airiti Library

本文章已註冊DOI數位物件識別碼

立體視覺之低階運算與高階調控

The Interaction of Low-Level Computation and High-Level Modulation in Human Stereopsis

doi:10.6129/CJP.2011.5301.01

中華心理學刊, 53(1), 2011

Chinese Journal of Psychology, 53(1), 2011

作者/Author： 黃榮村(Jong-Tsun Huang);唐大崙(Da-Lun Tang);袁之琦(Jy-Chyi Yuan);黃淑麗(Shwu-Lih Huang);櫻井正二郎(Shojiro Sakurai)

頁數/Page： 1-20

出版日期/Publication Date：2011/03

引用本篇文獻時，請提供DOI資訊，並透過DOI永久網址取得最正確的書目資訊。

To cite this Article, please include the DOI name in your reference data.

請使用本篇文獻DOI永久網址進行連結:

To link to this Article:

http://dx.doi.org/10.6129/CJP.2011.5301.01

DOI Enhanced

DOI是數位物件識別碼（Digital Object Identifier, DOI）的簡稱，
是這篇文章在網路上的唯一識別碼，
用於永久連結及引用該篇文章。

若想得知更多DOI使用資訊，

請參考 http://doi.airiti.com

For more information,

Please see: http://doi.airiti.com

請往下捲動至下一頁，開始閱讀本篇文獻

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

最完整的學術整合查詢平台—華藝線上圖書館 ● http://www.airitilibrary.com ● Find more academic articles on Airiti Library

中華心理學刊 民100，53卷，1期，1-20
Chinese Journal of Psychology 2011, Vol.53, No.1, 1-20

立體視覺之低階運算與高階調控

黃榮村[1]　唐大崙[2]　袁之琦[3]　黃淑麗[4]　櫻井正二郎[5]
[1]中國醫藥大學神經科學與認知科學研究所
[2]淡江大學大眾傳播學系
[3]輔仁大學心理學系
[4]政治大學心理學系暨心智、大腦與學習研究中心
[5]高雄醫學大學心理學系

本文評述在1983-2000年間於本實驗室所進行之立體視覺研究，以測試Marr（1982）所帶動之計算視覺理論。本文先綜述計算視覺理論中之兩大基石，亦即「空間對應假設」及「立體視覺基本假設」，以及可供有效電腦模擬的「合作算則」；之後依「計算視覺理論及其測試」、「神經機制與雙眼像差之獨立性與優先性」、及「立體視覺中的高階互動效應」三項子題，驗證Marr（1982）與傳統計算理論中有關視覺回復與反向光學議題。合作算則中的「相容性」限制條件，並未能切合雙眼配對之實驗資料；利用兩類眼動模組為基礎，以方位訊息為配對元素之模擬，應可成功取代合作算則對不同像差之計算。雙眼像差及錯覺輪廓因有明確的神經機制，故具有影響知覺結果之獨立性與優先性，其處理先後似可依序排列為像差→輪廓→顏色及其他次級知覺，惟尚有待進一步驗證。但該事實並不能排除高階調控之影響，在形狀與不確定像差對立體攫取之影響、漢字背景對錯覺輪廓之約束力、單眼線索對像差運作之影響，以及盲點區之深度填補等項上，皆可看到高階因素介入互動之可能。本文最後主張視覺計算理論應將迴饋機制列入考量，以有效處理立體視覺中低階運算與高階調控之互動。

關鍵詞：反向光學、立體視覺、計算視覺理論、高階調控、單眼與雙眼線索

立體視覺之低階計算與高階調控

Marr（1982）出版Vision一書，被視爲開啓了人類計算視覺研究的新時代，是20世紀下半葉有效結合視神經生理、計算歷程、與人類知覺三個層次，最重要的經典著作。其所提出視覺消息處理的三層次，包括計算理論、表徵與算則、與硬體建置，已成廣爲人知的視覺三層次取向，深刻影響了此後的視覺研究。本文將聚焦在該計算取向之測試，並以該書中最具示範性之立體視覺爲基礎，說明當時與之後（1983-2000）我們在台大心理系實驗室所作與立體視覺有關，且在此計算視覺脈絡下進行驗證之部分研究，以探討在立體視覺中人類知覺的各項表現及其變形，其中包括計算理論之測試與電腦模擬、輪廓偵測、錯覺輪廓與錯覺顏色、知覺消息處理管道之互動、盲點深度填補、與高階因素之互動等項。

Marr（1982）之經典著作與人類計算視覺研究

外界的光學訊息在網膜形成影像，當爲人類知覺的最基本資料。該訊息被抽取後，經過人體具有不同尺度之訊息處理管道予以分解，之後再予以綜合，便足以在知覺結果上充分回復外界物件之各項重要屬性（如形狀、色彩、運動、與深度）。最近20餘年

本篇文章爲特別邀稿，故無審查與修改日期。
通訊作者：黃榮村（jongtsun@mail.cmu.edu.tw）404台中市北區學士路91號　中國醫藥大學神經科學與認知科學研究所

致謝：本文承陳一平教授提供修正意見，特此誌謝。

© 2011 Airiti Press Inc. & Taiwanese Psychology Association

03-唐大崙.indd 1　2011/3/18 下午 16:19:36

airiti

來，該一想法亦轉型應用在人類意識的研究上，經過Francis Crick與其他重要研究者之推動，已成爲探討跨腦區神經活動之間如何進行關聯激發（correlated firing）的研究中，最重要的議題；也是兩百多年來「分解—聚合」（decomposition-binding）該一古老課題之現代科學化，對了解人類意識運作的結構與功能面貢獻巨大（Crick, 1994）。但在1980年代前後，機器視覺（machine vision）盛行之下，學界所處理者厥爲「視覺回復」問題，所重視者並非意識層面，其重點在尋找外界訊息中之充分不變量（sufficient invariants），以了解如何透過人體中具有神經生理基礎之多重管道（multiple channels），經過某種合理之計算方式，落實在可行的算則上，在知覺上回復出外界物件之各項重要屬性，完成反向光學（inverse optics，或稱視覺回復）之重要工作。這是David Marr在開啓新一代計算視覺研究中，最重要的三層次取向。有趣的是，雖然現代的意識研究與當時的反向光學研究大異其趣，但兩者都相當重視與引用Hubel與Wiesel於1960年代前後，在LGN（側膝核）、V1（視皮質部第一區）、與V2上的研究結果（Hubel & Wiesel, 2005）。

在尋找具充分性之訊息要件上，Marr及其合作者應用Logan（1977）在早期訊息處理上所提出之定理，並擴展到2D影像上（Marr, Poggio, & Ullman , 1979），這就是著名的零交叉（zero-crossings），意即以不同尺度之Laplacian Gaussian對外界投影在網膜上的2D影像予以濾波（先將2D影像高斯化，再針對已高斯化之2D影像的X軸與Y軸作二階偏微分，相加後即得出影像之零交叉，可表示出投影光強度之對比性變化），在找出不同尺度之零交叉後，經過不同高低空間頻率管道（spatial frequency channels）之處理，最後獲得視覺回復。Marr（1982）在此基礎上提出「空間對應假設」（Spatial Correspondence Assumption）：「若在一組不同大小相聯且互相獨立的Laplacian Gaussian之管道中，出現一個零交叉片段，且該片段在每一管道中有相同的位置與方位，則該組（跨不同大小管道）零交叉片段即可表示在該影像中所出現的強度變化，而該變化則來自於單一的物理現象（反射、照明、深度、或曲面方位之變化）。」由該假設可知，要達成視覺回復所需之最少管道數爲2，且外界訊息中可作視覺回復之充分性元素爲零交叉。

縱使確定雙眼影像中之充分性元素爲零交叉，亦未能說明左右眼之影像應如何配對，才能回復外界之立體結構，因爲在資料的配對中有很多內在的不確定性，其中之一就是著名的「假目標問題」（false target problem；櫻井正二郎、黃榮村，1986），必須先行解密，方能求解反向光學問題。所謂假目標問題指的是，當觀看外界與視線垂直之平面（fronto-parallel plane）上四個從左到右橫排的小方塊，若不對左右眼影像之配對給予任何限制條件，則可以有16種不同的配對方式，包括看成與視線平行的四個垂直小方塊。因此首需解決對應（correspondence）問題，亦即需對雙眼影像的配對方式作一限制，以消除不確定性，減少發生假目標之可能性，最終剩下一個邏輯上能真正對應外在世界真相的正確配對。

爲了解決立體視覺中該類難題，Marr與Poggio（1976, 1979）提出著名的合作算則（cooperative algorithm）及考量眼動後修正的第二算則，以電腦模擬方式先抽取不同解析度的零交叉，配對之後，成功的在隨機點立體圖（RDS）上偵測出其所具有的深度結構與圖形（如三角形浮出在均勻的背景之上）。合作算則利用三項雙眼配對的限制條件：(1)相容性（compatibility）：黑點祇能配黑點（或，左眼影像中的黑點不能配到右眼影像中的白點）；(2)唯一性（uniqueness）：一點配一點（或，左眼影像中的一個黑點不能同時配上右眼的兩個黑點）；(3)連續性（continuity）：配對之像差幾乎在影像上的任何地方，除了少數光強度有急遽變化的邊界外，皆屬平滑地變化。依據Marr（1982）的說法，這是一個有效結合三層次的例子，可說明視覺的目的性及其實現方式；他進而提出「立體視覺基本假設」（Fundamental Assumption of Stereopsis）：「若由具有充分訊息之外界物件的左右影像中，在抽取出富含物理意義之基本元素之間建立對應關係，且該對應滿足上述三個配對限制條件，則它就是物理上正確（physically correct）之對應。」由該假設很快即可引申出該對應爲唯一。

由上述可大約了解Marr（1982）的主張，立體視覺的存在性主要來自「空間對應假設」；唯一性則來自「立體視覺基本假設」，這些配對的限制條件不祇是知覺外界之必要條件，也是決定空間對應具有唯一性的充分條件。這就是當時David Marr的研究風格，但他也承認對視覺回復而言，要說明「立體視覺基本假設」具有充分性（sufficiency），比說明在「空間對應假設」中的零交叉具有充分性，要困難得多。

在當時人類知覺研究中，相當重視高階因素之影響，以及「由下往上」（bottom-up）與「由上往下」

airiti

（top-down）之間的互動。Ullman（1978, 1979）先安排一般的假象運動（apparent motion）實驗，如第一呈現框正中央出現的是一根直線（C）；下一瞬間出現第二呈現框，在相對於該直線位置的左右兩邊各出現一條直線（L與R），以觀察在這類典型的假象運動實驗中，中間直線看起來是跑往左邊或右邊。一般而言，應是跑向距離較近之一端。Ullman再將左右兩條直線放在立方體的框架之中，或者換一種說法，利用並列的C、L、與R三條直線略為調整其高低，可以當為不同平面的邊而畫出一個立方體，或將C與R當為同一個立方體其中一個面的兩個邊，而將L放於疊在其上之另一立方體的一個邊。若認知或知識因素確有影響，則跑左或跑右之機率應相同，不管其距中間線有多遠。但實驗結果仍與一般傳統的結果相同，亦即不受3D知識的影響，2D空間關係還是主要的決定力量。若三條線都在同一立方體中，設C與L為同一平面的兩個邊，C與R則是另一相鄰平面的兩個邊，則依3D知識，C與L或R之概念距離應等長，不管實際上L比R還更接近C；實驗結果可發現C跑往L之機率大於往R跑。同樣結果也發生在利用三條線段疊出兩個立方體的實驗情境。Marr（1982）因此認為在這類知覺與錯覺現象中，不需特別考量「由上往下」或高階認知之作用，其中心思想仍在於低階主導之層次。

