

私立中原大學
應用物理研究所
碩士學位論文

背投影電視鏡頭光學設計
與公差分析

Optical Design And Its tolerance for
The Rear Projection TV lens

指導教授：鍾炳濤

研究生：談智偉

中華民國九十五年七月

致謝

能唸完研究所，一切都要感謝下面所列的人，現在逐一致謝：

-感謝 雙親從不放棄我並給我關懷。-感謝 鍾炳濤老師在研究所兩年生活上及課業上的建議與照顧。-感謝 莊正當老師教導我在帶人處事上和研究學習的方法。-感謝 孫文信老師在深奧的光學專業上和光學設計上引領我、教導我和訓練我，讓我獲益良多。-感謝 熊信昌學長在日常生活的鼓勵和教導找尋資料的方法。-感謝電機系 林康平老師給我一個良好的學習環境。-感謝機械所 謝啟堂老師半年來的關心與教導。-感謝實驗室的信樵、大石、至傑、全佑和已畢業的佩璇學姊、展偉學長讓我待在實驗室時很溫暖。-感謝育伶學姊、nono、阿忠、佳運、光維、佩琦、欣欣、小綠，讓我在半夜的科館也有人陪。-感謝 虹純 doggie，忍受我的壞脾氣。-感謝賽門、小黑、阿壯、阿櫻，讓我的日子不無聊。

-感謝中央光電所的翊翦、家逢、靜君，每星期一個晚上的陪伴 並幫我紀錄。-感謝光資產碩班跟我一起上課的同學，讓我每星期有一堂快樂的課。如果沒有提到，那表示我在心理更深深默默的感謝你；雖然只是一句致謝，但妳們在我兩年研究生生活中給我所需的幫助與照顧的身影，我會一切都記在心理。

中文摘要

本文以 DLP 的背投影電視為基礎設計一 16:9 的 52 吋寬螢幕背投影電視所需的成像鏡頭。此鏡頭設計為反向找尋規格及設計，並且以返焦式透鏡組做為主要結構，然後再使此鏡頭的主光線到 DMD 為一平行系統光軸，即具有遠心系統特性，以此符合背投影電視鏡頭在光學系統上所需具備的後焦焦距長於有效焦距、廣視角和主光線平行系統光軸等光學特性。而所設計的背投影電視鏡頭以十三片透鏡所組成，每一片透鏡皆為球面透鏡，並再減少一片透鏡修改為十二片球面透鏡，使其在在成像品質上依然達到十三片球面透鏡的水準。最後對此鏡頭做公差分析模擬所設計鏡頭的 MTF。

中原大學

Abstract

In this thesis, we design lens for 52 inches of 16:9 screens that is based on rear projection television of DLP. We reverse the lens to find the specification, and the retrofocus type lens will be the main structure to proffer the back focus length is longer than effective focus length, then make the chief ray of the lens to arrived at DMD as a parallel optical axis that let the lens had the characteristic of telemetric system, The rear projection television lens is composed of 13 spherical lens. We reduce one spherical lens to 12 spherical lenses that will still meet the same image quality as 13 spherical lenses. At last, we make the tolerance analysis for the lens' MTF.



中原大學

目錄

致謝.....	I
中文摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	IV
圖表目錄.....	V
第一章 序論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	3
1.3 論文結構.....	4
第二章 背投影電視簡介.....	5
2.1 投影顯示器發展史.....	5
2.2 光閥式背投影電視.....	7
第三章 背投影電視鏡頭設計.....	16
3.1 投影顯示器鏡頭特色.....	16
3.2 返焦式鏡組(reverse lens).....	19
3.3 遠心系統(telecentric system).....	20
3.4 背投影電視鏡頭規格訂定.....	20
3.5 設計流程.....	26
3.6 13 片背頭影鏡頭設計結果.....	28
3.7 12 片背投影鏡頭設計結果.....	35
第四章 公差分析.....	39
4.1 前言.....	39
4.2 中心公差(centered tolerances).....	40
4.3 偏心公差(Decentered Tolarances).....	43
4.4 公差分析.....	45
4.4.1 決定公差的範圍.....	45
4.4.2 公差結果.....	47
4.4.3 討論.....	58
第五章 結論與展望.....	61
參考文獻.....	63

圖表目錄

表格 1 所需的光學規格表	27
表格 2 專利 4957355 光學規格表格	28
表格 3 稜鏡在鏡頭後方產生的三階 SEIDAL 像差	31
表格 4 主光線的角度	34
表格 5 減少一片後主光線的角度	38
表格 6 所自定的公差範圍	47
表格 7 檢視 POW/IR 和 THICKNESS 是否合理	60
圖 1 背投影電視主要光學元件簡示	7
圖 2 背投影螢幕構造[2.5]	8
圖 3 $\cos^4$ 定理	9
圖 4 穿透式液晶原理[2.7]	10
圖 5 穿透式液晶投影機工作原理[2.1]	11
圖 6 DMD 的微反射鏡形式[2.8]	11
圖 7 DMD 和成像點上的關係	12
圖 8 在色輪時間調變，視覺暫留產生全彩圖形	13
圖 9 LCOS 結構	14
圖 10 積分透鏡簡單易示圖[2.7]	15
圖 11 積分柱簡單示意圖[2.7]	15
圖 12 光線經過稜鏡的焦點位移	17
圖 13 從光學元件所形成的影像光錐為一發散形式[3.1]	18
圖 14 用聚光透鏡讓光束為匯聚在投射到投影鏡頭上	19
圖 15 $BFL < EFL$ 圖 16 $BFL > EFL$ 圖 17 新月形透鏡	20
圖 18 遠心系統簡易圖	20
圖 19 反上設計以找尋投影鏡頭規格	21
圖 20 物像距的關係圖	22
圖 21 物像距關係圖[3.2]	22
圖 22 在投影螢幕上水平邊緣和高度邊緣的畸變對螢幕的變形	24
圖 23 以線對(LINE-PAIR)代表一像素的空間頻率	26
圖 24 專利的正負兩群結構	28
圖 25 設計時所考慮的光路系統結構	29
圖 26 13 片鏡組結構圖	30

圖 27 13 片鏡組資料	30
圖 28 MTF 圖	31
圖 29 MTF V.S FIELD 圖	32
圖 30 SPOT DIAGRAM	33
圖 31 FIELD CURVATURE AND DISTORTION	34
圖 32 RELATIVE ILLUMINATION	34
圖 33 減少一片後優化的鏡頭 LAYOUT 圖及鏡組資料	35
圖 34 減少一片後的 MTF 圖	36
圖 35 減少一片後的 MTF V.S FIELD	36
圖 36 減少一片後的 SPOT DIAGRAM	37
圖 37 FIELD CURVATURE AND DISTORTION	38
圖 38 相對照度	38
圖 39 取自 EDMUND OPTIC 對透鏡製造要求和相對要求價格的曲線	40
圖 40 半徑 R 和 R' 的關係圖	41
圖 41 牛頓環測試	41
圖 42 厚度移動的相對關係	42
圖 43 位移量的意式圖	44
圖 44 透鏡傾斜的示意圖	44
圖 45 透鏡上下厚度不一致	45
圖 46 EDMUND OPTICS 中透鏡直徑加大的原因	45
圖 47 單一鏡片上下偏心時 對中心 FIELD 影響最大	59

中原大學

第一章 序論

1.1 前言

自 1940 年黑白電視出現在每個家庭，各家公司便開始追求大尺寸、高畫質和小體積的家庭用顯示器，而 2006 年初高解析度數位電視(high definition television)即將在全世界開播，數位電視的優勢不僅能提供更犀利的畫質以及更立體的音效，以便使用者能享受互動式且更便利的數位資訊服務，同時亦可更容易與其它多媒體設備進行連結。隨著數位電視的崛起，現有的顯示器解析度需向上提升，使影像訊息能完美的呈現在觀眾面前。[1.1][1.2]

在現階段次世代家用平面顯示器（Flat Panel Display）中，主要有薄膜液晶顯示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display，簡稱 TFT-LCD)、電漿顯示器(Plasma Display Panel，簡稱 PDP)和利用投影(projector)顯示的背投影顯示器(rear projector) 其中背投影電視又可分成映像管背投影電視、液晶背投影電視、反射式液晶投影電視（Liquid Crystal On Silicon ,簡稱 LCOS）與數位光處理電視（Digital Light Processing，簡稱 DLP）。而以螢幕尺寸上劃分，50 吋以上顯示器，投影顯示器無論是重量和影像單位面積價格上都比前兩者

(TFT-LCD 和 DLP)有競爭力。主要是 TFT-LCD 面板的技術瓶頸而受限制，其市場獨霸個人電腦顯示器，但和一般個人電腦用的液晶電視相比較，最大差異在於電視對亮度、視角和反應速度的要求較高，液晶電視不論是在視角與亮度上都有所限制，甚至在播放連續動作時也可能有視覺影像殘留的問題。而未來電視的主流在寬螢幕和尺寸大型化，所以就液晶電視而言，即使是七代面板廠所生產出來的玻璃基板最多也只能切出來兩塊 50 吋以上的面板，並且其價格昂貴。但液晶電視的優勢是具有較完整的產業鏈、發展時間較長，所以降低成本的速度也較快，提升了液晶電視的未來可能競爭能力。但在現階段液晶電視發展主要還是以 40 英吋以下的平面顯示器市場為主。電漿顯示器 PDP 是利用惰性氣體在真空中放電所產生的等離子效應，借由激發玻璃管壁上的螢光粉發出可見光來產生影像，其優點是具有尺寸大、厚度薄、廣視角和體積輕等，但缺點是電漿電視發光原理與日光燈近似，有發熱和高耗電率和因為其是以惰性或水銀氣體灌入，時間久了，容易有亮度、色彩飽和度衰減、損耗的問題，而在生產的關鍵步驟主要需要人工完成，連帶造成其價格一直居高不下，比之投影顯示器，雖然也有燈泡壽命不長的缺點，但換燈泡比換電漿面板便宜許多，比較上兩者的經濟性考量，背投電視依然有其優勢。在賣場中，相較於液晶電視或電漿電視的高能見度，背投影電視雖然日漸式微，

但由於具備價格低、可配合寬廣空間多樣的設計特色，在歐美地區反倒較其他兩者熱銷。背投影電視中，採用的技術有 CRT 背投、穿透式高溫多晶矽液晶顯示器、數位光源處理器（DLP）、反射式液晶（LCOS）等。過去為消費者所熟知的是映像管背投影電視；雖然價格便宜，但因為其基本訊號是類比訊號，無法接收數位訊號，加上體積笨重，而且每次開機都易失焦，所以一直沒有辦法打出市場。但科技和技術不斷在進步，發展出使用 DMD(Digital Mircomirror Display)、高溫多晶矽和結合了液晶與 CMOS 半導體的 LCOS 等光學元件，不僅在畫質和後續維修優於液晶電視或電漿電視，增強了產品的競爭力，而現階段的薄型化背投影電視產品也漸漸在市場中嶄露頭角，所以可以預見在未來大尺寸顯示螢幕上，背投影電視一定會佔有相當比例的實力。[1.3][1.4]

1.2 研究動機

光學鏡頭發展至今有百年以上的歷史，但在 80 年代之前由於計算機不發達，所以每顆光學鏡頭都需經過龐大的人力計算下才千錘百鍊得以成形。但就算在今日光學軟體成熟，前人經驗累積的專利眾多，要設計一組光學成像鏡頭仍需要有一定的經驗和基礎理論做後盾。本論文主要以設計一背投影電視鏡頭做目標，學習和了解如何設計一光學成像鏡頭，並在光學軟體 ZEMAX 設計下評價其成像品質。

而此背投影電視鏡頭以返焦系統做主軸並在後方成像時具有一遠心系統特性，鏡頭由十三片球面透鏡組成，並嘗試簡化一片透鏡，再根據自訂的公差範圍做一分析，以寄望自己能在過程中學習到光學設計的知識和技巧。

1.3 論文結構

本論文主要是以背投影電視鏡頭了解成像系統的光學設計，共分五章：第一章了解次世代家用平面顯示器即電視的市場及發展與論文動機；第二章將簡單描述背投影電視的光學結構和光學系統，以了解光學成像鏡頭在背投影電視中需要的特性；第三章將分析此背投影電視鏡頭所需要的光學特性，要一長後焦、廣視角和具遠心等特性，以及為了符合背投影電視的光學機構需求，並用光學軟體 ZEMAX 設計和分析成像品質；第四章將用自訂的公差範圍去模擬第三章所設計出來的光學成像投影鏡頭是否可以達到量產，並在此過程了解一鏡頭在鏡片組裝及鏡片製造時可能會產生哪些誤差；第五章為結論。

第二章 背投影電視簡介

2.1 投影顯示器發展史

早期投影顯示器是使用陰極射線管投影系統，其歷史甚至可以追溯到 1950 年代。然而一直到 1980 年代，陰極射線管投影技術才正式作為商業用途。當時，陰極射線管投影機主要用在商務飛機上，進行錄影帶的播放[2.1]。1980 年代，該技術得到了長足的發展，應用領域也從飛機上，發展到會議室及電影院。80 年代中期，電腦快速發展，開始需要大量呈現出電腦中的資訊於大眾面前做簡報，於是對投影機提出了更高解析度及亮度的要求。從 1992 年開始，陰極射線管投影系統由於聚焦清晰度、解析度，明暗對比均不能滿足下，且開始追求減小體積、重量等等考量，很多公司開始研發和製造其他可能技術的投影機，所以開始發展出光閥示(light valve)投影顯示器，如 LCD、DLP 和 LCOS 等投影機[2.1]。1995 年，單片 LCD 投影機開始在市場上銷售，但由於單片結構在亮度和色彩方面存在缺陷，所以 1996 年，改進成 3 片式 LCD 投影機，1997 年，美商德州儀器公司(Texas Instruments ,TI)開發出 DMD，以此為基礎發展出來的第一款 DLP 技術投影機也出現了，而且從那時起，DLP 技術就開始產業化的邁出了第一步，而德州儀器還針對此晶片研發出不少在影像處理上的手法。在 1996 年至 2002 年之間，LCD 投影機由於發展較早、較成熟，在

性能和色彩方面表現出色，基本上代表了同時期最優良的光閥式投影顯示技術，在此同時，陰極射線管投影系統開始消失在市場。1996年10月 PIONEER 推出以半導體製程製造的 LCOS (Liquid Crystal On Silicon)，稱為反射式液晶技術的投影顯示器(型號 RVD-XGI)。其優點是使 LCD 為人詬病的開口率加大，可達到 92%，但當時技術未成熟，因為利用反射的緣故導致光收集率不高相對使對比度也降低，但比之 DLP 有更高的量產能力和大幅度降低成本的潛力；2005 年，JVC 公司以 LCOS 原理發展出的 D-ILA(Direct-Drive Image Light Amplifier)技術，根據 JVC 公司表示其 D-ILA 晶片可以達到比 TI 的 DMD 晶片更高的像素、對比度也大大提升，而且價格更低。

在產業分析上，目前高穿透式高溫多晶矽(High-Temperature Poly Silicon , HTPS) LCD，全球只有兩家廠商可以生產，分別為 EPSON 和 SONY，該兩家廠商獨大領導 LCD 技術開發，台灣廠商要跨入只能以組裝品質取勝，產品差異度不大。DLP 技術雖由 TI 所提供，然而 TI 並未成立自己的投影機品牌，單只提供 DLP 技術部分，不會發生有和購買廠商競爭的狀況，而 DMD 僅單單為一個光學元件，而就整個產品來說，很多光機及鏡頭需要廠商自身去設計，也藉此有產品優劣的差異性。對 TI 來說，DMD 技術最大的好處在使用其光學元件的廠商。由於不同的廠商會依所需發展出不同的市場和產品，比如輕

巧易於攜帶式的投影機、家庭娛樂式的投影機或須大畫面的劇場用投影機。因此 DMD 技術的利用研發在於使用的廠商自身的市場作創新。[2.2] [2.3] [2.4]

2.2 光閥式背投影電視

光閥式(light valve)背投影電視主要光學元件(圖 1)可以分為：

- 1 螢幕(screen)
- 2 投影鏡頭(projection lens)
- 3 影像顯示微光學元件 (LCD DLP LCOS)
- 4 照明系統(illumination system)

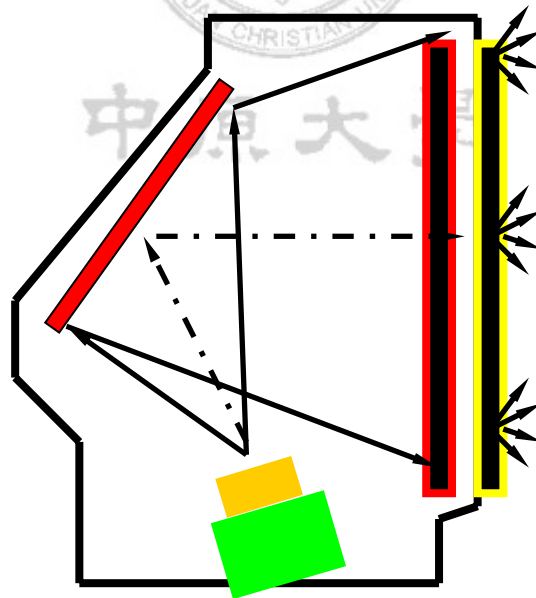


圖 1 背投影電視主要光學元件簡示

- 1 螢幕：

對背投影電視而言，背投螢幕是一個相當重要元件，其構造如圖 2 所示，主要結構由兩片組成，最前面那片是控制光的擴散角度及光增益的元件，增加背投影電視的可視角(view angle)，是散光片(diffusion plate)和雙凸透鏡陣列(lenticular lens)；而其後方是一片 Fresnel Lens，主要是讓進入擴散片的光線入射角度為一平行光軸，減少亮度不均的缺點，因為當投影鏡頭(projection lens)將影像成像在螢幕(screen)上時，會因為投影影像的場角(field angle)角度 θ 的問題出現 $\text{COS}^4\theta$ 定理的強度分布不均，如圖 3(front projection display)，此缺點可利用上述背投螢幕來來彌補。[2.6]

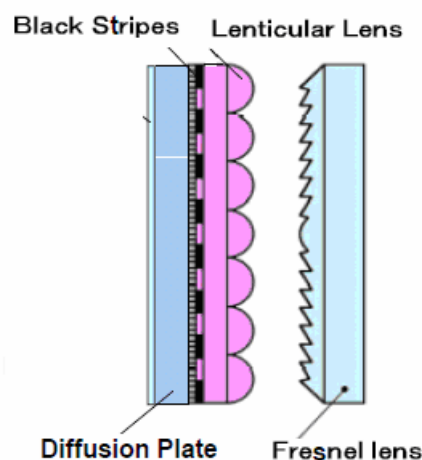
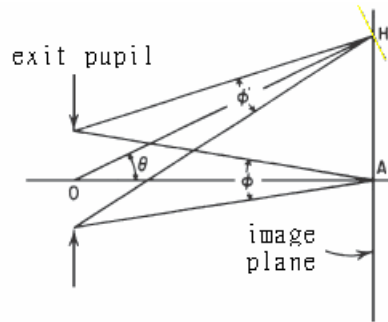


圖 2 背投影螢幕構造[2.5]



$$\text{illumination at } H = (\cos^4 \theta) \times (\text{illumination at } A)$$

圖 3 COS^4 定理

2. 投影鏡頭：

投影鏡頭最大功能在將在光學顯示晶片上面的影像放大並將其成像到螢幕上，因為投影機需高亮度的輸出，所以在工作溫度上也相對不同於在常溫下，這對其鏡頭的鏡片上是很大的考驗，因為鏡片會高溫下有熱膨脹的效應，使鏡片上曲率和折射率改變而出現像差，而也因為在高溫下，現在常用的塑膠鏡片也不利於此使用，其特性要求如下：

一 廣視角

二 為一後焦距(BFL)需長於有效焦距(EFL)

三 投影鏡頭最後一面到光學顯示元件的主光線(chief ray)

要平行光軸

3. 影像顯示微光學元件光學元件(LCD DLP LCOS)：

在現階段投影機大抵可以分類為三種微光學元件，

a. 高溫穿透式液晶(LCD)

b.數位微反射鏡面板(DMD)

c.反射型液晶(LCOS)。

a.高溫穿透式液晶(LCD)

穿透式液晶的原理是利用液晶的光調變，而液晶面板前後都會有一正交的偏振片，當從照明系統所輸出的偏振光會先通過第一片偏振片，如果偏振方向一樣會通過，然後再通過液晶，由於液晶長短軸折射率不同，光的振光方向會隨液晶分子排列方式旋轉 90 度，讓光的偏振方向也跟著轉 90 度，而才可通過放置在液晶面板前的偏振片，產生「亮」的狀態；而暗態的產生，則是由於液晶前後受一電壓產生單一方向電場，使得液晶分子站立，從照明系統所輸出的偏振光將不受液晶分子的影響改變其偏振方向，因此該偏振光必然與液晶面板前的偏振片正交而無法穿透，顯示器呈現「暗」的狀態，如下圖 4 所示。

