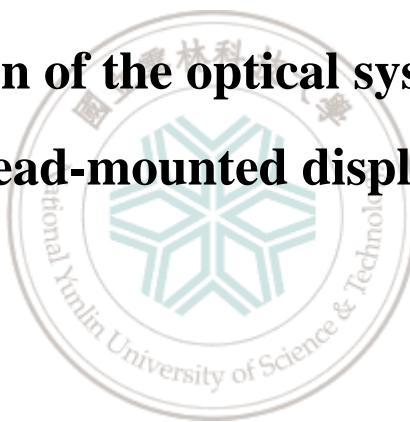


國立雲林科技大學
光電工程研究所碩士班
碩士論文

3D 頭戴顯示器之光學系統設計

**Lens design of the optical system of 3-D
head-mounted display**



研究 生：蔡 曼 穎

指 導 教 授：張 彥 華 博 士
陳 建 宇 博 士

中華民國 九十八 年 六 月

3D 頭戴顯示器之光學系統設計

Lens design of the optical system of 3-D head-mounted display

研究生：蔡 昱 穎

Student : Min-Ying Tsai

指導教授：張 彥 華 博士

Advisor : Yang-Hua Chang

陳 建 宇 博士

Chien-Yue Chen

國立雲林科技大學

光電工程研究所碩士班



June 2009
Douliou, Yunlin, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十八 年 六 月

3D 頭戴顯示器之光學系統設計

研究生：蔡曼穎

指導教授：張彥華 博士

陳建宇 博士

國立雲林科技大學 光電工程研究所

摘要

本論文主要設計頭戴式顯示器(Head Mounted Display, HMD)的光學系統。實驗將針對0.26吋的LCOS(Liquid Crystal On Silicon, LCOS)來設計光學系統。光學系統利用目鏡原理來設計，我們使用兩片、三片透鏡設計目鏡，從薄透鏡、加厚完成光學系統初階，再從專利中尋找四片透鏡組初階，利用ZEMAX軟體進行模擬與優化，對優化後的光學系統進討論。

首先將優化後的光學系統對人眼容忍解析度進行探討，結果對照ZEMAX所模擬出來的影像，發現兩片、三片透鏡組雖然符合人眼使用，但還有部分的像差與色差影響其顯示品質。而四片透鏡組的光學系統則大幅改善像差與色差問題，達到高解析度的光學系統。

本論文架設3D-HMD系統，設置兩部攝影機取像，藉由調整攝影角度後，將拍攝的影像分別傳送至左右眼，並透過HMD可以得到立體影像。HMD配合虛擬實境應用於娛樂、教育訓練，讓人們透過HMD在虛擬世界中，更真實的呈現影像，也能夠運用於模擬災害的教育訓練上，減少因演練而造成的傷害。

關鍵字：頭戴式顯示器、立體顯示、光學設計

Lens design of the optical system of 3-D head-mounted display

Student : Min-Ying Tsai

Advisors : Dr. Yang-Hua Chang

Dr. Chien-Yue Chen

Institute of Optoelectronics
National Yunlin University of Science & Technology

ABSTRACT

This research focuses on designing an optical system of 3-D Head-Mounted Display (HMD). We use Liquid Crystal on Silicon (LCOS) and eyepiece to design a 3-D HMD. We thicken and optimize thin lens by using doublet, triplet or multiple lens as eyepiece. Then we optimize and simulate the optical system by using ZEMAX and discuss this optical system.

Firstly, the optimized optical system is studied against the human eye tolerance level and the result is compared against the image simulated by ZIMAX. It is found that doublet and triplet lenses, though are applicable to human eyes, have some aberrations and chromatic aberration which affect the display quality. On the other hand, the multiple lens optical system has greatly improved the aberration and chromatic aberration issues to achieve high-resolution optical system.

In this research we set up the two cameras of 3D-HMD system, adjust the angles and deliver the images to the eyes. It can be applied to entertainment and educational training by cooperating HMD and virtual reality. Virtual reality can simulate the educational training of precaution and it decreases the damage caused by practical drills.

Key words : head-mounted display 、 3D 、 optical design

誌 謝

首先，我要非常感謝指導教授張彥華老師與陳建宇老師，在這碩士班兩年來的耐心指導，讓我能夠在這個領域上學習到很多專業知識跟技能，幫助我在研究所的路上獲得應具備的專業能力，同時也訓練我在任何事物上可以更有條理的處理。每當遇到困難的時候，老師總是秉持認真跟嚴謹的態度來對面問題，幫助我容易理解問題所在以及克服問題，從老師身上學到處理事情的正確態度。

另外，也要感謝孫文信老師、蘇威佳老師與林宇仁老師，在老師身上得到很多光學設計上面很寶貴經驗與論文上的意見，讓我在這個領域獲益良多；明達、宗諺、漢強、婷婷、信衡、宗興、榮豪、欣蓉、楹潔等學長姊們在我碩一時，給我很多學習上意見，正宏、溫振、彥慶、忠欣、安益、坤穎、建文、詩偉在課業上與生活上互相扶持幫忙，學弟清龍、志勝、一帆、錦榮、家豪、鼎堯、宗泰、耀仁在碩二時給予的幫忙，讓我能夠順利完成碩士學位。

最後，要感謝我的家人，如果沒有爸爸、媽媽、哥哥、姐姐、與女友兩年來的陪伴、支持與鼓勵，讓我能夠無後顧之憂的求學，真的非常謝謝你們。

目 錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	ii
目錄	iv
表目錄	v
圖目錄	vi
第一章 緒論	1
1.1 HMD 的發展	1
1.2 HMD 的應用	2
1.3 人類眼睛的構造	5
1.4 動機與目的	8
1.5 論文架構	8
第二章 HMD 架構介紹與其光學系統設計	10
2.1 HMD 顯示元件簡介	10
2.2 HMD 架構介紹	14
2.3 產生深度感之因素	17
2.4 3D - HMD 架構介紹	21
第三章 光學系統設計原理	23
3.1 目鏡原理	23
3.2 透鏡設計之符號定義及原理	25
第四章 光學系統設計與優化	40
4.1 光學系統的基本規格	40
4.2 雙合鏡與三合鏡初階	42
4.3 像質分析	44
4.4 光學系統優化	46
第五章 結果與討論	48
5.1 光學系統優化後結果	48
5.2 人眼視力的解析度	52
5.3 光學系統影像模擬結果	63
5.4 即拍即播 3D - HMD 的優點	69
第六章 結論與未來展望	71
參考文獻	73

表 目 錄

表 2.1 LCD 與 LCOS 比較	13
表 2.2 F320B 的規格	15
表 3.1 背景亮度 vs. 瞳孔直徑	23
表 3.2 厚透鏡的曲率與厚度	32
表 3.3 透鏡間距與曲率	35
表 4.1 LCOS 顯示器規格	41
表 4.2 光學系統規格	41
表 4.3 專利 US6349004 目鏡資料	44
表 5.1 兩片透鏡表面資料	48
表 5.2 三片透鏡表面資料	49
表 5.3 四片透鏡表面資料	50
表 5.4 兩片鏡組非球面係數透鏡	55
表 5.5 兩片透鏡組空間頻率對應 OTF	57
表 5.6 兩片透鏡組一面非球面空間頻率對應 OTF	58
表 5.7 兩片透鏡組兩面非球面空間頻率對應 OTF	58
表 5.8 三片透鏡組空間頻率對應 OTF	60
表 5.9 四片透鏡組空間頻率對應 OTF	60
表 5.10 像差比較表	64

圖 目 錄

圖 1.1 Datavisor - NVG HMD	2
圖 1.2 治療焦慮症的虛擬實境畫面	3
圖 1.3 Ubisoft 所製作的迷霧之島冒險遊戲	4
圖 1.4 第一人稱射擊畫面	4
圖 1.5 人類眼睛的構造	5
圖 1.6 視神經網路結構	6
圖 1.7 右眼(R)與左眼(L)視場的量測範圍	7
圖 2.1 CRT 之結構圖	11
圖 2.2 TFT - LCD 之結構圖	11
圖 2.3 砂基液晶顯示器之結構圖	12
圖 2.4 偏振分光鏡工作原理	14
圖 2.5 晶奇光電 HMD - 320B 的產品實際圖片	15
圖 2.6 HMD - F320 工作原理	16
圖 2.7 HMD 架構概略圖	17
圖 2.8 兩眼視差之立體成像	18
圖 2.9 屏幕上的視差	20
圖 2.10 特殊 3D 攝影雲台	21
圖 2.11 3D - HMD 拍攝與成像系統架構	22
圖 3.1 物體放在明視距離，眼睛看物體所張之角	24
圖 3.2 物體經放大鏡放大	24
圖 3.3 光學系統的主點與焦點	25
圖 3.4 光學系統的節點	26
圖 3.5 透鏡成像光路圖	27
圖 3.6 單一球面折射光路圖	28
圖 3.7 二球面間折射光路圖	28
圖 3.8 厚透鏡的有效焦距 EFL 和後焦距 BFL	31
圖 3.9 主平面與物像距之關係圖	33
圖 3.10 兩分開透鏡所組成系統圖	35
圖 3.11 在近軸光學下的球面折射光路	37
圖 4.1 光學系統設計流程圖	40
圖 4.2 Freebasic 計算出兩片透鏡的初階	42
圖 4.3 Freebasic 計算出三片透鏡的初階	43

圖 5.1 為優化後透鏡組的 Layout 圖(a)兩片(b)三片(c)四片	52
圖 5.2 透鏡組解像能力比較圖	53
圖 5.3 半視角對應人眼解析能力	54
圖 5.4 人眼解析能力	54
圖 5.5 非球面優化 MTF(a)一面非球面(b)兩面非球面	57
圖 5.6 MTF vs. field 比較圖：(a)球面(b)一面非球面(c)兩面非球面	59
圖 5.7 優化後 MTF(a)三片(b)四片透鏡	61
圖 5.8 MTF vs. field 比較圖：(a)兩片球面(b)三片球面(c)四片球面	62
圖 5.9 模擬影像輸出(a)原始圖(b)兩片(c)三片(d)四片透鏡組	63
圖 5.10 橫向色差(a)兩片(b)三片(c)四片透鏡組	66
圖 5.11 為透鏡的場曲與畸變像差(a)兩片(b)三片(c)四片透鏡組	67
圖 5.12 粗細線條圖形模擬像差(a)原始圖(b)兩片透鏡(c)三片透鏡(d)四片透鏡	68
圖 5.13 RGB 圖形模擬的色差(a)原始圖(b)兩片透鏡(c)三片透鏡(d)四片透鏡	69
圖 5.14 3D - HMD 系統架設展示	70



第一章 緒論

頭戴顯示器(Head Mounted Display, HMD)由於其體積短小輕巧，在配合電腦、錄放影機、電視收訊器及其他各型視訊產品使用後，有極大的發揮空間，是消費性電子產品重要發展項目之一。本論文主要設計HMD光學系統，使HMD具簡單、輕型且不失HMD成像品質為目標，並結合攝影機成為可拍攝的3D頭戴式顯示器。

1.1 HMD 的發展

HMD的發展最早從美國開始。1960年代，美國猶它州立大學Ivan E. Sutherland教授將陰極射線管顯示器(Cathode Ray Tube, CRT)配上聚焦光學系統，利用頭部轉動控制螢幕顯示訊號，再加上一部早期的電腦影像產生器，構成最早的一部HMD。由此，人類開始經歷虛擬實境(Virtual Reality, VR)與頭戴顯示器系統雙眼廣角的視覺領域[1, 2]。

1970年代起，美國軍事單位開始有計畫地將HMD系統應用於軍事設備上。最早HMD是利用體積較大的CRT所構成的，所以造成HMD系統過於龐大，直到薄膜電晶體液晶顯示器(Thin Film Transistor - Liquid Crystal Display, TFT - LCD)被利用於HMD之設計，頭戴顯示器重量大大減輕。雖然頭戴顯示器發展至今已四十餘年，但是許多相關技術不斷被發展出來，同時由於技術的成熟與零組件的價格降低，應用領域已不只限制在軍事用途上，在娛樂、醫療及教育等方面的產品也已陸續推出[3]。

1.2 HMD 的應用

HMD最早應用於軍事設備上，隨著科技進步與零組件價格的降低，HMD也應用於醫學、娛樂與教育方面，以下分為四個部分做介紹：

- I. 最早應用HMD的軍事設備如圖1.1，此產品是n - Vision[4]公司推出的Datavisor - NVG，由於使用CRT作顯示器，解析度可高達 1700×1350 pixels，而視角也可到達 40° 的高水準，也由於配備了攝影機，可模擬作戰用夜視鏡(Night Vision Goggles, NVG)。



圖 1.1 Datavisor - NVG HMD

II. HMD配合虛擬實境技術在醫學上的應用，包括恐懼治療和疼痛控制，提供一種浸入式的感受，讓懼高症患者透過虛擬空間來觀看視點與移動方位。安全的浸入環境，能逐漸適應恐懼感的刺激因子，有效地治療適應高度。圖1.2為治療對搭乘公共運輸有焦慮症的患者所設計的虛擬實境畫面，讓患者習慣運動空間並對公共場合增加適應力，能有效地消除緊張與焦慮感[5]。



圖1.2 治療焦慮症的虛擬實境畫面

III. HMD結合虛擬實境應用於娛樂遊戲具有相當蓬勃的商機。在面對硬體技術與軟體支援的效能提昇，讓遊戲畫面的真實臨場感更為擬真性。在圖1.3中的遊戲畫面為迷霧之島3D冒險遊戲[6]，遊戲內容的線索全靠玩家的觀察、想像、行動來進行解迷，圖1.4採用第一人稱視角的畫面處理[7]，增加視野的瀏覽性與遊戲的刺激流暢度。

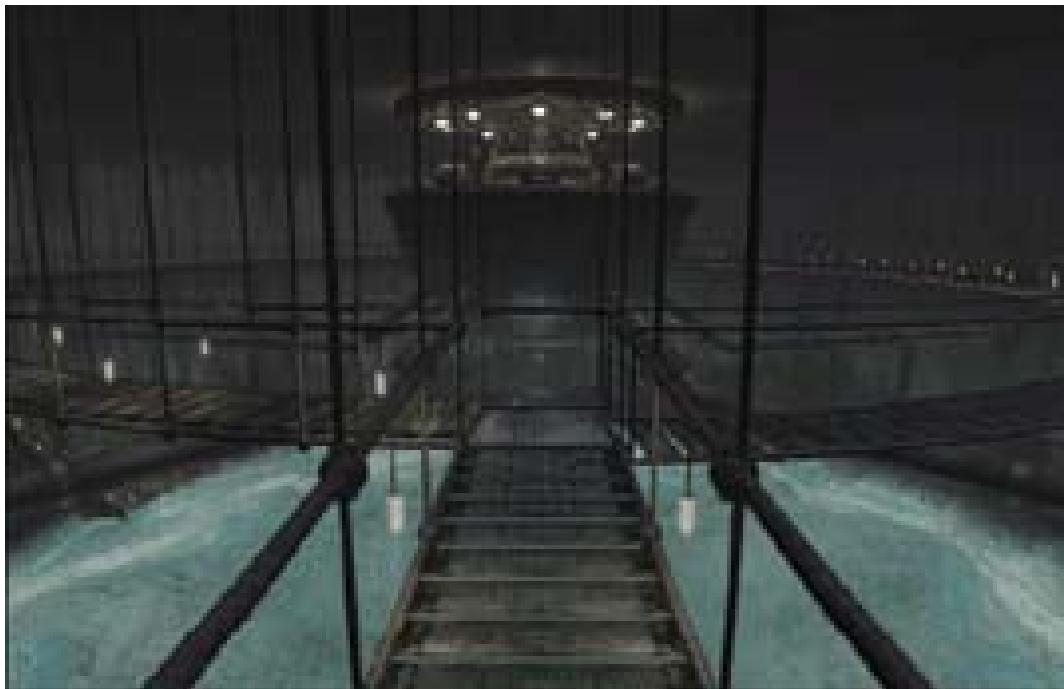


圖1.3 Ubisoft所製作的迷霧之島冒險遊戲

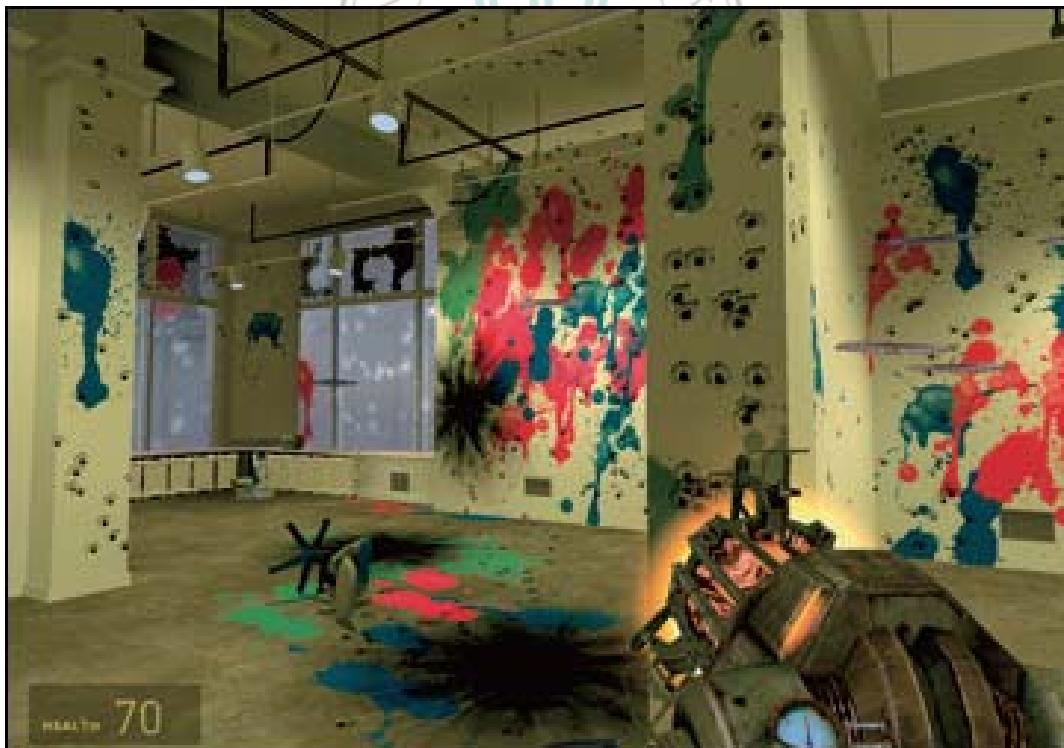


圖1.4 第一人稱射擊畫面

IV. 最後，藉由透過動態模擬的過程，來培訓專業人員操作以及應變能力，能有效地輔助學習者，在面對高成本或危險性高的設備，相當適合模擬真實空間的模擬訓練。在實際的例子中，可應用虛擬實境技術來模擬消防人員處理失火現場的應變程序，使相關人員可對未來真實狀況做好萬全的準備[8]。

1.3 人類眼睛的構造

在科學家一致認為下[9]，一對眼睛所分別看到的影像不同是造成深度感的主要來源。眼睛球狀的結構如圖1.5所示，此單眼視網膜所成的影像為一個二維影像的資訊，基本上單眼視網膜所收集到的二維影像是不會有深度感的，需藉由另一隻眼睛所看到的影像，讓視網膜接收到不同的二維影像資訊，透過視神經傳輸至大腦，再經過大腦對於兩張影像的判別，進而對該物體產生遠近距離的深度感。

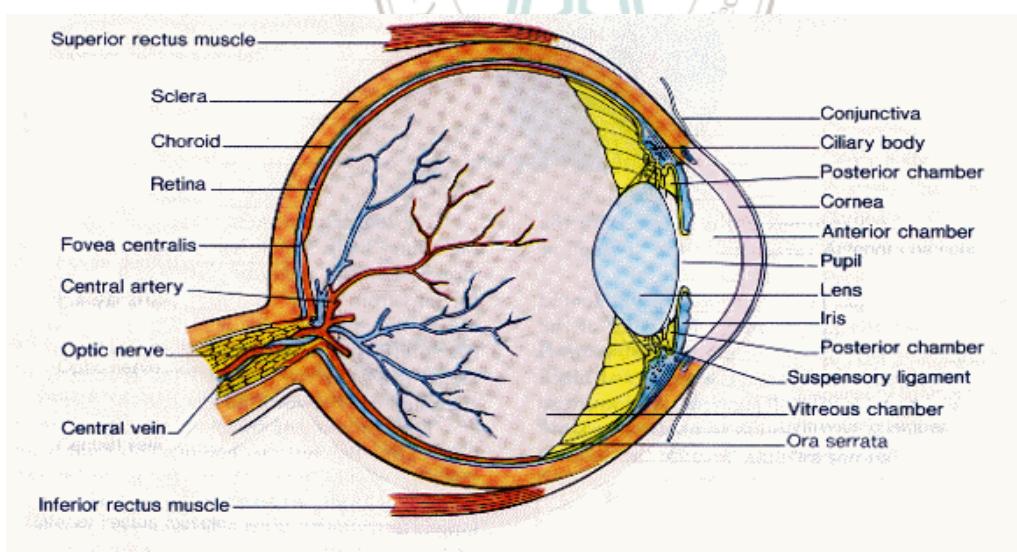


圖1.5 人類眼睛的構造

視神經如何將雙眼的二維影像資訊連接至大腦，圖 1.6 為視神經網路的結構。視神經從視網膜要到達大腦的入口有兩處，在這兩個入口可找到一對側膝狀核 (Lateral Geniculate Nucleus, LGN) ，一個 LGN 的直徑大約有數公分，而厚度約有一公分。

