

人腦與電腦的整合：腦機介面簡介

郭博昭

一、何謂腦機介面：

隨著電腦與生物科技的進步，越來越多的科學家嚐試由大腦直接控制體外的世界，而不須經由四肢或身體，這也是所謂的腦機介面或是腦控技術。先前有部電影The Matrix (譯名駭客任務) 就是這類技術之極至表現，在該部電影中，人類透過置於後腦的一個連接器與電腦相連，之後整個神智就進入電腦的世界，跟電腦內的程式或病毒互動、交談、甚至作戰。而與電腦互動同時，人類的外表沒有任何的表情與動作，呈現類似作夢的狀態，然而內心世界卻是異常豐富，甚至目不暇給而難以招架。這方面的技術與情境真的會發生嗎？目前又進展到什麼程度？

二、神經晶片：

於細胞生物學方面，近十年來德國與其他國家的學者已嚐試在積體電路(IC)之矽晶片上層營造一個類似培養皿的環境，包含水份與足夠的養份，然後在上面培養神經細胞。一開始神經細胞活不了多久就死掉了，但經過不斷努力改良培養液的配方，同時設法增進矽晶片與細胞的親和力，科學家們終於成功的在矽晶片上養活神經細胞。令人驚訝的是這些細胞不但活著，而且還能將它的樹突或軸突跟矽晶片上的接點形成通路，成功的流通電子訊號。恰巧的是微電腦線路與神經細胞有著本質上的雷同，他們都是以有或無，1或0二進位的方式傳遞訊息，而且同樣的具備“或”、“且”等邏輯運算的能力。所以當神經細胞與矽晶片結合之後，二者的溝通竟然相當順暢。在這個生物與電子線路融合的零件中，神經細胞可以跟矽晶片完美的構成各式的邏輯運算甚至加減法運算，而且訊號不但可以從細胞傳至IC，也可以從IC傳至細胞，說明了人腦跟電腦是有可能融合而一起運作，未來甚至可以增進

彼此的功能。不過直到目前為止，這方面的實驗仍僅限於非常原始而簡單的功能，甚至不如三、四十年前剛誕生的微電腦，但是有誰能夠想像未來的進步？

三、腦波：

除了細胞生物學家之外，神經生理專家也同樣在努力，但是使用不同的概念與方法。他們並不急於把每個神經細胞單獨分離出來，而是借用神經網路匯聚在一起的現狀。由於神經網路集體運作的時候會產生微弱的電磁訊號，也就是俗稱的腦波，這些腦波可以穿越頭骨與頭皮的屏障傳到頭皮的表面，經由適當的電極接觸，吾人可以將這些腦波加以收集、放大，並呈現在螢幕上或紙上，這就是所謂的腦波儀。腦波在1920年代第一次為人類所發現，八十幾年來人類對腦波的了解已相當豐富。透過睡眠研究者耐心的觀察，我們已經知道大腦在清醒的時候會發出高頻率而低振幅的腦波，在安眠時會發出低頻率高振幅的腦波，作夢時腦波又回到類似清醒的樣子。也透過臨床醫師不斷累積的經驗，我們也知道在癲癇發作時，腦波會呈現非常單調類似正弦波的波型，以將近每秒3次的頻率進行大幅振盪。這些知識在先前一直都用在疾病的診斷與睡眠的判讀，也幫助了不少相關的病人。然而在最近這十幾年來，由於電腦性能的進步與體積的縮小，已開始有學者嚐試將這些原本作為診斷用的腦波當作是一種控制訊號，來控制體外的電腦或是電器用品。

四、主動式腦波控制：

以腦波控制電腦的方法有各式各樣的變化，簡單來說可分成二大類。第一類是主動式腦波控制，或是直接解碼，換句話就是讓電腦能夠解讀腦波的資訊，並下達正確的控制指令。我個人先前有嚐試過類似的實驗，採用一台自製的無線腦波儀將電極貼在頭皮上，而微弱的腦波訊號經過這台腦波儀放大、過濾、數位化並轉換成無線訊號傳遞出去，在十公尺內的接收器收

