

神經工程學

腦機界面 以意馭動

癱瘓病人靠意念控制肢體
將不再是好萊塢科幻電影的情節。

撰文／尼可列利斯 (Miguel A. L. Nicolelis)

翻譯／涂可欣

SCIENTIFIC
AMERICAN
科學人雜誌

2014

年於巴西舉行的世界杯足球賽，全世界將有數十億名觀眾觀看開幕賽，屆時他們記得的將不只是巴西國家代表隊的得分和對手的紅牌，還有美國杜克大學實驗室計畫在那一天為了克服癱瘓所樹立的重要里程碑：我們將展示以大腦電訊號控制機器義肢的技術。

如果我們能順利完成種種艱鉅挑戰，世足賽將由一名癱瘓的青少年開球。兩支隊伍的球員列隊兩側時，這名少年將穿著全身式機械裝走到球場上，他的雙腿也包裹在這套稱為機械外骨骼 (exoskeleton) 的裝備內。少年先往前走，這是靠他大腦產生的運動訊號來控制：來自大腦的電訊號無線傳送到背包裡體積相當於筆記型電腦的裝置後，會轉換為數位指令，指

揮外骨骼裝，先穩定少年身體，然後啟動機械腿在修剪整齊的草坪上反覆踏步前進。當少年走近足球，腦中想像用一隻腳接觸足球的畫面，300毫秒後，大腦的訊號就會指揮外骨骼機械腳鉤在皮製足球下，接著以巴西風格飛踢出球。

展示我們和歐洲及巴西團隊合作開發的創新科技，將可讓全世界數十億觀眾知道，大腦控制機器的概念不再只是實驗室的示範和對未來的臆測，我們正進入一個能利用工具讓因傷或疾病而造成的不幸殘障者重獲行動能力的新紀元，或許不到10年，我們的技術就能連結大腦和機械、電子或虛擬機器，除了能讓因意外或戰爭受傷的殘障者恢復行動能力，也可造福罹患肌萎縮性偏側硬化症 (又稱路格利克氏症)、帕金森氏症，和其他會破壞運動行為而影響伸手、握物、行走

移動和言語疾病的病患。神經義肢裝置 (也稱為腦機界面) 不只讓科學家能幫助殘障者，還能拓展健康人的感覺與運動技能，徹底改變他們探索世界的方式。

在這想像的未來情境中，我們可用意識主動產生的腦電波，也就是構成人類思維的生物字母，來遙控大、小型機器人，操作遙遠的飛船，甚至讓兩個人透過集體腦網分享彼此的想法和感覺。

意念機器

雖然開球的少年尚未選定，我們也仍在開發輕型全身裝備，但德國慕尼黑技術大學的鄭戈登 (Gordon Cheng) 已著手組裝原型。他是我的好友兼合作夥伴，也是「再次行走計畫」(Walking Again Project) 的發起人之一。再次行走計畫是由杜克大學





尼可列利是神經義肢領域的先驅，他原籍巴西，現在是美國杜克大學醫學院神經科學教授，並兼任杜克大學神經工程學中心主任。

神經工程學中心、慕尼黑技術大學、洛桑瑞士聯邦理工學院和巴西納塔爾國際神經科學研究所組成的國際非營利組織進行，未來幾個月還會有世界各地幾個重要的研究機構和大學，陸續加入這個國際團隊。

這個計畫以杜克大學將近20年的腦機界面先驅研究為基礎。這類研究最早始於1960年代，當時科學家首度嘗試將動物大腦的神經訊號傳送到電腦，再轉換成可啟動機械裝置的指令。從1990年到2010年，我和杜克大學的同事開發了新方法，可在大鼠和猴子的大腦內植入數百根如髮絲般可彎曲的感測微電極。20年來，我們證實了這些柔軟電極在植入大腦後，可偵測到額葉皮質和頂葉皮質（負責自主運動的腦區，內有一個龐大的神經線路）數百個神經元產生的動作電位（action potential）。

有整整10年，腦機界面的動物實驗都是用大腦訊號來指揮機械肢體（手臂、手和腳）的運動，但是在2011年，我們實驗室有了重大突破，有兩隻猴子學會靠大腦神經指令，移動電腦裡分身的手臂來觸摸虛擬世界中的物體，並且能把虛擬物體的「人造觸感」反饋給大腦，電腦程式訓練猴子體會當大腦控制虛擬手指碰觸物體時的感覺。

在神經科學家、機器人專家、電腦科學家、神經外科醫生和復健專家組成的國際團隊協助之下，再次行走計畫利用動物實驗的發現，發展全新方法來訓練重度癱瘓病患使用腦機界面，重獲全身運動能力。事實上，開球少年會在可營造虛擬現實的自動虛擬環境室（Cave Automatic Virtual Environment）中學步。這個房間的每面牆（包括天花板和地板），都是投射屏幕，測試者戴上3D目鏡和非侵入

