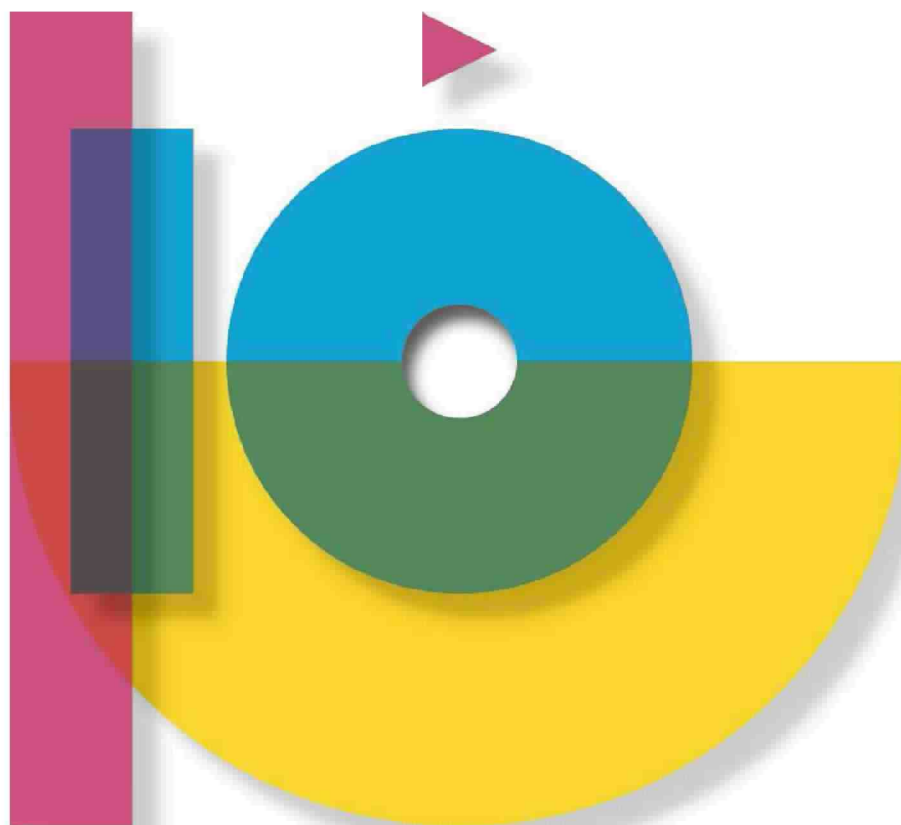




RAPPORTO SPECIALE

Dieci tecnologie emergenti per il 2019

Capire le innovazioni più recenti e le sfide che le accompagnano aiuterà la società a decidere come ottenerne il massimo dei benefici

IN BREVE

L'intelligenza artificiale è usata per cercare farmaci e materiali nuovi, e migliorare gli assistenti digitali. Presto avremo immagini virtuali sovrapposte al mondo reale. I computer quantistici stanno colmando il divario

con quelli classici.

Nel campo della salute, strumenti diagnostici avanzati danno maggiore profondità alla medicina di precisione. Cellule produttrici di farmaci, impiantabili e capaci di

sfuggire al sistema immunitario, e terapie di stimolazione nervosa potrebbero migliorare gestione e trattamento delle malattie.

Alcuni ricercatori fanno crescere carne da staminali, e la comunità

che lavora sui *gene drive* sviluppa regole con cui governare l'uso di strumenti capaci di alterare le specie. Nanomateriali a controllo luminoso potrebbero aumentare l'efficienza delle celle solari.

In che modo la tecnologia ci cambierà la vita nel prossimo futuro?

L'intelligenza artificiale accelererà di molto la progettazione di farmaci e materiali innovativi. Strumenti diagnostici avanzati renderanno possibile una medicina sempre più personalizzata. La realtà aumentata sarà dovunque, sovrapponendo informazioni e animazioni su immagini del mondo reale per aiutarci nelle attività quotidiane e aiutando l'industria a funzionare in modo più efficiente. Se ci ammaliamo, i medici potranno curarci impiantando nel corpo cellule che funzionano da fabbriche di farmaci. Mangeremo carne, pollo e pesce cresciuti da cellule staminali, riducendo parecchio l'impatto ambientale dell'allevamento animale e risparmiando trattamenti inumani a innumerevoli esseri viventi.

Queste idee capaci di cambiare il mondo, con le altre della lista delle dieci tecnologie emergenti, sono state selezionate da esperti di primo piano in campi come biologia, chimica inorganica, robotica e intelligenza artificiale. La lista è il risultato di un processo di selezione intensivo.

Innanzitutto siamo partiti da una ricerca a vasto raggio, sollecitando gli innovatori delle comunità dei Global Future Councils e dell'Expert Network del World Economic Forum, il comitato scientifico e la redazione di «Scientific American» e altri soggetti a fornire suggerimenti. Poi, in riunioni virtuali, un comitato direttivo ha valutato la rispondenza delle proposte a una serie di criteri. Le tecnologie da segnalare dovevano essere in grado di dare significativi benefici a società ed economie, e di farlo nei prossimi 3-5 anni. Dovevano essere potenzialmente dirompenti, in grado di cambiare settori economici o modi consolidati di agire. E dovevano essere in uno stadio di sviluppo ancora relativamente iniziale, non ancora di uso diffuso ma studiate da molti gruppi, capaci di suscitare entusiasmi tra gli esperti e attrarre investimenti crescenti e, idealmente, sviluppate da più aziende, non una sola. Da una lista di oltre 50 candidature, il comitato direttivo ne ha scelte una ventina, su cui assumere ulteriori informazioni. La decisione finale è stata presa in altre due sedute di discussione, dopo aver approfondito le informazioni raccolte.

