

CAPITOLO 4

PERCEZIONE DEL MONDO PER AUTOLOCALIZZAZIONE

Per funzionare correttamente il Robot ha bisogno di auto-localizzarsi cioè deve essere a conoscenza della propria posizione in campo in ogni istante. In questo capitolo verrà affrontato il problema dell'estrazione di *percezioni visive* utili all'autolocalizzazione del robot. Rabbiati utilizza come unico sensore un sistema di visione *omnidirezionale catadiottrico* che gli consente di vedere a 360° il mondo intorno a sé. Le percezioni consistono in particolari punti dell'immagine omnidirezionale catturata dal sistema di visione. Il nostro robot è dotato di un sistema di autolocalizzazione chiamato *Mu.R.E.A.* (Multi Resolution Evidence Accumulation) che riceve in ingresso le percezioni trovate e restituisce la posizione istantanea del robot nel sistema di riferimento iniziale.

Il sistema di visione

Come abbiamo appena detto, l'unico sistema sensoriale del robot consiste in un sistema di visione omnidirezionale catadiottrico. Questo particolare sistema di visione, composto da una telecamera Firewire e da un specchio Conico-Sferico, consente al robot di avere una visione a 360° del mondo che lo circonda [3]. Il sistema di visione deve essere in grado di tenere traccia, in tempo reale, del movimento di 7 robots, della palla e di un insieme di riferimenti ambientali utilizzati per autolocalizzarsi.

Come abbiamo detto, lo specchio montato su Rabbiati ha un profilo di tipo Conico-Sferico. Il particolare profilo di questo tipo di specchio consente di ottenere la massima risoluzione a grande distanza (intorno ai 6-7 metri), di solito ottenuto con specchi conici, parabolici o iperbolici, e allo stesso tempo consente di percepire la palla e i

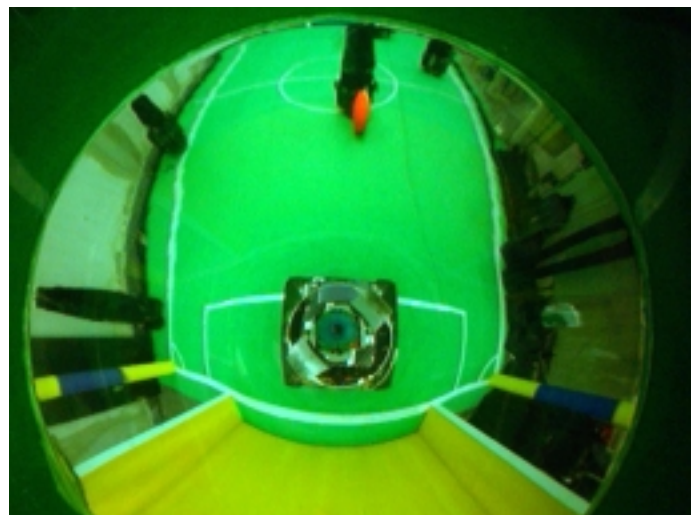


Figura 4.1 - Il Mondo visto da Rabbiati

possibili ostacoli vicino al robot grazie alla sua parte sferica. Nella *Figura 4.1* possiamo vedere un'immagine ottenuta utilizzando il sistema di visione di Rabbiati.

Come si può notare l'immagine omnidirezionale è parzialmente tagliata in basso. Questa scelta è stata effettuata per poter ottenere una buona visione frontale e laterale, più utili per il ruolo di portiere ricoperto dal nostro robot. Si può osservare infatti che Rabbiati riesce a vedere quasi tutto il campo dalla sua posizione di gioco.

La telecamera è montata sulla sommità del robot, direzionata verso l'alto mentre lo specchio è montato sopra di essa in asse con l'obiettivo. Li possiamo vedere fotografati in *Figura 4.2*.

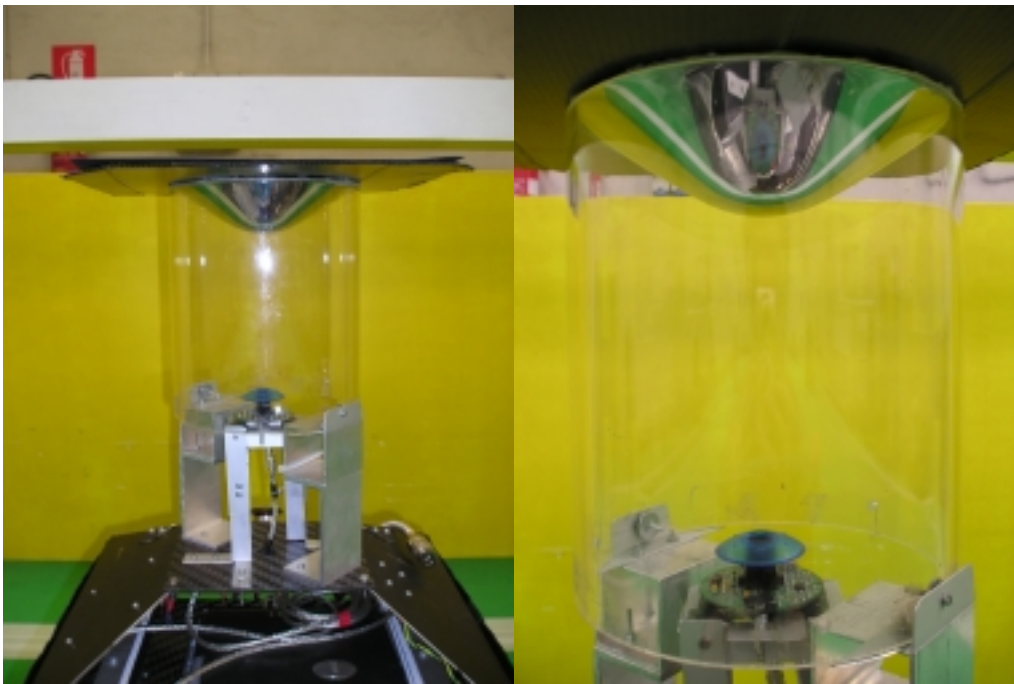


Figura 4.2 - Il sistema di visione di Rabbiati

L'immagine acquisita subisce una *Classificazione Colore* dove ogni colore dell'immagine viene riconosciuto e classificato come uno dei colori fondamentali utilizzati nell'ambiente di RoboCup: bianco, nero, rosso, verde, blu, giallo, ciano e magenta.

