

# La Psicologia degli Automi<sup>1</sup>

Orazio Miglino<sup>1,2</sup> Stefano Nolfi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Psicologia, II Università di Napoli

<sup>2</sup>Istituto di Psicologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma  
orazio.miglino@unina2.it, nolfi@ip.rm.cnr.it

## Introduzione

In molti saggi di questo libro si parla di modelli e simulazioni [Calabretta; Cangelosi e Turner; Di Ferdinando in questo volume] applicati a vari aspetti della psicologia. In tutti questi casi gli autori tendono a costruire un sapere psicologico fondato su modelli quantitativi e non verbali. In pratica tentano di raggiungere l'obiettivo che la psicologia scientifica persegue dalla sua fondazione: la definizione di leggi formali dei "fatti" psicologici come accade per i "fatti" fisici. Questo è stato il denominatore comune di ogni approccio nato all'interno della psicologia scientifica o sperimentale, come dir si voglia. È storicamente noto che questa ambizione si è sempre scontrata con il numero enorme di variabili che occorre considerare ogni qual volta si vuole quantitativamente spiegare un dato comportamento. Il comportamentismo è morto anche a causa dell'enorme numero di variabili intervenienti che ogni modello assumeva e non controllava. Il cognitivismo agonizza strangolato dal groviglio di "scatole" e "frecce" che propone in ogni sua spiegazione. Uno spiraglio per il rilancio del programma "formalista" è rappresentato dai (relativamente) nuovi modelli "emergentisti" accoppiati con la grande potenza di calcolo degli attuali computer. Infatti, la possibilità di delegare alla capacità di un modello, come nel caso delle reti neurali, di trovare (apprendere) una soluzione a dei problemi con molte incognite (o variabili), sembra aver dato nuova linfa alla psicologia scientifica<sup>2</sup>. L'impressione generale è che si abbiano a disposizione degli strumenti in grado di affrontare l'enunciazione di grandi teorie formali (o simulate, direbbe qualcuno) circa il linguaggio, la formazione dei concetti, i moduli mentali, ecc. Secondo una visione ancora più ottimistica questi nuovi strumenti potrebbero consentire di superare i confini disciplinari tra le varie scienze (biologia, neuroscienze, psicologia, sociologia) per arrivare ad una Teoria Generale della Vita [Parisi 1999]. L'obiettivo è ambizioso, tuttavia ci sembra che l'approccio emergentista stia introducendo qualcosa di qualitativamente nuovo nel nostro modo di fare ricerca. Ci sembra che questi strumenti, oltre che "rifare *la* realtà nel computer", come sostiene il titolo di un recente libro di Parisi [2001], consentano di ricreare *delle* realtà.

Da quando il metodo galileiano si è imposto come pratica gnoseologica, i modelli formali (matematici) prodotti dalla scienza sono il frutto di un'opera analitica del ricercatore che per spiegare un dato fenomeno impone una certa struttura di relazioni tra variabili ben definite. Ovviamente quanto maggiori sono il numero di variabili e le leggi di relazioni assunte dal modello, tanto più grande è la quantità di calcolo necessario per predire, a partire dalla struttura formale, i dati empirici. Alla base delle grandi teorie fisiche del Settecento e

---

<sup>1</sup> La definizione di *Psicologia degli Automi* è frutto di una felice intuizione del Prof. Sergio Lombardo dell'Accademia delle Belle Arti di Roma. Il Prof. Lombardo ha voluto così chiamare un insegnamento dell'indirizzo sperimentale di Psicologia dell'Arte. L'insegnamento è stato affidato al Prof. Luigi Pagliarini che ha, in parte, stimolato la nascita di questo saggio. Siamo debitori alla Professoressa Olimpia Matarazzo della II Università di Napoli per il suo attento lavoro di supervisione

<sup>2</sup> I contributi di Calabretta e Di Ferdinando, presenti in questo volume, offrono una sintetica ed esauriente introduzione alla modellistica di matrice "cognitivista" ed "emergentista".

dell'Ottocento c'era il lavoro massacrante e organizzato di centinaia di esseri umani. All'epoca il calcolatore (o computer) era sinonimo di persona delegata a fare calcoli [Bailey 1996]. Fortunatamente, questa attività ripetitiva e priva di qualsiasi forma di creatività è stata progressivamente automatizzata fino ad arrivare alla sua totale meccanizzazione. L'attuale potenza dei computer ha consentito di affrontare il calcolo di modelli matematici complicatissimi. Questo è il campo ben noto delle cosiddette *simulazioni* numeriche entrato nella pratica comune sia nella ricerca di base che in quella applicata. In questo caso, però, il progresso è stato solo quantitativo. La logica sottostante alla costruzione delle Teorie scientifiche è rimasta sostanzialmente la stessa da 300 anni a questa parte. È cambiata solo una cosa: un tempo il calcolatore era un essere umano, ora è una macchina.

Esiste comunque una nuova possibilità che la grande potenza di calcolo oggi a disposizione consente: la riproduzione (o simulazione) dei meccanismi di adattamento, apprendimento, evoluzione sottostanti alla vita di ogni sistema biologico. In questo caso, una particolare competenza o comportamento del modello *emerge* come risultato di questi processi di adattamento simulati. Per esempio, immaginiamo di voler spiegare alcuni indici comportamentali relativi all'orientamento spaziale di un ratto in un labirinto. Secondo l'approccio emergentista, il ricercatore addestra un sistema artificiale a produrre i dati empirici. La competenza di orientarsi nello spazio, quindi, non viene direttamente imitata/simulata, ma è un prodotto dei processi di adattamento/apprendimento inseriti nel modello simulato. A questo punto possiamo dire che la competenza così ottenuta rappresenta un modello del comportamento di orientamento spaziale dei ratti? La risposta non può essere netta. In qualche misura è affermativa perché, in fin dei conti, la soluzione appresa dal modello spiega e predice i risultati empirici osservati. D'altra parte è anche vero che il modello acquisisce autonomamente la competenza di orientamento spaziale. Ed è questo scarto di autonomia che fa la differenza con la modellistica tradizionale e le simulazioni numeriche in generale. La libertà data al modello di apprendere un compito potrebbe aver portato il sistema a produrre i medesimi indici comportamentali del ratto, ma la logica (o la psico-logica) con cui li ha ottenuti potrebbe essere completamente diversa. Tutto sommato le formiche e gli esseri umani possono presentare dei comportamenti di orientamento spaziale del tutto simili. Ma basta questo per dire che la formica è un buon modello dell'attività di orientamento spaziale umana (o viceversa)?

