

# Realizzare robot giocatori: problemi e soluzioni

Andrea Bonarini (bonarini@elet.polimi.it)

Dipartimento di Elettronica e Informazione,  
Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32,  
20133 Milano, Italy

## Sommario

Lo sviluppo di robot in grado di partecipare attivamente e autonomamente ad attività ludiche richiede di prendere in considerazione allo stesso tempo gli aspetti fisici del robot, le sue capacità sensoriali, e le sue abilità operative, che spesso si basano su modelli del mondo esterno e del compito da svolgere. In questo articolo, prenderemo in esame i principali aspetti dello sviluppo di robot giocatori autonomi e vedremo alcune possibili scelte, sviluppate negli ultimi anni di partecipazione al campionato di mondo per robot calciatori (Robocup).

## Abstract

The development of robots able to participate actively and autonomously to games calls for considering at the same time the physical aspects of the robot, its sensing possibilities, and its operational capabilities, which are often based on models of the external world and of the task to be accomplished. In this paper, we will consider the principal aspects of the development of autonomous playing robots, and we will see some of the possible design choices developed in the last years of participation to the world championship for soccer robots (Robocup).

## Robot autonomi

Lo sviluppo dei robot autonomi è uno dei temi di ricerca che più attirano l'attenzione di ricercatori e media negli ultimi anni. Perché un robot sia veramente autonomo, cioè sia in grado di operare senza alcun intervento umano per svolgere il compito a lui affidato, occorre dotarlo di tutte le capacità percettive, attuative e comportamentali che sono necessarie. In particolare, è importante valutare la relazione tra aspetti fisici del robot (corpo, sensori e attuatori) e le modalità con cui si realizzano i suoi comportamenti.

In questo articolo, ci focalizziamo sulla realizzazione di robot in grado di giocare. Si tratta di robot autonomi il cui compito è interagire con il mondo esterno seguendo delle regole definite ed ottenendo dei risultati. Uno degli aspetti interessanti di questo tipo di applicazioni è proprio il fatto che pur dovendo seguire delle regole ci sono ampi spazi in cui l'autonomia del robot può esprimersi ed anzi, più il robot riesce a sfruttare questa dimensione, più, in genere, ha successo nel gioco.

A titolo d'esempio, percorreremo il cammino che porta alla definizione di un particolare robot impegnato in un gioco di squadra competitivo nei confronti di altri robot (il calcio) e vedremo come una progettazione coordinata di aspetti fisici e aspetti comportamentali possa portare a realizzazioni di successo, in grado di competere con delle modalità così coinvolgenti che il pubblico è naturalmente portato a incitare direttamente i robot, dimenticando che si tratta di entità artificiali che nella maggior parte dei casi

non sono neanche in grado di percepire i segnali sonori a loro rivolti.

## Uno schema di principio

Nella progettazione di un robot autonomo, innanzitutto occorre identificare il contesto operativo ed i dati necessari allo svolgimento del compito. Si passa quindi ad identificare quali possano essere le modalità di acquisizione di questi dati e le necessità di movimento del robot. Una volta formulate le ipotesi su questi aspetti, compatibili con le risorse a disposizione e i livelli di affidabilità e approssimazione accettabili, si può passare alla definizione dei comportamenti attesi del robot.

Da ormai più di 20 anni si tende spesso ad adottare un modello di sistema di controllo per il robot che prevede la realizzazione di moduli comportamentali in grado di raggiungere obiettivi specifici e, in linea di principio, indipendenti gli uni dagli altri (Brooks, 1986). Il comportamento globale del robot emerge dall'interazione di questi moduli comportamentali. Questo approccio porta da un lato a sfruttare i vantaggi della modularizzazione (possibilità di sviluppo e manutenzione indipendente di vari moduli di complessità relativamente limitata), mentre dall'altro lato porta a potenziali incertezze sul comportamento globale del robot, qualora la complessità delle interazioni dovesse essere elevata.

L'approccio puramente "comportamentista", che tende ad ottenere un controllo di tipo stimolo-reazione viene spesso ibridizzato con elementi che comprendono aspetti di ragionamento quali la gestione di un modello del mondo più o meno complesso, o la pianificazione.

