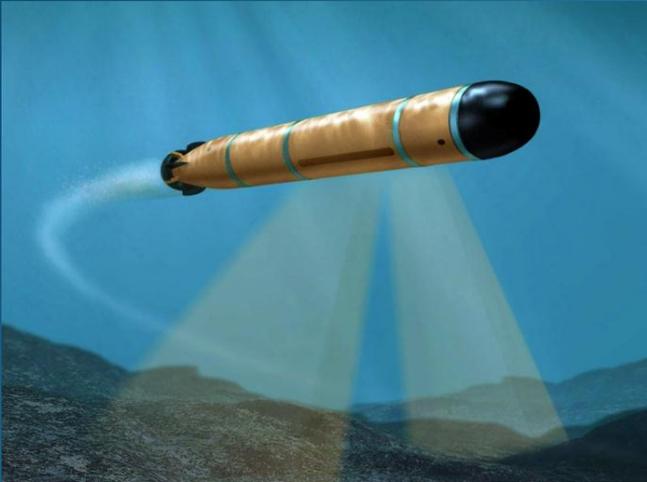
**Dott. Ovidio Salvetti**

**Ing. Lavinio Gualdesi**



# SCENARIO

- AUV (Veicolo Autonomo Sottomarino) :
  - utilizzo in sciami cooperanti o singole unità
  - dotazione sensoristica di varia natura
- Mappatura sistematica del fondale:
  - locale
  - su larga scala
- Ricerca di siti di interesse:
  - naturalistico
  - archeologico
  - industriale



## Funzioni principali:

- Rilevamento di oggetti/ostacoli (*ausilio alla navigazione*)
- Sorveglianza di ambienti noti (*monitoraggio ambientale*)
- Esplorazione dell'ambiente sconosciuto



# SOMMARIO

- Sensori ottici:
  - modello videocamera
  - ricostruzione 3D: stereoscopia + *laser stripe*
- Sensori acustici:
  - sidescan sonar
  - metodo *shape from shading*
- Modello di integrazione ottico/acustica
- Conclusioni

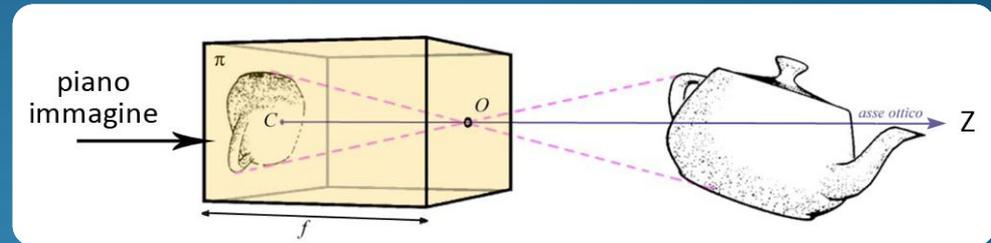


# Sensori ottici: VIDEOCAMERA

## Videocamera:

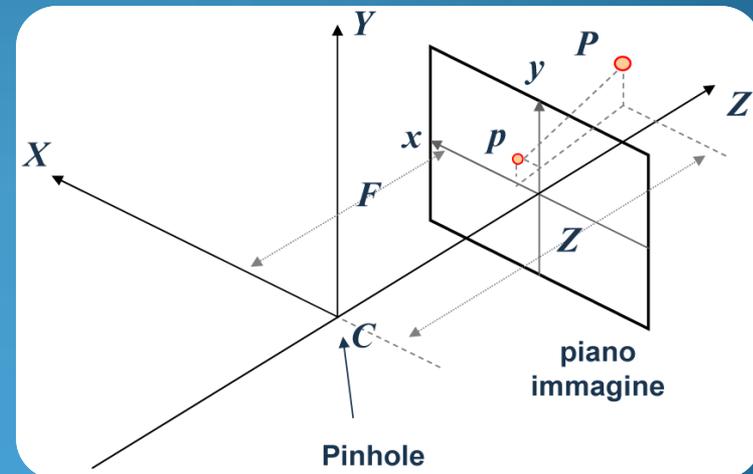
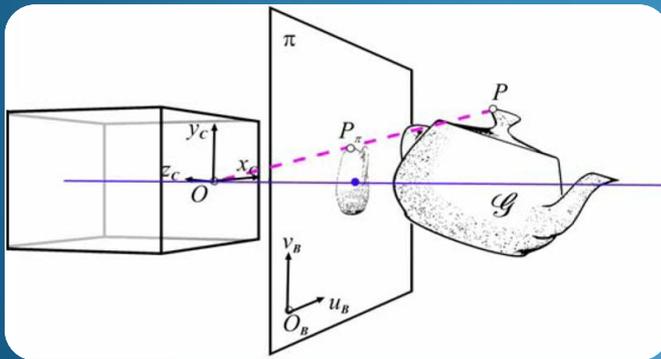
- Sensore passivo
- Dimensioni ridotte
- Costi contenuti
- Ricchezza di informazioni
- Facilità di interpretazione

