

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

盲點之深度擴散與圖形填補機制 (III)

計畫編號：NSC 87-2413-H-002-018-G5

執行期限：民國 86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

主持人：黃榮村 台灣大學心理學系

一、中文摘要

本第三年計畫成果報告書，摘要敘述第一年與第二年有關盲點區圖形填補及深度內插的實驗結果，並說明本第三年所作之心理物理實驗成果與神經網路模擬大要。本年度完成之成果澄清了均質性與非均質性背景對盲點填補之影響，也大體確定了盲點區域之空間表徵形式。本文依這三年的心理物理實驗成果，初步建立了能夠模擬盲點填補（包括 2D 與 3D）之神經網路的計算模式，刻正進行算則模擬中。

關鍵詞：盲點填補、大腦表徵、均質背景、神經網路

here our recent findings and intended computer simulation. The third-year psychophysical experiments clearly demonstrate how the variable of background homogeneity influences the filling-in process in the blind spot. The cortical representation format is also clarified for mapping with visual function in the vicinity around the blind spot. Based on these findings, we propose a tentative computational theory to simulate the visual behavior of the blind spot.

Keywords: filling-in around the blind spot, cortical representation, homogeneous background, neural net

Abstract

The third-year report summarizes our previous results of figural filling-in and depth interpolation in the blind spot. We also report

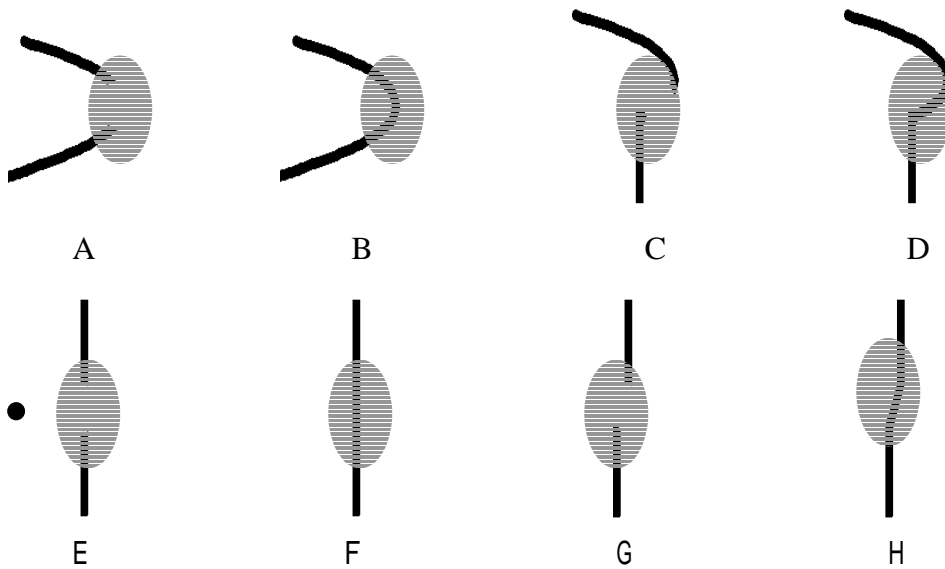
二、緣由與目的

當盲點區投射到 LGN 異側層 (1、4、6 層) 時, 有不連續之盲點縫 (尤其是在第 1 與第 6 層), 之後再投射到視皮質部 (V1) 時, 則可能無該盲點區之大腦表現 (cortical representation)。雖然目前尚無可信資料, 足以說明無這類大腦表現 (如 Malpeli & Baker, 1975), 但若參考感覺動作皮質部 (somatosensory cortex) 之神經可塑性研究 (見 Merzenich 等人, 1987), 皮質部之接受域可因兩隻手指縫合而合併, 亦可在兩指分離後再一分為二。則 LGN 中之盲點對應區, 因無神經纖維可投射到視皮質部, 很可能在皮質部應該是盲點對應區的部份, 就被周圍之接受域所「吞佔」, 而有空間壓縮現象, 造成盲點沒有功能上的大腦表現。至於雖然盲點沒有大腦表現, 但卻有單眼填補現象, 或在雙眼觀看時由一眼影像作「單眼表現」(此時若考慮已有單眼填補現象發生, 則在不均勻背景下, 便會發生雙眼競爭現象。該可能性尚待測試, 目前並無資料可資說明), 應可由最近一些實驗結果予以引申。大部份的 V1 細胞都是雙眼細胞 (binocular cells), 但大腦的盲點對應區部份之細胞, 祇能接受單眼來的消息, Fiorani 等人 (1992) 發現這類細胞竟能對視野中的雙眼訊息作反應, 似乎該祇接受單眼輸入的「雙眼細胞」, 能夠在大腦中回復或「擴散」出雙眼的訊息 (當然應該也有弄錯的時候!)。所以這類細胞可能就是盲點區能做圖形填補的機制之一, 這種可能性正如同雖然錯覺輪廓 (illusory contour) 並無物理上的存在, 但卻在主觀上可看到三角形或正方形, 而其基礎可能即在於 V2 有一類專門對錯覺輪廓作反應的細胞 (Von der Heydt 等人, 1984; Crick, 1994)。這兩類現象, 一為無物理上的形狀線索, 另一為沒有光接受器的盲點, 在本質上是很類似的, 但顯然都有填補的知覺結果, 而其機制可能就在於大腦層次, 存在有幫助其作用填補的細胞!

