

國立交通大學應用藝術研究所

博士論文

3D 影像之立體感與舒適度探討

Stereo Effect and Visual Comfort of 3D Images



指導教授：陳一平 教授

研究生：林智祥

中華民國 103 年 6 月

國立交通大學應用藝術研究所

博士論文

3D 影像之立體感與舒適度探討

Stereo Effect and Visual Comfort of 3D Images



研究指導委員會

莊明振 教授

徐明景 教授

陳一平 教授

孫慶文 教授

謝翠如 教授

中華民國 103 年 6 月

3D 影像之立體感與舒適度探討

學生：林智祥

指導教授：陳一平博士

國立交通大學應用藝術研究所

摘 要

3D 電影在近幾年開始受歡迎與流行，也導致一種新的症狀產生，稱做 3D 不適症或是阿凡達暈眩症。目前解釋的說法多偏重設備硬體的缺失，或是觀者生理層面的差異；卻較少討論到影像本身，是否因為 3D 影像製作過程的問題，才誘發人類視覺與大腦的不適。本研究有二部分假設：一是誇大眼睛網膜像差或是忽略人眼肌肉運動時，可能會產生不適；二是傳統平面影像的攝影技巧與美學，完全移植到 3D 立體影像而不修正時，可能也會造成不適。研究在這假設底下規劃了四個實驗：(1)像差距離實驗；(2)聚合對焦實驗；(3)焦距與景深實驗；(4)亮度與景深實驗。

研究結果發現：(1)像差距離是眼睛不適的主因；(2)最佳立體效果與最佳舒適度無法兼顧；(3)輻輳運動可有效提高視覺舒適度；(4)攝影焦距數值與景深模糊範圍成正比；(5)環境亮度下降，景深模糊範圍寬容度則會增加；(6)景深對視覺舒適度無影響。

本研究所量測出的舒適區間與立體效果區間之參數範圍，可以供 3D 材料製作者參考，以在立體感與舒適度之間取得最佳平衡。

關鍵字：3D 不適症、立體視覺、雙眼像差、輻輳運動、景深。

Stereo Effect and Visual Comfort of 3D Images

Student:Chih-Hsinag Lin

Advisor:I-Ping Chen

**Institute of Applied Arts
National Chiao Tung University**

Abstract

As technology advances, 3D movies enjoy a tremendous boost in recent years. With its popularity, a new symptom of 3Dache or Avatarh3dache emerges as well. Most studies addressing this issue placed their emphasis on finding plausible solutions at the display end. This study takes a new perspective by focusing on the production end for solving the problem. Two groups of possible causes are proposed and will be thoroughly examined. First, exaggerating the retinal disparity or ignoring the oculomotor cues may cause visual discomfort. These factors are related to the geometry of camera-setup. The second group pertains to visual effects of assorted kinds. Visual discomforts might be induced by applying traditional 2D photographic techniques to 3D situations blindly. Four experiments are designed to evaluate the effects of these factors: (1) Inter-camera distance; (2) vergence angle of the camera; (3) Focal length and depth of field; (4) Lightness and depth of field.

Our results indicate that: (1) Unnatural disparity is the main cause of eye discomfort; (2) There is some trade-off between three-dimensional effects and visual comfort. These two parameters cannot be optimized simultaneously; (3) Convergence can improve visual comfort; (4) The degree of depth of field in a 3D shooting should be set according to the focal length of the lens; (5) As the ambient

brightness decreases, one should reduce the depth of field accordingly to achieve good visual effect; (6) Depth of field has no effect on visual comfort.

Keywords: 3dache, Binocular disparity, Binocular vision, Convergence, Depth of field



致 謝

感謝交大應藝所。

感謝我最敬愛的指導老師 陳一平教授。

感謝我的論文指導委員們 莊明振教授、許峻誠教授、

徐明景教授、孫慶文教授、謝翠如教授。

感謝應藝所老師鼓勵支持 張恬君教授、賴雯淑教授。

感謝不斷關心我的家人們 老爸、老媽、老姊、老婆、老婆的爸媽。

感謝精神糧食我的朋友們 明鴻、小公主、愛堂、之維、VIC。



目錄

第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 論文研究架構	4
1.4 研究限制	5
第二章 文獻探討	7
2.1 立體成像原理在生理上的研究	7
2.1-1 眼球的運動與對焦	7
2.1-2 雙眼像差的影像辨識處理流程	9
2.1-3 瞳孔與景深效果	11
2.1-4 立體視覺與運動知覺在腦部中樞的研究	13
2.2 立體成像原理在硬體上的發展	15
2.2-1 雙眼像差與立體鏡	15
2.2-2 分色立體成像技術：彩色眼鏡與波長多路式系統	16
2.2-3 分光立體成像技術：偏振光技術	17
2.2-4 主動式(Active viewers)3D 眼鏡	19
2.2-5 裸眼式 3D 成像技術	19
2.3 立體成像原理在舒適度的相關研究	23
2.3-1 視覺不適	23
2.3-2 像差與輻輳問題	24
2.3-3 景深與模糊問題	28
第三章 研究方法	30
3.1 實驗設備與環境規劃	30
3.2 實驗受測者規畫與立體視覺敏感度測試	32
3.3 第一部分實驗 (一)：像差距離實驗	34
3.3-1 實驗概念說明	34
3.3-2 實驗基本設定	34
3.3-3 攝影幾何條件的設定	36
3.3-4 實驗方法	38

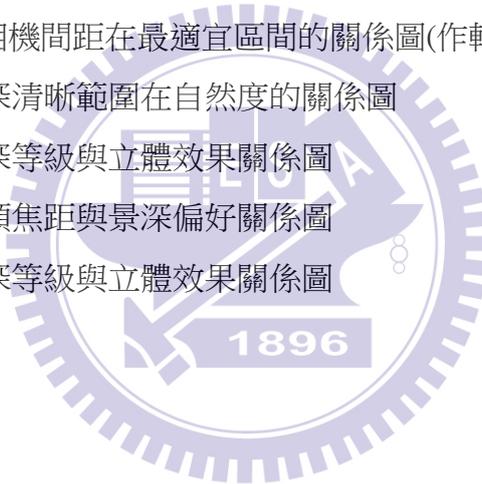
3.3-5 前測實驗與討論	38
3.3-6 正式實驗刺激	39
3.4 第一部分實驗 (二)：聚合對焦實驗	42
3.4-1 實驗概念說明	42
3.4-2 實驗基本設定	42
3.4-3 實驗刺激	43
3.4-4 實驗方法	45
3.5 第二部分實驗 (一)：焦距與景深實驗	46
3.5-1 實驗概念說明	46
3.5-2 實驗基本設定	46
3.5-3 實驗刺激	49
3.5-4 實驗方法	49
3.5-4-1 實驗方法 (一) 調整法	49
3.5-4-2 實驗方法 (二) 配對比較法	50
3.6 第二部分實驗 (二)：亮度與景深實驗	53
3.6-1 實驗概念說明	53
3.6-2 實驗基本設定	54
3.6-3 實驗刺激	55
3.6-4 實驗方法	56
第四章 結果與討論	57
4.1 像差距離實驗結果	57
4.2 聚合對焦實驗結果	59
4.3 整合像差距離與聚合對焦實驗的討論	61
4.4 焦距與景深實驗	68
4.5 亮度與景深實驗	76
4.6 整合焦距、亮度與景深實驗的討論	79
第五章 結論	82
參考文獻	90

圖目錄

圖 1.1 研究架構圖	5
圖 2.1 眼球眼外肌肉的聚合運動	7
圖 2.2 立體影像原理	9
圖 2.3 隨機立體圖(RDS)範例	10
圖 2.4 自然環境的光線強度變化與瞳孔的孔徑變化關係圖	12
圖 2.5 視覺 What Where/How 兩路徑示意圖	14
圖 2.6 布魯斯特立體鏡(Brewster's stereoscope)	15
圖 2.7 波長多路式(wavelength multiplexing)的分色原理	17
圖 2.8 未偏極化(unpolarized)的光線通過不同角度偏振片的效果	17
圖 2.9 分光立體成像技術	18
圖 2.10 螺旋偏振分光技術	18
圖 2.11 全像式(holographic type)3D 立體技術	20
圖 2.12 體積式(volumetric type)3D 立體成像技術展示台結構	20
圖 2.13 a.柱狀透鏡(lenticular screen) b.視差遮屏(Parallax barrier)	21
圖 2.14 3M 的指向背光(directional backlight)技術	22
圖 2.15 像差角與不同像差示意圖	25
圖 2.16 Panum 融合區示意圖	27
圖 2.17 模糊圖像對協調對焦與輻輳運動影響之研究刺激圖	29
圖 3.1 實驗用投影機架設偏光鏡的情況(左圖)；實驗用的立體眼鏡	31
圖 3.2 實驗環境與專用螢幕	31
圖 3.3 實驗環境的視角設定	32
圖 3.4 立體視覺能力測試工具「Stereo Fly Test」	32
圖 3.5 立體視覺能力測試工具九個等級的基本設定	33
圖 3.6 3D 軟體中攝影機拍攝不同距離目標物的詳細設定	35
圖 3.7 3D 環境中目標物的大小設定	36
圖 3.8 兩攝影機距離控制圖(無作輻輳運動)	37
圖 3.9 針對不同距離拍攝矩形目標物的刺激畫面	37
圖 3.10 3D 場景地板與九件刺激目標物的整體效果示意圖	40
圖 3.11 像差距離實驗三種距離刺激像差全距的示意圖	41

圖 3.12	a.SONY 為阿凡達電影開發的攝影機 b.家用的 3D 攝影機 (Panasonic AG-3DA1)	42
圖 3.13	兩攝影機距離控制圖(作輻輳運動)	43
圖 3.14	在鏡頭模擬輻輳運動的條件下，像差距離實驗三種距離刺 激像差全距的示意圖	44
圖 3.15	不同距離目標物以不同拍攝方法的實驗畫面	45
圖 3.16	3D 軟體中兩台攝影機間距與目標物距離的設定	47
圖 3.17	實驗畫面的三種焦距與視角(FOV)設定圖	47
圖 3.18	不同焦距下景深調整最深(清晰範圍最大)與最淺(清晰範圍	48
圖 3.19	三種不同焦距與三種複雜度目標物示意圖	49
圖 3.20	九種實驗刺激最立體化的分布圖(調整法)	51
圖 3.21	配對比較法的 15 種實驗刺激	52
圖 3.22	配對比較法實驗刺激在螢幕上的設定畫面(水平視角 55	53
圖 3.23	光度計 PR650	54
圖 3.24	三種明度與三種焦距組合的實驗刺激示意圖(編號用於對	55
圖 4.1	不同距離最佳立體效果數值統計表(無輻輳運動)	57
圖 4.2	不同距離最佳舒適度數值統計表(無輻輳運動)	58
圖 4.3	不同距離不舒適起始點數值統計表(無輻輳運動)	59
圖 4.4	不同距離最佳立體效果數值統計表(輻輳運動)	59
圖 4.5	不同距離最佳舒適度數值統計表(輻輳運動)	60
圖 4.6	不同距離不舒適起始點數值統計表(輻輳運動)	61
圖 4.7	輻輳運動與最佳立體效果關係圖表	61
圖 4.8	輻輳運動與最佳舒適度關係圖表	63
圖 4.9	輻輳運動與不舒適起始點關係圖表	63
圖 4.10	最佳立體效果與最佳舒適度關係圖表	65
圖 4.11	最佳立體效果與不舒適起始點關係圖表	65
圖 4.12	無輻輳運動下舒適度臨界值相關分析結果	67
圖 4.13	輻輳運動下舒適度臨界值相關分析結果	67
圖 4.14	不同焦距景深自然度的次數長條圖	69
圖 4.15	攝影焦距 100mm 景深自然度的累積次數圖	70

圖 4.16 攝影焦距 50mm 景深自然度的累積次數圖	70
圖 4.17 攝影焦距 25mm 景深自然度的累積次數圖	71
圖 4.18 實驗刺激最佳立體效果心理量表	75
圖 4.19 三種攝影機焦距與最佳立體效果比較圖	75
圖 4.20 高明度下景深自然度差別閾圖	77
圖 4.21 中明度下景深自然度差別閾圖	77
圖 4.22 低明度下景深自然度差別閾圖	77
圖 4.23 不同明度下景深最佳自然度主觀相等點 PSE 比較圖	78
圖 4.24 廣角大光圈的攝影作品(24/1.4 鏡頭)	80
圖 5.1 目標物距離與相機間距在舒適度安全區間的關係圖	83
圖 5.2 目標物距離與相機間距在最適宜區間的關係圖(無輻轉運動)	84
圖 5.3 目標物距離與相機間距在最適宜區間的關係圖(作輻轉運動)	84
圖 5.4 鏡頭焦距與景深清晰範圍在自然度的關係圖	85
圖 5.5 不同焦距下景深等級與立體效果關係圖	86
圖 5.6 不同明度下鏡頭焦距與景深偏好關係圖	87
圖 5.7 不同焦距下景深等級與立體效果關係圖	88



表目錄

表 4.1 輻輳運動與最佳立體效果的單因子變異數分析結果	62
表 4.2 輻輳運動與不舒適起始點的單因子變異數分析結果	64
表 4.3 最佳立體效果與最佳舒適度的單因子變異數分析結果	66
表 4.4 最佳自然度與三組焦距的單因子變異數分析結果	69
表 4.5 攝影焦距 100mm 與三種目標物複雜度 LSD 多重比較圖	71
表 4.6 攝影焦距 50mm 與三種目標物複雜度 LSD 多重比較圖	72
表 4.7 攝影焦距 25mm 與三種目標物複雜度 LSD 多重比較圖	72
表 4.8 實驗刺激最佳立體效果的 F 矩陣(次數矩陣)	73
表 4.9 實驗刺激最佳立體效果的 P 矩陣	73
表 4.10 實驗刺激最佳立體效果的 z 矩陣	74
表 4.11 不同明度下景深最佳自然度的單因子變異數分析結果	79



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

自從電影阿凡達(Avatar)在2009年上映後，掀起了電影與影視器材產業的大革命，以雙眼像差為結構的立體電影，自1950年代後再次風靡了整個視聽娛樂界，根據市場研究公司IHS Screen報導，全球3D電影螢幕數成長率在此年高達250%。主流電影製片商紛紛將各類型的電影改拍成3D立體的版本，電視與體育頻道也躍躍欲試；影視器材業者更是看到一個廣大的商業契機，除了投入新型攝影機的開發外，各種標榜不同重播技術的立體電影院紛紛林立競爭，家用市場更是各科技大廠的兵家必爭之地。

不過在這整個產業急速繁榮擴張時，卻也產出了另一個新的現象或症狀，便是3D立體影像不適症，因為案例多數首見於欣賞電影阿凡達後，因此也被稱為阿凡達暈眩症(Avatar 3d ache)。症狀大部分是「觀眾看過《阿凡達》後出現頭痛、頭暈，甚至想嘔吐的不適症狀，也有觀眾看完電影後突發急性青光眼。」¹

對於觀看3D影像產生的不適症，以往各種專家都在自己領域中提出可能的解釋(見文獻探討)。一部分集中在人類視覺生理層次：認為可能是眼球聚合、眼球肌肉導致視覺疲勞，或是大腦負荷過度的問題；另一部份則集中在播放裝置的硬體分析，認為可能是不習慣長時間戴立體眼鏡，或是放映機器不同步所造成的影響。在這些眾多說法中，很容易發現將問題指向觀者本身生理特質(眼睛或大腦)，不然就是播放硬體設備技術層面的不足，很少關注影片本身的呈現畫面是否就潛藏誘發不適的因子。在針對長時間觀看3D電影影響的研究中，也發現電影內容本身也對不適感有直接的影響(Kawamura et al.,2012)，所以引發這類症狀

¹你有《阿凡達》眩暈症嗎

http://big5.news365.com.cn:82/gate/big5/www.news365.com.cn/jk/201001/t20100114_2590509.htm

的主因，也有可能便是在 3D 影像的製作過程。

從 Wheatstone 製作第一台立體視覺觀看器(stereoscope)讓人們可以從左右兩片畫面產生立體視覺後(Wheatstone, 1838)，雖然經過近二百年的科學發展與生理研究，我們對大腦中立體視覺的演算過程仍未全盤瞭解，只能找到可能的訊號處理區域，與模擬局部的運算過程(詳見文獻探討)；因此電影的影像製作者，自然不可能依據大腦運作的原則來規畫作品，所以許多導演分享拍攝經驗時，都只能邊拍攝邊實驗，或者依循以往 2D 平面電影的經驗規則。其實早期在科學中心播放的立體電影，畫面影像可能就已存在許多問題，只是播放時間短，多半 5~15 分鐘，且觀看人數並不多，因此觀眾不適的感覺沒有被重視；不過現今利用雙眼像差的 3D 立體電影，多半都是娛樂性高、觀影者眾多的主流商業片，時間動輒 2 小時左右，這種不適的感覺經驗便會累加突顯出來。

1.2 研究目的

本研究感興趣的部分不是如何改進 3D 顯示端的技術，好降低視覺不適症的問題，而是針對影片製作端尋找可能造成 3D 不適症的潛藏因素。因為如果沒有在製作端設法改進這些因素，有誘發因素的材料拿到任何類型的顯示平台上播放，不適症的問題同樣會浮現。

在一些研究虛擬實境的文章中可知，原先受試者看著 2D 平面的虛擬環境便會產生不適(cybersickness 或是 simulator sickness)²，不過戴上 3D 立體鏡或是立體頭盔(HMDs)時，不適的感覺會增加許多(Jukka et al., 2006)；有些實驗甚至不適感比 2D 狀況時增強到四倍以上(Kay et al., 1997)。因此相同的畫面，或相同的電影影像，在 2D 平面環境的展示狀況似乎不能直接類推至 3D 的立體環境。不過目

² cybersickness 與 simulator sickness 是由於戴上電腦模擬器時的，影像運動時產生的暈眩不適感。

前導演、攝影師或是電腦影像創作者，依然用舊有的經驗來製作影像，甚至更操弄器材來強化視覺的立體度，可能才是導致許多生理或心理上不適的真正主因。

本研究希望在 3D 立體影像製作過程中，不管是在器材的設定上，攝影的鏡頭操作上，或是動態運動的影像處理上，去實徵測量不適感發生的程度與範圍，以此為依據來建立 3D 立體影像製作過程中的基本(或安全)的閾值範圍，以供未來從事 3D 影像製作人員評估參考，俾能減輕製作過程中可能加諸於觀賞者不適的可能性，創造出畫面呈現與舒適指標共同提升的 3D 立體影像。

設定研究方向前，研究者與二位博班同學，經過立體視覺敏感度測試合格後(見第三章研究方法)，於阿凡達電影播映時觀賞 3DIMAX 版本，實際觀察與記錄電影畫面會產生不適(或不自然)的部分，再進一步以實徵研究的精神規劃研究目標與方向。

藉由多方面的問題分析與實際觀看電影所得的經驗，我們將研究目標分為二個方向：

(1) **3D 攝影機在操作過程是否不同於過往 2D 攝影機，而應該更嚴謹地模擬眼睛運動狀態？**：第一個問題就是兩台攝影機間距該設多少最適合？這個問題在任何 3D 立體的教學資料中都沒有明確的規定，只有說約略以雙眼的間距為設定單位(約 6.5-7.5cm)，不過檢視市面上的 3D 立體影片時，我們可以發現幾乎所有影片的像差設定都遠遠高於這個數值，所以到底在哪個範圍內的數值可以提供足夠的立體感，又可確保觀看的舒適度，是製作 3D 影片的工作者應該仔細計較的問題。

另外眼睛看不同遠近物體時，眼球會向內外轉動聚合(vergence movement)，而目前許多攝影機的設計則是採取固定式的雙鏡頭，無法產生類似眼球轉動的效果，這種差異是否可能在觀者重建立體影像時產生不適？而每個人本身立體視覺

的敏感度，與立體度與舒適度之相關程度如何，也是這部分的研究想要理解的問題。

(2) *適合立體 3D 影像的「鏡頭語言」是否不同於平面 2D 素材，必須更貼近人眼在自然環境中觀看的模式？* 立體電影由於提供觀者左右兩眼不同的影像訊息，這與我們長時間雙眼看外界的情況一致，因此如果鏡頭使用的方式背離習以為常的視覺運作模式，是否可能會讓觀者產生矛盾而感到不適？像人類自然的視覺經驗很少出現一些「專屬於攝影」的技巧，如攝影師常用的大光圈淺景深手法，在不同構圖下是否仍自然？是否可提高 3D 立體感？

另一個問題仍然與景深有關係，即是 3D 電影中日光的環境與夜晚的場景下，攝影師如何處理景深會比較符合視覺的真實效果？由於眼睛中的瞳孔會依據外來光線自動調整大小，而瞳孔的大小又直接決定了景深的範圍，因此這些由電影螢幕傳來的亮度，是否會影響 3D 立體電影的觀者在觀看景深上面的舒適度；另外觀者針對不同構圖視角時，會不會在明暗情況不同時有不一樣的景深舒適度範圍？這類問題，都是本研究所想探討的對象。

1.3 論文研究架構

基於以上二個方向，本研究的重點包括以下項目 (圖 1.1)：

- (1) 讓觀測者調整像差間距的大小對 3D 立體影像強度與舒適度進行評估。
- (2) 操弄聚合運動的有無，觀察其對 3D 立體影像強度與舒適度的影響。
- (3) 鏡頭焦距與景深搭配，對 3D 立體影像強度與舒適度的評估。
- (4) 環境亮度與景深搭配，對 3D 立體影像強度與舒適度的評估。

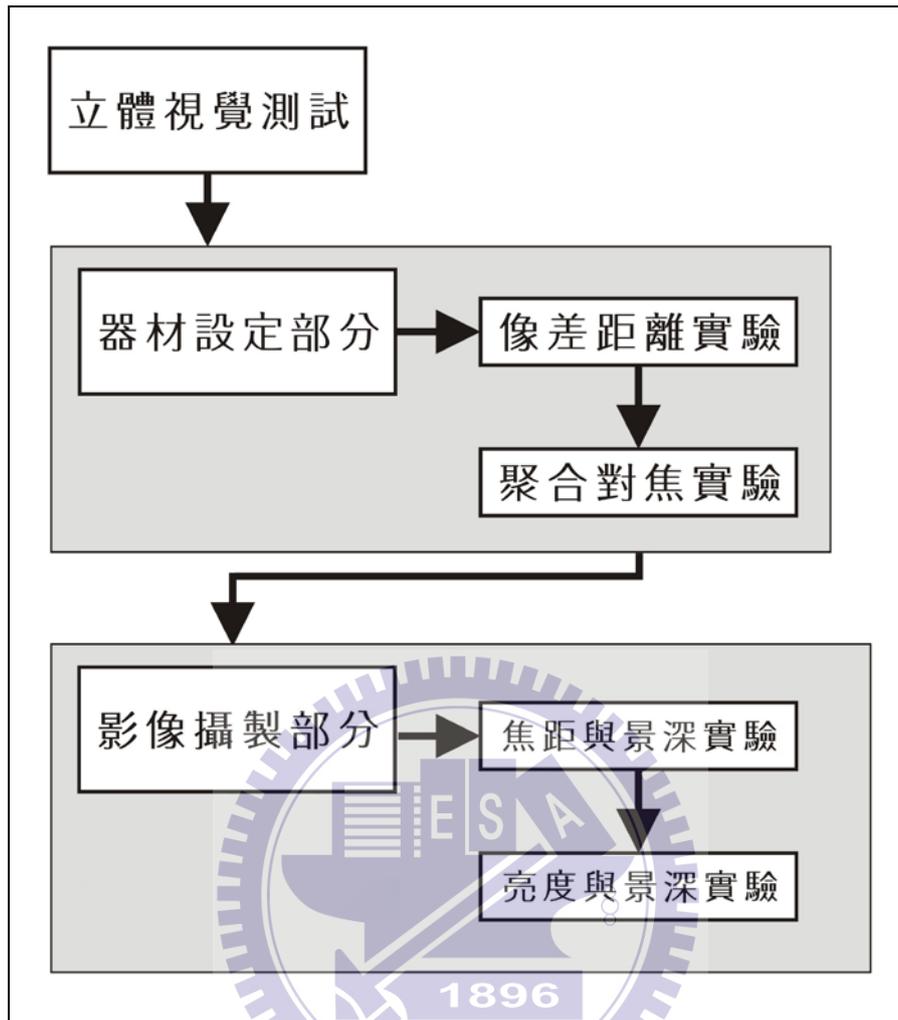


圖 1.1 研究架構圖

1.4 研究限制

本研究實驗素材全以 3D 軟體算圖模擬而成，主要是避免太多外在因素的干擾，如真實拍攝實的物件顏色、現場光線控制、拍攝物體材質等複雜因素，有可能影響受試者判斷，所以採取可以控制的軟體模擬。

另外攝影機景深部分，真實的鏡頭拍攝真實場景時，因為聚焦或是光圈問題，可能無法產生實驗預期的景深，因此也採用 3D 軟體模擬較容易精準控制。

本研究原先預計除了靜態攝影部分也探討動態部分，不過初期在實驗過程中發現實驗主機顯示卡在支援偏光鏡雙投影機時，每秒更新頻率過低(每秒 60Hz)，可能對實驗數據造成影響，因此研究先鎖定在靜態影像部分，待未來硬體科技完備後，再針對動態部分進行研究。



第二章 文獻探討

關於 3D 立體影像的研究目前約略分為三大類型，分別是 1.基本生理的文獻整理；2.硬體發展的文獻報告與 3.關於 3D 立體影像不適的相關研究。

2.1 立體成像原理在生理上的研究

考量與本研究的關連性，生理部分我們想討論的內容分別是：(1) 眼球的運動與對焦相關文獻；(2) 瞳孔與景深效果的相關文獻；以及 (3) 可能和動態視覺相關的雙眼像差影像辨識流程，與 (4) 在腦部中樞與運動知覺相關的研究。

2.1-1 眼球的運動與對焦

眼動線索(oculomotor cues)是指藉由測知眼球肌肉處於收縮或放鬆狀態來獲得有關深度的訊息，由於這線索來自於不同位置肌肉的生理回饋，因此又可分為兩種：眼外肌肉線索和眼內肌肉線索。

眼外肌肉線索指的是動眼肌肉所引發的聚合動作(vergence movement)。當往遠方望去，兩眼球的視線是平行的，在往近處看時動眼肌肉就愈往內側斜，亦即愈往鬥雞眼的方向傾斜(圖 2.1)。這兩眼聚合時肌肉所費的力氣就是與所視物體遠近有關的訊息，這肌肉運動訊息傳回大腦就提供有關深度的線索。

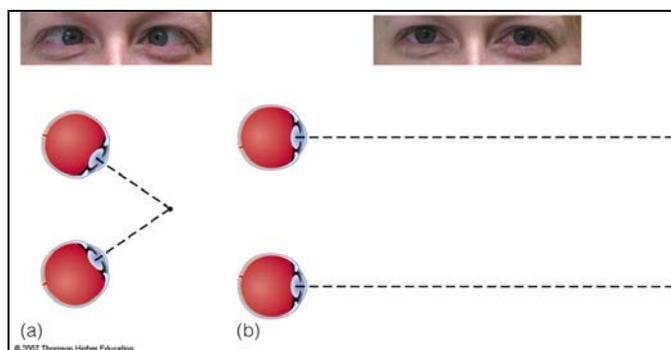


圖 2.1 眼球眼外肌肉的聚合運動(Goldstein, 2001)

另外一種眼內肌肉線索則是來自調焦作用(accommodation)，調焦是指藉由捷狀肌(ciliary muscle)收縮或放鬆來改變水晶體懸韌帶的張力，進而調整水晶體曲度。看近處或看遠處時，捷狀肌會將不同的收縮訊息回傳至大腦，以提供有關深度的線索。

這兩種眼球肌肉線索皆主要作用於中景至近身距離，效果最好的狀況便是在一個手臂之內的景物，若景物超過幾公尺距離外的狀況下，肌肉回饋就較無參考作用(Cutting & Vishton, 1995; Mon-Williams & Tresilian, 1999; Tresilian et al., 1999)。

在一般的視覺經驗中，觀察者盯著位於某深度平面上的目標時，其調焦作用與聚合動作所報告的深度訊息是一致的，這兩種肌肉運動線索處於協調的狀態。但在觀看螢幕所呈現的 3D 立體影像時，聚合動作對準於螢幕的平面，而調焦作用卻必須依 3D 物件的虛擬深度作反應，兩者便失去其一致性，這便是所謂的輻輳-調節衝突(convergence-accommodation conflict)。Hoffman 等人(2008)發現當調焦作用與聚合動作的線索相衝突時，受試者在一些立體視覺作業中的能力水準變差，如反應時間變長、立體視覺解析度變差、深度的扭曲變大，而且報告視覺不適的比例也增加；且長時間持續的輻輳眼球運動更會增加不適的感覺 (Kawamura et al., 2012)。

由於立體顯示器與裸視的 3D 遊戲機愈來愈普遍，所以有些研究也把關注焦點放到兒童上，認為這種輻輳-調節衝突可能對孩童視覺或腦部發展會有的傷害。目前雖然沒有研究結果證實此論點，不過也已證實一些罹患多重症狀的人，在觀看 3D 影片時，比一般人更容易產生頭痛、疲倦等不舒服的症狀(MacKenzie et al, 2012)。

2.1-2 雙眼像差的影像辨識處理流程

人眼在雙眼的設計必有其功能上的意義，便是製造深度知覺。當兩眼全開時，我們知覺層次看到的世界既不是由右眼位置，也不是由左眼位置所見的畫面，而是將兩者統合起來的結果，觀察點則在兩眼之間，研究者將此稱之為 Cyclopean Vision(Cyclopea 是指希臘神話的獨眼巨人)。由於兩隻眼睛並非重疊在一起，所以各自接受的影像必有因觀察位置不同所導致的差異，這就是雙眼像差(binocular disparity)，即是提供深度訊息的主要來源(Goldstein, 2001) (圖 2.2)。愈近的景物，雙眼像差愈大，愈遠則愈小，當兩眼距離與物距的比值趨近於零時(亦即物距遠大於眼距時)，雙眼像差就不復存在。當雙眼像差失去了作用時，我們對遠方景物仍然具有深度感，這是由於大氣透視(atmospheric perspective)或物體遮蔽(occlusion)等圖畫線索(pictorial cues)所貢獻的(陳一平，民 100)。

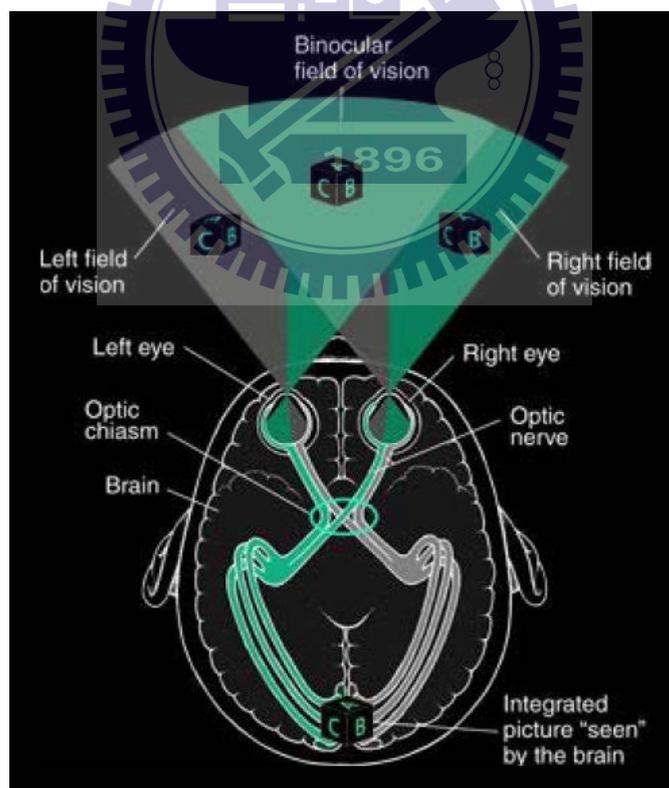


圖2.2 立體影像原理(Charles, 2011)

