



Team E.R.G.O.



UNIVERSITÀ DI PISA

PROGETTO SISTEMI ROBOTICI DISTRIBUITI

Pianificazione del moto di un robot per il monitoraggio della Posidonia Oceanica

Studenti

SEBASTIANO BIANCO

ALBERTO REGOLI

Professori

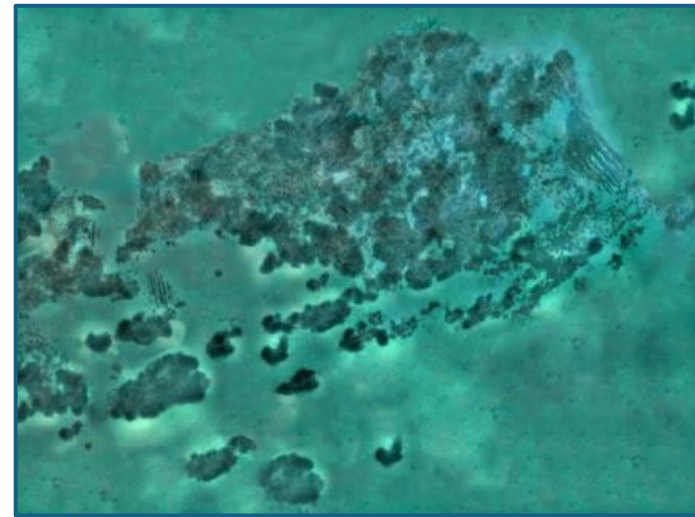
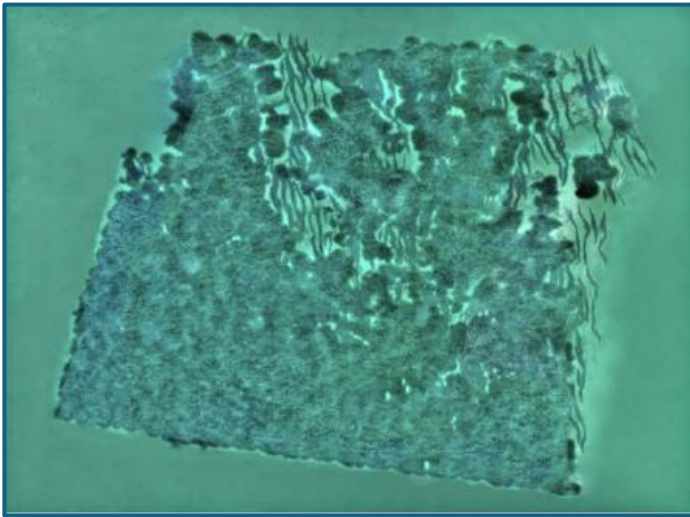
LUCIA PALLOTTINO

RICCARDO COSTANZI



SCENARIO DI LAVORO

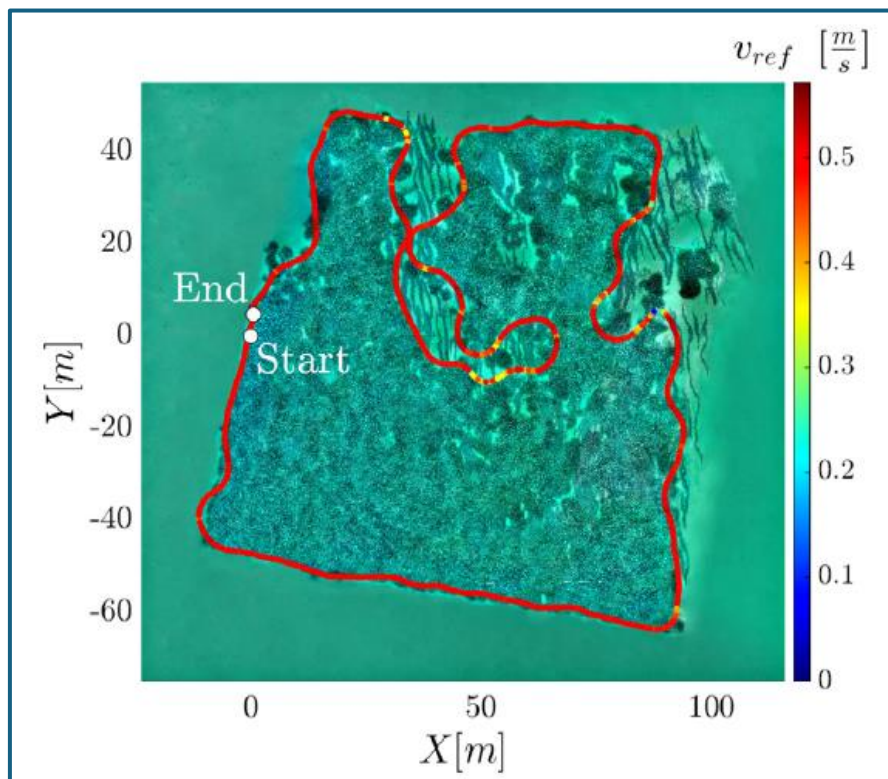
Negli ultimi anni gli studi biologici marini sono incentrati sull'osservazione della Posidonia Oceanica, poiché essa è un buon indice della qualità dell'acqua in cui vi si trova. Infatti la variazione di estensione della pianta esprime un miglioramento o degradamento dell'ecosistema.



La missione dei biologi è quindi quella di monitorare l'evoluzione della pianta attraverso dati ottici e eventuali campioni. L'acquisizione risulta spesso problematica per i subacquei, perciò nel corso degli anni è stato richiesto l'intervento di veicoli autonomi subacquei per l'ispezione. Lo scopo del robot è quindi di sostituire l'umano garantendo missioni più sicure, precise e lunghe.

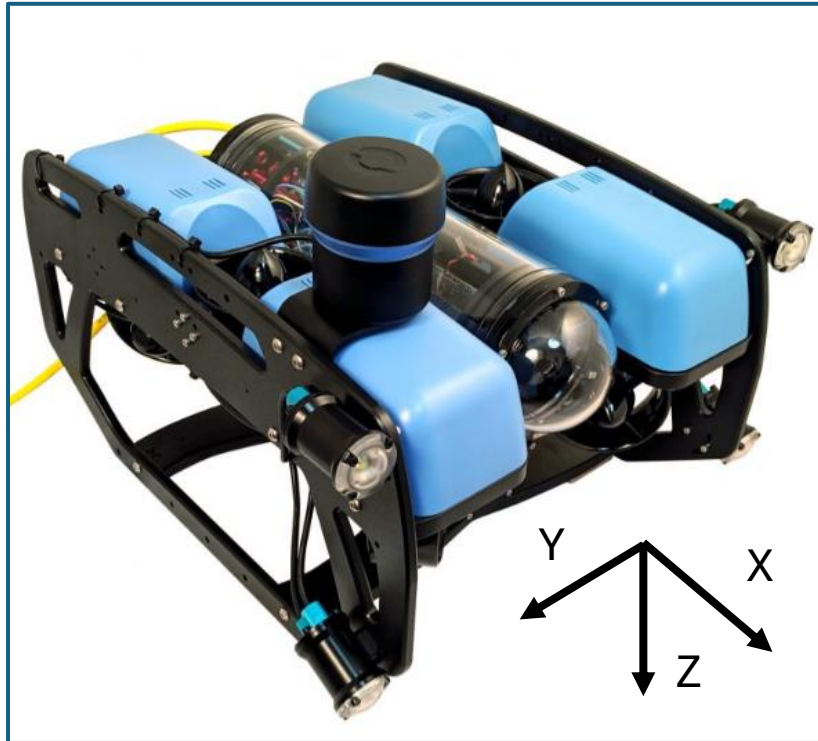
OBIETTIVI MISSIONE

I task del robot per il monitoraggio della Posidonia Oceanica sono i seguenti:



- Costruzione di una traiettoria prefissata per la ricerca di un bordo della prateria di Posidonia Oceanica all'interno di una safety area rettangolare;
- Pianificazione di una traiettoria per la circumnavigazione che si adatti alle forme complesse della pianta;
- Scansione interna della Posidonia;
- Raccolta di dati ottici.

BLUEROV2



Il robot utilizzato per la missione è il BlueROV2, prodotto della BlueRobotics, sul quale sono stati sviluppati algoritmi per renderlo autonomo (AUV).

Esso garantisce buone prestazioni a livello di profondità raggiungibile e velocità di movimento con autonomia massima di 2 ore di piccole, grazie ai 6 motori che permettono ampia manovrabilità (4 direzionabili e 2 verticali di tipo T200).

Max profondità [m]	100
Max velocità [m/s]	1.5

Il robot può muoversi in ogni direzione sul piano x-y e perpendicolare ad esso senza limitazione. Invece, per quanto riguarda le rotazioni, solo il beccheggio è difficile da imporre poiché i motori verticali sono disposti sul terzo asse principale di inerzia (Z).

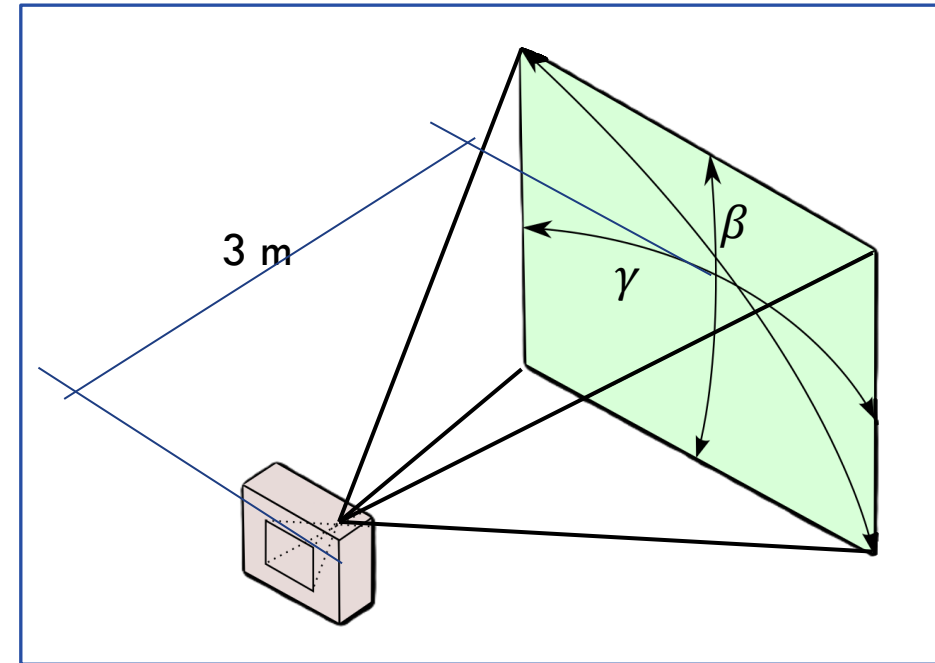
SENSORISTICA

La sensoristica presente sul robot è:

- Profondimetro;
- Piattaforma IMU;
- Modem acustico per georeferenziazione;
- Stereo camera ZED2.

Caratteristiche ottiche della camera

Max profondità di visione [m]	20
FOV orizzontale [gradi] (γ)	110
FOV verticale [gradi] (β)	70
Output video [p]	672x376
Frame rate [FPS]	30



VINCOLI DI PROGETTO

VINCOLI MOVIMENTAZIONE

I vincoli sul moto sono **velocità di surge** $u \leq 0.5 \text{ m/s}$ e una velocità di **imbardata** $r \leq 10 \text{ gradi/s}$ per una migliore manovrabilità e prontezza del veicolo.

VINCOLI OTTICI E DI PROFONDITA'

La missione si basa su **acquisizioni in tempo reale della camera**, quindi è necessario un adattamento della profondità del robot al fine di ottenere delle immagini ottimali sia per il moto sia per elaborazioni post-processing. Dagli studi di torbidità si osserva che il valore richiesto è di **1.5 m** dal fondale marino. Inoltre, dalla normativa ARPA, vi è richiesto che le immagini siano sovrapposte del 20-30%.

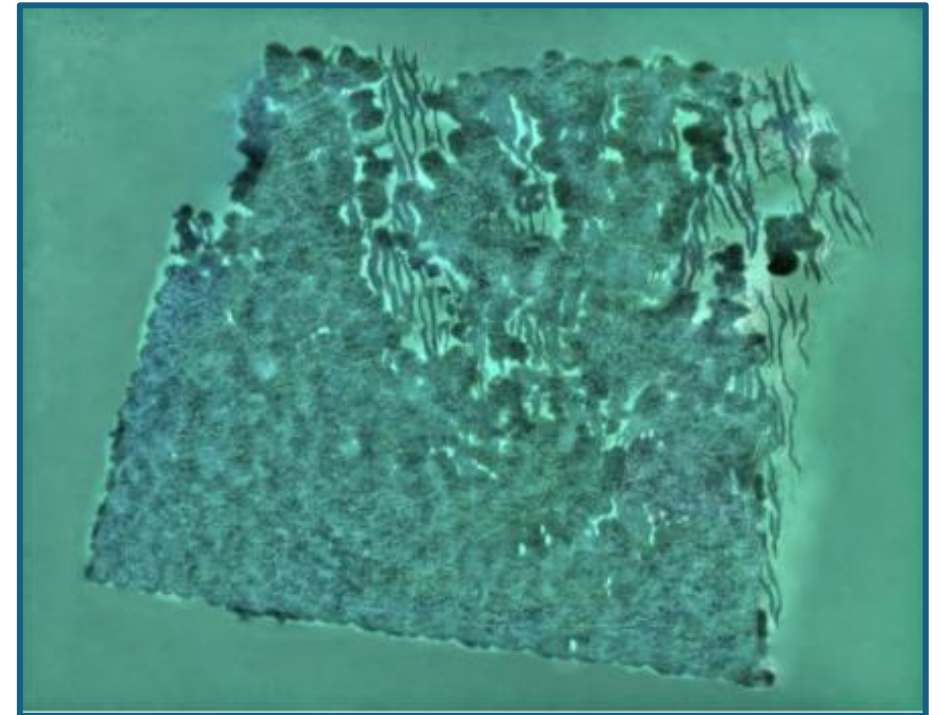
VINCOLI TEMPORALI

Nonostante la durata stimata della batteria sia di 2 ore, per questioni di sicurezza il tempo dell'operazione richiesto è compreso tra i **30 e i 45 minuti**.

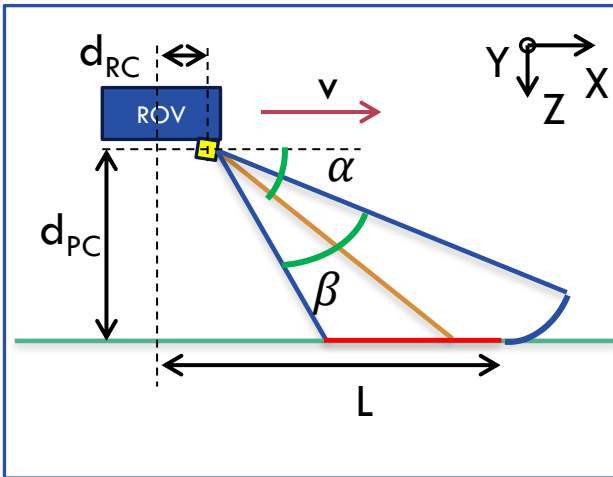
IPOTESI DI LAVORO

Per lo sviluppo del progetto sono state fatte le seguenti ipotesi e scelte progettuali:

- Singola posidonia piana a profondità costante;
- Immagini acquisite per la guida sono già il risultato di una rete neurale che identifica i bordi della pianta;
- Posizionamento della camera nella parte anteriore del robot con inclinazione per anticipare le decisioni sulla pianificazione del moto;
- Movimento del BlueRov2 parallelo e perpendicolare al piano della prateria;
- Presenza di un sistema di guida e navigazione ottimo.



