

# CIELAB、CMC、BFD、CIE94 色差公式之績效評估 —以 ABS 塑膠材料為例

管偉生\* 童鼎鈞\*\*

\* 國立雲林科技大學視覺傳達設計學系  
e-mail:ssguan@yuntech.edu.tw

\*\* 大慶高級商工職業學校  
e-mail:g9130806@yuntech.edu.tw

(收件日期:90年09月26日;接受日期:91年04月02日)

## 摘要

色差研究在工業界應用是非常重要的,諸如色彩容許誤差控制、色彩恒常及條件等色評價、不同色彩複製系統之色彩逼真性評估及提供工業設計界一個均勻色彩空間。一個理想的色差公式允許觀看參數改變,應該包含色樣本間隙、背景色彩、照度、樣本之明度、測量技術、色差大小及樣本大小等因素。這些觀看條件之改變在色差知覺上有相當大的影響,因此對於色差知覺之參數效果進行一系統性觀察是有必要的。

很多觀測變數會影響到色樣對的知覺性色差。世界照明委員會(CIE)屬下之TC 1-28技術委員會所提出影響色差評估之參數,即用以調查此一問題。本研究進行一系列實驗之目的,在研究不同觀測參數之效果。以ABS材質之色樣對,探討不同色差大小、背景顏色、光源、樣本間隙等觀測參數對知覺性色差之影響。

色樣共分佈在紅、橙、黃、黃綠、綠、青、藍、紫、洋紅及灰色等10個色彩中心。每一個色彩中心包含11組色樣對,其中有5組僅含彩度差色樣對,另2組僅含明度差色對及4組同時含有彩度差及明度差色樣對。最後這些實驗結果也將用於測試CIELAB、CIE94、CMC及BFD等四個色差公式。

在測試四種色差公式績效上,以CIELAB、CMC色差公式績效較優,CIE94、BFD色差公式績效較差;但整體而言,四種色差公式在本研究中仍然有不錯的績效。

關鍵字: 色差、色差公式、灰階法、參數效果

## 一、前言

色彩對於產品設計是一個很重要的因素。如果選擇了一個不受消費者歡迎的顏色,那麼不

管產品設計多麼好，它也不會暢銷。從最初的原始設計到最終製造，選擇正確的色彩，然後精確的複製出此一色彩是非常重要的工作。均勻的色度與色彩規範，可以維持產品適切的品質。為了精確的達成色彩複製的目標，且要使色樣本對之間的色差能給予量化，可靠的色差公式是必備的。

色差公式在色樣本對之間的色差認知與予量化表示。很多色差公式已經發展出來應用在物體色彩相關工業上，如紡織、塑膠和印刷等 [Kuehni 1990]。典型色差公式應用於色彩容允誤差控制、色彩複製系統間之色彩逼真性評估、色彩恒常及條件等色之量化、色度排序和色彩褪色測試等等。

自從 1976 年由 CIE 所推薦的 CIELAB 色差公式之外，新的色差公式如 CMC [10] 和 CIE94 [7] 標準分別由 ISO 和 CIE 所發展。雖然它們提供了更多從小到大色差的準確預測，但使用者仍然對使用哪一個公式感到困惑。另外，它們的結構之間有著很大的差異性。再者，所有的色差公式都被設計和應用在一系列的標準觀看條件下，例如在高明度、無樣本間隙和以中灰色為背景下來觀看色樣本對。在工業界實際從事色差評估中，色樣對樣本往往需要不同的觀看條件下作評估的。

一個理想的色差公式允許觀測參數改變，應該包含色樣本間隙、背景色彩、樣本照度、樣本之明度、評量技術、色差大小及樣本大小等因素。這些觀測條件之改變在色差知覺上有相當大的影響，因此對於色差知覺之參數效果進行調查是有必要的。

本研究嘗試依據視覺參數不同的影響，來描述當改變色差之視覺感受性。而這些參數影響是為推論未來的一個色差公式在不同視覺條件下，來預測色差的改變。因此建立一個大規模實驗之目的即探討觀測背景色（白、灰、黑）、樣本間隙（Hairline、Large gap）、光源（D<sub>65</sub>、A）之參數效果。而本研究將在不同參數之觀看條件下進行視覺評估。

先前相關文獻研究大部份採用小色差，是因為大部分物體色之色彩工業以處理小色差為主。但是其實驗的材質仍然採用紡織品、油墨塗料為主，並未探討塑膠製品（ABS）來進行實驗。但在色彩複製工業和工業設計相關領域，塑膠製品仍是最普遍加工、成型的材質，因此本研究此材質的色差是有其必要性。

而先前的研究中顯示此資料在多方面彼此並不一致。這導致某組資料在其中一個色差公式給了最好的預測，但在其他的色差公式預測並不好。因此本研究之目的在將實驗結果測試 CIELAB、CMC、BFD 及 CIE94 等四個色差公式之績效。

## 二、文獻探討

### 2.1 視覺評估方法

一些不同的視覺評估方法常被用於量化色差，以下就一般常見之六種方法予以簡短敘述如下：

灰階法一般常被用來評估色彩的褪色測試 (color fastness test) 中之色彩變異的方法之一。受測者被要求針對給予的色樣對進行色差評估，試著從無彩色的灰階標準色樣對中尋找相似的色差對。灰階中包含了幾個色樣對，全是無彩色而且所有樣本的材質是相同的，但色樣對的色差逐漸增加。本方法優點是允許在不同時間、相同的灰階下所判斷的視覺結果可以互相做比較。灰階樣本的色彩規格是依循英國國家標準 BS1006: A02 評估色彩改變所用的灰階[2]。

### (2)成對比較法 (Pair Comparison Method)

成對比較實驗的判斷通常用下列方法來陳述：『色樣本對的色差是否比標準色樣本對的色差大或小』[8] [19] 或『兩個樣本是否能區別』或『差異是否可以察覺』[Witt & Doring 1983]。以上這些判斷法則可以歸類為認知性判斷。在接受性測試 (acceptability test)，樣本被判斷可接受與否，主要取決於它們跟標準色樣有多麼相近[18]。然而，經實驗發現接受性判斷 (acceptability judgments) 的結果與認知性判斷 (perceptibility judgments) 的結果不同[15]。

### (3)排序法 (Ranking Method)

受測者被要求根據認知性色差之大小對一些樣本對進行排序。有些學者[Kuehni & Marcus 1979, Coates et al. 1972]在他們的實驗中曾使用這種方法。如果色彩樣本對的數目很小時，排序法是很容易使用的。不過當有很多樣本對時，它就顯的很麻煩。

### (4)比率法 (Ratio Method)

在色差評估中，把標準色樣本對之色差當作一個單位，然後讓受測者去判斷色樣本對之色差相對於這個單位的比率大小，可以是倍數或是分數的關係。

### (5)歸類法 (Category Method)

Morley et al. [1975] and Robinson [1969] 在他的實驗中使用歸類法。此方法是標準樣本與一群樣本呈現給受測者，受測者評估樣本間之色差並且根據色差距離之範圍內將之分級。在他們的研究裡將此大小分成六級：1.沒有差異 2.恰好達顯著差異 3.顯著差異 4.相當大差異 5.大差異 6.非常大差異。Robinson 分析資料時將前三項視為可接受性和後三項當作不可接受性。

### (6)絕對閾法 (Absolute Threshold Method)

呈現給受測者一剛好達到清晰可視之色差的色樣本對在開始評估前呈現沒有色差的樣本對給受測者，然後再把測試樣本對拿給受測者看，並且詢問他們是否可以發覺此樣本對已達到色差的狀況[13]。

上面所提的所有方法，除了『可接受性』或『不可接受性』的判斷法（歸類為接受性範圍）之外，都可以當作認知性的範圍。本研究採用灰階法來評估視覺差異結果 ( $\Delta V$ )。

## 2-2 色差公式的發展

色差公式是用來提供相對於知覺性色差的結果，且一個理想的色差公式，是一個能預測出

展出來，例如：Nickerson's 提出的「衰退指數 (Index of fading)」(Nickerson 1936)。以下將色基公式的發展分為二部份，一為 1976 年所提出的 CIE 色基公式，另一為 1976 年之後所發展出的 CMC、BFD 及 CIE94 色基公式。

### 2-2.1 1976 年 CIE 發展之色基公式

CIE 在 1976 年發展出一個均勻色彩空間，分別為 CIE L\*a\*b\* (or CIELAB) 和 CIE L\*u\*v\* (or CIELUV)。CIELAB 色基公式主要使用在物體色，而 CIELUV 色基公式則是使用在光源色 (自發光源顯示器) [Hunt 1987]。本研究以物體色為主，以下祇介紹 CIELAB 均勻色彩空間。

