



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

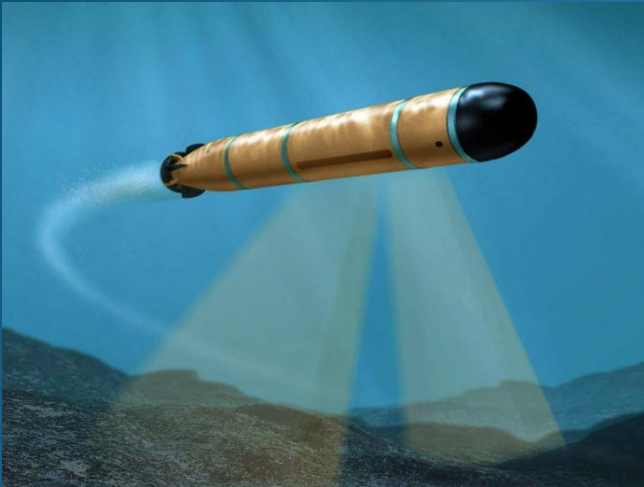
Dott. Ovidio Salvetti

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

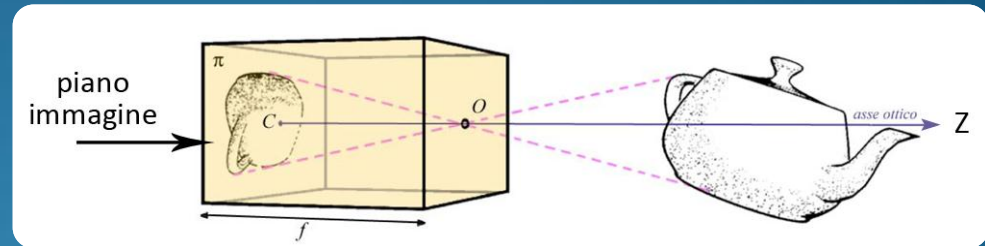


Sensori ottici: VIDEOCAMERA

Videocamera:

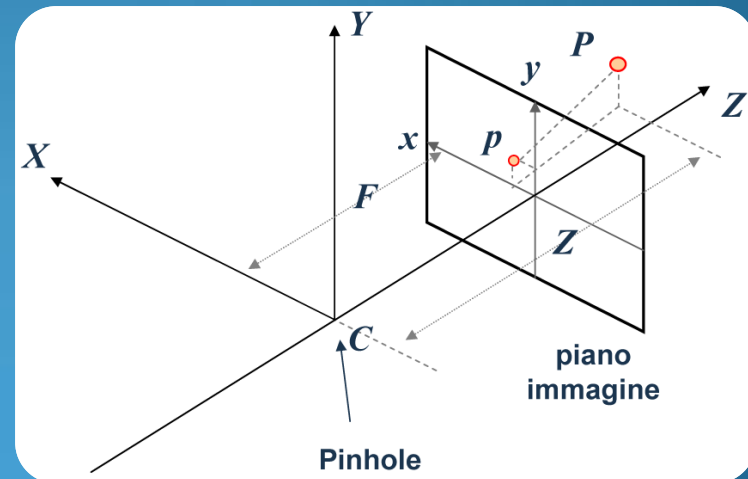
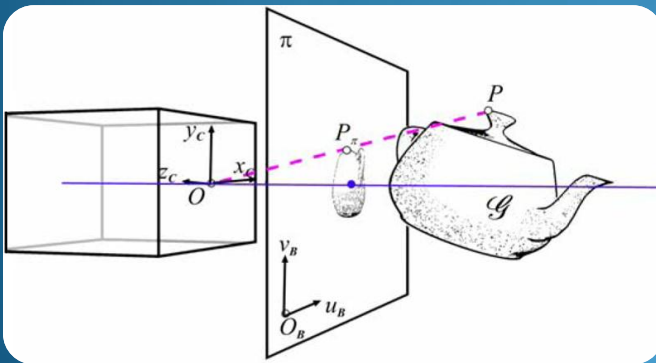
- Sensore passivo
- Dimensioni ridotte
- Costi contenuti
- Ricchezza di informazioni
- Facilità di interpretazione

Modello ideale: pinhole camera



Modello ideale equivalente:

Sistema di riferimento:





Sensori ottici: VIDEOCAMERA

Proiezione Prospettica:

