

# 虛擬照明改變下以主觀明度為錨定基準的色彩辨識

林大偉\* 孫春望\*\*

\* 亞東技術學院工商業設計系

fj017@mail.oit.edu.tw

\*\* 國立台灣科技大學設計研究所暨工商業設計系

suncw@mail.ntust.edu.tw

## 摘要

為了理解不同色相的明度資訊在電腦模擬照明劇烈改變下的色彩辨識過程中是否具備貢獻，二種明度序位被視為「錨定基準」：（1）「理論明度序位」，由機器量測排序而得；（2）「主觀明度序位」，來自於受測者主觀排序而得，具有個人差異。據此，3 種以明度為基準的「錨定策略」被視為研究假設，（H1）白色最亮假設（white patch hypothesis）：人們將最亮點視為純白，色彩辨識的表現最佳；（H2）灰色世界假設（gray world assumption）：人們將場景明度平均數視為錨定基準，表現最佳；（H3）黑色最暗假設（black patch hypothesis）：人們將最暗點視為純黑，表現最好。結果顯示：（1）為了使人們達成理想的色彩辨識，足夠的照明強度是必要的先決條件，但不是關鍵條件；（2）當明度序位被視為色彩辨識的錨定基準時，受測者所仰賴的明度序位，傾向於主觀明度，而不是理論明度。（3）在照明強度充足的中、長波長照明下，受測者表現雖然傾向於支持白色最亮假設，但無法以二種明度序位來解釋。據上，人們仰賴明度錨定作為色彩辨識基準時仍不具備規律性，因此不適合作為設計師用來進行色彩規劃之依據。

關鍵詞：虛擬照明、色彩辨識、主觀明度、明度錨定、錨定策略

論文引用：林大偉、孫春望（2011）。虛擬照明改變下以主觀明度為錨定基準的色彩辨識。《設計學報》，16（1），1-18。

## 一、前言

1980 年代以後，個人電腦普及且趨於廉價，不但使得許多設計作業逐漸轉進電腦平台，更在 1990 年代的網際網路普及之後，許多以數位為基礎的新興設計行業逐漸展露，例如：遊戲設計、虛擬實境、電腦動畫、網站設計、網路廣告、動態圖像。在全面數位化之際，不同的設計產業分別地遭遇到「色彩一致性」的相關問題，大多屬於硬體設備上的溝通科技，像是色彩校正。以數位印刷為例，必須在顯示器、印表機和最終印刷品之間取得一致色彩；而網路或視訊相關產業，則致力於不同顯示器的一致色彩。然而，另一個同樣發生在數位設計領域但較少被關心的色彩一致性議題，屬於「色彩認知」範疇，存在於以電腦軟體模擬照明的虛擬環境之中，特別是遊戲設計、虛擬實境和電腦動畫三個領域。

以知名的網路遊戲「魔獸世界」(Blizzard, Irvine, CA, USA) 為例, 使用者扮演虛擬角色穿梭於不同虛擬場景, 為了讓遊戲保持順暢, 許多視覺物件的細節往往被簡化, 以期降低遊戲引擎的負擔。此時, 色彩儼然成為重要的視覺辨識元素, 如圖 1 (a) 所示, 盟友的服飾色彩往往是分辨敵我的重要依據。然而, 隨著遊戲進行, 這些色彩將隨著虛擬照明的劇烈改變而變化, 如圖 1 (b) 所示, 使用者在如此情境中將如何保持一致的色彩認知? 這個問題類似於「色彩恆常」(color constancy) 這個經典的色彩基礎研究, 但不完全相同。其中最大的差異來自於, 虛擬環境中的照明色彩與表面反射色彩, 全部由電腦軟體運算模擬所得, 其所涵蓋的色彩空間遠小於人們在真實世界中的可視色彩, 其演色性也與真實世界大不相同。



圖 1. 虛擬遊戲角色的服飾色彩隨著由電腦模擬的虛擬照明而改變的二種情境

在可見文獻中, 色彩恆常一般被定義為: 「忽略照明改變而保持物體表面色彩感知不變的一種視覺現象」(Valberg & Lange-Malecki, 1990; Foster, Craven & Sale, 1992; Zeki, 1993; Hurlbert, 1997; Ebner, 2004)。實際上, 為了保持這種色彩認知一致性, 對於真實世界中的複雜資訊, 人類所能採取的認知途徑往往是多樣化且富於彈性, 除了仰賴視覺系統所取得的物理資訊之外, 同時也須倚靠大腦中更高階的資訊處理系統進行邏輯判斷或推演, 甚至還需要一些想像力。許多研究指出, 人類視覺 (human vision) 對於外界資訊的判斷, 確實摻雜了一定程度的物理假設 (Kersten et al., 1996; Speigle & Brainard, 1996)。然而, 本研究好奇的是, 在視覺資訊相對簡化的虛擬環境中, 特別是在演色性大不相同的虛擬照明劇烈改變之下, 什麼樣的視覺資訊適合人類視覺進行物理假設, 並且使得色彩辨識的水準保持一致。據此, 曾經在明度恆常 (lightness constancy) 和色彩恆常領域中被極度重視的「明度資訊」(lightness information), 被本研究視為一項重要的視覺線索而檢驗。同時, 人們將如何運用此一明度資訊的「認知策略」也將被觀察, 其所呈現的規律性也許可成為設計師從事虛擬環境設計時的用色依據。

## 二、文獻探討

### 2-1 明度標籤與相對明度

與明度資訊相關的色彩恆常研究, 最早可以追溯到 Monge 在 1789 年所發表的文章 (Kuehni, 1997)。Monge 透過紅色玻璃觀察眼前場景時, 發現原本色彩各異的物體即便全部染上紅色, 人們依然可以不同濃度的紅色來分辨物體的原有色彩, 特別是白色物體。Monge 認為, 關鍵是白色物體擁有場景中的最高明度, 這是一種「明度標籤」(lightness tab) 的概念, 不過當時未被 Monge 深入探討。對於長期習慣以色相來分辨色彩的人們來說, 這種以明度標籤來分辨色彩也許不是一項熟悉的行為, 但是對於二色色盲

(通常是紅綠色盲)者來說,學習將明度標籤當成分辨色相的輔助線索,是認識色彩的另一種選擇 (Jameson & Hurvich, 1978)。更甚者,天生的全色盲科學家,在從未經歷全彩視覺的情況下,卻能發展獨特的辨識策略而正確地使用色彩,所仰賴的基礎也來自於明度標籤 (Sacks, 1997)。有趣的是,在許多照明劇烈改變的情況下,色覺正常的人們所看到的色彩視野,其實非常類似於色盲者所見。因此,明度標籤也許是值得被仰賴的色彩辨識線索。

實際上,以明度標籤來分辨色彩之間的差異,有其優點;但在用來精確地辨識色彩時,卻有其困難。若不考慮色相,僅以無彩色的灰階來觀察,當照明強度不變時,人們可以輕易地分辨出不同灰階之間的明度排序 (lightness sequence),但不見得能夠指出特定灰階的真實明度 (luminance);而當照明強度改變時,雖然灰階之間的明度排序因為不會改變而可以輕易地被分辨,但是人們依舊無法正確地辨識特定灰階的真實明度。這個現象,首度被 Wallach (1948) 以實驗證明,他將一塊色彩均勻的單色紙板放在受測者面前,當紙板以固定照明照射時,只須適當改變紙板周圍的照明亮度,就可以使受測者感知這塊紙板呈現出由黑到白的任何一種灰階,而事實上,紙板本身並沒有發生任何變化,這就是所謂的「相對明度」 (relative lightness) 概念。

當相對明度的觀念應用到色彩恆常時,情況則顯得更為複雜。在不改變色相組合的情況下,若單純地改變照明強度而不改變光譜成份,那麼色相之間的明度排序同樣不會改變,因此容易用來估計色相之間的色差比例,如同 Rood (1879) 所提出的色相的自然連鎖 (natural sequence of hues)。然而,當照明的光譜成份改變時,由於物體表面對於不同波長色光有著不同反射率,色相之間的明度排序關係也將隨之變動。在此情況下,若能取得照明光譜成份,人們也許還能根據粗略的混色概念推測照明改變後的表面色彩。實際上,在大部分的情況下,環境照明的光譜成份不容易被預知。為了解決此一棘手問題,活躍於影像工程中的白平衡 (white balance) 理論,嘗試著在眾多色彩中找出一項色彩極端值,將之視為基準,因此可以推算並還原視野中的全部色彩。雖然,白平衡各項理論大多基於演算之便利,並非忠實於視覺系統的結構與功能,因此尚不足以解釋人類視覺的色彩恆常機制。但是,若從設計師的角度來看,提供一項有效的視覺線索而使得使用者保持一致的色彩認知,白平衡相關理論所關心的色彩極端值概念,也許可以指引設計師在從事虛擬環境設計時的一個用色啓示。

