

# Rappresentazioni Anticipatorie: Tre Studi Simulativi

Giovanni Pezzulo (giovanni.pezzulo@istc.cnr.it)

Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione - CNR

Via S. Martino della Battaglia, 44 - 00185 Roma, Italia

## Sommario

Un agente cognitivo e' capace di costruire rappresentazioni anticipatorie, in particolare riguardo gli effetti delle proprie azioni. Tale capacita' puo' essere utilizzata per un gran numero di funzioni, come ad esempio il controllo motorio, l'orientamento dell'attenzione e la pianificazione. Qui presentiamo tre studi simulativi mirati ad analizzare diversi usi dell'anticipazione nella cognizione.

## Abstract

A cognitive agent is able to build up anticipatory representations, and in particular those concerning the effects of his own actions. This capability can be exploited for a number of functions such as motor control, attention and planning. Here we present three simulative studies in which different uses of anticipation in cognition are analyzed.

## Introduzione

Recentemente una serie di evidenze convergenti in psicologia e neurobiologia indicano un ruolo cruciale delle rappresentazioni anticipatorie in molte funzioni cognitive, come ad esempio l'attenzione (Balkenius, 1999), la selezione ed il controllo dell'azione (Wolpert & Kawato, 1998). Gli avanzamenti nella comprensione dei meccanismi anticipatori alla base della cognizione umana non costituiscono soltanto una direzione promettente per gli studi sperimentali, ma coinvolgono nozioni teoriche centrali come quelle di rappresentazione ed intenzionalita'. Per questo motivo recentemente le capacita' simulative e generative sono state messe in evidenza per molte funzioni cognitive di alto livello come pianificazione, imitazione e teoria della mente (Hurley, 2005; Prinz, 2005), cosi' come nei meccanismi motivazionali ed emozionali (Damasio, 1994). Al tempo stesso in molti recenti lavori teorici (Barsalou, 1999; Clark & Grush, 1999; Grush, 2004) le rappresentazioni sono concepite come eminentemente orientate all'azione e fortemente collegate all'apparato motorio, in maniera consistente con i risultati sperimentali come la scoperta dei *mirror neurons* (Rizzolatti et al., 1996).

Noi crediamo che questo quadro unitario che mette in primo piano le capacita' anticipatorie di un agente cognitivo sia di grande interesse anche per i modelli computazionali, ed infatti recentemente cominciano ad essere sviluppati una serie di modelli simulativi focalizzati sull'anticipazione (Demiris, 2005; Shanahan, 2005; Wolpert & Kawato, 1998). D'altronde fin dalle origini le scienze cognitive hanno riconosciuto come una delle caratteristiche chiave di un agente cognitivo quella di mantenere modelli interni del proprio ambiente, non solo per agire nel mondo nell'immediato, ma anche (e

soprattutto) per concepire quello che non c'e'. La vera vita mentale di un agente inizia infatti quando l'organismo e' capace di generare *endogenamente*, e non soltanto come conseguenza degli stimoli sensoriali, una rappresentazione interna percettiva del mondo della percezione (Castelfranchi, 2005). In questo senso sono stati recentemente presentati modelli di rappresentazioni interne come "simulazioni" (Barsalou, 1999) o "emulazioni" (Grush, 2004) della percezione che possono poi essere "staccate" dal ciclo sensomotorio per essere utilizzate ad esempio come veri e propri *scopi da raggiungere* e confrontati con gli stimoli attuali durante l'esplorazione dell'ambiente; oppure come *anticipazione degli stimoli sensoriali* conseguenti alla propria azione che serve per il controllo motorio (Wolpert & Kawato, 1998); ancora, per concepire cio' che non e' ora percepibile e ricostruire l'input, come nel caso della *visual imagery* (Kosslyn, 1994). Le rappresentazioni anticipatorie possono inoltre essere impiegate per funzioni cognitive di piu' alto livello; tipicamente un agente cognitivo e' capace di costruire rappresentazioni allo scopo di operare su di esse al posto di operare sul mondo. Ad esempio, un agente cognitivo puo' pianificare simulando e valutando diverse azioni possibili, esplorando e confrontando varie possibilita' di scelta, al posto di procedere per prova ed errore tentando davvero tutte le azioni possibili. Le rappresentazioni anticipatorie dunque offrono un ponte verso le capacita' cognitive piu' complesse, come ad esempio quella di immaginare cio' che non e' mai stato esperito (ed in alcuni casi non puo' esserlo), pur restando ancorate (*grounded*) alla realta' empirica, poiche' derivano proprio dalla necessita' di anticipare le conseguenze sensoriali delle proprie azioni.

