

色彩視覺的三色論及其應用

葉素玲

陳一平

台灣大學心理系

陽明大學通識教育中心

對具有正常色彩視覺的人而言，若能適當選定三種色光，並調整其各自的強度便可以混成各種顏色。此種必須要三色方能達成配對的心理物理實驗，可藉由數學式的推導而知吾人內在處理系統的數目必為三。本文介紹色彩的功能、色彩研究的特色，並以色彩配對實驗解說三色理論（trichromatic theory）的原理以及其在量測與顯色系統方面的應用。適切地瞭解三色論的基本原理將有助於對色彩應用的正確認識，以及演色技術的突破與創新。

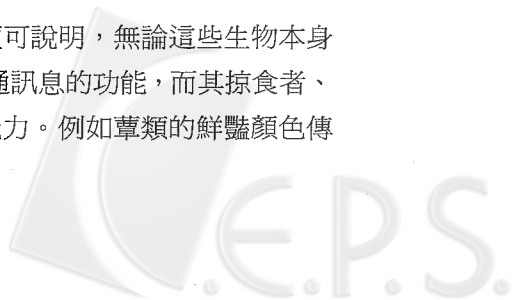
關鍵詞：三色論、色彩配對、國際照明協會、色彩圖

色彩的功能

要談色彩科學的發展與應用，首先必須瞭解色彩在人類視知覺中所扮演的角色。由於並非所有的動物都具有色彩視覺（大多數的家畜如牛、羊、狗、貓等皆不具辨識色彩的能力，哺乳類中僅靈長類以上具有色彩視覺），又由於提供色彩視覺所需的神經網路連結相當的繁複，因此以演化的觀點而言，人類發展出辨識色彩的能力必定有其適應環境的需要所致。對於人類而言，我們認為色彩主要的功能在於溝通訊息、幫助辨識物體與審美三部份⁽¹⁾，茲分述如下。

訊息與溝通

由大自然界中存在著眾多色彩豔麗的生物便可說明，無論這些生物本身是作為獵物、掠食者、或追求者，色彩都具有溝通訊息的功能，而其掠食者、獵物或被追求者，必定也具備此等辨識色彩的能力。例如草類的鮮豔顏色傳



遞著「小心有毒」的訊息；公孔雀的開屏展示向母孔雀傳遞著「求偶」的訊息；甚至如青蛙、蜥蜴等以身體的顏色提供保護色，使自己隱形於環境中，更是設法藉由掠食者的色彩視覺能力傳遞著「我不在此」的訊息。與動物王國可互相類比的情形在人類世界中比比皆是，並不因文明與科技的發展程度而減少對色彩的依賴。例如在不同的文化與社會中，「紅色」的標誌通常代表著「警告」的意味；化妝品與服裝工業藉助色彩來吸引異性；叢林作戰避免敵人發現所穿的迷彩衣等等，在在顯示了色彩所扮演的訊息傳遞與溝通的功能。

幫助辨識物體

當日光照耀大地，在由樹木、建築物等所形成的陰影處，其亮度值與光照處比起來可以有著相當大的差異。如果此時一個物體座落於陰影與光亮的交界處，例如一輛汽車有一部份在陰影中，而其他部份卻在光照處，則由一個完全沒有色彩視覺、所見只有不同灰階的動物眼中看去，陰影與光亮的交接處便可能代表著物體的邊界，如此一來辨識真實物體邊界的能力便會大打折扣。在設計一個機器人的視覺時，若是以特定亮度的差異值作為不同物體邊界的界定（例如以 Marr (1982) 所提的零交叉 (zero crossing) 邊界界定算則），在上例中便會在光影交接之處產生誤判。然而顏色，或更精確地說，顏色三向度中的色調 (hue)，在光亮與陰影兩處的差異不如亮度的差異來得大，因此由具有色彩視覺的人類眼中看去，在陰影與光亮兩部分大致相同的色調可提供一個穩定的線索，藉以協助個體正確無誤地辨識物體邊界。也就是說，物體表面色調的一致性提供了一個穩定辨識物體的知覺線索，尤其是在強勢物體邊界線索（如明亮度的差異）失效時（如在光影交接處）。

審美

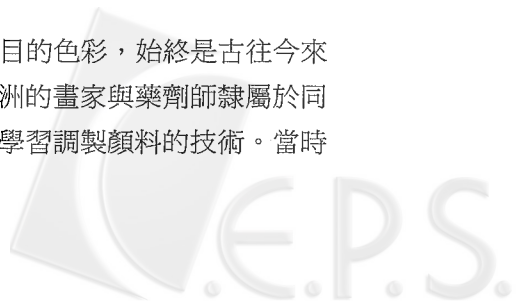
在加州大學柏克萊分校任教的著名視覺科學家 Gerald Westheimer 曾說過：「色彩的主要功用就是欣賞在舊金山金門大橋上的落日」。這雖是玩笑

之語，但也點出了色彩對於人類的另一項重要功能—豐富我們的審美經驗。關於色彩的前兩項功能：溝通訊息與幫助辨識物體，可同時適用於人類與其他具色彩視覺的動物，但色彩的審美功能以及由此而產生的創造美感的驅力，卻可能是人類所獨有的。

色彩的審美價值對人類的重要性，由文明史上人類對於追求色彩表現的工藝（technology）所花費的努力可見一斑。由舊石器時代原始人類在岩石上的塗鴉，就可以看出他們除了單純的線條表現之外，通常也佐以顏色來增加美感。西班牙庇里牛斯山麓著名 Altamira 洞窟壁畫裡面，描繪了非常生動的史前人類追捕動物的情形，以及在他們生活當中所看到的各種不同的野獸，這些作品雖然都以線條的流暢優美著稱，但是這些原始人類也以他們所能取材到的有限顏料來源當中，為這些作品塗上非常生動且具有表現力的色彩。

除了上述史前人類的繪畫之外，色彩在各類器物藝術上的應用也是具有悠遠的歷史。在人類學會製造陶器的時候，就已經同時設法利用不同陶土在不同溫度鍛燒之後成品色澤的不同，為他們的作品增加色彩與圖案。在來源可靠而選擇項多的顏料被發明以前，許多古文明都是以天然的材質來做為他們表達色彩的媒介，例如古巴比倫人的城牆採用各種不同的彩色石頭跟上過釉之後的彩磚，堆砌成色彩豐富的建築物，這種技術在古羅馬人的手上發展到極致，即一般所稱的馬賽克鑲嵌藝術。他們大量採用石頭、貝殼以及上釉的瓷片，以類似點描畫的方式，拼貼出色彩非常豐富的公共藝術作品。即使是古希臘的雕像，一般的錯誤觀念以為這些雕像都是以純白的石材所雕製，而且原意就是要維持素樸的材料特性，其實事實上所有的希臘雕像在當時都是上彩的，只是因為他們的塗料在耐久性方面不理想，以至於在文藝復興時期，歐洲文藝界對大量出土的希臘雕像產生濃厚興趣的時候，這些被發現的雕像已經完完全全的褪色了，乃至於產生誤解。不過這種誤解因為相當符合當時的學界對於古希臘藝術對理性美與精神美崇拜的預期，所以一直流傳至今。

如何尋求新的技術與材料來表現更為絢爛奪目的色彩，始終是古往今來的藝術家努力不懈的目標。在十六、七世紀時歐洲的畫家與藥劑師隸屬於同一職業公會，因為畫家自學徒生涯開始，便必須學習調製顏料的技術。當時



的畫家之工作室猶如小型的化工原料倉庫，儲有各種天然發色材料以及溶劑。許多人都有珍藏不露的調配特定顏色的秘方。而有些獨特色彩的顏料因為需要使用到珍稀的礦物，價格極為昂貴，在中世紀末至文藝復興初期，歐洲人流行委請畫家做祭壇畫，在雙方訂定契約時，契約當中對使用何種昂貴顏料，用量多少等事均詳細條列，可見發色良好的顏料被人重視之程度。畫家由化工匠的身分脫離出來，是到十八世紀初，開始有人工合成的色素出現之後。第一種廣泛使用的人工色素—波斯藍的發明，是藝術史上的一個重要事件。隨著該色素的發明，在十八世紀當中新的人工顏料大量出現，而使得畫家們擁有更多的創作時間以及色彩表現的自由。

