



UNIVERSITÀ DI PISA

UNIVERSITÀ DI PISA
ACCADEMIA NAVALE



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**RIVELAZIONE E LOCALIZZAZIONE DI
BERSAGLI SU SCENARIO MARITTIMO
MEDIANTE UN SISTEMA IR PASSIVO
MULTICAMERA**

Candidato:

STV (AN) Elena Franceschi

Relatori:

Prof. Giovanni Corsini

Prof. Marco Diani

Ing. Andrea Zingoni

Anno Accademico 2014-2015

Indice

Ringraziamenti	5
Abstract	6
Introduzione	8
PARTE I: Trattazione teorica	10
1. Modello <i>pinhole</i> e geometria stereoscopica	10
1.1. Introduzione	10
1.2. Modello <i>pinhole</i>	10
1.3. Geometria stereoscopica	16
1.4. Linea epipolare	20
1.5. Decomposizione della matrice essenziale	21
2. Segmento epipolare	22
2.1. Distanza minima.....	23
2.2. Distanza massima e punto all'infinito.....	25
2.3. Definizione del segmento epipolare.....	28
2.4. Scelta del punto corrispondente	28
3. Problematiche legate all'incertezza dei parametri di <i>roll, pitch</i> e <i>yaw</i>	30
3.1. Algoritmo a otto punti	30
3.2. Ottimizzazione dei parametri	31
3.3. Simulatore	32
4. Algoritmo di rivelazione	34
4.1. Introduzione	34
4.2. Stima dell'orizzonte	34
4.2.1. <i>Introduzione</i>	34
4.2.2. <i>Algoritmo per la stima dell'orizzonte</i>	35
4.3. Descrizione dell'algoritmo.....	38
4.3.1. <i>Area di ricerca</i>	38
4.3.2. <i>Identificazione del bersaglio di interesse</i>	39
4.3.3. <i>Proiezione sulla linea epipolare</i>	43

4.3.4.	<i>Triangolazione</i>	44
4.3.5.	<i>Scelta del baricentro come punto di partenza</i>	45

PARTE II: Risultati su immagini reali..... 46

5. Specifiche del sistema stereo..... 46

5.1.	Matrici dei parametri intrinseci.....	47
5.2.	Sistemi di riferimento.....	47
5.2.1.	<i>Introduzione</i>	47
5.2.2.	<i>Calcolo delle matrici rotazione e del vettore traslazione</i>	51

6. Segmento epipolare su immagini reali..... 56

6.1.	Dalla linea al segmento epipolare.....	56
6.2.	Sistema di Riferimento specifico di Matlab.....	58
6.3.	Errori sistematici.....	60
6.4.	Ottimizzazione dei parametri.....	61

7. Risultati dell' algoritmo rivelazione..... 64

7.1.	Stima della linea dell'orizzonte.....	64
7.2.	Area di ricerca.....	70
7.3.	Rivelazione del bersaglio.....	70
7.4.	Stima della distanza.....	72
7.5.	Identificazione del baricentro del bersaglio di interesse sulla prima immagine.....	73

PARTE III: Implementazione del simulatore e valutazione dei risultati..... 78

8. Simulatore di bersagli in un sistema stereoscopico..... 78

8.1.	Scopo dell'attività.....	78
8.2.	Parametri di ingresso.....	78
8.3.	Rapporto segnale rumore.....	80
8.4.	Inserimento del bersaglio nelle due immagini.....	81
8.4.1.	<i>Selezione del punto di posizionamento e calcolo degli indici statistici dello sfondo sulla SH</i>	81
8.4.2.	<i>Definizione e inserimento del bersaglio sulla SH</i>	83
8.4.3.	<i>Calcolo del punto tridimensionale e proiezione sulla DH</i>	92
8.4.4.	<i>Calcolo degli indici statistici dello sfondo sulla DH</i>	92

8.4.5.	<i>Definizione e Inserimento Bersaglio sulla DH</i>	92
9.	Estensione del simulatore a bersagli in movimento	94
9.1.	Scopo dell'attività	94
9.2.	Introduzione di un sistema di riferimento <i>ad hoc</i> per la simulazione del movimento del bersaglio	94
9.3.	Spostamento sul piano che approssima la curvatura terrestre.....	97
9.4.	Stima della rotta e della velocità	99
9.5.	Video simulati di bersagli in movimento	101
9.5.1.	<i>Plan Position Indicator</i>	101
9.5.2.	<i>Valutazione di algoritmi di tracking</i>	103
10.	Simulazione di bersagli utilizzando la SH a campo largo	107
11.	Valutazione dell'algoritmo di rivelazione	110
11.1.	Presenza di bersagli multipli nell'area di ricerca	110
11.2.	Bersaglio con basso rapporto segnale rumore.....	111
11.3.	Simulazione dell'errore sistematico sul valore di azimut	113
PARTE IV:	Applicazioni	115
12.	Possibili utilizzi in contesti attuali	115
13.	Installazione del sistema stereo a bordo delle Navi della Marina Militare	116
	Conclusioni	117
	Appendice A - Matrici di rotazione	119
	Appendice B - Trasformata di Hough	121
	Appendice C - Calcolo dell'inclinazione della terna fissa rispetto al piano orizzontale	123
	Bibliografia	127

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Corsini, per avermi indirizzato verso un lavoro di tesi che mi ha completamente coinvolto e affascinato. Allo stesso modo ringrazio il Professor Diani per il continuo supporto e confronto fornitomi e per avermi insegnato le basi della ricerca, permettendomi di crescere professionalmente sul campo sperimentale.

Un ringraziamento particolare va ad Andrea, che con le sue conoscenze, la sua esperienza ed i suoi consigli ha fornito un grande valore aggiunto a questo lavoro.

Ringrazio Stefano, per la sincera compagnia di ogni giorno, e tutti i ragazzi del laboratorio e non, che con la loro simpatia hanno reso migliore ogni momento della preparazione della tesi.

Grazie ai miei genitori, per aver sempre creduto in me e grazie alla mia sorella che, da affermata ricercatrice, è stata ancora una volta il mio punto di riferimento. Ringrazio Alessandro, nato e cresciuto insieme a questo lavoro di tesi, che mi ha regalato i sorrisi più intensi che abbia mai visto.

Grazie a Diletta, Nicole e Arianna per tutti gli sforzi fatti nel cercare di capire questo lavoro di tesi, ormai etichettato come “battaglia navale”. Siete la mia forza, ogni giorno.

Grazie a Riccardo, per l'affetto e il sostegno che è riuscito a trasmettermi da quasi 10.000 chilometri di distanza.

Ringrazio Ilaria e Larry, ormai parte della famiglia, e la mia nonna, che continua a trasmettermi energia anche a 90 anni.

Grazie infine a tutti i miei amici, a Alessandra, Costanza e Silvia e a tutti coloro che mi sono stati vicini durante questo percorso universitario.

Abstract

La rivelazione di bersagli in scenari marittimi e la determinazione della loro posizione è un compito che risulta cruciale in molteplici contesti e, dunque, un attuale argomento di ricerca.

Le tecnologie di localizzazione e sorveglianza si sono spesso avvalse di sistemi di telerilevamento attivi (radar), i quali però, oltre ad essere costosi, possono presentare problemi di compatibilità elettromagnetica in caso di vicinanza di diverse apparecchiature elettroniche. Inoltre, l'emissione di radiazioni elettromagnetiche può avere un forte impatto negativo sia sull'ambiente sia sulla salute dell'uomo. E' di notevole interesse lo sviluppo di tecnologie che consentano di ridurre tale inquinamento elettromagnetico.

Si presenta quindi un sistema passivo, che funziona cioè senza emissione di onde elettromagnetiche, per la rivelazione e la determinazione della posizione di un bersaglio, anche ad elevata distanza. Il sistema è composto da una coppia stereoscopica di termocamere opportunamente posizionate per inquadrare la stessa scena di interesse. Le termocamere possono essere collocate a piacimento, permettendo dunque al sistema di adattarsi a molteplici utilizzi. L'impiego di questo apparato per la scoperta di bersagli a bassa quota sul livello del mare consente di superare il limite di scoperta dei sistemi radar dovuto alle riflessioni delle onde emesse sulla superficie marina. Un ulteriore vantaggio rispetto a un radar, soprattutto in ambito militare, è quello di non incrementare il livello di osservabilità dell'unità o della sede dove viene montato il sistema.

Nell'elaborato viene proposto un algoritmo di rivelazione e di localizzazione automatica di bersagli in ambiente marittimo, realizzato specificamente per funzionare sul sistema sopra descritto.

Selezionando un bersaglio di interesse nell'immagine fornita dalla prima termocamera, l'algoritmo implementato è in grado di sfruttare la geometria che descrive il processo di acquisizione di entrambi i dispositivi, per individuare automaticamente un'area nella seconda immagine entro la quale si troverà il bersaglio scelto. Utilizzando una tecnica di rivelazione basata sulla sottrazione del *background* all'interno dell'area di interesse e sulla stima della linea dell'orizzonte al fine di segmentare le aree di cielo e di mare, l'algoritmo procede con il riconoscimento del baricentro del bersaglio. Nota la posizione del bersaglio sulle due immagini, l'uso congiunto dei due punti di vista differenti permette di effettuare la triangolazione e, dunque, di ricavare posizione e distanza del bersaglio.

L'algoritmo è stato validato su un *dataset* di immagini reali acquisite in ambiente marittimo, dando risultati promettenti anche in caso di bersagli a grande distanza dalle telecamere. Per poter operare

anche una valutazione quantitativa della bontà dell'algoritmo è stato implementato un simulatore in grado di ricreare dei bersagli all'interno delle immagini reali. Il simulatore permette all'utente di definire le caratteristiche dei bersagli che, essendo note, possono essere usate in seguito come *ground truth* da comparare con i risultati ottenuti dall'algoritmo. In fase di validazione del simulatore, questo è stato applicato anche a sequenze video, rivelandosi un utile strumento anche per il test di algoritmi di tracking.

I risultati ottenuti dimostrano che il sistema è particolarmente adatto a tutte quelle situazioni nelle quali si rendono necessarie delle valutazioni sulla presenza e sulla posizione di oggetti in ambiente marittimo. Operazioni di *search and rescue* (uomo a mare, soccorso profughi...), di sorveglianza (intrusioni in aree portuali, lotta alla pirateria...) e di monitoraggio di incidenti (incendi a bordo di navi, unità navali alla deriva...) sono solo alcune delle possibili applicazioni che potrebbero beneficiare dell'utilizzo del sistema e dell'algoritmo di scoperta implementato.

Introduzione

In questo elaborato viene descritta una strategia per determinare la posizione e la distanza di bersagli all'orizzonte utilizzando una coppia di immagini infrarosse fornite da due diverse termocamere.

Conoscendo la posizione di ognuna delle due termocamere rispetto ad un centro di riferimento fissato nello spazio, è possibile stimare le coordinate tridimensionali di un bersaglio presente in entrambe le immagini.

Nella prima parte si fornisce una descrizione puramente teorica di come un punto nello spazio si mappi sul piano immagine di una termocamera e si delineano i legami che esistono tra punti omologhi sui piani immagine delle due telecamere.

Dopodiché si esplicitano i passaggi che portano dalla selezione di un punto sul piano immagine di una termocamera, appartenente a un determinato oggetto, all'individuazione di una zona sul piano immagine della seconda, dove ci aspettiamo di ritrovare lo stesso oggetto.

Considerando che, per bersagli a grande distanza, un errore anche piccolo sui parametri relativi alle posizioni delle termocamere può causare una decisione errata sulla posizione stimata per i bersagli di interesse, si mostra una soluzione che prevede l'ottimizzazione di questi parametri e che permetterà una stima più accurata della posizione.

Nella seconda parte dell'elaborato si applicano le nozioni delineate in precedenza al nostro contesto di riferimento.

Nel nostro sistema si parte da un'immagine a campo largo, che rappresenta quindi una vasta porzione di mare, acquisita dalla prima termocamera, che sarà chiamata *Search Head* poiché verrà utilizzata per selezionare il bersaglio al quale siamo interessati.

La seconda termocamera è invece a campo stretto e questo permette di avere maggior dettaglio nell'immagine fornita. Se anche questa seconda termocamera inquadra il bersaglio d'interesse vedremo come sia possibile, dalla selezione del bersaglio sulla prima immagine, individuarlo automaticamente nella seconda e stimarne la posizione reale nelle tre dimensioni. Tale termocamera sarà chiamata *Detection Head*.

Per mostrare il procedimento con maggior dettaglio, in modo da seguire la logica del metodo più facilmente, si utilizzeranno coppie di immagini a campo stretto, in quanto dotate di maggior risoluzione.

Vedremo come l'errore sistematico sulla posizione delle telecamere incida effettivamente sulla determinazione della distanza e la sua correzione permetta di migliorarne la stima.

Per poter verificare il funzionamento dell'algoritmo di rivelazione implementato e per ricreare facilmente scenari di interesse, mostreremo come, partendo da immagini reali, sia possibile simulare dei bersagli su di esse. La versatilità del simulatore realizzato permette all'utente di scegliere diversi parametri relativi al bersaglio, tra i quali la dimensione, la posizione nell'immagine e la distanza dalle termocamere.

Si accenna anche alla possibilità di implementare dei video simulati che potrebbero essere utilizzati per testare anche algoritmi di tracking.

Mostrando le immagini che il simulatore riesce a riprodurre si evidenzierà come questo permetta di valutare sia le prestazioni dell'algoritmo di rivelazione in situazioni più o meno complicate sia il peso che comporta un errore sistematico.

PARTE I: Trattazione teorica

1. Modello *pinhole* e geometria stereoscopica

1.1. Introduzione

Lo scopo della visione stereoscopica, cioè dell'utilizzo di più di una telecamera o comunque di più punti di vista diversi, è quello di ricostruire la scena tridimensionale statica partendo da immagini bidimensionali. In particolare l'obiettivo di questa tesi si focalizza sulla determinazione della posizione e quindi della distanza di bersagli navali osservati sulla linea dell'orizzonte.

Prima di analizzare la relazione geometrica che lega due punti della stessa scena in due immagini diverse, ottenute nel nostro caso da telecamere differenti, è necessario introdurre il modello *pinhole*, che descrive come un oggetto tridimensionale viene rappresentato su di un'immagine.

1.2. Modello *pinhole*

Per facilitare e sintetizzare il processo di formazione delle immagini, cioè la proiezione dei punti reali sul piano immagine, si adotta il modello *pinhole*. La trattazione di questo modello puramente geometrico è necessaria per conoscere la relazione tra il punto sul piano dell'immagine e la posizione corrispondente nel mondo reale. Nel modello, la telecamera viene schematizzata mediante una scatola con un piccolo foro, come evidenziato in Figura 1.1.

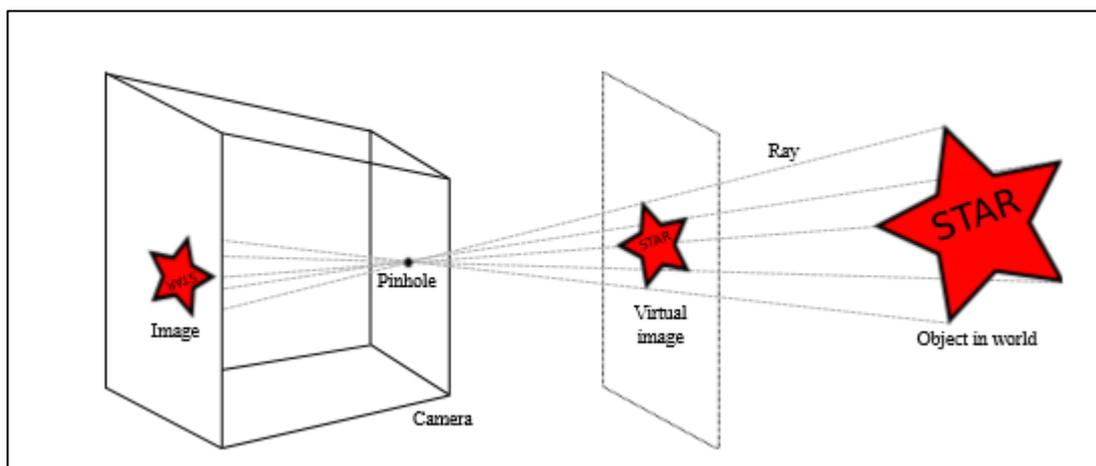


Figura 1.1 Modello *pinhole*

I raggi di luce provenienti dall'esterno della scatola seguono una traiettoria rettilinea. Questi possono passare solamente per il foro a spillo e da lì vanno a rivelarsi sulla parete della scatola opposta al foro, che funziona da schermo e che viene detto *piano immagine*. Osservando la Figura

1.1, si nota come l'immagine appaia rovesciata sullo schermo. Infatti, se seguiamo per esempio il raggio che parte dalla punta più alta della stella e continuiamo a seguirlo attraverso il foro, si nota come questo si intersechi con la parte bassa del piano immagine. Allo stesso modo il raggio che parte dalla punta più bassa dell'oggetto nel mondo reale finisce sulla parte alta del piano immagine, e lo stesso dicasi per quanto riguarda le punte destra e sinistra della stella.

Per evitare di lavorare con immagini capovolte, è possibile utilizzare l'espedito geometrico di considerare il piano immagine davanti al foro. La trattazione, seppur priva di significato reale, è comunque del tutto equivalente da un punto di vista geometrico.

Per descrivere la geometria di acquisizione di un'immagine, fissiamo un sistema di riferimento per i punti del mondo con origine nel *pinhole*, punto che chiameremo *centro ottico*. L'asse principale o asse ottico, ovvero la retta che, partendo dal foro, interseca perpendicolarmente il piano immagine in un punto detto *principale*, posto nel nostro caso al centro del piano stesso, corrisponde all'asse Z_1 . Gli assi X_1 e Y_1 corrispondono rispettivamente alle due dimensioni orizzontale e verticale del piano immagine, come vediamo nella Figura 1.2.

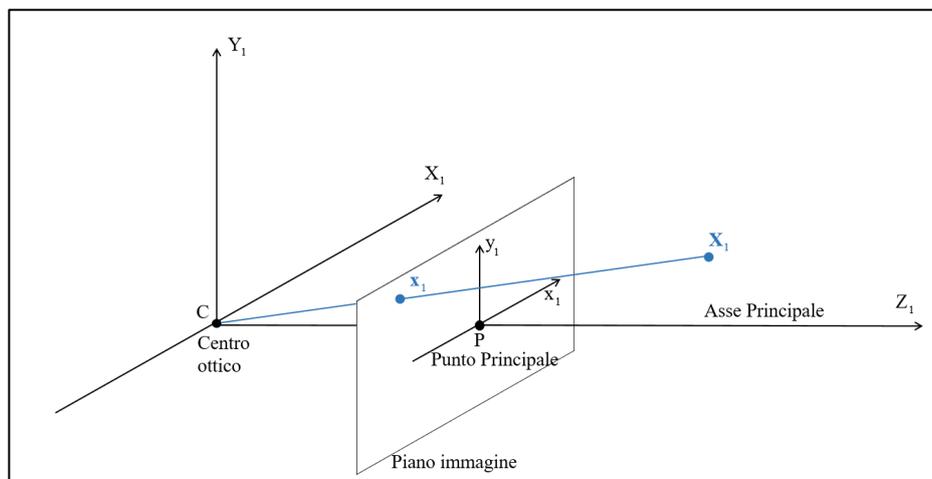


Figura 1.2 Terminologia utilizzata per il modello *pinhole*

Nella notazione in Figura 1.2, il pedice "1" è stato inserito per poter differenziare, successivamente, questo sistema di riferimento da quello presente sulla seconda telecamera. La simbologia priva di pedice sarà invece utilizzata per caratterizzare un sistema di riferimento fisso, indipendente dalle due telecamere.

Un punto nello spazio sarà dunque identificato dalla terna (X_1, Y_1, Z_1) ed è possibile ottenere la sua proiezione sul piano immagine, x_1 , dall'intersezione del segmento, che unisce il punto reale al centro telecamera, con il piano immagine stesso (Figura 1.3).

La distanza tra il centro della telecamera ed il piano immagine è nota come distanza focale, grandezza basilare, come vedremo, nella definizione della relazione che stiamo cercando tra punto immagine e punto nello spazio.

Osserviamo la Figura 1.3 per capire secondo quale regola si ottiene la proiezione di un punto appartenente allo spazio reale tridimensionale sul piano immagine.

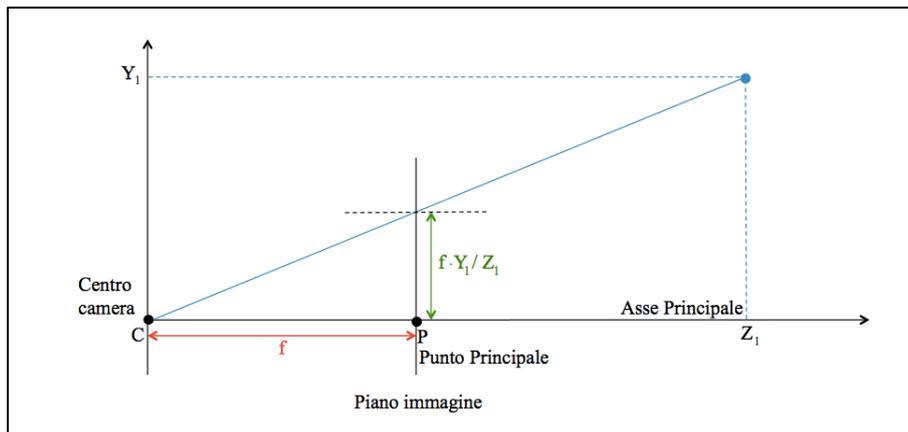


Figura 1.3 Lunghezza focale nel modello *pinhole*

Considerando i triangoli simili con base CP e CZ₁ abbiamo che

$$\frac{y_1}{Y_1} = \frac{f}{Z_1} \quad (1.1)$$

dove f è la grandezza focale, y_1 l'ordinata del punto sul piano immagine e, Y_1 e Z_1 , la seconda e la terza coordinata del punto in tre dimensioni.

Allora, ripetendo il procedimento anche per le coordinate orizzontali x_1 e X_1 , avremo che

$$\begin{cases} y_1 = f \frac{Y_1}{Z_1} \\ x_1 = f \frac{X_1}{Z_1} \end{cases} \quad (1.2)$$

Il sistema (1.2) descrive quindi la proiezione del punto 3D (X_1, Y_1, Z_1) sul piano immagine.

E' possibile stabilire una relazione lineare tra le coordinate del punto in tre dimensioni e le coordinate sul piano immagine. Definiamo a questo scopo la matrice dei *parametri intrinseci*, contenente i parametri caratteristici della telecamera.

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Per ottenere la matrice dei parametri intrinseci è possibile esplicitare la lunghezza focale in funzione dell'IFOV, *Instantaneous Field Of View*. Questo è possibile attraverso delle semplici proporzioni messe in evidenza dalla Figura 1.4.

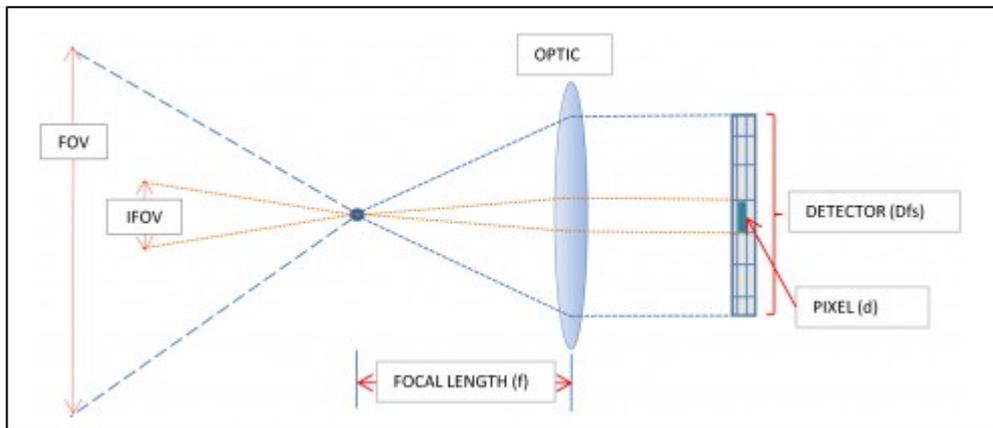


Figura 1.4 Grandezze principali di un sistema ottico

Possiamo approssimare la grandezza del *pitch* d come:

$$d = f \text{ IFOV} \quad (1.4)$$

dunque invertendo l'equazione troviamo

$$f = \frac{d}{\text{IFOV}} \quad (1.5)$$

Esprimendo la grandezza del *pitch* d in metri e il campo di vista istantaneo in radianti avremo di conseguenza una lunghezza focale in metri. f è il parametro che caratterizza la matrice dei parametri intrinseci e volendo esprimere quest'ultima in pixel è necessario riportare anche la lunghezza focale in pixel. Dividendo quindi il valore ottenuto per quello della grandezza del *pitch*, corrispondente appunto ad un pixel, il parametro di interesse sarà:

$$f_{\text{pixel}} = \frac{f}{d} = \frac{1}{\text{IFOV}} \quad (1.6)$$

La matrice dei parametri intrinseci, espressa in pixel, sarà quindi:

$$\Lambda_{\text{pixel}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{IFOV} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{IFOV} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

A sua volta è possibile esprimere l'IFOV in funzione del FOV, *Field Of View*, ad esempio quando noto solo quest'ultimo parametro. Conoscendo la dimensione in pixel dell'array sul piano focale e riferendoci nuovamente alla Figura 1.4, possiamo ricavare il primo dal secondo nel seguente modo:

$$IFOV = \frac{FOV}{N_{\text{pix}}} \quad (1.8)$$

Per esprimere la relazione tra le due coordinate attraverso equazioni lineari è necessario introdurre le coordinate omogenee (nel testo distinte con la soprilineatura). Chiameremo coordinate omogenee di un punto \mathbf{x}_1 del piano immagine di coordinate cartesiane x_1 e y_1 una qualsiasi terna di numeri (a, b, c) tali che $a/c = x_1$ e $b/c = y_1$. Segue da questa definizione che le coordinate omogenee sono definite a meno di un fattore di proporzionalità e che la terna omogenea $\lambda(x_1, y_1, 1)$ rappresenta quindi, per ogni valore dello scalare λ , lo stesso punto $\mathbf{x}_1 = (x_1, y_1)$. Allo stesso modo è possibile rappresentare il punto tridimensionale $\mathbf{X}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ in coordinate omogenee attraverso la terna $\overline{\mathbf{X}}_1 = \lambda(X_1, Y_1, Z_1, 1)$, dove λ è un fattore arbitrario scalare. In generale si aggiunge quindi una terza coordinata al punto sul piano bidimensionale ed una quarta a quello in tre dimensioni. Il risultato è il seguente:

$$\lambda \overline{\mathbf{x}} = \lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \Lambda_1 \overline{\mathbf{X}}_1 \quad (1.9)$$

Per avere conferma della correttezza dell'equazione (1.4), la si può sviluppare ottenendo il modello originale descritto nella 1.2.

Definiamo ora un ulteriore sistema di riferimento, che identificheremo come sistema di riferimento fisso, cioè indipendente dalla posizione delle telecamera e quindi dal sistema (X_1, Y_1, Z_1) che aveva origine sul centro ottico della telecamera stessa.

Lavorando con un sistema di visione costituito da due telecamere avremo due sistemi di riferimento, con l'origine nel centro di ognuna telecamera e asse Z_i , nella direzione di puntamento. Come detto in precedenza, chiameremo le due terne (X_1, Y_1, Z_1) e (X_2, Y_2, Z_2) .

Supponiamo siano note le coordinate di un punto nello spazio nel sistema di riferimento fisso, che identifichiamo con (X, Y, Z) . Per esprimerlo nelle coordinate relative al sistema telecamera è necessario introdurre una matrice di rotazione ed un vettore di traslazione tali da portare il primo sistema di riferimento sul secondo. La trattazione matematica delle matrici di rotazione è descritta nell'Appendice A.

Noto un punto nel sistema di riferimento di una della due telecamere (X_i, Y_i, Z_i) è possibile esprimerlo nelle coordinate relative alla terna fissa tramite la seguente trasformazione di coordinate:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = R_i \mathbf{X}_i + \tau_i \quad (1.10)$$

dove R_i e τ_i sono rispettivamente la matrice di rotazione ed il vettore di traslazione che portano il sistema di riferimento fisso su quello di una delle due telecamere. Queste due grandezze sono chiamate *parametri estrinseci* poiché descrivono l'orientazione della telecamera rispetto al sistema di riferimento fisso.

Invertendo l'equazione si trova la relazione inversa, che lega dunque il punto nelle coordinate fisse ad uno espresso nelle coordinate di una telecamera:

$$\mathbf{X}_i = R_i^{-1} (\mathbf{X} - \tau_i) = R_i^{-1} \mathbf{X} - R_i^{-1} \tau_i = R \mathbf{X} + \tau \quad (1.11)$$

Dove

$$R = R_i^{-1} = R_i' \quad (1.12)$$

è la matrice di rotazione che porta il sistema di riferimento di una della due telecamere su quello fisso e

$$\tau = -R_i^{-1} \tau_i \quad (1.13)$$

è il vettore di traslazione che esprime l'origine della terna fissa nel sistema di una delle due telecamere.

Esplicitando il punto tridimensionale reale, espresso in uno dei due sistemi relativi, in coordinate omogenee, è possibile modificare la relazione (1.11) come segue:

$$\overline{\mathbf{X}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \overline{\mathbf{X}} \quad (1.14)$$

Unendo l'equazione (1.14), che descrive il punto in coordinate tridimensionali nel sistema della telecamera di riferimento i -esimo e l'equazione (1.9), che esprime il punto nel piano immagine di una delle due telecamere, otteniamo:

$$\begin{aligned} \lambda \bar{x} = \Lambda_i \overline{\mathbf{X}}_i &= \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \overline{\mathbf{X}} = \\ &= \begin{bmatrix} \Lambda_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \overline{\mathbf{X}} = \Lambda_i [R \quad \tau] \overline{\mathbf{X}} = \Lambda_i P_i \overline{\mathbf{X}} \end{aligned} \quad (1.15)$$

dove P_i è chiamata matrice di proiezione.

1.3. Geometria stereoscopica

Ora che sono chiare le relazioni che coesistono tra una termocamera ed un sistema di riferimento fissato, possiamo descrivere le relazioni che legano due immagini ottenute con due telecamere diverse che inquadrano però la stessa scena.

Vedremo poi come, attraverso la conoscenza della geometria relativa tra queste due telecamere, sia possibile risalire alla posizione di un punto d'interesse nel mondo reale e calcolare così la sua distanza dalle telecamere.

Per descrivere le relazioni ed i vincoli geometrici che legano due immagini in due dimensioni della stessa scena tridimensionale, introdurremo alcuni concetti di geometria epipolare.

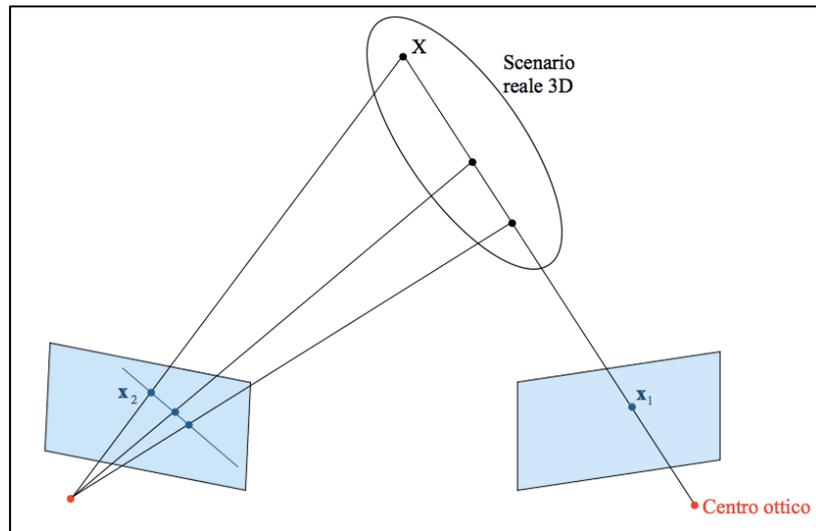


Figura 1.5 Linea epipolare

Prendiamo come riferimento la Figura 1.5. Sia x_1 un punto sulla prima immagine alla quale siamo interessati. Quello che sappiamo è che questo deriva dalla proiezione di un punto X appartenente allo scenario tridimensionale e che giace sulla retta che partendo dal centro ottico passa per X .

Quello che però non conosciamo a priori è la distanza del punto X dal centro della termocamera e questo dato non può essere determinato avendo a disposizione una sola immagine.

Se ci focalizziamo invece sulla seconda immagine, possiamo giustificare il fatto che sicuramente il punto 3D proiettato su di essa giacerà lungo la proiezione della retta considerata prima. Tale retta è chiamata *linea epipolare*.

Ricapitolando, ciascun punto sulla prima immagine si mappa nella seconda in una linea epipolare. Questo, come vedremo, sarà il primo passo da implementare nell'algoritmo di rivelazione: dopo aver selezionato un punto sulla prima immagine bisognerà capire come trovare la linea epipolare corrispondente nella seconda immagine.

Tale procedura è realizzabile sfruttando la relazione tra le due telecamere, che può esprimersi convenientemente mediante la *matrice essenziale* o la *matrice fondamentale*, che giocano un ruolo chiave in questa trasformazione.

Per semplificare i passaggi è necessario fare un passo indietro, lasciando da parte per il momento il terzo sistema di riferimento, quello fisso. Per fare questo possiamo pensare di avere il sistema fisso orientato come il sistema di riferimento sulla prima termocamera. Così facendo infatti i parametri estrinseci della prima termocamera, matrice di rotazione e vettore di traslazione, saranno la matrice identità e il vettore nullo, perché i due sistemi coincidono.

La seconda termocamera sarà invece in una posizione arbitraria e, come visto in precedenza, è possibile relazionarla alla terna fissa, che adesso facciamo coincidere col sistema di riferimento della prima termocamera, attraverso le matrici di rotazione ed il vettore di traslazione che portano il sistema di riferimento della seconda termocamera sul quello della prima, R_{21} e τ_{21} .

Facciamo un'ulteriore semplificazione considerando per il momento di avere telecamere *normalizzate*, cioè dove la distanza focale è pari ad uno. In questo modo le matrici dei parametri intrinseci coincideranno con la matrice identità, $\Lambda_1 = \Lambda_2 = I$.

Riprendendo le espressioni ottenute in coordinate omogenee, relazioniamo uno stesso punto nello spazio reale in tre dimensioni ai due punti su immagini diverse come:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = [I \quad 0] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \\ \lambda_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = [R_{21} \quad \tau_{21}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (1.16)$$

Avendo posto la terna fissa coincidente con il primo sistema di riferimento, la prima equazione del sistema (1.16) risulta notevolmente semplificata. Sviluppando le due equazioni (1.11) otteniamo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda_1 \bar{\mathbf{x}}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{X} \\ \lambda_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda_2 \bar{\mathbf{x}}_2 = R_{21} \mathbf{X} + \tau_{21} \end{array} \right. \quad (1.17)$$

Dopodiché, sostituendo la prima uguaglianza del sistema (1.17) nella seconda, si ha:

$$\lambda_2 \bar{\mathbf{x}}_2 = R_{21} \lambda_1 \bar{\mathbf{x}}_1 + \tau_{21} \quad (1.18)$$

Applicando il prodotto vettoriale per τ_{21} ad entrambi i membri, l'ultimo addendo del secondo membro diventa nullo, essendo il prodotto incrociato di qualsiasi vettore con se stesso pari a zero. L'equazione (1.18) si modifica nel seguente modo:

$$\lambda_2 \tau_{21} \times \bar{\mathbf{x}}_2 = \lambda_1 \tau_{21} \times \mathbf{R}_{21} \bar{\mathbf{x}}_1 \quad (1.19)$$

Compiendo il prodotto interno di entrambi i membri con $\bar{\mathbf{x}}_2$, il primo membro scompare, essendo $\tau_{21} \times \bar{\mathbf{x}}_2$ perpendicolare $\bar{\mathbf{x}}_2$. Di conseguenza il risultato sarà:

$$0 = \bar{\mathbf{x}}_2^T \tau_{21} \otimes \mathbf{R}_{21} \bar{\mathbf{x}}_1 = \bar{\mathbf{x}}_2^T \begin{bmatrix} 0 & -\tau_z & \tau_y \\ \tau_z & 0 & -\tau_x \\ -\tau_y & \tau_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{21} \bar{\mathbf{x}}_1 = \bar{\mathbf{x}}_2^T \cdot \mathbf{E} \cdot \bar{\mathbf{x}}_1 \quad (1.20)$$

dove E è la matrice essenziale che, come vediamo, vincola la relazione tra i due punti nell'immagine ed è definita dal prodotto vettoriale $\tau_{21} \otimes \mathbf{R}_{21}$.

Rimuoviamo adesso la semplificazione fatta sulle matrici dei parametri intrinseci. Il sistema diventa allora:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \Lambda_1 \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \\ \lambda_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \Lambda_2 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{21} & \tau_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (1.21)$$

Seguendo il procedimento fatto in precedenza il risultato finale sarà il seguente:

$$0 = \bar{\mathbf{x}}_2^T \Lambda_2^{-T} \mathbf{E} \Lambda_1^{-1} \bar{\mathbf{x}}_1 \quad (1.22)$$

Definendo la matrice fondamentale F come

$$F = \Lambda_2^{-T} \mathbf{E} \Lambda_1^{-1} \quad (1.23)$$

possiamo concludere che F esprime il vincolo matematico tra la posizione del punto immagine nella prima immagine e nella seconda nel seguente modo:

$$\overline{\mathbf{x}}_2^T F \overline{\mathbf{x}}_1 = 0 \quad (1.24)$$

Questo risultato è di fondamentale importanza poiché, scelto il punto di interesse nella prima immagine, siamo in grado di riportarlo nella seconda. Come abbiamo già affermato, non conoscendo a priori la distanza del *target* reale dal centro della telecamera, un singolo punto sulla prima immagine si andrà a mappare in una linea (epipolare) nella seconda e non in un singolo punto.

1.4. Linea epipolare

E' opportuno evidenziare i procedimenti matematici che permettono di passare da un punto sulla prima immagine alla linea epipolare, sfruttando la relazione definita dalla matrice fondamentale.

La formula (1.25) riporta l'equazione cartesiana di una retta in forma implicita.

$$ax + by + c = [a \quad b \quad c] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = l \overline{\mathbf{x}} = 0 \quad (1.25)$$

Mettiamo a sistema la formula (1.24), che esprime il legame presente tra due punti del piano di immagini diverse e la matrice fondamentale, e l'equazione (1.25) che, considerando la prima telecamera, esprimerebbe l'appartenenza di un punto del piano alla retta.

$$\begin{cases} \overline{\mathbf{x}}_2^T F \overline{\mathbf{x}}_1 = 0 \\ l_1 \overline{\mathbf{x}}_1 = 0 \end{cases} \quad (1.26)$$

E' facile concludere che la linea epipolare sulla prima immagine prodotta dal punto nella seconda immagine è

$$l_1 = \overline{\mathbf{x}}_2^T F \quad (1.27)$$

Con la stessa logica, la linea epipolare sulla seconda immagine, che deriva questa volta da un punto sulla prima immagine, sarà

$$l_2 = \overline{\mathbf{x}}_1^T F^T \quad (1.28)$$

1.5. Decomposizione della matrice essenziale

Sulla base delle definizioni teoriche illustrate fino ad ora, definendo un punto dell'immagine della prima telecamera, attraverso la relazione (1.28) siamo quindi in grado di determinare la linea epipolare sulla seconda immagine, a patto di conoscere la matrice fondamentale.

Per risalire a quest'ultima è possibile riprendere la relazione (1.23) che la lega alla matrice essenziale tramite le matrici dei parametri intrinseci. In altre parole, conoscendo le matrici dei parametri che descrivono le telecamere e la matrice essenziale, è possibile ricavare quella fondamentale.

Per riuscire a tracciare la linea epipolare nella seconda immagine non resta altro che determinare la matrice essenziale che, come abbiamo definito, è data dal prodotto vettoriale $\tau_{21} \otimes R_{21}$.

E' bene sottolineare che τ_{21} e R_{21} sono il vettore di traslazione e la matrice di rotazione che mappano i punti dalle coordinate del sistema della prima telecamera in quelle della seconda e quindi che portano il sistema di riferimento della seconda telecamera su quello della prima. E' inoltre opportuno rimarcare che questa affermazione è vera quando il sistema di riferimento fisso coincide con quello sulla prima telecamera.

2. Segmento epipolare

In questo paragrafo viene descritto il procedimento che permette di individuare, scelto un punto sulla prima immagine, un segmento epipolare sulla seconda. Partendo da ciò, vedremo come sia necessario, per motivi che saranno chiari successivamente, definire un'area di ricerca da ispezionare per rivelare la presenza dell'oggetto d'interesse sull'immagine fornita dalla seconda telecamera.

La volontà di limitare la linea ad un segmento nasce al fine di ridurre notevolmente lo spazio di punti che definisce le possibili posizioni del *target* nella seconda immagine.

Se fosse nota la distanza, sarebbe immediato ricavare il punto corrispondente nella seconda immagine, come mostra la Figura 2.1.

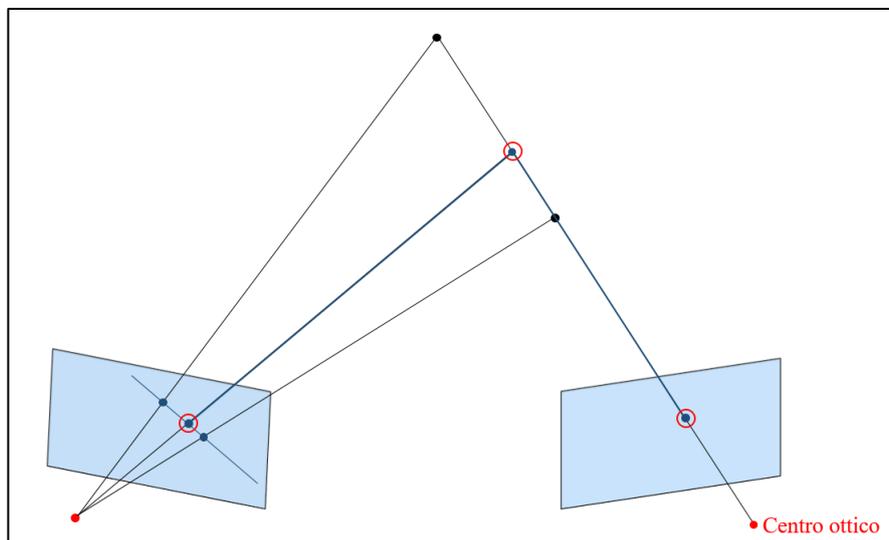


Figura 2.1 Geometria epipolare nel caso di distanza nota del punto tridimensionale dal centro ottico

Per ottenere una prima limitazione della linea viene scelta una distanza minima al di sotto della quale non siamo interessati alla rivelazione di oggetti. Questa scelta deriva dell'interesse di rivelare bersagli all'orizzonte e quindi ad una certa distanza dal sistema.