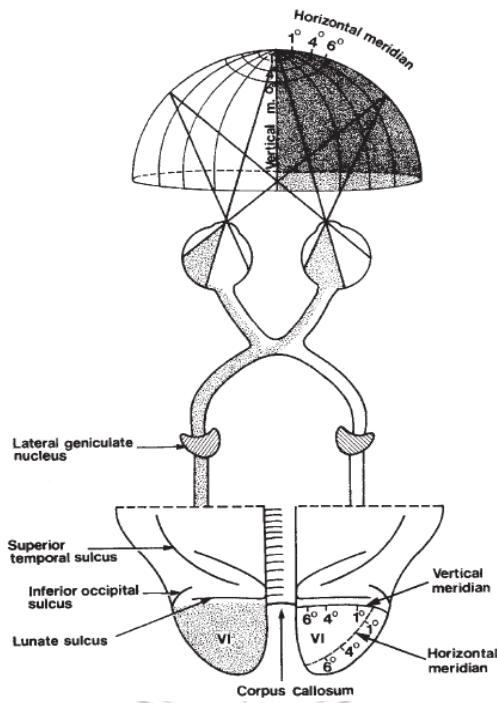


圖 1.6 視神經網路結構[9]

其中較值得注意的是，雙眼的視神經在進入側膝狀核之前會先相交一次，藉由這次相交，某部分的視神經會將右眼的影像資訊轉換成左眼的資訊；相同地，某些左眼的資訊也會轉換為右眼的資訊，我們稱這些神經為相交視神經 (Intersecting optic nerves)。經過相交視神經的作用，使得LGN在影像資訊進入大腦之前，對於影像有前處理(preprocessing)的功能，每一個LGN包含有六層，能夠分別對左右眼的資訊做進一步的處理。

人類眼睛有幾項重要的參數與特性，我們將其列舉如下[10]：

- (1)兩眼的平均距離 (瞳孔的距離)：6.5 cm。
- (2)瞳孔的直徑：2 - 8 mm (依照亮度而改變)。
- (3)最大的角度解析度：約為 0.5 分 (即 $\frac{1^\circ}{120}$)。
- (4)最大的資訊傳輸率：雙眼的傳輸率為 4.3 Mbits/s，單一神經的傳輸率為 5 bits/s。
- (5)視場(Visual field)：視場可以分成三個主要的部分，如圖 1.7 所示：

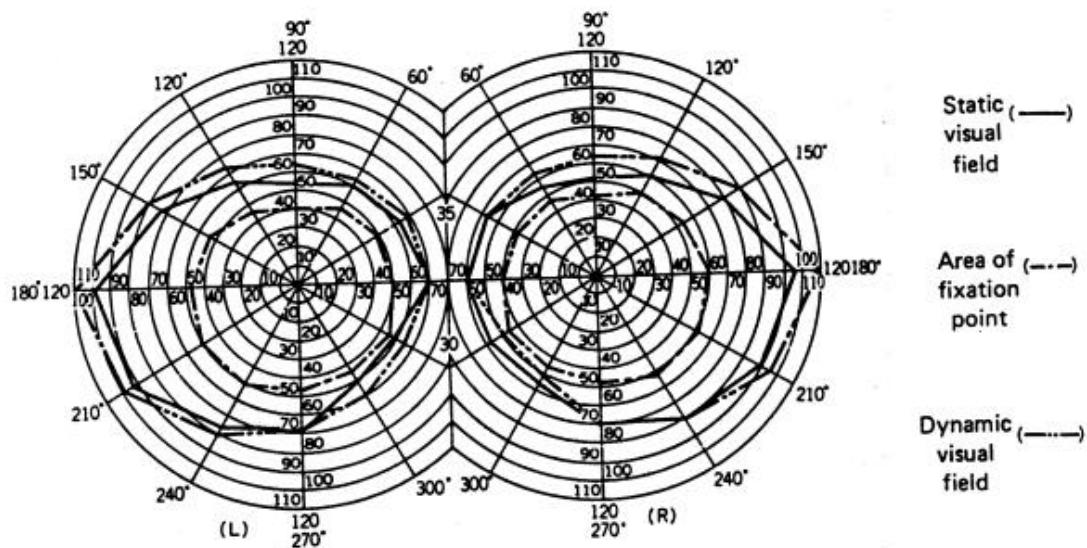


圖 1.7 右眼(R)與左眼(L)視場的量測範圍

- (a)靜止的視場(Static visual field)：當眼睛直視的視場。
- (b)固定點(Fixation point)的視場：對於一固定點，眼球可移動的範圍。
- (c)可動的視場(Dynamic visual field)：將頭固定住，眼睛所允許移動的範圍。

1.4 動機與目的

由上一個章節中，我們得知HMD的應用範圍非常的廣，而本論文將對一般視力正常者來設計HMD的光學系統。現今運用於娛樂、教育方面的顯示器愈來愈強調3D顯示，為了達到好的3D效果，光學系統的設計變的相當重要。因此我們分別利用兩片、三片、四片透鏡來設計優化光學系統，比較其優化出來的結果，進行討論。

1.5 論文架構

本論文以循序漸進式的說明，其能使讀者更能瞭解本論文的研究。論文主要分為六個部分，而其內容大綱如下：



第一章 緒論

介紹HMD發展與HMD於軍事、醫療、與一般大眾娛樂的應用概況，並簡單介紹眼睛的基本結構與特性。

第二章 HMD架構介紹與光學系統設計

本章節將介紹HMD架構，對HMD所使用微顯示元件做比較，找出適合的顯示元件。針對顯示元件設計光學目鏡系統，讓眼睛能夠清楚接收顯示元件的資料。

第三章 光學系統設計原理

本章介紹光學系統的設計原理，要設計HMD光學系統目鏡，首先我們先了解目鏡的成像原理與透鏡基本原理及透鏡光學追跡原理，讓我們在設計光學系統能

夠清楚的了解光學系統的原理與光追跡。

第四章 光學系統模擬與優化

訂定光學系統的規格，利用ZEMAX模擬軟體重初階設定到進行優化，找出光學系統的最佳化。

第五章 結果與討論

將最佳化的光學系統，對於人眼對像差的容忍做討論，使用多片透鏡設計透鏡提升MTF，得到較佳的成像品質。

第六章 結論

對設計完成的HMD所得的結果作概述，並探討改進方式及未來研究發展的方向。



第二章 HMD 架構介紹與其光學系統設計

HMD 的顯示元件直接影響了成像品質的好壞，所以選擇一個良好的顯示元件是非常重要。本章節一開始介紹 HMD 顯示元件的演進與其優缺點，選擇最適合本論文的顯示元件。

2.1 HMD 顯示元件簡介

HMD成像主要可分為三種，陰極射線管(Cathode Ray Tube, CRT)、薄膜電晶體液晶(Thin Film Transistor - Liquid Crystal Display, TFT - LCD)、矽基液晶顯示(Liquid Crystal On Silicon, LCOS)。CRT為最早被應用於頭戴式顯示器上的成像元件，CRT基本架構為一電子真空管，有電子槍在一邊及含磷螢幕在另一邊。電子槍主要由三樣元件組成，第一為發射系統(Emission System)，第二為聚焦格子(Grids)，第三為偏向電極(Deflecting Electrodes)，其結構如圖2.1。CRT主要優點為亮度高，解析度高，且發展技術成熟，但陰極射線管顯示器其體積龐大、高耗電及幅射問題，但隨著TFT - LCD的發展成熟，已漸漸的取而代之。TFT - LCD雖然在解析度、亮度、對比、及色彩飽和度皆不及陰極射線管，但TFT - LCD輕薄短小、低功率的優點便足以取代CRT，且隨著TFT - LCD的進步，這些問題已被解決，使得陰極射線管(CRT)已經沒有運用於HMD的價值[11]。

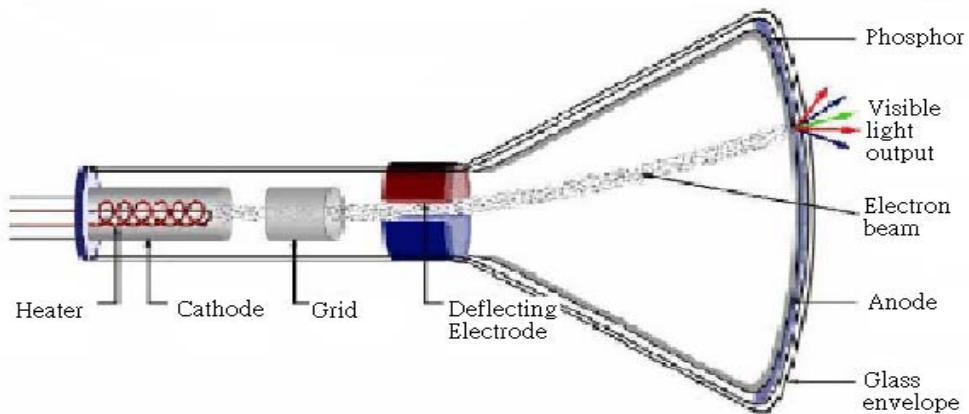


圖2.1 CRT之結構圖

TFT - LCD結構如圖2.2，入射光光源通常由背光源提供，而入射光必須先藉由前偏極化片(Pre - polarizer)吸收某一方向上的偏極化光，而讓另一偏極化方向的光通過，再利用液晶之開與關來控制通過液晶的光量，進而控制通過彩色濾光器之光亮，最後利用光之三種原色產生所需之色彩[13]。

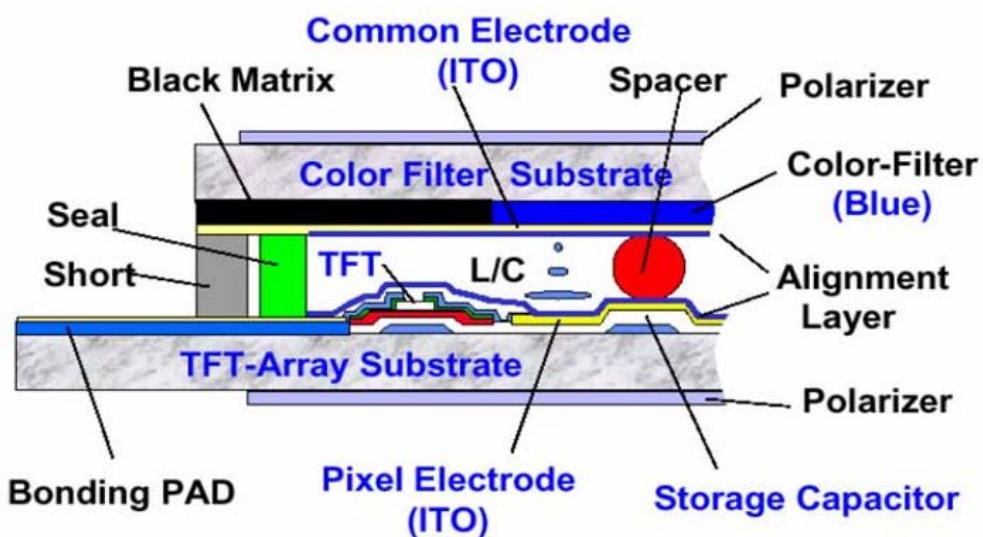


圖2.2 TFT - LCD之結構圖

矽基液晶顯示器又稱反射式液晶顯示器，其結構如圖2.3。光在通過液晶層之後，液晶分子的物理方向會隨著所施加的電壓而改變，進而改變穿透液晶的光線極化方向。微型顯示器就如同一列可以自行變化的極化偏光鏡，調整入射光的旋轉角度，於是產生了灰階影像，矽基板與玻璃面板之間填充了液晶分子材料，光在通過液晶層之後，會經由單晶矽液晶之反射層將光線反射回去，對於整片液晶面板來說，光線並沒有穿透液晶面板，而是全部將光反射回去，相較於TFT - LCD之光源穿過薄膜電晶體而損耗來的好[13]。

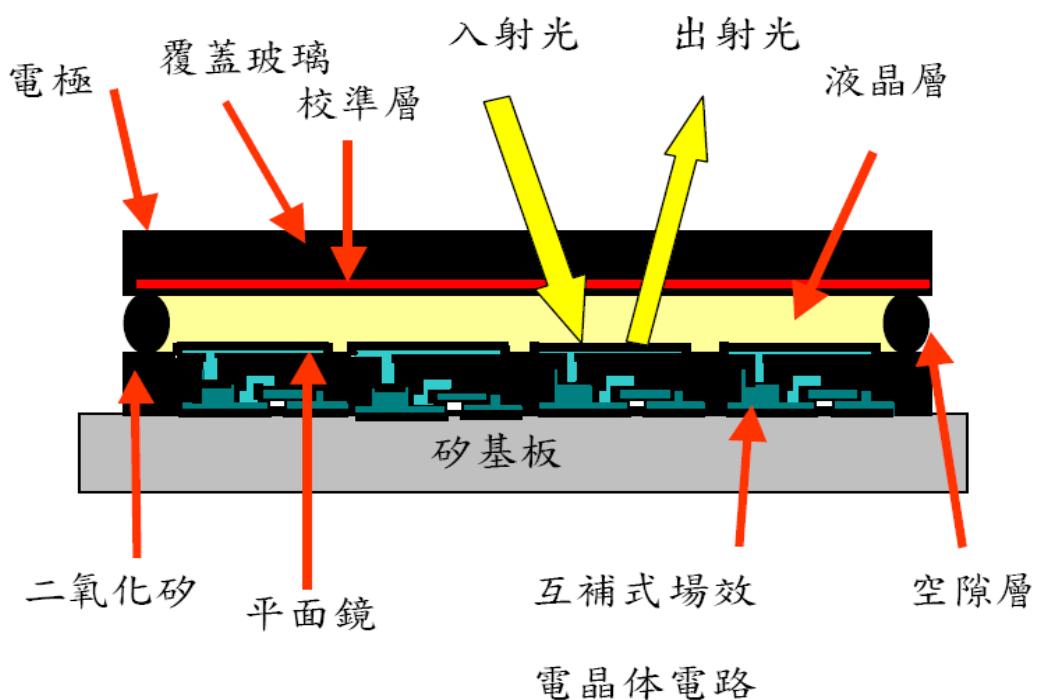


圖2.3 矽基液晶顯示器之結構圖

上述的三種顯示元件中，單晶矽基液晶顯示器主要是將一個標準的矽晶圓廠製造流程互補式金屬氧化半導體(Complementary Metal - Oxide - Semiconductor, CMOS)製程稍加修改，即可應用於矽微型顯示器的製程上。單晶矽基液晶顯示器開口率大，亮度高，對比度高，製程設備又比薄膜電晶體液晶顯示器便宜，所以成為HMD主流成像來源。頭戴顯示器依設計方法的不同又可分為軸上折射式、離軸折射式與反射式。本篇論文除了仔細介紹各種顯示元件外，也使用其中之單晶矽液晶顯示元件來設計頭戴顯示器。藉由顯示元件之選定及人眼特性，結合幾何光學原理制定目鏡之規格。並尋找符合初始結構之目鏡結構，最後利用光學設計軟體模擬出可以使用之目鏡。

顯示元件的選擇方面，因為 HMD 講求輕巧便利，所以本研究不採用體積龐大的 CRT 當顯示元件。由表 2.1 中得知，LCOS 有較好的顯示效果，且 LCOS 製程上又壓低了成本，所以本論文將採用 LCOS 顯示器為 HMD 的顯示元件。

表 2.1 LCD 與 LCOS 比較

	LCD	LCOS
光源	背光板	LED
電路設計	簡單	複雜
光學設計	穿透式	反射式
開口率	低	高
成本	高	低

LCOS為反射式顯示器，因此LCOS通常需要在光學系統上搭配偏振分光鏡(Polarized Beam Splitter, PBS)，將亮、暗狀態的光路分離出來，如圖2.4所示。當一個S偏振的光入射至光閥時，因為受液晶分子折射率的影響，使反射後的光偏振方向旋轉90°成為P偏振，此P偏振光可順勢穿透PBS到達投影鏡頭，再將影像投射至屏幕，呈現亮狀態；反之當驅動電壓改變液晶的扭轉形態，使入射S偏振光與反射光的偏振方向不變，將無法穿透PBS，則使屏幕上的影像呈現暗的狀態。再者藉由驅動電路對液晶的控制，使反射光有不同的偏振成分，再搭配PBS的使用，即可讓穿透PBS的光達到灰階的效果[14, 15]。

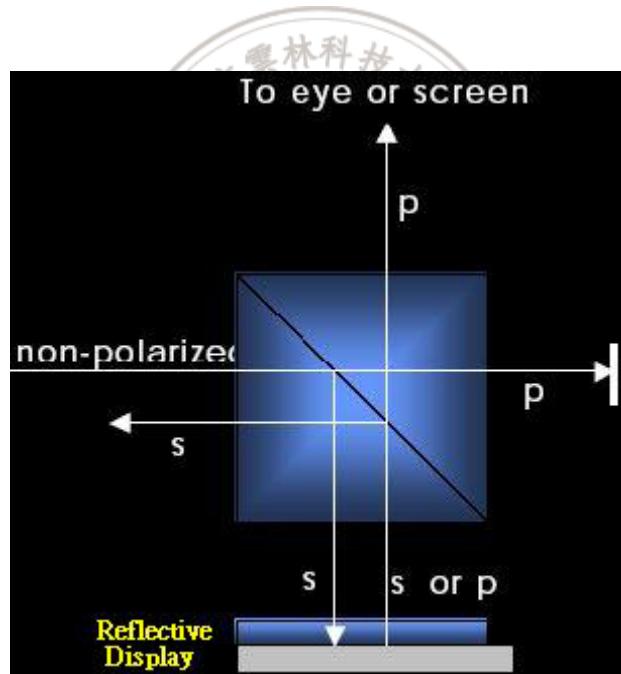


圖2.4 偏振分光鏡工作原理

2.2 HMD 架構介紹

本論文是採用晶奇光電股份有限公司所開發的HMD 當本論文的架構，其型號為 F320B 型號[16]，如圖 2.5 所示，而其規格如表 2.2 所示。



圖2.5 晶奇光電HMD - 320B的產品實際圖片

表 2.2 F320B 的規格

Magnification	12X
Field of View	22 degrees
Format	432 × 240
Array diagonal	0.26 "
Color depth	24 bit
Frame Rate	120 Hz (360 Hz RGB field rate)

此款 HMD 是利用 LCOS 顯示器當影像來源，我們拆解 HMD 來介紹其結構，並利用圖 2.6 來介紹 HMD 之工作原理。首先我們將拍攝影像訊號經控制盒傳送至晶片組做影像處理，接著將處理好的影像送至 LCOS 顯示器，利用上一節所介紹的 LCOS 原理，將影像成像，最後將成像影像經由一個光學系統成像，而使此 HMD 約可在兩公尺距離成一對角線為 37 吋效果的虛像。其光學系統與 LCOS 關係位置如圖 2.7 所示。