我們當時對於這幾個強烈的結論，包括零交叉是充分不變量、雙眼配對須遵循三項限制條件、計算視覺模式不太需要考量高階互動效應等項，認為有進一步驗證之必要，並開發替代方案，因此在1983開始在立體視覺主題上作了一些模擬與實驗，來進行有系統的探討。本文分別以「計算視覺理論及其測試」、「神經機制與雙眼像差之獨立性與優先性」，及「立體視覺中的高階互動效應」，作一綜合性的評述。

計算視覺理論及其測試

本節將探討合作算則中三項網膜影像配對限制條件之合理性，重點放在「相容性」之測試。因為「唯一性」與「連續性」該二限制條件在一般狀況下，應尚屬符合人類知覺之運作（Huang & Sakurai, 1987）但「相容性」條件則形成過多之限制，並不符人類知覺所具有之彈性。另外則是提出以方位訊息當為基本元素，在考量不同的眼動狀況下，模擬立體視覺之回復。

（一）「相容性」限制條件之測試

櫻井正二郎（1985）在其實驗三中將一個漢字（各部件及其本身均為高頻之高頻漢字，與各部件及其本身均低頻之低頻漢字，共兩類）依其面積分成64個大小相同的部分，並將這64個部分依左上、左下、右上、右下四區域，以區間隨機方式分成兩張各含32個完全不重疊的兩張圖。將其中一張投射給左眼，另一張投射給右眼（如圖1）。

圖1：無重疊完全互補呈現之漢字圖例
（此例為「窯」）

實驗結果發現單眼呈現或雙眼分離呈現中，不管高頻字或低頻字的實驗參與者均不少比率能看得出其中的字。同時也有不少參與者在單眼無法辨識之情況下，在雙眼分離呈現後成功融合出穩定影像，也能藉由融合後的影像辨識出漢字。唯少數幾次嘗試中有參與者雖然能成功融合出穩定影像，但仍無法由融合後的影像辨識出該漢字為何。相對於控制組（採用隨機圖形當為材料），漢字之辨識機會均高於控制組，且在互補呈現雙眼融合後的辨識比率上，漢字組遠高於控制組。換言之，雙眼融合的過程不僅靠由下而上的純視覺神經歷程，可能需要漢字知識等認知歷程之介入（Huang & Wang, 1992）。

視覺系統之具有多重空間頻率管道（multiple spatial frequency channels），且各管道獨立地進行視覺處理，已獲許多心理物理證據（如Campbell & Robson, 1968; Pantle & Sekuler, 1968; Stromeyer & Julesz, 1972）以及神經生理證據（如Maffei, Fiorentini, & Bisti, 1973）的支持。採用隨機點立體圖（random-dot stereogram）所進行的立體視覺研究，更顯示雙眼影像的融合與空間頻率管道之密切關聯性，兩眼影像具有類似的空間頻率成分，可有助於成功地融合雙眼影像；反之，兩眼影像若具有互不重疊的空間

airiti

頻率成分，則難以產生雙眼融合（Mayhew & Frisby, 1976）。此一雙眼融合的條件，可稱爲空間頻率的配對相容性。

空間頻率亦可影響圖形背景（figure-ground）知覺，低空間頻率管道的處理速度較快，抽取較粗略的一般性訊息，與背景的處理有關；而高頻管道則處理速度較慢，抽取較精細的訊息，與圖形的處理有關（Breitmeyer & Ganz, 1976; Ginsberg, 1982）。Klymenko與Weisstein （1986）在雙穩圖形中塡入不同空間頻率的光柵（grating），則塡入高頻光柵的區域傾向於被知覺爲圖形，而塡入低頻光柵的區域則傾向於被知覺爲背景。因此，當圖形相較於背景具有較高的空間頻率成分時，稱爲符合圖形背景相容性。

基於上述的分析，具有圖形背景結構的視覺刺激之形成立體視覺，多重空間頻率管道將在兩方面具有重要性，分別爲在雙眼影像配對與融合歷程之配對相容性，以及在圖形與背景分離歷程之圖形背景相容性。爲了解該兩種相容性影響立體視覺的詳細情況，以及兩者之間的關係，黃淑麗與黃榮村（1989）在其實驗一中，利用IMAGE-PRO影像處理軟體所提供的濾波（filtering）功能，以卷積（convolution）計算的方式，對於隨機點圖的圖形與背景區域分別進行處理，取得高頻、低頻以及全頻三種具不同空間頻率成分的隨機點刺激，再加以組合成爲立體圖之後，即可同時操弄兩種相容性。例如，左眼圖與右眼圖同爲高頻圖形／低頻背景，即爲同時符合配對相容性與圖形背景相容性；若兩眼圖同爲低頻圖形／高頻背景則只符合配對相容性，而不符圖形背景相容性；若左眼圖爲高頻圖形／全頻背景，而右眼圖爲全頻圖形／低頻背景，則只符合圖形背景相容性，而不符配對相容性（如圖2）。配對相容性對於圖形與背景區域獨立作操弄，可得四種情況：形同景同（兩眼圖的圖形與背景區域皆爲相同的空間頻率）、形同景異（兩眼圖形區域的空間頻率相同而背景區域不同）、形異景同與形異景異；圖形背景相容性則有符合與不符合兩種。該兩類相容性共可組成八種情況，再依此分別製作正像差與負像差的立體圖。測量雙眼融合並形成立體視覺所需的時間，無論在圖形浮出於背景之前的正像差情況，或圖形沉入於背景之後的負像差情況，皆顯示配對相容性爲形同景同的立體圖形成立體視覺的速度快於形異景異情況，並且符合圖形背景相容性的立體圖形成立體視覺的速度亦快於不符圖形背景相容性的情況。實驗二採用高頻、中頻與低頻的正弦波光柵製作立體圖（如圖2），以便精確地控制空間頻率，並進行同樣的操弄，亦在正像差的情況下重驗上述結果。然而在圖形與背景的其中之一不符配對相容性（即形同景異與形異景同）時，其處理速度受影響的狀況，卻未能得到穩定的結果。因此，不符配對相容性或不符圖形背景相容性，皆可阻礙立體視覺的形成，而圖形區域或背景區域個別不符所產生之相對影響強度則尚未明確。

若嘗試性比較兩種相容性的相對影響力，以較穩定的正像差情況而言，在隨機點立體圖所得的配對相容性效果（形同景同＜形異景異：4.82秒＜12.22秒，亦即快7.40秒），遠大於圖形背景相容性效果（符合＜不符：6.25秒＜8.68秒，亦即快2.43秒）；在光柵立

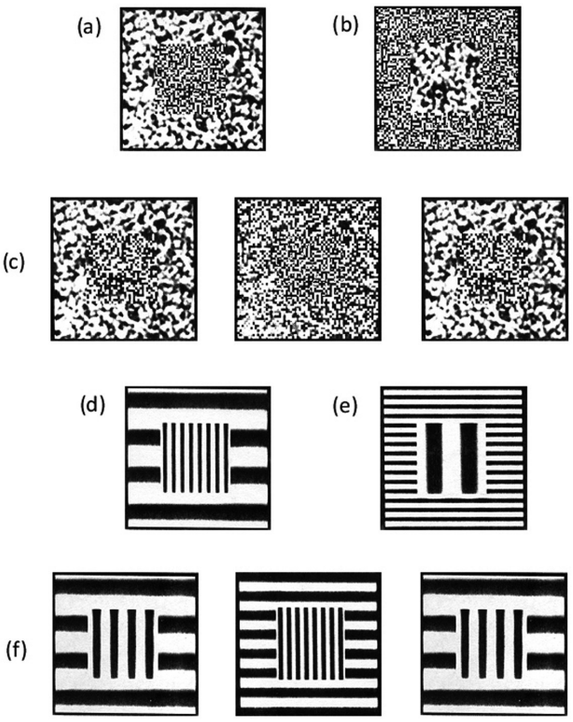

圖2：操弄空間頻率的配對相容性與圖形背景相容性之實驗刺激

註：(a)-(c)爲隨機點圖加以濾波處理而得的圖形；(d)-(f)爲正弦波光柵組合而成的圖形。(a)與(d)爲高頻圖形／低頻背景之組合，符合圖形背景相容性；(b)與(e)爲低頻圖形／高頻背景之組合，不符圖形背景相容性。(c)與(f)爲符合圖形背景相容性（亦即圖形相較於背景爲較高頻）但不符配對相容性之立體圖，交叉融合左圖與中央圖或平行融合中央圖與右圖，可得正像差深度，亦即中央方形區域浮出的知覺。

airiti

體圖亦得到配對相容性效果（30.73秒＜44.03秒，亦即快13.3秒），大於圖形背景相容性效果（34.05秒＜39.71秒，亦即快5.66秒）。另一方面，雖然配對相容性具有穩定的影響力，然而在不符合的情況下，仍可形成雙眼融合而產生立體視覺，只是處理速度較慢而已，因此不符合配對相容性並未能完全阻斷雙眼融合之產生。

綜合上述櫻井正二郎（1985）及黃淑麗與黃榮村（1989）所獲之實驗結果，皆可看出雖然在兩眼影像不相容時，確會造成處理速度變慢以及降低辨認正確率，但並不會完全阻斷雙眼融合後的正確辨認。前者的實驗乃在2D中給予兩個分眼呈現的互補漢字，在雙眼配對過程中可能克服了不相容的問題，而達到了雙眼融合的效果，正確辨認出漢字；後者之實驗，則係給予分眼不相容之影像以及像差，由所形成之立體視覺結果推論雙眼配對時克服了不相容問題，而達到雙眼融合的結果，進而產生立體視覺。由此看來，不管是在一般中性圖形或富有意義漢字之雙眼處理上，「相容性」的配對限制條件，難以涵蓋雙眼配對上可能具有的彈性。

（二）邊界方位與眼動可完成深度回復

櫻井正二郎（1992）利用模組化設計原則（principle of modular design）的方式，將形成雙眼立體視覺之歷程，以模擬各不同神經區域的方式來分段處理後再串聯。在處理流程上，以完全由下由上的純視覺神經歷程的方式，處理雙眼配對與雙眼立體視覺的過程。模擬的大致歷程是先由最低空間頻率過濾模組，驅動輻向動眼（disjunctive or vergent movement，雙眼水平運動方向相反）模組，找出背景零像差位置；將形成之背景零像差資訊暫存立體影像產生模組，接著配合協調動眼（conjunctive movement，雙眼水平運動方向相同）模組，及不同程度之空間頻率過濾模組（高、中、低），尋找不同區域像差值，再將其結果放入立體影像產生模組。在模擬中分別使用了隨機點立體圖以及單眼可見三層矩形之一般立體圖，當爲測試材料，成功地模擬出類似人類利用輻向與協調眼動作雙眼融合，以形成立體視覺的過程（如圖3及圖4）。

