

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

應用色彩學研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2413-H-009-005-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學應用藝術研究所

計畫主持人：陳一平

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

摘要

色點並置所得的加法混色又稱為色彩的空間平均，此法在繪畫及色彩工業之應用已有相當歷史。由色彩知覺的角度來看，以色點並置混色構成一個彩色刺激，其色彩外觀除了由小點的顏色以及面積決定之外，小點的排列圖樣也可能是潛在的影響要素。在本研究計畫當中將不同的排列圖樣定義為質感，為了評估質感對混色效果造成的影響，我們執行了兩個色彩比對實驗。實驗一當中，使用 13 種紅綠色點混合成的彩色質感作為標準刺激，緊鄰著的是比較刺激，即可調整色相值和亮度值的黃色均質色面，受試者調整黃色均質刺激的紅綠比例以及亮度，到達主觀上等色的效果，藉此測量多種等比例紅綠質感是否獲得相等的色相感覺。實驗一有三個主要發現：(1) 不同混色圖樣之質感顯著影響混色的色彩外觀。(2) 顆粒較大、圖樣較紊亂的圖形顯得比較偏紅。(3) 受試者所設定的紅綠比例與亮度表現出顯著的交互現象，色相設定值越偏紅、亮度設定值越高。為了進一步理解在空間混合現象當中質感、亮度及色相之間的關係，我們執行了實驗二：以六個亂度及顆粒大小不同的圖形作為標準刺激，比較刺激為可調整紅綠比例的黃色均質色面，與實驗一不同的是此色面的亮度固定在 45%、55%、65% 三種情況，受試者需在不同亮度條件之下，將均質色面的紅綠比調整至與鄰近質感圖形最為接近。經過 ANOVA 分析得到幾個結果：(1) 亂度高的圖樣導致偏紅色的判斷，顆粒大小影響不顯著。(2) 色相的紅綠平衡在三種亮度之下呈現非常顯著的差異，受試者普遍在亮度低時往偏綠調整、亮度高時則往偏紅調整，方可達到知覺上等色的水準。根據以上實驗，我們可以對紅綠質感的空間平均現象作以下的初步結論：在其他條件相等之下，圖樣足以成為加法混色的色彩外觀之影響因子，而其中亂度較高之圖樣影響混色結果較為顯著，另外亮度及色相平衡之間存在明顯的交互作用。

關鍵字：空間平均、色點並置混色、色彩外觀、圖樣、色彩比對實驗、紅綠比例、亮度、亂度

Abstract

According to the conventional additive color mixture theory, the result of a color mixture would be the same regardless of the spatial arrangement of the mixing dots so long as the mixing proportion is kept constant. To investigate the effect of pattern of mixing dots on color mixing, we conducted two color-matching experiments. In our first experiment we found that the spatial arrangement of color dots affects the color appearance of the mixture. Following this line, we attempted to investigate the interaction between texture (dot arrangement), intensity and hue perception. Experiment two is to gauge the effect of dot arrangement and luminance on the hue perception. We adopted a color matching paradigm again. Six texture patterns made of equal number of red and green dots were used for manipulating spatial arrangement. The participants were instructed to adjust the red/green ratio of a uniform yellow test field until its appearance matched to that of the textured field. The intensity level of the test field was locked at 45%, 55% and 65%. A post-hoc analysis reveals that: (1) there's a systematic correlation between dot arrangement and hue perception. A mixture appears redder when the arrangement is more irregular. (2) the red/green balance of a mixture is strongly affected by the intensity level of the yellow field. At the low intensity level, a texture made of equal amount of red and green dots appears greener than neutral. At the high intensity level, the reverse is true. The results clearly indicate that the color appearance of a dot mixture is not a simple function of spatial averaging. There is a close interdependent relationship among hue, texture and the intensity of the mixing dots in determining the color appearance of the mixture.

