

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	130012
參展科別	行為與社會科學
作品名稱	以色彩區辨派典探討環狀誘導色彩錯覺中的同 化與異化效果
得獎獎項	大會獎 一等獎 美國 ISEF 正選代表 美國心理學會獎
就讀學校	臺北市立第一女子高級中學
指導教師	陳建中、許一懿
作者姓名	余承穎、黃芷嫻

關鍵詞 色彩誘導(chromatic induction)、
視覺閾限(increment threshold)、
同化與異化(assimilation and contrast)

作者簡介



我們是就讀於北一女中的黃芷嫻(左)、余承穎(右)，由於兩人對心理學都有相當的興趣，因此踏入本研究領域。在走訪多個教授的實驗室後，我們決定請臺灣大學心理系陳建中教授作為我們的指導教授。

研究的過程中，我們曾經歷無數次的瓶頸，更曾因停電導致實驗前功盡棄。非常感謝教授、實驗室學長姐及幾位受試者在那段日子裡給予我們的支持，也期待我們能將所學與大家分享！

摘要

色彩知覺是人類最重要的感官之一。由於形狀、亮度、空間頻率和色彩組成的不同，每個人對色彩的感知也有所差異。我們對此現象感到著迷，並決定進行一項研究，以識別和量化不同情況下的色彩誘導。

本研究選擇以環狀刺激作為主要圖像，以測量人類視覺色彩誘導。而本實驗主要利用紅色與綠色的誘導效果。實驗中，我們採用紅色及綠色基準做為目標環狀區域，並於其中添加可變性紅色目標，以測量受試者之視覺閾限。在色彩誘導的情況下，透過環狀刺激與測量所得之視覺閾限，我們可以識別並量化環狀刺激對色彩感知造成的影響。此外，我們也發現了環狀刺激中的單一環形如何影響人們對目標環狀區域的色彩感知。

我們利用實驗所得之結果，建立了一個預測並描述色彩錯覺與細胞反應相關性的模型，而此模型將會讓我們對人類視覺系統及神經間的側交互作用有更深一層的了解。

Abstract

Color vision is one of the most significant senses in humans. Due to different shapes, luminance, spatial frequency and chromaticity, each individual human perceives colors differently. Fascinated by this phenomenon, we've decided to set up an experiment in order to identify and quantify chromatic induction in different situations.

The annulus stimulus was chosen as our main image frame for measuring human vision's chromatic induction, and our experiment utilized color red and color green's inducing effect. In the experiment, we've employed a red pedestal and a green pedestal for the target ring, and an adaptive red target was added to the target ring so as to measure the increment threshold of the observers. Through a combination of utilizing annulus stimulus and measuring human vision's increment threshold under chromatic inducing circumstances, we were able to identify and quantify the effect of chromatic induction caused by annulus stimulus. Moreover, we've also discovered how each individual ring influences our color percept on the annulus stimulus' target ring.

These results enabled us to build a model for predicting and describing the correlation between chromatic induction and cellular response. This model will give us a better understanding on how human's visual system functions, and it will also provide us with a clearer picture on how neurons interfere with one another.

壹、前言

一、研究動機

人們藉由雙眼認識世界，不論是天空的藍、森林的綠、花朵的紅，都促成了眼睛所見的繽紛。然而，我們卻偶然發現，不同背景下，同一物體可能擁有不同的呈色。

翻閱文獻資料後，此現象確實可由科學方法解釋，且稱為視覺色彩誘導(chromatic induction)。我們了解到：眼睛所見的事物皆由一個個神經訊號傳遞至大腦而成，在傳遞過程中，背景物體的色彩訊號可能對目標物體色彩訊號造成同化(assimilation)或異化(contrast)的效果，使所見顏色有所不同(Cerda-Company, X., Otazu, X., Sallent, N. & Párraga, C. A., 2018)。

另一個引起我們興趣的現象是：在不同條件下，人類察覺物體亮暗、顏色深淺的能力有所不同。同樣的光源，為什麼在暗房中十分明顯，在太陽下卻不易察覺呢？

參考了文獻(Chen, C.C., Foley, J. & Brainard, D., 2000)後，我們發現此現象稱為視覺閾限(increment threshold)。不同條件下，人類察覺物體的能力確實有異，經過更深入的文獻探索之後，我們發現視覺閾限是能經由實驗而被量化的。

以上兩個有趣而生活化的現象皆令我們非常好奇。於是，為了解視覺色彩誘導與視覺閾限背後的神經機制，我們決定將兩個主題結合，著手進行更深入的探討與研究。

二、研究目的

- (一) 探討視覺色彩誘導對人類視覺色彩感知的影響
- (二) 探討視覺色彩誘導對視覺接收的影響(以視覺閾限量化)
- (三) 探討視覺色彩誘導背後的神經機制

三、文獻回顧與名詞解釋

視覺中，色彩錯覺的現象會因顏色及光度強弱而有所不同。相異情況下，人眼色彩感知被影響的程度也不一定。而除了不同條件下色彩錯覺的影響程度不甚相同外，視覺閾限也會有所差異(Chen, C.C., Foley, J. & Brainard, D., 2000)。

本實驗以 L, M, S 計算及表達實驗中所用之色彩，並採用 MB-DKL 色彩座標(Derrington, A. M., Krauskopf, J., & Lennie, P., 1984)及強迫選擇法(2AFC)。實驗最終希望能理解不同視覺錯覺對視覺閾限的影響，並透過模型擬合量化其影響程度，再進一步得到於環狀色彩錯覺

(chromatic induction with annuli stimuli)中，不同的誘導環對目標環狀區域(target ring)的顏色感知產生何種效果。

(一) 環狀色彩錯覺(Chromatic Induction with Annuli Stimuli)

生活中常見視覺錯覺之一——色彩錯覺，描述了背景中的顏色會如何影響人眼對主觀物體顏色的認知。色彩錯覺的種類繁多，而本實驗主要採用環狀視覺刺激。

環狀視覺刺激在色彩錯覺上的效果最早於 2005 年被提出 (Shevell, S. K., & Monnier, P. 2005)。其錯覺效果由環形的空間頻率及色彩組成決定，不同區域之誘導環會導致目標環狀區域的呈現色彩趨近(同化)或遠離(異化)誘導環本身顏色。

(二) 強迫選擇法 (Two-Alternative Forced Choice Paradigm, 2AFC)

強迫選擇法要求受試者在實驗中從兩個選項選出較符合實驗要求者，不論題目為何，受試者皆必須選出一個選項作為回應。舉例來說，本實驗中受試者需觀看兩張不同的影像，並選出目標環狀區域顏色較明顯者，對於每道題目受試者皆必須選出一張影像，不可略過。

(三) 視覺閾限 (Increment Threshold)

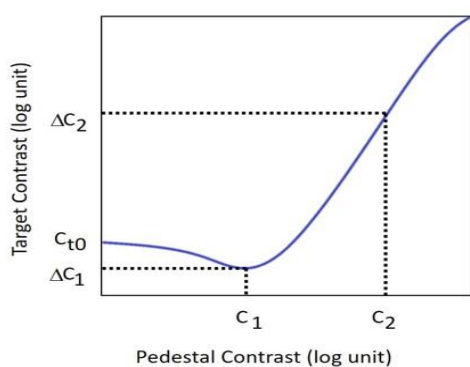


圖1 色彩基準與視覺閾限關係圖

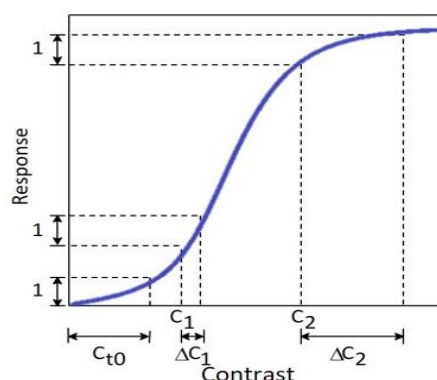


圖2 色彩對比程度與細胞反應關係圖

在理想狀況下，若定義 x 軸為目標環狀區域色彩基準(pedestal)之對比程度(contrast)大小(單位 dB)， y 軸為閾限大小(單位 dB)，並以實驗所得數據繪製成圖，將獲得一先減後增之曲線(如圖 1)，我們稱此函數圖形為 $T(x)$ ，其關係式可表示為 $T(C) = \Delta C$ (target versus contrast function)。由此，可推論出另一 x 軸為色彩基準對比程度(單位 dB)大小， y 軸為細胞反應(cell response, 單位 arbitrary unit)大小之曲線圖(如圖 2)，而我們稱此函數為 $R(x)$ 。

(四) 視錐細胞(L-, M-, S- cone cell)

視錐細胞為視網膜上的一種色覺感受細胞，可以在較強光線下被刺激。以人類來說，視錐細胞分為三種：L-cone cell 主要接收長波段(564-580 奈米)光波；M-cone cell 接收中波段(534-545 奈米)光波；S-cone cell 接收短波段(420-440 奈米)光波。藉由這三者，人們得以感受到各式的色彩。

