

SVILUPPO SENSOMOTORIO IN UN ROBOT UMANOIDE

1. INTRODUZIONE

Spesso nei sistemi intelligenti artificiali la rappresentazione del mondo è determinata a priori durante la fase di progettazione. Questo tipo di approccio ha portato alla realizzazione di sistemi in grado di risolvere efficientemente i problemi per i quali sono stati progettati, ma che falliscono in contesti più generali. Nonostante i recenti progressi tecnologici, non si è ancora riusciti a realizzare sistemi intelligenti in grado di affrontare la complessità e l'estrema variabilità del mondo reale.

Caratteristica comune a tutti i sistemi biologici, al contrario, è la capacità di adattarsi a situazioni e ad ambienti diversi. Soprattutto nell'uomo, la rappresentazione del mondo non è definita a priori ma viene costruita dall'individuo in maniera autonoma attraverso l'interazione fisica tra corpo e ambiente. Questa rappresentazione è estremamente ricca e include informazioni provenienti dagli organi sensoriali esteroceettivi (quali visione, olfatto e udito), e propriocettivi (fusi muscolari, sistema vestibolare).

I primi anni di vita rappresentano il momento di maggiore cambiamento delle capacità cognitive e sensomotorie di un individuo. In questo periodo le abilità motorie, percettive e cognitive maturano, mentre, da un punto di vista fisico, il corpo cambia in maniera drammatica. Nonostante questi aspetti siano ancora in fase di studio, è possibile identificare un insieme di principi e regole che governano il corretto sviluppo e l'apprendimento nei bambini. Nell'ambito della nostra ricerca abbiamo cercato di replicare alcuni di questi principi in un sistema robotico antropomorfo. In questo articolo presentiamo una panoramica dei risultati ottenuti e discutiamo le possibili implicazioni di questa ricerca per lo studio dei sistemi intelligenti.

2. SVILUPPO NEI SISTEMI BIOLOGICI

Neuroscienze e scienze cognitive sembrano concordare sull'importanza dell'attività motoria e sul suo ruolo nella percezione (Arbib *et al.* 2000; Jeannerod 1997; Milner e Goodale 1995; Rizzolatti e Gentilucci 1988). In parte questo è dovuto alla recente scoperta nelle aree della corteccia premotoria di neuroni la cui attività è modulata dall'informazione visiva (Fogassi *et al.* 1996; Graziano *et al.* 1997). La stessa conclusione è supportata da vari studi nel campo della psicologia dello sviluppo (Konczak e Dichgans 1997; Streri 1993; von Hofsten *et al.* 1998). Questo aspetto non è sorprendente se si pensa che alcune proprietà dell'ambiente possono essere percepite in maniera diretta solo attraverso l'interazione fisica con l'ambiente stesso. Ad esempio, la forma di un oggetto, la sua consistenza o la natura della sua superficie sono qualità che sono meglio percepite attraverso il tatto. L'acquisizione dell'informazione sensoriale pertanto è quasi sempre un processo attivo. Nell'uomo – e in tutti gli animali dotati di fovea – gli occhi sono in continuo movimento ed esplorano l'ambiente per acquisire l'informazione visiva in maniera efficiente. Altre modalità sensoriali, quali ad esempio il tatto, richiedono vere e proprie strategie di esplorazione che coinvolgono l'interazione tra corpo e ambiente. L'attività motoria ha pertanto un ruolo fondamentale per il corretto sviluppo percettivo dell'uomo (Bushnell e Boudreau 1993). Una possibile ipotesi è che sviluppo percettivo e motorio progrediscano di pari passo. Per esempio, sembra che l'abilità di percepire *visivamente* le caratteristiche degli oggetti quali ad esempio volume, durezza e tessitura, non emerga prima dei 6-9 mesi, mentre la capacità di discriminare forme tridimensionali si sviluppi solamente verso i 12-15 mesi di vita. Non è sorprendente che questa tempistica corrisponda con quella dello sviluppo motorio se si pensa che l'esplorazione degli oggetti e la conseguente abilità di percepirne determinate proprietà richiede un elevato grado di controllo del movimento. Gli esperimenti di Lederman e Klatzky (1987) dimostrano come negli adulti la determinazione di certe proprietà degli oggetti si accompagni a specifiche azioni esplorative. Nei bambini, durante lo sviluppo, l'impossibilità di eseguire una certa azione potrebbe quindi impedire la percezione della corrispondente proprietà.