La seconda limitazione è data dalla geometria relativa delle telecamere. Nel paragrafo 2.2 vedremo infatti che alcuni punti appartenenti alla linea epipolare sono in realtà privi di significato fisico e possono essere quindi scartati a priori.

Limitare la retta epipolare da un lato con la distanza minima e dall'altro con una considerazione geometrica permetterà quindi di passare da una linea ad un segmento epipolare.

2.1. Distanza minima

Come già accennato, essendo interessati a bersagli all'orizzonte o comunque posti ad una certa distanza è possibile definire una distanza minima che limita ad una semiretta la proiezione nella seconda immagine, come mostra la Figura 2.2.

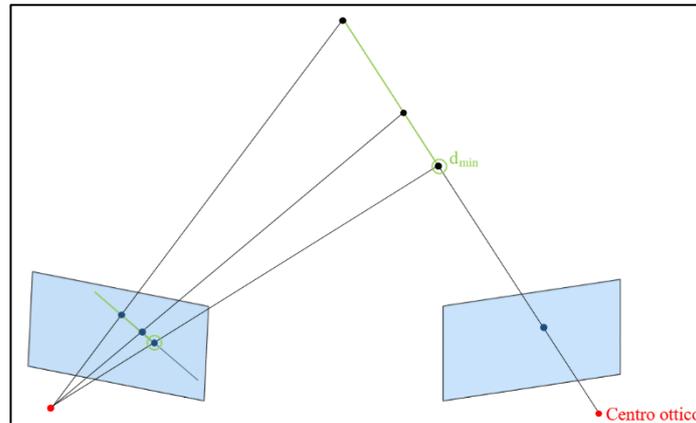


Figura 2.2 Geometria epipolare fissando una distanza minima di interesse

Esplicitiamo quindi i passaggi che permettono, scelta una distanza minima di interesse, di ottenere il punto nella seconda immagine, corrispondente al limite inferiore del segmento epipolare che stiamo andando a delineare.

L'equazione (1.2) esprime il punto sul piano immagine in funzione della lunghezza focale e delle coordinate del punto nello spazio, secondo i sistemi di riferimento della prima termocamera.

Volendo le coordinate sul piano immagine in pixel, sulla base dell'eguaglianza (1.6) che esprime appunto la lunghezza focale in pixel, il risultato, omettendo i pedici per semplicità di scrittura, sarà il seguente:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{IFOV} \frac{X}{Z} \\ y = \frac{1}{IFOV} \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (2.1)$$

E' quindi possibile ricavare la prima e la seconda coordinata del punto reale in tre dimensioni secondo il sistema di riferimento sulla prima telecamera invertendo le uguaglianze.

$$\begin{cases} X = x Z IFOV \\ Y = y Z IFOV \end{cases} \quad (2.2)$$

La distanza del punto reale nello spazio sarà data da

$$d = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2.3)$$

quindi, scegliendo una distanza minima d_{\min} , è possibile ricavare la terza coordinata in funzione delle prime due.

$$Z = \pm \sqrt{d_{\min}^2 - X^2 - Y^2} \quad (2.4)$$

Sostituendo quest'ultima equazione nel sistema (2.2) otteniamo che

$$\begin{cases} X = \pm x \sqrt{d_{\min}^2 - X^2 - Y^2} \text{ IFOV} \\ Y = \pm y \sqrt{d_{\min}^2 - X^2 - Y^2} \text{ IFOV} \end{cases} \quad (2.5)$$

Risolviendo entrambe le equazioni rispettivamente per la prima e la seconda coordinata otteniamo che

$$\begin{cases} X = \pm \sqrt{\frac{\text{IFOV}^2 x^2 (d_{\min}^2 - Y^2)}{1 + \text{IFOV}^2 x^2}} \\ Y = \pm \sqrt{\frac{\text{IFOV}^2 y^2 (d_{\min}^2 - X^2)}{1 + \text{IFOV}^2 y^2}} \end{cases} \quad (2.6)$$

E' ora possibile risolvere il sistema poiché, avendo fissato la distanza, siamo arrivati ad un sistema di due equazioni in due incognite. Sostituiamo quindi la seconda equazione nella prima:

$$\begin{aligned} X &= \pm \sqrt{\frac{\text{IFOV}^2 x^2}{1 + \text{IFOV}^2 x^2} \left(d_{\min}^2 - \frac{\text{IFOV}^2 y^2 (d_{\min}^2 - X^2)}{1 + \text{IFOV}^2 y^2} \right)} = \\ &= \pm \sqrt{\frac{\text{IFOV}^2 x^2}{(1 + \text{IFOV}^2 x^2)(1 + \text{IFOV}^2 y^2)} (d_{\min}^2 (1 + \text{IFOV}^2 y^2) - \text{IFOV}^2 y^2 (d_{\min}^2 - X^2))} = \\ &= \pm \sqrt{\frac{\text{IFOV}^2 x^2}{(1 + \text{IFOV}^2 x^2)(1 + \text{IFOV}^2 y^2)} (d_{\min}^2 + \text{IFOV}^2 y^2 X^2)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Portando a sinistra i termini relativi alla prima coordinata nello spazio reale, otteniamo che

$$X^2 \left[1 - \frac{(\text{IFOV}^2 x^2)(\text{IFOV}^2 y^2)}{(1 + \text{IFOV}^2 x^2)(1 + \text{IFOV}^2 y^2)} \right] = \frac{\text{IFOV}^2 x^2 d_{\min}^2}{(1 + \text{IFOV}^2 x^2)(1 + \text{IFOV}^2 y^2)} \quad (2.8)$$

Concludendo ed esplicitando i pedici, per maggiore chiarezza nei successivi passaggi, avremo quindi che

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = \pm \sqrt{\frac{IFOV_1^2 x_1^2 d_{min}^2}{(1+IFOV_1^2 x_1^2)(1+IFOV_1^2 y_1^2) - (IFOV_1^2 x_1^2)(IFOV_1^2 y_1^2)}} = \pm \sqrt{\frac{IFOV_1^2 x_1^2 d_{min}^2}{(1+IFOV_1^2(x_1^2+y_1^2))}} \\ Y_1 = \pm \sqrt{\frac{IFOV_1^2 y_1^2 d_{min}^2}{(1+IFOV_1^2(x_1^2+y_1^2))}} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Infine è possibile ricavare la terza coordinata sostituendo nella (2.4) i risultati ottenuti sopra.

La Figura 1.2 mostra che i due sistemi di riferimento, nei quali sono descritti i due punti, nell'immagine e nello spazio, appena relazionati, hanno gli assi del piano (x_1, y_1) coerenti con gli assi X_1 e Y_1 della sistema di riferimento tridimensionale della telecamera. Per determinare il segno positivo o negativo delle coordinate X_1 e Y_1 basterà quindi scegliere quello concorde rispettivamente alle coordinate (x_1, y_1) , relative alla proiezione sul piano.

Il segno sull'asse Z_1 è invece sempre positivo perché siamo ovviamente interessati a bersagli davanti alle termocamere.

Noto il punto $\mathbf{X}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ in coordinate tridimensionali nel sistema di riferimento della prima termocamera è facile riportarlo nel sistema di riferimento della seconda tramite l'equazione (5.12).

Per determinare infine il punto sul piano della seconda immagine che limita la linea epipolare basterà quindi proiettare \mathbf{X}_2 secondo la relazione espressa in (2.1) dove, riportandola al caso specifico avremo

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2 = \frac{1}{IFOV_2} \frac{X_2}{Z_2} \\ y_2 = \frac{1}{IFOV_2} \frac{Y_2}{Z_2} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

2.2. Distanza massima e punto all'infinito

Risulta più difficile definire a priori la distanza massima alla quale potremmo essere interessati poiché sulla visibilità o meno del *target* influiscono molteplici fattori, quali la distanza dell'oggetto dalla termocamera e l'altezza sul livello del mare sia della termocamera che dell'oggetto.

Per la posizione reciproca che possono assumere le due telecamere è possibile calcolare un punto “all’infinito” sulla linea epipolare. Questo permetterà di dare un limite superiore alla distanza e quindi di creare sulla seconda immagine un segmento invece che un’intera retta. Infatti, i punti sulla retta epipolare che giacciono oltre il punto all’infinito sono privi di significato fisico.

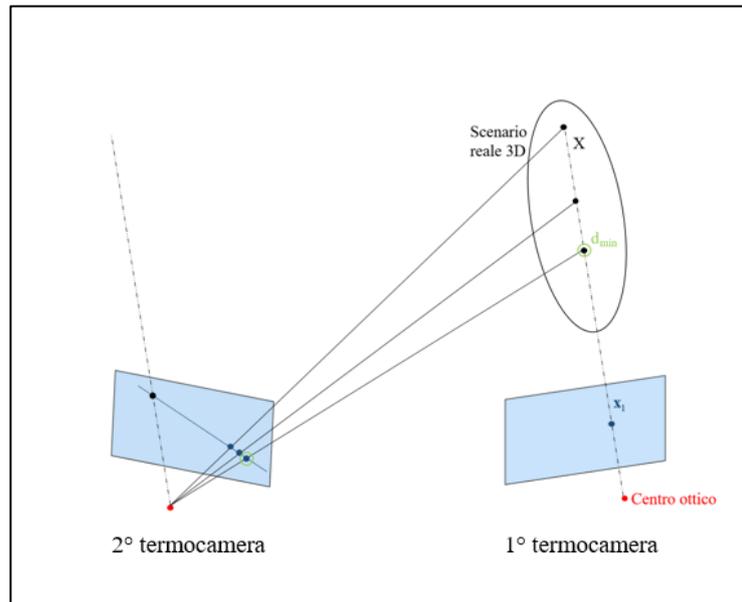


Figura 2.3 Geometria epipolare e definizione del “punto all’infinito”

Per comprendere quanto detto sopra consideriamo la Figura 2.3. Prendendo un punto x_1 sul piano della prima termocamera, sulla destra, sappiamo che può essere l’immagine di qualsiasi punto sulla retta (tratteggiata in figura) che, partendo dal centro della termocamera, passa per il punto sul piano immagine.

Aumentando la distanza dell’oggetto reale dalla prima termocamera vediamo che la retta uscente dal centro ottico della termocamera sulla sinistra e passante per il punto reale, si muove di conseguenza, mappando in successione sul secondo piano immagine i relativi punti sulla linea epipolare che si spostano, in figura, sempre più verso sinistra. Per quanto l’oggetto reale possa essere distante è intuibile che la seconda retta non potrà mai raggiungere la posizione parallela al primo raggio, sempre tratteggiata, poiché ciò vorrebbe dire inquadrare un punto a distanza infinita.

Per ottenere un segmento epipolare è necessario quindi esplicitare il procedimento che permette di ricavare il punto all’infinito, cioè quel punto appartenente alla linea epipolare che limita i punti sulla linea stessa ad un significato fisico.

Per fare questo, in accordo con la Figura 2.4 sottostante, si può pensare di passare dal punto A al punto B tramite una traslazione e mappare poi questo punto tridimensionale sulla seconda termocamera.

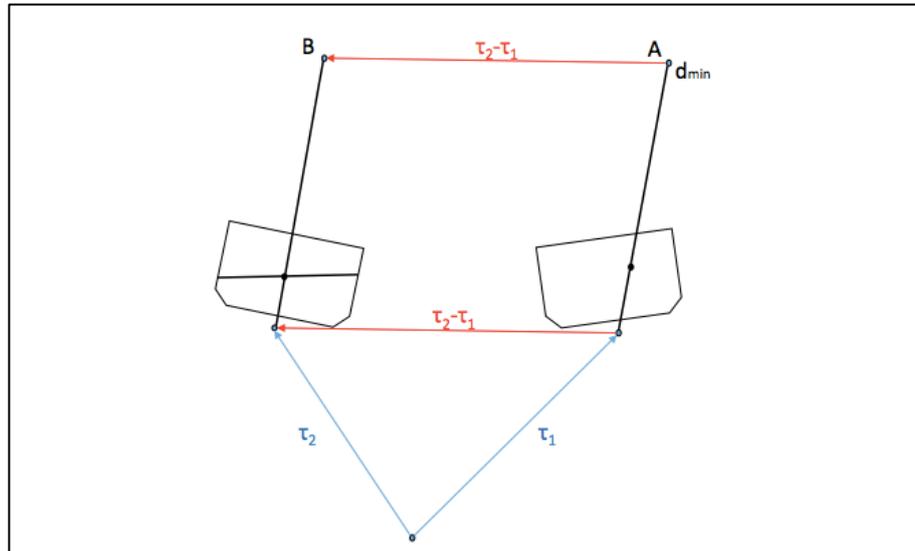


Figura 2.4 Geometria epipolare e traslazione del raggio che unisce il centro ottico della prima teletermocamera al punto tridimensionale a distanza minima sul secondo centro ottico

Il punto A è un qualsiasi punto reale, che uniamo al centro ottico della prima termocamera tramite la retta 1. Consideriamo il punto posto a distanza minima così da poter partire dai risultati precedenti. Avevamo infatti evidenziato il passaggio che porta un punto dal piano immagine ad un punto tridimensionale espresso nel Sistema di Riferimento (SdR) della termocamera stessa, fissata la distanza.

Essendo nota la posizione reciproca delle due telecamere nel sistema di riferimento fisso è conveniente esprimere il punto A in questo sistema di riferimento e tramite traslazione ottenere B sempre nel solito sistema.

Una volta determinato il punto B basterà esprimerlo nel SdR della seconda termocamera e proiettarlo successivamente sul piano immagine, ottenendo così il punto all'infinito cercato.

Siano quindi $\mathbf{X}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ le coordinate del punto A nel primo sistema di riferimento. Essendo noti vettore di traslazione e matrice di rotazione che portando il SdR fisso sul SdR della prima termocamera, è immediato il passaggio che permette di ottenere il punto A nel SdR fisso:

$$\mathbf{X}_A = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = R_1 \mathbf{X}_1 + \tau_1 \quad (2.11)$$

Il punto B tridimensionale espresso nelle coordinate del SdR fisso sarà quindi:

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + (\tau_2 - \tau_1) \quad (2.12)$$

Analogamente a quanto fatto prima è facile esprimere il punto B nel sistema di riferimento della seconda termocamera. In accordo all'equazione (1.11) sarà possibile ottenere il punto B espresso nelle coordinate della secondo sistema di riferimento come:

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = R_2^{-1} \mathbf{X}_B - R_2^{-1} \tau_2 \quad (2.13)$$

dove R_2 e τ_2 sono la matrice di rotazione ed il vettore di traslazione che portano il SdR fisso su quello della seconda termocamera.

Per ottenere il punto all'infinito basta quindi proiettare il punto B sul piano immagine similamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, secondo la relazione (2.10).

2.3. Definizione del segmento epipolare

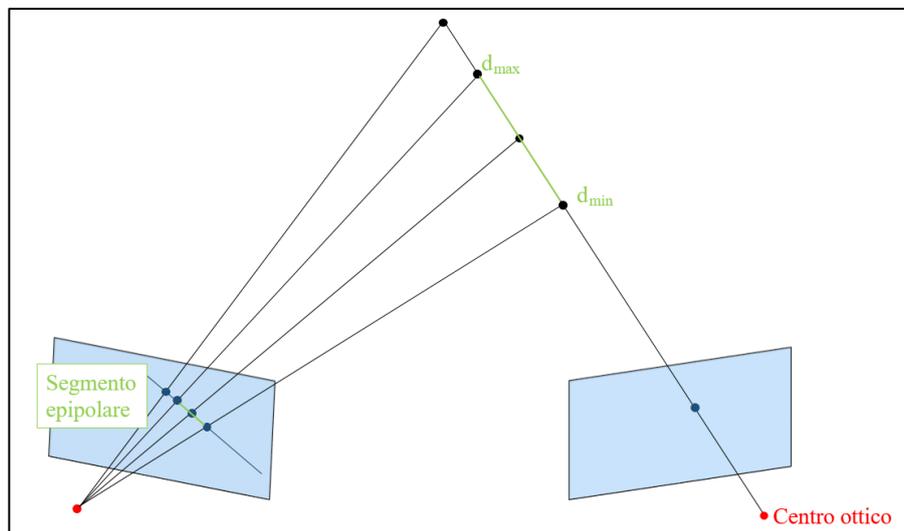


Figura 2.5 Geometria epipolare e definizione del segmento epipolare

2.4. Scelta del punto corrispondente

Una volta ottenuto il segmento epipolare sulla seconda immagine dovrebbe essere scelto il punto sul segmento corrispondente al bersaglio selezionato nella prima immagine.

Considerando solo i punti appartenenti al segmento epipolare è però difficile stabilire un criterio secondo il quale è possibile etichettare un solo punto tra essi come bersaglio e scartare tutti gli altri. Per applicare un algoritmo di rivelazione, che separa quindi un possibile bersaglio dallo sfondo, è infatti necessaria la conoscenza o comunque una stima delle proprietà statistiche dello sfondo stesso. A causa del rumore presente nelle immagini acquisite dalle termocamere è chiaro come aumentare il numero di pixel sui quali si esegue una stima delle loro proprietà aiuti a migliorare la stima stessa.

Per questo motivo la scelta del punto che identifica il bersaglio non sarà fatta direttamente sul segmento epipolare ma bensì in un'area di ricerca che verrà definita in seguito. In questo modo i pixel in ingresso all'algoritmo di rivelazione saranno di numero maggiore permettendo quindi una stima più accurata delle proprietà statistiche.

Ci occuperemo di questo problema nel capitolo 4.3.1 dove verrà selezionata una finestra intorno al bersaglio che delimiti, sulla seconda immagine, l'area di ricerca del punto corrispondente a quello selezionato sulla prima immagine.

3. Problematiche legate all'incertezza dei parametri di *roll*, *pitch* e *yaw*

In questo capitolo si descrive la problematica principale che scaturisce dall'utilizzo di un sistema complesso, cioè costituito da più di un sottosistema, nel nostro caso due. Vedremo come l'uso di due telecamere necessiti infatti di una perfetta conoscenza della posizione relativa tra le stesse per essere in grado di ottenere risultati con una accurata precisione.

La determinazione di punti corrispondenti su piani immagine diversi viene fatta sulla base della geometria epipolare che relaziona le due telecamere e che sfrutta le matrici fondamentale ed essenziale, come visto nel capitolo 1.3. Queste a loro volta sono definite dalla matrice di rotazione e dal vettore di traslazione relativi alle due telecamere. La presenza di errori, anche piccoli, sul valore dei dati di azimuth, elevazione e rollio (Appendice A) che descrivono la posizione di una termocamera rispetto all'altra, causando errori nella matrice di rotazione, provocano di conseguenza degli errori, anche grandi, sulla posizione del segmento epipolare sulla seconda immagine.

Supponendo che il rollio di entrambe le telecamere possa essere considerato nullo vogliamo approfondire gli effetti che discendono da un errore di questo tipo e analizzarne le possibili soluzioni.

Viste le considerazioni che terremo nel definire l'area di ricerca, menzionata già nel paragrafo 2.4, sarà facile capire come un errato segmento epipolare determinerà comunque un'area corretta, che includerà quindi l'oggetto cercato. L'errore sulla posizione reciproca delle due termocamere non influenzerà quindi sulla rivelazione del bersaglio cercato che potrà essere in ogni caso eseguita nel modo corretto. La problematica sta nel fatto che il punto finale dovrà appartenere al segmento epipolare e l'algoritmo riesce a soddisfare questo requisito proiettando il punto rivelato sul segmento epipolare stesso. Si capisce quindi come un errato segmento epipolare comporti un'errata proiezione del punto con la conseguente valutazione errata circa la distanza e la posizione dell'oggetto di interesse.

Tre diverse soluzioni sono possibili per correggere l'errore sulle misure che descrivono la posizione reciproca delle telecamere. Queste vengono riportate di seguito.

3.1. Algoritmo a otto punti

Una prima soluzione è quella di stimare la matrice fondamentale sulla base di punti corrispondenti presenti nelle due immagini. Espandendo l'equazione (1.24), se è presente una corrispondenza tra i punti sui due piani immagine diversi, il risultato è il seguente:

$$\begin{aligned}
\overline{\mathbf{x}}_2^T F \overline{\mathbf{x}}_1 &= \\
&= [x_2 \quad y_2 \quad 1] \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \\
&= x_2 x_1 f_{11} + x_2 y_1 f_{12} + x_2 f_{13} + y_2 x_1 f_{21} + y_2 y_1 f_{22} + y_2 f_{23} + x_1 f_{31} + y_1 f_{32} + f_{33} = \\
&= [x_2 x_1 \quad x_2 y_1 \quad x_2 \quad y_2 x_1 \quad y_2 y_1 \quad y_2 \quad x_1 \quad y_1 \quad 1] [f_{11} \quad f_{12} \quad f_{13} \quad f_{21} \quad f_{22} \quad f_{23} \quad f_{31} \quad f_{32} \quad f_{33}]' = 0
\end{aligned} \tag{3.1}$$

E' dunque teoricamente possibile stimare il vettore degli elementi della matrice fondamentale sulla base di 8 corrispondenze tra le due immagini. In altre parole, con almeno otto punti in comune tra le due immagini riusciremmo a stimare la matrice fondamentale e quindi a mappare correttamente il segmento epipolare sulla seconda immagine corrispondente ad un punto selezionato sulla prima.

Essendo però interessati ad un ambiente marittimo, con unità all'orizzonte, si intuisce facilmente che individuare otto punti correlati nelle due immagini è difficilmente attuabile. Questa soluzione non è quindi impiegabile nel nostro specifico caso.

3.2. Ottimizzazione dei parametri

La seconda soluzione, che sarà quella da noi usata, consiste in un'ottimizzazione dei soli parametri di azimut ed elevazione, tralasciando un errore sul rollio che nella maggior parte dei casi si rivela di minima influenza sulla posizione del segmento epipolare.

Ricordiamo che i parametri ai quali facciamo riferimento sono quelli della geometria relativa tra le due telecamere, cioè la differenza tra i valori degli angoli che specificano l'orientamento della prima e della seconda termocamera.

Per l'ottimizzazione dei suddetti parametri supponiamo di aver già individuato un punto a comune presente in entrambe le immagini. Si modellano i parametri di azimut ed elevazione come variabili aleatorie gaussiane con valor medio pari al valore noto e deviazione standard pari all'errore assoluto, quindi all'incertezza caratterizzante i valori degli angoli.

Successivamente si simula un certo numero di coppie di variabili azimut/elevazione e per ogni coppia si calcola la rispettiva matrice di rotazione ed il rispettivo vettore di traslazione. Utilizzando diverse matrici di rotazione e vettori di traslazione, al punto scelto nella prima immagine corrisponderà ogni volta un diverso segmento epipolare.

Ricordiamo che la problematica nasce perché, in presenza di errori, il segmento epipolare ottenuto con i valori nominali non passerà, nella seconda immagine, per l'oggetto corrispondente alla prima.

Lo scopo è quindi quello di correggere l'errore basandosi su quei segmenti epipolari che, a posteriori di una modifica dell'azimut e dell'elevazione (ottenuta con la simulazione gaussiana), passano per l'oggetto di riferimento nella seconda immagine.

Volendo ottenere un buon numero di segmenti epipolari passanti per il punto di riferimento, vedremo che il numero di coppie simulate deve essere elevato, dell'ordine delle centinaia di migliaia. Ottenuti così molti segmenti epipolari che passano per l'oggetto nella seconda immagine si riportano su un istogramma i valori delle differenze tra i parametri di azimut ed elevazione corrispondenti a ciascun segmento, frutto della simulazione gaussiana, con il valore nominale dei parametri. In altre parole sull'istogramma riportiamo i valori delle correzioni da applicare in elevazione ed azimut tali per cui il segmento epipolare ottenuto passi per l'oggetto selezionato. Prendendo il valore massimo di questo istogramma si individua la correzione più probabile secondo la quale il segmento epipolare passa effettivamente sull'oggetto di interesse.

Successivamente vedremo come sia possibile individuare automaticamente un punto a comune sulle due immagini tramite l'algoritmo di rivelazione.

3.3. Simulatore

Per poter lavorare in un contesto noto e avere quindi la completa conoscenza di tutti i parametri nominali, abbiamo implementato un simulatore, che descriveremo in dettaglio nella terza parte dell'elaborato.

Il simulatore nasce per poter risolvere ed anche analizzare la problematica degli errori sul valore degli angoli di azimut, elevazione e rollio, grazie alla simulazione di oggetti su un background fornito dalle immagini reali.

Prendendo per nota la geometria che lega le due telecamere, abbiamo inserito in entrambe le immagini degli oggetti simulati. Scegliendo la posizione dell'oggetto da simulare sulla prima immagine ne ricreiamo un secondo nell'altra termocamera sulla base della geometria stabilita. Così facendo, se ripetiamo il procedimento del segmento epipolare scegliendo sulla prima termocamera proprio l'oggetto simulato, il segmento epipolare sarà sicuramente sopra il rispettivo oggetto simulato sulla seconda immagine, essendo in assenza di errori.

I vantaggi che introduce l'uso di un simulatore sono molteplici. In primo luogo permette di valutare gli effetti che può portare un certo errore sull'azimut o sull'elevazione relativa tra le telecamere.

Simulando oggetti a distanza nota sarà infatti possibile capire quanto l'errore incida sulla misura della distanza questo tipo di errore.

Grazie al simulatore è inoltre possibile ricreare diversi scenari che permettono di testare l'algoritmo di rivelazione, proposto successivamente, in varie situazioni più o meno complicate.

Vedremo in più che, partendo da un certo numero di immagini in sequenza ottenute con le telecamere fisse, sarà possibile anche simulare dei video, nei quali ricreiamo un oggetto in movimento. Questi permettono sia di testare algoritmi di tracking sia di valutare l'efficienza del nostro sistema di stimare nello stimare la velocità e la rotta degli oggetti simulati in movimento.

4. Algoritmo di rivelazione

4.1. Introduzione

In questo capitolo si descrive il procedimento seguito per arrivare a determinare il *target* corrispondente nella seconda immagine.

I *target* di maggiore interesse, verso i quali viene rivolto l'elaborato, sono quelli all'orizzonte che, trovandosi a una distanza elevata, sono privi di dettagli. E' quindi impensabile l'utilizzo di un metodo basato sul riconoscimento di *feature* che mira a individuare alcune caratteristiche significative dei bersagli, permettendo di caratterizzare delle corrispondenze tra le immagini. In caso contrario sarebbe stato possibile l'utilizzo della *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), in grado di rivelare automaticamente le caratteristiche locali, su entrambe le immagini. Partendo dalle caratteristiche rivelate con questa trasformata è poi possibile trovare direttamente *features* corrispondenti tra le due immagini, associando facilmente eventuali punti di interesse presenti su entrambi i piani immagine.

Abbiamo visto che, partendo dal segmento epipolare, si può individuare un'area all'interno della quale ci aspettiamo di trovare il bersaglio corrispondente a quello scelto nella prima.

Vedremo che l'identificazione del bersaglio nella seconda immagine, come già accennato, è fattibile anche quando è presente l'errore sugli angoli di elevazione, rollio e beccheggio, o angoli di Tait-Bryan, che descrivono le telecamere. Il problema sarebbe poi sulla determinazione della distanza di questo bersaglio dalle telecamere poiché tale stima è ottenuta sulla base della geometria relativa tra le due telecamere, nota però con un certo errore. Vedremo come un errore anche piccolo sulla posizione relativa tra le telecamere può condurre a stime della distanza e della posizione molto distanti dalla realtà.

L'algoritmo, una volta scelta l'area di ricerca, individua i possibili *target* presenti all'interno. Nel caso in cui siano presenti più bersagli viene scelto quello telecamere che minimizza la distanza dal segmento epipolare. È comunque importante partire da una geometria corretta.

4.2. Stima dell'orizzonte

4.2.1. Introduzione

Nella rivelazione automatica di bersagli sul mare, come unità navali o aerei all'orizzonte, in immagini a infrarossi, è necessaria la determinazione della linea dell'orizzonte.

Questo perché un bersaglio, a seconda che si trovi in mare o in cielo, è soggetto ad un diverso tipo di *clutter* e quindi necessita di un diverso algoritmo di rivelazione, a seconda che si trovi su di uno sfondo o sull'altro.

Conoscendo la linea dell'orizzonte è quindi possibile segmentare lo sfondo in diverse regioni e, a seconda della posizione del *target*, utilizzare differenti statistiche per determinare la presenza dei bersagli.

4.2.2. Algoritmo per la stima dell'orizzonte

Il diagramma a blocchi riportato in Figura 4.1 rappresenta il procedimento seguito per la determinazione della linea dell'orizzonte. I blocchi che lo compongono vengono ora analizzati in dettaglio.

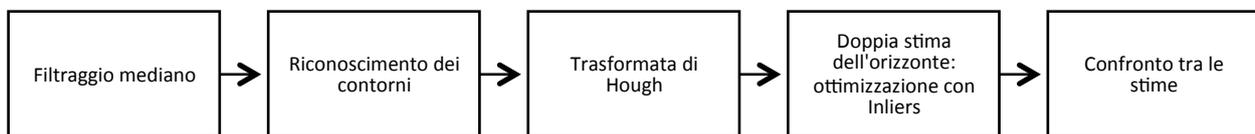


Figura 4.1 Diagramma a blocchi per la stima della linea dell'orizzonte

4.2.2.1. Filtraggio mediano

L'algoritmo implementato per la stima della linea dell'orizzonte si basa sull'estrazione dei contorni. Per ridurre l'effetto del rumore ad alta frequenza spaziale viene applicato un filtraggio mediano a ciascun pixel, così da abbassare la probabilità di falso allarme. Un pixel molto rumoroso infatti comporterebbe una discontinuità, associabile erroneamente alla presenza di un contorno.

Il filtro a mediana lavora su un intorno di ciascun pixel e assegna al pixel centrale il valore mediano delle intensità dei pixel di tale intorno. Dunque esso è in grado di rimuovere molto efficacemente il rumore impulsivo sale e pepe, un tipo di disturbo caratterizzato dal fatto che alcuni pixel dell'immagine diventano bianchi o neri, senza deteriorare i fronti di salita.

Adoperando il valore mediano garantiamo una maggior robustezza rispetto all'utilizzo del valor medio. Infatti, se qualche pixel nell'intorno è fortemente alterato, il valore mediano non subisce sensibili spostamenti, mentre il valor medio sarebbe polarizzato in modo consistente dalla perturbazione.

4.2.2.2. Riconoscimento dei contorni

Il passo successivo è quello di riconoscere i contorni, ottenendo così un'immagine binaria che permette di evidenziare i punti trovati di contorno.

Il metodo scelto per l'estrazione dei contorni è l'algoritmo di Canny. Questo si basa sul calcolo dei massimi locali del gradiente. Nello specifico vengono successivamente impiegati quattro filtri differenti per individuare i contorni orizzontali e verticali e quelli disposti lungo le due diagonali dell'immagine. Per ogni pixel dell'immagine viene poi valutata la direzione che dà il valore maggiore, ottenendo così la direzione in cui si ha il massimo gradiente di luminosità.

L'algoritmo continua con la soppressione dei non-massimi tramite un procedimento iterativo che confronta i valori dei pixel all'interno di un *neighborhood*. I valori dei punti ancora in gioco sono successivamente confrontati con due valori di soglia: tutti i pixel di valore più basso della soglia minore sono scartati, quelli con valore più alto della soglia superiore sono identificati come punti di *edge* ed i pixel compresi fra i due valori sono etichettati come punti *edge* solo se adiacenti ad altri pixel di valore maggiore della soglia alta. Questo tipo di *thresholding* è conosciuto col nome di sogliatura adattiva tramite isteresi e fornisce l'immagine binaria sulla quale si basano i passi successivi per il riconoscimento dell'orizzonte.

4.2.2.3. Trasformata di Hough

Per il rilevamento della linea dell'orizzonte si procede con la trasformata di Hough che, in generale, permette il riconoscimento di linee presenti.

Per la descrizione dell'algoritmo si rimanda all'Appendice B.

4.2.2.4. Stima di due linee dell'orizzonte e successiva ottimizzazione mediante gli *inliers*

Il riflesso del sole all'orizzonte è un problema comune nell'elaborazione di immagini ad infrarosso. Questo potrebbe incidere sulla determinazione della linea dell'orizzonte, dal momento che è facile che si presenti una seconda linea, dovuta proprio a questo riflesso, sotto la linea dell'orizzonte stesso. Non tenendo conto di questa problematica è facile ottenere come stima dell'orizzonte un risultato errato, cioè che delinea la linea dovuta al riflesso e non la linea vera dell'orizzonte. Per riuscire ad avere una stima corretta, l'algoritmo implementato, che descriveremo in questo paragrafo, cerca di individuare due possibili allineamenti di punti nell'immagine. Successivamente,

come descritto nel paragrafo 4.2.2.5, si sceglie tra i due allineamenti stimati quello che delinea la linea dell'orizzonte.

La stima del primo allineamento è ricavata sulla base del segmento più lungo ottenuto con la trasformata di Hough. Si presume infatti che questo giaccia sulla linea dell'orizzonte o su di un eventuale riflesso. Si ricercano successivamente tutti quei segmenti allineati a questo e per identificarli si traccia una retta dal segmento di partenza e, in base alla distanza dei segmenti analizzati dalla retta, si identifica ciascuno di essi come *inlier* o *outlier*, a seconda se distano dalla suddetta retta meno o più di una certa soglia prefissata.

Si produce una prima stima interpolando gli estremi dei segmenti appartenenti agli *inliers*. Dovendo determinare una linea, quale quella dell'orizzonte, l'interpolazione è ovviamente di tipo lineare. Seguendo il metodo dei minimi quadrati si vuole minimizzare la somma dei quadrati delle differenze tra valori rilevati ed i valori che assumerebbero se appartenenti ad una retta.

Siano (x_i, y_i) rispettivamente le ascisse e le ordinate degli *inliers*. Scegliendo come funzione interpolatrice quella lineare vogliamo determinare il coefficiente angolare m e l'intercetta q tale per cui

$$\arg \min_{m,q} \sum_i [y_i - (q + m \cdot x_i)]^2 \quad (4.1)$$

Per ottenere quindi un "buon accostamento", tra la distribuzione dei valori osservati e quelli ottenuti interpolando, bisogna utilizzare i seguenti valori:

$$\begin{cases} m = \frac{\sum_i [x_i - \mu_x][y_i - \mu_y]}{\sum_i [x_i - \mu_x]^2} \\ q = \mu_y - m \cdot \mu_x \end{cases} \quad (4.2)$$

dove μ_x e μ_y sono i valor medi dei punti x_i e y_i .

Per la seconda stima si ripete lo stesso procedimento seguito nella prima partendo però dal segmento più lungo presente tra gli *outliers*. Nel caso in cui il riflesso non sia presente è possibile che questi ultimi derivino da punti di *edge* corrispondenti a bersagli presenti nell'immagine, difatti non in linea con i segmenti sull'orizzonte (*inliers*). Questa è un'altra problematica da tenere in considerazione nella scelta della stima corretta. Replicando la procedura giungeremo quindi alla stima di un secondo allineamento che dovrà essere confrontato con quella del primo.

4.2.2.5. Confronto tra le stime

Una volta ottenute le due stime dell'orizzonte si procede con il confronto.

Per la scelta corretta della linea bisogna, come già detto, tenere in considerazione che una delle due potrebbe essere ottenuta da segmenti posizionati sugli eventuali *target* o riflessi.

Per capire se una stima deriva da un contorno dovuto ad un *target* e non alla linea dell'orizzonte viene fatto un controllo sul numero di punti utilizzato nell'interpolazione. Per discriminare invece il riflesso dalla linea effettiva dell'orizzonte si sceglie la stima ottenuta con intercetta più alta, poiché il riflesso del sole appare, come detto, al di sotto dell'orizzonte.

4.3. Descrizione dell'algoritmo

4.3.1. Area di ricerca

Come accennato nell'introduzione al capitolo 4, una volta mappato il segmento epipolare, è necessario individuare un'area circoscritta ad esso dove andare ad applicare l'algoritmo di rivelazione.

Se la geometria nota che descrive le posizioni relative delle due telecamere fosse corretta il punto ricercato sulla seconda immagine apparterebbe esattamente al segmento epipolare. Anche in questo caso però la designazione di un'area di ricerca si rende necessaria perché, per capire se è presente un *target* o meno, è fondamentale determinare le caratteristiche statistiche dello sfondo e del bersaglio stesso. Queste proprietà non potrebbero infatti essere individuate sulla base dei soli punti appartenenti al segmento epipolare ed essendo necessaria una finestra di lavoro, dove stimare le statistiche, il miglior modo per individuarla è quello di considerare l'errore massimo che possiamo avere sui tre angoli che descrivono l'orientamento relativo delle telecamere. Procedendo come descritto si individuerebbe un'area di ricerca che, ottenuta considerando l'errore massimo sulle misure dei tre angoli, anche nel caso di segmento epipolare non corretto, conterrebbe in ogni caso il bersaglio di interesse. Allo stesso tempo questa area di ricerca permette di stimare in modo più accurato le statistiche dello sfondo per applicare successivamente la rivelazione.

Per definire l'area di ricerca si prendono quindi in considerazione tutte le combinazioni di *roll*, *pitch* e *yaw* (si veda Appendice A) dove ogni parametro può assumere sia il valore nominale che i valori massimo e minimo possibili. Questi ultimi sono ottenuti sommando e sottraendo al valore nominale, l'errore assoluto sulle tre misure.

In totale avrò quindi 27 terne di valori, ad ognuna delle quali corrisponde una diversa matrice di rotazione, una diversa matrice fondamentale e di conseguenza anche un diverso segmento epipolare.

Si definisce quindi la finestra di ricerca minima che contenga tutti i 27 segmenti, così da individuare un'area la quale, essendo definita sulla base dell'accuratezza delle misure degli angoli, includerà il bersaglio ricercato.

4.3.2. Identificazione del bersaglio di interesse

Per identificare i pixel appartenenti al bersaglio ci riportiamo, per ogni pixel presente nella finestra di ricerca, ad un quesito di decisione binaria. Si definiscono due ipotesi, H_1 e H_0 , che corrispondono rispettivamente alla presenza o assenza del bersaglio. Sulla base della nostra osservazione, cioè dell'intensità relativa a ciascun pixel, andremo a decidere quale delle due ipotesi sia vera. Supponiamo di suddividere lo spazio delle osservazioni in due regioni di decisione, Z_1 e Z_0 , che affermano di trovarsi rispettivamente nell'ipotesi H_1 e H_0 .

La procedura segue il criterio di Neyman-Pearson e si basa sulle probabilità di “falso allarme” e di “*detection*”. La prima indica la probabilità di rilevare la presenza del bersaglio quando in realtà esso non è presente mentre la seconda la probabilità di decidere per la presenza del bersaglio quando questo è effettivamente presente.

Si riportando in seguito le due probabilità appena descritte che, come mostrano le formule, si basano sulla densità di probabilità condizionata alle ipotesi di partenza:

$$\begin{aligned} P_F &= \int_{Z_1} p_{y|H_0}(Y | H_0) dY \\ P_D &= \int_{Z_1} p_{y|H_1}(Y | H_1) dY \end{aligned} \quad (4.3)$$

Assumiamo ora che sotto l'ipotesi H_1 , presenza del bersaglio, il pixel assuma un valore costante pari a s , mentre, sotto l'ipotesi H_0 , assenza del bersaglio, il pixel sia pari a μ , valor medio dello sfondo. Supponiamo inoltre che l'immagine sia disturbata da un rumore n di tipo gaussiano additivo a valor medio nullo e varianza σ^2

$$n \in N(0, \sigma^2) \quad (4.4)$$

Le osservazioni rispetto alle due ipotesi saranno allora:

$$\begin{cases} x | H_0 = \mu + n \\ x | H_1 = s + n \end{cases} \quad (4.5)$$

Si consideri adesso la trasformazione

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.6)$$

la quale conduce ad una nuova forma delle osservazioni data da

$$\begin{cases} y | H_0 = \frac{n}{\sigma} = w \\ y | H_1 = \frac{s - \mu}{\sigma} + \frac{n}{\sigma} = \frac{s - \mu}{\sigma} + w \end{cases} \quad (4.7)$$

dove w è definito come

$$w \in N(0,1) \quad (4.8)$$

Esplicitando le probabilità condizionate presenti nell'equazione (4.3) avremo quindi che

$$p_{y|H_1}(Y | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(Y - \frac{s - \mu}{\sigma})^2}{2}\right]} \quad (4.9)$$

$$p_{y|H_0}(Y | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{Y^2}{2}\right]}$$

Sostituendo i risultati dell'equazione (4.9) nella definizione delle probabilità in (4.3) otteniamo che

$$P_D = \int_{Z_1} p_{y|H_1}(Y | H_1) dY = \int_{Z_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(Y - \frac{s - \mu}{\sigma})^2}{2}\right]} dY \quad (4.10)$$

$$P_F = \int_{Z_1} p_{y|H_0}(Y | H_0) dY = P \int_{Z_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{Y^2}{2}\right]} dY$$

La Figura 4.2 mostra gli andamenti delle osservazioni descritte in (4.7) allo scopo di determinare i valori della P_F e della P_D .

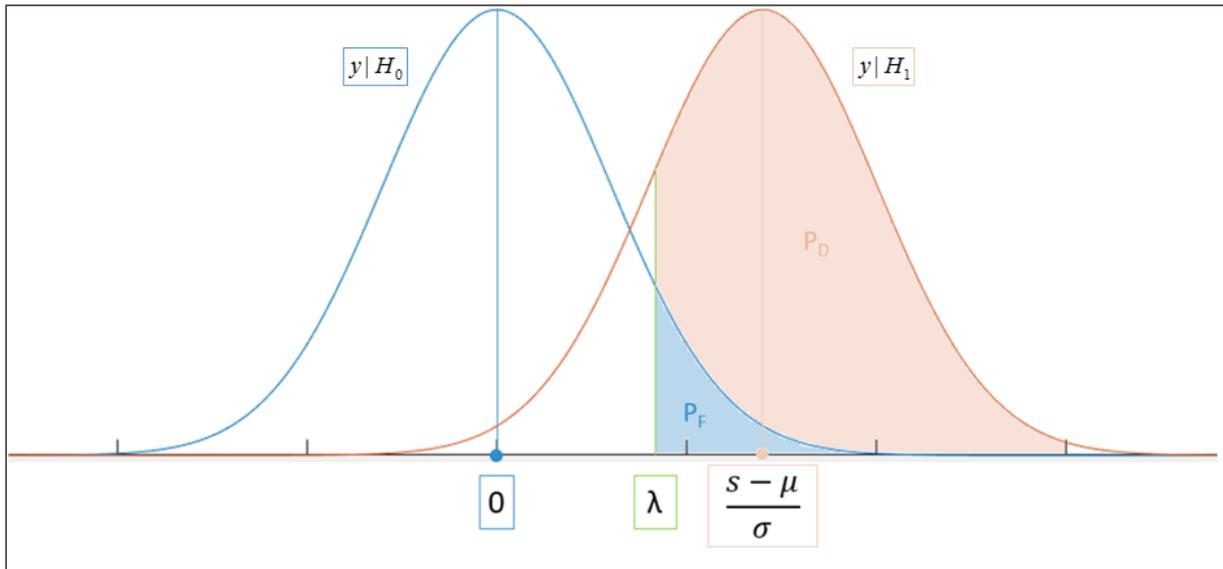


Figura 4.2 Probabilità di falso allarme e di *detection* in funzione della soglia λ

Fissando una soglia λ come limite inferiore della regione di decisione Z_1 è possibile ridefinire le due probabilità in equazione (4.10) come segue:

$$P_D = \int_{z_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(y-\frac{s-\mu}{\sigma})^2}{2}\right]} dY = \int_{\lambda}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(y-\frac{s-\mu}{\sigma})^2}{2}\right]} dY \quad (4.11)$$

$$P_F = \int_{z_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{y^2}{2}\right]} dY = \int_{\lambda}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{y^2}{2}\right]} dY$$

La Figura 4.2 sottintende che il valore s , assunto nel caso di presenza del bersaglio, sia superiore al valor medio di sfondo. Questo perché siamo interessati a rivelare dei bersagli caldi, i quali avranno un valore di intensità più alto rispetto allo sfondo. Si intuisce subito che è necessario un trade-off tra falsi allarmi e mancata rivelazione infatti aumentando la soglia diminuisce la probabilità di avere falsi allarmi ma, allo stesso tempo, diminuisce anche quella di rivelare bersagli se presenti.