(五) MB-DKL 色彩座標 (Macleod Boynton Derrington Krauskopf Lennie color space)

色彩的表示系統繁多，而 MB-DKL 色彩座標即為其中之一。此色彩座標共分為三個軸向，x、y 軸控制色彩組成(chromaticity)，z 軸控制光度(luminance)。說明如下：x 軸對應(L-M)，正向為紅，負向為綠；y 軸對應(S)，正向為藍，負向為黃；z 軸對應(L+M+S)，正向為亮，負向為暗。藉由此座標系統，每一個色彩的數據特質可以輕易地被表述。

(六) 正規化模型(normalization model)

已知正常情況下，人類視神經的反應可表示為： $R = \frac{E^P}{I+J+z}$ ，在此，E 表神經受刺激程度(excitation)；I 表細胞受抑制程度(inhibition)；z 表神經內部的原有抑制(inhibitory constant)；而 P、J 則為反應指數。視神經在環狀誘導色彩錯覺的情況下可能會有三種不同的反應模型，模型間以神經的側交互作用(lateral mechanisms)運算方式區分。

1. 可加性模型(additive model)，其神經反應可表示為： $R = \frac{(E+A_1)^P}{(I+A_2)^{J+z}}$ ，反應表示式中， $A_1 = w_1 \times r_1 + w_2 \times r_2$ 、 $A_2 = w_1' \times r_1 + w_2' \times r_2$ ，在此，w 表各誘導環產生的側交互作用比重； r_1 表近環所產生的側交互作用； r_2 表遠環所產生的側交互作用。
2. 相乘性模型(multiplicative model)，其神經反應可表示為： $R = \frac{E^P \times M_1}{(I \times M_2)^{J+z}}$ ，反應表示式中， $M_1 = q_1 \times r_1 + q_2 \times r_2$ 、 $M_2 = q_1' \times r_1 + q_2' \times r_2$ ，在此，q 表各誘導環產生的側交互作用比重； r_1 表近環所產生的側交互作用； r_2 表遠環所產生的側交互作用。
3. 可加性且相乘性模型(multiplicative and additive model)，其神經反應可表示為： $R = \frac{M_1 \times (E+A_1)^P}{M_2 \times (I+A_2)^{J+z}}$ ，反應表示式中各符號的含義可由前文敘述得知。

實驗中所採用的正規化模型包含用以將影像訊號乘上權重的線性濾波器(linear filter)、細胞初始興奮訊號(excitatory input, E)、細胞抑制訊號(divisive inhibition, I)、細胞處理模組

(hypercolumn)間的側交互作用，以及非線性的細胞反應函數(cell response function)。下圖黃色框線中的元素表單一細胞處理模組。

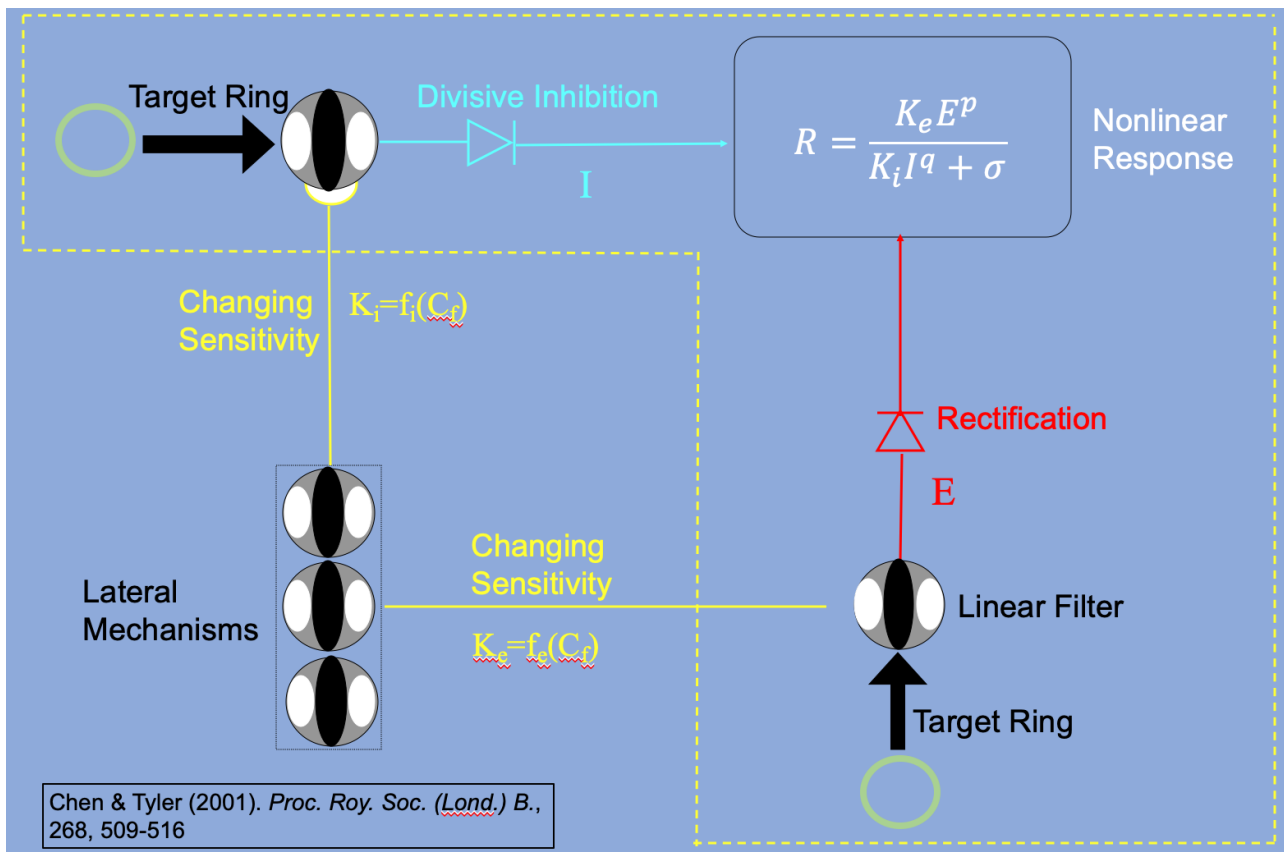


圖3 正規化模型示意圖

貳、 研究方法與過程

一、受試者

本行為實驗受試者共四人，兩人為本實驗之作者，另二人則為臺灣大學大學部之學生。受試者皆為女性。四人視力皆正常；經過石原氏色盲測試(Ishihara plate)後確認，四人色彩辨別能力亦正常。

實驗進行前，四位受試者皆已被告知實驗細項並簽署受試者知情同意書。四人在正式實驗開始前皆進行三個練習回合，一回合為紅色基準、灰/灰誘導情形並以-32dB 作為色彩基準之對比程度；另一回合則為綠色基準、綠/紅誘導情形並以-32dB 作為色彩基準之對比程度。

二、視覺刺激材料

本實驗共設計了 84 種不同的環狀視覺刺激。單一刺激由 30 個環組成，而實驗的觀察對象—目標環狀區域—位於由內而外的第 13 個環。目標環狀區域一半採紅色、另一半採綠色。在本研究中，我們稱鄰近目標環狀區域的誘導環為「近環」、與目標環狀區域間隔一環的誘導環為「遠環」。誘導區域的表示方法為：遠環顏色/近環顏色，分為紅/綠、綠/紅、紅/灰、灰/紅、綠/灰、灰/綠、灰/灰。色彩基準的對比程度則分為 $-\infty$ dB、-40 dB、-36 dB、-32 dB、-28 dB，及-24 dB。

實驗中，各環狀視覺刺激其顏色皆由 MB-DKL 色彩座標上的三個座標點所表示。第一個座標點決定對比程度，其可由 MB-DKL 色彩座標之向量長度換算而得；第二個座標點決定色彩組成，其可由 MB-DKL 色彩座標之平面角度(azimuth)換算而得；第三個座標點則決定光度，其可由 MB-DKL 色彩座標之上升角度(elevation)換算而得。

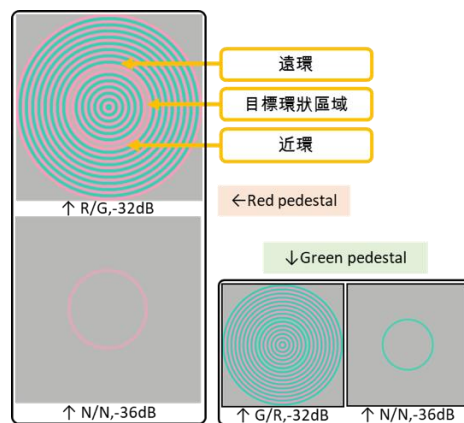


圖4 視覺刺激材料示意圖

三、設備

我們藉由蘋果公司之 G4 電腦控制 ViewSonic P75f+ 17 吋陰極射線管(cathode ray tube, CRT) 顯示器，使顯示器呈現環狀視覺刺激。G4 電腦之顯示卡具十位元的色彩解析度，此解析度可令我們產生接近人類視覺閾限的色彩異化效果。ViewSonic P75f+顯示器的平均亮度為 15 cd/m²，影像更新率(temporal refresh rate)為 75 赫茲，空間解析度則為 800 (H) × 600 (V)。實驗過程中，受試者距顯示器 110 公分。在此距離下，一個像素對應之視角為 0.02° (H) × 0.02° (V)；而整個顯示器之對應視角為 16.7° (H) × 12.5° (V)。

