

視知覺實驗的顯示器迦瑪校正：理論與實務

陳一平

葉素玲

陽明大學通識教育中心 台灣大學心理系

顯示器是大多數心理學實驗所採用的刺激呈示器 (stimulus display)。然而其輸出強度與程式人員所指定的電壓輸入值之間的關係卻是非線性的，這個現象會嚴重影響以刺激的強度或對比值為實驗變項的實驗結果。在工程界將各種矯正此非線性行為的措施稱為迦瑪校正。本文解說了顯示器的非線性行為的產生原因，以及如何以軟體手段予以精密矯正的方法。實際做螢幕校正工作時所需的工具程式亦以可由網路下載的方式提供有此需要的人士使用。

關鍵詞：顯示器、迦瑪校正、顯示記憶體、調色盤、色彩對照表

目前的認知以及知覺實驗多藉助電腦顯示器呈現視覺刺激，因此瞭解電腦顯示器的特性便成為精良控制視覺刺激所不可或缺的必要知識。對於較高層次的認知課題，如心理語言、思考、決策行為等等，由於所呈現的刺激多為黑白線條或文字，而且低階層的視覺處理對此類高層次認知現象的影響甚微，因此對於以下所討論的顯示器的非線性特性或可忽略不計。但是對於許多視知覺的研究而言，任何視覺刺激的微小差異便極可能成為實驗結果的主要變動來源，因此對於顯示器輸出的各項特性必須有著相當程度的瞭解與掌控，以確保實驗的結果是來自於研究者所欲操弄的刺激變項。在實驗環境裡對影像顯示裝置所需作的考量中，輸出亮度的線性校正（亦即在工程界所習稱的迦瑪校正）是其中最基本且最重要的一個項目。本文將詳述迦瑪校正的原理以及操作實務，並附上相關的程式，希望對於認知與知覺實驗，特別是視知覺實驗的研究者，能提供實質的參考功能。



顯示器的非線性特性

一般的電腦顯示器是利用數位類比轉換器 (Digital to Analog Converter, DAC) 將程式裡所寫入的數位值 (如 8 bit 解析度則可寫入 0-255 共 256 個值) 轉成類比的電壓值, 此電壓的輸出將用以調變 (modulate) 陰極射線管裡的陰極燈絲加熱後所釋放出的電子量。釋放出的電子經加速之後, 成為電子束打在顯示器背面的螢光劑 (phosphor) 上。電子束越強, 顯示器上的輸出值便越高, 因此電子束的強弱值直接反映在顯示器強度上 (見圖 1)。但是輸入的調變電壓與電子束的強度之間的關係並非線性, 而是呈現如圖 2 (A) 的非線性函數。當電壓與顯示器輸出強度值都常態化至其範圍由 0 到 1 時, 這個非線性函數可以下式表示之:

$$I = V^r \text{ ----- (1)}$$

其中 I 代表強度 (intensity), V 代表輸入的電壓值, r 則為迦瑪校正中所欲求得的迦瑪係數。一般顯示器的 r 值大約在 2-3 之間, r 值越大, 此函數圖形則越彎曲。燈絲加熱與釋放電子數之間的非線性關係是整個顯示器非線性行為的肇因, 螢光劑發光的強度與打擊在其上的電子數成正比, 由於整個系統的非線性來源只有一處⁽¹⁾, 因此以公式 (1) 即可作為描述螢幕行為的函數。

非線性所導致的問題

由圖 1 及圖 2 可知, 當一個實驗者在程式中寫入由 0 至 255 遞增的一個灰階梯度時, 若不經迦瑪校正, 則顯示器的輸出強度將會有所扭曲, 而非實驗者意欲顯示的強度值。這種扭曲的情形在數值低時尤其嚴重。例如呈現刺激的程式在顯示器的三個位置分別寫入 1、10 與 20 的強度值, 但是由於顯示器的非線性函數是如圖 2 (A) 呈指數增加的函數, 因此在低電壓值有一大段範圍內顯示器的強度輸出變化有限, 造成的效應是雖然實驗者想要控制的是第二、三個位置的強度值分別為第一個位置的 10 倍與 20 倍, 但是上述三個數值在顯示器上所呈現的亮度卻都相當暗, 也就是說, 低數值的明暗解析度

