

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

採用繞射/折射複合透鏡之十倍光學變焦
系統的設計



Design of 10X zoom system by
diffractive-refractive hybrid lens

研究生：呂怡瑱

指導教授：陸懋宏

中華民國九十三年七月

採用繞射 / 折射複合透鏡
之十倍學變焦鏡組的設計

Design of 10X zoom system
by diffractive-refractive hybrid lens

研究生：呂怡璵

Student : Yi-Chen Lu

指導教授：陸懋宏

Advisor : Mao-Hong Lu

國立交通大學

電機資訊學院

光電工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering
College of Electronic Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master

In

Electro-Optical Engineering

July 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年七月


採用繞射/折射複合透鏡之 十倍光學變焦系統的設計

研究生:呂怡瑱

指導教授:陸懋宏

國立交通大學 光電工程研究所

摘要



本論文包含了二個部份，第一部分中，我們設計了一組應用在數位相機系統的十倍光學變焦鏡頭。

繞射元件具有材質輕薄、容易複製及符合經濟效益的特點，它也具有一般折射透鏡的成像功能。結合繞射元件及折射元件的複合型透鏡，可以用來消除許多像差，所以採用複合透鏡，可使系統的重量減輕，減少系統所需的片數，本論文便利用繞射元件的優勢，成功的僅以四片複合非球面鏡和二片玻璃球面鏡來達到十倍變焦的功能，構成緊湊的光學結構。

本論文的第二部份，另外針對一組含複合透鏡，變倍比為三倍的鏡組，量測其光學特性，發現含繞射元件的系統，在製作及組裝上較只有折射元件的系統，必須有較高的精密度，才可完全發揮繞射元件的功能。

Design of 10X zoom system by diffractive-refractive hybrid lens

Student : Yi-Chen Lu Advisor : Prof. Mao-Hong Lu

Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao-Tung University



Abstract

This thesis contains two parts. In the first part, we design a 10X zoom lenses which can be used camera system.

The diffractive lens is characteristic of thinness and lightness, and costs effectively. The diffractive lens has the same imaging function as refractive lens. The hybrid lens which contains the diffractive lens formed on a surface of refractive lens can eliminate more aberrations, and decrease the volume and weight. With the advantage of the diffractive device, we accomplish the compact 10X zoom system which is made of four hybrid-aspheric lenses and two spherical lenses.

In the second part, we measure the optical performances of a 3X zoom lens made of hybrid lenses. From the measured results, we find that for a hybrid system (including diffractive components) the centering, aligning and packaging are required to be made more accurately than a pure refractive system in order to get good performance.

誌謝

很高興自己能如願完成二年的碩士生涯，在新竹交大唸書不僅提升了學習的層次，還讓我有更深入的見解及廣闊的視野。

本論文得以完成要感謝的人很多，首先，要感謝指導老師陸懋宏教授的耐心指導，培養我獨立思考、研究的能力，使我在研究方法和態度上獲益良多。在論文完成的過程中，周圍學長的指點，使論文完成的更加順利，在此深深感謝陳昭先學長，在光學知識、變焦鏡組的模擬及論文的寫作上給我很多指導及建議，對他的感謝難以言語道盡，謝謝伍清欽學長在系統的規格及 ZEMAX 的使用上給我很多的指點，謝謝工研院光電所的高弘毅先生給我許多相關資料，也謝謝精密儀器中心的林暉雄學長、林宇仁學長、傅同龍學長、工研院機械所的林宗信先生給我在論文上的很多幫助，並謝謝徐得銘學長、王俊勛學長的帶領，另外實驗室的施至柔學長、陳慶勳同學、馮志華同學、陳建丞同學、李廷彥學弟、戴銘成學弟、盧俊瑋學弟等，帶給實驗室很多的活力。

還要感謝我在交大的諸多好友，謝謝沛霖的陪伴，讓我在交大求學不感到孤單，謝謝光子工廠的秉其、學智、龍進、奕帆、之揚、學長、學弟們和液晶實驗室的美琪、品發、學長、學弟們帶給我歡樂，其中要感謝芝珊師母時常給我中肯的建議。

最後，要感謝我的母親及親友，謝謝媽媽支持我繼續求學，沒有媽媽的鼓勵我不可能完成學業，謝謝大妹、二妹和小弟你們的諒解，幫我分擔家裡的經濟，家人是我精神上最大的後盾，謝謝你們。謝謝我的好友郁青、芳菁，謝謝你們時常分擔我的喜怒哀樂，你們是我很珍惜的朋友。最後、最後要謝謝我的男友展宗，謝謝你在我準備考研究所時給我的鼓勵，在研究所這兩年內陪我渡過、給我支持，讓我無後顧之憂，謝謝你。

目錄

中文摘要	
英文摘要	
致謝	
目錄	
圖目錄	
表目錄	

第一章 緒論	1
第二章 繞射元件的原理	5
2.1 Fresnel 透鏡的演變由來	5
2.2 繞射元件的工作原理	9
2.3 波帶轉換	11
第三章 繞射光學元件的像差原理	17
3.1 繞射光學透鏡的賽得像差特性	17
3.1.1 光闌(stop)位置在繞射元件上的初階像差係數	17
3.1.2 光闌(stop)位置不在繞射元件上的初階像差係數	19
3.2 繞射光學透鏡的色散性質及色差的校正	20

3.2.1 繞射光學透鏡的等效阿貝(Abbe)指數 V_d	20
3.2.2 用繞射/折射混合透鏡實現消色差	22
3.3 繞射光學透鏡的部分色散及二次光譜的校正	25
3.3.1 繞射光學透鏡的等效相對部分色散	25
第四章 變焦距系統的基礎分析	27
4.1 引言	27
4.2 變焦系統的構成	27
第五章 繞射/折射複合透鏡應用在數位相機系統的	
十倍光學變焦鏡組的設計	33
5.1 數位相機系統的介紹	33
5.1.1 數位相機鏡頭的光學結構	34
5.2 十倍光學變焦系統	36
5.2.1 系統結構的介紹	37
5.2.2 光學系統	39
5.3 模擬結果	42
5.3.1 公差分析	55
第六章 變焦系統的量測結果與討論	62
6.1 透鏡表面輪廓量測	66
6.2 單片透鏡 MTF 量測	71
6.3 變焦系統各組態的組合	73
6.4 各組態 MTF 的量測	76
6.5 各組態 spot size 的測量	81
6.6 各組態的成像及失真情形	85
6.7 討論	87

第七章 結論	90
參考文獻	92



圖目錄

圖 1.1 積層型繞射光學元件的結構	2
圖 1.2 使用積層型繞射光學元件與未使用積層型繞射光學元件之相機鏡頭的比較	2
圖 2.1 半波帶法示意圖	6
圖 2.2 求半波帶半徑 r_k 的幾何示意圖	7
圖 2.3 繞射透鏡。(a) 連續表面輪廓, (b) 四階輪廓, (c) 二階輪廓	8
圖 2.4 繞射/折射複合透鏡示意	11
圖 2.5 第 N 個波帶結構圖	12
圖 2.6 巨觀下基面的天頂量	14
圖 2.7 波帶結構	14
圖 2.8 角度示意圖	14
圖 2.9 DOE 轉換過程示意圖	16
圖 3.1 系統參數的圖示說明	17
圖 3.2 繞射/折射複合透鏡的消色差特性	23
圖 3.3 折射材料部分色散的特性	26
圖 4.1 兩透鏡組的相互關係	28
圖 4.2 物像交換位置	29
圖 4.3 物像交換位置之間的像面位置	30
圖 4.4 補償組示意圖(a)正透鏡補償組 (b)負透鏡補償組	31
圖 5.1 數位相機基本的成像光學系統	34
圖 5.2 CCD 與傳統 35mm 底片焦距的比較圖	35
圖 5.3 傳統照相機與數位相機光學系統 MTF 的比較	36
圖 5.4 系統的結構與變焦軌跡	38
圖 5.5 薄透鏡光線追跡圖	40
圖 5.5 各組態的結構圖	44
圖 5.6 為各組態的在成像面上的光斑分布圖(a)廣角組態 (b)中間組態 (c)望遠組態	44
圖 5.7 各組態的 MTF 曲線圖	46
圖 5.8 各組態的場曲/畸變圖	47
圖 5.9 各組態的 Grid Distortion	49
圖 5.10 各組態的二次譜圖	50
圖 5.11 專利 USP61574942 廣角組態結構圖	51
圖 5.12 各組態設計結果與專利 USP61574942 的 MTF 曲線比較圖, 左圖為設計結果, 右圖為專利簡單優化果。	52

圖 5.13 系統各繞射面的輪廓示意圖	54
圖 6.1 變焦系統各組態的架構	63
圖 6.2 OV9620 感測器對光譜之響應曲線	65
圖 6.3 三群透鏡外觀	66
圖 6.4 三群透鏡繞射面量測的表面輪廓圖	67
圖 6.5 各群透鏡繞射面設計曲線與量測曲線的比較圖	69
圖 6.6 由光學顯微鏡量出第三群透鏡的表面分布	70
圖 6.7 第一群透鏡和第二群透鏡組合後子午面理論(虛線)和量測(實線)的 MTF 曲線	71
圖 6.8 第二群透鏡子午面理論(虛線)和量測(實線)的 MTF 曲線	72
圖 6.9 第三群透鏡子午面理論(虛線)和量測(實線)的 MTF 曲線	72
圖 6.10 各組態機構圖	73
圖 6.11 各組態的實體圖	74
圖 6.12 各組態的鏡頭組	74
圖 6.13 組合鏡組的系統架構	75
圖 6.14 廣角組態 0 度(a)子午面, (b)弧矢面的 MTF 曲線	76
圖 6.15 廣角組態 15 度(a)子午面, (b)弧矢面的 MTF 曲線	77
圖 6.16 廣角組態 21 度子午面(a)和弧矢面(b)MTF 曲線	77
圖 6.17 廣角組態 27 度子午面(a)和弧矢面(b)MTF 曲線	78
圖 6.18 中間組態子午面和弧矢面 MTF 曲線	79
圖 6.19 望遠組態子午面和弧矢面的 MTF 曲線	80
圖 6.20 入射波長為 633nm 廣角組態之量測結果(a)為量測結果(b)為 ZEMAX 模擬 結果	81
圖 6.21 入射波長為 633nm 中間組態之量測結果(a)為量測結果(b)為 ZEMAX 模擬 結果	82
圖 6.22 入射波長為 633nm 望遠組態之量測結果(a)為量測結果(b)為 ZEMAX 模擬 結果	83
圖 6.23 廣角組態的成圖	84
圖 6.24 中間組態的成像圖	85
圖 6.25 望遠組態的成像圖	85
圖 6.26 各組態的失真情形	87

表目錄

表 1.1 市面上所發表 DSC 系統的十倍光學變焦鏡組規格與本論文設計的作比較	3
表 3.1 折射透鏡與繞射透鏡聚焦特性比較	22
表 3.2 玻璃材料與繞射光學透鏡的相對部分色散 P_{l_1, l_2} 的比較	25
表 5.1 專利 USP61574942 系統參數值 單位(mm)	40
表 5.2 系統透鏡所使用的材料	41
表 5.3 系統的設計規格	42
表 5.4 系統中各面的面型態，其中數字 1 12 為面編號	42
表 5.5 各繞射面的最小線寬	54
表 5.6 各片透鏡或各群鏡組公差參數的容忍度大小	55
表 5.7 各組態的系統的零敏度	57
表 5.8 各組態在 500 組 Monte Carlo 迴圈裡，空間頻率為 80 line pair/mm， 最好與最差的 MTF 值及 500 組的平均結果。	59
表 5.9 500 組 Monte Carlo 迴圈裡，增加與減少的最大後焦距變化量(+、-號代 表往前或往後移動)，及平均變化量。	60
表 5.10 各組態在 500 組 Monte Carlo 迴圈，運算結果的百分比分佈	61
表 6.1 變焦系統的設計規格	62
表 6.2 型號 OV9620 之 CMOS 規格表	64
表 6.3 光學對準儀器列表	75
表 6.4 濾波片規格	76
表 6.5 量測與模擬的誤差百分比	84
表 6.6 模擬所得各組態公差的容忍度	88
表 6.7 模擬所得各組態公差的容忍度	88

第一章 緒論

最近幾年來數位相機蓬勃發展，不但取代傳統相機，同時更朝向動畫攝影方向發展，這意味著鏡頭模組輕巧型乃是必備的基本條件，而非球面鏡頭模組則成為業界共同標準結構。基於輕巧、小型的市場需求，減少包含非球面鏡片的使用數量，變成為設計者面臨的另一項難題，在此前提下，可大幅簡化鏡片使用量的繞射光學元件(DOE：Diffractive Optical Element)，因而再度受到學術及相關業界高度矚目。

利用繞射光學元件當作成像元件的構想，可追溯到 1870 年 Fresnel 波帶片的發明，1898 年 Wood 將繞射元件矩形凹凸狀的表面加以改良，在其表面賦予階梯狀，用於補償相位，藉此提高繞射效率，當截面形狀閃耀化後，在特定單波長下，理論上可達 100%的效率。1960 年更出現將繞射型鏡片與折射鏡片加以組合，藉此補正色差的構想。根據研究結果顯示，上述兩鏡片的組合，在色差、球差，以及溫度造成的像差變化上有很好的修正效果，同時還可以提高光束分割的附加價值。90 年代末期，東芝的奈米切削加工機的實用化，以及超精密加工技術與 lithography 技術的進步，研究人員已經可以製作幾乎與理論值相同的繞射光學元件，並開始大量應用在各領域。

2000 年初，日本 canon 公司開發「multi-layer diffractive optical lens」，成功的將繞射光學鏡片應用於相機鏡組上，那何謂“multi-layer diffractive optical lens”？其是將兩片具有同心圓狀的繞射光學元件對向貼合，形成獨特雙層型結構，如圖 1.1 所示。

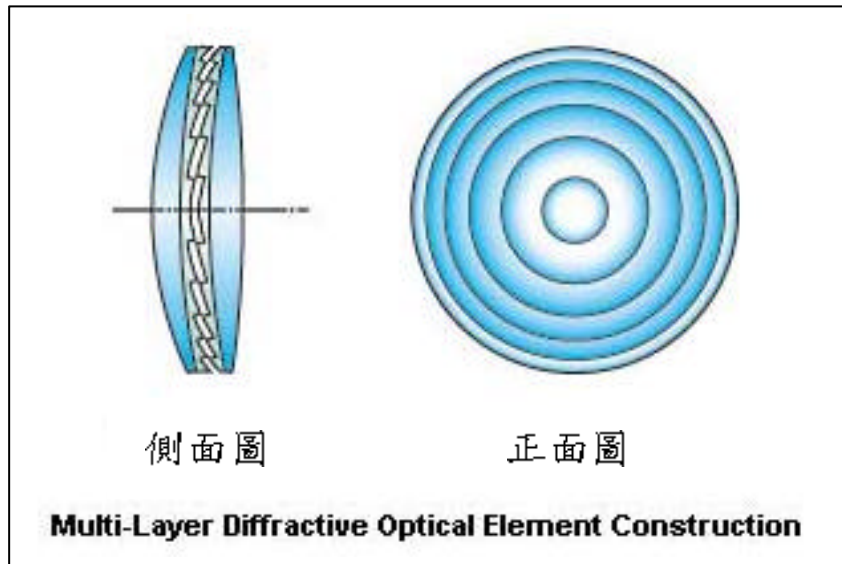


圖 1.1 “multi-layer diffractive optical lens” 的結構

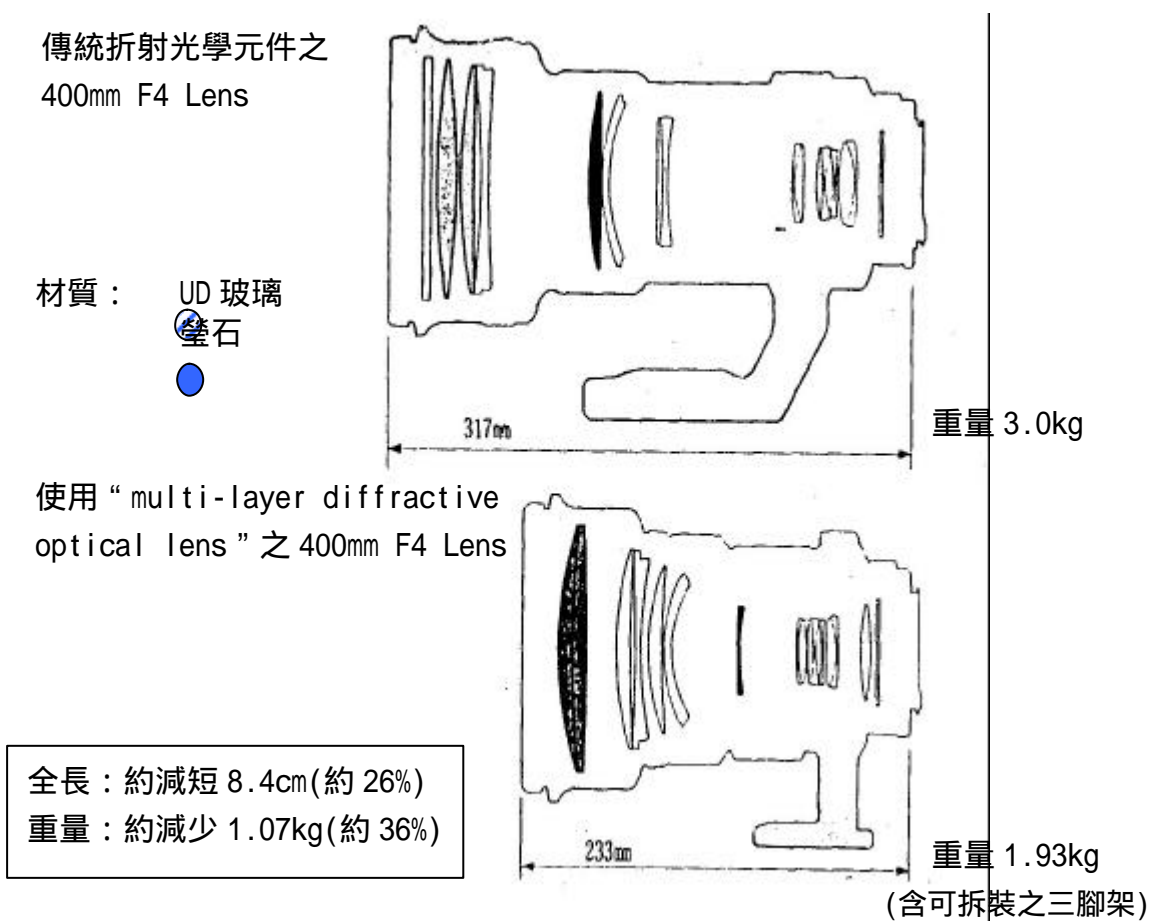


圖 1.2 使用“multi-layer diffractive optical lens”與未使用“multi-layer diffractive optical lens”之相機鏡頭的比較

由於“multi-layer diffractive optical lens”的實用化，非球面鏡片的使用數量與鏡頭的重量、外型尺寸獲得前所未有的效果，圖 1.2 為使用“multi-layer diffractive optical lens”與未使用“multi-layer diffractive optical lens”，在相機的長度與重量上的比較圖。利用繞射光學元件，在長度上減少了 26%，重量上減輕了 36%，是繞射光學元件運用在相機系統最成功的例子。

數位相機發展快速，高像素、高變倍比(8 倍以上)已成為評價相機等級的標準之一，所以本論文欲設計一款使用在數位相機系統的

相機型號	鏡頭焦長	F 數(W/T)	感光元件	鏡頭組成系統
Canon S1 IS	10x, 38~380mm	F2.8 / F3.1	1/2.7" CCD 320 萬像素	11 枚含 1 枚非球面鏡
Kodak DX6490	10x, 38~380mm	F2.8 / F3.7	1/2.5" CCD 400 萬像素	SCHNEIDER-KREUZNACH VARIAGON
DiMAGE Z2	10x, 38~380mm	F2.8 / F3.7	1/2.5" CCD 400 萬像素	11 枚
Kyocera M410R	10x, 37~370mm	F2.8 / F3.1	1/2.7" CCD 400 萬像素	11 枚
Olympus C-770 UZ	10x, 38~380mm	F2.8 / F3.7	1/2.5" CCD 400 萬像素	11 枚, 含 2 枚非球面鏡, 1 枚 ED 鏡
Toshiba M700	10x, 37~370mm	F2.8 / F3.1	1/2.7" CCD 320 萬像素	11 枚
本論文設計	10x, 38~380mm	F2.8/F3.6	1/3" CCD 300 萬像素	6 枚, 含 4 枚複合非球面鏡

表 1.1 市面上所發表 DSC 系統的十倍光學變焦鏡組規格與本論文設計的作比較。

十倍變焦光學鏡組，偵測端並採用 1/3 inch 300 萬像數的 CCD，利用繞射/折射複合透鏡的優勢，成功設計出僅利用六片鏡片即達到系統要求，表 1.1 列出了幾款近一年市面上所發表的十倍變焦鏡頭，300~400 萬像素的數位相機的系統規格，並與本論文所設計的鏡頭組作比較。

由表 1.1 可看出，相較其他市面上規格類似的數位相機，本論文設計的系統因採用了複合透鏡，鏡頭組僅使用了六片鏡片，片數減少了將近一半，相信在重量上勢必減輕許多。因為本設計並未實際加工，並配上電子端組裝，無法比較機身長度的，但本設計的鏡組長度僅約 6.8 公分，所以也達到小型化的需求。



第二章 繞射元件的原理

具有浮雕表面結構的透鏡稱為 Fresnel 透鏡(亦稱為信息透鏡、二元相位透鏡或相位片等)，很久以來就為光學科學家所關注，起源應追到近一世紀前 L.Rayleigh、Soret 和 Wood 等人關於波帶片的研究工作。人們很快發現，作為實用的成像透鏡，必須克服波帶片因存在多級像而損失光能量的缺點。其解決途徑是將波帶片製作成具有浮雕表面的相位結構，浮雕的厚度在波長量級，且圖形應儘可能接近設計值，已實現預期的高繞射效率(即要求的像點有最大的光強，而其他像點實際不存在)。這些設想直到近幾年來，由於加工技術的進步才得以實現。



2.1 Fresnel 透鏡的演變由來

欲知道光通過繞射元件的光強度分布，若使用 Fresnel 繞射積分公式來計算，在數學計算上將是一項相當繁雜的工作，因此，通常使用利用向量合成求場分布的“半波帶法”來進行處理計算，以簡化在數學運算上的工作。

半波帶法是以分割的方式將 Fresnel 積分公式中的積分項簡化為有限項的和。在圖 2.1 中，取以 S 為發射源的球面波前 G，半徑為 R，波前 G 的頂點 O 與觀察點 P 的距離為 b。以 P 為中心，在分別以 $b + \frac{l}{2}$ 、 $b + l$ 、 $b + \frac{3l}{2}$ 、 $b + 2l$ 、... 為半徑，將波前 G 分割成一系列的環形波帶。由於這些環形波帶的邊緣點 M_1 、 M_2 、 M_3 、... 到 P 點的光程依次相差半個波長，故稱為「半波帶法」。

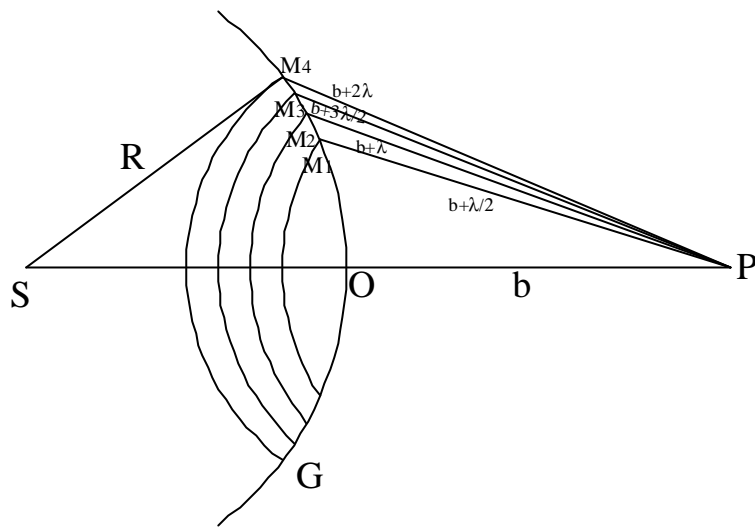


圖 2.1 半波帶法示意圖

經由半波帶法，我們可以了解到，入射光經過奇數的半波帶與偶數的半波帶，因為相位差的關係，在 P 點造成的複振幅將相互抵消。所以若將全部的奇數或偶數半波帶遮住，那麼，所有的透射光其相位將會產生建設性干涉，這將能大大提升 P 點的光強度。因此，這樣週期性的遮擋，實際上將有類似正透鏡的作用。

為了實現這種週期性的遮擋，我們可根據圖 2.2 的幾何關係，求得第 k 的半波帶的半徑 r_k

$$R(1 - \cos a) = \sqrt{r_k^2 - b^2} - b \quad (2.1)$$

其中
$$\cos a = \frac{R^2 + (R+b)^2 - r_k^2}{2R(R+b)}$$

再令 $r_k = b + \frac{k\lambda}{2}$ 代入，並忽略 λ^2 項，可得

入射光，也能達到在 P 點加強振幅的效果。這個想法的付諸實現在於將不透光的部分轉換成厚度，能使相位落後 p 的透明材料；或在透明板上挖溝槽，使光在經過時，造成相鄰波帶產生 p 的相位差，如此，在 P 點的振幅便會大大的增強。如圖 2.3(c)所示，即是將波帶板上的偶數波帶區挖溝槽，使光在經過此溝槽後，會與奇數波帶區產生光程差，而此光程差所引起的相鄰波帶相位差剛好差 p ，再加上原先設計的每一波帶至 P 點的相位差 p ，恰可在 P 點產生建設性干涉，較 Fresnel 波帶板可提高二倍振幅，而光強度大概可提升四倍左右，其繞射效率大約是 40.53%。

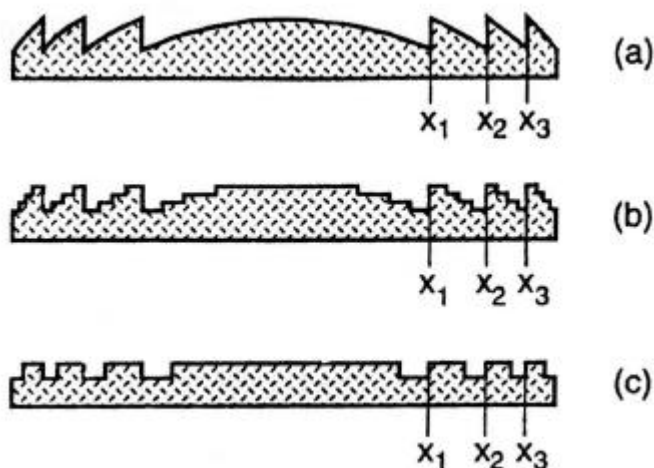


圖 2.3 繞射透鏡。(a) 連續表面輪廓，(b) 四階輪廓，(c) 二階輪廓

若進一步將波帶板上的相鄰波帶區到達 P 點時的相位差設計成 $\frac{p}{2}$ ，而板的直徑與焦距皆不變，如圖 2.3(b)所示，這需要在板上挖三種不同深度來達成，此元件繞射效率幾乎會是圖 2.3(c)的兩倍，可達 81.06%。同理，若再進一步將相鄰波帶區的相位差設計為 $\frac{p}{4}$ ，