四、行為實驗方法

控制實驗進行的程式由 MATLAB 輔以 Psychophysics Toolbox 寫成。實驗過程中，受試者手持按鍵，凝視前方的顯示器並做出按鍵反應。受試者一次進行約兩小時的實驗，每次約進行四十二個回合。一個回合中會出現八十張影像，而受試者則須做出四十次按鍵反應。

一次的按鍵反應中，受試者會看見先後兩張不同的環狀刺激影像，若第一張影像的目標環狀區域顏色較明顯，受試者需按 4，反之則按 6。為了有效地找出視覺閾限所在，一個回合中，實驗程式會以受試者的答題狀況為依據調整實驗難度。當受試者每答對或答錯一次，實驗程式便會依據 PSI 演算法(Kontsevich, L. L., & Tyler, C. W. 1999)重新計算目標環狀區域所添加之可變性紅色目標(adaptive red target)，調整目標環狀區域的呈色。

五、實驗結果描述方法

實驗過程中，我們將採用紅色基準與綠色基準的實驗數據個別分析。我們以受試者的姓名縮寫(例：HHY)代表其採用紅色基準的實驗數據，而在其姓名縮寫的後方加一字母“g”(例：HHYg)表其採用綠色基準的實驗數據。

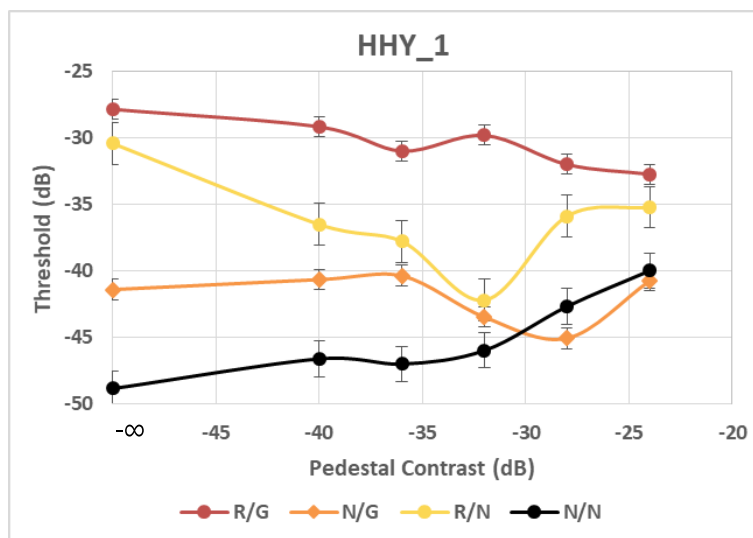
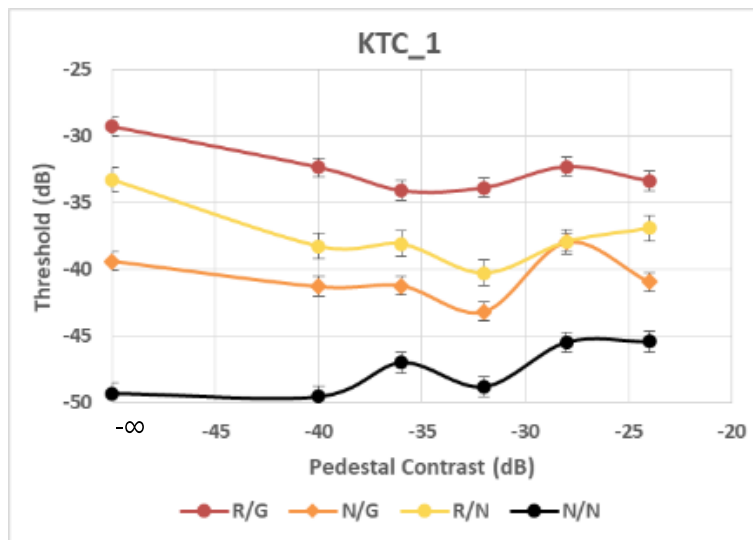
參、研究結果與討論

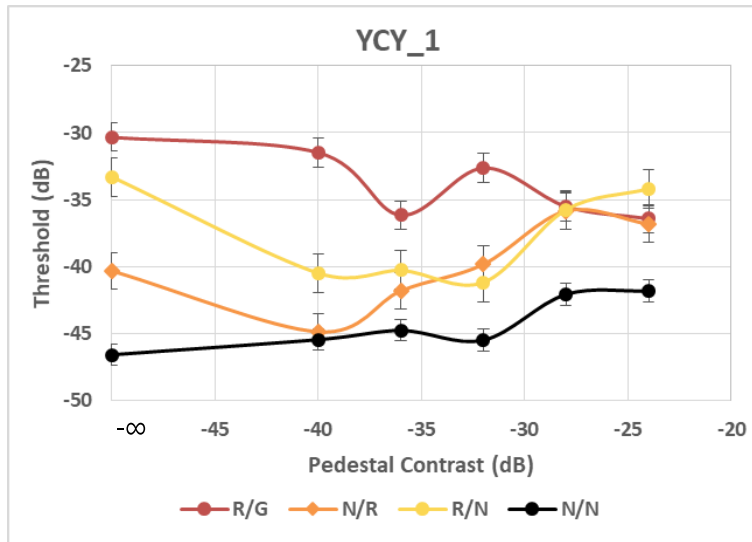
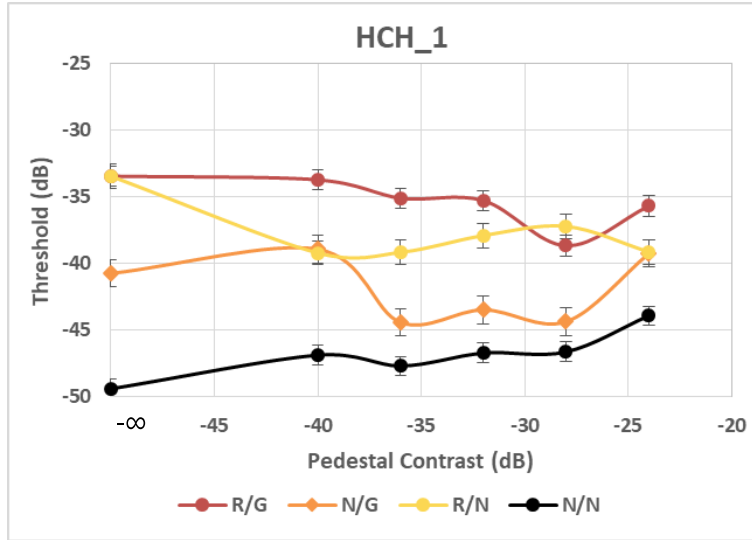
一、視覺閾限趨勢—原始數據

得到各誘導情況下視覺閾限之平均值後，將每組各自繪製為一條曲線。而在七組誘導情況中，我們再以環狀刺激影響視覺閾限之趨勢作為分類，定義：使視覺閾限在高對比程度上升，產生遮蔽效果(masking)者為一組；使視覺閾限在高對比程度下降，產生增進效果(facilitation)者為一組；而灰/灰(N/N)則為對照組。依照誘導情況與視覺閾限之平均值繪製曲線圖。