中國古代的器物藝術家，尤其是製作陶瓷的匠人，也為追求理想的色彩而付出過無數的心力。五代時期的後周世宗柴榮，在其御窯的匠人問及御用瓷器的顏色時，諭令道：「兩過天青雲破處，這般顏色作將來。」只有親身燒製過陶瓷的人，才能體會皇帝的這個隨口而出的命令，使得當時的工匠不知要花費多少的時間和精力，去研發滿足這個要求的釉藥，以及燒瓷溫度的組合。不過他們的努力並沒有白費，柴窯的作品成為傳奇式的珍品，以致後世有「片柴值千金」的美譽。這又是另一個色彩之審美價值在人類活動中扮演重要角色的例證。

直到今日，色彩科學的應用仍集中在其審美的功能上，例如一位藝術家若想在個人網頁上開闢藝廊、舉辦畫展，他/她如何確定以不同的作業平台、在不同的顯示器之前的觀賞者所看到的作品顏色均能忠於原作？欲將美術館的畫作複製於畫冊或海報時，以怎樣的電子掃描或照相技術，經過怎樣的分色印刷程序，才能忠實呈現原作的風貌？彩色底片、相紙、V8 錄影機如何能像人眼一般，在晨昏、正午、夜晚、乃至在不同的人工照明條件下，不須外加濾鏡也能獲得自然真實的色彩表現？水彩、油畫、乃至其他顏料的製造商如何擺脫語意不清的色彩俗名如鵝黃、湖綠、玫瑰紅等等，而有一套清楚標定顏色名稱的語彙？染料及塗料工業如何持續開發更多不同種色相、飽和度更高，而且耐得住汗酸、洗潔劑、日曬雨淋之侵蝕的色劑？彩色印表機的列印品質及演色（color rendering）能力如何趕上顯示器所能提供的品質？顯示器又如何趕上最好的傳統彩色攝影品質？幾個壟斷全球底片、相紙市場的

大公司，如柯達、富士等等，均有其註冊商標式的鮮明色調風格（柯達產品包裝上的黃色，是唯一申請專利獲准的顏色），如何在保持產品風格的前提下提供傳真度更高的演色能力，也是這些公司研發部門的人員日以繼夜、不斷努力的目標。不可否認的，在這些應用領域中，化工及材料科學的工程師們負擔了技術突破的重任，但是具有專業色彩科學訓練的人員，才是這些研發結果的評審員。

色彩研究的特色

知覺是個體內在的心理經驗與外在物理世界交接所產生的現象。在所有知覺的議題中，色彩知覺的研究可算是當中最成熟的一支。從最低層次的物理、生化一直到最高層次的心理經驗，幾乎沒有其他的議題像色彩視知覺的研究一般，由各種不同層次研究所得的知識，能夠如此充分地互相支援，統整成非常協調一致、串連緊密的理論體系。這是由於色彩的研究容許層次相當豐富的不同階層的研究者之參與的緣故。例如從最基本的對光線物理性質的興趣，到視覺色素（photopigments）的分子結構如何決定其吸收光譜；吸收了不同波長光線的色素分子又產生哪些生化反應（Stryer, 1995）；這些生化反應如何改變神經細胞的膜電位，而將光線的訊息轉變為神經的語言；這些翻譯後的神經語言在眼球至大腦的不同階段當中，以怎樣的形式傳達初始的訊息；這些對色彩知覺具有關鍵影響力的色素分子結構如何由基因決定（如 Neitz, Neitz & Kainz, 1996）；而這些基因如何遺傳；藉著物種與物種之間的比較，可否追溯色彩能力的演化歷史（Jacobs, 1981；Cronly-Dillon & Gregory, 1991）等等問題構成色彩研究中最底層的架構，吸納來自物理、化學、分子生物學、神經生理學、比較動物學等方面的專才。除此之外，在行為的層次上研究者致力於探討人類區辨色彩的能力極限、與色彩有關的主觀知覺現象、基於這樣的能力極限在工業界如何制訂一套可以用來正確無誤的指稱色彩的標定系統、以及更有效率的色彩顯示系統，如電視、電腦、底片、相紙、雷射印表機、塗料、布料、染色劑、印刷工業等等（Kelly, 1994）。另外更高層次的比較文化的研究當中，研究者對各種語言當中的色彩形容詞

的數目，以及這些形容詞的出現是否有一定的順序之類的問題感到興趣，而即使這麼高層次的研究，其結論也顯示出演化與生理的規範（constraints）之影響（Berlin & Kay, 1969；Davies & Gorbett, 1997）。

這樣由低階到高階的統整研究，以及其所累積的大量研究成果，一方面使得色彩的應用有相當多的實徵研究結果以資參考，另一方面則是如此豐富且深入的專業領域卻又使得非專業人員往往有不得其門而入之嘆，相對地也使得這個領域的研究成果之應用性受到一定程度的侷限。

由於色彩研究的廣度與深度實非一篇論文所能涵蓋，本文將集中焦點於與螢幕或其他電子展示的設計等當代色彩應用有關的研究，至於進一步與視知覺實驗有關的電子螢幕之應用，請參看下文（陳一平、葉素玲，2000）。以下先說明三色論的原理，再進一步闡釋其應用。

色彩配對與三色論

在人類色彩視覺的研究歷史中，三色論（trichromatic theory）與對比論（opponent theory）各享有其獨特的地位，但就本文的目的而言將集中討論三色論中與應用有關的部分，對色彩視覺研究的歷史沿革有興趣的讀者可參考 Kaiser 和 Boynton（1996）；三色論的理論推導及量化可參考 Wyszecki 和 Stiles（1982），Cornsweet（1970），Kaiser 和 Boynton（1996）；對比論則見 Hurvich（1981）；中文的介紹可參閱孫慶文（1999）。

導出三色論的重要實驗派典（paradigm）是色彩配對（color matching），此與電視機、電腦螢幕等的成色原理密切相關，都是利用三種色光的不同強度搭配出所有人眼可見的顏色。以電腦螢幕為例，每一個位置（或像素，pixel）都有三支電子槍對齊著這個位置發射出不同強度的電子束，這三支電子槍分別是紅槍、綠槍與藍槍。藉由調整這三支電子槍個別發射的電子束強度，便可以在同一位置上顯示出各種不同的顏色來。例如某一位置若只有紅槍發射，則顯示紅色，而若紅槍與綠槍發射等強度的電子束顯示出黃色，而若三種槍都發出等強度的電子束則顯示出白色等等。十九世紀法國的印象派繪畫也採用相同的原理，採用不同色調的顏料，以在人眼解析度範圍之外的點狀

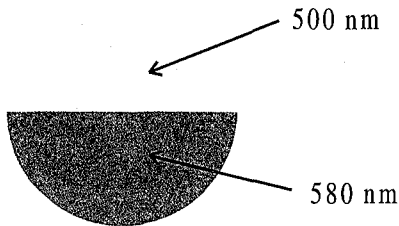
分佈混合出各種顏色。

這些三色混合的應用雖然存在已久（1723 年藝術家 Jakob C. Le Blon 即出版了一本有關三色混合的印刷複製繪畫的原理，引自 Sherman, 1981），但由此應用導致色彩研究理論的進展，且更進一步強化這方面的應用卻僅是前一世紀的事。在十八、十九世紀研究視覺的生理技術尚不如今日般發達之時，學者們即已利用色彩配對實驗，發現一般人可以藉由調整三種不同波長色光的強度，以配出人眼可見的各種不同顏色，並由此項結果推論出人類視覺中應具有三種分別負責處理不同波段訊息的系統。等到二十世紀中期視覺研究的生理技術發展較成熟之後，神經生理學家才真正記錄到在人類視網膜中三種對不同波段敏感的受器（S, M, L 視錐細胞），至此方以生理資料驗證了過去三色論的理論預測。由於 Helmholtz 在他 *Physiological Optics* (1924) 一書中介紹且修改了 Young (1802) 的三色論觀點，因此後人稱此理論為 Young-Helmholtz 三色論 (Weale, 1957)。