Sull'immagine omnidirezionale sono disposti, in 40 corone da 360 elementi, dei *recettori* che costituiscono un sottocampionamento polare dell'immagine [4]. Questi contengono informazioni sul colore di ogni singolo recettore, sull'angolo e sulla distanza dal robot del punto nella scena corrispondente al punto nell'immagine. Queste coordinate sono di tipo polare (ρ, θ) , rispettivamente distanza dal robot e angolo rispetto allo zero del robot in senso antiorario.

L'elaborazione avviene su una struttura dati che contiene l'insieme dei recettori, detta *Mappa dei Recettori*, che ha una dimensione di 40 righe per 360 colonne. La scansione della Mappa dei Recettori avviene per colonne, questo corrisponde ad una scansione a raggiera dell'immagine omnidirezionale partendo, per ogni raggio, dal punto più vicino al robot e allontanandosi progressivamente da esso.

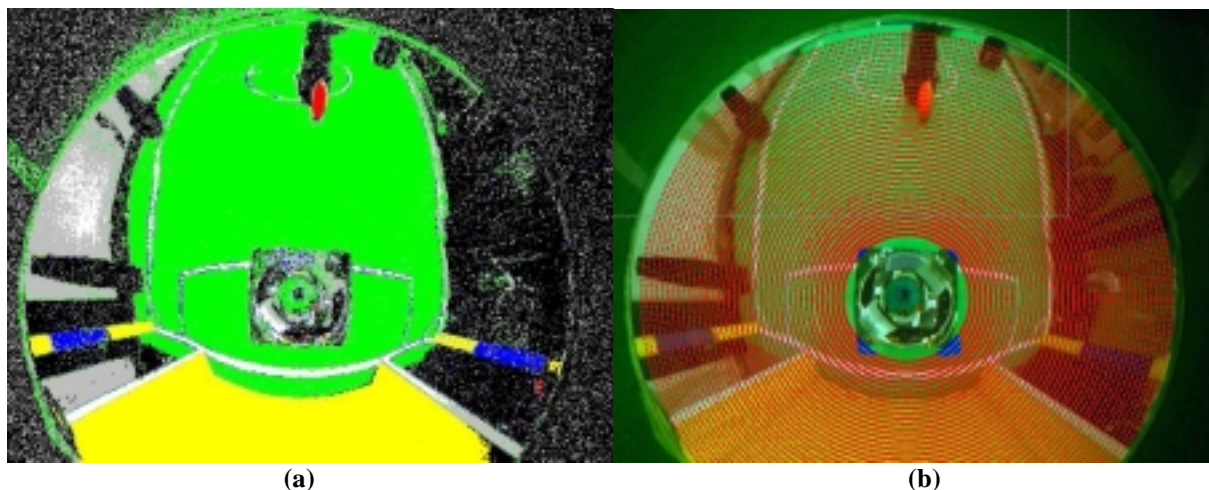


Figura 4.3 - L'immagine classificata (a) e la disposizione dei Recettori su di essa (b)

Nella *Figura 4.3 (a)* possiamo notare come appare la visione del mondo dopo la classificazione dei colori dell'immagine, mentre nella *Figura 4.3 (b)* possiamo vedere la disposizione dei Recettori sull'immagine omnidirezionale. I recettori blu in *Figura 4.3 (b)* sono detti *Killed*. Essi sono resi inattivi perché vanno a coprire una zona dell'immagine dove si trova il corpo del robot.

L'analisi dell'immagine è eseguita in tre passi:

1. Analisi dei recettori (in incroci di 3x3 pixel) distribuiti sull'immagine in modo che ogni oggetto largo almeno quanto la palla, ad una distanza minore del raggio dei sensori, possa essere coperto da almeno un recettore. Per ogni recettore viene elaborato il colore classificato. Questo attribuisce robustezza contro il rumore e le condizioni di illuminazione;
2. Raggruppamento dei recettori vicini con lo stesso colore in insiemi chiamati *Blobs*;
3. Analisi dei Blob per il riconoscimento di oggetti noti del mondo;

L'estrazione delle percezioni dall'immagine va ad integrarsi nel secondo passo dell'elaborazione, nell'algoritmo chiamato di *Blob Growing*.

Murea

Come abbiamo detto in precedenza, Rabbiati è dotato di una sistema di autolocalizzazione chiamato *Murea*¹ [5]. Murea parte dal presupposto che un sistema di localizzazione non può dipendere da un insieme ridotto di punti di riferimento nello spazio. Capita spesso che alcuni punti di riferimento, che ci si aspetta di rilevare, non siano percepiti. I motivi che possono causare questo problema variano dall'occlusione, un ostacolo non mi permette di percepire il punto in questione, al rumore sui sensori, ad

¹ MUREA: MULTI-Resolution Evidence Accumulation method for robot localization in known environments

imperfetti algoritmi per il processing dei dati sensoriali. Murea utilizza un algoritmo di localizzazione indipendente da uno specifico sistema di sensori, inoltre è in grado di accettare i dati direttamente dai sensori senza alcuna elaborazione intermedia.

