

國立交通大學

光電工程學系碩士班

碩士論文

筆型光學滑鼠之設計

Design of Pen-Type Optical Mouse

研究生：曾進興

指導教授：陳志隆 博士

中華民國一百零一年六月

# 筆型光學滑鼠之設計

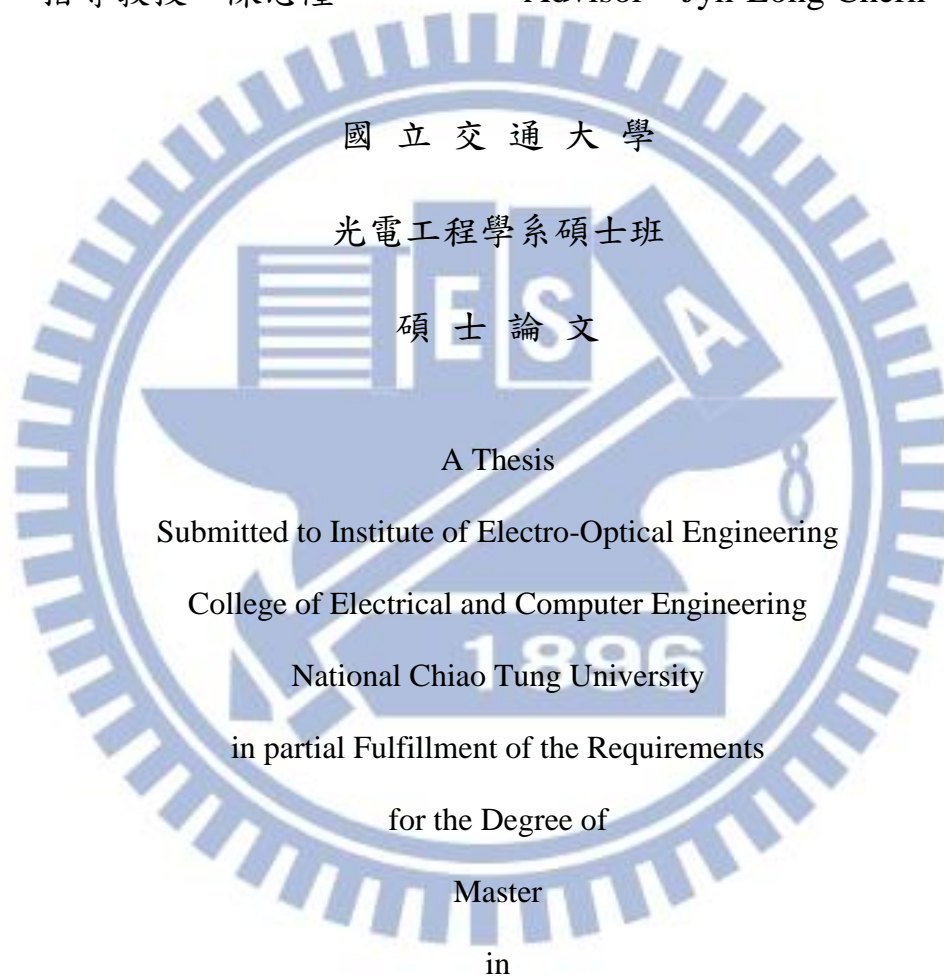
## Design of Pen-Type Optical Mouse

研究生：曾進興

Student : Jin-Shing Tseng

指導教授：陳志隆

Advisor : Jyh-Long Chern



Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Electronics and Electro-Optical Engineering

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年六月

# 筆型光學滑鼠之設計

碩士研究生：曾進興

指導教授：陳志隆教授

國立交通大學 光電工程學系碩士班

## 摘要

筆型光學滑鼠以光學滑鼠成像概念為基礎，外型為筆型之設計。與傳統光學滑鼠之主要差異在於照明元件採用同軸照明設計（Co-axial illumination），優點是重量體積較一般光學滑鼠輕薄，並且方便攜帶。採用藍芽無線技術使得操作方便，以及根據設計，適用於大部份材質上。因目前市面上筆滑鼠體積仍稍嫌略大，體積無法與一般用筆相比擬；另外，市面上的設計皆利用一般型發光二極體，消耗功率較多，為了節省成本與節約能源，本論文嘗試使用黏著型發光二極體（SMD LED, Surface-mount device Light-emitting Diode）發光元件，此類元件體積較小，重量減輕，消耗功率較少，成本亦比一般型 LED 較低。本篇論文利用新思科技公司(Synopsys, Inc.)之光學軟體 CODE V 設計模擬成像系統的部分，以及利用 Light tools 設計模擬非成像系統的部分。從成像到非成像元件及機構設計著手，且針對使用端進行長景深公差分析，最後設計一更加輕薄與更加節能之筆型光學滑鼠產品。

# Design of Pen-Type Optical Mouse

**Student: Jin-Shing Tseng**

**Advisor: Dr. Jyh-Long Chern**

Institute of Electro-Optical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The pen-type optical mouse is an innovative mouse design which based on the principle of original optical imaging theory but it reduces the volume of mechanism much smaller to be pen-shape. In the thesis, it presents the design of “co-axial” illumination device to improve the size problem and to arise the MTF performance of imaging lens in the meantime.

Besides, taking the problems of economizing power and cost into consideration, this thesis uses the SMD LED (Surface-mount device Light-emitting diode) for its smaller size, lower power loss, and besides, the cost is lower than the general LED.

In another part, the imaging lens takes the concepts of depth of focus into design for its long hyperfocal distance application. To confirm the accuracy, this thesis presents the tolerance analysis of depth of field versus MTF, the tilted angle versus imaging performance and the tolerance analysis of uniformity and efficiency of the illumination part.

## 誌 謝

回首這兩年於風城逗留，研究所生涯顯得若輕若重，在學校的時刻大多陷於學術世界的重重密網，而返回住處又能遠離塵囂被溫暖包覆。

關於這本論文的完成首先感謝研究所指導老師陳志隆教授，感謝您在光學設計的領域雕琢我，不僅僅是理論與技術，您亦為我們釐清未來理想的方向，指引我們走向有意義的大道上。亦要感謝實驗室學長姐們，竹明學長帶領的影像處理專題；以及剛進研究所時，介任學長熱情地分享學習上的心得；偉宏、柏宇、意雯、書正，學長姐們陪伴我們一年的時光，這期間每每看完你們的報告，都使我感覺想法成長不少。戰友們志庭、明憲、竑璋、弘胤、國展以及品儀，日子雖短，我們卻共同經歷了好多。從每個星期的週報、彼此討論設計上的想法，至時常的聚餐甚至出遊，很抱歉我時常因故缺席，也很感謝你們這兩年來的包容。

由衷感謝老師在碩一升碩二的暑假為我們安排金灶光學的暑期實習，除了理論的驗證，也讓我看到光學設計實務上的許多表現。期間要感謝幫助過我的 Helen 姊、安琪姊、雪珍姊、Alex 哥、Nick 哥還有 Rick 哥，尤其是 Helen 姊，我永遠不會忘記在測量光學滑鼠的特性時的那個小隔間，在那裡在您身上我學到了嚴謹的態度與求真的性格。

接著謝謝我的室友嘉振、柏維有時還有政文、瑋哲。我永遠不會忘記愛丁堡男豬喊們以及大家的女友每次聚會的笑鬧時刻，你們讓我在這時常下雨的風城徹底感到安心，在我們的桌遊、紅酒聚會中，分享各自的生活也讓我了解不同研究領域的甘與苦。

當然還要感謝女友季樺，哎還是習慣叫你小晃，我們新竹台中往返，感謝妳每次在我低落時陪伴我給予我鼓勵，想對妳說的話永遠還是太多，但我想我們能夠慢慢訴說。

最後是最最重要的家人，謝謝爸媽供給我唸研究所，每每在設計做不出來時，我便會走到田家炳光電大樓的樓梯間，播通電話聽聽你們的聲音，儘管只是聊著瑣事，但之後總感覺又有力氣堅持下去了。還有姊姊與妹妹，妳們給我的打氣我始終放在心裡，也祝福妳們各自的學習都能順利。

我曾經這樣的詩描寫新竹生活：「夢裡還在上個城市曬被／醒來已在多雨的臥榻／時日流轉一如這風／逼近牆角，跳躍／向更亮的天際轉彎」（2010）

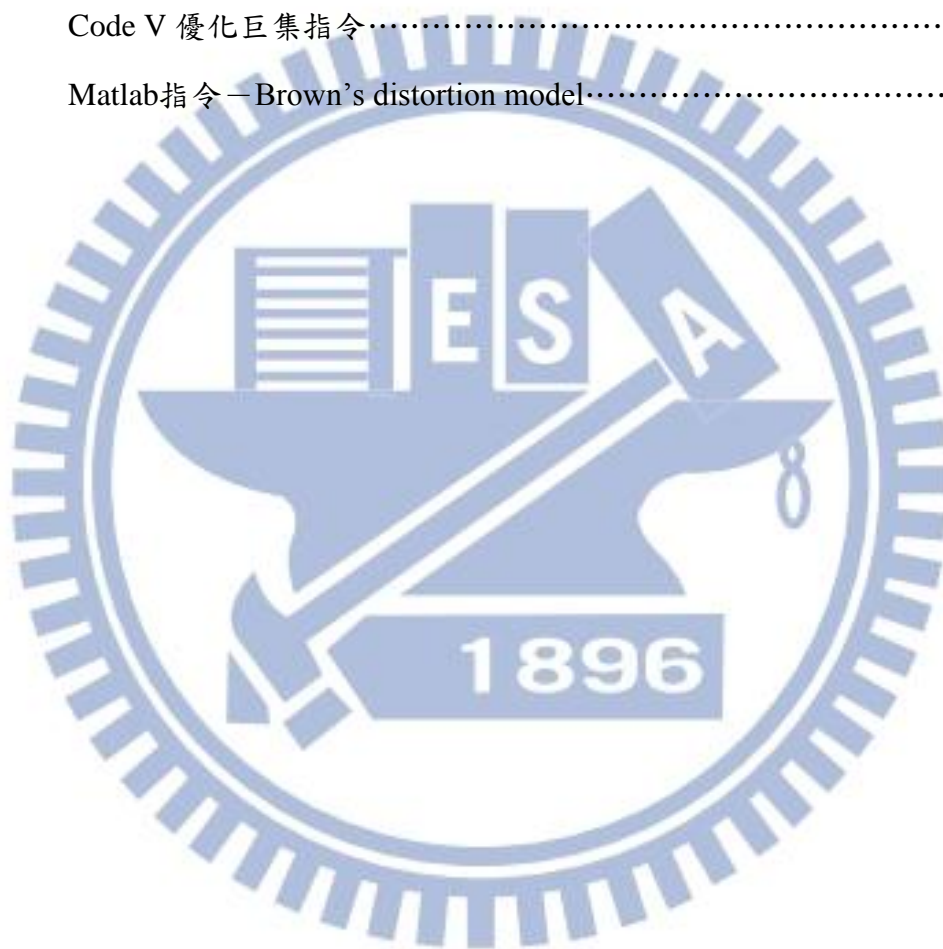
謹以此詩紀念我的研究時光，謹以此文獻給所有幫助過我的人。

# 目 錄

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 中文摘要  | .....                        | i   |
| 英文摘要  | .....                        | ii  |
| 誌謝    | .....                        | iii |
| 目錄    | .....                        | iv  |
| 表目錄   | .....                        | vii |
| 圖目錄   | .....                        | ix  |
| 一、    | 緒論.....                      | 1   |
| 1.1   | 光學滑鼠發展簡述與種類比較.....           | 1   |
| 1.1.1 | 光學滑鼠發展簡述.....                | 1   |
| 1.1.2 | 光學滑鼠種類比較.....                | 2   |
| 1.2   | 筆型光學滑鼠優勢與目前市場.....           | 4   |
| 1.3   | 研究動機與目的.....                 | 4   |
| 1.4   | 論文架構.....                    | 4   |
| 二、    | 成像光學系統介紹與成像品質分析.....         | 6   |
| 2.1   | 成像光學系統介紹.....                | 6   |
| 2.2   | 像差簡介.....                    | 7   |
| 2.3   | 簡易光學設計概念與進階變數.....           | 10  |
| 2.3.1 | 簡易光學設計概念.....                | 10  |
| 2.3.2 | 進階變數介紹.....                  | 11  |
| 2.4   | 成像品質名詞介紹.....                | 12  |
| 三、    | 基本原理介紹.....                  | 18  |
| 3.1   | 光學滑鼠操作原理.....                | 18  |
| 3.2   | CMOS 影像感測器元件.....            | 19  |
| 3.2.1 | CMOS 影像感測器元件簡介.....          | 19  |
| 3.2.2 | CMOS 影像感測器位移與方向偵測方法.....     | 21  |
| 3.3   | CMOS 影像感測器元件—PAW3204DB ..... | 22  |
| 3.3.1 | PAW3204DB 感測器規格 .....        | 22  |
| 3.3.2 | PAW3204DB 感測器重要參數 .....      | 24  |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 四、    | 筆型滑鼠之成像系統光學設計.....                                 | 26 |
| 4.1   | 導論.....  | 26 |
| 4.2   | 設計規格.....  | 27 |
| 4.2.1 | 光學設計規範—能看得見.....                                   | 27 |
| 4.2.2 | 光學設計規範—能看得清楚.....                                  | 28 |
| 4.3   | 設計流程.....  | 31 |
| 4.4   | 優化方式.....  | 31 |
| 4.5   | 設計結果.....  | 33 |
| 4.5.1 | 成像性能評價.....  | 34 |
| 五、    | 公差分析.....  | 43 |
| 5.1   | 公差介紹.....  | 43 |
| 5.2   | 鏡組公差分析.....  | 43 |
| 5.2.1 | 公差範圍決定.....  | 43 |
| 5.2.2 | 公差模擬結果.....  | 44 |
| 5.2.3 | 公差結果分析與說明.....                                     | 47 |
| 5.3   | 使用端公差分析.....                                       | 50 |
| 5.3.1 | 傾斜角公差項說明與結果.....                                   | 50 |
| 5.3.2 | 傾斜角公差結果分析.....                                     | 51 |
| 六、    | 光學機構件建立.....                                       | 53 |
| 6.1   | 機構件說明與規格訂定.....                                    | 53 |
| 6.1.1 | 應用端之使用者需求說明.....                                   | 54 |
| 6.1.2 | 光導 (Light guide) 與環狀反射體 (Cone reflector) 設計說明..... | 54 |
| 6.1.3 | 黑件 (Black cone reflector) 說明.....                  | 55 |
| 6.1.4 | 設計規格表與挑戰.....                                      | 55 |
| 6.2   | 機構件設計結果與光學模擬.....                                  | 56 |
| 6.2.1 | 能量轉換原理及均勻度計算說明.....                                | 56 |
| 6.2.2 | 設計與光學模擬結果.....                                     | 59 |
| 6.2.3 | 光導入光口製造公差分析.....                                   | 62 |
| 6.2.4 | 光導入光口改善進光效率分析.....                                 | 69 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.2.5 | 分析與討論.....                              | 72 |
| 七、    | 結論與未來展望.....                            | 73 |
| 7.1   | 結論.....                                 | 73 |
| 7.2   | 未來展望.....                               | 74 |
| 7.2.1 | 布朗扭曲模型 (Brown's distortion model) ..... | 75 |
| 7.2.2 | 幅狀基底方程 (Radial Basis Function) .....    | 77 |
| 參考文獻  | .....                                   | 79 |
| 附錄一   | Code V 優化巨集指令.....                      | 81 |
| 附錄二   | Matlab指令－Brown's distortion model.....  | 87 |



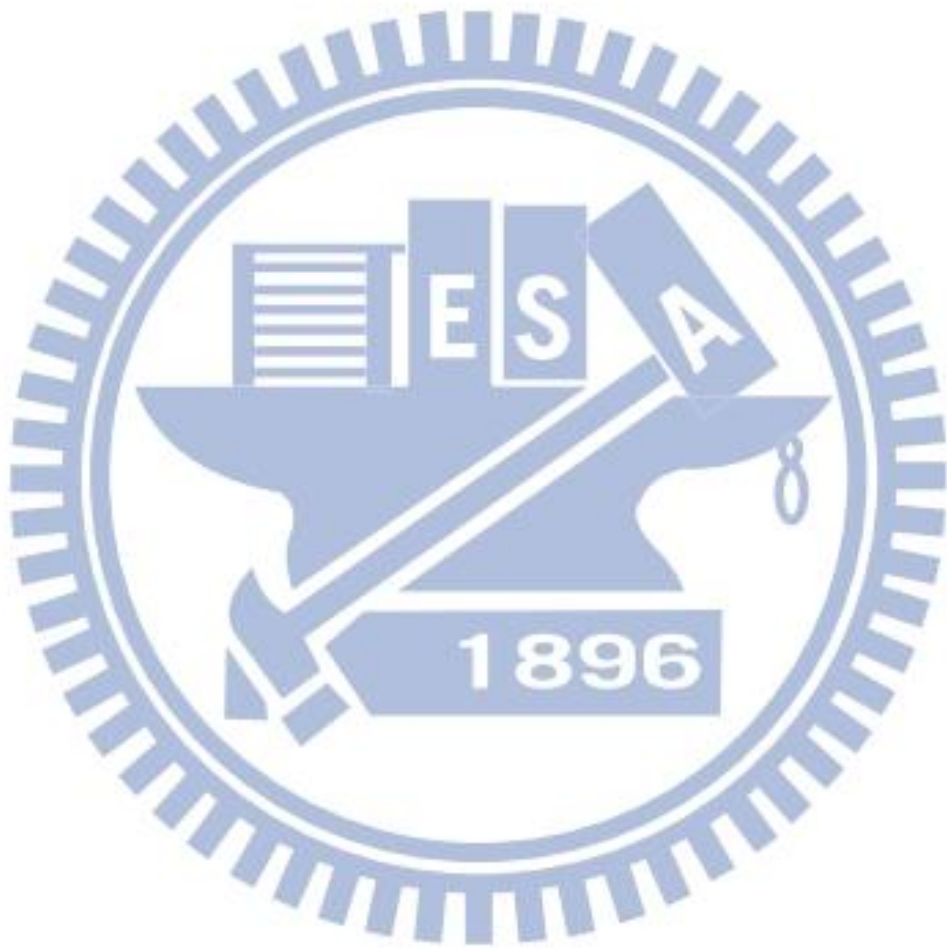


## 表目錄

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 表 2.1 | 規格表基本要素   | 7  |
| 表 2.2 | 三階像差係數的物理意義   | 9  |
| 表 2.3 | 孔徑大小與視場大小對於像差的關係  | 11 |
| 表 2.4 | k 值與二次曲面關係  | 12 |
| 表 3.1 | PAW3204DB CMOS 光學滑鼠感測器主要規格表                               | 23 |
| 表 4.1 | CCD 與 CMOS 優缺點比較  | 28 |
| 表 4.2 | 鏡頭選定之 CMOS 規格   | 28 |
| 表 4.3 | 筆滑鼠成像光學規格表  | 30 |
| 表 4.4 | 優化運算元與限制  | 31 |
| 表 4.5 | 訂定規格與設計值結果比較  | 33 |
| 表 5.1 | 公差類型分類與規格   | 44 |
| 表 5.2 | 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率 25lp/mm，良率 97.7%( $2\sigma$ )之公差分析       | 45 |
| 表 5.3 | 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率 25lp/mm，良率 97.7%( $2\sigma$ )之公差分析       | 46 |
| 表 5.4 | 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率 25lp/mm，良率 97.7%( $2\sigma$ )之公差分析       | 46 |
| 表 5.5 | 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率 16.67lp/mm，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析 | 48 |
| 表 5.6 | 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率 16.67lp/mm，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析 | 48 |
| 表 5.7 | 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率 16.67lp/mm，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析 | 49 |
| 表 5.8 | 不同傾斜角度時的最大孔徑表   | 52 |
| 表 6.1 | 筆滑鼠完整規格表  | 55 |
| 表 6.2 | 本論文選用型號為 19-215UBC 之 SMD LED 規格                           | 56 |
| 表 6.3 | 19-217R6C 系列 SMD LED 之發光強度表                               | 57 |
| 表 6.4 | 各組態均勻度與光效率數值  | 60 |
| 表 6.5 | 各公差效率數據整理表  | 67 |
| 表 6.6 | 各公差均勻度數據整理表   | 68 |
| 表 6.7 | 入光口設計於感光元件有效範圍之入光效率、均勻度比較表                                | 71 |

表 6.8 本論文設計值與一般市售光學滑鼠之光通量比較表..... 72

表 7.1 桶型與枕型扭曲修正..... 77



## 圖目錄

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 圖 1.1  | 滑鼠發展簡史  | 1  |
| 圖 1.2  | BlueTrack 藍光滑鼠架構圖                                   | 2  |
| 圖 1.3  | 一般光學追跡示意圖與感測影像(左)，雷射光線追跡示意圖及感測影像(右)                 | 3  |
| 圖 1.4  | 暗視角雷射照明工作示意圖  | 3  |
| 圖 2.1  | 光學系統簡易圖   | 6  |
| 圖 2.2  | 光學系統座標定義  | 8  |
| 圖 2.3  | 縱向色差。因為波長的不同形成折射率差異，造成藍光波段比紅光波段較早聚焦而形成縱向色差          | 10 |
| 圖 2.4  | 橫向色差。在同一焦平面，不同波段的光折射至成像面的位置不同而造成色偏移的情形              | 10 |
| 圖 2.5  | 二次曲面關係圖   | 12 |
| 圖 2.6  | 畸變圖。(a) 8% 正畸變(又稱枕形跡變)(b)6% 負畸變(又稱桶形畸變)。矩形格線為理想成像情形 | 13 |
| 圖 2.7  | 主光線角度示意圖  | 14 |
| 圖 2.8  | 一般成像光學系統  | 15 |
| 圖 2.9  | USAF 1951 Test Chart                                | 16 |
| 圖 2.10 | MTF 表示圖   | 17 |
| 圖 3.1  | 光學滑鼠照明並擷取桌面影像圖                                      | 18 |
| 圖 3.2  | 光學引擎辨識影像圖。影像 B 為影像 A 之後拍攝，可觀察有許多共同的圖樣往左下方移動         | 19 |
| 圖 3.3  | CMOS 影像感測器架構  | 20 |
| 圖 3.4  | (a)被動像素感測器架構 (b)主動像素感測器架構                           | 20 |
| 圖 3.5  | (a)畫素位址地圖 (b)以”白紙”為待測物所感應的調階值                       | 21 |
| 圖 3.6  | 區塊動態預測法示意圖  | 22 |
| 圖 3.7  | PAW3204DB 感測器內部功能區塊圖                                | 24 |
| 圖 4.1  | 一般光學滑鼠結構簡圖  | 26 |
| 圖 4.2  | 筆滑鼠結構簡圖   | 26 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 圖 4.3  | 景深示意圖  | 29 |
| 圖 4.4  | 設計優化流程圖  | 31 |
| 圖 4.5  | 設計結果。左為鏡片配置圖，由上往下依序為物距 32、35、38mm 的組態；<br>右圖為一階資料                    | 33 |
| 圖 4.6  | 物距 32mm—像散、場曲與畸變曲線圖(astigmatism field curve and<br>distortion curve) | 34 |
| 圖 4.7  | 物距 32mm—畸變格線圖(distortion grid)                                       | 35 |
| 圖 4.8  | 物距 32mm—光斑圖(spot diagram)  | 35 |
| 圖 4.9  | 物距 32mm—MTF 曲線圖  | 36 |
| 圖 4.10 | 物距 32mm—Ray aberration 圖   | 36 |
| 圖 4.11 | 物距 35mm—像散、場曲與畸變曲線圖(astigmatism field curve and<br>distortion curve) | 37 |
| 圖 4.12 | 物距 35mm—畸變格線圖(distortion grid)                                       | 37 |
| 圖 4.13 | 物距 35mm—光斑圖(spot diagram)  | 38 |
| 圖 4.14 | 物距 35mm—MTF 曲線圖  | 38 |
| 圖 4.15 | 物距 35mm—Ray aberration 圖   | 39 |
| 圖 4.16 | 物距 38mm—像散、場曲與畸變曲線圖(astigmatism field curve and<br>distortion curve) | 39 |
| 圖 4.17 | 物距 38mm—畸變格線圖(distortion grid)                                       | 40 |
| 圖 4.18 | 物距 38mm—光斑圖(spot diagram)  | 40 |
| 圖 4.19 | 物距 38mm—MTF 曲線圖  | 41 |
| 圖 4.20 | 物距 38mm—Ray aberration 圖   | 41 |
| 圖 5.1  | 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率取至 25lp/mm 時的公差分析結果                                  | 44 |
| 圖 5.2  | 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率取至 25lp/mm 時的公差分析結果                                  | 45 |
| 圖 5.3  | 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率取至 25lp/mm 時的公差分析結果                                  | 46 |
| 圖 5.4  | 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時的公差分析結果                               | 47 |
| 圖 5.5  | 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時的公差分析結果                               | 48 |
| 圖 5.6  | 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時的公差分析結果                               | 49 |
| 圖 5.7  | 傾斜角度在 CODE V 上的 2D 模擬圖   | 50 |

|        |                                    |    |
|--------|------------------------------------|----|
| 圖 5.8  | 物距為 32mm 處之各傾斜角度與 MTF 曲線變化圖        | 50 |
| 圖 5.9  | 物距為 35mm 處之各傾斜角度與 MTF 曲線變化圖        | 51 |
| 圖 5.10 | 物距為 38mm 處之各傾斜角度與 MTF 曲線變化圖        | 51 |
| 圖 6.1  | 光學滑鼠機構件示意圖                         | 53 |
| 圖 6.2  | 筆滑鼠機構件示意圖                          | 54 |
| 圖 6.3  | 19-215UBC SMD LED 之基本電光特性曲線圖       | 58 |
| 圖 6.4  | 在 Lighttools 輸入配光曲線作遠場強度模擬以確認光源可靠性 | 59 |
| 圖 6.5  | 筆滑鼠機構件模擬圖                          | 60 |
| 圖 6.6  | 光經過筆滑鼠機構件後於各組態照度模擬圖                | 60 |
| 圖 6.7  | 各表面之收光效率分布                         | 61 |
| 圖 6.8  | 原始設計模擬圖(發光元件與光導空氣間隙為 0.1mm)        | 62 |
| 圖 6.9  | 無空氣間隙之模擬示意圖                        | 62 |
| 圖 6.10 | 無空氣間隙且往 x 方向位移+0.1mm 模擬示意圖         | 63 |
| 圖 6.11 | 無空氣間隙且往 x 方向位移+0.2mm 模擬示意圖         | 63 |
| 圖 6.12 | 無空氣間隙且往 x 方向位移-0.1mm 模擬示意圖         | 64 |
| 圖 6.13 | 無空氣間隙且往 x 方向位移-0.2mm 模擬示意圖         | 64 |
| 圖 6.14 | 無空氣間隙且往 z 方向位移+0.1mm 模擬示意圖         | 65 |
| 圖 6.15 | 無空氣間隙且往 z 方向位移+0.2mm 模擬示意圖         | 65 |
| 圖 6.16 | 無空氣間隙且往 z 方向位移-0.1mm 模擬示意圖         | 66 |
| 圖 6.17 | 無空氣間隙且往 z 方向位移-0.2mm 模擬示意圖         | 66 |
| 圖 6.18 | 入光口結構修正                            | 69 |
| 圖 6.19 | 矩形環狀入光口設計                          | 70 |
| 圖 6.20 | 於入光口加一透鏡                           | 70 |
| 圖 6.21 | 於入光口加一透鏡設計，空氣間隙為 0.05mm            | 71 |
| 圖 7.1  | 傾斜角度 50° 的扭曲(distortion)分布         | 74 |
| 圖 7.2  | 傾斜角度-50° 的扭曲(distortion)分布         | 75 |
| 圖 7.3  | 以 400x400 畫素個數的方格進行-10%之桶型畸變修正     | 76 |
| 圖 7.4  | 以 400x400 畫素個數的方格進行+10%之枕型畸變修正     | 76 |
| 圖 7.5  | CODE V 內建扭曲格線圖                     | 78 |