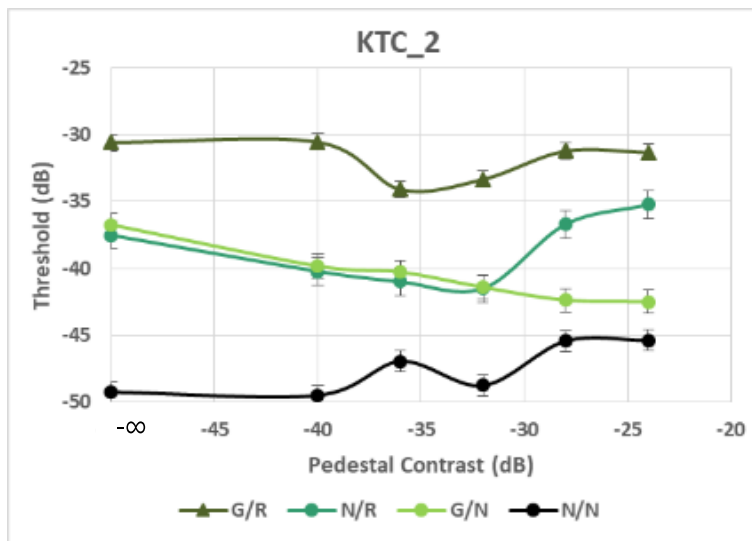
(一)結果

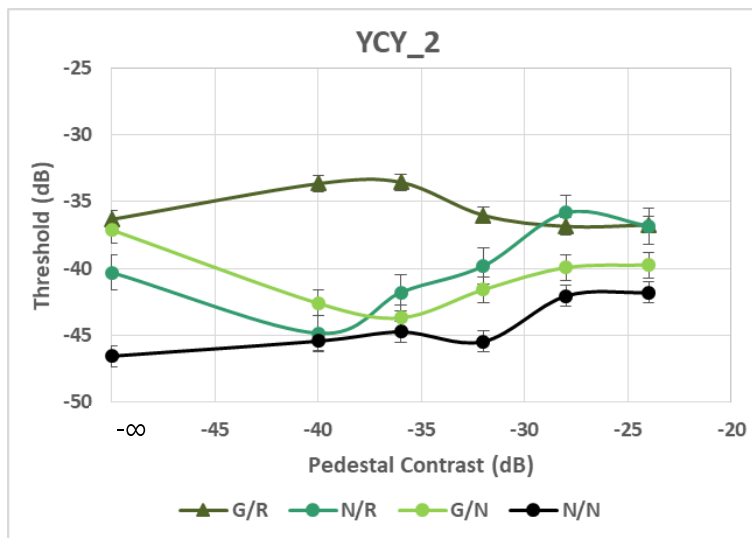
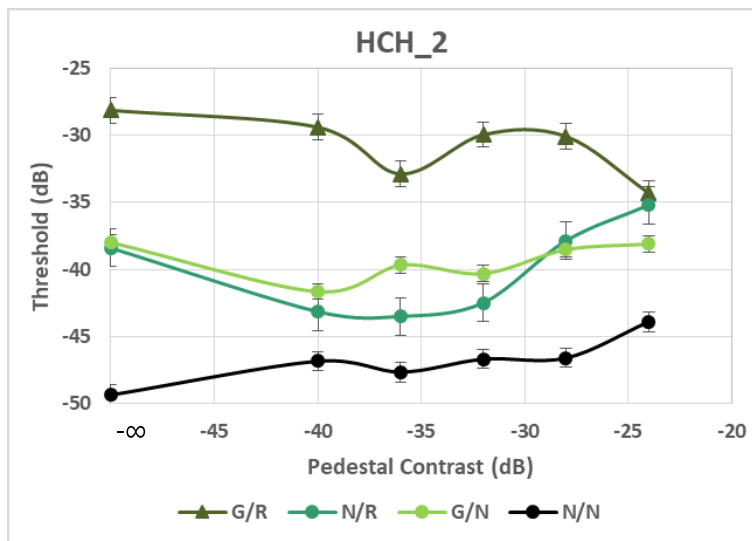
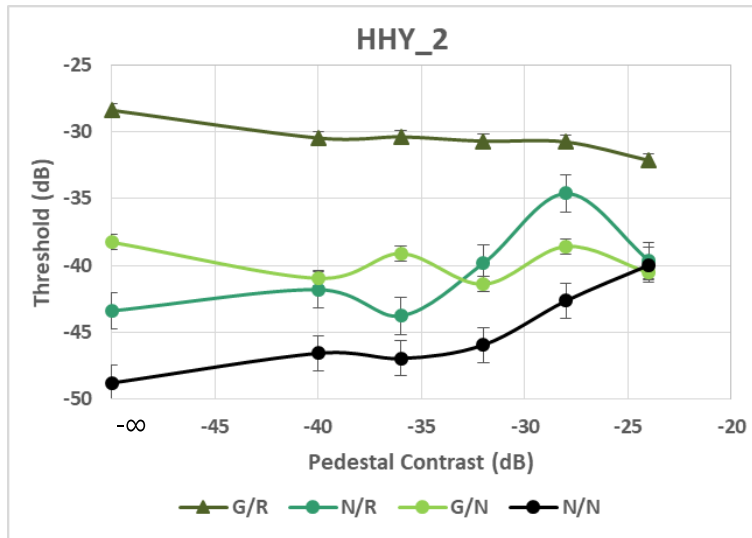
1. 紅色基準、誘導情況：紅/綠(R/G)、灰/綠(N/G)、紅/灰(R/N)、灰/灰(N/N)



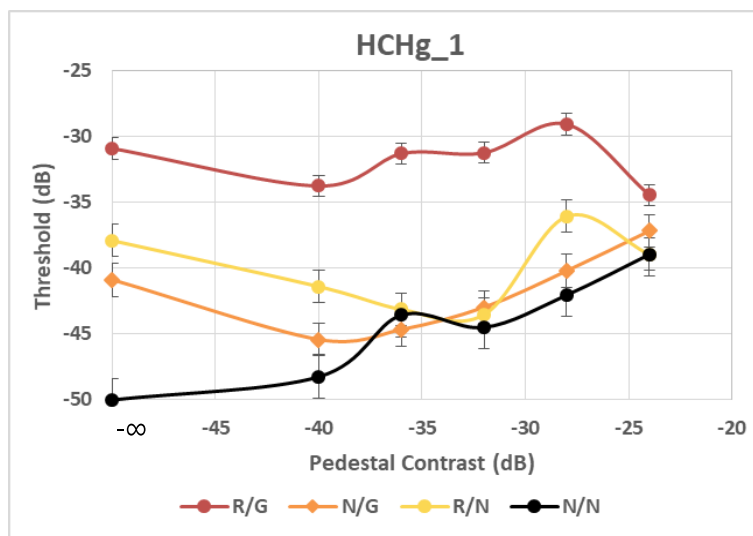
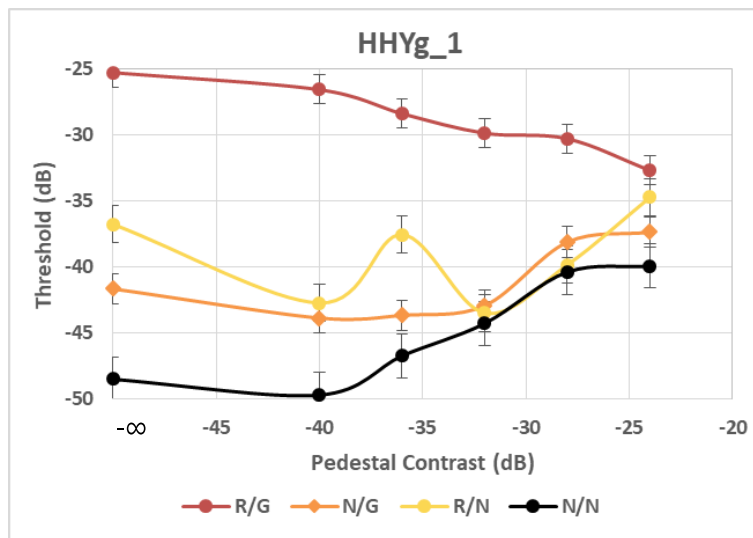
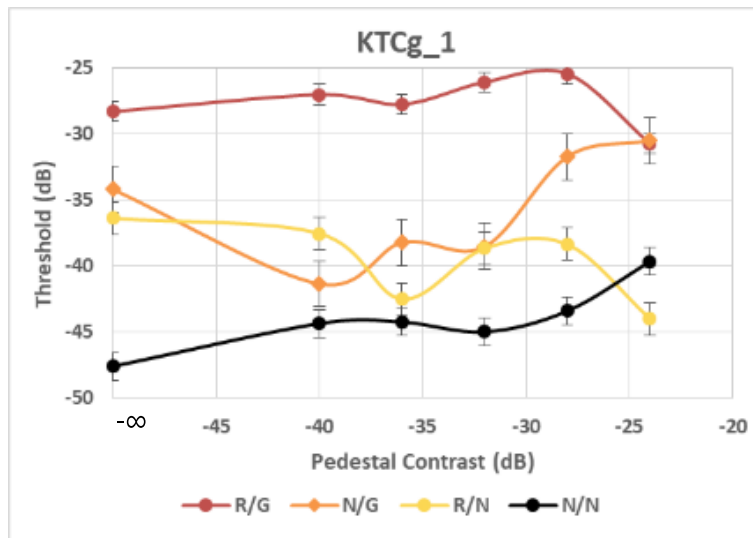


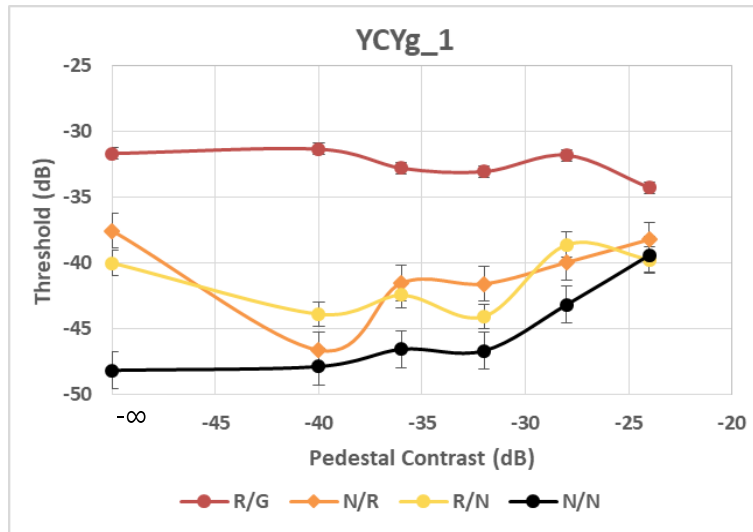
2. 紅色基準、誘導情況：綠/紅(G/R)、灰/紅(N/R)、綠/灰(G/N)、灰/灰(N/N)