Un'altra caratteristica importante di Murea è la possibilità di fornire quella che è chiamata “any-time localization” cioè la capacità di fornire la miglior posizione stimata in ogni istante della sua elaborazione. Questa caratteristica è molto importante in un realistico sistema robot real time; d'altra parte, gli altri algoritmi per la localizzazione noti non forniscono un output fino al completamento della loro computazione.

Il sistema ha 3 componenti:

1. La mappa dell'ambiente;
2. Le percezioni;
3. Il motore di localizzazione (Localization Engine);

L'ambiente è rappresentato da una mappa geometrica a 2 dimensioni che può sia essere inserita manualmente attraverso un file di configurazione sia essere generata automaticamente da un sistema apposito. La mappa è composta da semplici primitive come punti, linee, cerchi, ecc... che sono chiamate *Tipi*. Per ogni primitiva è specificata una lista di attributi che ne descrive le caratteristiche principali. Inoltre, per ogni elemento della mappa è specificato il sensore in grado di rilevarlo.

Dall'altra parte abbiamo i dati sensoriali. Questi dati producono delle “percezioni” intese come qualunque cosa che fornisce informazioni (anche parziali) sulla posizione del robot. Ogni percezione è caratterizzata da un tipo, una lista di attributi e il sensore che l'ha rilevata. Questi dati sono utili per ridurre il numero di confronti tra le percezioni e gli elementi della mappa.

Il motore di localizzazione prende in ingresso la mappa dell'ambiente e le percezioni e restituisce la posizione stimata del robot. Possono essere prodotte più posizioni possibili nel caso che l'ambiente e/o le percezioni contengano delle ambiguità.

Murea è un algoritmo ad “accumulo di prove” (evidence accumulation) dove la difficoltà è accumulare le prove lavorando ad alta definizione in modo da ottenere una stima accurata.

Lo spazio di ricerca viene diviso in sotto-regioni, chiamate *Celle*, a cui viene associato un contatore, come è usuale nei metodi ad accumulazione di prove.

Nei problemi di localizzazione per robot mobili in 2D lo spazio di ricerca è uno spazio a 3 dimensioni: X, Y, θ cioè le coordinate cartesiane del robot nel campo (x, y) e l'orientamento del robot (θ).

Ogni percezione incrementa il contatore associato ad una cella se qualche punto della cella è compatibile sia con la percezione che con il modello del mondo (mappa). Quindi, sulla base dei voti raccolti da ogni cella, il sistema seleziona quella che più probabilmente contiene la corretta posizione del robot. Il

processo viene quindi iterato sulla cella selezionata, aumentando così la definizione, finché non si verifica una condizione di terminazione.

Le condizioni di terminazione possono essere:

- raggiungimento della dimensione minima richiesta delle celle (si può decidere di raggiungere definizioni diverse a seconda delle applicazioni);
- la dimensione delle celle è diventata troppo piccola rispetto al rumore di fondo dei sensori e questo ha causato una dispersione dei voti;
- la cella più votata non riceve più di una data percentuale dei voti disponibili;
- scade un timeout, in questa situazione la precisione della soluzione non è rilevante.

L'algoritmo di estrazione delle percezioni

L'estrazione delle percezioni si basa sul fatto che l'ambiente di RoboCup è un ambiente strutturato, cioè costituito da elementi ben precisi e noti al robot: il campo è verde, le linee sono bianche, una porta è di colore giallo e una porta è di colore blu. Esistono inoltre, ai quattro angoli del campo, dei paletti multicolore gialli e blu chiamati *corner*.

I tipi di percezioni che vanno ricavate per consentire l'autolocalizzazione del robot sono:

- I punti bianchi appartenenti alle linee del campo;
- Le direzioni in cui si trovano le porte;
- Le direzioni in cui si trovano i corner;

Questi punti di riferimento sono sufficienti a Murea per determinare l'esatta posizione del robot nel campo.

Durante l'algoritmo di estrazione delle percezioni la mappa dei recettori viene scandita verticalmente dall'alto verso il basso. Questo tipo di scansione corrisponde ad una scansione a raggiera dell'immagine omnidirezionale partendo, per ogni raggio, dal recettore più vicino al robot, al più lontano fino a coprire tutti i 360 gradi. L'estrazione delle percezioni si basa sui colori dei recettori e sulle transizioni di colore tra due o più recettori consecutivi.

Punti – Linea

Come detto in precedenza un tipo di percezione valida per Murea sono i punti appartenenti alle linee bianche. Viene rilevato il punto di una linea bianca del campo che viene intersecato da uno dei raggi di recettori (le colonne della Mappa dei Recettori).

Durante la scansione di una colonna della Mappa dei Recettori, si prende in considerazione il colore del recettore i -esimo e del recettore $i-1$ -esimo controllando se tra i due vi è una transizione di colore. Se il recettore $i-1$ -esimo è verde e quello i -esimo è bianco, si ha una transizione iniziale valida e le coordinate

sulla mappa dei recettori del recettore i-esimo vengono memorizzate in una variabile temporanea. Proseguendo la scansione si incontrano più recettori di colore bianco (per tutto lo spessore della linea) fino a trovare un recettore i-1-esimo bianco e un recettore i-esimo verde rilevando così una transizione finale valida. Questa transizione e quella iniziale, che rappresentano i bordi della linea bianca, vengono memorizzati in una struttura dati per essere rielaborate in seguito (si veda la *Figura 4.4*).