由模擬結果看來，該程式相當成功地完成任務，同時能解決Marr（1982）所提出之第一個合作算則所發現的重覆運算及眼球運動問題，也以相當符合內在

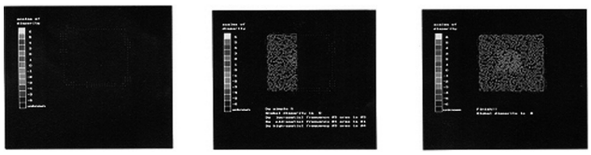

圖3：從左至右，係針對隨機點立體圖之模擬過程（小正方形浮出）

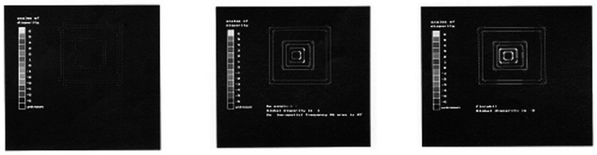

圖4：過程與圖3同，但模擬的材料為單眼可見三層矩形之一般立體圖

神經歷程之方式模擬出人類初期雙眼立體視覺之過程（Sakurai & Huang, 1993）。在1980年以後可成功模擬出立體視覺的計算理論，除了合作算則之外，至少尚有五種之多（Regan, Frisby, Poggio, Schor, & Tyler, 1990），但以兩類動眼模組爲基礎之實際立體模擬，則該研究應爲當時之首例。

但該研究之模擬結果僅進行至簡單細胞（simple cell）的層次，亦即配對元素爲不同空間頻率下之不同傾斜方位邊界（而非單純的零交叉）。但雙眼立體視覺之雙眼配對，可能不止在簡單細胞層次才有，其他更高層次之大腦皮質區也應發生。人類在形成立體視覺之過程中，還會受到相當多由上而下例如記憶與經驗之影響。在隨機點立體視覺中該可能性相當明顯，第一次觀看者常需要花上以「分」爲單位的時間，但有經驗者可能在幾秒鐘內即形成穩定之雙眼立體視覺經驗，但這些都是未能在模擬程式中予以考量的部分。同時在模擬當中，三層矩形之立體圖的表現與實際人類知覺有重大差異，在垂直方向有嚴重的立體攫取（stereo capture），這在幾何形狀立體圖中是不應發生之現象。因爲在幾何形狀立體圖中每一個特定之形狀，均可以形成單獨之面，不會被其他幾何形狀所破壞，故不應在幾何形狀立體圖中發生立體攫取現象。這可能是因爲程式模擬時，未將如完形規則（Gestalt principles）中之連續性等由上而下的規則加入其中所造成的。

airiti

神經機制與雙眼像差之獨立性與優先性

在立體視覺計算理論中，雙眼像差與早期視覺消息處理應具有特殊的獨立性與優先性。本節利用錯覺輪廓與錯覺顏色的實驗，來分別探討該一可能性。

（一）無單眼誘發元素下雙眼像差之作用

Poggio（1984）及Livingstone與Hubel（1987）提到在V1及V2有雙眼細胞，對於雙眼像差敏感（disparity-tuning cells），有正像差敏感、負像差敏感，及零像差敏感細胞。Von der Heydt、Peterhans與Baumgartner（1984）發現有偵測真實輪廓之V1細胞，錯覺輪廓之偵測則出現在V2細胞。雖然，傳統的錯覺輪廓多具備誘發元素（inducing elements）、亮度變化、重疊線索等特徵，但就生理證據而言，則有可能在視皮質部V1與V2進行雙眼影像配對，計算出像差，得到立體視覺，並在條件合宜時，由V2的神經偵測到由雙眼像差所造成的錯覺輪廓。

袁之琦（1986）的研究將方框隱藏在隨機點當中，結果發現在單眼看不清楚錯覺輪廓何在的情況下（見圖5），透過雙眼立體視覺配對，可以看到錯覺輪廓浮出於背景隨機點之前或下沉。此一錯覺方框輪廓，並不會將框內的隨機點攫取至同一平面。易言之，方框錯覺輪廓可獨立運作於隨機點的背景之上，也就是脫離於誘發元素之上。實驗另操弄錯覺方框輪廓之大小（5、10、15、20格）與框寬（1、2格），方框愈寬則愈容易形成立體知覺，受試者會知覺到錯覺方框輪廓上浮或下沉；框寬的效果則不顯著。正像差較負像差容易偵測到錯覺方框輪廓，但若分析上浮（正像差）或下沉（負像差）的幅度，則以負像差的深度感較大。該結果與Stevens（1983）的圖形辨認不能（visual agnosia）個案研究結果相符，亦即縱使在無法偵測到單眼重疊線索（一般正常人可看到該一2D形狀，如錯覺三角形壓在背景上）的情況下，仍可經由雙眼像差的深度線索，形成3D的錯覺輪廓知覺。

（二）單眼誘發元素下錯覺輪廓之深度表現

依據Von der Heydt等人（1984）之發現，單眼可見之錯覺輪廓會激發V2細胞作反應，則應可在Barlow（1972）所主張之「神經原則」（neuron doctrine）下，予以假設，該錯覺輪廓已因此具有如真實輪廓一樣之基礎，可在知覺上進行獨立運作。該想法應不違背計算視覺之原理，亦與上述袁之琦（1986）之實驗結果有相輔相成之處。

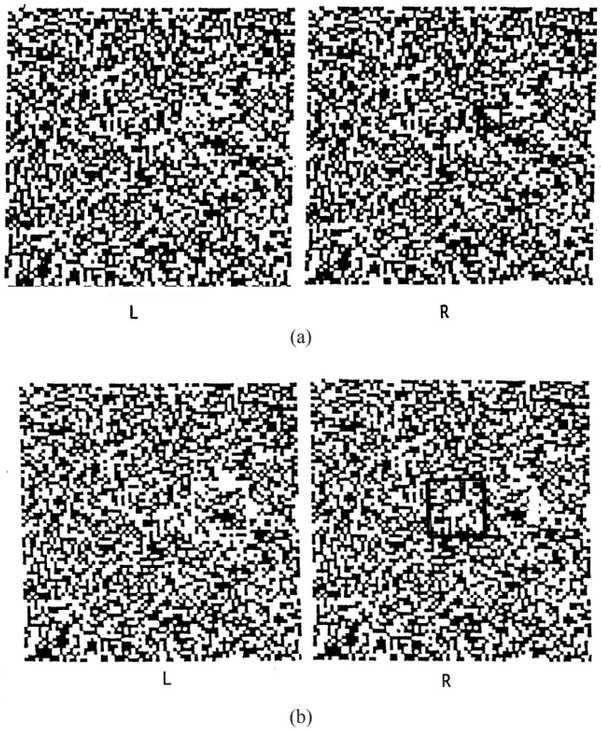

圖5：方框錯覺輪廓隱藏在隨機點立體圖中

註：(a) 方框之邊長爲5格，框寬爲1，兩眼水平像差爲2格之正像差刺激呈現圖。此處作爲說明的左眼圖L未標出方框之位置，右眼圖R則標示出方框所在位置；(b) 方框之邊長爲15格，框寬爲1格，兩眼水平像差爲16格之正像差刺激呈現圖。左眼圖L未標出方框位置，右眼圖R則標示出方框位置。

圖6利用白色誘發元素（inducing elements）所製作之錯覺三角形，並將其放置在不同密度的隨機點圖上，之後按實驗需要操弄各類雙眼像差，而獲得不同的3D視覺經驗。因爲在獲得雙眼融合的過程中，有人習慣用左右交叉方式，即左眼看右圖，右眼看左圖，有人習慣用非交叉方式，兩種方式所形成之立體感恰好相反，爲了保證兩種觀看方式的讀者都可以獲得正像差感受，右側第三欄位重複第一欄位的圖片，俾使觀看左側兩欄爲負像差感受者，可改觀看右側兩欄以確保感受到正像差的結果。對這些左右眼圖配對後的視覺經驗，可依不同假設作一猜測。假設一認爲不能以僅在主觀上具有亮度差異的點，當爲左右眼配對之基本原料，故若形成3D下的錯覺輪廓，應係在誘發元

airiti

素配對完成後才形成的。假設二則認爲主觀上具有亮度差異的點，亦可當爲左右眼配對的材料，故錯覺輪廓與誘發元素相同，都可經過配對融合的過程而獲得深度知覺。陳瑞雲（1991）的實驗結果，相當程度支持了假設二的觀點，認爲雖然2D錯覺輪廓並無明確的物理邊界，但它在單眼觀看時即可能已啓動獨立的神經表徵（如在V2的錯覺輪廓偵測器），據此可當爲立體視覺運作時的配對元素，而不須等到誘發元素在立體視覺下形成之後，才依照錯覺輪廓形成的法則（依照定義，有誘發元素才可能產生錯覺輪廓），讓錯覺三角形浮現出來。如圖6的第2、3、5、6四排，皆可看到錯覺三角形獨立浮出，而誘發元素則是在背景平面或另一深度平面。

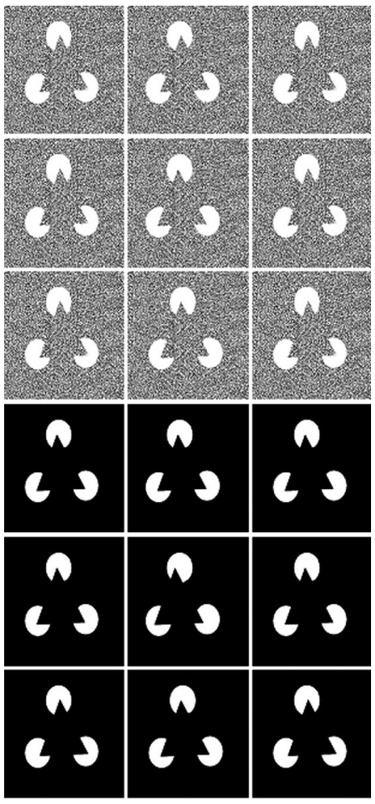

圖6：不同隨機點密度上的錯覺三角形立體對

註：1. 在50%密度的隨機點背景上，只有誘發元素具有像差，此時會看到只有三個「小精靈」會浮起來。2. 誘發元素與錯覺輪廓皆具有像差，此時不只看到三個「小精靈」浮起來，「小精靈」上面還有一個立體攫取的三角形。3. 僅錯覺輪廓具有像差，此時只看到「小精靈」上面有一個立體攫取的三角形。4. 在全黑的背景下，僅誘發元素具有像差。5. 誘發元素與錯覺輪廓皆具有像差。6. 僅錯覺輪廓具有像差。

另由圖6第3（背景隨機點密度50％）與第6排（背景隨機點密度爲零）之比較可知，當祇給予錯覺輪廓正像差時，兩者皆可清楚浮出，且在第6排浮出之錯覺輪廓上有較明顯的立體攫取（亦即，三角形內之零像差黑色背景被攫取到與錯覺輪廓同平面），依Ramachandran（1986）之說法，可能是在全黑背景下，缺乏如50％密度中可作雙眼配對之白點或黑點，以致在計算局部像差值時碰到困難，變成模擬兩可，故較易被帶上去。這種解釋強調了雙眼像差之獨立性與優先性。但亦可假定在背景隨機點密度爲零時，可能比背景密度爲50％時，有較清晰之錯覺輪廓（單眼重疊線索），則依據Von der Heydt之實驗邏輯，應有較大之V2反應，錯覺輪廓因此不祇具有獨立浮出之力量，且較能攫取三角形內之背景至同一平面。但該一單眼重疊線索鮮明度是否確實存在且有不同，則是另一需要驗證之問題，目前並無任何資料可作佐證。圖6在負像差時則皆未能看到下沉的錯覺三角形，可能是因違背了單眼重疊線索之認知解釋（亦即在2D時，錯覺輪廓應係壓在背景之上），所以下沉時祇能看到三角形，難以如在正像差時看到浮出的錯覺三角形。若此說有其道理，則雙眼像差與神經機制雖具有獨立性與優先性，但在某些特定情況下，亦有受到認知因素調控之可能。