# 第一節 緒論

## 1.1 光學滑鼠發展簡述與種類比較

### 1.1.1 光學滑鼠發展簡述

自從 1999 年安捷倫公司 (Agilent Technologies) 發布了第一顆 IntelliEye 光學引擎後，光學滑鼠定位技術趨於穩定，從此光學滑鼠便大量取代傳統機械式滾輪滑鼠。2003 年，羅技公司 (Logitech) 與微軟公司 (Microsoft) 分別推出以藍芽為通訊協定的藍芽滑鼠[1]。

2005 年，羅技公司與安華高公司 (Avago Technologies) 合作推出第一款無線且可充電之雷射滑鼠。2006 年，第一隻克服玻璃障礙的有線雷射滑鼠與藍芽雷射滑鼠先後問世。2008 年微軟公司採用以藍光辨識的 BlueTrack 技術推出藍光滑鼠，此滑鼠的特性為加載了藍光發光二極體及廣角鏡，幾乎在所有材質表面都可使用[1]。

2009 年羅技公司推出暗視角 (darkfield) 雷射追蹤技術，使得滑鼠感光元件能如同人的眼睛看見夜晚清澈的星空般地看見透明材質中的小瑕疵、灰塵以及微粒等微小物體，並藉以提供辨識定位資訊[1][2]。同年，蘋果電腦公司 (Apple) 推出新產品—魔術滑鼠 (magic mouse)，此滑鼠移去所有滑鼠按鍵、滾輪，只以一片多點觸控板，便能提供一般滑鼠的左、右鍵，以及 360 滾輪跟兩指手勢操作視窗縮放的功能[1]。圖 1.1 為滑鼠發展簡史。



圖 1.1 滑鼠發展簡史

資料來源：陳智信，楊智慧，黃耿祥，“掌上明珠—滑鼠，”科學發展月刊第 460 期  
page63,201104

### 1.1.2 光學滑鼠種類比較

光學式滑鼠發展至今，為了因應更好的影像處理晶片，亦同時不斷改良內部之成像鏡頭，目的皆為了克服先天光學波長的特性限制，使滑鼠能夠使用在大部分的材質上。目前市場上滑鼠的感應器類型以紅光、藍光及雷射為大宗。

紅色光波段（約 630-700nm）有時會被納括在長波長的波段範疇內，一般光學滑鼠皆使用紅色的發光二極體（LED, Light Emitting Diode）。利用光照射在待測物體表面（如桌面、滑鼠墊等）並反射出粗糙表面的陰影之後，透過鏡頭成像至內部的感光元件，最後透過感光元件的影像處理晶片高頻掃描比對，來計算滑鼠的移動及速度。因此待測表面之紋理變化對於光學滑鼠的移動辨識有絕對的幫助，若是在金屬、磁磚、大理石或玻璃等光滑表面，反射成像上恐怕較難辨識，這也就是光學滑鼠發展遇到之主要課題。市面上亦有使用紅外線發光二極體之不可見光波段的光學式滑鼠[3]。

2008 年微軟公司推出 BlueTrack 技術的短波長藍光型滑鼠，如圖 1.2。此技術特點在於 1.使用藍光作為光源，藍光波長短（約 450nm），反射回來的影像解析度較高。2.短波長的光穿越介質能力較低，於是在透明光滑表面如玻璃，亦可反射回來。3.在光學系統增加一個透鏡來分散光源，而取得比一般光學大四倍的照射面積，使反射回來的資訊量變多，最後靠著對焦鏡頭及影像處理晶片解析資訊並做定位。目前 BlueTrack 技術之藍光滑鼠已被廣泛使用[3]。

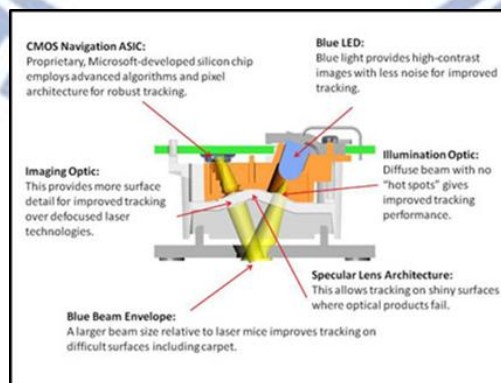


圖 1.2 BlueTrack 藍光滑鼠架構圖[4]

資料來源：網路資料，“Q&A with Mark DePue, Platform Engineering Manager, Hardware Group,”[http://www.maximumpc.com/article/features/everything\\_you\\_need\\_know\\_about\\_microsofts\\_bluetrack\\_mouse\\_technology?page=0%2C1](http://www.maximumpc.com/article/features/everything_you_need_know_about_microsofts_bluetrack_mouse_technology?page=0%2C1)

雷射滑鼠使用雷射二極體（LD, Laser Diode）作為光源，發出具有指向性的窄幅光束，照射範圍變小，但能夠直接反射出材質表面的細節，搭配使用高倍率的感測元件，而有更好的表面追蹤及辨識能力。如圖 1.3。

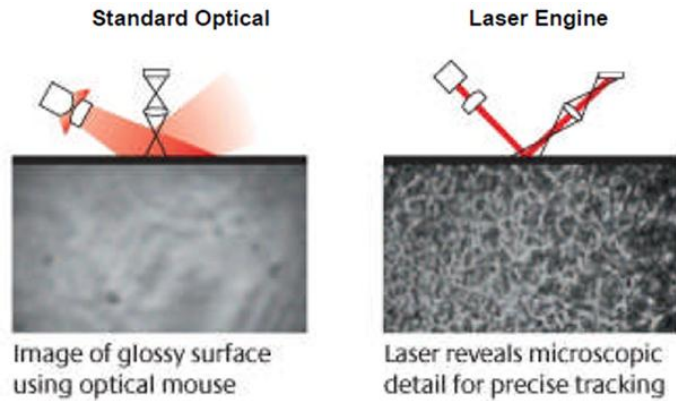


圖 1.3 圖左為一般光學追蹤示意圖與感測影像，圖右為雷射光線追蹤示意圖及感測影像  
 圖片來源：“An Innovation Brief—Logitech® Darkfield Laser Tracking: The World Is Your Mouse Pad,”Logitech, 2009, page2

2009 年羅技公司推出暗視角（Darkfield）雷射照明技術。此技術使用了兩組雷射二極體，一般情況僅使用一組雷射二極體照明，然而若是在較無細節變化之透明高光澤（High-gloss）的材質上時，第二組雷射二極體便會自動啟用，此時感光元件會視物體底色為黑色，進而由兩組雷射二極體照射表面上的微塵或是油污而反射白色的景象，影像處理晶片便根據這些數據做定位。如圖 1.4。

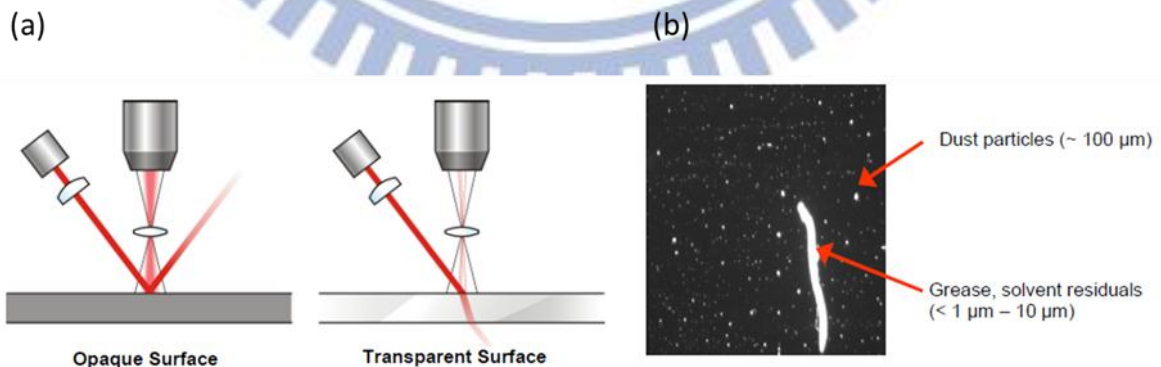


圖 1.4 圖左(a)為暗視角雷射照明分別在不透明與透明材質上的工作示意圖；圖右(b)為在玻璃樣本上感應之圖像，可觀測出表面上之微塵與油污

圖片來源：“An Innovation Brief—Logitech® Darkfield Laser Tracking: The World Is Your Mouse Pad,”Logitech, 2009, page4



## 1.2 筆滑鼠優勢與目前市場

筆滑鼠主要優勢在於：筆型設計，合乎日常人體工學、攜帶方便，搭配無線技術在使用上更加方便。

目前國內市場以昆盈公司（Genius）為主要設計供應廠商[5]。國外的部分為美國的 Fentek Industries 公司（產品－Wireless Ergonomic Mouse Pen）[6]、FingerSystem 公司（產品－P&M Neo wireless）[7]、Salient Technology（國內代理商為昇凌科技）[8]以及 Ultra 公司[9]。

其中 Ultra 公司的 U12-40871 無線筆滑鼠更將雷射投射筆與滑鼠作結合，使用者能夠在報告時隨即轉換滑鼠與雷射筆。

## 1.3 研究動機與目的

因目前市面上筆滑鼠體積仍稍嫌略大，以昆盈之筆滑鼠為例，筆寬、筆高與筆長分別為  $25 \times 16.3 \times 133 \text{ mm}$ [5]，體積無法與一般用筆相比擬。另外，市面上的設計皆利用一般型發光二極體，為了節省成本與節約能約，本論文嘗試採取黏著型發光二極體（SMD LED, Surface-mount device Light-emitting Diode）發光元件，此元件體積較小，重量減輕，成本亦可比一般型 LED 減少約 30%~50%[10]。

本著上述的理念，本論文不僅欲設計一更加輕薄、期待能夠利用模擬軟體設計出更加節能之筆滑鼠產品。

## 1.4 論文架構

本篇論文的架構建立於對光學滑鼠的著墨，由光學滑鼠的背景與光學滑鼠操作原理，進而設計筆型滑鼠、成像鏡組實際設計流程、非成像機構之光源模擬設計與公差分析以及最後一章做結論。

本篇論文所利用的設計軟體由 Optical Research Associates（ORA）公司的光學設計

軟體 CODE V、Light tools 進行設計與公差分析。各章節架構如下：

## 第一章 緒論

介紹光學滑鼠發展背景與目前滑鼠種類比較，以及說明研究動機與目的。

## 第二章 成像光學系統介紹與成像品質分析

介紹光學設計之基本原理，另外由於後幾章會討論到成像光學系統之像差比較，於是先在此章先說明像差與成像品質之關係。

## 第三章 光學滑鼠基本原理介紹

討論光學滑鼠如何運作，並且提及影像處理技術與感光元件的介紹。

## 第四章 筆滑鼠之成像系統光學設計

依需求建立起規格，作流程分析以及設計優化，對於成像性能做討論。

## 第五章 成像系統公差分析

納入公差分析，由製造端的鏡組公差為主，使用端的傾斜角公差分析為輔，進行討論。

## 第六章 機構件建立介紹

完成鏡組設計後，討論導光機構件之設計，並針對面臨之挑戰進行修改設計、優化，最後分析、比較規格。

## 第七章 結論與未來展望

本章將此論文的设计與分析做統整，得出產品之可能性結論，並分享個人在設計上的心得。並且於未來展望延伸思考，提出數位影像處理的方式修改扭曲變形以求精進。

## 第二章 成像光學系統介紹與成像品質分析

### 2.1 成像光學系統介紹

光學系統運用的原理為利用光線經過透鏡產生的折射與反射，使物體經過透鏡而成像，光學系統使用的單位大約位於毫米（mm, millimeter）甚至到微米（ $\mu\text{m}$ , micrometer），於是利用幾何光學的知識便足可建立起光學系統。

一般光學系統簡略來分，可分成物空間(object space)、光學系統(optical system)與像空間(image space)三個部份，如圖 2.1，每個部份對應的物理關係與成像表現便構成了基本的規格表架構，如表 2.1。

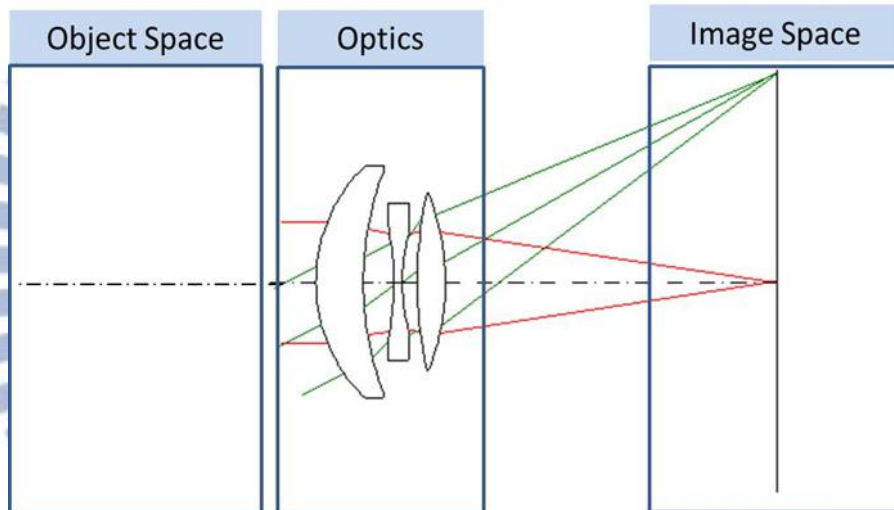


圖 2.1 光學系統簡易圖

表 2.1 之規格不一定完全都要納入考慮，一般依使用者需求而定。規格表的切入點有兩項：第一是要確保像能夠看得見以及第二是要能夠看得清楚。簡單來說，像要能夠被看見，首當其衝便是照度的問題。於是感光元件的選定、光源的使用須搭配適當，而後根據選定之元件方可進行設計；像要能被看清楚，即要確立設計時該用哪些準則，來確定成像品質到達某個標準後，物體成像即能夠看得清楚。一般鏡頭成像所關心的成像品質為 MTF(Modulation Transfer Function)與 Distortion。這兩項將在後面幾節進行說明。

常見之成像系統有望遠鏡、照相機、眼鏡等；非成像系統有照明系統、液晶面板之背光模組等等。本論文之設計不含有變焦功能，於是僅以定焦鏡規格進行設計。

表 2.1 規格表基本要素

| 物空間 Object Space                | 光學系統 Optics  | 像空間 Image Space                   |
|---------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1.物高 Object height              | 1.維度 Dimension   | 1.感光元件類型 Sensor type              |
| 2.物距 Object distance            | 2.出射與入射光瞳 Exit and Entrance pupils (location and size)                                 | 2.像高 Sensor height                |
| 3.視角 Field of view              | 3.一階光學規格 First-order optics specification  | 3.像距 Sensor distance              |
| 4.亮度 Brightness (luminance)     | 4.三階像差規格 Three-order aberration specification  | 4.感光度 Sensitivity (Field of view) |
| 5.光譜分布 Spectrum (wavelength)    | 5.一維點光源之成像品質 Imaging quality of point-like source (spot size/MTF)                      | 5.畫素類型/畫素大小 Pixel type/size       |
| 6.散發通量 Emitted Flux (Object NA) | 6.二維物體之成像品質 Imaging quality of 2D-like object (field curvature/astigmatism/distortion) | 6.相對照度 Relative Illumination      |
|                                 | 7.三維物體之成像品質 Imaging quality of 3D-like object (depth of field/focus)                   | 7.光譜分布 Spectrum (wavelength)      |
|                                 | 8.其他:如穿透率(Transmission)  | 8.接收通量 Flux Acceptance (Image NA) |

## 2.2 像差簡介

光線在光學系統內傳遞的過程中，經由透鏡的折射、反射鏡的反射到達成像面。若所見即所物，光線的傳遞毫無誤差，則稱作完美成像；反之，由於在光線的傳遞中，遇

見之透鏡曲率不同、所走光程不同，甚至不同波長對應透鏡折射率的差異，使得在成像上產生誤差，此時成像面上的實際影像與理想影像產生差異，此即產生像差。另外，甚至光源位置位於離軸或者軸上其他位置，亦會產生不同種類的像差。

在現今光學軟體的成像評估中，往往看的是光點圖（Spot diagram）。光點圖可視為光線經光學系統達成像面後，將其與理想光線成像位置之差異量化以後描繪出來的成像表現。由光斑大小可得知成像品質的好壞以及各種像差的表現，設計者可依據像差之物理意義與數學公式推演出優化的變因以改善像差。

如圖 2.2 所示，一般光學系統皆假定為一對稱光軸之對稱系統，於是所有表面皆視為環繞光軸，我們可定義其為一極座標系統[11]。

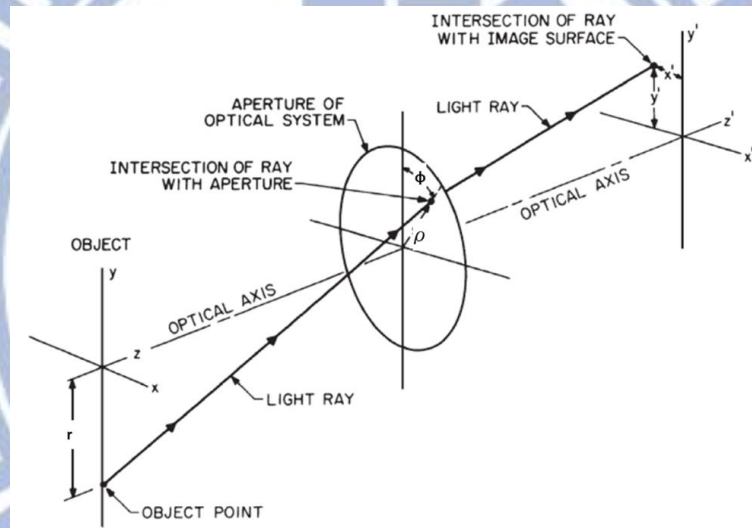


圖 2.2 光學系統座標定義

以點光源發出球面波視之為參考波前，實際與理想波前像差可由 Seidel 波面像差展開式 2-1 表示為：

$$W(r, \rho, \cos\varphi) = {}_0C_{40}\rho^4 + {}_1C_{31}r\rho^3\cos\varphi + {}_2C_{22}r^2\rho^2\cos^2\varphi + {}_2C_{20}r^2\rho^2 + {}_3C_{11}r^3\rho\cos\varphi + \text{Higher order terms} \quad \text{Eq.2-1}$$

其中  ${}_iC_{jk}r^i\rho^j\cos^k\varphi$  包含了  ${}_iC_{jk}$  像差係數， $r$ 、 $\rho$ 、 $\varphi$  分別為物高、入瞳大小、入瞳面光線與  $y$  軸的夾角。一般來說，三階項之 Seidel 像差即可表示各像差，更高階的係數因較缺乏規律性於是通常忽略，但在各光學設計軟體上設計時，設計者可利用軟體算出 5 階項差甚至設定優化限制。三階像差係數的物理意義與敘述如表 2.2。[12]

表 2.2 三階像差係數的物理意義

| 像差係數         | 名稱                             | 物理意義  |
|--------------|--------------------------------|---|
| ${}_0C_{40}$ | 球面像差<br>(Spherical aberration) | 與光軸平行入射光，在鏡片不同高度偏折造成軸上焦點的偏移差異。              |
| ${}_1C_{31}$ | 彗星像差<br>(Coma aberration)      | 離軸主光線之成像點向視界中心或外緣做彗星狀擴散的像差。                 |
| ${}_2C_{22}$ | 斜向像差<br>(Astigmatism)          | 離軸光線於水平與垂直方向的聚焦點不一致而形成的像差。                  |
| ${}_2C_{20}$ | 場曲<br>(Field curvature)        | 當前述球差、彗差及像散皆修正為零，離軸物距與軸上物距較長造成像點位置不同，形成一曲面。 |
| ${}_3C_{11}$ | 畸變<br>(Distortion)             | 離軸物點成像與理想近軸成像之放大率不同而形成像點的形變。                |

表 2.2 所列舉的像差通稱為賽德像差 (Seidel aberration)，皆為單色光的像差表現。此外若是光學系統的光源並非單色光，我們則需討論多光色所引起的像差。色差 (Chromatic Aberration) 成因是由於不同波長的光對於相同介質會有不同的折射率反應，導致在像平面的成像位置有所差異。一般可分為縱向色差 (longitudinal chromatic aberration) 與橫向色差 (lateral color/chromatic) 的情形。在做光學設計的品質評估時，時常討論橫向色差，以判斷色偏移的情況。

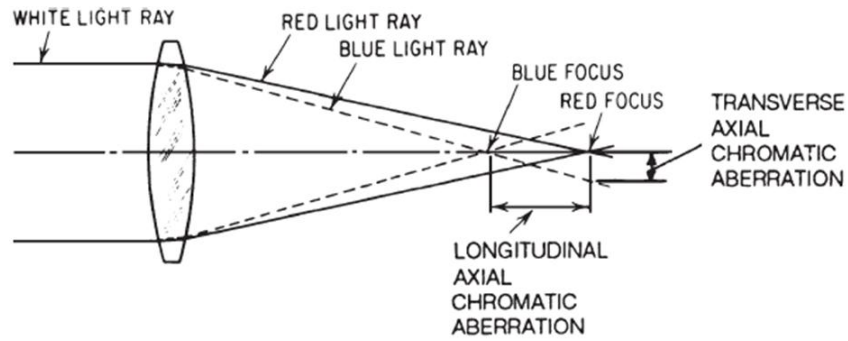


圖 2.3 縱向色差。因為波長的不同形成折射率差異，造成藍光波段比紅光波段較早聚焦而形成縱向色差

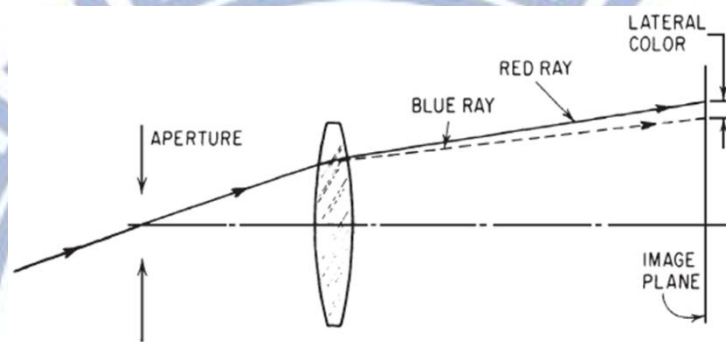


圖 2.4 橫向色差。在同一焦平面，不同波段的光折射至成像面的位置不同而造成色偏移的情形

## 2.3 簡易光學設計概念與進階變數

### 2.3.1 簡易光學設計概念

在設計初期階段 (Pre-design) 我們傾向使用高斯光學 (Gaussian optics) 近似，理由為守住近軸光學 (paraxial optics) 條件以達完美成像 (perfect imaging)，以高斯光學切入並能簡易估計像差同時作有效削減，甚至簡易公差分析。

$f/\#$  (f-number) 為一個設計的中心指標， $f/\#$  決定以後，整個光學系統的架構便進而訂定。如式 2-2， $f/\#$  為有效焦長 (EFL, Effective focal length) 與光圈直徑 (Clear aperture) 的比值，NA 為數值孔徑 (Numerical aperture)、 $\theta$  為邊緣光線與光軸夾角、E 為中心照度 (Illuminance)、 $t$  為材質穿透率 (transmittance)、 $B$  為光源亮度 (Brightness)。

$$f/\# \equiv \frac{EFL}{C.A} = \frac{1}{2} \left( \frac{EFL}{CA/2} \right) = \frac{1}{2(NA)} \quad \text{Eq.2-2}$$

$$\theta \sim \tan\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \sim \sin\theta = \frac{\left(\frac{CA}{2}\right)}{EFL} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f/\#}\right) \propto \left(\frac{1}{f/\#}\right) \quad \text{Eq.2-3}$$

$$E = \pi \cdot t \cdot B \cdot \sin^2(\theta_{max}) = \pi \cdot t \cdot B \cdot \left(\frac{\frac{CA}{2}}{EFL}\right)^2 = \frac{\pi \cdot t \cdot B}{4(f/\#)^2} \propto \frac{1}{(f/\#)^2} \quad \text{Eq.2-4}$$

由式 2-3、式 2-4 可知，中心照度與 $(f/\#)^2$ 呈反比。通常決定 f-number 的值，需仰賴感光元件之感光度與張角 $\theta$ 。

在像差的削減上可參考近軸成像，不同的孔徑大小以及視場大小皆會影響像差的比重，如表 2.3。

表 2.3 孔徑大小與視場大小對於像差的關係

| Aberration                                     | vs. Aperture | vs. Field Size or Angle |
|--|--------------|-------------------------|
| Spherical (longitudinal)                       | $y^2$        | —                       |
| Spherical (transverse)                         | $y^3$        | —                       |
| Coma   | $y^2$        | $h$                     |
| Petzval curvature (longitudinal)               | —            | $h^2$                   |
| Petzval curvature (transverse)                 | $y$          | $h^2$                   |
| Astigmatism and field curvature (longitudinal) | —            | $h^2$                   |
| Astigmatism and field curvature (transverse)   | $y$          | $h^2$                   |
| Distortion (linear)                            | —            | $h^3$                   |
| Distortion (in percent)                        | —            | $h^2$                   |
| Axial chromatic (longitudinal)                 | —            | —                       |
| Axial chromatic (transverse)                   | $y$          | —                       |
| Lateral chromatic                              | —            | $h$                     |
| Lateral chromatic (CDM)                        | —            | —                       |

### 2.3.2 進階變數

進行設計時，我們亦可引入非球面表面來削減離軸光線之像差，如下式 2-5 所示。

$$z = f(y) = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2(1+k)y^2}} + ADy^4 + AEy^6 + AFy^8 + AGy^{10} + \dots \quad \text{Eq.2-5}$$

其中  $z$  為鏡面深度(sag)、 $c$  為鏡面中心曲率(curvature)、 $y$  為鏡面上任一點至光軸之垂直高度、 $k$  為錐形係數(conic constant)，決定二次曲面的形式如表 2.4 所列。AD、AE、AF、



AG.....等為非球面高次項係數。

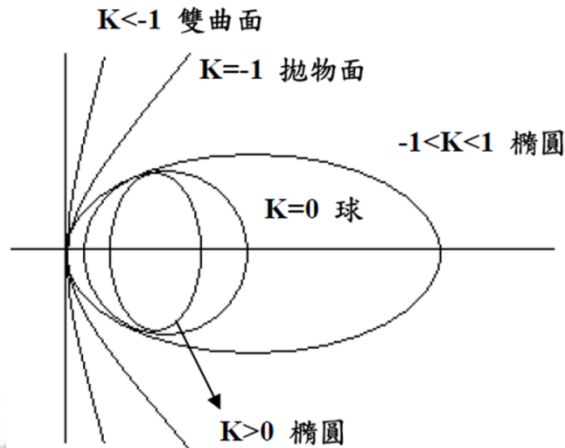


圖 2.5 二次曲面關係圖

表 2.4 k 值與二次曲面關係

|              |              |
|--------------|--------------|
| $k > 0$      | 橢圓面 (短軸在光軸上) |
| $k = 0$      | 球面           |
| $-1 < k < 0$ | 橢圓面 (長軸在光軸上) |
| $k = -1$     | 拋物面          |
| $k < -1$     | 雙曲面          |