Si introduce adesso la funzione Q che verrà utilizzata per il calcolo delle due probabilità menzionate. La funzione Q esprime la probabilità della coda destra per una distribuzione di variabili aleatorie normali gaussiane ed è definita come la probabilità che la variabile normale sia maggiore di λ .

$$Q(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\lambda}^{+\infty} e^{-\left[\frac{u^2}{2}\right]} du \quad (4.12)$$

dove

$$u \in N(0,1) \quad (4.13)$$

Anche nel caso di una variabile gaussiana $z \in N(\mu_z, \sigma_z)$ non normale è possibile calcolare la probabilità della coda destra, $\Pr[z > \lambda]$, mediante l'utilizzo della funzione Q. Definendo $\eta = \frac{\lambda - \mu_z}{\sigma_z}$ è infatti possibile, mediante semplici sostituzioni, arrivare alla forma voluta.

$$\Pr[z > \lambda] = \Pr[z > \eta\sigma_z + \mu_z] = \Pr\left[\frac{z - \mu_z}{\sigma_z} > \eta\right] = Q(\eta) = Q\left(\frac{\lambda - \mu_z}{\sigma_z}\right) \quad (4.14)$$

Tornando all'equazione (4.11) è possibile esprimere sia la probabilità di falso allarme che quella di *detection* utilizzando la convenzione della funzione Q:

$$P_D = \int_{\lambda}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(Y - s - \mu)^2}{2}\right]} dY = Q\left(\lambda - \frac{s - \mu}{\sigma}\right) \quad (4.15)$$

$$P_F = \int_{z_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{Y^2}{2}\right]} dY = \int_{\lambda}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{Y^2}{2}\right]} dY = Q(\lambda)$$

Invertendo la seconda equazione in (4.15) è possibile ottenere la soglia in funzione della P_F .

$$\lambda = Q^{-1}(P_F) \quad (4.16)$$

Fissando la probabilità di falso allarme è quindi possibile determinare la soglia da utilizzare nel test al quale sottoponiamo ciascun pixel nella finestra di ricerca. Per decidere se un pixel appartiene o meno ad un bersaglio si applica semplicemente un confronto a soglia, dove, l'intensità del pixel x diminuita del valor medio dello sfondo μ e normalizzata alla deviazione standard σ , sempre dello sfondo, è confrontato con il valore di soglia λ ottenuto.

$$\frac{x - \mu}{\sigma} > \lambda \quad (4.17)$$

Se $\frac{x - \mu}{\sigma}$ supera il valore di soglia il pixel viene associato ad un bersaglio mentre, in caso contrario, allo sfondo.

Per applicare la trasformazione (4.6), utilizzata poi nel confronto a soglia (4.17), è necessario calcolare sia il valor medio μ che la deviazione standard σ dello sfondo, considerando tutti i pixel appartenenti all'immagine. Per la presenza del rumore gaussiano sullo sfondo si utilizza, anziché il valor medio, il valore mediano tra le intensità dei pixel presenti nello sfondo. Questo perché la presenza di eventuali pixel saturati e dei pixel appartenenti al bersaglio, comporterebbe una grossa modifica sul valor medio mentre quello mediano rimarrebbe, nella maggior parte dei casi, invariato.

Nel caso in cui la finestra di ricerca sia a cavallo dell'orizzonte sarebbe sbagliato applicare la stima dei parametri statistici, μ e σ , senza considerare la presenza di uno sfondo bimodale cielo/mare. Si rivela fondamentale la stima dell'orizzonte, che consente, se necessario, la segmentazione della finestra in due regioni. In questo modo è possibile applicare la stima dei parametri statistici ed il successivo confronto a soglia separatamente sulla zona di cielo e su quella di mare.

Una volta ottenuta, con il confronto a soglia, l'immagine binaria, che corrisponde a una prima mappa di rivelazione non raffinata, si procede con la ricerca di componenti connesse. Diversi pixel che superano la soglia vengono quindi associati ad una stessa entità se disposti in posizioni adiacenti.

Accettando una probabilità maggiore di avere falsi allarmi per essere in grado di rivelare bersagli che si innalzano poco dallo sfondo è necessario abbassare la soglia. Per proteggersi dai falsi allarmi, causati quindi da pixel caldi di sfondo, viene settata una soglia sul numero di punti minimi che un bersaglio reale deve avere. Nel caso in cui siamo interessati a bersagli con un gruppo di pixel connessi in numero inferiore alla soglia, questa passo viene omissa.

Per ogni componente rivelata viene calcolato il baricentro che identificherà la posizione del bersaglio nell'immagine.

Nel caso in cui siano presenti più bersagli nella finestra di ricerca, viene scelto quello più vicino alla retta epipolare.

4.3.3. Proiezione sulla linea epipolare

Dopo aver individuato il baricentro del bersaglio di interesse, lo si proietta ortogonalmente sulla linea epipolare. Questo perché, se gli angoli relativi utilizzati fossero quelli effettivi, il punto sulla seconda immagine corrispondente a quello selezionato sulla prima dovrebbe giacere sulla linea epipolare. Con questa proiezione otterremo così il punto più vicino al bersaglio individuato che appartiene però alla retta epipolare.

Per determinare la proiezione ortogonale di un punto sulla retta epipolare partiamo dalla definizione della retta stessa secondo l'equazione in forma implicita

$$a \cdot x + b \cdot y + c = 0 \quad (4.18)$$

dove i parametri a, b e c sono noti grazie alla relazione espressa dell'equazione (1.28).

Descrivendo la retta in forma esplicita abbiamo

$$y = -\frac{a}{b} \cdot x - \frac{c}{b} = m \cdot x + q \quad (4.19)$$

dove m e q sono rispettivamente il coefficiente angolare e l'intercetta.

Siano (x_b, y_b) le coordinate del baricentro del *target* rivelato. Volendo calcolare la retta perpendicolare a quella epipolare passante per il bersaglio avremo che

$$y = m_{\perp} \cdot x + q_{\perp} \quad (4.20)$$

dove il coefficiente angolare m_{\perp} e l'intercetta q_{\perp} della nuova retta sono ottenuti come

$$\begin{cases} m_{\perp} = -\frac{1}{m} \\ q_{\perp} = y_b - x_b \cdot m_{\perp} \end{cases} \quad (4.21)$$

Per ottenere le coordinate del punto proiettato (x_2, y_2) , appartenente alla retta epipolare, metteremo a sistema le due rette ottenendo

$$\begin{cases} x_2 = \frac{q - q_{\perp}}{m_{\perp} - m} \\ y_2 = m_{\perp} \cdot x_2 + q_{\perp} \end{cases} \quad (4.22)$$

4.3.4. Triangolazione

Una volta ottenuti i punti corrispondenti sui piani immagine della prima e della seconda termocamera si procede con la triangolazione, procedura che permette di ricavare la distanza del bersaglio dalla prima termocamera.

Sia $\mathbf{X}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ il punto in tre dimensioni ottenuto dalla triangolazione, che caratterizza la posizione del bersaglio di interesse nello spazio. È possibile riportarlo nel sistema di riferimento

fisso tramite la relazione (1.10) e fornire quindi la stima della posizione e distanza del bersaglio rispetto al centro di questo sistema svincolato dalle due telecamere.

4.3.5. Scelta del baricentro come punto di partenza

Per ottenere un risultato più accurato viene introdotta una modifica sul punto selezionato sulla prima immagine, dal quale viene poi ricavato il segmento epipolare e sul quale alla fine viene proiettato il baricentro stimato nella seconda immagine.

Proprio perché con l'algoritmo di rivelazione andiamo a stimare il baricentro nella seconda immagine, vogliamo anche nella prima partire dal baricentro del bersaglio, così da avere una coerenza maggiore tra i due punti nelle immagini.

Per fare questo, invece di selezionare un punto sulla prima immagine, viene richiesta un'area, che naturalmente deve includere il bersaglio di interesse. Per rivelare il baricentro viene seguito il procedimento descritto nel paragrafo 4.3.2, dove viene sottratto il valore mediano di sfondo.

Una volta determinato il baricentro è data la possibilità di scegliere o meno questo punto di partenza, dal quale poi ottenere il segmento epipolare e successivamente l'area di ricerca con conseguente identificazione in essa del baricentro corretto. Come già detto il segmento epipolare condiziona sia la scelta del bersaglio, nel caso ne fossero rivelati più di uno, sia il punto finale proiettato su di esso, rispetto al quale viene eseguita la triangolazione.

Di conseguenza anche per l'ottimizzazione dei parametri (paragrafo 3.2) invece di scegliere manualmente il punto da far coincidere nelle due immagini risulta più corretto individuare in entrambe i baricentri, con i procedimenti descritti fino ad ora.

In questo modo otteniamo dei valori più precisi e soprattutto la selezione del punto non dipende più dall'utente, ma viene calcolato in modo automatico il baricentro del bersaglio di interesse.

PARTE II: Risultati su immagini reali

5. Specifiche del sistema stereo

Il sistema di visione utilizzato consiste in una coppia di termocamere poste in due posizioni diverse e ruotate in modo da inquadrare la stessa scena. Come descritto nella prima parte la geometria che lega le due termocamere è fondamentale per descrivere le relazioni che esistono tra la due immagini e quindi anche tra gli oggetti reali visualizzati in esse.

Le telecamere utilizzate sono in grado di fornire immagini ad infrarosso ad alta risoluzione e si riportano in Tabella 5.1 le specifiche tecniche di entrambe.

	Termocamera 1 <i>Search Head</i>	Termocamera 2 <i>Detection Head</i>
<i>Detector</i>	Medio infrarosso, 3.7-5.0 μ m Array piano focale 640 x 512 <i>Pitch</i> 16 μ m	Medio infrarosso, 3.7-5.0 μ m Array piano focale 640 x 512 <i>Pitch</i> 16 μ m
<i>Field of View</i> (FOV)	<i>Narrow</i> 1.25° <i>Wide</i> 24.0°	<i>Narrow</i> 2.4°

Tabella 5.1 Specifiche tecniche delle termocamere

La *Search Head* (SH) fornirà la prima immagine sulla quale selezioneremo il bersaglio di interesse. La *Detection Head* (DH), sarà invece la telecamera che fornirà la seconda immagine, sulla quale ricercheremo il bersaglio individuato nella prima immagine.

Come accennato nell'introduzione il sistema utilizzato prevede l'acquisizione di una prima immagine a campo largo sulla quale scegliere il bersaglio di interesse, attraverso l'impiego della telecamera SH. Successivamente, inquadrando il bersaglio stesso anche con la seconda termocamera, la DH a campo stretto, sarà possibile riconoscere automaticamente l'oggetto di interesse e determinarne la distanza dalle termocamere.

Negli esempi riportati in seguito si utilizzano due immagini acquisite dalle termocamere in campo stretto così da avere rappresentazioni più dettagliate e seguire più chiaramente i procedimenti.

La campagna di misura è stata realizzata all'Istituto Vallauri dell'Accademia Navale di Livorno. Entrambe le termocamere sono state poste sul tetto dell'edificio inquadrando l'orizzonte della zona di mare antistante.

5.1. Matrici dei parametri intrinseci

Come esplicitato nel capitolo 1.2 è possibile definire le matrici dei parametri intrinseci conoscendo i FOV delle termocamere, riportati in Tabella 5.1.

Considerando quadrati i pixel delle telecamere, possiamo utilizzare equivalentemente il numero di pixel del piano ed il *Field Of View* sia orizzontale che verticali. Considerando le misure orizzontali il risultato dell'IFOV in radianti, $IFOV_{rad}$, sarà il seguente:

$$IFOV_{rad} = \frac{FOV_{gradi}}{640} \times \frac{\pi}{180} \quad (5.1)$$

dove il FOV è invece espresso in gradi.

Ad esempio, considerando la termocamera SH, che lavora a campo stretto con un FOV di 1.25 gradi, il risultato è:

$$IFOV_1 = \frac{FOV_1}{640} \times \frac{\pi}{180} = \frac{1.25}{640} \times \frac{\pi}{180} = 3.4088 \times 10^{-5} \quad (5.2)$$

mentre per la DH, che ha un FOV di 2.4 gradi, l'IFOV corrispondente in radianti è

$$IFOV_2 = \frac{FOV_2}{640} \times \frac{\pi}{180} = \frac{2.4}{640} \times \frac{\pi}{180} = 6.5450 \times 10^{-5} \quad (5.3)$$

5.2. Sistemi di riferimento

5.2.1. Introduzione

Per descrivere al meglio i tre sistemi di riferimento adottati in questa tesi prendiamo come esempio una specifica disposizione delle termocamere utilizzata nella campagna di misura.

I dati che descrivono la posizione della due termocamere in questo caso sono quelli riportati nella Tabella 5.2:

Elevazione SH	Azimut SH	Elevazione DH	Azimut DH
-0.4	243.5	-0.43	244.182

Tabella 5.2 Parametri di elevazione e di azimut forniti dal sistema relativi alle due termocamere utilizzate nella campagna di misura

Come vediamo siamo in assenza di rollio per entrambe le termocamere.

I dati di elevazione per entrambe le termocamere sono convenzionalmente calcolati rispetto al faro dell'isola di Gorgona, puntato in fase di inizializzazione da entrambe le telecamere. E' necessario infatti prendere un riferimento iniziale poiché all'accensione del sistema il valore di elevazione fornito è casuale. Si prevede quindi una fase nella quale entrambe le termocamere puntano il faro e si memorizza il rispettivo valore di elevazione casuale, usato come "zero" nelle prove successive.

Puntando le termocamere verso la zona che vogliamo inquadrare, per ottenere la nuova elevazione, basterà sottrarre i valori iniziali dai nuovi dati ottenuti.

I valori ottenuti sono i seguenti:

Elevazione iniziale SH	Elevazione iniziale DH
-2.366	-1.447

Tabella 5.3 Valori di elevazione forniti dal sistema relativi alle due termocamere utilizzate nella campagna di misura durante la fase iniziale

I nuovi dati di elevazione forniti dal sistema, una volta spostate le termocamere nella posizione voluta, sono di - 2.7660 e -1.8770 rispettivamente per la SH e la DH. Le misure corrette si otterranno, come detto, per differenza tra la nuova misura e quella iniziale, ottenendo i valori di Tabella 5.2:

$$- 2.7660 - (- 2.366) = - 0.4$$

$$- 1.8770 - (- 1.447) = - 0.43$$

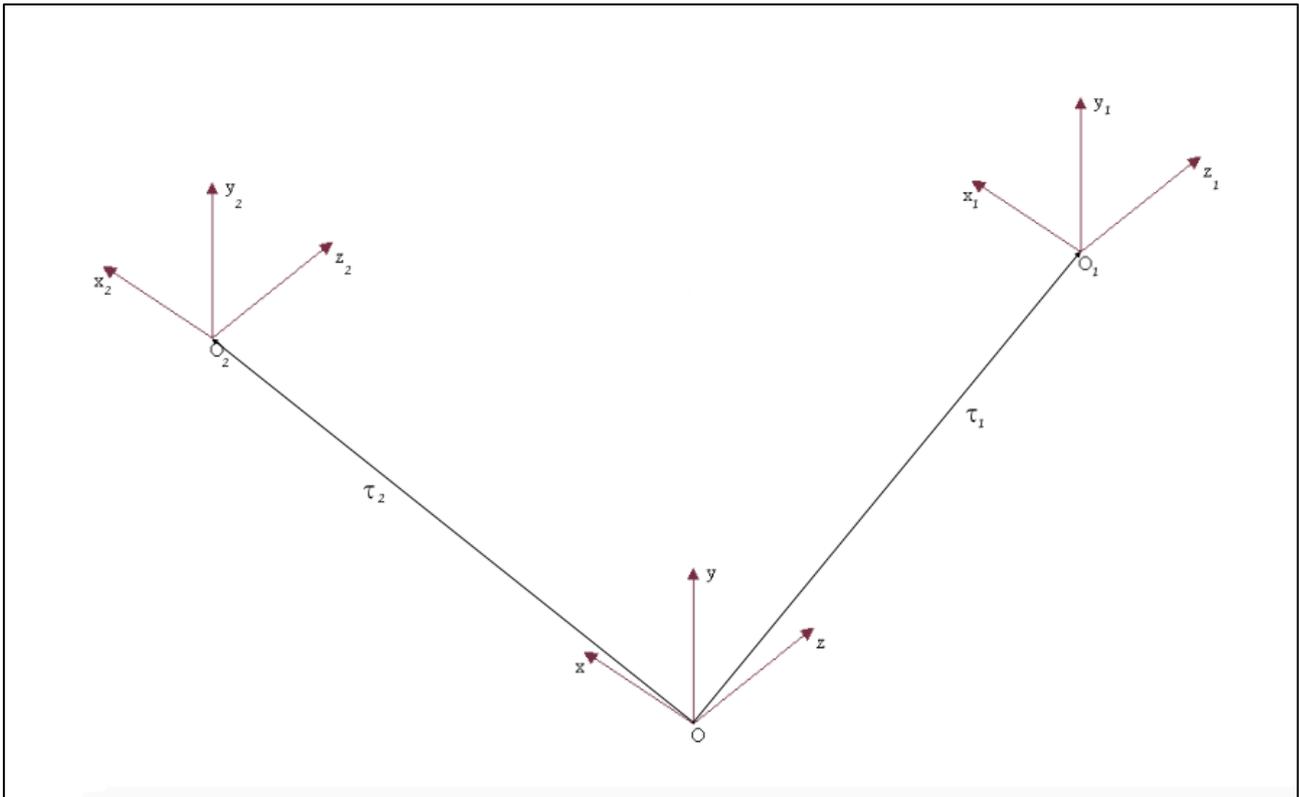


Figura 5.1 Sistemi di riferimento utilizzati per descrivere la geometria delle due termocamere, i quali centri ottici sono posizionati in O_1 e O_2

Sia (X,Y,Z) la terna del sistema di riferimento fisso e (X_1,Y_1,Z_1) (X_2,Y_2,Z_2) quelle centrate ed orientate rispettivamente sulla prima e sulla seconda termocamera, schematizzate in Figura 5.1.

Utilizzando questo sistema stereo su un'unità navale, la terna del sistema di riferimento fissa si potrebbe far coincidere con il centro nave permettendo quindi di avere misure indipendenti dalla posizione delle termocamere sulla nave.

Per descrivere la relazione che lega due sistemi di riferimento delle telecamere, bisogna esplicitare la matrice di rotazione ed il vettore di traslazione che portano l'uno nell'altro.

Per tutta la campagna di misura si è considerato, per semplicità, l'origine del sistema di riferimento fisso coincidente con l'origine del sistema di riferimento della prima termocamera. Gli assi (X,Y,Z) corrispondenti alla terna fissa sono disposti rispettivamente a ovest, verso l'alto e a nord e il piano XZ è inclinato sul faro della Gorgona. Nell'Appendice C si mostra un metodo per calcolare, sulla base di un'immagine dell'isola della Gorgona, quest'angolo di elevazione rispetto al piano orizzontale.

I sistemi di riferimento sulle due termocamere hanno invece l'asse ottico Z_i nella direzione di puntamento e inclinato dell'angolo di elevazione, calcolato in precedenza, rispetto alla Gorgona, l'asse Y_i rivolto verso l'alto e l'asse X_i di conseguenza, per creare una terna destrorsa.

Come parametri di sistema vengono fornite anche le posizioni dei centri delle due termocamere rispetto alla terna di riferimento fissa. Concorde con quanto detto sopra avremo il vettore di traslazione $\tau_1 = [0, 0, 0]$ mentre, in questo specifico caso, $\tau_2 = [-4.7612, -4.5960, -22.4317]$ metri. I vettori di traslazione non sono altro che l'origine delle due termocamere espresse nel sistema di riferimento fisso.

Stabiliti i vettori di traslazione, è necessario definire le matrici di rotazione per essere in grado di passare dal sistema di riferimento fisso a uno relativo alle due termocamere.

Per chiarire al meglio come sia possibile calcolarle ci riportiamo anche questa volta al caso già preso in esame.

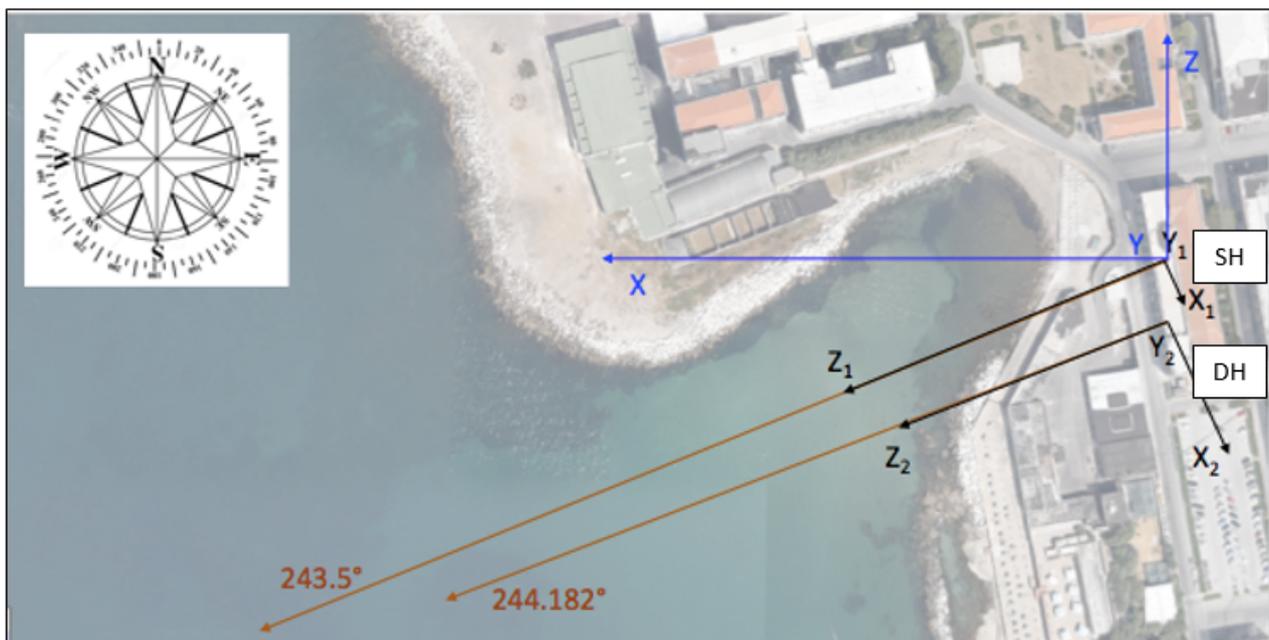


Figura 5.2 Sistemi di riferimento utilizzati per la descrizione della geometria nel caso della campagna di misura effettuata all'Istituto Vallauri dell'Accademia Navale di Livorno

In Figura 5.2 sono rappresentati i tre sistemi di riferimento nel caso selezionato. In blu abbiamo quello relativo alla terna fissa, che ricordiamo essere inclinata dell'angolo di rilevamento del faro della Gorgona. In nero abbiamo i sistemi relativi alle termocamere, inclinati dell'angolo di elevazione fornito dal sistema rispetto alla Gorgona e quindi rispetto alla terna fissa stessa.

5.2.2. Calcolo delle matrici rotazione e del vettore traslazione

5.2.2.1. Geometria fissa

Chiarito il significato dei parametri di ingresso forniti dal sistema è necessario ora mettere in relazione i tre sistemi di riferimento tramite le matrici di rotazione e i vettori di traslazione.

Si traducono quindi i dati sperimentali, in Tabella 5.2, nella convenzione che abbiamo scelto per descrivere la geometria.

Come già detto i vettori di traslazione sono già noti, quindi non resta che esplicitare le due matrici di rotazione. Come vedremo ci baseremo soprattutto sulla posizione relativa tra le due termocamere, piuttosto che sulla loro posizione rispetto alla terna fissa. Una volta ricavati i dati iniziali, espressi inizialmente rispetto alla terna fissa, andremo infatti a calcolare matrici di rotazione e vettori di traslazione che legano direttamente i sistemi di riferimento delle due telecamere, in modo da rendere più celere il passaggio da una telecamera all'altra.

Consideriamo nuovamente la Tabella 5.2, contenente i dati di elevazione e azimuth delle due telecamere. L'azimut fornito dal sistema indica la direzione in gradi dal Nord (asse Z della nostra terna fissa) in senso orario. L'elevazione invece è l'angolo di cui la termocamera è inclinata rispetto al faro della Gorgona e quindi rispetto al piano XZ della terna fissa. Questo è considerato positivo se partendo da questo piano si avvicina allo Zenit, e negativo altrimenti, sempre seguendo la convenzione utilizzata.

Tornando alla Figura 5.2, dove abbiamo rappresentato gli assi visti dall'alto, la rotazione intorno all'asse Y, uscente del piano, necessaria per passare dal nord (asse Z dalla terna fissa) al puntamento di una delle due telecamere (asse Zi dalla terna) deve eseguire in senso orario una rotazione di circa 244° per entrambe le telecamere. Utilizzando la regola della mano destra si ottiene una rotazione negativa. L'angolo di *yaw*, che porta la terna fissa su quella orientata come una delle due termocamere, sarà quindi data dall'angolo di azimuth della telecamera cambiato di segno.

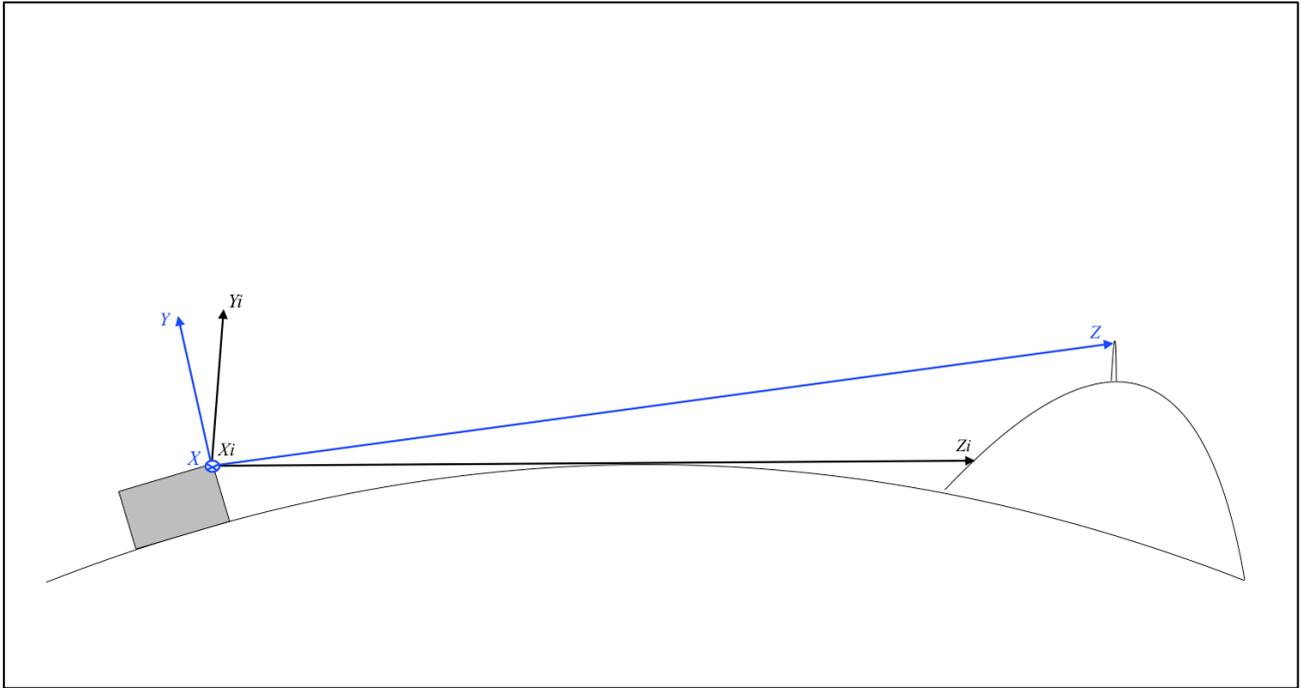


Figura 5.3 Sistema di riferimento fisso (blu) e sistema di riferimento relativo alla i -esima termocamera (nero)

Per quanto riguarda il *pitch*, prendiamo come riferimento la schematica Figura 5.3. Come parametri di ingresso abbiamo un valore negativo di circa -0.4 per entrambe le telecamere poiché, come già accennato, rispetto alla terna fissa, la telecamera punta verso il basso. Considerando la rotazione intorno all'asse X vediamo però come, secondo i nostri sistemi di riferimento, la rotazione che porta l'asse Z, fisso, su quello della telecamera Z_i , è positiva. Anche in questo caso occorre dunque cambiare di segno l'angolo fornito in ingresso.

Il rollio è considerato nullo quindi non avrà nessuna rotazione intorno all'asse Z.

I dati esposti fino ad ora permettono di ottenere le matrici di rotazione. Con riferimento all'Appendice A, indicando con ϕ , θ e ψ gli angoli di rotazione di beccheggio, imbardata e rollio, intorno ai rispettivi assi X, Y e Z, le matrici di rotazione sono i tre fattori al secondo membro della seguente equazione:

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & \sin\theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_i & 0 & \cos\theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_i & -\sin\phi_i \\ 0 & \sin\phi_i & \cos\phi_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\psi_i & -\sin\psi_i & 0 \\ \sin\psi_i & \cos\psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Tali matrici, moltiplicate per l'opportuno ordine mostrato nella (5.4), danno la corretta matrice di rotazione.

5.2.2.2. Geometria relativa

Con le matrici di rotazione ed i vettori di traslazione definiti fino ad ora siamo in grado di passare dal sistema fisso ad ognuno di quelli relativi alle termocamere. Per poter passare da un sistema relativo ad una termocamera a quello relativo all'altra, bisogna invece definire una nuova matrice di rotazione, che porti, per esempio, il sistema di riferimento della prima telecamera sul secondo. Bisogna inoltre esplicitare il vettore di traslazione che definisce l'origine della seconda termocamera nelle coordinate della prima (o equivalentemente la traslazione necessaria per portare l'origine del primo sistema di riferimento sul secondo).

Consideriamo ancora una volta la Figura 5.2 abbiamo visto che la rotazione intorno all'asse Y_1 deve essere negativa (senso orario) per passare dal valore di azimut della prima termocamera a quello della seconda. Volendo adoperare gli angoli di imbardata rispetto alla terna fissa bisogna ricordare che sono già stati invertiti di segno rispetto ai parametri di ingresso.

Ad esempio in questo caso specifico avremmo che $\theta_1 = -243.5$ e $\theta_2 = -244.182$. Per ottenere una differenza tra gli angoli negativa ed essere così concorde alle convenzioni prese, basterà sottrarre all'angolo di yaw della seconda termocamera quello della prima ottenendo

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = -244.182 + 243.5 = -0.6820 \quad (5.5)$$

Analogamente, per ottenere l'angolo di beccheggio che porta il sistema di riferimento della prima termocamera sulla seconda, basterà effettuare la sottrazione $\phi_2 - \phi_1$ ottenendo:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 0.43 - 0.4 = 0.03 \quad (5.6)$$

In questo caso infatti la rotazione intorno all'asse X_i che porta l'asse Z_1 su Z_2 , concorde alla regola della mano destra, è positivo.

La matrice di rotazione sarà quindi la seguente:

$$R_{12} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & 0 & \sin\Delta\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Delta\theta & 0 & \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\phi & -\sin\Delta\phi \\ 0 & \sin\Delta\phi & \cos\Delta\phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\Delta\psi & -\sin\Delta\psi & 0 \\ \sin\Delta\psi & \cos\Delta\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

dove $\Delta\psi$ è ovviamente definito come $\psi_2 - \psi_1 = 0$, in analogia a quanto visto precedentemente per θ e ϕ .

Per definire il vettore di traslazione è necessario fare alcune considerazioni geometriche prendendo come riferimento la Figura 5.4.

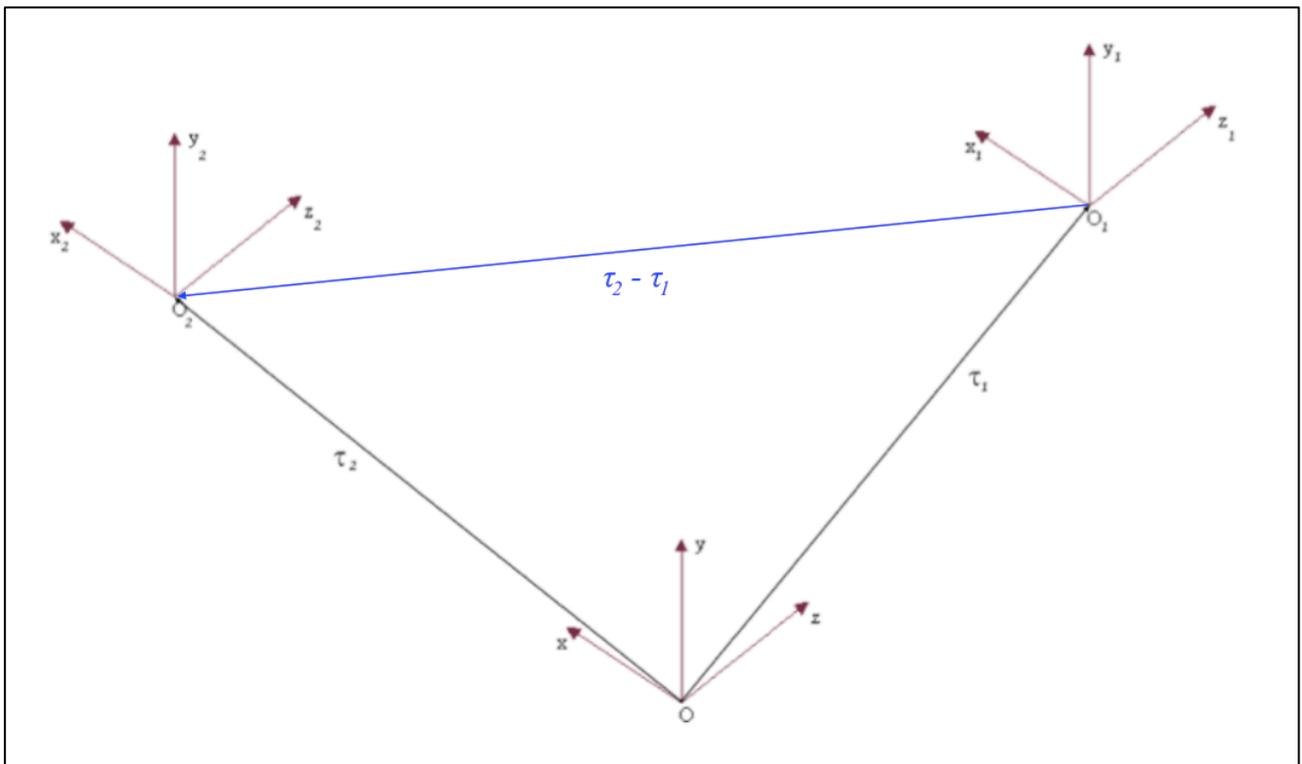


Figura 5.4 Vettore di traslazione che porta il sistema di riferimento della prima termocamera su quello della seconda.

Sia $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ il vettore in blu. È facile capire come il vettore di traslazione sia proprio il vettore $\Delta\tau$ definito nelle coordinate della prima termocamera (X_1, Y_1, Z_1) e non in quelle fisse (X, Y, Z) .

Conoscendo la matrice di rotazione e il vettore di traslazione che portano il sistema di riferimento fisso su quello della prima termocamera, possiamo esplicitare la relazione che lega il $\Delta\tau$, nel sistema fisso, al $\Delta\tau_1$, in quello relativo, come:

$$\Delta\tau = R_1\Delta\tau_1 + \tau_1 \quad (5.8)$$

Invertendo la relazione arriviamo al vettore cercato:

$$\Delta\tau_1 = R_1^{-1}(\Delta\tau - \tau_1) \quad (5.9)$$

Sostituendo $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ nell'equazione, concludiamo che il vettore di traslazione che porta il sistema di riferimento della prima termocamera in quello della seconda è proprio:

$$\tau_{12} = \Delta\tau_1 = R_1^{-1}(\Delta\tau - \tau_1) = R_1^{-1}(\tau_2 - \tau_1 - \tau_1) = R_1^{-1}(\tau_2 - 2\tau_1) \quad (5.10)$$

Per comprendere il vantaggio di aver introdotto R_{12} e τ_{12} basta pensare che per passare da un punto nello spazio espresso nelle coordinate della seconda immagine a uno espresso nelle coordinate della prima basterà utilizzare la seguente equazione:

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = R_{12} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \tau_{12} = R_{12} \mathbf{X}_2 + \tau_{12} \quad (5.11)$$

Invertendo la (8.17) abbiamo inoltre:

$$\mathbf{X}_2 = R_{12}^{-1} (\mathbf{X}_1 - \tau_{12}) = R_{12}^{-1} \mathbf{X}_1 - R_{12}^{-1} \tau_{12} = R_{21} \mathbf{X}_1 + \tau_{21} \quad (5.12)$$

dove $R_{21} = R_{12}^{-1}$ e $\tau_{21} = -R_{12}^{-1} \tau_{12}$ sono la matrice di rotazione ed il vettore di traslazione che portano il sistema di riferimento della seconda termocamera su quello della prima.

6. Segmento epipolare su immagini reali

6.1. Dalla linea al segmento epipolare

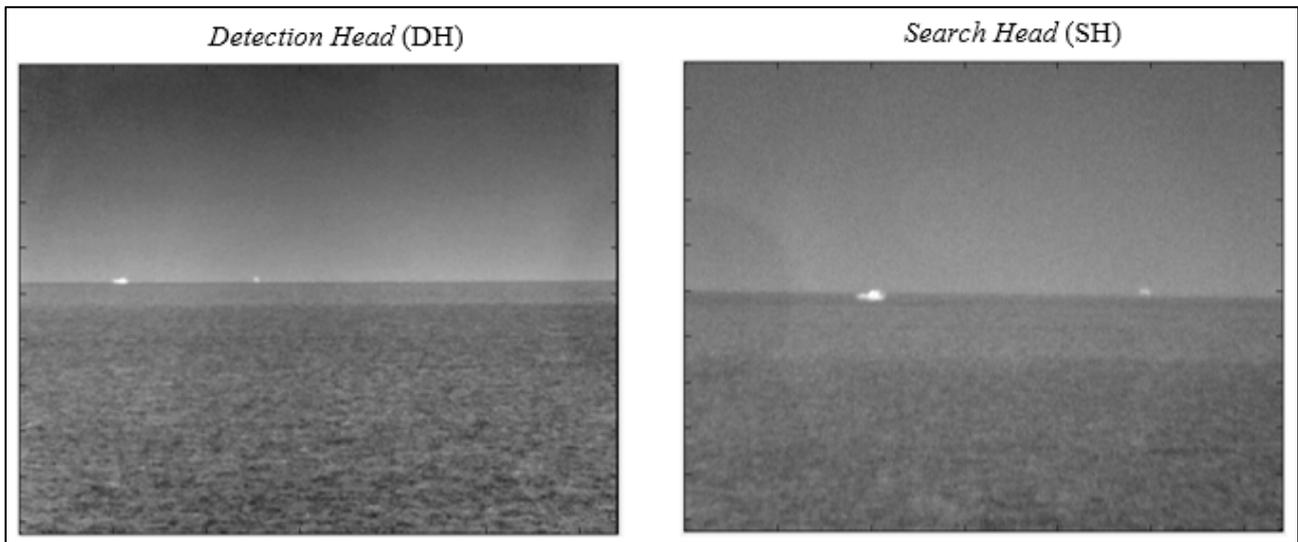


Figura 6.1 Coppia di immagini fornite dal sistema

Nelle misure effettuate, la prima termocamera, SH, era posizionata sulla destra della seconda termocamera, DH. Per essere coerenti a questa disposizione, in Figura 6.1 si riporta sulla sinistra l'immagine fornita dalla DH e sulla destra quella ottenuta con la SH.

Supponiamo di essere interessati al bersaglio più grande sulla destra, del quale vorremmo quindi conoscere distanza e posizione.

Sulla base delle nozioni teoriche definite nella PARTE I: si mostra ora il funzionamento dell'algoritmo, evidenziandone i singoli passi che lo compongono.

Selezionando questo bersaglio sulla prima immagine otteniamo sulla seconda la linea epipolare, corrispondente alla proiezione della retta che unisce il centro ottico della prima termocamera al bersaglio nell'immagine. In accordo alla Figura 1.5 infatti è chiaro che, non essendo nota la distanza del *target* nello scenario reale, un singolo punto sulla prima immagine si traduce in una linea epipolare sulla seconda.

Tornando alle immagini reali fornite dalle termocamere, la Figura 10.2 mostra come alla selezione del bersaglio sulla destra nella prima immagine corrisponda, secondo la relazione (1.28), una linea epipolare sulla seconda.