CIELAB (或以 CIE L\*a\*b\* 標註) 是 Adam-Nickerson 或 ANLAB 公式的簡化，將 CIE 色彩空間以非線性轉換所呈現之結果 [Adam 1942]。CIE L\*a\*b\* 大致上為一均勻的色彩空間，它以相對色彩尺度的方式來描繪知覺色彩的強度。這個色度空間可以採用直角座標及圓柱座標二種形式：[CIE 1978, Robertson 1977, Wyszecki and stiles 1982b]

#### (1) 直角座標

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \cdot (Y/Y_n)^{1/3} - 16 && \text{且 } Y/Y_n > 0.008856 \\
 L^* &= 903.3 \cdot (Y/Y_n) && \text{且 } Y/Y_n \leq 0.008856 \\
 a^* &= 500 [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\
 b^* &= 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] && (1)
 \end{aligned}$$

如果  $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n > 0.008856$ ，則  
 $f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3}, f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}, f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3}$   
 如果  $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n \leq 0.008856$ ，則  
 $f(X/X_n) = 7.787(X/X_n) + 16/116$   
 $f(Y/Y_n) = 7.787(Y/Y_n) + 16/116$   
 $f(Z/Z_n) = 7.787(Z/Z_n) + 16/116$

其中 X, Y, Z 是樣本的三刺激值，而  $X_n, Y_n, Z_n$  是特殊光源和觀測角在理想的反射光源擴散器內的三刺激值。

所以在 CIE L\*a\*b\* 色彩空間內的色基可以採用以下公式求之數值表示：

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

而將 CIELAB 直角座標轉換為 XYZ 三刺激值是非常簡單的。將  $L^*, a^*, b^*$  相反轉換成 X, Y, Z (在  $Y/Y_n > 0.008856$ ) 值，則依據以下公式 [Billmeyer & Saltzman 1981]：

$$\begin{aligned}
 X &= X_n [(L^* + 16) / 116 + (a^* / 500)]^3 \\
 Y &= Y_n [(L^* + 16) / 116]^3 \\
 Z &= Z_n [(L^* + 16) / 116 - (b^* / 200)]^3 && (3)
 \end{aligned}$$

#### (2) 圓柱座標

從  $L^*, a^*, b^*$  定義出色彩知覺與明度、彩度與色相彼此之間有相互的關係。

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad \text{或} \\
 L^* &= 903.3 (Y/Y_n) \quad \text{且 } Y/Y_n < 0.008856 \\
 C^* &= [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad h^0 = \tan^{-1} (b^*/a^*) && (4)
 \end{aligned}$$

且  $L^*$  為明度值， $C^*$  為彩度值， $h^0$  為色相角度，以  $0^\circ$  到  $360^\circ$  來表示。

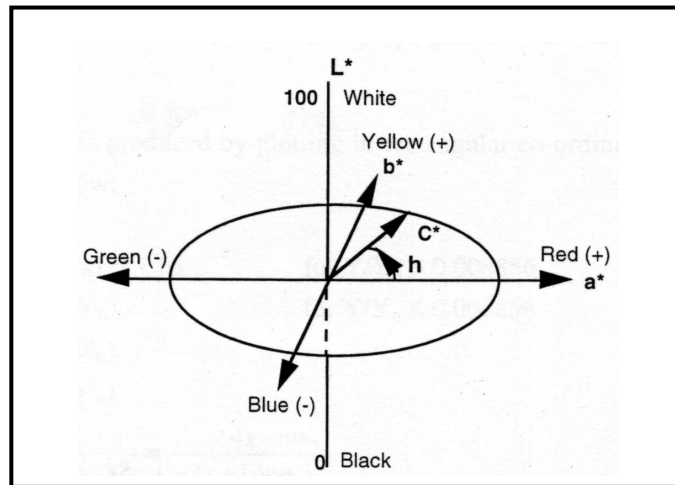


圖 1 直角座標與圓柱座標之 CIELAB 色度空間圖

在直角座標中， $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 的歐幾里得距離與在旋轉直角座標後的 $\Delta L^*$ 、 $\Delta C^*$ 、 $\Delta H^*$ 的歐幾里得距離是完全相同的。因此

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2]^{1/2} \quad (5)$$

色相差可以由色差扣除明度差及彩度差而求得。色相差 ( $\Delta H^*$ ) 可以採用以下公式求得之數值表示：

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

色相差的正負符號表示方式與色相角差 ( $\Delta h$ ) 的表示方式是完全相同的。而另外計算  $\Delta H^*$  值的方法，先前有些學者曾提出，諸如 Seve [1991&1996], Stokes & Brill [1992] 等。以 Seve [1996] 所提計算  $\Delta H^*$  的方程式表示如下：

$$\Delta H^* = (a_1 * b_2^* - a_2 * b_1^*) / [0.5(C_1 C_2^* + a_1 * a_2^* + b_1 * b_2^*)]^{1/2} \quad (7)$$

### 2-2.2 1976 年以後發展的色差公式

CIELAB 色彩空間對色彩的描述非常有用，但是 CIELAB 色差公式在工業界的色彩控制運用上卻有其極限。1976 年後許多實驗的結果發現 CIELAB 色差公式，並不是那麼完整，主要的三個實驗資料為 McDonald [18], Luo and Rigg [15,16] 和 Berns [19], [Alman et al. 1989] 等等的資料。這些實驗資料分別用來發展 CMC、BFD 和 CIE94 色差公式，而這些公式都將 CIELAB 色彩空間公式做某種程度修飾。關於這些公式的色彩空間，它們不是幾何式或歐幾里德式的表示，而是將環繞一個色彩中心的視覺偏差，定義在一個 CIELAB 空間中的橢圓面上。

#### (1) CMC 色差公式

英國染色省及色彩師學會 (Society of Dyers and Colorist, 簡稱 S.D.C)，在 1980 年，由 McDonald 發表了 JPC79 色差公式 [McDonald, 1980a&b]，此色差公式主要是修改自 CIE  $L^*a^*b^*$  公式 (或 ANLAB 的公式)，該公式是由 McDonald 所實驗的兩組允拒區別資料 (Acceptability Color Discrimination Data) 發展而來。在 1984 年，CMC (1:c) 公式由 Clarke、McDonald 及 Rigg 三人修改其中錯誤的部份，經過染色省及色彩師學會 (S.D.C) 的測色委員會 (Color Measurement Committee, 簡稱 CMC) 認可，推薦給一般色彩工業使用，命名為 CMC 色差公式，此色差公式用來作為色彩工業上的允收/拒收評估 [Clarke, 1984]，它的出現已很廣泛

的數據資料下受到驗證，也使得各別視覺鑑定者的評估更為可靠 [McDonald, 1988]。CMC

色差公式，以建立權重的機制來彌補評估時在明度、彩度與色相的視覺偏差。

CMC ( $l:c$ ) 公式已為英國國家標準 (1988)、美國紡織化學與色彩協會 (AATCC) 測試方法 [1992] 與國際標準組織 (ISO) [1995] 所採用。

CMC ( $l:c$ ) 公式為：

$$\Delta E_{CMC} = [(\Delta L^*/lS_L)^2 + (\Delta C^*/cS_C)^2 + (\Delta H^*/S_H)^2]^{1/2} \quad (8)$$

其中  $S_L = (0.040975L^*_{std}) / (1 + 0.01765L^*_{std})$

當  $L^*_{std} < 16$ ，則  $S_L = 0.511$

$$S_C = [(0.0638C^*_{std}) / (1 + 0.0131C^*_{std})] + 0.638$$

$$S_H = (fT + 1 - f)S_C$$

$$且 f = \{(C^*_{std})^4 / [(C^*_{std})^4 + 1900]\}^{1/2}$$

$$T = 0.36 + |0.4\cos(h^0_{std} + 35)|$$

當  $164^\circ < h^0_{std} < 345^\circ$ ，

$$則 T = 0.56 + |0.2\cos(h^0_{std} + 168)|$$

$l=c=1$ ，為色差知覺性； $l=2, c=1$ ，為允收/拒收（接受性）判定。

### (2) BFD 色差公式

學者 Luo and Rigg [14,15,16] 搜集了許多早期關於物體色對的研究，以小色差的「知覺性」和「接受性」實驗資料庫為基。他們運用了許多色樣及採用灰階法進行大規模補充實驗，累積了相當多的資料數據，同時將他們實驗結果與先前所蒐集的資料整合成一資料庫，並發展 BFD ( $l:c$ ) 色差公式 [14,16]。BFD 色差公式的結構近似於 CMC ( $l:c$ ) 色差公式，增加一個在  $a^*b^*$  圖中可以計算色度橢圓旋轉角度的新條件，且明度值計算採用 Fong 所提出之明度計算公式 [9]。

BFD ( $l:c$ ) 公式 [14]：

$$\Delta E_{BFD} = [(\Delta L^*_{BFD}/l)^2 + (\Delta C^*/cD_C)^2 + (\Delta H^*/D_H)^2 + R_T(\Delta C^* \Delta H^*/D_C D_H)^2]^{1/2} \quad (9)$$