## Modello ideale: *pinhole camera*



## Modello ideale equivalente:

## Sistema di riferimento:





# Sensori ottici: VIDEOCAMERA

## Proiezione Prospettica:

$$\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2: \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} f \frac{X}{Z} + c_X \\ f \frac{Y}{Z} + c_Y \end{bmatrix}$$

$f =$  lunghezza focale  
 $\bar{c} =$  punto principale

## Affinamento del modello: *distorsione radiale*

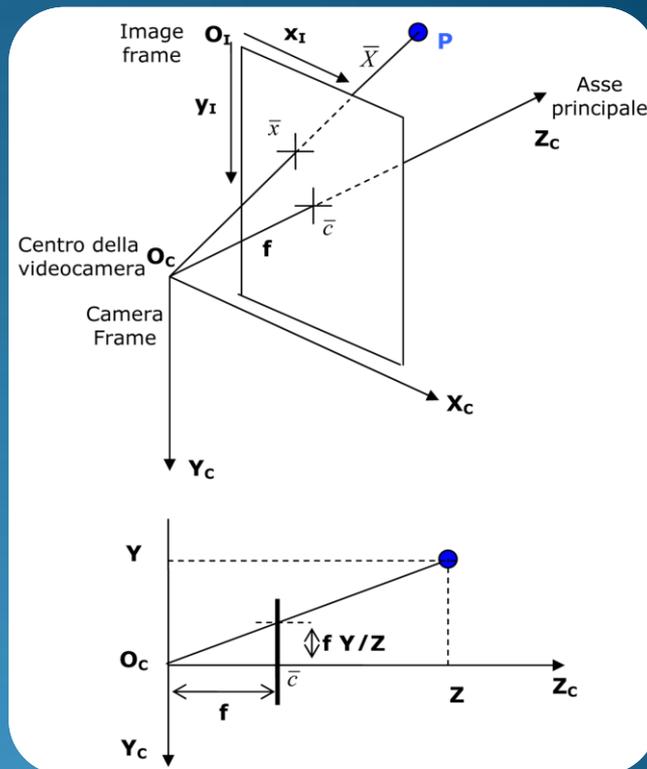
$$\begin{cases} \bar{a} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \end{bmatrix} \\ \bar{b} = \begin{bmatrix} b_X \\ b_Y \end{bmatrix} = \bar{a}(1 + k_c \|\bar{a}\|^2) \\ \tilde{x} = \begin{bmatrix} f_X b_X + c_X \\ f_Y b_Y + c_Y \end{bmatrix} \end{cases}$$

$f_X, f_Y =$  componenti di  $f$   
 $k_c =$  coefficiente di *distorsione radiale*

## Caratterizzazione di una videocamera :

- *parametri intrinseci*: collegano le coordinate di un pixel con le coordinate 3D (nel sistema di riferimento della camera)
- *parametri estrinseci*: definiscono la posizione ed orientazione del sistema di riferimento "camera", rispetto al riferimento "mondo", supposto noto.

## Calibrazione: stima dei parametri *intrinseci* ed *estrinseci*





# Sensori ottici: STEREOCOPIA

Stereoscopia ottica  $\Rightarrow$  ricostruzione della terza dimensione

Sistema ideale (*parallel cameras*), ipotesi:

- distanza tra le due ottiche: fissa e nota ( $B$ )
- posizione reciproca: nota
- scene osservate dai due sensori: simili
- parametri intrinseci delle ottiche: uguali
- piani immagine coplanari e assi ottici paralleli

$p_L$  e  $p_R$ : punti omologhi (*coniugati*)

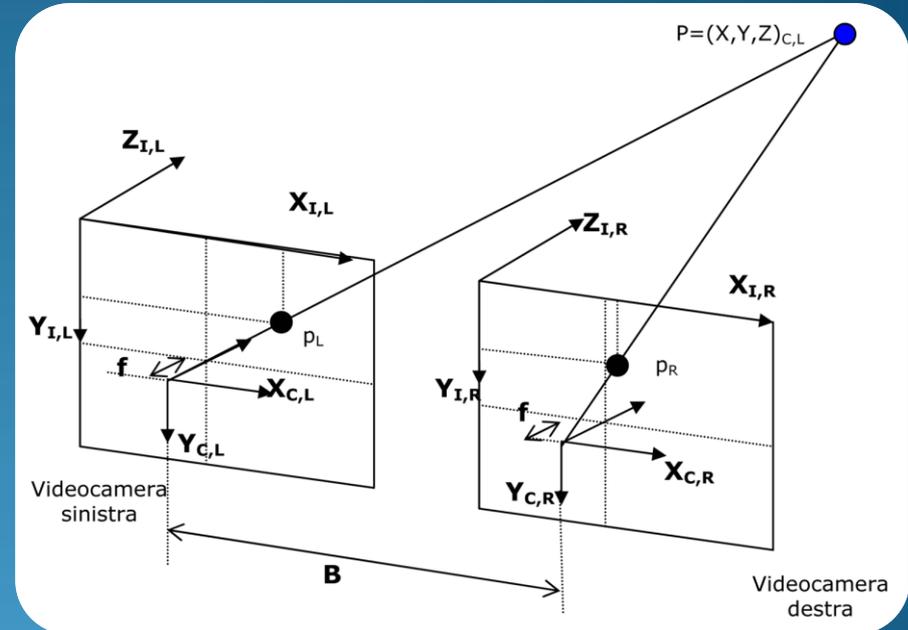
proiezione di  $P$  sui piani immagine L e R