由於大腦將左右兩眼傳來帶有差異的 2D 影像訊息，處理成我們知覺層次上

獨眼視覺的 3D 立體影像，中間勢必會遇到對應問題(correspondence problem)，即是左眼所看到的點，如何對應到右眼所看到的點。早期研究者認為大腦必須先辨識左右兩眼影像(處理形狀)，計算相同物件畫面的像差部分，再產生深度地圖(depth map)製造出立體感。由於完成物體辨識是首要工作，因此兩眼影像愈清晰穩定，對應起來自然深度效果最佳。

這種說法在 1960 年 Bela Julesz 發表隨機立體圖(random-dot stereogram, RDS)後有了變化。單是看著左右兩張 RDS 圖完全無法產生物體辨識作用(圖 2.3)，一定要先將兩張圖雙眼融合後才可看到圖形(形狀)的部分，似乎點與點的對應不一定要先處理形狀的物體辨識。所以 Julesz 在他的理論中認為應先有雙眼配對(binocular matching)，並找出其中的雙眼像差(binocular disparity)，接著建立起立體視覺(stereopsis)後，才進行圖形辨識(pattern recognition)或三度空間表面之還原(recovery of 3-D surface)(Julesz, 1960; Julesz, 1971)。不過觀看 RDS 圖需要經過一番練習才可看到 3D 效果浮現，且時常必須盯著好一陣子才可以慢慢雙眼融合，這也跟人眼平時觀看自然環境時處理雙眼訊息的效率差異極大，因此缺乏生態效度也是許多研究者質疑它的地方。



圖 2.3 隨機立體圖(RDS)範例

(<http://cs.wellesley.edu/~cs112/courseMaterials/assignments/assign3/assign3.html>)

有些實驗者利用 2D 與 3D 環境的差異測試物體辨識，發現單眼的輪廓辨識與雙眼立體視覺，在單獨呈現時與雙眼合併時的效果截然不同，說明了人眼似乎需要先作初步單眼層次的辨識，再進一步進行雙眼訊息的整合(林麗明，民 81)。Nakayama 與其同事一同研究的系列實驗，也認為立體視覺不是單純由點跟點的雙眼像差所構成，而是跟我們物體辨識的「形式補整」(modal completion)有關，即是當物體有互相遮蔽的關係時，我們會利用完形心理學的概念補足主觀輪廓，所以辨識機制優先發生在處理像差產生立體之前(Nakayama & Shimojo, 1990; Nakayama et al.,1989)。

以目前的研究而言，如果要站在生態效度的立場來看，物體辨識在整合雙眼像差前似乎是重要的一個基本的條件，因此如果左右兩眼的畫面內容是清晰不曖昧的，經過單眼辨識後立即計算雙眼像差所得到的立體感，似乎具有最佳的品質與效率；不過如果取得的是兩張模糊不易辨識的影像(推到極端就如同 RDS 的畫面)，也許大腦便會使用另外一種對應方法，花更多的資源與時間來處理。

此外，由 3D 攝影的原理來看，其作法是將兩部攝影機的位置在水平方向拉開，以模擬我們眼睛在水平方向具有間距的情況來獲得像差。若攝影時攝影機晃動或傾斜，其水平軸就會與觀眾雙眼水平軸的走向不一致，如此一來在觀眾兩個視網膜上的影像像差即失去生態效度，對大腦而言是陌生且變化複雜的雙眼訊息，要即時地處理這樣的訊息必定是非常費力的工作。

2.1-3 瞳孔與景深效果

景深(depth of field)是指相機對焦點前後相對清晰的成像範圍，或是影像中清楚部分的範圍。理論上鏡頭只能對焦於一個單一距離，即是最精確的焦平面，而遠離這個焦平面時，不管往前或是往後，畫面只會愈來愈模糊。在攝影技巧中為

了凸顯主題，常常會將背景處理得非常模糊而保留對焦物，這種便是淺景深的畫面，常見於人像的拍攝；相反如果整個畫面的前景背景都非常清晰，便是深景深的畫面了，常見於風景的作品。要產生淺景深的影像畫面有幾種作法：(1)使用較大的光圈；(2)離對焦物體近一些；(3)使用較長焦距的鏡頭。當然反過來操作便可以產生比較深的景深(Barbara, 2001)。

人眼組織其實有幾處跟相機結構非常類似，虹膜好比光圈葉片，具有遮光效果，而藉由虹膜縮放來控制其大小的瞳孔就好比光圈，可以調整大小，讓適量的光線進入眼球。不過人眼的瞳孔是自行對外界光線或情緒刺激作反射性的動作反應，無法以自主意識控制，依照實際測量明度與瞳孔孔徑的關係數據來看(圖 2.4)，人類瞳孔大部分相比於光圈是處於小光圈的狀況(孔徑 2.0-4.0mm 左右)，除非在低於星光亮度的灰暗照明水準(scotopic level)下，我們瞳孔才有可能處於大光圈的狀況(Hood & Finkelstein, 1986)。因此電影畫面中那類明亮環境卻又淺景深的效果，除非把對焦物貼得很接近眼睛，才能在周遭產生極淺景深，不然在自然環境下，是無法產生這類特殊的視覺經驗(Campbell, 1957; Charman & Whitefoot, 1977)。

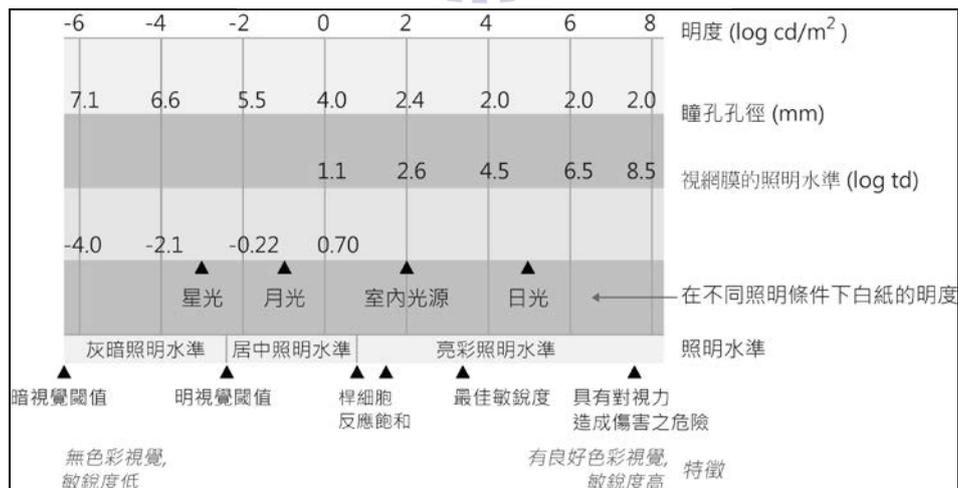


圖 2.4 自然環境的光線強度變化與瞳孔的孔徑變化關係圖 (陳一平, 民 100)

另外人眼與相機差異更大的是：人眼視野夾角約 210 度，以相機而言是超廣角鏡頭，實際上比魚眼鏡頭還廣，這類鏡頭大多數狀況很難產生淺景深。

綜合以上數據資料，視覺經驗中的景深是存在的，不過在大部分的照明水準與觀物距離下卻很輕微而不明顯(Campbell, 1957; Charman & Whitefoot, 1977)。電影或攝影作品中常看到的那種淺景深，是專屬於攝影的一種技術或是美學，單純用眼睛看自然環境是無法重現這種效果。因此當這種形式的效果要從平面的 2D 空間(類似畫作欣賞)轉換成 3D 空間(類似真實)的知覺經驗時，不自然的景深會加強觀者所經驗到的立體感，抑或是讓觀者的大腦處在矛盾之中，而造成反效果與不適？

2.1-4 立體視覺與運動知覺在腦部中樞的研究

目前的生理證據與研究資料顯示，立體視覺的處理中心可能位於大腦枕部的 V1(視覺第一區)(Poggio & Poggio, 1984)。V1 特殊之處為是由一群模組(module)所組成，在每一個模組中配備有分析其對應像素中的形狀、顏色、運動、深度等刺激屬性的細胞群，所以可以針對左右眼的訊息做初步的處理。不過更重要的是 V1 模組中也包含著處理雙眼訊息的細胞(binocular depth cells 或稱 disparity detectors)，研究者將二個實驗刺激前後一直線放好，當移動角度讓左右兩眼呈現明顯視差時，則 V1 此區的相關細胞會產生極大的反應(Barlow, Blakemore & Pettigrew, 1967; Hubel & Wiesel, 1970)。

不過這類雙眼訊息細胞，或是人類立體視覺的發展其實並非與生俱來，而是需要藉由外界環境不斷刺激才逐漸發展完全。一個早期的單眼視覺剝奪實驗(monocular deprivation)可以讓我們瞭解到這個發展方式。實驗者將初生小貓的雙眼，輪流縫合其中一隻的眼皮，兩週換一次，如此每隻眼睛都有看到世界，卻從來沒有兩眼一起看的經驗。在此實驗動物長成後，牠們在行為上顯示出對於判斷

物體精確距離的困難，而解剖之後在貓腦部 17 區(等同於人類的 V1)中發現缺乏與立體視覺有關的眼優勢柱列(ocular dominance columns)，這些貓便是無法產生立體視覺的貓(Wiesel, 1982)。這現象也會發生在人類身上，有些人即使戴上立體鏡也無法看到 3D 的立體效果，這種情況稱作「立體盲」。北美地區的統計約有 1~3%的人是立體盲(陳一平，民 100)，若非經過檢查平常很難自己察覺，目前認為主要可能是由早發性的斜視所造成，亦即個案的大腦始終以優勢眼的畫面為主，而不參考整合視力較差的那一眼，久而久之便影響了立體視覺的發展。

離開了處理立體視覺的 V1 後，視覺的路徑則分二條不同方向前進，一條是往顳葉(耳邊)而去的 what 路徑，一條是往頂葉(頭頂)去的 where 路徑(圖 2.5)。What 路徑主要是在處理色彩、形狀、質地等與認識物件的身份有關的工作；Where 路徑則除了負責空間定位之外，另外一個職責就是處理運動訊息(Mishkin et al., 1983)。Where 路徑上被研究得最透徹的部位就是 MT 或 V5(視覺第五區)。

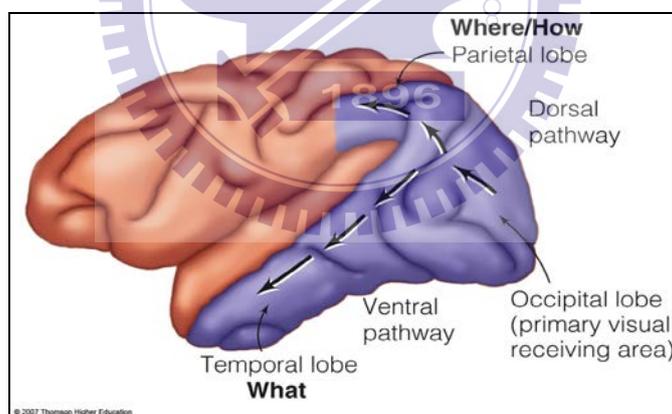


圖 2.5 視覺 What Where/How 兩路徑示意圖(Goldstein, 2001)

MT 最著名的功能是運動訊息的分析，先前研究 MT 的功能時，實驗者幾乎都是以 2D 的平面運動訊息當作刺激，不過新的研究發現 MT 也負責處理三維空間立體的移動訊息(3D motion perception)。實驗分別以 fMRI 測量受試者在單眼與雙眼像差時對於移動光點的反應，發現 MT 對於 3D 光點的移動有顯著的反應量，且血氧濃度高於 2D 平面運動的量，也就是說當 MT 在處理 3D 的運動資訊時，

會花費大腦較多的能量資源(Rokers, 2009)。這點似乎也以生理的角度解釋了在虛擬實境中，為何在 3D 立體影像中，不適的感覺(cyber sickness 與 simulator sickness)會是原先 2D 平面影像中的好幾倍(Jukka et al., 2006; Kay et al., 1997)。

2.2 立體成像原理在硬體上的發展

3D 立體影像的呈現方式相當多元，每一種呈現系統各有硬體設計上的不同，也具備本身結構就可能影響舒適度的差異，因此理解不同呈現方式的優缺點，未來便可以針對不同實驗目的而選擇最適當的硬體匹配，避免額外變項影響實驗結果。以下也分成重現 3D 立體影像與拍攝 3D 立體影像的硬體技術二部分作技術回顧。

2.2-1 雙眼像差與立體鏡

一般來說，想要還原或產生立體影像，需要具備兩眼像差(binocular parallax)或運動視差(motion parallax)的特性(Ogle, 1964)。其中最早利用像差原理製造出立體影像的人是查爾斯·惠斯通(Charles Wheatstone)在1838年用鏡子設計出的立體觀看鏡(stereoscope) (Wheatstone, 1838； Lee, 2011)。不過真正成為比較輕便普遍的立體鏡是1849年，David Brewster利用相同概念，把鏡子鏡換成了透鏡，稱為布魯斯特立體鏡(Brewster's stereoscope)(圖2.6)，這便是所有現今3D眼鏡的原始雛型了。

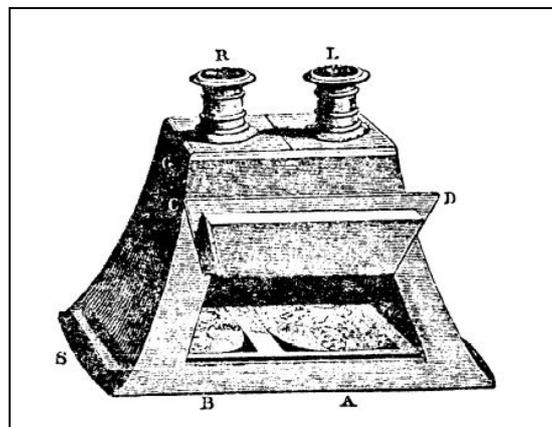


圖 2.6 布魯斯特立體鏡(Brewster's stereoscope)

(<http://culturevisuelle.org/blog/10804>)

2.2-2 分色立體成像技術：彩色眼鏡與波長多路式系統

傳統彩色眼鏡(anaglyph)的3D立體成像技術，是將有像差的兩個原始影像，分別以兩種不同顏色轉印在膠捲上(看起來像色彩偏移的影像)，兩種顏色就是色光三原色的其中二色，電影放映時，觀賞者帶著兩種匹配好的紅藍(或紅綠)眼鏡，如此彩色濾鏡與放映影像同色部分，便會消除掉，不同部分便會顯現出來。因此不同顏色的像差影像，便可通過色彩濾鏡讓左右兩眼各自取得匹配的影像，在大腦重疊出3D的立體效果(Lipton,1982)。在偏光眼鏡尚未開發之前，1980年代之前的立體電影都是使用這類紅藍(或紅綠)的分色立體技術。不過這類型的3D影像色彩品質很差，有嚴重的色偏感覺，畫面的亮度、對比與飽和度都有下降狀況，且長時間觀看也容易導致眼睛不適(潘攀，民101)。

早期的分色立體成像技術除了價格便宜外，各種視覺效果都不出色，所以在偏光系統出來後便沒落，只剩學校DIY教學與網路立體影片欣賞用。直到2007年Infitec GmbH公司研發的Dolby 3D系統被推廣開來，色分成像技術才重新被重視。新的技術又稱為「波長多路式(wavelength multiplexing)」或「光譜式(spectral)」成像技術，波長多路式系統的基本概念，架構在傳統分色技術與色光三原色理論上；既然三原色擁有各自的光譜波段，且只需極小的波段就足以混色顯示出足夠的色域，因此讓左右兩眼影像的三原色波段，各自偏移一點，就可同時區分左右兩眼眼影，與保持足夠的影片色域(圖2.7)。此種光譜式的分色技術，所製造出的立體影像品質，無論在亮度、對比、色彩還原都比舊式分色技術好上許多，且觀看角度比較沒有嚴格要求，也不用買專用的螢幕(偏光系統需要專用螢幕)，投影機取下彩色濾鏡後也變回一般的投影機，所以雖然影片的色彩轉換技術，與立體眼鏡鏡片設計都較複雜，但是成本並不會高於偏光式的電影院系統(3DIMAX)，因此一大部分電影院也選擇使用此種3D立體電影撥放系統。

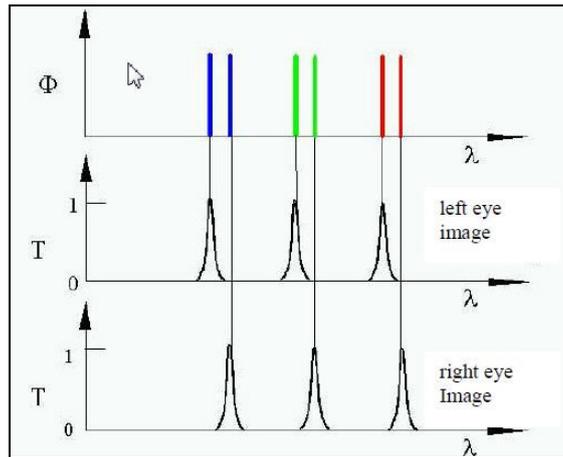


圖 2.7 波長多路式(wavelength multiplexing)的分色原理

(<http://www.infitec.net/index.php/en/>)

2.2-3 分光立體成像技術：偏振光技術

以往科學館展示的3D電影系統，與目前最普遍的3D電影院系統都不是使用分色技術，而是使用分光技術來進行立體成像，也稱偏光鏡片(polarizer)立體成像系統。此種系統是利用「光波動的方向性」來作為區分、遮蔽左右眼影像的方法，目前有線偏光(linear polarizer)和圓偏光(circular polarizer)兩種。兩者在系統建置時，性質都是類似，即是在電影院的兩架投影機前都安裝不同角度的偏振片(通常是垂直與水平偏振片)，因此投影出的光轉變成兩束不同角度的偏振光(圖2.8)，照射到螢幕上並反射到觀眾的眼睛。觀眾則配戴左右兩眼不同角度的偏振片眼鏡，如果與偏振光角度相同則允許通過，腳步不同則予以阻擋，因此便可以將左邊投影機的偏振光送入左眼，右邊的偏振光送入右眼，達到以分光的技术產生3D立體成像(圖2.9)。

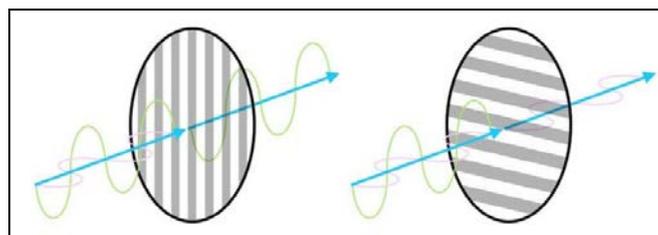


圖 2.8 未偏極化(unpolarized)的光線通過不同角度偏振片的效果

(<http://heresy.spaces.live.com/blog/cns!E0070FB8ECF9015F!9334.entry?wa=wsignin1.0&sa=418482533>)

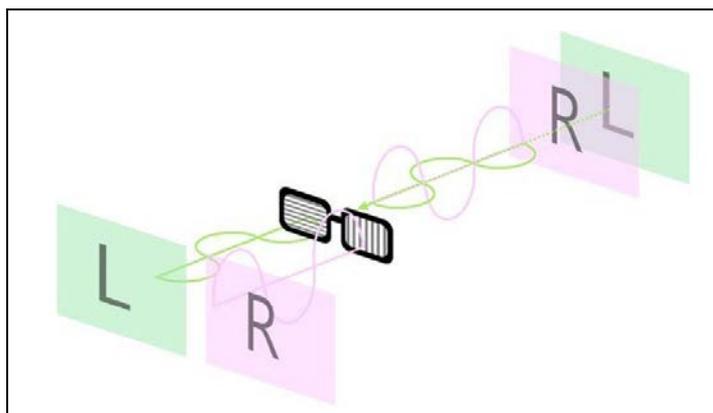


圖 2.9 分光立體成像技術

(<http://heresy.spaces.live.com/blog/cns!E0070FB8ECF9015F!9334.entry?wa=wsignin1.0&sa=418482533>)

早期的線性偏振(linearly polarized glasses)3D系統有一定的觀影角度，因此觀眾頭部被限制不可傾斜移動，觀看時容易產生不適感覺，所以以另一種螺旋偏振片(circularly polarized glasses)來改善這個缺點(圖2.10)。不過頭部不可移動的缺失雖然被改良，但是對於電影院觀看位置仍然有其限制，觀賞位置在螢幕正中央3D立體效果最佳，愈往兩旁偏移則3D影像效果愈差，也會產生左右影像互相干擾的問題(串線反應)。

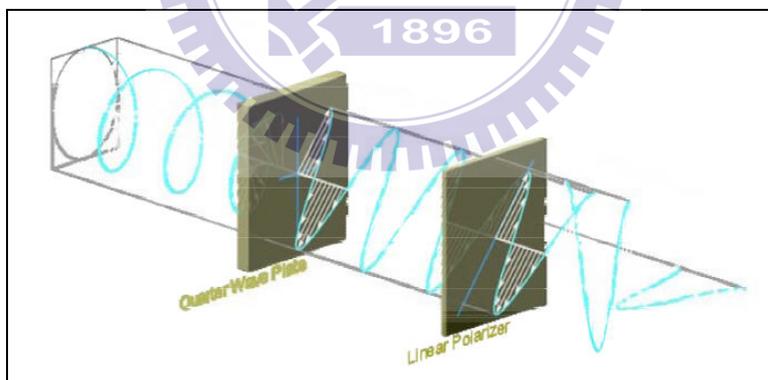


圖 2.10 螺旋偏振分光技術(Charles, 2011)

由於偏光眼鏡耐用且價格最低，所以成為 3D 電影院的首選系統。不過缺點是影片經過二次偏光片後亮度會大大減弱，因此需要使用高亮度的投影設備；另外需要使用專用電影螢幕，一種專門設計的 non-depolarized 投影幕，此類投影幕使用特殊材質(鍍銀)，讓投影幕上反射的光，依然可保持原有的偏極性。

2.2-4 主動式(active viewers)3D 眼鏡

立體眼鏡又可細分為與被動式(passive viewers)與主動式(active viewers)，常見的被動式立體眼鏡，主要使用偏振濾光與光譜濾波技術(馬士超，2010)。被動式眼鏡多半使用在大型電影院，一般人要建構此種系統費用仍然過高，因此開發出針對個人使用者的主動式3D眼鏡。主動式立體眼鏡又稱快門式眼鏡(shutter glasses)，眼鏡會配合顯示器自動開關左右兩眼顯像功能，接收來自更新頻率高達120 Hz的左右同步畫面，讓左、右眼只能看到各自的影像(左右兩眼各60Hz)。雖然在這種狀況下，沒有兩隻眼睛是同時看到影像的，但是由於人眼的視覺暫留等機制的效果，還是能感覺到兩眼都有看到各自不同的影像，進而產生立體感的，所以又稱為「分時立體」技術。相較於被動式眼鏡，主動式成像的效果較精細，但眼鏡價格卻昂貴許多(刁國棟，2010)，且由於每秒需要更新120次，加上液晶快門有延遲的問題，所以也產生了閃爍、動態殘影、立體串擾(crosstalk)等問題。

2.2-5 裸眼式3D成像技術

裸眼式3D成像技術相較於眼鏡式技術相對複雜，但是顯像時由於無須佩戴任何眼鏡，便能觀看立體影像，因此更切合使用者需求，應用層面也比較廣泛。裸眼式立體顯示器的種類更多，約可分成全像式(holographic type)、體積式(volumetric type)、成對立體影像式(parallax images)(刁國棟，2010)。

全像式3D立體成像技術主要由麻省理工學院所發展出，利用紅、藍、綠三色雷射光源，各自經過聲光調變器晶體(acoustic optical modulator, AOM)，產生相位型光柵，帶著光柵訊息的雷射光經過與全像片合併之後，利用垂直掃描鏡(vertical scanning mirror)及多面鏡(polygonal mirror)，進行垂直及水平的掃描，進而將立體影像呈現出來(Kollin, 1990)(圖2.11)。其優點為全像片的取得容易且技術成熟，然而製作所需的過程較為複雜繁瑣，多半應用在商業宣傳與藝術展覽。

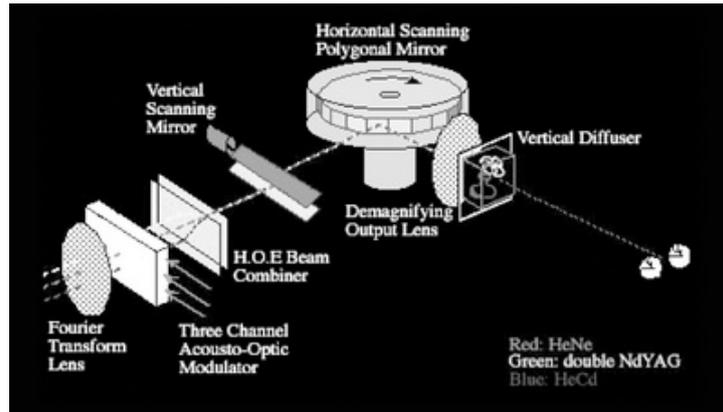


圖 2.11 全像式(holographic type)3D 立體技術

(<http://www.electronictechnology.com/apm/mgad.php?mcontentid=3047&sublnk=article>)

體積式3D立體成像技術由德州儀器(Texas Instrument, TI)提出，是一種利用雷射掃描方式的立體影像顯示器，又稱「體積式顯示器」。主要是利用一個快速旋轉的圓盤，配合由底下投影的雷射光源，藉由雷射光源投射到快速旋轉的旋轉面時，會產生散射的效應，以掃描重現空間中的每一點(許精益，民96)。這類3D技術多半用於商業展示，可以讓四周觀眾都看見3D效果；不過缺點是中央必須有一個旋轉軸轉動圓盤，靠近軸心的影像旋轉速度較慢，立體影像較不清晰(圖 2.12)。

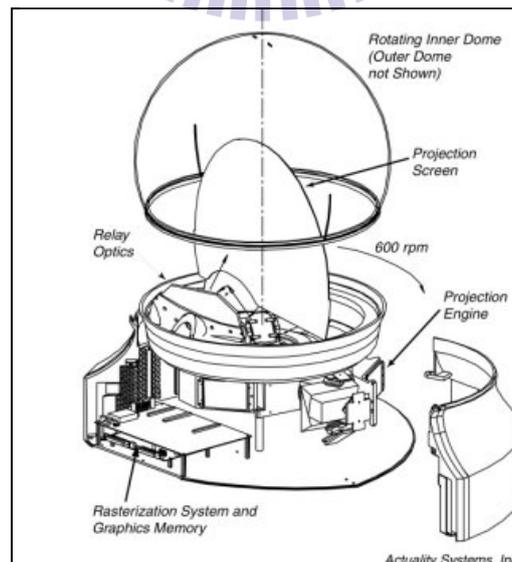


圖 2.12 體積式(volumetric type)3D 立體成像技術展示台結構

成對立體影像式(parallax images) 3D技術是目前商樣化產品的主流技術，與

全像式3D立體成像技術不同的是比較接近平面顯示方式，依照顯示方式又可分成空間多工(spatial-multiplexed)及時間多工(time-multiplexed)的模式。

空間多工(spatial-multiplexed)方式主要是將顯示畫面間隔地劃分為左右眼影像，由日本三洋(SANYO)公司最先提出，將液晶面板的畫素分成奇數畫素及偶數畫素的影像對，奇數畫素影像對提供一眼的視差影像，偶數畫素影像對則提供另一眼的視差影像，再利用柱狀透鏡(lenticular lens)將光線分光，進而將奇數畫素與偶數畫素的影像，分別投影至觀賞者的兩眼(Berkel,1999)(圖2.13a)。

除了柱狀透鏡分光外，日本Sharp與韓國三星公司則是利用視差遮屏(parallax barrier)來進行分光。以黑色與透明相間的直線條紋，置於離液晶面板一小段距離，讓觀賞者的其中一眼只能看到液晶面板奇數畫素對，觀賞者另一眼則只能看到液晶面板偶數畫素對(Sexton,1989) (圖2.13b)。如此兩眼也可藉由遮屏將眼像分別送至對應的眼睛，在沒有配戴眼鏡的情況下產生3D立體視覺。

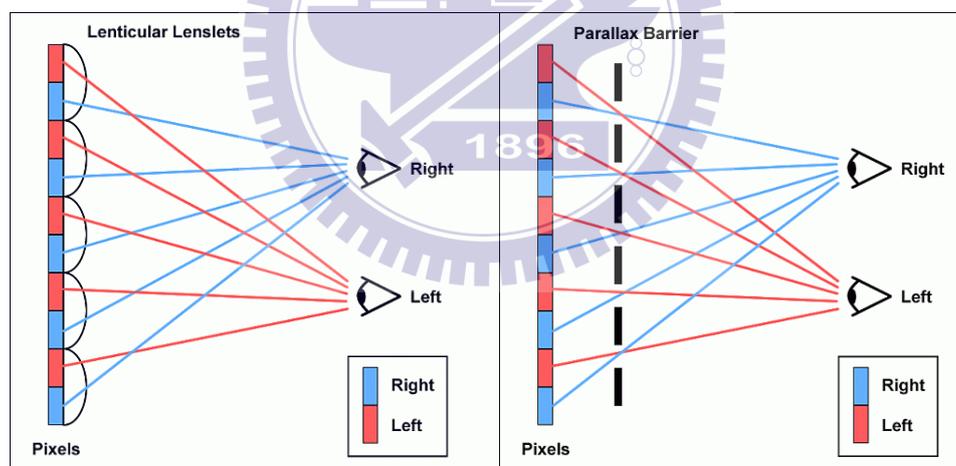


圖 2.13 a.柱狀透鏡(lenticular screen) b.視差遮屏(Parallax barrier)

(http://www.digitimes.com.tw/tw/B2B/Seminar/Service/download/0539804240/980424tvci_2.pdf)

空間多工方式的3D顯示有一個共同的缺點，由於液晶面板的畫素被分成若干奇數畫素及偶數畫素影像對，並且為了能夠讓立體影像可在更多角度被觀賞，所以3D影像的解析度(resolution)變成2D影像的一半以下(甚至更少)。另外，當觀賞者的雙眼，稍微錯位一個畫素位置，導致左右兩眼相差影像互換，導致大腦

無法融合影像產生立體感覺，此現象稱為錯覺視域效應(pseudo viewing zone effect)，研究也顯示這類顯示器在觀看角度大於15度時，立體感與舒適度便下降許多(柯盈盈，民 97)。

時間多工(time-multiplexed)方式則如同主動式3D眼鏡一樣，將左右眼影像連續地個別送到左右兩眼，只是主動式眼鏡利用左右眼鏡迅速開關的方式，而時間多工的裸眼式顯示器則利用面板上特殊設計的分光機制，以達到立體顯示效果(簡克偉，民100)。

這類顯示器多半使用指向背光(directional backlight)技術，友達光電與 3M 是主要的研發單位。將 3D 影像左右兩眼的相差內容以排序(sequential)方式播放，配合快速切換的液晶層，依序分別將光線投射入觀看者的左右眼，當左右兩眼影像切換夠快時，大腦將感受不到切換頻率，而形成左右眼的像差畫面，進而讓觀者形成具有高解析度的立體影像(Shieh et al., 2005；Chien et al.,2006) (圖 2.14)。

時間多工系統具有顯示器解析度在3D呈現時，不會減少的優點(空間分工則減少一半以上)，另外觀賞者也不需要嚴格的對位，透光率也能維持，在3D影像效果上幾可媲美配戴3D眼鏡的立體效果(鍾榮峰，民98)。