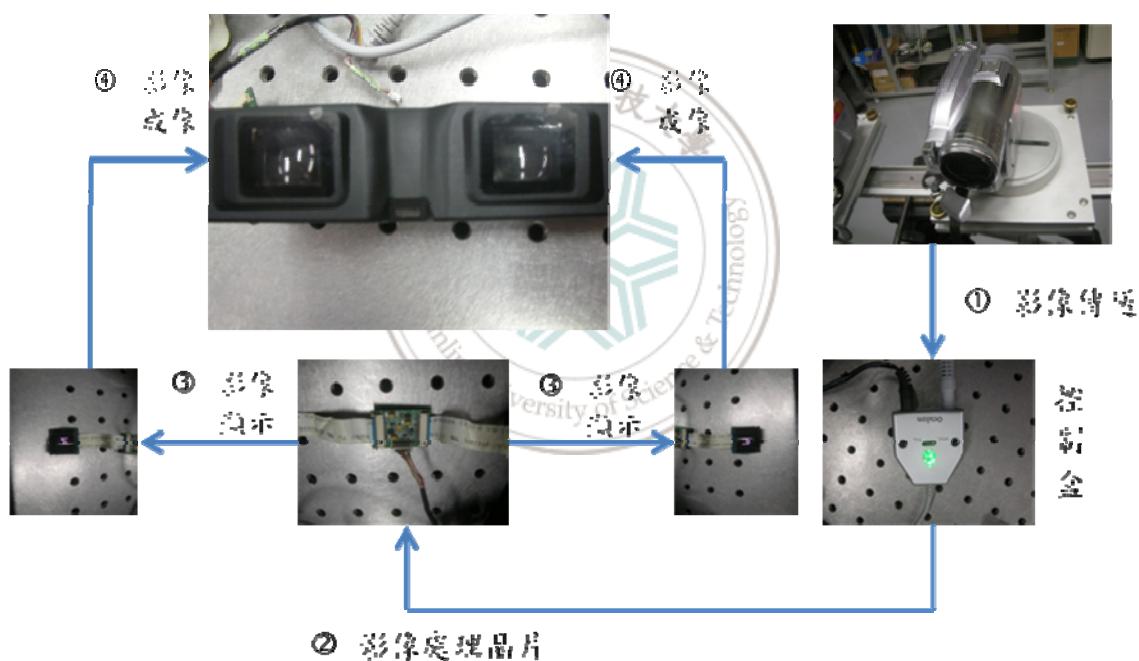


圖 2.6 HMD - F320 工作原理

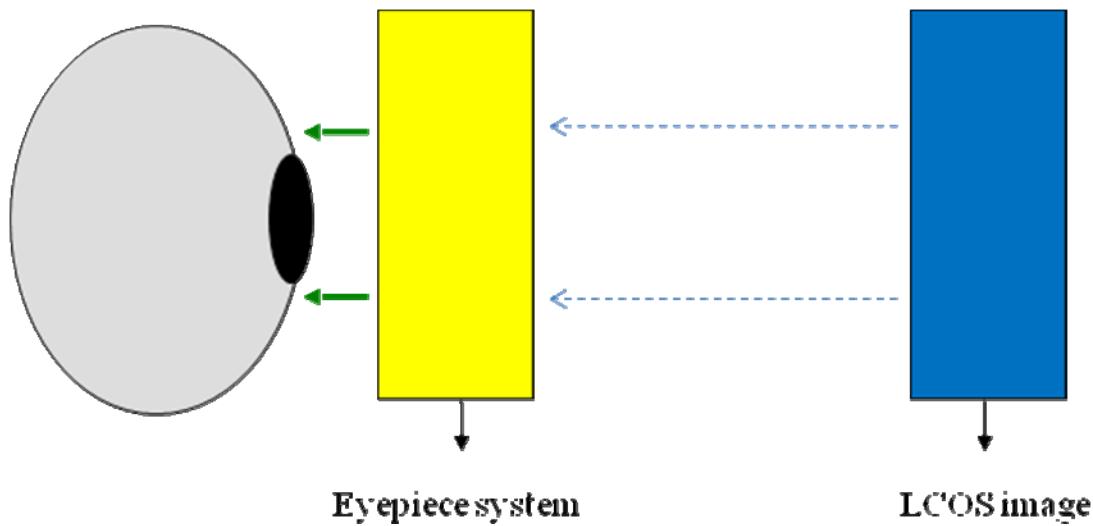


圖2.7 HMD架構概略圖

2.3 產生深度感之因素

在介紹3D - HMD前，我們要先了解形成立體視覺的原理。物體是藉由其反射的光線進入到人類眼睛的視網膜表面，便能夠知道物體的存在與形狀。人類視網膜的基本機能和照相攝影的原理類似，在視網膜上面密密麻麻地分佈了上下左右二維的視神經細胞，能夠知道被觀察物體的位置。然而，若想要知道被觀察物體有關於深度的感覺單靠視網膜是不夠的。從生理學和心理學的觀點來看人類眼睛在深度感覺的來源有下列幾個因素[17, 18]。

生理因素：

1. 兩眼視差(Binocular Disparity)：人類眼睛兩眼相距六公分左右，經由兩眼不同位置得到的成像差異可以感知和判斷被觀察物體的深度。如圖 2.8 所示，由左右眼睛分別眺望金字塔的外形，結果左右兩眼得到不同的成像，也就是兩眼視

差。經過兩眼視差的成像，左右兩眼所得到的影像外形為實線部分，而虛線部分為合成立體三度空間的金字塔型外觀[19]。

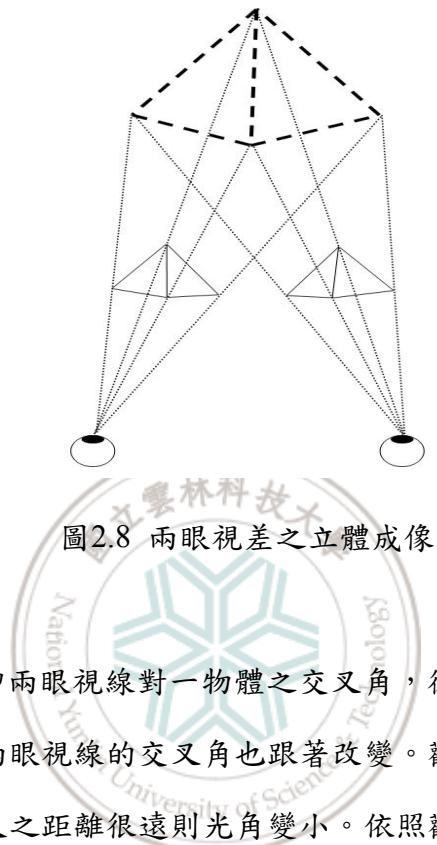


圖2.8 兩眼視差之立體成像

2. 光角(Convergence)：即兩眼視線對一物體之交叉角，從觀測者到標的物之間的距離依遠近的不同，兩眼視線的交叉角也跟著改變。觀測者到標的物之距離較靠近，則光角很大；反之距離很遠則光角變小。依照觀測物的距離遠近，兩眼眼球的角度也不得不跟著作調整，於是便可以感覺出物體遠近深度的距離大小。因此，在近距離時，視角的變化對於深度感的貢獻是相當大的(尤其是它與眼調節能力一起作用時)，但是當距離超過十公尺，由於視角的變化很小，而無法感知物體的深度。
3. 調節(Accommodation)：人類眼睛構造中水晶體相當於相機的對焦透鏡，能夠鼓起來將影像投影在視網膜表面。依照水晶體鼓起程度的調整也可以感覺出標的物的深度遠近。一般標的物距離超過二公尺以上的時候，要藉此來感知標的物的實際深度將有困難。

心理因素：

1. 當觀測者和標的物相對移動時，因近景和遠景的移動所產生的視差，我們稱此為單眼運動視差。單眼運動視差也能夠提供觀測者對於物體深度遠近的感覺。
2. 藉著在視網膜上成像大小的不同，即使是相同的物體也能分別出距離之遠近。
3. 從標的物三度空間的排列配置可以組合出其深度和立體的感覺。
4. 向遠方的平行線作眺望時，也可透過兩眼而感覺出其遠近的深度。
5. 即使眺望遠方之均勻排列的標的物，例如像是栽種茶葉的山坡地或是都市中排列的高樓大廈等的外形，可以透過不同密度而得到深度的感覺。
6. 當眺望同一對比度(Contrast Ratio)的遠方物體，可以從對比度減少的變化來判斷物體的距離與深度。
7. 從標的物依光線產生的陰影變化，可以感受到立體三度空間的外形。

產生深度感的形式：

基本上，我們人類的眼睛觀看景物可概分為遠、中、近三個層次，因此，我們的眼球會隨著景物的遠近而自動調整到一個最舒服的視覺角度來觀看，當兩個眼睛各自有其不同的位置與角度時，自然就會產生視差了。而這個視差依眼睛觀看遠、中、近程景物的不同，其兩眼視線的變化又可以概分為：(1)非交錯視差(Uncrossed - Parallax) (2)零視差(Zero - Parallax) (3)交錯視差(Crossed - Parallax)等。如圖 2.9 所示，我們將螢光幕設為一參考基準面來個別獨立呈現給左、右兩眼，以模擬其觀看景物的情況，並將其焦點視線(Focusing Visual) 的變化作說明：

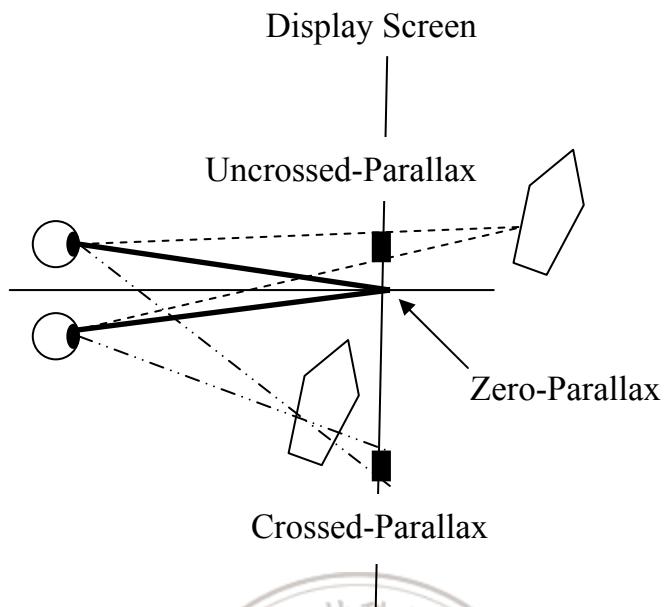


圖 2.9 屏幕上的視差[20]

- (1) 非交錯視差(Uncrossed - Parallax)：兩眼焦點視線在螢光幕前沒有任何交叉情況(亦即兩眼平視遠方景物)，其影像將會呈現在螢光幕後。
- (2) 零視差(Zero - Parallax)：兩眼焦點視線的交叉點落在螢光幕上(亦即兩眼觀看近距離的景物)，則其影像將會呈現在螢光幕上。
- (3) 交錯視差(Crossed - Parallax)：兩眼焦點視線在螢光幕前有交叉的情況(亦即兩眼觀看眼前近物)，其影像將會呈現在螢光幕前的焦點上。

上述三種產生視差的方式，將會使影像產生不同的立體效果。而在清楚瞭解眼睛如何立體成像與視差的各種物理特性後，將有助於本研究即拍即播之 3D 頭戴顯示器之架設。

2.4 3D - HMD 架構介紹

由上一節我們了解到影像如何造成深度感而產生3D影像，接著我們就利用產生深度感的原理，來架構3D - HMD的系統。我們知道深度感主要是由兩眼視差所造成，如圖2.8所示。我們的系統利用本實驗室所製作的特殊攝影雲台，配合物體的遠近、大小調整雲台的角度和相機的距離，以獲取最佳的立體影像拍攝條件，特殊3D攝影雲台如圖2.10所示。



圖2.10 特殊3D攝影雲台

大部份的3D影像拍攝後，都必須要經過影像處理，將左右兩張不同影像的奇、偶畫素分別抽離，再將抽離後的畫素進一步的合成產生新的影像。新的影像搭配遮障式的立體顯示器，以奇、偶畫素做遮障，讓左右兩眼分別接受不同角度的畫素，形成3D影像。而本系統的優點是拍攝的影像不需經過影像處理，可以直接將靜態、動態左右眼影像傳送至3D - HMD中，透過3D - HMD我們就可以得到具有深度感的3D影像。一般HMD是將同一影像傳送至左、右兩眼，因此人眼所看都為一般被放大的平面影像；而3D - HMD不一樣的地方就是是將我們利用特殊雲台所架設的兩台攝影機所拍攝的影像分別再送到左、右兩眼，人的左、右兩眼就可以從

3D - HMD得到兩眼視差造成的立體影像。

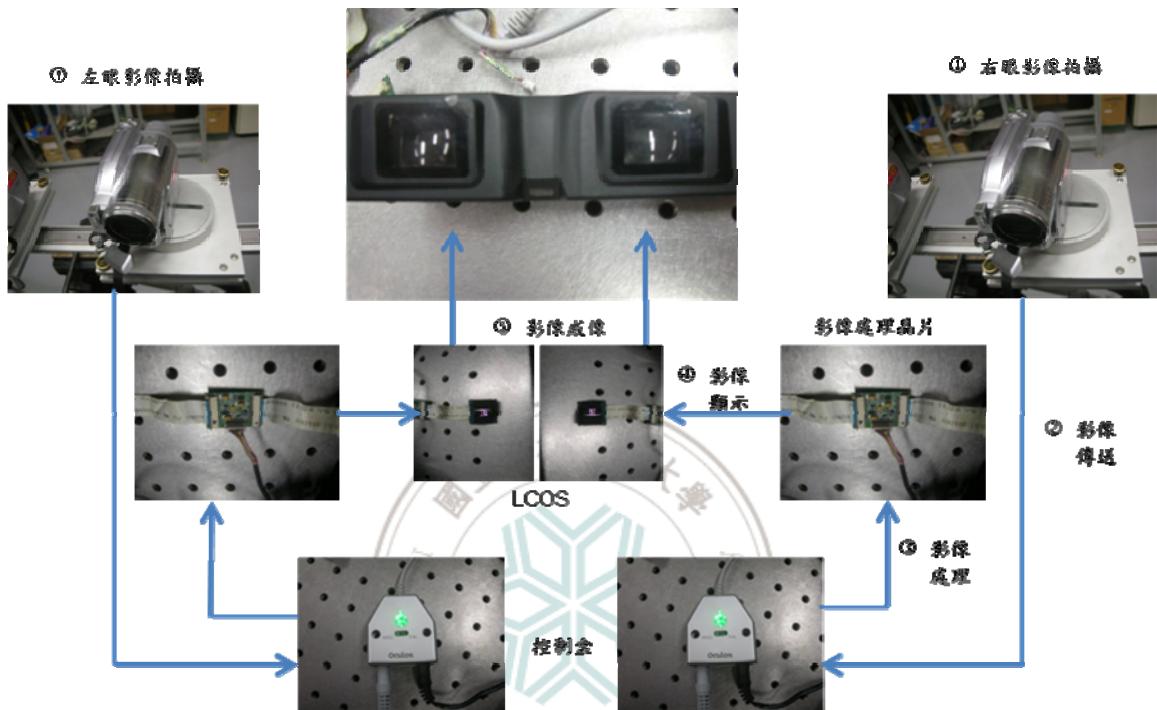


圖2.11 3D - HMD拍攝與成像系統架構

本研究最主要是將傳統的 HMD 做改進。由圖 2.11 中得知，欲得到較好的影像，除了需要高解析度的顯示器來呈現較好的 3D 效果外，HMD 的目鏡系統優劣影響影像品質的好壞。我們設計 HMD 目鏡系統還有一個目的，即是將 HMD 輕型化。我們發現 HMD 是利用單透鏡去將顯示器的影像成像放大，而成像品質卻沒有非常完美，因此我們將設計優化的光學目鏡，來代替目前多數系統的單透鏡，以便達到好的成像品質，並使投影系統輕型化，來達到我們使用 3D - HMD 系統的便利。

第三章 光學系統設計原理

本章節在介紹所設計 HMD 光學系統目鏡之前，首先介紹光學系統的成像原理與透鏡的基本原理與透鏡光學追跡原理，讓讀者可清楚瞭解設計光學系統時的理論基礎。

3.1 目鏡原理

目鏡是具有外部入射光瞳的透鏡系統[21, 22]。肉眼應置於這個入射光瞳的位置上。眼睛瞳孔的變化從直徑2 mm(晴空下)到直徑8 mm(夜視)，其焦距大約17 mm (Luizov, 1984)，瞳孔的直徑D(單位mm)可由經驗來近似成公式(3.1)。

$$D = 5.3 - 0.55\ln B \quad (3.1)$$

其中B為背景亮度，單位為英尺 - 朗伯(ft - L)。一些典型的B與D關係值可參閱表 3.1。

表 3.1 背景亮度 vs. 瞳孔直徑

環境	背景亮度(ft - L)	D(mm)
清澈夜晚	0.01	7.8
黎明/黃昏	1	5.3
室內	100	2.7
晴天	1000	1.5

放大鏡最主要功能是將物體的影像放大，而目鏡也同樣具有類似功能。眼睛看物體所察覺到的大小，決定在視網膜處的成像尺寸。換言之，成像尺寸與裸眼對物體所張之角成正比。當人們仔細欣賞物體結構之細節時，總是把物體向眼睛挪近，目的就是要將相對的張角增大，以便讓網膜上的影像盡量變大。通常我

們以影像張角與物體張角的比率來定義出角度之放大倍率M(Magnification)，(3.2)式分別為加上目鏡與裸眼將物體置於明視距離之視角比。

$$M = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} \quad (3.2)$$

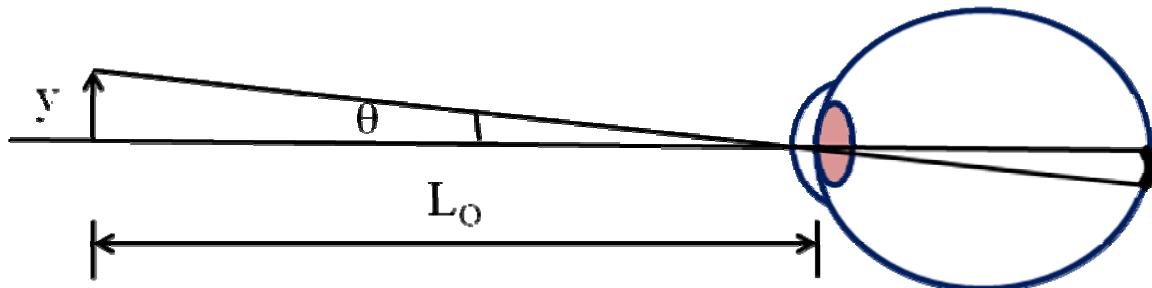


圖3.1 物體放在明視距離，眼睛看物體所張之角

又如圖3.1為物體放在明視距離 L_0 ，眼睛看物體所張角 θ 圖，圖3.2所示為將物高為 y 之待測物體，放在透鏡焦點內，經透鏡成一放大的高為 y' 的正立虛像，此虛像又在眼睛視網膜上成實像。設 y 到透鏡的距離為 s' ，對眼的視角為 θ' ，如眼曲率中心至透鏡之距離為 d ，則公式推導如(3.3)~(3.6)

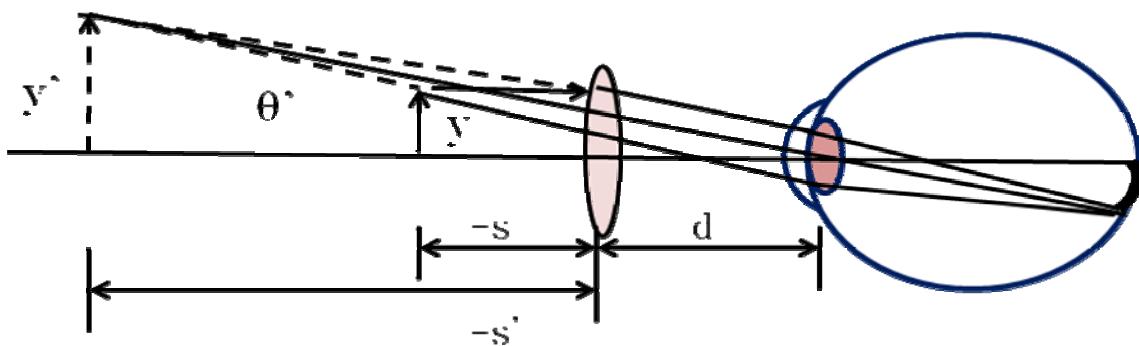


圖3.2 物體經放大鏡放大

$$\tan \theta' = \frac{y'}{-s' + d} \quad (3.3)$$

$$M = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{y'}{-s + d} \frac{L_0}{y} = \frac{y'}{y} \frac{L_0}{d - s} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{-s} + \frac{1}{-f'} = \frac{1}{-s} \Rightarrow s = \frac{s' f'}{f' - s'} \quad (3.5)$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{s'}{s' f'} = \frac{f' - s'}{f'} \quad (3.6)$$

若不用透鏡直接觀察放在明視距離 $L_0 = 250$ mm 處的物體如圖3.1，物體對眼睛的視角為 θ ，因此放大鏡的放大倍率為公式3.7所示。

$$M = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{y'}{-s + d} \frac{L_0}{y} = \frac{s - s'}{s} \frac{L_0}{d - s} = \frac{L_0}{s} \frac{s - s'}{d - s} \quad (3.7)$$

而我們頭戴式顯示器是將成像來源設計於焦點內，其放大率如公式(3.2)所示，由以上公式可知目鏡的放大率和目鏡到眼之距離無關[25]。

3.2 透鏡設計之符號定義及原理

一個理想的光學系統可以看成是一個整體。它的光學特性可以由六個基點來描述[22, 23]。這六個基點為：第一和第二焦點、第一和第二主點及第一和第二節點。

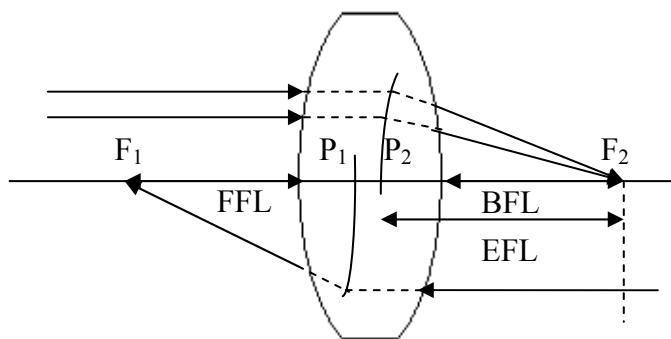


圖3.3 光學系統的主點與焦點

焦點(focal points)定義為一束平行於光軸的光線，經理想光學系統後將匯聚到光軸上的一點，此點稱為焦點。如果進入系統的每一根平行光線與其對應的出射光線反向延長相交，這些交點組成一交面，稱為主平面。此平面與光軸的交點稱為主點(principal points)。從左方射入光學系統的平行光確定了第二焦點和第二主點，從右方射入的平行光線確定了第一焦點和第一主點，如圖3.3所示。節點(nodal points)定義為光軸上兩點，當入射光線以一定的角度從一個節點射入，光線經過光學系統後將會以相同角度由另一節點射出，如圖3.4所示。通常用 N_1 和 N_2 來表示。如果系統兩側為空氣時，節點與主點將重合，光線從左方入射的節點為第一節點，出射的節點為第二節點。