Vediamo ora l'applicazione di questo schema concettuale di progettazione applicato alla realizzazione di un robot calciatore.

## Il contesto: Robocup

Il nostro robot giocatore deve partecipare a una competizione internazionale che si svolge ogni anno, denominata Robocup (<http://www.robocup.org>) (Kitano, Asada, 1999)(Asada et al., 1999)), nella lega denominata Middle Size League.

Questa è caratterizzata da robot di dimensioni massime di 50cm per 50cm per 80 cm di altezza, autonomi, che non possono sfruttare sensori e capacità di calcolo esterni. Il campo è un tappeto verde di 16m per 8 m, con linee analoghe a quelle di un campo da calcio reale. Le porte hanno un fondo colorato in modo diverso l'una dall'altra (una porta gialla e una blu), i robot sono neri e portano marker di squadra ciano o magenta, la palla è arancione. I robot possono comunicare tra loro via radio.

Dato questo contesto e regole analoghe a quelle del calcio giocato da umani, vediamo come è possibile progettare robot autonomi che possano partecipare a questo gioco.

## Informazioni e sensori

Nella progettazione di un robot calciatore per il contesto che abbiamo introdotto, ci siamo innanzitutto posti il problema della qualità delle informazioni necessarie per svolgere il compito: il robot deve avere in ogni istante una situazione possibilmente affidabile e aggiornata di quanto si sta svolgendo in campo. Abbiamo seguito lo stimolo degli organizzatori, e abbiamo considerato come principale fonte di informazione un sensore di visione a colori. Considerando, però, la necessità di avere informazioni su tutto quanto circonda il robot, abbiamo pensato di realizzare un sensore di visione omnidirezionale, che permette di avere informazioni visuali da 10 cm a 10 m nell'intorno del robot, con una sola immagine, che va elaborata in meno di 50 msec. (Bonarini, Aliverti, Lucioni, 2000) (Lima et al., 2001).

### Una metodologia generale

Nella scelta della visione omnidirezionale e nella progettazione del sensore abbiamo seguito i criteri di una metodologia generale (Bonarini, 2000) volta ad identificare il tipo di informazione necessaria per svolgere il compito, al fine di selezionare e progettare i sistemi sensoriali più opportuni. Nel seguito, citiamo i diversi aspetti che abbiamo considerato.

### Contenuto informativo

Cosa il nostro robot deve conoscere? Nel caso di Robocup è bene che abbia il maggior numero di informazioni circa distanze relative e posizioni dei singoli oggetti in campo, e che possa riferirsi a punti caratteristici per autolocalizzarsi, anche se solo in maniera qualitativa.

### Qualità dell'informazione

Il robot deve essere certo dell'informazione che gli giunge o può considerare anche aspetti come incertezza e approssimazione? Che tipo di precisione è necessaria? Nel nostro caso è più interessante avere informazioni precise nell'intorno del robot piuttosto che a distanza, in quanto qualunque cosa avvenga ad una distanza maggiore di 2-3 metri può cambiare più rapidamente di quanto il robot possa intervenire. Dunque, possiamo accettare anche informazioni rispetto ad oggetti distanti non molto precise, purché si conosca con precisione distanza e direzione degli oggetti vicini con i quali dobbiamo interagire direttamente.

### Tempistiche di acquisizione

Ogni quanto va aggiornata l'informazione? Le velocità dei robot in campo sono dell'ordine di 1-2 m/sec, questo vuol dire che, campionando il mondo esterno circa 20 volte al secondo, possiamo percepire differenze di posizione di circa 5-10 cm. Frequenze di campionamento più elevate richiederebbero maggior carico computazionale a fronte di un incremento di informazione non necessario. Frequenze minori potrebbero portare al mancato riconoscimento di eventi significativi.

## Il sensore realizzato

Il sensore consiste in una telecamera posta con asse verticale, orientata verso l'alto e puntata verso uno specchio progettato per ottenere le qualità ottiche sopra enunciate (Figura 1): possibilità di identificare con un sufficiente livello di dettaglio l'oggetto più piccolo in campo (la palla) da quando è in contatto con il robot, fino a circa 4 m di distanza, possibilità di rilevare le posizioni angolari delle porte (usate per l'autolocalizzazione) anche a 16 metri di distanza.