## Tre Studi Simulativi

Il nostro lavoro simulativo si fonda dunque sull'analisi delle rappresentazioni anticipatorie e del loro ruolo nelle funzioni cognitive. Coerentemente con il quadro teorico sopra descritto il nostro scopo e' quello di investigare come le rappresentazioni si siano prima evolute come mezzi per il controllo dell'azione, e poi si siano "staccate" da ciclo sensomotorio assumendo una serie di ruoli aggiuntivi, come quello di rendere possibile la pianificazione ragionando "in simulato" prima di agire davvero sul mondo. Al tempo stesso intendiamo analizzare come differenti funzioni delle rappresentazioni anticipatorie, come la selezione dell'azione, l'orientamento dell'attenzione, il controllo motorio, la pianificazione e l'orientamento verso i propri scopi possano integrarsi all'interno di una architettura cognitiva. In una serie di studi simulativi stiamo dunque tracciando un percorso che va dalla costruzione di rappresentazioni anticipatorie per il controllo dell'azione al loro uso per selezionare il

comportamento, categorizzare, costruire piani e valutarne gli esiti, fino a formulare e perseguire autonomamente degli scopi.

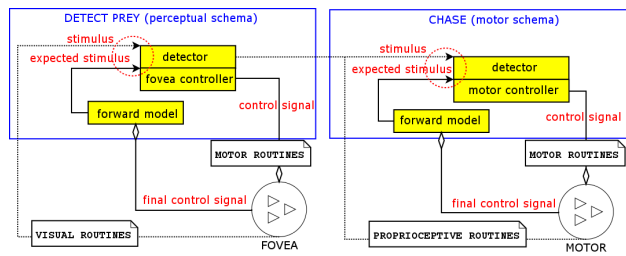


Figura 1: Uno schema percettivo (*detect prey*) ed uno motorio (*chase*).

## Il Primo Studio

Il *primo studio* (Pezzulo & Calvi, 2006a) presenta una architettura ispirata ad un modello etologico della mantide religiosa, nella quale sono presenti *schemi percettivi* e *schemi motori* (mostrati in Fig. 1). Nelle architetture basate su schemi (Arbib, 1992; Roy, 2005), ispirate al lavoro di Piaget (1954), il comportamento non è deciso da un sistema centrale ma è influenzato da numerosi schemi, i quali hanno livelli di attivazione che variano a seconda della loro rilevanza.

Nell'architettura esistono cinque schemi percettivi (ad esempio: *individua predatore*; *individua preda*; *individua ostacolo*) e sei schemi motori (ad esempio: *cattura preda*; *scappa dal predatore*). Ciascuno di tali schemi è composto da: un detector, che seleziona l'informazione rilevante; un controller che dirige il movimento o la visione della mantide; un predittore (forward model) che produce aspettative riguardo alle conseguenze attese dei comandi motori. Oltre agli schemi questo studio sono state introdotte delle pressioni interne (quattro drives: *fame*, *fatica*, *paura* e *riproduzione*) che fungono da contesto motivazionale, influenzando anch'essi il processo di selezione dell'azione. I drives, infatti, attivano maggiormente gli schemi specializzati per soddisfarli; ad esempio, *fame* attiva *individua preda* e *cattura preda*. Allo stesso tempo, poiché la quantità di attivazione è limitata, questo processo ha come risultato anche quello di inibire i comportamenti alternativi.

Il principale scopo dello studio simulativo è quello di comprendere quali siano i meccanismi più rilevanti per la selezione dell'azione, ovvero per scegliere lo schema o gli schemi più adatti al contesto. In questo senso l'ipotesi è che l'anticipazione abbia un ruolo rilevante, in quanto gli schemi che predicono bene sono da considerare "adatti" alla situazione ed al contesto corrente e dunque sono quelli che possono guidare meglio l'azione. Ovviamente allo stesso tempo il ruolo dei drives rimane importante; in questo senso, più precisamente lo schema o gli schemi che meglio possono portare al soddisfacimento dei drives sono selezionati per l'azione.

Per valutare l'ipotesi dell'importanza dei meccanismi anticipatori nella selezione dell'azione abbiamo disegnato uno scenario che comprende predatori, prede, ostacoli, etc. All'interno di tale scenario abbiamo confrontato una strategia di tipo anticipatorio (nella quale gli schemi che predicono meglio guadagnano attivazione e dunque hanno

più influenza sugli effettori) ad una strategia di tipo reattivo, nella quale il meccanismo di selezione dell'azione è di tipo stimolo-risposta. I risultati delle simulazioni mostrano un significativo vantaggio della strategia anticipatoria per tutti i tasks.

