



## 重點提要

- 科學家已經可以利用大腦信號，直接控制電腦和其他機器。
- 在未來，一種稱為「機械外骨骼」的全身式義肢，將可以直接與大腦連線。
- 腦波控制義肢和電腦的技術，預告了機器時代的來臨：人類將能發送心智電報，以傳遞思想。

# 終極義肢

透過腦機界面，癱瘓病患已經可以利用腦波控制電子義肢，完成簡單的動作。相信不久之後，「阿凡達」式的分身、腦網、下載記憶，都將逐一現實。

撰文／尼可列利斯（Miguel A. L. Nicolelis）  
翻譯／涂可欣

**過**去30年來，每回收到論文發表前必經的同儕審閱評論時，我都免不了得去處理那些要求我刪除「連結人類大腦和機器的臆測」的建議，因為審閱論文的其他神經科學家並不想鼓吹「這項研究可支持未來更冒險的科學夢想」。在掙扎妥協之際，我總幻想著能提出那些憧憬、讓其他人也放膽思考其可行性的一天。不過我們的實驗進展顯示，這個日子終於來了。

當我面對著極端保守的學術界時，一些科幻作家和電影導演卻毫無保留、甚至有些放縱他們的想像力。光是在2009年，好萊塢就有兩部鉅資製作的電影「獵殺代理人」和「阿凡達」，描繪了科學家如何利用先進的科技來控制、殺害和征服其他人。在這些電影中，腦機界面（brain-machine interface）讓人類能透過替身過生活、談戀愛和作戰，他們的「阿凡達」分身可幫助他們在宇宙中完成困難的任務，有時還在人類本尊的意志控制之下，試圖消滅整個外星種族。

這讓我對即將來臨的機器時代提出另一種不同的想法。在多年研發腦波控制機器人、並且曾認真思考它們可能的影響後，我看到的未來絕不是憂慮和災難，而是充滿樂觀希望、令人期待的。或許是因為我們對這個未來的真面目並不太確定，讓我有一股強烈的使命感，去擁抱這個可將我們大腦從肉身中釋放出來的神奇機會。事實上，考慮

腦機界面的研究可以帶來的廣大人道福祉，我想應該不會有人另做他想吧！

把大腦從身軀的種種生理束縛中「解放」出來，將可讓殘障人士從輪椅上重新站起。不過腦機界面的應用不只如此，在神經社會網絡時代即將來臨之際，讓我們暫且忘記簡訊或推特，在以腦為中心的未來世界裡，你將能和鄰桌同事或新媒體裡的數百萬名群眾，直接進行腦對腦的交流，我稱它為「腦網」。Flickr 將成為遠古歷史，你腦海中浮現的彩霞美景，或是你支持的棒球隊贏得世界大賽的畫面，都可透過無線電頻率的腦波，直接傳到容量有千兆位元組的口袋型硬碟。

## 穿上機械外骨骼

當然，我們現在想像的用電腦下載或模擬整個大腦運作的情境永遠不會成真，畢竟我們人格的精髓（例如是什麼特質讓曼德拉如此不凡）是無法轉載到硬碟上的。但齧齒類動物、猴子和人類的實驗顯示，我們在實驗室裡確實可將大腦直接連接到機器上。根據這些進展，我可預見令人興奮的未來。

未來20年，具有雙向連線、連接了大片大腦組織的腦機界面，將能幫助那些罹患嚴重神經疾病的患者恢復生活品質，數百萬名失去視覺、聽覺、觸覺，無法握物、行走

或是說話的人，都可以經由腦機界面重獲神經功能，他們甚至僅需要用腦波與機器交談，就能夠完成許多過去難以想像的活動。

「再次行走計畫」(Walking Again Project)是我參與創立的一個國際研究聯盟，讓我們可以一窺未來。幾年前，當我在美國杜克大學的實驗室證實連接活腦組織和人造工具的可行性後，我們便開始了這項計畫，目標是研發並植入第一個腦機界面，讓因脊椎創傷或退化性神經疾病而癱瘓的人恢復全身運動的能力。

為了達成這個目標，我們設計了神經義肢，癱瘓患者可透過腦機界面控制全身式的機械外骨骼。這種可穿戴的機器人裝可支撐病患的身體，並讓他們用意志控制上、下義肢。我們這項神經工程學的壯舉，根據的是神經生理學的原理，並透過恆河猴和其他動物的腦機界面實驗，不斷學習改進。