（三）在錯覺顏色上之測試

一般的錯覺輪廓是不透明的，然而若在錯覺輪廓誘發元素的特定區域，以不同顏色加以補整爲完整的形狀，即可產生透明的錯覺輪廓，或在整個錯覺輪廓區域知覺到一層淡淡的顏色，稱爲錯覺顏色（圖7）。Nakayama、Shimojo及Ramachandran（1990）對於2D可產生錯覺顏色的圖形給予雙眼像差，結果顯示在正像差情況可形成透明的錯覺輪廓浮出於誘發元素與背景之前，並且伴隨著錯覺顏色知覺，然而在負像差情況却不能形成錯覺輪廓，錯覺顏色知覺亦不能產生。因此，負像差可阻斷錯覺顏色之形成，顯示在立體視覺下之產生錯覺顏色，雙眼像差深度訊息的影響具有某種程度的優先性與獨立性。黃淑麗（1993）針對立體視覺下透明錯覺輪廓圖之形成錯覺顏色，進行了一系列探討，主要結果顯示雙眼像差深度雖可調控錯覺顏色的形成，但仍須符合誘發元素在單眼層次之局部條件（如誘發元素與周圍之明度對比），以及利用錯覺輪廓來限制顏色擴散，才可能形成錯覺顏色知覺。

airiti

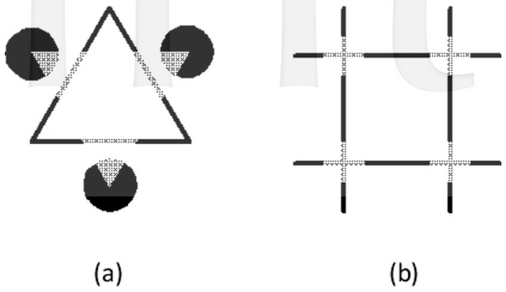

圖7：透明的錯覺輪廓

註：(a) 將Kanisza's 錯覺三角圖填入不同顏色加以補整而得。(b) Ehrenstein圖填入彩色十字。圖中的灰色用以代表具色彩的顏色。

當圖形結構符合誘發元素之局部條件時，必然會產生局部的顏色擴散，但若無錯覺輪廓限制其擴散範圍，則顏色擴散將隨距離而急遽減弱，無法形成整片的錯覺顏色，故錯覺輪廓之限制作用應是產生錯覺顏色的重要條件。爲探討立體視覺下錯覺輪廓如何影響錯覺顏色的產生，黃淑麗（1993）在實驗二中修改Koffka錯覺輪廓圖（見圖8），在其上下兩誘發元素之間填入綠色垂直線以形成顏色擴散，將此部分呈現於左眼或右眼的其中之一，而將左右兩誘發元素呈現於同一眼（單眼情況）或不同眼（雙眼情況），結果發現兩種情況皆可形成整片的錯覺顏色。另設計將左右兩誘發元素加以反轉或改爲完整的圓形，以作爲對照的控制情況，則形成錯覺顏色的比例無論在單眼或雙眼情況皆大幅降低。若比較單眼與雙眼情況所得的錯覺顏色反應，則相當一致。上述結果顯示，融合雙眼影像後所得的錯覺輪廓，具有與單眼錯覺輪廓相同的功能，對於同眼或不同眼的局部顏色擴散皆可產生限制作用，而形成輪廓內的整片錯覺顏色。

黃淑麗（1993）在實驗三中修改Mather（1989）所使用之錯覺輪廓，製成單眼可形成或單眼不能形成透明錯覺輪廓的實驗材料，並操弄錯覺輪廓的雙眼像差以及誘發元素爲高對比或低對比（見圖9）。結果顯示，無論單眼是否可形成錯覺輪廓，當誘發元素爲高對比時（亦即符合誘發元素之局部條件），在正像差情況皆得高比例（＞90%）之錯覺顏色反應，在負像差情況則皆大幅下降。當誘發元素爲低對比時，則錯覺顏色反應的比例遠小於高對比情況。因此，錯覺顏色的產生雖然有賴於錯覺輪廓的限制作用，然而上述結果顯示，除了複驗Nakayama等人（1990）的發現，對於單眼可形成2D錯覺顏色的圖形給予負像差，可減

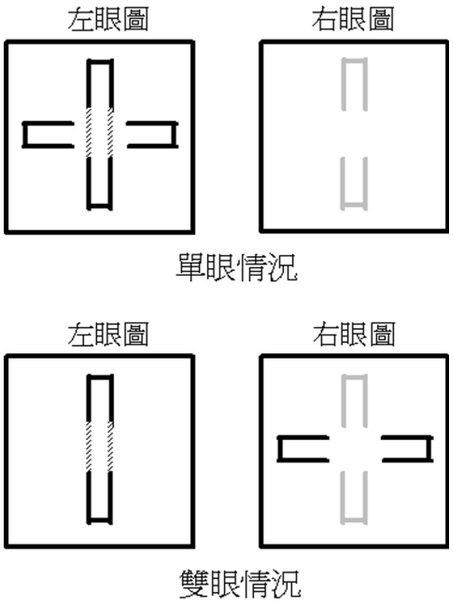

圖8：雙眼融合後形成的錯覺輪廓限制擴散而形成錯覺顏色

註：上排的單眼情況，將Koffka圖填入彩色垂直線所形成的透明錯覺輪廓圖，完整地呈現於同一眼，可在整個中央區域形成錯覺顏色。下排的雙眼情況，將透明錯覺輪廓圖中產生局部顏色擴散的中央垂直線部分呈現於一眼，而將其餘部分呈現於另一眼，因此單眼圖中只能形成局部且相當有限的顏色擴散，然而融合兩眼圖形之後，却可在中央區域產生整片的顏色擴散，類似單眼情況的效果。圖中的斜紋線條用以代表彩色的線條；灰色線條代表較低對比的線條，用以輔助形成穩定的雙眼融合。

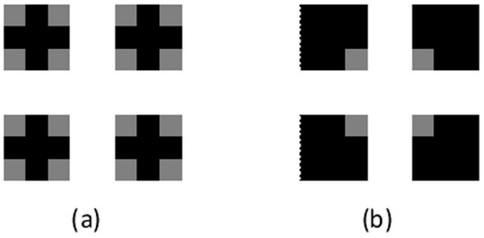

圖9：操弄錯覺輪廓深度所使用的實驗刺激

註：(a)單眼不能形成錯覺輪廓（未伴隨錯覺顏色）的圖形。(b)單眼可在中央區域形成透明的錯覺輪廓（伴隨錯覺顏色）。針對(b)圖錯覺輪廓的四個角給予雙眼像差，可操弄錯覺輪廓的深度，(a)圖亦以對應的方式進行雙眼像差的操弄，同樣可形成立體視覺下具深度的錯覺輪廓。圖中的灰色用以代表具色彩的顏色。

airiti

弱3D錯覺顏色的形成之外，另外發現對於單眼不能形成2D錯覺顏色的圖形給予正像差，則可形成3D錯覺顏色。因此，藉由雙眼像差深度訊息所形成的3D錯覺顏色，可獨立於單眼的2D錯覺顏色，亦即對於伴隨著透明錯覺輪廓所產生的3D錯覺顏色而言，雙眼像差具有其獨立性與優先性。

在上述實驗三所使用的實驗材料中，產生錯覺輪廓的誘發元素與產生錯覺顏色的誘發元素是相同的，因此黃淑麗（1993）在實驗四中嘗試將其分離，採用實驗二之Koffka圖上下兩誘發元素填入綠色垂直線的設計，藉以產生局部顏色擴散，而另以紅色短線圍成一圈的設計，作爲錯覺輪廓的誘發元素，並固定前者（顏色擴散部分與其誘發元素）爲零像差，而操弄錯覺輪廓爲正像差、零像差或負像差。結果顯示在正像差情況可穩定地形成錯覺顏色（100%），在零像差情況的錯覺顏色反應則較爲降低（59.67%），在負像差情況則難以形成錯覺顏色（1.42%）。此一結果顯示，錯覺輪廓的雙眼像差對於錯覺顏色的產生，具有重要的影響力（Huang & Huang, 1994）。

綜合本節所述，不管錯覺輪廓是單眼可見或不可見，祇要給予適當之像差即可浮出，而且浮出之後亦可具有獨立功能，對立體攫取或錯覺顏色產生規範作用。由此看來，雙眼像差在早期消息處理中，具有特殊的優先性；錯覺顏色相對於錯覺輪廓而言，屬於次級知覺結果，亦表示錯覺輪廓偵測之神經機制有可能早於錯覺顏色，且具較大之規範性功能。

立體視覺中的高階互動效應

計算視覺理論一直迴避高階因素的真正影響，其理由可能部分來自於對闡釋水準（level of explanation）之一致性看法，認爲若能在低階層次予以解釋完成，則可避免諸多不確定因素之干擾。但認知與高階因素之互動在心理學研究史中屢見不鮮，在日常生活經驗中也是廣爲人知之事實（Huang, 1995）。立體視覺並非祇是實驗室中孤立條件下之課題，亦是人類日常生活中很普遍的經驗，因此值得在計算視覺理論脈絡下，予以討論。

（一）漢字對錯覺輪廓形成與立體攫取之影響

文字是一種過度學習的刺激，在幼年時即已成爲人類知識與經驗的一部分。若在漢字上製造輪廓，並給予像差，則依據上節非文字材料的實驗結果，若像差具有特殊優先性，則應不受漢字背景之影響；惟若有不同結果，則難以排除立體視覺中的高階互動效應。

袁之琦（1986）以漢字爲錯覺輪廓的誘發元素，觀察其對錯覺輪廓知覺的影響，刺激材料如圖10，兩種真實輪廓（一爲空心，一爲實心）爲對照組。實驗結果見表1，在負像差的情境裡，不論真實輪廓或錯覺輪廓，都得不到負像差圖形下沉的知覺。當左右眼爲互補漢字時，即使給予正像差，錯覺輪廓亦較不易被知覺到浮出於漢字之上。

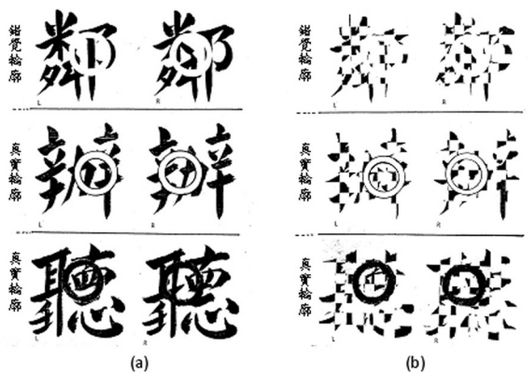

圖10：在漢字中製造錯覺輪廓的誘發元素

註：有兩種狀況，即左右眼皆爲完整的漢字(a)，或是互補的漢字(b)。

林麗明（1992）則進一步將背景漢字隨機點化（亦即既非完整字，亦非互補字，單眼看不出漢字），但其上之圓環仍清楚可見，又分爲真實與錯覺輪廓兩類。針對漢字與圓環給予不同像差後，皆可分別浮出與停留在不同平面，漢字經雙眼融合後亦可分辨，此時浮出圓環內有立體攫取現象，亦即本應在背景平面之刺激相當程度被攫取上來，其比率相對於放在單眼可見漢字上之圓環的浮出結果，有大幅的提高，似不太受已融合漢字之約束。該結果顯示單眼形狀可能會對立體攫取產生影響。