其中  $D_C = [0.035 \overline{C^*} / (1 + 0.0365 \overline{C^*})] + 0.521$

$$D_H = D_C(GT' + 1 - G)$$

$$G = \{(\overline{C^*})^4 / [(\overline{C^*})^4 + 14000]\}^{1/2}$$

$$T' = 0.627 + 0.055\cos(\overline{h} - 254^\circ) - 0.040\cos(2\overline{h} - 136^\circ) + 0.070\cos(3\overline{h} - 32^\circ) + 0.049\cos(4\overline{h} + 114^\circ) - 0.015\cos(5\overline{h} - 103^\circ)$$

$$R_T = R_H R_C$$

$$R_H = -0.260\cos(\overline{h} - 308^\circ) + 0.055\cos(\overline{h} - 308^\circ) - 0.379\cos(2\overline{h} - 160^\circ) - 0.636\cos(3\overline{h} + 254^\circ) + 0.226\cos(4\overline{h} + 140^\circ) - 0.194\cos(5\overline{h} + 280^\circ)$$

$$R_C = \{(\overline{C^*})^6 / [(\overline{C^*})^6 + 7 \times 10^7]\}^{1/2}$$

$$L^*_{BFD} = 54.6 \log(Y + 1.5) - 9.6$$

公式中提到  $\overline{C^*}$  與  $\overline{h}$  為計算標準色樣與批次色樣的  $C^*$  和  $h$  之算術平均值，而這些值與  $\Delta C^*$  和  $\Delta H^*$  值係來自於 CIEL\*a\*b\* 公式的計算。

### (3) CIE94 色差公式

Berns [19] [Alman et al. 1989] 等人使用光面壓克力樣本來做視覺評估，它包括了 156 對色樣對，共 19 個色彩中心，標準色樣對色差大小約等於一個單位的 CIEL\*a\*b\* 色差的灰色

式而得，且它近似於 CMC (l: c) 公式的純量函數值結構。而 CIE94 已經被 CIE 推薦作為工業界色差的評估工作。

CIE94 公式[7]：

$$\Delta E^*_{94} = [(\Delta L^*/k_L S_L)^2 + (\Delta C^*/k_C S_C)^2 + (\Delta H^*/k_H S_H)^2]^{1/2} \quad (10)$$

其中  $S_L = 1$

$$S_C = 1 + 0.045 C^*_{std}$$

$$S_H = 1 + 0.015 C^*_{std}$$

且  $k_L = k_C = k_H = 1$ ；為參考條件。

$k_L = 2, k_C = k_H = 1$ ；為織品工業所需條件。

### 2-3 觀測參數

許多觀測參數，如色樣大小、色樣間隔、色樣材質、背景色和色樣明度…等都會影響知覺性之色差。1993 年，世界照明委員會 (CIE) 之 TC 1-28 技術委員會曾影響色差評估之參數上，詳細規範一些明顯影響知覺性色差的參數因素，而這些參數因素與基準條件 (reference conditions) 有著很大的關係。而 CIE 所訂定之基準條件規定如表 1 [6]：

表 1 CIE 所訂定之基準條件

Illuminant	D <sub>65</sub>
Illuminance	~1000 lux
Luminance of medium gray	~64 cd/m <sup>2</sup>
Background	gray, L* <sub>10</sub> =50
Sample size	larger than 4°
Sample separation	direct contact
Sample lightness	L* <sub>10</sub> = 50
Surface structure	homogeneous(texture)
Appearance mode	object
Color difference magnitude	ΔE less than 5

CIE 亦提出當觀測條件與基準條件有所不同時，要有明確的指示。CIE 為參數研究提出了以下七個物理因素的建議 [7]：1、色樣大小；2、色樣間隔；3、色樣質感；4、背景色彩和明度；5、色樣亮度；6、色樣明度；7、色差大小差異。

### 2-4 評估效標

許多評估效標已被應用於評估視覺的結果，且普遍地使用不同尺度來評估。許多使用灰階法探討的文獻，從它們各別的色彩公式中，比較了視覺差異結果 (ΔV) 與計算出的色差值 (ΔE) 兩組資料間之關係，許多適合的定量評估已經被推論出來。Luo and Rigg [14] 結合了四個

$$PF = 100 [\gamma + CV / 100 + V_{AB} - r] \tag{11}$$

此方程式之  $\gamma$  和 CV 量測值由 Coates[9]等人提出； $V_{AB}$  值則是由 Schultze[25]推論出，而  $r$  為相關係數。由先前研究中發現，許多實驗的相關係數並不是非常好；例如由 Badu's data sets[1986]實驗數據中，以色差值為 12 CIELAB 色差單位為根據，來作的相關性歸納，就出現這種現象，表 2 使用 CIELAB、CMC、BFD 和 CIE94 色差公式計算評估值之績效因子的結果。表中 CIELAB 公式中的  $r$  值呈現為異常性的負值，是因為在實驗設計中，CIELAB 色差值均傾向於相同單位[Guan 1997]。

在理想條件下，一個特別的色差公式中，視覺結果對應於預測值的資料點應落於 45 度的直線上，而在 Badu's 的實驗中，當「色樣對」與 CIELAB 色差值相同時，會得到一個較低的相關係數值，這在 CIELAB 色差公式中是預料得到的事。

在許多研究中，以相近色差的「色樣對」利用一個特別的色差公式來計算，以致於其相關係數呈現不規則，因此決定以除  $r$  值，而只使用其他三項評估值。PF/3 的計算方式如下，而 PF/3 的大小值近似於百分比誤差 (percentage error)。

$$PF / 3 = 100 (\gamma - 1 + V_{AB} + CV/100) / 3 \tag{12}$$

在理想條件下， $V_{AB}$ 、CV 和 PF/3 值為 0 且  $\gamma$  值為 1。若 PF 值較高，表示二組實驗資料之間不一致，而 PF/3 值為 30，表示二組資料間標準差為 30%。

### 三、研究方法

許多有關色差的研究，在實驗中設定一組基準的視覺條件，此基準視覺條件一般來說係色樣對在高照度的光源下、無間隙下放在中灰色背景上。設定一組基準視覺條件無法涵蓋全部使用的情況，因此必須深入了解視覺參數對色樣對知覺性色差的影響。本研究嘗試依據視覺參數不同的影響，來描述當改變色差之視覺感受性。因此規畫一個人規模實驗，探討不同背景色、樣本間隙有無及不同光源之參數效果。

#### 3-1 實驗條件

本實驗共分成三個階段進行，共製作 110 對小色差的色樣對，進行不同參數效果的研究，這些參數包括：1.色樣大小：「 $5 \times 9\text{cm}^2$ 」。2.色差種類：「中色差」。3.背景顏色：「白」、「黑」、「灰」三種背景。4.光源：「A 光源」、「D<sub>65</sub> 光源」二種光源。5.照度：中高照度。6.間隙：「無間隙 (Hairline gap)」、「有間隙 (Large gap)」。

所有色樣都根據 10 個不同的色彩中心分別選取，總共進行 13200 次視感比色。實驗條件亦摘要表 2。

表 2 三個階段中色差實驗條件

階段	觀測背景	光源	間隙	色樣對數	比色人次	比色次數
1. GDH	Gray	D <sub>65</sub>	Hairline gap	110	12	2640



2. WDH	White	D <sub>65</sub>	Hairline gap	110	12	2640
CIELAB、CMC、BFD、CIE94色差公式之績效評估—以ABS塑膠材料為例						
3. BDH	Black	D <sub>65</sub>	Hairline gap	110	12	2640
4. GDL	Gray	D <sub>65</sub>	Large gap	110	12	2640
5. GAH	Gray	A	Hairline gap	110	12	2640
總和						13200

各個實驗之條件以英文縮寫表示之，各含三個字分別表示三個比色之參數條件：第一個字用「G (Gray=灰色)」、「W (White=白)」及「B (Black=黑)」等，表示背景色；第二個字用「D (D<sub>65</sub>光源)」、「A (A光源)」，表示光源種類；第三個字用「H (Hairline gap=無間隙)」、「L (Large gap=有間隙)」，表示間隙。

### 3-2 準備色樣對

本研究依據 CIE 所訂定之十個色彩中心[1]及色樣分佈性原則[12]，同時考量色彩空間分佈之均勻性，規劃了 10 個色彩中心，它們分別是灰色 (Grey)、紅色 (Red)、橙色 (Orange)、黃色 (Yellow)、黃綠色 (Y-Green)、綠色 (Green)、藍色 (Blue)、紫色 (Purple)、洋紅 (Magenta)、青綠 (Cyan) 等。它們的 CIELAB 值如表 3 所示。10 個樣本中心在 CIELAB a\* b\* 分佈區域圖如圖 3 所示。所有色樣對採用 ABS 塑膠製成，並依需要製成 5cm × 9cm 大小，實驗時觀測距離離色樣約 40 公分左右，樣本約為 7.2 度角，符合 CIE 10 度角觀測條件。各色彩中心之色樣如圖 2 所示。