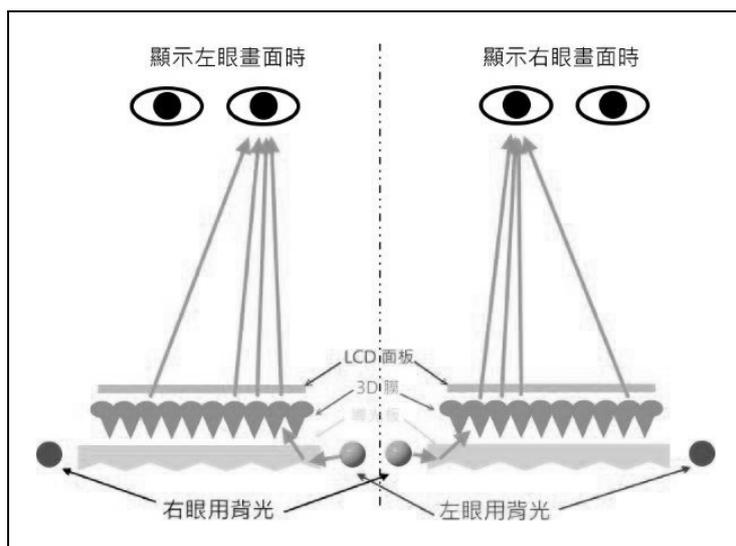


圖 2.14 3M 的指向背光(directional backlight)技術

2.3 立體成像原理在舒適度的相關研究

2.3-1 視覺不適

人們在觀賞 3D 立體影像時所產生的視覺不適感(visual discomfort)，常被歸納成是視覺疲勞(visual fatigue)的一種，因為視覺舒適感與視覺疲勞常是相反詞的關係，所以視覺不適也就被歸納進去 (Lambooij et al., 2005)。視覺疲勞，它是人的視覺系統因為某種內部或外部因素導致能力下降，可以用客觀的方式測量；相對要評估視覺不適的時候，由於並沒有明確的症狀可參考依據，如眼睛周圍疼痛、流淚等狀況，可能只是眼睛內部覺得怪怪不舒服等輕微不至於到達疲勞的訊息，所以要測量評估較為不易，除了可以使用主觀的問卷測量法外，也可使用心理物理學的測量方法。

雖然視覺疲勞(視覺不適)已累積許多相關研究，不過統一概念仍不明確，在許多不同領域都有各自不同的定義，直至今日仍沒有絕對的定義(Ware, 2004; Patterson & Martin, 1992)。多半都是以導致疾病的原因或是症狀的組合來當作定義，如「疼痛出現在眼睛周圍」、「眼睛導致頭痛的出現」這類的診斷術語。目前包含的症狀數量與多樣性 (Dillon & Emurian, 1996; Sheedy et al., 2003; Emoto et al., 2005; Uetake et al., 2000; Murata et al., 2001; Cooper et al., 2001)，可以分成四大類的視覺疲勞症(asthenopic)：

(1) 與眼睛疲勞相關的症狀，包含疲倦與酸痛，眼睛內部化學物質變化與壓力的感覺。

(2) 與眼表相關的症狀，包括流出粘液，疼痛刺激，流淚，眼睛和結膜泛紅。

(3) 屬於視覺能力相關，包括複視，視力模糊，焦點變化遲緩，空間對比度、速度感知降低，調節和輻輳作用降低和敏感度降低。

(4) 眼部導致的其他周邊症狀，包括頭痛，眼眶周圍疼痛，頸部疼痛，背部疼痛、肩部疼痛和心理活動低落等。

除了利用症狀可以確認視覺疲勞與不適外，也有些衡量的指標可以讓實驗者

針對問題進行初期的評估測量(Bangor, 2000; Uetake et al., 2000)，分成客觀與主觀兩類指標：

(1)客觀指標有測量瞳孔直徑，瞳孔光反應，臨界融合頻率(critical fusion frequency)，視力，近點(near point)，折射能力(refraction ability)，視野，立體視覺，固定穩定(fixation stability)，調節對焦反應(accommodative response)，AC / A 比率(accommodative convergence/accommodation ratio)，斜隱視(heterophoria)，輻輳眼球運動(convergent eye movement)，空間對比敏感度，色覺，光感，閃爍頻率，淚膜破裂時間(tear film breaking time)，脈搏和呼吸時間。

(2)主觀指標則有視覺舒適度評估量表和問卷調查，目前問卷主觀調查還未建立有效、可供查詢的資料庫系統。

2.3-2 像差與輻輳問題

要形成真正的 3D 立體影像需要左右兩眼對目標物作訊息的收集，因此眼睛正對目標物時便會形成像差角(angle of disparity)或叫光角(optical angle)。是方便我們辨識物體遠近深度的幾何結構，如圖 2.15 左邊圖示可知目標物 1 與兩眼所形成的角度 θ_1 ，會比目標物 2 與兩眼所形成的角度 θ_2 來得大，因此比較這角度的大小變化，便可以判斷物體的遠近。除了利用機械結構物理角度得到遠近資訊外，另一個便是因為光角產生目標物位置的差異，呈現到視網膜上就形成雙眼視網膜像差(binocular retinal disparity)。

像差角愈大，就物理現象來說應該像差也愈大，所以目標物愈接近眼睛，立體效果與深度效果應該更佳，不過研究發現觀賞距離以 70cm~500cm 為最佳的觀賞距離；且此範圍所觀賞目標物的立體效果最好，所成的「像差角」約為 0.8 度~ 6 度；如果距離目標小於 70cm，像差角大於 6 度時，眼睛會開始有不舒服的感覺；相反的，若大於 500m，像差角小於 0.8 度，則整體目標物立體效果會不佳(Ware, 2004; Patterson & Martin, 1992; Howard, 2002)。

不過我們不會只觀看近距離的目標物，眼睛觀看景物大概可分為遠、中、近三個層次，因此當眼球隨著景物的遠近而自動調整到一個視覺角度(視角)來觀看時，兩個眼睛各有其不同的位置與視角時，自然就會產生不同形式的像差。依眼睛觀看遠、中、近程的景物時，像差可以概分為：(1)非交叉型像差(uncrossed disparity) (2)零像差(zero disparity) (3)交叉型像差(crossed disparity)，所有零像差的點會形成一個曲面，則稱為零像差平面(horopter)(圖 2.15)，即是眼睛在觀看這個曲面上的每一個點時，雙眼輻輳程度都一樣，影像也會落在兩眼同一個位置(對應點)。如果影像比凝視點遠，兩眼視軸不會在遠處交叉，便是非交叉型像差；相反的如果影像比凝視點近，兩眼視軸一定會交叉，便是交叉型像差(Goldstein, 2001)。而像差的計算是以定義左眼網膜落點與左眼中央小窩的視角，減去右眼網膜落點與右眼中央小窩的視角，稱之為像差。

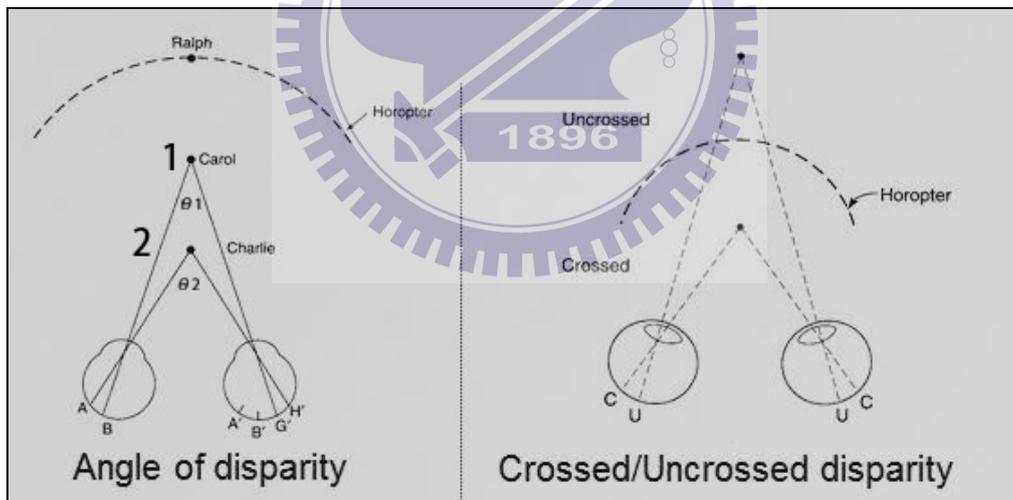


圖 2.15 像差角與不同像差示意圖

當雙眼注視某一目標物時，在凝視點的位置上，兩眼影像會融合成為單一影像，其他不在零像差平面(horopter)，都會產生雙像，即是所謂的複視(diplopia)，不過研究發現只要雙眼像差足夠小，即使沒有落在網膜的對應點上也可以成為一個單一影像，這個雙眼融合允許的像差範圍稱為 Panum 融合區 (Panum' s fusional

area) (Panum,1940)，圖 2.16 括號框出來的範圍就是融合區。研究發現如果落在 Panum 融合區內的影像相似，則可以看到單一影像成形，如果影像不相似則無法融合，反而會出現兩個影像交替出現的雙眼競爭情形(Howard & Rogers, 1995)。

由上段說明可知，雙眼影像融合的條件不算嚴格，所以有研究便計算出即使影像無作輻輳運動與刺激呈現很短時間，可以雙眼融合的極限在交叉像差時為 27.0arc min(弧分)，在非交叉像差為 24.0 arc min。不過即使給予較長的時間與作輻輳運動時，影像差距在交叉像差大於 4.93 度與非交叉像差變化大於 1.57 度時，將無法融合影像而產生複視效果，因此過度的雙眼像差，除了無法雙眼融合外，也容易因為雙眼鏡競爭產生不適感覺(Yeh et al.,1990)。另外，針對靜止的物件在雙眼融合允許的像差範圍，也會比動態的物件範圍較大(Tyler, 1983)，其它許多研究的結果顯示，會影響融合區的還包括刺激大小、空間頻率、訊息停留時間、時間效應、亮度值與受試者個體差異等諸多因素(Ware, 2004; Patterson & Martin, 1992; Coltekin,2006; Schor et al.,1984; Westheimer,1994)。不過立體視覺是否一定受限於雙眼融合區的極限與範圍，研究也發現並不絕對，我們有學習調控此融合區的能力(Jones & Stephens, 1989)，只要對受試者不斷的訓練融合效果，受試者便會慢慢修改提升雙眼融合能力。所以平時便愛看 3D-RDS 立體圖與打更新頻率快速的 3D 電玩者，可能在觀看 3D 立體電影時較不易出現不適症狀，便是平日訓練雙眼融合區得到的結果。

像差研究除了外在目標物的設定是主要變項外，內部個體的差異也是一個因素。有時即使觀看相同的影像，也會產生不同的像差距離，其中瞳距(IPD)的差距是最直接會影響到像差的距離；針對跨性別的 IPD 研究，絕大多數成人的 IPD 在 50mm~70mm 的範圍內，平均數和中位約 63mm，這些參考數值被用在設定許多立體參數，但是對於幼童(IPD 約 40mm 左右)與眼距較寬(IPD80mm)的特例人士來說，看立體電影可能會因為比平常人更容易到達界點而產生不適的狀況(Dodgson, 2004)。

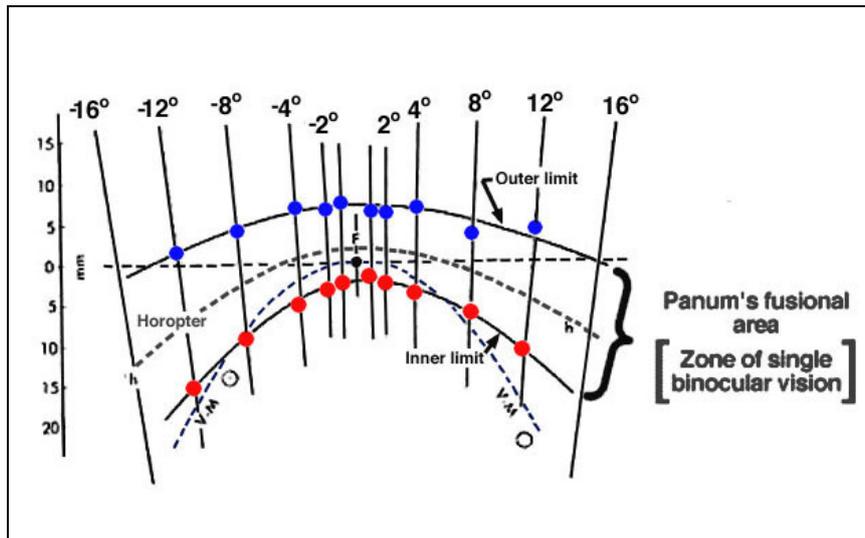


圖 2.16 Panum 融合區示意圖

(<http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/perception-of-depth/>)

除了像差可能會產生視覺不適外，眼外肌肉的輻輳運動(vergence)與眼內肌肉的調節對焦(accommodative)也會影響到視覺的舒適度。研究顯示在真實世界凝視目標物時，此時會形成一個焦點深度(depth of focus)，好讓眼球的輻輳運動與水晶體的調節對焦可以正常溝通運作並產生固定的互動模式；不過當看著平面螢幕所產生的 3D 影像，真實的焦點深度停留在螢幕上，眼內肌肉會調節對焦讓螢幕一直呈現清晰影像，但是眼球輻輳運動卻會跟著 3D 虛擬對象的前進後退不斷變動，因此在聯繫過程中可能產生不匹配與衝突狀況，因此引發視覺不適(Yano et al., 2004; Shibate et al., 2006)。

研究也發現在一定的焦點深度內，協調對焦與輻輳運動是會重新進行設定，不過如果目標物的像差效果(製造出來的虛擬立體深度)，遠超過眼睛到螢幕距離所建構出來的焦點深度，則會出現調節對焦被抑制，也暫停與輻輳運動的聯繫，產生影像模糊的狀況；或兩邊效能都有損失精確度的狀況，直接導致眼睛的疲勞(Pastoor, 1991)。

調節外在眼球輻輳運動與調節內在晶體對焦是屬於比較機械、幾何的工作，這兩部分的協調效率就是 AC / A (accommodative convergence/accommodation ratio) 比率，人眼有比攝影機更高的效率在處理對焦問題，但是每個人的 AC / A 比率跟眼距一樣也因人而異；這也會使得注視真實環境中高速移動的目標物與觀看 3D 立體影像時，由於 AC / A 效率的差異，導致對焦不精確或協調不及而產生不適的狀況(Bahn et al., 2002)。

2.3-3 景深與模糊問題

真實的環境中，我們很少出現影深模糊的問題，主要的原因當然與我們眼睛屬於大視角的超廣角鏡頭，光學上本來就不易製造出淺的景深；加上瞳孔在光源底下多半呈現小光圈狀態，自然在日常生活便不會經驗到如電影般的模糊前後景畫面。以雙眼融合度來看，目標物前後距離遠的景物都屬模糊影像，沒有清晰的輪廓一定要進行雙眼融合，加上注意力範圍的處理機制，所以基本上不會讓眼睛與大腦耗費太多資源。

不過觀看 3D 立體電影時，觀眾注意力可能集中在非攝影師對焦的清晰點上，或是以大光圈製造出的極淺模糊景深上，這些情形都可能超越了雙眼融合的極限範圍，當眼睛與大腦盡力將這些模糊畫面進行融合時，可能在辨識與融合過程便會降低舒適度(Talmi & Liu, 1999)。相關研究也發現，影像提供的 3D 立體畫面有時會誤導眼球的輻輳運動，導致過度融合像差的現象。譬如當注視一個在 3D 環境看起來非常近距離的目標物時，前景的模糊畫面可能被判斷與目標物位在相同平面(或是更前面的平面)，因此在像差的融合過程，將兩眼的模糊訊息都作過度的像差融合，這過程也可能影響觀看時的視覺舒適度(Blohm et al., 1997)。因應過度融合像差，有些演算技術則推出模擬對焦深度的景深濾鏡，應用在 3D 影像上可以增加觀賞舒適度(Blohm et al., 1997)。

針對模糊在協調對焦與輻輳運動下的影響研究，發現在無像差的情況下，以

不同程度模糊的十字靶標圖像測試受試者(圖 2.17)，調協對焦與輻輳對焦沒有變化，兩者數值相對是恆定的；接著使用有像差的模糊圖形受測，此時輻輳對焦機制受到目標物的影響，驅動眼內的調節對焦增加了畫面的模糊度。這也說明了因為像差導致協調對焦與輻輳運動的整合機制，超越協調對焦對畫面對焦深度(depth of focus)的判斷(Okada et al., 2006)。

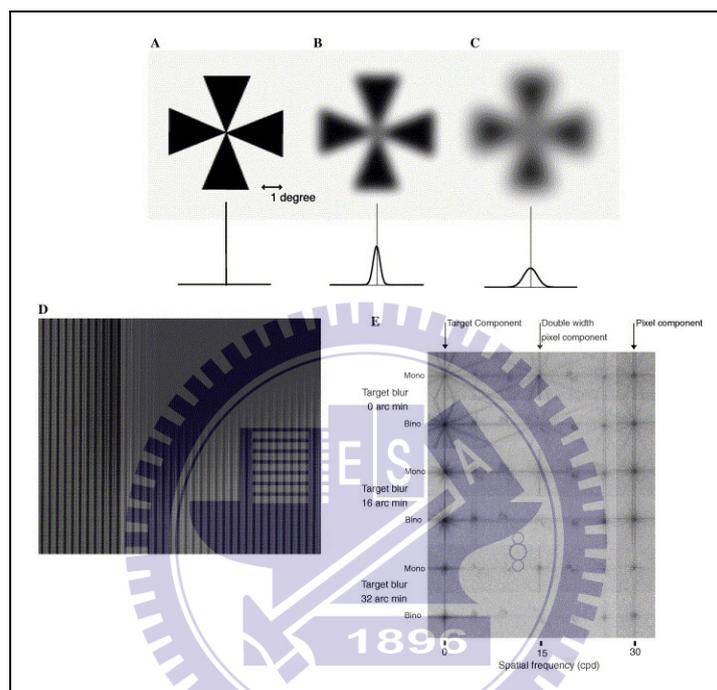


圖 2.17 模糊圖像對協調對焦與輻輳運動影響之研究刺激圖(Okada et al., 2006)

最後是關於瞳孔與景深的研究，在正常情況下，瞳孔的直徑取決於光照水平(Le-Grand, 1968)、年齡、性別，情緒的起伏也能引起瞳孔的變化(Le-Grand & El-Hage, 1980)，不過有時個體之間不同的瞳孔直徑差異也會影響立體感(Sekuler & Blake, 2002)，如先前提到的兒童與成人在觀看立體電影時因為瞳孔差異會有不同的深度效果。

第三章 研究方法

本研究針對造成 3D 不適症的可能來源，將研究目標分成二大部份、四個實驗問題。

第一部份是「器材(攝影機)的設定」與 3D 不適症的關係，這部分探討的重點都是與拍攝 3D 影片時，攝影器材如何設定其**幾何參數**的問題有關，這部分針對相同刺激，想問兩個問題。第一個問題是與「像差距離」有關（實驗一），想了解兩台攝影機間距所產生的像差影像，與立體感舒適度的關係。第二個問題是與「聚合對焦」有關（實驗二），想了解攝影機模擬人眼的輻輳運動對立體感與舒適度的影響。

第一部分實驗結果也將提供第二部分製作刺激時的基本設定參考，以避免錯誤設定產生的不適感會混淆第二部分實驗的結果。

第二部分是「影像攝製部分」與 3D 不適症的關係，關心的重點著重在光學、景深、照明內容等等**非幾何性的參數**。在這部分的項目分別針對靜態影像探討二個問題。第一個問題是：「焦距與景深的關係」（實驗三），想了解不同焦距與視角下，景深與立體度、自然度的關係。第二個問題是「亮度與景深的關係」（實驗四），想了解在不同畫面亮度底下，對於景深的立體度與舒適寬容度是否有差異，彼此的關係又是如何。

3.1 實驗設備與環境規劃

選擇實驗用的立體投影設備時，欲避免主動式 3D 眼鏡產生閃爍與動態殘影的問題，與裸眼 3D 顯示器解析度不足與觀賞角度限制的缺點，加上布魯斯特立體鏡(Brewster's stereoscope)方式的觀看方式需要練習，因此最後決定以較符合生態效度(眼睛觀看像差的方式)，與接近電影院設備情境的「偏振光分光立體成像

技術」。目前台灣多數的3D立體電影院多半是使用此種技術來呈現電影內容，所以對受試者而言也較熟悉不陌生，沒有太多需要調適的情況。另外，本研究著重在3D立體影像拍攝時的設定與改良，而不是在顯示端的技術層面上解決視覺不適症的問題，故所得的結論應可適用到不同技術的顯示設備上。

實驗空間選在文化大學資傳系的數位影像研究室，實驗設備為雙投影機系統(Panasonic PT-AE 4000)加上偏光鏡(polarizer)系統(圖 3.1)，投影機畫面解析度均為Full-HD(1920x1080)格式，實驗刺激投影在專用的銀灰質投影幕上投影幕寬256cm、高146cm。所有實驗進行時受試者距離螢幕約250cm(圖 3.2)，水平視角 55° 、垂直視角 33° (圖 3.3)，實驗時處於暗室的狀況。



圖 3.1 實驗用投影機架設偏光鏡的情況(左圖)；實驗用的立體眼鏡(右圖)



圖 3.2 實驗環境與專用螢幕

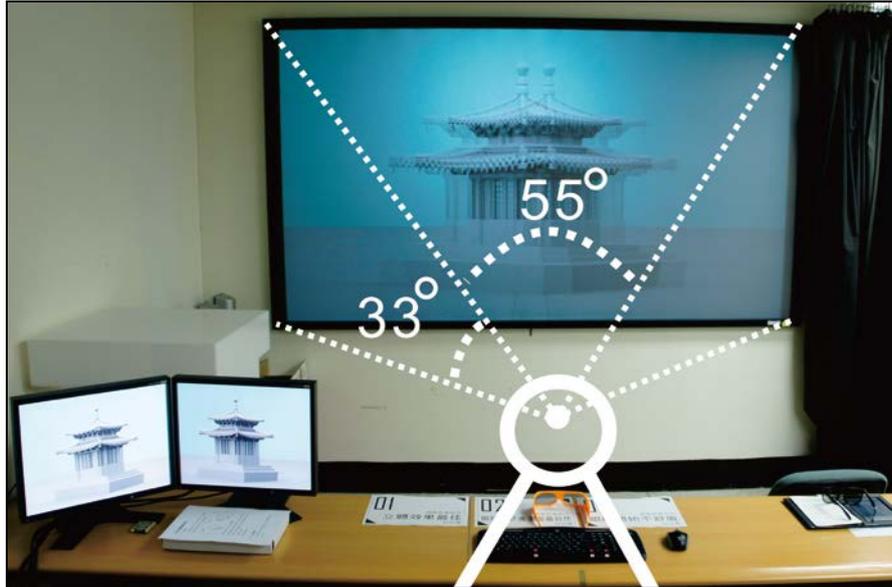


圖 3.3 實驗環境的視角設定

3.2 實驗受測者規畫與立體視覺敏感度測試

實驗對象以文化大學大學學生為主，年齡介於 18-30 歲，且具備良好立體視覺能力。在正式實驗前，研究者會替受試者進行立體視覺敏感度測試(Stereo Fly Test-Stereo Optical Co.,Inc.)(圖 3.4)，敏感度分成 9 個等級，評估具備標準(6 級)以上立體視覺能力者則符合相關實驗的要求，未達到標準的受試者也進行實驗，只是不列入立體度與舒適度的評估，但是資料可貢獻於立體視覺敏感度相關的統計。



圖 3.4 立體視覺能力測試工具「Stereo Fly Test」

立體視覺敏感度測試(Stereo Fly Test)在 9 個等級下的基本設定值，參閱下列的圖表(圖 3.5)，左側小圖內是 9 個測試用的立體圖，1 個編號圖中有上下左右四個小圓圈，其中一個有立體效果(浮出或下沉)，受測者如果看得到立體效果便可告知是哪個方向為解答，且是否為正解。9 個編號隨著數字增加等級難度漸提升，右側圖是 9 個測試圖的設定像差距離資料，多數人可以看到 6~8 的等級，能看到 9 級數的約一成左右的受試者，只能看到 1~2 級的人在我們的受試群中約有 2~3 位。

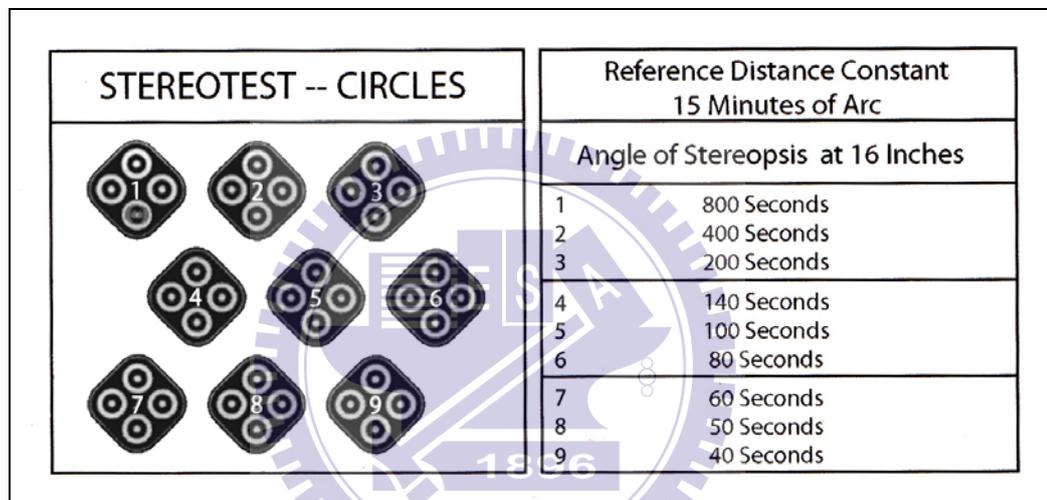


圖 3.5 立體視覺能力測試工具九個等級的基本設定

3.3 第一部分實驗（一）：像差距離實驗

3.3-1 實驗概念說明

在像差距離部分：早期立體電影(多數在科博館播放用)經常為了強化立體效果，將兩台攝影機間距設定得非常寬，遠遠超過兩眼間距與物體距離的比值，這樣不自然的誇大情形是否適當？其次，如果依照雙眼瞳孔間距(6.5~7.5cm)套至兩攝影機中間，間距是否最適合？因此本階段實驗會以左右兩攝影機的間距為變數，來研究像差距離與立體視覺效果、舒適度之間的關係。

其次想探討的是不同的對焦距距離，是否也會影響兩攝影機的間距設定，由於近距離時，拍攝到物體的形體與角度一定差距最大，而像差也遠大於距離遠的物件，因此對焦距距離差異與立體視覺效果、舒適度之間的關係，也是實驗想探討的問題。

3.3-2 實驗基本設定

為了準確控制的考量，本研究的實驗刺激係以 3D 軟體(3DMAX2010)製作，在軟體設定中攝影機皆使用標準鏡頭(50mm)拍攝構圖，攝影機距離地面高度 170cm(一般人眼睛位置的平均高度)，拍攝目標物分三種距離，近距離(175cm)、中距離(700cm)與遠距離(2800cm)，三種距離呈等比級數關係(圖 3.6)。

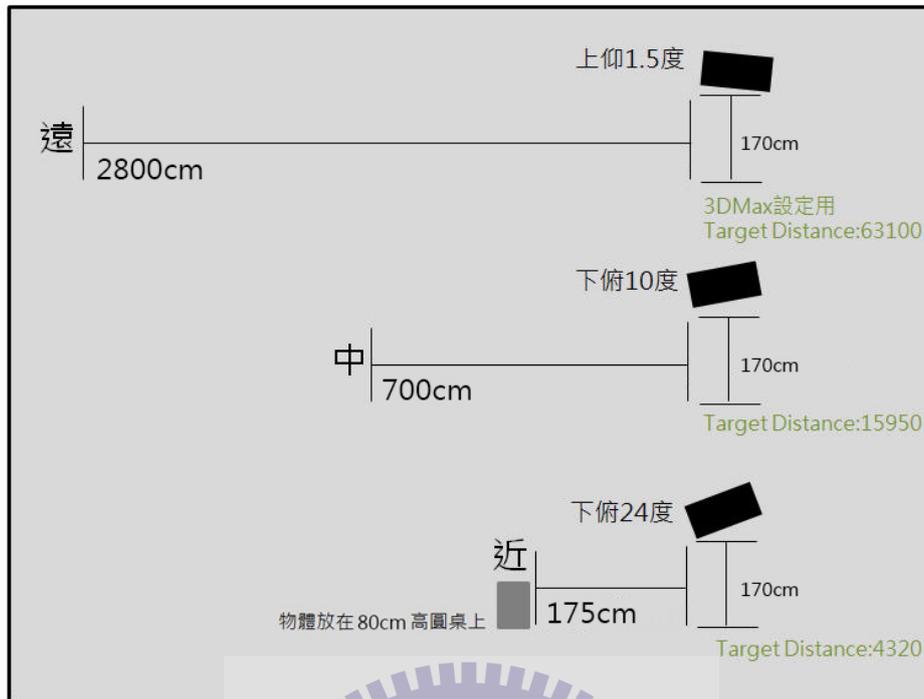


圖 3.6 3D 軟體中攝影機拍攝不同距離目標物的詳細設定

除了操弄三種不同的對焦距離外，另一組我們所操弄的獨變項是物件的結構的複雜度，每種拍攝距離的目標物結構也由簡單到複雜分三種。另外，由於同一物件在不同距離底下的視角大小會有劇烈變化，為了控制視角大小的約略相等，在不同觀測距離中我們採用了物理大小不同的物件作為刺激，因此三種距離下總共設定 9 個不同大小的目標物，目標物的大小設定基本上是模仿真實物件的大小。近距離的三個目標物大小(高度)矩形為 100mm，杯子為 120mm，顯微鏡為 250mm；中距離的三個目標物大小(高度)矩形為 500mm，椅子為 800mm，吉普車為 1000mm；遠距離的三個目標物大小(高度)矩形為 2500mm，鐘塔為 4000mm，廟宇為 5000mm。所有目標物的擺設角度均設定在容易辨識的角度，約在 35~45 度 (圖 3.7)。

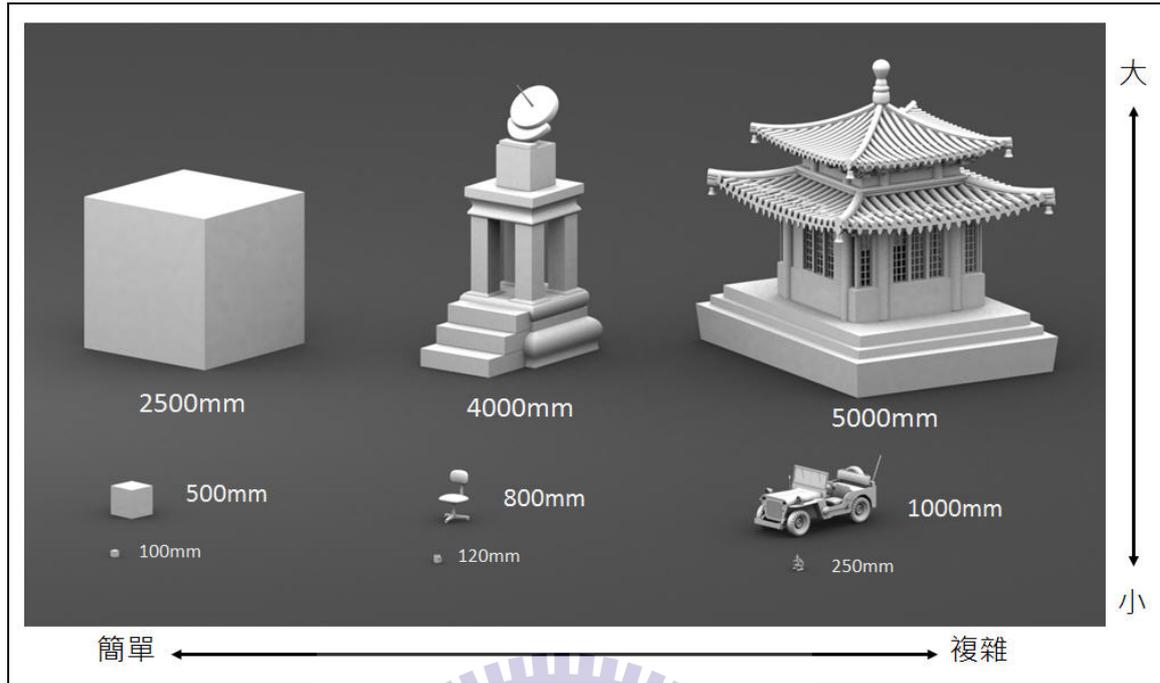


圖 3.7 3D 環境中目標物的大小設定

3.3-3 攝影幾何條件的設定

實驗刺激的製作是在 3D 軟體中模擬出兩台攝影機的畫面，針對單一目標物進行左右攝影機的視差畫面拍攝，一開始兩攝影機以 2mm 為最初の間隔設定，漸次增加其鏡頭間距，而產生像差愈來愈大的左右畫面。每一級變動量皆固定 (2mm)，間距變動級數共 50 級，攝影機間距範圍由 2mm~100mm。

