

## **Seconda parte**

### **Applicazioni robotiche**

#### **Mente e corpo nei robot**

*G. Metta, G. Sandini, V. Tagliasco*

##### **1. IL CORPO NEI ROBOT**

“What are little boys made of?  
Snakes and snails and puppy-dogs’ tails  
That’s what little boys are made of!  
What are little girls made of?  
Sugar and spice and everything nice  
That’s what little girls are made of!”

Attraverso questa graziosa breve poesia Bertram Raphael, nel 1976, sottolineava il ruolo del corpo e dell’ambiente nella progettazione dei robot: «Di che sono fatti i robot? Sicuramente la natura dei componenti gioca un ruolo molto importante nel definire il carattere del sistema risultante. In queste prime fasi dell’evoluzione dei sistemi robotici, un grande numero di diversi tipi di componenti vengono provati in diversi laboratori di ricerca». Nella stessa poesia è sotteso anche un riferimento alle tematiche dello sviluppo e dell’interazione con l’ambiente, ma questa è un’interpretazione che potrebbe essere data solo in questo inizio di terzo millennio (se ne parlerà in seguito).

Eppure, ancora oggi, in molti ambienti scientifici si ritiene che progettare una mente per una macchina possa essere possibile anche in assenza di un corpo. Addirittura si pensa che il corpo si debba identificare solo con l’insieme dei dispositivi che costituiscono il supporto fisico (hardware del cervello artificiale) della mente. Secondo questa accezione il corpo – ‘portatore’ di mente – può essere indifferentemente un computer oppure un robot. Eppure la differenza non è solo di natura tecnologica: ove per corpo si intenda una struttura in grado di interagire con l’ambiente attraverso la locomozione, la manipolazione e la percezione, il robot è in grado di offrire a una mente percorsi evolutivi che richiamano quelli verificatisi in molti organismi viventi. I robot, a differenza di altri esseri artificiali devono operare negli stessi ambienti fisici in cui opera o vorrebbe operare l’essere umano (spazio, profondità degli oceani); ci troviamo quindi in presenza di una condivisione degli ambienti di riferimento, che riteniamo di grande importanza nello sviluppo di menti, così come oggi le andiamo intuendo.

La tesi che vogliamo dimostrare è che la robotica nel sottolineare il ruolo del corpo e della sua interazione con l'ambiente interagisce con le discipline che cercano di capire l'essere umano in due direzioni: da una parte trae ispirazione dalle indicazioni offerte dalla scienza, dall'altra fornisce un formidabile set up sperimentale sul quale teorie e intuizioni possono venire implementate e verificate.

## **2. LA ROBOTICA NELLA DUPLICE VESTE DI ISPIRATRICE E FRUITRICE DEGLI STUDI SULLA MENTE**

La robotica è l'insieme delle discipline che si pongono come obiettivo la costruzione di esseri artificiali; e non tutte queste discipline hanno caratteristiche esclusivamente tecnologiche. Succede spesso per i manufatti costruiti dall'uomo. Prodotti dell'ingegneria danno luogo a discipline che, di fatto, acquistano lo status di scienza: scienza delle costruzioni, scienza dei materiali. Così come le scienze della vita si interessano dello studio degli organismi viventi, così la robotica si propone di costruire e progettare esseri artificiali mutuando da scienza e tecnologia suggestioni e competenze di cui ha bisogno. Dagli stupendi automi meccanici del Settecento, fatti di legno e cuoio, ai cagnolini-robot per l'intrattenimento della Sony, ogni epoca ha avuto i robot che sono l'espressione più elevata del particolare momento tecnologico in cui sono stati costruiti.

La robotica è tecnologia che incorpora il superamento del modello della "catena lineare della ricerca": dalla ricerca di base e fondamentale a quella applicata, da questa alla ricerca industriale e allo sviluppo precompetitivo. In ogni fase dello sviluppo scientifico e tecnologico, la robotica è sintesi e contemporaneità di varie discipline scientifiche e tecnologiche che mutuamente interagiscono e si fertilizzano.

La robotica non può aspettare i tempi lunghi della ricerca nell'ambito delle neuroscienze, ma non può ovviamente non tener conto di quello che è stato raggiunto dalla ricerca di frontiera: la robotica deve riuscire a dar luogo a un organismo artificiale completo, colmando in maniera empirica le lacune di conoscenze in un certo momento storico. Anzi, a volte, in questa sua operazione di modellistica globale dell'organismo biologico che vuole emulare, la robotica è in grado di offrire modelli da cui si possono evincere eventuali carenze nei "fatti" che la scienza mette a disposizione.