表 3 供參數效果研究的十個色彩中心 CIELAB 值

Color	L*	a*	b*	C*	h°
<b>Red</b>	42.59	38.33	17.39	42.09	24.41
Orange	60.40	13.05	22.23	25.78	59.59
Yellow	78.87	-0.57	29.74	29.75	91.09
Y-Green	57.56	-10.34	4.62	11.33	155.92
Green	45.24	-20.09	6.75	21.19	161.43
<b>Cyan</b>	51.76	-11.40	-5.0	12.45	203.66
Blue	33.90	4.16	-20.13	20.56	281.69
Purple	45.11	15.08	-14.95	21.23	315.25
<b>Magenta</b>	49.73	34.89	-9.89	36.26	344.18
Gray	58.19	1.08	2.22	2.47	64.13

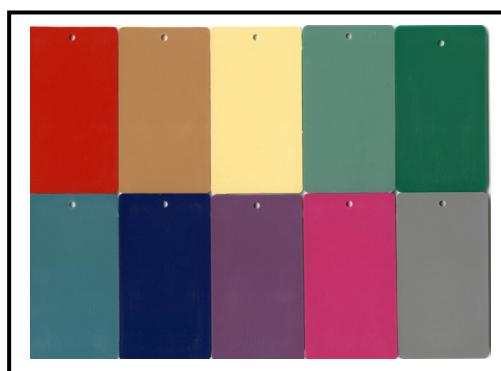


圖 2 十個色彩中心實際樣本

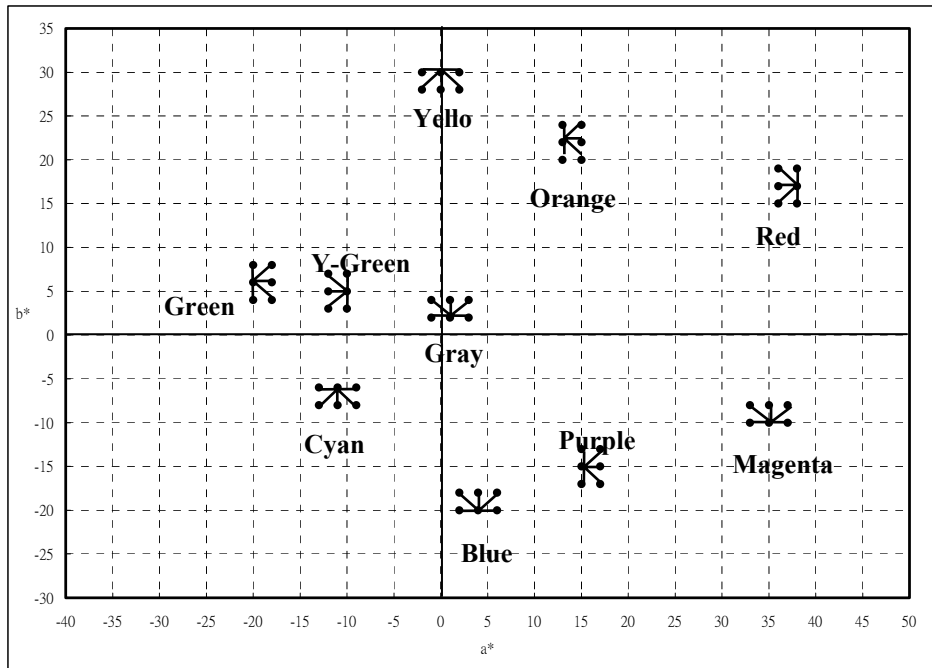


圖 3 10 個樣本中心在 CIELAB a\* b\* 分布區域圖

每個色彩中心之色樣對分別在「a\*b\*」平面上座落於 0°、45°、90°、135° 和 180° 線上的色樣、「L\*a\*」平面上座落於 45°、90° 和 135° 線上的色樣與「L\*b\*」平面上座落於 45°、-45° 和 0° 線上的色樣。因此，對每個色彩中心而言都有 11 對具彩度差與明度差的比色色樣被挑選出來，如圖 4。以灰色樣本對為例，圖 4a、圖 4b 及圖 4c 為灰色樣本分別在「a\*b\*」、「L\*a\*」與「L\*b\*」平面上的位置方向，圖中線段代表色差之大小。同一色彩中心的取樣方式亦同，只是其角度、方向不同。

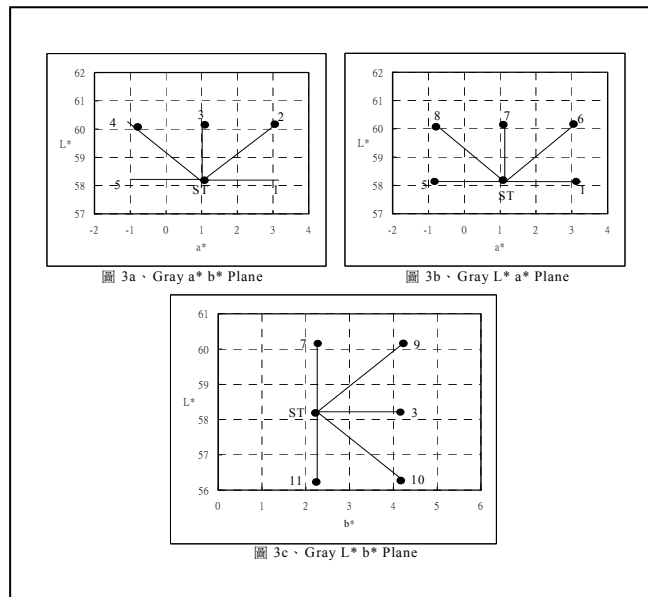


圖 3a、Gray a\* b\* Plane

圖 3b、Gray L\* a\* Plane

圖 3c、Gray L\* b\* Plane

### 3-3 製作背景色及灰階色

背景色為「黑」、「灰」、「白」三色，黑、白兩色採用市售之「蚰牌」平光黑、白兩色油漆，灰色由黑白兩色混和而成，其 L\*值以 50 為佳；最後將之塗於硬紙板上。表 4 為所製作背景色之 CIEL\*a\*b\*值。

表 4 中色差背景色之 CIELAB 值

色彩	L*	a*	b*	C*	h°
Gray	43.75	-0.59	-2.69	2.76	257.58
White	92.87	-0.88	-0.59	1.06	213.61
Black	25.95	0.17	0.57	0.60	73.81

本實驗採用「灰階尺度法」，灰階樣本的色彩規格是依循英國國家標準 BS1006: A02 評估色彩改變所用的灰階 [2]。實驗用之「灰階色樣」與「測試色樣」採用相同材質 (ABS) 與大小製成。採用灰階法在中色差實驗上，一組灰階色樣係由 5 階灰色樣本和一個標準色樣 (同第 5 階灰色樣本) 所構成，各灰階色樣皆 CIE D65 / 10° 觀測條件下予以量測。而本研究製作成的灰階色樣對 CIE L\*a\*b\*值、 $\Delta L^*$ 和 $\Delta E$ 值列於表 5。

表 5 中色差灰階級數之 CIELAB、 $\Delta L^*$ 和 $\Delta E$ 值

灰階級數	L*	a*	b*	C*	h°	$\Delta L^*$	$\Delta E$
Std	41.24	0.04	0.04	0.05	45.16	—	—
5	41.24	0.04	0.04	0.05	45.16	0.00	0.05
4	42.9	-0.07	0.03	0.08	158.56	1.66	1.68
3	44.64	0.02	0.01	0.02	22.00	3.40	3.42
2	48.04	0	-0.01	0.01	307.24	6.80	6.82
1	54.83	-0.04	-0.03	0.05	216.21	13.59	13.61

### 3-4 測色

所有色樣均使用 Data color SF500 分光儀進行量測，照明及觀測幾何機構條件：(1) d/8°，(2) 包含鏡面反射 (SCI)。此設定狀態考量是因為此種設定最接近視感比色的狀況，量測前先做例行校計，並在每次比色前做一次測色，每個色樣共測色 4 次，每次旋轉 90°共 4 個方向，得 4 組測色值，由此得到色樣的平均刺激值將用以表示此色樣的 CIEL\*a\*b\* (D<sub>65</sub>/10°) 色差值。

### 3-5 辨色力檢定及視感比色

由於本研究需要受測者具備正常的色彩辨識能力，因此在進行本實驗之前，受測者必須接

F-M 100 色相檢定器 (Farnsworth-Munsell Color 100 Hue Test)，以篩選出無色盲且辨色能力正常的受測者。

本研究受測者自設計科系挑選出辨色能力佳之學生共 12 人，每個人均參與五個階段實驗，且每個階段實驗做兩次，視感比色均在裝有 D<sub>65</sub> 光源及 A 光源之比色箱中進行，箱內置入所需之背景色，比色之實驗室環境亦以模擬 D<sub>65</sub> 之日光燈為照明裝置，採取 0/45 (照明/觀測) 角度。在觀測角度之可允許誤差內 (45° ± 8°)，受測者距離色樣約 40 公分左右，可以自由調整致最舒適之座位高度，接著受測者有 3 分鐘暗適應時間。每個階段計式實驗進行前，先隨意挑選幾對色樣由受測者進行視感比色訓練。