Key words: additive color mixture, spatial averaging, color appearance, pattern, color-matching experiment, hue perception, intensity level

一、前言

加法混色（additive color mixture）被廣泛運用在各種色彩顯示及創作的範疇當中，它不降低混合後的色彩品質，而且可由少數色彩可產生多種色彩，我們在彩色螢幕、印刷、織品、點描派（Pointillism）及馬賽克（mosaic）繪畫上所見到的豐富色彩即是並置色點的混色原理所致。並置細小色點的混色平面雖然看似均勻，但在物理上卻不是連續的，即使是色彩比例相同，色點本身的形狀、排列規則及圖樣等空間差異，都有可能影響其混色後的色彩外觀（color appearance）的因素。

本計畫之研究目的在於以色彩比對實驗探討質感因子對色點並置的加法混色之影響。我們執行兩個色彩比對實驗，兩個實驗均使用紅綠等面積、等明度、不等質感的彩色質感作為標準刺激、黃色均值色面作為比較刺激，於實驗二當中更詳細控制了標準刺激的亂度以及比較刺激的亮度，藉以進一步理解圖樣、亮度以及色相知覺三者的關係。

二、研究方法

（一）色彩比對實驗

色彩比對實驗主要根基於人類色彩視覺的三色性（trichromacy）（孫慶文，民 88）。色彩比對實驗派典如圖 1 所示，欲知一色光 L 在觀者眼中具體品質為何，可以讓另一混合數種波長不一的色光的平面 L' 緊鄰，觀者可調整各色光的比例與強度直到 L 和 L' 看起來最接近為止，此時 ABC 之色光物理值即間接反映受試者對 L 平面的色彩知覺。

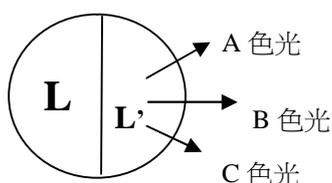


圖 1. 典型的色彩比對實際操作示意

（一）空間平均原理

空間平均為加法混色（additive mixture）的取得方式之一，只要某空間範圍內密集並置的不連續色點到達足夠高的空間頻率，人眼即可將這些色點的色相與明度等加以平均，感覺起來是一個均勻的連續色調。

影響人眼的空間解析力（spatial resolution power）表現好壞的因素之一為色彩（De Valois & De Valois, 1988; Wandell, 1995），紅綠組成的影像在頻譜上為中長光波段，在等明度刺激之下 L—M 管道的空間解析度降至 20cpd（Anderson, Mullen & Hess, 1991; Mullen, 1985）。圖 2 中表示的三條對應曲線，由空間解析度低至高分別是藍黃、紅綠及純明度變化的情況下，對視覺刺激的對比敏感度（contrast sensitivity）之表現（Anderson et al., 1991）。

圖中顯示紅綠色彩的 L-M 管道的表現僅次於明度變化的情況，解析度優於 S-ML 管道。研究當中使用了疏密不同的紅綠質感圖形，其顆粒大小控制在 L-M 管道的空間解析極限之上下，如此安排可讓空間頻率小於解析極限的密集部分發生空間平均效果，大於解析極限的部分仍可清晰顯示原本紅與綠的色相，亦有尚可辨識的紅綠色點作為提供受試者進行主觀色彩判斷的依據。

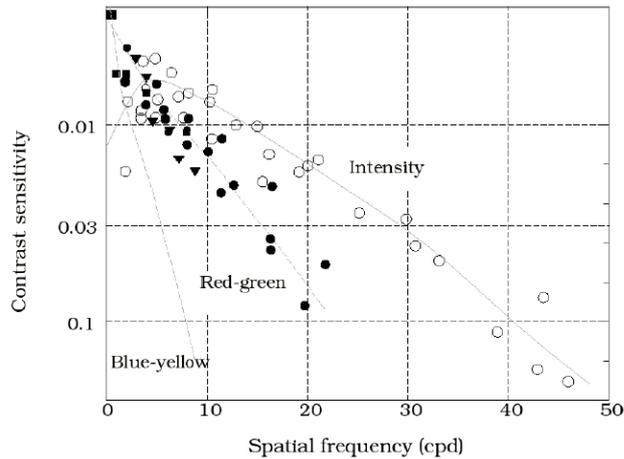


圖 2. 人眼的空間對比敏感度決定於刺激的波長範圍，此圖取自 Wandell (2000)