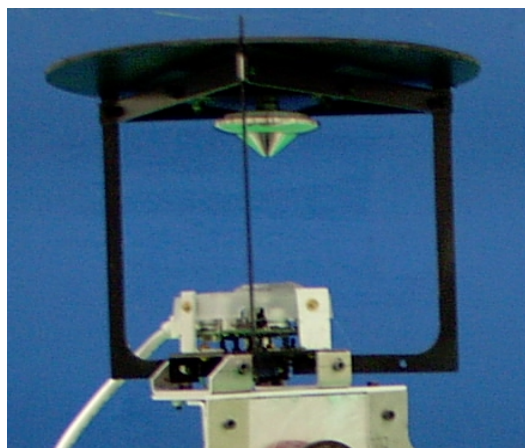


Figura 1 – Il sensore realizzato: sotto il disco nero lo specchio multiparte, e sotto ad esso la telecamera utilizzata (una webcam firewire).

Lo specchio realizzato consiste di due parti, ognuna delle quali ottenuta come solido di rivoluzione, che proiettano diverse zone del campo in diverse parti dell'immagine sfruttandone la risoluzione disponibile nel miglior modo possibile (Figura 2).

Una volta realizzato l'aspetto fisico del sensore, occorre ottenere le prestazioni desiderate: identificazione affidabile degli oggetti in campo nel più breve tempo possibile. Abbiamo considerato raggruppamenti di 3x3 pixel (chiamati *recettori*) distribuiti nell'immagine in modo da garantire che in ogni posizione la palla sia coperta da almeno 4 recettori. Questo porta ad una distribuzione dei recettori con densità decrescente dal centro alla periferia dell'immagine. In una prima fase elaboriamo i soli recettori, allo scopo di classificarli come appartenenti ad uno degli oggetti in campo, basandosi sul loro colore (figura 2). Questo permette di elaborare un numero di elementi visuali enormemente inferiore al totale e distribuiti in maniera opportuna per non perdere informazione.

La classificazione avviene mediando le tre componenti di colore (HSV) sui pixel appartenenti ad ogni recettore. Alla fine di questa prima fase, recettori contigui classificati nello stesso modo sono raggruppati in entità uniche (target), corrispondenti ad oggetti, o porzioni di essi. Come vedremo, queste informazioni, unitamente ad una localizzazione delle macchie di colore nello spazio operativo del robot, viene fornita ad un modulo di gestione del modello del mondo che la usa per identificare gli oggetti corrispondenti alle macchie di colore ed

eventualmente effettuare dei ragionamenti volti ad un miglioramento del modello stesso.

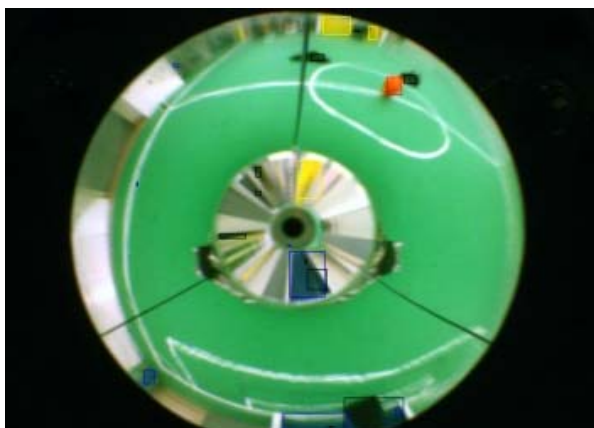


Figura 2 – L'immagine vista dal sensore: Nella parte esterna una parte del campo con la palla, altri robot e le due porte, gialla e blu; al centro dello specchio, disegnato con diversa curvatura rispetto alla parte esterna, di nuovo le porte proiettate in modo da ottimizzarne la percezione da lontano e la localizzazione angolare.