則為了補償相位，必須設計成八階的階梯狀表面結構，此時，其效率可達 94.96%。如果一直減小每一波帶區之間的相位差，則表面結構的階梯會愈來愈多，最後每個階梯狀結構將變成曲面，如圖 2.3(a) 所示，此即為 Fresnel 透鏡，經由此透鏡每個波帶曲面的相位補償，若入射光與曲面的設計波長相等，則理論上，可有 100% 的繞射效率。

2.2 繞射元件的工作原理

由於繞射元件是建立在光的波動理論基礎上。當繞射元件表面的刻紋寬度遠大於使用波長時(通常 $>5\lambda$)，即可採用純量繞射理論近似。在此近似中，繞射元件可以看成是一片薄的相位元件，其透射效率可表示成：

$$t(x, y) = e^{if(x,y)} \quad (2.3)$$

入射至元件的光波為 $A_i e^{if_i(x,y)}$ ，通過元件後出射的光波可表示為：

$$A_0 e^{if_0(x,y)} = t \cdot A_i e^{if_i(x,y)} = A_i e^{i(f+f_i)} \quad (2.4)$$

即：

$$f_0(x, y) = f_i(x, y) + f(x, y) \quad \text{或} \quad (2.5)$$

$$f(x, y) = f_0(x, y) - f_i(x, y) \quad (2.6)$$

這裡略去了光通過元件時的任何光能量損耗。由式(2.6)可以看出，繞射元件只能改變入射光的相位，形成一個波面，若給定所要求的出

射光的波面，根據式(2.6)就可以求得相位元件要提供的相位改變量。元件上各點相位的變化量可以用相位函數來表示：

$$f(x, y) = \frac{2p}{I_0} \sum_{m,n} a_{mn} x^m y^n \quad (2.7)$$

對於軸對稱的繞射元件，上式可以表示成：

$$f(x, y) = \frac{2p}{I_0} \sum_n a_n r^n \quad (2.8)$$

在製作繞射元件時，通常把相位函數壓縮在 $[0, 2p]$ 之間。實際上相位差 $2p$ 的整數倍對波面並無影響。壓縮後的相位函數可表示成：

$$\Psi(x, y) = [f(x, y) + f_0] \bmod 2p \quad (2.9)$$

其中， f_0 是一個恆定的相位補償。如果相位的變化是由元件表面的高低起伏所造成，一個薄的透射型繞射元件表面蝕刻深度可表示成：

$$h(x, y) = \frac{I_0}{n(I_0) - 1} \frac{\Psi(x, y)}{2p} \quad (2.10)$$

其中， n 是元件材料的折射率， I_0 是設計真空波長。對於大繞射角，式(2.9)和式(2.10)是必須採用更嚴格的方法計算。由式(2.10)可知最大的蝕刻深度為：

$$h_m(x, y) = \frac{I_0}{n(I_0) - 1} \quad (2.11)$$

相位函數經壓縮後，其輪廓形成落差為 $2p$ 的不連續階梯，如圖2.3所示。在式(2.9)中 f_0 是一相位補償，它將引起躍 $2p$ ，變點橫向

移動，但對於具有相位函數 $\Psi(x, y)$ 的理想繞射元件的特性並無影響。

2.3 波帶轉換

欲設計繞射/折射複合透鏡，可利用光學設計軟體，例如：ZEMAX、COVEV、OSLO 等，但在設計過程，乃是將繞射面視為無實際外形的相位補償面，當最佳化完成後的最後設計，才轉換成可加工製作的外形。

圖 2.4 為複合透鏡加工完成後的示意圖，一般會將加工繞射面的面稱為基面，繞射面是利用波帶轉換方法，轉換成表面的浮雕結構 (kinoform)。

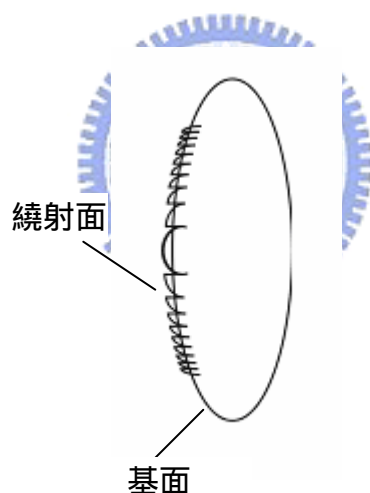


圖 2.4 繞射/折射複合透鏡示意

轉換方法是利用最後設計所求的繞射面相位函數，如式(2.12)所示，及基面的天頂函數，如式(2.13)所示。來轉換每一波帶的結構，

$$f(h) = P_2 \times h^2 + P_4 \times h^4 + P_6 \times h^6 + P_8 \times h^8 \dots \quad (2.12)$$

$$Sag(h) = \frac{h^2}{r \times \left(1 + \sqrt{1 - \frac{(1+K) \times h^2}{r^2}} \right)} + A_4 \times h^4 + A_6 \times h^6 + A_8 \times h^8 + A_{10} \times h^{10} + \dots \quad (2.13)$$

且在每一波帶內可以自動調整取樣點數，使得在靠近光軸的波帶有較多的取樣點，在靠近元件邊緣的波帶有較少的取樣點，如此相位函數在轉換成表面輪廓時不會造成太大的失真，因為對一DOE元件，如圖2.3(a)所示，中間的波帶半徑較大故需要較多的取樣點，而越接近邊緣的波帶半徑越小，且輪廓越接近直線，故所需的取樣點較少，如此才能真實的表現出所描述的曲線。

首先求出第 N 個波帶的內邊界 $h_i(N)$ 及外邊界 $h_o(N)$ 的高度，如圖2.5所示虛線為繞射面的基面，實線為波帶結構且與基面相交於 $h_c(N)$ ，而 $h_i(N)$ 與 $h_o(N)$ 位置的相位差分別與 $h_c(N)$ 相差 p ，則利用方程式(2.14)及方程式(2.15)可以計算出第 N 個波帶的 $h_i(N)$ 及 $h_o(N)$

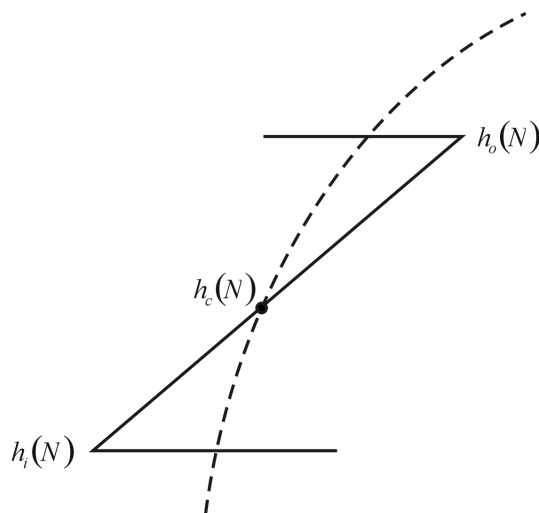


圖 2.5 第 N 個波帶結構圖

$$2p(N - 0.5) = P_2 \times h_i^2(N) + P_4 \times h_i^4(N) + P_6 \times h_i^6(N) + P_8 \times h_i^8(N) + \dots \quad (2.14)$$

$$2p(N + 0.5) = P_2 \times h_o^2(N) + P_4 \times h_o^4(N) + P_6 \times h_o^6(N) + P_8 \times h_o^8(N) + \dots \quad (2.15)$$

假設所設定的元件最小取樣間距高度為 H_d ，則第 N 個波帶的取樣間距為 $H_h(N)$ 可以計算如下

$$Num(N) = \frac{h_o(N) - h_i(N)}{H_d} \quad (2.16)$$

$$\overline{Num(N)} = \text{fix}[Num(N)] + 1 \quad (2.17)$$

$$H_h(N) = \frac{h_o(N) - h_i(N)}{\overline{Num(N)}} \quad (2.18)$$

其中 $\overline{Num(N)}$ 為第 N 個波帶的取樣點數， $\text{fix}[\]$ 為去除小數後的整數；所以可以求得第 N 個波帶每一取樣點的高度 $h_N(n; N)$ 為

$$h_N(n; N) = h_i(N) + (n - 1) \times H_h(N) \\ n = 1, 2, 3, \dots, \overline{Num(N)} + 1 \quad (2.19)$$

在求出第 N 個波帶在相對於每一取樣點高度 $h_N(n; N)$ 後，其巨觀下基面的天頂量 $X_S(n; N)$ ，如圖2.6所示為基面在光軸方向相對於基面頂點的位置，可表示為：

$$X_S(n; N) = \frac{h_N^2(n; N)}{r \times \left(1 + \sqrt{1 - \frac{(1+K) \times h_N^2(n; N)}{r^2}} \right)} + \\ A_4 \times h_N^4(n; N) + A_6 \times h_N^6(n; N) + A_8 \times h_N^8(n; N) + \dots \quad (2.20)$$

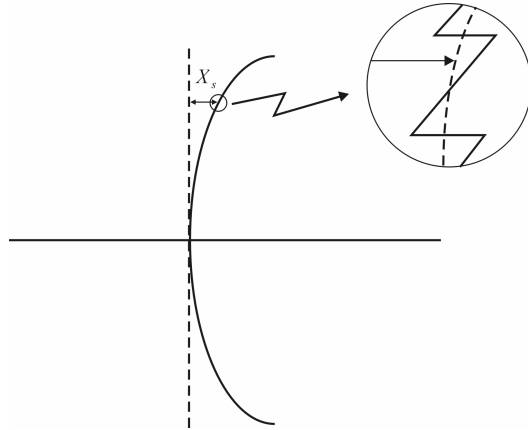


圖 2.6 巨觀下基面的天頂量

在前面已計算出巨觀下基面的天頂量，接著我們將計算微結構的等效厚度 ΔX ，它為微結構距基面的厚度，如圖2.7所示，而其計算流程如下。首先，計算巨觀表面法線和光軸的夾角 a ，如圖2.8所示，其方程式如下

$$\mathbf{a}(n; N) = \tan^{-1} \left(\frac{dX_s(n; N)}{dh_N(n; N)} \right) \quad (2.21)$$

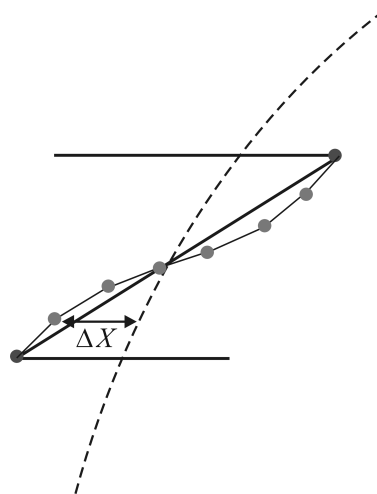


圖 2.7 波帶結構

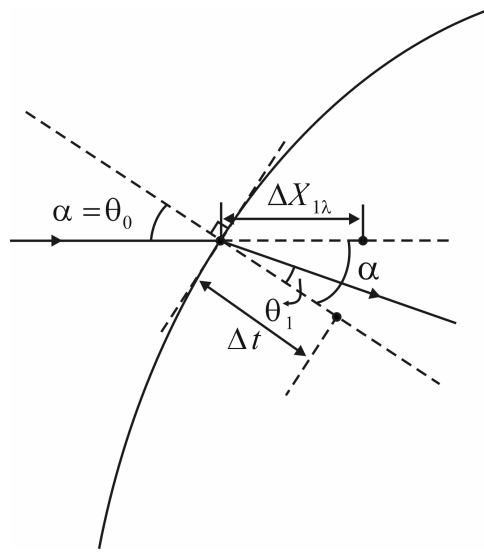


圖 2.8 角度示意圖

接著計算厚度 Δt ，使得光線在繞射元件內傳播時具有 l 的光程差，即

$$\Delta t(n; N) = \frac{l}{n_o \cos q_o - n_1 \cos q_1} \quad (2.22)$$

其中 n_o 為空氣的折射率， n_1 為材料的折射率， q_o 為入射角， q_1 為折射角，則可求得 Δt 平行於光軸的分量

$$\Delta X_{1l}(n; N) = \Delta t(n; N) / \cos[a(n; N)] \quad (2.23)$$

則微結構的等效厚度 ΔX 可以計算如下

$$\Delta X(n; N) = \Delta X_{1l}(n; N) \times \left[\frac{f(h_N)}{2p} - N \right] \quad (2.24)$$

則元件的實際外形可由方程式(2.20)的"巨觀結構"加上方程式(2.24)的"微結構"來構成，即

$$X(n; N) = X_s(n; N) + \Delta X(n; N) \quad (2.25)$$

經過上述繁瑣轉換，最後 DOE 變成 Kinoform 結構。圖 2.9 為波帶轉換過程的示意圖。

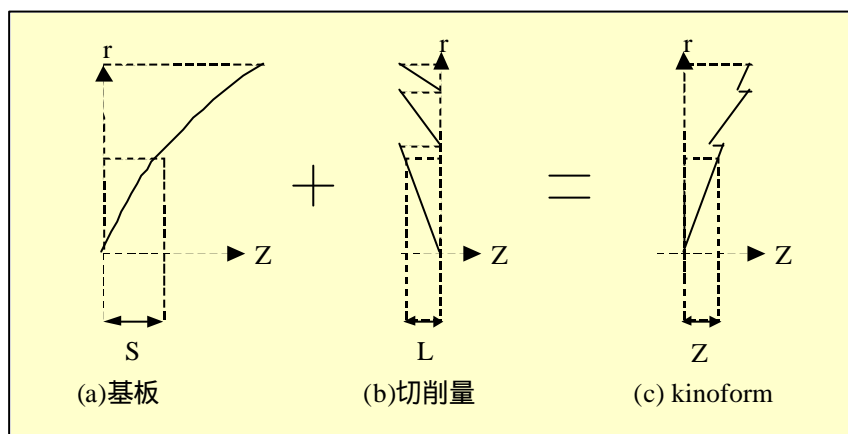


圖 2.9 DOE 轉換過程示意圖

第三章 繞射光學元件的像差原理

本論文的设计，是利用繞射光學元件於成像系統，所以必須對繞射元件的像差特性有所了解。下面基於初級像差理論，分析繞射光學透鏡的像差特性。

3.1 繞射光學透鏡的賽得像差特性

3.1.1 光闌(stop)位置在繞射元件上的初階像差係數

圖 3.1 表示光闌位在薄透鏡上的一些物理量定義。設 h 為物高， r 為光瞳面上的極座標， S 為初階像差係數，則其初階波像差多項式為：

$$W(h, r, \cos q) = \frac{1}{8} r^4 S + \frac{1}{2} h r^3 \cos q S + \frac{1}{2} h^2 r^2 \cos^2 q S + \frac{1}{4} h^2 r^2 (S + S') + \frac{1}{2} h^3 r \cos q S \quad (3.1)$$

如圖 3.1 所示， \bar{u} 為主光線的傾斜角； u 和 u' 為邊緣光線入射和出射的傾斜角； y 是邊緣光線與透鏡的交點到光軸的距離。

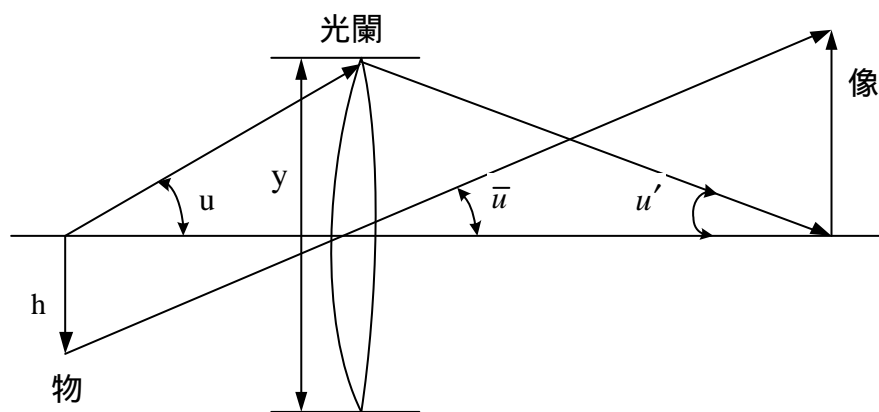


圖 3.1 系統參數的圖示說明

設 H 為 Lagrange 不變量， c_1 和 c_2 為透鏡兩個面的曲率，分別定義 B 為彎曲係數 (bending parameter) 和 C 為共軛參數 (conjugate parameter)：

$$B = \frac{c_1 + c_2}{c_1 - c_2} \quad (3.2)$$

$$C = \frac{u + u'}{u - u'} \quad (3.3)$$

令 j 為光焦度。薄透鏡的光焦度 由透鏡的結構參數決定，

$$j = (c_1 - c_2)(n-1) \quad (3.4)$$

則薄透鏡的初階像差係數分別為：

球差係數

$$S = \frac{y^4 j^3}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} B^2 + \frac{4(n+1)}{n(n-1)} BC + \frac{3n+2}{n} C^2 \right] \quad (3.5)$$

慧差係數

$$S = \frac{-y^2 j^3 H}{2} \left[\frac{n+1}{n(n-1)} B + \frac{2n+1}{n} C \right] \quad (3.6)$$

像散係數

$$S = H^2 j \quad (3.7)$$

場曲係數

$$S = \frac{H^2 j}{n} \quad (3.8)$$

畸變係數

$$S = 0 \quad (3.9)$$

為求得繞射透鏡的各種像差係數，令折射率 n 為無窮大，且 c_1 和 c_2 等於 c_s (c_s 為繞射面所在的基面曲率)，因而彎曲係數 B 趨近於無限大，令 T 為：

$$T = \frac{c_1 + c_2}{j} = \frac{2c_s}{j} = \frac{c_1 + c_2}{(n-1)(c_1 - c_2)} = \frac{B}{n-1} \quad (3.10)$$

則可得到繞射元件的初階像差係數

$$S = \frac{y^4 j^3}{4} [1 + T^2 + 4TC + 3C^2] - 8mIGy^4 \quad (3.11)$$

$$S = -y^2 j^2 H(T + 2C)/2 \quad (3.12)$$

$$S = H^2 j \quad (3.13)$$

$$S = 0 \quad (3.14)$$

$$S = 0 \quad (3.15)$$

可見，除場曲係數為零以外，其他初階像差特性與傳統透鏡相似

3.1.2 光闌(stop)位置不在繞射元件上的初階像差係數

設光闌離透鏡距離為 t ，對於單片透鏡或多片透鏡系統，有 $\bar{y} = t\bar{u}$ ，各項係數(由“*”表示)變為：

$$S^* = S \quad (3.16)$$

$$S^* = S + \frac{\bar{y}}{y} S \quad (3.17)$$

$$S^* = S + 2\frac{\bar{y}}{y} S + \left(\frac{\bar{y}}{y}\right)^2 S \quad (3.18)$$

$$S^* = S \quad (3.19)$$

$$S^* = S + \frac{\bar{y}}{y} (3S + S) + 3\left(\frac{\bar{y}}{y}\right)^2 S + \left(\frac{\bar{y}}{y}\right)^3 S \quad (3.20)$$

若對無窮遠物體 ($u=0$) 成像，則 $C=-1$ ；並令繞射面的基面為平面，即 $c_s=0$ ， $T=0$ ；則式(3.16) 式(3.20)的表示式為：

$$S^* = \frac{y^4}{f^3} \quad (3.21)$$

$$S^* = \frac{y^3 \bar{u} (t-f)}{f^3} \quad (3.22)$$

$$S^* = \frac{y^2 \bar{u}^2 (t-f)^2}{f^3} \quad (3.23)$$

$$S^* = 0 \quad (3.24)$$

$$S^* = \frac{y \bar{u}^3 t (3f^2 - 3tf + t^2)}{f^3} \quad (3.25)$$

3.2 繞射光學透鏡的色散性質及色差的校正

3.2.1 繞射光學透鏡的等效阿貝 (Abbe) 指數 V_d

在可見光波段，大部分光學材料，如玻璃、晶體等的折射率都隨波長增大而減小，而使透鏡的光焦度隨波長增大而減小。由於繞射光學元件的成像原理類似全像元件的再現，其焦距如式(3.26)所示。若

繞射光學透鏡的焦距為 f_d ， r_1 為繞射元件第一波帶至光軸的半徑，則
 焦距為：

$$f_d = \frac{r_1^2}{2I} \quad (3.26)$$

而傳統薄透鏡在波長 λ ，對應的玻璃折射率為 n 情況下焦距為：

$$f_r = \frac{c_r}{n-1} \quad (3.27)$$

式中 c_r 是與透鏡表面幾何形狀有關的常數。若將式(3.26)和式(3.27)

對波長作微分，可得式(3.28)及式(3.29)。

$$\frac{\partial f_d}{\partial I} = \frac{-r_1^2}{2I^2} = -\frac{f_d}{I} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial f_r}{\partial I} = -c_r \frac{\left(\frac{\partial n}{\partial I}\right)_0}{(n_0-1)^2} = -\frac{\left(\frac{\partial n}{\partial I}\right)_0}{n_0-1} f_r \quad (3.29)$$

傳統光學玻璃材料的阿貝指數 V_r 定義為

$$V_r = \frac{n_d - 1}{n_F - n_c} \quad (3.30)$$

所以式(3.28)及式(3.29)可改寫為

$$Df_d = -\frac{DI}{I} f_d = f_c - f_F = \frac{f_d}{-\frac{1}{DI}} \quad (3.31)$$

$$Df_r = \frac{f}{V_r} \quad (3.32)$$

比較式(3.31) 式(3.32)可得繞射光學透鏡的等效阿貝指數 V_d 為：

$$V_d = \frac{I_d}{I_F - I_c} = -3.452 \quad (3.33)$$

式中所用 I_F 、 I_c 、 I_d 分別為 $0.4861 \mu\text{m}$ 、 $0.6563 \mu\text{m}$ 、 $0.5876 \mu\text{m}$ 。

特性	折射透鏡	繞射透鏡
光焦度	$j = (n-1)\Delta C$	$j = KI$
Abbe 數	$V = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_3} > 0$	$V = \frac{I_1}{I_2 - I_3} < 0$
部分色散	$P = \frac{n_1 - n_3}{n_2 - n_3}$	$P = \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_3}$
注： $I_3 > I_1 > I_2$ ，K 是常數		

表 3.1 折射透鏡與繞射透鏡聚焦特性比較

由式(3.33)及表 3.1 可知：(1)繞射光學透鏡的色散與玻璃材料無關，僅與波長有關，這是繞射光學透鏡區別於傳統折射透鏡的一大特點；(2)繞射光學透鏡的阿貝指數 v_d 與傳統折射透鏡的阿貝指數 V_r 符號相反；且絕對值較傳統折射透鏡小，表繞射光學透鏡有較大的色散。



3.2.2 用繞射/折射混合透鏡實現消色差

由於色差的存在，在光學設計中通常不單獨使用單片透鏡，而是根據光學材料在特定波長下的色散特點，使用雙膠合或三片透鏡，經過適當分配光焦度使兩種或三種波長下的焦距一致而實現消色差，留下其他自由度(如曲率、厚度等)以校正其他像差。

繞射光學透鏡的色散特性與材料無關及其負向性就非常有利於消色差，若將折射透鏡與繞射透鏡結合，就能組成很好的消色差系統，這也是繞射光學透鏡在成像領域受到青睞的最主要原因。下面就詳細分析由繞射光學透鏡與傳統折射透鏡組合而成的複合透鏡

(Hybrid lens)的特點及在消色差方面的應用價值。

首先，考慮一個複合透鏡的結構，如圖 3.2 所示：

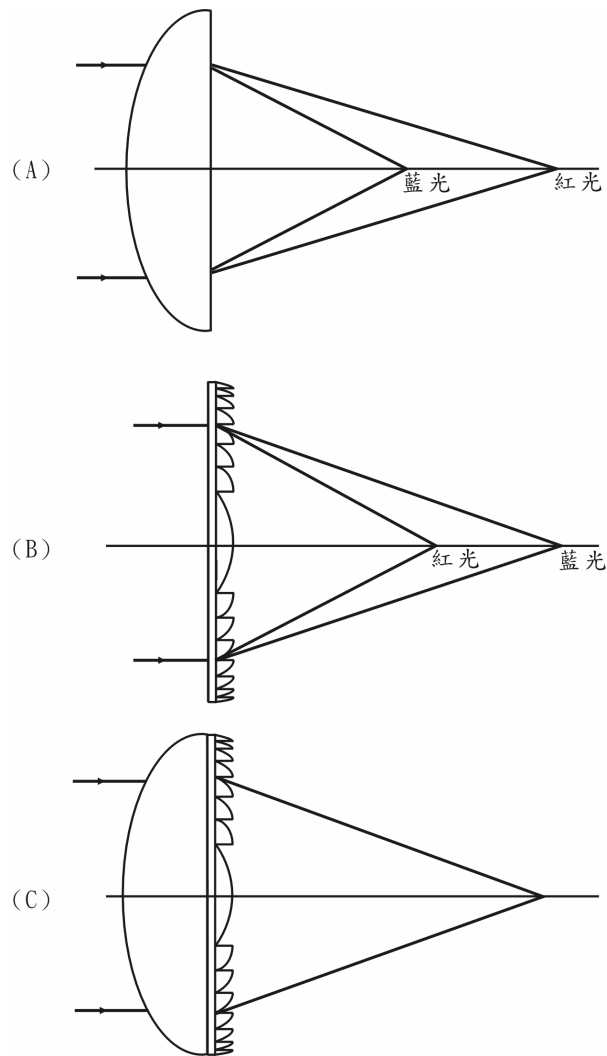


圖 3.2 繞射/折射複合透鏡的消色差特性

設折射透鏡的光焦度為 j_{ref} ，繞射透鏡的光焦度為 j_{dif} ，則複合透鏡的總光焦度為 j_{hyb}

$$j_{hyb}(l) = j_{ref}(l) + j_{dif}(l) \quad (3.34)$$

設 λ_d 為設計的中心波長， λ_c 為消色差波長，則要求複合透鏡在 λ_c 的光焦度相等。對設計的光焦度，即要求

$$\frac{1}{f'_{dif}} + \frac{1}{f'_{ref}} = \frac{1}{F'} \quad (3.35)$$

$$\frac{1}{f^F_{dif}} + \frac{1}{f^F_{ref}} = \frac{1}{f^C_{dif}} + \frac{1}{f^C_{ref}} \quad (3.36)$$

式中， F' 為複合透鏡在 λ_d 的目標焦距； f'_{dif} 和 f'_{ref} 分別為繞射透鏡和折射透鏡在 λ_d 的焦距。設 V_{dif} 和 V_{ref} 分別為繞射和折射部分的阿貝指數，則由式(3.36)可得到消色差複合透鏡的光焦度分配公式

$$f'_{dif} = F' \left(\frac{V_{dif} - V_{ref}}{V_{dif}} \right) \quad (3.37)$$

$$f'_{ref} = F' \left(\frac{V_{ref} - V_{dif}}{V_{ref}} \right) \quad (3.38)$$

傳統在設計消色差透鏡，是採用正透鏡與負透鏡組成的？合鏡 (doublet)，來達到消色差的功能，但以負透鏡抵消正透鏡色差的設計增加了正透鏡的光焦度負擔，進而增大了單色像差，限制了消色差物鏡的孔徑的增大。而正光焦度的繞射光學透鏡具有負向色散，不僅為校正系統色差提供了條件，還分擔了光焦度，有利於減少單色像差，而且包含繞射光學透鏡的複合消色差透鏡可以不使用那些難以加工的或稀少昂貴的大色散材料，對於紅外波段的應用尤為有利，可以大大降低紅外消色差透鏡的成本。

