

La robotica al servizio delle neuroscienze: stato dell'arte e problemi aperti

Edoardo Datteri

Sommario *La robotica contemporanea intrattiene uno stretto legame con le neuroscienze e con le scienze cognitive. Da una parte, il progresso nella comprensione delle basi neurali e cognitive del comportamento dei sistemi viventi stimola lo sviluppo di sistemi robotici sempre più efficienti e in grado di operare in contesti ambientali relativamente caotici o poco strutturati. Dall'altra, la robotica fornisce significativi contributi sperimentali alla ricerca neuroscientifica e cognitiva. In questo articolo discuteremo alcuni esempi di quest'ultima direzione di ricerca, tracciando le linee generali delle procedure sperimentali seguite, indicando alcune tipologie di contributi che tali procedure hanno fornito alla ricerca sui meccanismi del comportamento animale, ed elencando alcuni problemi di metodo che chiunque si proponga di sottoporre la robotica "al servizio" delle neuroscienze e delle scienze cognitive deve considerare e affrontare.*

Abstract. *Contemporary robotics research is deeply intertwined with neuroscientific and cognitive science research. Advancements in the understanding of the neural and cognitive mechanisms underlying animal behaviour often inspire and stimulate the development of more and more efficient robotic systems. Conversely, robots are often deployed as experimental platforms to test neuroscientific and cognitive science hypotheses. In this article, we discuss the latter research approach from a methodological point of view. By describing some interesting examples of it, we identify some ways in which robots can contribute to the discovery of animal sensory-motor mechanisms, and introduce some methodological problems that are likely to emerge in the use of robots to test neuroscientific and cognitive science hypotheses.*

Keywords: Biorobotics; Simulations in neuroscience; Computational neuroscience; Cognitive science; Mechanisms of animal sensory-motor coordination.

1. Introduzione

La robotica contemporanea intrattiene un duplice legame con lo sviluppo delle neuroscienze e delle scienze cognitive. Da una parte, il progresso nella comprensione delle basi neurali e cognitive del comportamento dei sistemi viventi ha spesso stimolato lo sviluppo di sistemi robotici efficienti e in grado di operare in contesti ambientali relativamente caotici o poco strutturati. Dall'altra, in molti casi la costruzione di robot ha fornito contributi significativi al progresso delle neuroscienze e delle scienze della mente. I due legami che abbiamo appena tracciato corrono in direzione opposta: nel primo caso le scienze del comportamento animale e umano si pongono, per così dire, "al servizio" della robotica; nel secondo caso è la robotica a porsi "al servizio" delle neuroscienze e delle scienze della cognizione. In queste pagine ci proponiamo di esplorare quest'ultima direzione di ricerca che, pur avendo una storia relativamente lunga, è stata raramente oggetto di attenzione metodologica. Senza la pretesa di fornire un esaustivo stato dell'arte discuteremo alcuni esempi significativi provando a chiarire le linee generali delle procedure sperimentali seguite, indicando alcune tipologie di contributi che tali procedure hanno fornito alla ricerca sui meccanismi del comportamento animale, ed elencando alcuni problemi di metodo che chiunque si proponga di sottoporre la robotica "al servizio delle neuroscienze" deve considerare e affrontare. Prima di iniziare è opportuno sottolineare ulteriormente la distinzione tra le due direzioni di ricerca che abbiamo appena introdotto.

1.1. La "biologically inspired robotics"

Le neuroscienze e le scienze cognitive condividono l'obiettivo di scoprire i meccanismi che sottostanno a vari aspetti del comportamento animale e più specificamente umano, distinguendosi soprattutto per l'uso di differenti concetti teorici: le scienze cognitive tendono infatti alla scoperta dei meccanismi *mentali* che stanno alla base del comportamento animale, teorizzando dunque sulle *rappresentazioni*, sulle *aspettative*, sulle *intenzioni* che lo determinano; le teorie neuroscientifiche fanno invece riferimento ai meccanismi *neurali* che sottostanno al comportamento, chiamando dunque in causa l'interazione di natura elettrica e chimica tra regioni del sistema nervoso e del sistema muscolare animale. Lungo tutta la storia dell'Intelligenza Artificiale e della robotica, teorie di entrambi i tipi hanno spesso costituito fonte di ispirazione per la realizzazione di sistemi robotici efficienti e robusti: si tratta dei cosiddetti "biologically-inspired robots" (Meyer & Guillot, 2008), di cui troviamo molti esempi nella cosiddetta *robotica a comportamenti*, elaborata intorno agli anni'90 del secolo scorso (Arkin, 1998) e profondamente radicata nella cibernetica e nell'Intelligenza Artificiale connessionista (Cordeschi, 2002).

I teorici della robotica a comportamenti proposero alcuni principi guida per la costruzione di robot in grado di svolgere efficientemente il proprio compito in ambienti simili a quelli in cui ordinariamente vivono gli esseri umani, ambienti dunque relativamente imprevedibili e potenzialmente pericolosi per l'incolumità del sistema. Con una certa quota di semplificazione molti di essi sostennero che i robot costruiti fino ad allora – in quella che venne chiamata la fase "classica"

dell'Intelligenza Artificiale – incorporavano meccanismi senso-motori *sequenziali*, basati sui seguenti passi: (1) lettura dei sensori ed elaborazione di una rappresentazione interna quanto più dettagliata, completa e integrata possibile dell'ambiente circostante; (2) pianificazione di una sequenza di azioni adatta al raggiungimento dell'obiettivo prefissato; (3) esecuzione del piano di azioni. Una struttura sequenziale di questo tipo, si sostenne, può essere funzionale allo sviluppo di robot industriali che operano in ambienti statici e precisamente noti *a priori*, ma non allo sviluppo di sistemi in grado di interagire prontamente ed efficientemente con ambienti di vita ordinaria. Nel tempo necessario a costruire la rappresentazione dell'ambiente (passo 1) quest'ultimo infatti probabilmente cambierà, rendendo l'azione conseguente obsoleta e dunque inefficiente; nessuna pianificazione a lungo termine (passo 2) potrà inoltre ritenersi affidabile in un ambiente in continuo cambiamento.