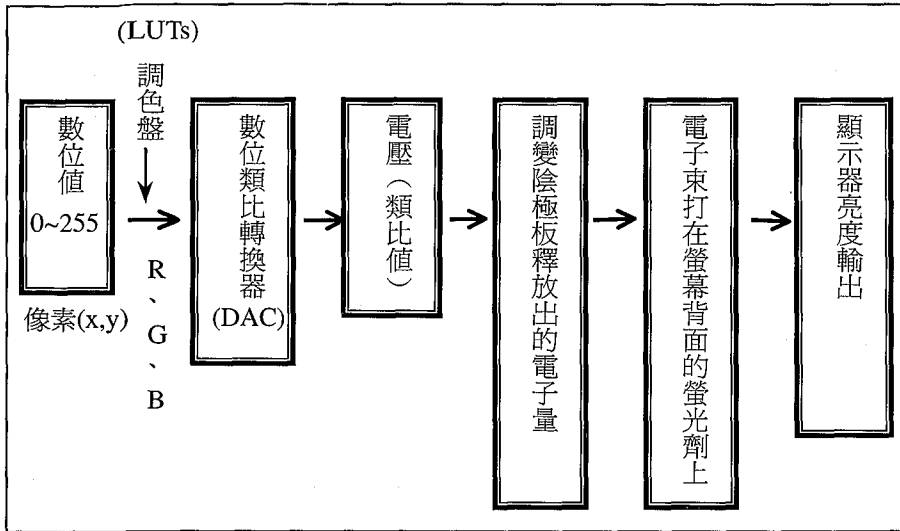


圖 1 程式數值輸入與顯示器亮度輸出之間所經過的步驟

(A) 典型的伽瑪函數圖

(B) 經伽瑪校正後的線性函數圖

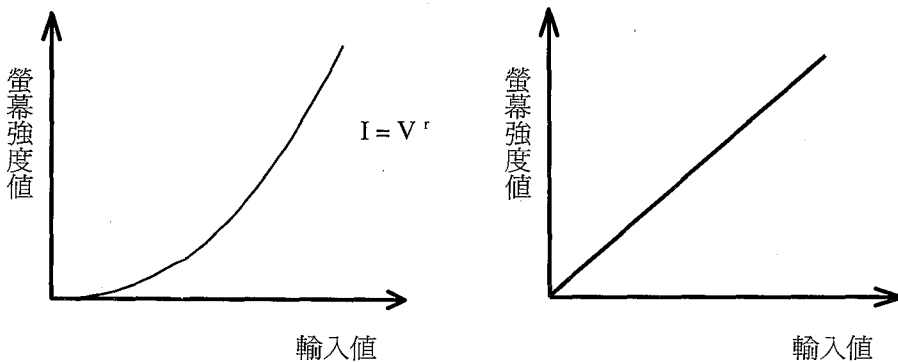


圖 2 (A) 典型的伽瑪函數圖，在此圖中顯示器的強度值與程式中指定電壓值之間呈指數函數的關係，其中低電壓處的強度變化被壓縮，而高電壓處的強度變化被誇大。(B) 經伽瑪校正後的線性函數圖，在此圖中顯示器的強度值與程式中指定電壓值之間呈線性的關係。為使明暗值或對比值的操弄有意義，實驗進行之前必須先做伽瑪校正以得線性的輸入/亮度函數圖。

將變差。另一方面，在高電壓的範圍卻又是被誇大了原有的強度差異。這種低電壓時壓縮顯示器輸出強度的差異，高電壓時則誇大顯示器輸出強度的差異的特性將使得顯示器輸出的明暗程度與程式的輸入所欲呈現者有所不同。顯示器的迦瑪值越大，顯示器輸出的扭曲程度（亦即在低數值處變暗的範圍以及在高數值時變亮的範圍）也就越大。

以視覺研究一般所採用的基本函數正弦波為例，研究者本欲呈現一個強度變化為正弦函數的光柵 (sinusoidal grating)，但由於顯示器的非線性特性，將導致低數值處的亮度輸出被壓縮，而高數值處的亮度輸出被誇大，如此一來，造成在顯示器上所呈現出來的光柵並不真正具有單一正弦波的強度變化值，反而成為一個複雜波形（見圖 3），引進了許多高空間頻率的波形在內。既然人眼所見並非研究者所宣稱與意欲呈現的基本函數，所得結果自然無法驗證任何研究者原先的假設。

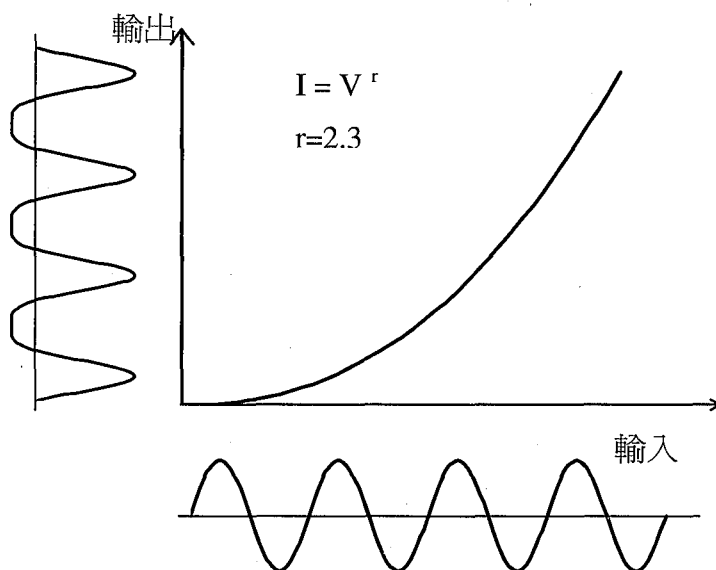


圖 3 未經迦瑪校正的非線性顯示器之輸入輸出關係：輸入一個正弦波函數將得一個複雜波形的輸出。

哪些人需要應用伽瑪校正

由以上的敘述可知，任何灰度值或對比值的相對大小對實驗而言是重要的變項時，便必須對顯示器先做伽瑪校正，使得程式輸入的數值與顯示器輸出的亮度值之間成為線性的關係，如圖 2 (B) 所示。有三類研究者會需要應用伽瑪校正：第一類是視覺研究者，其感興趣的主題即在於視覺系統本身的種種特性。由於在視覺研究的領域中，60 年代至今已成為常態化科學派典的線性系統分析（見 DeValois & De Valois, 1990；陳一平，1999），都以正弦波作為視覺刺激中最基本的單位（稱為基本函數），而其他所有複雜的圖形則是由個別正弦波以不同的空間頻率、相位角、對比值、傾斜角等所組合而成的。這種將視覺圖形以頻率領域的各項參數來表達的方式在視覺理論上有其特定的意涵（Campbell & Robson, 1968；Blakemore & Campbell, 1969），此外，將空間領域的點、線、面等圖形轉換成頻率領域的空間頻率、相位角、對比值、傾斜角度等等來表達，在數學運算上也有其便利之處。誠如上節所言，要使一個正弦函數在輸出時亮度的變化情形的確是一個正弦函數，自然必須對所欲呈現刺激的電腦顯示器做伽瑪校正，而由不同正弦函數所組合而成的複雜圖形也才能確保其正確性。事實上，所有視覺科學領域的研究者，都必須定期的檢測其呈現刺激的電腦顯示器，並定期做伽瑪校正。

第二類是知覺研究者，這些人未必對低階的視覺研究（主要是感覺層次、由下而上的研究取向）感興趣，但其所感興趣的較高層次的知覺領域有時也不得不將刺激強度的變化值或對比值列為重要的影響變項之一；若不經伽瑪校正，此時顯示器的非線性特性將使得強度值或對比值的操弄失去意義。第三類則是認知領域（如語言心理、記憶、思考、認知監控等等）的研究者，當所呈現的刺激有不同的強度變化值或對比值時，例如呈現不同明暗程度的中文字刺激，以檢測特定表現的差異。總之，當任何灰度值或對比值對實驗而言是重要的變項時，對顯示器的伽瑪校正便成為正式實驗之前必須先做的前置處理。只有當程式輸入的數值與顯示器輸出的亮度值之間成為線性的關係時，明暗度或對比值的操弄才有意義。