## 四、結果與討論

### 4-1 灰階結果換算視覺色差值

每位觀測者將對色樣對與灰色對比灰階數字的視覺結果轉換成 CIELAB ΔE 色差單位。由 3.3 中提到灰階樣本和標準樣本兩者之間的色差全是明度差，因此可以合理的假設此視覺差異與 CIELAB 之 ΔE 色差值是成比例關係的。利用 Excel 軟體中，繪製一條多項式的曲線 (採用最小平方方法) 來推論每一個灰階色差值。

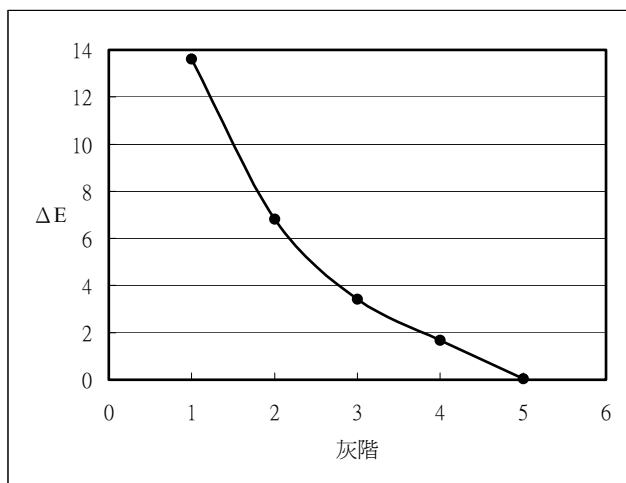


圖 5 中色差研究中灰階級數與 CIELAB ΔE 關係圖

圖 5 描繪公式 13 灰階等級 (GS) 與表 5 所有 CIELAB ΔE 色差值之間的關係。

$$\Delta E = 25.376 - 14.811 GS + 3.3157 GS^2 - 0.2733 GS^3 \quad (13)$$

其次，公式 14 可以表示個別觀測者對對色的灰階等級轉換為樣本對個別視覺差異 (命名為  $\Delta V_i$ )。

$$\Delta V_i = 25.376 - 14.811 GS + 3.3157 GS^2 - 0.2733 GS^3 \quad (14)$$

## 4-2 受測者準確度

每一個色樣對在 5 個階段皆由 12 位受測者完成視覺評估兩次，而本實驗受測者準確度可由受測者對每個色樣對的各次視覺結果與平均視覺結果間之綜合平均差異來表示，本研究採用 PF/3 評估因子為效標，藉由 PF/3 之數值來表示受測者準確度。表 7 為 5 個階段實驗中每一位受測者準確度（以 PF/3 值表示）；各階段中準確度較優者以粗體數字加「\*」表示，績效較劣者以粗體數字表示。

表 7 受測者準確度（以 PF/3 值表示）

人次	階段	1.GDH 2.WDH 3.BDH 4.GDL 5.GAH					平均
		1	37	44	37	35	
2	37	44	35	34	<b>47</b>	39	
3	32	33	28	<b>39</b>	36	34	
4	33	35	28	<b>39</b>	32	33	
5	65	33	29	31	35	39	
6	64	<b>46</b>	29	29	34	40	
7	41	33	28	32	29	33	
8	42	31	28	31	28	32	
9	37	27	<b>25*</b>	26	<b>26*</b>	28	
10	37	27	<b>25*</b>	26	<b>26*</b>	28	
11	35	25	<b>25*</b>	<b>25*</b>	28	28	
12	35	<b>23*</b>	26	<b>25*</b>	28	27	
13	37	30	37	32	32	34	
14	38	31	<b>40</b>	31	29	34	
15	33	38	34	33	29	33	
16	32	41	34	32	28	33	
17	36	32	35	29	32	33	
18	36	32	35	29	32	33	
19	31	42	34	<b>25*</b>	<b>26*</b>	32	
20	<b>28*</b>	39	33	26	<b>26*</b>	30	
21	41	36	37	38	43	39	
22	40	34	35	31	38	36	
23	<b>67</b>	34	35	34	41	42	
24	51	32	36	32	41	38	
平均		40	34	32	31	33	<b>34</b>

註：GDH 為 Gray background, D<sub>65</sub>, Hairline gap；WDH 為 White background, D<sub>65</sub>, Hairline gap；BDH 為 Black background, D<sub>65</sub>, Hairline gap；GDL 為 Gray background, D<sub>65</sub>, Large gap；GAH 為 Gray background, A, Hairline gap。

實驗結果顯示所有受測者在不同觀測條件下之平均準確度是 34 PF/3 單位，而個別受測者在不同觀測條件下，平均 PF/3 值範圍由 23 至 67，有些受測者之變異性較大，可能因為受測者在進行此實驗前訓練不足，或者是受測者判色能力不穩定在實驗中產生視覺疲勞所造成，大多數的受測者有「一致性」之趨勢，因此整體實驗結果算是相當合理的。

五種參數條件下之實驗結果，其 24 次觀測之平均 PF/3 數值分別為 40、34、32、31、33，而前四個階段受測者準確度數值皆優於管骨 [1999a] 小色差研究中所發現之數值，分別為 41、40、39、40，但卻劣於管骨 [1999b] 大色差研究中所發現之數值，分別為 26、25、25、22。總括來看，本實驗中色差研究之總平均 PF/3 值為 34，顯然優於管骨 [1999a] 的小色差研究（PF/3 為

當合理。一般而言，受測者準確度可以說明差異的百分比，因此必須藉由大量的色彩差異訓練來改善。

舉例說明受測者準確度，圖 6 中表示著第 20 次觀測及第 23 次觀測在灰色背景、D<sub>65</sub> 光源、無間隙 (GDH) 狀態下之實驗結果，最佳的狀態是實驗結果均落於 45° 線上，而第 20 次觀測之 PF/3 值為 28，第 23 次觀測之 PF/3 值為 67。由圖 6 中得知右圖之受測者之視覺色差與平均視覺色差間之差異較右圖之受測者來得小，所以色樣對分布圖較集中。右、左兩圖之受測者之大部分色樣對的視覺色差皆比平均視覺色差來得小。

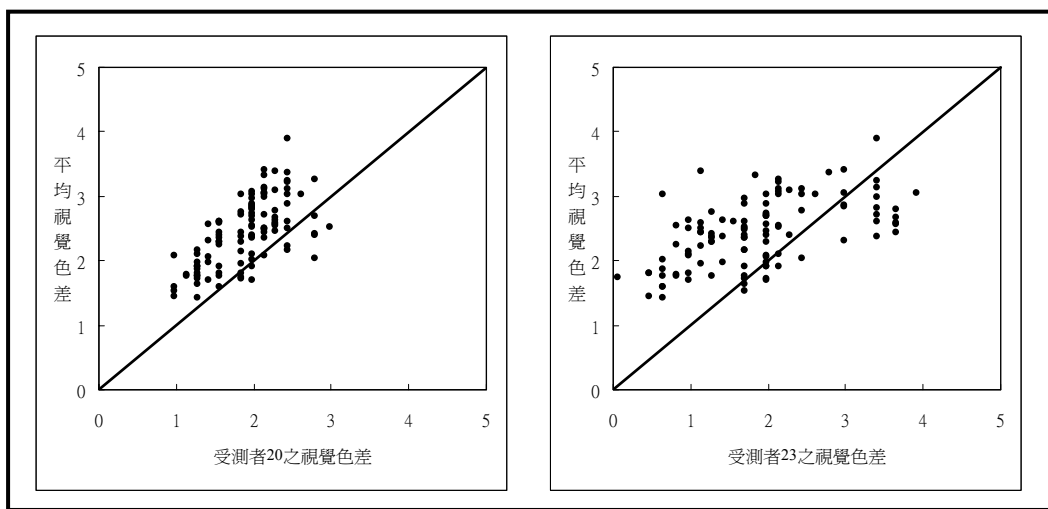


圖 6 受測者視覺色差與平均視覺色差結果之關係圖

#### 4-3 測試色差公式之績效

比較視覺差異結果 ( $\Delta V$ ) 與計算出的色差值 ( $\Delta E$ ) 兩組資料間之關係，許多適合的定量評估已經被提出，本文亦位於 2.4 節說明採用 PF/3 做為色差公式之績效評估效標可以得到較合理之結果。

整合方程式，如下列方程式可以用來代表四種先進及工業上較常用的色差公式：CIELAB[1]、CMC[10]、BFD[14,16]和 CIE94[7]。如下：

$$\Delta E = \{ [\Delta L^*/(K_L S_L)]^2 + [\Delta C^*/(K_C S_C)]^2 + [\Delta H^*/(K_H S_H)]^2 + RT * f(\Delta C^* \& \Delta H) \}^{1/2}$$