Anche il più piccolo insetto, si osservò, supera grandemente i robot dell'Intelligenza Artificiale "classica" in fatto di reattività, robustezza ed efficienza nel perseguire i propri obiettivi. Al fine di realizzare sistemi robotici in grado di operare in ambienti non precisamente strutturati e prevedibili come quelli industriali, i teorici della robotica a comportamenti pensarono dunque di trarre ispirazione dai meccanismi viventi senso-motori animali. Due caratteristiche molto generali di tali meccanismi colpirono la loro attenzione, poiché in netta contrapposizione con le caratteristiche dei sistemi sequenziali descritti sopra: essi sono, in larga parte, meccanismi *distribuiti* e *paralleli*. Le operazioni necessarie a elaborare gli stimoli sensoriali e a produrre un comportamento motorio sono *distribuite* tra vari moduli, ognuno dei quali è responsabile dell'elaborazione di un frammento degli stimoli in ingresso e della conseguente produzione di una singola componente del comportamento finale; tali moduli agiscono inoltre in *parallelo*. Le architetture a comportamenti presentano proprio queste caratteristiche. Ogni modulo, o *comportamento*, esegue un particolare tipo di elaborazione sensoriale finalizzata alla produzione di un particolare tipo di azione motoria. Per realizzare un robot in grado di muoversi autonomamente nell'ambiente potremo, per esempio, dotarlo di un comportamento – che chiameremo *repulsivo* – deputato alla rilevazione di ostacoli e alla produzione di azioni motorie di sterzata; dovremo però dotarlo anche di un comportamento *attrattivo* in grado di rilevare la presenza dell'obiettivo (per esempio, di un essere umano da raggiungere) e di produrre movimenti di sterzata *verso* di esso. A ogni istante avremo dunque un'azione repulsiva e una attrattiva. Un meccanismo ulteriore di coordinazione produrrà *una sola azione motoria* combinando quelle appena prodotte dai vari comportamenti.

L'architettura senso-motoria appena descritta presenta alcuni elementi di interesse. In primo luogo, ogni comportamento è da solo in grado di "far muovere" il robot: se i vari comportamenti agiscono in parallelo, il danneggiamento di uno di essi non bloccherà totalmente il robot (per esempio un danno al comportamento attrattivo impedirà al robot di raggiungere il proprio obiettivo spaziale ma non di continuare a salvaguardare la propria struttura fisica evitando gli ostacoli). Un robot di questo tipo possiederà dunque una forma di *robustezza* ai danni non semplice da ottenere attraverso una struttura

di controllo totalmente sequenziale (in cui il danno a un modulo bloccherebbe l'azione di tutti quelli successivi). Alcuni robot a comportamenti possiedono inoltre repertori comportamentali ricchi ed efficienti, ottenuti attraverso la combinazione di un numero elevato di moduli relativamente "semplici" nella loro struttura senso-motoria e per questo di esecuzione *rapida*: alcuni dei primi robot a comportamenti erano in grado di eseguire in maniera relativamente veloce compiti che, attraverso un'architettura sequenziale, avrebbero richiesto cicli percezione-azione molto più lunghi (alcuni di essi sono descritti in Brooks, 1991).

Si è spesso discusso sulla reale portata delle idee proposte dai teorici delle architetture a comportamenti. Oggi è chiaro che essi commisero un'eccessiva semplificazione nel caratterizzare le architetture della robotica "classica" come puramente sequenziali; dopo alcuni successi iniziali, inoltre, le architetture a comportamenti rivelarono alcune importanti limitazioni (per una discussione più approfondita si veda Datteri, 2008). Tuttavia, in molti casi l'idea di trarre ispirazione dai meccanismi senso-motori animali è stata feconda. Alcuni ricercatori hanno addirittura tentato di implementare versioni adattate dei meccanismi all'opera in particolari specie animali, replicandone dunque a grana più fine la struttura funzionale. Arbib e Liaw (1995), per esempio, hanno riprodotto alcune strategie di navigazione e pianificazione motoria delle rane, mentre Arkin et al. (2000) hanno implementato alcuni meccanismi senso-motori della mantide religiosa. In questi studi, come abbiamo più volte sottolineato, il fine dell'ispirazione biologica era quello di realizzare sistemi robotici robusti, reattivi ed efficienti nello svolgimento di qualche compito di utilità pratica. Nelle sezioni che seguono vedremo come la riproduzione a grana fine di meccanismi senso-motori animali possa essere guidata anche da un obiettivo di natura totalmente diversa, cioè quello di valutare empiricamente teorie neuroscientifiche e cognitive sul comportamento dei sistemi viventi.

1.2. La biorobotica

Gli studi cosiddetti *biorobotici* condividono con quelli che abbiamo appena discusso il proposito di implementare (versioni adattate di) meccanismi di controllo senso-motorio animale. Si distinguono nettamente da essi, tuttavia, per il fine che guida tale proposito: l'implementazione robotica in questo caso è finalizzata alla comprensione dei meccanismi neurali e cognitivi dei sistemi viventi. Prima di discutere alcuni esempi proviamo a tracciare le linee generali di questa metodologia.

Abbiamo appena sottolineato che negli studi biorobotici, come in quelli "biologically inspired", si realizzano robot che implementano (versioni adattate di) particolari meccanismi di controllo senso-motorio animale. Tali meccanismi costituiscono il prodotto di indagini empiriche condotte nell'ambito delle neuroscienze e delle scienze cognitive. È un'ipotesi neuroscientifica quella secondo cui i meccanismi di controllo senso-motorio implementati da Arbib e Liaw nello studio citato siano proprio quelli che governano il comportamento delle rane, e lo stesso dicasi per lo studio di Arkin et al. (2000) sulla mantide religiosa. Alla luce di questa precisazione, che per brevità abbiamo sottinteso, avremmo dunque dovuto affermare che negli studi biorobotici e "biologically inspired" si realizzano robot che implementano meccanismi *ipotetici* di controllo

senso-motorio animale *formulati nell'ambito delle neuroscienze o delle scienze cognitive*. Ora, non tutte le ipotesi scientifiche sono ugualmente plausibili: alcune saranno solo speculazioni iniziali in attesa di prime valutazioni empiriche, mentre altre saranno state già accreditate da numerosi esperimenti o riflessioni teoriche (pur rimanendo comunque *fallibili*: non si può escludere in linea di principio che esse verranno sconfessate da qualche futuro risultato sperimentale). Negli studi biorobotici la costruzione di un sistema robotico basato su una particolare ipotesi di meccanismo biologico è mossa proprio dallo scopo di valutarne la plausibilità (e non, come nel caso degli studi "biologically inspired", dallo scopo di costruire robot più efficienti).