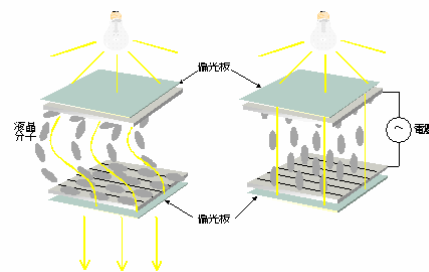


圖 4 穿透式液晶原理[2.7]

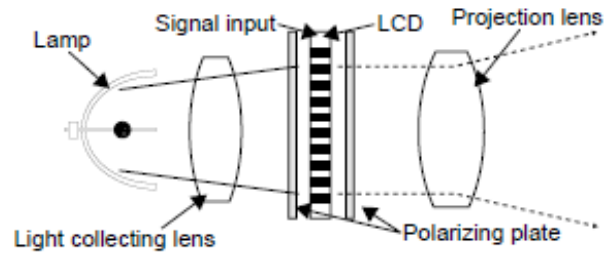


圖 5 穿透式液晶投影機工作原理[2.1]

b. 數位微反射鏡面板(DMD)

該元件是美國德州儀器（TI）公司於 1987 年使用微機電技術的構想，但一直到 1997 年才開發出第一台使用此元件的投影顯示器 (DLP)，其原理是由許多的鋁金屬微小反射面結構排列組合而成(圖 6)，一微金屬反射面構成螢幕上的一畫素，底部則以半導體驅動電路產生磁場來控制每個反射面的傾斜角度來決定畫面上的亮暗態(圖 7)。

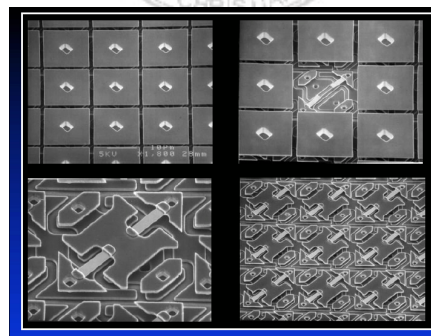


圖 6 DMD 的微反射鏡形式[2.8]

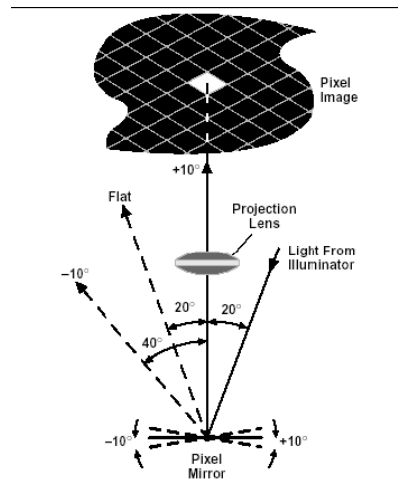


圖 7 DMD 和成像點上的關係

以整個投影顯示系統來討論，如果是使用單一 DMD 面板的投影系統，其照明系統進入 DMD 前須加入色輪（Color Wheel），讓所產生的白光通過一快速旋轉的色輪濾出紅、藍、綠三色光，並以時間調變的方式，依序入射 DMD 光閥面板上，讓紅、藍、綠三色光依序快速的疊加在影像上，在人眼視覺暫留產生一全彩影像(圖 8)，但卻可能會因為色輪轉速不穩時，可能會產生的彩虹效應(人眼就會發現有各色分離或顏色怪異的現象)。而如果是 3 片式 DMD，則可使用像 LCD 的照明系統，先分光成三原色，再合光混合成一全彩的圖形。

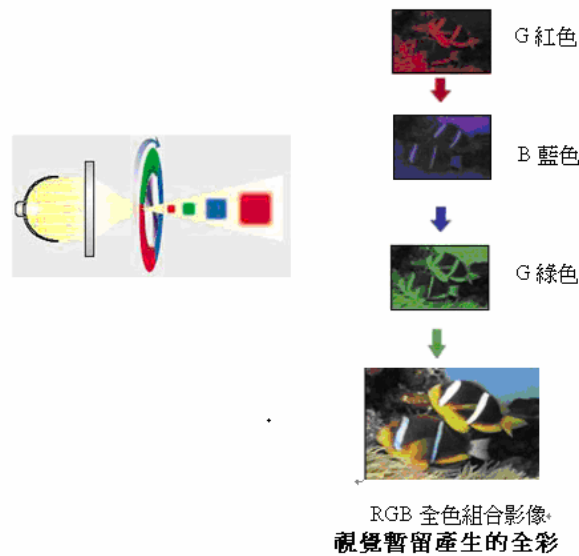


圖 8 在色輪時間調變，視覺暫留產生全彩圖形

c. 反射型液晶(LCOS)

為了改善穿透式液晶顯示器開口率小與體積大的問題，所以採用反射原理，將驅動電路製作於矽基板下方，使驅動電路不會再影響開口率 (aperture ratio)，使開口率也因為採用反射型，其開口率相較於穿透型可提升至 95% 以上，並易於縮小面板整體體積；製備過程中反射型液晶與穿透式液晶結構相似，上方為玻璃層，中間是液晶層，最大的差異是下方的驅動電路在矽晶圓上以半導體製程製作像點的驅動電路，在驅動電路製造完成後，還要在每一個像點上鍍上鋁質反射鏡，也因為驅動電路都在反射鏡的下方，並不會對穿透面造成阻礙，再者反射鏡彼此非常靠近，這也是為什麼反射式液晶面板開口率可以高過穿透式液晶面板的原因，然後跟穿透式液晶一樣再以玻璃封裝後填充液晶做光調變。

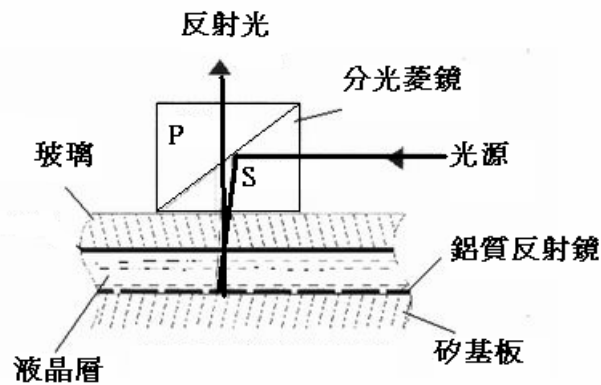


圖 9 Lcos 結構

4 照明系統：

照明系統主要用意就是將光源的光收集與均勻化，並處理光的性能讓光學元件使用。所以照明系統有許多元件所組成，一開始的燈源，和收集燈源的反射罩，當收集完後使用常見的積分透鏡(integrator lens array)或積分柱(light pipe)來讓光源均勻，兩者的主要特性都是使從反射罩所收集來的光能均勻的散佈在某個特定方向以便使用。積分透鏡為一方陣的透鏡陣列，其每個小透鏡長寬比都跟螢幕大小比值是一樣的，這樣才不會讓光源利用率太低，而其使用常是成對出現，第一片主要是收集並切割光源聚集第二片，而第二片則是將聚集的光源重新放大再經過聚光透鏡(condenser lens)後疊加光源，使其分布均勻(圖 10)。

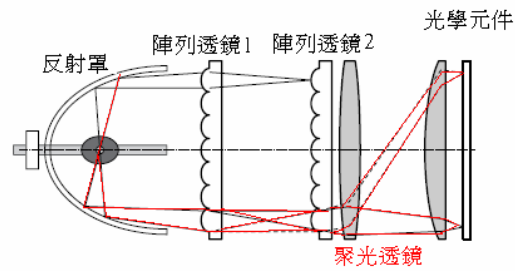


圖 10 積分透鏡簡單易示圖[2.7]

積分柱主要是用橢球反射罩聚焦光源進入一長柱內(圖 11)，讓光源像在光纖般不斷在內部全反射，而光在射出長柱後會在出光面重新分布並均勻化，在經過傳遞透鏡(relay lens)後均勻照射到光學元件上。而在光源均勻後，就視光學元件的需要再分光或是使光具有偏振性，然後再經過稜鏡導光照射到光學元件讓光學元件反射或穿透到投影鏡頭成像。[2.9]

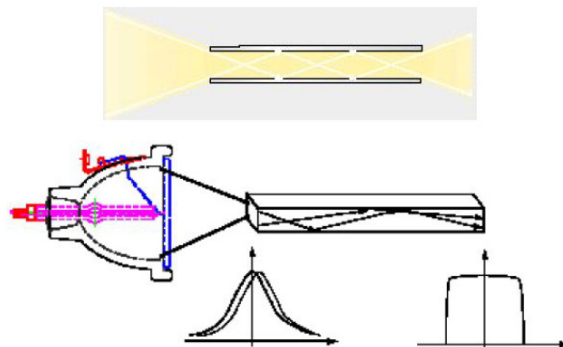


圖 11 積分柱簡單示意圖[2.7]

第三章 背投影電視鏡頭設計

3.1 投影顯示器鏡頭特色

針對不同光學系統的需求所設計的成像系統，會著眼不同的光學特性，但基本成像光學觀念的定義上並沒有變，如基本光學起始值定義的 F-number、有效焦距(effective focal length EFL)和像高(image height)等等。

以本論文的投影顯示器的成像鏡頭為例，類似的有電影放映機和幻燈片投影機的投影顯示鏡頭，但這只單單就都為放大投影成像的原理來初步檢視；如果再仔細思考細節需求會發現，用電子控制的顯示光學元件的光學特性異於影像底片，因為兩者在照明設計和光訊號產生輸出上有不同特性的差異，如底片式投影放大，單純的只是把照明系統的光均勻的分布在底片上，並不需要有特別的分光或合光動作，然後穿透投影片後，再經由投影鏡頭放大成像在螢幕上；但以 DMD 微反射面光學元件或液晶式光調變光學元件的投影顯示器鏡頭，DMD 需考慮到反射鏡的傾斜角度，來設計照明系統要如何將光束光錐照射在 DMD 元件上；而 LCD 則還需要多考慮關於光的偏振態控制。而 DMD 以其反射的光錐角度考慮成像系統 f-number，然後再經 DMD 元件的微傾斜反射鏡將影像的電訊號轉換為光的訊號，經過投影顯示器的鏡頭將光訊號放大並成像在螢幕上；液晶式光學元件則需

考慮液晶的偏轉來將電訊號轉為光訊號，再依液晶穿透光發散光錐的角度，得到此類投影鏡頭的 F-number，這還需多考量。由於分光和合光的稜鏡元件大小讓後焦拉長，所以在在都顯示底片用的投影機鏡頭並不完全適用於此類投影系統。

本文背投影系統的投影鏡頭所需具備的能力特色，有投影鏡頭須在短距離下呈現大畫面，所以其半視角(semi-field angle)約莫在 33 度以上，基本上為一廣角(wide angle)鏡頭，如同將其倒置逆向來投影成像；而為能放入各類平板玻璃、濾光片、光偏極元件和合光分光用的稜鏡(prism)組等等，上述的都須配合照明系統設計而考慮其間距、材質及尺寸，所以投影鏡頭的後焦距(back focus length BFL)除需預留放入此類元件的長度外，還需注意到由於經過這些元件後會有使原先的焦點被拉長位移(focus shift)(圖 12)，所以後焦距(BFL)在空氣介質設計預留時要多加注意，而也由於要放入上述元件的因素，將使有後焦距(BFL)要大於有效焦距(EFL)。

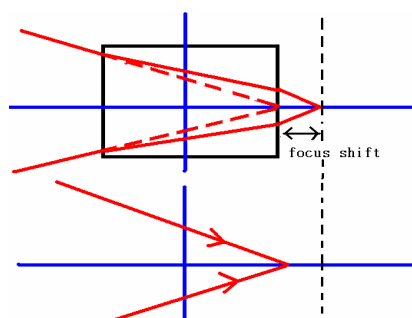


圖 12 光線經過稜鏡的焦點位移

而投影機鏡頭實質上就是將光從光學晶片放大投射至螢幕上，而

大部分搭配的照明系統都是將光均勻一致的照射或穿透在光學顯示元件上，所以從元件上所形成的光錐一定都是發散的形式(圖 13) [3.1]，就像是光學元件上的每個像點呈現點發散一樣，而每個像點的主光線(chief ray)會近乎是平行光軸(optical axis)的方式從光學晶片射向投影鏡頭成像，所以投影鏡頭在後端到顯示光學元件的主光線應要幾乎為一平行光軸，此好處除了使成像亮度均勻外，也可使光的收集使用率增加，再者當稜鏡再合光時不會讓某原色產生偏移。[3.1]

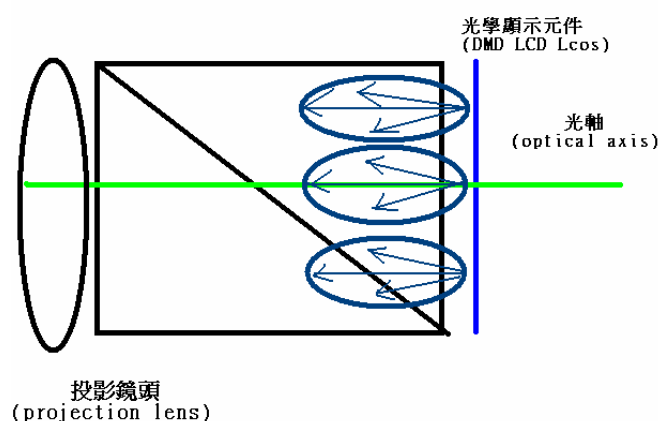


圖 13 從光學元件所形成的影像光錐為一發散形式[3.1]

而也有許多設計是在光學顯示晶片前多加一片聚光透鏡(condenser lens)或列陣透鏡(lens array)(圖 14)，讓從光學元件的影像投射至投影鏡頭不為一發散形式，而為一匯聚的光錐，此有助於讓最後一片的直徑不須大於光學顯示元件，並可以縮小投影透鏡的整體大小，但也可能會因為聚光透鏡所產生的像差，造成影像光能量不均勻分布。[3.1]

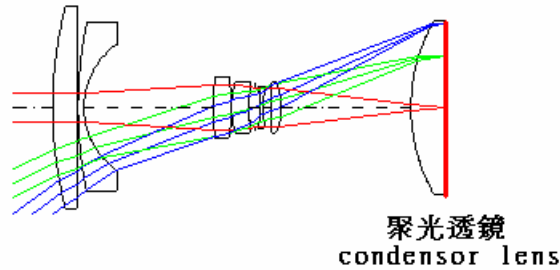


圖 14 用聚光透鏡讓光束為匯聚在投射到投影鏡頭上

鏡頭到光學顯示元件主光線平行光軸特性也影響許多在後來成像時的效果，因為當投影鏡頭未仔細和光學顯示元件和照明系統搭配時，會發生成像後的色散，而此色散並非鏡頭的設計不良之罪，主要是主光線在導入鏡頭時就已經偏離原本光軸的緣故。

從上述可以整理出關於投影鏡頭的幾個特性：

A 廣視角。

B 後焦(BFL)需長於有效焦距(EFL)。

C 投影鏡頭最後一面到光學顯示元件的主光線要平行光軸。

3.2 返焦式鏡組(reverse lens)

具備後焦距(BFL)比有效焦距(EFL)長的成像系統，從簡單的兩片式透鏡來討論，常見的小視角望眼鏡頭(Telephoto lenses)，有效焦距(EFL)比之於後焦距(BFL)較長(圖 15),其為一正透鏡後面接著一片負透鏡，此種為最常見的形式。而如果將此正透鏡和負透鏡顛倒放置(圖 16)，可以使後焦距(BFL)拉長，使後焦距(BFL)比有效焦距(EFL)長許多，而前方的負透鏡為了有廣視角的功能，可以設計為如圖 17 為一新月形透鏡(Meniscus lens)，其負透鏡的第一面面形的曲率為正，而

第 2 面面形為負，即為一新月形透鏡(Meniscus lens)，當大角度光線經過第一面後光線角度可以大幅平緩有利於後方透鏡可以利用。[3.2]

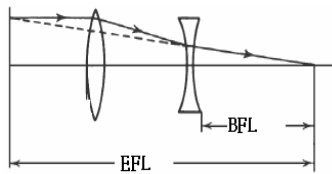


圖 15 $BFL < EFL$

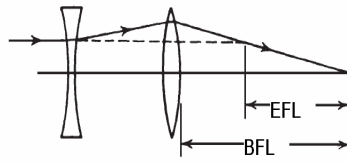


圖 16 $BFL > EFL$

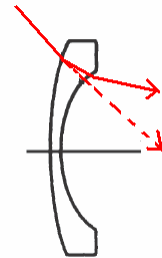


圖 17 新月形透鏡

3.3 遠心系統(telecentric system)

遠心系統常見於量測系統中，其原理是根據光圈(stop)的放置位置在前焦或後焦的位置來決定[3.2]，讓出瞳(exit pupil)或入瞳(entrance pupil)在無窮遠的位置，進入或成像的主光線為平行光軸，如圖 18 中光圈放置在前焦面(front focus plane)，使出瞳位在無窮遠處，讓主光線為平行的聚焦在像平面上，此也可符合投影鏡頭最後一面到光學顯示元件的主光線要平行光軸的特性。

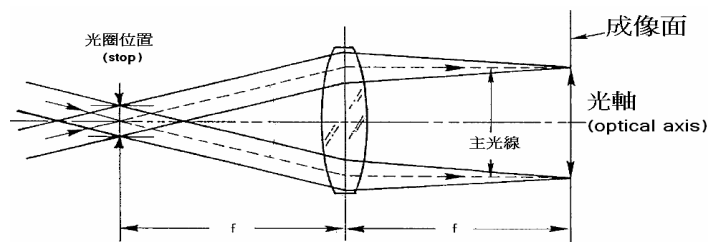


圖 18 遠心系統簡易圖

3.4 背投影電視鏡頭規格訂定

規格定義方式是以反向設計(圖 19)，所以可以如同照像機鏡頭般定義規格，使用光學元件為 DMD，而 DMD 元件對角線為 0.97inch，

像素為 1506 像素 x 847 像素，像素大小為 $14.25\ \mu\text{m} \times 14.25\ \mu\text{m}$ ，為一 16:9 寬螢幕，投影尺寸為 52 inch，以此定義一背投投影鏡頭初階光學規格。

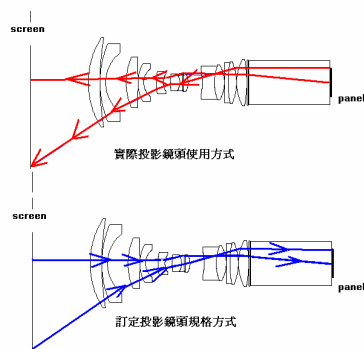


圖 19 反上設計以找尋投影鏡頭規格

1. 成像高度：

使用光學顯示晶片為 DMD，先根據其對角線尺寸來決定最大成像高度，所以依照 0.97 吋的對角線來做像高，所以初階像高取 12.319 mm。

$$0.97(\text{inch}) \times 25.4 \times 0.5 = 12.319(\text{mm})$$

2. 投影高度：

成像尺寸為 52 吋(inch)背投影電視，其 52 吋表示其螢幕對角線長度，所以像高選定為 52 吋即 1320.8 mm 的一半，即 660.4 mm 做為物高。

$$52(\text{inch}) \times 25.4 \times 0.5 = 660.4(\text{mm})$$

3. 投影視角：

選定其半投影視角(semi-throw angle)正切值為物高與物至主平面距離之比值，大約是 ± 34 度和 ± 33 度之間，取 1000 mm 為物體到主平面

的距離。

$$\text{物距(object distance)} = \frac{660.4 \text{ mm}}{\tan 33^\circ} = 1016 \text{ mm}$$

$$\text{物距(object distance)} = \frac{660.4 \text{ mm}}{\tan 34^\circ} = 979.08 \text{ mm}$$

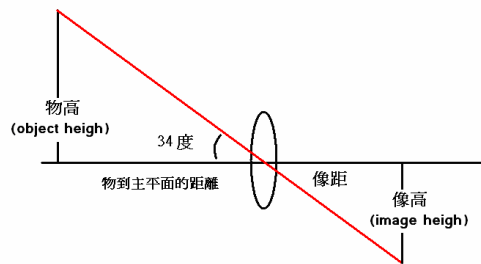


圖 20 物像距的關係圖

4.有效焦距：

在有物高、物距和像高下使用高斯成像公式的物像距關係計算，如圖 21[3.2]所示， h 像高而 h' 為物高， S 為物到第一主平面距離， S' 為像到第二主平面，先以相似三角形得放大倍率 m ：

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{S}{S'} \quad \text{得} \quad S' = mS$$

$$\text{代入} \quad \frac{1}{S'} = \frac{1}{S} + \frac{1}{f'}$$

$$\text{可以導出} \quad \frac{1}{mS} = \frac{1}{S'} + \frac{1}{f'} \quad \text{得} \quad \frac{1}{S} \left(\frac{1}{m} - 1 \right) = \frac{1}{f'} \quad s = f \left(\frac{1}{m} - 1 \right)$$

$$\text{結果-} \quad f = \frac{s}{\frac{1}{m} - 1}$$

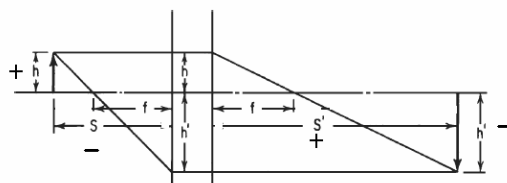


圖 21 物像距關係圖[3.2]