Nei primi mesi di vita le capacità motorie dei neonati sono limitate. La coordinazione e il controllo dei movimenti delle braccia risultano poco accurati; solo in rari casi e in maniera quasi casuale il bambino riesce a guadagnare il contatto con gli oggetti e afferrarli (von Hofsten 1982). Intorno ai 3 mesi queste abilità migliorano e i movimenti di prensione diventano più affidabili. In questo periodo tuttavia gli oggetti sono quasi sempre afferrati con la mano aperta sfruttando l'opposizione tra le dita e il palmo (*power grasp*). Questa semplice interazione con gli oggetti è comunque sufficiente a rendere accessibili proprietà quali

temperatura, dimensione/volume, e durezza. Infine, verso i 6-9 mesi, i bambini iniziano a manipolare gli oggetti con una certa abilità e con differenti strategie che includono l'uso delle dita in differenti configurazioni (von Hofsten e Ronnqvist 1993). A questo punto dello sviluppo il maggior controllo sull'esplorazione degli oggetti permette ai bambini di iniziare a percepire proprietà più complesse quali la forma e la rugosità degli oggetti. Ulteriore evidenza a supporto di questa teoria si trova nel lavoro di Needham *et al.* (2002), dove l'abilità di alcuni bambini di 3 mesi nell'afferrare oggetti è artificialmente aumentata per mezzo di un apposito guanto ricoperto di velcro. Il guanto incrementa in modo rilevante la possibilità di afferrare ed esplorare alcuni oggetti preventivamente preparati dai ricercatori (questi oggetti erano ricoperti ai bordi con lo stesso tipo di velcro). I risultati dimostrano che i bambini sottoposti al test mostrano un maggior interesse nei confronti degli oggetti rispetto a un gruppo di riferimento. Questo interesse si manifesta, tra le altre cose, in una prolungata esplorazione visiva e permane anche in assenza del guanto. È come se l'anticipato sviluppo dell'abilità motoria, provocato artificialmente dal guanto, induca un maggior interesse verso l'esplorazione visiva degli oggetti.

L'identificazione delle regolarità nel flusso sensoriale, e quindi di certe proprietà costanti dell'ambiente, è un processo che caratterizza lo sviluppo sensomotorio che è particolarmente interessante perché ci permette di predire gli eventi che osserviamo (Rosander e von Hofsten 2004; von Hofsten *et al.* 1998). Le capacità predittive portano a un ulteriore incremento dell'abilità di interagire con l'ambiente, ma cosa forse più importante, forniscono una chiave per interpretare gli eventi intorno a noi.

Intorno ai 9 mesi d'età, la capacità di interagire con gli oggetti in maniera ripetitiva e accurata consente di estendere ulteriormente le capacità cognitive. Le azioni di prensione sugli oggetti permettono di costruire una rappresentazione multisensoriale che combina opportunamente esperienza visiva, tattile e chinestetica.

3. BABYBOT, UN ROBOT CHE CRESCE

Motivati da queste osservazioni abbiamo realizzato un robot antropomorfo con alcune delle caratteristiche richieste per studiare lo sviluppo sensomotorio. Il robot, chiamato Babybot, consiste in una testa, un braccio e una mano antropomorfa. Da un punto di vista sensoriale il robot è equipaggiato con visione stereoscopica, un sistema acustico, un sistema vestibolare e sensori tattili (maggiori dettagli sono riportati in fig. 1).

Lo sviluppo del robot segue un percorso che per semplicità può essere diviso in tre fasi: apprendimento della rappresentazione del proprio