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

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

Affinamento del modello: *distorsione radiale*

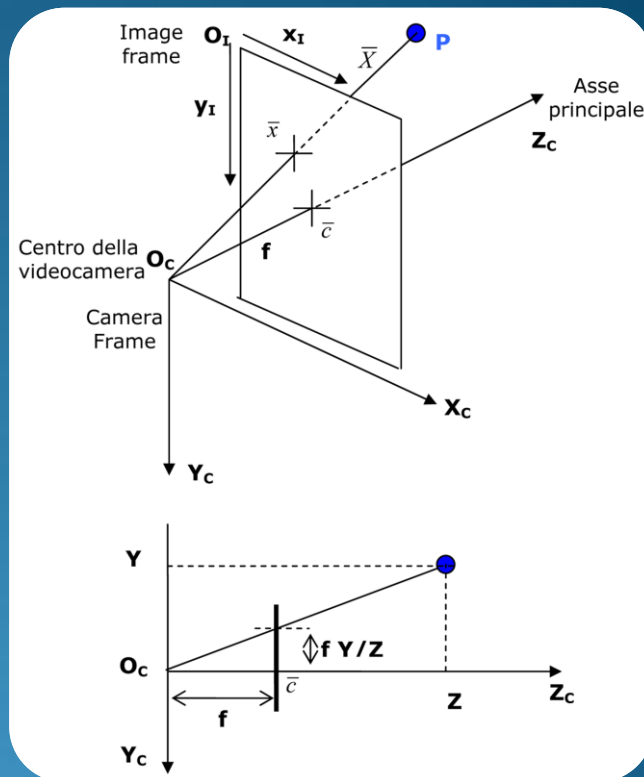
$$\begin{cases} \bar{a} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \end{bmatrix} \\ \bar{b} = \begin{bmatrix} b_X \\ b_Y \end{bmatrix} = \bar{a}(1 + k_c \|\bar{a}\|^2) \\ \tilde{x} = \begin{bmatrix} f_X b_X + c_X \\ f_Y b_Y + c_Y \end{bmatrix} \end{cases}$$

$f_X, f_Y = \text{componenti di } f$
 $k_c = \text{coefficiente di distorsione radiale}$

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: STEREOSCOPIA

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*)

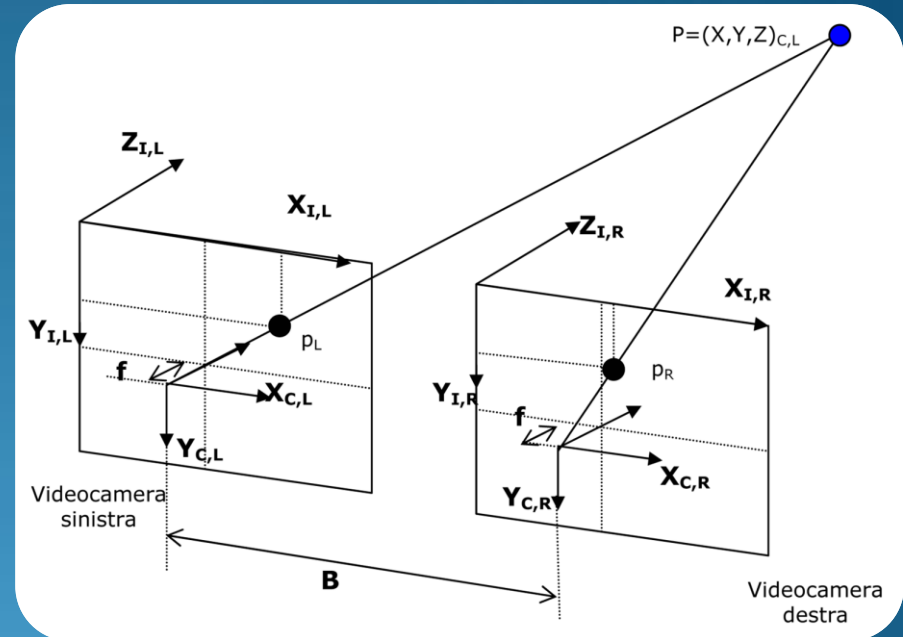
proiezione di P sui piani immagine L e R