（二）單眼界面線索之影響

Julesz （1971） 的隨機點立體圖（RDS）實驗，說明在完全沒有單眼形狀、邊界線索的狀態下，人眼仍舊能夠依賴雙眼像差形成立體視覺。然而，該一結果並不能完全否認單眼線索可能具有之功能。在雙眼

airiti

表1　背景刺激為漢字下之輪廓立體反應率

		完整字		互補字	
		正像差	負像差	正像差	負像差
錯覺輪廓		鄰　100% 辨　100% 聽　100%	不下沉	鄰　30% 辨　20% 聽　30%	不下沉
真實輪廓	線條	鄰　100% 辨　100% 聽　100%	不下沉	鄰　70% 辨　80% 聽　80%	不下沉
	實心	鄰　100% 辨　100% 聽　100%	不下沉	鄰　90% 辨　100% 聽　100%	不下沉

像差線索與單眼邊界線索同時存在時，是否會相互影響，是個有趣的問題。直覺上若存在有較清楚之單眼邊界線索時，因可省掉在RDS配對上所花的定位時間，應能加速雙眼影像之配對。

袁之琦（1988）設計一種新的刺激材料呈現方式，可操弄單雙眼邊界線索之異同。在相異情況裏，單眼所見之輪廓在雙眼立體視覺形成時被破壞，亦即雙眼像差深度知覺所形成的圖形輪廓與單眼所見輪廓不同。如圖11所示，圖11(a) 是單雙眼界面相同的情況，圖11(b) 則是雙眼界面不同的情況。

若單雙眼的輪廓線索一致（d = 0），則因有單眼輪廓之局部線索助益，其雙眼影像融合速度較快（圖11中的d = 0，係指C與D皆具有與A相同之質地內容，但針對C與D在雙眼呈現中給予不同之水平像差，故有雙眼融合，亦可形成立體視覺之結果）。易言之，單眼的形狀或輪廓線索，有助於雙眼影像配對時局部配對的進行，故有單眼線索應較無單眼線索時，更容易促成立體視覺。但在單雙眼的輪廓線索不一致時（d≠0），單雙眼互動變項趨多，若單雙眼產生競爭，則單眼線索反而可能有害於立體視覺的形成。但若雙眼影像配對的難度，遠高於單雙眼線索之競爭，則單眼輪廓線索仍可能對雙眼影像配對，造成促進效果，亦即由點線面次第形成的較高階邊界線索，是立體視覺之高階效應，必須要納入考量。

Julesz（1962, 1975）與Julesz、Gilbert、Shepp及Frisch（1973）的研究，說明人眼可以分辨第一級統計結構不同之相鄰兩質地平面的界面，和第二級統計結構不同（但第一級結構相同）之相鄰兩質地平面的界面。但是，人眼不能分辨第三級結構不同，而一、二級結構相同之相鄰兩質地平面的界面。易言之，圖形的第一、第二級統計結構不同，均可提供作爲質地分

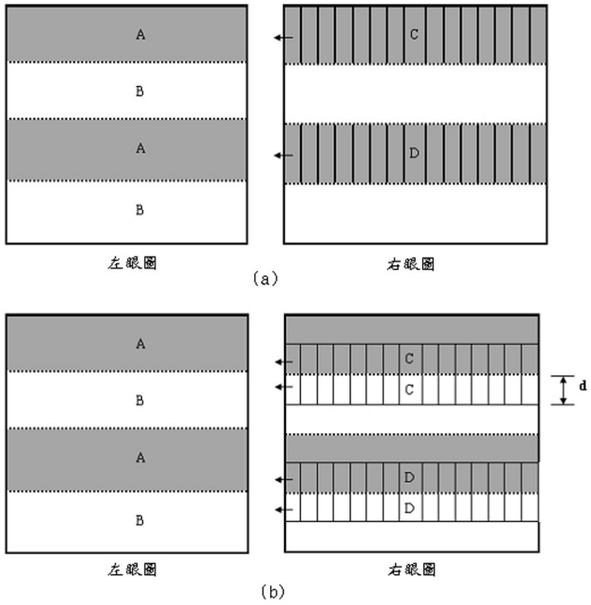

圖11：(a)單雙眼界面相同（d = 0）：A、B之邊界，為單眼質地線索不同所造成之界面；C、D區域具有水平像差，為雙眼像差所造成的立體界面。(b)單雙眼界面不同（d > 0）：圖中的d 表示單雙眼訊息不同下，邊界位置差異的大小

割之線索，但人眼無法分辨第三級結構不同的圖形。所謂第一級統計（first-order statistic）結構不同係指相鄰兩質地界面，各自界面內的黑白點比例不同。第二級統計結構不同，係指第一級結構相同（黑白點比例相同）之相鄰兩界面，其任兩相鄰點黑黑、白白、黑白、白黑之機率分配不等。第三級統計結構不同則是第一與第二級結構相同（黑白點個數相同；黑黑、白

airiti

白、黑白、白黑之機率分配相等）之相鄰兩界面，其任三相鄰點黑黑黑、白白白、黑黑白、白白黑、黑白黑、白黑白、白黑黑、黑白白之機率分配不等。圖12是不同梯度的一級(a)與二級統計結構(b)，所形成的質地界面；圖13則爲第三級統計結構不同（但一、二級相同）之圖形。

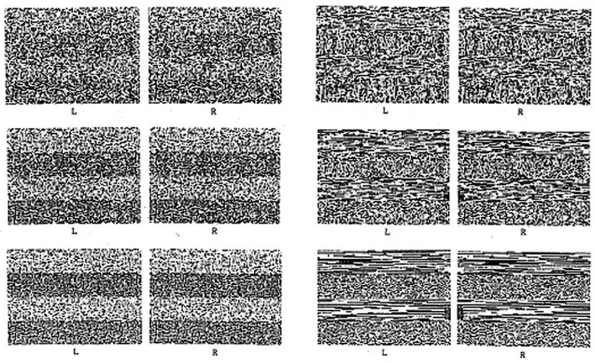

圖12：不同梯度的一級(a)與二級(b)統計結構，所形成的質地界面

圖13：三級統計結構不同的質地界面，人眼無法分辨界面所在。

實驗以不同清楚度單眼可見的一級與二級統計結構不同的質地界面，配合無單眼界面線索的三級統計結構不同的質地界面，依照圖11之方式操弄單雙眼邊界線索之一致性，讓受試者判斷其爲立體視覺之上升或下沉？14名受試者所得之結果發現，在單雙眼訊息不一致狀況下，單雙眼界面差距的距離遠近（d值大小），並不影響雙眼像差界面形成的反應時間；反而是單眼界面線索的有無，會縮短雙眼像差界面形成的反應時間，而且，單眼界面線索愈清楚，反應時間有愈短的趨勢（袁之琦，1988；袁之琦、黃榮村，1992；Yuan & Huang, 1995）。

（三）立體感與立體攫取

Ramachandran（1986）主張在雙眼配對過程中，當網膜影像的局部配對出現模擬兩可狀態時，視覺系統可能會藉由周圍配對確定的像差訊息進行內插填補，使得觀察者產生立體攫取的錯覺現象，亦即感受到被包圍之內容深度與包圍者之深度一致（若純粹依賴像差運作，則應屬不同平面）；反之，若配對成功，則不易產生立體攫取現象。但林麗明（1992）與陳瑞雲（1991）的研究卻指出，在非週期性背景結構（如隨機點背景圖）中，即便被包圍的隨機點可以配對成功，仍會發生立體攫取現象，與Ramachandran（1986）的觀察結論相互矛盾，這可能是立體攫取現象本身有高層認知推論的因素混淆其中，以致於實驗指導語即可影響到受試者的主觀報告。爲了釐清該一可能性，唐大崙（1994）在誘發錯覺輪廓之元素內側邊界給予像差訊息，受試者也能透過與真正具有像差之錯覺三角形（如圖14）的比對，區辨三角形內隨機點深度差異的不同。只有當受試者在無像差對比情境下（亦即祇呈現圖14之上排），被直接詢問錯覺三角形內部隨機點的深度感受時，才有部分受試者報告有立體攫取感受，這表示立體攫取現象可能有更高層的認知推論涉入。

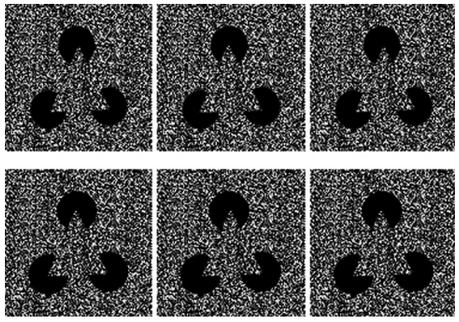

圖14：上排三個僅在誘發錯覺三角形的小精靈開口內側有像差，下排三個則是整個錯覺三角形皆具有像差。在透過上下兩排比較的對比情境下，受試者都能區辨兩類三角形內部隨機點的深度差異；但若直接詢問上排融合後三角形內部隨機點的感受，則有部分受試者會報告立體攫取現象

唐大崙（1994）也發現，若隨機點背景上的圓環，只有環內側邊緣具有像差，則環內隨機點的深度

airiti

判斷會受到圓環形狀決策的影響。當圓環被看成是圓錐隆起時，環內的隨機點多不產生立體攫取感受；反之當圓環被看成是圓盤狀時，環內的隨機點則較容易發生立體攫取感受（見圖15）。該結果支持立體攫取現象並非單純像差計算與擴散的結果，意即像差計算與深度判斷是兩個不同的運作歷程，受試者在做深度判斷時，並非單由像差計算決定，而是在像差計算之後，藉由計算結果所獲得的各類形狀（包括單眼可見的表面與像差構成的邊界）訊息，綜合各種可能性的經驗來推論結果。

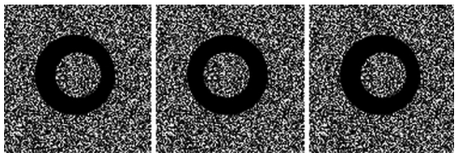

圖15：當圓環只有環內側邊緣具有像差，則環內隨機點的深度判斷會受到圓環形狀決策的影響（本圖觀看方式與圖6相同）

立體攫取可能涉及認知推論的說法，亦可從立體攫取受透明感機制影響得到證實。意即在周期性背景的錯覺輪廓中，僅誘發元素邊緣有像差訊息所引起的立體攫取感受，多半會伴隨著該誘發元素引起的透明感而消失（Nakayama et al., 1990），如圖16。