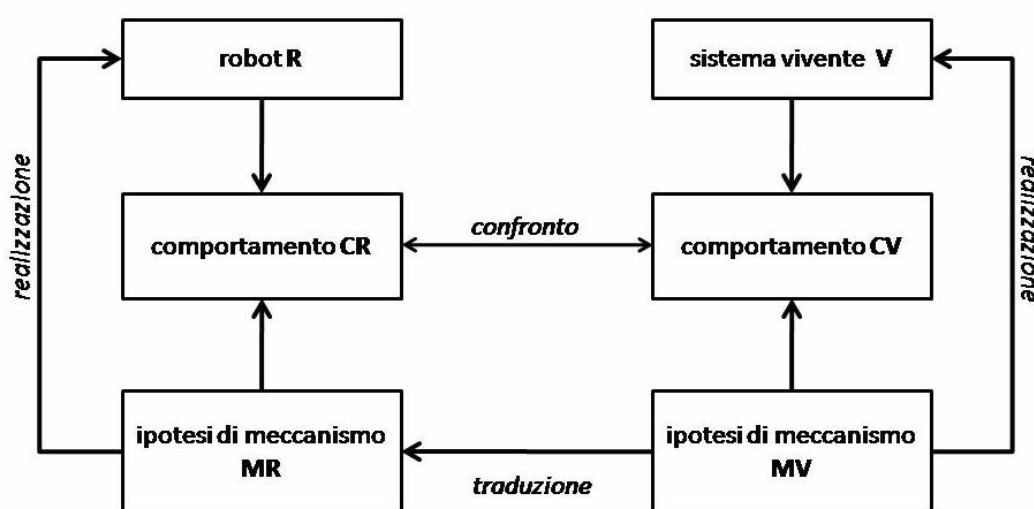


Figura 1
Schema della metodologia biorobotica.

Osserviamo la parte destra dello schema di Figura 1 (adattato da Datteri, 2012). Supponiamo di avere osservato il comportamento (che chiamiamo CV) di un certo sistema vivente V in qualche circostanza ambientale. Supponiamo inoltre di avere formulato un'*ipotesi* MV sul meccanismo che potrebbe aver prodotto quel comportamento, oppure sul meccanismo che, in quelle particolari circostanze ambientali, produce regolarmente quel comportamento. Può essere difficile valutare "a mente", oppure con carta e penna, se l'*ipotesi* MV sia plausibile o meno – ovvero, se il meccanismo MV sia davvero in grado di produrre il comportamento CV nelle circostanze ambientali considerate. Il metodo biorobotico, analogo sotto molti aspetti ai metodi simulativi spesso adottati nell'Intelligenza Artificiale (Newell & Simon, 1961), costituisce una strategia potenzialmente utile per svolgere tale valutazione. Esso consiste nel realizzare un sistema robotico R *che implementi proprio il meccanismo MV in esame* (più verosimilmente, una sua versione MR opportunamente adattata per l'implementazione: discuteremo questo punto nella sezione 3.2), ovvero, in breve, nel realizzare una *simulazione robotica* di MV. Il comportamento del robot

R (indicato con CR nella parte sinistra dello schema) viene poi confrontato con quello del sistema vivente in esame. Se il robot R riesce a replicare il comportamento CV, si può essere indotti a concludere che MV è un'ipotesi plausibile: *in simulazione*, infatti, MV ha prodotto proprio il comportamento che si desiderava spiegare. Se invece R non riesce a riprodurre il comportamento CV, si può essere indotti – in base alla stessa idea di metodo – a concludere che l'ipotesi MV non descrive il meccanismo effettivamente operante nell'animale. La costruzione di R è dunque funzionale alla valutazione sperimentale dell'ipotesi neuroscientifica o cognitiva MV: ecco in che senso la robotica, in questa metodologia di ricerca, è posta “al servizio” delle neuroscienze e delle scienze della mente.

È opportuno sottolineare sin d'ora due caratteristiche significative della metodologia appena schematizzata. Anzitutto, la costruzione di una simulazione robotica offre un'opportunità sperimentale non permessa da una simulazione che “giri” esclusivamente su un calcolatore digitale: quella, cioè, di valutare se il meccanismo senso-motorio in esame possa produrre il comportamento da spiegare in un ambiente *simile alla nicchia ecologica* in cui vive il sistema vivente oggetto di studio, o comunque in un ambiente non simulato. Se il meccanismo MV venisse riprodotto attraverso un programma per calcolatore, sarebbe ovviamente necessario simulare un ambiente nel quale collocare il sistema virtuale (se non altro, al fine di impartire al meccanismo gli stimoli sensoriali in risposta ai quali esso dovrà produrre le azioni motorie simulate). È lecito supporre, alla luce delle grandi risorse computazionali necessarie per la simulazione di un ambiente caotico e dinamico come quello in cui vivono ordinariamente i sistemi viventi, che tale ambiente virtuale ne costituirebbe, nella maggior parte dei casi, una versione severamente impoverita o distorta; che esso riprodurrebbe, cioè, solo un sottoinsieme ristretto degli stimoli sensoriali e delle condizioni al contorno che caratterizzano la nicchia ecologica di V. In tali condizioni, eventuali differenze tra il comportamento della simulazione R e quello del sistema vivente V potrebbero essere imputate alle differenze tra i due ambienti, più che all'inadeguatezza del meccanismo MV; l'applicazione del metodo simulativo non fornirebbe dunque basi troppo solide per valutare la plausibilità dell'ipotesi teorica in esame. Ecco perché, secondo molti ricercatori, la simulazione biorobotica (che in molti casi permette l'osservazione del comportamento del robot nella nicchia ecologica di V) fornisce opportunità sperimentali decisamente più promettenti di quelle fornite dalle simulazioni puramente informatiche. Discuteremo alcune possibili obiezioni a questa tesi nella sezione 3.1.