Mariette DiChristina e Bernard S. Meyerson



INFORMATICA

Realtà aumentata ovunque

Il mondo sarà ricoperto di dati

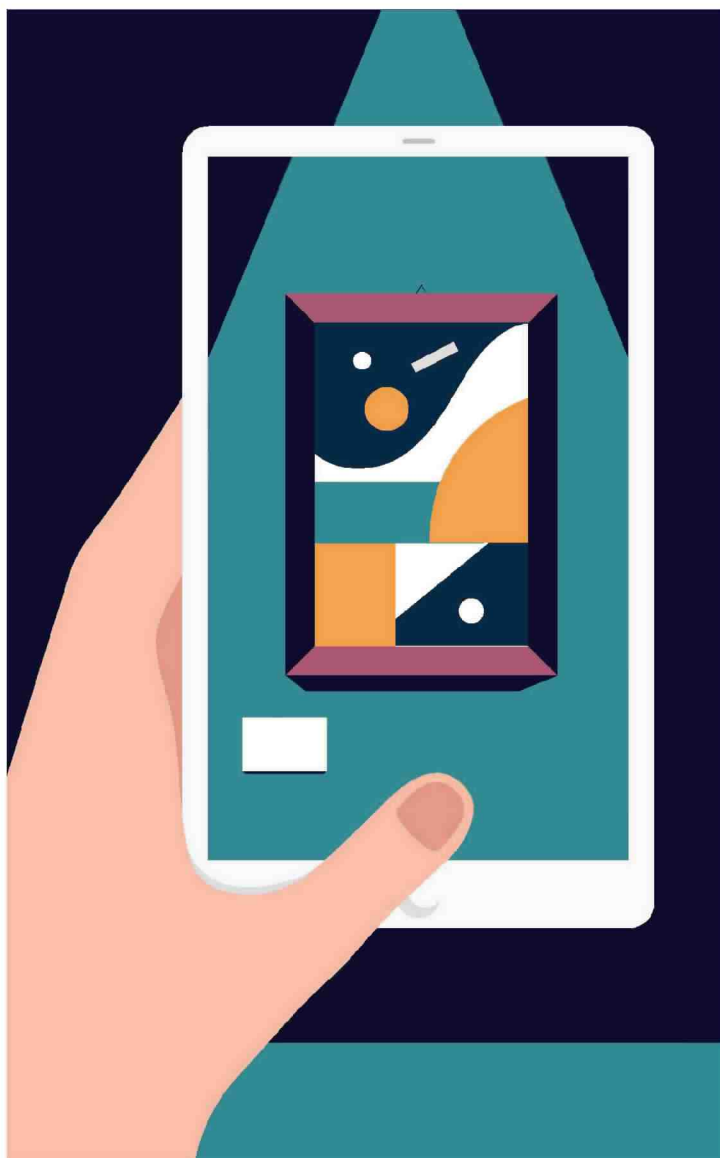
di Corinna E. Lathan e Andrew Maynard

La realtà virtuale (VR) ci immerge in un universo di finzione, isolato. La realtà aumentata (AR), invece, sovrappone informazioni generate da un computer sul mondo reale, in tempo reale. Quando si guarda o si indossa un dispositivo dotato di telecamera e *software* per AR – che sia uno *smartphone*, un *tablet*, un casco o degli occhiali «intelligenti» – il programma analizza il flusso di dati video in entrata, scarica ampie informazioni relative alla scena e sovrappone a essa dati, immagini o animazioni rilevanti, spesso in 3D.

Due esempi: lo schermo per il parcheggio assistito dell'automobile e il gioco popolare *Pokemon GO*. Un gran numero di applicazioni per l'utente – che possono tradurre insegne e segnali stradali per i turisti stranieri, permettere a uno studente di dissezionare una rana virtuale o farci vedere che effetto farà una poltrona in salotto prima di portarla a casa – sono anch'esse dotate di AR. In futuro questa tecnologia permetterà di visitare un museo evocando come guida una sorta di ologramma; i chirurghi potranno visualizzare i tessuti sotto la pelle dei pazienti in 3D; architetti e *designer* avranno strumenti inediti per elaborare progetti in collaborazione; gli operatori dei droni controlleranno i loro robot distanti attraverso immagini aumentate; e i principianti potranno imparare a svolgere nuovi compiti più rapidamente in campi che vanno dalla medicina alla manutenzione dei macchinari.

Nei prossimi anni l'offerta diretta ai consumatori dovrebbe espandersi grazie a programmi facili da usare nella progettazione di applicazioni, ma al momento l'impatto più forte dell'AR riguarda l'industria, dove è parte integrante della cosiddetta «quarta rivoluzione industriale», o «industria 4.0»: una trasformazione sistemica dell'attività manifatturiera attraverso l'integrazione di sistemi fisici e digitali per migliorare la qualità, abbassare i costi e aumentare l'efficienza. Molte aziende, per esempio, ne stanno testando l'uso sulle catene di montaggio. L'AR può far arrivare l'informazione giusta proprio nel momento in cui ce n'è bisogno (come quando un operaio deve scegliere un certo pezzo rispetto a un altro), e dunque ridurre gli errori, accrescere l'efficienza e migliorare la produttività. Può anche visualizzare tensioni e stress in macchinari e strutture e dare immagini in tempo reale delle zone in cui ci sono problemi.

Analisti di mercato come ABI Research, IDC e Digi-Capital ritengono che la realtà aumentata sia sul punto di diffondersi. E si attendono che il relativo mercato, il cui valore è oggi stimato in circa 1,5 miliardi di dollari, crescerà fino a 100 miliardi entro il 2020. Grandi aziende tecnologiche – comprese Apple, Google e Microsoft – stanno dedicando ingenti risorse finanziarie e



umane a prodotti e applicazioni sia di realtà virtuale sia di realtà aumentata. E il capitale di rischio (*venture capital*) sta entrando in gioco, con 3 miliardi di dollari investiti in AR e VR nel 2017, di cui la metà solo nel quarto trimestre. Di recente la «Harvard Business Review» ha indicato nell'AR una tecnologia trasformativa che interesserà tutti i settori.

Permangono alcuni ostacoli. Al momento, limiti di *hardware* e di larghezza di banda per le comunicazioni pongono barriere al passaggio all'uso quotidiano da parte dei consumatori. Per esempio, molte *app* usate oggi per migliorare l'esperienza di viaggiatori e visitatori di musei devono essere scaricate in anticipo, e anche così la qualità della grafica può essere inferiore alle aspettative dell'utente. Ma il campo è pronto a crescere in misura spettacolare; via via che saranno disponibili *chip* per dispositivi mobili più veloci e predisposti per l'AR, arriveranno sul mercato occhiali intelligenti più versatili e aumenterà la larghezza di banda. Allora la realtà aumentata prenderà posto accanto a Internet e ai video in diretta come un aspetto ordinario della vita quotidiana.

Hanno contribuito

Comitato direttivo sulle tecnologie emergenti

Mariette DiChristina,

presidente del comitato direttivo, è *editor in chief* di «Scientific American», ed *executive vicepresident*, Editorial and Publishing, Magazines del Nature Research Group, per la società madre, Springer Nature. Dal 2014 al 2016 è stata vicepresidente del Meta-Council on Emerging Technologies, uno dei Global Agenda Councils del World Economic Forum.

Bernard S. Meyerson,

vicepresidente del comitato di direzione, è il responsabile per l'innovazione di IBM. È membro della National Academy of Engineering degli Stati Uniti e ha ricevuto numerosi premi come fisico, ingegnere e manager aziendale. Nel 2014-2016 ha presieduto il Meta-Council on Emerging Technologies e nel 2016-2018 il Global Future Council on Advanced Materials del World Economic Forum.

Habiba Alsafar

è *associated professor* di ingegneria biomedica alla Khalifa University degli Emirati Arabi Uniti (EAU), dove dirige inoltre il centro di eccellenza in biotecnologie. Il suo lavoro riguarda l'identificazione dei segmenti del genoma che predispongono a malattie di cui sta crescendo la prevalenza nelle comunità degli EAU. Nel 2016-2018 ha fatto parte del Global Council on Biotechnology del World Economic Forum.

Alán Aspuru-Guzik

è professore di chimica e informatica all'Università di Toronto e fa parte del Vector Institute for Artificial Intelligence. Cofondatore di Zapata Computing e Kebotix, è *Canada 150 Research Chair 150* in chimica teorica e quantistica. Nel 2016-2018 ha fatto parte del Global Future Council on Advanced Materials del World Economic Forum.

Jeff Carbeck,

ha costituito e fatto crescere diverse aziende, è CEO di 10EQS, azienda che mobilita le conoscenze di numerosi esperti, tramite *crowdsourcing*, per risolvere problemi di business. Nel 2016-2018, ha fatto parte del Global Future Council on Advanced Materials del World Economic Forum.

Rona Chandrawati

è stata inserita nella Young Scientist Community of 50 Under 40 del World Economic Forum nel 2018 e fa parte dell'Expert network del Forum. È *senior lecturer* e responsabile del Nanotechnology for Food and Medicine Laboratory dell'Università del New South Wales (UNSW Sydney) in Australia. Le sue ricerche riguardano lo sviluppo di materiali bioispirati per la somministrazione di farmaci e per sensori.

Cynthia H. Collins

è *associate professor* di ingegneria chimica e biologica al Rensselaer Polytechnic Institute dove applica approcci interdisciplinari – dalla biologia sintetica e genomica microbica ai big data – per comprendere i diversi microbiomi e introdurre proprietà utili nei microbi con l'ingegneria genetica. È stata Young Scientist del World Economic Forum del 2016 e ha fatto parte nel 2016-2018 del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum.