若該推論正確, 則盲點區之圖形填補

與深度內插現象, 至少在均勻的背景下會發生。少數研究也發現, 縱使因 V1 區部份損壞造成大腦小範圍視盲區, 亦可能會發生填補現象, 雖然其填補速度較網膜視盲區之填補慢很多 (Ramachandran, 1993)。另外, 在均勻的背景下, 圖形填補與深度內插, 皆可能是被同一機制所啟動。至於在不均勻的背景下, 是否亦被同樣機制所啟動? 若係如此, 則常會形成錯誤的知覺結果, 該一可能性存在於孤立的觀看條件下; 但在正常條件下 (雙眼觀看外界事物), 可能有其他機制以避免時常得到錯誤的知覺結果, 其中一種去曖昧化 (disambiguating) 的力量, 為來自空間頻率管道訊息的預先警示。以盲點在網膜上所佔的大小, 大約 0.17cpd (每度視角 0.17 cycles) 的低空間頻率訊息, 即可跨越盲點區的困難, 而這類資訊在一般觀看環境中極易獲得, 且攜帶有粗略的形狀與像差訊息, 若視覺系統只依賴低空間頻率管道, 則很容易對盲點區做出填補與深度內插的工作, 該作法在有均勻背景時, 極易完成填補與深度內插, 不管目標圖形是否真的與周圍背景同質或同一深度。在非均勻背景時, 亦會得到類似結果。所以為防止錯誤知覺的產生, 必有賴於繼續參考中高空間頻率之訊息。人類視覺系統是否具有這種「調整」機制, 也是本研究可透過濾波 (filtering) 方式來探討的工作之一。本研究計畫依照以上之分析, 採下列方式分年測試了若干子題:

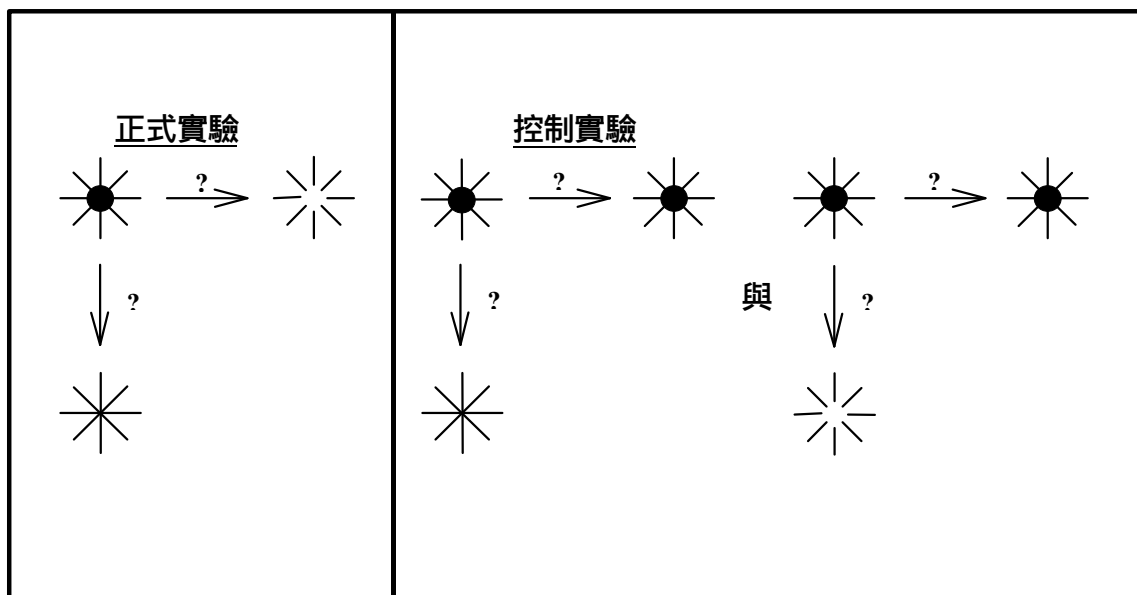
(1) 第一年計畫以盲點區的圖形填補歷程之探討為主。探討變項有三: (a) 直線與曲線圖案之單眼填補效應 (參見圖一)。結果發現, 直線圖案較易產生單眼填補, 曲線圖案的填補反應則接近 50% 的猜測機率。(b) 熟悉與不熟悉物體之效應。若測試對象為熟悉物體, 則掉在盲點區的物體之一部份, 可能會因 top-down 效應而填補; 但不熟悉物體之填補則相形之下, 較為困難。(c) 是否有協同一致的整體參與競爭。該變項採似動運動 (apparent motion) 之技術進行實驗。如在出現 \square 並讓其中黑點掉



圖一：曲線圖形填補實驗材料圖例。A、B、C、D 為曲線系列，其中 A 為平滑斷裂的曲線，B 為平滑連續的曲線，C 為不平滑斷裂的曲線，D 為不平滑連續的曲線。E、F、G、H 為直線系列，其中 E 為平滑斷裂的直線，F 為平滑連續的直線，G 為不平滑斷裂的直線，F 為不平滑連續的直線。灰色橢圓則表示盲點區域。

