

# 動動眼， 看得更清楚！

由於視網膜構造特殊，眼球必須不停地轉動，  
才能讓我們看清楚外在的世界。

撰文／蔡介立

每天起床一睜開眼，外界的訊息就開始源源不斷透過眼睛進入大腦。藉由眼睛接收到的資訊，讓我們知道身在何處，得以尋找食物或避開危險及障礙，同時，眼睛也是知識學習與經驗累積的主要資訊來源。眼睛擔負了生存與學習的重要任務，它負責將外界視覺訊息傳遞至大腦，同時也接受大腦的控制來轉動，因此眼睛所展現有關知覺、認知及動作之間的三角關係，向來是科學家極有興趣的研究主題。

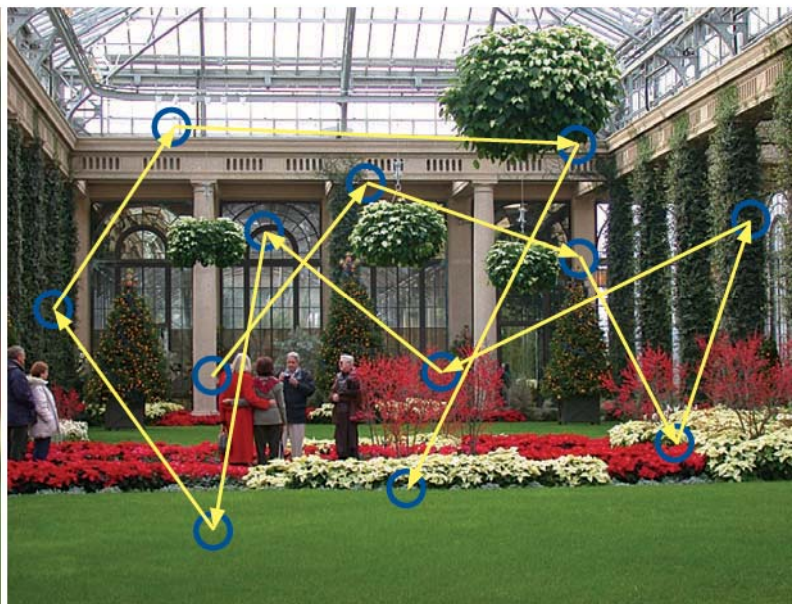
當光透過瞳孔進入眼球之後，會刺激視網膜上的感光細胞，產生微弱的電流變化，電流就沿著視神經傳導到大腦視覺皮質及其他部位。因此視網膜最重要的工作，是將光的能量轉換成神經元的電位變化，一如相機底片的感光功能。然而，相機底片在不同位置的感光效果都相同，視網膜上感光細胞的分佈卻不均勻：以眼睛凝視點為中心，在視網膜上投射影像的位

置附近，感光細胞的密度最高，這塊高密度感光細胞的視網膜區域稱為「中央窩」（fovea），可接收外界兩度視角內的視覺資訊（一度視角約等於眼睛距電腦螢幕60公分時，在螢幕上以凝視點位置為中心的1公分範圍）；離中央窩越遠，感光細胞的密度明顯下降。由於感光細胞的密度決定了視網膜對光的敏感程度，也就是視覺敏銳度的好壞，因此光投射在越接近中央窩的區域，會成為越清晰的影像，越遠離中央窩則影像越模糊。

由於視網膜生理構造上的限制，使得眼睛凝視在一張圖片的某個位置時，只有凝視點附近一小塊區域的影像能在視網膜被看清楚，其餘大部份的區域是看不清楚的。因此，為了看清楚更大的範圍，眼球必須不斷轉動，凝視各個位置，以取得每個位置清楚的視覺資訊，而這些在不同凝視點上看到的影像，就如同一片片的拼圖，最後由大腦負責拼湊出一張完整的圖

## 關於作者

蔡介立是政治大學心理學研究所博士，曾任陽明大學認知神經心理學實驗室助研究員。今年8月，他回到母校政治大學擔任心理學系助理教授，同時兼任政治大學心智、大腦與學習研究中心研究員。他的主要研究領域為認知神經科學、眼球運動與閱讀歷程。