Seth Fletcher

è *chief features editor* di «Scientific American».

Javier Garcia Martinez

è professore di chimica inorganica e direttore del laboratorio di nanotecnologie molecolari dell'Università di Alicante, in Spagna. È fra i fondatori di Rive Technology (spin-off del Massachusetts Institute of Technology, che commercializza catalizzatori nanostrutturati per l'industria chimica), fa parte del comitato esecutivo

dell'Unione internazionale di chimica pura e applicata (IUPAC), è fra gli Young Global Leader e nell'Expert Network del World Economic Forum. Ha pubblicato molti lavori su nanomateriali, reazioni catalitiche ed energia.

Hiroaki Kitano,

esperto di intelligenza artificiale e biologia dei sistemi, è presidente e CEO di Sony Computer Science Laboratories e dirige il System Biology Institute, entrambi a Tokyo. Ha fatto parte di vari Global Future Council del World Economic Forum, ultimamente (2016-2018) fa parte dell'Artificial Intelligence and Robotics Council.

Corinna E. Lathan

è cofondatrice e CEO di AnthroTronix, azienda di ricerca e sviluppo in ingegneria biomedica che realizza prodotti come dispositivi digitali per la salute, tecnologia «da indossare», robotica e realtà aumentata. Fa parte del consiglio di amministrazione di PTC, provider di «Internet delle cose» e piattaforme di realtà aumentata. È stata inoltre nominata Young Global Leader and Technology Pioneer dal World Economic Forum e ha presieduto il Global Future Council on Human Enhancement del Forum nel 2016-2018.

Geoffrey Ling,

ex-colonnello dell'Esercito degli Stati Uniti, insegna neurologia alla Uniformed Services University of Health Sciences e alla John Hopkins University. Esperto di sviluppo e transizione all'uso commerciale delle tecnologie, ha ricoperto posizioni direttive alla Defense Advanced Research Projects Agency, sotto la presidenza di Barack Obama, nell'Office of Science, Technology and Policy della Casa Bianca. Nel 2016-18, ha fatto parte del Council on Neurotechnologies del World Economic Forum.

Andrew Maynard

è professore alla School for the Future of Innovation in Society dell'Arizona State University. È appena stato pubblicato il suo libro *Films from the future: The technology and Morality of Sci-Fi Movies*. Il suo lavoro è centrato sullo sviluppo e sull'uso responsabile delle tecnologie emergenti. Nel 2016-18, ha fatto parte del Global Future Council on Technology, Values and Policy del World Economic Forum.

Elizabeth O'Day

è CEO e fondatrice di Olaris Therapeutics, azienda dedicata alla medicina di precisione di Cambridge, in Massachusetts, e nel 2016-2018 ha fatto parte del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum. Inoltre è la fondatrice di Lizzard Fashion, Proyecto Chispa, Women in Science and Technology, PhiSB.

Sang Yup Lee,

co-presidente 2016-18 del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum, è *Distinguished Professor* di ingegneria biomedica e biomolecolare al Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), e preside dei KAIST Institutes. È proprietario di oltre 630 brevetti.

AUTORE OSPITE

Owen Schaefer

è *research assistant professor* del Center for Biomedical Ethics della Yong Loo Lin School of Medicine della Singapore National University. Studia gli aspetti etici delle biotecnologie innovative in fase di sviluppo e ha scritto sulle tematiche etiche del miglioramento degli esseri umani per via tecnologica, della genetica, dei big data, della riproduzione assistita e della produzione di carne in vitro. Nel 2016-18 è stato fra i *fellow* del Global Future Council on Technology Values and Politics del World Economic Forum.



MEDICINA

di Geoffrey Ling e Corinna E. Lathan

Dispositivi «elettroceutici»

Terapie di stimolazione dei nervi potrebbero sostituire i farmaci in molte condizioni croniche

I dispositivi detti «elettroceutici» – con cui si trattano vari malanni con impulsi elettrici – sono usati da tempo in medicina: si pensi ai *pacemaker* cardiaci, agli impianti cocleari per la sordità e alla stimolazione cerebrale profonda per la malattia di Parkinson. Uno di questi approcci è pronto a diventare più versatile, migliorando in modo netto i trattamenti per una serie di condizioni. Si tratta di inviare segnali al nervo vago, che trasmette impulsi dal tronco cerebrale alla maggior parte degli organi e da essi ne riceve. Nuove applicazioni della stimolazione del nervo vago (VNS) sono state in parte rese possibili da ricerche effettuate, fra gli altri, da Kevin Tracey del Feinstein Institute for Medical Research, che mostrano come il nervo vago emetta composti chimici che aiutano a regolare il sistema immunitario. Il rilascio di uno specifico neurotrasmettitore nella milza, per esempio, calma cellule immunitarie coinvolte nei processi infiammatori in tutto il corpo. Queste scoperte indicano che la VNS potrebbe avere effetti benefici per altre condizioni oltre a quelle

disturbi autoimmunitari come il lupus, in cui il nervo vago stesso riduce la propria attività. Un'altra potenziale applicazione di questa tecnologia riguarda la prevenzione del rigetto dei tessuti trapiantati.

La maggior parte degli stimolatori del nervo vago, compresi i dispositivi di SetPoint e quelli già in uso per il trattamento di epilessia e depressione, sono impiantabili. In genere i medici li dispongono sotto la pelle, al di sotto della clavicola. I fili provenienti dal dispositivo si avvolgono attorno a una branca del nervo vago e inviano impulsi elettrici a intervalli predeterminati; frequenza e altre caratteristiche sono programmate mediante un dispositivo magnetico esterno. I dispositivi attuali hanno un diametro di 3,5 centimetri circa, ma ci si aspetta che nel tempo diventino più piccoli e più finemente programmabili.

Di recente hanno ottenuto l'approvazione della Food and Drug Administration (FDA) anche stimolatori portatili non invasivi del nervo vago per attenuare emicranie e cefalea a grappolo, anche se

non è ben chiaro come la stimolazione del nervo vago sia di aiuto in queste condizioni cliniche. Sono dispositivi da tenere in mano, che inviano lievi stimoli elettrici al nervo attraverso la pelle del collo o l'orecchio.

Il nervo vago non è l'unico a essere bersagliato dai nuovi approcci elettroceutici. Alla fine del 2017 la FDA ha approvato un dispositivo non impiantabile che allevia l'astinenza da oppiacei inviando segnali a branche

Di recente negli Stati Uniti sono stati approvati stimolatori portatili non invasivi del nervo vago progettati per attenuare emicranie e mal di testa a grappolo. Ma non è ancora chiaro come agisca la stimolazione del nervo vago

segnate da disturbi dei segnali elettrici, come autoimmunità e infiammazioni. Per i pazienti potrebbe essere una manna, perché spesso i farmaci falliscono o hanno seri effetti collaterali. La VNS potrebbe essere più tollerabile perché agisce su un nervo specifico, mentre in genere i farmaci viaggiano in tutto il corpo, colpendo potenzialmente altri tessuti oltre a quelli bersagliati nel trattamento.

Fin qui gli studi sulle applicazioni legate a fenomeni infiammatori sono incoraggianti. Dispositivi per VNS sviluppati da SetPoint (un'azienda fondata, con altri, dallo stesso Tracey) si sono dimostrati sicuri in sperimentazioni preliminari su esseri umani per l'artrite reumatoide, che provoca infiammazioni dolorose e deformanti delle articolazioni, e per la malattia di Crohn, che comporta infiammazione intestinale. Per entrambe le condizioni sono attualmente in corso nuove sperimentazioni. Si stanno esaminando approcci elettroceutici anche ad altre malattie che hanno una componente infiammatoria, come quelle cardiovascolari, disturbi del metabolismo e demenze nonché per

dei nervi craniali e occipitali attraverso la pelle dietro le orecchie. Il dispositivo ha ottenuto l'assenso della FDA dopo che in 73 pazienti in astinenza da oppiacei è stata osservata una riduzione della severità dei sintomi del 31 per cento o più.

