

# Un sistema robotico occhio-braccio per lo studio dei processi neurali sottostanti a compiti di reaching costruito presso il LARAL

Angelo Rega, Dimitri Ognibene, Onofrio Gigliotta, Gianluca Baldassarre

{angelo.rega, dimitri.ognibene, onofrio.gigliotta, gianluca.baldassarre}@istc.cnr.it

Laboratory of Autonomous Robotics and Artificial Life,  
Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione,  
Consiglio Nazionale delle Ricerche (LARAL-ISTC-CNR),  
Via San Martino della Battaglia 44, 00185 Roma

## Introduzione

Lo scopo di questo scritto è illustrare l'esperienza di costruzione di un sistema occhio-braccio robotico avvenuta presso il "LARAL - Laboratory of Autonomous Robotics and Artificial Life", un laboratorio di ricerca appartenente all'Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione, Consiglio Nazionale delle Ricerche, situato a Roma. Lo scritto illustra non solo l'architettura del sistema ma anche la "filosofia" di costruzione di sistemi robotici che è stata messa a punto durante la sua costruzione. Questa filosofia, partendo dai presupposti per cui l'interesse principale del gruppo è nello studio dei sistemi neurali artificiali e naturali e nello studio del comportamento, ed i robot sono un mezzo per raggiungere questi scopi, è basata su principi che tendono a minimizzare i costi, i tempi, le conoscenze tecniche e le attrezzature necessarie per lo sviluppo dei robot. Il sistema robotico qui presentato è stato mostrato in una demo in occasione del workshop di Siena WIVA3 (3° Workshop Italiano di Vita Artificiale).

## Gli studi che saranno condotti con il sistema robotico

Il sistema robotico è stato costruito allo scopo di poter realizzare studi con modelli neurali dei processi sottostanti all'esecuzione da parte di scimmie di compiti di raggiungimento di target (*reaching*) mediante gli arti superiori, sulla base di informazioni visive (occhio). Questi tipi di compiti sono spesso condotti da gruppi di (neuro)scienziati interessati a studiare non solo i fenomeni comportamentali legati al *reaching* ma anche i processi neurali sottostanti ad esso. Questi studi sono particolarmente rilevanti per le indagini sul comportamento senso-motorio condotto nell'ambito della vita artificiale per due motivi. Il primo è che consentono di confrontare i dati sul comportamento dei modelli neurali con quelli sul comportamento delle scimmie, e questo è molto importante se i modelli utilizzati sono *embodied*, nel rispetto la "filosofia" della vita artificiale. Il secondo motivo è che questi studi forniscono anche importanti "vincoli" con cui formulare le assunzioni inerenti all'architettura ed agli algoritmi di apprendimento dei modelli neurali utilizzati.

## La "filosofia" seguita per lo sviluppo del sistema robotico

Il sistema robotico è stato costruito presso il LARAL cercando di seguire una filosofia di sviluppo costruita sulla base della storia, degli interessi e delle competenze tecniche del gruppo di ricerca. Il gruppo di ricerca risulta avere una lunga e fortissima tradizione nel controllo con reti neurali e nello studio del comportamento in sistemi di vita artificiale (*embodied* e *situated*) che lo pone come leader di livello internazionale in questi settori.

Finora il gruppo ha condotto tali studi soprattutto utilizzando robot simulati e robot completi direttamente acquistabili sul mercato (per es., Khepera<sup>TM</sup>, Koala<sup>TM</sup>, Pioneer<sup>TM</sup> ed e-puck<sup>TM</sup>). Recenti dibattiti avvenuti all'interno del gruppo hanno tuttavia evidenziato la necessità di cambiare strategia in merito a questo aspetto, in particolare per dotarsi di conoscenze, di capacità e di una di una