### Modello del mondo

Con le informazioni provenienti dal sensore omnidirezionale, è possibile costruire un modello del mondo a livello concettuale, in cui vengono mantenute le informazioni relative agli oggetti riconosciuti, alle loro posizioni ed al movimento relativo. Il modello è realizzato a partire da informazioni ad alto livello fornite dal modulo di elaborazione sensoriale. Questo elabora l'immagine identificando dapprima le macchie di colore omogeneo, e poi localizzandole nell'ambiente. Il sistema di gestione del modello del mondo, sulla base di queste informazioni, aggrega eventualmente le macchie di colore e le associa ad oggetti. Un meccanismo di tracking mette cerca di mettere in relazione gli oggetti rilevati in un'immagine, descritti a livello concettuale in termini di proprietà quali il colore e la posizione, con analoghi oggetti percepiti in precedenza, tenendo in conto anche le traiettorie attese. In questo modo si può mantenere ogni oggetto "ancorato" (Bonarini, Matteucci, Restelli, 2006b), che facilita attività di ragionamento ed il suo riconoscimento nelle situazioni affrontate in futuro.

All'interno del modello le informazioni sono organizzate attorno ad una classica tassonomia che definisce i concetti principali del dominio applicativo (qui, ad esempio: oggetti, oggetti mobili, oggetti fissi, robot, palla, avversari, compagni di squadra, ecc.) in termini di proprietà sostanziali (quali la forma) e proprietà attuali (quali la velocità). Questo permette di mantenere descrizioni ad alto livello di astrazione che sfruttano la conoscenza a disposizione. Ad esempio, se non ci sono abbastanza informazioni per dire che una certa macchia nera sia un compagno di squadra o un avversario, questo può essere classificato comunque come robot e una certa attività di ragionamento resta possibile con questa informazione.

Inoltre, questo tipo di rappresentazione rende più semplice la fusione di informazioni provenienti da diversi sensori, ad esempio da diversi robot, ma anche da diverse attività di interpretazione dei dati del sensore di visione.

### Meccanica e attuazione

Il resto del corpo del robot può essere progettato in modo da trarre il massimo beneficio dai sensori a disposizione. Ad esempio, un sistema di visione con la frequenza di elaborazione sopra menzionata sarebbe poco sfruttato da un robot che può viaggiare al massimo a 30 cm/sec. D'altra parte, un robot che fosse anche cinematicamente omnidirezionale, quindi che potesse traslare e ruotare a piacimento nel piano, potrebbe interagire con palla ed avversari sfruttando al meglio le caratteristiche del sensore. Ad esempio, potrebbe colpire la palla traslando per scartare un avversario, oppure potrebbe generare una traiettoria ottimale per raggiungere la palla con il lato dotato di sistema di calcio orientato nella direzione opportuna. Abbiamo realizzato questo tipo di movimento per i nostri robot, utilizzando ruote omnidirezionali disposte a 120 gradi una dall'altra e governate da motori indipendenti (figura 3).

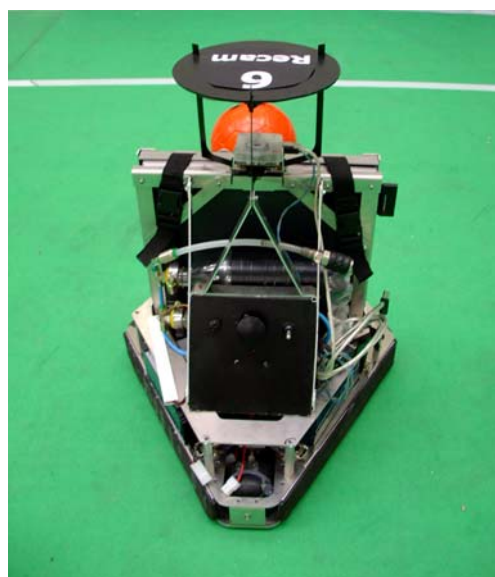


Figura 3 – Vista posteriore del robot con cinematica omnidirezionale. Si può notare la ruota posteriore posta perpendicolarmente alla normale direzione di marcia, che è resa possibile dalla trazione delle altre due ruote poste ai vertici del triangolo e dai rullini che costituiscono i bordi della ruota, e che non offrono resistenza al movimento parallelo all'asse della ruota stessa