Il costo dei dispositivi impiantabili e degli interventi chirurgici potrebbe ostacolare un'ampia adozione delle terapie VNS, anche se il problema dovrebbe ridursi via via che la tecnologia diventa meno invasiva. Tuttavia il costo non è l'unica difficoltà. È ancora necessario che i ricercatori capiscano meglio come la VNS produce i suoi effetti in ognuna delle condizioni da curare, e come ottimizzare l'andamento delle stimolazioni per ogni paziente. È anche possibile che gli impulsi indirizzati al nervo vago influiscano sui nervi circostanti in modi indesiderati. Eppure, con il crescere degli studi e delle sperimentazioni su meccanismi ed effetti, la VNS e altre terapie elettroceutiche potrebbero alla fine riuscire a gestire un'ampia gamma di condizioni croniche, riducendo potenzialmente la necessità di assumere farmaci per milioni di pazienti.



CHIMICA

Produrre carne dalle staminali

Mangiare carne risparmiando però animali e ambiente

di G. Owen Schaefer

Sarebbe bello poter addentare un succulento hamburger di manzo prodotto senza uccidere animali. Il sogno sta diventando realtà grazie a carni fatte crescere in laboratorio partendo da cellule in coltura. Diverse *start-up* stanno sviluppando manzo, maiale, pollame, pesce e frutti di mare cresciuti in laboratorio, per esempio Mosa Meat, Memphis Meat, SuperMeat e Finless Foods. E il settore sta attirando finanziamenti milionari. Nel 2017, per esempio, Memphis Meat ha ricevuto 17 milioni di dollari provenienti, fra l'altro, da Bill Gates e da una multinazionale agro-alimentare come Cargill.

Adottata su larga scala, la carne cresciuta in laboratorio, chiamata anche carne pulita, potrebbe eliminare gran parte dei trattamenti crudeli ed eticamente inaccettabili a cui sono sottoposti gli animali allevati per ottenere cibo. E potrebbe anche ridurre il considerevole costo ambientale della produzione di carne: sarebbero necessarie solo risorse per generare e alimentare le cellule in coltura, non un intero organismo dalla nascita in poi.

Il primo passo è il prelievo di un campione di muscolo da un animale. I tecnici raccolgono cellule staminali dal tessuto, le fanno moltiplicare molte volte e le lasciano differenziare in fibre primitive che poi si ingrossano a formare tessuto muscolare. Mosa Meat afferma che un campione prelevato da una vacca può dare tessuti muscolari sufficienti a produrre 80.000 dei classici hamburger da poco più di 100 grammi.

Varie *start-up* si aspettano di avere prodotti da vendere entro qualche anno. Ma la carne pulita dovrà superare diverse barriere per diventare sostenibile dal punto di vista commerciale. Due riguardano costo e sapore. Nel 2013, quando è stato presentato alla stampa un hamburger di carne cresciuta in laboratorio, il suo costo di produzione superava i 300.000 dollari e al palato risultava troppo secco (aveva pochissimi grassi). Da allora il costo è precipitato. Memphis Meat ha riferito quest'anno che poco più di 100 grammi della sua carne macinata costano circa 600 dollari. Se la tendenza è questa, la carne pulita potrebbe diventare competitiva con quella tradizionale entro alcuni anni. La questione del sapore si potrebbe affrontare regolandone la consistenza e con l'aggiunta di altri ingredienti.

Per farla accettare sul mercato, si dovrà dimostrare che la carne pulita si può mangiare senza pericolo. Anche se non c'è motivo di pensare che possa costituire un rischio per la salute, solo ora la FDA inizia a occuparsi di come regolamentare la carne prodotta in laboratorio. Intanto i produttori tradizionali stanno reagendo: sostengono che i prodotti ottenuti in laboratorio in realtà non sono affatto carni e non dovrebbero essere etichettate come tali, e le indagini di mercato mostrano che il pubblico ha solo un tiepido interesse nel mangiare carne ottenuta in laboratorio. Malgrado queste difficoltà, le aziende interessate vanno avanti. Se saranno in grado di realizzare prodotti di sapore credibile ed economicamente accessibili, la carne pulita potrebbe rendere le nostre abitudini alimentari più accettabili in termini etici e più sostenibili per l'ambiente.



INFORMATICA

Programmi che discutono e istruiscono

Nuovi algoritmi permetteranno ai dispositivi personali di apprendere qualunque argomento abbastanza bene da affrontare una discussione

di Bernard S. Meyerson

A volte gli assistenti digitali attuali possono ingannarvi nel farvi credere di essere umani, ma quelli in arrivo saranno di gran lunga più bravi. Dietro le quinte, Siri, Alexa e compagnia usano raffinati programmi di riconoscimento vocale per capire che cosa stiamo chiedendo e come soddisfarci, e generano risposte predefinite ma corrispondenti alle domande con un parlato che suona naturale. I sistemi di questo tipo devono essere preliminarmente «addestrati», cioè esposti a molti esempi del tipo di richieste che gli esseri umani probabilmente potrebbero fare, e le risposte appropriate devono essere scritte da esseri umani e organizzate in formati di dati altamente strutturati.

È un lavoro che richiede tempo e che porta ad assistenti digitali capaci di eseguire solo una ristretta gamma di compiti. Questi sistemi sono in grado di «imparare» – le loro capacità di apprendimento automatico permettono di migliorare la corrispondenza tra domande in entrata e risposte preesistenti – ma in misura limitata. Tuttavia già così sono impressionanti. A livelli più alti di raffinatezza e complessità, oggi si stanno sviluppando tecnologie che permetteranno alla prossima generazione di questi dispositivi di assorbire e organizzare dati non strutturati (testi grezzi, video, immagini, spezzoni sonori, e-mail e via dicendo) da una miriade di fonti e poi dare autonomamente consigli convincenti – oppure discutere –