三、實驗與結果

(一) 實驗一

使用 13 種紅綠比例相等、明度相等但圖樣不同的質感圖形，質感的樣式參見圖 3，圖中僅呈現局部圖樣，實際實驗大小為 256x256 像素。以這些圖樣與黃色均質色面進行色彩比對實驗，令受試者調整黃色色面的亮度與紅綠比例，達到與紅綠質感圖形色彩最接近為止，結果如圖 4 直方圖所示，空間上的變異影響了理論上應該呈現等色的 13 種植感圖形。

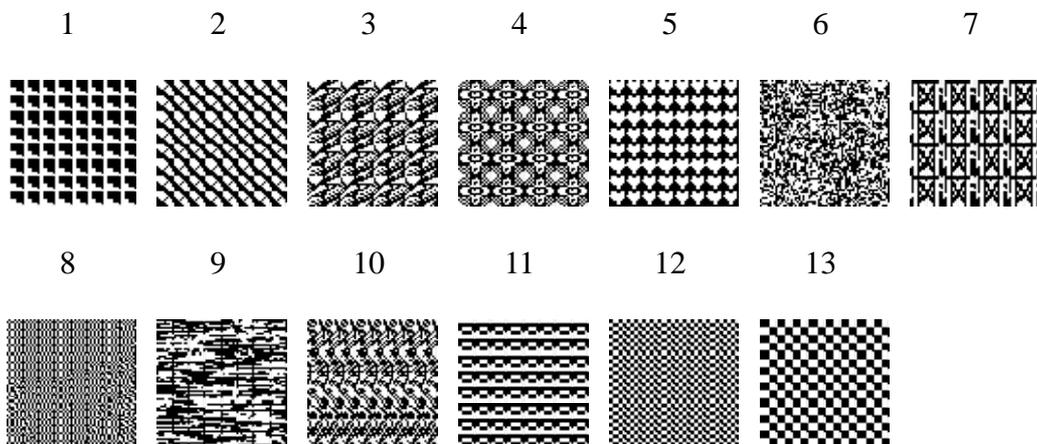


圖 3. 實驗一當中所採用的 13 種質感圖形之局部圖樣

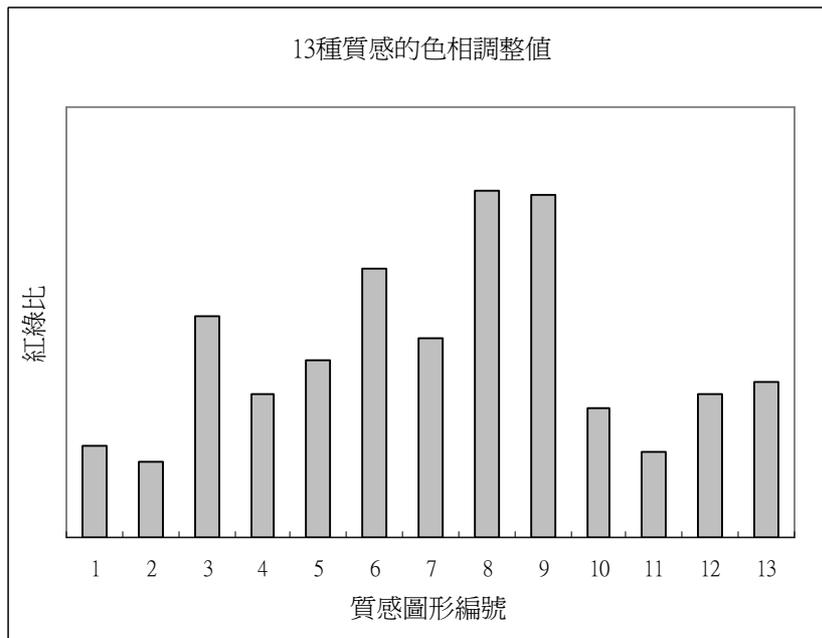


圖 4. 實驗一所獲得的色彩比對結果，橫軸表示不同的質感圖形、縱軸表示受試者調整的平均紅綠比例

實驗一的初步結論是：1.不同混色圖樣的質感會導致不同的色彩外觀，質感所導致主觀色相的偏移方向為紅色。2. 顆粒較大、圖樣較紊亂的圖形顯得比較偏紅。3. 受試者所設定的紅綠比例與亮度表現出顯著的交互現象，色相設定值越偏紅、亮度設定值越高。