Oggi si dischiude la fase che potrebbe venire denominata con lo slogan "la robotica ai tempi della genomica e delle nanotecnologie". Nel momento in cui i risultati resi via via disponibili con la decrittazione del DNA e con sofisticate tecniche di indagine cerebrale suggeriscono di rivisitare le neuroscienze e la psicologia della percezione e dello sviluppo, è indubbio che anche la robotica sempre più potrà utilizzare le conoscenze acquisite sui meccanismi neurali per la formazione dei corpi e delle menti. Peraltro è indubbio che l'apparire sulla scena di studi sul cervello che sembrano affiancare alla consolidata metafora del cervello-calcolatore quella del cervello ghiandola provoca disagio e incertezza nel costruttore di robot che meglio si muoveva nell'ambito di un paradigma prettamente elettronico-informatico. L'apparire sulla scena delle neuroscienze di nuovi neuropeptidi e del loro ruolo, i rinnovati studi sulla glia e sugli astrociti delimitano scenari con i quali i modelli della mente dovranno inevitabilmente

confrontarsi. Tuttavia, come già accennato, il costruttore di robot non può aspettare: deve scegliere le suggestioni che ritiene meglio aderenti alle possibilità che tecniche, tecnologie e materiali mettono a disposizione, anche a costo di rivisitare vecchie teorie, specie quando queste sono state avvallate da recenti approcci disciplinari. È il caso della teoria dello sviluppo cognitivo proposta originariamente da Piaget.

Nell'ambito della robotica alcuni studiosi hanno acquisito l'idea che per poter costruire un robot autonomo sia opportuno dargli un corpo capace di adattarsi, di imparare e di evolvere (robotica epigenetica). Come avviene per i cuccioli degli esseri umani, così anche per i robot si schiudono gli scenari dello sviluppo e dell'apprendimento (*babybot*). Per transitare dai robot con comportamenti stereotipati a quelli in grado di modificare il loro comportamento, il robot deve svilupparsi e apprendere facendo esperienza del mondo che lo circonda. Quindi l'avvento della robotica epigenetica, della robotica cognitiva e della coscienza artificiale non costituisce un semplice avvicendamento rispetto alle consolidate tematiche delle discipline che si ponevano il problema di costruire robot intelligenti. Si assiste, invece, a un riposizionamento dei saperi alla base delle tecnologie su cui costruire i robot.

### 3. I REFERENTI BIOLOGICI DELLA ROBOTICA

La robotica spesso si è ispirata, più o meno consciamente, alla biologia. A volte ha cercato di emulare le prestazioni più sofisticate dell'essere umano (sfruttando la mediazione dell'intelligenza artificiale); altre volte ha tratto ispirazione da organismi relativamente semplici (richiamandosi alla prima cibernetica e alle reti neurali).

Così il robot, come altri "semplici" organismi biologici, viene costruito su misura per l'ambiente in cui deve operare. Il robot conosce dell'ambiente quello che gli viene permesso dai suoi sensori, dai suoi attuatori e dall'interazione che ha avuto con l'ambiente. Non esiste un ambiente valido per tutti: per l'essere umano, per il *caenorhabditis elegans*, per il robot fatto di acciaio e silicio, per il pipistrello, per la zecca. I riferimenti al pipistrello e alla zecca non sono casuali; l'ambiente del pipistrello comprende aspetti della realtà alle quali l'essere umano non può accedere. La zecca, citata dall'etologo Jakob Johann von Uexküll, ha un ambiente all'insegna della parsimonia e dell'estrema efficienza.

La zecca femmina, dopo essere stata fecondata, grazie alla sua pelle fotosensibile riesce a dirigersi sulla cima di un piccolo ramo o di un arbusto. Lì aspetta, a volte addirittura per anni, che il suo destino si compia; il suo metabolismo è molto rallentato, la sua vita quasi sospesa. Lo sperma che ha ricevuto all'atto della fecondazione rimane racchiuso in capsule che si apriranno solo quando il sangue di un mammifero raggiungerà il suo stomaco. La zecca aspetta che qualche molecola di acido butirrico (una delle molecole presenti nella traspirazione dei mammiferi) arrivi al suo appropriato organo sensoriale; in quel preciso istante la zecca si precipita verso l'origine dell'acido butirrico, o meglio si lascia cadere sull'oggetto del suo desiderio. Nella zecca non si parla di odore: l'odore della traspirazione, così come lo intende l'essere umano, non è la molecola dell'acido butirrico. Una volta che i sensori della zecca l'avvertono che è atterrata, comincia a muoversi alla ricerca di un punto caldo. L'oggetto che emette

