



UNIVERSITÀ DI PISA

Progetto di Sistemi Subacquei:

Deep PU.R.P.L.E Wall-Following
(PUffer Robotic Pool Levee Evaluation)

Navigation System

Professori:

Andrea Caiti

Riccardo Costanzi

Candidati:

Franca Corradini

Ilaria Rosati

Marco Borraccino



SCOPO E STRUTTURA DEL PROGETTO

Scopo: implementazione tramite software Matlab di un AUV che effettui il pattugliamento delle pareti laterali di un bacino rettangolare di cui sono noti gli spigoli

Struttura del progetto:

- Fase di Inizializzazione
- EXTENDED KALMAN FILTER TD
- Implementazione Matlab del blocco Sistema di Navigazione
- Simulazioni e integrazione complessiva dei vari blocchi

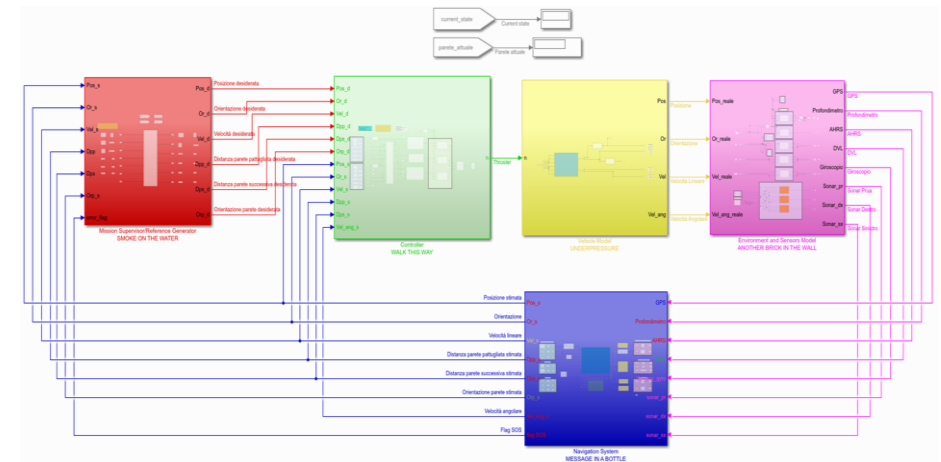
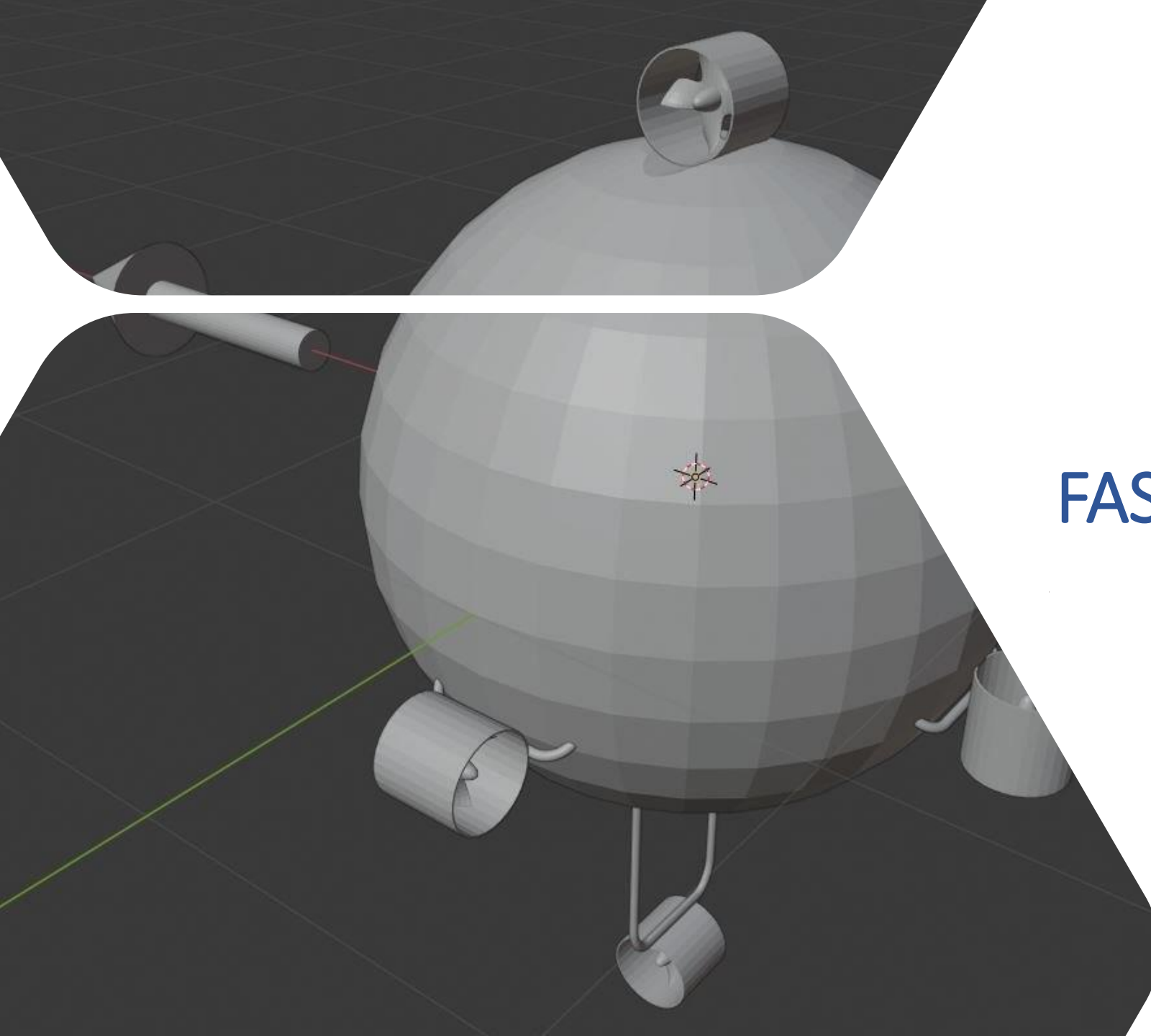


Figura 1: template integrale Team C



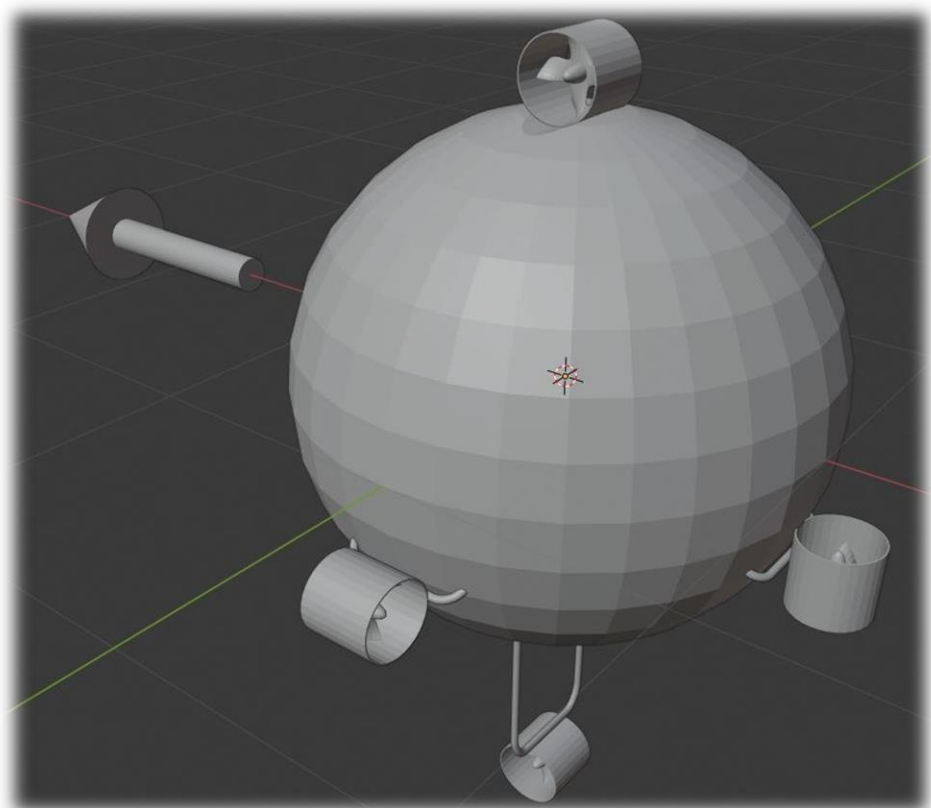
FASE DI INIZIALIZZAZIONE



FASE DI INIZIALIZZAZIONE

- **Caratteristiche fisiche**

- Sensori
- Segnali di interfaccia tra i vari blocchi



- Forma **sferica** ($r = 0,285 \text{ m}$)
- Peso 100 kg
- Neutro ($\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$)
- Stabilità di peso

Figura 2: modello fisico di **DEEP PU.R.P.L.E** (*Puffer Robotic Pool Levee Evaluation*)



FASE DI INIZIALIZZAZIONE

- Caratteristiche fisiche
- **Sensori**
- Segnali di interfaccia tra i vari blocchi

SENSORE	VARIANZA σ^2	FREQUENZA
GPS	3 [m ²]	1 Hz
Profondimetro	0.2 [m ²]	10 Hz
DVL	0.012 ² [(m/s) ²]	5 Hz
AHRS	0.0087 [rad ²] 0.0087 [rad ²] 0.0017 [rad ²] Roll Pitch Yaw	10 Hz
Sonar	0.05 [m ²]	2 Hz
Giroscopio	2.5133 · 10 ⁻⁶ [(rad/s) ²]	10 Hz

Tabella 1: tabella dei sensori con rispettivi valori delle varianze e delle frequenze

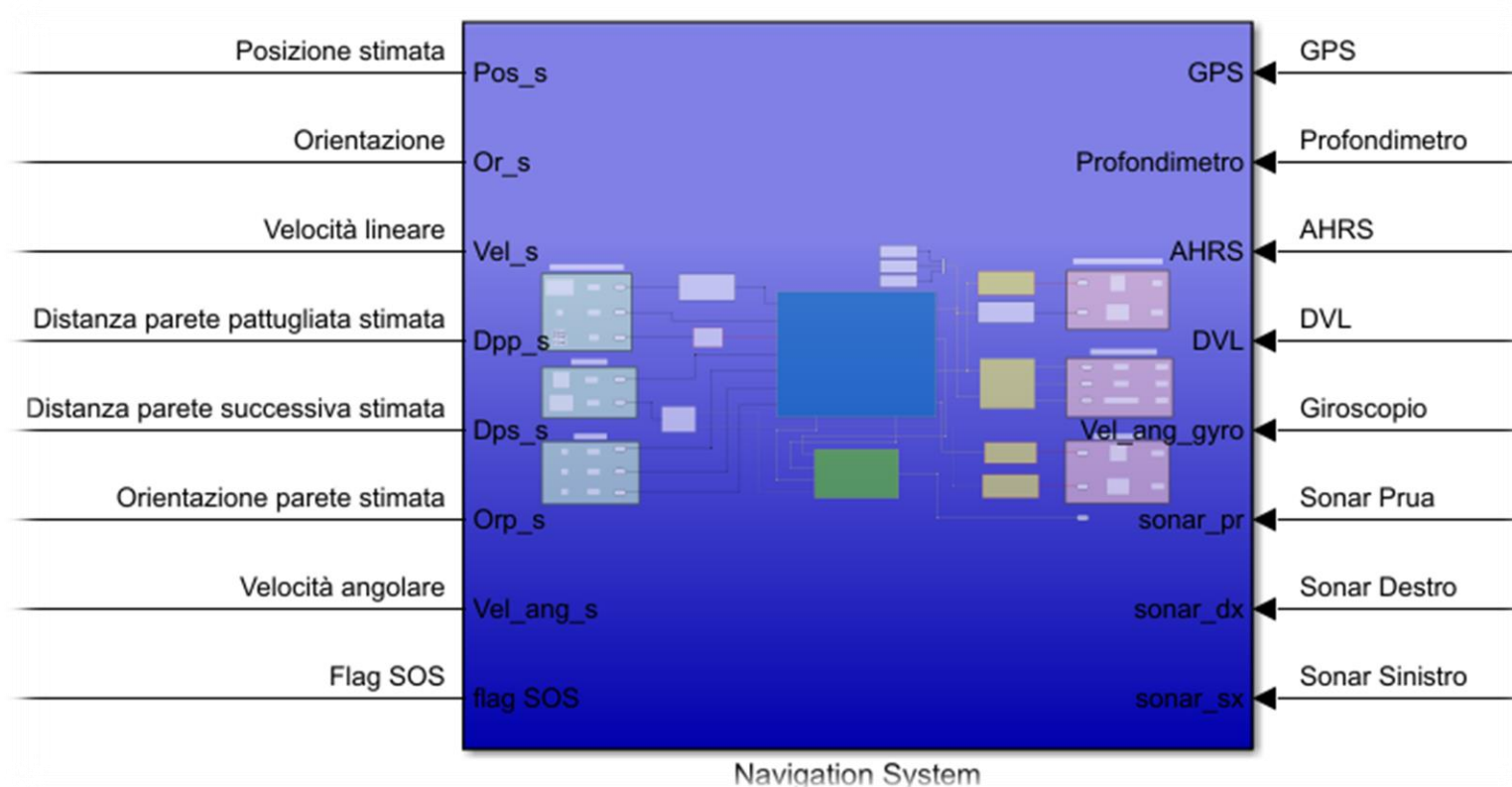


FASE DI INIZIALIZZAZIONE

- Caratteristiche fisiche
- Sensori
- **Segnali di interfaccia tra i vari blocchi**