## 2.4 成像品質名詞 (MTF、Distortion) 介紹

### (1) 光學畸變 (Optical distortion)

畸變為離軸物點成像與理想近軸成像之放大率不同而形成像點的形變[13]。畸變情況會隨著透鏡不同區塊擁有不同焦距與不同放大倍率而更加顯著[14]，一般而言，隨著視場角越大，畸變越大，然而其變化曲線不為線性。此種像差只影響成像的形狀，並不影響清晰度。於光學系統的計算公式如式 2-6。

$$\text{Distortion} = \frac{\text{Real image height} - \text{Ideal image height}}{\text{Ideal image height}} \times 100\% \quad \text{Eq.2-6}$$

如果像點位置比理想位置遠離光軸，則畸變為正，稱為枕形畸變 (pincushion

distortion)，如圖 2.6a。反之，像點位置比理想位置接近光軸，則畸變為負，稱為桶型畸變（barrel distortion），如圖 2.6b。在一般矩形感光元件，邊緣四個角落的畸變情形與中心相比若等於或小於 1%，畸變情形不顯著，品質良好；此外，若在 2%~3% 之間，通常亦能被規格接受。[13]

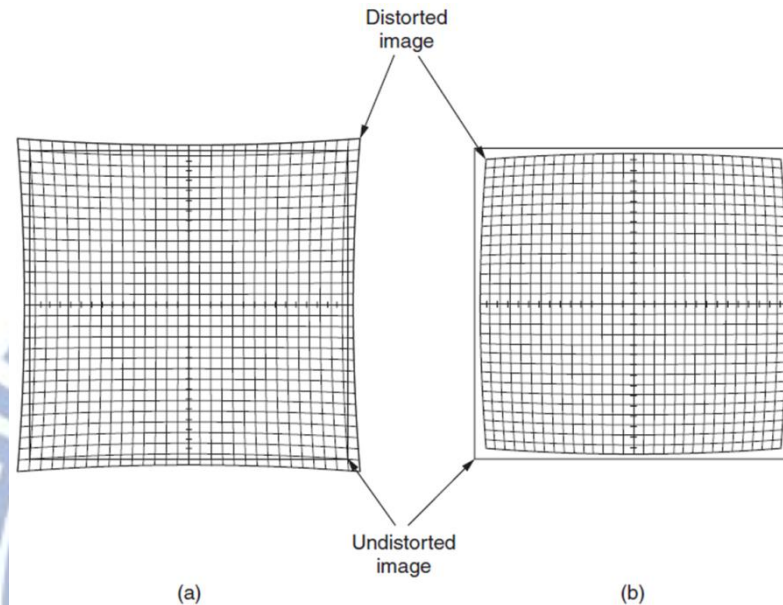


圖 2.6 畸變。(a) 8% 正畸變(又稱枕形跡變) (b) 6% 負畸變 (又稱桶形畸變)。矩形格線為理想成像情形

### (2) 橫向色差 (Lateral color)

離軸光線由於波長不同，其成像位置不同造成放大率的差異。一般感光元件接收面皆排列 R G B 畫素值，所以感光元件在接收多色光源輸入時，最長波長的紅光與最短波長的藍光成像位置差異必須要求在一个畫素 (pixel) 大小以內，否則在感光元件上的感應會造成色彩偏移的情形[15]。

### (3) 相對照度 (Relative illuminance)

相對照度定義為視場週邊照度與中央照度的百分比。依近軸光學理論計算方式如式

2-7：

$$RI = \frac{E_{edge}}{E_{center}} \quad \text{Eq.2-7}$$

其中  $E_{edge}$  為畫面邊緣照度、 $E_{center}$  為畫面中心照度。

相對照度與光圈大小以及入射至像平面的角度有關，光圈越大則相對照度越高，反之則越低，相對照度與  $f/\#$  關係已於上節討論。光線入射至像平面的角度可由  $\cos^4\theta$  定律所規範，角度越大則邊緣視場照度相對於中心視場會越低。如果一個光學系統的相對照度低於 60%，則可被人眼所輕易辨識出畫面邊緣與畫面中心的亮度差異[15]。

#### (4) 主光線角度 (Chief ray angle)

主光線有許多定義，端看使用面去選定。一般指的是穿過光學系統之光圈孔徑中心的斜向出射光線，而主光線角度則為此出射角度，如圖 2.7。在照射相同面積的光線下，光線的直射與斜射會影響照射面接收的功率與強度，光線直射結果較佳。於是在成像光學系統的設計中，為了使感光元件能接收較高功率與能量，必須使主光線的角度在不影響像差修正的情況下越小越好[15]。

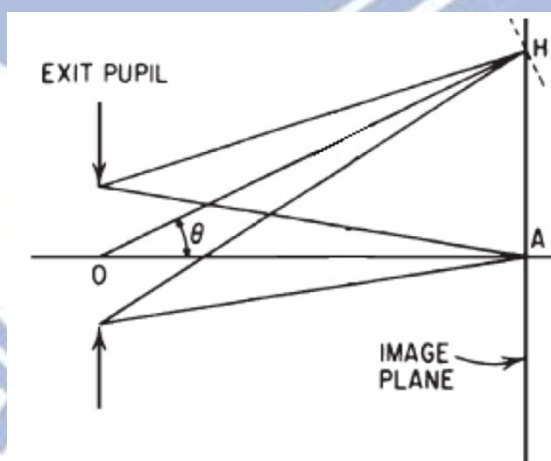


圖 2.7 主光線角度示意圖

#### (5) MTF (Modulation Transfer Function) 調制轉換函數

一組成像光學系統的優劣，最重要的即是成像品質的表現，而測試成像品質一般最主要的方式就是觀測其 MTF (Modulation Transfer Function) 表現[16]。

我們可將一般的成像光學系統簡化如圖 2.8 所示，其中  $\xi$ 、 $\eta$  為物空間座標， $u$ 、 $v$  為像空間座標， $x$ 、 $y$  為孔徑的座標， $z_o$  與  $z_i$  分別為光圈至物面與光圈至像面的距離。

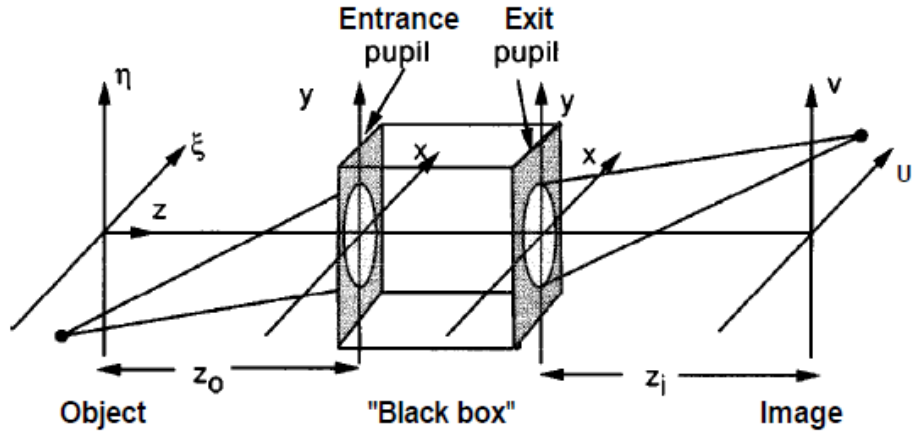


圖 2.8 一般成像光學系統

根據光線經光學系統至像平面的成像富氏光學（Fourier optics）原理，此系統能夠以式 2-8 表示：

$$U_i(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(u - \xi, v - \eta) U_o(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad \text{Eq.2-8}$$

其中  $U_o(\xi, \eta)$  為物平面振幅分布函數， $U_i(u, v)$  為像平面振幅分布函數， $h(u - \xi, v - \eta)$  為點擴散函數（Point spread function），點擴散函數的表示如式 2-9：

$$h(u, v) = \frac{A}{\lambda Z_i} \iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda Z_i}(ux+vy)} dx dy \quad \text{Eq.2-9}$$

$p(x, y)$  為孔徑函數（Pupil function），由式 2-9 可得知，點擴散函數為孔徑函數做富氏轉換。而若再將點擴散函數做富氏轉換，則得式 2-10，即振幅傳遞函數（ATF, Amplitude transfer function），並且能夠推算出光學傳遞函數（OTF, Optical transfer function）如式 2-11：

$$\text{ATF} : H(f_x, f_y) = F\{h(x, y)\} \quad \text{Eq.2-10}$$

$$\text{OTF} : \tilde{H}(f_x, f_y) = \frac{F\{|h|^2\}}{\iint |h(u, v)|^2 dudv} \quad \text{Eq.2-11}$$

最後取 OTF 的模得到  $|\tilde{H}(f_x, f_y)|$ ，此即為調製轉換函數 MTF（Modulation transfer

function)。

以 MTF 判斷成像品質的好壞是最直接的方式，因為 MTF 代表了鏡頭成像的對比度與清晰度高低，可直接反應所有像差綜合對成像品質的影響。換句話說，MTF 為一種測試鏡頭成像反差對比度及銳利度的評估方式，也是分析鏡頭的解像力跟反差再現能力使用的量化方式。一般在做 MTF 的評估時，我們可直接將 MTF 簡化為對比度的差異，如式 2-12。

$$MTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad \text{Eq.2-12}$$

上式  $I_{max}$  為強度最大值；而  $I_{min}$  為強度最小值，對於物體來說對比度 MTF 為 1，代表線條由純白與純黑構成。以繞射極限 (Diffraction limit) 為標準，繞射極限是指在以傳統光學量測方法觀看兩個東西時，如果它們之間的距離比大約  $\frac{1}{2}$  光波波長還短，就會因為光波繞射極限而無法辨識[17]。此種測定光學頻率的方式是以一釐米的範圍能呈現出多少對線來度量，其單位為  $\frac{\text{line pair}}{\text{millimeter}}$ 。圖 2.9 為 USAF 1951 MTF 測試圖卡，可看出在不同的區塊有不同的空間頻率[18]。

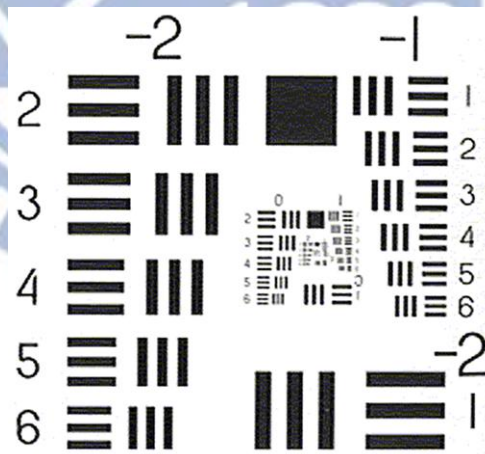


圖 2.9 USAF 1951 Test Chart

圖 2.10 為一 MTF 的表現例子，圖左為 MTF 的曲線圖，縱軸是對比度，橫軸為空間頻率，可觀察低空間頻率至高空間頻率，線條分布密度的變化。通常我們檢視 MTF 會分成縱向(Tangential)與橫向(Sagittal, or Radial)。圖右為對應之像的強度[19]。

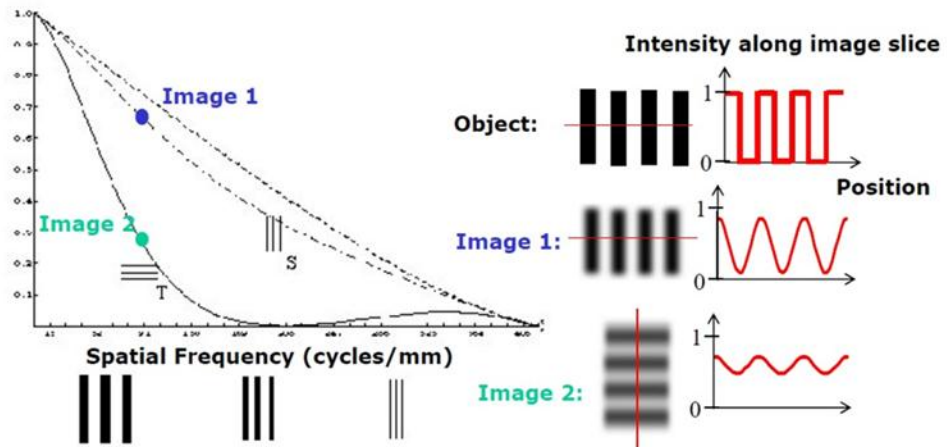


圖 2.10 MTF 表示圖

最後必須要注意的是 MTF 對視角的關係圖，以確定自軸上至全視角（1.0 view），MTF 皆能到達預期目標，另外也必須考量鏡組與感測器組裝公差，觀察 MTF 在成像面有位移的情況下之變化程度，此即為離焦 MTF（Through focus MTF）。

## 第三章 基本原理介紹

### 3.1 光學滑鼠操作原理

自安捷倫公司 (Agilent Technologies) 於 1999 年發布 IntelliEye 光學引擎後，至今光學滑鼠的基本操作及定位技術已臻成熟，於是此章節便藉由安捷倫公司 2001 年發表之技術報告” Optical Mice and how they work” 簡述光學滑鼠基本操作原理。[20]

光學滑鼠整體為一個小型的影像處理系統，包括高速度的照相機和影像處理器，如圖 3.1。發光二極體經光學非成像機構傳遞將光線照射至滑鼠下方之待測物如桌面，桌面上之不均勻表面將光散射，接著使用成像光學透鏡收集散射光成像在感光元件上。元件上感受到的影像為桌面灰階值的黑白分布，當滑鼠移動時感光元件連續對桌面擷取影像，速度達每秒 1500 張照片，此種速度快到讓照片中的影像能連續及重疊，影像最終被傳送至光學處理引擎 (Optical navigation engine) 上進行資料處理。

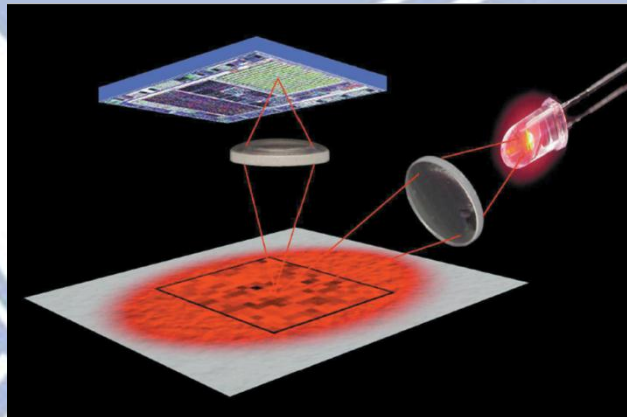


圖 3.1 光學滑鼠照明並擷取桌面影像圖

資料來源: Agilent's Data Sheet” Optical Mice and how they work” page2

光學處理引擎如同滑鼠之大腦，能夠辨識影像之特徵以及追蹤其移動，如圖 3.2。兩張影像隨著滑鼠往右上角移動而依序拍攝，可於下圖清楚看出大致上相似的輪廓。經由影像處理的演算法辨識影像後，光學處理引擎便可辨別此兩張影像之相關性以及相對距離，接著把資訊轉成 X-Y 座標系統以指出滑鼠的移動。

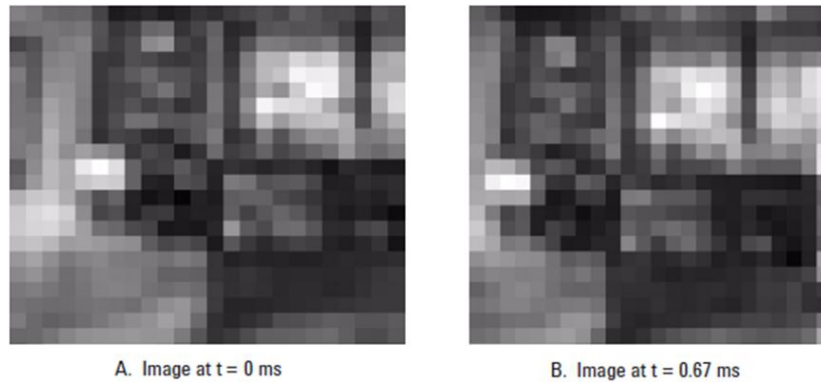


圖 3.2 光學引擎辨識影像圖。影像 B 為影像 A 之後拍攝，可觀察有許多共同的圖樣往左下方移動

資料來源:Agilent's Data Sheet" Optical Mice and how they work" page3

## 3.2 CMOS 影像感測器元件

### 3.2.1 CMOS 影像感測器元件簡介

以 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 為影像感測器的構想早在 1968 年便被提出來，不過由於當時光蝕刻 (Photolithography) 技術未成熟，並未開發出有實用價值的感測器。直到 1990 年代初期，次微米半導體製程技術成熟，才又使得 CMOS 影像感測器得到注目[21]。CMOS 影像感測器是由陣列式的感光像素 (Pixel cell) 所構成，像素是 CMOS 影像感測器的基本單位，其包含一個光二極體，用來產生與入射光成比例的電荷，也包含一些電晶體，以提供緩衝轉換和復位功能。像素電容累積的電荷被抽樣緩衝傳送給放大器 (Gain Amplifiers) 與類比／數位轉換器 (A/D Converter) 之後，攝取影像之原始訊號才得以形成，由這些功能構成一組 CMOS 影像感測器，如圖 3.3[22]。



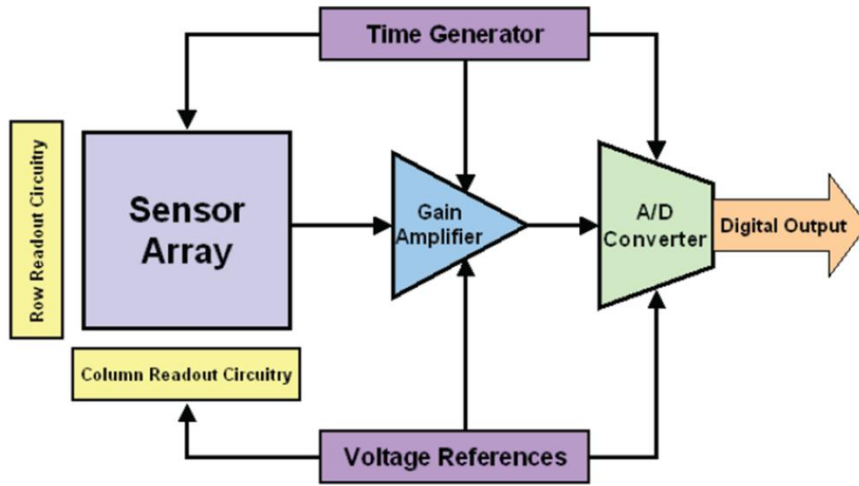


圖 3.3 CMOS 影像感測器架構

CMOS 影像感測器依像素結構可分為：被動像素感測器 (CMOS Passive Pixel Image Sensor, CMOS PPS) 與主動像素感測器 (CMOS Active Pixel Image Sensor, CMOS APS)。基本像素結構如圖 3.4 所示。原理為將每個獨立的電晶體 (電容器) 置於每個影像感測單元處 (像素) 充當開關，當光線激發出電子後，將電子儲存於電容器中。不同的是，被動像素感測器將放大器置於每行末端，如此一來線路輸出阻抗高，且容易產生隨機雜訊及較低的動態範圍；而主動像素感測元件則是直接在每一單位像素上加上放大器及雜訊控制元件，解決了隨機雜訊的問題，使影像品質得到明顯的改善，此低雜訊、高速、提升動態感測能力等優點，非常適合作光學滑鼠之影像位移感測元件[22]。

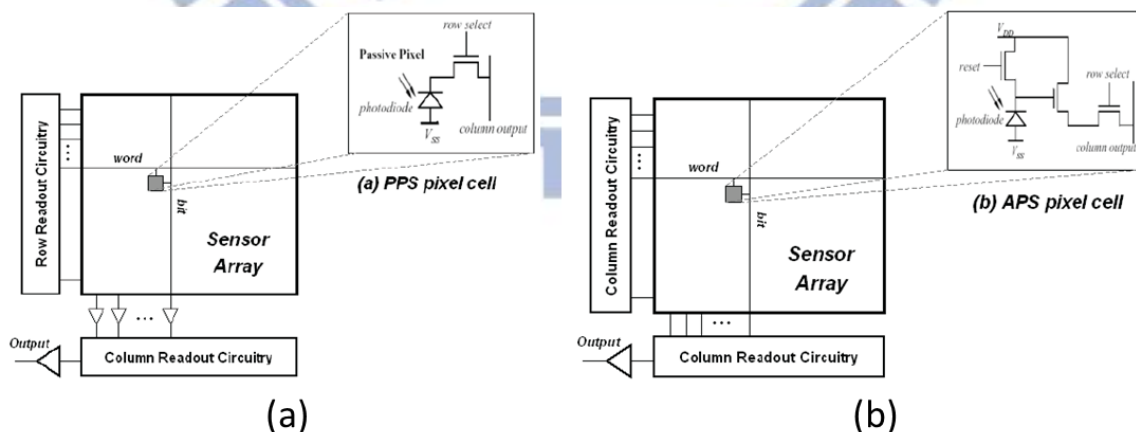


圖 3.4 (a)被動像素感測器架構 (b)主動像素感測器架構

### 3.2.2 CMOS 影像感測器位移與方向偵測方法

動態影像中每一個畫面都是由一連串像素之灰階值所組成，灰階值為射入影像經影像處理器作量子化後以 0 及 1 作二進位編碼(binary coding)，一般採用 256 個圖素(pixel cell)，每個畫素採 6 位元調製值，最亮處以 111111 表示，而最暗處用 000000 表示，如圖 3.5。[23]

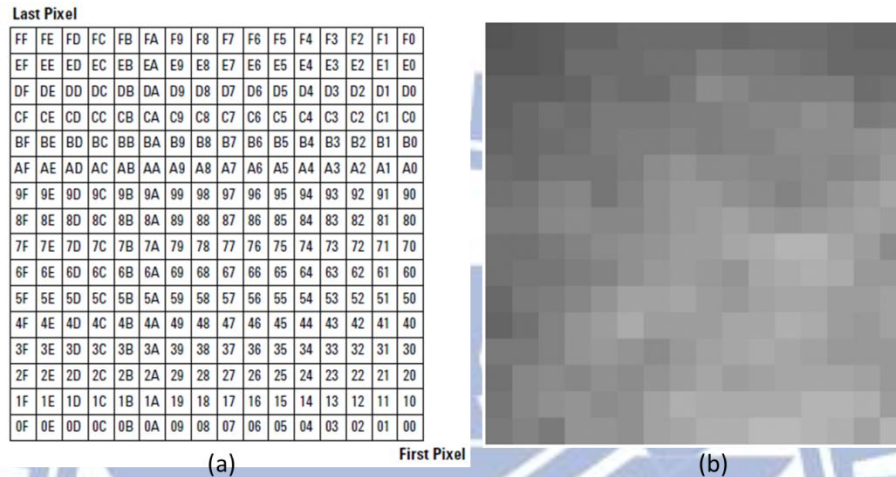


圖 3.5 (a) 畫素位址地圖 (b) 以”白紙”為待測物所感應的調階值

由上述可知，動態影像位移是由一連串連續時間的靜態畫面組合而成，而每一張畫面在連續的時間軸上通常都有兩個特性：(a) 朝同一方向持續移動的趨勢與(b) 相鄰時間中畫面上圖案的差異性不大。如上圖 3.2 所示。依這兩個特性，若能找到畫面上的圖案在時間軸上移動的方向，則影像位移感測器僅需要紀錄圖案移動的方向以及將同一圖案在時間軸上有變化的部分加以編碼計算  $\Delta X$  與  $\Delta Y$  位移。以同一圖案在連續時間軸上差異值來作位移的評估與預測的方法稱作「動態預測法」(Motion estimation) [22]。另外基於減少感測器的計算複雜度、紀錄動態向量數目及提升動態預測效率考量下，亦有提出將每張畫面切割成數個  $N \times N$  像素的區塊 (block) 且每一區塊都被當成獨立圖案，如圖 3.5。此種以區塊為動態預測的方式又稱「區塊動態預測法」(Block motion estimation) [24]。

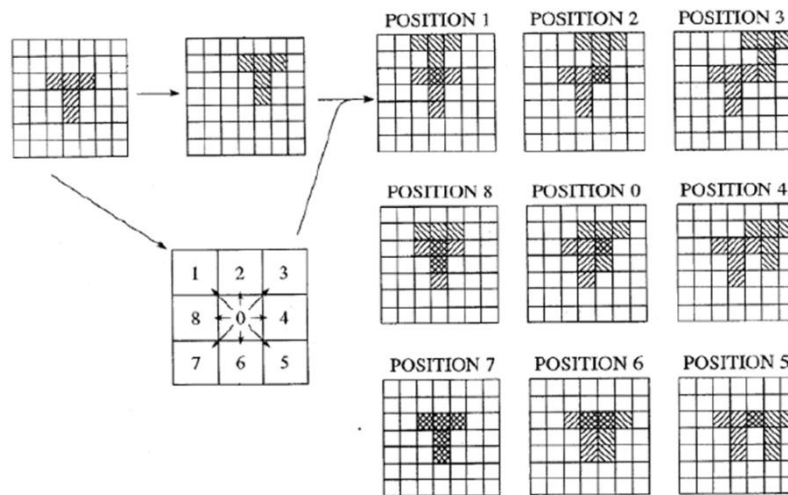


圖 3.6 區塊動態預測法示意圖

圖 3.6 之區塊動態預測法是取前一個圖像 (frame) 中間之  $N \times N$  像素位置 (Position 0) 當參考圖像 (reference frame)，接著將前一個參考圖線和目前擷取到的圖像 (current frame) 進行區塊比較的影像處理，看看哪個位置的區塊 (Position 1~8) 和參考圖像的區塊最像，便可得知移動方向並計算出相對位移距離。[22][24]

### 3.3 CMOS 影像感測器元件—PAW3204DB

本論文預計採用由原相科技公司 (PixArt Imaging Inc.) 研發生產之低功率無線滑鼠感測器，型號為 PAW3204DB。選擇此感測器的原因主要是由於筆型滑鼠為使操作方便自然，故無線感測器較為適合，此外便是追求低功耗，高傳輸速率為佳，接下來幾小節將會針對此感測器作詳細的介紹。

#### 3.3.1 PAW3204DB 感測器規格[25]

PAW3204DB CMOS 光學滑鼠感測器有下列特點：

- 單電源供應
- 具完整 2-D ( $\Delta X; \Delta Y$ ) 位移感測能力
- 於各種表面皆能正確位置偵測估算
- 高位移速率偵測達 28 inches/sec

- 高解析能力達 1600 CPI (Count per inch)
- 內含編譯與檔案轉換之序列介面 (Serial interface)
- 無偵測到位移時進入省能模式
- 內建低功耗的時間計時器 (Low Power Timer, LPT) 以用於睡眠模式
- 建立 MOTSWK pin 以用於轉換睡眠/操作模式
- 內建 LED 光源驅動電路

PAW3204DB CMOS 光學滑鼠感測器主要規格如下表 3.1：

表 3.1 PAW3204DB CMOS 光學滑鼠感測器主要規格表

| Item                      | Specification   |
|---------------------------|---|
| Power Supply              | Operating voltage<br>1.73V~1.87V (VDD and VDDA short)<br>2.5V~2.9V (VDD)  |
| Optical Lens              | 1:1   |
| Speed                     | 28 inches/sec   |
| Resolution                | 400/500/600/800/1000(Default)<br>/1200/1600 CPI   |
| Frame Rate                | 3000 frames/sec   |
| Typical Operating Current | 3mA @ Mouse moving (Normal)<br>300 $\mu$ A @ Mouse not moving (Sleep1)<br>60 $\mu$ A @ Mouse not moving (Sleep2)<br>7 $\mu$ A @ Power down mode |
| Package                   | Staggered DIP8  |