色彩配對實驗指的是在一個圓形的色盤中，其中上半圓為測試色光，下半圓則是另一（或二、三種混合的）調整色光，為說明起見特舉一例於圖 1。圖 1 (A) 中上半圓的測試色光為一 500 nm 的單色光，下半圓的調整色光為一 580 nm 的單色光。受試者的作業是調整下半圓色光的強度，使得上下兩半圓看起來完全相等，使得圖 1 (A) 可被看成是一個均質 (uniform) 的圓盤。

假設某人只有一種處理色彩的系統，暫命名為 α 系統，其吸收率對波長作圖所得的函數圖如圖 1 (B) 所示。基於單一變量原則 (principle of univariance)，這個系統只要接收到相同數目的光子，便會有相同的反應，即使這個等數目的光子可能是來自於不同波長的色光，以不同的比率被此系統吸收。例如藍光被此系統吸收的比率很低，但只要有足夠強度的藍光，仍可與一個強度較低但被吸收率較高的綠光產生相等數目的光子。也就是說，對於一個具有特性函數如圖 1 (B) 的 α 系統而言，這個系統僅能作為光子計數器，卻無法分辨被吸收光子的特性，因此一束光的波長與強度兩種訊息並無法被單一系統所區分開來。由這種單一變量原則所導致的直接結果便是，對於一個只具有如圖 1 (B) 所示的一套系統的人而言，當被要求施行如圖 1 (A) 的色彩配對實驗時，可以輕易的將圖 1 (A) 中上下兩半圓調成看起來完全相

(A) 色彩配對實驗



(B) α 系統的吸收率對波長的函數圖

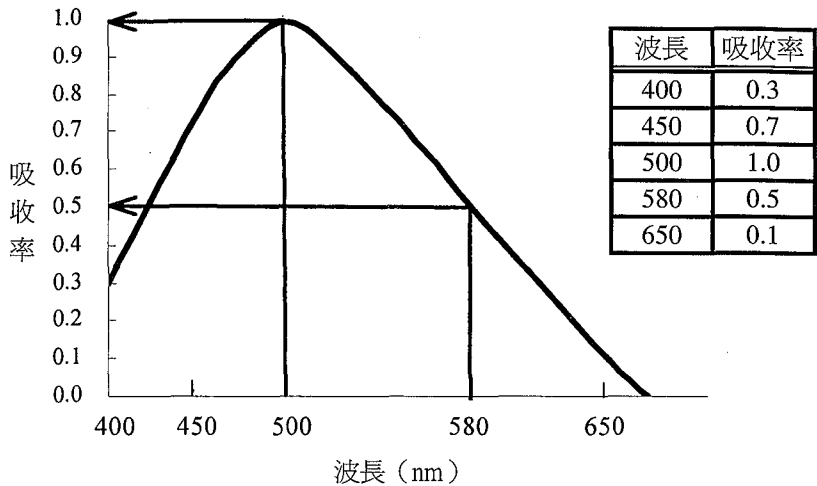


圖 1 (A) 色彩配對實驗。其中上半圓呈現一個固定強度的測試光（在此例中波長為 500nm），下半圓則呈現另一不同波長的色光（在此例中為 580nm），受試者的作業是調整下半圓色光的強度，使其看起來與上半圓的顏色一樣。(B) 假設此人內在有一套且只有一套系統 α ，其吸收率對波長作圖如此圖所示，則此人可以輕易的調整 (A) 圖中下半圓的色光強度，使得其內在的 α 系統對上下兩半圓的色光皆接收到相同數目的光子，因此知覺上將上下兩半圓視為相等，看成一均質的原盤。在此例中，由於 α 系統對下半圓色光 (580nm) 的吸收率 (0.5) 是其對上半圓吸收率 (1.0) 的一半，因此投入 580nm 光束的光子總數 ($N_{580}=200$) 為上半圓 500nm 光子總數 ($N_{500}=100$) 的 2 倍。



同，而視為一個完全均質的圓盤。

以上的陳述可將之轉換成數學式子以得更具體的概念。先假設當此系統得到上下兩半有相同的光子數時，知覺上視為相等。再假設上半圓的 500nm 測試光只有 100 個光子數的強度，亦即 $N_{500}=100$ (N 為光子數)，欲達到圖 1 (A) 上下兩半圓看起來相同，受試者必須調整下半圓 580nm 色光的強度，此舉相當於解下式中的 N_{580} ：

$$N_{500} \times P_{\alpha,500} = N_{580} \times P_{\alpha,580} \dots\dots\dots (1)$$

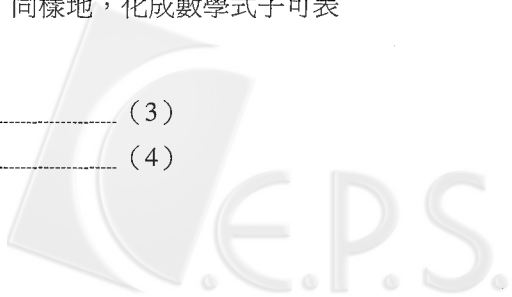
其中 $P_{\alpha,500}$ 、 $P_{\alpha,580}$ 代表對此 α 系統而言，波長為 500nm 與 580nm 的色光分別被此系統吸收的比率。根據圖 1 (B) 的函數圖， $P_{\alpha,500}=1.0$ ， $P_{\alpha,580}=0.5$ 。此時 N_{500} 、 $P_{\alpha,500}$ 、 $P_{\alpha,580}$ 皆為已知，分別的數值為 100、1.0、與 0.5，將此三值代入 (1) 式，可解 N_{580} 。

$$\begin{aligned} N_{580} &= N_{500} \times P_{\alpha,500} / P_{\alpha,580} \dots\dots\dots (2) \\ \Rightarrow N_{580} &= 100 \times 1.0 / 0.5 \\ \Rightarrow N_{580} &= 200 \end{aligned}$$

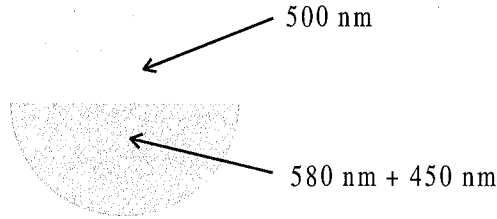
在此例中，由於 α 系統對下半圓色光 (580nm) 的吸收率 (0.5) 是對其上半圓色光吸收率 (1.0) 的一半，因此投射入下半圓中的色光光子數 ($N_{580}=200$) 便必須為投射入上半圓色光光子數的 2 倍 ($N_{500}=100$)，方能達成上下兩半圓的色光皆被 α 系統接收到相等數目的光子，也才能使上下兩半圓兩個不同波長的光在知覺上看起來相等。

但是如果某人不只有一種處理色彩的系統，而是具有 2 種，暫名為 α 、 β 兩系統，如圖 2 (B) 所示。此時欲解上述如圖 1 (A) 的色彩配對問題，則必須 α 、 β 兩系統分別在上下兩半圓中皆得到相同的光子數； α 系統所得的光子數不一定要與 β 系統所得的光子數相同，但在上下兩半圓必須相等； β 系統所得的光子數也必須在上下兩半圓相等。同樣地，化成數學式子可表達如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{500} \times P_{\alpha,500} = N_{580} \times P_{\alpha,580} \dots\dots\dots (3) \\ N_{500} \times P_{\beta,500} = N_{580} \times P_{\beta,580} \dots\dots\dots (4) \end{array} \right.$$