È inoltre molto importante, per comprendere a fondo le potenzialità del metodo che stiamo discutendo, identificare con precisione il tipo di risultati teorici che esso permette di ottenere. Dal fatto che R riesca a riprodurre il comportamento CV potremo concludere, al massimo, che MV è *uno* dei meccanismi potenzialmente realizzati nel sistema vivente V. In sé tale risultato sperimentale non ci permette di escludere che V, in realtà, realizzi un meccanismo MV' totalmente diverso da MV, finora sconosciuto ed egualmente in grado di produrre il comportamento da spiegare. Non ci fornisce dunque basi

convincenti per sostenere che MV è *proprio* il meccanismo che cercavamo. Vari meccanismi molto diversi tra di loro potrebbero produrre lo stesso comportamento; il metodo biorobotico ci permette di identificare uno o più di tali meccanismi, senza però indicarci quale sia quello “giusto”. Per compiere tale passo ulteriore sarà necessario procedere attraverso altre metodologie di indagine sperimentale. Per esempio, attraverso tecniche che permettano di dissezionare il sistema nervoso di V e cercare traccia dei componenti menzionati nell'ipotesi MV.

Questa considerazione non depone affatto a sfavore dell'utilità del metodo biorobotico. Vi sono varie circostanze in cui può essere utile – ai fini della ricerca neuroscientifica o cognitiva – chiedersi se un certo meccanismo ipotetico *possa in linea di principio* produrre il comportamento da spiegare. Alcuni esempi tratti dalla storia della biorobotica ci permetteranno di esaminare più da vicino queste circostanze.

2. Il ruolo della biorobotica nello studio del comportamento: alcuni esempi

2.1. Sostegno a una concezione meccanicistica dei sistemi viventi

Uno dei primi studi aderenti al metodo appena descritto risale, più o meno, al 1915; ben prima, dunque, della costruzione dei primi calcolatori digitali. In quegli anni due ingegneri, John Hammond Jr. e Benjamin Miessner, presentarono al pubblico un automa, chiamato Seleno, in grado di dirigersi verso fonti di luce. Il meccanismo di controllo era basato su due fotocellule al selenio disposte nella parte frontale del robot: quando la fotocellula di destra (o quella di sinistra) veniva colpita dalla luce, il retrostante motore di sterzata virava verso destra (o verso sinistra). L'automa catturò l'attenzione del fisiologo Jacques Loeb, che qualche anno prima aveva presentato alcune ipotesi sui meccanismi che producono varie forme di comportamento animale (Loeb, 1900). Il comportamento delle falene, che inesorabilmente si dirigono verso fonti luminose, può essere spiegato secondo Loeb ipotizzando che gli organi motori dell'insetto colpiti dalla luce si muovano più velocemente rispetto a quelli in ombra. Loeb riconobbe nell'automa Seleno una sorta di “prova costruttiva” della sua ipotesi: Seleno (R nello schema di Figura 1) incorporava, in una versione leggermente modificata, il meccanismo (MV) che egli aveva proposto per spiegare il comportamento delle falene (V). Il robot, alla prova dei fatti, riusciva a dirigersi verso fonti di luce, replicando così – nei suoi aspetti rilevanti – il comportamento delle falene. La sua ipotesi meccanicistica, dando buona prova di sé “in simulazione”, ne usciva dunque rafforzata (si veda il monumentale testo di Cordeschi, 2002, per una discussione di questo esempio).

Si ricordi quanto abbiamo appena sottolineato: il comportamento di Seleno non fornisce basi per concludere che il meccanismo ipotizzato da Loeb sia *proprio quello* realizzato nel sistema nervoso delle falene; esso, al più, indica che quel meccanismo è in grado di riprodurre il comportamento da spiegare. Le falene potrebbero implementare un meccanismo totalmente differente ed egualmente funzionante. Tuttavia la conclusione teorica tratta da Loeb ebbe una certa

risonanza tra i fisiologi dell'epoca. Erano infatti diffuse tesi di stampo *vitalista*, secondo cui molte forme di comportamento animale, soprattutto quelle che manifestano orientamento verso uno scopo, *non possono essere spiegate in termini meccanici* ma solo attraverso il riferimento a una sorta di "spirito" o "forza vitale" di natura non meccanica. Il mero fatto che un meccanismo riuscisse a generare un comportamento simile a quello delle falene (e di qualsiasi altro insetto *fortotropico*), al di là del fatto che tale meccanismo fosse proprio quello realizzato nel sistema nervoso delle falene, bastò a sferzare un forte colpo alle tesi vitaliste e dunque a infondere fiducia, tra i biologi dell'epoca, nella possibilità di una spiegazione meccanicistica di altri aspetti del comportamento animale. Ecco dunque uno dei modi in cui il metodo biorobotico ha contribuito al progresso della ricerca neuroscientifica e cognitiva: *fornendo basi empiriche a sostegno di un orientamento meccanicista nello studio del comportamento*.

2.2. Formulazione di un repertorio di possibili spiegazioni meccanicistiche

La tipologia di contributi teorici che abbiamo appena discusso è, al giorno d'oggi, di interesse esclusivamente storico: il vitalismo gode infatti di credito scarso o nullo nel panorama della ricerca contemporanea. Altri e più recenti esempi illustrano ulteriori sensi in cui la biorobotica può contribuire allo studio del comportamento animale. Uno di essi è esemplificato dallo studio sulla navigazione degli astici descritto in (Grasso et al., 2000).

Come le falene si dirigono verso fonti luminose così gli astici, esplorando i fondali marini, si dirigono verso le proprie fonti di nutrimento: quale meccanismo permette loro di raggiungerle? È noto che le loro antenne includono dei *chemorecettori*, ovvero dei sensori in grado di rilevare la concentrazione di particolari sostanze chimiche. Si potrebbe dunque supporre che essi siano in grado di localizzare fonti di nutrimento risalendo le scie chimiche disperse nell'acqua dalle potenziali prede. L'obiettivo dello studio condotto da (Grasso et al., 2000) è quello di valutare l'efficacia del seguente meccanismo, del tutto analogo a quello implementato in Seleno: in base a tale meccanismo, l'animale a ogni istante sterza verso il lato corrispondente all'antenna che percepisce maggior concentrazione chimica (e che, probabilmente, corrisponde alla direzione relativa dell'obiettivo). Per valutare questa ipotesi essi costruiscono un piccolo robot mobile, chiamato RoboLobster, in grado di muoversi nell'acqua attraverso ruote e fornito di due chemorecettori localizzati frontalmente. Negli esperimenti RoboLobster viene collocato sul fondale di una vasca piena d'acqua, a una certa distanza da una fessura che rilascia una scia chimica percepibile dai chemorecettori. Lo scopo di tali esperimenti è naturalmente quello di valutare se RoboLobster (R), implementando il meccanismo MV appena descritto, riesce a raggiungere la sorgente chimica riproducendo dunque il comportamento (CV) degli astici (V). Se così fosse si potrebbe concludere che il meccanismo MV "funziona", ovvero che è un meccanismo quantomeno plausibile. Non certo, come abbiamo sottolineato, che MV è proprio *il* meccanismo realizzato negli astici; ma questa considerazione non sminuisce l'utilità sperimentale di RoboLobster.

