

ROBOT

SCIENZA E COSCIENZA DELLE MACCHINE

a cura di

CRISTIAN FUSCHETTO

PIETRO GRECO



*In collaborazione con
la Cooperativa di Comunicazione Scientifica “CodiCS”*



© CUEN 2009

via Coroglio, 104- 80124 NAPOLI

tel. 081.2301118/2301119 - fax 081/ 2302850

www.cuen.it

“La bussola di Albert” è una collana editoriale, che si apre con questo volume, nata dalla volontà della Fondazione Idis-Città della Scienza di documentare e rendere disponibile al pubblico, l’attività di riflessione, ricerca, documentazione svolta quotidianamente nelle tante iniziative che declinano la missione di Città della Scienza: costruire una società democratica della conoscenza, a partire dal Mezzogiorno d’Italia, attraverso la diffusione della cultura scientifica e dell’innovazione.

Il titolo della collana, da questo punto di vista, non è certo casuale.

Se da un lato il primo riferimento è alla bella citazione di Einstein riportata in epigrafe dei nostri volumi, che allude alla curiosità che – come per il piccolo Albert – è la molla di ogni percorso conoscitivo, la curiosità che noi lavoriamo per stimolare quotidianamente con le tante iniziative portate avanti nel nostro Science Centre; dall’altro, la bussola è un simbolo forte della necessità di orientarsi all’interno di un mondo via via più complesso e in cui scienza e tecnologia giocano un ruolo sempre più determinante; un mondo scosso dagli effetti di un processo di ristrutturazione globale dell’economia che ha radicalmente messo in crisi antiche certezze ma anche, al contempo, riaperto prospettive di ricerca per immaginare il futuro.

Vittorio Silvestrini

*Presidente della
Fondazione Idis-Città della Scienza*

Sommario

Pietro Greco, *Prefazione. L'uomo e i robot* 9

Parte prima. La scienza dei robot

Bruno Siciliano, *I robot sono con noi, dentro di noi e tra noi* 25

Ernesto Burattini, *Cos'è un robot* 33

Orazio Miglino, *I robot alla scoperta del nostro mondo* 41

I robot nello spazio

Intervista a Luigi Colangeli di Adele Brunetti 47

Gianmarco Veruggio, *I robot sotto i mari* 55

Vincenzo Capone, *I robot soldati* 65

Ilaria Merciai, *I robot in sala operatoria* 73

Vincenzo Balzani, Alberto Credi, Margherita Venturi, *Nanorobot:
le macchine molecolari* 79

Un nanorobot ci guarirà

Intervista a Marco Foiani di Stefano Pisani 93

Parte seconda. La coscienza dei robot

Roberto Cordeschi, *L'alba della robotica* 105

Edoardo Datteri, Guglielmo Tamburrini, *Robotica,
etica e conoscenza scientifica* 119

Gianmarco Veruggio, *La Roboetica* 133

Giuseppe O. Longo, *L'uomo dopo i robot* 143

Riccardo Notte, *Il robot e il mito* 153

Francesco De Matteis, *Il robot e il suo doppio* 161

Gianni Zanarini, *Creature tecnologiche:
storie di robot al cinema* 169

Settimo Termini, <i>“Io robot, la (fanta)scienza e le altre”</i> . <i>Complessità e domanda di interdisciplinarietà</i>	181
Postfazione	
Cristian Fuschetto, <i>Per un umanesimo delle macchine</i>	197
Gli autori	209

Prefazione
L'uomo e i robot
Pietro Greco

I robot costituiscono una grande sfida per la scienza e per l'umanità. Forse la più grande. Perché ci obbligano a immaginare il futuro remoto, partendo dal presente tangibile. Perché ci invitano a pensare l'altro da noi. Perché, di conseguenza, ci impongono di guardarci allo specchio: per osservare noi stessi con più attenzione e capire come siamo fatti. Fuori e, soprattutto, dentro. Perché ci costringono, semplicemente, a riflettere.

Ma cosa sono, i robot?

Non è affatto semplice rispondere a questa domanda. Non a caso abbiamo chiamato a farlo, in questo libro, diverse persone, di riconosciuta competenza, di diversa estrazione culturale e con diversi interessi scientifici. Ingegneri, fisici, chimici, matematici, storici, filosofi, sociologi, antropologi, comunicatori. Tutti chiamati a descrivere le mille facce del robot. E i mille specchi in cui possiamo rifletterci. Tutti chiamati a costruire, insieme, l'era dei robot.

Un'era che è già iniziata.

E che già ci propone, a sua volta, mille domande concrete. Per questo abbiamo diviso il libro in due parti: la scienza dei robot (Parte I) e la coscienza dei robot (Parte II). Nella prima parte alcuni tra i maggiori esperti italiani spiegano cosa stanno già facendo e cosa faranno nel futuro prossimo i robot. Nella seconda parte alcuni tra i maggiori esperti italiani ci indicano quali sono stati, quali sono e quali presumibilmente saranno i temi e i problemi del rapporto tra l'uomo e i robot.

E già questa voluta asimmetria (la parola uomo declinata al singolare; la parola robot declinata al plurale) è contenuta un'infor-

mazione o, almeno, una visione del mondo dei robot: qualsiasi cosa siano, i robot non sono una cosa sola. Ma una pluralità di cose. Che trova una prima espressione in una pluralità di forme. C'è Asimo, il robot androide. E ci sono i robot industriali.

C'è il robot marziano. E il robot sottomarino.

C'è la macchina molecolare, il nanorobot. E ci sono i robot giganti.

C'è il robot chirurgo. E c'è, anche, il robot soldato.

Ma procediamo con ordine. Iniziando col definire, in prima approssimazione, cosa possiamo intendere per robot. La parola deriva da *robot*, che in lingua ceca significa *lavoro duro, pesante, forzato*. L'attuale significato è stato attribuito alla parola robot da un giornalista e scrittore ceco, appunto: Karel Čapek. Nella sua opera più famosa, *R.U.R (Rossum's Universal Robots)*, scritta nel 1920, il giornalista e scrittore narra di un grande filosofo, il vecchio Rossum, che vuole ricostruire l'uomo, tal quale. Impiega dieci anni, usa materiale biologico e infine ci riesce. L'uomo è ricopiato tal quale dal vecchio Rossum, ma vive solo tre giorni.

Giunge infine sulla scena il giovane Rossum, un geniale ingegnere. E chiede al vecchio zio: a che serve un uomo tal quale ricostruito in dieci anni, quando la natura ci riesce in nove mesi? A noi non serve l'uomo. Non serve un altro uomo. A noi serve qualcuno, da costruire in tempi rapidi e a basso costo, che svolge le funzioni indesiderabili al posto dell'uomo. Uno schiavo che libera definitivamente l'uomo dalla fatica.

Ma lasciamo la parola a Karel Čapek: "Il giovane Rossum inventò l'operaio con il minor numero di bisogni. Dovette semplificarlo. Eliminò tutto quello che non serviva direttamente al lavoro. Insomma, eliminò l'uomo e fabbricò il Robot".

La parola robot, dunque, nasce nel 1920 per indicare una macchina che, come un nuovo schiavo, compie i lavori più duri e pesanti al posto dell'uomo.

Già, ma qual è la differenza tra i robot del giovane Rossum e una qualsiasi macchina? Banalizzando, possiamo dire che una mac-

china qualsiasi aiuta l'uomo a compiere un lavoro. Un coltello è un utensile che aiuta l'uomo a tagliare il pane. Un'automobile è una macchina che aiuta l'uomo a muoversi velocemente. Un coltello se ne sta lì fermo se un uomo non lo utilizza. Un'automobile se ne sta lì ferma senza un uomo che la guida mentre si fa trasportare? Né il coltello né la macchina hanno senso se non c'è l'uomo. Né il coltello né la macchina agiscono “al posto dell'uomo”.

Sia pure semplificato e ridotto all'essenziale, secondo la ricetta del giovane Rossum, il robot è una macchina che opera “al posto” dell'uomo e, dunque, si muove nell'ambiente con molta flessibilità e soprattutto in autonomia. Il robot è, almeno tendenzialmente, una macchina autonoma, capace di agire in maniera intelligente nell'ambiente nel quale opera.

Riassumendo. Il tagliaerba che abbiamo in giardino è una macchina che assolve la sua funzione, tagliare l'erba, solo se noi l'azioniamo e la guidiamo. Il robot tagliaerba è una macchina che assolve la sua funzione, tagliare l'erba del giardino, in maniera autonoma, senza che noi l'azioniamo e senza che noi la guidiamo. Le macchine e persino gli utensili possono evolvere in robot. Basta che un coltello tagli il pane da solo, al momento giusto. O che un'automobile si muova nel traffico da sola, senza andare a sbattere e portando il passeggero (o la merce) a destinazione. Ed ecco che una macchina o comunque un artefatto è diventato un “operaio di Rossum”, un robot.

Naturalmente i gradi di libertà concessi all'operaio di Rossum possono essere molto diversi. Da una libertà molto condizionata a una libertà totale. Diciamo subito che, al momento, scienziati e ingegneri – talvolta con l'aiuto dei logici e dei filosofi – sono riusciti a costruire macchine dotate di diversi gradi di libertà. Ma non sono riusciti ancora a costruire robot con una “libertà totale”. Di più: ancora non sappiamo – la possibilità, in linea di principio, è prevista da alcuni, ma negata da altri – se mai esisterà un robot dotato di “libertà totale”: che sceglie di agire avendo co-

scienza sia che sta per agire sia che ha coscienza che sta per agire. Cosa intendiamo dire, lo vedremo tra poco. Verifichiamo per ora quali sono i principali “gradi di libertà” delle macchine finora realizzate: già in commercio o allo stato di prototipo da laboratorio. Alla base della piramide dell’autonomia ci sono gli oggetti artificiali, come i coltelli da tavola, privi di qualsivoglia autonomia e flessibilità. Appena più su ci sono i “sistemi controllati” (in inglese “controlled systems”): ovvero le macchine che si muovono nell’ambiente sotto il totale o parziale controllo dell’uomo. La nostra automobile, per esempio, è un sistema controllato. È un insieme di parti, un sistema, che agendo in maniera coerente compie un lavoro duro: porta noi, essere pensanti ma anche pesanti, a spasso per il mondo, senza tuttavia alcuna possibilità di agire in maniera autonoma. Si muove solo sotto la nostra guida. L’automobile è una macchina, talvolta molto sofisticata, ma non è un robot.

Più su, nella nostra piramide della libertà, ci sono i “sistemi sorvegliati” (in inglese “supervised systems”): sono macchine programmate dall’uomo, che agiscono sulla base di programmi piuttosto stretti, ma interagendo con l’ambiente e scegliendo di volta in volta tra poche opzioni quella che risulta la migliore in quel frangente. È il caso di *Robogate*, la macchina, dotata di braccia articolate e altri meccanismi mobili, capace di saldare e assemblare le scocche delle automobili utilizzata per prima nelle fabbriche della Fiat a partire dagli anni ’70 del secolo scorso. Queste macchine svolgono con una certa flessibilità lavori molto duri e pericolosi al posto dell’uomo (oggi sono usate, per esempio, nei reparti verniciatura e, dunque, in un ambiente inquinato e rischioso), hanno un minimo grado di autonomia e, dunque, sono a tutti gli effetti robot. Sono chiamati, infatti, robot industriali. Negli ultimi tempi abbiamo assistito a una notevole evoluzione dei “sistemi sorvegliati”: abbiamo robot capaci di realizzare lavori con estrema precisione e flessibilità nei più diversi ambienti, nello spazio, nelle profondità sottomarine, tra le macerie di un pa-

lazzo crollato, nelle più asettiche sale chirurgiche. Per quanto sofisticate, queste macchine non possono gestire l'imprevisto: ovvero eventi che non sono stati immaginati da chi le ha programmate. Sono robot, talvolta molto sofisticati, ma del tutto stupidi. Per questo hanno bisogno di essere "sorvegliati": c'è sempre un operatore umano che segue il loro lavoro, li dirige ed è pronto a bloccarli in caso di necessità.

