

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

複合式全像之立體顯示研究

The Research on Three-dimensional Displays using
Multiplexed Holograms



研究生：董冠佑

指導教授：許根玉 教授

中華民國 一 百 年 七 月

複合式全像之立體顯示研究

The Research on Three-dimensional Displays using
Multiplexed Holograms

研 究 生：董冠佑
指 導 教 授：許根玉

Student : Guan-Yo Tung
Advisor : Ken-Yuh Hsu



A Thesis
Submitted to Department of Photonics
College of Electrical and Computer Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Engineering

July 2011
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 年 七 月

複合式全像之立體顯示研究

研究生：董冠佑

指導教授：許根玉

國立交通大學光電工程研究所碩士班



複合式全像是介於現在市場上之立體顯示器技術與全像術之間的技術，兼取一般攝影與全像術之長處，可以在特定觀賞距離下，讓觀賞者不需配戴眼鏡就享受立體效果。

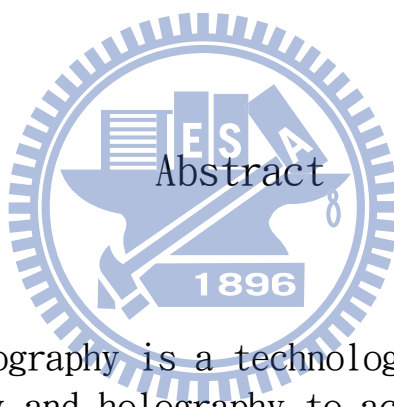
本論文研究包含複合式全像的理論、立體感模擬、實作方法與成像特性，以及比較此技術與一些裸眼立體顯示技術的差異。論文中藉由研究雙眼視差造成立體感之人因理論與全像術理論，找出複合式全像的限制與成像特性；再由此出發，比較此技術與市面上以視差理論達到裸眼立體顯示之技術的顯示特性。實驗的設計，分成展示、平面取像的方法、全像記錄以及影像重建四個系統，包含由模擬決定的攝影架構，與各實驗儀器規格對系統設計限制的探討。

在論文的最後，我們以全像方法達到複合立體感的展示，並以實驗證實所設計之裸眼立體顯示系統特性。

The Research on Tree-dimensional Displays using Multiplexed Holograms

Student : Guan-Yo Tung

Advisor : Ken-Yuh Hsu



Multiplexed holography is a technology that combines the merits of photography and holography to achieve three-dimensional displays. It can present three-dimensional image to a viewer without wearing stereoscopic glasses.

In this thesis we investigate the principle, computer simulation, and optical experiments of multiplexed holography. By analyzing the theories of binocular disparity and holography, we find the limits and the properties of multiplexed holography, and we compare them with those of other parallax three-dimensional displays. There are four sub-systems in our hologram multiplexing system: photography, hologram recording, hologram transfer and 3-D image displays.

We have constructed the hologram multiplexed system, demonstrated the 3-D display, and discussed the important properties.

誌 謝

時光飛逝，一下子兩年就過去了，期間實驗室大家庭給了我無數的鼓勵和支持，大家共同創造了許多溫馨的回憶。其中，我要特別感謝我的指導教授許根玉老師，他總是耐心地和我一同學習、討論，引導我們學會獨立思考，並互相幫助解決問題。也要感謝林烜輝老師，給了我實驗上很多的指導與幫忙。實驗室中，Vera、仁崇、柏霖、俊華、阿龍、啟新、翊安、功賀、昶慶、信甫學長以及怡安學姊，不但常常幫我解惑，還帶著我尋訪新竹美食、參與實驗室球賽、出遊等等各色各樣的實驗室活動，加上翊生學弟停不下來的歌聲，我才能有勇氣與信心完成這個份論文。

最後我要謝謝我的家人、在學校朋友：光電 99 的大家、薇雅以及室友盈瑩，這段期間給我的關心，讓我在研究的時候沒有忘記要運動且不覺得孤單。

目 錄

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
誌 謝.....	iii
目 錄.....	iv
表 目 錄.....	vi
圖 目 錄.....	viii
一、緒論.....	1
1.1 研究背景與目的.....	1
1.2 平面式立體顯示技術簡介與回顧.....	1
1.2-1 眼鏡式立體顯示技術.....	3
1.2-2 裸眼式立體顯示技術.....	5
1.3 研究方法與論文安排.....	14
二、原理介紹.....	15
2.1 人因立體視覺原理.....	15
2.1-1 人體視覺系統.....	15
2.1-2 構成立體感之因素.....	18
2.1-3 平面式螢幕顯示立體效果之原理.....	23
2.2 複合式全像原理.....	30
2.2-1 基本全像術原理.....	30
2.2-2 平面式複合全像原理.....	40
三、實驗設計.....	45
3.1 實驗設備規格.....	45
3.1-1 全像記錄材料.....	45
3.1-2 照相機規格.....	49
3.1-3 雷射之特性.....	50
3.2 實驗架構設計方法.....	53
3.2-1 展示期望.....	54
3.2-2 取平面像片系統與立體合成模擬.....	57
3.2-3 全像記錄系統.....	67
3.2-4 展示方法與成像特性.....	70

四、實驗與分析.....	75
4.1 實驗架構	75
4.2 實驗結果	86
4.2-1 實驗一：裸眼立體系統特性驗證.....	86
4.2-2 實驗二：成像特性驗證	93
4.2-3 實驗三：實物拍攝	97
五、結論與未來工作.....	100
參考文獻.....	102
附錄一：雷射之可用同調長度測量.....	104
附錄二：光程差與所用光源之穩定性.....	109
附錄三：以 Matla 程式模擬攝影與立體感.....	112



表 目 錄

表 1. 平面式立體顯示技術的優劣比較.....	13
表 2. 眼睛成像特性.....	17
表 3. 照相術與全像術的差異比較.....	30
表 4. JD4 全像底片沖洗配方[17]	46
表 5. PFG-01 底片參數[18]	48
表 6. PFG-01 沖洗流程[17]	49
表 7. Nikon D' 100 與 Nikon AF Nikkor 28-85mm/F3.5-4.5 鏡頭搭配規格.....	49
表 8. 雷射參數規格表[20].....	50
表 9. 穩定性測量重建結果.....	53
表 10. 拍攝架構優劣比較.....	66
表 11. 展示設計參數表.....	77
表 12. 程式模擬各角度平面相片.....	80
表 13. 外拍實拍取得平面影像與比例圖.....	81
表 14. 實驗室實拍取得平面影像與比例圖.....	82
表 15. 全像記錄系統參數.....	83
表 16. 雙視窗之主全像片曝光記錄.....	87
表 17. 觀察裸眼立體特性，在不同距離觀察主全像片之光場.....	88
表 18. 裸眼立體系統效果驗證.....	89
表 19. 主全像片中的兩個影像.....	89
表 20. 雙視窗之轉換全像片曝光記錄.....	90
表 21. 雙視窗之轉換全像片觀察結果.....	91
表 22. 轉換全像片中的兩平面影像.....	92
表 23. 10 觀景窗之主全像片曝光條件記錄	93
表 24. 10 觀景窗之轉換全像片曝光條件記錄	94
表 25. 10 觀景窗轉換全像片，在不同距離觀察轉換全像片之光場面積...	95
表 26. 疊影效應觀察結果.....	96
表 27. 雞蛋花主全像片曝光記錄.....	97
表 28. 雞蛋花主全像片重建結果.....	97
表 29. 雞蛋花轉換全像片曝光記錄.....	97
表 30. 雞蛋花轉換全像片重建結果.....	98
表 31. 鉛筆與橡皮擦主全像片曝光記錄.....	98
表 32. 鉛筆與橡皮擦轉換全像片曝光記錄.....	98

表 33. 鉛筆與橡皮擦轉換全像片重建結果	99
-----------------------------	----



圖目錄

圖 1. Wheatstone 立體鏡.....	2
圖 2. 色彩多工法.....	3
圖 3. 偏振多工法.....	4
圖 4. 眼鏡式時間多工法.....	4
圖 5. 兩張影像的視差立體圖.....	6
圖 6. 五張影像的視差立體圖.....	6
圖 7. 疊紋效應.....	7
圖 8. 積分攝影術.....	8
圖 9. 裸眼空間多工法.....	8
圖 10. 以蠅眼透鏡製作之自然光下物體的全像光學示意圖[4].....	10
圖 11. 以蠅眼透鏡產生之複合式全像展示圖[4].....	10
圖 12. 以可移動孔徑位置的相機製作之複合式全像光學示意圖[5].....	11
圖 13. D. J. DeBitetto 簡化之複合式全像全像步驟光學示意圖[6].....	12
圖 14. 眼睛結構圖[8].....	16
圖 15. 視覺訊息傳播途徑[10].....	17
圖 16. 雙眼線所示意圖[12].....	18
圖 17. 光角與距離示意圖[12].....	19
圖 18. 水晶體調節與物距關係示意圖[12].....	19
圖 19. 靜態立體線索[13].....	21
圖 20. 運動視差的結果示意圖.....	21
圖 21. 立體線索效率[13].....	22
圖 22. 三種視差之示意圖[2].....	24
圖 23. 兩眼視網膜上的視差推导图[2].....	24
圖 24. Panum' s fusional area 與雙眼視界的關係示意圖。[12].....	26
圖 25. Convergence 的限制與量化[2].....	26
圖 26. 判別視差角與距離之關係圖 [2].....	27
圖 27. 可用景深範圍與距離的關係.....	28
圖 28. 全像記錄示意圖.....	31
圖 29. 底片曝光能量與穿透率示意圖.....	32
圖 30. 重建光為參考光所重建物體光與底片之關係.....	33
圖 31. 重建光為共軛參考光所重建共軛物體光與底片之關係.....	34
圖 32. 重建光為參考光所重建四光場與底片之關係.....	35
圖 33. 反射式全像之記錄(左)與重建(右)概略光學架構.....	36

圖 34. 穿透式全像(左)與反射式全像(右)的干涉光柵[8]	36
圖 35. 多層膜干涉情形示意圖	38
圖 36. 以向量形式表示布拉格條件重建之原像與共軛像示意圖	39
圖 37. 複合式全像光學架構俯視示意圖(a)記錄(b)重建。 x 為觀賞距離， w 為狹縫寬度。	40
圖 38. 記錄多張平面影像的複合式全像片重建示意圖	41
圖 39. 觀賞距離改變，所看到的複合式全像片重建影像改變	42
圖 40. 讓狹縫平面遠離全像底片的方法	43
圖 41. 複合式全像底片的重建情形	44
圖 42. 記錄材料沖洗化學變化流程	47
圖 43. 光程差與明視度關係曲線	52
圖 44. 可用景深範圍與觀賞者之關係圖	54
圖 45. 展示期望系統示意圖	55
圖 46. 不同觀賞距離對於影像解析度的要求	56
圖 47. 複合式全像攝影架構方法	57
圖 48. 平面影像取得幾何圖	58
圖 49. (b)架構拍照所得影像，左為 $(40, -5, 0)$ ，右為 $(40, 0, 0)$ 之影像 ...	59
圖 50. (c)架構拍照所得影像，左為 $(40, -5, 0)$ ，右為 $(40, 0, 0)$ 之影像 ...	59
圖 51. 以(b)架構拍照所得影像與拍攝軌道之關係，左為 $(40, -5, 0)$ ，右 為 $(40, 0, 0)$ 之關係	59
圖 52. 以(c)架構拍照所得影像與拍攝軌道之關係，左為 $(40, -5, 0)$ ，右 為 $(40, 0, 0)$ 之關係	60
圖 53. 相機視場角與觀賞系統總視角關係圖	60
圖 54. (b)與(c)拍攝架構的觀賞系統	61
圖 55. 雙眼視覺模擬示意圖	62
圖 56. 欲拍攝物體之頂點在空間的座標	63
圖 57. 左圖和右圖分別為 (b)架構拍攝理想重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 0)$ 與 $(40, 0, 0)$ 所合成之物體	64
圖 58. 左圖和右圖分別為(b)架構拍攝但忽略平面影像角度重建下，人的 兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 0)$ 與 $(40, 0, 0)$ 所合成之物體	64
圖 59. 左圖和右圖分別為(b)拍攝架構有調整平面影像角度，與忽略角度 調整的中心位置隨觀賞位置改變的關係圖	65
圖 60. 上圖和下圖分別為理想(c)架構重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 0)$ 與 $(40, 0, 0)$ 所合成之物體	66
圖 61. 主全像片記錄光學設計	67

圖 62.	轉換全像片記錄光學設計.....	69
圖 63.	重建光源收斂焦距與底片距離計算.....	70
圖 64.	展示.....	71
圖 65.	各平面影像光場重建式意圖.....	71
圖 66.	最佳觀賞位置示意圖.....	72
圖 67.	不正確的觀賞高度.....	72
圖 68.	左圖和右圖分別為理想重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 5)$ 與 $(40, 0, 5)$ 所合成之物體。.....	73
圖 69.	理想重建下，觀賞者之兩眼中心在 $(40, y, 5)$ ， y 由 $-1.75 \sim 1.75$ 移動，合成物體中心位置改變關係圖。.....	73
圖 70.	看到疊影效應示意圖[23].....	74
圖 71.	展示期望設計.....	77
圖 72.	拍攝物體.....	78
圖 73.	攝影示意圖.....	78
圖 74.	實物取圖架構，左圖為外景取圖架構，右圖為實驗室取圖架構 ...	79
圖 75.	主全像片記錄系統圖.....	84
圖 76.	轉換全像片系統圖.....	84
圖 77.	展示系統架構圖.....	85
圖 78.	雙視窗之主全像片平面影像曝光位置與沖洗結果.....	87
圖 79.	觀察架構.....	87
圖 80.	雙視窗之轉換全像片沖洗結果.....	90
圖 81.	觀察架構.....	91
圖 82.	10 觀景窗之主全像片平面影像曝光位置與沖洗結果.....	93
圖 83.	10 觀景窗轉換全像片沖洗結果	94
圖 84.	實驗架構拍攝預測.....	94
圖 85.	10 觀景窗轉換全像片疊影效應觀察架構	95
圖 86.	麥克森干涉儀。[24].....	104
圖 87.	能量-灰階程度轉換方程式測量實驗架構圖-1	105
圖 88.	能量-灰階程度轉換方程式測量結果	105
圖 89.	介質選擇膜態示意圖[24].....	107
圖 90.	脈衝駐波週期性示意圖.....	108
圖 91.	雷射穩定度測量記錄架構圖。 $\Theta=47^\circ$	109
圖 92.	雷射穩定度測量重建效率架構圖。.....	110

一、緒論

1.1 研究背景與目的

視覺的立體顯示技術已發展四百年之久，但直到 2009 年，好萊塢電影「阿凡達」空前的票房驚動世人，才在商業與科技市場掀起 3D 顯示器熱潮。為何人類長久以來不斷追求立體？這是由於「科技，始終於來自人性」，人生活於三維空間，並以雙眼感知三維空間的立體感，讓我們精準地知道物體與自身的空間相對關係，這是單一平面影無法提供的。

目前可產生立體感所運用的原理有二，一是利用光學原件將平面影像面投影至空間不同位置，讓兩個眼睛分別看不同的平面影像來產生立體感，稱為雙眼視差；二是全像術，全像術把物體的光場完整記錄並重建，因此到達雙眼的光場就如同空間中立體物體的光場，是可以真正重現原物的立體顯示技術。全像術顯示的立體感是現今最接近完美的，可挑剔的美中不足，可說只有對光源的嚴格要求：無法在一般自然光的環境下記錄與展示。為克服記錄光源的問題，發展出複合式全像，即先以一般光源對物體記錄許多畫面，再以全像方式合成完整之立體顯示。複合式全像的原理也是利用雙眼視差，但因其光學的原理與目前其他利用視差的顯示器不同，結合了兩者的優點互補不足。

全像術不一定是立體顯示技術的終點，但以目前的科學來說它是呈現效果最好的技術，而複合式全像是外景全像記錄的必要手段。因此，本文結合人因與全像的特性，研究複合式全像對於立體重建應用上的原理、限制與設計方法，再以實驗觀察此系統的裸眼立體顯示特性。

1.2 平面式立體顯示技術簡介與回顧

對於立體呈現的技術，最早可追溯至 1600 年，第一個嘗試做出立體影

像的是 Giovanni Battista della Porta，他利用繪畫的技術，對於一個物體，分別從兩個不同的觀看方向，去畫出兩張清晰的圖形而組合成一立體圖。後來攝影技術出現，這種繪圖技術便逐漸沒落，取而代之的是立體鏡與立體相機的發展。

在 1838 年，Charles Wheatstone 提出立體視鏡（Stereoscope viewer）的原理，即把同一物體從不同方向得到的兩張影像，利用兩個反射鏡，讓兩張像分別由雙眼來觀看，這種形式的立體視鏡現今便稱之為 Wheatstone 立體鏡。其合成方式如圖 1 所示，它可說是立體顯示技術之始祖。[1]

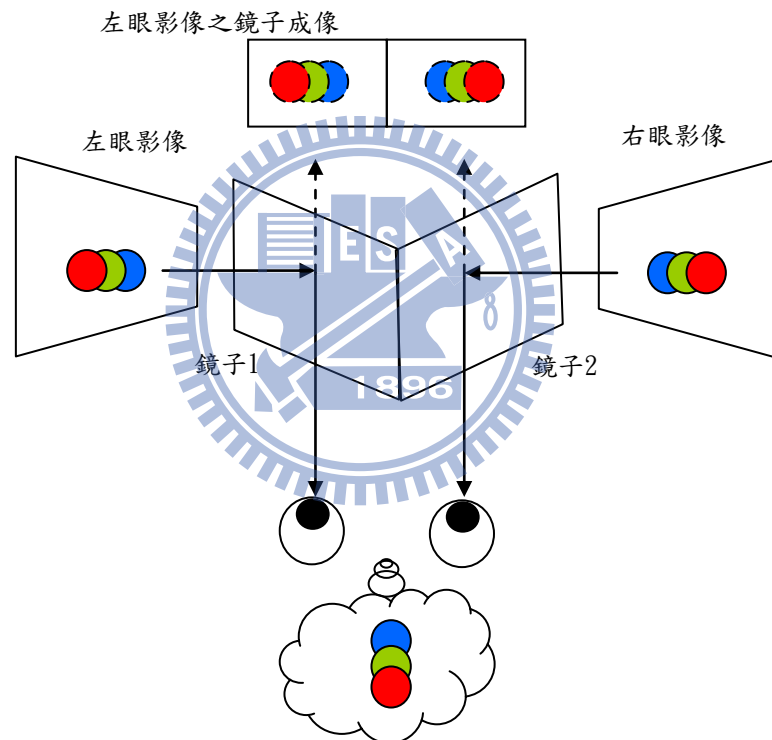


圖 1. Wheatstone 立體鏡

現在由於平面電視的流行，呈現立體效果的系統大多構築在平面上，以下將現有的平面式立體顯示技術以需要眼鏡與否分成兩類，逐一介紹其方式與原理，並著重於不需要眼鏡的裸眼系統。

1.2-1 眼鏡式立體顯示技術

眼鏡式立體顯示技術依照影像過濾的方法分成色彩多工、偏振多工與時間多工，原理都是利用眼鏡的過濾作用，讓兩影像分別給左右眼觀看。

色彩多工法

以上所述，用兩張平面影像合成立體感的方式，在 1850 年首度被 Joseph D' Almeida 和 Louis Du Hauron 改良成在平面媒材上呈現。他們將兩張影像分別以互補色對呈現，並令它們有些許錯位，配合貼有相同互補色對的眼鏡，經由濾光的效果讓兩影像分別由雙眼來觀看。圖 2 所示為其示意圖，圖中上方為以紅藍色對呈現之兩影像疊加，在透過不同顏色的濾光片後，兩影像被過濾分離，再到達觀賞者眼睛。現在又稱此種濾光方式為色彩多工法。除了紅藍色對，另有紅綠、黃藍色對等等，但是不可避免的是眼鏡會讓影像色彩變調，現在比較少使用此種立體眼鏡。[1]

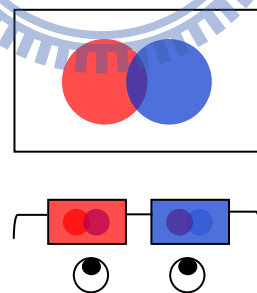


圖 2. 色彩多工法

偏振多工法

此方法由 Polaroid 公司的 Edwin H. Land 於 1938 年發明。偏振多工又分線性偏振與圓偏振兩種，都以兩互相獨立之偏振態呈現兩影像，並配合具有相同組合的偏振態眼鏡來濾光。用於電影院之系統包含兩台投影機，與有能

力將光散射但不改變其偏振性能力的「金屬銀幕」，做法是在兩投影機前加上互相獨立之偏振過濾片，讓投影機畫面帶有偏振性，接著光經由金屬銀幕散射到觀眾眼前，再藉由觀眾配戴的眼鏡達到過濾左右眼畫面之效果[1]。偏振多工用於液晶螢幕製程方法，則是先將畫面分割成基數與偶數列，並在螢幕表面奇偶列對應位置分別加上正交的偏振過濾片或相位模，如圖 3；此種方法有降低畫面解析度的缺點。

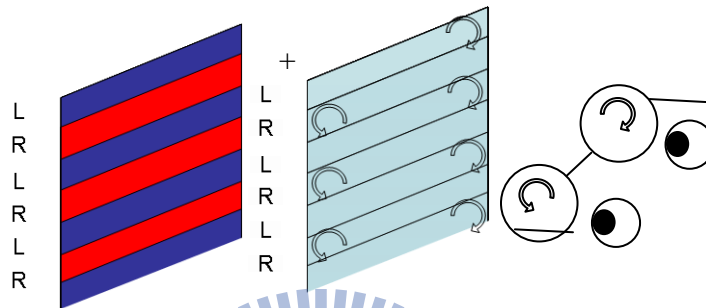


圖 3. 偏振多工法

時間多工法

時間多工法是利用人眼視覺暫留效果，在時間上輪流呈現兩影像，並讓眼鏡左右視窗輪流開啟、關閉來達到濾光，被稱為快門眼鏡，如圖 4。由於此種眼鏡需要驅動，也稱為主動式立體眼鏡，上述其他眼鏡則稱為被動立體眼鏡。時間多工法不會降低解析度，但是一個畫面被看見的時間比其他方法短，導致畫面亮度降低，而眼鏡也因需要驅動而提高了製作成本。

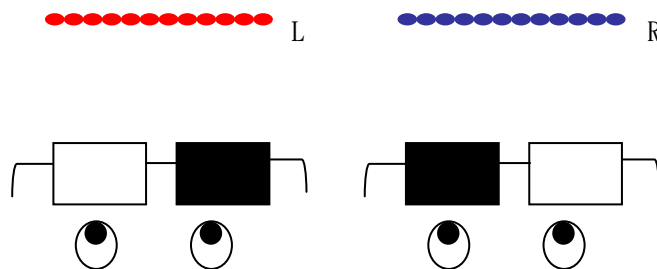


圖 4. 眼鏡式時間多工法

現在亦有同時利用多種多工的眼鏡式系統，利用眼鏡來過濾是將兩個影像分離的好方法，且只要觀賞者人手一副立體眼鏡，對一個螢幕而言觀賞者沒有人數限制。然而眼鏡還是有其缺點，其一是原本有戴眼鏡的觀眾得戴兩副眼鏡，再者即是左右眼鏡各一種濾光片，就只有兩種濾光結果，導致在影像呈現的平面媒材上只能有兩個影像，當觀賞者的位置不在所設計之最佳觀賞位置，或是由於每個人雙眼距離不同，導致觀眾被強迫以和平常不同之影像資訊合成立體感，可能會有立體感不自然，或是不舒服的感覺。

1.2-2 裸眼式立體顯示技術

裸眼式立體指不需要戴眼鏡，就可以觀賞立體感覺的技術，不用眼鏡來做濾光的動作，此種技術必須讓離開顯示螢幕的光有「方向性」，即主動把不同影像投影到空間中不同位置，在此介紹空間多工法、時間多工法與全像術，其中全像術的回顧著重於複合式全像術的回顧。

空間多工法[1][2]

在二十世紀初期，有人開始思考是否可由任意角度來看立體影像，以增加觀看的自由度。美國的 F. E. Ives 在 1903 年率先製作了 parallax stereogram，將左右眼的影像以直線條相互間隔的方式做融合，並在融合影像前面加上一片視差遮障 (Parallax barrier)，利用遮障線條的遮蔽效果，讓在空間中不同位置的左右眼可以看到不同影像，如圖 5。然而此系統在觀賞時，站錯位置可能讓預計給左眼的影像被右眼接收，預計給右眼的影像被左眼看到，如圖 5 中位置 2，會造成大腦無法融合影像，此種現象稱為錯覺視域效應(Pseudo viewing zone effect)。

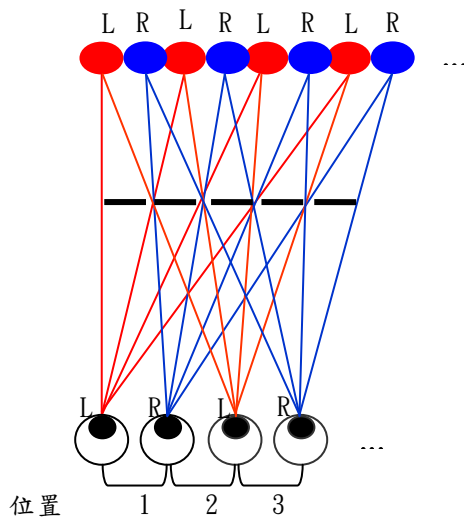


圖 5. 兩張影像的視差立體圖

如果讓一個遮障下，放更多張影像，就可以呈現物體更多角度觀看的樣貌，稱為多視角(Multi-view)效果。在圖 6 中紅色點代表從物體最右方角度攝影的影像，相機相對物體逐漸往左移，依序照下橘色、黃色、綠色與藍色，當觀眾橫向移動時由於看到不同的影像對，會組合出物體物不同角度的樣貌。要注意的是，放多張影像的處理讓發生錯覺視域效應的機會變小，在圖 6 中只有在位置 4 發生，其他位置都可看到對的影像。

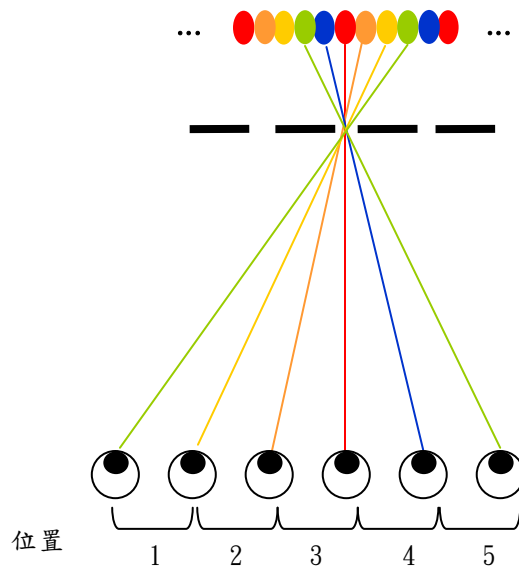


圖 6. 五張影像的視差立體圖

在此設計中，遮障的透光區寬度越小，可以讓光在空間中路徑控制越精確，然而也表示透光的面積減少，會降低整體亮度，這是由於舊式遮障陣列的黑色部分為吸收材質，會導致螢幕的光被吸收，而讓整體亮度下降，現在已有設計令不透光的部分為反射金屬，並藉由設計其形狀讓光反射後再經由透光處射出遮障層。也有企業以另一層液晶螢幕顯示圖案作為遮障，如此一來此螢幕便可以在 3D 與 2D 用途轉換。雖然改善了亮度與看錯影像的問題，解析度下降的缺點卻無法避免，且當所放的影像數目越多，解析度下降也越多。此外，如果影像分割的方向和遮障光柵如果沒有對齊(夾一夾角)，會產生疊紋效應 (Moire effect)，即兩種週期性圖案疊加，產生第三種週期條紋的現象，如圖 7，圖中只有橫向的條紋和左斜的條紋，但是在它們重疊的區域可以感覺出直向條紋。

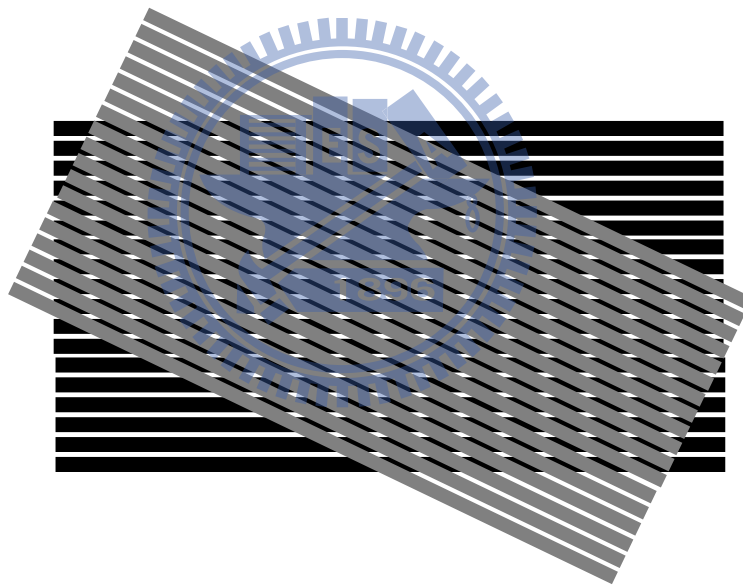


圖 7. 疊紋效應

另外一種方法，是 1908 年由法國的 M. G. Lippmann 所提出的積分攝影術(Integral photography)，之後則將之簡化為複眼透鏡面板 LS (Lenticular-sheet)，首先同樣將左右眼的影像以線條相互間隔的方式做融合，再利用柱狀透鏡的光學特性，將兩張圖投影在空間中不同位置，分別讓左右眼看到不同的影像，如圖 8。

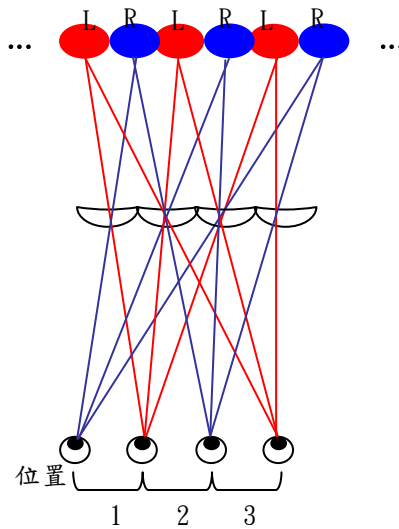


圖 8. 積分攝影術

其擴展視野的方法同視差立體圖，副作用也相似，唯一不同為透鏡沒有不透光處因此沒有亮度下降的問題，不過離軸的像差會造成空間中成像位置偏移。

時間多工法

它的基本原理和快門眼鏡的螢幕一樣，需要可以快速切換的高速面板，在時間上交錯地顯示左右眼畫面，配合螢幕下兩組可快速切換的背光光源與一層 3D 指向板，把影像投射到空間中不同位置。其概略圖如圖 9。[3]

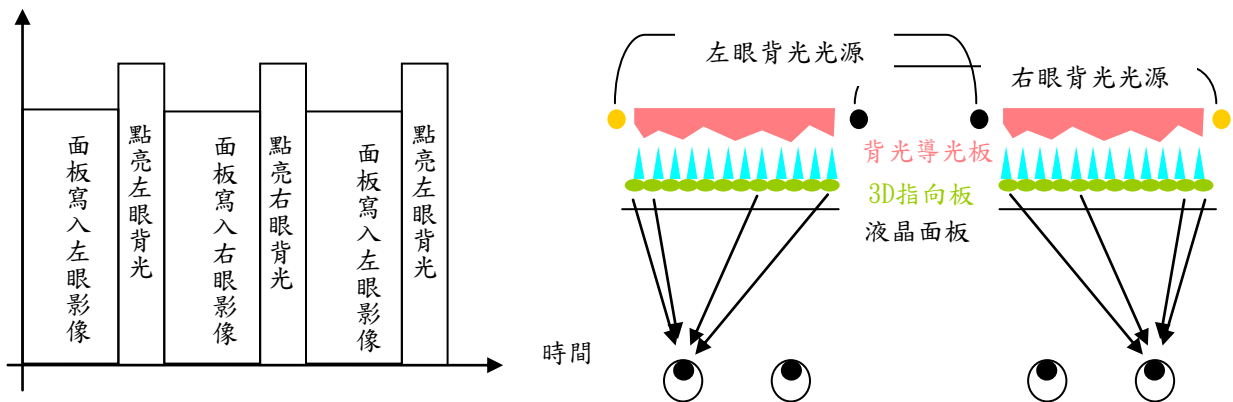


圖 9. 裸眼空間多工法

由於現在液晶面板反應速度的問題，目前此方法還沒有做出多視角效果。此種方法的優點即不會犧牲畫面解析度，且只要兩個光源同時點亮即可轉換成 2D 模式，缺點如同快門眼鏡，但亮度必會隨著科技發展而改善。

不需額外的立體眼鏡對眼鏡使用者是一大福音，然而少了眼鏡濾光的效果因觀賞位置而異，當觀賞距離非螢幕所設計的距離時，會發生疊影現象 (Crosstalk)。空間多工之方式因影像被切割成週期性，觀賞空間也成週期性，產生錯覺視域效應。不過現在一個平面媒材上有更多影像，最佳觀賞位置的空間增加，也增加了可以感覺自然立體感的機會。

全像術

1948 年由 D. Gabor 所提出的全像術，原是為了提升電子顯微鏡解析度激發的想法，其原理和上面所述皆不同，首先藉由加入另一道光，讓兩道光的干涉作用來記錄物體的完整光場資訊，再利用光的繞射將物體的光場完整重現。由於此技術需要同調光源，不同於一般攝影能以自然光為光源，直到 1962 年才由美國的 Leith 和 Upatnieks 用雷射作為光源展示了全像之立體顯示效果。

1966 年 R. V. Pole 發表自然光下物體的全像記錄手法，當時以蠅眼透鏡(fly' s eye lens，小透鏡排成之二維陣列)在一個時間點取得物體各角度之縮小平面影像，並記錄在一般底片上，接著用蠅眼透鏡與取得之底片配合，利用光的可逆性，在實驗室中重現在特定觀賞距離、同調光源照射下的「取樣過之物體光場」與「蠅眼透鏡孔鏡實像」，再用一般的全像術來記錄之。其自然光下之物體光拍攝概念如圖 10(a)，全像記錄則如圖 10(b)。^[4] 全像重建時以共軛參考光為光源，其示意圖如圖 11。

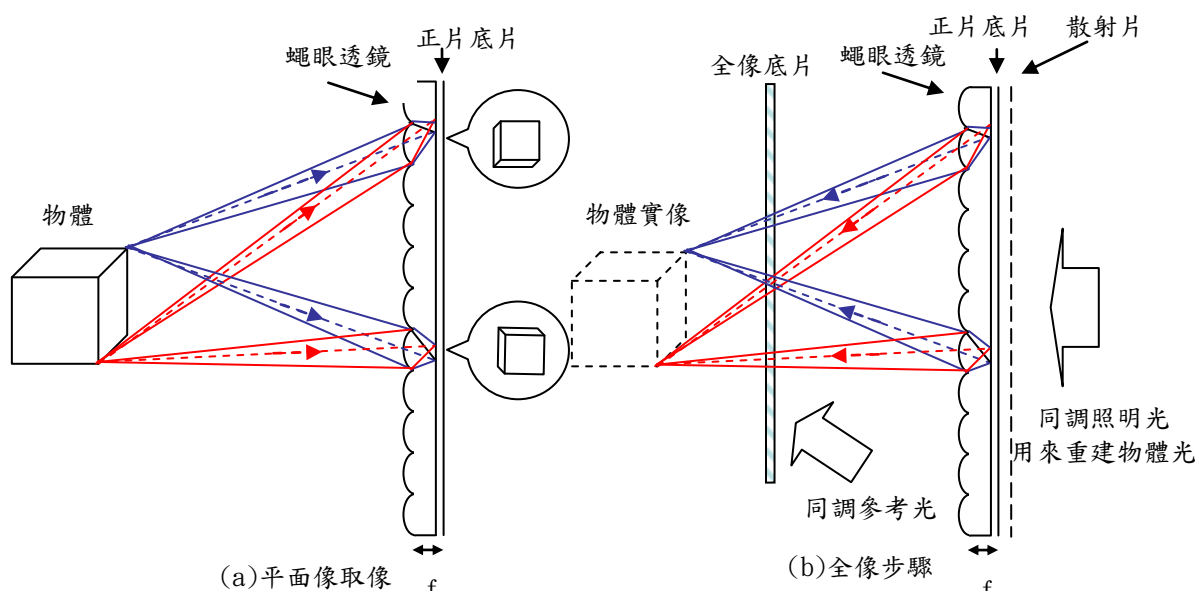


圖 10. 以蠅眼透鏡製作之自然光下物體的全像光學示意圖[4]

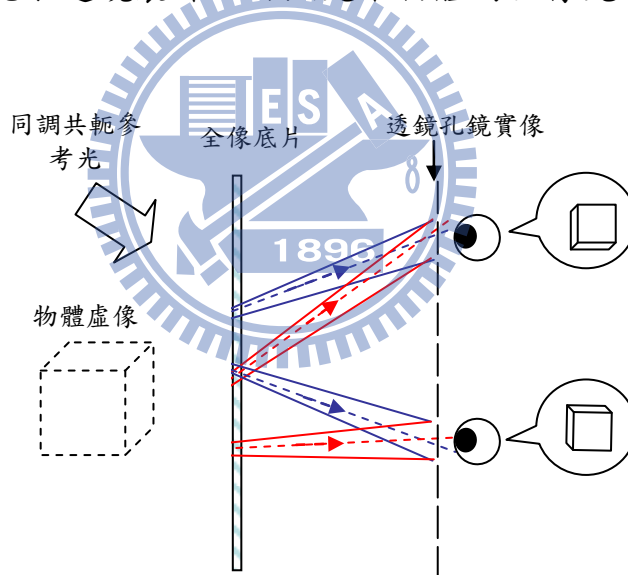


圖 11. 以蠅眼透鏡產生之複合式全像展示圖[4]

然而上述方法成像效果主要受限於蠅眼透鏡，蠅眼透鏡個別孔徑光欄互相遮蔽會造成畫面不連續，其次，將平面成像縮小，相較於以整張底片記錄一張影像，所得到的平面影像會較粗糙。

在 1967 年，首次在 J. T. McCrickerd 與 Nicholas George 的文章出現全像立體圖(Holographic Stereogram)這個稱呼。他們用可移動孔徑位置

的相機，以時間多工的方式取得物體各角度的平面影像，用一整張底片來記錄一個角度的平面影像，克服蠅眼透鏡與對底片解析度要求高的限制，增加了物體光取樣資料的品質。同樣以原本相機的成像透鏡與取得之平面影像配合，藉由光的可逆性重建取樣過之物體光場，但此時一次只重建一個角度所見的物體光場，必須在時間上逐一將其重建，並記錄到放在孔徑平面後的全像底片上，變得較費時。其平面影像取得架構與全像記錄架構如圖 12。此方法是用很多張平面影像來複合立體感，因此又被稱為複合式全像(multiplex hologram)。[5]