Mission
supervisor

Controller

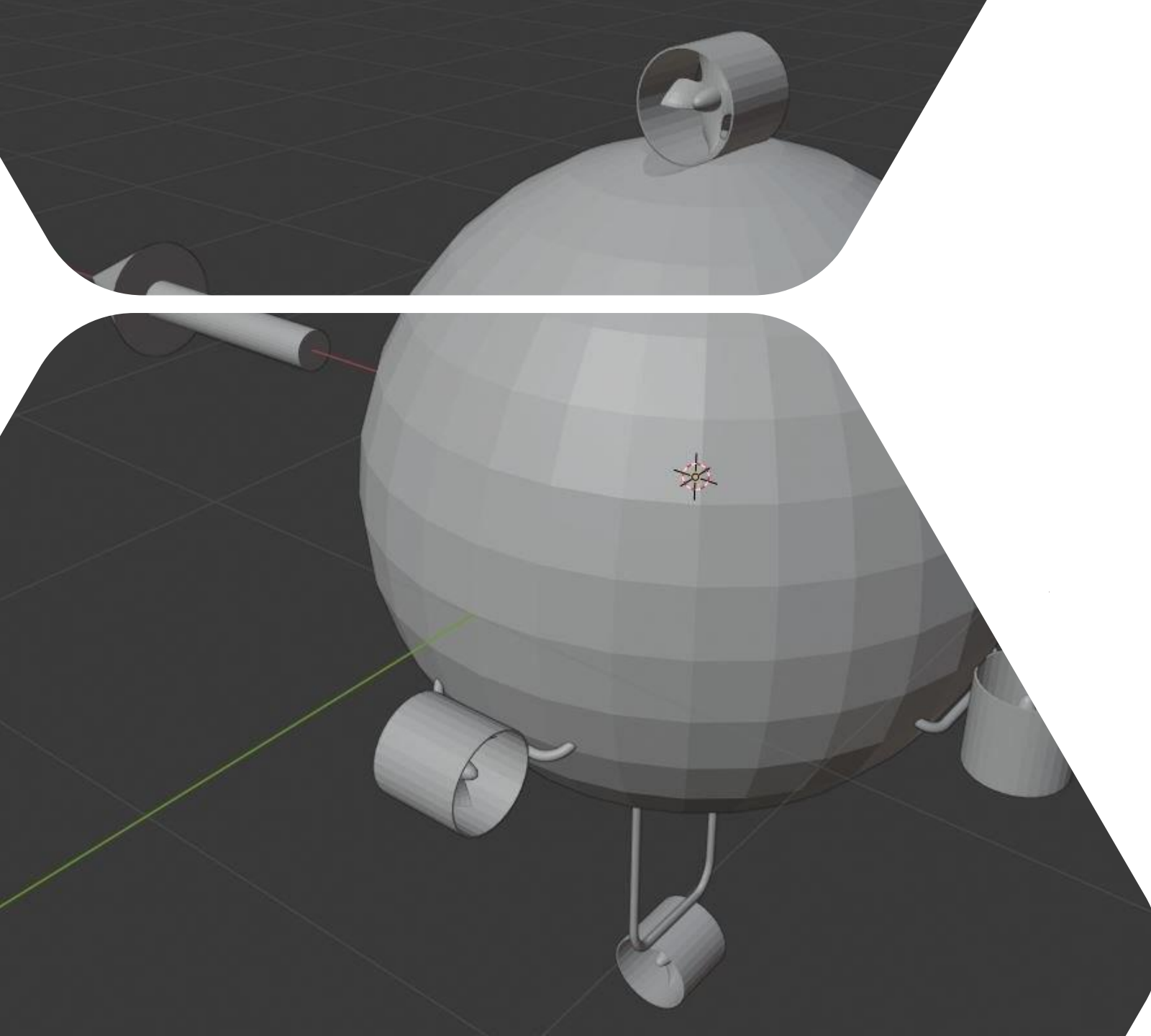


Environment
and Sensor
Model

Figura 3: segnali di interfaccia provenienti da Environment and Sensor System e in uscita verso Controller e Mission Supervisor



EXTENDED KALMAN FILTER TD: per la stima della posizione





EXTENDED KALMAN FILTER TD

$$\begin{cases} \overrightarrow{\eta_1^k} = \overrightarrow{\eta_1^{k-1}} + \Delta T J_{\left(\overrightarrow{\eta_2^{k-1}} + \overrightarrow{\omega_{\eta_2}^{k-1}}\right)} \left(\overrightarrow{v_1^{k-1}} + \overrightarrow{\omega_{v_1}^{k-1}}\right) \\ \overrightarrow{z^{k-1}} = \overrightarrow{\eta_1^{k-1}} + \overrightarrow{\omega_z^{k-1}} \end{cases}$$

Posizione Stimata (NED frame)

$$\overrightarrow{\eta_1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Orientazione (XYZ)

$$\overrightarrow{\eta_2} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$

Velocità lineare

$$\overrightarrow{v_1}$$

Tempo di campionamento

$$\Delta T = 0.1 \text{ s}$$

Misure

Errore velocità lineare

Errore orientazione

Errore vettore delle misure

Matrice di rotazione

$$\overrightarrow{z}$$

$$\overrightarrow{\omega_{v_1}}$$

$$\overrightarrow{\omega_{\eta_2}}$$

$$\overrightarrow{\omega_z}$$

$$J(\overrightarrow{\eta_2})$$



EKF Predizione

$$\overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k-1}} = f\left(\overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k-1|k-1}}, \overrightarrow{v_1^{k-1}}, \overrightarrow{\eta_2^{k-1}}, \mathbf{0}\right) = \overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k-1|k-1}} + \Delta T J_{\left(\overrightarrow{\eta_2^{k-1}}\right)} \overrightarrow{v_1^{k-1}}$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{L}_{k-1} \mathbf{Q}_k \mathbf{L}_{k-1}^T$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_{AHRs_{roll}}^2 \quad \sigma_{AHRs_{pitch}}^2 \quad \sigma_{AHRs_{yaw}}^2 \quad \sigma_{DVL}^2 \quad \sigma_{DVL}^2 \quad \sigma_{DVL}^2)$$

$$\mathbf{F}_{k-1} = \left(\frac{df}{d\eta_1} \right) \begin{matrix} \overrightarrow{v_1^{k-1}} \\ \overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k-1}} \\ \overrightarrow{\omega_{k-1}=0} \end{matrix}$$

$$\mathbf{L}_{k-1} = \left(\frac{df}{d\omega} \right) \begin{matrix} \overrightarrow{v_1^{k-1}} \\ \overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k-1}} \\ \overrightarrow{\omega_{k-1}=0} \end{matrix}$$



EKF Correzione

$$\vec{e}^k = \vec{z}^k - \vec{h} \left(\overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k-1}}, J \right)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + M_k R_k M_k^T$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$

$$\overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k}} = \overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k-1}} + K_k e_k$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

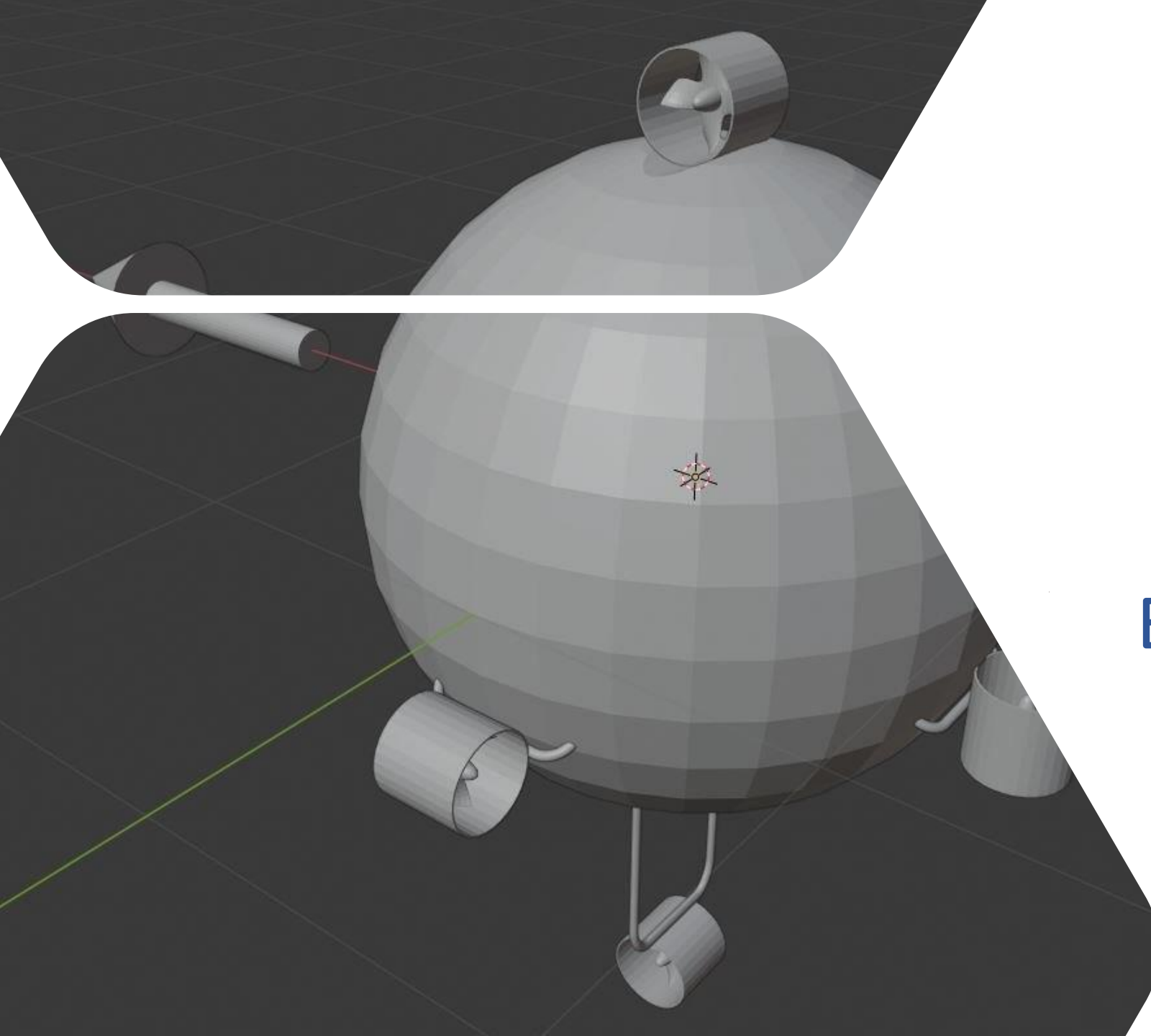
$$R = \text{diag}(\sigma_{GPS}^2 \quad \sigma_{GPS}^2 \quad \sigma_{profondimetro}^2 \quad \sigma_{sonar}^2 \quad \sigma_{sonar}^2 \quad \sigma_{sonar}^2)$$

$$M_k = \left. \frac{dh(\eta_1, J)}{d\omega_z} \right|_{\overrightarrow{\hat{\eta}_1^{k|k-1}}} = I_{6 \times 6}$$

