

---

# 眼球軌跡記錄—科學學習研究的明日之星

韓承靜<sup>1\*</sup> 蔡介立<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立臺灣師範大學 科學教育研究所

<sup>2</sup>國立政治大學 心理系

我們對外在事物的認知活動，是一個主動建構的過程，結合著兩個不同方向的認知歷程。一個是由外在世界的物理訊號吸引著我們的注意力的從下而上(bottom-up)的歷程，一個是從大腦中已有的知識系統決定如何去抓取並解讀外在訊息的從上而下(top-down)的歷程。眼睛從一個位置移動到下一個位置，除了由外在視覺刺激決定外，大腦中對於外在事物的認知亦決定著眼睛必須去哪裡看些什麼。眼睛移動去看世界是一個知覺、認知與行動三個不同歷程合作的結果。在生活中無論是辨識物體、閱讀、看圖片以及尋找東西，都必須依賴眼睛的移動去收集各項工作中需要的訊息。透過記錄和分析眼球運動的資料可以幫助我們瞭解各種工作的認知處理歷程。以下分別說明眼球運動的生理機制、眼球運動的特性以及自主性眼球運動的大腦神經通路，並介紹眼睛軌跡記錄(眼動儀)在問題解決之研究上的應用。

## 壹、眼球運動的生理機制

因為眼睛中視網膜上的感光細胞並不是均勻分佈的，只有在視網膜上的中央小窩(fovea)有密度較高的感光細胞，可接

受外界約兩度視角內的視覺資訊。要得到清晰的視覺訊息，眼睛必須讓視覺訊號落這個區域上。當要看清楚更大的範圍時，眼睛必須不斷地轉動，凝視各個位置來取得不同位置清楚的視覺資訊(蔡介立、顏妙璇、汪勁安，民 94)。眼球的肌肉可分為內部與外部兩種，內部的肌肉是虹彩和睫狀肌和睫狀肌，分別負責調節瞳孔的大小和水晶體的焦距。外部的肌肉則有六條，這六條眼外肌(extraocular muscles, EOM)用來產生眼球的上、下、左、右和旋轉等不同的運動以控制眼睛的移動(有興趣讀者可以參考 [http://en.wikipedia.org/wiki/Eye\\_movement](http://en.wikipedia.org/wiki/Eye_movement) 內的圖)。這六條眼外肌分別為：

1. 外直肌(lateral rectus)：可使眼球向外轉(以右眼為例，向右看)
2. 內直肌(medial rectus)：可使眼球向內轉(以右眼為例，向左看)。
3. 下直肌(inferior rectus)：用來使眼球往下轉，即向下看。
4. 上直肌(superior rectus)：用來使眼球往上轉，也就是向上看。
5. 上斜肌(superior oblique)：使眼球以瞳孔為軸，向鼻側旋轉(以右眼為例，逆時鐘轉。)

---

\*為本文通訊作者

6. 下斜肌(inferior oblique):使眼球以瞳孔為軸,向耳側旋轉(以右眼為例,順時鐘轉。)

部分的眼睛移動都包含了數種上述的眼球轉動,若根據眼球運動的特性,又可以分成六類,包括跳視(saccade)、追瞄(pursuit)、輻奏運動(vergence movements)、前庭眼反射(vestibulo-ocular reflex, VOR)、視動震顫(optokinetic nystagmus, OKN)以及保持短暫停住狀態的凝視(fixation)。以下分別詳細說明它們不同的特性。

## 貳、眼球運動的特性

為了保持視覺影像落在中央小窩上,有六種的眼球運動方式來達成這個目的,其中五種是關於眼球運動,一種相對於其它五種較為靜止的凝視(fixation)(Kandel, James, & Thomas, 2000)。關於眼球運動機制又可分成兩大類:第一類是穩定凝視點的機制(gaze stabilizing mechanisms);另一類則是轉移凝視點的機制(gaze shifting mechanisms)(Carpenter, 1988; Zigmond, Bloom, Landis, Roberts, & Squire, 1999)。穩定凝視點的機制可分成三種,其中後兩種屬於非自主反射運動:

1. 輻奏運動:這個運動目的在使眼睛聚焦在不同遠近的物體上的,通常兩個眼球會做互為相反的移動。
2. 前庭眼反射:這是接受半規管傳來的訊號而調整的運動,目的在使頭部移動時

保持視覺影像在視網膜上固定的位置,眼睛會往與頭部移動相反的方向移動。

3. 視動震顫:當頭部以固定速度轉動時, VOR 的效應會成指數衰減。OKN 為補償 VOR 衰退的交互作用機制,使頭部與凝視物體成一固定相對速率時,保持影像仍落在固定的視網膜上。

轉移凝視點的機制則分兩種,一般皆認為這兩種屬於自主的眼球運動(voluntary eye movements):

1. 跳視:是眼睛在不同凝視點之間的迅速移動,屬最普遍的移動方式的,且被認為是最快速的眼球運動,移動速率可達  $800^{\circ}/s$ (Zigmond et al., 1999)。
2. 平滑追瞄移動(smooth pursuit movement):一種為了追蹤某個正在移動物體的眼球運動,移動速率不超過  $100^{\circ}/s$ (Zaccara et al., 1991)。

除了以上五種眼球運動外,還有三種比較細微的運動在凝視(fixation)的時候發生:

1. 震顫(tremor),又稱眼球震顫(nystagmus):為高頻(80Hz)低振幅(150-2500nm)的眼球運動。目前認為眼球震顫產生的原因可能與使視網膜上的感光細胞持續作用有關。
2. 漂移(drift):為低速的眼動,被認為可能與眼球控制系統不完美有關,因此產生一些誤差。
3. 微跳視(microsaccade):一種高速高振幅的眼動,被認為可能是修正漂移使眼睛

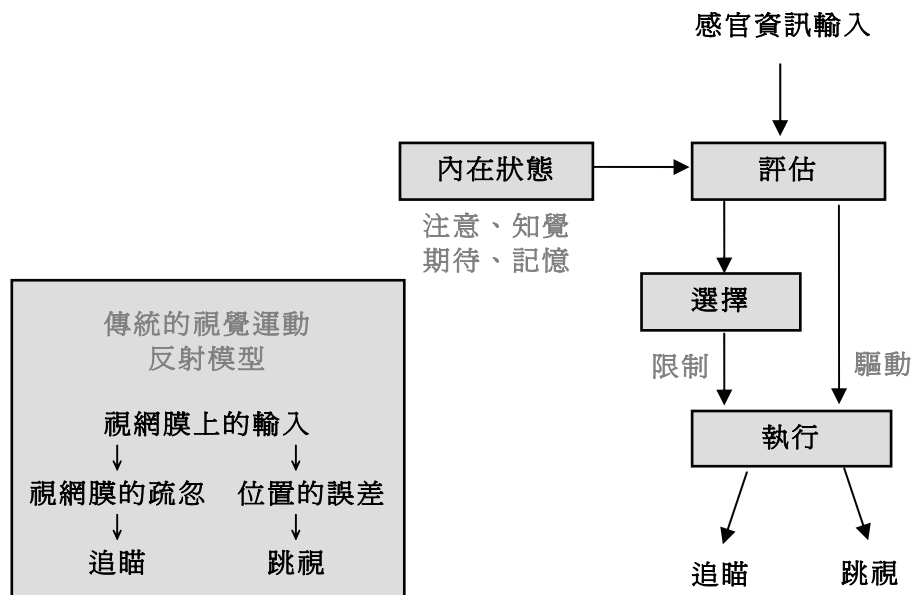
回到正確位置而產生的眼球運動，但目前學界對漂移與微跳視之間維持凝視位置的角色有不同的看法 (Martinez-Conde, Macknik, & Hubel, 2004)。

### 參、眼睛移動的大腦控制機制

眼睛如何決定在什麼時間點落到何處是由大腦神經通路(neural pathways)來決定。以凝視點轉移的機制—跳視及追移為例，過去傳統上的研究認為這兩個運動的產生是由分開的神經通路來決定，且主要受到來自視網膜的輸入訊息的影響。現在則認為這兩個眼球運動方式其實是來自大部分相似的神經通路的作用，且受到大