- 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

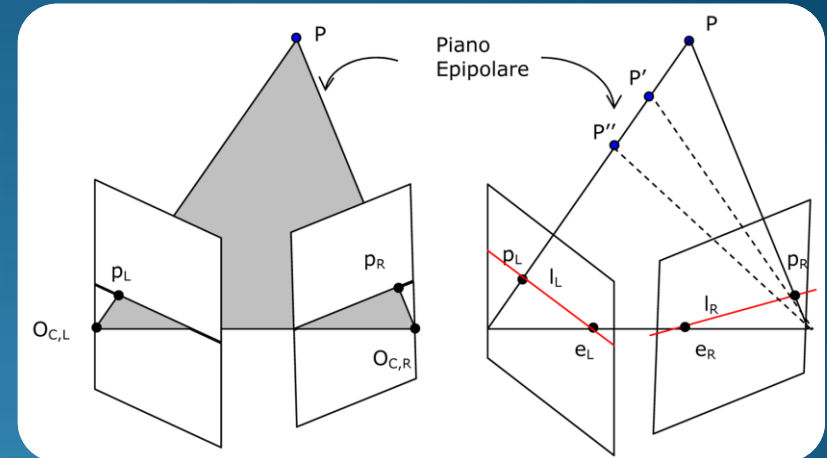
Generalizzazione: geometria epipolare

- *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

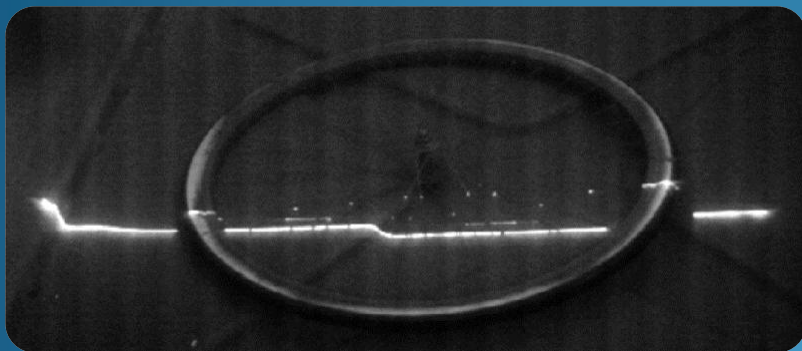
Calcolo della disparità e ricostruzione della terza dimensione



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

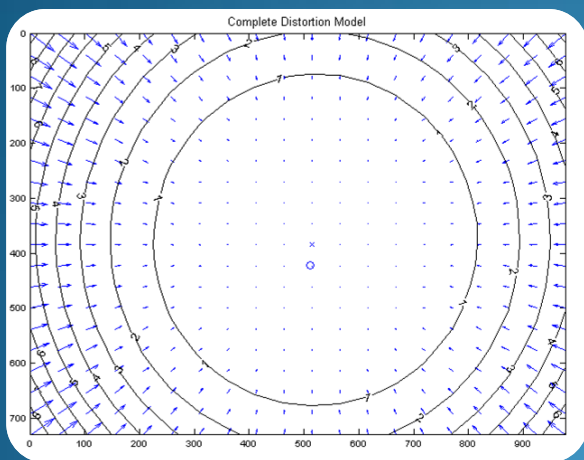
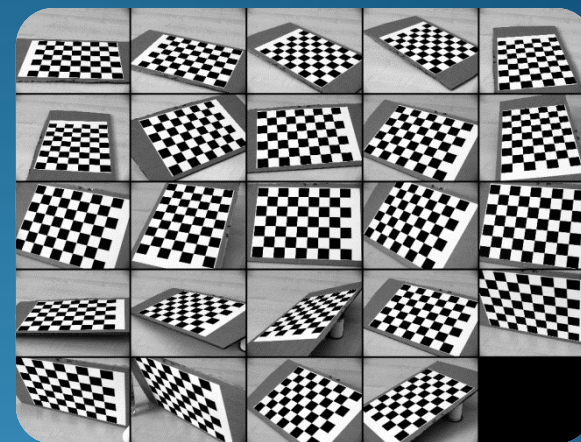