(A) 色彩配對實驗



(B) α 、 β 兩系統的吸收率對波長的函數圖

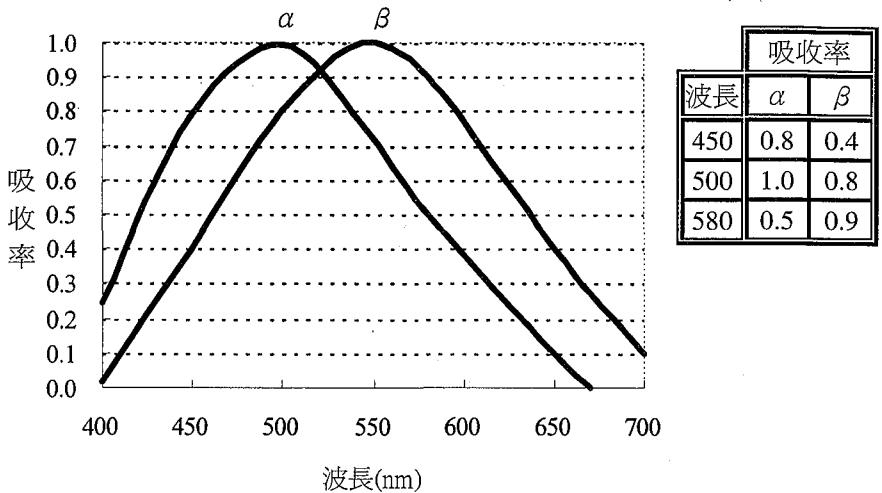


圖 2 (A) 色彩配對實驗。與圖 1 (A) 不同處在於此時受試者必須調整下半圓的兩色光之強度 (在此例中為 580nm 與 450nm) 使其混合的結果看起來與上半圓的顏色一樣。(B) 對於具有 α 、 β 兩套系統之人而言，可以達成此配對作業的要求，此時對 α 系統而言，上半圓所吸收的光子數與下半圓相同，對 β 系統而言亦同。



值得注意的是，由（3）、（4）兩式的聯立方程式可看出，此時只有一個未知數 N_{580} ，但是卻有兩個方程式，而且這兩個方程式並非平行（ $P_{\alpha,500} \neq P_{\beta,500}$ ， $P_{\alpha,580} \neq P_{\beta,580}$ ），因此這個聯立方程式無解。欲得一解，必須再多加進一個未知數，使成以兩道方程式解兩個未知數，方可有唯一解。這樣的數學描述表現在色彩配對實驗上即是必須在下半圓中再加入一個配對的色光。假設這個多加的色光為 450nm，則整個色彩配對實驗將改變成「調整下半圓兩色光的強度以使得與上半圓的測試色光看起來相同」。實驗配置如圖 2（A）所示，以數學式表達如下。

$$\begin{cases} N_{500} \times P_{\alpha,500} = N_{580} \times P_{\alpha,580} + N_{450} \times P_{\alpha,450} & \text{..... (5)} \\ N_{500} \times P_{\beta,500} = N_{580} \times P_{\beta,580} + N_{450} \times P_{\beta,450} & \text{..... (6)} \end{cases}$$

這時 N_{580} 與 N_{450} 為欲調整的 580nm 與 450nm 兩色光的強度，因此為欲解的兩個未知數，而 N_{500} 、 $P_{\alpha,500}$ 、 $P_{\alpha,580}$ 、 $P_{\alpha,450}$ 、 $P_{\beta,500}$ 、 $P_{\beta,580}$ 、 $P_{\beta,450}$ 等皆為已知。此時有兩個方程式，解兩個未知數（ N_{580} ， N_{450} ），因此可得唯一一組解。由圖 2（B）的函數圖可知 α 、 β 兩系統分別對不同波長的吸收率，參考此圖再將 $N_{500}=100$ 、 $P_{\alpha,450}=0.8$ 、 $P_{\alpha,500}=1.0$ 、 $P_{\alpha,580}=0.5$ 、 $P_{\beta,450}=0.4$ 、 $P_{\beta,500}=0.8$ 、 $P_{\beta,580}=0.9$ 等等的數值分別代入（5）、（6）二式，可得：

$$\begin{cases} 100 \times 1.0 = N_{580} \times 0.5 + N_{450} \times 0.8 & \text{..... (7)} \\ 100 \times 0.8 = N_{580} \times 0.9 + N_{450} \times 0.4 & \text{..... (8)} \end{cases}$$

解此二元聯立方程式，則可得 $N_{580}=46$ ， $N_{450}=96^{(2)}$ 。亦即對擁有 α 、 β 兩套系統的人而言，要使上下兩半圓看起來相同，必須在下半圓中投射強度為 46 光子數的 580nm 色光，再加上強度為 96 光子數的 450nm 色光，方能使這個人的 α 系統得到上下兩半圓都有 100 個光子數、 β 系統得到上下兩半圓都有 80 個光子數；如此一來， α 、 β 兩系統在兩半圓都吸收了相同數目的光子數，因此對此人而言，此二半圓看起來的顏色與亮度皆一致，成爲一個均質的圓盤。

依此類推，如果某人有 α 、 β 、 γ 三套系統在處理色彩，則無法將圖 2（A）中下半圓的兩個顏色相混調成與上半圓相同，因爲此時必須符合下列聯立方程式：

$$\begin{cases} N_{500} \times P_{\alpha,500} = N_{580} \times P_{\alpha,580} + N_{450} \times P_{\alpha,450} \text{---- (9)} \\ N_{500} \times P_{\beta,500} = N_{580} \times P_{\beta,580} + N_{450} \times P_{\beta,450} \text{---- (10)} \\ N_{500} \times P_{\gamma,500} = N_{580} \times P_{\gamma,580} + N_{450} \times P_{\gamma,450} \text{---- (11)} \end{cases}$$

此時有兩個未知數 (N_{450} 與 N_{580})，卻必須解三道方程式，因此無解。在這種情況下，欲得一組解，必須再加上一個未知數，也就是說，在下半圓的調整色光中必須再加一道色光，假設為 600nm，以解下列聯立方程式：

$$\begin{cases} N_{500} \times P_{\alpha,500} = N_{580} \times P_{\alpha,580} + N_{450} \times P_{\alpha,450} + N_{600} \times P_{\alpha,600} \text{---- (12)} \\ N_{500} \times P_{\beta,500} = N_{580} \times P_{\beta,580} + N_{450} \times P_{\beta,450} + N_{600} \times P_{\beta,600} \text{---- (13)} \\ N_{500} \times P_{\gamma,500} = N_{580} \times P_{\gamma,580} + N_{450} \times P_{\gamma,450} + N_{600} \times P_{\gamma,600} \text{---- (14)} \end{cases}$$

如此一來成為有三個未知數 (N_{580} , N_{450} , N_{600})，解三道方程式 (除了下半圓三色光各自需調整的強度 N_{580} 、 N_{450} 、 N_{600} 之外其餘皆為已知)，由此可得一組解。由於三色配對的計算方式與上式 (5) 至 (8) 兩色配對的情形相同，故不在此詳列，有興趣的讀者可自行畫出某一假設的 γ 系統的吸收率對波長的函數圖，並據此推導解題。對詳細內容有興趣的讀者可參看 Cornsweet (1970)。這裡要提示的重點是，如果內在只有一套色彩系統，則在下半圓中只需要一色，即可配成與上半圓的一測試色光相同；如果有兩套系統，則必須至少兩色相加才能混成與測試光相同；而若有三套系統，則必須至少三色相加才能混成與測試光相同。注意，以上 500nm、580nm、450nm、600nm 等色光都只是為說明方便而舉例用的，在實際的色彩配對實驗中，可以任意選用三種不同的色光去配出所有的可見光，只要此三色光中任二色不能配成第三色即可。有時在解聯立方程式時會得到負值，此時只要把帶負值的色光加到測試色光中 (上半圓) 即可，如同數學式中 $A + B - C = D$ ，則 $A + B = C + D$ 。

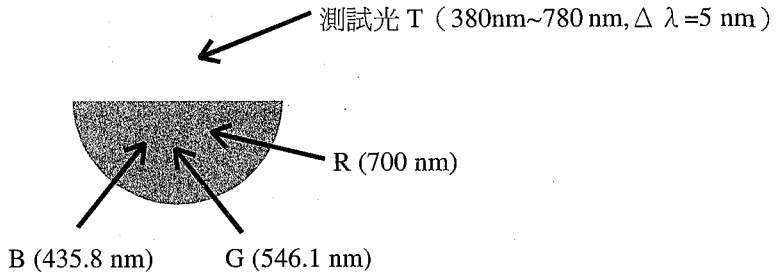
由以上的推導過程可反推得知，若在色彩配對實驗中至少需三色方能達成配對，代表受試者的內在有三套系統；若至少需兩色方能達成配對，代表內在有兩套系統；而若僅需一色達成配對，則代表內在只有一套系統。由此可知，即便不知道內在處理系統的詳細頻譜吸收函數，只要用心理物理的實驗方法 (色彩配對實驗) 便可用以判斷一個人是否具有正常的色彩視覺；若