PAW3204DB 感測器就功能分成九大部份，如圖 3.7。

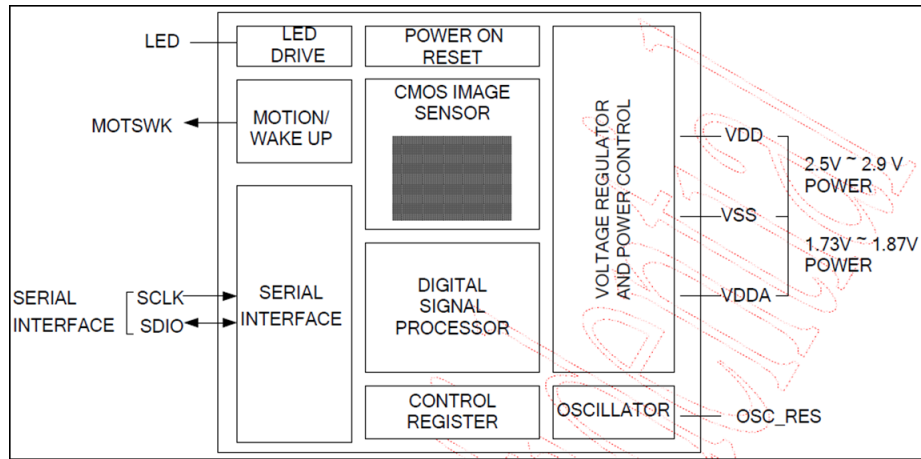


圖 3.7 PAW3204DB 感測器內部功能區塊圖

### 3.3.2 PAW3204DB 感測器重要參數

評斷光學滑鼠感測器性能的方式，主要有三大重點：

#### 1. 影像擷取速度 (Frame rate)

又稱內部採樣率、掃描頻率、拍照速率……等，是對滑鼠光學系統影像採樣能力的描述參數，單位通常以 FPS (Frames per second) 表示，亦在掃描器應用以赫茲 (Hz) 表示。工作原理為：當 LED 光源照射工作表面，位移感測器以一定的頻率捕捉工作表面反射的快照 (Snapshot)，由影像位移演算引擎 (Navigator Engine) 分析和比較這些快照的差異，從而判定滑鼠移動的方向和距離。影像擷取速度的高低決定了圖像的連貫性好壞以及對微小移動的響應，擷取速度越高則在越短的時間內影像處理分析的次數越多，於是獲得的資訊越充分、圖像越連貫，表現在光學滑鼠的操作上則是反應更敏捷、準確和平穩，並且對任何細微的移動都能作出響應。[22]

#### 2. 位移解析度 (Resolution)

解析度的單位一般以 dpi (dots per inch, 每英吋點數) 來表示，不過實際上以 cpi (count per inch, 每英吋測量次數) 為單位較為適當。解析度影響兩個層面：當解析度上升時，由於單位距離中的測量次數增加，所以第一是精準度隨之上升，第二點是相對的在使用滑鼠時，實際移動距離則會縮短。在較高螢幕解析度下使用時，會比較容易感受到解析度上升的效果，這代表來回移動滑鼠游標時，不需要大幅度移動滑鼠。

[22]

### 3. 移動速度 (Motion speed)

在相同的距離之下移動所需的時間越短則速度越快。我們可以此項標準來定義光學系統之感光像素大小，比如以表 3.1 所示之解析度列表取一較平均的 800dpi 解析度，在此規格標準下，必須滿足移動距離一英寸而得到 800 次數 (counts) 的計算，則感光像素大小如式 3-1 計算，不得大於  $30\mu\text{m}$ ，才能偵測到一次 (a count) 的位移。於是我們在後面章節便定義光學系統的像素大小為  $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 。[22]

$$\text{One pixel} = \frac{25.4\text{mm}}{800} = 0.03175\text{mm} = 31.75\mu\text{m} \cong 30\mu\text{m} \quad \text{Eq.3-1}$$



## 第四章 筆滑鼠之成像系統光學設計

### 4.1 導論

筆滑鼠整體機構與光學滑鼠類似，主要由發光二極體（Light-Emitting Diode）、偵測感光元件（Detector sensor）、透鏡（Lens）、印刷電路板（Print Circuit Board）及塑膠底座載板所組成，如圖 4.1 所示。差異在於筆滑鼠將機構縮減至筆的形狀，以便於攜帶，如圖 4.2。

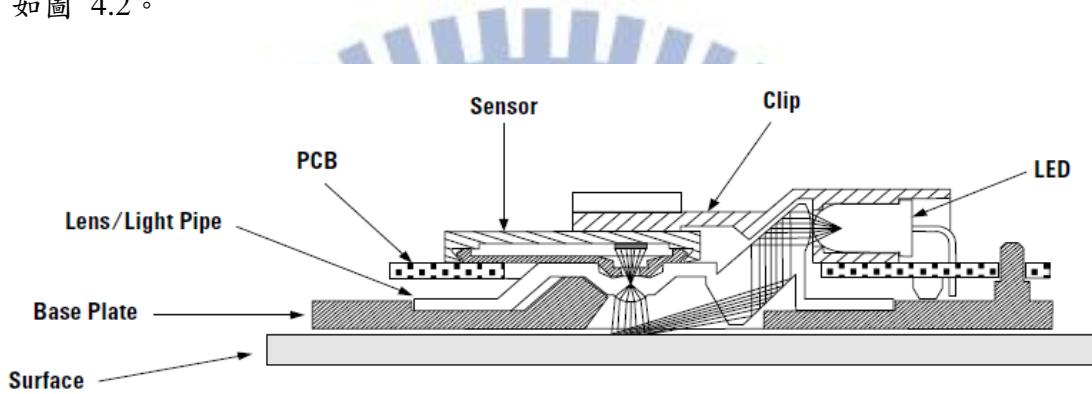


圖 4.1 一般光學滑鼠結構簡圖

資料來源：

Agilent's Data Sheet "ADNS-2030 Low Power Optical Mouse Sensor" page 3

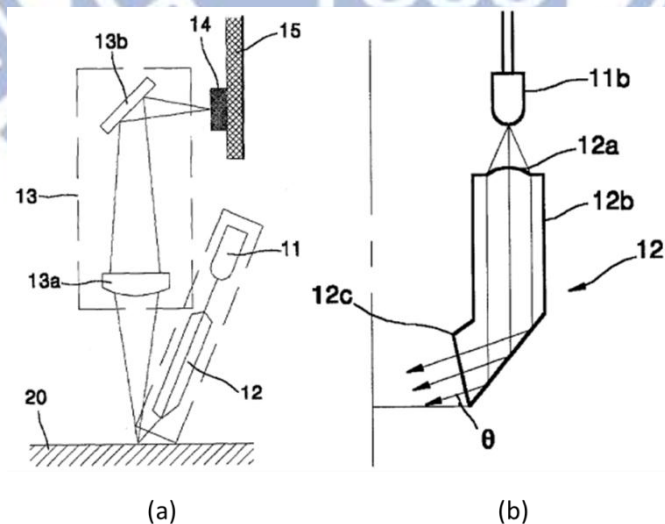


圖 4.2 筆滑鼠結構簡圖。(a) 為主要結構圖，發光二極體(11)經光導(12)射出均勻光線於桌面(20)，接著經光學成像系統(13)成像至感光元件(14)，以感應方位。(b) 為發光元件構造（11b 為發光二極體，12 為光導）

資料來源:

US Patent 7098894, “Pen Type Optical Mouse Device and Method of Controlling the Same”,  
Hoing-Young Yang, Seung-Gol Lee

為了省電，近年來亦有業者陸續使用表面黏著型發光二極體（SMD LED, Surface Mounted Device LED），此發光元件於 1980 年初期出現，主要因應更小的封裝以及工廠自動化而生[26]。於是在本論文的设计中，發光元件便以表面黏著型發光二極體進行設計。在光學系統的设计中，首先先依需求設定規格，利用光學軟體 Code V 進行光學設計與分析[27][28]，將所設定的規格，利用指令寫入巨集對鏡組進行優化[29]，達到品質要求之後，最後進行公差分析，評估所有組裝與製造因素對成像品質的影響，並加以訂定鏡組中各元件之公差容忍值。

## 4.2 設計規格

在设计鏡頭時，規格的選定相當重要，所謂綱舉目張，確定規格時，必須確認兩件要素：「能否看得見？」、「能否看得清楚？」。

### 4.2.1 能看得見

像要能夠被攝入，首當其衝便是照度的問題，所有光學系統都是針對成像接受面所做的設計，因此先選定成像面的規格。一般常見的感光元件有 CMOS 與 CCD 兩類，粗略來看，感光度 CCD 較優，焦比（f-number）選定大致落於 2.8 左右；而 CMOS 感光度較差，焦比（f-number）的選定大致落於 3~4 間，基於感光度的限制，在主光線角度的要求上，CMOS 的角度也較 CCD 來得有限制。針對 CCD 與 CMOS 的優缺點做比較，如表 4.1[30]，考量優缺點與目前趨勢選擇 CMOS Sensor—PAW3204DB 為成像感測面，規格如表 4.2



表 4.1 CCD 與 CMOS 優缺點比較

| 感光元件類型 | 優點                      | 缺點                          |
|--------|-------------------------|-----------------------------|
| CMOS   | 低價位、低耗電量、畫素可隨機讀取。       | 雜訊度較高、光感度較差、晶片線路複雜、技術尚未完全成熟 |
| CCD    | 低雜訊、高感度、線路設計及製程單純、技術成熟。 | 高耗電量、畫素無法隨機讀取、電荷傳遞要求較高      |

表 4.2 鏡頭選定之 CMOS 規格

| 項目     | 規格                                   |
|--------|--------------------------------------|
| 感光元件型式 | PAW3204DB (CMOS)                     |
| 單一畫素大小 | $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ |
| 有效面積   | $0.48\text{mm} \times 0.48\text{mm}$ |

#### 4.2.2 能看得清楚

欲使物體成像看得清楚，務必將像平面放置在焦平面上。然而由於考量使用者在使用筆滑鼠的方便性，此光學系統的景深容忍度必須至少達 6mm。

決定好接收面規格以後，接著決定鏡頭之光學成像品質標準。

##### 1. 像高 (Image height)

由於 CMOS 感光元件有效面積為  $0.48\text{mm} \times 0.48\text{mm}$ ，由此可求得對角線的長度為

$\sqrt{0.48^2 \times 0.48^2} \cong 0.68\text{ mm}$ ，在考量製作公差下，取對角線長度至 1.0mm，推得鏡頭

所需設計之像高為  $1.0\text{mm}/2 = 0.5\text{ mm}$ ，也就是此 CMOS 感光元件最大成像圈的大小。

##### 2. 光瞳規格 (Pupil specification)

光瞳規格的選定一般決定了入射／出射光線的數量，一般而言選定焦比 (f-number)，

即有效焦距 (EFL, Effective focal length) 與入瞳直徑 (Clear aperture diameter) 的比。但在這個設計裡，像高固定，我們取有效物高，以放大率 (Magnification) 進行設計，於是在光瞳規格的選定為物體數值孔徑 (ONA, Object numerical aperture)，並在優化時下優化運算元指定對應之 f-number。

### 3. MTF (Modulation transfer function)

由於所選擇的 CMOS 感光元件之畫素大小為  $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ ，並且考慮發光二極體為單一波長光源，因此可以計算得知系統最高之空間頻率為  $\frac{1}{2 \times 30\mu\text{m}} \cong 16.67 \text{ lp/mm}$ ，但在設計上亦必須考慮公差，於是要求 MTF 在高空間頻率 25lp/mm 必須在 20% 以上。

### 4. 光學畸變 (Distortion)

光學畸變在所有視角皆小於 5%。

### 5. 景深 (Depth of field)

景深須達 6mm。

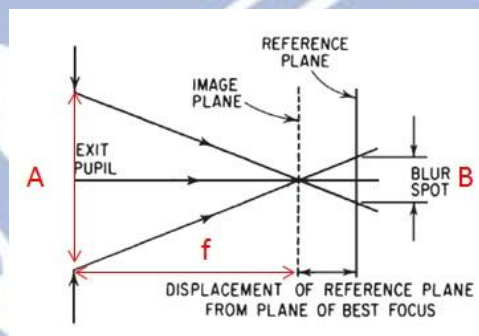


圖 4.3 景深示意圖

景深的概念建立在對於光學系統離焦點產生的模糊點有足夠容忍度的假設上；而超焦距離指的是在此距離內，光學系統必可視為對焦 (亦為景深延伸至無限遠處)[31]。

在設計時我們可將超焦距離納入起始設計：

$$D_{hyp} = \frac{-fA}{B} \quad \text{Eq.4-1}$$

其中  $D_{hyp}$  為系統可視為對焦的距離 (對應至光學系統物距)、A 為鏡頭入射光瞳之直徑、f 為鏡頭焦距長以及 B 為可接受的模糊點 (Blur) 直徑，如圖 4.3。由式 4-1

可推估，假若景深要夠長，則物距必須也要夠長。值得一提的是，上述假設皆以”完美成像”作假設，只適用於起始設計時光學鏡頭形式的選定。

#### 6. 系統長度 (Total length)

系統長度控制在 50mm 以內。

#### 7. 材質 (Material)

使用塑膠材質，一般而言考慮成本皆使用聚碳酸酯 (PC, Polycarbonate)。

整理規格如表 4.3

表 4.3 筆滑鼠成像光學規格表

| I   | 物空間        |       | 項目                  | 規格          |                   | 備註   |
|-----|------------|-------|---------------------|-------------|-------------------|--|
|     |            | I-1   | 物距(object distance) | 32-35-38mm  |                   | 景深達 6mm  |
| II  | 光學系統       | II-1  | f-number            | 4.2-3.4-2.8 |                   |  |
|     |            | II-2  | 畸變(distortion)      | < 5% (<3%)  |                   |  |
|     |            | II-3  | 系統全長 (TTL)          | <50mm       |                   | 自物體至成像面  |
|     |            | II-4  | 鏡頭孔徑                | 2~3mm       |                   |  |
|     |            | II-5  | 結構                  | 2P          |                   | PMMA or PC   |
| III | 像空間 (感光元件) |       |                     |             |                   |  |
|     |            | III-1 | 畫素大小                | 30um        | B/W               | MTF 截止頻率(cut-off frequency) 16.67 lp/mm<br>→ >0.2 @25lp/mm |
|     |            | III-2 | 成像孔徑                | 0.68mm      | →<br>0.88mm~1.0mm | 像高→0.44~0.5mm  |

### 4.3 設計流程

設計流程如圖 4.4 表示

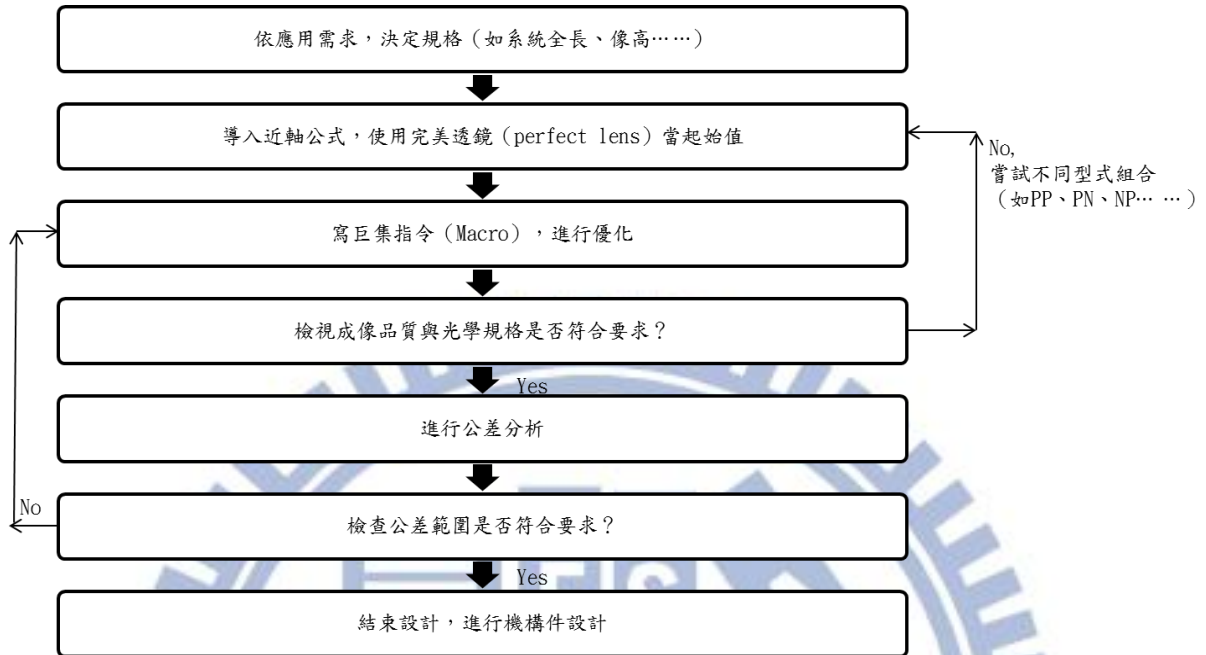


圖 4.4 設計優化流程圖

### 4.4 優化方式

此項光學設計的關鍵在於景深的範圍，目標在物距 32-35-38mm 時，MTF 皆有好的表現，於是利用光學軟體 Code V 內的組態設定，加強中心組態（物距為 35mm）。優化運算元設定像高、系統總長、畸變以及基本鏡間距；變數為透鏡曲率、透鏡厚度，並開放非球面係數下去進行優化。如表 4.4

表 4.4 優化運算元與限制

| 變數                           | 備註     |
|------------------------------|--------|
| 曲率(Curvature)                |        |
| 厚度(Thickness)                |        |
| 非球面係數(Aspheric coefficients) | 至 14 階 |

| 優化運算元                                     | 限制                  |
|---|---------------------|
| 最小軸上空氣間隙<br>(Minimum axial air spacing)   | 0.05mm              |
| 最小邊緣厚度(Minimum edge thickness)            | 0.14mm              |
| 最大空氣邊緣間隙<br>(Maximum air edge separation) | 0.0025mm            |
| 鏡面總長(第一面至成像面)                             | <6mm                |
| 第一組態(物距 30mm)像高                           | >-0.53mm<br><-0.5mm |
| 畸變(所有組態)                                  | >-0.03<br><0.03     |

根據優化運算元鍵入 Code V，並自行寫巨集指令(Macro)（如附錄一）。在優化的過程中，需反覆注意鏡片形狀與成像品質的變化，以針對限制條件做調整，必須經過多次嘗試，才能設計出符合規格的鏡組。

## 4.5 設計結果

完成優化後，設計結果如圖 4.5。並將目標值與設計值做比較如表 4.5。

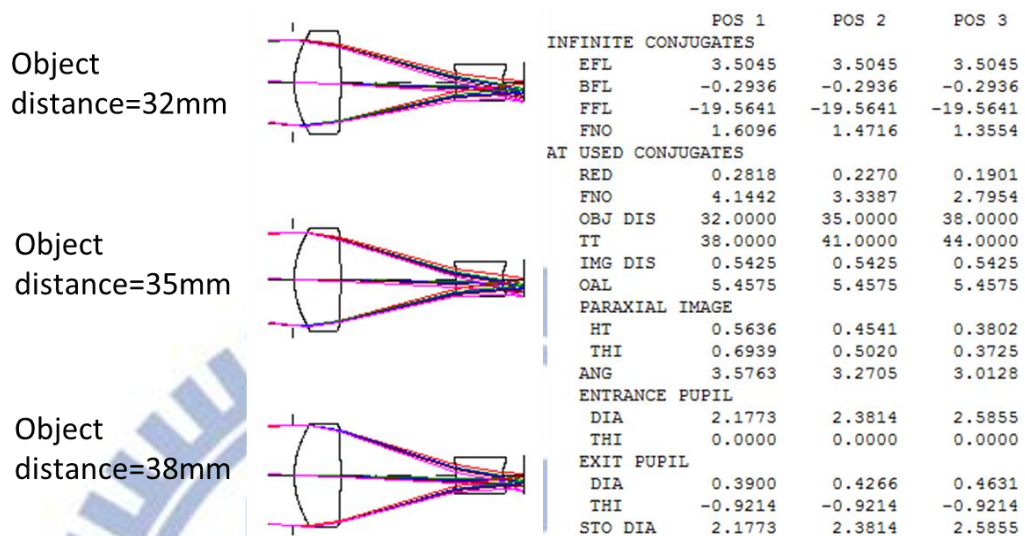


圖 4.5 設計結果。左為鏡片配置圖，由上往下依序為物距 32、35、38mm 的組態；右圖為一階資料

表 4.5 訂定規格與設計值結果比較

| I   | 物空間           |       | 項目                  | 規格                 | 設計值                                      |
|-----|---------------|-------|---------------------|--------------------|--|
|     |               | I-1   | 物距(object distance) | 32-35-38mm         | 32-35-38mm                               |
| II  | 光學系統          | II-1  | f-number            | 4.2-3.4-2.8        | 4.14-3.34-2.80                           |
|     |               | II-2  | 畸變(distortion)      | < 5% (<3%)         | <3%                                      |
|     |               | II-3  | 系統全長 (TTL)          | <50mm              | 44mm                                     |
|     |               | II-4  | 鏡頭孔徑                | 2~3mm              | 2.67mm                                   |
|     |               | II-5  | 結構                  | 2P                 | 2P                                       |
| III | 像空間<br>(感光元件) |       |                     |                    |  |
|     |               | III-1 | MTF                 | >20%<br>(@25lp/mm) | 於 25lp/mm 處皆<br>超過 20%；中心組<br>態甚至達 49.5% |
|     |               | III-2 | 像高                  | 0.44~0.5 mm        | -0.50mm<br>-0.46mm<br>-0.42mm            |

觀察上表，可觀察設計值皆符合規格要求。對於滑鼠，光源成像至感光元件並非為了成像，於是畸變程度並不會影響太大，但仍控制在 3% 以內；在 MTF 的表現上，即使兩側組態較弱，亦已達成像標準，在規格之內。

#### 4.5.1 成像性能評價

此小節將會列出本設計的光學品質表現結果，並且最後給予討論說明。

##### 1. 物距為 32mm 處

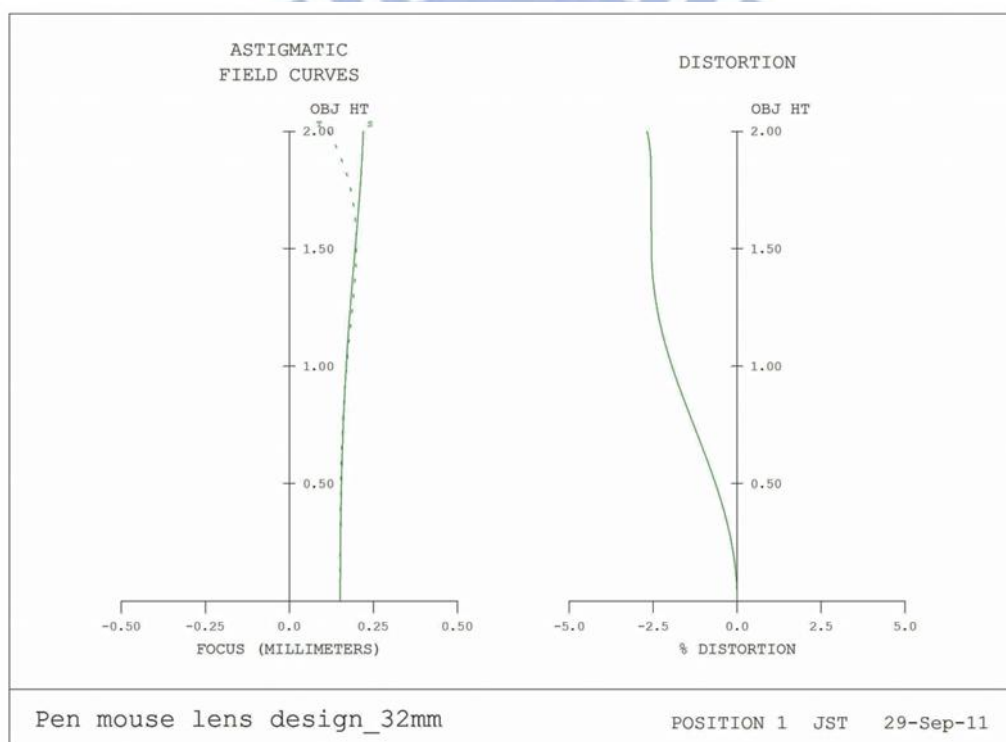


圖 4.6 物距 32mm—像散、場曲與畸變曲線圖(astigmatism field curve and distortion curve)

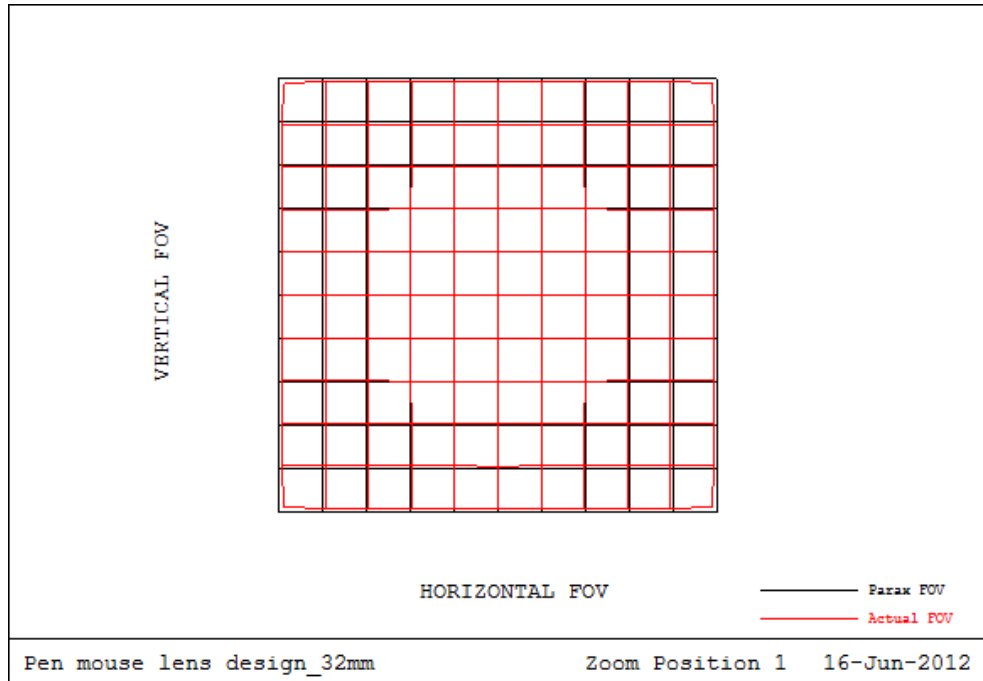


圖 4.7 物距 32mm—畸變格線圖(distortion grid)