Questo è il punto. Modellare i processi di adattamento/apprendimento/autorganizzazione, come accade nel caso delle reti neurali artificiali, può trasformare le strutture formali in sistemi autonomi molto simili a nuove forme di vita più che alla "fotografia" schematica di un pezzo del reale. A certi condizioni, che vedremo nelle pagine seguenti, questi modelli possono essere considerati alla stregua di veri e propri organismi artificiali, insomma come una nuova realtà e non solo delle simulazioni della realtà.

### **1. Modelli o Organismi artificiali?**

La creazione di altre realtà ha un sicuro interesse estetico (principalmente), ludico (per alcuni) e applicativo (forse): c'è da chiedersi, però, se e come gli organismi artificiali possono contribuire alla nostra comprensione del mondo in generale e delle attività cognitive in particolare. Per riflettere su questo problema occorre, gioco forza, ragionare contemporaneamente sia sul "se" che sul "come".

Un processo fondamentale di conoscenza scientifica del mondo è rappresentato dallo studio comparato degli organismi naturali. Tale approccio tende a individuare ciò che è generale nella natura e ciò che è peculiare di una particolare forma di vita. In tal senso, la Psicologia Comparata, come brillantemente esposto in un altro capitolo di questo libro [Sovrano e Vallortigara in questo volume], cerca di capire la genesi e la struttura della

cognizione studiando, oltre al comportamento dell'uomo, anche quello degli altri esseri viventi senza distinzione di complessità e specie. Molto del "sapere" psicologico attuale è stato ottenuto con questo approccio. Per esempio, Tolman, studiando principalmente il comportamento del ratto di laboratorio, arrivò a definire il costrutto ipotetico di "mappa cognitiva" che risulta essere valido per numerosissime specie di animali. Gli organismi artificiali, analogamente ai topi della cosiddetta "rat psychology", potrebbero legittimamente essere inseriti nella serie di esseri viventi studiati dalle scienze comparate. C'è da dire che, per applicare correttamente la metodologia comparativa, i nostri organismi artificiali debbono condividere il medesimo ambiente fisico di tutti gli organismi biologici. Ovvero ci deve essere la possibilità per lo sperimentatore di valutare il comportamento degli organismi artificiali utilizzando le medesime scale di misura e nelle medesime condizioni sperimentali adottate nello studio degli esseri biologici. Questa è la condizione necessaria per passare dalla realizzazione di modelli che *simulano* l'attività psicologica, come potrebbe essere un qualsiasi programma per computer, alla creazione di un organismo artificiale che *vive* nel nostro mondo. Un organismo artificiale deve, quindi, essere un oggetto fisico che reagisce e si adatta ad un ambiente materiale e concreto.

Nelle pagine seguenti vedremo come la convergenza tra robotica mobile, informatica e modellistica neuro-biologica consente di realizzare delle macchine che potrebbero essere considerate come i primi individui di una nuova specie vivente: gli *automi biomorfi*. Questi "organismi", sebbene fatti di ferro e silicio, hanno molte caratteristiche in comune con gli animali biologici: agiscono nel medesimo mondo fisico; hanno un sistema nervoso; adottano dei meccanismi di adattamento sia in senso filogenetico (ovvero possono riprodursi) che ontogenetico. Attualmente, i comportamenti che sono in grado di apprendere sono già abbastanza complessi da richiedere delle tecniche di osservazione e analisi del tutto simili a quelle usate in un tradizionale laboratorio di Psicologia Animale. Stiamo assistendo alla nascita di una *Psicologia degli Automi*? Come vedremo, sono stati fatti i primi passi in questa direzione, ma la strada da percorrere è ancora lunghissima. Un sistema artificiale si trasforma da "modello" a "organismo" in funzione di quanta reale autonomia ha a disposizione per adattarsi ed evolversi nel proprio ambiente di vita. Per tale ragione l'attuale ricerca nel campo dei sistemi artificiali applicati alla psicologia è maggiormente orientata a scoprire (e ricreare) i meccanismi che sono alla base dei processi di adattamento/evoluzione/auto-organizzazione più che alla riproduzione/simulazione di particolari abilità, competenze, comportamenti. Anche se l'avvento degli automi biomorfi è iniziato solo da qualche decennio, vale comunque la pena di tentare di tracciare un primo percorso che partendo dall'"automa antenato" arrivi a descrivere gli organismi artificiali dei giorni nostri. È quello che tenteremo di fare nelle pagine seguenti trattando soprattutto quegli automi che hanno un certo interesse per la ricerca psicologica.

## **2. Alcuni antenati**

### **2.1. L'Onisco Schematico di Tolman**

Nel 1939 Edward Tolman diede alle stampe un curioso articolo in cui descriveva nei dettagli tecnici e progettuali una macchina semovente che oggi non esiteremmo a definire come organismo artificiale. In quel lavoro, il ricercatore americano esplorò un modo di esprimere una teoria scientifica in termini del tutto nuovi per l'epoca. Partendo da una serie di osservazioni comportamentali relative a particolari processi di apprendimento dei ratti progettò un automa che riproducesse i medesimi dati osservati negli esperimenti condotti sui ratti da laboratorio. L'automa fu battezzato con il nome di onisco schematico e non fu mai realmente costruito. Per amor di chiarezza occorre dire che l'onisco è un piccolo crostaceo di

forma ovale, dal corpo diviso in anelli e ricco di zampe, antenne e appendici. In termini comuni l'animale è conosciuto come porcellino di terra.

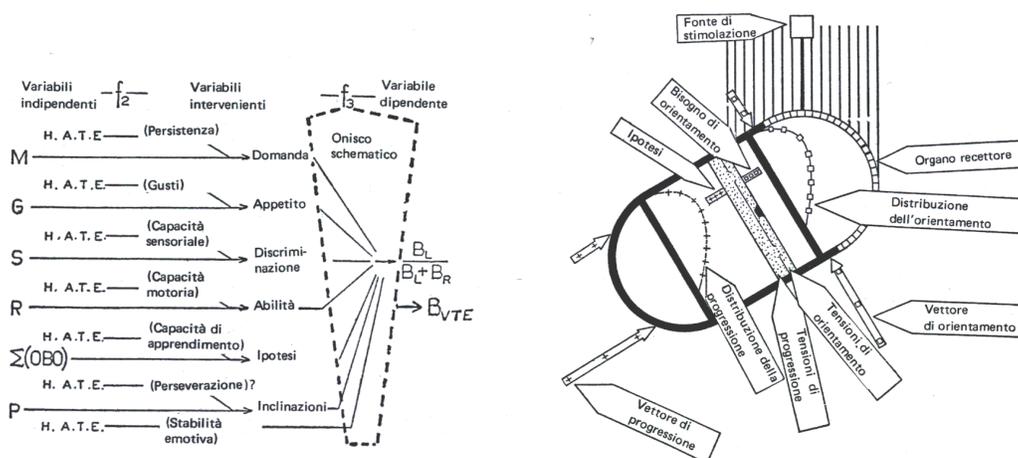


Fig. 7.1. Riproduzione del modello di Onisco Schematico di Tolman [1938].