他需要三色才能配出某一固定色光，則其內在必有三套系統（稱為 trichromat）--這是正常人所具有的系統數目。少於三色即可完成配對者，則成爲在色彩處理方面有缺陷者，例如若某人只要兩個色光就可以配對，則表示此人內在只有兩套系統（稱爲 dichromat）。而若某人只要一個色光就能配對，則表示其內在只有一套系統（稱爲 monochromat）。對於這些少於三套系統的色障者，具正常色彩視覺者所見爲不同的多種顏色，對他們而言會是同色（稱爲異構同色物，metamer），意即他們所能區辨的色調比起正常人而言少得多。至於正常人的三套系統究竟爲何，早在十八世紀 Thomas Young 提出三色論之前，George Palmer 即指出是 3 種不同的視覺受器，而色障者是由於其中一種或兩種視覺受器受損所致（Weale, 1957）。這種主流的思想一直持續至今日，直到色彩的分子生物學以及行爲研究的進展之後，將這三套系統等同於三種視覺受器（即 S、M、L 視錐細胞）的想法才開始受到學者們的質疑（如 Neitz & Jacobs, 1986; Neitz, Neitz & Jacobs, 1993; Neitz & Neitz, 1995）。

色彩的量測與標定

前述的色彩配對實驗事實上可有好幾種變形，以具有正常三色系統的人爲例，Maxwell（1860）首先提出只要適當選取三色，皆可配成白光；Ives（1915, 1923）則進一步證明任何三色光皆可做色彩配對，並且在不同的三原色所建立的配對函數之間可以互相轉換；Guild 則指出三種寬頻的色光可以配成任何顏色，並以理論推導出三種色光系統如何轉換成另三種色光的系統；而 Wright 更進一步演算出三種單色光便可以不同比例混合成在光譜中的所有顏色（Kaiser & Boynton, 1996）。圖 3（A）所繪爲一個典型的對正常人所做的色彩配對實驗，在此例中所用以與測試光做配對的是三種固定的單色光，分別爲 453.8nm、546.1nm 與 700nm。當實驗者在圖 3（A）的上半圓中依序放入由短波到長波的所有單色可見光，而改變下半圓中三原色光（primaries）的強度，記錄此三原色光各自達成配對特定測試光的值，便可得到如圖 3（B）的色彩配對函數（color matching function）。將以上陳述以數學式子表達如下：

(A) 色彩配對實驗



(B) 色彩配對函數

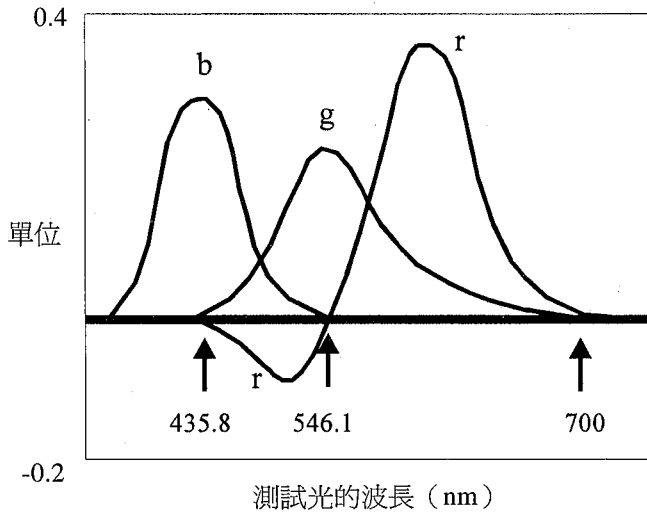


圖 3 (A) 利用三種單色光所做的色彩配對實驗；與 (B) 所得的色彩配對函數。



$$t(T) = r(R) + g(G) + b(B) \text{-----} (15)$$

其中 t 、 r 、 g 、 b 分別為測試光 T ，以及三原色光 R 、 G 與 B 的強度值，可將其想成是前節所述的光子數，或其他強度值的測量。值得注意的是，圖 3 (B) 中有一段 r 值是負的，此時必須將原色光 R 加到色彩配對實驗中的上半圓與測試光混合，為方便起見可寫成：

$$t(T) + r(R) = g(G) + b(B) \text{-----} (16)$$

如此可使得 r 成為正值。

將色彩配對寫成如上 (16) 式另外具有的意涵是，在 (16) 式中的運算都符合代數運算法則，如 (16) 式中等式的兩邊可同加一值 K 而不改變左右兩邊的相等關係，在實際的操作上便是將上下兩半圓都分別再加上一道相同強度的色光，兩半圓看起來仍是相等；或是在等式兩邊同乘或同除一個 K 值而不改變左右兩邊的相等關係，實際的操作便是放一個濾鏡在已成均質圓盤的前方以濾掉一定強度的光，此時圓盤看起來仍是均質的。這些符合代數法則的運算稱為 Grassmann's law，其實便是上節所述的，當兩邊色彩相等時代表內在系統有等量吸收的數學陳述。

在圖 3 (B) 中有三個點於 r 、 g 、 b 三值中有兩個值為 0，只有其中一數有值，這三點便是所採用色彩配對的三種原色光之波長，在此處採用 Guild (1925-1926) 與 Wright (1928-1929) 的平均結果所導出的色彩配對函數，其三原色光分別為 435.8nm、546.1nm 與 700nm。國際照明協會 (The Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) 在 1931 年制訂了一套標定色彩的系統，稱為 CIE XYZ system。這套系統目前已成為國際通用的標定色彩的方式，也內建在大多數的測光計 (photometer) 或測色計 (spectroradiometer) 中，成為一般在標定螢幕、照明器材或其他物體的顏色時用以溝通的國際通用標準。舉例來說，某電腦螢幕在整個螢幕為白色時可用測光計測得三個數值，標示為 CIE (.33, .36)， $L=40\text{cd/m}^2$ ，前者可利用 CIE 的平面直角座標系查得其顏色 (為特定的白色)，而後者 L 則代表明度值 (luminance)，為螢幕明亮程度的測量。圖 4 即為 CIE (1931) 的系統中所採用的色彩配對函數，是由圖 3 (B) 的色彩配對函數值經過轉軸而得。至於明度的測定則是依據 CIE (1924)



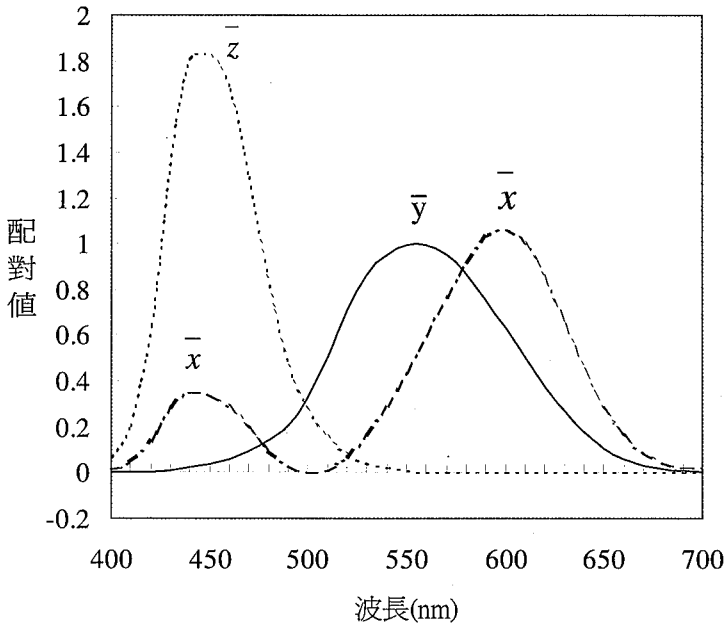


圖 4 CIE XYZ 系統的色彩配對函數

採定的 V_λ 函數，在此函數中標準受試者對不同波長的色光有著不同程度的敏感度。CIE 在 1931 年將此函數融入 XYZ 系統，使成為圖 4 中的 \bar{y} 函數。一般在量測色彩與明度時，由於採用 CIE 的標準，因此在參照色彩圖欲知所得顏色時難免受限於 CIE 在制訂此標準時的情況。例如採用 2° 的隔離圓形做色彩配對，因此在藍綠色部份與大塊面積的色彩會有些差異；而且在 CIE 彩色圖上等距離的顏色差距並非人眼所見的最小可覺差異（just noticeable difference, JND）；另外也必須在標準照明（ S_A ：鎢絲燈， S_B ：4500°K 日光， S_C ：6500°K 北半球日光）下方能得相同的顏色。這些都有後續的修正，例如 CIE（1964）採用 10° 直徑的色彩配對圖形，以及 CIE（1976）制定的等距均質（ $L^*u^*v^*$ ）色彩空間圖，有興趣的讀者請參閱 Wyszecki 和 Stiles（1982）。