入盲點區時，可能有兩種皆有意義之知覺結果參與競爭，一為 d 另一為 d' ，前者為順勢填補，後者則形成一錯覺圖形，兩者可能互相競爭。為確定單眼的填補

歷程，是否發生該類競爭現象，可在 CRT 上出現如下的排列：（見圖二）如果盲點區的填補結果相當強勢，亦即盲點區與非盲視區的知覺結果相抗衡，



圖二：盲點區測試似動運動的實驗刺激安排圖例。

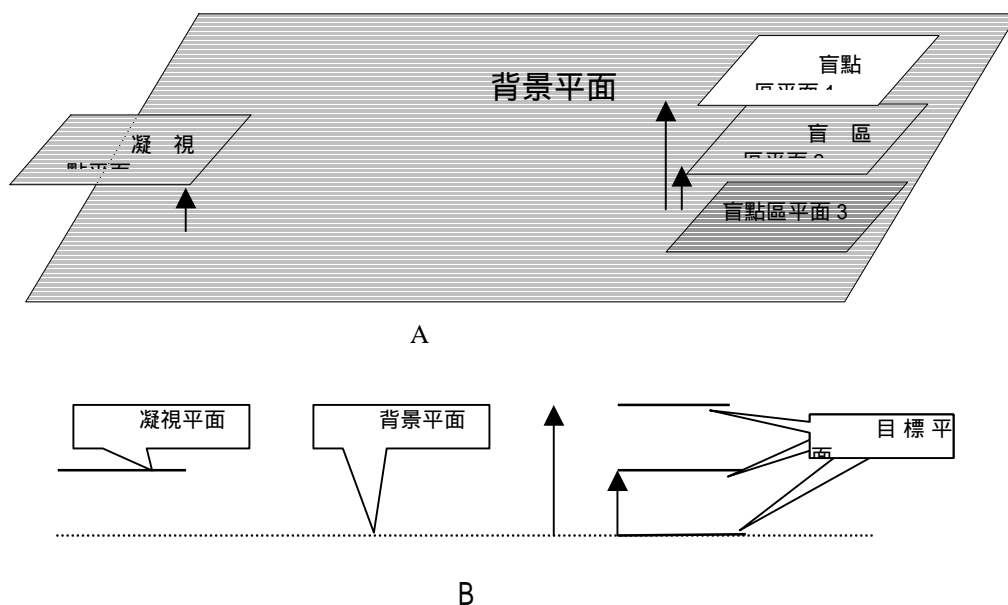
則預期受試者在觀看似動運動的實驗圖形（如圖二所示）時，往右動的感覺與往下動的主觀感受應該相等。結果發現，盲視區的填補可以引發長距的似動運動感覺，亦即往右動的感覺與往下動的主觀感受幾乎相等。

另外，我們也以信號偵測理論探討最簡單的直線填補感受的認知可穿透性，結果發現這項知覺填補感受符合認知不可穿透的特性。

(2) 第二年計畫則以探討深度內插為主題。基於從 2D 到 3D 訊息處理的同構性，單眼的圖形既會被填補，則 3D 的深度訊息也應該被填補，否則吾人的視野中將會有一塊區域「凹陷」下去。但是到底深度訊息如何填補？我們提出三種可能的機制：第一類機制是以其中一眼相對應的非盲點區影像填入另一眼盲點區內，再進行像差計算以獲得深度感，稱為「跨單眼填補」機制。第二類機制則是先將同一眼之盲點區域周圍的隨機點填入盲點區，之後再計算兩眼像

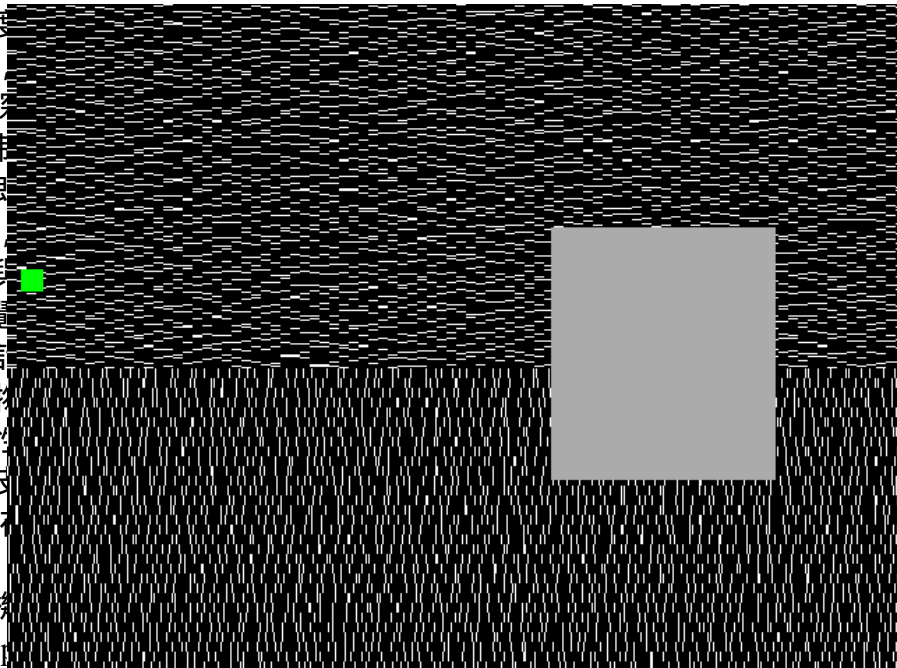
差，以獲得深度感，稱為「直接單眼填補」機制。第三類機制稱為「像差擴散填補」，即先計算盲點區域外圍的像差訊息，再以像差擴散方式填入盲點區內，以獲得深度感。

如果「跨單眼填補」機制正確，我們預期盲點區之像差值必為零（因為左右眼的訊息完全一致），亦即受試者報告盲點區的深度與凝視點平面的深度一致。如果「直接單眼填補」機制正確，則因為隨機點無固定的空間訊息結構，因此直接填入盲點區的訊息內容，可能與另一眼不同而產生雙眼競爭，故預期受試者的反應將與雙眼競爭下的反應一致。如果「像差擴散填補」機制正確，則預期受試者的反應只會受到背景的影響，盲點區的深度將依背景立體深度而定。為了檢驗這些機制，我們在隨機點立體圖中，分別操弄凝視平面、背景平面與在盲點區內的目標平面，讓三者有不同的相對深度組合（參見圖三），以靜態與動態的呈現方式，來觀察受試對盲點區



圖三：像差填補實驗使用的刺激圖形之相對深度關係圖。此圖所繪之凝視平面比背景高，盲點區圖形平面有比凝視區高、低、一致三種變化。A 圖為平面正視圖，B 圖為縱剖面圖。箭號方向表示上浮的方向，箭號長度表示上浮高度。

附近的深度
結果發現
區域內的深
形填補機制
影響，亦即
擴散效應
深度判斷與
到 3D 視覺
第三年子計
得之心理物
/ 非均質性
點區之視皮
參酌盲點在
LGN V1
徵與運作機
經網路」(p



而有跨越
Weerd 甚
有這樣的
歷程才會
示出，真
域內所進
經植入的
用引導，
抑制的作
速完成。
點填補與
補時序上
法之一，
ry(1991)
用不同方