Oltre alla funzione di selezione dell'azione, in questo modello l'anticipazione ha anche un ruolo nel controllo dell'azione, in quanto gli input attesi (prodotti dai predittori) sono utilizzate per sostituire o integrare gli input sensoriali se questi mancano o sono in ritardo. Questa capacità aggiuntiva permette di operare con maggior successo in ambienti dinamici.

## Il Secondo Studio

Il *secondo studio* (Pezzulo & Calvi, 2006b) indaga invece come simili schemi ma specializzati per features come colori, forme e traiettorie possano evolvere e "clusterizzarsi", formando vere e proprie rappresentazioni concettuali, sulla base della teoria dei *simboli percettivi* e dei *simulatori* descritti da Barsalou (1999). A differenza dello studio precedente qui l'enfasi è principalmente sullo sviluppo: nella prima fase sono appresi singoli schemi, corrispondenti a simboli percettivi; nella seconda fase essi sono aggregati in concetti, corrispondenti ai simulatori. Lo scenario simulativo coinvolge 20 "insetti" aventi features differenti che l'agente simulato deve imparare a seguire (muovendo la fovea e le ruote).

La Fig. 2 mostra come in un compito di "tracking" e "following" di un insetto numerosi schemi siano attivi a differenti gradi (rappresentati da differenti colori); poiché il successo nella previsione determina maggiore attivazione, gli schemi che fanno previsioni coerenti rispetto alla stessa entità hanno patterns di attivazione coerenti, che sono interpretati come simulatori nel senso sopra citato. In questo caso l'anticipazione è utilizzata per costruire categorie di tipo percettivo. La Fig. 2 mostra anche come fra gli schemi aventi attivazioni coerenti si formino dei legami di tipo hebbiano che permettono di scambiare attivazione fra gli schemi correlati alla stessa categoria stabilizzano; le dinamiche di scambio di attivazione hanno come effetto una stabilizzazione e sincronizzazione del simulatore. Abbiamo testato il vantaggio di evolvere rappresentazioni categoriali mediante simulatori (ovvero insiemi di schemi con patterns di attivazione coerenti) attraverso una serie di compiti di *categorizzazione* e *predizione*, che consistono nell'individuare la categoria corretta delle entità in scena e nel predire accuratamente i loro movimenti. In tutti i compiti è stato trovato un vantaggio significativo dei simulatori sui semplici sistemi basati su schemi di comportamento.

Successivamente abbiamo investigato l'emergenza di categorie più astratte, quelle di *predatore* e *preda*, legate al ruolo delle entità e non alle loro features. Per questo motivo meta' degli insetti sono stati classificati come predatori, meta' come prede. Allo scopo di potersi allontanare dalla preda, l'agente simulato è stato dotato anche di schemi per la fuga e non solo per il raggiungimento di entità in movimento. Allo stesso tempo l'agente simulato è stato dotato di due drives come *fame* e *paura*, che gli permettono di discriminare il ruolo delle entità nella scena. Quando il predatore si avvicina,

infatti, la paura cresce, mentre decresce se non ve ne sono nelle vicinanze. Allo stesso modo la fame, oltre ad essere regolata da un orologio biologico, cresce se una preda e' in vista e decresce altrimenti. Attraverso un apprendimento di tipo hebbiano (differential hebbian learning) sono stati evoluti legami energetici fra i drives e gli schemi piu' adatti a soddisfarli: tipicamente il drive *fame* ha evoluto legami con schemi per raggiungere le prede, il drive *paura* con quelli per fuggire dai predatori. Attraverso un compito di astrazione, consistente principalmente di soddisfare i propri drives (ed implicitamente categorizzando correttamente secondo le categorie astratte "predatore" e "preda"), abbiamo osservato come i ruoli giocati dalle entita' possano essere a loro volta riconosciuti ed utilizzati correttamente, grazie al fatto che i drives permettono di discriminare tali ruoli. Si tratta di vere e proprie categorie astratte che emergono per la necessita' dell'agente simulato di soddisfare i propri drives.