- stessa ordinata,  $y_{I,L} = y_{I,R} = Y \frac{f}{Z}$

- ascissa differente,  $x_{I,L} = X_L \frac{f}{Z}$  e  $x_{I,R} = X_R \frac{f}{Z}$

*disparità* di  $P$ : differenza di ascissa tra  $p_L$  e  $p_R$

$$d = x_{I,L} - x_{I,R} = (X_L - X_R) \frac{f}{Z} = B \frac{f}{Z} \Rightarrow Z = \frac{Bf}{d}$$



- $d$  grande  $\rightarrow$  punto vicino
- $d$  piccola  $\rightarrow$  punto lontano
- $d=0 \rightarrow$  punto a distanza infinita



# Sensori ottici: STEREOSCOPIA

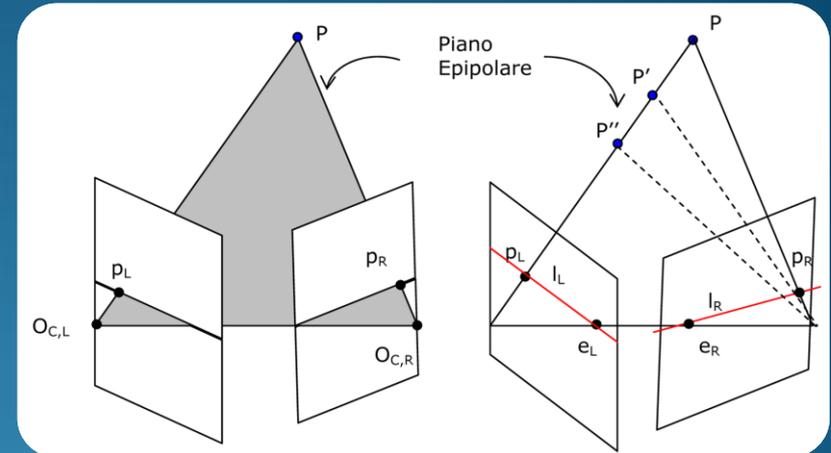
## Generalizzazione: geometria epipolare

- *piano epipolare*: passa per i centri ottici e il punto  $P$
- *linea epipolare*: intersezione tra un piano immagine e il piano epipolare

$P, O_{C,L}, O_{C,R}, p_L$  e  $p_R$  giacciono sullo stesso piano

## Matching stereo: ricerca del punto coniugato

bidimensionale (sul piano immagine)  $\longrightarrow$  monodimensionale (sulla linea epipolare)



## Workflow per la ricostruzione 3D di una scena:

Calibrazione

Stima dei parametri *intrinseci* ed *estrinseci*

Rettificata

Correzione delle distorsioni ottiche e simulazione del sistema ideale

Matching

Ricerca delle corrispondenze stereo

Triangolazione

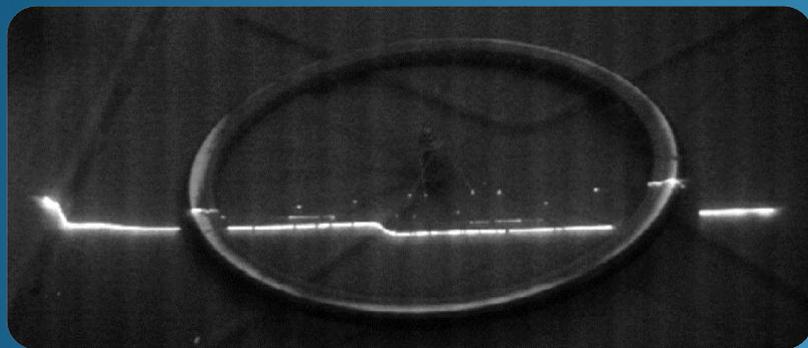
Calcolo della disparità e ricostruzione della terza dimensione



# Sensori ottici: STEREOSCOPIA + *laser stripe*

*Laser stripe*: illuminatore laser ausiliario

- luce monocromatica
- angolo di apertura  $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$
- intensità linea uniforme con cut-off netto
- scarso assorbimento elettrico, leggero, compatto
- utilizzo fino a 4000 metri di profondità



Vantaggi principali:

- Evidenziazione dei dettagli
- Risoluzione **univoca** del matching stereo

Ricostruzione 3D di un oggetto di test:

- Setup stereoscopico in aria + laser stripe
- Simulazione del movimento in *stop motion*
- Fotocamere diverse
- Condizioni di illuminazioni non controllate