acido butirrico deve essere caldo; in questo caso la zecca penetra nella pelle del mammifero con la testa e comincia a succhiare il fluido che trova, purché sia caldo: qualunque sia il fluido che trova (anche se non è sangue). La zecca non è dotata di organi che riescano a discriminare il tipo di fluido. Dopo essersi satollata di sangue, la zecca depone le uova e muore. La zecca, intesa come essere robotico, ha prestazioni incredibili (tenuto conto delle sue ridotte dimensioni). Riesce a conseguire i suoi obiettivi in ambienti diversi (dal bosco al vagone ferroviario) con adeguata flessibilità, riuscendo ad arrampicarsi su alberi e su abiti e poltrone con eguale disinvoltura, evitando di interrogarsi se si tratta di foglie o di decorazioni di seta; è in grado di riprodursi e prima di farlo si garantisce di avere le risorse sufficienti per portare a termine il compito; è dotata di sensori e attuatori che coordina sapientemente; ha obiettivi e sub-obiettivi chiari e definiti e piani di azione adeguati. Si può dire che la zecca abbia una mente? E se si riuscisse a costruire un robot-zecca, potremmo anche in esso individuare una mente? Il costruttore di robot alla continua ricerca di suggestioni e di suggerimenti non ha potuto evitare di porsi le domande che, da sempre, hanno affascinato gli studiosi: la mente è qualcosa che emerge con l'essere umano, sostanzialmente con l'apparire sulla scena dell'evoluzione del linguaggio, o è qualcosa che l'essere umano condivide con altre specie, con altri organismi biologici? La robotica, finora, non ha mai fatto una riflessione articolata su una "eventuale" mente nei robot, ma non è insensibile alle tematiche della mente\_cervello, mente\_corpo, mente\_corpo\_ambiente. In alcuni contesti i costruttori di robot sottolineano il ruolo del corpo e dell'interazione corpo\_ambiente nei robot per caratterizzarsi rispetto altri settori disciplinari contigui più orientati alla simulazione e più vicini all'intelligenza artificiale. Tuttavia, così facendo, sembrano porsi come candidati per superare la metafora del cervello come unico depositario della mente, proprio per il loro sottolineare il ruolo e l'importanza del corpo nella sua interezza. I neurobiologi hanno rintracciato nel Dna umano interi pezzi del Dna del moscerino della frutta. Prima o poi si potrà verificare fino a che punto pezzi del Dna della zecca saranno rintracciabili nel Dna umano. Ancora più promettenti sembrano essere gli scenari dischiusi dalla constatazione del grande ruolo che ha il Rna nello sviluppo di un organismo che interagisce con l'ambiente (dal genoma al trascrittoma). «Per capire meglio di che portata siano le conseguenze di questa ricerca si può ricorrere a una metafora: - sottolinea Andrea Ballabio, direttore dell'Istituto Telethon di genetica e medicina di Napoli - immaginiamo che i geni siano lampadine di diversi colori. Queste lampadine producono luci (proteine) di colore diverso. Ma non basta: le lampadine possono emanare luce intensa o fioca, essere accese o spente, accendersi solo in una particolare fase della vita, come la nascita o la vita embrionale, oppure accendersi in un certo momento in una certa stanza (cioè far codificare per una proteina in un organo piuttosto che in un altro) o in tempi diversi e così via, in una complicatissima armonia. E che cosa governa e rende possibile tutto questo sistema? Ovviamente l'impianto elettrico: circuiti, reostati, interruttori. Ecco, il trascrittoma può rappresentare tutto questo. E ora sappiamo che è lì che c'è molto da cercare e da trovare».

Gli studiosi di robotica aspettano con ansia dai decrittatori del Dna delle zecche come l'evoluzione, attraverso il mirabile gioco tra Dna, Rna e ambiente sia riuscita a dare "credenze" e "nozioni di fisica ingenua" al terribile animaletto. La zecca "sa" che la luce viene dall'alto; "sa" che esiste la legge di gravità e per questo motivo sale in

alto verso la luce per poter poi cadere sulla preda, lasciando il comodo sostegno del ramoscello su cui è posizionata da lungo tempo; “ritiene” ragionevole che se c’è dell’acido butirrico in giro (escludendo l’ipotesi di essere capitata tra le mani di un perfido ricercatore) sicuramente ci sono ottime probabilità che ci sia vicino un mammifero con del buon sangue caldo; pur non avendolo mai sperimentato precedentemente, “sa” che una volta atterrata tra folti peli o su pelle vellutata dovrà muoversi per scavare il suo personale accesso alla fonte di nutrimento. Uno scrittore di fantascienza potrebbe facilmente inventarsi un racconto mettendosi nei panni di un personaggio, fuori dal tempo e dallo spazio, alla ricerca disperata di una tana in cui poter finalmente mettere al mondo i figli che custodisce gelosamente nel suo ventre: solo, alla fine del racconto, utilizzando uno dei classici *escamotage* della fantascienza l’Autore ci rivelerebbe che l’essere su cui è imperniato il racconto è semplicemente una zecca.