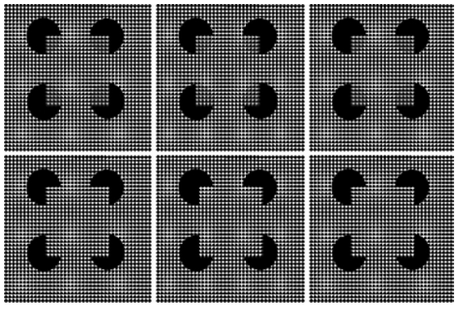

圖16：上排誘發元素因為有透明感，使得立體攫取感受消失；下排誘發元素無透明感，又有週期性背景，故產生立體攫取感受

（四）形狀決策影響立體攫取

深度判斷有高階歷程涉入的證據，也來自更多立體雙穩圖形的觀察，如圖17的白色圓環，只有環內邊緣具有像差，此時，白色圓環可以被看成圓盤，也可被看成圓錐。當環內徑越大，環內隨機點多能配對成功，使得環內隨機點產生立體攫取的機會，決定於觀察者對圓環的詮釋（亦即圓環被當成圓錐時，立體攫取便不易發生）。反之，環內徑愈小，環內隨機點能配對成功的比率降低，因此引起立體攫取的感受也愈強，這表示像差計算僅僅是深度判斷必要的前處理（preprocessing）。

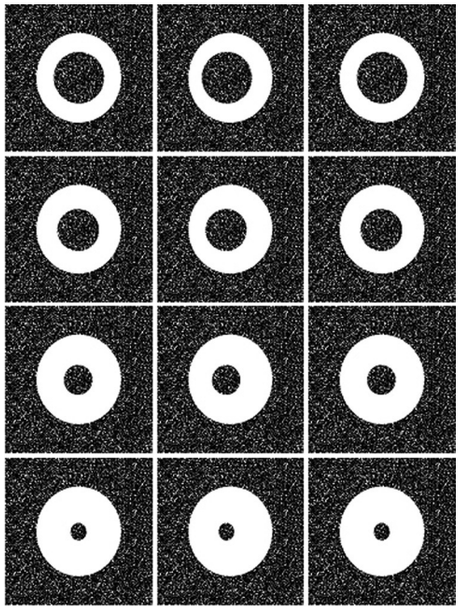

圖17：立體雙穩圖形

依據計算理論觀點，像差訊息模糊之區域的深度感，可藉由周圍有明確配對之區域作深度內插（disparity interpolation）而獲得。像差訊息模糊度則可由明確配對點數之多寡，予以定義。當可明確配對之點數愈多，則在雙眼呈現作業下所作之深度判斷愈一致，且愈受其本身所具有之像差訊息所決定。「深度判斷之一致性與像差依賴性，是否祇受像差訊息明確度之影響？或者，配對融合後之不同立體形狀感，也會影響到深度判斷？」前者爲一純低階問題，後者則可能涉及高階效應。若深度感純依像差訊息之運作而定，則當單眼白環內徑愈大時，環內可明確配對之點數愈多，受試者應傾向於判斷原本具零像差特性之環內隨機點，會停留在零像差平面，不管他是看到平面圓盤或立體圓錐；反之，當環內徑愈小，環內

airiti

可明確配對之點數愈少，則因深度內插之故，會傾向於判斷環內隨機點被攫取至與圓盤或立體圓錐一端相同之正像差平面。若深度判斷可受形狀調節，則當白環被視爲平面圓環時，對環內隨機點所在平面之深度判斷，可能與看成立體圓錐時之判斷，有所不同。圖17的實驗結果支持形狀感覺與像差訊息之間有交互作用。當環內徑趨大，且看成圓盤時，環內隨機點會被攫取到正像差平面；但當看成圓錐時，則同樣的環內隨機點（亦即像差訊息相同），會停留在零像差平面。但當環內徑趨小時，不管看成圓盤或圓錐，環內隨機點被攫取到正像差平面的機率增大。該結果顯示，當單眼環內隨機點與環本身的面積比趨小時，兩眼之環內隨機點可資明確配對的點數大幅減少，使環內隨機點失去像差訊息（因爲此時有雙眼競爭），當像差訊息模糊時，周圍的深度內插效應即可能發生。當面積比值增大時，可配對點數增多，零像差訊息發揮作用而下沉到零像差平面；但該行爲也會受雙穩形狀所調節，當看到的是圓盤時，則會將其攫取至正像差平面。故立體形狀之變化與像差訊息明確度之間，確有交互作用。該結果值得進一步討論之處在於：當像差訊息不明確時，會受周圍像差值內插之影響，符合計算理論的看法；但當像差訊息趨明確時，則會受到立體形狀變化之影響，該結果顯然非計算理論所能解釋，應涉及高階歷程。形狀對深度判斷之影響，應發生在像差計算之後，因爲像差計算以在V1與V2區進行爲主，而靜態形狀之處理則在下顳葉區（inferotemporal lobe），故形狀對深度判斷之影響，應已有高階效應介入調節，其細節影響機制則尚有待探討（唐大崙、黃榮村，1994）。

（五）盲點填補與像差擴散

立體攫取現象是立體視覺中的一種錯覺，它反映出立體視覺不完全由網膜影像的像差來決定，而是包含像差訊息的擴散、內插與單眼可見之表面形狀經驗的輸入等複雜因素在內之運作，因此該現象成爲理解視覺表徵與運作的重要工具之一。但是，視覺系統沒有理由只爲了單一功能而發展出大範圍的像差擴散與內插運作。事實上，已有許多視覺研究者發現，視覺系統隨時隨地都有大範圍的填整運作（completion）發生，例如霓虹色彩擴散（Bressan, Mingolla, Spillmann, & Watanabe, 1997）、Craik-O'Brien-Cornsweet錯覺現象（Pessoa & Neumann, 1998）、錯覺輪廓（Peterhans & Von der Heydt, 1989）、盲點填整感受（Ramachandran, 1992, 1993）等等。這些在單眼即可發生之填整運作，多數已找到其神經生理上的實質訊息填補過程，亦即產生填整的空間內，有相對應於知覺感受的神經活動（Baumgartner, Von der Heydt, & Peterhans, 1984; Davey, Maddess & Srinivasan, 1998; Peterhans & Von der Heydt, 1989）。即便在網膜上無感光細胞的盲點區域，其單眼的直線填整感受與初級視皮質區內，相對應於盲點區之同側眼非盲點對應皮質區（ipsilateral corresponding non-blind-spot visual cortex）的神經活動，亦滿足知覺感受與神經活動同構的假設（neural-perceptual isomorphism; Gattass et al., 1992）。

像差擴散與填補極有可能是知覺填整的多種機制之一，不過到目前爲止，雙眼深度訊息的填整運作只有現象上的展示證據，尚未找到實質訊息填補的神經活動，例如像差擴散（Yang & Blake, 1995）與立體攫取現象。基於從2D到3D訊息處理的同構性假設，單眼的圖形既會被填補起來，則3D的深度訊息也應該被填補，否則人的視野中將會出現一塊塊凹陷的空間。左右兩眼盲點區不重複，故在形狀辨認上不受影響，問題出在像差計算部分，雖可依曲面平滑性原則予以內插，惟盲點太大（6°×4.5°，比中央小窩大），神經系統如何對盲點區作深度的彈性填補，其實是一件不容易研究的課題（Huang & Tang, 1998）。因此在盲點區域內進行心理物理學的3D深度填整研究，也許可以提供另一個窺視像差填補歷程的窗口。

盲點填整機制是一個相當具有爭議的課題，因爲網膜上沒有感光細胞，初級視皮質部也沒有相對應於盲點區的輸入運作，早期神經生理研究認爲，因爲初級視皮質部只接受同側眼之非盲點對應區的網膜輸入（Florence & Kaas, 1992），所以應該沒有任何關於盲點填整之視皮質運作。但是最近的許多研究結果都開始質疑這個論點（Fiorani, Rosa, Gattass, & Rocha-Miranda, 1992; Kawabata, 1982, 1983, 1984; Murakami, 1995; Murakami, Komatsu, & Kinoshita, 1997; Ramachandran, 1992, 1993, 1995; Tripathy & Levi, 1994），這些研究者認爲雖然在解剖上，網膜上的盲點沒有大腦投射區，但是大腦仍會對盲點周圍進行不同於另一眼非盲點對應區的額外處理。這些額外運作是基於盲點存在的事實所引起，不能單純以「視覺系統會忽略盲點」的說法予以解釋，而應正視其背後可能涉入的低階與高階運作特性。

airiti

唐大崙（2000）發現，大腦對於盲點周圍訊息所進行的填整運作處理，包括以下幾項與低階神經運作有關的重要特徵：

1. 盲點區的直線填整感受具有相當程度的認知不可穿透性，認知不可穿透性與低階神經運作模組有關（Fodor, 1983），其推論建立在非視覺因素對直線斷裂機率判斷的ROC曲線變化上，亦即相對於非盲點對應區而言，受試者對於盲點區內直線斷裂機率的指導語操弄很不敏感。
2. 視覺系統可能將盲點區當成永恆的遮蔽物（occluder）看待，與一般的非跨越填整（amodal completion）現象類似，而非跨越填整也涉及快速的低階運作（Rensink & Enns, 1998）。因爲在盲點區周圍所測得的線段對齊差異閾，與非盲點對應區適應圓形遮蔽之後所測得線段對齊差異閾的結果相類似，卻與非盲點對應區未適應圓形遮蔽的結果有顯著差異。
3. 盲點周圍所對應的皮質區可能沒有縫合，因此盲點周圍的刺激可以對另一眼非盲點對應區內的判斷，產生跨眼的交互作用（Tripathy & Levi, 1994）。
4. 產生盲點填整的關鍵元素可能是位於盲點周圍的、對稱分布的亮度訊息，而非線段方位訊息。此推論建立在De Weerd、Desimone與Ungerleider（1998）的動態質地背景填補的實驗典範上，如圖18，發現只要視野上下兩區域亮度相同，不論質地差異爲何，即使在盲點區上呈現一塊大於盲點區的靜止灰色方塊，此灰色方塊仍能快速被背景質地填滿而感覺到消失。反之，在視野上下區域亮度不等的情境下，該灰色方塊便很難感受到消失。
5. 盲點區內似乎也對深度訊息進行了填整。此推論建立在橫跨20度紅綠隨機點立體圖的觀察上，如圖19與圖20所示，不論凝視平面比背景深度高或低，受試者對於目標平面（位於其中一眼的盲點範圍內）與凝視平面間的相對深度判斷，顯著受到背景平面深度訊息的影響，而多判斷爲與背景等高度。雖然

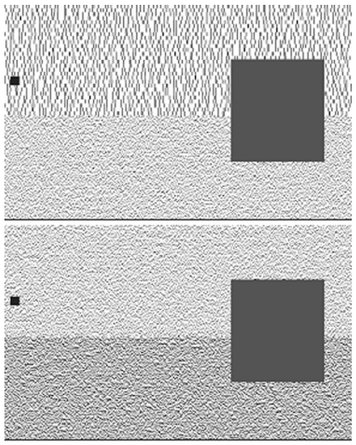

圖18：上圖在凝視點（左側小方塊）上下視野呈現動態的、但是亮度接近的非均質質地，則盲點區置放的大型灰色方塊仍容易消失。下圖在凝視點上下視野呈現動態的、但是亮度不相同質地，盲點區置放的大型灰色方塊就不容易消失

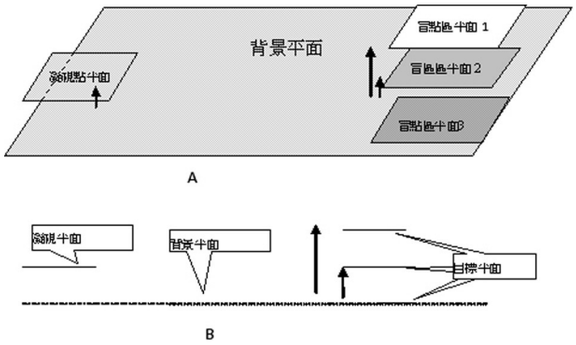

圖19：唐大崙與黃榮村（2000）的實驗刺激圖形之相對深度關係圖。此圖所繪之凝視平面比背景高，盲點區圖形平面有比凝視區高、低、一致三種變化。A圖為平面正視圖，B圖為縱剖面圖。箭號方向表示上浮的方向，箭號長度表示上浮高度