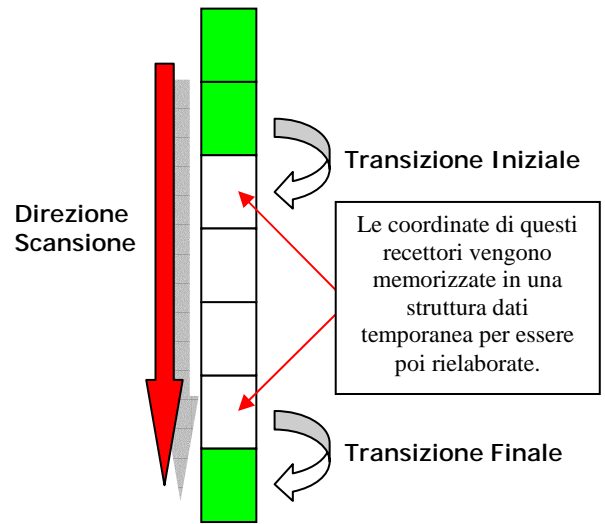


Figura 4.4 - Rilevamento di una percezione di tipo punto-linea

È prevista la soppressione di eventuali “buchi” di classificazione del colore nella mappa dei recettori. Questi buchi si creano quando l’algoritmo di classificazione colore non riesce a riconoscere il colore dell’immagine e attribuisce al recettore corrispondente un colore indefinito (grigio) (*Figura 4.5*).

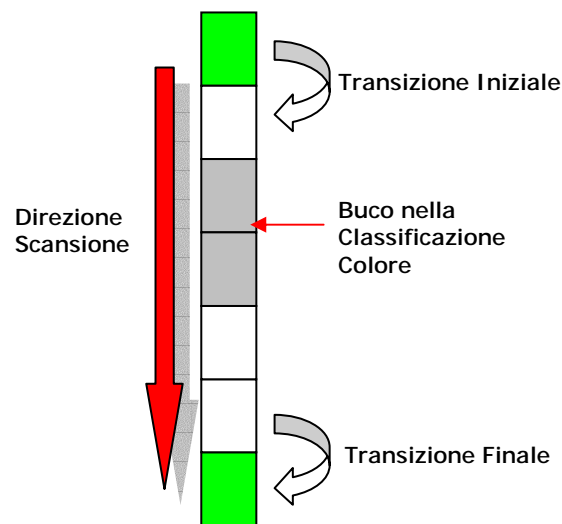


Figura 4.5 - Soppressione di un buco nella classificazione colore

Quando l’algoritmo di estrazione delle percezioni, dopo aver incontrato una transizione iniziale valida, incontra un recettore non classificato passa al successivo e incrementa un contatore. Se anche il successivo è non classificato si ripete l’operazione, e così via fino ad incontrare di nuovo un recettore bianco. Il contatore serve per determinare la larghezza del “buco di recettori”. Se il contatore supera una soglia da noi precedentemente impostata via software la transizione iniziale viene cancellata e si comincia la ricerca di una nuova percezione. L’inserimento di questa soglia è stato necessario perché, come vedremo in seguito, la percezione che sarà poi mandata a Murea avrà le coordinate scena del centro della linea. Un numero eccessivo di recettori non classificati consecutivi introduce una incertezza sulla posizione del bordo finale della linea e di conseguenza sulle coordinate esatte del suo centro. Con questa soglia viene introdotta una tolleranza che può essere tarata a seconda delle esigenze.

La ricerca di una transizione finale viene interrotta anche quando si incontra un recettore di colore diverso dal bianco (ad es.: verde) dopo una serie di non classificati, come mostrato nella *Figura 4.6*. In questo caso si ha una *Transizione Finale Incerta* e diventa impossibile stabilire la posizione del bordo linea.

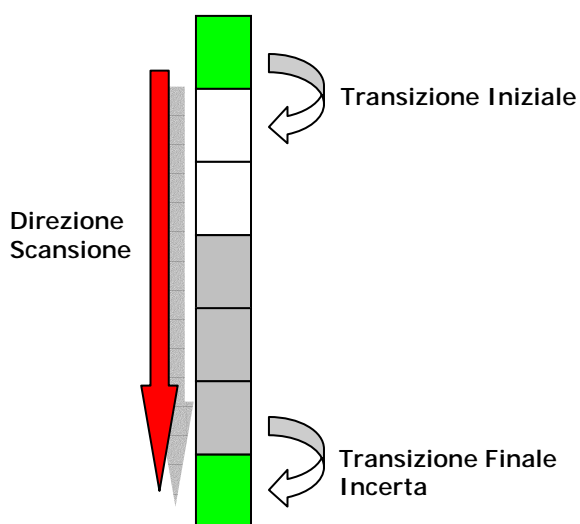


Figura 4.6 - Percezione eliminata a causa dell’incertezza sulla transizione finale

Alla fine della scansione di ogni colonna, tutte le coppie di transizioni rilevate vengono rielaborate e vengono calcolate le percezioni punto-linea da inviare al sistema di autolocalizzazione. La percezione ricavata consiste nella media delle distanze delle due transizioni dal robot e dall’angolo, rispetto allo zero del robot, in cui queste sono state trovate. Le coordinate del punto sono quindi in coordinate *relative* nel sistema di riferimento del robot. Queste coordinate vengono memorizzate, assieme al tipo di percezione a cui si riferiscono, nella struttura dati temporanea che contiene tutte le percezioni da inviare a Murea.

Un caso particolare si verifica nel momento in cui il robot si trova esattamente su una linea bianca. Nel momento in cui ciò accade abbiamo, anche a partire dal primo recettore e lungo uno stesso raggio di scansione, un elevato numero di recettori bianchi. Anche nel caso in cui si incontrasse una transizione

finale valida la percezione sarebbe errata perché la linea bianca non è intersecata perpendicolarmente dal raggio di scansione.