POSIZIONAMENTO STEREOCAMERA

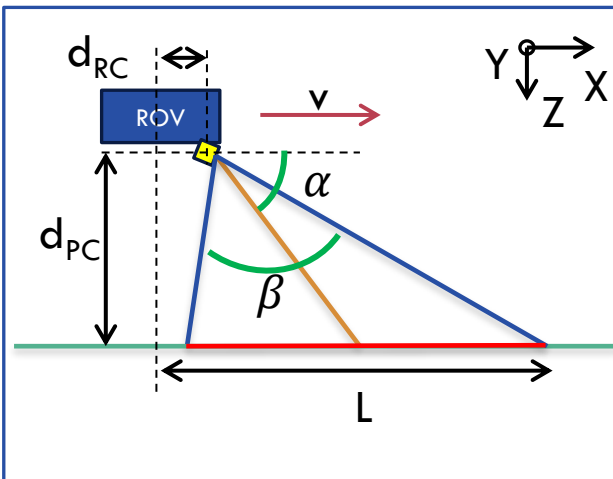


Posizionando l'AUV a 1.5 metri dal fondale, l'inclinazione della telecamera (angolo α) rispetto all'asse X è di 75° perché garantisce il miglior compromesso tra visione anteriore e sottostante (deformabilità immagini).

$$L = d_{RC} + d_{PC} * \tan(90 - \alpha + \beta/2)$$

d_{RC} = distanza centro ROV e centro camera lungo asse X (0.2 m)

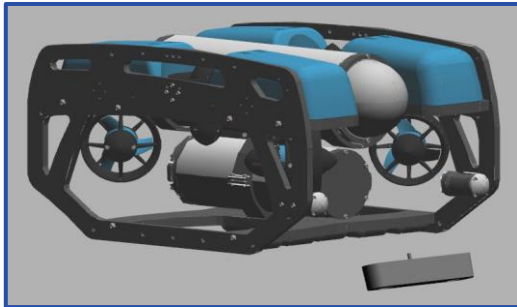
d_{PC} = distanza centro camera dal fondale (1.5 m)



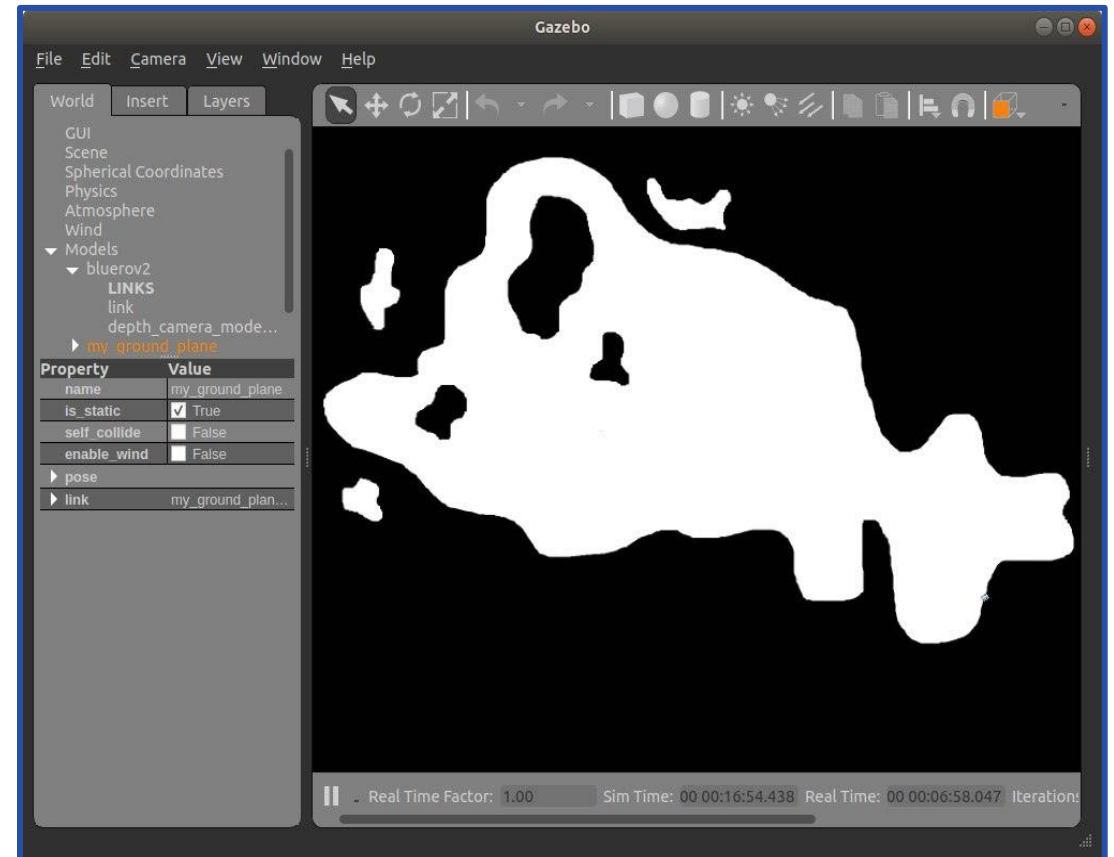
Angolo [gradi] (α)	L	Deformazione lunghezze
90	1.25	0%
80	1.7	10%
75	2.0	15%
65	2.8	25%

AMBIENTE SIMULATIVO

Per la validazione degli algoritmi di pianificazione è stato sviluppato un ambiente simulativo in **GAZEBO** basato sull'architettura ROS, dal quale sono ricavate le informazioni visive (immagini e distanze) e rappresentata il movimento del robot.



BlueRov2 e stereo camera

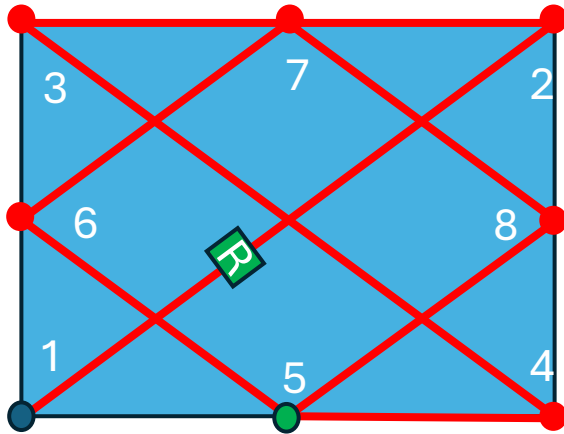


ALGORITMI MONITORAGGIO

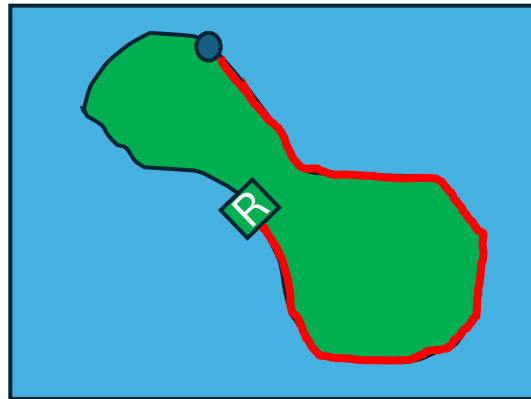
Il monitoraggio della Posidonia può essere suddiviso in 3 missioni:

- esplorazione dell'area per individuare la pianta;
- circumnavigazione per identificare i confini;
- esplorazione interna della prateria per la raccolta dei dati.

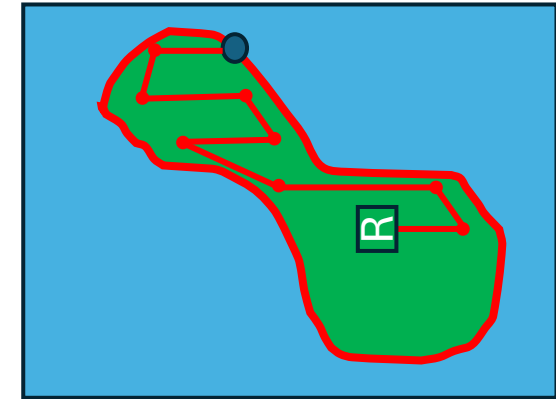
Ogni missione è caratterizzata da un algoritmo per la ricerca di uno o più punti ottimali per la movimentazione, dai quali verrà estratto lo stato desiderato del robot.



Esplorazione area



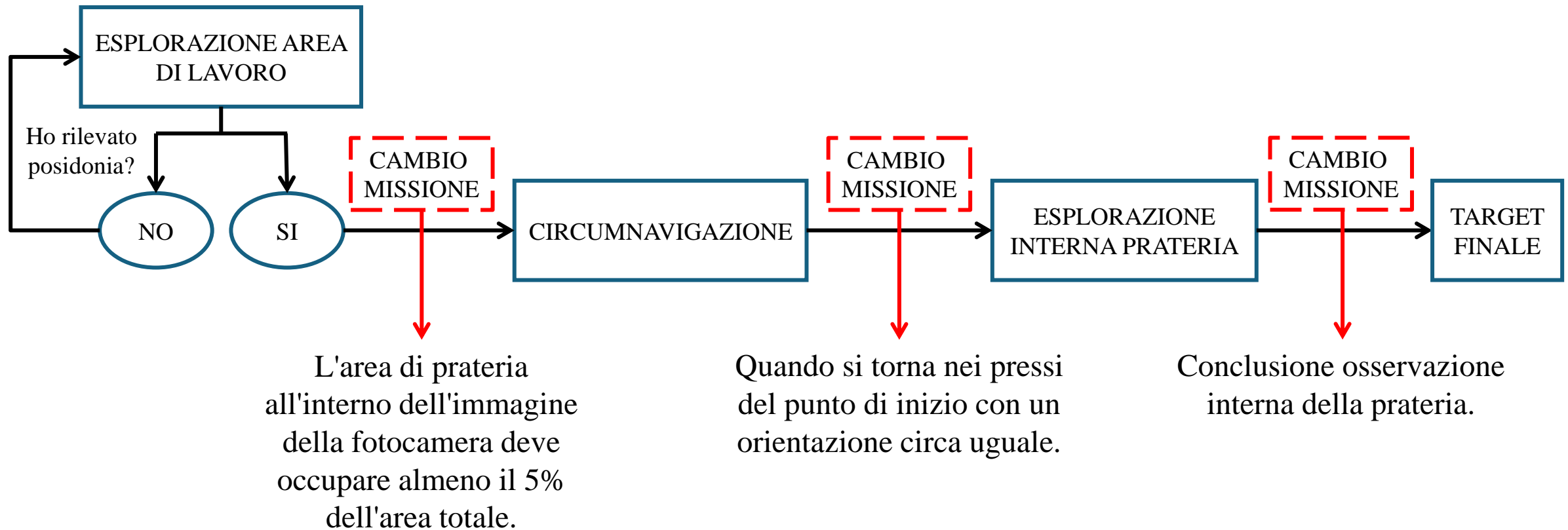
Circumnavigazione



Esplorazione interna

SELETTORE MISSIONE

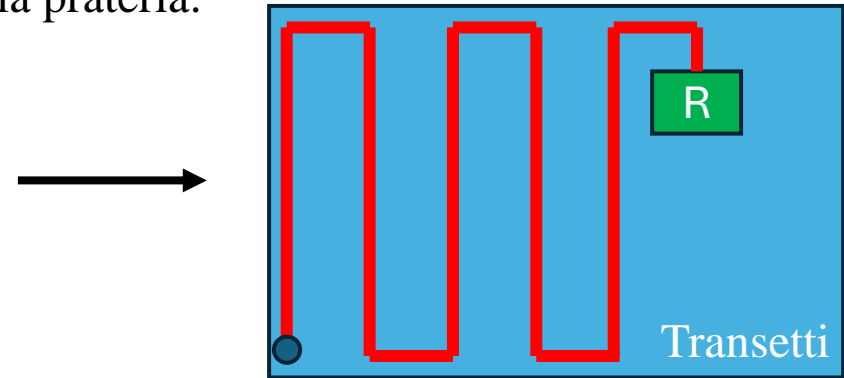
Il passaggio da una missione all'altra dipende da ciò che viene rilevato dalla camera:



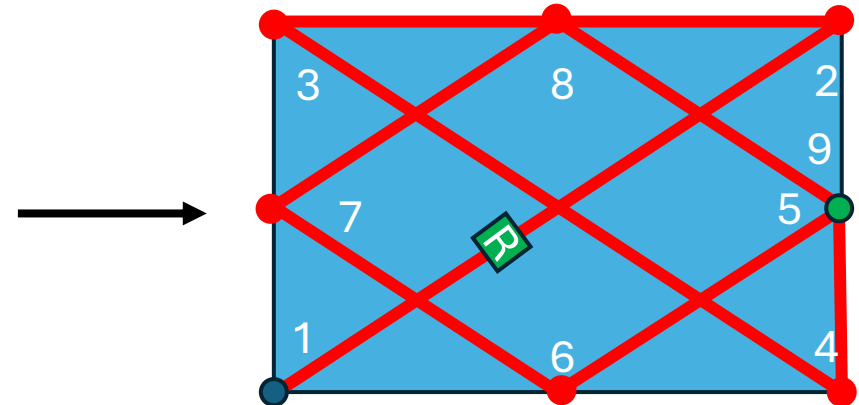
ESPLORAZIONE AREA

L'**area di lavoro** da scandagliare per la ricerca e il monitoraggio della Posidonia solitamente ha una forma **rettangolare** di estensione variabile. Solitamente non sono note informazioni sull'ubicazione della pianta, quindi è necessario imporre una traiettoria per la individuare della prateria.

La tecnica tipica per l'esplorazione si basa sulla conoscenza dell'area di lavoro e sulla costruzione di waypoint da raggiungere costruendo una **traiettoria a transetti**, garantendo una raccolta elevata di informazioni.



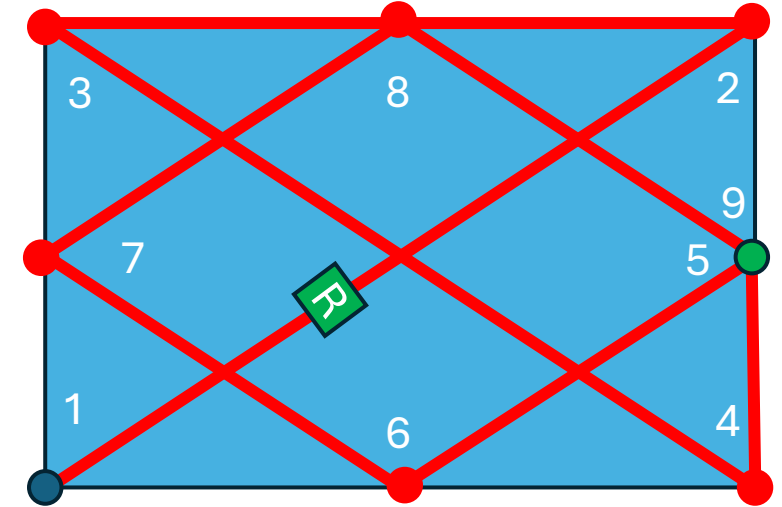
Nonostante l'esplorazione a transetti garantisce al 100% il ritrovamento della Posidonia e la raccolta di maggiori informazioni sul fondale, questa richiede molto tempo andando così a scontrarsi con i limiti temporali del progetto. Per questo è stato scelto di implementare una strategia che indirizzi il BlueRov2 in punti specifici dell'area di lavoro **riducendo il tempo** a scapito delle informazioni.



ESPLORAZIONE AREA

La strategia '**diagonale**' scelta è basata su 9 waypoint ottenuti dalla combinazione dei vertici dell'area di lavoro. Questa combinazione permette di osservare in primo luogo **il centro della safety area** e successivamente le figure ottenute dalla divisione dell'area facendo le diagonali principali.

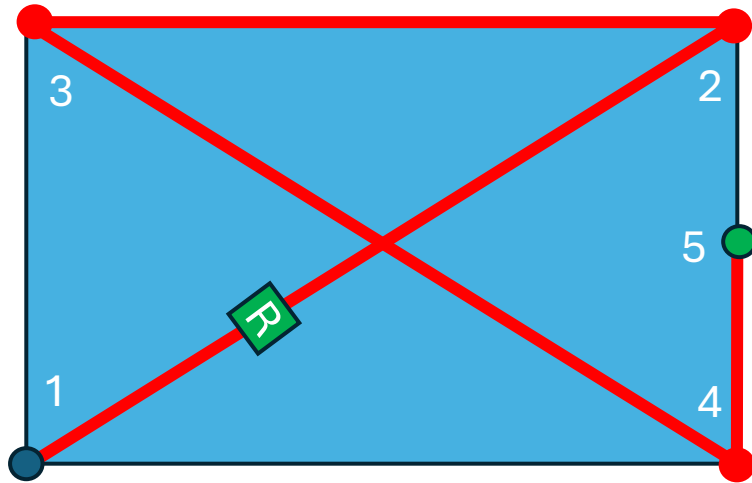
A sostegno di questa scelta, vi è l'estensione media della pianta. Infatti dalle rilevazioni fatte da subacquei o da altri AUV in altri siti si osserva che l'area occupata è molto grande ed è facilmente intercettabile dalla nuova traiettoria.



Per mettere in luce quanto detto si riportano i tempi di missione per le due strategie a parità di area di lavoro:

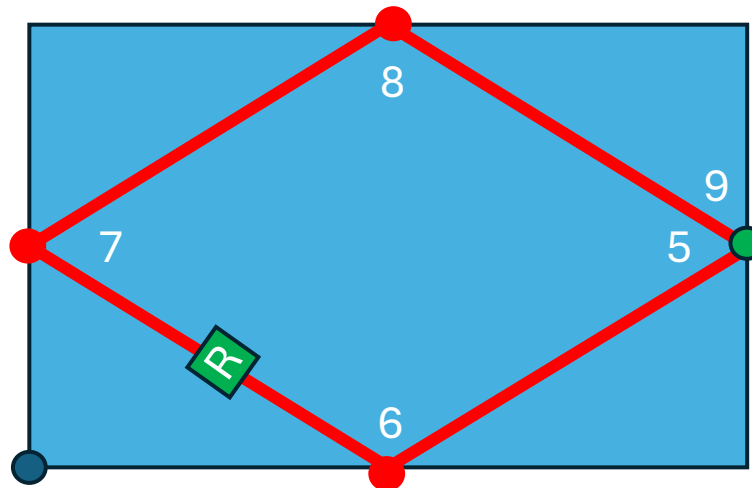
Area di lavoro [m ²]	Tempo di missione [s]	
	Transetti	Diagonale
50 x 50	714	1282
50 x 100	2533	1194
100 x 100	5060	1430

ESPLORAZIONE AREA



FASE 1

Ipotizzando che una parte della Posidonia possa occupare le zone centrali, è stato scelto di far percorrere la diagonale dell'area. Dopo di che l'AUV si muove sul lato più lungo per osservare uno dei due triangoli generati dalla diagonale (1 - 2) e percorre l'altra (3 - 4) per valutare le zone centrali delle figure sopra indicate.