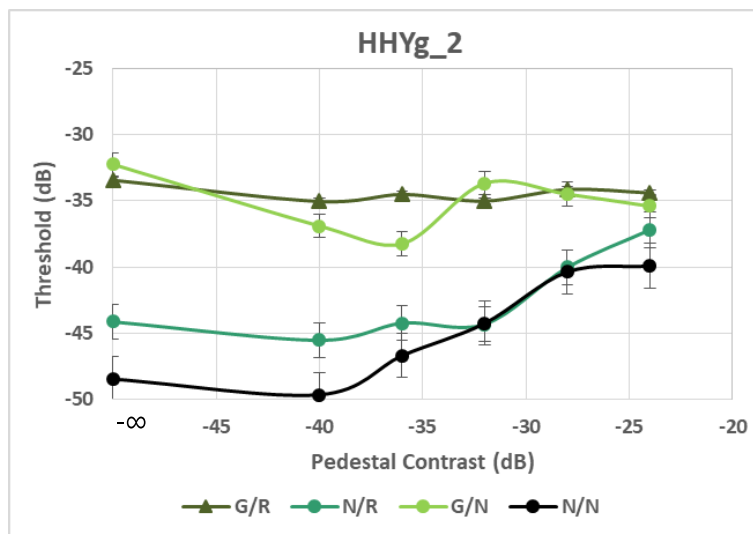
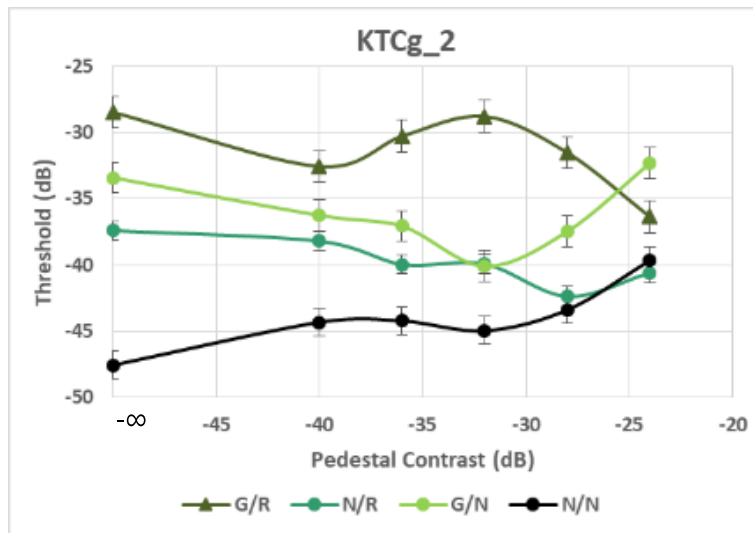


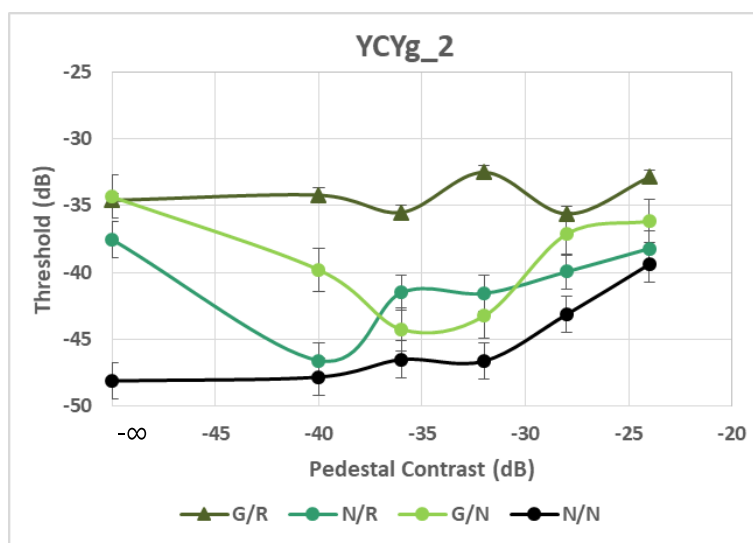
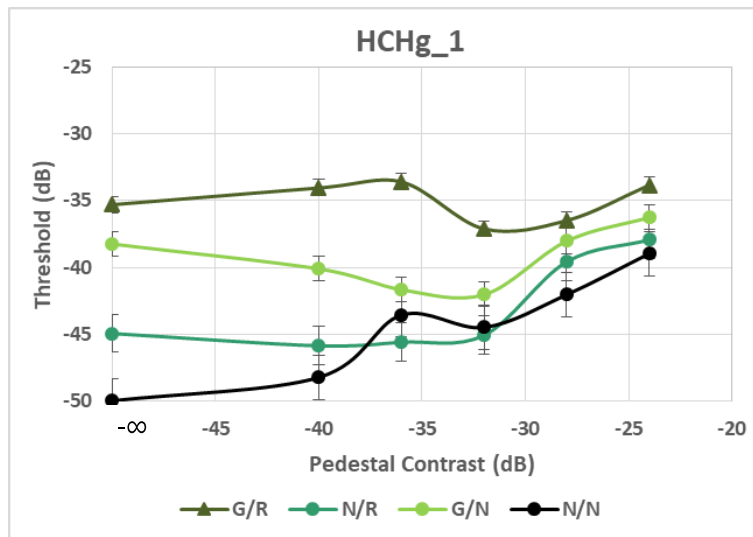
3. 綠色基準、誘導情況：紅/綠(R/G)、灰/綠(N/G)、紅/灰(R/N)、灰/灰(N/N)





4. 綠色基準、誘導情況：綠/紅(G/R)、灰/紅(N/R)、綠/灰(G/N)、灰/灰(N/N)





二、視覺閾限趨勢—模型擬合(model-fitting)

(一) 決定採用模型

在模型擬合的過程中，我們總共嘗試了六種不同的模型，分別為：近環與遠環皆可加性模型、近環與遠環皆相乘性模型、近環與遠環皆可加性且相乘性模型、近環可加性而遠環可加性且相乘性模型、近環可加性而遠環相乘性模型，及近環可加性且相乘性而遠環相乘性模型。

得到了六種模型的擬合結果後，我們先透過模型的迴歸趨勢、擬合參數剔除了近環與遠環皆可加性模型、近環與遠環皆相乘性模型、近環可加性而遠環相乘性模型，近環可加性且相乘性而遠環相乘性模型。之後，我們將近環與遠環皆可加性且相乘性模型、近環可加性而遠環可加性且相乘性模型的殘差平方和(sum of squared difference, SSE)帶入 f 檢定(f test)之公式：

$f = \frac{SSE_r - SSE_f}{\frac{df(r) - df(f)}{SSE_f / df(f)}}$ 。在此，我們定義自由參數較多的模型其殘差平方和為 SSE_f ，自由參數較少的模型其殘差平方和為 SSE_r ，而自由度則為資料點數目減去自由參數數目再減去一。

透過 f 檢定，我們得到了 p -value 為 0.07，其大於我們所設的顯著水準(significant level) 0.05。另外，兩模型之迴歸趨勢並無太大差異，故選定近環可加性而遠環可加性且相乘性模型作為最終的正規化模型。

	SSE_f	SSE_r	$df(f)$	$df(r)$	p -value
HHY	71.2	123.44	20	24	0.0211
HCH	90.55	123.36	20	24	0.1662
YCY	82.52	114.64	20	24	0.1419
KTC	45.38	76.04	20	24	0.0289
統合數據			20	24	0.0709
HHYg	105.52	159.48	19	23	0.1487
HCHg	93.17	139.36	19	23	0.0905
YCYg	100.98	152.74	19	23	0.0828
KTCg	124.00	193.06	19	23	0.0656
統合數據			19	23	0.0789

表 1 各受試者 f 檢定數據

(二) 模型擬合結果

由實驗所得資料，我們分別建構了 HHY, HCH, YCY, KTC 四位受試者的視覺色彩誘導之正規化模型(normalization model)，此模型中，橫軸為色彩基準之對比程度(單位 dB)，縱軸為視覺閾限大小(單位 dB)。分析過程中，我們定義 SS_{total} 為實驗數據之最大總和變異數、 SSE 為數據與模型之殘差平方和，以及 $Goodness-of-fit (GoF) = 1 - SSE / SS_{total}$ 。