像；同樣的，當我們想看清楚某個位置，大腦就會命令眼睛將視線轉動到該位置上，以獲得視覺上完整的景象。

### 無時無刻不在運動

當我們在閱讀雜誌、瀏覽網頁，或是欣賞畫作，只要是看著靜止不動的影像，眼睛就會在不同位置短暫停留，也就是凝視（fixation）；而從一個凝視點移動到下個凝視點，其間眼睛快速移動的過程稱為顫動（saccade）。

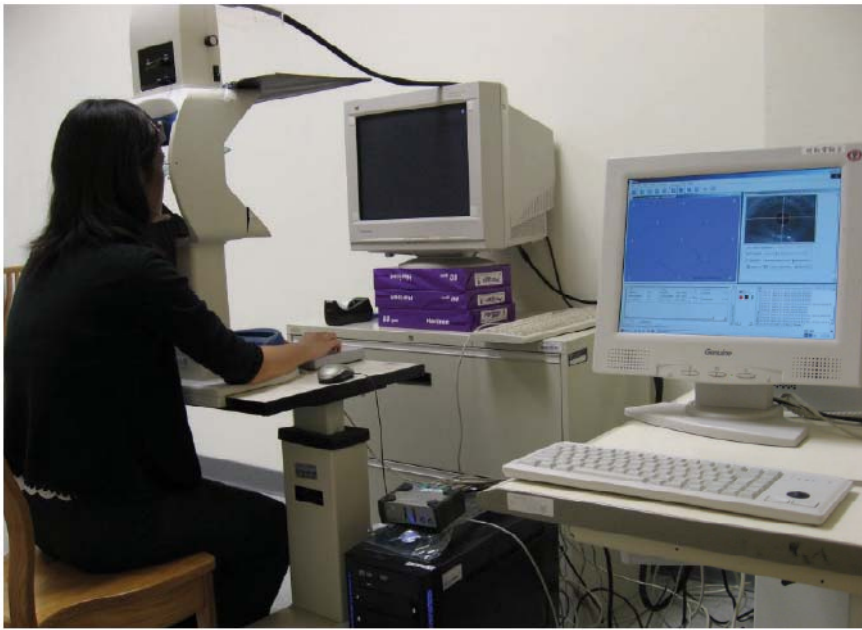
眼睛在看東西時其實是相當忙碌地到處遊移，但是我們常常不自覺。一般而言，眼睛在一秒內就會顫動3~4次，平均每次凝視時間約為0.25~0.5秒，而每次顫動的時間約為0.02~0.04秒，運動幅度可達每秒500度視角。藉由目前技術已經相當成熟的眼球追蹤儀（eye-tracker），科學家可以精確記錄眼球隨時間變化發生的一連串凝視和顫動的軌跡，包括眼睛停在什麼位置、停留多久的時間，以及瞳孔的大小變化等。分析這些資訊，與呈現的視覺資訊特性之間的關係，科學家就可以了解大腦如何處理來自視網膜的視覺訊息，以及如何命令眼球轉動以將視線移到下一個重要的位置。

當眼睛凝視在一個定點時，最重要的工作就是要在凝視的短暫停留時間內，讓外界資訊在視網膜上有穩定的成像，將訊息傳遞到大腦進行辨識及處理。維持成像的穩定性，是取得清楚影像的重要前提，如同現在的相機有「防手震」的功能，就是為了避免因為震動而拍出模糊的照片。

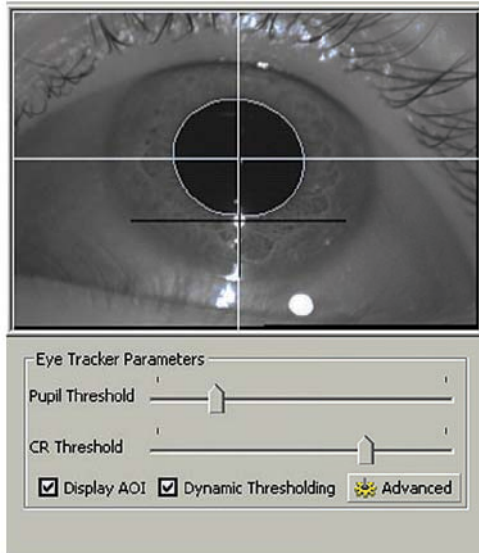
其實早在18世紀，科學家就已經發現眼睛凝視時並非在一個定點上完全靜止不動，而是偶爾會有微幅的漂移（drift）和微顫動（microsaccade）。這種微幅的眼球運動，有一部份是眼球運動控制系統在生理上原本的穩定性就不足，這現象在很多運動神經系統中也很常見，就像我們若把手臂懸在半空中，而要讓手指指向一個定點，無論如何手指總還是會有些抖動。