式可偵測腦波的頭盔（利用腦電圖和腦磁圖技術），即可沉浸在完全虛擬的環境裡。展示這第一代技術的開球者必須是體重輕的少年，他將學習只靠意念來控制電腦中分身的動作。我們將逐步增加動作的複雜度，最後演進到細微動作，像是行走在起伏的地勢或打開虛擬果醬瓶。

接通神經元

操作外骨骼裝的機械運動比控制電腦裡的分身困難，需要更複雜的技術和訓練。要操控機器肢體，我們除了要將電極直接植入頭顱下的大腦，還得同時讀取更多分散在皮質各處的神經元訊號，我們需要在與運動控制密切相關的額葉運動皮質區，放置許多感測器，這些訊號在正常時會傳送到脊髓，由脊髓神經元控制和協調肌肉的收縮。有些神經科學家相信，意念與肌肉的交互作用，可以透過非侵入式的方法來記錄腦活性，像是腦電波圖，不過這目標目前還無法實現。

杜克大學的里修（Gary Lehew）設計了一個新型感測器，這種方形記錄器在植入大腦後可測得整個三維皮質的訊號。早期大腦感測器是由扁平的微電極陣列構成，靠電極尖端記錄神經電訊號，里修的感測方塊則沿著整個中軸都可感測微電極向上、下和橫側延伸。

我們目前使用的方塊有1000根微電極，每根可記錄至少4~6個神經元，因此每個方塊可以偵測4000~6000個神經元的電活性。如果在負責高層次運動和決定的額葉及頂葉皮質植入數個方塊，即可同時獲得數萬個神經元的訊息。根據我們的電腦模擬程式，這樣的設計足以靈活控制外骨骼雙腳的運動，讓病人恢復自主行走的能力。

重點提要

- 我們現在能靠腦波操作電腦游標和機械手臂，不久後還能控制全身式機械外骨骼，讓半身不遂的人可以行走，甚至優雅地移動。
- 近年來發展的幾個尖端生物電子科技，讓我們可用來自大腦皮質的訊號操縱機械外骨骼的動作。
- 2014年於巴西舉辦的世界杯足球賽，為大腦控外骨骼裝提供了一個試驗場，如果順利的話，將由一名殘障青少年開球。

逐步走向腦控義肢

人類使用義肢已有數千年歷史，這是對戰爭、天生缺陷和其他類型創傷合理的因應辦法。科技進步至今，我們終於可直接透過腦部發出的電訊號來控制人工肢體。

公元前1500~1000年 第一個歷史文獻記錄

當時成書的印度教聖書提到，維席帕拉（Vishpala）在戰役中受傷截肢，她裝上鐵義肢後又回到部隊。



公元前400年 古器物

1858年在義大利南部出土了一具目前所知最古老的義肢，約在公元前300多年以銅和木材製成，用來取代小腿。

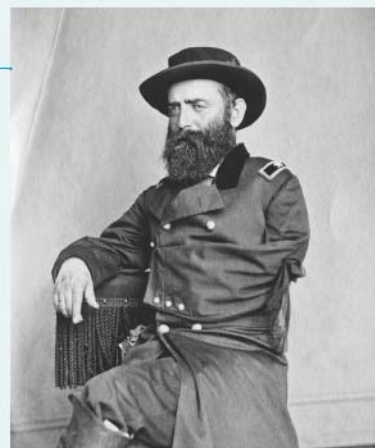
14世紀 槍枝與截肢

當火藥引進歐洲戰場前線時，因傷截肢的士兵大幅增加。16世紀擔任法國數代國王皇家外科醫生的帕瑞（Ambroise Paré），發展了連接上、下肢體到病患身上的技術，並重新引進以縫合線紮住血管的方法。



1861~1865年 南北戰爭

美國南北戰爭導致許多人截肢，陸軍准將麥克葛羅提（Stephen Joseph McGroarty）也失去了一條手臂。政府資金的挹注和較長手術時使用麻醉劑，促進了義肢技術的改良。



1963年 原始的腦機界面

美國耶魯大學的戴爾嘎多（Jose Manuel Rodriguez Delgado）在公牛大腦深處的尾狀核植入無線遙控電極，若按下遙控器的按鈕，可讓衝向他的鬥牛倏然止步。他發明的裝置是現代腦機界面的前身。