以此算出有效焦距，即

$$f(\text{EFL}) = \frac{-1000\text{mm}}{\left(\frac{660\text{mm}}{-12.31\text{mm}}\right) - 1} = 18.31\text{mm}$$

所以定義有效焦距為 18.31mm。

5.F-number 的選擇：

DMD 的每個微反射鏡的傾角在+10 度和-10 度，以下列公式，得一 F-number 近似值 2.8。

$$F/\# = \frac{1}{2 \times \sin \theta'} = \frac{1}{2 \times \sin 10^\circ} = 2.879 \approx f/2.8$$

如果是在 LCD 或是 LCOS 光學顯示晶片考慮 F-number，則要從照明系統開始思考；即照明系統將光束收集到兩光學顯示元件上的收光角 θ' ，此 θ' 如同上述 DMD 的微反射鏡傾角正負 10 度，以此考慮這兩種投射型顯示器的 F-number。因為在照明系統設計時即可確定聚集光束的角度，其角度牽扯到燈絲的間距、燈罩的外型和積分透鏡(Lens array)或積分柱(light pipe)的設計等等特性所決定。

6.機構要求：

考慮到投影鏡頭的最後一面到 DMD 晶片還有分光和合光用的稜鏡和濾光片要放入，所以在此先預留一長後焦(Back Focus Length)50mm，可以發現此後焦遠長於效焦距(BFL=50mm 大於 EFL=18.31mm)，而自訂一總長(total track)限制在 210mm 以內。

7.畸變(distortion)：

雖然畸變不會對成像品質產生影響，但當成像在螢幕上時，如果有嚴重彎曲變形很容易被人眼所觀察發現，尤其是在邊緣時更容易被識別。所以需要先嚴格限制和要求，在此定義兩種形式的畸變，一是光學畸變(distortion) [3.2]、一是視訊畸變(TV distortion)，計算如下：

$$\text{光學畸變} = \left| \frac{\text{實際像高} - \text{理想像高}}{\text{理想像高}} \right| \times 100\% < 2\%$$

$$\text{水平視訊畸變} = \frac{|ES1| + |ES2|}{RS1 + RS2} \times 100\% < 1\%$$

$$\text{垂直視訊畸變} = \frac{|ET1| + |ET2|}{RT1 + RT2} \times 100\% < 1\%$$

視訊畸變和光學畸變不同之處在視訊畸變是針對實際螢幕中的直線之不規則改變量作一定義(圖 22)，而此改變量會影響鏡頭的成像品質。而視訊畸變在此處又可分兩種，水平視訊畸變和垂直視訊畸變；水平視訊畸變將針對的螢幕上下部份水平線的兩邊緣做誤差百分比，自定評估其變化量要 1% 以內；而垂直視訊畸變將針對的螢幕垂直線的左右兩邊緣的最大誤差量誤差百分比，其變化量要在 1% 以內。

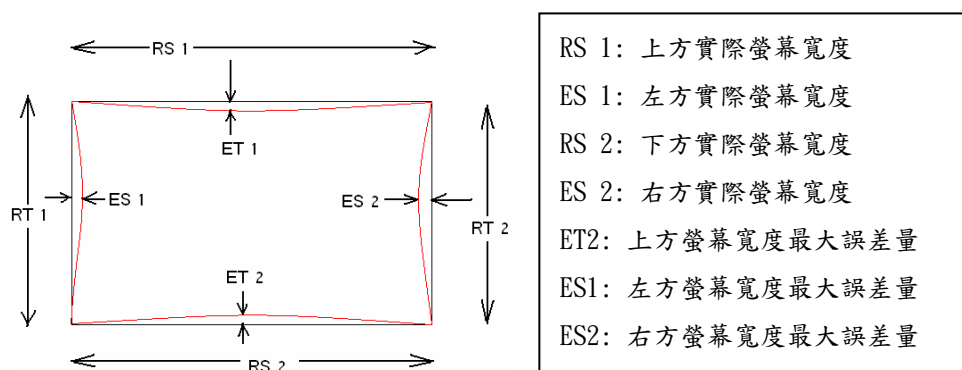


圖 22 在投影螢幕上水平邊緣和高度邊緣的畸變對螢幕的變形

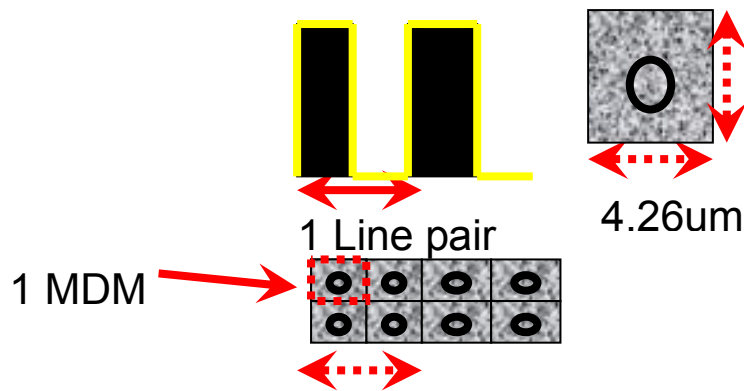
8.MTF (modulation transfer function)：

MTF 是現代光學上常用的綜合性評價標準。一個鏡頭的好壞最

主要是對比度(contrast)和解析度(resolution)兩方面是否有好的表現，而鏡頭的 MTF 就相當於是這兩方面的綜合性描述，其用來評估當物體為一特定空間頻率(spatial frequency 即每毫米(mm)裡面有多少線對，單位是 line-pair/mm or lp/mm)分布時，在經過鏡頭成像後的解析度百分比[3.4]。簡單的解釋，就是得到一個固定頻率黑白相間的圖樣經過鏡頭後還可以被辨識的程度。本鏡頭是反向設計，所以空間頻率是根據 DMD 的一個像素大小來計算空間頻率，而一個線對(line-pair)裡面包含兩個像素(圖 3.4.5)，以此可以決定 MTF 需要達到的辨識空間頻率為 35lp/mm，其計算如下：

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2 \text{ (pixels/lp)} \times 14.25 \text{ (}\mu\text{m)}} \\
 &= \frac{1}{28.5 \text{ (}\mu\text{m/lp)}} \\
 &= 0.035 \frac{\text{lp}}{\mu\text{m}} \\
 &= 35 \frac{\text{lp}}{\text{mm}}
 \end{aligned}$$

常態來說 MTF 在 0.2 以下，光學系統可能已經在辨識上有問題，常見於初階設計對 MTF 成像品質先要求較高的標準，以預留給組裝時可能會產生的誤差產生讓 MTF 降低後仍可以被系統所使用。有鑑於此，在此先自訂一 MTF 需要符合的要求，方便在設計時有一評估標準存在，所以本人在此自己先定義：最邊緣的 Field 要大於 0.45，中心 Field 大於 0.7。



1 line pair = 2 pitch DMD

圖 23 以線對(Line-pair)代表一像素的空間頻率

9. 成像光點大小(spot size)：

DMD 晶片上的每一個微反射面大小為 $14.25\mu\text{m}$ ，所以在反向設計時成像點(spot diagram)的 RMS 像點(root main square spot size)大小，即像點要集中在一個 DMD 光學元件的大小以內。[3.5]

10. 相對照度(Realtive illumintion)

定義系統為遠心系統(telecentric system)，使反向設計時，能讓主光線(chief ray)到 DMD 光學元件時的角度盡量為 0^0 ，使相對照度能均勻分布，所以先自我要求在設計時邊緣相對照度要大於 90%。

3.5 設計流程

在上述中已經大略了解背投影鏡頭的光學系統規格和此鏡頭所需的特性，再來設計上大致可分兩個方法尋找透鏡的起始值：方法一是不具厚度的薄透鏡(Thin lenses)以雙高斯結構排列消三階像差開始設計，在得到一三階像差最小的起始曲率後開始變成實體有厚度的

透鏡組，得到一初階起始值設計後使用光學軟體開始著手優化[3.5]；

方法二是站在前人肩膀，如專利、期刊或參考書尋找光學規格相近的鏡組，並符合所需的光學系統的結構，以此為起始值開始設計並著手修改。而當使用上述兩種方法得到初階起始值設計後，便可運用電腦軟體做為工具來優化達到所要求的成像品質完成一鏡組設計。

本文將使用方法二，在專利中尋找一適合的起始值，並加以調整到符合初階光學規格(表 1)，然後再加以修改，並使成像品質達到所需的光學要求，而鏡片曲面面形皆以球面透鏡為主，並不考慮使用非球面鏡片。

表格 1 所需的光學規格表

F-number	2.8
有效焦距(EFL)	18.31mm
半視角(semi-field angle)	33 度
返焦型鏡頭(Reverse lens)	後焦(BFL) > 有效焦距(EFL)
遠心系統(telecentric system)	主光線平行光軸
鏡片曲面面形	球面
後焦距	50mm

找方向因為此系統結構上的需要，以返焦式鏡組(reverse lens)做主軸尋找美國專利，參考結構以專利編號 4957355(u.s. patent4957355 RETROFOCUS TYPE LENS SYSTEM)。在專利編號 4957355 中，其內文自述專利鏡頭的基本結構為正負兩大群(圖 24)，在第二群中也具有兩小群，總鏡片數為 13 片，而其視角(field angle)為 94 度、有效焦距為 20.442mm 和 f-number 為 2.8，第一群總共 6 片，

第二群為 7 片(表 2)。

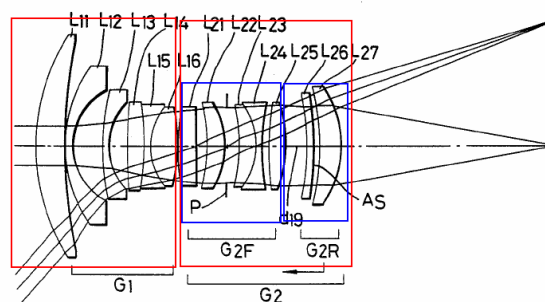


圖 24 專利的正負兩群結構

表格 2 專利 4957355 光學規格表格

F-number	2.8
有效焦距(EFL)	20.442mm
半視角(semi-field angle)	47 度
返焦型鏡頭(Reverse lens)	後焦(BFL) > 有效焦距(EFL)
總鏡片數	13 片

以此篇專利做基礎在使用光學軟體 ZEMAX 優化，選用專利 4957355，主要在於其視角(field angle)為 94 度，而系統只需大約 68 度，有利於可以得到較好的成像品質，且每一面的曲率(power)都不會太大，所以以此專利開始優化時有較大的寬容度可以做形變，又利於把後方的主光線扳成平行光軸，即具有遠心系統(telecentric system)的形式已符合投影鏡頭的需要。

3.6 13 片背頭影鏡頭設計結果

以 3.5 節的專利做起始值並且加入稜鏡，以光學設計軟體 ZEMAX 做工具加以修改然後優化成像品質，使用的導光稜鏡是複合式的菲利浦稜鏡組(Philips Prism)，而其分光到合光為等光程設計[3.1]，即三原色從燈泡到分光到 DMD 再到合光進入投影鏡頭光程路

徑對三種色光而言都是等長的，所以設計在投影鏡頭後方加入稜鏡只單一考慮某一寬度即可。再來就是加入稜鏡後的設計結果，圖 26 為背投影鏡頭加稜鏡的結構圖，其總長為 210.02338mm，未加其他光元件的鏡頭總長為 136.55338mm，鏡片最大直徑在第一片為 38.438mm、鏡片片數共 13 片，每片鏡片皆為球面。從光學軟體中檢視稜鏡在此系統中產生的三階像差表(表 3)可以放入稜鏡後，帶入的有球像差(spherical aberration)、縱向色差(longitudinal color)。球像差是稜鏡的厚度使聚焦點後移，聚焦點會因不同高度而產生不同，縱向色差(longitudinal color)是因為稜鏡材質的色散不同所產生的。

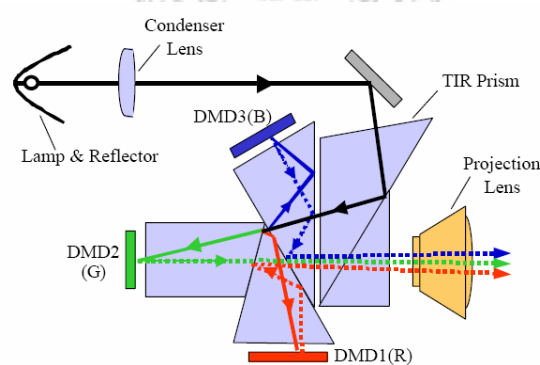


圖 25 設計時所考慮的光路系統結構

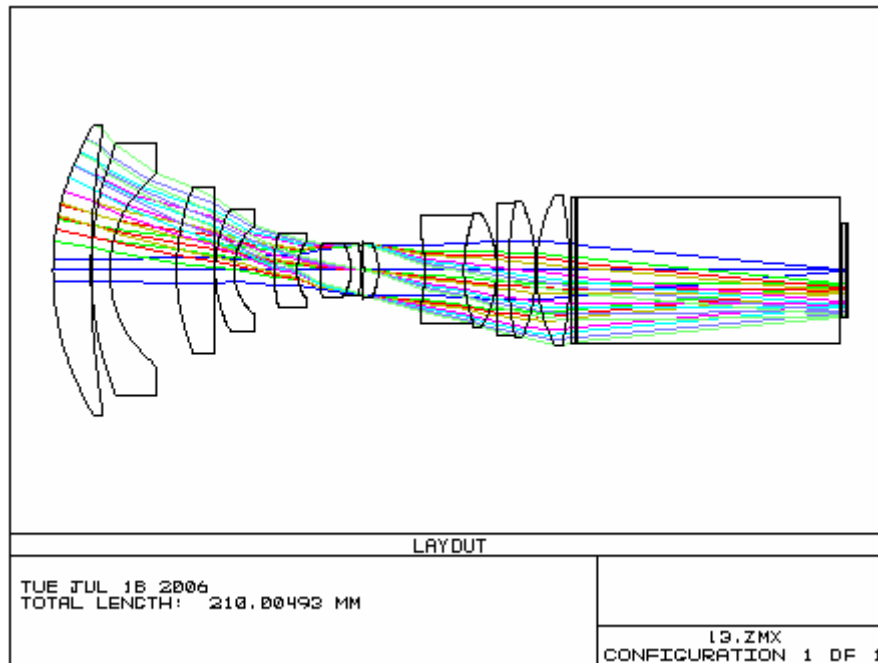


圖 26 13 片鏡組結構圖

Surf	Type	Radius	Thickness
OBJ	STANDARD	Infinity	930
1	STANDARD	72.57999	10
2	STANDARD	223	0.12
3	STANDARD	88	5
4	STANDARD	32.64468	17.73079
5	STANDARD	57	10
6	STANDARD	-941.1155	0.12
7	STANDARD	34.37506	5
8	STANDARD	15.3	10.72014
9	STANDARD	43.5	6
10	STANDARD	13.27239	6.186666
11	STANDARD	65	8.121747
12	STANDARD	-12.81031	2.3
13	STANDARD	-180	0.5
STO	STANDARD	Infinity	0.5
15	STANDARD	-71.06988	3.853631
16	STANDARD	-16.30543	12.3
17	STANDARD	-46.72374	10.34955
18	STANDARD	39.86513	8.705634
19	STANDARD	-30	0.1761094
20	STANDARD	-513.5565	3
21	STANDARD	92.27437	7.277972
22	STANDARD	-45.72787	0.12
23	STANDARD	43	8.773185
24	STANDARD	-100	0.3644984
25	STANDARD	Infinity	1
26	STANDARD	Infinity	0.5
27	STANDARD	Infinity	69.47
28	STANDARD	Infinity	0.5
29	STANDARD	Infinity	1
30	STANDARD	Infinity	0.5
IMA	STANDARD	Infinity	

圖 27 13 片鏡組資料

表格 3 稜鏡在鏡頭後方產生的三階 Seidal 像差

Seidel Aberration Coefficients:									
	SPHA S1	COMA S2	ASTI S3	FCUR S4	DIST S5	CLA (CL)	CTR (CT)		
PRISM	-0.028260	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.038086	0.000000		
	0.001246	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.001679	0.000000		

再來是檢驗其光學品質，在鏡頭結構圖中因為對鏡頭總長(total track)未嚴格要求很短，所以在第 3 片為一正折光透鏡而使鏡頭在光圈(stop)之前並未如前篇專利很緊實的排列。再來是討論其光學品質，如圖 27 所表示，X 座標為空間頻率每毫米(mm)下有幾條線對(line pair)，y 座標是 MTF 值即像的對比除以物的對比，根據此圖可以看出設計結果的 MTF 值在空間頻率 35lp/mm 下，最外圍 FILED 的 MTF 為 0.5，中心 FIELD 的 MTF 為 0.8。

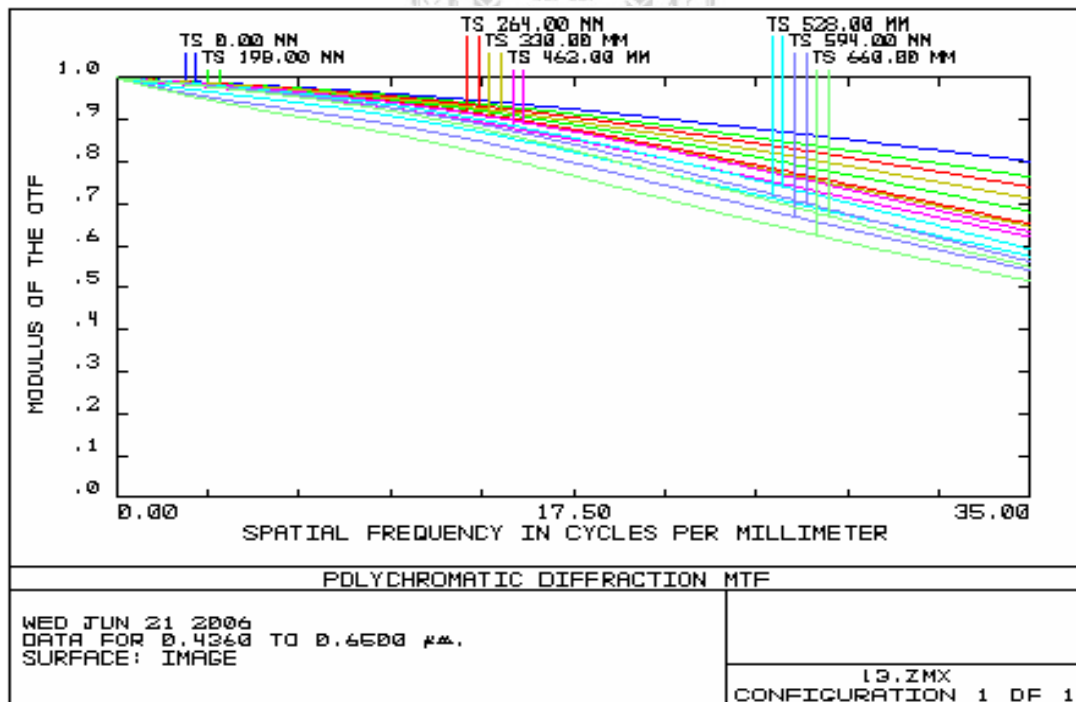


圖 28 MTF 圖

接著考慮 MTF 對不同像高的變化關係，圖 28 是 MTF v.s Field，X 軸是像高，Y 軸是 MTF 值，而 T 表示子午面(tangential)的 MTF 值，

S 表示弧矢面(sagittal)的 MTF 值，主要是可以了解在不同空間頻率中水平 MTF 和垂直 MTF 在不同像高下的變化。如果在相同空間頻率下，如果水平 MTF 和垂直 MTF 的辨識程度分離太過於嚴重會讓人眼輕易的發現，而被人眼看到的感覺就如同近視中的散光，水平方向和垂直方向辨識能力不同，所以盡量讓 T 和 S 的差異不要有太嚴重的分離。

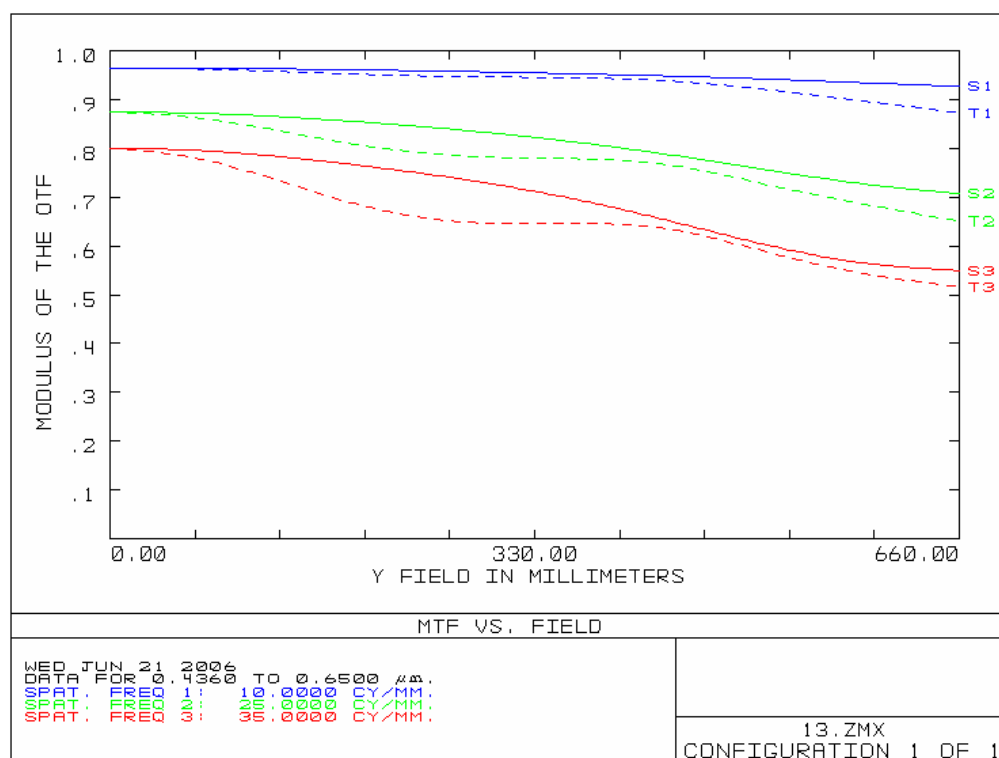


圖 29 MTF v.s Field 圖

圖 29 為像點圖中的 RMS SPOT SIZE 最大為 $11.921\mu\text{m}$ 也在一個 DMD($14.26\mu\text{m}$)大小以內。