在此實驗中攝影機的安排是平行排列對著拍攝物，隨著距離增加不作輻輳運動，仍然是維持平行角度的情況。圖 3.8 是攝影機的設定方式，圖 3.9 左側圖是以三種距離拍攝矩形所呈現的示範畫面，兩者在左右兩台攝影機(以 L、R 標示)拍攝出的像差畫面有明顯差異，隨著拍攝物愈遠差異愈小，地板採深灰色(R:89 G:89 B:89)，並增加中間灰色格線(R:128 G:128 B:128)以形成空間立體感，拍攝距離遠的物件會出現天空，其色彩則設定為淺藍色(R:196 G:238 B:237)。圖 3.9 右側圖是雙投影機將左右兩眼所接收的畫面重疊呈現在螢幕上的樣貌，受試者再利用偏光眼鏡還原成立體感覺進行實驗。

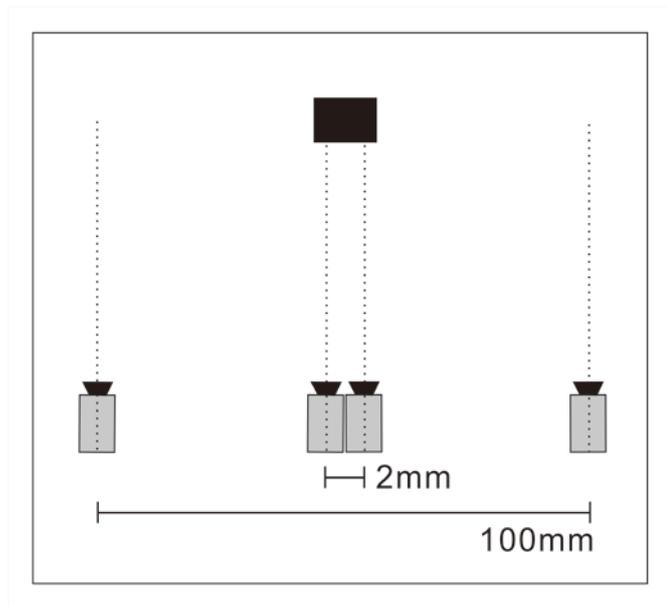


圖 3.8 兩攝影機距離控制圖(無作輻轉運動)

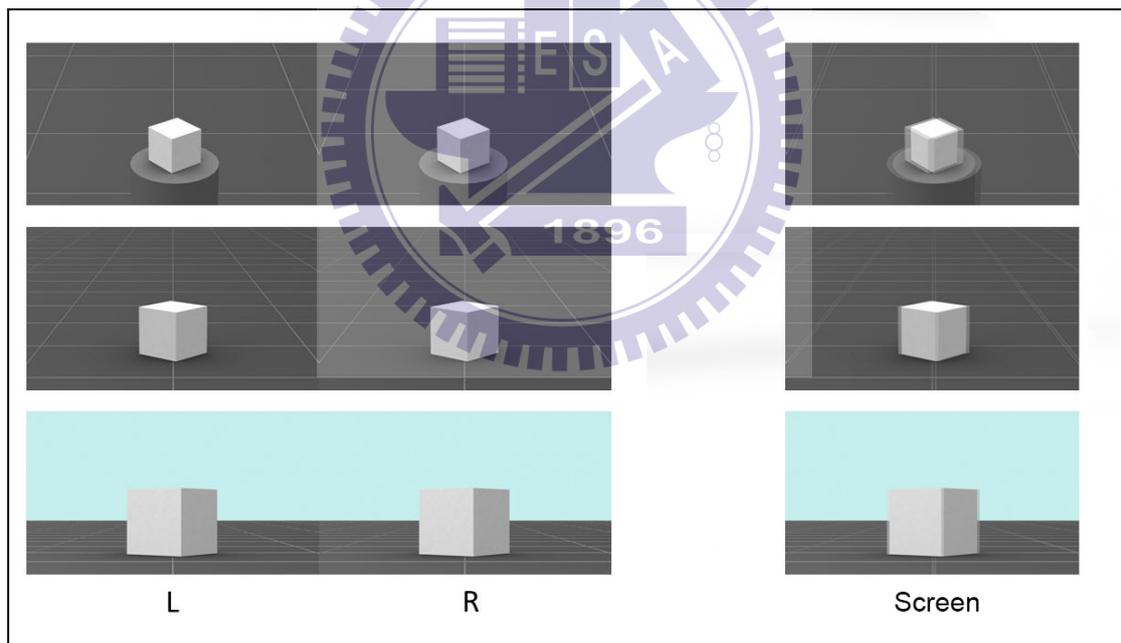


圖 3.9 針對不同距離拍攝矩形目標物的刺激畫面

由於兩攝影機必須針對三種距離與每種距離下三種不同目標物作拍攝，因此受試者在一種攝影機的模式下，所需要面對的不同刺激畫面就有 9 個。

3.3-4 實驗方法

實驗方法使用心理物理學(psychophysics)中的調整法(method of adjustment)來測量差異，調整法是最古老也是最基本的心理物理學方法之一，最主要的特性是讓受試者自己來調整刺激值的大小，直到他感覺與標準刺激相等，或是感覺不出差異與察覺到極限為止，由於受試者可以直接參與實驗的操作，因此較不易感到疲勞。此法適用於測量絕對閾與主觀相等點，也可以測量差異閾。又稱為平均差誤法(method of average error)、再造法(method of reproduction)、均等法(method of equation)。前測階段也曾以其它方法來實驗，發現在測量舒適度時，如果實驗刺激屬於隨機出現模式，一開始便出現像差最大的畫面導致受試者眼睛不適後，便無法短時間恢復到舒適的狀況，因此決定都由無像差影像逐漸加強的調整法當成這階段的實驗方法。

本階段研究以調整法為實驗程式設計的基礎，實驗程式會隨機出現不同對焦距離的立體畫面，受試者則可依據提問，控制鍵盤左右鍵來進行調整像差距離，一直按右鍵會造成像差逐漸增大(攝影間距變大)，按左鍵則狀況相反。調整時間沒有限制，受試者選定後則按下鍵盤空白鍵換下一個刺激，等到 9 個刺激都出現過，實驗程式便會結束，這便是一回合的實驗。受試者根據以下三種不同條件對實驗畫面進行調整法的設定：(1)調整看起來立體效果最佳的位置；(2)調整到看起來最舒服自然的位置；(3)調整到眼睛開始不舒服的位置。每種作業各有其對應的指導語，受試者依照不同指導語的指示每種作業進行三回合的實驗，因此每個受試者在同一畫面中有三次的調整紀錄，三種不同作業則累計共 9 次的數據供統計計算。

3.3-5 前測實驗與討論

前測總共施行四次，每次針對前一次實驗進行修正，總共受測人數約 20 人。在這四次檢討實驗結果與觀察實驗過程時，發現許多以往沒意識到的問題，以下

是把這四次前測問題整理出，以提供正式實驗前改進的項目：(1) 前測所用的地板格子是固定其絕對大小，原本用意是想提供受試者判斷物件大小訊息的線索，然而我們發現這會嚴重干擾立體判斷，主要是在中遠距離時格子數太多(圖 3.9)，因此在正式實驗中改為各種距離的格子大小與觀測物的比例接近的作法。(2)地板與物體明暗程度差異超過某一門檻時，偏光眼鏡會出現明顯左右影像殘影，嚴重干擾判斷，這個問題屬於硬體缺失，可能電影院也有此狀況，在正式實驗中已小心避免此狀況的發生。(3)物體會隨著像差愈大而變形愈嚴重(調整時可以發現)。(4)不同距離的刺激，像差改變的級距(在調整法中每往上或往下調一格的像差變動大小)變化甚大，要找出不同距離受測物件像差的調整範圍值難度頗高，近距離物件由於左右兩眼的攝影機之微小位置變化就會導致大幅的像差改變，調整之級距以 2mm 為單位作變動，實驗提供 50 個級距範圍(100mm)可以滿足多數受測者操作的需求，亦即可以在此像差範圍內決定最舒服、最不舒服、以及立體感最佳的區域。中、遠距離物件的設定在前測時無法得到收斂的結果，受試者調到最後級數也不敷使用，我們在前測階段花費了相當可觀的時間與嘗試次數才定義出正式實驗中所使用的像差級距與變化全距之數值(參見下文之說明)。

3.3-6 正式實驗刺激

(1)實驗刺激改變

實驗刺激的間隔設定是正式實驗與前測實驗最大的不同點之一，由於前測實驗針對不同距離的攝影機間隔變動級距皆相同，所以導致中距離與遠距離的實驗數據皆沒有鑑別度(變動範圍太窄不夠調整)，因此正式實驗時依照拍攝不同距離目標物，在進行調整法的調整時，每一級の間距變動量數值不同，近距離(175cm)拍攝時，兩攝影機維持一級 2mm 的變動數值，且調整時共 50 級，因此兩攝影機的最大變動距離是 100mm；中距離(700cm)拍攝時，兩攝影機以每 6mm 為一級的變動數值，兩攝影機的最大變動距離是 300mm；遠距離(2800cm)拍攝時，兩攝影

機以每 18mm 為一級的變動數值，故兩攝影機的最大變動距離是 900mm。另外也調整 3D 場景地板底圖的亮度，改成較淺的灰色(R:221 G:221 B:221)，格線也改以不干擾視覺又足以觀察到產生空間透視感的亮度(R:191 G:191 B:191)，以減少左右影像干擾的狀況；天空則仍然維持前測時的淺藍色(R:196 G:238 B:237) (圖 3.10)。

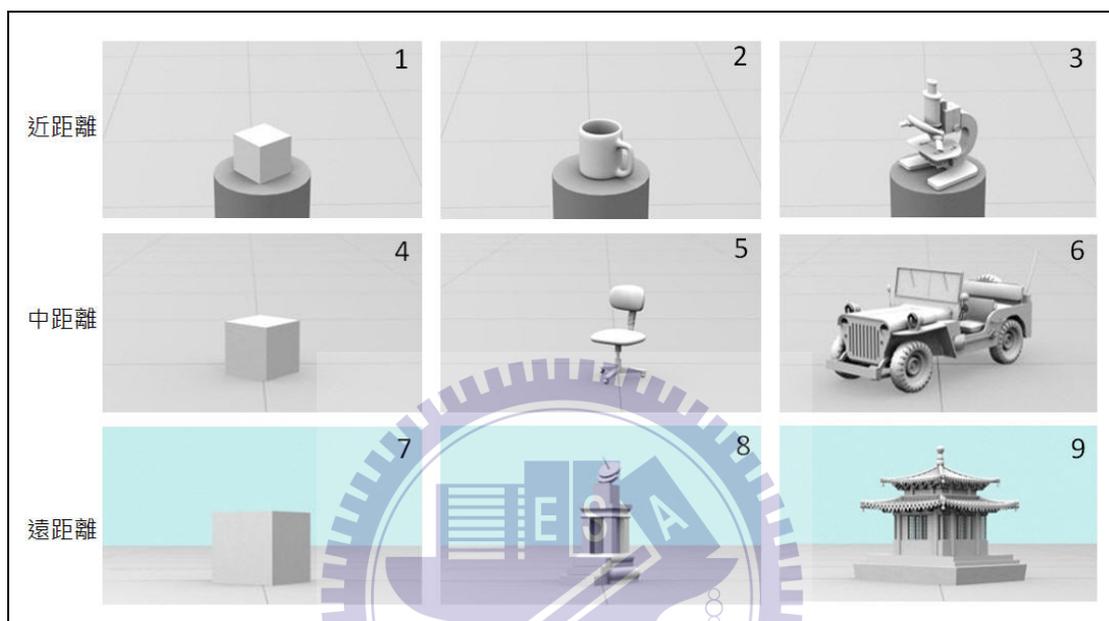


圖 3.10 3D 場景地板與九件刺激目標物的整體效果示意圖(編號用於對照統計圖表)

圖 3.11 呈現本研究中不同距離條件下像差可變動的完整範圍 (全距)，以較複雜的物件作示範。最上方的圖是近距離物件在最小調整級數 2mm(左圖)與最大調整級數 100mm(右圖)的差異；中間圖示則是中距離物件在最小調整級數 6mm(左圖)與最大調整級數 300mm(右圖)的差異；下方的圖則是遠距離物件在最小調整級數 18mm(左圖)與最大調整級數 900mm(右圖)的差異。

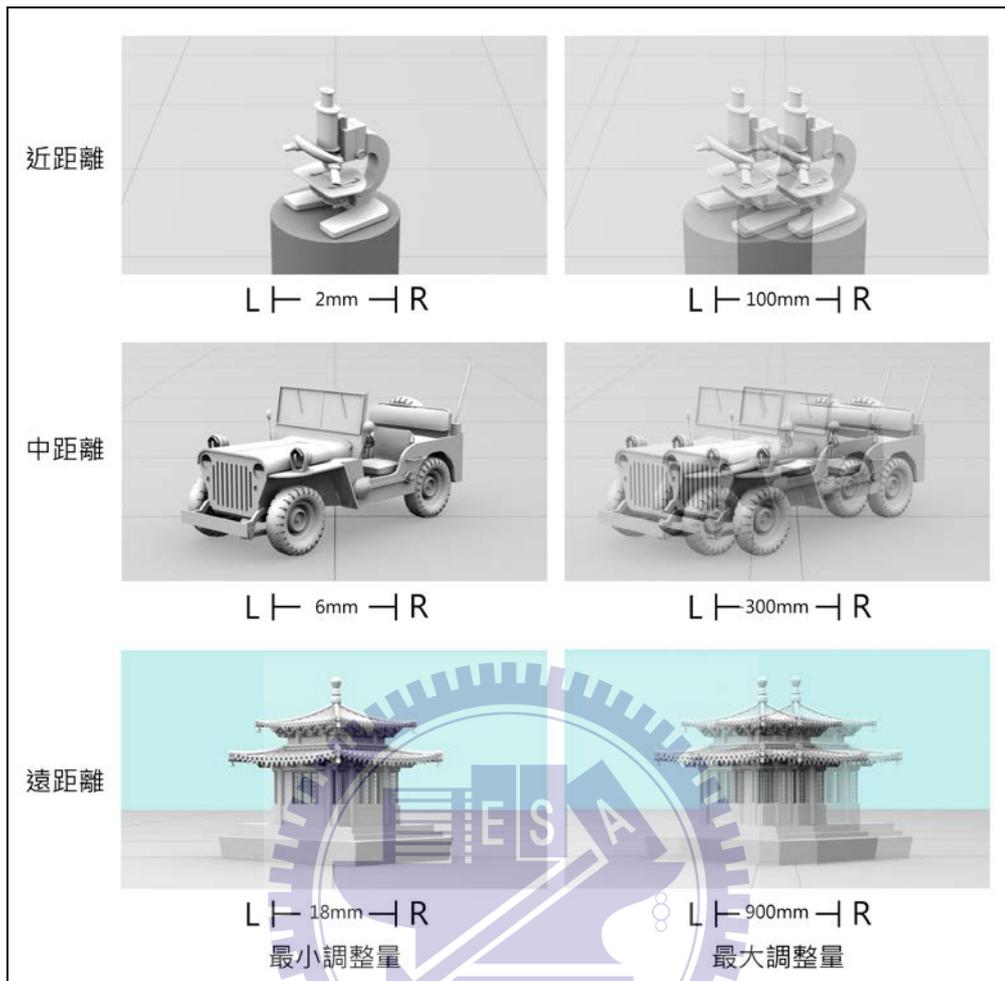


圖 3.11 像差距離實驗三種距離刺激像差全距的示意圖

(2) 實驗人數與實驗流程

正式實驗受測者人數共計 45 人，一回合的實驗總共要調整 9 個立體畫面（3 種距離 X 3 種物件）。一個作業為了穩定度須重覆測量三回合，共有三個作業（最舒服、最不舒服、立體感最強），故受試者一次實驗要作九回合、共計 81 次的立體畫面調整作業。

3.4 第一部分實驗（二）：聚合對焦實驗

3.4-1 實驗概念說明

在聚合對焦部分：目前除了電影用的高階攝影機系統有考慮聚合(vergence)效果而做出機械式的調整外(圖 3.12a)，一般的攝影系統皆採用固定平視的雙鏡頭設計(圖 3.12b)；即使可調整的機器也可能因手動方式，在拍攝時多半對運動主體無法進行即時調整，這與人類視覺可以提供的肌肉對焦線索便不一致。這類為了節省成本或技術不足等因素，讓攝影機的設計忽略聚合運動的功用，是否會在 3D 立體影像上產生一些問題，讓觀者在大腦整合時造成昏眩不適，便是本階段實驗另一個欲了解的內容。

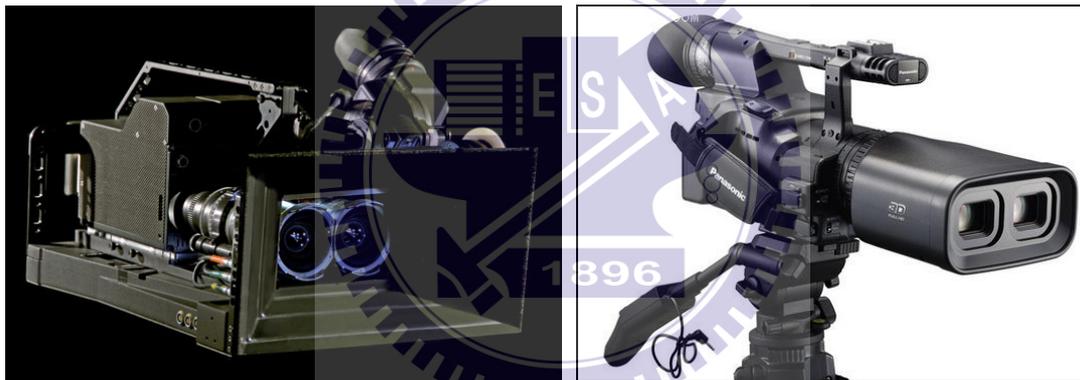


圖 3.12 a.SONY 為阿凡達電影開發的攝影機 b.家用的 3D 攝影機(Panasonic AG-3DA1)

(<http://celluloidpopculturejunkie.wordpress.com/tag/pace-fusion-3d-camera/>)

3.4-2 實驗基本設定

聚合對焦實驗在實驗基本設定上與像差距離實驗除了攝影機會隨目標物進行輻轉運動外，在攝影機與目標物的距離設定(參考圖 3.6)、9 種目標物(參考圖 3.10)、目標物大小設定(參考圖 3.7)與地板天空背景設定(參考圖 3.10)均相同。除了可以依循前測實驗所改進的部分外，最重要的是可以比較兩台攝影機在不同間隔距離下，拍攝的影像是否做輻轉運動對於 3D 立體視覺上面的影響。

3.4-3 實驗刺激

實驗刺激的製作是在 3D 軟體中模擬出兩台攝影機的畫面，針對單一目標物進行左右攝影機的視差畫面拍攝，一開始兩攝影機以 2mm 為最初の間隔設定，漸次增加其鏡頭間距，而產生像差愈來愈大的左右畫面。每一級變動量皆固定 (2mm)，間距變動級數共 50 級，像差間距範圍由 2mm~100mm。

攝影機會針對目標物作輻輳運動，因此隨著兩攝影機間距愈大，而攝影機角度會有向內聚集的情形(圖 3.13)。實驗依照前測實驗經驗，故拍攝不同距離目標物，調整時的每一級の間距變動量數值不同，近距離(175cm)拍攝時，兩攝影機維持一級 2mm 的變動數值，且調整時共 50 級，因此兩攝影機的最大變動距離是 100mm；中距離(700cm)拍攝時，兩攝影機以每 6mm 為一級的變動數值，兩攝影機的最大變動距離是 300mm；遠距離(2800cm)拍攝時，兩攝影機以每 18mm 為一級的變動數值，故兩攝影機的最大變動距離是 900mm(圖 3.14)。

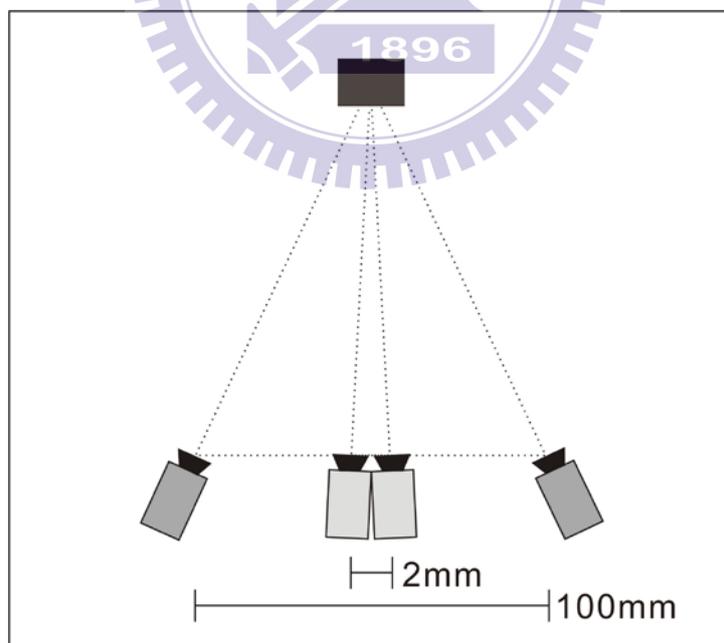


圖 3.13 兩攝影機距離控制圖(作輻輳運動)

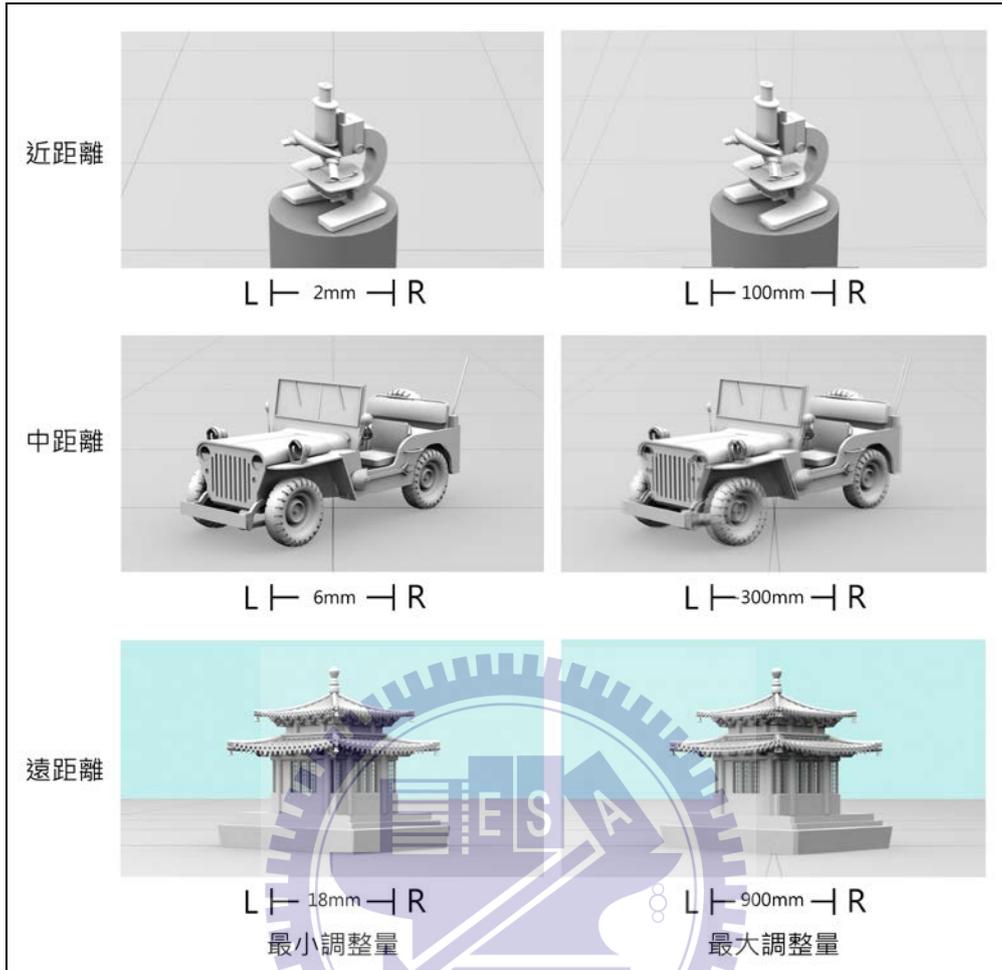


圖 3.14 在鏡頭模擬輻轉運動的條件下，像差距離實驗三種距離刺激像差全距的示意圖

比較兩種不同攝影方法，圖 3.15 是攝影機以三種距離拍攝目標物所呈現的示範畫面，左邊組圖是沒有針對目標物作輻轉運動的結果，右邊組圖則是有作輻轉運動的結果，兩者在左右兩台攝影機拍攝出的像差畫面有明顯差異，無輻轉運動的攝影機拍攝影像，在最大調整量的狀況下，可以看出目標物與背景位移(像差)較為明顯；相反的使用輻轉運動的攝影機，則由於攝影機中央焦點都以目標物為中心，所以影像中目標物像差不明顯，反而是背景的格線像差便很明顯。由於兩種不同攝影方法產出的影像差異頗大，所以利用 3D 立體系統呈現後的立體感覺應該也是完全不同的感受。

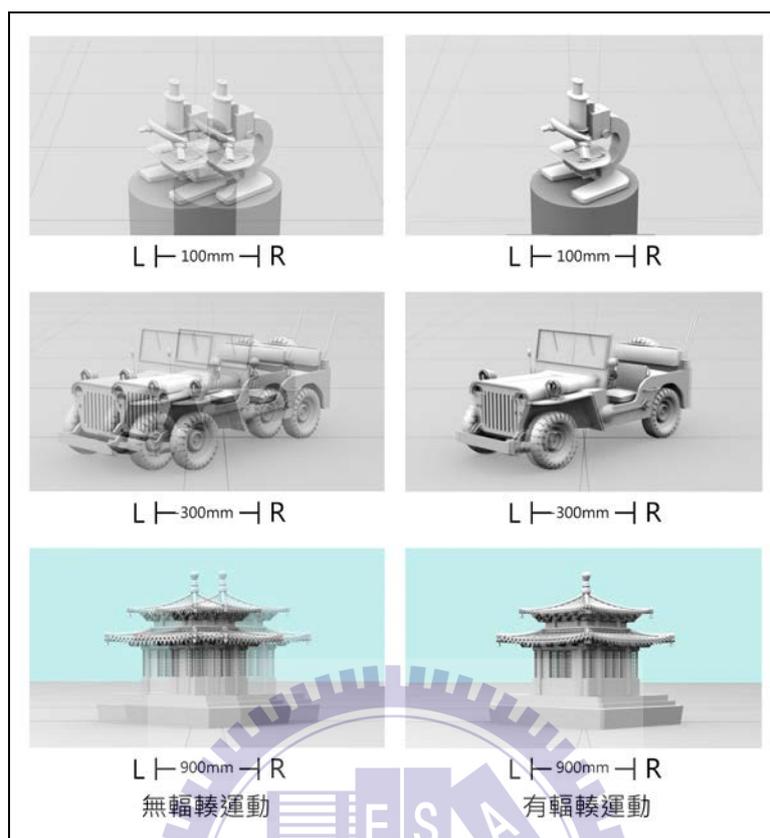


圖 3.15 不同距離目標物以不同拍攝方法的實驗畫面

3.4.4 實驗方法

本實驗方法與像差距離實驗相同，以心理物理學中的調整法來測量差異，實驗程式會隨機出現不同對焦距離(含 vergence)的立體畫面，受試者則可依據指導語的提問，控制鍵盤左右鍵來進行調整像差距離，一直按右鍵會讓像差逐漸增大(攝影間距變大)，按左鍵則狀況相反。受試者選定後則按下鍵盤空白鍵換下一個刺激，等到 9 個刺激都出現過，實驗程式便會結束，這便是一回合的實驗。

設定的提示語與像差距離實驗相同，共有三類：(1)調整到看起來立體效果最佳的位置；(2)調整到看起來最舒服自然的位置；(3)調整到眼睛開始不舒服的位置。

正式實驗受測者人數共計 45 人，實驗一回總共要調整 9 個作輻轉運動設定

的立體畫面。一個提問為了穩定度須重覆受測三回合，共有三個提問，故受試者一次實驗要作九回合，總計 81 次的立體畫面調整作業。

3.5 第二部分實驗（一）：焦距與景深實驗

3.5-1 實驗概念說明

焦距與景深關係：在攝影的美學中，景深(depth of field)是一項重要的元素，因此在電影攝影與構圖中，無論是短焦距(低於 35mm)的廣角畫面，或是中焦距(135mm 左右)的特寫畫面，或是長焦距(200mm 以上)的望遠畫面都少不了景深的陪襯，除了增加美感外，也可以營造深度與立體感。不過，由於人眼如同配備超廣角鏡頭與小光圈的瞳孔，加上非常近距離看東西的機會也不多，所以除了從平面攝影與電影的構圖美學來獲得景深印象外，日常生活的感受並不明顯。

因此當 3D 影像由大腦處理像差，形成如突出在眼前的真實物件時，此時再搭配上明顯的模糊景深時，立體效果是更好，還是會出現反效果的情形，或是是否會有不適的狀況，這是此階段研究想要了解的重點。

3.5-2 實驗基本設定

經由第一部分像差實驗結果，兩攝影機在 3D 軟體中間距設定為不會產生不適感且適當的距離 90mm，並在對目標物對焦時作可提升視覺舒適度的聚合對焦。攝影機距離地面高度 200cm，目標物為一個矩形正立方塊，長寬高均為 500mm，拍攝距離 10m(圖 3.16)。

實驗的操作變項為焦距，設定拍攝鏡頭則有三種焦距，廣角鏡頭 25mm(視角 43.84°)、標準鏡頭 50mm(視角 22.75°)與中焦段鏡頭 100mm(視角 11.49°)(圖 3.17)，在前測實驗時發現受試者不知注意力該放在何處，因此正式實驗時，攝影機目標