如 CIE TC 1-28 [CIE 1993] 所建議，在方程式中的  $K_L$ ,  $K_C$  and  $K_H$  三個值，是指從不同參數最佳化而得來的係數，這代表了不同觀測變數的影響。除了 BFD 公式之外，RT 值通常設為 0；對 CIELAB 公式而言， $S_L=S_C=S_H=1$ ，CIE94 公式將  $S_L$  設為 1。對 CMC 公式而言，其公式中的  $S_L$ 、 $S_C$  和  $S_H$  三個函數可以從 CIELAB 公式中的  $L^*$ 、 $C^*$  和標準樣本對的色彩角度計算而來。

Guan & Luo[1999]曾提出以下四種方法可以用來測試色差公式之績效：

方法 (1)：調整每種觀測條件下的  $\Delta V$  值至以某一特定色差公式所得之  $\Delta$  值相同的大小，並且採用個別的調整因子 (Scaling Factor)，簡稱 SF。這個方法將不會考量出由觀測變數所導致的效果。舉例而言，如果每種觀測條件下的  $\Delta V$  變成原來的兩倍，則 SF 值係數將變成兩倍，但是 PF/3 (評估因子) 值不會有任何改變。對每個公式， $K_L$ ,  $K_C$  和  $K_H$  都設為 1，換言之，它代

求了原來公式的執行績效。

方法（2）：與方法（1）用同樣的方式進行，但不同的觀測條件採用不同的 SF，而  $K_L$  值是採用最佳化條件，而  $K_C$ 、 $K_H$  設定為 1。因為這些色差公式允許調整明度比重，而固定彩度及色相兩項因素，像 CMC (L:c) 方式。

方法（3）：調整不同觀測條件下的  $\Delta V$  值至以某一特定色差公式所得之  $\Delta E$  值相同的大小，此時採用基準觀測條件下的 SF 值。

方法（4）：和方法（3）相同，固定 SF（基準觀測條件），且  $K_L$  是採用最佳化，而  $K_C$ 、 $K_H$  設定等於 1。

首先將實驗結果使用方法（1）來測試 CIELAB、CIE94、CMC、BFD 四種色差公式的績效。依此四種色差公式之平均執行績效之數值，皆比受測者平均準確度之數值小，代表此四種色差公式仍有相當好的執行績效。表 8 為不同觀測條件之各色差公式績效之比較。當  $K_L$  設定為 1 時，在各種觀測條件下，CIELAB、CIE94、CMC、BFD 各色差公式之平均執行績效以 PF/3 值表示，分別為 22.17、24.80、21.79、27.56 單位。另外經由各色差公式間之成對樣本 T 檢定結果，發現「CIELAB 與 BFD」、「CMC 與 CIE94」及「CMC 與 BFD」三對有顯著性差異，因此綜合來說，以 CMC、CIELAB 績效表現優於 CIE94、BFD。

表 8 不同觀測條件下，各色差公式之比較 (PF/3)

PF/3 值	1.GDH	2.WDH	3.BDH	4.GDL	5.GAH	Mean
CIELAB	25.95	22.12*	20.52*	18.99*	23.26	22.17
CIE94	25.22	26.53	24.72	25.11	22.44	24.80
CMC	20.41*	22.42	21.71	22.77	21.65*	21.79*
BFD	27.09	24.79	28.16	26.53	32.25	27.56

註： $K_L=K_C=K_H=1$ ，各階段中績效較優為數字加「\*」。

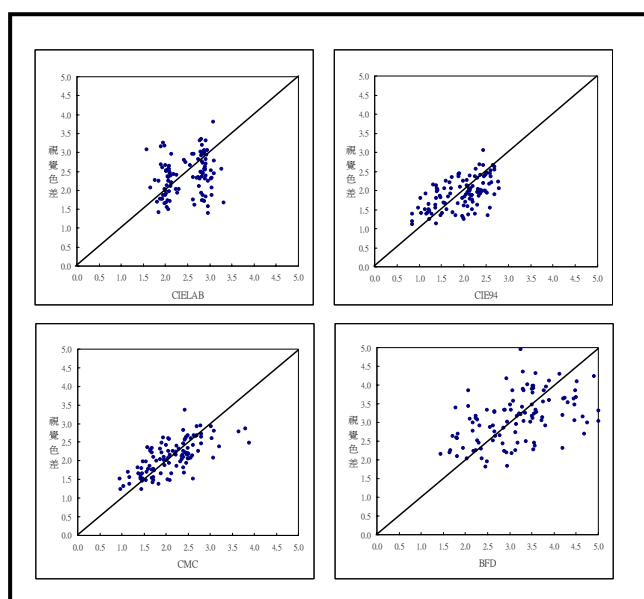


圖 7 為 GDH 階段實驗中視覺色差值與由四個色差公式 ( $K_L=K_C=K_H=1$ ) 所預測色差值兩者之間關係分佈圖。可以看出由 BFD 色差公式所預測色差值的分佈範圍比另外三種色差公式所預測色差值的分佈範圍較大，這些分佈可以根據表 4-2 中 GDH 的 PF/3 值看出，PF/3 值在 CIELAB、CIE94、CMC 和 BFD 四種色差公式分別為 25.95、25.22、20.41、27.09 單位。

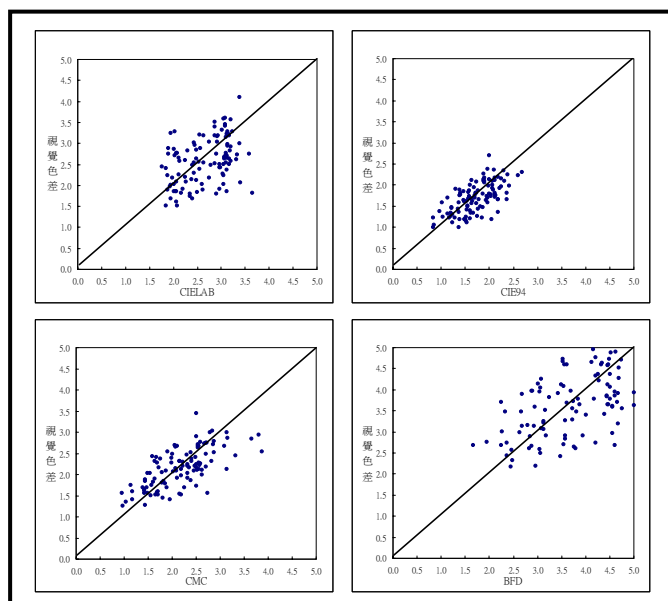
其次運用方法 (2) 來測試 CIELAB、CIE94、CMC、BFD 四種色差公式的執行績效。表 9 為不同觀測條件之各色差公式比較。當各階段  $K_L$  調整為「最佳狀態」且  $K_C=K_H=1$  時，在各種觀測條件下，CIELAB、CIE94、CMC、BFD 各色差公式之平均執行績效以 PF/3 值表示，分別為 19.27、19.32、21.52、21.32 單位。經由各色差公式間之成對樣本 T 檢定結果，發現「CIELAB 與 BFD」、「CIE94 與 CMC」及「CIE94 與 BFD」三對有顯著性差異，因此綜合來說，以 CIELAB、CIE94 績效表現優於 CMC、BFD。整體而言，調整後各色差的績效皆相當理想。另外 CIE94、BFD 色差公式的平均  $K_L$  值分別為 1.45、0.65，CIELAB、CMC 色差公式的平均  $K_L$  皆接近於 1。

表 9 經  $K_L$  調整之後，不同觀測條件下，各色差公式之比較 (PF/3)

PF/3 值		1.GDH	2.WDH	3.BDH	4.GDL	5.GAH	Mean
CIELAB	$K_L$	0.95	1.04	0.92	0.95	0.84	0.94
	PF/3	22.17	19.02	18.42*	16.79*	19.96	19.27*
CIE94	$K_L$	1.47	1.57	1.43	1.47	1.31	1.45
	PF/3	19.52*	18.69*	19.72	19.17	19.49*	19.32
CMC	$K_L$	1.08	1.17	1.03	1.07	0.94	1.06
	PF/3	20.16	21.60	21.69	22.65	21.51	21.52
BFD	$K_L$	0.66	0.72	0.63	0.65	0.58	0.65
	PF/3	21.84	21.12	21.21	20.45	22.00	21.32

註： $K_L$  為最佳值， $K_C=K_H=1$ ，各階段中績效較優為數字加「\*」。

圖 8 為視覺色差值與四個色差公式  $K_L$  調整至最佳值， $K_C=K_H=1$  所預測色差值兩者之間關係分佈圖。同樣在圖 8 與圖 7 中可以看出 CMC 的分佈範圍相近似，而圖 8 中之 CIE94 和 BFD 的分佈範圍比圖 7 中的來得集中，因此  $K_L$  值在 CIE94 和 BFD 色差公式中有較大的影響。而在 CIELAB、CMC 色差公式中的  $K_L$  值近似於 1，所以圖 8 與圖 7 的分佈範圍相似。





