

ATTI
DELL'ACCADEMIA
DELLE SCIENZE
DI FERRARA



Estratto

Volume 98
Anno Accademico 198
2020-2021

Volume 98
Anno Accademico 198
2020-2021

Proprietario e copyright

Accademia delle Scienze di Ferrara
Palazzo Tibertelli - via del Gregorio, 13 - 44121 Ferrara
tel. - fax (0532) 205209
e-mail: info@accademiascienze.ferrara.it
sito web: <http://www.accademiascienze.ferrara.it>

Direttore responsabile

Dott. Francesco Scutellari

Redattori

Prof. Paolo Zanardi Prosperi
Dott.ssa Giuliana Avanzi Magagna

Periodicità annuale

Autorizzazione n. 178 Reg. Stampa
in data 6 maggio 1972 del Tribunale di Ferrara

Composto per la stampa

Sara Storari
Studio editoriale Fuoriregistro
via Zucchini, 79 - 44122 Ferrara
e-mail: studiofuoriregistro@gmail.com

ISSN 0365-0464

INDICE GENERALE

| | | |
|--|----|-----|
| Consiglio Direttivo | p. | 9 |
| Note storiche | » | 13 |
| I Presidenti dalla fondazione ad oggi | » | 17 |
| Elenco dei Soci | » | 19 |
| Programma attività culturale svolta nell'anno accademico 2020-2021 | » | 27 |
| Ricordo di Giorgio Franceschini (1921-2012) nel centenario della nascita | » | 33 |
| <i>Comunicazioni scientifiche</i> | » | 39 |
| INAUGURAZIONE DEL CXCVIII ANNO ACCADEMICO | » | 41 |
| CARLO CONTINI, FRANCESCA CUOGHI Covid-19: l'attesa pandemia zoonotica del terzo millennio. Attualità e prospettive | » | 47 |
| ELEONORA POLO Sotto un'altra luce. Vedere i fiori con gli occhi di una farfalla | » | 111 |

| | |
|--|-------|
| GIORGIO RISPOLI Intelligenza Naturale (IN) e Intelligenza Artificiale (IA)... o Idiozia Artificiale (sempre IA)? | » 133 |
| ALESSANDRA FIOCCA Gli studi di filosofia e medicina di Federico Commandino (1509-1575) tra Padova e Ferrara | » 169 |
| LORENZO CAPPELLARI 'Les gueules cassées' ovvero 'Le facce rotte' della Grande Guerra | » 193 |
| STEFANO MANDRIOLI La Grande guerra e la nascita e sviluppo della chirurgia plastica e della chirurgia bucco-facciale | » 215 |
| LUISA VALENTE Le origini della Chirurgia Maxillo-Facciale: sfida al fronte | » 217 |
| VINCENZO BALZANI Custodire il Creato. Sostenibilità ecologica e sociale | » 223 |
| LUIGI PEPE Napoleone. Le istituzioni culturali, i licei, le università | » 233 |
| FRANCESCO SCAFURI Giardini estensi e 'semplici' tra estetica e scienza | » 253 |
| DANIELE RAVENNA Domenico, Gualtiero, Leopoldo e Corrado. I fratelli Tumiati fra Ottocento e Novecento | » 277 |
| PAOLO ZANARDI PROSPERI Gettysburg: la resa del Sud | » 311 |

*Giorgio Rispoli**

INTELLIGENZA NATURALE (IN) E INTELLIGENZA ARTIFICIALE (IA)... O IDIOZIA ARTIFICIALE (SEMPRE IA)?

COME I SUPERCOMPUTER PIÙ POTENTI HANNO PRESTAZIONI INFERIORI
A QUELLE DELLE RETI NEURONALI PIÙ SEMPLICI

ABSTRACT

Riceviamo quotidianamente informazioni da giornali, televisioni e *social network* delle mirabolanti prestazioni dell'intelligenza artificiale, dove si paventa un futuro molto prossimo dominato da macchine coscienti più intelligenti di noi. In questo lavoro si dimostrerà che, al contrario, i più avanzati sistemi di 'intelligenza artificiale', che richiedono computer con consumi energetici dell'ordine dei megawatt e del peso di centinaia di kg, siano nei fatti molto meno 'prestazionali', per esempio, del sistema nervoso di un insetto, che esprime una 'intelligenza naturale' con consumi energetici e peso che sono molti miliardi di volte inferiori a quelli di questi computer. Si discuterà infine brevemente dei vantaggi e dei pericoli della applicazione di questa 'non-intelligenza' o 'idiozia' artificiale.

BREVE INTRODUZIONE AL SISTEMA NERVOSO

L'architettura generale e i principi di funzionamento del sistema nervoso animale, da quello più semplice fino a quello dell'essere umano (il cui cervello appena estratto dalla scatola cranica è illustrato in figura 1), sono simili.

(*) Università di Ferrara, Dipartimento di Neuroscienze e Riabilitazione, Sezione di Fisiologia, Via Borsari 46 - 44121 Ferrara.

Un ringraziamento va al dott. Francesco Scutellari, presidente dell'Accademia delle Scienze di Ferrara, alla dottoressa Marta Martini e al signor Adam Salvaterra.



Figura 1. Cervello umano.

L'ingrandimento progressivo del cervello umano (filmato 1) mostra che contiene un numero enorme di cellule specializzate, dette neuroni. Nel filmato, i neuroni sono rappresentati molto diradati per illustrarne la struttura, ma la loro reale densità nel cervello di qualsiasi animale è elevatissima e sono quasi in completo contatto gli uni con gli altri. I lampi di luce rappresentano l'attività elettrica di ciascun neurone, che

consiste in brevi impulsi di tensione, cioè in variazioni transienti della differenza di potenziale a cavallo della loro membrana plasmatica, le quali avvengono in tempi inferiori al decimillesimo di secondo (e in questo filmato sono quindi estremamente rallentati per poter essere percepiti) e hanno ampiezza massima di circa 100 millesimi di volt. Una rappresentazione estremamente semplificata di un circuito neuronale è illustrata in figura 2.

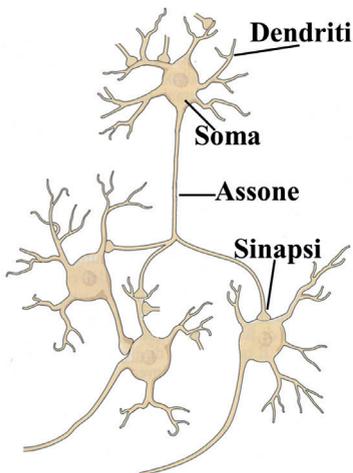


Figura 2. Schema ipersemplificato di una rete neuronale.

Ciascuno dei quattro neuroni rappresentati è costituito da un albero dendritico, un soma che contiene il nucleo e un assone, il quale si dirama e va a contattare altri neuroni tramite delle sinapsi. Queste sinapsi sono di solito collocate sull'albero dendritico del neurone post-sinaptico; ciascun neurone riceve i segnali elettrici dai neuroni che fanno sinapsi con esso, li elabora e invia la risposta elaborata lungo l'assone a tutti i neuroni contattati da quest'ultimo, e così via. L'attività elettrica collettiva dei neuroni di questa rete – composta, nell'essere umano, da 100 miliardi di neuroni (10^{11}) connessi tra di loro con 1 milione di miliardi di sinapsi (10^{15}) – genera i nostri pensieri, le emozioni, i sogni, i ricordi, i movimenti, le percezioni sensoriali, la coscienza di noi stessi. Affinché questa rete, che 'tratta' solo segnali elettrici, possa percepire il mondo esterno e l'animale in cui è inserita, è necessario che quest'ultimo sia dotato di sensori che convertano in segnali elettrici solo queglii stimoli fisici particolarmente utili all'animale, generati dall'ambiente e dal suo corpo, e li veicolino alla rete. Per esempio, vediamo ciò che ci circonda poiché i nostri occhi sono dotati di particolari cellule, i fotorecettori, che convertono le immagini, o meglio la distribuzione spazio-temporale dell'intensità cromatica della luce, in una moltitudine di segnali elettrici che raggiungono il cervello tramite un fascio di assoni, detto nervo ottico (figura 3).

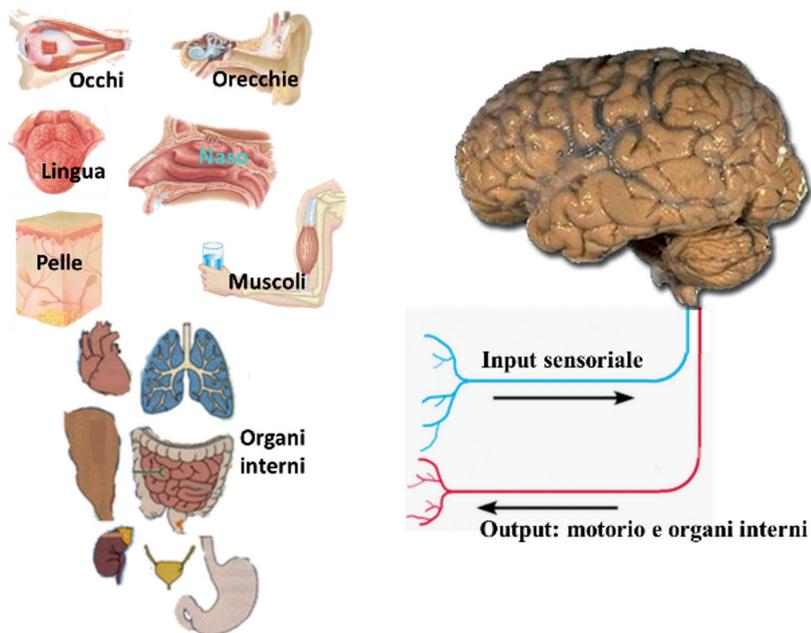


Figura 3. Schema dell'architettura del sistema nervoso.

Allo stesso modo, percepiamo odori e sapori poiché particolari neuroni presenti nelle cavità nasali e sulla lingua, i chemorecettori, sono specializzati a generare segnali elettrici ogni volta che vengono in contatto con particolari molecole, classificate come odoranti e sostanze gustative: questi segnali elettrici vengono poi trasmessi al cervello tramite due fasci di assoni, il nervo olfattivo e quello gustativo. Altri chemorecettori misurano, per esempio, la osmolarità del sangue e la concentrazione di glucosio e di ossigeno disciolti in esso, informando continuamente l'encefalo dei loro livelli: se questi fossero anormali, il cervello darà il via a tutta una serie di contromisure per riportarli a livelli fisiologici, tra cui innescare la sensazione di sete, di fame o la respirazione più rapida, rispettivamente. Così percepiamo i suoni, l'accelerazione subita dal nostro corpo, la nostra posizione rispetto alla gravità e il contatto tra la pelle e ciò che ci circonda (il tatto) perché particolari cellule, i meccanorecettori (presenti nell'orecchio interno e nella pelle), convertono la sollecitazione meccanica da essi subita in segnali elettrici, i quali vengono trasmessi al cervello tramite altri fasci di assoni. Questi meccanorecettori sono presenti, inoltre, sulle pareti dello stomaco, del retto, della vescica, nei muscoli, nei tendini e nelle giunture, e informano il cervello se lo stomaco è pieno, se dobbiamo correre in bagno, dello stato di contrazione di ogni muscolo e della posizione di ogni arto, rispettivamente. Questa immensa massa di segnali elettrici, veicolata da centinaia di milioni di assoni, viene recepita e analizzata dal cervello che elabora una risposta appropriata che viene inviata, sempre tramite centinaia di milioni di assoni, ai muscoli e alle ghiandole a secrezione interna ed esterna, i quali eseguono questa risposta. Infine questa immensa rete neuronale è plastica, cioè si modifica continuamente a seguito dell'intensità dell'attività elettrica generata da essa stessa a seguito degli stimoli fisici provenienti dal mondo circostante e dall'interno del corpo: questo è il meccanismo alla base della memoria, argomento su cui si ritornerà più avanti.

Tutti i sistemi nervosi, da un piccolo insetto o una lumaca fino agli esseri umani, funzionano con questi principi: in prima approssimazione, un sistema nervoso è tanto più 'prestazionale' quanto maggiore è il numero di neuroni e di sinapsi che lo compongono rispetto alla massa dell'animale di cui fa parte, quanto più complessi sono i loro neuroni e le loro sinapsi e quanto maggiore è la densità neuronale (numero di neuroni per cm^3).