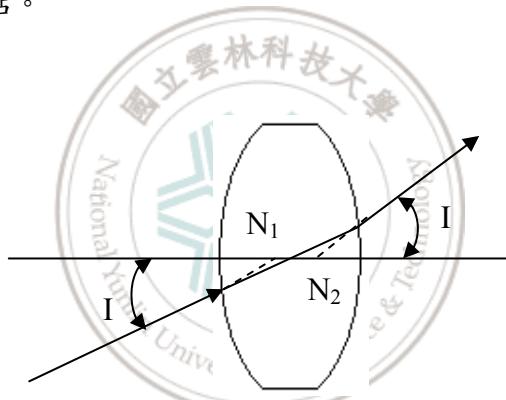


圖3.4 光學系統的節點

為了建立普遍適用的公式，來確定像相對於物的位置和大小，必須對長度和角度的計量有明確的定義，下面給出這些量的符號規則：

- 1.高度以軸上方為正，下方為負。
- 2.距離以參考點右方為正，左方為負。
- 3.當光線與光軸在同一平面內時，光線與光軸間夾角稱為傾斜角，用 U 表示。當光軸以順時針轉至光線(銳角)為正，反之為負。當光線入射至一折射(或反射)面上，光線與面法線的夾角稱為入射角，用 I 來表示。當法線以反時針轉向光線(銳角)為

正，反之為負。

在前面所說的系統焦距是以系統的主點為參考點，在圖3.5所示的情況，在物空間焦點 F_1 在第一主點左方，故焦距為負。而在像空間焦點 F_2 在第二主點右方，故焦距為正。為了避免引起混淆，在像空間的量加上一個“'”，以示區別。

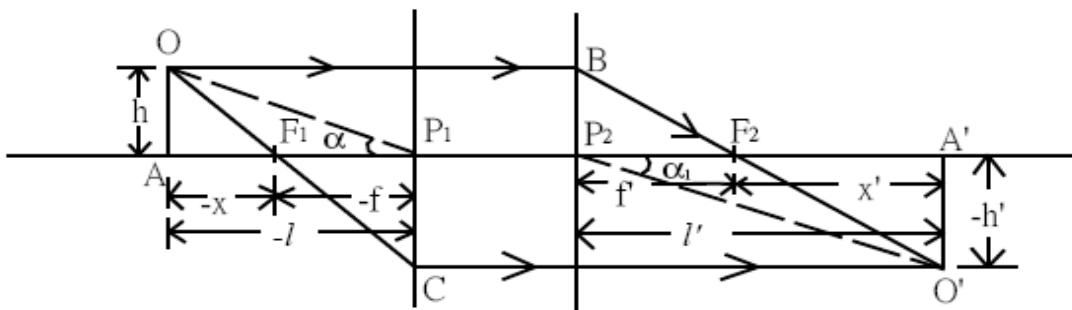


圖3.5 透鏡成像光路圖

3.2.2 近軸近似下的光追跡法

光線在球面上的折射過程可以用Snell定律和三角函數進行嚴格計算。如圖3.6所示，在球面上，光線以傾斜角 U 入射至折射面。頂點A與光線的距離定義為 Q 。這樣入射光線在給定 Q 和 U 後就完全被確定。由曲率中心C作 Q 之垂線，將 Q 分成兩部份。設球面半徑為 r ，由圖3.6可看出 $Q = r \sin I + r \sin U$ ，即

$$\sin I = QC - \sin U \quad (3.9)$$

$$\text{其中 } C = \frac{1}{r}$$

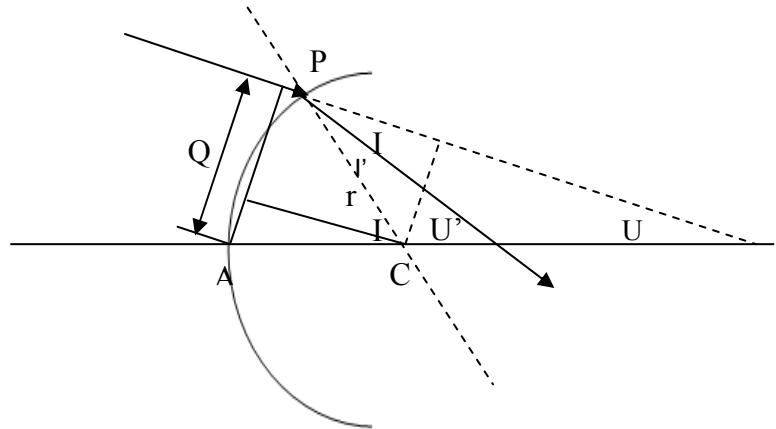


圖3.6 單一球面折射光路圖

由折射定律得

$$M = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (3.10)$$

由圖3.6可知 $\angle PCA = I + U = I' + U'$ ，故

$$U' = I + U - I' \quad (3.11)$$

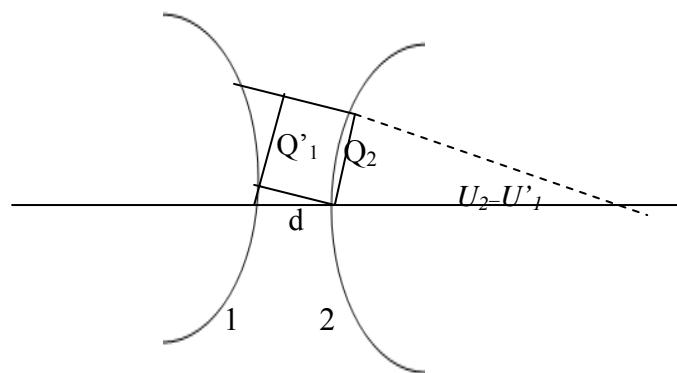


圖3.7 二球面間折射光路圖

當光線經第一折射面折射後，離開第一折射面到達相距 d 的第二面時，其參數 (Q_2, U_2) 可以由轉移方程求得，從圖3.7看出：

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q'_1 - d \sin U'_1 \\ U_2 &= U'_1 \end{aligned} \quad (3.12)$$

在一級光學近似下， Q 和 U 都非常小，也就是光線十分接近於光軸，這時可採用近似 $\sin I \sim I$ ， $\sin U \sim U$ 和 $Q \sim Y$ 。我們用小寫字母來表示在近軸近似下所對應的量，即用*i*和u分別來表示I和U，用y和z來表示Y和Z。在此近似下，可將(3.9)、(3.10)、(3.11)式寫成

$$i = yC - u \quad (3.13)$$

$$i' = \frac{n}{n'} i \quad (3.14)$$

$$u' = i + u - i' \quad (3.15)$$

在(3.13)和(3.14)式中消除*i*和*i'*，可得：

折射方程式

$$n(yC - u) = n'(yC - u') \quad (3.16)$$

或

$$n'u' = nu + y(n' - n)C \quad (3.17)$$

轉移方程

$$y_2 = y_1 - d u'_1 = y_1 + \left(-\frac{d}{n'_1}\right) n'_1 u'_1 \quad (3.18)$$

和

$$u_2 = u'_1 \quad (3.19)$$

則

$$l = \frac{y}{u} \quad , \quad l' = \frac{y}{u'} \quad (3.20)$$

在近軸近似下，如用*l* 和*l'*來計算，(3.17)式可寫成：

$$n' \frac{u'}{y} = n \frac{u}{y} + (n' - n)C \quad (3.21)$$

考慮到 $l = \frac{y}{u}$ 和 $l' = \frac{y}{u'}$ ，則上式成為：

$$\frac{n'}{l'} = \frac{n}{l} + (n' - n)C \quad (3.22)$$

定義光焦度(Refractive power)

$$\phi = (n' - n)C = \frac{(n' - n)}{r} \quad (3.23)$$

即可得到下列一組方程：

折射方程

$$\frac{n'}{l'} = \frac{n}{l} + \phi \quad (3.24)$$

轉移方程

$$l_2 = l'_1 - d \quad (3.25)$$

在光焦度的計算中，當r的單位為公尺時，光焦度的單位稱為屈光度(diopter - D)。

3.2.3 厚透鏡的主點和焦點

單透鏡的各基點可以很容易由前面的公式求得。透鏡的焦點來自無窮遠平行於光軸的光線經透鏡後與光軸的交點。此點可以由初始傾斜角為 $u_I = 0$ 的光線追跡後求得。圖3.8是此光線的光路圖。主平面 P_2 可由出射光線與入射光線延長後的交點所決定。由 P_2 到交點 F'_2 的距離，稱為有效焦距 EFL ，可表示為

$$EFL = f' = \frac{y_1}{u'_2} \quad (3.26)$$

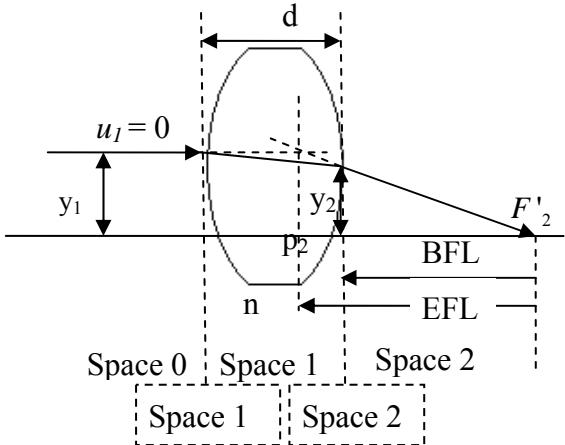


圖3.8 厚透鏡的有效焦距EFL和後焦距BFL

焦點至最後面頂點的距離定義為後焦距 BFL ：

$$BFL = f'_B = \frac{y_2}{u'_2} \quad (3.27)$$

由於經常使用這些量，給出上述量的一般計算公式是十分有意義的。我們利用 $(y-nu)$ 法來追跡。假定透鏡置於空氣中， $n_1 = n'_2 = 1.0$ ，透鏡折射率為 $n'_1 = n_2 = n$ ，兩折射面曲率分別為 C_1 和 C_2 ，透鏡中心厚度為 d 。由下表3.2進行計算可知

$$u'_2 = (n-1)y_2(c_1 - c_2 + \frac{n-1}{n}c_1c_2d) \quad (3.28)$$

透鏡的光焦度定義為 $\phi = \frac{1}{f'}$ ，根據(3.25)式可表示成

$$\phi = \frac{1}{f'} = \frac{u'_2}{y_1} = (n-1)[c_1 - c_2 + \frac{n-1}{n}c_1c_2d] \quad (3.29)$$

或

$$\phi = (n-1)\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{d}{R_1R_2} \frac{n-1}{n}\right] \quad (3.30)$$

由(3.27)式可得後焦距為

$$BFL = \frac{y_2}{u'_2} = EFL * \left[1 - \frac{d}{R_1} \frac{n-1}{n}\right] \quad (3.31)$$

第二主點至後折射面頂點的距離為

$$(BFL - EFL) = -\left(\frac{d}{R_1} \frac{n-1}{n}\right) EFL \quad (3.32)$$

表 3.2 厚透鏡的曲率與厚度

	Space 0	Surface 1	Space 1	Surface 2	Space 2
ϕ		$(n-1)C_1$		$-(n-1)C_2$	
$-d/n$			$-d/n$		
y		y_1		$y_1 - \frac{d}{n} y_1 (n-1) C_1$	
nu	0		$y_1 (n-1) C_1$		$y_1 (n-1) C_1 - (n-1) C_2 \left[y_1 - \frac{d}{n} y_1 (n-1) C_1 \right]$

上面計算確定了第二焦點和第二主點。而第一焦點和第一主點，只需把 R_1 和 R_2 交換即可求得，但結果要改變符號。薄透鏡則是將 $d=0$ 代入 (3.30)、(3.31)、(3.32) 等公式，也可分別求得在薄透鏡情況下，光焦度、後焦長，而第二主點就是等於在折射面上。

3.2.4 多透鏡組合系統

通常一個光學系統是由許多分離透鏡所組成，用每一透鏡的焦距和元件間的距離來處理，要比用折射面逐面處理來得方便。

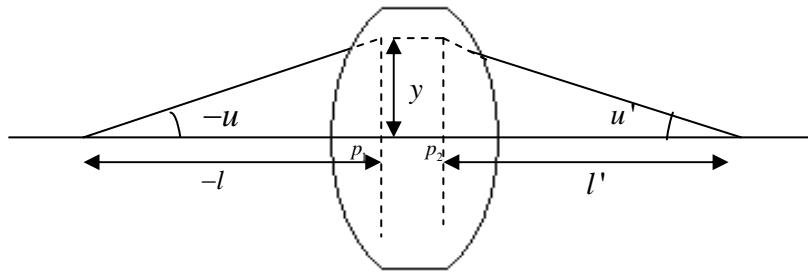


圖3.9 主平面與物像距之關係圖

如圖3.9所示，物距 l 是物與第一主平面的距離。像距 l' 是像與第二主平面的距離。兩主平面為放大率為1的共軛面，如果一物點所發出的光線交第一主平面的高度為 y ，則此光線將以相同的高度 y 由第二主平面射出。光線的傾斜角可以表示為

$$u = \frac{y}{l} \text{ 和 } u' = \frac{y}{l'} \quad (3.33)$$

上式代入到Gauss公式 $\frac{1}{l'} = \frac{1}{l} + \frac{1}{f}$ 中，可得

$$\frac{u'}{y} = \frac{u}{y} + \frac{1}{f}, \quad (3.34)$$

或

$$u' = u + y\phi \quad (3.35)$$

其中 $\phi = \frac{1}{f}$

對於由一透鏡轉移至下一透鏡的表示式為

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 + (-d'_1)u'_1 \\ u_2 &= u'_1 \end{aligned} \quad (3.36)$$

其中下標“1”表示前透鏡和“2”表示後透鏡， d'_1 是前面透鏡第二主平面至後透

鏡第一主平面之間的距離。上面公式都是假定透鏡的周圍介質為空氣。系統的總焦距或總光焦度可以由一般的近軸近似公式推得。我們利用(3.16)式對系統中每一個折射面逐一進行計算，可寫成(3.37)式

$$\begin{aligned} n'_1 u'_1 - n_1 u_1 &= y_1 (n'_1 - n_1) C_1 \\ n'_2 u'_2 - n_2 u_2 &= y_2 (n'_2 - n_2) C_2 \end{aligned} \quad (3.37)$$

即

$$\begin{aligned} n'_2 u'_2 - n'_1 u'_1 &= y_2 (n'_2 - n_2) C_2 \\ n'_k u'_k - n'_1 u'_1 &= y_k (n'_k - n_k) C_k \end{aligned} \quad (3.38)$$

即

$$n'_k u'_k - n'_1 u'_1 = y_k (n'_k - n_k) C_k \quad (3.39)$$

上面各式相加後，將得到：

$$n'_k u'_k - n_1 u_1 = \sum_i y_i (n'_i - n_i) C_i \equiv \sum y \phi \quad (3.40)$$

對於系統焦點，可用平行光射入，求出射光與軸的焦點，可表示為

$$f' = \frac{y_1}{u'_k} \quad (3.41)$$

系統光焦度為：

$$P = \frac{n'_k}{f'} = \frac{n'_k u'_k}{y_1} = \frac{1}{y_1} \sum y \phi \quad (3.42)$$

上式中 n'_k 是像空間折射率。由於入射光平行於光軸，故 $u_1 = 0$ 。

我們可以根據上面公式求得在空氣中兩分離薄透鏡組合焦距的一般公式。假定兩透鏡的光焦度分別為 ϕ_a 和 ϕ_b 相互間距為 d ，如圖3.10。用 $y = 1$ ， $u = 0$ 的光線入射。

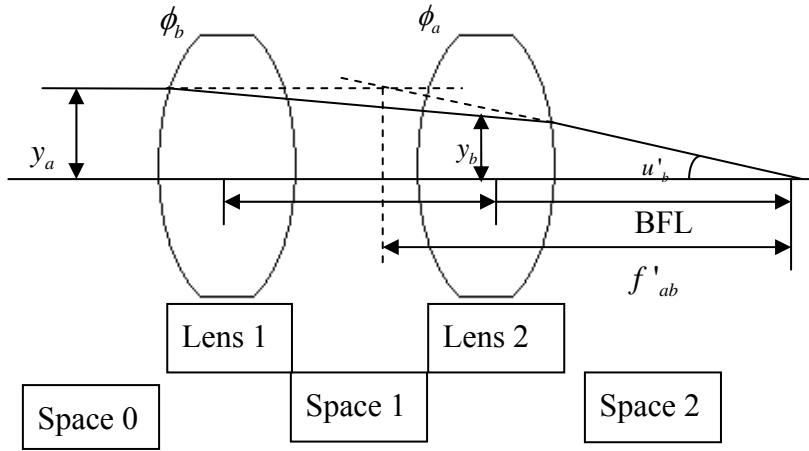


圖3.10 兩分開透鏡所組成系統圖

表 3.3 透鏡間距與曲率

	Space 0	Lens 1	Space 1	Lens 2	Space 2
ϕ		ϕ_a		ϕ_b	
$-d$			$-d$		
y		1		$1-d\phi_a$	
u	0		ϕ_a		$\phi_a + \phi_b - d\phi_a\phi_b$

根據上表3.3就可求得系統光焦度為：

$$\phi_{ab} = \frac{1}{f'_{ab}} = \frac{u'_b}{y_a} = \phi_a + \phi_b - d\phi_a\phi_b = \frac{1}{f'_a} + \frac{1}{f'_b} - \frac{d}{f'_a f'_b} \quad (3.43)$$

或

$$f'_{ab} = \frac{f'_a f'_b}{f'_a + f'_b - d} \quad (3.44)$$

系統後焦距

$$BFL = \frac{y_b}{u'_b} = \frac{(1-d\phi_a)}{\phi_a + \phi_b - d\phi_a\phi_b} = \frac{f'_b(f'_a - d)}{f'_a + f'_b - d} \quad (3.45)$$

利用(3.44)

$$BFL = \frac{f'_{ab}(f'_a - d)}{f'_a} \quad (3.46)$$

前焦距可採用反向追跡，也可以在(3.45)中把a和b對換，可得

$$FFL = -\frac{f'_{ab}(f'_a - d)}{f'_a} \quad (3.47)$$

如果給定了系統的有效焦距 f'_{ab} ，後焦距 BFL 和透鏡間距 d ，則可求得兩透鏡的個別焦距為：

$$f'_a = \frac{df'_{ab}}{f'_{ab} - (BFL)} \quad (3.48)$$

$$f'_b = \frac{-d(BFL)}{f'_{ab} - (BFL) - d} \quad (3.49)$$

3.2.5 光學計算的矩陣方法

在一級近似下，光線的(y, nu) 表示式在第一折射面折射可由圖3.11得

$$n'_1 u'_1 = \frac{n_1 u_1 + y_1(n'_1 - n_1)}{r_1} = n_1 u_1 + y_1 \phi_1 \quad (3.50)$$

$$y'_1 = y_1$$

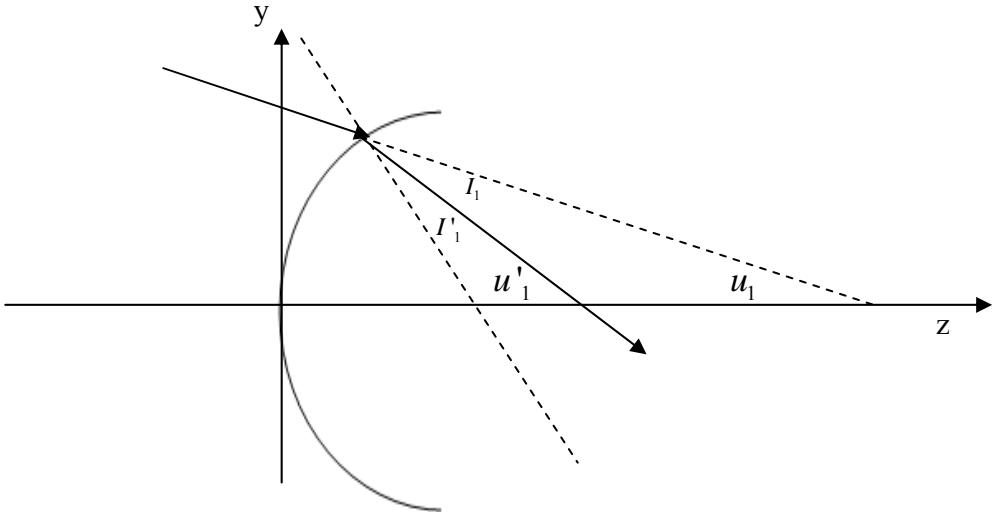


圖3.11 在近軸光學下的球面折射光路

和從第一面轉移至第二面：

$$\begin{aligned} n_2 u_2 &= n'_1 u'_1 \\ y_2 &= y'_1 + \left(-\frac{t'_1}{n'_1}\right) (n'_1 u'_1) \end{aligned} \quad (3.51)$$

(3.50)和(3.51)式可以用矩陣表示成：

$$\begin{pmatrix} n'_1 u'_1 \\ y'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \phi_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 u_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

和

$$\begin{pmatrix} n_2 u_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{t'_1}{n'_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n'_1 u'_1 \\ y'_1 \end{pmatrix} \quad (3.53)$$

在光線的傾斜不大時， t'_1 可近似地看成透鏡的厚度。這樣光線從第一面經折射，在達到第二面時，可表示成

$$\begin{pmatrix} n_2 u_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{t'_1}{n'_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \phi_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 u_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

或

$$\begin{pmatrix} n_2 u_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = T_{21} R_1 \begin{pmatrix} n_1 u_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