FASE 2

Analogamente alla fase precedente, se non vi è stato un rilevamento il robot si muoverà verso le zone centrali dei quattro triangoli riducendo le zone non osservate.

ELABORAZIONE IMMAGINI

Per lo sviluppo dell'algoritmo di circumnavigazione, è necessario un'elaborazione delle immagini generate dalla stereo camera.

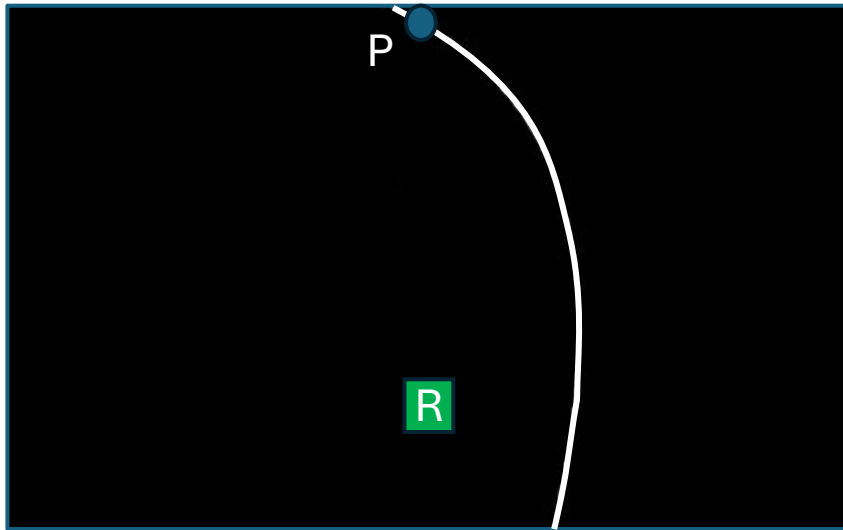
Nel caso reale le immagini ricevute vengono manipolate da una rete neurale con lo scopo di identificare quale parte della zona osservata è Posidonia e quale no. In questo progetto il robot, invece, riceve direttamente il risultato dalla rete sottoforma di immagini in scala di grigi, ad indicare la probabilità che l'oggetto inquadrato sia la pianta o altro.



Per l'identificazione del bordo da seguire viene trasformata l'immagine in scala di grigi in una binaria, dove viene considerata prateria tutti i pixel con probabilità del 70% assegnato dalla rete.

Il 70% è un valore tipico usato in letteratura.

ELABORAZIONE IMMAGINI



Dalla precedente immagine binaria viene estratto attraverso l'algoritmo Canny il bordo da inseguire.

A questo punto l'immagine presenta dei pixel bianchi solo per il perimetro che hanno una duplice funzione:

- identificazione della Posidonia durante l'esplorazione dell'area di lavoro;
- scelta dei punti da seguire durante la circumnavigazione (sfruttando anche le informazioni sulla distanza dalla camera).

La scelta di definire solo il bordo di separazione per la circumnavigazione permette di gestire correttamente sia il caso in cui il BlueRov2 venga posizionato inizialmente esterno alla prateria sia internamente.

ELABORAZIONE IMMAGINI

Le immagini presentate precedentemente sono una semplificazione della prateria, poiché solitamente esse presentano un contorno molto irregolare e un manto a densità discontinua (figura sottostante).

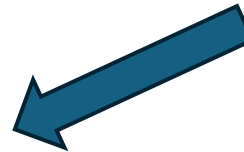
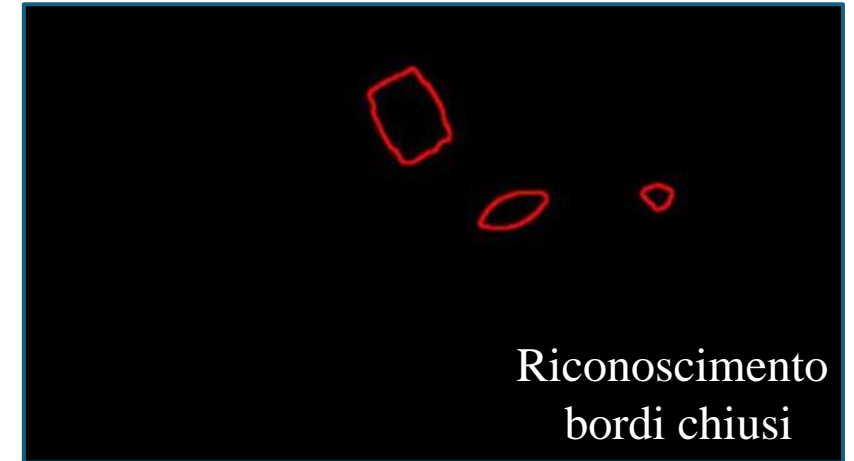


Per gestire la presenza di fori nella distesa, di dimensione minore dell'immagine, è stato implementato un algoritmo per il riconoscimento ed eliminazione di contorni chiusi dalla scelta dei punti possibili come riferimento durante la circumnavigazione.

Le parti con minore densità vengono poi osservate meglio durante la fase di ispezione interna poiché sono le zone che posso fornire più informazioni a livello biologico.

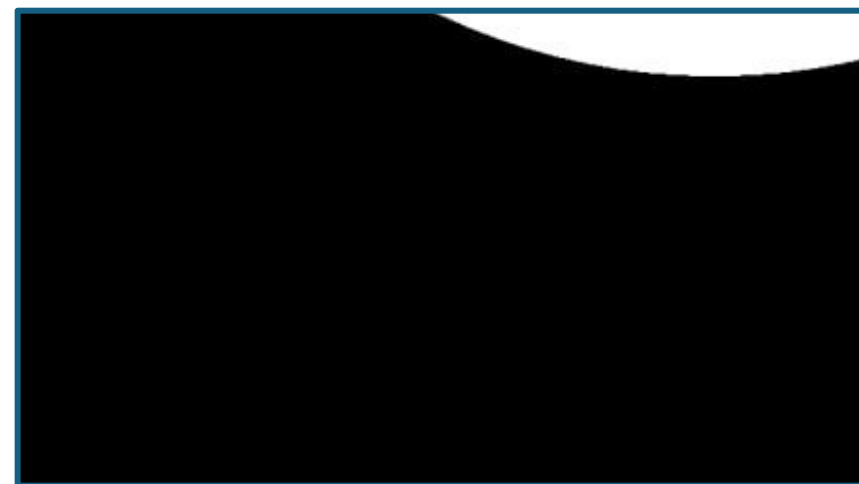
Infine per eventuali 'ciuffi' di prateria esterni vengono tralasciati ad esplorazioni future dando priorità alla zona più estesa.

ELABORAZIONE IMMAGINI CON FORI



RILEVAMENTO POSIDONIA

L'esplorazione dell'area di lavoro viene fermata quando si rileva dalla camera una porzione di Posidonia, ovvero nel momento in cui essa occupa un'area maggiore del 5% dell'area totale dell'immagine. A questo punto avviene un cambio missione, poiché vi sono sufficienti dati per garantire la corretta circumnavigazione.



ESPLORAZIONE

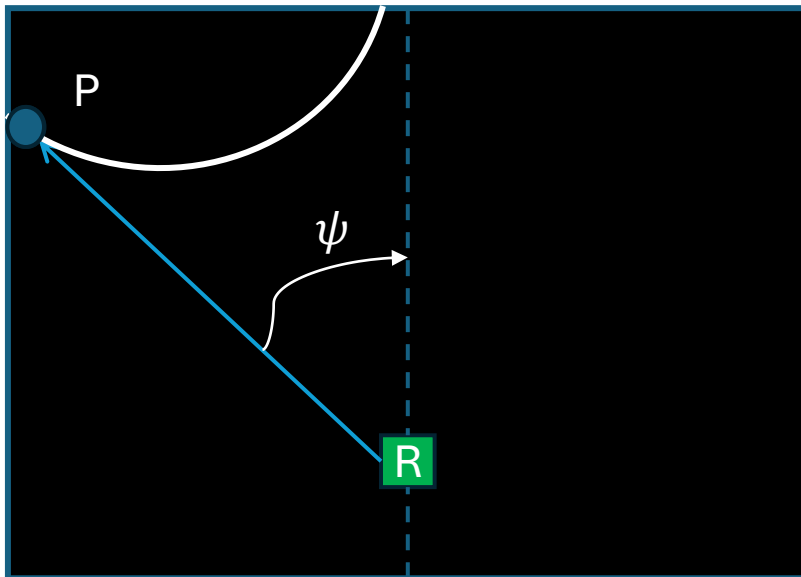
CAMBIO
MISSIONE



CIRCUMNAVIGAZIONE

CIRCUMNAVIGAZIONE

Dopo aver rilevato la pianta, inizia l'algoritmo per la scelta dei riferimenti del bordo osservato.

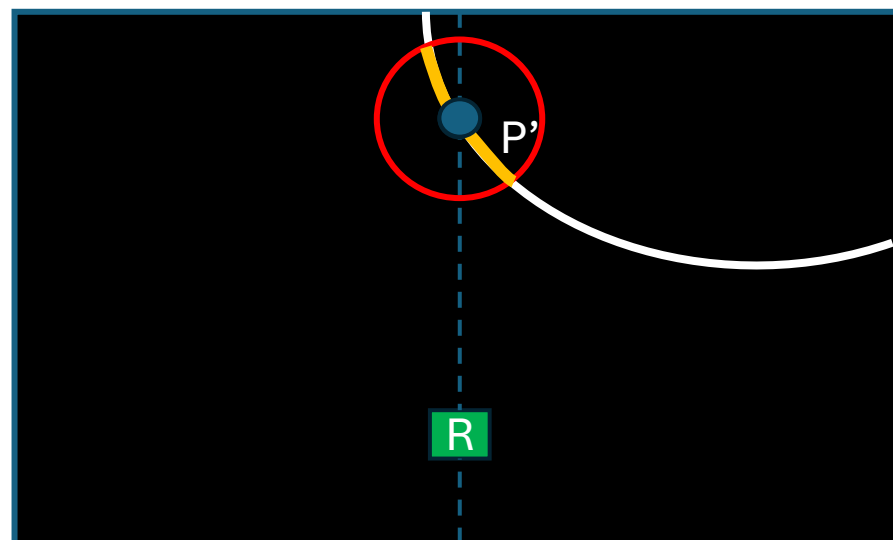


Il primo riferimento da inseguire della circumnavigazione viene scelto prendendo **il punto a massima distanza** dal BlueRov2. Questa scelta viene fatta poiché la parte di perimetro dell'immagine è stata osservata tutta e il robot viene indirizzato nelle zone da esplorare; inoltre permette di avere un riferimento a distanza maggiore dal robot **migliorando la manovrabilità**.

Per una corretta osservazione del bordo, ovvero mantenerlo in mezzo all'immagine, il robot viene controllato in modo che **il punto** scelto venga puntato e quindi venga compiuta una rototraslazione al fine di averlo nei frame successivi **davanti a lui**.

CIRCUMNAVIGAZIONE

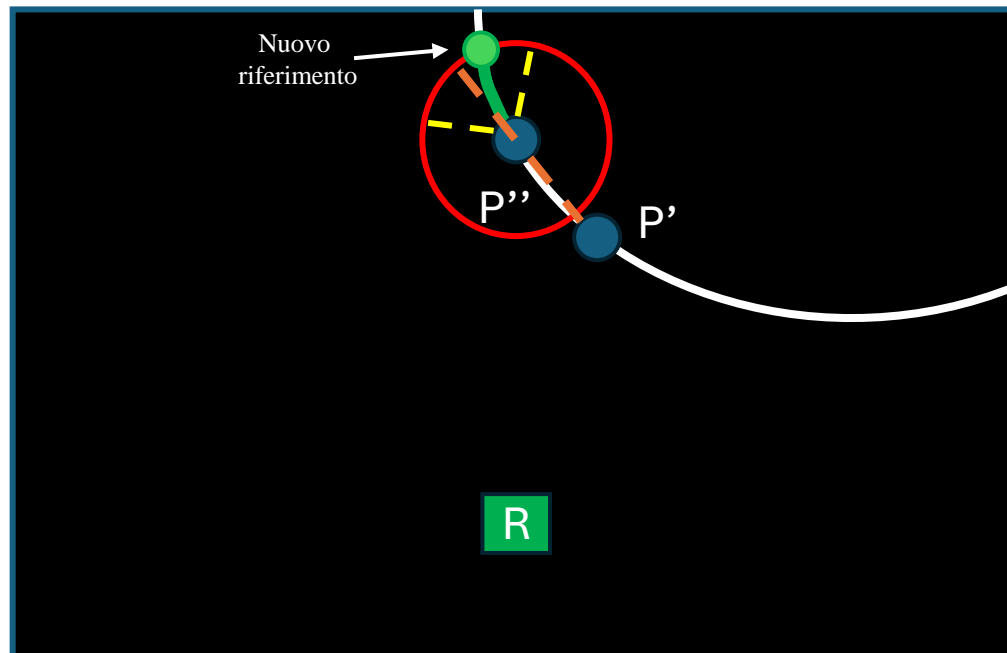
Con l'arrivo di una nuova immagine dalla camera è necessario definire un nuovo punto da inseguire. I possibili punti del bordo da raggiungere sono quelli che si trovano all'interno di un intorno centrato nel riferimento passato, riportato nel nuovo frame camera.



Il nuovo set di punti (arancione, in figura) viene successivamente ridotto tenendo conto dei punti davanti al punto P' e quelli dietro per decidere la direzione di circumnavigazione. Dopo di che viene richiesto di inseguire un punto anteriore.

CIRCUMNAVIGAZIONE

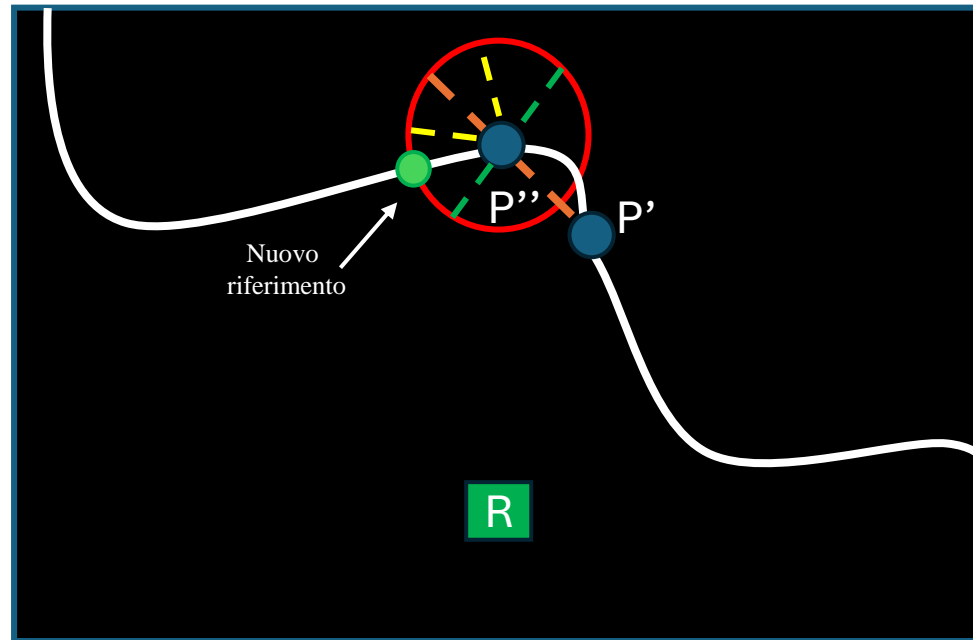
L'estrazione dei punti anteriori avviene attraverso la costruzione di un settore angolare centrato nel riferimento precedente e di ampiezza variabile. Il raggio centrale del settore ha una direzione data dalla **coniungente tra i due precedenti riferimenti**. Per la definizione del settore angolare al secondo passo dell'algoritmo viene scelta come direzione la congiungente tra P' e il robot.



I punti scelti sono quindi quelli indicati in figura in verde; dai quali viene estratto il **punto a massima distanza dal precedente** come effettivo riferimento della circumnavigazione.

CIRCUMNAVIGAZIONE

La dimensione del settore angolare è di ampiezza 90° e raggio 20 cm (scelto perché è circa la distanza percorsa dal robot tra un frame e il successivo).