個人電腦繪圖的基本知識

顯示記憶體

在做電腦繪圖時，所有的影像都是由離散（discrete）的像素所排列而成的，我們是以數字標示某個影像像素的色彩或明暗值，而將這些數字以對應顯示器位置的方式依序寫入電腦裡的顯示記憶體，如圖 4 所示。假設圖 4 的圖形之空間解析度為 800x600 個像素，則每一像素的色彩或明暗值內容便由顯示器左上角的像素為起點，以線性排列的方式儲存於連續的記憶體位址上⁽²⁾。依色彩顯示模式的不同，每個數字所佔用的記憶體大小也有所區別，顯示色彩種類愈多的模式，標示每個像素色彩或明亮值所需的記憶體量也就愈大。在全彩的顯示模式中，每個像素需要三個位元組（byte）來表示，每個位元組各代表 R、G、B 三隻電子槍的亮度值，因此可以調配出 $2^{24} = 16,777,216$ 種不同的色彩。但是若呈現的是黑白影像時，由於 R、G、B 的值在每種灰階的情況均需保持同步，因此只能獲得 $2^8 = 256$ 種不同的灰階值。在顯示記憶體中所寫入的數值，原本應該是程式人員希望獲得的色彩或亮度輸出，但由於上述顯示器亮度輸出的非線性行為，由顯示記憶體的數值映射到最後的畫面時，其間有很大的落差，這也是本文所要解決的問題所在。

數位類比轉換器

在顯示記憶體裡的數字並不能直接驅動顯示器，這些以數位形式存在的數值必須餵進一個數位類比轉換器（DAC），才能將數值轉為顯示器所能接受的類比電壓訊號。由於每支電子槍必須獨立控制，所以在顯示卡上共有三組 DAC，分別負責 R、G、B 的類比輸出。一般做顯示器伽瑪校正時均假設 DAC 的轉換函數是線性的，因為這部份的數位電路邏輯相當單純，理論上可保證相當線性的轉換。但在真實世界中 DAC 晶片的特性不會是完美無瑕的，其轉換函數或多或少也會有一些偏誤，講究的研究者在進行螢幕的伽瑪校正之前，往往會先作 DAC 的線性校正。由於 DAC 的輸出會偏離預測值的原因

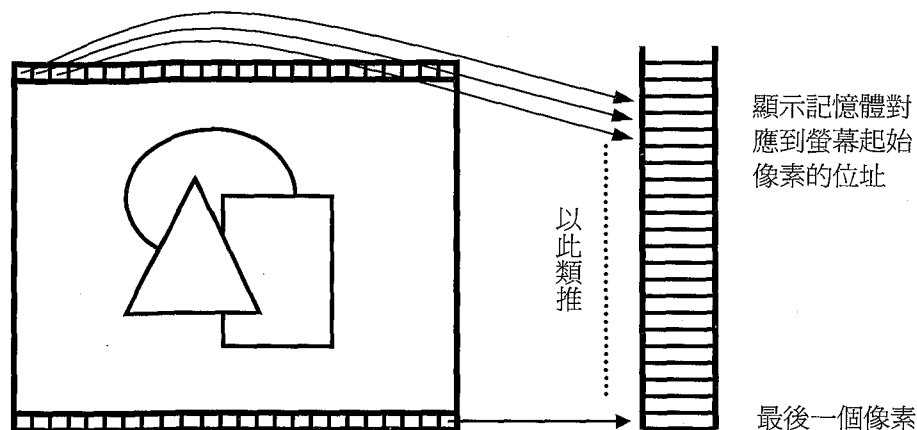


圖 4 簡化的螢幕像素的空間位置與顯示記憶體位址之關係。由螢幕的左上方起，依照從左而右、由上至下的規律，每個像素均依序對應到連續的顯示記憶體位址上。

是來自電路元件本身的規格精密度有限的關係（例如某個電阻的實際電阻值為理想值 $\pm 10\%$ ），一般而言無法像螢幕校正那般，以簡單的數學式加以描述，所以必須以建立實徵輸入／輸出對照表的方式進行。除此之外，對 DAC 作線性校正的步驟及原理與顯示器的伽瑪校正完全相同，在底下會說明其細節。在此僅需注意在做顯示器的伽瑪校正之前，我們必須確定（或有充分的理由假設）DAC 的轉換函數是線性的。雖然 DAC 的校正比顯示器的校正麻煩，不過我們對一特定顯示卡的 DAC 僅需校正一次，其基本特性不太會隨使用時間而改變，這是和顯示器的情況不同的一點。

調色盤／色彩對照表

在所謂的真實色彩模式（true color mode）底下繪圖時，每個像素的 R、G、B 值均須在顯示記憶體中予以指定，假若每支電子槍的灰階解析度為 8 個位元，則每個像素須佔用 3 個位元組的記憶空間，在一般 PC 的繪圖卡若採用 24 位元全彩模式時，即屬於真實色彩模式⁽³⁾。與真實色彩模式相對的，則為