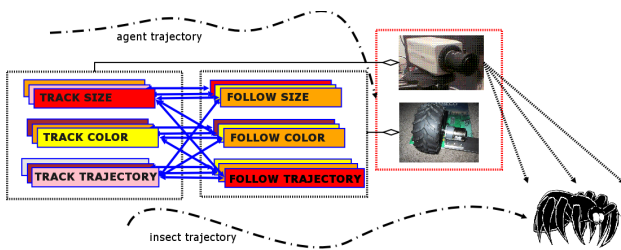


Figura 2: Un simulatore che comprende schemi di tracking e following

Abbiamo inoltre notato come la categorizzazione dipenda dal contesto: in presenza di una certa entita' saranno attivate tutte le categorie ad essa corrispondenti, ovvero quella percettiva e quella astratta. L'agente simulato tuttavia e' capace di selezionare per l'azione principalmente gli schemi piu' appropriati al compito. Se si tratta di un compito di categorizzazione, nel quale sono rilevanti le features percettive, gli schemi piu' attivi apparterranno alla categoria percettiva. Viceversa, se si tratta di soddisfare i drives e dunque di azionare i comportamenti adeguati per inseguire o fuggire, gli schemi piu' attivi saranno quelli appartenenti alla categoria astratta.

## Il Terzo Studio

Il terzo studio (Pezzulo et al., 2005) infine presenta una architettura nella quale schemi specializzati per features di complessita' via via crescente ed organizzati gerarchicamente compiono un task di visual search (trovare una "T rossa" fra i distrattori, che sono "T verdi" ed "L rosse"). In questo caso l'anticipazione e' il principio organizzativo dell'architettura gerarchica in quanto, come nella teoria del *predictive coding* (Rao & Ballard, 1999), gli schemi di livello superiore imparano a prevedere il comportamento di quelli di livello inferiore. La Fig. 3 mostra l'architettura gerarchica composta di cinque livelli di schemi: a partire dal basso: *individua punti pieni*; *individua colore*; *individua linee*; *individua lettere*; *controller della fovea*. La ricerca inizia con l'attivazione di uno stato goal (corrispondente alla "T rossa") che attiva

gli schemi corrispondenti alla "T" ed al "rosso" (freccie nere in Fig. 3), in base ad un principio ideomotorio (James, 1890). Di seguito, attraverso le attivita' di passaggio dell'attivazione e di monitoraggio da parte degli schemi di livello superiore su quelli di livello inferiore (linee tratteggiate in Fig. 3), il compito di visual search e' condotto in maniera cooperativa dagli schemi di tutti i livelli, ognuno dei quali influenza l'azione della fovea orientandola verso la direzione nella quale prevede di trovare nuovi input significativi. L'anticipazione e' dunque usata per selezionare l'informazione rilevante ed orientare conseguentemente l'azione della fovea, e conseguentemente l'attenzione dell'agente simulato. Infine, poiche' come nei due studi precedenti l'attivazione degli schemi, e dunque la loro possibilita' di influenzare la fovea, e' proporzionale alla loro capacita' di anticipare bene, l'anticipazione e' di nuovo usata come indice di rilevanza.

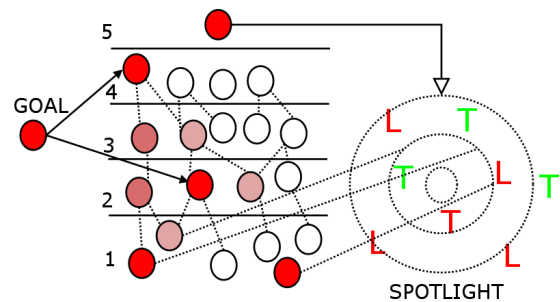


Figura 3: L'architettura gerarchica per il visual search

A differenza delle architetture precedenti in questo studio gli schemi sono organizzati gerarchicamente in maniera tale che quelli di livello piu' alto sfruttano le informazioni di quelli di livello piu' basso ed imparano allo stesso tempo a predire i loro livelli di attivazione (ovvero la loro rilevanza contestuale). Inoltre sono introdotti veri e propri goals il cui ruolo e' duplice: iniziare l'azione passando l'attivazione agli schemi piu' adatti a soddisfarli; e concludere la ricerca quando il risultato desiderato e' raggiunto.

Anche in questo caso abbiamo confrontato una strategia reattiva, basata su semplici regole stimolo-risposta e la selezione dell'azione sulla base del suo successo (ad esempio premiando gli schemi *individua colore* che trovano con successo il colore per i quali sono specializzati) con una strategia anticipatoria, selezionando per l'azione gli schemi che predicono con successo gli input dei livelli inferiori, ottenendo un significativo vantaggio della strategia anticipatoria.

## Conclusioni

L'anticipazione e' un fenomeno diffuso e presente in moltissimi aspetti della cognizione. Nei tre studi simulativi qui presentati abbiamo mostrato alcuni dei suoi ruoli: per la selezione dell'azione; per il controllo dell'azione; per la categorizzazione; per il controllo gerarchico dell'attenzione. In tutti i casi abbiamo confrontato una strategia basata sulla generazione e sull'uso di predizioni con una strategia reattiva, ottenendo sempre un vantaggio significativo per la prima. Questi risultati indicano un generale vantaggio di affidarsi

all'anticipazione anche, e soprattutto, in ambienti dinamici e con vincoli di rapidità dovuti al fatto che le simulazioni sono svolte in tempo reale.