最後運用方法 (3)、(4) 來測試 CIELAB、CIE94、CMC、BFD 四種色差公式的執行績效。方法 (3) 採用 GDH 基準觀測條件下的 SF 值，且  $K_L=K_C=K_H=1$  來測試四種色差公式；方法 (4) 仍然採用 GDH 基準觀測條件下的 SF 值，但  $K_L$  為調整到最佳值，而  $K_C=K_H=1$ ，來測試四種色差公式。表 10 及表 11 分別顯示方法 (3) 及方法 (4) 的結果。

表 10 以 GDH 的 SF 值在不同觀測條件下，各色差公式之比較

	SF	1.GDH	2.WDH	3.BDH	4.GDL	5.GAH	Mean
CIELAB	0.98	25.95	22.14*	24.23*	25.02*	26.41	24.70
CIE94	0.79	25.22	26.53	28.08	30.41	25.29	27.17
CMC	0.86	20.41*	22.43	25.20	28.09	24.62*	24.15*
BFD	1.27	27.09	24.80	31.03	31.50	33.41	29.57

註： $K_L=K_C=K_H=1$ ，各階段中績效較優為數字加「\*」。

表 11 以 GDH 的 SF 值在不同觀測條件下，調整  $K_L$  值之各色差公式比較

	PF/3 值	1.GDH	2.WDH	3.BDH	4.GDL	5.GAH	Mean
CIELAB	SF	1.01					
	$K_L$	0.95	1.03	1.02	1.06	0.95	1.00
	PF/3	22.17	19.04	22.09*	22.68*	23.58	21.91
CIE94	SF	0.67					
	$K_L$	1.47	1.56	1.57	1.63	1.45	1.54
	PF/3	19.52*	18.70*	23.32	24.77	23.26*	21.91*
CMC	SF	0.84					
	$K_L$	1.08	1.15	1.14	1.18	1.06	1.12
	PF/3	20.16	21.62	25.13	27.67	25.07	23.93
BFD	SF	1.44					
	$K_L$	0.66	0.71	0.70	0.73	0.65	0.69
	PF/3	21.84	21.14	24.76	25.89	25.57	23.84

註： $K_L$  為最佳值， $K_C=K_H=1$ ，各階段中績效較優為數字加「\*」。

總括來說，方法 (1) (表 8) 和方法 (3) (表 10) 此二種不同方法所獲得的結果非常具一致性，在績效表現上，仍以 CMC、CIELAB 色差公式較優，而以 CIE94、BFD 色差公式表現較差。同樣地，方法 (2) (表 9) 和方法 (4) (表 11) 這二種不同方法所獲得的結果也是非常具一致性，在績效表現上，仍以 CIELAB、CIE94 色差公式較優，而以 CMC、BFD 色差公式表現較差。

## 五、討論與建議

先前有些學習者在色差研究上有一些結論，本節試著將這些結果整合比較來探討之間的差異性。

表 12 為本研究依據方法 (1) 的分析結果與 Guan & Luo [21,22] 研究中針對四個色差公式所進行之績效評估結果進行比較。在 Guan & Luo 的小色差研究中使用羊毛布料為實驗材質，發現 CIELAB、CIE94 色差公式表現比 CMC、BFD 色差公式之績效值更差；而在大色差研究中，發現 CIELAB、CIE94 色差公式表現比 CMC、BFD 色差公式之績效值更好。而本研究使用 ABS

塑膠材料為實驗材質，得到的結論是 CMC、CIELAB 色差公式表現比 CIE94、BFD 色差公式之績效值好，其原因可能有二：

第一為所選用之材質不同。前次表面為糙面效果，而本研究選用之 ABS 塑膠材質為光面效果，因此色差公式之績效上有所不同。

第二為所設定的色差大小不同。在 Guan & Luo 的研究中所製作之小色差大約為 2，大色差大約為 12，而本研究製作之色差大約為 2 至 5 之間，在國際照明委員會 (CIE) 的定義上是屬於中色差，因此舊色差公式之績效上可能略顯不同。

表 12 本研究與 Guan & Luo [1999a,b] 研究中四個色差公式績效差異 (方法 1)

研究者	色差公式	CIELAB	CIE94	CMC	BFD
Guan & Luo (小色差研究)	PF/3	43	31	25	24*
Guan & Luo (大色差研究)		19*	22*	27	24
本研究 (中色差研究)		23	25	22*	27

註： $K_L=K_C=K_H=1$ ，各研究中績效較優為數字加「\*」。

表 13 為比較本研究依據方法 (2) 的分析結果與 Guan & Luo [21,22] 的四個色差公式績效差異。同樣地發現舊 Guan & Luo 的小色差實驗研究中調整  $K_L$  值至最佳績效，CIELAB、CIE94 色差公式表現仍然比 CMC、BFD 色差公式之績效值更佳；而在大色差研究中，發現 CIELAB、CIE94 色差公式表現比 CIE94、BFD 色差公式之績效值更好。而本研究經調整  $K_L$  值至最佳績效後，反而 CIELAB、CIE94 色差公式表現比 CMC、BFD 色差公式之績效值好，與 Guan & Luo 之大色差研究結果雷同。綜合來說，CIE94 比其他色差公式需要較大的明度值 ( $K_L$ ) 來調整。

表 13 本研究與 Guan & Luo [1999a,b] 研究中四個色差公式績效差異 (方法 2)

研究者	色差公式	CIELAB	CIE94	CMC	BFD
Guan & Luo (小色差研究)	$K_L$	0.84	1.56	1.14	0.91
	PF/3	42	27	24	23*
Guan & Luo (大色差研究)	$K_L$	0.78	1.13	1.03	0.81
	PF/3	16*	20	27	23
本研究 (中色差研究)	$K_L$	0.97	1.49	1.09	0.67
	PF/3	20	19*	21	21

註： $K_L$  為最佳值， $K_C=K_H=1$ ，各研究中績效較優為數字加「\*」。

依據方法 (3) 的分析結果，本研究與 Guan & Luo [21] 研究中四個色差公式績效差異 (如表 14)。在 Guan & Luo 的小色差研究中，發現 CIELAB、CIE94 色差公式表現比 CMC、BFD

色差公式之績效值更差。而本研究得到的結論是 CMC、CIELAB 色差公式表現比 CIE94、BFD 色差公式之績效值好。

表 14 本研究與 Guan & Luo [1999a] 研究中色差公式績效差異 (方法 3)

研究者	色差公式	CIELAB	CIE94	CMC	BFD
		Guan & Luo (小色差研究)	SF	1.48	0.92
	PF/3	46	33	26	25*
本研究 (中色差研究)	SF	0.98	0.79	0.86	1.27
	PF/3	24	27	23*	28

註： $K_L=K_C=K_H=1$ ，各研究中績效較優為數字加「\*」。

表 15 為比較本研究依據方法 (4) 的分析結果與 Guan & Luo [21] 的四個色差公式績效差異。Guan & Luo 的小色差實驗研究中調整  $K_L$  值至最佳績效，CIELAB、CIE94 色差公式表現仍然比 CMC、BFD 色差公式之績效值更差；而本研究經調整  $K_L$  值至最佳績效後，反而 CIELAB、CIE94 色差公式表現比 CMC、BFD 色差公式之績效值好。綜合來說，CIE94 仍然比其他色差公式需要較大的明度值 ( $K_L$ ) 來調整。

表 15 本研究與 Guan & Luo [1999a] 研究中四個色差公式績效差異 (方法 4)

研究者	色差公式	CIELAB	CIE94	CMC	BFD
		Guan & Luo (小色差研究)	SF	1.56	0.84
	$K_L$	0.77	1.45	1.06	0.85
	PF/3	43	28	26	25*
本研究 (中色差研究)	SF	1.01	0.67	0.84	1.44
	$K_L$	1.00	1.53	1.12	0.69
	PF/3	21	21*	22	23

註： $K_L$  為最佳值， $K_C=K_H=1$ ，各研究中績效較優為數字加「\*」。

Guan & Luo [22] 依據先前研究資料，如 Badu、OSA、WW、Guan 等，採用 PF/3 值計算感知色間的差異，用來評估四種色差公式之績效，以及預測不同資料庫的績效。表 16 為本研究與各項先前研究資料庫間色差公式的績效值。

表 16 各項資料庫之色差公式績效

PF/3 值	Badu 大色差	OSA 大色差	WW 大色差	Guan 大色差	Guan 小色差	本研究 中色差	Mean
CIELAB	41	27	23	27	43	22	31
CIE94	24	23	31	22	33	25	26
CMC	24	28	33	24	26	22	26
BFD	27	28	32	29	24	28	28
CIELAB	35	24	23	18	42	19	27
$K_L$	0.59	0.62	0.97	0.65	0.87	0.94	0.77
CIE94	24	23	29	21	27	19	24
$K_L$	1.09	1.04	1.36	1.11	1.61	1.45	1.28