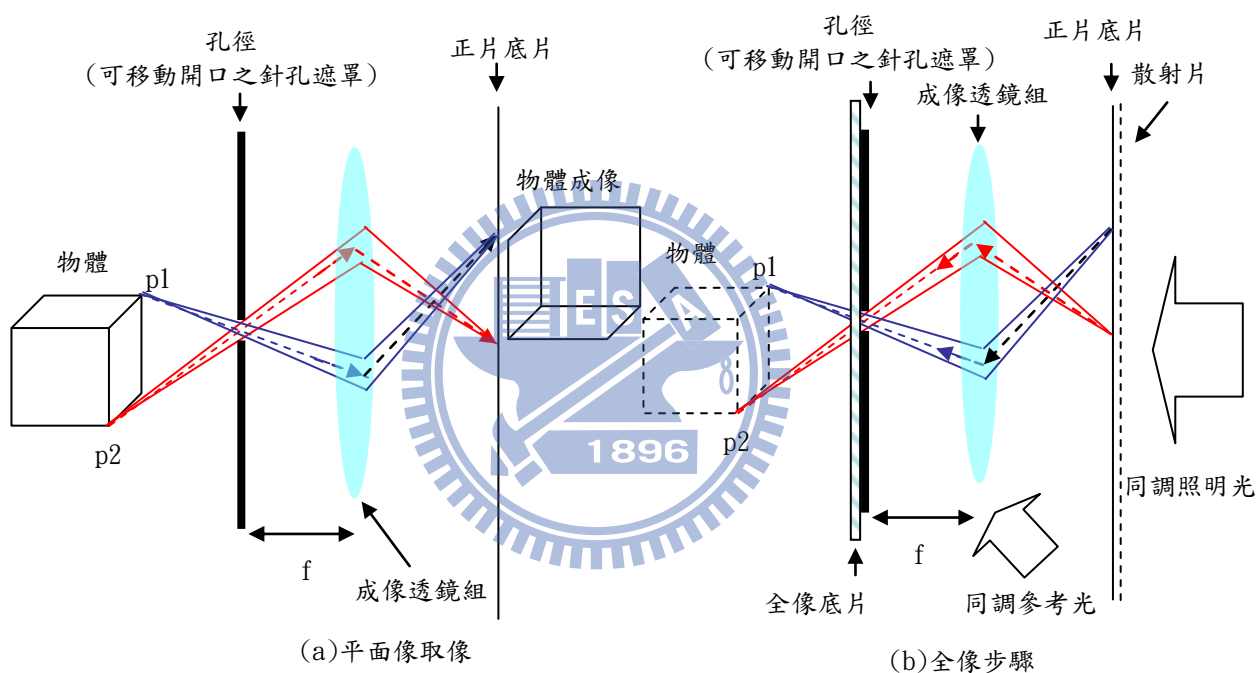


圖 12. 以可移動孔徑位置的相機製作之複合式全像光學示意圖[5]

1969 年，D. J. DeBitetto 考慮到人的立體視覺如同雙眼只有水平排列，將原本二維立體的全像立體圖簡化成一維方向複合，並簡化 McCrickerd 與 Nicholas George 所設計的全像術步驟，省去其中的透鏡，增加可設計重建立體影像結果尺寸的彈性，成為現在所知的平面式複合式全像架構，其全像記錄架構如圖 13。[6]

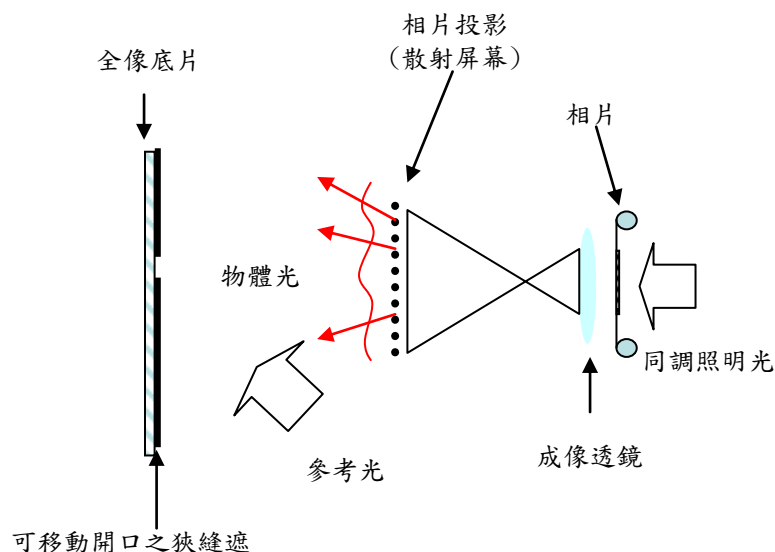


圖 13. D. J. DeBitetto 簡化之複合式全像全像步驟光學示意圖[6]

用上述兩種架構所做出的全像底片為了觀賞方便，通常會再藉由全像底片的翻拍讓觀眾可以在全像片前方，而不是緊貼著全像片來觀賞。在稍後的介紹可知，這是它的缺點亦是優點。

為何利用全像底片，無論全像術或複合式全像，在觀賞時就不用眼鏡、透鏡、狹縫等，觀賞時如同看照片，只要光源和底片就可以看到立體的影像？此部分在第二章中會做詳細的介紹。

全像術所呈現的立體感並非經由平面影像合成，是將物體的光場直接重現，沒有觀賞位置限制、疊影現象、錯覺視域效應、疊紋效應等問題，然而因技術需求高，在動態立體顯示方面尚未普及。近期由於雷射、記錄材料等的改良，全像技術目前用於製作光學元件、古物影像複製、高密度儲存、防偽印刷、工程非破壞檢測、靜態立體圖像展示等。

受到記錄光源條件的限制，全像術可以記錄的對象有限，為了擴展全像可以記錄的對象，發展出複合式全像，用來記錄大型、戶外、材質反光率低、需要快速記錄等不適合直接拿進實驗室，以雷射為照明之物體或場景等立體實景。此種全像有兩種普遍的應用，其一為記錄靜態，或是同一時刻物體各種角度之影像，讓人在特定空間位置時，兩眼分別對應一個影像，利用雙眼

視差產生立體感；其二為記錄動態、不同時物體各角度之影像，讓人在一空間位置對應某一平面影像，移動時產生動態錄影的效果。

複合式全像之立體效果如同先前介紹的裸眼立體顯示技術，有特定的觀賞距離、可以做出多視角效果，其顯示特性在之後的探討再做討論。

以下以表 1 列出現有市面上平面式立體顯示技術的優劣。

表 1. 平面式立體顯示技術的優劣比較

		個別優點	個別缺點	分類之特性
眼鏡式	色彩多工	製程簡單、便宜	色彩變調	只有兩個畫面，露光較少，眼鏡使用者不方便，有特定觀賞位置，需要特定螢幕配特定眼鏡。記錄對象無限制
	時間多工	保留原解析度	亮度下降、眼鏡昂貴	
	偏振多工	眼鏡便宜	解析度下降或投影設備昂貴	
裸眼式	時間多工	保留原解析度，適合 2D 用途與 3D 用途轉換，無錯覺視域效應	只有兩個畫面、亮度下降	不需要眼鏡，如觀賞距離非所設計之距離則有疊影效應
	空間多工	可多視角，適合 2D 用途與 3D 用途轉換	解析度下降、錯覺視域效應、疊紋效應	

1.3 研究方法與論文安排

關於研究方法，本論文首先藉由文獻的蒐集，了解複合式全像相關的技術與理論，包含立體成像相關技術的發展、人眼感知立體的方法、全像術的特性與實做要領，找出它們如何限制複合式全像的呈現結果。接著以電腦程式計算，模擬多角度取景的平面影像，以及觀賞時所合成之立體結果。再來，以上述取得之理論與現有設備，設計複合式全像各步驟的系統架構，並以符合架構條件的立體物體為模擬拍攝之對象，取得其各角度平面影像。最後以模擬之平面影像與所設計之架構製作複合式全像片，觀察其結果並驗證複合式全像的特性。

本論文分五個部分，第一部分為研究動機與立體成像相關的文獻回顧，闡明裸眼立體顯示技術展示時的長處，指出裸眼式之立體顯示技術是未來的發展趨勢。第二部分說明人類感知立體的原理與複合式全像的原理。第三部分為現有設備之分析與複合式全像各步驟架構的設計方法。第四部分以實驗與其結果證實複合式全像的特性。最後為結論與未來研究方向。

二、原理介紹

此章節中，介紹立體視覺原理與複合式全像原理，了解立體視覺原理是為了找出人因對於複合式立體的限制，說明複合式全像原理的目的為點出複合式全像與其他裸眼立體顯示技術的差異。

2.1 人因立體視覺原理

在此首先定義立體感(Depth perception)，其為一種視覺能力，讓我們可以感覺三維的空間與分辨物體的距離，讓我們可以和空間中不同距離的物體有準確的互動，比如接近、拾起、遠離等等[7]。

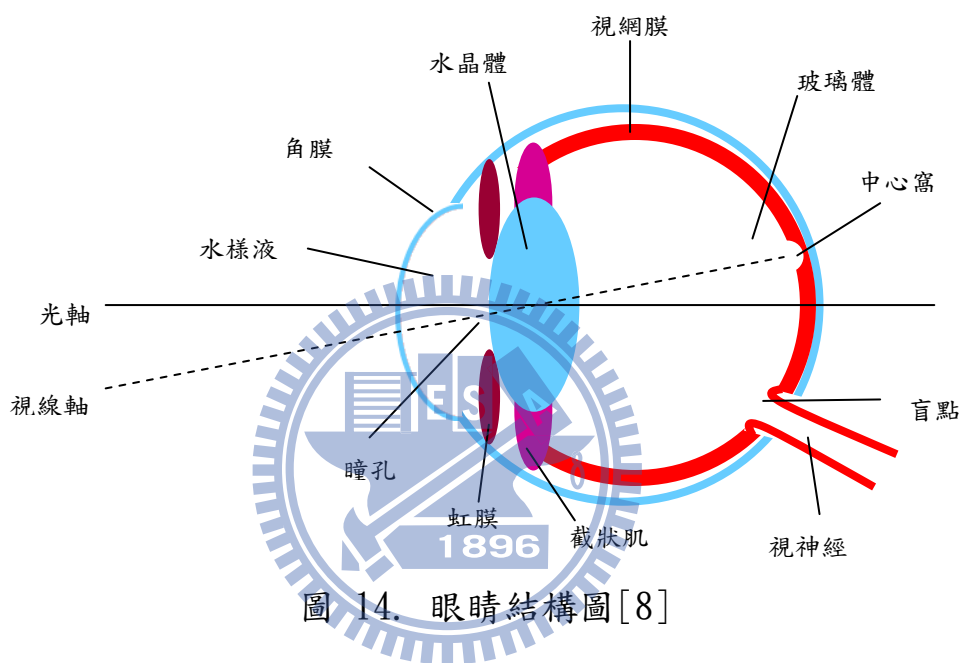
人眼視覺系統可分成輸入端的眼睛、傳輸的神經和終端的大腦，前者功能可以以相機來比擬，後者則如解碼程式讓資訊為我們所用，神經則為重要的分工者，將資訊正確的傳遞到左右腦。在此章節中我們首先了解成像系統的構造與特性，再討論要產生立體感的認知要素，最後討論這些要素如何影響我們設計平面式立體螢幕。

2.1-1 人體視覺系統

在此小節中我們先了解眼睛，接著了解視覺訊息的傳播途徑。

圖 14 是眼睛的簡易構造圖。首先是眼睛最前端的角膜(cornea)，它如同魚眼鏡頭的收光透鏡，經由折射減小入射光角度；接著虹模(iris)是有色素、不透明的肌肉組織，功能如同光圈，控制瞳孔(pupil)的大小調節入光量；

水晶體(lens)是最主要的成像透鏡，其曲率由睫狀肌(ciliary muscles)控制，好讓影像在視網膜(retina)上成像；視網膜如底片，它是腦組織的延伸，表面上有感光的桿狀細胞(rods)，與感色的椎狀細胞(cone)，不過這些功能細胞並非均勻分布，加上成像本有近軸、離軸品質差異，導致成像品質因區域而異。視網膜在中心窩(fovea)處有最好的成像品質，而在連接視神經附近的區域因血管組織多不能成像，稱做盲點(blind point)。



正常視力的成人在中心窩附近之角解析度約為 $1'$ [2]，在最短明視距離 25cm[1] 的點陣列密度(Dpi)計算約 350。眼睛的感色細胞有三種，分別對紅、藍、綠三波長響應，作用頻譜區為 400nm~700nm，且只在光能量高於 10cd 才全部作用，當光能量再減少，對紅色響應之細胞首先失靈；而感光細胞則可偵測數個光子的能量，因此眼睛有明視覺(photopic vision)與暗視覺(scotopic vision)兩操作模式，後者由於紅色感色細胞最先失靈，它的最敏感波長偏短，看見的顏色會藍移(Purkinje shift)[8]。

和一般相機不同的是，相機中成像透鏡形狀不變，要在底片上有清楚成像，是藉由調整系統中透鏡與底片的距離來達到，而眼睛視網膜和水晶體的距離可調範圍很小，要有清楚成像主要是靠水晶體的形變來達成。

如果眼睛就是照相機，為何眼睛能建立的立體感遠超過相機？研究顯示，人可以看見立體，是由於人對於一個目標，一次使用兩個眼睛來收集資訊，由於兩個眼睛在空間中不同位置，其取到的圖像不同，經由大腦對兩圖片解碼後才能得到正確的立體感。

一般動物身體的左邊動作由右腦控制，右邊動作由左腦控制，眼睛亦是，但人類眼睛的訊號則是部分到左腦部分到右腦，其中兩眼中央窩處的訊號左右腦都會接收到。訊息的傳播路徑如圖 15：兩個眼睛視網膜得到的資訊在視交叉(optic chiasma)處，某部分視神經會交換左右眼的訊息，這些神經為相交視神經 Intersecting optic nerves。經過相交視神經的作用後資訊接著到達側膝核(lateral geniculate nucleus, LGN)，側膝核能夠分別對左右眼的資訊做先一步的處理，最後才將訊息給大腦。[2]

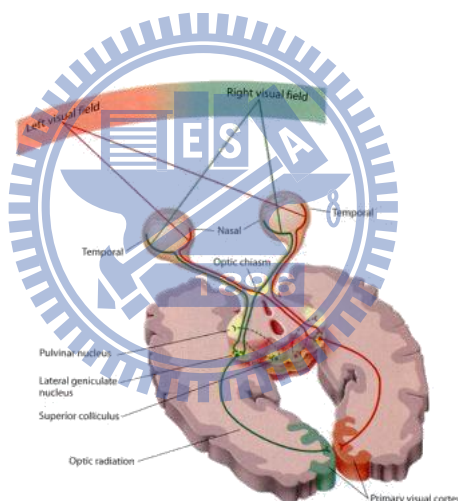


圖 15. 視覺訊息傳播途徑[10]

以下以表 2 標明眼睛成像特性，統整本小節結論：

表 2. 眼睛成像特性

項目	量值	
光圈數值(f-number)	3~16	
解析度	1' (角解析度)；在 25cm 處解析度為 350dpi	
色彩	400nm~700nm	
操作模式	依亮度分類	暗視覺、明視覺
	依維度分類	立體雙眼視覺、單眼平面視覺

2.1-2 構成立體感之因素

要建立立體影像系統前，應先了解人們如何感知縱深。人類對立體空間的感知建立，主要依據視覺與認知系統的相互作用，大腦藉由收集許多生理與心理的立體線索來觀賞這立體世界。

生理線索

生理線索是人為了觀察環境，經由調整視覺系統的量值來衡量距離感，因此又稱做觀察者中心線索(observer-centered cues)，包含雙眼線索(binocular cue)和動眼線索(oculomotor cues)，其中後者包含光角(Convergence)與調節(Accommodation)。[11]

(a) 雙眼線索

由於人的兩眼在空間中佔據不同的位置，當在觀察一個物體時，左右眼有不同的觀察角度，兩眼視網膜上的成像位置會有些許的水平差距，為水平視差(horizon disparity)，如圖 16 所示。大腦可藉由兩眼得到的不同影像來計算物體的距離感。[11]

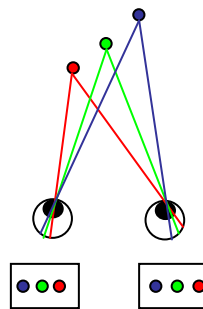


圖 16. 雙眼線所示意圖[12]

(b) 光角

為了讓最重要的影像成像在中央窩，觀看物體時兩眼睛會旋轉，讓視線對準物體，此時物體和兩眼睛連線的夾角稱為光角。由於兩眼的距

離固定，光角大小由物體與眼睛的距離決定，如圖 17 所示。大腦藉由控制肌肉的訊號來得知光角改變量，並由此計算物體距離的改變量。當物體較近，距離改變一點點就有很大的光角變化，因此容易感覺立體感，但是當物體遠過 10m，同樣的距離改變光角變化卻很少，因此在超過 10m 的距離，我們很難靠此線索感覺物體的景深。[12]

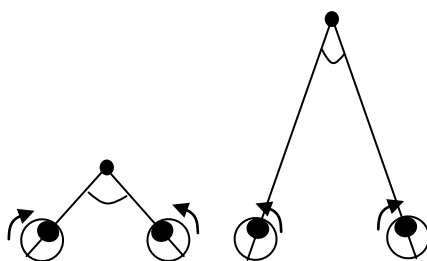


圖 17. 光角與距離示意圖[12]

(c)調節

由於眼睛是藉由調整水晶體的形狀來達到清楚成像的條件，對於距離不一樣的目標，睫狀肌必須給予不同的張力來給水晶體不同的壓縮量，如圖 18 所示。大腦藉由水晶體的壓縮程度改變量來衡量物體的距離改變量。當物體較近，距離改變一些些，水晶體的形狀要改變很多才能清楚成像，因此容易感覺立體感，但是當物體超過 2m 遠，同樣的距離改變量水晶體形狀不需要調整很多，因此在超過 2m 時我們不易靠此線索感覺立體感 [12]。

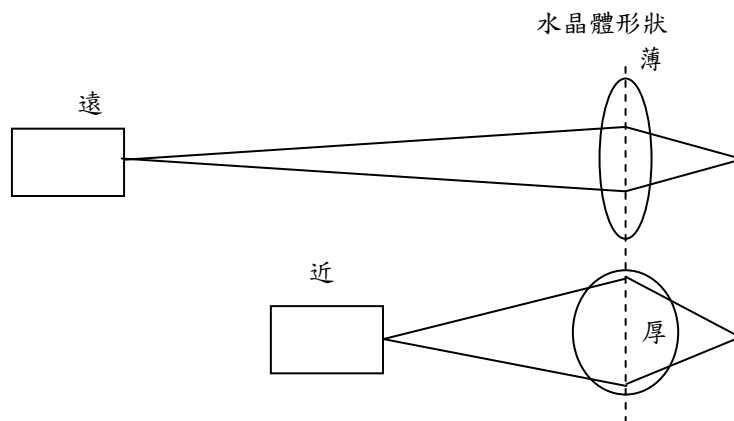


圖 18. 水晶體調節與物距關係示意圖[12]

心理線索

心理線索主要由後天對各種物體的學習經驗而得，為一個眼睛就可以做到的認知判斷，也稱物體中心線索(object-centered cues)、單眼視覺線索(monoscopic depth cues)或是畫的線索(pictorial cues)。在此分類之下，有一種特別需要時間上多個畫面變化才可以察覺的線索，為動態視差(motion parallax)，其他由一靜止畫面就可以得到線索相對稱為靜態線索(static cues)，以下一一說明它們如何幫人類營造立體感。[13]

(a)視網膜成像大小與經驗相對大小(retinal image size and relative size)

一般而言視網膜上的成像越小代表距離越遠，越大就越近。但當看見大小不一的物體在畫面上一樣大時，運用經驗可得知理應較小的物體距離較近。另一個情況是一樣大的物體，但在畫面上不一樣大，依靠經驗可獲得比較小的距離較遠，如圖 19 中的火車車廂。

(b)線透視性(Linear Perspective)

線性透視提供一種變形印象，當看見兩線條往地平線收斂，代表線條平行，但是往遠方延伸，如圖 19 中的鐵軌。

(c)漸層組織(texture gradient)

重複排列的相同元素在近的地方看起來比較大且排列比較鬆散，可以看到比較多細節，遠的則比較小且排列緊密，如圖 19 的鐵路碎石。

(d)遮蔽(occlusion)

當兩物體其中有一個的部分被另一個擋住，會提供遮蔽者距離觀賞者比較近，而檔住了被遮蔽者的部分光線，因此能分別出距離之遠近，如圖 19 中的月台柱子。

(e)天際遠景(aerial perspective)

由於大氣水氣的散射作用，較遠的風景會較模糊，顏色飽和度較差，如圖 19 中鐵軌盡頭的房子。

(f)光影(light and shadow)

光的反射與陰影變化可給予立體感提示，如圖 19 中月台的影子讓觀賞者得知來自左上方的光線遇到不透明物月台，光線無法到達地面。

(g)形狀經驗(previous knowledge of shape)

當再次看見曾接觸過的物體，看見它的相似形狀配合一些花紋或場景提示，在腦海中浮現它的立體感，比如圖 19 中的火車車廂基本是長方體，但是藉由環境的鐵軌、加上窗戶可以讓觀賞者聯想到火車。

(h)和地平線的相對位置(position relative to the horizon)

當畫面中有地平線，地平線是畫面最上方的地線，因此可藉由比較物體地線和地平線的距離，來判斷物體的遠近，如圖 19 中的月台柱子。



圖 19. 靜態立體線索[13]

(i)運動視差(motion parallax)

視差指在一系列圖片中，物體們影像之間的相對位置。當觀察者和物體有相對移動時，因近景和遠景的移動方向與速率不同，導致相對的距離、遮蔽改變，觀察者可以由此判斷物體之間的相對遠近關係，如圖 20 兩小圖中，右圖的花心被遮住了一些。[11]



圖 20. 運動視差的結果示意圖

各種線索之效率

1995 年 Cutting 和 Vishton 發現，當這麼多深度線索同時發生，可能產生立體感增加或矛盾的情形，且並不是所有線索都一樣容易讓我們察覺立體感，他們將這些視覺線索分別在個人(personal, 1.5m 內)、動態(action, 1.5~30m)與遠景(vista, >30m)三個不同距離空間的作用效率整理成圖，如圖 21。[13]

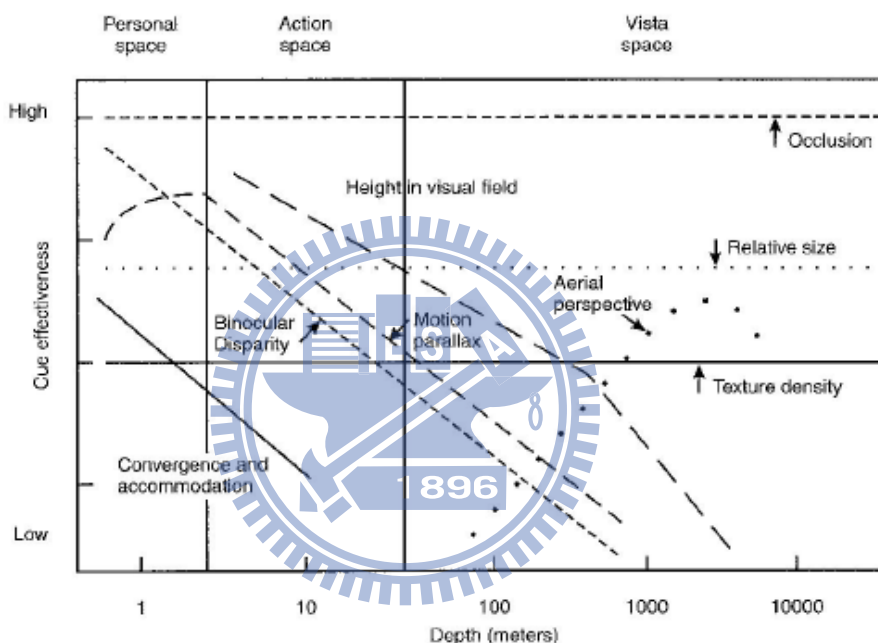


圖 21. 立體線索效率[13]

以運動視差線索為例，夜晚行車於高速公路上時，會覺得月亮與星都跟著我們走，但是只知道月亮與星都離我們很遠，卻不知道實際多遠或誰比較遠，但是同條路上的路燈與隔壁公路的路燈向後跑的速度不同，明確的告訴我們前者比較近，表示運動視差線索在例子中的距離：遠於 1.5m 時，近距離指示距離遠近的效率比遠距離時來的好，對應圖上的運動視差線索，在個人空間外是一個負的斜率，隨著距離遠離效率下降。

2.1-3 平面式螢幕顯示立體效果之原理

在我們觀賞三維空間時，視差、光角與調節的功能密不可分，日常生活中，對於有深度的景物，藉由三者功能彼此的調和，便能感覺到遠近深度的立體感。而當觀賞者不移動且專注於顯示器平面時，三者都不變，因此我們得知螢幕為平面而非立體。

在單眼線索外的雙眼線索，在圖 21 中分成視差，光角與調節兩條線，其中視差的效率高於光角與調節，因此要在平面畫面上增加立體感，首選就是利用視差。要注意的是，由於人已習慣視差、光角與調節同時產生，有了視差線索另外兩者會被誘導產生，其影響也需列入設計考量。

在此節中，首先探討雙眼視差與光角在平面式立體效果顯示器上的應用有何限制，再討論哪些原因會影響立體影像品質。

實際上雙眼視差產生的縱深是相對的，當眼睛凝視著一固定點時，那固定點會成像在雙眼視網膜中心，此時成像於視網膜其他位置的影像，會根據視網膜中心判斷其相對位置關係。然而，並非所有異於固定點之點的成像都會在視網膜上與固定點成像有相同相對位置，這種效應便會產生雙眼視差。視差依眼睛觀看遠、中、近程景物的不同，可分為[2]：

(a)非交錯視差 (Uncrossed-Parallax)：

兩眼焦點視線在螢幕前不相交，其影像將會呈現在螢幕後，如兩視線平行則成像在無限遠；

(b)零視差 (Zero-Parallax)：

兩眼焦點視線的交點在螢幕上，則其影像將會呈現在螢幕上；

(c)交錯視差 (Crossed-Parallax)：

兩眼焦點視線在螢幕前有交叉的情況，即兩眼觀看眼前近物，則影像將會呈現在螢幕前的焦點上。

圖 22 以螢幕為凝視平面，模擬觀看景物的情況並將其焦點視線 (Focusing Visual) 的變化作說明：

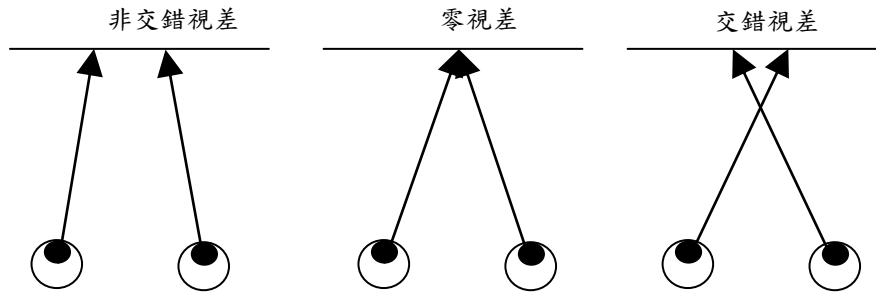


圖 22. 三種視差之示意圖[2]

視差的限制與量化

首先了解什麼情況會有相同相對位置，以下以圖 23 來說明。假設所觀看的固定點為 M，雙眼水晶體的中心為 OL 和 OR，而直線 M-OL 與 M-OR 延長線交點 ML 與 MR，分別為雙眼的視網膜中心，則 M 點成為視差的比較原點[2]。由於任三點必可定義一圓，我們將 M、OL 與 OR 所在之圓畫出作為輔助線。現在，在圓上任找一點 P，P 點在雙眼視網膜上的 PL 和 PR 位置成像，其成像位置與 M 點成像位置的關係由等圓周角： $\angle OL-P-OR = \angle OL-M-OR$ 可推得滿足：

$$\angle PL-OL-ML = \angle PR-OR-MR \quad (1)$$

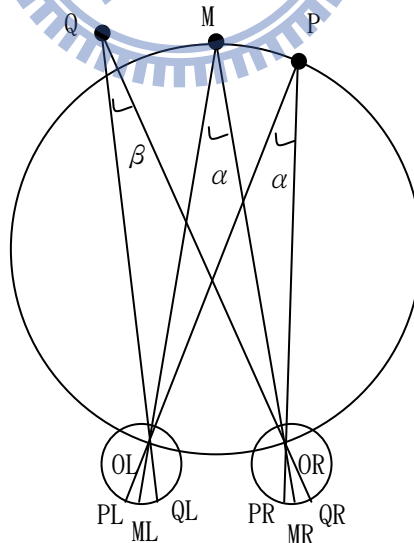


圖 23. 兩眼視網膜上的視差推導圖[2]

表示在兩眼的成像中，P 和 M 點的相對位置相同。所有在輔助線圓弧上的點都滿足(1)式，和 P 點一樣會被認知成和 M 點同景深，此圓被定義為雙眼視界

(Horopter)，為人類雙眼視差的參考基準曲面。不在圓上的點，如 Q 點，則會因為在雙眼中與 M 點成像的相對位置不同而有雙眼視差。由視差的分類，遠於雙眼視界的空間點形成非交錯視差，近於者則形成交錯視差。

接著我們以數學分析上述原理，在雙眼視界上的點，之於兩眼產生的視角為 α ，不在雙眼視界上的點 Q，視角為 β ，其間角度差異 η 可寫成：

$$\eta = \alpha - \beta \quad (2)$$

令眼睛至 M 點與至 Q 點的距離分別為 x_M 和 x_Q ，則距離差 δ 可表示成(3)式；在 $\delta \ll x_M$ 且 $x_M \sim x_Q \sim x$ 的情形下， δ 可以代換如(4)式：

$$\delta = x_M - x_Q \quad (3)$$

$$\eta = \alpha - \beta = \frac{B}{x_M} - \frac{B}{x_Q} \sim B \frac{\delta}{x^2} \quad (4)$$

$$\delta = \eta \frac{x^2}{B}$$

其中 B 為兩眼距離，為一定值，由(4)式可發現，最小可分辨距離和觀賞距離的平方成正比。根據研究，人眼可以判斷的景深視角差最小為 $1.8''$ [12]，而一般建議實際操作值為 $20''$ [12]。

光角的限制與量化

雙眼視差確實是造成深度感的重要因素，但是由於雙眼視差在產生立體影像的同時，光角（Convergence）也會一起變化，使得雙眼視差只限制於某固定的距離之內。雙眼能相互融合成像的區域，稱為 Panum's fusional area，在融合區域外的物體無法合成立體，所見之影像會有多個邊界。在日常生活中，由於眼睛對交焦點會不斷改變，在積分作用下，融合區域相對擴大而不會造成無法融合的現象。圖 24 為聚焦某距離情形下，Panum's fusional area 與雙眼視界的關係示意圖。在此節中我們首先模擬雙眼觀看物體時的情況，觀察物體與參考平面至觀看者雙眼之間的距離關係，並藉此推導出在特定距離時，Panum's fusional area 的邊界。

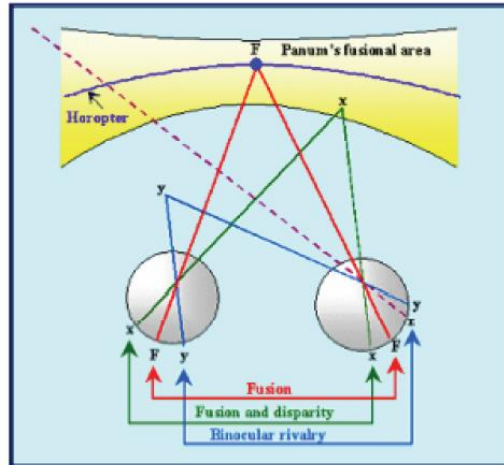


圖 24. Panum's fusional area 與雙眼視界的關係示意圖。[12]

如圖 25 所示，A 代表參考平面 E 前方的物體，與眼睛距離 y ，而 E 平面與眼睛距離 x ，L 和 R 分別代表左右眼，B 為兩眼間距，AL 和 AR 分別為左眼和右眼各自看到 A 在平面 E 上的投影點，D 為兩點距離。當左眼只看到 AL，右眼只看到 AR 時，就可以在平面 E 之前看到與平面 E 距離 $x-y$ 的 A 點。[2]

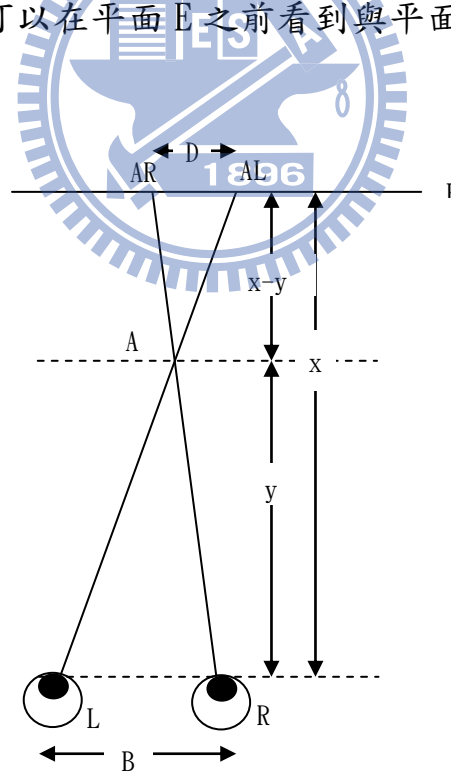


圖 25. Convergence 的限制與量化[2]

當觀賞者和平面 E 的距離 x 改變，眼睛光角隨之變化，當 x 變小時， D 會變大，當 x 增加時， D 會變小，當 D 小到人眼無法辨別時，觀賞者就會覺得 A 點在平面 E 上而沒有浮出平面的立體感。

由圖 25 中 $\Delta(AL-AR-A) \approx \Delta(L-R-A)$ ，可以得知：

$$\frac{D}{B} = \frac{x-y}{y} = \frac{x}{y} - 1 \quad (5)$$

一般人眼的角解析度為 $1'$ ，其意義為 AL 與 AR 對於一眼睛的張角小於 $1'$ 時，眼睛會將兩點的成像看成一點。同時這也是判別視差角 (Differential parallax angle)[2]，表示此兩點在兩視網膜上之成像和中央窩的距離差大於 $1'$ ，足以形成視差。圖 26 為判別視差角與距離關係圖：

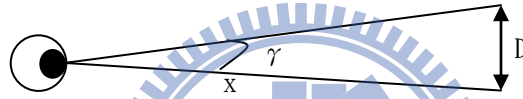


圖 26. 判別視差角與距離之關係圖 [2]

其中 γ 以弧度為單位。由幾何關係可知人眼光角、觀賞距離與 D 的關係為：

$$D = x\gamma = x \frac{\pi}{180} \gamma' \quad (6)$$

γ' 以度為單位。把此關係帶入(5)式則可表示成：

$$\frac{D}{B} = x \frac{\pi}{180} \frac{\gamma'}{B} = \frac{x}{y} - 1 \Rightarrow y = \frac{x}{1 + \frac{\pi}{180} \frac{\gamma'}{B} x} \quad (7)$$

此時把眼睛寬度 6.5cm、 $\gamma' = 1'$ 帶入，則：

$$y \approx \frac{x}{1 + 0.00448x} \quad (8)$$

當 y 在(8)式中小於等號右方時會讓 A 在平面 E 之前，並產生立體感，距離眼睛 $0 \sim y$ 的範圍為可用之浮出景深，但通常小於 25cm 之範圍不使用，因為長時間凝視在 25cm 內之物體睫狀肌長期用力易使眼睛疲累。從(8)式也可以

得到人眼能感受深度感的最遠距離，即上下同除 x ，並把 x 以無限大代入，可得 y 值約為 223m，表示當雙眼與物體距離超過 233m 便不能感覺深度，影像會出現在 x 到 y 之間的任意平面上，此距離稱為 neutral distance。

從判別視差角度的限制，(9)式為我們定了在不同距離 x 時 d 的最小值：

$$\gamma = \frac{D}{x} \geq 2.9 * 10^{-4} \quad (9)$$

其中 γ 為弧度。然而根據前人經驗，視差太大會讓光角與調節不匹配而不適，一般小尺寸螢幕都操作在：

$$D \leq 0.03x \quad (10)$$

把(10)式代入(5)式所繪出之可用景深範圍與距離的關係，如圖 27。其中標示座標為以當螢幕距離觀眾 50cm 為例，景深可往後凹 15cm(綠線 y 值：65=50+15)，往前可凸出約 9.4cm(紅線 y 值：40.46=50-9.37)。

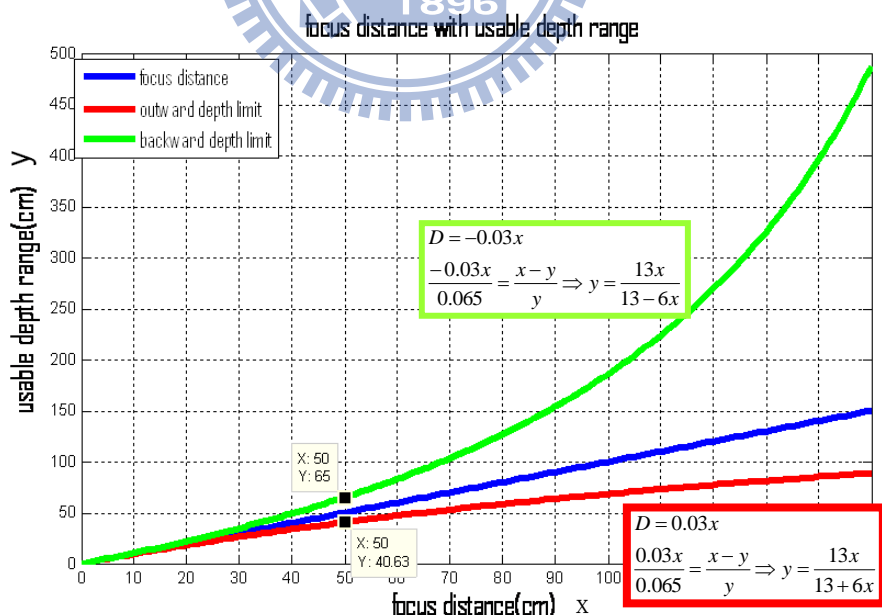


圖 27. 可用景深範圍與距離的關係

影響立體影像品質的原因

目前關於此的研究多是人因實驗的統計，主要歸納的原因有三[12]：

(a) 視覺系統異常

前面提過各種立體線索，有些人天生兩眼的視力相差甚多，導致從小大腦就沒有學習立體線索的使用；有些人則視左右腦連結和一般人不同，除了天生如此，早期治療癲癇的方法也可會導致此副作用。

(b) 光角與調節不匹配

這是造成觀看立體顯示器產生嚴重不適感的主要原因。真實生活中，光角與調節作用是相互匹配的，然而在觀看立體顯示器時，調節作用聚焦於螢幕平面，利用視差誘導光角變化產生縱深效果，卻因此造成兩作用間的不匹配，產生視覺疲勞與頭暈等副作用。根據人因實驗的結果，光角與調節的可接受不匹配程度因人而異。

(c) 雙眼影像不對稱

不對稱包含影像光學幾何的不對稱，如大小、旋轉、視角等；與影像特性的不對稱，如對比、亮度、顏色與解析度等。

綜合以上，設計立體感螢幕需要注意各種立體線索之效率、視差可呈現之景深範圍，以及可能降低立體品質的因素。各種效率中遮蔽最具主導性，在畫面中的元素，包含顯示器邊框，絕對不要和遮蔽效果矛盾；效率其次的是雙眼視差，因此雙眼視差線索被廣泛用來增加平面視立體效果顯示器的立體感。視差可呈現之景深空間有限是由於光角線索會同時調變，在螢幕後的景深效果可利用非交錯視差達到無限遠，但最深可感知和無限遠不同之景深約為距離人眼 223m，然而為了光角匹配，最大可設計凹陷景深要符合左右眼視差量為觀賞距離之 3%之限制；在螢幕前的景深則依與螢幕的距離而定，最淺浮出景深被判別視差角度限制，而最大可設計浮出景深要符合左右眼視差量為觀賞距離之 3%之限制。影響立體品質的原因有視覺系統異常、光角與調節不匹配與雙眼影像不對稱三個原因。