來模擬人類視覺系統在有盲點此一缺陷
下，仍能藉由有效填補質質地對盲點填補之影響
圖 2 實驗填補質質地對盲點填補之影響
小方形為凝視點，右邊大方方形為真實補點，兩塊均為等亮。
到目前為止，前述關於均質性 / 非均質性背景對盲點填補的影響與盲點區之視皮質部空間表徵兩項評估已經初步完成，神經網路的建構則已完成計算理論並進行算則模擬中，以下即分別敘述本年度計畫目前的成果。

位、不同質地組織、動態呈現的隨機線
點填補與真實補點的填補時間均等。另一方面，這個實驗也是第一次觀察，非均質刺激在盲點區與非盲點區（即人工盲點區）所產生的填補效應究竟有無差異。

本實驗將質地表面的均質性定義在受試者能否快速區辨不同隨機質地（random texture）的邊界上。當受試者無法立即區辨出兩個不同隨機質地的邊界時，便將這兩組質地視為均質的（homogeneous），反之，當受試者可以立即區辨兩個不同隨機質地的邊界時，這兩組質地便是不均質的。

本實驗產生均質隨機質地的方法有四種：（1）隨機點質地，（2）橫向的隨機線質地，（3）直向隨機線質地，（4）隨機線段與隨機點均勻混合的質地。

產生不均質隨機質地的方法則有兩種，為了保持平均亮度一致，並具有隨機性，本研究操弄（1）不同方位的非均質性，即兩組方位相差 90 度（互相垂直）的隨機線段所組成的兩塊質地與同樣點密度之隨機點、隨機線段組合的質地。

（2）隨機點與隨機線分開的非均質性，也是一級統計量相同（即黑白區域的面積比例相同），但二級統計量不同的兩

三、結果與討論：本年度計畫成果

（一）均質性 / 非均質性背景對盲點填補之影響

DeWeerd, Desimone 與 Ungerleider (1997) 曾在隨機閃爍的橫線段的質地中，有系統的操弄人工盲點區（是一塊與周圍等亮度的灰色方塊）的大小、形狀與離心度，結果發現，人工盲點區越大產生填補（亦即看不見該灰色區塊）的時間越長。當人工盲點區產生左右晃動的位移時，則顯著延宕了填補感發生的時間，這意味著人工盲點填補現象的關鍵機制可能是如 Grossberg 所言，邊界表徵（boundary representation）逐漸適應，導致形成邊界所需要的拮抗活動

組質地。另外也比較一級統計量不同(即隨機點密度不同)所造成的非均質的填補效應。

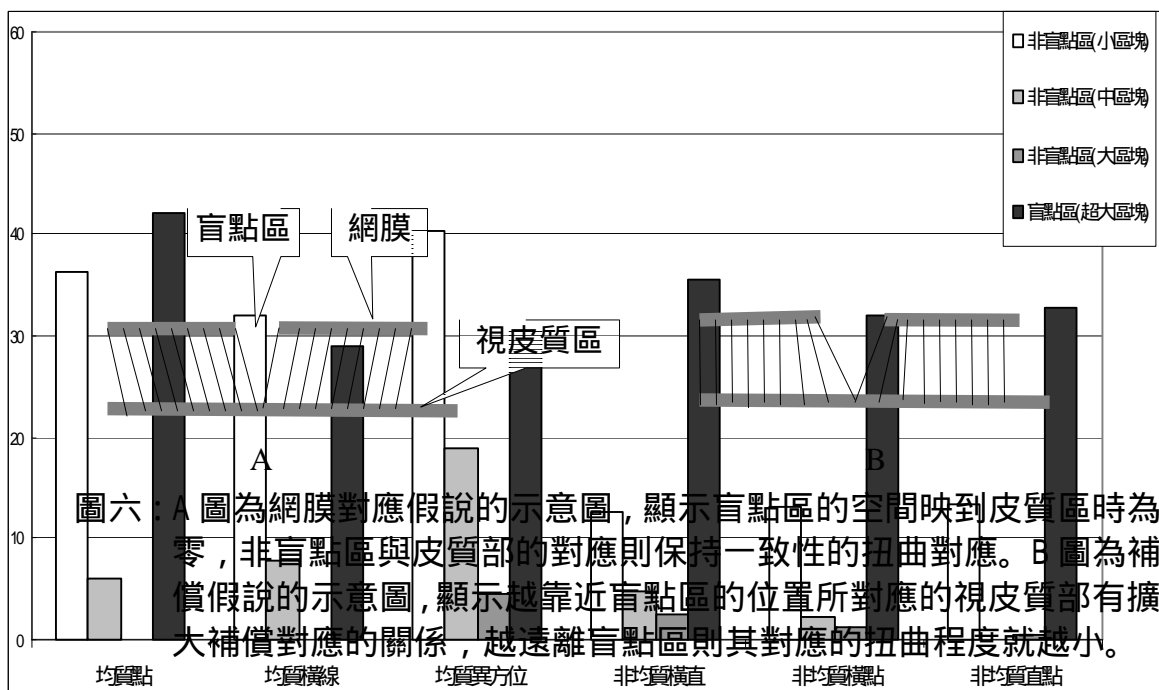
用上述方法所產生的隨機質地動態呈現,在均質質地中央附近置放一個平均亮度與周圍質地相似的灰色方盤。在非均質質地呈現時,該灰圓盤則置放於不同質地的邊界上。本實驗操弄的獨變項為質地均質性(分均質/非均質兩種,每種質地都產生三個動畫刺激,故有六個動畫刺激)、離心率(即盲點區/非盲點區)與灰方盤大小(1.5度、3度、5度、6.5度四種),每位受試者總共要觀看48(=6x2x4)張動畫圖案。基本上,非盲點區之呈現不與盲點區重疊,而且在盲點區內,5度的灰塊與盲點區內接,6.5度的灰塊則與盲點區外切。要求受試者以右眼(遮住左眼)盡量凝視螢幕上的紅色小點,用餘光感覺右邊灰色圓盤,如果覺得它消失時,就立即按「消失鍵」,如果它又跑出來時,再按一次「出現鍵」,如此一直觀看一張動畫持續約1分鐘,電腦程式會自動計算該時段內,灰色圓盤消失的總秒數,以作為依變項。