Malgrado l'immenso progresso nella conoscenza del cervello compiuto negli ultimi anni, soprattutto nei meccanismi della generazione e trasmissione dei segnali elettrici al livello del singolo neurone, resta ancora oscuro come l'attività elettrica collettiva di un grande numero di neuroni generi pensieri, emozioni, ricordi, autocoscienza, ecc.

DAGLI AUTOMI E ANDROIDI MECCANICI A QUELLI MODERNI, PASSANDO PER I CERVELLI ELETTRONICI

Quando si può dire di aver capito il funzionamento di un certo meccanismo? Una delle migliori risposte l'ha suggerita il premio Nobel per la fisica Richard Feynman: *what I cannot create I do not understand*, cioè se un certo meccanismo non lo posso riprodurre in qualche modo, non l'ho capito. Per esempio, è stato compreso come funziona un cuore, perché è possibile riprodurne una copia perfettamente funzionante utilizzando materiali a-biologici come materie plastiche, gomma e metalli. Questo dispositivo, una volta inserito nel corpo umano, pompa il sangue esattamente come il cuore biologico composto da cellule muscolari (un esempio è nel filmato 2).

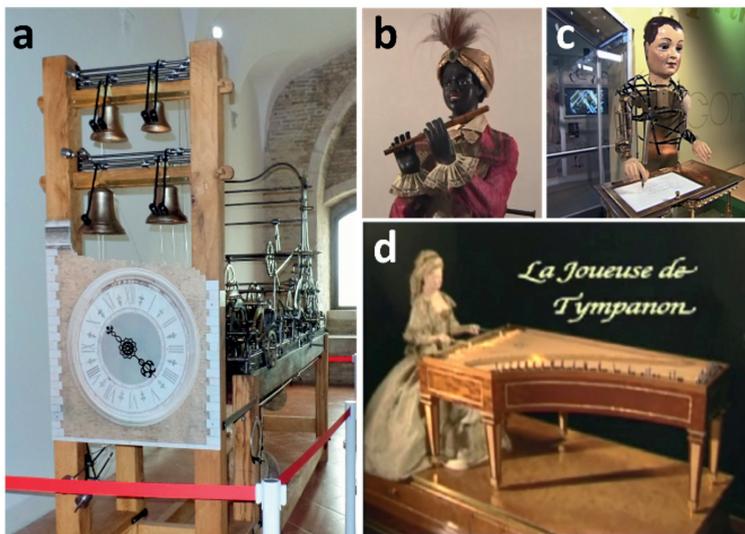


Figura 4. Il mondo della meccanica. a: orologio della Torre civica del Palazzo del Governo, esposto al Palazzo degli Anziani di Ancona (1500); b: suonatore di flauto, costruito da Jacques de Vaucanson, Parigi (1737; filmato 3); c: scrivano, costruito da Henri Maillardet, Londra (1800; filmato 4); d: suonatrice di salterio, costruito da Pierre Kintzing e David Roentgen, Germania (1772; filmato 5).

Il sogno di creare una macchina che assomigli a noi, non solo nell'aspetto, ma anche nei pensieri, nei movimenti, nelle emozioni e nella coscienza di sé, ha radici antichissime che risalgono addirittura alla mitologia classica. Nel XVIII

libro dell’Iliade si narra infatti che il Dio del metallo Efesto creò, tra gli altri suoi servi meccanici, delle ancelle dorate in grado di muoversi autonomamente e dotate di intelligenza. Un altro esempio della mitologia greca è Talos, fatto di bronzo, posto da Zeus (o da Minosse) a guardia di Creta per proteggere Europa, la regina dell’isola. Tralasciando gli esseri fatti di materia organica (nella letteratura di fantascienza sono i *cyborg*, i replicanti e i mutanti), come il tupilaq delle leggende inuit o l’universalmente nota creatura del dottor Frankenstein dell’omonimo romanzo di Mary Wollstonecraft Shelley (1818), o gli oggetti trasformati in esseri viventi per magia, come la statua Galatea di cui si era invaghito Pigmalione, trasformata in donna da Afrodite, o il Pinocchio di Carlo Collodi (1883), burattino di legno trasformato in bambino, è solo con lo sviluppo della meccanica che si è intravista la possibilità di costruire macchine che ci assomiglino, seguendo il principio enunciato da Feynman.

Con l’avvento dell’illuminismo, che si prefiggeva di spiegare razionalmente ogni fenomeno naturale, è esplosa la costruzione artigianale di automi (o robot, cioè macchine in grado di operare in modo autonomo) antropomorfi, che ora denominiamo androidi, in grado di riprodurre alcune attività umane (come suonare uno strumento o scrivere), utilizzando la più avanzata tecnologia disponibile all’epoca, cioè gli orologi meccanici inventati circa 300 anni prima (figura 4a). Il primo androide costruito con successo è considerato ‘un suonatore di flauto’, opera del francese Jacques de Vaucanson nel 1737 (figura 4b). Altri straordinari esempi sono ‘la suonatrice di salterio’ (figura 4d) e ‘l’androide scrivano’ (figura 4c), costruito a Londra nel 1800 circa dal meccanico svizzero Henri Maillardet, che ha ispirato il film *Hugo Cabret* del 2011, diretto da Martin Scorsese. La grande impressione che fecero all’epoca questi automi si è protratta nei secoli successivi, e ancora oggi diciamo: “gli manca qualche rotella” quando accenniamo a una persona che sragiona, come se il cervello umano fosse costituito da ruote dentate come un orologio. È ovvio che questi automi non abbiano alcuna autonomia: non fanno che ripetere, finché la loro molla è carica, ciò per cui sono stati programmati da un sistema meccanico: questi automi non possono ‘decidere’ di suonare o scrivere ciò che ‘desiderano’!

Lo sviluppo della telefonia ha visto, tra la fine dell’Ottocento e l’inizio del Novecento, la sostituzione delle centraliniste (figura 5a) con dei selettori elettromeccanici per mettere in contatto tra loro le utenze telefoniche (figura 5b). Basandosi su questa tecnologia, Alan Turing ha potuto sviluppare nel 1940 una macchina denominata la ‘Bomba’ (figura 5c; nel filmato 6 è mostrata una sua fedele ricostruzione completata nel 2007), in grado di decodificare autonomamente i messaggi criptati dei nazisti,

dopo che un operatore aveva inserito i testi da decodificare e possibili chiavi di decodifica tramite dei selettori (filmato 6). Lo scienziato britannico aveva così gettato le basi dell'informatica moderna, fornendo un nuovo paradigma per sviluppare sistemi computazionali programmabili. Naturalmente questa macchina non faceva null'altro da ciò per cui era stata costruita, esattamente come gli automi illustrati in figura 4.

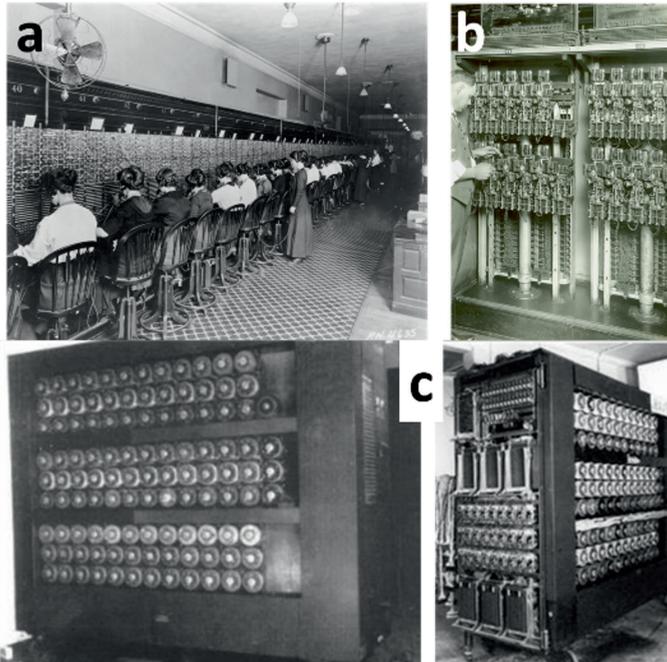


Figura 5. Il mondo dell'elettromeccanica. a: centraliniste in una sala di commutazione a New York (circa 1890); b: centralino a commutazione automatica (1919); c: vista frontale e laterale della 'Bomba' di Alan Turing (1940).

Con l'invenzione della valvola termoionica nel 1907 si è aggiunto un ulteriore paradigma per lo sviluppo degli automi: quasi parallelamente alla 'Bomba', era stata sviluppata nel 1944 da Max Newman e Tommy Flowers un'altra macchina, il 'Colossus', progettata anch'essa per decodificare i messaggi cifrati e antesignana dei computer moderni (figura 6). Infatti, come questi ultimi è elettronica, utilizza la logica binaria di Boole ed è programmabile, sebbene i programmi venissero inseriti con interruttori e spinotti (figura 6a) e non tramite nastri o schede perforate, oppure

digitati su tastiera. Queste macchine erano appunto colossali, consumavano moltissima energia elettrica e avevano capacità computazionali inferiori a quelle di un odierno distributore automatico di bevande. Nonostante il ‘Colossus’ fosse dotato di sole 2.500 valvole (figura 6b e 7a), veniva chiamato ‘cervello elettronico’ (come tutti i supercomputer costruiti fino a una ventina di anni fa, poi il termine è diventato desueto) in quanto in grado di fare calcoli impossibili per il cervello umano.

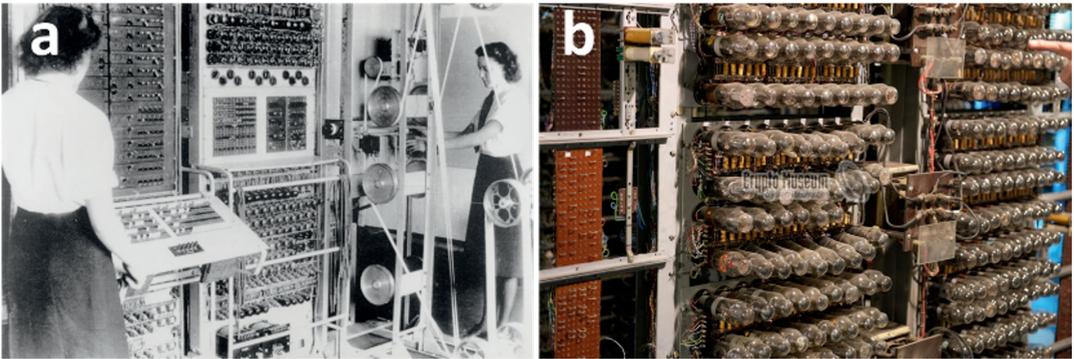


Figura 6. Il mondo dell’elettronica. a: interfaccia utente del Colossus; b: particolare della sua unità di processo, a valvole (1944).

A seguito dell’invenzione del transistor nel 1947 ad opera di Walter H. Brattain, John Bardeen e William Shockley, che è l’equivalente delle valvole, ma con dimensioni e consumi immensamente più piccoli (figura 7b), è stato poi possibile ridurli a dimensioni sempre più minuscole e con densità progressivamente crescenti: dalle 2.500 valvole del ‘Colossus’ che occupavano una grossa stanza, si è giunti nel 1963 al primo circuito integrato (figura 7c) prodotto dalla Fairchild, di dimensioni inferiori a una moneta di un cent contenente una decina di transistor, che ha equipaggiato il computer di bordo delle missioni Apollo che hanno portato l’uomo sulla Luna nel 1969 (figura 7d). Il più potente circuito integrato prodotto fino a questo momento è il microprocessore A64FX prodotto dalla Fujitsu nel 2019 (figura 7e), che racchiude quasi 10 miliardi di transistor su una superficie di circa 20 cm².