$$H_k = \left. \frac{d\vec{h}(\eta_1, J)}{d\eta} \right|_{\hat{\eta}_{k|k-1}}$$



IMPLEMENTAZIONE MATLAB: BLOCCO NAVIGATION SYSTEM





SCHEMA GENERALE Blocco Navigation System

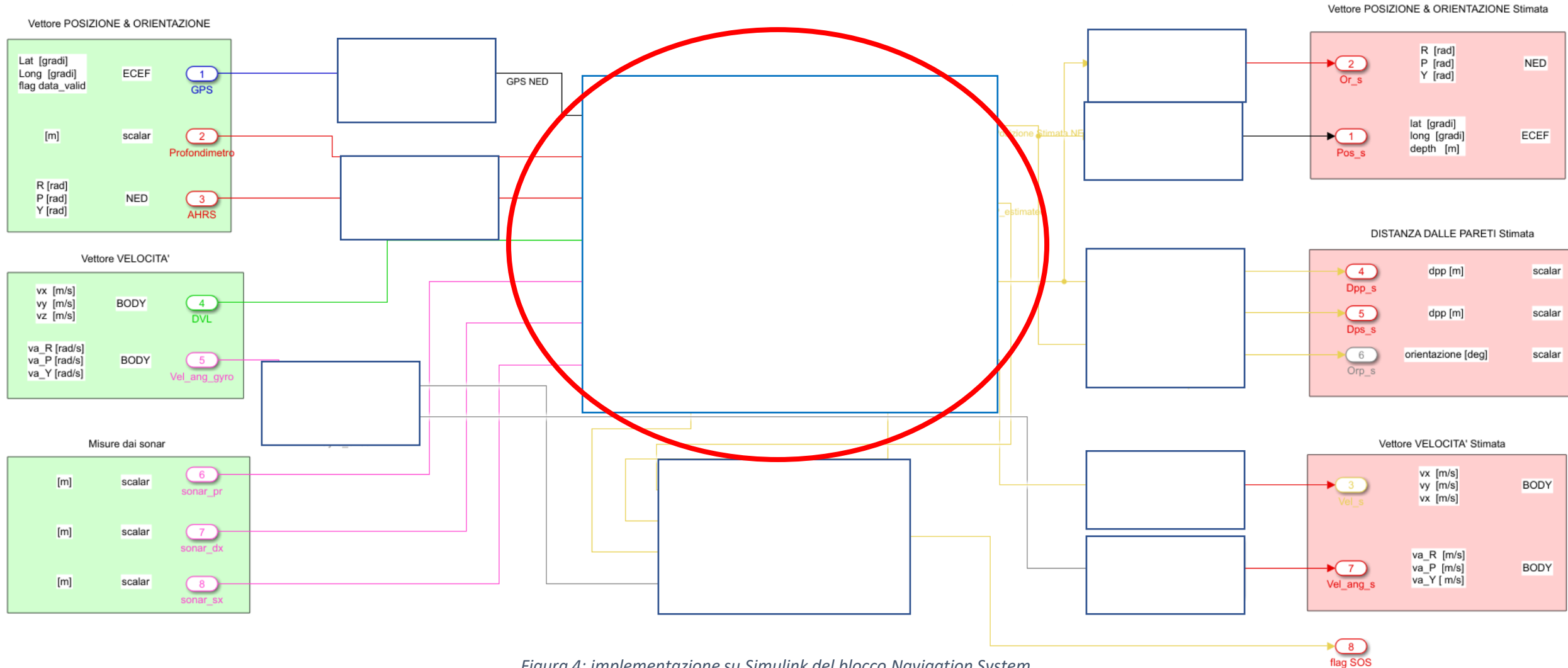


Figura 4: implementazione su Simulink del blocco Navigation System



SCHEMA GENERALE Filtro EKF TD

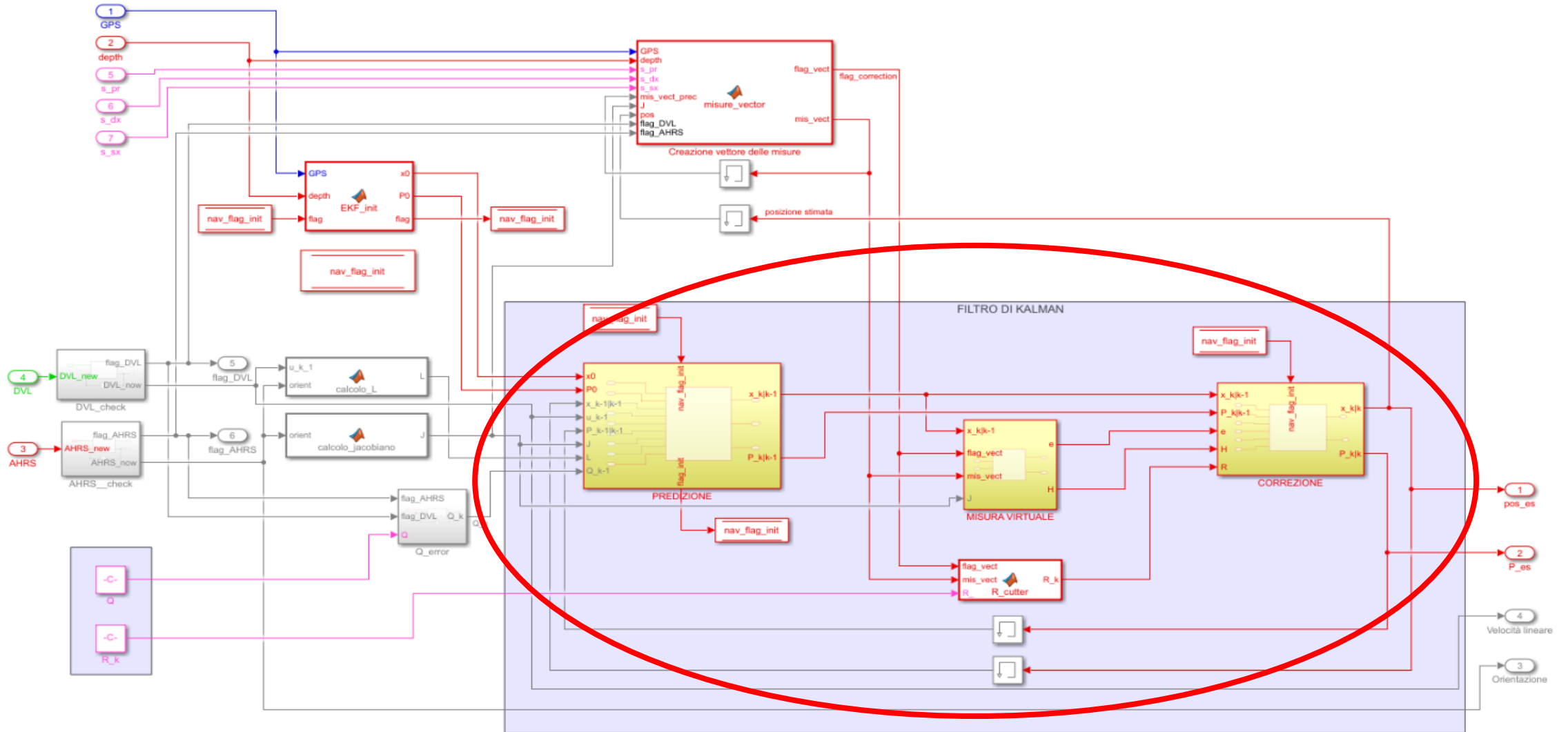


Figura 5: implementazione su Simulink del filtro EKF TD per la stima della posizione



Predizione - Misure virtuali - Correzione

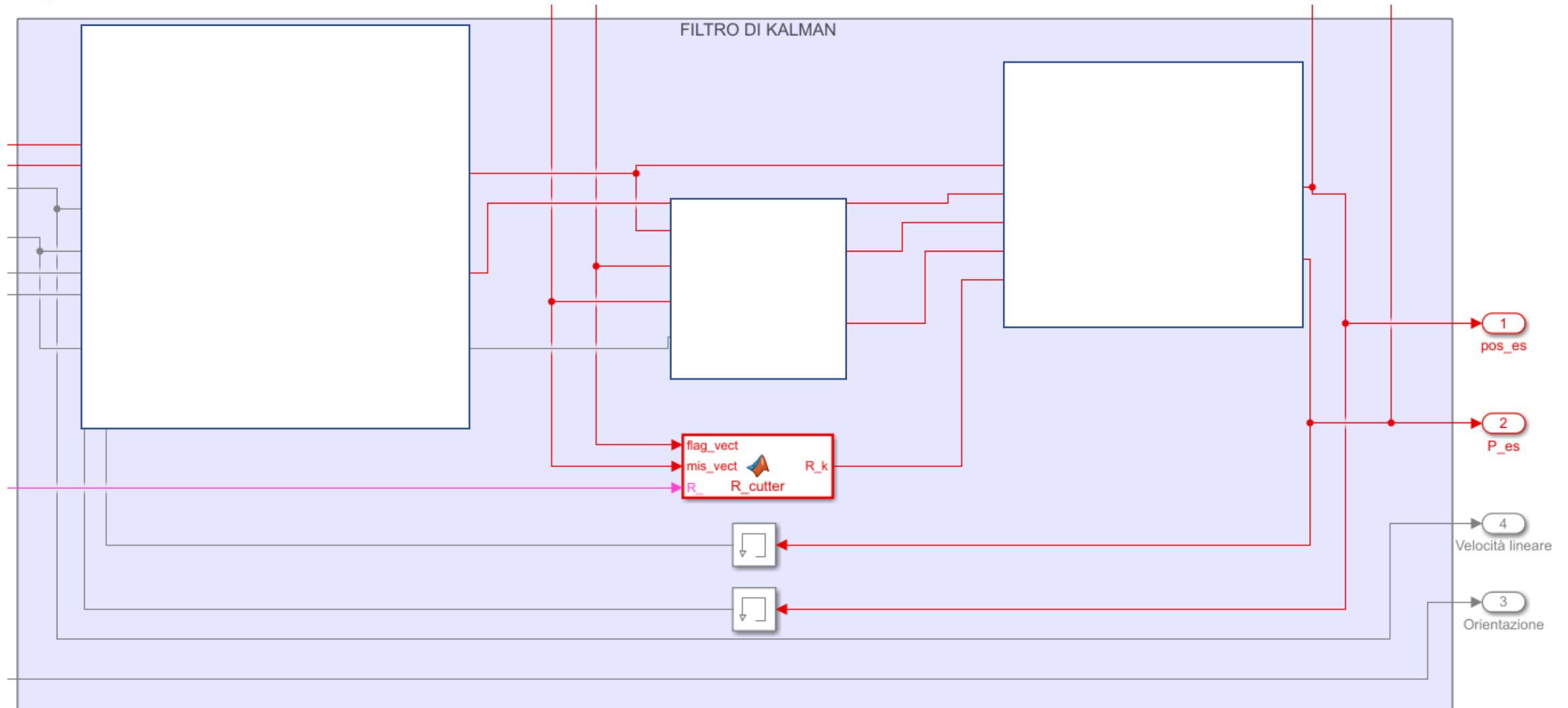


Figura 6: funzioni di Predizione , Misura virtuale, Correzione e elaborazione della matrice di covarianza associata al rumore di misura R.



SCHEMA GENERALE Filtro EKF TD

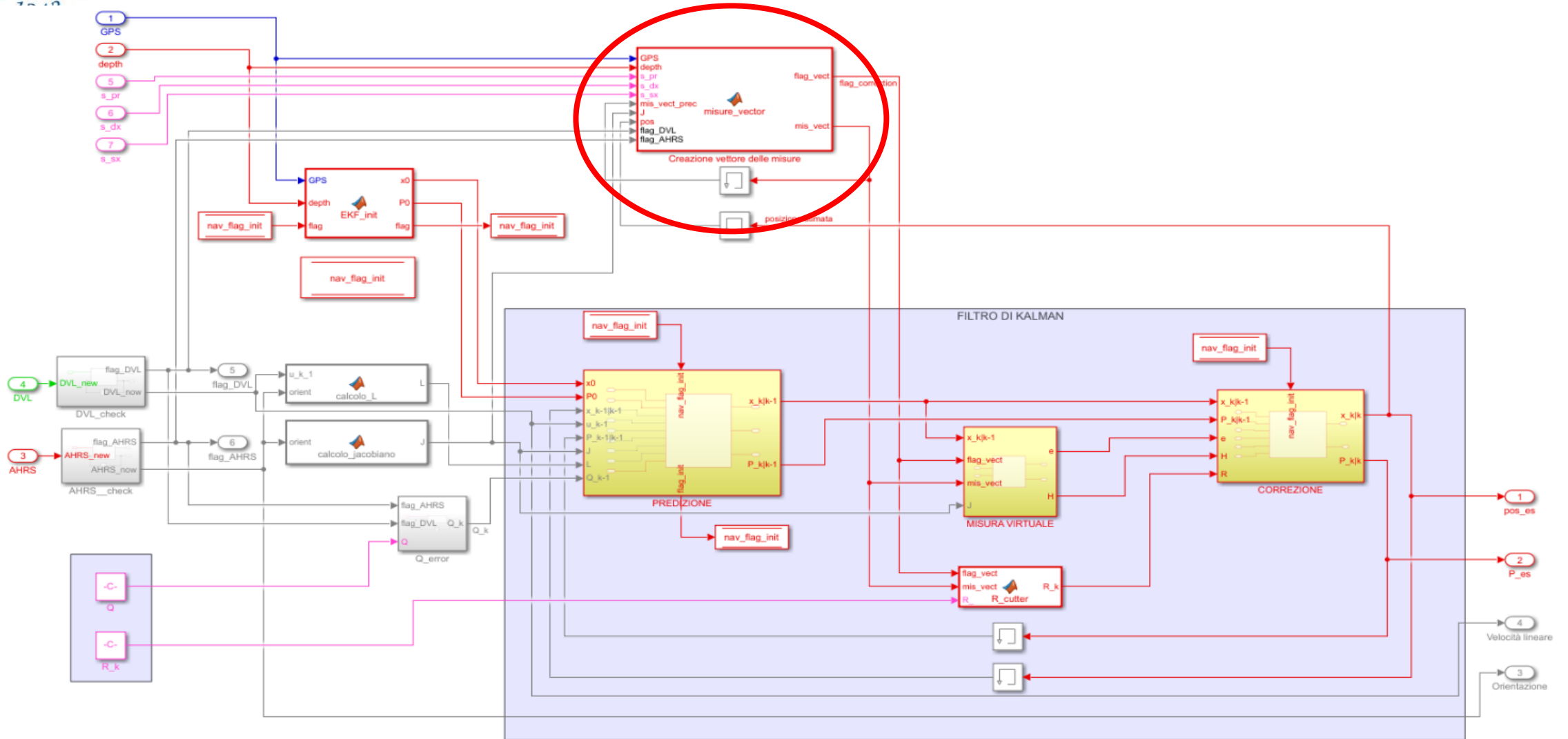


Figura 5: implementazione su Simulink del filtro EKF TD per la stima della posizione