物有標示黑點提供受試者凝視。

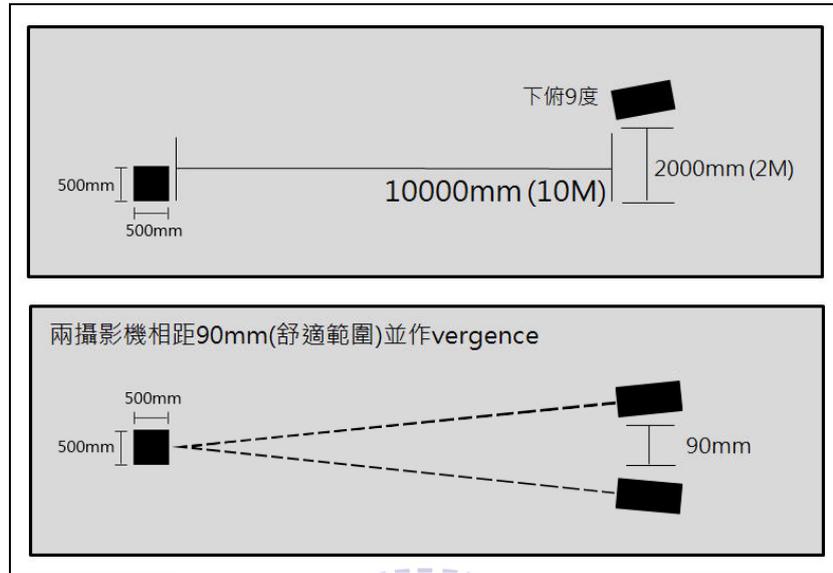


圖 3.16 3D 軟體中兩台攝影機間距與目標物距離的設定

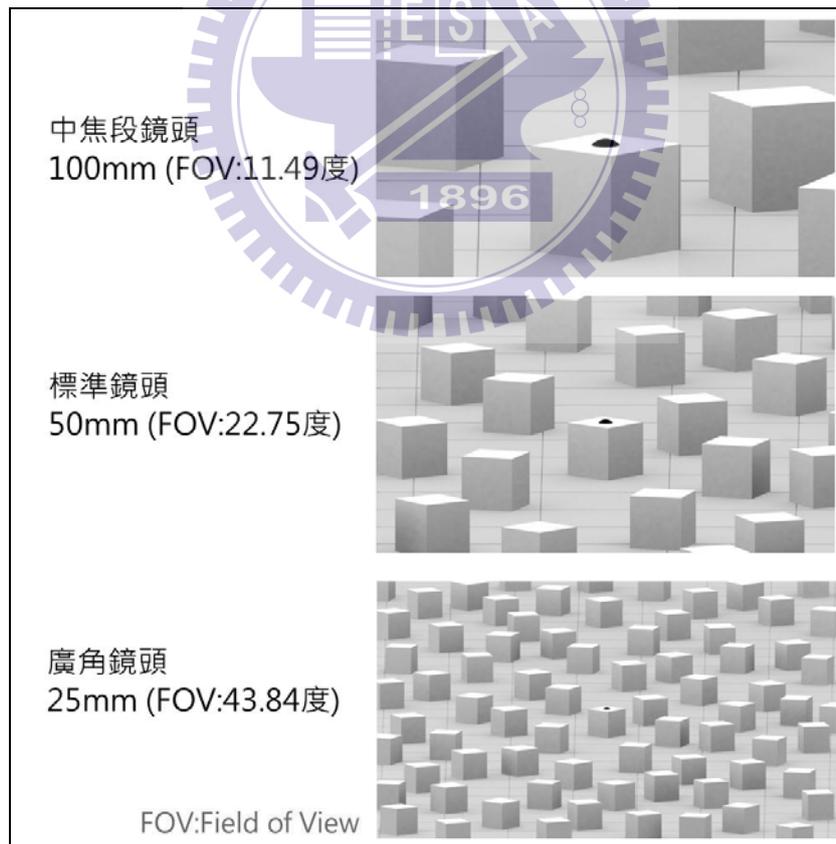


圖 3.17 實驗畫面的三種焦距與視角(FOV)設定圖

受試者依據看到的畫面與提示語調整景深，調整範圍是每一種焦距構圖，由深到淺的景深(清晰範圍寬到清晰範圍窄)設定有 10 級變化。在圖 3.18 可見，以目標物中心點前後清晰距離當變動單位，中焦段鏡頭(焦距單位 100mm)這組以 60cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 600cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 60cm；標準鏡頭(焦距單位 50mm)這組以 120cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 1200cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 120cm；廣角鏡頭(焦距單位 25mm)這組以 240mm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 2400cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 240cm。畫面清晰範圍轉換成以佔據受試者視角範圍來說明，則中焦段鏡頭 10 級分別是 33°、29.9°、26.7°、23.6°、20.4°、17.3°、14.1°、11°、7.8°、4.7°；標準鏡頭 10 級分別是 33°、30.8°、28.5°、26.7°、24°、19.5°、15°、10.5°、6°、3.8°；廣角鏡頭 10 級分別是 33°、31°、29°、25°、20.9°、16.9°、12.8°、8.8°、4.8°、1°。

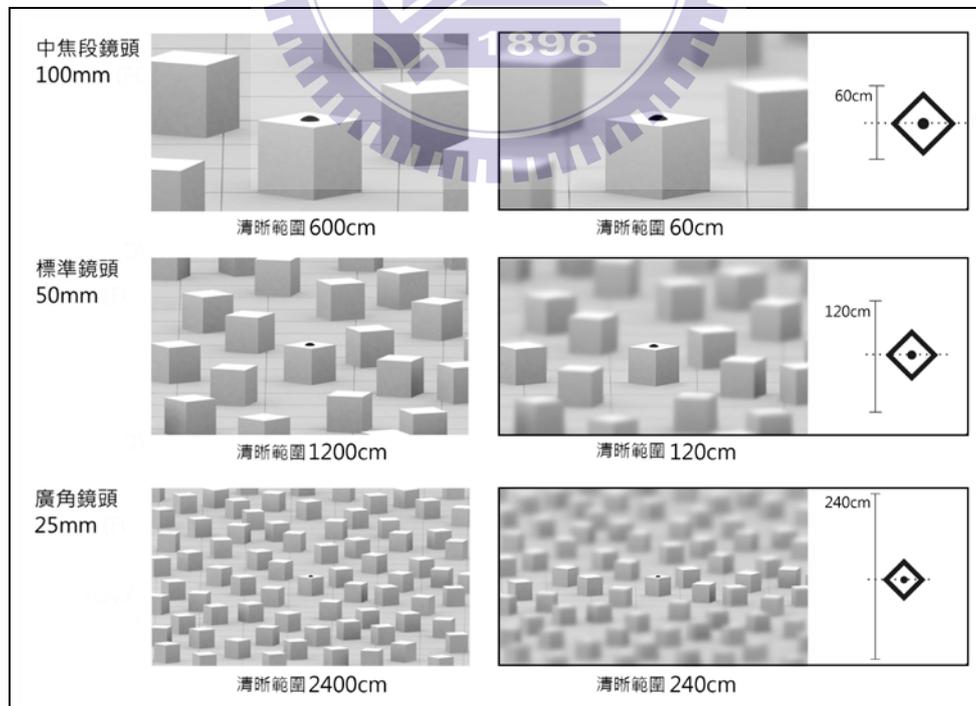


圖 3.18 不同焦距下景深調整最深(清晰範圍最大)與最淺(清晰範圍最小)示意圖

3.5-3 實驗刺激

實驗除了操弄三種不同的對焦距離外，另一組我們所操弄的獨變項是物件在物體辨識產生的大小知覺，想知道受試者對於物體大小知覺的判斷，是否也會影響到景深的判斷，因此每種拍攝距離的目標物結構也由簡單到複雜分三種，簡單的結構與先前實驗刺激最簡單的目標物相同，以正立方塊當實驗刺激；稍微複雜一點的結構以可能產生是小物件印象的鎖頭當目標物；更複雜的結構則是可能產生大型物件感覺的挖土機當成目標物。這些目標物雖然可能產生大小知覺的判斷，不過在 3D 軟體設定時，尺寸接近相同，都接近長寬高 500mm 的體積大小，並無實際尺寸大小的變化(圖 3.19)。

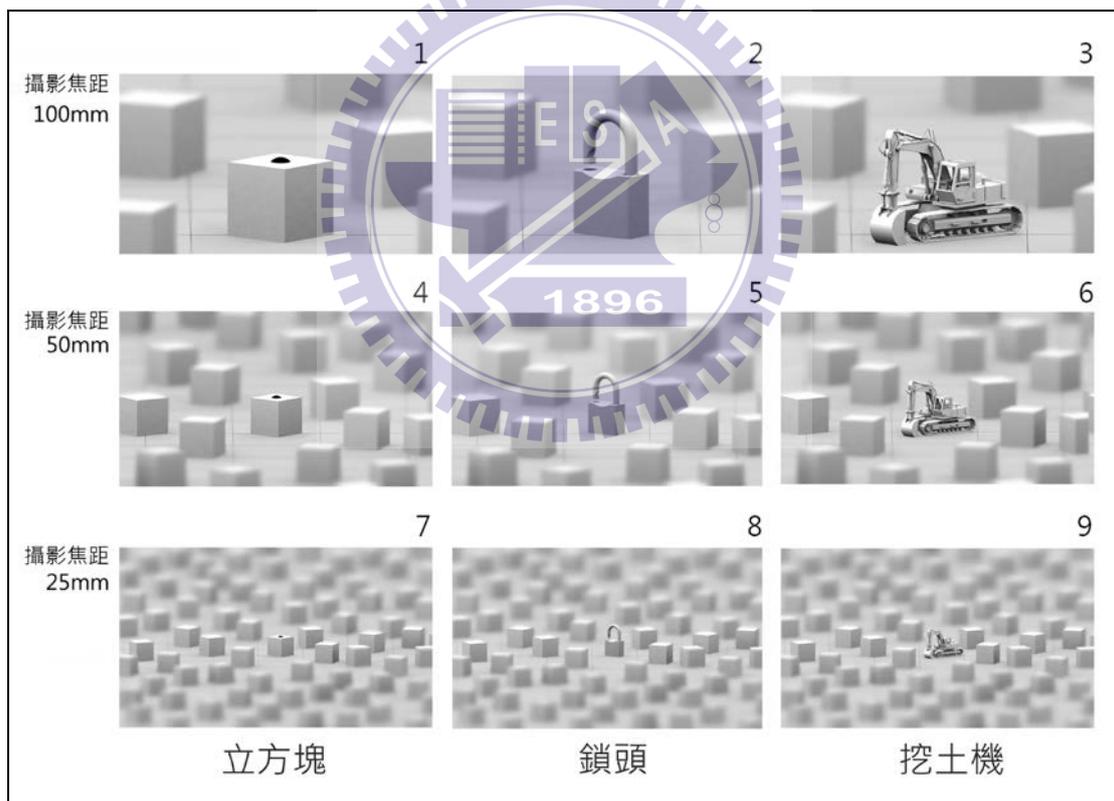


圖 3.19 三種不同焦距與三種複雜度目標物示意圖(編號用於對照統計圖表)

3.5-4 實驗方法

3.5-4-1 實驗方法 (一) 調整法

實驗方法仍同樣使用調整法來測量差異，實驗程式會隨機出現不同焦距(含不同複雜度目標物)的立體畫面，受試者則可依據提問，控制鍵盤左右鍵來進行調整景深，按右鍵增大清晰範圍(景深加大)，按左鍵則狀況相反。受試者選定後則按下鍵盤空白鍵換下一個刺激，等到所有刺激都出現過，實驗程式便會結束，這便是一回合的實驗。

設定的提示語有三類：(1)調整到看起來立體效果最佳的位置；(2)調整到畫面看起來最自然的位置；(3)調整到眼睛開始不舒服的位置。

正式實驗受測者人數共計 60 人，實驗一回總共要調整 9 個立體畫面(圖 3.19)，3 個不同焦距(不同視角)的立體畫面，每一種焦距畫面都有三種不同形狀的畫面。一個提問為了穩定度須重覆受測三回合，共有三個提問，故受試者一次實驗要作九回合的立體畫面調整作業。

3.5-4-2 實驗方法 (二) 配對比較法

以實驗方法(一)操作研究時，針對提示語(1) 調整到看起來立體效果最佳的位置所做的實驗，統計後發現出現雙峰分配的狀況，可觀察圖 3.20 的長條圖，X 軸是清晰範圍的級數，1 代表清晰範圍最大(深景深)，10 代表清晰範圍最小(淺景深)；Y 軸是受試者選擇的次數統計。發現受者者在立體化的調整下有兩極化的狀況，一大群體認為沒有景深的畫面(景深無限大)最立體，另一大群體則是偏好景深較淺的畫面。詢問過受測者發現可能的原因是多數受過攝影教育，因此模糊景深可以提供立體感的想法深植在觀念中，影響到單純用視覺判斷作答的情形，加上調整法無法讓受試者可以同時比較有、無景深對立體感的差異，所以造成這種分配的情形。

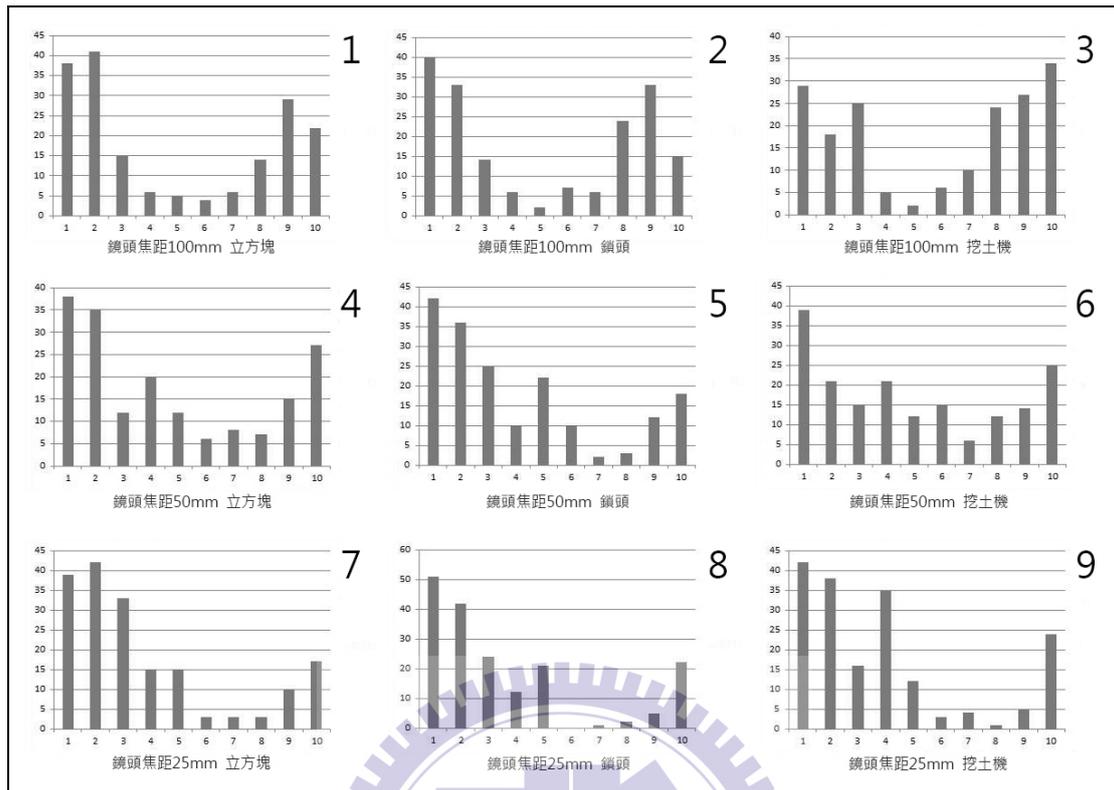


圖 3.20 九種實驗刺激最立體化的分布圖(調整法)

基於以上原因，針對立體效果的問題研究我們使用另外一種方法，稱為配對比較法(paired comparison method)。許多研究物理刺激與心理感覺的實驗，最終的目的就是希望可以將受試者對刺激的心理感覺反應轉換成量化的數據，再將數據轉換成可以反映心理感覺程度的間距量表，配對比較量表是較容易與最接近此目標的實驗方法，因為要進行配對比較，所以每次只會有兩樣刺激顯示，對於受試者而言，在兩樣刺激中就實驗者所要求的向度上選擇其中較為優勢的一個刺激，似乎是單純且難度較低的工作，而最重要的是此法可以產生一個心理感覺的間距量表。

由於配對比較法需要所有刺激兩兩配對比較，因此原先三種焦距乘上三種複雜度的目標物，再乘上 10 級景深清晰度變化，如此配對的數量會變得過於龐大，故僅以立方塊為單一目標物，配合上三種焦距的變項與 5 級的不同景深清晰範圍，構成 15 個實驗刺激。圖 3.21 則是實驗刺激，除了三種不同焦距的變項外，

每一個焦距在景深上由深到淺(清晰範圍窄到清晰範圍寬)設定有 5 種變化。以中焦段鏡頭(焦距單位 100mm)這組以 120cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 600cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 120cm；標準鏡頭(焦距單位 50mm)這組以 240cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 1200cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 240cm；廣角鏡頭(焦距單位 25mm)這組以 480cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 2400cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 480cm。

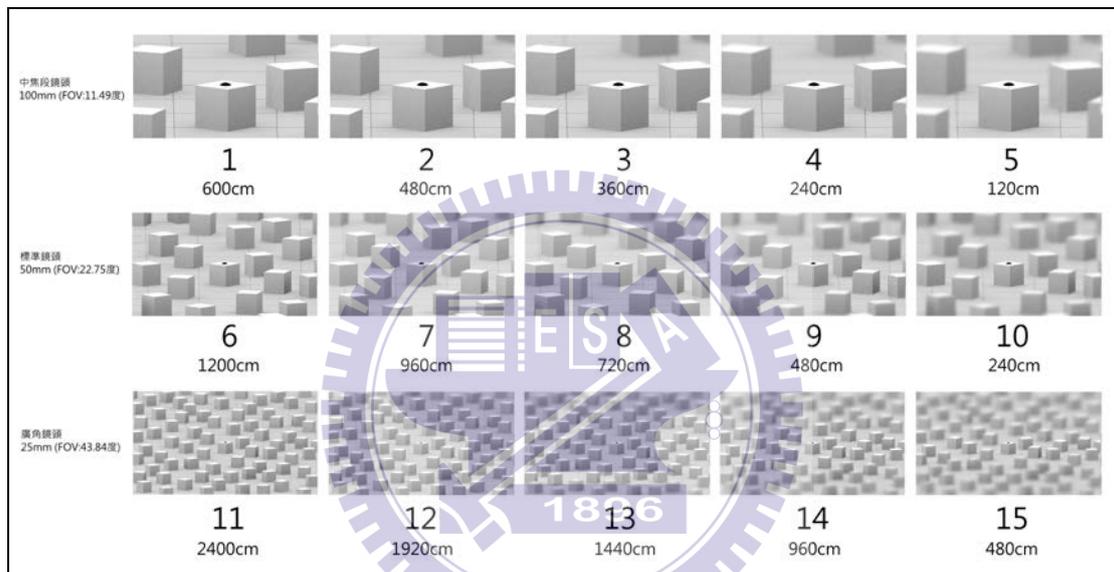


圖 3.21 配對比較法的 15 種實驗刺激(編號用於對照統計圖表)

實驗時，程式會隨機從 15 個實驗刺激中任選 2 個呈現在畫面兩側(圖 3.22)，受試者則可依據提示語：左右哪個刺激看起來較為立體，控制鍵盤左右鍵來進行選擇，按下選擇鍵後則換另一個配對組合，當 15 個實驗刺激彼此兩兩配對都完成後，實驗程式便會結束，這便是一回合的實驗，所以會有 105 個配對畫面需要受試者做選擇。

配對比較表實驗受測者人數共計 60 人，實驗一回總共要選擇 105 個配對立體畫面，每一個受測者為了穩定性重複施測 3 回，因此每個配對組合有 180 個數據可供統計，足夠建立穩定的資料結構。

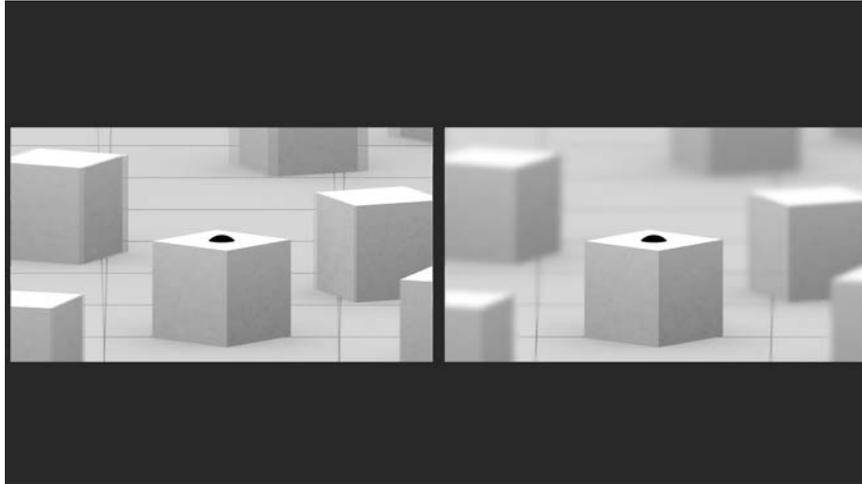


圖 3.22 配對比較法實驗刺激在螢幕上的設定畫面(水平視角 55 度、垂直視角 18 度)

3.6 第二部分實驗（二）：亮度與景深實驗

3.6-1 實驗概念說明

亮度與景深關係：從文獻探討中可知，人類視覺經驗中多半時間是處於小光圈(瞳孔開口 2mm)的情形，除非到了無人造光源的月光底下，瞳孔才開始放大些，一直要到光線微小到比星光還弱時，人眼才是屬於大光圈的狀況(瞳孔開口 7.1mm)(見圖 2.4)，因此光線強弱與於景深大小在生理上有一定的關聯性。

本階段研究之源由便是因為筆者在前測資料收集階段時，與一同觀看的評估者觀看 3D 電影時發現：視覺系統對於影片中昏暗環境搭配極淺的景深似乎適應度較好，且不會覺得有不自然的狀況，而昏暗環境所造成的大瞳孔正是在自然情況下產生淺景深的條件，因此筆者好奇在 3D 影片中的舒適度與自然感是否遵循自然條件下景深變化的規則，亦即低亮度/淺景深與高亮度/深景深的搭配比其他的組合自然。由於本實驗希望探討畫面亮度與景深範圍接受度的關係，因此實驗會操作的變項是亮度，觀察受試者對於景深的調整，是否會隨螢幕場景亮度的變化而有所變動。

3.6-2 實驗基本設定

實驗基本設定與焦距與景深實驗相同，兩攝影機在 3D 軟體中間距設定為 90mm，並在對目標物對焦時作聚合對焦。攝影機距離地面高度 200cm，目標物設定為一個矩形正立方塊，長寬高均為 500mm，拍攝距離 10m(圖 3.16)。

實驗的操作變項為亮度，在同一個焦段鏡頭下改變 3D 軟體燈光亮度，製造出三種不同亮度的環境，讓畫面中的白色部分有(255.255.255)、(155.155.155)與(55.55.55)三種亮度變化。兩台投影機投出來的畫面會經過投影機前面的偏光鏡再經過受試者偏光眼鏡進入眼睛視野，因此光線會受到兩次偏光的折損，所以畫面亮度動態範圍會被壓縮，這也是亮度只分成三個級別的主要原因。亮度的定義是投出來的畫面經由兩次偏光後，藉由光度計 PR650(圖 3.23)測量畫面中在軟體設定的白色部分(目標物立方體上方平面部分)之明度(物理明度，即 CIE 系統上的大 Y 值)數值，高明度實驗刺激組明度為 70.3 cd/m^2 ；中明度實驗刺激組明度為 40.3 cd/m^2 ；低明度實驗刺激組明度為 10.4 cd/m^2 ，三種不同實驗刺激組明度維持等距的變化(圖 3.24)。

另外也搭配操作三種攝影機焦距，基本設定也與前項實驗相同，廣角鏡頭 25mm(視角 43.84 度)、標準鏡頭 50mm(視角 22.75 度)與中焦段鏡頭 100mm(視角 11.49 度)(圖 3.17)。因此 3 種焦距變化與 3 種不同明度的搭配，一回實驗共有 9 種狀況需調整。



圖 3.23 光度計 PR650

3.6-3 實驗刺激

圖 3.24 是本階段實驗的刺激，主要操弄的獨變項是明度，並搭配三種攝影焦距，受試者依據看到的畫面與提示語調整景深，與前項調整法實驗相同，景深調整範圍由深到淺(清晰範圍寬到清晰範圍窄)設定有 10 級變化(圖 3.18)。中焦距鏡頭(焦距單位 100mm)這組以 60cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 600cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 60cm；標準鏡頭(焦距單位 50mm)這組以 120cm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 1200cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 120cm；廣角鏡頭(焦距單位 25mm)這組以 240mm 為變動單位，最深的景深，對焦物前後共有 2400cm 的清晰範圍，最淺的景深則是清晰範圍前後共 240cm。

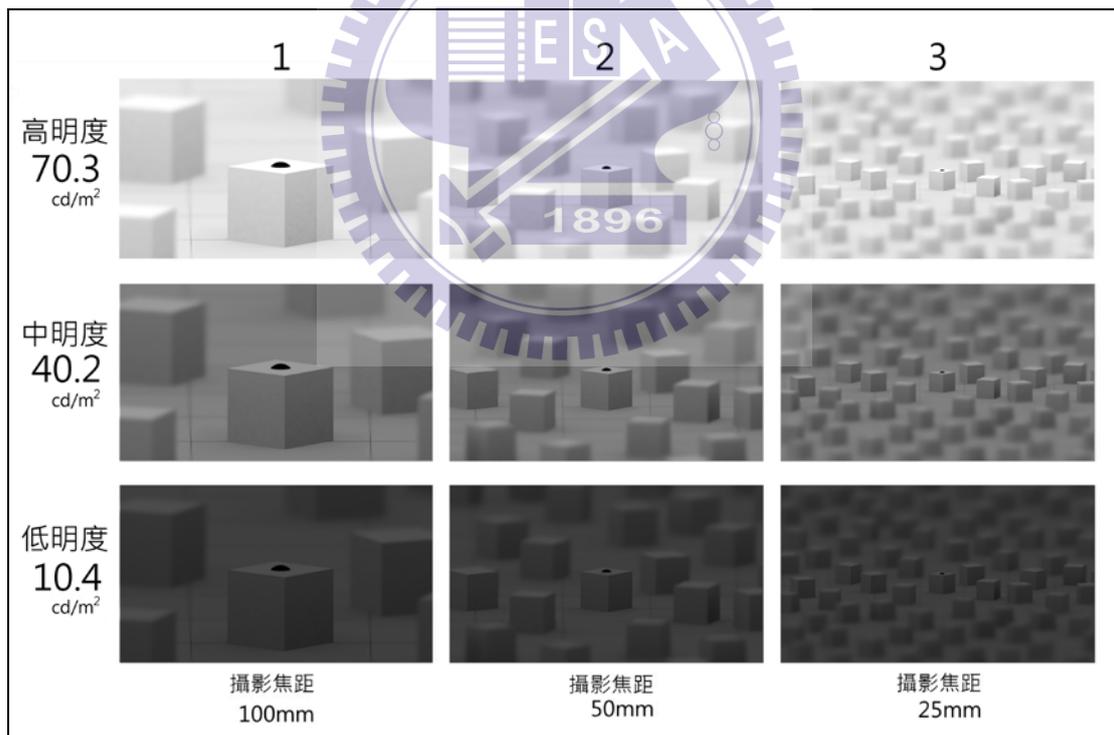


圖 3.24 三種明度與三種焦距組合的實驗刺激示意圖(編號用於對照統計圖表)

3.6-4 實驗方法

本實驗使用心理物理學中的極限法(method of limits)，刺激以相等間距變化，從遠離閾限值開始，以漸增(上升嘗試 ascending trial)，或漸減(下降嘗試 descending trial)的方向逼近閾限值，以上升方向為例：當受試者由一開始無法察覺刺激的狀態開始轉為感受到刺激時，便由另一端往下逼近，直至反應型態又改變的那一點為止，交替實施數次，取其轉折點的平均值，即為極限法所求出的閾限值。

實驗開始時，實驗程式會隨機出現不同實驗刺激的立體畫面，與先前調整法不同之處，調整法景深都是從最大的清晰範圍漸漸調整限縮。本實驗為了避免習慣性誤差(error of habituation)與預期性誤差(error of expectation)，則是從 10 級的景深隨機決定起始點，依據起始點是高於或低於閾值的估計點作下降或上升序列，所以每個實驗刺激都會有不同的調整出發點，上升組與下降組輪流出現。受試者依據提問：怎樣的景深畫面最自然?，控制鍵盤左右鍵來進行調整景深的強弱，一直按右鍵則是景深愈來愈深(清晰範圍變大)，按左鍵則狀況相反。受試者選定後則按下鍵盤空白鍵換下一個刺激，等到 9 個刺激都出現過，實驗程式便會結束，這便是一回合的實驗。

實驗受測者人數共計 30 人，實驗一回總共要調整 9 個立體畫面，每個畫面會隨機出現 3 次上升與 3 次下降嘗試，故一個實驗刺激畫面有 180 個受試者資料可供統計。

第四章 結果與討論

4.1 像差距離實驗結果

(1) 最佳立體效果調整結果

在無輻轉對焦運動的像差距離實驗中，針對最佳立體效果度的調整，經過統計 45 名受測者資料後，在圖 4.1 的 X 軸部分代表 1~9 號目標物，標號下方標示完整的統計數值，上排數字是平均值(AVG)，下排數字是標準差(STD)，Y 軸是兩攝影機の間距單位(mm)。從圖中可知 1~3 號近距離的目標物，受試者覺得 3D 立體效果最佳の間距約在 46.6mm~61.4mm；4~6 號中距離的目標物 3D 立體效果最佳の間距約在 162.7mm~173.1mm；7~9 號遠距離的目標物 3D 立體效果最佳の間距約在 529.6mm~610.4mm。

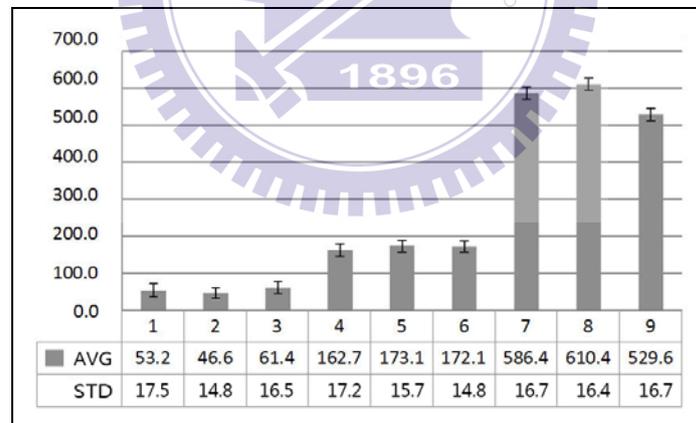


圖 4.1 不同距離最佳立體效果數值統計表(無輻轉運動)

(2) 最佳舒適度調整結果

針對舒適度的調整結果統計，與圖 4.1 相同，在圖 4.2 的 X 軸部分代表 1~9 號目標物，標號下方標示完整的統計數值，Y 軸是兩攝影機の間距單位(mm)。從圖 3.13 中可知 1~3 號近距離的目標物，受試者覺得 3D 立體效果最舒服自然的間

距約在 25.4mm~30.3mm；4~6 號中距離的目標物 3D 立體效果最舒服自然的間距約在 70.7mm~86.8mm；7~9 號遠距離的目標物 3D 立體效果最舒服自然的間距約在 298.4~361.2mm。

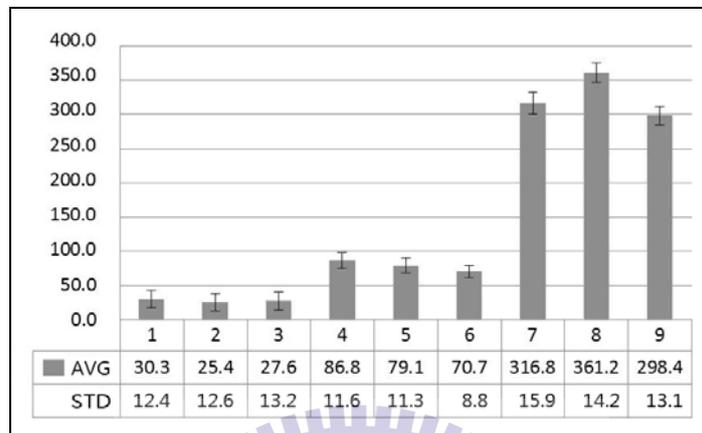


圖 4.2 不同距離最佳舒適度數值統計表(無輻轉運動)