## 2-2 錨定策略：灰色世界與白色最亮

如同一個簡單的統計問題:已知樣本數 (個數) 及其相對距離 (標準差),那麼尋求一個基準點,再以這個基準點推算其他樣本的正確數值時,這個基準點可能是平均數、中位數、最大值或是最小值,Wallach (1963) 嘗試採用這樣的概念來彌補相對明度的不足。這個基準點,也就是一個可以用來當作恆定標準的明度標籤,給予適當運算條件之後,可以發展出一種重建色彩的演算法, Gilchrist 等人 (1999) 將之視為「錨定規則」 (anchor rule)。由這樣的「錨定規則」概念所衍生出來的演算法,主要用來解決影像工程的白平衡問題,其中最著名的演算法,則是灰色世界假設 (gray world assumption, 以下簡稱 GWA) 和白色最亮假設 (white patch hypothesis, 以下簡稱 WPH)。這二種理論基礎各自有其優缺點,近年來有人不斷嘗試融合並改進,諸如 ACE (Rizzi, Gatta & Marini, 2002)、Lam (Lam, 2005)、RSR (Provenzi et al., 2008) 等。不過,灰色世界所關注的色彩中間值,以及白色最亮假設所關心的色彩極端值,目前仍是白平衡相關理論的運算依據之二。

GWA 和 WPH 究竟如何運作?簡單的說,GWA 假設單一場景中所有物體所反射的紅光 (R)、綠光 (G) 和藍光 (B) 出現的機率相同,而實際運作流程是:當一張色彩變化豐富的影像被呈現時,GWA

認為這影像所組成的 RGB 平均值，應該綜合平均出一個理想的灰色值（Chikane & Fun, 2006）。於是，GWA 根據此一理想灰色值，分別動態調整 RGB 的灰階分布圖之後，再還原重建該影像的應有色彩。但是，GWA 有一個很大的缺點，當場景中有著顯著的主調色彩（例如：紅色調）時，那麼調整之後的影像則有嚴重偏色的情形（陳錦杏等人，2006）。另一方面，以白色為基準點的 WPH 又稱為「完美反射體假設（perfect reflector hypothesis）」，WPH 假設單一場景中的最亮點應該是由鏡面表面所反射出的光澤，被視為參考白點。WPH 認為，在任何情況下，這個參考白點的 RGB 值應該是極大值（也就是白色），其他色彩也以此為基準而校正（Chikane & Fun, 2006）。與 GWA 互補的狀況是，WPH 擅長處理單一色調的影像，但處理色彩豐富的影像時，容易過亮或產生色偏（陳錦杏等人，2006）。

實際上，在當代色彩恆常研究中，若要追究人們如何達成色彩恆常，其肇因與程序，遠比影像工程所關注的白平衡問題還要複雜許多。然而，若從設計角度切入，提供適當的視覺線索，讓使用者在虛擬照明劇烈改變之下仍然可以保持一致的色彩認知，則是適合被開發的設計實務議題。因此，GWA 和 WPH 所各自關注的色彩中間值和色彩極端值，也許是可以被考量並檢驗的視覺線索。只是，本研究好奇的是，當人類視覺面臨如此明度資訊而當成色彩辨識依據時，究竟如何處理？其色彩認知過程，本研究將之視為一種「錨定策略」（anchor strategy），而與 Gilchrist 等人（1999）所言之「錨定規則」有所區隔。理由是，除 Gilchrist 等人的研究著重於明度恆常的差異之外，「錨定規則」比較適合應用於機器視覺中獨立且精密的演算過程；而「錨定策略」屬於一種模糊、多面向且極具彈性的決策過程，似乎比較適合用來說明人類視覺的運作模式。

## 2-3 主觀明度與設計

另一個有趣的問題是，當明度資訊被視為重要的色彩辨識依據時，人們所感知的明度資訊，是否如同設計師所預測？實際上，不同於色彩三屬性中的「理論明度」（lightness）具有客觀性和穩定性，並且具有可加成性，人類視覺所感知的物體表面亮度被視為「主觀明度」（brightness），可能受到視野、周遭背景和適應狀況等因素所影響，屬於一種不穩定且有個人差異的視知覺（石曉蔚，1996；Fairchild, 2005）。林智祥與陳一平（2004）曾對於人類視覺的穩定性產生好奇，巧妙地安排「等明度色相」而進行定量測量，觀察受測者在比較前進色與膨脹色的順序關係的同時，發現了主觀明度介入色彩心理感覺的判斷。因此，當明度資訊被視為色彩辨識依據時，主觀明度應該獨立被觀察，而和機器所量測的真實明度有所區隔。

在設計實務上，色彩經常被視為重要的設計元素。然而，主觀色彩感知是相對較少被設計師所關心的設計項目，卻是人們用來感受世界的重要視覺線索，即使人們身處於電腦模擬的虛擬世界之中。若以 Dreyfuss（1955/2003）的人機系統概念，用來描繪設計師、使用者、環境和設計物四者的微妙關係，如圖 2 所示，設計物位於設計師、環境和使用者三者之間，是設計師用來描繪環境的媒介，也是使用者用來認識環境的線索。一般而言，設計師建構設計物的色彩依據，大部分來自於量測與演算，屬於一種物理建構的過程；使用者則透過設計物的外觀色彩來感受環境，屬於一種心理建築的過程。設計過程中，使用者的使用經驗，可能回饋給設計師而形成另一部份的設計依據。於是，有經驗的設計師不斷地周遊於物理資料和心理經驗，進而能夠預測使用者可能產生的行為，也因此調整設計物內容，使其接近理想狀態。因此，一個設計物是否良善，設計師的預測技巧往往是一項重要關鍵。然而，當使用者所回饋的資訊，不再是透過客觀途徑而量測，而是一種具有個人差異的主觀感受時，那麼設計師是否可以尋求不同準繩來協助設計，正是本研究所亟於理解的議題。



圖 2. 設計物與設計師、使用者和環境之間的關係圖

## 2-4 錨定策略所形成的三種假設

據前所述，不同於經典色彩恆常基礎研究，本研究所關心的是，在以電腦軟體模擬的虛擬環境中，當照明劇烈改變時，根據現場所提供的明度資訊當作視覺線索，人們將如何運用？其色彩認知模式是否具有規律性而可被預測？因此，三種可能被人們採用的錨定策略被視為三個假設，如下所示：

**H1：白色最亮假設：**人們將場景中的最亮點視為純白參考點時，色彩辨識表現最佳。

**H2：灰色世界假設：**人們將場景中的明度中間值視為灰色參考點時，色彩辨識表現最佳。

**H3：黑色最暗假設：**人們將場景中的最暗點視為純黑參考點時，色彩辨識表現最佳。

其中，H1 和 H2 來自於解決白平衡問題的二種錨定規則，分別以 GWP 和 WPH 為其理論基礎。雖然，GWP 和 WPH 過於簡化而不足以解釋人類視覺的色彩恆常機制，但其中間值（中灰）和極端值（黑或白）的概念也許適合作為設計師用來提供給使用者的視覺線索。實際上，當人們採用這二種錨定基準而進行色彩辨識時，並不如機器那般可以進行精密演算，卻可能是一連串的假設、權重和推理的決策過程，本研究將之視為「錨定策略」，而不同於 Gilchrist 等人（1999）的「錨定基準」。

另一方面，本研究所採用以電腦模擬的虛擬實驗環境，儼然不同於實體場景和真實照明所形成的實驗環境。除了色彩空間和演色性大不相同之外，人們在實體場景所能依賴而判斷的色彩資訊，大多來自反射表面，由於大部分的反射表面反射率（reflectance）有其極限，白色因此容易成為錨定基準（Gilchrist, 2006）。然而，當電腦螢幕成為人們的主要觀測目標時，電腦螢幕的發光功率則成為新的判斷依據。在此情況之下，RGB 均不發光的黑色也許相對顯得更穩定且可靠。因此，本研究提出第三種錨定策略：黑色最暗假設（black patch hypothesis，簡稱 BPH），而成為第三個假設 H3。

## 三、研究方法

### 3-1 受測者

共有 48 位受測者參與實驗，均通過「石原氏色覺異常檢查表」（Kanehara Shuppan, Tokyo, Japan）之檢驗，表示辨色能力均屬正常。參與本研究實驗之前，48 位受測者從未參與過類似實驗。