2.2 複合式全像原理

複合式全像是一項結合一般相機與全像特性的技術，以一系列的平面影像作為物體光來拍攝全像片，經過光學系統的空間安排，讓重建時每張平面影像都有各自的觀景窗，而人眼在不同位置就可以觀賞到不同的平面影像。

在此小節中，我們依序介紹本文所運用的全像術技術。2.2-1 首先介紹全像術如何記錄光場的振幅與相位資訊、如何重建所記錄的光場，並簡單介紹主要兩種記錄全像的光學架構：穿透式與反射式全像，以及討論厚全像與薄全像的差異，闡明選擇反射式作為全像記錄架構的優點。2.2-2 則講解複合式全像是如何結合雙眼視差原理或是動態視差原理，運用平面影像產生物體的立體感。



2.2-1 基本全像術原理

全像術和一般照相術的製作過程，都需要拍照記錄和觀看兩個步驟，不過兩者的原理完全不同，以下以表 3 列出兩者在兩步驟分別使用之原理。

表 3. 照相術與全像術的差異比較

	照相術	全像術
拍照	經由透鏡做出物體之縮小實像，把物體光之強度分部記錄在底片上	經由兩道光之干涉現象，把物體光之強度和與參考光之相位差記錄在底片上
觀看	經由光從底片上圖案的反射，重現物體光場的強度資訊	經由光從底片上干涉圖案之繞射，重現物體光場的強度資訊與相位資訊

由上表比較，可知兩者差異即在是否有把光場的相位資訊記錄下來。

記錄：干涉原理[14]

一個波動可以表示成振幅函數與相位函數乘積之組合，振幅函數表達波動的量值，相位函數標示函數的起點，相位差則是兩函數的起點差異。全像術之所以能記錄相位資訊，關鍵就是有物體光與參考光的干涉，干涉即是多道光到達空間某一點時，光場疊加的結果。

全像術所使用之底片僅可記錄振幅，但其記錄的並非影像的振幅資訊，而是影像光場與參考光干涉後的強度分布。以下以數學式與底片記錄特性配合，來說明為何記錄干涉條紋可以記下相位資訊[14]。圖 28 是全像記錄示意圖，將底片放在 $z=0$ 平面，物體光與參考光分別以 $U_o(x, y)$ 、 $U_r(x, y)$ 表示，而兩道光在底片上的干涉光場可以(12)式表示。

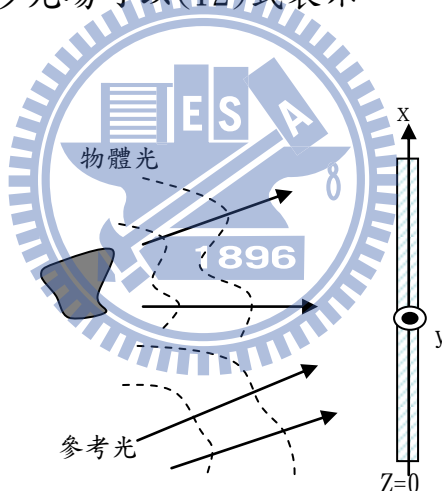


圖 28. 全像記錄示意圖

$$U_o(x, y) = a(x, y) = |a(x, y)| e^{i\phi_o(x, y)} \quad (11)$$

$$U_r(x, y) = A(x, y) = |A(x, y)| e^{i\phi_r(x, y)} \quad (12)$$

$$I(x, y) = |U_o(x, y) + U_r(x, y)|^2$$

底片上的感光材料對於不同的能量將會有不同的反應濃度，造成不同的底片穿透率，通常曝光能量與穿透率的關係圖如圖 29：

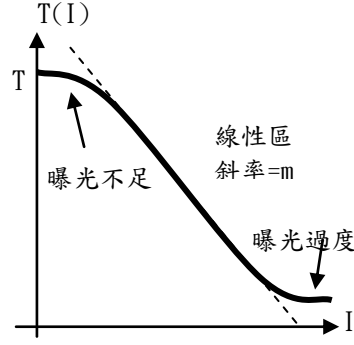


圖 29. 底片曝光能量與穿透率示意圖

如果曝光能量操作在線性響應區，則底片的穿透光可以表示成：

$$\begin{aligned}
 T(x, y) &= mI(x, y) = T_0 + m |U_o(x, y) + U_r(x, y)|^2 \\
 &= T_0 + m[|A(x, y)|^2 + |a(x, y)|^2 + 2|a(x, y)||A(x, y)| \cos(\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y))]
 \end{aligned} \tag{13}$$

其中 T_0 為某個常數值， m 為底片線性響應區斜率。(13)式中最後一項是干涉圖形，包含了物體光的振幅資訊 $|a(x, y)|$ 與相位資訊 $\phi_o(x, y)$ 。由算幾不等式可知 $T(x, y)$ 是一個大於零的函數，因此運用干涉，就可以達到用記憶振幅的底片卻同時記錄相位的目的。

而一般的照相術沒有參考光的參與，透光函數表示為(14)式，只記錄了振幅資訊。

$$T(x, y) = T_0 + m |a(x, y)|^2 \tag{14}$$

重建：繞射理論[14]

將資訊記錄後，全像利用光波繞射，將影像重建。繞射現象可看成光遇到物體邊界後，產生往各方向之新光源，包含繞到物體後方之方向，而繞射圖形是這些新光源彼此干涉的結果。

以下以數學式表示利用一個光源： $U_p(x, y)$ ，照射記錄的干涉條紋並穿透全像片之光場，其光場可表示為照射光源與穿透函數的乘積：

$$\begin{aligned}
U_t(x, y) &= U_p T(x, y) \\
&= U_p (T_o + m |U_r|^2) + U_p m |U_o|^2 + U_p m U_o U_r^* + U_p m U_o^* U_r \\
&= U_1 + U_2 + U_3 + U_4
\end{aligned} \tag{15}$$

當 $U_p(x, y) = U_r(x, y) = |A(x, y)| e^{i\varphi_r(x, y)}$ 時，透射光函數可整理成：

$$\begin{aligned} U_1 &= A(T_o + m |U_r|^2) e^{i\varphi_r} \\ U_2 &= Am |U_o|^2 e^{i\varphi_r} \\ U_3 &= A^2 m U_o \\ U_4 &= A^2 m U_o^* e^{i2\varphi_r} \end{aligned} \quad (16)$$

其中 U_3 包含原物體光，強度被底片與重建光振幅調變，相位分佈則和物體光一樣。當振幅調變為一常數時，則相當於物體光場被重建出來，稱為主像或原像(primary image)。重建影像之於底片之關係如圖 30：

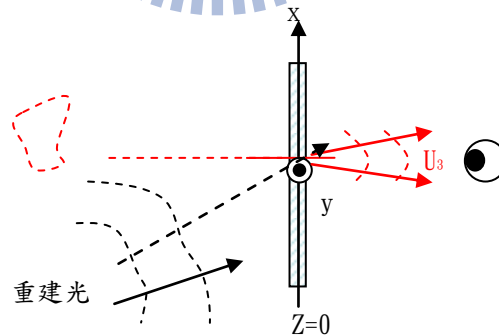


圖 30. 重建光為參考光所重建物體光與底片之關係

由圖 30 可知，原本物體位置並沒有光，當觀賞者眼睛接收到 U_3 ，可以看到物體的像是由 U_3 光線反向延伸而得，是為虛像(virtual image)。

如果以參考光的共軛光為重建光，即 $U_p(x, y) = U_r(x, y) = |A(x, y)| e^{-i\varphi_r(x, y)}$ ，則重建之四項光場如(17)式所示，而重建影像與底片之關係如圖 31：

$$\begin{aligned} U_1 &= A(T_o + m |U_r|^2) e^{-i\varphi_r} \\ U_2 &= Am |U_o|^2 e^{-i\varphi_r} \\ U_3 &= A^2 m U_o e^{-i2\varphi_r} \\ U_4 &= A^2 m U_o^* \end{aligned} \quad (17)$$

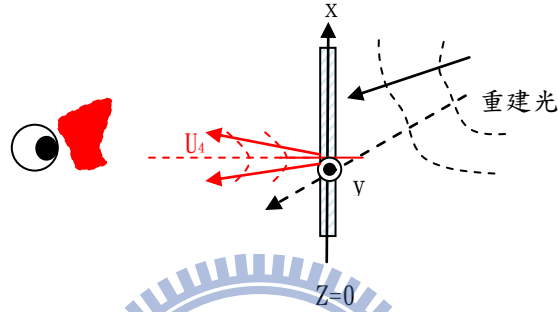


圖 31. 重建光為共軛參考光所重建共軛物體光與底片之關係

由於 U_4 的相位函數是物體光相位函數乘上負號，即共軛相位，代表波前曲率與物體光相反，會在原本物體的位置形成實像(real image)。要注意的是，此時人已經換了觀賞方向，因此覺得像是前後顛倒，此像被稱為共軛像(conjugate image)。

一般展示全像片會重建物體的原像，然而有時候因有其他用途會重建其共軛像，且原像和共軛像沒有一定為虛像或實像，在下一個小節我們就會介紹重建共軛像的用途。

以下我們以參考光與重建光的光軸方向來分析四項光場的行進角度，討論光場之間的重疊狀況。這樣如同把參考光與重建光都假設成平面波：

$U_p(x, y) = U_r(x, y) = |A(x, y)| e^{i(2\pi \frac{\sin \theta_r}{\lambda})x}$ ，其中 $\frac{\sin \theta_r}{\lambda} = \nu_r$ 表示參考光在 x 方向的條紋密度，又稱空間頻率， θ_r 為參考光與 z 軸的夾角，則(16)式的可寫成：

$$\begin{aligned}
U_1 &= A(T_o + m|A|^2)e^{i2\pi u_r x} = A_1 e^{i2\pi u_r x} \\
U_2 &= Am|U_o|^2 e^{i2\pi u_r x} = A_2 |U_o(x)|^2 e^{i2\pi u_r x} \\
U_3 &= A^2 m U_o = A_3 U_o(x) \\
U_4 &= A^2 m U_o^* e^{-i4\pi u_r x} = A_4 U_o^*(x) e^{-i4\pi u_r x}
\end{aligned} \tag{18}$$

它們和底片的空間關係如圖 32：

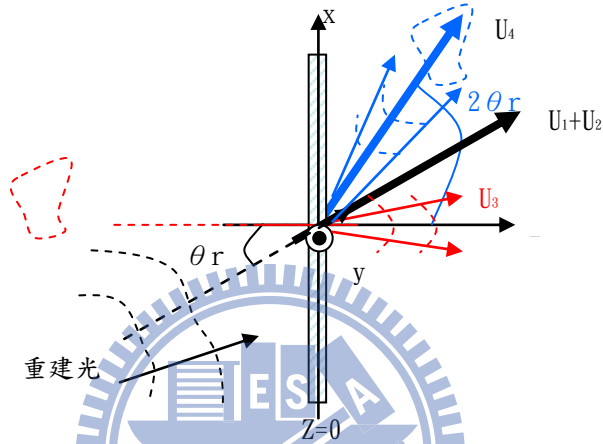


圖 32. 重建光為參考光所重建四光場與底片之關係

由圖 32 可知，如果 θ_r 不夠大， U_3 可能與其他光場重疊，此時會覺得影像有很多背景光而對比下降。 θ_r 為零即所謂共軸(on-axis, in-line)全像，有 U_3 和其他光場重疊的現象，尤其 U_4 是 U_3 之共軛影像，如果重疊就會看到兩個不同的物體； θ_r 不為零則為離軸(off-axis)全像，可藉由 θ_r 的選擇讓 U_3 不和其他光場重合。然而分離 U_3 的方法不只有離軸的方式，利用厚全像嚴格的繞射條件也可達讓 U_4 與 U_3 分離的目的。要討論後全像之前，要先知道干涉條紋在材料中記錄的情形，這和記錄架構有關，因此以下先介紹兩種記錄架構。

穿透式與反射式全像[15]

此分類代表觀賞方式的不同，當在看全像片的時候，感覺影像在重建光穿透底片之光場中者，為穿透式全像(transmission hologram)，而感覺影像在重建光從底片反射之光場中者，為反射式全像(reflection hologram)。藉

由記錄步驟的光學設計，可以產生這兩種不同效果的重建方式，將物體光與參考光放在底片同側來記錄，會產生穿透式全像，其記錄與重建之光學概略架構如圖 28 與圖 30；將物體光與參考光分別放在底片異側來記錄，則會產生反射式全像片，圖 33 為反射式全像片之記錄與重建光學概略圖：

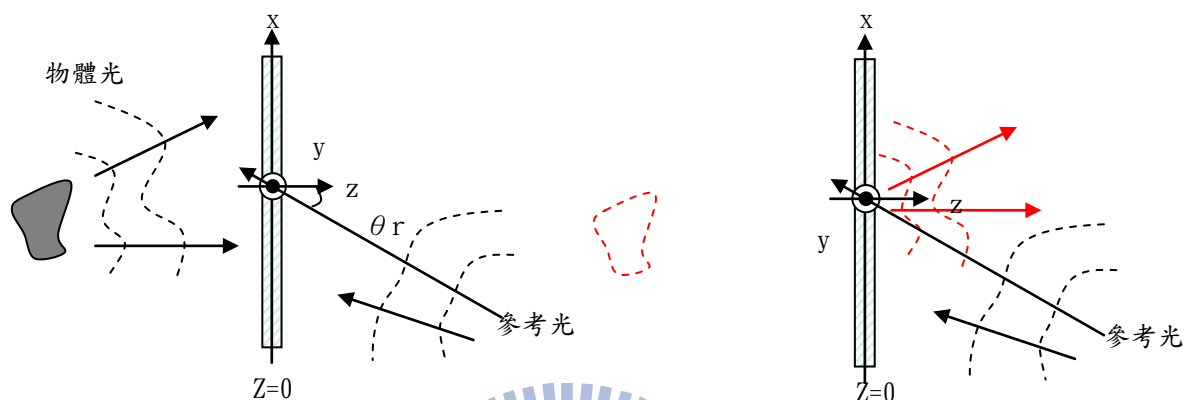


圖 33. 反射式全像之記錄(左)與重建(右)概略光學架構

由於光學架構的不同，在材料裡面形成的干涉光柵也不一樣。圖 34 中左為穿透式、右為反射式記錄的光柵情形：

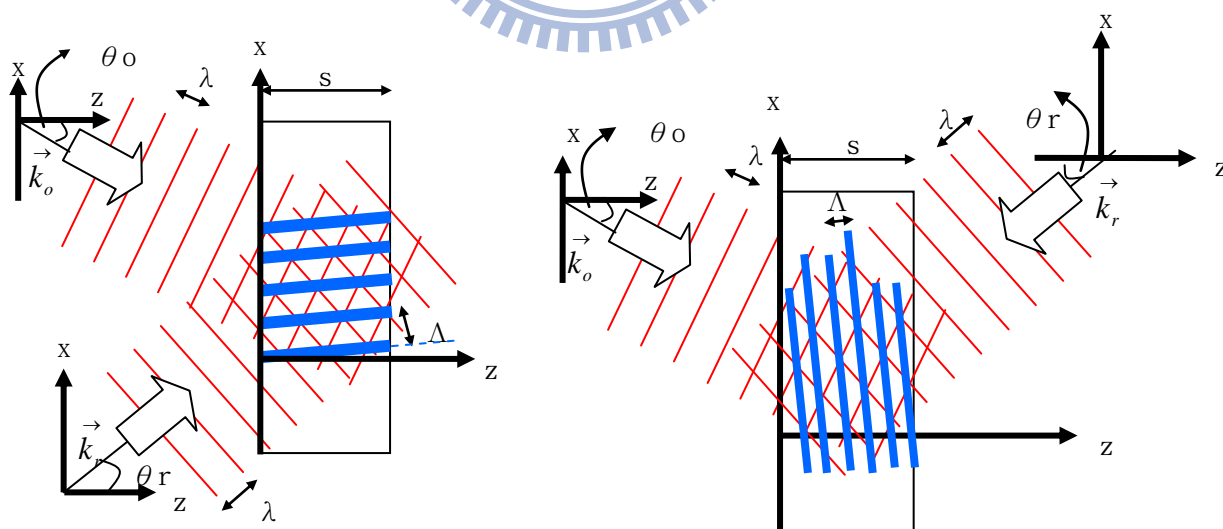


圖 34. 穿透式全像(左)與反射式全像(右)的干涉光柵[8]

其中粗箭頭代表物體光與參考光在底片中的波向量， $\vec{k}_r = \vec{k}_o = \vec{k}$ 為波數 (wave number)，定義為 $\frac{2\pi}{\lambda}$ ，可視為一個波向量的單位向量， λ 為在材料中的波長，紅色線代表波前為 2π 的空間位置， s 為材料厚度。物體光以和材料法向量夾 θ_o 度入射，參考光以 θ_r 入射，則隨著光波前進，兩道光完全建設性的空間位置會在材料體積中形成藍色條紋的光柵，其週期為 Λ ，並且和材料法向量夾了一個角度 Ψ 。由於波前和波向量垂直，首先定義光柵的波數 $\vec{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} = \vec{k}_o - \vec{k}_r$ ，三個波單位向量可形成封閉等腰三角形，如圖 36 之布拉格條件，我們可以利用波向量來計算光柵週期 Λ ，其中(19)式為穿透式全像、(20)式的則為反射式全像的計算結果：

$$K = 2k \sin\left(\frac{\theta_o + \theta_r}{2}\right), \Lambda = \frac{2\pi}{K} = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta_o + \theta_r}{2}\right)} \quad (19)$$

$$K = 2k \cos\left(\frac{\theta_o + \theta_r}{2}\right), \Lambda = \frac{2\pi}{K} = \frac{\lambda}{2 \cos\left(\frac{\theta_o + \theta_r}{2}\right)} \quad (20)$$

薄與厚全像[14]

全像片的重建是光的繞射現象，先前的重建推導中，我們將透過全像片的光波想成入射光場與全像片透光函數相乘： $U_i(x, y, 0^+) = U_p(x, y, 0^-)T(x, y, 0)$ ，相當於說透射光場為全像片的幾何投影，但是這只有在全像片材料很薄的條件下才成立。界定材料厚薄，通常是和記錄在其上的干涉條紋週期比較而得，通常以 Q-factor 界定，Q-factor 定義如下：

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 d}{n\Lambda^2} \quad (21)$$

其中 λ_0 為光在真空中的波長， s 為材料厚度， n 為材料折射率， Λ 為干涉條紋週期。通常 Q-factor 大於 2π 為厚全像，小於則為薄全像。一般的材料厚度約為數微米，嚴格算起來不能視為薄全像，但是繞射現象還不嚴重，故以薄全像分析之。在此可發現，同樣的材料厚度對於反射式與穿透式全像來說，為了光強度的均勻，兩道光的角度都不會太大，導致 Λ 的計算在反射式

架構中總比穿透式架構的結果小，代入(21)計算，可知反射式全像比較有厚全像的特性。

在厚全像的理論中，材料在記錄過程裡由於干涉條紋為強度之週期性分佈，導致記錄後材料的特性也呈現週期性分佈，形成體積光柵。光在傳播中遇到介質會發生反射、吸收與穿透，所以當光在體積光柵中傳播，週期性介質會對光造成吸收率與折射率的週期性調制，而介面則如同週期性的部分反射鏡。以全像記錄形成的光柵週期為波長等級，在此種厚度下，光在各介質間的反射會形成干涉現象。而由於材料特性成週期性，在相鄰兩反射層間的干涉條件在其他層中也相同，如同多層膜。

假設入射光波長為 λ_1 ，與光柵週期夾角為 θ ，則從圖 35 可知，在材料中傳播的光如果要形成完全建設性，其條件要符合(22)式：

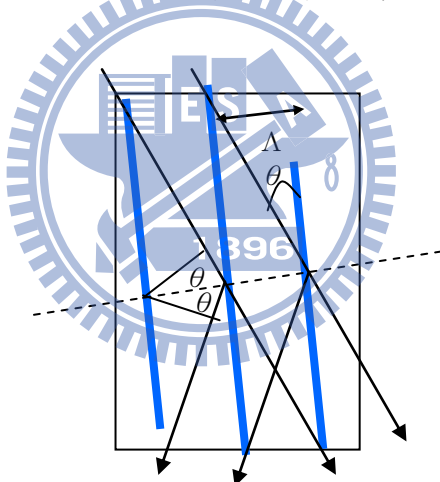


圖 35. 多層膜干涉情形示意圖

$$2\Lambda \cos(\theta) = N\lambda_1 \quad (22)$$

其中標示了特定條件包含波長和入射角度，此條件被稱為布拉格條件(Bragg condition)。把 $\Lambda = \frac{2\pi}{K} = \frac{\lambda}{2 \cos(\frac{\theta_o + \theta_r}{2})} = \frac{\lambda}{2 \cos(\theta_B)}$ 代入，布拉格條件可以寫成：

$$\cos(\theta) = N \frac{\lambda_1}{\lambda} \cos(\theta_B) \quad (23)$$

當考慮第一階繞射， $N=\pm 1$ ，且 $\lambda_1=\lambda$ ，而光柵座標和材料座標夾了 $\frac{\theta_o-\theta_r}{2}$ ，符合布拉格條件時重建光與光柵之夾角 $\theta=\pm\theta_B$ 或 $\theta=\pm(\pi-\theta_B)$ ，而與材料法向量夾角為以下四個情況：

$$\begin{aligned}
 \theta &= \theta_B - \frac{\theta_o - \theta_r}{2} = \theta_r \\
 \theta &= -\theta_B - \frac{\theta_o - \theta_r}{2} = -\theta_o = -\theta_o \\
 \theta &= \pi - \theta_B - \frac{\theta_o - \theta_r}{2} = \pi - \theta_o \\
 \theta &= -(\pi - \theta_B) - \frac{\theta_o - \theta_r}{2} = -(\pi - \theta_r)
 \end{aligned} \tag{24}$$

在(24)式中由於習慣，物體光的角度其實和法向量夾 $2\pi - \theta = -\theta$ ，因此結果差一個負號，其結果同參考光，表示重建入射光為參考光、物體光記錄時的角度，或它們的共軛光時，才能得到強的重建光。對於進入體積光柵後，光場向量非原參考光或物體光的光場，如 U_2 非參考光之分量與 U_4 ，在多次干涉後，將因沒有原全建設性干涉而強度衰減，達到厚全像分離共軛像的目的。

布拉格條件也可表示成波向量型式，設重建入射光波向量為 \vec{k}_d ，光柵為 \vec{K} ，繞射光為 \vec{k}_p ，則布拉格條件為三者形成密閉三角形，如圖 36，向量關係為：

$\vec{k}_d = \vec{k}_p - \vec{K}$ 。若 $\vec{k}_p = \vec{k}_o + \vec{K}$ ，則 $\vec{k}_d = \vec{k}_p - \vec{K} = \vec{k}_o + \vec{K} - \vec{K} = \vec{k}_o$ ，可以重建物體光光場。

如果 $\vec{k}_p = \vec{k}_o^* + \vec{K}^*$ ，則 $\vec{k}_d = \vec{k}_p - \vec{K}^* = \vec{k}_o^* + \vec{K}^* - \vec{K}^* = \vec{k}_o^*$ ，可以重建物體光共軛光場。

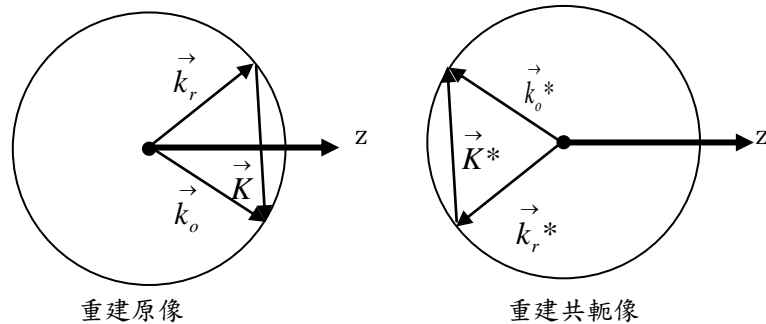


圖 36. 以向量形式表示布拉格條件重建之原像與共軛像示意圖

2.2-2 平面式複合全像原理

在此以 D. J. DeBitetto 所設計的平面式複合全像記錄架構，來說明利用全像之特性，達到裸眼立體顯示技術的方法和原理，以及其重建的光場分布特性。

在取得平面影像後，記錄某一張平面影像的光學示意圖如圖 37(a)，將平面影像做成穿透式影像，如幻燈片或以光空間調制器顯示，加上散射平面再以同調光源照射之，以之穿透光做為物體光；以另一道離軸參考光與物體光干涉，以底片某「特定位置」記錄它們；「特定位置」的選擇方法為在底片前加上一個狹縫遮罩，狹縫開口處即是底片的記錄位置。平面影像在作為物體光時，影像上任一點會發出無線多條光線，當我們以圖 37(a)架構記錄時，只有往狹縫開口處的光線被記錄。其重建情形如圖 37(b)，平面影像只有往狹縫開口處傳播的光場被重建，而狹縫的位置也因此被記錄下來，狹縫亦成為物體光的一部份。當觀賞者眼睛在狹縫開口處時才看的到所記錄的相片，如圖 37(b)中較上方的眼睛，當眼睛在其他位置時則看不到所記錄的相片，如圖中較下方的眼睛。

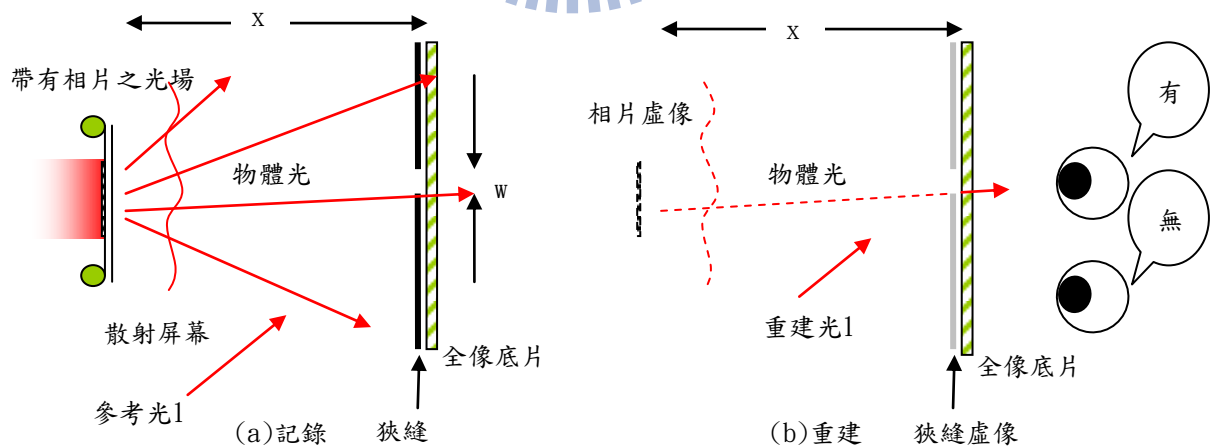


圖 37. 複合式全像光學架構俯視示意圖(a)記錄(b)重建。 x 為觀賞距離， w 為狹縫寬度

利用圖 37(a)的光學架構記錄完第一個平面影像後，我們在原本影像位置換上另一個平面影像，同時把狹縫開孔移動到另一個位置，讓這個影像在底片上不同位置記錄，同理，此時相當於只記錄了此影像往現在狹縫開口處的光線。我們可以以此方法重複記錄很多張平面影像。當記錄完一序列的平面影像並重建時，眼睛對應到不同的底片位置，就可以看到不同的平面影像，如圖 38 所示，其中以不同顏色代表不同影像，重建時它們的虛像都在空間中同一個位置，但因為全像限制了個別影像「光的行徑」，觀賞者不會在一個底片位置看到兩張影像。用圖 37(a)的光學記錄架構，我們為每個個別影像指定了觀賞的方向。

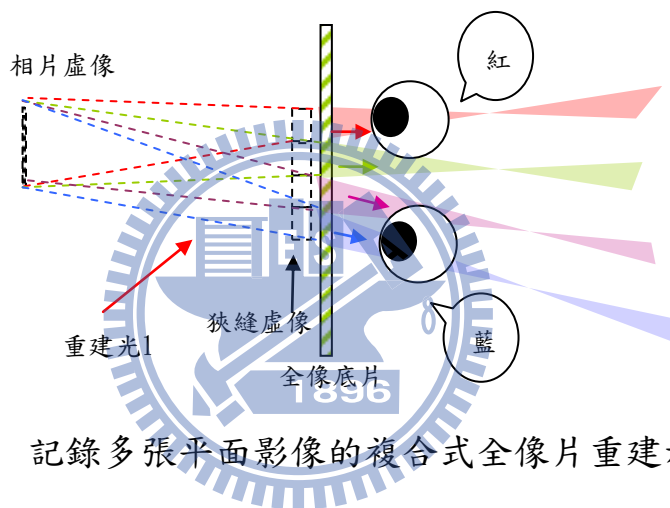


圖 38. 記錄多張平面影像的複合式全像片重建示意圖

當這些平面影像是某物體各角度的相片，且記錄各影像之底片位置，和拍攝時有一樣的幾何關係：包含觀賞的距離和方向，就可以讓眼睛利用 2.1 節中介紹的雙眼視差合成立體感。為何特別提到幾何關係呢？加入 2.1 節中人眼如同相機的觀念，當改變看一個物體的距離與方向，光角、調節的情形與視網膜上的視差量都會改變，因此要用特定的兩平面影像合成立體感，除了要顯示兩個畫面，還要重現觀賞者觀賞某物體時，觀賞者和物體的距離與角度關係。由此可知，在製作複合式全像片時，控制幾何關係十分重要。

現在，讓我們來觀察平面式複合式全像片在不同距離觀賞時，可能出現的情況，來找出最佳觀賞距離，不同觀賞距離可能見到的情形如圖 39。

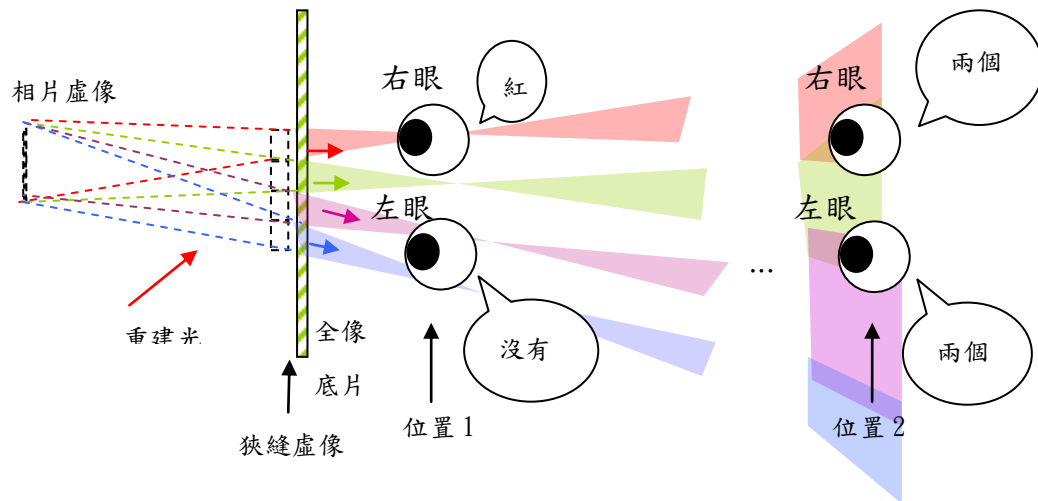


圖 39. 觀賞距離改變，所看到的複合式全像片重建影像改變

我們觀察每張影像通過各自狹縫後的光傳播形狀，會發現形狀會先收縮再擴張。只有緊鄰記錄的狹縫時，各平面影像的光場如拼好的拼圖，緊密排列，表示觀賞者的眼睛在此平面(狹縫平面)任何位置都只能看到一張影像，且沒有看不到影像的位置；而當觀賞者逐漸遠離狹縫平面，首先會遇到有些空間沒有影像的區域，稱為部分影像區(zones of partial vision)，當觀賞者眼睛在這個和狹縫平行且距離不為零的平面上移動時，有可能看不到影像，如位置 1 的那對眼睛；如果觀賞者再繼續遠離狹縫平面，形狀在擴張中的各光場在某處會發生重疊，稱做影像重疊區(zones of overlapping)，如果某個眼睛正好在光場重疊的空間，就會看到兩個影像，如位置 2 的那對眼睛。因此重建影像最好的觀賞位置，就是把眼睛放在狹縫平面。

如圖 39 眼睛的位置就是底片的位置，觀賞模式就不理想了。不理想的原因有二，其一為人看東西時不會讓眼睛和東西貼在一起，礙於眼睛天生的能力限制，通常眼睛和物體都遠於人的最小明視距離 25cm；其二為重建光會影響觀賞者，當觀賞穿透式全像片時，在底片附近的眼睛容易不小心直視重建光而感覺刺眼，而當為反射式全像片時，人的頭會擋住重建光而無法重建影像。因此，要增加觀賞到最理想立體感的機會，必須讓狹縫平面遠離底片，讓觀賞者更容易接近狹縫平面。

解決方法是以已記錄好之全像片的重建繞射光當作物體光，在狹縫平面外的位置，用另一張全像片來記錄之，稱為全像片的翻拍。通常被翻拍的全像片稱為主全像片(master hologram)，在此以 H1 稱之，而記錄主全像片的稱為轉換全像片(transfer hologram)，在此以 H2 稱之。我們重建時必須以 H1 的共軛參考光為重建光，重建狹縫與平面影像的實像，讓光場與影像在 H1 同側，並把 H2 放在實像的光場中來記錄，如圖 40。為了展示方便，記錄 H2 通常以反射式架構來記錄。

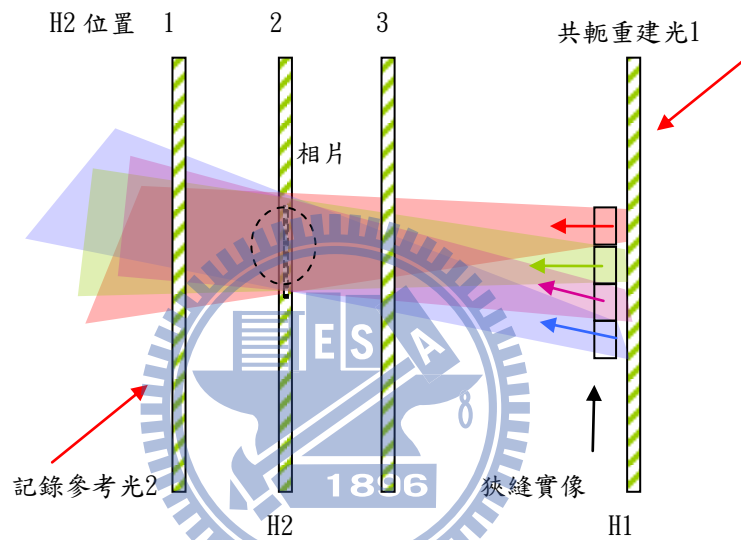


圖 40. 讓狹縫平面遠離全像底片的方法

重建時以記錄 H2 的共軛參考光來重建，重建的影像包含狹縫與平面影像，此時重建的狹縫影像比 H2 更接近觀賞者，即狹縫浮出全像片，達到讓觀賞者更容易接近狹縫平面的目的，如圖 41。實像的重建常常被用於製作浮出全像片的立體記錄。因此根據 2.1 節中介紹的 Panum' s fusional area，由兩平面影像形成視差的景深範圍，在對焦平面附近，即平面影像成像位置的前後，在圖 40 中以虛線圓表示呈現影像的景深。在選擇放置 H2 的位置時，放在位置 1 則重建時整個立體影像浮出 H2，如圖 41(a)；放在位置 2 立體景深會在 H2 前後都有，如圖 41(b)；記錄時 H2 放在位置 3 則重建時整個影像會在 H2 後，如圖 41(c)。因此選擇可依照展示的期望決定，是另一種設計彈性，表示顯示螢幕(H2)可以展示立體深度的空間，不限於相片實像平面的 Panum' s fusional area。[16]

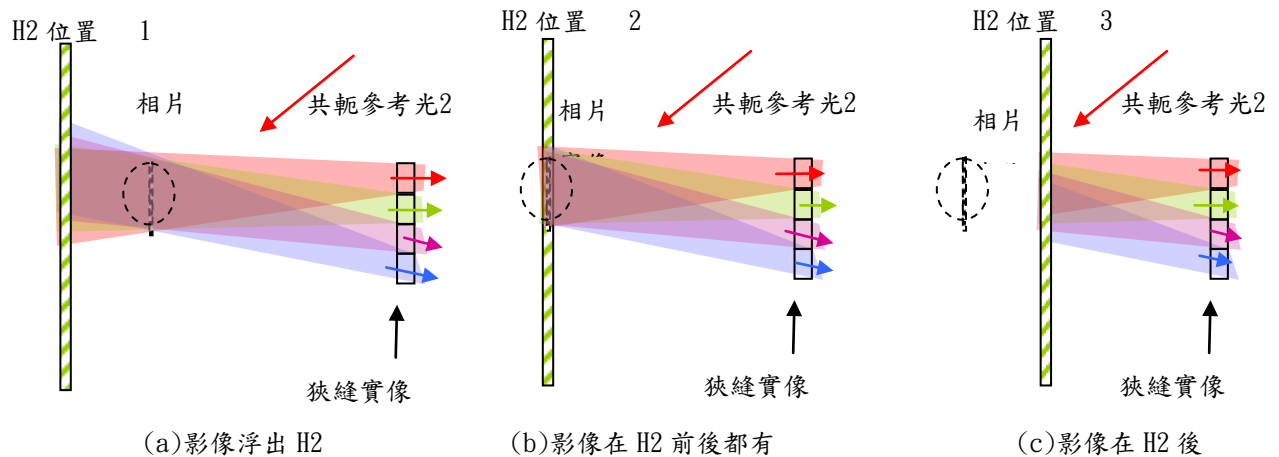


圖 41. 複合式全像底片的重建情形

平面複合式全像和 1-3 節中介紹，許多立體效果的平面顯示器相同，都是藉由視差，讓人看到兩個平面影像來合成立體感，因此都有所謂的最佳觀賞距離。不過複合式全像有些和其他平面顯示器相異的特性：

- (a) 複合式全像所記錄的是平面影像的傳播光場，不一定是平面影像。
- (b) 藉由翻拍的手法，可以移動可用景深範圍，即讓顯示螢幕(轉換全像片)有更廣的深度表現範圍。
- (c) 複合式全像利用狹縫控制記錄時底片的記錄位置，來指定一張平面影像的觀賞位置與方向，每一個狹縫都只對一張平面影像的光場作用，不同於空間多工的立體顯示器，一個狹縫或透鏡要對多張平面影像作用。
- (d) 複合式全像和空間多工的裸眼立體顯示器一樣，同時呈現多個畫面，但這些畫面如同時間多工的裸眼立體顯示器，是完整的畫面而沒有被切割而降低解析度。

三、實驗設計

第三章中首先列舉實驗中所用之主要實驗設備規格，著重介紹影響或限制此實驗的特性。接著在 3.2 節中說明實驗的設計方法。

3.1 實驗設備規格

此節中分別介紹全像記錄材料、照相機與所使用之雷射的特性。



3.1-1 全像記錄材料

全像記錄材料依其記錄後改變之特性，分為振幅材料與相位材料。振幅材料在記錄、沖洗完後，不同曝光強度之區域在重建時會有不同的吸收係數，以致於入射重建光的振幅被調制。相位材料在記錄、沖洗完成後，不同曝光強度之區域在重建時有不同的厚度或折射係數，導致入射重建光相位被調制。

在此實驗中，所用的記錄材料為 Slavich 公司的 PFG-01 底片(plate)，它們的沖洗步驟主要分為顯影(developer)與漂白(bleach)，在顯影後漂白前它是振幅材料，漂白後為相位材料，通常會以漂白步驟來增加重建強度，在此都以 Integraf 公司的 JD4 配方沖洗，JD4 配方如表 4。

以下配合此實驗所用之底片與沖洗配方組合，說明材料在各步驟中的變化情形。

表 4. JD4 全像底片沖洗配方[17]