### Controllo di primo livello

Con il termine "controllo di primo livello, indichiamo il sistema di controllo che riceve gli obiettivi di velocità per l'attuazione e si occupa di raggiungerli e mantenerli. Questo sistema di controllo non è direttamente influenzato dal sensore di visione omnidirezionale, ma interagisce con gli altri sensori progettati per questo scopo. In particolare, seguendo la traccia sopra indicata per la scelta di sensori opportuni per questo compito, abbiamo considerato degli

encoder che sono in grado di fornire una misura dell'avanzamento della ruota con una risoluzione dell'ordine del millimetro, coadiuvati da un sistema odometrico basato su mouse ottici che permettono di ottenere una stima precisa e robusta dello spostamento (Bonarini, Matteucci, Restelli, 2005).

### Governo del robot e comportamenti

Il governo del robot viene realizzato tramite moduli ognuno dei quali implementa un comportamento elementare, quali, ad esempio: "vai sulla palla", "tira in porta", "evita un avversario". Questi sono fortemente influenzati dal sensore scelto. Addirittura, certi comportamenti hanno ragione di essere solo se necessari per ottenere una certa prestazione con un certo tipo di sensori. Per esempio, nel caso di una telecamera puntata verso la direzione di avanzamento del robot, sarebbe necessario implementare un modulo comportamentale per cercare la palla, quando questa non fosse inquadrata dalla telecamera, magari facendo ruotare il robot su sé stesso. Nel caso invece del sensore omnidirezionale la palla è sempre in vista, salvo in caso di occlusione della visuale, che comunque non sarebbe risolto con rotazioni del robot, ma, eventualmente, con il suo spostamento. L'architettura comportamentale che abbiamo realizzato per Robocup è riportata in Figura 4.

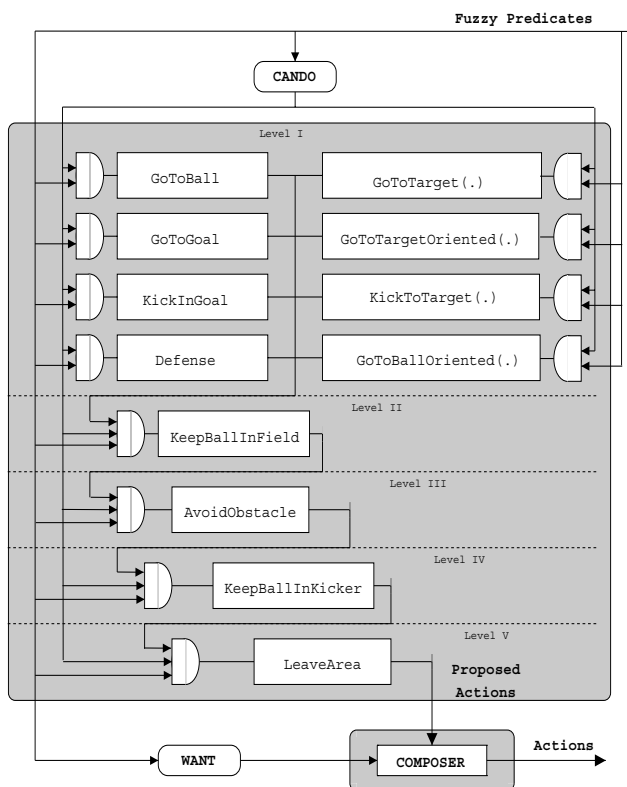


Figura 4 – Schema dell'architettura comportamentale implementata per i robot del Milan Robocup Team

Il sistema di gestione dei comportamenti (MrBRIAN (Bonarini, Matteucci, Restelli, 2006a)) richiede al sistema di gestione del modello del mondo le informazioni necessarie per attivare i moduli comportamentali. Nel modello che abbiamo sviluppato (Bonarini et al., 2003),