I robot che sono già tra noi sono sempre più sofisticati, ovvero hanno al loro interno una quantità sempre più grande di conoscenza, e iniziano a sollevare l'uomo da molte delle sue fatiche. Sono utili. E sono sempre più diffusi. Chi li possiede ne trae un vantaggio, ma qualcuno ne trae anche svantaggio. L'introduzione dei robot industriali in fabbrica, per esempio, solleva gli operai umani dalla dura fatica: e questo è un bene. Questo è il bene che si proponeva il giovane Rossum. Ma, talvolta, sottraggono il lavoro stesso all'operaio in carne e ossa. E questo crea problemi sociali, che vanno gestiti. Di più. Le imprese che utilizzano robot industriali hanno un vantaggio economico: la loro competitività sul mercato aumenta. Talvolta, però, a scapito di imprese, magari dislocate in altre parti del mondo, che non hanno la possibilità di accedere e di usare le nuove conoscenze robotiche. Il robot industriale (a causa del sistema economico dell'uomo) può generare disuguaglianza sociale.

Tutto questo e altro ancora ci impongono di affrontare il primo e il più elementare tema del rapporto tra l'uomo e i robot: chi deve beneficiare dello sviluppo della robotica, anche allo stadio di sviluppo di "sistemi sorvegliati"? La domanda non prevede una risposta specifica. Vale per i robot ciò che vale per tutta la scienza e la tecnologia: le nuove conoscenze e le nuove tecnologie devono essere un fattore di integrazione e non di esclusione sociale; devono essere tendenzialmente a vantaggio dell'intera umanità, e non di sue singole componenti. Il robot deve sostituire l'uomo nei lavori pesanti, non deve sostituire l'uomo come attore sociale. La risposta, in teoria, è semplice. Ma la sfida, nel concreto, è davvero grande.

Saliamo ancora lungo la piramide della libertà di azione e ci imbattiamo nei “sistemi automatici”: sono i sistemi che svolgono un certo tipo di lavoro per cui sono programmati, ma senza l'intervento di un operatore. Esistono già macchine di questo tipo, capaci di muoversi nell'ambiente e agire in maniera automatica, senza il controllo diretto dell'uomo. Ne sono esempi i robot che giocano a calcio o i già menzionati robot giardinieri, capaci di “decidere” se e come falciare l'erba in un giardino. Si sta lavorando alla realizzazione di “robot soldati”, capaci di agire, in maniera automatica, in uno scenario di guerra. Tutto questo ha una valenza specifica e ci induce a porci due tipi di domande.

Primo: qual è il grado di sofisticazione e di complessità raggiunto dai “sistemi automatici”? Dal tempo di Karel Čapek e, soprattutto, dal tempo di Norbert Wiener e della nascita della cibernetica – che al tema della automazione delle macchine ha cercato di dare risposta – i progressi di questi robot sono stati enormi. Abbiamo robot che operano a ogni livello: macroscopico e microscopico, nello spazio esterno alla Terra e in quello interno agli uomini. Eppure non tutti i problemi di progettazione e di concreta realizzazione sono stati risolti. La gestione della complessità dell'ambiente da parte di macchine che vogliamo sempre più autonome è questione ancora aperta. Si tratta, appunto, di una sfida che la scienza ha colto e con cui si sta cimentando.

L'altro tipo di domande ha una natura affatto diversa: chi risponde per le azioni dei “sistemi automatici”? E il fatto stesso che ci poniamo una domanda del genere sta a indicare che siamo di fronte a una prima svolta, a una specificità emergente, nel rapporto tra uomo e robot. I “sistemi automatici” che, per definizione, non sono sotto il controllo dell'uomo, pongono problemi sociali, filosofici, etici del tutto originali: chi ha la responsabilità delle azioni svolte da macchine che non sono direttamente controllate dall'uomo?

Di più. Molti di questi “sistemi automatici” non sono esterni all'uomo. Alcuni iniziano a essere “interni” all'uomo. Macchine,

talvolta molto piccole, poste nel suo corpo. Persino nel suo cervello. C'è una crescente ibridazione dell'uomo e dei robot. Qualcosa cui il giovane Rossum non aveva, forse, pensato: non la sostituzione dell'uomo con il robot, ma l'integrazione nell'uomo del robot. La nascita dell'uomo/robot. I problemi sociali, filosofici, etici di questa nuova condizione sono ancora a un livello largamente speculativo. L'ibrido non ha ancora assunto una forma chiara e visibile. Però lo farà certamente in futuro. Nel futuro remoto. O anche nel futuro prossimo. Cosicché conviene iniziare già ora a riflettere sul governo (delle opportunità e dei rischi) della nuova era, che qualcuno ha definito del transumanesimo o del postumanesimo.

Veniamo, infine, all'ultimo (o meglio, al penultimo) livello nel grado di libertà dei robot: quello dei "sistemi autonomi", delle macchine capaci di imparare dall'ambiente, adattarsi, evolvere e assumere decisioni. Diciamo subito che questi tipi di robot ancora non sono tra noi. Non a livello commerciale, almeno. Ma è molto probabile che lo saranno tra poco. Qualcuno avrà una forma umana (i robot androidi), altri no (per esempio i sistemi intelligenti per la gestione della casa). Molti ci aiuteranno nella nostra vita quotidiana: come camerieri tutto fare, come infermieri, come manager della casa. Altri avranno una funzione sociale: come i sistemi di gestione del traffico o come i robot, per così dire, destinati alla protezione civile, in grado di intervenire in condizioni pericolose: l'incendio di una casa; la ricerca di persone sotto le rovine di un terremoto; l'intervento in un ambiente saturo di gas nocivi e via lasciando briglia sciolta alla fantasia. Altri, occorre ricordarlo, potranno trovare impiego in guerra: diventando veri e propri soldati dotati di autonomia di decisione.

Anche in questo caso si aprono due tipologie di domande. Le medesime che abbiamo posto prima, ma a un livello più elevato. La prima riguarda la capacità tecnica di mettere a punto robot dotati di autonomia. Si tratterà di macchine che devono osservare e imparare a muoversi nell'ambiente; gestire gli imprevisti e le situa-

zioni di incertezza; assumere una decisione persino in condizioni che un logico definirebbe di indecidibilità. Per realizzare queste macchine abbiamo bisogno, probabilmente, di una convergenza culturale: migliorare le capacità computazionali dei nostri computer (la potenza di calcolo) e, nel medesimo tempo, far assumere alla macchina le capacità evolutive tipiche dei sistemi biologici. È una sfida scientifica antica, ma non ancora risolta. Occorre unificare a un livello più intimo la fisica, la chimica e la biologia. Occorre, probabilmente, elaborare nuove matematiche. Occorre probabilmente scoprire tutto il valore dell'interdisciplinarietà.

La seconda tipologia di domande che generano i “sistemi autonomi” hanno una natura sociale ed etica. Ne rilanciamo alcune, proposte di recente dalla Royal Academy of Engineering di Londra: è consigliabile produrre macchine autonome il cui comportamento non può essere controllato e, all'occorrenza, interrotto dall'intervento dell'uomo? Potremo credere a queste macchine come o addirittura più di quanto crediamo a noi stessi? Chi ci assicura, per esempio, che in guerra un soldato robot si comporti in maniera eticamente più accettabile di un soldato in carne e ossa? Chi è responsabile per il loro comportamento? Se un robot ucciderà un uomo, chi metteremo in prigione: la macchina o il suo progettista? Chi ci assicura che riusciremo a impedire che l'evoluzione di robot in possesso di quella particolare autonomia che è l'autonomia di evolvere non si risolva in una minaccia per l'uomo? Quando e come dovremo intervenire per limitare l'autonomia di questi robot autonomi?

Sono domande che si aggiungono a, certo non sostituiscono, quelle più generali che abbiamo posto prima. Può aiutarci nelle scelte che dovremo affrontare la riaffermazione di un valore fondante della scienza, compresa la scienza robotica: i robot autonomi non dovranno essere a vantaggio di questo o di quello, ma – come voleva Francio Bacon a proposito, appunto, dell'intera scienza – dovranno essere a vantaggio dell'intera umanità.

È in questa prospettiva che Isaac Asimov, il grande scrittore di

fantascienza, ha elaborato le tre famose “leggi della robotica” che immagina saranno attuali nel 2058:

1. Un robot non può recar danno a un essere umano né può permettere che, a causa del proprio mancato intervento, un essere umano riceva danno.
2. Un robot deve obbedire agli ordini impartiti dagli esseri umani, purché tali ordini non contravvengano alla Prima Legge.
3. Un robot deve proteggere la propria esistenza, purché questa autodifesa non contrasti con la Prima e con la Seconda Legge.

La concreta applicazione di queste leggi generali ha già portato, come vedremo, a elaborare una vera e propria “etica dei robot” o “roboetica”: un pensiero di “filosofia applicata” piuttosto complesso, solido, ben argomentato. Un pensiero che, tuttavia, è ancora in fase di forte evoluzione, perché il suo oggetto, i robot e il rapporto dei robot con l’uomo, è esso stesso in fase di rapida evoluzione. E ancor più lo sarà in prospettiva, quando – ma occorrerebbe anche aggiungere un prudente se – i robot raggiungeranno il massimo grado di libertà possibile: la coscienza. E il libero arbitrio (ammesso che esista qualcosa che possiamo chiamare libero arbitrio). Nell’immaginario di noi tutti il robot è un automa che somiglia, nella forma, all’uomo. Il robot è un androide. Non è un immaginario che nasce con Karel Čapek. Appartiene alla mitologia antica, mediterranea – celeberrimo è il Golem della leggenda ebraica – e non. Il robot ha le fattezze dell’uomo. Ma non solo le fattezze. Ha anche un’intelligenza umana. È cosciente di sé. Ed è dotato, appunto, di libero arbitrio.

Inutile dire che, a tutt’oggi, questo tipo di robot non esiste. Asimo, forse il più famoso tra gli androidi finora realizzati, ha due gambe, due braccia e una testa che lo rendono nella forma simile all’uomo. Ha un cervello, capace di computare in maniera molto veloce, che lo mette in grado di muoversi con una certa flessibilità e una certa sicurezza nell’ambiente. Ma non ha ancora una mente umana. Non è cosciente. Non è autocosciente. Non è dotato di libero arbitrio.

Ma esisterà mai un robot – androide o meno – dotato di intelligenza umana, di autocoscienza e di libero arbitrio? E se sì, ciò modificherà in maniera significativa i temi e i problemi nel rapporto tra robot e uomo che abbiamo finora sollevato?

A questo punto la comunità scientifica si divide al suo interno. E così anche quelli che, come i filosofi, pur non essendo scienziati riflettono sullo sviluppo della scienza. Ci sono coloro che sostengono sicuri: è solo questione di tempo e, nel giro di qualche decennio, i robot supereranno le capacità cognitive dell'uomo. Alcuni sono certi che acquisteranno la coscienza, l'autocoscienza e il libero arbitrio. E c'è chi, infine, con inferenza lineare sostiene che questi esseri coscienti di sé e con capacità fisiche e cognitive superiori a quelle umane sono destinati a prendere il sopravvento sull'uomo. La letteratura e il cinema hanno riproposto mille e mille volte il mito dello schiavo meccanico che si ribella al suo padrone e riduce in schiavitù il suo (malaccorto) creatore.

C'è chi, invece, sostiene che la coscienza, la coscienza di sé e il libero arbitrio sono frutti irripetibili e tutto sommato casuali dell'evoluzione biologica. E che mai l'uomo riuscirà a creare una macchina dotata di un'intelligenza (artificiale) così sofisticata da somigliare o addirittura da superare quella umana.

Probabilmente entrambe queste posizioni estreme e opposte, che abbiamo delineato non perché riflettano il pensiero – in genere ben più complesso e articolato – di scienziati e filosofi, ma per mera comodità di argomentazione, sono sbagliate. Non è affatto scontato che i robot acquisteranno capacità cognitive analoghe a quelle umane. Ma, allo stesso modo, non è affatto escluso che potranno acquisire capacità cognitive molto sofisticate: anche perché di alcune di queste capacità cognitive, i robot, sono già in possesso.

Come si vede, a questo punto della discussione il progetto della robotica si sovrappone largamente al progetto della cosiddetta «intelligenza artificiale forte» e, con ciò, accetta la sfida più alta che è di fronte alla scienza moderna: capire la mente dell'uomo ed eventualmente riprodurla.