實驗結果發現:(1)非盲點區的動態質地填補時間隨著待填補區塊增大而減少(參見圖五),這個結果與 DeWeerd

等人(1997)的結論相同。(2)在非盲點區的非均質質地比均質質地不容易產生填補感覺。這可能可以用 Grossberg (1997)所說的,邊界表徵(boundary representation)逐漸適應,導致形成邊界所需要的拮抗活動(antagonistic activity)瓦解,而產生跨越人工盲點之填補歷程來解釋。(3)在盲點區內則發現,均質質地與非均質質地並沒有顯著影響填補感受產生的時間。這似乎意味著,盲點區域的填補可能沒有如前述的邊界拮抗作用。其中一種最有可能的運作機制是,只有興奮沒有抑制的水平連結力量。

(二) 盲點區域之空間表徵形式

依據 Tripathy (1995)對這一個議題所做的整理與分析,概有以下可能的三種空間表徵假說:(1)如果初級視皮質區對盲點區域的表徵方式是「縫合」的,則將預測造成在盲點區域附近的空間扭曲,這種扭曲在盲點區附近都是一致的,不因物體大小不同而不同(參見圖六A的說明),以下稱為「網膜對應假說」(retinotopic hypothesis)。(2)如果盲點區域的填補運作方式不只是單純縫合,還有一些補償性的擴展



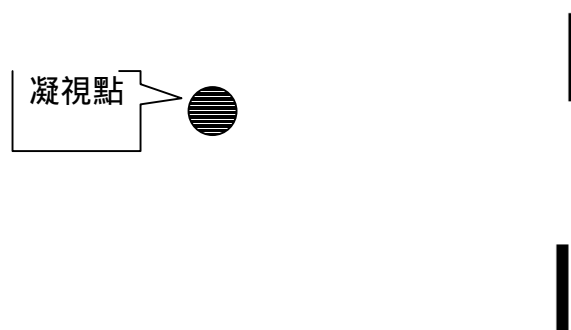
圖五：均質與非均質的動態質地填補實驗結果。

(compensatory expansion) 發生在盲點區周圍的皮質部，亦即越靠近盲點區域周圍的物體，其大小知覺扭曲程度越嚴重，則將預期在盲點區呈現不同大小的物體，會產生不同的扭曲程度，以下稱為補償假說(compensatory hypothesis)，參見圖六 B 的說明。(3) 也有可能根本沒有縫合，亦即視皮質區仍然可以依照周圍相似離心度之細胞所擁有的空間值特性，幾乎完全保持盲點區域的空間值 (spatial value)，此時根本不會有扭曲現象，以下稱聯結假說 (association hypothesis)。

檢驗這類空間表徵的方法是，在該

我們預測：(1) 如果初級視皮質區對盲點區域的表徵方式符合「網膜對應假說」，則將預期不論是在 5 度或 7 度距離下，盲點區所測得的差異閾總是比非盲點區大。(2) 如果盲點區域的填補運作方式如補償假說所言，則將預期在五度距離下，盲點區所測得的差異閾總是比非盲點區大，但是在 7 度距離時，這個差距便會減緩。(3) 也有可能根本沒有縫合，亦即符合聯結假說，此時將預測在盲點區所測得的結果與非盲點區幾乎一致才是 (參見圖八)。