### 3-2 設備

為了在虛擬照明劇烈改變之下觀察人們的色彩辨識水準，以及考慮色彩呈現和情境控制的穩定性，本研究採取電腦來取得實驗數據，同時希望藉此所得的結果，將可作為日後設計師的用色參考依據。本

研究所採用之硬體設備為 ASUS 廠牌之 W3/V 筆記型電腦，螢幕規格為 14.1 吋之 WXGA 液晶顯示器，最高亮度為  $160 \text{ cd/m}^2$ （螢幕亮度在實驗進行期間被調至 95%~100% 之間），ATI Mobility Radeon X600 獨立顯示卡，解析度為  $1280 \times 768 \text{ pixels}$ ，24bit 全彩顯示。螢幕事先採用 Spyder2PRO™（Color Vision, New Jersey, USA）螢幕校色器進行校正，在實驗之前暖機 30 分鐘。每一位受測者被要求保持 50 公分的觀測距離，如圖 3 所示，並在實驗之前進行至少 30 分鐘的暗適應。

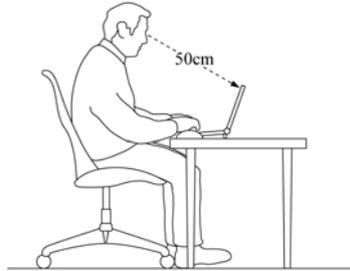


圖 3. 受測者、筆記型電腦和實驗環境之間的關係示意圖

### 3-3 刺激

#### 3-3.1 測試光源

爲了排除色彩適應或其他機制的補償效應（Arend & Reeves, 1986），以及避免距離太小的色差容易引起混淆（Foster, Nascimento & Amano, 2004），本研究因此增加測試光源以及色彩樣本的色相間隔，以期建構「虛擬照明劇烈改變」之情境。測試光源的 RGB 值比例，參考來自於 Land 與 McCann（1971）曾經所採用的 60:35:6，以及 Zeki（1999）所沿用的 60:30:10，本研究進而簡化爲 6:3:1。這個比例依序輪替混合後（例如：1:6:3、3:1:6、6:1:3、3:6:1 和 1:3:6），共獲得 6 組測試光源（T1~T6），以下簡稱測試光源（T），換算成 CIE LUV 數值之後，呈現於表 1。其中，T1 和 T4 由於 R 的數值最高，被視爲長波長照明。T2 和 T5 的 G 數值最高，被視爲中波長照明。T3 和 T6 的 B 數值最高，被視爲短波長照明。

表 1. 測試光源和色彩樣本之 RGB 和 CIE LUV 對應表

色彩刺激	Munsell 標示法 <sup>a</sup>	色光三刺激值			CIE LUV 值		
		R	G	B	L <sup>b</sup>	u'	v'
標準光源 (S)		255	255	255	100.00	0.20	0.47
測試光源							
T1 (L)		255	128	42	36.87	0.32	0.53
T2 (M)		42	255	128	73.57	0.13	0.53
T3 (S)		128	42	255	13.47	0.21	0.23
T4 (L)		255	42	128	24.47	0.38	0.46
T5 (M)		128	255	42	76.28	0.15	0.56
T6 (S)		42	128	255	23.15	0.16	0.31
PCCS 色彩樣本							
v4 (rO)	10R	252	96	65	29.48	0.35	0.52
v8 (Y)	5Y	253	204	8	64.26	0.24	0.55
v12 (G)	3G	0	160	88	25.71	0.13	0.53
v16 (gB)	5B	0	126	156	16.76	0.14	0.41
v20 (V)	9PB	89	88	156	11.59	0.19	0.36
v24 (RP)	6RP	171	51	96	11.88	0.34	0.45

<sup>a</sup> PCCS 色彩樣本與 Munsell 標示法之間的對應，來自於 Nayatani 與 Komatsubara（2005）研究中的表 2。

<sup>b</sup> 以本研究所採用螢幕之最高亮度  $160 \text{ cd/m}^2$  爲參考白，視爲 CIE Y=100，x 和 y 則分別爲 0.3127 和 0.3290。

### 3-3.2 色彩樣本

相對於 Munsell 和 NSC 色票，PCCS (practical color coordinate system) 色票因為廉價並且容易取得，經常被國內設計師所採用。另一方面，由於 PCCS 的色相環兼併色光三原色以及色料三原色 (林昆範, 2007)，且平均分配於 24 個色相之間，因此成為取樣基礎 (Nayatani, 2003)。因此，本研究從 PCCS 色相環中的 24 個色相中每隔 60° 依序擷取，共得 6 個色相，如表 1 所示。由於 PCCS 並未提供具公信力的量化資料，因此以日本色彩研究所出版之「129a 色票」(Japan Enterprise, Tokyo, Japan) 為基礎，挑選 v4 至 v24 等 6 張色票。每一張色票均採用 CR10 色差計 (Konica Minolta, Tokyo, Japan) 進行量測，以 CIE 之 D<sup>65</sup> 標準光源以及 10° 觀察角度針對色票上的 5 個不同單點位置取得色彩平均值，再換算成 CIE LUV 數值，呈現於表 1。同時，本研究並列出 6 張色票的 Munsell 標示法，以便於 Munsell 慣用者對照。

## 3-4 實驗設計

### 3-4.1 自變數與依變數

48 位受測者都必須經歷二組實驗：「色彩辨識」和「明度排序」，如圖 4 所示。在二組實驗中，6 組測試光源都被視為自變數，並且被歸類成短、中、長三種波長之虛擬照明；而受測者在照明改變之後針對 6 個 PCCS 色彩樣本進行辨識的結果經由轉換後，被視為「辨識率」，屬於「色彩辨識實驗」的依變數；受測者針對相同的 6 個 PCCS 色彩樣本在虛擬照明改變之後進行明度排序之後的結果，被視為「主觀明度序位」(brightness ranking)，屬於「明度排序實驗」的依變數。同時，為了進一步理解受測者為了進行色彩辨識所採取的錨定策略，「辨識率」和「主觀明度序位」二項依變數以「排序相關檢定」進行檢測。

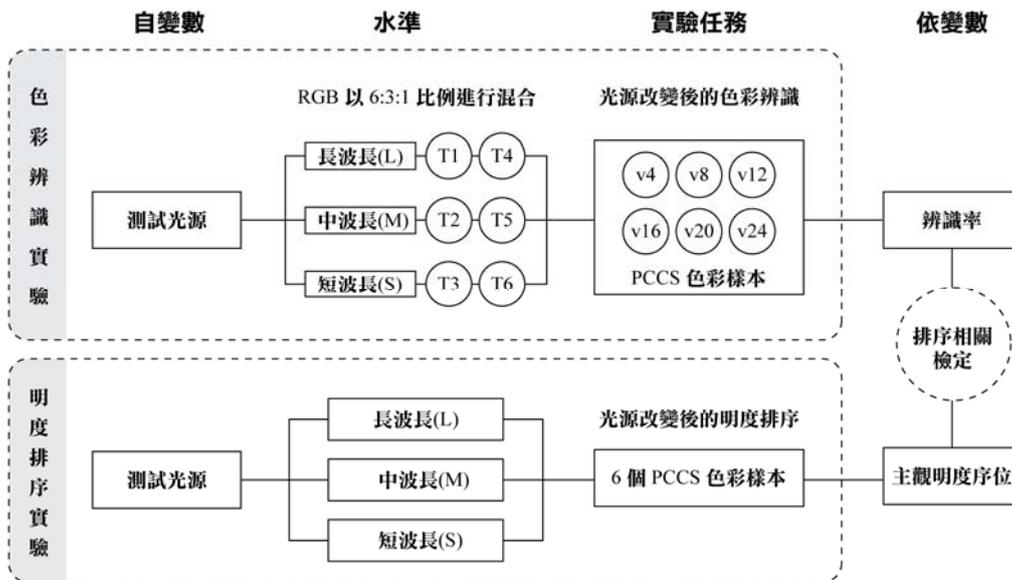


圖 4. 自變數、依變數與實驗任務之關係圖

### 3-4.2 實驗 1：色彩辨識

「色彩辨識實驗」屬於組內實驗設計，共有 36 個試驗 (6 組測試光源 x 6 個色彩樣本)。為了避免次序效應和順序效應，色彩樣本在每一測試光源之下的呈現順序，以亂數呈現。每一試驗的執行程序分

