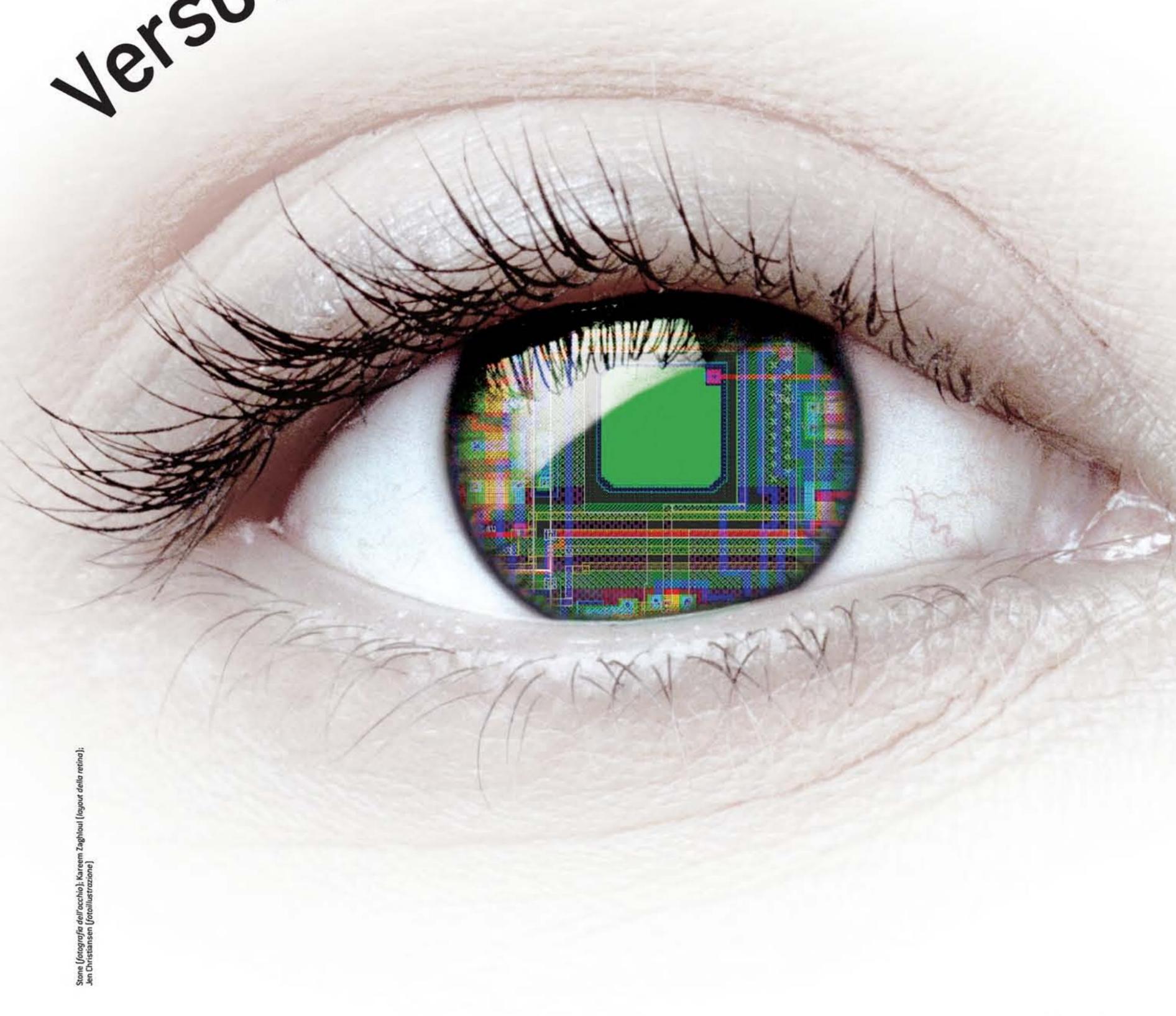


Verso l'occhio artificiale



Stone (fotografia dell'occhio); Kareem Zaghoul (logour della retina);
Jan Christensen (fotografia)

Sistemi elettronici compatti ed efficienti che imitano il funzionamento del cervello potrebbero produrre retine di silicio che restituiscono la vista, occhi robotici e altri sensori intelligenti

di Kwabena Boahen

Quando Deep Blue, il supercomputer della IBM, sconfisse il campione mondiale Garry Kasparov nel celebre incontro di scacchi del 1997, ci riuscì usando la forza bruta. La macchina era in grado di valutare circa 200 milioni di possibili mosse in un secondo, mentre il suo antagonista in carne e ossa nella migliore delle ipotesi arrivava a prenderne in considerazione tre al secondo. Ma, a dispetto della vittoria di Deep Blue, i computer non sono ancora realmente in concorrenza con il cervello umano in campi come la visione, l'udito, il riconoscimento di forme e l'apprendimento. Per fare un esempio, i computer non hanno nulla di simile alla nostra capacità di riconoscere un amico a distanza osservandone semplicemente l'andatura. Quanto all'efficienza, non c'è proprio confronto: un tipico supercomputer è grande come una stanza, è circa 1000 volte più pesante e 10.000 volte più voluminoso della massa di tessuto neurale che costituisce il cervello, rispetto al quale, per di più, consuma un milione di volte più energia.