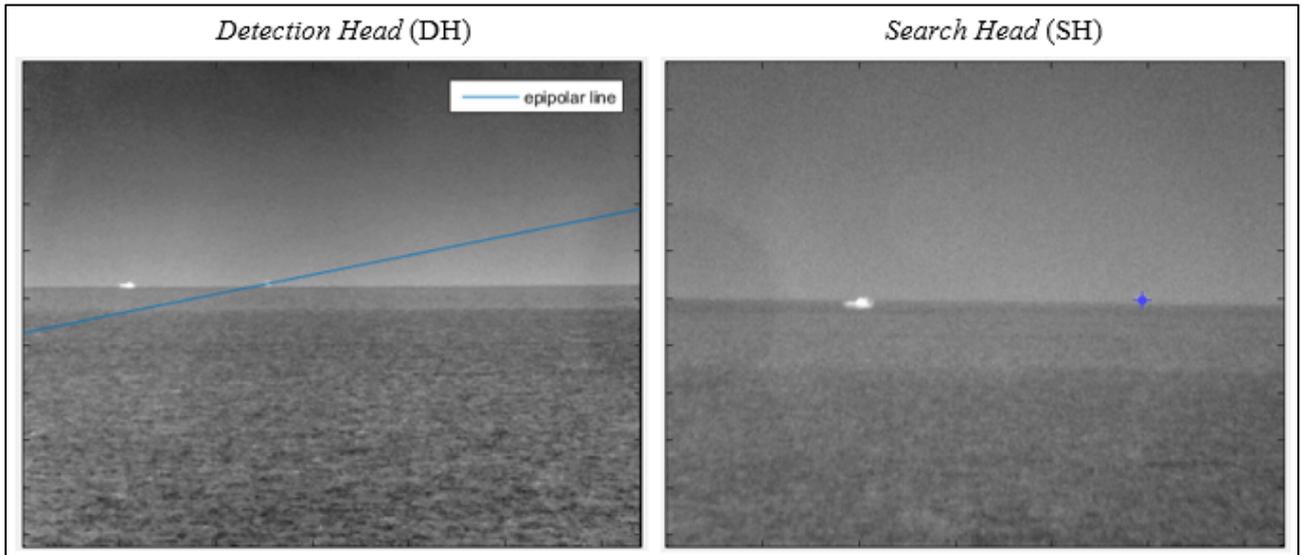


Figura 6.2 Selezione del bersaglio di interesse sulla SH e corrispondente linea epipolare sulla DH

Per ottenerla è stato necessario ricavare la matrice fondamentale che, come abbiamo visto, è legata a quella essenziale, e quindi alla matrice di rotazione e al vettore di traslazione, nel seguente modo:

$$F = \Lambda_2^{-T} E \Lambda_1^{-1} = \Lambda_2^{-T} \tau_{21} \otimes R_{21} \Lambda_1^{-1} \quad (6.1)$$

Riassumiamo i parametri in gioco. In accordo con le convenzioni prese, abbiamo:

- Le matrici dei parametri intrinseci in pixel definite come segue

$$\Lambda_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{IFOV_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{IFOV_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

- La matrice di rotazione e il vettore di traslazione che portano il sistema della seconda termocamera nella prima definite come:

$$\begin{cases} R_{21} = R_{21}^{-1} \\ \tau_{21} = -R_{21}^{-1} \tau_{12} \end{cases} \quad (6.3)$$

Ricordiamo che la matrice R_{12} ed il vettore τ_{12} sono stati ottenuti considerando le differenze tra i tre angoli di Tait–Bryan relativi alle due termocamere.

Limitando i punti tra una distanza minima di nove chilometri ed il “punto all’infinito” il segmento epipolare che otteniamo sull’immagine è mostrato in Figura 11.3

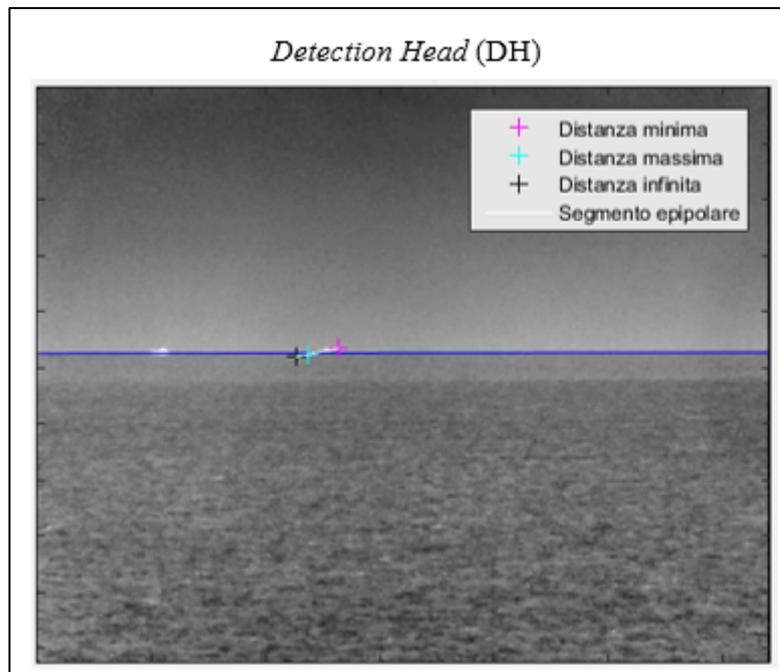


Figura 6.3 Segmento epipolare

Confrontando questa figura con la precedente vediamo come i punti candidati sulla retta epipolare vengono ridotti notevolmente.

La distanza massima, evidenziata dalla croce azzurra, è in questo caso di 30Km. Per ottenere questa croce è stato seguito un procedimento analogo a quello impostato per ricavare il punto sul piano immagine corrispondente alla distanza minima, capitolo 2.1.

6.2. Sistema di Riferimento specifico di Matlab

Il linguaggio utilizzato per l’elaborazione dei dati è Matlab. Selezionando sulla prima termocamera, la *Search Head*, il *target* di interesse, andiamo ad individuare il punto nel piano. Questo sarà definito secondo le specifiche del linguaggio Matlab, che seguono una loro specifica convenzione, alla quale dunque dobbiamo riportarci. Innanzitutto, la disposizione degli assi che abbiamo scelto per il piano immagine non è coerente con quella utilizzata da Matlab. Inoltre il centro dei due sistemi bidimensionali non coincide. E’ necessario quindi esplicitare il SdR utilizzato da Matlab per essere in grado di tradurre le coordinate del punto selezionato.

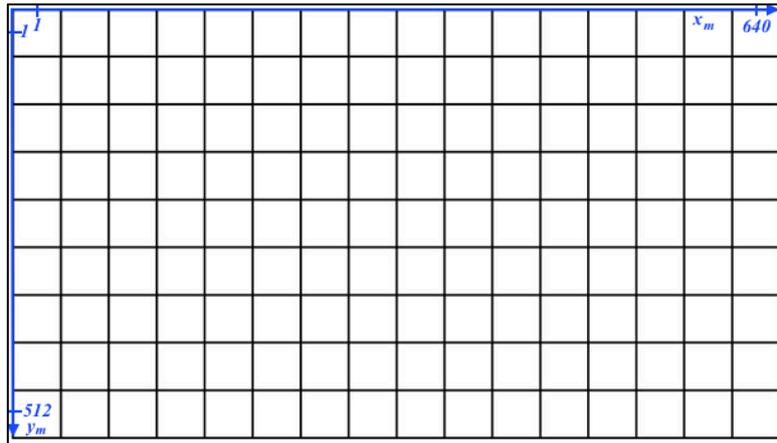


Figura 6.4 Array sul piano focale di 640x512 pixel descritto mediante il sistema di riferimento utilizzato da Matlab

Le immagini in Figura 6.1 hanno una grandezza di 640x512 pixel, in accordo alle specifiche in Tabella 5.1. Nella Figura 6.4 è riportata la suddivisione della rappresentazione vettoriale in matlab, secondo la quale sono numerati i pixel presenti nelle immagini. Si riporta in Figura 6.5 la disposizione degli assi che abbiamo scelto per descrivere il piano immagine.

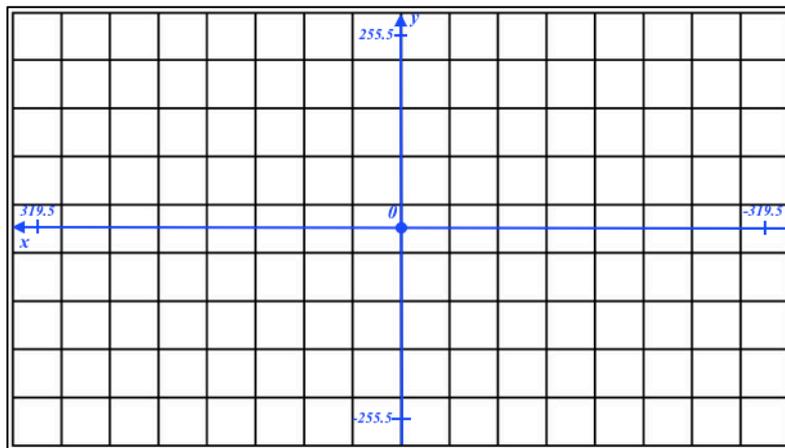


Figura 6.5 Sistema di riferimento scelto da noi per rappresentare l'array sul piano focale di 640x512 pixel

Osservando la

Figura 1.2, che evidenziava i sistemi di riferimento sul piano immagine e tridimensionale relativi ad una stessa termocamera, vediamo che la scelta di questa disposizione degli assi è coerente se consideriamo l'operatore posto nel centro termocamera, quindi dietro alla termocamera stessa che guarda in direzione di puntamento.

E' facile dunque ricavare che i due sistemi di coordinate siano relazionate mediante:

$$\begin{cases} x = 320.5 - x_m \\ y = 256.5 - y_m \end{cases} \quad (6.4)$$

dove (x_m, y_m) e (x, y) sono le coordinate di un pixel descritto rispettivamente nel SdR utilizzato da Matlab e nel SdR scelto da noi come riferimento, Figura 6.5.

6.3. Errori sistematici

Un sistema formato da una coppia di termocamere, riflette una criticità sui valori degli angoli che descrivono l'orientamento relativo delle due telecamere. Ognuna di queste misure è infatti affetta da un errore sistematico.

Nel nostro caso specifico, si ha un errore massimo pari a circa 1mrad. Purtroppo però anche un errore piccolo causa un grande errore sulla posizione del segmento epipolare sulla seconda immagine, data la distanza elevata a cui si trova il bersaglio.

Le immagini mostrate fino ad ora erano infatti ottenute dopo aver introdotto sui tre angoli forniti dal sistema un'opportuna correzione. La Figura 6.6 mostra invece la posizione del segmento nel caso in cui non si apporti nessuna correzione.

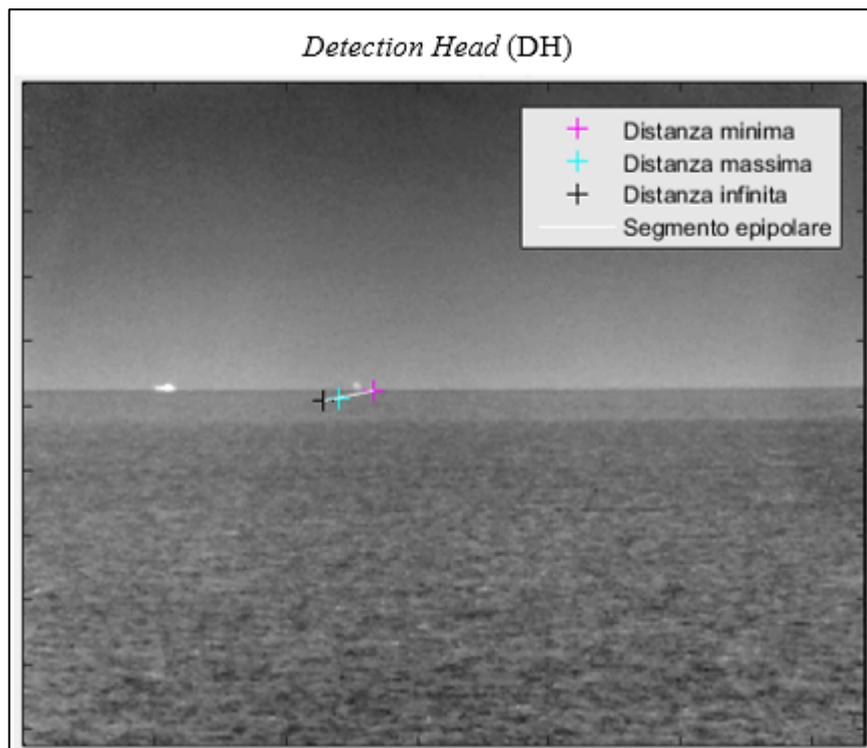


Figura 6.6 Segmento epipolare in caso di errore sistematico

Come vediamo dalla Figura 6.6, causa errore sistematico, il segmento epipolare non passa per il *target* di interesse.

Nella sezione successiva si mostrano i risultati ottenuti implementando l'ottimizzazione dei parametri descritta nel paragrafo 3.2.

6.4. Ottimizzazione dei parametri

Seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 3.2, si analizzano le migliori introdotte, sempre riferendoci all'esempio scelto precedentemente. Il segmento di partenza è quello mostrato in Figura 6.6, ottenuto selezionando sulla prima immagine il *target* sulla destra, Figura 6.2.

L'errore assoluto nel nostro caso specifico è pari all'errore sistematico, cioè all'accuratezza dei valori di azimut ed elevazione che vengono forniti da sistema, pari ad 1mrad.

Ricordiamo che per l'ottimizzazione dei parametri di azimut ed elevazione si simulano coppie di variabili aleatorie gaussiane ottenute con valor medio pari rispettivamente ai due valori dei parametri forniti dal sistema e deviazione standard uguale all'errore sistematico di 1mrad. Alla selezione del punto sulla prima immagine corrisponderà, per ogni coppia simulata, una diversa matrice di rotazione ed un diverso vettore di traslazione, ottenendo ogni volta un segmento epipolare differente.

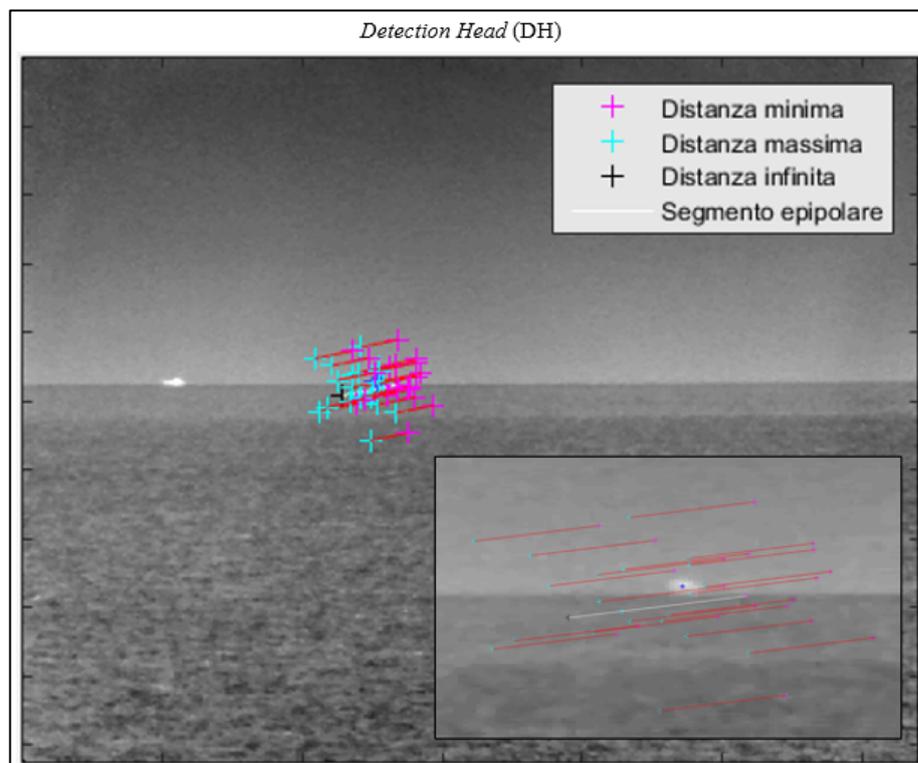


Figura 6.7 Risultato della simulazione gaussiana di 20 coppie di parametri azimut/elevazione

Nella Figura 6.7 si osservano 20 segmenti epipolari, frutto di 20 coppie simulate di parametri di azimut ed elevazione gaussiani. Nella *zoomed* box si nota in blu il baricentro dell'oggetto

corrispondente a quello selezionato sulla prima immagine, il quale possiamo supporre sia ottenuto mediante l'algoritmo di rivelazione. Simulando un numero basso di coppie gaussiane vediamo che nessuno dei rispettivi segmenti epipolari passa per il bersaglio di riferimento. Si aumenta quindi il numero di simulazioni per ottenere un buon numero di segmenti epipolari che passano per il bersaglio di interesse. Questi segmenti sono ottenuti modificando di una certa quantità sia l'azimut che l'elevazione e, se questa modifica permette di passare da un segmento epipolare errato ad uno che passa effettivamente per il bersaglio, possiamo ipotizzare che la stessa sia tale da correggere l'errore che affligge le misure. Durante la simulazione si ottengono segmenti epipolari, passanti per il bersaglio, che sono stati ottenuti variando della stessa quantità i due parametri da ottimizzare. Più è alto il numero di segmenti derivanti da una stessa correzione più la stessa potrebbe essere probabile. Si crea quindi un istogramma che riporta rispetto alle correzioni in azimut e in elevazione il numero di segmenti che, generati successivamente a queste, passano effettivamente per il bersaglio di riferimento.

Con una simulazione di 500.000 coppie l'istogramma risultante è il seguente

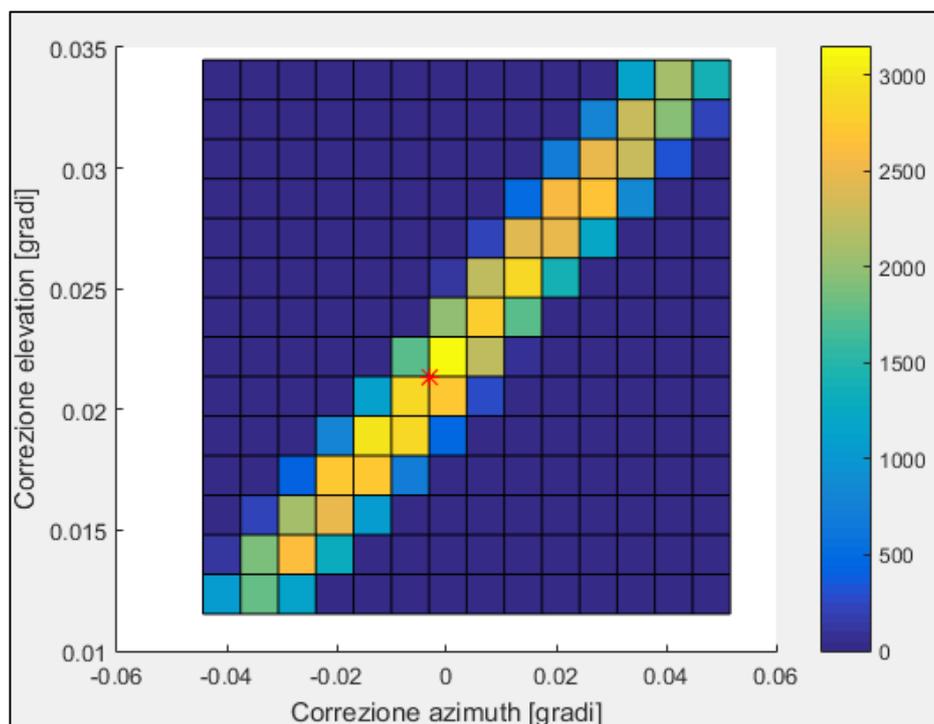


Figura 6.8 Istogramma che riporta il numero di segmenti ottenuti mediante stesse correzioni sui parametri di azimut ed elevazione

Prendendo il valore massimo dell'istogramma, ci aspettiamo di individuare quali, tra le correzioni di azimut e elevazione, risultino più probabili. Il numero massimo si riferisce infatti alla maggior quantità di segmenti epipolari, passanti per il bersaglio, ottenuti considerando le medesime

correzioni su entrambi i parametri. Si riportano in Tabella 6.1 le correzioni che hanno generato il numero massimo di segmenti passanti per il bersaglio.

Correzione azimut	Correzione elevazione
-0,0032	0,0214

Tabella 6.1 Valori di correzione dei parametri di azimut e elevazione stimati mediante l'algoritmo di ottimizzazione. Correggendo i valori nominali forniti dal sistema il risultato è quello riportato in Figura 6.9

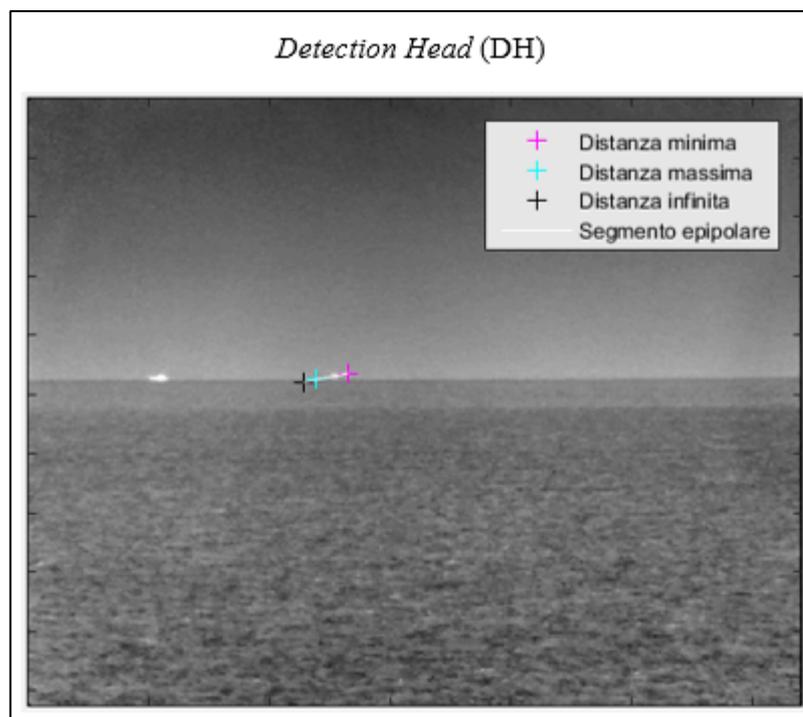


Figura 6.9 Segmento epipolare ottenuto con una matrice di rotazione ed un vettore di traslazione calcolati sui parametri di azimut ed elevazione corretti dell'errore sistematico stimato

Dal confronto della Figura 6.9 con la Figura 6.6 si evince che l'algoritmo di ottimizzazione è tale da portare il segmento epipolare sul bersaglio di interesse. La procedura utilizzata si rivela quindi in grado di gestire la presenza di errori sistematici e di fornire una stima degli stessi sui parametri di azimut ed elevazione. Per la triangolazione e la successiva stima della posizione e della distanza sarà quindi necessario fare riferimento alla nuova geometria che lega le due telecamere, modificando sia il parametro relativo in azimut che quello in elevazione, delle correzioni stimate.

7. Risultati dell'algoritmo rivelazione

7.1. Stima della linea dell'orizzonte

Riportiamo, per ogni blocco del diagramma in Figura 4.1, i risultati ottenuti sulla prima immagine del caso in esame.

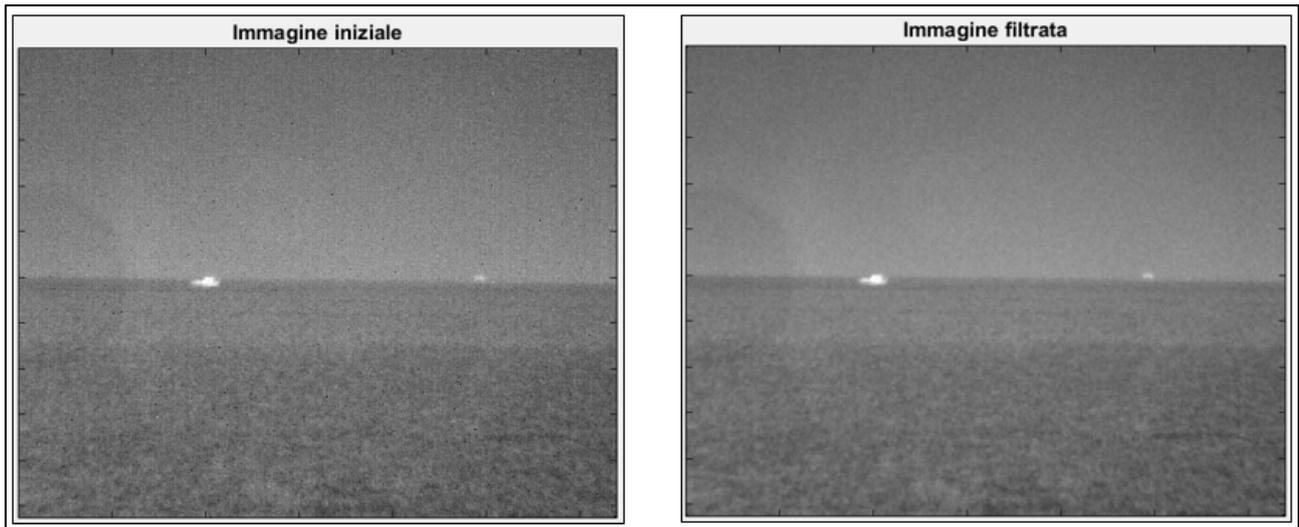


Figura 7.1 Filtraggio a mediana

La Figura 7.1 mostra come un filtraggio a mediana, corrispondente al primo passo nella stima dell'orizzonte, sia in grado di ridurre il rumore e di conseguenza anche eventuali false rivelazioni nei passaggi successivi.

Nella Figura 7.2 si vede il risultato dell'applicazione dell'algoritmo di Canny. Si nota come, nonostante la rumorosità sul mare, sia possibile intuire quale sia la linea dell'orizzonte.

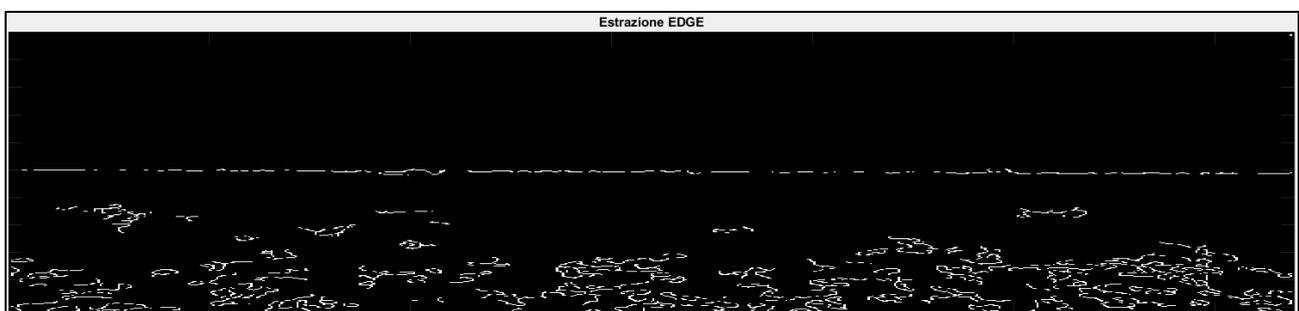


Figura 7.2 Edge detection

La Figura 7.3 riporta il risultato della trasformata di Hough, riportata sull'immagine di riferimento. Come vediamo, le linee ottenute sono per la maggior parte segmenti appartenenti alla linea dell'orizzonte.



Figura 7.3 Trasformata di Hough

La figura mette anche in evidenza come la presenza di un *target* possa creare ambiguità sull'effettiva posizione della linea dell'orizzonte. Questo è infatti un fattore che abbiamo tenuto in considerazione nei passi successivi dell'algoritmo.

Si riporta in Figura 7.4 l'output proveniente dall'estrazione di *edge* e dalla successiva trasformata di Hough applicando l'algoritmo ad un altro caso.

In questo caso, in aggiunta al problema prima accennato della presenza dei *target*, abbiamo l'effetto del riflesso del sole sull'orizzonte, che conduce alla rivelazione di una doppia linea nell'immagine binaria.

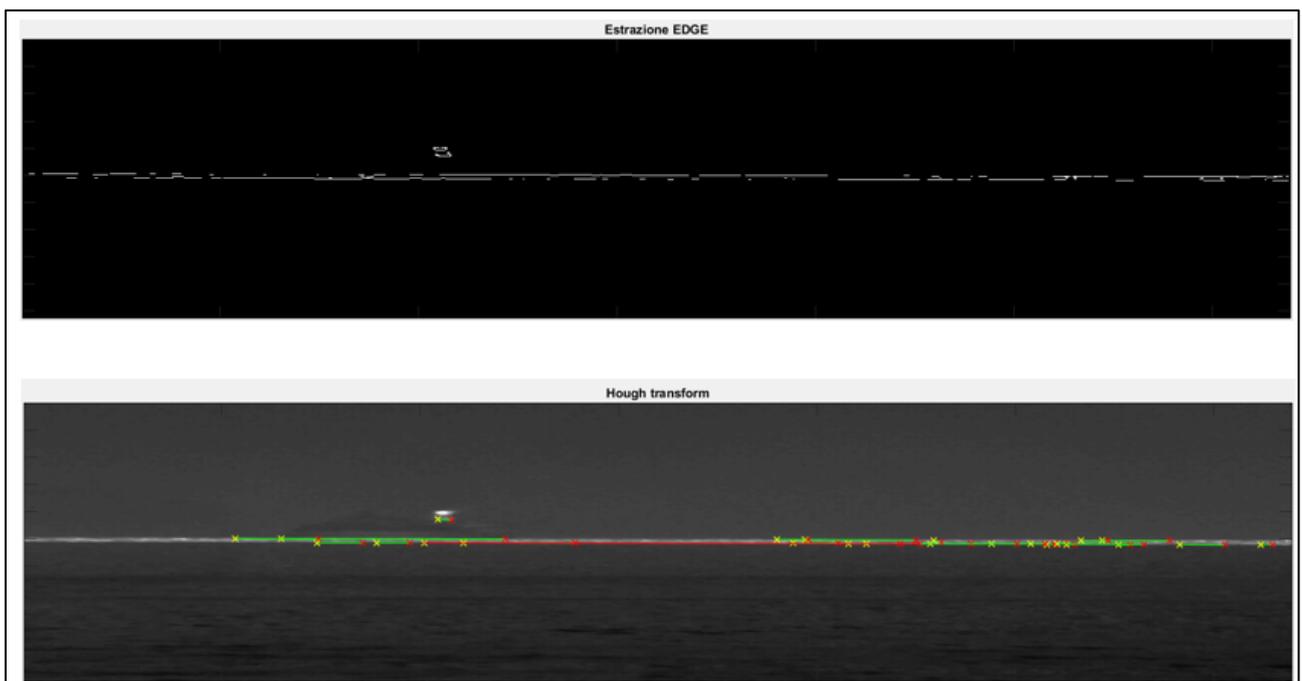


Figura 7.4 Edge detection e trasformata di Hough

Di conseguenza anche i segmenti, ottenuti mediante trasformata di Hough, vengono individuati sia sulla linea dell'orizzonte sia sul riflesso sottostante.

Nel paragrafo 4.2.2, che descrive l'algoritmo di rivelazione dell'orizzonte, si introduceva la difficoltà principale nel ricavare una stima accurata della linea dell'orizzonte, corrisponde alla presenza di forti riflessi del sole. Il riflesso del sole, come nel caso riportato in Figura 7.4, crea un riflesso sotto l'orizzonte tale da creare, successivamente alla trasforma di Hough, un doppio allineamento. La procedura prevede, come già detto appunto nel paragrafo 4.2.2, di individuare, se presenti, entrambi gli allineamenti e di confrontarli successivamente tra di loro per individuare quello corretto. Si mostrano i risultati ottenuti sul caso in Figura 7.4, così da evidenziare la capacità dell'algoritmo di risolvere tale problematica.

In Figura 7.4 si è evidenziato in rosso il segmento più lungo, il quale sarà il nostro punto di partenza per la stima del primo allineamento, lungo il quale è disposto il segmento stesso. In questo caso vediamo che il segmento di partenza delinea una linea riflessa e non la linea dell'orizzonte. Di conseguenza la stima del primo allineamento sarà in questo caso quella errata e l'algoritmo deve essere in grado di capire che la stima dell'allineamento corretto è, come vedremo, la seconda.

Seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 4.2.2, sulla base del segmento più lungo, si dividono gli altri segmenti in *inliers* ed *outliers*. I primi sono quelli che si trovano sull'allineamento del segmento di riferimento mentre i secondi sono disposti lungo un allineamento differente.

La Figura 7.5 (a) illustra la retta ottenuta prolungando il segmento di riferimento. Sulla base di questa viene poi calcolata la distanza di tutti gli altri segmenti dalla retta e, se questi distano più o meno di una certa soglia, vengono etichettati rispettivamente come *outliers* o *inliers*. In Figura 7.5 (b) e (c) si mostrano gli estremi dei segmenti appartenenti rispettivamente agli *inliers* e agli *outliers*. Si conclude la prima stima con l'interpolazione degli estremi appartenenti agli *inliers* secondo l'equazione (4.2), Figura 7.5 (d).

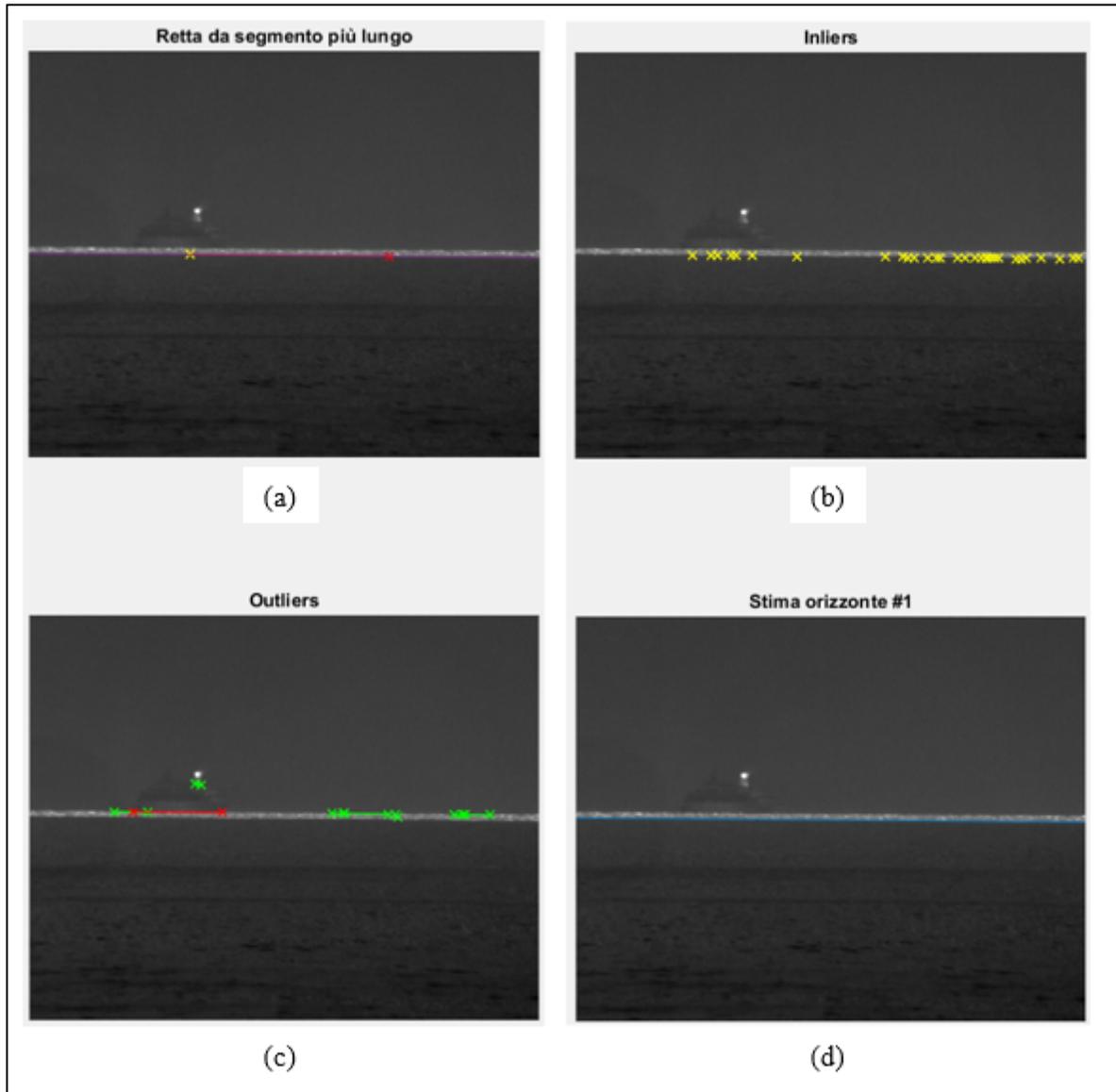


Figura 7.5 Stima del primo allineamento sulla base del segmento più lungo tra quelli rivelati mediante la trasformata di Hough

Dalla Figura 7.5 si nota come la prima stima sia errata, poiché corrispondente ad un riflesso del sole e non alla linea dell'orizzonte.

Si ripete il procedimento partendo dal segmento più lungo tra gli *outliers*. In questo modo si vuole infatti andare a stimare il secondo allineamento e consideriamo quindi il segmento più lungo tra quelli non in linea alla prima stima. In Figura 7.6 si mostrano i risultati del procedimento per giungere alla stima del secondo allineamento. Si noti come in Figura 7.6 (c) i nuovi *outliers* ottenuti siano frutto di bersagli presenti nell'immagine o comunque segmenti non allineati con nessuno tra i due allineamenti sotto stima. Grazie alla nuova divisione tra *inliers* e *outliers*, con successiva interpolazione degli *inliers* per ottenere la stima del secondo allineamento, si noti, in Figura 7.6 (d),

la corretta stima del secondo allineamento, che questa volta corrisponde proprio alla linea dell'orizzonte.

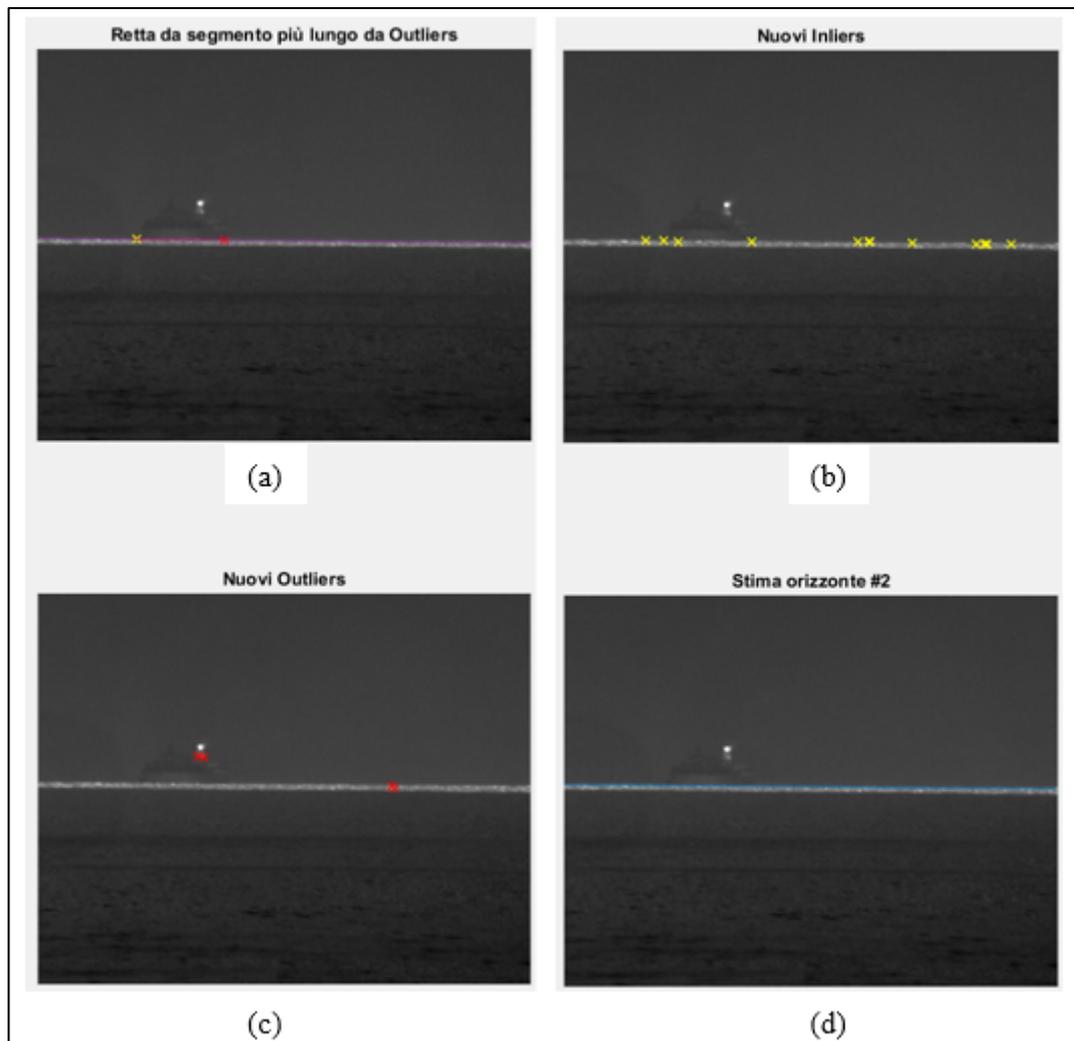


Figura 7.6 Stima del secondo allineamento sulla base del segmento più lungo tra gli *outliers* del primo allineamento. Confrontando la prima stima, Figura 7.5 (d), con la seconda, Figura 7.6 (d), l'algoritmo associa alla linea dell'orizzonte la seconda stima, giungendo quindi a conclusioni corrette.

Come riportato nel paragrafo 4.2.2.5 la scelta tra le stime dei due allineamenti si basa sul valore dell'intercetta, e scegliendo la retta stimata ad intercetta più alta, si identifica correttamente la linea dell'orizzonte e non un suo riflesso. Inoltre verifica anche il numero di *inliers* utilizzati nell'interpolazione, scartando stime ottenute con pochi punti. Quest'ultima accortezza è necessaria per evitare di scegliere erroneamente una stima che deriva non da punti sull'orizzonte ma da contorni rilevati per la presenza di bersagli.

Si riportano in Figura 7.7 le stime dell'orizzonte eseguite su diversi casi, soggetti alle problematiche elencate precedentemente. Nelle prime due colonne si mostra la stima delle due linee candidate, mentre nella terza la decisione finale sulla designazione della linea dell'orizzonte.