其實界定色彩的方式可有許多種，例如看到一朵黃花，可以分析這朵花所反射出來的波長，以物理能量為縱軸，波長為橫軸，描繪出這朵花的頻譜

圖，如圖 5 (A) 的實線所示。問題是，這樣純粹的物理描述對於我們而言並不是一種非常有效的方式，原因在於人類只有少數的幾種視覺受器，而每種視覺受器所能反應的範圍與強度又相當有限，由此所導致的結果便是，兩個物體即使它們在頻譜圖上有著相當不同的分配圖形，只要這兩種物體在人眼的三種視覺受器中，對每種視覺受器而言都有著相同的吸收量（見前節「色彩配對與三色論」的說明），則二者的顏色看起來就會完全相同，此時這兩種物體互為異構同色物（metamer，物理刺激不同，但知覺相同）。事實上，對我們而言自然界中許多看起來相同的顏色都只是異構同色物，而非同構同色物（isomer，物理特性完全相同者稱之）。然而對於具有四、五套系統的鳥類而言，這些正常人眼中所見的異構同色物卻是可區辨的不同顏色，就像是正常人所見的不同顏色，對只有一或二套系統的色弱者而言可能是異構同色物一樣。

為能適當反應人眼所見，CIE XYZ 系統利用色彩配對實驗所導出的心理物理的描述方式，一方面考慮光線的物理特性，另一方面也採用人類看起來為相同顏色的配對實驗，如此若兩物體為異構同色物，則其在這種色彩標定的系統中也會有相同的值。因此 CIE 的目的在於基於人類視覺提供一個國際間能夠互相溝通的標準化測量色彩的科學方式。但是由於其所奠基的色彩配對具有各項代數或矩陣運算的法則，例如各加一色光或先濾掉等量的光、或是由於視覺系統長時間暴露於相同刺激產生適應作用（adaptation）而導致的色彩變化等等，在這些情況下無論看起來的顏色是什麼，色彩配對的值對上下兩半圓仍是相同的，由此所推導的 CIE 座標值也會相同。因此嚴格說來，CIE 系統只是一個心理物理的描述，還不能算是一種知覺的描述。我們只能知道兩種顏色若具有 CIE 相同的座標值，則此二色必是異構同色物，亦即看起來是完全相同的兩種顏色，至於對每個人而言這顏色看起來究竟是什麼（例如：偏藍綠色或綠色？），由於涉及各人所擁有的視覺受器的敏感範圍與種類而有所差異，因此不是 CIE 這類以三十多人的配對平均值所導出的國際標準所能回答與所欲回答的。因此 CIE 色彩圖上不同座標值所顯示的顏色只能代表標準受試者在標準情況下所看到的顏色。

陳述了 CIE 系統的目的之後，容我們花一些篇幅，介紹一下 CIE 系統由



Guild 與 Wright 的標準受試者的視覺實驗所得的色彩配對函數，如何得到 1931 年所採用的 XYZ 系統。由於由最初選定的三原色 (primaries) 所做出之色彩配對函數，可以經由矩陣轉換，轉換成另一個由不同的三原色所形成的色彩配對函數，此時所有的點仍不變，只是三個座標軸經過轉軸的運算，因此各點的座標也會隨之轉換。利用此原理，並考量讓所有的配對值成為正值，並將 Y 設定為與 V_λ 相同，CIE 將圖 3 (B) 以 RGB 為三原色的色彩配對函數轉換成如圖 4 以 XYZ 為三原色的色彩配對函數。再以圖 5 (A) 的黃花的頻譜圖 (實線) 為例，欲知對此三原色 XYZ 各需多少單位的強度才能與綠葉 (虛線) 看起來顏色相同，必須將黃花在各波長的能量與各波長的配對函數相乘之後對所有可見光波長的範圍做積分，得以下三值，分別代表 X, Y, Z 三原色所需的單位值：

$$X = K_m \int L_\lambda \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K_m \int L_\lambda \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K_m \int L_\lambda \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

其中 $K_m=683[\text{lm/W}]$ ，加入此一常數的目的是要將原先的物理單位轉換成明度的單位：米燭光 (cd/m^2)，以便使得 Y 值成為明度的測量。CIE 由此 XYZ 三值可導出一個平面座標系的兩值 (x, y)：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

由於

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y$$

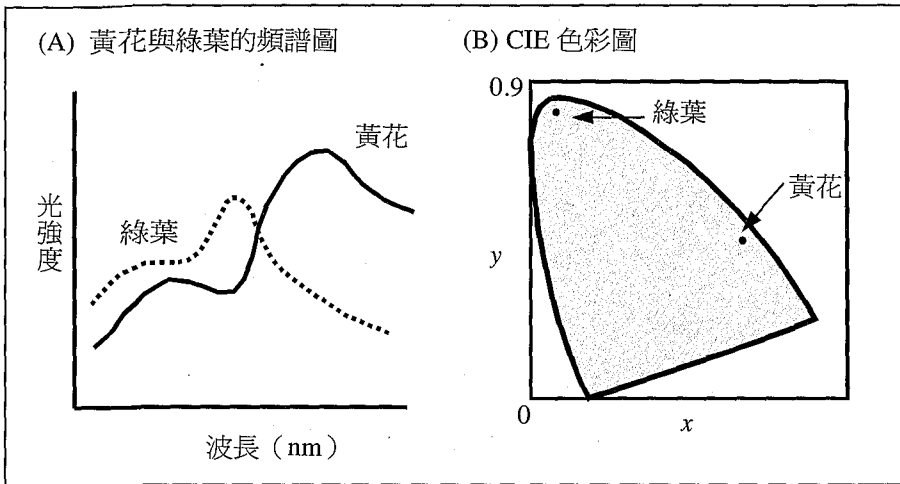


圖 5 (A) 黃花與綠葉的物理描述。(B) 以 CIE 色彩圖標示黃花與綠葉的顏色，前者為 $(0.7, 0.5)$ ，後者為 $(0.1, 0.8)$ 。

因此只要有 x 、 y 兩值即可包含應有的消息量（包括還原成 XYZ 三值），如此一來可將所有的顏色標定在一個橫軸為 x ，縱軸為 y 的平面座標系上，即為圖 5 (B) 的 CIE 色彩圖 (chromaticity diagram)。上例中的黃花與綠葉由上述運算所測出的色彩分別位於此座標系上的兩點。若此兩點重合，則人眼視之色彩相同。圖 5 (B) 中的灰色區域為所有人眼可見顏色的範圍，圈出此區域的邊界曲線則為各單色光 (monochromatic light) 的點所組成。

值得一提的是，雖然 CIE 系統的發展主要在於制定一套標定色彩的標準，而其應用也多在工業界，但從事基礎研究的色彩科學家們也曾利用前述「任三原色的座標系統可經轉軸而轉換成其他三原色所構成的系統」之原理，採用 CIE XYZ 系統經轉換之後導出以人類的三種視錐細胞 (S, M, L) 之光譜敏感曲線 (如 Vos & Walraven, 1971; Smith & Pokorny, 1975; Vos, 1978)。其中在色彩基礎研究中最常被引用的可屬 Smith & Pokorny (1975)。他們夫婦兩人經 CIE 所導出的人類 S、M、L 視錐細胞的光譜敏感曲線，與爾後神經生理技術發展成熟後實際抽取出三種視錐細胞所測得的曲線相當吻合，這又是由心理物理實驗而產生的理論推導早於（或優於）生理實驗的一