Sensori ottici: STEREOSCOPIA + *laser stripe*

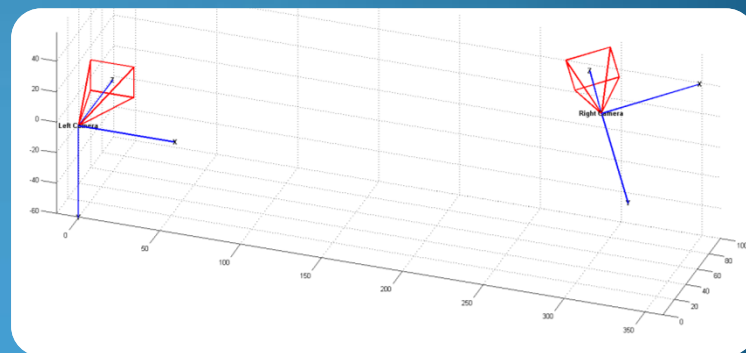
○ Calibrazione: *Camera Calibration Toolbox (Jean-Yves Bouquet)*

- Utilizzo di un pattern noto (scacchiera)
24 pose



- Stima dei *parametri intrinseci ed estrinseci*

- Ricostruzione della geometria stereo

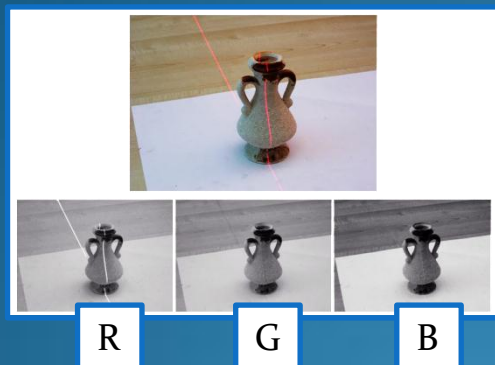




Sensori ottici: STEREOCOPIA + *laser stripe*

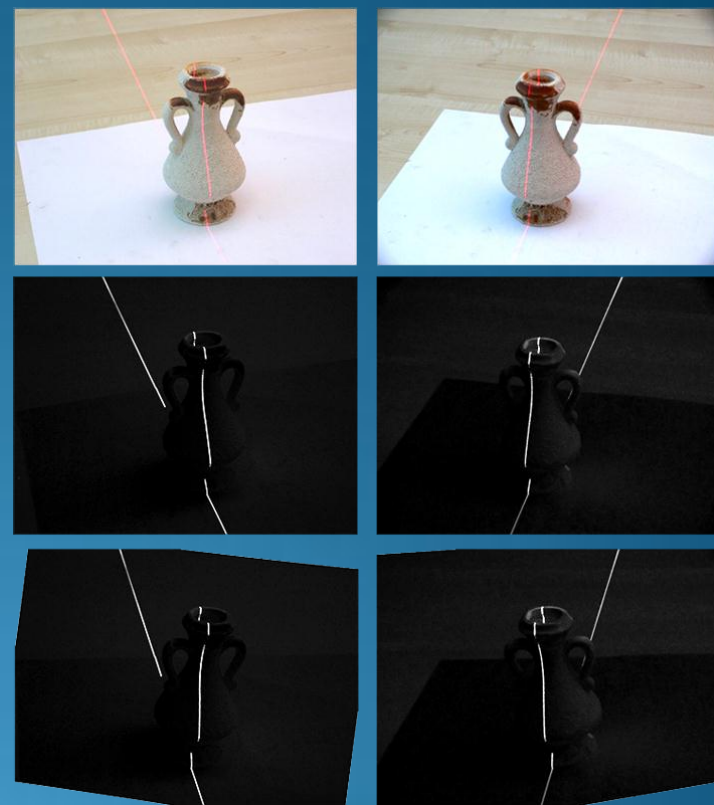
○ Estrazione della lama laser:

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

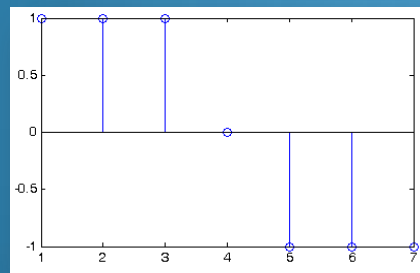


- Rettifica: utilizzo dei *parametri intrinseci ed estrinseci*
→ (linee epipolari orizzontali)

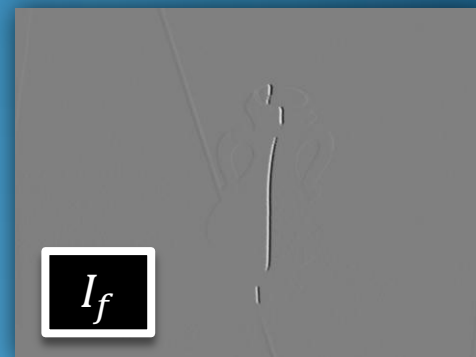
- Filtraggio 2D: $I_f = \sum_{i=-n}^n -\text{sign}(x) \cdot I(x + i, y)$