Blocco measure_vector

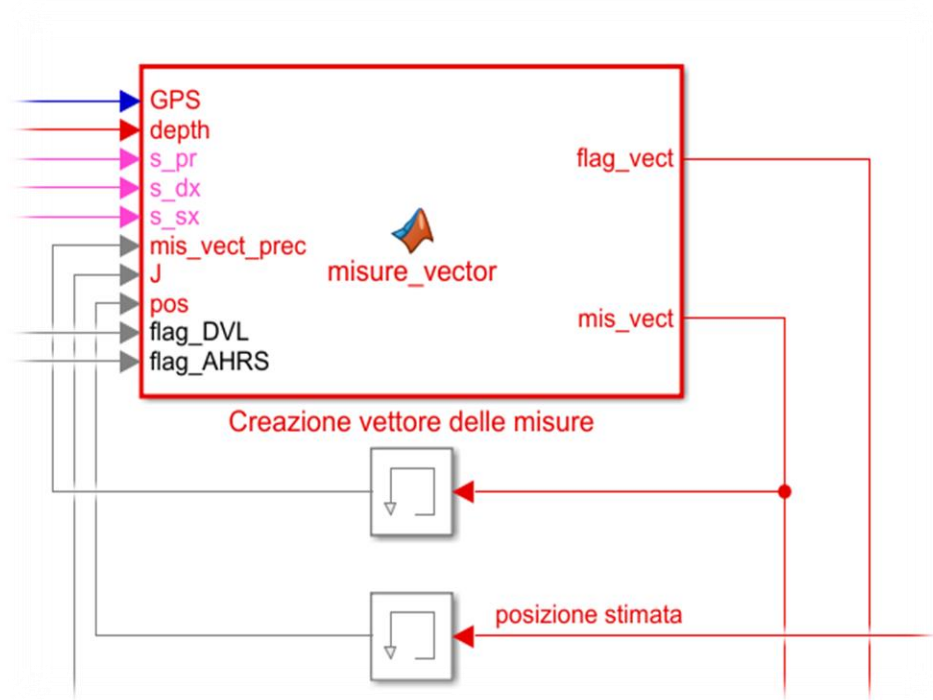


Figura 7: funzione di creazione del vettore delle misure

$$\bullet \text{ mis_vect} = \begin{pmatrix} GPS_{(xNorth)} \\ GPS_{(yEast)} \\ GPS_{(flag)} \\ depth_{profondimetro} \\ d_{sonar_{prua}} \\ d_{sonar_{dx}} \\ d_{sonar_{sx}} \end{pmatrix}$$

- Ultime misure provenienti dai sensori
- **flag_vect**
 - Un flag per ogni misura:
 - Flag=1 se la misura
 - è aggiornata e
 - non supera la soglia (caso sonar)
 - Se Flag=0 misura ignorata nella fase correzione



Soglie sui sonar

- Soglia 1: La misura del sonar inferiore a tre volte la distanza AUV-parete.
- Soglia 2: La distanza tra il centro del fascio del sonar e gli spigoli del bacino è inferiore a 5 m.
- Soglia 3: Si ha variazione repentina della misura del sonar

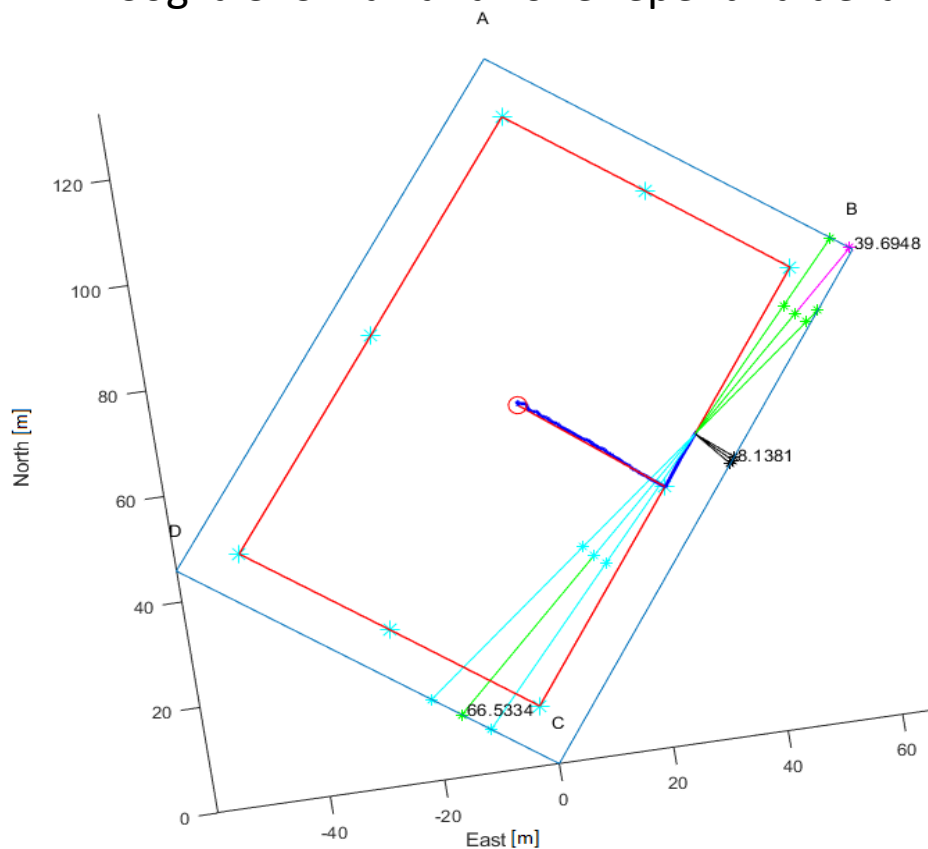


Figura 8: esempio dei fasci conici dei sonar quando puntano verso uno spigolo

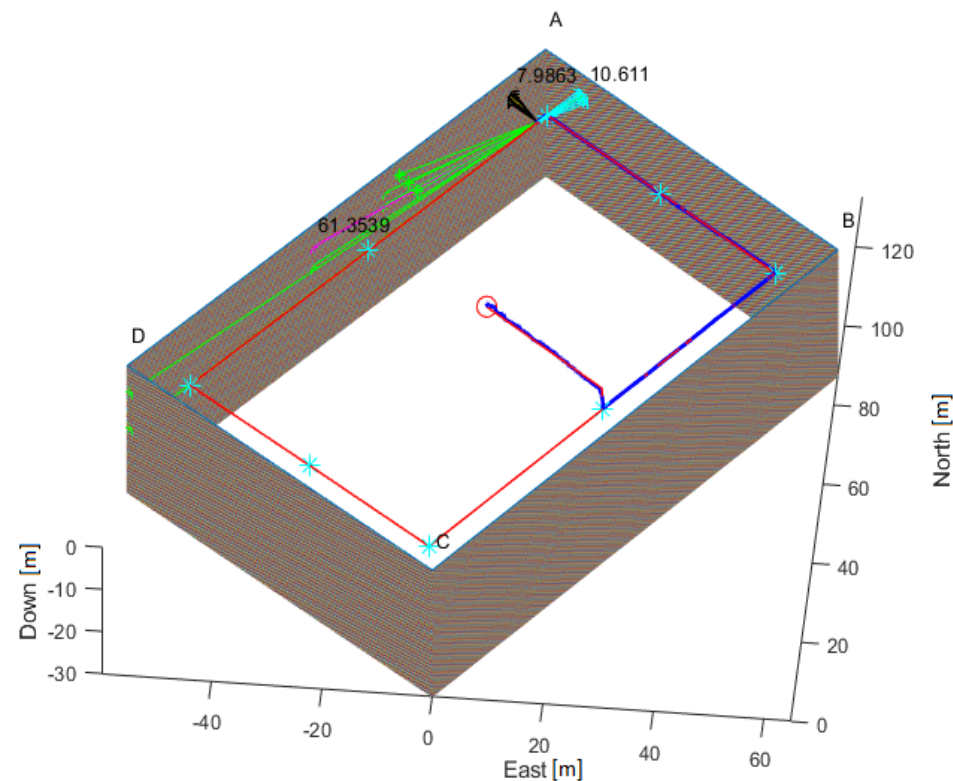


Figura 9: Fase di rotazione dell'AUV con fascio del sonar parallelo alla parete





Funzioni di ausilio

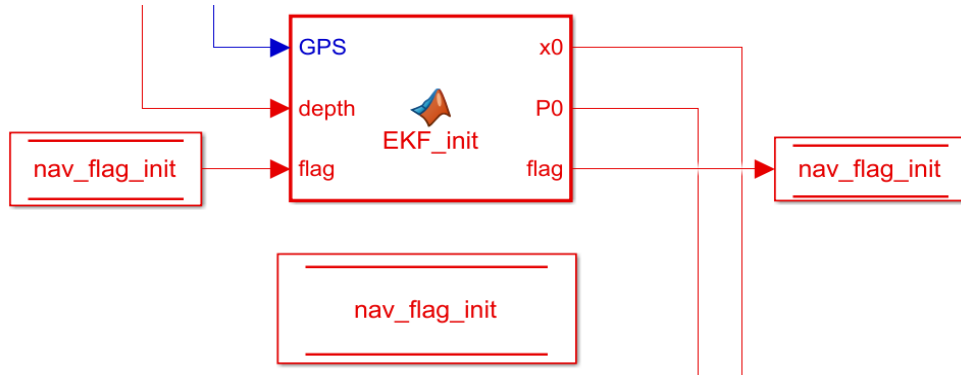


Figura 10: blocco di inizializzazione del filtro

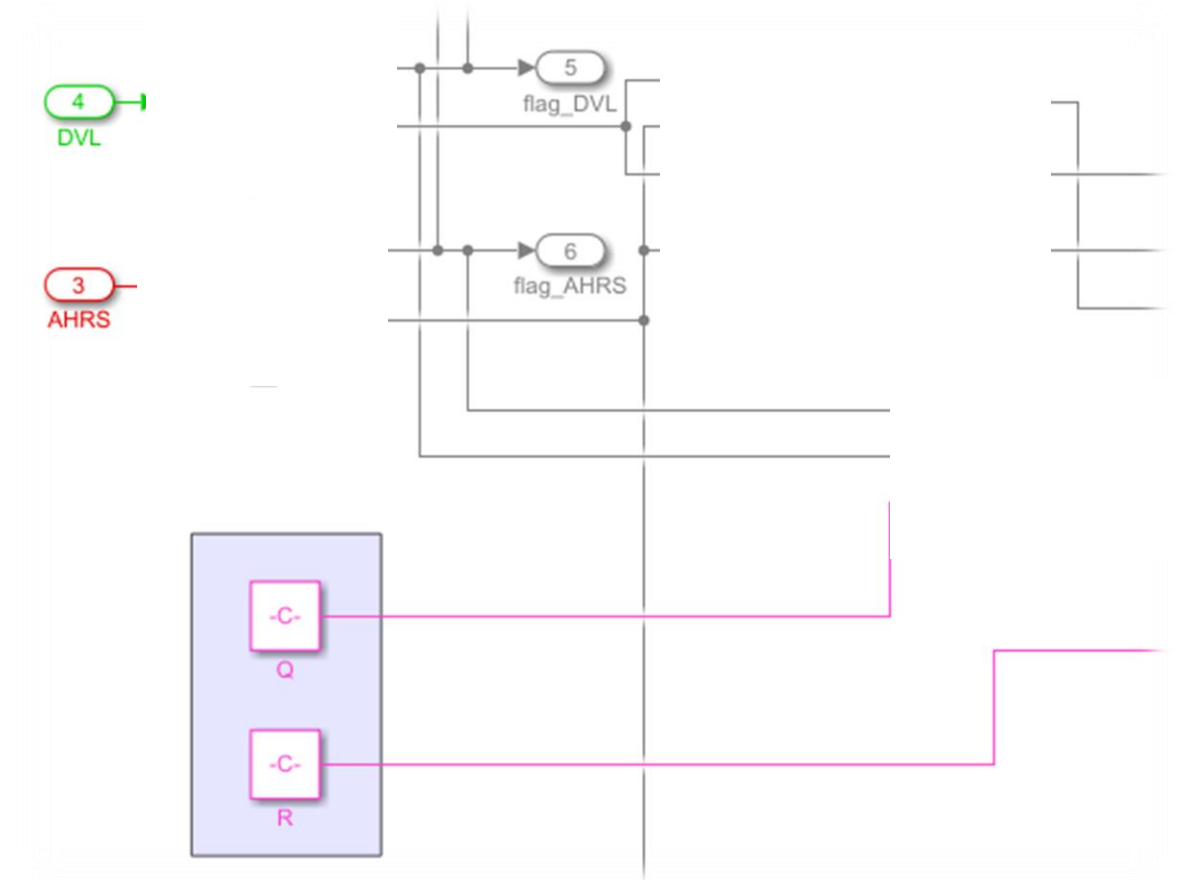
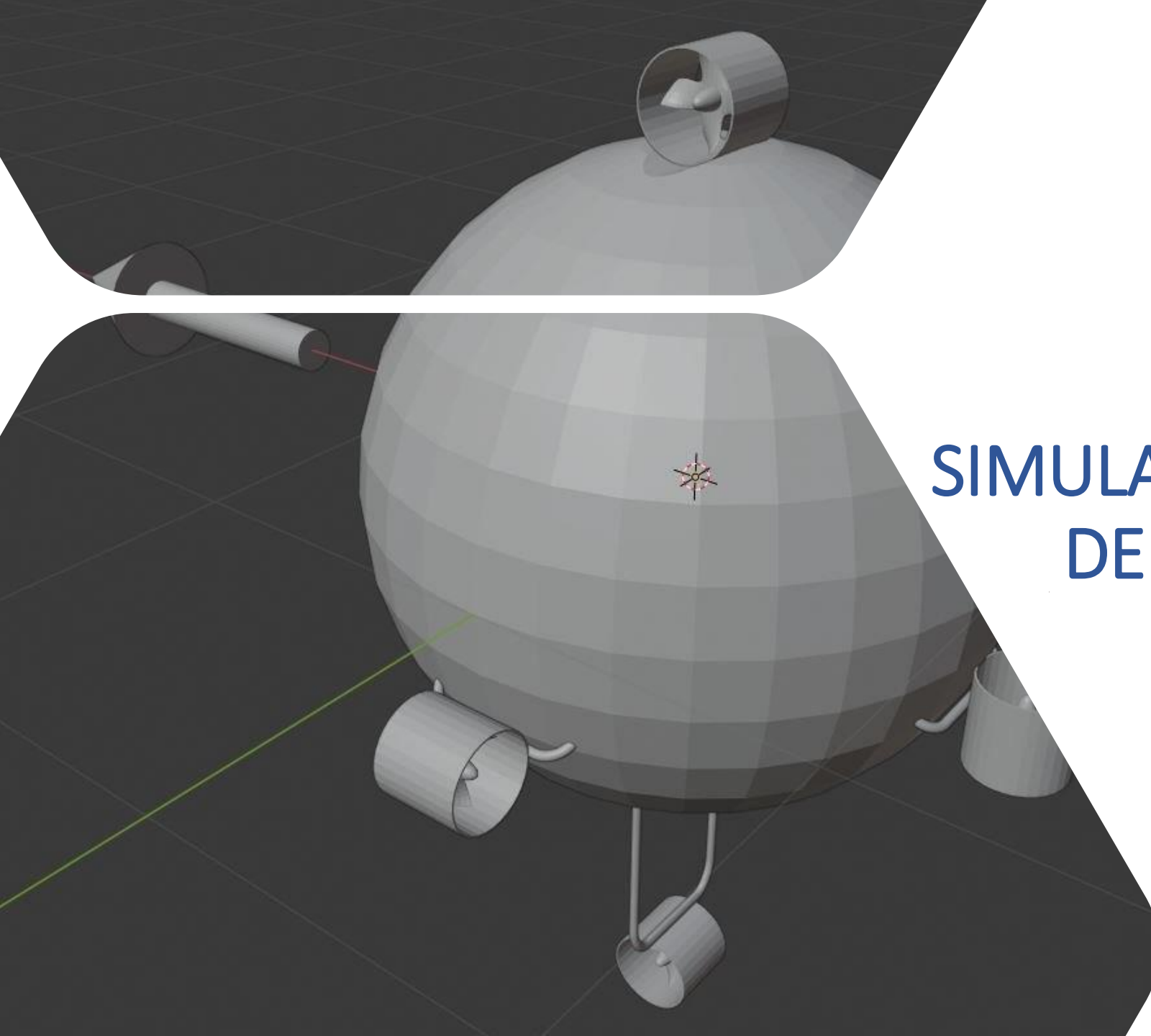