Esistono numerose altre funzioni dell'anticipazione, alcuni dei quali sono state recentemente modellizzate attraverso simulazioni. Ad esempio la capacità di predire può permettere, se iterata, di pianificare a medio e lungo termine "simulando" diverse possibili linee d'azione e scegliere fra di esse al posto di compiere tentativi nel mondo reale. Il nostro prossimo lavoro sarà quello di modellizzare tali funzioni prima isolatamente e poi in una architettura integrata, che permetta di realizzare sia comportamenti tipici del livello sensomotorio che di quello della cognizione di alto livello. In questo senso stiamo analizzando come evolvere rappresentazioni di tipo gerarchico, simili a quelle illustrate nel terzo studio, per il controllo dell'azione da un livello più fine (quello basso) ad uno più astratto (quello alto) che comprenda sequenze di azioni, macro-azioni, o piani. L'anticipazione ed il successo nella predizione potrebbero in quest'ultimo caso anche avere un ruolo nella scelta di quale sia il "livello" più rilevante per il controllo dell'azione, in maniera simile a come descritto da Demiris e Khadhour (2005). Infine, uno dei nostri obiettivi a lungo termine è quello di passare da rappresentazioni anticipatorie (dei risultati delle proprie azioni) a veri e propri goals, che hanno una componente epistemica, poiché incorporano una rappresentazione anticipatoria, ed una motivazionale poiché possono motivare, iniziare e terminare i comportamenti.

### Ringraziamenti

Questo lavoro è supportato dal Progetto Europeo **MindRACES** (FP6-511931).

### Riferimenti

Arbib, M.A. (1992) Schema Theory. in the *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, 2nd Edition, Editor Stuart Shapiro, 2:1427-1443, Wiley.

Balkenius, C. & Hulth, N. (1999). Attention as selection-for-action: a scheme for active perception. In *Proceedings of EuRobot-1999*, Zurich.

Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences.*, 22:577-600.

Castelfranchi, C. (2005). Mind as an anticipatory device: For a theory of expectations. In *BVAI 2005*, pages 258-276.

Clark, A. & Grush, R. (1999). Towards a cognitive robotics. *Adaptive Behavior*, 7(1):5-16.

Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason and the Human Brain*. Grosset/Putnam. trad. it. *L'errore di Cartesio*. Adelphi, Milano, 1999.

Demiris, Y. & Khadhour, B. (2005). Hierarchical attentive multiple models for execution and recognition (hammer). *Robotics and Autonomous Systems Journal*, 54:361-369.

Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *Behav Brain Sci*, 27(3):377-96.

Hurley, S. L. (2005). *Perceptual Experience*, chapter Active Perception and Perceiving Action: the Shared Circuits Hypothesis.

James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. Dover Publications, New York.

Kosslyn, S. M. & Sussman, A. (1994). Roles of imagery in perception: Or, there is no such thing as immaculate perception. In Gazzaniga, M., editor, *The cognitive neurosciences*, pages 1035-1042. Cambridge, MA: MIT Press.

O'Regan, J. and Noe, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5):883-917

Pezzulo, G. & Calvi, G. (2006a). A schema based model of the praying mantis. In *Proceedings of The Ninth International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior (SAB'06)*.

Pezzulo, G. & Calvi, G. (2006b). Toward a perceptual symbol system. In *Proceedings of Epirobot 2006*.

Pezzulo, G., Calvi, G., Lalia, D., & Ognibene, D. (2005). Fuzzy-based schema mechanisms in akira. In Mohammadian, M., editor, *Proceedings of CIMCA'2005*, Vienna.

Piaget, J. (1954) *The Construction of Reality in the Child*, Ballentine

Prinz, W. (2005). *Perspectives on imitation: From neuroscience to social science*, volume 1, chapter An ideomotor approach to imitation, pages 141-156. MIT Press, Cambridge, MA.

Rao, R. P. & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nat Neurosci*, 2(1):79-87.

Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3.

Roy, D. (2005) Semiotic schemas: a framework for grounding language in action and perception. *Artificial Intelligence*, Elsevier Science Publishers Ltd., 2005, 167, 170-205

Shanahan, M. (2005). Cognition, action selection, and inner rehearsal. In *Proceedings IJCAI 2005 Workshop on Modelling Natural Action Selection*, pages 92-99.

Wolpert, D. & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Netw*, 11(7-8):1317-1329.