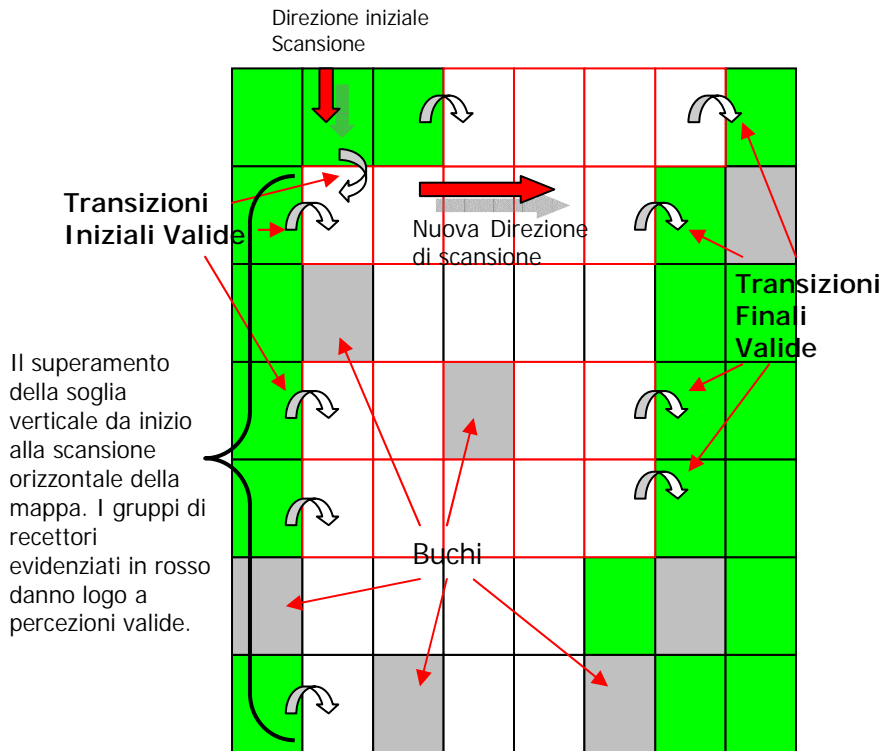


Figura 4.7 - Scansione orizzontale di una porzione della Mappa dei Recettori

Per evitare questo inconveniente è stata introdotta una soglia che indica il numero massimo di recettori bianchi consecutivi, superati i quali si considera di essere sopra una linea bianca, e in tal caso si dà il via ad una scansione orizzontale nella mappa dei recettori nella zona interessata (Figura 4.7). I canoni di ricerca restano gli stessi della scansione verticale: si cercano transizioni iniziali e finali e si filtrano i buchi nella classificazione colore. Una volta trovata una coppia di transizioni iniziale e finale valida viene memorizzata la percezione corrispondente alle coordinate scena del punto mediano tra le due transizioni.

Un altro tipo di percezione utile all'autolocalizzazione consiste nella direzione in cui viene rilevato del blu o del giallo. Questi colori infatti fanno parte sia delle porte che dei corner.

Direzione – Blu e Direzione – Gialla

Nel caso delle porte viene presa in considerazione la direzione in cui, durante la scansione della colonna della mappa dei recettori, si incontrano un certo numero di recettori blu o gialli. Il numero minimo di recettori consecutivi necessari al rilevamento di questo tipo di percezione è impostabile da programma e consente di filtrare eventuali errori nella classificazione colore.

Per poter affermare che in una certa direzione c'è del blu (o del giallo) appartenente ad una porta bisogna quindi incontrare un numero significativo di recettori blu (o gialli), come mostrato nella *Figura 4.8*.

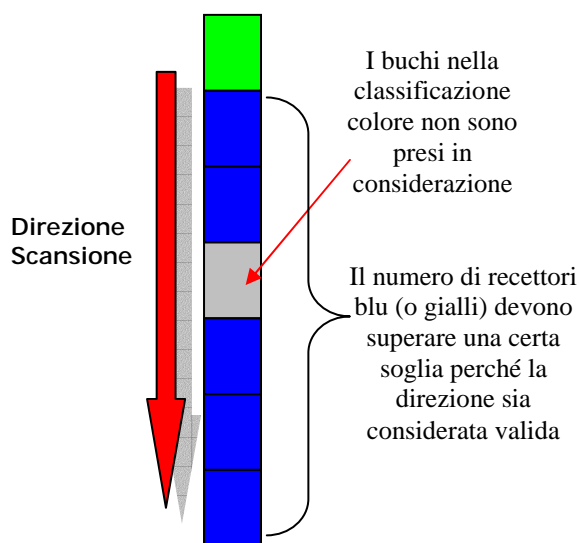


Figura 4.8 - Rilevamento di una percezione di tipo Direzione - Porta

In questo caso non avviene alcun filtraggio dei buchi nella classificazione colore in quanto non ci interessa il punto esatto dove viene rilevato il colore ma solo la direzione.

Una volta rilevata, la percezione viene memorizzata nella struttura dati che contiene tutte le percezioni da inviare a Murea.

Direzione – Corner

Fino ad ora si è cercato di estrarre percezioni senza dare loro alcun significato semantico: le direzioni indicano semplicemente che lungo un certo raggio c'è una certa quantità di recettori blu o gialli, senza specificare se si tratta effettivamente di una porta e i punti-linea indicano solo che in determinate coordinate è presente un punto bianco, e non che questo faccia effettivamente parte di una linea.