1969年 創新實驗

美國華盛頓大學的費茲（Eberhard Fetz）訓練猴子啟動大腦電訊號來控制單一特定神經元的活化，並用金屬電極忠實記錄其活性。

為了處理感測器偵測到的龐大數據，我們改良出新一代神經晶片，當晶片與微電極一起植入病患頭顱下，就能擷取控制全身機械外骨骼所需的基本運動指令。

當然，感測器測得大腦訊號後，還需要將它們傳送到義肢。最近剛從杜克大學取得博士學位的韓森（Tim Hanson），組裝了一個具有128個無線頻道、感測器和晶片的記錄系統，可植入顱內，將記錄到的腦波傳送至遠距接收器。現在第一代神經晶片在猴子試驗中測試成功，我們觀察到猴子全天候無線傳送大腦訊號來操作腦機界面，並於今年7月向巴西政府提出將這項科技應用在人類的許可。

關於我們將來要開球的少年，來自記錄系統的數據將傳送到背包裡的小型電腦組，由幾個數位處理器同時進行各種運算，將運動訊號轉換為數位指令，來控制運動組件或分佈在機械裝各關節的致動器（調整外骨骼義肢位置的硬體元件）。

大腦的力量

這些指令讓穿著外骨骼裝的人可跨出一步又一步，減慢或加快腳步，彎腰或爬樓梯。有些調整義肢位置的簡單指令，不需任何神經輸入訊號，可直接由電子機械迴路處理。這套有如太空裝的裝備不僅能讓穿戴者靈活運動，也能取代脊椎，提供結構性支持。如果能充份發揮腦機界面訊號和致動器電子反射動作彼此交互作用的優勢，腦機界面可望讓世足盃開球者憑著意志力完成動作。

踢球的少年將不僅能走動，還能感覺地面。我們可在外骨骼裝上加上微型感測器，測量特定動作的力道，並將裝備的資訊傳回大腦，產生觸覺與平衡感。踢球者應該可以感覺到腳趾

[大事年表]

1980年代 聆聽腦波

美國約翰霍普金斯大學的喬哥波洛斯 (Apostolos Georgopoulos) 發現了恆河猴以特定方向旋轉手臂時，運動神經元的電活性模式。

1990年代初 連通大腦

尼可列利斯和現在任教於美國紐約州立大學的查品 (John Chapin) 研發的技術，使植入的電極可同時記錄幾十個散開神經元的活性，為後來的腦機界面研究鋪路。

1997年 動作流暢

有微處理器控制的**C-Leg**下腿義肢問世，目前的版本可讓穿戴義肢的人根據活動 (例如騎腳踏車) 調整設定。

1999~2000年 良好反饋

查品和尼可列利斯的實驗室發表了第一個由大鼠大腦控制的腦機界面，動物可經由視覺反饋訊號感覺運動。隔年尼可列利斯發表了第一個僅利用猴子大腦活動操控機械手臂運動的研究。

2008~2011年 刀鋒跑者

雖然在2008年夏季奧運資格賽中失敗，**皮斯托利斯 (Oscar Pistorius)** 卻橫掃2008年殘障奧運，並在2011年韓國大邱舉行的國際田徑聯合會世界錦標賽中晉級400公尺準決賽。

2011年 猴子想，分身做

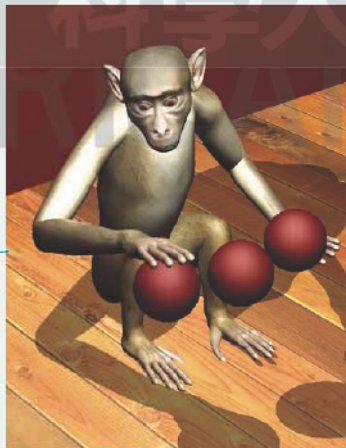
美國杜克大學神經工程學中心的尼可列利斯團隊證明，猴子能用意念控制電腦裡分身的動作。

2012年 從腦到機器臂

美國布朗大學的多諾格 (John Donoghue) 和同事在受試者腦中植入他們研發的**腦門神經界面系統 (Braingate Neural Interface System)** 後，受試者就可以操控機器手臂拿起飲料。

2014年 機械裝開球

尼可列利斯實驗室計畫設計一套機械裝置，讓一名殘障青少年能在巴西主辦的世界杯足球賽上開球。



碰觸到球。

我們長達10年的腦機界面實驗顯示，一旦踢球者開始和外骨骼裝互動，大腦就會將這套機械視為身體的延伸，透過訓練，持續累積機械腳位置和接觸地面的感覺經驗，讓踩在足球場上或走在人行道上時的動作更順暢。計畫的每個階段都需先經過持續而嚴謹的動物實驗，之後才能展開人體試驗。此外，所有程序必須通過巴西、美國及歐洲科學和倫理機構的審核。即使有這麼多不確定的因子，距離第一次公開展示的時間又近，但完成這個重大里程碑的想法，激起了巴西社會對科學的興趣，這是過去很少見的現象。