所謂的索引色彩模式(indexed color mode),又稱為虛假色彩模式(pseudo color mode)。在索引色彩模式下繪圖時,寫進記憶體的內容並不是每個像素的 R、G、B 值,而是每個像素所使用的色彩編號。我們以圖 5 來說明索引色彩模式對於色彩的管理方式。圖 5(A)是常見於幼兒著色遊戲的一個例子,在這種著色遊戲中,小孩手上的畫冊均是顏色為空白的線條畫,但是每個欲著色的區塊均已事先標示出應塗進去的顏色號碼,而隨同畫冊所附上的顏料罐或彩色筆也是各有各的編號,著色的方式便是按圖上每個區域指定的號碼以相應編號的顏色塗上去(圖 5(B))。索引色彩模式的工作原理與這個例子完全相同。在繪圖時,寫入記憶體裡的數值只是每個像素的色彩編號,而不是實際決定螢幕所見色彩的 R、G、B 值。色彩編號的可選擇數之多寡,由每個像素在記憶體佔的空間所決定,例如 16 色的顯示模式下,每個像素佔用 4 個位元的空間,而 256 色的顯示模式下,每個像素需佔用 8 個位元,也就是一個位元組的空間。至於每個色彩編號在螢幕上所顯現的顏色為何,則由調色盤裡的色彩對照表所決定。回到圖 5 的類比,在線條畫中的每個區域的色彩編號只是一個索引值(index),與色彩的種類沒有任何先驗的關係,每個索引值對應到什麼顏料,是畫冊製造商隨意武斷地決定的。在索引色彩模式底下的繪圖亦然,記憶體中的索引值只是抽象的數字,真正顯示的色彩內容是必須透過此索引值去查閱調色盤裡的色彩對照表,每個索引值在此對照表中均可查到另外三個預先指定的數值,這三個數值才是最終餵進 DAC 的 R、G、B 值,如圖 5(C)所示。在此需注意每個像素在記憶體所佔的空間大小決定的是每個像素所能攜帶的色彩編號的總數,也就是在同一個畫面中同時能夠顯現的色彩數目,然而實際上可挑選的顏色種類可以比能夠同時呈現的色彩數多得多。決定可挑選顏色總數的因素是色彩對照表裡頭每個電子槍輸出值所佔的記憶容量。例如在 SVGA256 色顯示模式下,每個像素使用一個位元組的空間,因此可表示 $2^8=256$ 種色彩編號,而在此模式下,色彩對照表中每支電子槍的數值佔用 6 個位元,因此實際上可調配出 $2^6*2^6*2^6=2^{18}=262,144$ 種不同的顏色作選擇。在視覺實驗中常用的 Cambridge Research Systems 公司的 VSG 卡,色彩編號數同樣是 256 色,但色彩對照表中的 R、G、B 值可達 15 個位元的解析度,因此可選擇的色彩數高達 $2^{15}*2^{15}*2^{15}=35,184,372,088,832$ 種

之多！

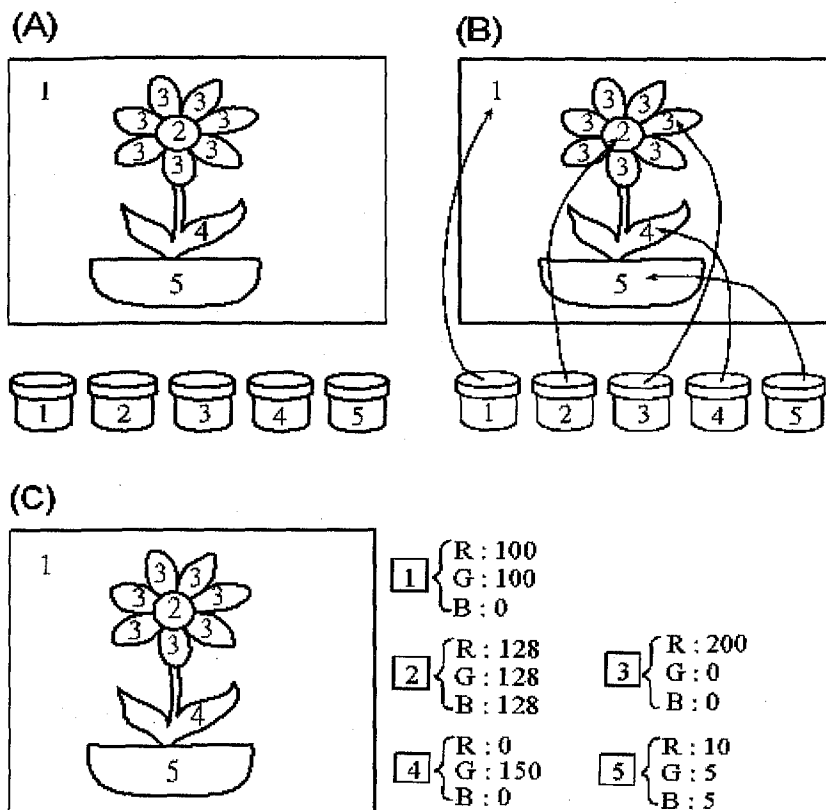


圖 5 (A) 一種幼兒著色遊戲，欲著色的畫面上，每個空白著色區上都有編號。(B) 著色的規則為按照畫面指定的編號，以同樣編號的顏料塗到著色區。(C) 索引色彩模式下，編號與色彩的關係與上述著色遊戲相同，只是每個顏料換為在色彩對照表中的每一欄位所指定的 R、G、B 值。

硬體上，調色盤通常是和 DAC 燒在一起的晶片，其色彩對照表（共三個，分別控制每一支電子槍的內容）則可以藉由程式的控制予以寫入。一般的繪圖函數庫（如 Borland 公司的 BGI 繪圖函數庫）均有控制調色盤的函式可以使用，然而由於 PC 的顯示卡在 SVGA 的格式以上便缺乏真正通用的標

準，所以許多繪圖函示庫並不支援 256 色模式以上的功能，此時只能透過 BIOS 中斷，或查閱所使用的顯示卡之技術手冊，以直接控制硬體暫存器的方式進行，這方面的技術細節請參閱呂澄源（1994）。

索引色彩模式比真實色彩模式要節省許多記憶空間，而所犧牲的不過是同時呈現的色彩數，就可選擇的色彩數而言，前者甚至能超越後者。不過對做實驗的目的而言，一個具有控制調色盤功能的顯示程式具有其他無可替代的好處，這些優點包括允許一些高級繪圖技巧的發揮，迅速變換圖形色彩的能力，以及對本文目的而言最為重要的：提供矯正螢幕非線性行為的方法。在觀念上，我們如果已經得到螢幕非線性扭曲的量化描述，即可導出此扭曲函數的反函數，將此反函數建立在調色盤裡的色彩對照表，即可將影像的亮度值在進入 DAC 之前透過此對照表反向扭曲一次，扭曲後的結果再經螢幕本身的扭曲，便可還原為線性的輸入／輸出關係。實際的操作細則於下文中會有詳盡的說明。

迦瑪校正的操作實務

欲進行螢幕的迦瑪校正，必備的工具是一個可以量測光源強度的光度計（photometer），以及一個能選擇任意電子槍，並能任意調整其輸出強度值的程式，若欲進行 DAC 的校正，則另需一個精準度夠高的電壓計（voltmeter）。