queste informazioni sono rappresentate in termini di predicati fuzzy, che sono espressi linguisticamente con frasi tipo: "PallaVicina", o "AvversarioADestra". Questi termini hanno un valore di verità che varia nell'intervallo [0, 1], calcolato come un predicato fuzzy in funzione dei dati contenuti nel modello del mondo. Ognuno dei moduli comportamentali viene attivato proporzionalmente al valore di verità di un insieme di predicati (CANDO in figura 4) che ne costituiscono le condizioni di attivazione. Ad esempio, il comportamento "AvoidObstacle" è attivato solo quando è vero il predicato "OstacoloDavanti". Ogni modulo comportamentale è costituito da un insieme di regole fuzzy che mettono in relazione una descrizione della situazione corrente (sempre fornita in termini di predicati fuzzy) con una possibile azione da intraprendere. Ad esempio, nel modulo comportamentale "AvoidObstacle" potremmo avere una regola che stabilisce di andare a destra se l'ostacolo è davanti a sinistra. Si noti che questa scelta di modello implementativo permette sostanzialmente di esprimere i comportamenti del robot in termini linguistici, rendendo quindi la progettazione dei comportamenti relativamente semplice, e comunque vicina al modo di pensare del progettista.

L'uscita di ogni modulo comportamentale è un'azione che viene composta con quella proposta dagli altri moduli comportamentali dello stesso livello gerarchico e passata in ingresso, insieme ai relativi predicati fuzzy ai moduli comportamentali di livello gerarchico superiore. Questi sono a loro volta costituiti da regole fuzzy che prendono in considerazione non solo la descrizione della situazione corrente, ma anche le proposte di azione elaborate dai livelli inferiori. Così, se, ad esempio, il robot si trovasse di fronte un ostacolo, la porta avversaria fosse leggermente a destra dell'ostacolo e il comportamento "GoToGoal", di livello inferiore, avesse proposto di andare a destra verso la rete, il comportamento "AvoidObstacle" potrebbe scegliere di evitare l'ostacolo andando a destra, anziché a sinistra, così assecondando le proposte emerse dai livelli inferiori, purrealizzando il suo compio primario (e critico) di evitare l'ostacolo.

Alla fine del processo di generazione delle azioni sopra tratteggiato, le azioni provenienti dai diversi comportamenti sono pesate con l'opportunità di attivare i rispettivi comportamenti, valutata attraverso un ulteriore insieme di predicati fuzzy per ogni comportamento (WANT in figura 4). Questi predicati permettono di modulare l'importanza di quanto proposto da ogni comportamento e, così, di adattare la scelta di quali siano i comportamenti più importanti alla situazione. Tra i predicati di tipo WANT abbiamo sia predicati relativi alla situazione (ad esempio se stiamo vincendo e siamo lontani dalla porta potrebbe non essere opportuno tirare), sia predicati utilizzati per coordinare le azioni tra i diversi giocatori; ad esempio, se a livello di strategia (vd. prossima sezione) si è deciso di realizzare un passaggio, è più importante voltarsi in direzione del giocatore a cui si vuole passare ("GoToTarget") piuttosto che portare la palla in rete ("GoToGoal"), e quindi i predicati di tipo WANT del primo comportamento avranno valore di verità superiore a quelli del secondo comportamento.

## Strategie

Per un efficace gioco di squadra è necessario implementare delle strategie di gioco cooperativo. La più semplice è basata sul fatto che sia possibile stabilire chi cerca di prendere possesso della palla evitando di indirizzarsi tutti verso la stessa. Altre possono riguardare passaggi piuttosto che blocchi nei confronti degli avversari. Per realizzare queste strategie è importante avere una valutazione il più possibile completa della situazione in campo. Questa può essere ottenuta o scambiandosi informazioni su ciò che ogni robot vede, oppure valutando la situazione nel suo complesso, come è possibile con un sensore omnidirezionale. Nel primo caso, la qualità della strategia realizzata dipende dalla bontà delle comunicazioni e dalla capacità di ogni robot di fondere o comunque utilizzare le informazioni provenienti dagli altri. Nel secondo caso, ogni robot è autonomo e possiede tutta l'informazione necessaria per effettuare la scelta, ma certi tipi di coordinamento, basati sostanzialmente solo sulle intenzioni dei robot, non sono possibili.