(一) 實驗二

實驗二延續實驗一所獲得的結果做進一步探討。實驗一當中約略顯示圖樣的顆粒大小以及亂度兩個質感的特徵有可能是造成主觀色相偏移的主要因素（參見圖 2 圖 3 資料），另外受試者設定的亮度值與偏紅值呈現明顯正相關。實驗二基於這兩個結果，分別在實驗刺激以及色彩比對實驗的程序做一些控制，藉以更系統化地探討質感特徵、亮度以及色項三者的關係。

1. 實驗刺激

實驗二所採用的刺激控制了幾個條件：(1) 為紅綠兩色 (binary) 影像，紅與綠面積各佔 50% (2) 六種圖形主要以顆粒大小和亂度兩條件為變化方向，圖 5 為六種不同的紋理之局部 (3) 圖形中的紅綠為等明度 (iso-luminant)，這裡的等明度由最模糊方向實驗所獲得。(4) 刺激大小在經過伽瑪校正 CRT 螢幕上以 256x256 像素呈現，在實驗控制距離下為 3.5° x3.5° 視角 (visual angle) (5) 所有質感圖形的顆粒大小為 1 到 4 像素，顆粒為 1 像素的情況空間頻率約為 37cpd，顆粒為 2 像素的空間頻率約為 18.5cpd，兩者略低於或等於略低於紅綠條件下的空間解析力 20cpd。如此設計下高頻區域發生空間平均效果(產生黃色色相)，頻率略低的區域紅綠色點仍可辨識。

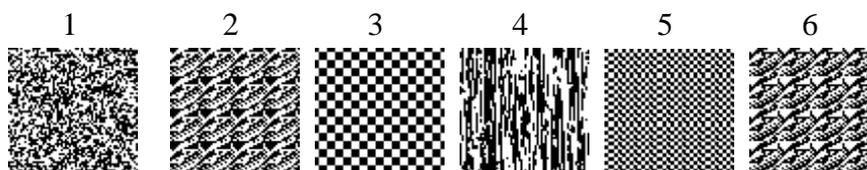


圖 5.實驗二當中所採用的 13 種質感圖形之局部圖樣

2. 實驗程序

實驗二的刺激介面如圖 6 所示意，矩形框內為受試者所見的視野，左邊為測試區域 (test field)，每次比對呈現六種紅綠質感其中一種作為標準刺激，右邊為呈現均質黃色的比較區域 (comparison field)，明度被固定在三種水準，下方的 G-R 調整桿可往偏紅或偏綠方向調整，改變此區域的色相。

6 種圖樣及 3 個固定明度，總共有 18 種配對情況，每位受試者在每個情況進行 5 次重複的嘗試，參與實驗的 5 位受試者均接受 90 次色彩比對嘗試，18 種情況隨機出現，每次嘗試 (trial) 中受試者調整右方區域色相，將該區域的色彩外觀微調至與填滿紅綠值感的測試區域看起來最接近、邊界最模糊為止。

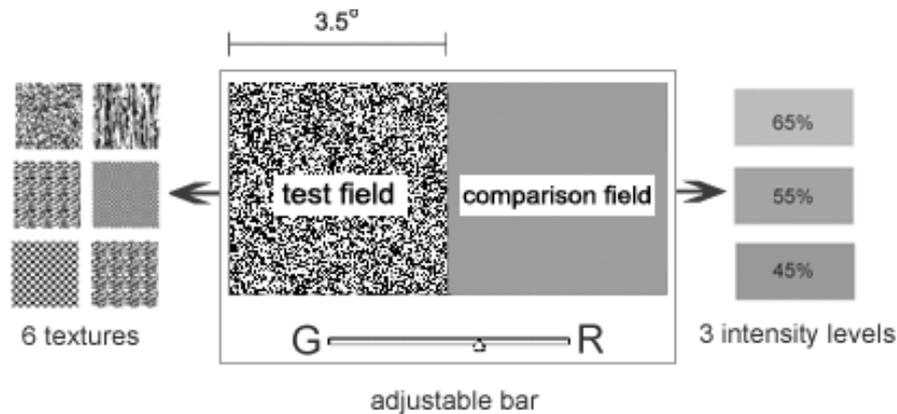


圖 6. 紅綠質感 vs. 均勻色面的色彩比對實驗示意圖

3. 實驗結果

圖 7 為實驗結果的綜合統計圖，三折線分別為比較區域的明度固定在 65%、55% 以及 45% 時的表現趨勢，X 軸為 6 種不同的紋理 (參見圖 5)，Y 軸為受試者在不同條件下所調整的紅綠比值，理論上與測試區域在理論上的「相等色相」的比值為 1，即圖中水平線所標示處，高於此水準的觀察值表示在色彩比對作業當中受試者對紋理的感覺偏向紅色，低於此水準者表示偏綠色。