#### 4. IL ROBOT CHE SI SVILUPPA

Se si esamina la letteratura sulla psicologia e sulla psicologia dello sviluppo negli anni Cinquanta e Sessanta si avverte uno stile scervo da ogni riferimento a ipotetici *hardware* e *software* presenti nel sistema nervoso dell’organismo in via di sviluppo. Le parole “crescita”, “sviluppo” e “maturazione” apparivano nei manuali e nei testi di psicologia, anche se, a volte, erano usati quasi come sinonimi. Non mancava mai in quei manuali, che ormai sono stati eliminati dagli scaffali, l’immagine, in bianco e nero, di Konrad Lorenz (stivali, mani in tasca e secchiello sotto il braccio) che camminava, mentre una fila di sette paperette tagliava diagonalmente, in modo magistrale da un punto di vista dell’estetica fotografica, il vasto prato con gli alberi sullo sfondo. Riflessi, istinti, imprinting, maturazione neurale, pratica, natura e cultura (*nature and nurture*) e ambiente, condizionamento, rinforzo, motivi e motivazioni erano i termini con i quali le matricole dei grandi politecnici nordamericani dovevano confrontarsi ancora (o già!) quarant’anni fa. L’ultimo terzo del manuale era dedicato allo sviluppo della “persona”: la prima infanzia, il secondo anno, la prima fanciullezza, quella matura, l’adolescenza, la maturità, la vecchiaia. A questo modello di riferimento all’essere umano, basato sullo sviluppo, si sarebbero potuti ispirare i costruttori di robot dei grandi politecnici. Invece il modello veicolato dalla fantascienza era quello dell’adulto, già formato, possibilmente ispirato alla cultura maschile e bianca: il modello del *blue collar worker*, l’incredibile carpentiere costruttore di grattacieli o il magico meccanico assemblatore di automobili. Anche i grandi scrittori di fantascienza - precursori dell’essere artificiale, progettato per lavorare - avevano veicolato l’idea della costruzione di robot, già adulti, già pronti a essere utilizzati come schiavi da lavoro. C’è in Asimov qualche breve accenno all’importanza di una breve permanenza in fabbrica per apprendere una specializzazione; ma niente di più.

Anche l’incontro tra le macchine utensili e le prime applicazioni industriali dell’intelligenza artificiale (anche quelle basate sull’impiego dei sistemi esperti) sosteneva l’ipotesi progettuale che il sapere del robot dovesse essere preventivamente progettato: l’eventuale capacità del robot di reagire a situazioni “nuove” e ad ambienti sconosciuti doveva essere preventivamente delineata. La transizione dal robot delibe-

rativo a quello reattivo era basato sulla constatazione che il cervello del robot poteva essere reso capace di reagire a stimoli esterni; poteva affrontare nuove realtà purché si fosse progettato un opportuno software per una architettura hardware sufficientemente potente e complessa.

L'avvento delle reti neurali alla fine degli anni Ottanta ripropone il ruolo centrale dell'apprendimento e la neurobiologia, durante al decade dedicata al cervello (*the brain decade*), sottolinea l'evoluzione delle strutture cerebrali: secondo una ingenua, ma efficace interpretazione ingegneristica, il cervello umano non è puro hardware statico e immobile (costruito una volta per sempre), ma è una struttura non solo viva ma anche una struttura che si modifica nel tempo a seguito dei processi di sviluppo.

Venivano, inoltre, sottolineate le ambiguità di concetti quali “costituzionale” (fattori genetici e biologici), “innato” (fattori genetici, biologici e psicologici comuni), “esperienziale” (fattori psicologici comuni e specifici). Ovviamente anche allora c'erano coloro che sostenevano che il neonato era una tabula rasa sulla quale i comportamenti vengono scolpiti dall'esperienza; altri ritenevano che i neonati fossero forgiati dall'esperienza secondo delle linee guida ben definite e attivati secondo sequenze temporali precise (maturazione).

Quando Asimov propone un modello di robot tecnico-scientifico, all'insegna dell'emergente paradigma scientifico-tecnologico emergente (quello elettronico-informatico) il suo obiettivo è quello di liberarsi dalle pastoie e dai limiti degli esseri biologici, limitati nella loro efficienza dal portarsi dietro tutta una serie di istinti e di pulsioni legati alla necessità di vivere, di riprodursi, di combattere. Asimov conosceva la sorte dei robot alla Čapek, costituiti da materiale biologico, che erano stati poi condizionati proprio da quegli istinti di cui il materiale biologico sembrava portarsi addosso come una maledizione. Asimov si muove nell'ambiente culturale della psicologia in cui è egemone il comportamentismo, il cui fondatore John Watson rinuncia all'introspezione per rifondare la psicologia su basi esclusivamente obiettive e sperimentali.

Le contaminazioni culturali sono frequenti nell'ambito della fantascienza, molto meno nell'ambito dell'ingegneria. Quando la robotica industriale comincia ad affermarsi come disciplina autonoma, poche sono le contaminazioni con la cultura biologica: come già detto la matrice delle macchine utensili è prevalente. Con i primi lavori nell'ambito della robotica antropomorfa, tra la fine degli anni Settanta e l'inizio degli anni Ottanta, l'anatomia e la neurofisiologia offrono le prime indicazioni e suggerimenti. In realtà gli studiosi di robotica antropomorfa chiedono alle “discipline della vita” suggerimenti per la progettazione e costruzione dell'architettura del robot, dei suoi apparati motori e dei suoi dispositivi sensoriali. La disciplina principe in tale contesto è, ovviamente, la neurofisiologia, il cui atteggiamento riduzionista (prevalente negli anni Sessanta e Settanta) la rende vicina alle aspettative dell'operare ingegneristico. Inoltre il mondo della robotica è pervaso da una non esplicita attesa: quella di poter sviluppare separatamente la robotica industriale, tesa a costruire i corpi, e l'intelligenza artificiale, in grado di offrire metodi e strumenti per dare una mente al robot. Poi qualcuno sarebbe stato in grado di coniugare sapientemente robotica industriale e intelligenza artificiale per dare luogo a una generazione di robot sempre più vicina alle prestazioni dell'essere umano.