minima infrastruttura per “costruire” robot direttamente presso il laboratorio. L’utilità di questo cambiamento è legata al fatto che esso porta con se diversi vantaggi: a) possibilità di manipolare come variabili di studio vari aspetti del “corpo” dei sistemi studiati; b) abbassamento dei costi economici per disporre di sistemi robotici; c) possibilità di fronteggiare rapidamente in loco eventuali guasti dei sistemi robotici utilizzati evitando lunghe pause nelle attività di ricerca dovute al ricorso di assistenza esterna; d) maggiore impatto, sia sulla comunità scientifica che sui mass media, delle ricerche effettuate; e) acquisizione di conoscenze tecniche di più basso livello, e conseguente diversificazione del tipo di collaborazioni esterne possibili da parte del gruppo di ricerca; f) allargamento delle tipologie di competenze, e quindi dei possibili sbocchi professionali, di chi opera presso il LARAL.

La tradizione e gli interessi di ricerca del gruppo suggeriscono comunque di implementare questo cambiamento cercando di non “abbassare” troppo il livello di dettaglio degli interventi realizzati sull’hardware. Infatti dati tali interessi i robot sono uno strumento per il gruppo, e non uno scopo, per cui si vorrebbe cercare di avere i vantaggi sopra elencati cercando al contempo di limitare al massimo i costi che la costruzione diretta dei robot comporta, in particolare: a) necessità di acquisire conoscenze, skills e strumenti per costruire parti elettroniche e parti strutturali dei robot; b) necessità di grossi investimenti di tempo per la soluzione di problemi “tecnici” che esulano dagli interessi di ricerca del gruppo.

Date queste premesse, la costruzione del sistema robotico qui presentato è stata l’occasione per mettere a punto una “filosofia” generale di costruzione di robot che cerca di contemperare le diverse esigenze illustrate sopra e che potrebbe essere riutilizzata in futuro per la costruzione di altri robot da parte del LARAL o di altri gruppi di ricerca con interessi e competenze simili. Vengono ora illustrati in dettaglio i principi alla base di tale filosofia:

- **Principio della modularità e del “medio livello”:** più che *costruire* robot, si deve cercare di *assemblare* robot, utilizzando il più possibile componenti già disponibili sul mercato. I pezzi utilizzati debbono essere smontabili, intercambiabili, e riassemblabili con la massima facilità. Questo ha il vantaggio di abbassare i tempi di progettazione e produzione, di richiedere attrezzature semplici, e di richiedere meno competenze tecniche. In passato il gruppo ha già avuto esperienza con le potenzialità di questo principio lavorando con i kit robotici della Lego chiamati MindStorm<sup>TM</sup> (questa strada aveva tuttavia molti limiti legati alla semplicità ed livello non professionale dei componenti disponibili nei kit).
- **Principio del possesso di competenze minime per la modifica a “basso livello” di hardware e firmware:** il principio della modularità e del medio livello indicato sopra deve comunque essere accompagnato dal possesso di un minimo di capacità di intervento a “basso livello”, sia in termini di conoscenze che di attrezzature (per es.: tester, saldatori, seghe e smerigliatrici automatiche e manuali, trapani a colonna, ecc.). Infatti questo comporta *pochi* costi aggiuntivi (in termini di conoscenze, tempo, ed attrezzature necessarie), ma unito alla modularità dei pezzi utilizzati *aumenta notevolmente* i gradi di libertà che si hanno per la realizzazione dei robot. Questo lo si è visto sia durante la costruzione della “base” del braccio robotico (vedi sotto) a partire da lamiere di alluminio e ferro, sia in passato dotando robot commerciali (es. Pioneer<sup>TM</sup> e Lego MindStorm<sup>TM</sup>) di apparati sensoriali customizzati (per es.: sensori radio e sensori ad infrarossi), sia creando interfacce di basso livello (via porta seriale) con il *firmware* delle schede elettroniche utilizzate, sia intervenendo direttamente a modificare il *firmware* (per es. *firmware* dell’e-puck, ancora incompleto; *firmware* di schede di interfaccia con i sensori).
- **Principio della facilità d’uso e della diffusione e reperibilità commerciale:** i servo-motori, i pezzi passivi della struttura fisica, e le schede elettroniche utilizzate devono essere ampiamente utilizzate dalla comunità di robotica e facilmente reperibili sul mercato. Questo infatti è innanzi tutto indice di qualità e robustezza. Inoltre garantisce la facile e rapida reperibilità degli stessi presso fornitori locali (con conseguente abbattimento dei prezzi, abbassamento dei tempi di ottenimento dei pezzi e semplificazione dei passaggi burocratici per l’acquisto). Infine, in