在(3.55)式中， R_1 是表示在折射面1的折射矩阵，和 T_{21} 表示由折射面1轉移到折射面2的平移矩阵。把折射矩阵和平移矩阵按一定的順序從右至左組合起來，即可獲得光線經過一系列折射和平移的行為。光線每一次折射或平移都有一個矩阵與其對應。對於一透鏡而言，有兩個折射面，入射光線和出射光線之間的關係可表示為

$$\begin{pmatrix} n'_2 u'_2 \\ y'_2 \end{pmatrix} = R_2 T_{21} R_1 \begin{pmatrix} n_1 u_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

其中 n_1 、 u_1 和 y_1 是第一面左方入射參量， n'_2 、 u'_2 和 y'_2 是第二面右方出射參量。

矩阵法中採用的參量符號規則與3.2.2節中的符號規則基本上一致。現在再一次整理如下：

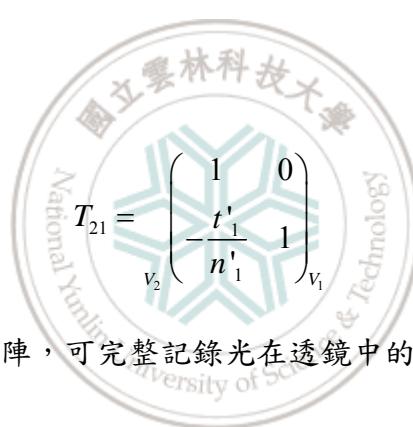
- 1.光線由左至右為正，折射率取正值；光線由右至左為負，折射率取負值。
- 2.距離從透鏡頂點開始量測，頂點為透鏡面和光軸的交點。
- 3.距離從左至右為正。垂直高度y在光軸(z軸)上方為正。
- 4.傾斜角以反時針轉至軸為正(銳角)。入射或折射角以順時針轉至法線為正(銳角)。
- 5.不同介質的介面從左向右計數。

6. 入射光線的符號右上方不加“'”號，經折射後右上方加“'”號。
7. 下標表示折射面。
8. 曲率中心在曲面之右方為正，在其左方為負。
9. 矩陣外的下標表示對應的參考點和平面： O 為物平面， O' 為像平面，和 V_1, V_2, \dots, V_n 為介面。

對於單一球面的折射矩陣為：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & \phi_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_{V_1} \quad (3.57)$$

經距離 t'_1 的平移矩陣為：



$$T_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{t'_1}{n'_1} & 1 \end{pmatrix}_{V_2} \quad (3.58)$$

而利用折射矩陣與平移矩陣，可完整記錄光在透鏡中的追跡過程。

第四章 光學系統設計與優化

一般而言，對於HMD目鏡之設計有兩種方法，第一種就是先從薄透鏡系統著手，經過加厚及優化程序到最後的實際光學系統。第二種就是從舊有之目鏡資料，依照所需要之規格選取設計過之目鏡資料，經優化程序完成設計。

我們利用兩種不同的方法來設計目鏡，以HMD微顯示元件固有的規格設計，兩片、三片透鏡組的初階是由光學系統的焦距長度、物像距、放大倍率等參數得到。利用3.2節光追跡方法，來設計出我們需要初階的光學透鏡，再將初階的透鏡系統進行優化，完成我們需要的光學系統，另外我們利用第二種方法，找一組四片透鏡組的專利，設定系統的初階後，再對系統進行優化。

4.1 光學系統的基本規格

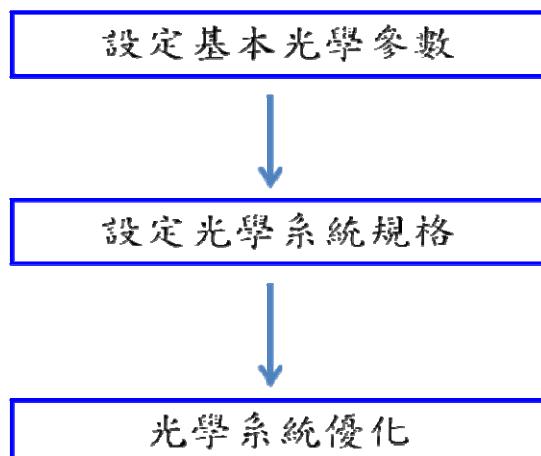


圖4.1 光學系統設計流程圖

表 4.1 LCOS 顯示器規格

解析度	432*240*3
面板尺寸	0.26吋(4 : 3)
畫面速率	120 Hz
光源色溫	6500±500 K
消耗功率	>1.2 W

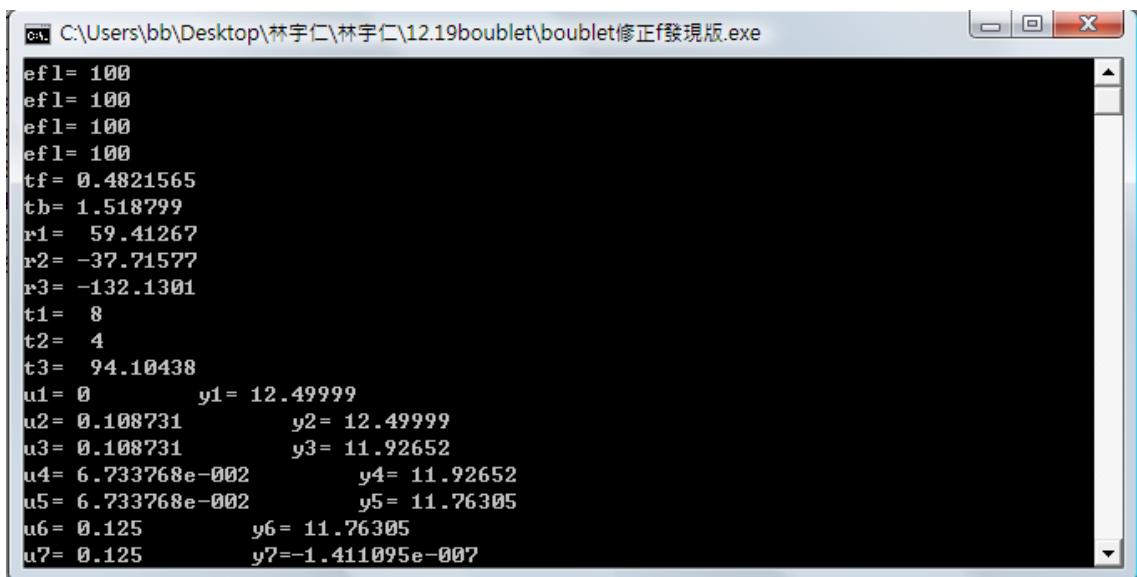
由表4.1可知面板尺寸為0.26吋(6.6 mm)，我們所設計規格為放大率17倍之目鏡，其焦距為15.625 mm，設計出成像於250 mm明視距離位置。上一章提到目鏡放大率與眼睛距離無關，一般目鏡都是眼睛貼著目鏡觀看，所以設目鏡與眼睛的距離為5 mm 以讓眼睛有一個緩衝的空間。半場視角以 \tan^{-1} (像高/像距)來計算，得到12.65度的視角。以上光學系統規格經整理並顯現如表4.2所示，訂出這些規格後，我們便可以開始進行光學系統的設計。

表 4.2 光學系統規格

	一般人
焦距	15.625 mm
半視場角	12.65 °
光波長	486 nm ~ 656 nm
f/#	5
放大率	17×

4.2 雙合鏡與三合鏡初階

上一章透鏡設計原理，再利用 Freebasic 軟體，算出雙合鏡的曲率半徑與厚度等透鏡資料，再將算出來的資料輸入至 ZEMAX 光學模擬軟體。輸入至 ZEMAX 後，我們些微調整透鏡的參數，完成光學系統的初階設定。我們為何要利用 Freebasic 來寫透鏡的 macro 而不直接在 ZEMAX 裡寫，原因是 ZEMAX 內建的軟體除錯功能未竟完全，所以另外選用 Freebasic 來撰寫透鏡的 macro。圖 4.2 與 4.3 分別為 Freebasic 計算出兩片與三片透鏡的初階。



```
efl= 100
efl= 100
efl= 100
efl= 100
tf= 0.4821565
tb= 1.518799
r1= 59.41267
r2= -37.71577
r3= -132.1301
t1= 8
t2= 4
t3= 94.10438
u1= 0      y1= 12.49999
u2= 0.108731      y2= 12.49999
u3= 0.108731      y3= 11.92652
u4= 6.733768e-002      y4= 11.92652
u5= 6.733768e-002      y5= 11.76305
u6= 0.125      y6= 11.76305
u7= 0.125      y7=-1.411095e-007
```

圖4.2 Freebasic計算出兩片透鏡的初階

```
C:\Users\bb\Desktop\林宇仁\林宇仁\11.29triplet\tripletfinal.exe
u1= 0      y1= 12.5
u2= 0.1758032      y2= 12.5
u3= 0.1758032      y3= 11.62792
u4= 0.1864064      y4= 11.62792
u5= 0.1864064      y5= 8.641548
u6= 4.520485e-002      y6= 8.641548
u7= 4.520485e-002      y7= 8.528934
t1= 16.02074
t2= 16.088
t3= 85.93632
tt1= 8
tt2= 4
tt3= 8
phi1= 1.491251e-002
phi2=-3.817595e-002
phi3= 2.343153e-002
f1= 67.05779
f2=-26.1945
f3= 42.67753
m1= 0
m2=-1.393699
m3=-1.069995
r1= 43.56562
r2=-671.9311
r3=-37.06572
r4= 28.8651
r5= 53.91424
r6=-47.91438
u1= 0      y1= 12.5
u2= 0.1758032      y2= 12.5
u3= 0.1758032      y3= 11.62792
u4= 0.1864064      y4= 11.62792
u5= 0.1864064      y5= 8.641548
u6= 4.520485e-002      y6= 8.641548
u7= 4.520485e-002      y7= 8.528934
u8=-0.1337494      y8= 8.528934
u9=-0.1337494      y9= 10.68069
u10=-1.236671e-002      y10= 10.68069
u11=-1.236671e-002      y11= 10.74204
u12= 0.125      y12= 10.74204
u13= 0.125      y13=-2.069315e-007
```

圖4.3 Freebasic計算出三片透鏡的初階

四片透鏡組是由專利US6349004[26]中所介紹傳統目鏡為我們的初階資料，我依照訂定的規格設計好我們四片透鏡組的系統，表4.3為專利US6349004的透鏡資料。

表 4.3 專利 US6349004 目鏡資料

Surf	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass	Semi-Diameter (mm)
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard	Infinity	25		3
2	Standard	138.360	1.5	SF6	9.240
3	Standard	35.727	6	S - LAH66	9.496
4	Standard	-37.727	0.25		9.869
5	Standard	22.273	6	S - LAH66	9.822
6	Standard	-64.982	1.5	SF6	9.164
7	Standard	33.977	17.292		8.492
IMA	Standard	Infinity			5.760

我們分別將 Freebasic 計算出的透鏡初階與專利中目鏡的資料輸入到 ZEMAX 軟體中，在軟體中設定我們所訂定光學系統的規格後，開始利用軟體對透鏡進行優化。

4.3 像質分析

評價光學品質是一件費時又費工的事情，像差理論雖經由複雜的數學推演而得，但大部份光學的品質檢測還是傾向以光學現象來判定什麼才是真正的優良成像。而在光學模擬軟體的分析中，可以透過數學運轉換成圖像來表示[27]。在本研究中，我們利用 MTF、MTF 與視場角的關係、場曲與畸變、橫向色差分別來檢驗

品質。

眼球之像差容忍度和像差種類透鏡因鏡片不同的形狀、厚度及材質的關係，存在著相對的像差量，此像差量會造成物體透過透鏡組及人的眼球光學系統成像於視網膜上的清晰度。影響此成像的像差可分成兩大類：色散像差與單色光像差。

(1) 色散像差：

因為透鏡組的作用可視為無數的小稜鏡所組成，且白光經過此透鏡組時，因不同的光波波長所受透鏡的屈折能力不同，以致會有(a)縱向色像差(b)橫向色像差兩種。

(a) 縱向色像差：

平行光軸入射至透鏡的白光，因青藍色波長的光所受的透鏡屈折作用力強，所以焦距比紅色波長為小。在光軸上發生的像差距離稱為縱向色像差。與阿貝(ABBE number)的大小成反比。眼球的平均屈折力(D_d)是58.6且阿貝數是56.4所以縱向色散差約1.04屈折力(約0.225 mm)。眼球雖然有此色像差，但平時感覺不出來，因為眼球對黃色光感度較強，藍色光、紅色光感度較弱。

(b) 橫向色像差：

主要是由軸外的物點因各色光譜之屈折力不等，造成像的大小在光軸的垂直方向產生像差，也就是在橫向方向產生色像差。同樣的也與阿貝數成反比，阿貝數越大色像差越小。人眼對於橫向色散的容忍度在0.1屈光度(約22.5 microns)，只要橫向色散在此容忍度以下，眼球就感覺不出來。

(2) 單色光像差：

單色光引起的像差有5種：(a)球面像差、(b)彗形像差、(c)像散像差、(d)像面彎曲、(e)畸變像差。

(a)球面像差：

光軸上的一點發出並擴散的光束經透鏡後成像所引起的像差稱為球面像差，週邊光線與近軸光線在像平面無法共交於一點，且球面像差量與透鏡半徑平方值成正比。

(b)彗形像差：

軸外之點與近軸光線在像平面上形成 60° 的圓錐面，形狀成一彗形像差。

(c)像散像差：

來自軸外物點之光束經透鏡折射後形成互相正交之兩條短焦線，謂之像散。一為切像面焦線，另一為矢像面焦線。

(d)像面彎曲：

會使成像在矢方向或切方向產生像面彎曲，而在造成邊緣或中心部分的成像模糊，影響成像品質。

(e)畸變像差：

所謂畸變像差乃是透鏡或是透鏡系統對某一定形狀之物體所成之像無法完全與原物相似。而產生桶形畸變(Barrel Distortion)或枕形畸變(Pincushion Distortion)。

4.4 光學系統優化

根據 4.3 節，我們訂出符合需求所開出透鏡規格，並藉由 Zemax 光學模擬軟體將粗略的透鏡系統形成，包括透鏡組的曲率、厚度與間距。初階設計的好處在

於軟體找尋最佳解時，能快速且精確找到最佳解，可以減少優化過程中花費的時間。由於設計完成的鏡頭都是在一般白光作業，所以在模擬軟體設定波長選擇時，我們選擇三段可見光來表示，分別為 $0.486\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.588\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.656\text{ }\mu\text{m}$ 。在優化的過程中必需給予軟體適當的限制條件，使用 merit function 優化的參數 EFFL、PMAG、MNCA、MXCA、MNCG、MXCG、DIMX、MTFT、MTFS 進行優化過程。由先前我們設定焦長 15.625 mm ，系統在優化完全過程中一定要達到物高的視場，為了要確實檢驗每個視場，我們一共取了 11 個物高的視場，分別是 0.33 、 0.66 、 0.99 、 1.32 、 1.65 、 1.98 、 2.31 、 2.64 、 2.97 、 3.3 ，此時使用的優化因子有 EFFL、PMAG、DISG、CTGT、CTLT、MTFS、MTFT。在視場優化的過程中，必需注意透鏡間距是否會變為負值，因為如果變成負值就表示兩透鏡已重疊在一起，這是不能發生的現象，還需檢驗各個像差值是否有過大的跡象，如果都在正常範圍中就能進行下一步的動作。



第五章 結果與討論

本章節將最佳化的光學系統，以人眼對於像差的容忍做討論，說明為何使用非球面設計透鏡提升MTF的值，同時可以得到較佳的成像品質。接著討論利用兩片、三片、四片透鏡優化出來的光學系統做比較。

5.1 光學系統優化後結果

我們設計三組不同的透鏡組，經過ZEMAX系統優化後的表面、厚度、材料等條件優化後，所得到透鏡資料如表5.1、5.2、5.3。圖5.1分別為其系統Layout圖，圖5.1(a)裡的1為物體由透鏡所成之虛像，2為物高，3為透鏡，4為人眼的位置。

表 5.1 兩片透鏡表面資料

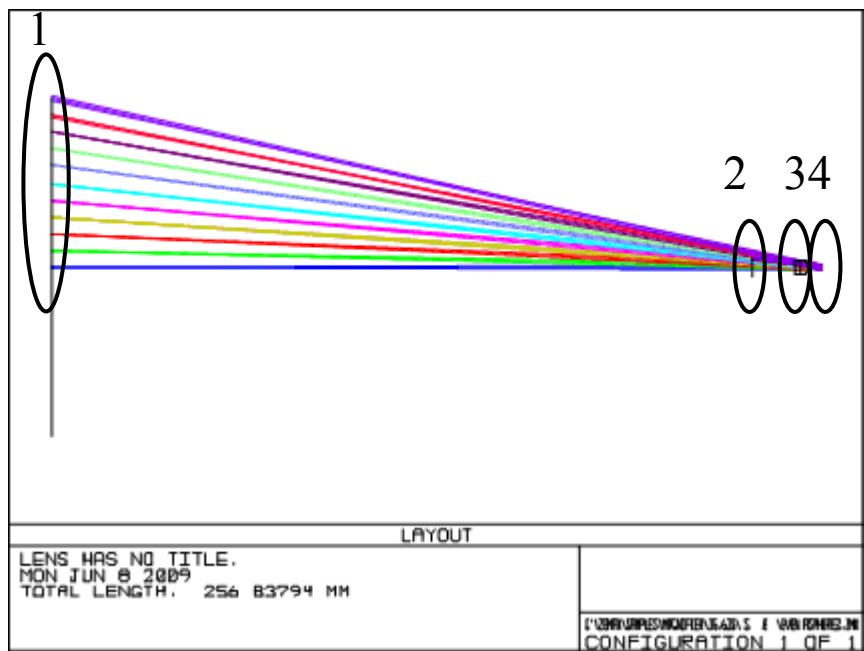
Surface	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass	Semi-Diameter (mm)
OBJ	Standard	Infinity	13.803710		3.3
1	Evenasph	11.653862	2.01545	M - BACD5N	2.381433
2	Standard	-6.160987	0.2000178	SF2	2.227992
3	Standard	-27.003782	1.8		2.002657
STO	Standard	Infinity	-256.837945		0.928434
IMA	Standard	Infinity	5		56.633675
Surface	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass	Diameter (mm)

表 5.2 三片透鏡表面資料

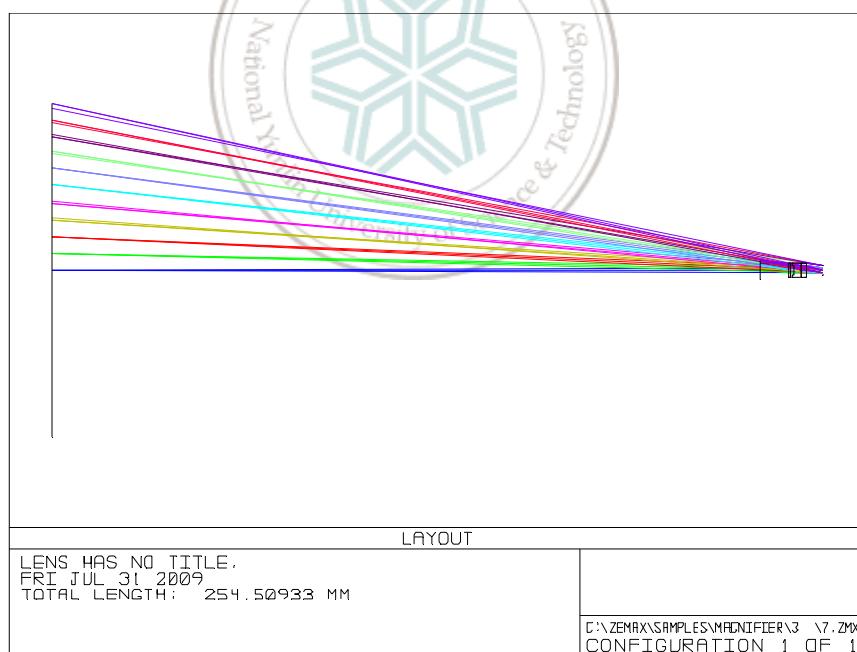
Surf	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass	Semi-Diameter (mm)
OBJ	Standard	Infinity	9.442278		3.3
1	Standard	11.261745	0.896770	LAC11	2.525555
2	Standard	-16.836824	1.059627		2.466196
3	Standard	-4.259279	2.147325	F15	2.258866
4	Standard	8.839275	0.163854		2.419010
5	Standard	27.717872	2.121575	SK4	2.399483
6	Standard	-4.658268	5		2.566062
STO	Standard	Infinity	-254.509331		1.397769
IMA	Standard	Infinity			55.086704

表 5.3 四片透鏡表面資料

Surf	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass	Semi-Diameter (mm)
OBJ	Standard	Infinity	13.620893		3.3
1	Standard	-12.084342	0.672562	PBH11W	2.382395
2	Standard	13.436513	0.219753		2.441298
3	Standard	19.656936	2.259069	S - LAH66	2.480546
4	Standard	-11.261793	0.072059		2.626897
5	Standard	5.710609	0.684486	S - LAH66	2.585325
6	Standard	12.299569	0.070827		2.507805
7	Standard	3.248581	0.908974	SF6	2.304424
8	Standard	2.534030	5		1.872174
STO	Standard	Infinity	-256.328392		0.975241
IMA	Standard	Infinity			56.525008