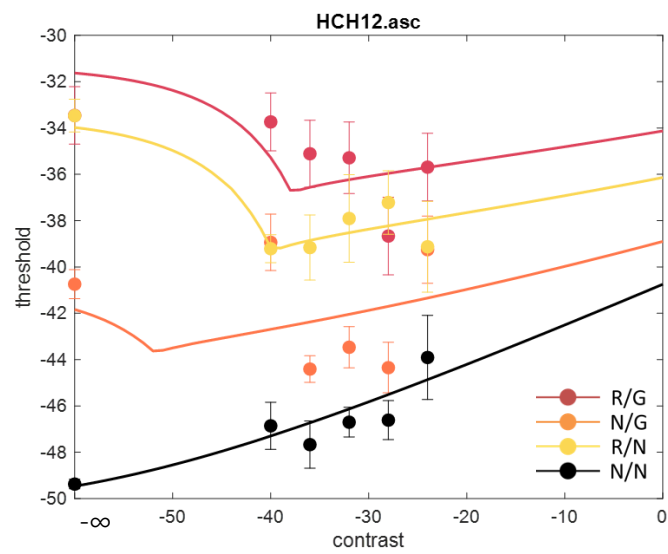
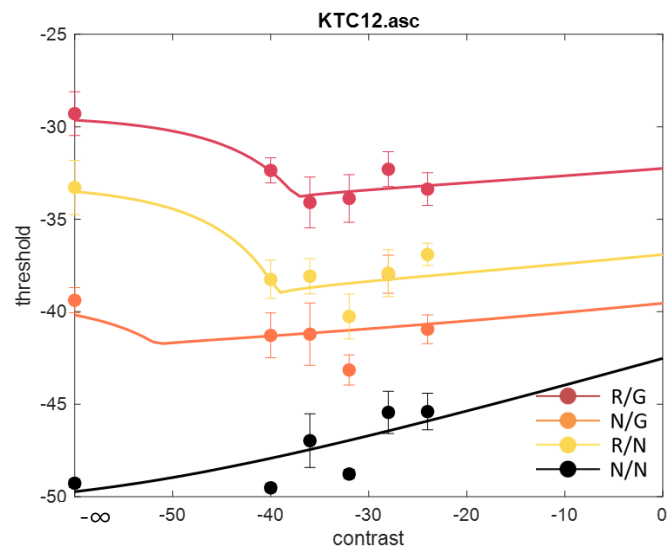
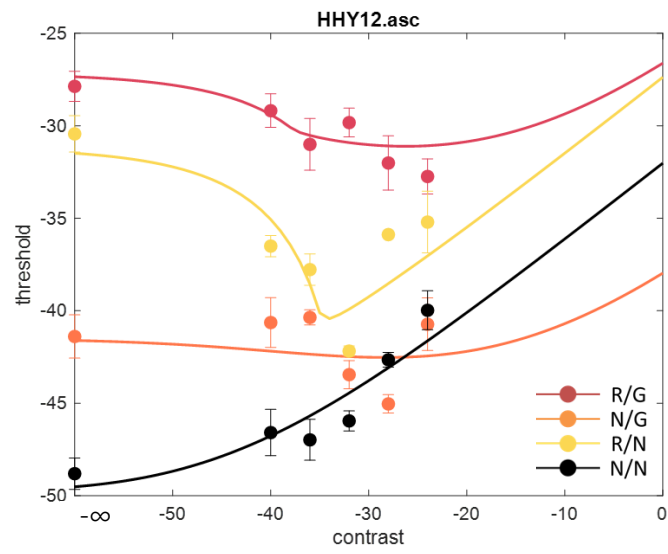
表 4 為本實驗各受試者模型的擬合結果，在此 SSE 代表數據與模型之殘差平方和， $RMSE$ 代表數據與模型之均方根誤差 (root-mean-square error)， MSE 則代表實驗數據之平均標準誤差 (mean standard error)。

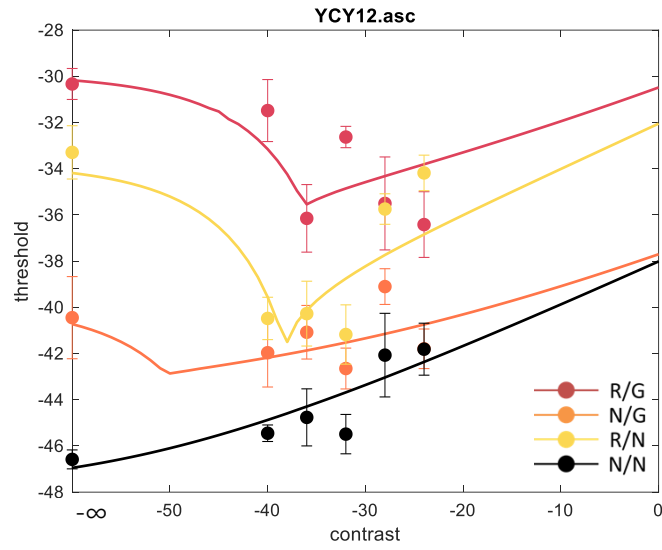
	SSE	$RMSE$	GoF	MSE
HHY	123.44	1.71	0.91	0.96
HCH	123.36	1.71	0.89	1.09
YCY	114.64	1.65	0.83	1.24
KTC	76.04	1.35	0.94	1.00

表 2 各受試者模型擬合數據

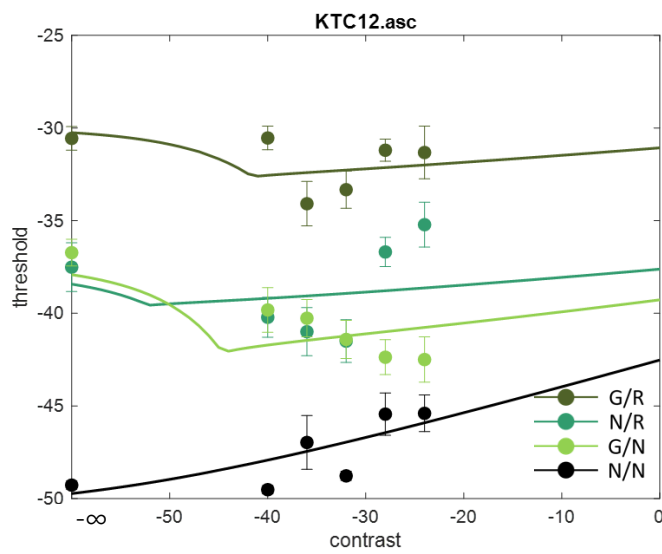
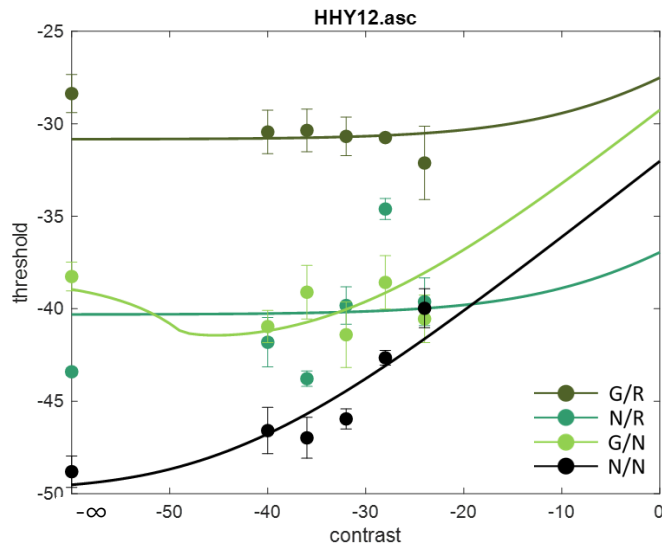
	SSE	$RMSE$	GOF	MSE
HHYg	159.48	1.95	0.89	0.92
HCHg	139.36	1.82	0.87	0.99
YCYg	152.74	1.91	0.84	0.98
KTCg	193.06	2.14	0.86	1.12

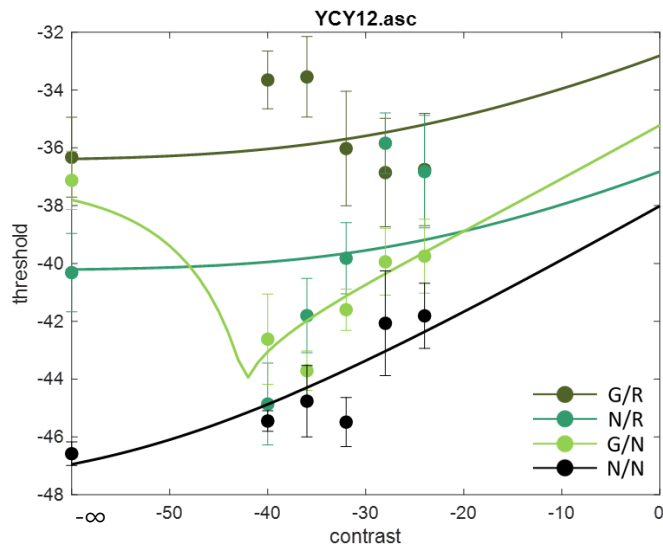
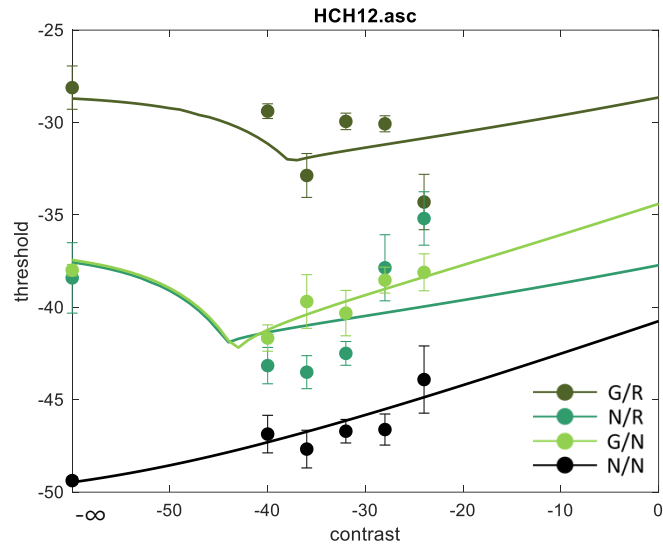
1. 紅色基準、誘導情況：紅/綠(R/G)、灰/綠(N/G)、紅/灰(R/N)、灰/灰(N/N)