(3) 視覺不舒適起始點調整結果

視覺不舒適起始點即是受試者調整到眼睛開始不舒服的位置，大於等於此數值都更有機會產生不舒服的視覺現象。與圖 4.1、4.2 相同，在 X 軸部分代表 1~9 號目標物，標號下方標示完整的統計數值，Y 軸是兩攝影機的間距單位(mm)。從圖 4.3 中可知 1~3 號近距離的目標物，受試者覺得 3D 立體效果開始不舒服的間距約在 43.0mm~46.7mm；4~6 號中距離的目標物 3D 立體效果開始不舒服的間距約在 134.1mm~143.1mm；7~9 號遠距離的目標物 3D 立體效果開始不舒服的間距約在 462.4mm~537.2mm。

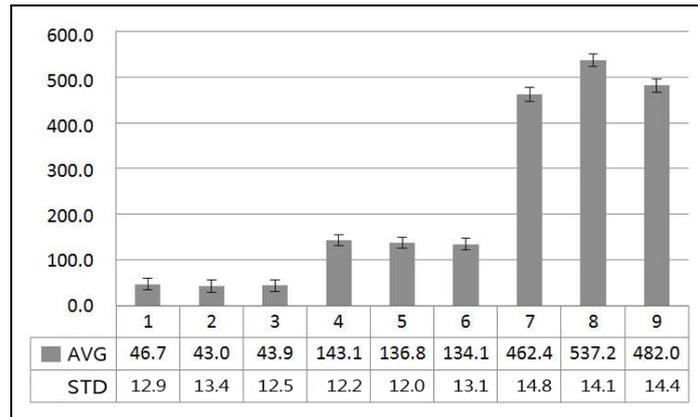


圖 4.3 不同距離不舒適起始點數值統計表(無輻轉運動)

4.2 聚合對焦實驗結果

(1) 最佳立體效果調整結果

在有輻轉運動的攝影機運作下，受試者調整看起來立體效果最佳的位置，經過統計 45 名受測者資料後，在圖 4.4 的 X 軸部分代表 1~9 號目標物，標號下方標示完整的統計數值，上排數字是平均值(AVG)，下排數字是標準差(STD)，Y 軸是兩攝影機の間距單位(mm)。從圖中可知 1~3 號近距離的目標物，受試者覺得 3D 立體效果最佳の間距約在 57.8mm~67.2mm；4~6 號中距離的目標物 3D 立體效果最佳の間距約在 177.6mm~195.5mm；7~9 號遠距離的目標物 3D 立體效果最佳の間距約在 572.4mm~668.8mm。

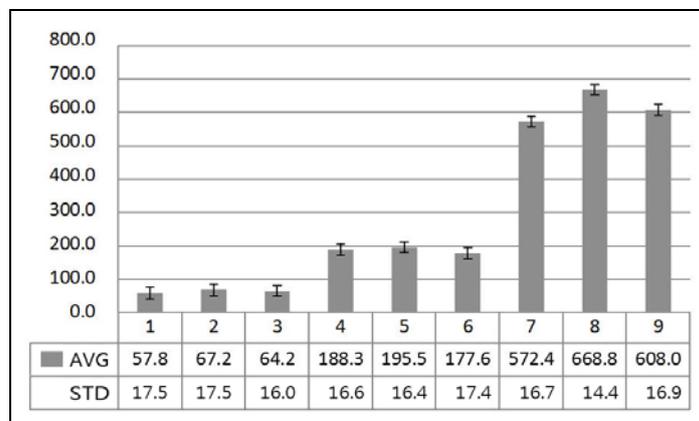


圖 4.4 不同距離最佳立體效果數值統計表(輻轉運動)

(2) 最佳舒適度調整結果

在有輻輳運動的攝影機運作下，針對受試者最佳舒適度的數值統計，與圖 4.4 相同，在圖 4.5 的 X 軸部分代表 1~9 號目標物，標號下方標示完整的統計數值，Y 軸是兩攝影機の間距單位(mm)。從圖 4.5 中可知 1~3 號近距離的目標物，受試者覺得 3D 立體效果最舒服自然的間距約在 29.2mm~38.4mm；4~6 號中距離的目標物 3D 立體效果最舒服自然的間距約在 102.4mm~117.7mm；7~9 號遠距離的目標物 3D 立體效果最舒服自然的間距約在 334~443.2mm。

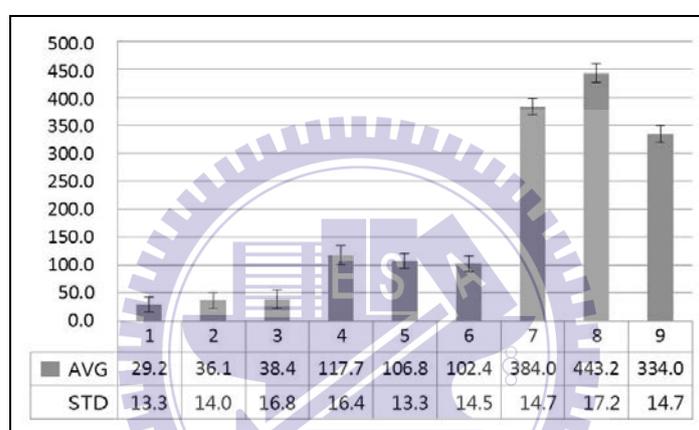


圖 4.5 不同距離最佳舒適度數值統計表(輻輳運動)

(3) 視覺不舒適起始點調整結果

視覺不舒適起始點即是受試者調整到眼睛開始不舒服的位置，接近與超過此數值都更有機會產生不舒服的視覺現象。圖 4.4、4.5 相同，在 X 軸部分代表 1~9 號目標物，標號下方標示完整的統計數值，Y 軸是兩攝影機の間距單位(mm)。從圖 4.6 中可知 1~3 號近距離的目標物，受試者覺得 3D 立體效果開始不舒服的間距約在 58.0mm~65.7mm；4~6 號中距離的目標物 3D 立體效果開始不舒服的間距約在 189.9mm~217.6mm；7~9 號遠距離的目標物 3D 立體效果開始不舒服的間距約在 548.4mm~615.6mm。

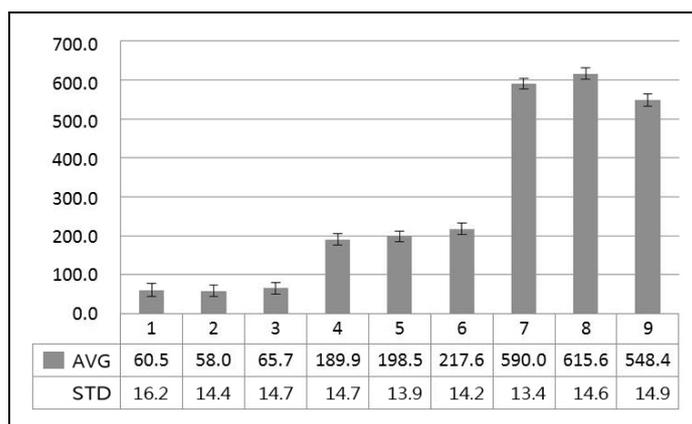


圖 4.6 不同距離不舒適起始點數值統計表(輻轉運動)

4.3 整合像差距離與聚合對焦實驗的討論

(1) 想要呈現最立體的 3D 效果，有無輻轉運動差異不大。

整合第一部分的兩個實驗，以曲線方式呈現較容易觀察、理解輻轉運動的影響。圖 4.7 是輻轉運動與最佳立體效果的關係圖表，X 軸是目標物的編號，Y 軸是兩台相機的間距數值(單位是 mm)，淺色線標示攝影機有輻轉運動後的實驗數據，深色線則是無輻轉運動。由兩線條的密合程度來看，可以發現針對最立體的效果呈現，攝影機有無輻轉運動差異不大。

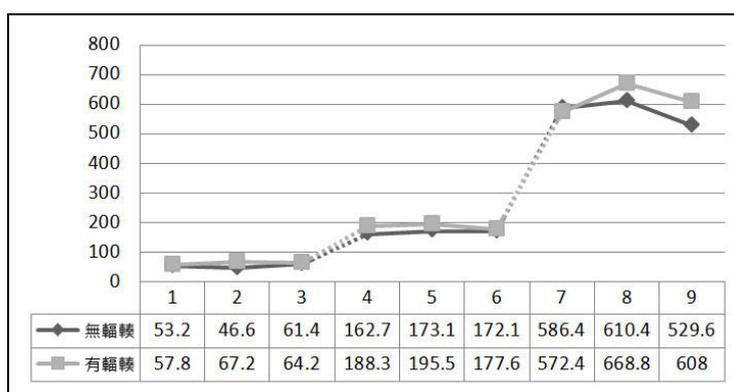


圖 4.7 輻轉運動與最佳立體效果關係圖表

表 4.1 是進一步在最佳立體度上，針對兩組有無輻轉運動的數據作單因子變異數分析(one-way anova)，以輻轉運動作為獨變項，兩組整體比較沒有顯著差異

($F(1, 45) = 2.664, p = .432$)。各組刺激彼此間比較，除了編號 2 的刺激外，也幾乎都呈現顯著性 p 值沒有顯著的結果(p 值大於 0.05)，所以是否在拍攝時作輻輳運動對焦對立體效果是沒太大效益。藉由表 4.1 也可知拍攝近距離目標物時，兩攝影機間距約在 47~67mm；中距離目標物的間距約在 163~196mm；遠距離目標物的間距約在 530~669mm 左右都可以獲得非常佳的 3D 立體效果。

表 4.1 輻輳運動與最佳立體效果的單因子變異數分析結果

	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
1 組間	117.878	1	117.878	.385	.536
組內	26936.222	88	306.093		
總和	27054.100	89			
2 組間	2371.600	1	2371.600	9.078	.003
組內	22990.622	88	261.257		
總和	25362.222	89			
3 組間	45.511	1	45.511	.172	.679
組內	23274.089	88	264.478		
總和	23319.600	89			
4 組間	409.600	1	409.600	1.431	.235
組內	25195.022	88	286.307		
總和	25604.622	89			
5 組間	313.600	1	313.600	1.212	.274
組內	22776.889	88	258.828		
總和	23090.489	89			
6 組間	18.678	1	18.678	.071	.790
組內	22992.444	88	261.278		
總和	23011.122	89			
7 組間	13.611	1	13.611	.049	.826
組內	24520.178	88	278.638		
總和	24533.789	89			
8 組間	236.844	1	236.844	.996	.321
組內	20915.556	88	237.677		
總和	21152.400	89			
9 組間	426.844	1	426.844	1.505	.223
組內	24962.756	88	283.668		
總和	25389.600	89			

(2) 輻輳運動對舒適度有幫助，且有作輻輳運動的攝影，兩台相機的間距可以擁有更寬的舒適安全範圍。

圖 4.8 則是輻輳運動與最佳舒適度的關係圖表，曲線圖表中增加的虛線連結主要是為了更容易觀察出變化趨勢。由圖資料可以發現有輻輳運動的狀況底下，近距離目標物的舒適間距約在 29~38mm；無輻輳運動時則約 25~30mm，遠低於平常認知的 6.5cm 左右。中距離目標物的間距約在 71~118mm；遠距離目標物的

間距約在 298~443mm 左右。其中也可以發現對於舒適度方面而言，輻輳運動是有正向的幫助，有作輻輳運動的相機組，其舒適間距的距離可以更大(中距離、遠距離效果更明顯)，因此如果 3D 電影在拍攝時，兩攝影機除了適當的間距設定外，還能針對對焦物作同步的聚合運動，相信可以增加欣賞電影時的舒適度。

另外在 3D 的立體塑形上，也發現有無輻輳運動產生的 3D 立體效果不盡相同，無輻輳運動的拍攝方法，似乎取得像差較大的左右兩張畫面，目標物與背景都可以呈現較強的立體效果；而有接近人眼對焦方式作輻輳運動的攝影，兩張影像在目標物差距較小，只有角度差異，但是背景卻是像差極大，因此背景襯托出立體感的成分多於目標物，不過卻擁有較舒適或是大腦較習慣的立體效果。

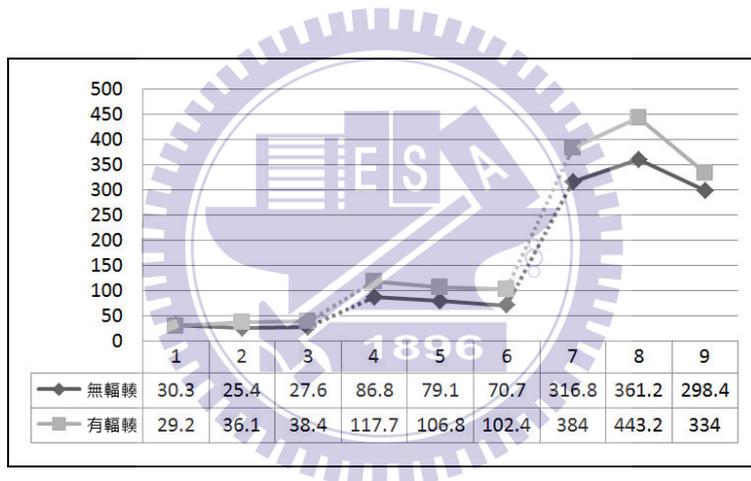


圖 4.8 輻輳運動與最佳舒適度關係圖表

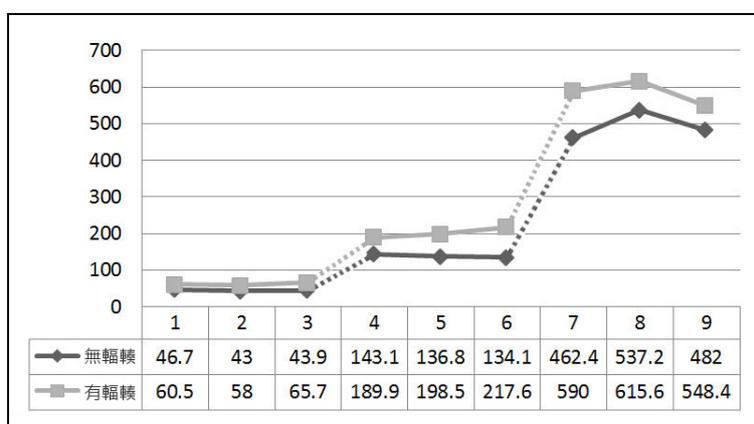


圖 4.9 輻輳運動與不舒適起始點關係圖表

圖 4.9 是輻輳運動與不舒適起始點的關係圖表，由圖可以發現針對不舒服感開始出現的閾值，有無輻輳聚合運動差異極大，無輻輳聚合運動時的不舒服感間距數值遠低於有聚合運動的間距數值。表 4.2 則是進一步在舒適度的臨界值上，針對兩組有無輻輳運動的數據作單因子變異數分析(one-way anova)，以輻輳運動作為獨變項，兩組整體比較有顯著差異 ($F(1, 45) = 8.897, p = .045$)。各組刺激彼此間比較發現在顯著性 p 值表現上，除了遠距離的第 8、9 兩刺激外，其餘都達到顯著水準(p 值小於等於 0.05)，可見輻輳聚合運動在提高舒適度的寬容度是有顯著的關係，在中距離與遠距離的狀況下，兩者的差距都維持在 40~70mm 左右的差距。

表 4.2 輻輳運動與不舒適起始點的單因子變異數分析結果

	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
1 組間	1074.678	1	1074.678	5.016	.028
組內	18852.311	88	214.231		
總和	19926.989	89			
2 組間	1269.378	1	1269.378	6.568	.012
組內	17007.244	88	193.264		
總和	18276.622	89			
3 組間	2667.778	1	2667.778	14.256	.000
組內	16467.822	88	187.134		
總和	19135.600	89			
4 組間	1368.900	1	1368.900	7.504	.007
組內	16052.222	88	182.412		
總和	17421.122	89			
5 組間	2381.878	1	2381.878	14.129	.000
組內	14834.844	88	168.578		
總和	17216.722	89			
6 組間	4354.178	1	4354.178	23.431	.000
組內	16353.111	88	185.831		
總和	20707.289	89			
7 組間	1130.678	1	1130.678	5.665	.019
組內	17563.422	88	199.584		
總和	18694.100	89			
8 組間	426.844	1	426.844	2.068	.154
組內	18165.111	88	206.422		
總和	18591.956	89			
9 組間	306.178	1	306.178	1.432	.235
組內	18812.978	88	213.784		
總和	19119.156	89			

(3)最佳 3D 立體效果可能伴隨觀賞上的不舒適。

如果再將受試者最佳立體效果與最佳舒適度的相機間距拿來比較(圖 4.10)，

可以發現在兩相機間距的調整上，3D 立體感呈現似乎都與舒適度沒有交集，且舒適度的間距數值，不論是否作輻轉運動下，也遠低於 3D 立體效果佳の間距數值，而且隨著目標物距離增加，兩者的差距也被拉大，可見立體效果愈佳的 3D 圖形，可能離舒適度的關係愈遠。

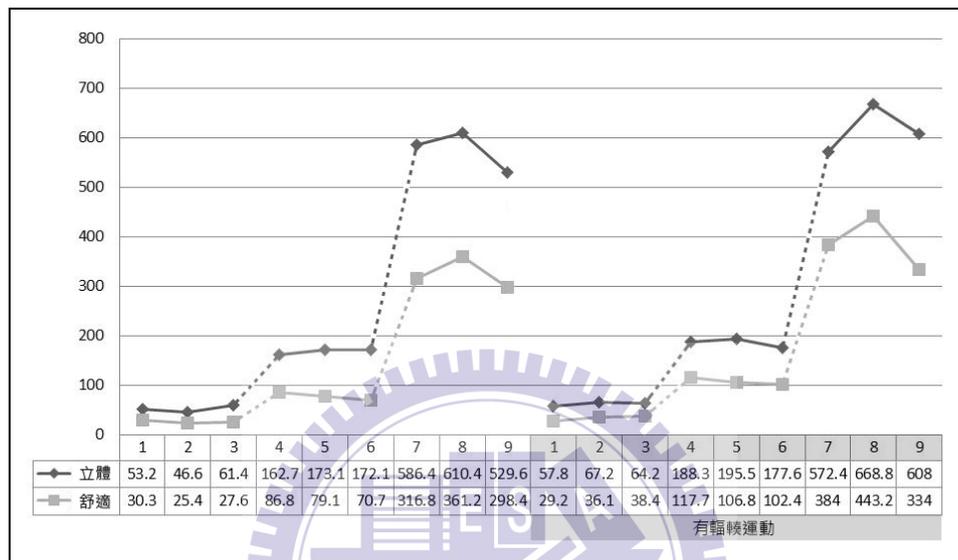


圖 4.10 最佳立體效果與最佳舒適度關係圖表

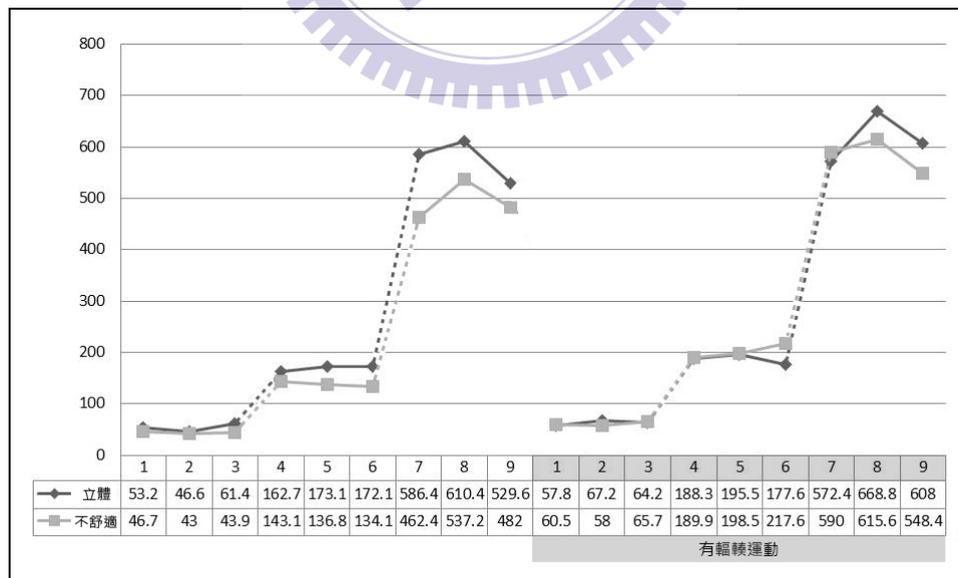


圖 4.11 最佳立體效果與不舒適起始點關係圖表

最佳 3D 立體效果可能伴隨觀賞上的不舒適，這種想法在整合比較受試者感

覺最立體與開始不舒服的實驗數據時，得到更明確的關係，圖 4.11 可以發現最佳立體效果の間距數值卻也與大部分開始感到不舒適的起始點數值吻合。而不管是否作輻轉運動，表 4.3 是將最佳立體效果與最佳舒適度資料作進一步 one-way anova 分析，也發現最立體與最舒適兩者完全不相同，在作輻轉運動的數據作單兩組整體比較有顯著差異 ($F(1, 45) = 16.283, p < .001$)，而無作輻轉運動的兩組整體比較也同時具顯著差異 ($F(1, 45) = 22.052, p < .001$)。獨立來看，無論是有作輻轉運動，實驗刺激 1~9 號的顯著性值完全呈現顯著水準，可知兩種不同視覺感受完全沒交集，且彼此有顯著的差異。

表 4.3 最佳立體效果與最佳舒適度的單因子變異數分析結果
(左表作輻轉運動，右表無作輻轉運動)

	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
1 組間	4593.878	1	4593.878	19.069	.000
組內	21200.222	88	240.912		
總和	25794.100	89			
2 組間	5413.378	1	5413.378	21.601	.000
組內	22053.778	88	250.611		
總和	27467.156	89			
3 組間	3750.678	1	3750.678	13.908	.000
組內	23731.644	88	269.678		
總和	27482.322	89			
4 組間	3109.344	1	3109.344	11.428	.001
組內	23943.156	88	272.081		
總和	27052.500	89			
5 組間	4913.611	1	4913.611	21.958	.000
組內	19692.178	88	223.775		
總和	24605.789	89			
6 組間	3534.400	1	3534.400	13.781	.000
組內	22569.600	88	256.473		
總和	26104.000	89			
7 組間	2464.900	1	2464.900	9.934	.002
組內	21835.200	88	248.127		
總和	24300.100	89			
8 組間	3534.400	1	3534.400	14.103	.000
組內	22054.489	88	250.619		
總和	25588.889	89			
9 組間	5213.611	1	5213.611	20.765	.000
組內	22094.889	88	251.078		
總和	27308.500	89			

	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
1 組間	2969.878	1	2969.878	12.948	.001
組內	20183.778	88	229.361		
總和	23153.656	89			
2 組間	2528.100	1	2528.100	13.448	.000
組內	16542.889	88	187.987		
總和	19070.989	89			
3 組間	6434.678	1	6434.678	28.841	.000
組內	19633.422	88	223.107		
總和	26068.100	89			
4 組間	3597.344	1	3597.344	16.658	.000
組內	19003.644	88	215.951		
總和	22600.989	89			
5 組間	5522.500	1	5522.500	29.424	.000
組內	16516.489	88	187.687		
總和	22038.989	89			
6 組間	6434.678	1	6434.678	43.300	.000
組內	13077.422	88	148.607		
總和	19512.100	89			
7 組間	5047.511	1	5047.511	19.042	.000
組內	23325.778	88	265.066		
總和	28373.289	89			
8 組間	4312.544	1	4312.544	18.367	.000
組內	20662.444	88	234.801		
總和	24974.989	89			
9 組間	3712.044	1	3712.044	16.442	.000
組內	19867.956	88	225.772		
總和	23580.000	89			

(4)兩攝影機安全間距與目標物距離呈線性關係。

將受試者調整到開始感覺不舒適的資料與目標物距離作散點圖，在圖 4.12 與 4.13 左側圖即是結果的呈現，X 軸是兩攝影機間距(單位 mm)，Y 軸是攝影機與目標物距離(單位 cm)，。兩圖中散點圖的部分都可發現無論是否作輻轉運動皆

呈現線性關係，將數據資料作相關分析也可看出，在右側圖的 2*2 相關係數矩陣，cd(兩攝影機間距)與 od(與目標物距離)之間相關係數在無輻轉運動下為.995，在輻轉運動下則為.994，顯著性 p 值都小於顯著性水準 0.01，呈現高度相關性。

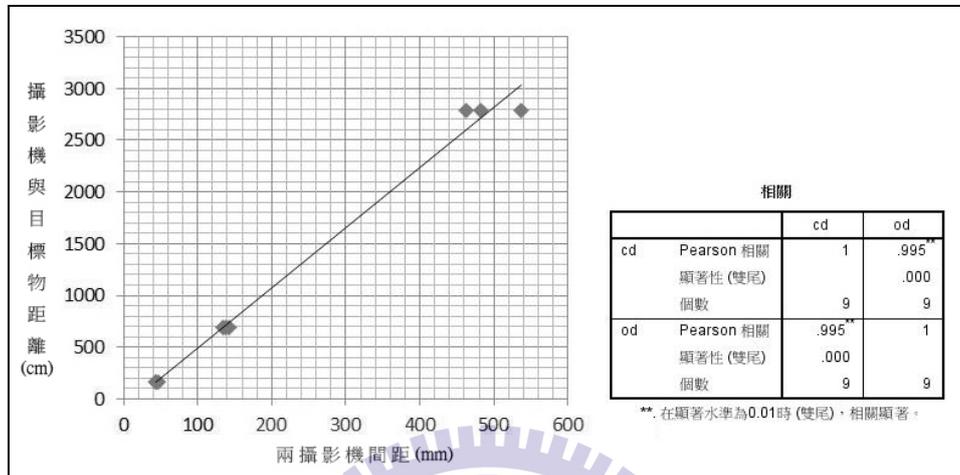


圖 4.12 無輻轉運動下舒適度臨界值相關分析結果
(左圖散點圖，右圖為相關係數矩陣)

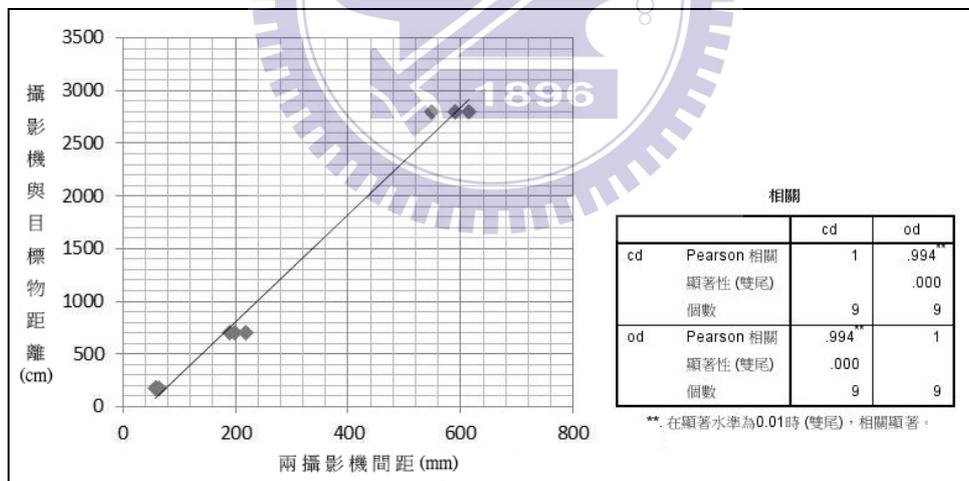


圖 4.13 輻轉運動下舒適度臨界值相關分析結果
(左圖散點圖，右圖為相關係數矩陣)

由統計資料可知目標物的距離與兩攝影機設定時間距有密切關係，隨著對焦目標物的距離愈遠，兩攝影機的安全間距可以逐漸擴大，且呈線性的關係；如果拍攝方式採取輻轉運動，則安全間距範圍比無採取輻轉運動更大，如目標物距離

1000cm(10m)，在無輻輳運動下，兩攝影機間距拉大到 180mm 便到達舒適的臨界值，不過有輻輳運動下，間距要拉大到 240mm 才到達不舒適的範圍。兩張散點圖也可作為拍攝時的數值設定依據(針對靜態影像)，線段上方區域都是安全的範圍，也是舒適的部分；而線段下方的空間，則進入視覺不適的範圍，在考量物體距離與設定攝影機間距時須多加留意。

4.4 焦距與景深實驗

在焦距與景深的實驗中，我們希望可以了解景深在 3D 立體視覺中所扮演的角色，所以也設定了三個提問，先來看針對三種不同鏡頭焦距與三種形狀複雜度不同的目標物，在最佳自然舒適度的數據如何。

(1) 最佳自然度調整結果

自然度是指受試者看到目標物與不同視角畫面時，認為加入多少模糊範圍的景深，可以讓整體效果在 3D 立體視覺看起來最真實自然，受試者可能會以平時觀察真實周遭 3D 環境的視覺經驗，來參考比對實驗刺激加以調整，而不是把目標物調整成立體效果最佳的狀況。圖 4.14 是九種實驗刺激的次數統計表，表格 X 軸是 10 種景深，由清晰範圍大到最小(深景深到淺景深)，Y 軸是受試者調整到的次數統計，受試者 60 人對刺激重覆施測三回，所以每個人都調整同一個景深，最多次數可以累計 180 次。

圖中最上面的三個長條圖是中距離鏡頭 100mm 視角的次數統計圖，可以發現受試者在視角很窄的特寫畫面時，認為畫面最自然的狀況是景深比較淺的情形，因此第 8、9 級的淺景深累積最多的次數；其次中間的三個長條圖是標準鏡頭視角的 50mm 的次數統計圖，在較多背景加入之後，受試者偏好似乎開始移動，對於畫面最自然的情況調整成中間等級的景深，對於景深極深與極淺較不偏好，形成

常態分佈的狀況；最後圖表下面的三個長條圖則是廣角鏡頭焦距 25mm 所呈現次數統計圖，在大量的背景與前景加入畫面後，受試者似乎多半覺得沒有模糊的範圍才是最自然的情形，因此第 1、2 級清晰範圍最廣的景深也是次數分配最集中的區域。表 4.4 是進一步將三組不同焦距與景深資料作 one-way anova 分析，以自然度作為獨變項，三組整體比較有顯著差異 ($F(2, 60) = 70.82, p < .001$)。分別看各組刺激資料，發現三組資料在顯著性 p 值完全呈現顯著水準，可知畫面要呈現自然的立體感覺，不同焦距需要搭配不同範圍的景深效果。

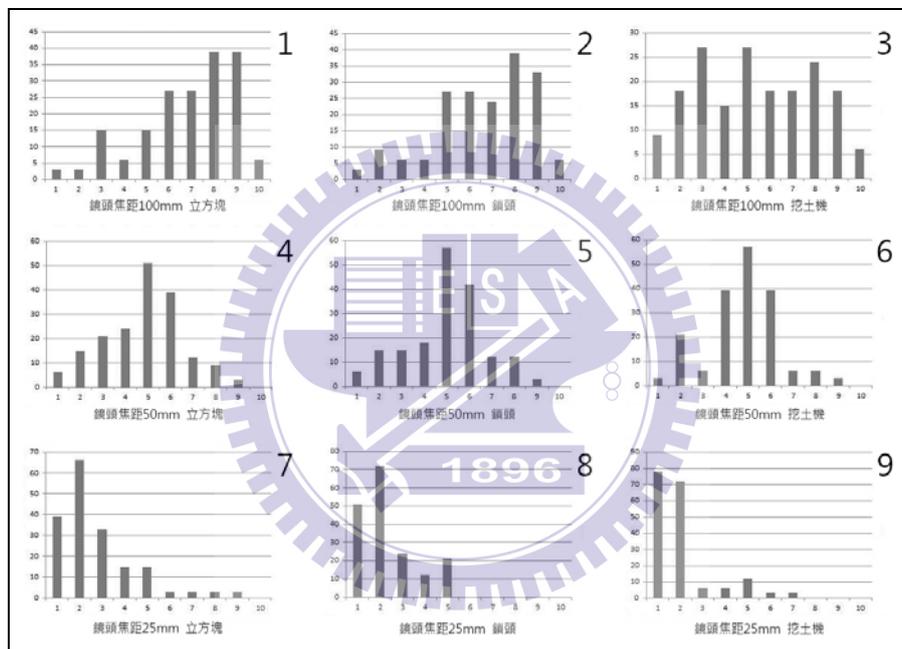


圖 4.14 不同焦距景深自然度的次數長條圖

表 4.4 最佳自然度與三組焦距的單因子變異數分析結果

	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
100mm 組間	496.178	2	248.089	69.347	.000
組內	633.217	177	3.577		
總和	1129.394	179			
50mm 組間	568.678	2	284.339	90.523	.000
組內	555.967	177	3.141		
總和	1124.644	179			
25mm 組間	384.133	2	192.067	52.591	.000
組內	646.417	177	3.652		
總和	1030.550	179			