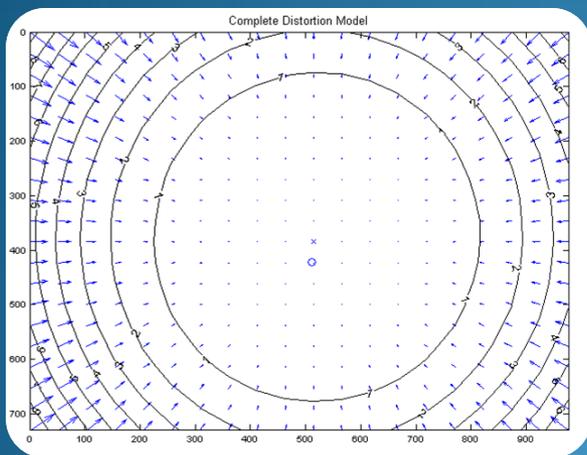
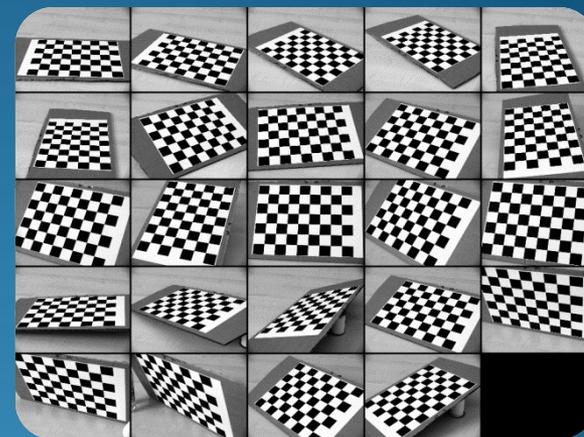




# Sensori ottici: STEREOSCOPIA + *laser stripe*

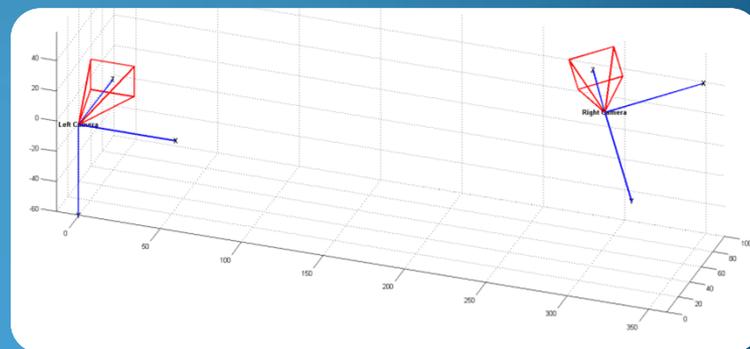
## ○ Calibrazione: *Camera Calibration Toolbox (Jean-Yves Bouquet)*

- Utilizzo di un pattern noto (scacchiera)  
24 pose



- Stima dei *parametri intrinseci ed estrinseci*

- Ricostruzione della geometria stereo

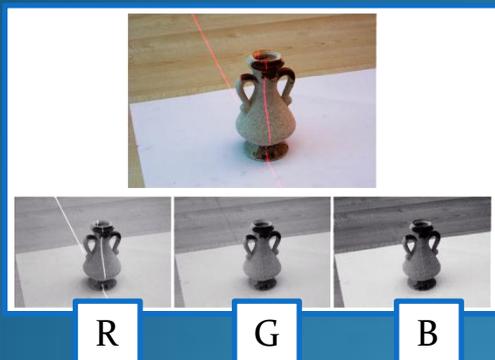




# Sensori ottici: STEREOCOPIA + *laser stripe*

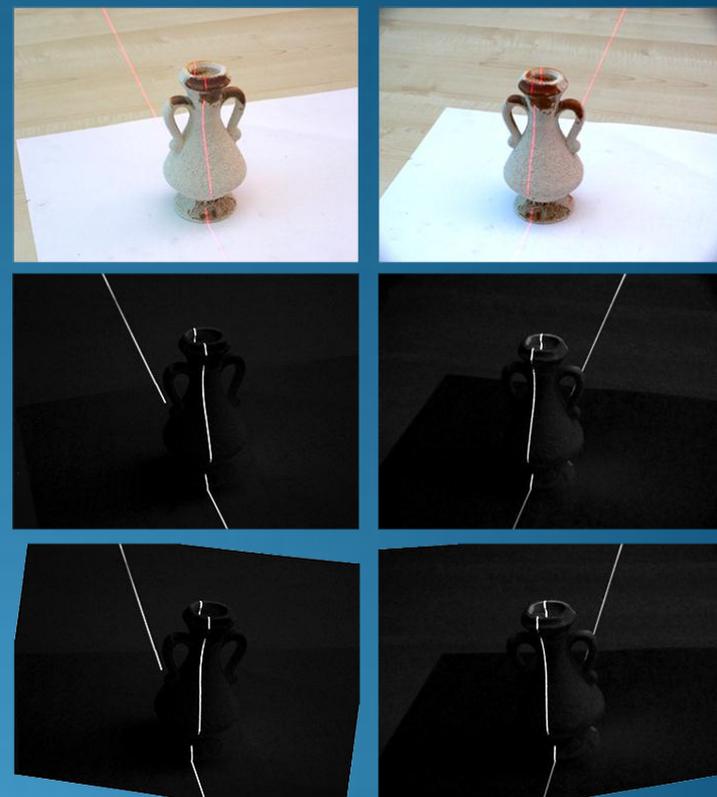
## ○ Estrazione della lama laser:

- Mix dei canali colore (R,G,B):  $I = 1 \cdot R - \alpha \cdot G - \beta \cdot B$

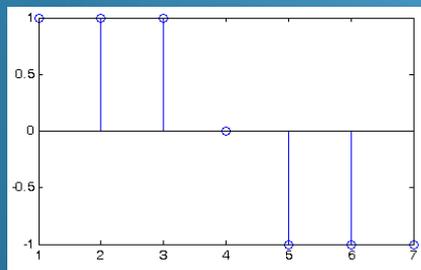


- Rettifica: utilizzo dei *parametri intrinseci ed estrinseci*  
→ (linee epipolari orizzontali)

- Filtraggio 2D:  $I_f = \sum_{i=-n}^n -\text{sign}(x) \cdot I(x + i, y)$



Filtro  
 $n=3$



+ eliminazione  
lama a vuoto





# Sensori ottici: STEREOSCOPIA + *laser stripe*

- Estrazione della lama laser (studio singola riga):

- Identificazione del picco luminoso della *laser stripe* con accuratezza *sub-pixel*. Studio allo zero-crossing:

$x_c$  = ascissa del pixel immediatamente precedente

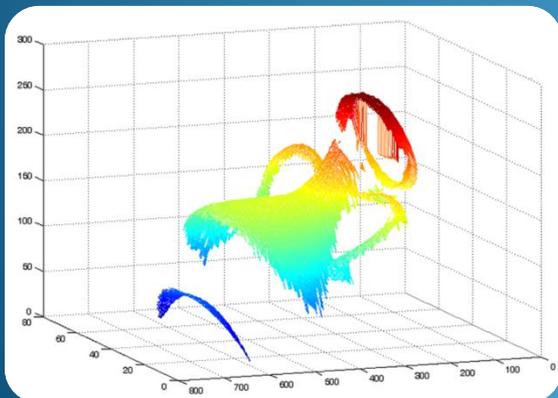
$$\delta = \frac{I_f(x_c, y_c)}{I_f(x_c, y_c) - I_f(x_c + 1, y_c)} = \text{scostamento da } x_c$$

- Costruzione della *linea dei centri* per ogni fotogramma

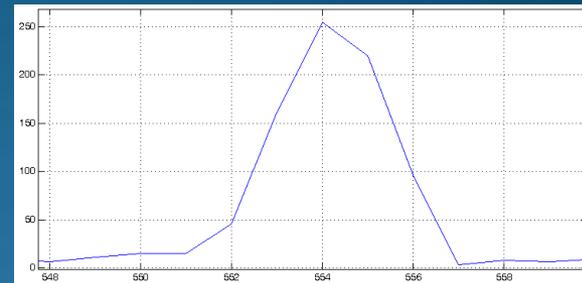
- Matching stereo *univoco* per ogni riga della coppia L,R

- Creazione della nuvola di punti :

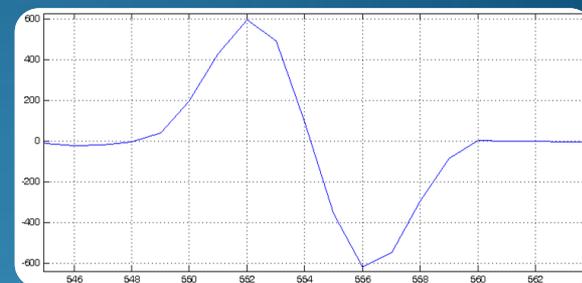
- Esportazione in MeshLab + affinamento della mesh:



$I$



$I_f$



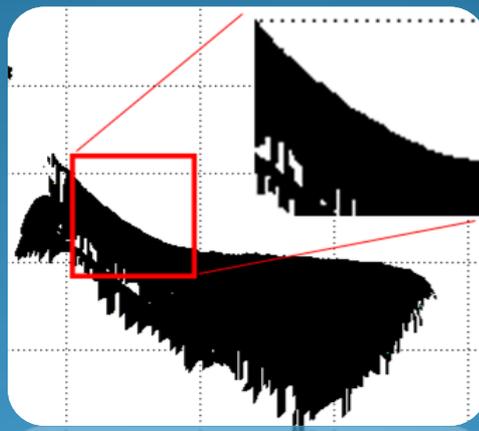
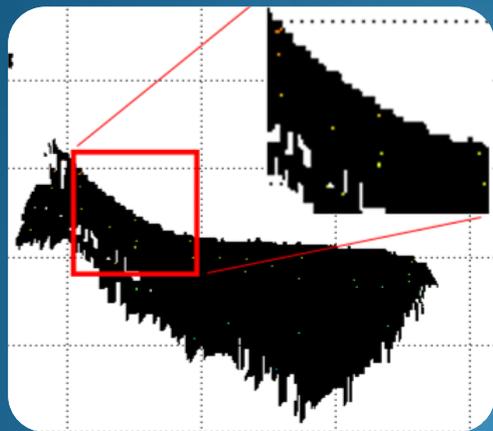