到這些腦波訊息之後立即分析其成份，當偵測出腦波中特定的波型後，電腦就將一旁的電燈打開，如此就構成一個具體而微的腦機介面或是腦控開關。在這個實驗中，我採用 α 波當媒介，作為開關的指令，原因在於 α 波是一個蠻奇特的腦波，在眼睛張開、大腦完全清醒的時候， α 波並不會出現，在完全熟睡之後 α 波也不會出現，唯獨在眼睛閉起來後但是睡著之前， α 波會明顯的產生。其實也不必等到睡覺的時候，我們在平時只要將眼睛閉上並放空思緒， α 波就會出現。一些修道人在冥想、打坐時 α 波也會產生。這個現象從1920年代人類第一次記錄腦波時就知道了。但是目前為止 α 波的功用仍不明確，或許只是大腦運作時的副產品，其意義還有待科學家去探索。即使我們還不是很了解 α 波，我們仍然可以透過上述的方法，利用 α 波來開關電器。

以 α 波來控制電器雖然有使用方便、不需訓練的優點，但誤判率高而且無法進行太精細的控制則是其缺點。於此有科學家嚐試更細緻的腦波控制方法，在最近幾年的研究中，有學者將腦波電極深入猴子的腦袋中，穿過頭骨直接接觸到大腦內層的細胞。他們將電極植入到大腦的運動區，將運動神經所發出的訊號予以放大，並傳送至旁邊的電腦進行分析。由於電極直接接觸到大腦內部，所以可以得到非常精準的訊息，不論在時間或振幅的解析度都大為提升。於是可以用這些豐富的神經訊息，透過電腦的輔助來控制機器手臂等複雜的電器。在這個實驗中，猴子經過簡單的訓練之後，居然可以用腦波中的“意念”來控制機器手臂，將食物送至其口中。這個技術目前僅在動物身上能夠進行，等到哪一天技術更為成熟之後，想必就會應用在人腦上，屆時勢必會引發科學與哲學上的討論。

五、被動式腦波控制：

前段舉的例子屬於直接解碼的實例，另外有種腦波控制的方式是採用間接解碼。為什麼叫作間接解碼？因為這種技術是利用人眼在注視閃爍的燈光時，在大腦後方同樣會產生閃爍的腦波。這種腦波叫作誘發電位，就是被光

亮所誘導產生的腦波電位，既然是由光所誘發的電位，所以當光在閃動時，這些誘發電位也會跟著同步閃動。譬如說你看到的光一秒閃動3次，在你後腦的腦波一秒也會跟著變動3次，當看到一秒變動6次的光源，後腦腦波就會一秒鐘跟著變動6次。這樣的特性有什麼用途呢？本來也沒什麼用途，但是當電腦逐漸進入每個家庭，當人類每天要花很多時間注視電腦螢幕的時候，這個情況就有了改變。我們可以設計一個程式在電腦螢幕上進行切割，譬如切成左半邊及右半邊，左半邊有一個光點一秒中閃爍3次，右半邊也有一個光點一秒中閃爍6次。當眼睛在看左邊的時候，腦波也會跟著產生一秒3次的波型，當看右邊的時候，腦波會產生一秒6次的波型。所以只要將腦波記錄起來並分析其中的頻率，我們就可知道這個人是在看左邊或看右邊。也許可以規劃成看左邊就是打開電風扇，看右邊就是關閉電風扇，我們只要用眼睛看左或看右就可以達到用腦波來控制電器的開或關。這種方法嚴格講起來並不是直接由意念來進行控制，所以我稱它作間接腦波控制。美國的軍方就想要利用這類技術來控制戰鬥機等武器。最近陽明大學與中央大學的教授們也製造了一個利用眼睛注視開關就可以控制姿勢的病床，對於一些肢體不方便的人，只要眼睛還管用，就可以達到控制病床的目的，這類技術在醫療保健市場上也有很大的潛力。

六、腦波儀之設計：

記錄大腦訊息的技術，目前常見的有腦波、腦磁波與核磁共振影像(MRI)等，其中又以腦波記錄的歷史最悠久而廣泛使用。腦波是在1924年由德國醫師Hans Berger所發現，但一直等到十幾年後才逐漸普及。在1950年代開始大量應用在睡眠研究，並且因為快速動眼睡眠的發現而聲名大噪。腦波記錄的技術從1920年代到目前2008年這近八十多年間，雖然記錄的原理完全一樣，就是將大腦所發出的微弱電訊號(通常小於萬分之一伏特)加以適當的放大與濾波。常見的放大倍率為1000到10000倍，而濾波的範圍在0.5 Hz到50 Hz之間，這些是長久以來不變的標準。但是隨著電子技術的進