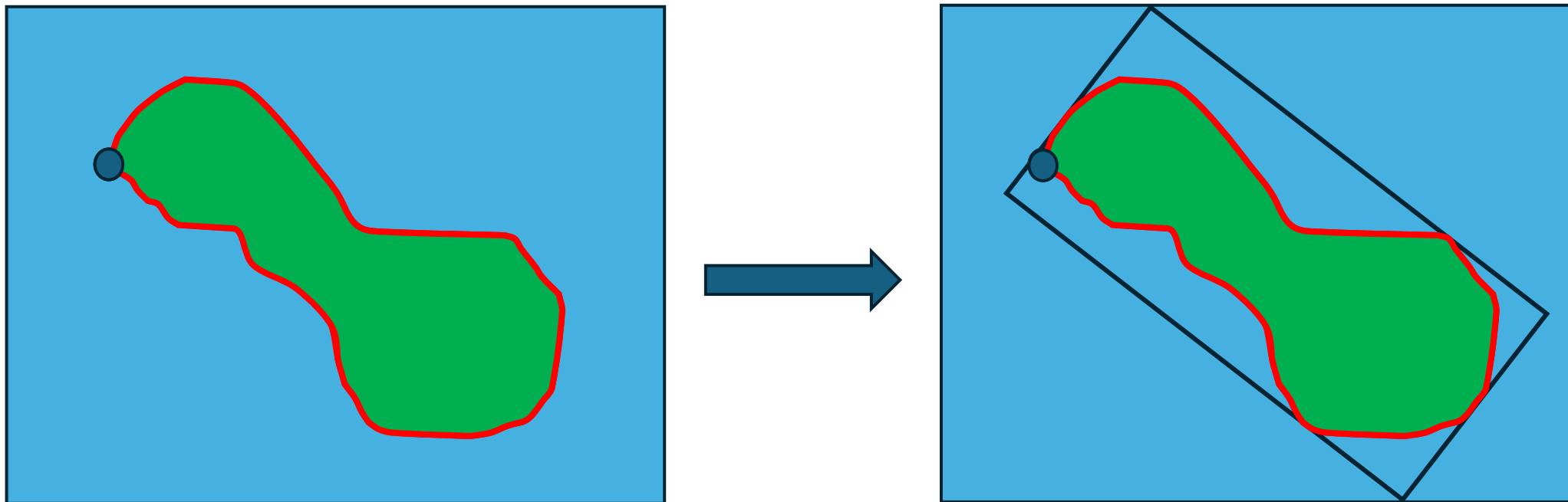


In assenza di punti del bordo nel settore angolare questo viene **aumentato in modo incrementale** al fine di ottenere almeno un punto davanti a quelli precedenti.

ESPLORAZIONE INTERNA

Il passaggio all'esplorazione interna avviene quando il robot torna al punto di inizio della circumnavigazione. L'algoritmo ha lo scopo di costruire una traiettoria a transetti per massimizzare la raccolta di immagini della distesa.

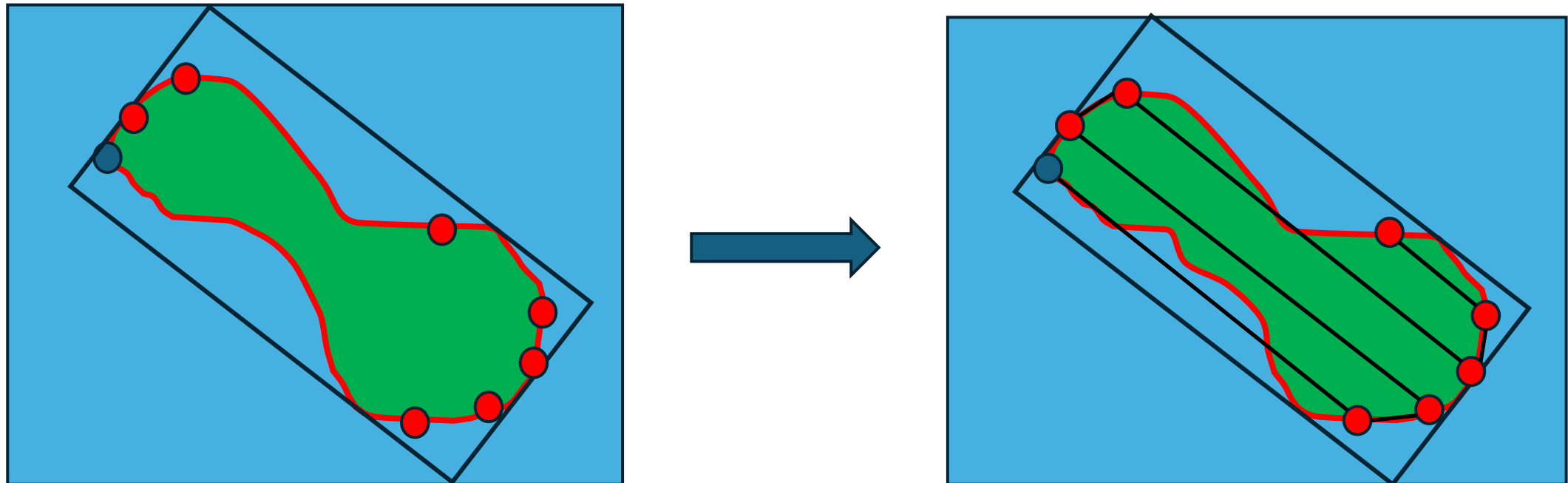
Questo sfrutta i punti del perimetro ottenuti dall'algoritmo precedente per definire il più piccolo rettangolo che circonda il manto.



ESPLORAZIONE INTERNA

Dato il rettangolo vengono scelti dei punti sul bordo della pianta per generare dei transetti che hanno i segmenti più lunghi paralleli al lato più del poligono che circoscrive. Questo garantisce un minor numero di transetti e di manovre da parte del robot riducendo quindi il tempo di monitoraggio.

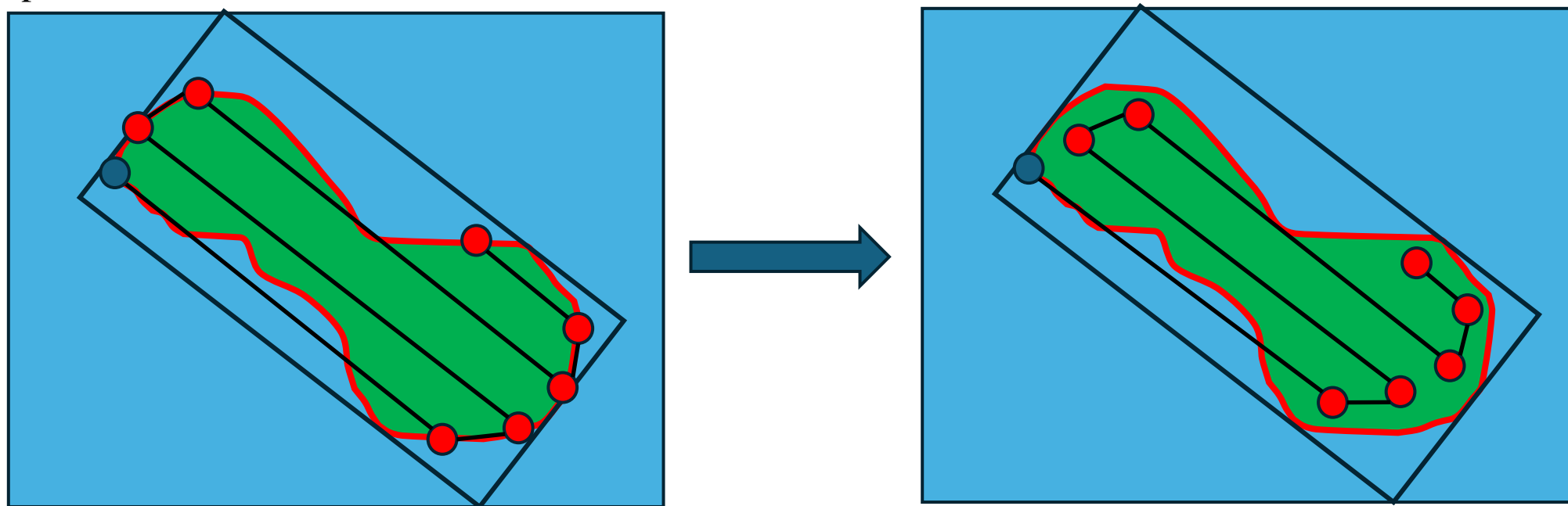
L'inizio della traiettoria avviene nel waypoint più vicino alla posizione finale della circumnavigazione dell'AUV



ESPLORAZIONE INTERNA

La scelta del passo dei transetti è legato alla sovrapposizione richiesta delle immagini per poter costruire meglio il mosaico di informazioni finale. Quindi, impostata la sovrapposizione per normativa, viene adattata la profondità del robot e il passo.

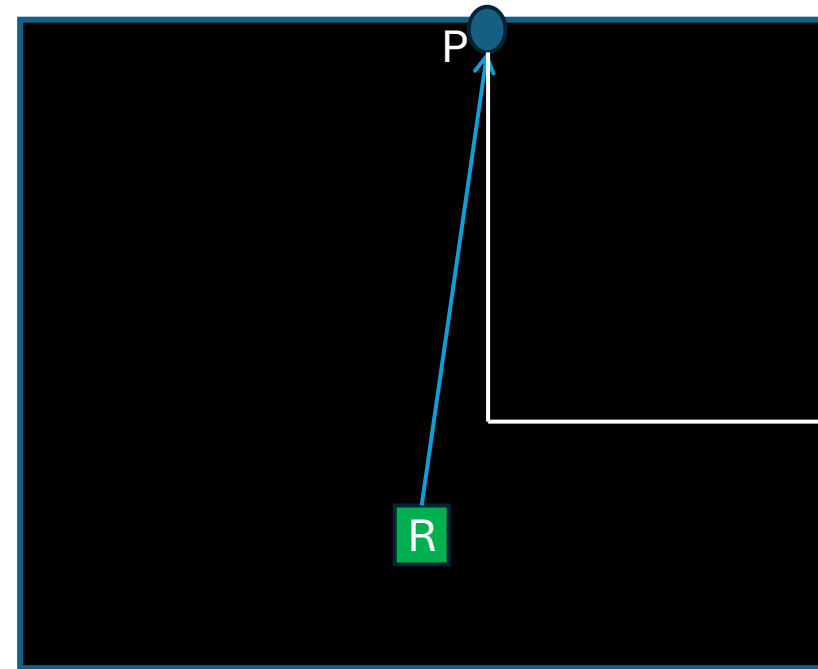
Poiché la camera permette di vedere anche in avanti, i vari punti sul bordo sono sostituiti con punti all'interno della Posidonia al fine di anticipare il moto fino alla fine del perimetro e ridurre nuovamente il tempo.



VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

L'algoritmo di circumnavigazione descritto è il risultato finale di un'analisi approfondita del problema. Infatti sono stati sviluppati in partenza degli algoritmi più semplici che hanno portato alla luce problematiche risolte con la proposta fatta.

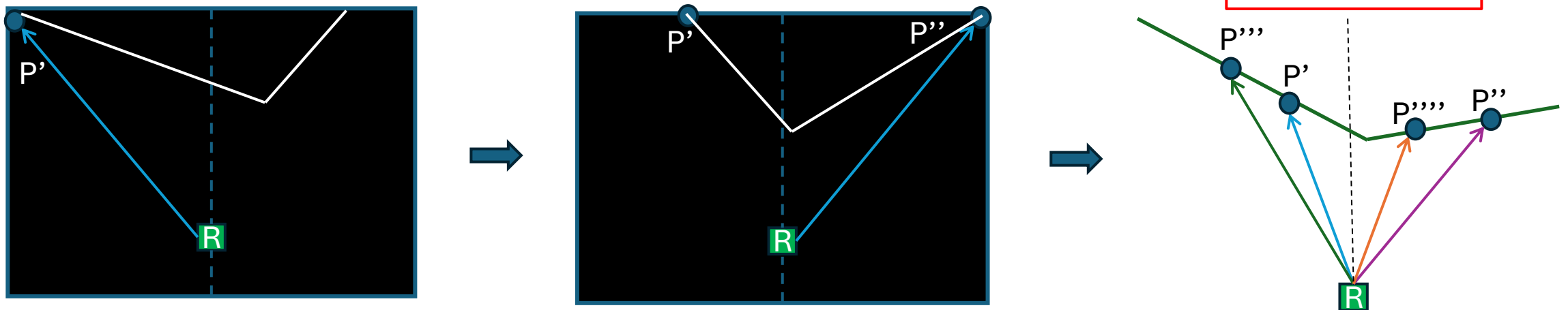
La prima strategia di circumnavigazione è basata sull'acquisizione e inseguimento del punto del bordo osservato alla massima distanza dal BlueROV2. Questo permette di indirizzare il robot in una delle direzioni di sviluppo del perimetro della prateria fuori dal piano immagine.



VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

Esistono delle situazioni in cui la scelta del massimo porta ad errori:

- Se il frame rappresenta un bordo che si estende nella parte alta dell'immagine (come in figura), il robot punta al massimo (P'), ma al frame successivo viene indirizzato ad un nuovo massimo (P'') che si trova nella zona opposta dal precedente, creando un moto oscillatorio fino a quando l'immagine non presenta un bordo che si sviluppa principalmente in verticale;

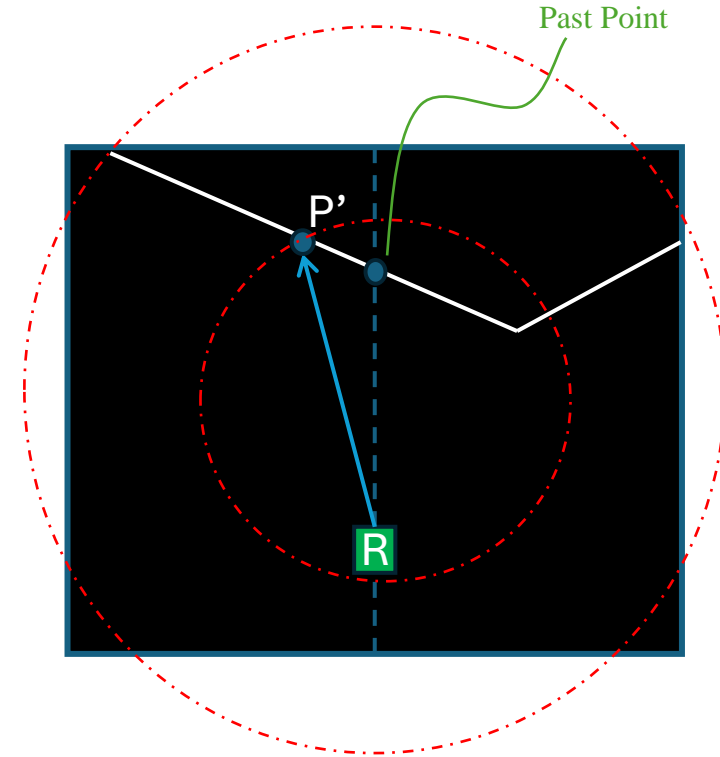


VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

Per risolvere questa problematica, è stata creata una seconda strategia basata sulla memorizzazione del punto scelto al frame precedente e sulla costruzione di una corona circolare. Si analizzano quindi, i pixel del bordo che risiedono in tale area e si identifica **il punto a minor distanza** da quello scelto al passo precedente.

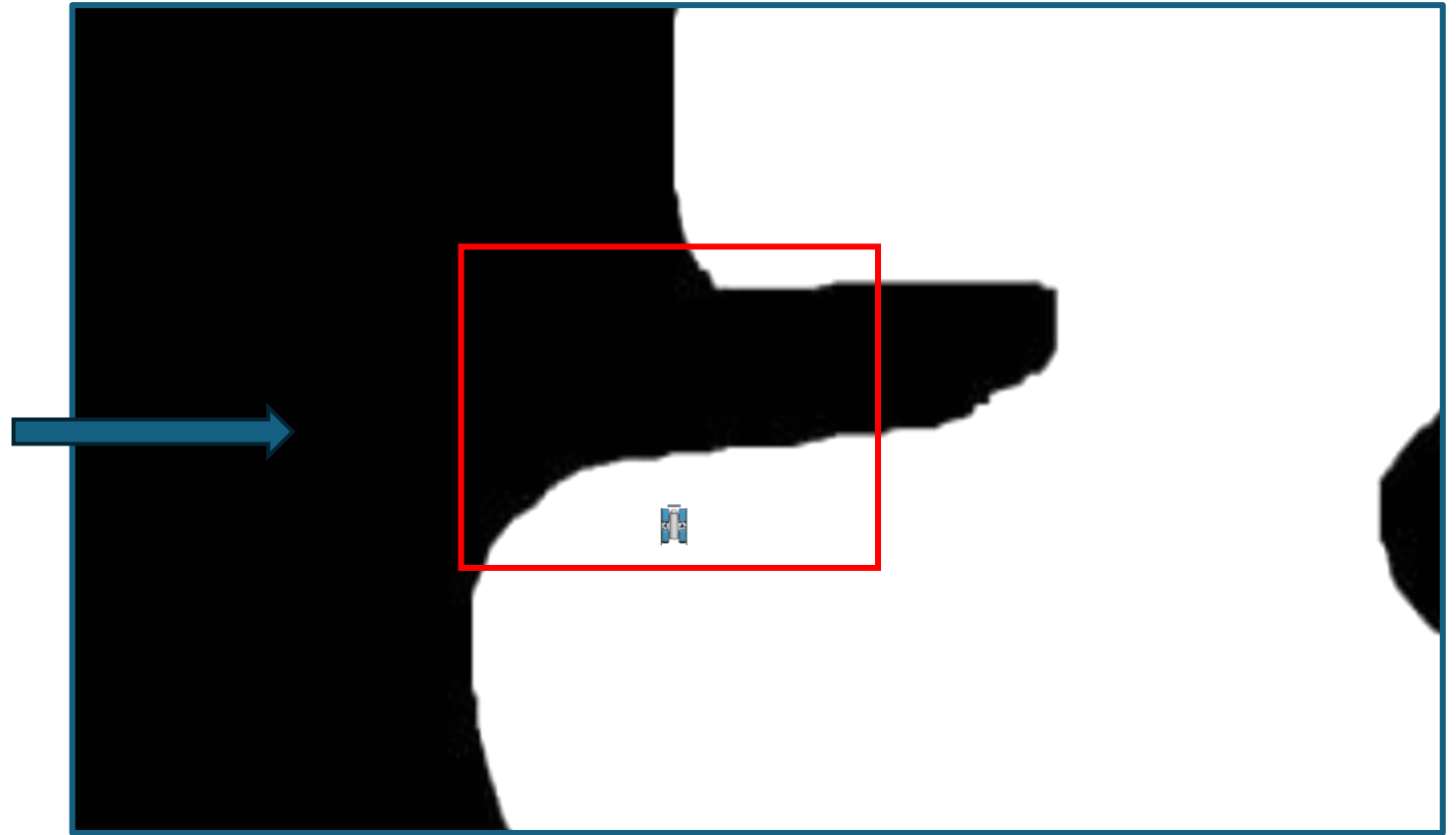
In tal modo è possibile acquisire riferimenti lontani dal robot, ottimizzando la manovrabilità dell'AUV per l'osservazione del perimetro, ma allo stesso tempo essi sono vicini ai punti precedenti per mantenere la corretta direzione di moto.