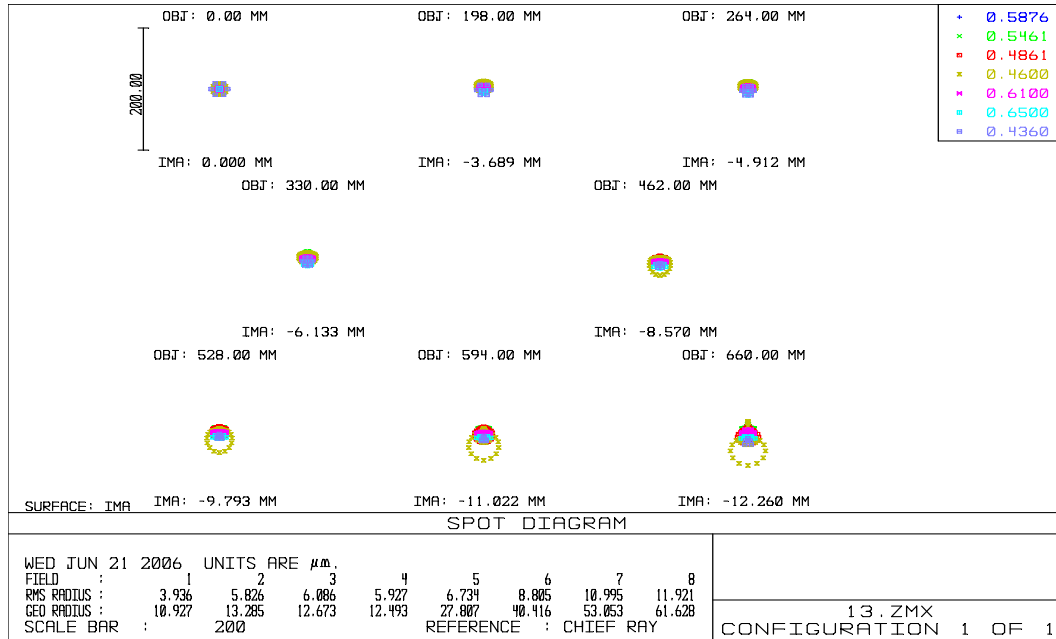


圖 30 spot diagram

圖 30 在光學畸變(distortion)部分在 0.7%以內，視訊畸變為 0.3%，畸變的變化最好是一漸變的慢慢增加，在人眼的視覺感受上才不會被辨識，以符合當初訂定視訊畸變的主要原因。在場曲(field curture)中 T 表示子午面(tangential)，S 表示弧矢面(sagittal)的聚焦誤差，其可以看出兩者基本都很密合。

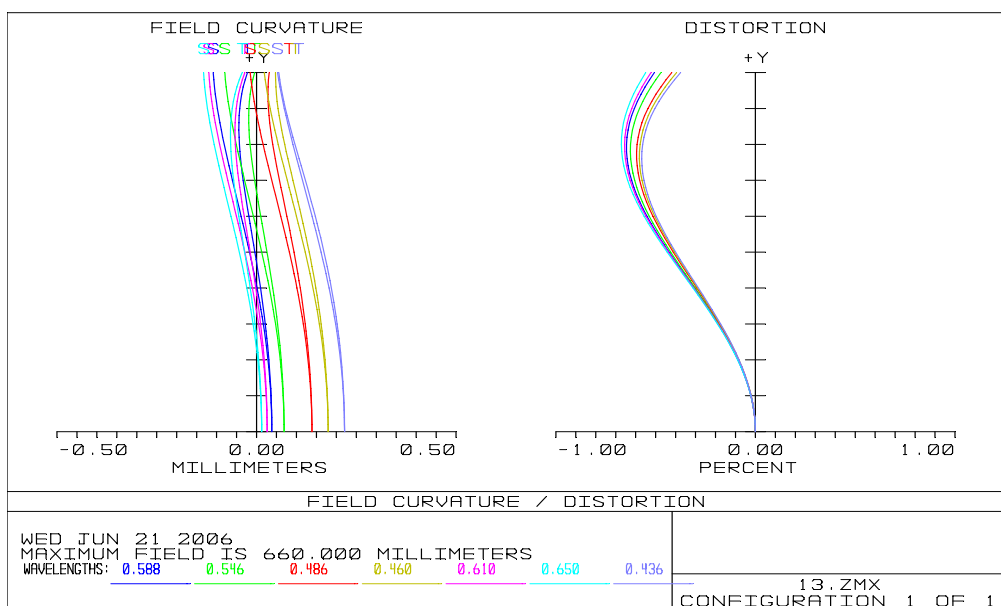


圖 31 field curvature and distortion

最後是觀察其相對照度(圖 31)值在 95%以上，

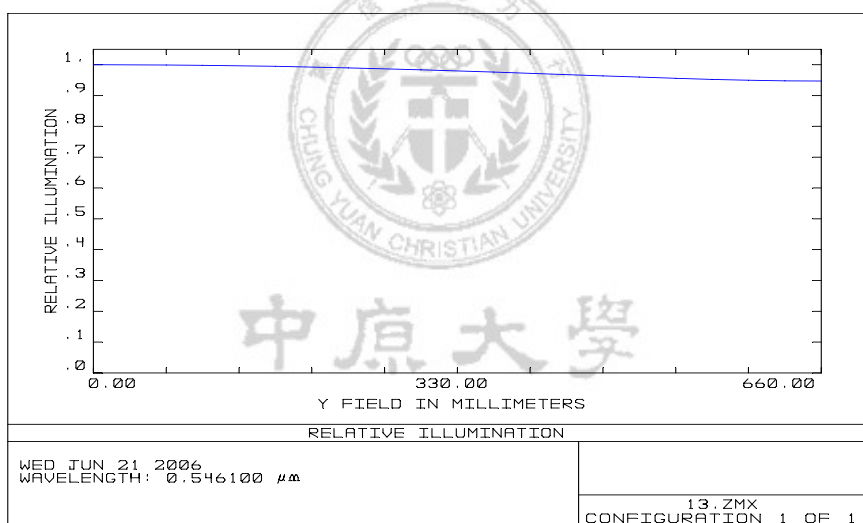


圖 32 relative illumination

最後是檢查其是否為遠心系統，表 4 可以看出在最外圍的 field 其主

光線的角度為 0.405 度，可達到遠心系統的標準。

表格 4 主光線的角度

相對像高	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
主光線角度 (Degree)	0	3.2×10^{-4}	2.6×10^{-3}	8.8×10^{-3}	0.021	0.041	0.073	0.12	0.186	0.277	0.405

3.7 12 片背投影鏡頭設計結果

在優化過程中觀察發現，在 13 片鏡組中的第 11 片透鏡的兩面有變成平板玻璃的現象(第 11 片的兩個曲面半徑趨近於無窮大)。而在 13 片鏡組中，第 11 片在三階像差主要是產生正畸變和正橫向色差，所以實驗上先忽略色差的影響，把第 11 片透鏡刪除變為 12 片鏡組，並期望其產生的正畸變以第一片鏡來補償，下一步驟再使用光學軟體給予優化後。

圖 32 為優化後的鏡片 layout 圖及鏡片資料，發現減少 11 片所未補償的畸變值主要被第一片所補償，而軸向色差和正橫向色差則主要由讓第 6 片和第 7 片變厚來補償，而其焦距的變化量主要是讓 11 片由正折射率變負折射率補償。

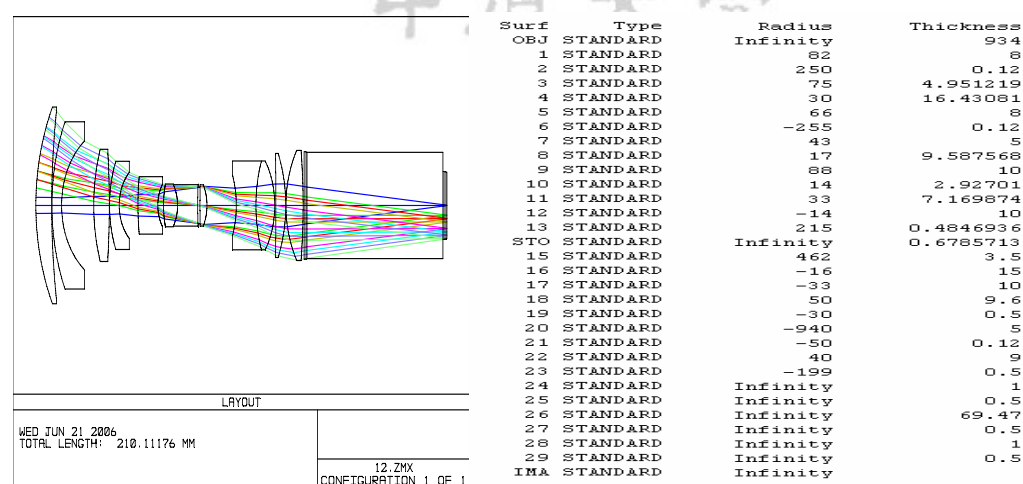


圖 33 減少一片後優化的鏡頭 layout 圖及鏡組資料

在光學品質上，MTF 在 35lp/mm 下如圖 33，相較於 13 片鏡組，其中心的 FILED 的 MTF 值下降了 0.05。

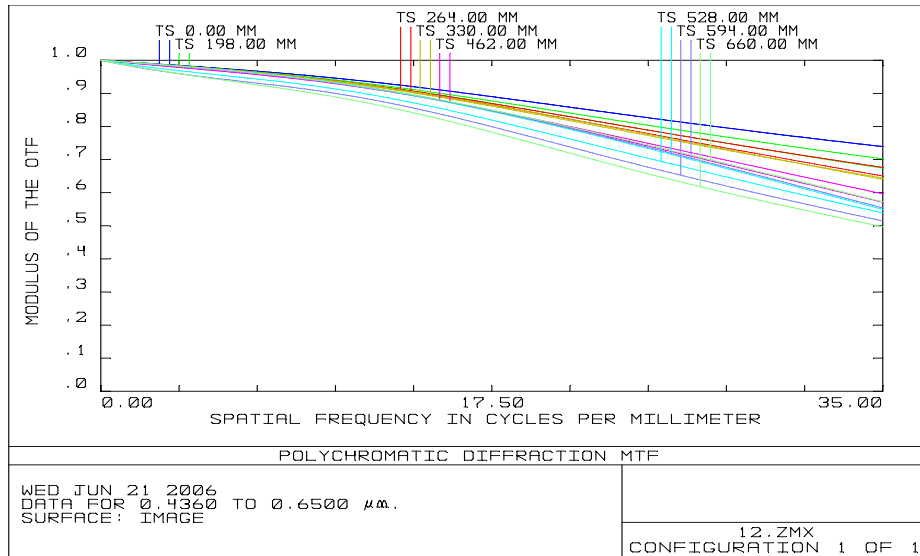


圖 34 減少一片後的 MTF 圖

圖 34 在 MTF v.s Field 中和 13 片鏡組相比，在 10lp/mm、25lp/mm 和 35lp/mm 基本上聚合程度並沒有太大差別，但 12 片在一半像高的聚合比之 13 片好但卻犧牲邊緣的聚合程度。

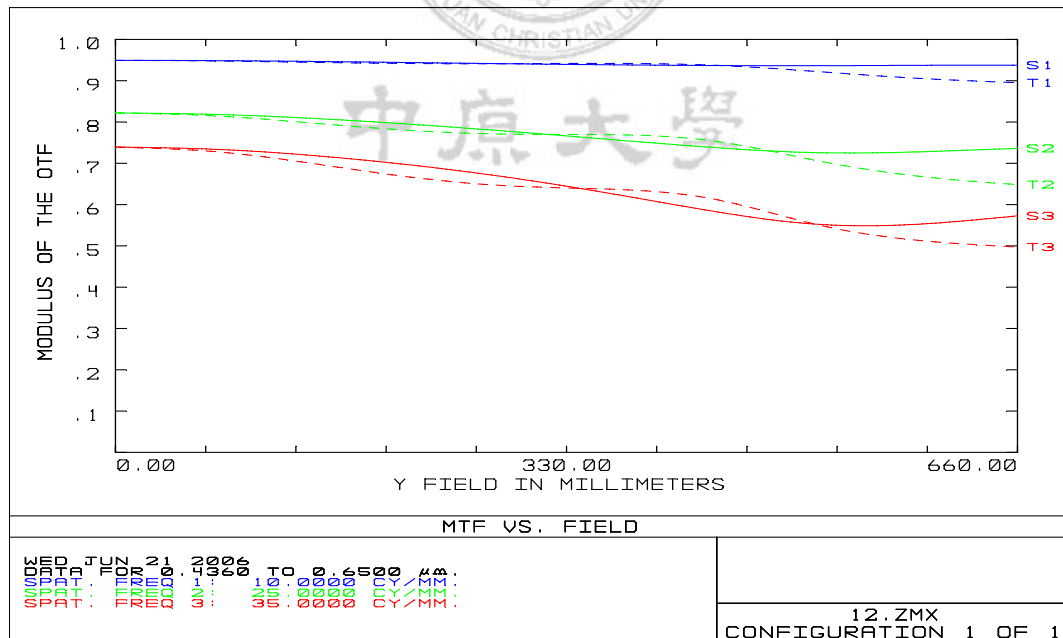


圖 35 減少一片後的 MTF v.s Field

圖 35 的 RMS spot size 比之 13 片有更好的效果效果，最大 RMS 像點半徑為 9.421 μ m。

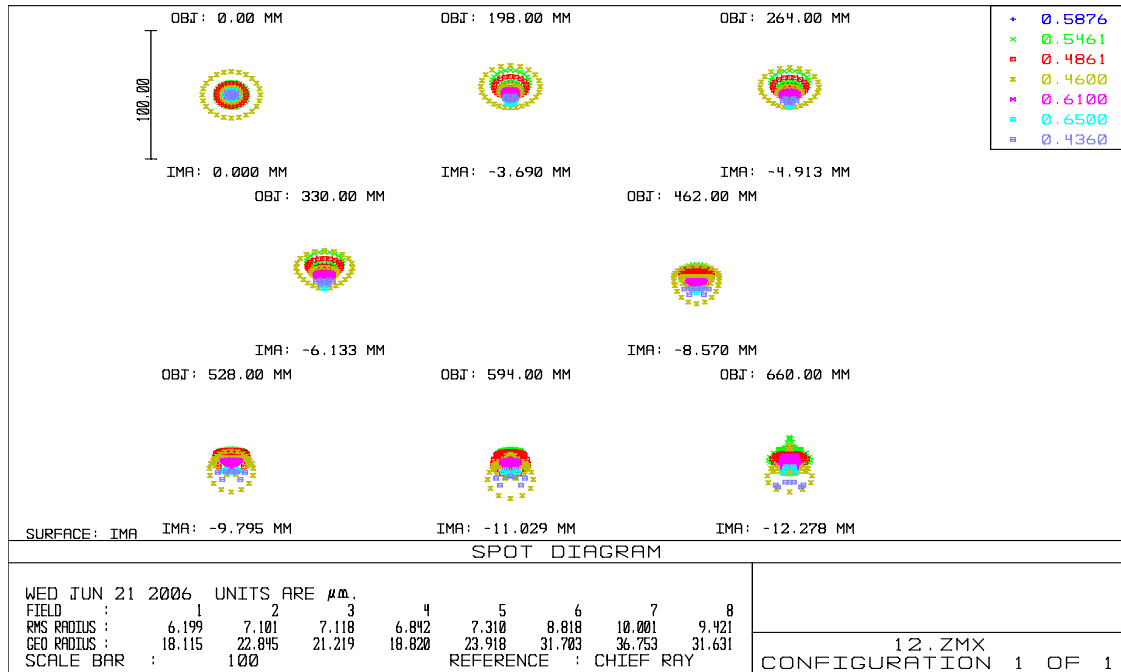


圖 36 減少一片後的 SPOT DIAGRAM

在畸變部分(圖 36)，光學畸變為 0.7%，視訊畸變並不如 13 片在 0.6 field 到 1.0field 有一平緩的變化，但即便如此變化量能也在 1%以內，而場曲的部份在邊緣視場 T 和 S 並未聚合但基本上並不影響成像品質，主要是本系統具有一遠心特性；而相對照度部分(圖 37)最邊緣在 95%，表 5 可以評估出其聚遠心特性。根據上述的成像品質比較，基本上除了中心的 MTF 下降和畸變在 0.6FIELD 到 1.0FIELD 改變量較大外，其他的成像品質評比都近乎是一樣，所以改成 12 片後效果依然有達到 13 片的水準。

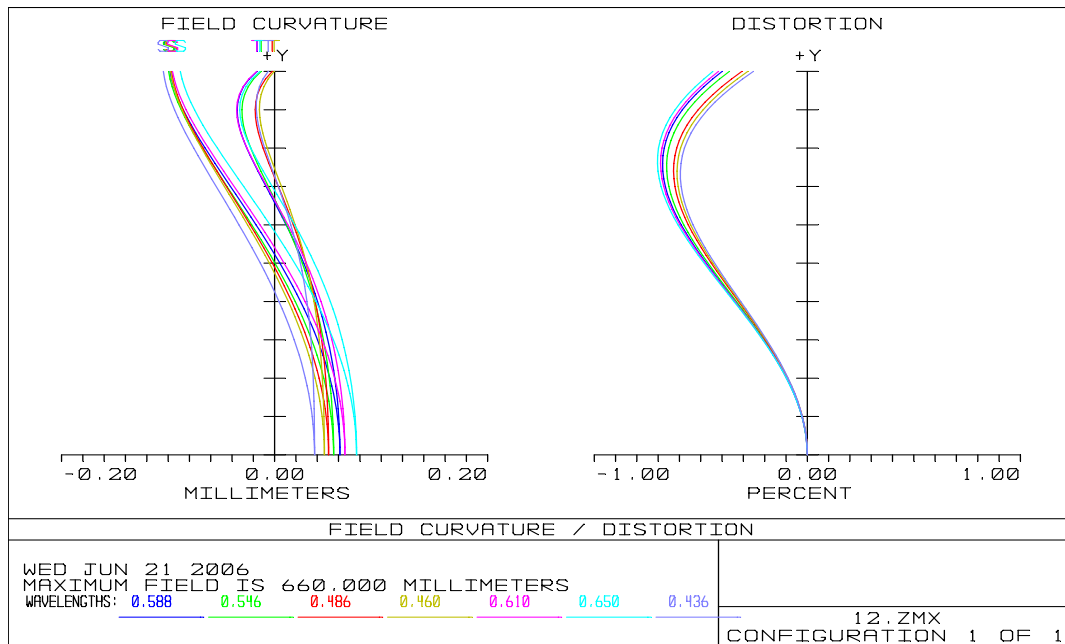


圖 37 field curvature and distortion

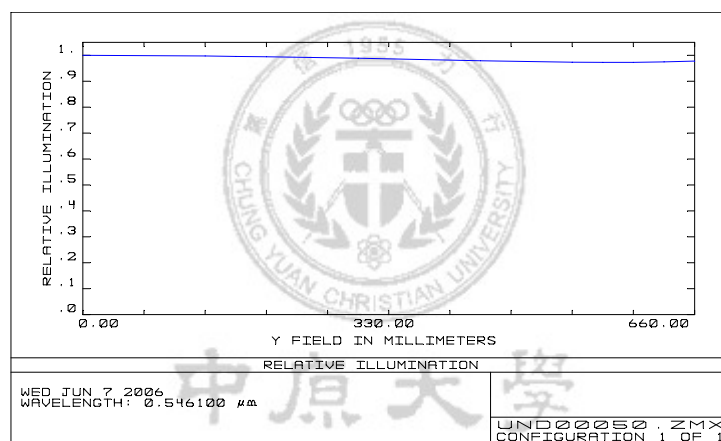


圖 38 相對照度

表格 5 減少一片後主光線的角度

相對像高	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
主光線角度 (Degree)	0	7×10^{-4}	6.1×10^{-3}	0.021	0.050	0.099	0.176	0.289	0.45	0.676	0.99