La figura 7.1 descrive il processo di modellizzazione usato da Tolman. La parte di sinistra riporta la tradizionale rappresentazione in termini di frecce e "scatolette" di tutte le variabili indipendenti, intervenienti e dipendenti necessarie, secondo Tolman, alla spiegazione del comportamento di apprendimento vicario nei ratti. Nella parte di destra della fig. 7.1, invece, le variabili vengono ridefinite e incorporate in un modello, lo schema dell'onisco, che riproduce l'intera struttura (o, per l'appunto, lo schema) senso-motoria di un organismo "artificiale".

In sostanza, Tolman cercò di aggirare la complicatezza dei tradizionali metodi di rappresentazione scientifica (fig. 7.1, parte destra) creando un nuovo modo di presentare la spiegazione scientifica in psicologia animale: ricostruì una versione semplificata (o per usare le sue parole: "schematica") dell'organismo nella sua interezza (fig. 7.1, parte sinistra). Secondo questo approccio, il modello viene ad essere un oggetto fisico immerso nello stesso ambiente dell'organismo biologico e capace di esibire il medesimo comportamento dell'animale oggetto di studio. In sostanza, Tolman aggiunge al consueto processo di *analisi* e identificazione delle variabili sottostanti ad dato fenomeno, un momento di *sintesi* (o di ricostruzione) del modello astratto in un oggetto fisico con un corpo e un sistema senso-motorio aventi funzionalità del tutto simili ad un qualsiasi organismo. Grazie a questa novità metodologica, Tolman riesce a pensare alla sua teoria come ad un qualcosa di vivo e funzionante e, infatti, immagina il suo animaletto meccanico in varie fasi del suo agire nel mondo reale. In sostanza, Tolman aveva la possibilità di immaginare la sua teoria in azione.

L'approccio non era nuovo nemmeno all'epoca. La ricerca scientifica nelle discipline cosiddette forti (fisica, chimica, biologia) si è sempre sviluppata grazie al rapporto dialettico tra momenti d'analisi e sintesi del reale. Per la ricerca psicologica dell'epoca, la proposta di Tolman era assolutamente eccentrica e cadde nell'assoluto oblio. Solo dopo qualche decennio, con l'avvento del cognitivismo, gli psicologi cominciarono ad accettare la possibilità di riprodurre sotto forma di macchine (in genere programmi per computer) pezzi dell'attività cognitiva umana ed animale. Ma l'Onisco Schematico di Tolman va oltre alla metodologia simulativa radicatasi recentemente nella ricerca psicologica. Tolman tentò di catturare nel modello meccanico l'organismo naturale nella sua interezza. L'Onisco Schematico ha un apparato senso-motorio, una fonte di alimentazione energetica ed era

pensato per vivere nel mondo fisico. Queste caratteristiche lo rendono qualitativamente differente da qualsiasi modello simulativo: è un primo passo verso la creazione di un'entità autonoma.

## **2.2. I veicoli pensanti di Braitenberg**

Circa un quindicennio fa, Valentino Braitenberg, uno dei pionieri della cibernetica, ha pubblicato un piccolo volumetto dal titolo *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology* [Braitenberg 1984, trad. it. 1986], in cui provocatoriamente propone di affrontare alcuni temi tipici della ricerca psicologica costruendo dei veicoli (o automi) che si comportano "come se" avessero degli stati psicologici sofisticati. Nel libro Braitenberg descrive diversi esperimenti in cui rende progressivamente più complesso il comportamento degli automi assemblando semplici componenti meccanici ed elettronici. Ognuna di queste macchine imita in qualche modo un comportamento intelligente e ad ognuna è dato un nome che corrisponde al comportamento mimato. E' importante sottolineare che Braitenberg, come del resto Tolman, non ha costruito realmente i robot, ma si è limitato solo a progettarli ed a descriverli sulla carta. Comunque, un lettore procedendo nella lettura del libro vede concretizzare intricati comportamenti che emergono dall'interazione di semplici elementi. Braitenberg battezzò il suo approccio con l'etichetta di "Psicologia Sintetica". Come è successo con Tolman, la psicologia "mainstream" ha quasi completamente ignorato la proposta/provocazione di Braitenberg. Per i più, la Psicologia deve essere una scienza *analitica* e sarebbe stato impensabile arrivare alla comprensione dei fatti psicologici anche per *sintesi*. Eppure i "veicoli" di Braitenberg erano stati progettati proprio per "sintetizzare" una serie di comportamenti che un osservatore esterno avrebbe attribuito al possesso di complessi stati mentali come paura, curiosità, esitazione, ecc. Paradossalmente, la prospettiva metodologica della Psicologia Sintetica ha invece avuto un fortissimo impatto negli ambienti di ricerca interdisciplinari frequentati soprattutto da biologi, informatici, fisici, matematici e, solo molto marginalmente, da psicologi.

Oggi giorno i veicoli di Braitenberg possono facilmente essere realizzati anche da ragazzi intorno ai 13-14 anni di età. Da qualche anno la Lego, la famosa industria danese di giocattoli, ha sviluppato un kit di costruzione denominato Lego-MindStorm che permette di costruire buona parte degli automi di Braitenberg (per esempi, demo e altre informazioni si veda il sito: [www.legomindstorms.com](http://www.legomindstorms.com)).