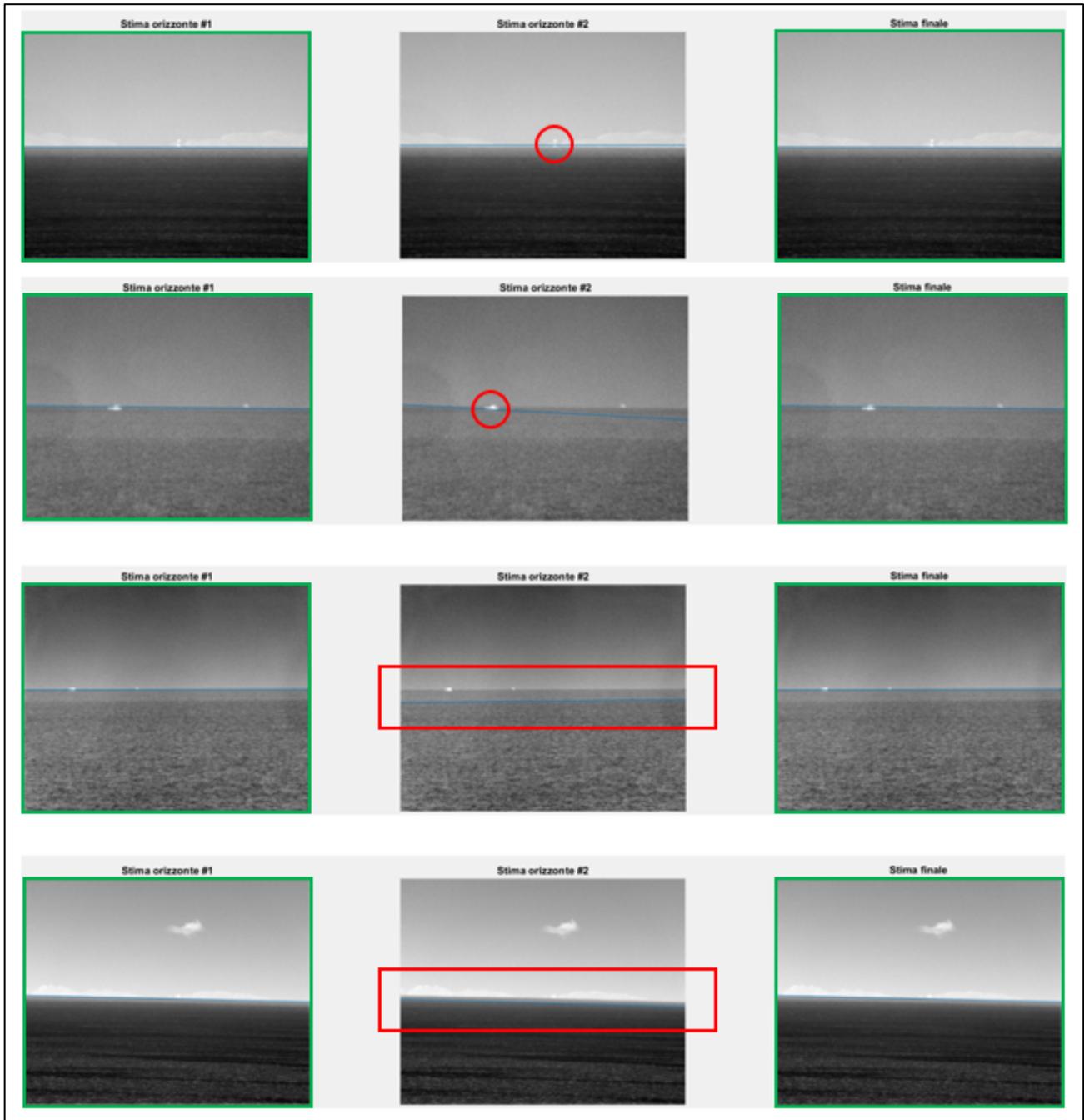


Figura 7.7 Confronto tra le stime dei due allineamenti e scelta della linea corretta per la descrizione dell'orizzonte

Nei primi due casi, la stima sbagliata è stata causata dalla presenza di un *target*, cerchiato in rosso, mentre, negli ultimi due, da un riflesso sotto la linea dell'orizzonte, circoscritto dal rettangolo rosso.

La stima finale dell'orizzonte risulta corretta in ciascuno dei casi analizzati, dimostrando la robustezza dell'algoritmo.

7.2. Area di ricerca

Come già specificato, l'accuratezza delle misure di azimut, elevazione e rollio fornite dal sistema, è di circa 1mrad.

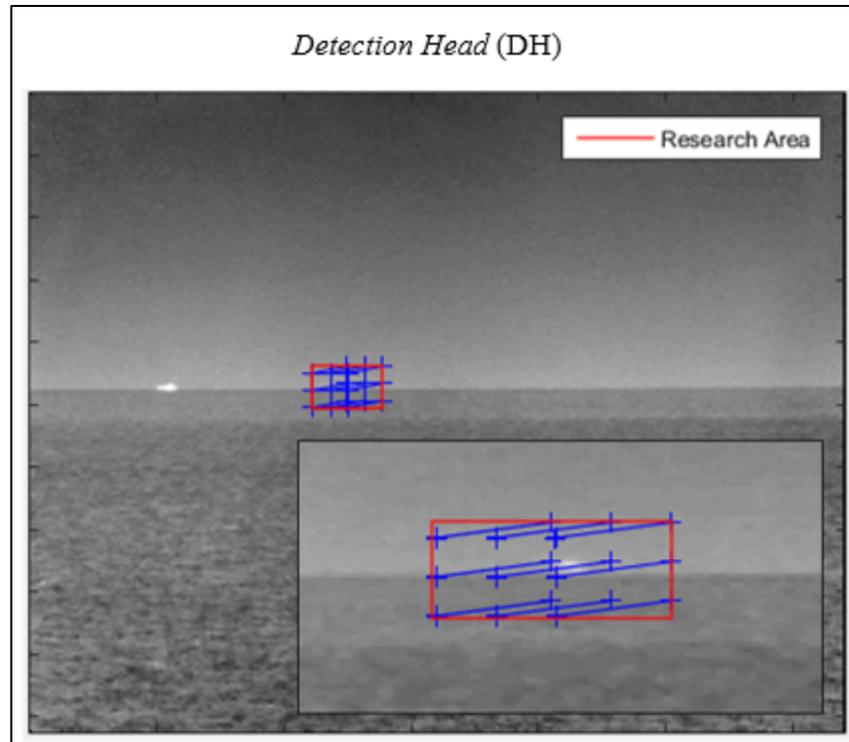


Figura 7.8 Area di ricerca

La Figura 7.8 mostra i segmenti epipolari ottenuti con le 27 terne di valori applicate secondo le specifiche del paragrafo 4.3.1. Si noti che i segmenti sembrano essere solo 9. Ciò è dovuto al fatto che l'errore sul rollio incide quasi trascurabilmente e, dunque, la variazione della linea epipolare dipende, in pratica, dal solo errore sul azimut e sull'elevazione.

La finestra in rosso identifica la nostra area di ricerca nella quale ci aspettiamo di trovare il *target* di interesse, determinata in modo da contenere tutti i segmenti di linea epipolare ottenuti.

7.3. Rivelazione del bersaglio

Si riportano di seguito nella Figura 7.9 le coppie di immagini relative a casi differenti. Nelle immagini della prima colonna è stato selezionato il bersaglio del quale vogliamo determinare posizione e distanza, mentre, nelle immagini della seconda, il risultato dell'algoritmo di rivelazione, ovvero il punto omologo a quello selezionato, sull'immagine prodotta dalla seconda telecamera

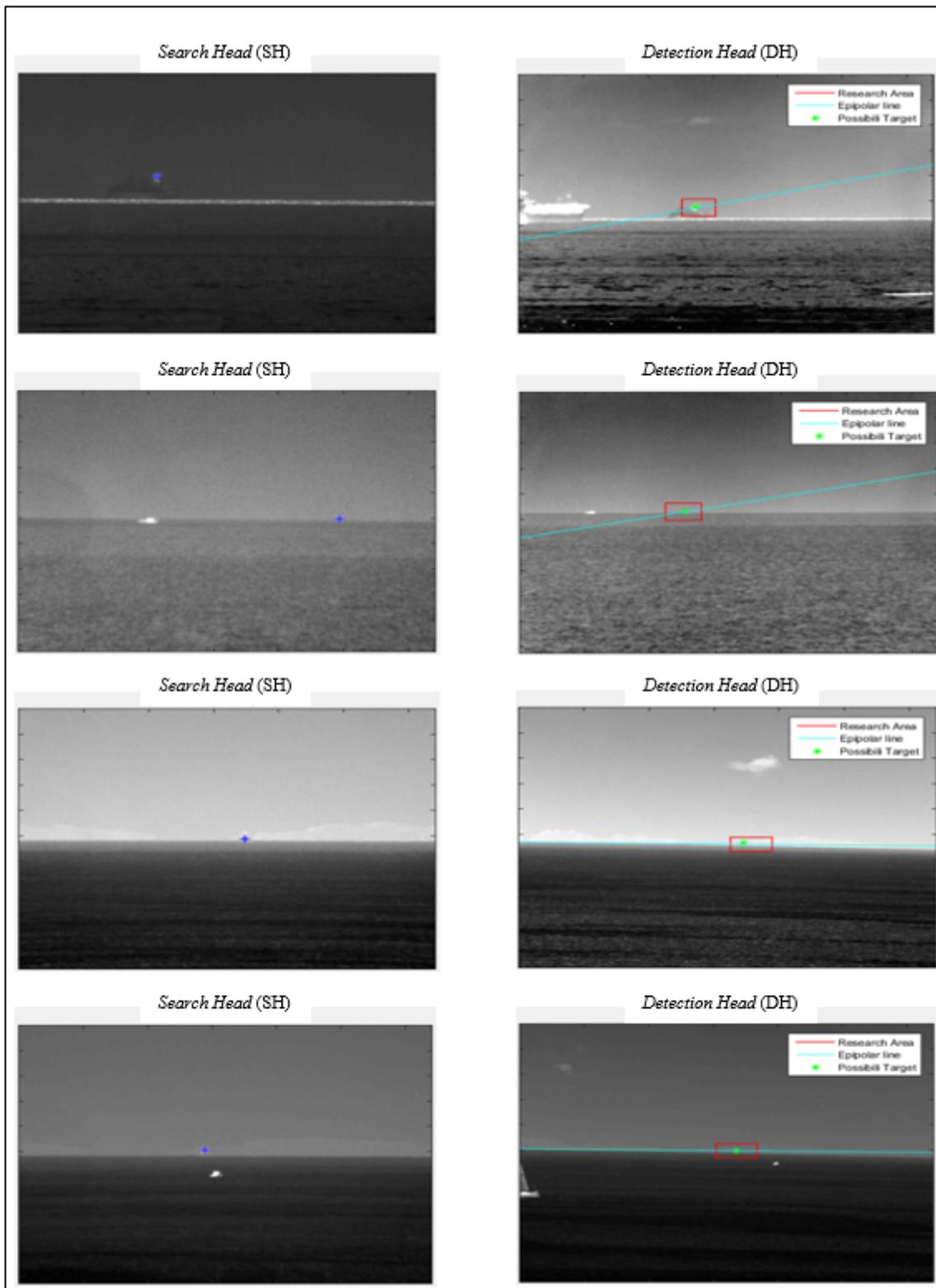


Figura 7.9 Risultati della rivelazione automatica del bersaglio sulla seconda immagine (DH)

Da un'ispezione visiva dei risultati ottenuti, possiamo concludere che la rivelazione automatica del bersaglio viene eseguita in maniera corretta.

7.4. Stima della distanza

Ottenuto il baricentro del bersaglio sulla seconda immagine si procede con la proiezione di questo sulla linea epipolare. Si riporta nella Figura 7.10, a titolo di esempio, il risultato ottenuto nel secondo caso mostrato in Figura 7.9.

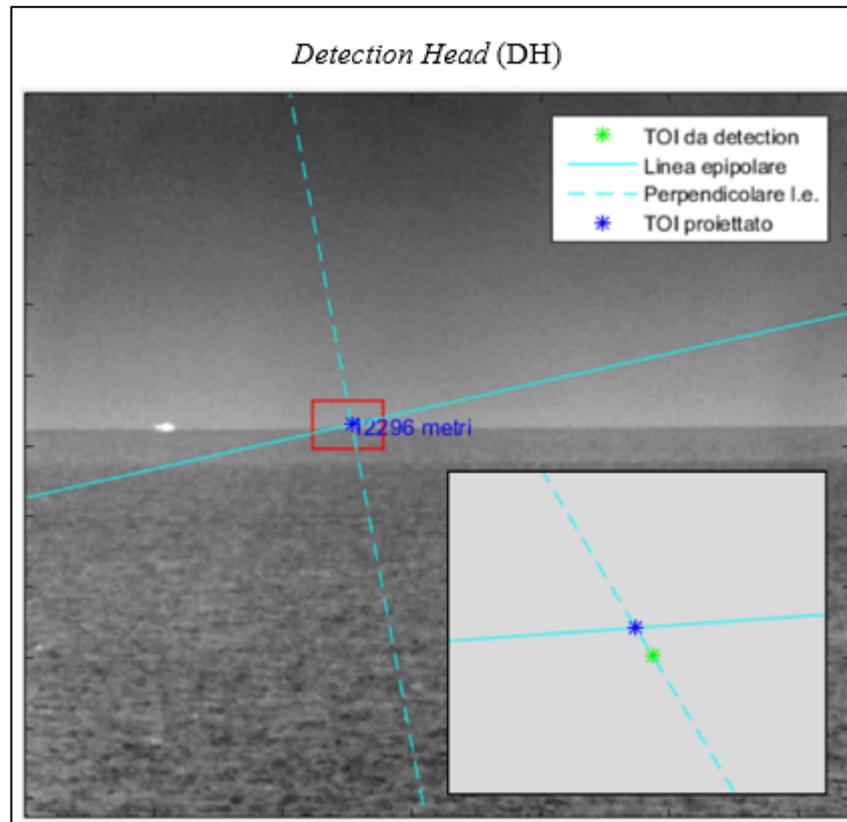


Figura 7.10 Proiezione del baricentro rivelato sulla linea epipolare e risultato ottenuto mediante la triangolazione

Grazie al sistema di visione costituito da due termocamere la presenza di un punto sui due piani immagine permette, tramite triangolazione, di ottenere la distanza del bersaglio dal sistema stesso. Il punto sulla prima immagine è quello che abbiamo selezionato inizialmente, Figura 6.2, mentre quello sulla seconda, in blu nella Figura 7.10, è quello rivelato mediante l'algoritmo implementato. Come mostra la *zoomed box* in Figura 7.10 il punto finale appartiene alla retta epipolare e questo è coerente alle basi teoriche, descritte nel capitolo 1.3, dove viene descritta la geometria stereoscopica.

La distanza stimata tramite la triangolazione, come vediamo in Figura 7.10, è di 12.296 metri. Durante la campagna di misura è stata valutata la distanza dell'unità navale con altri strumenti a circa 12.220 metri. Prendendo per buona questa misura l'errore sarebbe di 76 metri, che corrisponde ad un errore relativo percentuale di 0.62%. Il risultato conferma la bontà dell'algoritmo implementato.

Si ricordi comunque che i parametri di azimuth ed elevazione relativi erano stati precedentemente ottimizzati con la procedura descritta nel paragrafo 3.2, che impone automaticamente un fattore di correzione delle stime.

Si riporta nella Tabella 7.1 la posizione stimata del *target*, espressa nel sistema di riferimento fisso, a confronto con la posizione reale calcolata con altra strumentazione.

	X	Y	Z
Posizione stimata del <i>target</i> [metri]	11035	-79	-5423
Posizione reale del <i>target</i> [metri]	10967	-79	-5390
Errore [metri]	68	0	34
Errore relativo percentuale	0,62%	0	0,63%

Tabella 7.1 Risultati della posizione stimata a confronto di quella reale

I risultati in Tabella 7.1 evidenziano che l'utilizzo successivo della procedura per ottimizzare i parametri forniti dal sistema e di quella per rivelare il bersaglio di interesse anche nella seconda immagine porta ad importanti risultati. La posizione stimata del bersaglio dalle termocamere infatti si avvicina molto alla realtà.

7.5. Identificazione del baricentro del bersaglio di interesse sulla prima immagine

Nel paragrafo 6 la scelta del bersaglio sulla prima immagine è ottenuta mediante la selezione da parte dell'utente di un punto appartenente al bersaglio. È però difficile, da parte dell'utente, essere in grado di selezionare correttamente il baricentro del bersaglio. Per evitare quindi che la selezione del primo punto sia dipendente dall'utente si richiede, anziché la selezione di un punto, la definizione di un'area intorno al bersaglio di interesse. L'algoritmo di rivelazione, descritto nel paragrafo 4, è in grado di rivelare la presenza di bersagli entro un area di ricerca. Per individuare

automaticamente il baricentro del bersaglio viene quindi applicata la stessa procedura di rivelazione sull'area, definita dall'utente, intorno al bersaglio di interesse sulla prima immagine.

In questo paragrafo si mostra come l'utilizzo del baricentro dell'oggetto di interesse su entrambe le immagini reali, invece che un punto arbitrario sul bersaglio scelto dall'utente, porti ad evidenti miglioramenti nei risultati di stima della distanza e posizione del bersaglio stesso.

L'utilizzo del baricentro del bersaglio nella prima immagine viene utilizzato sia nella prima fase di ottimizzazione dei parametri sia in quella successiva di rivelazione.

La Figura 7.11 riporta sulla sinistra l'immagine fornita dalla telecamera SH, sulla quale l'utente ha selezionato un'area intorno al bersaglio di cui vuole determinare la posizione. Si noti come l'applicazione su questa finestra dell'algorithmo di rivelazione porti all'identificazione del baricentro del bersaglio.

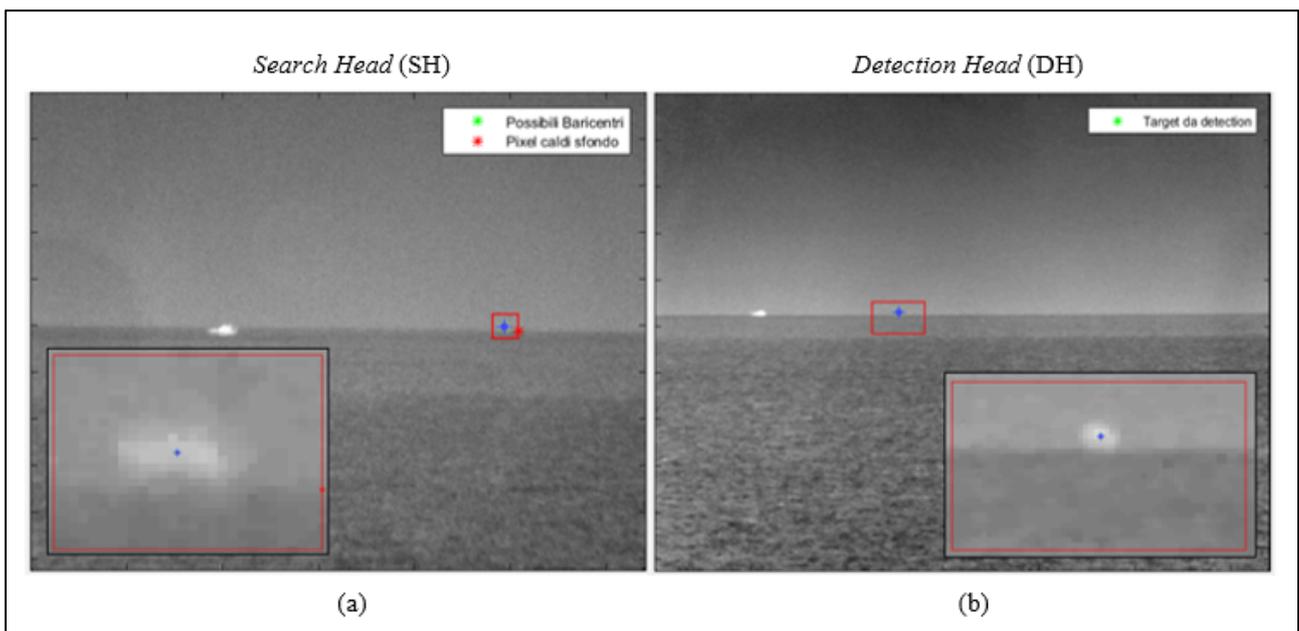


Figura 7.11 Risultati della rivelazione dei baricentri dei bersagli nel riquadro specificato dall'utente nella prima immagine (SH) (a) e nell'area di ricerca individuata dall'algorithmo, sulla base della geometria epipolare, sulla seconda immagine (DH) (b)

Il baricentro del bersaglio individuato sulla SH sarà il punto di partenza per il segmento epipolare e per le successive procedure che permettono di rilevare lo stesso bersaglio anche sulla DH.

Si noti che il rettangolo rosso presente nell'immagine sulla destra della Figura 7.11, DH, corrisponde all'area di ricerca ottenuta come descritto già nel paragrafo 7.2. Anche in questa finestra, mediante il solito algorithmo, viene rivelato il baricentro. Avendo ora la corrispondenza tra i

due baricentri, anziché tra un punto arbitrario sulla prima immagine ed il baricentro sulla seconda, è chiaro come questa porterà a risultati più accurati.

Utilizzando il baricentro sulla prima immagine si mostrano ora i risultati ottenuti nell'ottimizzazione dei parametri di azimuth ed elevazione forniti dal sistema. Seguendo il procedimento del paragrafo 3.2, si riporta in Figura 7.12 l'istogramma ottenuto considerando 200.000 coppie di parametri di elevazione e azimuth.

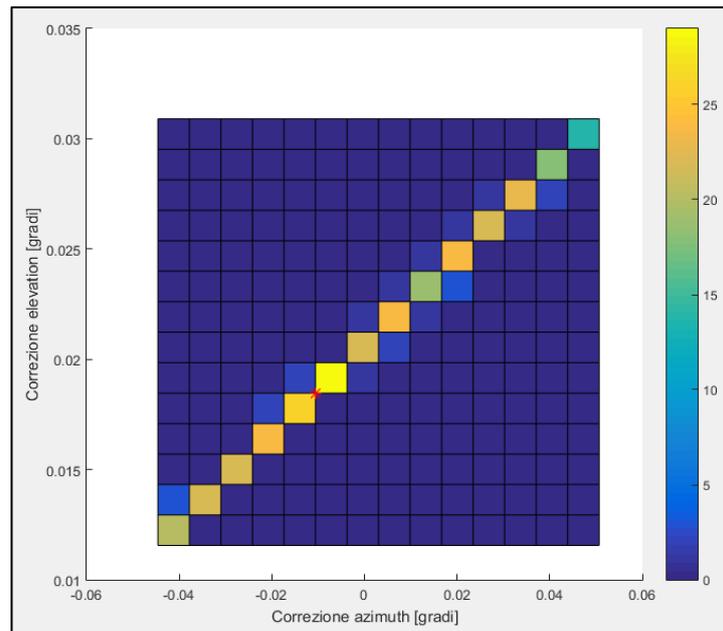


Figura 7.12 Istogramma che riporta il numero di segmenti ottenuti mediante stesse correzioni sui parametri di azimuth ed elevazione

Ricapitolando, rispetto al procedimento delineato nel paragrafo 3.2, sia il punto sulla prima termocamera sia quello sulla seconda vengono determinati tramite l'algoritmo di rivelazione, che fornisce i baricentri, e non tramite la procedura manuale di selezione del bersaglio.

Si giunge quindi a nuovi valori di correzione stimati, mostrati in Tabella 13.2

Correzione azimuth	Correzione elevazione
-0.0106	0.0185

Tabella 7.2 Valori di correzione dei parametri di azimuth e elevazione stimati mediante l'algoritmo di ottimizzazione

Una volta applicate tali correzioni, si ripete il procedimento per determinare la posizione del bersaglio. Anche questa volta si seleziona sulla prima immagine il rettangolo che lo circonda,

così da avviare il procedimento avvalendosi del suo baricentro, come previsto dalla procedura automatica.

Si riporta in Figura 7.13 il risultato ottenuto determinando i baricentri su entrambe le telecamere.

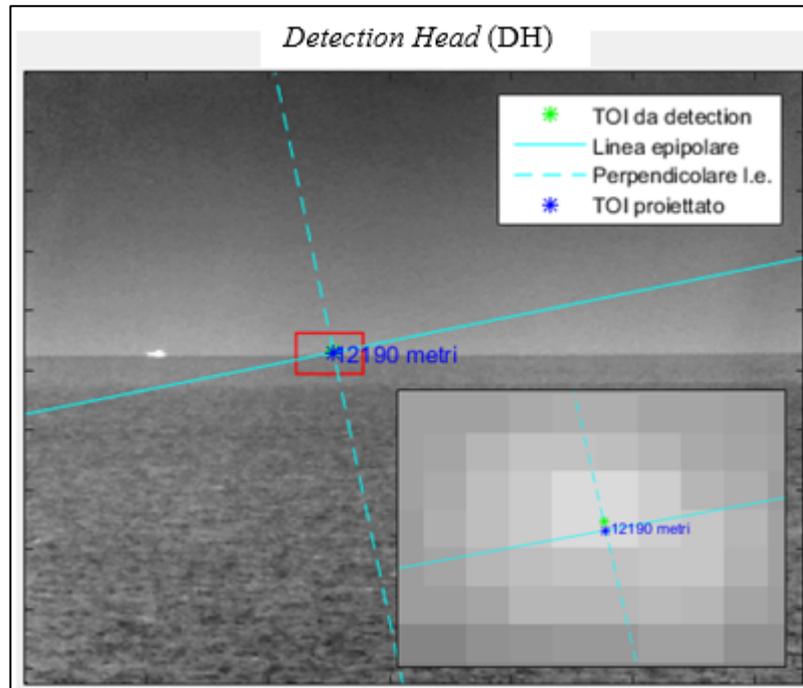


Figura 7.13 Proiezione del baricentro rivelato sulla linea epipolare e risultato ottenuto mediante la triangolazione. Utilizzando come dato di verità quello misurato con gli strumenti ausiliari, che fornisce una distanza termocamera-bersaglio di 12.220 metri, otteniamo i risultati elencati nella Tabella 13.3

	X	Y	Z
Posizione stimata del <i>target</i> [metri]	10940	-79	-5377
Posizione reale del <i>target</i> [metri]	10967	-79	-5390
Errore [metri]	27	0	13
Errore relativo percentuale	0,25%	0%	0,24%

Tabella 7.3 Risultati della posizione stimata a confronto di quella reale

L'errore sulla distanza risulta 27 metri, corrispondente ad un errore relativo percentuale dello 0.25%. Si nota come l'utilizzo del baricentro anche nella prima immagine permetta di avere risultati ancor più vicini alla realtà, evidenziando ancor più la validità di un sistema stereo e dell'algoritmo su questo implementato.

PARTE III: Implementazione del simulatore e valutazione dei risultati

8. Simulatore di bersagli in un sistema stereoscopico

8.1. Scopo dell'attività

Come già accennato, l'uso di un simulatore di bersagli nel nostro sistema risulta un utile strumento di analisi. Permette infatti di conoscere a priori tutte le informazioni sul bersaglio, consentendo una più completa analisi dei risultati. Consente inoltre di lavorare in assenza di errori sistematici.

In questo capitolo verrà illustrato il procedimento di implementazione del simulatore, volto a posizionare bersagli virtuali su coppie di immagini reali.

Nei capitoli successivi, invece, verranno ricreati vari scenari mediante il simulatore al fine di valutare l'algoritmo di *detection*. La capacità di riprodurre una molteplice varietà di situazioni realistiche permette infatti di verificare la validità dell'algoritmo nel caso in cui sia necessario scegliere tra più bersagli presenti nella finestra di ricerca, oppure nel caso in cui il bersaglio di interesse abbia un basso rapporto segnale rumore.

Inoltre, creando le immagini secondo la geometria corretta e, modificando successivamente i parametri del sistema, come valore di azimut o di elevazione relativo tra le telecamere, è possibile simulare l'errore sistematico e, successivamente, analizzare la degradazione della performance sul risultato finale, grazie al fatto che l'errore sistematico simulato è ora noto.

8.2. Parametri di ingresso

Prima di illustrare il procedimento seguito per simulare dei bersagli su immagini reali, esaminiamo quali sono i parametri di ingresso necessari per una corretta ed esaustiva simulazione. In questo paragrafo accenneremo solamente a tali parametri, in modo da poter delineare quelle che sono le caratteristiche generali del simulatore. Lasciemo i dettagli ai paragrafi successivi.

PARAMETRO	VALORE	UNITA' DI MISURA
Distanza	15.000	Metri
Finestra	20	Pixel
SNRdb	15	Decibel
Rotta	80	Gradi
Tempo	19.98	Secondi
Dim. motoscafo	10	Metri
Velocita motoscafo	40	Nodi
Ap. alare aereo	11	Metri
Velocita aereo	550	Metri / Secondo
Tipologia bersaglio	0	-
Rappresentazione	1	-
Posizione	0	-
Eventuale altezza	10	Metri

Tabella 8.1 Parametri di inupt del simulatore

Nella Tabella 8.1 abbiamo l'elenco dei parametri di ingresso al simulatore, con i valori associati di esempio. La struttura riportata è la stessa del file di input effettivamente utilizzato.

Il primo parametro specificato è la distanza. Essa esprime, appunto, la distanza alla quale vogliamo simulare il nostro bersaglio, in riferimento all'origine del sistema di riferimento sulla prima termocamera, che, nelle nostre misure, coincide anche con l'origine del sistema di riferimento fisso.

Il secondo parametro è la dimensione della finestra quadrata di stima dei parametri statistici dell'immagine, utile per simulare un bersaglio coerente con le specifiche desiderate e, contemporaneamente, con l'immagine reale. Questa viene espressa in pixel, mediante il valore del suo lato. Vedremo nel paragrafo 8.4.1 come questa dimensione può cambiare a seconda di dove vogliamo simulare il nostro *target*.

Il rapporto segnale rumore è invece espresso in decibel e fornisce una misura dell'intensità dei pixel del bersaglio, rispetto a quella dei pixel di sfondo.

I parametri di "rotta" e "tempo" vengono utilizzati solamente nel caso in cui vogliamo simulare uno spostamento del bersaglio (si veda il Capitolo 9). Questi forniscono, rispettivamente, l'angolo di

rotta in gradi del bersaglio rispetto al Nord e la durata dello spostamento compiuto da esso lungo tale rotta.

Il simulatore permette di visualizzare diversi tipi di bersagli. Attraverso il parametro “Rappresentazione” viene determinato quale tipo di bersaglio rappresentare (bersaglio circolare, valore 0, o bersaglio di una forma presente nel database, valore 1). A seconda se vogliamo simulare un bersaglio navale oppure aereo si inserisce nel parametro “Tipologia bersaglio” rispettivamente il valore 0 e 1. Nel primo caso è necessario esplicitare la grandezza dell’unità navale da simulare in termini di lunghezza prora-poppa (l’altra dimensione è calcolata in proporzione al riferimento presente nel database) e la velocità dello spostamento espressa in nodi, rispettivamente mediante i parametri “Dim. motoscafo” e “Velocità motoscafo”. Volendo invece simulare un aereo si definiscono tramite i parametri “Ap. Alare aereo” e “velocità aereo” l’apertura alare in metri e la velocità in metri al secondo.

Con il parametro “Posizione” scegliamo invece se rappresentare il bersaglio sulla linea dell’orizzonte, valore 0, a una certa quota sopra esso, dichiarata nel parametro successivo ed espressa in metri, valore 1, oppure in una posizione scelta arbitrariamente dall’utente sull’immagine stessa, valore 2.

8.3. Rapporto segnale rumore

Come visto nel paragrafo precedente l’intensità del *target* viene definita attraverso il rapporto segnale rumore. Vediamo come è possibile ricavarla data quest’ultima grandezza.

Il rapporto segnale rumore (*Signal to Noise Ratio* - SNR) corrisponde al rapporto tra la potenza del segnale e la varianza dello sfondo:

$$SNR = \frac{(\mu_b - \mu_s)^2}{\sigma_s^2} \quad (8.1)$$

dove μ_b, μ_s e σ_s sono rispettivamente il valor medio del bersaglio, il valor medio dello sfondo e la deviazione standard dello sfondo.

Esprimendo il rapporto in decibel avremo

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{\mu_b - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 = 20 \cdot \log \left(\frac{\mu_b - \mu_s}{\sigma_s} \right) \quad (8.2)$$

Poiché siamo interessati al valor medio del bersaglio, che nel nostro caso consideriamo come il valore di intensità del bersaglio stesso, basta invertire l'equazione (8.2) per ottenere:

$$\mu_b = \sigma_s \cdot 10^{\left(\frac{SNR_{dB}}{20}\right)} + \mu_s \quad (8.3)$$

8.4. Inserimento del bersaglio nelle due immagini

Il diagramma a blocchi in Figura 9.2, riporta il procedimento seguito per simulare un bersaglio in entrambe le immagini, secondo le specifiche scelte.

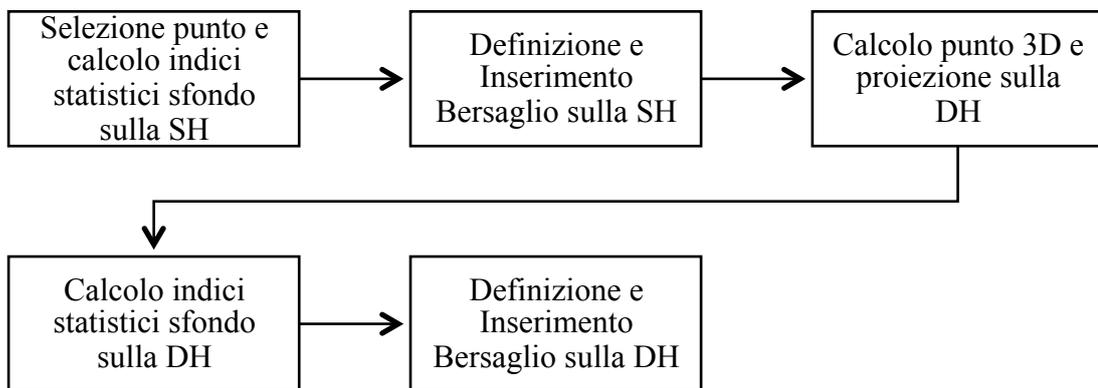


Figura 8.1 Diagramma a blocchi che descrive l'inserimento di un bersaglio simulato su due immagini reali acquisite da un sistema stereo

8.4.1. Selezione del punto di posizionamento e calcolo degli indici statistici dello sfondo sulla SH

Una volta immesse le specifiche del bersaglio, definite nel paragrafo 8.2, l'utente seleziona manualmente, sull'immagine della prima termocamera, la posizione in cui inserire il bersaglio simulato. Come vedremo, questa scelta condiziona la dimensione e la posizione della finestra quadrata di stima dalla quale ricaveremo valor medio μ_s e deviazione standard σ_s dello sfondo. Questi due parametri sono necessari, come vediamo in equazione (8.3) per calcolare il valore di intensità medio μ_b del bersaglio. Per una buona stima di queste due statistiche è necessario avere una finestra di stima che limiti un'area omogenea. Faremo quindi in modo, a prescindere della posizione che vogliamo fare assumere al nostro bersaglio, che questa finestra sia posizionata in cielo e non sul mare, dove il forte rumore non permetterebbe una buona stima dei parametri di interesse. La scelta di limitare le dimensioni della finestra di stima mediante il parametro "Finestra" senza invece condurre una stima di μ_s e σ_s su tutta la regione di cielo presente nelle immagini è dovuto al fatto che spesso l'intensità del cielo subisce una variazione allontanandosi dalla linea dell'orizzonte. La regione di cielo vicina all'orizzonte, ad esempio, potrebbe risentire del calore del

mare, mostrandosi, rispetto alle regioni più lontane, con un'intensità maggiore. Limitando la dimensione della finestra di stima si focalizza l'attenzione sulla regione di cielo dove vogliamo porre il bersaglio all'orizzonte o comunque su un valore specifico di intensità media μ_s rispetto al quale vogliamo definire l'intensità del bersaglio da simulare.

Prendendo come esempio il valore associato al parametro "Finestra" in Tabella 8.1, dove la finestra scelta è di 20 pixel per 20 pixel, la stima delle due misure di interesse μ_s e σ_s sarà calcolata sui pixel presenti in una finestra di quelle dimensioni intorno al punto selezionato nella prima immagine.

Volendo evitare la stima su pixel di mare, prima di procedere con la simulazione del bersaglio, si stima la linea dell'orizzonte, con il procedimento descritto nel Capitolo 4.2.

Una volta selezionato il punto quindi, se questo si trova molto sopra l'orizzonte e non comprende dunque alcun pixel di mare, l'area usata per la stima è una finestra delle dimensioni specificate centrata nel punto stesso. Se il punto è invece in prossimità dell'orizzonte, la finestra viene inoltre limitata inferiormente per non includere pixel di mare. Infine, se invece, il bersaglio deve essere simulato sul mare, viene richiesta un'area in cielo dove calcolare deviazione standard e valor medio, così da essere in grado di avere una stima corretta nella finestra specificata.

Siano x_i gli N pixel nella finestra selezionata. Si riportano per completezza le formule per il calcolo del valor medio e della deviazione standard.

$$\mu_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (8.4)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_s)^2} \quad (8.5)$$

Noti gli indici statistici dello sfondo, tramite l'equazione (8.3), siamo in grado di ricavare il valore di picco che assumerà la risposta del nostro *target*.

In Figura 9.3, si riportano alcuni esempi di funzionamento della procedura. In giallo sono state evidenziate le aree scelte per il calcolo degli indici statistici. Vediamo come, in base alla posizione del punto selezionato, la posizione e la dimensione della finestra varia, in accordo a quanto detto precedentemente.

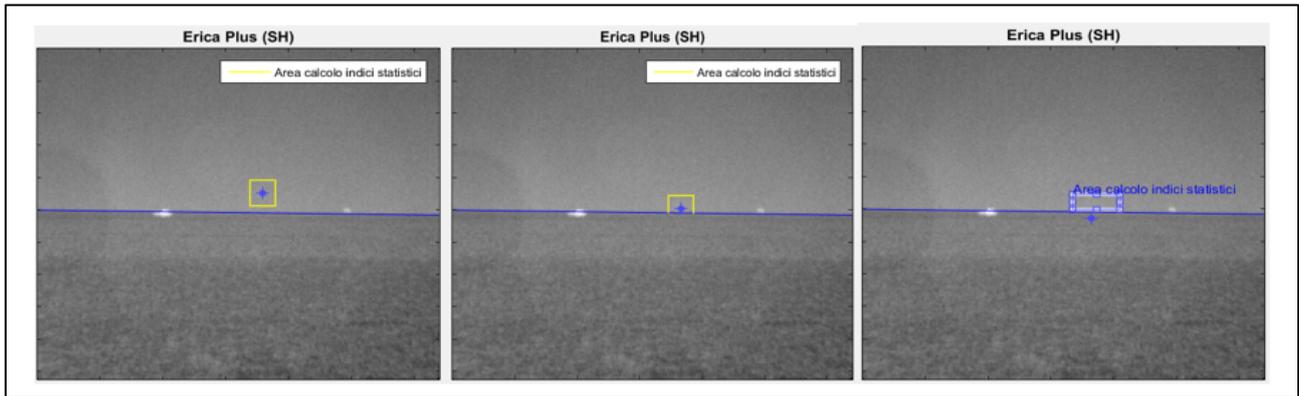


Figura 8.2 Definizione della finestra per il calcolo degli indici statistici sulla base della posizione del punto selezionato dall'utente, in corrispondenza del quale si vuole simulare un bersaglio

8.4.2. Definizione e inserimento del bersaglio sulla SH

8.4.2.1. Risposta impulsiva del sistema

Per inserire il bersaglio nella prima immagine è necessario introdurre la risposta impulsiva del nostro sistema ottico, descritta dalla *Point Spread Function* (PSF). Questo passaggio si rende necessario per dare al bersaglio un aspetto “realistico”. Infatti, da un punto di vista fisico, la PSF descrive come il sistema ottico risponde ad un impulso (nel caso specifico a un punto luminoso), dando luogo al tipico effetto di diffusione presente in ogni immagine al limite della sua risoluzione. Poiché, nel nostro caso, vogliamo inserire un bersaglio non reale in uno scenario reale, una volta scelto tale bersaglio, questo dovrà essere processato nello stesso modo in cui il sistema ottico processa la scena acquisita, meccanismo definito, appunto, dalla PSF

Da un punto di vista matematico, processare il bersaglio con la PSF del sistema corrisponde a operare una convoluzione. Definendo con $I(x, y)$ e $O(x, y)$ rispettivamente, l'intensità luminosa nell'immagine e nello spazio oggetto, per un generico punto (x_0, y_0) avremo:

$$I(x_0, y_0) = \iint O(x, y) \cdot PSF(x_0 - x, y_0 - y) dx dy \quad (8.6)$$

Per rappresentare la PSF viene scelto un modello gaussiano bidimensionale. Per esprimere il potere risolutivo, cioè la capacità di mostrare separati due dettagli posti l'uno vicino all'altro, ci basiamo invece sul criterio di Abbe. In accordo a questo criterio la risoluzione spaziale, Δr , corrisponde alla larghezza a metà ampiezza del lobo principale ed è definita da

$$\Delta r = \lambda \cdot \frac{f}{D} = \lambda \cdot f_{\#} \quad (8.7)$$

dove λ , f e D sono rispettivamente la lunghezza d'onda di lavoro, la lunghezza focale e la dimensione dell'apertura dell'obiettivo delle termocamere e $f_{\#}$ è il rapporto di queste ultime due grandezze.

I parametri che compongono l'equazione (8.7) sono tutti noti, dunque possiamo facilmente calcolare il valore di Δr . In particolare, sapendo che le termocamere lavorano nel medio infrarosso, dai 3.7 ai 5.0 μm , possiamo approssimare il valore della lunghezza d'onda a 4 μm . L'*f-number* è invece pari a due, come riportato nelle specifiche della termocamera, quindi la risoluzione spaziale del sistema ottico risulta pari a 16 μm .

Come specificato nel Capitolo 5, la dimensione del *pitch* è pari proprio a 16 μm . Pertanto, volendo rappresentare la risposta impulsiva in pixel, basterà far sì che in mezzo pixel il lobo principale si dimezzi.

E' possibile ricavare il valore della deviazione standard della gaussiana che rappresenta la PSF risolvendo il problema in una dimensione.

$$PSF_{1D} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (8.8)$$

Volendo che il valore si dimezzi in mezzo pixel e quindi in $x=0.5$ avremo che

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(1/2)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (8.9)$$

Risolvendo l'equazione (8.9) rispetto a σ otteniamo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(1/2)^2}{2 \cdot \ln 2}} = \sqrt{\frac{1}{8 \cdot \ln 2}} = 0.4247 \quad (8.10)$$

Passando alle due dimensioni, la risposta impulsiva del sistema sarà dunque:

$$PSF = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x^2+y^2}{\sigma^2} \right]} \quad (8.11)$$

dove la σ assume il valore riportato in (8.10).