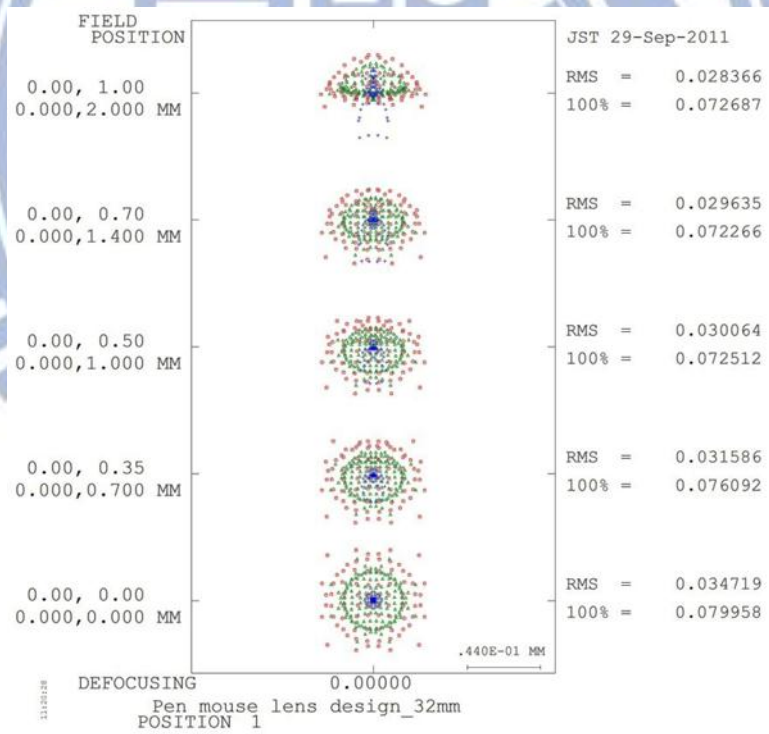


圖 4.8 物距 32mm—光斑圖(spot diagram)



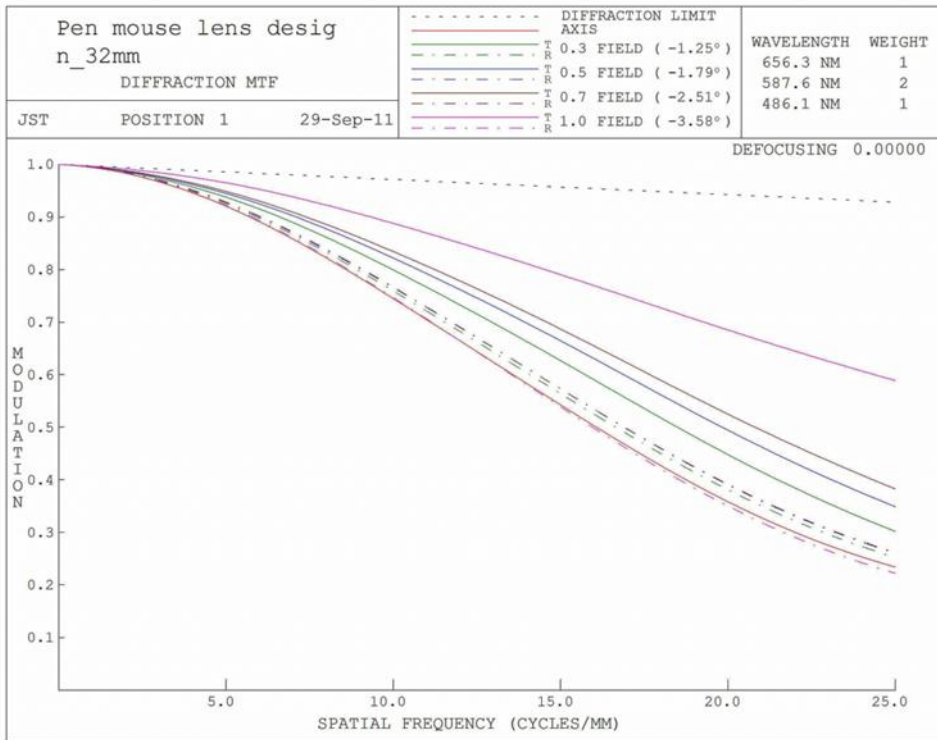


圖 4.9 物距 32mm—MTF 曲線圖

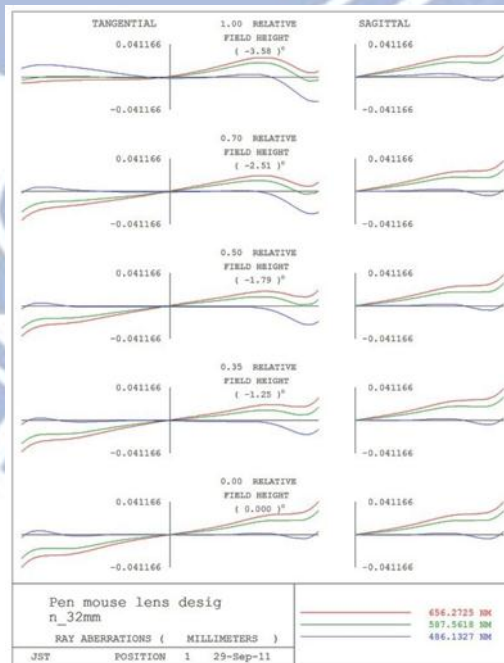


圖 4.10 物距 32mm—Ray aberration 圖

2. 物距為 35mm 處

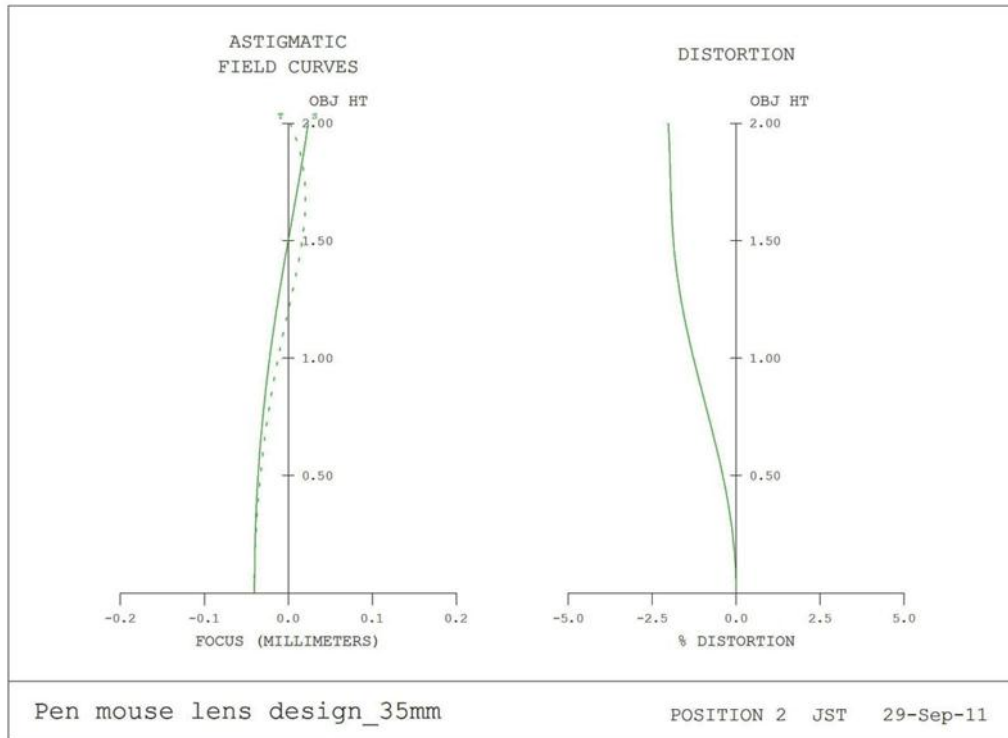


圖 4.11 物距 35mm—像散、場曲與畸變曲線圖(astigmatism field curve and distortion curve)

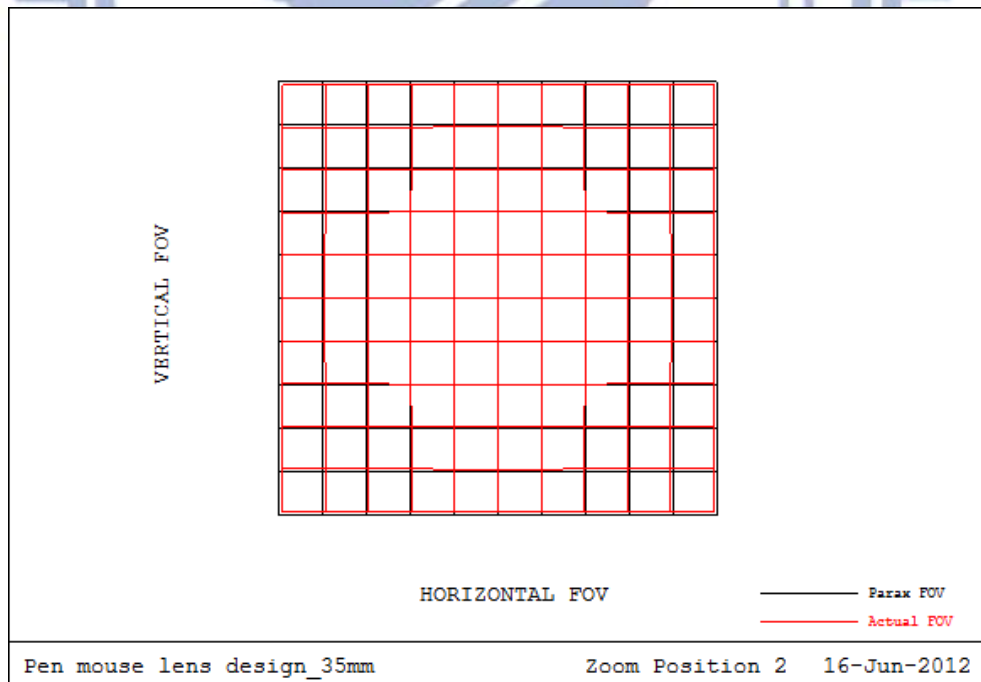


圖 4.12 物距 35mm—畸變格線圖(distortion grid)

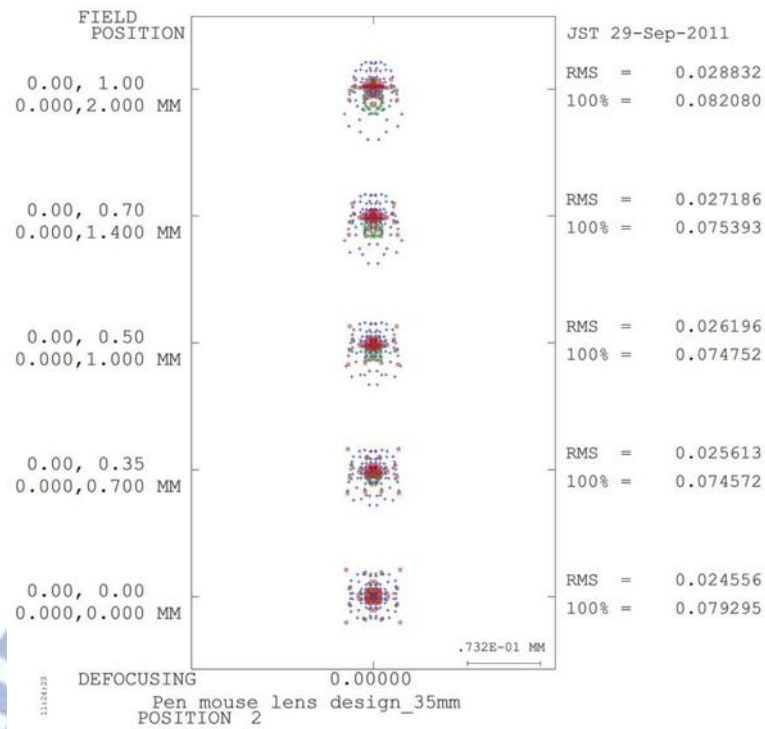


圖 4.13 物距 35mm—光斑圖 (spot diagram)

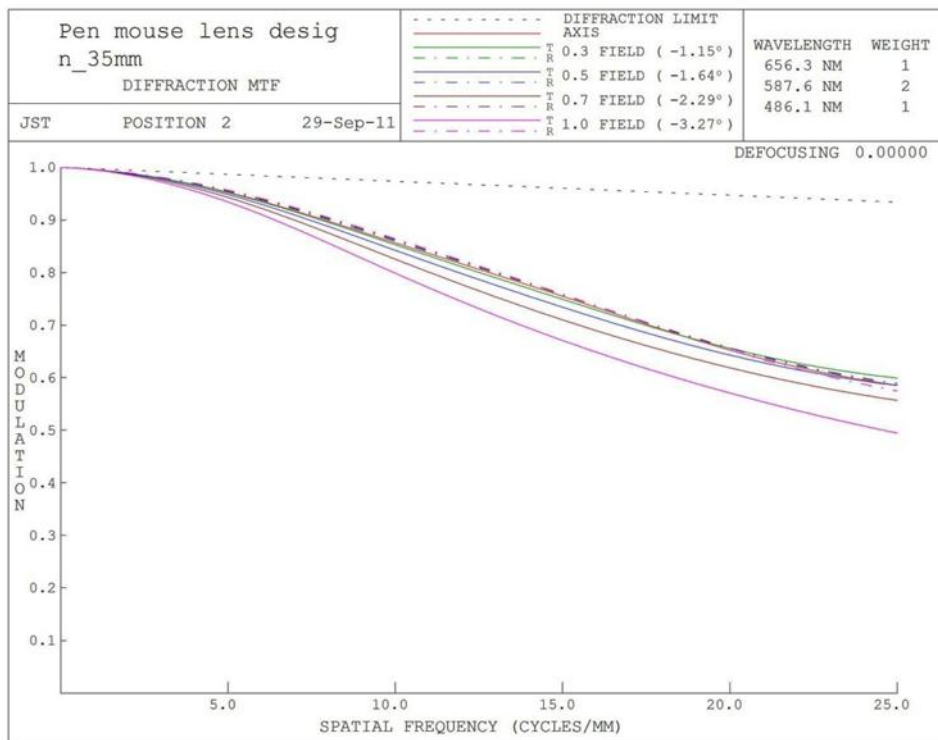


圖 4.14 物距 35mm—MTF 曲線圖

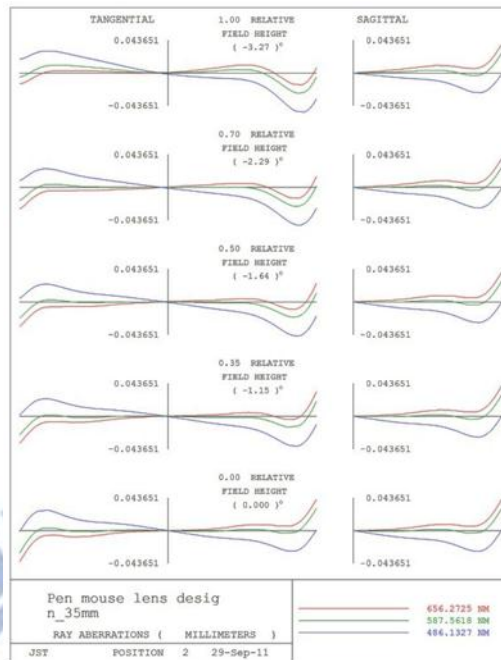


圖 4.15 物距 35mm—Ray aberration 圖

3. 物距為 38mm 處

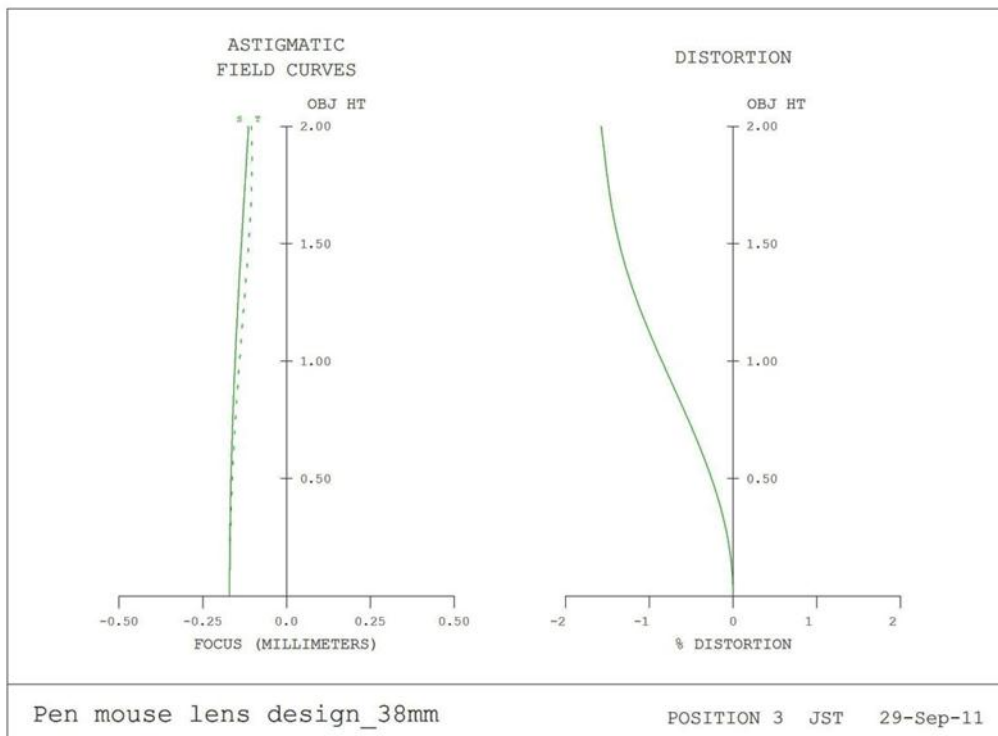


圖 4.16 物距 38mm—像散、場曲與畸變曲線圖(astigmatism field curve and distortion curve)

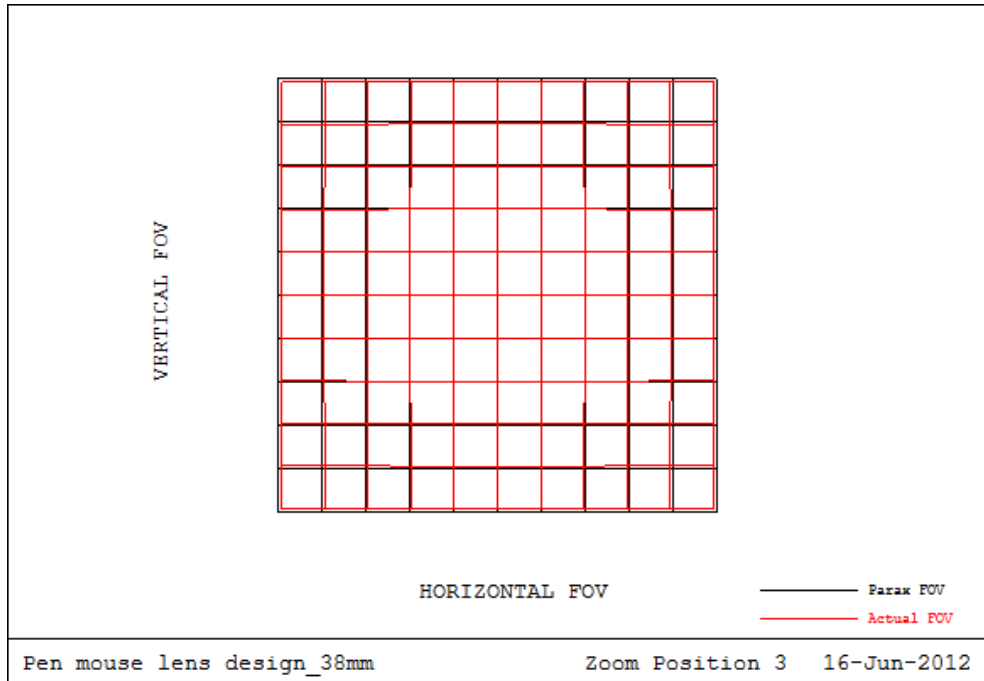


圖 4.17 物距 38mm—畸變格線圖(distortion grid)

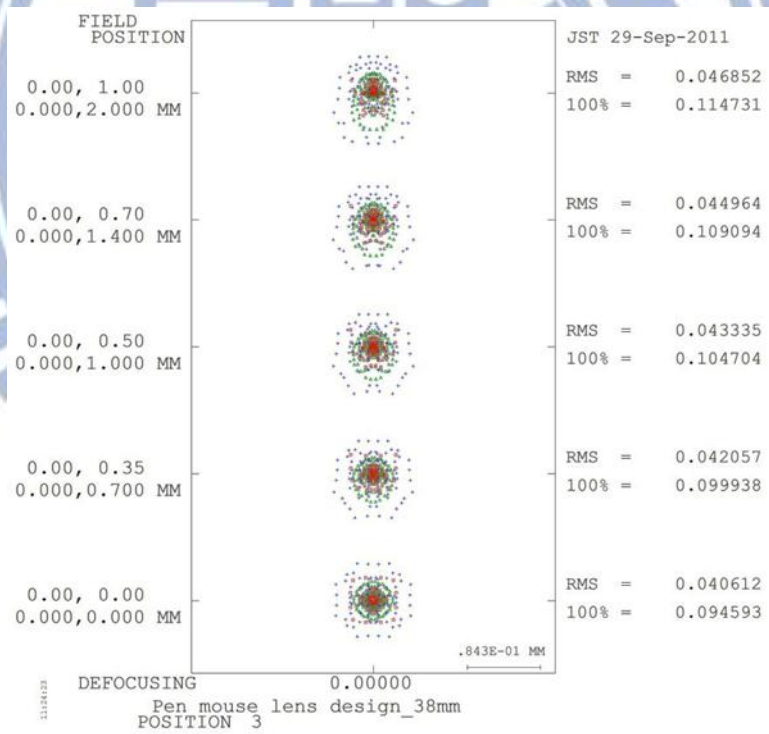


圖 4.18 物距 38mm—光斑圖(spot diagram)

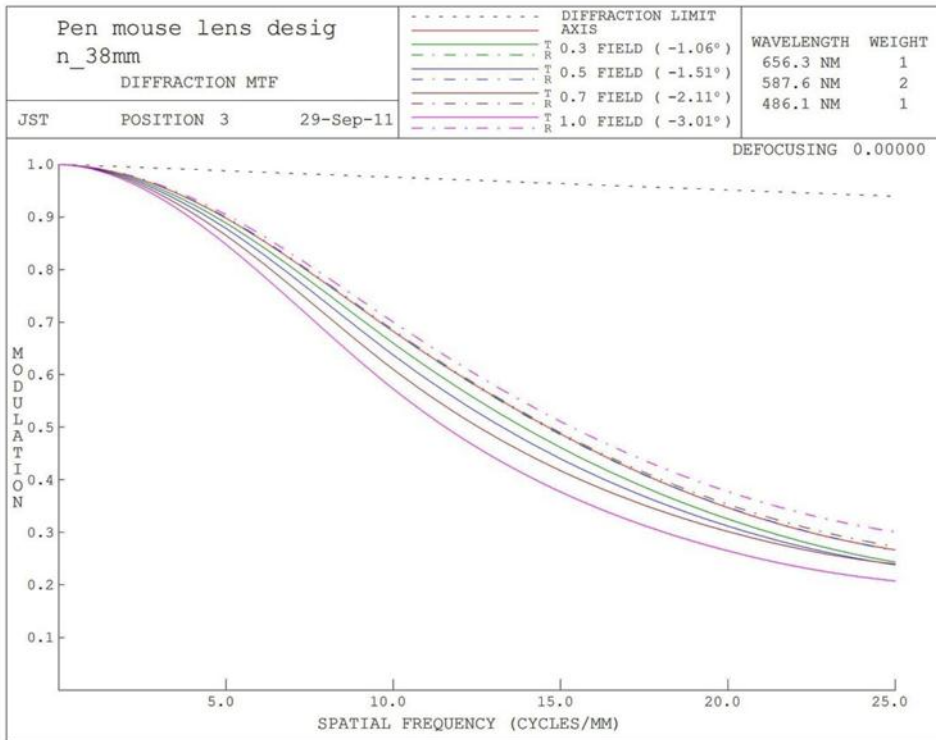


圖 4.19 物距 38mm—MTF 曲線圖

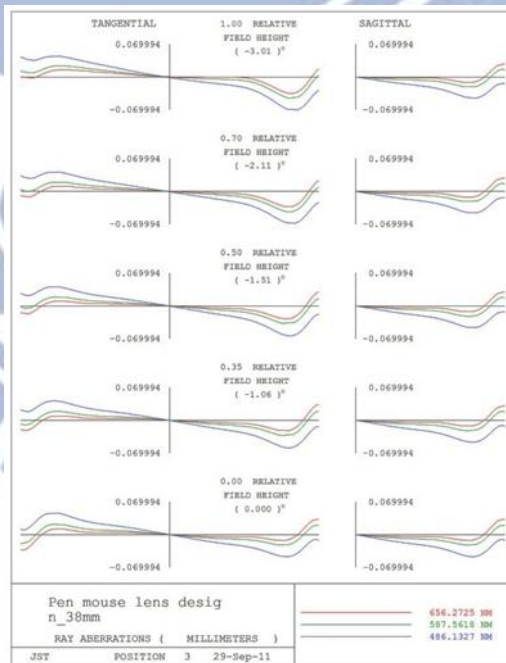


圖 4.20 物距 38mm—Ray aberration 圖

像散、場曲與畸變圖 (Astigmatism field curve and distortion curve) 表示出鏡頭的場曲情形以及成像的畸變狀況，在像散、場曲圖中，實線代表矢狀切面 (sagittal plane) 在各場點的焦點分布；虛線則代表正切切面 (tangential plane) 的各場點焦點分布，實線與虛線愈接合，則說明此鏡頭像散情形不明顯。由位於不同物距的像散、場曲圖 (圖 4.6, 4.11, 4.16) 可觀察出此鏡頭像散情形不嚴重。由畸變圖則可觀察不同組態在各場點的畸變量，最高達-2.67%，在所有變焦組態的光學品質皆達到標準，說明畫面形變程度是可以被人眼所接受的。

畸變格線圖 (Distortion grid) 則能夠看出在實際成像情況與理想成像情況的差異，黑線為近軸理想成像面，紅線則是實際成像面，由兩者差異量可觀察此畸變的類型為桶形畸變 (Barrel distortion)，物距較近時，畸變程度較大，然而大致亦可在感光元件上辨識 (<5%)。

光斑圖 (Spot diagram) 可觀察在不同場點的光斑情形，看彗差 (Coma) 情形是否嚴重。

而MTF曲線圖，包括對不同視場角與空間頻率作圖。此鏡組在中間組態 (物距為35mm，如圖4.14) 與所有視角的MTF 值在空間頻率為25 lp/mm 時，MTF 都可以大於45%，兩側因為離焦的緣故，於是較為下滑，然而MTF成像是品質仍是能被接受的，這點在之後的公差分析會加以說明。此圖同時也可以顯示出所有組態位置在所有視角 (除了物距30mm處的最外視角)，MTF徑向與切向的差值皆在20%之內，也就表示在成像的情況不會產生正切 (tangential) 方向與矢切 (sagittal) 方向成像清晰度差異過大。

Ray aberration 圖表示為在X和Y方向，光線像差與入瞳XY 座標的關係。由於比例尺度為 $\pm 0.07$ ，於是像差情形仍在接受範圍之內。

## 第五章 公差分析

### 5.1 公差介紹

光學成像系統被設計出來之後，必須考慮到真實生產時的製造情形、實際組裝時機構模組件的構造與應用端的使用者需求，這些都會影響到光學成像品質。考慮上述因素，於是必須先模擬公差分析，由結果可分析此光學系統在不同公差範圍的品質優劣狀況，這些分析的目的都在於減少之後的來回測試次數，以降低生產成本。以本論文設計的產品為例，一個好的設計必須考慮到成像品質在使用上的公差容忍度，以及合乎成本效益下關於製造、組裝上的公差容忍度。

本論文公差模擬使用光學軟體 CODE V 作分析與評估，其中定義了中心公差（centered tolerances）和偏心公差（decentered tolerances）兩種[32]。