Gli autori dello studio sottolineano infatti che, fino a quel momento, i comportamenti chemotattici degli astici erano stati studiati senza tenere conto delle reali caratteristiche dell'ambiente in cui essi si manifestano. Il metodo biorobotico era già stato applicato in alcuni studi precedenti, in cui il comportamento del robot era però stato osservato in ambienti sostanzialmente impoveriti rispetto alla nicchia ecologica degli astici. All'epoca dello studio che stiamo discutendo, dunque, non erano ancora disponibili ipotesi solide sul meccanismo che potrebbe generare un comportamento chemotattico nelle reali condizioni di vita dell'astice: capire se il meccanismo MV *potrebbe* generare il comportamento da spiegare in quelle condizioni costituiva dunque un risultato di rilievo, ancorché preliminare, in una fase tanto embrionale della ricerca. Il metodo biorobotico, in questo caso, permetteva dunque di formulare *un repertorio di possibili ipotesi meccanicistiche* tra cui poi selezionare, con ulteriori esperimenti, quelle che più si avvicinano al meccanismo realmente realizzato negli astici.

È opportuno osservare che, negli esperimenti descritti in (Grasso et al., 2000), RoboLobster si dimostra *incapace* di raggiungere con sufficiente affidabilità la sorgente chimica. A valle di alcune riflessioni metodologiche, che riprenderemo nella sezione 3, gli autori escludono dunque il meccanismo MV dal repertorio delle possibili ipotesi meccanicistiche sulla chemotassi degli astici: come abbiamo sottolineato nella sezione 1.2, se il sistema robotico che simula MV non genera il comportamento da spiegare (come è accaduto a RoboLobster), si può essere indotti a screditare l'ipotesi teorica MV. Si tratta comunque di un risultato di un certo rilievo teorico: nella ricerca scientifica il rifiuto di un'ipotesi precedentemente formulata rappresenta un successo teorico tanto importante quanto una sua eventuale corroborazione. Il rifiuto dell'ipotesi MV contribuisce infatti, se non altro per esclusione, a delimitare l'insieme delle possibili spiegazioni del comportamento in esame. Un altro studio biorobotico che ha contribuito alla formulazione di un repertorio di possibili spiegazioni meccanicistiche è relativo all'orientazione spaziale della formica del deserto *Cataglyphis* (Lambrinos et al., 2000).

2.3. Identificazione del meccanismo che connette componenti biologici noti

Gli studi biorobotici che abbiamo appena descritto si muovevano in fasi relativamente embrionali della ricerca sul comportamento di particolari specie animali. Data la mancanza di ipotesi meccanicistiche mature sui comportamenti in esame, la semplice identificazione di ipotesi plausibili (poiché "funzionanti" in simulazione) costituiva comunque un risultato di un certo interesse. Altri studi biorobotici si collocano invece in fasi più avanzate della ricerca: vari componenti del meccanismo che potrebbe produrre il comportamento da spiegare sono già stati identificati attraverso altre tecniche di indagine neuroscientifica e/o cognitiva. Conoscere i "pezzi" del meccanismo, però, non significa necessariamente conoscere gli schemi della loro connessione e le dinamiche delle loro interazioni; non significa cioè conoscere l'organizzazione del meccanismo di cui fanno parte. Negli studi biorobotici di cui discuteremo un esempio, il meccanismo simulato corrisponde a un'ipotesi (MV) sul modo in cui

quei componenti noti, simulati nel sistema, potrebbero essere organizzati nel sistema vivente in esame. La strategia è la stessa: se il robot R riesce a riprodurre il comportamento da spiegare, si può essere indotti a concludere che quei componenti sono proprio organizzati, in V, come prescritto dall'ipotesi MV.

L'oggetto dello studio condotto da (Reeve et al., 2005) riguarda ancora una volta l'orientazione verso la fonte di stimoli sensoriali. In questo caso si tratta della *fonotassi* dei grilli, ovvero della loro capacità di raggiungere altri membri della propria specie riconoscendone e seguendone i richiami sonori. Il sistema nervoso dei grilli è stato analizzato in gran dettaglio: è nota la struttura fisica dei loro organi uditivi, e molti neuroni o gruppi neurali coinvolti nell'elaborazione sonora sono stati già identificati. Come tali componenti siano connessi tra di loro, formando un meccanismo di coordinazione senso-motoria adatto a produrre un comportamento fonotattico, è però una questione ancora aperta. Il robot descritto in (Reeve et al., 2005) è costituito da una piattaforma in grado di muoversi con relativa agilità su terreni erbosi, controllata da una rete neurale artificiale che fa capo a due sensori uditivi. La rete neurale artificiale simula il comportamento di alcuni dei neuroni e dei gruppi neurali appena menzionati. Nel complesso, dunque, la rete neurale costituisce l'implementazione di uno dei modi in cui i vari componenti noti del sistema nervoso del grillo, isolati dalla ricerca neuro-etologica, possono essere connessi in un meccanismo. Negli esperimenti il robot viene posto su un terreno erboso, a una certa distanza da un generatore che emette i richiami sonori dei grilli. In varie sessioni sperimentali esso si rileva in grado di raggiungere il generatore, corroborando dunque l'ipotesi MV. L'esempio del robot-grillo illustra dunque un altro potenziale ruolo del metodo biorobotico: quello di *indicare possibili schemi di organizzazione meccanicistica di certi componenti noti* del sistema vivente in esame. Anche lo studio biorobotico sul sistema visivo della locusta descritto in (Blanchard et al., 2000), quello sul mantenimento della postura negli esseri umani descritto in (Chou & Hannaford, 1997), e quello sulla navigazione dei ratti descritto in (Krichmar et al., 2005) mettono alla prova ipotesi sull'organizzazione meccanicistica di componenti noti del sistema V.