particolare per le schede elettroniche di interfaccia tra i sensori/attuatori ed il computer, garantisce un'ampia disponibilità di informazioni, di software di controllo e di manualistica in internet, e di solito comporta l'utilizzabilità attraverso programmi scritti con i più diffusi linguaggi di programmazione (per es.: Java, C e C++).

- **Principio della robustezza:** i pezzi utilizzati devono essere resistenti all'usura, agli urti, ecc. (nell'esempio qui riportato si è deciso di usare servo-motori con ingranaggi in *allumite*, una lega di ferro, alluminio e titanio molto resistente, piuttosto che ingranaggi in plastica). Questo garantisce maggiore durata dei robot e minori interventi di manutenzione. La robustezza è anche richiesta dall'utilizzo dei robot in compiti che richiedono lunghi processi di apprendimento, cosa spesso richiesta dagli interessi di ricerca del gruppo.

## Il sistema robotico occhio-braccio costruito dal LARAL

Il sistema occhio-braccio costruito presso il LARAL è costituito principalmente da una web-cam e da un braccio robotico. Il braccio robotico, mostrato in Figura 1, è costituito da tre segmenti con 4 gradi di libertà (2 presso la "spalla", 1 presso il "gomito", uno presso il "polso"). I componenti utilizzati per la costruzione del braccio sono stati acquistati presso *RobotItaly* (un fornitore di robot operante in Roma: <http://www.robot-italy.com/>; molti dei pezzi utilizzati sono disponibili anche presso buoni negozi di modellismo) e rispondono ai requisiti di modularità, semplicità e robustezza indicati sopra (vedi Figura 2). In particolare le staffe, i tubi, la viteria ed altri accessori utilizzati per la struttura del robot, e per sostenere i servo-motori, fanno parte della serie *Erector Set* della *Lynxmotion* (<http://www.lynxmotion.com/>).

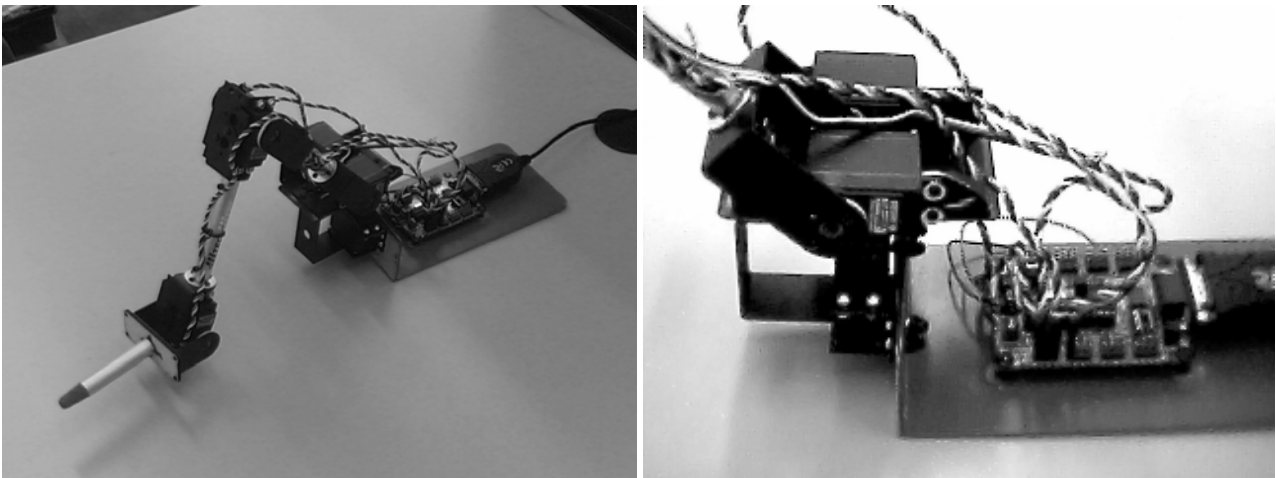


Figura 1. Sinistra: il braccio robotico costruito nel LARAL. Destra: particolare della base del braccio e della scheda elettronica.