(a)



(b)

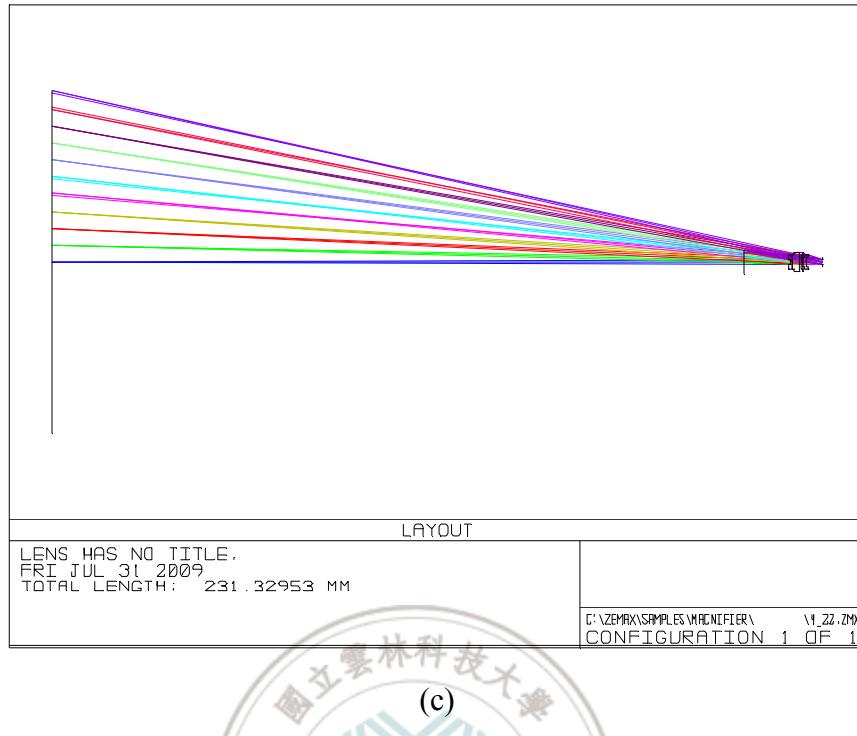


圖5.1 為優化後透鏡組的Layout圖(a)兩片(b)三片(c)四片

5.2 人眼視力的解析度

因為本論文主要是利用MTF來判斷透鏡組綜合評估指標[25]，首先先針對MTF的特性來做介紹。MTF是正弦波響應，使用檢驗圖時以正弦波變化之特性引進反差的概念來檢定透鏡組的解像能力。首先必須對「空間頻率」下個定義，空間頻率就是1 mm 的寬度中，有幾次正弦濃度反覆變化次數的意思(請想像空間頻率如同聲音一般的波型變化)。原本充足的反差可以很容易辨識出兩條線來，而當空間頻率加大時(即線條越緊密時)反差也逐漸縮小，終於反差低落到全部變成灰色，再也分辨不出黑白條紋來，就表示透鏡的解像能力已到極限，如圖5.2所示[28]。



圖5.2 透鏡組解像能力比較圖

在了解 MTF 的特性後，針對人眼來探討其解析度，由文獻[29, 30]中可以得到人眼半視角對應人眼最小解析能力(Minimum Angle of Resolution)，如圖 5.3 所示藍色虛線所框的線。由圖 5.3 所示人眼於 250 mm 明視距離，在光軸上的解析能力為 1 分角，而以本論文設計的 HMD 的半視角為 12 °，對照圖 5.3 其解析能力約為 4 分角。如圖 5.4 所示，1 分角是以物體兩點的光線入射眼球，透過節點交叉時所形成的夾角的 θ ， θ 就是人眼於光軸上的最小解析度[30]。

以此系統於 250 mm 成像位置計算，1 分角為 $\frac{1^\circ}{60}$ ，利用公式(5.1)計算出眼睛在 1 分角所能解析最小線寬[33]，如圖 5.4 所示的 d，由公式計算其值為 0.0727 mm，在半視角 12 °時，其解析度為 4 分角，所能解析的線寬為 0.2909 mm，計算出眼睛能夠分辨的最小線寬後，再利用公式(5.2)計算最人眼解析的空間頻率，計算出的 1 分與 4 分角的空間頻率分別為 6.88 與 1.72 (lp/mm) [34, 35]。

$$d = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180} \times 250 \quad (5.1)$$

$$\text{空間頻率} = \frac{1}{2 \times \text{眼睛分辨最小線寬}} (\text{lp / mm}) \quad (5.2)$$

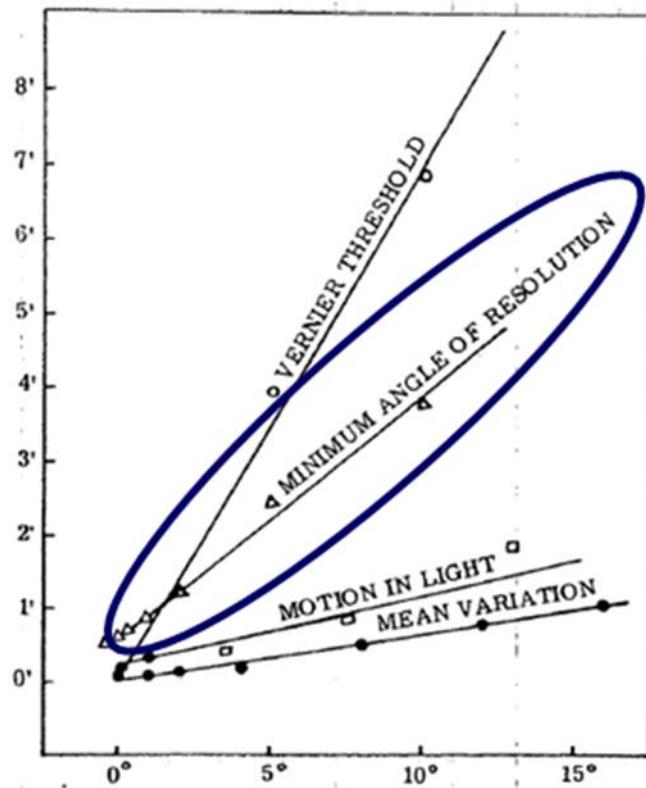


圖5.3 半視角對應人眼解析能力

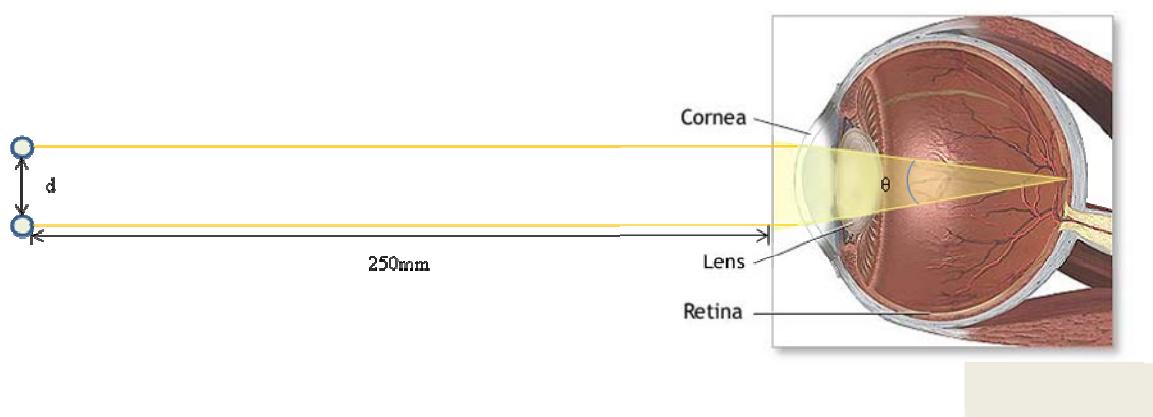


圖5.4 人眼解析能力

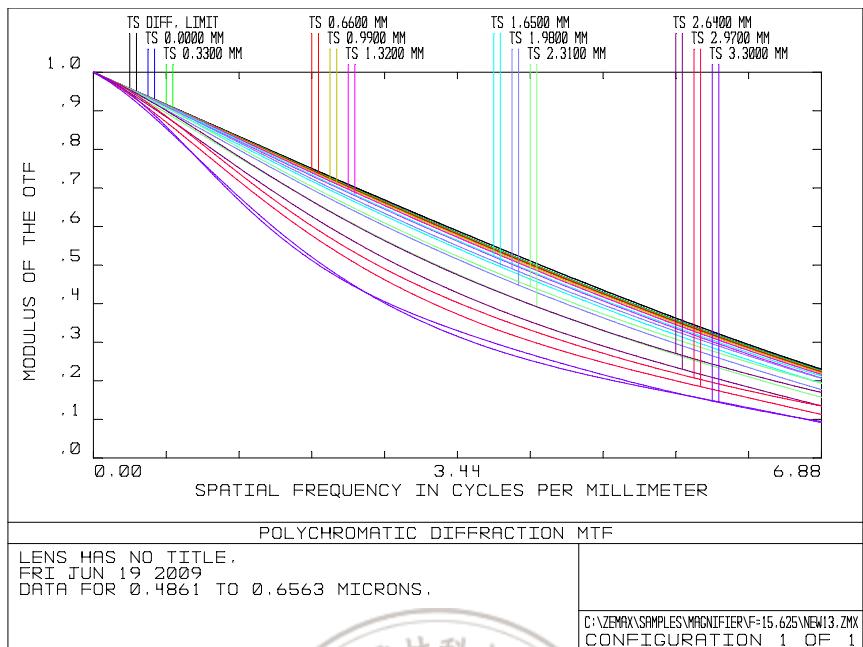
本論文利用兩片透鏡的光學系統，在其第一面表面做非球面的處理。我們選用塑膠材質有兩個好處，其一是重量較輕，還有另一個好處就是製作非球面鏡片上比較容易。而在設定非球面參數為變數時，必須注意非球面公式有奇次項與偶次項兩種，而奇次為不對稱函數，在透鏡製造上會有困難，因此奇次項係數不予考慮。偶次項非球面公式，如公式(5.3)所示。其中z為鏡面深度，r為鏡面上任意點到光軸上的垂直高度，c為中心曲率，而k為二次曲面係數， α_2 、 α_4 、...、 α_j 為非球面係數。表5.4為兩片透鏡經非球面優化後所得到係數資料。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \alpha_2 r^2 + \alpha_4 r^4 + \dots + \alpha_j r^j \quad (5.3)$$

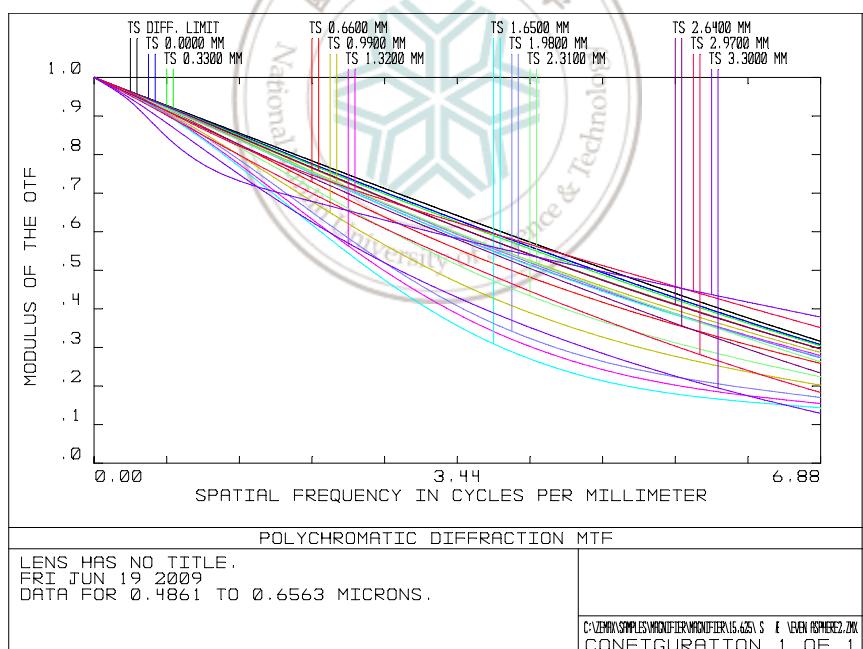
表 5.4 兩片鏡組非球面係數透鏡

Order	Term
2nd	0.000994
4th	-0.000543
6th	0.000197
8th	-0.000027
10th	8.666871E-007

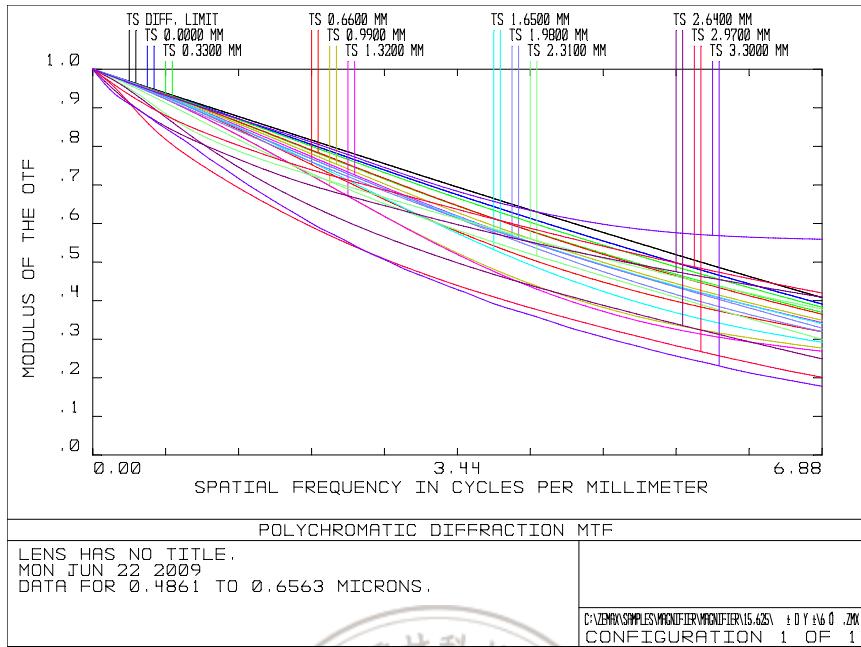
我們由圖5.5(a)、(b)比較球面與非球面透鏡優化後的MTF，表面的型態由球面改成非球面後，有顯著的改善了透鏡組的像差，其OTF有明顯的提升。我們將雙合鏡的兩面透鏡拆開，再將第二面透鏡做非球面的優化，增進系統的MTF，圖5.5(b)、(c)分別為優化一面與兩面非球面的比較，由圖5.5可得到增加一面非球面對其OTF也有顯著的提升。



(a)



(b)



(c)

圖5.5 非球面優化MTF(a)球面(b)一面非球面(c)兩面非球面

兩片透鏡球面系統中，眼睛 1 分解析度只有 0.22648，對於一般影像解析中，OTF 必須要大於 0.3 以上，兩片透鏡非球面優化，改善了在光軸上的解析度，使兩片透鏡的 OTF 都在 0.3 以上。表 5.5~5.7 為整理出來空間頻率對應 OTF，我們得到兩片透鏡組再加上非球面的優化後，光軸上 OTF 有明顯的提升，而在 2、3、4 分角的解析度沒有很大的改善空間。

表 5.5 兩片透鏡組空間頻率對應 OTF

眼睛解析度	視角	空間頻率	OTF 值	繞射極限
1 分角	0 °	6.88 lp/mm	0.22648	0.23005
2 分角	5 °	3.44 lp/mm	0.57997	0.59310
3 分角	8 °	2.29 lp/mm	0.67903	0.72201
4 分角	12 °	1.72 lp/mm	0.58761	0.79424

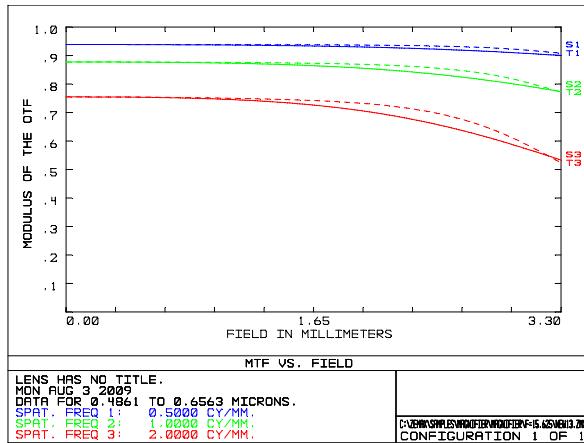
表 5.6 兩片透鏡組一面非球面空間頻率對應 OTF

眼睛解析度	視角	空間頻率	OTF 值	繞射極限
1 分角	0 °	6.88 lp/mm	0.31173	0.31680
2 分角	5 °	3.44 lp/mm	0.45946	0.64629
3 分角	8 °	2.29 lp/mm	0.65482	0.75938
4 分角	12 °	1.72 lp/mm	0.71138	0.82198

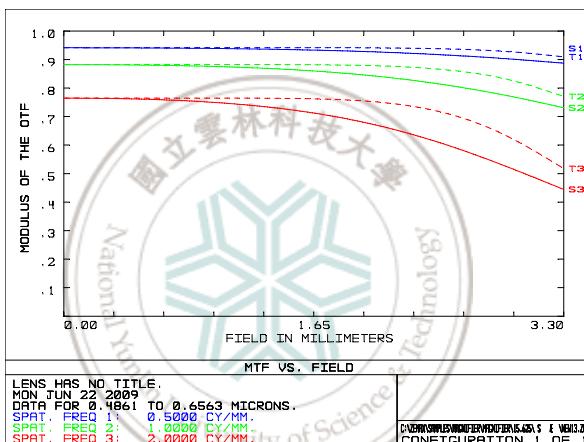
表 5.7 兩片透鏡組兩面非球面空間頻率對應 OTF

眼睛解析度	視角	空間頻率	OTF 值	繞射極限
1 分角	0 °	6.88 lp/mm	0.31088	0.32012
2 分角	5 °	3.44 lp/mm	0.44336	0.64813
3 分角	8 °	2.29 lp/mm	0.65080	0.76046
4 分角	12 °	1.72 lp/mm	0.70662	0.82291

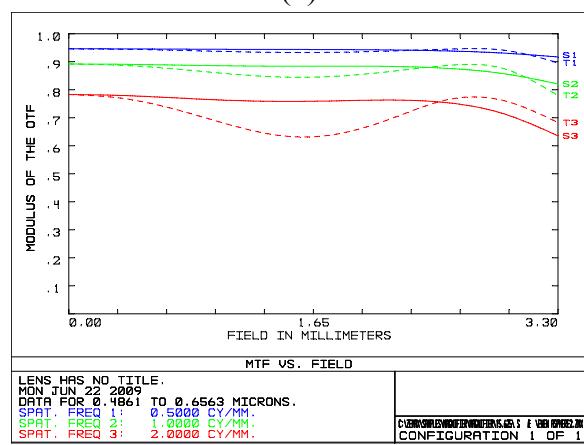
提升 MTF 後，我們考慮像散的問題，在不同視場中的徑向與切向之 MTF 值的差異能小於 10 %左右。圖 5.6(a) MTF vs. field 比較圖(a)球面(b)一面非球面(c)兩面非球面。由圖 5.6 可以得到雖然非球面優化可以提升透鏡的 MTF，但球面型態的光學系統，其徑向與切向的 MTF 值差異遠小於非球面型態，而增兩面非球面其像散像差更為明顯的增加，所以利用非球面來提升 MTF 的方面似乎不是最好的。



(a)



(b)



(c)

圖5.6 MTF vs. field比較圖：(a)球面(b)一面非球面(c)兩面非球面

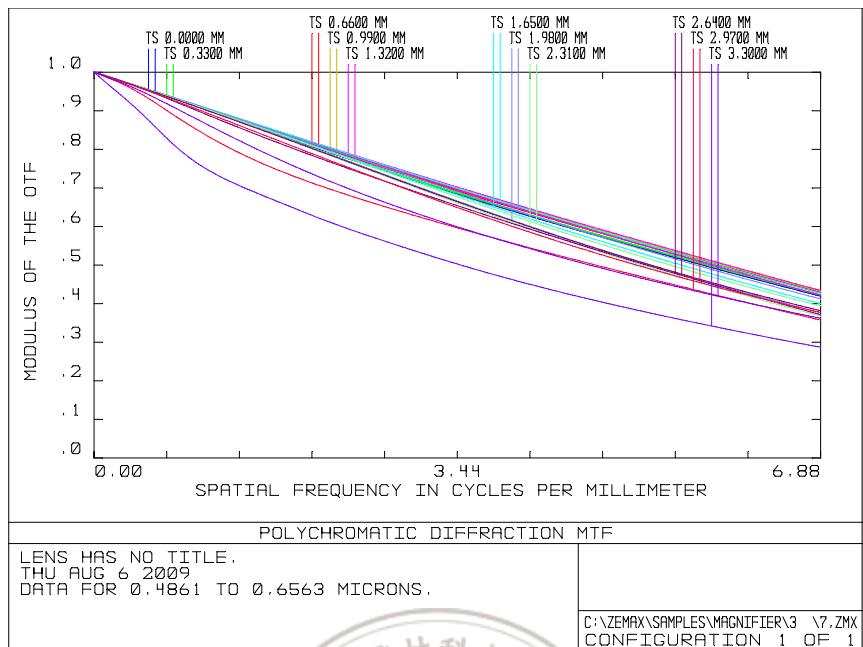
由於利用兩片透鏡不能達我們所要的成像品質，所以利用三片與四片透鏡來模擬光學系統，其優化後的透鏡資料如表 5.2 與 5.3 所示，MTF 如圖 5.7 所示。整理出三片與四片透鏡的 MTF 後發現，如表 5.8 與 5.9，在每個視場的 OTF 都明顯提升，尤其在光軸上的 OTF 有更明顯改善。由圖 5.8 所示，利用三片與四片透鏡組改善成像品質，也不會像非球面一樣，照成嚴重的像散問題，圖 5.7(b)、(c)的徑向與切向的之 MTF 不會有很大的差異，尤其是利用四片透鏡其像散問題是非常小。