Ma come fa il cervello – che trasmette i segnali chimici tra neuroni nel tempo relativamente lento di un millesimo di secondo – a eseguire alcuni compiti più velocemente e con maggiore efficienza dei più potenti processori digitali? Il segreto sembra nascosto nel modo in cui sono organizzate le sue componenti elettriche. Il cervello non esegue istruzioni codificate, ma attiva dei legami tra i neuroni: le sinapsi. Ciascuna attivazione equivale all'esecuzione di un'istruzione digitale, per cui è possibile confrontare quante connessioni attiva il cervello ogni secondo e quante istruzioni esegue un computer nello stesso tempo. L'attività sinaptica è impressionante: 10 milioni di miliardi (10^{16}) di connessioni neurali al secondo. Per eguagliare questa velocità, servirebbe un milione di computer dotati di processore dell'ultima generazione.

Tuttavia, un piccolo gruppo di progettisti all'avanguardia oggi sta facendo significativi progressi nell'imitazione delle funzioni e dell'organizzazione del sistema nervoso. Essi definiscono questa operazione *morphing* della struttura delle connessioni neurali su circuiti di silicio, da cui si ottengono «microchip neuromorfici». Se saranno coronate da successo, queste ricerche potrebbero condurre a retine di silicio impiantabili per non vedenti, e a processori sonori per non udenti, capaci di durare trent'anni con una batteria da nove volt; oppure a chip per il riconoscimento visivo, uditivo od olfattivo efficienti ed economici per robot e altre macchine intelligenti (si veda il box a p. 99).

Il nostro gruppo di ricerca all'Università della Pennsylvania si è dedicato inizialmente al morphing della retina, la lamina spessa mezzo millimetro che ricopre la parete posteriore dell'occhio. L'abbiamo scelta perché è un sistema sensoriale di cui è nota la struttura anatomica. Composta da cinque strati specializzati di cellule nervose, la retina «pre-elabora» le immagini vive entranti estraendone l'informazione utile, alleggerendo il cervello di una parte del lavoro.

Il milione circa di cellule gangliari della retina confronta i segnali visivi provenienti da gruppi costituiti da un numero di fotorecettori variabili da cinque ad alcune centinaia, dove ogni gruppo interpreta gli eventi di una piccola porzione del campo visivo. Quando in un settore della retina cambia un parametro della luce – per esempio l'intensità – ciascuna cellula gangliare trasmette impulsi elettrici al cervello (i potenziali d'azione, o *spike*) lungo il nervo ottico. Ogni cellula scarica in proporzione alla variazione relativa di intensità luminosa nel tempo o nello spazio e non al livello assoluto dell'input. La sensibilità del nervo decresce allora gradualmente all'aumentare dell'intensità complessiva della luce. Ciò le consente, per esempio, di adattarsi a un aumento pari anche a 50 volte del livello della luce naturale tra l'aurora e mezzogiorno.

I primi a riprodurre la retina su silicio sono stati Misha Mahowald e Carver Mead del California Institute of Technology, che in un rivoluzionario lavoro hanno riprodotto su circuiti elettronici i primi tre dei cinque strati che formano la retina (si veda *La retina di silicio*, di Misha A. Mahowald e Carver Mead, in «Le Scienze», n. 275, luglio 1991). Altri ricercatori (molti dei quali, compreso chi scrive, avevano lavorato con Mead al Caltech) hanno effettuato il morphing degli stadi successivi del sistema visivo e di quello uditivo. Nel 2001, per esempio, Kareem Zaghloul, dottorando nel mio laboratorio, ha effettuato il morphing di tutti e cinque gli strati della retina, imitando i messaggi visivi che le cellule gangliari – i neuroni che trasmettono l'informazione in uscita dalla retina – inviano al cervello. Il suo chip di retina su silicio, Visio1, riproduce le risposte dei quattro principali tipi di cellule gangliari, che insieme formano il 90 per cento del nervo ottico (si veda l'illustrazione in questa pagina).

Zaghloul ha rappresentato l'attività elettrica di ciascun neurone nei circuiti della retina mediante un'unica tensione in uscita. La tensione controlla la corrente che viene convogliata da transistor connessi tra una sede nel circuito e altri punti, imitando la modulazione della risposta delle sinapsi biologiche. La luce rilevata da fotosensori elettronici influenza la tensione in quella parte del circuito allo stesso modo in cui influenza una cellula corrispondente della retina. Disseminando a mosaico sul chip copie di questo circuito di base, Zaghloul ha riprodotto l'attività dei cinque strati di cellule della retina.

Il chip imita il modo in cui i canali ionici sensibili al voltaggio inducono le cellule gangliari (e i neuroni in altre parti del cervello) a generare i potenziali d'azione. Zaghloul ha installato dei transistor che reintroducono la corrente nello stesso punto del circuito. L'arrivo di questa corrente di ritorno aumenta la tensione, che a sua volta recluta altra corrente di ritorno causando un'ulteriore amplificazione. Raggiunto un determinato livello iniziale, questo effetto rigenerativo accelera, e la tensione raggiunge rapidamente il livello massimo. Il risultato è un potenziale d'azione.



Kareem Zaghloul

LA RETINA DI SILICIO percepisce i movimenti laterali della testa di Kareem Zaghloul, ricercatore all'Università della Pennsylvania. I quattro tipi di cellule gangliari di silicio del suo chip Visio1 imitano la capacità delle cellule della retina di pre-elaborare l'informazione visiva senza ricorrere a una montagna di calcoli. Una classe di cellule risponde ad aree scure (*in rosso*), mentre una seconda reagisce a regioni chiare (*in verde*). Un altro insieme di cellule individua il bordo d'entrata degli oggetti (*in giallo*) e il bordo di uscita (*in blu*). Le immagini in scala di grigio, generate decodificando questi messaggi, illustrano il mondo visto da una persona cieca a cui venisse impiantata una retina neuromorfica.