以隨意電子槍顯示隨意灰階的程式

一般在做迦瑪校正時必須先針對程式輸入值與顯示器輸出值測得如圖 2（A）的函數圖，由此求得迦瑪值。原則上，我們須能獨立操弄紅、綠、藍三支電子槍，使得在測量顯示器輸出時，控制在任一特定時間內只有一支電子槍有強度的輸出，其他兩支電子槍的輸出都為零，如此方能一一測量三支電子槍的電壓/亮度的函數圖（如圖 2（A），紅、綠、藍三支電子槍分別得一圖形）。在許多具有 RGB 分色功能的電腦繪圖程式中（如 CorelDraw、Photoshop）均可直接指定某一填色區域的 R、G、B 值，此時可以採用的作法是將顯示器填成某種純色（例如：純紅色）的畫面，每次調整不同的純色

強度，藉由測光計測得顯示器相對應的強度值，理論上也可畫出電壓/亮度關係的函數圖形。問題是，這類電腦繪圖程式往往有內建的不完全伽瑪校正，目的在於使螢幕上所見之色彩儘可能接近彩色列印的結果，在麥金塔系列的電腦，甚至在硬體層次即已預設一個伽瑪校正值，但這些為桌上排版的用途所作的校正，原本的目的就不在於達成螢幕線性輸出的目標，所以其存在不但無法解決實驗用途的校正問題，反而徒增干擾。因此除非能夠「解除」其內建的伽瑪校正，否則根據這些繪圖程式所做出的伽瑪值無法放之四海皆準地應用於其他的程式。基於此，在做伽瑪校正時必須先建立一個不具有「外包」伽瑪校正的程式，此程式要能夠以隨意電子槍顯示隨意灰階的值，例如選定紅槍，並隨意呈現由 0 至 255 的數值，此時顯示器必須有相對應的強度值輸出，可由測光計讀出其數值。

另外有一個技術性的問題必須考慮的，就是螢幕的電源供應器的電流供應能力限制。一般螢幕的電源供應器並不如功率放大器那麼講究，遇到需供應大量電流的情況時，往往會力有未逮，而造成全螢幕高亮度畫面的顯示強度比理想值低的結果，這種情形在標榜具有低輻射護目功能的產品中尤為嚴重（因此在任何操弄亮度的實驗中，應盡可能避免採用全螢幕、高亮度的刺激）。為了避免電源供應器所加進來的額外變數，在做伽瑪校正時，無論欲對哪一種灰階的強度做量測，螢幕畫面上的平均能量須儘可能保持一致，在本文所附之程式中已考慮這個因素，而以一個亮度補償區塊來維持平均能量的不變。

本文所附之程式分為一般 PC 顯示卡，以及 Cambridge Research System VSG 卡所用的兩種版本。其操作介面極為單純，首先受試者必須選擇欲在 256 色或全彩的模式、以及何種螢幕解析度下作校正（VSG 卡的版本則選擇 8 位元或 15 位元的模式），螢幕解析度的選擇並不影響伽瑪校正的結果，然而使用者的繪圖卡的顯示記憶體大小會限制所能選用的最高解析度。使用者並須指定要做 DAC 還是螢幕的校正，兩者的區別在於前者使用的刺激為全螢幕的畫面（DAC 的行為不受螢幕電源供應器的影響，因此使用全螢幕刺激在此不會是個問題），而後者則為兩個區塊的刺激。接著選擇欲進行校正之電子槍（R、G、B 三者其中之一），然後程式會要求使用者所欲輸出的強度值

（在 256 色模式中範圍為 0~63，全彩模式中為 0~255）。之後若是螢幕校正的情況，螢幕上便會顯示兩個區塊，左邊的區塊是目標區塊，其強度便是受試者所指定的值，而此區塊也是測光計所量測的對象；右邊的區塊則是作為亮度補償之用，其功能在於確保螢幕輸出的平均能量在每一種目標灰階的情況下均恆定，所以其亮度與目標區塊之亮度成反比，無論目標區的亮度設為哪個水準，目標區與亮度補償區之平均亮度均維持不變。在 DAC 校正的情況整個螢幕畫面均為目標區，然而我們量測的對象並不是螢幕的亮度，而是繪圖卡的輸出電壓。

測量電壓／亮度關係的函數

應用上述以隨意電子槍顯示隨意灰階的程式，可以分別輸入由 0 至 255（或 0~63，視色彩顯示模式而定）不同的數值，利用測光計讀出在顯示器上的強度值，此強度值的單位可為各種不同量測的單位，只要一致即可。欲得到穩定的讀數，螢幕應開機至少半小時方能做校正，在進行量測時，螢幕的亮度旋鈕應調至最低，以確保輸入值為 0 時，螢幕不會有任何光線發出，而且必須關閉所有光源，以免螢幕的反光不當地影響亮度的讀數。此外，測光計在量取亮度時總是會有小小的讀數波動（小數點以下一位的範圍），尤其是在剛按下「開始量測」的開關、或測光計本身暖機時間不夠久時最為明顯，通常在一、兩秒內讀數會漸趨穩定，這是正常的現象，然而若讀數波動範圍太大而且穩定不下來時，則須檢查實驗室的 AC 電源的供應電壓是否穩定，或是實驗室是否有磁場的干擾。前者可以使用隔離變壓器或市售的穩壓電源供應器加以改善，後者則很難處理。一般測光計會輸出 CIE 色彩座標值（ x ， y ）與明度值（米燭光， cd/m^2 ），此時可以記錄下輸入數值與輸出亮度之量測值，簡單地描點做作圖便可得一電壓/亮度關係的函數圖形。在 0 至 255 的輸入範圍中，取愈多樣本點，當然所得的曲線配合（curve fitting）愈精確，但所耗費的時間便愈長，一般的習慣由 25 點至 64 點不等，研究者可依其實驗室之狀況、校正頻率等因素自行定奪。

做 DAC 的線性校正時，我們仍然使用同樣的程式，但是所量測的是 DAC—

亦即顯示卡對外的輸出電壓，由於 R、G、B 三個輸出均有其專屬的 DAC，每個通道均需個別做校正。在校正 DAC 時，顯示卡的輸出電纜仍須連接到螢幕上，以提供輸出電流正確的阻抗（impedance，在一般 BNC 接頭的電纜為 75 歐姆），因此必須以一個 T 接頭接在欲校正的輸出通道的電纜上，剩下的兩端一個接螢幕，另一個則將訊號導出以便於量測其電壓，請參見圖 6 的說明。由於 DAC 的行為沒有簡單的數學式可預測，所以我們沒有取樣的自由，在實驗中每支電子槍所用的灰階個數有多少，就必須做相同數目的量測。以所附的程式為例，在 256 色模式下每支電子槍須量測 64 個灰階值的輸出電壓，在全彩模式則須量測 256 個輸出值。使用者必須檢視所有輸入／輸出值之間的對應關係，若有某些值偏離線性預測值太大，則在做完下面幾節所述的螢幕校正，並求得矯正函數陣列之後，還須手工修改矯正函數陣列中 DAC 輸出有誤的陣列元素內容。