不同明度 (見圖中 intensity 之圖例) 明顯影響主觀色相知覺，代表三個明度水準的折線均不相交，明度高低與色相的偏紅程度呈正比關係，這表示受試者在高明度時，需要調高紅色比例，才可達到等色感覺。

另外紋理對色相知覺的影響程度也與明度水準成正相關，明度越高時紋理對色彩外觀的影響越大，明度低時不同紋理的色相感覺無明顯差別。即使如此，三種明度狀況下，紋理所導致的紅綠比例之高低趨勢並不相矛盾 (除了 texture1 在 45% intensity 的資料點之外)。

由圖 7 我們可清楚看出紋理、明度及色相的交互關係，而圖 8 則可看出單一因子對紅綠色相的影響，a 為三種明度之下所有紋理的紅綠比平均，b 為六種紋理的紅綠比平均，兩個直方圖當中的水平線均為紅綠比值等於 1 的水準 (即理論上的等色)，由此可更直接觀察出明度水準和不同紋理兩因素對色彩比對實驗當中的色相知覺之影響。

表 1 為以紋理和明度為因子做雙因子變異數分析 (2-way ANOVA) 之檢定結果，兩個因子的個別效果以及交互作用都是非常顯著的 ($p < 0.01$)。

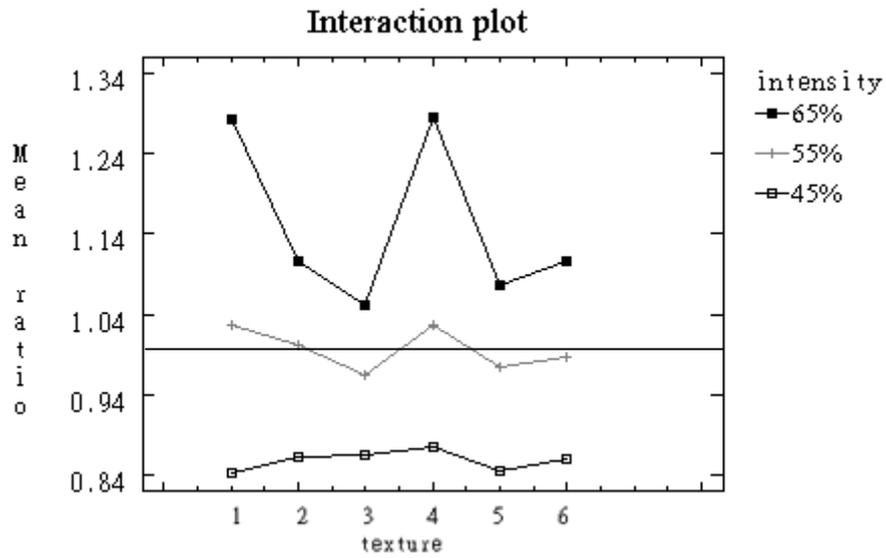


圖 7. 質感/明度/色相的交互作用圖，X 軸為 6 種植感，Y 軸為調整紅綠比值，三折線為三種固定亮度

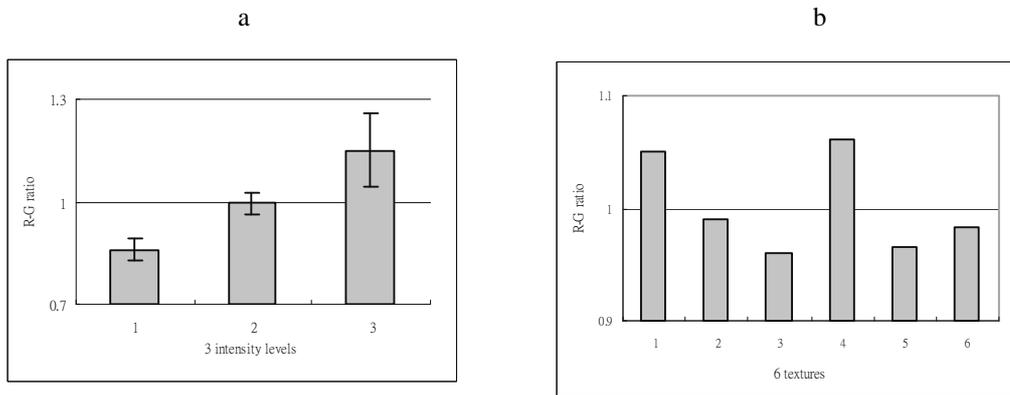


圖 8. a 圖的 X 軸為三個固定明度、b 圖的 X 軸為六種紋理，兩圖 Y 軸均為調整紅綠比值

表 1 雙因子變異數分析 (2-way ANOVA) 之結果

Response variable: ratio