Con i corner, invece, dobbiamo dare necessariamente una piccola interpretazione ai dati che rileviamo. Il motivo principale è che i corner sono costituiti dagli stessi colori delle porte. Esistono quattro corner di due tipi diversi: i primi due sono posti ai lati della porta gialla e sono cilindri di colore giallo-blu-giallo, mentre i secondi due sono posti ai lati della porta blu e sono cilindri di colore blu-giallo-blu.

Non basta più quindi rilevare se in una certa direzione c'è un certo colore ma bisogna tenere presente che, se c'è un'alternanza di questi colori (con uno specifico ordine), si è in presenza di un corner. In più, a seconda della posizione del robot nel campo, potrei essere in grado di scorgere uno solo, due, o tutti e tre i colori che compongono il corner, introducendo ulteriore incertezza.

Per questo motivo le percezioni riguardanti i corner inviate a Murea possono essere di 3 tipi:

1. *Direzione blu o gialla*: nel caso che riesca a vedere solo uno dei colori. Questa percezione è esattamente uguale a quella delle porte, spetterà a Murea capire la differenza.
2. *Direzione corner generico*: nel caso che riesca a vedere un'alternanza giallo-blu o blu-giallo stabilisco che in quella direzione è presente un corner senza specificare di quale corner si tratti.
3. *Direzione giallo-blu-giallo o blu-giallo-blu*: in questo caso riesco a vedere tutti e tre i colori e comunico la presenza di un corner specifico nella direzione considerata.

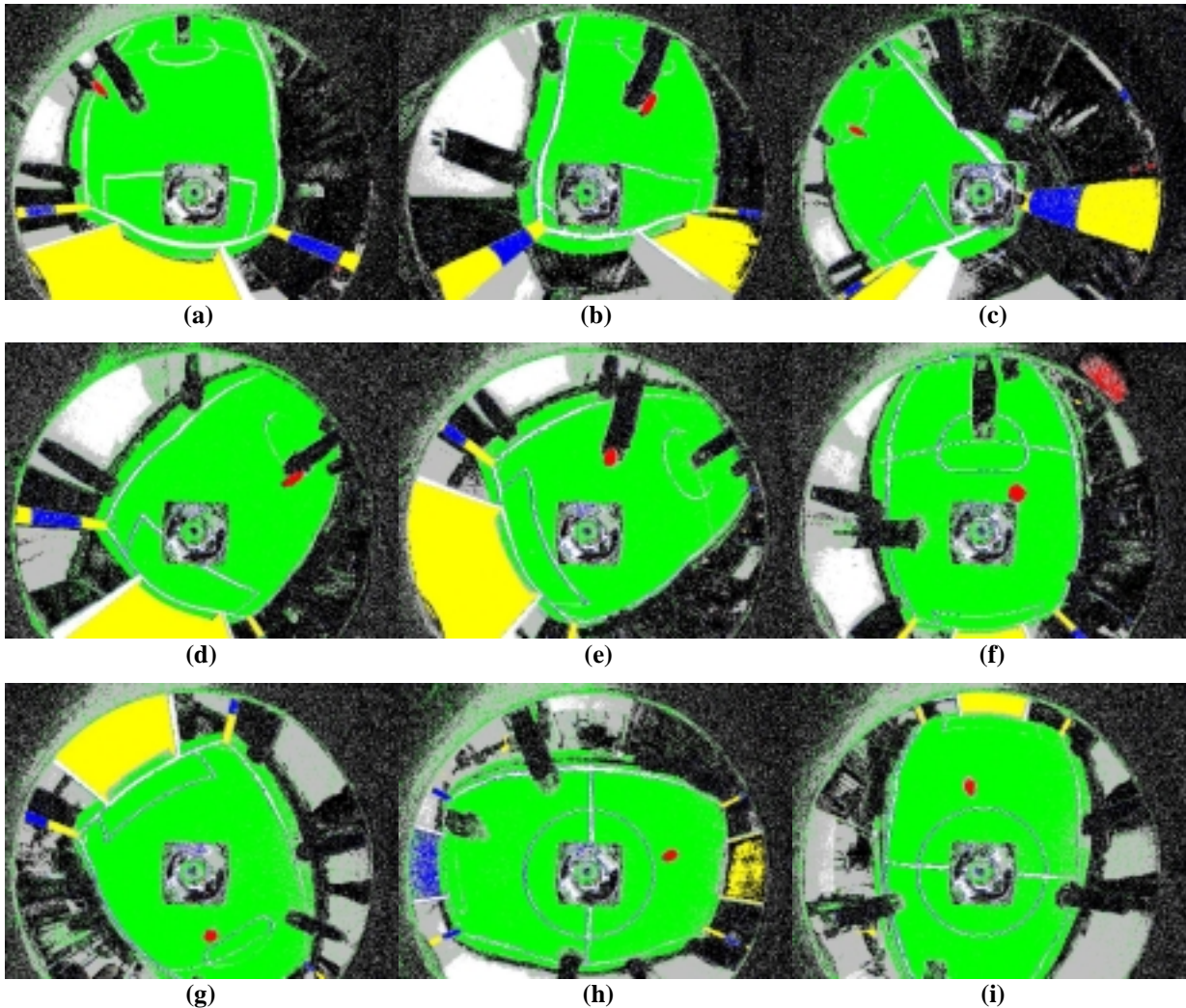


Figura 4.9 - Vista dei corner e delle porte da diverse posizioni nel campo

In *Figura 4.9* sono mostrati degli esempi dei casi in cui i corner sono visti totalmente o parzialmente dal Robot a seconda della sua posizione nel campo vediamo in breve: La *Figura 4.9 (a)* ci mostra che generalmente quando Rabbiati staziona nella sua zona di gioco, cioè l'area, è in grado di vedere completamente i due corner ai lati della propria porta. Nelle *Figure 4.9 (b) e (c)* possiamo vedere che, quando il robot si trova in una posizione parzialmente (*Figura 4.9 (b)*) o totalmente (*Figura 4.9 (c)*)