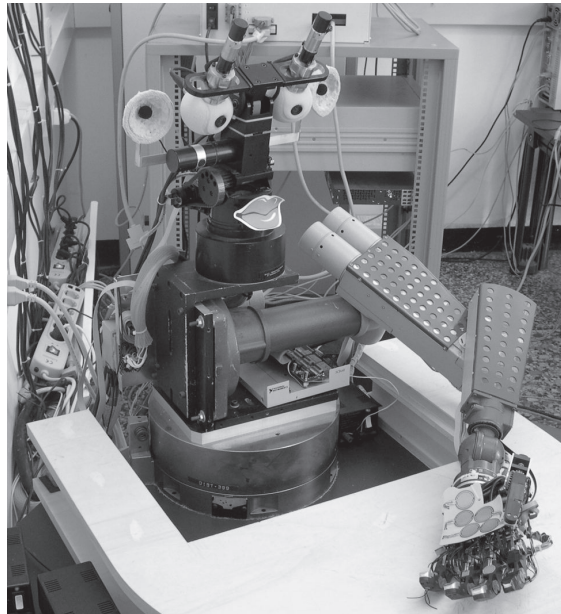


FIG. 1. Il Babybot. Il setup utilizzato consiste in un robot antropomorfo chiamato Babybot (Metta 2000; Natale 2004) avente un totale di 18 gradi di libertà. Dal punto di vista sensoriale il robot è equipaggiato con una coppia di telecamere CCD, due microfoni, un sensore inerziale, sensori tattili e propriocettivi (quest'ultimi costituiti da *encoder* che forniscono informazioni sulla posizione dei giunti).

corpo, apprendimento dell'interazione con gli oggetti e apprendimento dell'interpretazione degli eventi. Durante la prima fase il robot esplora le capacità sensoriali e motorie del proprio corpo e ne costruisce un'opportuna rappresentazione interna. Nella seconda fase l'esplorazione si sposta verso il mondo esterno: il robot impara a controllare il corpo in modo da eseguire azioni per interagire con gli oggetti che lo circondano. Un esempio in questo senso consiste nell'abilità di muovere il braccio in modo da toccare o afferrare un oggetto con la mano. Nella terza fase il robot usa la sua conoscenza delle regolarità del mondo esterno per imparare a predire le conseguenze delle proprie azioni sull'ambiente. L'esperienza accumulata dal robot può essere usata in questa fase per interpretare gli eventi osservati sulla base di quelli generati dal robot stesso (Fitzpatrick *et al.* 2003). Nel seguito riportiamo alcuni esperimenti relativi alle prime due fasi.

4. IL CORPO

L'esecuzione di un movimento richiede la trasformazione dell'informazione sensoriale corrispondente allo stato¹ desiderato del sistema nella sequenza di comandi necessaria a eseguire il movimento stesso. In alcuni casi questa trasformazione è piuttosto semplice. Si consideri per esempio il sistema oculomotorio nell'uomo e il problema di controllare i muscoli degli occhi per dirigere lo sguardo verso un oggetto identificato visivamente. L'informazione visiva in questo caso è già espressa in un sistema di riferimento in qualche modo «compatibile» con il sistema motorio. Il sistema di controllo degli occhi deve portare l'oggetto al centro della retina o, in altre parole, *azzerare l'errore retinico* corrispondente. Il problema può essere risolto con un controllore in anello chiuso, e l'apprendimento in questo caso si riduce ad una semplice stima dei guadagni del controllore. La situazione si complica, però, se l'oggetto non è visibile e la sua posizione è identificata grazie al suono che produce (ad es. un oggetto che cade al di fuori del campo visivo o in assenza di luce). In questo caso la conversione di coordinate avviene a partire dallo spazio nel quale è rappresentata la posizione dell'evento sonoro (ad es. la differenza di fase tra il suono percepito dall'orecchio destro e quello sinistro) e non è possibile impiegare un controllore in anello chiuso poiché la posizione degli occhi non influenza la percezione sonora. È quindi necessaria una trasformazione più complessa.

In alcuni casi le conversioni tra i sistemi di riferimento possono essere rappresentate come una generica trasformazione $\Delta q = f(s)$ dove s è il segnale sensoriale e Δq il comando motorio necessario per l'esecuzione del compito considerato. La funzione $f(\cdot)$ racchiude la conoscenza sia dei parametri interni del robot che dell'ambiente esterno e viene detta *trasformazione inversa* (o *modello inverso*) poiché converte una sensazione sensoriale nel comando motorio necessario per ottenerla. ~~In alcuni casi~~ la funzione inversa non è definita; ad esempio nel caso di un braccio ridondante² non esiste una funzione che, data la posizione del punto finale del braccio (mano), fornisce un unico valore dei giunti per realizzarla (in questi casi i meccanismi utilizzati dal cervello per risolvere il problema non sono del tutto noti; un'ipotesi può essere trovata in Jordan e Rumelhart 1992).