Abbiamo realizzato un sistema di gestione delle strategie (SCARE (Bonarini, Restelli, 2002)) in cui, sempre basandosi su una descrizione della situazione corrente fornita in termini di predicati fuzzy, i robot della squadra vengono assegnati a dei ruoli in schemi comportamentali cooperativi, tenendo conto anche delle rispettive capacità (ad esempio la velocità o la precisione di tiro). Sulla base di queste assegnazioni, per ognuno dei robot diventa più importante eseguire certi comportamenti piuttosto che altri e si ottiene così il comportamento cooperativo desiderato.

Le migliori condizioni di funzionamento per questo tipo di meccanismo di coordinamento si hanno quando tutti i robot possono scambiarsi informazioni sui ruoli. In questo caso, un robot prende l'iniziativa del coordinamento ed assegna i ruoli. Nella pratica, spesso si hanno problemi di comunicazione che non permettono di scambiarsi messaggi espliciti. In questo caso, il coordinamento avviene con questo meccanismo solo tra robot che possono comunicare, mentre tutti gli altri seguiranno schemi comportamentali che non comportano comunicazione esplicita, in cui l'eventuale coordinamento avviene solo in forma implicita attraverso l'interpretazione di quello che accade in campo.

## Apprendimento

In molti casi si adottano tecniche di apprendimento o adattamento del robot (Dorigo, Colombetti, 1997) per implementarne comportamenti e strategie, o per adattare questi a mutate esigenze di gioco.

Nell'ambito della competizione che stiamo considerando, l'apprendimento da tabula rasa di comportamenti può essere fatto solo fuori linea e richiede in linea di principio uno sforzo computazionale e sperimentale che non ne giustifica l'adozione rispetto alla programmazione diretta di moduli comportamentali.

L'adattamento del robot alla situazione di gioco è invece importante, e non può essere fatto altrimenti che in partita, mentre si incontra una specifica squadra avversaria. Abbiamo realizzato un sistema in grado di classificare il

comportamento dei singoli avversari e della squadra in generale, in risposta ad eventi che avvengono durante il gioco. Ad esempio, essendo in grado di capire se gli avversari tendono a impossessarsi comunque della palla, o cercano di effettuare un gioco più difensivo, se in generale sono fallosi e quindi cercano il contatto fisico o se, una volta ingaggiati, si ritirano. Una volta identificate queste caratteristiche, il robot si può adattare ad esse, modificando i criteri di scelta tra i diversi comportamenti definiti a priori. È evidente come, anche in questo caso, una quantità di informazione elevata come quella che viene da un sensore omnidirezionale sia da preferirsi, se non addirittura si renda necessaria per fornire una descrizione sufficientemente ricca della situazione da permetterne una classificazione accurata e non sporadica.

## Conclusioni

Abbiamo visto come la progettazione di un robot autonomo nasca dall'integrazione dei diversi aspetti ("corpo" e "mente") allo scopo di raccogliere l'informazione disponibile e sfruttarla il meglio possibile. Riportiamo a questo punto uno schema riassuntivo dell'architettura presentata (Figura 5). Qui sono evidenziati i diversi moduli dell'architettura che abbiamo descritto e le loro relative interazioni.

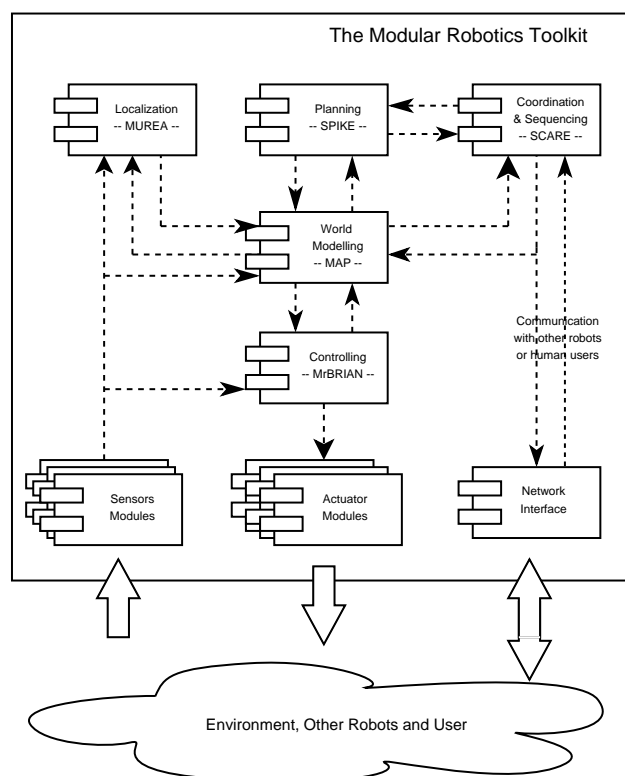


Figura 5 – L'architettura generale dei nostri robot autonomi.