顯影還原劑(A 劑)	份量
Metol or Elon (p-Methylaminophenol sulfate)	4g
Ascorbic Acid(powder)	25g
Distilled water	1000ml
顯影鹼性溶液(B 劑)	份量
Sodium Carbonate, Anhydrous	70g
Sodium Hydroxide	15g
Distilled water	1000ml
漂白劑	份量
Copper Sulfate, Pentahydrate	35g
Potassium Bromide	100g
Sodium Bisulfate, Monohydrate	5g
Distilled water	1000ml

PFG-01 的記錄材料為鹵化銀乳膠(silver halide emulsions)，主要反應物鹵化銀以微小的結晶方式分散在凝膠中，如同固態懸浮粒子，藉由加入不同的光敏染料(sensitizing dyes)，可以選擇或加寬此記錄材料的感光波長。PFG-01 選擇了 632.8nm 為主要波長。

材料被光照射到時，鹵化銀吸收光的能量造成區域擾動，造成部分的鹵化銀游離，凝膠裡的物質變成未反應之鹵化銀、銀離子與鹵素離子的混合物，未反應之鹵化銀與兩種不同離子的區域濃度依區域光能量而定，形成和光強度相關的影像資訊，但是這些濃度分佈在可見光下無法看見，稱為潛像(latent image)。

潛像需要經過顯影過程，將潛像轉換成黑白反轉的振幅函數，即所謂的負片底片(negative film)，才能在可見光下觀察。顯影藥劑包含兩種還原劑與鹼性溶液，兩種還原劑一起作用的效果比單獨使用一種的還原性更好，且化學作用產生的粒子也比單使用一種來的細膩。還原劑的還原反應把銀粒子還原成金屬銀原子，而鹼性溶液用來中和還原反應產生的氫離子，防止還原

劑在酸性環境活性下降，在此當作酸鹼度控制的緩衝溶液。而鹵素離子在水溶液中溶解度高，在顯影過程中會溶於水中。凝膠與未反應的鹵化銀在此階段則不受影響。

接下來此配方的漂白溶液中包含氧化劑與大量的溴離子，將被還原的銀離子全數以溴化銀取代。溴化銀具有透明與高折射率的特性，它和未反應的鹵化銀會有不一樣的分子密度，因此經過漂白程序，即將原本銀粒子與鹵化銀的負片圖形轉換成溴化銀與鹵化銀的正片底片，變成相位式的全像片。[16]

全部的化學變化流程如圖 42：

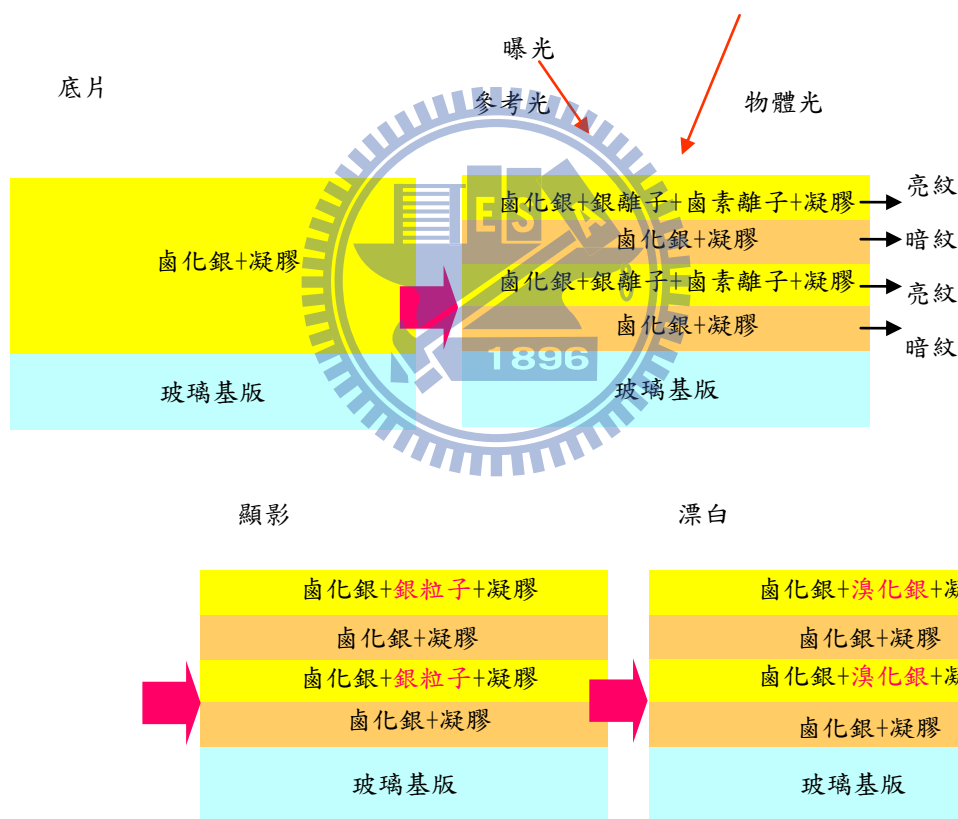


圖 42. 記錄材料沖洗化學變化流程

一般用於記錄影像的材料會考慮其厚度、感光波長、敏感度與解析能力等特性，其中最感光波長為材料製作時選定的特性，而厚度會影響厚全像特性的顯著性，即重建光選擇性的嚴格程度；敏感度會影響攝影的曝光時間，

時間越短攝影品質越不容易被外界不穩定影響，解析能力會影響記錄的干涉圖案品質，以下以表 5 整理 PFG-01 的底片規格參數：

表 5. PFG-01 底片參數[18]

特性項目	量值	附註
大小	10.16cm*12.7cm	
厚度	7.31um	
玻璃基板折射率	1.5	[19]
材料折射率	1.609 ±0.002	[19]
適用波長	633nm - He Ne laser and 526nm - Neodymium lasers	
顆粒大小(平均)	40nm	
曝光能量密度	80uJ/cm ²	
解析度	>3000lp/mm	由顆粒大小計算值：2.5×10 ⁴ lp/mm

由曝光能量密度資訊，底片曝光的時間經由計算為：

$$\text{曝光時間} = \frac{\text{曝光能量密度}}{\text{物體光能量密度} + \text{參考光能量密度}} = \frac{80\text{uW}}{I_o + I_r} \quad (25)$$

底片中發生的各個化學反應速率都溫度有關，溫度約高反應越快，在此實驗中，暗房溫度控制在約 20°C。從曝光完成至沖洗步驟的漂白完成前，底片需與其敏感波長的光隔離。沖洗流程由浸泡去離子水開始，在去離子水中浸泡 10 秒可讓底片各處之反應物在接下來的藥水反應中，有較均勻的反應速率；接下來將底片移到由 A 劑與 B 劑等量混和的顯影液中，以緩慢速度輕搖底片，直到底片變黑，在此溫度下約需要 90 秒，顯影完成後需讓底片在去離子水中輕搖 3 分鐘，將殘留在底片上的顯影液去除；再來，將底片移至漂白水溶液中輕搖直到其完全透明，透明後在同藥水中放置 5 秒，再將其移至去離子水中輕搖 3 分鐘，充分洗去在底片上的漂白劑；最後的清洗步驟，是將底片浸泡在水痕防止液中 40 秒，降低底片上水的表面張力，防止底片乾燥時表面有水珠的痕跡，至此底片以沖洗完成。沖洗完成後，需讓底片平放在通風乾淨的環境約 2 小時，讓水分充分乾燥後才可以移動與重建欣賞。

以下為 PFG-01 以 JD4 配方沖洗的沖洗流程：

表 6. PFG-01 沖洗流程[17]

步驟	時間	附註
1. 浸泡去離子水	10s	
2. 顯影	約 90s	輕搖材料，直到材料變黑
3. 去顯影液	3min	
4. 漂白	變透明後再放置 5s	
5. 去漂白水	3min	
6. 泡水痕防止液	40s	
7. 風乾	2hr	

3.1-2 照相機規格

在此論文中，平面影像的取得包含以 Matlab 軟體模擬產生，與以 Nikon D' 100 數位相機配合 Nikon AF Nikkor 28-85mm/F3.5-4.5 鏡頭取得。以前者產生的平面影像沒有視角限制，如同以針孔相機來取像，任何影像都可完整取得。而已真實的像機取像則要考慮其視角與影像品質，在此只列出其規格，3.2 節中會說明這些規格對於複合式全像設計的限制。

表 7. Nikon D' 100 與 Nikon AF Nikkor 28-85mm/F3.5-4.5 鏡頭搭配規格


項目		註
影像畫素	3008*2000	
對焦長度與 35mm 底片機校正值	1.5	
CCD 尺寸	23.7mm*15.6mm	視場角計算要除上 1.52

3.1-3 雷射之特性

全像術包含光波干涉記錄與光波繞射重建兩步驟。光波干涉需要同調的光源，1960 雷射發明後，記錄全像以雷射為光源。

雷射光與一般光源之重要差異有二，一為強度比一般的光源強，可以減少底片曝光的時間，減少外界擾動影響的機會；另一則是其同調性比一般的光源好很多。除了同調性和強度，作為全像光源還有偏振性、穩定性，以及波長需要考慮。此實驗所用之雷射參數規格如表 8，其中已經包含強度、空間同調性、偏振性、穩定性以及波長(632.8nm)資訊，以下對各個參數作簡單討論以及解釋。

表 8. 雷射參數規格表[20]

High Performance JDS Uniphase Helium-Neon Lasers		
	型號	1137P
	最小輸出功率(TEM00)	7mW
	光束直徑	0.81mm
	縱軸模態間距	435(MHz)
	偏振性	500:1

強度方面，考量儀器與環境之不穩定，希望底片曝光時間越短越好，所以在底片不被破壞情形下，希望光強越強越好。而波長方面，對於一般全像攝影，需考慮物體的反射強度與頻譜，此和物體之材質、顏色有關，在複合式全像中因物體為平面影像之穿透光，穿透光場可藉由影像調整，但仍需針對物體顏色選擇配合之底片與雷射波長，以免成像與物體的顏色認知差異太大。而偏振態在此以 S 偏振來記錄，以光場疊加之概念，以 S 偏振記錄干涉條紋將有最好的對比度。

在講解空間同調性與時間同調性之前，首先了解什麼是同調性。同調性（希臘文 *cohaerere*）又稱相干性，描述波動在傳播時，其物理量在不同地點或不同時間的相關特性。同調度（degree of coherence）是用來表示波動相關特性的一種度量[21]。由全像原理介紹，兩道光的干涉條紋強度可以表示成：

$$\begin{aligned}
 I &= \langle |\vec{U}_o + \vec{U}_r|^2 \rangle_t = \langle |\vec{U}_o|^2 \rangle_t + \langle |\vec{U}_r|^2 \rangle_t + \langle \vec{U}_o \vec{U}_r^* + \vec{U}_r \vec{U}_o^* \rangle_t \\
 &= \langle |\vec{U}_o|^2 \rangle_t + \langle |\vec{U}_r|^2 \rangle_t + 2 \langle \vec{U}_o \bullet \vec{U}_r \rangle_t \\
 &= I_o + I_r + 2 \langle |\vec{U}_o| |\vec{U}_r| \cos(\phi_o - \phi_r) \rangle_t \\
 &= I_o + I_r + 2 \sqrt{I_o I_r} \left| \frac{\langle \vec{U}_o^* \vec{U}_r \rangle_t}{\sqrt{I_o I_r}} \right| \langle \cos(\phi) \rangle_t \\
 &= I_o + I_r + 2 \sqrt{I_o I_r} |g_{or}| \langle \cos(\phi) \rangle_t
 \end{aligned} \tag{26}$$

\vec{U}_o 、 \vec{U}_r 分別為物體光與參考光光場， $|g_{or}|$ 為同調度，代表強度外兩道光的相似程度，而 $2\sqrt{I_o I_r} |g_{or}|$ 為干涉明視度（interference visibility），由同調度和兩道光之強度比例所決定。干涉明視度被定義為兩個波干涉圖案的強度對比，其公式如下：

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \tag{27}$$

(27)式中最大與最小強度相差越多，干涉明視度會越好。在實驗上，藉由讓兩道光強度一樣，同調度可以由干涉明視度來計算：

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_o I_r}}{I_o + I_r} |g_{or}| = |g_{or}| \tag{28}$$

運用算幾不等式可知，當兩道光能量相同時干涉條紋會有最大的對比度，因此記錄全像時我們應讓兩道光的能量盡量相同，以達最好的干涉條紋品質。[24]

一個光源的空間同調性，指它所發出之光場在空間裡相異位置的相似程度，一般以楊氏雙狹縫(Young's double slit)實驗測量，對於雷射而言則是它的橫向模態。根據表 8，此雷射的橫向模態只有 TEM00 模一種，在橫向光束截面有固定的相位、均勻的強度分布，不但是光功率最高的模態，且在橫向方向只有一種振動頻率，條紋的位置不會隨時間飄移，相較於多模雷射十分適合用來記錄全像。

一個光源的時間同調性，指它所發出之光場在相異時間截面相位的相似程度，實驗上一般以麥克森干涉儀(Michelson Interferometer)測量，對於雷射而言則是它的縱向模態。時間同調性在表格中沒有直接闡述，由有縱向模態間距，僅可知此為多模雷射。然而記錄全像必須知道光源的同調長度，才知道兩道光光程差(OPD, Optical path difference)的容許範圍，在此論文中我們以麥克森干涉儀測量其同調長度，測量架構與討論請參照附錄一。在此測量結果如圖 43，在此定一明視度介於 $0.707 \sim 1$ 的兩道光具時間同調特性，可知此雷射明視度好的同調範圍為 $69 \times n + 10 \text{cm}$ 。

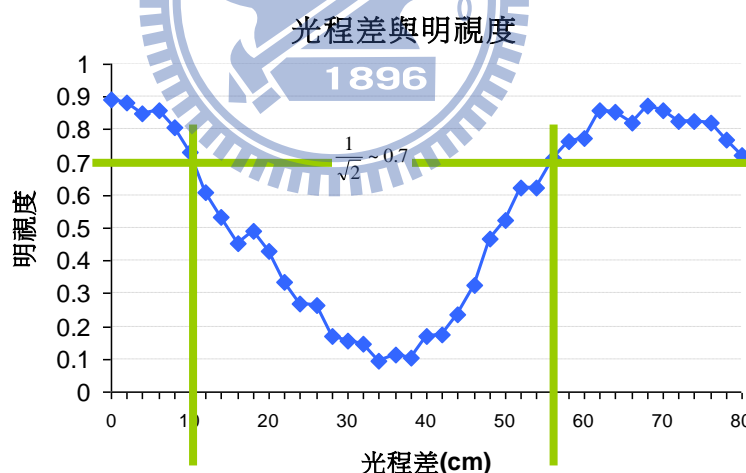


圖 43. 光程差與明視度關係曲線

穩定性的重要性在於，在全像記錄期間，干涉條紋之位置必須穩定，感光材料的記錄結果才不會一片模糊。屏除光學架構中，因元件振動造成光程差變化而改變條紋位置，雷射共振腔之溫度、電源電壓變動也可能造成主波長飄移而間接造成條紋位置改變[22]。干涉條紋的亮暗位置分佈決定於相位差，而相位差決定於光程差與入射角度，因此上述光程差不為零、但是明視

度好的同調長度，在所用底片所需之記錄時間內，不一定足夠穩定來記錄全像。因此在此以實驗架構所需之 69cm 光程差與底片 PFG-01、PFG-03，來測試此光源在不同記錄時間長度下，穩定度是否足夠。測試方法為觀察光程差為零，與光程差為 69cm 條件下記錄之平行光重建效率，如果差異不大即表示穩定性足夠。光程差與條紋位移程度之推導，以及實驗方法請見附錄二，在此結果如表 9。表示此雷射在 69cm 光程差下，曝光 2 分 30 秒以內穩定性皆足夠記錄全像。

表 9. 穩定性測量重建結果

PFG-01 底片	記錄時之曝光時間(t)	重建光強度(uW)	物體光強度(uW)	繞射效率(%)
OPD=0	5.663	187.928	43	22.88
OPD=69cm	6.988	187.928	51	27.14
PFG-03 底片	記錄時之曝光時間(t)	重建光強度(uW)	物體光強度(uW)	繞射效率(%)
OPD=0	134.62	164.458	4	2.43
OPD=69cm	169.145	164.458	4.8	2.92

3.2 實驗架構設計方法

在此小節中，包含展示設計、以一般相機記錄物體各角度相片、以全像將平面像片合成立體顯示系統，以及此系統的重建方法與成像特性。前兩者為以立體效果為考量的設計，後兩者則是全像光學架設的設計。

從展示期望出發，首先考慮人因以平面影像合成立體需要遵守的限制，找出可展示的空間。接著，以相機記錄物體各角度相片的架構有幾種可供選擇，在此會以電腦模擬所取得之相片以及合成的立體感，並比較、選擇其一來設計全像系統的記錄步驟。全像記錄如 2.2-2 節原理提及，需要拍攝兩次全像，其中第一張記錄架構藉由透鏡光學來增加光的使用效率，而第二張全像片的記錄則將重建方便性列入設計。最後則是討論在理想重建情形下，觀賞者在觀賞此系統時可能看到的各種情況。希望藉此實驗設計，統整出複合式全像實做時應考量之因素與設備需求。

3.2-1 展示期望

在展示時，觀賞者看見的是由 $H2$ 產生之繞射光場，其中包含狹縫的實像與平面影像的虛像或實像。在展示的設計中，首先了解展示物，必須知道其尺寸；接著考量展示物與觀賞者的關係，必須決定以下參數：觀賞者與全像所記錄平面影像的最佳距離(以下簡稱最佳觀賞距離)、預定觀賞者水平位移、一個狹縫的寬度、觀賞總視角、與平面影像數目。

複合式全像由於先以一般照相機取像再拍成全像片，原物與展示時的大小縮放比例可以很方便的藉由平面影像的大小來決定。假設展示時的寬、高與景深分別為 w_0 、 h_0 與 d_0 ，為了在全像步驟中能完整記錄物體資訊，平面影像中的物體影像面積要比 $H2$ 的有效曝光面積寬 y_2 與高 h_2 小，而景深 d_0 需在對焦平面的可用景深範圍中(圖 27)，在展示設計中其示意圖如圖 44；而最小可設計之深度細節由視差的最小量值限制，參照(4)式。此外，還要注意平面影像要放在最小明視距離 25cm 外。考慮以上，決定了展示物的尺寸後，最小的最佳觀賞距離 x 便可決定。

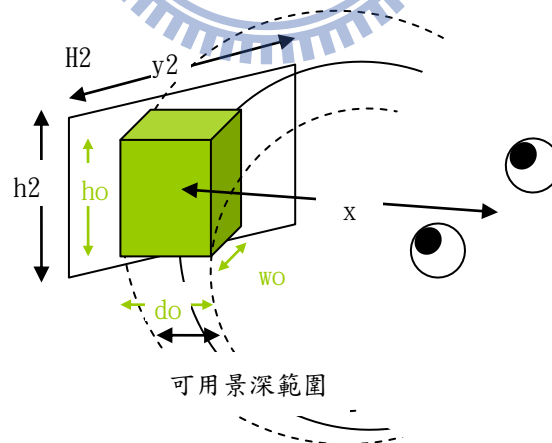


圖 44. 可用景深範圍與觀賞者之關係圖

狹縫加上觀賞者的眼睛，是觀賞者看一張平面影像的成像系統，如果狹縫的寬度比人的瞳孔小，由幾何光學可知，狹縫成為此成像系統的孔徑，會

讓成像系統的解析度降低，因此狹縫寬度至少與人眼瞳孔相同。由光的繞涉來思考，將一個影像上最細的條紋當作光柵，並以記錄光源的波長照射之，則此影像的零階繞射邊緣即是此最細條紋的空間頻率，如果狹縫太小，影像的高頻資訊無法記錄到底片上，重建時解析度會下降；影像解析度可下降但不可低於人眼解析度，而人眼的解析度與觀賞距離有關，參照(6)式，觀賞距離為 x 、最細條紋間距 D 為 $x\gamma$ ，連結人眼角解析度 $1'$ ，可以寫成：人眼解析度條紋光柵零階繞射寬度 \leq 狹縫寬度 w ，數學如(29)式，只和波長有關。

$$\frac{\lambda x}{D} * 2 = \frac{\lambda x}{x \frac{\pi}{180} * \frac{1}{60}} \leq w \Rightarrow w \geq \frac{2 * 180 * 60 * \lambda}{\pi} \quad (29)$$

觀賞總視角可由最佳觀賞距離 x ，與預定的觀賞者水平位移 y 決定， y 最大值为複合式全像原理中提及的 $H1$ 的寬度 $y1$ 與狹縫寬度 w 決定， y 最大值为 $y1-w$ ，而平面影像的最大數目為 $n=y1/w$ 。綜合上述所提及的參數所構成的展示期望系統如圖 45：

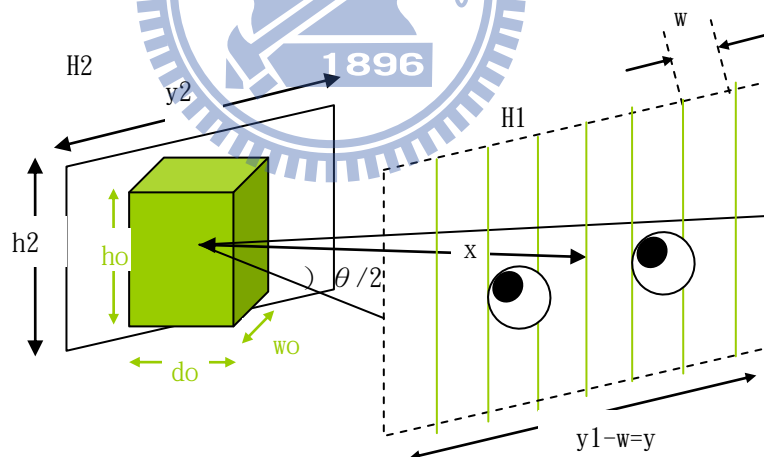


圖 45. 展示期望系統示意圖

其中 θ 為總視角，其最大值可由 x 、 $y1$ 與 w 計算而得：

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{(y1-w)/2}{x} \right) \quad (30)$$

由圖 45 可知，H1 的寬度必定要大於人的兩眼間距 6.5cm。

此外，平面影像在縮放的同時解析度會隨著影像大小改變，人眼對於影像的需求根據角解析度 $1'$ ，會隨著觀賞距離 x 遠離而下降，不同觀賞距離對於影像解析度的要求可寫成：

$$dpi(x) = \frac{0.0254}{x \frac{\pi}{60 * 180}} \quad (31)$$

(31)式可以繪成圖 46，顯示在不同觀賞距離 x 下對於影像解析度的要求，這個解析度代表人眼在該位置所能觀察到物體的最細微條紋。

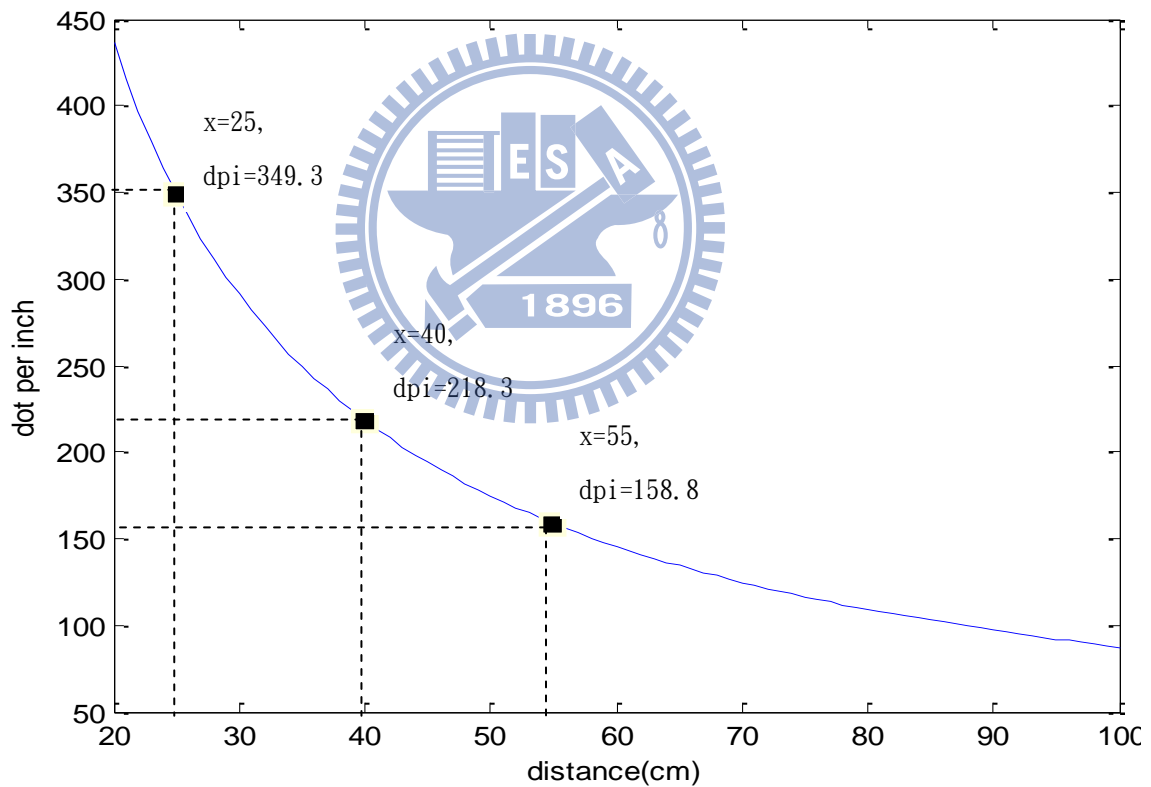


圖 46. 不同觀賞距離對於影像解析度的要求

3.2-2 取平面像片系統與立體合成模擬

取平面像系統

取平面像系統為展示期望的等比例放大，其放大比例為真實物體尺寸除上展示時物體尺寸，在此段落的圖中尺寸變數符號都為展示系統變數符號加上「'」標示之。舉例來說，展示時物體寬 w_o 為 5cm，真實物體寬 w_o' 為 10cm，則所有其他符號都代表加了「'」即表示為原本符號的兩倍。

以一般相機記錄一物體各角度平面影像的空間架構有三種，分別為以物體為圓心，在等距上的圓弧軌道上，每間隔相同圓弧距離拍攝一影像，如圖 47(a); 第二種為在一直線軌道上，相機畫面以物體為中心，每間隔一相同距離拍攝一影像，如圖 47(b); 第三種為在一直線軌道上，相機不以物體為中心而指向同一方向，每間隔一相同距離拍攝一影像，如圖 47(c)。每一種都要依序完成 n 個位置的拍攝，取得 n 個平面像。

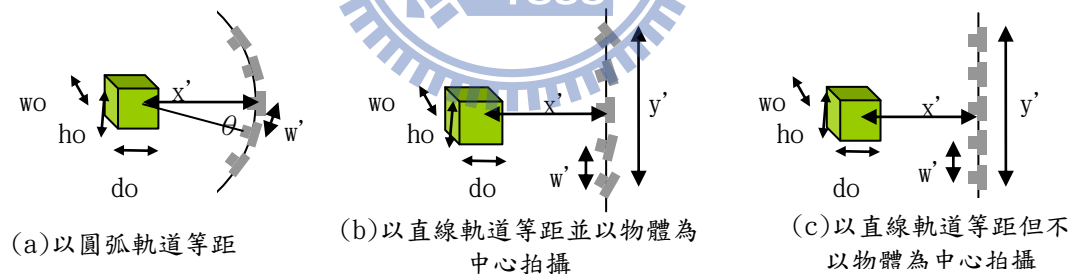


圖 47. 複合式全像攝影架構方法

其中 w_o' 、 h_o' 與 d_o' 分別為物體原大小尺寸， x' 與 w' 則為攝影時的距離與兩張相片的間隔。三種空間架構分別對應平時觀賞物體時的方式：(a)架構如同把物體拿在手上把玩，會轉動物體來觀察其各角度面貌，(b)架構如同在欣賞有限大小的平面畫作，或是在展覽場被限制觀賞距離的情況下觀賞物體，(c)架構則是如同在欣賞遠方或是大型的物體。平面式複合全像狹

縫在同一平面上，(b)與(c)架構較符合觀賞的設計，因此以下以數學公式來模擬(b)與(c)架構會取得的平面影像之不同。

在假設沒有像差的情形下，即以完美的針孔相機為平面影像取得工具，則所拍得的相片與真實畫面只是等比例的縮放關係，因此可以將成像平面設為相機的對焦平面，而成像平面上的像點位置即為包含針孔與物點之射線與成像平面的解，在此成像平面的法向量即為相機的方向向量。其相機與物體、對焦平面的成像關係如圖 48，模擬程式碼如附錄三。

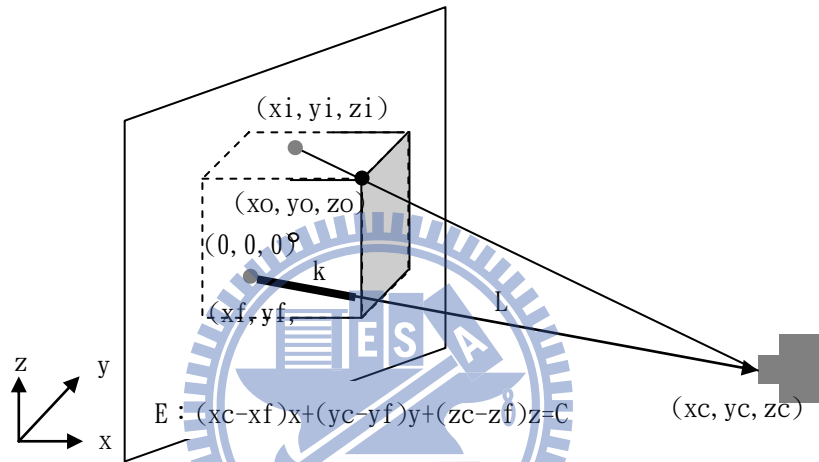


圖 48. 平面影像取得幾何圖

其中座標原點是物體中心， (x_c, y_c, z_c) 是相機位置， (x_f, y_f, z_f) 是相機對焦中心， (x_0, y_0, z_0) 是物點位置，其成像位置為 (x_i, y_i, z_i) ， L 是相機與其對焦點的向量(平面 E 法向量方向)的絕對值，粗線 k 是物點與相機對焦中心向量與平面法向量內積的值。而像點位置則如(32)式：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = A \left(\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \frac{L}{L - k} \begin{bmatrix} x_0 - x_c \\ y_0 - y_c \\ z_0 - z_c \end{bmatrix} \right) \quad (32)$$

其中 A 是一個常數，相片可以被沖洗為實景的任意倍率。

如以物體中心與相機的距離為對焦距離，以(b)架構拍攝時 (x_f, y_f, z_f) 為原點。物體為長 5cm 的立方體，前傾 15° ，逆時鐘轉 65° ，相機在 40 公分處

拍照，在觀賞系統不同位置取得之平面影像如圖 49；而以(c)架構拍攝時， (x_f, y_f, z_f) 為 $(0, y_c, 0)$ ，其在觀賞系統不同位置取得之平面影像如圖 50。

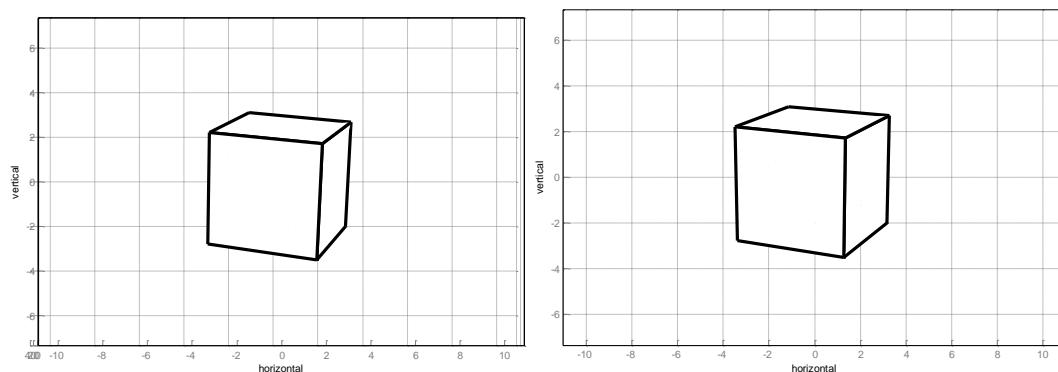


圖 49. (b)架構拍照所得影像，左為 $(40, -5, 0)$ ，右為 $(40, 0, 0)$ 之影像

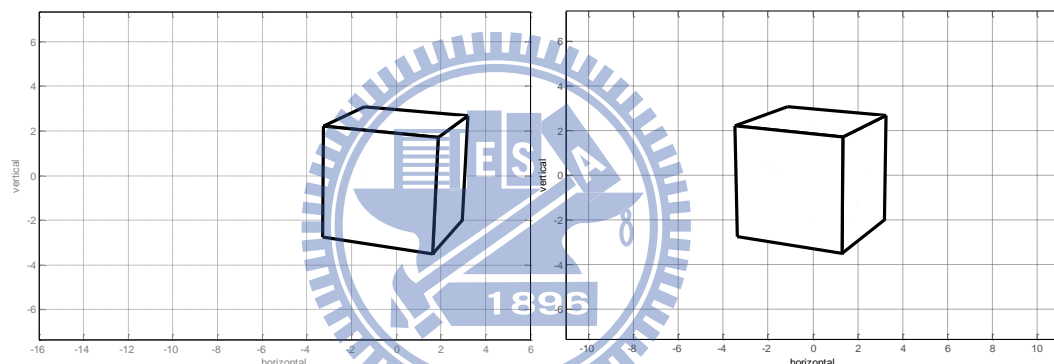


圖 50. (c)架構拍照所得影像，左為 $(40, -5, 0)$ ，右為 $(40, 0, 0)$ 之影像

不同的拍攝架構取得的影像除了畫面不同，它們在空間中的成像面也不同。(b)與(c)架構所得之影像在空間中與拍攝軌道的關係如圖 51 與圖 52。

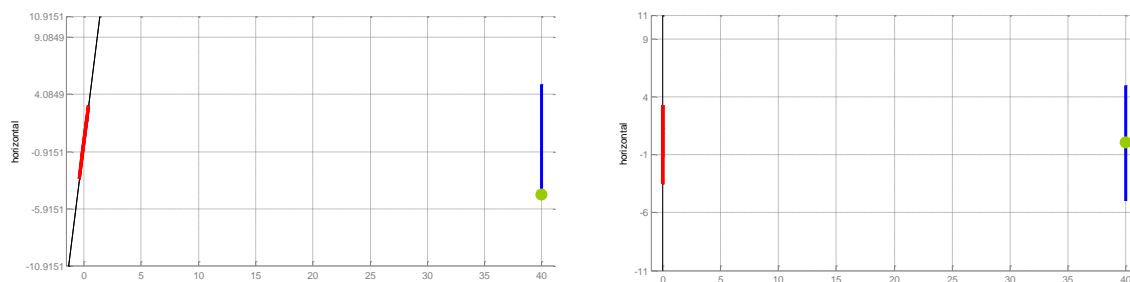


圖 51. 以(b)架構拍照所得影像與拍攝軌道之關係，左為 $(40, -5, 0)$ ，右為 $(40, 0, 0)$ 之關係

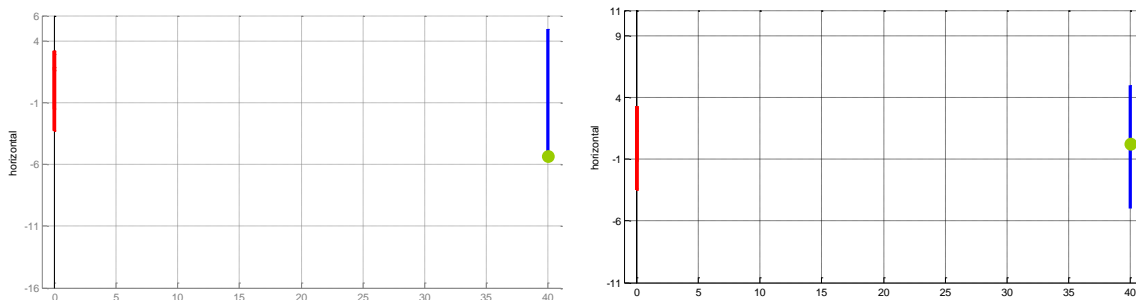


圖 52. 以(c)架構拍照所得影像與拍攝軌道之關係，左為 $(40, -5, 0)$ ，右為 $(40, 0, 0)$ 之關係

其中藍色是拍攝軌道，綠色點是拍攝位置，黑細線是影像平面，紅線是物體在相片上的位置。

由上述討論可知，(b)架構方法的相片平面會隨著觀賞位置改變而改變，物體都在相片的正中間，但由於拍攝距離隨觀賞位置不同而不同，影像的大小會隨之改變。(c)方法的相片平面在每個觀賞位置都相同，而物體在相片上的位置與大小也因觀賞位置改變而改變。

此外，(c)架構由於物體可能在畫面的一側，為了物體影像完整被捕捉，對於相機有較嚴格的要求，不同的觀賞系統參數對於相機的水平視場角 φ 的要求不同， θ 與 φ 的關係可以由觀賞系統俯視圖算得，如圖 53 所示：

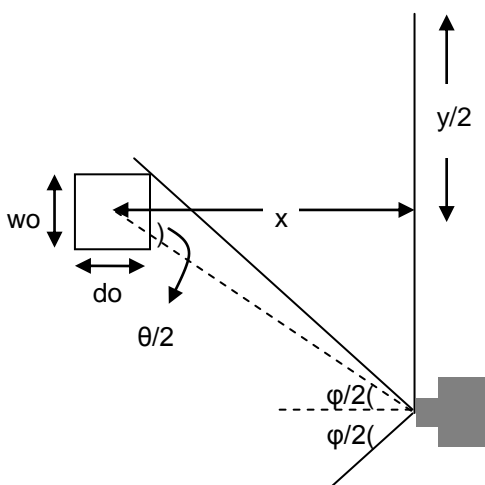


圖 53. 相機視場角與觀賞系統總視角關係圖

圖中 $\theta < \varphi$ ，而 φ 以觀賞系統的幾何關係可表示成(33)式，可以依照此公式由展示系統選取適合條件的相機，或者依照所擁有的相機設計展示系統。照相機的設定上，水平視場角可以表示成(34)式。

$$\varphi \geq 2 \tan^{-1} \left(\frac{\frac{y - wo}{2}}{x - \frac{do}{2}} \right) \quad (33)$$

$$\varphi = 2 * \tan^{-1} \left(\frac{\text{底片橫向寬度}}{2 * \text{變焦鏡頭數值}} \right) \quad (34)$$

如要正確地合成立體感，觀賞者與平面像片的幾何關係在展示系統中，必須和拍攝平面影像時相同，因此也導致(b)與(c)架構展示系統有些差異，它們的示意圖如圖 54。由圖 54 可發現，(b)架構整張影像都可以放物體資訊，而(c)架構則只有影像重疊的部分可以放物體資訊。在總視角 θ 較大時，(c)架構為了讓側視角拍攝時，物體也在畫面內，需要讓畫面上有比較廣的視野，表示如果洗出來後平面影像一樣大，(c)架構的物體在畫面上會比(b)架構小，解析度會比較差。此外，要實現(b)架構的觀賞系統，以原平面影像來做全像記錄步驟需要調整平面影像與 H1 的角度，如忽略此角度的校正會造成之結果在立體合成模擬中再說明。