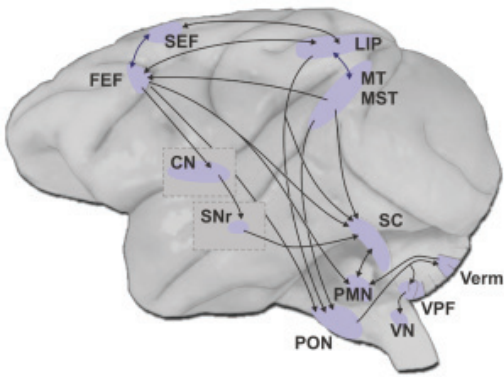
腦內在認知系統狀態（注意力、知覺、期待和記憶等）的影響，是包含抉擇(deciding making)的目標物選擇歷程(process of target selection)（見圖一）(Krauzlis, 2005)。

雖然過去傳統上認為跳視及追瞄這兩個自主性眼球運動的大腦神經通路在解剖上是分屬於兩個不同的路線。但有更多的證據顯示，這兩個眼球運動有互相重疊的大腦神經通路（圖二）。以跳視來說，評估及更新潛在的目標物位置並提供跳視所需的運動指揮的大腦皮質區域，包括後頂內葉區(lateral intraparietal area, LIP)、額葉眼動區(frontal eye fields, FEFs)以及輔助眼動區(supplementary eye



圖一：自主性眼球運動的功能組織假設模型。現今研究認為自主性眼球運動中的跳視及追移受到來自視網膜訊號以及內在心理狀態影響，經數個檢核點提供指引、選擇及執行眼睛如何運動的彈性。(譯自 Krauzlis, R. J. (2005). p.134.)

fields,SEFs)。處理視覺移動及控制訊號需求給追移的大腦皮質區域則包含中顛區(middle temporal areas, MT)、內上顛區(medial superior temporal areas, MST)以及後頂內葉區、額葉眼動區和輔助眼動區的分區(subregions of areas LIP, FEF and SEF)。



圖二：跳視及追移的大腦神經通路網要圖  
 CN 為尾狀核(caudate nucleus)；  
 FEF 為額眼動區；LIP 是後頂內葉區；MT 為中顛區；MST 為內上顛區；PMN 是腦幹前運動核(brain stem premotor nuclei, PPRF, riMLF, cMRF)；PON 是前小腦橋核(precerebellar pontine nuclei)；SC 為上丘(superior colliculus)；SEF 為輔助眼動區；SNr 是中腦黑質網狀結構(substantia nigra pars reticulata)；Verm 則為動眼小腦蚓部(oculomotor vermis)；VN 為前庭神經核(vestibular nuclei)；VPF 為腹傍片葉(ventral paraflocculus)。  
 (引自 Krauzlis, R. J. (2005). p.125.)

眼睛在看外在事物的時候，並非平滑地四處移動，也不是停留在視覺區(visual field)上每一個點，眼睛總是不斷地在短暫的凝視與快速地跳視中轉換著。外在物理影像與內在的認知系統不斷地交互作用來決定眼睛何時(when)移動到哪裡(where)去。在凝視的時候，視覺系統登錄、處理影像訊息；在跳視的時候，則視覺系統暫時處於關閉的狀態。為了瞭解眼球運動與外在訊息之間的關係，必須得到眼球運動的時間空間資訊。多數的眼動研究中研究者想要取得的量化資料，是眼睛凝視在一張圖或一段文字的位置及停留時間。在時間向度上以凝視次數及凝視停留時間(fixation duration)來瞭解視覺知覺系統處理訊息的深度；在空間向度上，則重視凝視位置(fixation position)與跳視長度(saccade length)(Henderson & Hollingworth, 1999)。要知道如何取得眼球運動的量化資料及其意義，要瞭解測量眼球運動的方式及原理。