若單考慮成像穩定性，眼睛在凝視的過程中持續微幅的運動，不是應該對視覺系統造成困擾而讓人看不清楚嗎？事實正好相反，眼睛維持微幅的運動，才能讓我們看見東西，若你有辦法能讓眼睛保持不動，或讓影像和眼睛完全同步移動，使投射在視網膜的成像位置不變時，幾秒後眼前的東西反而會消失！這種「視而不見」的現象，所反應的是視覺神經適應（neural adaptation）的問題。也就是說，

初來乍到一座美麗的庭園，你的眼睛其實並不會馬上看見所有的景物。由於視網膜只有中央窩擁有最高的視覺敏銳度，因此眼睛必須不斷轉動，才能看清楚外界景物。你可能會先看到你所注意的人群（左圖藍圈處），然後轉動眼睛到各個位置（右圖黃色箭頭代表凝視的順序），才獲得庭園的完整影像。



目前常用來研究人類認知功能的眼球追蹤儀，是利用高解析攝影機，在不妨礙視線的前提下拍攝眼睛的影像；然後藉由影像分析技術，偵測眼睛影像中瞳孔所在的位置及區域（右圖）。由於眼球運動時，瞳孔所在位置會隨之偏移，因此眼球追蹤儀可記錄到在不同時間裡，眼球轉動的方向及幅度。接著透過校正的程序，眼球追蹤儀會產生一個演算法則，來計算出眼球轉動的方向幅度大小，和受試者所觀看畫面的座標系統之間的關係。



當我們刺激一個神經細胞，它會有反應，但以同樣強度去刺激一段時間後，它反而不再有反應。這種特性看似缺點，但可讓整個神經傳遞系統運作得更經濟且有效率。既然神經傳遞喜歡有變化的刺激，才不至於因疲乏而不反應，眼睛的微顫動正好可以滿足這樣的需求，讓視網膜的感光細胞受到的刺激有所變化，我們才能一直「看」見東西，不會因凝視反而使眼前景象漸漸消失。

眼球運動的關鍵任務是讓我們看得見且看清楚眼前的景物，解決了視覺神經系統本身特性可能帶來的後遺症。顫動可解決

視網膜上視覺敏銳度不一致的問題，透過眼球的轉動，將影像的各個位置投射到視覺敏銳度最高的中央窩區域，讓我們看得清楚；微顫動則可以解決視覺神經適應的問題，讓凝視的過程中，視神經系統持續傳遞資訊，讓看見的東西不至於消失。

兩者相較之下，眼球的顫動可反映大腦想要尋找新資訊的渴望，把視線帶到我們感興趣或是想注意的地方；而微顫動若單純只是為了維持視覺資訊的新鮮感，那麼只要隨機的運動就可達到此目的，其運動的方向或發生的時間，應該不勞大腦做太精準或有意義的控制。

## 看與不看都有知覺

近年來科學家發現眼球微顫動除了維持視覺資訊的恆定之外，也會受到注意力的調控。注意力的運作就像心智的「眼睛」一般，也有人比喻為探照燈，可使大腦在面對外界大量資訊而資源有限的情况下，選擇重要訊息先處理，再轉移至不同位置上處理其他有用的訊息。

在大部份的情況下，眼睛凝視的位置就是注意力的焦點所在，但注意力的位置也可與凝視位置分離。在一個典型的注意力實驗中，我們隨機在凝視點的左側或右側短暫出現一個需辨識的物體，發現若在目標出現前預先給予目標出現位置的線索，不論是呈現一個指示方向的箭頭或是在該位置上出現一個亮點，辨識目標的速度會比沒有提示線索的情況要快。根據此結果可以推論，給予的線索可在眼睛凝視位置不變的情況下，使注意力移動至提示的位置上，加快辨識目標的速度。