I temi e le problematiche che scaturiscono da questa sfida sono tanti e per noi, in questa sede, sarebbe difficile anche solo elencarli. Possiamo dar conto, tuttavia, delle principali poste in gioco mettendo a confronto posizioni diverse. Sul piano scientifico c'è chi sostiene che, tutto sommato, il cervello umano è una macchina che computa. Con alcune centinaia di miliardi di neuroni e con alcune decine di migliaia di miliardi di connessioni tra i neuroni, il cervello umano è in grado di elaborare informazione più di qualsiasi computer artificiale esistente. Ma la differenza sta diminuendo sensibilmente. E già si intravede la data in cui i computer prodotti dall'uomo raggiungeranno le capacità cognitive del cervello dell'uomo e, subito dopo, le supereranno. Qualcuno chiama "singolarità" questo evento e sostiene che si verificherà non più tardi del 2040 o 2050 (proprio quando Isaac Asimov prevede che diverranno attuali le "leggi della robotica").

Hans Moravec, un austriaco che lavora al Robotics Institute della Carnegie Mellon University, per esempio, ritiene che per emulare le funzioni del cervello umano occorreranno computer capaci di effettuare diecimila miliardi (10^{13}) di operazioni al secondo. E che queste performance saranno possibili entro il 2030 o 2040 per computer relativamente economici, da 10.000 dollari. A quel punto avremo robot pienamente intelligenti (ed economici). Già oggi, sostiene Moravec, i robot hanno capacità cognitive paragonabili a quelle di un insetto o, addirittura, di un piccolo rettile come una lucertola.

I critici del modello computazionale del cervello e della mente umana sostengono che le nostre capacità cognitive (ma anche quelle delle lucertole) non sono date solo dalla mera velocità di elaborare informazione, ma anche da altri fattori (non è sempre chiaro quali siano questi fattori) che consentono al cervello umano di scavare tunnel sotto la necessità del calcolo e di "intuire" le decisioni giuste da prendere. Questo avviene sia quando agiamo, per così dire, in "automatico": ovvero quando prendiamo decisioni che non attraversano la nostra coscienza (per esempio

quando guidiamo l'automobile o quando mastichiamo il cibo), sia quando prendiamo decisioni di cui abbiamo piena coscienza: per esempio quando decidiamo di iscriverci all'università al corso di laurea in ingegneria per studiare i robot. In breve: la nostra intelligenza e la nostra coscienza non sono riducibili a meri algoritmi. A questo punto le posizioni dei critici del modello computazionale si dividono. Le possiamo dividere, a grana grossa, in tre ulteriori posizioni distinte. C'è chi dice: la mente umana è frutto dell'evoluzione biologica per selezione naturale del più adatto. Costruiamo un robot capace di adattarsi (un computer collegato con dei sensori all'ambiente e in grado di apprendere dall'esperienza), mettiamolo in un ambiente opportuno, in cui è possibile un'evoluzione accelerata, e i principi della selezione naturale si applicheranno anche a queste macchine generando inevitabilmente un'emergenza: il robot intelligente e persino autocosciente, capace di "intuire" non solo di "calcolare".

A ben vedere le differenze tra la posizione dei sostenitori del modello computazionale e dei sostenitori del modello evolutivo non sono insuperabili. Anzi, per certi versi possono sfumare le une nelle altre. Di fatto entrambe prevedono che, prima o poi, avremo robot proprio come li voleva il vecchio filosofo Rossum: uguali cognitivamente all'uomo.

C'è, tuttavia, un'ulteriore scuola di pensiero tra i critici del modello computazionale. Quella che sostiene che non esiste l'intelligenza umana o una sola e straordinaria capacità cognitiva della mente dell'uomo. Ne esistono diverse. Anzi, esistono in natura capacità cognitive che l'uomo non possiede, ma che sono appannaggio di altre menti (o, almeno, di altri cervelli). Per cui non c'è dubbio alcuno che i robot incrementeranno la loro autonomia – il loro grado di libertà – ma acquisendo solo una parte delle svariate intelligenze e delle svariate capacità cognitive umane, e acquisendone altre che non sono nella disponibilità dell'uomo. Insomma, avremo robot sempre più cognitivamente complessi. Ma "diversi" dall'uomo.

C'è, infine, un'ultima posizione. Quella che ritiene che per quanto i computer acquisteranno capacità di calcolo e i sensori consentiranno a macchine guidate da computer di muoversi in maniera flessibile e sicura nell'ambiente, mai e poi mai queste macchine diventeranno "intelligenti", mai e poi mai acquisteranno la "semantica" dell'ambiente, né tanto meno diverranno coscienti e coscienti di sé. Saranno macchine capaci di fare calcoli in quantità sbalorditiva, ma resteranno irrimediabilmente stupidi.

Naturalmente il ventaglio di posizioni tra gli studiosi sul campo della robotica e dell'intelligenza artificiale è molto più variegato. Copre, in sostanza, tutto lo spazio tra l'ottimismo più spinto e il pessimismo più irriducibile. Ciò rende la sfida scientifica che ci pongono i robot ancora più avvincente, perché risulta ancora del tutto aperta: svilupperemo solo macchine in grado di agire al posto dell'uomo in maniera economica, sicura e flessibile come indicava il giovane ingegnere Rossum; avremo macchine analoghe o addirittura omologhe all'uomo, come voleva il vecchio filosofo Rossum o l'evoluzione culturale andrà oltre e genererà macchine con capacità cognitive a ogni livello più sofisticate di quelle umane?

Semplicemente non lo sappiamo.

Probabilmente avremo non un solo robot, ma diversi robot con diverse capacità cognitive. Alcune inferiori, alcune analoghe e altre superiori a quelle umane.

In ogni caso possiamo (dobbiamo) iniziare a immaginare degli scenari di possibilità. E simulare quali effetti ciascuno di essi avrà sull'uomo e sulla sua società. L'esercizio ci aiuterà a costruire un futuro desiderabile.

Intanto ci aiuta a capire noi stessi. Se, infatti, vogliamo costruire un robot simile a noi, dobbiamo capire in dettaglio chi siamo noi: come sono fatti il nostro corpo, il nostro cervello, la nostra mente. Da dove veniamo: qual è la nostra storia. Come sono fatte le società dei nostri corpi, dei nostri cervelli, delle nostre menti.

E poi ci aiuta a interrogarci su chi è l'altro. In un mondo in cui esi-

steranno nuovi esseri, artificiali, con capacità cognitive analoghe o omologhe alle nostre, esseri dotati di intelligenza, di coscienza, di capacità etiche, di emozionarsi e quindi di gioire e di soffrire, ebbene non potremo limitarci a dare corpo alle “leggi di Asimov” per tutelare la nostra sicurezza e il nostro benessere; dovremo elaborare leggi simmetriche che tutelino la sicurezza e il benessere anche dei robot senzienti. Dovremo imparare a riconoscere e a rispettare l’“altro” da noi. E questo, a ben vedere, è un esercizio necessario non solo per il futuro remoto, ma anche per quello più prossimo. Utile per il presente.

Parte prima

La scienza dei robot

Nanorobot: le macchine molecolari

Vincenzo Balzani

Alberto Credi

Margherita Venturi

Nanomacchine

I congegni biochimici che presiedono a tutte le funzioni vitali, dalla sintesi dell'ATP ai movimenti muscolari, ci dicono che il concetto di macchina, così familiare nel mondo macroscopico dove gli oggetti sono tangibili e visibili, può essere esteso al mondo microscopico e invisibile delle molecole. Questi dispositivi di dimensione nanometrica (un nanometro, nm, è pari a un milionesimo di metro) sono infatti costituiti da componenti molecolari opportunamente assemblati al fine di eseguire movimenti meccanici in seguito all'azione di stimoli energetici esterni; si tratta, pertanto, di vere e proprie macchine a livello molecolare, chiamate anche "nanomacchine" con evidente riferimento alle loro dimensioni. Le macchine molecolari naturali sono molto complesse, sia per il numero di componenti molecolari che per struttura e, quindi, inimitabili. La conoscenza sempre più approfondita della loro composizione e funzionalità e i recenti progressi della chimica hanno, però, permesso di ottenere i primi prototipi di macchine molecolari artificiali che, nonostante siano estremamente più semplici rispetto a quelle biologiche, stanno aprendo prospettive del tutto nuove in vari campi della scienza e della tecnologia.

Macchine microscopiche e "naturali"

Il movimento è uno degli attributi principali della vita. I sistemi viventi sono forniti di aggregati di molecole molto complessi (gli enzimi) che lavorano all'interno delle cellule come vere e proprie macchine per soddisfare i bisogni delle cellule stesse: trasporto

di materiale molecolare, copia e trasduzione del codice genetico nelle proteine, scambio di informazioni con altre cellule, e altro ancora. Anche tutti i movimenti macroscopici degli organismi viventi – dai batteri alle balene – e le funzioni più nobili dell'uomo – dal parlare al pensare – sono conseguenze di movimenti a livello molecolare. L'esistenza delle nanomacchine naturali è nota da molto tempo, ma solo di recente i ricercatori hanno cominciato a studiare i meccanismi chimici del loro funzionamento, evidenziando che questi sistemi operano mediante movimenti meccanici di vario tipo, spesso complessi e interconnessi, ma a volte anche semplici, come rotazioni e spostamenti lineari, simili a quelli effettuati da macchine del mondo macroscopico. Anche se i meccanismi di funzionamento a livello molecolare delle nanomacchine naturali non sono ancora chiariti del tutto, è possibile rappresentare schematicamente in forma grafica le loro funzioni. Per ragioni di spazio, saranno illustrati soltanto alcuni esempi tipici suddivisi in base al tipo di movimento effettuato. Cominciamo con i movimenti lineari.

Un esempio ben noto di motore naturale che sviluppa un movimento di tipo lineare è rappresentato dalla miosina, termine usato per indicare numerose classi di proteine che sono alla base di tutti i movimenti muscolari volontari e involontari. Le molecole di miosina, ciascuna costituita da una lunga "coda" a cui sono collegate due grosse "teste", nelle cellule dei muscoli sono assemblate tramite le code per dare un filamento dal quale si protendono le teste; queste raggiungono un filamento di actina (una proteina assimilabile a una scala) e si attaccano ad esso (v. fig. 1). L'idrolisi di una molecola di ATP fornisce al sistema energia, che viene utilizzata per far cambiare radicalmente la forma delle teste della miosina e per costringerla a spostarsi lungo il filamento di actina. In un muscolo che si contrae rapidamente, ciascuna unità di miosina si muove cinque volte al secondo, percorrendo una distanza di circa 10 nm.