### 5.2 鏡組公差分析

#### 5.2.1 公差範圍決定

鏡組設計完成之後，基於實際製造與組裝的考量，必須給予其一有效公差容忍範圍，也就是說在此公差容忍範圍之內，成像品質皆能夠達到規範標準。公差範圍的給定基本上來自於製造機台的製造公差，以及生產線上的組裝公差。公差範圍若訂定太嚴或太鬆，則無法有效確認成像品質。一般而言，製造公差為 $\pm 0.02\text{mm}$ ；而組裝公差在 $\pm 0.05\text{mm}$ 之間。

在光學軟體 CODE V 使用公差分析，必須先鍵入每一項公差的合理範圍（如表 5.1），而評斷方式以 MTF 的降低量作根據，因為 MTF 為所有像差的綜合表現，於是藉由 MTF 的降低量來得知整體成像品質的情況大致合理客觀。

以本論文而言，考量適當的公差分析後，生產良率（cumulative probability）為 97.7%（ $2\sigma$ ，兩個標準差）時必須達 0.2（20%）以上，以確定量產上鏡頭能保持高光學成像品質。另外由於本實驗針對光學系統的景深作分析，給予三個組態分別為前組態（front



zoom，物距 32mm 處）、中組態（middle zoom，物距 35mm 處）以及後組態（rear zoom，物距 38mm 處）。此實驗並非變焦系統，於是無位移補償來維持 MTF，故離焦面的成像品質勢必會下降，所以在公差分析的討論上，主要針對中組態，也就是焦平面位置的成像品質進行討論分析。

表 5.1 公差類型分類與規格

| 公差 (Tolerance)               | 項目                     | 規格                           |
|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 中心公差<br>Centered tolerance   | Test plate Fit         | 2.0 fringes ( $\lambda$ )    |
|                              | Radius delta           | 0.02 mm                      |
|                              | Thickness delta        | 0.02 mm                      |
|                              | Refractive index delta | 0.002<br>Abbe's number: 0.8% |
|                              | Irregularity           | 1.0 fringes ( $\lambda$ )    |
| 偏心公差<br>Decentered tolerance | Element tilt           | 1 arc min                    |
|                              | Element wedge          | 1 arc min                    |
|                              | Element decenter       | 0.01 mm                      |

### 5.2.2 公差模擬結果

以像平面位置為補償面（compensator），對光學系統的成像品質做機械式補償，在各組態的公差分析結果如圖 5.1 至圖 5.3 與表 5.2 至表 5.4。

#### 鏡頭在物距為 32mm 時的公差分析結果

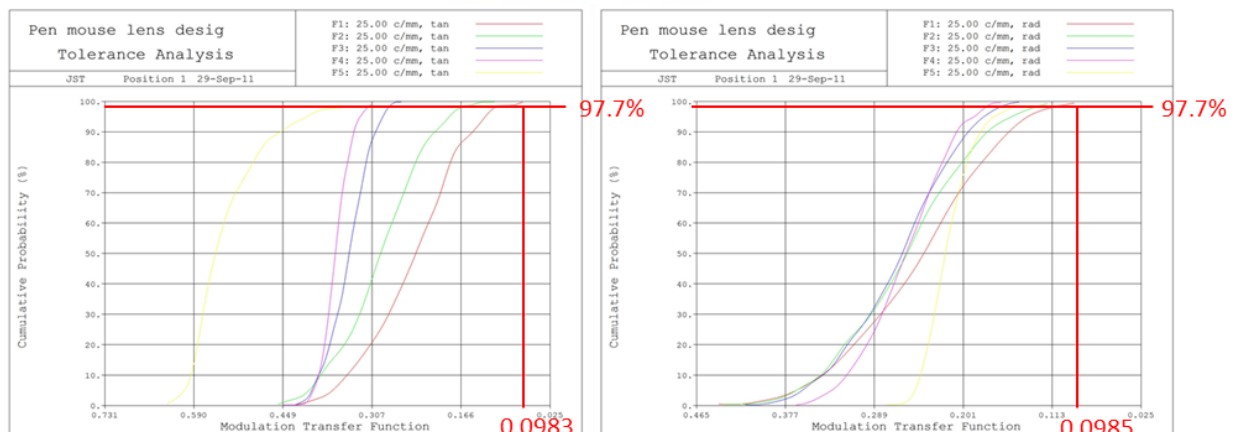


圖 5.1 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率取至 25lp/mm 時的公差分析結果。左圖為正切 (tangential) 各場點分布情形；右圖為橫向 (radial) 各場點分布情形

表 5.2 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率取至 25lp/mm 時，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析結果

| RELATIVE FIELD | FREQ L/MM | AZIM DEG | WEIGHT | DESIGN | DESIGN + TOL * | COMPENSATOR RANGE (+/-) * |
|----------------|-----------|----------|--------|--------|----------------|---------------------------|
| DLZ S6         |           |          |        |        |                |                           |
| 0.00, 0.00     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2295 | 0.0983         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.35     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2947 | 0.1605         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.50     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.3493 | 0.2754         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.70     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.3734 | 0.3017         | 0.144068                  |
| 0.00, 1.00     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.5895 | 0.4005         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.00     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2295 | 0.0985         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.35     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2482 | 0.1247         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.50     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2606 | 0.1517         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.70     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2582 | 0.1687         | 0.142453                  |
| 0.00, 1.00     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2268 | 0.1663         | 0.142453                  |

鏡頭在物距為 35mm 時的公差分析結果

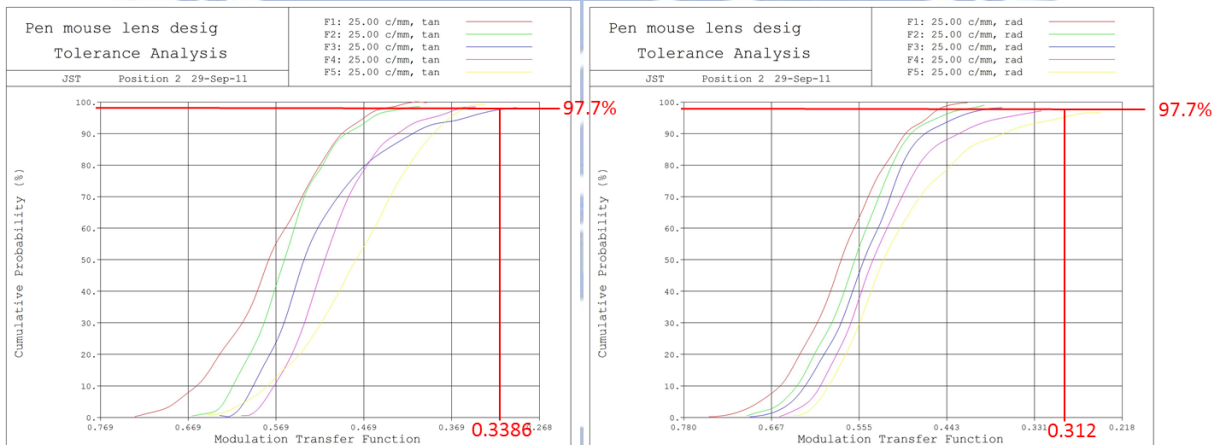


圖 5.2 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率取至 25lp/mm 時的公差分析結果。左圖為正切 (tangential) 各場點分布情形；右圖為橫向 (radial) 各場點分布情形

表 5.3 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率取至 25lp/mm 時，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析結果

| RELATIVE FIELD | FREQ L/MM | AZIM DEG | WEIGHT | DESIGN | DESIGN + TOL * | COMPENSATOR RANGE (+/-) * |
|----------------|-----------|----------|--------|--------|----------------|---------------------------|
|                |           |          |        |        |                | DLZ S6                    |
| 0.00, 0.00     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.5815 | 0.4430         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.35     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.5906 | 0.4429         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.50     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.5771 | 0.3507         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.70     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.5470 | 0.3828         | 0.144068                  |
| 0.00, 1.00     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.4914 | 0.3386         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.00     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.5815 | 0.4427         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.35     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.5843 | 0.4369         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.50     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.5775 | 0.4164         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.70     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.5773 | 0.3741         | 0.142453                  |
| 0.00, 1.00     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.5707 | 0.3120         | 0.142453                  |

鏡頭在物距為 38mm 時的公差分析結果

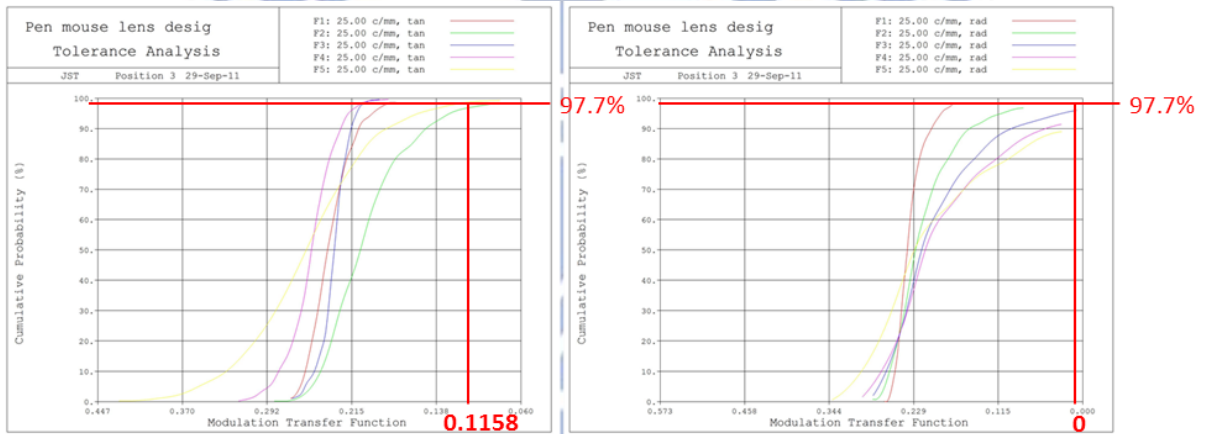


圖 5.3 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率取至 25lp/mm 時的公差分析結果。左圖為正切 (tangential) 各場點分布情形；右圖為橫向 (radial) 各場點分布情形

表 5.4 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率取至 25lp/mm 時，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析結果

| RELATIVE FIELD | FREQ L/MM | AZIM DEG | WEIGHT | DESIGN | DESIGN + TOL * | COMPENSATOR RANGE (+/-) * |
|----------------|-----------|----------|--------|--------|----------------|---------------------------|
|                |           |          |        |        |                | DLZ S6                    |
| 0.00, 0.00     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2488 | 0.1898         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.35     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2308 | 0.1158         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.50     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2291 | 0.2000         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.70     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2407 | 0.1993         | 0.144068                  |
| 0.00, 1.00     | 25.00     | TAN      | 1.00   | 0.2095 | 0.1247         | 0.144068                  |
| 0.00, 0.00     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2488 | 0.1912         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.35     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2520 | 0.1145         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.50     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2562 | 0.0389         | 0.142453                  |
| 0.00, 0.70     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2605 | 0.0000         | 0.142453                  |
| 0.00, 1.00     | 25.00     | RAD      | 1.00   | 0.2879 | 0.0000         | 0.142453                  |

### 5.2.3 公差結果分析與說明

公差分析圖縱軸為生產良率，橫軸為 MTF 值，不同顏色分別代表不同視場角的公差結果，分成橫向 (radial) 與縱向 (tangential)。

由結果可看出在前組態 (front zoom, 物距在 32mm 處) 與後組態 (rear zoom, 物距在 38mm 處) 時，因為已偏離焦平面，於是 MTF 值都降至幾乎為零，其中縱向切面的公差結果比橫向切面稍微較好一些。在中間組態，也就是物距在 35mm 處時，MTF 值在 25lp/mm 時皆在 20% 以上，表示在公差範圍之內皆有良好的成像表現。另外在前後組態雖然 MTF 值皆掉至幾乎為零，然而若是考慮感光元件的截止頻率 16.67lp/mm，則可望到達 20%，如圖 5.4~圖 5.6 與表 5.5~表 5.7 所示，僅僅在物距為 38mm 處之軸向公差容忍度不足 20%，其餘皆有良好的品質表現；綜合上述討論，此光學成像系統尚可滿足此公差範圍。

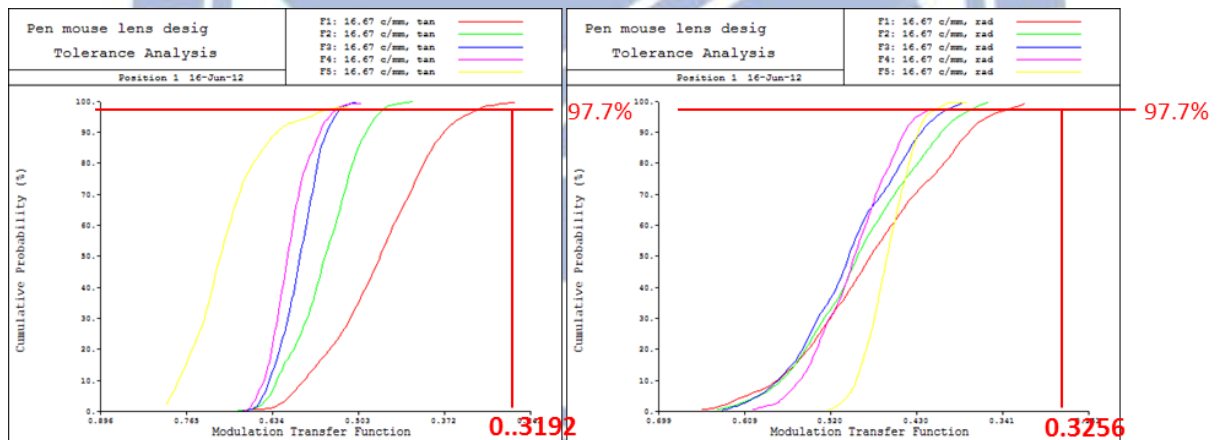


圖 5.4 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時的公差分析結果。左圖為正切 (tangential) 各場點分布情形；右圖為橫向 (radial) 各場點分布情形

表 5.5 鏡頭在物距為 32mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析結果

| RELATIVE FIELD | FREQ L/MM | AZIM DEG | WEIGHT | DESIGN | DESIGN + TOL * | COMPENSATOR RANGE (+/-) * |
|----------------|-----------|----------|--------|--------|----------------|---------------------------|
|                |           |          |        |        |                | DLZ S6                    |
| 0.00, 0.00     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.4760 | 0.3192         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.35     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.5633 | 0.4570         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.50     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.6051 | 0.5217         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.70     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.6283 | 0.5278         | 0.124229                  |
| 0.00, 1.00     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.7509 | 0.5656         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.00     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4760 | 0.3256         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.35     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4904 | 0.3632         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.50     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.5038 | 0.3870         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.70     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.5010 | 0.4064         | 0.126660                  |
| 0.00, 1.00     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4709 | 0.3988         | 0.126660                  |

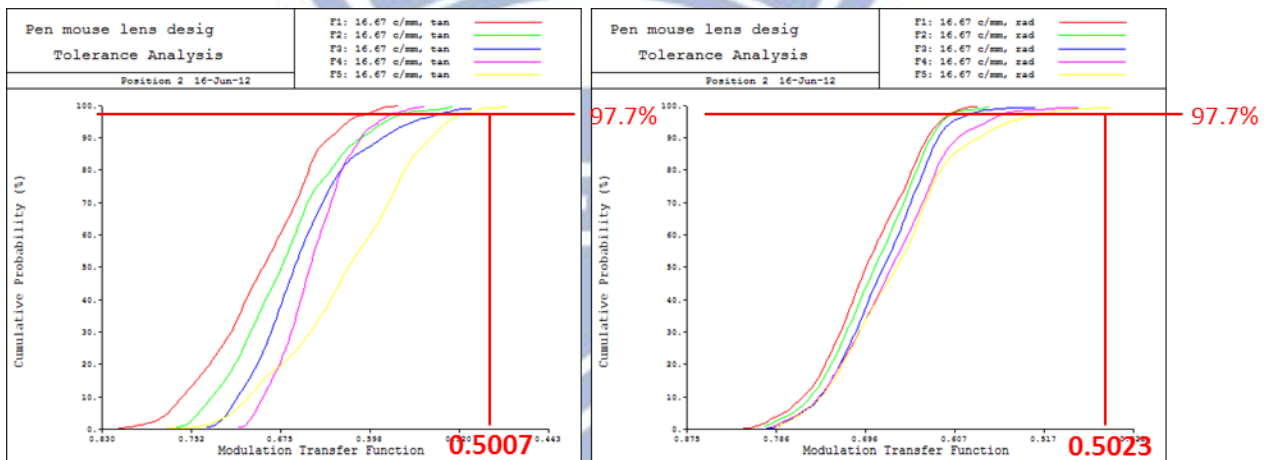


圖 5.5 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時的公差分析結果。左圖為正切 (tangential) 各場點分布情形；右圖為橫向 (radial) 各場點分布情形

表 5.6 鏡頭在物距為 35mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析結果

| RELATIVE FIELD | FREQ L/MM | AZIM DEG | WEIGHT | DESIGN | DESIGN + TOL * | COMPENSATOR RANGE (+/-) * |
|----------------|-----------|----------|--------|--------|----------------|---------------------------|
|                |           |          |        |        |                | DLZ S6                    |
| 0.00, 0.00     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.7100 | 0.5923         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.35     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.7101 | 0.5624         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.50     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.6970 | 0.5449         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.70     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.6719 | 0.5750         | 0.124229                  |
| 0.00, 1.00     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.6333 | 0.5007         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.00     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.7100 | 0.5892         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.35     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.7130 | 0.5785         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.50     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.7121 | 0.5629         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.70     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.7125 | 0.5288         | 0.126660                  |
| 0.00, 1.00     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.7161 | 0.5023         | 0.126660                  |

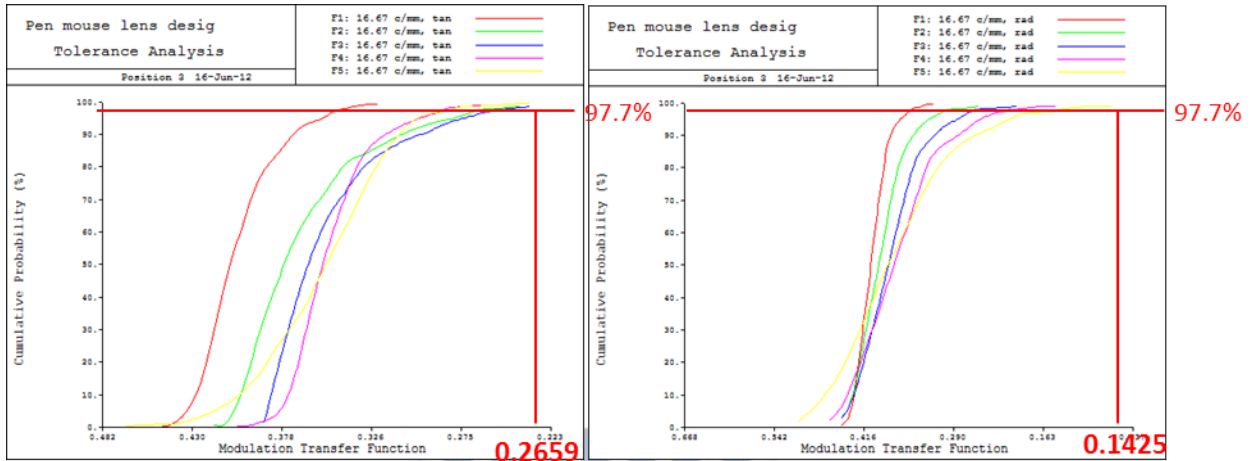


圖 5.6 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時的公差分析結果。左圖為正切 (tangential) 各場點分布情形；右圖為橫向 (radial) 各場點分布情形

表 5.7 鏡頭在物距為 38mm，空間頻率取至 16.67lp/mm 時，良率在 97.7% ( $2\sigma$ ) 之公差分析結果

| RELATIVE FIELD | FREQ L/MM | AZIM DEG | WEIGHT | DESIGN | DESIGN + TOL * | COMPENSATOR RANGE (+/-) * |
|----------------|-----------|----------|--------|--------|----------------|---------------------------|
|                |           |          |        |        |                | DLZ S6                    |
| 0.00, 0.00     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.4270 | 0.3418         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.35     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.4044 | 0.2701         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.50     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.3872 | 0.2633         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.70     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.3717 | 0.2834         | 0.124229                  |
| 0.00, 1.00     | 16.67     | TAN      | 1.00   | 0.3300 | 0.2659         | 0.124229                  |
| 0.00, 0.00     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4270 | 0.3389         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.35     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4296 | 0.2859         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.50     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4239 | 0.2439         | 0.126660                  |
| 0.00, 0.70     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4251 | 0.1987         | 0.126660                  |
| 0.00, 1.00     | 16.67     | RAD      | 1.00   | 0.4481 | 0.1425         | 0.126660                  |

### 5.3 使用端公差分析

#### 5.3.1 傾斜角公差項說明與結果

上述公差分析大致為製造、組裝之公差分析，然而在筆滑鼠的使用上，筆滑鼠的傾斜角度為更加重要之公差項。因為筆的傾斜，會使得光源（SMD LED）投影之斑點物平面傾斜而影響像平面之成像品質（如圖 5.4），為了單獨討論此項公差，本節以紀錄並畫出不同傾斜角於各 MTF 值之最低情形的圖表來分析討論。結果如圖 5.5 至 5.7

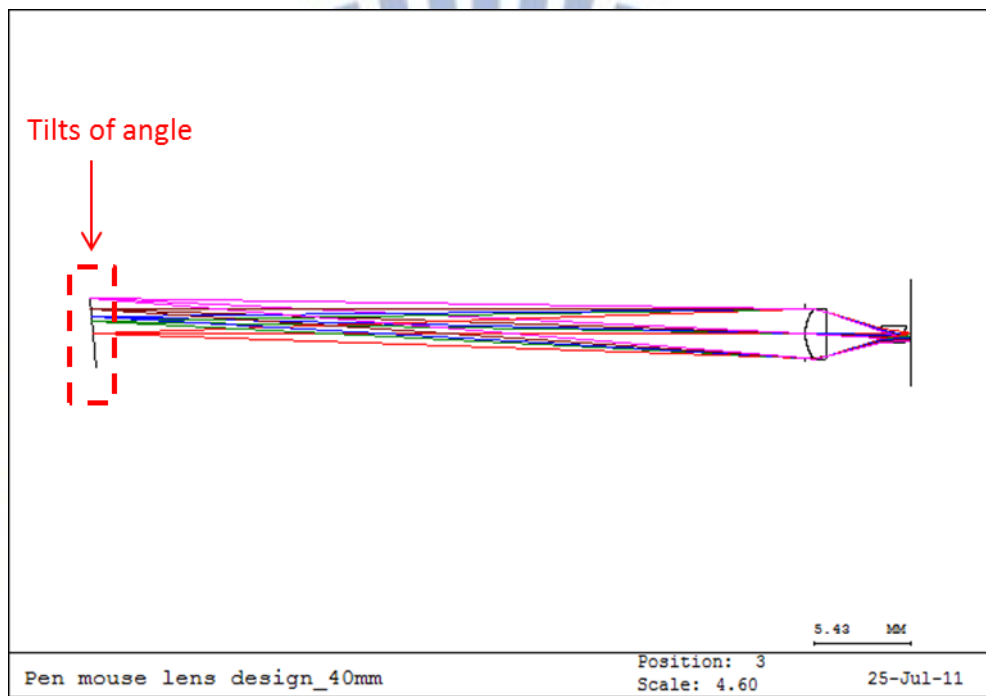


圖 5.7 傾斜角度在 CODE V 上的 2D 模擬圖

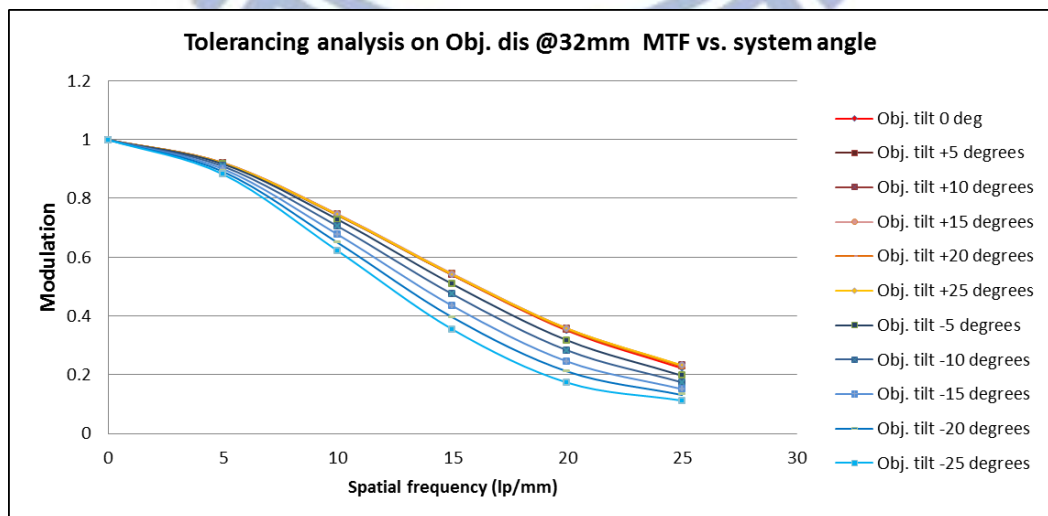


圖 5.8 物距為 32mm 處之各傾斜角度與 MTF 曲線變化圖

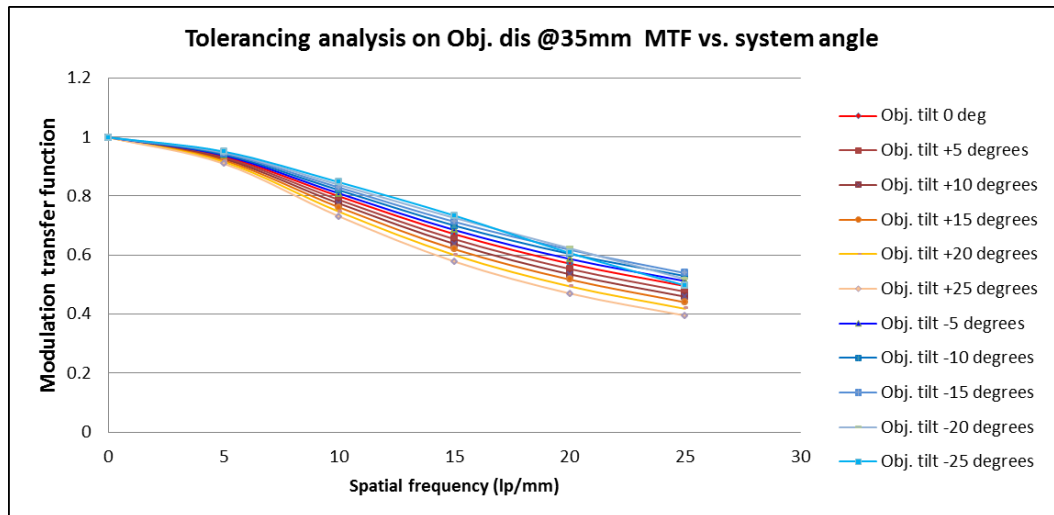


圖 5.9 物距為 35mm 處之各傾斜角度與 MTF 曲線變化圖

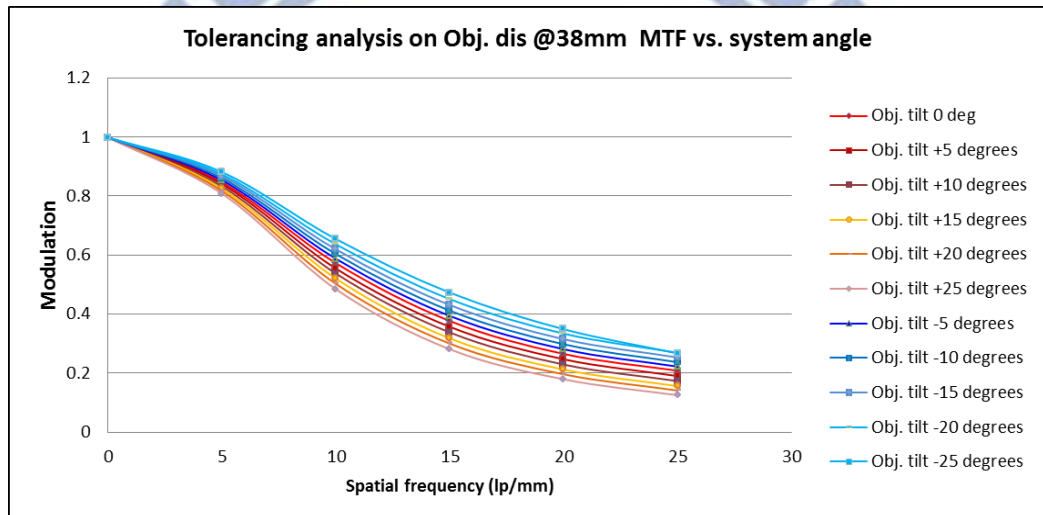


圖 5.10 物距為 38mm 處之各傾斜角度與 MTF 曲線變化圖

### 5.3.2 傾斜角公差結果分析

由圖 5.5 可觀察出，在物距為 32mm 處離焦情形嚴重，於是 MTF 最低值在空間頻率約為 18lp/mm 處就幾乎降至 0.2 以下；在物距為 38mm 處亦同（圖 5.7）。