3.3 繞射光學透鏡的部分色散及二次譜的校正

3.3.1 繞射光學透鏡的等效相對部分色散

傳統光學材料對於 C 光和 F 光折射率變化的相對部分色散如下式定義：

$$P_{l_1, l_2} = \frac{n_{l_1} - n_{l_2}}{n_f - n_c} \quad (3.39)$$

繞射光學透鏡的色散決定於波長，其對於 C 光和 F 光的等效部分色散為：



$$P_{l_1, l_2} = \frac{I_1 - I_2}{I_f - I_c} \quad (3.40)$$

RELATIVE PARTIAL DISPERSIONS	FLUORITE (Calcium Fluoride)	SCHOTT BK 7	SCHOTT KzFS 1	SCHOTT F 4	SCHOTT SF 10	SCHOTT SF 59	HOLOGRAM (EFFECTIVE)
P _{st}	0.269	0.310	0.279	0.231	0.211	0.190	0.9514
P _{rs}	0.361	0.382	0.360	0.326	0.309	0.290	0.8557
P _{cr}	0.173	0.178	0.171	0.162	0.157	0.151	0.2953
P _{cs}	0.534	0.561	0.530	0.489	0.467	0.441	1.1510
P _{dc}	0.304	0.308	0.301	0.294	0.289	0.283	0.4038
P _{ed}	0.239	0.239	0.238	0.237	0.236	0.235	0.2438
P _{fe}	0.457	0.454	0.461	0.469	0.475	0.482	0.3523
P _{gf}	0.538	0.535	0.558	0.582	0.604	0.631	0.2956
P _{hg}	0.442	0.441	0.473	0.505	0.539	0.582	0.1832
P _{ih}	0.742	0.748	0.830	0.913	---	---	0.2330

表 3.2 玻璃材料與繞射光學透鏡的相對部分色散 P_{l_1, l_2} 的比較

表 3.2 表明：繞射光學透鏡因繞射產生的部分色散與光學材料因折射產生的部分色散相比有很大不同。相對於同樣的波長間隔，絕大部分折射材料在藍光波段的末端表現出較大的部分色散，向紅光波段逐漸減小，呈現非線性特性，此種特性尤其在高折射率玻璃特別明顯，如圖 3.3 所示。而繞射光學透鏡的色散變化情況恰好相反，因此有利於二次譜的校正。所以利用繞射元件所組成的複合透鏡在玻璃材料的選擇上，需注意部分色散隨波長的分布，最好呈線性，再配合適當光焦度的分配，便可達到消色差的目的。

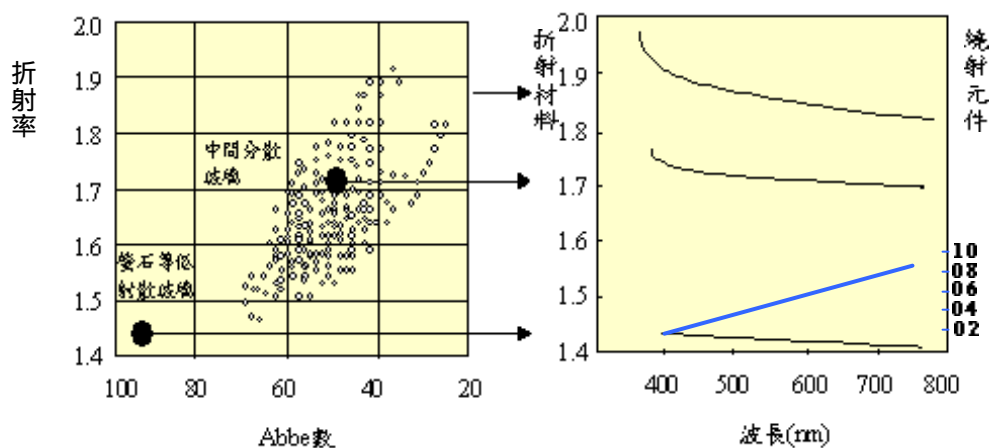


圖 3.3 折射材料部分色散的特性

Kingslake 推出，對 F、C 光消色差系統的二次譜為

$$Dl'_{I_F} = -f' \frac{P_{I_F}^a - P_{I_F}^b}{V_d^a - V_d^b} \quad (3.41)$$

式中， Dl'_{I_F} 是波長為 I_F 及 F 時的焦距差值； f' 是消色差透鏡的焦距； $P_{I_F}^i$ 是 i ($i=a$ 或 b) 透鏡 I_F 光到 F 光的相對部分色散； V_d^i 是 i 透鏡的阿貝指數。

第四章 變焦距系統的基礎分析

4.1 引言

變焦距系統在使用過程中，由於它的焦距可以在一定範圍內以不同的速度不間斷的進行改變，因此它能在成像物體不變的情況下，獲得連續變焦，改變成像畫面大小的效果，進而產生強烈的真實感和藝術上的不同表現力。如果變焦鏡頭能夠達到較滿意的成像品質，則可代替在變焦範圍內的任一個定焦距鏡頭，進而在使用上帶來方便。

早在 1940 年左右，變焦距物鏡即有實際應用，但由於品質比較差，使用不夠普遍。1960 年以後，隨著計算機在光學設計中的普遍應用，光學材料性能的提高，光學冷加工、鍍膜技術的發展，促進了變焦距光學設計的工作。近年來，電視和電影攝影機中幾乎全部採用變焦鏡頭代替定焦鏡頭。因此，變焦系統的設計是現代光學系統設計中的一個重要組成部分。

4.2 變焦系統的構成

利用系統中若干透鏡組的移動，使系統的焦距在一定範圍內改變的光學系統稱為變焦距系統。由於系統焦距的改變，必然使物像之間的倍率發生變化，所以變焦距系統也稱為變倍系統。多數變焦系統除了要求改變物像之間的倍率之外，還要求保持像面位置不變，及物像之間的共軛距不變。

對一個確定的透鏡組來說，當它對固定的物平面作相對移動時，對應的像平面的位置和像的大小都將發生變化。當它和另一個固定的透鏡組組合在一起時，它們的組合焦距將隨之改變。如圖 4.1 所示，假定第一個透鏡組的焦距為 f_1' ，第二個透鏡組對第一透鏡組焦面 f_1' 的垂軸放大率為 b_2 ，則它們的組合焦距 f 為

$$f' = f_1' \times b_2 \quad (4.1)$$

當第二透鏡組移動時， b_2 將改變，像的大小將改變，像面位置也隨之改變，因此系統的組合焦距 f_1' 也將改變。顯然，變焦距系統的核心是可移動透鏡組倍率的改變。

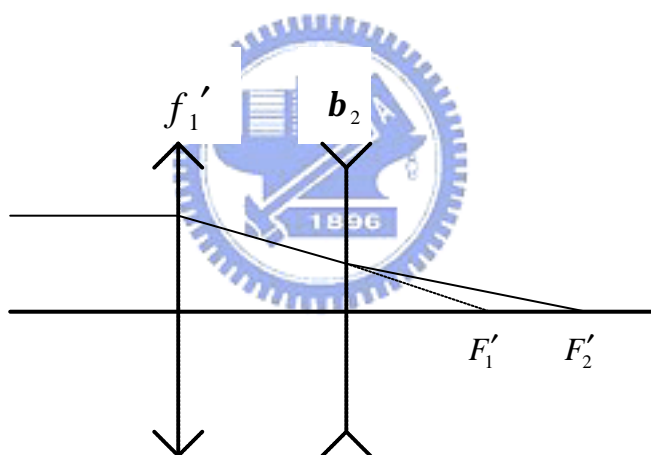


圖 4.1 兩透鏡組的相互關係

對單個透鏡組來說，要它只改變倍率而不改變共軛距是不可能的，但是有兩個特殊的共軛面位置能夠滿足這個要求，即所謂的“物像交換位置”，如圖 4.2 所示。這種情況下，第二透鏡組位置的物距（絕對值）等於第一透鏡組位置的像距，而像距（絕對值）恰恰為第一透鏡組位置的物距，前、後兩個位置之間的共軛距離不變，彷彿把物平

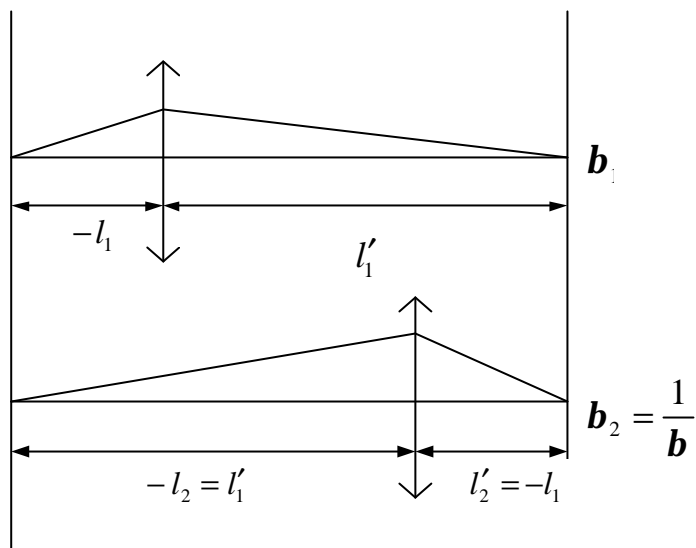


圖 4.2 物像交換位置

面和像平面作了一個交換，因此稱為“物像交換位置”。

透鏡組的倍率由

$$b_1 = \frac{l'_1}{l_1} \quad (4.2)$$

變到

$$b_2 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{-l_1}{-l'_1} = \frac{1}{b_1} \quad (4.3)$$

前、後兩個倍率 b_1 與 b_2 之比稱為變倍比，用 M 表示為

$$M = \frac{b_1}{b_2} = b_1^2 \quad (4.4)$$

由此可知，在滿足物像交換的特殊位置上，物像之間的共軛距不變，但倍率改變 b_1^2 倍。對於由 b_1 到 b_2 的其它中間位置，隨著倍率的改變，像的位置也要改變，如圖 4.3 所示。

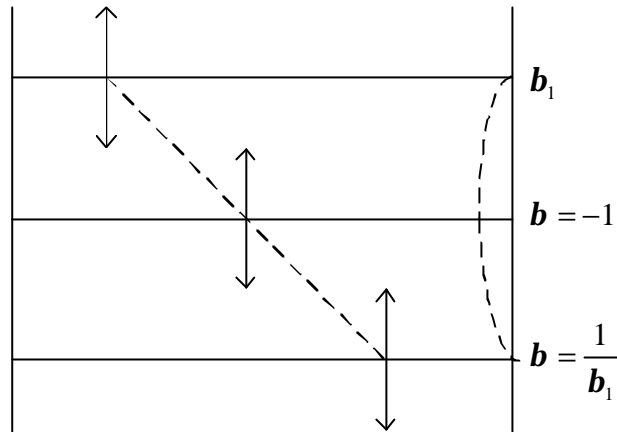


圖 4.3 物像交換位置之間的像面位置

圖中虛線表示透鏡位置和像面位置中間的關係，當透鏡處於 $-1\times$ (表示垂軸放大率或視放大率時，通常在放大率數值右上方加上標 X) 位置時，物像中間的距離最短。此時的共軛距 L_{-1} 為

$$L_{-1} = l' - l = 2f' - (-2f') = 4f' \quad (4.4)$$

當倍率等於 b 時，共軛距 L_b 為

$$\begin{aligned} L_b &= l' - l = (f' + x') - (f + x) \\ &= (f' - bf') - (f - \frac{f}{b}) = (2 - b - \frac{1}{b})f' \end{aligned} \quad (4.5)$$

其中 $l' = f' + x'$ $l = f + x$ $m = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$

由 $-1\times$ 到 b 時相應的像面位移量為

$$\Delta L = L_{-1} - L_b = (2 + b + \frac{1}{b})f' \quad (4.6)$$

由上式看到，當在倍率等於 $1/b$ 時的像面位移量顯然是相等的，

這就是說，“物像交換位置”在變倍比 M 相同的條件下，處在物像交換條件下像面的位移量最小。在變焦距系統中起主要變倍作用的透鏡組稱為“變倍組”，它們大多工作在 $b = -1\times$ 的位置附近，稱為變焦距系統設計中的“物像交換原則”。

由上面的分析可以看到，要使變倍組在整個變倍過程中保持像面

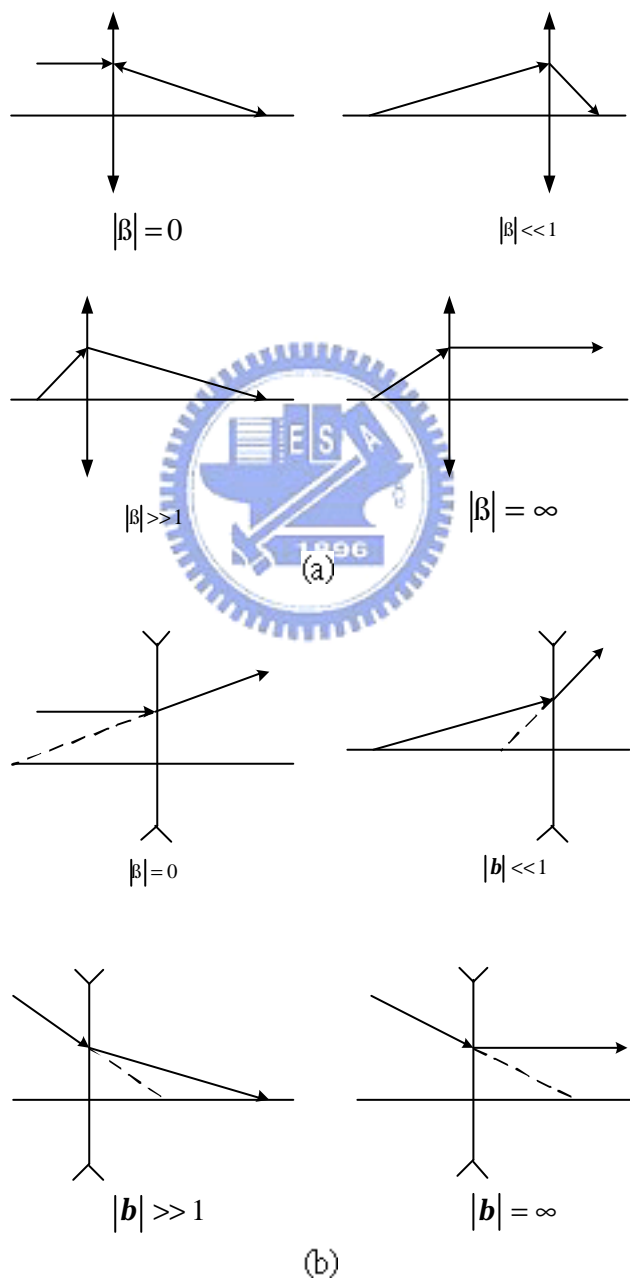


圖 4.4 補償組示意圖
(a) 正透鏡補償組 (b) 負透鏡補償組

位置不變是不可能的，要使像面保持不變，必須另外增加一個可移動的透鏡組，以補償像面位置的移動，這樣的透鏡組稱為“補償組”。在補償組移動過程中，它主要產生像面位置變化，以補償變倍組的像面位移，而對倍率影響很小，因此補償組一般處在遠離 $-1\times$ 的位置上工作。例如，對正透鏡補償組一般處於如圖 4.4(a)所示的 4 種物像位置；對負透鏡補償組，則處於圖 4.4(b)所示的 4 種物像位置。實際系統中究竟採用哪一種，則要根據具體使用要求和整個系統的方案而定。

實際應用的變焦距系統，它的物像平面是由具體的使用要求來決定的，一般不可能符合變倍組要求的物像交換原則。例如，望遠鏡系統的物平面和像平面都位在無限遠，照像機的物平面同樣位在物鏡前方遠距離外。為此，必須首先用一個透鏡組把指定的物平面成像到變倍組要求的物平面位置上，這樣的透鏡組稱為變焦距系統的“前固定組”。如果變倍組所成的像不符合系統的使用要求，也必須用另一個透鏡組將它成像到指定的像平面位置，這樣的透鏡組稱為“後固定組”。大部分實際使用的變焦距系統均由前固定組、變倍組、補償組和後固定組 4 個透鏡組構成，有些系統根據具體情況可能省去這 4 個透鏡組中的 1 個或 2 個。

上面簡單介紹了變焦距系統的基本原理和構成。

第五章 繞射/折射複合透鏡應用在數位相機系統的十倍光學變焦鏡組的設計

5.1 數位相機系統的介紹

隨著計算機技術的不斷成熟，數字化成為社會發展的趨勢，以數位相機為代表的數位成像技術引起了學術界和產業界的重視。特別是近幾年來，隨著微電子技術的快速發展，電腦的日益普及，以及遍及世界各地的網路用戶的膨脹，數位成像技術獲得了前所未有的發展。

數位成像系統是對傳統的光化學成像系統的概念革新。數位照相機(Digital Still Camera 簡稱 DSC)採用 CCD 或 CMOS 作為圖像的紀錄器件，取代了傳統照相機成像物鏡焦平面上的膠片。在曝光過程中，被攝圖像被 CCD/CMOS 面陣上各感光單元 像素所紀錄，以電荷存儲量來表示。通過對像素陣列上電荷的掃描讀取、信號放大和 A/D 轉換，得到可以用像素矩陣描述的數字圖像。將數字圖像進一步壓縮與處理後，既可儲存在數位相機的存儲介質中，又可直接實現與計算機的圖像交換。數位成像技術改變了傳統攝影的沖印化學過程，完全用光電子成像方式取代了光化學影像方式。快速、便捷的數字成像手段，直接與電腦相連的圖像傳輸方式順應了時代的潮流。

目前，廣用的商用數位相機已到百萬像素等級，某些數位相機的功能超過了傳統相機和掃描儀的簡單組合。同時，數位相機的價格卻在不斷的下降，所以數位相機在商業應用和家庭應用中越來越受到人們的喜愛。

今天，無論在 Internet、報章雜誌、家庭以至各行各業到處都

可見到數位相機的身影。各大傳統相機生產商和一些著名的多媒體設備商也都紛紛加入到數位相機市場的競爭中。數位相機在功能上逐漸接近傳統相機，數位相機必然會衝擊傳統相機的地位，甚至在不久的將來，隨著技術的不斷進步，數位相機有可能代替傳統相機，開創人類攝影技術的新紀元。

5.1.1 數位相機鏡頭的光學結構

因為本論文的研究僅涉及數位相機系統鏡頭的部分，所以僅介紹數位相機系統的光學結構及特性，對於系統中的成像光電元件就不多做介紹，圖 5.1 所示為一般數位相機成像光學系統。系統由位於前部的成像物鏡和後部的低通濾波片 (low-pass filter) 所組成。

和傳統 35mm 底片照相機一樣，數位相機鏡頭的設計中需要校正球差、慧差、像散、場曲、畸變、縱向色差和橫向色差。與傳統的照

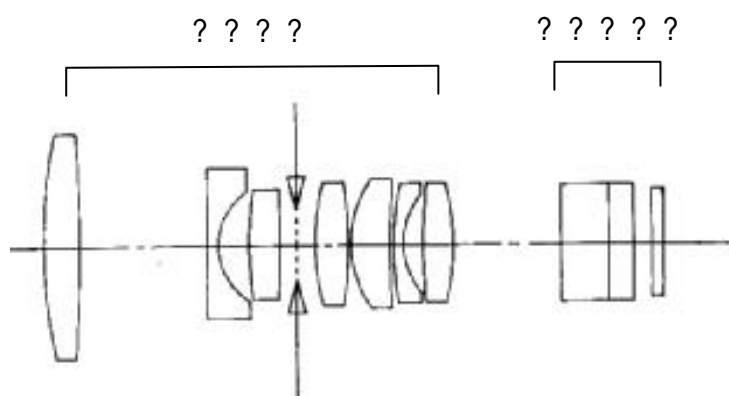


圖 5.1 數位相機基本的成像光學系統

相物鏡相比，數位相機的鏡頭結構比較複雜。傳統 35mm 以基本 Cooke Triplet 三片物鏡系統即可較好的校正 7 種光學像差，為普及型取景照相機所廣泛採用。而數位相機由於需要較小的 F 數，較短的焦距和較長的後焦距，給像差校正帶來一定的困難。

為何數位相機的鏡頭需要較短的焦距？是因 CCD 元件尺寸的緣故，CCD 元件尺寸愈小，相對的焦距就愈短，圖 5.2 為 CCD 1/4" sensor 與 35 mm 底片系統焦距對照圖，因為傳統 35 mm 底片尺寸較大，若視角相同時，數位相機鏡頭的焦距會較短。

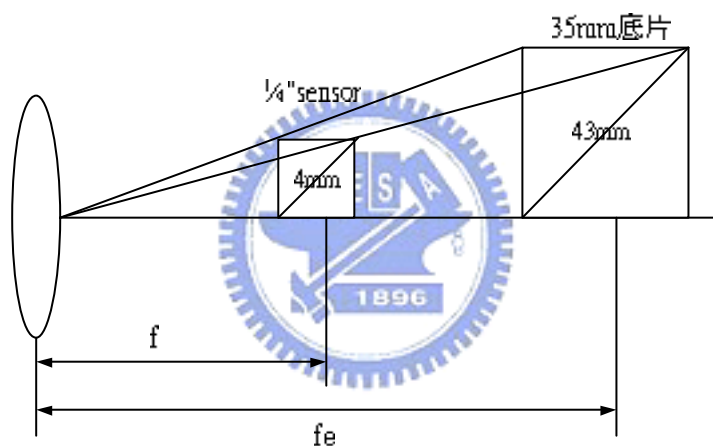


圖 5.2 CCD 與傳統 35mm 底片焦距的比較圖

下面舉例說明數位相機鏡頭實際焦長 f 與等同 35mm 底片焦長 f_e 間的關係：

設 FOV=54°

$$f = \frac{4/2}{\tan(54^\circ/2)} = 3.925 \text{ mm}$$

$$f_e = \frac{43/2}{\tan(54^\circ/2)} = 42.2 \text{ mm}$$

系統中的低通濾波片的作用是對提高系統整體成像分辨率無貢獻的高頻部分過濾掉，使光學系統的調制傳遞函數曲線(MTF)呈現出如圖 5.3 所示的狀態。低通率波片通常用兩片石英晶體制成，第一片晶體的表面鍍有光學增透膜用來降低入射光能量的損耗，第二片晶體的表面鍍有紅外濾光膜，以減小紅外輻射對光電探測元件的影響。數位相機系統也由於需要放置濾波片，所以需要較長的後焦。

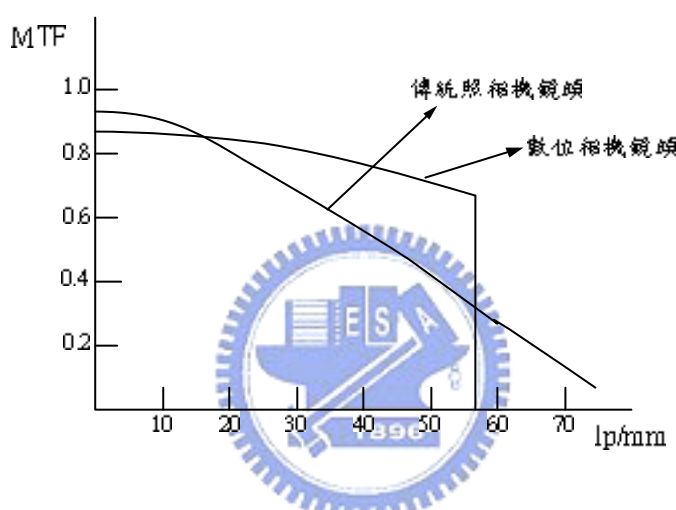


圖 5.3 傳統照相機與數位相機光學系統 MTF 的比較

5.2 十倍光學變焦系統

數位變焦相機分為光學變焦和電子變焦。電子變焦是對已獲得的數字圖像信息通過數字圖像處理，對其中的局部放大而獲得，是可以放大圖像，但不能夠增加被放大部分的細節訊息。光學變焦是真正能夠改變成像系統的焦距，並在改變過程中能夠保證系統的等效分辨率水準。

本論文是設計一組使用在數位相機系統的十倍光學變焦鏡組，最

大視角為 60 度，焦距為 5.048mm~50mm，F 數為 2.8~3.6，鏡頭組並採用了繞射/折射複合透鏡，利用了複合透鏡的優點，成功的僅使用了四片塑膠鏡片和兩片玻璃鏡片即達到十倍光學變焦的功能，與現在市面上數位相機十倍光學變焦動輒至少要十片以上鏡片的鏡頭組相比，大大的減少了使用片數、系統複雜度及重量，sensor 端並採用 1/3 inch 300 萬像素的 CCD，所以本論文的设计兼具數位相機要求的輕巧、高像素的目標。

5.2.1 系統結構的介紹

本論文的设计為達到十倍光學變焦的功能，系統的安排是採用四群鏡頭組，從物面到像面，第一群是正光焦度，包括一片正光焦度的塑膠複合非球面鏡，和一片正光焦度的玻璃球面透鏡，在變焦過程中是保持固定的。第二群是負光焦度，包括一片負光焦度的玻璃球面透鏡，和一片負光焦度的塑膠複合非球面透鏡，在變焦過程中會移動。第三群是正光焦度，包括一片正光焦度的塑膠複合非球面透鏡，在變焦過程中會移動。第四群是正光焦度，包括一片正光焦度的塑膠複合非球面透鏡，在變焦過程中會移動。系統的孔徑光闌位在第二群和第三群間，在變焦過程是保持固定的。在成像面前並放置了一片濾波片。所以整個系統是由六片透鏡及一片濾波片所組成。由圖 5.4 可說明系統的變焦軌跡。

在這個變焦系統中，G2(第二群)是負責變焦，使系統達到最大的變倍比。G3 是補償因變焦造成的成像面移動，並修正變焦造成的像差變化。G4 是負責對焦。

一般這種由四群(正負正正)鏡組組成的十倍光學變焦系統，大部

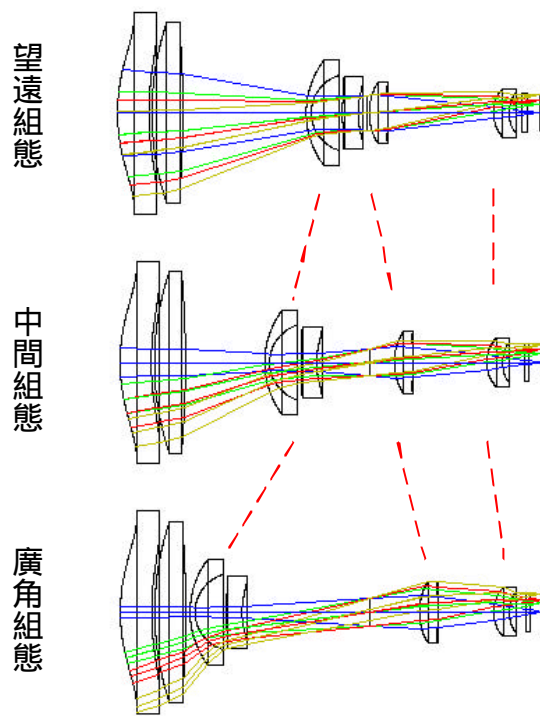


圖 5.4 系統的結構與變焦軌跡

分在變焦過程中，是移動第二、四群，固定第一、三群，但本論文是採取移動第二、三、四群，並固定第一群及 stop 的方式，如此是為了要提升系統的變倍比及提高最大視角。因為四群(正負正正)的架構，為提升系統變倍比通常會採取兩個方法：(1)增加變焦鏡組的光焦度，但此方式會使變焦鏡組產生球差、慧差等像差。(2)拉長變焦鏡組的移動距離，因為此架構變焦鏡組是第二群，其位於光闌前，所以第一群至 stop 的距離勢必增長，造成系統長度較長，增長的結果，為符合視角的要求，也會使第一群透鏡尺寸加大。