I servo-motori utilizzati sono digitali e sono prodotti dall'*Hitec*. Essi sono controllabili in termini di angoli desiderati, e sono in grado di ritornare l'informazione sull'avvenuta esecuzione del comando a loro impartito attraverso la stessa scheda che li controlla. La scelta di utilizzare servomotori digitali è dovuta alle caratteristiche che essi possiedono: capacità di mantenere posizioni con precisione millimetrica (questo consente di avere una propriocezione simulata degli angoli del braccio), peso estremamente contenuto (60 g), ottimo rapporto coppia/voltaggio richiesto (coppia 12.1 kg cm, consumo 6 V dc), presenza di un microprocessore servo-integrato che controlla la linearità della velocità, lo sforzo, ed il mantenimento costante dell'ultima posizione comandata. Un apposito "programmatore" prodotto dalla *Hitec*, HFP-10, permette la modifica delle impostazioni di fabbrica dei servo-motori, agendo su parametri non modificabili via scheda elettronica: (a) Regolazione dell'escursione (in gradi) e del punto centrale (stop); (b) Direzione di

rotazione; (c) Larghezza della *dead band*; (d) *Failsafe*; (e) Velocità massima; (f) Reset del servo alle specifiche della casa.

Date le esigenze del gruppo, la base del braccio robotico, formata dal supporto dell'intero braccio (dove è anche fissata la scheda di controllo), il sostegno del primo servo-motore della "spalla" del braccio (quello diretto a consentire la rotazione del braccio sul piano orizzontale), e le strutture che collegano questo alla coppia di due servo-motori della spalla (quelli che consentono l'elevazione del braccio), è stata costruita tagliando delle piattine di metallo e modificando opportunamente alcune staffe (vedi Figura 1, foto a destra). Questo è un esempio di intervento "a basso livello" sulla struttura fisica del sistema.

La scheda elettronica utilizzata per controllare i servo-motori è una SSC32 (*Serial Servo Controller*), è distribuita dalla *Lynxmotion*, ed è una delle schede più diffuse ed utilizzate per questo scopo. Essa si basa su un altrettanto diffuso microcontrollore, l' ATMEGA8-16PI, prodotto dalla *Atmel* (Figura 3). La scheda è in grado di controllare 32 servo-motori utilizzando fino a 3 tipi di sorgenti di alimentazione differenti: quest'ultima caratteristica permette l'utilizzo combinato di diversi servomotori (ad es. è in commercio un grip da montare sul braccio, qui non mostrato, che utilizza servo-motori che richiedono un'alimentazione differente dagli altri). La scheda elettronica è inoltre dotata di una memoria a bordo di tipo 24LC32P EEPROM (*Electrically Erasable and Programmable ROM*: una memoria ROM che a differenza di una semplice ROM è cancellabile e riscrivibile, mediante opportune tensioni e correnti applicate ai MOSFET, ed è estendibile fino a 1024 KB). La scheda è collegabile ad un computer via porta seriale, e controllabile o attraverso un programma (per es. scritto in C++) che usa le DLL che vengono fornite con la scheda stessa, o attraverso un programma (per es. scritto in C++ o Java) che dialoga direttamente con la porta seriale.



Figura 2. I pezzi utilizzabili per la costruzione di vari robot, ed in parte usati per la costruzione del braccio robotica qui presentato: servomotori, staffe ad U, sostegni dei servomotori, tubi di struttura di varia misura, basi per il fissaggio dei tubi alle staffe. Tutti i pezzi, con l'eccezione dei servo-motori, sono in lega di alluminio, molto leggeri, resistenti e facilmente assemblabili e modificabili con un'attrezzatura molto semplice.