接著由圖 5.6 可觀察在中間組態，也就是物距為 35mm 處時，MTF 之成像品質皆在 40% 以上，其中包含傾斜角較大的  $+25^\circ$ 。說明此筆滑鼠設計在傾斜角  $\pm 25^\circ$  的情況下，皆能維持良好的光學成像品質。

最後確認在傾斜角度的情況下，造成所需透鏡孔徑的變化公差量，如表 5.5，在不同傾斜角度，最大孔徑與最小孔徑差值為  $2.7306\text{mm} - 2.6158\text{mm} = 0.1148\text{mm}$ 。可得知兩點



關係：第一，傾斜角度 $\pm 25^\circ$ 之間時，所需孔徑仍在第四章訂定的光學規格 3mm 以內；  
 第二，於兩個最大傾斜角度之間，所需孔徑需要有約 0.115mm 的容忍度。

表 5.8 不同傾斜角度時的最大孔徑表

| Angle tolerancing     | max. lens aperture size |
|-----------------------|-------------------------|
| Obj. tilt 0 deg       | 2.6652mm                |
| Obj. tilt +5 degrees  | 2.6776mm                |
| Obj. tilt -5 degrees  | 2.653mm                 |
| Obj. tilt +10 degrees | 2.69mm                  |
| Obj. tilt -10 degrees | 2.6404mm                |
| Obj. tilt +15 degrees | 2.7028mm                |
| Obj. tilt -15 degrees | 2.6276mm                |
| Obj. tilt +20 degrees | 2.7164mm                |
| Obj. tilt -20 degrees | 2.6158mm                |
| Obj. tilt +25 degrees | 2.7306mm (maximum)      |
| Obj. tilt -25 degrees | 2.6158mm (minimum)      |

## 第六章 機構件建立

### 6.1 機構件說明與規格訂定

光學鏡頭經設計優化、公差分析完成以後，接著須考慮其餘機構件的部份。誠如前述 3.1 節—光學滑鼠操作原理所敘述，光學滑鼠基本操作原理依序可粗略分成三個步驟，如圖 6.1：

1. 光源 (SMD LED) 發光，經光導 (Light guide) 集中與傳播光線，使光線均勻擴散至待測面。
2. 待測面 (如桌面) 之均勻擴散面便成一面光源，反射經光學鏡頭成像至感光元件 (sensor)。
3. 經感光元件之影像處理器做座標位移分析，輸出訊號至電腦。

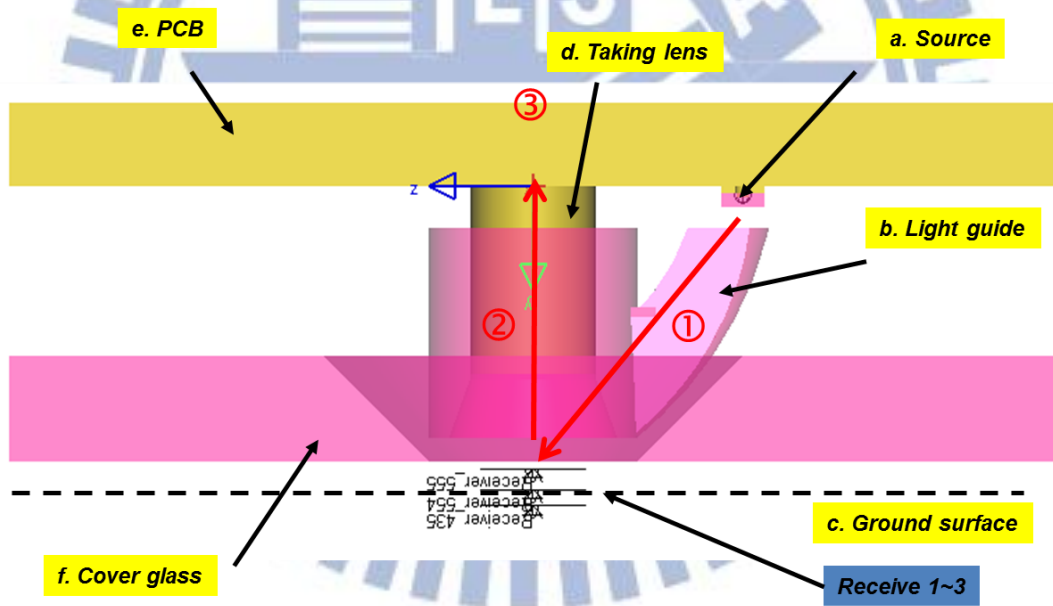


圖 6.1 光學滑鼠機構件示意圖。成像步驟依序如上述 1、2、3 所示。a 為光源、b 為光導、c 為待測面 (桌面)、經 d 光學鏡頭成像、e 為印刷電路板，感光元件則嵌入至上頭、f 為覆蓋玻璃；另外因考量成像物距公差，在模擬時定義三組接收面 (receiver 1~3)

鑒於上述原理及應用端之使用者需求，可建立出本論文之機構件規格，如圖 6.2 所示，規格並於本小節後頭各段作說明。

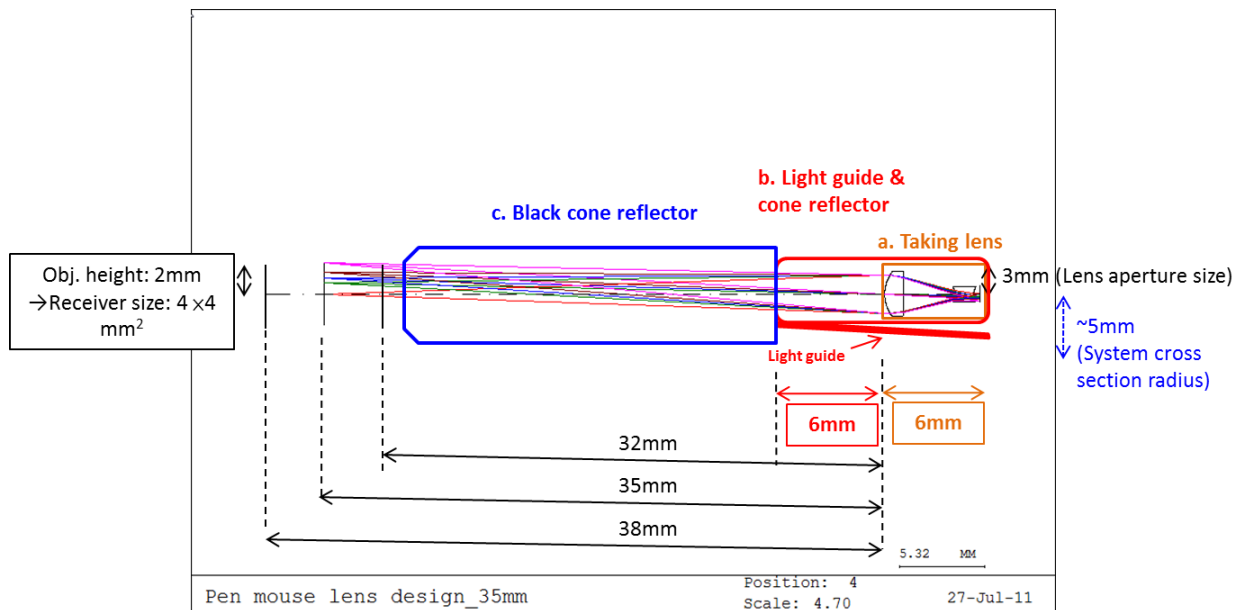


圖 6.2 筆滑鼠機構件示意圖。(a) 為光學成像鏡組、(b) 為光導與環狀反射機構件、(c) 黑件（筆滑鼠之外殼機構）

### 6.1.1 應用端之使用者需求說明

回顧成像鏡組之光學系統設計，再考量使用者需求，可歸納在應用端之使用者需求如下，而這也將納入機構件的設計：

- I. 物距必須有 32mm~38mm 之容忍度，也就是指第一面透鏡至物面須達 32mm 以上。
- II. 筆滑鼠外殼機構截面直徑最多達 10mm。

### 6.1.2 光導(Light guide)與環狀反射體 (Cone reflector) 設計說明

光導 (light guide) 主要目的在於將光源 (SMD LED) 所發射之光線均勻打至光學鏡頭之物面；而環狀反射體 (Cone reflector) 其實就是連結光導與成像鏡組之機構件，然而我們能夠在這機構件上作些出光口的曲面設計，以提高出光亮度或者均勻度。由於製程上的限制，光導與環狀反射體之機構件的長度最大值為 12mm。

### 6.1.3 黑件 (Black cone reflector) 說明

黑件主要是為了模擬光線自光導經過筆滑鼠機構外殼之情形而設立，簡單來說，黑件也就是筆滑鼠之機構外殼，於本論文採用塑膠黑件，藉此要求機構表面對光的吸收率。

### 6.1.4 設計規格表與挑戰

由上述筆滑鼠設計機構件規格，加上第四章所附之光學成像規格整理成一完整規格表如表 6.1

表 6.1 筆滑鼠完整規格表

| I   | 物空間        |       | 項目                                       | 規格             |                   | 備註   |
|-----|------------|-------|--|----------------|-------------------|--|
|     |            | I-1   | 物距(object distance)                      | 32-35-38mm     |                   | 景深達 6mm  |
| II  | 光學系統       | II-1  | f-number                                 | 4.14-3.34-2.80 |                   |  |
|     |            | II-2  | 畸變(distortion)                           | < 5% (<3%)     |                   |  |
|     |            | II-3  | 系統全長 (TTL)                               | <50mm          |                   | 自物體至成像面  |
|     |            | II-4  | 鏡頭孔徑                                     | 2~3mm          |                   |  |
|     |            | II-5  | 結構                                       | 2P             |                   | 材質：PMMA 或 PC   |
| III | 像空間 (感光元件) |       |  |                |                   |  |
|     |            | III-1 | 畫素大小                                     | 30um           | B/W               | MTF 截止頻率 (cut-off frequency) 16.67 lp/mm → >0.2 @25lp/mm |
|     |            | III-2 | 成像孔徑                                     | 0.68mm         | →<br>0.88mm~1.0mm | 像高→0.44~0.5mm  |
| IV  | 照明與機構元件    | IV-1  | 鏡頭與感光元件承載具                               | ≤ 3-6mm        |                   | 光學鏡頭 TTL~6mm   |
|     |            | IV-2  | 光導 (light guide) /環狀反射體 (cone reflector) | ≤ 12mm         |                   |  |
|     |            | IV-3  | 黑件                                       | ≤ 26mm         |                   |  |

綜合以上討論，可依使用者需求與製程限制歸納出下列在設計時面臨之挑戰：

1. 物距很長，而光導因製程限制，與物距相較短了許多，必須考量並選定適當能量強度之光源。
2. 因橫截面需求（~10mm），光導出光角度受限，恐怕影響光線傳導至待測面之強度與均勻度。

## 6.2 機構件設計結果與光學模擬

### 6.2.1 能量轉換原理及均勻度計算說明

本節將討論光源射出光線經光導機構件至待測面之照度關係，一般而言，須有足夠強度以及足夠均勻的照明範圍，方能確認影像之可見度。在本論文光源的選定是表面黏著式的發光二極體（SMD LED, Surface Mounted Device Light-Emitting Diode），型號是億光電子工業股份有限公司（EVERLIGHT ELECTRONICS CO., LTD）的 19-217/R6C 紅光發光二極體。簡易規格如表 6.2，並附上其基本電光特性曲線圖如圖 6.3。

表 6.2 本論文選用型號為 19-215UBC 之 SMD LED 規格

| Device Selection Guide |          |               |             |
|------------------------|----------|---------------|-------------|
| Part No.               | Chip     |               | Lens Color  |
|                        | Material | Emitted Color |             |
| 19-217/R6C             | AlGaInP  | Brilliant Red | Water Clear |

| Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C) |      |      |      |      |           |
|---|------|------|------|------|-----------|
| Parameter                                 | Min. | Typ. | Max. | Unit | Condition |
| Peak Wavelength                           | ---- | 632  | ---- | nm   | IF=20mA   |
| Dominant Wavelength                       | ---- | 624  | ---- | nm   | IF=5mA    |
| Spectrum Radiation Bandwidth              | ---- | 20   | ---- | nm   | IF=20mA   |
| Forward Voltage                           | ---- | 2.0  | 2.4  | V    | IF=5mA    |
| Reverse Current                           | ---- | ---- | 10   | μA   | VR=5V     |

資料來源：EVERLIGHT ELECTRONICS's Technical Data Sheet—0.4mm Height Flat Top

表 6.3 19-217R6C 系列 SMD LED 之發光強度表

IF=20mA

| Part No.        | Parameter          | Symbol | Typ. | Bin | Min. | Max. | Unit |
|-----------------|--------------------|--------|------|-----|------|------|------|
| 19-217/R6C-P1Q2 | Luminous Intensity | IV     | 75   | P1  | 45   | 57   | mcd  |
|                 |                    |        |      | P2  | 57   | 72   |      |
|                 |                    |        |      | Q1  | 72   | 90   |      |
|                 |                    |        |      | Q2  | 90   | 112  |      |
| 19-217/R6C-Q1R1 | Luminous Intensity | IV     | 100  | Q1  | 72   | 90   | mcd  |
|                 |                    |        |      | Q2  | 90   | 112  |      |
|                 |                    |        |      | R1  | 112  | 140  |      |
| 19-217/R6C-Q2R2 | Luminous Intensity | IV     | 135  | Q2  | 90   | 112  | mcd  |
|                 |                    |        |      | R1  | 112  | 140  |      |
|                 |                    |        |      | R2  | 140  | 180  |      |

資料來源：EVERLIGHT ELECTRONICS's Technical Data Sheet – 0.4mm Height Flat Top

LED\_19-217R6C page4

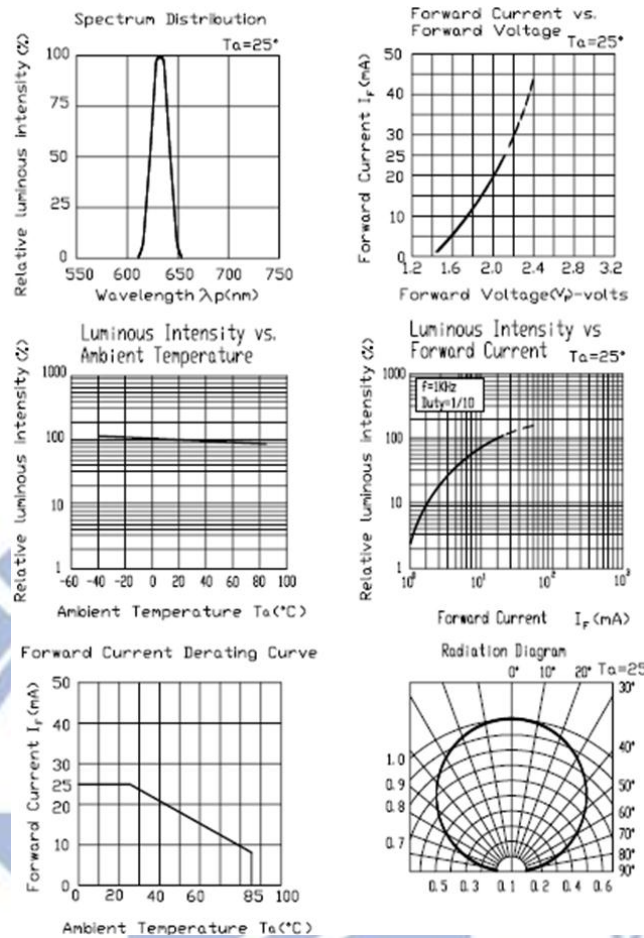


圖 6.3 19-215UBC SMD LED 之基本電光特性曲線圖

資料來源：EVERLIGHT ELECTRONICS's Technical Data Sheet—0.4mm Height Flat Top LED\_19-217R6C page5

由規格圖表可得知此元件之最大照明強度為 180 mcd，然而在往後幾節的模擬我們往往是觀察待測面照度分析之流明數，於是透過公式，搭配此發光元件之配光曲線必須將強度單位 (cd, 燭光) 轉換為接收面照度通量單位 (lumen, 流明)。以便於往後的模擬分析。發光強度與光通量關係式如式 6-1 所示[33]：

$$F = 680 \int V(\lambda)P(\lambda)d\lambda \text{ lumens} \quad \text{Eq.6-1}$$

上式 F 即為發光強度 (單位：candela, 燭光)； $V(\lambda)$  為人眼的視覺反應方程， $P(\lambda)$  則為該光源之強度分布，也就是配光曲線；而由流明的定義，在人眼最大感應波長

( $0.555\mu\text{m}$ ) 對應一瓦 (watt) 輻射能量之照度為 680 流明，於是在前面乘上 680 做歸一化。

現今我們已得知配光曲線與發光強度，於是能利用上式，在光學模擬軟體 Lighttools[34]內利用其實用工具 (utility tool) 直接作轉換，在轉換之前，必須先確認配光曲線輸入無誤，如圖 6.4，如此一來才確定模擬的可靠性。

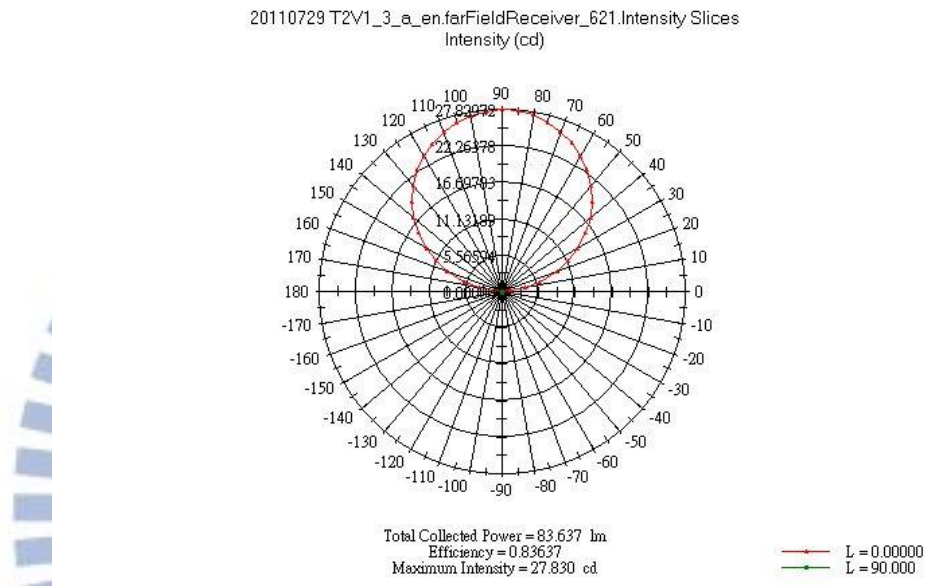


圖 6.4 在 Lighttools 輸入配光曲線作遠場強度模擬以確認光源可靠性

強度轉換照度討論以後，另外在照明元件設計，均勻度亦是一項重要的考量。均勻度愈高表示整體光場較一致，亮點狀況較少。本論文在分析均勻度的方式是採計最小照度比平均照度的關係式，藉此評斷待測面之照明均勻程度。

### 6.2.2 設計與光學模擬結果

如 6.1 節討論進行設計，以及分析在不同物距之光通量及效率後，設計之結果如圖 6.5~圖 6.6；詳細均勻度與接收面效率如表 6.3。



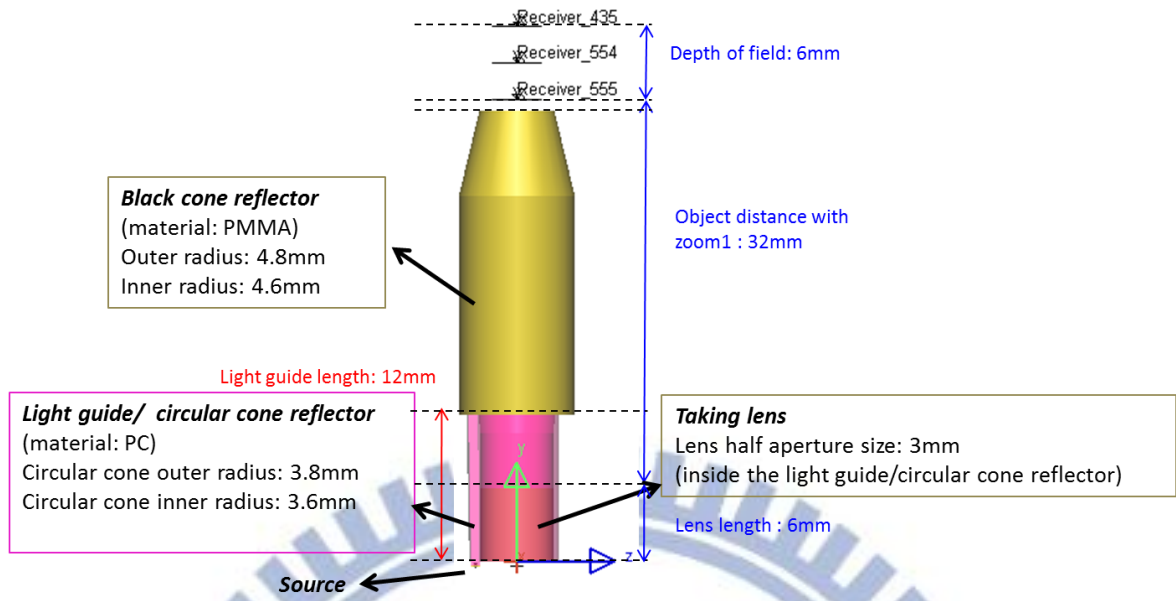


圖 6.5 筆滑鼠機構件模擬圖

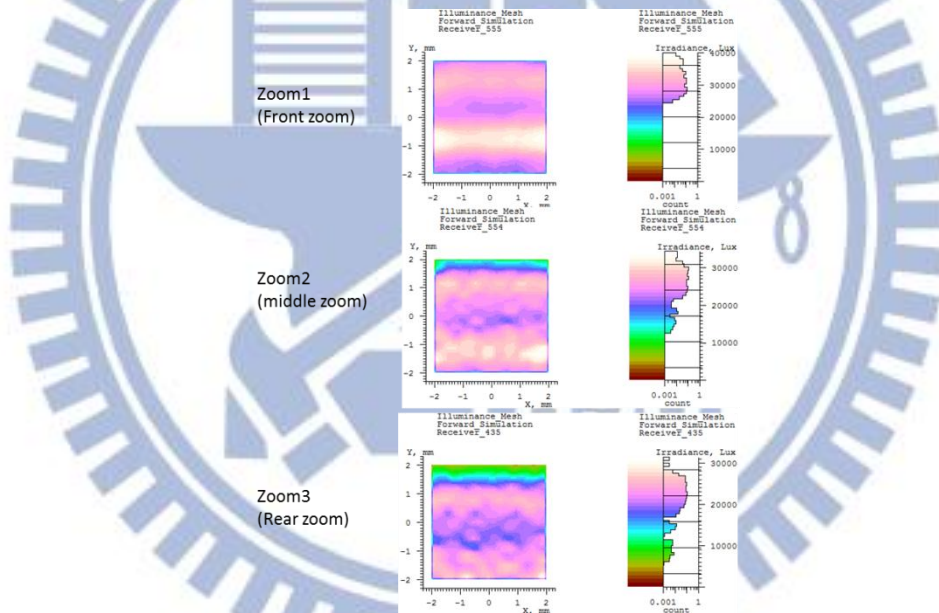


圖 6.6 光經過筆滑鼠機構件後於各組態照度模擬圖

表 6.4 各組態均勻度與光效率數值

|            | Zoom1  | Zoom2  | Zoom3  |
|------------|--------|--------|--------|
| Efficiency | 0.499% | 0.411% | 0.335% |
| Uniformity | 80.21% | 46.42% | 27.51% |

因距離甚遠的緣故，使得接收面入光效率皆不到 1%，並且在長景深的要求下，使得光線均勻度至物距 38mm 處便已下降至不足 30%。另外補上於各表面之漏光情形如圖 6.7，可觀察出至光導入口已有約 18% 的光漏失，至光導出口處約漏失 65%，因距離太遠，至黑件出口僅存不到 1%。

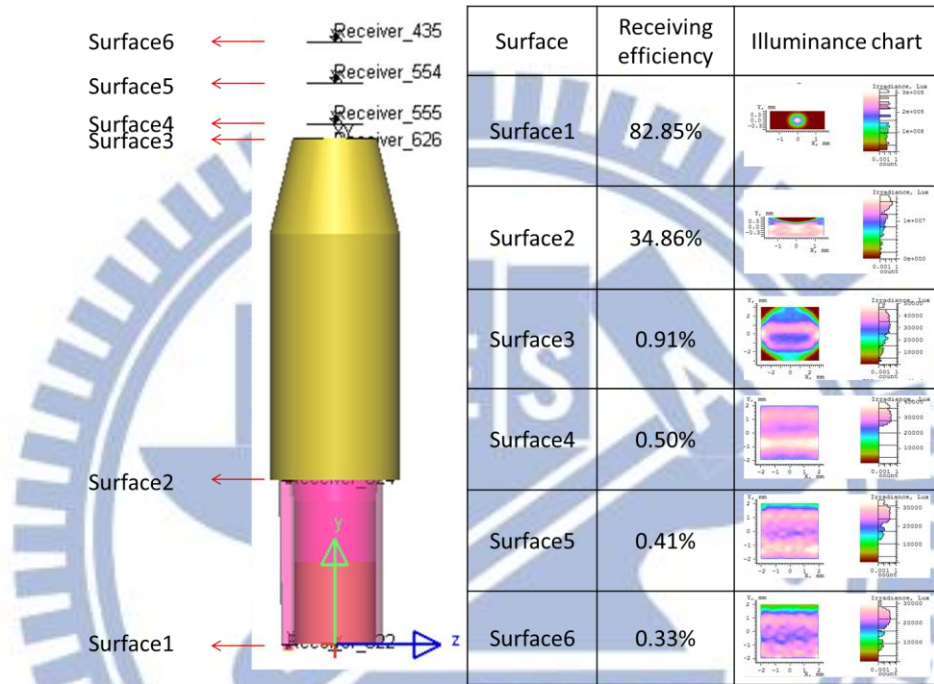


圖 6.7 各表面之收光效率分布

### 6.2.3 光導入光口製造公差分析

由於其餘機構件如印刷電路板或 SMD LED 焊接位置亦有其各自之製造公差，於是必須將製造公差納入考量，在模擬軟體上先模擬不同公差造成之情形。此小節便是在討論 SMD LED 焊接高度與位置相對於光導入光口的差異對效率之影響。如圖 6.7~圖 6.16。