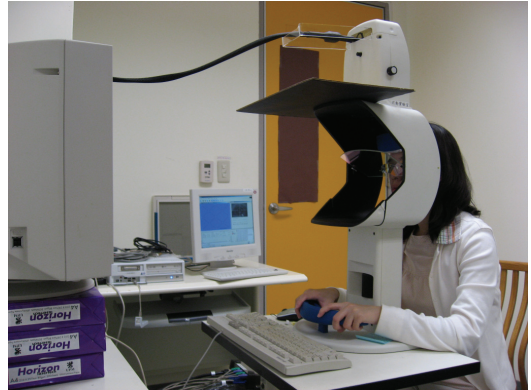
## 肆、測量眼球運動的方式

用來測量眼球運動的方法原則上有三類。第一類利用裝有內建感應線圈的特殊透鏡帶在眼睛上來記錄眼睛的轉動，如 Scleral Search Coil；第二類則使用光學的非接觸式方法來測量眼球運動，如 Video-Based Eye Tracker、Dual Purkinje Image Tracker 及 Infra-red Oculography。第三類則利用眼睛附近的肌電位變化得到眼電圖(electro-oculogram, EOG)來取得眼

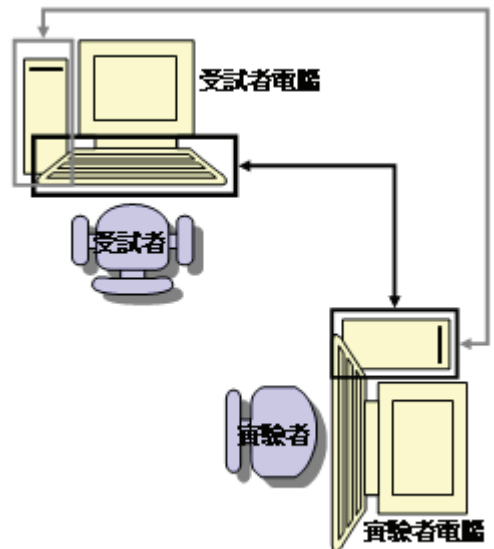
球運動的數據。蔡介立、顏妙璇及汪勁安（民 94）一文中詳細介紹在認知神經科學常見的四種測量眼球運動的方法：Scleral Search Coil、Video-Based Eye Tracker、Dual Purkinje Image Tracker 及 Infra-red Oculography 及其應用原理。因 Video-Based Eye Tracker 使用上較為方便，比較適合在科學教育研究上。以下介紹 Video-Based Eye Tracker 之一 iView X Hi-speed 記錄眼球軌跡紀錄的原理。

Video-Based Eye Tracker 指的是利用攝影機實際拍攝瞳孔的位置且以影像處理程式來取得眼球運動資料的眼球運動追蹤儀。國內常見的機種有 EYELINK 及 iView X Hi-speed（圖三）兩種。以 iView X Hi-speed 為例，Video-Based Eye Tracker 需要的系統設備（圖四）包括實驗者電腦（負責計算眼球轉動位置並紀錄對應外在平面的眼睛所看的座標）、受試者電腦（負責呈現一些讓受試者觀察的刺激材料並記錄受試者的作答反應）以及測試托架（包括攝影機、拍攝光源等）。呈現刺激材料的受試者電腦通過網路與實驗者電腦進行同步通訊。

利用 iView X Hi-speed 來追蹤受試者的眼球移動時，受試者需將頭部固定地靠在儀器前面。受試者頭部上方的位置有攝影機，並有紅外線光源將紅外線射向受試者的眼睛上。受試者透過眼前的反射片看前面的電腦螢幕上呈現的刺激。儀器上採用特殊的反射片，使得可見光不會受到反射片的影響，紅外線則會被反射片反射到