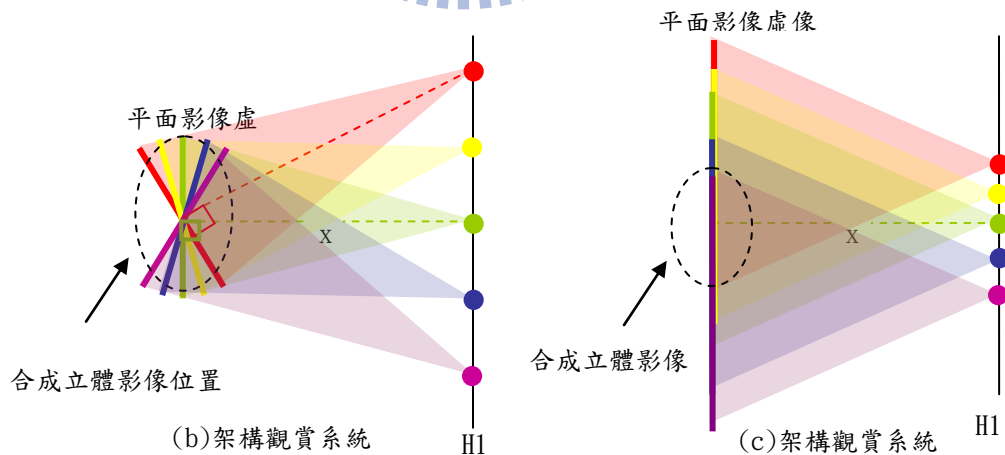


圖 54. (b)與(c)拍攝架構的觀賞系統

立體合成模擬

模擬合成立體的方式，是把平面相片置於景深為零的平面，並把眼睛放在景深不為零的平面，用視差的原理，讓左右眼看各狹縫對應之相片上的像點，左眼與左眼像點連線成為左眼視線，右眼與右眼像點連線成為右眼視線。考慮可能有誤差的情形下，以空間中兩直線最接近的點當作合成之影像點空間位置，作其示意圖如圖 55，模擬程式碼如附錄三：

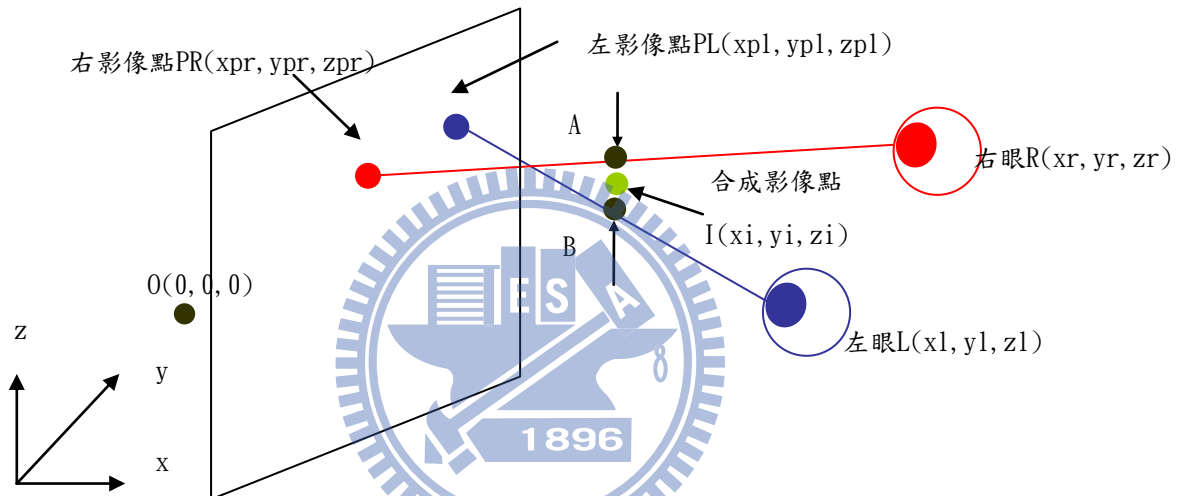


圖 55. 雙眼視覺模擬示意圖

其中景深方向為 x 軸，水平方向為 y 軸，垂直方向為 z 軸， 0 為座標原點，左右眼座標分別為 L 與 R ，左右影像點座標為 PL 與 PR ，紅色線為右眼視線向量 \vec{d}_r ，藍色線為左眼視線向量 \vec{d}_l ，點 A 與 B 為兩視線公垂線與兩條線的焦點，合成影像點 I 為 A 與 B 點的中點：

$$\overrightarrow{OI} = \frac{(\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{OB})}{2} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{OR} + \frac{\left| \begin{matrix} \overrightarrow{RL} \cdot \vec{d}_r & \vec{d}_r \cdot \vec{d}_l \\ \overrightarrow{RL} \cdot \vec{d}_l & \vec{d}_l \cdot \vec{d}_l \end{matrix} \right|}{\left| \begin{matrix} \vec{d}_r \cdot \vec{d}_r & \vec{d}_r \cdot \vec{d}_l \\ \vec{d}_r \cdot \vec{d}_l & \vec{d}_l \cdot \vec{d}_l \end{matrix} \right|} \vec{d}_r + \overrightarrow{OL} + \frac{\left| \begin{matrix} \vec{d}_r \cdot \vec{d}_r & \vec{d}_r \cdot \overrightarrow{LR} \\ \vec{d}_r \cdot \vec{d}_l & \vec{d}_l \cdot \overrightarrow{LR} \end{matrix} \right|}{\left| \begin{matrix} \vec{d}_r \cdot \vec{d}_r & \vec{d}_r \cdot \vec{d}_l \\ \vec{d}_r \cdot \vec{d}_l & \vec{d}_l \cdot \vec{d}_l \end{matrix} \right|} \vec{d}_r) \quad (35)$$

以下假設觀賞系統中，預定觀賞者水平位移 y 為 10cm，觀賞距離 x 為 40cm；物體為邊長 5 公分的立方體，並前傾 15° 、逆時鐘轉 65° ，中心位於座標系原點；相機距離物體 40cm 拍攝；而觀賞者兩眼距離為 6.5cm，在 $x=40\text{cm}$ 、 $z=0$ 的軌道觀賞的情形下來模擬合成的立體圖形。將物體旋轉讓我們比較方便觀察物體的各頂點。

立方體旋轉後的頂點座標可藉由空間旋轉矩陣得到，依照先前照相的公式，前傾代表以 y 軸旋轉正角度，以下以 α 表示，水平旋轉以逆時鐘為正角度，以下以 β 表示，則旋轉之後物體的座標為 (x_o', y_o', z_o') ：

$$\begin{bmatrix} x_o' \\ y_o' \\ z_o' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} \quad (36)$$

代入此模擬物體的邊長與傾角，在空間中的頂點座標如圖 56，合成之正確立體結果要與圖 56，但是在不同觀賞位置會看見物體不同角度。

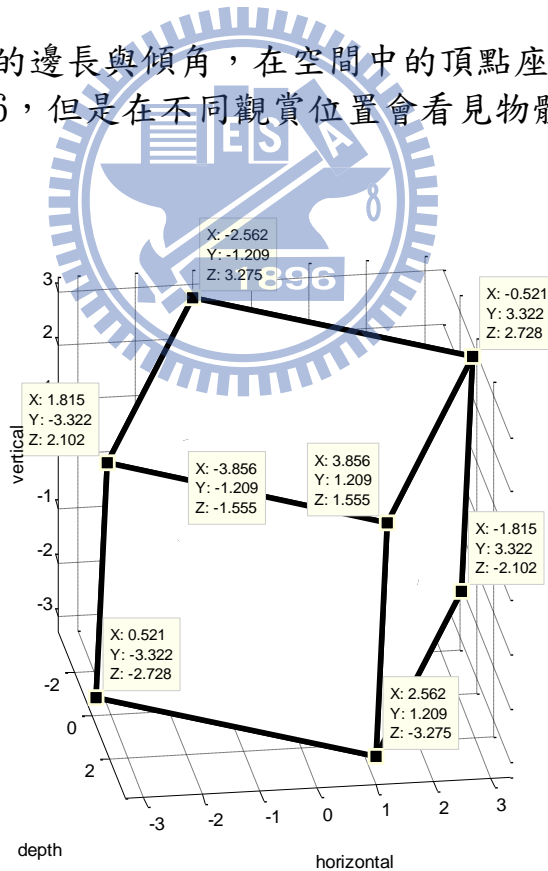


圖 56. 欲拍攝物體之頂點在空間的座標

首先考慮(b)拍攝架構的平面影像，如果依照各相片各自的角度記錄成 H1，所合成之立體感如圖 57：

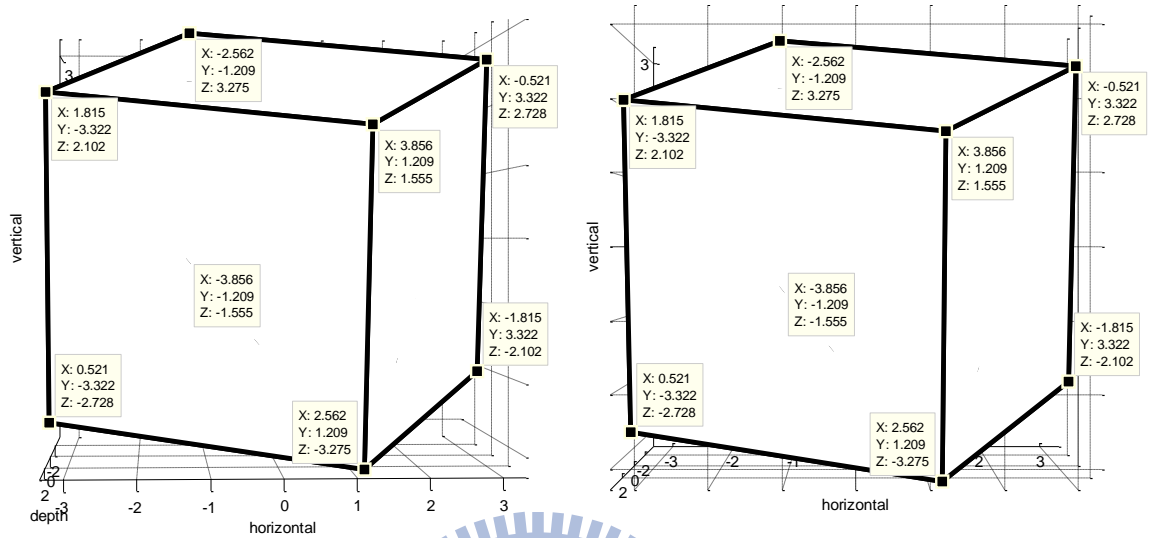


圖 57. 左圖和右圖分別為 (b)架構拍攝理想重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 0)$ 與 $(40, 0, 0)$ 所合成之物體

如果忽略影像平面和 H1 之間的角度調整，合成之立體結果如圖 58：

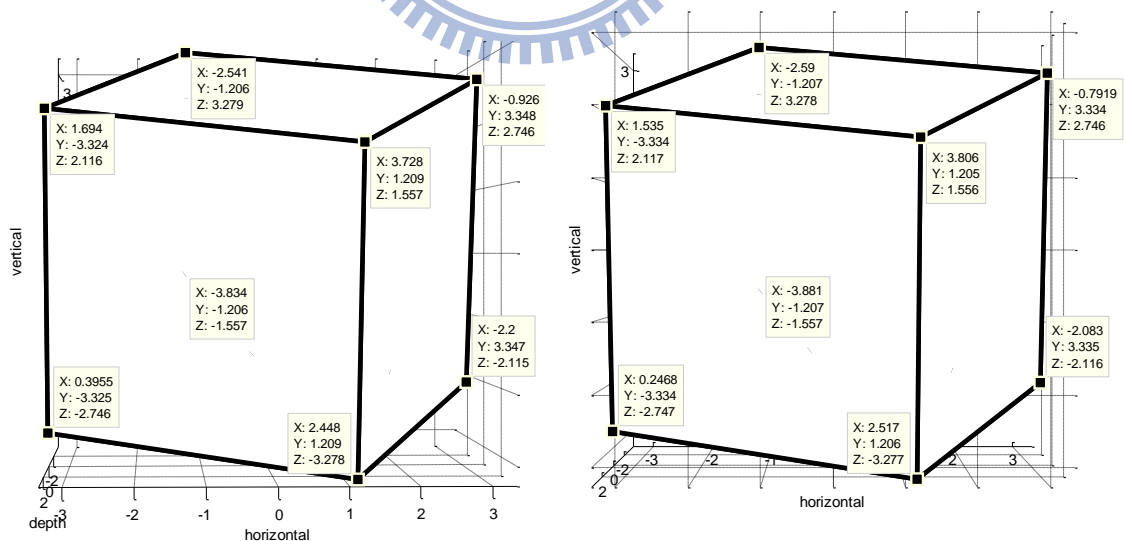


圖 58. 左圖和右圖分別為(b)架構拍攝但忽略平面影像角度重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 0)$ 與 $(40, 0, 0)$ 所合成之物體

觀察各座標點，可發現當忽略角度調整，在不同的觀賞位置所合成的立體感會有不同的變形，但都是變成遠景寬於前景的梯形畸變。而觀察其景深方向(x)，會發現總景深稍稍變淺。比較平面影像有無調整之合成影像中心位置隨觀賞位置的關係如圖 59，可以察覺在忽略調整平面影像角度的情形下，合成物體會整體退後，而合成物體在水平方向(y)有些許的位移。此變形的問題可以藉由事先影像運算得到解決，但在此不討論。

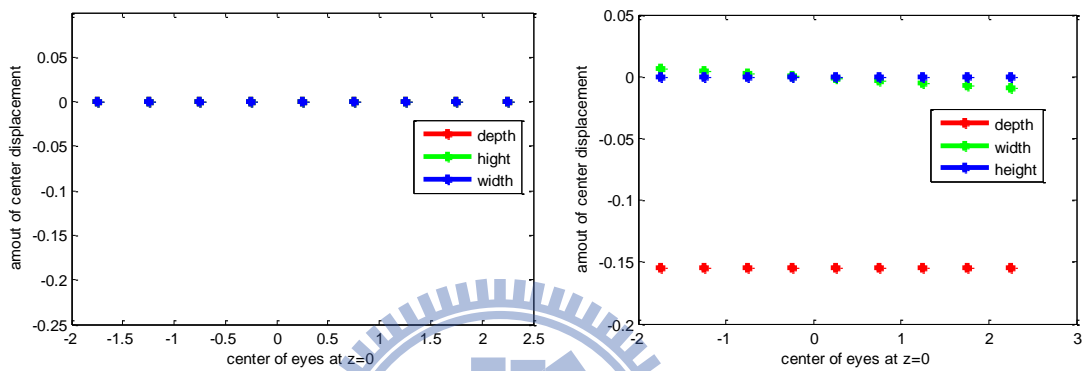
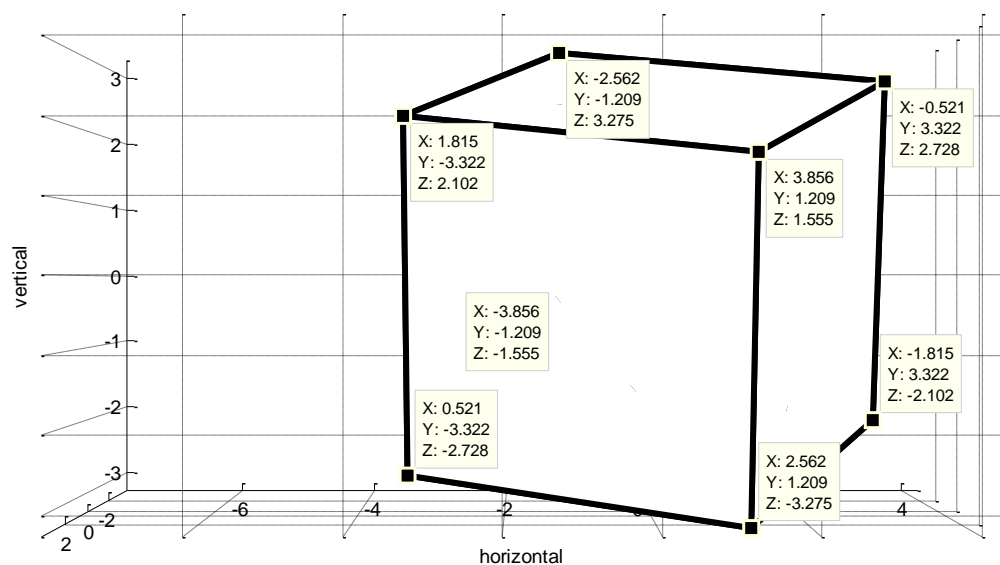


圖 59. 左圖和右圖分別為(b)拍攝架構有調整平面影像角度，與忽略角度調整的中心位置隨觀賞位置改變的關係圖

接著考慮(c)拍攝架構的平面影像，依照其平面影像位置所合成之立體感如圖 60：



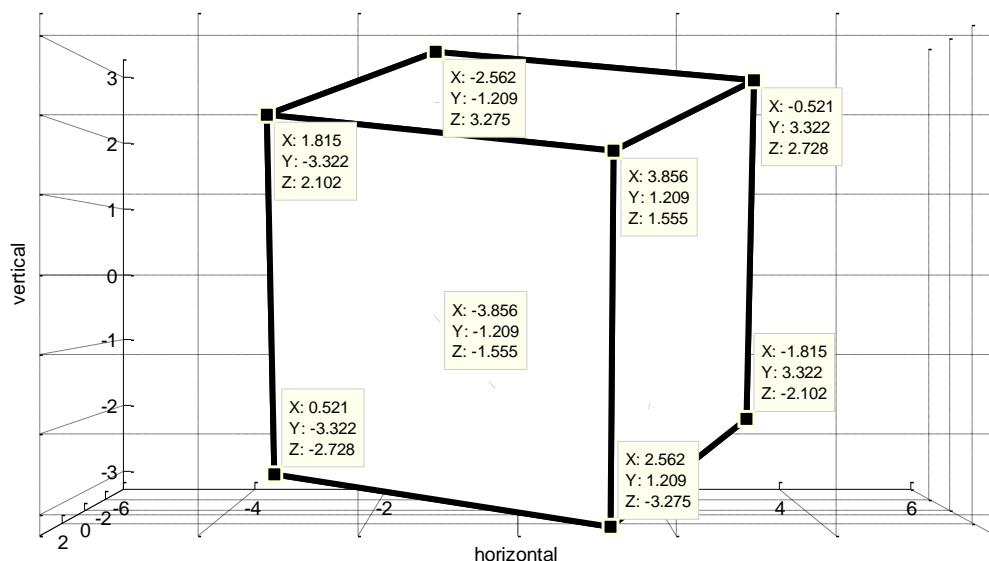


圖 60. 上圖和下圖分別為理想(c)架構重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 0)$ 與 $(40, 0, 0)$ 所合成之物體

可發現物體雖然沒有變形且位置也沒有變動，但物體和觀賞者的相對位置會隨著水平觀賞位置改變。這是由於在此設定觀賞者朝向正前方，並非一直朝著物體中心觀賞所致。

以下以表 11 比較(b)與(c)拍攝架構的優劣，考慮操作的簡易，選擇(c)架構來設計全像記錄步驟。

表 10. 拍攝架構優劣比較

	優點	缺點
(b) 架構：相機拍攝軌道為一直線，以物體為中心拍攝	<ul style="list-style-type: none"> ● 對相機視場角規格較不要求 ● 物體可佔畫面較多畫素而有較高解析度 ● 符合觀賞展示品的觀賞模式 	<ul style="list-style-type: none"> ● 攝影時相機的方向與對焦深度要隨位置調整 ● 全像記錄步驟複雜
(c) 架構：相機拍攝軌道為一直線，相機朝向正前方拍攝	<ul style="list-style-type: none"> ● 攝影時相機的方向與對焦深度不需調整 ● 全像記錄步驟簡單 	<ul style="list-style-type: none"> ● 需要視場角較大的相機 ● 相同平面影像大小的情形下可合成之物體較小、解析度較低

3.2-3 全像記錄系統

全像記錄步驟分成記錄主全像片(H1)與轉換全像片(H2)兩步驟。

在主全像片的記錄中，藉由狹縫開孔與記錄底片的相對位移來達到將不同的影像記錄在不同的底片位置，在光學系統中可以選擇固定狹縫或是固定記錄底片材料，移動另一者來達到目的。在此，希望藉由反射式的記錄，提升全像片重建影像的厚全像特性(對於不正確的重建光則重建較弱的影像)，如此一來架構中需要前後兩片狹縫，因此移動底片是較方便的選擇。

此外，由於曝光時間越短，越不容易受到擾動的影響，在此選擇光路上光強強的位置來放置記錄底片，創造光束集中處之方法，為利用凸透鏡來聚光。要藉由凸透鏡集中光能量，則其成像必為放大倒立實像，造成物體光打光時光束擴束可以較小，容易讓平面影像打光均勻；此外，以原參考光重建此全像片即形成實像，翻拍時成像座標不需轉向，可說是一舉兩得。

依照以上期許所設計之主全像片記錄的光學設計如圖 61：

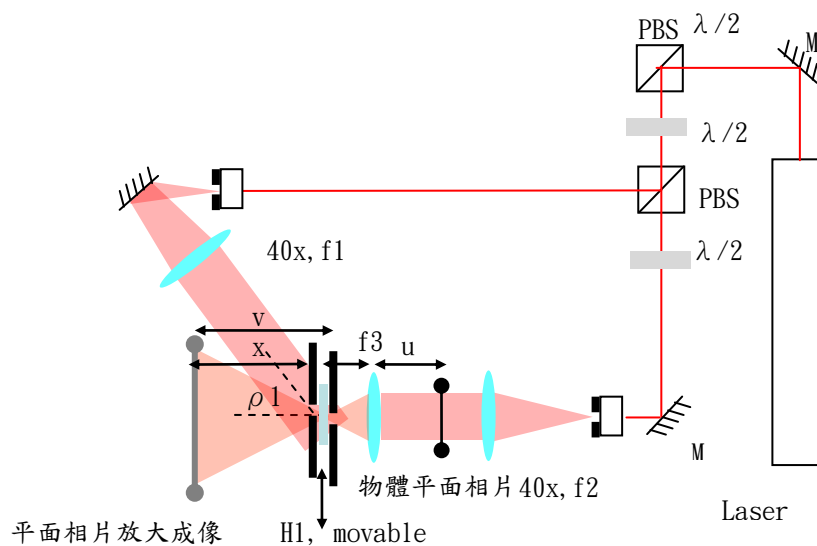


圖 61. 主全像片記錄光學設計

圖中最上方之偏振分光器是為了翻拍而準備，下方的偏振分光器將光能量兩道，上方為參考光，下方為物體光， ρ_1 是參考光入射底片的的角度， f_3 是成像透鏡的焦距， u 和 v 分別為成像的物距和像距，此兩距離和 f_3 符合透鏡成像公式 $\frac{1}{f_3} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 。兩道光的光程差設計為 69cm，此光程差由雷射的特性證實可使用。偏振分光器前加入二分之波板，是為了方便調整兩道光的能量比例，在偏振分光晶體穿透光後加上二分之波板將光的偏振態由 P 轉為 S。

參考光首先經由空間濾波器與透鏡，擴束為平行光，其在底片上的截面積要大於等於預定觀賞者橫向位移 y ，截面積可以藉由擴束光束大小與參考光與底片的夾角 ρ_1 來決定。

物體光的部分，除了照射物體之光束擴束大小要設計外，還有透鏡成像部分要考慮。首先設計透鏡成像，在此成像設計讓像距 $v = f_3 + x$ ， x 為展示期望中的最佳觀賞距離，帶入成像公式算出物距 u ，則可以得到平面影像的放大比例為 v/u 。當攝影時的視場知道，則照射物體之擴束直徑要求為視場對角線除上成像放大比例 v/u 。

在此的物體光為平面相片之穿透光，在預計記錄的傅立葉平面上會形成即小的成像點，其能量在預計記錄的狹縫面積中無法均勻分布，如果以此焦點成像記錄，會導致主全像片上有效記錄面積小，重建影像強度弱不利於翻拍，且展示時觀賞者眼睛必須對到此小點才能看見影像，導致展示不方便。解決方法為在貼近物體平面相片處放置散射面，或是將影像印在散射面上，讓焦點面積擴大且能量分布較均勻，在此實驗中將影像印在描圖紙上。

記錄時會將記錄材料 H1 放在成像透鏡後焦平面曝光，在此要以狹縫選擇底片的曝光位置，以實現 2.2-2 節所述觀景窗的效果。由於參考光有一個角度，且狹縫與底片間有一定的距離，首先應先調整兩狹縫開孔位置，讓通過狹縫之兩道光在底片平面重合。由於不同的平面影像，要曝光的底片位置不同，且希望兩曝光位置間沒有間距或重疊，在此以一維微動平台控制底片的移動，移動方向為圖 61 中之箭頭方向。各影像的相對記錄位置要和拍攝時相同。另外，在此影像經過透鏡成倒立實像，因此放置物體平面相片時得先

讓影像上下左右顛倒。記錄時根據每張影像穿透光強不同，個別調整兩道光至光強相等，計算出個別的曝光時間，依序將平面影像記錄到 H1 上，並經由顯影定影過程，完成主全像片的製作。

接下來為了觀賞需求，必須將主全像片 H1 翻拍成轉換全像片 H2。考慮展示時重建光源的取得便利性，配合一般藝術品展是以鹵素燈等都是點光源的形式，以及考量全像片需要以共軛參考光源重建，在此以收斂球面波為參考光，而以主全像片 H1 的重建光場為物體光。要有最佳的物體光，需以原參考光重建之，因此在上述光學設計中，預先考慮翻拍的光學設計，希望在原架構中，不改變主全像片之參考光以便重建。收斂球面波可以利用空間濾波器做出發散點光源後，以凸透鏡成像成收斂點光源，在此以兩片凸透鏡增加調整的自由度，來決定底片之曝光面積與收點點光源的位置。以上述期望所架設的全像翻拍架構如圖 62。

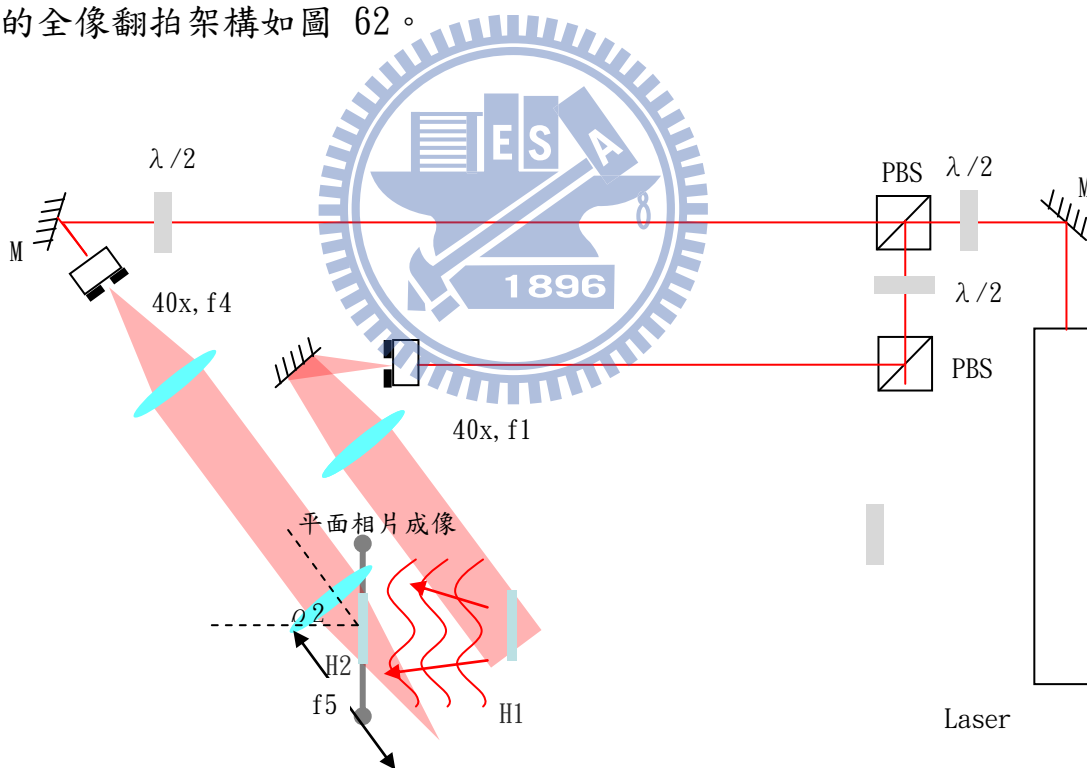


圖 62. 轉換全像片記錄光學設計

在圖 62 中，下方為 H1 重建光路，上方為要記錄 H2 之參考光。其中 H2 的位置可以依希望的呈現效果移近或遠離 H1，參考光的位置也要和 H2 一起移動，在此選擇將 H2 放置在物體平面影像的成像面。為了讓參考光光束在記

錄材料上的截面積較大，透鏡通常會很接近記錄材料，此時為了觀賞方便，必須選擇適當焦距的透鏡 f_5 與方向 ρ_2 ，讓光源重建時不影響到觀賞者，此和最佳觀賞距離有關，同時也要考慮光源發散角。以上述拍攝模擬為例， x 為 40cm， y 為 10cm，假設重建光源發散角為 30° 並以水平 45° 入射，而平面影像寬約為 10cm，則重建光源收斂焦距與底片的距離關係如圖 63：

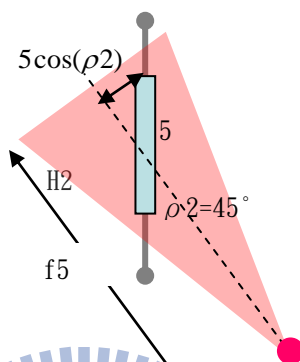


圖 63. 重建光源收斂焦距與底片距離計算

則 f_5 可由(37)式計算得知最小值：

$$f_5 \geq \frac{5 \cos(45^\circ)}{\tan(15^\circ)} = 13.2 \text{ cm} \quad (37)$$

此設計可以一次架設拍攝兩全像片所需之光學架構。

3.2-4 展示方法與成像特性

理想的重建為將點狀重建光源放在上述所設計，透鏡 f_5 的後焦點處，此時觀賞者可在轉換全像片 H2 與光源同側、原本主全像片 H1 位置處，觀賞立體合成效果，展示中重建光源與觀賞者的位置關係如圖 64：

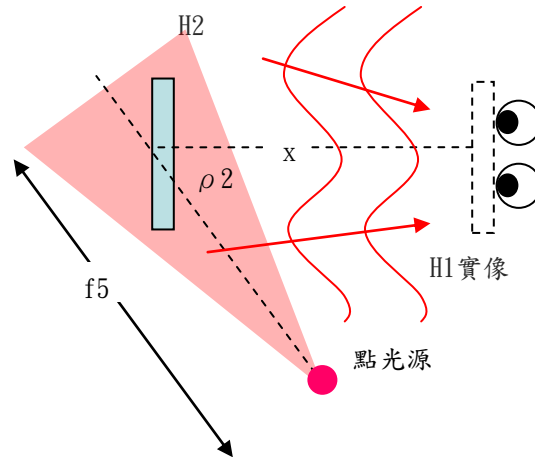


圖 64. 展示

此時狹縫實像與平面影像之像(在 H2 平面)的距離，為最佳觀賞距離，每一張平面影像之觀景窗在此距離為記錄主全像片時的曝光位置。

光場示意圖如圖 65，其中不同顏色代表不同的平面影像，顏色濃度則代表光強度，等能量的重建光場隨著光場擴散範圍不同，而有不同的光強度。圖 64 和圖 39 不同，沒有部分影像區存在，除了在狹縫實像的平面，在其他距離可能會遇到單一平面影像與影像重疊區交錯出現，或是皆為影像重疊區的情形。

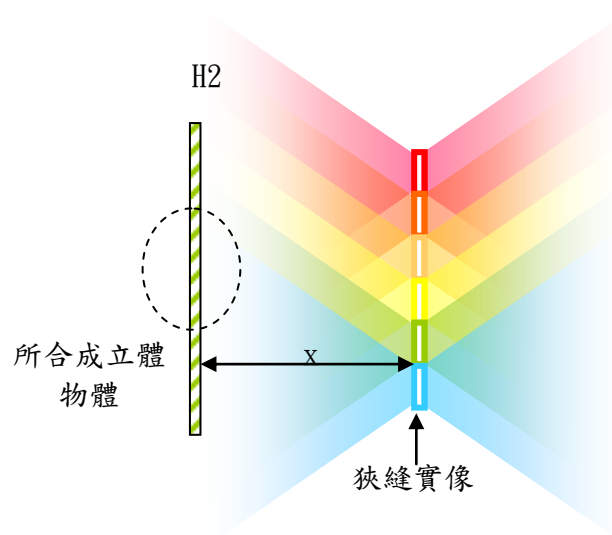


圖 65. 各平面影像光場重建式意圖

要建立正確的立體效果，需要觀賞者將眼睛擺在正確的觀賞位置。所謂正確的觀賞位置即是觀賞者將眼睛放在狹縫平面、高度在狹縫正中間，且兩眼正好在兩狹縫的開孔上而非狹縫邊緣，如圖 66 中紅色三角形標示位置。

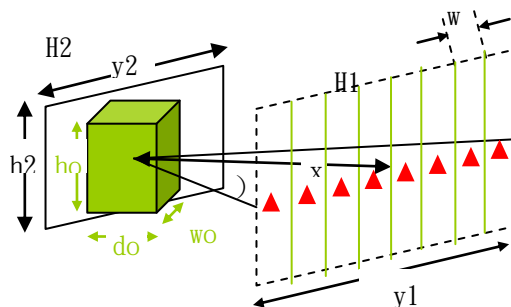


圖 66. 最佳觀賞位置示意圖

其他觀賞位置都會造成變形或是無法合成立體效果的狀況。然而在此設計中，針對最佳觀賞距離的立體效果做設計，著重於在此觀賞距離，而非圖 66 所標示位置的其他位置作討論。在此觀賞距離，但是非理想觀賞方式的其一為例，觀賞高度不在狹縫正中間，如圖 67 中所標示的藍色圓圈及藍色菱形，分別表示觀賞高度過高與過低。1896

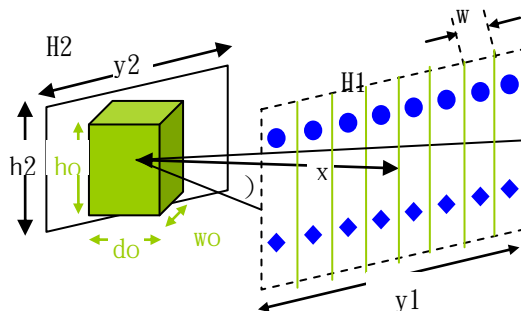


圖 67. 不正確的觀賞高度

如果藍色圓圈的高度代表比中心水平高 5cm，則表示兩眼中心在 $(40, y, 5)$ ，在此位置所合成立體結果如圖 68。與原物體圖 56 比較，物體有前景上移遠景下移的情形，不同位置所看到的影像不會改變，其中心位置與觀賞位置之關係圖如圖 69，八個點都有位移但平均之後沒有位移，可知變形

為點對稱，也可推測如果觀察者在低於水平高度觀賞，會有前景下移遠景上移之情形。在此主要設計水平方向的視差效果，因此僅在此討論但不以實驗驗證。

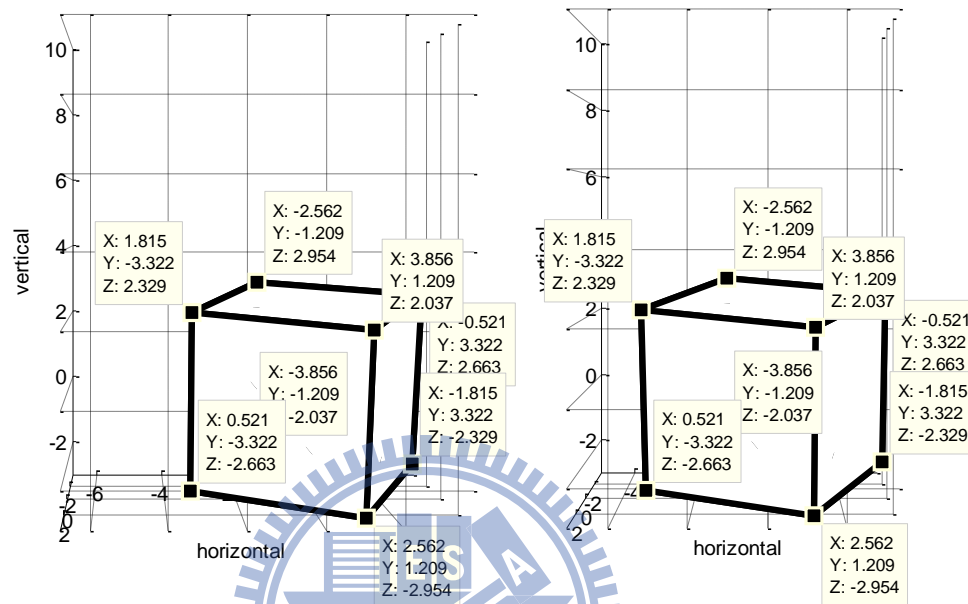


圖 68. 左圖和右圖分別為理想重建下，人的兩眼中心在 $(x, y, z)=(40, -1.75, 5)$ 與 $(40, 0, 5)$ 所合成之物體。

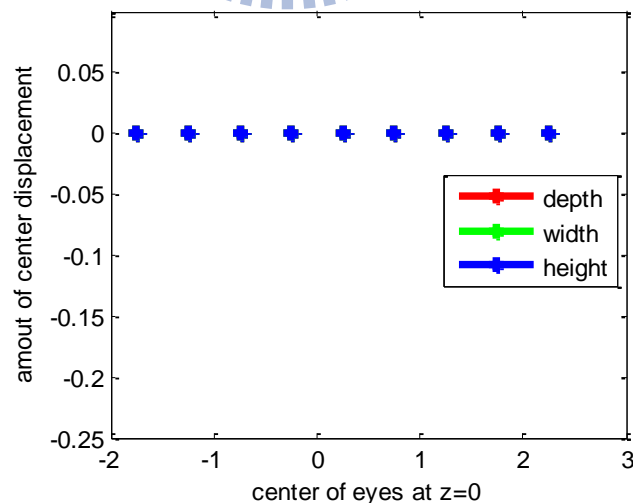


圖 69. 理想重建下，觀賞者之兩眼中心在 $(40, y, 5)$ ， y 由 $-1.75 \sim 1.75$ 移動，合成物體中心位置改變關係圖。

另一種不理想的觀賞情況為觀賞者在橫向(y 方向)移動時，眼睛對到狹縫的邊緣，導致一個眼睛同時看到超過一個影像，即所謂的疊影效應，如圖 70 所示：

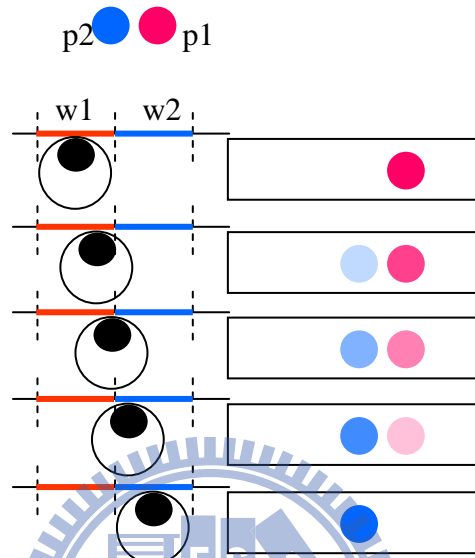


圖 70. 看到疊影效應示意圖[23]

圖中藍點 p2 與紅點 p1，分別代表由藍色狹縫 w2 與紅色 w1 狹縫所看到的影像，當眼睛由紅色狹縫移往藍色狹縫的過程中，由於可以同時接收到來自兩個狹縫的光場，可以看到兩個狹縫所對應的影像，而影像的強度根據收到的光能量多寡而有變化，是一個漸變的過程。由視差的原理可知，在相同的展示設計下，兩相鄰狹縫所對應影像的位移量越小，疊影效應越不易被察覺。

以上為此平面式複合全像的展示方式與成像特性分析，在下章節中，將以電腦拍攝之模擬方塊平面影像，以全像進行立體合成，並以數位相機記錄狹縫所見影像，觀察以此光學架構可否做到多視角裸眼立體合成的效果。