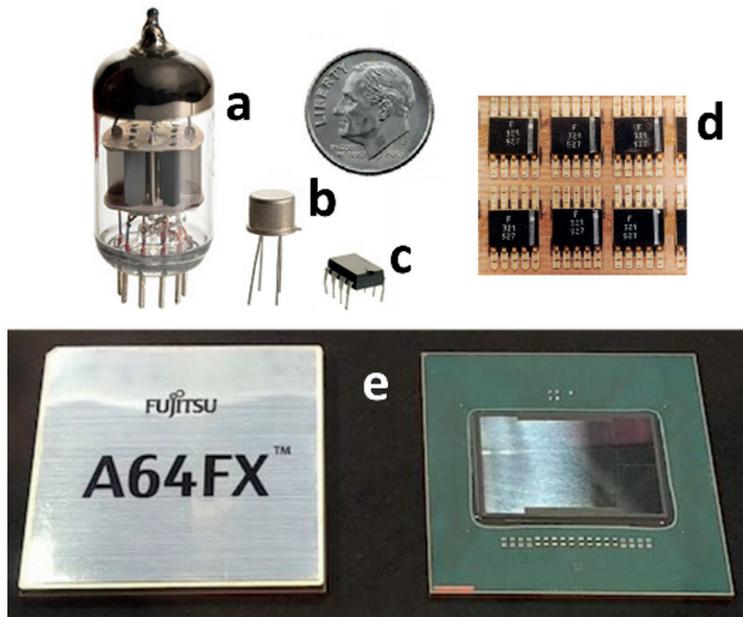


Figura 7. Lo sviluppo del mondo dell'elettronica. a: valvola termoionica; b: transistor; c: circuito integrato; d: un particolare del computer di bordo delle missioni Apollo con i primi circuiti integrati; e: il più potente microprocessore prodotto fino ad oggi (2019). Foto approssimativamente in scala con un centesimo americano (19 mm di diametro) come paragone, posto in alto.



Figura 8. Il Fugaku (Kobe, Giappone), il più potente computer del mondo fino ad oggi (2021).

Questo microprocessore è utilizzato nel più potente (ad oggi) supercomputer del mondo, il Fugaku (Kobe, Giappone), che ne ospita ben 158.976, ed è così in grado di eseguire 415 milioni di miliardi ($4.15 \cdot 10^{17}$) di operazioni in virgola mobile al secondo (o 415 petaflops). Il Fugaku, entrato in servizio nel 2020, ha un consumo energetico pari a '30 megawatt', cioè è necessaria un'intera centrale elettrica dedicata per farlo funzionare, e la sola unità di processo (escludendo cioè le stanze occupate dai sistemi di raffreddamento, la centrale elettrica, le interfacce utente, ecc.) occupa un intero locale di 300 m² (figura 8), pesa 'centinaia di tonnellate' e costa un miliardo di dollari. Questa immensa potenza di calcolo può indurre a immaginare che queste macchine possano davvero diventare dei 'cervelli elettronici', cioè in grado di simulare la mente umana. Infatti, a un'analisi superficiale, gli androidi più recenti sembrano essere molto umani, come quelli sviluppati dalla americana *Boston Dynamics*. In realtà, tutta la potenza computazionale dell'androide del filmato 7 è esclusivamente dedicata a evitarli di cadere e a scansare gli ostacoli, non ha cioè alcuna 'idea' di cosa stia facendo, di dove stia andando e perché: non fa null'altro che eseguire il programma caricato nella sua memoria. Più avanti, nel filmato 7, l'androide esegue un altro programma, che gli fa posizionare dei cartoni su uno scaffale e, mentre un essere umano cerca di impedirglielo, l'androide continua imperterrito a fare ciò per cui è stato programmato, cioè afferrare un cartone e posizionarlo su uno scaffale. Eppure gran parte dell'opinione pubblica ha ritenuto che questo androide avesse una qualche forma di coscienza di ciò che stava eseguendo, e purtroppo non si è trattato solo di persone sprovviste e disinformate: per esempio, un giornalista di uno dei principali quotidiani italiani, il *Corriere della Sera*⁽¹⁾, di fronte a questi 'dispetti', si è chiesto: "e se l'androide Atlas si dovesse arrabbiare?". Ciò quindi significa non avere idea della immensa disparità di potenza computazionale che c'è tra l'eseguire un programma e avere coscienza di ciò che viene fatto e dell'ambiente in cui si opera, e di essere poi in grado di modificare il proprio comportamento di conseguenza e avere infine una reazione 'emozionale' (per esempio 'arrabbiarsi'), come sarà dimostrato più avanti. In effetti è facile essere ingannati da questi comportamenti e immaginare che queste macchine pensino, se non come noi, almeno come un animale da compagnia. Per esempio, si immagini di inserire il programma di riconoscimento facciale che sblocca uno smartphone, nel sistema di controllo dell'automa quadrupede che sta correndo accanto all'uomo di figura 9, e che ogni volta che il programma ne riconosca il viso, azioni il motorino di un tergicristallo posizionato sul retro di questo automa su cui è incollata una coda di peluche: l'automa così 'agiterà la coda' ogni volta che la sua telecamera inquadrerà l'uomo.



Figura 9. Un androide quadrupede che scodinzola.

E il giornalista che ha redatto l'articolo precedente sulla possibile arrabbiatura di Atlas, scriverebbe senz'altro che l'androide quadrupede corre col suo amico umano e scodinzola felice al vederlo, mentre invece non è altro che una macchina, come gli automi meccanici del '700, che sta eseguendo un programma immagazzinato in una memoria, questa volta elettronica anziché meccanica: felicità, amicizia, rabbia, coscienza sono concetti che per essere espressi richiedono ben altre capacità computazionali. Ed è incredibile come uno dei massimi geni di questo secolo, Alan Turing, fosse convinto che presto un computer sarebbe arrivato alle prestazioni del cervello umano e a questo scopo aveva proposto nel 1950 un test per verificarlo, l'*imitation game*. Invece, malgrado gli immensi progressi tecnologici fatti nei successivi 70 anni, la tecnologia corrente più avanzata non è ancora capace di replicare le prestazioni di un insetto. Nell'*imitation game* (figura 10) un essere umano 'interrogatore' dialoga con un terminale che può essere connesso, a sua insaputa, ad un secondo terminale comandato da un altro essere umano oppure a un computer.

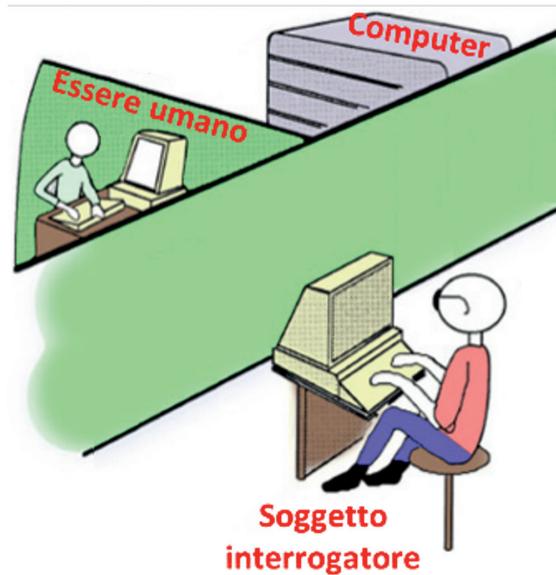


Figura 10. L'*imitation game* di Alan Turing.

Se l'interrogatore non è in grado di capire con chi sta effettivamente dialogando, allora il computer ha raggiunto le prestazioni umane. In realtà è relativamente semplice trarci in inganno, come facevano gli automi che suonavano o scrivevano nel '700, assemblando programmi che simulino molto bene un dialogo umano, per esempio: a domande banali tipo: "che tempo fa oggi" il computer può rispondere consultando il meteo su internet, ma a domande più articolate può estrarre una o più parole significative dalla domanda posta dall'interrogatore e rispondere con una frase a caso che le contenga; per esempio alla richiesta: "cosa pensi della mia personalità?" potrebbe rispondere: "penso che hai una personalità interessante" e sorprendere così l'interrogatore. Un esempio di ciò è nel filmato 8, dove un giornalista intervista un androide dalle sembianze femminili di nome Sofia, il cui viso è fatto da un polimero elastico che può essere mosso da attuatori meccanici in grado di fargli assumere espressioni facciali molto 'umane' (null'altro che un ulteriore perfezionamento dei movimenti meccanici degli androidi del '700). Tutta la capacità computazionale a bordo di questa testa è dedicata a farle eseguire questi movimenti e a interfacciarsi col mondo esterno, poiché è dotata di un sintetizzatore vocale, una telecamera e un microfono: è poi connessa via *wifi* a un grosso computer (non mostrato nel filmato) che esegue un programma dedicato a elaborare le voci e le immagini digitalizzate

ricevute e a formulare una risposta che poi rinvia alla testa, la quale la verbalizza tramite il sintetizzatore vocale e la 'anima' assumendo le espressioni facciali che il programma ha trovato appropriate alla risposta. In questo filmato alle domande banali dell'intervistatore: "come stai", "ti piace parlare con me" l'androide risponde con frasi standard preregistrate, come: "sto benissimo", "parlare con gli umani è una dei miei compiti principali"; sembra quindi che questo androide abbia una sua personalità e provi delle emozioni, mentre sta invece eseguendo un programma la cui risposta 'emozionale' è equivalente alla coda agitata dal quadrupede di figura 9. È curioso che il cameraman che ha effettuato queste riprese si soffermi sulla lucina che lampeggia nella parte posteriore trasparente della testa, come se lì ci fosse la sorgente di chissà quale intelligenza elettronica, mentre non è altro che un led che segnala il traffico dati via *wifi* tra la testa e il computer alloggiato in un'altra stanza. Ma non appena l'intervistatore pone una domanda non standard, come: "hai intenzione di distruggere l'umanità?" il computer, non avendo una risposta pronta in memoria né in grado di reperirla su internet, costruisce una frase a caso che sia di senso compiuto partendo dalla parola "distruggere", e la risposta è: "OK ho intenzione di distruggere l'umanità"! Un altro esempio di questo modo di sintetizzare le risposte è Replika, un 'chatbot' (cioè un robot creato per chattare) creato nel 2016 per gli smartphone (che ha al momento circa due milioni di utilizzatori) per consolare chi si sente solo. Una giornalista, in una decina di minuti di utilizzo, ha ingannato il 'chatbot' al punto che quest'ultimo ha spinto la giornalista a uccidere tre persone per poi ringraziarla della carneficina, che la giornalista aveva ovviamente solo millantato al 'chatbot' di aver compiuto!⁽²⁾.

INTELLIGENZA E AUTOCOSCIENZA NATURALE E ARTIFICIALE

Quanto esposto fino a questo punto dovrebbe aver consolidato l'idea che l'intelligenza 'artificiale' sia poca cosa rispetto a quella 'naturale' espressa da un essere umano. In realtà l'automa Atlas, gli automi quadrupedi e Sofia sono poco più che giocattoli se le loro prestazioni sono paragonate non a quelle di un mammifero, ma a quelle di un semplice (per modo di dire) insetto.

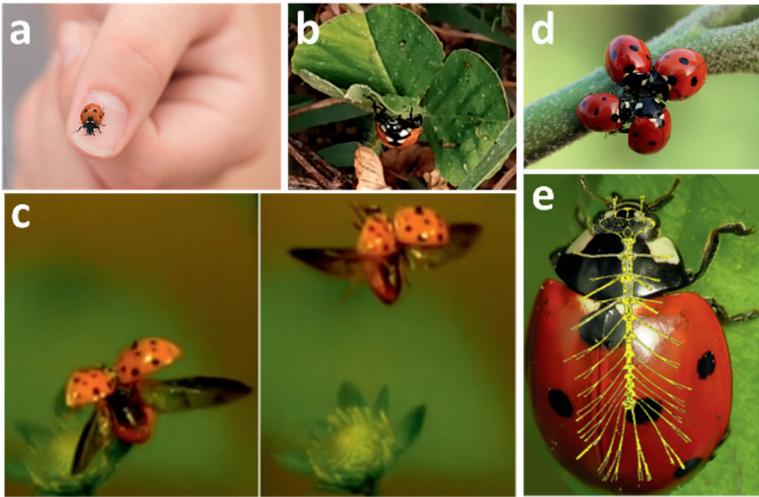


Figura 11. La coccinella e il suo sistema nervoso. a: le dimensioni di una coccinella comparata a quelle di una mano; b: la coccinella in grado di camminare su qualsiasi superficie e in qualsiasi posizione; c: due istantanee di una coccinella poco prima e poco dopo aver spiccato il volo; d: coccinelle che comunicano tra loro; e: disegno in scala del sistema nervoso (in giallo) della coccinella.