Con i suoi 60 milliwatt, il chip neuromorfico di Zaghloul utilizza una quantità di elettricità mille volte inferiore a quella di un computer. Grazie alle sue modeste esigenze di energia, questa retina di silicio potrebbe aprire la strada a una protesi intraoculare totale, con telecamera, processore e stimolatore, impiantata nell'occhio di una persona resa cieca da una retinite pigmentosa o da una degenerazione maculare, malattie che danneggiano i fotorecettori ma risparmiano le cellule gangliari. Le protesi retiniche in via di sviluppo, per esempio alla University of Southern California, forniscono la cosiddetta visione dei fosfeni (i pazienti impiantati percepiscono il mondo come una griglia di macchie di luce, evocate stimolando le cellule gangliari con microelettrodi impiantati dentro l'occhio) e hanno bisogno di un computer «indossabile» che elabori le immagini catturate da una videocamera. Poiché la matrice di microelettrodi è molto piccola (inferiore a 10 × 10 pixel), il paziente sperimenta una visione a tunnel: deve muovere la testa per scandire la scena.

Se invece si usasse l'occhio stesso come telecamera, risolveremo il problema dello sguardo fisso, e gli output delle 3600 cellule gangliari del nostro chip dovrebbero produrre una visione quasi normale. I materiali di incapsulazione biocompatibili e le interfacce di stimolazione dovranno però essere perfezionati, prima che si possa realizzare una protesi ad alta fedeltà, forse per il 2010. Sarà inoltre necessario conoscere meglio le risposte agli stimoli dei diversi tipi di cellule della retina e il

GRUPPI DI RICERCA IN ELETTRONICA NEUROMORFICA

I ricercatori cercano di colmare il divario di efficienza tra sensori elettronici e reti neurali biologiche costruendo microchip che imitano il cervello. Questa ricerca si concentra su sistemi di piccoli sensori che possono essere impiantati nel corpo o installati su robot.

ISTITUZIONI	RICERCATORI	OBIETTIVI PRINCIPALI
Johns Hopkins University	Andreas Andreou, Gert Cauwenberghs, Ralph Etienne-Cummings	Riconoscitore di linguaggio a batterie; generatori di ritmo per la locomozione; telecamera che estrae le caratteristiche degli oggetti
Politecnico di Zurigo (ETH)	Tobi Delbruck, Shi-Chii Liu, Giacomo Indiveri	Retina di silicio e un chip dell'attenzione che seleziona automaticamente le regioni salienti di una scena
Università di Edimburgo	Alan Murray, Alister Hamilton	Nasi artificiali e riconoscimento automatico degli odori sulla base della sequenza temporale dei potenziali d'azione prodotti dai segnali
Georgia Institute of Technology	Steve DeWeerth, Paul Hasler	Generatori di ritmo accoppiati che coordinano un robot multisegmento
HKUST, Hong Kong	Bertram Shi	Processore binoculare per la percezione della profondità e il tracking visivo
Massachusetts Institute of Technology	Rahul Sarpeshkar	Processore sonoro per impianti cocleari in pazienti sordi
Università del Maryland	Timothy Horiuchi	Chip per sonar che imitano l'ecolocalizzazione dei pipistrelli
Università dell'Arizona	Charles Higgins	Chip per la percezione del movimento basato sulla visione delle mosche

loro contributo alla percezione. Per adesso, questi chip neuromorfici potrebbero essere usati come sensori su autoveicoli, per applicazioni di sicurezza, oppure nella robotica o nei sistemi industriali automatizzati.

Il metamorphing delle reti nervose

Il risparmio di energia ottenuto con il morphing della retina è stato incoraggiante, e mi ha spinto a riflettere sul modo in cui il cervello riesce a raggiungere la sua elevata efficienza. Una ventina d'anni fa Carver Mead fu preveggenente quando capì che i computer, anche se avessero continuato a seguire la legge di Moore (secondo cui il numero di elementi su un chip raddoppia ogni 18 mesi), se fossero rimasti come li conosciamo adesso non avrebbero eguagliato l'efficienza del cervello. Come raggiungerla allora? La soluzione mi è diventata chiara otto anni fa.

Mi resi conto che l'efficienza operativa è legata al grado di «personalizzazione» dell'hardware rispetto al compito da svolgere. I computer tradizionali non consentono questi aggiustamenti; la macchina utilizza pochi strumenti di uso generale per ogni compito, e il software si limita a cambiare l'ordine in cui sono impiegati. Quello che accomuna chip neuromorfici e cervello è la personalizzazione dell'hardware: ambedue sono programmati

a livello delle singole connessioni. Essi adattano lo strumento al compito specifico. Ma come fa il cervello a personalizzare se stesso? Se fossimo riusciti a tradurre su silicio questo meccanismo – che abbiamo chiamato *metamorphing* – avremmo potuto far sì che i nostri chip neuromorfici si automodificassero allo stesso modo. Ho cominciato quindi a studiare lo sviluppo del sistema nervoso, sperando di capire come fa l'organismo a produrre esattamente gli strumenti che gli servono.

Costruire la rete neurale del cervello – mille miliardi (10¹²) di neuroni connessi da 10 milioni di miliardi (10¹⁶) di sinapsi – è un compito immane. Anche se il DNA umano contiene l'equivalente di un miliardo di bit di informazione, questo valore è insufficiente per specificare i percorsi di tutti quei neuroni e le connessioni che dovrebbero formare. Dopo aver sfruttato l'informazione genetica nelle prime fasi del suo sviluppo, il cervello si personalizza ulteriormente, con interazioni interne tra i neuroni e interazioni esterne con il mondo circostante. In altre parole, i neuroni sensoriali si collegano tra loro in risposta ai segnali sensoriali, nel rispetto di una regola ingannevolmente semplice: i neuroni che scaricano insieme si collegano insieme. Questo significa che un neurone accetta i segnali in arrivo dei neuroni coerentemente attivi quando è attivo a sua volta, e ignora tutto il resto.