成二個階段，如表 5 所示。6 個 PCCS 色彩樣本以等體積的圓球呈現，在標準光源 (S) 下被置於一個可以旋轉的虛擬樂透彩箱，並靜置 3 秒，受測者可以仔細觀察 6 個色彩樣本，此階段被視為「瞭解階段」。接下來，標準光源 (S) 關閉至畫面全黑，歷經 1 秒的黑暗間隔之後，6 個色個色樣本隨著樂透彩箱旋轉而改變位置，照明色彩也同時變更為測試光源 (T)，此時受測者可以針對被指定的圓球（以不受照明色彩影響的絕對白點標示）進行色彩辨識，並在畫面右側選擇指定圓球的真實色彩，此階段被視為「辨識階段」，此階段沒有時間限制，直到受測者按下「OK」按鈕，才會進入另一個試驗。在受測者參與實驗之前，所接受的指導語是：「請在照明改變之後，根據被絕對白點所指定的彩色球，在畫面右方選擇此一色球的原有面貌」。

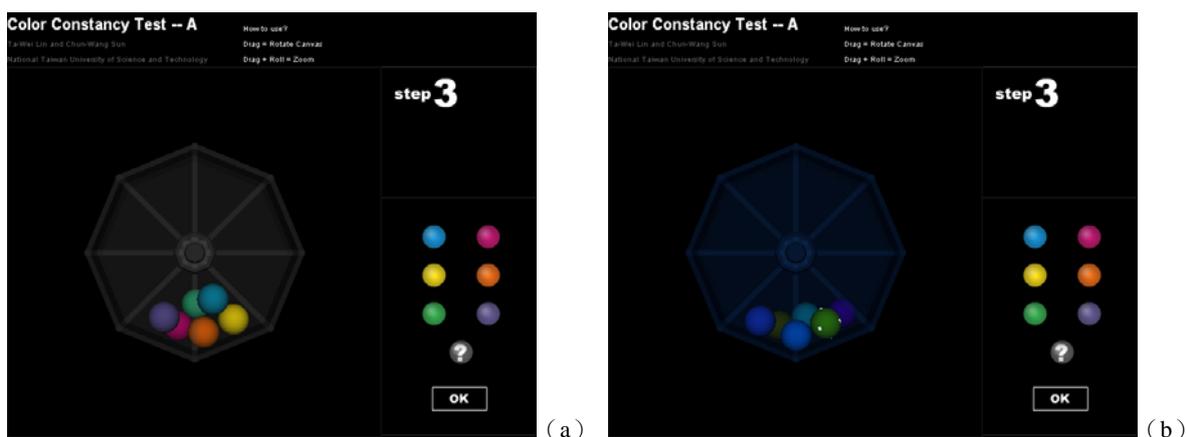


圖 5. 「色彩辨識實驗」的二個階段：(a) 瞭解階段；(b) 辨識階段

### 3-4.3 實驗 2：明度排序

「明度排序實驗」被安排於「色彩辨識實驗」之後，目的是為了避免受測者產生學習效應而影響色彩辨識的結果，同樣屬於組內實驗設計，共有 6 個試驗（6 組測試光源）。每一測試光源的呈現順序，同樣以亂數分配。受測者被賦予的實驗任務是：根據自己雙眼所視，自由地以滑鼠拖曳的方式，將畫面中的彩色球，依據亮度高低，依序排列於畫面下方的空欄位中，越亮的彩色球應被排列在越前面（序位數字越小）的空欄位。6 個色彩樣本在測試光源 (T) 中的排序前後情形，如圖 6 所示。在受測者所接受的指導語是：「請比較下列彩色球的亮度，再依序排列，並將最亮的彩色球放在 1 號位置，依此類推」。

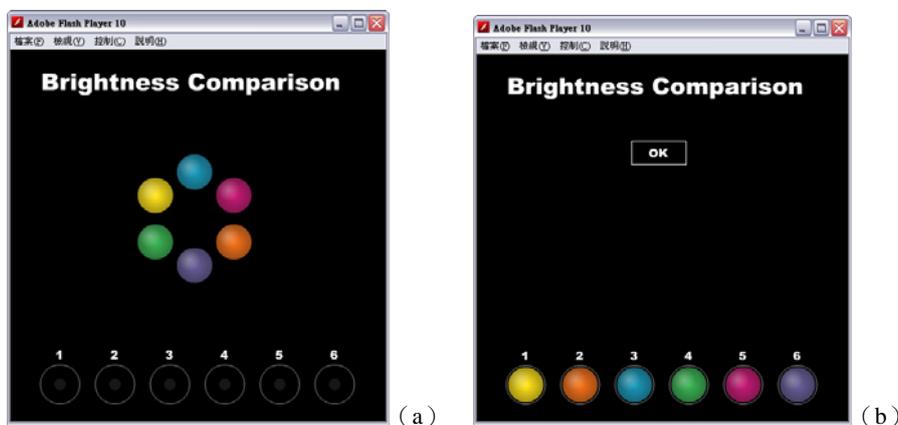


圖 6. 6 個 PCCS 色彩樣本在「明度排序實驗」中二種狀態：(a) 明度排序之前；(b) 明度排序之後

### 3-5 資料分析

#### 3-5.1 辨識率

受測者在測試光源 (T) 下正確辨認 6 個 PCCS 色彩樣本的累計次數，被製成次數分配表之後，再轉換成百分率分配表，被視為「辨識率」，如公式 A 所示。IR 為辨識率，TF 為試驗累計次數，CF 則為正確辨識色彩次數。本研究假設，受測者在測試光源 (T) 下的辨識率越高，則表示色彩辨識的表現越好。

$$IR = \frac{CF}{TF} \times 100\% \quad \text{公式 A}$$

#### 3-5.2 理論明度序位

以 CR10 色差計進行量測每一個色彩樣本在測試光源 (T) 下的色彩數據，轉換成 CIE LUV 數值之後，所取得的明度排序資料，被視為「理論明度序位」(lightness ranking)，序位之間存在絕對的次序關係和距離關係，具有可加成性。如圖 7 (a) ~ (f) 所示，隨著測試光源 (T) 的光譜成份改變，6 個 PCCS 色彩樣本之間的明度序位也隨之改變。「理論明度」相當於色彩屬性中的 lightness，是一種穩定且可被機器量測的色彩值。

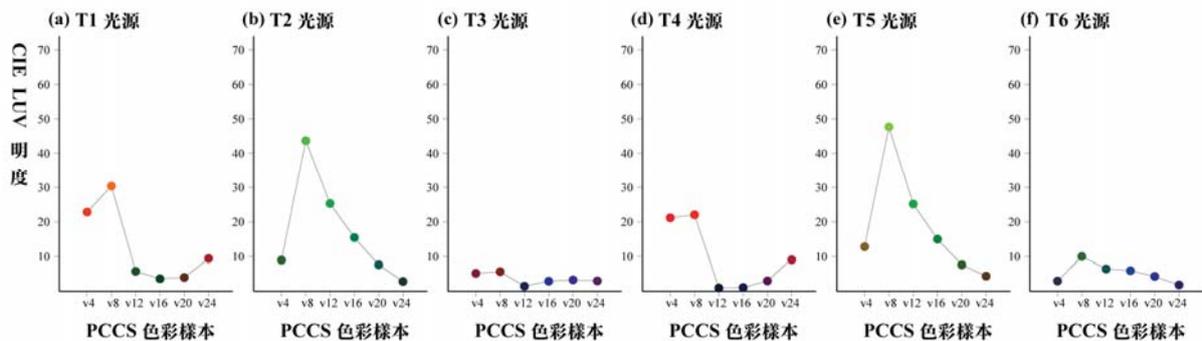


圖 7. 6 個 PCCS 色彩樣本在 6 組測試光源之下的 CIE LUV 理論明度序位

#### 3-5.3 主觀明度序位

來自於受測者在測試光源 (T) 下針對 6 個 PCCS 色彩樣本的理论明度進行排序，所取得的明度排序資料，被視為「主觀明度序位」。不同於「理論明度序位」，除了具有顯著的個人差異之外，主觀明度序位之間僅有相對次序關係而無絕對距離關係。本研究假設，理論明度序位和主觀明度序位，二者均可能被視為錨定基準而影響受測者的色彩辨識表現。「主觀明度」相當於人類視覺中的 brightness，是一種不穩定且由個人估計的色彩值。

#### 3-5.4 主觀表現序位

為了觀察主觀明度序位對於色彩辨識的貢獻水準，每一位受測者的辨識結果，以各自取得的主觀明度序位為錨定基準進行轉換之後，被視為「主觀表現序位」，而原辨識目標的主觀明度序位被視為「主觀基準序位」，用來理解受測者所選擇的色彩樣本與辨識目標之間的序位是否吻合。簡單地說，主觀基準序位，來自於「明度排序實驗」；主觀表現序位來自於「色彩辨識實驗」，二者都有個人差異。以 T1