# Sensori ottici: STEREOSCOPIA + *laser stripe*

- Applicazione *texture* da immagine: 

## Considerazioni sulla ricostruzione 3D:

- senza accuratezza *sub-pixel*
- con accuratezza *sub-pixel*:



- Presenza di *lacune ed imperfezioni*, cause:
  - ombra nella proiezione della *laser stripe*. Ricerca del miglior angolo di puntamento
  - oclusioni: ogni ottica vede un'immagine diversa. Scelta di una baseline opportuna

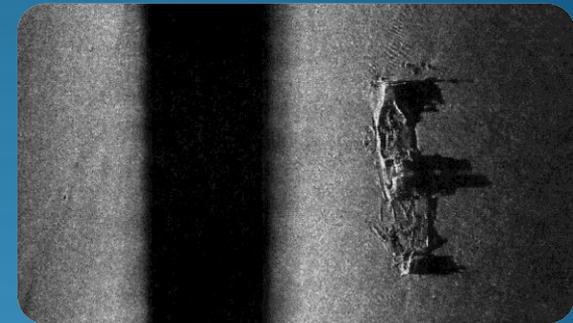
Risultato soddisfacente a scopo di estrazione di *features geometriche*



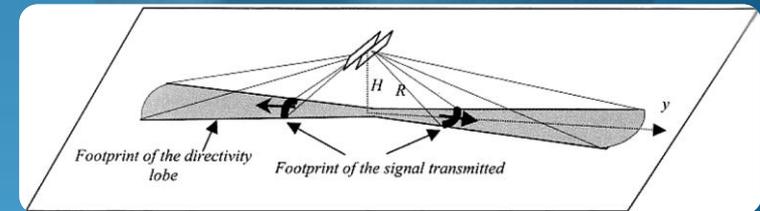
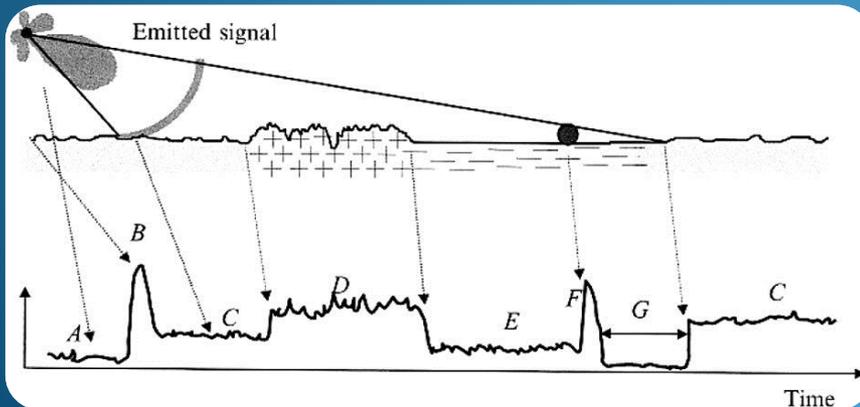
# Sensori acustici: SIDESCAN SONAR

## Il sidescan sonar:

- Dispositivo acustico *attivo* a scansione laterale
- Durata dell'impulso trasmesso (*ping*): 0,1 ms (o meno)
- Frequenze operative nell'ordine di 200~400 KHz
- Risoluzione nell'ordine dei centimetri
- Fornisce *immagini acustiche (tempo-tempo)*
- Trasduttori:
  - fascio molto aperto sul piano verticale ( $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ )
  - fascio stretto sul piano orizzontale ( $1^{\circ}$ )



## Costruzione dell'eco di ritorno:



(A) rumore e riverbero; (B) eco di primo ritorno;  
(C) area sabbiosa; (D) rocce; (E) fango; (F) eco  
del bersaglio; (G) ombra del bersaglio



# Sensori acustici: SIDESCAN SONAR

## Costruzione dell'immagine acustica:

- Immagine grezza: visualizzazione semplice di eco successive. Percezione buona.
- Correzione geometrica: necessita di info ausiliarie (rotta, morfologia, etc.) o ipotesi/stime