Ma oltre ai movimenti lineari rivestono una grande importanza

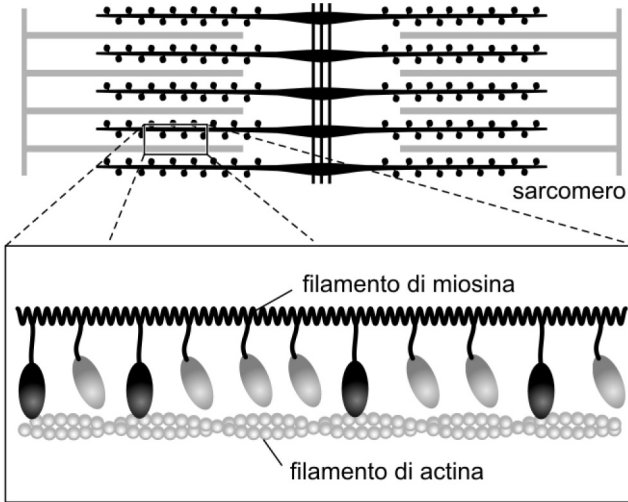


Figura 1. Rappresentazione schematica di un sarcomero, il più piccolo elemento funzionale contenuto nelle fibre muscolari: le molecole di miosina (ovali) sono in parte libere (chiarie) e in parte legate (scure) al filamento di actina.

anche i movimenti rotatori. Una delle nanomacchine naturali più studiate è certamente quella preposta alla sintesi dell'adenosintrifosfato (ATP), molecola che fornisce l'energia per le funzioni vitali. Questo congegno, illustrato nella fig. 2, ha dimensioni dell'ordine di 10 nm ed è costituito da un'unità *C*, formata da proteine a elica che attraversano una membrana, e da un'unità *g* solidale a *C*. Quando la concentrazione dei protoni all'interno della membrana è inferiore a quella esterna, si genera un flusso di protoni che causa la rotazione di *C* e, di conseguenza, di *g* (v. fig. 2a). Quest'ultima unità agisce come una camma meccanica che, ruotando, deforma in successione tre siti nel sistema proteico che la circonda, causando, in ognuno di essi, la trasformazione di adenosindifosfato (ADP) e fosfato inorganico (P_i) in ATP (v. fig. 2b). Il funzionamento di questa nanomacchina, però, è più complicato di quanto ora detto, perché essa in realtà deve essere vista (v. fig. 2a) come la combinazione di due motori molecolari, F_1 e F_0 , uniti alla stessa camma *g*, che tentano di ruotare in direzione opposta.

denominato *assembler*, dovrebbe essere capace, secondo Drexler, di costruire, atomo per atomo, qualsiasi cosa, compreso repliche di se stesso. L'idea di procedere alla costruzione di macchine molecolari atomo per atomo non è però condivisa dai chimici, che la considerano assolutamente non realistica. I chimici, infatti, sapendo che gli atomi sono specie molto reattive e che, quindi, non possono essere "presi" da un materiale e "portati" su un altro, come fossero semplici mattoni, pensano che la costruzione dal basso di congegni e macchine a livello nanometrico si possa e si debba fare molecola per molecola, partendo da molecole programmate. Essi sanno anche che sarebbe folle cercare di imitare quanto avviene in natura, dove le macchine molecolari si formano per autoassemblaggio e sono di estrema complessità. Quello che si può fare nel campo delle nanomacchine artificiali, almeno allo stato attuale, è progettare e costruire sistemi molto semplici, costituiti da pochi componenti molecolari.

La fase della progettazione è, ovviamente, la più delicata e in quest'ambito è particolarmente critico l'aspetto che riguarda il tipo di energia da usare per far operare la nanomacchina. Infatti, come per le macchine del mondo macroscopico, anche per le macchine molecolari è possibile ottenere movimento solo se si fornisce energia. Per la maggior parte delle macchine del mondo macroscopico l'energia necessaria è prodotta da reazioni fra ossigeno e sostanze ad alto contenuto energetico (combustibili), fatte avvenire in motori detti a combustione interna. Ovviamente, reazioni di questo tipo, che comportano alte temperature ed elevate pressioni, non possono essere usate per alimentare le fragili macchine molecolari, le quali, tuttavia, possono sfruttare reazioni chimiche purché avvengano in condizioni blande. Questo, infatti, è proprio quello che succede nelle nanomacchine biologiche, dove le reazioni di combustione che generano l'energia necessaria al loro funzionamento procedono attraverso molti stadi successivi, in ciascuno dei quali è messa in gioco solo una piccola quantità di energia. Comunque, a parte questa differenza tecnica, rimane il fatto

che sia le macchine macroscopiche che quelle biologiche funzionano consumando un combustibile. Questo, inevitabilmente, comporta la formazione di prodotti di scarto, la cui eliminazione è condizione necessaria per preservare il buon funzionamento della macchina stessa.

Le ricerche condotte sulle macchine molecolari artificiali hanno mostrato che è possibile far funzionare questi sistemi non solo fornendo energia chimica (utilizzando cioè opportuni reagenti in grado di indurre reazioni acido-base o di riduzione-ossidazione), ma anche, e in modo più conveniente, mediante energia elettrica o luminosa.

La prima viene fornita mediante elettrodi e agisce inducendo reazioni redox, mentre la seconda può operare indirettamente, provocando reazioni acido-base o redox, oppure direttamente, tramite reazioni di fotoisomerizzazione che causano grandi cambiamenti conformazionali. Queste due forme di energia sono particolarmente interessanti in quanto sistemi opportunamente scelti possono operare senza formare prodotti di scarto.

Altro aspetto critico in fase di progettazione è quello che riguarda la necessità di controllare in modo soddisfacente i movimenti delle nanomacchine artificiali e a tal scopo è opportuno che siano verificati quattro requisiti fondamentali: 1) il sistema deve possedere solo due situazioni strutturalmente stabili, osservabili mediante segnali ben distinti; 2) una delle due strutture deve essere più stabile dell'altra, così da avere una condizione iniziale in cui è presente una sola di esse; 3) con uno stimolo esterno deve essere possibile destabilizzare la struttura iniziale e costringere il sistema a riorganizzarsi nell'altra; 4) con un secondo stimolo esterno deve essere possibile annullare l'effetto destabilizzante e ritornare alla struttura originale.

Shuttle e ascensori nanometrici: l'incredibile mondo delle nanomacchine artificiali

Per ragioni di spazio, illustreremo solo alcuni esempi tipici che,

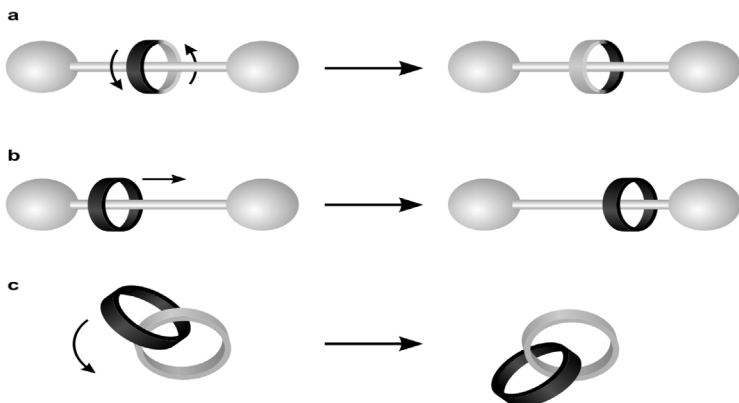


Figura 3. Esempi di movimenti che possono essere ottenuti in rotassani (a e b) e catenani (c).

in analogia con quanto visto per le nanomacchine naturali, sono suddivisi in base al tipo di movimento effettuato.

La maggior parte delle ricerche nel campo delle macchine molecolari artificiali capaci di compiere movimenti lineari è attualmente concentrata su sistemi chiamati rotassani (v. fig. 3a e b). Un rotassano è un sistema formato da una molecola ad anello infilata in una molecola filiforme; alle estremità del quale vi sono due gruppi ingombranti (*stopper*) per impedire lo sfilamento dell'anello. Sistemi di questo genere, se accuratamente progettati, possono, mediante l'uso di opportuni stimoli energetici, effettuare movimenti meccanici come quelli mostrati nella fig. 3.

Di seguito sono illustrati alcuni esempi di macchine molecolari basate su tali sistemi, scelti anche per evidenziare come sia possibile utilizzare vari tipi di energia per far avvenire il movimento meccanico.

Navetta azionata da energia chimica. In un rotassano, il movimento dell'anello lungo il filo (v. fig. 3b) corrisponde, a livello molecolare, al movimento di una "navetta" (*shuttle*) lungo un binario. Un esempio di questo tipo è rappresentato dal rotassano

mostrato in fig. 4, formato dall'anello A e dal componente lineare B , in cui sono presenti due unità diverse, B_1 e B_2 ; la prima unità è costituita da un ammonio secondario, che può essere deprotonato reversibilmente ad ammina, mentre la seconda è formata dal dicatione dipiridinio, che ha caratteristiche di elettrone-accettore. Queste unità rappresentano due potenziali "stazioni" per l'anello A , dal momento che esso può interagire sia con B_1 , grazie alla formazione di legami a idrogeno, che con B_2 , dando un'interazione di tipo elettrone donatore-accettore. Poiché il primo tipo di interazione è più forte del secondo, l'anello si trova inizialmente sulla stazione B_1 . Se, però, alla soluzione contenente il rotassano viene aggiunta una base, l'unità ammonio B_1 viene deprotonata e perde così la capacità di formare legami a idrogeno con l'anello A ; come conseguenza, l'anello si sposta sulla stazione B_2 , con la quale può dare interazioni donatore-accettore. Se poi, a questo punto, si aggiunge alla soluzione un acido, l'unità ammonio B_1 viene ricostituita e l'anello A torna su questa stazione. Il movimento alternato di A fra B_1 e B_2 può essere ripetuto molte volte, perché la reazione acido-base che lo governa è perfettamente reversibile. L'unica limitazione deriva dal fatto che le successive aggiunte di base e di acido comportano la formazione di sostanze che, alla lunga, compromettono il funzionamento del sistema.

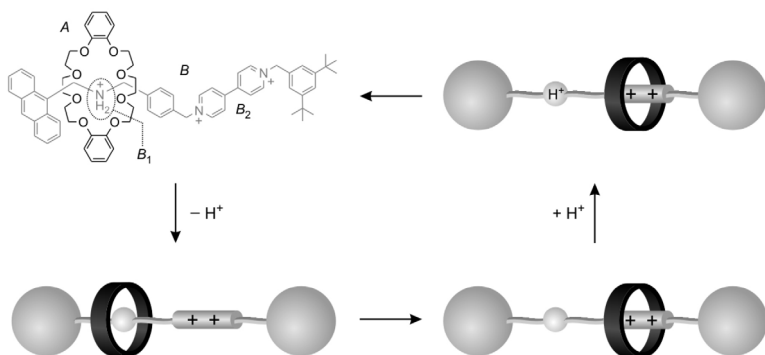


Figura 4. Una "navetta" molecolare azionata da protoni.

Navetta controllata da energia luminosa. Lo stato di sofisticazione raggiunto dalla progettazione e dalla sintesi delle macchine molecolari è chiaramente evidenziato dalla complessità strutturale e funzionale del sistema mostrato nella fig. 5. Si tratta di un rotassano costituito da un componente ad anello C , con caratteristiche di elettrone-donatore, e da un componente lineare formato da: il complesso $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$ (D), che svolge sia la funzione di *stopper* che quella fondamentale di assorbire la luce utilizzata dal sistema per operare; uno spaziatore rigido E ; un'unità 4,4'-dipiridinio (F_1) e un'unità 3,3'-dimetil-4,4'-dipiridinio (F_2), che avendo entrambi caratteristiche elettrone-accettrici svolgono il ruolo di "stazioni" per l'anello C ; e infine un secondo *stopper* G . La situazione iniziale del sistema è quella in cui l'anello C circonda l'unità F_1 , che è un elettrone-accettore migliore di F_2 . In seguito ad eccitazione luminosa del componente $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$ avvengono nel sistema una serie di movimenti elettronici e nucleari (v. fig. 5) che possono essere descritti molto schematicamente nel modo seguente.

In seguito all'assorbimento di luce (processo 1) si ottiene uno stato eccitato di D che trasferisce un elettrone alla stazione F_1 (processo 2) circondata dall'anello C . Questo trasferimento elettronico fa sì che la stazione F_1 perda le caratteristiche di elettrone-accettore, il che destabilizza la sua interazione con C ; l'anello si muove allora sulla stazione F_2 (processo 3); a questo punto un trasferimento elettronico, opposto a quello fotoindotto, dalla stazione ridotta $F_{1,\text{rid}}$ (non più circondata da C) all'unità fotoattiva ossidata D_{oss} (processo 4) ripristina il carattere elettrone-accettore della stazione F_1 ; in seguito a questo *reset* elettronico, l'anello C torna sulla stazione F_1 (processo 5), riportando il sistema alla struttura iniziale.

In conclusione, ogni impulso luminoso causa, attraverso quattro stadi, il movimento alternato dell'anello lungo il filo senza generare prodotti di scarto, così che questo sistema può essere considerato un motore lineare a quattro tempi, azionato dalla luce.