Nell'equazione (8.3) si ricava il valore μ_b corrispondente al valore di intensità che deve avere il nostro bersaglio per essere coerente al rapporto segnale rumore, dato come parametro di ingresso, rispetto all'intensità dello sfondo relativa alla zona dove vogliamo simularlo. Quello che vogliamo ottenere come risposta del sistema ottico al bersaglio è quindi una funzione di valor massimo uno che possiamo successivamente scalare per far sì che il valore massimo corrisponda al μ_b ricavato. Questo semplifica la procedura nel senso che possiamo già da subito considerare la risposta impulsiva del sistema con valor massimo unitario, senza tener conto del valore del modulo che caratterizza una gaussiana, esplicitando solamente l'esponenziale.

$$PSF = e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right]} \quad (8.12)$$

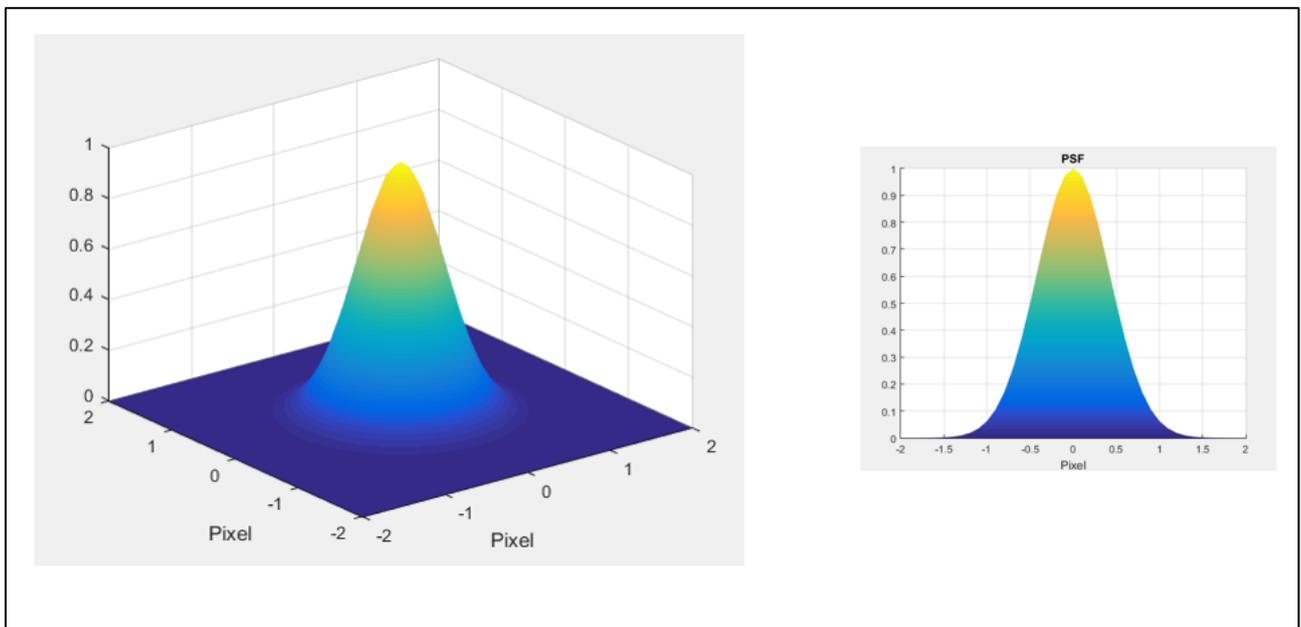


Figura 8.3 Risposta impulsiva del sistema ottico

In Figura 8.3, è mostrata la rappresentazione della risposta del nostro sistema ottico, come calcolata precedentemente.

8.4.2.2. Risposta del bersaglio

Le forme di unità navali ed aeree presenti nel nostro *database* sono caratterizzate da un'intensità uniforme di valore pari ad uno. Come già detto nel paragrafo 8.4.2.1 la risposta del sistema ottico al bersaglio viene scalata per il fattore μ_b solo dopo la convoluzione riportata in equazione (8.6), la quale fornisce, viste le premesse sulla risposta impulsiva e le caratteristiche delle forme del *database*, una funzione dal valore massimo unitario.

Per evitare di perdere informazioni, soprattutto quando le dimensioni del *target* in termini di pixel sono ridotte, sia la risposta impulsiva che quella del *target* vengono sovracampionate. In particolare ogni pixel viene rappresentato con 10 campioni.

Per determinare la grandezza in pixel che il bersaglio assumerà sull'immagine facciamo riferimento alla Tabella 5.1 e utilizziamo l'approssimazione utilizzata per la lunghezza focale, sempre in pixel, ricavata nell'equazione (1.6).

Tramite semplici proporzioni, è possibile ricavare il numero di pixel con il quale deve essere visualizzato il bersaglio da simulare nell'immagine:

$$N_{pixel} = \left[f_{pixel} \cdot \frac{Dim}{d} \right] \quad (8.13)$$

dove *Dim* e *d* sono rispettivamente la dimensione dell'oggetto da simulare e la distanza alla quale vogliamo porlo nello spazio.

Supponendo di voler simulare un bersaglio di 10 metri a 15 chilometri di distanza, secondo l'equazione (8.13), il numero di pixel sul quale bisogna rappresentare il bersaglio sarà 20. Nella Figura 8.4 si riportano due tipologie di *target* che il simulatore è in grado di riprodurre, sulla base della scelta fatta dall'operatore di voler simulare un bersaglio navale o aereo.

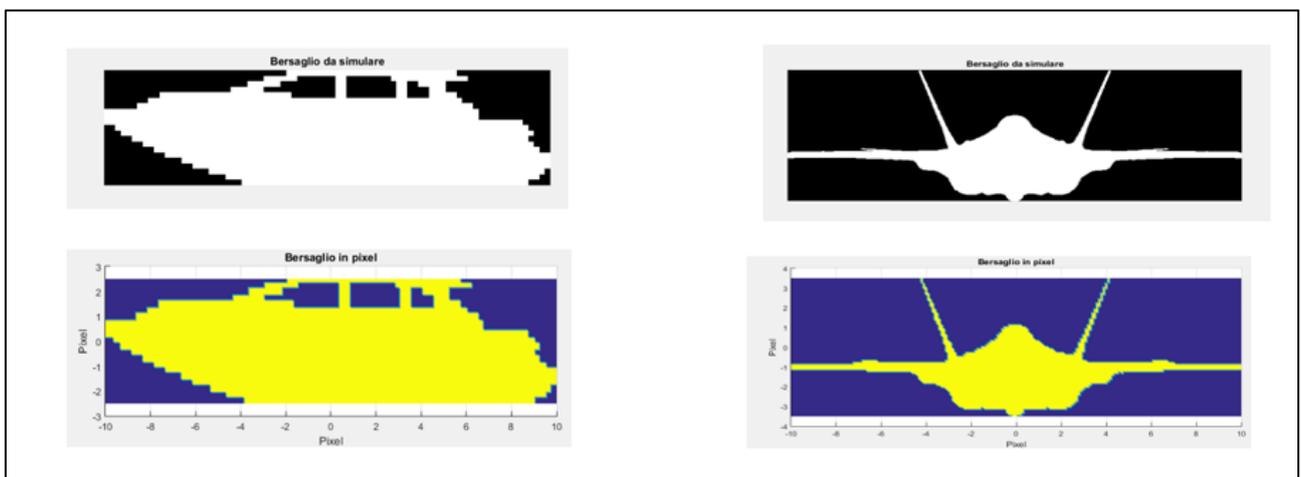


Figura 8.4 Tipologie di bersagli che il simulatore è in grado di riprodurre su immagini reali a infrarosso

Nel caso in cui si scelga di rappresentare un *target* circolare, il bersaglio simulato apparirà come in Figura 8.5.

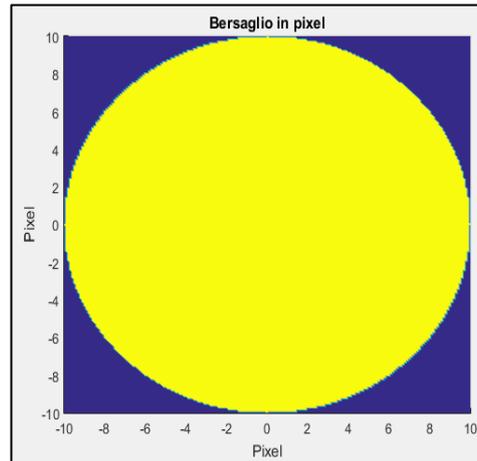


Figura 8.5 Bersaglio circolare che il simulatore è in grado di riprodurre su immagini reali a infrarosso

8.4.2.3. Effetto della risposta impulsiva del sistema sull'immagine simulata

Per tener conto dell'effetto del sistema sull'immagine da simulare, viene applicata l'equazione (8.6). Ciò si traduce in una convoluzione tra la risposta del sistema e l'immagine del *target*.

La Figura 8.6 mostra il risultato di questa convoluzione nel caso in cui si voglia simulare un bersaglio navale.

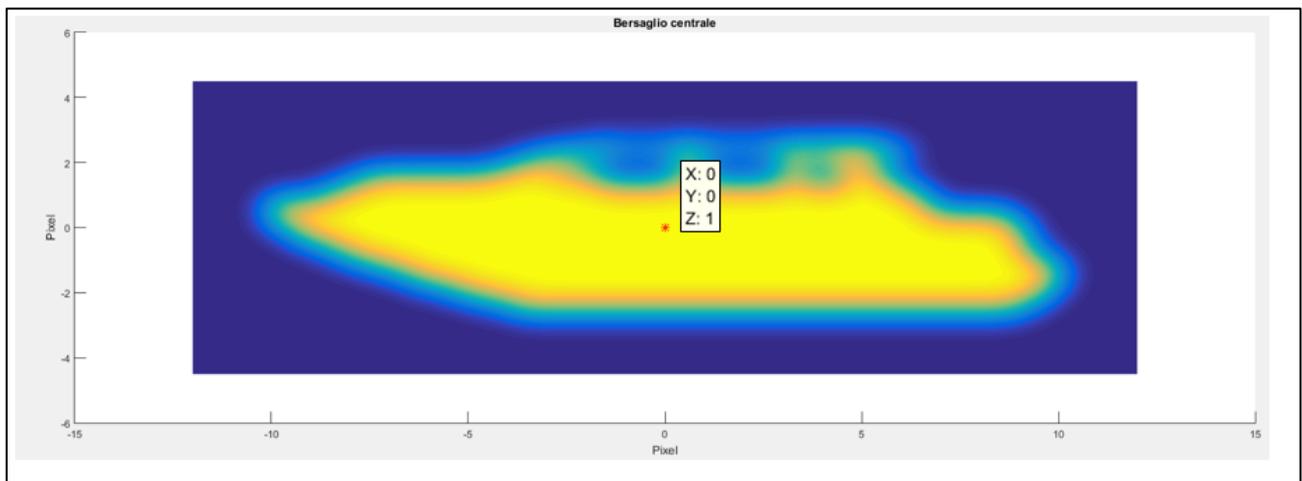


Figura 8.6 Risultato della convoluzione tra la risposta del sistema e l'immagine del bersaglio

Come possiamo vedere la figura subisce l'effetto della convoluzione mostrando una sfocatura ai bordi. Il numero totale di pixel appartenenti al bersaglio diventa dunque:

$$\begin{cases} row_I = row_O + row_{PSF} - 1 \\ col_I = col_O + col_{PSF} - 1 \end{cases} \quad (8.14)$$

Come detto in precedenza, per evitare la perdita dei dettagli, sia la risposta impulsiva che l'immagine del bersaglio vengono sovracampionate di un fattore 10. Questo sovracampionamento permette anche di conferire al bersaglio, nel caso in cui la simulazione preveda uno spostamento dello stesso, una continuità nel movimento. Per capire il perché di questa affermazione bisogna anticipare che nel paragrafo 8.4.2.4 il bersaglio viene inserita nell'immagine reale sostituendo l'immagine del bersaglio, opportunamente scalata, ai pixel dell'immagine stessa, centrando l'immagine sul punto selezionato. Nel caso in esempio di Figura 8.6 il centro del bersaglio, evidenziato con l'asterisco rosso, cade nel centro dell'immagine. Riportando la stessa sull'immagine reale è chiaro che anche in questo caso il centro del bersaglio andrebbe a coincidere con il centro del pixel selezionato. Questo causerebbe, nel caso di simulazione di un bersaglio in movimento, uno spostamento a scatti del bersaglio, dovuto al fatto che il centro del bersaglio coincide ogniqualvolta con il centro pixel. Si vorrebbe invece ottenere un bersaglio il cui centro si muova anche internamente al pixel così che, nel passaggio da un pixel a quello adiacente, si conferirebbe al bersaglio simulato un'impressione di movimento continuo.

Non volendo agire sull'immagine reale si agisce sulla maschera in Figura 8.6. In base alla posizione del punto selezionato sull'immagine reale all'interno del pixel si sposta di conseguenza il bersaglio sulla maschera. Questo è possibile grazie al sovracampionamento e mediante l'esempio che riportiamo di seguito sarà chiaro come.

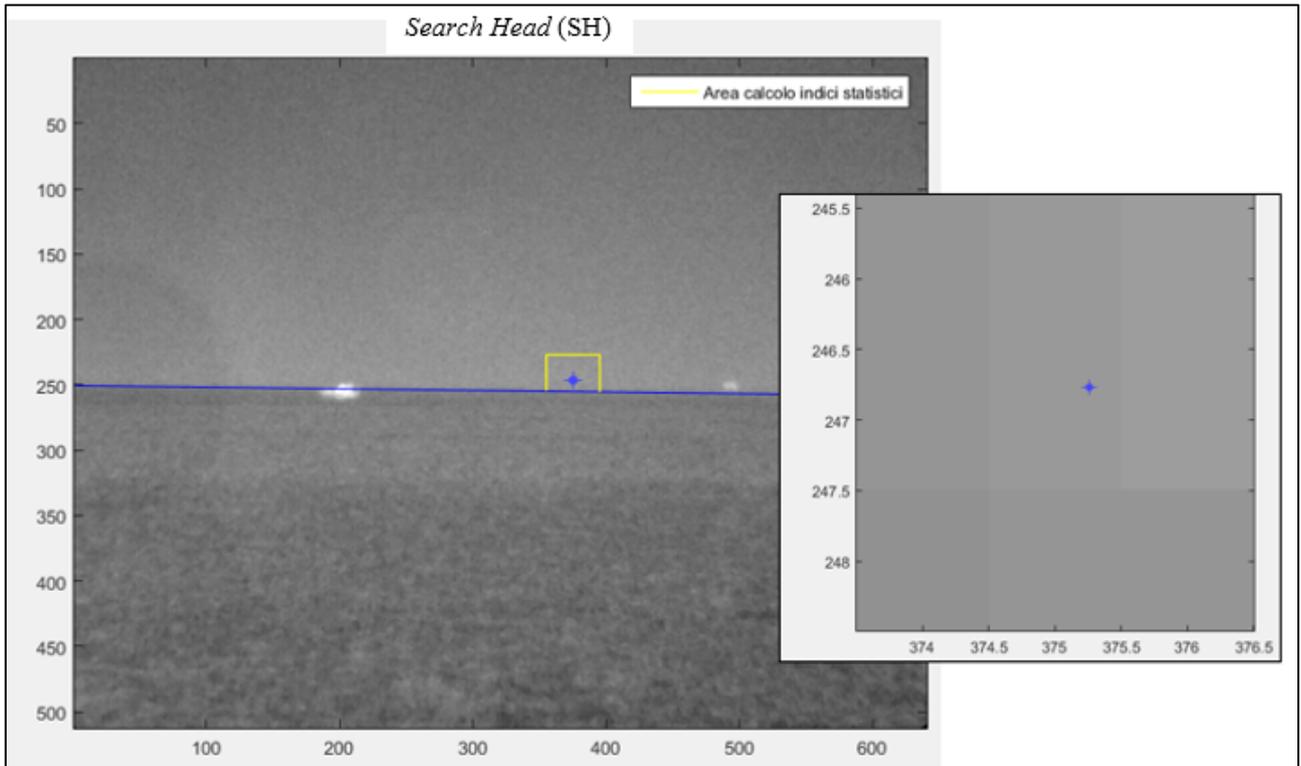


Figura 8.7 *Zoomed box* che mostra la posizione del punto selezionato dall'utente sulla prima immagine (SH) all'interno del pixel

La Figura 8.7 mostra la selezione del punto sulla prima immagine dove si vuole simulare il bersaglio, passo precedente all'inserimento del bersaglio nelle immagini reali, come riportato nel diagramma a blocchi di Figura 8.1. Nella *zoomed box* vediamo come, rispetto al centro pixel, questo punto sia spostato in alto a destra. Lo stesso spostamento deve essere applicato alla maschera che andremo successivamente a sostituire nell'immagine reale. Come mostrano gli esempi il punto selezionato sull'immagine reale, nel quale dovrà ricadere il centro del bersaglio, è

$$\begin{cases} x = 375.2594 \approx 375.3 \\ y = 246.7690 \approx 246.8 \end{cases} \quad (8.15)$$

Il centro del bersaglio sulla maschera deve quindi spostarsi di

$$\begin{cases} \Delta x = x - 375 \approx 0.3 \\ \Delta y = y - 247 \approx 0.2 \end{cases} \quad (8.16)$$

Si noti come si è scelta un'approssimazione al primo decimale in quanto, con un sovracampionamento di rapporto 1 a 10, siamo in grado di rappresentare fino ad un decimo di pixel. Si mostra in Figura 8.8 la maschera di Figura 8.6 traslata sulle ordinate e sulle ascisse dei valori riportati nel sistema (8.16). Si noti come il nuovo centro è stato spostato, coerentemente alla

posizione nel pixel del punto selezionato sull'immagine reale, in alto a destra. I risultati riportati nel sistema (8.16) sono coerenti con il centro della Figura 8.8 dove il segno sull'ordinata è correttamente opposto per rispettare la posizione inversa dell'asse sul grafico e quello del piano matlab, in Figura 6.4.

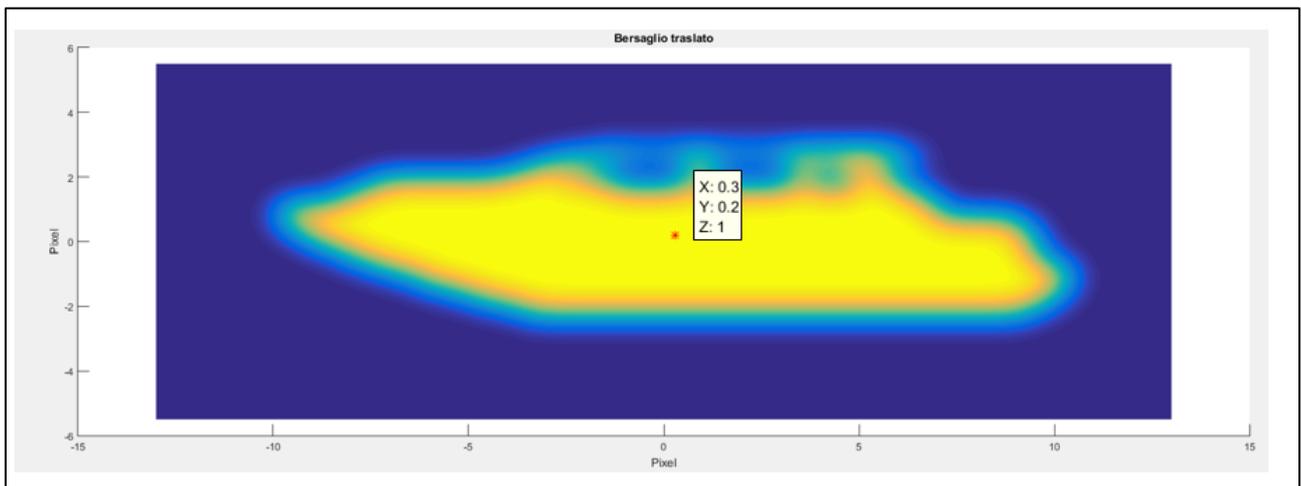


Figura 8.8 Risultato della convoluzione tra la risposta del sistema e l'immagine del bersaglio decentrata in base alla posizione del punto selezionato dall'utente sulla prima immagine (SH) all'interno del pixel

L'ultimo passo è quello di sotto campionare la maschera in Figura 8.8 così da riportarsi ad una matrice di pixel che può essere inserita facilmente nell'immagine reale. In Figura 8.9 si riporta il risultato della definizione del bersaglio, in questo caso l'unità navale, che sarà effettivamente il bersaglio da riportare sull'immagine.

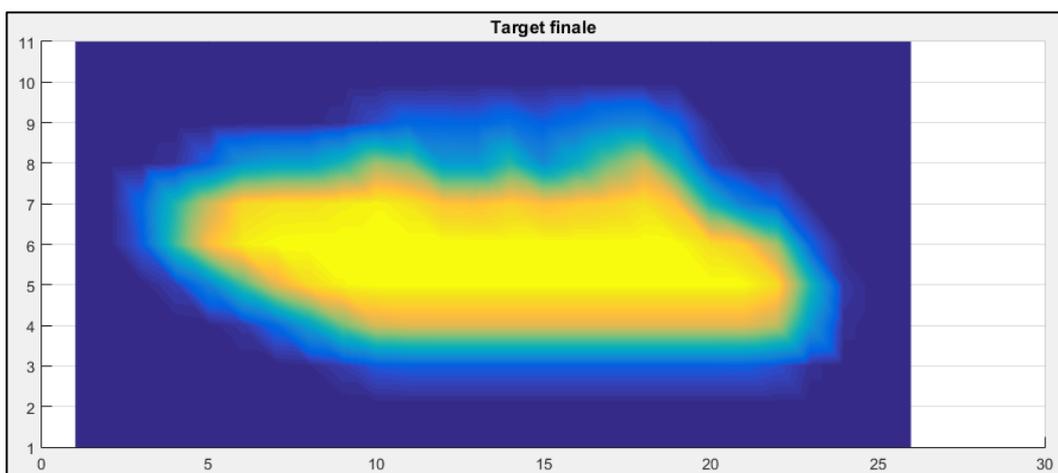


Figura 8.9 Risultato della convoluzione tra la risposta del sistema e l'immagine del bersaglio in pixel

8.4.2.4. Inserimento del *target* nell'immagine reale

La maschera in Figura 8.9, che descrive la risposta del sistema al bersaglio, ha valor massimo unitario. E' quindi necessaria moltiplicarla per l'intensità del bersaglio μ_b ricavata come in equazione (8.3)

Per un'implementazione più vicina alla realtà, al bersaglio ottenuto si somma un rumore gaussiano con una deviazione standard pari a σ_s ovvero quella stimata in precedenza dallo sfondo (paragrafo 8.4.1).

Il valore scelto per il parametro di ingresso "Posizione", come già accennato nel paragrafo 8.2, permette di scegliere la posizione del bersaglio nell'immagine. Se il valore è posto a 0 si rappresenta il bersaglio sulla linea dell'orizzonte, se ad 1 a una certa quota sopra esso e se a 2 nel punto selezionato manualmente dall'utente. Si riporta nella Figura 8.10 il risultato corrispondente ai tre diversi valori del parametro "Posizione": nel caso (a) il valore è stato posto a 0, nel caso (b) ad 1, specificando nel parametro "Eventuale altezza" 10 metri, corrispondente a quanti metri sopra il livello del mare si vuole simulare il bersaglio e nel caso (c) a 2.

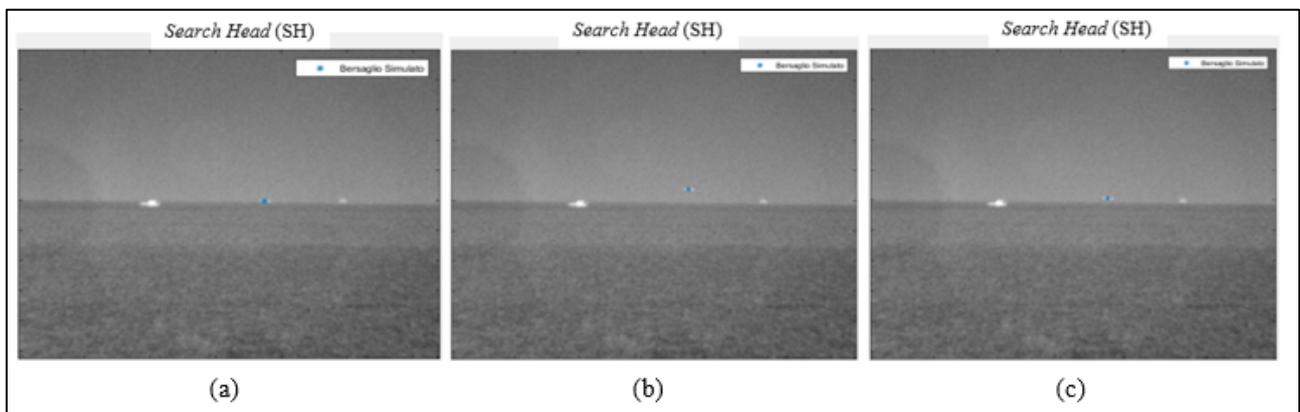


Figura 8.10 Scelta della posizione del bersaglio in base al valore associato al parametro "Posizione": (a) valore 0, (b) valore 1 e (c) valore 2,

La Figura 8.11 mostra un ingrandimento della Figura 8.10 (a). Si noti come il bersaglio simulato, contrassegnato dal punto celeste, risulti molto simile al bersaglio reale presente nell'immagine sulla destra. La figura rappresenta una prova della bontà dell'algorithm di simulazione.

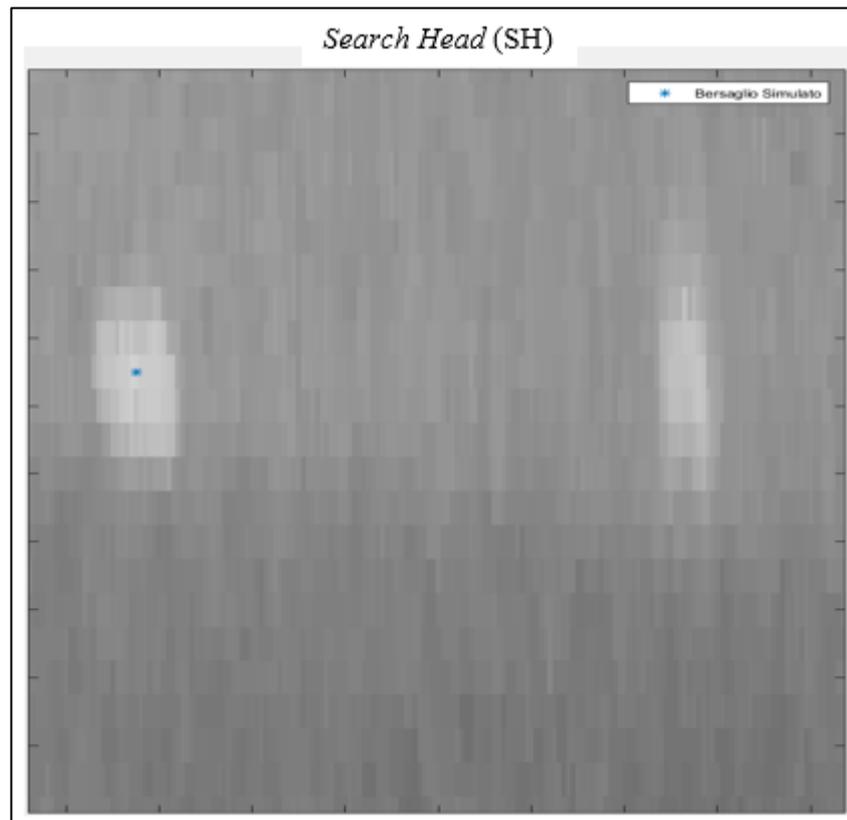


Figura 8.11 Visualizzazione ingrandita di un bersaglio simulato (contrassegnato dal punto celeste) e di uno reale

8.4.3. Calcolo del punto tridimensionale e proiezione sulla DH

Per poter simulare il bersaglio anche sull'immagine fornita dalla seconda termocamera è necessario prima calcolare le coordinate del punto nello spazio tridimensionale alla distanza scelta come input.

Il procedimento da seguire per ottenere il punto (x_2, y_2) sul piano immagine della seconda telecamera è identico a quello seguito nel paragrafo 2.1 con la differenza che la distanza fissata non è quella minima ma quella scelta come parametro di ingresso.

8.4.4. Calcolo degli indici statistici dello sfondo sulla DH

Nota il punto sul piano immagine della seconda telecamera si procede con la stima del valor medio e della deviazione standard dello sfondo con lo stesso procedimento descritto nel paragrafo 8.4.1.

8.4.5. Definizione e Inserimento Bersaglio sulla DH

Noti gli indici statistici anche della seconda immagine, il passo successivo consiste nella definizione e nell'inserimento del bersaglio anche in questa, secondo il procedimento già descritto nel paragrafo 8.4.2.

In Figura 8.12 e Figura 8.13 si riportano i risultati della simulazione di un bersaglio navale e di uno aereo rispettivamente.

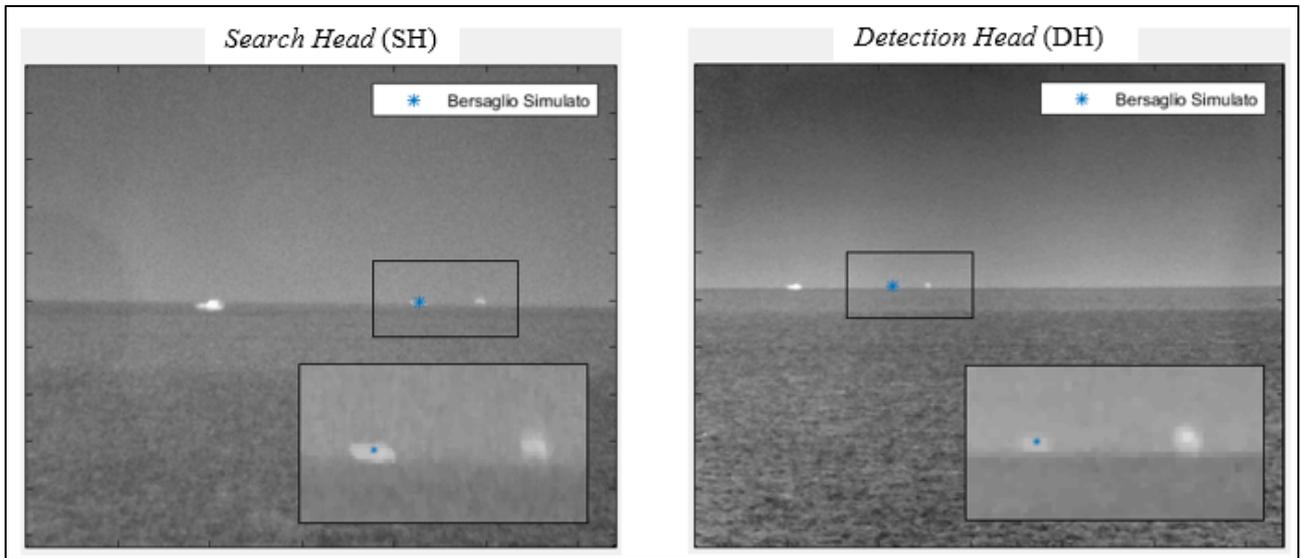


Figura 8.12 Inserimento di un bersaglio navale simulato sulla coppia di immagine reali fornite dal sistema stereo

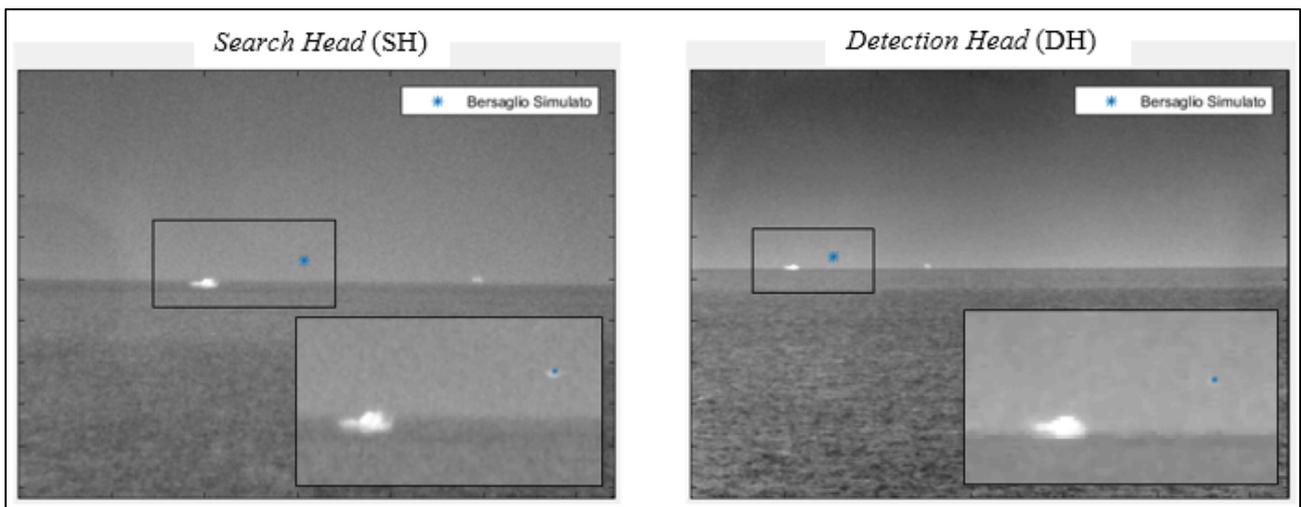


Figura 8.13 Inserimento di un bersaglio aereo simulato sulla coppia di immagine reali fornite dal sistema stereo

9. Estensione del simulatore a bersagli in movimento

9.1. Scopo dell'attività

Sulla base di quanto visto nel capitolo precedente si può pensare di ampliare le capacità del simulatore per creare un set di immagini sequenziali che rappresentano un bersaglio in movimento.

In altre parole, partendo da un insieme di immagini reali prese ad istanti successivi, vogliamo simulare bersagli in movimento. L'idea è quella di simulare il movimento dei punti in coordinate tridimensionali del bersaglio, seguendo una determinata rotta definita dall'utente, e, tramite i metodi di proiezione visti nei paragrafi precedenti, proiettare questo spostamento nella coppia stereoscopica di immagini.

Si esamina successivamente la possibilità, attraverso il sistema stereo, di stimare la rotta e la velocità del bersaglio simulato. Sarà possibile testare la validità della procedura in quanto le due grandezze sono state scelte dall'utente e quindi note a priori.

Tramite il simulatore di bersagli in movimento sono stati creati anche video in cui i bersagli utilizzano delle contromisure alla rivelazione e al tracking.

L'alto grado di verosimiglianza dei video simulati li rende particolarmente adatti per il test di algoritmi di tracking.

9.2. Introduzione di un sistema di riferimento *ad hoc* per la simulazione del movimento del bersaglio

Per descrivere il movimento del bersaglio si parte dal punto nello spazio tridimensionale $\mathbf{X}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$, ottenuto come nel paragrafo 8.4.3 fissando la distanza del punto dall'origine del sistema di riferimento sulla prima termocamera.

Nel paragrafo 5.2.2.1 è illustrata la geometria fissa di riferimento. Ricordiamo che questo ha l'origine coincidente con il centro ottico della prima termocamera ed è orientato sul faro della Gorgona.

Si definisce ora un quarto sistema di riferimento che differisce dal precedente per il solo angolo di elevazione. Vogliamo infatti ottenere un'altra terna fissa ma con il piano XZ sul piano orizzontale.

Definiamo quindi la terna (X_o, Y_o, Z_o) che otteniamo, in accordo alle convenzioni espresse nell'Appendice A, ruotando la terna fissa originale intorno all'asse X.

Il valore dell'angolo di *pitch* che porta la terna originale in quella che vogliamo ottenere è pari a 0.3937° (vedi Appendice C) e, in accordo alla Figura 9.1, il segno dell'angolo è positivo.

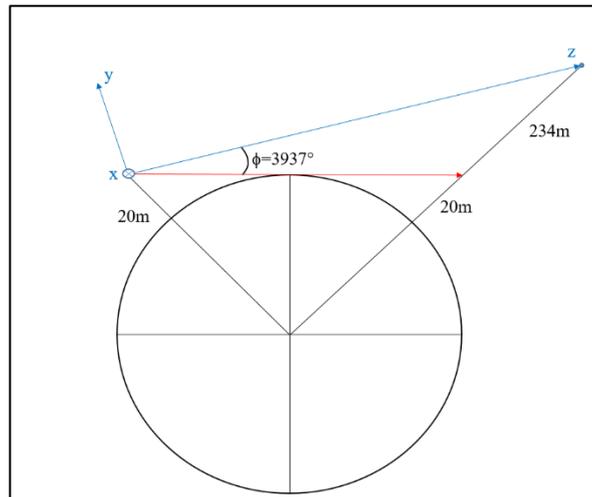


Figura 9.1 Sistema di riferimento fisso con piano XZ inclinato sull'isola di Gorgona (blu) e sistema di riferimento fisso con piano XZ orizzontale

La matrice di rotazione che porta il sistema originale, in Figura 9.1 in blu, su quello orizzontale, in rosso, è data da

$$R_{FO} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

Partendo come detto dal punto tridimensionale \mathbf{X}_1 , definito rispetto al sistema di riferimento sulla prima termocamera, possiamo esprimerlo nel sistema di riferimento fisso originale attraverso l'equazione (1.10), dove l'indice i sarà uno, cioè in riferimento alla prima termocamera.

Una volta specificato il punto 3D nel sistema di riferimento originale, lo proiettiamo sulla terna orizzontale. Poiché le origini dei due sistemi di riferimento sono coincidenti, per mappare il punto tridimensionale sulla terna orizzontale basterà premoltiplicare quello espresso secondo la terna di riferimento originale per la matrice trasposta di R_{FO} :

$$X_o = R_{FO}^T \cdot X \quad (9.2)$$

Per simulare lo spostamento di un bersaglio bisogna definire un piano parallelo alla superficie del mare sul quale fare muovere il punto tridimensionale. In altre parole il punto tridimensionale, per essere coerente al movimento di un bersaglio reale in movimento, dovrebbe muoversi lungo la curvatura terrestre. Per semplificare il procedimento si definisce un terzo sistema di riferimento (X_s, Y_s, Z_s) con il piano (X_s, Z_s) parallelo ad un piano che approssima la curvatura terrestre. In questo modo è possibile approssimare lo spostamento lungo la superficie terrestre perché, volendo spostare un punto tridimensionale espresso in questo sistema, basterà modificare solamente la prima e la terza coordinata lasciando invariata Y_s , ottenendo così un secondo punto sullo stesso (X_s, Z_s) di quello di partenza. In Figura 9.2 si approssima con il segmento s , in verde, la curvatura terrestre. Per quanto detto fino ad ora il nuovo sistema di riferimento dovrà avere il piano (X_s, Z_s) parallelo a questo segmento. Si definisce questo nuovo sistema mantenendo ruotando rispetto all'asse X_s di un angolo β il sistema di riferimento fisso orizzontale, in rosso.

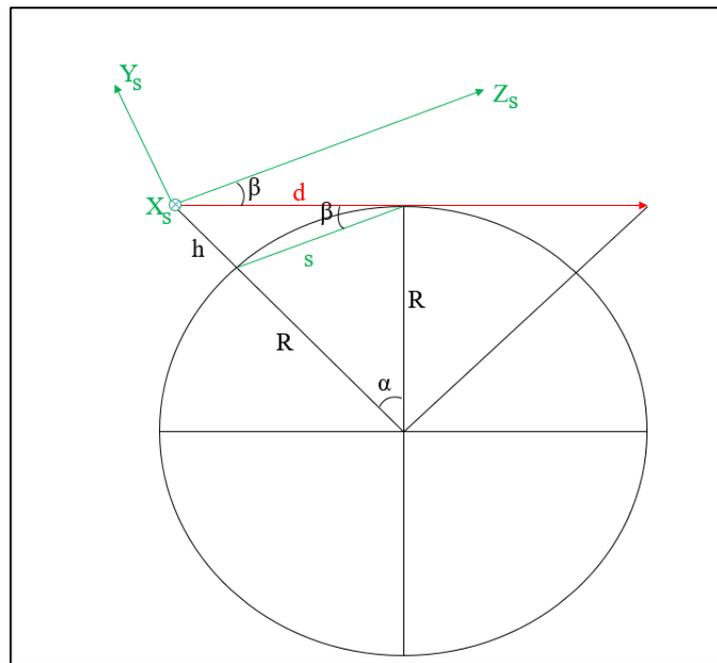


Figura 9.2 Sistema di riferimento fisso con piano (X_s, Z_s) parallelo ad un piano che approssima la curvatura terrestre. Per definire il suddetto sistema basterà quindi determinare l'angolo β che permette, tramite una rotazione, di portare il SdR orizzontale su questo nuovo SdR.

Si mostra ora il procedimento seguito per determinare l'angolo di interesse.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{R}{R+h} \right) = 0.0023 \text{ rad} = 0.1328^\circ \quad (9.3)$$

L'angolo α , visibile in Figura 9.2, si può ricavare conoscendo R , raggio della terra, e h , corrispondente all'altezza del sistema di visione sul livello del mare. Il raggio R , secondo la convenzione di Young che tiene di conto della rifrazione atmosferica è pari a sette sesti del raggio reale della terra (circa 6.378×10^6 metri). L'altezza h invece corrisponde all'altezza del terrazzo dell'Istituto Vallauri sul quale sono state posizionate le termocamere durante la campagna di misura, pari a 20 metri. Il parametro s , che descrive la distanza lungo la superficie della terra verso l'orizzonte si ricava come:

$$s = R \cdot \alpha = 17252 \text{ metri} \quad (9.4)$$

Nota la distanza dell'orizzonte ottico d (si veda Appendice C) siamo in grado di ricavare l'angolo β di intesse che porta la terna orizzontale su quella che vogliamo definire.

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + s^2 - h^2}{2 \cdot d \cdot s} \right) = 0.99626 \text{ mrad} = 0.0571^\circ \quad (9.5)$$

Per definire la matrice di rotazione che porta il nuovo sistema di riferimento sulla terna orizzontale l'angolo β deve avere segno positivo. La matrice di rotazione corrispondente sarà quindi data da

$$R_{SO} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

e sarà possibile definire il punto in queste nuove coordinate tramite la relazione

$$X_S = R_{SO} \cdot X_O = R_{SO} \cdot R_{FO}^T \cdot X = R_{SO} \cdot R_{FO}^T (R_1 \cdot X_1 + \tau_1) \quad (9.7)$$

9.3. Spostamento sul piano che approssima la curvatura terrestre

Partendo dal punto X_1 tridimensionale a distanza nota, espresso nel sistema di riferimento della termocamera EP, tramite l'equazione (9.7) è possibile riportarlo nelle coordinate del piano che approssima la curvatura terrestre, definito nel paragrafo 9.2.

L'idea è quella di far sì che il punto si muova parallelamente al piano (X_s, Z_s) , dove X_s indica l'ovest e Z_s il nord, considerando dunque che questo rappresenti effettivamente il piano del mare.

Andiamo dunque a rappresentare su questo piano la rotta di un bersaglio, sfruttando il sistema di riferimento appena definito, spostandolo in accordo alla velocità specificata nei parametri di

ingresso. Come dato di input viene specificato l'angolo di rotta seguito dalla nostra nave o dal nostro aereo, cioè l'angolo tra il piano verticale contenente la direzione del Nord ed il piano verticale contenente la direzione della rotta dell'unità. La rotta verrà espressa in gradi da 0° a 360° in senso orario.