表 5.8 三片透鏡組空間頻率對應 OTF

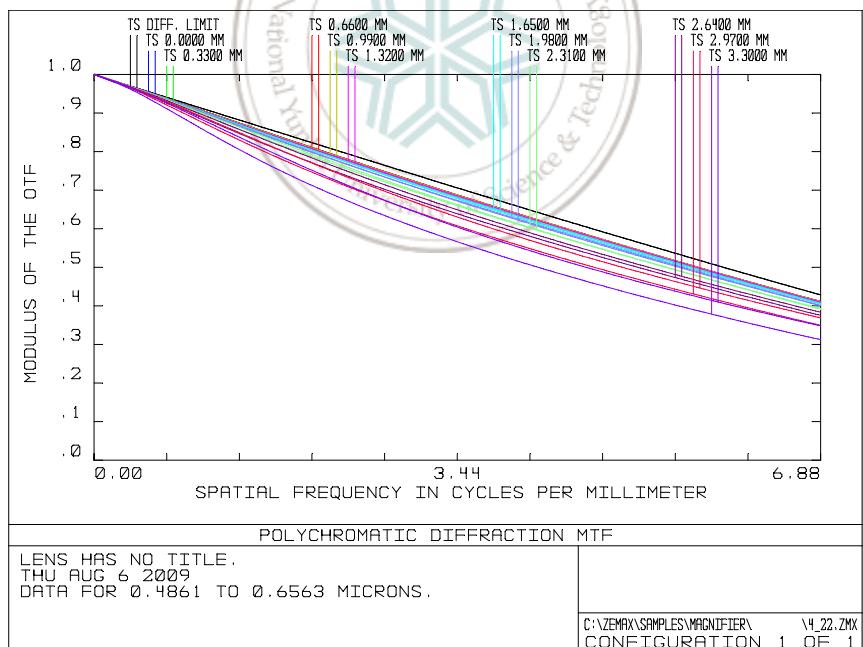
眼睛解析度	視角	空間頻率	OTF 值	繞射極限
1 分角	0 °	6.88 lp/mm	0.42012	0.45466
2 分角	5 °	3.44 lp/mm	0.70368	0.72342
3 分角	8 °	2.29 lp/mm	0.77951	0.81265
4 分角	12 °	1.72 lp/mm	0.67017	0.86135

表 5.9 四片透鏡組空間頻率對應 OTF

眼睛解析度	視角	空間頻率	OTF 值	繞射極限
1 分角	0 °	6.88 lp/mm	0.35967	0.37517
2 分角	5 °	3.44 lp/mm	0.66058	0.66105
3 分角	8 °	2.29 lp/mm	0.74711	0.76772
4 分角	12 °	1.72 lp/mm	0.73806	0.82794

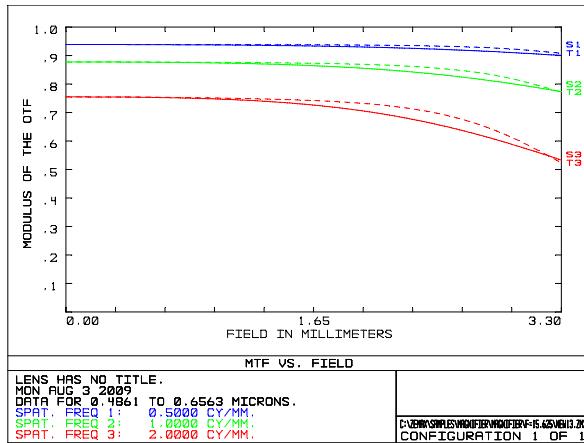


(a)

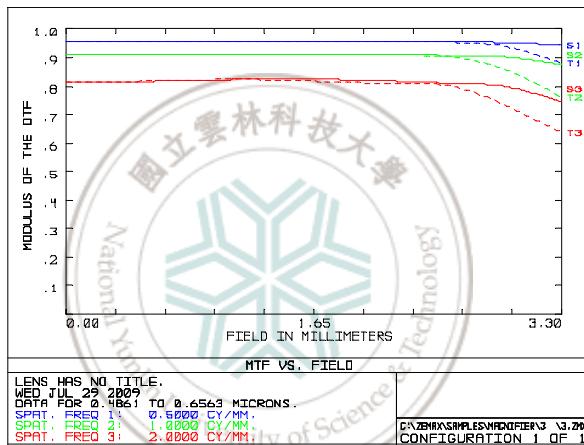


(b)

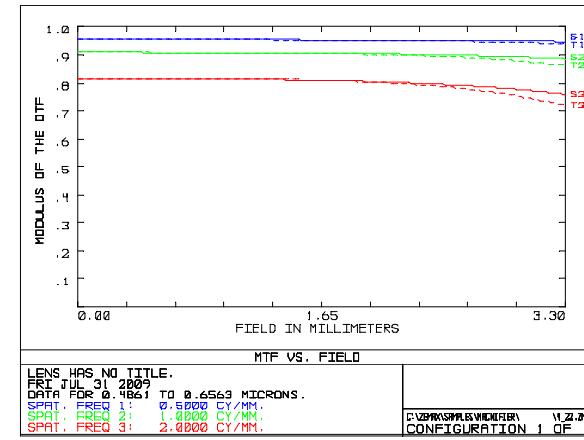
圖5.7 優化後MTF(a)三片(b)四片透鏡



(a)



(b)



(c)

圖5.8 MTF vs. field比較圖：(a)兩片球面(b)三片球面(c)四片球面

5.3 光學系統影像模擬結果

利用 ZEMAX 模擬軟體，對所設計透鏡進行影像品質模擬，取用本研究所架設 3D - HMD 系統所拍攝的公仔圖片對透鏡影像品質做分析，圖 5.9 為原始圖。將圖片輸入軟體後，透過軟體模擬影像輸出後，其結果如圖 5.10(a)兩片透鏡(b)三片透鏡(c)四片透鏡影像模擬結果。

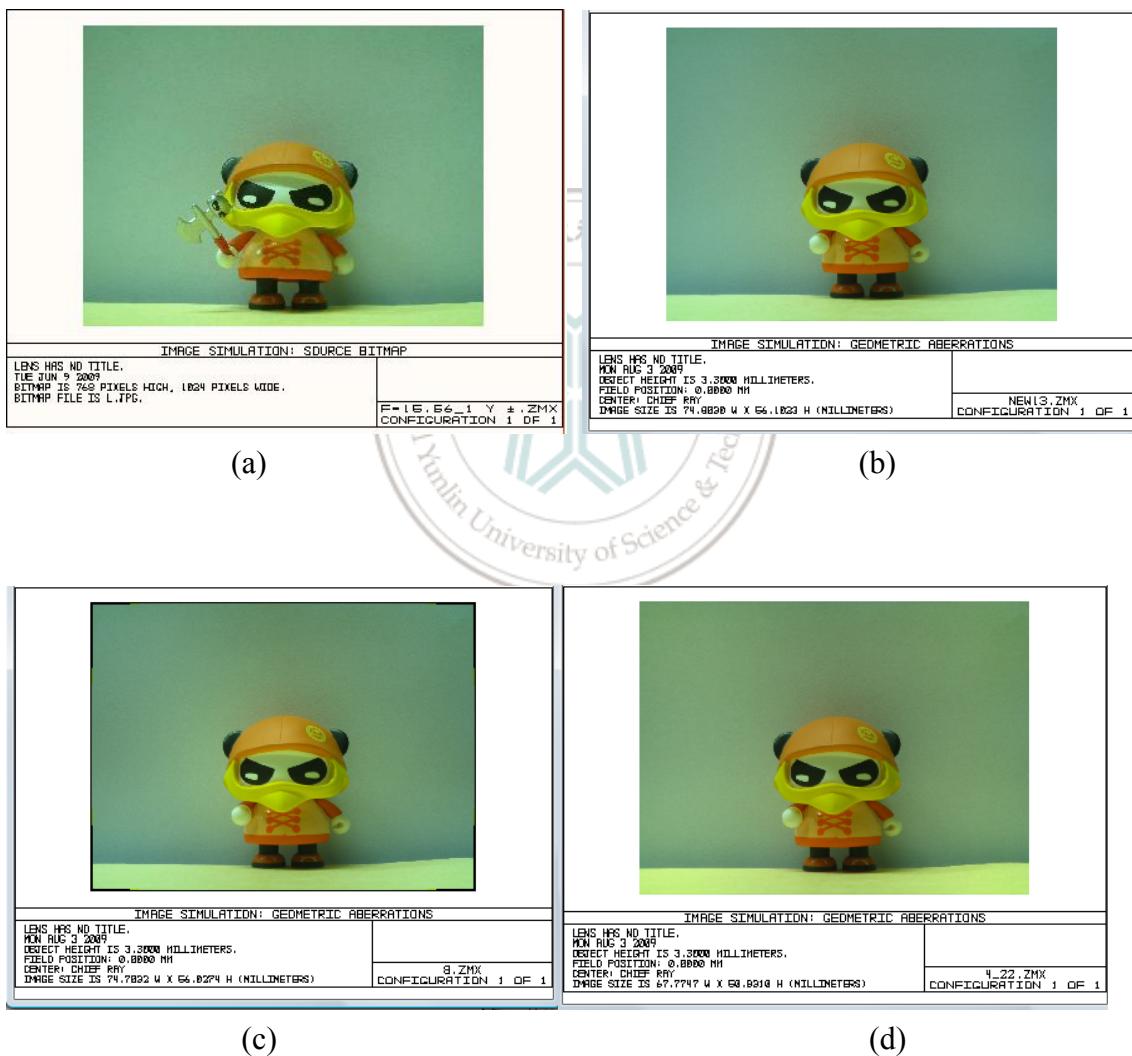


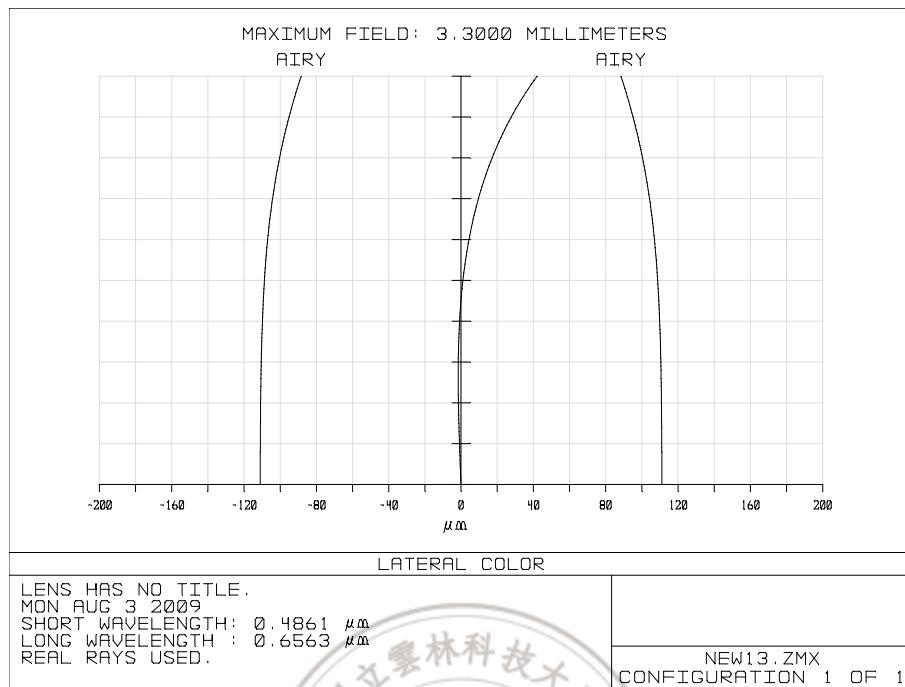
圖5.9 模擬影像輸出(a)原始圖(b)兩片(c)三片(d)四片透鏡組

由模擬出來的影像可以得到，兩片與三片的透鏡組有較高的色差值，由圖 5.11(a)兩片(b)三片(c)四片透鏡組橫向色差。橫向色差圖中縱軸為透鏡視場，橫軸為像平面上，最短波長主光線交點到最長波長主光線交點的距離。圖 5.11 中比較，模擬軟體中兩片與三片透鏡組的最大橫向色差分別為 $41.991 \mu\text{m}$ 與 $52.702 \mu\text{m}$ ，而四片透鏡最大橫向色差只有 $18.192 \mu\text{m}$ ，所以由模擬出來的影像中，得到四片透鏡組所呈現出來的影像色調是最接近原始影像。

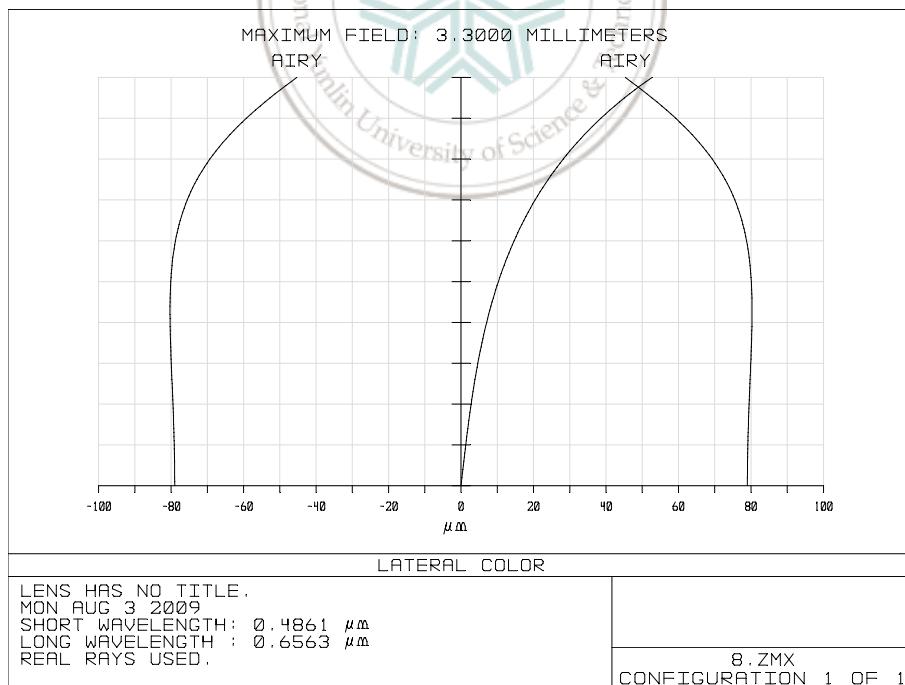
圖 5.12 為透鏡的場曲與畸變像差，我們整理出三組透鏡的各項像差比較表，如表 5.10 所示，我們也很明顯可以得到四片透鏡組所模擬出來的光學系統，其像差皆小於兩片與三片透鏡，所以我們最後採用四片透鏡來當作我們 3D - HMD 光學系統。

表 5.10 像差比較表

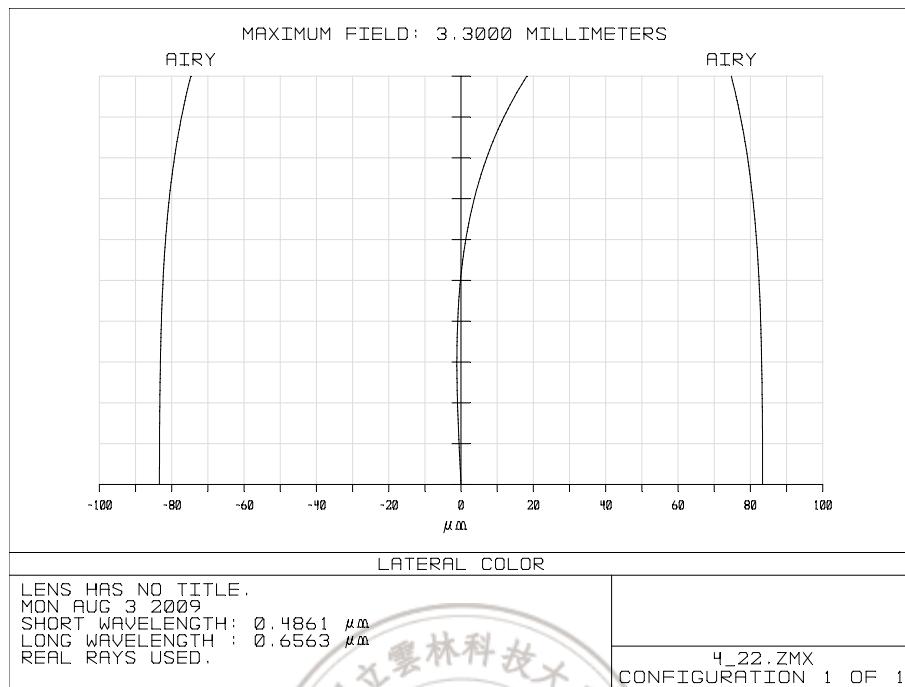
	橫向色差(μm)	場曲(mm)	畸變(%)
兩片	41.991	-48.7373	1.141
三片	52.702	-26.229	-2.018
四片	18.192	-15.728	0.961



(a)

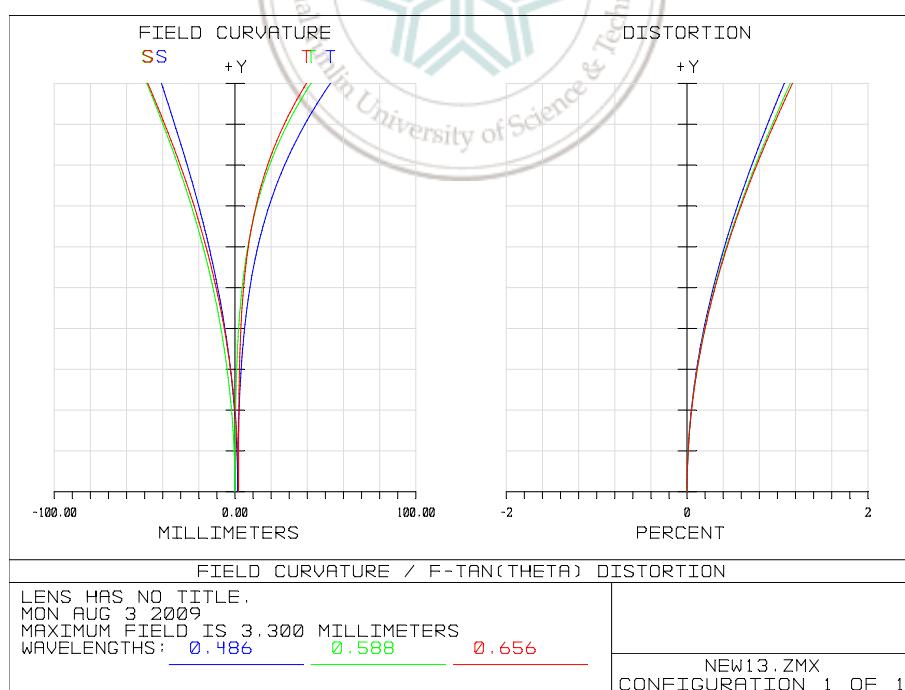


(b)

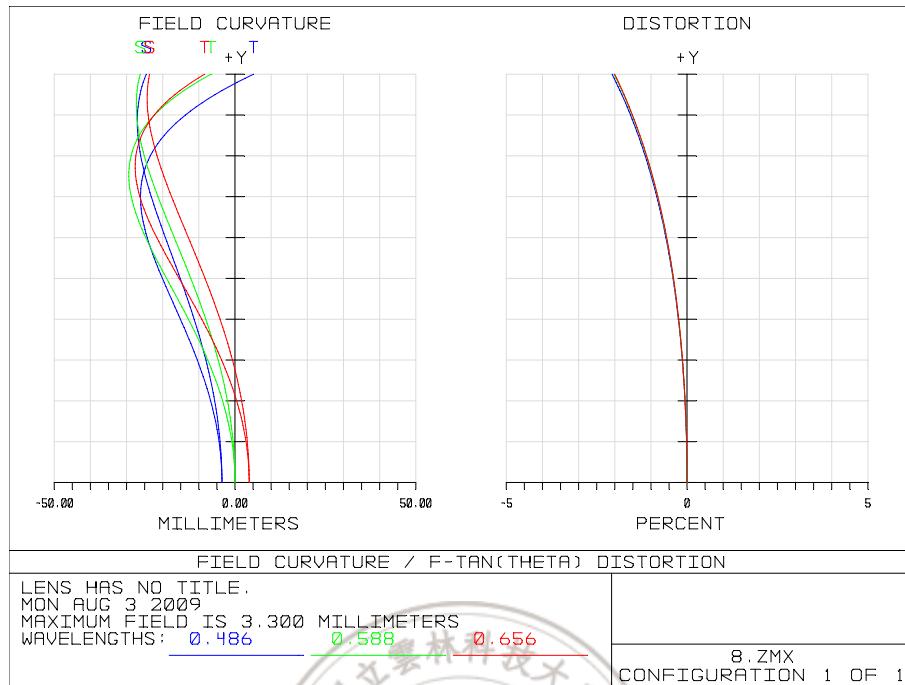


(c)