實驗程序：

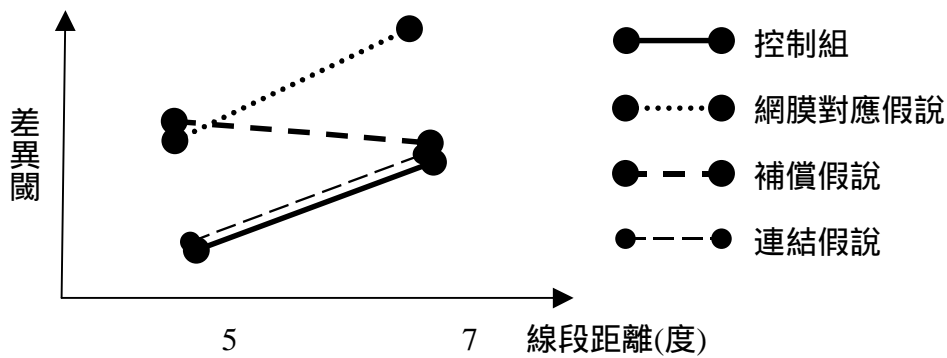


圖七：兩線段對齊作業的刺激安排圖例。

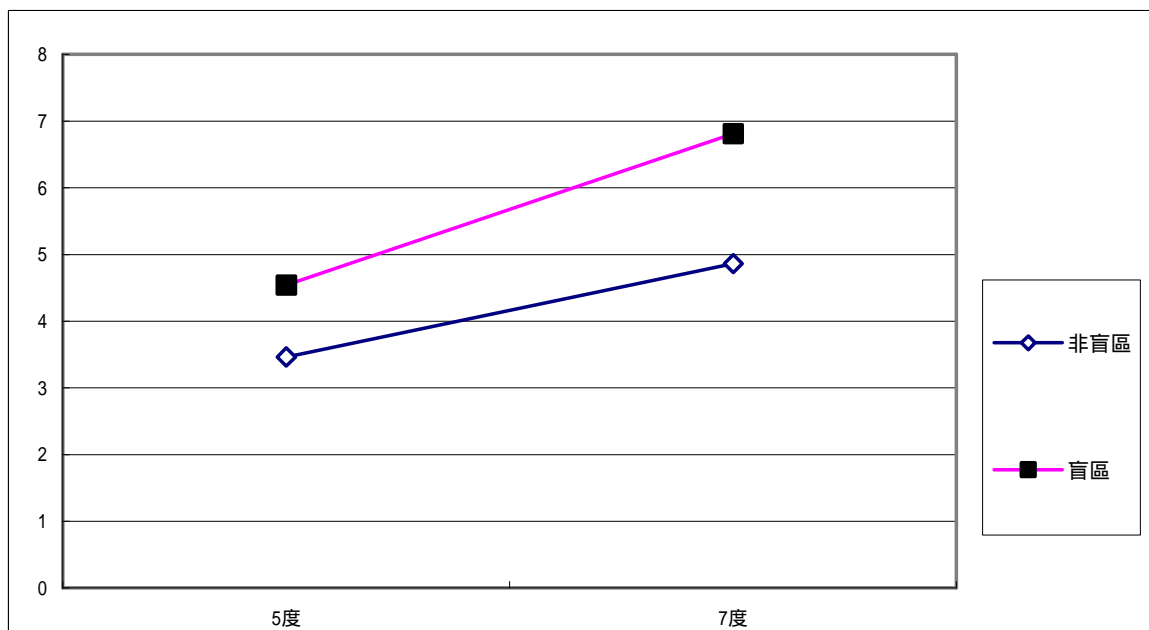
區附近觀察有物體大小扭曲 (size distortion) 的知覺經驗，因此我們設計了以下兩線段對齊作業的實驗。

本實驗操弄的獨變項有三：1. 兩線段的距離 (5 度/7 度兩種)；2. 判斷區域 (右眼盲點區/左眼同離心度之非盲點區)；3. 上下兩線段偏差的度數，上方的線段比下方線段偏左的差距有 -6d、-5d、-4d、-3d、-2d、-d、0、d、2d、3d、4d、5d、6d，共 13 種 (其中，d 隨著受試者的閾值而適當改變，參見圖七)。每種情境重複測量 20 次，故受試者總共需要做 $2 \times 2 \times 13 \times 20 = 1040$ 個嘗試次。

製作兩個約 0.1 度寬、2 度高的線段，相距 5 度或 7 度，位於盲點區域上下緣，使上下兩點對齊或不對齊。刺激呈現只有 150 ms，呈現之後隨即被遮蔽，要求受試者盡量盯著凝視點不斷改變的數字符號，但也注意周圍兩點出現的位置，盡量正確回答上方線段比起下方線段偏左或偏右，如果無法判斷則強迫隨機選擇。實驗組情境與控制組情境輪流進行，記錄受試者回答偏左的反應頻次，以 probit analysis 計算 50% 反應頻率所對應的值為絕對閾值， $50 \pm 25\%$ 的範圍為差異閾。以各種情境做過 20 個嘗



圖八：盲點區之空間表徵實驗的預測結果。



圖九：盲點區之空間表徵實驗結果。縱軸為對齊判斷的差異閾，橫軸為上下兩線段的空間距離。

試次稱為 1 區間 (block)，每個受試者都重複測量 5 區間，以利進行變異計算。

更多的統計測試來肯定目前的結論。

結果：

由於本實驗完成需要耗費較多的時間，目前只對一個受試者完成測試，其結果見圖九所示。基本上受試者的反應型態接近網膜對稱假說，我們仍然需要

(三) 神經網路的建構

綜合第一年與第二年計畫成果，並回顧近五年國外神經生理的研究，我們知道，盲點區的知覺填補結果具有以下幾個特性：(1) 同時具有低階神經運作

與高階認知運作介入。(2)就最簡單的直線填補而言，它的填補速率相當快，填補結果具有認知不可穿透性質。(3)填補歷程的關鍵可能是在同一層神經元之間的水平連結基礎上。(4)發生填補的階段可能從雙眼處理模組開始，亦即藉由非盲點區域之神經網路連結的學習，過渡到盲點區域上。因此我們在第三年計畫中，原先規畫的神經網路是針對這類直線填補的表徵與運作特

自動填補斷線；但在盲點處看到斷線刺激時，卻會自動填補中間的斷線部份。

2. 在雙眼像差內差填補層次，合理且符合實驗數據的結果如表二。本計畫將訓練網路以模擬在非盲點區域看到像差斷層刺激時，不會產生填補；但在盲點處看到像差斷層刺激時，則會產生背景像差的填補！
3. 藉著不同網路之空間表徵方式的安

表一 單眼填補歷程的預測模擬結果（輸入的刺激都比盲點區域大）

區 位	輸入刺激	輸出的知覺結果
盲點區		
正常非盲點區		
後天破壞的 非盲點區域		

性而建立的。網路模擬的目標有三：

1. 在單眼填補層次，合理且符合實驗數據的結果如表一。將訓練網路以模擬網膜的生理功能，使其在非盲點區域 看到斷線刺激材料時，不會

排，比較不同網路的收斂速率與表徵方式的關係，藉此提供盲點填補可能的機制驗證。

經考量本年心理物理實驗結果，及前兩年之相關結果後，我們研擬網路建

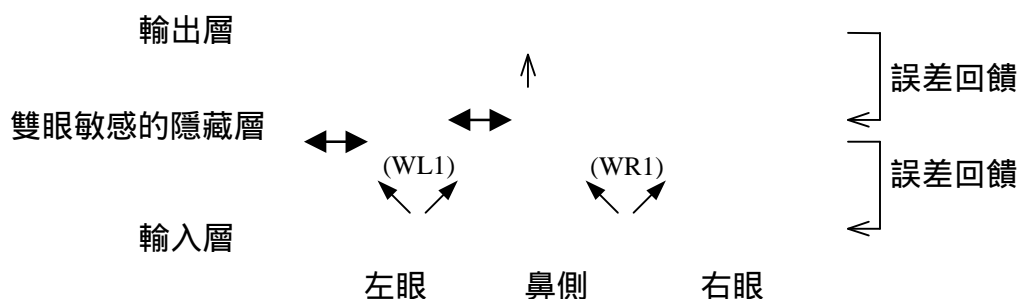
表二 雙眼填補歷程的預測模擬結果（輸入的刺激都比盲點區域大）

區 位	輸入刺激	輸出的知覺結果
盲點區	像差無斷層	背景內插成功，像差無斷層
	像差斷層	背景內插成功，像差無斷層
正常非盲點區	像差無斷層	像差無斷層
	像差斷層	像差斷層
後天破壞的 非盲點區域	像差無斷層	像差斷層
	像差斷層	像差斷層