Specificando in ingresso la velocità v e il tempo t dopo il quale vogliamo riosservare il bersaglio, lo spostamento da simulare sarà pari a

$$s = v \cdot t \quad (9.8)$$

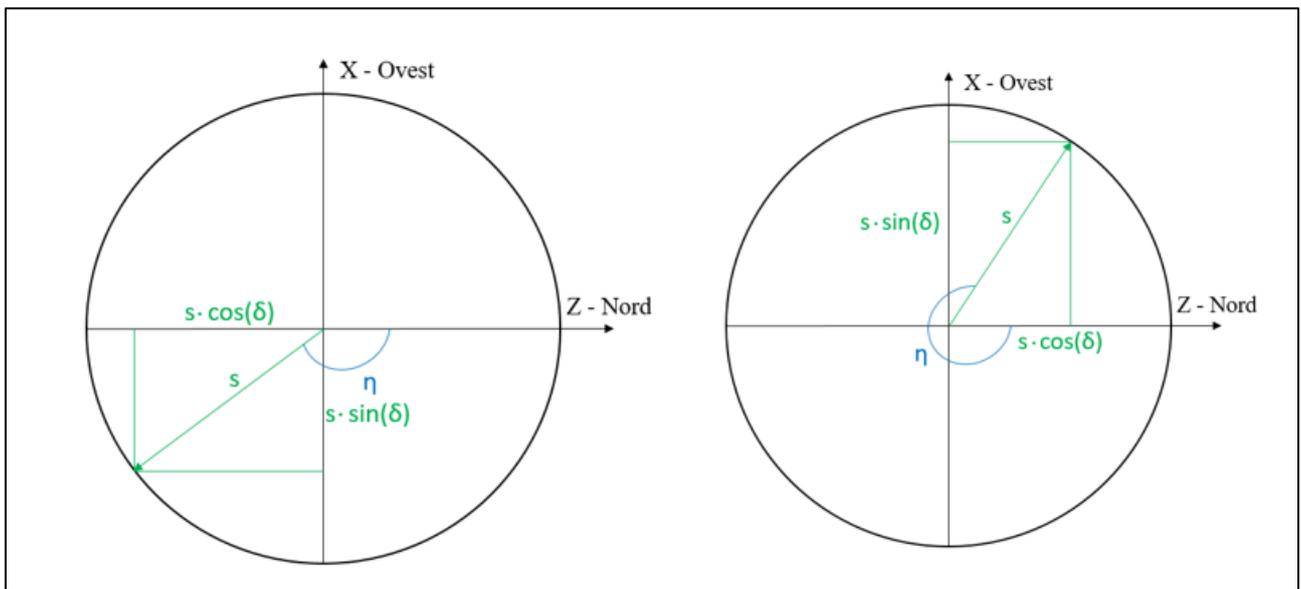


Figura 9.3 Esempi di angoli di rotta rispetto al Nord, indicati con il simbolo η

La Figura 9.3 riporta due esempi di angoli di rotta, identificati con η . Rispetto al nostro sistema di riferimento, partendo dal punto $\mathbf{X}_S = (X_S, Y_S, Z_S)$, il nuovo punto nello spazio tridimensionale si troverà in

$$\mathbf{X}'_S = (X_S - s \cdot \sin(\eta), Y_S, Z_S + s \cdot \cos(\eta)) \quad (9.9)$$

Per mappare \mathbf{X}'_S sui due piani immagine e inserire quindi il bersaglio simulato dopo lo spostamento, è necessario riportare il punto prima nel sistema di riferimento orizzontale, successivamente in quello inclinato sulla Gorgona ed infine in quello relativo alla prima termocamera, come descritto nelle successive equazioni.

$$\mathbf{X}'_O = R_{SO}^T \cdot \mathbf{X}'_S \quad (9.10)$$

$$\mathbf{X}' = R_{FO} \cdot \mathbf{X}'_O \quad (9.11)$$

$$\mathbf{X}'_1 = \mathbf{R}_1^{-1}(\mathbf{X}' - \boldsymbol{\tau}_1) \quad (9.12)$$

Noto il punto tridimensionale nel sistema di riferimento della prima telecamera, è possibile proiettarlo sul piano della stessa attraverso le equazioni (2.1). Per definire il punto anche nel secondo piano immagine si riporta prima il punto tridimensionale nelle coordinate relative al secondo sistema di riferimento attraverso la relazione (5.12), dopodiché si applicano nuovamente le equazioni (2.1). Noti i punti nei due piani immagine si ripete il procedimento descritto nel paragrafo 8.4.2 per inserire i bersagli nelle posizioni specificate.

Si mostra nella Figura 9.4 la simulazione di un bersaglio navale con rotta 70° e velocità pari a 40 nodi, osservato dopo 30 secondi, relativamente alla prima (a) e alla seconda termocamera (b).

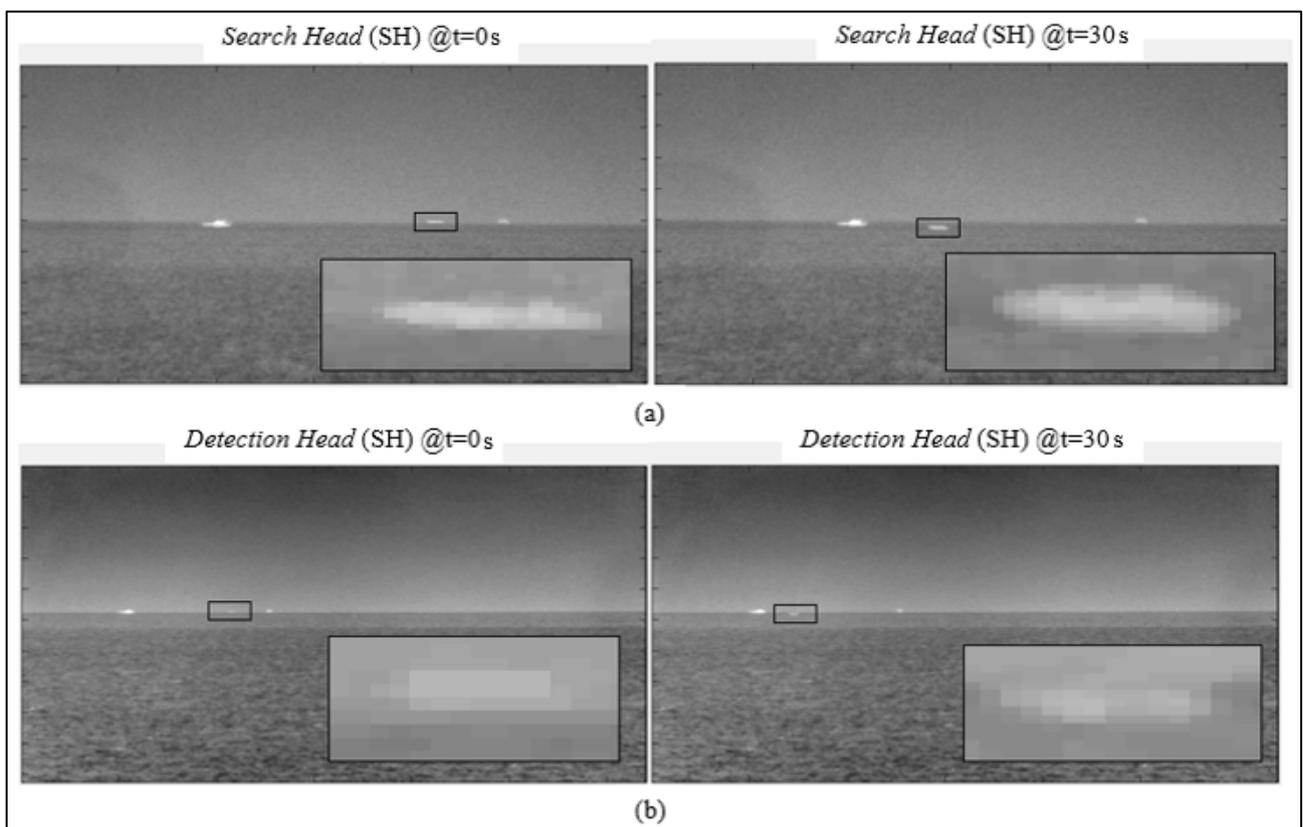


Figura 9.4 Risultato dello spostamento di un bersaglio simulato che segue una rotta di 70° per 30 secondi a 40 nodi

9.4. Stima della rotta e della velocità

Grazie al sistema stereo abbiamo visto come sia possibile determinare il punto nello spazio in tre dimensioni, partendo dalle immagini del bersaglio di interesse acquisite dal sistema stereo. In questo paragrafo mostreremo come sia possibile fare una stima della rotta e della velocità che caratterizzano il bersaglio, partendo da tali considerazioni.

Con riferimento alla Figura 9.3, dove l'origine dei sistemi di riferimento è posizionata sul punto tridimensionale corrispondente alla posizione del bersaglio prima dello spostamento, sarà possibile stimare la rotta ($\bar{\eta}$) nel seguente modo:

$$\bar{\eta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}_s - \bar{X}'_s}{\bar{Z}_s - \bar{Z}'_s} \right) \quad (9.13)$$

Nell'equazione (9.13) entrano in gioco la prima e la terza componente dei punti stimati in tre dimensioni prima e dopo lo spostamento:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{X}}_s = (\bar{X}_s, \bar{Y}_s, \bar{Z}_s) \\ \bar{\mathbf{X}}'_s = (\bar{X}'_s, \bar{Y}'_s, \bar{Z}'_s) \end{cases} \quad (9.14)$$

La stima del punto tridimensionale nel sistema di riferimento rispetto al quale si sposta il bersaglio può essere fatta partendo dal punto nel SdR della prima termocamera, ottenuto con la triangolazione (paragrafo 4.3.4). Si riporta poi, tramite matrici di rotazioni, al sistema di riferimento di interesse.

Il procedimento è uguale a quello seguito per la simulazione del bersaglio, espresso nell'equazione (9.7), con la differenza che il punto di partenza \mathbf{X}_1 è stimato tramite l'algoritmo di *detection* e non è noto a priori.

Per stimare la velocità con la quale si sposta il bersaglio si rapporta invece la differenza di distanza di questo dall'origine della terna fissa prima e dopo lo spostamento, al tempo t noto dopo il quale vogliamo riosservare il bersaglio:

$$\bar{v} = \frac{\left[\sqrt{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2 + \bar{Z}^2} - \sqrt{\bar{X}'^2 + \bar{Y}'^2 + \bar{Z}'^2} \right]}{t} \quad (9.15)$$

dove

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{X}} = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) \\ \bar{\mathbf{X}}' = (\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}') \end{cases} \quad (9.16)$$

sono i punti stimati prima e dopo lo spostamento, espressi nel sistema di riferimento fisso.

9.5. Video simulati di bersagli in movimento

Avendo a disposizione una sequenza di immagini reali, dove la geometria relativa tra le due telecamere rimane la stessa, è possibile creare, utilizzando i procedimenti descritti fino ad ora, dei video in cui appare un bersaglio simulato in movimento.

Nel nostro caso abbiamo a disposizione un set di 1000 immagini ottenute ogni 0,02 secondi. In altre parole abbiamo un *frame rate* di 50 immagini al secondo per un totale di 20 secondi.

Ripetendo il procedimento descritto nel paragrafo 9.3 su ogni singola immagine, viene ricreata una serie di frame consecutivi, nei quali il bersaglio si sposta sulla base delle specifiche in ingresso, che, riprodotto con un opportuno *frame rate*, dà origine ad un video simulato.

9.5.1. Plan Position Indicator

Per conoscere lo spostamento del bersaglio durante il video è stato aggiunto un *Plan Position Indicator* (PPI), un display ben noto nel campo della radaristica. Nel nostro PPI, mostrato in Figura 9.5, il centro corrisponde al centro del sistema di riferimento fisso, rispetto al quale sarà fornita la posizione del bersaglio sotto osservazione. Il movimento del bersaglio simulato è stato tracciato in rosso ed evidenziato nella *zoomed box*. Nel caso specifico il bersaglio parte da 15 chilometri di distanza e si avvicina verso il centro.

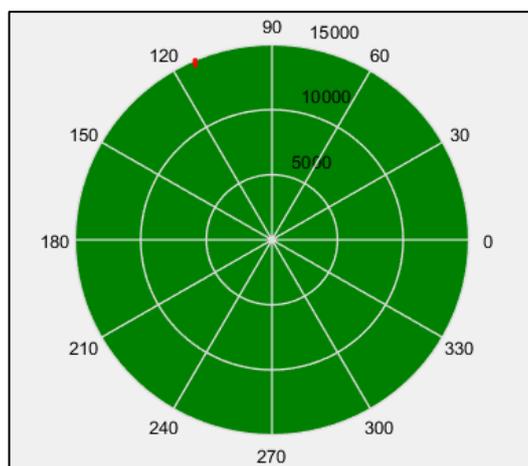


Figura 9.5 Plan Position Indicator (PPI)

Il PPI fornisce una rappresentazione bidimensionale dello spazio circostante il nostro centro di riferimento. La distanza del punto rivelato dal centro del PPI stesso indica la distanza effettiva del bersaglio simulato dal centro del sistema di riferimento fisso mentre la sua posizione sullo schermo definisce l'angolazione reale sul piano XZ, con la convenzione che un angolo è definito positivo in senso antiorario.

Riportiamo in Figura 9.6 i frame iniziali e finali di una simulazione video su entrambe le telecamere. Il bersaglio segue una rotta di 85 gradi e viene osservato in due istanti temporali che distano 19.98 secondi.

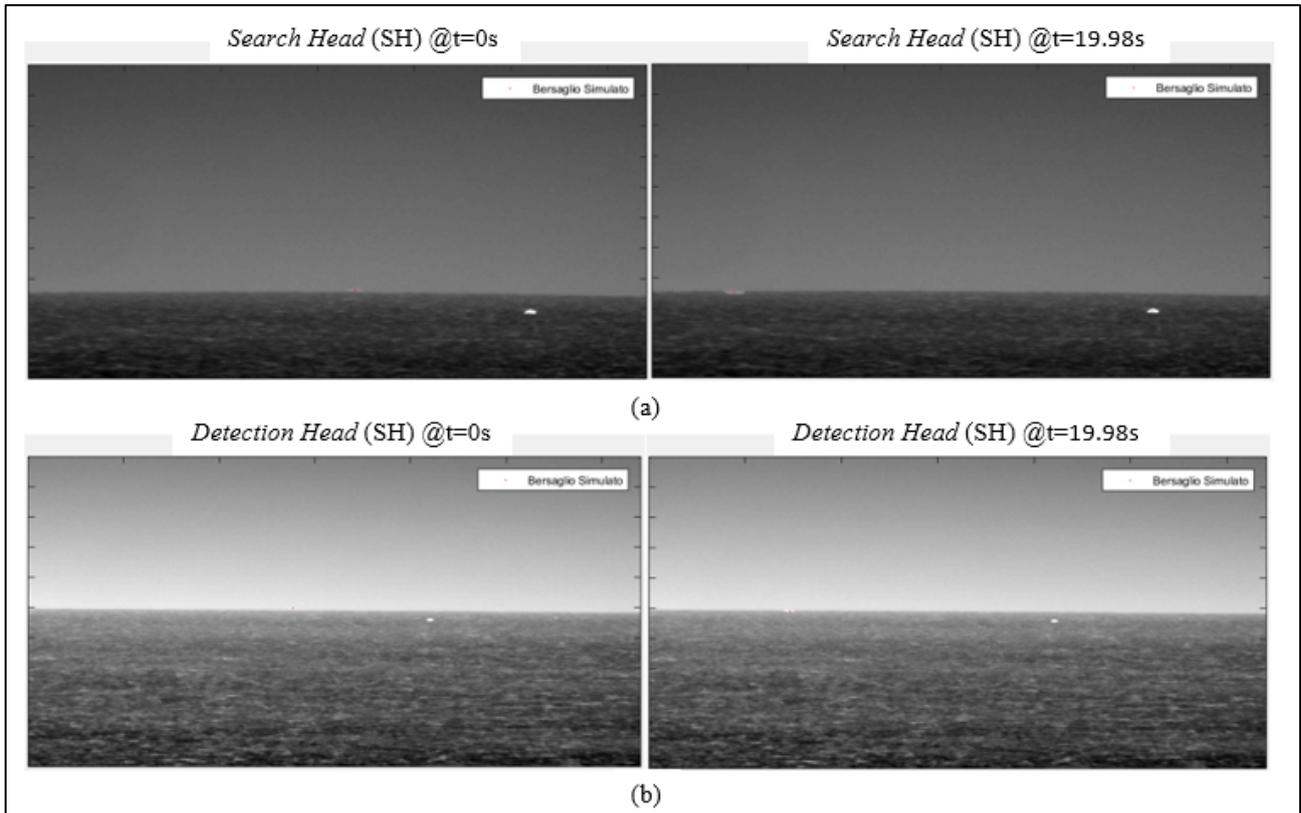


Figura 9.6 Frame iniziale e finale di una simulazione video ottenuta da immagini reali acquisite da un sistema stereo. Per verificare la coerenza del PPI esplicitiamo la posizione tridimensionale in metri del bersaglio rispetto al centro di riferimento prima dello spostamento, $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$:

X	13807
Y	-88
Z	-5861

Tabella 9.1 Posizione del bersaglio simulato rispetto al centro di riferimento prima dello spostamento

Nella Figura 9.7 riportiamo il PPI relativo all'esempio considerato. In rosso sono state segnate le coordinate del punto di interesse ricavate con il nostro algoritmo. Si noti come il PPI offra una rappresentazione schematica ed immediata della posizione del bersaglio rispetto al nostro centro di riferimento, rivelandosi un prezioso strumento di analisi.

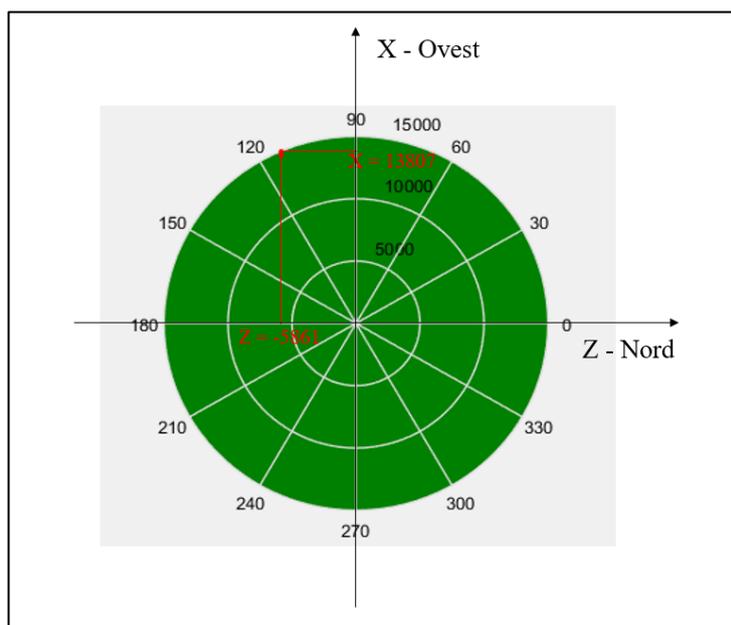


Figura 9.7 *Plan Position Indicator* (PPI) e visualizzazione delle coordinate sul piano XZ del bersaglio simulato prima dello spostamento

9.5.2. Valutazione di algoritmi di tracking

Come già accennato i video simulati potrebbero essere utilizzati per testare algoritmi di *tracking*. Abbiamo visto infatti che il simulatore creato permette di variare diversi parametri, come la dimensione del bersaglio, la sua visibilità, la velocità e la rotta secondo le quali si sposta, riuscendo a ricreare numerose situazioni realistiche differenti, relative a bersagli in movimento su scenario marittimo.

Conoscendo a priori il punto sull'immagine relativo al centro del bersaglio è infatti possibile valutare in modo quantitativo la precisione con la quale l'algoritmo di tracking riesce a seguire il bersaglio stesso, operando un confronto tra i dati simulati inizialmente e l'output fornito dall'algoritmo.

Una particolarità del simulatore è anche quella di poter ricreare due diverse tipologie di contromisure che potrebbero essere adottate da un ipotetico bersaglio per deviare il *tracker*.

La prima contromisura è la *flare*, che consiste nel lancio di sostanze combustibili, che partendo dal bersaglio si allontanano da questo, creando una forte luminosità momentanea e quindi una forte radiazione IR che confonde il sistema di tracking. Il bersaglio tende dunque a sparire confrontato con oggetti a così alta emissività.

Nella simulazione abbiamo considerato come esempio una velocità di eiezione di 45 metri al secondo e il lancio di 3 *flare* distanziate di 0.2 secondi l'una dall'altra.

Per simulare una *flare* sono stati usati diversi parametri come il tempo per raggiungere la massima temperatura e la sua durata totale.

In Figura 9.8 (a) viene riportato il grafico che mostra l'intensità radiante di un *flare* in funzione del tempo, ricavata da un sito inerente gli aerei militari che descrive appunto nello specifico le contromisure all'infrarosso. In Figura 9.8 (b) viene riportata invece l'approssimazione dell'andamento effettivamente utilizzata nella simulazione.

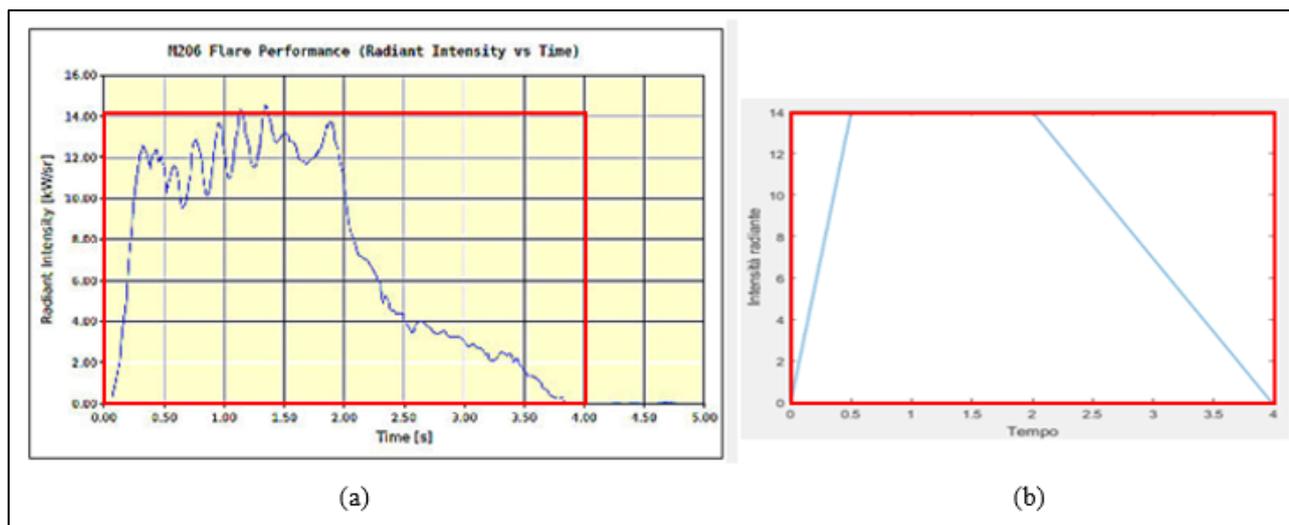


Figura 9.8 Andamento nel tempo dell'intensità radiante di una flare: andamento reale (a) e approssimato (b)

Nei grafici in Figura 9.8 il valore di intensità radiante è espresso in kW/sr. Non conoscendo l'intensità radiante dell'immagine, si assume come valore massimo della *flare* un valore 40 volte più grande dell'intensità del bersaglio simulato rispetto allo sfondo. Per passare dall'intensità radiante espressa in kW/sr a quella che effettivamente vogliamo associare alla *flare* sulla nostra immagine si divide quindi per 14 kW/sr l'andamento in Figura 9.8 (b) così da normalizzare ad 1 il valore massimo. Successivamente si moltiplica l'andamento ottenuto per $40 \cdot (\mu_b - \mu_s)$ e, prima di inserire il bersaglio nell'immagine, si somma il valor medio dello sfondo μ_s . Per simulare la *flare* il parametro di ingresso "Rappresentazione" viene posto a 0, così da simulare un bersaglio circolare, visibile in Figura 8.5.

Si riportano nella Figura 9.9 quattro diversi frame di un video in cui si simula un aereo – cerchiato in rosso - che si muove verso la telecamera e che cambia rotta dopo aver lanciato una prima *flare*. Altre due *flare* vengono lanciate successivamente.

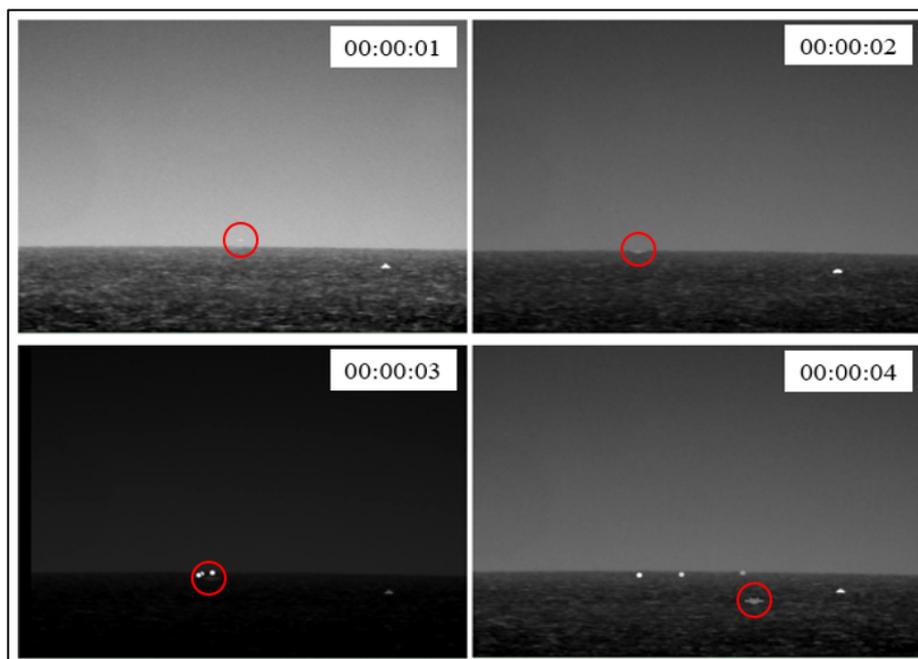


Figura 9.9 Quattro *frame* di un video in cui si simula un aereo in movimento ed il lancio di *flare*

La seconda contromisura simulata dal nostro programma è il *Directional Infrared Counter Measures* (DIRCM). Questa consiste “nell’accecare” la telecamera mediante il puntamento di un fascio laser verso di essa. Il bersaglio diventa dunque momentaneamente invisibile alla telecamera, inficiando così le operazioni di *tracking*. In Figura 9.10 viene riportata la simulazione del DIRCM che punta nella direzione del sensore per un secondo.

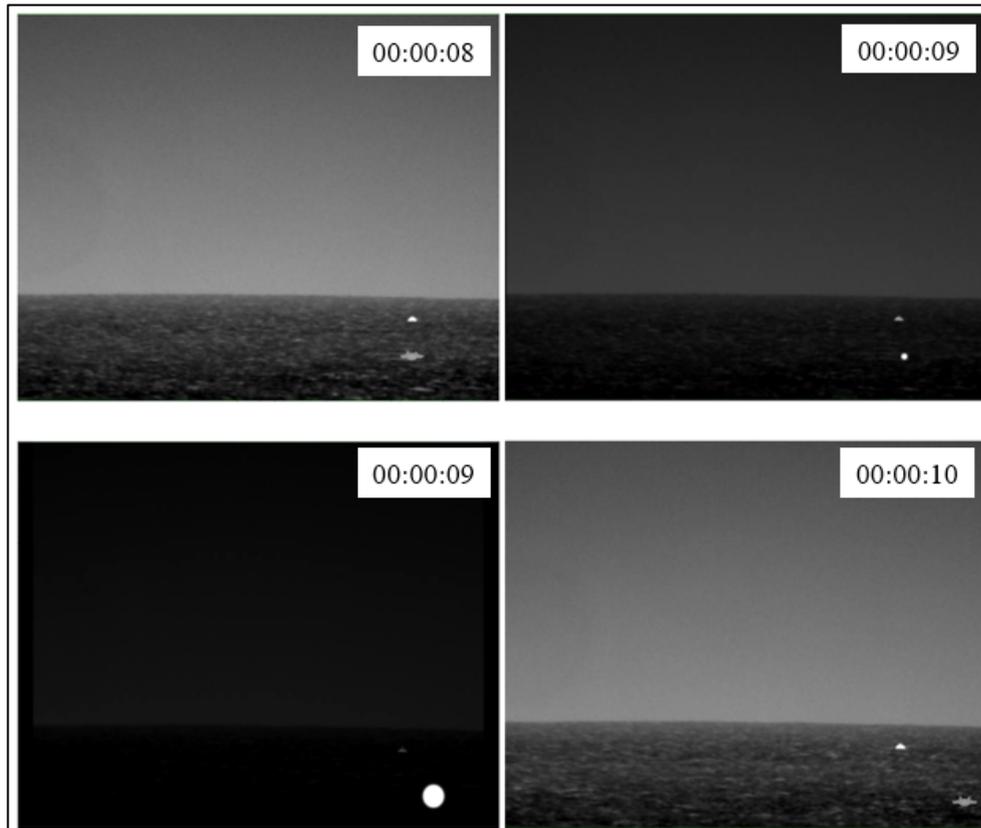


Figura 9.10 Quattro *frame* di un video in cui si simula un aereo in movimento e l'utilizzo della contromisura DIRCM

10. Simulazione di bersagli utilizzando la SH a campo largo

Le immagini viste fino ad ora sono state ottenute da entrambe le termocamere settate a un campo di vista stretto, utilizzando l'IFOV riportato in Tabella 6.1.

Come specificato nell'introduzione, il sistema di visione potrebbe essere composto da una prima termocamera, la SH, in grado di scoprire possibili bersagli osservando nella banda IR tutta l'area di 360° intorno alla termocamera stessa e da una seconda termocamera, la DH, con il ruolo di puntare eventuali *targets* osservandoli con maggiore risoluzione, avendo un campo di vista più stretto. Sempre con riferimento alla Tabella 6.1 si vuole quindi simulare questa situazione, utilizzando immagini ottenute dalla SH con un campo di vista largo, 24° e dalla DH con un campo stretto, di 2.4° . Lo scopo è quello di identificare un bersaglio nella prima immagine, mediante un sistema *ad hoc* o con la selezione di un bersaglio da parte dell'utente, come visto nel paragrafo 7.5, e di procedere con l'algoritmo di rivelazione (paragrafo 4). Si individua così sulla seconda immagine il bersaglio corrispondente a quello scelto nella prima e, mediante triangolazione, si determina la posizione reale del bersaglio. La procedura è la stessa di quella seguita in tutto l'elaborato, nel quale, fino ad ora, si faceva riferimento ad immagini acquisite da entrambe le telecamere con un campo di vista stretto. Questo ha permesso un'elaborazione su immagini più dettagliate che hanno facilitato la comprensione della procedura utilizzate e dei risultati.

In questo capitolo si vuole presentare la simulazione su immagini con caratteristiche sopra descritte, evidenziando come il simulatore stesso sia flessibile alla variazione del campo di vista.

Nella Figura 10.1 sono riportate le immagini reali sulle quali abbiamo in seguito simulato un bersaglio.

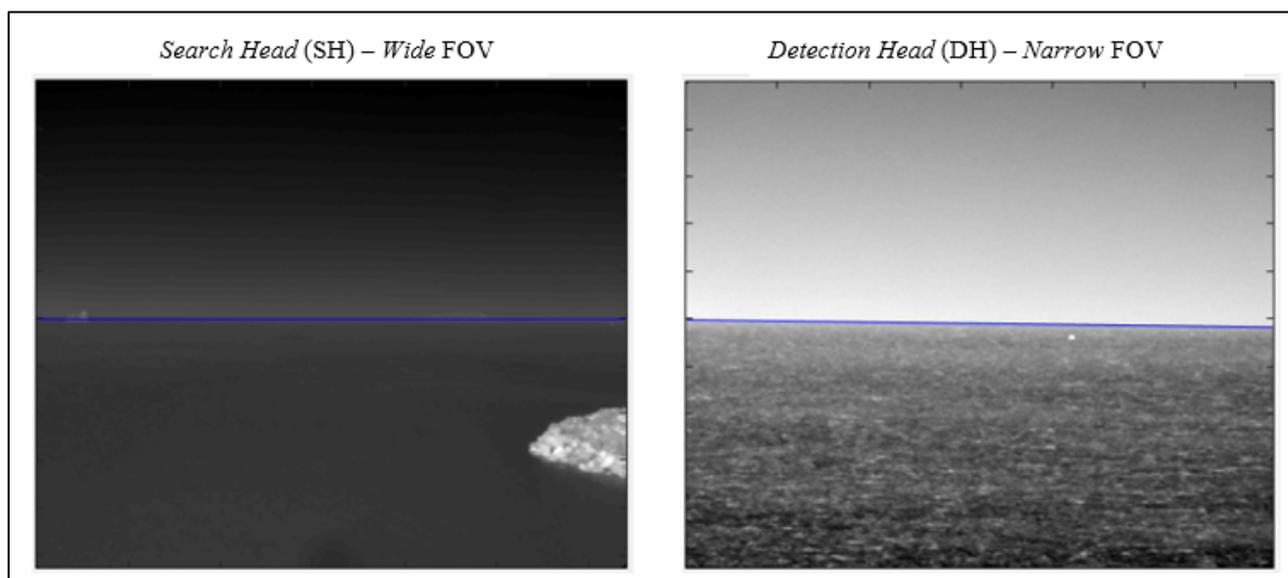


Figura 10.1 Immagini reali acquisite mediante un sistema stereo che utilizza la prima termocamera (SH) a campo largo e la seconda (DH) a campo stretto

Seguendo il diagramma a blocchi che descrive il procedimento per aggiungere un bersaglio simulato alle due immagini, Figura 8.1, si nota che il primo passo è la selezione del punto sull'immagine fornita dalla SH. Quando l'immagine acquisita è ottenuta con un campo di vista largo risulta però difficile capire quale porzione di immagine sia effettivamente inquadrata anche dalla DH a campo stretto. Volendo simulare un bersaglio su entrambe le immagini, l'utente seleziona il punto nel quale simulare il bersaglio sulla seconda termocamera (a campo stretto) e si ricava da questo, nota la distanza, prima il punto tridimensionale e, successivamente, la proiezione sul piano immagine dell'EP. Analiticamente i passaggi da seguire sono gli stessi riportati nelle equazioni (2.9) e (2.10) dove basta invertire i pedici 1 e 2 e sostituire la distanza minima con quella specificata in ingresso.

Si riporta in figura il nuovo diagramma a blocchi che sintetizza il procedimento da seguire nel caso in cui le immagini della prima termocamera siano a campo largo.

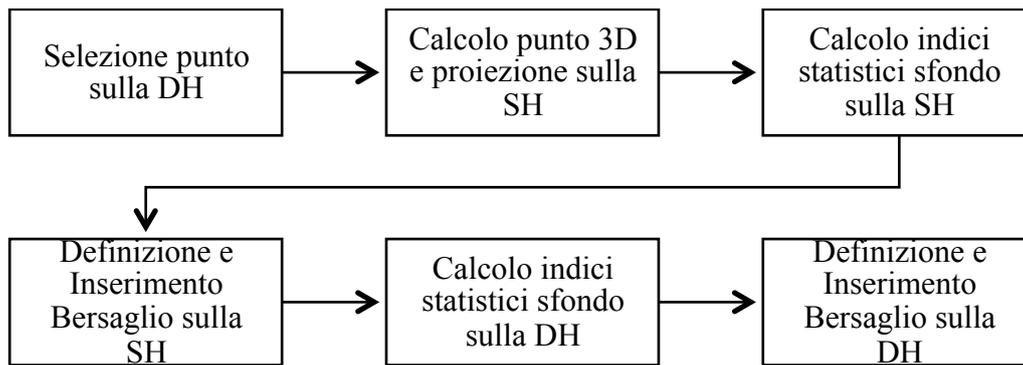


Figura 10.2 Diagramma a blocchi che descrive l’inserimento di un bersaglio simulato su due immagini reali acquisite da un sistema stereo

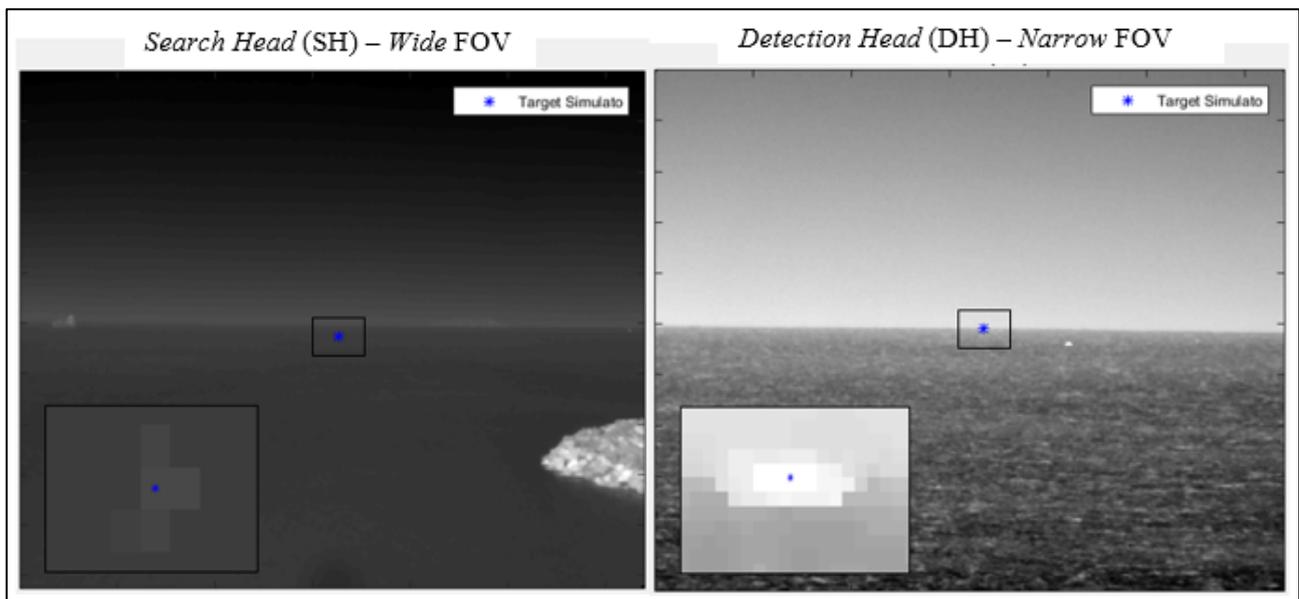


Figura 10.3 Risultato dell’inserimento di un bersaglio sulle immagini reali acquisite mediante un sistema stereo che utilizza la prima termocamera (SH) a campo largo e la seconda (DH) a campo stretto

La Figura 10.3, dove si mostra la simulazione di un unità navale nel sistema di visione sopra descritto, evidenzia la flessibilità del simulatore, capace di gestire diversi FOV e di adattare di conseguenza le caratteristiche del bersaglio simulato.

11. Valutazione dell'algoritmo di rivelazione

In questo capitolo, sfruttando il fatto che è stato creato un simulatore molto versatile, verrà testato, in modo quantitativo, l'algoritmo di rivelazione in diversi scenari, più o meno complicati.

11.1. Presenza di bersagli multipli nell'area di ricerca

Una situazione che potrebbe verificarsi è quella della presenza di due bersagli vicini. Come già detto, se nell'area di ricerca sulla seconda immagine sono presenti più bersagli plausibili, viene scelto quello più vicino alla retta epipolare.

Si riporta in Figura 11.1 la simulazione di un bersaglio vicino ad uno reale.

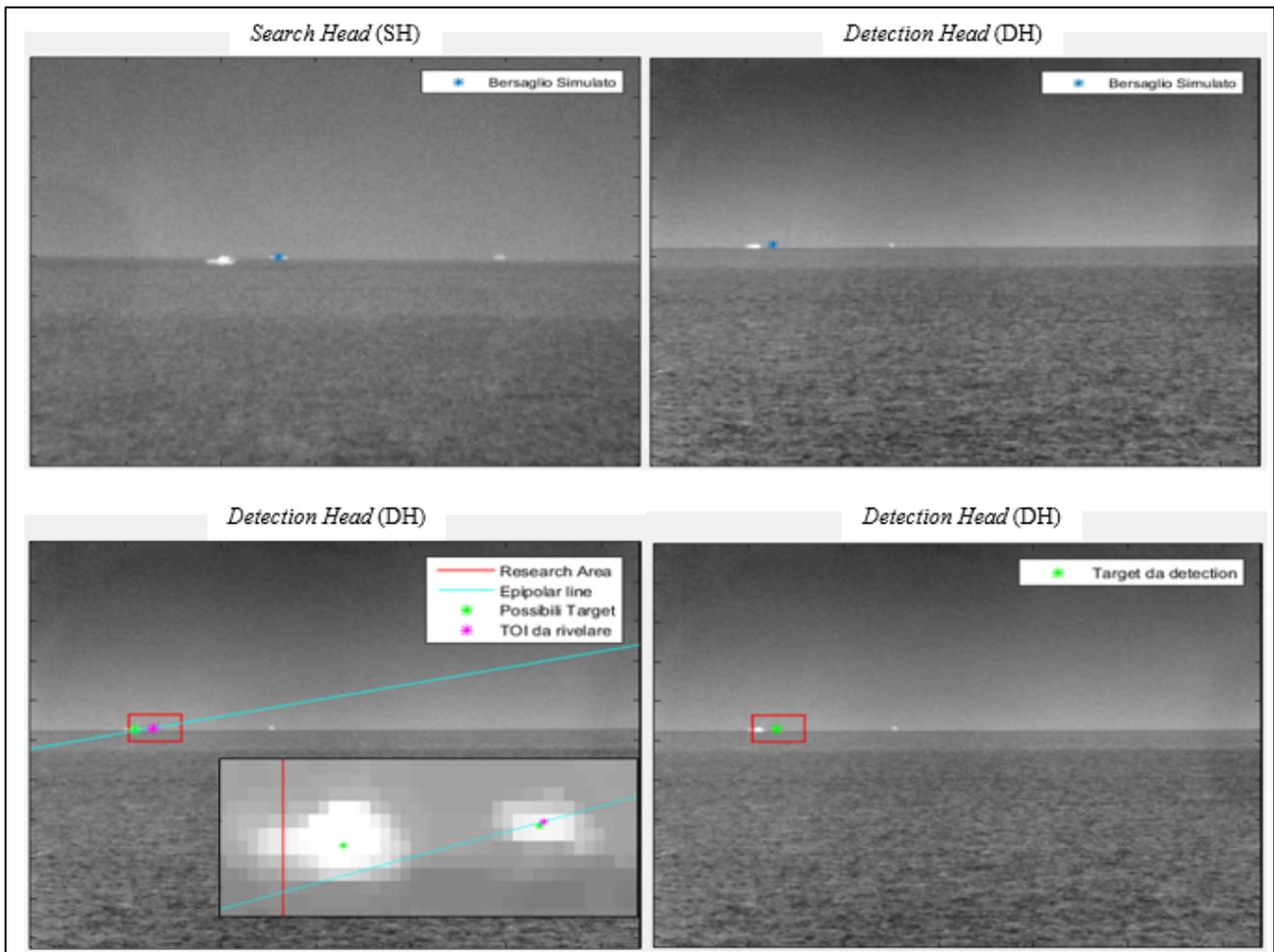


Figura 11.1 Risultato della corretta rivelazione del bersaglio simulato quando vicino ad uno reale

Si noti come l'algoritmo implementato sia in grado di rivelare due bersagli, effettivamente presenti nella finestra di ricerca, e di scegliere, in base alla distanza dei baricentri dalla linea epipolare, il bersaglio simulato di interesse, scelto in precedenza sulla SH.

11.2. Bersaglio con basso rapporto segnale rumore

L'algoritmo di rivelazione si basa, come descrive il paragrafo 4.3.2, sul criterio di Neyman-Pearson. Nel *trade-off* tra la probabilità di falso allarme e di *detection* è possibile che per rivelare bersagli che si distinguono con difficoltà dallo sfondo, e quindi aventi un basso rapporto segnale rumore, si scelga di dare priorità alla corretta rivelazione. Ciò significherebbe abbassare la soglia λ (si veda paragrafo 4.3.2), scoprendosi a false rivelazioni di pixel caldi dello sfondo. L'algoritmo di rivelazione implementato tiene in considerazione tale ipotesi, riuscendo a distinguere punti caldi dello sfondo dai bersagli, sulla base del numero di punti che compongono ciascuna entità rivelata nella finestra di ricerca.