四、實驗與分析

在此章中，第一小節依照實驗架構設計的順序與條件，決定四個系統的各參數。第二小節以實驗驗證此系統有裸眼立體系統的特性，以及其成像特性與設計是否有相同的趨勢。

4.1 實驗架構

根據第三章實驗架構設計方法，會發現各系統的參數都會互相影響，在此配合實驗所用之設備，依序討論四個架構，首先由計算展示期望的各項參數極限值開始。



展示期望

在此要求出圖 45 中所有的代號參數。

首先是曝光面積：H1 與 H2 的曝光範圍受限於全像記錄系統中的光學曝光面積，或是全像記錄底片的大小。實驗中所用之記錄底片長寬為 12.7cm*10.2cm，而可用之擴束透鏡直徑約 7cm。在全像記錄系統參考光的部分，考量重建影像與重建光入射光夾角與曝光均勻性的取捨，在此 H1 以 $\rho_1=45^\circ$ 平行光拍攝，H2 以 $\rho_2=45^\circ$ 收斂球面波拍攝，所量得之曝光有效面積 H1 為長軸與短軸為 10.5cm 與 7.2cm 的橢圓，H2 則為 8.4cm 與 6cm 的橢圓。物體光的部分，H1 的焦點尺寸和所用之散射面、成像透鏡尺寸有關，在此焦點直徑約 5cm。在此會發現，使用透鏡會有一個缺點：透鏡尺寸會限制觀景窗

的高度，但是如同成像特性章節所提及，高度不正確之觀賞位置會看見錯誤的合成立體感，加了透鏡則使看見錯誤影像的機會變少。

再來是物體大小：受限於 H2 的曝光面積，在此物體取邊長為 4cm 的立方體，即在水平方向觀賞時，其最長影像寬為 $4\sqrt{2}$ 約 5.7cm，小於 H2 短軸 6cm，而總景深可能因物體傾角而異，約 6cm(do)，對於觀賞距離的限制參照圖 27，得 x 大於只要遠於 25cm 即可。

接著決定狹縫寬度 w：由(29)式，此和波長有關，波長 632.8nm 代入計算：
$$w \geq \frac{2 \cdot 180 \cdot 60 \cdot 632.8 \cdot 10^{-9}}{\pi} = 4.35 \text{mm}$$
，在此最小取 w 為 5mm。

知道了狹縫寬度與 H1 曝光面積，可以推出狹縫數目 n 為 h1 寬 y1/w，最多為 21，然而由於曝光面積為橢圓，其兩側高度不足，在此取最多為 20。

總視角根據上一節的討論，和物體邊長、攝影相機視場角 φ 、觀賞距離 x 有關，而在此因為在全像記錄系統中平面影像需經過成像過程，成像透鏡的收光角度也需考慮。以一般標準鏡頭 f=50mm 配合 135 底片為例，其水平視場角約 39° 。而本實驗所使用的相機型號，最大視場角約為 30.2° 。電腦模擬的相片以平均值 φ 約 32° 取得。而物體邊長為 4cm，帶入(33)式：

$$32 \geq 2A \tan\left(\frac{10-4}{x-\frac{4}{2}}\right), \text{ 得 } x \text{ 大於 } 20.6 \text{cm}, \text{ 表示 } x \text{ 必須遠於 } 25 \text{cm} \text{ 即可。此系統中}$$

所用的成像透鏡為焦距為 10cm，直徑為 5cm，但是利用透鏡離軸部分的成像會有枕形畸變，在此物體在平面影像成像放大前，影像寬度控制最遠離鏡心 1.75cm，則透鏡收光角度約 20° ，影像中物體邊長 1cm，需要被放大 4 倍，利用透鏡成像公式 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ ，得 $u=12.5 \text{cm}$ ， $v=4u=50 \text{cm}$ ，觀賞距離 $x=v-f=40 \text{cm}$ ，

$$\text{總視角計算為 } 2a \tan\left(\frac{4.75}{40}\right) \approx 13.54^\circ。$$

以上完成展示設計，並將參數以表 11 整理：

表 11. 展示設計參數表

參數名稱	數值
H1 的有效曝光面積	10cm(水平)*5cm(垂直)
H2 的有效曝光面積	橢圓：長軸 8.4cm(水平)，短軸 6cm(垂直)
展示物之尺寸	wo(寬)= ho(高)= do(深)=4cm
一個狹縫的最小寬度 w	5mm
最多狹縫數目 n	20
觀賞距離	40cm
總視角	14.25°

最理想的展示期望各參數如圖 71：

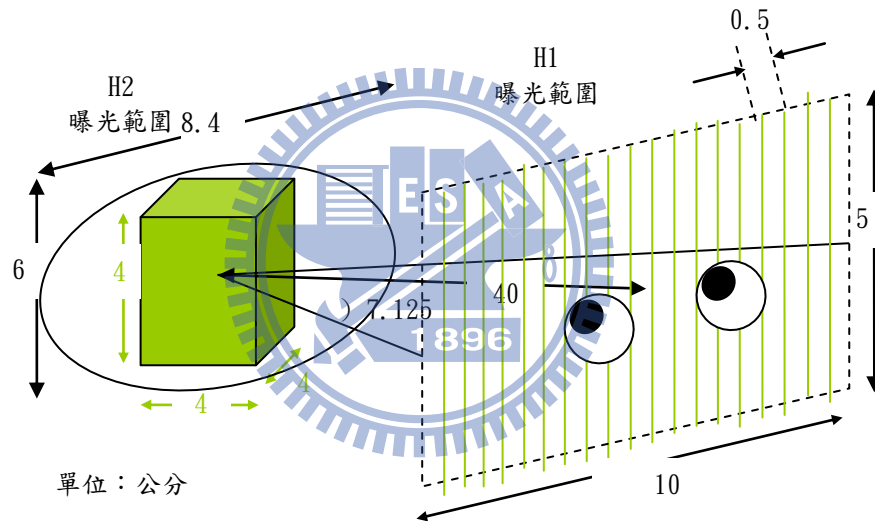


圖 71. 展示期望設計

取平面像系統

在此取平面影像分為電腦模擬之立方體與實物拍攝。

電腦模擬的部分，拍攝對象有二，主要對象為邊長 4cm 的立方體，中心位於座標(0, 0, 0)，並讓其前傾 15°、逆時鐘轉 65°，以方便觀察；另一個是

位於零景深平面的一個圓點，作為立體合成的校準指標，座標定為(0, 0, 3)。拍攝物體在實驗中的座標點如圖 72 所示，而拍攝架構如圖 73。

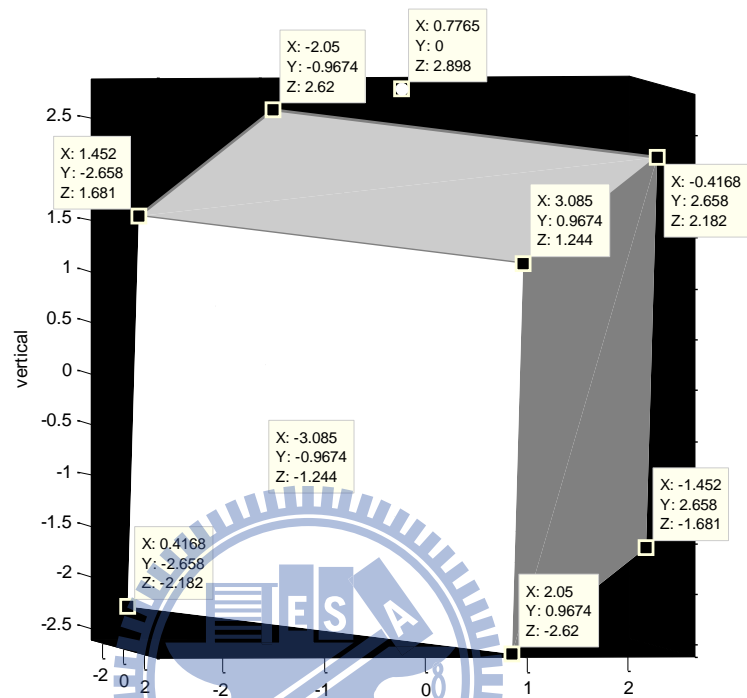


圖 72. 拍攝物體

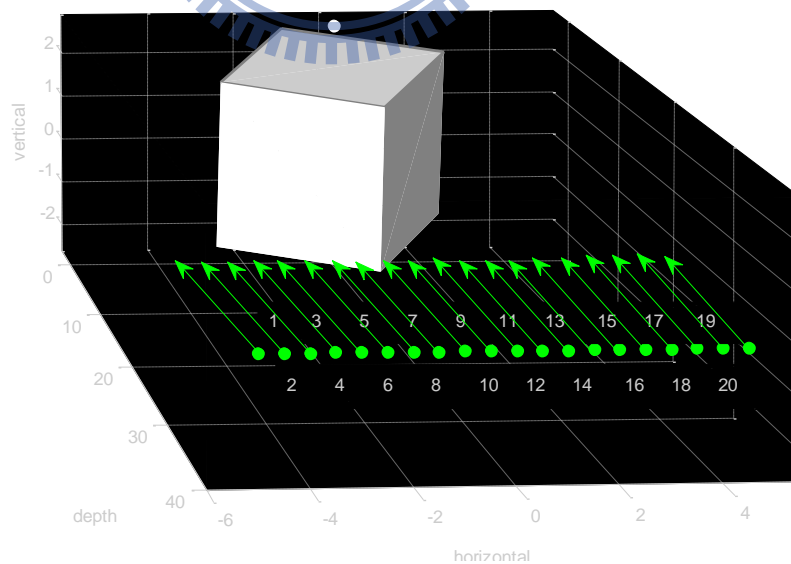


圖 73. 攝影示意圖

圖中綠色點為相機位置，相機在 40 公分處拍攝，水平視場角 ϕ 設為 32° 。取得 20 張平面影像如表 12，由最左方取得的平面影像開始編號標記，對應圖 73 中的相機編號，括號中為其拍攝座標，單位為公分，箭頭方向為相機方向。物體平面相片的尺寸與取平面像系統所使用的水平視場角 ϕ 、觀賞距離 x 與成像放大倍率 M 有關，在此架構裡 $M=4$ ，根據 $\phi=32^\circ$ 、 $x=40\text{cm}$ 所得物體平面相片寬為 5.5cm ，高為 3.67 公分，並印在描圖紙上。

實物拍攝分為兩部分，第一部分為了實現複合式全像可以戶外取景的長處，同時考量拍攝架構過大會被地理條件限制，選擇選擇大小約 5cm 、景深 3cm 且線條簡潔的雞蛋花落花與草地當作目標，拍攝架構如圖 74 左圖，相機以腳架固定好方向，將皮尺放在地上並讓腳架兩隻腳平行皮尺以確定相機方向，以腳架一隻腳的位置為定位點拍攝個角度平面影像，由於此鏡頭微距模式無法調整視場，在此為了取得視場與物體之比例尺以皮尺與物體合拍，拍得之平片影像裁剪並做成單色影像後如表 13。表中平面影像已經做好大小比例之調整。在此物體足夠小但是受限於腳架的高度，拍攝距離為 60cm ，而觀賞距離設計為 40cm ，因此物體會被縮小 $2/3$ 倍，而兩平面影像拍攝間隔為 9cm ，在展示系統中則為 6cm ，由於圖片較小，未填滿部分皆以黑色填滿。第二部分取在室內的物體，方便在光學桌上架設相機，精準地拍攝多視角的相片。拍攝目標為橡皮擦與鉛筆，其景深約 10cm 。拍攝架構如圖 74 右圖，所拍得並裁剪好的 5 張平面影像與視場比例圖如表 14，其中相機於 60cm 拍攝，拍攝間隔為 3cm ，在展示系統中為 2cm 。

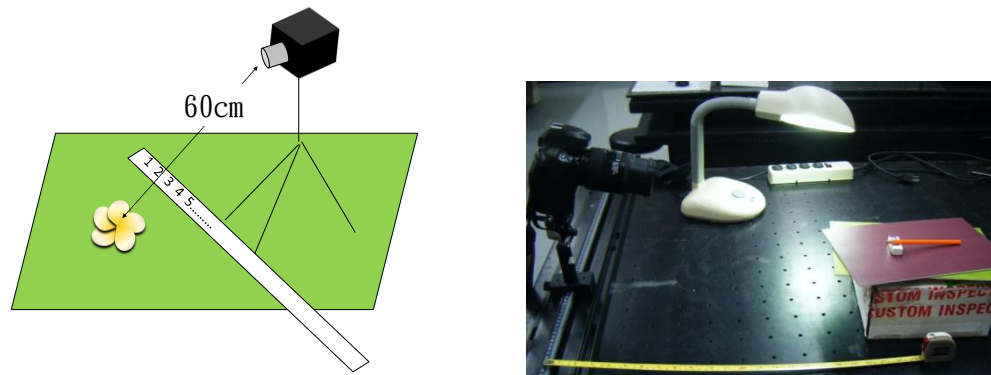
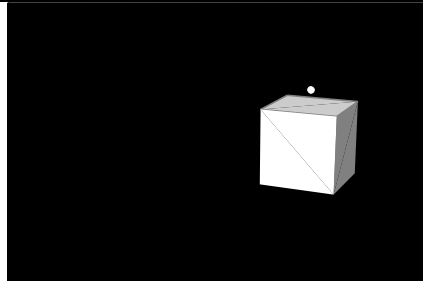
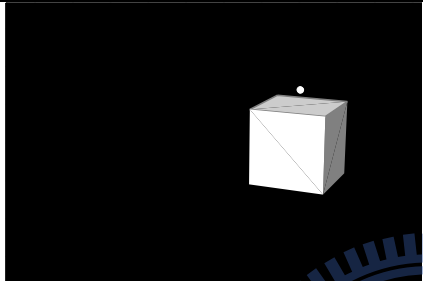
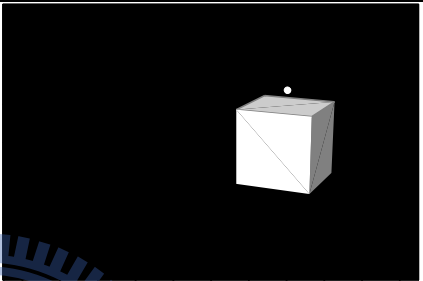
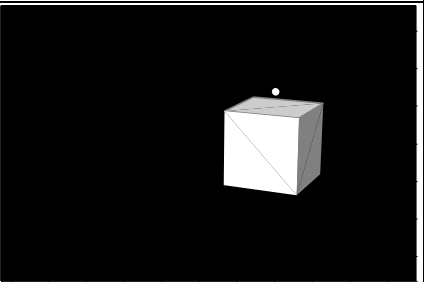
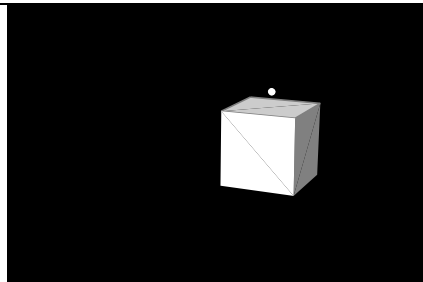

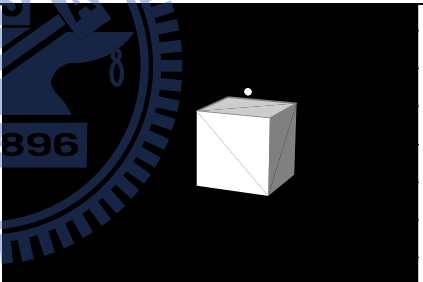
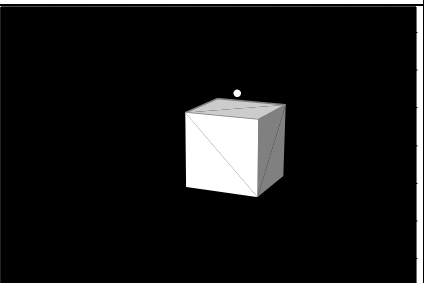
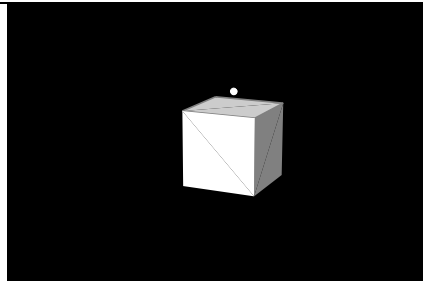
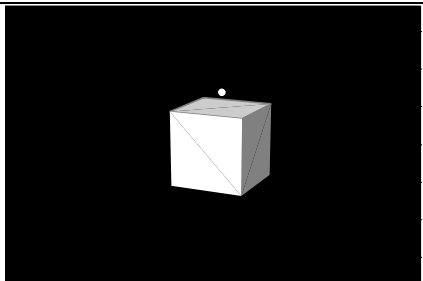
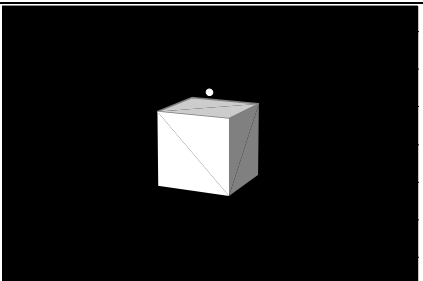
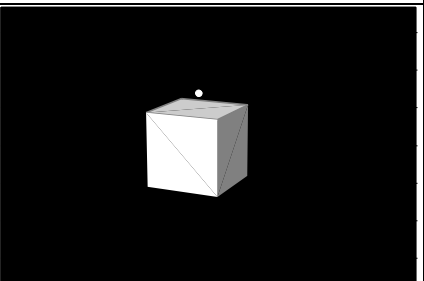


圖 74. 實物取圖架構，左圖為外景取圖架構，右圖為實驗室取圖架構

表 12. 程式模擬各角度平面相片

1(40, -5, 0)	2(40, -4.5, 0)	3(40, -4, 0)	4(40, -3.5, 0)
			
5(40, -3, 0)	6(40, -2.5, 0)	7(40, -2, 0)	8(40, -1.5, 0)
			
9(40, -1, 0)	10(40, -0.5, 0)	11(40, 0, 0)	12(40, 0.5, 0)
			

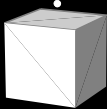
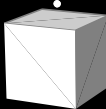
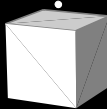
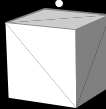
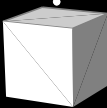
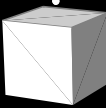
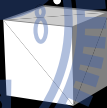
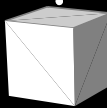
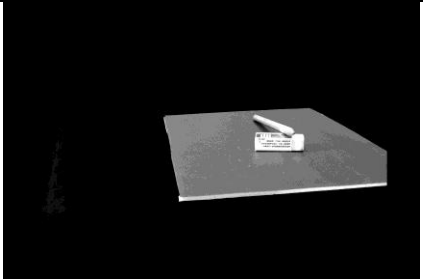
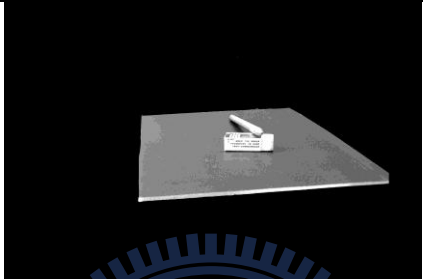
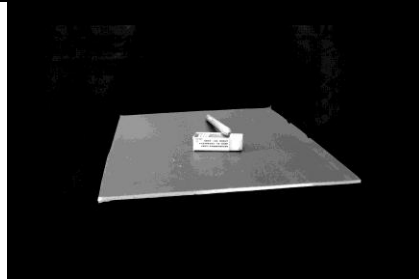
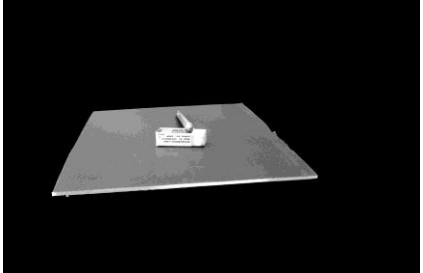


13(40, 1, 0)	14(40, 1.5, 0)	15(40, 2, 0)	16(40, 2.5, 0)
			
17(40, 3, 0)	18(40, 3.5, 0)	19(40, 4, 0)	20(40, 4.5, 0)
			

表 13. 外拍實拍取得平面影像與比例圖

左眼圖	右眼圖	比例圖
		

表 14. 實驗室實拍取得平面影像與比例圖

1(最左圖)	2	3
		
4	5(最右圖)	比例圖
		

全像記錄系統

由於全像記錄系統中，包含和展示設計一樣架構的成像系統，許多參數在展示設計已經考慮，討論過的全像記錄系統參數在此不再重複。參照圖 61 與圖 62，未決定的參數剩下平行光束寬度，其決定於物體平面相片尺寸與 H1 有效曝光面積，在此系統中要使用足以將光均勻覆蓋物體平面相片與 H1、H2 有效曝光面積的擴束透鏡組。

在系統中平面波以角度零度照射物體平面相片，物體平面相片寬為 5.5cm，高為 3.67 公分，擴束平行光直徑最小值計算為相片對角線長約 6.61cm。在此使用 40 倍的顯微物鏡與焦距 40cm、直徑 7.2cm 的透鏡搭配，做出直徑 7.2 公分的平行光。

H1 有效曝光面積亦以同樣組合，藉由設計主全像片參考光角度 $\rho_1=45^\circ$ 達到目標；H2 有效曝光面積亦是相同組合，全像片參考光角度 $\rho_2=45^\circ$ ，再以同樣規格的透鏡，貼近底片達到最大有效曝光面積。

本系統參數如表 15，填上參數之系統圖如圖 75 與圖 76。

表 15. 全像記錄系統參數

參數名稱	數值
成像透鏡焦距 f_3	10cm
物體平面相片物距 u	12.5cm
物體平面相片像距 v	50cm
主全像片參考光角度 ρ_1	45°
轉換全像片參考光角度 ρ_2	45°
擴束透鏡 f_1, f_2, f_4	$f=40\text{cm}$ ，直徑 7cm
收斂球面波透鏡 f_5	$f=40\text{cm}$ ，直徑 7cm

而實驗設計中所述，使用成像透鏡可以增加光的使用效率，減少曝光時間，以程式模擬之平面影像 5 為例，如以傳統之記錄架構(圖 37)，在平面影像前方 40cm 處放置底片，參考光與物體光總和約 0.5uW，加了成像透鏡後，底片在此拍攝架構中距離平面影像 22.5cm，所量得兩道光總和約 3.38uW，曝光時間可以減少為原來的 1/6~1/7。

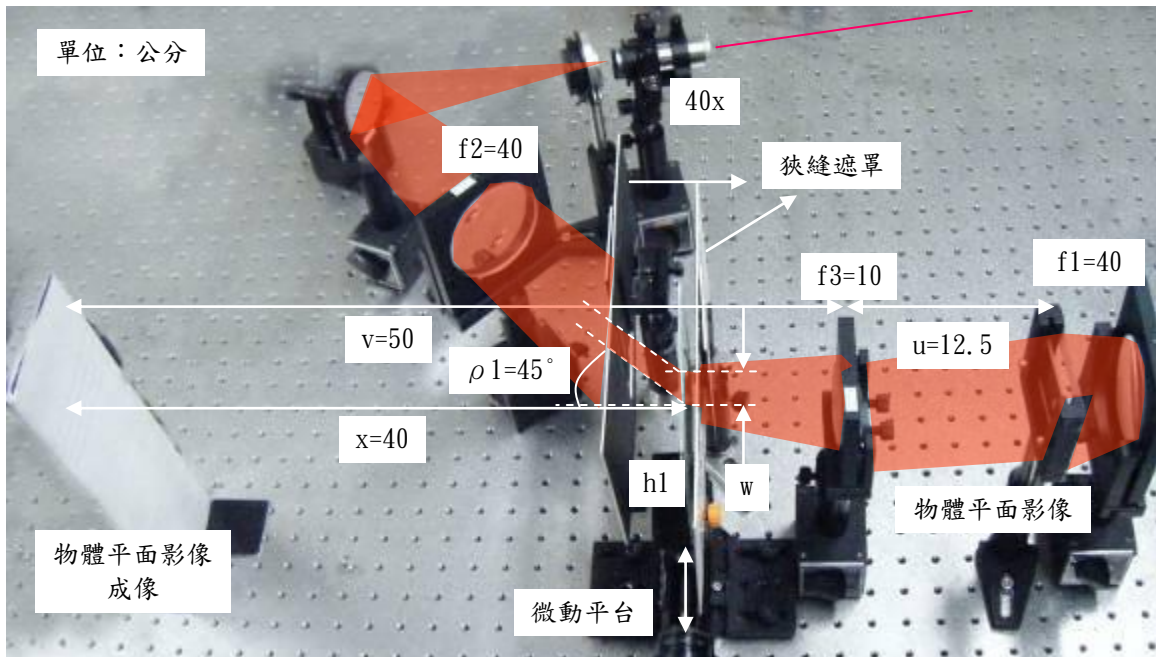


圖 75. 主全像片記錄系統圖

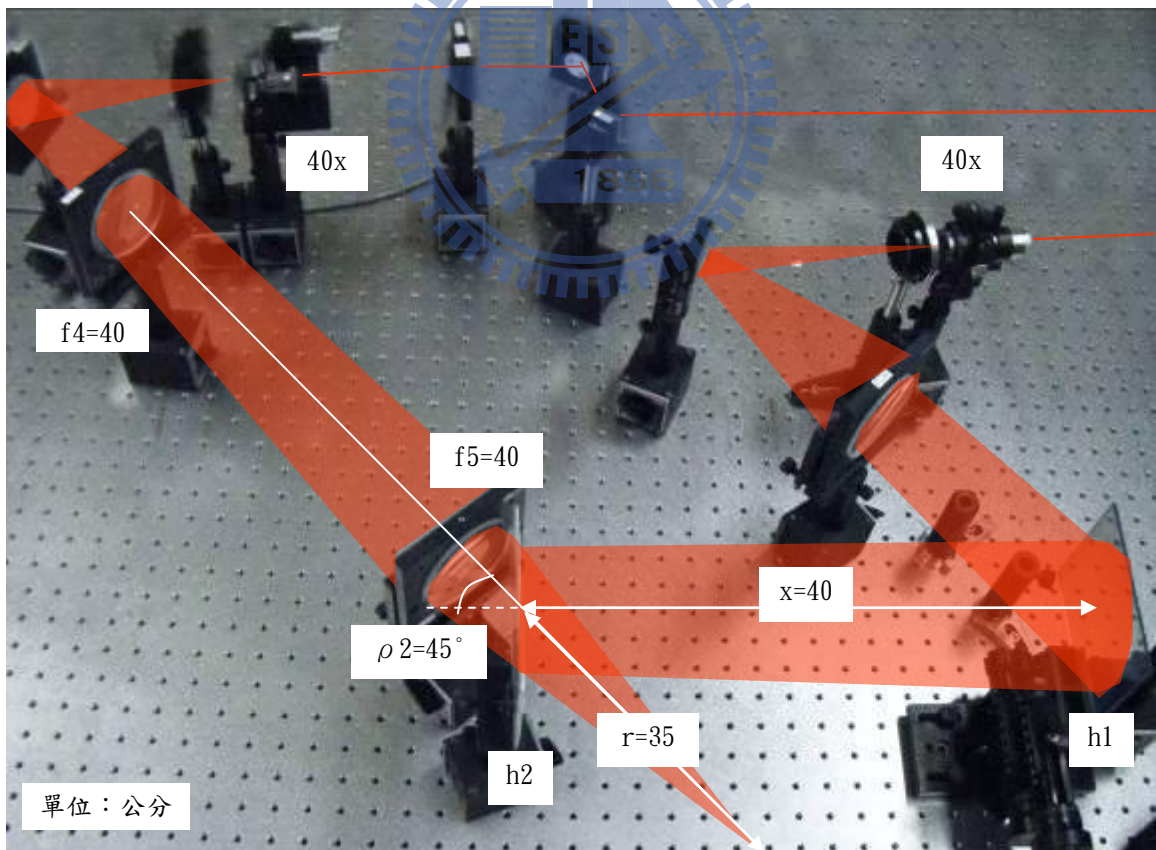


圖 76. 轉換全像片系統圖

在圖 76 中多了一個重建距離 r ，實驗記錄時也要記下所調整之收斂球面波球心位置，才知道重建時點光源應在何處，。

展示方法

展示方法如圖 77，同複合式全像原理中所述，藉由重現全像記錄時的共軛光源，讓記錄時的物體光反向傳播，做出浮出全像片的狹縫實像。

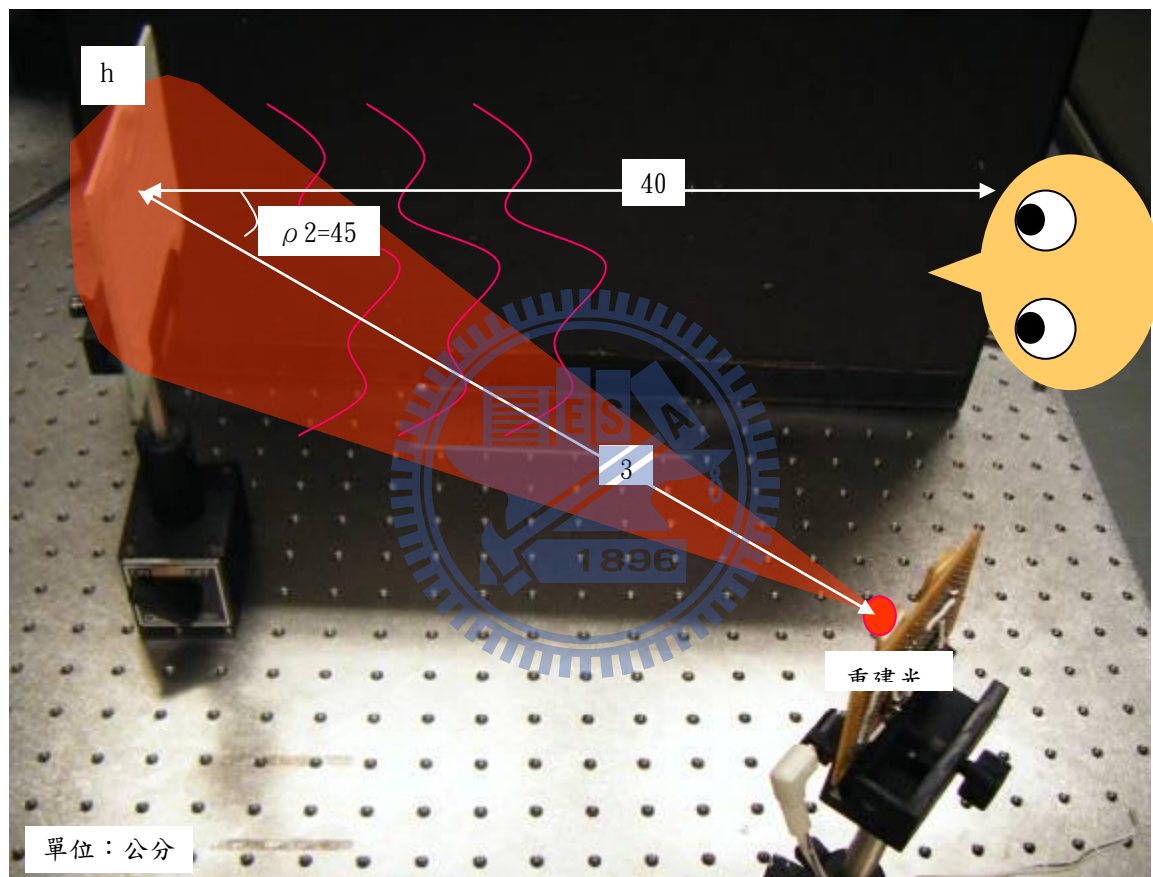


圖 77. 展示系統架構圖

4.2 實驗結果

此實驗目的為驗證此光學架構有裸眼立體系統特性，即可讓多張平面影像在空間中有不同的觀賞空間，並可以在特定觀賞距離運用視差原理合成物體的立體感。接著驗證其成像特性與預期的是否相同。

在設計完上述架構並取得平面影像後，實驗時的流程分主全像片記錄與轉換全像片記錄。

主全像片記錄流程如下：

- (a)決定要記錄的平面影像，以及每一張平面影像要在主全像片上記錄的位置與所使用的狹縫寬度。
- (b)每一張平面影像記錄前，都需先調整參考光與平面影像到達記錄底片的光強度，讓兩者強度相同，並計算該平面影像之曝光時間。
- (c)調整好平面影像之記錄位置，靜置系統 100 秒後，讓底片以所計算之曝光時間曝照。以圖 75 架構依序完成每一張平面影像之記錄。
- (d)依照沖洗流程沖洗並將之晾乾。
- (e)重建影像，觀察並記錄。

轉換全像片記錄流程如下：

- (f)將主全像片放在圖 76 架構，測量主全像片重建影像在成像面之強度，調整參考光強度與之相同，計算曝光時間。
- (g)依照沖洗流程沖洗必將之晾乾。
- (h)重建影像，觀察並記錄。

4.2-1 實驗一：裸眼立體系統特性驗證

驗證裸眼立體系統特性的方法，為做一由兩張平面影像合成的複合式全像，觀察兩影像光場在空間中的分佈情形。首先從表 13 取拍攝位置相距 6cm 的兩張平面影像，在此選 5 與 17 號，分別給左眼與右眼觀看。接著要決定主全像片上的曝光位置，根據兩平面影像的拍攝相對位置，讓兩狹縫中心相差 6cm， w 定 5cm，讓兩狹縫間隔 1cm，如此一來，兩光場有間隔，光場的分布比較容易觀察。此次實驗的曝光條件如表 16。沖洗晾乾後，兩平面影像在主全像片上之記錄情形如圖 78 所示，光點間距約 5.3cm，是由於在物平面影像有離軸所致，不影響立體結果的觀察。

表 16. 雙視窗之主全像片曝光記錄

	物體光能量 (uW/cm^2)	參考光能量 (uW/cm^2)	曝光時間(s)
平面影像 5	1.697	1.69	23.623
平面影像 17	1.66	1.632	24.301

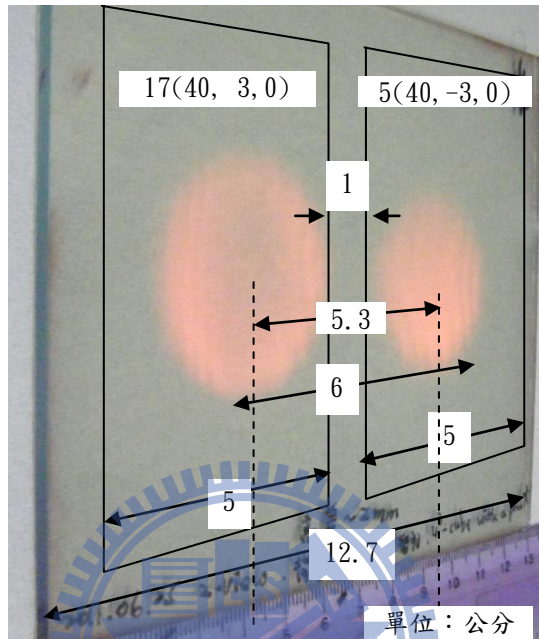


圖 78. 雙視窗之主全像片平面影像曝光位置與沖洗結果

將此全像片放回主全像片的記錄架構，以參考光或共軛參考光重建之，並在全像片前不同距離處放置觀察屏幕，分別觀察其光場，觀察架構如圖 79，結果如表 17。

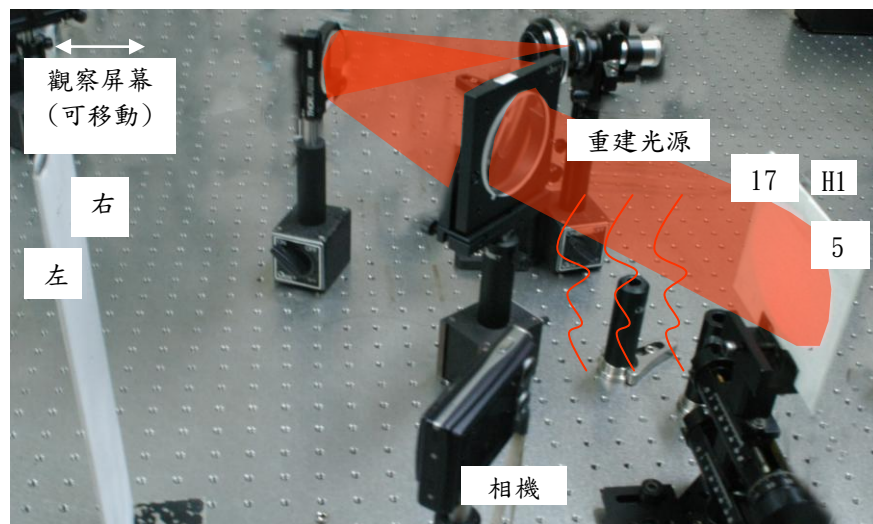
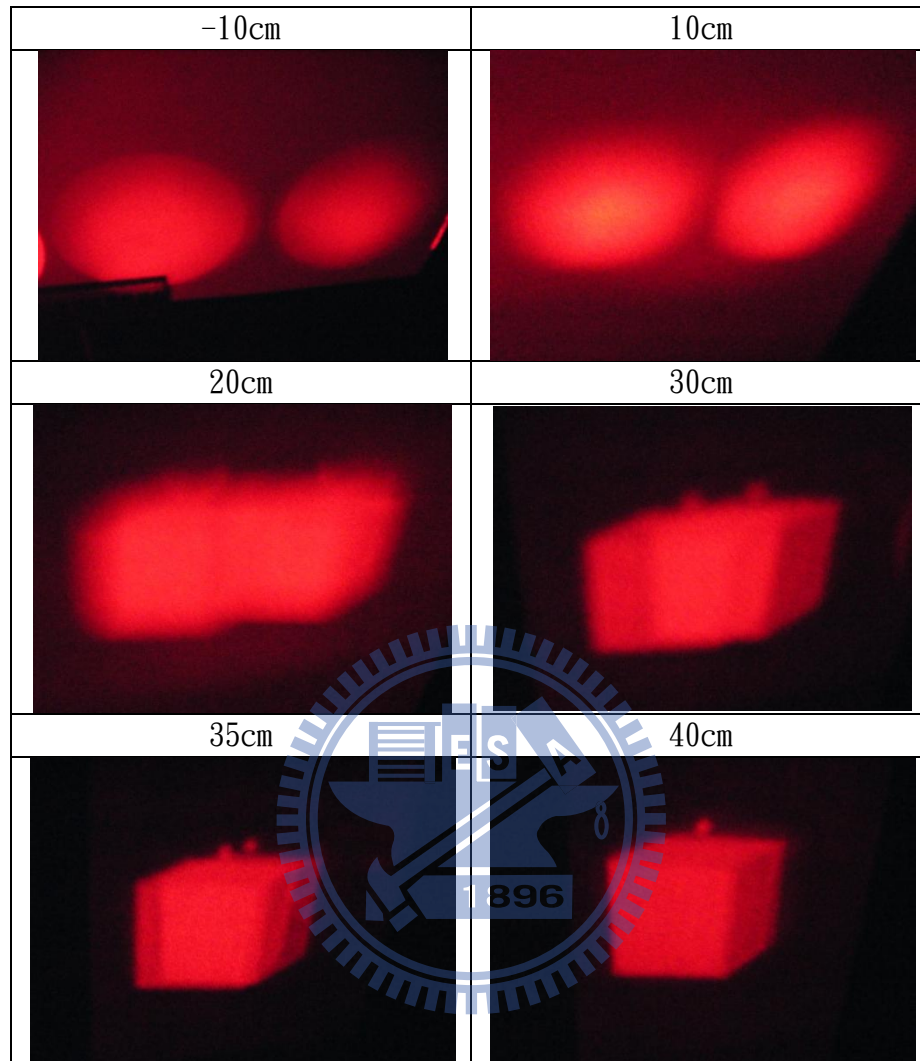