Figura 11: blocchi per il calcolo delle matrici L , di rotazione J e di covarianza Q con i blocchi di ausilio su DVL e AHRS



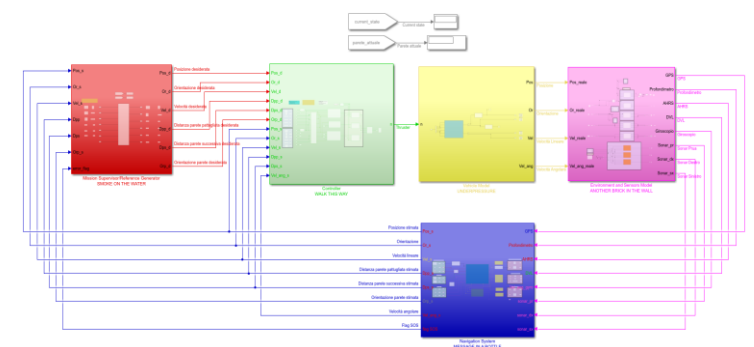
SIMULAZIONI E VALIDAZIONE DEL SISTEMA INTEGRALE





SIMULAZIONI E VALIDAZIONE DEL SISTEMA INTEGRALE

- Simulazione con dati di ricerca reali
- Esempio di miglioramento delle prestazioni con soglie sonar
- Simulazioni con DVL e AHRS non funzionanti
- Prestazioni del sistema





SIMULAZIONE CON DATI DI RICERCA

Sensori disponibili

- GPS (in superficie)
- profundimetro
- DVL
- AHRS

NO SONAR

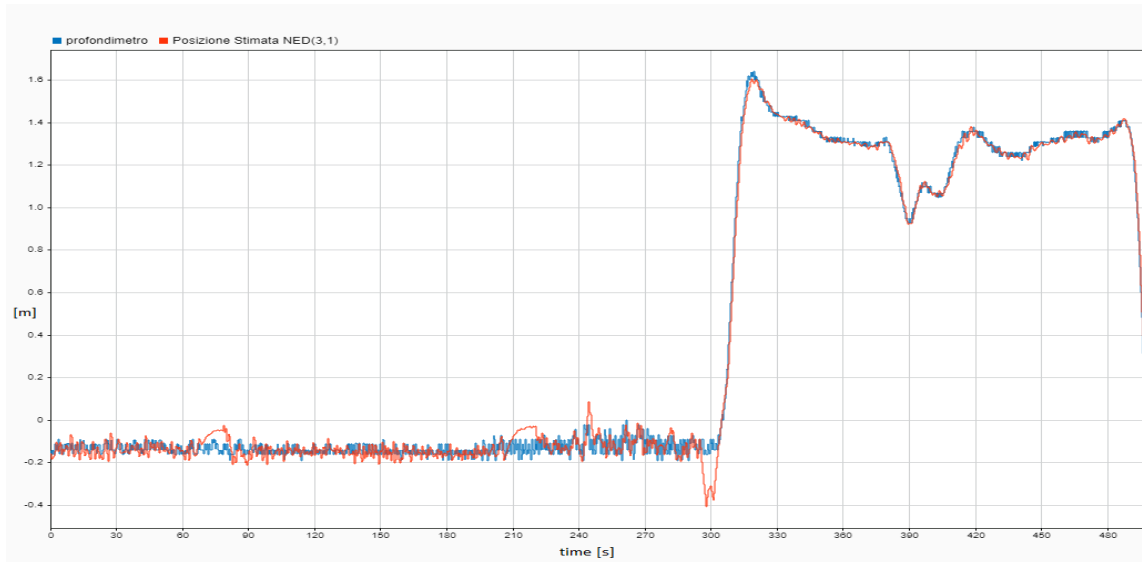


Figura 13: confronto tra profondità stimata e dati provenienti dal profundimetro

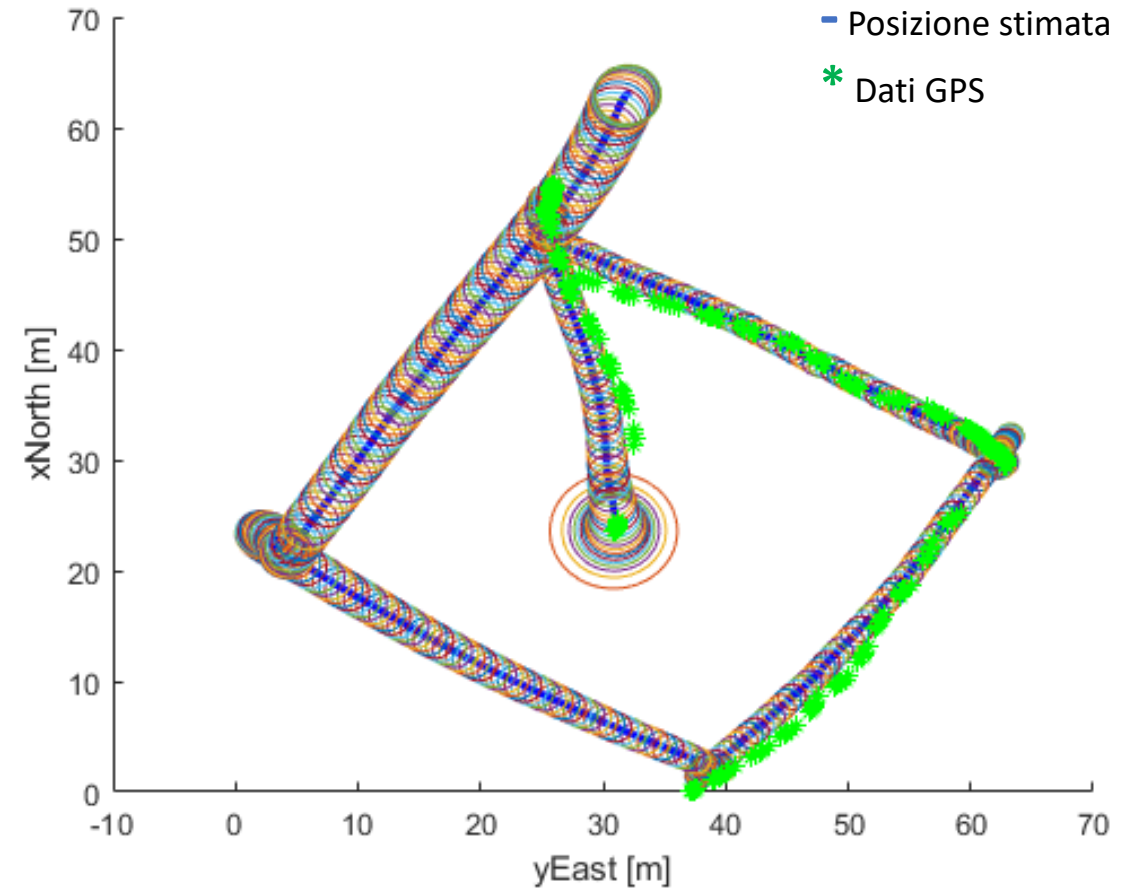
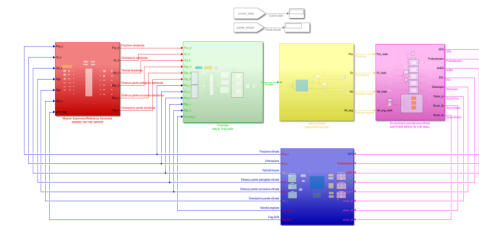


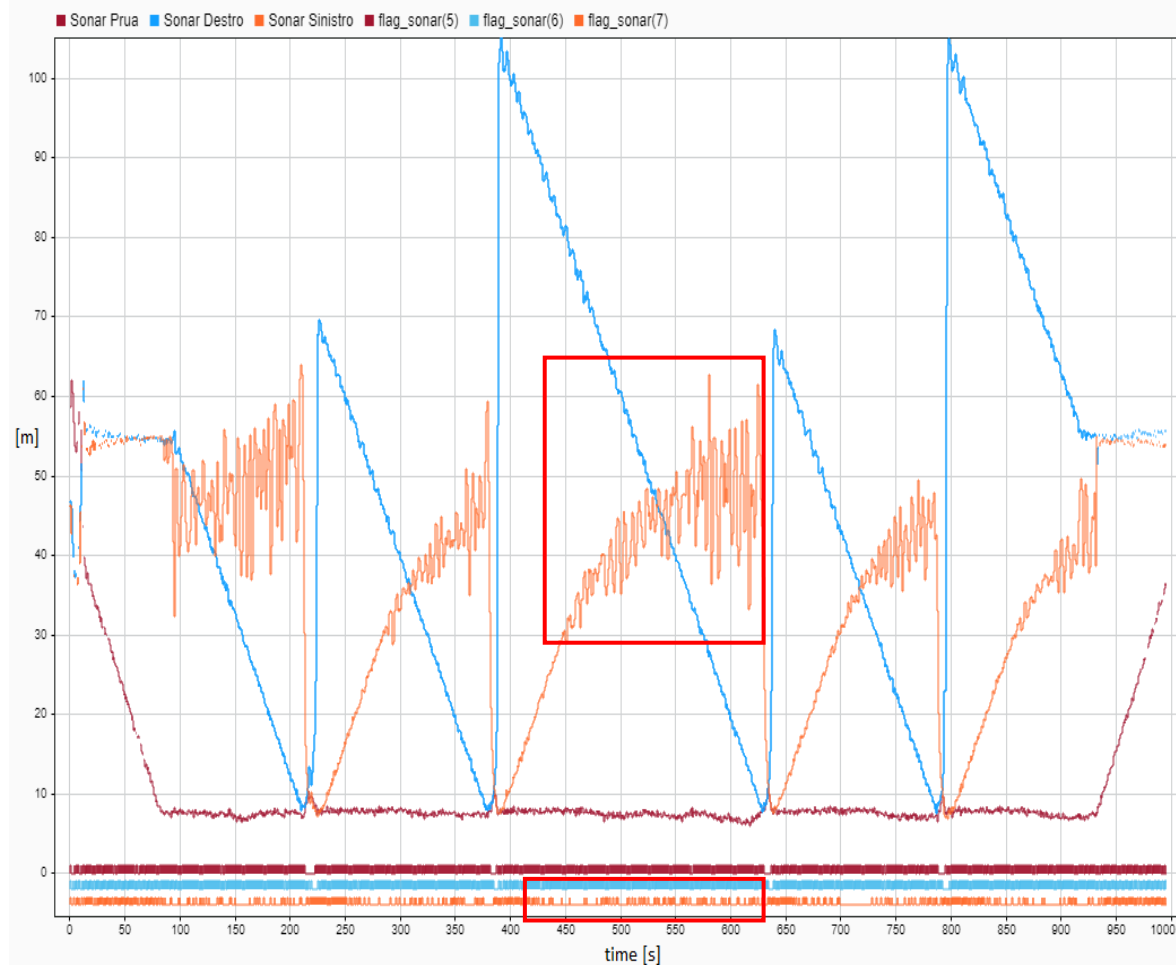
Figure 12: confronto tra la traiettoria stimata dell'AUV e i dati del GPS con ellissoidi d'incertezza (semiassi pari a tre volte la deviazione standard)