為了解決上述兩個問題，所以在變焦過程中增加移動第三群，因為 G3 的移動，可分擔 G2 的移動距離，且 G3 是位於 stop 之後，所以 stop 前的長度可縮短，使 G1 的尺寸不會加大，並因為 G4 也會移動，

所以 G3 的移動並不會造成 stop 至成像面的距離增長。且移動 G3 還有個重要的優點，是可補償 G2 變焦時造成的像差，以減少變焦過程中像差的變化。基於以上的優點，所以本論文的设计增加第三群的移動，以期達到更緊湊、更輕巧的系統結構。

另外，此設計是由第四群負責對焦，由第四群對焦的系統稱為“後組對焦變焦系統(rear-focus type zoom system)”，以往具有高變倍比和大視角的四群光學變焦結構，是由第一群負責對焦，在變焦過程中 G1 是需要移動的，造成第一群透鏡尺寸會較大，且系統長度會拉長，而且因為第一群的尺寸較大又需移動，所以此結構會較耗電。總結上述，利用第四群對焦會有幾個好處：(1)可使第一群的尺寸較小，減輕系統重量。(2)可使系統的長度縮短。(3)因為第四群尺寸相對第一群小，且接近成像面，所以移動距離短，達到省電、快速對焦的功能。

基於上述考量，就決定出此設計的基本架構。



5.2.2 光學系統

因為上節的分析，本設計是採用滑動三群鏡組的變焦系統，一般由四群鏡組構成並滑動三群的變焦系統，其滑動軌跡曲線會有多種變化，必須加入限制條件，否則無法做解析。所以為得到系統的初始參數，我參考了一篇專利，美國專利號碼為 6157494 中的一個例子，引用了它的系統規格、各群焦距分配及各組態(廣角、中間和望遠組態)中群與群主平面間距的變化等，作為初始的設計值，再進行一連串的設計、優化得到此論文設計的最後結果。表 6.1 說明專利 USP6157494 系統參數值，其中 d_i ， $i=1\sim5$ 代表各群間距離。

將主要的光學參數輸入 ZEMAX 光學模擬軟體後，可求得系統薄透鏡的光線追跡圖，如圖 5.5 所示。

	EFL	f_{G1}	f_{G2}	f_{G3}	f_{G4}	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
廣角	5.048	39.7435	-7.50043	14.3799	55.3522	1.555	20.386	4.696	1.729	7.254
中間	17					12.731	9.129	0.982	2.644	10.085
望遠	50					20.930	1.111	0.8	5.033	7.796

表 5.1 專利 USP61574942 系統參數值 單位(mm)

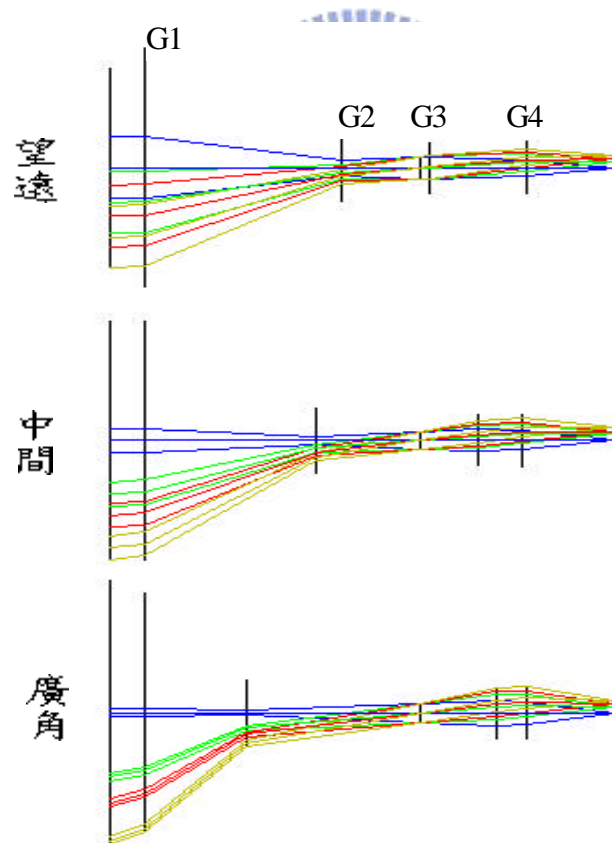


圖 5.5 薄透鏡光線追跡圖

由圖 5.5 可發現，第一群和第二群的進光角度和出光角度變化很大，若只用單透鏡，可能會造成嚴重像差，所以第一、二群皆安排由一片複合非球面透鏡和一片玻璃球面透鏡組成，第三、四群各由一片複合非球面鏡組成。表 2 為設計的系統所使用的材料，由物面至像面為第一 第六片透鏡。

鏡片	材料名	Nd	Vd
1	PMMA	1.491756	57.4408
2	BSM16	1.620410	60.2719
3	LAM2	1.743997	44.7875
4	PMMA	1.491756	57.4408
5	E48R	1.531160	56.0438
6	PMMA	1.491756	57.4408

表 5.2 系統透鏡所使用的材料

繞射面的設計，是使用 ZEMAX 中的“ Binary 2 ” Surface type，ZEMAX 定義的相位補償公式如下：

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i r^{2i} \quad (5.1)$$

其中，N 為多項式序列的總數， r 是歸一化的徑向孔徑值， A_i 是 r 的第 $2i$ 次冪的係數，因為 r 已歸一化，所以 A_i 均以弧度為單位， M 是繞射級數。

5.3 模擬結果

由表 5.3 列出系統的設計規格，並由表 5.4 列出每一面的面型態，面的編號是由物面至像面。且此系統是針對無窮遠物距所做的設計。

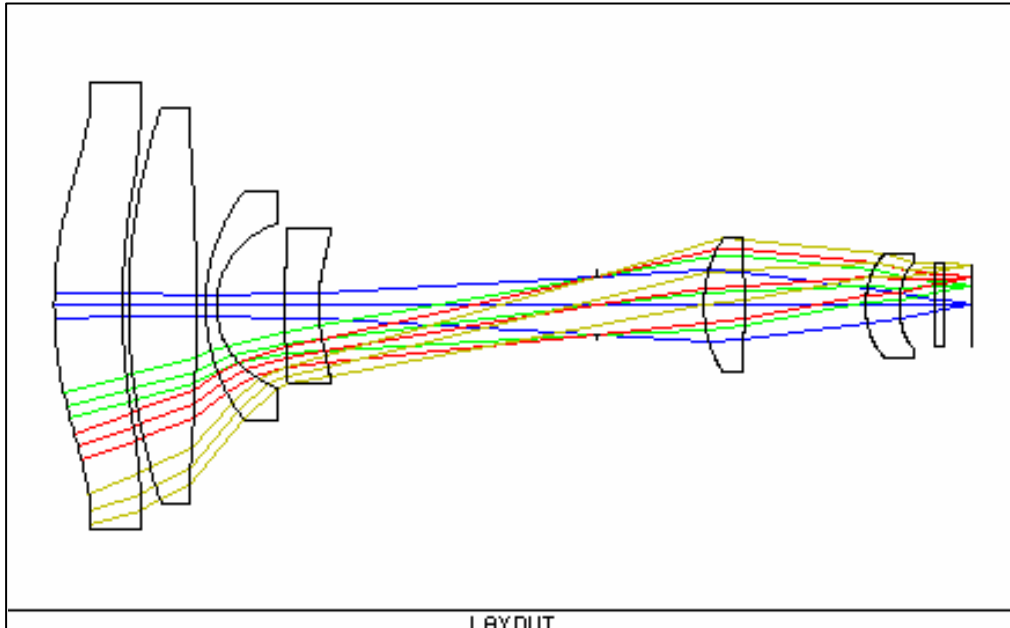
焦距長	5.048mm 50mm
Sensor 尺寸	1/3 " CCD (像幅大小為 3.48mm×4.64mm)
F number	F/2.8 F/3.6
波段	486nm 656nm
畸變	< ±5%
總長度	< 68mm
像面最大入射角	約 14.6°
像面最大相對漸暈	約 69%
最大光圈直徑	約 5.62 mm

表 5.3 系統的設計規格

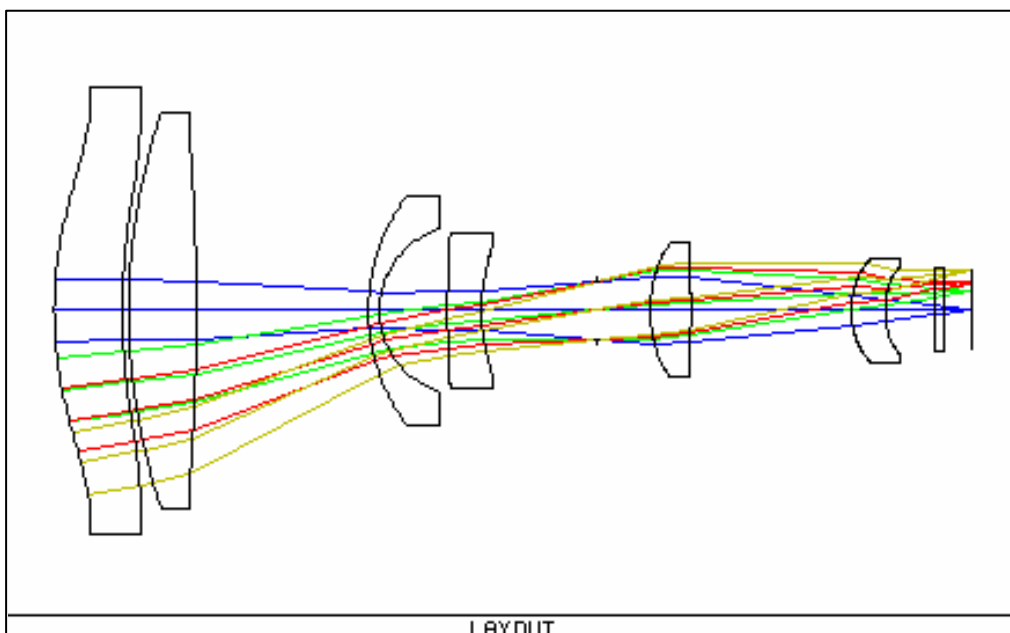
1	2	3	4	5	6	
非球面	繞射面	球面	球面	球面	球面	
7	8	9	10	11	12	13
繞射面	非球面	光欄	非球面	繞射面	非球面	繞射面

表 5.4 系統中各面的面型態，其中數字 1 13 為面編號

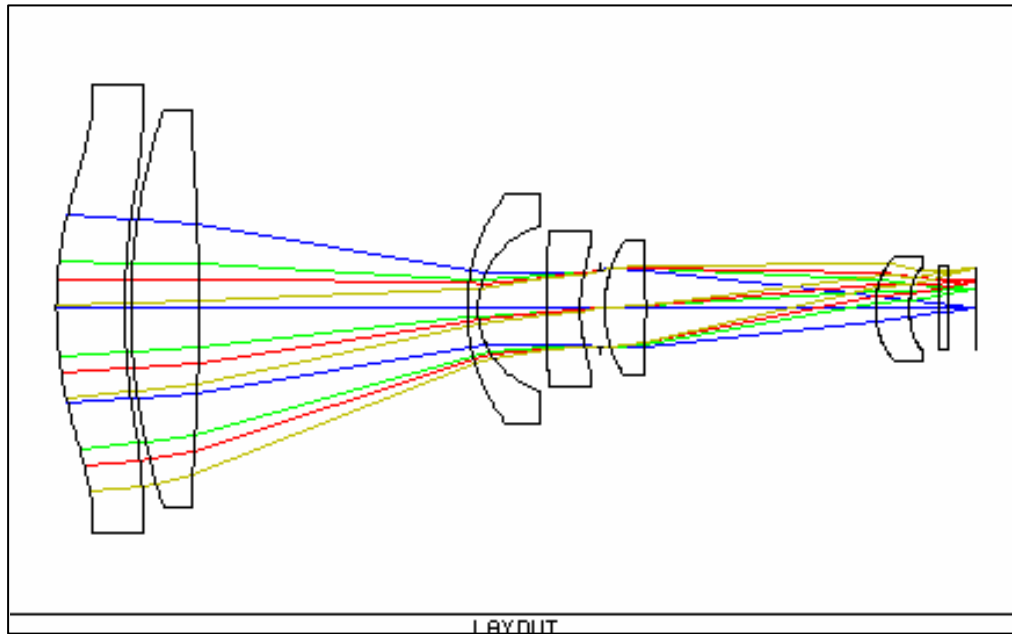
圖 5.5 列出系統在各組態(廣角、中間、望遠組態)的結構圖。圖 5.6 圖 5.9 列出系統各組態的像差圖，其中因為 CCD 的 pixel size 為 $2.32\mu\text{m}$ ，所以 CCD 的空間頻率解析極限為 215 line pair/mm，因此 MTF 曲線看到 215 line pair/mm。圖 5.10 更列出各組態的二次譜曲線，證明系統已達消色差功能。



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組態



圖 5.5 各組態的結構圖

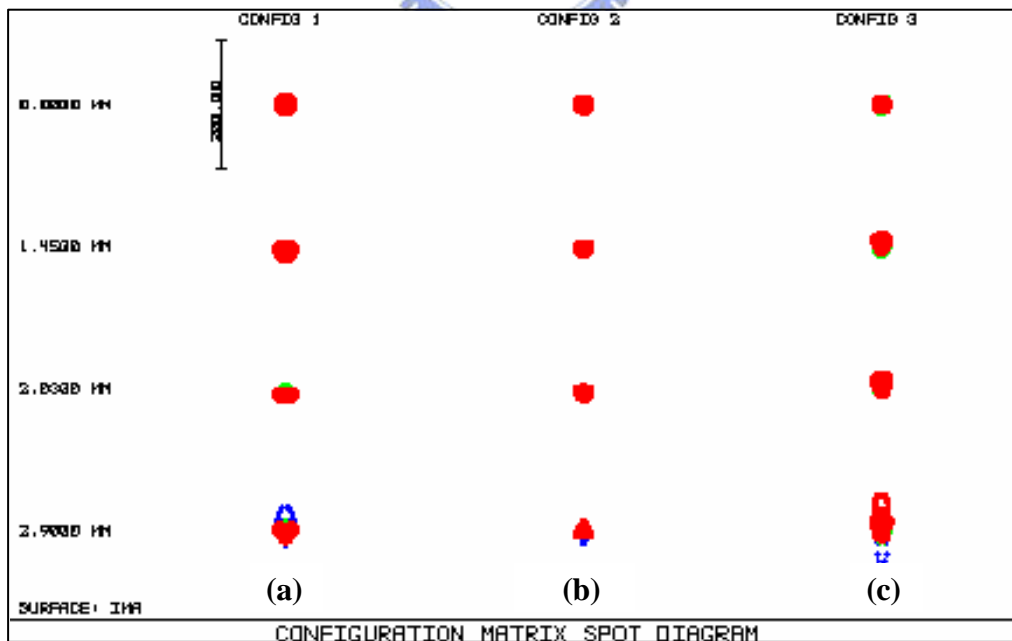
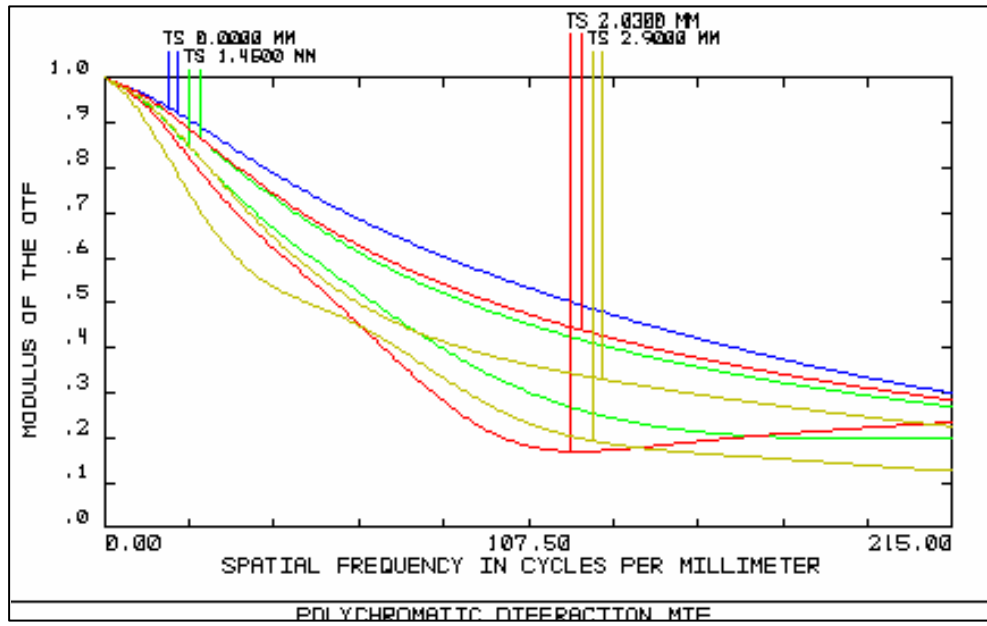
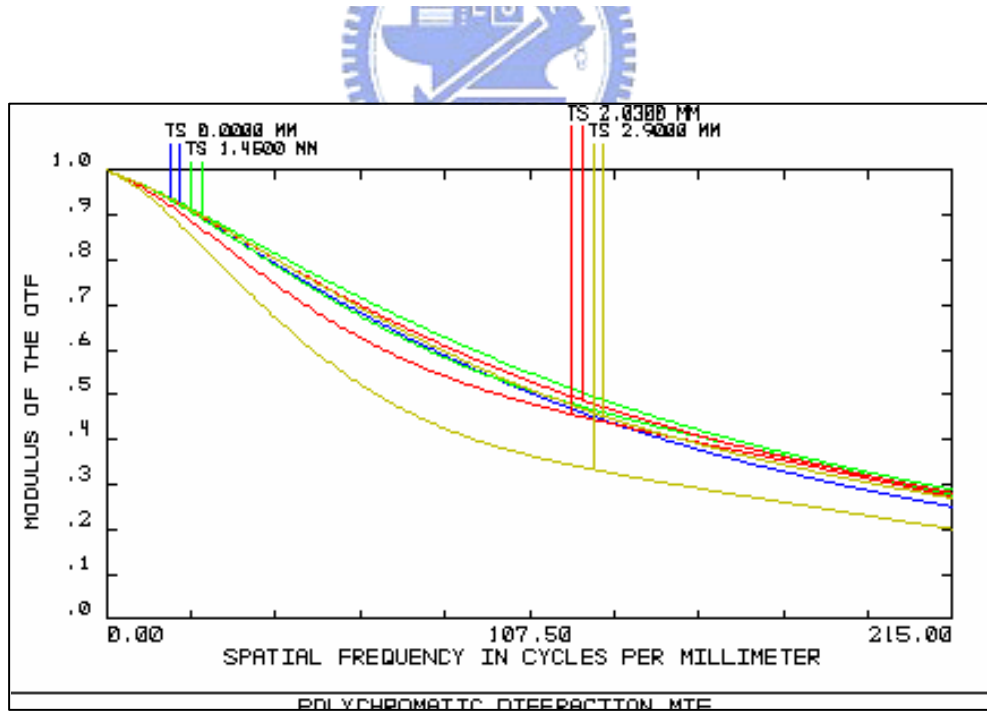