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Texture	0.0855519	5	0.0171104	11.85	1.0E-4
Intensity	0.775179	2	0.387589	268.34	1.0E-4
INTERACTION	0.0919375	10	0.00919375	6.37	1.0E-4
RESIDUAL	0.0519973	36	0.00144437		
Total (corr.)	1.00467	53			

四、綜合討論

根據實驗一與實驗二的結果，我們可以歸納出兩個重點：

(一) 兩個實驗都支持不同的質感圖形會影響混色結果。我們曾經根據實驗一的結果認為影響主觀色相偏移的空間特徵為顆粒大小和亂度，因而鎖定此二因素設計實驗二，但實驗二發現顆粒大小對紅綠比例影響不大，導致色相偏移的主要因素應可更縮減到「亂度」一因素。

(二) 明度改變會影響條件等色的平衡狀態，就本研究而言，高明度的限制會使得觀者需要將比較區域調得更紅一些，才能與低明度時的等色品質相仿。圖 7 為一個以紋理的亂度為水平軸、顆粒大小為垂直軸的二度平面，若將本實驗刺激按照其特徵擺放在此空間當中，並且為每個紋理標上色彩比對的平均紅綠比值（1.06 即是紅比綠等於 1.06 : 1），其中數值大於 1 者即是色彩外觀較偏紅的紋理，我們可發現紋理較為紊亂的亂數點和隨機筆觸圖形均屬於引導色相感偏紅的樣本，而最規律的棋盤方格則不論顆粒的大小均為偏綠，中央的兩紋理為圖案相同但是紅綠互為顛倒的樣本，採用的目的在於檢驗實驗程式的比例計算正確與否，所得到的接近紅綠相等的調整值，呼應其相對而言較為中性的圖樣特徵。