Per capire come si formano le connessioni tra due strati di neuroni, i neuroscienziati hanno studiato nella rana le proiezioni delle fibre nervose dalla retina al tetto ottico (la parte del mesencefalo che elabora i segnali sensoriali), e hanno scoperto che il processo avviene in due tappe. Nella prima, un neurone appena formato emette delle ramificazioni. Il ramo più lungo diventerà l'assone, la fibra dei segnali in uscita; le altre ramificazioni diventeranno

In sintesi/Imitare la natura

- I computer attuali possono eseguire miliardi di operazioni al secondo, ma non eguagliano nemmeno un bambino in tenera età quando devono percepire il mondo. In più, il cervello umano è milioni di volte più efficiente dal punto di vista energetico e assai più compatto di un computer.
- Microchip neuromorfici ispirati alla struttura del cervello hanno già dimostrato un'impressionante riduzione del consumo di energia. La loro efficienza potrebbe consentire di sviluppare retine artificiali impiantabili in persone afflitte da alcune forme di cecità, ma anche sensori elettronici perfezionati.
- Un giorno i chip neuromorfici potrebbero addirittura replicare le connessioni modulabili che permettono al cervello le sue incredibili capacità funzionali.

no i dendriti, i fili che ricevono gli input. L'assone poi continua la sua crescita, trainato dal cono di crescita, una struttura ameboide che ne forma l'estremità, il quale percepisce gradienti di sostanze chimiche deposte da un'avanguardia di cellule precursori che fungono da segnale e guidano l'assone all'interno della «città» delle cellule del tetto ottico: ma non, per così dire, verso la «casa» giusta, bensì verso la «strada» in cui si trova.

Restringere la ricerca fino ad arrivare all'indirizzo esatto della «casa» richiede un secondo passaggio, di cui ancora ci sfuggono i dettagli. Sappiamo però che le cellule gangliari adiacenti della retina tendono ad attivarsi insieme. Questo mi ha indotto a formulare l'ipotesi che un assone potrebbe trovare nel tetto ottico le cellule retiniche sue vicine attratto da sostanze chimiche rilasciate da neuroni attivi del tetto ottico, poiché i suoi vicini erano più probabilmente la fonte di questa traccia. Una volta che l'assone prende contatto con gli alberi dendritici del neurone del tetto ottico, tra essi si forma una sinapsi: ed ecco che due neuroni che scaricano insieme si collegano insieme.

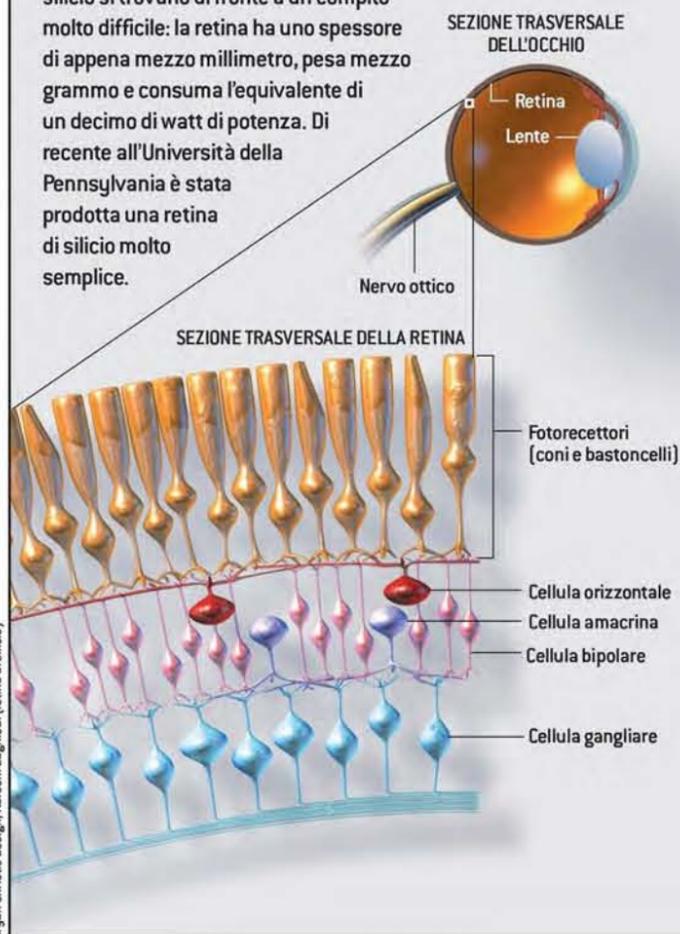
Nel 2001, Brian Tabak, anch'egli dottorando nel mio laboratorio, ha costruito un chip modellato su questo aspetto dello sviluppo del cervello. Poiché i fili metallici non si possono reinstradare, decidemmo di reindirizzare i potenziali d'azione, sfruttando il fatto che Visio1, il chip concepito da Zghoul, produce un indirizzo esclusivo di 13 bit ogni volta che una delle sue 3600 cellule gangliari genera un potenziale. Trasmettere indirizzi, e non potenziali d'azione, risolve il problema del numero limitato di terminali di input/output dei chip. Gli indirizzi sono decodificati dal chip ricevente, che ricrea il potenziale d'azione nella sede corretta nel suo mosaico di neuroni di silicio. Questa tecnica produce un fascio virtuale di assoni che decorrono tra sedi corrispondenti nei due chip: un «nervo ottico» di silicio. Se sostituiamo un indirizzo con un altro, reinstradiamo un assone virtuale appartenente a un neurone (l'indirizzo originario) verso un'altra sede (il nuovo indirizzo). Possiamo instradare questi *software* – come li abbiamo chiamati – ovunque vogliamo, memorizzando le sostituzioni in un database (una tabella di ricerca) e usando l'indirizzo originale per ritrovarli.