Il momento più alto di questa impostazione fu rappresentato alla expo internazionale di Tsukuba nel 1985: non solo a Tsukuba venne presentato il robot pianista con struttura antropomorfa, ma soprattutto si celebrò il possibile ruolo dell'intelligenza artificiale che, all'epoca, cominciava a dubitare del progetto dedicato ai calcolatori della quinta generazione. Dal 1985 l'evoluzione della robotica, a livello internazionale, cominciò a subire un certo rallentamento innescato da un mercato della robotica industriale non particolarmente brillante.

Emergevano le premesse per la nascita di approcci alternativi. Rodney Brooks con i suoi *robot beings* avviò di fatto un progetto di ricerca in cui cercò di arrivare alla progettazione di robot autonomi attraverso una rivisitazione dell'evoluzione: invece di riprodurre direttamente le prestazioni più evolute dell'essere umano, forse era meglio di produrre comportamenti e strategie di animali più semplici, quali gli artropodi. Brooks propose, di fatto, un ripensamento sulla filogenesi: perché non arrivare a robot intelligenti ripercorrendo i percorsi dell'evoluzione? Perché invece di arrivare al robot intelligente con un approccio *top down*, che cerca di riprodurre i comportamenti intelligenti superiori dell'essere umano, non tentare di utilizzare un approccio *bottom up* che cerca di progettare e far evolvere macchine dalle più semplici alle più complesse?

Tuttavia alla fine degli anni Novanta un altro approccio venne delineandosi: l'approccio evolucionistico di Brooks pone l'accento sulla filogenesi, richiamandosi al fatto che la struttura sensoriale-motoria dell'essere umano è il risultato di un lungo percorso attraverso le architetture biologiche più disparate. Sullo sfondo le reti neurali e le metodologie messe a punto nell'ambito della vita artificiale mettevano a disposizione l'apparato metodologico che avrebbe permesso di indagare il comportamento di reti nervose via via sempre più complesse.

Invece, nel caso in cui si voglia mantenere la struttura umanoide dell'essere artificiale e si voglia nel contempo proporre un approccio alternativo al classico approccio *top down* dell'intelligenza artificiale si doveva esplorare quello che nell'essere umano corrisponde a quello che la filogenesi ha nell'evoluzione degli organismi: il ruolo dell'ontogenesi, o meglio quello dello sviluppo delle strutture sensoriali motorie, del comportamento e dell'intelligenza.

## 5. ROBOTICA EPIGENETICA

Il termine epigenesi viene introdotto in biologia nel 1807 (*The Shorter Oxford English Dictionary on Historical Principles*, ed.1964) e la teoria epigenetica, prima del 1830, era connotata principalmente come la teoria opposta a quella della preformazione. La teoria della preformazione, formalizzata da Charles Bonnet nel 1745, sosteneva che tutta la struttura degli organismi adulti era già contenuta nei gameti e che essi dovevano soltanto dispiegarsi, srotolarsi per facilitare lo sviluppo dell'individuo (da cui l'origine del termine evoluzione). L'epigenesi (letteralmente 'origine dal di fuori') è l'opposto della preformazione, per cui l'*homunculus* in miniatura è già contenuto tutto all'interno dell'organismo iniziale. Dopo il 1830 con gli studi sulla differenziazione di Karl Ernst von Baer si apre un affascinante viaggio sull'origine e lo sviluppo

dell'essere umano: da Charles Darwin a Ernst Haeckel che nel 1874 affermò: “la filogenesi è la causa meccanica dell'ontogenesi”.

Nel 1975 Conrad H. Waddington (nel suo lavoro *The evolution on an Evolutionist*) riprende il termine epigenesi per sottolineare il fatto che ogni stadio embriologico è un atto di divenire (in greco génesis) che deve essere costruito sopra lo stato immediatamente precedente: “la continua emergenza di una forma da stadi precedenti”. Al momento del concepimento la totalità dei percorsi potenzialmente aperti ad un individuo è determinata dalla costituzione del genoma. Via via che lo sviluppo procede e le strutture progressivamente si differenziano, il numero dei percorsi rimasti aperti diminuisce, così alla nascita lo sviluppo dipende dall'interazione tra la costituzione fisiologica del neonato e la famiglia o non-famiglia in cui nasce; ad ogni età successiva esso dipende dalla struttura della personalità allora presente e dalla famiglia e, in seguito dagli ambienti sociali più ampi in cui l'individuo verrà a trovarsi.