圖 5.6 為各組態的在成像面上的光斑分布圖

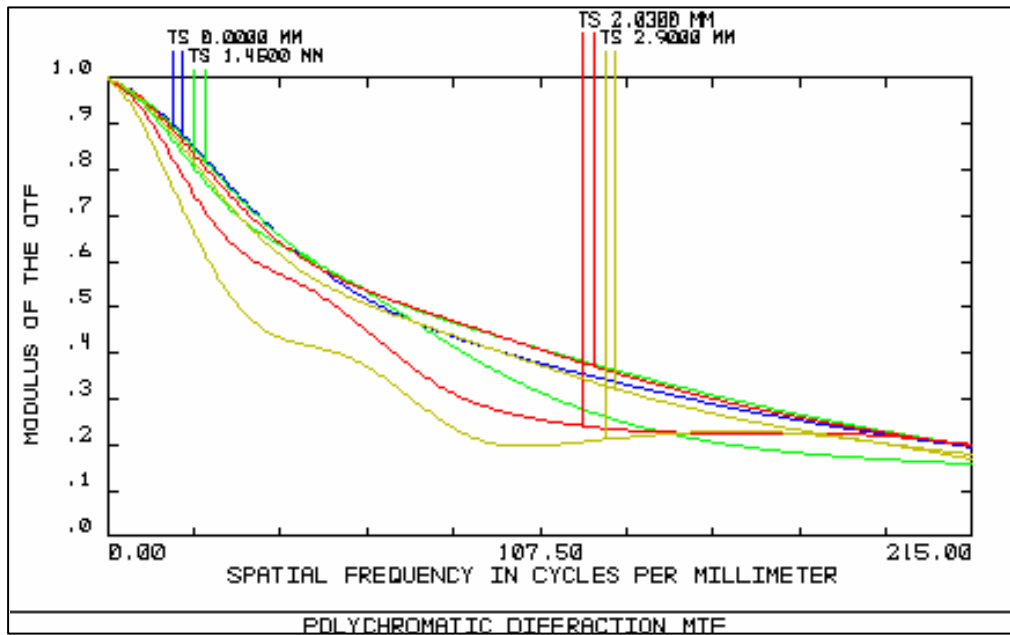
(a) 廣角組態 (b) 中間組態 (c) 望遠組態



(a) 廣角組態 MTF 曲線

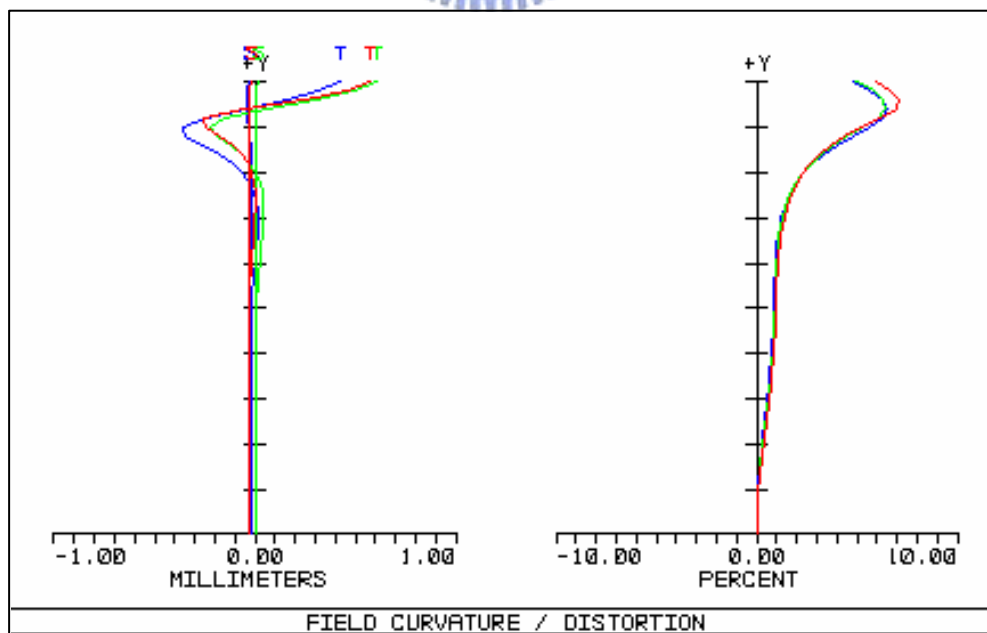


(b) 中間組態 MTF 曲線

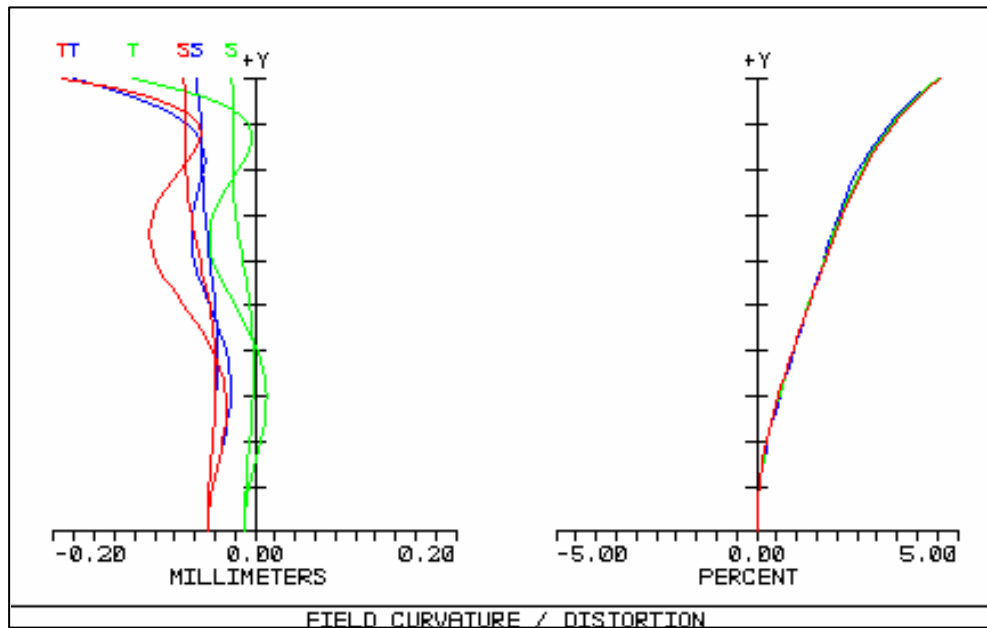


(c) 望遠組態 MTF 曲線

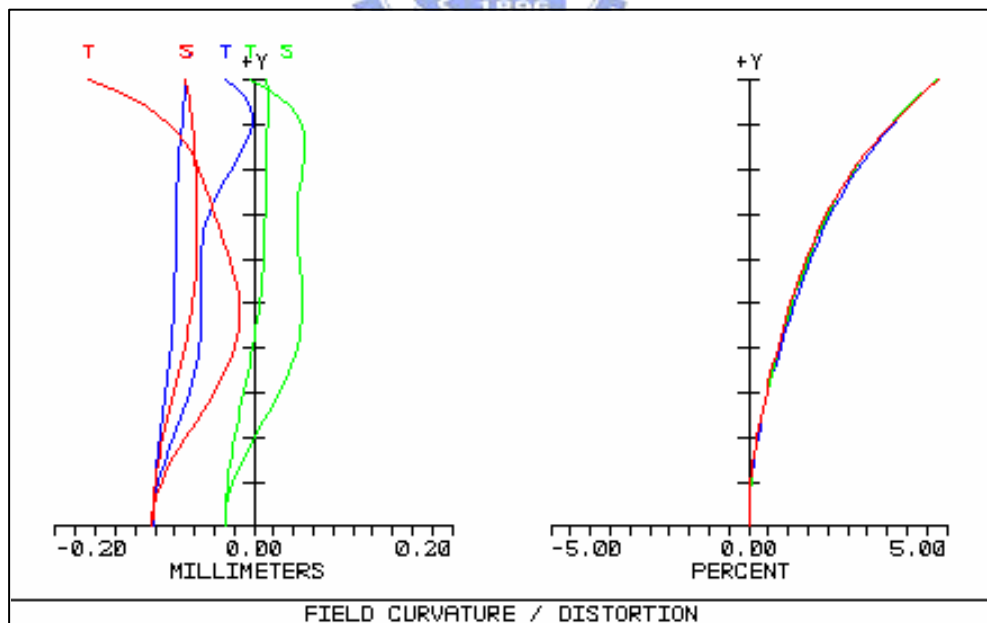
圖 5.7 各組態的 MTF 曲線圖



(a) 廣角組態

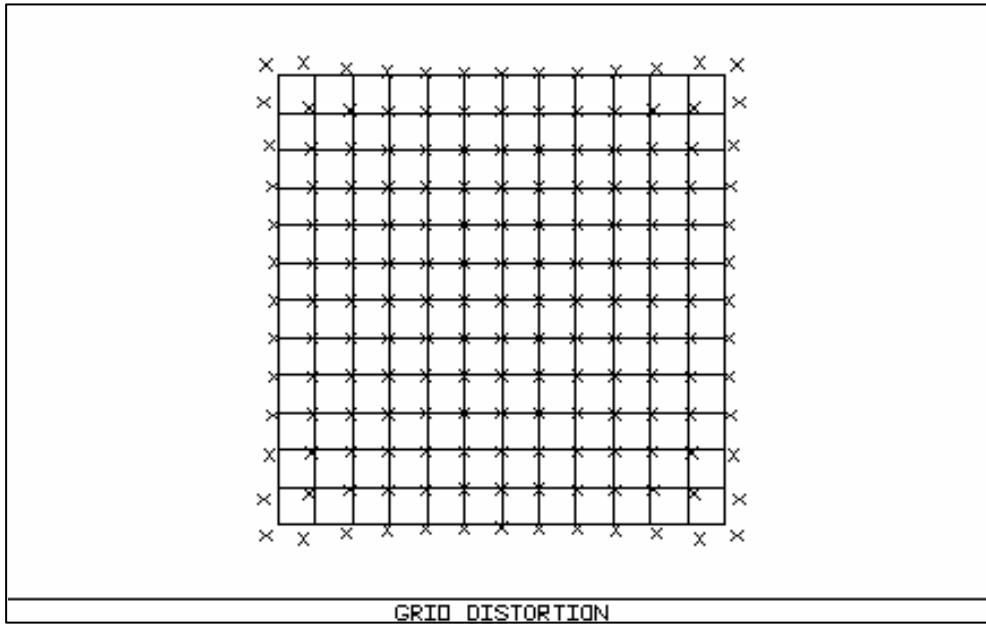


(b) 中間組態

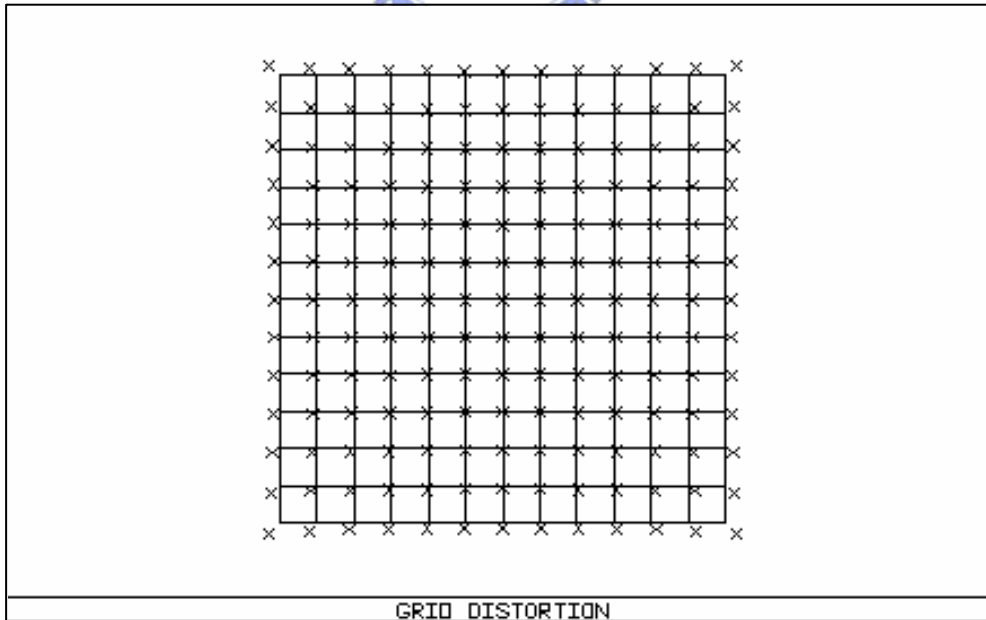


(c) 望遠組態

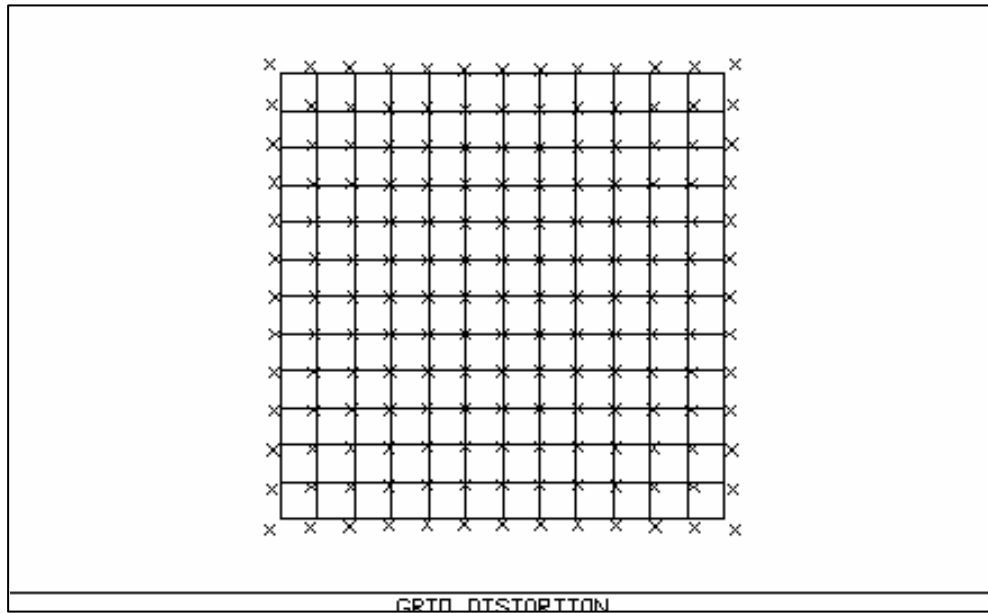
圖 5.8 各組態的場曲/畸變圖



(a) 廣角組態

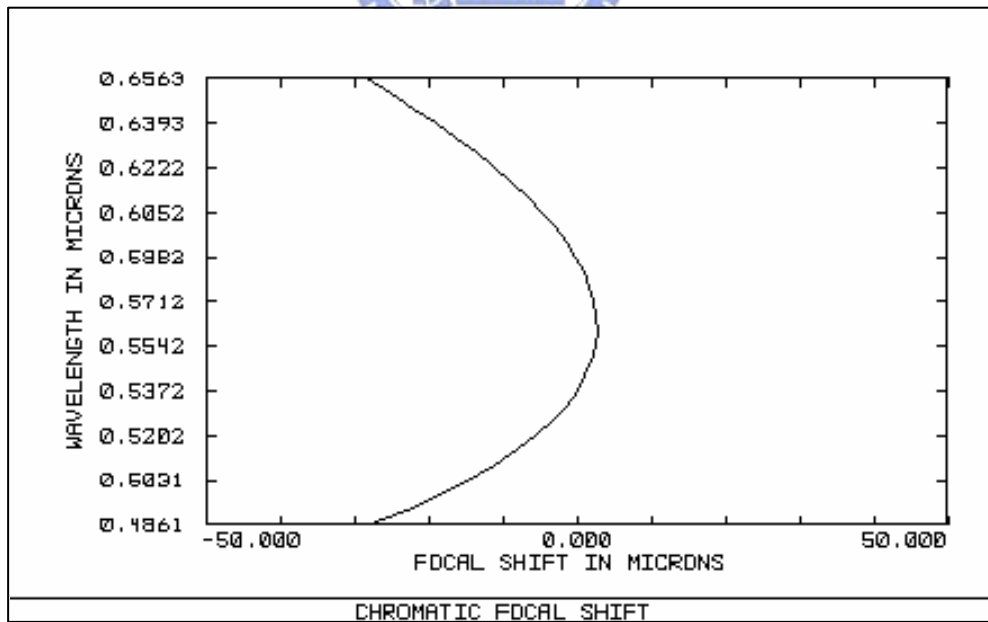


(b) 中間組態

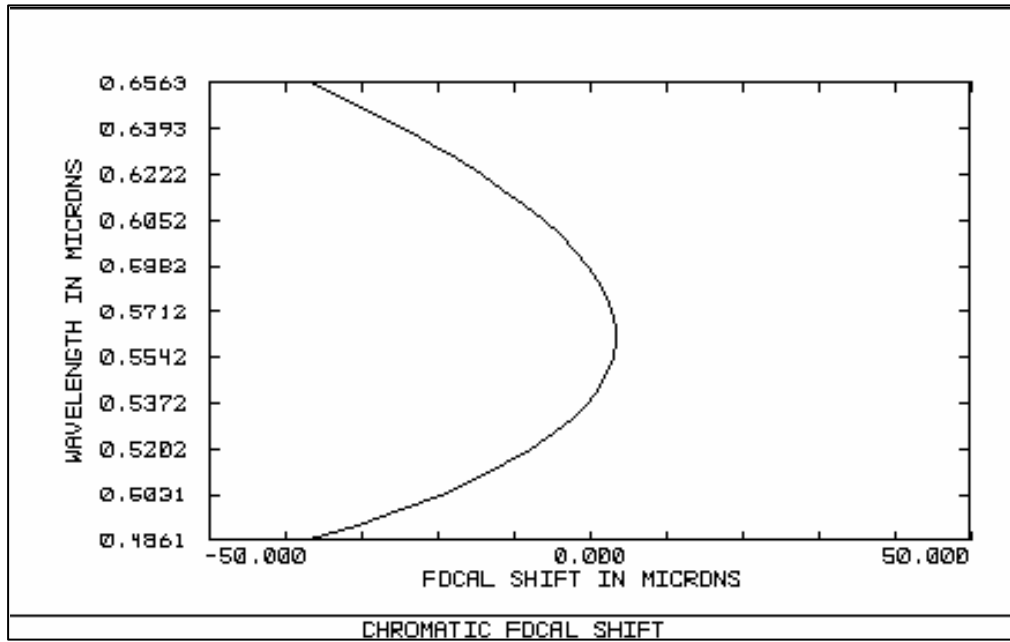


(c) 望遠組態

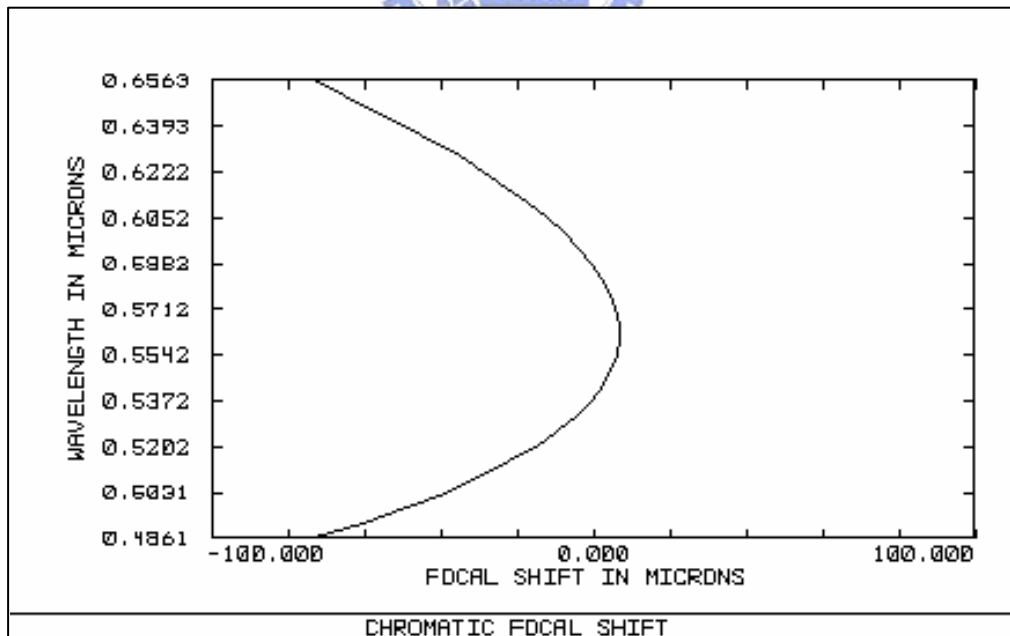
圖 5.9 各組態的網格畸變



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組

圖 5.10 各組態的二次譜圖

由圖 5.7 可看出，廣角端的 MTF 值較其它組態差，可能是因為廣角端的視角較大所致。圖 5.8 也發現廣角組態的畸變曲線在 0.8 像面是急遽增加的，這種情形並不好，會造成 TV 畸變很大，所以造成圖 5.9 在廣角組態的網格畸變較明顯。圖 5.10 的二次譜圖證明系統在各組態已達消色差功能，各組態的二次譜也不大，而系統僅用了三種透鏡材料，證明複合透鏡確實可校正二次譜。

接著，將模擬結果與參考專利 USP6157494 的系統，將這兩個系統針對 MTF 曲線進行比較，以驗證此論文所設計的結果，並不會因為加入繞射元件並減少使用片數而影響效能。當然，有將專利所給的系統做進一步簡單的優化。在比較前先對專利的系統做簡單的介紹，圖 5.11 為專利 USP6157494 廣角組態結構圖，此系統共使用了 10 片鏡片，六種材料，材料的折射率在 1.51~1.85 之間，所以系統使用了不少高折射率玻璃。圖 5.12 為本論文各組態設計結果與專利 USP6157494 系統的 MTF 曲線比較圖，左圖為設計結果，右圖為專利簡單優化的結果。

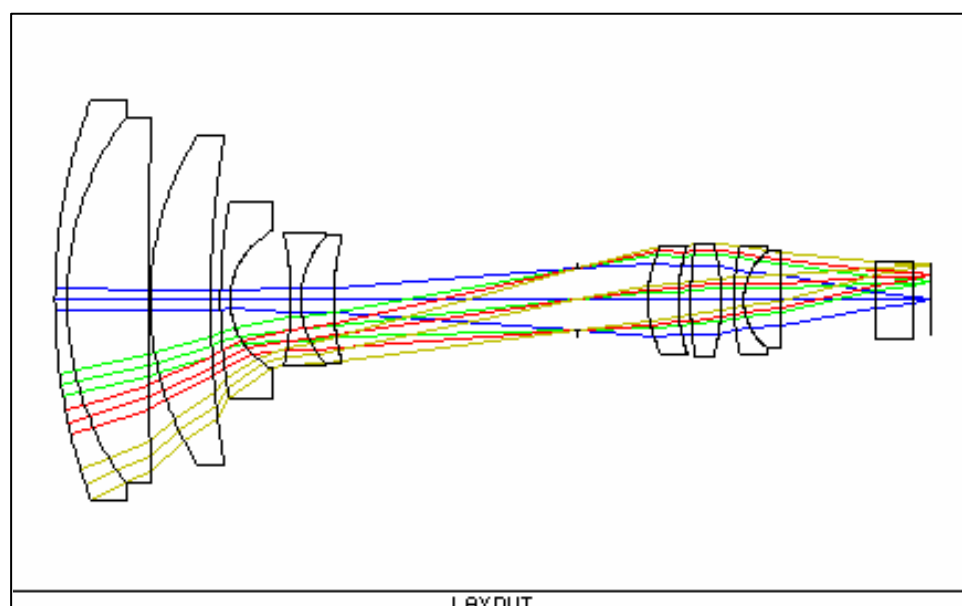
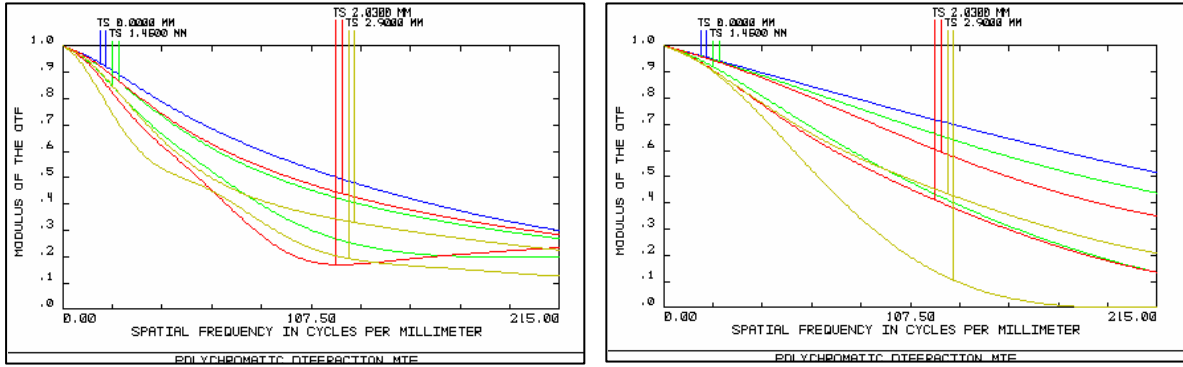
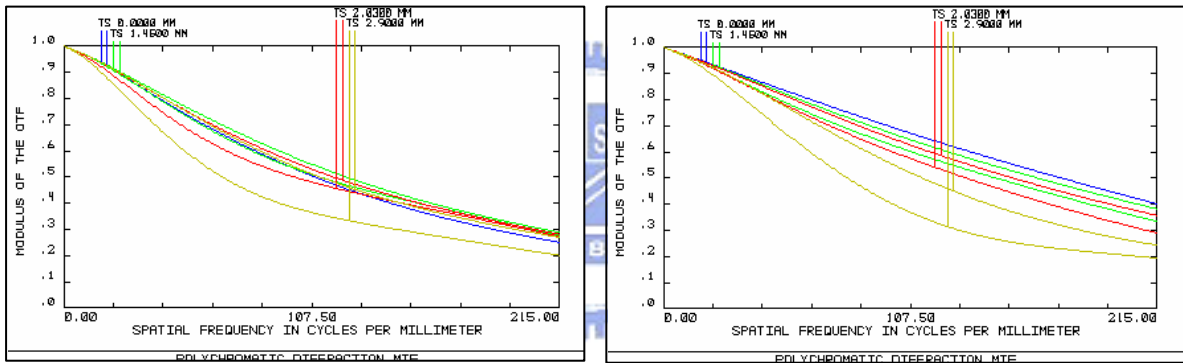


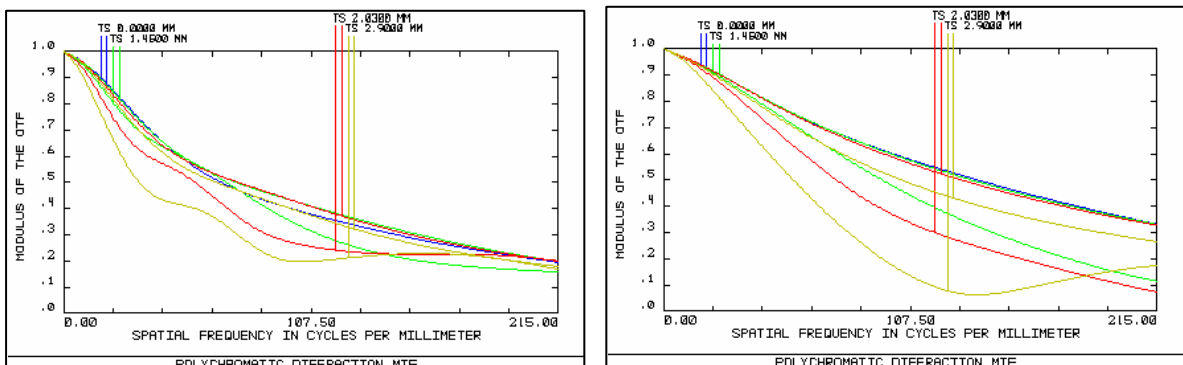
圖 5.11 專利 USP6157494 廣角組態結構圖



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組態

圖 5.12 各組態設計結果與專利 USP6157494 的 MTF 曲線比較圖，左圖為設計結果，右圖為專利簡單優化結果。

由圖 5.12 可發現，本論文模擬結果與專利系統比較，各組態在中間視場時，專利的結果較好，在全視場時，本論文的模擬結果較好。一般若要使中間視場的成像品質較離軸視場的好很多，便會犧牲離軸視場的成像品質，若要使離軸視場的成像品質與中間視場不要差太多，自然會犧牲中間視場的成像品質，所以會有此結果，再者，專利例子的系統並沒有達到消色差的功能，所以單色像差會較好，MTF 值就會較高。

因為，系統在第一、二群各有一片玻璃球面鏡，所以在鏡頭設計上必須注意球面鏡加工時對心的困難度，有個可以參考的公式及判斷標準：

$$V_{-val} = \frac{1}{4} \left| \frac{d_1}{r_1} \pm \frac{d_2}{r_2} \right| \quad (5.2)$$

當 $V > 0.15$ ，對心容易

當 $0.15 > V > 0.1$ ，對心困難度適中

當 $V < 0.1$ ，對心困難

其中， r_1 、 r_2 、 d_1 、 d_2 分別為球面前後面的曲率半徑和尺寸大小。利用此公式可求出系統的兩個玻璃球面鏡的 V 值，第二片和第三片其 V 值分別為 0.118 和 0.176，皆大於 0.1，所以是屬於對心較容易的。

另外，此系統的設計，是採用繞射/折射複合透鏡，所以在設計時，必須注意繞射面波帶的線寬，若元件是利用鑽石車床加工，此種機台可加工的最小線寬為 $5 \mu\text{m}$ ，鑑於此，繞射面的最小線寬不得小於 $5 \mu\text{m}$ ，若小於此值，就算設計的系統成像再好，無法加工，也沒有用。所以表 5.5 列出此系統各繞射面的最小線寬值。由表中可看出，各繞射面的最小線寬皆大於 $5 \mu\text{m}$ ，所以符合加工要求。

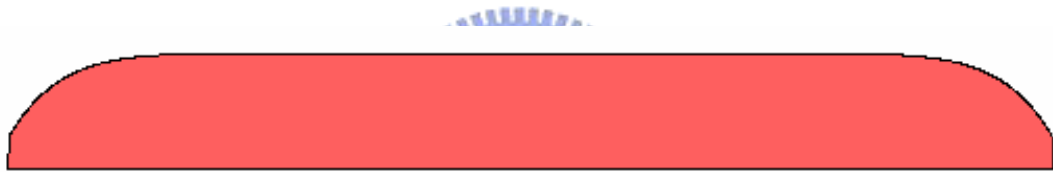
	Surface 2	Surface 7	Surface 11	Surface 13
最小線寬	154 μm	57 μm	47 μm	31 μm

表 5.5 各繞射面的最小線寬

最後，將設計所得繞射面的數據，利用 DIFFSYS 軟體，轉出繞射面的輪廓示意圖，如圖 5.13 所示。



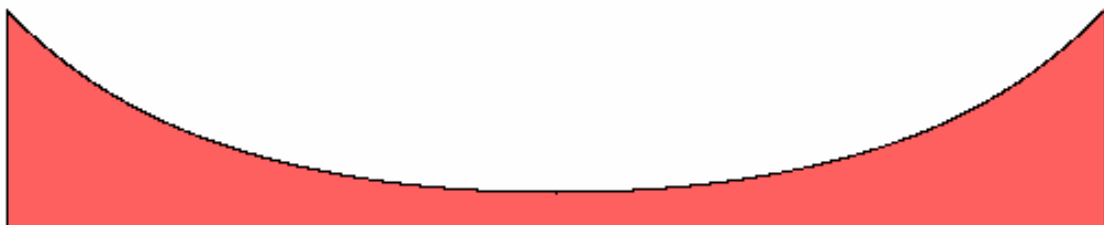
(a) 第 2 面



(b) 第 7 面



(c) 第 11 面



(d) 第 13 面

圖 5.13 系統各繞射面的輪廓示意圖

5.3.1 公差分析

最後，針對所設計的系統進行公差分析，因為系統採用了複合透鏡，繞射面上的面公差一般軟體是無法做公差分析，所以對於此系統，僅針對組裝誤差進行公差分析，分別是在組裝時元件會產生的傾斜、偏心和空氣的厚度誤差這三種公差，表 5.6 說明設定的各片透鏡或各群鏡組間公差參數的容忍度大小。

傾斜公差	偏心公差	群內空氣的厚度公差	群與群間空氣的厚度公差
$\pm 0.1^\circ$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 40 \mu\text{m}$

表 5.6 各片透鏡或各群鏡組公差參數的容忍度大小

訂出各公差容忍度大小後，就對各組態進行各鏡片的靈敏度分析及 Monte Carlo 分析。進行分析前先介紹在 zemax 光學模擬軟體中，會使用到的公差運算元及其意義。分析結果會依照各組態一一介紹。

TEDX、TEDY：X 和 Y 方向的元件偏心公差。

TETX、TETY：X 和 Y 方向的元件傾斜公差。

TTHI：厚度公差。

其中，靈敏度分析是將各公差大小進行獨立求值，以各視場在空間頻率為 80 line pair/mm 的平均 MTF 值作為評價標準，視場設定分別為中間視場、0.7 視場和全視場，補償器為系統的後焦距離。表 5.7 列出各組態在設定的公差大小下，評價標準改變量最大的前十項，面編號請考表 5.4。

運算元	面編號	面編號	公差大小	改變後的值	改變量
TEDY	12	13	0.020000	0.393124	-0.024785
TETX	10	11	0.100000	0.393696	-0.024212
TEDY	7	8	0.020000	0.394237	-0.023671
TTHI	4	4	0.040000	0.394795	-0.023113
TEDY	5	6	-0.020000	0.395060	-0.022848
TETX	5	6	0.100000	0.399682	-0.018226
TEDY	7	8	-0.020000	0.401006	-0.016902
TEDY	10	11	-0.020000	0.401450	-0.016459
TTHI	4	4	-0.040000	0.404426	-0.013482
TETX	3	4	0.100000	0.406464	-0.011445

(a) 廣角組態

運算元	面編號	面編號	公差大小	改變後的值	改變量
TETY	10	11	-0.100000	0.491106	-0.010029
TETY	10	11	0.100000	0.491106	-0.010029
TETX	10	11	0.100000	0.492556	-0.008579
TETX	10	11	-0.100000	0.496078	-0.005056
TEDY	7	8	-0.020000	0.496184	-0.004950
TEDX	7	8	-0.020000	0.496713	-0.004421
TEDY	5	6	0.020000	0.496785	-0.004349
TEDX	10	11	-0.020000	0.496973	-0.004161
TEDX	10	11	0.020000	0.496973	-0.004161

(b) 中間組態

運算元	面編號	面編號	公差大小	改變後的值	改變量
TETX	3	4	0.100000	0.268302	-0.069055
TETX	1	2	-0.100000	0.287150	-0.050207
TETY	3	4	-0.100000	0.306400	-0.030957
TETY	3	4	0.100000	0.306400	-0.030957
TEDY	5	6	0.020000	0.307435	-0.029922
TETX	10	11	0.100000	0.309179	-0.028178
TEDY	7	8	-0.020000	0.309321	-0.028037
TETY	1	2	-0.100000	0.317671	-0.019687
TETY	1	2	0.100000	0.317671	-0.019687
TETX	5	6	-0.100000	0.317733	-0.019624