Nel chip del tetto ottico artificiale di Tabak, che egli ha chiamato Neurotrope 1, i *software* attivano dei circuiti sensibili al gradiente (coni di crescita di silicio) e anche neuroni di silicio vicini, situati nelle celle di una matrice a nido d'ape. Quando sono attivi, questi neuroni di silicio rilasciano una carica elettrica nella matrice, progettata da Tabak per condurre la carica come un transistor. La carica diffonde nella matrice, proprio come le sostanze chimiche rilasciate nel tessuto neurale dalle cellule del tetto ottico. I coni di crescita di silicio percepiscono la diffusione di questa «sostanza chimica» simulata e trascinano il loro *software* verso il gradiente – cioè verso la fonte della carica del neurone di silicio – aggiornando la tabella di ricerca. Poiché la carica deve essere rilasciata dal neurone di silicio ed essere simultaneamente percepita dal cono di crescita di silicio, i coni di crescita di Tabak trascinano virtualmente i *software* verso i neuroni attivi nello stesso momento in cui sono anch'essi attivi. Proprio ciò che accadrebbe durante la crescita di un assone reale: Neurotrope1 collegherà insieme i neuroni che scaricano insieme.

Iniziando da connessioni casuali tra i chip Visio1 e Neurotrope1, Tabak, attivando in modo casuale zone di cellule gangliari di silicio, ha imitato la tendenza delle cellule gangliari della retina

LA VISIONE CON I NEURONI OTTICI

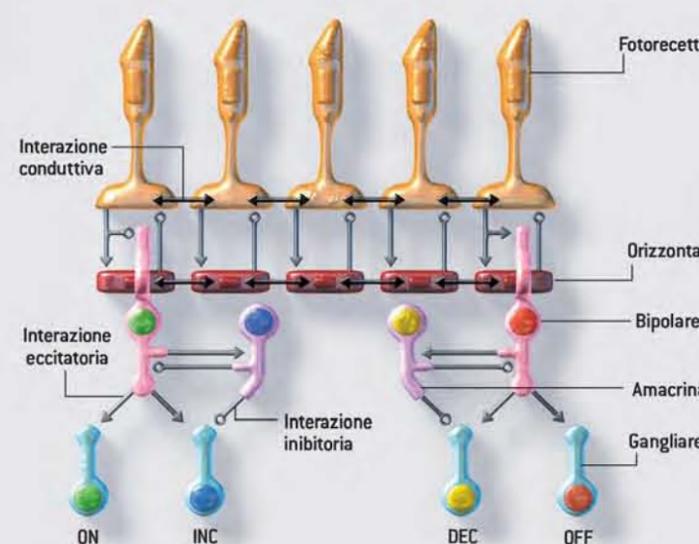
I sistemi sensoriali biologici forniscono modelli compatti ed efficienti dal punto di vista energetico per i sensori elettronici neuromorfici. I progettisti che cercano di replicare la retina su silicio si trovano di fronte a un compito molto difficile: la retina ha uno spessore di appena mezzo millimetro, pesa mezzo grammo e consuma l'equivalente di un decimo di watt di potenza. Di recente all'Università della Pennsylvania è stata prodotta una retina di silicio molto semplice.



E CON I CHIP NEUROMORFICI

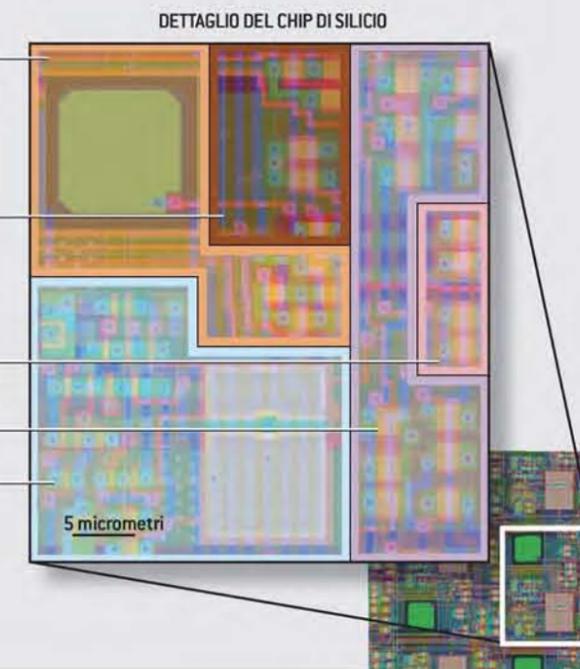
LA RETINA BIOLOGICA

I diversi tipi di cellule della retina ricavano l'informazione dal campo visivo formando una rete complessa di segnali eccitatori (*freccie unidirezionali*), inibitori (*cerchi sui bastoncini*) e di conduzione o bidirezionali (*freccie bidirezionali*). Questi circuiti generano le risposte selettive dei quattro tipi di cellule gangliari (*in basso*), che formano il 90 per cento delle fibre del nervo ottico, lungo il quale l'informazione visiva arriva al cervello. Cellule gangliari On (*in verde*) e Off (*in rosso*) aumentano la frequenza di scarica quando l'intensità locale della luce è più chiara o più scura rispetto alla regione circostante. Le cellule gangliari Inc (*in blu*) e Dec (*in giallo*) scaricano quando l'intensità aumenta o diminuisce, rispettivamente.