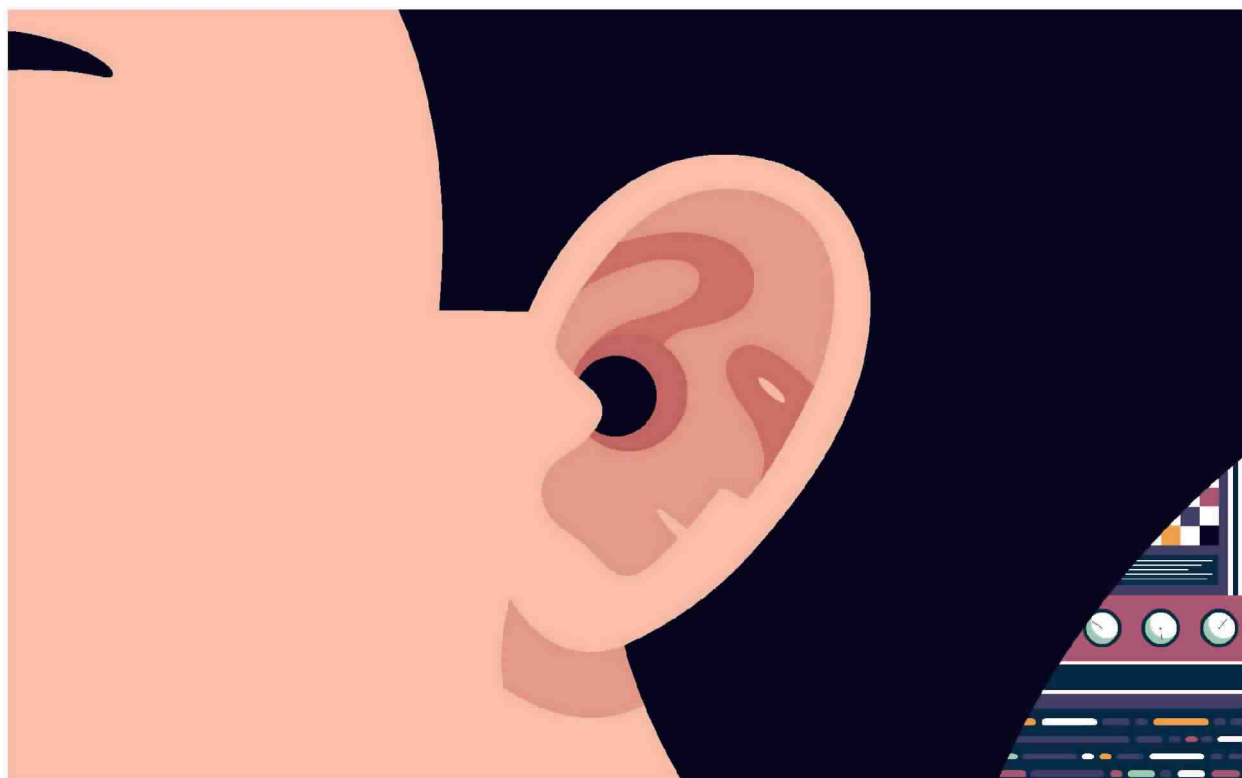


BIOTECNOLOGIE

di Sang Yup Lee

Cellule per produrre farmaci nel corpo

Rilasciare agenti terapeutici nel corpo, dove e quando servono e senza attacchi da parte del sistema immunitario



su un determinato argomento senza essere stati addestrati in precedenza a trattarlo.

Già si vede un barlume di questa capacità in siti web che propongono programmi chiamati *chatbot* che possono rispondere a domande formulate in linguaggio naturale relative a una gran varietà di insiemi di dati su cui sono stati addestrati. Questi chatbot hanno bisogno di poco o nessun addestramento sulle specifiche domande o richieste; usano dati preconfigurati e una capacità emergente di «leggere» i materiali pertinenti di riferimento che sono forniti loro. Richiedono però un certo addestramento per riconoscere parole e intenzioni prima di poter dare risposte altamente precise.

A giugno 2018 IBM, per cui lavoro, ha dato una dimostrazione di una versione più avanzata di questa tecnologia: un sistema ha portato avanti un dibattito con un esperto umano in tempo reale senza essere stato addestrato in precedenza né sull'argomento né sulla posizione che doveva sostenere. Partendo da dati non strutturati (fra cui contenuti tratti da Wikipedia, in parte corretti per renderli più chiari), il sistema doveva accertare rilevanza e veridicità delle informazioni e organizzarle in un insieme da usare per costruire argomentazioni coerenti a sostegno della posizione che gli era stata assegnata. Inoltre doveva rispondere alle argomentazioni del suo avversario umano. Nel corso della

dimostrazione il sistema è stato impegnato in due dibattiti, e in uno di essi è stato giudicato più persuasivo del suo avversario da un ampio gruppo di spettatori.

La relativa tecnologia – di cui fa parte un programma capace non solo di capire il linguaggio naturale ma anche di gestire la sfida più difficile di individuare i sentimenti positivi e negativi – è stata sviluppata nel corso di oltre cinque anni ed è ancora in gran parte un lavoro in corso. Tuttavia, la vittoria di un sistema di intelligenza artificiale a risposte non predefinite contro un esperto umano apre già la strada a innumerevoli applicazioni collegate che potrebbero venire alla luce nel giro di 3-5 anni, se non prima. Per esempio un sistema del genere potrebbe aiutare i medici a trovare rapidamente studi rilevanti per un caso particolarmente controverso e poi a discutere i pregi di un certo protocollo di trattamento.

Questi sistemi intelligenti serviranno solo per mettere insieme le conoscenze esistenti, non per crearne di nuove come può fare uno scienziato di laboratorio o un esperto. Eppure, via via che le macchine diventano sempre più intelligenti, fanno emergere lo spettro della perdita di posti di lavoro. È compito della società dare alla prossima generazione le abilità di cui avrà bisogno per affrontare i problemi che per essere risolti richiedono l'ingegno umano.

Molti diabetici si pungono un dito diverse volte al giorno per misurare i livelli degli zuccheri nel sangue e decidere la dose di insulina da assumere. Impiantando le cellule pancreatiche che normalmente producono l'insulina nel corpo – le cosiddette cellule delle isole pancreatiche – si potrebbe rendere superfluo questo complicato e fastidioso procedimento.

Gli impianti cellulari potrebbero rivoluzionare anche il trattamento di vari altri disturbi, fra cui cancro, insufficienza cardiaca, emofilia, glaucoma e morbo di Parkinson. Questi impianti, però, hanno un grosso difetto: il ricevente deve assumere farmaci immunosoppressivi per un tempo indefinito allo scopo di impedire il rigetto delle cellule da parte del sistema immunitario; e questi farmaci possono avere seri effetti collaterali, come un aumento del rischio di infezioni e di tumori maligni.

In decenni di lavoro gli scienziati hanno inventato diversi modi di racchiudere le cellule in membrane semipermeabili che impediscono al sistema immunitario di attaccare le cellule impiantate; le capsule permettono l'entrata di nutrienti e altre piccole molecole e l'uscita degli ormoni o delle altre proteine terapeutiche prodotte. Tuttavia non basta tenere le cellule al sicuro: se il sistema immunitario vede come estraneo il materiale protettivo, farà sì che le capsule siano ricoperte di

tessuto cicatriziale; e la risultante «fibrosi» impedisce ai nutrienti di raggiungere le cellule, uccidendole.

I ricercatori stanno cominciando a risolvere il problema. Nel 2016, per esempio, un gruppo del Massachusetts Institute of Technology (MIT) ha reso pubblico un sistema per rendere le cellule impiantate invisibili al sistema immunitario. Dopo aver prodotto e testato centinaia di materiali, i ricercatori hanno scelto una versione modificata per via chimica dell'alginato, un gel che ha una lunga storia di uso sicuro nel corpo umano. Le cellule delle isole pancreatiche incapsulate in questo gel e impiantate in topi diabetici hanno subito iniziato a produrre insulina in risposta al variare dei livelli ematici del glucosio, tenendoli sotto controllo per tutti i sei mesi dello studio. Non è stata osservata fibrosi. In un altro studio, lo stesso gruppo ha mostrato che bloccando una particolare proteina (il recettore del fattore stimolante le colonie 1) dei macrofagi, cellule immunitarie importanti nella fibrosi, si può inibire la cicatrizzazione. L'aggiunta di questo fattore bloccante dovrebbe migliorare ulteriormente la sopravvivenza delle cellule impiantate.

Sono nate diverse aziende che sviluppano terapie con cellule incapsulate. Una di esse, Sigilon Therapeutics, sta facendo progredire la tecnologia sviluppata al

MIT in modo da progettare trattamenti per diabete, emofilia e un disturbo del metabolismo detto malattia da accumulo lisosomiale. Il suo lavoro sul diabete ha come partner l'azienda farmaceutica Ely Lilly. Altri esempi sono Semma Therapeutics, azienda che lavora sempre sul diabete, con una propria tecnologia; Neurotech Pharmaceuticals, che ha impianti cellulari in fase di sperimentazione clinica per glaucoma e varie affezioni oculari con degenerazione della retina; Living Cell Technologies sta testando a livello clinico impianti cellulari per la malattia di Parkinson, e sviluppa terapie per altre condizioni neurodegenerative.