## **2.3. Un Gryllus Maculatus elettronico**

Nel dicembre del 1994, *Science* ha riportato un interessante esperimento condotto su un automa che tentava di replicare dei comportamenti delle femmine di *Gryllus Maculatus* [Bains 1994]. La rivista ha descritto il lavoro di ricerca svolto presso l'Università di Edinburgo dalla psicologa animale Barbara Webb. La studiosa inglese è impegnata a spiegare il comportamento di accoppiamento dei grilli. In particolare, nello studio in questione, la Webb cercava di capire come la femmina della specie *Gryllus Maculatus* localizza e raggiunge il maschio basandosi sul richiamo emesso da quest'ultimo. La faccenda si complica in quanto il suono prodotto dal maschio non è continuo, ma è composto da "sillabe", brevi suoni, che sono ripetuti ad intervalli regolari. La questione se il grillo femmina raggiunge il suo compagno grazie ad una complessa rappresentazione cognitiva del suo "spazio di vita" oppure attua un semplice comportamento riflesso è ancora ampiamente dibattuta. Barbara Webb propende per la seconda ipotesi ed ha dimostrato la validità del suo punto di vista costruendo un piccolo robot che reagisce in modo molto simile a quello dell'insetto.

L'organismo artificiale della Webb ha due ruote governate da altrettanti motori, il suo apparato sensoriale è costituito da due ricevitori di suoni collocati nelle parti anteriori laterali, da alcuni sensori all'infrarosso e di contatto. Alcune regole scritte nella memoria del

computer di bordo del robot rappresentano il "cervello" della macchina e permettono all'organismo artificiale di riconoscere ed evitare ostacoli, individuare e seguire uno stimolo sonoro simile al canto di richiamo sessuale del grillo maschio. Il robot, malgrado la semplicità del suo "cervello", esibisce un comportamento pressoché identico a quello degli insetti reali. Inoltre, sorprendentemente, produce strategie comportamentali altrettanto efficienti anche in condizioni non previste dall'originario disegno sperimentale. Per esempio, se nell'ambiente sono collocati due registratori che emettono il medesimo canto di richiamo, l'organismo artificiale si orienta e ne raggiunge solo uno. Lund *et al.* [1997a] hanno mostrato in modo abbastanza impressionante la potenza della spiegazione della Webb. Hanno osservato il comportamento combinato di un organismo artificiale con quello di un animale reale. Un maschio di grillo in condizione di eccitazione sessuale era posto in una gabbia, ad una distanza di circa 5 metri veniva invece collocato l'organismo artificiale. Il grillo maschio veniva raggiunto dall'automa in qualsiasi condizione. C'è da dire che l'esperimento si fermava a questo aspetto preliminare del comportamento, l'accoppiamento non aveva luogo.

Come molti critici hanno sottolineato, a rigore di logica, gli studi della Webb non dimostrano in maniera definitiva se effettivamente i grilli producono il loro comportamento in base a delle catene tutto sommato abbastanza semplici di stimoli associati a risposte oppure ricorrendo a complesse rappresentazioni cognitive. Si afferma, comunque che, almeno in linea di principio, le femmine di grillo potrebbero individuare e raggiungere il proprio "partner" grazie a degli schemi senso-motori molto elementari.

### **3. Gli Automi adattivi**

Come già detto nella parte iniziale di questo saggio, la sfida scientifica e tecnologica nella costruzione degli organismi artificiali consiste nel dotarli della maggiore autonomia possibile. Finora abbiamo descritto degli automi con un'autonomia molto relativa: una volta progettati e realizzati da un essere umano possono liberamente agire, fino ad esaurimento delle loro scorte energetiche, nel mondo fisico senza alcun intervento esterno. Tutto sommato sono ancora degli oggetti più vicini alle nostre tradizionali macchine che a dei veri e propri organismi artificiali. Questi automi, fatta salva la normale usura fisica, saranno sempre uguali a se stessi, non potranno mai modificarsi, riprodursi, adattarsi alle mutevoli condizioni ambientali. Il cambiamento, in realtà, è la caratteristica pervasiva del vivente. La vita emerge da un incessante dinamismo che coinvolge tutto e tutti in qualsiasi scala sia temporale che spaziale. Il lavoro di ricerca quindi sta aggredendo proprio questo aspetto della vita: replicare i processi che sottendono il cambiamento sia in senso filogenetico che in senso ontogenetico. Il punto di arrivo di questa prospettiva sarà quello di sviluppare popolazioni di automi che possono vivere, riprodursi, morire indipendentemente dall'intervento umano. In sostanza, si punta a ricostruire il processo evolutivo biologico su oggetti non-biologici o, come vedremo avanti, solo in parte costituiti da materiale biologico. Questa è la direzione di ricerca della *Robotica Evolutiva* [Nolfi e Floreano 2000], una disciplina abbastanza nuova che comincia a produrre dei primi significativi risultati. Con la Robotica Evolutiva il ricercatore comincia a trasformarsi da *progettista* di macchine ad *allevatore* di automi. Al fine di rendere chiara al lettore le fasi di sviluppo di un progetto di Robotica Evolutiva descriviamo una delle versioni più semplici di queste tecniche di "allevamento" artificiale di robot. Una popolazione iniziale di automi (prima generazione) viene costituita attribuendo in modo casuale ad ogni individuo le proprie caratteristiche distintive (per esempio il numero ed il tipo di sensori, alcune regole di comportamento, l'architettura della rete neurale, la posizione delle ruote, ecc.). L'insieme di tutte queste caratteristiche individuali rappresentano a tutti gli effetti il *genotipo* dell'automa. Successivamente, ogni organismo artificiale viene sottoposto ad un compito dato (per esempio raggiungere nel modo più veloce possibile una determinata zona dello spazio). A questo punto, gli individui della prima generazione che, per caso, hanno mostrato maggior

efficienza degli altri vengono selezionati. Da notare che, in questo caso, il comportamento viene ad essere il tratto *fenotipico* su cui lo sperimentatore/addestratore opera la scelta. I genotipi degli individui selezionati vengono *clonati* per un certo numero di volte. Il processo di clonazione tuttavia non è perfetto: è possibile che parte del *genotipo* venga trasferito in modo errato: tale meccanismo riproduce l'azione di ciò che accade in natura allorché viene operata una "*mutazione genetica*". I cloni (o *figli*) costituiscono la seconda generazione. Il processo di selezione e riproduzione può essere iterato un numero arbitrario di volte. Dal punto di vista pratico, condurre un solo esperimento di robotica evolutiva su automi fisici potrebbe richiedere anche mesi. Per ovviare a tale problema, i ricercatori realizzano parte dell'evoluzione in simulazioni su computer in cui si ricostruiscono le caratteristiche salienti degli ambienti, degli automi e dei processi di addestramento. I genotipi evolutisi in questi ambienti digitali vengono poi trasferiti negli automi fisici. In sostanza la simulazione viene ad essere una specie di incubatore dove è possibile velocizzare dei processi evolutivi che nel mondo fisico potrebbero richiedere tanto tempo da rendere impraticabile qualsiasi emergenza di comportamenti significativamente complessi [Nolfi *et al.* 1994; Miglino *et al.* 1996].