Secondo tale teoria i progressi che determinano lo sviluppo di un organismo, e in particolare la misura in cui ogni carattere evolutivo è sensibile o insensibile alle variazioni ambientali, sono governati dal genoma. I caratteri evolutivi che sono relativamente insensibili ai cambiamenti ambientali si possono chiamare ambientalmente stabili; i caratteri che sono relativamente sensibili si possono chiamare ambientalmente labili. Anche in Gerald Edelman, che propone il *darwinismo neurale* [1] è centrale il concetto di *epigenesi*, ovvero la modulazione dell'espressione dei geni da parte di segnali interni ed esterni alla cellula. Il prodotto di questa espressione, le proteine, modifica ulteriormente l'ambiente, e l'ambiente modificato modulerà di ritorno l'attività dei geni in un processo che risulta perciò ricorsivo. Considerato il numero astronomico di variabili in gioco, è impensabile un controllo puntuale, determinato da istruzioni nei geni oppure nell'ambiente. Piuttosto, il processo dinamico di costruzione del cervello ha una natura probabilistica. Cioè viene generato un grande numero di elementi (molecole, cellule, fibre nervose) successivamente soggetto a selezione. Il risultato finale è una serie di gruppi di neuroni, che saranno le unità strutturali e funzionali del sistema nervoso. Al contrario, Quartz e Sejnowski propongono [2] una visione alternativa nella quale sono centrali alcuni processi di costruzione successiva e non solo i processi di selezione descritti da Edelman. Gli autori descrivono per esempio i processi di formazione e crescita dei dendriti come “sede” dell'aumento di complessità di alcuni processi cognitivi.

La stessa logica vige nella genesi delle funzioni del cervello, in particolare nel modo in cui un essere vivente impara a percepire il mondo. Qui, è centrale il concetto di *costruzione*. Anche in questo caso non esistono istruzioni né nel cervello né nel mondo che ci insegnano a discriminare un oggetto da uno sfondo. Piuttosto, l'oggetto sarà percepito (e ricordato) costruendolo in un'attività dinamica continua che coinvolge quasi tutte le aree del cervello, incluse quelle specializzate nel movimento. E in tale attività sarà di nuovo all'opera un processo di selezione di quei gruppi di neuroni formati selettivamente durante lo sviluppo.

Negli ultimi venti anni gli straordinari risultati della genetica hanno recuperato la centralità dello sviluppo embrionale nei processi evolutivi (la nuova disciplina di sintesi che ne deriva, viene chiamata negli Stati Uniti Evo-Devo) e hanno attribuito nuova enfasi ai processi di epigenesi. Contemporaneamente anche la psicologia dello sviluppo ha tratto ispirazione dai progressi della neurobiologia e dell'embriologia dando

luogo alle cosiddette neuroscienze cognitive dello sviluppo (*developmental cognitive neuroscience*). La riscoperta delle radici biologiche dello sviluppo ha anche spinto molti ricercatori a rivalutare l'epigenesi costruttivista sulla quale Piaget aveva fondato la sua teoria.

Quando nel 2001 si tenne il *First International Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems* [3, 4] a Lund, Svezia, per sottolineare l'incontro tra robotica e psicologia si usò il termine epigenesi in segno di riconoscimento al contributo di Piaget, che aveva sostenuto che lo sviluppo era determinato dall'interazione tra l'organismo e l'ambiente.

La robotica epigenetica, quindi, non vuole definire *ex ante* tutti i comportamenti che il robot dovrà tenere quando affronterà le situazioni e gli ambienti più diversi, bensì si pone il problema di dare ai robot struttura e strumenti per evolversi in base alle esperienze che riuscirà a fare dell'ambiente in cui si sviluppa.

## 6. UN ROBOT CHE SI SVILUPPA: BABYBOT

Caratteristica comune alla maggior parte dei sistemi biologici è la capacità di adattarsi a situazioni e ad ambienti diversi. Questa capacità non è definita a priori ma viene costruita dall'individuo in maniera autonoma attraverso l'interazione fisica tra corpo e ambiente.

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.

Neuroscienze e scienze cognitive sembrano concordare sull'importanza dell'attività motoria e sul suo ruolo nella percezione [5]. 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. Per esempio, la forma di un oggetto, la sua consistenza o la natura della sua superficie sono qualità che sono meglio percepite attraverso il tatto. La percezione è quasi sempre un processo attivo. Nell'uomo – e in tutti gli animali dotati di fovea – gli occhi sono in continuo movimento. Altre modalità sensoriali (per 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. Una possibile ipotesi è che sviluppo percettivo e motorio progrediscano di pari passo. Alcuni ricercatori ritengono 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 a 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. Negli adulti la determinazione di certe proprietà degli oggetti si accompagna 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. Intorno ai tre 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. 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.