Il simulatore diventa in questo caso essenziale perché permette di verificare le capacità dell'algoritmo di rivelazione implementato. Riuscendo a simulare bersagli sulle immagini reali coerenti a caratteristiche scelte dall'utente, è possibile ricreare contesti particolari che mettono alla prova l'algoritmo su diversi punti critici.

Simulando bersagli sulle immagini reali con un basso rapporto segnale rumore, si vuole evidenziare la capacità dell'algoritmo non solo di distinguere pixel caldi di sfondo da plausibili bersagli ma anche la flessibilità dello stesso di confrontare tra loro entità inizialmente associate a pixel caldi di sfondo, nel caso in cui non si riveli la presenza di un bersaglio.

In Figura 11.2 si evidenzia la capacità dell'algoritmo di distinguere i punti caldi da quello che effettivamente potrebbe essere il baricentro del bersaglio. Il bersaglio simulato è di 5 metri, a una distanza di 15000 e con rapporto segnale rumore di 13dB.

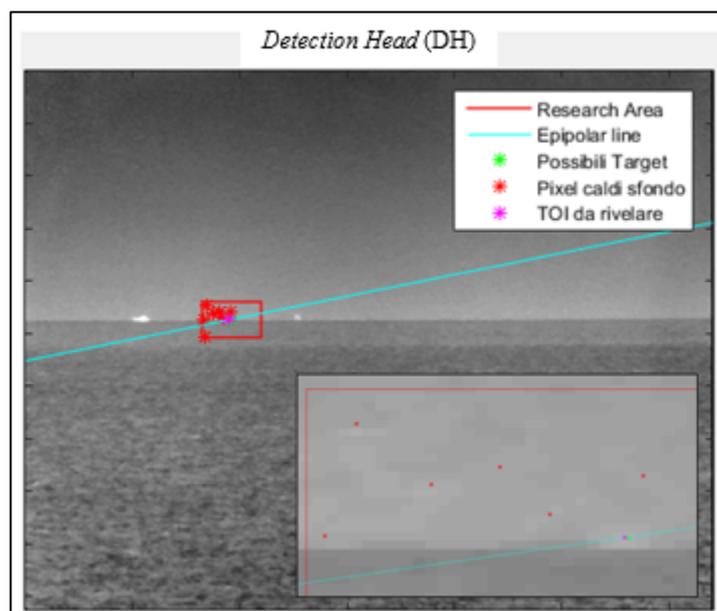


Figura 11.2 Risultato della corretta rivelazione del bersaglio simulato e del riconoscimento dei falsi allarmi causati da pixel caldi di sfondo

Questo risultato mostra la robustezza dell'algoritmo ai falsi allarmi, permettendo una scelta della soglia λ più bassa che consenta di rivelare anche bersagli poco visibili sullo sfondo.

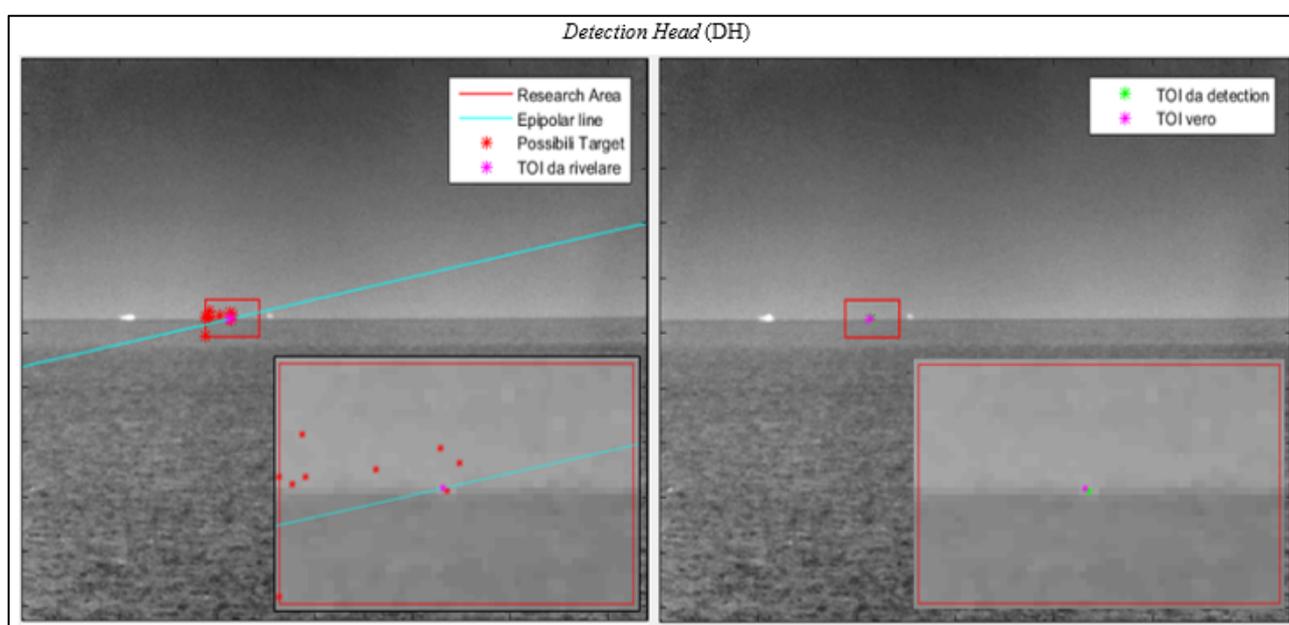


Figura 11.3 Risultato della corretta rivelazione del bersaglio simulato quando rappresentato con un basso rapporto segnale rumore

In Figura 11.3, dove viene simulato un bersaglio di un metro sempre a 15 chilometri e con rapporto segnale rumore di 5dB, si evidenzia la flessibilità dell'algoritmo di considerare ciascun punto caldo come possibile *target* nel caso in cui non sia presente nessun bersaglio che si distingua da essi. Si vede che, nel caso in cui non venga identificata nessuna entità con un certo numero di pixel, tutti i

pixel caldi diventato possibili *target*. La scelta tra tutti questi possibili *target* dipende sempre dalla distanza dalla retta epipolare e dalla Figura 11.3 si vede come questo criterio porti al risultato corretto.

11.3. Simulazione dell'errore sistematico sul valore di azimuth

Grazie al simulatore è possibile valutare il peso dell'errore sistematico sulla misura dei parametri di elevazione e azimuth relativo tra le due telecamere.

Si mostrano in Figura 11.4 le immagini di un bersaglio simulato di 5 metri a 15 chilometri di distanza con un rapporto segnale rumore di 15 dB.

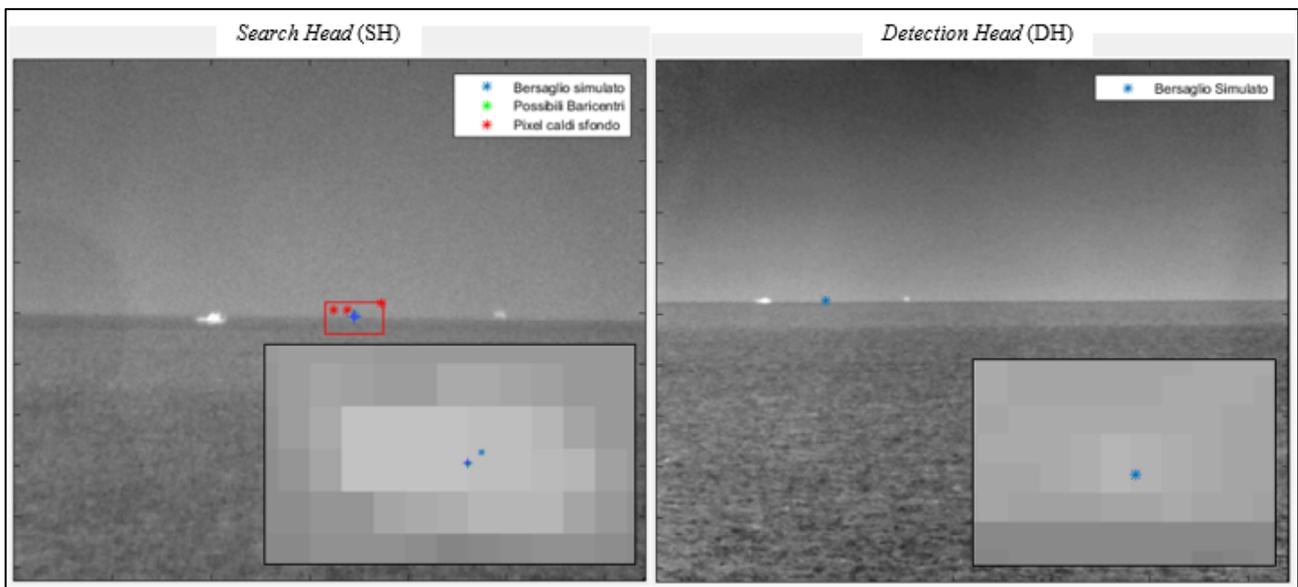


Figura 11.4 Simulazione di un bersaglio su una coppia di immagini relai fornite da un sistema stereo

Si applica in successione l'algoritmo di rivelazione, basandosi prima sui dati corretti e successivamente introducendo un errore sul valore di azimuth scelto, in questo esempio, pari a metà dell'errore massimo che si ha nel sistema reale, ξ_θ , di un milliradiante. L'errore, riportato in gradi, è calcolato come

$$\varepsilon_\theta = \xi_\theta \frac{180}{2 \cdot \pi} = 0.9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{180}{2 \cdot \pi} = 0.0258^\circ \quad (11.1)$$

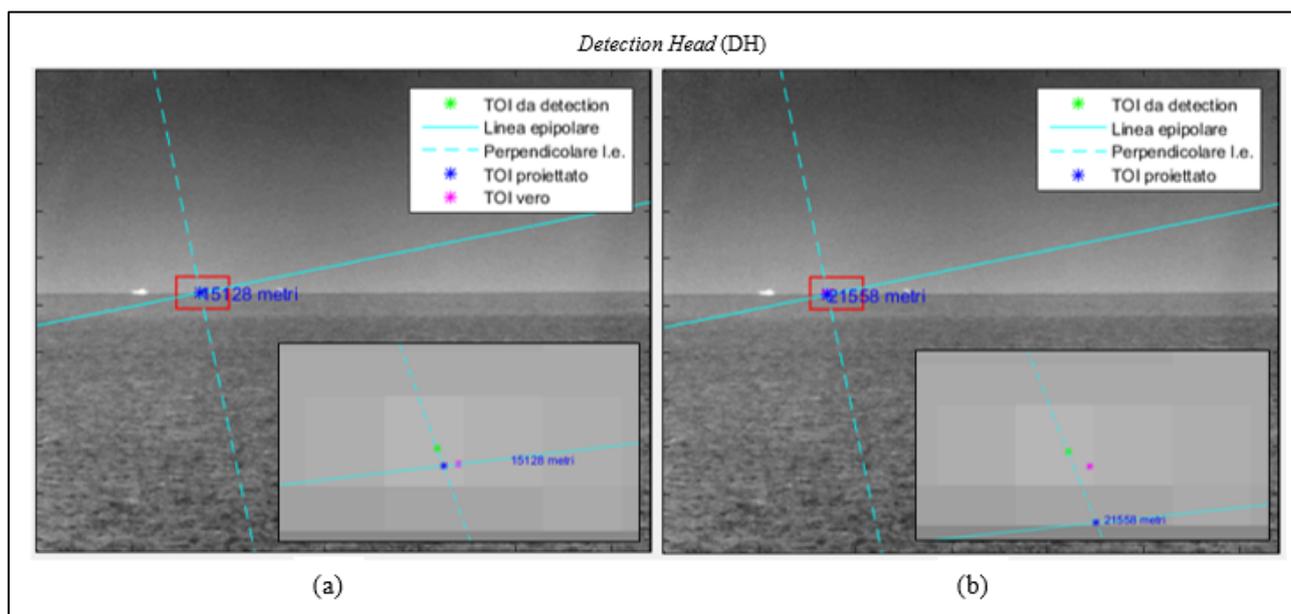


Figura 11.5 Risultati della proiezione del bersaglio rivelato sulla linea epipolare e della triangolazione nel caso di assenza e presenza di errore sistematico

In Figura 11.5 viene confrontato il risultato dell’algoritmo di rivelazione nel caso in cui il valore di azimuth sia quello corretto (a) e nel caso in cui è invece presente l’errore sistematico ε_θ (b). Nelle *zoomed box* si nota che il baricentro rivelato dall’algoritmo (in verde) è lo stesso in entrambi i casi mentre il punto proiettato sulla linea epipolare (in blu), che corrisponde all’output finale dell’algoritmo, differisce sensibilmente, in quanto la linea epipolare risente in modo consistente dell’errore introdotto. Si noti come, mentre nel caso (a) il punto trovato risulta molto vicino al punto reale (in rosa), nel caso (b) questo si discosta da esso. Con il valore corretto di azimuth relativo tra le due termocamere la stima della distanza è di 15.128 metri, mentre con l’errore sistematico questa risulta di 21.558 metri. La prima misura differisce dalla distanza reale di 128 metri (che corrisponde ad un errore relativo percentuale dello 0,85%), mentre la seconda differisce di 6.558 metri (che corrisponde ad un errore relativo addirittura dello 43,72%).

Questo esempio è stato volutamente riportato per sottolineare l’importanza di avere delle misure dei valori di azimuth e di elevazione corretti. Qualora fosse presente un errore sistematico negli strumenti è di importanza primaria ricavare il reale valore dei parametri, come illustrato nel paragrafo 3.2.

PARTE IV: Applicazioni

12. Possibili utilizzi in contesti attuali

Si conclude l'elaborato descrivendo alcuni possibili utilizzi del sistema stereo di visione esaminato.

Lo scopo del sistema di visione preso come riferimento per tutto l'elaborato è la localizzazione di bersagli su scenari marittimi. Questo dà spazio a tutte quelle applicazioni che sono rivolte alla determinazione della posizione di un qualsiasi oggetto sul mare.

Si suddividono alcune delle possibili applicazioni in tre contesti più generali, cercando di fornire un insieme schematico che evidenzia l'importanza del sistema esaminato in molteplici ed importanti scenari attuali.

In primo luogo, il sistema di visione esaminato si rende idoneo in operazioni di *Search and Rescue*. Il sistema descritto, infatti, si integra perfettamente con la necessità di localizzazione di persone nel caso di "uomo a mare" o nel soccorso profughi. Il sistema potrebbe essere impiegato a bordo di una moto vedetta o di qualsiasi unità navale o aerea, grazie alla flessibilità di installazione delle due termocamere.

L'applicazione di tale sistema potrebbe inoltre sopprimere alla esigenza di una sorveglianza accurata. In ambito portuale, riuscendo ad identificare bersagli anche a 20 chilometri, consentirebbe un'efficace protezione da accessi indesiderati. Nuovamente a bordo di unità navali, invece, porterebbe un aiuto nella lotta alla pirateria dove si aggiungerebbe, ai sistemi esistenti, un forte strumento per la localizzazione di bersagli su mare.

L'ultimo impiego del sistema che vogliamo citare è il monitoraggio di incidenti. Un esempio è nel soccorso di unità incidentate, dove la localizzazione di queste unità incapaci di manovrare aiuterebbe la nave soccorritrice nel tentativo di salvare l'unità in pericolo o comunque persone che si trovano a bordo. Anche nel caso di incendi a bordo il sistema stereo risulterebbe un valido strumento per la determinazione dell'unità soprattutto grazie al funzionamento della termocamera che, rilevando l'energia all'infrarosso e quindi il calore emesso, consentirebbe un forte ritorno dall'unità in pericolo.

13. Installazione del sistema stereo a bordo delle Navi della Marina Militare

In questo capitolo si vogliono analizzare i vantaggi che si otterrebbero montando il sistema di visione su un'unità della Marina Militare per la localizzazione accurata di bersagli a grande distanza.

Dispositivi di ricerca, scoperta ed inseguimento di obiettivi, noti con il nome di *InfraRed Search and Track* (IRST), sono già utilizzati dalla Marina Militare Italiana (MMI). Tali dispositivi sono costituiti da un sensore ad infrarosso che, ruotando sul piano azimutale, copre, con la sua scansione, tutti i 360° intorno ad esso. Lavorando completamente in passivo è possibile acquisire e seguire uno o più obiettivi di interesse, senza l'emissione di alcun tipo di radiazione. Si pensi di utilizzare tale dispositivo IRST per acquisire la prima immagine, etichettando tale termocamera come *Search Head*. Sono già utilizzati, sui video acquisiti da queste termocamere, algoritmi di elaborazione che si occupano della rivelazione e del tracciamento di plausibili bersagli presenti nella scena inquadrata. Soffermandoci su un *frame* di questi video ci riportiamo al caso preso in esame nell'elaborato, dove però la scelta del bersaglio su questa prima immagine non sarebbe data dalla selezione manuale dell'utente, come ipotizzato fino ad ora, ma sarebbe frutto di informazioni messe a disposizione da algoritmi già noti. L'idea è quella di aggiungere a questa prima termocamera una seconda unità elettro-ottica, la DH, che, inquadrando l'area verso il bersaglio di interesse, permetterebbe di osservare con maggiore risoluzione, avendo anche un campo di vista più stretto (situazione già descritta nel paragrafo 10). Sull'immagine di questa seconda termocamera sarà possibile rivelare, mediante l'algoritmo implementato nell'elaborato, il bersaglio corrispondente a quello individuato nella prima immagine, sulla base della geometria epipolare. I risultati di un tale sistema di visione sono quelli riportati nel paragrafo 7, dove si intuisce che le immagini elaborate potrebbero puntualmente corrispondere a quelle acquisite mediante l'utilizzo congiunto di due unità elettro-ottiche.

Ulteriori vantaggi nell'utilizzo del sistema stereo a bordo delle unità navali della MMI è senz'altro il funzionamento passivo del sistema. I numerosi apparati a bordo di una nave possono dar luogo a problemi di compatibilità elettromagnetica, cioè di interferenze create da un sistema sugli altri strumenti o, viceversa, di interferenze degli altri strumenti su di un certo sistema. Tramite un sensore IR ci potremmo invece svincolare da questa problematica essendo comunque in grado di effettuare misure di distanza senza emissione di energia.

Conclusioni

Il lavoro descritto nell'elaborato si è posto come obiettivo l'implementazione di un algoritmo, basato su di un sistema stereo, per la localizzazione automatica dei bersagli su scenario marittimo.

Le basi dell'algoritmo implementato sono fornite dalla geometria che lega due punti corrispondenti in due immagini della stessa scena, osservata da punti di vista e con telecamere differenti. Per qualsiasi punto nell'immagine fornita da una prima telecamera, il punto corrispondente nell'immagine fornita dalla seconda giace su di una linea che attraversa la stessa e questo vincolo è noto con il nome di *epipolar constraint*.

Il primo passo per la localizzazione è identificare sulle immagini fornite dalle due termocamere del nostro sistema la proiezione su di esse del bersaglio reale di interesse. Scegliendo un bersaglio sull'immagine fornita dalla prima termocamera si sono sviluppati questi risultati teorici per ottenere automaticamente sull'immagine acquisita con la seconda termocamera la linea epipolare. Sulla base di questo risultato l'algoritmo è in grado di determinare nella seconda immagine un'area di interesse intorno al bersaglio e, procedendo poi con la rivelazione all'interno di quest'area di ricerca, di individuare automaticamente il bersaglio di interesse. Grazie alla conoscenza di due punti su due piani immagine diversi è possibile, mediante triangolazione, determinare la posizione del bersaglio reale.

L'algoritmo di rivelazione è stato testato su di una serie di immagini acquisite da due termocamere inquadrando la zona di mare antistante l'Accademia Navale di Livorno. Il sistema di acquisizione è stato installato presso l'Istituto Vallauri dove, le due unità elettro-ottiche, sono state disposte sul terrazzo dell'edificio stesso.

I risultati ottenuti si sono rivelati molto buoni e con errori sulla stima della distanza inferiori all'1%. Il sistema stereo e l'algoritmo di rivelazione sono stati in grado di localizzare bersagli a distanza superiori i 10 chilometri.

Per una valutazione quantitativa dell'algoritmo è stato implementato un simulatore di bersagli sia statici che in movimento, con caratteristiche da associare ai bersagli definibili dall'utente. Il simulatore si è mostrato capace di riprodurre scenari molto verosimili e ha permesso di testare il comportamento dell'algoritmo su tipiche situazioni che potrebbero facilmente verificarsi in un contesto operativo, come la presenza di bersagli a bassa intensità o di bersagli vicini difficili da discriminare. L'algoritmo di rivelazione ha risposto in modo molto positivo, riuscendo ad

identificare e localizzare i bersagli anche in contesti più complessi di quelli reali sulla quale si è basata la campagna di misura.

La verosimiglianza delle immagini create dal simulatore ci ha spinto a ricreare anche bersagli in movimento, rendendo i video simulati validi test per gli algoritmi di tracking.

Il sistema analizzato e l'utilizzo dell'algoritmo implementato trovano un campo di applicazione molto ampio. Il sistema si rivela infatti d'aiuto in qualsiasi contesto dove sia necessario determinare la posizione di un bersaglio su scenario marittimo. Sono molti i casi odierni nei quali è necessario il controllo del mare, sia da un punto di vista militare che civile. Il lavoro passivo delle termocamere rende inoltre il loro utilizzo compatibile con ogni altro sistema di rivelazione ed in ambienti complessi, come potrebbe essere l'unità navale, è un fattore piuttosto determinante.

La principale problematica nell'utilizzo di un sistema complesso, che utilizza cioè più di una vista, è l'errore sistematico sulla misura di orientamento relativo di una termocamera rispetto all'altra. Con l'utilizzo del simulatore è stato possibile avere una misura oggettiva dell'errore sulla stima della distanza di un bersaglio di interesse dalle termocamere causato da un errore sistematico. Anche un piccolo errore sulla posizione relativa delle due telecamere può causare grandi errori sulla determinazione della distanza. Si rende quindi necessaria un'ottimizzazione dei parametri di azimuth, elevazione e rollio relativo tra le due termocamere, condotta anche nell'elaborato, che sia in grado però di dare una correzione esatta ai parametri stessi, eliminando l'errore sistematico. Lavorare con un sistema in cui l'errore sistematico che affligge le misure sia il minore possibile consentirebbe di migliorare molto l'accuratezza delle stime della posizione dei bersagli di interesse.

Appendice A - Matrici di rotazione

L'orientamento di un sistema di coordinate relativo ad un altro può essere definito da una sequenza di tre rotazioni successive. Gli angoli di imbardata, beccheggio e rollio, chiamati angoli di Tait-Bryan, forniscono l'entità di tali rotazioni.

Come vediamo nella Figura A.1, il *pitch* o beccheggio consiste in una rotazione attorno all'asse trasversale del veicolo, lo *yaw* o imbardata attorno all'asse verticale e il *roll* o rollio attorno a quello longitudinale.

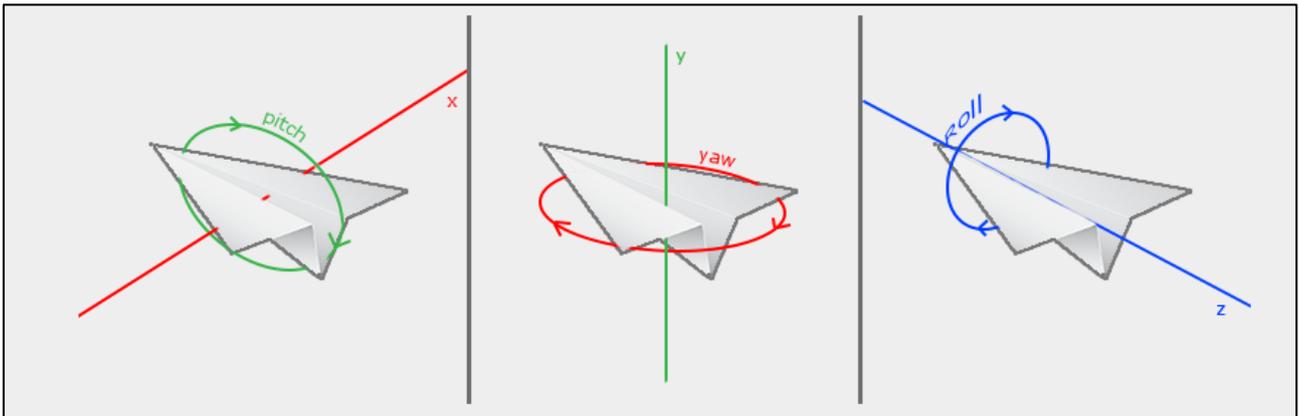


Figura A.1 Definizione degli angoli di *pitch*, *yaw* e *roll*

Se si hanno tre rotazioni rigide generiche successive, espresse rispettivamente dalle matrici R_1 , R_2 , R_3 , queste devono essere moltiplicate tra loro in un ordine opportuno, al fine di ottenere la rotazione composta. Se le rotazioni avvengono tutte rispetto agli assi fissi iniziali l'ordine corretto è

$$R = R_3 \times R_2 \times R_1 \quad (\text{A.1})$$

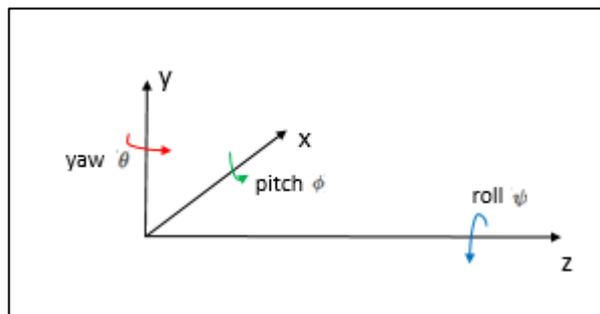


Figura A.2 Definizione degli angoli di *pitch*, *yaw* e *roll* su di uno specifico sistema di riferimento

Eseguendo prima la rotazione dovuta al rollio, poi quella dovuta al beccheggio e successivamente quella dovuta all'imbardata, per come abbiamo definito i tre assi, stiamo eseguendo, nell'ordine,

una rotazione rispetto all'asse z, poi rispetto all'asse x ed infine rispetto all'asse y. Da quanto detto in precedenza la matrice di rotazione composta è:

$$R = R_3 \times R_2 \times R_1 = R_{yaw} \times R_{pitch} \times R_{roll} = R_y \times R_x \times R_z \quad (A.2)$$

Le matrici di rotazione attorno agli assi x, y e z, in cui si rappresentano con ϕ , θ e ψ i rispettivi angoli di rotazione ottenuti con la regola della mano destra attorno agli assi stessi, sono le seguenti:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.5)$$

Concludendo, la matrice di rotazione finale sarà:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.6)$$

Appendice B - Trasformata di Hough

La trasformata di Hough è una tecnica che, applicata a immagine binarie ottenute tramite un algoritmo di estrazione dei contorni (come ad esempio il Canny utilizzato nell'algoritmo implementato), ne permette di identificare eventuali allineamenti di punti. Nello spiegare il procedimento si fa riferimento direttamente alle convenzioni utilizzate anche in Matlab così da essere coerenti con l'implementazione usata.

Per analizzare nel dettaglio il calcolo della trasformata consideriamo innanzitutto la rappresentazione parametrica di una retta in un sistema di riferimento coerente con quello utilizzato dal Matlab

$$\rho = x \cdot \cos(\vartheta) + y \cdot \sin(\vartheta) \quad (\text{B.1})$$

Consideriamo tutti i possibili allineamenti mediante la coppia di parametri (ϑ, ρ) , che individuano appunto delle rette. Per ogni punto dell'immagine originale appartenente ad un contorno, che si mappa con degli 1 nell'immagine binaria, vengono tracciate tutte le rette definite dai parametri (ϑ, ρ) e viene incrementato di uno lo *score* di una determinata coppia ogniqualvolta che un altro punto viene intercettato da tale retta. Come mostrato in Figura B.3, applicando la trasformata si ottiene una funzione di accumulazione definita nello spazio bidimensionale dei parametri (ϑ, ρ) , dove ρ è la distanza dall'origine della retta presa in considerazione mentre ϑ è l'angolo, misurato in senso orario, che si forma tra l'asse x e la perpendicolare alla retta stessa.

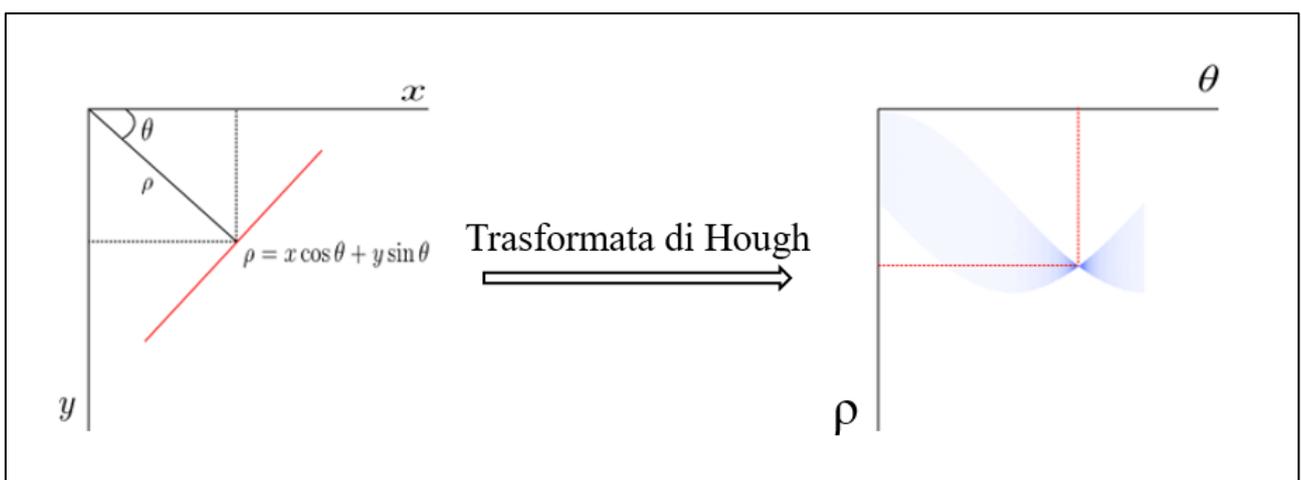


Figura B.3 Trasformata di Hough: trasformazione dal piano dell'immagine allo spazio dei parametri (ϑ, ρ)

I massimi della funzione di accumulazione ricavata, ovvero le rette che hanno ottenuto lo *score* maggiore, rappresentano gli allineamenti che hanno probabilità elevata di essere presenti nell'immagine.

I valori di ϑ e ρ variano rispettivamente negli intervalli $[-90^\circ:89^\circ]$ e $[-val_diag, val_diag]$ dove val_diag , che corrisponde al valor massimo lungo la diagonale, è dato da

$$val_diag = RhoResolution \cdot \left\lceil \frac{D}{RhoResolution} \right\rceil \quad (B.2)$$

dove *RhoResolution* è la risoluzione scelta sull'asse ρ nello spazio di Hough e D è ottenuto come

$$D = \sqrt{(Num_rows - 1)^2 + (Num_cols - 1)^2} \quad (B.3)$$

E' possibile scegliere quale risoluzione avere sull'asse ρ e sull'asse ϑ . Nel nostro caso il passo di campionamento sull'asse ρ è di un pixel e quello sull'asse ϑ è di un grado.

Appendice C - Calcolo dell'inclinazione della terna fissa rispetto al piano orizzontale

Come descritto nel paragrafo 5.2.2.1 il sistema di riferimento fisso ha il piano XZ inclinato verso la Gorgona. La Figura C.4 riporta in blu questa terna fissa di riferimento.

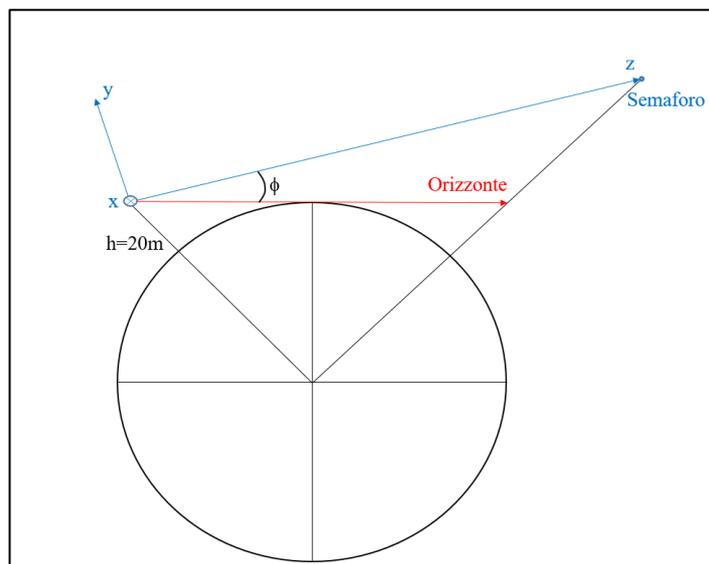


Figura C.4 Sistema di riferimento fisso inclinato sul semaforo dell'isola di Gorgona

Si vuole calcolare l'angolo ϕ che, come si vede in Figura C.4, descrive l'elevazione rispetto al piano orizzontale, mostrato in rosso. La conoscenza del suddetto angolo permette di definire un nuovo sistema di riferimento nel quale il piano XZ risulti orizzontale e non inclinato sul Semaforo dell'isola di Gorgona. Il centro di entrambi i sistemi di riferimento è posizionato su una delle due termocamere utilizzate nella campagna di misura, nella quale sono state acquisite le immagini reali utilizzate nell'elaborato. Il sistema di acquisizione è stato installato sul pavimento del tetto dell'Istituto Vallauri, a circa 20 metri di altezza.

È possibile stimare l'angolo ϕ utilizzando una delle immagini acquisite nella campagna di misura. In tale campagna il faro dell'isola di Gorgona è stato ripreso da una delle due termocamere. Una delle immagini acquisite è riportata in Figura C.5.

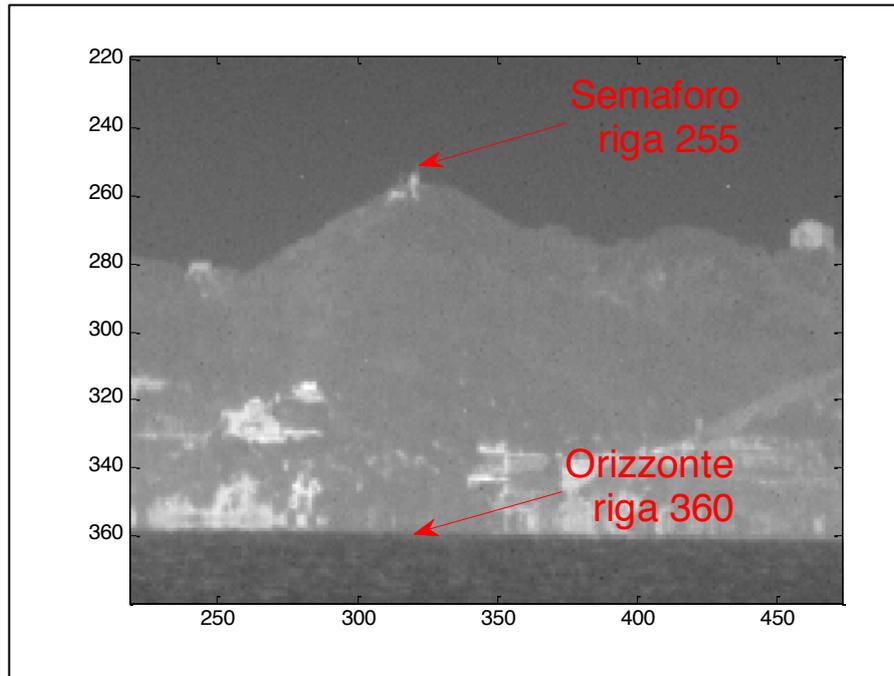


Figura C.5 Immagine IR che permette di definire l'altezza del faro sull'isola di Gorgona dal livello del mare in pixel. Note le due letture corrispondenti alle righe in cui si trovano il faro e la linea dell'orizzonte è possibile definire l'altezza del faro dal livello del mare in pixel h_{pix} come:

$$h_{pix} = Row_{orizz} - Row_{sem} = 360 - 255 = 105 \quad (C.1)$$

Tramite una semplice proporzione che lega l'angolo di interesse ϕ che sottende l'altezza del faro dal livello del mare in pixel h_{pix} è possibile ricavare lo stesso come

$$\phi = \frac{FOV}{N_{pix}} \cdot h_{pix} = \frac{2.4}{640} \cdot 105 = 0.3937^\circ \quad (C.2)$$

dove FOV indica il *Field Of View* della termocamera utilizzata, N_{pix} il numero di pixel sul piano focale lungo la direzione orizzontale, rispetto alla quale è espresso anche il FOV.

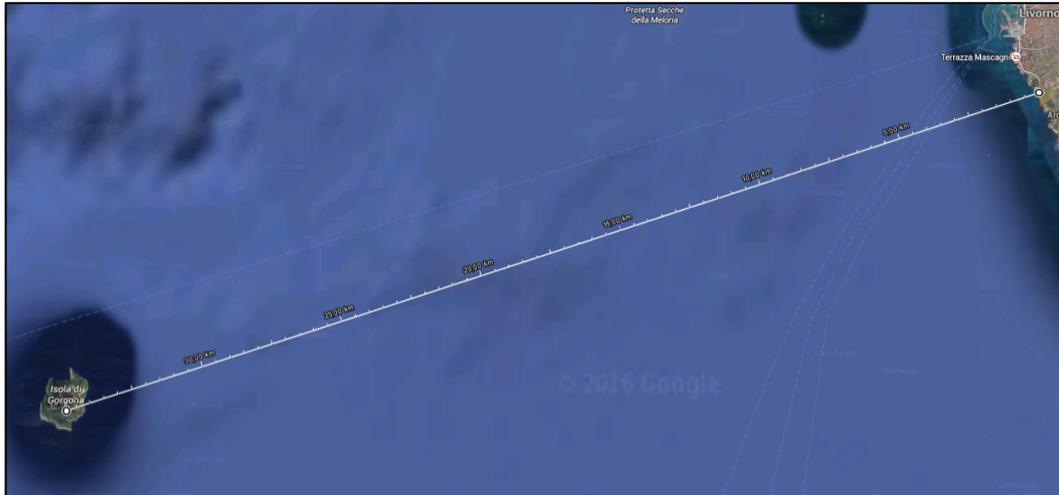


Figura C.6 Misura della distanza tra la posizione della termocamera e l'isola di Gorgona

Come mostrato in Figura C.6 possiamo approssimare la distanza tra la termocamera e l'isola di Gorgona a 34 chilometri. Noto dall'equazione (C.1) il numero di pixel di distanza tra il faro e la linea dell'orizzonte, è possibile stimare una distanza in metri per poi confrontarla con quella reale del faro della Gorgona dal livello del mare.

Volendo esprimere l'altezza in pixel h_{pixel} in metri è necessario moltiplicare per D/f_{pixel} dove D è la distanza tra la termocamera e l'isola di Gorgona di 34 chilometri e f_{pixel} è la lunghezza focale in pixel, che corrisponde all'inverso dell'*Instantaneous Field Of View* della termocamera, pari a 6.5450×10^{-5} nel nostro caso specifico. L'altezza in metri ricercata sarà quindi data da:

$$h_{metri} = \frac{h_{pixel} \cdot D}{f_{pixel}} = h_{pixel} \cdot D \cdot IFOV = 105 \cdot 34 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 6.5450 \times 10^{-5} = 233.6565 \text{ m} \quad (\text{C.3})$$

La misura ottenuta con l'equazione (C.3) non tiene conto del fatto che nelle immagini acquisite una parte dell'isola rimane nascosta a causa della curvatura della terra. Per inserire questo dato nel confronto con la misura reale della quota del faro, pari a 257 metri, è necessario dunque sottrarre da questa l'altezza della porzione di isola sotto l'orizzonte ottico.

È possibile ricavare la distanza dell'orizzonte ottico come

$$d_{orizz} = 3.86\sqrt{h} = 3.86 \cdot 20 = 17.2624 \quad (\text{C.4})$$

dove h è l'altezza alla quale è posto l'osservatore, quindi nel nostro caso l'altezza del tetto sulla quale sono poste le termocamere.

Essendo la distanza complessiva tra la Gorgona e la termocamera pari a 34 chilometri e l'orizzonte ottico a circa la metà, si evince che, in riferimento alla Figura C.4, la parte non visibile dell'isola sotto l'orizzonte ottico è circa pari ad $h=20$ metri.

La stima ottenuta per l'innalzamento del faro sul livello del mare di 234 è quindi simile a quella ottenuta sottraendo ai 257 metri, misura effettiva, i 20 metri nascosti dall'orizzonte ($257-20=237$).

Bibliografia

Calinon S., (2009), *Robot Programming by Demonstration: a probabilistic approach*, First Edition, EPFL Press

De Paolis L. T., Mongelli A. (2015), *Augmented and Virtual Reality*, Second International Conference, AVR 2015, Lecce, Italy, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9254, Springer

Driggers R. G., Friedman M. H., (2012), *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*, Second Edition, USA, Artech House

Gershikov E., Libe T., Kosolapov S., (2013), *Horizon Line Detection in Marine Images: Which Method to Choose?*, International Journal on Advances in Intelligent Systems 6 (1-2)

Hartley R., Zisserman A., (2004), *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Second Edition, Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press

He Z, Zhou J, (2008), *Empirical Evaluation of a New Method for Calculating Signal-to-Noise Ratio for Microarray Data Analysis*, University of Oklahoma

Kim S., Know S., Choi B., *Robust Horizontal Line Detection and Tracking in Occluded Environment for Infrared thermocameras*

S., Lee J., (2014), *Small Infrared Target Detection by Region-Adaptive Clutter Rejection for Sea-Based Infrared Search and Track*, Sensors Editorial Office, Vol. 14:13210–13242, Basel, Switzerland

Kim S., Yang Y., Lee J., (2011), *Horizontal small target detection with cooperative background estimation and removal filter*, International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference

Leung A., (2014), *Multimedia, Communication and Computing Application*, Xiamen, China, CRC Press

Lipson A., Lipson S.G., Lipson H., (2011), *Optical Physics*, Fourth Edition, New York, Cambridge University Press

Prince S., (2012), *Computer Vision: Models, Learning, and Inference*, Cambridge University Press

Warren R. C., (2002), *The Performance of Small Support Spatial and Temporal Filters for Dim Point Target Detection in Infrared Image Sequences*, Springer

Williams C.S., Becklund O. A., (1989), *Introduction to the Optical Transfer Function*, Washington USA, Spie Press

Zhang W, Yang X., Xu Z, An P., Liu Q., Lu Y, (2012), *Advances on Digital Television and Wireless Multimedia Communications*, Shanghai, Springer

Evgeny, Tzvika, and Samuel Department of Electrical Engineering Braude Academic College of Engineering Karmiel 21982, Israel