測試光源為例，某位受測者對於色彩樣本從 v4~v24 的主觀明度序位關係為 2、1、4、6、5、3，因此，當辨識目標為 v4 時，主觀基準序位為 2，而該受測者選擇 v16，主觀表現序位為 6，二者呈現不吻合。本研究假設，當二者吻合度越高時，表示主觀明度序位在色彩辨識方面的貢獻越大。

### 3-5.5 理論表現序位

為了觀察理論明度序位對於色彩辨識的貢獻水準，每一位受測者的辨識結果，以理論明度序位為錨定基準進行轉換之後，被視為「理論表現序位」，而原辨識目標的理論明度序位被視為「理論基準序位」，如圖 7 所示之序位。簡單地說，理論基準序位，來自於 CR10 的機器量測，不會呈現個人差異；理論表現序位來自於「色彩辨識實驗」，有個人差異。本研究假設，當二者吻合度越高時，表示理論明度序位在色彩辨識方面的貢獻越大。

## 四、結果分析與討論

### 4-1 辨識率平均值

48 位受測者對於 6 個 PCCS 色彩樣本在 6 組測試光源下的色彩辨識表現，如表 2 所示，整體辨識率平均值為 41.09%，表示色彩辨識表現並不理想。若將受測者在 6 組測試光源下所得的辨識率以 ANOVA 進行差異檢定，所得結果為  $F_{(5,282)} = 10.973$ ， $p = 0.000 < 0.001$ ，表示其間存在著顯著差異。其中，受測者在 T1 和 T5 測試光源下的表現最佳，辨識率平均值均大於 50%，並顯著地高於其他測試光源；受測者在 T3 測試光源下的表現最差，僅有 28.47%，並顯著地低於其他測試光源。由此可見，受測者在中、長波長照明（T1 和 T5）下的色彩辨識表現較好；而在短波長照明（T3）下的表現則相對較差。

表 2. 受測者在 6 組測試光源下針對 6 個 PCCS 色彩樣本的辨識率平均值之對應表

色彩樣本	T1 光源 (36.87) <sup>a</sup>	T2 光源 (73.57) <sup>a</sup>	T3 光源 (13.47) <sup>a</sup>	T4 光源 (24.47) <sup>a</sup>	T5 光源 (76.28) <sup>a</sup>	T6 光源 (23.15) <sup>a</sup>	平均值
v4	68.75 <sup>c</sup>	33.33	25.00	47.92	66.67 <sup>c</sup>	47.92	48.26
v8	60.42	68.75 <sup>c</sup>	10.42	25.00	72.92 <sup>c</sup>	62.50	50.00
v12	45.83	54.17	10.42	10.42	68.75 <sup>c</sup>	31.25	36.81
v16	14.58	20.83	64.58 <sup>c</sup>	50.00	18.75	64.58	38.89
v20	45.83	14.58	27.08	37.50	41.67	18.75	30.90
v24	64.58	18.75	33.33	60.42	64.58 <sup>c</sup>	8.33	41.67
平均值	50.00 <sup>b</sup>	35.07	28.47	38.54	55.56 <sup>b</sup>	38.89	41.09
F 值	8.486 <sup>d</sup>	11.963 <sup>d</sup>	10.996 <sup>d</sup>	7.526 <sup>d</sup>	9.983 <sup>d</sup>	13.154 <sup>d</sup>	10.973 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> 表示測試光源 (T) 的 CIE LUV 亮度值。

<sup>b</sup> 表示該測試光源的辨識率平均值  $\geq 50$ ，且與平均值低於 50 的測試光源之間有著顯著差異者。

<sup>c</sup> 表示該色彩樣本的辨識率平均值  $\geq 60$ ，且與同一測試光源下平均值低於 60 的色彩樣本之間有著顯著差異者。

<sup>d</sup> 表示 ANOVA 檢定後有顯著差異， $p < 0.05$ 。

這樣的結果，也許可以透過圖 7 來理解，中波長照明因為擁有較高的 G 值而亮度平均較高；長波長以 R 值為主而亮度次之；短波長以 B 值為主而亮度最低。根據 Foster (2004)、Nascimento (2005) 與 Amano (2006) 所關心的色差議題，當照明提供足夠亮度的情況下，色彩樣本之間的色差距離較大，因此比較容易辨識；相對地，當照明亮度不足時，色差距離縮小而導致辨識困難。不過，假設色差與辨識

率之間的相對關係推論合理，那麼受測者在 CIE LUV 明度值 (lightness) 高達 73.57 的 T2 測試光源下的色彩辨識表現，應該優於在明度值只有 23.15 的 T6 測試光源下的表現，然而卻是 T6 (38.89%) 的表現優於 T2 (35.07%)。雖然二者之間的差異並不顯著 ( $t=3.819, p=0.370>0.05$ )，卻也顯示了色彩樣本之間的色差 (明度差) 仍不足以合理解釋受測者的色彩辨識表現。

進一步觀察，受測者對於每一個色彩樣本的個別表現。若將辨識率 60% 視為門檻，超過門檻且與辨識率低於 60% 的色彩樣本之間有著顯著差異的 PCCS 色彩樣本之中，在 CIE LUV 明度值最高的中波長照明 (T2 和 T5) 之下的 v8，色彩辨識表現顯著地優於其他色彩樣本，符合於白色最亮假設 H1。有趣的是，若對應圖 7 來觀察，在 T5 測試光源之下，除了反射率最高的 v8 之外，受測者對於 v4、v12 和 v24 的色彩辨識表現也顯著較好，然而，此一現象卻未在同樣是中波長的 T2 測試光源下浮現，可見受測者在 T2 和 T5 這 2 組測試光源下所採用的錨定策略有著多重面向 (H1、H2 或 H3)。

另一個值得注意的現象，反應在 T1 測試光源下的 v4 和 T3 測試光源下的 v16，受測者的表現都顯著地優於其他色彩樣本。但是，這 2 個 PCCS 色彩樣本的明度序位都不是最高 (請見圖 7 (a)、(c)，分佔第 2 位和第 6 位)，很明顯地，受測者的表現並不符合於白色最亮假設 H1。然而，是否符合於 H2 或 H3，在尚未取得更進一步分析數據之前，無法斷定。但是，若輔以 T3 和 T6 測試光源下的平淡表現 (28.47% 和 38.89%) 來看，受測者若須依賴明度序位來達成良好的色彩辨識時，那麼充足的照明強度則是必要條件，如同中波長照明的高亮度 (CIE LUV 明度值至少高於 73.57)，並且錨定策略明顯地傾向 H1。倘若當照明光譜成份改變之後的照明強度不足時，如同短、長波長照明 (CIE LUV 明度值低於 36.87) 之下，可以被仰賴的明度序位則顯得晦暗且紊亂，那麼受測者的錨定策略也隨之變得曖昧不明。

#### 4-2 主觀與理論明度序位之匹配分析

從「明度排序實驗」結果發現，每一位受測者所產出的主觀明度序位不盡相同，但依稀可以看出某種規律性。因此，先以 Kendall's W 檢定來檢視 48 位受測者的主觀明度序位，其間確實存在著高度一致性。若以受測者在 6 組測試光源下的表現來觀察，主觀明度序位的一致性介於 0.429~0.890 之間，並且達到顯著水準 ( $p=0.000 < 0.005$ )，表示 48 位受測者的主觀明度等級平均數有著相當程度的統計解釋力。