例。相當不同於較高層次的知覺或認知理論，色彩視覺的研究由於累積著頗為豐富的成果，合併著研究技術的進步，這類由生理實驗來「確認」具領導地位的心物理論的方式不僅可行，也非常普遍。愈是低階的處理，如本文所述的三色論，這種理論與生理互相驗證的情形便愈普遍。至於與高階知覺有關的色彩現象，如色彩恆定性的問題、純色（不摻雜其他色光的顏色，如純紅、純綠、純藍、純黃等色）的表徵，以及其生理機制等問題則至今仍未能有清楚的解答。

當代與色彩應用密切相關的範疇： 螢幕或其他電子展示的設計

在工業上所有關於色彩的應用幾乎都與上述討論的三色論有關，這種人類所能辨識的所有色彩均可由三個基本色來混成的事實，提供了各類顯色系統的基本設計原理。顯色系統又可分為採用色光混色（或稱為加法混色）以及色素混色（或稱為減法混色）兩種。屬於色光混色的顯色系統包括電視及電腦螢幕，屬於色素混色者則有各種染料、塗料、彩色照相等。彩色印刷則視方式的不同可屬其中任何一種。欲瞭解色光及色素混色的不同，我們必須回到類似圖 5 (A) 所示的色光的頻譜圖。作加法混色的各種顏色是以色光的形式將每個顏色的頻譜相加，圖 6 (A) 所示為兩個假想的色光之頻譜圖，以及將這兩個色光相加以後，混合結果之頻譜圖。由圖 6 (A) 中可知當色光相加時，其頻譜也是線性的加成。在這個例子中加成的頻譜剛好以等能量的高度涵蓋了可見光譜中的所有範圍，所以看起來是白光，此時這兩個色光便成為在色光加成中的互補色。注意在此例中我們僅以兩個假想色光為例。實際上不管參與混色的色光數目為何，只要相加後的頻譜在可見光的範圍內為等能量的分配，則結果即為白光。圖 6 (B) 所示的則是色素混色的情形，由於色素是一種選擇性地吸收光譜中某一波段的物質，其色彩是反映出照明光源被吸收後剩下的其餘波段，例如紅色的顏料在白光的照射下呈現紅色，是因為該顏料吸收了白光當中波長較短的成分，而反射出剩下的長波部分，因而看起來呈現出紅色。圖 6 (B) 當中的色素表示法如以下之說明：白色區域

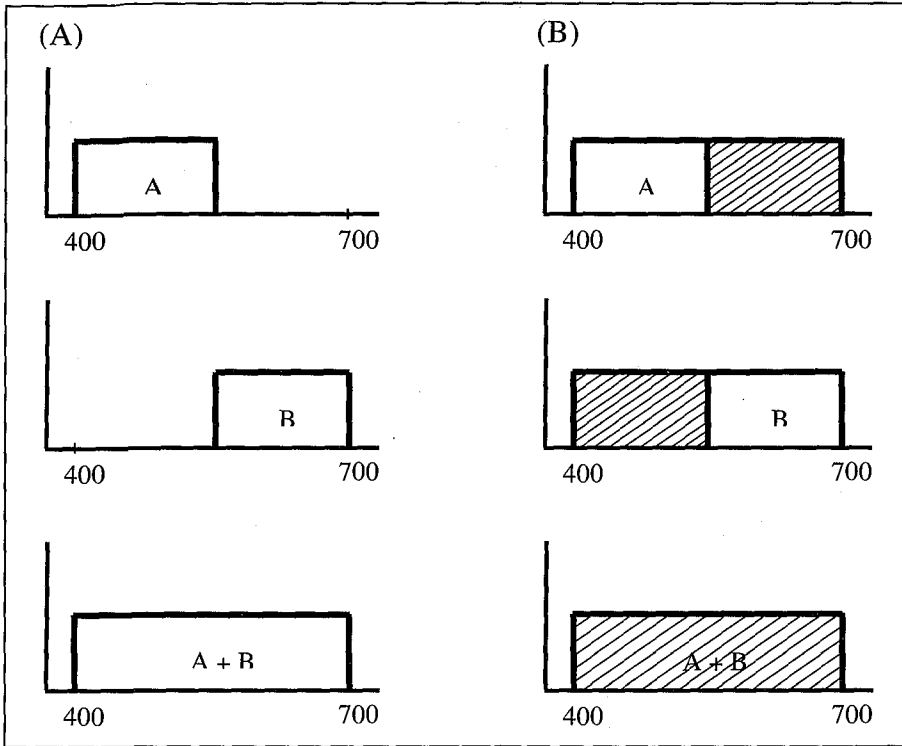


圖 6 (A) 色光加成的原理 (B) 色素加成的原理

代表該色素反射的波段，斜線區域則代表該色素吸收掉的波段，在此例中這兩個色素在白光的照明下，色相均與圖 6 (A) 的兩種色光相同，但是相加後的結果則大不相同，第一個色素吸收掉白光當中的短波部分，第二個色素再吸收掉白光當中的長波部分，兩者合起來，將照明光源的可見光譜中的所有能量都吸收殆盡，因此結果為黑色。在此需注重的一點是，色素所呈現的色彩是反射自光源中的部分波段而來的，因此會直接受到光源本身光譜的能量分佈情形的影響，例如在白光照明之下呈現紅色的顏料，在藍紫光的照明情況下就會變成黑色，易言之，只要光源中缺乏長波的成分，則紅色顏料便無法反射任何的紅光，這是色素和色光非常不同的地方⁽³⁾。

另外一點需要說明的是，在許多應用美術的教科書中均教授「色光的三

原色」以及「色素的三原色」的概念，前者為紅、綠、藍三色，後者為紅、黃、藍三色。其實對色彩的科學研究而言，無論是色光或色素，均沒有具有理論意義的標準原色。然而三原色的概念如此廣泛地被教導，也不是沒有理由的，只是這些理由是建立在實用的目的上，而非反映色彩的物理或心理本質⁽⁴⁾。在此以色光為例，說明為何就實用的考量而言，紅、綠、藍會被視為三原色。圖 7 當中畫出了 CIE 色彩圖，所有物理上可能的色彩（physically realizable colors）均落在灰色的區域中，而以隨意三種色光所可能混出的色彩，即落在這三種色光在此座標系中所圍繞出來的三角形區中⁽⁵⁾。由圖 7 中可知要儘可能增加三種色光所能混成的色彩種類，則此三角形的面積必須愈大愈好，如此一來，所選用的三種色光便會趨向 CIE 色彩圖中的紅色、綠色、以及藍色的角落中，以其他方式所選用的三種色光，所得的顏色數勢必大幅減少。以同樣的概念亦可解釋色素三原色的挑選原理。

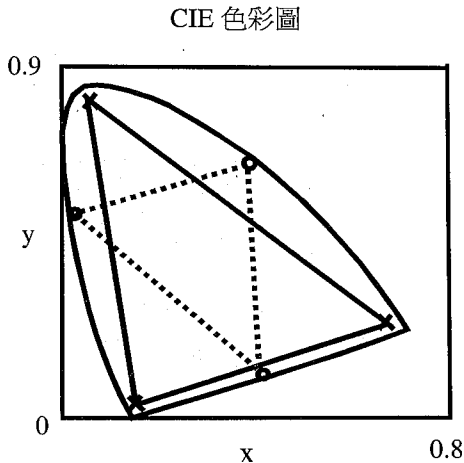


圖 7 由 CIE 色彩圖可看出要在可實現的色彩中挑選三個基本色，使其構成的三角形面積為最大，結果必然像 X 符號所構成的三角形所示，端點會落於紅（右邊角落）、綠（左上角）、以及藍（左下角）的區域，選擇其他的基本色（例如圖中○符號、虛線所構成的三角形），其三角形面積會顯著地小於理想值，也就是此時可以由這三種色光所混成的色彩種類較少。

由圖 7 可以再引伸說明的一點就是：囿於螢光劑（phosphor）的材料限制，無法找到發出的藍光是很接近 CIE 色彩圖上的藍色端點並且亮度也夠亮的，因此目前選用的是較遠離藍色的端點但可發出足夠亮度的螢光劑，如此一來螢幕所能顯示的藍色調的層次並不理想，許多人眼可區辨的藍色調並無法被不同地顯現出來。如果在這方面的技術無法突破，解決這種藍色調的問題便必須另闢蹊徑，例如再增加一種螢光劑，如藍綠色，以四色混成來達成更豐富的演色。但是如此一來勢必得在每個像素的位置呈現 4 種色光，因此螢幕的空間解析度將會變差。如何在演色豐富性與空間解析度之間取得一個折衷，則將視實際的需求與技術的發展而定。