Per esempio una coccinella, le cui dimensioni sono meno della metà di quelle di un'unghia (figura 11a), cammina su sei zampe su qualunque terreno, anche a testa in giù, senza mai cadere (figura 11b), surclassando così tutte le macchine deambulanti mostrate prima. Ma per il sistema nervoso a bordo di questo insetto il farla camminare su sei zampe e su qualsiasi terreno è un'operazione del tutto banale: la coccinella è anche in grado di volare, dopo aver sollevato le elitre e dispiegato le ali (figura 11c), e la tecnologia più avanzata non è ancora stata in grado di costruire un drone che possa 'autonomamente' volare tra il fogliame di un bosco, atterrare e decollare su tronchi, foglie, rami, ecc. senza andare a sbattere o rovinare a terra; addirittura ci sono insetti, come la mosca cavallina, che sono in grado di sfrecciare a 40 km all'ora nel fogliame. Del resto, per il sistema nervoso della coccinella sono ancora operazioni banali camminare su sei zampe e volare: infatti l'insetto sa anche dove andare, ha sue motivazioni, riconosce le prede (è carnivoro e si nutre di altri insetti) e le cattura con tattiche opportune a seconda all'ambiente in cui si trova (per esempio una roccia, una foglia, il fango, ecc.), riconosce i predatori e attua strategie per sfuggirgli, scambia informazioni con altre coccinelle (figura 11d), cerca un partner e vi si accoppia, ecc. Ma questo sistema nervoso non è grande come un

palazzo, non pesa centinaia di tonnellate e non consuma milioni di watt: è appena visibile a occhio nudo (figura 11e), occupando il volume di un cubetto di mezzo millimetro di lato che racchiude ben 300 mila neuroni e 50 milioni di sinapsi, pesa mezzo millesimo di grammo e consuma 50 miliardesimi di watt. E si continuano a scoprire prestazioni sempre più stupefacenti di questi sistemi nervosi, che mostrano un divario computazionale sempre più grande tra i supercomputer più potenti e gli insetti. Un esempio tipico sono le api, che hanno un sistema nervoso più sofisticato di quello di una coccinella perché dotato di circa 950 mila neuroni e 200 milioni di sinapsi, contenuti comunque nel volume di un millimetro cubo, con un peso di un millesimo di grammo e un consumo di 200 miliardesimi di watt. Nel 1947 Karl Von Frisch ha dimostrato come le api riconoscano forme, colori e odori, e li memorizzino (associandoli opportunamente a formare una mappa cognitiva dell'ambiente) allo scopo di orientarsi per ritrovare l'alveare, ritornare a zone ricche di cibo o evitare luoghi pericolosi. Sfruttando queste loro capacità, Von Frisch ha dimostrato che le api sono anche in grado di indicare alle compagne con un volo danzante la direzione e la distanza del cibo dall'alveare, nonché la sua appetibilità⁽³⁾: per tutte queste scoperte, Von Frisch ha ricevuto il premio Nobel nel 1973. Qualche anno dopo James Gould ha scoperto che le api sono inoltre in grado di valutare, prima di agire, se le informazioni ricevute da terzi (per esempio una compagna) abbiano senso o no. L'esperimento con cui ha dimostrato ciò è semplice: Gould ha posto in un certo luogo un piattino con del cibo, ci ha messo un'ape sopra e poi l'ha lasciata ritornare all'alveare. Puntualmente, poco dopo, arrivava lo sciame di api, informate dalla loro compagna. Ma se Gould metteva il piattino con l'ape sopra su di una barca al centro di un laghetto ben noto alle api, una volta lasciata libera quest'ape di informare le compagne della presenza del cibo, le api non partivano in direzione del cibo, poiché, già conoscendo il laghetto, sapevano che non c'era alcuna isola al centro⁽⁴⁾. Studi più recenti hanno mostrato comportamenti ancora più evoluti degli insetti: in un articolo del 2018 si è dimostrato che il moscerino della frutta si accoppia non solo per istinto ma anche per il piacere di farlo, e se ne è deprivato sembra si consoli consumando più frutta fermentata, che contiene alcool⁽⁵⁾. In definitiva il sistema nervoso di animali come gli insetti, che è semplicissimo se paragonato a quello di un mammifero, è già in grado di manifestare un comportamento 'intelligente'. Ma cos'è l'intelligenza?

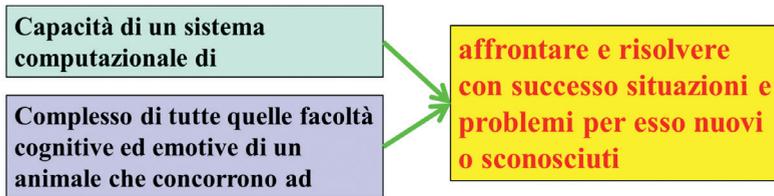


Figura 12. Che cos'è l'intelligenza.

‘Intelligenza’ è una parola derivata dal latino *intelligĕre*, che significa per capire. *Intelligĕre* è composto dal verbo *legĕre* (che significa leggere) e da un prefisso forse derivato dall’avverbio *intūs*. *Intūs* significa dentro: *intelligĕre* significherebbe dunque saper leggere-dentro, ovvero leggere oltre la superficie, cioè comprendere i reali meccanismi e le reali intenzioni di viventi e non viventi. Il prefisso potrebbe invece essere la preposizione *inter*, che vuol dire tra, e in questo caso *intelligĕre* indicherebbe la capacità di leggere tra le righe o di stabilire delle correlazioni tra elementi. In definitiva si può affermare che l’intelligenza è la capacità di un ‘essere’ (artificiale o naturale) di affrontare e risolvere con successo situazioni e problemi per esso nuovi o sconosciuti (figura 12). Questo è il problema fondamentale dei computer: sono incapaci di risolvere un problema se non sono stati programmati per risolverlo, al contrario degli animali, che in genere risolvono problemi tanto più nuovi e difficoltosi (e tanto più rapidamente) quanto maggiore è la complessità del loro sistema nervoso.

Da una certa complessità in poi i sistemi nervosi manifestano un’altra straordinaria proprietà, che è ancora più notevole dell’intelligenza: l’autocoscienza. Ma che cos’è? Come per l’intelligenza, non c’è accordo sulla precisa definizione dell’autocoscienza, ma in prima approssimazione si può affermare che è la consapevolezza di essere un ‘qualcuno’ dotato di una vita psichica, con esperienze e progetti, e che si relaziona con il mondo circostante e con i propri simili. Per valutare la presenza dell’autocoscienza in un animale, è stato proposto da Gordon Gallup nel 1970 un esperimento (detto ‘test dello specchio’) molto semplice ma efficace: all’animale da esaminare viene sporcata, senza che se ne accorga, una parte del corpo, per esempio facendogli una piccola macchia su un orecchio o sul muso. Se l’animale, vedendo la sua immagine riflessa in uno specchio, cerca di pulire la parte del corpo sporcata dallo sperimentatore, vuol dire che ha compreso che l’immagine che vede nello specchio è lui stesso e quindi ha manifestato una qualche consapevolezza di sé. Questa proprietà è stata di solito attribuita agli animali più evoluti come i mammiferi, e molti scienziati l’hanno addirittura limitata ai soli primati. Uno studio pubblicato nel 2019 ha invece mostrato

che un pesce d'acqua salata molto usato negli acquari, il *Labroides dimidiatus*, ha superato il 'test dello specchio'⁽⁶⁾.



Figura 13. Il pesce *Labroides dimidiatus*: lunghezza: 5-14 cm, peso: 2-5 g, peso del cervello: 30-70 mg.

Gli sperimentatori sono infatti riusciti a sporcare una pinna all'insaputa del pesce, il quale, una volta notata la macchia nella sua immagine riflessa in uno specchio immerso nell'acquario, si è diretto verso una pietra per pulirvisi la pinna sopra. È vero che questo pesce lungo pochi centimetri ha un cervello che è tra le 50 e le 70 volte più grande di quello di un'ape, ma è 30.000 volte più piccolo di quello umano, pertanto è davvero inaspettato che un sistema nervoso così semplice rispetto a quello dei primati sia già in grado di esprimere una qualche forma di autoconsapevolezza.

L'APPRENDIMENTO NEI SISTEMI COMPUTAZIONALI NATURALI E ARTIFICIALI

Malgrado gli incredibili progressi nello studio del sistema nervoso, non si ha ancora idea di come un insieme di neuroni possa esprimere delle facoltà così elevate come la consapevolezza: nei fatti si ha una conoscenza approssimativa, e limitata ai sistemi nervosi più semplici (come quello di un mollusco, dotato di poche centinaia di neuroni), su come un certo schema dell'attività elettrica di un particolare gruppo di neuroni possa generare risposte elementari, per esempio una successione coordinata

di movimenti. Lo studio mostrato nel filmato 9 è un esempio dell'applicazione delle tecniche più avanzate per lo studio in tempo reale dell'attività elettrica dei neuroni: consiste nel far esprimere (con la biologia molecolare) nei neuroni del sistema nervoso di una larva di pesce una particolare proteina la cui luce di fluorescenza ha un'intensità proporzionale all'attività elettrica del neurone in cui è stata espressa⁽⁷⁾. Utilizzando una telecamera (originariamente sviluppata per indagini astronomiche) e un sofisticatissimo sistema ottico a laser per l'eccitazione sequenziale delle proteine fluorescenti, è possibile osservare (dato che l'animale è trasparente) in tempo reale l'attività elettrica dell'intero sistema nervoso di questa larva lunga qualche millimetro, che è composto da 80.000 neuroni, con la risoluzione spaziale del singolo neurone. Nel filmato 9 è mostrata questa attività (dall'alto e con vista frontale e laterale), codificata con colori che vanno dal marrone scuro, che indica assenza o bassa attività elettrica, al rosso, al giallo e al bianco che indicano attività elettrica progressivamente crescente. Malgrado gli sforzi per analizzare questi filmati, ad esempio misurando come l'attività elettrica diffonda in un insieme di neuroni nel tempo, o quali neuroni entrino in attività simultaneamente o in opposizione di fase, ecc., non si è ancora capito come questa attività si correli a un particolare movimento della coda o degli occhi, o per quale motivo ci siano degli improvvisi aumenti o diminuzioni di attività in certe regioni, ecc.

Questa rete inoltre si modifica via via che il pesce fa delle esperienze: in generale, ogni qualvolta una rete neuronale memorizza qualcosa, le sinapsi tra i neuroni si modificano prima nella loro struttura interna e in quella delle cellule post-sinaptiche, nei processi di memorizzazione a breve termine, poi nella forma della sinapsi e della regione post-sinaptica, che possono, per esempio, ingrossarsi o ridursi o addirittura sparire, nei processi di memorizzazione a medio termine; infine nella formazione di sinapsi *ex-novo* o nella completa distruzione di altre, nei processi di memorizzazione a lungo termine. Pertanto, dopo aver letto questo testo, il vostro cervello sarà senz'altro strutturalmente diverso da prima! Inoltre, non esiste una porzione del cervello dove vengano registrati i ricordi (a parte una regione che coordina il processo di memorizzazione, detta ippocampo), ma questi sono invece immagazzinati nell'intera rete neuronale, la quale si modifica, seppure a ritmo sempre meno sostenuto, nel corso di tutta la vita. Il cervello di un bambino cresce dimensionalmente nei primi anni perché si formano nuovi neuroni e nuove sinapsi, ma dopo qualche anno dalla nascita la formazione di nuovi neuroni cresce sempre meno e si stabilizza. Anzi, dopo i 6-10 anni la formazione di nuove cellule nervose è trascurabile rispetto alla loro perdita, che ha luogo al ritmo di 6.000-9.000 al giorno; la crescita della massa cerebrale dopo

i 6 anni è dovuta per lo più all'aumento delle sinapsi tra i neuroni, piuttosto che alla formazione di nuove cellule.