圖 4.15~4.17 則是將累積次數轉成折線圖以觀察不同複雜度目標物之間是否有差異，三種不同線段分別代表三種目標物：立方塊、鎖頭與挖土機的景深分配狀況。在圖 4.15 中，可以看到受試者在針對三種目標物做景深調整實驗時，似乎簡單形狀的立方塊與鎖頭結果較接近，都是會選擇較淺的景深(5-10 級次數最多)；而形狀比較複雜的挖土機似乎就比較看不出明顯的偏好方向，也較難判斷有大小知覺的主觀意識涉入景深的判斷。

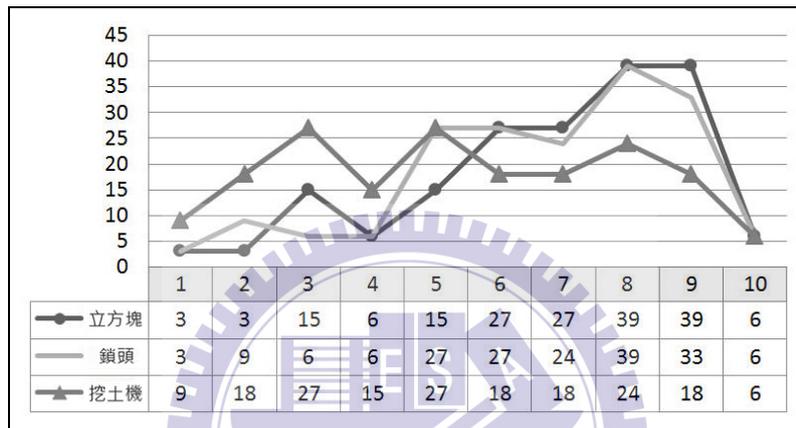


圖 4.15 攝影焦距 100mm 景深自然度的累積次數圖

至於圖 4.16、4.17 這兩個標準鏡頭與廣角鏡的畫面，似乎三種不同複雜度的線段幾乎起伏相同的疊在一起，完全看不出形狀複雜度這個變項會有足夠的影響景深的判斷，大小知覺主觀涉入景深的判斷在這實驗中也沒有明顯的跡象可尋。

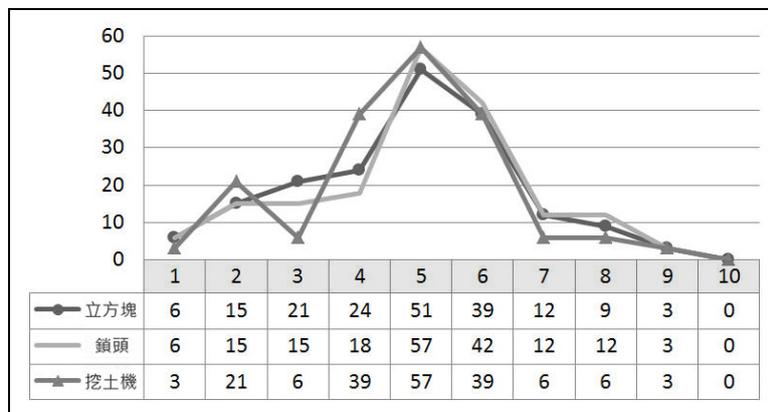


圖 4.16 攝影焦距 50mm 景深自然度的累積次數圖

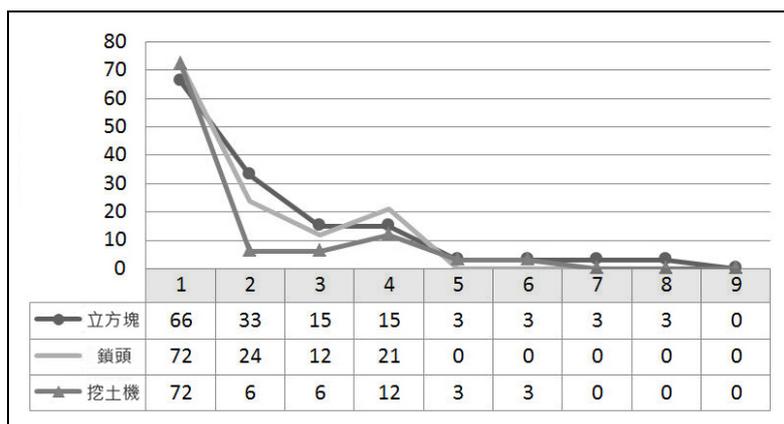


圖 4.17 攝影焦距 25mm 景深自然度的累積次數圖

接著將數據進一步作 LSD 多重比較，由表 4.5 可以看見雖然在 100mm 焦距下，目標物的複雜度在級別 1(立方塊)與級別 3(挖土機)是有顯著差異($p=0.001$)，不過在圖 4.15 比較下不容易看出差異的走向；相同的，級別 2(鎖頭)與級別 3(挖土機)也是有顯著差異($p=0.003$)，依舊看不出差異明顯的趨勢，主要還是挖土機的數值變動較大所產生的結果，立方塊與鎖頭的結果走向趨勢倒是比較一致的。

表 4.5 攝影焦距 100mm 與三種目標物複雜度 LSD 多重比較圖

依變數: 100mm 焦距數值 LSD						
(I) 大小級別	(J) 大小級別	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性	95% 信賴區間	
					下界	上界
1.00	2.00	.16667	.41733	.690	-.6569	.9903
	3.00	1.43333*	.41733	.001	.6097	2.2569
2.00	1.00	-.16667	.41733	.690	-.9903	.6569
	3.00	1.26667*	.41733	.003	.4431	2.0903
3.00	1.00	-1.43333*	.41733	.001	-2.2569	-.6097
	2.00	-1.26667*	.41733	.003	-2.0903	-.4431

*. 平均差異在 0.05 水準是顯著的。

表 4.6 與表 4.7 LSD 多重比較表可看見，除了 25mm 焦距(表 4.7)下的級別 1(立方塊)與級別 3(挖土機)是有顯著差異($p=0.008$)，原因似乎也是挖土機數值與另外兩目標物差異較大所致，其餘目標物的複雜度兩兩比較幾乎沒有顯著的差異，趨勢與走向都是比較一致。

表 4.6 攝影焦距 50mm 與三種目標物複雜度 LSD 多重比較圖

依變數: 50mm 焦距數值 LSD						
(I) 大小級別	(J) 大小級別	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性	95% 信賴區間	
					下界	上界
1.00	2.00	-.16667	.31270	.595	-.7838	.4504
	3.00	.06667	.31270	.831	-.5504	.6838
2.00	1.00	.16667	.31270	.595	-.4504	.7838
	3.00	.23333	.31270	.457	-.3838	.8504
3.00	1.00	-.06667	.31270	.831	-.6838	.5504
	2.00	-.23333	.31270	.457	-.8504	.3838

*. 平均差異在 0.05 水準是顯著的。

表 4.7 攝影焦距 25mm 與三種目標物複雜度 LSD 多重比較圖

依變數: 25mm 焦距數值 LSD						
(I) 大小級別	(J) 大小級別	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性	95% 信賴區間	
					下界	上界
1.00	2.00	.41667	.27155	.127	-.1192	.9526
	3.00	.73333*	.27155	.008	-.1974	1.2692
2.00	1.00	-.41667	.27155	.127	-.9526	.1192
	3.00	-.31667	.27155	.245	-.2192	.8526
3.00	1.00	-.73333	.27155	.008	-1.2692	-.1974
	2.00	-.31667	.27155	.245	-.8526	.2192

*. 平均差異在 0.05 水準是顯著的。

原先預期操弄熟悉物大小會影響觀察者的主觀距離判斷，因而影響景深調整的現象並沒有出現，實驗數據中除了挖土機數據差異比較大外，受試者並沒有因為形狀大小的辨識而改變對景深的調整，所以目標物的大小程度應該不會影響景深的判斷，焦距所產生的視角才是主要原因。

(2) 最佳立體效果實驗結果

實驗原先以調整法讓受試者調整景深到最佳立體效果時的狀態，受試者調整出的結果卻挺令人意外，9 個實驗刺激都呈現雙峰分配的狀況(圖 3.20)，對於最佳立體效果的景深，前後景清晰範圍較大與清晰範圍較小都擁有比例接近的累積次數，經由與受試者的訪談了解可能是有主觀認知(攝影景深知識)涉入實驗的問

題，因此改變實驗方法，由更嚴謹的配對比較法來探討這個問題。

由於可以在同一時間觀看到最深與最淺景深的狀況再做判斷，因此受試者可以直接用視覺的印象來作答，減少了認知的干預。表 4.8 是針對受試者選擇最佳立體效果所建立的 F 矩陣（次數矩陣）圖，在資料中每一格是 180 次的出現配對次數中選擇橫向刺激立體效果較好的次數總和。因為程式撰寫以一回實驗兩刺激配對一次後便不會再出現，因此在次數統計的 F 矩陣中，會有一半是無記錄的狀況，也就是黑色的部分 F 矩陣的次數總和在經過幾回的轉換後，可以得到以間距量表表示的圖形。

表 4.8 實驗刺激最佳立體效果的 F 矩陣（次數矩陣）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	50	39	116	149	94	57	51	41	19	175	109	93	152	176
2	130	0	41	125	116	151	102	104	44	23	169	146	62	134	168
3	141	139	0	96	158	129	116	110	37	36	177	157	165	96	140
4	64	55	84	0	175	164	149	155	126	73	166	173	119	116	81
5	31	64	22	5	0	162	158	174	150	148	127	167	163	149	116
6	86	29	51	16	18	0	111	39	21	14	139	121	73	50	14
7	123	78	64	31	22	69	0	65	41	18	174	149	93	53	52
8	129	70	70	25	6	141	115	0	78	15	178	109	126	62	9
9	139	136	143	54	30	159	139	102	0	87	144	168	135	115	31
10	161	157	144	107	32	166	162	165	93	0	169	167	153	116	72
11	5	11	3	14	53	41	6	2	36	11	0	90	48	33	14
12	71	34	23	7	13	59	31	71	12	13	90	0	79	99	11
13	87	118	15	61	17	107	87	54	45	27	132	101	0	62	34
14	28	46	84	64	31	130	127	118	65	64	147	81	118	0	69
15	4	12	40	99	64	166	128	171	149	108	166	169	146	111	0

表 4.9 實驗刺激最佳立體效果的 P 矩陣

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1E-04	0.278	0.217	0.644	0.828	0.522	0.317	0.283	0.228	0.106	0.972	0.606	0.517	0.844	0.978
2	0.722	1E-04	0.228	0.694	0.644	0.839	0.567	0.578	0.244	0.128	0.939	0.811	0.344	0.744	0.933
3	0.783	0.772	1E-04	0.533	0.878	0.717	0.644	0.611	0.206	0.2	0.983	0.872	0.917	0.533	0.778
4	0.356	0.306	0.467	1E-04	0.972	0.911	0.828	0.861	0.7	0.406	0.922	0.961	0.661	0.644	0.45
5	0.172	0.356	0.122	0.028	1E-04	0.9	0.878	0.967	0.833	0.822	0.706	0.928	0.906	0.828	0.644
6	0.478	0.161	0.283	0.089	0.1	1E-04	0.617	0.217	0.117	0.078	0.772	0.672	0.406	0.278	0.078
7	0.683	0.433	0.356	0.172	0.122	0.383	1E-04	0.361	0.228	0.1	0.967	0.828	0.517	0.294	0.289
8	0.717	0.389	0.389	0.139	0.033	0.783	0.639	1E-04	0.433	0.083	0.989	0.606	0.7	0.344	0.05
9	0.772	0.756	0.794	0.3	0.167	0.883	0.772	0.567	1E-04	0.483	0.8	0.933	0.75	0.639	0.172
10	0.894	0.872	0.8	0.594	0.178	0.922	0.9	0.917	0.517	1E-04	0.939	0.928	0.85	0.644	0.4
11	0.028	0.061	0.017	0.078	0.294	0.228	0.033	0.011	0.2	0.061	1E-04	0.5	0.267	0.183	0.078
12	0.394	0.189	0.128	0.039	0.072	0.328	0.172	0.394	0.067	0.072	0.5	1E-04	0.439	0.55	0.061
13	0.483	0.656	0.083	0.339	0.094	0.594	0.483	0.3	0.25	0.15	0.733	0.561	1E-04	0.344	0.189
14	0.156	0.256	0.467	0.356	0.172	0.722	0.706	0.656	0.361	0.356	0.817	0.45	0.656	1E-04	0.383
15	0.022	0.067	0.222	0.55	0.356	0.922	0.711	0.95	0.828	0.6	0.922	0.939	0.811	0.617	1E-04

表 4.10 實驗刺激最佳立體效果的 z 矩陣

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-0.59	-0.78	0.37	0.945	0.056	-0.48	-0.57	-0.75	-1.25	1.915	0.268	0.042	1.013	2.01
2	0.589	0	-0.75	0.508	0.37	0.99	0.168	0.196	-0.69	-1.14	1.546	0.882	-0.4	0.657	1.501
3	0.784	0.746	0	0.084	1.164	0.573	0.37	0.282	-0.82	-0.84	2.128	1.137	1.383	0.084	0.765
4	-0.37	-0.51	-0.08	0	1.915	1.348	0.945	1.085	0.524	-0.24	1.42	1.764	0.415	0.37	-0.13
5	-0.95	-0.37	-1.16	-1.91	0	1.282	1.164	1.834	0.967	0.924	0.54	1.459	1.314	0.945	0.37
6	-0.06	-0.99	-0.57	-1.35	-1.28	0	0.297	-0.78	-1.19	-1.42	0.746	0.446	-0.24	-0.59	-1.42
7	0.477	-0.17	-0.37	-0.95	-1.16	-0.3	0	-0.36	-0.75	-1.28	1.834	0.945	0.042	-0.54	-0.56
8	0.573	-0.28	-0.28	-1.09	-1.83	0.784	0.355	0	-0.17	-1.38	2.287	0.268	0.524	-0.4	-1.64
9	0.746	0.692	0.822	-0.52	-0.97	1.192	0.746	0.168	0	-0.04	0.842	1.501	0.674	0.355	-0.95
10	1.251	1.137	0.842	0.239	-0.92	1.42	1.282	1.383	0.042	0	1.546	1.459	1.036	0.37	-0.25
11	-1.91	-1.55	-2.13	-1.42	-0.54	-0.75	-1.83	-2.29	-0.84	-1.55	0	0	-0.62	-0.9	-1.42
12	-0.27	-0.88	-1.14	-1.76	-1.46	-0.45	-0.95	-0.27	-1.5	-1.46	0	0	-0.15	0.126	-1.55
13	-0.04	0.4	-1.38	-0.42	-1.31	0.239	-0.04	-0.52	-0.67	-1.04	0.623	0.154	0	-0.4	-0.88
14	-1.01	-0.66	-0.08	-0.37	-0.95	0.589	0.54	0.4	-0.36	-0.37	0.903	-0.13	0.4	0	-0.3
15	-2.01	-1.5	-0.76	0.126	-0.37	1.42	0.557	1.645	0.945	0.253	1.42	1.546	0.882	0.297	0

表 4.9、表 4.10 則是將 F 矩陣的統計次數轉變為 p 矩陣的分辨差異比率，再將資料轉換為有距離關係的 z 矩陣。最後再經過轉換成為距離有意義的心理感覺的間距量表。圖 4.18 是實驗刺激所得到的最佳立體效果量表，X 軸編號表示 15 個實驗刺激畫面，其中編號 1~5 是攝影焦距 100mm 的畫面，景深模糊效果也是隨著編號愈來愈大；編號 6~10 是攝影焦距 50mm 的畫面，編號 11~15 則是攝影焦距 25mm 的畫面，Y 軸是心理的距離數值，也是立體效果的程度。

由圖 4.18 可看出在不同的攝影視角而言，最佳立體效果都落在清晰範圍較大的畫面，即是沒有模糊前後景的畫面；而隨著視角加大，前後景清晰範圍愈多的畫面，對受試者而言立體效果也逐漸增強，沒有模糊景深的實驗刺激中，廣角畫面(25mm)所提供的立體效果也大於標準鏡頭(50mm)的畫面，當然更遠大於中距離焦距(100mm)的鏡頭畫面。

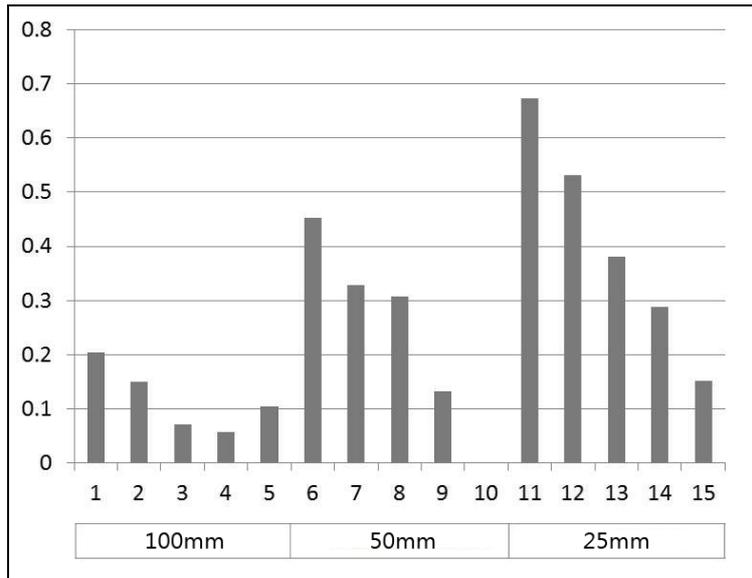


圖 4.18 實驗刺激最佳立體效果心理量表

圖 4.19 是將資料再次轉變成可以更容易比較的折線圖，圖中三個線段分別代表不同焦距，X 軸代表的是景深的深淺，1~5 是景深愈來愈淺的狀況。由此可知，不管哪種視角，隨著景深愈來愈淺，在 3D 立體視覺的狀況下，反而立體效果會下降，反之景深愈深的畫面，立體感的效果也是成正向增加的效果；另外若將景深固定，則鏡頭焦距的長短與立體效果呈反比關係。研究結果與 2D 攝影平常認知景深可以加強立體感的說法似乎不同，而且有呈現相反結果的狀況，這倒是未來可以繼續研究的方向。

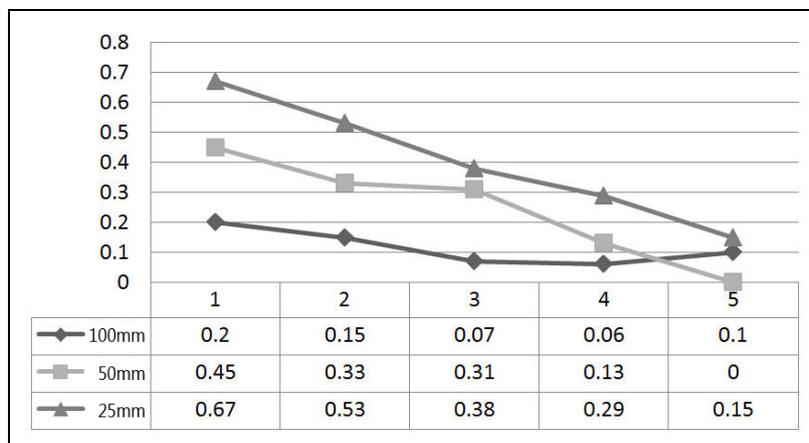


圖 4.19 三種攝影機焦距與最佳立體效果比較圖

(3) 視覺不舒適起始點調整結果

針對景深是否在 3D 立體視覺中產生不適感的實驗發現，受試者將所有景深調至到最淺，即是清晰範圍最窄的狀況，視覺仍然不會有不適的感覺，只是覺得畫面不自然，目標物的 3D 影像似乎會變成片狀的 2D 圖層立在 3D 空間的感覺，所以受試者幾乎全數都認為再淺的景深也不會產生視覺不適的感覺，景深跟立體不適的感覺沒有太多關聯性，攝影機拍攝的間距與幅輳運動才是關鍵，光圈大小形成的畫面模糊感只跟自然度有關連。

4.5 亮度與景深實驗

亮度實驗是 3D 立體視覺景深實驗內的最後一項實驗，由於在先前的實驗中有些提問已經有比較多的實驗數據可供參考，加上在做亮度正式實驗時做過的前測實驗資料顯示：在較暗(實驗刺激明度為 10.4 cd/m^2)但仍可以辨識物件與周遭環境的狀況下，選擇各種不同景深數值都不會讓觀察者產生不適的感覺，即使是景深調到最淺(清晰範圍最少)的狀況亦如此，因此在正式實驗時不會再出現關於不適感的提問。另外明暗的變化不是屬於照明角度的變化(不同角度光影可能影響目標物立體感覺)，而是整體環境光源大小的變化，似乎也不會在立體效果上有所影響，因此正式實驗時只針對自然度作為提示語。

圖 4.20~4.22 是三種明度環境光源下，不同視角景深自然度的差別閾圖，X 軸編號是不同攝影視角的實驗刺激圖，數字 1 代表 100mm 中距離攝影視角，數字 2 代表 50mm 標準鏡頭視角，數字 3 代表 25mm 廣角鏡頭視角，Y 軸是景深清晰範圍，單位是 cm。兩個線段分別代表極限法的平均上閾限值與平均下閾限值，介於上下閾值之間的範圍是受試者感覺自然的區間，低於下閾或高於上閾的景深都屬不自然。這三張圖中都可以看出在不同明度的環境下，受試者會隨著鏡頭焦

距的縮短，觀景範圍的視角變寬，選擇的清晰範圍也漸漸增寬（景深變深），愈廣角愈不偏好有模糊景深的感覺，整個畫面都是清晰範圍才是擁有最佳的自然度，這與焦距與景深實驗結果一致。

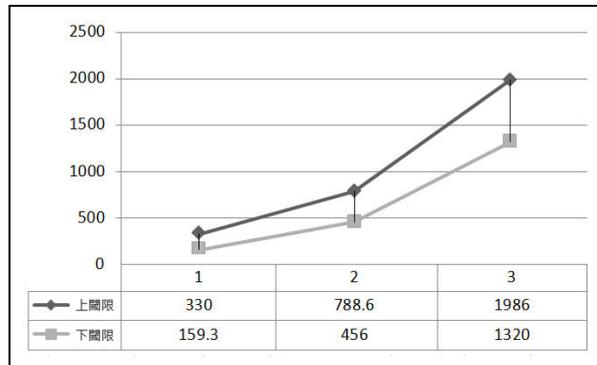


圖 4.20 高亮度下景深自然度差別閾圖

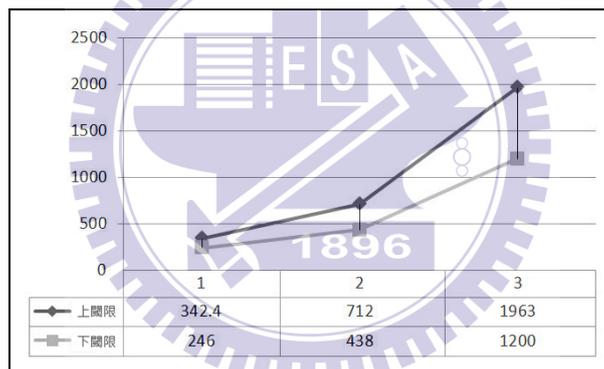


圖 4.21 中亮度下景深自然度差別閾圖

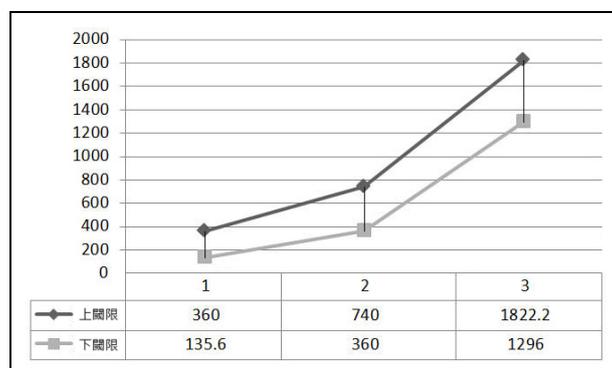


圖 4.22 低亮度下景深自然度差別閾圖

將三張不同明度的差別閾圖整合來看，取其平均主觀相等點(point of

subjective equality, PSE)數值呈現，在我們的資料中，PSE 的數值可視為自然度最佳的位置，由於原先數值是 3D 空間環境下 Z 軸清晰範圍，我們轉換成為受試者觀看的垂直視角範圍，也就是受試者在觀看 2D 投影幕上 X 軸的視角範圍。圖 4.23 即是呈現此數據，圖上 X 軸編號是不同視角的實驗刺激，Y 軸則是受試者的垂直視角的清晰範圍度，三個線段則分別代表不同明度的變化曲線。表 4.11 將數據進一步作 one-way anova 分析，明度作為獨變項，三組整體比較有顯著差異 ($F(2, 30) = 12.943, p = .019$)。分別看各組刺激資料後，發現除了低明度組的數值接近顯著外($P=0.056$)，另外兩個明度組別其顯著性 p 值完全呈現顯著水準。

我們再回來檢視圖 4.33，X 軸編號是不同視角的實驗刺激，Y 軸則是受試者的垂直視角的清晰範圍度，三個線段則分別代表不同明度的變化曲線。由圖中可以更清楚看到個別明度在不同鏡頭下，隨著焦距變短，觀景視角變寬，要求視角清晰的範圍也會擴大；另外更重要的是隨著明度下降，除了在特寫鏡頭 100mm 的視角刺激，在高明度比較不規則外，其餘數值都可看出隨著明度升高，我們要求景深在視角的清晰度也會提高，相反的，當很暗的環境時，我們可以接受模糊範圍比較大的景深。

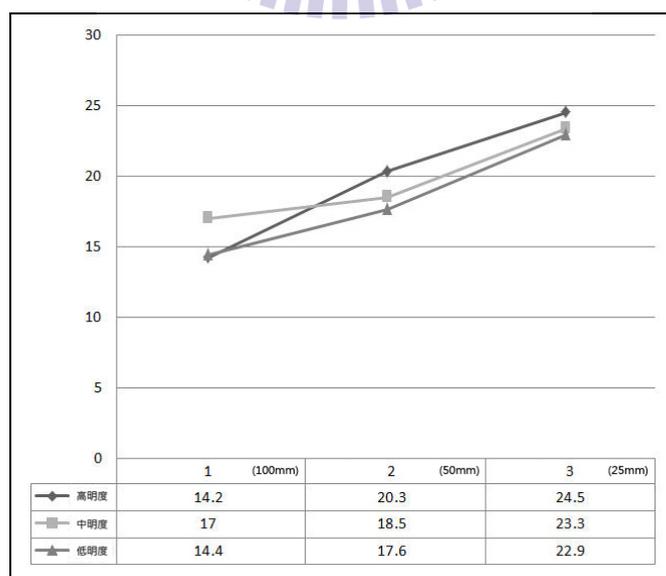


圖 4.23 不同明度下景深最佳自然度主觀相等點 PSE 比較圖

表 4.11 不同明度下景深最佳自然度的單因子變異數分析結果

		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
高明度組	組間	97.156	2	48.578	29.458	.000
	組內	143.467	87	1.649		
	總和	240.622	89			
中明度組	組間	35.622	2	17.811	6.387	.003
	組內	242.600	87	2.789		
	總和	278.222	89			
低明度組	組間	11.400	2	5.700	2.984	.056
	組內	166.200	87	1.910		
	總和	177.600	89			

4.6 整合焦距、亮度與景深實驗的討論

(1) 不同攝影焦距需要不同景深營造最佳的自然效果。

從焦距與景深實驗結果與亮度與景深實驗結果來看，都可以看到攝影焦距這個變項會讓影響受試者對景深的判斷，而且焦距愈短景深清晰範圍便要擴大，即使特寫鏡頭也不偏好極淺的景深效果。這結論其實反映眼睛與大腦的在看 3D 立體視覺的要求與看 2D 平面攝影作品有些不同；在平面攝影作品上，常會利用大光圈製造極淺的景深，即使在廣角鏡頭只要光圈足夠大，拍出目標物前後都充滿模糊前景、背景似乎成為一種可以提供立體感與美感的訣竅(圖 4.24)；不過當受試者需要戴上 3D 眼鏡觀看時，這種傳統的攝影景深作法可能就需要改變，由於不論是否做輻輳運動，立體視覺需要以像差來讓大腦建構立體感，如果畫面中絕大比例的範圍都是景深外的模糊地帶，會讓影像呈現片狀的立體效果，對焦清晰的目標物之立體感是完整的，但是背景會成為一片模糊的牆壁置於後面，這種畫面在 2D 攝影作品很常見，但是在 3D 立體空間時就變得很不自然，且在真實環境的立體視覺經驗而言，明亮的廣角環境與大光圈的組合幾乎不可能存在，這也可能是要創造最佳自然度的 3D 立體視覺時，受試者都偏好清晰範圍較多的場景設定的原因，特別是廣角視角幾乎都不需要模糊的景深。

不過在 3D 立體視覺的情況下，不使用大光圈/極淺景深只有在廣角跟標準鏡

頭的情況下才對自然度的提升有幫助，中距離特寫鏡頭這類視角則比較傾向接近 2D 攝影條件，受試者比較能接受極淺模糊的景深，可能與真實視覺經驗無法產生這類視角有關，只好依循以往平面攝影作品的觀賞經驗來建構 3D 的立體空間。



圖 4.24 廣角大光圈的攝影作品(24/1.4 鏡頭)
(<http://bobkrist.com/fast-wide-and-handsome/>)

(2) 想要呈現最立體的 3D 效果，周遭的環境像差很重要。

從圖 4.28 配對比較量表來看，無論哪種攝影視角而言，營造最佳的立體效果都需要清晰範圍較大的周遭線索，因此景深愈淺似乎立體度也愈降低。由於近年來 3D 攝影機技術的發達，經由家用 3D 藍光片檢視與 3D 電影幕後花絮，幾乎都可以看到導演與攝影師採用輻輳對焦的方式拍攝，這當然與提升舒適度有關；因此兩台攝影機中心軸都正對目標物軸心時，目標物的像差其實相對而言會減少，相反的背景的像差反而會增加(可參考圖 3.15)，所以建構 3D 立體視覺的立體度所需的線索似乎主要落在背景當中。

不過大光圈/淺景深的設定卻是以虛化模糊目標物前景、背景的方式來達到其效果，如此一來也把建構立體度所倚賴的重要線索給模糊掉了，當然可能減弱了整體畫面在 3D 立體視覺上面立體度的呈現；另外立體效果在景深與自然度的實驗中隨著視角愈大呈現比較正向的關係，因此在廣角鏡頭畫面裡景深清晰範圍

較大，則自然度與立體度都同時提升。

(3) 景深的深淺不會產生 3D 立體不適的感覺。

在焦距與景深實驗中，針對視覺不適的提問發現，所有受試者景深範圍由清晰範圍最大(小光圈模式)，調整到清晰範圍最小的狀況(大光圈模式)，受試者眼睛清晰範圍的視角從 33 度(看清楚全景)變成 1 度(只看清楚目標物)，在 3D 立體視覺經驗上都不會產生眼睛不舒服的狀況，所以雖然景深與立體感有關，像差距離也與立體感營造有關係，不過像差對舒適度的影響更是直接。