L'identificazione delle regolarità nel flusso sensoriale, e quindi di certe proprietà costanti dell'ambiente, è un processo che caratterizza lo sviluppo sensoriale e motorio: particolarmente interessante perché ci permette di predire gli eventi che osserviamo. 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 nove 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.

Si può ipotizzare un robot antropomorfo (realizzato con il nome Babybot presso il LIRA – Lab dell'Università di Genova) in grado di seguire un percorso che per semplicità può essere diviso in tre fasi: conoscenza del proprio corpo, apprendimento dell'interazione con gli oggetti e apprendimento dell'interpretazione degli eventi [6, 7]. Durante la prima fase il robot esplora le capacità sensoriali e motorie del proprio corpo. 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.

In questo contesto un particolare suggerimento viene offerto dai neuroni specchio [8] che hanno offerto un riscontro neurofisiologico alle teorie sull'apprendimento per imitazione che sono alla base dell'insegnamento di parecchie discipline sportive e dello sviluppo di cuccioli dei mammiferi attraverso il gioco e l'imitazione del comportamento degli adulti con particolare riferimento alla madre. L'individuazione degli obiettivi e delle azioni motorie negli adulti permette all'organismo che si sta sviluppando l'organizzazione dei propri goal e delle relative azioni motorie in un continuo confronto alla base del processo ontogenetico che darà luogo alla mente.

In particolare, gli sviluppi recenti della neurofisiologia e soprattutto, come già detto, la scoperta dei neuroni specchio ha offerto una conferma delle teorie sull'importanza del corpo, visto quest'ultimo come la "struttura" sulla quale organizzare la percezione [9]. I neuroni specchio in realtà sono solo la punta dell'iceberg. Quello che si è scoperto è l'esistenza di una miriade di aree cerebrali, nelle quali si trova un'integrazione fitta tra l'informazione motoria e quella sensoriale. Inizialmente, questa scoperta ha creato forti dubbi, mettendo in crisi il modello del cervello che prevedeva aree sensoriali o motorie deputate a un'unica funzione. In seguito, la mole di dati sperimentali via via accumulati, sia nella scimmia che nell'uomo, ha consentito la costruzione di un modello del cervello che vede i segnali motori come una tessitura sulla quale organizzare la percezione. Mentre i neuroni specchio riguardano la manipolazione di oggetti, altri risultati supportano la presenza di modelli interni del corpo, dell'influenza delle capacità motorie sulle capacità del sistema attentivo mostrando come anche la codifica dello spazio intorno a noi sia sostanzialmente fatta dal cervello in termini motori.

Anche il concetto di oggetto (in quanto qualcosa di discriminabile dal resto della realtà) ha perso una sua unità intrinseca. Sembra infatti che il cervello generi rappresentazioni diverse a seconda del compito al quale è chiamato. Per esempio, risultati derivati da pazienti hanno permesso di dimostrare una dissociazione della percezione a seconda che il compito richiesto fosse di manipolazione rispetto a uno puramente semantico. Chiaramente, una serie di proprietà degli oggetti quale la propria dimensione o posizione spaziale non è identificata dal cervello in termini assoluti – in uno spazio cartesiano tridimensionale – ma viceversa in termini motori. L'interruzione di questa connessione tra percezione e azione, nei pazienti osservati, creava una mancanza anche nell'abilità di giudicare alcune caratteristiche visive degli oggetti in questione [10].

Insieme a questa variazione di prospettiva, si è andata indebolendo anche la posizione tipicamente comportamentalista del ciclo percezione-elaborazione-azione e l'enfasi si è potuta spostare sull'influenza dell'azione sulla generazione degli stati percettivi. Questo nuovo modo di guardare al cervello è importante anche perché un'opportuna esplorazione – l'equivalente del giocare per il bambino – e quindi strategie motorie opportune sono alla base dell'esperienza necessaria all'apprendimento e, su scala temporale più ampia, allo sviluppo cognitivo.

Un robot epigenetico non può quindi essere visto come una serie di moduli percettivi che elaborano posizioni spaziali di oggetti ed eventi – il mondo dei blocchi della classica intelligenza artificiale (GOF AI, Good Old Fashioned Artificial Intelligence) – e li traducono in azioni corrispondenti, ma deve necessariamente considerare cicli di azione-percezione (e viceversa percezione-azione) integrati nei quali la norma è legare dati multisensoriali e motori in un continuum nel quale la trasformazione da sensoriale a motorio è accompagnata da retroazione dal motorio al sensoriale.