laterale rispetto all'area, riesce a percepire totalmente solo uno dei due corner, mentre dell'altro riesce a vedere solo due colori. La situazione peggiora nelle *Figure 4.9 (d), (e) ed (f)* a causa del fatto che i corner si vengono a trovare posteriormente al robot, nella zona in cui l'immagine è tagliata. Questa situazione si può verificare nel caso in cui Rabbiati si trovi in una posizione avanzata rispetto alla porta, oppure nel caso in cui il robot sia molto angolato e non in linea con essa. In *Figura 4.9 (d)* possiamo vedere infatti che il robot riesce a vedere totalmente uno dei corner e solo un colore dell'altro corner. Nella *Figura 4.9 (e)*, riesce a vedere due colori di un corner e uno solo dell'altro, mentre in *Figura 4.9 (f)* riesce a vedere a malapena due colori di un corner e uno solo dell'altro. Nella *Figura 4.9 (g)* il robot si trova nello stesso punto della *Figura 4.9 (f)*, ma è ruotato rispetto ad essa. Notiamo, quindi, che rivolgendo il fronte del robot verso la porta riusciamo a vedere due colori per entrambe i corner. Nelle *Figure 4.9 (h) ed (i)*, possiamo vedere come Rabbiati percepisce il mondo quando si trova a centro campo. A seconda del suo orientamento riesce a vedere entrambe le porte ed un colore per ogni corner (*Figura 4.9 (h)*) o una sola porta con un colore per entrambi i corner posti lateralmente ad essa (*Figura 4.9 (i)*).

Quando, durante la scansione di una colonna, viene rilevata la presenza di un recettore di colore blu o giallo, viene settata una variabile che tiene traccia dello stato di questi rilevamenti. Se successivamente al primo viene rilevato un recettore di colore opposto a quello rilevato in precedenza, la variabile di stato viene aggiornata in modo che indichi il rilevamento di un'alternanza dei colori di nostro interesse (giallo-blu oppure blu-giallo). Nel caso infine, che successivamente al secondo rilevamento si trovi un recettore di colore opposto a quello rilevato immediatamente prima, la variabile di stato passa ad indicare la presenza di un'alternanza di colori blu-giallo-blu o giallo-blu-giallo, come mostrato in *Figura 4.10*.

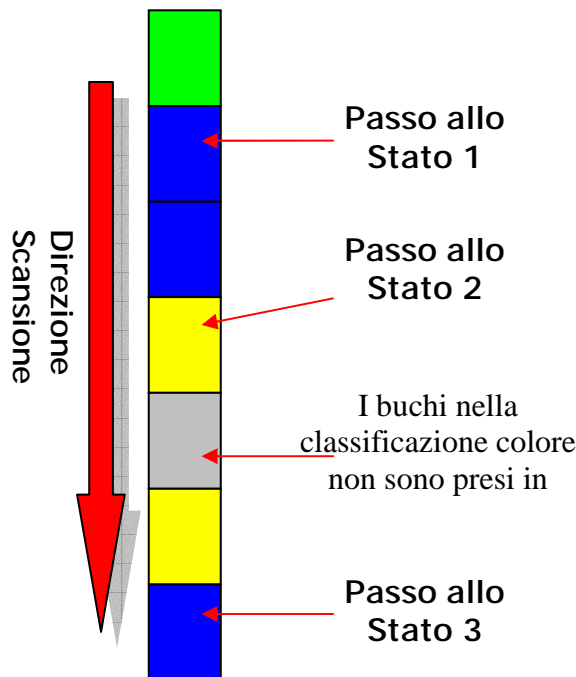


Figura 4.10 - Rilevamento di una percezione di tipo Corner

Alla fine della scansione della colonna, si va a guardare la variabile di stato *e*, a seconda dello stato che contiene, la direzione corrente di scansione viene salvata come una percezione di tipo direzione blu (o gialla), corner generico o corner blu-giallo-blu (o giallo-blu-giallo).

Al momento dell'invio delle percezioni trovate al sistema di autolocalizzazione, queste subiscono una selezione. Nel prossimo paragrafo sono indicati i criteri utilizzati per compiere questa operazione.

Selezione delle percezioni

Come abbiamo detto in precedenza tutte le percezioni rilevate durante la scansione della Mappa dei Recettori vengono memorizzate in una struttura dati temporanea prima di essere inviati al sistema di autolocalizzazione. Al momento dell'invio, queste percezioni subiscono una selezione in base alla loro significatività e al loro numero.

Le percezioni inviate al sistema di autolocalizzazione sono quindi un sottoinsieme di quelle trovate: prima si inviano tutti i corner perché costituiscono un punto di riferimento ben preciso nel campo, e quindi sono più significative, e poi un certo numero, parametrizzabile, delle altre. Questa selezione in base al numero viene fatta in maniera casuale, cioè viene inviata una percezione ogni 2, ogni 3, ogni 4, ecc... a seconda del numero totale di percezioni trovate e del parametro che indica il numero di percezioni che vogliamo siano inviate. Ovviamente se il numero di percezioni trovate è minore o uguale al numero di quelle desiderate, vengono inviate tutte le percezioni. Infine, e per ognuna delle percezioni selezionate, viene costruito, e successivamente inviato a Murea, un messaggio contenente il tipo di percezione, il dato riguardante la percezione e il sensore che l'ha rilevata (nel nostro caso esiste solo il sistema di visione).