圖 79. 觀察架構

表 17. 觀察裸眼立體特性，在不同距離觀察主全像片之光場



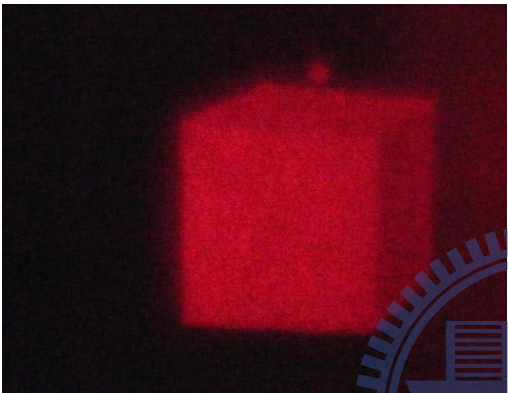



觀察結果中標記 10cm、20cm、30cm、35cm 與 40cm 的影像是以原參考光重建，標示-10cm 的影像是將底片水平翻轉，同等以共軛參考光重建並觀察其另一面距離 10cm 處之光場，此時平面影像 5 與 17 的左右會對調。在-10cm 處，會看到清楚的透鏡孔鏡。觀察 10cm 到 40cm 的光場，可以觀察到兩個平面影像同時經由透鏡逐漸成像的過程：在 10cm 處有兩個佔據不同空間的光點，當觀察屏幕逐漸往平面影像成像處(後方 40cm)移動，兩光點會漸漸靠近、變成方形，最後在主全像片後方 40cm 處兩張圖形成清晰成像，且圖中零景深的原點標記會重疊。

此時如果輪流在主全像片後 10cm 處遮蔽右方或左方光點，即只讓左方或右方光點的能量通過，會看見成像如表 18，左影像與右影像分別為平面影像 17 與 5。由此可證實，在形成清晰成像前的兩個光點分



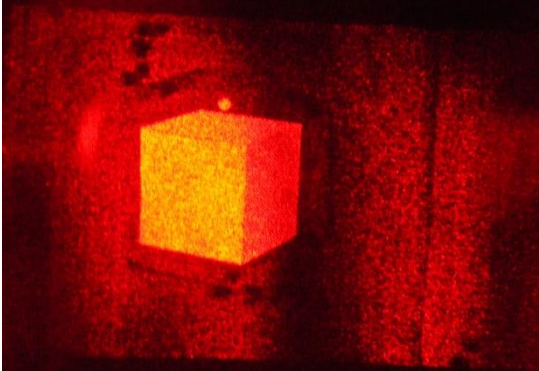

別為平面影像 17 與 5 的光場，此架構具有裸眼立體系統的特性，即它有能力將在同一空間位置之不同平面影像的光場，傳播到空間中不同位置。同時可發現，單一平面影像之光場在空間中不會呈現週期性分布，因此不會有錯覺視域效應的產生。

表 18. 裸眼立體系統效果驗證

讓左邊光點通過	讓右邊光點通過
	
	

如果將相機置於表 17 中標示-10cm 的左右光點中，分別可以看到的影像如表 19。

表 19. 主全像片中的兩個影像

相機至於左光點中	相機至於右光點中
	
	

此時如果觀賞者面向全像片，即讓右眼在左方光點，左眼在右方光點中，可以感覺視差合成的立體感，但是由於和拍攝時的相機位置不同，所認知的景深和設計有些許差距。且此時觀賞者必須和全像底片十分接近(10cm)，觀賞不方便且不夠舒適，因此利用翻拍成轉換全像片，達到增加觀賞舒適感與重建正確立體感的目的。

根據實驗設計，主全像片的清楚成像面(40cm)處是接下來轉換全像片材料要放置的位置，依照圖 76 的拍攝架構拍攝。此次記錄之曝光條件以表 20 記錄之。

表 20. 雙視窗之轉換全像片曝光記錄

參考光能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	重建影像能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	曝光時間(s)
0.725	0.7	45.14

沖洗晾乾後之全像片如圖 80：



圖 80. 雙視窗之轉換全像片沖洗結果

在此將之放在圖 77 的展示系統中重建，並在其前方不同距離處放置觀察平面，觀察其光場分布情形，觀察架構如圖 81，結果如表 21。

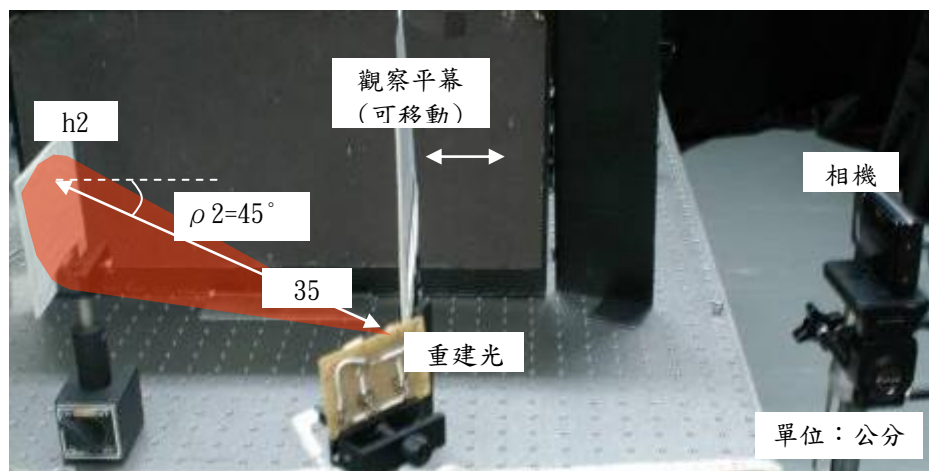


圖 81. 觀察架構


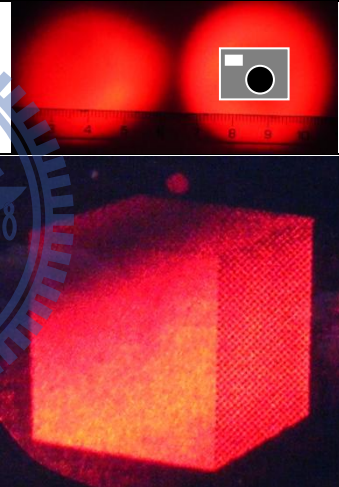
表 21. 雙視窗之轉換全像片觀察結果

屏幕位置	光場分布記錄
30cm	
40cm	
50cm	
75cm	

由實驗證實為兩平面影像各自光場的兩光點，它們由轉換全像片出發時在空間中位置重疊，而在距離轉換全像片 30cm 處兩光場在空間中的路徑開始分開，在 75cm 處再次有重疊。表示相鄰狹縫間隔 1cm 時，平面影像光場分開傳播的距離約 45cm，表示在翻拍前，不用緊鄰主全像片也有機會讓兩眼看到不同影像，但是由表 20 也可發現，距離越遠，光點越大能量越分散，之間的距離也越大，超出人類的雙眼間距，且因觀賞距離不正確會複合錯誤的立體感，因此還是需要翻拍。

在此重建情形下，將相機置於轉換全像片前 30cm~75cm 的左邊或右邊光點中，分別會看到的影像如表 22，由於轉換全相片記錄時只有方塊部分有參考光，其背景沒有被記錄下來。

表 22. 轉換全像片中的兩平面影像

相機置於左邊光點中	相機置於右邊光點中
	

此時如果觀賞者面向全像片，即讓右眼在右方光點，左眼在左方光點中，可以觀察到此實驗所設計的立體感。由表 21 可發現，隨著觀察平面移動，左右平面影像光場之間的距離隨之改變，觀察者可依個人的雙眼間距稍稍調整觀看的距離，立方體會有些微的形變但不易察覺。觀看時在距離全像底片約 40cm 處找到如表 20 的兩光點，先閉上右眼，讓左眼找到可以看見清楚完整影像的位置，接著換閉起左眼、張開右眼，如果此時右眼所見影像左方模糊請稍稍移近全像底片，如果是右方模糊請稍稍遠離全像底片，直到找到兩眼皆看到清楚平面影像的距離，同時張開雙眼即可感覺立體感。

4.2-2 實驗二：成像特性驗證

除了已證實沒有錯覺視域效應，還要驗證光場傳播距離與其分布寬度的關係，以及疊影效應與水平位移的關係。在此以一含 10 個平面影像、觀景窗連續的複合全像片來驗證。此實驗中選擇了模擬平面影像編號為偶數的 10 張影像， w 為 1cm，曝光條件以表 23 記錄。沖洗晾乾後在主全像片上之記錄情形如圖 82，記錄位置寬皆為 1cm、彼此緊密排列，共有 10 個，兩側的重建效率較差，有效觀景窗只有 8 個，猜測原因是狹縫沒有固定好，因微擾導致干涉條紋品質不佳。

表 23. 10 觀景窗之主全像片曝光條件記錄

	物體光能量($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	參考光能量($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	曝光時間(s)
平面影像 2	1.594	1.591	25.118
平面影像 4	1.485	1.498	26.817
平面影像 6	1.669	1.690	23.817
平面影像 8	1.556	1.574	25.563
平面影像 10	1.626	1.632	24.555
平面影像 12	1.485	1.488	26.909
平面影像 14	1.520	1.555	26.016
平面影像 16	1.414	1.402	28.410
平面影像 18	1.450	1.440	27.682
平面影像 20	1.344	1.315	30.086

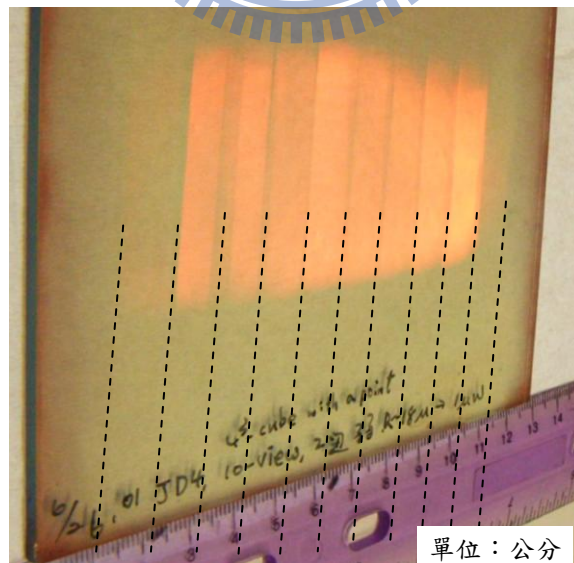


圖 82. 10 觀景窗之主全像片平面影像曝光位置與沖洗結果

將圖 82 的主全像片以圖 76 的架構翻拍成轉換全像片，其曝光條件以表 24 記錄，沖洗結果如圖 83。由於攝影時各影像的觀景窗很接近，在白光下稍稍轉動全像片，很容易一次拍攝到兩個平面影像。

表 24. 10 觀景窗之轉換全像片曝光條件記錄

參考光能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	重建影像能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	曝光時間(s)
1.2519	1.33	30.985

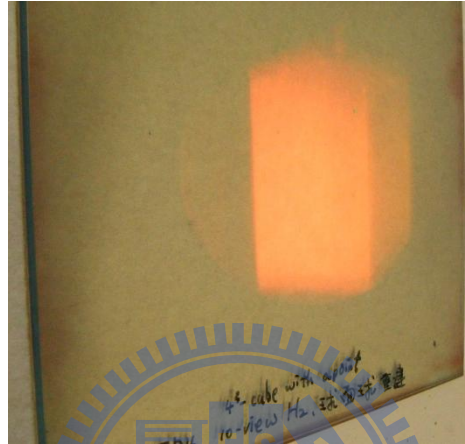


圖 83. 10 觀景窗轉換全像片沖洗結果

根據 3.2 結實驗架構設計，轉換全像片所重建之各平面影像的光場形狀應如圖 65，然而在此實驗中，由於翻拍轉換全像片時只有記錄平面影像包含物體的局部面積，其面積小於主全像片上狹縫佔據的總面積，因此光場圖應為圖 84，即光場面積隨著與轉換全像片的距離增加逐漸變大。

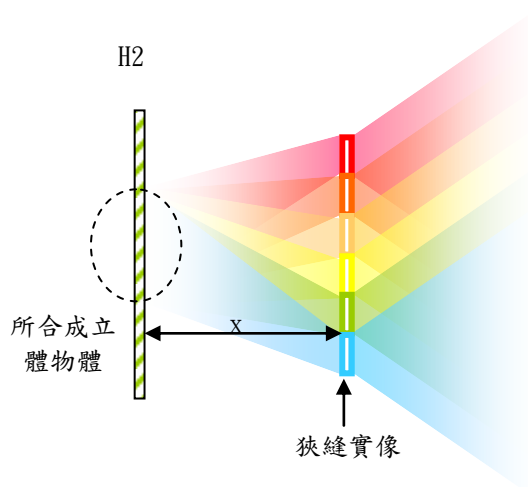
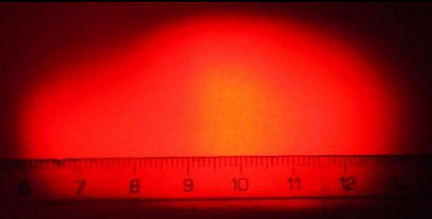
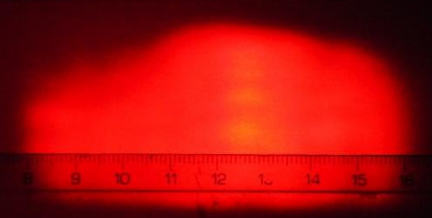



圖 84. 實驗架構拍攝預測

以圖 81 架構觀察與轉換全像片不同距離處之光場面積，結果如表 25，和預測有相同的趨勢，且在距離 40cm 處光場寬為 8cm。

表 25. 10 觀景窗轉換全像片，在不同距離觀察轉換全像片之光場面積

30cm	
40cm	
50cm	

接著拿掉觀察屏幕，以相機在光場中對著轉換全像片拍攝。首先在距離轉換全像片 40cm 處找到一清楚影像，以此標視為水平移動原點，接著一次水平移動 0.5cm 拍攝，共拍攝 5 張影像，觀察架構如圖 85，其結果如表 26。觀察零景深標示點，會發現當移動 0.5cm 時，此點會錯開，但是當移動為 1cm 的整數倍時，則不會錯開。觀察圖形，會發現由於兩張圖視差角度很小，即使有疊影效應也很難察覺。在此由於為水平方向的複合，標示點錯開應只有水平方向，有垂直方向錯開是在記錄時，各平面影像高度沒有對其所致。

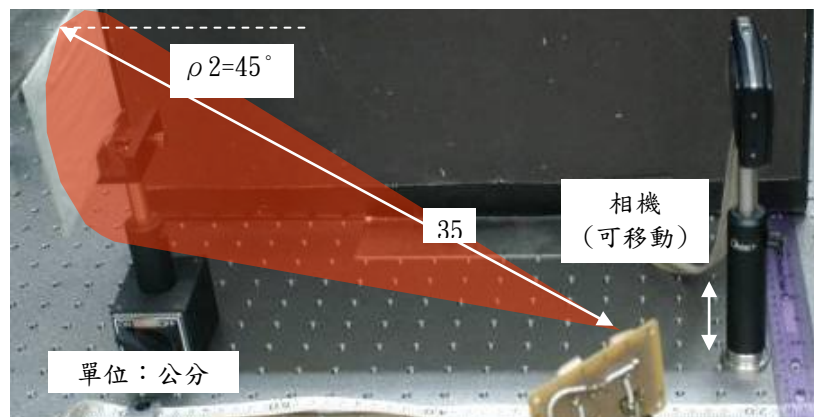
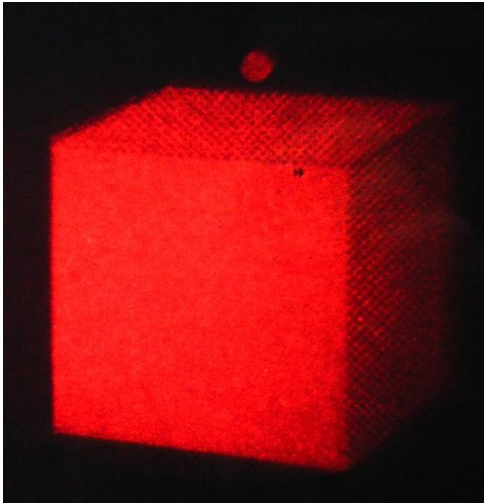
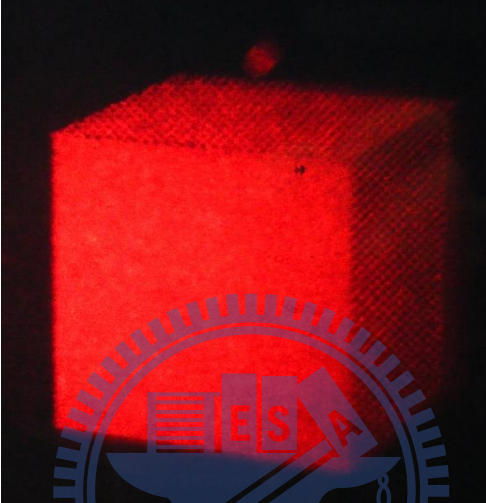
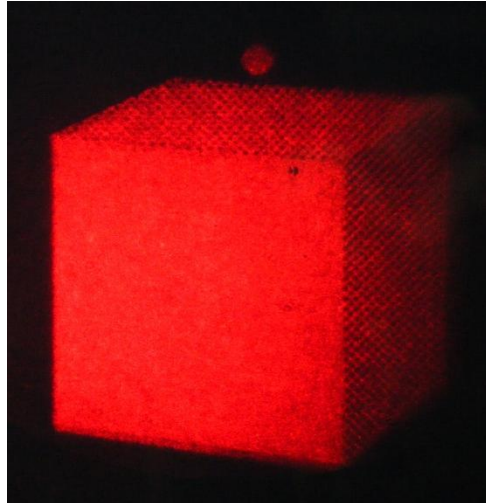
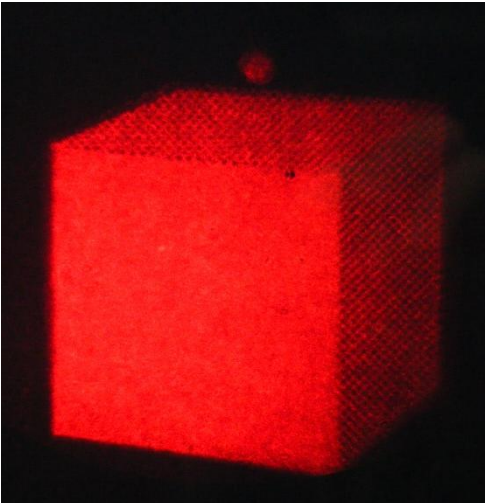
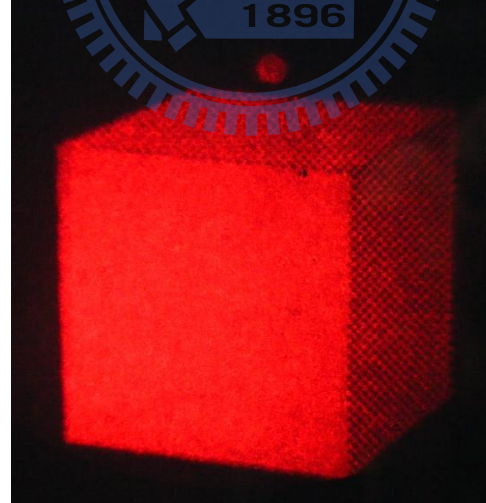


圖 85. 10 觀景窗轉換全像片疊影效應觀察架構

表 26. 疊影效應觀察結果

0	0.5	1
		
1.5	2	
		

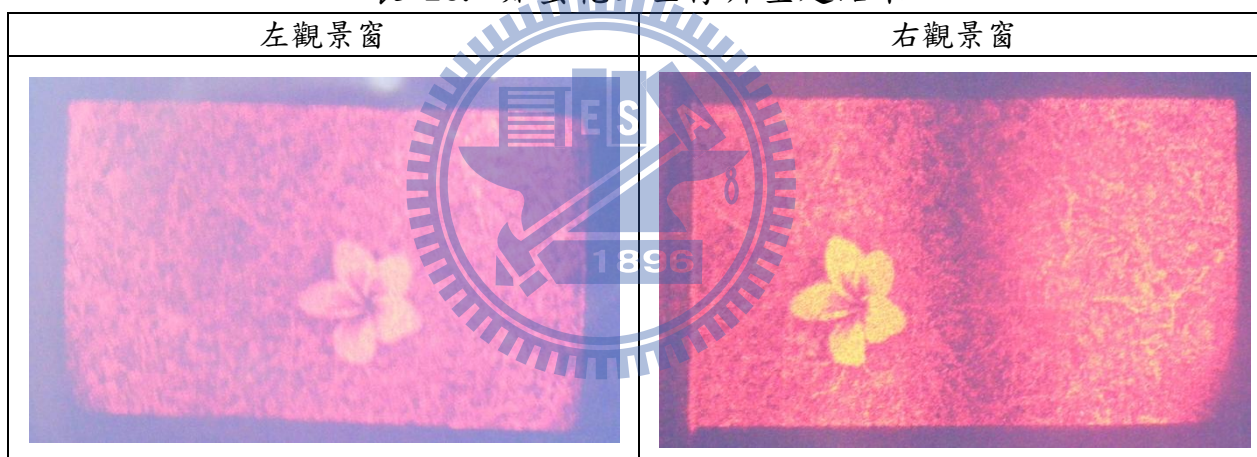
4.2-3 實驗三：實物拍攝

實物拍攝第一部分，以表 13 中的左眼圖與右眼圖拍攝複合式全像， w 設計 6cm，兩狹縫間隔 6cm，以圖 75 架構拍攝主全像片，曝光條件如表 27。可發現和電腦模擬平面影像相比影像的透光部分較多，因此曝光時間可以較短。主全像片兩觀景窗看到的影像如表 28，以能量測量儀測得兩影像中花朵強度比例約 8:9，表中強度不同為觀察時相機測光不同所致。影像中黃色是相機側光過鋪造成的，實際以像皆為紅色。

表 27. 雞蛋花主全像片曝光記錄

	物體光能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	參考光能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	曝光時間(s)
左平面影像	2.77	2.75	14.493
右平面影像	2.448	2.404	16.488

表 28. 雞蛋花主全像片重建結果

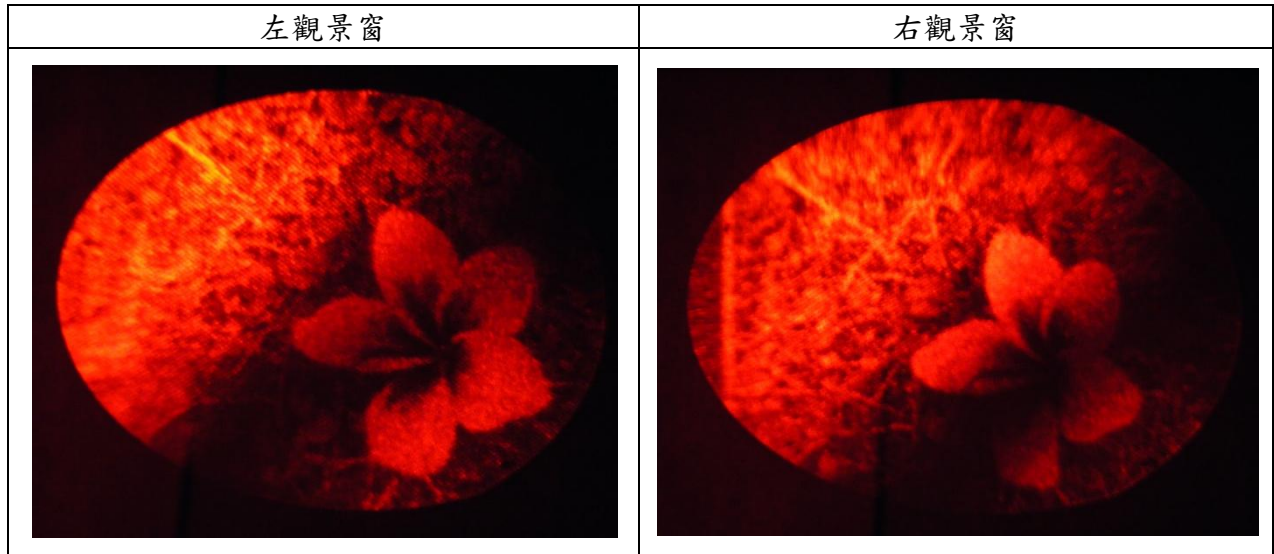


接著將主全像片以圖 76 翻拍，曝光條件如表 29，以圖 81 觀察架構之兩觀景窗拍得兩影像如表 30。可發現由於主全像片上相同的面積，卻要重建大面積的影像，會將能量分散，而轉換全像片因為參考光光源面積有限，重建之影像只有主全像片的局部，表示主全像片過大的重建影像並不能為翻拍時所用，導致翻拍時記錄時間較長，此部分應在處理平面影像時加以改進，將會超出轉換全像片曝光面積之影像去除。而轉換全像片中右觀景窗因為物體在影像中過於偏左，導致重建視場中有相片邊緣，此在拍攝時應加以注意，即設計要拍攝環境時總視角必須有所取捨。

表 29. 雞蛋花轉換全像片曝光記錄

參考光能量 (nW/cm^2)	重建影像能量 (nW/cm^2)	曝光時間(s)
475	460	85.562

表 30. 雞蛋花轉換全像片重建結果



實物拍攝的第二部分，以表 14 中比例圖以外的平面影像拍攝複合式全像，w 設計為 2cm，狹縫中心間隔 2cm，共 5 個影像，以圖 75 架構拍攝主全像片，曝光條件如表 31。

表 31. 鉛筆與橡皮擦主全像片曝光記錄

	物體光能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	參考光能量 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	曝光時間(s)
平面影像 1	1.488	1.534	26.469
平面影像 2	1.546	1.534	25.974
平面影像 3	1.632	1.626	24.553
平面影像 4	1.459	1.485	27.173
平面影像 5	1.344	1.344	29.767


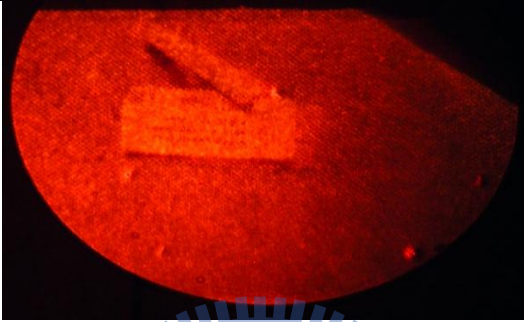
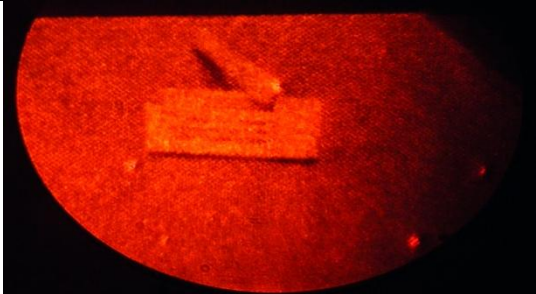
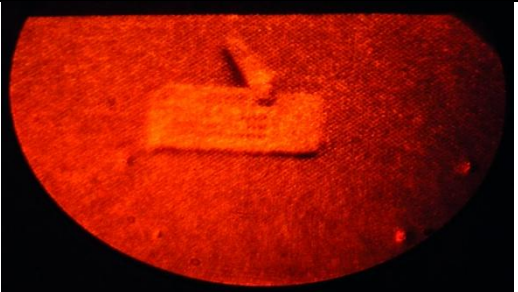

接著將主全像片以圖 76 翻拍，曝光條件如表 32，而 5 個重建影像對照平面影像編號結果如表 33。

圖中影像的對比度不佳，導致物體邊緣搜尋不易，雖然視差量大卻因邊緣不夠銳利而立體效果不如淺景深的雞蛋花好。

表 32. 鉛筆與橡皮擦轉換全像片曝光記錄

參考光能量 (nW/cm^2)	重建影像能量 (nW/cm^2)	曝光時間(s)
473.154	473	84.553

表 33. 鉛筆與橡皮擦轉換全像片重建結果

1		2		3	
4		5			

五、結論與未來工作

在此論文中，經由人因方面、全像光學理論的探討，模擬以及架構設計的過程，討論出複合式全像在實作中各設備的規格如何影像展示結果，並提供一個設計、拍攝複合式全像的流程方法；其中在全像步驟中增加成像透鏡，在此實驗條件下可以將曝光時間縮短至約為原本的 $1/6$ ，然而透鏡的尺寸會影響影像垂直方向的觀賞自由度，這是增加透鏡的缺點，但是同時，在錯誤垂直觀賞位置會看見的錯誤合成立體影像將不會被看見，這視其優點。原理中，推導出複合式全像與市面上立體平面顯示系統的差異有以下幾點：

- (a) 複合式全像所記錄的是平面影像的傳播光場，不一定是平面影像。
- (b) 藉由翻拍的手法，可以移動可用景深範圍，即讓顯示螢幕(轉換全像片)有更廣的深度表現範圍。
- (c) 複合式全像利用狹縫控制記錄時底片的記錄位置，來指定一張平面影像的觀賞位置與方向，每一個狹縫都只對一張平面影像的光場作用，不同於空間多工的立體顯示器一個狹縫或透鏡要對多張平面影像作用。
- (d) 複合式全像和空間多工的裸眼立體顯示器一樣，同時呈現多個畫面，但這些畫面如同時間多工的裸眼立體顯示器，是完整的畫面而沒有被切割而降低解析度。

而經由實驗，證實了複合式全像有裸眼立體顯示系統特性：可以把原本在同一空間位置之各平面影像光場，傳遞至不同空間的能力。同時藉由觀察其光場的分布，可知其幾個顯示特性：

- (a) 各平面影像之光場空間位置會隨著距離變化，表示此立體顯示技術有特定的觀賞距離。
- (b) 一個平面影像之光場在空間中沒有週期性，表示此立體顯示技術不會有錯覺視域效應。
- (c) 在最理想的觀賞距離有仍可能會看到疊影效應，但因相鄰觀景窗之平面影像間差距甚少，並不易察覺。

與市面上裸眼平面式立體顯示技術比較，除了高解析度是由於顯示媒材特性，沒有錯覺視域效應以及更廣的深度表現範圍，是以全像特性才能表現出的優點。然而由實驗可知其製作流程之繁複，加上記錄干涉條紋之製程環境較嚴格，如何將此自動化、準確控制製程環境是此技術邁向普及必須克服的難題。



參考文獻

- [1]張明仁，「即時立體影像擷取與實體重建技術之研究」，碩士論文，理學院應用科技學程，2010。
- [2]劉榮政，「平面螢幕之立體影像設計」，碩士論文，國立中央大學光電科學研究所，2001。
- [3]<http://kheresy.wordpress.com/2009/11/27/%E7%AB%8B%E9%AB%94%E9%A1%AF%E7%A4%BA%E6%8A%80%E8%A1%93%E7%B0%A1%E4%BB%8B%E4%B8%80%E3%80%81%E5%8E%9F%E7%90%86%E3%80%81%E6%8A%80%E8%A1%93%E5%88%86%E9%A1%9E/>
- [4] R. V. Pole, Thomas J., Watson Research Center” 3-D IMAGERY AND HOLOGRAMS OF OBJECTS ILLUMINATED IN WHITE LIGHT” , Volume. 10, Number 1, APPLIED PHYSICS LETTERS, 1966.
- [5] J.T.McCrickerd, Nicholas George,” Holographic Stereogram from Sequential Component Photographs” , California Institute of Technology, Pasadena, California 91109, 1967.
- [6] D. J. DeBitetto, Philips Laboratories,” Holographic Panoramic Stereograms Synthesized from White Light Recordings” , APPLIED OPTICS ,Vol. 8, No. 8 .1969.
- [7]http://en.wikipedia.org/wiki/Depth_perception （立體感定義）
- [8]Graham Saxby, The Science of Imaging, Institute of Physics.
- [9]<http://www.forbestvision.com/binocular-vision/>
- [10]<http://www3.hku.hk/philodep/joelau/wiki/pmwiki.php?n=Main.NagelOnSplitBrain>
- [11]孔維瑩，「裸眼式立體顯示器深度效應之人因評估」，碩士論文，國立清華大學工業工程與工程管理學系，2009。
- [12]陳國宗，「Crosstalk 對動態立體影像影響之人因評估」，碩士論文，國立交通大學電機學院電子與光電學程，2009。
- [13]Wickens, C.D., & Hollands, Engineering Psychology and Human Performance , 3rd. , J.G.(2002).
- [14]Joseph W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 3rd .2005.

- [15] Eugene Hecht, Optics, 4th. 2002.
- [16] Graham Saxby, Practical Holography, 3rd, Institute of Physics, 2004.
- [17] JD-4 (JARB) HOLOGRAPHY PROCESSING KIT.
- [18] <http://www.integraf.com/Downloads/PFG-01.pdf>
- [19] Augusto Bele´ ndez, Tarsicio Bele´ ndez, Cristian Neipp, Inmaculada Pascual, " Determination of the refractive index and thickness of holographic silver halide materials by use of polarized reflectances" .
- [20] <http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=3053>
- [21] http://phys.thu.edu.tw/~mengwen/exp-photonics/about_coherence.pdf
- [22] 許根玉教授全像術講義，交通大學光電系，2009。
- [23] Michael W. Halle, MIT Media Laboratory, "Holographic stereograms as discrete imaging systems ", To appear in SPIE Proceeding #2176 "Practical Holography VIII" (SPIE, Bellingham, WA, February 1994) paper #10 (in press).
- [24] Saleh. Teich, Fundamentals of Photonics, Wilez Interscience.
- [25] Ackermann. Eichler, Holography, Wielz-Vch.
- [26] Nouredine Zettili , Quantum Mechanics : Concepts and Applications, 2nd, Wiley, 2009.

附錄 一：雷射之可用同調長度測量

在此架設之麥克森干涉儀架構如圖 86：

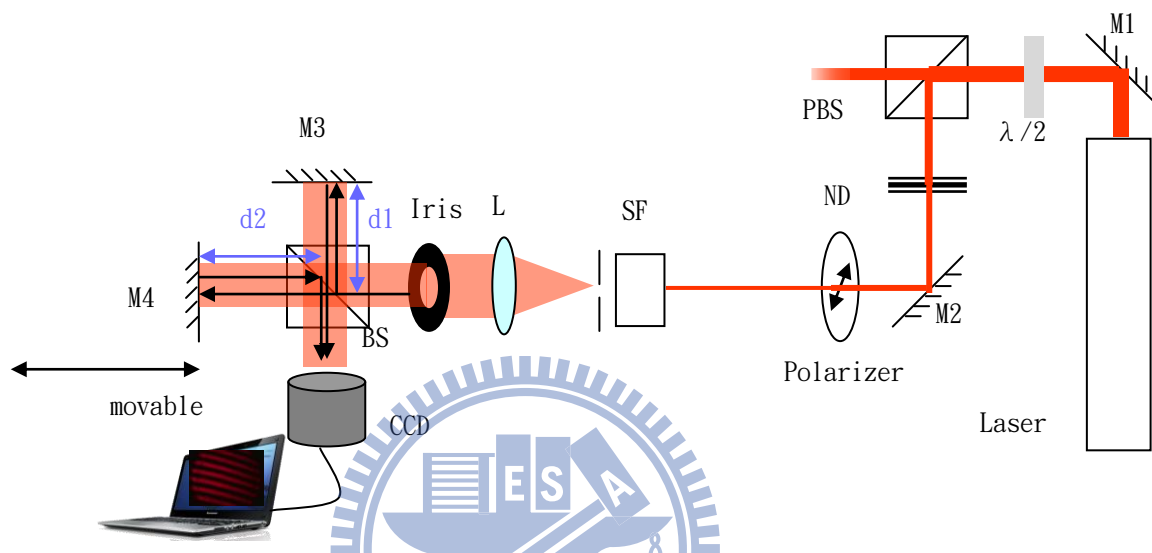


圖 86. 麥克森干涉儀。[24]

本論文用的 CCD 相機為 Microtech SV-C393-2NU CCD Camera。為了配合 CCD 相機可接受的照度，架構中空間濾波器前使用一些元件來衰減雷射光的能量。接著藉由空間濾波器與透鏡，把雷射微小的光束擴束做成平行光，並用光圈控制入射分光器的光束大小，以利干涉條紋的觀察。接下來光束才走進麥克森干涉儀架構，經過分光器將光束分成兩道，接著利用反射鏡控制兩道光走的光程差，即兩道光走的時間差，在此我固定 M3，藉著移動 M4 的位置調變整兩道光的光程差，由圖 86 所示，在此光程差表示為：

$$OPD = 2 * (d2 - d1) \quad (38)$$

實驗中每一次移動 M4，就用 CCD 相機攝影來記錄干涉條紋圖形一次。其中 M4 每次移動距離為 1cm，由光程差等於零，移動到光程差等於 80cm。

由於相片是把不同能量以不同的灰階程度(Gray-level)表示，圖形上的亮暗值並不能表示圖形該處的能量，要知道干涉條紋的對比度還須知道此相機轉換能量與灰階程度的方程式，我以圖 87 架構來得知此方程式：

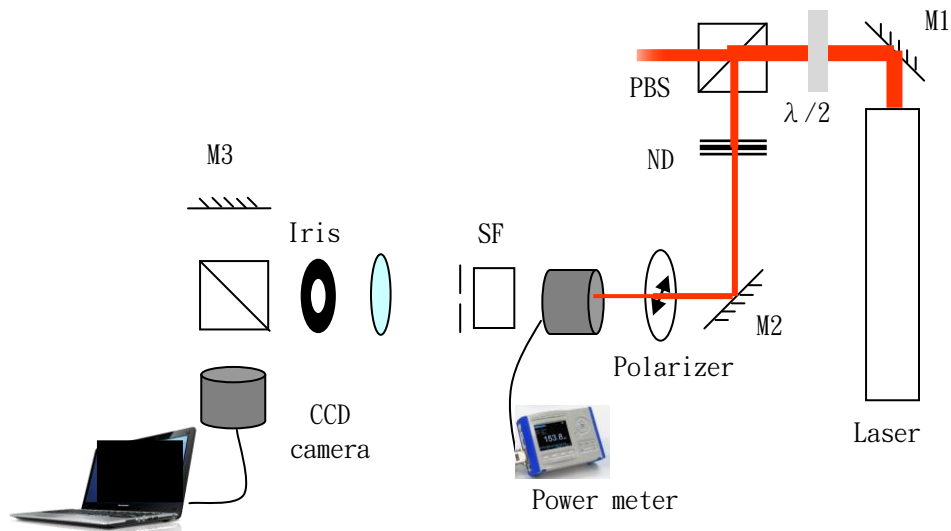


圖 87. 能量-灰階程度轉換方程式測量實驗架構圖-1

同干涉儀實驗，空間濾波器前之原件用來衰減雷射光能量。由於能量測量儀在低能量的量測值容易被環境雜訊影響而浮動，加上抵達 CCD 相機前的光太微弱，人眼無法看見，測量結果易因沒有對準光路產生誤差，實驗時，首先取得空間濾波器前與 CCD 相機前的能量比例，測量時讀取空間濾波器前的能量，再乘上轉換比例算出 CCD 相機接收到的能量。接著移開能量測量儀，讓光進入 CCD 相機產生灰階圖形。實驗結果之數據經過曲線匹配之後得到能量與灰階程度的轉換方程式： $y = 0.0001x^2 + 0.0559x + 0.0545$ ，如圖 88。