Il saggio di Raffaele Calabretta ha già descritto uno degli esperimenti di Robotica Evolutiva che ha prodotto un organismo artificiale dal comportamento abbastanza complesso. Stefano Nolfi ha addestrato un piccolo robot mobile dotato di un semplicissimo apparato sensoriale e di un rudimentale braccio meccanico a localizzare e spostare degli oggetti disseminati casualmente all'interno di una arena [Nolfi 1997]. Apparentemente il comportamento dell'automa potrebbe essere spiegato con il ricorso ad una ricca attività cognitiva fondata sull'attivazione differenziale di diversi moduli cognitivi. Per esempio si potrebbe ipotizzare che il comportamento dell'automa potrebbe essere sostenuto dapprima da un modulo dedicato al riconoscimento dell'oggetto, poi da una struttura neuro-cognitiva dedicata alla prensione dell'oggetto e così via. In effetti, molti psicologi cognitivi a cui è stato mostrato il comportamento dell'automa hanno tentato di costruire un modello di spiegazione basato sulla logica analitica e sequenziale appena descritta. In realtà, grazie ad uno studio molto attento della *psicologia dell'automa*, Stefano Nolfi ha potuto mostrare come l'organismo artificiale basasse la sua efficienza comportamentale sull'attuazione di uno schema senso-motorio che integrava parallelamente e dinamicamente nel tempo tante funzioni cognitive (localizzazione, prensione, spostamento, ecc.). Inoltre, tale competenza non era mediata da nessuna rappresentazione dell'ambiente e degli oggetti dispersi nell'ambiente. In poche parole: la soluzione appresa dall'automa era molto più semplice di quanto teorizzato dagli psicologi.

Dal punto di vista della ricerca psicologica, i risultati e la metodologia seguita da Nolfi nell'esperimento sommariamente descritto meritano una riflessione. È che il processo di addestramento è stato preceduto da una massiccia opera di progettazione. L'ambiente, le caratteristiche fisiche dell'automa, l'architettura del sistema di controllo erano state pensate e stabilite prima di qualsiasi processo evolutivo. L'addestramento interessava solo ed esclusivamente l'aggiustamento di qualche parametro del sistema di controllo che andava ad influire sull'efficienza del comportamento dell'automa. È innegabile che l'autonomia dell'organismo artificiale risulta essere molto limitata. Comunque, malgrado tutti questi elementi progettati e preordinati, la comprensione del comportamento emerso dal processo di evoluzione simulata era raggiunta solo grazie ad osservazioni e analisi sistematiche del tutto simili a quelle adottate da un normale psicologo animale. In sostanza, il ricercatore dapprima ha allevato l'automa, poi ne ha verificato l'efficienza comportamentale e *dopo*, a processo di addestramento avvenuto, ha tentato di capire la logica che ne sottende il comportamento. Questo è il punto di svolta. Per la ricerca scientifica tradizionale i modelli nascono dalla comprensione completa del fenomeno oggetto di studio. È inconcepibile che la loro logica debba essere svelata *dopo* il loro corretto funzionamento. Viceversa, gli automi prodotti

dall'approccio emergentista non possono essere considerati dei modelli ma occorre trattarli come dei veri e propri organismi artificiali e l'apparato metodologico sviluppato dalla ricerca psicologica può venire in soccorso alle scienze dell'artificiale. Ed infatti, le analisi fondamentalmente di psicologia animale condotte da Nolfi sull'organismo artificiale hanno mostrato come l'automa avesse acquisito dei perfetti schemi senso-motori che gli consentivano di agire in modo efficiente. Cosa hanno portato questi risultati al nostro "sapere" psicologico? Si è empiricamente mostrata la validità e la potenza del costrutto ipotetico di "conoscenza senso-motoria" sviluppato da Piaget [1971, trad. it. 1986] che, oltre ad essere un meccanismo adattativo fondamentale per gli organismi naturali, risulta essere basilare anche nei processi di apprendimento che coinvolgono i sistemi artificiali.

Dal punto di vista epistemologico, nel caso sopra descritto, quindi, lo studio attento e minuzioso dell'attività dell'automa ha consentito di portare altre conferme e prove sperimentali ad un costrutto ipotetico ben definito da una teoria psicologica. C'è da dire che, a parte questo aspetto fondamentalmente *confermativo*, la costruzione/addestramento degli automi può portare anche alla definizione di nuovi costrutti circa processi e attività non considerati da nessuna preesistente teoria. Infatti la possibilità di smontare e osservare l'organismo artificiale in condizioni perfettamente controllabili e ripetibili, consente al ricercatore di svelarne gli intimi meccanismi di funzionamento e, a volte, questi meccanismi potrebbero essere del tutto diversi da quelli ipotizzati da qualsiasi teoria scientifica.

La Psicologia degli Automi nasce, quindi, da una fertile contaminazione tra tecnologia, teorie cognitive e metodi di ricerca psicologica. C'è da dire che le conoscenze psicologiche ottenute dagli studi sugli automi sarebbero enormemente rafforzate se fossero orientate ad osservare gli organismi artificiali alle prese con compiti standard correntemente usati nelle ricerche etologiche e/o di psicologia animale. Anche in questo caso cominciano a compiersi i primi passi in questa direzione. Nelle pagine seguenti proveremo a descrivere nel dettaglio un esperimento di robotica evolutiva che confronta i comportamenti di un automa con quelli dei pulcini di due giorni di vita.

### **3.1. Il Gallus-Gallus Domesticus e l'automa Khepera**

Alcuni studi molto accurati condotti su dei Gallus-Gallus Domesticus (più noti come pulcini) di solo due giorni di vita hanno mostrato come questi animali fossero capaci di compiere semplici comportamenti di *detour* o aggiramento senza nessuna forma di apprendimento [Vallortigara e Zanforlin 1984; Regolin *et al.* 1994]. Tale condotta consiste nel raggiungimento di un obiettivo seguendo traiettorie che, per specifiche condizioni ambientali (ostacoli, differenti livelli di luminosità, ecc.), deviano da un percorso di approccio ottimale [Chiapus 1987]. Per esempio, quando dobbiamo raggiungere un particolare luogo della nostra città e, a causa di lavori in corso, siamo costretti a trovare una deviazione al nostro abituale e ottimale percorso, allora in quel caso compiamo un comportamento di aggiramento. Il *detour* potrebbe essere un "sintomo" dell'esistenza di una rappresentazione mentale dello spazio. Infatti, in mancanza del contatto percettivo con il target (ovvero il luogo da raggiungere) la ripianificazione dell'azione di avvicinamento potrebbe essere sostenuta da una qualche forma di "immagine" mentale dell'ambiente.