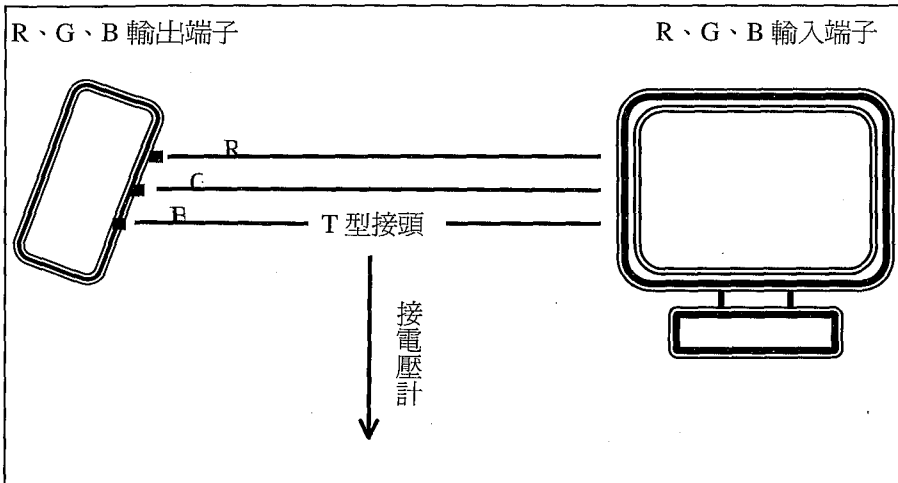


圖 6 做 DAC 線性校正時的接線法

伽瑪值的計算

得到電壓/亮度關係的函數圖形之後，可將此圖形的 x, y 軸做對數轉換

以後再做直線配合，或是利用軟體工具如 MATLAB 或 EXCEL 直接做指數函數的曲線配合（以對數轉換採直線配合的 EXCEL 試算表以及直接做指數函數曲線配合的 MATLAB 程式均可由本文第一作者網頁中下載），求得適合所測各觀察點的函數圖。當輸入與輸出的數值都常態化至 0 到 1 的範圍時，此函數所得的指數即為迦瑪值。若先做對數轉換，則式（1）將成為：

$$\log I = r \log V \text{ ----- (2)}$$

此時若以 $\log I$ 對 $\log V$ 做圖，將得一直線，此直線的斜率即為 r ，迦瑪校正中的迦瑪值。欲得圖 2 (B) 的線性圖形，必須求得圖 2 (A) 的反函數：

$$I = V^{1/r} \text{ ----- (3)}$$

圖 7 所示的即為（3）式的曲線圖。

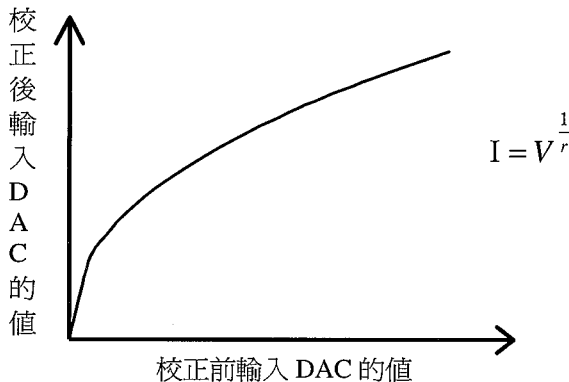


圖 7 迦瑪曲線的反函數圖形

因此，只要將所有輸入數值巢套一個 $1/r$ 的指數，即可矯正顯示器的非線性特性。對一般新的螢幕而言，以式子（1）至（3）所導的校正公式應該即已適用，然而螢幕上的發色螢光劑隨使用時間而衰減的速度相當快，在一個每天均需進行實驗的實驗室中，往往在半年到兩年的時間內，螢光劑所能產生的最大亮度值便會減少到全新時期的一半以下。一般的視覺實驗所重視的是亮度的對比（contrast），而非亮度的絕對值，所以輸出亮度值的衰減本來是不會造成實驗上的困擾的，但是減到一定程度時，其反應會有門檻現象

(thresholding) 發生。此時輸入電壓必須高過某個臨界值，螢光劑才會開始有反應，如圖 8 (A) 所示，當量測結果顯示有此現象發生時，原本的校正公式便不再適用。