在這些實驗中，一隻名為奧羅拉的恆河猴學會透過腦機界面來告訴電腦游標應該指在哪裡，牠的這項技能後來變得非常嫻熟，就像牠操作搖桿時一樣自然。我們接著在帕金森氏末期患者的試驗，也獲得了成功的結果。更後來，杜克大學實驗室的猴子甚至學會將腦信號透過電腦網路，去控制位於日本的機械腿。

現在我們開始進行反向實驗，將信號傳送回猴子的大腦皮質，像是讓動物知道食物是裝在哪個盒子裡。新一代的神經義肢將需要可以傳入和傳出的雙向溝通能力，穿戴著神經義肢的人在指揮人造腳時，不僅要指揮腳走到下階樓梯，還還能收到義肢已經踩穩的回饋信號，然後才送出下一個指令，讓另一隻腳抬起。

有了和外界聯繫的輸入和輸出線路，我們現在正站在通往「生物電子學」(bionics)未來的路口。腦機界面將會和目前測試中最精密的機械肢體結合，軀幹部份將由類似樂高積木的材料組成，並連接機器手和機器腳，把這看似外骨骼的機器人裝套上癱軟的肢體，即可直接連線到大腦指揮中樞：皮質。



機械外骨骼：或許有一天，殘障人士能利用腦波來控制義肢、自行行走。

要實現讓身障人士穿著腦機界面外骨骼活動的目標，我們還需要更先進的科技。新一代的高密度微電極將可安全植入人腦，可靠地同步記錄下散佈在多個腦區裡數萬個神經元的長期電活性。事實上，腦機界面要能實惠地應用在醫學上，它必須能持續而穩定地大規模記錄腦活性10年以上，期間不需要任何手術維修。

針對個人特別訂作的神經晶片也必須能夠永久性植入，讓我們能適應並處理大腦的電信號模式，並轉化為可控制外骨骼的信號。為了降低大腦皮質感染和受損的風險，這些神經晶片必須具備低功率、多頻道的無線傳輸技術，才能將數千個腦細胞產生的整體資訊，傳送給大小和手機相仿的攜帶型處理裝置，這些處理裝置負責運算大腦內部的運作模型，能即時讀取大腦指揮動作的電信號。

經由腦機界面輸出的信號，是來自分散於多個腦區的神經元群，把運動腦區的原始電信號數位化後，就可命令機械外骨骼的關節動起來，神經信號將與機械外骨骼交互作用，以模擬人類脊髓的功能，這些指令可讓病患踏出一步又一步、加速或減速、彎腰或爬樓梯。執行這些動作時，大腦和機器將會持續傳送並接收對方的信號，是一串沒有間斷的對話。這項技術將在大腦信號和機械反射之間，建立連續的交互作用。

我也預見，在機械外骨骼上將佈滿壓力和伸展感應器，可產生連續回饋信號，通知病患大腦當下的觸覺和本體感覺（偵測機器人裝的位置）。電子微型刺激器



#### 關於作者

尼可列利是神經義肢研究領域的先驅，現為美國杜克大學丁恩講座教授，也是杜克大學神經工程中心的創辦人。他的新書《超越邊界》(Beyond Boundaries: The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines — and How It Will Change Our Lives)即將在今年3月中旬由美國時代出版公司出版，本文是該書的書摘。

(microstimulator) 會將信號送至病患的大腦皮質，或是以光訊號直接啟動皮質上的光敏感離子通道。根據我們實驗室在猴子身上進行的腦機界面實驗，我預計經過幾星期的交互作用後，病患的大腦就會完全將外骨骼視為自己身體的一部份，那時病患就能夠使用腦機界面控制的外骨骼，隨心所欲活動。

## 從神經應用程式到腦網

未來幾十年後，人類若能掌握讓大腦電活性以及與各種電腦裝置之間交互作用的技術，將會是什麼樣的光景？從隨身攜帶的微型個人電腦（或許還是植入式的），到數位化社交活動的分散式無線網路，我們的日常生活看起來和感覺起來，將與今日習慣的生活非常不同。