(c) 望遠組態

表 5.7 各組態的系統的零敏度

由表 5.7 可看出，廣角組態的平均 MTF 值改變量在 0.02 以上，主要分佈在第二、三、四群透鏡的傾斜、偏心公差，可說公差靈敏度較平均，其中值得一提的是第一群與第二群間的空氣厚度公差需要較注意，因為一般厚度公差相較元件的傾斜、偏心公差的靈敏度會較小，但廣角組態由分析結果呈現要注意第一、二群間的空氣厚度公差，我想是因為此組態的光線由第一群入射至第二群的入射角較大，所以空氣厚度較靈敏。中間組態的平均 MTF 值改變量在 0.01 以上，主要為第三群透鏡，但相較其它組態，改變量並不大，所以此組態整體的公差靈敏度較低。望遠組態呈現改變量最大的前十項，其改變值較其它組態都較大，所以組裝上要格外小心，尤其第一群透鏡的傾斜公差，佔前十項中有六項，所以第一群透鏡在組裝上對於元件的傾斜要更注意。

分析了系統的靈敏度後，接著要分析各組態的 Monte Carlo 分析，其與靈敏度分析不同，是同時仿真所有擾動的影響，對於每個 Monte Carlo 迴圈，所有已指定公差的參數都可以由其定義的參數範圍和那個參數對於整個指定範圍的統計分佈模式來隨機設定。所以對於每個組態，我們設定了 500 組 Monte Carlo 迴圈，所有公差分佈遵循常態統計分佈。表 5.8 表示各組態在 500 組 Monte Carlo 迴圈裡，各視場在空間頻率為 80 line pair/mm，最好與最差的 MTF 值及 500 組的平均結果。因為整個公差分析系統的補償器選定為後焦距，所以表 5.9 顯示在 500 組 Monte Carlo 迴圈裡增加與減少的最大後焦距變化量(即+、-號代表像面往前或往後移動)，及平均變化量。

	平均	中間視場	0.7 視場	全視場
理想值	0.417908	0.506022	0.420230	0.318535
最好	0.429056	0.508311	0.438690	0.346520
最差	0.326788	0.504167	0.316881	0.146813
平均	0.398790	0.506048	0.411071	0.272230
標準偏離量	0.016686	0.000863	0.019212	0.036647

(a) 廣角組態


	平均	中間視場	0.7 視場	全視場
理想值	0.501134	0.526815	0.531857	0.449056
最好	0.508797	0.529850	0.543686	0.485197
最差	0.445267	0.519487	0.447156	0.359526
平均	0.491087	0.525775	0.516763	0.435931
標準偏離量	0.009630	0.001713	0.018704	0.017983

(b) 中間組態

	平均	中間視場	0.7 視場	全視場
理想值	0.337357	0.342655	0.352939	0.316995
最好	0.348500	0.352005	0.373308	0.331119
最差	0.197852	0.281569	0.164945	0.104901
平均	0.298047	0.337590	0.306657	0.253237
標準偏離量	0.028753	0.008647	0.038432	0.044425

(c) 望遠組態

表 5.8 各組態在 500 組 Monte Carlo 迴圈裡，空間頻率為 80 line pair/mm，最好與最差的 MTF 值及 500 組的平均結果。



改變後焦距：	
減少	: -0.050727
增加	: 0.054042
平均	: 0.001062
標準偏離量	: 0.020100

(a) 廣角組態

改變後焦距：	
減少	: -0.068167
增加	: 0.059270
平均	: 0.001093
標準偏離量	: 0.021528

(b) 中間組態

改變後焦距：

減少	:	-0.091135
增加	:	0.080675
平均	:	0.001471
標準偏離量	:	0.032641

(c) 望遠組態

表 5.9 500 組 Monte Carlo 迴圈裡，增加與減少的最大後焦距變化量 (+、-號代表往前或往後移動)，及平均變化量。

由表 5.8 可知，500 組 Monte Carlo 迴圈運算結果，空間頻率為 80 line pair/mm 的 MTF 值最差的情況是在望遠組態的全視場時，MTF 為 0.104901，其在 0.1 以上，而且全視場的 MTF 值本來就會較差，所以還是在可接受的範圍內。表 5.10 表示各組態、各視場在 500 組 Monte Carlo 迴圈，運算結果的百分比分佈

百分比	平均	中間視場	0.7 視場	全視場
98% >=	0.351808	0.504486	0.360692	0.190582
90% >=	0.378587	0.504964	0.383923	0.219837
50% >=	0.401865	0.506033	0.416404	0.277982
10% >=	0.417592	0.507191	0.430618	0.315353
2% >=	0.424939	0.507681	0.434821	0.331547

(a) 廣角組態

百分比	平均	中間視場	0.7 視場	全視場
98% >=	0.461551	0.521604	0.461890	0.390888
90% >=	0.479459	0.523434	0.491361	0.413997
50% >=	0.493469	0.525871	0.522431	0.435899
10% >=	0.500175	0.527969	0.535574	0.457265
2% >=	0.504249	0.528921	0.540412	0.468435

(b) 中間組態

百分比	平均	中間視場	0.7 視場	全視場
98% >=	0.223853	0.311311	0.205371	0.143222
90% >=	0.261457	0.327713	0.252917	0.194635
50% >=	0.302127	0.339606	0.312267	0.258748
10% >=	0.330756	0.345206	0.351227	0.304157
2% >=	0.338411	0.348010	0.362064	0.322144

(c) 望遠組態

表 5.10 各組態在 500 組 Monte Carlo 迴圈，運算結果的百分比分佈

由表 5.10 可知，在空間頻率為 80 line pair/mm，百分比為 98% 最差的 MTF 值是在望遠組態的全視場時，值為 0.143222，是可接受的情況。

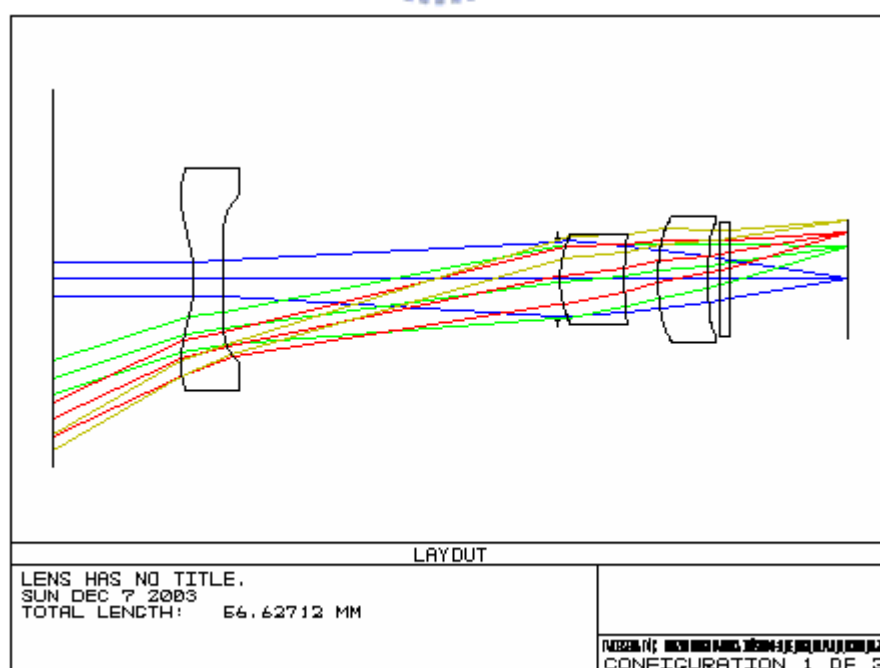
以上是針對本論文的模擬結果所做的組裝公差分析。

第六章 變焦系統的量測結果與討論

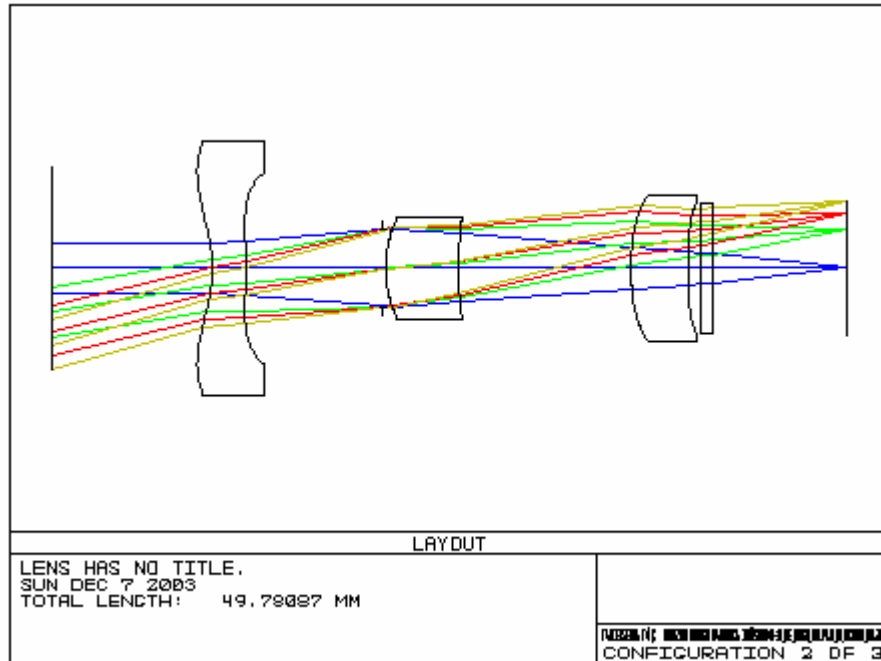
本量測鏡組是由王俊勛學長所設計的，為採用繞射/折射複合光學元件(D/ROE)設計的一組變倍比為三倍的變焦光學成像系統。此系統由負正正三群透鏡組成，每一群各包含一片複合透鏡，每一片複合透鏡具有非球面和繞射面。由表 6.1 及圖 6.1 列出系統各組態的設計規格及架構。

名稱	廣角組態	中間組態	望遠組態
F-number (F/#)	3	4.5	6
焦距 (EFL, mm)	7.2	14.4	21.6
視角 (FOV)	約 60°	約 32°	約 22°
波長範圍 (μm)	0.4~0.67		
材料	PMMA		

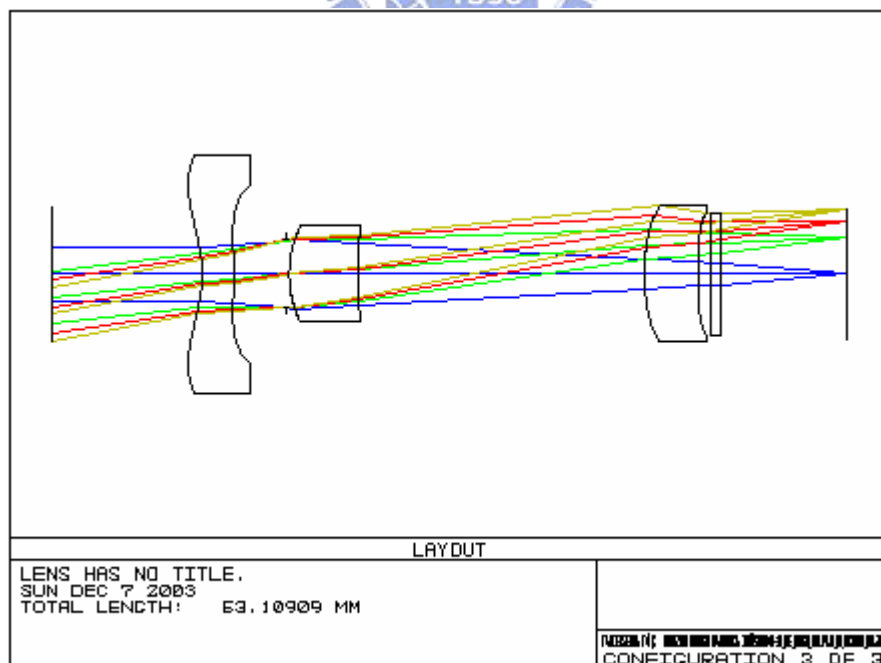
表 6.1 變焦系統的設計規格



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組態

圖 6.1 變焦系統各組態的架構

成像面所使用的感測器為 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor, 互補金氧半元件), Omni Vision Technologies 公司所擁有, 型號為 OV9620, 其規格如表 6.2 所示(元件購自天翰科技公司 Pen Cam 1.3M SD), 此感測器的頻譜響應如圖 6.2。圖 6.2(A)顯示可通過濾波片之波長範圍與感測器對紅光、綠光和藍光等波長的響應曲線, 圖 6.2(B)說明感測器對所列波長的響應曲線, 圖中橫座標為波長, 縱座標為規一化的效率。

Array Format	Total : 1312H × 1036V Active : 1280H × 1024V Used : 1280H × 960V
Image Area	Total : 6.82 × 5.39 mm ² Active : 6.66 × 5.32 mm ² Used : 6.656 × 4.992 mm ²
Pixel Size	5.2 μm × 5.2 μm
Optical Size	1/2"
Color Mosaic	RGB Bayer Pattern
Max Frame Rate	30fps at 1280 × 1024 120fps at 640 × 480
Electronics Exposure	1.8 μs to 1/30 s
Scan Mode	Progressive

表 6.2 型號 OV9620 之 CMOS 規格表

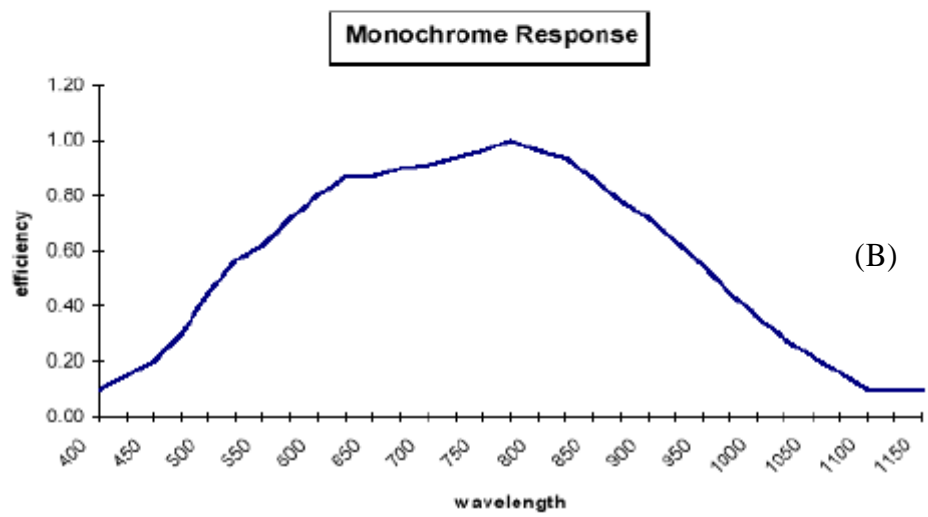
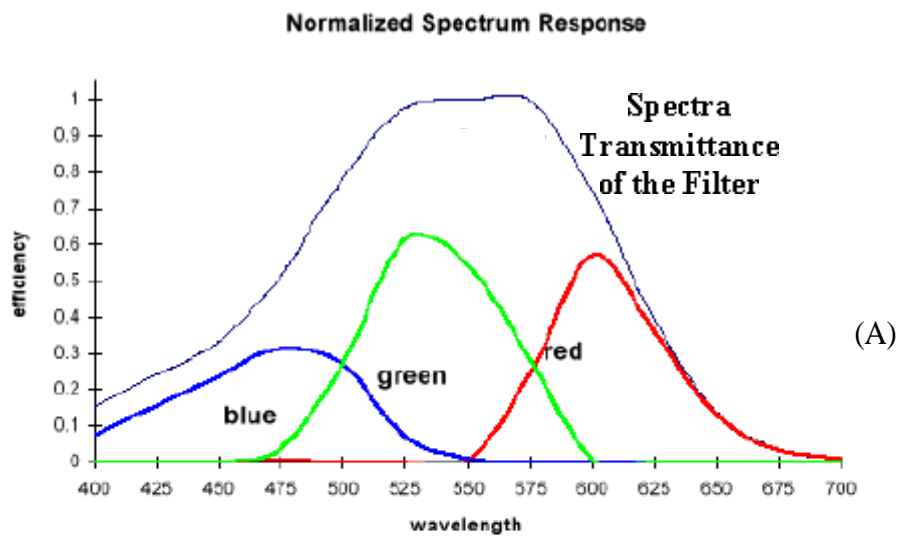
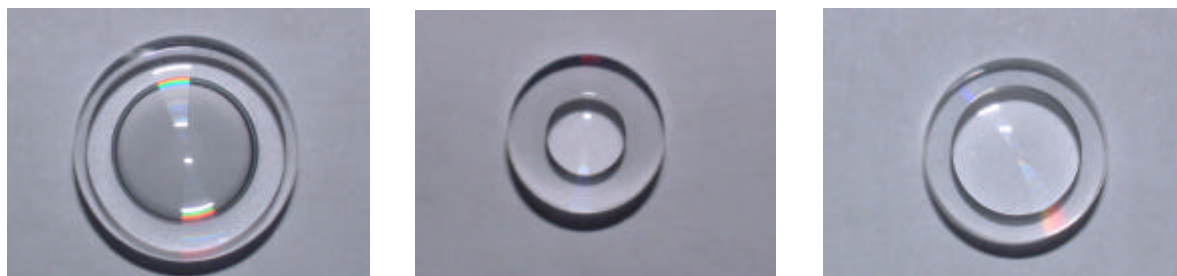


圖 6.2 OV9620 感測器對光譜之響應曲線

6.1 透鏡表面輪廓量測

首先顯示三群透鏡的外觀如圖 6.3 所示，此三群透鏡是由工研院機械所利用鑽石車床所加工。



(a) 第一群透鏡外觀

外圍直徑為 18mm

(b) 第二群透鏡外觀

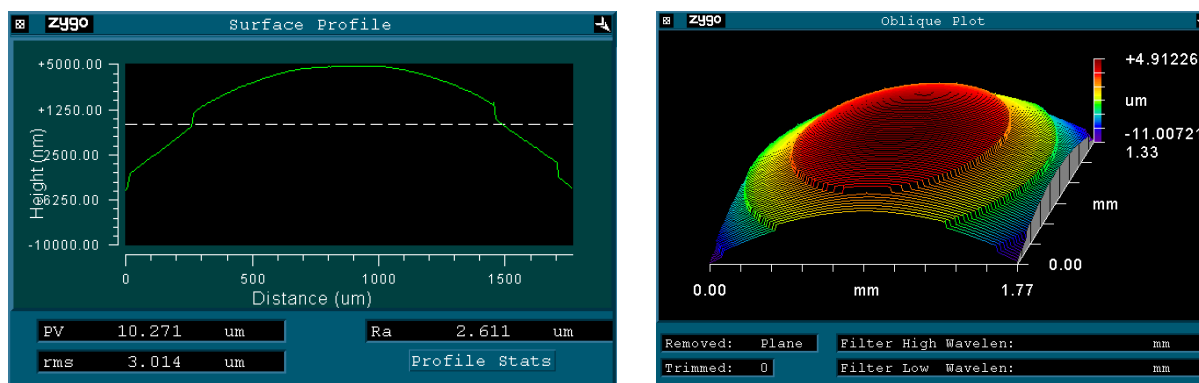
外圍直徑為 12.38mm

(c) 第三群透鏡外觀

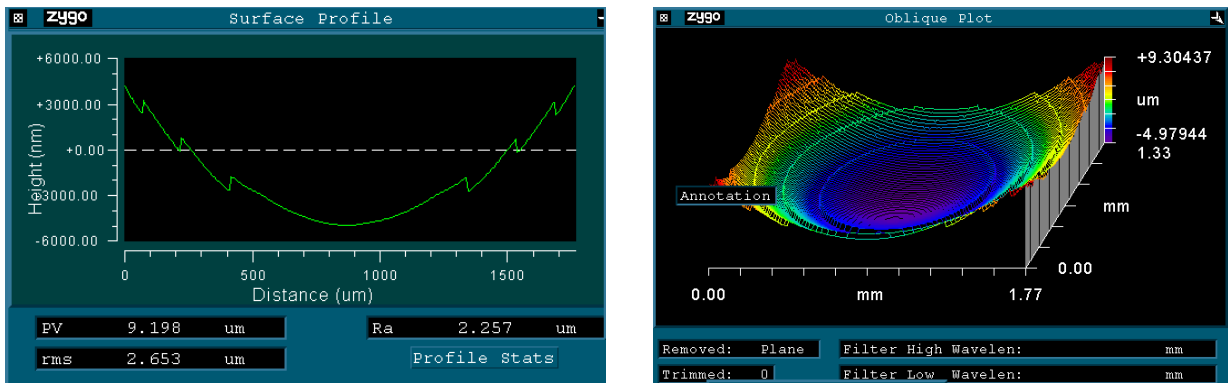
外圍直徑為 13mm

圖 6.3 三群透鏡外觀

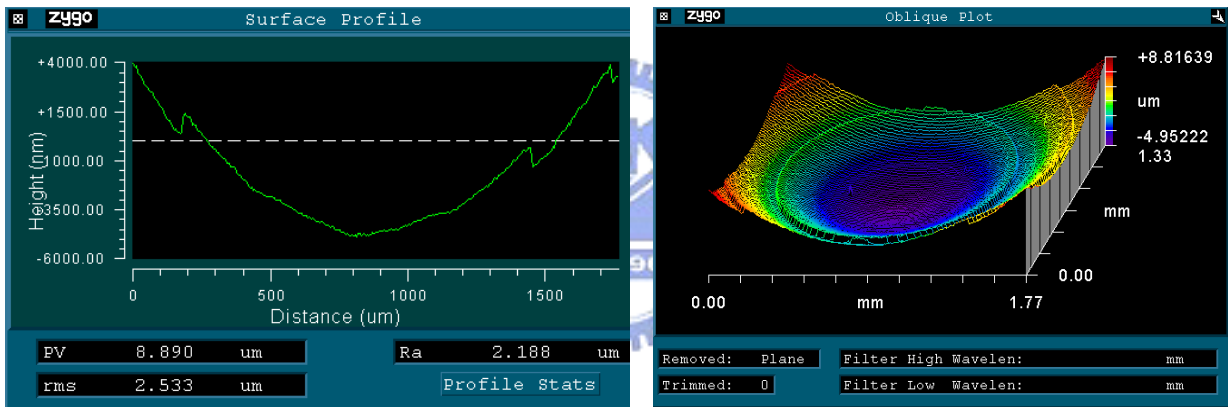
透鏡的表面輪廓主要是量測繞射面中心的圖樣，使用的機台為精密儀器中心的 Zygo 儀器，各群透鏡所量得的繞射面輪廓如圖 6.4 所示：



(a) 第一群透鏡繞射面的表面輪廓



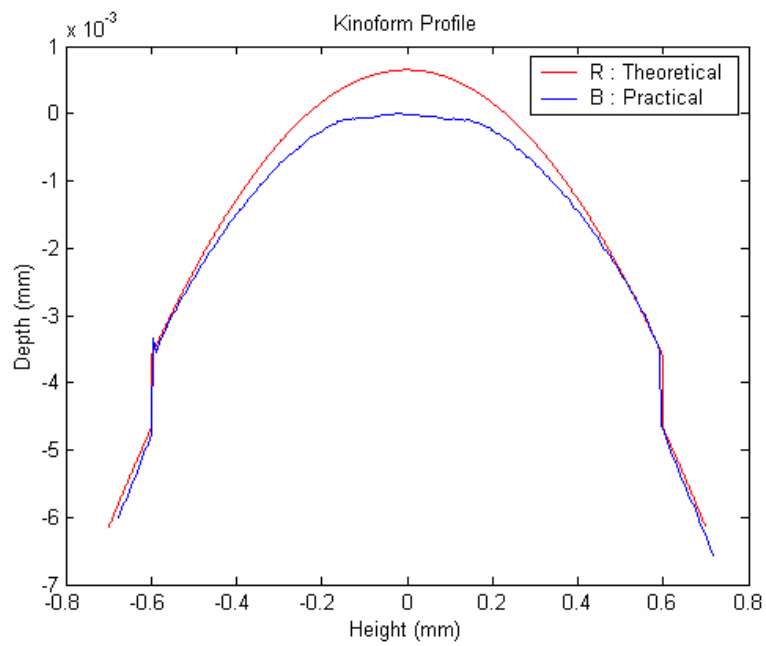
(b) 第二群透鏡繞射面的表面輪廓



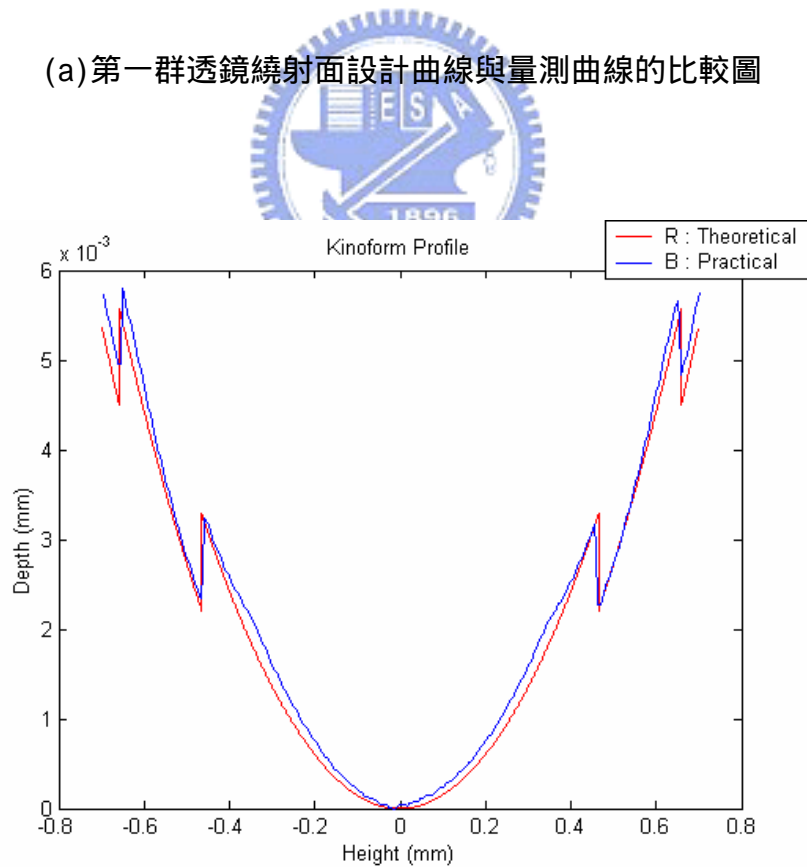
(c) 第三群透鏡繞射面的表面輪廓

圖 6.4 三群透鏡繞射面量測的表面輪廓圖

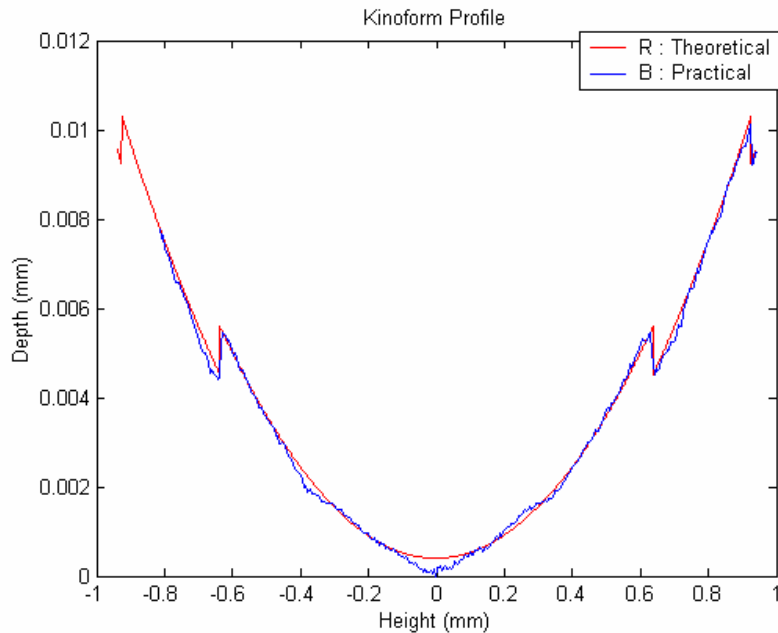
圖 6.5 為繞射面設計曲線與實際量測曲線的比較圖形，其中紅色曲線為元件設計的曲線，藍色曲線為量測出的曲線。