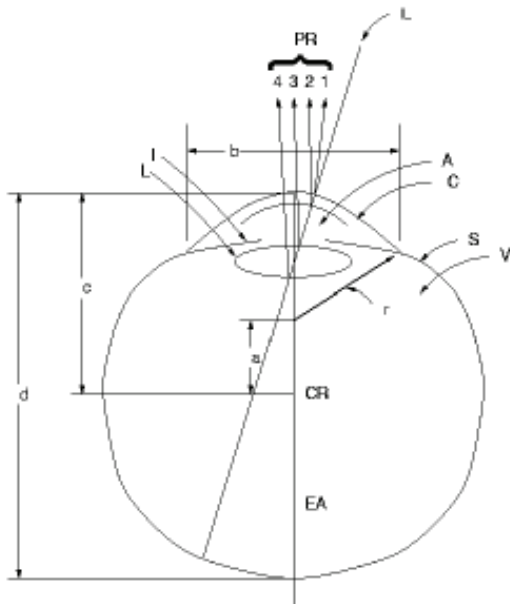
圖三：iView X Hi-speed(SMI)



圖四：Video-Based Eye Tracker 的基本系統設備。Video-Based Eye Tracker 的基本系統設備包含實驗者電腦 (Operator PC) 以及受試者電腦 (Subject PC)。實驗者電腦的主機與受試者電腦的主機以網路線連接溝通，受試者電腦會傳遞刺激呈現及受試者反應的資訊至實驗者電腦。

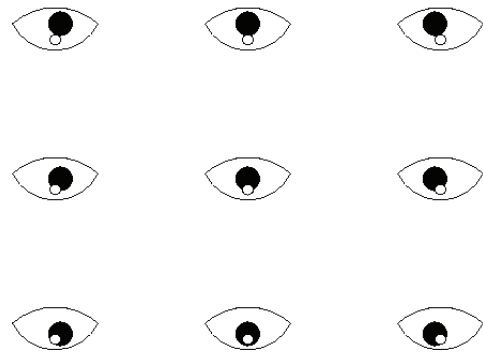
攝影機上，讓攝影機可以清楚的拍攝到受試者瞳孔的輪廓及反射光源的亮點，卻不會影響受試者看螢幕上呈現的刺激。

光線進入眼睛後，在角膜前後方與水晶體前後方的界線產生四組反射影像，稱為 Purkinje-images 或 Purkinje reflections(PR) (圖五)。第一組 PR 是角膜前方與空氣接觸的表面的反射光源；第四組 PR 是來自水晶體與眼球內部的反射光源；第二與第三組 Purkinje-image 因為反射量太小不易觀測到。相對於白光線較不容易量測到反射，而使用紅外線光源時，可以很容易地取出瞳孔的輪廓外圍來判斷視線方向(Duchowski, 2007)。



圖五：Purkinje images。IL 為入射光 (incoming light)；A 為房水 (aqueous humor)；C 是角膜 (cornea)；S 是鞏膜 (sclera)；V 為玻璃體 (vitreous humor)；I 是虹膜 (iris)；L 是水晶體 (lens)；CR 是眼球旋轉中心；EA 為眼軸。(引自 Duchowski, A. T. (2007). P.57)

因瞳孔與角膜對紅外線光源的反射率不同，瞳孔對紅外線的反射低，而角膜對紅外線幾乎是完全反射，讓 iView X Hi-speed 可以藉由拍攝眼睛的影像取得瞳孔與反射光源的影像，利用影像處理技術來計算瞳孔與角膜上反射光的中心位置，藉此計算眼球轉動的角度與方向 (圖六)。



圖六：第一組 Purkinje image 與瞳孔位置之關係。上圖影像是從 Video-Based Eye Tracke 的攝影機得到的瞳孔與第一組 Purkinje image 之相關位置。(引自 Duchowski, A. T. (2007).. P.58)

眼動儀記錄的是隨著時間變化眼球轉動的角度範圍。要得到眼睛看哪裡的資料，必須得到眼球轉動角度相對於外在環境空間位置的對應。因此眼動儀更重要的功能是由凝視位置校正程序 (calibration) 來產生這個眼球轉動角度與凝視空間位置之間對應方程式，用來計算隨後的過程中取得的數據。在校正程序中，會在呈現刺激的平面範圍內 (一般多指電腦螢幕) 的多個位置上，一次呈現一個小圓點。請受試者凝視出現在螢幕上出