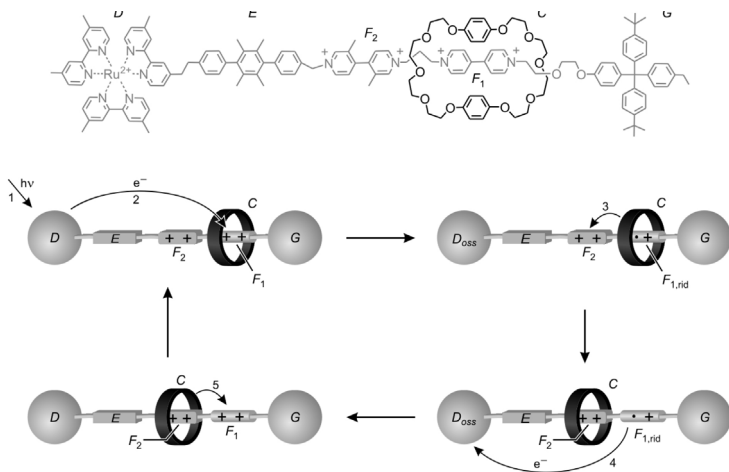


Figura 5. Una ‘navetta’ molecolare controllata da energia luminosa.

Un ascensore nanometrico. L’esperienza acquisita con i più semplici prototipi di nanomacchine artificiali ha permesso di progettare e costruire sistemi di complessità sempre maggiore. Ad esempio, lo sviluppo in senso tridimensionale della navetta controllata da energia chimica (v. fig. 4) ha portato alla costruzione di quello che può essere definito un “ascensore” nanometrico. Come mostrato in fig. 6a, esso è costituito da un componente a tre braccia *H*, ciascuna delle quali contiene due stazioni, uno ione ammonio e uno ione dipiridinio, e da una piattaforma molecolare *I* ottenuta dalla ‘fusione’ di tre anelli. Quando i due componenti si trovano assieme in soluzione, le tre braccia di *H* si infilano nei tre anelli di *I*; si ottiene così una struttura a triplo pseudorotassano, stabilizzata da forti legami a idrogeno, in cui i tre anelli di *I* circondano le tre stazioni ammonio di *H*. Se però si aggiunge una base, le unità ammonio vengono deprotonate, i legami a idrogeno vengono rotti e, di conseguenza, gli anelli si spostano sulle unità dipiridinio, con le quali danno un’interazione donatore-accettore; per successiva aggiunta di acido è possibile far tornare il sistema alla struttura iniziale. Schematicamente (v. fig. 6b), il si-

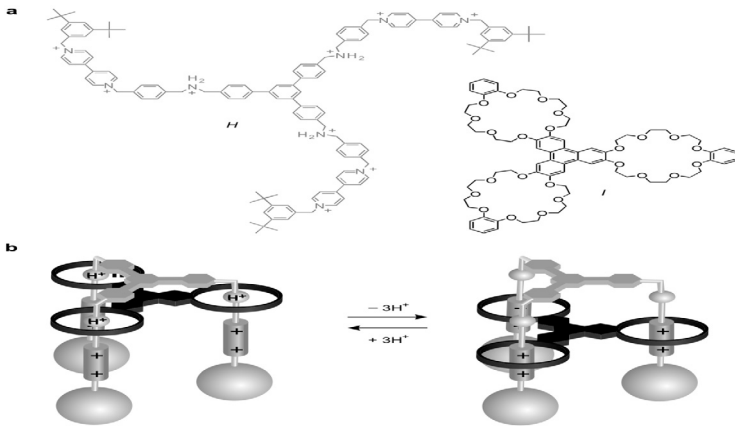


Figura 6. Un “ascensore” nanometrico. (a) Componenti molecolari; (b) schema di funzionamento.

stema può quindi essere rappresentato come una piattaforma incardinata a tre colonne che sale e scende fra due piani in seguito a stimoli (comandi) provenienti dall'esterno.

Rotazione di un anello azionata da energia elettrica. Un catenano è un sistema formato da due molecole ad anello incatenate una all'altra in cui, in seguito a un'opportuna progettazione, è possibile far ruotare un anello rispetto all'altro (v. fig. 3c). Per evidenziare questo movimento, però, occorre che almeno uno dei due anelli sia non simmetrico, come è appunto il caso del sistema illustrato nella fig. 7. Tale catenano è costituito dall'anello J , che contiene due unità J_1 uguali ed elettrone-accettrici, e dall'anello K , che contiene due unità elettrone-donatrici diverse, K_1 ed K_2 , con K_1 più forte di K_2 . La struttura stabile è quella in cui l'unità K_1 è contenuta all'interno dell'anello J ; una tale struttura permette, infatti, l'interazione di K_1 con entrambe le unità J_1 dell'anello. Per far ruotare l'anello è necessario destabilizzare questa struttura; ciò può essere ottenuto con uno stimolo elettrochimico che, togliendo un elettrone all'unità K_1 , annulla la sua proprietà di donare elet-

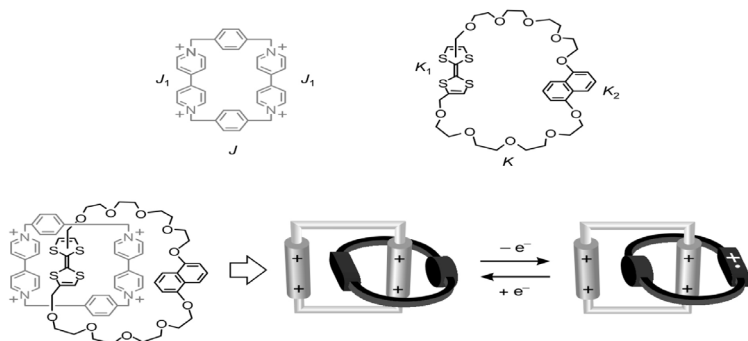


Figura 7. Un catenano in cui è possibile, mediante uno stimolo elettrochimico, far ruotare un anello rispetto all'altro.

troni. La struttura più stabile diventa, allora, quella con l'unità K_2 all'interno dell'anello J , situazione che viene raggiunta per rotazione di 180° dell'anello K . A questo punto, se l'elettrone precedentemente tolto viene restituito, sempre mediante uno stimolo elettrochimico, all'unità K_1 , essa riacquista le sue caratteristiche elettron-donatrici e, di conseguenza, l'anello K ruota nuovamente ripristinando la struttura iniziale. Sistemi tipo quello appena descritto, benché molto interessanti, sono limitati dal fatto che è impossibile dire se i due movimenti dell'anello K corrispondono a una rotazione completa oppure a due semirotazioni con senso opposto.

Un motore rotante azionato dalla luce. Un interessante esempio di motore rotante nanometrico artificiale azionato soltanto dalla luce è quello illustrato nella fig. 8. È noto che, allo stesso modo dei composti aventi un doppio legame $-N=N-$, anche quelli che contengono un doppio legame $-C=C-$ (ad esempio lo stilbene: v. fig. 8a) possono esistere come isomeri *trans* e *cis*. In sistemi di questo tipo l'eccitazione luminosa di uno dei due isomeri, ad esempio dell'isomero *trans*, può causare la rotazione di 180° di una delle due subunità molecolari, con formazione dell'isomero *cis*. L'eccitazione di quest'ultimo può poi ripristinare l'isomero

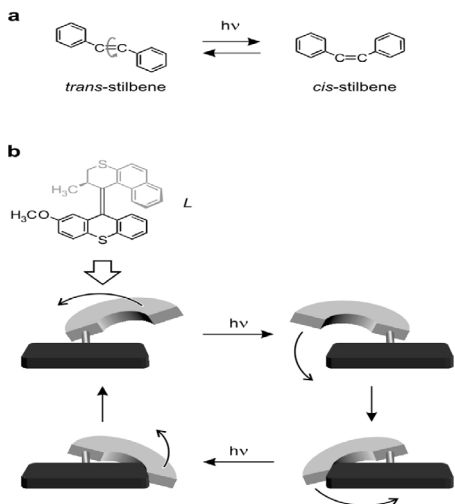


Figura 8. (a) Composti aventi un doppio legame $-C=C-$ che possono esistere in due forme isomeriche interconvertibili mediante l'eccitazione luminosa. (b) Composto opportunamente progettato per ottenere una rotazione completa in seguito a stimoli luminosi.

trans iniziale, tramite una successiva rotazione di 180° . In composti semplici come lo stilbene la direzione del moto rotatorio è casuale, per cui non è affatto detto che la trasformazione *trans* \rightleftharpoons *cis* \rightleftharpoons *trans* avvenga attraverso una rotazione completa (cioè di 360° nello stesso senso); la trasformazione *cis* \rightleftharpoons *trans*, infatti, può comportare una rotazione di 180° in senso opposto a quello della trasformazione *trans* \rightleftharpoons *cis*. È stato, tuttavia, sintetizzato un composto più complesso (*L*, rappresentato in fig. 8b) in cui, a causa di impedimenti sterici, sia l'isomero *trans* che quello *cis* non sono planari ed esistono ciascuno in due configurazioni 'distorte' (isomeri chirali). Questa particolarità facilita la rotazione in un senso rispetto all'altro rendendo così possibile una rotazione fotoindotta completa di 360° .

Conclusioni

Le macchine molecolari artificiali discusse negli esempi sopra riportati sono interessanti non solo per il loro aspetto meccanico, ma anche dal punto di vista informatico. Esse, infatti, possono esistere in due stati distinti e convertibili mediante stimoli esterni di natura luminosa, chimica o elettrica. Su questi sistemi, dunque,

si possono “scrivere” informazioni secondo la logica binaria. Lo stato in cui si trova il sistema, d’altra parte, può essere “letto” facilmente, poiché alcune sue proprietà (ad esempio, l’assorbimento o l’emissione di luce di specifica lunghezza d’onda) cambiano drasticamente nel passaggio da uno stato all’altro. Alcuni scienziati vedono in queste e in altre ricerche collegate i primi passi verso la costruzione di una nuova generazione di computer (computer chimici) che, basandosi su componenti di dimensioni nanometriche, potrebbero offrire prestazioni molto superiori a quelle dei calcolatori oggi in uso. La cosa, forse, non stupisce più di tanto se si pensa alle capacità di quello stupefacente computer chimico che è il cervello dell’uomo.

Bisogna anche sottolineare che tutto quanto è stato qui descritto si riferisce a sistemi studiati in soluzione, dove un numero molto grande di nanomacchine, in seguito allo stimolo ricevuto, compiono la stessa funzione, ma operano individualmente e indipendentemente l’una dall’altra. Si tratta, cioè, di sistemi incoerenti e, come tali, difficili da utilizzare per taluni scopi pratici. Dopo questo essenziale primo passo, che ha permesso di dimostrare che è possibile progettare e costruire macchine nanometriche, si possono però organizzare le nanomacchine in modo da interfacciarle col mondo macroscopico. Questo può essere realizzato, ad esempio, facendo aderire un certo numero di macchine, tutte nello stesso senso, su una superficie, in modo da ottenere un insieme, ancora nanometrico, in cui il movimento (ad esempio, lo spostamento di un anello in un rotassano), avvenga in fase per tutte le molecole dell’insieme, così che la variazione nelle proprietà delle singole macchine divenga un fenomeno collettivo misurabile. Tentativi in questa direzione sono in atto in numerosi laboratori. Alternativamente, si può pensare di operare su una singola macchina, fissata e orientata su un supporto; questo approccio, però, comporta il superamento di notevoli difficoltà, dovute al fatto che il segnale di una singola macchina è molto debole.

Letture consigliate

- V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, “Nanomacchine azionate dalla luce”, in «Le Scienze Dossier: Nanotecnologie», 2002, n. 11, pp. 83-87.
- V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, *Molecular devices and machines: concepts and perspectives for the nanoworld*, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- K. E. Drexler, *Engines of creation. The coming era of nanotechnology*, Anchor Press, New York, 1986.
- R. P. Feynman, *There's plenty of room at the bottom*, in «Engineering and science», 1960, vol. 23, pp. 22-36.
- D. S. Goodsell, *Bionanotechnology: Lessons from nature*, Wiley, Hoboken, 2004
- R. E. Smalley, *Chimica, amore e nanorobot*, in «Le Scienze», 2001, n. 398, pp. 58-59.