(4) 環境光源的亮度會影響 3D 視覺對景深的寬容度。

經由以明度為操作變項的實驗得知，隨著環境整體明度的下降，似乎對模糊景深的寬容度也會增加，愈暗的場景，可以製造多一些淺的景深也不至於改變我們對整個畫面自然度的觀感；形成的原因可能與 3D 立體視覺是讓觀者真的處在一個立體空間的感覺，所以操作環境光源的改變，讓瞳孔產生縮放的動作，真實的視覺經驗就可能回饋到實驗中，讓受試者在不同明度下認為該產生不同的模糊景深會更真實自然。未來也許可以如果有辦法控制明度，讓戴上 3D 立體眼鏡與拿下來看 2D 平面畫面時明度都保持一致，便可以探索 2D 平面與 3D 立體空間在不同明度下，我們是會怎麼看待景深這個問題。

第五章 結論

3D 電影或是家用 3D 電視系統已是現今與未來的趨勢，而目前對於產生 3D 立體不適的生理研究卻仍在探索階段，無法馬上提供具體的資料讓製作 3D 影像的導演、攝影師、動畫師與藝術家們在製作的階段做出任何防範問題的措施。因此本研究以這個迫切需求為研究目的，從拍攝時攝影機的架設間距，對焦時兩台攝影機的聚合動作，到攝影構圖時的焦距、亮度、景深等問題，以實徵研究取得相關線索，了解人類視覺在觀看 3D 立體材料時各種與舒適度有關的參數範圍。

在器材設定方面，我們針對像差距離與聚合對焦實驗的結果作了以下幾點結論整理：

(1)發現最佳的 3D 立體效果可能伴隨著不舒適的感覺。因為舒適度的臨界範圍與最佳立體效果數據是接近吻合的，所以想要擁有最佳的立體感，在提高像差的狀況底下，一定就是提高不舒適的感覺，因此很遺憾地，最佳 3D 立體效果與最佳的舒適度兩者是無法得兼的，創作者必須隨時根據其創作目的，很有意識地在這兩者間權衡其輕重，以期達到合理的平衡。

(2)如果以立體效果為主要目標，拍攝影像時有沒有作輻輳運動沒有太大的影響。因為輻輳運動可以提供的是舒適度的提升，而不是立體效果度的提升；加上拍攝時設定輻輳運動的過程往往比沒有輻輳運動操作困難與耗時，因此以 3D 立體度為主要目的時，可以省略較複雜的輻輳對焦方式。

(3)如果以舒適度為主要考量時，有沒有作輻輳運動就可以有範圍不大一樣的攝影機間距數值。圖 5.1 是整合焦距與舒適度臨界範圍的圖形，X 軸是兩攝影機間距數值，Y 軸是攝影機距離目標物的距離，單位是 mm，目標物大小都固定在受試者水平視角約 14 度左右(隨著目標物距離會更換不同焦距的鏡頭)。可以發現在較深色的區域是無作輻輳對焦的舒適範圍，而增加出去較淺的區域則是作

了輻輳運動後所增加出來的寬容範圍。也就是說在相同的目標物距離上，有作輻輳運動的兩攝影機間距，可以設定的比無作輻輳運動的間距較大上一些，圖 5.1 也是設定攝影機間距可以參考的應用數據，根據拍攝目標物的距離，可以依照自己器材允許的間距調控範圍，在圖上灰色範圍內對應到合適的攝影機間距，都會是舒適度的安全區間(有輻輳運動可以增加出一段淺灰色的安全區間)。

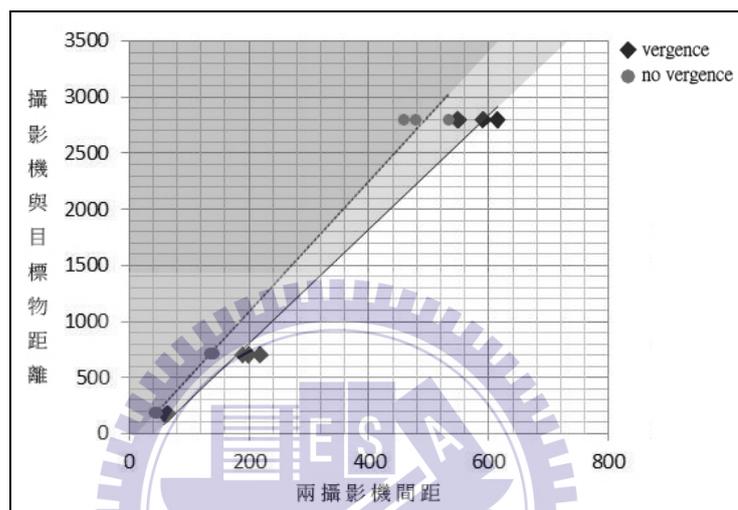


圖 5.1 目標物距離與相機間距在舒適度安全區間的關係圖

(4)如果舒適度與立體感都要兼顧的話，則相機間距適合設定在最佳舒適度與開始不舒適的區間。圖 5.1 灰色區域雖然都是相機間距舒適的安全區間，不過 3D 立體影像還是要提供足夠的立體效果，因此如果間距設定太保守(太接近 Y 軸)，則也失去立體度與拍攝 3D 立體影像的意義。圖 5.2 與圖 5.3 是整合最佳舒適度的關係圖，圖 5.2 是無作輻輳運動的關係圖，圖 5.3 則是有作輻輳運動的關係圖；虛線是最佳舒適度的位置，實線是舒適度的臨界線，也是非常接近最佳立體效果的位置。因此在兼顧舒適度與立體效果下，這兩線段形成的區域就是理想的相機設定區間，如果想要舒適度高一些，則稍微向左往虛線靠攏，想要加強立體感，則間距設定往右邊實線靠攏(但不宜超過實線)，則可以有接近最佳立體效果與不錯舒適度的 3D 畫面呈現。

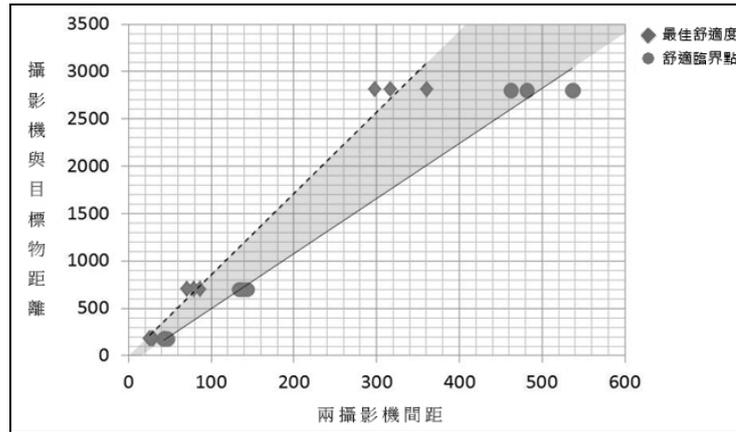


圖 5.2 目標物距離與相機間距在最適宜區間的關係圖(無幅轉運動)

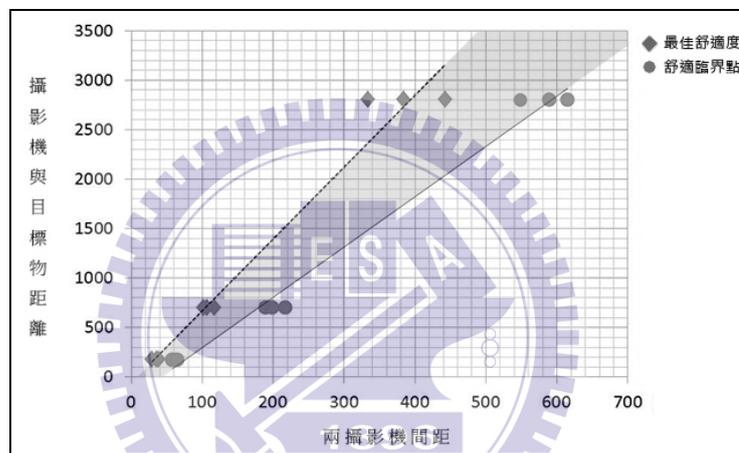


圖 5.3 目標物距離與相機間距在最適宜區間的關係圖(作幅轉運動)

設定好了兩攝影機の間距，可以在舒適的狀況下產生較佳的立體效果，接著便是針對拍攝畫面的考量。我們發現作品如果本身以 3D 形式拍攝，許多以往 2D 平面攝影手法與美學的經驗可能有需要多考量的部分，雖然 3D 影像與 2D 影像不至於如彩色膠捲與黑白膠捲的差異性那麼強烈，但是還是有許多不同的地方需要在拍攝時多加留意，因此在影像攝製方面，我們針對焦距、亮度與景深實驗的結果作了以下幾點結論整理：

(1)3D 立體攝影在不同攝影焦距需要搭配不同景深，才能營造出最佳的自然效果。由於 3D 立體影像模擬是人類真實立體視覺的感覺，所以在與景深的搭配上如何真實自然就顯得重要；不過由於人類視覺不會出現離開廣角畫面的狀況，

所以當 3D 呈現這些中距離焦段或是遠距離焦段時，怎樣在景深的搭配上可以更自然便無法從日常視覺經驗獲得，因此我們以足夠的受試者，經過實驗建立一個在 3D 立體自然度上，運用不同鏡頭焦距可以參考的景深變化數據。圖 5.4 是將實驗時最多受試者調整的清晰範圍結果轉成視角單位，再與鏡頭焦距作散點分布關係圖，可以得到一個在 3D 立體真實自然度上足以應用的參考圖形。由圖可知隨著拍攝鏡頭焦距數值愈大(Y 軸)，可以看見景深的清晰範圍視角愈來愈窄(對應 X 軸)，亦即景深愈來愈淺畫面模糊範圍愈多的狀況。

因此用鏡頭語言的術語來說便是，拍攝確立環境背景所用的遠景鏡頭(long shot)時，景深清晰範圍要大(深景深)，畫面中幾乎所有遠近程度的細節都要清晰呈現，完全沒有模糊的範圍；而拍攝雙人鏡頭、團體鏡頭或過肩鏡頭用的中景鏡頭時(media shot)，景深清晰範圍約占視角 25 度左右，畫面縱深之 2/3 都是清楚的部分，只有 1/3 是模糊的範圍；至於讓主體成為必然焦點的特寫鏡頭(close up)時，則是畫面縱深之 2/3 都呈現模糊狀況較為真實自然，即所謂的淺景深效果。所以拍攝 3D 立體影像時，隨著使用不同焦段鏡頭構圖時，利用光圈產生適當景深變化，是想要拍攝出精緻自然作品的導演與攝影師可以加以操作的一環。

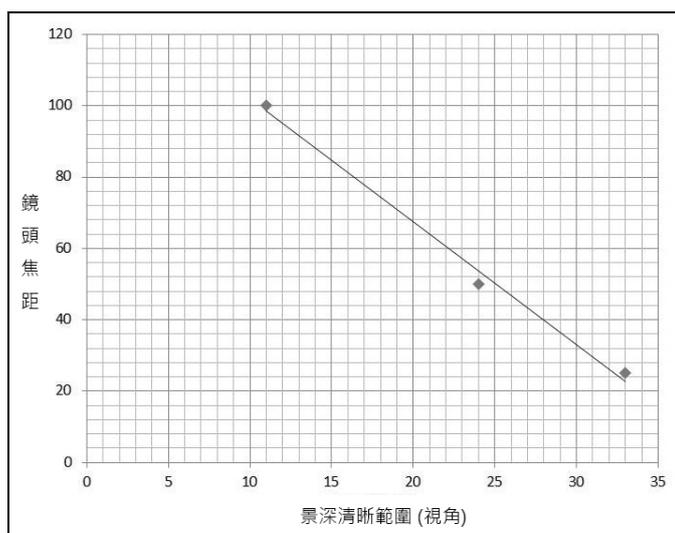


圖 5.4 鏡頭焦距與景深清晰範圍在自然度的關係圖

(2)想要呈現較佳的 3D 立體效果，減少景深外的模糊範圍是必要的，因為目標物周遭的環境像差很重要。在傳統 2D 平面攝影上，運用光圈產生的淺景深是建立深度的方法之一，不過在 3D 立體攝影上，則不會產生更好的立體空間效果，反而會減弱空間的立體感。下圖 5.5 X 軸是景深等級，數字愈大代表景深愈淺(模糊範圍愈大)，X 軸則是配對比較表呈現出來的立體效果心理距離，我們可以看出在不同焦距下，景深大小(清晰範圍)與 3D 立體效果均呈現正相關，原因當然與可以清楚看到不同遠近物件形成的像差訊息有關，這些訊息經由大腦處理過後自然呈現出前後關係非常明確的立體空間，其中以輻輳對焦攝影而言，周遭的環境像差線索其實比目標物的像差更為重要。因此如果模糊景深將這些線索模糊後，特別是非常淺的景深，大腦處理後的 3D 影像幾乎只剩背景模糊成一片景片(如舞台劇背景)的狀況，前後的空間關係變得很窄化，自然得不到較佳的立體效果。

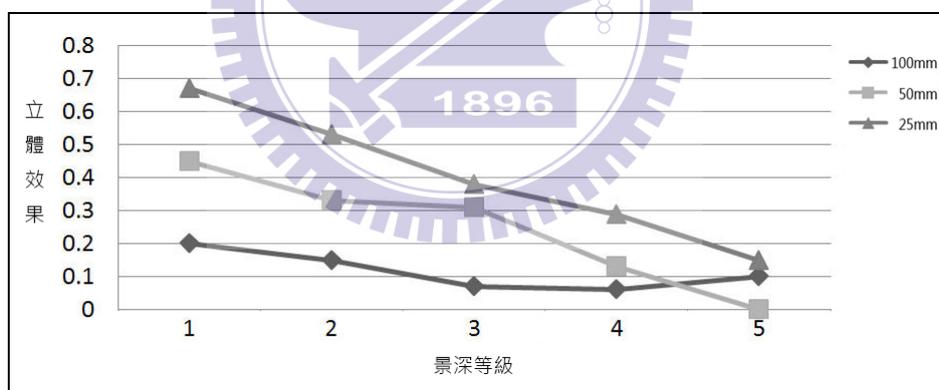


圖 5.5 不同焦距下景深等級與立體效果關係圖

由於環境像差在 3D 立體視覺變得很重要，因此周遭環境訊息量愈多當然立體效果也愈佳，這也是為什麼廣角鏡頭(25mm)在很深的景深狀況下，會有最佳的立體效果了，而變隨著鏡頭焦距變長，周遭環境訊息下降後，立體效果也就跟著下降了。另外比較圖 5.4 跟 5.5 後，可以發現相同景深在自然度與立體效果的好壞也是隨著鏡頭焦距有逐漸分離的狀況，在 25mm 短焦廣角鏡頭下，最自然的感

覺與立體效果最佳都是落在很深的景深的表現，不過隨著攝影焦距增加，需要加一些模糊的景深才會愈自然真實，不過如此一來便須犧牲一部份的立體效果，這便是拍攝時導演跟攝影師在影像攝製上需要考量與取捨的地方了。

(3)環境光源的亮度會影響 3D 視覺對景深的寬容度，所以在戶外與室內拍攝，或是日光與夜晚拍攝時，照明條件的巨大變化也連帶使得景深設定變得相對複雜。圖 5.6 可以看出隨著明度的降低，對於景深偏好的清晰範圍也會降低，亦即觀察者傾向可以容忍畫面出現較多的模糊範圍，或是接受更淺的景深；因此除了參考 5.4 在高明度下呈現的自然度關係圖外，隨著不同的拍攝環境與照明條件，導演與攝影師可以斟酌在明度偏低時將光圈調得比曝光需求更大一點，好獲得更自然的 3D 立體畫面；在極度昏暗的光源下使用極淺的景深，應該也不至於讓觀眾太難以接受。

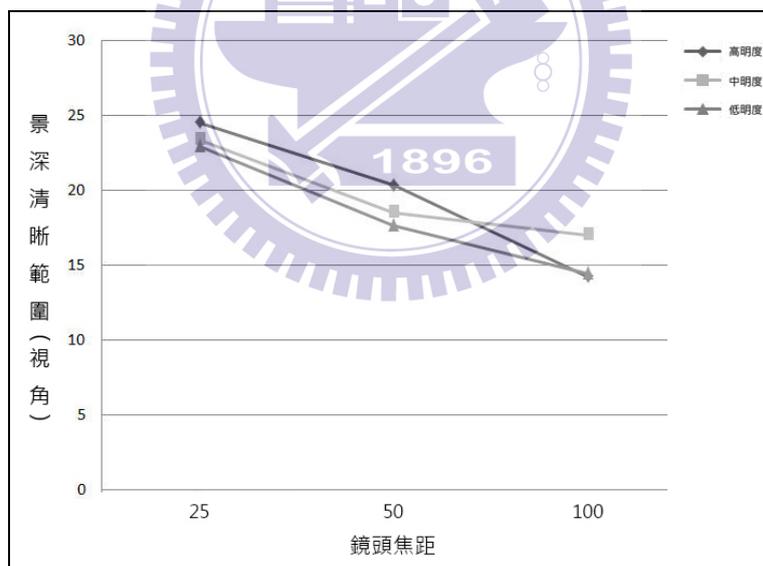


圖 5.6 不同明度下鏡頭焦距與景深偏好關係圖

(4) 經由實驗可知，景深的深淺不會產生 3D 立體不適的感覺。由第一部分的研究可知，相機間距所形成的像差會是產生不適感覺的原因，如果將攝影機間距設定在安全區間內，再利用景深變化詢問是否會不適，發現所有受試者不會認為景深的模糊感覺會在 3D 立體效果上產生不適，頂多只有畫面不自然的感覺，

所以在目前二階段的實驗大致可以得知，景深不會是構成 3D 立體不適的原因，它只與自然度與立體效果有關，真正構成不適的還是像差距離。

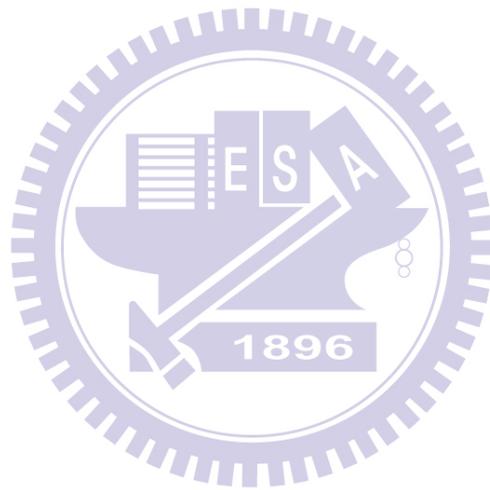
(5)熟悉物的大小不會影響景深，但景深會影響大小的知覺判斷。在第二階段實驗中曾經利用目標物所產生的熟悉物大小辨識，來探討是否影響景深的判斷（藉由暗示物件與觀察者之間的主觀距離），因為如果主觀認知是很小的物件(如鎖頭)，也許因為需要很近看會加強景深模糊度來增加自然感覺，另外認知很大的物件(挖土機)便是相反的狀況。不過在實驗中發現沒有明顯的影響，熟悉物的大小認知辨識不會影響到景深的判斷，當然原因可能是目標物的生態效度不高不夠寫實，這是未來後續還可以繼續改進的地方。雖然從熟悉物的大小辨識這個方向不會改變景深的判斷，但是相反的方向，景深的操作卻很容易影響大小知覺的判斷，如圖 5.7 就是以移軸鏡頭(Tilt-Shift Lens) 拍攝的真實場景畫面，不過由於製造出極淺的景深，整個原先巨大的球場變成了袖珍的模型感覺，這種由景深而來的大小知覺改變也是有趣的課題。



圖 5.7 不同焦距下景深等級與立體效果關係圖

(http://en.wikipedia.org/wiki/Tilt%E2%80%93shift_photography)

整個研究成果在器材設定與影像應用層面上，可讓從事 3D 立體影像的工作者可以有基本的參考依據，好創作出優秀且舒適悅目的 3D 立體影像作品。在學術研究層面上，對內而言，研究過程的執行可讓參與的助理人員熟悉 3D 立體視覺的研究步驟，也對製作 3D 素材與量化分析有足夠的經驗。對外而言，各領域的研究單位可在本計畫的基礎視覺研究成果上，進一步的深化探討，將此部分的研究資料應用到更廣的層面。未來也會針對 3D 立體視覺，在實際的攝影機拍攝研究上與動態化的立體畫面上，繼續進一步的研究與發展。



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。
- 柯盈盈 (2008)。立體顯示器顯示型態與觀看角度之人因評估。國立清華大學工業工程與工程管理學系碩士論文。
- 程治 (2009)。3D 立體顯示應用產品的現況與未來發展。《光連》，84，65-70。
- 馬士超、張韜 (2010)。數位 3D 立體電影技術之深度分析。《現代電影技術數位立體電影研究》，5，6-14。
- 許精益、黃乙白 (2007)。3D 立體顯示技術之發展與研究。《光學工程》，98，1-8。
- 陳一平 (民 100) 《視覺心理學》。台北：雙葉書廊。
- 劉英茂 (民 76)。《基本心理歷程》。臺北市：大洋。
- Barbara, L., John, U. & Jim, S. 著。邱奕堅 譯 (2001)。《新現代攝影》。台北：影像視覺藝術。
- Barlow, H. B., Blakemore, C., & Pettigrew, J. D. (1967). The neural mechanism of binocular depth discrimination. *Journal of Physiology*, 193, 327-342.
- Berkel, C. (1999). Image Preparation for 3D LCD, SPIE Proceeding, 3639, 84.
- Blohm, W., Beldie, I. P., Schenke, K. Fazel, K. & Pastoor, S. (1997) .Stereoscopic image representation with synthetic depth of field. *Journal of the Society for Information Display* ,5, 307-313.
- Bahn, J. K. San, J. Y., Choi, Y. J., Kham, K., & Chung, C. S. (2002). Effects of

interpupillary distance and AC/A ratio on binocular fusion and depth perception. *Proceedings of the IDW'02*, 1303-1306.

Bangor, A. W. (2000). Display technology and ambient illumination influences on visual fatigue at VDT workstations. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.

Coltekin, A. (2006). Foveation for 3D visualisation and stereo imaging. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland.

Campbell, F. W. (1957). The depth of field of the human eye. *Journal of Modern Optics*, 4, 157-164.

Charman, W. N., & Whitefoot, H. (1977). Pupil diameter and depth-of-field of human eye as measured by laser speckle. *Optica Acta*, 24, 1211-1216.

Chien, K. W. & Shieh, H. P. D. (2006). Time-multiplexed three-dimensional plays based on directional backlights with fast-switching liquid-crystal displays. *Applied Optics*, 45 (13), 3106-3110.

Cutting, J. E. & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers. (Eds), *Handbook of perception and cognition: Perception of space and motion* (pp.69-117). New York: Academic Press.

Cooper, J. S., Burns, C. R., Cotter, S. A., Daum, K. M., Griffin, J. M. & Scheiman, M. M. (2001). Optometric clinical practice guideline care of the patient with accommodative and vergence dysfunction. St. Louis, America, American Optometric Association.

Goldstein, E. B. (2001). *Sensation and Perception*. Wadsworth.

- Dillon, T. W. & Emurian, H. H. (1996). Some factors affecting reports of visual fatigue resulting from use of a VDU. *Computers in Human Behaviour*, 12, 49-59.
- Dodgson, N. A. (2004). Variation and extrema of human interpupillary distance. *Proceedings of the SPIE*, The International Society for Optical Engineering, 5291, 36-46.
- Emoto, M., Niida, T. & Okana, F. (2005). Repeated Vergence Adaptation Causes the Decline of Visual Functions in Watching Stereoscopic Television. *Journal of Display Technology*, 1, 328-340.
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3), 1-30.
- Hook, D. C. & Finkelstein, M. A. (1986). Sensitivity to light. In Boff, K., Raufman, L. & Thomas, J. (Eds), *Handbook of Perception and human performance* (Chap. 5). New York: Wiley.
- Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1970). Cells sensitive to binocular depth in area 18 of the macaque monkey cortex. *Nature*, 225, 41-42.
- Howard, I. P. & Rogers, B. J. (1995). *Binocular vision and stereopsis*, Oxford University Press, New York.
- Hagura, H., Nakajima, M., Owaki, T. & Takeda, T. (2006). Study of asthenopia caused by the viewing of stereoscopic images: measurement by MEG and other devices. *Proceedings of SPIE*, 6057, 192-202.
- Howard, I. P. (2002). *Seeing in Depth: Basic Mechanisms, vol 1. I*. Porteous Publishing, Toronto.

- Jukka, H., Monika, P., Jari, T., & Gote, N. (2006). Simulator sickness in virtual display gaming: A comparison of stereoscopic and non-stereoscopic situations. Proceedings of the 8th conference on Human-computer interaction with mobile devices and services, 227-230.
- Julesz, B. (1960). Binocular depth perception of computer generated patterns. *The Bell System Technical Journal*, 39, 1125-1162.
- Julesz, B. (1971). *Foundation of Cyclopean Perception*. Chicago: University of Chicago press.
- Jones, R. & Stephens, G. L. (1989). Horizontal fusional amplitudes. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 30, 1638-1642.
- Kawamura, Y., Horie, Y., Sano, K., Kodama, H., Tsunoda, N., Shibuta, Y., Kawachi, Y., & Yamada, M. (2012) The Influence on Humans of Long Hours of Viewing 3D Movies. *IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E95-A(8), 1306-1309.
- Kay, M. S., Robert, S. K., & Julie, M. D. (1997). Cybersickness is not simulator. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, 1138-1142.
- Kollin, J. S., Benton, S. A., & Jepsen, M. L. (1990). Real-Time Display of 3-D Computed Holograms by Scanning the Image of an Acoustic-Optic Modulator, *SPIE Proceedings*, 1212, 174.
- Lipton, L. (1982). *Foundations of the Stereoscopic Cinema*, New York: Van Nostrand Reinhold Co.

- Lambooij, M.T.M., IJsselsteijn, W.A., & Heynderickx, I. (2007). Visual Discomfort in stereoscopic Displays: A Review. *SPIE-IS&T*, Volume 6490, 64900I-1.
- Le-Grand, Y. (1968). *Light, colour and vision* (2nd edn). London: Chapman and Hall.
- Le-Grand, Y. & El-Hage, S.G. (1980). *Physiological optics*. Berlin.
- MacKenzie, K. J., Dickson, R. A., & Watt, S. J. (2012). Vergence and accommodation to multiple-image-plane stereoscopic displays: 'Real world' responses with practical image-plane separations? *Journal of Electronic Imaging*, 21(1), 011002.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: Two central pathways. *Trends in Neuroscience*, 6, 414-417.
- Mollon-Williams, M., & Tresilian, J. R. (1999). Some recent studies on the extraretinal contribution to distance perception. *Perception*, 28, 167-181.
- Murata, A., Uetake, A., Otsuka, W. & Takasawa, Y. (2001). Proposal of an index to evaluate visual fatigue induced during visual display terminal tasks. *International journal of human computer interaction*, 13, 305-321.
- Nakayama, K. & Shimojo, S. (1990). Da Vinci stereopsis: Depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, 30, 1811-1825.
- Nakayama, K., Shimojo, S. & Silverman, G. (1989). Stereoscopic depth: Its relation to image segmentation, grouping, and the recognition of occluded objects. *Perception*, 18, 55-68.
- Okada, Y., Ukai, K., Wolffsohn, J. S., Gilmartin, B., Iijima, A. & Bando, T.

- (2006). Target spatial frequency determines the response to conflicting defocus- and convergence-driven accommodative stimuli. *Vision Research* ,46, 475-484.
- Ogle, K. N.(1964), *Researches in Binocular Vision*. Hafner Publishing Co. Lt.
- Poggio, G. F. & Poggio, T. (1984). The analysis of stereopsis. *Annu Rev Neurosci*, 7, 379-412.
- Pastoor, S. (1991). 3D-television: a survey of recent research results on subjective requirements. *Signal Processing: Image Communication* ,4, 21-32.
- Panum, P. L. (1940). *Physiological investigations concerning vision with two eyes* (Hubscher C. Trans.). Hanover, NH: Dartmouth Eye Institute. (Original work published 1858).
- Rokers, B., Cormack, L. K., Huk, A. C. (2009). Disparity- and velocity-based signals for three-dimensional motion perception in human MT+. *Nat Neurosci*. 12(8), 1050-1055.
- Patterson, R. & Martin, W. L. (1992) . Human Stereopsis. *Human Factors*, 34, 669-692.
- Shibata, T., Kawai, T., Ohta, K., Lee, J., Otsuki, M., Miyake, N., Yoshihara, Y. & Iwasaki, T. (2006). Examination of asthenopia recovery using stereoscopic 3D display with dynamic optical correction. *Proceedings of SPIE* ,60550, E-1.
- Sekuler, R. & Blake, R. (2002) . *Perception*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Schor, C., Wood, I. & Ogawa, J. (1984). Binocular sensory fusion is limited by spatial resolution. *Vision Research* ,24, 661-665.
- Sexton, I. & Crawford, D. (1989). Parallax Barrier 3-D TV, in *Three-Dimensional*

Visualization and Display Technologies, Proc. SPIE 1083, 84-92.

Shieh, H.-P. D., Huang, Y.-P., & Chien, K.-W. (2005) .Micro-Optics for liquid crystal displays applications, *IEEE/OSA J. Display Technology*, 1(1), 62-76.

Sheedy, J. E., hayes, J. & Engle, J. (2003). Is all asthenopia the same. *Optometry and vision science*, 80, 732-739.

Tresilian, J. R., Mon-Williams, M., & Kelly, B. (1999). Increasing confidence in vergence as a cue to distance. *Proceedings of the Royal Society of London*, 266B, 39-44.

Tyler, C.W. (1983). Sensory processing of binocular disparity. IN C.M. Schor, K.J. Cuiffreda (Eds.), *Vergence eye movements: Basic and clinical aspects* (pp. 199–295), Boston: Butterworths.

Talmi, K. & Liu, J. (1999). Eye and gaze tracking for visually controlled interactive stereoscopic displays. *Signal Processing: Image Communication*, 14, 799-810.

Uetake, A., Murata, A., Otsuka, M. & Takasawa, Y. (2000). Evaluation of visual fatigue during VDT tasks, Systems, Man, and Cybernetics. *IEEE International Conference on systems, machines and cybernetics*, 2, 1277-1282.

Wheatstone, C. (1838). On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomenon of binocular vision, *Philosophical Trans. Royal Soc. of London*, 128, 371-394.

Wiesel, T. N. (1982). Postnatal development of the visual cortex and the influence of environment. *Natural*, 299, 583-591.

Westheimer, G. (1994).The Ferrier Lecture, 1992. Seeing depth with two eyes: stereopsis. *Proceedings of Royal Society of Lond (Biological)*, 205-219.

Ware, C. (2004) . *Information Visualization: Perception for Design*, Morgan

Kaufman, San Francisco, CA.

Yano, S., Emoto, M. & Mitsuhashi, T. (2004). Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images. *Displays* ,25, 141-150.

Yeh, Y. Y. & Silverstein, L. D. (1990). Limits of fusion and depth judgement in stereoscopic color displays. *Human Factors* ,32, 45-60.

網站

Charles Lee. (2011). 3D Cinema Technology and the making of “Seediq Bale” 3D.

http://big5.news365.com.cn:82/gate/big5/www.news365.com.cn/jk/201001/t20100114_2590509.htm

你有“《阿凡達》眩暈症”嗎?

http://big5.news365.com.cn:82/gate/big5/www.news365.com.cn/jk/201001/t20100114_2590509.htm

陳柏睿 (2010)。3D 產業發展現況與未來趨勢--工研院電光所刁國棟副所長演講紀要。儀科中心簡訊。

<http://www.itrc.narl.org.tw/Publication/Newsletter/no99/p08.php>

簡克偉、謝漢萍 (2012)。立體顯示器(3D display)之發展與未來。

<https://doc-04-94-docviewer.googleusercontent.com/viewer/secure>

鍾榮峰 (2009)。裸眼 3D 備受矚目 3M 開發指向背光技術迎戰。CTimes。

<http://www.ctimes.com.tw/News/ShowNews.asp?O=HJTAECRACIWSA-0ME>

H.