Il problema opposto riguarda invece la predizione delle conseguenze sensoriali di una data azione motoria. In questo caso la trasformazione è detta *diretta* e può essere scritta come una funzione $s = f(\Delta q)$ che converte un comando motorio Δq nel conseguente effetto sensoriale

¹ Per stato in questo caso si intende sia il corpo che l'ambiente esterno.

² Un sistema meccanico è detto ridondante quando ha un numero di gradi di libertà superiore a quello minimo per eseguire un determinato movimento.

s. In altre parole, questo *modello diretto* fornisce una predizione sullo stato del sistema a seguito di un comando motorio. L'aspetto interessante dei modelli diretti è che sono sempre definiti, dato che ad ogni azione corrisponde una conseguenza unica.

~~In questi casi~~ lo scopo finale dell'apprendimento si riduce ad un generico problema di approssimazione funzionale che può essere risolto tramite reti neurali, metodi di ottimizzazione o, talvolta, utilizzando una semplice tabella di *look-up*. Purtroppo non è sempre immediato realizzare una procedura che permetta al sistema di raccogliere in maniera autonoma gli esempi utilizzati per l'apprendimento delle trasformazioni dirette e inverse. Una possibile soluzione consiste nel generare movimenti casuali e di misurarne gli effetti sul sistema sensoriale (nel robot una procedura simile è utilizzata da Metta (2000) per i movimenti oculari e da Natale (2004) per la compensazione degli effetti della forza peso sul braccio del robot). Un'altra soluzione sostituisce i movimenti casuali con comandi generati da un semplice controllore proporzionale in anello chiuso (Gomi e Kawato 1993). In entrambi i casi il sistema utilizza una procedura di inizializzazione (movimenti casuali o controllore in anello chiuso) che permette al robot di muoversi e contemporaneamente di avviare l'apprendimento. Nel Babybot abbiamo affrontato il problema dell'acquisizione di modelli inversi per il controllo dei movimenti oculari a partire da informazione visiva, inerziale e uditiva (Metta 2000; Natale *et al.* 2002; Panerai *et al.* 2002).

Un'altra possibile procedura di apprendimento, ricerca le similarità tra modalità sensoriali diverse. Questo meccanismo è stato per esempio utilizzato nell'acquisizione di un modello del corpo del robot. Il problema, in pratica, consiste nell'identificazione visiva della mano del robot e la distinzione di quest'ultima rispetto al resto dell'ambiente. Nella soluzione adottata il robot è stato programmato per eseguire, se necessario, delle azioni con la mano che permettono di semplificare l'elaborazione dei dati visivi. In questo caso l'apprendimento avviene durante una fase di esplorazione nella quale il robot esegue dei movimenti periodici con la mano, mentre un modulo dedicato si occupa di identificare movimenti periodici all'interno dei segnali propriocettivi e visivi. Se sono identificati dei movimenti periodici in entrambi i canali sensoriali, il periodo di oscillazione viene estratto e confrontato. Qualora tale confronto sia positivo, i punti dell'immagine che hanno superato il test sono selezionati come parte della mano. La procedura permette di collezionare esempi per risolvere un problema di apprendimento supervisionato e addestrare un modello diretto che predice la posizione della mano nel campo visivo a partire dalla sola informazione propriocettiva (segnale in retroazione degli *encoder* dei motori). In figura 2 viene mostrato il risultato dell'apprendimento della trasformazione sensomotrice che consente la localizzazione della mano.

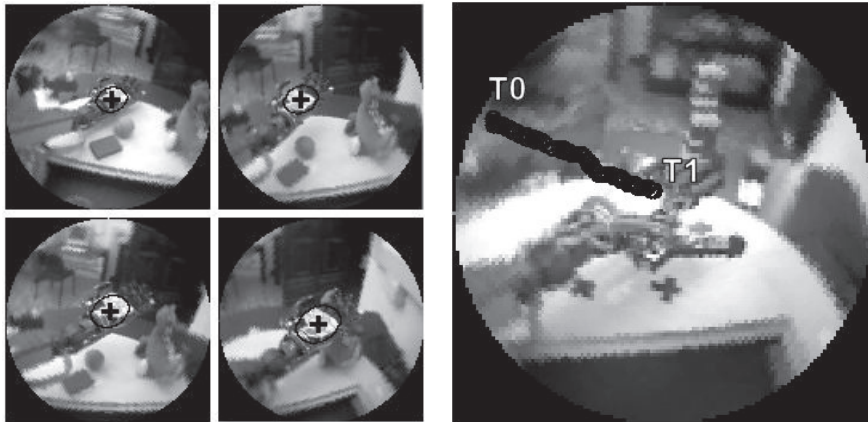


FIG. 2. A sinistra: apprendimento della localizzazione della mano. La croce scura rappresenta la posizione della mano mentre l'ellisse ne approssima forma e orientamento. A destra: raggiungimento di un ipotetico bersaglio al centro dell'immagine. T0 e T1 segnano rispettivamente l'inizio e la fine della traiettoria.