立的程序可分為以下四個步驟進行，並先建立初步的計算理論（算則模擬另進行中）：

1. 先建立非盲點區的視覺神經網路系統，模擬目標在於建立不同空間解析度下，同方向互相興奮、不同方

站，因此我們可以合理的把它當成中間隱藏層。依照神經生理測量所提供的證據，該層神經元具有方向性，所以我們設定各種不同方位的敏感度（orientation sensitivity），並允許水平連結，使每一個中間層



圖九： 模擬填補的神經網路架構簡圖

（ 表示非盲點區域的神經處理單元； 表示盲點區域的神經處理單元，其輸入值恆為零；WR1 與 WL1 表示盲點區域的神經處理單元與隱藏層的連結強度，在學習階段恆為零。水平箭頭表示隱藏層之間的水平連結。 ）

向互相抑制的雙眼訊息處理網路（先不考慮像差因素）。網路各層之空間表徵與運作形式的安排如下（參見圖十）：

輸入層（input layer）：因為網膜與 LGN 對盲點區域都沒有任何接受器或神經表徵，而且符合拓樸對應原則，故將網膜與 LGN 同等看待，並予以合併（即只用一個輸入層表示）應是合理的。又依據 Fiorani 等人（1992）的生理測量，我們合理猜測：發生填補的層次可能是從雙眼訊息處理階段開始，因此我們必須分別建立左右兩眼的輸入層，來模擬左右兩眼的輸入，而不能只建立單眼的輸入。輸入層的狀態不是 0（暗點），就是 1（亮點）。
隱藏層（hidden layer）：初級視皮質部是 LGN 投射到大腦的第一

神經元都對各自一定的空間位置（假設非盲點區的接受域大小都一樣）進行雙眼訊息加總（先只考慮零像差的計算，見 1 式），若超過某個閾限值，便將訊息往周圍擴散，並依照海伯法則（Hebbian rule）調整水平連結強度，因此隱藏層與輸入層並不是完全連結（full connection）。

$$X_i = T\{[ij \quad g(L_j)] + [ij \quad g(R_j)]\} \quad (式 1)$$

其中 表示捲積運算； ij 表示隱藏層第 i 個神經元與輸入層中第 j 個單元的連結權重，它可以反應隱藏層第 i 個神經元的接受域反應型態，為具有方向性的空間頻率過濾器（filter）； $g(L_j)$ 與 $g(R_j)$ 分別表示

從左眼和右眼對應點 (corresponding point) 送進來的影像訊息；之所以取「+」運算是基於「在非盲點區，左右眼看到的外界訊息應該是一致，而且兩眼的訊息影響力一樣大」的假設上。而 T 函數為 X_i 神經元的閾值函數，採取 [1,-1] 的 sigmoid 轉換函數。

為了簡化問題複雜度，本研究直接將該層網路的運作依照 Hopfield (1982) 所建立之演算法 (見式 2)，來決定水平連結強度。

$$W_{ij} = X_i^p X_j^p \text{ for all } p; W_{ii}=0 \quad (\text{式 2})$$

其中 X_i^p 表示第 p 個學習樣本在隱藏層中所引發的第 i 個神經元之特徵值。

待隱藏層的水平連結強度決定之後，即對輸入層送進來的訊號進行有限次迭代計算 (見式 3)，以決定該層各個神經元的狀態 (介於 -1 與 1 之間)。因為該層神經元攜帶方位訊息，所以 Hopfield 網路的迭代計算過程將會使相似方位敏感的神經元連結相互激發，不同方位則互相抑制，一直到沒有神經元處於模擬兩可狀態為止 (即穩定收斂到局部極小值)。

$$\begin{aligned} \text{Net}(j) &= \sum_i W_{ij} X_i \text{ for all } j \\ X_j &= 1 \quad \text{if } \text{Net}(j) > 0 \\ &= X_j \quad \text{if } \text{Net}(j) = 0 \\ &= -1 \quad \text{if } \text{Net}(j) < 0 \end{aligned} \quad (\text{式 3})$$

但是我們並不等待該層達到穩定態，因為這樣的等待不太符合實際神經生理運作。因此在固定迭代次數之後，便繼續由下一層的神經元透過隱藏層與輸出層之間的錯誤回饋傳遞方式 (error-back propagation)，進行隱藏層與輸出層的垂直連結調整，調整公式如下：

$$w_{ij} = \eta \sum_j j^n A_i^{n-1} \quad (\text{式 4})$$

其中 η 表示學習速率； j^n 表示第 j 個上層處理單元的差距量，在輸出層時， $j^n = (T_j - Y_j) Y_j (1 - Y_j)$ ， Y_j 為輸出層單元的輸出值， T_j 為目標答案的輸出值； A_i^{n-1} 表示下層處理單元的輸出值。另外，為了不影響隱藏層對輸入層之接受域反應型態，我們只改變隱藏層對輸入層加總之後的閾限值，而不改變輸入與隱藏層的連結權重。

隱藏層除了有水平連結的調整之外，也用來將輸入層的訊息映到輸出層。根據 Kolmogorov 定理：任何從 m 維空間對應到 n 維空間的映射 (mapping)，都可用一個具有 $2m+1$ 個單元的單一隱藏層倒傳遞神經網路來表示。而且盲點區的填補有可能用到非線性的轉換空間 (沒有刺激卻有知覺結果，是屬於非線性的空間對應問題)，故本模擬以輸入層、隱藏層與輸出層，構成三層錯誤倒傳遞網路 (back-propagation of errors)，應可以解決非線性空間轉換的問題。雖然錯誤倒傳遞網路學習過程比較慢，但是回想速度快，學習精度高，所以本研究在此運用該算則進行網路各層垂直連結的權重調整算則。