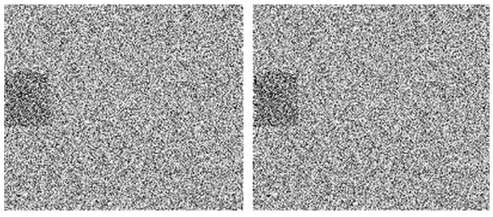

圖20：唐大崙與黃榮村（2000）的實驗刺激圖例。原為紅綠點立體圖，但為了印刷方便，轉製成兩張黑白隨機點立體圖。圖中較黑的方塊區為凝視區平面，當雙眼視線交叉觀看，產生融合之後，凝視區有一個方形與數字浮出，在距離該方形右邊15度視角位置則有另一塊小方形（目標平面）浮出

airiti

盲點內根本無法計算像差訊息，但是受試者仍然不會因爲喪失深度感而隨機亂猜，顯然視覺系統也對盲點周圍之深度訊息進行了塡整處理（唐大崙、黃榮村，2000）。

目前關於盲點塡整（completion）可能的機制，雖仍有爭議，但是盲點塡整可能同時涉及低階神經運作與高階認知推論的過程，已有前述發生在盲點周圍空間表徵的測量證據，盲點對應空間內的單眼主觀報告之觀察，與非盲點對應區內之皮質神經運作等證據支持。雖然強調低階計算的研究者，仍可基於視覺系統以簡馭繁的演化原則猜測，並推論可在盲點周圍訊息啓動之低階神經運作的基礎上，運用與其他訊息塡補歷程類似的神經機制，例如亮度訊息與像差訊息的內插擴散，使個體快速感受到塡整結果。惟到目前爲止，我們仍然很難排除盲點塡整感受具有認知推論的可能性。

結論

本文綜合評述1983-2000年間我們在台大心理系實驗室所進行有關立體視覺的研究，旨在針對Marr（1982）所開啓之計算視覺理論，提出直接之測試與修正，並依「計算視覺理論及其測試」、「神經機制與雙眼像差之獨立性與優先性」、與「立體視覺中的高階互動效應」三項子題，分別簡述並驗證相關議題，所得結論如下：

1. 能夠有效回復立體視覺之低階配對元素的充分性，以及對應與計算機制的唯一性，皆尙有可供探討之空間，以不同眼動模組擷取並統整影像像差，並善用方位訊息，應爲一可行作法。計算視覺理論中若干基本假設，如網膜元素尋找雙眼配對時所考量的「相容性」限制條件，顯有修正之必要。
2. 雙眼像差在立體視覺中具有特殊之優先性；輪廓（包括真實與錯覺兩類）之神經激發，亦應具有影響知覺結果之獨立功能。錯覺顏色或其他次級知覺，皆受到像差與輪廓之規範。在立體視覺中，其處理及影響之先後似可依序排列如下：像差→輪廓→顏色及其他次級知覺。惟單眼界面線索之清晰度，有助於雙眼像差界面之形成（圖11-13），該結果顯示單眼的輪廓訊息也強烈地影響像差計算的難易程度。由此看來，該一排列順序尙有待更進一步之驗證，以資確認。
3. 高階調控現象，乃是立體視覺研究中難以迴避之重大問題。在形狀與不確定像差對立體攫取之影響、漢字背景對錯覺輪廓之約束力、單眼線索在像差產生作用後對深度知覺之影響，以及在盲點區所進行之深度塡補等項上，皆可看到高階因素介入互動的可能性。高階調控之影響方式相當多元，包括有不涉及像差計算之雙眼配對與融合，有時則在像差計算之後開始影響，若干情形亦可能在像差計算之前或之中發生作用。有些則可能出現在像差塡補與深度擴散的現象中。這些發生在不同類別知覺過程中的高階調控，是否涉及不同之神經運作機制，值得進一步研討。

這些結論對計算視覺理論與人類深度知覺研究，應可提供進一步修正與參考之依據。以電腦模擬方式固然可以探討所提出之計算理論的實踐，是否可逼近人類視覺系統的表現，但不見得就能代表人類視覺系統內在真正之計算過程。像差雖有優先性，但高階歷程確實會對立體視覺或深度知覺產生特別的影響，具一致性的單眼界面線索也會促進雙眼配對，而儘速無誤的產生立體知覺。像差固然重要，但是像差只不過是視覺系統日理萬機中的一小部分訊息而已，視覺系統爲了幫助個體對環境建構穩定的表徵，以迅速做出必要行動，可能演化出一套共通的、大幅度的交換傳遞視覺訊息的模式，可同時針對像差、色彩、亮度、方位與運動等訊息，進行類似跨越空間與跨越時間的擴散塡補。因此，一個完備的計算視覺理論，應同時考慮像差計算與其他視覺訊息之間的交互作用。

計算視覺理論著力最深者厥爲前行投射（feed-forward projection），但大腦動力學的研究指出，有愈來愈多的證據說明迴饋（feedback）不祇有其功能上之重要性，亦有其結構與神經通路上之建置。晚近熱門研究議題之一爲有關跨越不同腦區之「關聯激發」，即需特別考量迴饋機制，方有可能說明實驗結果。本文所提之高階調控現象，雖經常難以將其機制明確化，但其實也應具有迴饋機制之運作在內。

在解釋錯覺輪廓之立體攫取現象時，Ramachandran（1986）認爲在背景圖案深度結構具有多重可能性的情況下，具有雙眼像差的錯覺輪廓可產生明確的深度，而促使錯覺輪廓內的圖案形成相同的深度，Ramachandran並提出其對應的神經機制，可能爲對錯覺輪廓與像差敏感的V2細胞迴饋到對像差敏感的V1細胞，此項論點屬於較少數強調廻饋的理論觀點。

airiti

近年認知神經科學的研究，似乎從以往著重於探討前行投射，逐漸轉而強調迴饋聯接（feedback connection）的重要性。例如Goebel與Weerd（2009）對於填補歷程之神經生理機制的討論與模擬，即提出V4 迴饋到V2與V1所形成的返復迴圈（recurrent loop），可能與填補歷程的運作有關，並且填補歷程中的擴散作用以及邊界（boundary）的限制作用，可能是發生在V2。Komatsu（2006）回顧填補歷程之神經機制的研究，亦認為有相當多的證據指出在低層視覺區（early visual areas）即可測量到填補作用之神經反應，例如V1的第六層，推論填補歷程應是涉及低層與高層視覺區之間的返復前行迴饋迴圈（recurrent feedforward-feedback loop）。然而Goebel與Weerd的理論尚未論及立體視覺下的填補歷程，Komatsu亦未提出詳細的理論，如何將返復迴圈觀點應用於處理立體視覺下的知覺問題仍未明朗。返復迴圈的概念除了不同於純粹前行模式，亦不同於強調每一功能獨立地由特定模組加以處理的模組取向。但是對計算視覺研究而言，迴饋觀念雖已具有相當的神經基礎，惟所涉及之非線性特質與過多需調整之動態參數，在數學處理上有相當難度存在，因此該一發展對於傳統的計算理論究竟會產生什麼影響，以及影響到那些層次，值得繼續觀察及參與進一步之研究。

參考文獻

林麗明（1992）：《單眼形狀線索對雙眼影像配對歷程的影響》。國立台灣大學心理學研究所，碩士論文。[Lin, L. M. (1992). *The effect of monocular cue on matching process of stereopsis*. Unpublished master's thesis, National Taiwan University.]

唐大崙（1994）：《從立體攫取與透明感現象看單、雙眼形狀所扮演的角色》。國立台灣大學心理學研究所，碩士論文。[Tang, D. L. (1994). *Form as an emergent representation: Effects of monocular and binocular form on stereo capture and transparency experience*. Unpublished master's thesis, National Taiwan University.]

唐大崙（2000）：《盲點填整的運作特性》。國立台灣大學心理學研究所，博士論文。[Tang, D. L. (2000). *Operational characteristics of blind-spot completion*. Unpublished doctoral dissertation, National Taiwan University.]

唐大崙、黃榮村（1994）：《深度判斷之高階效應：以立體雙穩圖形為例》。中國心理學會年會報告論文，台北市。[Tang, D. L., & Huang, J. T. (1994). *High level effect of depth judgment: Example from bistable stereograms*. Oral presentation article on Taiwanese Psychological Association Annual Meeting, Taipei.]

唐大崙、黃榮村（2000）：〈盲點區域之深度訊息填補〉。見陳烜之、梁覺（主編）：《邁進中的華人心理學》， 頁57-75。香港：香港中文大學出版社。[Tang, D. L., & Huang, J. T. (2000). Exploring the possibility of depth interpolation on blind-spot. In H. C. Chen & K. Leung (Eds.), *Chinese psychology in progress* (pp. 57-75). Hong Kong: Chinese University of Hong Kong.]

袁之琦（1986）：《深度效應下錯覺輪廓的形成》。國立台灣大學心理學研究所，碩士論文。[Yuan, J. C. (1986). *Stereoscopic effect on the formation of illusory contour*. Unpublished master's thesis, National Taiwan University.]

袁之琦（1988）：《圖形統計特性與界面之深度效應》。國立台灣大學心理學研究所，博士班獨立研究論文。[Yuan, J. C. (1988). *The effect of statistical texture and monocular surface cue on stereoscopic processing*. Unpublished doctoral dissertation, National Taiwan University.]

袁之琦、黃榮村（1992）：〈統計質地平面偵測與單眼界面線索的立體效應〉。《應用心理學報》，*1*，93-129。[Yuan, J. C., & Huang, J. T (1992). The detection of statistical texture surface and how the monocular boundary cues involved in the stereopsis formation. *Chinese Journal of Applied Psychology*, *1*, 93-129.]

陳瑞雲（1991）：《立體視覺下錯覺輪廓之消息處理》。國立台灣大學心理學研究所，碩士論文。[Chen, R. Y. (1991). *Information processing of illusory contour in stereopsis*. Unpublished master's thesis, National Taiwan University.]

黃淑麗（1993）：《錯覺顏色產生與深度調節機制之探討》。國立台灣大學心理學研究所，博士論文。[Huang, S. L. (1993). *The emergence of illusory color under stereoscopic modulation*. Unpublished doctoral

airiti

dissertation, National Taiwan University. Also appeared in Huang, S. L., & Huang, J. T. (1993). Effects of boundary and binocularity on the emergence of illusory color. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, *35*, 1665.]

黃淑麗、黃榮村（1989）：〈雙眼融合中圖形與背景分離的空間頻率效應〉。《1989年電腦視覺、圖學及影像處理研討會論文集》，59-71。台北：中央研究院。[Huang, S. L., & Huang, J. T. (1989). Effects of spatial frequency analysis in separating figure from ground under binocular fusion. *Proceedings of 1989 Workshop on Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 59-71. Taipei: Academia Sinica.]

櫻井正二郎（1985）：《立體視覺與網膜影像的配對歷程》。國立台灣大學心理學研究所，碩士論文。[Sakurai, S. (1985). *Stereopsis and matching process of retinal images*. Unpublished master's thesis, National Taiwan University.]