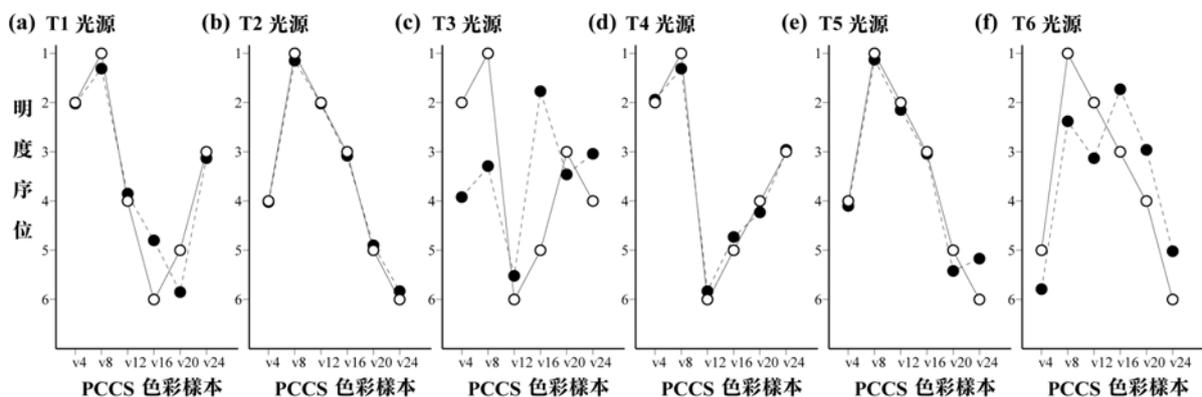


圖 8. 受測者之主觀明度等級平均數與理論明度序位匹配分析圖

因此，若將受測者所產出的主觀明度序位 (等級平均數) 和理論明度序位進行匹配，結果如圖 8 所示，理論明度序位以白點實線表示，而主觀明度序位以黑點虛線表示，在中、長波長照明 (T1、T2、T4 和 T5) 下的二條軌跡呈現緊密吻合，表示有著高度相關，透過 Spearman's rho 相關分析，4 組測試光源

的相關係數介於 0.943~1.000，均達顯著水準。然而，同樣屬於短波長照明的 T3 和 T6 測試光源，相關係數分別為 0.029 和 0.657，且未達顯著水準，同時二條軌跡分別在圖 8 (c)、(f) 呈現明顯錯位，表示主觀明度序位和理論明度序位之間並無關聯。如此結果意味著，當照明強度充足（中、高波長照明的強度較高）時，主觀明度序位將比較容易符合於理論明度序位，也可以容易被預測；反之，照明強度不足（低波長照明的強度較低）時，受測者的主觀明度序位則難以透過理論明度序位來理解或被預測。

#### 4-3 來自於理論明度序位的貢獻

為了進一步理解，當照明劇烈改變之後，受測者的色彩辨識表現，色彩之間的相對明度是否成為辨識依據？據此，理論明度序位的貢獻有必要被測定。因此，當理論明度序位被受測者視為辨識依據時，機器量測的「理論基準序位」和受測者的「理論表現序位」，經由 Wilcoxon Man Whitney 檢定（簡稱排序差異檢定），共計得到 36 筆檢定結果，如圖 9 所示。圖中，「理論基準序位」以白點實線表示，「理論表現序位」以黑點虛線表示，當黑點和白點以紅線圈起時，表示二者之間沒有顯著的排序差異。換句話說，呈現沒有顯著排序差異的色彩樣本，可以被用來解釋理論明度序位的貢獻水準。這樣的 PCCS 色彩樣本，在圖 9 中共有 6 筆，佔全部表現的 16.67%。

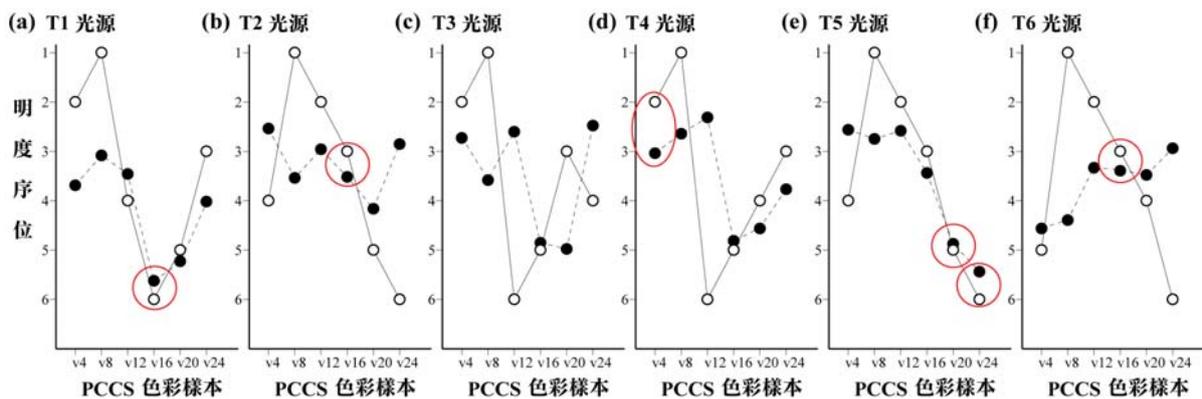


圖 9. 以理論明度為排序基準之「表現—基準」排序差異分析圖

然而，若將圖 9 與表 2 進行對應，那麼 T1 和 T2 測試光源下的 v16，以及 T4 測試光源下的 v4，雖然可以用來說明受測者將「理論明度序位」視為錨定基準，然而最終的色彩辨識表現並不理想，依序為 14.58%、20.83% 和 47.92%。相對地，在表 2 中，T1 的 v4、T2 的 v8 和 T3 的 v16，雖然有著顯著高於其他色彩樣本的辨識率，卻無法在圖 9 中說明理論明度序位的貢獻。反倒是，T5 測試光源下的 v20 和 v24，以及 T6 測試光源下的 v16，不但有著顯著高於其他色彩樣本的辨識率，並且可以用來解釋理論明度序位的貢獻。有趣的是，不同於表 2 的初始觀察，這 3 個 PCCS 色彩樣本的表现，並非支持白色最亮假設 H1。而是，若將照明強度不足的 T6 測試光源下的表現予以保留而不討論，那麼，T5 測試光源下的 v20 和 v24 的表现應該支持黑色最暗假設 H3。

#### 4-4 來自於主觀明度序位的貢獻

當理論明度序位無法解釋受測者在色彩辨識表現中的錨定基準時，主觀明度序位值得被關心。因此，同樣來自受測者，主觀排序之後的「主觀基準序位」和辨識後所得的「主觀表現序位」，經由排序差異檢定之後，共計得到 36 筆檢定結果，如圖 10 所示。圖中，「主觀基準序位」以白點實線表示，「主觀

表現序位」以黑點虛線表示，當黑點和白點以紅線圈起時，表示二者之間沒有顯著的排序差異，同樣被用來解釋主觀明度序位的貢獻水準。檢定過後，共有 13 個色彩樣本沒有顯著的排序差異，佔全部表現的 36.11%。若進一步觀察，這 13 個色彩樣本和辨識率之間的關係。發現，除了 T5 的 v20 和 v24 之外，共有 11 個色彩樣本的辨識率並不理想，請見表 2，辨識率並未顯著地高於他色彩樣本。這樣的情況，雷同於理論明度序位的分析，也不同于表 2 的初始觀察。因此，若以主觀明度序位為基準來觀察受測者的色彩辨識表現，並不支持白色最亮假設 H1，而應該支持黑色最暗假設 H3。

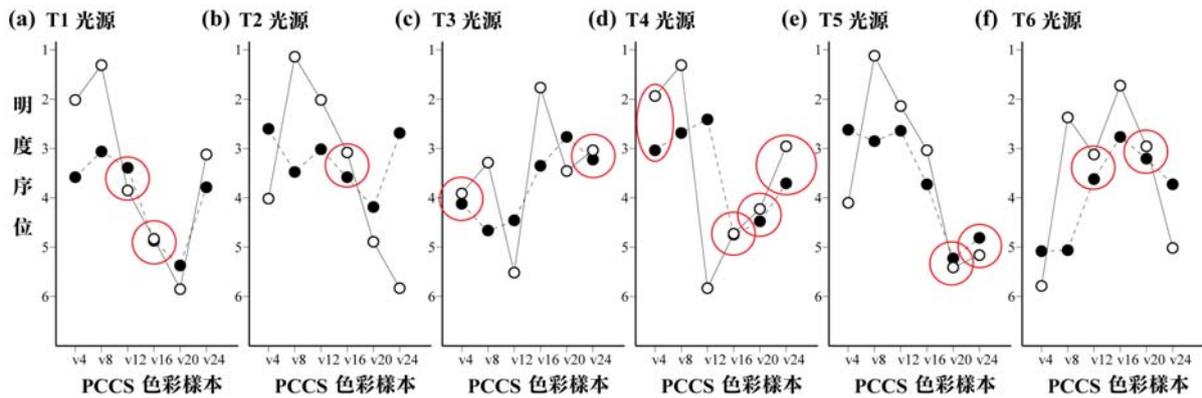


圖 10. 以主觀明度為排序基準之「表現-基準」排序差異分析圖

那麼，根據上述 4-3 和 4-4 所分析，理論明度序位或主觀明度序位，究竟何者才是受測者達成良好色彩辨識時所依賴的錨定基準？若將二者在 4-3 和 4-4 以排序差異檢定之後的排序差異距離視為連續變數，並且以測試光源 T 為分組單位，以成對 t 檢定進行兩兩比較之後，結果如表 3 所示。其中，當 2 組各 36 筆排序差異距離一起比較時，主觀明度序位和理論明度序位之間的成對相關係數為 0.661，並且有顯著差異 ( $t=3.129$ )。若分別觀察每一組測試光源時，T3 和 T6（屬於短波長照明）由於照明強度不足的緣故，二種明度序位之間顯得混亂而無交集，成對相關係數分別為 0.088 和 0.367，不具統計解釋力。而 T1、T2、T4 和 T5（屬於中、長波長照明）由於照明強度充足，雖然成對相關均達顯著水準，二種明度序位之間卻無明顯差異。