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

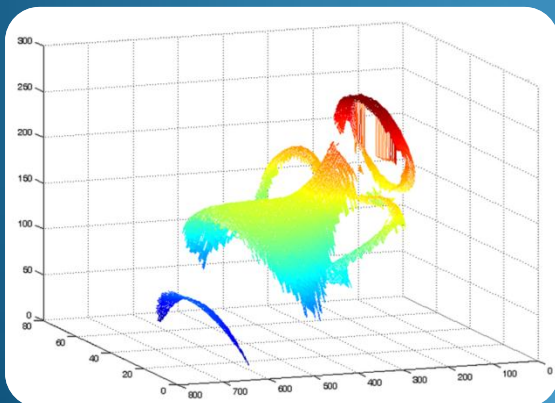
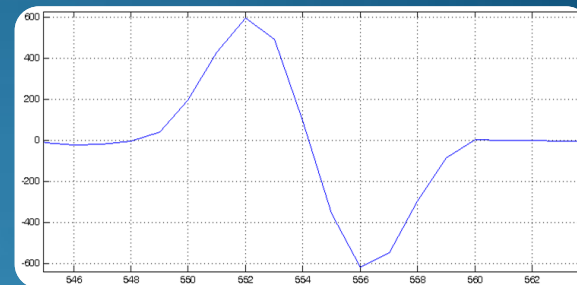
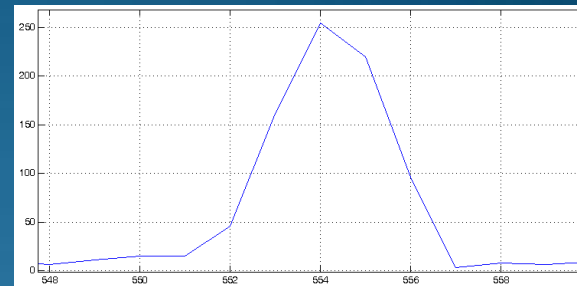
$$\delta = \frac{I_f(x_c, y_c)}{I_f(x_c, y_c) - I_f(x_c + 1, y_c)} = \text{scostamento da } x_c$$

- 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:



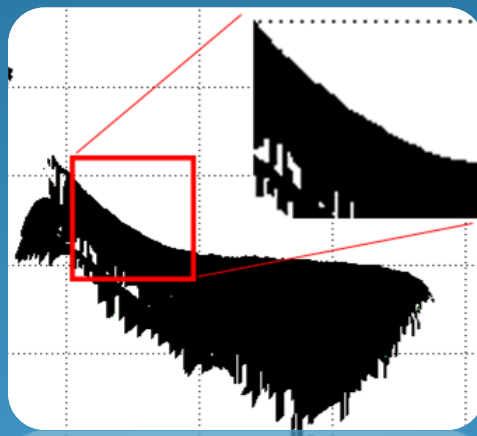
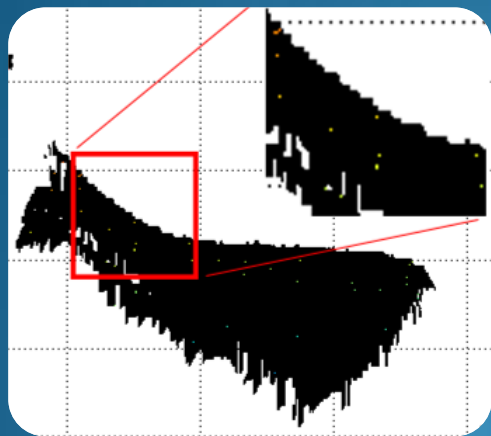


Sensori ottici: STEREOCOPIA + *laser stripe*

- 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

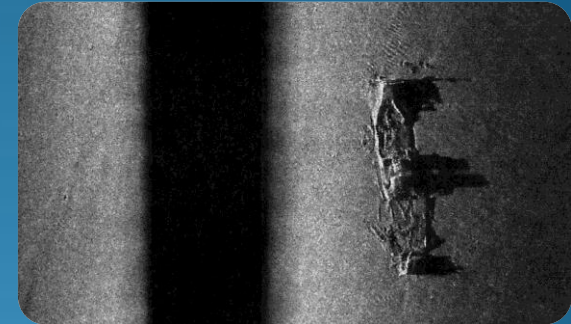
Risultato soddisfacente a scopo di estrazione di *features geometriche*