LA RETINA DI SILICIO

I circuiti neuromorfici imitano le complesse interazioni tra i diversi tipi di cellule della retina. Qui, gli assoni e i dendriti di ciascuna cellula (le vie dei segnali) sono sostituiti dai fili di metallo e le sinapsi dai transistor. Le permutazioni di questa disposizione producono interazioni eccitatorie e inibitorie che emulano attività simili tra neuroni. I transistor e i fili che li connettono sono depositi su chip di silicio. Diverse regioni della superficie del chip eseguono le funzioni dei differenti strati cellulari. I grandi quadrati verdi sono fototransistor, che convertono la luce in elettricità.



vicine a scaricare insieme. Una volta stimulate diverse migliaia di zone, egli ha osservato un drastico cambiamento nel *software* tra i chip. Le cellule gangliari artificiali confinanti adesso erano connesse a neuroni nel tetto ottico di silicio con una distanza che è la metà di quella delle connessioni iniziali. Il rumore e la variabilità non permettevano, però, un cablaggio perfetto: le terminazioni di cellule vicine nella retina di silicio non terminavano adiacenti nel tetto ottico di silicio. Come si formano allora quei precisi schemi di cablaggio che pensiamo siano alla base del funzionamento della corteccia biologica? E poi, la natura ci avrebbe dato nuovi suggerimenti per perfezionare i nostri sistemi?

Le mappe corticali

Per scoprirlo, siamo andati a studiare come si auto-organizzano le connessioni della corteccia cerebrale, la sede dei processi cognitivi. Con i suoi 40 centimetri di diametro, la superficie della corteccia si ripiega come un origami per alloggiare dentro il cranio. Durante l'infanzia, su questa tela straordinaria vengono

disegnate «mappe» del mondo esterno. L'esempio più studiato è l'area V1 (la corteccia visiva primaria), la prima area della corteccia dove entrano i messaggi visivi. In V1 si creano le mappe della lunghezza e della larghezza di un'immagine, ma anche dell'orientamento dei margini degli oggetti che la compongono. Come risultato, i neuroni dell'area V1 rispondono in modo ottimale a margini orientati con un angolo particolare: linee verticali, orizzontali, a 45 gradi, e così via. Le stesse preferenze di orientamento si ripetono circa ogni millimetro, consentendo l'orientamento dei margini in settori differenti della scena visiva.

I neurobiologi David Hubel e Torsten Wiesel, che negli anni sessanta hanno condiviso il premio Nobel per la scoperta della mappa dell'area V1 (si veda l'articolo *I meccanismi cerebrali della visione*, di David H. Hubel e Torsten N. Wiesel, in *«Le Scienze»*, n. 135, novembre 1979), hanno proposto un diagramma di cablaggio per la costruzione di una corteccia visiva la cui complessità ci aveva spaventato. Nel loro modello, ciascuna cellula corticale forma una connessione con due tipi di cellule del talamo, la stazione sottocorticale del cervello che ritrasmette i segnali in

arrivo dalla retina e li invia alla corteccia visiva. Un gruppo di cellule corticali dovrebbe rispondere percependo aree scure (da noi imitate con le cellule Off di Visio1), mentre il secondo gruppo dovrebbe rispondere alla percezione della luce (come le cellule On di Visio1). Per esempio, per far sì che una cellula corticale preferisca i margini verticali, entrambi i gruppi di cellule dovrebbero essere impostati in modo da giacere su linee verticali, ma leggermente spostati, così che le cellule Off si trovino appena a sinistra delle cellule On. In questo modo il margine verticale di un oggetto nel campo visivo attiverà tutte le cellule Off e tutte le cellule On quando è nella posizione corretta. Viceversa, un margine orizzontale attiverà solo metà delle cellule di ciascun gruppo: la cellula corticale riceverà così un input doppio in presenza di un margine verticale, e la sua risposta sarà più intensa.

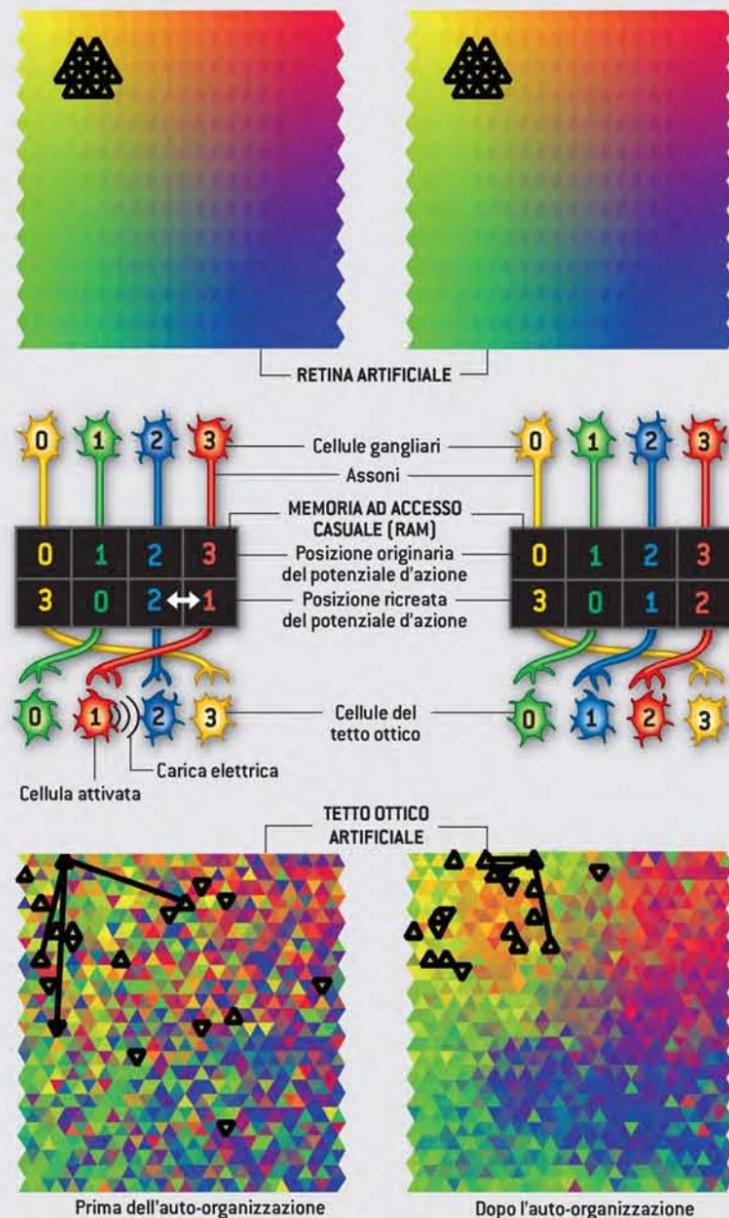
Inizialmente i dettagli di questi diagrammi di cablaggio ci hanno scoraggiato: dovevamo collegare ciascuna cellula in base alla sua preferenza di orientamento e poi modificare questi diagrammi sistematicamente per far variare le preferenze di orientamento in modo continuo, e far sì che cellule vicine fossero caratterizzate da