I raggi della corona circolare sono dati dalla distanza tra robot e il punto del bordo a massima distanza e un raggio variabile che decresce per poter comprendere punti più vicini.



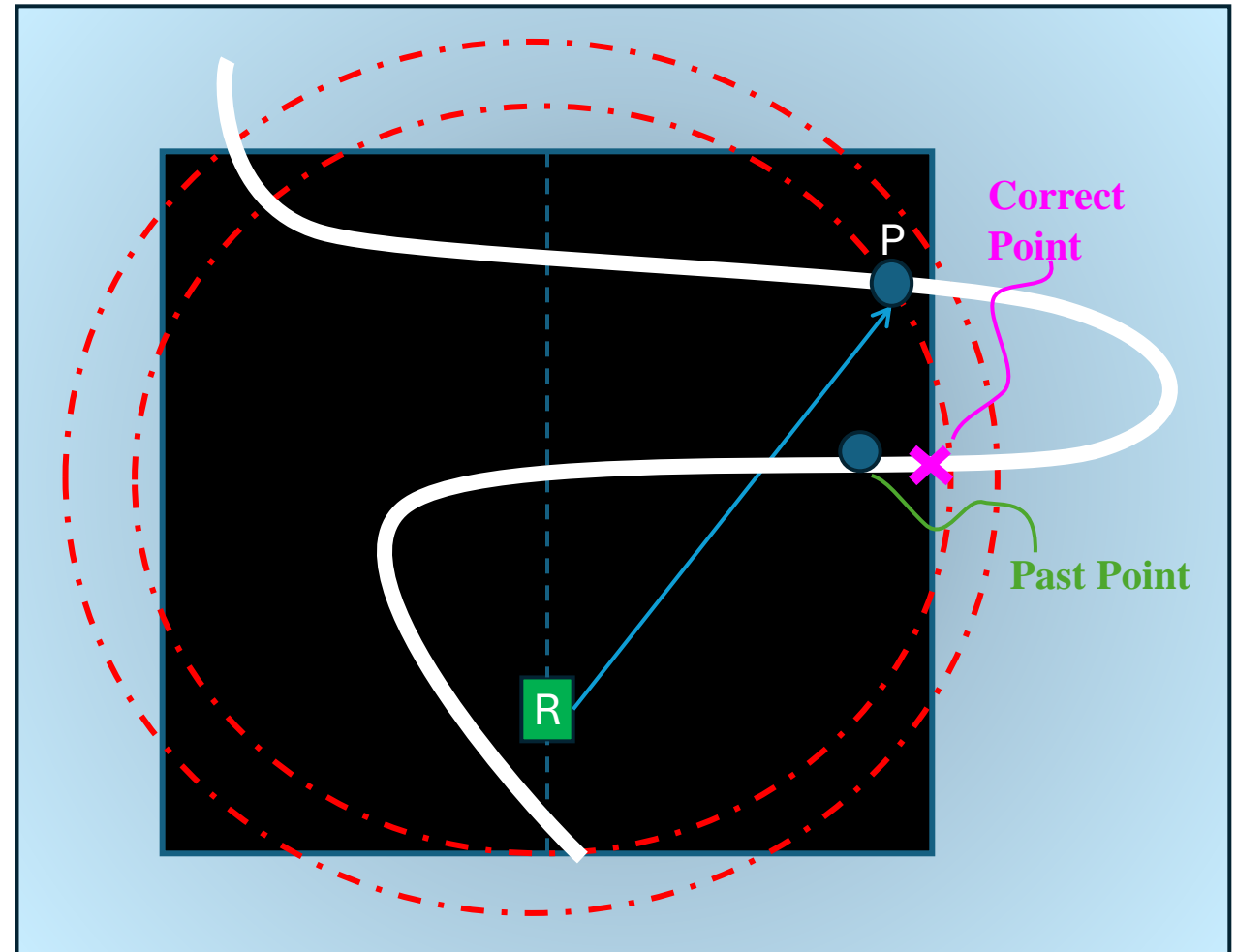
VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

Nascita di nuove
problematiche per la
seconda strategia



VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

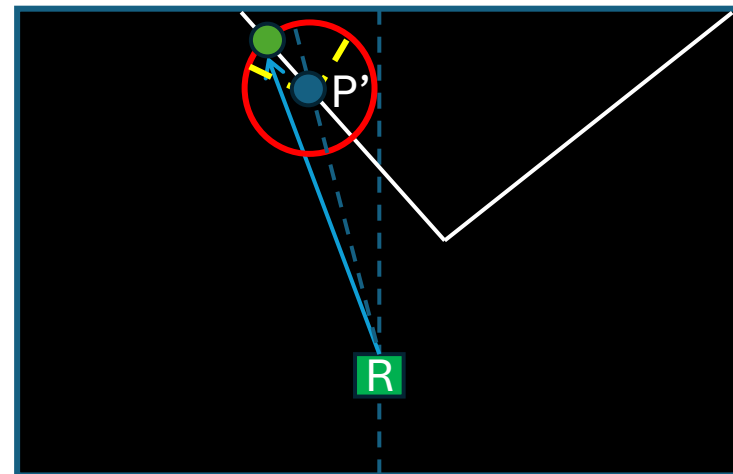
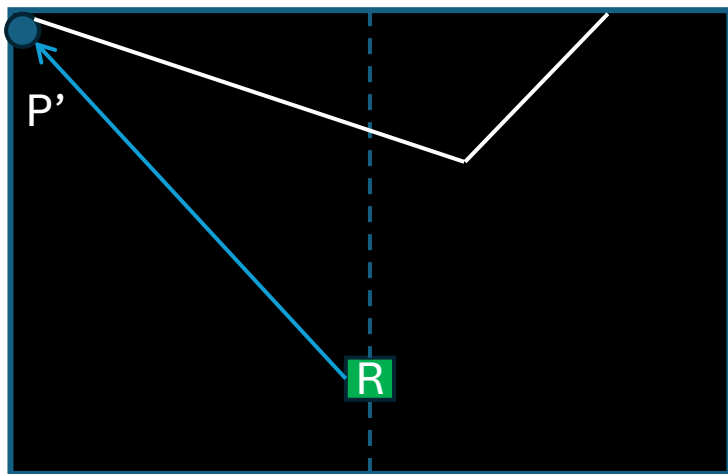
L'algoritmo sotto test presenta delle criticità. Nel caso raffigurato, in cui il contorno continuo della prateria non è completamente visibile dalla camera, è dimostrabile che l'algoritmo fallisce in quanto seleziona un riferimento che non permette di seguire il contorno nel modo corretto (tralasciando la parte destra del bordo).



VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

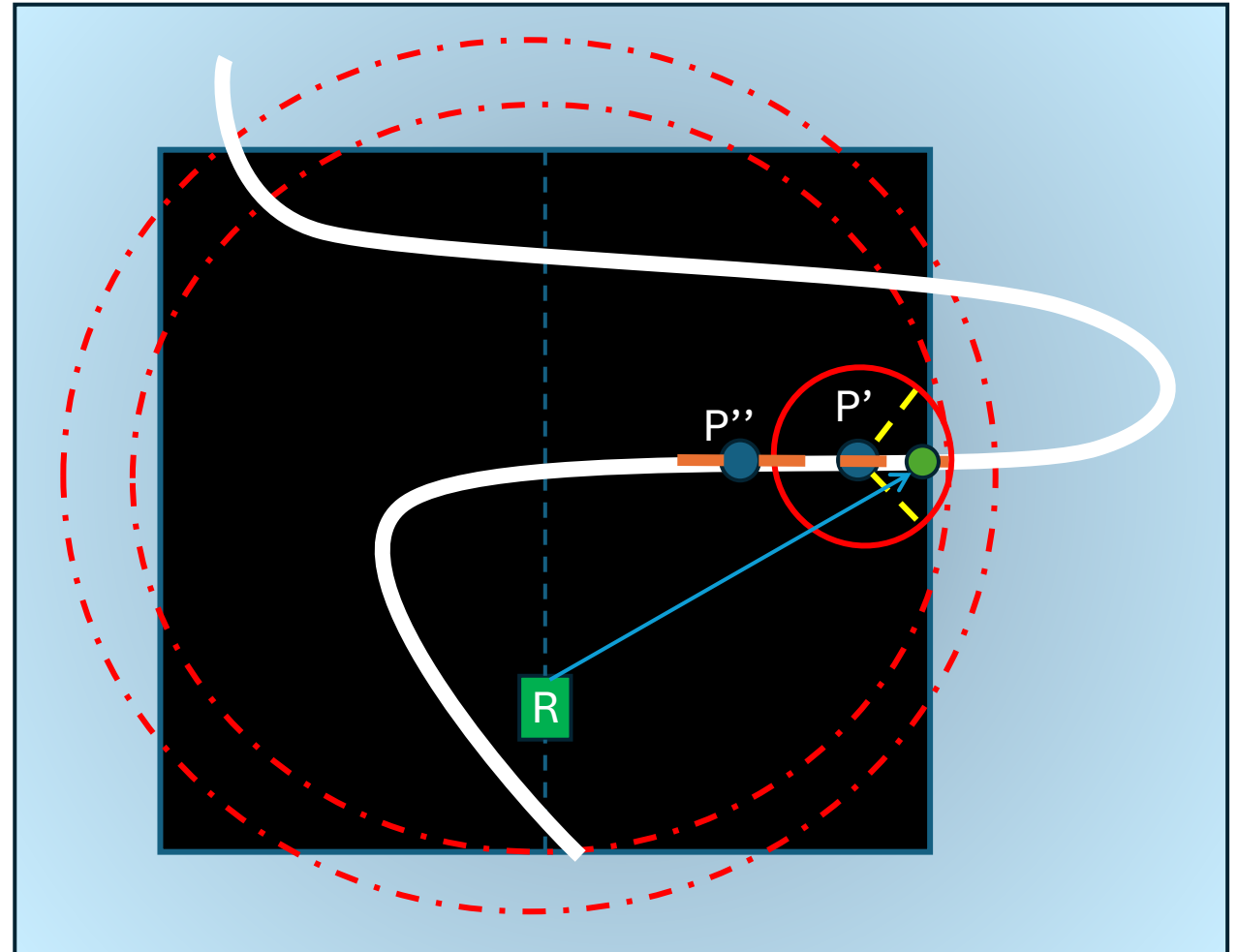
L'algoritmo finale proposto riesce a **risolvere** tutti i problemi presentati; poiché evita l'**oscillazione** del robot in quanto, definito il primo punto come quello a massima distanza dal ROV, il secondo riferimento è acquisito nell'intorno di quest'ultimo.

Questo riduce la variazione di angolo fra un riferimento e il precedente limitando movimenti indesiderati.



VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

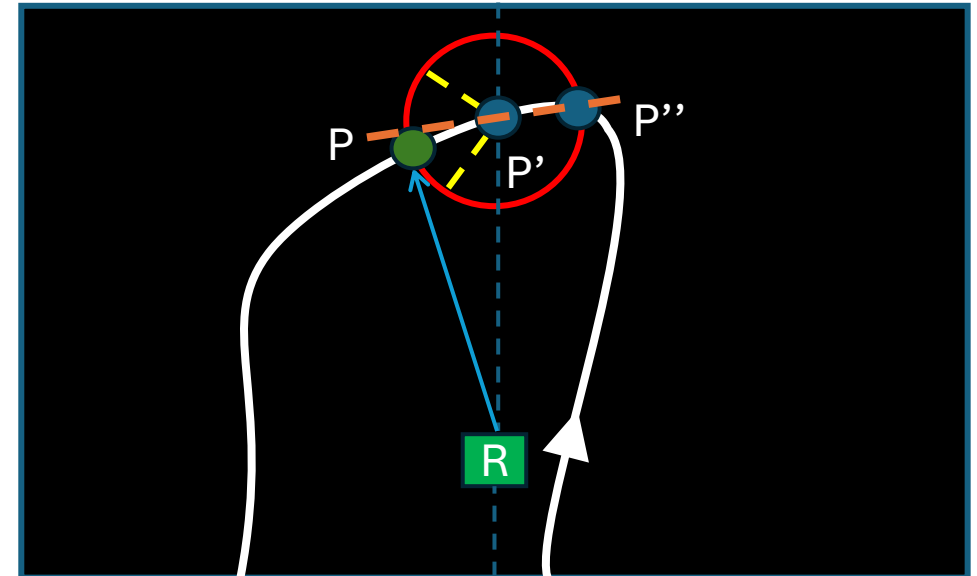
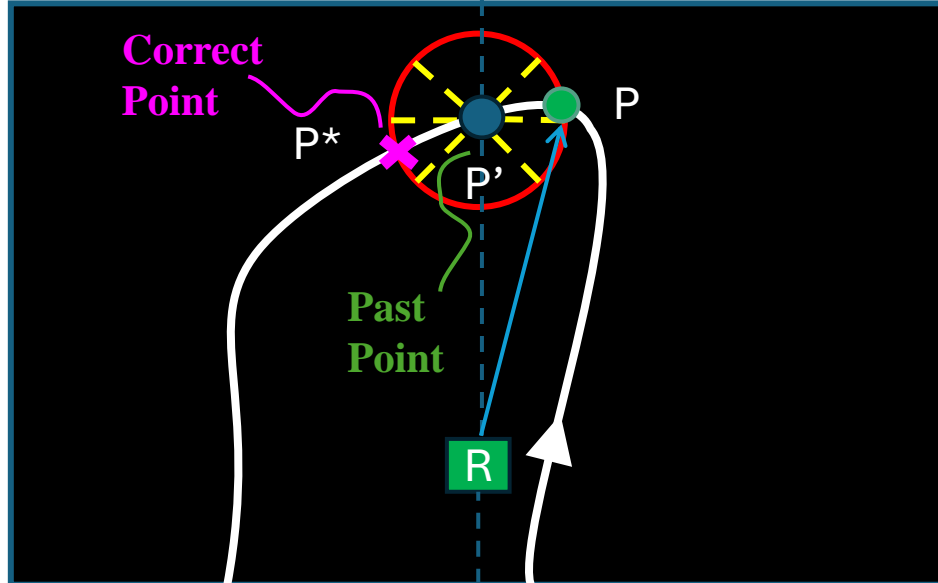
Inoltre l'utilizzo di un riferimento nell'intorno del precedente, permette di rimanere sempre ancorato al bordo inseguito **eliminando salti da una parte di bordo all'altro**. Questo garantisce la visione del perimetro in tutte le sue direzioni osservate nel piano immagine.