È interessante notare come gli esperimenti condotti attraverso il robot-grillo abbiano sia corroborato l'ipotesi meccanicistica in esame sia stimolato l'approfondimento e la revisione di alcuni suoi aspetti. In alcune sessioni sperimentali il robot stentava a raggiungere il suo obiettivo, nonostante il circuito neurale indicasse la direzione corretta. Sulla base di ulteriori controlli gli autori hanno concluso che tali difficoltà non erano dovute a limitazioni del meccanismo di elaborazione uditiva, bensì a limitazioni del meccanismo di controllo motorio. Si trattava infatti di un meccanismo cosiddetto a "circuito aperto": i comandi venivano semplicemente inviati ai motori, senza controllare che essi fossero stati eseguiti correttamente. Il robot non era dunque in grado di correggere opportunamente i propri movimenti nel caso fossero stati temporaneamente ostacolati da impedimenti fisici (oggetti che si frapponevano lungo il cammino, resistenza ai movimenti causata dall'erba e altro ancora). Questa considerazione, stimolata dall'osservazione del comportamento del robot, ha indotto gli autori a perfezionare la propria ipotesi congetturando la presenza, nel

sistema nervoso dei grilli, di meccanismi di controllo “a circuito chiuso” che garantiscano una corretta esecuzione dei comandi motori.

In altre prove sperimentali il robot manifestava difficoltà di movimento in prima battuta difficili da diagnosticare. Indagini più approfondite hanno identificato la probabile fonte di tali difficoltà nel fatto che i sensori uditivi del robot erano collocati troppo vicino ai motori, il cui suono a tratti “copriva” il richiamo da seguire. Tale problema era senz'altro risolvibile allontanando i due componenti o scegliendo motori meno rumorosi. Tuttavia questa diagnosi richiamò l'attenzione dei ricercatori sul fatto che gli organi uditivi dei grilli sono, come nel robot, posizionati molto vicino agli arti dell'insetto. Si può dunque supporre che anche nei grilli il rumore causato dai movimenti dell'insetto interferisca con l'elaborazione sonora. Probabilmente, essi suggerirono, l'insetto dispone di qualche meccanismo che permetta di “cancellare” gli effetti sonori dei propri atti motori nel momento in cui vengono prodotti. Per una discussione più approfondita di questo e altri esempi in cui l'implementazione biorobotica ha stimolato la *nascita di nuovi quesiti scientifici* o la *revisione di particolari aspetti di ipotesi già formulate* si veda (Datteri, 2012).

3. Questioni di metodo scientifico

Le interessanti opportunità sperimentali permesse dalla biorobotica, che nella sezione precedente abbiamo introdotto e illustrato attraverso alcuni esempi, hanno legittimamente attratto l'attenzione di molti neuroscienziati e scienziati cognitivi lungo tutto il corso del XX secolo (il neuroscienziato Mitsuo Kawato ha addirittura affermato che “l'unico modo per comprendere a fondo il funzionamento del cervello consiste nel costruire, o ricostruire, sistemi artificiali che realizzano funzioni cerebrali”, Kawato, 2008). Il metodo biorobotico è stato discusso nelle principali riviste scientifiche (inclusa *Nature*: si veda Webb, 2002), e i progressi nella ricerca neuroscientifica e nella tecnologia robotica delle ultime due decadi hanno ulteriormente rafforzato l'entusiasmo nei confronti delle sue potenzialità. Nell'attestare l'importanza di tale strategia di ricerca è opportuno considerare alcune difficoltà metodologiche connesse alla realizzazione di un “buon” esperimento biorobotico: le insidie di metodo annidate nello schema di Figura 1 sono infatti molte e non semplici da neutralizzare. Senza la pretesa di una discussione approfondita, vale la pena quantomeno introdurre alcuni di questi potenziali problemi.

Si tratta di problemi detti, nella letteratura epistemologica e scientifica, di *sottodeterminazione teorica*. Abbiamo osservato che, negli studi biorobotici, la concordanza o la differenza tra il comportamento CR del robot e quello CV del sistema vivente in esame possono indurre a corroborare o screditare, rispettivamente, l'ipotesi in esame MV. La cautela è necessaria, tuttavia: concordanze o differenze tra CR e CV potrebbero essere dovute anche ad *altri* fattori, che elencheremo nei seguenti paragrafi. Dunque, il risultato del confronto tra CR e CV non determina univocamente il successo o l'insuccesso della teoria in esame – che dunque è *sottodeterminata* dal risultato sperimentale. Nessuno studio scientifico è immune dai problemi di sottodeterminazione teorica: in nessun caso si può escludere, in linea di principio, che i risultati sperimentali

siano dovuti a fattori che non hanno nulla a che fare con l'ipotesi che si desiderava valutare (per esempio a errori favorevoli o sfavorevoli degli strumenti di misura). La conduzione di uno studio biorobotico procede dunque, analogamente al procedere di qualsiasi studio scientifico, affrontando e tentando di arginare, volta per volta, i più seri problemi di sottodeterminazione teorica che emergono agli occhi del ricercatore. Vediamo dunque più da vicino alcune categorie di tali problemi.

3.1. L'ambiente sperimentale

Nella sezione 1.2 abbiamo sottolineato quella che viene spesso ritenuta una virtù del metodo biorobotico rispetto ai metodi simulativi spesso utilizzati in Intelligenza Artificiale: il fatto che il robot può essere collocato in ambienti molto simili a quello in cui si manifesta il comportamento da spiegare. A un esame più attento questa virtù perde un po' della sua attrattiva iniziale. Nel momento in cui il sistema V diventa oggetto di studio scientifico, esso viene tipicamente collocato in circostanze ambientali artefatte e sostanzialmente impoverite rispetto a quelle che caratterizzano la sua nicchia ecologica originaria. I comportamenti fonotattici dei grilli oggetto dello studio citato in precedenza non sono stati studiati nei prati di periferia, bensì in un laboratorio attrezzato con un piccolo *tapis-roulant* (tipicamente sferico) in grado di rilevare ogni minimo movimento dell'animale; le capacità di memorizzazione dei ratti, oggetto dello studio biorobotico descritto in (Burgess et al., 2000), non vengono studiate nei pertugi di una vecchia casa oppure nei sentieri umidi di campagna, ma in labirinti sperimentali e sotto condizioni ambientali rigorosamente controllate. La predisposizione di un ambiente sperimentale "artificiale" permette proprio di identificare i fattori ambientali maggiormente responsabili del comportamento dell'animale; in un ambiente caotico tale opera di discriminazione, necessaria per identificare i meccanismi senso-motori in atto, sarebbe molto difficile da compiere.