櫻井正二郎（1992）：《立體視覺下雙眼配對的神經模型》。國立台灣大學心理學研究所，博士論文。[Sakurai, S. (1992). *A neural model for stereoscopic binocular matching*. Unpublished doctoral dissertation, National Taiwan University.]

櫻井正二郎、黃榮村（1986）：〈有關假目標問題之雷射試驗〉。《中華心理學刊》，*27*，105-112。[Sakurai, S., & Huang, J. T. (1986). Laser experiment on the false-target problem. *Chinese Journal of Psychology*, *27*, 105-112.]

Barlow, H. B. (1972). Single units and sensation: A neuron doctrine for perceptual psychology. *Perception*, *1*, 371-394.

Baumgartner, G., Von der Heydt, R., & Peterhans, E. (1984). Anomalous contours: A tool in studying the neurophysiology of vision. *Experimental Brain Research Supplement*, *9*, 413-419.

Breitmeyer, B. G., & Ganz, L. (1976). Implications of sustained and transient channels for theories of visual pattern masking, saccadic suppression, and information processing. *Psychological Review*, *83*, 1-36.

Bressan, P., Mingolla, E., Spillmann, L., & Watanabe, T. (1997). Neon color spreading: A review. *Perception*, *26*, 1353-1366

Campbell, F. W., & Robson, J. G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, *197*, 551-566.

Crick, F. (1994). *The astonishing hypothesis*. New York: Touchstone.

Davey, M. P., Maddess, T., & Srinivasan, M. V. (1998). The spatiotemporal properties of the Craik-O'Brien-Cornsweet effect are consistent with "filling-in". *Vision Research*, *38*, 2037-2046.

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.

Florence, S., & Kaas, J. (1992). Ocular dominance columns in area 17 of old world macaque and talapoin monkeys: Complete reconstruction and quantitative analyses. *Visual Neuroscience*, *8*, 449-462.

Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA: MIT press.

Gattass, R., Fiorani, M., Jr., Rosa, M. G. P., Pinon, M. C. G. P., Barbosa de Sousa, A. P., & Soares, J. G. M. (1992). Visual responses outside the classical receptive field in primate striate cortex: A possible correlate of perceptual completion. In R. Lent (Ed.), *The visual system from genesis to maturity* (pp. 233-244). Boston: Birkhaeuser.

Ginsberg, A. P. (1982). On a filter approach to understanding the perception of visual form. In D. G. Albrecht (Ed.), *Recognition of pattern and form* (pp. 175-192). New York: Springer-Verlag.

Goebel, R., & de Weerd, P. (2009). Perceptual filling-in: From experimental data to neural network modeling. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences III* (4th ed.). Cambridge, MA: MIT Press.

Huang, J. T., & Sakurai, S. (1987). *The plausibility of cooperative algorithm in human stereoscopic processing*. Paper presented at the 1987 Workshop on Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Taipei.

airiti

Huang, J. T., & Tang, D. L. (1998). Disparity interpolation in the blind spot. *Perception*, *27*, S101.

Huang, J. T., & Wang, M. Y. (1992). From unit to gestalt: Perceptual dynamics in recognizing Chinese characters. In H. C. Chen & O. J. L. Tzeng (Eds.), *Language processing in Chinese* (pp. 3-35). Amsterdam: North-Holland.

Huang, J. T. (1995). Visual perception in Chinese people. In M. H. Bond (Ed.), *Handbook of Chinese psychology* (pp. 15-29). Hong Kong: Oxford University Press.

Huang, S. L., & Huang, J. T. (1994), Effects of boundary and binocularity on the emergence of illusory color. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *35*, 1665.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (2005). *Brain and visual perception: The story of a 25-year collaboration*. New York: Oxford University Press.

Julesz, B. (1962). Visual pattern discrimination. *IRE Transactions on Information Theory*, *8*, 84-92.

Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.

Julesz, B. (1975). Experiments in the visual perception of texture. *Scientific American*, *232*, 34-43.

Julesz, B., Gilbert, E. N., Shepp, L. A., & Frisch, H. L. (1973). Inability of humans to discriminate between visual textures that agree in second-order statistics. *Perception*, *2*, 391-405.

Kawabata, N. (1982). Visual information processing at the blind spot. *Perceptual & Motor Skills*, *55*, 95-104.

Kawabata, N. (1983). Global interactions in perceptual completion at the blind spot. *Vision Research*, *23*, 275-279.

Kawabata, N. (1984). Perception at the blind spot and similarity grouping. *Perception & Psychophysics*, *36*, 151-158.

Klymenko, V., & Weisstein, N. (1986). Spatial frequency differences can determine figure-ground organization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *12*, 324-330.

Komatsu, H. (2006). The neural mechanisms of perceptual filling-in. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*, 220-231.

Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1987). Segregation of form, color, movement and depth: Anatomy, physiology, and perception. *Science*, *240*, 740-749.

Logan, B. F., Jr. (1977). Information in the zero-crossings of bandpass signals. *Bell System Technical Journal*, *56*, 487-510.

Maffei, L., Fiorentini, A., & Bisti, S. (1973). Neural correlate of perceptual adaptation to gratings. *Science*, *182*, 1036-1038.

Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. Cambridge, MA: MIT Press. [Reprinted with Shimon Ullman's foreword and Tomaso Poggio's afterword in 2010.]

Marr, D., & Poggio, T. (1976). Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, *194*, 283-287.

Marr, D., & Poggio, T. (1979). A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London*, *204*, 301-328.

Marr, D., Poggio, T., & Ullman, S. (1979). Bandpass channels, zero-crossings, and early visual information processing. *Journal of the Optical Society of America*, *69*, 914-916.

Mather, G. (1989). The role of subjective contours in capture of stereopsis. *Vision Research*, *29*, 143-146.

Mayhew, J. E. W., & Frisby, J. P. (1976). Rivalous texture stereograms. *Nature*, *264*, 53-56.

Murakami, I. (1995). Motion aftereffect after monocular adaptation to filled-in motion at the blind spot. *Vision Research*, *35*, 1041-1045.

Murakami, I., Komatsu, H., & Kinoshita, M. (1997). Perceptual filling-in at the scotoma following a monocular retinal lesion in the monkey. *Visual Neuroscience*, *14*, 89-101.

Nakayama, K., Shimojo, S., & Ramachandran, V. S. (1990). Transparency: Relation to depth, subjective contours, luminance, and neon color spreading. *Perception*, *19*, 497-513.

Pantle, A., & Sekuler, R. (1968). Size-detecting mechanisms in human vision. *Science*, *162*, 1146-1148.

airiti

Pessoa, L., & Neumann, H. (1998). Why does the brain fill in? *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 422-424.

Peterhans, E., & von der Heydt, R. (1989). Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex: II. Contours bridging gaps. *Journal of Neuroscience*, *9*, 1749-1763.

Poggio, G. F. (1984). Processing of stereoscopic information in primate visual cortex. In G. M. Edelman, W. E. Gall, & W. M. Cowan (Eds.), *Dynamic aspects of neocortical function* (pp. 613-635). New York: Wiley.

Ramachandran, V. S. (1986). Capture of stereopsis and apparent motion by illusory contours. *Perception and Psychophysics*, *39*, 361-373.

Ramachandran, V. S. (1992). Blind spots. *Scientific American*, *266*, 86-91.

Ramachandran, V. S. (1993). Filling in gaps in perception: II. Scotomas and phantom limbs. *Current Directions in Psychological Science*, *2*, 56-65.

Ramachandran, V. S. (1995). Filling in gaps in logic: Reply to Durgin et al. *Perception*, *24*, 841-845.

Regan, D., Frisby, J. P., Poggio, G. F., Schor, C. M., & Tyler, C. W. (1990). The perception of stereodepth and stereomotion. In L. Spillman & J. S. Werner (Eds.), *Visual perception*. San Diego, CA: Academic Press.

Rensink, R. A., & Enns, J. T. (1998). Early completion of occluded objects. *Vision Research*, *38*, 2489-2505.

Sakurai, S., & Huang, J. T. (1993). *A stereo-finding algorithm based on an eye-movement-driven disparity-tuning strategy*. Paper presented at the 10th Conference of the Japanese Association of Cognitive Science, Tokyo.

Stevens, K. A. (1983). Evidence relating subjective contours and interpretations involving interposition. *Perception*, *12*, 491-500.

Stromeyer, C. F., III, & Julesz, B. (1972). Spatial-frequency masking in vision: Critical bands and spread of masking. *Journal of the Optical Society of America*, *62*, 1221-1232.

Tripathy, S. P., & Levi, D. M. (1994). Long-range dichoptic interactions in the human visual cortex in the region corresponding to the blind spot. *Vision Research*, *34*, 1127-1138.

Ullman, S. (1978). Two dimensionality of the correspondence process in apparent motion. *Perception*, *7*, 683-693.

Ullman, S. (1979). *The interpretation of structure from motion*. Cambridge, MA: MIT Press.

Von der Heydt, R., Peterhans, E., & Baumgartner, G. (1984). Illusory contours and cortical neuron responses. *Science*, *224*, 1260-1262.

Yang, Y., & Blake, R. (1995). On the accuracy of surface reconstruction from disparity interpolation. *Vision Research*, *35*, 949-960.

Yuan, J. Y., & Huang, J. T. (1995). Different monocular and binocular boundary cues in stereo matching. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *36*, 366.

03-唐大崙.indd 19 2011/3/18 下午 16:19:41

airiti

The Interaction of Low-Level Computation and High-Level Modulation in Human Stereopsis

Jong-Tsun Huang,[1] Da-Lun Tang,[2] Jy-Chyi Yuan,[3] Shwu-Lih Huang,[4] and Shojiro Sakurai[5]

[1]Graduate Institute of Neural and Cognitive Sciences, China Medical University

[2]Department of Mass Communication, Tamkang University

[3]Department of Psychology, Fu-Jen Catholic University

[4]Department of Psychology & Research Center for Mind, Brain and Learning, National Chengchi University

[5]Department of Psychology, Kaohsiung Medical University

The present article reviews a set of studies that were conducted in the period of 1983-2000 for a test of the evolving computational vision theory after the posthumous publication of Marr's (1982) classic on vision. Two pillars of the main architecture, namely, the spatial correspondence assumption and the fundamental assumption of stereopsis, with their realization into a successful implementation of cooperative algorithm were briefly described and put into a series of critical tests. A summary evaluation was suggested to highlight the plausibility and inadequacies concerning an application of retinal matching constraints (especially, the constraint of compatibility) in human stereoscopic processing. An alternative approach based on the operation of conjunctive and vergent eye movements in finding hidden disparities has been simulated to show its successful resolution of visual recovery, and henceforth, inverse optics. Further experimental evidence were provided to show the operational precedence of disparity and contour information with a compromise to the modulation of high-level factors in human stereoscopic processing. High-level influence could be brought into effect to resist the stereo capture to a positive disparity plane where residing the illusory contour while a Chinese character was resting on a zero-disparity background. A similar result was also observed in a stereoscopic experiment on bistable figure. Monocular cues were shown to be effectively modulating the disparity computation. The study also maintains that a cognitive interpretation can not be excluded in the discussion of disparity interpolation in the blind-spot area. The study therefore proposes that an evolving computational vision theory should better take feedback mechanism into account to deal with the intricate interaction of low-level computation and high-level modulation.

Keywords: *computational vision theory, high-level modulation, inverse optics, monocular and binocular cues, stereopsis*