現的小圓點，此時眼動儀記錄眼球轉動的數據，然後小圓點將會出現在另一個位置上，受試者則必須移動眼睛盯住出現在新位置上的小圓點，眼動儀再次記錄眼球轉動的數據。一般實驗的校正程序多使用平均分佈在螢幕上 9 個位置來進行校正，稱為九點校正程序(9 point calibration)。眼動儀依據這 9 個凝視位置上眼球相對應的轉動角度及螢幕上此 9 點的相對物理距離來產生估算公式，用來計算眼球轉動角度應對應的螢幕上位置座標。也可依據不同的實驗需要採用 3 點、5 點或 13 點的校正程序。校正用的凝視點越多，估算出來的眼睛凝視位置越精確，但所花費時間也越久。

眼動儀所記錄的資料，主要包括一段時間內各取樣時間點得到的眼球轉動原始數據以及所對應到的呈現刺激電腦螢幕凝視位置。眼動儀每一秒內可記錄的凝視位置的資料數目，稱為取樣頻率，例如，500Hz，即每一秒鐘可記錄 500 個眼睛凝視位置，也就每 2 毫秒(msec)取一次該時間點的凝視座標值。因此要計算某特定位置被眼睛凝視的時間長短，就必須參考該次記錄所使用的取樣頻率，將連續的凝視位置資料個數除以取樣頻率再乘以 1000，公示如下：

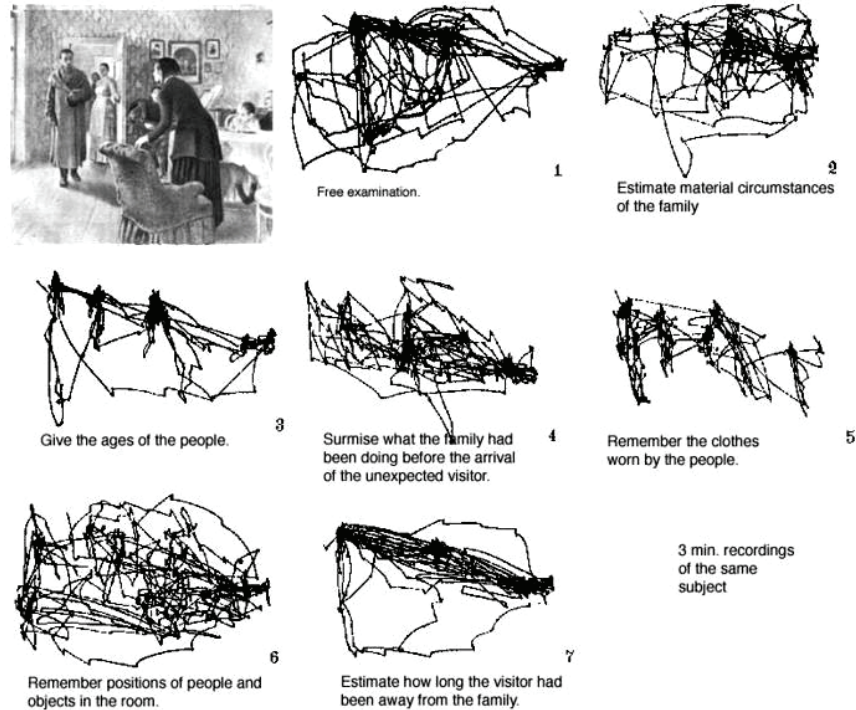
$$\text{凝視時間} = \frac{\text{連續之凝視資料個數}}{\text{取樣頻率}} \times 1000$$

例如，眼動儀以 500Hz 的取樣頻率記錄到連續的 40 個凝視位置座標，則該區域的凝視時間就是 80 毫秒。

眼動研究的範圍很廣，特別是在閱讀上眼動的研究相當多，探討的重點在閱讀時的眼動特性、知覺廣度、跳視過程中的資訊整合、眼睛控制歷程以及個別差異(Rayner, 1998)。眼動研究亦應用在其他認知領域議題上，像是聽覺語言處理、數學、讀數字、問題解決、雙作業處理、臉孔辨識、錯覺、心像以及腦傷研究，甚至是應在用開車這樣的動態系統中。與眼動研究結果相關的應用也不少，像是在軍方的飛行器上，眼動儀可以幫助飛行員在忙碌的任務中，用眼睛的視線直接鎖定想要擊中的目標。在科學教育上眼動的研究可以用來幫助瞭解科學學習或問題解決。