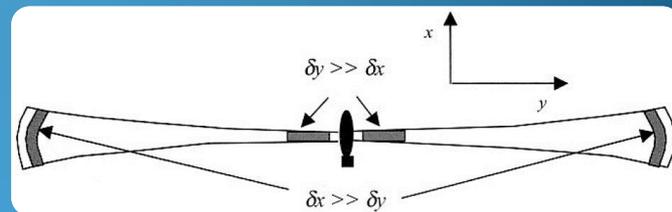
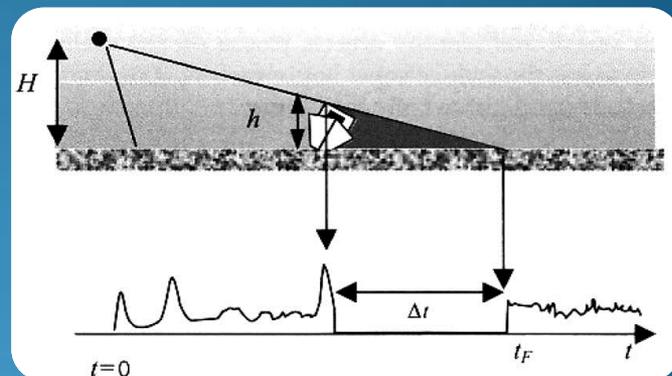
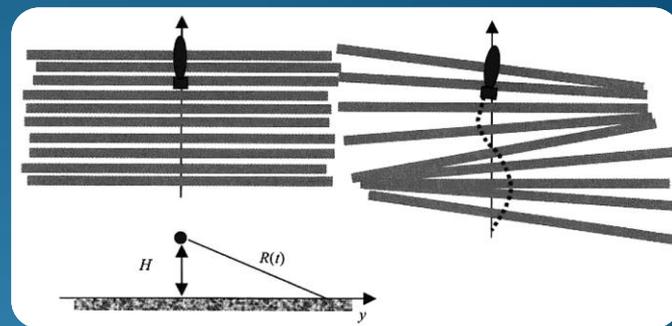
## Ombre Acustiche:

- Stima dell'altezza di un bersaglio
- Ricostruzione del profilo

$$\frac{h}{\Delta t} = \frac{H}{t_F} \Rightarrow h = H \frac{\Delta t}{t_F}$$

## Risoluzione spaziale disomogenea:

- $\delta y \approx \frac{cT}{2 \sin \theta}$   
 $c$  = velocità del suono in mare (~1500 m/s)  
 $T$  = durata del ping  
 $\theta$  = angolo di elevazione
- $\delta x = R \phi$   
 $R$  = distanza obliqua del sonar dal fondo  
 $\phi$  = angolo di apertura del fascio sul piano orizzontale





# Sensori acustici: 3D da immagini acustiche

## Estensione d'uso delle *immagini acustiche*:

- Relazione con la topografia (pendenza locale)
- Proporzionalità con la riflettività dei materiali
- Dipendenza dalla direzione di osservazione

## Ricostruzione 3D con tecniche *shape-from-shading*:

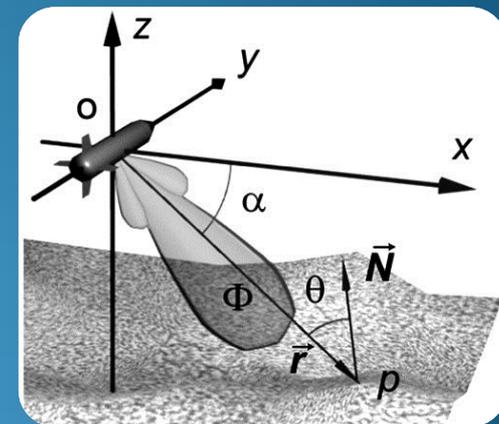
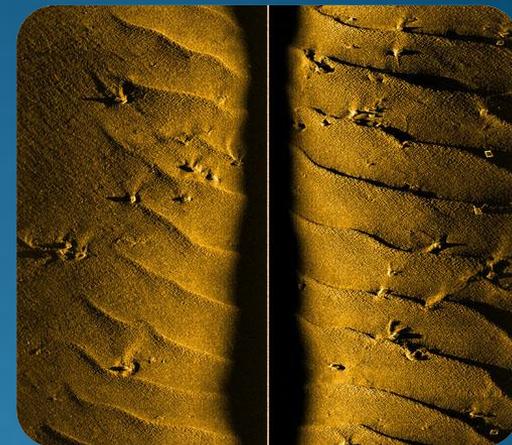
- Buona approssimazione dello scattering acustico con il modello di diffusione Lambertiano
- Posizione della sorgente acustica e trasduttore in rx coincidenti

## Modello di diffusione acustica:

- $I(p) = K\Phi(p)R(p)|\cos(\theta(p))|$

- $$I(x, y) = -K\Phi(x, y)R(x, y) \cdot \frac{Z(x, y) - x \cdot \frac{\partial Z}{\partial x}(x, y)}{\sqrt{x^2 + Z^2(x, y)} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x}(x, y)\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}(x, y)\right)^2 + 1}}$$