L'"occhio" del sistema è costituito da una comune web-cam digitale (320×240 pixels, RGB) montata sopra il piano di lavoro del braccio a circa 60 cm da esso in modo da poter osservare il principale campo di azione dello stesso.

## **Il programma, il compito e la rete neurale utilizzati per testare il braccio**

Il sistema occhio-braccio è stato testato con un programma di controllo scritto in Java. Il task utilizzato per il test prevede la rilevazione del baricentro di una pallina rossa di plastica su sfondo bianco da parte della web-cam, ed il *reaching* di essa da parte del braccio (o più precisamente da parte dell'estremità del secondo segmento del braccio, d'ora in poi chiamata "mano"). Per facilitare il compito, il movimento del braccio è stato limitato agli spostamenti della mano sul piano orizzontale. A questo scopo i comandi mandati al braccio da parte del controllore sono stati pensati

in termini di coordinate polari desiderate della mano (gli angoli effettivi del braccio corrispondenti a tali coordinate, cioè i comandi effettivamente mandati ai servo-motori, sono stati generati mediante un apposito calcolo trigonometrico).

L'acquisizione dell'immagine dalla web-cam è stata implementata mediante le librerie open-source *Java Media Framework 2.1.1*. La determinazione del baricentro della pallina nell'immagine è stata effettuata dapprima computando i pixel aventi una distanza dal colore della pallina, nello spazio RGB, sotto una certa soglia (il programma consente il campionamento di colori sull'immagine direttamente attraverso il mouse) e successivamente calcolando le medie delle coordinate x e delle coordinate y di tali pixel.

Il controllore del braccio utilizzato per risolvere il compito è costituito da una rete neurale a due strati. Il primo strato della rete è costituito da una mappa 2D di 20×20 neuroni con attivazione Gaussiana codificanti la posizione della pallina sul piano di lavoro sulla base di una “codifica per popolazione”. Lo strato di output della rete è costituito da 3 neuroni codificanti direttamente la postura desiderata (angoli desiderati) del braccio. La rete neurale è stata inizialmente addestrata (prima off-line sulla base di un semplice simulatore del braccio, e poi “rifinita” in reale) ad associare alla posizione x-y della propria “mano” (a cui era stata appositamente attaccata la pallina) la postura del braccio ad essa corrispondente. In fase di test la pallina è mossa dallo sperimentatore sul piano di lavoro sotto la web-cam: il braccio tende allora a produrre la postura che porta la mano sopra la pallina, cioè a raggiungere il target.



Figura 3. Il cuore della scheda elettronica, un ATMEGA8-16PI prodotto dalla *Atmel*.

## Conclusioni

Il sistema robotico realizzato mostra come la “filosofia” adottata per la sua costruzione, basata sulla modularità ed un livello intermedio di azione (“assemblaggio” di pezzi piuttosto che loro costruzione), ed inoltre basata sulla reperibilità, diffusione, robustezza e facilità d’uso dei pezzi utilizzati, è effettivamente utilizzabile da parte di laboratori di robotica come il LARAL che hanno il loro interesse principale nello studio del comportamento con l’approccio della vita artificiale. In effetti il grado di successo raggiunto rispetto a questi criteri è mostrato dai contenuti costi economici del sistema (800 euro per i componenti, di cui circa 50 euro per ogni servo-motore e per la scheda elettronica, e 200 euro per le attrezzature), e dal limitato tempo uomo necessario per la sua realizzazione (2 mesi uomo per il braccio, 2 settimane per la creazione del software di acquisizione dell’immagine, 1 mese per la creazione della rete neurale e per la messa a punto di tutto il sistema). Rispetto alla qualità e stabilità finale del sistema realizzato, ovviamente inferiori a quelle dei sistemi commerciali, osserviamo che esse costituiscono anche una sfida interessante per la costruzione di sistemi di controllo neurali con proprietà di adattatività e robustezza analoghi a quelli naturali.