Postfazione

Per un umanesimo delle macchine

Cristian Fuschetto

*Dove sono i Mounier delle macchine, i Lèvinas degli animali, i Ricouer dei fatti?
L'umano, ormai lo comprendiamo, non si può cogliere e salvare senza
restituirgli quell'altra metà di sé, la parte delle cose.*

Bruno Latour

Golem, relé, transistor e pensiero. La robotica tra Levi e Calvino

Spesso la letteratura lascia entrare nel vocabolario quello che sembra destinato a rimanere nelle mute e impalpabili forme dell'immaginario. Sia chiaro, non che un racconto o un romanzo possano di per sé rendere intelligibili i contraddittori interrogativi di volta in volta suggeriti dalle innovazioni scientifiche, non è certo questo il tipo di "lavoro" che ci si aspetta dagli scrittori. Piuttosto nelle loro storie si riverberano e acquistano finalmente fisionomia questioni altrimenti lasciate in sospeso, altrimenti costrette nel limbo dell'impronunciato, e se proprio non servono a dare delle risposte le loro parole ci aiutano comunque a porre un po' meglio alcune domande. Questo perlomeno è stato il caso di Italo Calvino e di Primo Levi a proposito dell'avvento, sul proscenio della storia del secondo Novecento, delle «macchine pensanti». Da buon materialista, in fondo è un chimico, Levi non esclude che la scienza possa arrivare a costruire degli uomini artificiali, o comunque qualcosa di assimilabile a un'intelligenza artificiale, solo che le sue riserve sono tali e tante che queste prospettive finiscono col diventare, suo malgrado, dei meri esercizi intellettuali. Ne *Il servo*, per esempio, Levi trasloca l'immaginario fantascientifico dal futuro al passato e lo fa evocando una delle figure più emblematiche della modernità: il Golem. Fantoccio d'ar-

gilla magicamente animato dai poteri di un leggendario rabbino vissuto nel XVI secolo, il Golem rappresenta per Levi la figura più adatta a interpretare le moderne tecnologie robotiche. Nel corpo e nell'anima quest'Adamo fabbricato dall'uomo ricalca la distinzione che 400 anni più tardi si sarebbe fatta tra hardware (l'argilla di cui è intessuto il suo corpo) e software (gli algoritmi che presiedono il suo comportamento). Ma quel che più conta è che per Levi il Golem è il perfetto precursore del robot perché, proprio come quest'ultimo, esso non può che nascere e morire alla stregua di un servo, cioè non può essere altro da un dispositivo automatico che risponde esattamente, senza alcuna possibilità di errore, alle istruzioni impartitegli dal suo creatore o, se si preferisce, dal suo programmatore.

Un'ipotetica corsa, poi puntualmente verificatasi, all'umanizzazione dei robot sarebbe quindi stata per Levi qualcosa di incomprendibile, visto e considerato che un robot è tale proprio perché retto dal calcolo di chi lo ha programmato e dunque è tale proprio perché, a differenza dell'uomo, coincide con un meccanismo servile. «La differenza fra i Golem sta nella precisione e nella completezza delle prescrizioni che sovrintesero al loro costruirsi. [...] Ora, il rabbino Arié non era un bestemmiatore, e non si era proposto di creare un secondo Adamo. Non intendeva costruire un uomo, bensì un *po'el*, o vogliamo dire un lavoratore, un servo fedele e forte e di non troppo discernimento: ciò insomma che nella sua lingua boema si chiama un robot». Ecco, il golem per Levi è l'esempio perfetto del robot, un esecutore di istruzioni, «qualcosa di un po' più e di un po' meglio dei fantocci campanari, e di quelli che vanno in processione quando suonano le ore, sulla facciata del Municipio di Praga». Imitare l'uomo e la sua vivente intelligenza sulla base dei soli regimi di calcolo è dunque per Levi un'impresa destinata a fallire. Come scriverà altrove: «Perché la ruota giri, perché la vita viva, ci vogliono le impurezze, e le impurezze delle impurezze: anche nel terreno, come è noto, se ha da essere fertile». Ma è proprio così? Davvero non c'è alcuna possibilità che dalla

freddezza dei circuiti elettrici possa un giorno nascere qualcosa di simile al pensiero o, addirittura, agli affetti degli umani? È davvero così impensabile che dalle rigide combinatorie di una macchina possa sgorgare la multiforme attività di una mente? Calvino, a differenza di Levi, appare possibilista.

In *Cibernetica e fantasmi* (1967) egli dimostra di centrare alla perfezione quello che col senno di poi si può facilmente individuare come la cifra dell'epoca, e cioè la rivoluzione di linguaggi e di prospettive che le nascenti teorie dell'informazione avrebbero di lì a poco imposto a tutti i campi del sapere. Calvino esprime il nuovo orizzonte culturale attraverso la rimodulazione della dicotomia apparentemente così poco letteraria che oppone il «continuo» al «discreto»: «Nel modo in cui la cultura d'oggi vede il mondo, c'è una tendenza che affiora contemporaneamente da varie parti: il mondo nei suoi vari aspetti viene visto sempre più come *discreto* e non come *continuo*. Impiego il termine “discreto” nel senso che ha in matematica: quantità “discreta”, cioè che si compone di parti separate».

Ma qual è il mondo a cui lo scrittore si riferisce? Parla dell'universo, della natura, delle cose che tocchiamo e possiamo sperimentare, o fa cenno anche a quel pezzo di realtà dall'ontologia un po' più evanescente che solitamente rappresentiamo sotto le insegne della spiritualità, dell'immateriale o del mentale? Il mondo «che si compone di parti separate» abbraccia forse anche il pensiero? Se così fosse le posizioni guardinghe di Levi sull'umanizzazione dei robot sarebbero *superate* (ma certo non è questione di imbastire competizioni tra chi starebbe “più avanti” di chi) da quelle di Calvino; infatti se anche il pensiero è una realtà «discreta», composta di parti separate e ben definite, non è poi così improbabile la produzione di «cervelli elettronici» o di «macchine pensanti». «I cervelli elettronici, se sono ancora lungi dal produrre tutte le funzioni di un cervello umano, sono però già in grado di fornirci un modello teorico convincente per i processi più complessi della nostra memoria, delle nostre associazioni

mentali, della nostra immaginazione, della nostra coscienza». Memoria, immaginazione, coscienza, nulla che sia propriamente umano sembra poter restare fuori dalla potenza ingegneristica dei cibernetici: «Shannon, Weiner, von Neumann, Turing, hanno cambiato radicalmente l'immagine dei nostri processi mentali. Al posto di quella nuvola cangiante che portavamo nella testa fino a ieri e del cui addensarsi o disperdersi cercavamo di renderci conto descrivendo impalpabili stati psicologici, umbratili paesaggi dell'anima, al posto di tutto questo oggi sentiamo il velocissimo passaggio di segnali sugli intricati circuiti che collegano i relé, i diodi, i transistor di cui la nostra calotta cranica è stipata».

Sulla scia di Alan Turing, macchine e pensiero appaiono a Calvino come grandezze commensurabili, e questo significa che la millenaria rappresentazione «gassosa» dell'anima non è più così evidente ma necessita di essere rivista, dagli scienziati, dai letterati, dai filosofi e da tutti quelli che molto semplicemente avvertono lo scrupolo di capire il proprio tempo coi mezzi del proprio tempo. «Il pensiero, che fino a ieri ci appariva come qualcosa di fluido, evocava in noi immagini lineari come un fiume che scorre o un filo che si sdipana, oppure immagini gassose, come una specie di nuvola, tant'è vero che veniva spesso chiamato "lo spirito", oggi tendiamo a vederlo come una serie di stati discontinui, di combinazioni di impulsi su un numero finito (un numero enorme ma finito) di organi sensori e di controllo». Come nel gioco degli scacchi, una gamma pressoché infinita di possibilità può aver origine da un numero finito di elementi: l'incorporeo e il corporeo sembrano così vicini da potersi quasi stringere le mani.

Del resto è esattamente questo lo scopo dichiarato dell'Intelligenza Artificiale, che già nella primavera del 1956, per bocca di John McCarthy, tracciava così le proprie ambizioni: «Si cercherà di costruire macchine in grado di usare il linguaggio, di formare astrazioni e concetti, di migliorare se stesse e risolvere problemi che sono ancora di esclusiva pertinenza degli esseri umani». Se lo spirito è una serie di stati discontinui, vale a dire «discreti», per-

ché continuare a credere (o a *voler* credere) che i robot debbano per forza obbedire al meccanismo servile di un dispositivo automatico? Perché continuare a tutelare l'esclusività di alcuni domini di «pertinenza degli esseri umani»?

Mente e materia: una conversione possibile?

Seppur in una condivisa cornice materialistica, le sensibilità di Levi e di Calvino *paradossalmente* divergono. Come osserva Pierpaolo Antonello: «Paradossalmente, nella loro comune comprensione discreta della realtà, Calvino e Levi adottano una convergenza opposta, dove lo scrittore Calvino sposa una più radicale anti-umanistica escatologia materialistica, mentre il chimico Levi è sempre pronto a riaffermare la centralità irriducibile dell'intelligenza umana, la gravidanza a un tempo cognitiva e evolutiva delle passioni umane».

Un paradosso è il sintomo di una verità più complessa di quella che ci si aspetterebbe di afferrare e la *paradossale* «convergenza opposta» tra Levi e Calvino sembra proprio confermarlo. Le sensibilità dei due scrittori agiscono come la punta di un sismografo pronto a segnalare lo sgretolarsi di un orizzonte culturale che ha alimentato per secoli la cultura occidentale e che non è esagerato considerare come l'a-priori che da Platone in poi ha fatto da guida alle interpretazioni che l'uomo ha dato di se stesso, del mondo e di tutto ciò che di volta in volta è venuto a trovarsi in quella zona grigia che non è né l'Altro né il Sé, di quella porzione di indefinito in cui non è difficile oggi riconoscere quei robot così pericolosamente umani da infrangere sistematicamente lo specchio di fronte al quale poter dire a noi stessi "Ecco, questo sono io". Da Platone in poi, infatti, l'uomo non ha mai smesso di considerare lo spirito, l'anima, la mente, la cultura, come lo stigma della propria umanità. L'a-priori fermamente condiviso da tutta questa tradizione è quindi l'equivalenza tra pensiero e uomo e, di conseguenza, il disconoscimento di qualsiasi convergenza tra ciò che ha pensiero e ciò che non è umano oppure tra ciò che non è

umano e quel che solitamente riconduciamo alle creazioni di una mente.

Tanto per citare due esempi piuttosto significativi di questa tradizione basta considerare il manifesto umanista di Pico della Mirandola e l'ontologia altrettanto umanistica di Cartesio. Nel suo celebre *Discorso sulla dignità dell'uomo*, Pico scrive: «O Adamo, noi non ti abbiamo dato una sede determinata, [...]. La natura degli altri viventi già definita è costretta entro leggi da noi prescritte [...]. Non ti abbiamo fatto né celeste né terreno, né mortale né immortale, affinché tu possa tranquillamente darti la forma che vuoi, come libero e sovrano scultore e artefice di te stesso». Secondo questa prospettiva l'uomo è l'unico essere che non ha natura e che, proprio per questo, a differenza di tutti gli altri è chiamato a darsela da sé grazie al dono del libero arbitro. Insomma, per Pico, l'uomo è l'eccezione tra le creature perché è la creatura che dispone del linguaggio, della mente e del pensiero. Cartesio non va molto al di là da questa impostazione. Come è noto egli distingue la totalità del reale tra *res cogitans* e *res extensa* e così finisce col distanziare l'uomo e la sua essenza cogitante dalla materialità dell'universo. La sostanza discreta delle cose non solo è qualcosa di diverso dal cogito, ma è addirittura concepita in antitesi a esso, le cose cioè appartengono a una dimensione dell'essere che è agli antipodi di quella che Calvino definirebbe la natura «gassosa» del pensiero.

Ma, come abbiamo visto, a fare la parte dei guastafeste rispetto a questa visione un po' narcisistica dell'uomo arrivano nella seconda metà del Novecento la Cibernetica e la Teoria dell'informazione, le quali cominciano a parlare di una sostanza discreta non solo delle cose ma anche del pensiero. E non è un caso, allora, se è proprio un cibernetico a inquadrare meglio di altri la rivoluzione filosofica e *umanistica* messa in atto dalla scienza delle macchine pensanti.