COME SI FORMANO LE CONNESSIONI

Nei primi stadi di sviluppo del sistema oculare, le cellule gangliari della retina proiettano gli assoni verso un centro sensoriale del mesencefalo, il tetto ottico. Gli assoni della retina si dirigono verso tracce chimiche rilasciate da cellule del tetto vicine che sono state attivate contemporaneamente, in modo tale che i neuroni che scaricano insieme sono collegati insieme. Si forma così nel mesencefalo una mappa dell'organizzazione spaziale dei sensori della retina.

I progettisti dell'Università della Pennsylvania imitano questo processo usando *software* per auto-organizzare le connessioni tra le cellule del chip della retina di silicio Visio1 (*in alto*) e quelle del chip del tetto ottico artificiale, Neurotrope1 (*in basso*). Gli impulsi elettrici in uscita sono indirizzati dalle cellule gangliari artificiali alle cellule del tetto ottico mediante un chip a memoria ad accesso casuale, o RAM (*al centro*). Il chip retinico fornisce l'indirizzo del neurone di silicio attivato e quello del tetto ricrea l'impulso nella sede corrispondente. Nell'esempio illustrato qui a fianco, il tetto artificiale istruisce la RAM a scambiare gli indirizzi 1 e 2. Come risultato, la terminazione dell'assone della cellula gangliare 2 si sposta alla cellula tetale 1, eliminando l'assone della cellula gangliare 3 da quella posizione. L'assone è guidato dalla sua «percezione» del gradiente di carica elettrica rilasciato da una cellula attivata del tetto ottico di silicio.

Dopo un'attivazione ripetuta di neuroni vicini nella retina artificiale (*triangoli in alto a sinistra*) l'estremità assonale delle cellule del tetto – all'inizio ampiamente distribuite nel tetto ottico di silicio (*triangoli in basso a sinistra*) – si avvicinano tra loro, producendo campi colorati più uniformi sulla mappa (*in basso a destra*).



Brian Tabak e Jen Christiansen

preferenze simili. Come nel caso della corteccia, gli stessi orientamenti si sarebbero dovuti ripetere ogni millimetro, con le cellule di silicio collegate a sedi vicine nella retina. I conetti di crescita di Tabak non erano certamente all'altezza di questa complessità. Alla fine del 2002 cercammo una via d'uscita da questo incubo, e la trovammo in un esperimento di cinquant'anni fa.

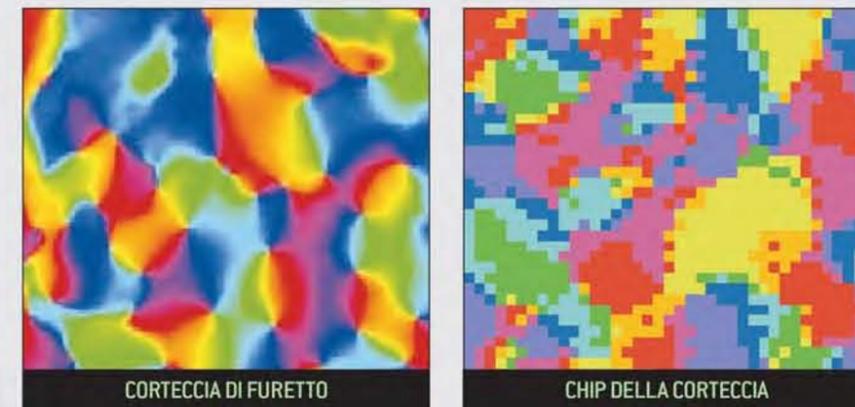
A metà del Novecento Alan Turing, pioniere dell'informatica, dimostrò che dal rumore casuale possono nascere spontaneamente strutture ordinate, come le macchie del leopardo o la pezzatura del mantello dei bovini. Speravamo di poter utilizzare per il nostro chip una tecnica simile al fine di creare regioni confinanti con schemi di orientamento simili. L'idea di Turing, che egli verificò all'Università di Manchester simulandola sui primi computer

elettronici, era che cellule della pelle simulate producessero indifferentemente «colorante nero» o «candeggiante». Introducendo variazioni tra le cellule in modo che producessero quantità appena differenti di colorante e di candeggiante, Turing generò macchie, pezzature e persino strisce simili a quelle di una zebra. Queste leggere differenze iniziali venivano amplificate sbiancando e macchiando con lo scopo di creare disegni netti. Questa idea poteva funzionare anche nel caso delle mappe corticali?