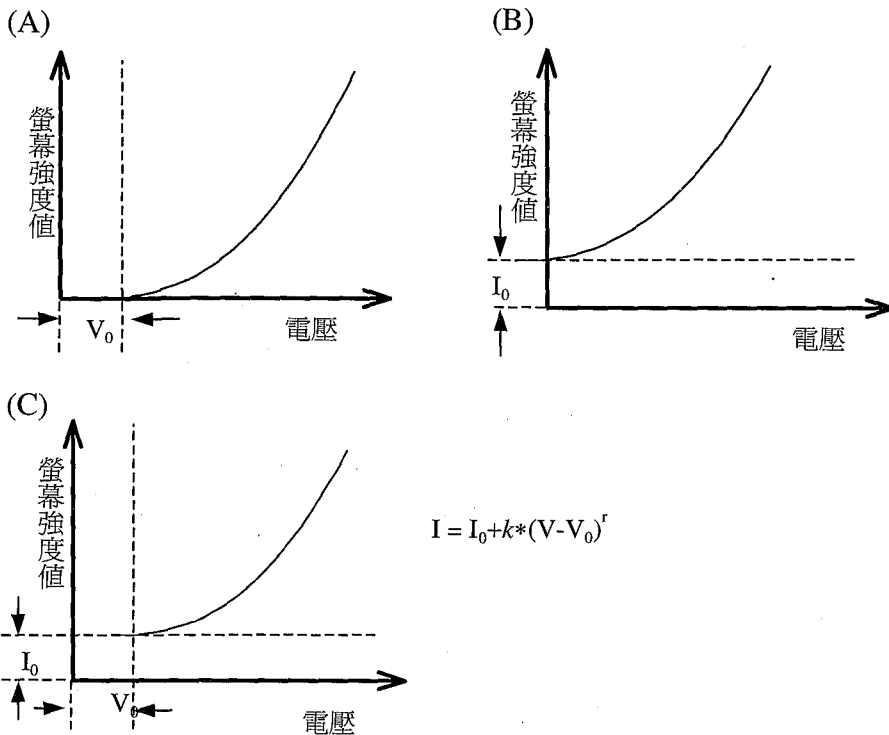


圖 8 (A) 螢幕螢光劑發生門檻現象時的迦瑪曲線。(B) 螢幕的偏壓過高時所得的迦瑪曲線。(C) 考慮了以上兩種情況之後所得的通用迦瑪曲線描述式。

另一種原公式不適用的情況是所用的螢幕電子槍之偏壓 (bias) 過高時，這些螢幕即使在亮度旋鈕調到最低時，畫面也非電源關閉時的全暗狀態，如圖 8 (B) 所示。將這兩個因素考慮進來，我們可以得到適用範圍更為廣泛的迦瑪校正公式，此描述電壓／亮度關係的新公式如下（參見圖 8 (C)）：

$$I = I_0 + k * (V - V_0)^r \quad (4)$$

其中 I_0 是輸入電壓為 0 時所測得的螢幕亮度， V_0 則為欲使螢光劑發光所需的最低輸入， k 則為調整亮度及電壓單位的常數。由 (4) 式可導出其反函數，也就是通用的校正公式：

$$I = [(V - I_0) / k]^{1/r} + V_0 \quad (5)$$

將 $(1/k)^{1/r}$ 視為一常數 c ，則 (5) 式又可表示為：

$$I = c * (V - I_0)^{1/r} + V_0 \quad (6)$$

(6) 式即為做完迦瑪校正之後所應求得的結果。在沒有先做 DAC 校正之前若得到相當良好的曲線配合，通常表示 DAC 的行為是線性的，若整條曲線中有幾個觀測點明顯地偏離預測值，則極可能 DAC 的若干輸出值有偏離正確值的現象，遇到這種情形，就無法省去校正 DAC 的步驟了。

驗證校正結果

做完上述的步驟之後，還須確認所得結果是否正確。以本文所附之程式，鍵入 r 以及 V_0 值，則可用校正後矯正的結果顯示各種亮度的刺激，重複進行每支電子槍、抽樣呈現各種輸入值的步驟，每種亮度值同樣須以測光計測量，並將結果做圖，若校正無誤的話，此時的亮度與輸入值之間的關係應該為一直線。注意在做軟體矯正時，並沒有考慮 I_0 的值，所以矯正後的結果會類似圖 8 (B) 的情況，只是輸入／輸出的關係變為直線而已。這是因為一方面 I_0 無法以軟體的手段控制，另一方面對大多數的實驗而言，零輸入時螢幕是否有微量的亮度輸出並不重要，重要的是在最大及最小輸出之間的範圍內螢幕的行為是否是線性的，萬一對某個實驗而言絕對零點是重要的（例如實驗變項是不同刺激間亮度的比值，而非亮度的差異時），而 I_0 又不等於零時，則解決方法只有更換螢幕、或是在指定刺激的強度值時便預先將此基準值納入考慮。雖然 I_0 在實際矯正時未予考慮，但是在校正過程中的曲線配合若漏掉 I_0 ，則配合結果會有很大的誤差，所以在計算 r 值時切不可忽略 I_0 。

應用程式當中使用校正後的色彩對照表的方式

當以上的程序皆已確定無誤之後，剩下的事就是如何將矯正函數植入應用程式當中。在概念上，我們可將矯正函數建立在調色盤中 R、G、B、三個色彩對照表裡，如此在繪圖時可以完全不用理會伽瑪校正的存在。以下的 C 語言程式段落是以 SVGA256 色模式為範例，相信對具有撰寫繪圖程式經驗的讀者而言不難理解。只要瞭解其原理，要移植到其他模式也不會太困難。

『（範例程式片段開始）

```
#define GRAY_NUMBER 64 /*此處須依色彩對照表的灰階解析度設定*/
```

```
typedef struct LUT_cell { /*定義符合色彩對照表格式的資料型態*/
```

```
    unsigned char Red, Green, Blue;
```

```
} RGBTriplet;
```

```
RGBTriplet PalBuf[256]; /*矯正各個電子槍的函數所在的調色盤陣列*/
```

```
float xx, R_Gamma, G_Gamma, B_Gamma, R_V0, G_V0, B_V0;
```

```
for (i=0; i<256; i++) /*建立矯正函數於陣列中，在此僅舉 R 通道為例*/
```

```
{
```

```
    if (i< GRAY_NUMBER) {
```

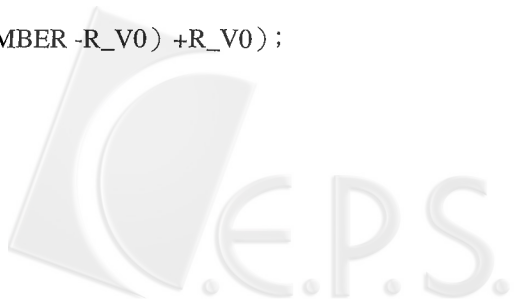
```
        fi = (float) (i/ GRAY_NUMBER);
```

```
        xx = pow (fi, (1./R_Gamma));
```

```
        PalBuf[i].Red = (int) (xx* ( GRAY_NUMBER -R_V0) +R_V0);
```

```
    }
```

```
    else { PalBuf[i].Red =0; }
```



```
}
```

SET_ALL_PALETTE (0 , 256 , PalBuf); /* 以矯正後的函數設定調色盤內容*/

/*以下以平常程序做繪圖工作即可*/

』(範例程式片段結束)

其中 SET_ALL_PALETTE () 並非標準 BGI 函式庫裡設定調色盤的函式，但是它具有一次可直接設完所有色彩對照表的功能，比標準 BGI 函式庫內的 setrgbpalette () 方便，在此抄錄其內容如下：