In (Bonarini, Matteucci, Restelli, In Press) mostriamo come questa architettura generale e modulare sia stata usata in diverse applicazioni, cambiando alcuni moduli, riusandone altri ed eventualmente lasciando da parte moduli non specificamente rilevanti. In altri termini, la

realizzazione di robot autonomi è basata su principi comuni utilizzabili in applicazioni diverse quali quelle considerate: robot calciatori, accompagnatori museali o esploratori spaziali.

Lo sviluppo di questi robot, stimolato dalla competizione Robocup, ha portato risultati scientifici e tecnologici che stanno per essere usati per sviluppare i robot di servizio della prossima generazione, che popoleranno le nostre città nei prossimi anni.

### Ringraziamenti

Si ringraziano tutti i partecipanti al progetto Milan Robocup Team che hanno contribuito alla realizzazione dei robot esposti nell'articolo, ed in particolare i responsabili delle diverse aree di competenza: Matteo Matteucci, Marcello Restelli e Domenico Sorrenti.

La ricerca qui sviluppata è stata supportata in parte dal progetto MADSys (Multi-Agent Development System) cofinanziato dal MURST, ed in parte dalla Federazione Robocup e dagli sponsor della squadra Milan Robocup Team.

### Bibliografia

- Asada M., Kitano H., Noda I., Veloso M. (1999) RoboCup: Today and tomorrow-What we have learned *Artificial Intelligence Journal* (110), pp. 193–214
- Bonarini, A., (2000) The Body, the Mind or the Eye, first? In M. Veloso, E. Pagello, M. Asada (Eds), *Robocup99 – Robot Soccer World Cup III*, Springer Verlag, Berlin, D. pp. 210 - 221
- Bonarini A., Aliverti, P., Lucioni, M. (2000). An omnidirectional sensor for fast tracking for mobile robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 49(3). pp. 509-512.
- Bonarini, A., Restelli M. (2002) An Architecture to Implement Agents co-operating in Dynamic Environments *Proceedings of AAMAS 2002 – Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, ACM Press, New York, NY, pp. 1143-1144.
- Bonarini A., Invernizzi G., Labella T. H., Matteucci M. (2003), An architecture to coordinate fuzzy behaviors to control an autonomous robot. *Fuzzy sets and systems*. 134(1), pp. 101-115.
- Bonarini A., Matteucci M., Restelli M. (2005) Automatic Error Detection and Reduction for an Odometric Sensor based on Two Optical Mice. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pp. 1687-1692, Barcelona, Spain.
- Bonarini A., Matteucci M. and Restelli M. (2006a) Concepts and Fuzzy Models for Behavior-Based Robotics, *International Journal of Approximate Reasoning*. 41, pp.110-127.
- Bonarini A., Matteucci M. and Restelli M. (2006b) Problems and solutions for anchoring in multi-robot applications, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 17, pp.1 - 10.
- Bonarini A., Matteucci M., Restelli M. (In press) In *Software Engineering for Experimental Robotics*, D. Brugali (Ed.), STAR Collection, Springer Verlag, Berlin D
- Brooks R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 2 (1),pp. 14-23.
- Dorigo M., Colombetti M., (1998) *Robot shaping*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Kitano H., Asada M. (1999) Robocup: e ora in campo gli automi. *Le Scienze*. 372, pp. 32-42.
- Lima P., Bonarini A., Machado C., Marchese F. M., Marques C., Ribeiro F., Sorrenti D. G., (2001), Omnidirectional catadioptric vision for soccer robots. *International Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 36(2-3), 87-102, (invited paper).
- Yagi Y, Kawato S., Tsuji S. (1994) Real-time omnidirectional image sensor (COPIS) for vision-guided navigation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10 (1), pp 11-22.