Regolin e colleghi [1994] hanno sperimentalmente stabilito che "...i pulcini si orientano correttamente verso un obiettivo anche in assenza di qualsiasi indizio sensoriale. Tale comportamento si fonda sull'abilità di *mantenere una rappresentazione* dell'obiettivo almeno per qualche tempo dopo la sua scomparsa dal campo percettivo dell'animale....." (il corsivo è nostro).

Certo il compito a cui erano sottoposti i pulcini era abbastanza semplice: gli animali venivano collocati in una gabbia da cui potevano vedere un cilindro rosso. Per i pulcini il rosso è associato alla chioccia, quindi viene ad essere uno stimolo altamente attraente. Ai lati

della gabbia vi erano due aperture. Gli animali, quindi, aggiravano la barriera e uscendo da una delle due porte raggiungevano il target. L'operazione di aggiramento faceva perdere loro il contatto percettivo con il cilindro rosso. In questo particolare momento cosa succede nella "testa" del pulcino? Come fa a *mantenere* la rappresentazione del target? "Immagina" la posizione dello stimolo e di se stesso nello spazio e successivamente programma l'azione? Adotta delle strategie cognitive che fanno a meno di rappresentazioni mentali?

Lo studio sugli animali si ferma agli aspetti comportamentali del fenomeno. L'attività cognitiva che sostiene la condotta, quindi, viene inferita ragionando esclusivamente su indici comportamentali. Non è un limite della ricerca, esistono delle ragioni pratiche per cui sarebbe obiettivamente complicato, anche se non impossibile, entrare "fisicamente" nel cervello del pulcino.

Dal punto di vista della *Psicologia degli Automi* a questo punto potremmo domandarci: esistono degli organismi artificiali in grado di fare le stesse cose dei pulcini? Se sì, quale strategie cognitive (o neuro-cognitive) usano?

Khepera [Mondada *et al.* 1993], un piccolo micro-robot mobile, è stato addestrato a raggiungere dei target aggirando eventuali ostacoli che potrebbe incontrare sul suo cammino [Miglino *et al.* 1998; Walker e Miglino 1999]. L'automa è un oggetto di forma circolare, largo 5,5 cm. e alto nove centimetri. Due ruote, ognuna azionata da un motore, sono il suo apparato motorio. Il sistema sensoriale è molto semplice ed è costituito da otto sensori all'infrarosso, tutti posizionati lungo la circonferenza del robot ad un'altezza di 0,5 centimetri dalla base, e da una telecamera lineare posizionata a 6 cm. dal livello delle ruote. Ogni sensore all'infrarosso si attiva in presenza di un oggetto ed ha un campo di attivazione di solo 3 cm. di profondità e di circa 10 gradi di ampiezza. La telecamera ha campo visivo profondo circa un metro e ampio esattamente 36 gradi. Khepera ha un cervello artificiale costituito da una rete neurale artificiale. La fig. 7.2 rappresenta l'architettura del sistema nervoso dell'automa.

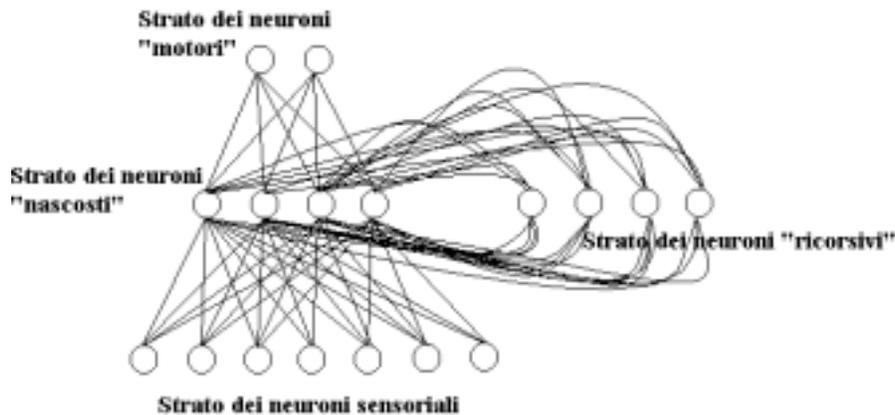


Fig. 7.2. L'architettura del sistema nervoso dell'automa Khepera

Ad un dato tempo  $t$ , il primo strato di unità sensoriali viene attivato dai valori dei sensori all'infrarosso e della telecamera. Tali valori vengono immediatamente e parallelamente trasferiti, tramite le "connessioni sinaptiche", allo strato delle unità nascoste. Queste unità elaborano il segnale sensoriale e spediscono tale informazione allo strato delle unità motorie e a quello delle unità ricorsive. L'attivazione delle unità motorie determina la quantità di potenza impressa ad ogni ruota, mentre le unità ricorsive scaricano al tempo  $t+1$  i risultati della loro elaborazione nello strato delle unità nascoste. Da notare che lo strato delle unità ricorsive consente di *mantenere* una traccia temporale dell'attività di elaborazione

all'interno del circuito neurale. Mancando questo strato di elaborazione l'automa risponderebbe ad un determinato stimolo sempre con una sola risposta. In sostanza non ci sarebbe la possibilità di modulare il comportamento di orientamento spaziale in funzione del treno di stimoli esperito durante gli spostamenti dell'automa nell'ambiente.