Questa selezione è necessaria per evitare che il sistema di autolocalizzazione riceva un numero eccessivamente elevato di percezioni che causerebbero un rallentamento dell'elaborazione.

Prove sperimentali

Nelle *Figure 4.11 e 4.12* possiamo vedere due immagini prese dal Monitor, un programma che solitamente viene mandato in esecuzione su un calcolatore che si trova a bordo campo e che visualizza sullo schermo una grafica del campo con gli oggetti del mondo visti dai robot, monitorando i messaggi inviati via rete wireless dai robot stessi.

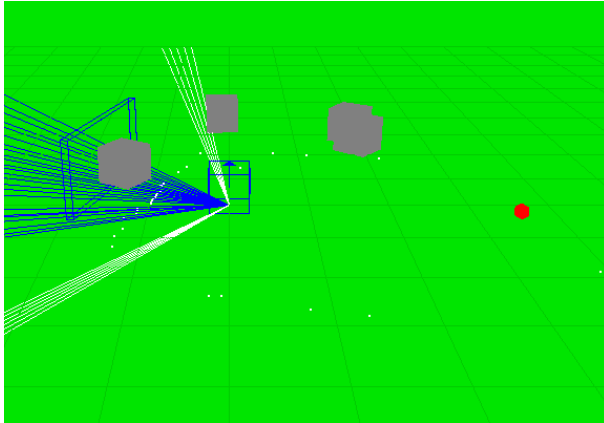


Figura 4.11

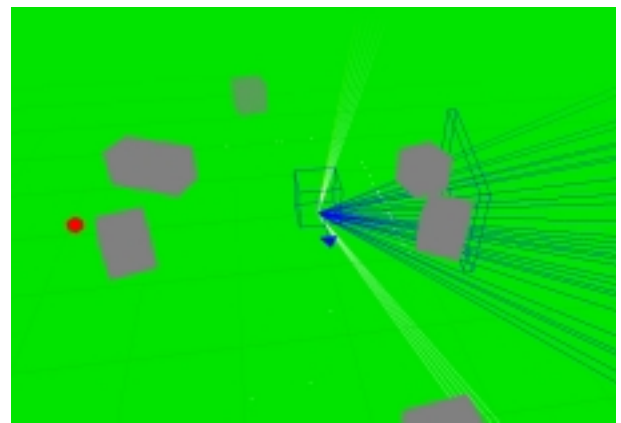


Figura 4.12

Nella grafica il robot è rappresentato dal cubo blu con la freccia che indica la sua direzione frontale di avanzamento che, vista la particolare cinematica del nostro robot, nel caso di Rabbati indica il lato sinistro. I cubi grigi sono ostacoli, il punto rosso è la palla e il parallelepipedo più grande è la porta blu. Le percezioni sono rappresentate dai punti bianchi sul terreno, per i Punti - Linea, e dalle rette che partono dal centro del robot, che sono blu o gialle, per le Direzioni - Blu o Gialle, e bianche per le Direzioni - Corner. Possiamo notare come effettivamente le Direzioni - Corner puntino con precisione verso i corner e le Direzioni - Blu si dirigano verso la porta blu.

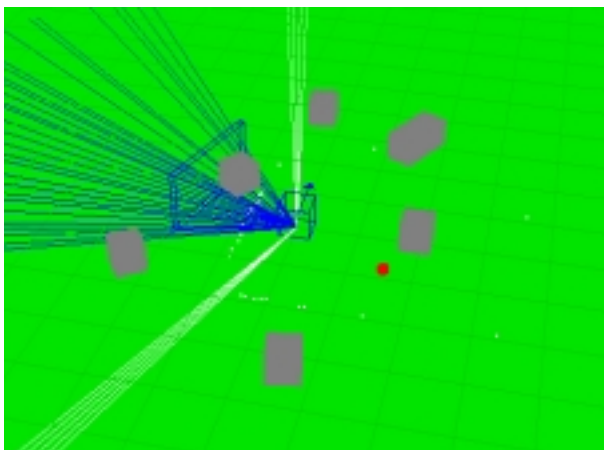


Figura 4.13

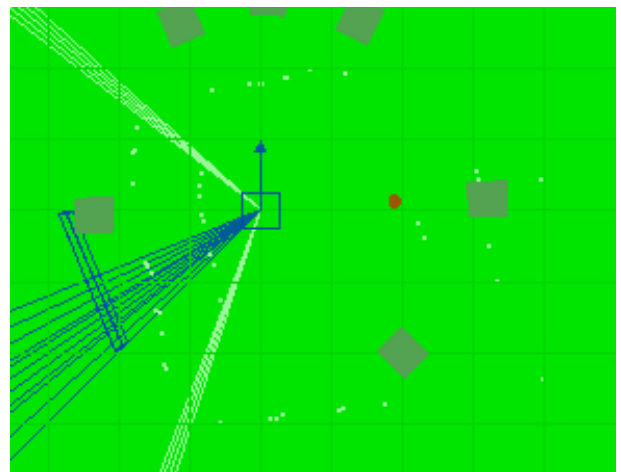


Figura 4.14

Nelle *Figure 4.13 e 4.14* sono meglio evidenziate le percezioni di tipo Punto - Linea. Si può notare come i punti bianchi disegnino effettivamente sul terreno le linee del campo. Questo aspetto è ancora più evidente nella *Figura 4.14* in cui il robot si trova circa un metro fuori dall'area. Si possono riconoscere facilmente le linee di bordo campo, dell' area e del cerchio di centro campo (vicino alla palla). Notate infine come effettivamente le Direzioni - Corner si dirigano verso gli angoli del campo disegnate dalle percezioni di tipo Punto - Linea.