若將 4-3 和 4-4 的結果綜合觀察，可以確定的是，若以全體觀察 6 個 PCCS 色彩樣本在 6 組測試光源下的表現，受測者明顯傾向於以主觀明度序位為錨定基準，而不是理論明度序位。然而，這樣的差異，卻未反應在不同波長照明下，因此不容易解釋主觀明度序位在不同波長照明之下的貢獻。

表 3. 主觀明度與理論明度之「表現-基準」排序差異距離 T 檢定對應表

排序差異	全體比較	T1 光源	T2 光源	T3 光源	T4 光源	T5 光源	T6 光源
成對相關	0.661 <sup>a</sup>	0.834 <sup>a</sup>	0.994 <sup>a</sup>	0.088	0.830 <sup>a</sup>	0.953 <sup>as</sup>	0.367
t 值	3.129 <sup>a</sup>	1.458	1.974	2.449	1.722	0.649	0.889

<sup>a</sup> 表示有顯著差異， $p < 0.05$ 。

#### 4-5 白色最亮？還是灰色世界？

為了觀察受測者在不同測試光源下所採取的「錨定策略」，6 個 PCCS 色彩樣本的明度序位被分成 3 個群組：高明度序位、中明度序位和低明度序位。本研究假設，如果受測者在高明度序位的色彩辨識表

現較好時，表示受測者可能將場景中的最高明度（highest lightness）視為參考白，符合於「白色最亮假設」；如果中明度序位的表現較好時，表示受測者可能將場景中的中間明度（middle lightness）視為參考灰，則符合於「灰色世界假設」；如果低明度序位的表現較好時，表示受測者可能將場景中的最低明度（lowest lightness）視為參考黑，就符合於「黑色最暗假設」，如表 4 所示。其中，T4 和 T6 測試光源下，因未有色彩樣本的辨識率高於 60%，且顯著優於其他色彩樣本，因此難以判斷受測者在這 2 組測試光源下所採取的錨定策略。另外，在 T1 和 T2 測試光源下，無論理論明度序位或主觀明度序位，2 個高明度序位色彩樣本（v4 和 v8）的辨識率都相對較好，因此支持白色最亮假設 H1。不過，經由排序差異檢定之後，v4 和 v8 這 2 個色彩樣本均無法證明，較高的辨識率表現是否來自於理論明度序位的貢獻，或是主觀明度序位的貢獻。因此，根據有限數據，在照明強度較為充足的中、長波長照明之下，受測者的錨定策略，支持著白色最亮假設 H1，但無法確定是否來自於相對明度（理論明度或主觀明度）的貢獻。

表 4. 主觀明度等級平均數與理論明度序位所對應的相對明度錨定基準

色彩樣本	T1 光源		T2 光源		T3 光源		T4 光源		T5 光源		T6 光源	
	理論	主觀	理論	主觀	理論	主觀	理論	主觀	理論	主觀	理論	主觀
v4	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	4	4	2	5	2	2	4 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5	6
v8	1	1	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1	3	1	1	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1	2
v12	4	4	2	2	6	6	6	6	2	2	2	4
v16	6	5	3	3	5 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	5	5	3	3	3	1
v20	5	6	5	5	3	4	4	4	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	4	3
v24	3	3	6	6	4	2	3	3	6 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6	5
WP 白色最亮	☆ <sup>b</sup>	★ <sup>c</sup>	☆	★		★			☆	★		
GW 灰色世界									☆	★		
BP 黑色最暗					☆				☆	★		

<sup>a</sup> 表示該色彩樣本的辨識率平均值 ≥ 60，且與同一測試光源下平均值低於 60 的色彩樣本之間有著顯著差異者。

<sup>b</sup> ☆表示理論明度序位支持該假設。

<sup>c</sup> ★表示主觀明度序位支持該假設。

值得討論的是，在 T3 測試光源下，由於照明強度不足，使得主觀明度與理論明度之間的序位關係呈現極度混亂，辨識率優於其他色彩樣本的 v16，卻各自獲得不同序位的支持：在理論明度屬於低明度序位，支持著黑色最暗假設 H3；而在主觀明度屬於高明度序位，支持著白色最亮假設 H1。同樣的，經由排序差異檢定之後，v16 也無法證明較高的辨識率表現是否來自於理論明度序位的貢獻，或是主觀明度序位的貢獻。因此，根據有限數據，在照明強度不足的低波長照明之下，受測者的錨定策略，即使分別支持白色最亮假設 H1 和黑色最暗假設 H3，同樣也是無法確定理論或主觀二種明度序位的貢獻。

最有趣的現象，則呈現於 T5 測試光源之下。辨識率高於 60% 且顯著較好的色彩樣本，分佔高明度序位（v8）、中明度序位（v4）和低明度序位（v20 和 v24），同時支持本研究的三種假設。其中，經由排序差異檢定之後，v20 和 v24 均能證明，較好的辨識率同時來自於理論主觀明度二種序位的貢獻。因此，在照明強度充足之下，受測者的錨定策略，同時支持 H1、H2 和 H3 三種假設。其中，支持黑色最暗假設 H3 的部份，可以確定是來自於理論和主觀二種明度序位的貢獻。本研究認為，當電腦螢幕（發光體）被視為實驗媒介時，由於 T5 測試光源擁有最充足的照明強度（CIE LUV 明度值高達 76.28），除了可以將 6 個色彩樣本之間的色差距離拉開而便於辨識之外，不發光的黑色容易被當成錨定基準，因此使得屬於低明度序位的色彩樣本可以因此被辨識。然而，當屬於中、高明度序位的色彩樣本同樣有著較高辨識水準時，較大的色差距離也許是辨識基準，但是無法證明是來自於相對明度的貢獻。

## 五、結論

### 5-1 照明強度是必要的先決條件

根據本研究分析顯示，當色彩樣本之間的明度序位被視為一種「錨定基準」時，足夠的照明強度將是必要條件。實際上，當照明劇烈改變時，照明強度隨著光譜成份大幅度改變而下滑，往往成為色彩辨識的主要障礙。這樣的情況，通常呈現於短波長照明之中。反之，當照明中的 G 值被增加時，通常能提高照明強度而加大色彩樣本之間的色差，可以降地色彩之間的混淆機會（Foster, Nascimento, & Amano, 2004）。然而，根據本研究所得結果，色差並無法解釋其與辨識率之間的因果關係。因為，色差可以提升色彩區隔（discrimination），而非色彩辨識（identification），二者之間並無等同關係。更進一步地說，色彩區隔僅僅分辨二者之間的差異，而色彩辨識則必須正確地做出選擇。因此，本研究認為，當良好的色彩辨識被要求時，照明強度將會是先決條件，但不會是關鍵條件。

### 5-2 主觀明度應該被關心

另一個有趣的現象，在本研究中被驗證：當明度序位被視為達成良好色彩辨識的「錨定基準」時，受測者所仰賴的明度序位，傾向於主觀明度，而不是理論明度。這樣的結果，值得設計師注意。在過去的色彩理論中，具有個人差異的主觀明度從未被關心。事實上，主觀明度並非不被關心，而是難以執行。在講求經濟效益的商業生態中，設計對象往往趨向一種「平均值」，設計必須符合於大部分人的需求，而不是每一個人的需求，因此色彩被應用的根據往往來自於恆定的物理資訊。然而，當具有個人差異的主觀明度議題被凸顯時，色彩成為辨識依據的設計技巧也許必須改變。所幸，根據本研究結果，當照明強度達到一定程度時，人們的主觀明度序位大致符合於理論明度序位。換句話說，只要照明強度足夠，人們的主觀明度是可以用理論明度來預測的。