I computer hanno invece un'architettura diversa: la memoria occupa una zona ben definita (che può essere uno o più *hard disk* oppure uno o più *drive* a stato solido), dove vengono memorizzati i programmi (che ne determinano la funzionalità) e i dati che il computer acquisisce ed elabora. Inoltre, basta staccare un solo componente nella scheda madre o all'interno di un circuito integrato, o del microprocessore, per causare gravissimi malfunzionamenti o addirittura il blocco completo del computer. Nel filmato 10 sono mostrati degli automi che costruiscono automobili: per esempio ne saldano la scocca o la verniciano, anche se le operazioni più complesse, come assemblare il motore, sono fatte ancora dagli umani. Nello stesso filmato c'è anche un automa che fa la pizza, accelerato di otto volte per comodità di visione. Una di queste macchine, in grado anche di condire la pizza, infornarla e inserirla in un contenitore di cartone, è già in funzione a Parigi⁽⁸⁾. Ma come fanno questi automi ad essere in grado di saldare, verniciare o fare le pizze? Assemblare tutta la sequenza di istruzioni per la movimentazione di questi automi nei linguaggi di programmazione più comuni è un compito estremamente complesso, ma i recenti sviluppi del *software* consentono a questi automi di assemblarle praticamente da soli, 'apprendendo' i movimenti da un operatore umano che faccia compiere alle loro 'braccia' tutti movimenti necessari, come mostrato nel filmato 10 nel caso del robot pizzaiolo. Dopo aver fatto l'impasto e averlo fatto lievitare al punto giusto, la pizzaiola professionista afferra il braccio della macchina e gli fa eseguire tutti i movimenti necessari per tirare la pasta alla forma e spessore voluto. Questo braccio è dotato di una miriade di sensori che rilevano ogni spostamento, rotazione, accelerazione o decelerazione impressi ad esso dalla pizzaiola, che poi sono registrati nella memoria del computer che muoverà il braccio. Tutta questa cinematica viene quindi elaborata da appositi programmi del computer e, dopo un gran numero di calcoli, finalmente questo automa è in grado di tirare la sfoglia. Naturalmente, se l'impasto fosse di consistenza diversa, o inizialmente posto in altra posizione, la macchina continuerebbe pedissequamente a eseguire il programma, facendo un disastro, come farebbero del resto gli automi che saldano e verniciano le scocche delle auto, se queste fossero posizionate diversamente dal solito. Anche questi automi sono stati istruiti, nello stesso modo dell'automata pizzaiolo, da saldatori e verniciatori 'umani' professionisti. La programmazione di un automa che costruisca da solo un manufatto a partire da pezzi distribuiti alla rinfusa (seguendo naturalmente le istruzioni di montaggio) è molto più complessa di quella per le macchine descritte poc' anzi: un esempio è riportato in questo articolo

pubblicato da *Nature* nel 2018⁽⁹⁾, che divulga il contenuto di uno studio pubblicato su una prestigiosa rivista di robotica⁽¹⁰⁾. Nel filmato in testa all'articolo di *Nature* si può osservare un automa dotato di due braccia che monta una semplice seggiola dell'Ikea: per non tediare l'osservatore, il filmato è stato accelerato di circa 50 volte, poiché il robot ha impiegato ben 26 minuti per montare la seggiola, malgrado fosse costituita da pochi pezzi! Le prestazioni di questi automi 'costruttori', già ridimensionate per quanto scritto sopra, diventano ridicole se paragonate a quelle di un semplicissimo (rispetto a un mammifero) insetto. Le api, per esempio, assemblano magnifici alveari, costituiti da celle esagonali perfette, in fogge complesse e mai uguali, a seconda del luogo che considerano più adatto: tra le pietre, appesi agli alberi, su superfici piane o dentro oggetti (figura 14).



Figura 14. Esempi di alveari costruiti dalle api con celle esagonali perfette e con le fogge più varie a seconda del posto più conveniente individuato dalle api.

Costruire questi alveari, rapidamente e con grande ‘intelligenza’, è un’operazione banale per il sistema nervoso delle api, che le fa camminare su qualsiasi superficie, le fa volare, procurare il cibo, sfuggire ai predatori, difendere l’alveare, valutare ‘con intelligenza’ le informazioni recepite da terzi, ecc., come sopra illustrato; e questo sistema nervoso ha consumi energetici infinitesimali, occupa uno spazio appena visibile a occhio nudo e ha un peso dell’ordine del millesimo di grammo. Queste abissali differenze mostrano come abbia poco senso immaginare di poter riprodurre il comportamento espresso anche dagli animali più semplici rendendo sempre più potenti i computer, perché la tecnologia e l’architettura generale dei computer è troppo primitiva. Il ‘divario tecnologico’ tra il più potente computer costruito finora e il sistema nervoso di un insetto è paragonabile a quello che c’è tra un triciclo (figura 15a) e lo *Space Shuttle* (figura 15b); è verissimo che triciclo e *Space Shuttle* hanno molte cose in comune, come tre ruote (o tre gruppi di ruote), un vano di carico posteriore, una ruota sterzante anteriore, una cabina di pilotaggio anteriore, un sistema di propulsione posizionato a un’estremità del veicolo, ecc., ma malgrado tutti questi punti in comune, è evidente per chiunque che con il triciclo di figura 15a non si possono portare in orbita dei satelliti, ma al più si può trasportare un *peluche* attorno all’isolato.

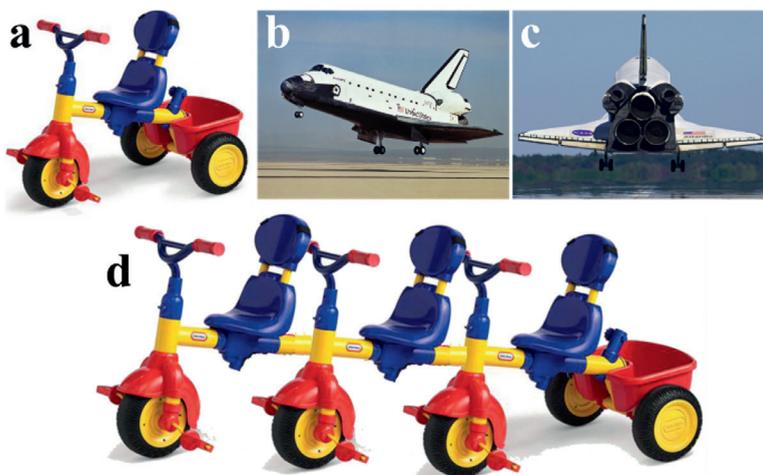


Figura 15. Il ‘divario tecnologico’ tra un triciclo e lo *Space Shuttle*, paragonabile a quello tra un supercomputer e un insetto. a: il triciclo; b: lo *Space Shuttle*; c: i tre ugelli dei tre motori a reazione dello *Space Shuttle*; d: il triciclo con tre ‘motori’.

Questo ‘divario tecnologico’ non viene colmato triplicando il sistema di propulsione del triciclo (figura 15d) per imitare lo *Space Shuttle* che è dotato di 3 motori (figura 16c), oppure dipingendo il triciclo di nero sotto e di bianco sopra e incollandovi su il marchietto NASA (operazione analoga all’aver costruito l’androide Sofia simile a una donna nel filmato 8): anche con queste modifiche, il triciclo resterà a terra.

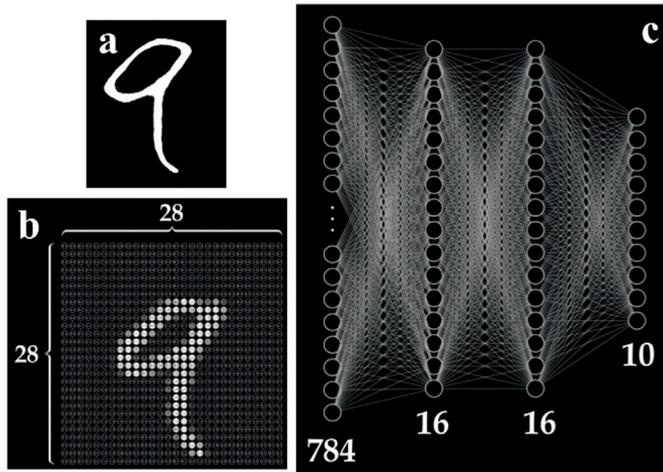


Figura 16. Esempio di una semplice rete neurale artificiale per il riconoscimento di numeri tracciati a mano. a: esempio di cifra tracciata a mano; b: l’immagine in digitalizzata da una matrice di 28x28 pixel; c: rete neurale artificiale costituita da 826 processori (rappresentati con i cerchi bianchi) distribuiti in 4 livelli: 784 nel primo, 16 nel secondo e nel terzo, 10 nel quarto.

Purtroppo una gran parte dei media non ha recepito questo immenso divario tecnologico che intercorre tra i supercomputer e un insetto, e questo fraintendimento ha sfortunatamente raggiunto anche i livelli più importanti della politica, dove si dovrebbe legiferare con grande competenza anche sull’utilizzo dell’intelligenza artificiale. Ne è un esempio la lettera aperta all’Europarlamento, firmato da 56 esperti di intelligenza artificiale di 14 paesi per scongiurare la possibilità che la Commissione vari una norma che conferisca uno stato giuridico ai robot⁽¹¹⁾. La Commissione sta infatti esaminando questa possibilità per normare la responsabilità dei danni che potrebbe provocare l’intelligenza artificiale: per esempio, nel caso di un’auto a guida completamente autonoma, a chi dovrebbe essere attribuita la colpa in caso di incidente? Al proprietario, anche se non stava guidando? Al costruttore

dell'auto? All'azienda che ne ha sviluppato il *software* di guida? In questa lettera gli esperti scrivono:

La Commissione ha comunicato che sta considerando la possibilità di creare nel lungo periodo uno specifico stato giuridico per i robot, in modo che quelli più sofisticati possano avere lo status di persone elettroniche responsabili, in grado di porre rimedio a ogni danno che possono causare quando interagiscono con terze parti, ma questa idea chiaramente sopravvaluta le attuali possibilità dei robot più avanzati, dimostra una conoscenza superficiale dell'imprevedibilità dei comportamenti e delle capacità di autoapprendimento, e rivela una percezione dei robot distorta dalla science-fiction e da alcuni recenti annunci sensazionalistici della stampa.

Che altro aggiungere?

Naturalmente la comunità scientifica è ben consapevole dei limiti dell'intelligenza artificiale costruita con le tecnologie di cui sono dotati i computer che utilizziamo quotidianamente: quindi negli ultimi anni si stanno sviluppando sempre di più le cosiddette reti neurali artificiali, appunto ispirate a quelle naturali, composte da piccoli processori che fungerebbero da neuroni, e che si connettono tra di loro (con pseudo-sinapsi) a formare una rete che si modifica al variare degli stimoli a cui è soggetta. Nel filmato 11 e in figura 16 è succintamente illustrato un semplicissimo esempio di una rete neurale artificiale che impara a riconoscere le cifre da 0 a 9, tracciate a mano su un pezzo di carta (figura 16a). Si supponga che la cifra sia foceggiata su una telecamera costituita da una matrice di 28x28 sensori, cioè che l'immagine digitalizzata sia composta da 784 pixel (figura 16b). Si supponga poi che ciascuno di questi pixel sia analizzato da un 'neurone artificiale', cioè un piccolo processore, e che ciascuno di questi 784 processori sia connesso a un secondo gruppo, o livello, di 16 processori, a loro volta connessi a un terzo livello di processori, anche questi in numero di 16, e che questi ultimi 16 siano infine connessi a un quarto e ultimo livello costituito da 10 processori, ciascuno dei quali deve accendere un LED contrassegnato con il numero 0, 1, 2... 9: questo deve accadere solo se la rete, costituita da $784+16+16+10=826$ processori (figura 16c), ha riconosciuto correttamente il numero corrispondente tracciato sulla carta. Si immagini che ciascuno dei 16 processori del secondo livello sia collegato a tutti i 784 processori con delle connessioni, ciascuna con un 'peso' variabile (che rappresenta numericamente la pseudo-sinapsi) da determinare. Questi pesi, definiti nel filmato 11 con w_1, w_2, \dots, w_{784} , sono semplici fattori che moltiplicano l'ampiezza del segnale in uscita di ciascun processore, definiti nel