首先，使用個人電腦裡的操作系統和軟體，會像在探險一樣，我們的大腦可抓握虛擬物體、啟動程式、書寫備忘錄，更重要的是，還能與我們喜愛的腦網裡的成員自由交流，將現有的線上社交網絡大大升級。英特爾、Google和微軟均成立了腦機界面部門，顯示這個概念並非空想。要實現腦機界面，最主要的障礙在於發展非侵入式腦活動偵測法，我有信心未來20年內可找到解決之道。

到那時，不管現在聽起來多麼不可思議的想法，都會變得司空見慣，像是透過意志控制阿凡達分身或人造工具，讓人類的足跡遍及各種偏僻的環境，從深不可測的海洋到遠方的超新星、甚至人體內微小的細胞間隙，人類探索未知境地的飢渴野心，終將獲得滿足。正是在這樣的背景下，我想像人類的大腦終於能從這寄居了數百萬年的肉體上，完成這個劃時代的旅程：透過雙向傳遞、思想控制的界面，操作各式各樣可當做新眼睛、耳朵和手的奈米工具，造訪自然界創造的許多微世界。

從巨觀的角度來看，我們將能派遣遙控特使或外交官，操作各種大小的機器人和太空船，探索宇宙偏遠角落的行星與恆星，將奇怪的地域及風景放在我們心智指尖之下。

在每一步的探索過程中，那些想要延伸自我而展開心智之旅的後代子孫，都會不斷加入他們發展的新工具、他們形成的世界觀，還有與世界交流的方式，這一切都將超乎我們現在所有的想像。這個想法帶給我極大的喜樂和敬畏，我就像500年前的葡萄牙水手一樣，即將結束漫長而驚險的航行，眺望著新世界閃閃發光的白沙灘。

在徹底解放大腦後，一度以實質形體為本的人類定義，是否會因此模糊、甚至消失？在遙遠的未來，我們有沒有可能體驗由集體思維構成的意識網絡、一個真正的腦網？

讓我們先假設腦網果然成真，個人參與者又能否僅透過意念即可溝通，甚至能生動鮮明地體驗對方的感覺和感知，達到沒有隔閡的「心靈融合」？今日很少人會選擇冒這種未知之險，但我們無法預測若是有這樣的機會，未來世代會不會願意嘗試這種難以想像的經驗。

在接納這些驚人的情境可能真的發生、並且相信未來世代會普遍認同集體心靈融合是分享生命、符合道德的途徑之後，我們的後代會不會有一天早上醒來，便意識到他們已經和平創造出了不同的人類？不難想像我們的後代有能力發展出建立腦網所需的科技、巧思和道德規範，經由腦網的媒介，數十億人類同意透過意念與其他人類建立暫時性的直接接觸。

**要實現腦機界面，最主要的障礙在於發展非侵入式腦活動偵測法，我有信心未來20年內可找到解決之道。**

這樣一個龐大的意識集合體，當今任何人都無法想像它看起來或感覺起來會是什麼。它很可能意外提供了人類終極的感知經驗：我們並不孤獨，我們最私密的想法、經驗、痛苦、熱情和慾望，那些讓人之所以為人的最原始特質，都可以與我們的數十億同胞分享。

只需用點想像力，就不難預見我們的子孫在獲得他們的新智慧後，或許會決定跨越人類史詩的另一個分水嶺，為他們的未來世代及宇宙的延續，記錄下人類遺產的豐富性與多樣化。我相信若想保存這樣的無價之寶，只有透過將記憶轉移到數位儲存媒體，整合每一個人親身敘述的獨特生平。這樣的活動將能保護每個人獨一無二的生存經驗、那些曾短暫存在於每個人的心智，但在生命結束時無可避免會消失的東西。自然界很少會這樣虛擲浪費的！

在我退休前，我希望我勇於夢想的努力，有助於這些目標的實現：從今日大腦控制電腦，進步到控制機械外骨骼，或甚至能發送神經簡訊。如果能在那些老是抱怨我的審稿人的聽覺皮質裡，植入我幾十年來想傳達的答案，將會是我科學戰壕生涯裡最甜美的尾聲。 SA

涂可欣是陽明大學神經科學研究所碩士，並曾於美國伊利諾大學遺傳學研究所從事博士研究，現專職科普翻譯。

## ► 延伸閱讀

〈隨心而動——以意念操控機器〉，《科學人》2002年12月號。

〈找尋神經編碼〉、〈讓腦與機器也能溝通〉，《科學人》2007年1月號。

〈駭入大腦〉，《科學人》2009年3月號。