Collocare il robot R nella nicchia ecologica dell'animale, dunque, non sembra essere necessariamente una buona idea. Si potrebbe più ragionevolmente pretendere, invece, che R venga posto nelle *stesse* (accuratamente controllate) condizioni ambientali in cui è stato osservato il comportamento di V. In caso contrario, potrebbero emergere problemi di interpretazione dei risultati sperimentali. L'incapacità del robot R di replicare il comportamento dell'animale potrebbe essere infatti imputata a una particolare condizione *perturbante* presente nell'ambiente di R e non in quello di V; in tal caso non sarebbe ragionevole "dare la colpa" al meccanismo implementato? Analogamente, il fatto che R abbia riprodotto con successo il comportamento dell'animale potrebbe essere dovuto a fattori ambientali *ad hoc*, non presenti nell'ambiente in cui V è stato osservato, che lo facilitavano notevolmente: non sarebbe dunque ragionevole imputare questo successo alla "bontà" del meccanismo MV.

È dunque importante, per condurre uno studio biorobotico rigoroso, porre particolare attenzione alla relazione tra le circostanze ambientali in cui viene posto il robot e quelle in cui è stato osservato il sistema vivente in esame (non necessariamente coincidenti con quelle che sussistono nella sua nicchia ecologica). Sono proprio considerazioni di questo tipo a giustificare l'interesse dello studio sull'astice che abbiamo descritto nella sezione 2.2 e a sollevare

perplexità, per esempio, nei confronti dello studio biorobotico sull'orientazione spaziale dei ratti descritto in (Burgess et al., 2000). In conclusione di questa sezione osserviamo come, quanto più l'ambiente sperimentale in cui è stato studiato il sistema V è impoverito e artefatto, tanto meno schiacciante appare il confronto tra le virtù delle simulazioni biorobotiche e quelle delle simulazioni puramente informatiche: se i fattori ambientali presi in considerazione sono pochi e non troppo caotici, la simulazione informatica rappresenta un'alternativa praticabile e relativamente più economica rispetto alla costruzione di un robot. L'opportunità di realizzare una simulazione robotica deve dunque essere valutata con attenzione tenendo in considerazione le caratteristiche dell'ipotesi da controllare e dell'ambiente sperimentale in cui si desidera osservare il comportamento del sistema.

3.2. L'accuratezza implementativa

A rigore, il robot R dovrebbe costituire un'*implementazione accurata* del meccanismo ipotizzato MV. Altrimenti, non è chiaro perché il comportamento di R dovrebbe fornirci basi empiriche per corroborare o screditare MV. Si noti che l'accuratezza implementativa *non* è un requisito dei buoni studi "biologically inspired", in cui l'ispirazione biologica è meramente funzionale alla realizzazione di sistemi efficienti e robusti. L'efficienza, al contrario, non è un requisito dei "buoni" studi biorobotici: se il modello MV, per esempio, prevede che certi processi interni al sistema agiscano lentamente, anche il robot dovrà necessariamente essere "rallentato" negli aspetti corrispondenti, a spese ovviamente della velocità complessiva d'esecuzione. Se le caratteristiche di MV non vengono fedelmente riprodotte nel robot R, ritardi inclusi, si potrà dire che quest'ultimo implementa in realtà un meccanismo MR diverso, sotto qualche aspetto, da MV: in tal caso, perché dovremmo imputare le eventuali concordanze o discrepanze tra i comportamenti del robot e quelli del sistema vivente al meccanismo MV?

Il requisito dell'accuratezza implementativa non è facile da definire con precisione (per qualche spunto ulteriore si veda Datteri, 2012). Non è nemmeno semplice da soddisfare: per esigenze pratiche o teoriche è spesso necessario adattare l'ipotesi biologica all'implementazione robotica, introducendo dunque differenze significative tra il meccanismo MV e il meccanismo MR realmente implementato nella macchina (si veda ancora lo schema di Figura 1). Notevoli sforzi di accuratezza caratterizzano i già citati studi biorobotici sulla navigazione dei ratti (Krichmar et al., 2005), sul mantenimento della postura negli esseri umani (Chou & Hannaford, 1997) e sulla fonotassi dei grilli (Reeve et al., 2005). Lo studio sull'astice che abbiamo discusso nei paragrafi precedenti presenta spunti particolarmente interessanti per riflettere su questo importante requisito metodologico. Gli autori intraprendono una delicata e accurata ricerca delle possibili cause dell'inefficienza di RoboLobster; in particolare si chiedono se essa dipenda da certi aspetti del robot che non hanno alcuna relazione con l'ipotesi MV da controllare (ovvero, da alcune delle differenze tra MR e MV). Per valutare tali possibilità essi tentano di capire, attraverso ulteriori prove sperimentali, se modificando tali aspetti il comportamento del robot cambia o meno, sotto certi aspetti ritenuti rilevanti. Così non è: R continua a mancare il

suo obiettivo anche a seguito di tali modifiche. Gli autori concludono dunque che le differenze tra MR e MV non influiscono significativamente sul comportamento del robot: l'inefficienza di RoboLobster non è dovuta a dettagli implementativi del robot bensì, secondo gli autori, proprio all'inadeguatezza dell'ipotesi MV. Le argomentazioni condotte dagli autori costituiscono esempi molto interessanti per riflettere sulle sottili ma cruciali difficoltà connesse alla valutazione dell'accuratezza implementativa dei biorobot.

4. Conclusioni

In questo articolo abbiamo discusso, e illustrato attraverso alcuni esempi, il ruolo svolto dagli studi biorobotici nella scoperta dei meccanismi che stanno alla base del comportamento animale. Abbiamo inoltre introdotto alcuni problemi di carattere metodologico che è necessario affrontare per poter progettare e condurre dei "buoni" esperimenti biorobotici. La consapevolezza di tali problemi non depone affatto a sfavore delle potenzialità del metodo descritto (per una rassegna aggiornata dei molti studi di successo in biorobotica si veda Floreano et al., 2014) ma può anzi contribuire a rafforzare la solidità e il rigore delle argomentazioni coinvolte nell'interpretazione dei dati sperimentali e nella valutazione delle ipotesi teoriche in esame.