Khepera si trova ad agire in un ambiente in cui ci sono degli oggetti alti 3 cm. e altri di 7 cm.; i target sono rappresentati da questi ultimi. L'automa, considerate le sue caratteristiche fisiche, si trova in una situazione di conflitto quando percepisce contemporaneamente un oggetto "basso" con i sensori all'infrarosso e uno "alto" con la telecamera lineare. Questo è il caso in cui deve rispondere con un comportamento di *detour*. L'addestramento è stato condotto con le tecniche di robotica evolutiva descritte sopra. Il genotipo degli individui era rappresentato dai valori delle connessioni del sistema nervoso. Le mutazioni genetiche, quindi, andavano a modificare, di clone in clone, solo la forza e il segno delle connessioni sinaptiche tra le unità della rete neurale che controllava il comportamento dell'automa. Dopo la sessione di addestramento evolutivo, l'automa che presentava il migliore indice di avvicinamento agli oggetti target (ovvero quelli alti) veniva osservato in un ambiente che riprendeva esattamente la geometria dell'arena utilizzata negli esperimenti con i pulcini. Khepera produceva i medesimi indici comportamentali dei piccoli animali. Al fine di comprendere la genesi di questo comportamento, gli sperimentatori sono "entrati" nel cervello di Khepera. Varie tecniche di osservazione e modificazione (per esempio delle lesioni di parte del sistema nervoso) hanno permesso di evidenziare che l'automa basa essenzialmente la sua azione su due capacità senso-motorie: a) evitare (aggirare) un qualsiasi oggetto "basso"; b) dirigersi verso un oggetto "alto". La condotta (a) aveva la priorità su quella (b). Le unità ricorsive consentivano di mantenere traccia delle stimolazioni sensoriali per brevissimi intervalli di tempo in modo da riprendere il contatto visivo con il target quando per una qualunque causa scompariva dal campo sensoriale della telecamera. In sostanza, il comportamento di *detour* era basato sulla perfetta coordinazione dello schema "percezione - azione - percezione". Ad ogni stimolo visivo seguiva l'elaborazione a livello neurale di una particolare azione che, a sua volta, selezionava un'altra stimolazione e così via. L'azione veniva ad essere il meccanismo di base su cui si fondava la rappresentazione neuro-cognitiva dell'ambiente. La competenza era prodotta quindi da una organizzazione dinamica dell'attività neurale più che da una "immagine" mentale statica dell'ambiente di vita dell'automa. Da un punto di vista metaforico si potrebbe dire che la rete neurale abbia incamerato tante fotografie (rappresentazioni) parziali dell'ambiente, l'azione e l'attività delle unità ricorsive legavano temporalmente queste "vedute" in un tutt'uno. L'automa Khepera non ha una rappresentazione stabile e duratura del target. In altre parole, la sua attività non è mediata da una "mappa" onnicomprensiva del suo ambiente di vita. Dal punto di vista teorico questo potrebbe essere un risultato interessante. Come è noto, nella ricerca psicologica, la questione sulla natura e la tipologia delle rappresentazioni neuro-cognitive sottostanti al comportamento di orientamento spaziale negli animali e negli uomini è accessissima. Per esempio Gallistel [1990] sostiene che i comportamenti più complessi, come per esempio quelli di *detour*, devono essere sostenuti da una mappa cognitiva euclidea dello spazio. Questo appare non essere vero per Khepera. Ma basta questo per dire che non è vero nemmeno nel caso dei pulcini? Certamente no. Abbiamo già detto che le specificità del nostro organismo artificiale e del processo di addestramento avrebbero potuto far *emergere* delle strategie che, anche se identiche dal punto di vista comportamentale a quelle dei pulcini, potrebbero essere fondate su una logica del tutto differente. D'altra parte, questi risultati mostrano che alcuni comportamenti di *detour* potrebbero essere prodotti senza ricorrere a nessuna rappresentazione euclidea dello spazio. A questo punto la "palla" rimbalza agli psicologi animali. Infatti solo ulteriori osservazioni direttamente sui pulcini possono

consentire di stabilire in che modo effettivamente essi si "rappresentano" il loro spazio di vita.

### **Conclusione**

Riassumendo. Si ritiene che un modello formale spieghi un fenomeno catturandone le caratteristiche salienti e ignorandone i dettagli. In questo senso ogni modello deve essere una semplificazione della realtà. Potremmo allora dire che l'automa Khepera è un modello del Gallus-Gallus, in fin dei conti spiega e predice gli indici comportamentali di quest'ultimo. Potrebbe essere una interpretazione legittima ma che non condividiamo. La ragione risiede in quello che Sovrano e Vallortigara [in questo volume] chiama la specificità delle intelligenze. Un comportamento, una strategia cognitiva, una particolare architettura biologica si evolve ed emerge sfruttando e indirizzata dai "dettagli". Ciò vale per qualsiasi sistema evolutivo, artificiale e non. Khepera o un qualsiasi altro "organismo artificiale", quindi, non può essere considerato un modello di nessun altro animale. I "dettagli" fisici dell'automa e del processo di addestramento potrebbero aver indirizzato l'emergenza di una struttura neuro-cognitiva di cui potrebbe non esservi traccia in natura. Quindi, più che parlare di "modello" pensiamo che sia più corretto trattare l'automa come un organismo a se stante con una propria autonomia. Khepera presenta dei comportamenti simili a quelli dei pulcini e conosciamo i meccanismi sottostanti alla produzione di tale condotta. Da questi dati di fatto, però, non possiamo assolutamente concludere che i pulcini adottano la medesima logica dell'automa. Sarebbe un salto logico non giustificabile. Per stabilire quanto è generalizzabile la strategia neuro-cognitiva appresa da Khepera occorre necessariamente costruire delle esperienze *ad hoc* sugli altri organismi naturali. In pratica si tratta di compiere dei tradizionali studi di Psicologia Comparata. La novità è questa: c'è un nuovo organismo da studiare, un organismo creato in dall'uomo.

Insomma, l'approccio emergentista alla modellistica scientifica tenta di riprodurre l'autonomia dei sistemi viventi invece di catturare l'architettura e la logica dell'attività cognitiva. I lavori di Tolman, Braitenberg e Webb, presentati nella prima parte di questo saggio, sono ancora il prodotto di un approccio tradizionale alla modellistica. La loro dimensione innovativa deve rintracciarsi nella proposta di un modello olistico dell'organismo che sintetizza in un solo sistema la componente sensoriale e motoria e che agisce nel mondo fisico. La simulazione dei processi di apprendimento e di adattamento applicati agli automi fisici, come nel caso della Robotica Evolutiva, rappresenta un cambiamento epistemologico radicale nelle spiegazioni dei fatti della natura. I modelli smettono di essere delle rappresentazioni della realtà per acquistare lo status di esistenze autonome. È stato già detto che l'autonomia degli attuali organismi artificiali è molto limitata. Per esempio, nel caso del comportamento di *detour* l'unica libertà lasciata a Khepera era quella di organizzare i propri circuiti neurali. Ma siamo appena all'inizio. Degli studi molto recenti stanno provando a far evolvere, oltre il comportamento degli automi, anche il loro corpo [Lund *et al.* 1997b; Lipson e Pollack 2000]. Lo studio della genesi della morfologia degli automi comincia a convogliare l'interesse di una larga parte della ricerca interdisciplinare. Parallelamente, si sta avviando la costruzione di organismi artificiali tramite tecniche di ibridazione. In sostanza vengono assemblate in un solo sistema delle componenti biologiche, elettroniche e meccaniche. Reger *et al.* [2000] hanno prelevato una parte del cervelletto della lampreda, un pesce marino, e poi lo hanno connesso con l'apparato sensoriale e motorio di Khepera. Questo ibrido robot/lampreda veniva addestrato a compiere dei semplici compiti di orientamento spaziale. In pratica, il robot sfruttava le capacità neuro-cognitive del pezzo di cervello del pesce e quest'ultimo aveva la possibilità di interagire con il mondo tramite la struttura hardware del robot.