第四章 公差分析

4.1 前言

光學鏡頭設計完成後，需要把實際的光學透鏡製造和光學系統組裝所可能產生的誤差加以考慮，因為把理想的設計值變為實際鏡頭時，成像品質並不會和理想的設計值一致吻合；拜現代電腦快速進步和完備光學軟體的快速模擬計算下，已經可以事先加以模擬評估製造和組裝誤差量要控制在多少範圍內，對整個光學系統產生的破壞改變不會使成像品質達不到所預期，而當設計值需要越嚴苛的製造誤差容忍度才可達到所需的成像品質時，如圖 38 所示製造要求精度到某依程度時所需的成本會大幅提高[4.1]，要求越高的製造精度，成本會出乎意料的驚人，所以在製造公差的容忍度要求範圍不能太嚴苛但也不能因此太寬鬆，要在此中間和製造成本取得一平衡點[4.1]。再者當組裝和製造的成本太高時，就要思考是否要修改當初的成像鏡頭設計值，所以一鏡頭設計值模擬出來後，仍有許多是需要和其他方面一起討論。總而言之，一個好的設計值除了成像品質要達到規範標準外，在製造和組裝上的公差容忍度也要能合乎成本效益。

本論文公差模擬使用光學軟體 code v 做分析與評估，其分析公差可大致分為中心公差(centered tolerances)和偏心公差(decentered tolerances)兩種[4.2]，這兩種公差的主要分類區分方式為誤差產生方式

是對稱性的改變或是非對稱性的改變來加以區分。而 4.2 節和 4.3 節將針對中心公差和偏心公差加以詳述，並在 4.3 節討論設計值的公差分析。

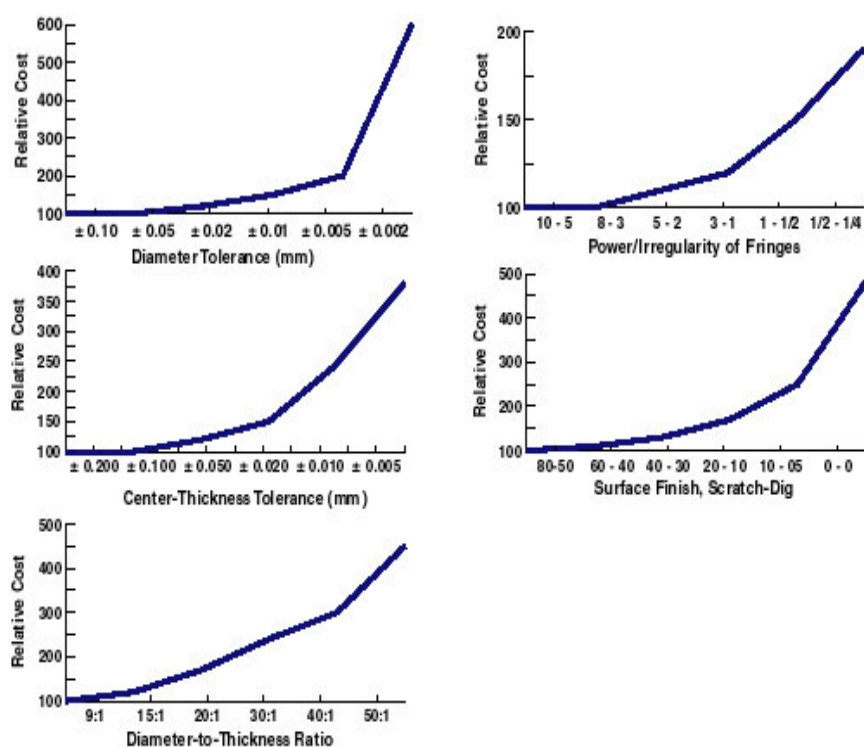


圖 39 取自 Edmund optic 對透鏡製造要求和相對要求價格的曲線

4.2 中心公差(centered tolerances)

中心公差是針對對稱光軸的製造或組裝上對系統產生的誤差，主要可能會影響為聚焦(focus)位置的改變[4.2]，而對成像品質的改變是一對稱光軸的形式，其誤差項目有：

一、半徑公差(radius tolerance)

針對系統中的每一片透鏡的兩個面的半徑做誤差的公差分析。在透鏡進行製造時，透鏡曲率不可能完全吻合設計值生產，而當改變時

對系統最大的影響是焦距會產生偏移，圖 39 中的 R 為曲面的半徑設計值，而 R' 為製造後的曲面半徑，會產生一半徑的誤差量，而此 R 和 R' 值皆以球座標定義。

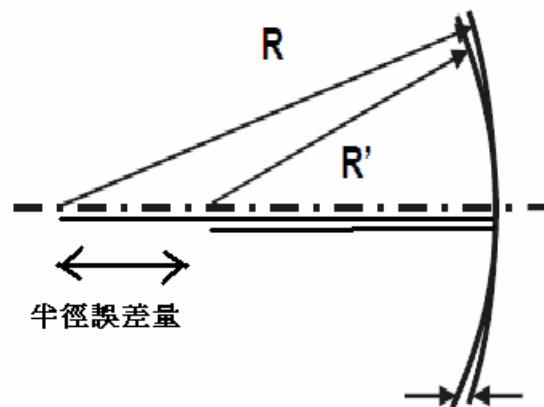


圖 40 半徑 R 和 R' 的關係圖

二、圓器測量公差(Test Plate Fit Tolerance)

為檢測透鏡曲率是否達到標準的另一種方式，其作法是把標準圓器覆蓋在待測透鏡上，兩者會因為不吻合處產生空氣間距，而產生干涉條紋，如圖 40，如果出現干涉條紋圈數越多即誤差越大，如果只有一圈就表示測量透鏡和標準圓器的最大空氣間距為測量波長的一半。

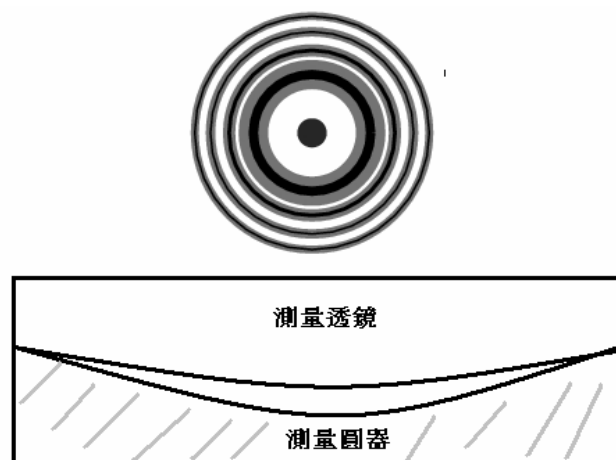


圖 41 牛頓環測試

三、中心厚度公差(center Thickness Tolerance)

當透鏡加工時，中心厚度會因為機械加工的精密度而有一定的誤差值，而此厚度的誤差容忍度，不單單透鏡是中心厚度改變誤差，也針對組裝時透鏡和透鏡間的間距誤差，以此來評估製造透鏡時的誤差和鏡組在組裝上的誤差，此厚度的改變方向以平行系統光軸(optical axis)做變化。

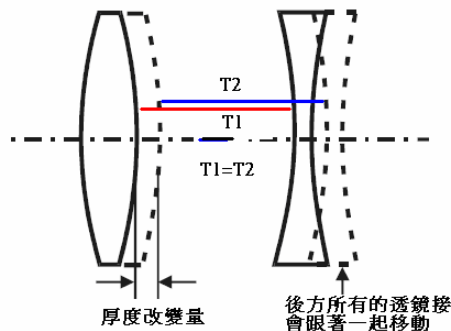


圖 42 厚度移動的相對關係

四、材料公差(Material Tolerances)

每個透鏡所用的玻璃材質，可能在製備或退火的過程中會出現折射率(Refractive index)或色散能力(abbe number)和標準值不同。而在討論此類誤差時，折射率公差是先針對所做公差的玻璃對所有波長的折射能力改變量都相等，另外再討論關於玻璃對每種波長產生不一樣的折射率。另外定義色散公差，色散公差以所定義的主波長為基準，且並不改變主波長的折射率，而是給與其他非主波長的波長一折射能力的誤差量。此值會由製造玻璃材質的廠商給予，而如需均勻度和色散材質均勻度非常高的玻璃材質則須特別訂製。

五、表面平整度公差(Irregularity Tolerances)

在每個光學透鏡面進行研磨完成後，透鏡表面並非一完整的球面，而會具有不規則的變形，量測方式類似圓器量測半徑誤差的方式，以產生干涉條紋來檢視。當在干涉暗紋的位置出現一個尖銳的峰谷值(pick to valley)時，即表示表面出現一個不平整的區域在平滑的球面透鏡表面上，以此檢視表面加工平整度。[4.3]

4.3 偏心公差(Decentered Tolerances)

主要是針對非對稱光軸的製造或組裝上對系統產生的誤差，其可能會影響的是不同的高度和不同視角的入射光線會不具對稱的改變，也由於非對稱光軸，所以其誤差量對系統的成像品質影響甚巨，其誤差項目為：[4.3]

一、位移公差(Element Displacement Tolerances)

指系統的每個單一透鏡可能產生偏離光軸的偏移量，產生的原因可能是組裝時透鏡外徑和鏡緣套筒(barrel)的內徑可能沒有完全固定在正確位置，而產生某一片透鏡的光軸和系統光軸有一平行的偏離量(圖 42)。

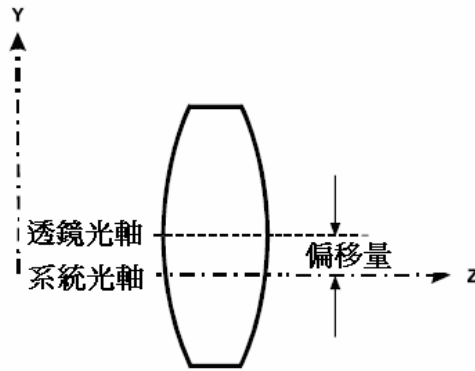


圖 43 位移量的意式圖

二、透鏡傾斜公差(Element Tilt Tolerances)

透鏡在鏡組組裝時可能因為夾具未把透鏡上下固定在同一位置而發生傾斜，即整個光學系統的光軸和單一透鏡的光軸並未平行，而是發生一傾斜角度誤差(圖 43)。

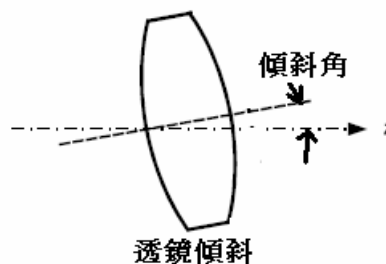


圖 44 透鏡傾斜的示意圖

三、透鏡產生楔型邊緣公差(Elenemt Wedge Tolerance)

當透鏡在進行面研磨或加工時，機械軸和光軸兩者有一偏移傾斜出現，導致透鏡邊緣厚度不一致(圖 44)，面和面之間的光軸(optical axis)已經偏移。

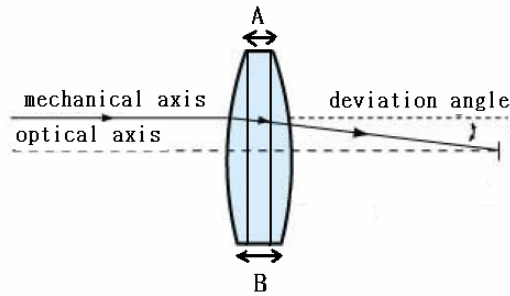


圖 45 透鏡上下厚度不一致

4.4 公差分析

4.4.1 決定公差的範圍

在做公差容忍度前，先討論此透鏡的每一片是否具有可製造性，在 Edmund optics 光學公司提到關於其可以代工(OEM)光學鏡片，在鏡片的孔徑要求視情況要預留一定的透鏡直徑以便在加工和夾具時可以完成組裝(圖 38)，而在每片透鏡的中心厚度(center thickness)和透鏡直徑要求一定比例，如 10:1(直徑:中心厚度)基本上在 Edmund optics 光學公司價格不會太高，但如果是 15:1(直徑:中心厚度)則價格將非線性成長(圖 38)。

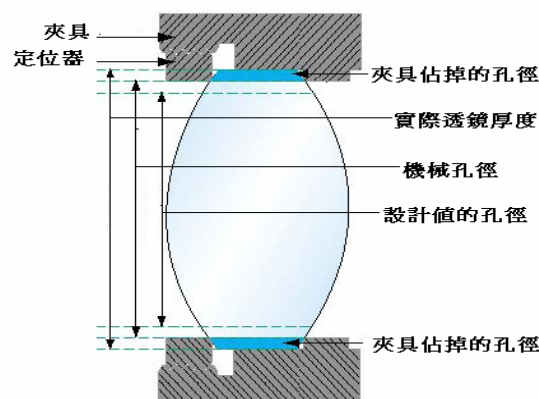
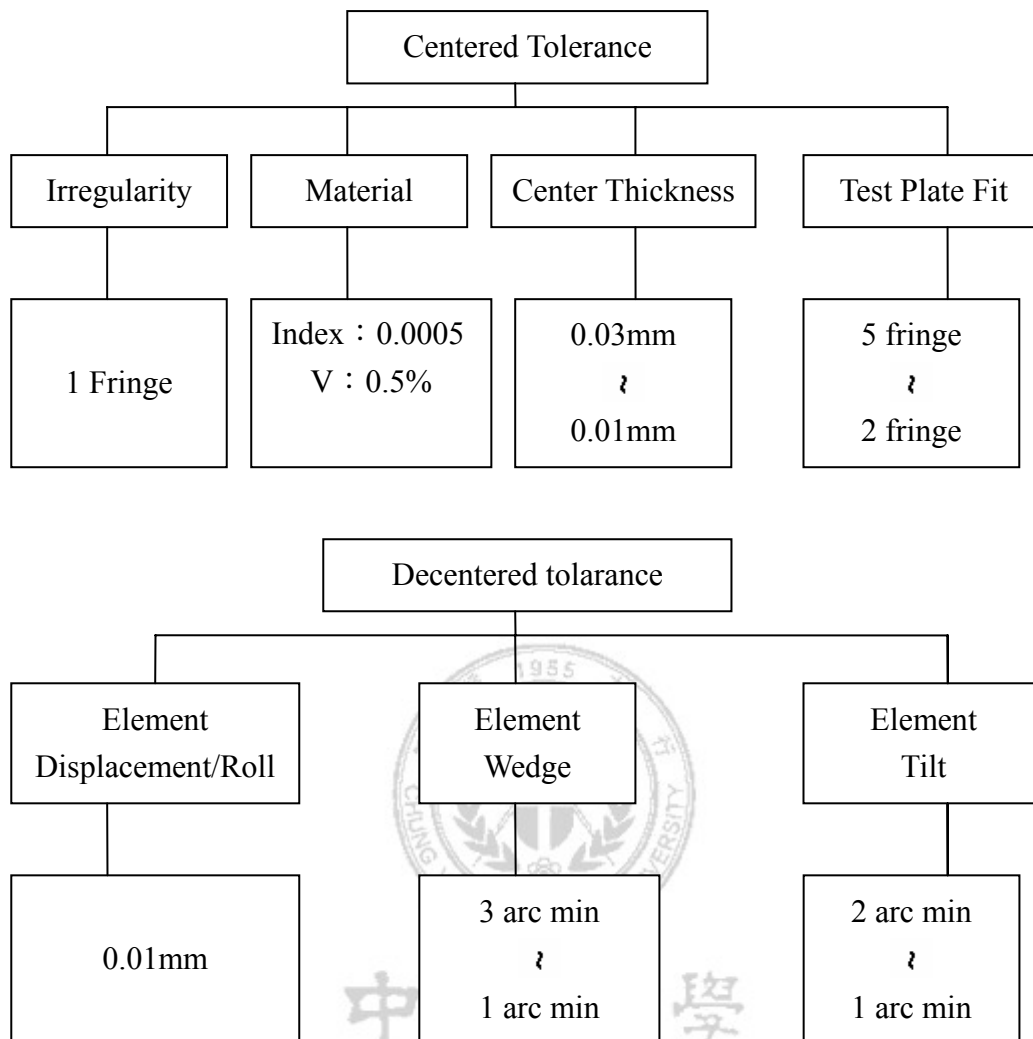


圖 46 Edmund optics 中透鏡直徑加大的原因

先給定此光學成像系統在誤差發生後，討論成像標準的依據，而

本鏡頭的公差將以 MTF 為誤差發生時，評斷成像品質優劣的標準，因為 MTF 是所有像差(aberration)的綜合性表現，以此評斷成像品質容忍度不會太偏頗或忽略可能影響成像品質的因素。而基本上本鏡頭的鏡片未使用非球面透鏡，所以一開始分析容忍度範圍以最外圍的視場為觀察重點。主要是依據當誤差量發生時，中心公差如鏡片曲面的變化量，半徑 R 值對最外圍的光線所造成的光程差誤差值最嚴重，但此也可能同樣發生在偏心公差中，最外圍的視場可能產生最大的誤差變化量，所以基本上最外圍的視場即邊緣光線被破壞下降最快的。在此先自己定義一公差對系統 MTF 影響的底限，最多系統 MTF 只能降到 0.4 或在 0.4 以上就可以接受此公差範圍，即 1.0Field 的 MTF 值以此作底線都要在 0.4 以上。而其次在考慮公差嚴謹範圍，在鏡片製造部分以 Edmund optics 做基準，而材質的公差和組裝部份將自訂，因為其主要是由玻璃廠所提供材質誤差數據和牽扯到各組裝廠本身組裝能力，其標準值難以找到一公正性的評估，所以這部份將是自己所定義一較寬容的值，以下將列出所討論公差類型和公差寬容度的範圍。(表 6)

表格 6 所自定的公差範圍



4.4.2 公差結果

分析 13 片投影機鏡頭，以上述的範圍在 code v 做公差分析，並以 MTF 做判斷標準，取 0 field、0.6 field、0.8 field 和 1.0 field 的子午面 (tangential) 的 MTF 值，弧矢面(sagittal)的 MTF 值作檢視，以下為公差分析表。

Centered Tolerance

Test Plate Fit (5fringe~2fringe) fringes in wavelengths at 546.1 nm

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

SURFACE	FRINFES	0 field		0.6field		0.8field		1.0field	
		MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	5	-1E-04	0.0001	0	0	0	0	-2E-04	0.0002
S2	5	0.0002	-2E-04	0	0	-1E-04	0.0001	0.0005	-5E-04
S3	5	-2E-04	0.0002	0.0002	-2E-04	0.0001	-1E-04	-5E-04	0.0005
S4	4	0.0003	-4E-04	-2E-04	0.0002	-2E-04	0.0002	0.0011	-0.001
S5	5	-2E-04	0.0002	0	0	0	0	-7E-04	0.0007
S6	3	0.0005	-5E-04	0.0001	-1E-04	-3E-04	0.0003	0.0015	-0.002
S7	5	-1E-04	0.0001	-1E-04	0.0001	-2E-04	0.0002	-3E-04	0.0003
S8	4	0.0008	-0.001	-0.002	0.0015	-6E-04	0.0005	0.0042	-0.004
S9	5	0.0005	-6E-04	-0.004	0.0036	-8E-04	0.0004	0.0008	-0.001
S10	4	-0.011	0.0058	0.0039	-0.006	-5E-04	-0.003	-0.01	0.0074
S11	3	0.0042	-0.006	-0.01	0.0074	-0.002	-4E-04	0.0051	-0.007
S12	4	-0.001	0.0009	-5E-04	0.0004	0	0	0	-1E-04
S13	2	-0.001	0.001	0.0052	-0.006	-6E-04	0	-7E-04	0.0002
STOP									
S15	2	0.0006	-8E-04	-0.004	0.0037	0.0001	-3E-04	0.0001	-4E-04
S16	3	-0.005	0.0035	0.0024	-0.003	0	-0.001	-0.005	0.0046
S17	3	0.0002	-2E-04	-0.002	0.0021	0.0002	-3E-04	-8E-04	0.0007
S18	3	0.0005	-7E-04	0.0027	-0.003	-7E-04	0.0006	0.0019	-0.002
S19	5	-7E-04	0.0007	0.0005	-6E-04	0.0003	-4E-04	-0.002	0.0016
S20	5	0.0004	-4E-04	-0.001	0.001	0.0001	-1E-04	-4E-04	0.0003
S21	3	0	0	0.0008	-8E-04	-2E-04	0.0002	0.0006	-6E-04
S22	5	-4E-04	0.0004	0.0007	-7E-04	0.0002	-2E-04	-9E-04	0.0009
S23	3	-5E-04	0.0004	-5E-04	0.0005	0.0004	-4E-04	-0.002	0.0015
S24	3	0.0004	-4E-04	0.0013	-0.001	-4E-04	0.0003	0.0011	-0.001
S25	5	0	0	-4E-04	0.0004	0.0001	-1E-04	-3E-04	0.0003
S26	5	0	0	0.0004	-4E-04	-1E-04	0.0001	0.0003	-3E-04
S27	5	0.0003	-3E-04	-0.001	0.0009	0.0001	-2E-04	-4E-04	0.0004
S28	3	0.0003	-3E-04	-1E-04	0	-1E-04	0.0001	0.0009	-9E-04
S29	3	-2E-04	0.0002	0.0001	-1E-04	0.0001	-1E-04	-7E-04	0.0007
S30	5	0.0004	-4E-04	-1E-04	0.0001	-1E-04	0.0001	0.0012	-0.001