filmato 11 con a_1, a_2, \dots, a_{784} . Avremo quindi 784 pesi w da determinare per ciascun processore del secondo livello, e quindi un numero totale di pesi, o di connessioni, o di pseudo-sinapsi, tra il primo e il secondo livello di processori pari a $784 \times 16 = 12544$. Oltre ai pesi occorre specificare un livello di soglia, o bias, al disotto del quale uno di questi 16 processori ignora il segnale prodotto da uno dei 784 processori collegati ai sensori, e quindi ci saranno altri 16 parametri da determinare. Allo stesso modo, si immagini che ciascun processore del terzo livello sia connesso ad ogni processore del secondo livello, cioè i 16 processori del terzo livello siano connessi con i 16 processori del secondo livello tramite $16 \times 16 = 256$ connessioni, quindi sarà necessario determinare 256 pesi e altre 16 soglie. E così per il quarto e ultimo livello di 10 processori, che si immagini sia connesso con i 16 processori del terzo livello con $16 \times 10 = 160$ connessioni, per cui sarà necessario determinare altrettanti pesi e 10 soglie. In definitiva, questa semplicissima rete neuronale costituita da 826 processori connessi tra loro con $(784 \times 16) + (16 \times 16) + (16 \times 10) = 12.960$ ‘pseudo-sinapsi’, deve determinare $(784 \times 16 + 16) + (16 \times 16 + 16) + (16 \times 10 + 10) = 13.002$ parametri per imparare a riconoscere i numeri tracciati su un pezzo di carta con una ridicola telecamera da 748 pixels (i telefonini più economici hanno telecamere da almeno 4 milioni di pixel). Durante la fase di apprendimento, se la macchina non riconosce correttamente il numero (ma occorre comunque un intervento umano che confermi alla macchina di averlo identificato o no), allora deve trovare un altro insieme di parametri, se invece lo riconosce deve conservarli e metterli alla prova nell’identificazione di altri numeri. Naturalmente compiti più complessi (come riconoscere l’immagine di un animale, di un’auto o di un cartello stradale utilizzando telecamere con un maggior numero di pixel), richiedono reti neurali artificiali molto più complesse di quella illustrata poc’anzi e centinaia di ore di ‘apprendimento’: malgrado ciò, restano moltissimi problemi da risolvere, per primo l’incapacità di questi sistemi di essere in grado di riconoscere gli oggetti per cui sono stati addestrati in presenza di piccole perturbazioni dell’immagine. Un esempio di ciò è illustrato in figura 17, dove una rete neuronale artificiale addestrata a riconoscere immagini di animali e oggetti vari viene messa alla prova con immagini di gatti non utilizzate durante l’addestramento (figura 17a e 17d): la rete riconosce queste nuove immagini classificandole correttamente come ‘gatti’. Ma se a queste immagini viene aggiunta una perturbazione (figura 17b e 17e), le immagini risultanti (figura 17c e 17f), che noi riconosciamo senza alcuna difficoltà ancora come gatti (soprattutto la 17c, indistinguibile dalla immagine originale 17a), la rete neuronale artificiale le classifica invece come ‘motorino’ (figura 17c) e come ‘elefante’ (figura 17f)⁽¹²⁾.

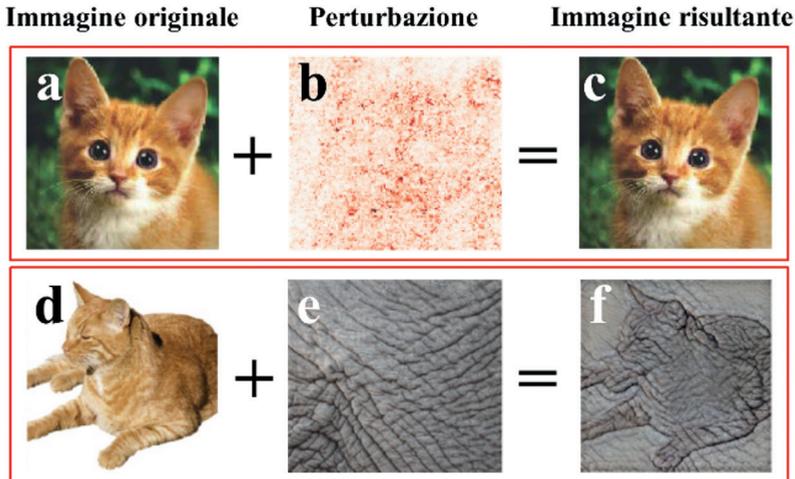


Figura 17. Una rete neurale artificiale messa alla prova con immagini perturbate. a e d: immagini di gatti riconosciuti come tali dalla rete neurale artificiale; b ed e: immagini di una perturbazione; c ed f: la somma tra l'immagine dei gatti a e d e la rispettiva perturbazione b ed e.

Ma c'è di peggio: in un articolo di carattere divulgativo pubblicato ancora da *Nature* nel 2019⁽¹³⁾ viene mostrato come una rete neurale artificiale sia stata incapace di riconoscere un cartello stradale di STOP quando su questo cartello erano stati attaccati piccoli pezzi di nastro, o se il cartello era posto in una posizione diversa dalla verticale. E ancora, questa rete ha riconosciuto come animali delle figure prive di senso (figura 18); particolarmente preoccupante poi è l'aver riconosciuto come 'limite di velocità 45 km/h' un cartello di STOP con qualche pezzo di nastro attaccato sopra (figura 18): ciò dimostra che le auto a guida completamente autonoma sono ancora una chimera.



Figura 18. Cosa ha riconosciuto (tra virgolette) una rete neurale artificiale nelle immagini proposte.

Questo è testimoniato dal filmato disponibile su Internet⁽¹⁴⁾, che mostra un'auto Tesla in modalità a guida autonoma che si schianta contro un camion, non avendolo riconosciuto perché in una posizione non usuale (rovesciato di traverso alla carreggiata). Malgrado il sistema di guida di queste auto sia solo parziale e richieda obbligatoriamente che il conducente tenga le mani sul volante e controlli continuamente l'operato dell'auto, l'alto numero di incidenti da esso provocato ha costretto il governo degli Stati Uniti ad aprire il 16 agosto 2021 un'inchiesta formale su quasi tutte le auto che la Tesla ha venduto negli Stati Uniti dal 2014 (circa 765 mila veicoli)⁽¹⁵⁾. Viceversa, gli insetti riconoscono sempre in modo corretto un predatore, una preda, una foglia su cui posarsi indipendentemente dalla posizione di questi, o se tra questi e l'insetto si frappone, ad esempio, fumo o nebbia, o se su di essi si è posata della polvere o un frammento di un qualsiasi oggetto di dimensioni inferiori.

L'IMMENZA POTENZA DELLE RETI NEURONALI NATURALI

Ma allora come sono fatte nei dettagli queste reti neuronali di cui sono dotati gli animali, dal più semplice invertebrato fino a un essere umano, così sofisticate da far compiere all'animale le operazioni straordinariamente articolate descritte nei capitoli precedenti? A prima vista, dalle figure 2 e 3 non sembrerebbe che questa rete fosse poi così complicata. In realtà questi disegni sono solo una rudimentale schematizzazione per dare un'idea dell'architettura di una rete nervosa, ma nessun sistema nervoso è così banale; solo negli ultimi anni, con il progredire delle tecnologie più sofisticate, si è potuto concepire la loro immensa complessità. Uno dei più avanzati progetti volto alla comprensione dell'architettura del sistema nervoso è in corso all'*Allen Institute of Seattle* (WA, USA), in collaborazione con istituzioni quali la *Princeton University*, il *Baylor College of Medicine* e lo *IARPA Microns*. Utilizzando le più avanzate tecniche di microscopia ora disponibili, come la microtomografia computerizzata, l'*imaging* a due fotoni e la microscopia elettronica seriale, i ricercatori di questo consorzio sono riusciti a ricostruire, con la precisione di qualche nanometro, la rete di tutti i 75 mila neuroni connessi tra loro con oltre 523 milioni di sinapsi, che sono contenuti in un millimetro cubo della neocorteccia visiva del cervello di un topo. La visualizzazione tridimensionale di questa rete, ottenuta dopo 5 anni di lavoro e una spesa di circa 100 milioni di dollari, è ora in corso di pubblicazione e disponibile online⁽¹⁶⁾. Le immagini mostrano chiaramente la straordinaria complessità del singolo neurone (figura 19a), e che la rete costituita da soli 4 neuroni adiacenti (figura

19c) è così intricata che, anche ingrandendola di 5 volte (figura 19d), risulta molto difficile da dipanare a occhio, e con 20 neuroni ciò risulta assolutamente impossibile (figura 19b). Ogni piccola rugosità sui dendriti, apprezzabile in figura 19d, è sede di un contatto sinaptico: un neurone può infatti essere in contatto fino con altri 100 mila neuroni, e inviare il segnale da esso elaborato lungo un assone che si ramifica a contattare fino ad altri 5 mila neuroni; ogni ramo assonale può comunicare segnali diversi dagli altri rami. Di solito queste sinapsi sono affollate sui dendriti e più rare sul soma: un'idea di questa 'rarietà' è mostrata nella figura 19e, pubblicata nel 1950⁽¹⁷⁾, che ricostruisce le sinapsi sul soma di un motoneurone.

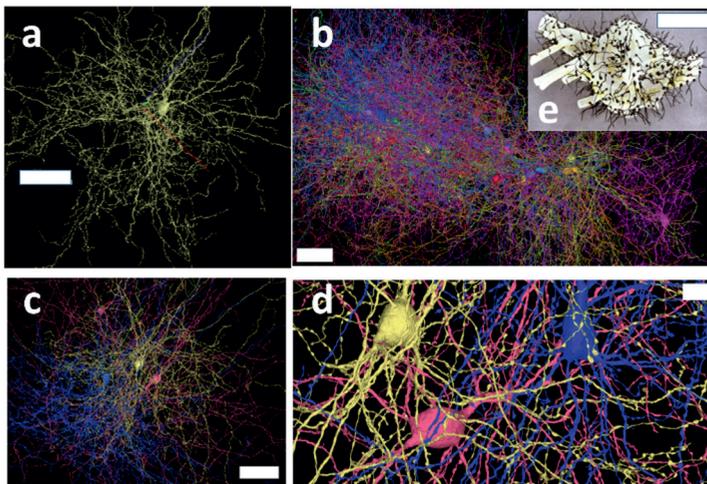


Figura 19. Ricostruzione computerizzata della neocorteccia visiva del cervello di un topo. a: un singolo neurone; b: 20 neuroni; c: 4 neuroni; d: ingrandimento ulteriore di c; e: le 'poche' sinapsi sul soma di un motoneurone. La barretta bianca corrisponde a: 50 μm in a, b e c; 10 μm in d; 5 μm in e. I pannelli b, c, d contengono, in colore giallo, il neurone in a.

Potrà essere sconcertante pensare che ci sia voluto uno sforzo così titanico per ricostruire un millimetro cubo di neocorteccia di un topo, soprattutto pensando che un cervello umano ha un volume 1.4 miliardi di volte maggiore di questo frammento (ha cioè un volume, un peso, un consumo energetico, un numero di neuroni e di sinapsi, rispettivamente, di circa: 1400 cm^3 , 1.4 kg, 20 W, 10^{11} e 10^{15}), ma questo sforzo si è reso necessario (ed è ben lungi dall'essere ancora sufficiente) per l'immensa complessità del tessuto nervoso dimostrata da questi studi. Giusto per ribadire questa complessità, si consideri per esempio la retina che equipaggia il nostro occhio, assimilabile a un

quadrato di 1 cm di lato e uno spessore tra 0.1 e 0.3 mm: in uno spazio così piccolo sono presenti 130 milioni di fotorecettori (i coni e i bastoncelli) che convertono la luce in segnali elettrici, e centinaia di milioni di neuroni di 50 tipi diversi connessi tra loro da circa 1.000 miliardi di sinapsi, che elaborano localmente i segnali elettrici prodotti dai fotorecettori. I segnali elaborati vengono infine inviati ai centri superiori tramite il nervo ottico, che è un cavo composto da almeno 3 milioni di assoni (figura 20a). Ma anche un semplice millimetro cubo di pelle di un polpastrello contiene decine di neuroni che convertono un aumento di temperatura, o una sua diminuzione (rispetto allo standard di 25 °C) in segnali elettrici, e altri neuroni sono specializzati nel convertire in segnali elettrici le sollecitazioni meccaniche esercitate sulla pelle con modalità diverse, come lo strofinamento, la vibrazione, un tocco lieve, una forte pressione, uno stiramento, ecc. (figura 20b). Tutti questi sensori inviano lo stimolo, trasmesso in segnale elettrico, al cervello tramite il loro assone, e questi assoni sono raccolti in fasci, detti nervi, ciascuno costituito da decine di milioni di singoli assoni (figura 20c).