5. CONTROLLO DEL MOVIMENTO

Nel paragrafo precedente abbiamo descritto diversi meccanismi di apprendimento che consentono al robot di imparare alcuni modelli diretti e inversi del proprio corpo e dell'ambiente. In generale un modello inverso permette di risolvere un problema di pianificazione o controllo, mentre un modello diretto permette di anticipare la conseguenza di una determinata azione. La distinzione tuttavia non è così netta: un modello diretto può essere impiegato per risolvere un problema inverso (Jordan e Rumelhart 1992). Si consideri ad esempio il problema di controllare la mano per raggiungere un oggetto. Il problema può essere formulato in termini di una funzione inversa che lega la posizione dell'oggetto nell'immagine con il corrispondente comando motorio necessario a spostare il braccio. Nello spazio dei giunti il comando motorio corrisponde alla posizione del braccio che minimizza la distanza tra la mano e il bersaglio e può essere trovato, in alternativa, utilizzando una procedura iterativa che impiega la funzione diretta descritta nel paragrafo precedente (per i dettagli si veda l'Appendice). Un esempio dell'uso di questa tecnica per raggiungere un oggetto è mostrato in figura 2.

6. CONCLUSIONI

In questo articolo abbiamo presentato un approccio per la realizzazione di un robot umanoide ispirato alle prime fasi dello sviluppo sensomotorio

dell'uomo. La possibilità di manipolare l'ambiente circostante si ritiene essere uno degli aspetti cruciali dello sviluppo dell'intelligenza negli esseri umani. Lo studio della manipolazione in robotica è stato tradizionalmente finalizzato alla semplice esecuzione di compiti di assemblaggio o assistenza. Il controllo dell'interazione tra robot e ambiente è uno degli aspetti più difficili della robotica, ma allo stesso tempo il suo punto di forza poiché permette al sistema l'esplorazione autonoma dell'ambiente e del legame tra attività motoria e percezione. Abbiamo visto come questi aspetti si trovino alla base dei meccanismi che consentono all'uomo di adattarsi all'ambiente e di comprenderne struttura e regole. Per questi motivi riteniamo che l'approccio presentato offra non solo l'opportunità di realizzare robot più adattabili, ma anche un nuovo modo di affrontare lo studio dell'intelligenza nei sistemi artificiali.

APPENDICE

Matematicamente il problema del controllo del braccio per raggiungere un oggetto può essere formulato come la minimizzazione del seguente costo:

$$\min_q (f(q) - x)^2$$

dove x è la posizione del bersaglio, e $f(q)$ la posizione del braccio, calcolata utilizzando il suo modello diretto. Il valore di q che risolve l'equazione precedente corrisponde alla soluzione cercata e può essere determinato in maniera iterativa ad esempio utilizzando il metodo della discesa del gradiente:

$$q_{t+1} = q_t + k \cdot (f(q) - x) \nabla f(q)$$

dove k è una costante positiva che regola la velocità di discesa e $\nabla f(q)$ è il gradiente del modello diretto:

$$\nabla f(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q}$$

Quest'ultimo può essere calcolato in maniera analitica oppure sostituito con una sua stima locale. Questa tecnica non richiede un'inversione esplicita, e come tale, può essere applicata anche quando il braccio è ridondante o in presenza di singolarità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ARBIB M.A., BILLARD A., IACOBONI M. e OZTOP E. (2000), *Synthetic brain imaging: grasping, mirror neurons and imitation*, in «Neural Networks», 13, pp. 975-997.
- BUSHNELL E. e BOUDREAU J. (1993), *Motor development and the mind: the potential role of motor abilities as a determinant of aspects of perceptual development*, in «Child Development», 64, pp. 1005-1021.
- FITZPATRICK P., METTA G., NATALE L., RAO S. e SANDINI G. (2003), *Learning about objects through action: Initial steps towards artificial cognition*, in IEEE International Conference on Robotics and Automation (Icra) 2003, Taipei, Taiwan.
- FOGASSI L., GALLESE V., FADIGA L., LUPPINO G., MATELLI M. e RIZZOLATTI G. (1996), *Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4)*, in «Journal of Neurophysiology», 76, pp. 141-157.
- GOMI H. e KAWATO M. (1993), *Neural network control for a closed-loop system using feedback-error-learning*, in «Neural Networks», 6, pp. 933-946.
- GRAZIANO M.S.A., HU X. e GROSS C.G. (1997), *Visuo-spatial properties of ventral premotor cortex*, in «Journal of Neurophysiology», 77, pp. 2268-2292.
- JEANNEROD M. (1997), *The cognitive neuroscience of action*, Cambridge, Mass. - Oxford, Blackwell Publishers.
- JORDAN M.I. e RUMELHART D.E. (1992), *Forward models: Supervised learning with a distal teacher*, in «Cognitive Science», 16, pp. 307-354.
- KONCZAK J. e DICHGANS J. (1997), *Goal-directed reaching: development toward stereotypic arm kinematics in the first three years of life*, in «Experimental Brain Research», 117, pp. 346-354.
- LEDERMAN S.J. e KLATZKY R.L. (1987), *Hand movements: A window into haptic object recognition*, in «Cognitive Psychology», 19, pp. 342-368.
- METTA G. (2000), *Babyrobot: A study into sensori-motor development*, PhD Thesis, ~~LIRA Lab, Dist~~, University of Genoa.
- MILNER D.A. e GOODALE M.A. (1995), *The visual brain in action*, Oxford, Oxford University Press.
- NATALE L. (2004), *Linking action to perception in a humanoid robot: A developmental approach to grasping*, PhD Thesis, ~~Dist~~, University of Genoa.
- NATALE L., METTA G. e SANDINI G. (2002), *Development of auditory-evoked reflexes: Visuo-acoustic cues integration in a binocular head*, in «Robotics and Autonomous Systems», 39, pp. 87-106.
- NEEDHAM A., BARRET T. e PETERMAN K. (2002), *A pick-me-up for infants' exploratory skills: Early simulated experiences reaching for objects using «sticky mittens» enhances young infants' object exploration skills*, in «Infant Behavior & Development», 25, pp. 279-295.
- PANERAI F., METTA G. e SANDINI G. (2002), *Learning stabilization reflexes in robots with moving eyes*, in «Neurocomputing», 48, pp. 323-337.
- RIZZOLATTI G. e GENTILUCCI M. (1988), *Motor and visual-motor functions of the premotor cortex*, in *Neurobiology of neocortex*, Chichester, Wiley, pp. 269-284.
- ROSANDER K. e VON HOFSTEN C. (2004), *Infants' emerging ability to represent object motion*, in «Cognition», 91, pp. 1-22.

- STRERI A. (1993), *Seeing, reaching, touching: The relations between vision and touch in infancy*, Cambridge, Mass., ~~Mit~~ Press.
- VON HOFSTEN C. (1982), *Eye-hand coordination in newborns*, in «Developmental Psychology», 18, pp. 450-461.
- VON HOFSTEN C. e RONNQVIST L. (1993), *The structuring of neonatal arm movements*, in «Child Development», 64, pp. 1046-1057.
- VON HOFSTEN C., VISHTON P., SPELKE E.S., FENG Q. e ROSANDER K. (1998), *Predictive action in infancy: Tracking and reaching for moving objects*, in «Cognition», 67, pp. 255-285.

Lorenzo Natale, ~~Mit CSAIL~~, 32 Vassar Street, Cambridge, Mass., 02139, ~~USA~~ e ~~LIRA-Lab, Dist~~, Università di Genova, Viale Causa 13, 16145 Genova. E-mail: lorenzo@csail.mit.edu

Giorgio Metta e Giulio Sandini, ~~LIRA-Lab, Dist~~, Università di Genova, Viale Causa 13, 16145 Genova. E-mail: pasa@liralab.it / sandini@unige.it

La ricerca descritta in questo articolo è finanziata in parte dalla Commissione Europea con i progetti RobotCub FP6-IST-004370 e Contact NEST-5010.