SIMULAZIONE INTEGRALE SONAR



SOGLIA DISTANZA: DISATTIVA



SOGLIA DISTANZA: ATTIVA

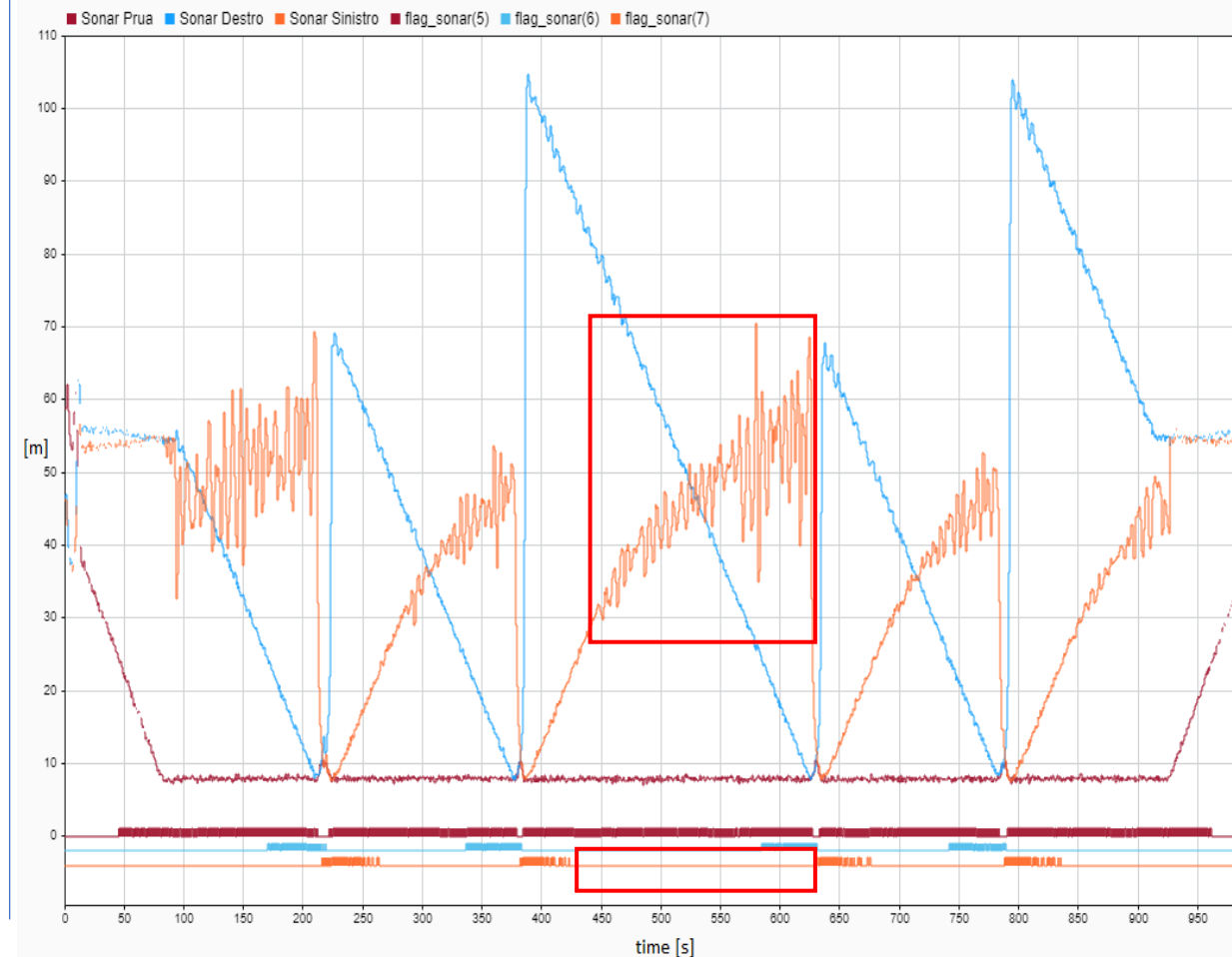
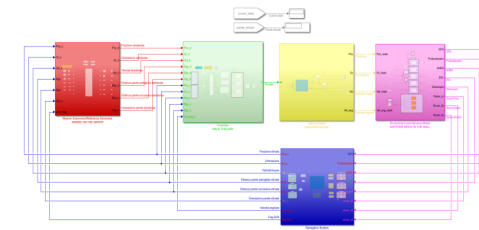


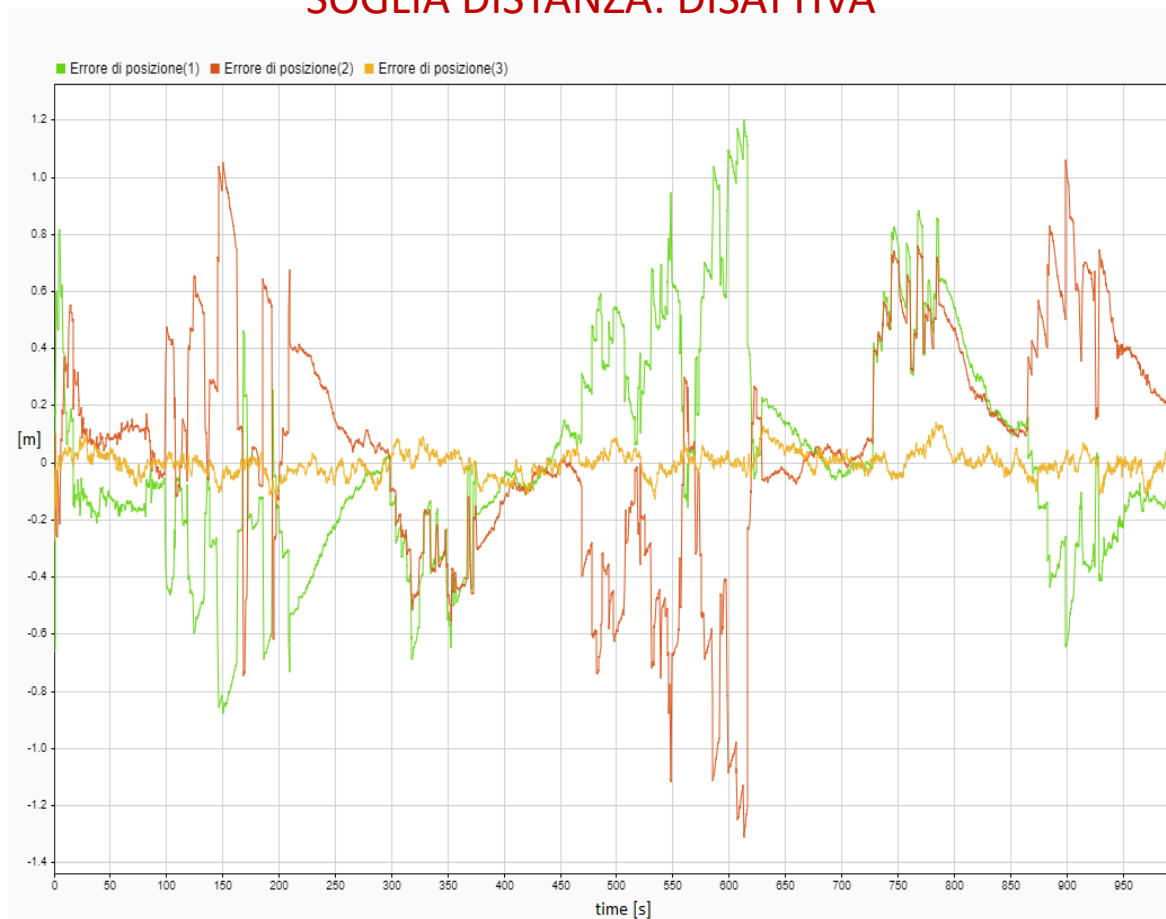
Figura 14: confronto flag di validità di misura in presenza o assenza della soglia sulla distanza