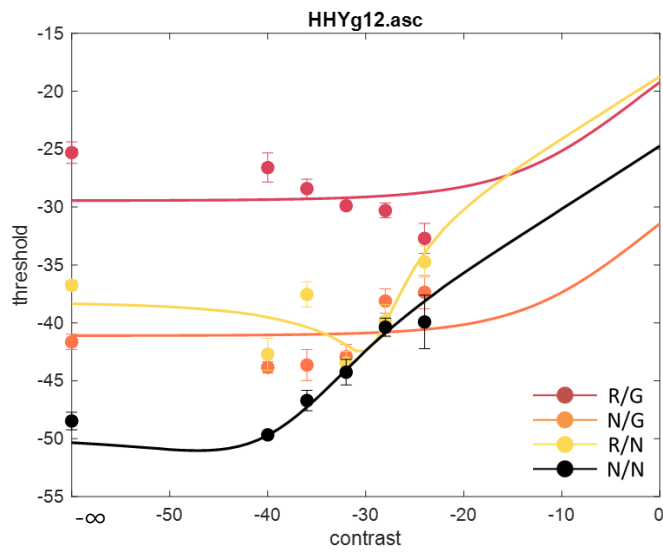


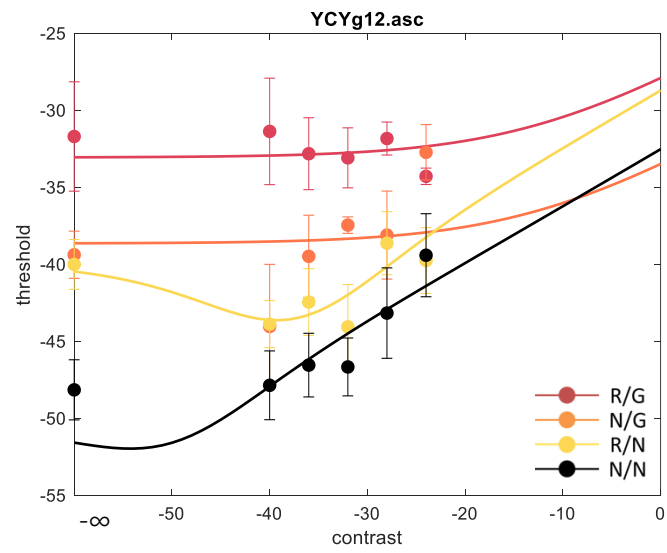
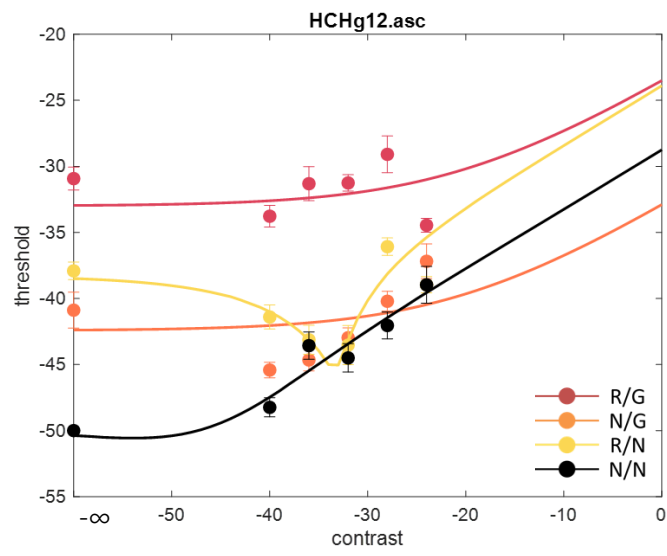
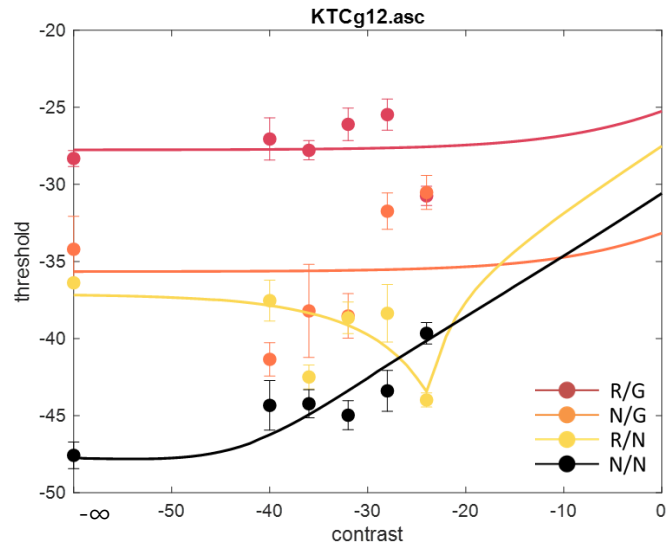
2. 紅色基準、誘導情況：綠/紅(G/R)、灰/紅(N/R)、綠/灰(G/N)、灰/灰(N/N)



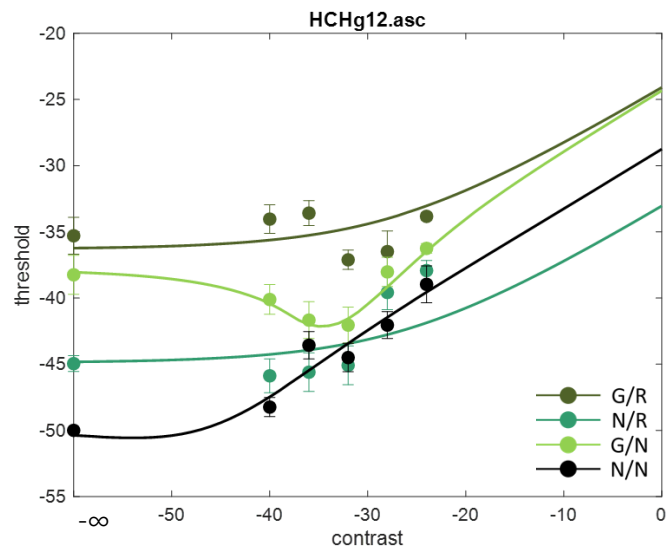
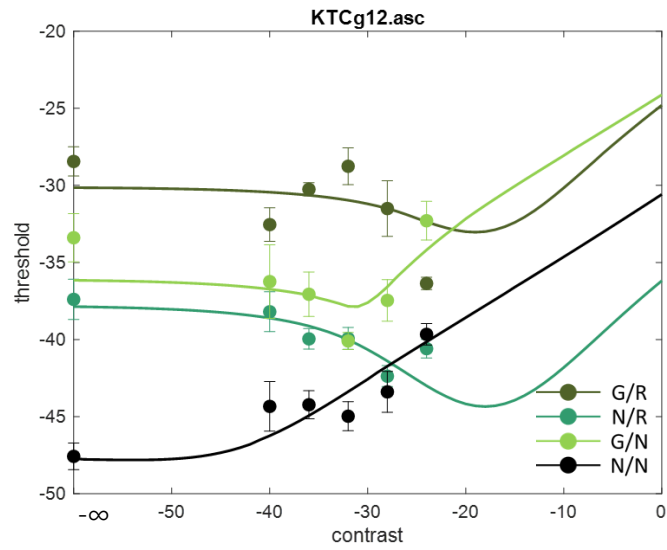
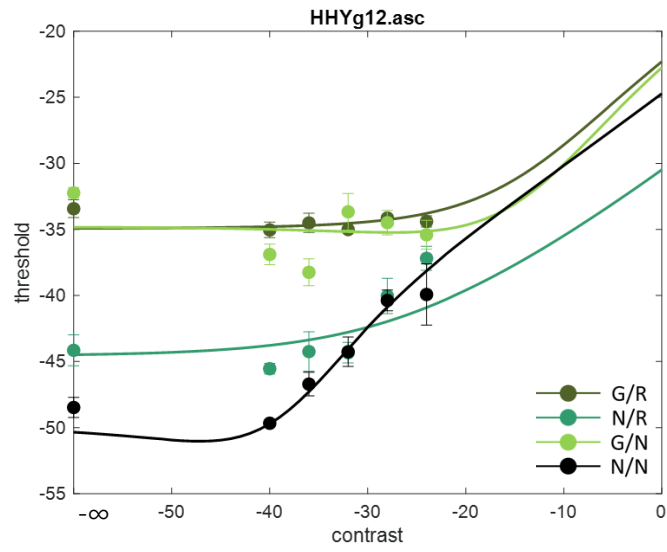