## 伍、在問題解決上的眼動研究

過去在問題解決的研究上，觀察在解決問題時的書寫步驟、解題時間、正確率以及利用放聲思考法得到解題者在解決問題時的片段思考，來推測解題者的思考歷程，並無法全程觀察解題者問題解決的過程。眼動儀在時間與空間向度上提供了不同的數據來幫助問題解決研究瞭解更多(Knoblich, Ohlsson, & Raney, 2001)。早在一九六七年 Yarus 就發現，當觀察者看同一個影像被要求的任務不同時，觀察者的眼球運動模式有所不同(見圖七)，顯示為了達到不同的目的，從上而下的認知歷程驅使著眼睛去注意不同的細節(Yarus, 1967)。反之，從下而上的認知歷程亦會影響著我們的認知。即便是操弄同樣的外在影像，控制著眼球運動也會影響著觀察者的認知活動(Grant & Spivey, 2003)。



圖七：同一觀察者看同一張圖片三分鐘的眼球運動掃瞄軌跡。圖中是同一個觀察者被要求回答的不同問題時的眼睛掃瞄路徑；1.觀察者自由觀察的結果；2.要求觀察者評估家庭的物質狀況；3.要求判斷人物的年齡；4.推測家庭成員在不預期訪客來到前正在做些什麼；5.記住哪些人穿些什麼衣服；6.記住每個人與物體在房間的位置；7.評估訪客離開這家庭多久了。

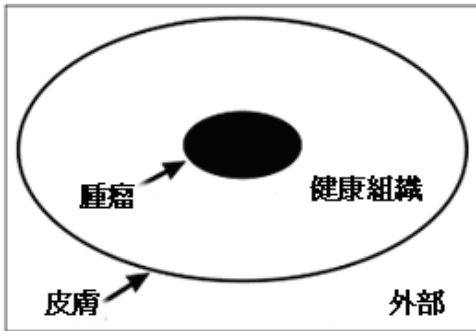
圖引自 [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Yarbus\\_The\\_Visitor.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Yarbus_The_Visitor.jpg) (Lucs-kho, 2007)。

Grant 及 Spivey(2003)利用眼動儀觀察受試者在圖形相關的問題解決時的眼球運動(圖八)。他們觀察到當解題者解決 Duncker 的「腫瘤與雷射輻射」問題(Duncker, 1945)時,成功的解題者相較於不成功的解題者花較多的時間注意在外面的區域(特別是在皮膚區域)而不是在腫瘤與健康組織上。另外發現藉由解

題者對「視覺表徵結構中的改變」的敏感吸引解題者的知覺注意力在皮膚區域上時,受到知覺改變影響的解題者成功解決問題的比率比沒有受到知覺改變影響的解題者多。顯示在問題解決時引導注意力的方向可以改變思考的認知歷程。此外,這個發現引發了一個議題「注意力及眼動是認知過程的結果呢?還



是，認知過程是注意力和眼動的結果？」，值得學界做進一步的探究。



圖八：Grant 及 Spivey(2003)給解題者看的「腫瘤與雷射輻射」圖。解題者必須試圖解決「若要以雷射治療那些無法用傳統手術開刀治療腫瘤的病人，要用什麼樣的方式來利用雷射治療這個病人而不造成腫瘤附近的正常組織的傷害？」這個問題。(引自 Grant, E. R., & Spivey, M. J. (2003). p.463.)