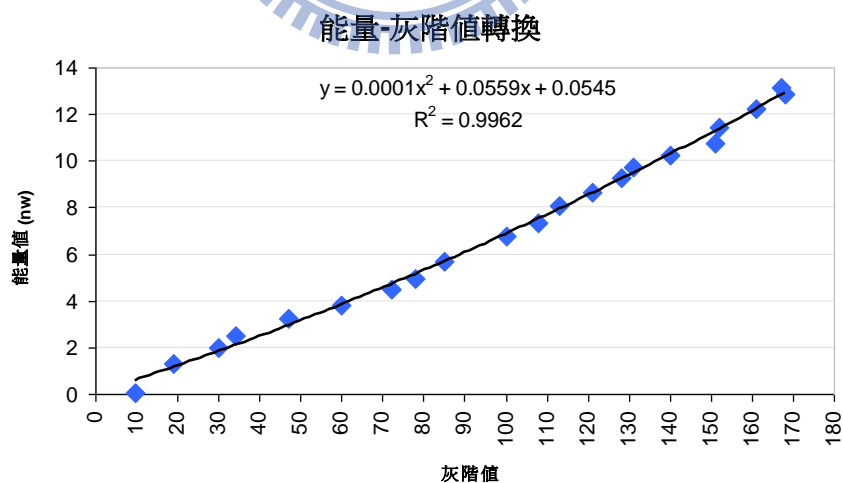


圖 88. 能量-灰階程度轉換方程式測量結果

將先前干涉條紋之圖形灰階值以此含數轉換成能量，並計算得到光程差與明視度關係曲線，如圖 43，在此再次列出，圖中之數據為三次實驗之平均。

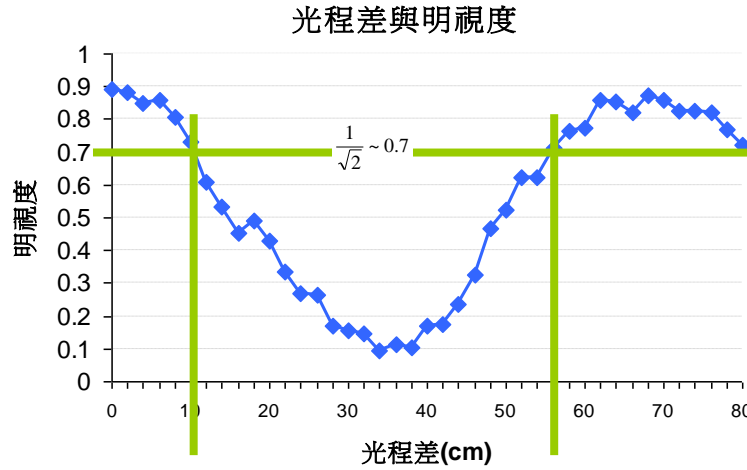


圖 43. 光程差與明視度關係曲線

一般定義明視度介於 0.707~1 的兩道光具時間同調特性[25]，並稱此段光程差為同調長度。由實驗得到此雷射同調長度約 10cm，而在光程差約為 70cm 處有明視度的另一個週期。此結果表示除了光程差在 10cm 內的選擇外，60~80cm 光程差如果對於光路設計比較方便也許是個不錯的選擇。

一般雷射同調長度(Coherence length)計算[24]公式如下：

$$L_c = \frac{C}{\Delta\nu} \quad (39)$$

其中 C 為光速， $\Delta\nu$ 為雷射的頻寬。雷射的頻寬決定於雷射縱向共振腔腔長度，與其中的增益介質。能在雷射共振腔縱向方向形成駐波的頻率，因其來回建設性干涉而有較大振幅，其駐波形式可表示[26]為：

$$\begin{aligned} \Psi_n(x,t) &= \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) * e^{-i\frac{n\pi}{L}ct + in\phi} \\ n &= 1,2,3,\dots, \frac{n\pi}{L}c = w_n, c = 3*10^8 \text{ m/s} \\ 0 &< x < L \end{aligned} \quad (40)$$

其中 L 為共振腔縱向長度，w 為角頻率，n 為正整數集合，c 為光速。我們稱不同角頻率的駐波為不同縱向模態，並以整數 n 來編號區別之，兩相鄰模態的頻率差(Longitude mode spacing)如(41)式，由雷射規格表(表 8)中之相鄰模態頻率差數據代入上式，我們可以求得共振腔長 L~34.5 公分。

$$\Delta\nu = \left(\frac{2\pi}{\pi/L C}\right)^{-1} = \frac{C}{2L} \quad (41)$$

共振腔中的增益介質會針對某些模態放大，在頻率軸上示意如圖 89：

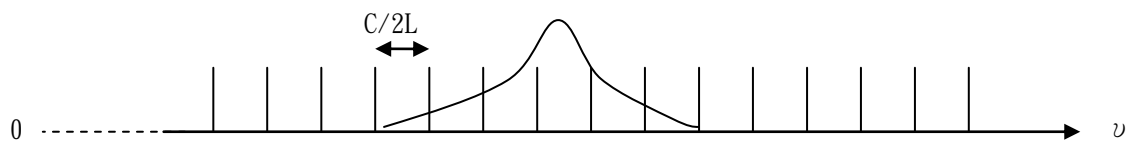


圖 89. 介質選擇模態示意圖[24]

如果介質只放大一種模態，則此雷射稱為單模雷射，其頻寬非常小，是由於共振腔的不完美而存在，其頻寬必定小於共振腔相鄰模態頻率差，而同調長度範圍如(42)式，如果不只放大一個模態則稱為多模雷射，其頻寬可視為相鄰模態頻率差的整數倍，則同調長度可表示為(43)式[25]：

$$L_{c(s)} \geq \frac{C}{\Delta\nu} = 2L \quad (42)$$

$$L_{c(m)} = \frac{C}{q\Delta\nu} = \frac{2L}{q}, q=1,2,3... \quad (43)$$

如果為單模，以上面求得之共振腔長 L 代入(42)式，得同調長度~69cm，與實驗結果不符，表示此雷射縱向非只有單模模態。與實驗結果比較，我們知道 q 約等於 7。

由此可知此雷射縱向為多模雷射，而我們所見之光為所有被增益之不同頻率波動所組成，當此光在空間中行走不同距離或不同時間時，各種不同頻率的波動會有不同之的相位，走的越遠各頻率波動之相位差越不統一。

以下整理並觀察這些模態所組成之總和波動特性。假設被增益之模態遠比基頻頻率大很多，且有 $2M+1$ 個模態備增益，則總和波動可寫成以下式子：

$$\begin{aligned}
\phi(x,t) &= \sum_{n=-M}^M \Psi_n \\
&= \sum_{n=-M}^M \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) * e^{-i\frac{n\pi}{L}ct + in\varphi} \\
&= \sqrt{\frac{2}{L}} \frac{1}{2i} \sum_{n=-M}^M e^{in\varphi} \left[e^{i\frac{n+n_0}{L}\pi(x-ct)} - e^{-i\frac{n+n_0}{L}\pi(x+ct)} \right] \\
&= \sqrt{\frac{2}{L}} \frac{1}{2i} \left\{ e^{i\frac{n_0}{L}\pi(x-ct)} \sum_{n=-M}^M e^{i\frac{n}{L}\pi(x-ct + \frac{L}{\pi}\varphi)} - e^{-i\frac{n_0}{L}\pi(x+ct)} \sum_{n=-M}^M e^{-i\frac{n}{L}\pi(x+ct - \frac{L}{\pi}\varphi)} \right\} \\
&= \sqrt{\frac{2}{L}} \frac{1}{2i} \left\{ e^{i\frac{n_0}{L}\pi(x-ct)} \frac{\sin\left[\left(\frac{2M+1}{2}\right)\frac{\pi}{L}(x-ct + \frac{L}{\pi}\varphi)\right]}{\sin\left[\left(\frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{L}(x-ct + \frac{L}{\pi}\varphi)\right]} \right. \\
&\quad \left. - e^{-i\frac{n_0}{L}\pi(x+ct)} \frac{\sin\left[\left(\frac{2M+1}{2}\right)\frac{\pi}{L}(x+ct - \frac{L}{\pi}\varphi)\right]}{\sin\left[\left(\frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{L}(x+ct - \frac{L}{\pi}\varphi)\right]} \right\}
\end{aligned} \tag{44}$$

其中有兩個反向的脈衝波，且都以 $2L$ 為週期[25]，所以它們形成之駐波也以 $2L$ 為週期，如同實驗之結果。由上面討論可知，同調長度為一光程差，在此光程差內其相位整齊度足以讓明視度大於 $1/\sqrt{2}$ ，與光源的頻寬呈現反比關係，且如果組成其頻寬的各頻率有相關性，明視度與光程差會呈現週期性。圖 90 為兩反方向脈衝波形成駐波之概念示意圖。

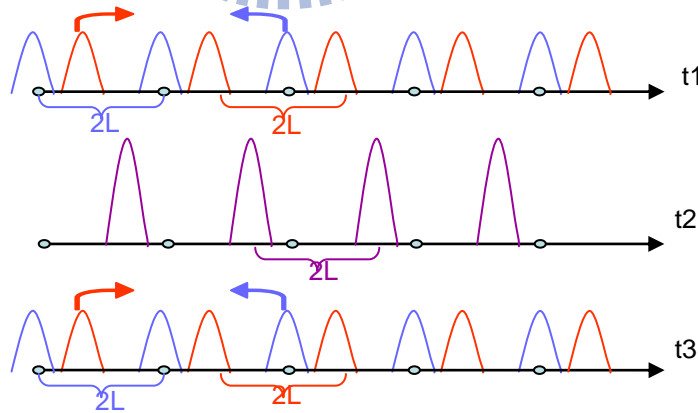


圖 90. 脈衝駐波週期性示意圖

附錄 二：光程差與所用光源之穩定性

光程差與亮暗條紋關係如下：

$$\varphi_o(x) - \varphi_r(x) = kl + 2kx \sin(\theta) = \begin{cases} m^* 2\pi & \text{--- 亮紋} \\ (2m+1)^* \pi & \text{--- 暗紋} \end{cases} \quad (45)$$

其中 x 為觀察平幕上位置, l 為光程差, k 為波數。其中亮紋可表示為(46)式; 當波長飄移: $\lambda \rightarrow \lambda + \Delta\lambda$, 亮紋位置 $x \rightarrow x + \Delta x$, 可表示為(47)式。

$$l + 2x \sin(\theta) = m\lambda \quad (46)$$

$$l + 2(x + \Delta x) \sin(\theta) = m(\lambda + \Delta \lambda)$$

$$\Rightarrow \Delta x = m \frac{\Delta \lambda}{2 \sin(\theta)} \quad (47)$$

因原本 x 位置是亮紋，其光程差 $l=m\lambda \rightarrow m=\frac{l}{\lambda}$ ，代入上式得：

$$\Delta x = \frac{l}{2 \sin(\theta)} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (48)$$

表示光程差越大，條紋的飄移量越大。如此一來表示：時間同調性佳，但是光程差大的兩道光不一定可以用來記錄全像。討論此問題有太多無法計算的量值，例如波長偏移量、條紋偏移原位置時間佔總曝光時間比例等等。以下直接以本實驗所用的紀錄底片：PFG-01，來驗證此波長偏移的不穩定是否造成影響，如果有影響，光程差較大的記錄條件會產生較差的重建效率。實驗以及實驗架構如圖 91：

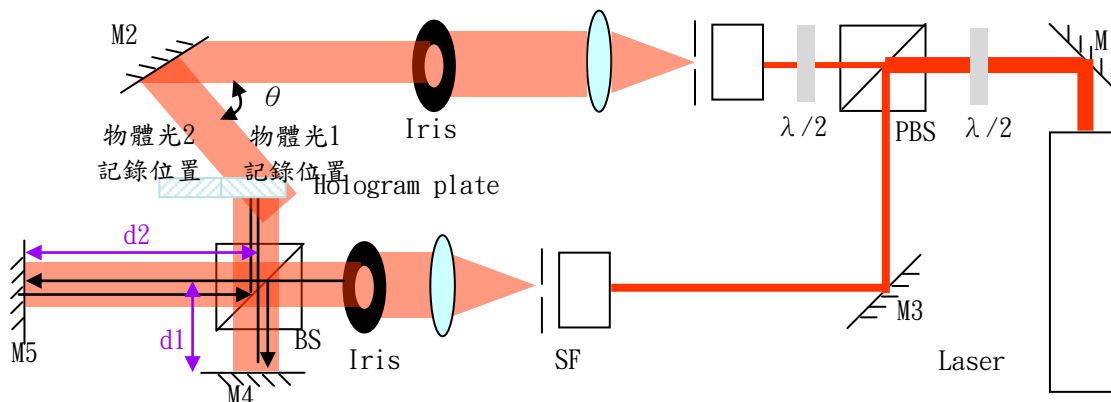


圖 91. 雷射穩定度測量記錄架構圖。 $\Theta=47^\circ$

在此上方之光路做為參考光，下方之光路藉由麥克森干涉儀架設兩道光程差為 69cm 的兩道光作為物體光。物體光方面藉由調整 d1 讓一道物體光與參考光兩者 OPD=0，稱此為物體光 1，再調整 d2 使 d2-d1 等於一倍共振腔長 34.5cm，稱此為物體光 2。在雷射出口放置半波板用來調節光的偏振比例，好讓抵達底片的兩道光有相同能量，以達最好的記錄干涉條件。在同一張底片上兩相異位置分別記錄兩物體光與參考光的干涉條紋，以同步沖洗達到相同沖洗條件。沖洗方法與配方如同 3.1-1 節，曝光條件如表 9。其中兩次曝光時，光總能量不同可能來自 M4 與 M5 反射率不同。

表 9 穩定性測量記錄條件列表

PFG-01 底片曝光記錄位置	物體光強度(uW)	參考光強度(uW)	曝光時間(s)
物體光 1 記錄位置(OPD=0)	7.008	7.118	5.663
物體光 2 記錄位置(OPD=69cm)	5.664	5.768	6.988
PFG-03M 底片曝光記錄位置	物體光強度(uW)	參考光強度(uW)	曝光時間(s)
物體光 1 記錄位置(OPD=0)	6	7	134.62
物體光 2 記錄位置(OPD=69cm)	5.15	5.19	169.145

沖洗之後，將記錄之底片在原光路架構上重建，架構如圖 92：

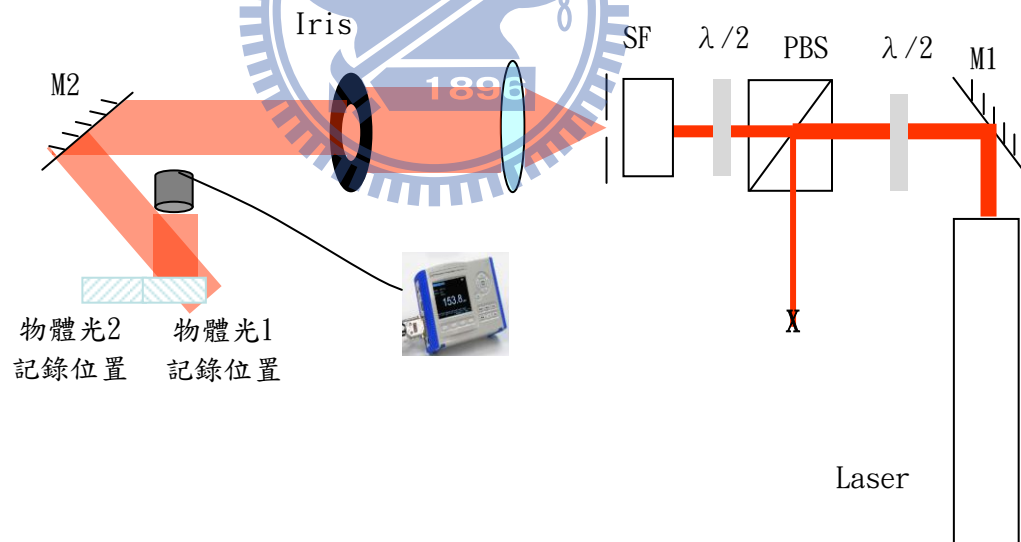


圖 92. 雷射穩定度測量重建效率架構圖。

在此將物體光擋住，一次重建一物體光記錄之底片位置，並以能量測量儀量測重建之物體光強度，量測結果如表 9，在此再次列出。其中光程差為 0 與 69cm 的重建效率相差不大，有些許不同可能是人為量能量不準確所致，可以確定在此兩種光程差在記錄時間 169 秒內，都是可以記錄並重建的。

表 9. 穩定性測量重建結果

PFG-01 底片	記錄時之曝光 時間(t)	重建光強度 (uW)	物體光強度 (uW)	繞射效率(%)
OPD=0	5.663	187.928	43	22.88
OPD=69cm	6.988	187.928	51	27.14
PFG-03 底片	記錄時之曝光 時間(t)	重建光強度 (uW)	物體光強度 (uW)	繞射效率(%)
OPD=0	134.62	164.458	4	2.43
OPD=69cm	169.145	164.458	4.8	2.92




附錄 三：以 Matla 程式模擬攝影與立體感

程式一：模擬攝影與立體感

操作此程式時，首先設定以下變數：

攝影方式((b)或(c)架構，(b)架構選擇相片方向是否忽略)，
左眼座標，
左眼相機座標，
相機視場角，
相機軌道顯示，
相片尺寸誤差，
物體尺寸。

此程式的結果有三張圖，第一張圖為物體，第二張圖為左眼位置所見相片，第三張圖為左眼與右眼合成之立體感。



```
clear
clc

%模型中，(x,y,z)座標分別為(景深,水平,垂直),物體中心在座標(0,0,0)
%攝影方式輸入
k=1;          % (b)架構：以物體為中心攝影，k=1；(c)架構：相機筆直像正前方攝影，k=0
% (b)架構是否忽略相片平面方向
ig=1;         % ig=1 忽略，ig=0 不忽略

%請輸入左眼座標位置
xe=40;        % >0
ye=-3.25;     % -5~-1.5
ze=0;         % -5~5
Xe=[xe xe];
Ye=[ye ye+0.5*13];
Ze=[ze ze];

%請輸入左方相機座標
xc=40;        % >0
yc=ye;
zc=0;         % -5~5
Xc=[xc xc];
```

```

Yc=[yc yc+0.5*13];
Zc=[zc zc];

%攝影視場角設定
ro=31;          %視場角，>0
w=2*xc*tan(ro/2); %相片寬
h=w*2/3;        %相片高

%相機軌道顯示選擇設定
d=0;            %d=1 畫，d=0 不畫

%相片大小誤差
er=1;           %相片放大比例，正確為 1，縮小<1，放大>1，恆大於零

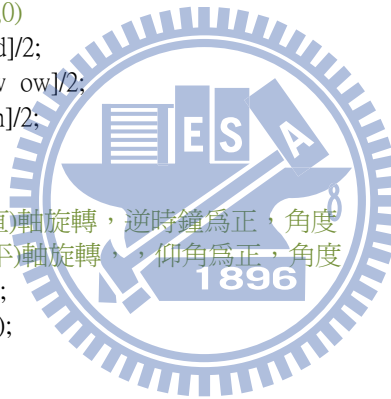
%物體尺寸設定
od=5;           %深(x)
ow=5;           %寬(y)
oh=5;           %高(z)

%原物座標圖，物體中心(0,0,0)
x=[od od od od -od -od -od -od]/2;
y=[ow -ow -ow ow ow -ow -ow ow]/2;
z=[oh oh -oh -oh oh oh -oh -oh]/2;

%物體旋轉
thida=65;       %以 z(垂直)軸旋轉，逆時鐘為正，角度
phi=15;         %以 y(水平)軸旋轉，仰角為正，角度
x1=x.*cosd(thida)-y.*sind(thida);
y1=x.*sind(thida)+y.*cosd(thida);
z1=z;
x=x1.*cosd(phi)+z1.*sind(phi);
y=y1;
z=x1.*-sind(phi)+z1.*cosd(phi);

%面物體畫圖
xx=[x(1) x(2);x(4) x(3)]; %前
yy=[y(1) y(2);y(4) y(3)];
zz=[z(1) z(2);z(4) z(3)];
mesh(xx,yy,zz)
hold on
xx1=[x(5) x(6);x(8) x(7)]; %後
yy1=[y(5) y(6);y(8) y(7)];
zz1=[z(5) z(6);z(8) z(7)];
mesh(xx1,yy1,zz1)
hold on
xx2=[x(6) x(2);x(7) x(3)]; %左
yy2=[y(6) y(2);y(7) y(3)];
zz2=[z(6) z(2);z(7) z(3)];
mesh(xx2,yy2,zz2)
hold on

```



```

xx3=[x(5) x(1);x(8) x(4)]; %右
yy3=[y(5) y(1);y(8) y(4)];
zz3=[z(5) z(1);z(8) z(4)];
mesh(xx3,yy3,zz3)
hold on
xx4=[x(1) x(2);x(5) x(6)]; %上
yy4=[y(1) y(2);y(5) y(6)];
zz4=[z(1) z(2);z(5) z(6)];
mesh(xx4,yy4,zz4)
hold on
xx5=[x(4) x(3);x(8) x(7)]; %下
yy5=[y(4) y(3);y(8) y(7)];
zz5=[z(4) z(3);z(8) z(7)];
mesh(xx5,yy5,zz5)
hold on
grid on

xlabel('depth')
ylabel('horizontal')
zlabel('vertical')
axis equal
grid on

%照照片
%左
L=Xc(1)^2+Yc(1)^2*k+Zc(1)^2;%法向量和自己內積
for a=1:8;
    k1=Xc(1)*x(a)+Yc(1)*y(a)*k+Zc(1)*z(a);%法向量和點向量內積
    t1=L/(L-k1);
    xpla(a)=Xc(1)+(x(a)-Xc(1))*t1;
    ypla(a)=Yc(1)+(y(a)-Yc(1))*t1;
    zpla(a)=Zc(1)+(z(a)-Zc(1))*t1;
end
%右
R=Xc(2)^2+Yc(2)^2*k+Zc(2)^2;
for b=1:8;
    k2=Xc(2)*x(b)+Yc(2)*y(b)*k+Zc(2)*z(b);
    t2=R/(R-k2);
    xprb(b)=Xc(2)+(x(b)-Xc(2))*t2;
    yprb(b)=Yc(2)+(y(b)-Yc(2))*t2;
    zprb(b)=Zc(2)+(z(b)-Zc(2))*t2;
end

%乘上相片大小誤差
xpl=er*[xpla(1) xpla(2) xpla(3) xpla(4) xpla(5) xpla(6) xpla(7) xpla(8)];
ypl=er*([ypla(1) ypla(2) ypla(3) ypla(4) ypla(5) ypla(6) ypla(7) ypla(8)]-Yc(1)*abs(k-1))+Yc(1)*abs(k-1);
zpl=er*[zpla(1) zpla(2) zpla(3) zpla(4) zpla(5) zpla(6) zpla(7) zpla(8)];
xpr=er*[xprb(1) xprb(2) xprb(3) xprb(4) xprb(5) xprb(6) xprb(7) xprb(8)];
ypr=er*([yprb(1) yprb(2) yprb(3) yprb(4) yprb(5) yprb(6) yprb(7) yprb(8)]-Yc(2)*abs(k-1))+Yc(2)*abs(k-1);
zpr=er*[zprb(1) zprb(2) zprb(3) zprb(4) zprb(5) zprb(6) zprb(7) zprb(8)];

```




```

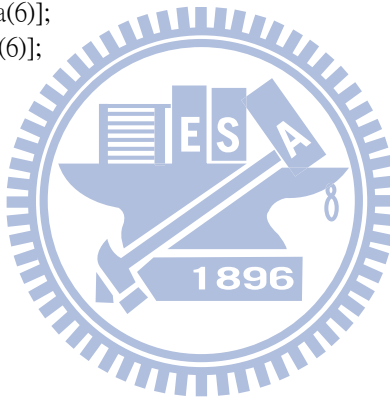
figure;
%畫左眼座標照片(如要右眼相片請在左眼位置輸入右眼座標即可)
xx=[xpla(1) xpla(2);xpla(4) xpla(3)];      %前
yy=[ypla(1) ypla(2);ypla(4) ypla(3)];
zz=[zpla(1) zpla(2);zpla(4) zpla(3)];
mesh(xx,yy,zz)
hold on
xx2=[xpla(6) xpla(2);xpla(7) xpla(3)];      %左
yy2=[ypla(6) ypla(2);ypla(7) ypla(3)];
zz2=[zpla(6) zpla(2);zpla(7) zpla(3)];
mesh(xx2,yy2,zz2)
hold on
xx3=[xpla(5) xpla(1);xpla(8) xpla(4)];      %右
yy3=[ypla(5) ypla(1);ypla(8) ypla(4)];
zz3=[zpla(5) zpla(1);zpla(8) zpla(4)];
mesh(xx3,yy3,zz3)
hold on
xx4=[xpla(1) xpla(2);xpla(5) xpla(6)];      %上
yy4=[ypla(1) ypla(2);ypla(5) ypla(6)];
zz4=[zpla(1) zpla(2);zpla(5) zpla(6)];
mesh(xx4,yy4,zz4)
hold on

ylabel('horizontal')
xlabel('vertical')

%畫相片邊界
if k==1
    % (b) 架構
    thida=atan(Xc(1)/Yc(1));
    plx=[w/2*cos(thida) w/2*cos(thida) -w/2*cos(thida) -w/2*cos(thida) w/2*cos(thida)];
    ply=[-w/2*sin(thida) -w/2*sin(thida) w/2*sin(thida) w/2*sin(thida) -w/2*sin(thida)];
    plz=[h/2 -h/2 -h/2 h/2 h/2];
    plot3(plx,ply,plz,'k-','LineWidth',1)
    hold on
end
if k==0
    % (c) 架構
    plx=[0 0 0 0 0];
    ply=[Yc(1)-w/2 Yc(1)-w/2 Yc(1)+w/2 Yc(1)+w/2 Yc(1)-w/2];
    plz=[h/2 -h/2 -h/2 h/2 h/2];
    plot3(plx,ply,plz,'k-','LineWidth',1)
    hold on
end

%畫相機軌道
if d==1
    vx=40*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
    vy=-5:0.5:5;

```



```

vz=0*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
plot3(vx,vy,vz)
end

grid on
axis equal

%(b)架構忽略相片方向
%將圖轉到 x=0
if ig==1
    %y 座標
    yL=[(-Yc(1)*Zc(1)+10*Yc(1)) (Zc(1)*Xc(1)-10*Xc(1)) 0];
    yLL=(yL(1)^2+yL(2)^2+yL(3)^2)^(1/2);
    yR=[(-Yc(2)*Zc(2)+10*Yc(2)) (Zc(2)*Xc(2)-10*Xc(2)) 0];
    yRR=(yR(1)^2+yR(2)^2+yR(3)^2)^(1/2);
    for e=1:8;
        mly=yL(1)*xpl(e)+yL(2)*ypl(e)+yL(3)*zpl(e);
        mry=yR(1)*xpr(e)+yR(2)*ypr(e)+yR(3)*zpr(e);
        yple(e)=-mly/yLL;
        ypre(e)=-mry/yRR;
    end
    %z 座標
    zL=[(Yc(1)*Zc(1)-10*Zc(1)) 0 (10*Xc(1)-Xc(1)*Yc(1))];
    zLL=(zL(1)^2+zL(2)^2+zL(3)^2)^(1/2);
    zR=[(Yc(2)*Zc(2)-10*Zc(2)) 0 (10*Xc(2)-Xc(2)*Yc(2))];
    zRR=(zR(1)^2+zR(2)^2+zR(3)^2)^(1/2);
    for f=1:8;
        mlz=zL(1)*xpl(f)+zL(2)*ypl(f)+zL(3)*zpl(f);
        mrz=zR(1)*xpr(f)+zR(2)*ypr(f)+zR(3)*zpr(f);
        zplf(f)=mlz/zLL;
        zprf(f)=mrz/zRR;
    end

    xpl=[0 0 0 0 0 0 0 0];
    ypl=[yple(1) yple(2) yple(3) yple(4) yple(5) yple(6) yple(7) yple(8)];
    zpl=[zplf(1) zplf(2) zplf(3) zplf(4) zplf(5) zplf(6) zplf(7) zplf(8)];
    xpr=[0 0 0 0 0 0 0 0];
    ypr=[ypre(1) ypre(2) ypre(3) ypre(4) ypre(5) ypre(6) ypre(7) ypre(8)];
    zpr=[zprf(1) zprf(2) zprf(3) zprf(4) zprf(5) zprf(6) zprf(7) zprf(8)];
end

%將兩眼座標與左右相片相同物點寫成空間兩直線，寫成點斜式，用歪斜線最接近的點當作合成立體點
for s=1:8;
    A=[(-Xe(1)+xpl(s)) (-Ye(1)+ypl(s)) (-Ze(1)+zpl(s))]; %左眼視線向量
    B=[(Xe(2)-xpr(s)) (Ye(2)-ypr(s)) (Ze(2)-zpr(s))]; %右眼視線向量

    Ol=[Xe(1) Ye(1) Ze(1)]; %左眼座標
    Or=[Xe(2) Ye(2) Ze(2)]; %右眼座標
end

```

```
lr=[0 0.5*13 0]; %右-左眼座標向量
rl=[0 -0.5*13 0]; %左-右眼座標向量
```

```
%歪斜線公垂中點計算
```

```
C1=det([dot(A,A) dot(A,B);dot(A,B) dot(B,B)]);
C2=det([dot(lr,A) dot(A,B);dot(lr,B) dot(B,B)]);
C3=det([dot(A,A) dot(A,rl);dot(A,B) dot(B,rl)]);
xs(s)=(Ol(1)+Or(1)+C2/C1*A(1)+C3/C1*B(1))/2;
ys(s)=(Ol(2)+Or(2)+C2/C1*A(2)+C3/C1*B(2))/2;
zs(s)=(Ol(3)+Or(3)+C2/C1*A(3)+C3/C1*B(3))/2;
```

```
end
```

```
figure;
```

```
%面物體畫圖
```

```
xx=[xs(1) xs(2);xs(4) xs(3)]; %前
yy=[ys(1) ys(2);ys(4) ys(3)];
zz=[zs(1) zs(2);zs(4) zs(3)];
```

```
mesh(xx,yy,zz)
```

```
hold on
```

```
xx1=[xs(5) xs(6);xs(8) xs(7)]; %後
yy1=[ys(5) ys(6);ys(8) ys(7)];
zz1=[zs(5) zs(6);zs(8) zs(7)];
mesh(xx1,yy1,zz1)
```

```
hold on
```

```
xx2=[xs(6) xs(2);xs(7) xs(3)]; %左
yy2=[ys(6) ys(2);ys(7) ys(3)];
zz2=[zs(6) zs(2);zs(7) zs(3)];
mesh(xx2,yy2,zz2)
```

```
hold on
```

```
xx3=[xs(5) xs(1);xs(8) xs(4)]; %右
yy3=[ys(5) ys(1);ys(8) ys(4)];
zz3=[zs(5) zs(1);zs(8) zs(4)];
mesh(xx3,yy3,zz3)
```

```
hold on
```

```
xx4=[xs(1) xs(2);xs(5) xs(6)]; %上
yy4=[ys(1) ys(2);ys(5) ys(6)];
zz4=[zs(1) zs(2);zs(5) zs(6)];
mesh(xx4,yy4,zz4)
```

```
hold on
```

```
xx5=[xs(4) xs(3);xs(8) xs(7)]; %下
yy5=[ys(4) ys(3);ys(8) ys(7)];
zz5=[zs(4) zs(3);zs(8) zs(7)];
mesh(xx5,yy5,zz5)
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
xlabel('depth')
```

```
ylabel('horizontal')
```

```
zlabel('vertical')
```



```
axis equal  
grid on
```

程式二：中心位移觀察

操作此程式時，首先設定以下變數：

攝影方式((b)或(c)架構，(b)架構選擇相片方向是否忽略)，
觀眾移動次數，
觀眾一次移動距離，
最左方眼睛座標，
最左方相機座標，
相片尺寸誤差，
物體尺寸。

```
clear;  
clc;  
%模型中，(x,y,z)座標分別為(景深,水平,垂直),物體中心在座標(0,0,0)  
%攝影方式輸入  
k=1;    %(b)架構：以物體為中心攝影，k=1；(c)架構：相機筆直像正前方攝影，k=0  
% (b)架構是否忽略相片平面方向  
ig=1;   %ig=1 忽略，ig=0 不忽略  
%觀眾移動次數設定  
g0=8;  
%觀眾一次移動距離  
w0=0.5;  
  
%請輸入最左方相機座標  
xc=40;   %>0  
yc0=-5;  %-5~-1.5  
zc=0;    %-5~5  
  
%請輸入最左方眼睛座標位置  
xe=40;   %>0  
ye=yc0;  
ze=0;    %-5~5  
  
%相片大小誤差  
er=1;    %相片放大比例，正確為 1，縮小<1，放大>1，恆大於零  
  
%物體尺寸設定  
od=5;    %深(x)  
ow=5;    %寬(y)  
oh=5;    %高(z)
```

```
x=[od od od od -od -od -od -od]/2;
y=[ow -ow -ow ow ow -ow -ow ow]/2;
z=[oh oh -oh -oh oh oh -oh -oh]/2;
```

%物體旋轉

```
thida=65;      %以 z(垂直)軸旋轉，逆時鐘為正，角度
phi=15;        %以 y(水平)軸旋轉，仰角為正，角度
x1=x.*cosd(thida)-y.*sind(thida);
y1=x.*sind(thida)+y.*cosd(thida);
z1=z;
x=x1.*cosd(phi)+z1.*sind(phi);
y=y1;
z=x1.*-sind(phi)+z1.*cosd(phi);
```

for g=0:g0

```
yc=yc0+g*w0;
Xc=[xc xc];
Yc=[yc yc+0.5*13];
Zc=[zc zc];
```

```
Xe=[xe xe];
Ye=[yc yc+0.5*13];
Ze=[ze ze];
```

%照照片

%左

```
L=Xc(1)^2+Yc(1)^2*k+Zc(1)^2;      %法向量和自己內積
for a=1:8;
    k1=Xc(1)*x(a)+Yc(1)*y(a)*k+Zc(1)*z(a);      %法向量和點向量內積
    t1=L/(L-k1);
    xpla(a)=Xc(1)+(x(a)-Xc(1))*t1;
    ypla(a)=Yc(1)+(y(a)-Yc(1))*t1;
    zpla(a)=Zc(1)+(z(a)-Zc(1))*t1;
```

end

%右

```
R=Xc(2)^2+Yc(2)^2*k+Zc(2)^2;
for b=1:8;
    k2=Xc(2)*x(b)+Yc(2)*y(b)*k+Zc(2)*z(b);
    t2=R/(R-k2);
    xprb(b)=Xc(2)+(x(b)-Xc(2))*t2;
    yprb(b)=Yc(2)+(y(b)-Yc(2))*t2;
    zprb(b)=Zc(2)+(z(b)-Zc(2))*t2;
```

end

%乘上相片大小誤差

```
xpl=er*[xpla(1) xpla(2) xpla(3) xpla(4) xpla(5) xpla(6) xpla(7) xpla(8)];
ypl=er*[ypla(1) ypla(2) ypla(3) ypla(4) ypla(5) ypla(6) ypla(7) ypla(8)]-Yc(1)*abs(k-1)+Yc(1)*abs(k-1);
zpl=er*[zpla(1) zpla(2) zpla(3) zpla(4) zpla(5) zpla(6) zpla(7) zpla(8)];
xpr=er*[xprb(1) xprb(2) xprb(3) xprb(4) xprb(5) xprb(6) xprb(7) xprb(8)];
ypr=er*[yprb(1) yprb(2) yprb(3) yprb(4) yprb(5) yprb(6) yprb(7) yprb(8)]-Yc(2)*abs(k-1)+Yc(2)*abs(k-1);
zpr=er*[zprb(1) zprb(2) zprb(3) zprb(4) zprb(5) zprb(6) zprb(7) zprb(8)];
```

```

% (b) 架構忽略相片方向
% 將圖轉到 x=0
if ig==1
    % y 座標
    yL=[(-Yc(1)*Zc(1)+10*Yc(1)) (Zc(1)*Xc(1)-10*Xc(1)) 0];
    yLL=(yL(1)^2+yL(2)^2+yL(3)^2)^(1/2);
    yR=[(-Yc(2)*Zc(2)+10*Yc(2)) (Zc(2)*Xc(2)-10*Xc(2)) 0];
    yRR=(yR(1)^2+yR(2)^2+yR(3)^2)^(1/2);
    for e=1:8;
        mly=yL(1)*xpl(e)+yL(2)*ypl(e)+yL(3)*zpl(e);
        mry=yR(1)*xpr(e)+yR(2)*ypr(e)+yR(3)*zpr(e);
        yple(e)=-mly/yLL;
        ypre(e)=-mry/yRR;
    end
    % z 座標
    zL=[(Yc(1)*Zc(1)-10*Zc(1)) 0 (10*Xc(1)-Xc(1)*Yc(1))];
    zLL=(zL(1)^2+zL(2)^2+zL(3)^2)^(1/2);
    zR=[(Yc(2)*Zc(2)-10*Zc(2)) 0 (10*Xc(2)-Xc(2)*Yc(2))];
    zRR=(zR(1)^2+zR(2)^2+zR(3)^2)^(1/2);
    for f=1:8;
        mlz=zL(1)*xpl(f)+zL(2)*ypl(f)+zL(3)*zpl(f);
        mrz=zR(1)*xpr(f)+zR(2)*ypr(f)+zR(3)*zpr(f);
        zplf(f)=mlz/zLL;
        zprf(f)=mrz/zRR;
    end

    xpl=[0 0 0 0 0 0 0 0];
    ypl=[yple(1) yple(2) yple(3) yple(4) yple(5) yple(6) yple(7) yple(8)];
    zpl=[zplf(1) zplf(2) zplf(3) zplf(4) zplf(5) zplf(6) zplf(7) zplf(8)];
    xpr=[0 0 0 0 0 0 0 0];
    ypr=[ypre(1) ypre(2) ypre(3) ypre(4) ypre(5) ypre(6) ypre(7) ypre(8)];
    zpr=[zprf(1) zprf(2) zprf(3) zprf(4) zprf(5) zprf(6) zprf(7) zprf(8)];
end

```

% 將兩眼座標與左右相片相同物點寫成空間兩直線，寫成點斜式，取兩組來解聯立，都用歪斜線情況來寫

```

for s=1:8;
    A=[(-Xe(1)+xpl(s)) (-Ye(1)+ypl(s)) (-Ze(1)+zpl(s))]; % 左眼視線向量
    B=[(Xe(2)-xpr(s)) (Ye(2)-ypr(s)) (Ze(2)-zpr(s))]; % 右眼視線向量

    Ol=[Xe(1) Ye(1) Ze(1)]; % 左眼座標
    Or=[Xe(2) Ye(2) Ze(2)]; % 右眼座標

    lr=[0 0.5*13 0]; % 右-左眼座標向量
    rl=[0 -0.5*13 0]; % 左-右眼座標向量

    % 歪斜線公垂中點計算
    C1=det([dot(A,A) dot(A,B); dot(A,B) dot(B,B)]);
    C2=det([dot(lr,A) dot(A,B); dot(lr,B) dot(B,B)]);
    C3=det([dot(A,A) dot(A,rl); dot(A,B) dot(B,rl)]);
    xs(s)=(Ol(1)+Or(1)+C2/C1*A(1)+C3/C1*B(1))/2;
end

```



```

ys(s)=(Ol(2)+Or(2)+C2/C1*A(2)+C3/C1*B(2))/2;
zs(s)=(Ol(3)+Or(3)+C2/C1*A(3)+C3/C1*B(3))/2;
end

X=(xs(1)+xs(2)+xs(3)+xs(4)+xs(5)+xs(6)+xs(7)+xs(8))/8;
Y=(ys(1)+ys(2)+ys(3)+ys(4)+ys(5)+ys(6)+ys(7)+ys(8))/8;
Z=(zs(1)+zs(2)+zs(3)+zs(4)+zs(5)+zs(6)+zs(7)+zs(8))/8;

v=(Yc(1)+Yc(2))/2;
plot(v,X,'*r-','LineWidth',3)
hold on
plot(v,Y,'*g-','LineWidth',3)
hold on
plot(v,Z,'*b-','LineWidth',3)
hold on

xlabel('center of eyes')
ylabel(' amount of center displacement')
legend('depth','width','height')
end

```