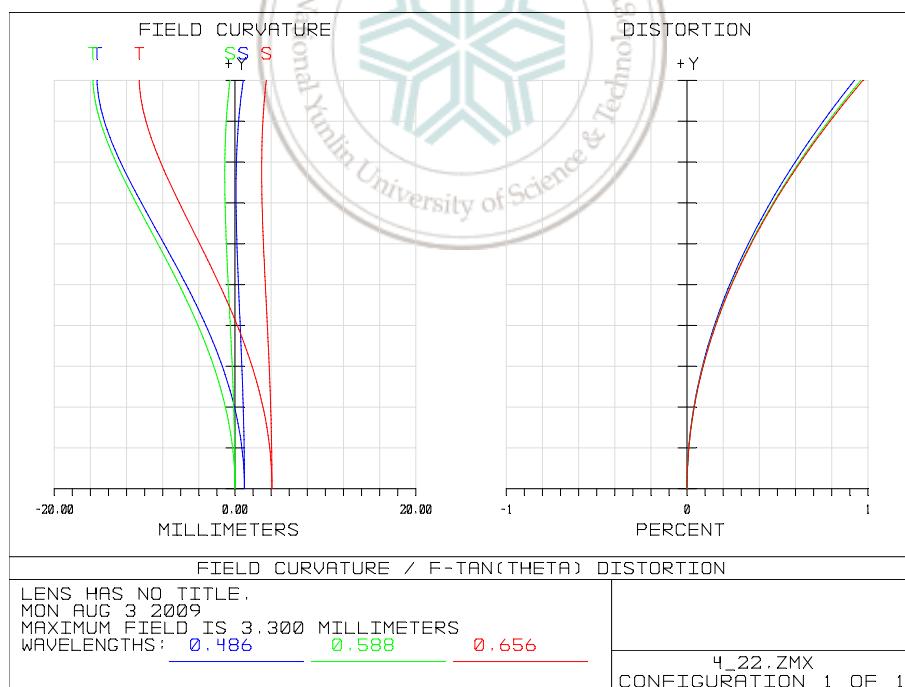
圖5.10 橫向色差(a)兩片(b)三片(c)四片透鏡組



(a)



(b)



(c)

圖5.11 為透鏡的場曲與畸變像差(a)兩片(b)三片(c)四片透鏡組

由圖 5.9 所模擬影像也許無法有效分便出影像品質的好壞，因此利用簡單粗細線條與 RGB 三色的影像，來驗證四片透鏡組的光學系統，其成像品質是最好的，圖 5.12(a)利用粗細線條圖形，發現兩片與三片透鏡的邊緣有明顯的像差，四片透鏡則完全沒有，結果顯示四片透鏡組具有非常好的成像品質。

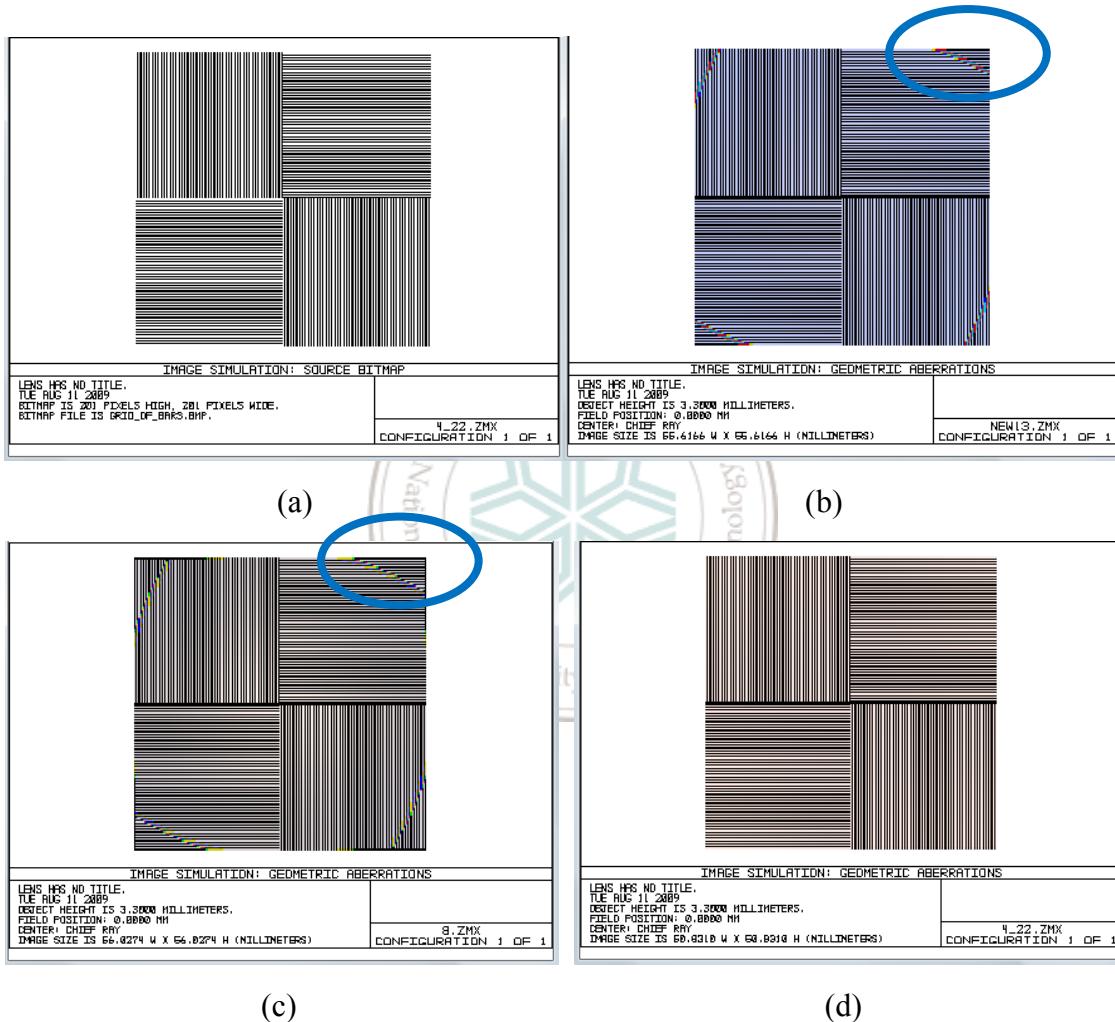


圖 5.12 粗細線條圖形模擬像差(a)原始圖(b)兩片透鏡(c)三片透鏡(d)四片透鏡

利用 RGB 三色的影像如圖 5.13(a)所示，兩片、三片透鏡組所模擬的影像結果較四片透鏡組暗沉，由圖 5.13 的結果也證實四片透鏡組橫向色差較兩片、三片透

鏡組小，因此呈現出較佳的影像色彩。

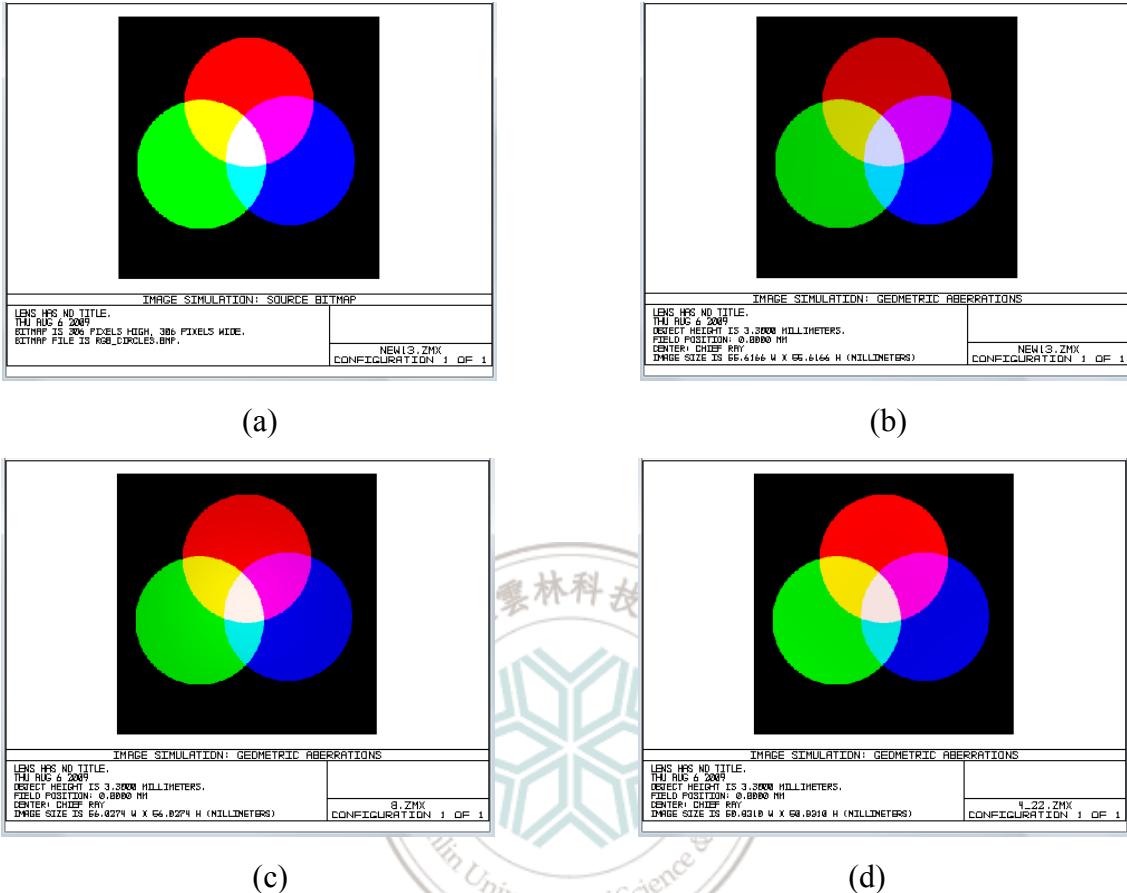


圖 5.13 RGB 圖形模擬的色差(a)原始圖(b)兩片透鏡(c)三片透鏡(d)四片透鏡

文獻中設計 HMD 光學系統的焦長在 20~30 mm 之間[36, 37]，而為了更有效減小系統的長度，設計焦長為 15.625 mm，焦長變短整個系統的長度也相對縮短 20%~45%，而設計利用塑膠材料來製作透鏡，不但可以大幅降低光學系統重量，在製作上也可以大量生產，降低成本優勢。

5.4 即拍即播 3D - HMD 的優點

首先先介紹本論文所架設的 3D - HMD 實際成品，如圖 5.13 所示。架設兩部攝影機於特殊雲台上，同時拍攝公仔，取得立體影像對，並將即時左右的影像透

過 3D - HMD 播放，人眼因為雙眼視差的原理，得到即時立體影像。

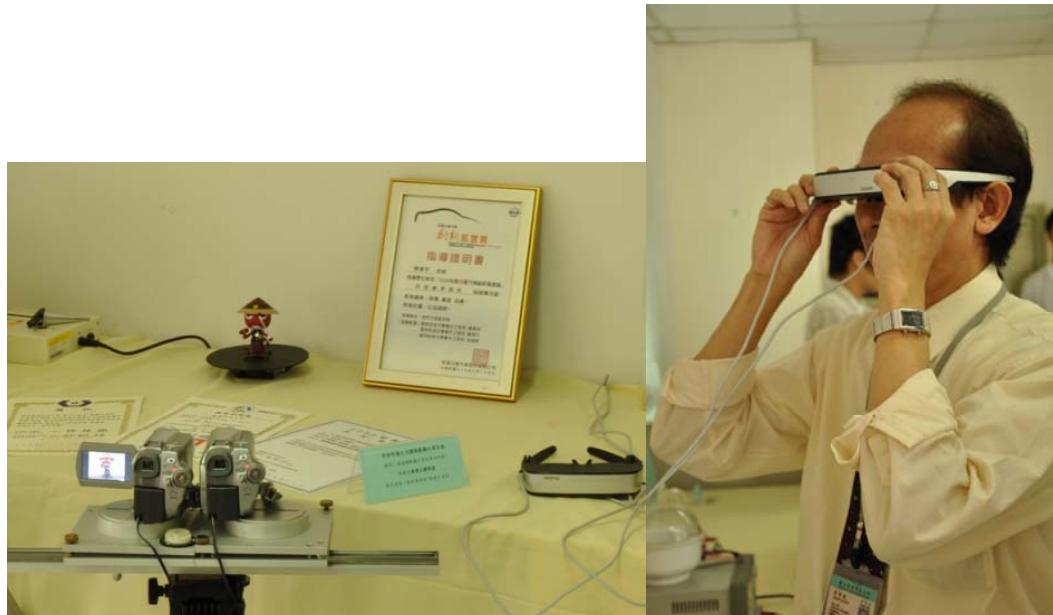


圖 5.14 3D - HMD 系統架設展示

本研究利用兩部攝影機做即時取像的動作，而兩部攝影機的架設是利用兩眼視差的原理來拍攝，把攝影機當眼睛，將目標物的左、右兩眼的影像分別傳送至 HMD 左顯示器與右顯示器，眼睛透過 HMD 就可以呈現非常好的立體效果，與一般視差遮障式 3D 顯示技術相比，3D - HMD 不會因遮障式 3D 顯示造成輝度下降，因為 3D - HMD 是利用眼睛直接接收左、右影像，所以利用 HMD 不會有因為觀看 3D 影像而有此問題。

第六章 結論與未來展望

HMD 應用愈來愈廣泛，其高解析與輕型化是我們可以持續改進的地方。對照 ZEMAX 所模擬出來的影像，發現兩片、三片透鏡組雖然符合人眼使用，但還有部分的像差與色差影響其顯示品質。而四片透鏡組比較兩片、三片光學系統的畸變、場曲、橫色色差值分別降低 18%、66%、130%以上，四片透鏡也改善了二片、三片透鏡會造成的像散問題，因此我們利用四片透鏡組當作 HMD 的光學系統，大幅改善像差與色差問題，達到高解析度的光學系統。

文獻中 HMD 系統所設計的目鏡大都採用焦距 20~30 mm 的透鏡系統[36,37]，本論文模擬光學系統，降低光學系統的焦距至 15.625mm，其結果造成光學系統長度有效縮短。而材質上選用塑膠不但可以降低系統的重量，又較容易設計製做非球面以改善球面造成的像差，同時達到輕型化之目的。本論文最後設置兩部攝影機，完成具有即時取像功能的 3D - HMD，透過 HMD 得到具有立體的視覺效果。

未來在針孔攝影機與顯示器解析度的提升下，如 FLCOS 微顯示器的發展更成熟後，將可呈現出更好影像，針孔攝影機做到變焦的功能，那麼本論文的 3D - HMD 將可應用在弱視視力輔助上，光學系統的部分也可設計變焦光學系統，針對不同程度弱視患者可以變焦的動作，讓弱視病人透過 3D - HMD 呈現出更真實的即拍即播立體影像。成熟的建立 3D - HMD 系統後，將來還可朝無線系統發展，取代一般視力輔助系統，幫助弱視患者學習或成為其生活輔助工具。

3D - HMD 在娛樂與教育訓練上的應用就更加廣泛，我們可以透過 3D - HMD 將我們的視線完全融入遊戲中，使整個遊戲更加擬真。而教育訓練的部分，我們

也可以透過 3D - HMD，由 HMD 模擬出 3D 災害的情況，使受訓者在眼前呈現出災害現場，而做出反應，這樣不僅可以教授教育訓練人員接收到實際的狀況，又可以除去實際模擬所造成的意外事故，未來將有更多 3D - HMD 應用，用來造福人們。

3D - HMD 的光學系統未來依舊朝著輕型化方向發展，且不斷的提升其影像解析度，近年繞射元件的研究顯示，繞射元件可以提升影像的成像品質，又可以改善透鏡輕量化的問題，未來 3D - HMD 的光學系統也可以試著引進繞射元件，加強成像影像的品質。



參考文獻

- [1] J. E. Melzer and Kirk Moffitt, Head - mounted Displays Designing for the User, McGraw Hill, New York, 1997.
- [2] 林榮泰， “HMD/HUD 人因工程研究的探討”，*工業設計*，第21 卷，第2 期， pp.80-84, 1992.
- [3] Mordekhai Velger, Helmet - Mounted Displays and Sights, Artech House, London, 1998.
- [4] <http://www.nvis.com/>
- [5] C Sik Lanyi1, V Simon2, L Simon3 and V Laky, Using virtual public transport for treating phobias, ICDVRAT/University of Reading, 2004.
- [6] <http://www.riven.com/>
- [7] http://chris-reilly.org/everything_ptII.html
- [8] http://www.virttools.com/application/index_simulation.asp
- [9] S. M. Zeki, “Functional specialisation in the visual cortex of the rhesus monkey”, *Nature* 274, pp. 423-428, 1978.
- [10] T. Okoshi, “Three - dimensional imaging techniques, Academic Press”, New York, 1976.
- [11] E.H.Stupp and M.S.Brennesholtz, “Projection Display ”, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [12] 萬明美，視覺障礙教育，臺北：五南出版社, 1996.
- [13] 沈偉，“LCD 明日之星反射液晶投影顯示器，”新電子科技第 165 期，pp.73-80，1999.

- [14] Wei Shaiu Chen , “矽晶圓廠製造之矽晶片上液晶微型顯示器”，半導體科技第19期，2001
- [15] Ernst Lueder, “Liquid Crystal Display ”, John Wiely & Sons, 2001.
- [16] <http://www.oculon.com.tw/en/products/pro-detail.aspx?pid=4&tid=1>
- [17] L. Hill, and A. Jacobs, “3 - D Liquid Crystal Displays and Their Applications”, Proc. IEEE, vol. 94, no.3, March, 2006.
- [18] 趙中興，顯示器原理與技術，全華科技圖書, 1999.
- [19] A. Wood, T. Docherty, and R. Koch, “Image Distortions in stereo Video System, Stereoscopic Display and Applications IV”, Proc. Soc. Photo. Opt. Instrum. Eng., Vol.1915, pp. 36-47, 1993.
- [20] G. J. Kim, Designing Virtual Reality Systems : The Structured Approach, Springer+Business Media, Inc pp.83-88, 2005.
- [21] 耿繼業，幾何光學，取自教學講義。
- [22] 陸懋宏，幾何光學，取自教學講義。
- [23] R. E. Fisher, Optical system design, New York : McGraw - Hill, pp. 336-337, 2001.
- [24] 林宇仁，透鏡設計之我見，取自教學講義。
- [25] Milton Laikin, Lens Design, 2006.
- [26] Jonh Back Park, Suwon - si (KR) ; U. S. Patent Application Publication 20010030631, 2001.(US6349004)
- [27] 詹惠安，擴視機視界的影像評估系統實現，碩士論文，私立逢甲大學，自動控制工程學系碩士班, 2005.
- [28] C. Zhao and J. H. Burge, “Application of the pupil astigmatism criteria in optical

- design,” Applied Optics, vol. 41, pp. 7288-7293, 2002.
- [29] S. H. Lin, I. K. Fong, Y. T. Juang, T. S. Kuo, and C. F. Hsu, “Stability of Perturbed Polynomials based on the Principle of the Argument and Nyquist Criterion”, Int. J. Control, vol. 50, no. 1, pp. 55-63, 1989.
- [30] E. Vigier - Blanc, “Optics for mobile phone imageing,” Proc. of SPIE, vol. 5249, pp. 273-280, 2004.
- [31] F. W. Weymouth, “Visual sensory units and the minimal angle of resolution”, American Journal of Ophthalmology, 46, 102-113, 1958.
- [32] I. Howard Fine, Mark Packer, Richard S. Hoffman, Refractive Lens Surgery, Springer - Verlag Berlin Heidelberg Printed in Germany, 2005.
- [33] Charman, W. N. Optics of the eye, Handbook of Optics, Volume 1, Chapter 24, McGraw Hill, New York, 1995.
- [34] A TOET, DM LEVI , The Two - Dimensional Shape of Spatial Interaction Zones in the Parafovea, Vision Res, Vol. 32, No 7, pp. 1349-1357, 1992.
- [35] Kevin Lyons and Pantazis Mouroulis, Effect of instrumental spherical aberration on visual image quality, Vol. 13, No. 2 J. Opt. Soc. Am. A, February 1996.
- [36] Rui Zhang and Hong Hua, Design of a polarized head - mounted projection display using ferroelectric liquid - crystal - on - silicon microdisplays, APPLIED OPTICS / Vol. 47, No. 15 / 20 May 2008.
- [37] Qiu - Ling Zhao, Zhao - Qi Wang, Tie - Gen Liu, Design of optical system for head - mounted micro - display, Optik 118 29–33, 2007.
- [38] 張明傑，以微反射元件設計高輝度視差屏障式立體顯示器，國立雲林科技大

學，電子工程研究所碩士論文, 2007.

[39] 楊婷婷，利用微稜鏡陣列製作單眼立體攝影鏡頭之光學系統設計，國立雲林
科技大學，光學電子工程研究所, 2008.