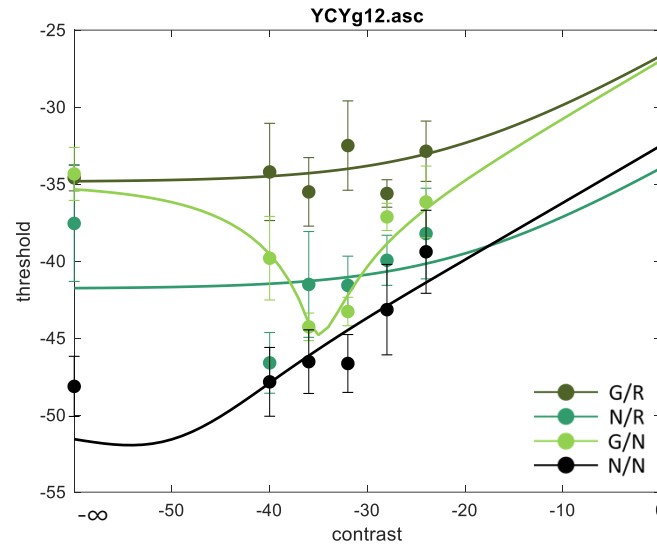
3. 綠色基準、誘導情況：紅/綠(R/G)、灰/綠(N/G)、紅/灰(R/N)、灰/灰(N/N)





4. 綠色基準、誘導情況：綠/紅(G/R)、灰/紅(N/R)、綠/灰(G/N)、灰/灰(N/N)





(三) 討論

近環可加性而遠環可加性且相乘性模型是在原先的可加性且相乘性模型

$$R = \frac{M_1 \times (E + A_1)^P}{M_2 \times (I + A_2)^J + z}$$

中，調整以下數值

$$A_1 = w_1 \times r_1 + w_2 \times r_2$$

$$A_2 = w_1' \times r_1 + w_2' \times r_2$$

$$M_1 = q_1 \times r_1 + q_2 \times r_2$$

$$M_2 = q_1' \times r_1 + q_2' \times r_2$$

內的權重，使 $q_1 = 0$ 、 $q_1' = 0$ ，以此方式達到近環可加性而遠環可加性與相乘性皆有的目的。

由以上模型可見，當基準色彩對比程度逐漸上升時，會有如下的結果：

- (一) 在紅色基準的條件下，紅/綠、灰/綠、紅/灰三種誘導情況會帶給目標環狀區域遮蔽效果，使視覺閾限呈向上趨勢。此現象意味著以上三種誘導情況會使目標環狀區域趨於紅色。
- (二) 在紅色基準的條件下，綠/紅、灰/紅、綠/灰三種誘導情況會帶給目標環狀區域增進效果，使視覺閾限呈些微向下趨勢。此現象意味著以上三種誘導情況會使目標環狀區域趨於綠色。
- (三) 在綠色基準的條件下，紅/綠、灰/綠、紅/灰三種誘導情況會帶給目標環狀區域增進效果，使視覺閾限呈向下趨勢。此現象意味著以上三種誘導情況會使目標環狀區域趨於紅色。

(四) 在綠色基準的條件下，綠/紅、灰/紅、綠/灰三種誘導情況會帶給目標環狀區域遮蔽效果，使視覺閾限呈向上趨勢。此現象意味著以上三種誘導情況會使目標環狀區域趨於綠色。

取以上綠色基準、灰紅背景為例說明推導結論過程。由第(四)列點可知，在此誘導情況下視覺閾限可見遮蔽效果，這意味著灰紅背景會使綠色基準的色彩呈現更偏向綠色，而由以上可進一步推論位於近環的紅色誘導環使綠色基準的色彩呈現遠離了本身的色彩組成，意即近環對目標環狀區域產生了異化效果。此推論過程可運用於本研究的其他結果，於是得到以下結論。

總結前文，本實驗最終推得：近環會對目標環狀區域的色彩感知產生異化效果，而遠環則會對其產生同化效果，且環狀誘導色彩錯覺所造成之神經側交互作用為近環可加性而遠環可加性且相乘性。

肆、 結論與應用

一、 結論

(一) 鄰近目標環狀區域之誘導環(近環)會對其產生異化效果

藉由紅、綠基準搭配七種不同之誘導情形對視覺閾限的影響、正規化模型擬合的結果，可推知近環會對目標環狀區域產生異化效果。

(二) 與目標環狀區域間隔一環之誘導環(遠環)會對其產生同化效果

藉由紅、綠基準搭配七種不同之誘導情形對視覺閾限的影響、正規化模型擬合的結果，可推知遠環會對目標環狀區域產生同化效果。

(三) 環狀視覺刺激所造成神經間的側交互作用為部分可加性部分相乘性

藉由正規化模型擬合所得出的模型參數、迴歸趨勢，以及所進行的統計檢定，可推知近環會造成可加性的側交互作用，遠環則會造成可加性且相乘性的側交互作用。

二、 未來展望與應用

(一) 未來展望

實驗中我們僅探討了可變性紅色目標與紅、綠色基準間的誘導關係，將來，我們會進一步探討可變性綠色目標與紅、綠色基準間的誘導關係。

另外，實驗中我們僅將模型擬合結果的趨勢(增進、遮蔽)作為討論對象，將來，我們會更深入的解讀模型擬合參數的結果，以了解在不同基準色彩強度下，細胞的興奮以及抑制程度，而模型擬合參數的解讀將作為本實驗結論最直接也最有力的證據。

(二) 應用

以上結論皆對於量化視覺色彩誘導有所貢獻，期望本研究之成果可應用於工業設計，幫助設計者更準確預測並運用色彩呈現。

另外，目前學術界似乎都將研究重心放在神經的輸入與輸出，神經間的交互作用此議題較少得到關注。然而，在未來人工智慧的時代，無論是機器學習、深度學習，抑或其他相關領域，其理論皆必奠基於完善的人體神經模型。期望本研究之成果可使神經模型更加豐富，並有朝一日被應用於各領域之中。

伍、 參考文獻

- Cerda-Company, X., Otazu, X., Sallent, N. & Párraga, C. A. (2018). The effect of luminance differences on color assimilation. *Journal of Vision*. 18. 10.1167/18.11.10.
- Chen, C. C., & Tyler, C. W. (2001). Lateral sensitivity modulation explains the flanker effect in contrast discrimination. *Proceedings. Biological sciences*, 268(1466), 509 – 516.
- Chen, C. C., Foley, J. & Brainard, D. (2000). Detection of chromoluminance patterns on chromoluminance pedestals. I: Threshold measurements. *Vision research*. 40. 773-88. 10.1016/S0042-6989(99)00227-8.
- Coia, A. J., & Shevell, S. K. (2018). Chromatic induction in space and time. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 35(4), B223 – B230.
- Derrington, A. M., Krauskopf, J., & Lennie, P. (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *The Journal of physiology*, 357, 241 – 265.
- Kontsevich, L. L., & Tyler, C. W. (1999). Bayesian adaptive estimation of psychometric slope and

- threshold. *Vision research*, 39(16), 2729 – 2737.
- Lin, Y. J., Chen, C. C., & Chien, S. H. L. (2010). The Munker-White Effect and Chromatic Induction Share Similar Nonlinear Response Properties. *Seeing and perceiving*, 23, 223-40. 10.1163/187847510X516395.
- Miyahara, E., Smith, V. & Pokorny, J. (2001). The consequences of opponent rectification: The effect of surround size and luminance on color appearance. *Vision research*, 41, 859-71. 10.1016/S0042-6989(00)00313-8.
- Ratnasingam, S., & Anderson, B. L. (2017). What predicts the strength of simultaneous color contrast. *Journal of vision*, 17(2), 13.
- Shevell, S. K., & Monnier, P. (2005). Color shifts from S-cone patterned backgrounds: contrast sensitivity and spatial frequency selectivity. *Vision research*, 45(9), 1147 – 1154.
- Xiao, B., & Wade, A. R. (2010). Measurements of long-range suppression in human opponent S-cone and achromatic luminance channels. *Journal of vision*, 10(13), 10.

【評語】 130012

研究動機，文獻，與實驗設計都很清楚，結果呈現與討論偶切合議題。唯一缺點是此研究利用模型方式來解釋 lateral interaction 的神經機制，在此部分未提供其準確度與相關性。