Attualmente le cellule da incorporare nelle capsule sono prelevate da animali o cadaveri umani o sono derivate da staminali umane. Un giorno però le terapie con cellule impiantate potrebbero usare una più ampia gamma di tipi cellulari, forse anche ingegnerizzati con la biologia sintetica, in cui si riprogramma il patrimonio genetico delle cellule affinché svolgano nuove funzioni, come il rilascio controllato e a richiesta di specifiche molecole farmaceutiche in un tessuto. Siamo ancora agli inizi. Né la sicurezza né l'efficacia delle terapie con cellule incapsulate sono state ancora provate in ampi trial clinici, ma i segnali sono incoraggianti.



INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Progettare nuove molecole in modo veloce

Algoritmi di apprendimento automatico accelerano la ricerca di farmaci e materiali nuovi

di Jeff Carbeck

Volete progettare un nuovo materiale per l'energia solare, un farmaco anticancro o un composto che impedisca a un virus di attaccare una coltura? Dovete affrontare due sfide: trovare la struttura chimica giusta e le reazioni per combinare gli atomi giusti a dare la molecola, o l'insieme di molecole, desiderati. In passato le risposte sono arrivate da ipotesi sofisticate con l'aiuto della serendipità. È un processo che richiede tempo e include un gran numero di tentativi falliti. Un piano di sintesi,

per esempio, può prevedere centinaia di singoli passi, ciascuno dei quali avrà reazioni collaterali o prodotti secondari, o magari potrebbe non funzionare affatto. Ora, però, l'intelligenza artificiale (IA) inizia ad aumentare l'efficienza delle fasi di progettazione e di sintesi, rendendo l'impresa più rapida, facile ed economica, riducendo i rifiuti chimici.

Nell'IA, algoritmi di apprendimento automatico analizzano tutti gli esperimenti che hanno cercato di scoprire o sintetizzare la sostanza di interesse; sia quelli che hanno funzionato sia, passaggio cruciale, quelli falliti. Sulla base delle regolarità individuate, gli algoritmi prevedono strutture di nuove molecole potenzialmente utili e possibili modi di fabbricarle. Non c'è uno strumento di apprendimento automatico in grado di fare tutto questo da solo, ma le tecnologie basate sull'IA stanno entrando nella progettazione di molecole per farmaci e materiali avanzati. Per esempio uno di questi strumenti, sviluppato da ricercatori dell'Università di Münster, in Germania, simula ripetutamente le 12,4 milioni di reazioni chimiche a singolo passaggio oggi note per arrivare a una via sintetica in più passaggi, pianificando il tutto 30 volte più rapidamente degli esseri umani.

In campo farmaceutico, una tecnologia basata sull'IA, detta apprendimento automatico generativo, sta entusiasmando. La maggior parte delle case farmaceutiche immagazzina milioni di composti e ne valuta le potenzialità terapeutiche. Ma anche con gli strumenti della robotica e l'automazione dei laboratori il processo è lento e dà relativamente pochi risultati positivi. Inoltre, tutte queste «librerie» messe insieme coprono solo una minuscola frazione delle oltre 10^{30} molecole teoricamente possibili. Con un insieme di dati che descrive la struttura dei



MEDICINA

Diagnostica per la medicina di precisione

Una nuova generazione di strumenti può aiutare a superare le terapie uguali per tutti

di Elizabeth O'Day e Habiba Alsafar

Per la maggior parte del XX secolo le donne con tumore al seno sono state trattate in modo simile. Da allora la terapia è diventata più individuale: oggi i tumori al seno sono divisi in sottotipi e sono trattati su questa base. Molte donne i cui tumori producono recettori per gli estrogeni, per esempio, potrebbero ricevere farmaci che hanno per bersaglio questi recettori e la chemioterapia postoperatoria. Nel 2018 i ricercatori hanno

fatto un altro passo avanti verso un trattamento ancora più personalizzato: hanno identificato una frazione delle pazienti i cui tumori mostrano caratteristiche che indicano che possono fare a meno della chemioterapia, evitando gli effetti collaterali.

La marcia verso una medicina personalizzata, o di precisione, sta accelerando grazie ai progressi degli strumenti diagnostici. Queste tecnologie possono aiutare a rilevare e quantificare molti biomarcatori (molecole che segnalano un disturbo) per dividere i pazienti in sottogruppi diversi per suscettibilità a una malattia, prognosi o probabilità che rispondano a un dato trattamento. Nei primi strumenti diagnostici molecolari si osservavano singole molecole; nel caso del diabete, per esempio, il glucosio. Nell'ultimo decennio però le cosiddette tecnologie «-omiche» hanno fatto progressi enormi, permettendo di sequenziare in modo rapido, affidabile ed economico il genoma di una persona, o di misurare i livelli di tutte le proteine (proteoma), i prodotti del metabolismo intermedio (metaboloma) o i microbi (microbioma) in un fluido biologico o in un campione di tessuto. Allo stesso tempo l'uso frequente di queste tecnologie ha iniziato a produrre grandi insiemi di dati che l'intelligenza artificiale può analizzare per scoprire nuovi biomarcatori clinicamente significativi. La combinazione di tecnologie -omiche e intelligenza artificiale apre la strada alla nuova era della diagnostica avanzata, che cambierà comprensione e trattamento di molte malattie, permettendo di stabilire le terapie in base al profilo molecolare dei pazienti.

Alcuni strumenti diagnostici avanzati sono già in uso per il cancro. Oncotype DX esamina 21 geni, ed è il test che ha rivelato che molte donne con tumori al seno possono risparmiarsi la chemioterapia.

farmaci noti (e delle molecole candidate), insieme alle loro proprietà, gli strumenti di apprendimento automatico possono costruire librerie virtuali di nuovi composti con caratteristiche simili e potenzialmente più utili. Questa capacità sta accelerando l'identificazione di possibili farmaci promettenti. Quasi 100 *start-up* esplorano le possibilità dell'IA per scoprire farmaci, tra cui Insilico Medicine, Kebotix e BenevolentAI; quest'ultima ha raccolto 115 milioni di dollari per estendere la sua tecnologia alla scoperta di farmaci per le malattie che colpiscono i motoneuroni, come il Parkinson e altri disturbi difficili da curare. BenevolentAI applica l'IA allo sviluppo dei farmaci, dalla scoperta di molecole alla progettazione e all'analisi delle sperimentazioni per dimostrarne sicurezza ed efficacia negli esseri umani. Nel campo dei materiali, aziende come Citrine Informatics usano approcci simili a quelli dei produttori di farmaci e collaborano con grandi aziende come BASF e Panasonic per accelerare l'innovazione. Anche gli Stati Uniti sostengono le ricerche sulla progettazione aiutata dall'IA. Dal 2011 hanno investito oltre 250 milioni di dollari nella Materials Genome Initiative, che realizza un'infrastruttura che include l'IA e altri approcci computazionali per accelerare lo sviluppo di materiali avanzati. L'esperienza insegna che nuovi materiali e prodotti chimici possono creare pericoli imprevisti per salute e sicurezza. Ma gli approcci basati sull'IA dovrebbero prevedere e ridurre questi esiti indesiderati. Le tecnologie sembrano molto vicine ad aumentare velocità ed efficacia con cui nuove molecole e materiali sono scoperti e messi sul mercato, dove possono migliorare cure mediche e agricoltura, far risparmiare risorse e far progredire produzione e stoccaggio dell'energia da fonti rinnovabili.