Knoblich、Ohlsson 及 Raney(2001)利用火柴的算術問題(matchstick arithmetic problem)探究洞察(insight)產生的機制。讓人產生洞察的經驗通常來自於必須解決容易讓人陷入僵局的問題。企圖建立洞察產生的理論時常遇到這兩個挑戰，第一個挑戰是必須解釋「當人們已經得到所有必須的資料後為何還是會困在問題中？」；第二個挑戰則是必須說明「僵局如何被解開？」。Knoblich 等人認為大部分的理論都只著重在某一個挑戰的解決。例如，功能固著假說(functional fixedness hypothesis)認為解題者不能解決問題是因為問題中的

物體的心智表徵連結在該物體一般普遍的功能上，解題者無法跳脫這樣的認知。心智車軌假說(mental ruts hypothesis)則認為解題者陷入僵局的原因在於重複地在不成功的解決方法中提取同樣的知識，尋找相同的資訊，造成那條不可能成功的路徑不斷地被活化。這兩種假設屬於回答第一個挑戰的理論。少數的理論則試圖解決第二種挑戰，如格式塔理論(Gestalt theory)認為思考必須產生在知覺區域的不平衡或張力上，問題的解決建立在知覺區域的重新組織以達到新的平衡；變異與選擇的達爾文歷程(Darwinian process of variation and selection)假說則認為新的解決方法建立在原解決方法或多或少的變異上，再去評估這些變異的可能性直到成功的解決方法出現。過去傳統的行為表現測量，如成功解題時間、正確率以及收集的解題過程中的片段思考過程，無法顯示出受試者的在各問題中的注意力分配結構近乎差不多數量的細節。Knoblich 等人的眼動研究的資料加入，顯示受試者陷入僵局的原因是因為問題本身的內在表徵誤導受試者重回原來的解決路徑。因此要產生洞察以解決問題必須受試者思考原先不理會的可能性。Knoblich 等人(2001)的研究還顯示眼動記錄資料加入問題解決研究中，比過去更能在實證上釐清不同理論之間的效力。

## 陸、結語

眼球運動的測量有多種指標可以反映出大腦認知系統對資訊處理的過程與選

擇。利用測量眼動的方式來探討科學學習中相關的認知歷程，不但是是一個自然的研究方法，且取得的數據是立即且直接的，可比收集到傳統科學教育中的不同資料以得到不同面向的佐證。期待眼動儀應用原理以及與問題解決相關的研究介紹能帶動更多關於科學學習的眼動研究。

## 柒、參考文獻

- 蔡介立、顏妙璇、汪勁安（民 94）。眼睛移動測量及在中文閱讀研究之應用。應用心理研究，28 期，91-104 頁。
- Carpenter, R. H. S. (1988). *Movements of the Eyes* (2nd ed.). London: Pion Ltd.
- Duchowski, A. T. (2007). *Eye tracking methodology*. New York: Springer.
- Duncker, K. (1945). *On problem solving* (Vol. 58). California: American Psychological Association
- Grant, E. R., & Spivey, M. J. (2003). Eye movements and problem solving: guiding attention guides thought. *Psychological Science*, 14(5), 462-466.
- Henderson, J. M., & Hollingworth, A. (1999). High-level scene perception. *Annual Reviews of Psychology*, 50, 243-271.
- Kandel, E. R., James, H. S., & Thomas, M. J. (2000). *Principles of Neural Science*. New York: McGraw-Hill.
- Knoblich, G., Ohlsson, S., & Raney, G. E. (2001). An eye movement study of insight problem solving. *Memory and Cognition*, 29(7), 1000-1009.
- Krauzlis, R. J. (2005). The control of voluntary eye movements: new perspectives. *The Neuroscientist*, 11, 124-137.
- Lucs-kho. (2007, 11 February). Image: Yabus The Visitor.jpg. Retrieved 11 June, 2008, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Yabus\\_The\\_Visitor.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Yabus_The_Visitor.jpg)
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., & Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(3), 229-240.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422.
- Yabus, A. (1967). *Eye movements and vision*. New York: Plenum Press.
- Zaccara, G., Baldini, S., Gangemi, P. F., Messori, A., Parigi, A., & Nencioni, C. (1991). A new method for analyzing smooth-pursuit eye movements. *The Italian Journal of Neurological Sciences*, 12.
- Zigmond, M. J., Bloom, F. E., Landis, S. C., Roberts, J. L., & Squire, L. R. (1999). *Fundamental Neuroscience*. San Diego: Academic Press.