(a) 第一群透鏡繞射面設計曲線與量測曲線的比較圖



(b) 第二群透鏡繞射面設計曲線與量測曲線的比較圖



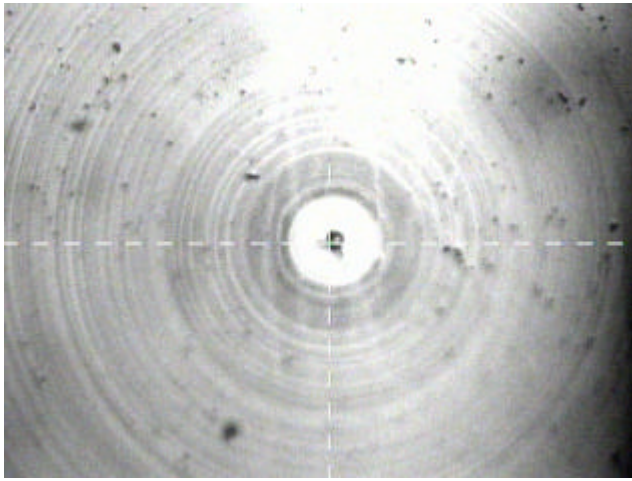
(c) 第三群透鏡繞射面設計曲線與量測曲線的比較圖

圖 6.5 各群透鏡繞射面設計曲線與量測曲線的比較圖

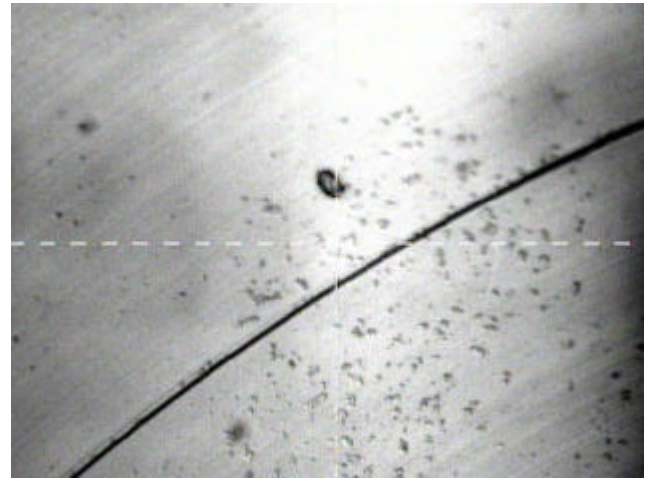


由圖 6.5 可看出各群透鏡的繞射面的量測結果與理論在深度與寬度上皆有一些差距。因為透鏡加繞射面是要來補償相位，修像差，若繞射輪廓有某程度的偏差在成像品質上一定會造成影響。因為第三群透鏡由 Zygo 量出的輪廓明顯較粗糙，所以針對第三群透鏡使用光學顯微鏡觀察繞射面的表面。這次透鏡組共加工了四套，只對其中一套中的第三群透鏡做了觀察，圖 6.6 為量測結果。由圖中可發現可發現，表面有許多粒子。

由於每一群透鏡都是一起加工的，量測另外一套的第三群透鏡也獲得類似的結果，所以推測所有第三群透鏡都有相同的情況。若透鏡表面有一定量的清不掉的粒子，光線通過鏡面時會造成散射，且對繞射面的效用也會造成影響。



(a)中間



(b)側邊

圖 6.6 由光學顯微鏡量出第三群透鏡的表面分布



6.2 單片透鏡 MTF 量測

量測過各群透鏡的表面輪廓後，我們針對單片透鏡的光學特性做檢測，選擇測量單片透鏡子午光線且入射光波長為 510.0nm 的 MTF 值並與理論值做比較。由於第一群透鏡為負透鏡所以我們選擇將第一群和第二群透鏡結合作整體的檢測，圖 6.7~圖 6.9 為各群透鏡量測與理論的比較值，其中虛線代表理論值，實線代表量測值。

第三群透鏡因為鏡面上有粒子，所以只能測出 0 度視角的 MTF 值，由圖 6.7~圖 6.9 可看出各片透鏡的 MTF 曲線與理論值有某程度的差距。

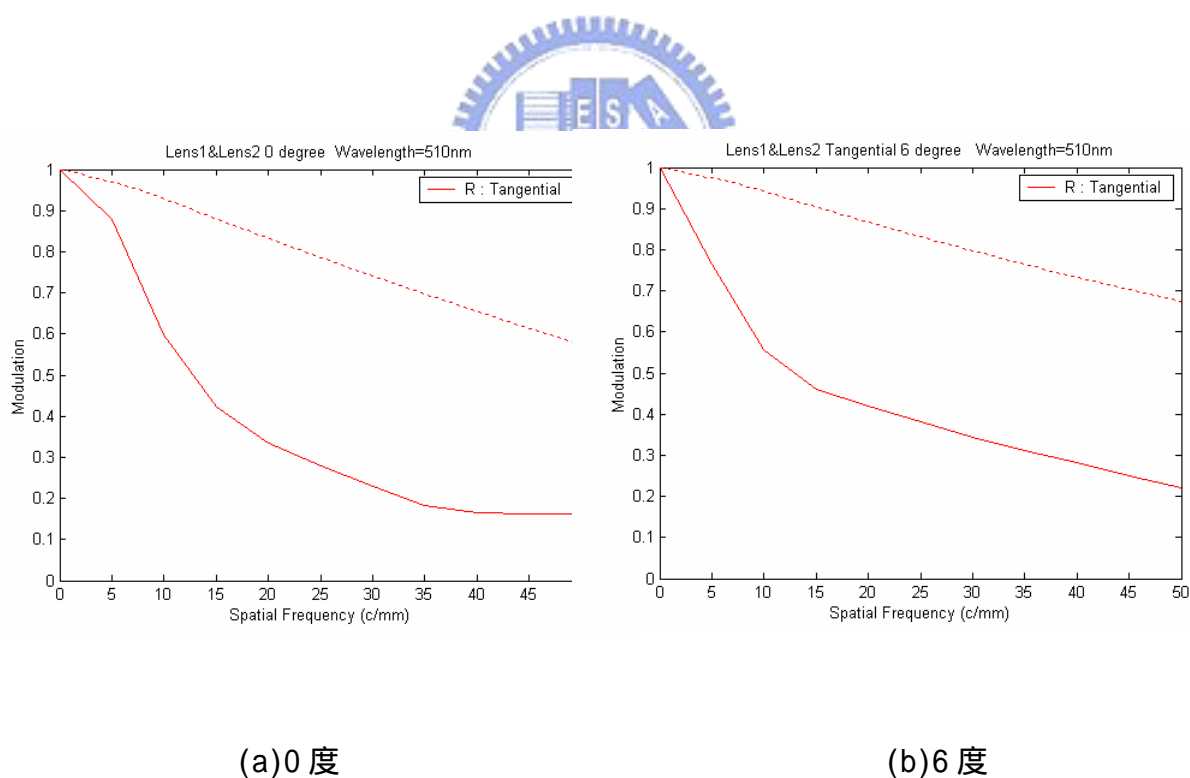
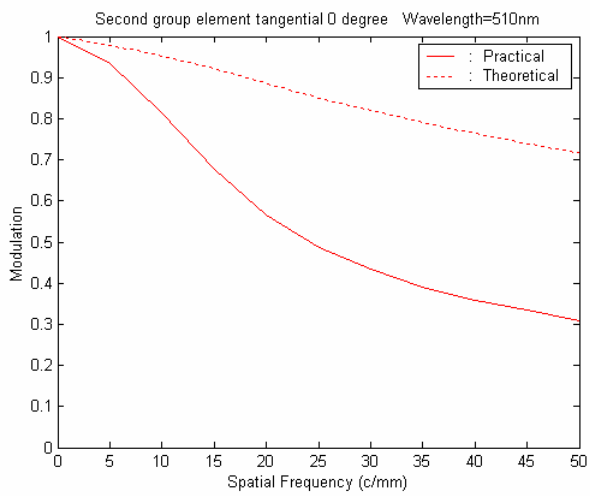
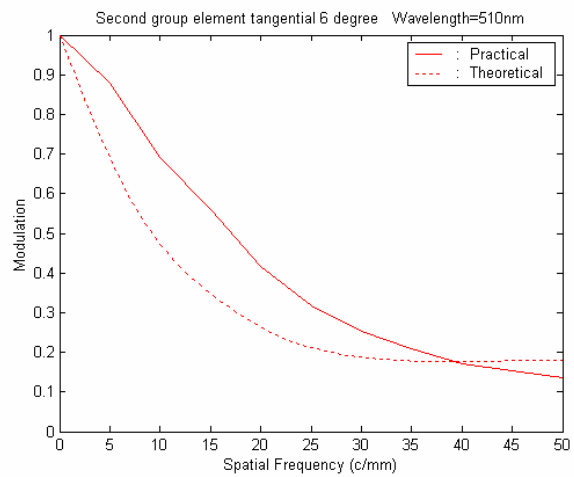


圖 6.7 第一群透鏡和第二群透鏡組合後子午面理論(虛線)和量測(實線)的 MTF 曲線

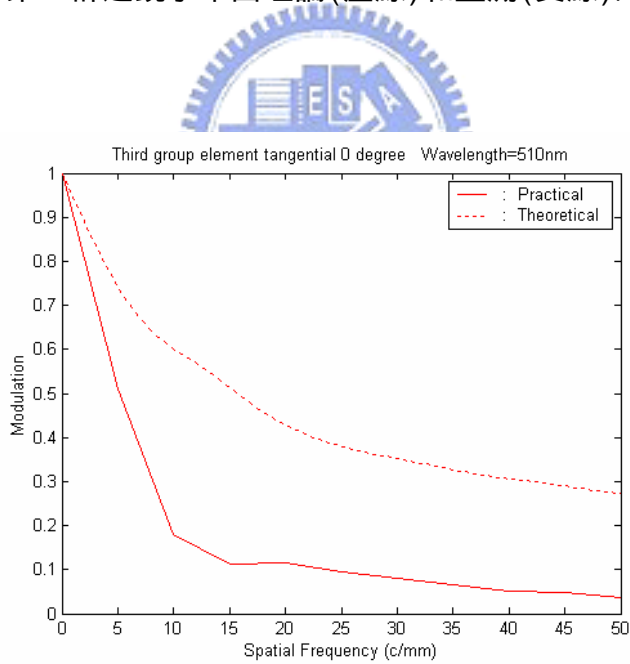


(a)0 度



(b)6 度

圖 6.8 第二群透鏡子午面理論(虛線)和量測(實線)的 MTF 曲線



0 度

圖 6.9 第三群透鏡子午面理論(虛線)和量測(實線)的 MTF 曲線

6.3 變焦系統各組態的組合

對於三倍變焦光學系統，我們採取將各組態(廣角、中間、望遠組態)個別組合，圖 6.10 及圖 6.11 為各組態的機構圖及實體圖。圖 6.12 為各組態組裝後的鏡頭組。

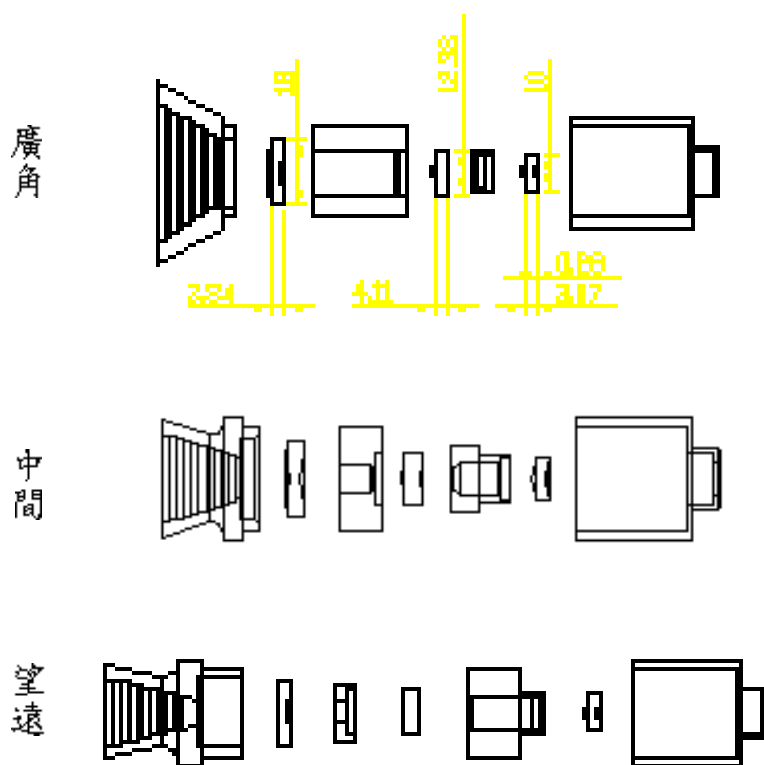


圖 6.10 各組態機構圖



圖 6.11 各組態的實體圖

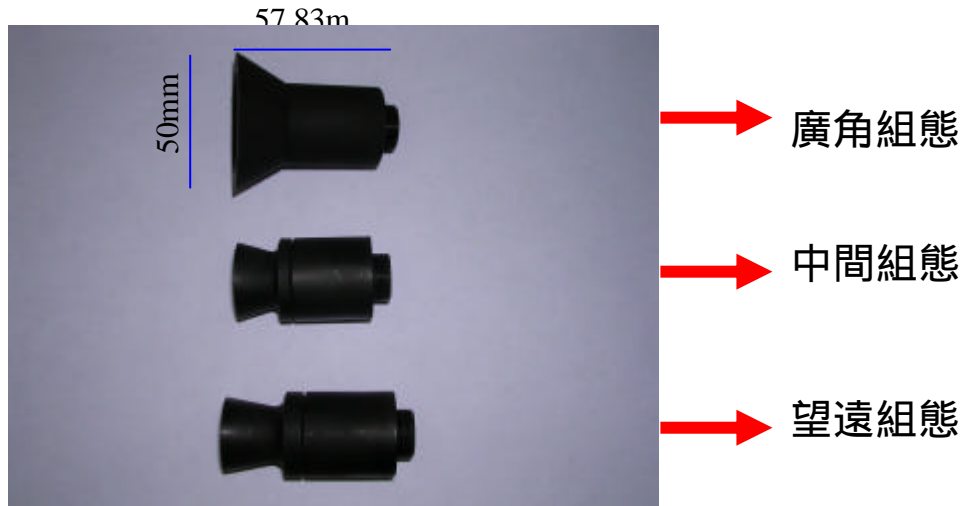


圖 6.12 各組態的鏡頭組

各組態元件的組裝上我們採取以光學對準的方式組合，其方式是入射準直光於欲組裝的元件，再將與 CCD 連接的顯微物鏡對準在元件的焦點處，透過影像擷取卡在螢幕上觀察聚焦光斑，調整元件的傾斜、偏心，以使光斑的形狀對稱，能量分布均勻，若調整到符合要求，再將各元件以光學膠黏牢，固定。此方式可減少透鏡間因組裝造成的偏心、傾斜等問題，所以採取此方式組合鏡組。圖 6.13 為組合鏡組的系統架構，表 6.3 為系統架構所用到的元件。

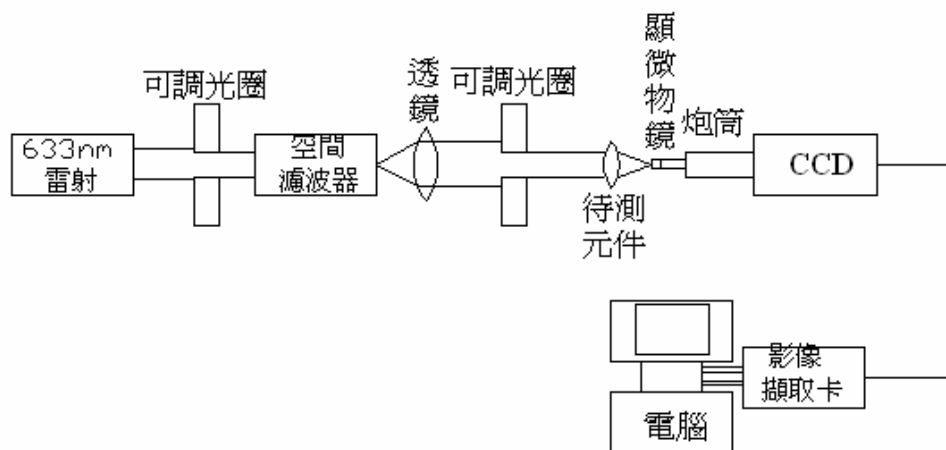


圖 6.13 組合鏡組的系統架構

	名稱	數量
1	氦氖雷射及雷射架	1
2	光學具座	數個
3	60 倍顯微物鏡 NA=0.4	1
4	10um 針孔 (pinhole)	1
5	焦距 125mm 孔徑 25.4mm 之 凸透鏡	1
6	待測元件	3
7	可調光圈	1
8	反射鏡	2
9	鏡架及底座	數個
10	可調平台	數個
11	光學軌道	1
12	CCD	1

表 6.3 光學對準儀器列表

6.4 各組態 MTF 的量測

對各組態做 MTF 測量，其中特別對廣角組態針對入射波長 R(620.8nm)、G(551.0nm)、B(490.0nm) 做子午面和弧矢面 MTF 量測，如圖 6.14~圖 6.17 所示。另外兩個組態則是對入射光波長 551.0nm 做子午面和弧矢面 MTF 量測，如圖 6.18 到圖 6.19 所示，其中虛線代表理論值，實線代表量測值。而濾波片所使用的規格如表 6.4 所示。

波長	帶寬
490.0nm	10nm
551.0nm	10nm
620nm	20nm

表 6.4 濾波片規格

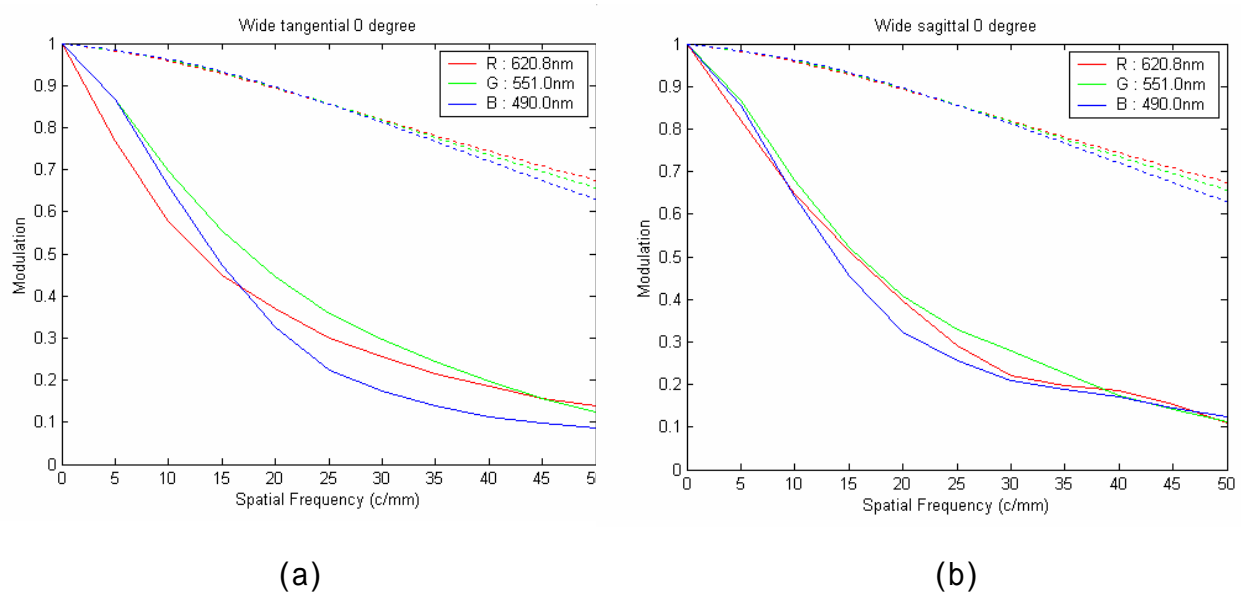
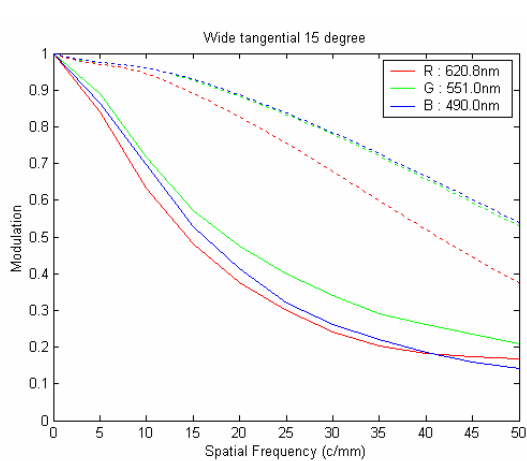
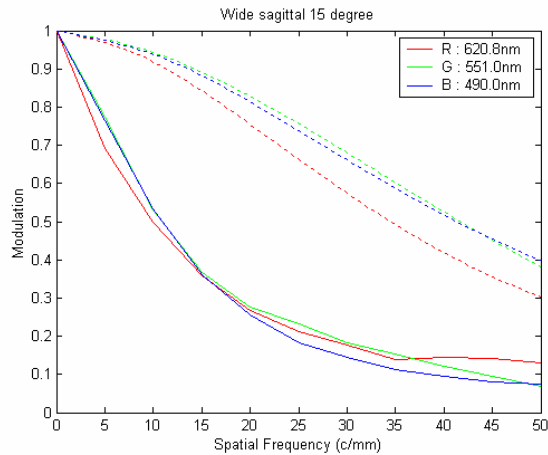


圖 6.14 廣角組態 0 度 (a) 子午面，(b) 弧矢面的 MTF 曲線

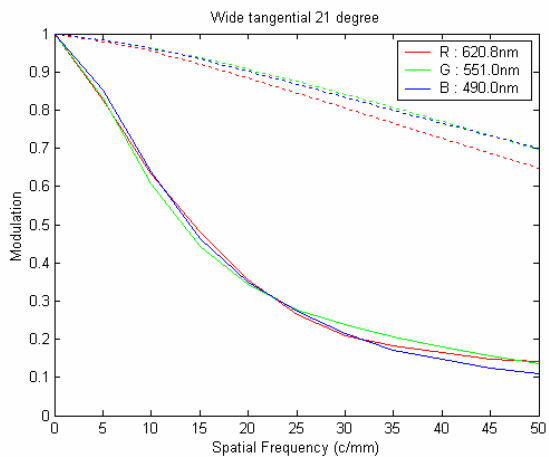


(a)

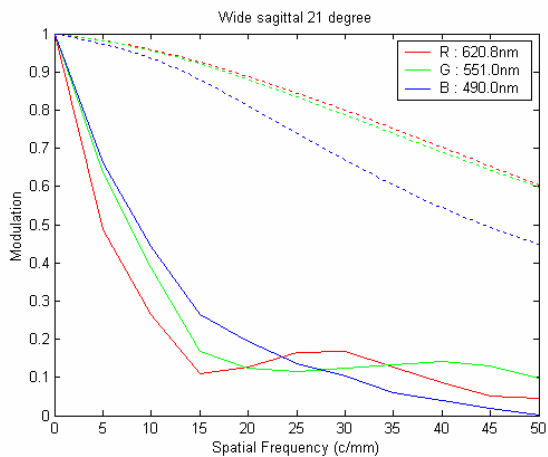


(b)

圖 6.15 廣角組態 15 度(a)子午面, (b)弧矢面的 MTF 曲線

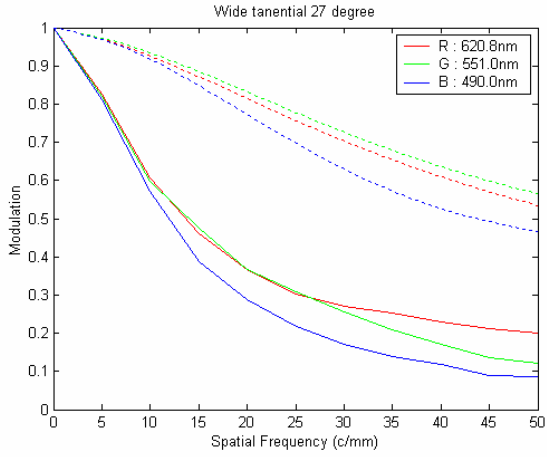


(a)

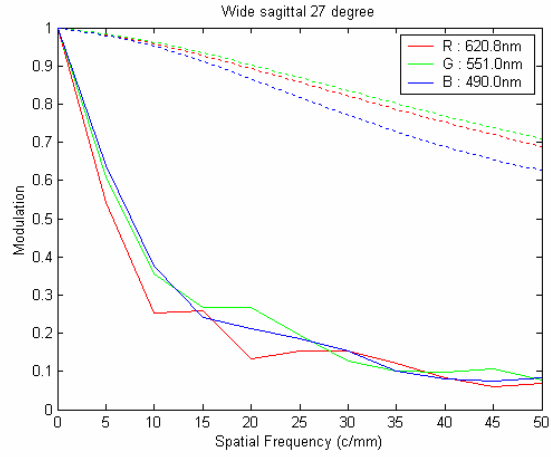


(b)

圖 6.16 廣角組態 21 度子午面(a)和弧矢面(b)MTF 曲線

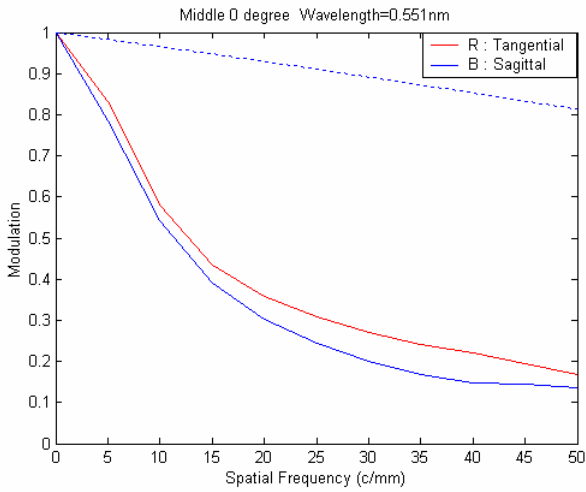


(a)

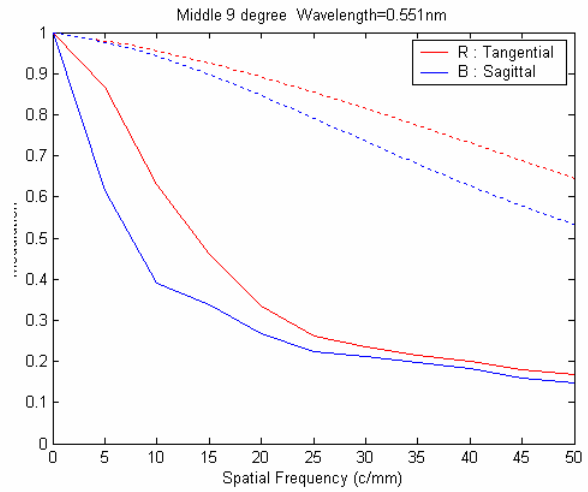


(b)