## 7. IL FUTURO DEI ROBOT

Nel corso del progetto finalizzato Robotica del CNR, pensato e progettato in Italia all'inizio degli anni Ottanta, si pensava che si potesse costruire un robot assemblando insieme l'architettura di un robot, i sensori e gli attuatori, il controllo del robot e il suo governo. Il progetto si poneva, di fatto, l'obiettivo di progettare separatamente il corpo e l'intelligenza di un robot. All'epoca era un obiettivo ragionevole che si rendeva interprete anche di approcci scientifici e metodologici condivisi da molti ricercatori. La GOFAI vedeva appannarsi la sua fase più luminosa e intrigante; le reti neurali si stavano nuovamente affacciando sul panorama internazionale; Searle, Dennet e Chalmers attaccavano e minavano anche tra gli ingegneri la serena certezza di un atteggiamento cartesiano nella costruzione di esseri artificiali. Infatti fino ad allora Cartesio era stato re-interpretato e modernizzato attraverso la metafora *mente\_cervello*, *software\_hardware*. Già all'inizio degli anni Ottanta l'antica certezza del matrimonio del matrimonio tra robotica e la GOFAI aveva cominciato a declinare. I bioingegneri che non potevano aspettare i tempi lunghi e le certezze assolute della neurofisiologia si erano avventurati, sbilanciandosi nella formulazione di una sorta di periferizzazione dell'intelligenza nel sistema visivo e nel sistema motorio.

Visione e sistema di coordinazione sensoriale-motorio vivevano di vita propria; non avevano bisogno di una intelligenza linguistica e simbolica per attivarsi. Forse ne avrebbero avuto bisogno in futuro per coordinarsi con le attività più elevate del pensiero linguistico tipico dell'essere umano.

La robotica cognitiva e la robotica epigenetica sono solo ulteriori stadi nella lunga strada verso la costruzione di esseri artificiali in grado di avere prestazioni analoghe a quelle degli esseri umani. Per raggiungere questo obiettivo, sarà necessario che ingegneri, neuroscienziati, fisici, biologi, filosofi lavorino insieme per realizzare i robot del futuro: robot che siano in grado di eseguire compiti complessi, di imparare da esempi e dall'esperienza, di ricordare per analogie, di associare situazioni presenti a situazioni passate, di individuare e riconoscere eventi e di generalizzare da esperienze individuali, di predire l'effetto delle proprie azioni e agire di conseguenza, di esprimere emozioni e di interagire socialmente, di comunicare in modo naturale e a diversi livelli con gli esseri umani.

Il modo nel quale gli esseri umani percepiscono il mondo, controllano i comportamenti, imparano a prevedere il risultato delle azioni, dipende nella stessa misura dalle capacità "mentali" e dalla forma e dalle caratteristiche meccaniche dei tessuti muscolari e nervosi. Per questo motivo, anche se la ricerca scientifica di questi ultimi anni ha consentito di ottenere importanti risultati sia nell'ambito delle tecnologie della "mente" (apprendimento, riconoscimento, pianificazione) che nella realizzazione di dispositivi e nuovi materiali, lo studio congiunto di tutti gli aspetti che contribuiscono alla costruzione di robot umanoidi costituisce un territorio ancora largamente inesplorato.

Per realizzare dispositivi artificiali con queste caratteristiche è indispensabile da un lato comprendere a fondo le soluzioni biologiche che sono alla base delle prestazioni degli esseri umani e dall'altro studiare le soluzioni tecnologiche che consentano di realizzare tali funzioni in sistemi artificiali. Da qui la necessità di studiare l'essere

---

umano per comprendere l'origine delle sue capacità e di costruire sistemi umanoidi per trovare soluzioni confrontabili e basate su tecnologie realizzabili.

## BIBLIOGRAFIA

- Balkenius, C., *et al.*, eds. *Proceedings of the First International Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems (2001)*. Lund University Cognitive Studies. Vol. 85. 2004, LUCS: Lund.
- Berthouze, L., *et al.*, eds. *Proceedings of the Fifth International Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*. Lund University Cognitive Studies. Vol. 123. 2005, LUCS: Lund, Sweden.
- Edelman, G.M., *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection*. 1988, Oxford: Oxford University Press. 371.
- Gallese, V., *et al.*, *Action recognition in the premotor cortex*. *Brain*, 1996. 119: p. 593-609.
- Jeannerod, M., *et al.*, *Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation*. *Trends in Neurosciences*, 1995. 18(7): p. 314-320.
- Metta, G., *Babybot: a Study on Sensori-motor Development*, in *DIST*. 2000, University of Genova: Genova. p. 176.
- Metta, G., *et al.*, *Understanding mirror neurons: a bio-robotic approach*. Submitted to *Interaction Studies*, special issue on Epigenetic Robotics, 2006. 7(2): p. In press.
- Quartz, S.R. and T.J. Sejnowski, *The neural basis of cognitive development: A constructivist manifesto*. *Behavioral and Brain Sciences*, 1997(20): p. 537-596.
- Sandini, G., G. Metta, and J. Konczak. *Human Sensori-motor Development and Artificial Systems*. in *AIR&IHAS '97*. 1997. Japan.
- von Hofsten, C., *An action perspective on motor development*. *Trends in cognitive sciences*, 2004. 8(6): p. 266-272.