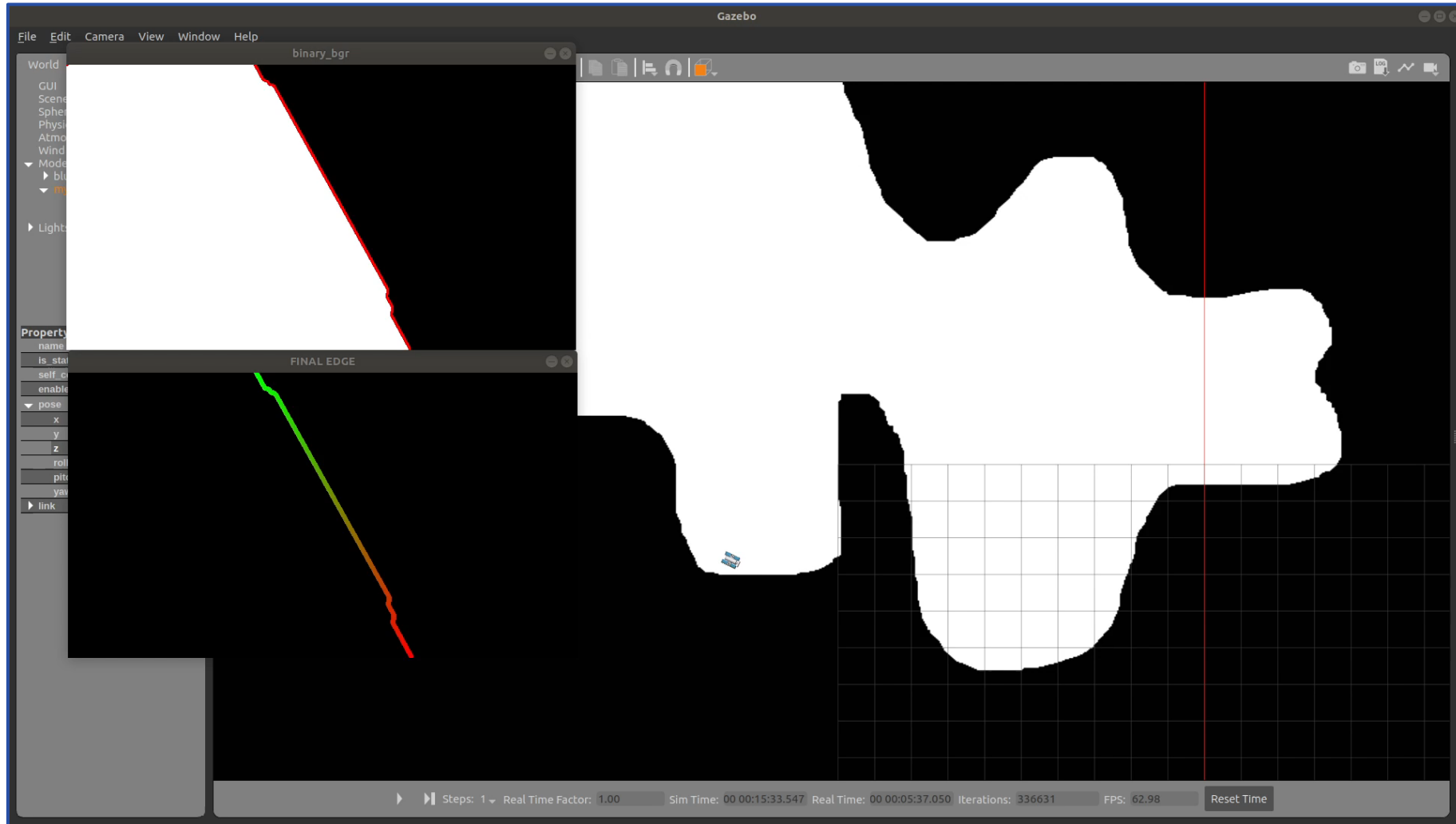
VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE

È necessario inoltre sottolineare l'importanza della **direzione di apertura del settore angolare** definita dai due punti scelti ai due frame precedenti in presenza di concavità.

Se non viene considerata la direzione di apertura, il robot rischierebbe di esplorare nuovamente la porzione di contorno già vista ai passi precedenti, non mantenendo la direzione iniziale. Tale scelta è influenzata dalla forma geometrica che assume la prateria.



VALIDAZIONE CIRCUMNAVIGAZIONE



GUIDE

Per le missioni, in generale, il robot compie un moto sul piano parallelo al fondale marino.

Il moto nel piano dipende dal task che viene svolto:

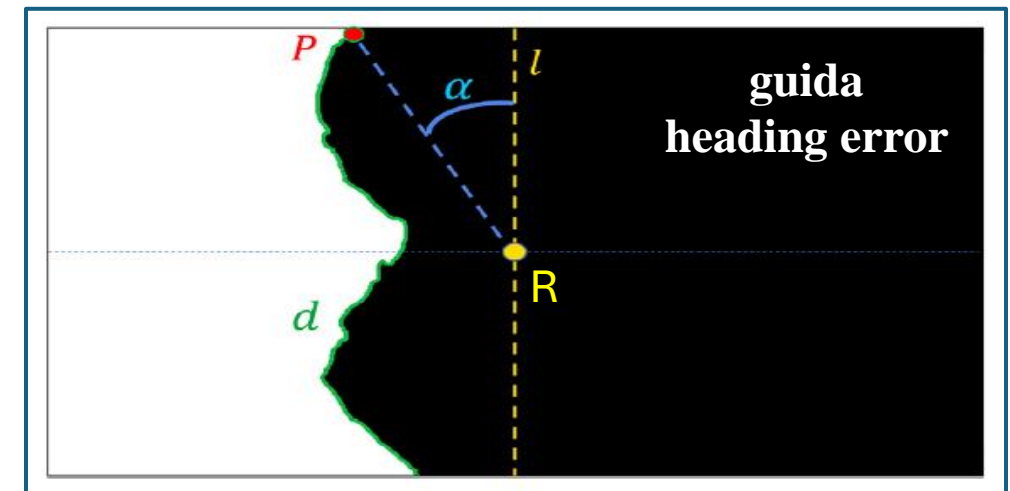
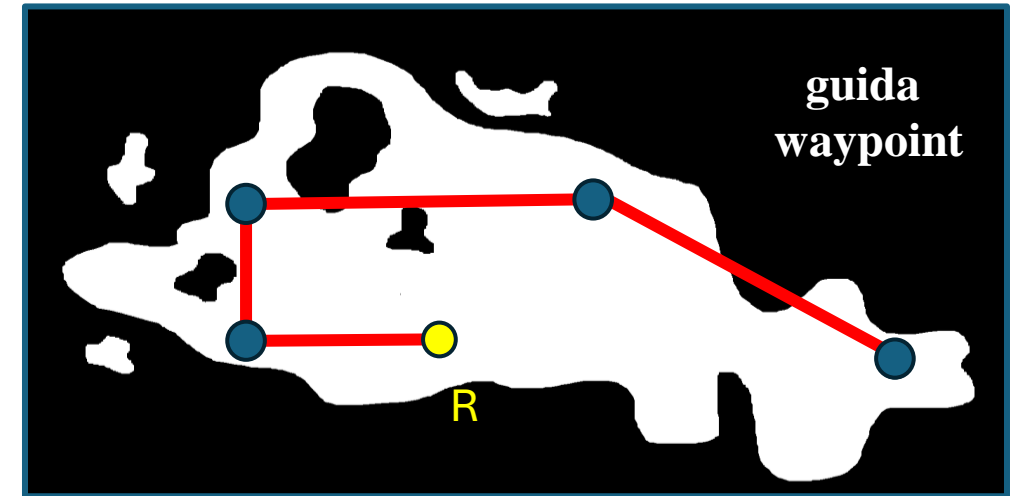
- per l'esplorazione dell'area di lavoro e l'interno della pianta viene usata una **guida a waypoint** basata sul disaccoppiamento dei gradi di libertà (x, y, ψ) al fine di **controllare** al meglio la **velocità di surge** e l'**orientazione**;
- per la circumnavigazione, invece, si ha '**guida heading error**' per monitorare i bordi esterni generando quindi un moto con gradi libertà accoppiati al fine di rendere il ROV maggiormente reattivo ai cambi di forma della Posidonia.

CONTROLLI

Per ogni guida della missione è stato utilizzato un controllore PID per regolare lo stato ai riferimenti. Per i gradi di libertà z e ψ è stato creato un anello di **controllo** per la **posizione**, invece per la **velocità di surge**, ovvero la prima componente della velocità del veicolo in terna body, un anello di velocità.

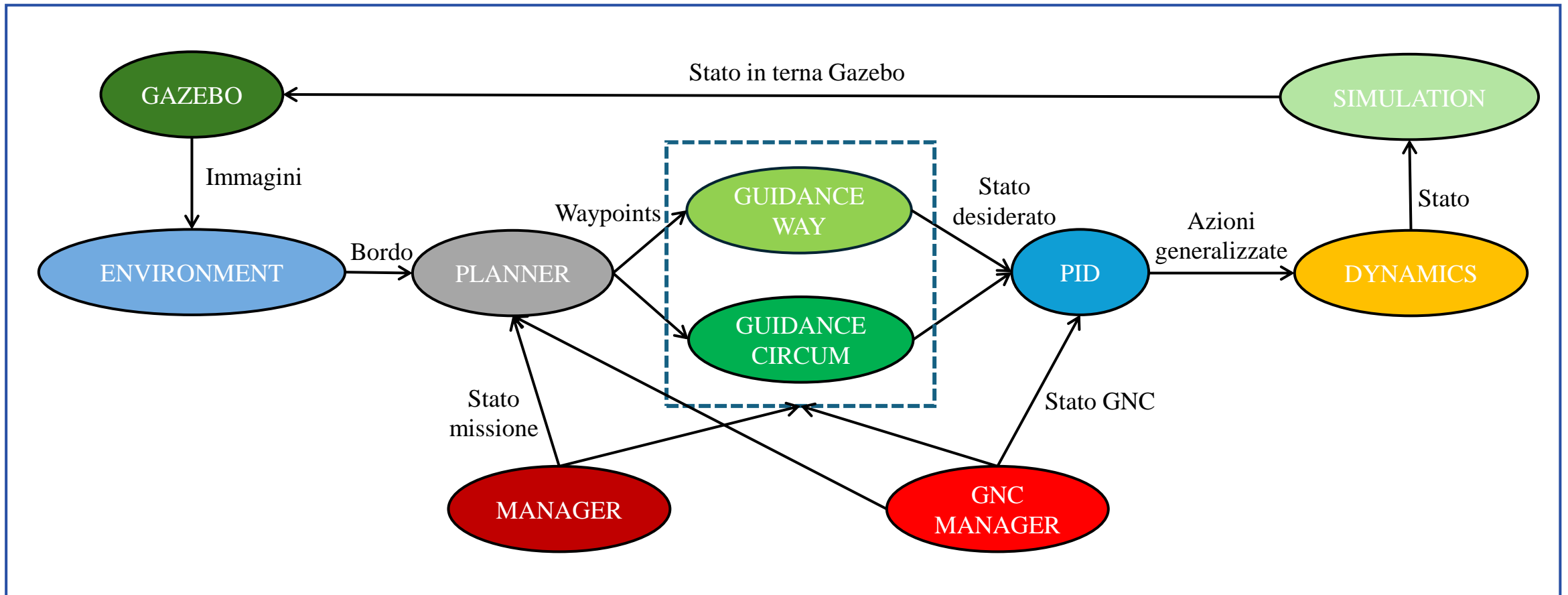
Nella **guida waypoint** viene passato come riferimento la **posizione** del nuovo punto da raggiungere e la sua **orientazione** rispetto alla direzione di moto del ROV.

Invece per la **guida heading error** sono forniti come riferimenti l'angolo di **yaw** (nella foto α), la velocità di imbardata e la **velocità di surge** u .

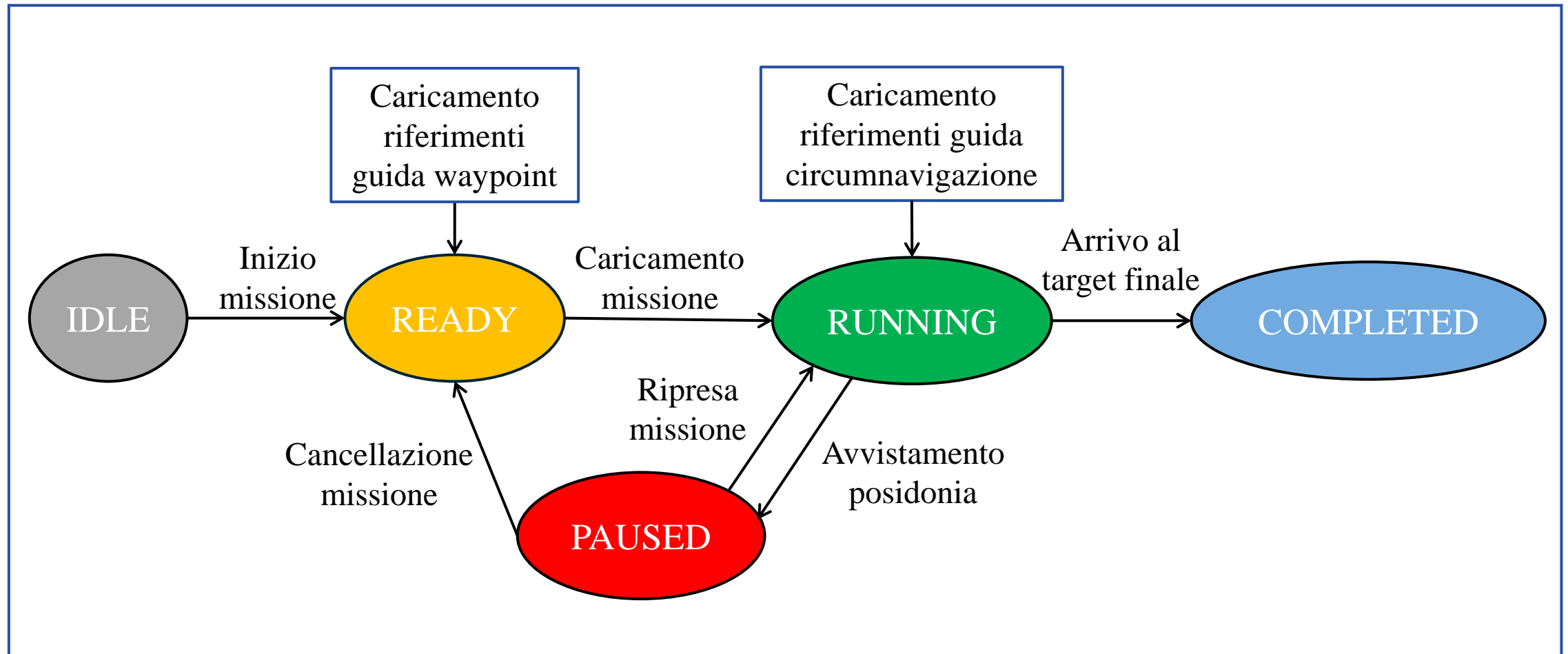


ARCHITETTURA ROS

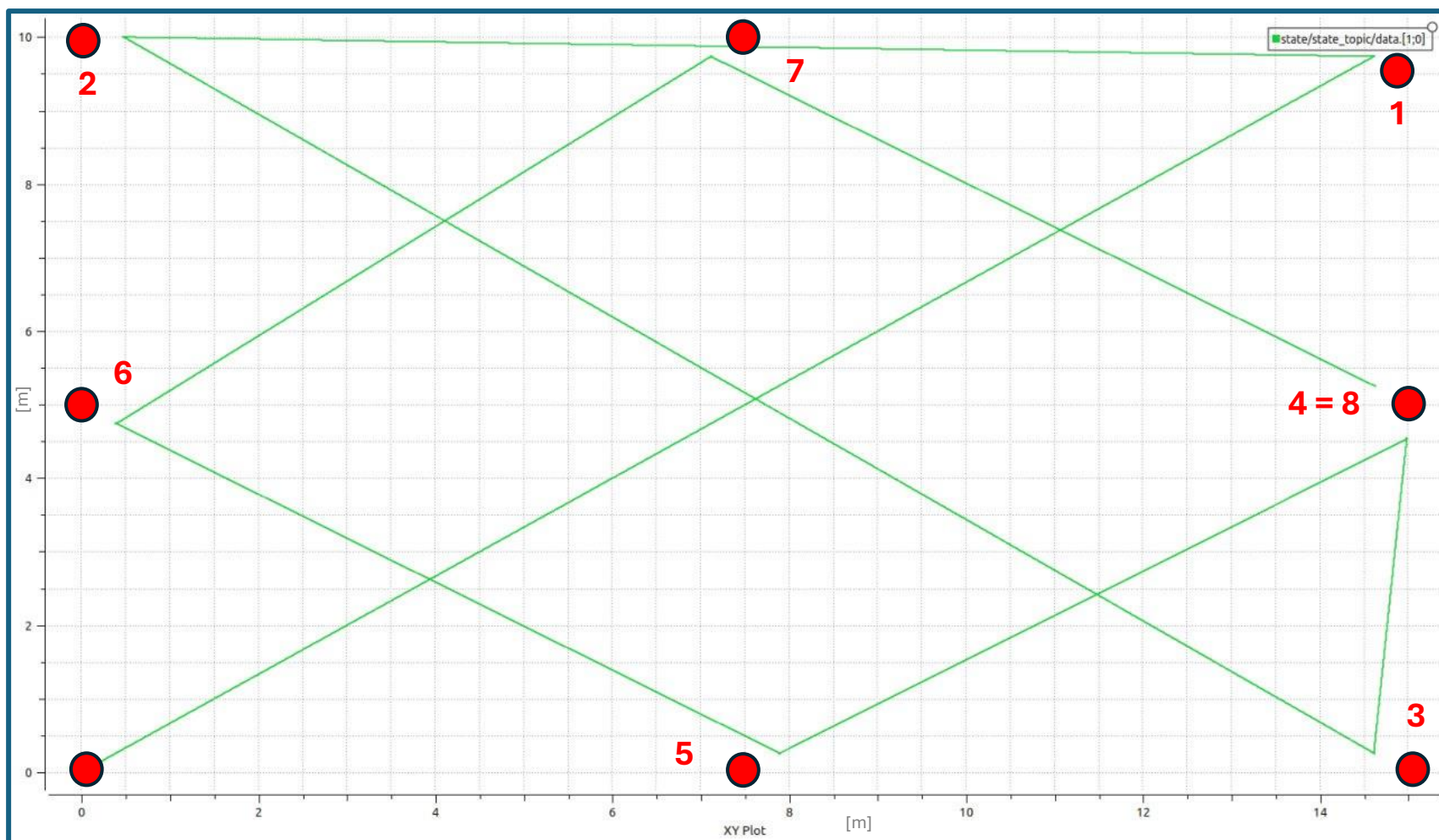
Il software è stato sviluppato tramite una sequenza di nodi che comunicano tramite messaggi pubblicati su topic. E' riportato uno schema semplificato dei nodi e il flusso delle informazioni.