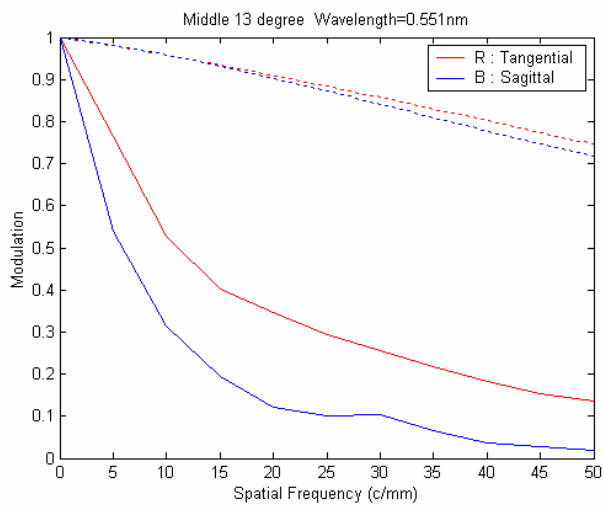
圖 6.17 廣角組態 27 度子午面(a)和弧矢面(b)MTF 曲線



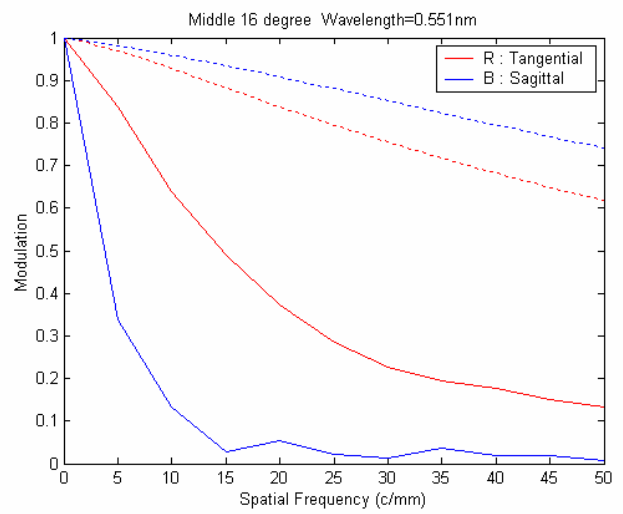
(a)



(b)

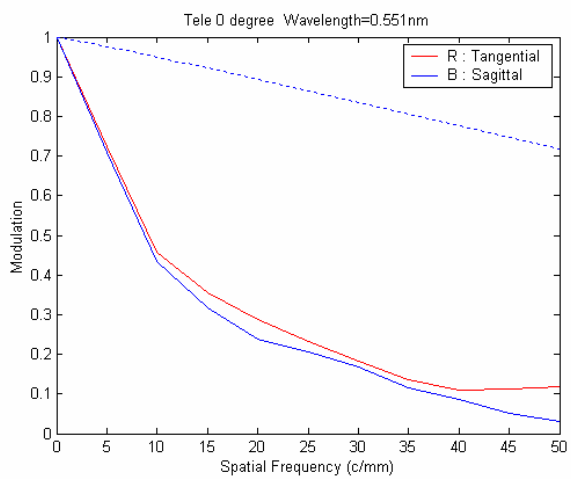


(c)

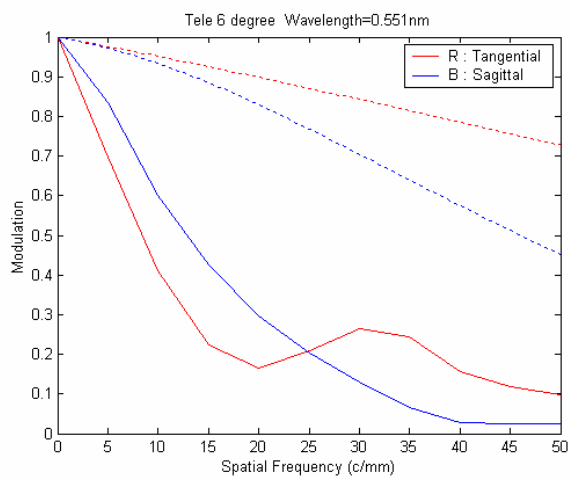


(d)

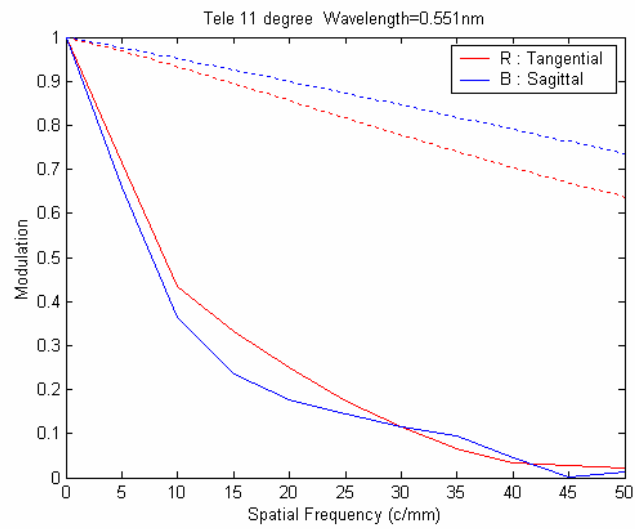
圖 6.18 中間組態子午面和弧矢面 MTF 曲線



(a)



(b)



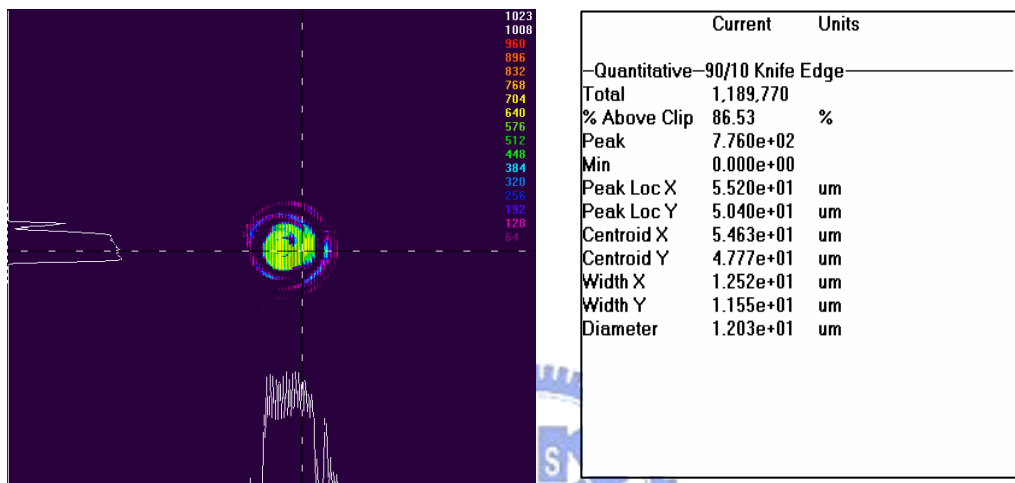
(c)

圖 6.19 望遠組態子午面和弧矢面的 MTF 曲線

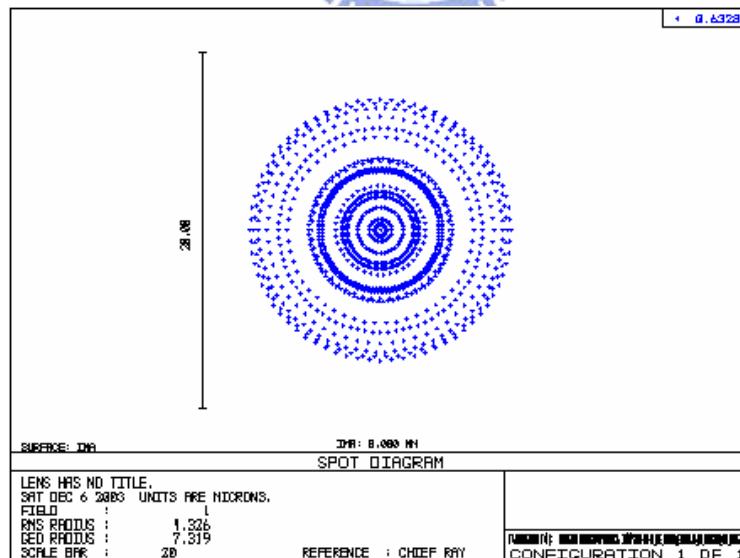
由上述各圖可看出，各組態的 MTF 曲線皆不盡理想，由單透鏡所量測的 MTF 值已跟模擬結果有差距，所以組裝後的 MTF 值也會不好。

6.5 各組態 spot size 的測量

欲了解各組態的光學特性，我們也量測了 633nm 波長的雷射經過各組態的聚焦情況及焦點大小並與理論值做比較，如圖 6.20~圖 6.23 所示，表 6.5 列出了實驗與模擬的誤差百分比。



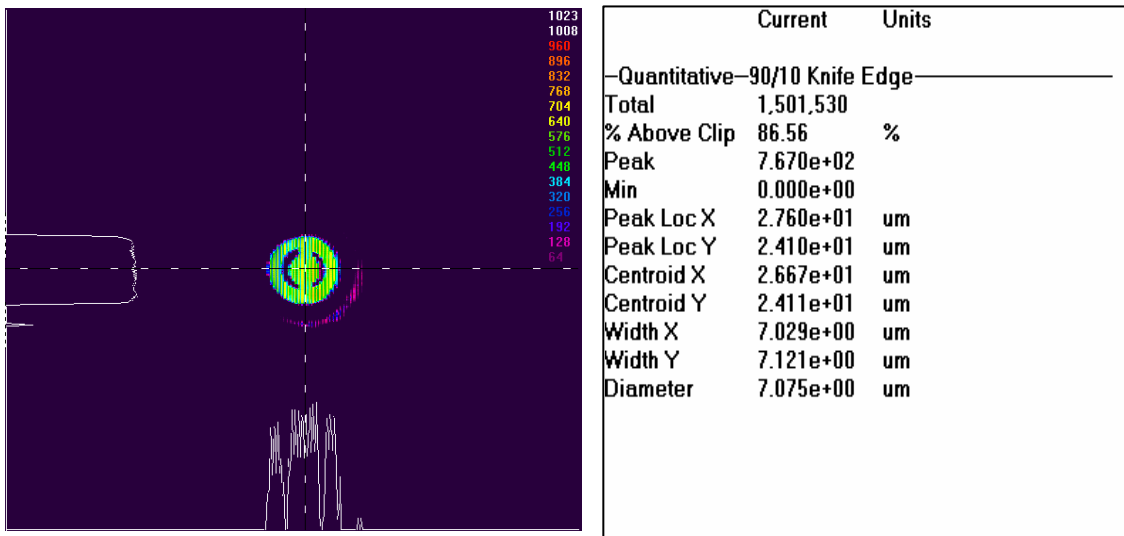
(a)



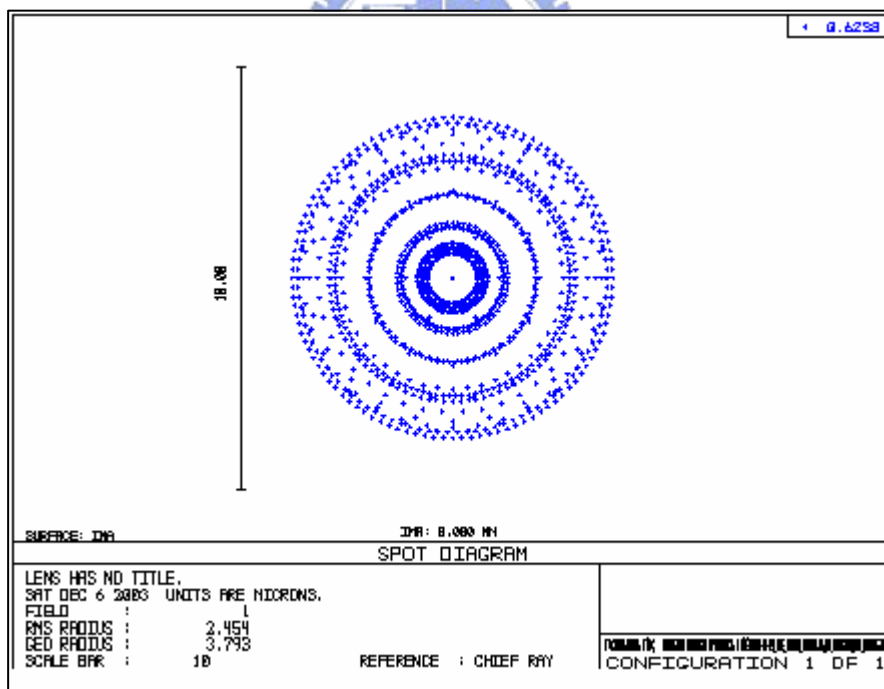
(b)

圖 6.20 入射波長為 633nm 廣角組態之量測結果

(a)為量測結果(b)為 ZEMAX 模擬結果



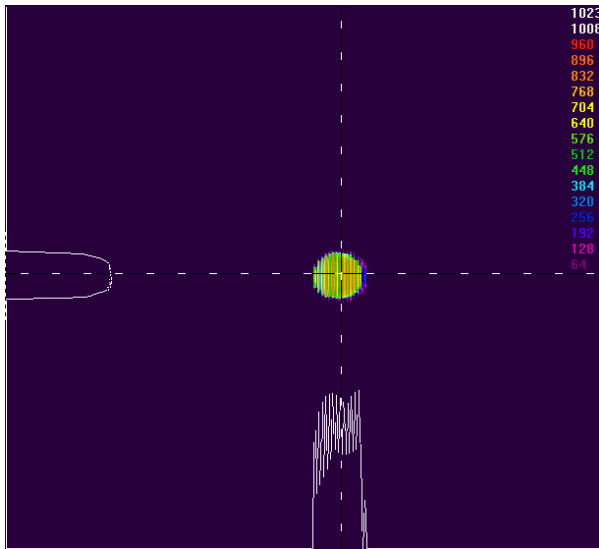
(a)



(b)

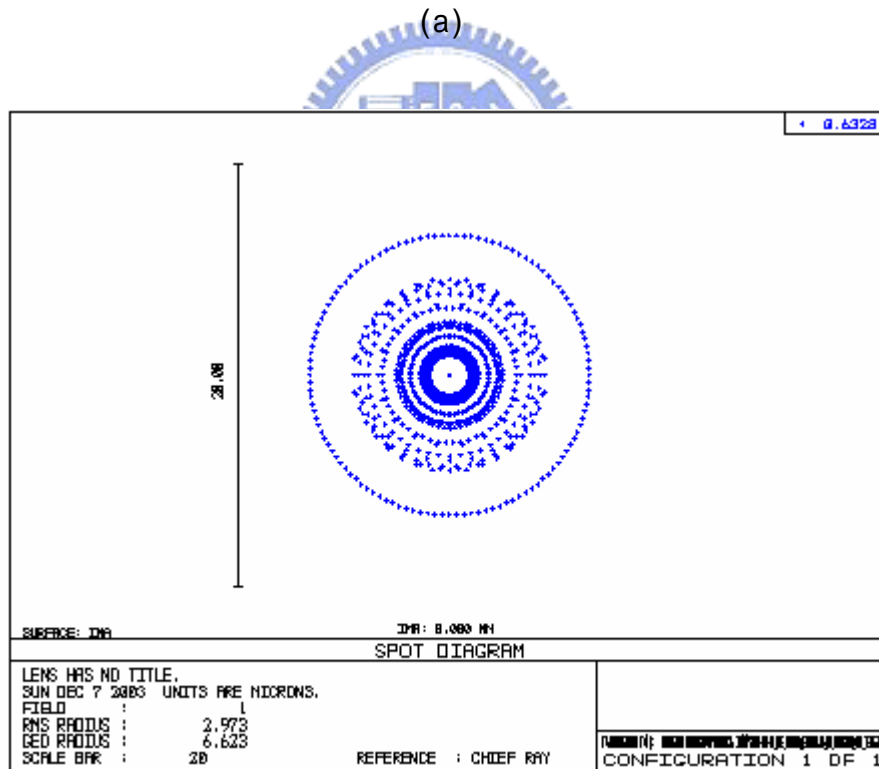
圖 6.21 入射波長為 633nm 中間組態之量測結果

(a)為量測結果(b)為 ZEMAX 模擬結果



	Current	Units
—Quantitative—90/10 Knife Edge—		
Total	933,396	
% Above Clip	86.63	%
Peak	9.030e+02	
Min	0.000e+00	
Peak Loc X	6.020e+01	um
Peak Loc Y	4.780e+01	um
Centroid X	5.688e+01	um
Centroid Y	4.766e+01	um
Width X	9.120e+00	um
Width Y	8.780e+00	um
Diameter	8.950e+00	um

(a)



(b)

圖 6.22 入射波長為 633nm 望遠組態之量測結果

(a)為量測結果(b)為 ZEMAX 模擬結果

組態	焦點直徑(量測值)	焦點直徑(理論值)	誤差 %
廣角	12.030 μm	8.652 μm	39.04
中間	7.075 μm	4.908 μm	56.99
望遠	8.950 μm	5.946 μm	50.52

表 6.5 量測與模擬的誤差百分比

由上述各圖可看出各組態量得的光斑大小(spot size)與模擬的結果有一段差距，因為各組態的 MTF 量測結果就不盡理想，所以光斑大小(spot size)量測結果會較理論值大是可想而知的。

6.6 各組態的成像及失真情形

對於變焦光學系統的成像面所使用的感測器為 130 萬像素的 CMOS，Omni Vision Technologies 公司所生產，型號為 OV9620，圖 6.23~圖 6.25 為各組態的成像圖。



圖 6.23 廣角組態的成像圖

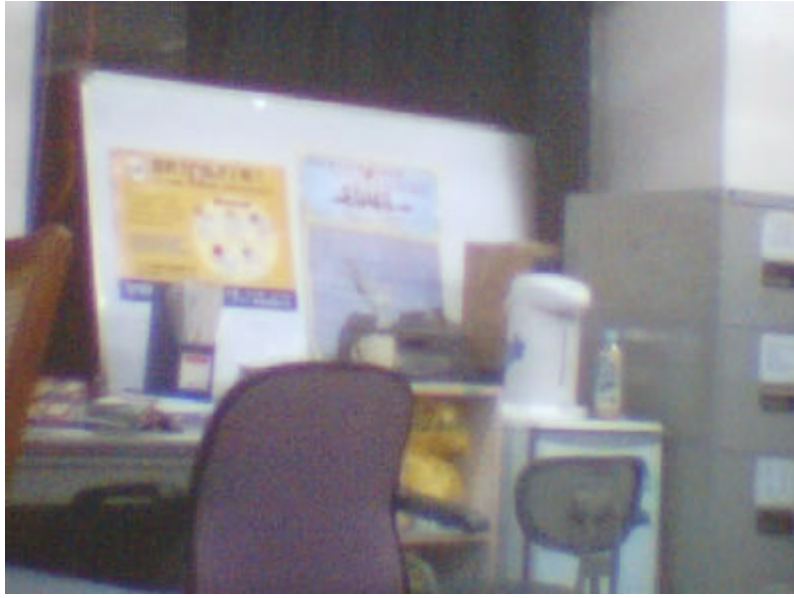


圖 6.24 中間組態的成像圖

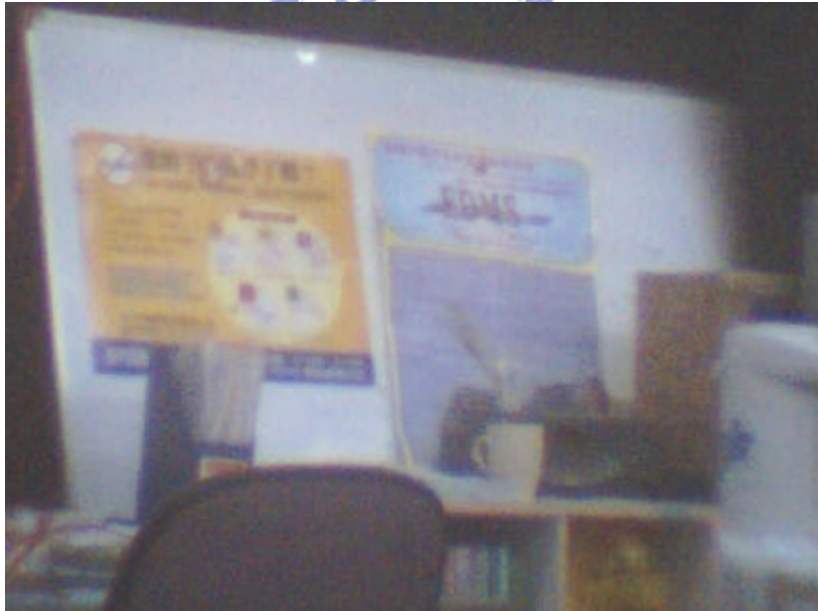


圖 6.25 望遠組態的成像圖

由上述各組態成像圖的比較，可發現成像情形並不是很清晰，尤以望遠組態的成像最不理想。

接著我們來探討各組態的失真情形，由圖 6.26 所示。



(b) 中間組態



(c)望遠組態

圖 6.26 各組態的失真情形

由上圖可發現廣角組態有較明顯的桶形畸變，另外兩組態的失真就較小。



6.7 討論

針對光學變焦系統的光學特性量測上，可發現結果與模擬有一段差距，就各種量測的結果我們分析造成差距的原因有下列幾點：

1. 透鏡加工上的誤差，造成繞射面沒有發揮應有的效應，尤其第三片(最後一片)透鏡上清不掉的粒子會造成嚴重的散射，產生的散射光(雜散光)沒有機構可以擋直接打在成像面上，這對成像品質(例如解析度)會造成嚴重的影響。
2. 鏡組在組裝和對準上的誤差，雖然這次組裝是採取光學對準的方式，但需要將三片透鏡組起來還是會有些誤差。

3. 鏡筒加工上的誤差。

上述三個原因中，第二、三個原因主要是會造成系統元件間偏心、傾斜和空氣厚度誤差，我們特別針對這三種誤差使用 ZEMAX 光學模擬軟體進行公差容忍度分析，即在不考慮其他因素的影響下，僅就這三種因素對成像的影響做模擬分析，表 6.6 為模擬所得各組態公差的容忍度，表 6.7 為各組態在此公差容忍度下對成像面高度為 0mm、2.912mm 和 4.160mm 之 MTF 值改變：

	廣角組態	中間組態	望遠組態
離軸	$\pm 30 \mu\text{m}$	$\pm 30 \mu\text{m}$	$\pm 30 \mu\text{m}$
傾斜	第一片 $\pm 0.1^\circ$ 第二、三片 $\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.5^\circ$
軸向誤差	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$

表 6.6 模擬所得各組態公差的容忍度

	像高	0mm	2.912mm	4.160mm
廣角組態	MTF	0.7067	0.3997	0.1603
中間組態	MTF	0.4006	0.1456	0.2616
望遠組態	MTF	0.5066	0.4244	0.1993

表 6.7 模擬所得各組態在公差容忍度下不同像高的 MTF 值

由上表可知，在表 6.6 所列的公差容忍度下，各組態的最小 MTF 值皆在 0.14 以上，機構加工的尺寸也確認在公差容忍度內，且這次組合三群鏡片是使用光學對準的方式，可大大減少透鏡間偏心的問題，對

準誤差可控制在 $10\ \mu\text{m}$ 內，所以就量測結果看來，單片透鏡量測的光學特性(MTF)是不理想的，所以我們認定透鏡的品質是影響成像品質的主要因素。



第七章 結論

現在幾乎所有利用到光學鏡片的系統，發展到最後都脫離不了變焦系統，例如顯微鏡、影印機、投影電視、影像掃瞄機、望遠鏡以及照像機等，可見變焦光學系統的應用廣泛。以數位相機系統來說，其變焦系統必須達到的高變倍比、大視角的要求，整體又須符合輕巧、小型化的市場需求，在減少光學鏡片的使用量上，成為設計者的難題

繞射元件具有一些折射元件無法比擬的優點，其具有相當大的功能性，經過元件表面輪廓的精心設計，已達到預期的光波波面，從而實現在成像系統上的應用。所以，繞射光學元件具備了可減少系統鏡片的使用量的強大優勢。

所以，本論文便利用了繞射光學元件的功能，設計了一組數位相機系統的十倍光學變焦鏡組，成功的僅利用了六片鏡片即達到系統要求，其中便是因 D/ROE 可消除系統的色差、球差 等特性，修正了系統的像差，才能以六片即達到系統在規格及像差上的要求。

但是，有一點值得注意是，在寬波段的設計中必須考量繞射元件與波長的相關性。亦即在入射光為非設計波長時，會有一些光能量進入其他繞射級，引起像平面上成像點的模糊，而導致光學品質的降低；其解決的方法，可決定繞射元件的設計波長，此設計波長可使光學元件的平均繞射效率達到最高，亦即其他繞射級的光能量達到最小。日本 canon 公司發展積層型繞射光學元件也是為使各波長的繞射效率皆達到 95%以上，以減少繞射現象所造成的雜散光。

本研究的結果並未實際加工，以驗證模擬結果，但在論文第六章另外量測了一組，採用 D/ROE 複合鏡片的 3 倍光學變焦鏡組，由量測

的結果可知，與模擬結果有一段的差距，其中顯示出，由於繞射面的作用是為補償相位，所以在元件的製作上、鏡頭的組裝上必須要求極高的精密度，才能達到預期的結果。

雖然，繞射光學元件有繞射效率上的問題，但由 cannon 公司成功應用繞射光學鏡片於成像系統，可預期未來複合光學元件的應用將是相廣泛，相信在光學系統會更加蓬勃的發展。



參考文獻

1. 林明宗, “可見光波段複合式(繞射/折射)光學元件的製作與研究” 1997 年, 交通大學光電所碩士論文
2. 徐得銘, “繞射/折射複合光學元件設計與模擬” 2001 年, 交通大學光電所碩士論文
3. Kleinmans W A. “Aberration of curved zone plates and fresnel lenses” Appl. Opt., 1997, 16: 1701~1704
4. Stone T, George N. “Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats” Appl. Opt., 1988, 27(14):2962
5. 李林 安連生, “計算機輔助光學設計的理論與應用”, 國防工業出版社, 2002 年
6. 徐之海 李奇, “現代成像系統”, 國防工業出版社, 2001 年
7. Shin-ichi, Mihara, “VARI-FOCAL LENS SYSTEM” United States Patent, Num:4,818,083(1989)
8. Kazuo Tanaka, “ZOOM LENS” United States Patent, Num:4,859,042(1989)
9. Hiroyuki Hamano, Kenichi Kimura, Saburo Sugawara, “REAR FOCUS TYPE ZOOM LENS” United States Patent, Num:5,134,524(1992)
10. Hironori Shibata, Astujiro Ishii, “WIDE-ANGLE ZOOM LENS SYSTEM HAVING A HIGH VARIFOCAL RATIO” United States Patent, Num:5,418,646(1995)
11. Tetsuo Nagata, Hachioji, “ZOOM LENS SYSTEM USING A DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT AND IMAGE PICKUP DEVICE USING THE SAME” United States Patent, Num:6,157,494(2000)
12. Robert E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, “Optical System Design”, McGraw-Hill Companies, 2000
13. 王俊勛, “繞射/折射複合型變焦鏡組之設計與量測” 2003 年, 交通大學光電所碩士論文
14. Stenfan Sinzinger, Jurgen Jahns, “Microoptics”, WILEY-VCH, 1999
15. Shinchi Mihara, “COMPACT REAR FOCUSING ZOOM LENS” United States Patent, Num:5,808,810(1998)
16. 邱怡萱, “利用繞射透鏡元件校正折射透鏡的球差之探討” 1996 年, 交通大學光電工程研究所碩士論文
17. ZEMAX User's Guide, Version 9.0