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =TANGENTIAL

SURFACE	FRINFES	0 field		0.6field		0.8field		1.0field	
		MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	5	0.0001	-1E-04	0.0002	-2E-04	0	0	0	0
S2	5	-2E-04	0.0002	-4E-04	0.0004	0.0001	-1E-04	0	0
S3	5	0.0002	-2E-04	0.0004	-4E-04	0.0001	-1E-04	-1E-04	0.0001
S4	4	-4E-04	0.0004	-0.001	0.001	0	0	0.0001	-1E-04
S5	5	0.0003	-3E-04	0.0006	-6E-04	0	0	-1E-04	0.0001
S6	3	-7E-04	0.0007	-0.001	0.0014	0.0003	-3E-04	0.0001	-2E-04
S7	5	-1E-04	0.0001	0.0003	-3E-04	0	-1E-04	-1E-04	0
S8	4	-5E-04	0.0005	-0.004	0.0038	-8E-04	0.0007	-3E-04	0.0001
S9	5	0.0009	-0.001	-6E-04	0.0003	-0.002	0.0015	-8E-04	-1E-04
S10	4	0.0056	-0.009	0.0017	-0.006	-8E-04	-4E-04	-0.002	0.0016
S11	3	-0.002	0.0003	-0.004	0.0012	-0.004	0.002	0.0004	-0.001
S12	4	-0.001	0.0011	-5E-04	0.0004	-3E-04	0.0003	0.0001	-1E-04
S13	2	-0.001	0.0005	-0.001	0.0009	0.0023	-0.003	-6E-04	0
STOP									
S15	2	0.0001	-5E-04	0.0007	-9E-04	-0.002	0.0017	0.0001	-4E-04
S16	3	0.0038	-0.005	0.0014	-0.003	-1E-04	-3E-04	-0.001	0.0012
S17	3	0.0003	-4E-04	0.0011	-0.001	-0.001	0.001	0.0004	-5E-04
S18	3	-0.001	0.0011	-0.002	0.0022	0.0017	-0.002	-2E-04	-3E-04
S19	5	0.0016	-0.002	0.0014	-0.001	-2E-04	0.0001	-3E-04	0.0002
S20	5	-1E-04	0.0001	0.0005	-5E-04	-4E-04	0.0004	0.0005	-5E-04
S21	3	-5E-04	0.0004	-7E-04	0.0007	0.0005	-5E-04	-2E-04	0.0002
S22	5	0.0009	-9E-04	0.0007	-7E-04	0.0001	-1E-04	-2E-04	0.0002
S23	3	0.0004	-4E-04	0.0013	-0.001	-5E-04	0.0005	-1E-04	0
S24	3	-1E-04	0.0001	-0.001	0.0011	0.0008	-9E-04	0	-1E-04
S25	5	-2E-04	0.0002	0.0003	-3E-04	-1E-04	0.0001	0.0001	-1E-04
S26	5	0.0002	-2E-04	-3E-04	0.0003	0.0001	-1E-04	-1E-04	0.0001
S27	5	0	0	0.0005	-5E-04	-4E-04	0.0004	0.0004	-4E-04
S28	3	-1E-04	0.0001	-8E-04	0.0008	-1E-04	0.0001	-1E-04	0.0001
S29	3	0.0001	-1E-04	0.0006	-6E-04	0	0	0.0001	-1E-04
S30	5	-2E-04	0.0002	-0.001	0.001	-1E-04	0.0001	-1E-04	0.0001

Center Thickness (0.03mm~0.01mm)

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

		0field		0.6field		0.8field		1.0field	
<i>SURFACE</i>	Thickness TOL	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	0.03	0	0	2E-04	-2E-04	0	0	1E-04	-1E-04
S2	0.02	1E-04	-1E-04	2E-04	-2E-04	-1E-04	1E-04	1E-04	-1E-04
S3	0.02	0	0	4E-04	-4E-04	-1E-04	1E-04	2E-04	-2E-04
S4	0.01	2E-04	-2E-04	-2E-04	2E-04	-1E-04	1E-04	5E-04	-5E-04
S5	0.01	3E-04	-3E-04	0	0	-3E-04	3E-04	9E-04	-9E-04
S6	0.01	5E-04	-6E-04	0	0	-6E-04	6E-04	0.002	-0.002
S7	0.01	7E-04	-8E-04	1E-04	-1E-04	-7E-04	7E-04	0.003	-0.003
S8	0.01	0.002	-0.002	-0.001	0.001	-0.001	0.001	0.005	-0.005
S9	0.01	0.001	-0.001	-4E-04	4E-04	-7E-04	7E-04	0.003	-0.003
S10	0.01	0.007	-0.017	-0.021	0.012	-0.006	-0.002	0.016	-0.021
S11	0.01	0.003	-0.004	-0.003	0.003	-0.001	8E-04	0.006	-0.007
S12	0.01	0.003	-0.003	-0.003	0.002	-0.001	8E-04	0.006	-0.007
S13	0.01	0.004	-0.006	-0.006	0.005	-0.002	0.001	0.011	-0.011
STOP	0.01	0.004	-0.006	-0.006	0.005	-0.002	0.001	0.011	-0.011
S15	0.01	0.003	-0.004	-0.003	0.003	-0.001	9E-04	0.008	-0.008
S16	0.01	2E-04	-3E-04	4E-04	-5E-04	-2E-04	2E-04	7E-04	-7E-04
S17	0.01	2E-04	-2E-04	2E-04	-2E-04	-2E-04	2E-04	7E-04	-8E-04
S18	0.01	-2E-04	1E-04	-0.001	0.001	2E-04	-2E-04	-3E-04	2E-04
S19	0.03	-0.001	0.001	-0.001	0.001	7E-04	-7E-04	-0.003	0.003
S20	0.03	-7E-04	6E-04	-8E-04	7E-04	4E-04	-4E-04	-0.001	0.001
S21	0.02	-7E-04	6E-04	-0.001	0.001	5E-04	-5E-04	-0.002	0.002
S22	0.03	-0.001	9E-04	-1E-04	0	5E-04	-5E-04	-0.002	0.002
S23	0.03	-4E-04	4E-04	8E-04	-8E-04	0	0	-7E-04	7E-04
S24	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
S25	0.03	-2E-04	2E-04	0	0	0	0	-1E-04	1E-04
S26	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
S27	0.03	-3E-04	3E-04	0	0	0	0	-2E-04	1E-04
S28	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
S29	0.03	-1E-04	1E-04	0	0	0	0	-1E-04	1E-04
S30	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =TANGENTIAL

		0field		0.6field		0.8field		1.0field	
<i>SURFACE</i>	Thickness TOL	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	0.03	0	0	0	0	2E-04	-2E-04	-1E-04	1E-04
S2	0.02	1E-04	-1E-04	-1E-04	1E-04	2E-04	-2E-04	-1E-04	1E-04
S3	0.02	0	0	-2E-04	2E-04	3E-04	-3E-04	-2E-04	2E-04
S4	0.01	2E-04	-2E-04	-4E-04	4E-04	0	0	1E-04	-1E-04
S5	0.01	3E-04	-3E-04	-8E-04	8E-04	1E-04	-2E-04	0	-1E-04
S6	0.01	5E-04	-6E-04	-0.002	0.002	2E-04	-3E-04	-1E-04	-2E-04
S7	0.01	7E-04	-8E-04	-0.002	0.002	3E-04	-4E-04	-2E-04	-2E-04
S8	0.01	0.002	-0.002	-0.004	0.004	-2E-04	-1E-04	-1E-04	-6E-04
S9	0.01	0.001	-0.001	-0.003	0.003	1E-04	-3E-04	-1E-04	-3E-04
S10	0.01	0.007	-0.017	-0.015	0.005	-0.008	0.002	0.002	-0.004
S11	0.01	0.003	-0.004	-0.005	0.004	-4E-04	2E-04	3E-04	-7E-04
S12	0.01	0.003	-0.003	-0.005	0.005	-4E-04	2E-04	1E-04	-5E-04
S13	0.01	0.004	-0.006	-0.009	0.007	-0.002	8E-04	2E-04	-0.001
STOP	0.01	0.004	-0.006	-0.009	0.007	-0.002	8E-04	2E-04	-0.001
S15	0.01	0.003	-0.004	-0.006	0.005	-6E-04	3E-04	1E-04	-7E-04
S16	0.01	2E-04	-3E-04	-6E-04	6E-04	4E-04	-5E-04	-3E-04	2E-04
S17	0.01	2E-04	-2E-04	-7E-04	7E-04	3E-04	-3E-04	-1E-04	1E-04
S18	0.01	-2E-04	1E-04	3E-04	-4E-04	-6E-04	6E-04	-1E-04	0
S19	0.03	-0.001	0.001	0.002	-0.003	-0.001	9E-04	-7E-04	2E-04
S20	0.03	-7E-04	6E-04	0.001	-0.001	-6E-04	6E-04	-3E-04	2E-04
S21	0.02	-7E-04	6E-04	0.002	-0.002	-0.001	9E-04	-2E-04	0
S22	0.03	-0.001	9E-04	0.002	-0.002	-4E-04	4E-04	-3E-04	1E-04
S23	0.03	-4E-04	4E-04	4E-04	-5E-04	3E-04	-3E-04	-1E-04	1E-04
S24	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
S25	0.03	-2E-04	2E-04	1E-04	-1E-04	0	0	0	0
S26	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
S27	0.03	-3E-04	3E-04	0	0	0	0	0	0
S28	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
S29	0.03	-1E-04	1E-04	1E-04	-1E-04	0	0	0	0
S30	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0

Irregularity(1 fringe)

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL 0 degree

		0field		0.6field		0.8field		1.0field	
SURFACE	IRREGULAR FRINGE 0 Degree	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	1	0.0001	-0.0001	0	0	0	0	0.0001	-0.0001
S2	1	-0.0001	0.0001	0.0001	-0.0001	0	0	-0.0001	0.0001
S3	1	0.0002	-0.0002	-0.0001	0.0001	0	0	0.0003	-0.0003
S4	1	-0.0004	0.0004	0.0001	-0.0001	0	0	-0.0003	0.0003
S5	1	0.0007	-0.0007	-0.0005	0.0004	0.0002	-0.0002	0.0005	-0.0005
S6	1	-0.0009	0.0008	0.0006	-0.0007	-0.0003	0.0003	-0.0005	0.0005
S7	1	0.0014	-0.0018	-0.001	0.0008	0.0003	-0.0003	0.0013	-0.0013
S8	1	-0.0035	0.0022	0.0013	-0.0016	-0.0006	0.0006	-0.0018	0.0018
S9	1	0.003	-0.0097	-0.0063	0.0025	0.002	-0.002	0.0026	-0.0026
S10	1	-0.0309	-0.002	0.001	-0.0185	-0.0047	0.0046	-0.0053	0.0053
S11	1	-0.005	-0.0386	-0.025	-0.0005	0.0056	-0.0057	0.0058	-0.0059
S12	1	-0.0005	0.0005	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001
S13	1	-0.0374	-0.0049	-0.0016	-0.0257	-0.0058	0.0058	-0.0057	0.0057
STOP									
S15	1	0.0018	-0.0186	-0.0133	0.0023	0.0037	-0.0037	0.0037	-0.0037
S16	1	-0.0178	0.0016	-0.0005	-0.0093	-0.0034	0.0033	-0.0033	0.0033
S17	1	0.0024	-0.0147	-0.0092	0.0018	0.003	-0.003	0.0031	-0.0032
S18	1	-0.0026	0.0018	0.0016	-0.0023	-0.0009	0.0009	-0.0007	0.0007
S19	1	-0.0045	0.0024	0.0011	-0.002	-0.001	0.001	-0.0016	0.0016
S20	1	0.0029	-0.007	-0.0042	0.0018	0.0017	-0.0017	0.0019	-0.0019
S21	1	-0.002	0.0015	0.001	-0.0013	-0.0006	0.0006	-0.0006	0.0006
S22	1	-0.0032	0.002	0.001	-0.0016	-0.0008	0.0008	-0.0012	0.0012
S23	1	0.0018	-0.0027	-0.0015	0.001	0.0008	-0.0008	0.0007	-0.0007
S24	1	-0.0022	0.0016	0.0013	-0.0017	-0.0008	0.0008	-0.0005	0.0005
S25	1	0.0016	-0.0023	-0.0014	0.001	0.0007	-0.0007	0.0006	-0.0006
S26	1	-0.0023	0.0016	0.001	-0.0014	-0.0007	0.0007	-0.0005	0.0005
S27	1	0.0023	-0.004	-0.0025	0.0015	0.0012	-0.0012	0.0009	-0.0009
S28	1	0.0001	-0.0001	0	0	0	0	0.0003	-0.0003
S29	1	-0.0001	0.0001	0	0	0	0	-0.0002	0.0002
S30	1	0.0001	-0.0001	0	0	0	0	0.0002	-0.0002

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL 45 degree

		0field		0.6field		0.8field		1.0field	
SURFACE	IRREGULAR FRINGE 45 Degree (CYD)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	1	-0.0001	0	0	0	0	0	-0.0001	0.0001
S5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	1	0.0001	-0.0001	0	0	-0.0001	0	0.0002	-0.0003
S7	1	0	-0.0001	-0.0001	0	-0.0001	0	0.0001	-0.0001
S8	1	-0.0005	0.0001	0	-0.0001	0.0001	-0.0002	-0.0007	0.0007
S9	1	-0.001	-0.0011	-0.0012	-0.0004	-0.0005	-0.0004	-0.0001	-0.0003
S10	1	-0.0063	-0.0047	-0.0073	-0.005	-0.0019	-0.0023	-0.0022	0.0001
S11	1	-0.0066	-0.0081	-0.0073	-0.0042	-0.0032	-0.0029	-0.0007	-0.0026
S12	1	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	0	0	0	0
S13	1	-0.0076	-0.007	-0.0045	-0.0073	-0.0034	-0.0032	-0.002	-0.0018
STOP									
S15	1	-0.0027	-0.0031	-0.0034	-0.0014	-0.0013	-0.0014	-0.0007	-0.0008
S16	1	-0.0026	-0.0028	-0.0027	-0.0015	-0.0012	-0.0011	0	-0.0013
S17	1	-0.002	-0.0021	-0.0019	-0.0013	-0.0009	-0.0009	-0.0006	-0.0004
S18	1	-0.0001	-0.0002	0.0002	-0.0004	-0.0002	0	0.0002	-0.0003
S19	1	-0.0005	-0.0002	-0.0004	-0.0001	0	-0.0002	-0.0003	0.0002
S20	1	-0.0006	-0.0007	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0003	-0.0002	-0.0001
S21	1	-0.0001	-0.0001	0	-0.0002	-0.0001	0	0	-0.0001
S22	1	-0.0003	-0.0001	-0.0002	-0.0001	0	-0.0001	-0.0002	0.0002
S23	1	-0.0002	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0	-0.0001	-0.0001	0.0001
S24	1	-0.0001	-0.0002	0.0001	-0.0003	-0.0001	0	0.0001	-0.0001
S25	1	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0	-0.0001	-0.0001	0
S26	1	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0	0	-0.0001
S27	1	-0.0003	-0.0003	-0.0003	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0
S28	1	0	0	0	0	0	0	0.0002	-0.0002
S29	1	0	0	0	0	0	0	-0.0001	0.0001
S30	1	0	0	0	0	0	0	0.0001	-0.0001

Irregularity(1 fringe)

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH = TANGENTIAL 0 degree

		0field		0.6field		0.8field		1.0field	
SURFACE	IRREGULAR FRINGE 0 Degree	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	1	0	0	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	0	0
S4	1	0.0002	-0.0002	0.0002	-0.0002	0	0	0	0
S5	1	0	0	0	0	-0.0003	0.0002	-0.0001	0.0001
S6	1	-0.0002	0.0002	-0.0002	0.0002	0.0004	-0.0005	0.0001	-0.0001
S7	1	-0.0002	0.0002	-0.0003	0.0003	-0.0005	0.0004	-0.0001	0.0001
S8	1	0.0001	-0.0001	0.0005	-0.0005	0.0005	-0.0005	0.0002	-0.0002
S9	1	0.0002	-0.0002	0.0012	-0.0012	-0.0036	0.0014	-0.0013	0.0004
S10	1	0.0011	-0.0011	-0.0029	0.0029	0.0002	-0.0102	-0.0006	-0.0035
S11	1	-0.0002	0.0001	0.0031	-0.0039	-0.0146	-0.0009	-0.0057	-0.0012
S12	1	-0.0003	0.0003	-0.0001	0.0001	0	-0.0001	0.0001	-0.0001
S13	1	-0.0005	0.0004	-0.0042	0.0041	-0.0021	-0.016	-0.0021	-0.0065
STOP									
S15	1	0.0001	-0.0002	0.0026	-0.0026	-0.0012	0.0001	-0.0031	-0.0007
S16	1	-0.0004	0.0004	-0.0025	0.0025	-0.0007	-0.0057	-0.0015	-0.0017
S17	1	0.0001	-0.0001	0.002	-0.002	-0.0055	0.0007	-0.0016	-0.0001
S18	1	-0.0003	0.0003	-0.0001	0.0001	0.001	-0.0015	0.0001	-0.0004
S19	1	0.0005	-0.0005	-0.0003	0.0003	0.0005	-0.001	0	-0.0001
S20	1	0	0	0.0011	-0.0011	-0.0024	0.0009	-0.0005	-0.0002
S21	1	-0.0001	0.0001	-0.0004	0.0004	0.0006	-0.0001	0	-0.0001
S22	1	0.0003	-0.0003	-0.0003	0.0003	0.0005	-0.0001	0	-0.0001
S23	1	0	0	0.0006	-0.0006	-0.0009	0.0005	-0.0002	0
S24	1	0	0	-0.0007	0.0007	0.0007	-0.001	0.0001	-0.0002
S25	1	0	0	0.0006	-0.0006	-0.0001	0.0005	-0.0001	0
S26	1	0	0	-0.0006	0.0006	0.0005	-0.0001	0	-0.0001
S27	1	0	0	0.001	-0.001	-0.0014	0.0001	-0.0002	-0.0001
S28	1	0	0	-0.0003	0.0003	0	0	0	0
S29	1	0	0	0.0002	-0.0002	0	0	0	0
S30	1	0	0	-0.0002	0.0002	0	0	0	0

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH = TANGENTIAL 45 degree

		0field		0.6field		0.8field		1.0field	
SURFACE	IRREGULAR FRINGE 45 Degree (CYD)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)	MTF (+)	MTF (-)
S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	1	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001
S5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	1	-0.0001	0.0001	-0.0002	0.0002	0	-0.0001	0.0002	-0.0003
S7	1	-0.0001	0	-0.0001	0.0001	0	-0.0001	0.0001	-0.0001
S8	1	0.0002	-0.0005	0.0006	-0.0001	-0.0002	0.0001	-0.0007	0.0007
S9	1	-0.0001	-0.001	-0.0001	-0.0007	-0.0009	-0.0005	-0.0001	-0.0003
S10	1	-0.0045	-0.0057	-0.0021	-0.0041	-0.0031	-0.0036	-0.0022	0.0001
S11	1	-0.0079	-0.0071	-0.0053	-0.0045	-0.0055	-0.0043	-0.0007	-0.0026
S12	1	-0.0002	0.0002	-0.0001	0.0001	0	0	0	0
S13	1	-0.0071	-0.0074	-0.0053	-0.0041	-0.0046	-0.006	-0.002	-0.0011
STOP									
S15	1	-0.003	-0.0031	-0.0011	-0.0022	-0.0026	-0.0017	-0.0007	-0.0001
S16	1	-0.003	-0.0026	-0.0024	-0.0012	-0.0022	-0.0016	0	-0.0013
S17	1	-0.002	-0.0021	-0.0012	-0.0016	-0.0016	-0.0013	-0.0006	-0.0004
S18	1	-0.0003	0	-0.0004	0.0002	0.0001	-0.0003	0.0002	-0.0003
S19	1	-0.0001	-0.0006	0.0001	-0.0005	-0.0003	0	-0.0003	0.0002
S20	1	-0.0007	-0.0007	-0.0004	-0.0005	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001
S21	1	-0.0001	0	-0.0001	0	0	-0.0001	0	-0.0001
S22	1	0	-0.0004	0.0001	-0.0003	-0.0002	0	-0.0002	0.0002
S23	1	-0.0002	-0.0002	0	-0.0002	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001
S24	1	-0.0001	-0.0001	-0.0002	0	0	-0.0002	0.0001	-0.0001
S25	1	-0.0001	-0.0001	0	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0
S26	1	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0	-0.0001	-0.0001	0	-0.0001
S27	1	-0.0003	-0.0003	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0001	-0.0001	0
S28	1	0	0	-0.0001	0.0001	0	0	0.0002	-0.0002
S29	1	0	0	0.0001	-0.0001	0	0	-0.0001	0.0001
S30	1	0	0	-0.0001	0.0001	0	0	0.0001	-0.0001

Material(Index : 0.0005 ,Vd : 0.5%)