MACCHINA A STATI

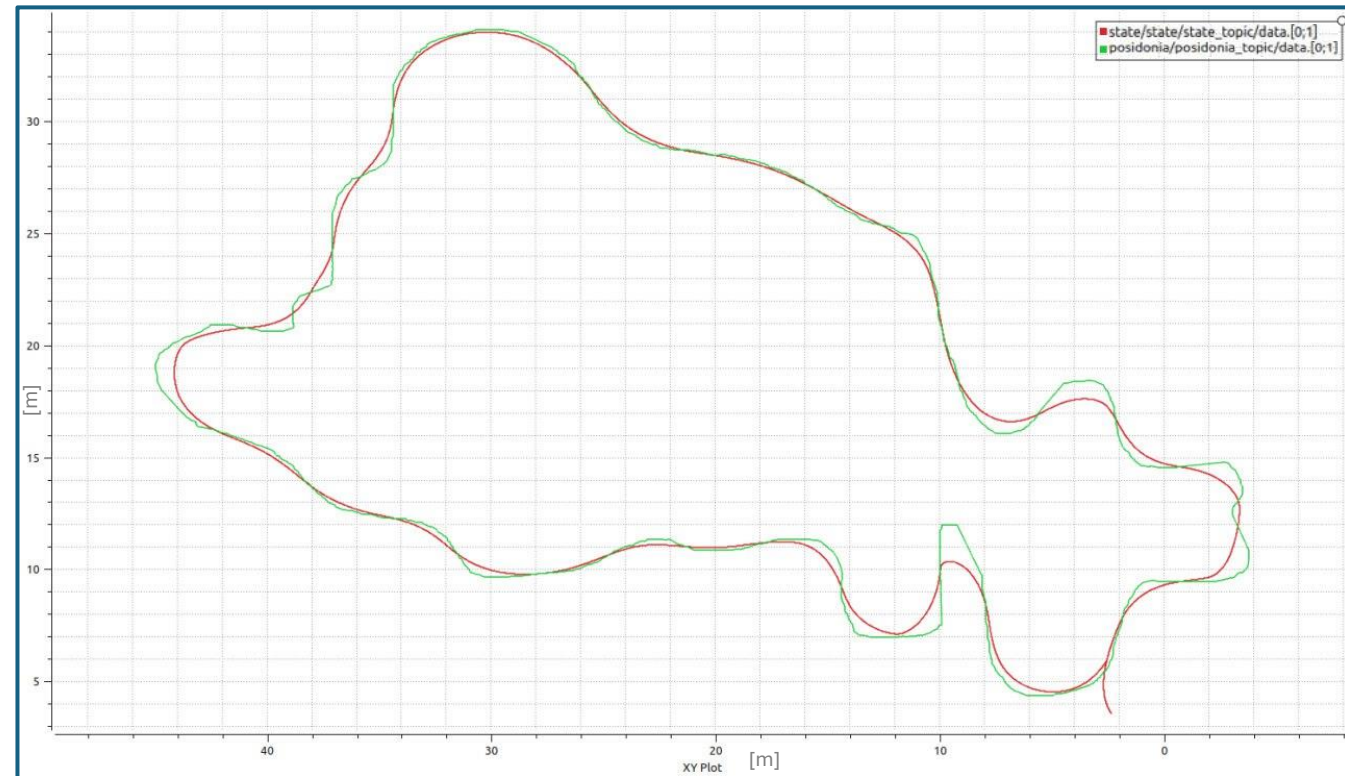
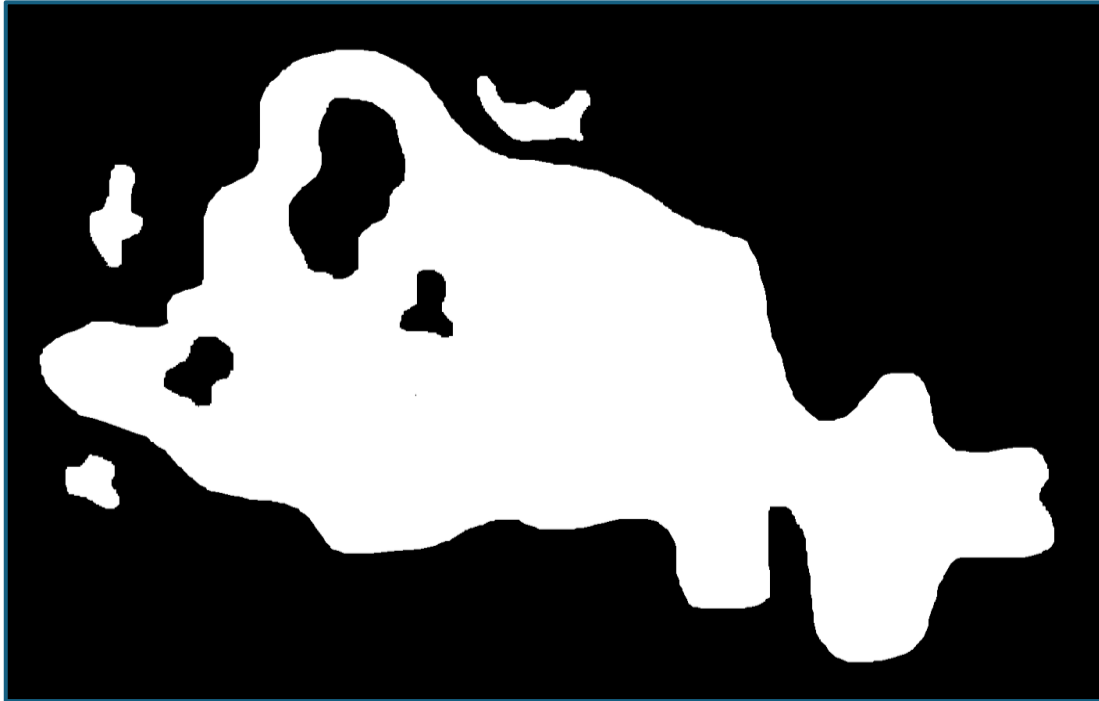


RISULTATI ESPLORAZIONE

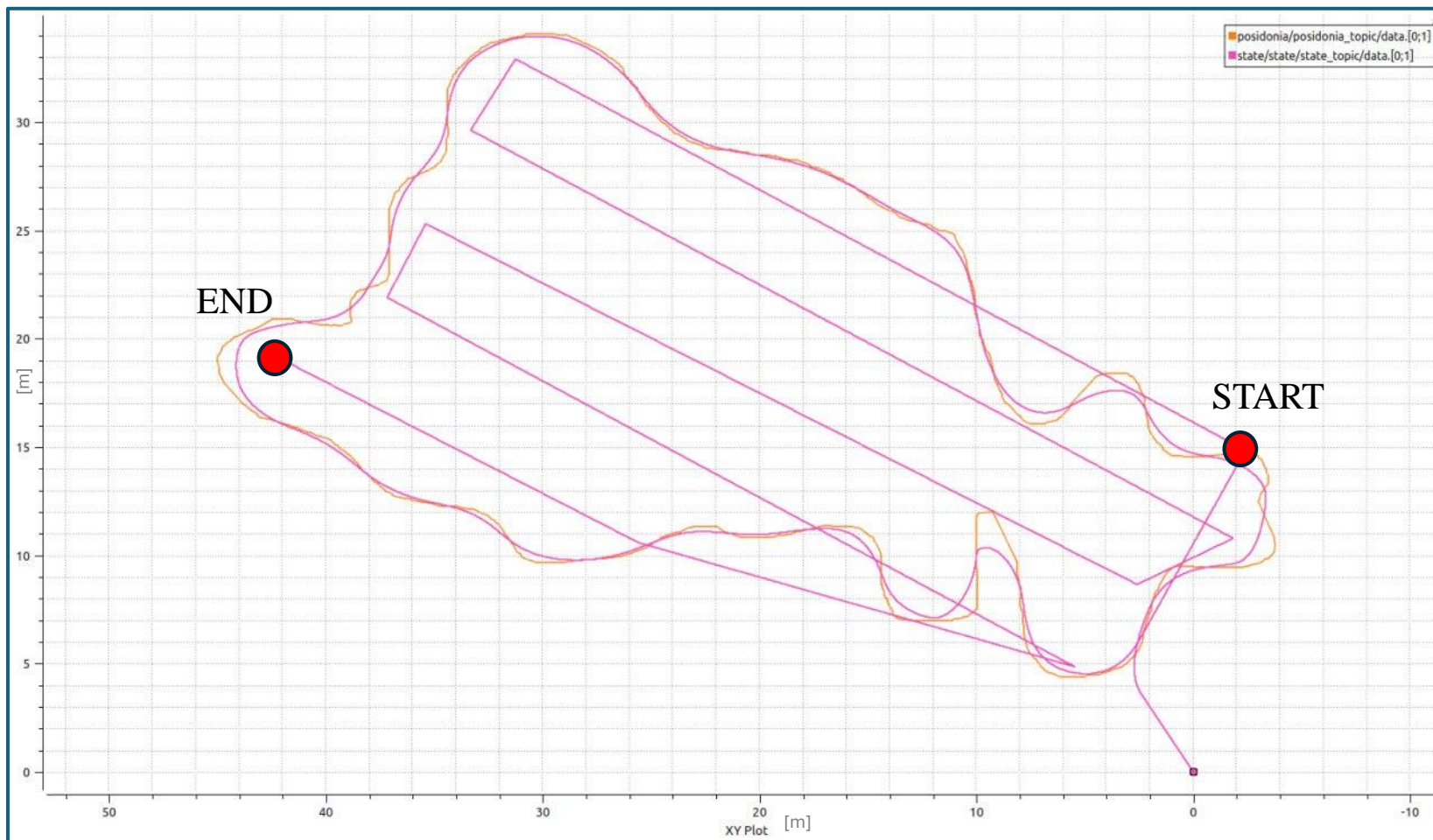


	X	Y
1	15	10
2	0	10
3	15	0
4	15	5
5	7,5	0
6	5	0
7	7,5	10
8	15	5

RISULTATI CIRCUMNAVIGAZIONE

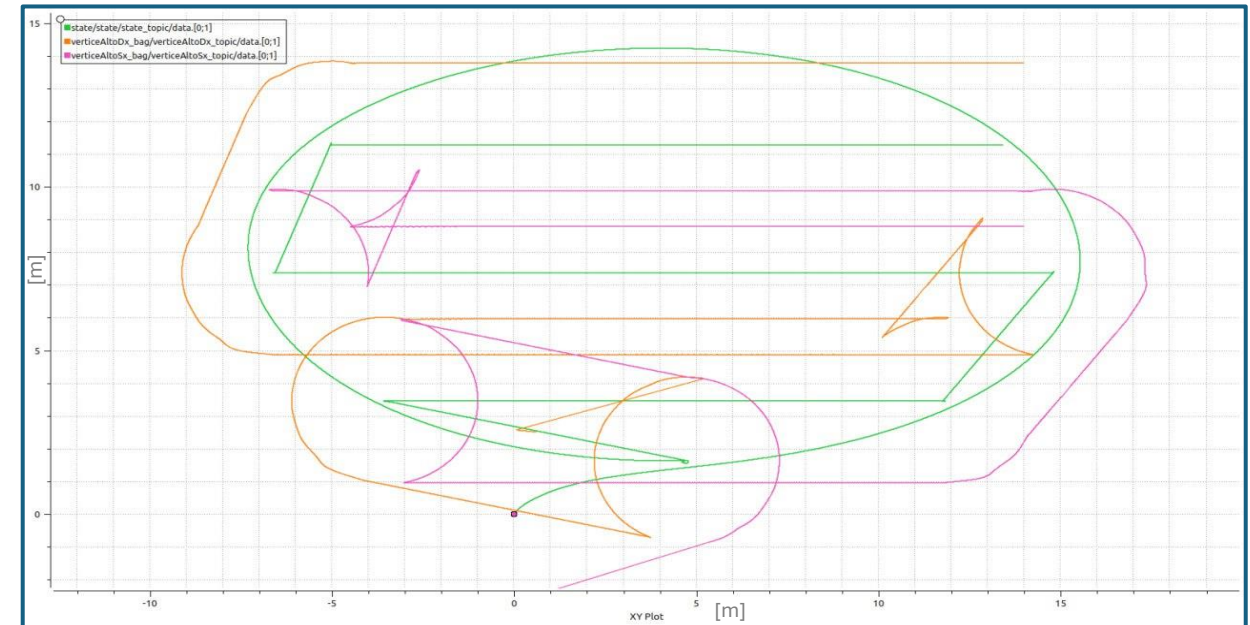
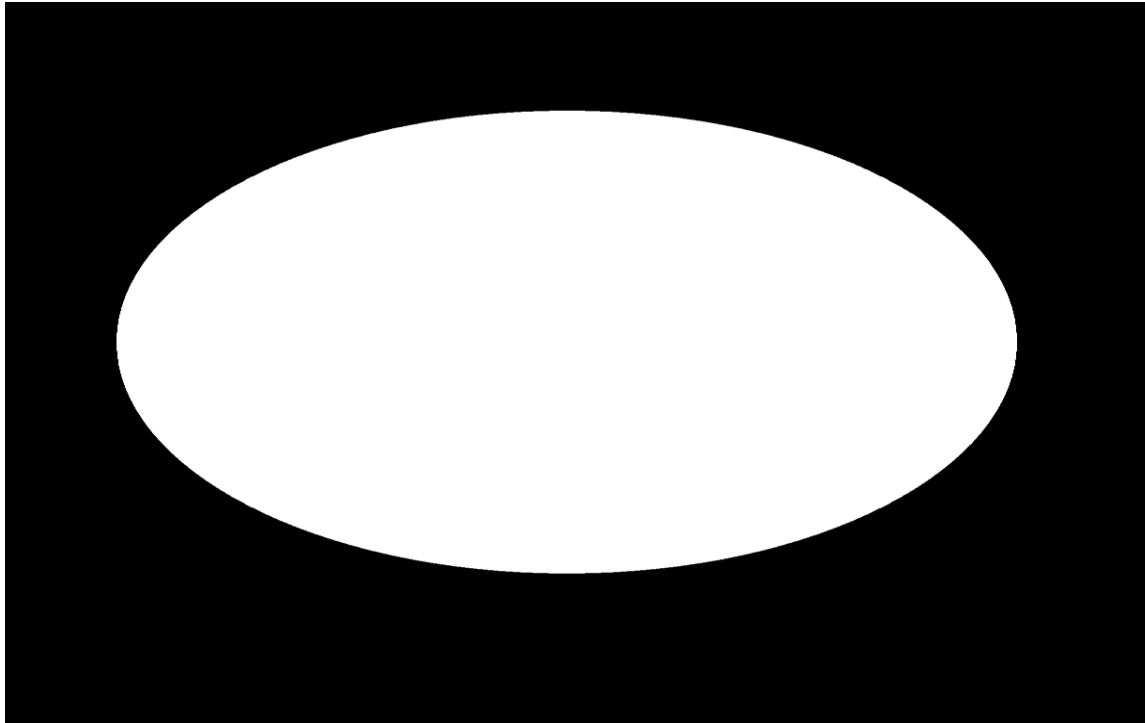


RISULTATI ESPLORAZIONE INTERNA

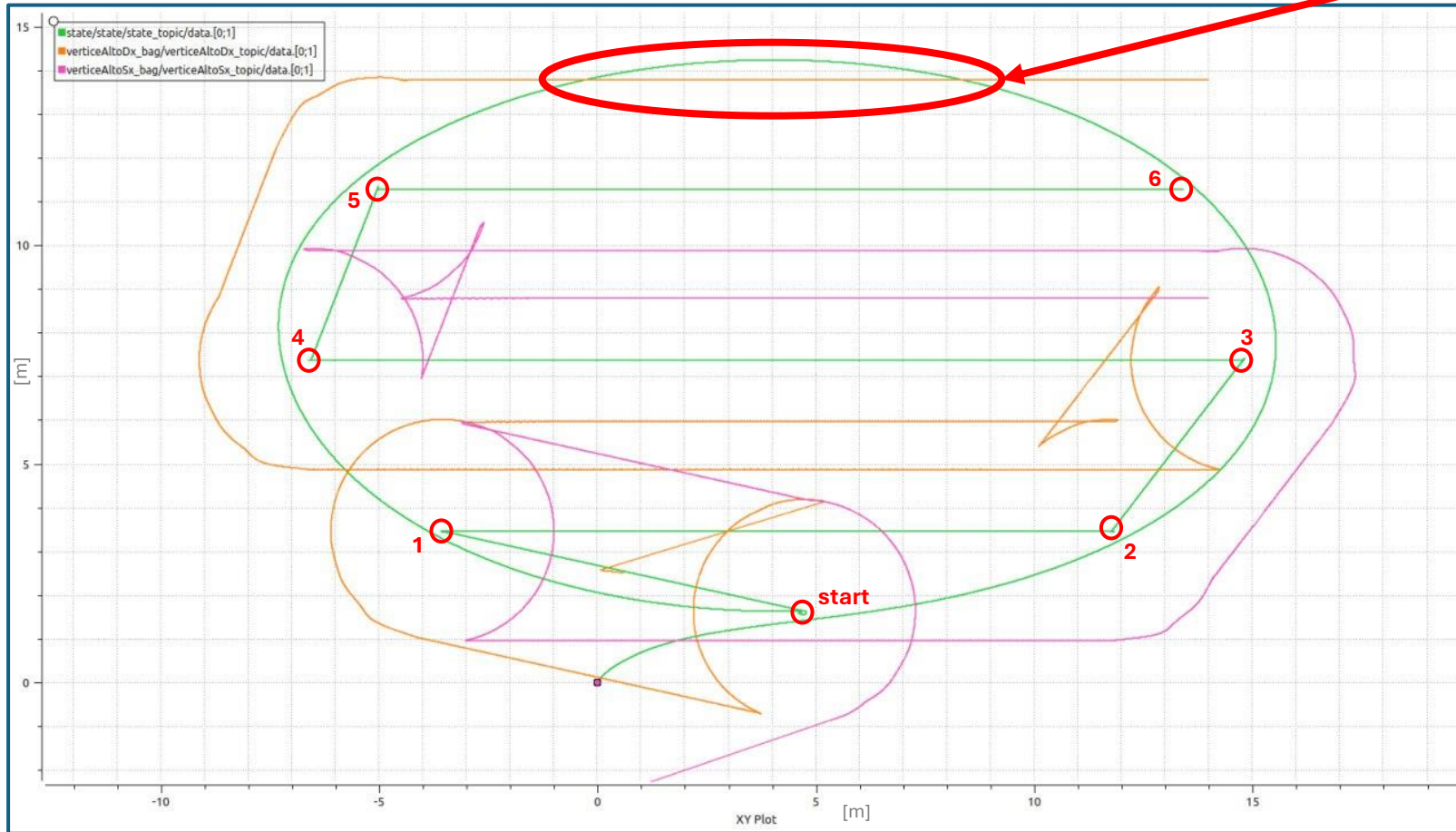


Forma particolare della prateria in cui si osserva come si sfrutta l'estensione della Posidonia per effettuare **minori rotazioni** possibili durante la fase di esplorazione interna, prestando attenzione all'ottima soluzione ottenuta nonostante le diverse insenatura che presenta tale geometria.