因為隱藏層中的水平連結權重，是由輸入層的訊息經過輸入與隱藏層垂直連結的加總與閾限函數轉換之後才決定，所以在錯誤倒傳遞學習過程，只要改變輸入與隱藏層垂直連結的閾限值，則水平連結權重也會跟著變動。其垂直連結與水平連結的交互作用需要經驗評估，以保證網路能收斂。

輸出層 (output layer)：用來表示隱藏層運作之後的二度空間知覺結果，因此表徵方式與一般非盲點區輸入的二度空間表徵相同，1 表示

亮點，0 表示暗點。

網路訓練學習過程：隨機從 80 個直線/斷線刺激圖形中（20 種不同方位，每種方位各有直線/斷線兩種，和長線/短線兩種區別），選取不同方位的刺激各三個（共 60 個刺激圖形），進行單眼輸入與雙眼輸入的監督式學習。所謂監督式神經網路，是指神經網路在學習階段，我們所給予的訓練範例都有標準答案，透過網路輸出與答案之間的誤差計算，再回去修改網路連結的權重數值，使得神經網路漸漸學習到輸入與輸出之間的內在對應規則。

最後，取另外 20 個作為測試樣本。當 95% 測試樣本通過測試之後，這一個神經網路的建構便暫時結束。

接下來，將輸入層中，其中一眼有一塊區域的輸入恆為零，以模擬後天病變產生初期的視盲症。如果前述非盲區的學習與測試成功，則本項測試結果與學習階段的斷線刺激一樣，因此測試結果必符合表一預期。

2. 建立涵蓋盲點區的神經網路系統。基本上盲點區的神經網路與非盲點區的網路差異在於：（1）固定一眼輸入的特定空間區域（盲點區）的輸入恆為零，因此在該區域的兩眼輸入訊息始終不一致；（2）盲點區相應的隱藏層雖然無法藉由盲點區的輸入來調整水平連結與垂直連結的權重，但仍可藉由另一眼輸入的訊息，進行水平連結與垂直連結的權重調整；（3）在涵蓋盲點區網路建構的學習階段，只允許不一致的雙眼輸入的學習樣本，與另一眼（沒有盲點區的輸入層）的單眼輸入學習樣本。而測試樣本一律為包含盲點區之單眼輸入樣本。要達成上述目標，可以有兩種方式：（1）將已經建立好了的非盲點

區域的神經網路中，相對應於盲點區的隱藏層之水平抑制連結砍掉，只留下興奮連結，如此即可立刻以單眼刺激輸入盲點位置，測試其是否產生如表一所示的填補現象。

（2）依照前述的盲點區網路與非盲點區網路差異特性，重新建立一個涵蓋盲點區的神經網路，在學習階段只允許不一致的雙眼輸入的學習樣本，與另一眼（沒有盲點區的輸入層）的單眼輸入學習樣本。而測試樣本一律為包含盲點區之單眼輸入樣本。由（式 2）推論，如果將輸入與隱藏層垂直連結的閾限適度降低，則雖然盲點區沒有訊息輸入，也可能維持如非盲點區網路的穩定態，但是增加水平連結的互動關係，使興奮/抑制對比加強。這類水平連結的改變有助於發生填補效應。

3. 將前述模擬成功的隱藏層網路結構改變，使盲點區對應的隱藏層單元之接受域逐漸縮小，模擬空間訊息縫合的表徵方式。重新訓練該網路，以檢查其收斂速率是否比前述網路快速。其中，收斂速率以錯誤傳遞網路的迭代次數為依據。因為盲點區的填補歷程可以在相當短的時間內完成（依據前兩年計畫的研究，可以在低於 150ms 以內發生），所以我們也依據收斂速率的快慢為依據，建立隱藏層接受域大小與收斂速率的關係，以評估模擬空間訊息縫合之表徵方式的可能性。
4. 將前述模擬成功的網路結構，加上像差敏感度的參數，此時隱藏層所攜帶的訊息改為雙眼像差訊息。改以同像差敏感細胞互相興奮、不同像差敏感細胞互相抑制的方式運作。

參考文獻

- Crick, F. H. C. (1994). The astonishing hypothesis: The scientific search for the soul. New York: Simons & Schuster.
- De Weerd, P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1998). Perceptual filling-in : A parametric study. *Vision Research*, **38**, 2721-2734.
- Fiorani, M., Jr, Rosa, M. G. P., Gattass, R., & Rocha-Miranda, C. E. (1992). Dynamic surrounds of receptive fields in primate striate cortex: A physiological basis for perceptual completion? *Proceedings of the National Academy of Sciences (U.S.A.)*, **89**, 8547-8551.
- Grossberg, S. (1997). Cortical dynamics of three-dimensional figure-ground perception of two-dimensional pictures. *Psychological Review*. **104**, 618-658.
- Ramachandran, V. S. (1993). Filling in gaps in perception: II. Scotomas and phantom limbs. *Current Directions in Psychological Science*. **2(2)**, 56-65.
- Ramachandran, V. S. & Gregory, R. L. (1991). Perceptual filling in of artificially induced scotomas in human vision. *Nature*, **350**, 699-702.
- Tripathy, S. P., Levi, D. M., Ogmen, H. & Harden, C. (1995). Perceived length across the physiological blind spot. *Visual Neuroscience*, **12**, 385-402.
- Merzenich, M. M., & Kaas, J. H. (1982). Reorganization of mammalian somatosensory cortex following peripheral nerve injury. *Trends in Neurosciences*. **5**, 434-436.
- von der Heydt, R; Peterhans, E; Baumgartner, G. (1984). Illusory contours and cortical neuron responses. *Science*. **224**, 1260-1262.