Attraverso un serrato confronto con i classici della tradizione filosofica e scientifica occidentale, da Platone ad Heisenberg, da

Aristotele a Schrödinger, Gottard Günther riesce infatti a tratteggiare un quadro esaustivo della decostruzione operata dalle nuove scienze cognitive nei confronti del (fin lì) solido edificio umanistico. In una pagina particolarmente illuminante della sua *Cybernetic Ontology* (1962) Günther osserva: «Mente e Materia appartengono a due differenti dimensioni metafisiche; esse non possono mescolarsi. Non vi è tuttavia una distinzione di questo tipo tra lo stato energetico e lo stato materiale dell'Universo. L'equazione di Einstein secondo cui $E = mc^2$ stabilisce che l'energia può convertirsi in massa e viceversa. Ma non vi sono formule analoghe per la conversione del pensiero in materia o del significato in energia. Noi conosciamo come un fatto empirico che il nostro cervello è un sistema fisico dove hanno luogo certi processi per molti versi sconosciuti anche se certamente fisici. Per l'osservatore si tratta di una combinazione di dati elettrici e chimici in grado di produrre un fenomeno misterioso che potremmo chiamare senso, coscienza, o autoconsapevolezza. In considerazione di ciò dovremmo eliminare ogni teologia e evitare di parlare di un'anima soprannaturale che risiede nel corpo solo come un ospite, e considerare materia, energia e mente come elementi di una relazione transitiva. In altre parole dovrebbe esserci una formula di conversione tra energia e mente, una formula che sia in stretta analogia con l'equazione di Einstein». Ma è davvero possibile trovare questa formula di conversione?

Günther ci mette in guardia e osserva: «Dal punto di vista della nostra classica logica bivalente (con la sua rigida dicotomia tra enti soggettivi e enti oggettivi) la ricerca di una formula siffatta potrebbe sembrare poco meno che una follia. Il comune denominatore tra Mente e Materia, secondo una tradizione spirituale lunga millenni, è infatti metafisico e non fisico». Secondo il teorico dell'informazione tedesco è quindi la struttura profonda della nostra logica che ci ostacola, fino a farla apparire addirittura come una autentica follia, nell'impresa di trovare una formula di conversione tra mente e materia.

Eppure, prima ancora della Robotica, prima ancora dei vari “Deep Blue”, “Asimo” o “Ecce Robot”, prima ancora della Cibernetica, è forse possibile rinvenire colui che ha trovato una tale formula di convertibilità.

Robotica in evoluzione verso un nuovo umanesimo

A mio giudizio il pensatore atteso da Günther, quello capace di oltrepassare l’impianto metafisico sul quale è stato da sempre pensato il rapporto tra Mente e Materia non era di là da venire, ma aveva già iscritto il proprio nome nel solco della storia. A poter essere considerato come lo scopritore della formula di conversione della materia in spirito è infatti Charles Darwin.

Darwin, come Einstein, trova una formula di convertibilità della materia in energia per il semplice fatto che egli realizza una genealogia integralmente materialistica della mente e della morale, e ciò equivale né più né meno che a tradurre la materialità del biologico nell’immaterialità dello spirituale. Detto in altri termini, Darwin ci spiega che grazie all’incontenibile potenza della dimensione diacronica variazione e selezione possono fabbricare ogni nuova forma di vita, anima, mente e pensiero compresi.

Parafrasando, ma non troppo, la metafora lucreziana resa celebre da Blumenberg, si può dire quindi che con Darwin l’uomo scopre d’un colpo che tra sé e il naufragio cui da sempre assiste con fascino e tribolazione non c’è più alcun margine di sicurezza: densità della carne e impalpabilità dell’anima si accoppiano come mai prima s’era azzardato di pensare e diventano così il medesimo frutto di una *natura naturans* spudoratamente immune a ogni soluzione di continuità. Come ha scritto Patrick Tort: «Con Darwin non ha effettivamente più alcun senso identificare un inizio a partire dal quale la scienza dell’uomo dovrà cessare di essere *naturale* per diventare *umana*; [...] nel quadro del suo evoluzionismo non c’è infatti più alcuno spazio per la metafisica degli inizi assoluti». Per tornare alle nostre care «macchine intelligenti», ciò significa che la dimensione *gassosa* del pensiero non solo può na-

scere, ma deve necessariamente originarsi da quella *estesa* della materia biologica e, *why not?*, fisica. A pensarci bene, nel preferire la brutta ascendenza scimmiesca alla purezza delle idee platoniche Darwin non fa altro che riconoscere un *tertium datur* tra materia e spirito e, da *cibernetico ante litteram* quale è, tesse una trama che ricongiunge l'immaterialità dell'idea alla materialità del corpo, tra la sostanzialità estrema del soggetto a quella altrettanto estrema dell'oggetto e, in questo modo, compie il «crimine mostruoso» di una «redistribuzione di soggettività». Per Darwin, cioè, non c'è più alcun puro soggetto cogitante da opporre ad altrettanto puri oggetti estesi, ci sono piuttosto diversi gradi di *purezza* o, fa lo stesso, di *impurità*.

Ed eccoci di nuovo ai robot, a questi oggetti il cui tasso di complessità cognitiva ci fa dubitare ogni giorno di più sull'opportunità di considerarli ancora alla stregua di semplici oggetti. Una interessante conferma, non solo semantica, circa la possibilità di avvicinare il pensiero evoluzionistico alla rivoluzione epistemologica introdotta dall'intelligenza delle macchine è la cosiddetta Robotica Evolutiva, una disciplina il cui scopo è esattamente quello di *evolvere robot autonomi*, cioè dei congegni che siano in grado di mostrare un comportamento adattivo senza alcuna supervisione da parte di terzi, in altre parole senza alcun aiuto da parte degli uomini. Per raggiungere questo obiettivo la Robotica Evolutiva si basa sulle stesse leggi dell'evoluzione biologica: riproduzione, mutazione, selezione. I ricercatori sottopongono al vaglio della selezione (che può essere svolta da un computer o anche da uno sperimentatore) una popolazione di robot le cui caratteristiche, per esempio la morfologia o l'architettura neurale, sono definite in un genoma artificiale fatto di algoritmi. I genotipi dei robot selezionati vengono copiati anche se, proprio come accade in natura, non perfettamente; infatti tramite l'azione di alcuni operatori genetici vengono introdotte delle variazioni casuali nel genotipo dei "figli", i quali daranno inizio a una seconda generazione e così via finché non si ottiene una ge-

nerazione di robot dalle prestazioni giudicate particolarmente “adattive”.

I robot si allevano, i robot evolvono: come in un gioco di specchi la vita naturale si riflette nella vita artificiale per conoscere meglio se stessa. In questo gioco il coinvolgimento dei robot risulta essenziale perché, contrariamente a quello che si è ritenuto fino a qualche decennio fa, si è compreso che l’intelligenza non è un processo puro, cioè non è mero calcolo o combinazione simbolica, ma è un processo che nasce dal basso delle esigenze materiali di adattamento all’ambiente. È l’interazione col mondo che fa emergere l’intelligenza nelle sue varie manifestazioni. L’intelligenza ha cioè bisogno di un corpo per poter essere tale.

I robot rappresentano degli strumenti perfetti per simulare e sperimentare quel che potrebbe definirsi la genealogia dell’intelligenza (ma forse sarebbe meglio dire le genealogie delle intelligenze) proprio perché riescono a render conto non un’intelligenza “astratta” – che non esiste – ma di un’intelligenza concretamente situata in un ambiente. In questo senso i robot sono senz’altro dei sistemi intelligenti “incarnati”, tanto più potenzialmente intelligenti quanto meno vincolati all’esattezza di un meccanismo, tanto meno servili quanto più evolvibili. Ma se i robot evolvono, se possono evolvere la loro “intelligenza”, non dovremmo forse cominciare a parlare di soggetti? Non dovremmo perlomeno provare a riflettere sull’opportunità di redistribuire parte della soggettività che da sempre riconosciamo a noi stessi? È recente la notizia del robot messo a punto dal Professor Christopher MacLeod della Gordon University di Aberdeen, in Gran Bretagna, il quale ha realizzato un congegno meccanicamente semplice ma “cerebralmente” assai sofisticato, nel senso che il cervello in questione è stato realizzato come una «rete neurale capace di crescere, esattamente come accade negli animali — ha sottolineato MacLeod — con la differenza che mentre la natura impiega milioni di anni per modificarsi nel nostro robot si richiedono poche ore». Il “cervello” di questo robot viene fatto evolvere

insieme al suo “corpo”, aggiungendo delle unità di elaborazione, cioè dei neuroni artificiali, che funzionano come quelli naturali che, col tempo, cambiano e si modificano. Il professor MacLeod sostiene che «in questo modo saremo in grado di sviluppare un’intelligenza artificiale che permetterà di realizzare anche robot umanoidi».

Se è vero quel che insegnava Vico, e cioè che il vero e il fatto coincidono (*verum et factum convertuntur*), allora l’aspirazione alla creazione un uomo artificiale non è altro che l’aspirazione alla più autentica conoscenza di sé da parte del *sapiens*. Il Golem di Levi o il «robot umanoide» del professor MacLeod rappresentano due varianti di un medesimo tema. Tuttavia, a differenza di quel che immaginava Levi, la fabbricazione del Golem oggi punta sull’inesattezza delle leggi della vita piuttosto che sull’esattezza della computazione logica. La robotica si è intanto “darwinizzata” e le macchine sono letteralmente diventate degli enti evolvibili, per niente immuni alla «discreta» dimensione della mente, dello spirito e della soggettività.

Gli umanisti devoti e un po’ snob sono avvisati.

Gli autori

Vincenzo Balzani

accademico dei Lincei, è professore di Chimica Generale presso l'Università di Bologna. È da molti anni nell'elenco dei 100 chimici più citati del mondo. Per la sua attività scientifica ha ottenuto numerosi riconoscimenti, fra i quali la laurea "Honoris Causa" all'Università di Friburgo (CH), la "Porter Medal" per la Fotochimica e il Premio Italgas per la Ricerca e l'Innovazione. Alla ricerca scientifica affianca un'intensa attività di divulgazione sul rapporto fra scienza e società e fra scienza e pace, con particolare riferimento ai temi dell'energia e delle risorse. Il suo recente libro *Energia per l'Astronave Terra* (Zanichelli, 2008), scritto con Nicola Armaroli, ha ricevuto il "Premio Galileo" 2009 per la divulgazione scientifica.

Adele Brunetti

è giornalista pubblicitista. Ha scritto e scrive per diversi giornali e riviste e attualmente scrive per le pagine culturali del quotidiano "la Repubblica". Collabora alla Cooperativa di Comunicazione Scientifica "Co-diCS".

Ernesto Burattini

è professore ordinario di Informatica presso l'Università di Napoli "Federico II". È autore di circa 120 pubblicazioni, tra le quali: E. Burattini, R. Cordeschi (a cura di), *Intelligenza Artificiale. Un'introduzione per le discipline della comunicazione*, Carocci, 2001; E. Burattini, S. Rossi, *Periodic adaptive activation of behaviors in robotic systems*, in «International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence», Vol. 22, n. 5 (2008), pp. 1–13; E. Burattini, S. Rossi, *Periodic activations of behaviours and emotional adaptation in behaviour-based robotics*, in

«Connection Science», (in press); E. Burattini, M. De Gregorio, S. Rossi, *An adaptive oscillatory neural architecture for controlling Behavior Based Robotic System*”, in «Neurocomputing» (in press).

Vincenzo Capone

lavora presso il Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università “Federico II” di Napoli. Si occupa di gestione di sistemi informativi, di sistemi di rete e di Grid Computing. Il suo interesse per la robotica si concentra, in particolare, sugli aspetti tecnologici ed etici dell'uso dei robot nella società umana. A tal riguardo ha pubblicato, con Guglielmo Tamburrini, *I robot in guerra*, in «Scienza&Società», n. 7/8 (giugno 2009), pp. 145-149.

Luigi Colangeli

è direttore dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte di Napoli. È consigliere e Segretario scientifico della European Astrobiology Network Association, membro del Working Group - ESA “Network of Centers Working Group on Space Debris” e, tra gli altri incarichi, è responsabile dello strumento GIADA a bordo del satellite spaziale europeo Rosetta in viaggio verso la cometa di Chyuriumov-Gerasimenko. Tutti i progetti scientifici a cui Colangeli partecipa sono svolti in collaborazione con i maggiori centri di ricerca nazionali e i più prestigiosi enti internazionali, come l'ESA e la NASA. Ha pubblicato oltre 200 lavori, di cui oltre 100 sulle più prestigiose riviste scientifiche del settore astrofisico.