### 5-3 明度錨定不適合成為色彩辨識的主要依據

在照明強度充足的中、長波長照明下，明度序位較高的色彩，明顯地要比其他色彩更容易被辨識。這似乎斷定了「白色最亮假設」就是最佳的「錨定策略」？

事實上，當作為「錨定基準」的明度序位被仔細觀察時，如此假設卻因缺乏足夠證據而難以解釋。根據本研究驗證，明度序位較高的色彩雖有較高的辨識率，但無法證明是否來自於主觀明度序位或理論明度序位的貢獻，表示人們並非仰賴這二種明度序位來進行色彩辨識。然而，能夠同時滿足辨識率和明度序位貢獻的色彩，僅存在於中波長照明下的低明度序位，卻又令人意外地支持「黑色最暗假設」。實際上，無論如何，當人們在不同波長照明下的色彩辨識表現被觀察時，「錨定策略」往往顯得薄弱或不明顯，同時還缺乏充分證據。換句話說，在本研究所架構的實驗環境下，也就是以電腦模擬照明劇烈改變之下，明度錨定不適合成為色彩辨識的主要依據。

## 誌謝

感謝國科會計畫 NSC 93-2411-H-011-003 提供經費支持本研究進行。

## 參考文獻

1. Arend, L., & Reeves, A. (1986). Simultaneous color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 3(10), 1743-1751.
2. Chikane, V., & Fun, C. S. (2006). Automatic white balance for digital still cameras. *Journal of Information Science and Engineering*, 22(3), 497-509.
3. Dreyfuss, H. (1955/2003). *Designing for people*. New York: Allworth Press.
4. Ebner, M. (2004) A parallel algorithm for color constancy. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(1), 79-88.
5. Fairchild, M. D. (2005). *Color appearance models*. NJ: John Wiley & Sons Ltd.
6. Foster, D. H., Craven, B. J., & Sale, E. R. H. (1992). Immediate colour constancy. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12(2), 157-160 .
7. Foster, D. H., Nascimento, S. M. C., & Amano, K. (2004). Information limits on neural identification of colored surfaces in natural scenes. *Visual Neuroscience*, 21(3), 331-336.
8. Foster, D. H., Nascimento, S. M. C., & Amano, K. (2005). Information limits on identification of natural surfaces by apparent colour. *Perception*, 34(8), 1003-1008.
9. Foster, D. H., Nascimento, S. M. C., & Amano, K. (2006). Color constancy in natural scenes explained by global image statistics. *Visual Neuroscience*, 23(3-4), 341-349.
10. Gilchrist, A., Kossyfidis, C., Bonato, F., Agostini, T., Cataliotti, J., Li, X., Spehar, B., Annan, V., & Economou, E. (1999). An anchoring theory of lightness perception. *Psychological Review*, 106(4), 795-834.
11. Gilchrist, A. (2006). Seeing in black and white. *Scientific American Mind*, 17(3), 42-49.
12. Hurlbert, A. C. (1997). Colour vision: A primer. *Current Biology*, 7(7), R400-R402.
13. Jameson, D., & Hurvich, L. M. (1978). Dichromatic color language: Reds and greens don't look alike but their colors do. *Sensory Processes*, 2(2), 146-155.
14. Kersten, D., Knill, P., Mamassian, P., & Bühlhoff, I. (1996). Illusory motion from shadows. *Nature*, 379(6560), 31.
15. Lam, E. Y. (2005). Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography. In R. S. Bradbeer, & R. Martins (Eds.), *Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics* (pp. 134-139). Los Alamitos: Institute of Electrical & Electronics Engineer.
16. Land, E. H., & McCann, J. J. (1971). Lightness and retinex theory. *Journal of the Optical Society of America*, 61(1), 1-11.
17. Kuehni, R. G. (1997). Memoir concerning certain phenomena of vision by M. Monge “Memoire sur quelques phénomènes de la vision” Annales de Chimie 3 131–147 (1789). *Color Research and Application*, 22(3), 199-203.
18. Nayatani, Y. (2003). Adequateness of a newly modified opponent-colors theory. *Color Research and Application*, 28(4), 298-307.
19. Nayatani, Y., & Komatsubara, H. (2005) Relationships among chromatic tone, perceived lightness, and degree of vividness. *Color Research and Application*, 30(3), 221-234.
20. Provenzi, E., Gatta, C., Fierro, M., & Rizzi, A. (2008). A spatially variant white-patch and gray-world

- method for color image enhancement driven by local contrast. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(10), 1757-1770.
21. Rizzi, A., Gatta, C., & Marini, D. (2002). Color correction between gray world and white patch. In B. E., Rogowitz, & T. N. Pappas (Eds.), *Proceedings of SPIE*, 4662-Human Vision and Electronic Imaging VII (pp. 367-375). Bellingham: The International Society for Optical Engineering.
  22. Rood, O. (1879). *Modern chromatics: With applications to art and industry*. New York: D. Appleton & Company.
  23. Sacks, O. (1997). *The island of the colorblind*. New York: Alfred A. Knopf.
  24. Speigle, J. M., & Brainard, D. H. (1996). Luminosity thresholds: Effects of test chromaticity and ambient illumination. *Journal of the Optical Society of America A*, 13(3), 436-451.
  25. Valberg, A., & Lange-Malecki, B. (1990). "Colour constancy" in Mondrian patterns: A partial cancellation of physical chromaticity shifts by simultaneous contrast. *Vision Research*, 30(3), 371-380.
  26. Wallach, H. (1948). Brightness constancy and the nature of achromatic colors. *Journal of Experimental Psychology*, 38(3-4), 310-324.
  27. Wallach, H. (1963). The perception of neutral colors. *Scientific American*, 208(1), 107-116.
  28. Zeki, S. (1993). *A vision of the brain*. London: Blackwell Science.
  29. Zeki, S. (1999). *Inner vision: An exploration of art and the brain*. New York: Oxford University Press.
  30. 石曉蔚 (1996) 。*室內照明設計原理*。台北市：淑馨出版社。  
Shih, S. W. (1996). *Fundamentals of interior lighting design*. Taipei: Shu-Shin. [in Chinese, semantic translation]
  31. 林昆範 (2007) 。*色彩原論*。台北市：全華圖書。  
Lin, K. F. (2007). *Color theories*. Taipei: Chun-Hwa. [in Chinese, semantic translation]
  32. 林智祥、陳一平 (2004) 。色彩之前進後退與膨脹收縮之定量測量。2004 色彩學研討會論文集 (頁 169-184) 。台北市：中華色彩學會。  
Lin, J. S., & Chen, I. P. (2004). Quantitative assessment of the advancing / receding and the expansion / constriction effects of colors. *Proceedings of Color Studies Conference 2004* (pp. 169-184). Taipei: Color Association of Taiwan. [in Chinese, semantic translation]
  33. 陳錦杏、譚巽言、黃文增、林殷旭 (2006) 。自動白平衡之軟硬體共同設計。台北科技大學學報，40 (1) ，101-113。  
Chen, C. H., Tan, S. Y., Huang, W. T., & Lin, Y. H. (2006). Hardware-software co-design of an automatic white balance. *Journal of Taipei University of Technology*, 40(1), 101-113. [in Chinese, semantic translation]

# Color Identification Anchored by Brightness under Virtual Illumination Changes

Ta-Wei Lin\*    Chun-Wang Sun\*\*

\* Department of Industrial and Commercial Design, Oriental Institute of Technology  
fj017@mail.oit.edu.tw

\*\* Graduate School of Design, National Taiwan University of Science and Technology  
suncw@mail.ntust.edu.tw

## Abstract

To determine the contribution of lightness information of different hues during the process of achieving color identification under drastic changes of illumination simulated by computer, two types of lightness ranking are considered the "anchoring criterion": (1) "lightness ranking" acquired through machine measurement, and (2) "brightness ranking" acquired through the subjects' subjective ranking which is subject to individual differences. Three research hypotheses were proposed based on the above setup: (H1) white patch hypothesis (WPH) : People consider the brightest point to be pure white and this achieves the best color identification; (H2) gray world assumption (GWA): People use the average lightness of the whole scene as the anchoring criterion and this achieves the best color identification; (H3) black patch hypothesis (BPH): People consider the darkest point to be pure black and this achieves best color identification. The results showed that: (1) sufficient illumination is a determining factor for good color identification but is not critical; (2) when lightness ranking is treated as the anchoring criterion for color identification, the subjects tend to rely on brightness rather than lightness; (3) when there is sufficient medium and long wavelength illumination, the subjects' performance tends to support the WPH but this can't be explained with either type of lightness ranking. This study therefore concludes that lightness ranking does not suit to be the criterion of color planning to designers, because the lightness ranking still does not possess regularity in color identification yet.

**Keywords:** Virtual Illumination, Color Identification, Brightness, Lightness Anchoring, Anchor Strategy.