最近的研究證據顯示，凝視過程產生的微顫動可透露出注意力轉移的時間點與方向。這項發現的重要性在於，微顫動不僅與低層次的視覺系統有關，也受到認知因

## 眼球運動與閱讀

我們在閱讀文句的時候，眼睛的視線並非逐字停留，但也無法一目十行。受限於視覺敏銳度與認知處理可用的資源，我們在一次凝視的停留時間內，只能處理凝視點附近一定範圍內的文字。利用眼球追蹤儀，科學家現在可以準確測量閱讀時視線停留的位置、停留的時間，以及移動的軌跡，從文句的各項語言特性如何影響凝視的時間及位置，進而了解大腦進行閱讀的處理機制。

下圖為某位受試者在閱讀一個句子時，眼球追蹤儀每隔2毫秒所記錄到的眼睛視線位置（紅色圓點）。從

圖中可發現，這些紅點在特定的位置上分佈較為集中，這些在連續時間內位置相近的紅點，即為一次的凝視（fixation），在此例中，眼睛視線共有13個凝視位置（藍色圓圈），紅點密度越高，代表凝視時間越長；藍色實心圓則是閱讀此句子的第一個凝視點。在相鄰凝視點之間，會有些稀疏的紅點，反應眼球高速轉動的過程，即為顫動（saccade）。

從一般閱讀的眼球運動證據顯示，眼睛視線並不會凝視每個字，而是大多停駐在有助於閱讀理解的字詞上，並往往會略過較熟悉或意義較不重要的

的字詞。此外，當讀到較困難的字詞時，凝視時間會比較長，也可能凝視不只一次，或是眼睛視線離開後，會回頭再看一次。

利用眼球追蹤儀，科學家可以在一個自然閱讀的情況下，藉由眼球運動的表現來了解閱讀過程中，從認字到理解的動態處理機制；同時，眼球運動的測量在教育與學習上也有應用的意義，科學家可以利用細膩的眼球運動指標，偵測讀者在閱讀中何時何地可能遇到困難，並立即給予適切的輔助說明，將有助於提升閱讀與學習的效率。



- 【圖例】
- 閱讀時的第一個凝視點
  - 凝視位置
  - 每隔2毫秒所記錄到的眼睛視線位置

根據眼球追蹤儀記錄人們在閱讀句子時眼睛的移動軌跡，可發現人們在閱讀時，眼睛不一定從第一個字開始看，視線也不會逐一停留在每個字上。例如「一間畫廊」上的「間」及「廊」各是一個凝視點，而凝視點位置則是根據一群位置變動不大的樣本平均計算得出，可見眼睛即使在凝視時，也非完全靜止不動。

位於十字路口的第一間畫廊經常會展示各個畫家們的畫作

素的影響；此外，微顫動也為注意力轉移的心理運作機制，除了透過實驗操弄來間接推論之外，另外提供了一個直接可測量的具體指標。

眼睛動與不動之間，都會洩露出我們當下的心思與意圖。通常眼睛凝視的位置或顫動的軌跡，大部份和注意力的配置相符，也顯示哪些位置會吸引我們的眼光。然而眼睛要看什麼地方，或是故意不看某些地方，是我們自己可以有意識加以控制的，因此當我們眼睛正視前方不動，注意力還是可以轉移到旁邊其他的事物上。另一方面，微顫動並非我們能夠用意識加以操控，如果它和注意力轉移之間的關係確實穩定存在，則微顫動就能忠實呈現出我

們「想」要看什麼東西，反應出內心真正的偏好。

微顫動最迷人的地方就在於，它不僅解決了生理上神經適應所帶來的影像消褪的危機，也能表現心理上注意力轉移的傾向，雖然只是很微幅的眼球運動現象，卻在視知覺及注意力的功能表現上扮演重要的角色。此外，眼球的視知覺神經系統及運動神經系統都有些先天上的限制，包括視網膜感光細胞分佈不勻、神經適應的現象、運動神經系統穩定性不夠等，但它們的搭配卻有完美的演出，而大腦更是賣力地協調，融合這些不斷跳動的視覺影像，使我們得以看見並感受到這個美麗而完整的世界。

SA

眼球顫動可以解決視網膜上視覺敏銳度不一致的問題；微顫動則可以解決視覺神經適應的問題，並透露出注意力轉移的時間點與方向。