Un altro, FoundationOne CDx, individua mutazioni di oltre 300 geni nei tumori solidi, e indica quali farmaci contro geni specifici possono essere utili per un paziente. Uno strumento interessante riguarda l'endometriosi, condizione in cui tessuto uterino cresce dove non dovrebbe, causando spesso forti dolori. In genere, la diagnosi si fa per via chirurgica. Un test non invasivo di DotLabs, basato sulla saliva, identifica l'endometriosi misurando un gruppo di piccole molecole dette micro-RNA. Inoltre sono in fase di sviluppo test ematici per aiutare a identificare disturbi cerebrali – come autismo, Parkinson e Alzheimer – oggi diagnosticati con la soggettiva valutazione dei sintomi da parte dei medici. I ricercatori esplorano anche la possibilità che sequenziando il genoma, analizzando il microbioma e misurando i livelli di centinaia di proteine e metaboliti in persone sane si possano ottenere indicazioni personalizzate su come ognuna potrebbe prevenire le malattie. Un'avvertenza: strutture e ricercatori che usano strumenti diagnostici così approfonditi devono applicare rigorose misure per la privacy dei pazienti. Inoltre sono necessarie chiare normative e linee guida per valutare l'utilità dei biomarcatori come strumenti diagnostici in modo coerente, che serviranno ad accelerare l'adozione dei nuovi biomarcatori nella pratica medica. La diagnostica avanzata inizia a dissolvere l'approccio standard a diagnosi e trattamento delle malattie. Indirizzando i pazienti a cure più valide, potrebbero anche ridurre la spesa sanitaria. Un giorno potremmo avere una *cloud* con dati sui biomarcatori, che cresce nel tempo e su cui sono basate le cure, a prescindere dal medico o dalla struttura a cui ci rivolgiamo.



BIOTECNOLOGIE

Gene drive, ma con la sicura

Come limitare i rischi di una tecnologia in grado di alterare intere specie

di Cynthia H. Collins

La ricerca su una tecnica di ingegneria genetica che può modificare in via permanente i tratti di una popolazione o anche di un'intera specie procede in modo spedito. L'approccio usa i cosiddetti *gene drive*, elementi genetici trasmessi dai genitori a una frazione insolitamente alta della prole, che quindi si diffondono con rapidità nelle popolazioni.

I gene drive si osservano in natura, ma possono anche essere ingegnerizzati, e farlo potrebbe essere vantaggioso per gli esseri umani in molti modi. Si potrebbe impedire agli insetti di trasmettere la malaria e altre terribili infezioni, migliorare i raccolti alterando gli organismi che attaccano le piante, rendere i coralli resistenti agli stress ambientali e impedire a piante e animali invasivi di distruggere gli ecosistemi. I ricercatori tuttavia sono ben consapevoli del fatto che alterare o addirittura eliminare una specie potrebbe avere conseguenze profonde. Come risposta, stanno sviluppando regole che governino il passaggio dei gene drive dal laboratorio ai futuri test sul campo e infine a un uso più esteso.

Sono decenni che gli scienziati lavorano su come usare i gene drive per combattere malattie e per altri problemi. Negli ultimi anni una grossa spinta è stata data dalla tecnica di editing genomico CRISPR, grazie a cui è diventato semplice inserire materiale genetico in punti specifici dei cromosomi. Nel 2015 diversi articoli scientifici hanno riferito di aver diffuso con successo gene drive basati sulla CRISPR in lieviti, moscerini della frutta e zanzare. Una di queste dimostrazioni ha diffuso un gene per la resistenza al parassita malarico in una popolazione di zanzare, il che, in teoria, dovrebbe limitare la trasmissione del parassita. Un altro studio ha interferito con la fertilità delle femmine di una diversa specie di zanzara.

Nel 2018 è stato testato un sistema di gene drive con CRISPR nei topi, che puntava a manipolare il colore del manto; la procedura ha funzionato solo nelle femmine. Anche così, però i risultati confermano la possibilità che questa tecnologia contribuisca a eliminare o alterare popolazioni invasive di topi o altri mammiferi che minacciano i raccolti o altre specie selvatiche, oppure che trasmettono malattie.

La statunitense Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) è fra gli investitori che appoggiano questa tecnologia con entusiasmo, avendo riversato 100 milioni di dollari su ricerche mirate a combattere, con gene drive, malattie trasmesse dalle zanzare e roditori invasivi. La Bill & Melinda Gates

Foundation ha investito 75 milioni di dollari in un consorzio di ricerca che lavora a un gene drive contro la malaria. Nonostante tutte le promesse, questa tecnologia solleva molte preoccupazioni. È possibile un gene drive che salti inaspettatamente ad altre specie selvatiche e le danneggi? Quali rischi possono esserci se dall'ecosistema si eliminano determinate specie? È possibile che malintenzionati usino gene drive per interferire, per esempio, con l'agricoltura? Nel tentativo di scongiurare queste preoccupanti prospettive, un gruppo di ricerca ha inventato un interruttore che deve essere acceso somministrando una particolare sostanza affinché il gene drive possa funzionare. In parallelo, parecchi gruppi sono al lavoro per definire protocolli che guidino il percorso attraverso tutti i singoli passaggi della sperimentazione sul campo dei gene drive. Nel 2016, per esempio, le National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine degli Stati Uniti hanno riesaminato

le ricerche e formulato raccomandazioni per definire pratiche responsabili. E nel 2018 un ampio gruppo internazionale ha formulato un percorso da seguire per il passaggio della ricerca dagli studi di laboratorio al rilascio sul campo. Il gruppo ha preso come caso modello per le sue raccomandazioni l'uso dei gene drive per il controllo della malaria in Africa, dove, dicono gli esperti, si potrebbero avere i massimi benefici per la salute delle popolazioni. Oltre a limitare i rischi inerenti alla tecnologia in sé, molti ricercatori vogliono evitare

Molti ricercatori vogliono evitare anche incidenti e passi falsi che potrebbero provocare contraccolpi normativi oppure a livello di opinione pubblica

incidenti e passi falsi che potrebbero provocare contraccolpi normativi o a livello di opinione pubblica. In un saggio del 2017 sul possibile uso di gene drive per eliminare mammiferi infestanti, Kevin M. Esvelt, del Massachusetts Institute of Technology, e Neil J. Gemmel, dell'Università di Otago, in Nuova Zelanda, temevano che un incidente internazionale potesse rallentare la ricerca di almeno un decennio. «Solo per la malaria – prevedevano – probabilmente il costo di un simile ritardo potrebbe essere misurato in decine di milioni di morti altrimenti prevenibili».

PER APPROFONDIRE

The Top 10 Emerging Technologies of 2017. Scientific American e World Economic Forum, dicembre 2017.

Le promesse della plasmonica. Atwater H.A., in «Le Scienze» n. 467, settembre 2007.

Terapie shock. Tracey K.J., in «Le Scienze» n. 561, maggio 2015.

La lotta alla malaria con il gene drive. Crisanti A. e Galizi R., in «Le Scienze» n. 594, febbraio 2018.

Collegamenti quantistici. Monroe C.R., Schoelkopf R.J. e Lukin M.D., in «Le Scienze» n. 575, luglio 2016.

Le nostre controfingure digitali. Domingos P., in «Le Scienze» n. 603, novembre 2018.