SIMULAZIONE INTEGRALE SONAR



SOGLIA DISTANZA: DISATTIVA



SOGLIA DISTANZA: ATTIVA

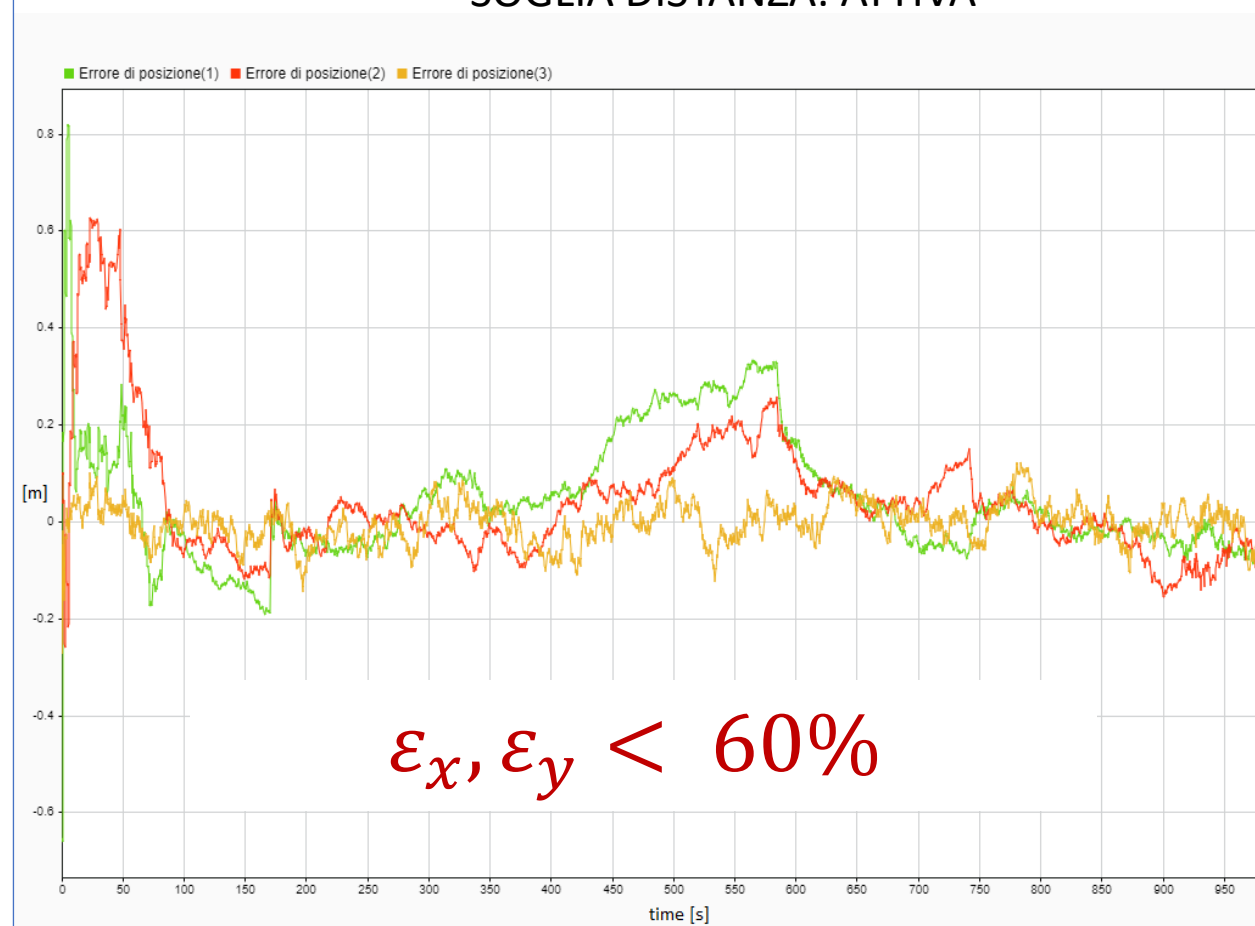


Figura 15: confronto errori assoluti caso con e senza soglia 1 sui sonar



SIMULAZIONE INTEGRALE DVL e AHRS guasti

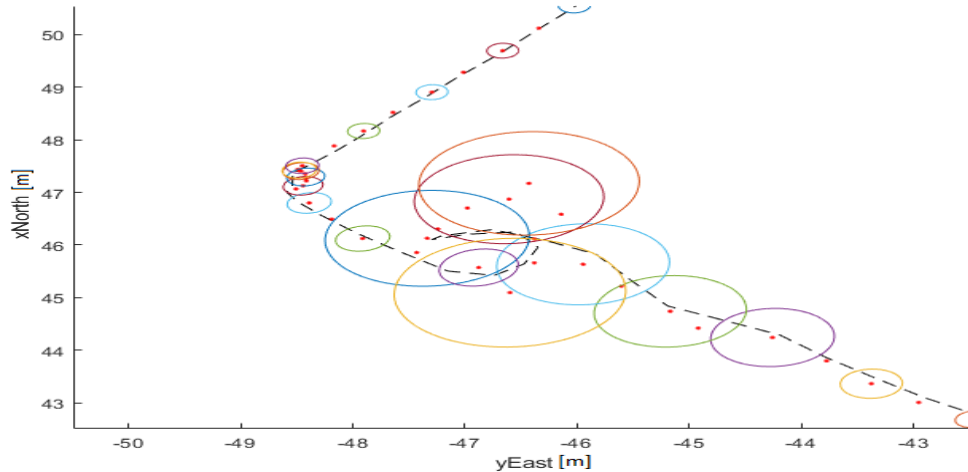
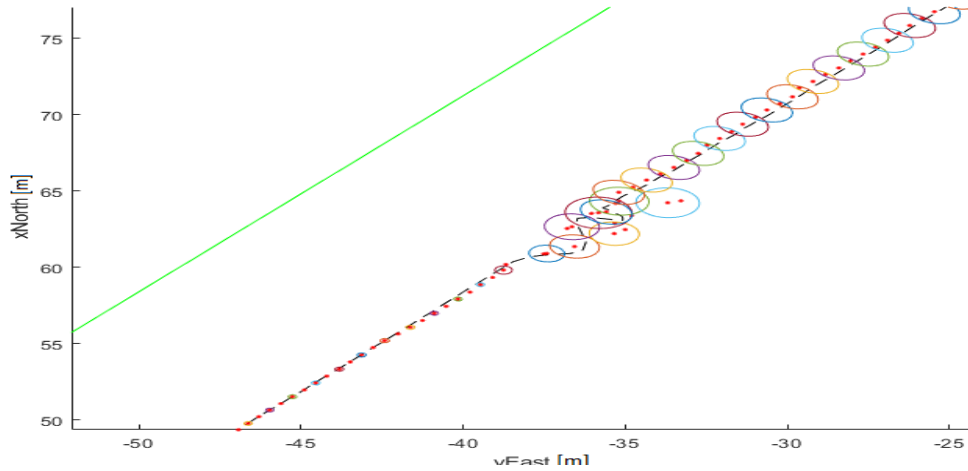
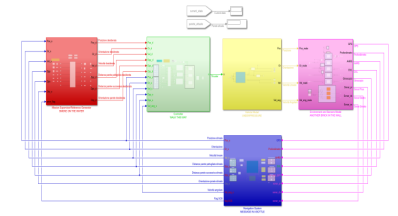


Figura 16: malfunzionamento DVL

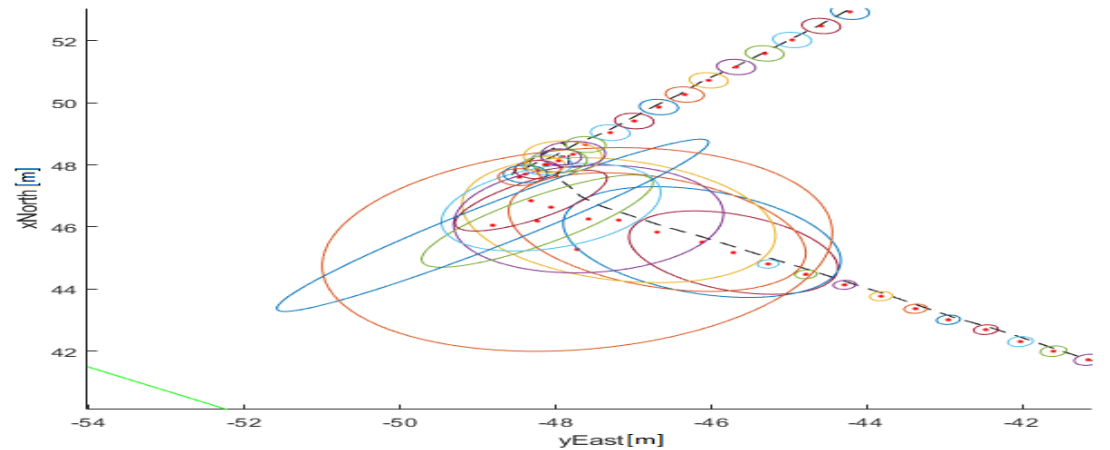
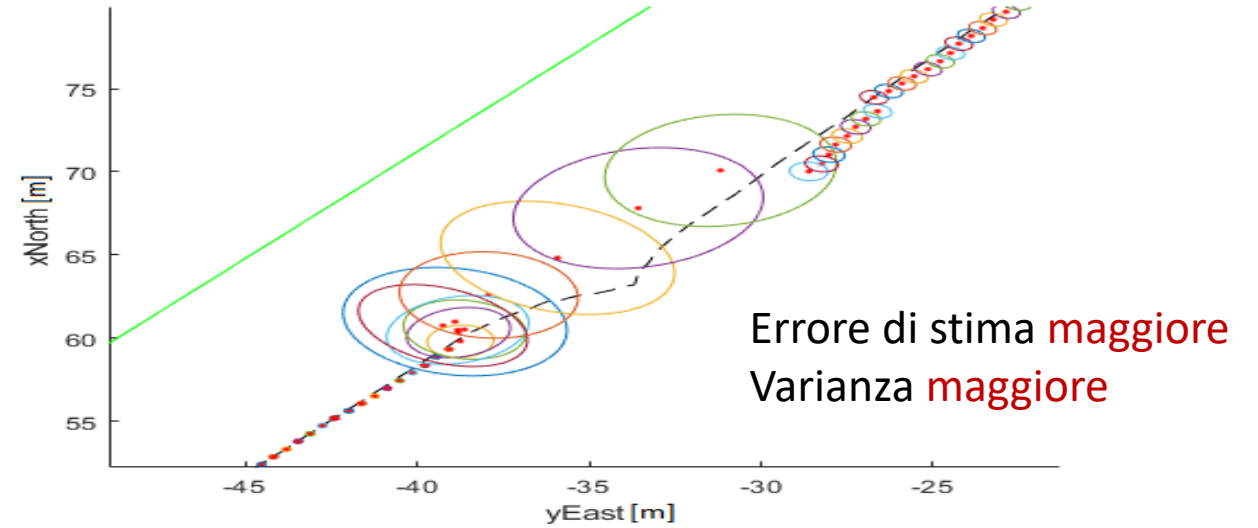
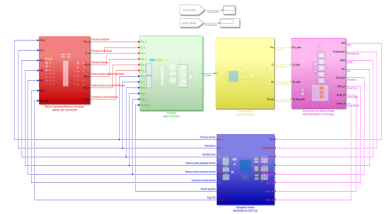


Figura 17: malfunzionamento AHRS



SIMULAZIONE INTEGRALE DVL e AHRS guasti



Tempo di guasto di DVL e AHRS

$t_{\text{simulazione}} \approx 15 \text{ secondi}$

Tempo **max** guasto di DVL e AHRS

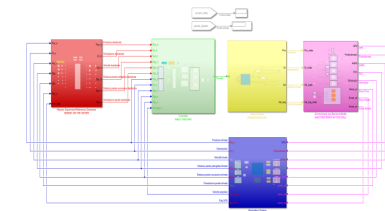
$t_{\text{max}} = 5 \text{ secondi}$



SOS



SIMULAZIONE INTEGRALE



Parete iniziale	Profondità	Distanza dalla parete	Verso di ispezione	Orientazione relativa	Velocità
BC	5 m	8 m	Orario	30°	0,4 m/s

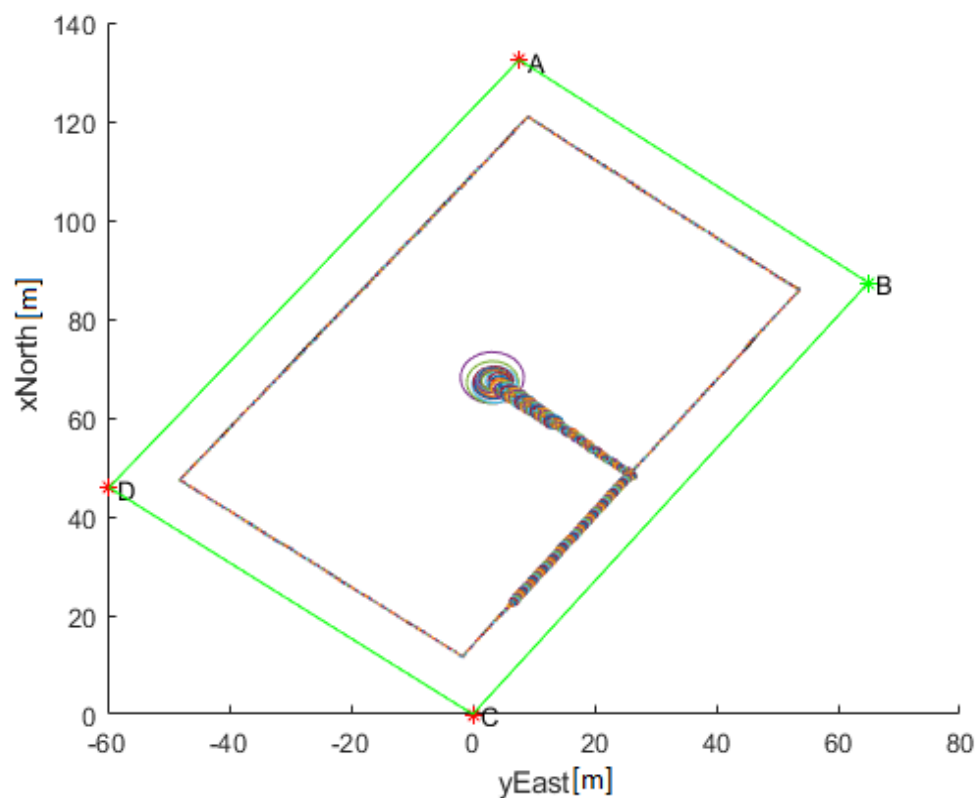


Figura 18: pattugliamento del bacino

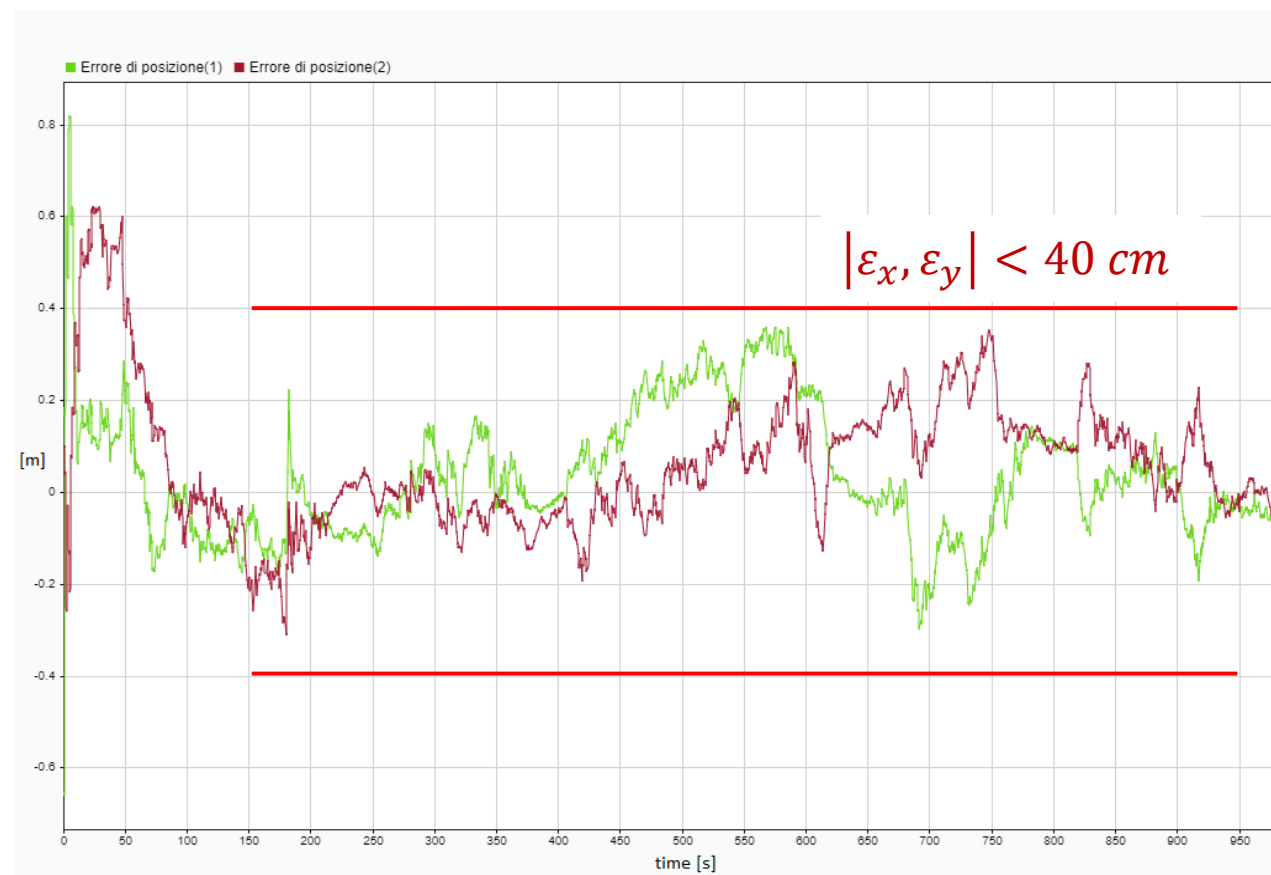
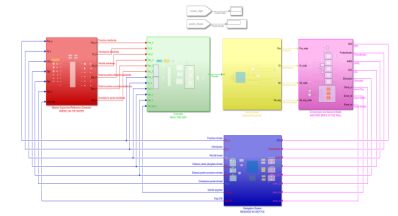