Roberto Cordeschi

insegna Filosofia della scienza presso la Facoltà di Filosofia dell'Università di Roma “La Sapienza”. È autore di diverse pubblicazioni sulla storia della cibernetica e sui problemi epistemologici dell'Intelligenza Artificiale e della scienza cognitiva. Tra queste: *The discovery of the Artificial* (Kluwer, 2002); con V. Somenzi, *La filosofia degli automi* (Bollati Boringhieri, 1994); con E. Burattini, *Intelligenza Artificiale* (Carocci, 2001)

Alberto Credi

è professore associato di Chimica generale e inorganica presso l'Uni-

versità di Bologna. È autore di oltre 160 articoli scientifici nel campo della fotochimica ed elettrochimica supramolecolare, del volume *Molecular Devices and Machines* (scritto insieme a V. Balzani e M. Venturi) e di un manuale di fotochimica. La sua ricerca, focalizzata sullo sviluppo di macchine e dispositivi molecolari artificiali, ha ricevuto numerosi premi e riconoscimenti sia in Italia che all'estero.

Edoardo Datteri

svolge attività di ricerca in Filosofia della scienza presso l'Università degli Studi di Milano - Bicocca. I suoi interessi di ricerca includono i fondamenti epistemologici e metodologici delle scienze cognitive, con particolare riferimento alle simulazioni robotiche e bioniche di modelli neuroscientifici. Per ulteriori informazioni su progetti di ricerca e pubblicazioni si può consultare il sito web: <http://www.episteme.formazione.unimib.it/datteri>.

Francesco De Matteis

laureato in Biologia con indirizzo in Antropologia e Paleoeologia Umana, ha condotto per oltre quindici anni ricerche nel campo dell'archeologia preistorica con incarichi di collaborazione scientifica con università italiane, tedesche e spagnole. La sua attività di ricerca si è incentrata sul rapporto tra le dinamiche dell'insediamento antropico e le dinamiche ambientali durante il Paleolitico Finale e il Neolitico Iniziale. Attualmente lavora in Fondazione IDIS – Città della Scienza, nello staff di progettazione della manifestazione *Futuro Remoto. Un Viaggio tra Scienza e Fantascienza*.

Marco Foiani

è professore ordinario di Biologia Molecolare presso l'Università degli Studi di Milano e Direttore scientifico dell'Istituto Firc di Oncologia Molecolare (IFOM). È inoltre responsabile del gruppo di ricerca "Controllo del ciclo cellulare e stabilità del genoma" di IFOM. Autore di numerosi articoli sulle più prestigiose riviste internazionali si è distinto negli ultimi dieci anni per i suoi importanti contributi alla ricerca relativa alla stabilità del genoma.

Cristian Fuschetto

dottore di ricerca in Bioetica, è saggista e giornalista scientifico. Collabora alle attività didattiche e di ricerca delle cattedre di Filosofia Morale e di Antropologia Filosofica dell'Università di Napoli Federico II. È redattore di «Scienza&Società», della rivista telematica «S&F_scienzaefilosofia.it» e di «Futura», supplemento di innovazione scientifica del quotidiano «Il Denaro». È socio della Cooperativa di Comunicazione Scientifica «CodiCS». Tra le sue ultime pubblicazioni: *Fabbricare l'uomo. L'eugenetica tra biologia e ideologia* (Armando, 2004); *Sperimentalità dell'uomo e sperimentatori dell'umano*, in «Filosofia Politica» (n. 2/2008); *Darwin e l'artificializzazione del vivente*, in *Atti del VI Convegno annuale dell'Associazione Nazionale di Scienze Cognitive*, (Fridericiana, in stampa).

Pietro Greco

giornalista e scrittore, collabora con Fondazione IDIS – Città della Scienza. Tra i suoi ultimi libri: *L'idea pericolosa di Galileo. Storia della comunicazione della scienza nel Seicento* (UTET, 2009); *L'astro narrante. La luna nella scienza e nella letteratura italiana* (Springer, 2009); con Vittorio Silvestrini ha pubblicato *La risorsa infinita. Per una società democratica della conoscenza* (Editori Riuniti, 2009).

Giuseppe O. Longo

è professore ordinario di Teoria dell'informazione presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Trieste. Si occupa della comunicazione nelle sue varie forme. Tra le sue pubblicazioni: *Il senso e la narrazione* (Springer Italia, 2008), *Il simbiote* (Meltemi, 2003), *Homo Technologicus* (Meltemi, 2001), *Il nuovo golem: come il computer cambia la nostra cultura* (Laterza, 1998). Tra i suoi romanzi: *Di alcune orme sopra la neve* (Mobydick, 2000), *L'acrobata* (Einaudi, 1994), *La gerarchia di Ackermann* (Mobydick, 1998).

Ilaria Merciai

giornalista, si occupa di comunicazione e divulgazione scientifica, con particolare attenzione al mondo di internet e delle nuove tecnologie. Ha curato uffici stampa e relazioni nazionali e internazionali di eventi quali EnergyMed e DentalGo. Fa parte della redazione della rivista

«Scienza&Società», edita dalla Pristem Bocconi, e del portale SciCam (www.sci-cam.it). Attualmente collabora con l'Università degli Studi di Napoli Federico II per il progetto di Web Learning "Federica".

Orazio Miglino

è professore ordinario di Psicologia Generale, responsabile scientifico del Laboratorio per lo Studio dei Sistemi Cognitivi Naturali e Artificiali (NAC) e coordinatore del dottorato in Scienze psicologiche e pedagogiche presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II". I suoi interessi di ricerca riguardano principalmente il campo delle Scienze Cognitive e della Vita Artificiale. Tra le sue ultime pubblicazioni si segnalano: O. Miglino, M. Ponticorvo, P. Bartolomeo, *Place cognition and active perception. A study with evolved robots*, in «Connection Science», Vol. 21, Issue 1 (March 2009), pp. 3-14; O. Miglino, M. Ponticorvo, *Place cognition as an example of situated cognition: a study with evolved agents*, in «Cognitive Processing», Vol. 10, Supplement 2 (September 2009), pp. 250-252; O. Miglino, M. Ponticorvo, *Exploring the Roots of (Spatial) Cognition in Artificial and Natural Organisms. The Evolutionary Robotics Approach*, in *Horizons of Evolutionary Robotics*, MIT Press, (in stampa).

Riccardo Notte

è docente di Antropologia culturale presso l'Accademia di Brera di Milano. Dal 1989 studia i mutamenti socio-antropologici derivanti dalle nuove tecnologie. Su questi argomenti ha pubblicato diversi volumi, tra cui: *Millennio virtuale* (Seam, 1996), *La razza stellare* (Seam, 1999), *La condizione connettiva* (Bulzoni, 2002), *You, Robot* (Vallecchi, 2005) e *Machina ex machina. Saggio sul mito del robot* (Bulzoni, 2008).

Stefano Pisani

è giornalista scientifico. Collabora con diverse testate tra cui *Le Scienze* e *Mente e Cervello*. È Responsabile della Comunicazione per l'Istituto di Cibernetica "E. Caianiello" del Cnr di Napoli e consulente per la divulgazione del gruppo SIMAI-DMA (Società Italiana Matematica Applicata e Industriale - Divulgazione Matematica Applicata). È caporedattore del portale di comunicazione scientifica SciCam

(www.sci-cam.it) e socio della Cooperativa di Comunicazione Scientifica “CodiCS”.

Bruno Siciliano

è professore ordinario di Controllo e Robotica e Direttore del Laboratorio PRISMA presso la Facoltà di Informatica e Sistemistica dell’Università di Napoli “Federico II”. È membro dell’IEEE, dell’ASME e dell’IFAC e presidente della Società Mondiale di Robotica e Automatica - IEEE. I suoi interessi di ricerca comprendono il controllo in forza, l’asservimento visuale, l’interazione uomo-robot e la robotica di servizio. È stato coautore di sette libri, 70 articoli per riviste scientifiche e 170 testi di conferenza e capitoli di libro. È co-redattore dei *Springer Tracts in Advanced Robotics* e del *Springer Handbook of Robotics*, vincitore del “PROSE Award for Excellence in Physical Sciences & Mathematics”, il più prestigioso riconoscimento internazionale per l’editoria scientifica.

Guglielmo Tamburrini

è docente di Logica e Filosofia della scienza presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell’Università di Napoli “Federico II”. I suoi interessi di ricerca includono le problematiche epistemologiche, etiche e sociali delle tecnologie robotiche. Per ulteriori informazioni su pubblicazioni, progetti di ricerca e collaborazioni scientifiche si può consultare il sito: <http://people.na.infn.it/~tamburrini/>.

Settimo Termini

è professore ordinario di Informatica presso l’Università di Palermo e ha diretto per sette anni l’Istituto di Cibernetica “Eduardo Caianiello” del CNR di Napoli. Si è occupato principalmente dei problemi posti dal trattamento dell’informazione incompleta e rivedibile in sistemi complessi e, più di recente, del rapporto tra ricerca scientifica e sviluppo economico. È Socio dell’Accademia Nazionale di Scienze Lettere ed Arti di Palermo, Fellow dell’International Fuzzy Systems Association (IFSA) e condirettore della Rivista «Lettera matematica Pristem», che ha ricevuto il Premio “Pitagora” 2005 per la divulgazione scientifica. Tra le sue pubblicazioni si ricordano i volumi *Aspects of Vagueness* (Springer, 1984), *Imagination and Rigor* (Springer, 2006) e *Contro il declino* (Codice edizioni, 2007), scritto con Pietro Greco.

Margherita Venturi

è professore ordinario di Chimica generale ed inorganica presso l'Università di Bologna. Dal 1992 collabora al gruppo di Fotochimica del Professore Vincenzo Balzani dedicandosi allo sviluppo di macchine e dispositivi molecolari artificiali. È autore di oltre 180 articoli scientifici nel campo della fotochimica ed elettrochimica supramolecolare, di un testo intitolato *Molecular Devices and Machines* (scritto insieme a V. Balzani e A. Credi) e di un manuale di fotochimica.

Gianmarco Veruggio

è primo ricercatore presso il CNR-IEIIT e docente di Robotica Marina presso l'Università di Genova. Nel 1990 ha fondato Robotlab, il Reparto di Robotica del CNR-IAN di Genova (Istituto Automazione Navale del Consiglio Nazionale delle Ricerche), che ha diretto sino al 2003. Le sue ricerche sono concentrate sulla robotica sperimentale e ha guidato campagne di robotica marina in Antartide e nell'Artico. Nel 2000 ha fondato la Scuola di Robotica per favorire la divulgazione di questa nuova scienza tra i giovani e la società. Nel 2002 ha proposto il concetto di Robotica. Ha ricevuto nel 2009 l'onorificenza di Commendatore dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana. Tra le sue pubblicazioni: *Il Mare della Robotica*, (Di Renzo Editore, 1999), *Io, Robotico*, in *Intelligenza Artificiale, dal test di Turing alla macchine pensanti*, (Le Scienze Editore, 2005).

Gianni Zanarini

è professore di Fisica presso l'Università di Bologna. Affianca da tempo ai suoi interessi scientifici lo studio delle relazioni tra scienza e arte e, a tal riguardo, tiene il corso di Scienza e letteratura presso il Master di Comunicazione della Scienza della SISSA di Trieste. Tra le sue pubblicazioni: *Complex Systems and Cognitive Processes* (Springer, 1989); *Diario di viaggio: auto-organizzazione e processi cognitivi* (Guerini, 1990); *Ludwig Boltzmann: una passione scientifica* (Cuen, 1996); *Appassionato rigore: visioni del mondo e passioni scientifiche* (Cuen 2001); *Kosmos: arte e scienza allo specchio* (Istituto italiano per gli studi filosofici, 2009).

Finito di stampare nel mese di novembre 2009 da Arti Grafiche Solimene, Casoria (Na)
per conto della CUEN srl, Napoli

ISBN 978 88 7146 770-2