Quattro anni fa Misha Tsodyks, esperto di neuroscienze computazionali, ha dimostrato con i colleghi del Weizmann Institute of Science di Rehovot, in Israele, che un processo simile simulato con il software genera davvero mappe «corticali». Paul Merolla, anch'egli dottorando nel mio laboratorio, si era posto l'obiettivo

QUANDO IL SILICIO IMITA LA VITA

Ricercatori hanno creato nella corteccia visiva di un furetto e in un chip della corteccia neuromorfica la mappa di cellule che rispondono preferenzialmente a margini di oggetti con un determinato orientamento (*legenda, in basso*). In entrambe le mappe, cellule vicine tendono ad avere preferenze simili, e ciò dimostra che il chip della corteccia imita il sistema biologico.



Marcus Frank (furetto); Paul Merolla (chip)

L'AUTORE

KWABENA BOAHEN, specializzato in ingegneria neuromorfica, è professore associato di bioingegneria all'Università della Pennsylvania. Ha lasciato il Ghana, dove è nato, per laurearsi in ingegneria elettrica e informatica alla Johns Hopkins University nel 1985, iniziando poco dopo a interessarsi di reti neurali. Convinto che i sistemi neurali abbiano un'eleganza progettuale che manca agli attuali computer, Boahen cerca di riprodurre la sofisticazione sui suoi progetti in silicio.

PER APPROFONDIRE

MEAD C., *Analog VLSI and Neural Systems*, Addison-Wesley, 1989.

TABAK B. e BOAHEN K., *Topographic Map Formation by Silicon Growth Cones*, in «Advances in Neural Information Processing Systems», Vol. 15, a cura di Suzanna Becker, Sebastian Thrun e Klaus Obermayer, MIT Press, Boston, 2003.

ZAGHLOUL K. e BOAHEN K., *Optic Nerve Signals in a Neuromorphic Chip*, in «IEEE Transactions on Biomedical Engineering», Vol. 51, n. 4, pp. 657-675, 2004.

MEROLLA P. e BOAHEN K., *A Recurrent Model of Orientation Maps with Simple and Complex Cells*, in «Advances in Neural Information Processing Systems», Vol. 16, MIT Press, Boston, 2004.

Il sito web dell'autore: www.neuroengineering.upenn.edu/boahen.

di far funzionare su silicio questo processo basato sul software. Era noto che sostanze droganti (impurità) introdotte durante la microfabbricazione cadevano in modo casuale, introducendo variazioni in transistor altrimenti identici. Pensammo perciò che questo processo cogliesse l'aleatorietà dell'espressione dei geni in natura. Questa è presumibilmente la fonte di variazione della struttura delle macchie da un leopardo all'altro e delle strutture delle mappe di orientamento in persone diverse. Le cellule che creano questi disegni in natura, pur esprimendo geni identici, producono una quantità differente del colorante corrispondente nel primo caso, o delle proteine dei canali ionici nel secondo.

Tenendo presente questa analogia, Merolla ha progettato un singolo neurone di silicio, un'unità che ha ripetuto creando un

mosaico di connessioni eccitatorie e inibitorie di tipo neuronale tra elementi vicini. Nel 2003, osservando i nuovi chip in azione, siamo rimasti piacevolmente sorpresi dal comparire di mappe – ogni chip ne ha una differente – di forma simile a quelle rappresentate nell'area V1 dei cuccioli di furetto (*si veda il box qui sopra*).

Cervelli di silicio

Dopo aver effettuato il morphing su silicio dei cinque strati della retina, ci abbiamo riprovato con i sei strati della corteccia visiva. Il primo passo è stato il morphing dello strato IV della corteccia, dove arrivano i segnali visivi nella corteccia: volevamo ottenere una mappa delle preferenze di orientamento in una forma immatura. Con i suoi tre millimetri, la corteccia è tuttavia cinque volte più spessa della retina, ed effettuare il morphing di questi sei strati richiede circuiti integrati con un numero molto più elevato di transistor per unità di area.

Gli attuali produttori di chip stipano milioni di transistor e dieci metri di fili in un millimetro quadrato di silicio. Alla fine di questo decennio la densità dei chip sarà inferiore solo di dieci volte alla densità del tessuto della corteccia, con i suoi 100 milioni di sinapsi e tre chilometri di assoni per millimetro cubo.

L'imitazione della corteccia sarà quindi alla portata dei ricercatori, in termini di puro numero di dispositivi. Ma come faranno a far funzionare un miliardo di transistor per centimetro quadrato di silicio? Seguendo i metodi tradizionali, per progettare questi chip nanotecnologici a elevata densità ci vorrebbero migliaia di persone. Fino a oggi un aumento di 100 volte del numero di progettisti ha accompagnato un aumento di 10.000 volte del numero di transistor sui processori. In confronto, il semplice raddoppio del numero dei geni dalla drosophila all'uomo ha permesso alle forze dell'evoluzione di costruire cervelli con un numero di neuroni dieci milioni di volte superiore. Processi di sviluppo più sofisticati hanno aumentato la complessità perfezionando una ricetta relativamente semplice. Allo stesso modo, effettuare il morphing dei processi di sviluppo neurale e non il semplice morphing dei circuiti neurali nasconde grandi promesse per le nostre possibilità di gestire la complessità dei sistemi nanoelettronici di domani.