Figura 19: errore assoluto tra posizione stimata e reale



SIMULAZIONE INTEGRALE



Parete iniziale	Profondità	Distanza dalla parete	Verso di ispezione	Orientazione relativa	Velocità
BC	5 m	8 m	Orario	30°	0,4 m/s

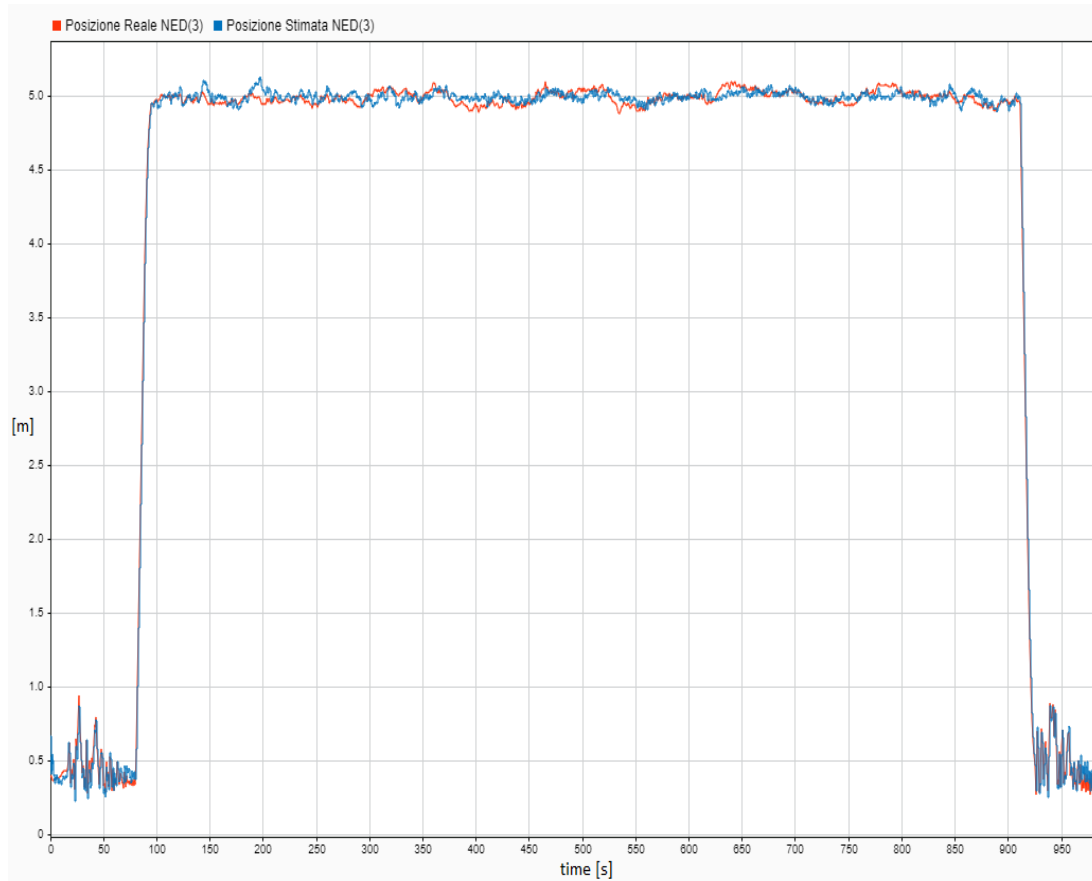


Figura 20: confronto tra profondità reale e stimata

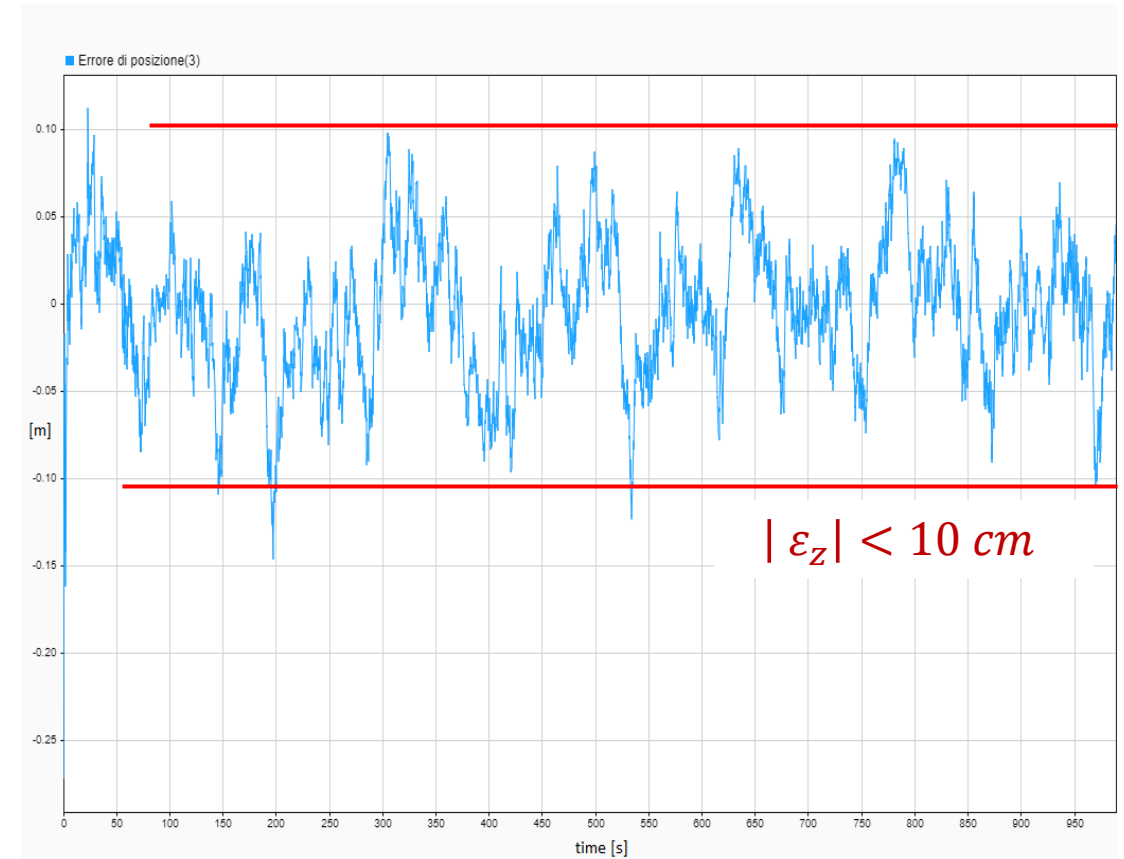


Figura 21: errore assoluto tra profondità stimata e reale



PRESTAZIONI DEL SISTEMA E CONCLUSIONI

Deviazione standard	Valore massimo	Sensori per la correzione
σ_{xy}	$\approx 0,23 \text{ m}$	GPS (superficie)
	$\approx 0,07 \text{ m}$	Sonar (immersione)
σ_z	$\approx 0,05 \text{ m}$	profondimetro

Tabella 2: deviazione standard massima della posizione e profondità stimata

Componente posizione stimata	Errore assoluto massimo
x	$\pm 0,40 \text{ m}$
y	
z	$\pm 0,10 \text{ m}$

Tabella 3: errore assoluto massimo di posizione e profondità stimata

Le prestazioni del sistema di navigazione sono adeguate ed in linea con le necessità del progetto



POSSIBILI SVILUPPI E MIGLIORAMENTI

AUMENTO DI STATO

1) Utilizzo della velocità stimata in ingresso al filtro

$$\vec{\eta} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{c} \text{Posizione} \end{array} \right\} \\ \left. \begin{array}{c} \text{Velocità lineare} \end{array} \right\} \end{array}$$

CONSIDERARE IL RUMORE DELL'AHRS

2a) Pesare l'azione correttiva dei sonar

$$R = \text{diag}(\sigma_{GPS}^2 \quad \sigma_{GPS}^2 \quad \sigma_{profondimetro}^2 \quad \mathbf{K} \cdot \sigma_{sonar}^2 \quad \mathbf{K} \cdot \sigma_{sonar}^2 \quad \mathbf{K} \cdot \sigma_{sonar}^2)$$

2b) Considerare l'errore dell'AHRS nell'innovazione

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{M}_k \mathbf{R}_k \mathbf{M}_k^T$$

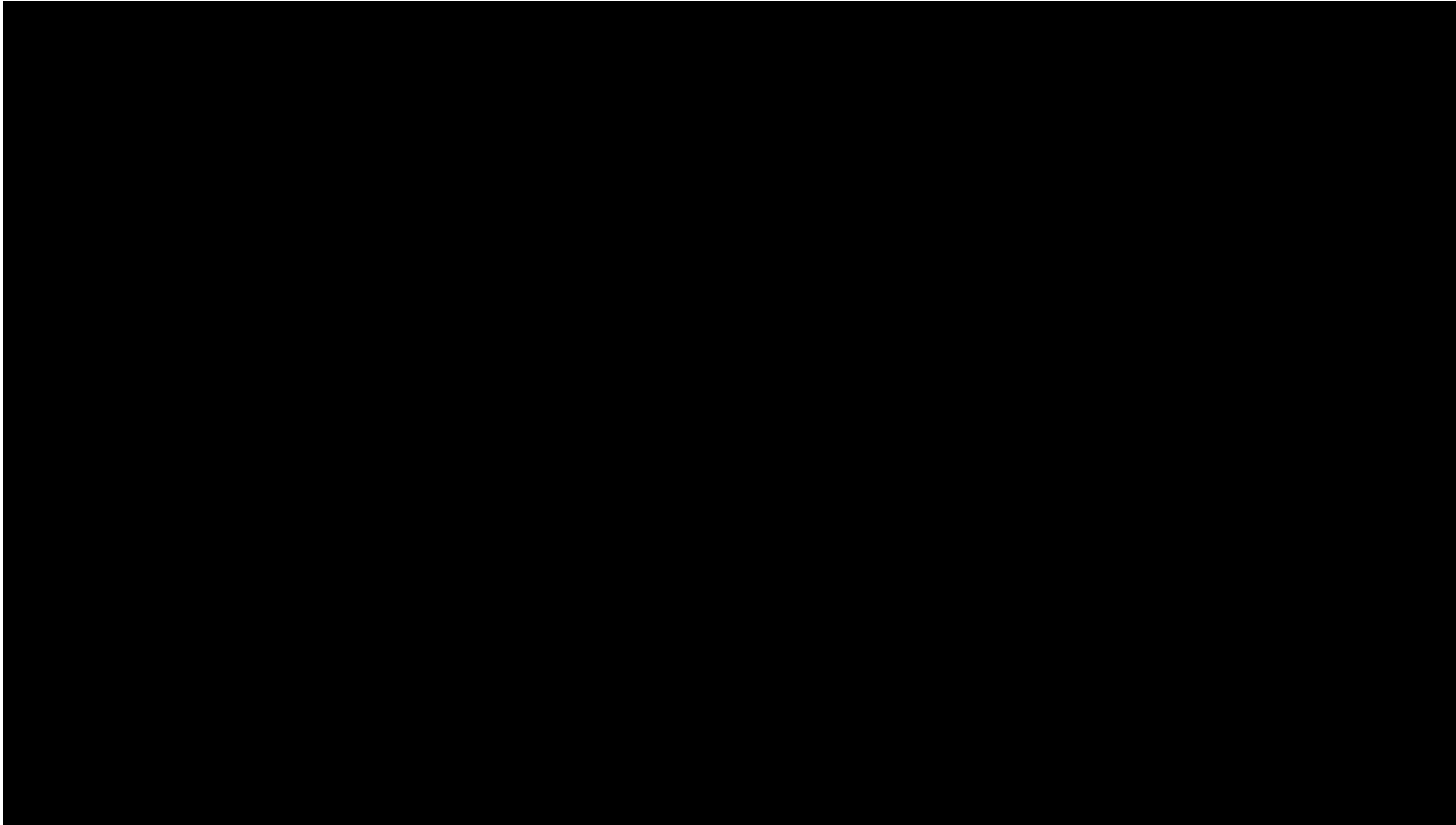
$$\mathbf{M}_k = \left. \frac{dh(\eta_1, J)}{d\omega_z} \right|_{\hat{\eta}_1^{k|k-1}}$$

$$\vec{\omega}_z = \begin{pmatrix} \overrightarrow{\omega_{GPS(xNorth)}} \\ \overrightarrow{\omega_{GPS(yEast)}} \\ \overrightarrow{\omega_{depthprofondimetro}} \\ \overrightarrow{\omega_{dsonarprua}} \\ \overrightarrow{\omega_{dsonardx}} \\ \overrightarrow{\omega_{dsonarsx}} \\ \overrightarrow{\omega_{\eta_2(1)}} \\ \overrightarrow{\omega_{\eta_2(2)}} \\ \overrightarrow{\omega_{\eta_2(3)}} \end{pmatrix}$$



RINGRAZIAMENTI

SIMULAZIONE 3D



Contatti:

m.borraccino@studenti.unipi.it

i.rosati1@studenti.unipi.it

f.corradini@studenti.unipi.it