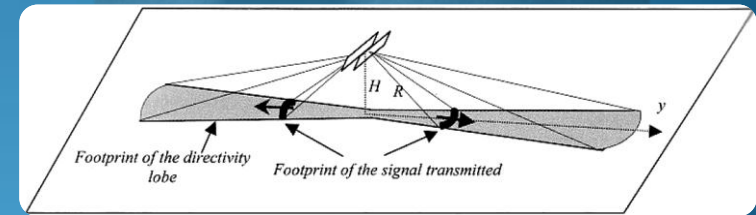
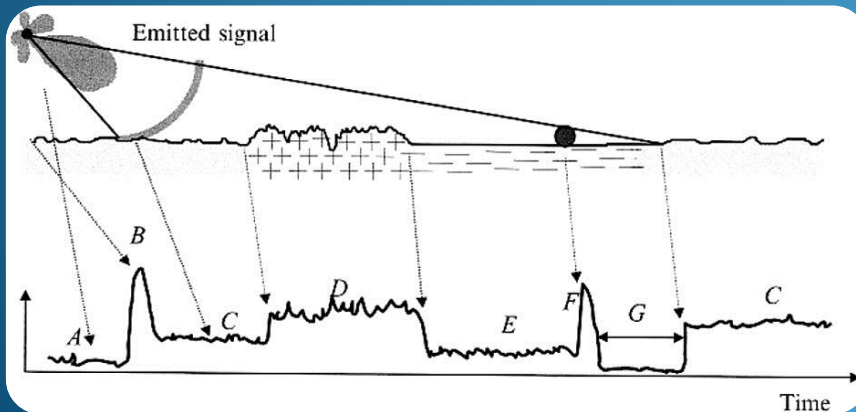
Sensori acustici: SIDESCAN SONAR

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°)



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

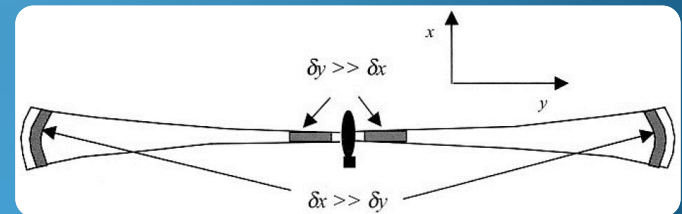
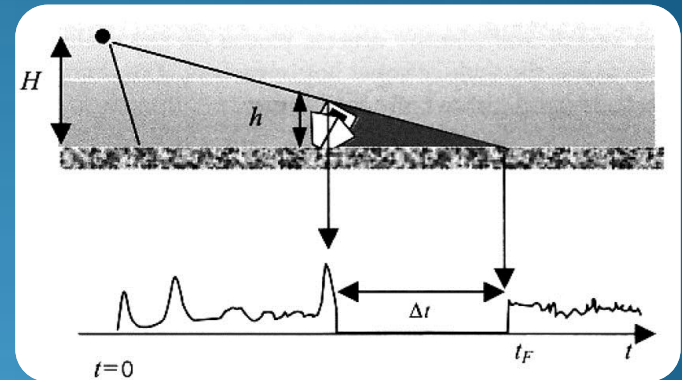
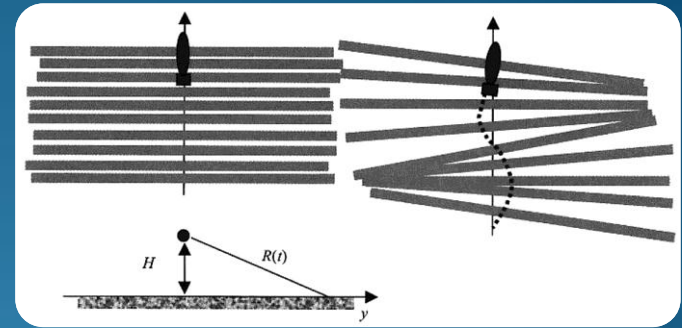
Ombre Acustiche:

- 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:

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

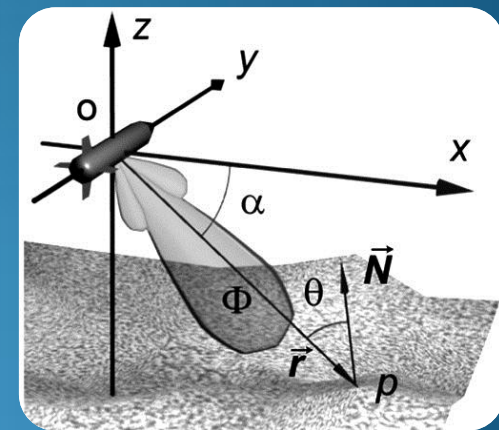
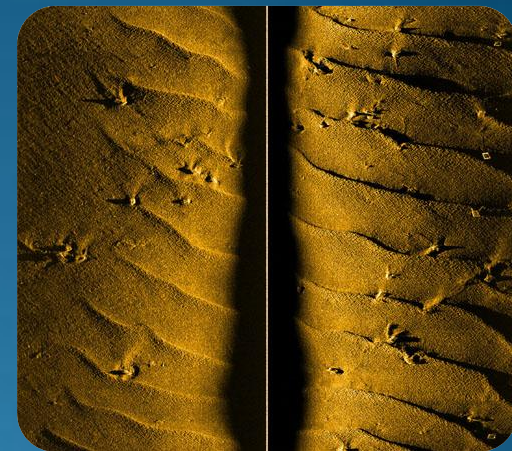
- Buona approssimazione dello scattering acustico con il modello di diffusione Lambertiano
- Posizione della sorgente acustica e trasduttore in rx coincidenti

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 $\Phi(x, y), R(x, y), Z(x, y)$



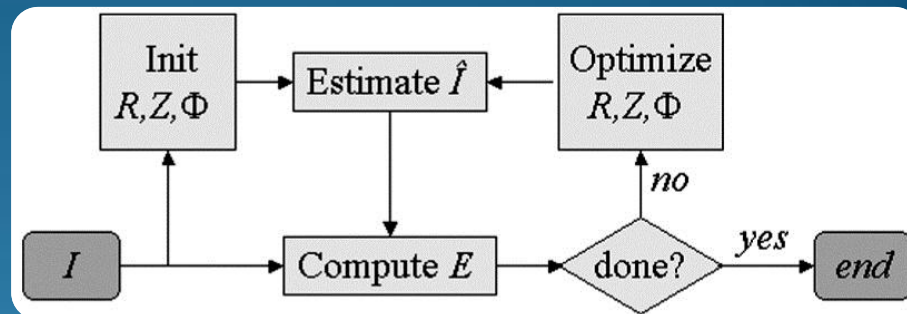


Sensori acustici: 3D da immagini acustiche

Inversione SONAR:

$I(x, y)$ = immagine originale

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

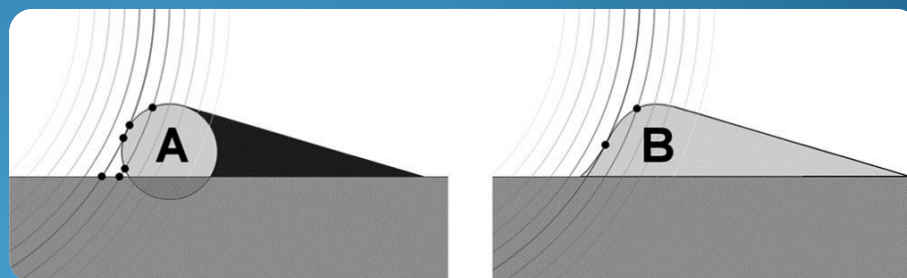


Studio dell'errore $E = \sum_{x,y} E(x, y) = \sum_{x,y} (I(x, y) - \hat{I}(x, y))^2$

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:

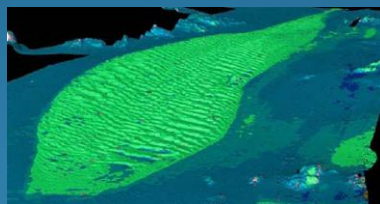
- Integrazione *a cascata (livello operativo)*:
 - sicurezza di acquisizione dati in condizioni non ottime, nei vari domini: distanza dal fondale elevata, acque torbide, vegetazione sviluppata, etc.
 - ripianificazione della missione *in itinere*
- Fusione dei dati acquisiti:
 - basso livello
 - alto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