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

	0field						0.6field						0.8field						1.0field					
SURF ACE	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)
S1	5E-04	-5E-04	4E-04	0.005	-1E-04	1E-04	5E-04	-3E-04	3E-04	0.005	-0.002	0.002	5E-04	2E-04	-2E-04	0.005	1E-04	-1E-04	5E-04	-0.001	0.001	0.005	1E-04	-1E-04
S2	5E-04	4E-04	-5E-04	0.005	7E-04	-8E-04	5E-04	4E-04	-4E-04	0.005	0.007	-0.009	5E-04	-2E-04	2E-04	0.005	-3E-04	3E-04	5E-04	0.001	-0.001	0.005	-3E-04	3E-04
S3	5E-04	-5E-04	5E-04	0.005	-4E-04	4E-04	5E-04	-5E-04	5E-04	0.005	-0.002	0.002	5E-04	2E-04	-2E-04	0.005	1E-04	-1E-04	5E-04	-0.001	0.001	0.005	1E-04	-1E-04
S4	5E-04	2E-04	-2E-04	0.005	9E-04	-0.001	5E-04	4E-04	-4E-04	0.005	0.003	-0.003	5E-04	1E-04	-1E-04	0.005	-1E-04	1E-04	5E-04	6E-04	-7E-04	0.005	-1E-04	1E-04
S5	5E-04	-0.001	0.001	0.005	0.002	-0.003	5E-04	0.003	-0.003	0.005	0.002	-0.002	5E-04	2E-04	-4E-04	0.005	-2E-04	-1E-04	5E-04	-0.002	0.002	0.005	-1E-04	-2E-04
S6	5E-04	-8E-04	-3E-04	0.005	-0.021	0.007	5E-04	-0.008	0.007	0.005	-0.014	0.005	5E-04	6E-04	-0.001	0.005	-0.005	-0.005	5E-04	-0.003	0.002	0.005	-0.005	-0.004
S7	5E-04	-7E-04	0	0.005	0.004	-0.006	5E-04	0.005	-0.006	0.005	0.002	-0.003	5E-04	-9E-04	4E-04	0.005	-8E-04	-7E-04	5E-04	0.001	-0.002	0.005	-5E-04	-8E-04
S8	5E-04	0.002	-0.004	0.005	-0.004	0.003	5E-04	-0.008	0.006	0.005	-8E-04	3E-04	5E-04	-4E-04	-0.001	0.005	-3E-04	-2E-04	5E-04	6E-04	-0.002	0.005	-4E-04	-1E-04
S9	5E-04	0.001	-0.002	0.005	0.005	-0.01	5E-04	0.005	-0.006	0.005	-0.012	0.004	5E-04	-0.001	8E-04	0.005	-0.001	-0.002	5E-04	0.003	-0.003	0.005	-9E-04	-0.002
S10	5E-04	-0.002	0.001	0.005	-0.003	0.002	5E-04	-0.006	0.005	0.005	0.002	-0.003	5E-04	6E-04	-0.001	0.005	-3E-04	0	5E-04	-0.003	0.003	0.005	-3E-04	1E-04
S11	5E-04	3E-04	-3E-04	0.005	0.003	-0.003	5E-04	6E-04	-6E-04	0.005	-0.005	0.003	5E-04	-2E-04	2E-04	0.005	0	-5E-04	5E-04	6E-04	-6E-04	0.005	1E-04	-5E-04
S12	5E-04	0	0	0.005	-0.002	0.002	5E-04	-9E-04	8E-04	0.005	0.002	-0.003	5E-04	-1E-04	0	0.005	-2E-04	1E-04	5E-04	4E-04	-4E-04	0.005	-2E-04	1E-04
S13	5E-04	-0.001	9E-04	0.005	-0.002	0.002	5E-04	-0.002	0.002	0.005	0.003	-0.004	5E-04	7E-04	-8E-04	0.005	-2E-04	1E-04	5E-04	-0.003	0.003	0.005	-3E-04	1E-04
STOP	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S15	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S16	5E-04	3E-04	-3E-04	0.005	0.003	-0.003	5E-04	1E-04	-1E-04	0.005	9E-04	-0.001	5E-04	0	0	0.005	-2E-04	-2E-04	5E-04	0	0	0.005	-1E-04	-2E-04
S17	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S18	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S19	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S20	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S21	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S22	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S23	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S24	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S25	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S26	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S27	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S28	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S29	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S30	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =TANGENTIAL

	0field						0.6field						0.8field						1.0field					
SURF ACE	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)	Index	MTF (+)	MTF (-)	V(%)	MTF (+)	MTF (-)
S1	5E-04	-5E-04	4E-04	0.005	-1E-04	1E-04	5E-04	0.001	-0.001	0.005	0	0	5E-04	-4E-04	4E-04	0.005	-0.001	0.001	5E-04	0	-1E-04	0.005	5E-04	-8E-04
S2	5E-04	4E-04	-5E-04	0.005	7E-04	-8E-04	5E-04	-0.001	0.001	0.005	0	0	5E-04	4E-04	-4E-04	0.005	0.004	-0.004	5E-04	-2E-04	1E-04	0.005	-0.005	-4E-04
S3	5E-04	-5E-04	5E-04	0.005	-4E-04	4E-04	5E-04	0.001	-0.001	0.005	-1E-04	1E-04	5E-04	-5E-04	5E-04	0.005	-0.002	0.002	5E-04	-1E-04	0	0.005	5E-04	-9E-04
S4	5E-04	2E-04	-2E-04	0.005	9E-04	-0.001	5E-04	6E-04	6E-04	0.005	2E-04	-3E-04	5E-04	1E-04	-1E-04	0.005	0.002	-0.002	5E-04	-2E-04	1E-04	0.005	-0.001	5E-04
S5	5E-04	-0.001	0.001	0.005	0.002	-0.003	5E-04	7E-04	-8E-04	0.005	6E-04	-0.001	5E-04	0.001	-0.001	0.005	0.001	-0.002	5E-04	-3E-04	2E-04	0.005	-5E-04	3E-04
S6	5E-04	-8E-04	-3E-04	0.005	-0.021	0.007	5E-04	0.004	-0.005	0.005	-0.011	-0.002	5E-04	-0.005	0.003	0.005	-0.009	0.004	5E-04	-5E-04	-0.001	0.005	-3E-04	-0.003
S7	5E-04	-7E-04	0	0.005	0.004	-0.006	5E-04	-0.003	0.003	0.005	8E-04	-0.003	5E-04	0.002	-0.003	0.005	0.001	-0.002	5E-04	-0.001	-1E-04	0.005	-5E-04	1E-04
S8	5E-04	0.002	-0.004	0.005	-0.004	0.003	5E-04	0.001	-0.003	0.005	-0.001	7E-04	5E-04	-0.004	0.002	0.005	-4E-04	2E-04	5E-04	7E-04	-0.002	0.005	-2E-04	1E-04
S9	5E-04	0.001	-0.002	0.005	0.005	-0.01	5E-04	-0.004	0.003	0.005	9E-04	-0.005	5E-04	0.002	-0.004	0.005	-0.01	0.001	5E-04	-6E-04	-0.001	0.005	-0.002	-0.007
S10	5E-04	-0.002	0.001	0.005	-0.003	0.002	5E-04	0.003	-0.003	0.005	-0.001	7E-04	5E-04	-0.003	0.002	0.005	0.002	-0.002	5E-04	-7E-04	-6E-04	0.005	-0.001	4E-04
S11	5E-04	3E-04	-3E-04	0.005	0.003	-0.003	5E-04	6E-04	6E-04	0.005	9E-04	-0.001	5E-04	3E-04	-3E-04	0.005	-0.004	0.002	5E-04	0	0	0.005	2E-04	-0.002
S12	5E-04	0	0	0.005	-0.002	0.002	5E-04	-4E-04	3E-04	0.005	-7E-04	5E-04	5E-04	0	-1E-04	0.005	0.001	-0.002	5E-04	2E-04	-3E-04	0.005	-0.001	4E-04
S13	5E-04	-0.001	9E-04	0.005	-0.002	0.002	5E-04	0.002	-0.003	0.005	-8E-04	6E-04	5E-04	-0.001	8E-04	0.005	0.002	-0.003	5E-04	-3E-04	-2E-04	0.005	-0.001	4E-04
STOP	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S15	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S16	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S17	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S18	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S19	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S20	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S21	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S22	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S23	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S24	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S25	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S26	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S27	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S28	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S29	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0
S30	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0	5E-04	0	0	0.005	0	0

Decentered Tolerance

0 field

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL Min(mm)	MTF (+)	MTF (-)
1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
		0	0		0	0		0	0
2	1.6	0	0	1	0	0	0.01	0	0
		-0.0001	-0.0001		0	0		0	0
3	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
		0	0		0	0		0	0
4	1	0	0	1	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0007	-0.0007
		0	0		-0.0004	-0.0004		-0.0022	-0.0022
5	1	0	0	1	-0.0053	-0.0053	0.01	-0.0102	-0.0102
		-0.0001	-0.0001		-0.0139	-0.0139		-0.0277	-0.0277
6	1	-0.0012	-0.0012				0.01⊗	-0.0013	-0.0013
		-0.004	-0.004					-0.0059	-0.0059
6.7				1	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0102	-0.0102
					-0.0005	-0.0005		-0.0324	-0.0324
7	1	-0.0005	-0.0005						
		-0.0016	-0.0016						
8	1	-0.0003	-0.0003	1	0	0	0.01	-0.0071	-0.0071
		-0.0009	-0.0009		-0.0001	-0.0001		-0.0194	-0.0194
9	1	-0.0001	-0.0001				0.01⊗	0	0
		-0.0005	-0.0005					-0.0004	-0.0004
9_10				1	0	0	0.01	-0.0001	-0.0001
					-0.0001	-0.0001		-0.0001	-0.0001
10	1.4	-0.0001	-0.0001						
		-0.0003	-0.0003						
11	1	0	0				0.01⊗	0	0
		-0.0003	-0.0003					-0.0001	-0.0001
11_12				1	0	0	0.01	0	0
					-0.0001	-0.0001		0	0
12	1.6	-0.0002	-0.0002						
		-0.0005	-0.0005						
13	2.1	0	0	1.4	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0001	-0.0001
		-0.0001	-0.0001		-0.0005	-0.0005		-0.0002	-0.0002
14	2.8	-0.0003	-0.0003	1.7	0	0			
		-0.0007	-0.0007		0	0			
15	1.3	-0.0001	-0.0001	1	0	0			
		-0.0004	-0.0004		-0.0003	-0.0003			
16	2.8	0	0	1.7	0	0			
		-0.0001	-0.0001		0	0			

AZIMUTH =TANGENTIAL

ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL Min(mm)	MTF (+)	MTF (-)
1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
		0	0		0	0		0	0
2	1.6	0	0	1	0	0	0.01	0	0
		-0.0001	-0.0001		0	0		0	0
3	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
		0	0		0	0		0	0
4	1	0	0	1	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0007	-0.0007
		0	0		-0.0004	-0.0004		-0.0022	-0.0022
5	1	0	0	1	-0.0053	-0.0053	0.01	-0.0102	-0.0102
		-0.0001	-0.0001		-0.0139	-0.0139		-0.0277	-0.0277
6	1	-0.0012	-0.0012				0.01⊗	-0.0013	-0.0013
		-0.004	-0.004					-0.0059	-0.0059
6.7				1	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0102	-0.0102
					-0.0005	-0.0005		-0.0324	-0.0324
7	1	-0.0005	-0.0005						
		-0.0016	-0.0016						
8	1	-0.0003	-0.0003	1	0	0	0.01	-0.0071	-0.0071
		-0.0009	-0.0009		-0.0001	-0.0001		-0.0194	-0.0194
9	1	-0.0001	-0.0001				0.01⊗	0	0
		-0.0005	-0.0005					-0.0004	-0.0004
9_10				1	0	0	0.01	-0.0001	-0.0001
					-0.0001	-0.0001		-0.0001	-0.0001
10	1.4	-0.0001	-0.0001						
		-0.0003	-0.0003						
11	1	0	0				0.01⊗	0	0
		-0.0003	-0.0003					-0.0001	-0.0001
11_12				1	0	0	0.01	0	0
					-0.0001	-0.0001		0	0
12	1.6	-0.0002	-0.0002						
		-0.0005	-0.0005						
13	2.1	0	0	1.4	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0001	-0.0001
		-0.0001	-0.0001		-0.0005	-0.0005		-0.0002	-0.0002
14	2.8	-0.0003	-0.0003	1.7	0	0			
		-0.0007	-0.0007		0	0			
15	1.3	-0.0001	-0.0001	1	0	0			
		-0.0004	-0.0004		-0.0003	-0.0003			
16	2.8	0	0	1.7	0	0			
		-0.0001	-0.0001		0	0			

0.6 field

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

	ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL Min(mm)	MTF (+)	MTF (-)
S1	1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S1			-0.0008	0.0007		-0.0002	0.0002		-0.0003	0.0003
S3	2	1.6	0	0	1	0	0	0.01	0	0
S3			-0.0026	0.0023		-0.0005	0.0003		0.0007	-0.0008
S5	3	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S5			-0.0025	0.0022		-0.0015	0.0012		-0.0014	0.0013
S7	4	1	0	0	1	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0007	-0.0007
S7			-0.0025	0.002		0.0003	-0.0032		0.0034	-0.0106
S9	5	1	-0.0003	-0.0003	1	-0.0035	-0.0035	0.01	-0.0089	-0.0089
S9			-0.0056	0.0036		0.0181	-0.0305		0.0229	-0.0563
S11	6	1	-0.0027	-0.0027				0.010	-0.0028	-0.0028
S11			-0.027	0.014					-0.0313	0.0163
	6_7				1	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0223	-0.0223
						-0.0059	0.0052		-0.1117	0.0057
S13	7	1	-0.0016	-0.0016						
S13			0.0104	-0.0182						
S15	8	1	-0.0009	-0.0009	1	-0.0008	-0.0008	0.01	-0.0043	-0.0043
S15			-0.0125	0.0083		-0.0062	0.0005		-0.0376	0.0157
S17	9	1	-0.0002	-0.0002				0.010	-0.0004	-0.0004
S17			-0.0067	0.0058					0.0066	-0.0112
	9_10				1	-0.0004	-0.0004	0.01	-0.0003	-0.0003
						0.0046	-0.0083		0.0075	-0.0089
S19	10	1.4	-0.0001	-0.0001						
S19			0.0021	-0.0023						
S20	11	1	-0.0001	-0.0001				0.010	0	0
S20			-0.0042	0.0039					0	-0.0001
	11_12				1	0	0	0.01	0	0
						0.0022	-0.0026		0.0016	-0.0016
S22	12	1.6	-0.0001	-0.0001						
S22			0.0036	-0.004						
S23	13	2.1	-0.0002	-0.0002	1.4	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0001	-0.0001
S23			-0.0052	0.0035		0.0051	-0.0074		-0.0053	0.0038
S25	14	2.8	-0.0001	-0.0001	1.7	0	0			
S25			-0.0068	0.0055		-0.0001	0.0001			
S27	15	1.3	0	0	1	0	0			
S27			-0.0052	0.0047		-0.0043	0.004			
S29	16	2.8	0	0	1.7	0	0			
S29			-0.0018	0.0011		-0.0001	0.0001			

AZIMUTH =TANGENTIAL

	ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT ARC mm	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL Min(mm)	MTF (+)	MTF (-)
S1	1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S1			-0.0008	0.0008		-0.0001	0.0001		-0.0003	0.0003
S3	2	1.6	-0.0001	-0.0001	1	0	0	0.01	0	0
S3			-0.0032	0.0032		-0.0034	0.0033		-0.002	0.0019
S5	3	1.2	-0.0001	-0.0001	1.7	0	0	0.01	0	0
S5			-0.0017	0.0016		-0.0011	0.0011		-0.001	0.001
S7	4	1	0	0	1	-0.0005	-0.0005	0.01	-0.0023	-0.0023
S7			-0.0045	0.0044		-0.0114	0.0104		-0.0172	0.0142
S9	5	1	-0.0003	-0.0003	1	-0.0129	-0.0129	0.01	-0.0274	-0.0274
S9			-0.0022	0.0022		-0.0069	0.0004		-0.0075	-0.0044
S11	6	1	-0.0053	-0.0053				0.010	-0.0071	-0.0071
S11			-0.0028	0.0013					-0.0023	0.0007
	6_7				1	-0.0005	-0.0005	0.01	-0.043	-0.043
						-0.0012	0.0011		-0.012	-0.0002
S13	7	1	-0.0026	-0.0026						
S13			0.0008	-0.0014						
S15	8	1	-0.0014	-0.0014	1	-0.0007	-0.0007	0.01	-0.018	-0.018
S15			-0.0013	0.0009		-0.0065	0.0062		0.0122	-0.0253
S17	9	1	-0.0005	-0.0005				0.010	-0.0007	-0.0007
S17			0.0014	-0.0015					0.01	-0.0106
	9_10				1	-0.0004	-0.0004	0.01	-0.0009	-0.0009
						0.0093	-0.0098		-0.002	0.0018
S19	10	1.4	-0.0003	-0.0003						
S19			-0.0057	0.0054						
S20	11	1	-0.0003	-0.0003				0.010	-0.0001	-0.0001
S20			0.003	-0.0031					0.0008	-0.0008
	11_12				1	-0.0001	-0.0001	0.01	-0.0001	-0.0001
						0.0042	-0.0043		-0.0012	0.0012
S22	12	1.6	-0.0005	-0.0005						
S22			-0.0006	0.0004						
S23	13	2.1	-0.0002	-0.0002	1.4	-0.0005	-0.0005	0.01	-0.0002	-0.0002
S23			-0.0071	0.0068		0.0114	-0.0121		-0.0081	0.0077
S25	14	2.8	-0.0007	-0.0007	1.7	0	0			
S25			-0.0156	0.0144		0	0			
S27	15	1.3	-0.0004	-0.0004	1	-0.0002	-0.0002			
S27			-0.0073	0.007		-0.0008	0.0008			
S29	16	2.8	-0.0001	-0.0001	1.7	0	0			
S29			-0.0136	0.0127		0	0			

0.8 field

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

	ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL	MTF (+)	MTF (-)
		ARC mm			ARC mm			Min(mm)		
S1	1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S1			-0.002	0.0015		0.0002	-2E-04		-5E-04	0.0005
S3	2	1.6	-1E-04	-1E-04	1	0	0	0.01	0	0
S3			-0.006	0.0063		-0.0066	0.0065		-0.004	0.0038
S5	3	1.2	-1E-04	-1E-04	1.7	0	0	0.01	0	0
S5			-0.003	0.003		-0.0011	0.0011		-0.002	0.0018
S7	4	1	-1E-04	-1E-04	1	-0.0005	-5E-04	0.01	-0.002	-0.002
S7			-0.008	0.0082		-0.0224	0.0213		-0.034	0.0311
S9	5	1	-4E-04	-4E-04	1	-0.0108	-0.011	0.01	-0.024	-0.0237
S9			-0.004	0.0039		-0.0212	0.0173		-0.023	0.0163
S11	6	1	-0.005	-0.005				0.01⊗	-0.007	-0.0068
S11			0.0022	-0.003					0.0035	-0.0044
	6.7				1	-0.0004	-4E-04	0.01	-0.041	-0.0413
						0.0002	-3E-04		0.004	-0.0111
S13	7	1	-0.003	-0.003						
S13			-0.002	0.0019						
S15	8	1	-0.001	-0.001	1	-0.0008	-8E-04	0.01	-0.015	-0.015
S15			0.0011	-0.001		-0.012	0.0117		0.0425	-0.0525
S17	9	1	-5E-04	-5E-04				0.01⊗	-8E-04	-0.0008
S17			0.004	-0.004					0.0174	-0.0181
	9.10				1	-0.0005	-5E-04	0.01	-9E-04	-0.0009
						0.0158	-0.016		-0.005	0.0053
S19	10	1.4	-2E-04	-2E-04						
S19			-0.012	0.0115						
S20	11	1	-3E-04	-3E-04				0.01⊗	-1E-04	-0.0001
S20			0.0064	-0.007					0.0023	-0.0023
	11.12				1	-0.0001	-1E-04	0.01	0	0
						0.0066	-0.007		-0.003	0.0026
S22	12	1.6	-4E-04	-4E-04						
S22			-0.004	0.0034						
S23	13	2.1	-3E-04	-3E-04	1.4	-0.0004	-4E-04	0.01	-3E-04	-0.0003
S23			-0.013	0.0125		0.0173	-0.018		-0.013	0.0129
S25	14	2.8	-6E-04	-6E-04	1.7	0	0			
S25			-0.025	0.0234		0	0			
S27	15	1.3	-3E-04	-3E-04	1	-0.0002	-2E-04			
S27			-0.012	0.0113		-0.0004	0.0004			
S29	16	2.8	-1E-04	-1E-04	1.7	0	0			
S29			-0.024	0.0225		0	0			