INGEGNERIA

Trovare tossine con la plasmonica

Nanomateriali attivati dalla luce stanno rivoluzionando il settore dei sensori

di Javier Garcia Martinez

Scrivendo nel 2007 su «Le Scienze», Harry A. Atwater del California Institute of Technology ha formulato una previsione: una tecnologia, che chiamava «plasmonica», avrebbe potuto trovare una serie di applicazioni, da sensori biologici ad alta sensibilità fino al «mantello dell'invisibilità». Una decina di anni dopo alcune tecnologie plasmoniche sono una realtà commerciale e altre stanno passando dal laboratorio al mercato. Si basano sul controllo delle interazioni tra un campo magnetico



INFORMATICA

Algoritmi per computer quantistici

Gli sviluppatori stanno perfezionando programmi pensati per girare sui computer quantistici

di Alán Aspuru-Guzik

Nel giro di qualche anno i computer quantistici potrebbero raggiungere o anche superare le prestazioni di quelli classici grazie al significativo lavoro su hardware e algoritmi specifici. I computer quantistici sfruttano la meccanica quantistica per eseguire i calcoli. L'unità base di questi calcoli, il *qubit*, è analogo ai consueti bit (0 oppure 1), ma si trova in una sovrapposizione dei due stati computazionali quantistici: può essere allo stesso tempo sia 0 che 1. Questa proprietà, insieme a un'altra esclusiva dei sistemi quantistici detta *entanglement*, può permettere ai computer quantistici di risolvere certe classi di problemi in modo

ed elettroni liberi di un metallo (tipicamente oro o argento), che rendono conto delle proprietà ottiche e di conduttività elettrica del metallo stesso. Quando sono colpiti dalla luce, gli elettroni liberi sulla superficie di un metallo oscillano collettivamente, formando un cosiddetto «plasmon di superficie». Se il pezzo di metallo è abbastanza grande, gli elettroni liberi riflettono la luce che li colpisce, dando al materiale lucentezza. Ma se misura solo pochi nanometri, i suoi elettroni liberi sono confinati in uno spazio ridotto, che ne limita le possibili frequenze di vibrazione. La frequenza di oscillazione dipende dalle dimensioni della nanoparticella del metallo. In un fenomeno detto risonanza, il plasmon assorbe solo la frazione della luce incidente che oscilla alla stessa frequenza del plasmon (il resto della luce è riflesso). Questa risonanza di superficie può essere sfruttata per realizzare nanoantenne, celle solari efficienti e altri dispositivi.

Una delle applicazioni meglio studiate dei materiali plasmonici sono sensori per rilevare agenti chimici e biologici. In uno degli approcci, i ricercatori rivestono un nanomateriale plasmonico con una sostanza che si lega alla molecola di interesse, per esempio una tossina batterica. In assenza della tossina, la luce che colpisce il materiale è riemessa a un certo specifico angolo. Se invece è presente, la tossina altera la frequenza del plasmon di superficie e, di conseguenza, l'angolo della luce riflessa. Questo effetto può essere misurato con grande precisione, permettendo di rilevare e misurare anche tracce minime della tossina. Alcune start-up stanno sviluppando prodotti basati su questo o su

approcci analoghi: un sensore interno per batterie che permette di monitorarne l'attività come aiuto per aumentarne densità di energia e velocità di carica, o un dispositivo per distinguere le infezioni virali da quelle batteriche. La plasmonica avanza anche nel campo dei dispositivi magnetici di memorizzazione su disco. Per esempio, nei dispositivi di registrazione magnetica termo-assistiti si migliora la capacità di memoria riscaldando brevemente minuscoli punti del disco durante la scrittura. Nel campo della medicina si sta testando in trial clinici la possibilità di curare il cancro con nanoparticelle attivate dalla luce. Le nanoparticelle sono somministrate nel sangue e poi si concentrano nel tumore. Infine si illumina la massa tumorale con luce della stessa frequenza del plasmon di superficie, provocando il riscaldamento delle particelle per risonanza; il calore uccide selettivamente le cellule tumorali senza danneggiare il tessuto sano circostante.

Le aziende che sfrutteranno la plasmonica dovranno assicurare prodotti a prezzo ragionevole, affidabili, robusti e facili da fabbricare su larga scala e da integrare con altri componenti. Malgrado le difficoltà, le prospettive sono brillanti. L'arrivo dei metamateriali – materiali sintetici a nanoscala in cui i plasmoni generano effetti ottici inconsueti – ha permesso di usare materiali diversi da oro e argento, come grafene e semiconduttori. Future Market Insights predice che il valore del mercato nordamericano per le sole applicazioni ai sensori crescerà dai 250 milioni di dollari del 2017 a 470 milioni entro il 2027.

più efficiente di qualunque computer convenzionale. È una tecnologia entusiasmante, ma anche notoriamente esigente.

Un processo detto decoerenza, per esempio, può distruggerne la funzionalità. I ricercatori hanno determinato che un computer quantistico dotato di qualche migliaio di qubit e strettamente controllato potrebbe essere messo in condizione di resistere alla decoerenza mediante una tecnica detta di correzione quantistica degli errori. Ma i più grossi computer quantistici sviluppati finora in laboratorio – gli esempi più notevoli vengono da IBM, Google, Rigetti Computing e IonQ – contengono solo qualche decina di qubit. Queste versioni, che John Preskill del California Institute of Technology chiama computer NISQ (la sigla sta per «quantistici rumorosi a scala intermedia»), non sono ancora in grado di eseguire la correzione degli errori. Eppure, un'esplosione di ricerche su algoritmi ideati specificamente per i computer NISQ potrebbe mettere questi dispositivi in grado di eseguire alcuni calcoli con più efficienza dei computer tradizionali.

Un più ampio accesso alle macchine NISQ da parte di utenti di tutto il mondo ha contribuito a questo progresso, permettendo a un numero crescente di ricercatori di sviluppare e testare versioni su scala ridotta di programmi per queste macchine. E sta fiorendo anche un ecosistema di start-up che si concentrano su aspetti diversi del software quantistico.

I ricercatori trovano promettenti due tipi di algoritmi per i NISQ: quelli di simulazione e quelli di apprendimento automatico. Nel 1982 il fisico teorico Richard Feynman aveva suggerito che una delle applicazioni più potenti dei computer quantistici sarebbe stata la simulazione della natura stessa: atomi, molecole e materiali. Molti ricercatori, me compreso, hanno sviluppato algoritmi per simulare molecole e materiali su dispositivi NISQ (e su computer quantistici a correzione d'errore totale del futuro).

Questi algoritmi potrebbero migliorare la progettazione di nuovi materiali da usare in campi che vanno dall'energia alla medicina.

Inoltre gli addetti ai lavori stanno valutando la possibilità che i computer quantistici siano migliori nei compiti di apprendimento automatico, in cui i computer apprendono da grandi insiemi di dati o dall'esperienza. I test effettuati su un gruppo sempre più grande di algoritmi per dispositivi NISQ hanno mostrato che i computer quantistici possono facilitare compiti di apprendimento automatico come classificare informazioni in categorie, raggruppare insieme oggetti o caratteristiche e generare nuovi campioni statistici da quelli esistenti, per esempio per prevedere quali strutture molecolari potrebbero avere un certo insieme di proprietà desiderate. Almeno tre gruppi di ricerca hanno riferito progressi nello sviluppo di versioni quantistiche di un approccio all'apprendimento automatico che usa le cosiddette reti antagoniste generative (GAN), che da diversi anni a questa parte ha conquistato di slancio il campo.

Un certo numero di algoritmi sembra funzionare bene sulle macchine NISQ esistenti, tuttavia nessuno ha ancora esibito una prova formale del fatto che siano più potenti di quelli che possono essere fatti eseguire a computer convenzionali. Si tratta di prove difficili, e per ottenerle potrebbero essere necessari anni. Nel giro di qualche anno probabilmente i ricercatori realizzeranno dispositivi NISQ più estesi e più controllabili, e poi macchine a correzione totale con migliaia di qubit fisici. Quelli di noi che lavorano su questi dispositivi sono ottimisti sulla possibilità che gli algoritmi per i NISQ saranno abbastanza efficaci da dare vantaggi rispetto ai computer convenzionali all'avanguardia, anche se forse dovremo aspettare che siano disponibili macchine a correzione totale degli errori.