CMC	23	27	33	21	25	22	25
$K_L$	0.79	0.79	0.97	0.80	1.17	1.06	0.93
BFD	21	26	32	22	24	21	24
$K_L$	0.65	0.64	0.78	0.66	0.93	0.65	0.72

經由 SPSS 統計方法中的成對樣本 T 檢定來看，各色紙公式間並無顯著性差異，再從平均值來看，各色紙公式之績效表現仍是非常理想的。同樣地在所有的資料庫中，CIE94 比其他色紙公式仍需要較大的明度值 ( $K_L$ ) 來調整。

在色彩知覺研究領域所涵蓋的範圍可說相當廣泛，對於後續相關研究，筆者提供以下幾點建議：

- (1) 可針對不同材質進行研究。目前研究學者已針對羊毛、油漆、油墨以及本研究 ABS 塑膠材質進行探討，建議採用更多樣化材質進行實驗及驗證。
- (2) 採用不同觀測條件進行比較。如採用不同照度（高照度、低照度）之比較，都是值得再進行研究比較的課題。
- (3) 如果製作技術與經費預算皆許可，可選擇更多的色彩中心進行研究。本研究採用 10 種色彩中心為實驗樣本，日後可選擇更多的色彩中心進行探討。
- (4) 可針對色樣對不同色紙大小來進行研究。本研究僅製作中色紙色樣對，對於後續研究者可以製作大色紙和小色紙 ABS 塑膠色樣對來進行實驗及驗證，並測試色紙公式績效及不同參數間之影響。
- (5) 可增加採用不同的研究方法來進行研究。本研究之實驗以「灰階法」評估，後續研究者可加用「成對比較法」進行實驗。

## 六、致謝

本研究感謝奇美關係企業奇美科技股份有限公司提供測色器材並監製實驗樣本，陳光斗總經理、色彩研發盧建良課長及配色課盧進財課長在研究進行中提供寶貴建議，邱秋虹小姐和配色課相關人員對色樣製作之協助，並感謝所有參與此次實驗進行之受測者，使得本研究得以順利完成。

## 參考文獻

- 1.A. R. Robertson, CIE Guidelines for Coordinated Research on Colour-Difference Evaluation, *Color Res. Appl.*, 3, 149-151 (1978).
- 2.BS, Gray scale for Assessing Change in color, BS 1006 A02, (1990).
- 3.C. Alder, A Monte Carlo Method for the Validation of Discrimination Ellipse Data, *J. Soc. Dyers Col.*, 97, 514-517 (1981).
- 4.C. Alder, K. P. Chaing, T. F. Chong, E. Coates, A. A. Khalili and B. Rigg, Uniform chromaticity scales - new experimental data.", *J. Soc. Dyers Col.*, 98, 14-20 (1982).
- 5.CIE, Colorimetry, 2nd Ed., CIE Publ. No. 15.2 Central Bureau of the CIE, Vienna, Austria (1986).
- 6.CIE, Parametric Effects in Colour-Difference Evaluation, CIE Publ. No. 101, Central Bureau of the CIE, Vienna, Austria (1993).
- 7.CIE, Technical Report: Industrial colour-difference evaluation, CIE Publ. No. 116, Central Bureau of the CIE, Vienna, Austria (1995).
- 8.D. Strocka, A. Brockes and W. Paffhausen, Influence of experimental parameters on the evaluation of color-difference ellipsoids, *Color Res. Appl.*, 8, 169-175 (1983).
- 9.E. Coates, K. Y. Fong and B. Rigg, Uniform Lightness Scales, *J. Soc. Dyers Col.*, 97, 179-183, (1981).
- 10.F.J. J. Clarke, R. McDonald and B. Rigg, Modification to the JPC79 Colour-Difference Formula, *J. Soc. Dyers Col.*, 100, 117- 148 (1984).
- 11.K. McLaren, Colour Passing-Visual or Instrumental? , *J. Soc. Dyers Col.*, 86, 389-393 (1970).
- 12.M. Cheung and B. Rigg, Colour-Difference Ellipsoids for Five Colour Centres, *Color. Res. Appl.*, 11, 185-195 (1986).
- 13.M. Melgosa, E. Hita, A. J. Poza, D. H. Alman and Roy S. Berns, Suprathreshold Colour-Difference Ellipsoids for Surface Colours, *Color Res. Appl.*, 22, 148-155 (1997).
- 14.M. R. Luo and B. Rigg, BFD(l:c) colour-difference formula, Part I \* Development of the formula, *J. Soc. Dyers Col.*, 103, 86-94 (1987).
- 15.M. R. Luo and B. Rigg, Chromaticity- discrimination ellipses for surface colours, *Color Res. Appl.*, 11, 25-42 (1986).
- 16.M. R. Luo, and B. Rigg, BFD(l:c) colour- difference formula, Part II \* Performance of the formula, *J. Soc. Dyers Col.*, 103, 126-132 (1987).
- 17.M. R. Luo, M. C. Lo and W. G. Kuo, The LLAB (l:c) Model, *Color Res. Appl.*, 21, 412-429 (1996).
- 18.R. McDonald, Industrial Pass/Fail Colour Matching Part I- Preparation of Visual Colour- Matching Data, *J. Soc. Dyers Col.*, 96, 372-376 (1980).
- 19.R. S. Berns, D. H. Alman, L. Reniff, G. D. Snyder and M. R. Balonon-Rosen, Visual

Determination of Suprathreshold Color-Difference Tolerances Using Probit Analysis, *Color Res. Appl.*, 16, 297-316, (1991).

- 20.S. S. Guan & M. R. Luo, A New Colour-Difference Formula for Assessing Large Colour Differences, *Journal of Color Research and Application*. Vol. 24 No.5, pp. 344-355 (1999c).
- 21.S. S. Guan & M. R. Luo, Investigation of Parametric Evaluation Using Small Colour Differences, *Journal of Color Research and Application*. Vol. 24 No.5, pp. 331-343 (1999a).
- 22.S. S. Guan & M. R. Luo, Investigation of Parametric Evaluation Using Large Colour Differences, *Journal of Color Research and Application*. Vol. 24 No.5, pp. 356-368 (1999b).
- 23.W. G. Kuo and M. R. Luo, Methods for quantifying metamerism. Part 1 - Visual assessment, *J. Soc. Dyers Col.*, 112, 312-320 (1996).
- 24.W. G. Kuo and M. R. Luo, Methods for quantifying metamerism. Part 2 – Instrumental method, *J. Soc. Dyers Col.*, 112, 354-360 (1996).
- 25.W. Schultz, The Usefulness of Colour-Differences Formulae for Fixing Colour Tolerances, *Color Metrics*, Soesterberg, AIC/Holland, 245-265 (1972).

# The Evaluation On Performance Of Four Color Difference Formulae — A Case Study Of Abs Plastic Material

Shing-Sheng Guan\* Ting-Chun Tung\*\*

\* Department of Visual Communication, National Yunlin University of Science and Technology  
e-mail:ssguan@yuntech.edu.tw

\*\* Department of advertisement, Dah Ching Commercial & Industrial Senior Vocational School  
e-mail:g9130806@yuntech.edu.tw

(Date Received : September 26,2001 ;Date Accepted : April 2,2002)

## Abstract

Color difference research is important for industrial applications such as tolerance control, assessment of metamerism and color constancy, color fidelity evaluation of different color reproduction systems and a uniform color space for industrial design. An ideal color difference formula should include factors to allow for the changes of viewing parameters, such as sample separation, background color, luminance, lightness of sample, scaling techniques, magnitude of color difference and physical size of sample. These changes in viewing conditions could significantly influence the perception of color difference. Thus a systematic investigation of parametric effects on color difference perception is necessary.

There are many viewing parameters might affect the perceived color differences of sample pairs, and the CIE Technical Committee 1-28 on Parameters Affecting color-difference Evaluation was therefore formed to investigate this problem. The objective of this research is to study different effects caused by various viewing parameters. We used sample pairs made of ABS to investigate how different viewing parameters, such as intensity of color differences, color of backgrounds, source of light, interval of samples, could affect perceived color differences.

All samples were prepared corresponding to ten color centers. They were named as red, orange, yellow, yellow-green, green, cyan, blue, purple, magenta and gray. For each color center have eleven color sample pairs, five sample pairs that exhibited chromaticity differences with negligible lightness differences were selected, i.e.  $\Delta L^*$  was kept as small as possible, while the other pairs included two pair having only differences in lightness and four pairs that exhibited a mixture of chromaticity and lightness differences. At last, the final experimental results were also used to test four color-difference formula: CIELAB, CIE94, CMC, and BFD.

As to the tests of effectiveness for each formula, CIELAB and CMC are better than CIE94 and BFD. However, they were all quite effective in general.

Keywords : Color difference, Color difference formula, Gray scale method, Parametric effect.