『 (範例函式開始)

```
void SET_ALL_PALETTE ( int start , int count , RGBTriplet *PalBuf )
{
    int i ;

    if ( start < 0 || count < 0 ) /*錯誤的引數範圍*/
        return ;

    start = min ( start , 255 ); /*起始索引編號，介於 0-255*/
    count = min ( count , 256 ); /*欲設定的顏色個數，1-256*/
    outportb ( 0x3C8 , start ); /*設定顯示卡暫存器 */
    for ( i=0 ; i<count ; i++ ) {
        outportb ( 0x3C9 , PalBuf[i].Red );
        outportb ( 0x3C9 , PalBuf[i].Green );
        outportb ( 0x3C9 , PalBuf[i].Blue );
    }
}
```

』(範例函式結束)

在一般 PC 顯示卡 24 位元的色彩模式下並不支援調色盤的功能，此時便不能使用色彩對照表來矯正，而須在繪圖時以矯正後的顏色替代原始的顏色。例如原來若想畫一個 R、G、B 值各為 i ， j ， k 的點，現在便須以 `PalBuf[i].Red`，`PalBuf[j].Green`，以及 `PalBuf[k].Blue` 來取代 i ， j ， k ，除此以外與平常的繪圖動作並無不同。

程式下載說明

本文所附的程式均可由第一作者的網頁（<http://daisy.ym.edu.tw/vision/>）下載，計有測量伽瑪值的程式（分為一般 PC 繪圖卡版以及 VSG 卡版兩種），以及做伽瑪曲線配合的 EXCEL 和 MATLAB 檔案。目前 EXCEL 檔做曲線配合的方式是用公式 (2)，以最小平方方法做直線配合，這種方法雖然簡便，但是在配合過程中低亮度的觀測值之誤差會比高亮度時的誤差獲得較大的權值，所以不是最理想的方法。MATLAB 程式則直接做指數函數的曲線配合，但對不熟悉 MATLAB 工作環境者，使用較為不便。我們會再利用機會將 EXCEL 檔改寫為使用指數函數配合的版本。

結語

本文所介紹的線性校正觀念並不限用於顯示器上，所有實驗的刺激呈示器（例如虛擬實境用的目鏡、呈現聽覺刺激的耳機及揚聲器等等），只要能用電腦控制，而且刺激的強度是重要的實驗變項時，就可以、也應該以本文介紹的方法做線性校正。良好的實驗除了原創性以及實驗設計等方法學上的考慮須周延之外，也必須在儀器使用的技術問題上力求無瑕。在閱讀視覺以及聽覺研究的經典論文時，我們常常為這些研究者對於細節問題的講究及用心而感動。我們希望本文能夠發揮拋磚引玉的功能，使學術社群內的各方專家能多提供研究實務方面的心得，這對於同儕們互相提高研究工作的效率應有極大的幫助。



註釋

- (1)顯示器還有另一種形式的非線性行爲，亦即螢幕上不同地點的螢光劑之發色效率不同的現象。此謂顯示器的「空間非線性特性」(spatial nonlinearity)。這個問題很難以軟體方式予以矯正，只能以選購信譽良好品牌的高檔產品的方式來避免之（坊間電腦雜誌對顯示器的評比並不包含此項目，因為這個問題不會影響一般工作時的顯示器表現）。這也是為什麼視覺實驗所用的顯示器之價格比一般用途顯示器高數倍的原因。
- (2)實際的儲存方式會依色彩模式之不同而有所差別，詳情比此處所述要複雜得多，有興趣的讀者請參閱 Ferraro (1990)。
- (3)在若干高階繪圖工作站的顯示卡，即使為 24 位元的繪圖模式，仍可保有調色盤的功能，在複雜的索引色彩模式底下工作。

參考文獻

- 呂澄源 (1994)：《TURBO C/C++ 256 色中文繪圖原理與實務》。台北：靖宇。
- 陳一平 (1999)：〈線性系統分析在視覺科學的應用〉。見李江山（主編）：《視覺與認知-視覺知覺與視覺運動系統》。台北：遠流大學館，5-42。
- Blakemore, C., & Campbell, F.W. (1969). On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *Journal of Physiology (London)*, 203, 237-260.
- Campbell, F. W. & Robson, J. G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology (London)*, 187, 437-445.
- De Valois, R.L. & De Valois, K.K. (1990). *Spatial Vision*. Oxford University Press.
- Ferraro, R.F. (1990). *Programmer's Guide to the EGA and VGA Cards*. Addison-Wesley publishing company. （中譯本：EGA 與 VGA 程式設計指南，黃三益、許錦松譯，儒林圖書有限公司）

初稿收件：1999 年 6 月 10 日
二稿收件：1999 年 9 月 27 日
三稿收件：1999 年 10 月 19 日
審查通過：1999 年 11 月 11 日
責任編輯：曾志朗、洪蘭

作者簡介：

陳一平 美國加州大學柏克萊分校心理學博士（生物心理學組）
陽明大學通識教育中心副教授
通訊處：(112) 台北市立農街二段 155 號 陽明大學通識教育中心
電 話：(02) 28267245
傳 真：(02) 28201674
E-mail：ipchen@ym.edu.tw

葉素玲 美國加州大學柏克萊分校心理學博士（認知心理學組）
台灣大學心理系副教授
通訊處：(106) 台北市羅斯福路四段 1 號 台灣大學心理系
電 話：(02) 23670833 (02) 23670794
傳 真：(02) 23629909
E-mail：suling@ccms.ntu.edu.tw



Gamma Correction for Monitors Used in Psychological Experiments

I-Ping Chen

*Center for General Education
National Yang-Ming University*

Su-Ling Yeh

*Department of Psychology
National Taiwan University*

Color monitors are widely used by experimental psychologists as a major visual display device. There is an inherent nonlinear output property of the monitor that can greatly affect the results of experiments where the intensity level or contrast of the stimuli is of any significance. Measures taken to ameliorate this problem have been generally called “Gamma correction” in engineering fields. The physical cause of such nonlinearity, together with the correction procedures by software to the precision for experimental purposes are discussed in this article. Downloadable software tools and instructions are also provided.

Keywords: Monitor, Gamma correction, video memory, color palette, color lookup table