AZIMUTH =TANGENTIAL

	ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL	MTF (+)	MTF (-)
		ARC mm			ARC mm			Min(mm)		
S1	1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S1			-0	0.0005		-0.0001	1E-04		-0.0002	0.0002
S3	2	1.6	0	0	1	0	0	0.01	0	0
S3			-0	0.0013		-0.0007	4E-04		0	-0.0002
S5	3	1.2	-0	-0.0001	1.7	-0.0001	-0	0.01	0	0
S5			-0	0.0012		-0.0011	9E-04		-0.0009	0.0008
S7	4	1	0	0	1	-0.0003	-0	0.01	-0.0007	-0.0007
S7			-0	0.0012		-0.0017	-0		-0.0016	-0.0055
S9	5	1	-0	-0.0005	1	-0.0025	-0	0.01	-0.0079	-0.0079
S9			-0	0.0016		0.0064	-0.01		0.0068	-0.0272
S11	6	1	-0	-0.0033				0.01⊗	-0.0034	-0.0034
S11			-0.02	0.0043					-0.0179	0.0048
	6.7				1	-0.0001	-0	0.01	-0.0272	-0.0272
						-0.0025	0.002		-0.0764	-0.0187
S13	7	1	-0	-0.0022						
S13			0.004	-0.0115						
S15	8	1	-0	-0.0012	1	-0.0012	-0	0.01	-0.003	-0.003
S15			-0.01	0.0033		-0.0061	-0		-0.0174	0.0025
S17	9	1	-0	-0.0002				0.01⊗	-0.0006	-0.0006
S17			-0	0.0026					0.0027	-0.0082
	9.10				1	-0.0006	-0	0.01	-0.0003	-0.0003
						0.0019	-0.01		0.0033	-0.0045
S19	10	1.4	-0	-0.0001						
S19			6E-04	-0.0007						
S20	11	1	-0	-0.0001				0.01⊗	0	0
S20			-0	0.0017					0.0002	-0.0003
	11.12				1	0	0	0.01	0	0
						0.001	-0		0.0007	-0.0007
S22	12	1.6	-0	-0.0001						
S22			0.001	-0.0015						
S23	13	2.1	-0	-0.0003	1.4	-0.0002	-0	0.01	-0.0002	-0.0002
S23			-0	0.0019		0.0021	-0		-0.0036	0.0019
S25	14	2.8	-0	-0.0001	1.7	0	0			
S25			-0	0.0025		0	0			
S27	15	1.3	0	0	1	0	0			
S27			-0	0.0021		-0.002	0.002			
S29	16	2.8	0	0	1.7	0	0			
S29			-0	0.0004		0	0			

1.0 field

FREQUENCY : 35.00 L/mm

AZIMUTH =RADIAL

	ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL	MTF (+)	MTF (-)
		ARC mm			ARC mm			Min(mm)		
S1	1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S1			-0.002	0.0015		0.0002	-2E-04		-5E-04	0.0005
S3	2	1.6	-1E-04	-1E-04	1	0	0	0.01	0	0
S3			-0.006	0.0063		-0.0066	0.0065		-0.004	0.0038
S5	3	1.2	-1E-04	-1E-04	1.7	0	0	0.01	0	0
S5			-0.003	0.003		-0.0011	0.0011		-0.002	0.0018
S7	4	1	-1E-04	-1E-04	1	-0.0005	-5E-04	0.01	-0.002	-0.002
S7			-0.008	0.0082		-0.0224	0.0213		-0.034	0.0311
S9	5	1	-4E-04	-4E-04	1	-0.0108	-0.011	0.01	-0.024	-0.0237
S9			-0.004	0.0039		-0.0212	0.0173		-0.023	0.0163
S11	6	1	-0.005	-0.005				0.018	-0.007	-0.0068
S11			0.0022	-0.003					0.0035	-0.0044
	6.7				1	-0.0004	-4E-04	0.01	-0.041	-0.0413
						0.0002	-3E-04		0.004	-0.0111
S13	7	1	-0.003	-0.003						
S13			-0.002	0.0019						
S15	8	1	-0.001	-0.001	1	-0.0008	-8E-04	0.01	-0.015	-0.015
S15			0.0011	-0.001		-0.012	0.0117		0.0425	-0.0525
S17	9	1	-5E-04	-5E-04				0.018	-8E-04	-0.0008
S17			0.004	-0.004					0.0174	-0.0181
	9.10				1	-0.0005	-5E-04	0.01	-9E-04	-0.0009
						0.0158	-0.016		-0.005	0.0053
S19	10	1.4	-2E-04	-2E-04						
S19			-0.012	0.0115						
S20	11	1	-3E-04	-3E-04				0.018	-1E-04	-0.0001
S20			0.0064	-0.007					0.0023	-0.0023
	11.12				1	-0.0001	-1E-04	0.01	0	0
						0.0066	-0.007		-0.003	0.0026
S22	12	1.6	-4E-04	-4E-04						
S22			-0.004	0.0034						
S23	13	2.1	-3E-04	-3E-04	1.4	-0.0004	-4E-04	0.01	-3E-04	-0.0003
S23			-0.013	0.0125		0.0173	-0.018		-0.013	0.0129
S25	14	2.8	-6E-04	-6E-04	1.7	0	0			
S25			-0.025	0.0234		0	0			
S27	15	1.3	-3E-04	-3E-04	1	-0.0002	-2E-04			
S27			-0.012	0.0113		-0.0004	0.0004			
S29	16	2.8	-1E-04	-1E-04	1.7	0	0			
S29			-0.024	0.0225		0	0			

AZIMUTH =TANGENTIAL

	ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE	MTF (+)	MTF (-)	ELEMENT TILT	MTF (+)	MTF (-)	DECENTER / ROLL	MTF (+)	MTF (-)
		ARC mm			ARC mm			Min(mm)		
S1	1	1.2	0	0	1.7	0	0	0.01	0	0
S1			0.0001	-0.0001		-0.0001	0.0001		0	0
S3	2	1.6	0	0	1	0	0	0.01	0	0
S3			0.0005	-0.0009		-0.0001	-0.0003		-0.0004	0.0002
S5	3	1.2	-0.0001	-0.0001	1.7	-0.0001	-0.0001	0.01	0	0
S5			0	-0.0005		-0.0004	0.0002		0.0001	-0.0002
S7	4	1	-0.0001	-0.0001	1	-0.0003	-0.0003	0.01	-0.0007	-0.0007
S7			-0.0002	-0.0004		-0.0013	-0.0013		-0.0028	-0.0024
S9	5	1	-0.0006	-0.0006	1	-0.0012	-0.0012	0.01	-0.0058	-0.0058
S9			-0.0011	-0.0013		-0.0009	-0.0013		-0.0047	-0.005
S11	6	1	-0.0033	-0.0033				0.018	-0.0034	-0.0034
S11			-0.004	-0.0037					-0.0031	-0.0056
	6.7				1	-0.0001	-0.0001	0.01	-0.0273	-0.0273
						-0.0003	0.0002		-0.0317	-0.031
S13	7	1	-0.0024	-0.0024						
S13			-0.0027	-0.0031						
S15	8	1	-0.0013	-0.0013	1	-0.0015	-0.0015	0.01	-0.0015	-0.0015
S15			-0.0017	-0.0013		-0.0028	-0.0025		-0.0051	-0.0042
S17	9	1	-0.0002	-0.0002				0.018	-0.0008	-0.0008
S17			0.0002	-0.0006					-0.0024	-0.0023
	9.10				1	-0.0008	-0.0008	0.01	-0.0003	-0.0003
						-0.0014	-0.0027		-0.0008	0.0002
S19	10	1.4	0	0						
S19			0.0001	-0.0002						
S20	11	1	-0.0001	-0.0001				0.018	0	0
S20			0.0003	-0.0005					-0.0003	0.0003
	11.12				1	0	0	0.01	0	0
						-0.0001	-0.0001		-0.0002	0.0001
S22	12	1.6	-0.0001	-0.0001						
S22			0.0002	-0.0003						
S23	13	2.1	-0.0004	-0.0004	1.4	-0.0002	-0.0002	0.01	-0.0002	-0.0002
S23			-0.0022	-0.0004		-0.0003	-0.0007		-0.0013	-0.0002
S25	14	2.8	0	0	1.7	0	0			
S25			-0.0009	0.0003		0	0			
S27	15	1.3	0	0	1	0	0			
S27			0.0002	-0.0005		0.0001	-0.0002			
S29	16	2.8	0	0	1.7	0	0			
S29			0.0001	-0.0004		0	0			

TOTAL PERFORMANCE SUMMARY

Relative Field	Freq L/mm	Azin DEG	Design	Design + TOL
0	35	TAN	0.8328	0.6634
0	35	RAD	0.8328	0.6634
0.6	35	TAN	0.6677	0.4905
0.6	35	RAD	0.749	0.6271
0.8	35	TAN	0.6063	0.4772
0.8	35	RAD	0.6404	0.5112
1	35	TAN	0.5363	0.449
1	35	RAD	0.6009	0.4623

C E N T E R E D T O L E R A N C E S

SUR	RADIUS TOL	FRINGES POW/ IRR	THICKNESS TOL	INDEX TOL	V-NO (%)
0					
1	0.0000	5.0/ 1.00	0.03000	0.00050	0.50
2	0.0000	5.0/ 1.00	0.02000		
3	0.0000	5.0/ 1.00	0.02000	0.00050	0.50
4	0.0000	4.0/ 1.00	0.01000		
5		5.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
6	0.0000	3.0/ 1.00	0.01000		
7	0.0000	5.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
8	0.0000	4.0/ 1.00	0.01000		
9	0.0000	5.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
10	0.0000	4.0/ 1.00	0.01000		
11	0.0000	3.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
12	0.0000	4.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
13		2.0/ 1.00	0.01000		
14			0.01000		
15		2.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
16	0.0000	3.0/ 1.00	0.01000		
17	0.0000	3.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
18	0.0000	3.0/ 1.00	0.01000	0.00050	0.50
19	0.0000	5.0/ 1.00	0.03000		
20		5.0/ 1.00	0.03000	0.00050	0.50
21	0.0000	3.0/ 1.00	0.02000	0.00050	0.50
22	0.0000	5.0/ 1.00	0.03000		
23	0.0000	3.0/ 1.00	0.03000	0.00050	0.50
24	0.0000	3.0/ 1.00	0.03000		
25		5.0/ 1.00	0.03000	0.00050	0.50
26		5.0/ 1.00	0.03000		
27		5.0/ 1.00	0.03000	0.00050	0.50
28		3.0/ 1.00	0.03000		
29		3.0/ 1.00	0.03000	0.00050	0.50
30		5.0/ 1.00	0.03000		
31					

D E C E N T E R E D
T O L E R A N C E S

ELEMENT NO.	ELEMENT WEDGE		ELEMENT TILT		EL. DEC/ROLL (R)	
	TIR	ARC MIN	TIR	ARC MIN	TIR	mm.
1	0.0231	1.2	0.0341	1.7	0.0074	0.0100
2	0.0194	1.6	0.0119	1.0	0.0078	0.0100
3	0.0089	1.2	0.0130	1.7	0.0055	0.0100
4	0.0049	1.0	0.0048	1.0	0.0074	0.0100
5	0.0030	1.0	0.0031	1.0	0.0054	0.0100
6	0.0031	1.0			0.0088	0.0100 (R)
6- 7			0.0032	1.0	0.0031	0.0100
7	0.0037	1.0				
8	0.0040	1.0	0.0041	1.0	0.0097	0.0100
9	0.0058	1.0			0.0077	0.0100 (R)
9-10			0.0058	1.0	0.0044	0.0100
10	0.0102	1.4				
11	0.0085	1.0			0.0034	0.0100 (R)
11-12			0.0083	1.0	0.0060	0.0100
12	0.0141	1.6				
13	0.0203	2.1	0.0136	1.4	0.0104	0.0100
14	0.0267	2.8	0.0162	1.7		
15	0.0094	1.3	0.0072	1.0		
16	0.0201	2.8	0.0122	1.7		

4.4.3 討論

上述數據是以 4.2 節所定義的公差容忍範圍尋找最小的 MTF 變化，其基本上以改變 MTF 正負值不超過 0.01 為基準，尋找每項公差可以符合的公差值，所以如果在某公差要求此面較嚴格處，就是此面或此鏡片在製作或組裝時須特別在意，如在 TEST PLTE FIT 中對 S13 和 S14 的曲面要求異常嚴格，即意味著此面的品質對系統有很大的起伏改變，而所有項目的公差分析中以偏心公差的项目對系統影響最劇烈，尤其是鏡片的上下偏移最為嚴重，在中間視場(0field)時第 5 片、膠合透鏡的第 6 片第 7 片、第 8 片，其就算抓到所訂定的公差範圍限制最嚴謹處，還是對系統的 MTF 變化影響有超過 0.01，但在最邊緣

視場(1.0field)的影響起伏沒中心視場嚴重，主要是因為當透鏡偏心時，以中心視場的光程差改變量比之其他視場嚴重，另一個可能原因是中心光軸在鏡片上下位移後對中心視場的影響最大，此假設如圖46簡單的看單一透鏡，視角取0度和5度，當透鏡發生向上偏移0.3mm時，可以從field以0度和5度聚焦點發現中心變化量最大，以此可以理解出為何非對稱的公差比之對稱型的公差有更大的改變量。而最後TOTAL PERFORMANCE SUMMARY，此MTF數據是以高斯分佈統計其設計值加上公差誤差量[4.2]。所以如果以此設計值，在此要求的公差範圍內，基本上以所定義的公差寬容度下高斯分布的MTF可以達到0.449。再來使用Edmund optics公司的製造價位檢視POW/IRR和Thickness(表7)，在POW/IRR部分生產價位有兩面接近相對價位145其餘皆在相對價位125以內；在Thickness部分，生產價位有半數即8片在相對價位150其餘皆在相對價位50以內。

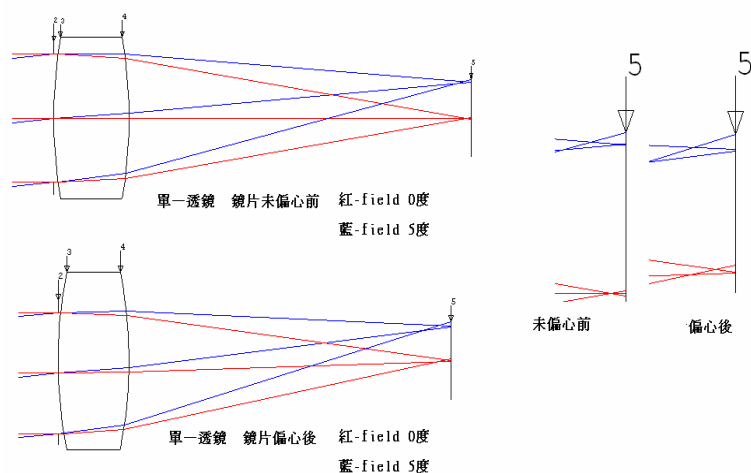
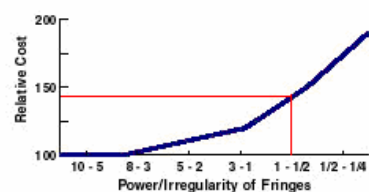


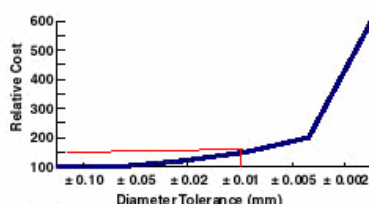
圖 47 單一鏡片上下偏心時 對中心 field 影響最大

表格 7 檢視 POW/IRR 和 Thickness 是否合理

		FRINGES	THICKNESS
	SUR	POW/IRR	TOL
	0		
element 1	1	5.0/ 1.00	0.03000
	2	5.0/ 1.00	0.02000
element 2	3	5.0/ 1.00	0.02000
	4	4.0/ 1.00	0.01000
element 3	5	5.0/ 1.00	0.01000
	6	3.0/ 1.00	0.01000
element 4	7	5.0/ 1.00	0.01000
	8	4.0/ 1.00	0.01000
element 5	9	5.0/ 1.00	0.01000
	10	4.0/ 1.00	0.01000
element 6	11	3.0/ 1.00	0.01000
element 7	12	4.0/ 1.00	0.01000
	13	2.0/ 1.00	0.01000
stop			0.01000
element 8	15	2.0/ 1.00	0.01000
	16	3.0/ 1.00	0.01000
element 9	17	3.0/ 1.00	0.01000
element 10	18	3.0/ 1.00	0.01000
	19	5.0/ 1.00	0.03000
element 11	20	5.0/ 1.00	0.03000
element 12	21	3.0/ 1.00	0.02000
	22	5.0/ 1.00	0.03000
element 13	23	3.0/ 1.00	0.03000
	24	3.0/ 1.00	0.03000
element 14	25	5.0/ 1.00	0.03000
	26	5.0/ 1.00	0.03000
element 15	27	5.0/ 1.00	0.03000
	28	3.0/ 1.00	0.03000
element 16	29	3.0/ 1.00	0.03000
	30	5.0/ 1.00	0.03000



POW/IRR	數量
5.0/1.0	13
4.0/1.0	4
3.0/1.0	10
2.0/1.0	2



THICKNESS	數量
0.03mm	6
0.02mm	2
0.01mm	8

Edmund optics的透鏡製做價位表

而在其他組裝部份的公差為作者所設計於模擬和作者所定義的規範，因為在組裝能力要和組裝廠做溝通，所以關於其他未討論公差容忍度範圍的值為作者所定義，實際製作方面的公差，其範圍仍需與製造和生產的公司仔細討論。

第五章 結論與展望

本文以先了解被投影電視鏡頭規格，並實作一背投影電視鏡頭，並用 ZEMAX 光學軟體模擬出以十三片透鏡所組成的背投影電視投影鏡頭；在模擬投影機鏡頭的步驟上，先針對背投電視所需要的特殊光學特性和機構要求，找尋可能可以符合的光學投影鏡頭，而光學鏡頭鏡片曲率上以球面鏡片為主，並嘗試減少一片，再用光學軟體 zemax 模擬光學鏡頭成像品質，而成像品質上可以達到自身所定義的標準。其後再用光學軟體 code v 分析自訂的公差容忍度，以此公差範圍模擬製作和組裝上可能的誤差，其在自訂公差範圍內分析的結果，在製作後仍依然具有一定的成像水準，並發現非對稱公差在所設計的投影鏡頭中有較嚴重的影響，以此了解如果在組裝或製造本顆鏡頭時，須特別嚴格要求在偏心這個生產環節，以利於提升如果產品生產的良率。而本論文並不夠完備，其中還有許多可以繼續改善的空間，如未仔細考慮鏡組的體積縮小或縮短長度，因為在現今製造技術發達，如果引入非球面除了可以平衡像差提升成像品質外，還有利於減少透鏡片數降低成本和縮短鏡組的長度，這樣可以使產品更具競爭力。或是如美國專利 7,009,765 中所設計的鏡頭般在內部放入一稜鏡的設計，使鏡頭轉 90 度以利在背投影電視內部的機構放置。背投影電視在現階段的發展越來越輕薄但卻有更大的螢幕面積，而且成像品

質及亮度一直不斷在突破，因為其越來越多巧思在光路上改進，並配合光學設計上有許多變化。又如 JVC 公司的專利 7,021,770，把反射面配合一超廣角光學鏡頭做成非球面反射面，並設計多片反射面，讓背投影電視厚度大幅縮減但光學品質卻不會因此被犧牲，這都是近幾年背投影電視相關專利常出現的獨特設計，可以期待背投影電視在未來會因為光學元件的製造進步及光學設計的創意下，更提升其競爭力。



參考文獻

- [1.1] JVC “D-IAL PROJECTOR TECHNICAL GUIDE”
- [1.2] 網站 數位電視
<http://www.digitaltv.eetchina.com/HOME.HTM>
- [1.3] 數位時代雙週刊
http://www.bnnext.com.tw/mag/2004_02_01/2004_02_01_1945.html
- [1.4] http://info.ceprei.com/news/news_detail.asp?w_id=715
- [2.1] JVC “D-IAL PROJECTOR TECHNICAL GUIDE”.
- [2.2] 網站 技術在線 “背投、PDP、液晶 3 種方式競爭前景預測”.2005/04/26
- [2.3] http://www.cfan.com.cn/pages/20051019/2996_3.htm.
- [2.4] <http://www.optoelectro.com/translate/opti/opti20.htm>.
- [2.5] Susumu Takaha , “Advanced Screen Development Next-Generation” .
- [2.6] Edward H. Stupp, Matthew S. Brennessoltz , “Projection Displays”John Wiley & Sons , 1999.
- [2.7] 許紘齊 , “精巧型矽基投影機照明系統之研究”, 長庚大學光電研究所
93 年碩士論文.
- [2.8] Texas Instruments.
- [2.9] 林來誠 , “Lcos 微型顯示器投影光學系統”, 光訊 , 108 期
- [3.1] Edward H. Stupp, Matthew S. Brennessoltz , “Projection Displays”John Wiley & Sons , 1999.
- [3.2] Warren J. Smith, “Modern Optical engineering, McGraw-Hill, New York, 2000. .
- [3.3] <http://www.ncc.sdccd.cc.ca.us/resource/qtvr/qtvrlm2/lm2p7.html>.
- [3.4] R. E. Fischer, B. T. Galeb, “ Optical system design”, McGraw-Hill,2000.
- [3.5] Shannon, Robert Rennie, “the art and science of optical design”.
- [4.1] Edmend optics <http://www.edmundoptics.com/us/>
- [4.2] Code v User ’ s Guide , Focus Software , CODE V 9.0 September 2001
- [4.3] R. E. Fischer, B. T. Galeb, “ Optical system design”, McGraw-Hill,2000