VALIDAZIONE RACCOLTA DATI



VALIDAZIONE RACCOLTA DATI

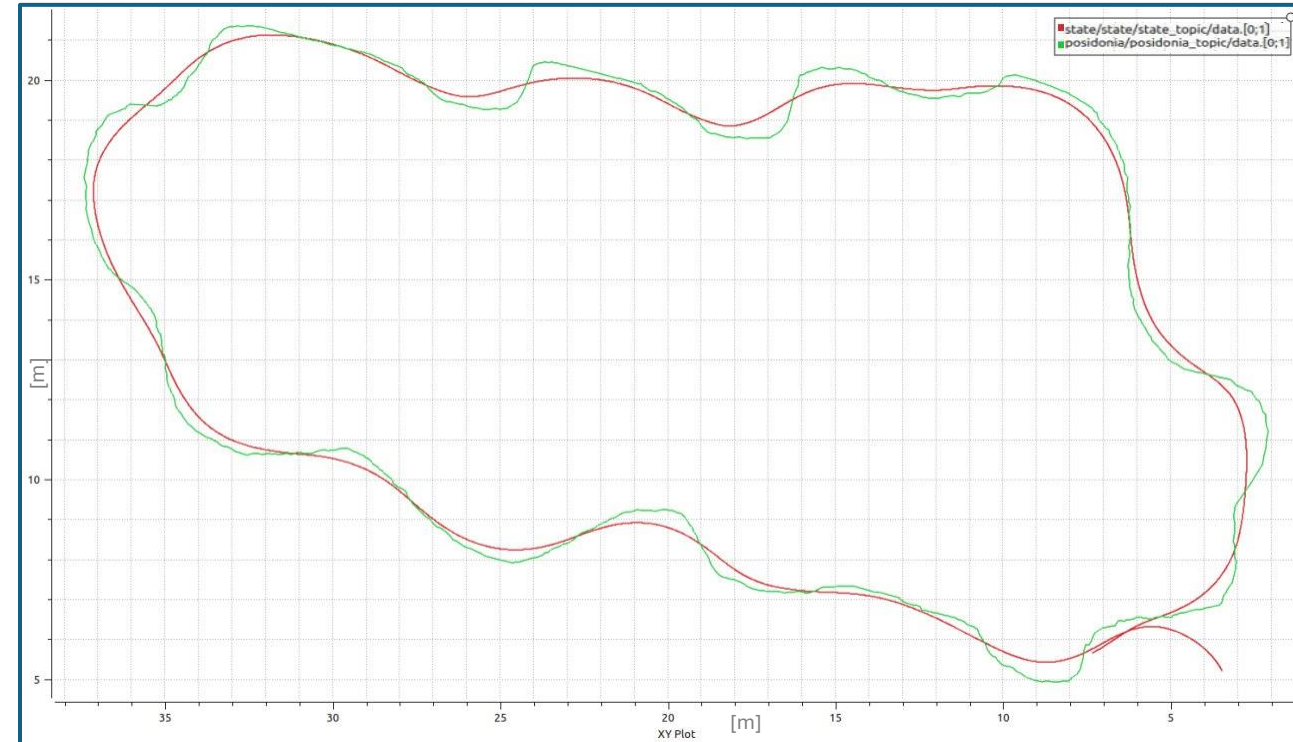
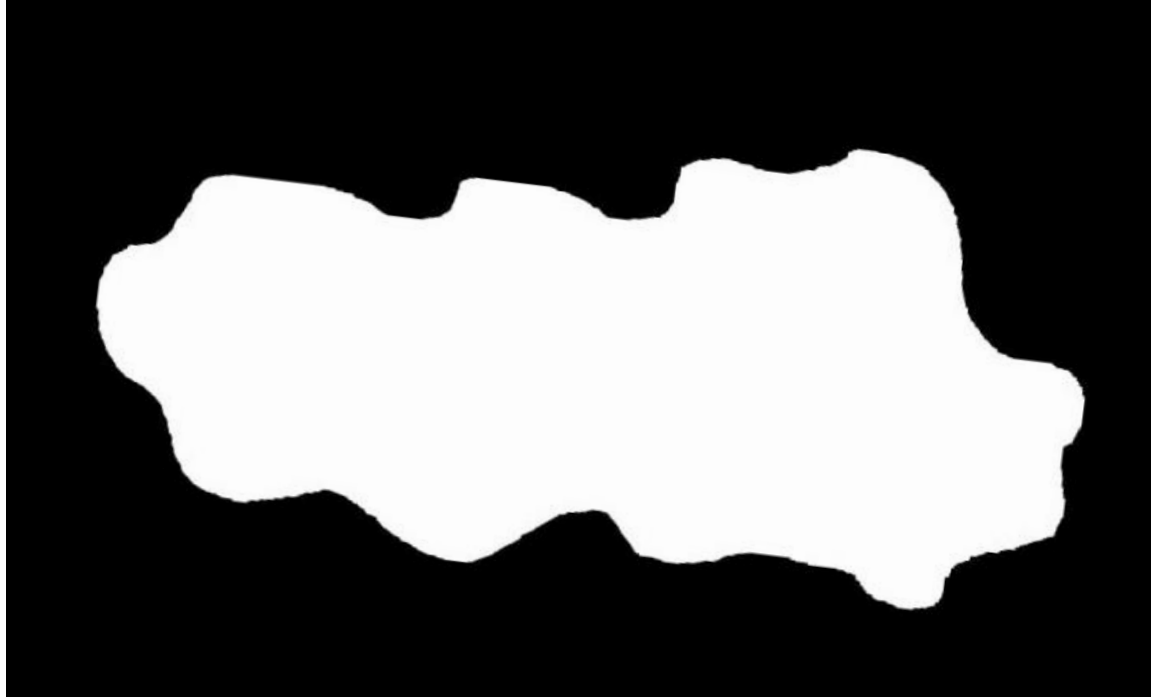


Questa porzione di area di prateria non è necessaria da visualizzare durante l'esplorazione in quanto è stata osservata nella fase precedente di circumnavigazione

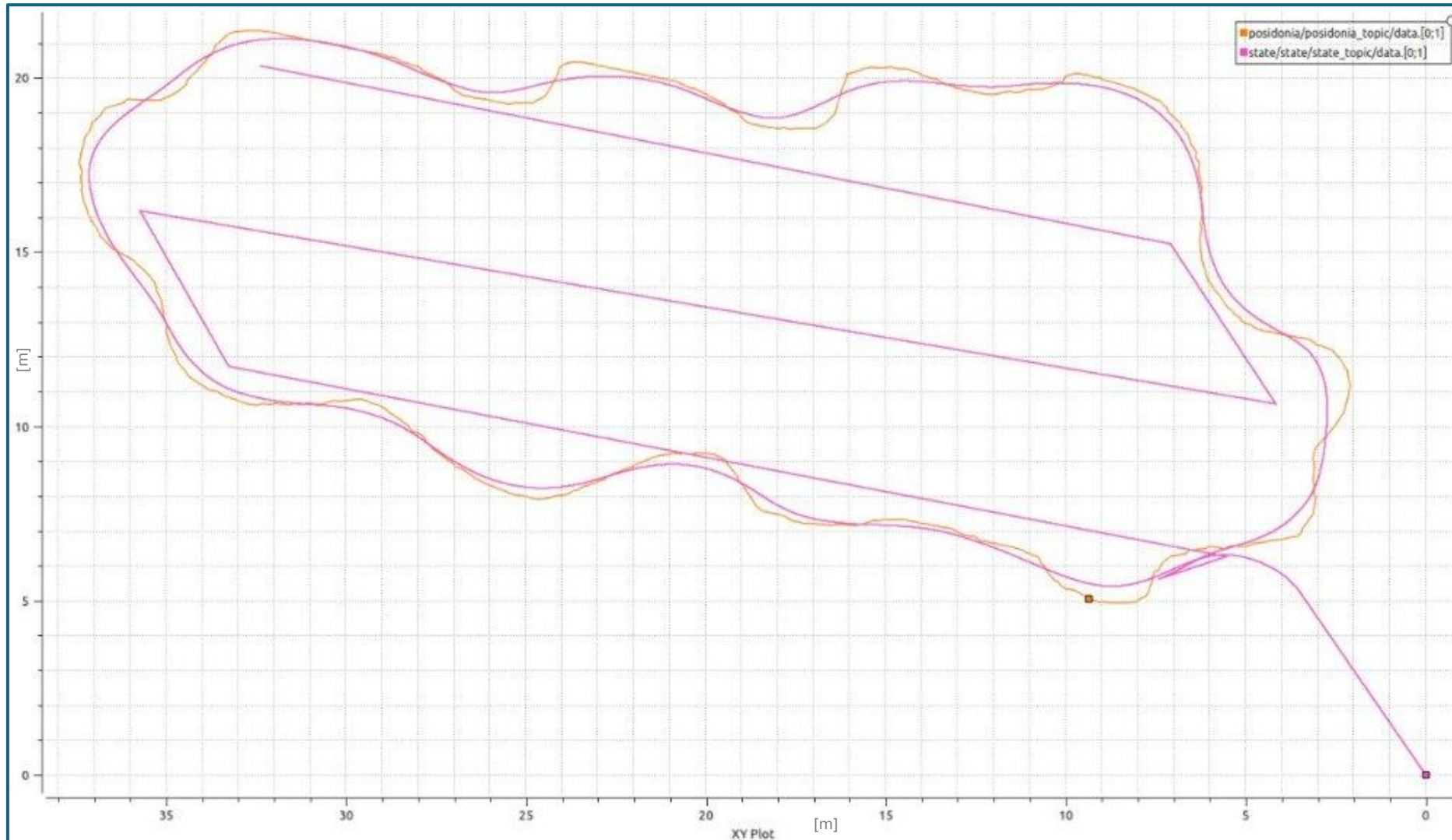
La **sovrapposizione** fissata dell'immagine del **20%** dell'area del FOV camera permette di acquisire dati con un'ottima affidabilità.

È evidente come la costruzione dei **transetti** risulta **efficace** per coprire tutta l'area della prateria.

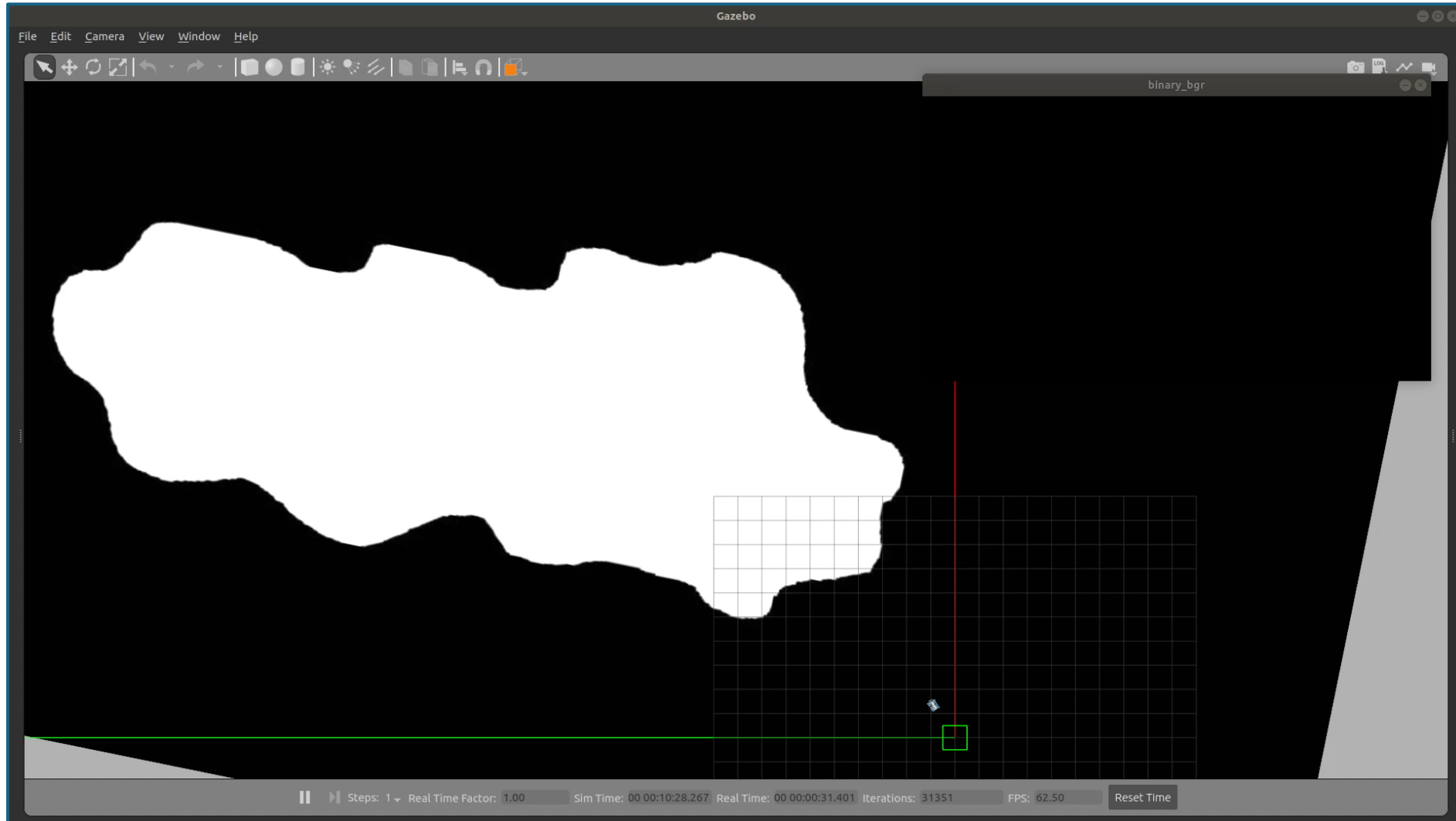
MISSIONE COMPLETA



MISSIONE COMPLETA



MISSIONE COMPLETA



CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Le strategie di pianificazione del moto costruite risultano adeguate per l'obiettivo del monitoraggio della prateria di Posidonia. Infatti in ambiente simulativo i risultati sono convincenti su differenti forme geometriche di manto erboso.

Per completare il sistema al fine di portarlo in ambiente reale è necessario:

- Validare su forme reali di prateria;
- Implementare in ambiente simulativo l'errore di navigazione e validare nuovamente il sistema;
- Aggiungere la stereo-camera al veicolo, precedentemente calibrata;
- Sviluppare e allenare la rete neurale capace di identificare la Posidonia;
- Implementazione architettura software-hardware dalla camera all'AUV passando per la rete neurale;
- Costruzione di una guida tridimensionale per adattare il moto al fondale marino.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

BIBLIOGRAFIA

Le immagini presenti in questa relazione sono state prese dagli articoli sottostanti:

- 2023 - Autonomous boundary inspection of Posidonia oceanica meadows using an underwater robot
- Zero-Shot Estimation of Radial Distortion of Wide-Angle Camera