- Funzione di  $\Phi(x, y), R(x, y), Z(x, y)$



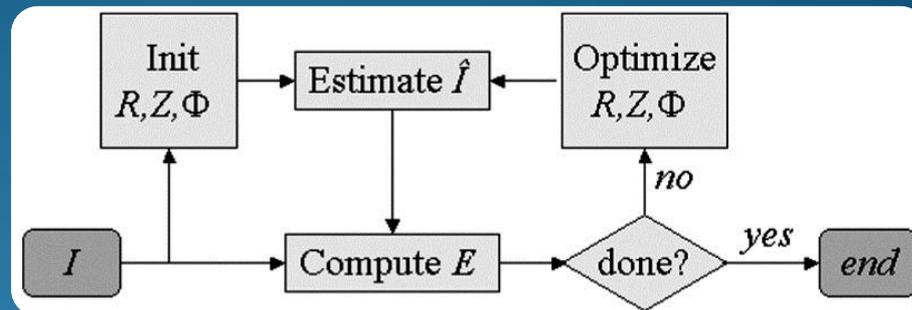


# Sensori acustici: 3D da immagini acustiche

## Inversione SONAR:

$I(x, y)$  = immagine originale

$\hat{I}(x, y)$  = immagine simulata

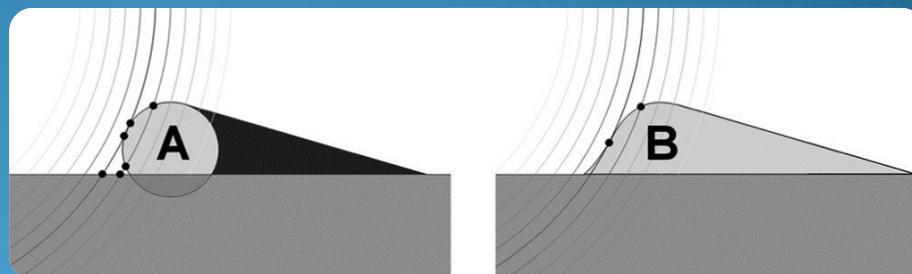


Studio dell'errore  $E = \sum_{x,y} E(x, y) = \sum_{x,y} (I(x, y) - \hat{I}(x, y))^2$

Stima di  $\Phi(x, y), R(x, y), Z(x, y)$  tali che:  $(Z, R, \Phi) = \operatorname{argmin}(E)$

## Limiti nella ricostruzione:

- Affidabilità del modello
- Performance del sensore
- Limiti intrinseci



Il sonar integra i segnali ricevuti al tempo  $t^*$



Superfici A e B equivalenti:  
stessa immagine acustica prodotta



# Integrazione ottico/acustica

L'utilizzo congiunto di diversi sensori (ottico, acustico ad anche magnetico) sulla stessa piattaforma permette un *riferimento reciproco accurato* dei dati acquisiti:

- Sistema di riferimento omogeneo (locale)
- Georeferenziazione (globale)
- Riferimento temporale (sincronizzazione e datazione)

Benefici su più livelli:

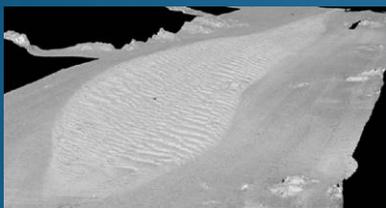
- Integrazione *a cascata (livello operativo)*:
  - sicurezza di acquisizione dati in condizioni non ottime, nei vari domini: distanza dal fondale elevata, acque torbide, vegetazione sviluppata, etc.
  - ripianificazione della missione *in itinere*
- Fusione dei dati acquisiti:
  - basso livello
  - alto livello



# Integrazione ottico/acustica

- Fusione di *basso livello*:

- stratificazione in *layer* dei dati referenziati: consultazione congiunta



- correlazione di grandezze di natura diversa

- Fusione di *alto livello*:

- confronto di *features* estratte: geometrie 2D (segmenti, curve elementari) e 3D (piani, superfici semplici), pattern ripetitivi

- rafforzamento nella rivelazione di oggetti d'interesse

- integrazione di informazioni semantiche:

- aiuto alla classificazione

- template matching → riconoscimento di strutture già note

- creazione ed affinamento di *mappe di probabilità* come misura della bontà di ricerca

**Ottica:**  
Nuvola di punti  
Texture  
Pattern geometrico  
Colore, etc.



**Acustica:**  
Mappe di elevazione  
Mappe di riflettività



# Conclusioni

- Studio di sensori per la mappatura del fondale:
  - ottici
  - acustici
- Studio e test di algoritmi per la ricostruzione 3D mediante stereoscopia e *laser stripe*
- Studio di algoritmi per l'estrazione di morfologia e riflettività da immagini acustiche
- Metodologie per l'integrazione ottico/acustica

I metodi proposti per la ricostruzione e l'integrazione dei dati potranno essere utilizzati per :

- riconoscimento automatico di manufatti di interesse archeologico
- creazioni di simulatori grafici 3D per l'esplorazione virtuale di ambienti sottomarini

*Grazie per l'attenzione*