結語

在本文中我們主要是以色光混成爲例子來說明一些色彩應用的原理。相同的概念其實也可用於塗料、染料方面的應用。隨著資訊的快速網路化，圖像式的表達在知識的生產與傳遞中扮演著愈來愈重要的角色，與此相關的工業界對於具有專業色彩科學訓練的人才之需求也日益殷切。在美國已有多所大學及研究機構（例如發展出在應用美術界廣爲使用的 Munsell 色票『Munsell color chips』的 Munsell 機構）成立了色彩科學研究所，培訓基礎及應用方面的人才。無論從事哪一個層面的色彩應用之技術工作，最重要的基本能力就是關於色彩量測（color measurement）以及轉換色彩座標系的知識。而這些技術皆建立在本文所介紹的色彩配對以及三色論的推演程序上。台灣的顯示器及掃描器之產能在世界上均名列前茅，但據我們所知，即使在中央標準局，也沒有可勝任各種色彩量測以及測光儀器校準的專業技術人員常駐，僅在工研院有一色彩計量部門。假若國內的相關業界能撥注更多的心力在於產品的研發上面，則色彩科學的專業在國內環境中應有相當廣闊的發揮空間。

註釋

(1)有關色彩在人類空間視覺中所扮演的角色之詳細討論，請參閱葉素玲



(1999)。

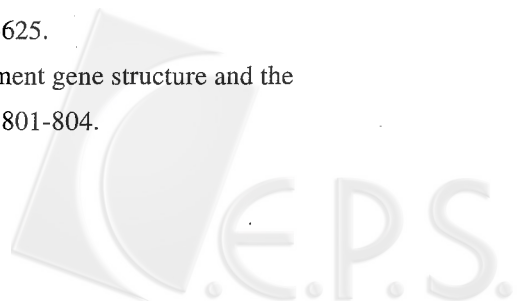
- (2)此處為方便舉例用，以光子總數作為強度的單位，採整數值。
- (3)在日常生活中改變照明設備並不會使人感覺到物體的色彩隨之變化的現象，這是因為視覺系統具有相當程度的校正色差的能力，亦即所謂的色彩恆常性 (color constancy)。但是要維持恆定的色彩知覺有一前提要件，就是所使用的光源必須是寬頻的刺激。若光源的能量集中在極少數的波長上 (例如普遍用於公路照明的鈉氣燈)，則色彩恆常性會失去作用。試著在鈉氣燈下閱讀彩色書報及觀看電視，即可清楚地發現色素與色光對照明光譜不同的依賴程度。前者的色相會完全偏離日光下所見的面貌，後者則不受光源影響。
- (4)有些生理或普心教科書錯誤地將網膜上的三種視錐細胞稱為對紅色、綠色、以及藍色反應的細胞，加上這些文字通常與介紹色光混成現象的段落擺在一起，以致容易造成紅、綠、藍三種顏色是具有生理基礎的三原色之印象。事實上，無論哪種視錐細胞對教科書中的三原色都會有反應，而且三種視錐細胞最為偏好的光線波長，也與所謂的三原色並不相符。
- (5)至於落在三種既定色光所圍出的三角形之外區域的顏色，便無法以純粹加法的方式混出，但這並不違背第四節所提的 Guild 與 Wright 等人的發現。因為所謂的「三種色光即可配成任何顏色」，指的是色彩配對 (color matching)，亦即 (15) 式的內容。其中 r 、 g 、 b 任一之符號皆可為負值。

參考文獻

- 陳一平、葉素玲 (2000)：〈實驗用途的顯示器之伽碼校正：理論與實務〉。
《應用心理研究》(台灣)，5 期，143-164。
- 葉素玲 (1999)：〈色彩在空間視覺所扮演的角色〉。見李江山等著：《視覺與認知—視覺知覺與視覺運動系統》。台北：遠流大學館，227-258。
- 孫慶文 (1999)：〈色彩視覺〉。見李江山等著：《視覺與認知—視覺知覺與視覺運動系統》。台北：遠流大學館，209-226。
- Berlin, B. & Kay, P. (1969). *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*.

Cambridge University Press.

- Consweet, T. N. (1970). *Visual Perception*. New York: Academic Press.
- Cronly-Dillon, J. R. & Gregory, R. L. (1991). *Vision and Visual Dysfunction, Vol 2: Evolution of the Eye and Visual System*. Boston: CRC Press.
- Davies, I. R. & Gorbett, G. G. (1997). A cross-cultural study of colour grouping: Evidence for weak linguistic relativity. *British Journal of Psychology*, 88, 493-517.
- Guild, J. (1925-1926). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 230A, 149-187.
- Hurvich, L. M. (1981). *Color vision*. Sunderland, MA: Sinauer Assoc. Inc.
- Helmholtz, H. (1924). *Physiological optics* (edited by J. P. C. Southall; 3 volumes). Rochester, New York: Optical Society of America.
- Ives, H. E. (1915). The transformation of color-mixture equations from one system to another. *Journal of the Franklin Institute*, 180, p.673.
- Ives, H. E. (1923). The transformation of color-mixture equations from one system to another II. Graphical Aids. *Journal of the Franklin Institute*, 195, p.23.
- Jacobs, G. H. (1981). *Comparative Color Vision*. New York: Academic Press.
- Kaiser, P. K. & Boynton, R. M. (1996). *Human color Vision*, 2nd edition. Optical Society of America.
- Kelly, D. H. (1994). *Visual science and engineering: models and applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Maxwell, J. C. (1860). On the theory of compound colours, and the relations of the colours of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, 150, 57-84.
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco: W. H. Freeman & Co.
- Neitz, J. & Jacobs, G. H. (1986). Polymorphism of the long-wavelength cone in normal human color vision. *Nature*, 323, 623-625.
- Neitz, J., Neitz, M. & Kainz, P.M. (1996). Visual pigment gene structure and the severity of color vision defects. *Science*, 274, 801-804.



- Neitz, J., Neitz, M. & Jacobs, G. H. (1993). More than three different cone pigments among people with normal color vision. *Vision Research*, 33, 117-122.
- Neitz, M. & Neitz, J. (1995). Numbers and ratios of visual pigment genes for normal red-green color vision. *Science*, 267, 1013-1016.
- Sherman, P. D. (1981). *Colour vision in the nineteenth century*. Bristol: Adam Hilger Ltd.
- Smith, V. C. & Pokorny, J. (1975). Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15, 161-171.
- Stryer, L. (1995). *Biochemistry*, 4th edition. New York:Freeman.
- Vos, J. J. (1978). Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. *Color Research and Application*, 3, 125-128.
- Vos, J. J. & Walraven, P. L. (1971). On the derivation of the foveal receptor primaries. *Vision Research*, 11, 799-818.
- Weale, R. A. (1957). Trichromatic ideas in the seventeenth and eighteenth centuries. *Nature*, 179, 648-651.
- Wright, W. D. (1928-1929). A re-determination of the mixture curves of the spectrum. *Transactions of the Optical Society London*, 30, 141-164.
- Wyszecki, G. & Stiles, W. S. (1982). *Color Science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, 2nd edition, New York: John Wiley & Sons.
- Young, T. (1802). On the theory of light and colors, *Philosophical Transactions*, 12-48.

初稿收件：1999年6月10日

二稿收件：1999年7月28日

三稿收件：1999年10月19日

審查通過：1999年10月19日

責任編輯：曾志朗、洪蘭

作者簡介：

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

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）28204903

E-mail：ipchen@ym.edu.tw

Trichromatic Theory of Color Vision and its Applications

Su-Ling Yeh

*Department of Psychology
National Taiwan University*

I-Ping Chen

*Center of General Education
National Yang-Ming University*

Various colors can be obtained by mixing three appropriately chosen chromatic lights. Such color matching experiments had been taken as strong evidence to support the trichromatic color vision theory. The function of color vision, the diversity of color vision research, and the mathematical expressions of trichromatic theory and its applications are explained in this article. Links between the fundamental principles of the trichromatic theory and various color applications are also stressed in the text.

Keywords: trichromatic theory, color matching, CIE, chromaticity diagram