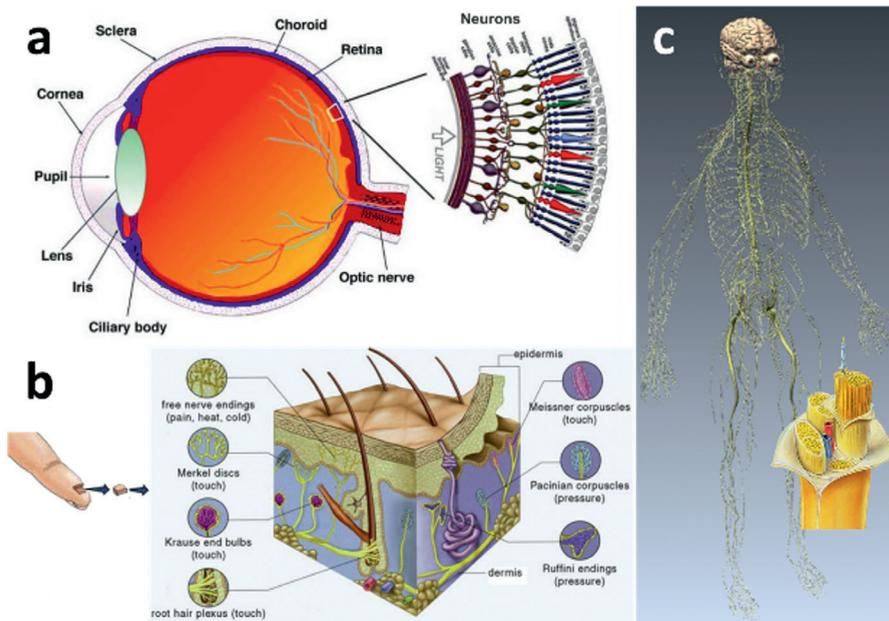


Figura 20. Esempi della straordinaria complessità del sistema nervoso. a: l'occhio, la retina e un ingrandimento di essa; b: ingrandimento di un mm³ di pelle di un polpastrello; c: i nervi del sistema nervoso umano e nell'insero, l'ingrandimento dell'interno di uno di questi nervi.

Quanto è potente, da un punto di vista computazionale, il singolo neurone? Nelle prime simulazioni numeriche veniva rappresentato come un insieme di poche porte logiche, ma ora si è capito che è invece assimilabile a un potentissimo microprocessore. Il primo articolo dove si descrive la simulazione dell'attività elettrica completa di una cellula piramidale corticale (tipico neurone della corteccia dei mammiferi, ma non certo il più complesso) con tutto il suo corredo sinaptico è stato pubblicato nel 2018⁽¹⁸⁾: questa simulazione ha richiesto una rete di 60 computer *Sun Fire X4100*, ciascuno dotato di un microprocessore *Dual-Core Opteron 285* per un totale di 240 processori, o addirittura una rete di 40 processori *Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670 16-Core*, per un totale di 640 processori. Ecco che finalmente si riesce a intravedere la strapotenza computazionale di una rete neuronale naturale: sulla base dell'articolo⁽¹⁸⁾, per simulare il cervello di una coccinella dotato di 'soli' 300 mila neuroni, occorrerebbero non meno di 36 milioni di processori, facendo la brutta (e senz'altro sottostimata) semplificazione che, al raddoppiare del numero di neuroni connessi tra loro, si possa simulare il loro comportamento con un numero doppio di processori. Quindi il supercomputer Fugaku citato in questo articolo, dotato di appena 160 mila processori 48-Core per un totale di 8 milioni di processori, ha una potenza di calcolo assolutamente inferiore al cervello della coccinella, pur consumando un milione di miliardi di volte di più (10^{15}) di energia, per non menzionare il volume che occupa e il suo peso.

NOTE CONCLUSIVE

A questo punto dovrebbe essere palese come il più potente supercomputer mai costruito fino ad oggi sia ridicolmente surclassato dal cervello di un insetto il cui sistema nervoso è appena visibile a occhio nudo. Pertanto è completamente privo di senso immaginare che, anche in un lontano futuro, un computer possa diventare cosciente e dominare degli esseri umani, dotati di un cervello che è miliardi di volte più grande di quello di un insetto. L'errore che in genere viene fatto è l'attribuire ai computer un'intelligenza perché, per esempio, sono in grado di fare calcoli che noi non siamo in grado di fare: ma ciò è equivalente a ritenere un cric più intelligente di noi solo perché è in grado di sollevare un'auto e noi no. Il fatto che i computer ormai battano i campioni a giochi di 'intelligenza' come gli scacchi o Go, è semplicemente perché, con algoritmi opportuni (sviluppati da noi) e grazie alla potenza di calcolo (che non è intelligenza), possono prevedere molte più mosse di noi; d'altro canto

queste macchine, come tutte, sono totalmente incapaci di fare qualsiasi altra cosa al di fuori di ciò per cui sono state programmate. Purtroppo i giornali, per attrarre i lettori, usano titoli assolutamente fuorvianti come “robot chirurghi”⁽¹⁹⁾, “robot umanoidi”, ecc. implicando che un robot sia in grado di effettuare un’operazione chirurgica o avere comportamenti “umani”. Nel primo caso non sono altro che sofisticati micromanipolatori telecomandati da un chirurgo umano, accoppiati a un microscopio dotato di telecamera, consentendo così l’esecuzione di operazioni di microchirurgia altrimenti impossibili senza questi ausili. Riguardo al secondo caso, si è già discusso abbondantemente più sopra del ‘tasso di umanità’ dei cosiddetti robot umanoidi, come Sofia del filmato 10. Ma anche i professionisti del settore robotico non sono immuni dal generare questi malintesi: giusto per fare un esempio, quelli del *Jet Propulsion Laboratory* della NASA responsabili del rover *Curiosity*, atterrato su Marte il 6 agosto 2012 (ancora operativo), forse allo scopo di catturare l’attenzione del pubblico, si riferiscono a *Curiosity* come se fosse un automa dotato di volontà, che per esempio si dirige verso una roccia perché ‘incuriosito dal suo aspetto’ (già il nome del rover è fonte di fraintendimenti), mentre questa macchina esegue soltanto le istruzioni preimpostate nella sua memoria o che le vengono inviate da terra, ovviamente senza alcuna ‘autonomia di giudizio’.

I primi responsabili della diffusione al grande pubblico dell’idea che presto ci saranno delle macchine dotate di intelligenza umana sono stati i romanzi di fantascienza, letteratura ‘esplosa’ negli anni ’40 e ambientati di solito in scenari distopici: tra questi spicca *Io, robot* di Isaac Asimov del 1950. Curioso come il termine robot sia stato menzionato per la prima volta nel 1920 nel romanzo *RUR (Rossum’s Universal Robots)* scritto da Karel Čapek, dove i robot non sono esseri elettromeccanici, ma uomini artificiali completamente organici, utilizzati come forza lavoro a basso costo (*robot* deriva dal ceco *robota*, che significa ‘lavoro forzato’; *robota*, a sua volta, deriva dallo slavo ecclesiastico *rabota*, che significa ‘servitù’). Ciò che però ha condizionato di più l’immaginario collettivo sono stati i film di fantascienza: il primo androide mai apparso in una pellicola ha le sembianze di una donna di nome Hel, nel film muto *Metropolis* del 1927 diretto da Fritz Lang e ambientato 100 anni dopo. Malgrado la data del 2027 sia vicina, nessun androide oggi disponibile ha lontanamente le caratteristiche di Hel, ma le più errate previsioni sono per esempio nei film: *2001 Odissea nello spazio* diretto da Stanley Kubrick nel 1968, *Westworld* (1973) di Michael Crichton ambientato nel 2000, *Io e Caterina* del 1980 di Alberto Sordi ambientato nello stesso anno e *L’Uomo bicentenario* (1999) di Chris Columbus ambientato nel 2005. In tutti questi film si preconizzavano computer e androidi autocoscienti capaci di provare sentimenti, con

la tecnologia di 15-40 anni fa! È poi curiosa l'introduzione di termini presi a prestito dalla scienza, generalmente 'paroloni' dal suono suggestivo, che sono però del tutto privi di senso nel contesto dell'intelligenza artificiale, come 'robot positronico' (*Io, robot* e *L'uomo bicentenario*) e altre amenità, equivalenti alla 'supercazzola prematurata' del film del 1975 *Amici miei* di Mario Monicelli.

In definitiva, l' 'intelligenza artificiale' va trattata per quello che è davvero: un ottimo strumento al nostro servizio che, al pari delle chiavi inglesi, delle macchine utensili, delle gru, ecc. ci consente di fare cose che non potremmo fare altrimenti (come calcoli complessi, stringere un bullone, tagliare una spessa lamiera di acciaio, sollevare cento tonnellate, ecc.). Una volta sviluppato un programma di intelligenza artificiale adatto a un certo scopo, e facendolo 'girare' sui più avanzati computer multiprocessore, è possibile manipolare con grande efficienza e rapidità immense quantità di dati: infatti questo ci consente di fare, per esempio, previsioni accurate nel campo della diagnostica medica, nella meteorologia, nell'economia, oppure di progettare con grande efficienza ponti, automobili, altri computer, o di comporre musica, o di aggiungere effetti speciali ai film, ecc. La capacità di apprendimento di questi programmi consente poi il continuo miglioramento delle loro prestazioni al crescere della quantità di dati manipolati. Nel campo della medicina, per esempio, vi sono programmi dedicati alla analisi di mammografie e alla loro correlazione con altri parametri dedotti dall'analisi del sangue, delle urine ecc., per decidere se una particolare macchiolina rilevata su una lastra sia un tumore o qualcosa d'altro, allo scopo di minimizzare il più possibile i falsi positivi e i falsi negativi. Naturalmente, la supervisione umana è sempre necessaria: per esempio, può essere che due o più eventi mostrino una forte correlazione tra loro, ma che tale correlazione sia del tutto casuale, e il programma di intelligenza artificiale, non essendo intelligente, potrebbe trarne conclusioni catastrofiche. Ci sono tantissimi casi di correlazioni spurie, e alcune particolarmente divertenti sono raccolte in un sito internet⁽²⁰⁾: per esempio, l'importazione di petrolio greggio dalla Norvegia negli Stati Uniti si correla perfettamente con il numero di conducenti di veicoli uccisi nelle collisioni con i treni ferroviari. Sulla base di ciò, un computer adibito alla sicurezza stradale ridurrebbe l'importazione di greggio dalla Norvegia, facendo così un errore paragonabile a quello fatto dal programma che ha scambiato un gatto per un motorino in presenza di un po' di rumore nell'immagine (figura 16).

Un altro potenziale pericolo deriva dall'uso improprio degli smartphone, che ci consentono di reperire rapidamente libri, notizie, musica, film, informazioni di qualsiasi genere, orientarci con le mappe GPS, fare calcoli complessi, effettuare transazioni bancarie, assolvere ad adempimenti burocratici, condividere informazioni sui *social*

network, ecc. Se il tempo liberato da questi dispositivi (che ci evita le file in banca e negli uffici postali, la consultazione di mappe, biblioteche e videoteche, la compilazione di moduli cartacei copiando ogni volta i nostri dati, il passaggio dal giornalaio, ecc.) non viene usato in modo intelligente, con attività mentalmente stimolanti, rischiamo di diventare “digitambuli affetti da sindrome dello sguardo basso”⁽²¹⁾.