Queste ultime ricerche rappresentano un modo di fare scienza del tutto nuovo. Il contatto e la contaminazione tra diverse discipline, metodologie e tecnologie ci sta portando alla realizzazione di "entità" che "creiamo" ma che non comprendiamo fino in fondo. Cominciamo ad essere nella situazione degli allevatori o dei coltivatori che da una parte controllano e indirizzano per un determinato fine il corso della vita e da un'altra non possiedono una conoscenza piena dei meccanismi profondi che sottendono l'evoluzione degli esseri viventi di cui si prendono cura. Di fatto, queste entità artificiali che stanno cominciando ad apparire nei nostri laboratori sono contemporaneamente prodotto e oggetto della riflessione epistemologica. Da una parte è innegabile che siano dei *prodotti*, in quanto provengono dall'integrazione di tante conoscenze scientifiche circa i processi evolutivi, neurali, cognitivi degli esseri viventi. È anche vero che sono degli *oggetti*, in quanto per conoscere come realmente funzionano occorre studiarli solo *dopo* averli costruiti/addestrati/allevati. Per questa ragione pensiamo che queste entità non possono essere considerate né modelli che simulano pezzi del reale né tantomeno delle Teorie scientifiche reificate che spiegano i fenomeni della natura. Queste entità saranno a tutti gli effetti dei nuovi esseri viventi o "organismi artificiali". Una *psicologia degli automi* si troverà contemporaneamente a contribuire alla costruzione/creazione del proprio soggetto di studio, l'automa appunto, e a svelare i meccanismi cognitivi grazie ai quali l'automa funziona. Forse questi meccanismi saranno molto differenti da qualsiasi "psicologia" di nostra conoscenza ma l'unico modo per saperlo sarà quello di studiare queste "creature" che cominciano a condividere il nostro mondo. E, forse, la possibilità di addestrare e smontare un organismo completamente creato da noi ci consentirà di arricchire le nostre teorie sull'attività cognitiva sia essa naturale o artificiale.

## Bibliografia

- Bains, S. (1994). Even a Robot Cricket Always Gets Her Mate. *Science*, 266, 1809.
- Baley, J. (1996). *Il Postpensiero*. Garzanti
- Braintenberg, V. (1984). *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Chiapus, N. (1987). *Detour abilities in several species of mammals*. In *Cognitive Processes and Spatial Orientation in Animals and Men*. (Ed. by P. Ellen & C. Thinus-Blanc). Dordrecht: Martin Nijhoff.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. MA, MIT Press
- Lund, H. H., Lee, W.-P., Hallam, J. (1997b) Evolving Robot Morphology. *Proc. of IEEE 4th Int. Conf. on Evolutionary Computation*. IEEE Press, NJ.
- Lund, H. H., Webb, B., Hallam, J. (1997a) A Robot Attracted to the Cricket Species *Gryllus Bimaculatus*. *Proc. 4th European Conf. on Artificial Life*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA.
- Miglino, O., Denaro, D., Tascini, S., Parisi, D. (1998). Detour Behavior in Evolving Neural Networks. *Proceedings of first European Workshop on Evolutionary Robotics*, Parigi 1998, pp 112-125
- Miglino, O., Lund, H. H., Nolfi, S. (1996). Evolving Mobile Robots in Simulated and Real Environments. *Artificial Life 2* (4), 417-434
- Mondada, F., Franzi, E., Ienne, P. (1993). Mobile miniaturisation: A tool for investigation in control algorithms. In *Experimental Robotics III. Lecture Notes and Information Sciences 200*, pp. 510-513. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Nolfi S. (1997). Evolving non-trivial behaviors on real robots: a garbage collecting robot. *Robotics and Autonomous System*, 22: 187-198
- Nolfi, S., Floreano, D. (2000). *Evolutionary Robotics*. MIT Press.

- Nolfi, S., Floreano, D., Miglino, O., Mondada, F. (1994). How to evolve autonomous robots: Different approaches in evolutionary robotics. In Brooks R. A. & Maes P. (a cura di) *Artificial Life IV. Proceedings of the Fourth International Workshop on The Synthesis and Simulation of Living Systems*, pp. 190-197. Cambridge, MA: MIT press.
- Parisi, D. (2000) *Simulazioni*. Il Mulino
- Piaget, J. (1971). *Biology and Knowledge: An Essay on the Relations Between Organic Regulations and Cognitive Processes*. Chicago, University Press
- Reger, B.D., Fleming, K.M., Sanguineti, V., Alford, S., Mussa-Ivaldi, F.A. (2000). Connecting Brains to Robots: The Development of a Hybrid System for the Study of Learning in Neural Tissues. *Seventh International Conference on Artificial Life*, Portland, OR, 1-6 August 2000.
- Lipson, H., Pollack, J. B., (2000) Automatic design and manufacture of robotic lifeforms. *Nature* 406, 974-978,
- Regolin, L. Vallortigara, G, Zanforlin, M. (1994). Object and Spatial Representations in Detour Problems by Chicks. *Animal Behavior*, 48: 1-5
- Thinus-Blanc, C. (1996). *Animal Spatial Cognition*. Singapore: World Scientific
- Tolman, E. C. (1939). Prediction of vicarious trial and error by means of the schematic sowbug. *Psychological Review*, 318-336.
- Vallortigara, G, Zanforlin, L (1986). Position Learning in Chicks. *Behavioral Proceedings*, 12: 32-32
- Walker, R., Miglino, O. (1999). Replicating experiments in "detour behavior" with evolved robots: an A-Life approach to comparative psychology. In *Proceedings of the European Conference on Artificial Life (Ecal99)*, Mit Press
- Webb, B. (1995) Using robots to model animals: a cricket test. *Robotics and Autonomous Systems*, 16, 117-134.