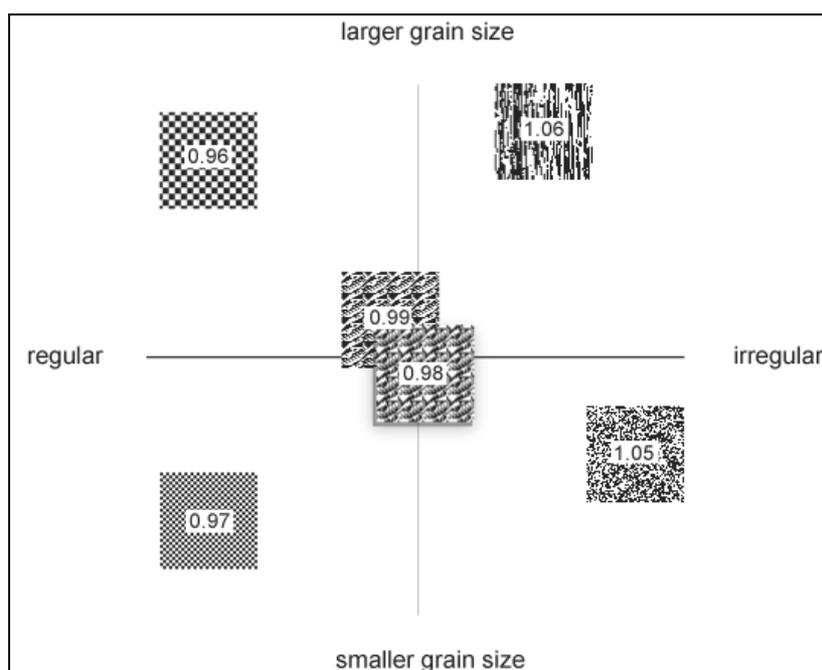


圖 9. 以規則度－顆粒大小作為二度空間的水平垂直軸、配上紋理樣本與其主觀紅綠比的關係圖

藉著圖 9 的亦可以歸納出更扼要的結論：影響等量紅綠質感的混色外觀的主要因素為色點的規則程度，越凌亂者越容易導向偏紅色的色相感覺，反之偏綠。若嘗試以直覺解釋此現象，我們可推論因為紊亂的紋理缺乏幾何面積上的參考線索，受試者在不知所有樣本的紅綠面積都是各佔 50%、像素數目都是一模一樣的狀況下，全憑直覺去決定無合理線索的圖形的紅綠比例。

那麼，為什麼紋理與色相偏移的對應方向是「規則－凌亂」配對到「偏綠－偏紅」呢？這意味著我們在沒有數字根據之下判斷一個紅綠相等的質感時，會替紅色部分做注意力上

的加權動作，紋理與色相偏移的方向性暗示著不同色相的顯眼 (saliency) 程度並非平等的。

本系列的實驗下一步所要探討的兩個重點，即是繼續以不同的色相所構成的質感進行色彩比對，以及以色點排列的規則度作為操弄因子，進一步探討色彩外觀與質感的關係。

參考文獻

孫慶文 (民 88 年) 。色彩視覺。視覺與認知。遠流。

陳一平 (民 88 年) 。質感辨識。視覺與認知。遠流。

葉素玲 (民 88 年) 。色彩在空間視覺所扮演的角色。視覺與認知。遠流。

Anderson, S., Mullen, K., & Hess, R.(1991). Human perception spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: limits imposed by optical and retinal factors. *J. Physiology.*, 442, 47-64.

Beck, J. and Mingolla, E. (1999). Texture segregation in chromatic element-arrangement patterns. *Spatial Vision*, 4, 421-460.

Chen, I. P. (1994) *Texture perception: a linear system approach*. University of California at Berkeley. USA.

De Valois, R. L. & De Valois, K.K (1988) *Spatial vision*. Oxford University. USA.

Julesz, B. (1981) Textons, the elements of texture perception and their interactions. *Nature*, 290, 91-97.

Landy, M. S., & Graham, N. (2002) . *Visual perception of textures*. (unpublished manuscript)

Li , A.& Lennie, P. (1996). Mechanism underlying segmentation of colored textures, *Vision research* 37,83-97

Kingdom, F.A., & Mullen, K.T. (1995) Separating color and luminance information in the visual system. *Spatial Vision*, 9, 191-219

Komatsubara, H., Kobayashi, S. Nasuno, N., Nakajima, Y., & Kumada, S. (2002) Visual color matching under various viewing conditions. *Color research and application*, 27, 399-420.

Montag, E. D., & Berns. R. S. (1999) Lightness dependencies and the effect of texture on suprathreshold texture on lightness tolerances. *Color research and application*, 25, 241-249.

Mullen (1985) .The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *J. of Physiology*, 359,381-400.

Pearson, P. M. & Kingdom, F. A. A. (2001) On the interference of task—irrelevant hue variation on texture segmentation. *Perception*, 30, 559—569

Pearson, P.M. & Kingdom, F.A.A. (2002) Texture—orientation mechanism pool color and luminance contrast. *Vision Research*, 42, 1547—1558

Regan, D.(2000)*Human Perception of Objects: Early Visual Processing of Spatial Form Defined by Luminance, Color, Texture, Motion, and Binocular Disparity*. Sinauer Associates. USA.

- Rivest, J., & Cavanagh, P. (1999) Localizing contours defined by more than one attribute. *Vision Res*, 36(1), 53–66.
- Wandell, B. A. (1995) *Foundation of Vision*. Sunderland, MA: Sinauer Press.
- Wandell, B. A. & Silverstein, L. D. (2000) *OSA Handbook: the science of color*, 2nd. Edition 1.0. *Digital color reproduction*.