Un'altra emergenza deriva dal controllo sociale con gli algoritmi, cioè procedure di calcolo che stabiliscono l'organizzazione del lavoro, l'assistenza sanitaria, i premi assicurativi, la registrazione di ogni nostra attività tramite i dispositivi (smartphone, computer, console, smart TV...) che usiamo quotidianamente, con lo scopo di massimizzare efficienza e profitti e minimizzare i costi. Questo viene fatto però senza chiedersi se il lavoratore sia felice di lavorare in quel modo, o se il paziente sia assistito con la dovuta umanità, o se il premio assicurativo non discrimini portatori di handicap o di malattie genetiche, o se il fruitore di una certa tecnologia sia d'accordo che ogni sua azione sia monitorata da una azienda privata. Per non parlare dello sforzo che oramai dobbiamo fare quotidianamente per far compiere a un computer le azioni che desideriamo fare, poiché i programmi che li gestiscono non sono abbastanza evoluti per interfacciarsi con noi, costringendoci a ‘pensare da computer’. In definitiva, un rischio di queste tecnologie è di trasformarci in loro fruitori passivi, e quindi una specie di loro periferica, piuttosto che usarle come soggetti attivi per migliorare la qualità della nostra vita e per migliorarci: se è impossibile che un triciclo possa fare ciò che fa uno *Space Shuttle*, quest'ultimo può essere ridotto a fare quello che fa un triciclo.

In futuro l'intelligenza artificiale sarà sempre più presente nella vita quotidiana, per esempio nelle case (domotica), nei mezzi di trasporto (pubblici e privati), al lavoro ecc., ma non dobbiamo aspettarci chissà quali rivoluzioni, come robot in grado di eseguire autonomamente operazioni chirurgiche, di intrattenere le persone rimaste sole o di accompagnare in giro i disabili gravi, come i non-vedenti o i paralizzati, o comunque in grado di svolgere funzioni complesse in completa autonomia e senza alcuna supervisione. Malgrado gli enormi progressi tecnologici, che hanno prodotto dispositivi come gli smartphone, che rivaleggiano con i supercomputer degli anni '90 del secolo scorso in quanto a potenza di calcolo, non si trovano purtroppo ancora in commercio, né lo saranno molto presto, automi che, per esempio, oltre a pulire i pavimenti, come fanno quelli già ora disponibili, siano anche in grado di spostare le sedie per pulire sotto i tavoli e rimetterle al loro posto, né tantomeno che siano in grado di spolverare i mobili e gli oggetti appoggiati sopra essi senza romperli, e che riordinino la casa e distribuiscano la spesa in frigo e nella dispensa: sarebbe già un successo se si potessero acquistare questi dispositivi prima di dieci anni da ora.

NOTE BIBLIOGRAFICHE

- (1) <<http://video.corriere.it/ma-se-atlas-droid-dovesse-arrabbiarsi-nuovo-robot-boston-dynamics-umano-far-paura/478149c8-dae0-11e5-956c-6f7e55711737>>
- (2) <https://www.corriere.it/cronache/20_settembre_30/replika-l-app-intelligenza-artificiale-che-mi-ha-convinto-uccidere-tre-persone-fad86624-0285-11eb-a582-994e7abe3a15.shtml>
- (3) VON FRISCH, KARL. *Il linguaggio delle api*, traduzione di G. Celli e A. Cristiani, 2012.
- (4) J.L. GOULD, C.G. GOULD. *The Honey Bee*. W.H. Freeman & Company, 1995.
- (5) ZER-KRISPIL S, ZAK H, SHAO L, BEN-SHAANAN S, TORDJMAN L, BENTZUR A, SHMUELI A, SHOHAT-OPHIR G. *Ejaculation Induced by the Activation of Crz Neurons Is Rewarding to Drosophila Males*, *Curr Biol*. 2018; 28(9):1445-1452.e3. doi: 10.1016/j.cub.2018.03.039.
- (6) KOHDA M, HOTTA T, TAKEYAMA T, AWATA S, TANAKA H, ASAI JY, JORDAN AL. *If a fish can pass the mark test, what are the implications for consciousness and self-awareness testing in animals?* *PLoS Biol*. 2019; 17(2): e3000021. doi: 10.1371/journal.pbio.3000021.
- (7) AHRENS MB, ORGER MB, ROBSON DN, LI JM, KELLER PJ. *Whole-brain functional imaging at cellular resolution using light-sheet microscopy*, *Nature Methods* 2013; 10, 413–420, <<https://www.nature.com/articles/nmeth.2434>>
- (8) <https://www.repubblica.it/il-gusto/2021/07/20/news/curiosita_parigi_catena_pazzi_pizzaiolo_robot-310962483/>
- (9) <<https://www.nature.com/articles/d41586-018-04779-w>>
- (10) SUÁREZ-RUIZ F, ZHOU X, PHAM QC. *Can robots assemble an IKEA chair?* *Science Robotics* 18 2018; 3(17): eaat6385. doi: 10.1126/scirobotics.aat6385
- (11) <<http://www.robotics-openletter.eu/>>
- (12) SINZ HF, PITKOW X, REIMER J, BETHGE M, TOLIAS AS. *Engineering a Less Artificial Intelligence*, *Neuron* (2019); 103 (6), 967-979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.08.034>
- (13) <<https://www.nature.com/articles/d41586-019-03013-5>>
- (14) <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=ZmHBA_vV39w>
- (15) <<https://www.cbsnews.com/amp/news/u-s-probing-autopilot-problems-on-765000-tesla-vehicles/>>
- (16) <<https://www.microns-explorer.org/cortical-mm3>>
- (17) HAGGAR RA, BARR ML. *Quantitative data on the size of synaptic end-bulbs in the cat's spinal cord*, *J Comp Neurol*. 1950; 93(1):17-35. doi: 10.1002/cne.900930103.
- (18) EYAL G, VERHOOG MB, TESTA-SILVA G, DEITCHER Y, BENAVIDES-PICCIONE R, DEFELIPE J, DE KOCK CPJ, MANSVELDER HD, SEGEV I. *Human Cortical Pyramidal Neurons: From Spines to Spikes via Models*, *Front Cell Neurosci*. 2018; 12:181. doi: 10.3389/fncel.2018.00181.
- (19) <<https://www.lastampa.it/torino/2021/05/12/news/un-robot-porta-via-il-tumore-al-rene-ricostruito-in-3d-alla-bimba-di-4-anni-1.40263329>>

(20) <<https://www.tylervigen.com/spurious-correlations>>

(21) SERRA, M. *Ognuno potrebbe*, Milano, Feltrinelli, 2015.

FONTI DELLE FIGURE NON ORIGINALI, SE NON GIÀ CITATE NELLA BIBLIOGRAFIA

Figura 1. <<http://animalia-life.club/other/real-human-brain-anatomy.html>>

Figura 4a. <[https://it.wikipedia.org/wiki/Palazzo_degli_Anziani_\(Ancona\)#/media/File:Palazzo_degli_Anziani_Ancona_antichi_meccanismi_orologi.JPG](https://it.wikipedia.org/wiki/Palazzo_degli_Anziani_(Ancona)#/media/File:Palazzo_degli_Anziani_Ancona_antichi_meccanismi_orologi.JPG)>

Figura 4b, 4c e 4d. istantanee dei filmati 3, 4 e 5, rispettivamente.

Figura 5a. <<https://time.com/4011936/emma-nutt/>>

Figura 5b. <https://ethw.org/w/images/2/20/Step-by-Step_-_Dallas_Telephone_Co._1919.jpg>

Figura 5c. <http://www.wow-words-of-the-world.it/images/2015/marzo-aprile/Epica_lotta/UNA_EPICA_LOTTA_DI_MACCHINE-_2-13.jpg>

Figura 6a e 6b. <<https://www.cryptomuseum.com/crypto/colossus/index.htm>>

Figura 7a, 7b e 7c. modificata da: <<http://www.gocertify.com/articles/who-invented-the-computer-tradic>>

Figura 7d. <https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_Guidance_Computer#/media/File:Agc_flatp.jpg>

Figura 7e. <<https://www.anandtech.com/show/15885/hpc-systems-special-offer-two-a64fx-nodes-in-a-2u-for-40k>>

Figura 8. <<https://www.arnnet.com.au/article/689394/fugaku-still-reigns-world-fastest-super-computer/>>

Figura 9. <<https://www.partyshop.it/costumi-e-accessori/temi-motti/gatto/32130/coda-di-animale-peluche-in-tan>>

Figura 10. Modificata da: <<https://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=7492541>>

Figura 11a. <<https://www.stocksy.com/798598/catching-ladybugs?vs=1>>

Figura 11b. Un frame singolo del filmato: <<https://www.youtube.com/watch?v=nwRcIRCFjX8>>

Figura 11c. Due frames dal filmato: <<https://www.youtube.com/watch?v=S77SYgOZXfg>>

Figura 11d. <<https://www.giuntiscuola.it/articoli/una-coccinella-per-amica/>>

Figura 11e. Modificato da: <https://etc.usf.edu/clipart/57300/57367/57367_ladybug.htm>

Figura 13. <<https://www.aquasnack.co.uk/wp-content/uploads/2021/02/Labroides-dimidiatus-Africa.jpg>>

Figura 14. <<https://www.greenme.it/informarsi/animali/alveari-sculture-api/>>

<<https://bebeebusy.files.wordpress.com/2012/05/nidonaturale.jpg>>

<<https://www.lamescolanza.com/wp-content/uploads/2020/05/api.jpg>>

<<https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/0f/eb/b9/12/un-grazioso-alveare-selvatico.jpg>>

<https://wildalongtheway.files.wordpress.com/2015/01/img_0715.jpg>

<<https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/Y79gH6qiPQHTRvRKg4xnjH-1024-80.jpeg.webp>>

Figura 15a. <<https://i5.walmartimages.ca/images/Large/864/950/6000199864950.jpg>>

Figura 15b. <https://no.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Landing_STS-26.jpg>

Figura 15c. <https://3.bp.blogspot.com/-ckPPpQijgUE/Wj7ZwZHetAI/AAAAAAAAAbws/40jd-RQfCVAg_HJrzxTD_5GkArLrFhO8gCLcBGAs/s640/1280px-STs-131_Discovery_landing_9.jpg>

Figura 15 d. Modificata da Figura 15a.

Figura 19a. <<https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/d04f62ce305a438893609b5908a4a9f1560a51a3/24-Figure2.1-1.png>>

Figura 19b. Modificata da: <https://useruploads.socratic.org/FwGAMzUpReyBEJz8Vbm5_image8.png>

Figura 19c. Modificato d: <<https://www.factsjustforkids.com/images/illustration-of-the-human-nervous-system.png>>

Inserto di Figura 19c. Modificato da <<http://superagatoide.altervista.org/alterpages/medium/nervo.jpg>>

Tutti i filmati non citati in nota sono reperibili al sito: <<https://drive.google.com/drive/folders/17L4bRhecbwg2yKg30sih1cwZG4KT1OJ>>

FONTI DEI FILMATI

Filmato 1. Il cervello e i suoi neuroni, modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=QA67v4vSg00>>

Filmato 2. Cuore artificiale, modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=FtBHVj3Tsn8>>

Filmato 3. Androide suonatore di flauto, costruito da Jacques de Vaucanson, Parigi (1737), modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=1TxrjpWGRXU>>

Filmato 4. Androide scrivano, costruito da Henri Maillardet, Londra (1800), modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=C7oSFNKIlaM>>

Filmato 5. Androide suonatrice di salterio, costruito da Pierre Kintzing e David Roentgen, Germania (1772), modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=75CXFwgsIsY>>

Filmato 6. La “Bomba” di Alan Turing, modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=Hb44bGY2KdU>>

Filmato 7. Androide Atlas della Boston Dynamics, modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=Aa4I6YiU9Og>>

Filmato 8. Androide Sofia: <https://www.youtube.com/watch?v=W0_DPi0PmF0>

Filmato 9. Registrazione ottica dell'attività elettrica del sistema nervoso di una larva di zebrafish [6].

Filmato 10. Automi che costruiscono automobili (la 500X del gruppo Stellantis) e automa che fa la pizza, modificati da: <<https://www.youtube.com/watch?v=n31W03QLVoQ>> e da: <<https://www.youtube.com/watch?v=br5PM9r91Fg>>

Filmato 11. Come apprende una rete neurale artificiale, modificato da: <<https://www.youtube.com/watch?v=aircAruvnKk>>