步，腦波儀的尺寸可以大幅縮小，從先前一個比人高的機台演變到目前比火柴盒還要小。另一方面，由於電腦科技的進步，讓腦波的記錄與分析也有了長足的進步。於記錄方面，由於IC科技的進展，記錄腦波的方式由磁帶、磁碟而至今天的記憶晶片。於分析方面，也逐漸由傳統的原始波型進入到頻域分析，甚至非線性分析。筆者從2000年開始嚐試自製腦波儀，包括其中的腦波放大器與微電腦記錄系統。因為目前半導體科技的進步，我不需像前輩一樣利用幾十個電晶體設計差分放大器，而是採用新上市的一些IC零件，將複雜而高性能的類比線路完全封裝在一個和米粒般大的IC中，甚至我不需要知道太多電子線路運路的細節，只要知道這些IC接條的定義及使用方式，就可以製作出腦波放大器中最關鍵的差分放大線路。如果沒有這些集體電路，憑著筆者一個電子愛好者的能耐是很難做出一台腦波放大器的。雖說要做出堪用的放大器不難，但是要做出高性能的放大器仍是有其難度，如果再考慮要做到最小的體積與最低的耗電，這些規格湊在一起真的可算是高難度的工作了。不過筆者八年來也一一克服了大部份的問題，現在已經可以製作醫療等級的腦波放大器。在微電腦記錄系統方面，最主要的功能在取代以前的磁帶記錄系統。作法將腦波訊號數位化，儲存在固態記憶體或是所謂的記憶卡裡。爲了要得到高品質的腦波訊號，必須在一秒鐘內測量腦波100次以上，並將這些源源不斷的數據存在記憶卡中。這個新設計的腦波儀，不但可以用在人類的腦波記錄，同時也可以用在動物的腦波記錄上。利用這些自己做的儀器，我們嚐試了一些睡眠研究，之後也順利的將論文發表在醫學期刊。

七、無線腦波儀之設計：

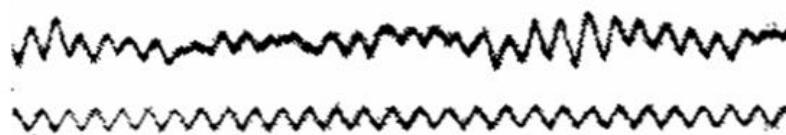
大約在三年前(2005)我開始另外一個新的挑戰，就是將腦波的儀器體積徹底的小型化，小到極限，連放置記憶卡的空間都沒有。那資料的儲存該怎麼處理呢？我們在腦波儀中加入一組無線傳輸電路，將數位化的腦波訊號透過高速的無線傳輸，連續不斷的傳到幾公尺外的電腦，再由這個電腦進行

資料記錄與分析的工作。甚至可以用這個電腦來進行電器的控制，如此一來就完成了一個腦機介面的雛型。在這個設計的過程中，我採用目前成熟的電子元件，譬如無線傳輸電路就是從無線滑鼠中得到靈感。在設計的過程中也曾經考慮到是否採用現有的無線傳輸技術譬如藍芽或無線網路等。評估之後發覺這些現有技術的耗電量都非常大（大於50 mA），導致設計出來的產品如果以電池供電只能使用很短的時間，如果爲了增加使用時間而加大電池，又會增加整個腦波儀的體積與重量，難以做到攜帶方便。在考慮現有技術的限制之後，我決定自己開發專用的無線收發技術。這個技術的目標很單純，就是要省電、輕巧與正確。爲了達到這個目標，我只能坐在電腦面前一行一行將無線電收發的韌體程式打字出來，並把它燒錄到無線收發IC裡進行測試。要將一個構想落實成一個醫療產品，所經過的繁瑣過程很難爲外人所想像，到目前爲止已經開發了三年，幾乎每隔幾天就要修正、改善程式碼，但也是經過這三年不斷的改良，以這套無線技術配合上自己開發的微型腦波儀，我們已經可以做到全世界最小的無線腦波儀之一。目前的成品重量輕達6公克（含電池），然而連續使用的時間超過24小時，並且可以同時傳輸四個頻道的腦波訊號。我們先前就用這個無線腦波儀展示腦波控制檯燈的實驗，達到相當可靠的品質。最近我們又開發了微型的電刺激器，它的作用和無線腦波儀相反，不再是收集腦波訊號，反而是將電訊號傳送到大腦裡面，藉以控制大腦神經的活性。經由無線腦波儀與無線電刺激器的搭配，我們現在已經可以在動物實驗上對動物的大腦進行精細的控制，並立即得知控制的結果以進行修正。