憑想像力遙控

不管是在世界杯足球賽的開幕賽，或是我們因某些原因錯過第一個機會，延至2016年里約熱內盧奧運，或在殘障奧運等類似重要活動來發表成果，它都不會是僅此一次的特技表演。從已完成的兩階段猴子試驗，我們可看出這項科技的潛力。2007年，我們杜克大學的研究團隊開始訓練恆河猴在跑步機上直立行走，同時記錄200多個皮質神經元的電活性。當時還在日本京都ATR機器人及通訊實驗室的鄭戈登，建立了一個極快的網路通訊協定，讓我們能將源源不絕的神經資訊直接傳送到京都，輸入代號CB1的人形機器人。在這個跨越半個地球的實驗第一階段，鄭戈登和我們杜克團隊證明了，過去研發把意念傳送至機械手臂的演算法，也可以用在雙足運動的神經活動模式上，讓兩隻機械腳行走。

而第二階段的實驗帶來更大的驚奇。我們在美國北卡羅來納杜克實驗室有一隻名為伊多亞 (Idoya) 的猴

子，當牠在跑步機上行走時，腦機界面可將牠的腦部電活性透過網路，持續傳到京都，CB1 機器人接收到這些動作指令後，也幾乎同步開始行走。剛開始CB1的腰部還需要扶持，到了實驗後期，它一收到來自地球另一端猴子大腦的指令後，即可自動行走。

更重要的是，即使身在杜克大學的伊多亞不走了，跑步機靜止時，牠仍可控制遠在京都的CB1的腳步動作。僅透過觀看機器人腳移動的即時影像，伊多亞可在腦中擬想CB1的每一步該怎麼踩；即使牠自己身體靜止不動，仍可繼續產生讓CB1移動所需的腦波模式。這個跨洲的腦機界面試驗顯示，人類或是猴子可能擺脫時間、空間和自身力量的限制，讓腦部的意念指令傳播到遙遠的裝置。

這些實驗指出，我們可將機器送到

人類無法置身的環境，再透過腦機界面來操控。我們可用意念操作人體內的顯微手術工具，或是控制機器人來修復輻射外洩的核電廠。

我們還可以超越生理力量的極限，透過腦機界面來讓我們使出的力量變大或減小。連接猴腦和人形機器人的實驗突破了時間與空間的藩籬：伊多亞的意念只花了20毫秒就跨過半個地球，比牠移動自己肢體還要快。

除了受到未來願景的鼓舞，動物實驗的成功也增添我們實現目標的信心。撰寫這篇文章時，我的祖國已接受我的提議並以此為榮，今年7月，巴西政府答應讓一名半身麻痺的年輕人參加2014年世界杯足球賽的開幕儀式，現在只等國際足球協會的許可而已。

雖然我們在達成願景前，先得排除

許多官僚難題和科學不確定因子，而我卻無法不去想像那短暫而名垂青史的一刻：在翠綠的足球場上，一名癱瘓的巴西少年在30億人的注目下站了起來，靠著自己的意志再次行走，最後將球踢進球門，在這掌握了足球賽藝術的國家，為科學贏得永生難忘的一分。

SA

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

延伸閱讀

Controlling Robots with the Mind. Miguel A. L. Nicolelis and John K. Chapin in *Scientific American*, Vol. 287, No. 4, pages 46–53; October 2002.

Cortical Control of a Prosthetic Arm for Self Feeding. Meel Velliste et al. in *Nature*, Vol. 453, pages 1098–1101; June 19, 2008.

Beyond Boundaries: The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines—and How It Will Change Our Lives. Miguel Nicolelis. St. Martin's Griffin, 2012.

SCIENTIFIC AMERICAN 科學人雜誌

SCIENTIFIC AMERICAN 科學人雜誌

科學教師談《科學人》

武陵中學 生物科 蕭國偉 老師

我認為《科學人》雜誌適合高中生當做課外閱讀補充教材，書中充滿了精美插圖、照片與各學科領域精采的文章，例如在生物科方面，當介紹到基礎生物（上）第二章基因轉殖技術時，可以補充第124期的文章〈死亡交配根除登革熱〉，說明如何利用基因轉殖技術讓登革熱的病媒蚊（雌蚊）喪失飛行能力，以減緩疾病傳播的案例，讓學生對於抽象的學術概念有更進一步的具體認識，增加學習的動機與興趣。

此外還可以探討基因改造蚊子在國際上面臨了什麼樣的爭議？對於生物多樣性、生態環境會造成怎樣的影響？阻止登革熱傳播的益處與尊敬大自然間，人類該如何權衡？這些問題，都可以在第三章生物多樣性與應用生物學時與學生們一起討論，培養學生們議題思辨和批判的能力，以增加學術涵養。