Abbiamo necessariamente trascurato alcune varianti della metodologia biorobotica, tra cui quelle connesse allo sviluppo delle cosiddette interfacce *bioniche* o cervello-macchina, che permettono di controllare i movimenti di artefatti robotici sulla base di segnali rilevati dal sistema nervoso animale. Attraverso tecnologie di questo tipo si spera di riuscire a costruire protesi robotiche che permettano di recuperare facoltà motorie o comunicative a soggetti affetti da gravi danni neurologici. Secondo molti ricercatori, le interfacce bioniche aprono inoltre nuove e significative opportunità sperimentali per la scoperta dei meccanismi che soggiacciono al comportamento motorio o addirittura alle capacità cognitive degli animali, esseri umani inclusi. La metodologia adottata a tale scopo mostra qualche aspetto in comune con quella biorobotica (Karniel et al., 2005; Reger et al., 2000). Insieme, la biorobotica e la bionica illustrano varie metodologie attraverso le quali la robotica può essere posta "al servizio" delle neuroscienze e delle scienze cognitive: metodologie più volte esplorate sin dagli inizi del XX secolo e oggi sempre più spesso adottate nei laboratori di ricerca, anche sull'onda dei notevoli progressi nella tecnologia robotica e nelle scienze del comportamento animale compiuti nelle ultime decadi di ricerca sperimentale.

Bibliografia

- Arbib, M. A., & Liaw, J.-S. (1995). Sensorimotor transformations in the worlds of frogs and robots. *Artificial Intelligence*, 72(1-2), 53–79.
- Arkin, R. C. (1998). Behavior-based robotics. The MIT Press.
- Arkin, R. C., Ali, K., Weitzenfeld, A., & Cervantes-Pérez, F. (2000). Behavioral models of the praying mantis as a basis for robotic behavior. *Robotics and Autonomous Systems*, 32(1), 39–60.

- Blanchard, M., Rind, F. C., & Verschure, P. F. M. J. (2000). Collision avoidance using a model of the locust LGMD neuron. *Robotics and Autonomous Systems*, 30(1-2), 17–38.
- Brooks, R. A. (1991). New Approaches to Robotics. *Science*, 253(5025), 1227–1232.
- Burgess, N., Jackson, A., Hartley, T., & O'Keefe, J. (2000). Predictions derived from modelling the hippocampal role in navigation. *Biological Cybernetics*, 83(3), 301–12.
- Chou, P. C., & Hannaford, B. (1997). Study of human forearm posture maintenance with a physiologically based robotic arm and spinal level neural controller. *Biological Cybernetics*, 76(4), 285–98.
- Cordeschi, R. (2002). *The Discovery of the Artificial: Behavior, Mind and Machines Before and Beyond Cybernetics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Datteri, E. (2008). Intelligenza artificiale: elaborazione simbolica e coordinazione senso-motoria. In S. Gensini & A. Rainone (Eds.), *La mente. Tradizioni filosofiche, prospettive scientifiche, paradigmi contemporanei* (pp. 237–254). Roma: Carocci.
- Datteri, E. (2012). *Filosofia delle Scienze Cognitive. Spiegazione, previsione, simulazione*. Roma: Carocci.
- Floreano, D., Ijspeert, A. J., & Schaal, S. (2014). Robotics and Neuroscience. *Current Biology*, 24(18), R910–R920.
- Grasso, F. W., Consi, T. R., Mountain, D. C., & Atema, J. (2000). Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges. *Robotics and Autonomous Systems*, 30(1-2), 115–131.
- Karniel, A., Kositsky, M., Fleming, K. M., Chiappalone, M., Sanguineti, V., Alford, S. T., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2005). Computational analysis in vitro: dynamics and plasticity of a neuro-robotic system. *Journal of Neural Engineering*, 2(3), S250–65.
- Kawato, M. (2008). From “understanding the brain by creating the brain” towards manipulative neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363(1500), 2201–14.
- Krichmar, J. L., Seth, A. K., Nitz, D. A., Fleischer, J. G., & Edelman, G. M. (2005). Spatial navigation and causal analysis in a brain-based device modeling cortical-hippocampal interactions. *Neuroinformatics*, 3(3), 197–221.
- Lambrinos, D., Möller, R., Labhart, T., Pfeifer, R., & Wehner, R. (2000). A mobile robot employing insect strategies for navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 30(1-2), 39–64.
- Loeb, J. (1900). *Comparative physiology of the brain and comparative psychology*. New York: G.P. Putnam's Sons.

Meyer, J., & Guillot, A. (2008). Biologically Inspired Robots. In B. Siciliano & O. Khatib (Eds.), *Springer Handbook of Robotics* (pp. 1395–1422). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Newell, A., & Simon, H. A. (1961). Computer simulation of human thinking. *Science*, 134(3495), 2011–2017.

Reeve, R., Webb, B., Horchler, A., Indiveri, G., & Quinn, R. (2005). New technologies for testing a model of cricket phonotaxis on an outdoor robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 51(1), 41–54.

Reger, B. D., Fleming, K. M., Sanguineti, V., Alford, S., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2000). Connecting brains to robots: an artificial body for studying the computational properties of neural tissues. *Artificial Life*, 6(4), 307–324.

Webb, B. (2002). Robots in invertebrate neuroscience. *Nature*, 417(6886), 359–363.

Biografia

Edoardo Datteri, dottore di ricerca in Filosofia, svolge attività di ricerca in Filosofia della Scienza presso l'Università degli Studi di Milano-Bicocca. I suoi interessi di ricerca vertono soprattutto sul ruolo delle simulazioni robotiche nelle scienze cognitive e sulla struttura delle spiegazioni neuroscientifiche oltre a numerosi articoli comparsi su riviste internazionali e nazionali del settore, è autore di "Filosofia delle Scienze Cognitive, Spiegazione, previsione, simulazione" (Carocci, 2012) e, assieme a Federico Laudisa, de "La natura e i suoi modelli. Un'introduzione alla filosofia della scienza" (Archetipo, 2011).

Email: edoardo.datteri@unimib.it