八、腦波分析：

當大腦的活性已經可以透過微小而無線的儀器收集之後，接下來解析腦波的工程就顯得格外重要。在腦波第一次被發現的時候，腦波唯一的分析工具就是腦波圖：將原始腦波一五一十的畫在示波器上，再用人的肉眼去判斷其中的各式樣的波型（圖一）。後來科學家逐漸將腦波分成 α 波、 β 波、 δ

波與 θ 波等。在1970年代之後隨著電腦技術的發展，一項新的技術開始進入到腦波分析中，那就是頻譜分析或是所謂傅立葉轉換技術。從此以後除了看腦波原始圖外，又可以多看腦波的頻譜圖。所謂的頻譜圖就是橫座標是頻率，縱座標是振幅的一種表達方式。然而不管是時域分析或是頻域分析，都無法將腦波的複雜性完全解答，之後有科學家開始提倡頻域和時域的混合分析方法，就是將頻譜連續不斷的重覆，每重覆一次叫做一個分析窗，可長可短，短可至一秒，長可至一分鐘。在每一個分析窗中都進行一次的頻譜分析，這樣子就可以看到接連不斷的頻譜的變化，對於腦波動態的分析又向前邁進了一步。當我在1993年第一次發表腦波分析的論文時，就是採用這種連續重覆的頻譜分析技術，也成功的觀察腦波在麻醉時或是在興奮劑作用時的變化。



圖一，人類第一次記錄到的腦波圖

之後於2002年開始發表睡眠研究的論文，也是用同樣的技術觀察到腦波各個頻率隨著睡眠進展時的動態變化。在2007年利用無線腦波儀進行腦控開關時，也是利用同樣的技術，將腦波進行即時的傅立葉轉換，分離出其中的 α 波段，並以它作為控制電燈的憑據。然而傅立葉轉換有其先天的限制，就是必須應用在線性且穩態的訊號上，才能符合當初傅立葉轉換設計的原理。然而我們的腦波真的是線性而且穩態的嗎？答案是不可能！所以在使用傅立葉轉換時，我們將腦波設限在線性且穩態的條件中，許多非線性與不穩態的特性就因此被邊緣化而受到忽略，令人擔憂的是這些被忽略的可能才是腦波中最重要的成分。於此，一位在美國國家太空總署 (NASA) 長期服務的華人黃鐸院士於1996年後發表了一系列劃時代的論文。他開發了一

個稱爲HHT的分析方法 (Hilbert Huang Transform)，針對非線性與非穩態的訊號進行分析。一開始HHT首先應用在地球科學的訊號上，最近這幾年也逐漸推廣到生物醫學研究上。已經有少數學者開始將HHT用在腦波的分析。和傅立葉轉換分析比較起來，HHT能提供更爲高超的時間解析度。假設傅立葉轉換一秒鐘能夠分析腦波一次而得到一秒的時間解析度，HHT卻能夠在一秒內分析腦波上百次甚至上千次，甚至可以得到毫秒 (ms) 等級的時間解析度。這方面的分析能力對於稍縱即逝、瞬息萬變的腦波訊號而言不啻爲一個超級工具。目前黃鐸院士已回國任職於中央大學，對於有志於相關研究的國人而言是一大福音。

九、控制：

當腦波被收集且分析之後，最後的步驟就是控制。目前控制的技術已經相當成熟，小到控制電視的選台，大到控制人造衛星的發射與降落，都已經完全進入數位化的時代。所謂的數位化控制也就是電腦控制的基本原理，利用電腦二進位的特性，我們可以控制一個電器的開或關，如果再搭配數位類比轉換器，我們還可以進行漸進式的控制，讓燈暗一點或亮一點。這些控制以前都是由電腦獨立完成，當人腦與電腦可以進行適當的整合之後，我們人腦也可以透過同樣技術來控制電器及機械。所以理論上從控制電視的選台到控制火箭的發射，都可能用人腦意念來進行。相對之下，控制技術上比較沒有太大的問題，目前最大的問題還是出現在大腦資訊的收集與分析。所謂21世紀是腦科學的世紀，這句話是現在進行式，多久後會成爲完成式則不得而知。筆者也希望有興趣的老師或學生，大家一起投入腦科學研究的領域，共同來開發這個生物醫學上最後一塊處女地，可能也是最重要的一個環節。