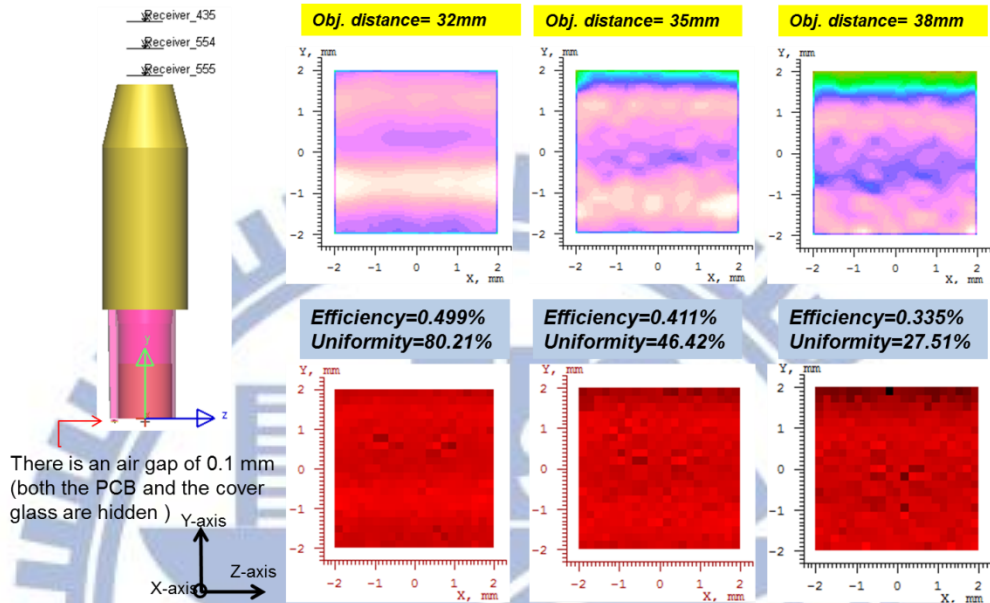


圖 6.8 原始設計模擬圖（發光元件與光導空氣間隙為 0.1mm）。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

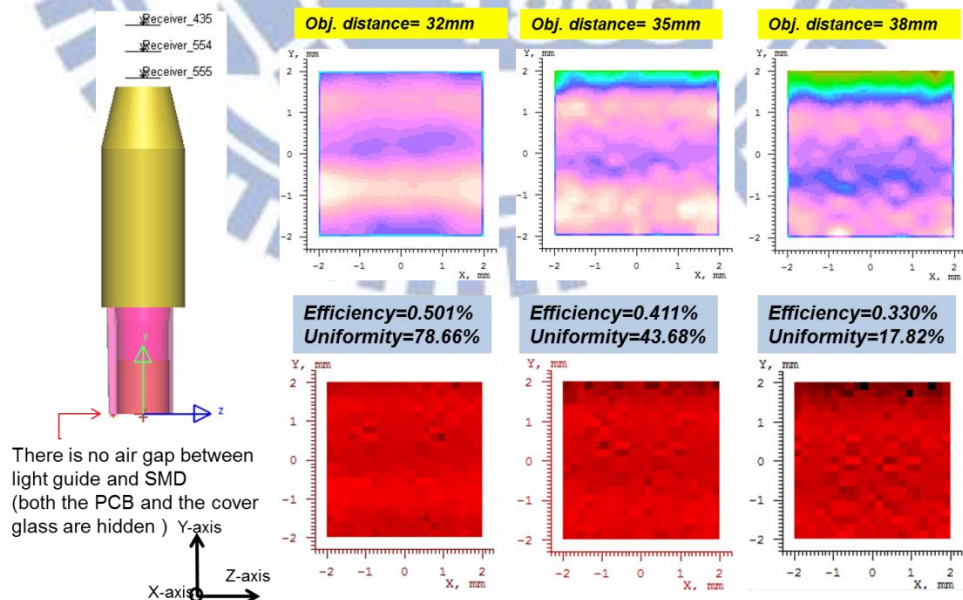


圖 6.9 無空氣間隙之模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

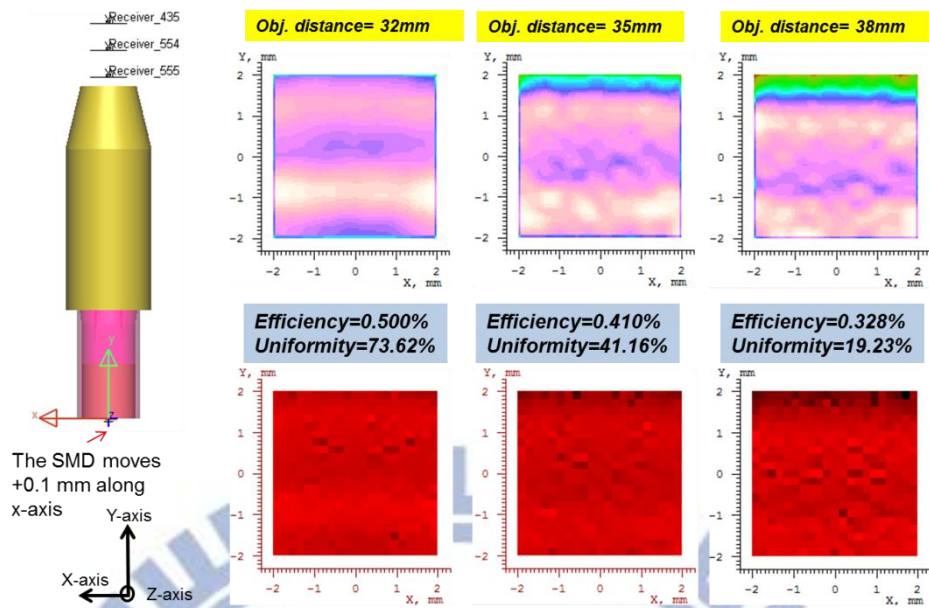


圖 6.10 無空氣間隙且往 x 方向位移+0.1mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

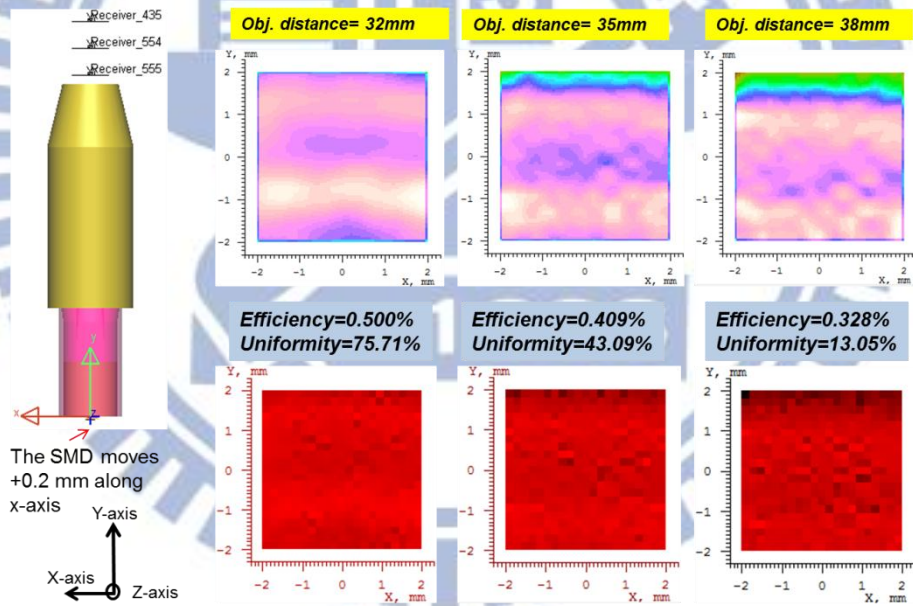


圖 6.11 無空氣間隙且往 x 方向位移+0.2mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

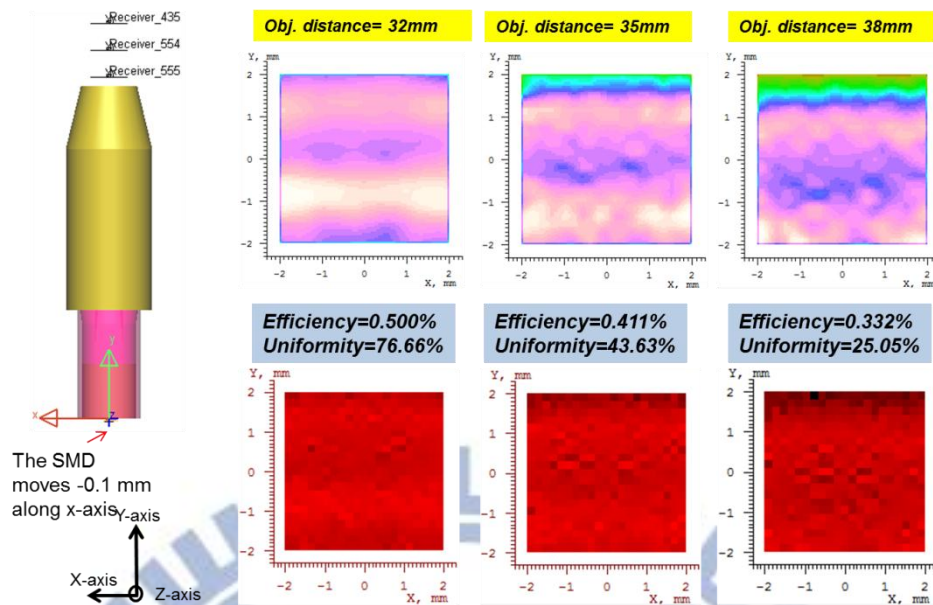


圖 6.12 無空氣間隙且往 x 方向位移-0.1mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

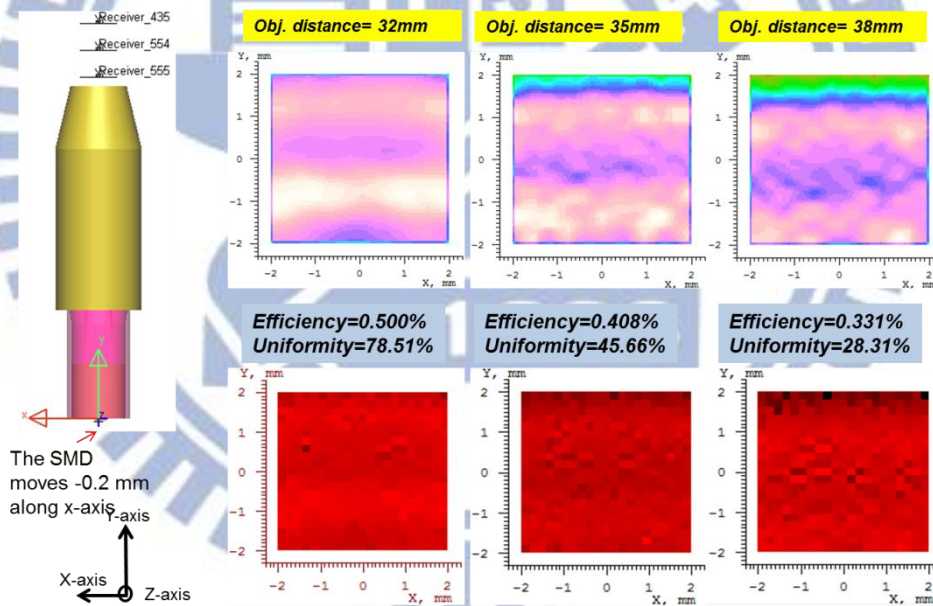


圖 6.13 無空氣間隙且往 x 方向位移-0.2mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

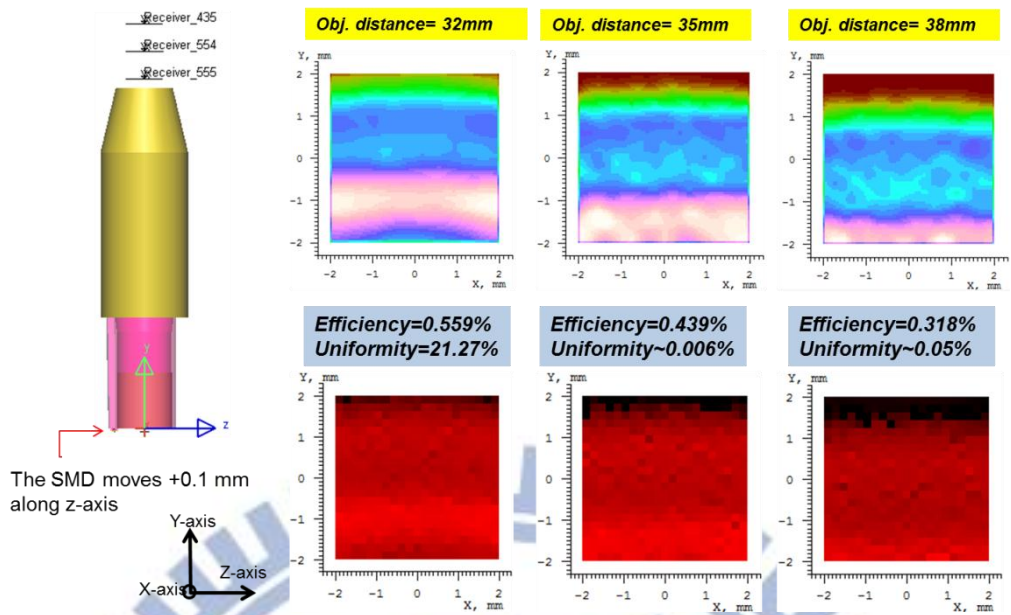


圖 6.14 無空氣間隙且往 z 方向位移+0.1mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

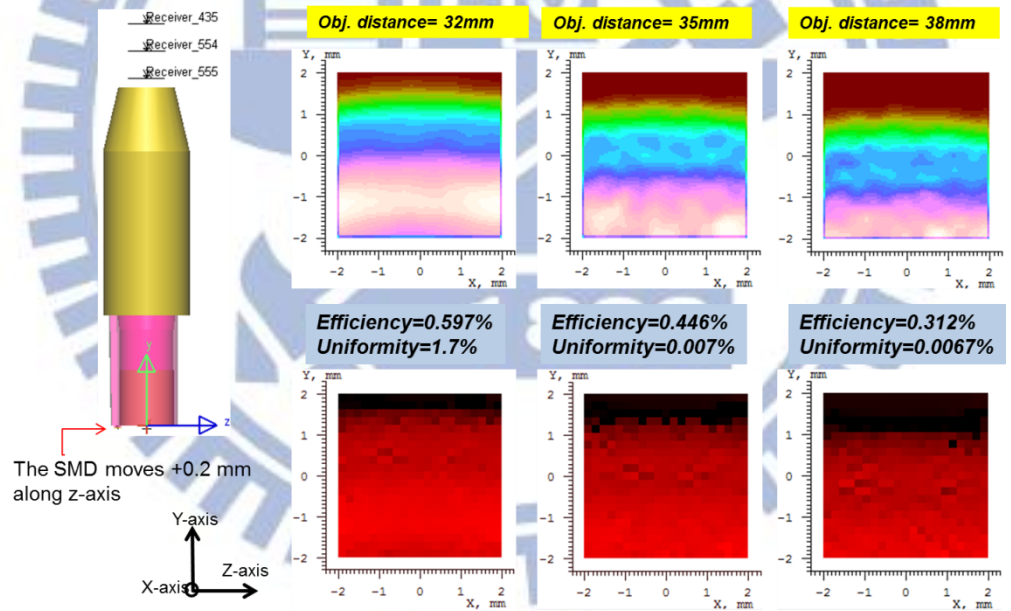


圖 6.15 無空氣間隙且往 z 方向位移+0.2mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

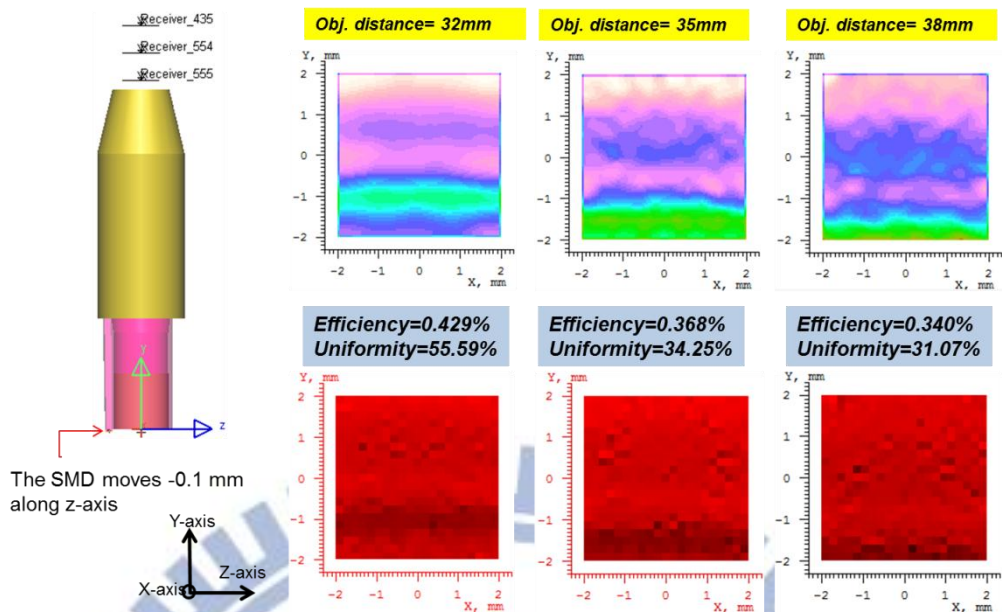


圖 6.16 無空氣間隙且往 z 方向位移-0.1mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

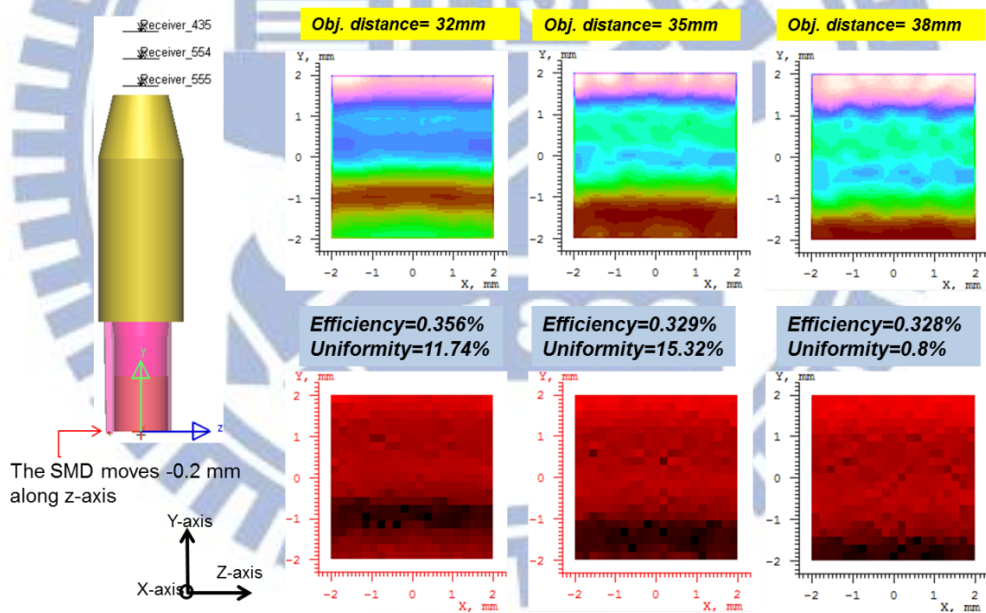


圖 6.17 無空氣間隙且往 z 方向位移-0.2mm 模擬示意圖。圖左為機構系統示意圖；圖右上方為各物距組態照度模擬圖、圖右下方為真實色彩照度模擬圖以及其對應之效率

表 6.5 各公差效率數據整理表

| Case \ Efficiency                | Front zoom<br>(Obj.<br>distance=32mm) | Middle zoom<br>(Obj.<br>distance=35mm) | Rear zoom<br>(Obj.<br>distance=38mm) |
|----------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Original case<br>(air gap=0.2mm) | 0.499%                                | 0.411%                                 | 0.335%                               |
| No air gap                       | 0.501%                                | 0.411%                                 | 0.330%                               |
| No air gap &<br>X shift +0.1mm   | 0.500%                                | 0.410%                                 | 0.328%                               |
| No air gap &<br>X shift -0.1mm   | 0.500%                                | 0.411%                                 | 0.332%                               |
| No air gap &<br>X shift +0.2mm   | 0.500%                                | 0.409%                                 | 0.328%                               |
| No air gap &<br>X shift -0.2mm   | 0.500%                                | 0.408%                                 | 0.331%                               |
| No air gap &<br>Z shift +0.1mm   | 0.559%                                | 0.439%                                 | 0.318%                               |
| No air gap &<br>Z shift -0.1mm   | 0.597%                                | 0.446%                                 | 0.312%                               |
| No air gap &<br>Z shift +0.2mm   | 0.429%                                | 0.368%                                 | 0.340%                               |
| No air gap &<br>Z shift -0.2mm   | 0.356%                                | 0.329%                                 | 0.328%                               |



表 6.6 各公差均勻度數據整理表

| Case \ Uniformity                | Front zoom<br>(Obj.<br>distance=32mm) | Middle zoom<br>(Obj.<br>distance=35mm) | Rear zoom<br>(Obj.<br>distance=38mm) |
|----------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Original case<br>(air gap=0.2mm) | 80.21%                                | 46.42%                                 | 27.51%                               |
| No air gap                       | 78.66%                                | 43.68%                                 | 17.82%                               |
| No air gap &<br>X shift +0.1mm   | 73.62%                                | 41.16%                                 | 19.23%                               |
| No air gap &<br>X shift -0.1mm   | 76.66%                                | 43.63%                                 | 25.05%                               |
| No air gap &<br>X shift +0.2mm   | 75.71%                                | 43.09%                                 | 13.05%                               |
| No air gap &<br>X shift -0.2mm   | 78.51%                                | 45.66%                                 | 28.31%                               |
| No air gap &<br>Z shift +0.1mm   | 21.27%                                | 0.006%                                 | 0.05%                                |
| No air gap &<br>Z shift -0.1mm   | 55.59%                                | 34.25%                                 | 31.07%                               |
| No air gap &<br>Z shift +0.2mm   | 1.70%                                 | 0.007%                                 | 0.0067%                              |
| No air gap &<br>Z shift -0.2mm   | 11.74%                                | 15.32%                                 | 0.80%                                |

本小節公差分析主要目的為探討發光元件、印刷電路板在製造焊接上的誤差對於接收面入光效率及均勻度的影響，於是模擬更動光導與發光二極體間距離差異，觀察發光二極體位移對於入光效率與均勻度的關係。

以上述圖表可觀察出，隨著空氣間隙的減少，入光效率幾乎無損，反之均勻度顯著下降，在後組態幾乎下降近 10%。在位移的部分，以入光效率而言，發光元件無論在 X 方向（相對於光導為左右移動）或是 Z 方向（相對於光導為前後移動）皆無太大改變；其中在 Z 方向的前後移動可能使得效率提升，然而因為機構件阻擋的關係，均勻度卻可能因此大幅滑落，由模擬可得，均勻度在發光二極體沿 X 方向左右移動時公差容忍度較

寬鬆，但在 Z 方向前後移動容忍度卻很微量，其中-Z 方向尤為明顯，此是因為發光元件漸漸遠離入光口，進入的光線變少所致。也就是說在 Z 方向上稍有製造上的變動，即可能影響此系統之成像品質。

入光效率不足會導致光線數量無法到達，於接收面不夠亮；而均勻度不佳則可能造成亮點不均，進而影響光學成像。

#### 6.2.4 光導入光口改善進光效率設計

在進行公差分析之後，儘管進光效率大抵不變，然整體效率仍是偏低（小於 1%，如表 6.4 所示），為求改善進光效率，本節進行光導入光口的設計修正，試圖收進更多光線以敷機構件傳遞。本小節提出兩種修正設計，並於最後加以討論比較。

為了收進更多光線，考量前述設計，光導與發光二極體具有 0.1mm 之空氣間隙，如此一來，發光二極體較大角度的光線便無法收納至光導內，於是設計想法是在光導入光口處嘗試設計出一些結構，藉此以包覆住發光元件，納入更多光線為系統所用。如圖 6.17。



圖 6.18 入光口結構修正。圖左為長出矩形之包覆結構；圖右為傾斜視角表示圖

此類設計必須考慮到加入環狀包覆結構後，在製程考量下，整體光導管之背緣仍必須長出結構，符合製造時能接受的角度。設計結果如圖 6.18。

### I. 矩形環狀入光口設計

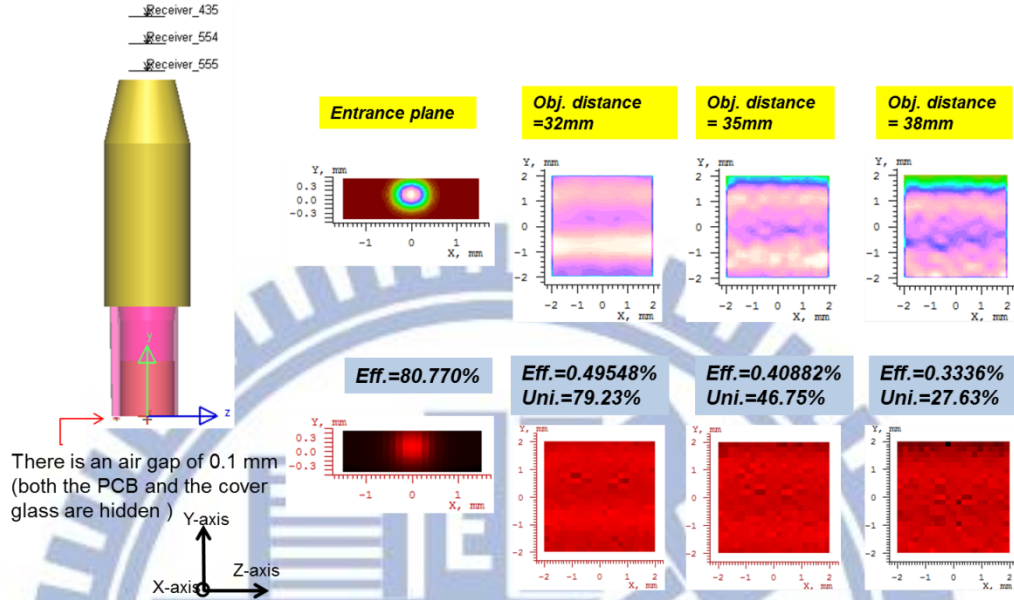


圖 6.19 矩形環狀入光口設計。圖左為設計圖；圖右由左至右依序為為入光口、前組態、中組態與後組態之照度模擬圖與真實色彩照度模擬圖

### II. 於入光口加入一透鏡

由於前項設計概念仍然受限於製程的不便，於是嘗試於入光口加入一透鏡，目的在於匯聚光線並使光線集中在同一範圍，如此一來，同一範圍路徑的有效光線變多，則有利於接收面的入光效率提升；另外，在製程上只需加上一透鏡後，將光導四面多餘部分切除即可。設計示意圖如圖 6.19，設計結果如圖 6.20。

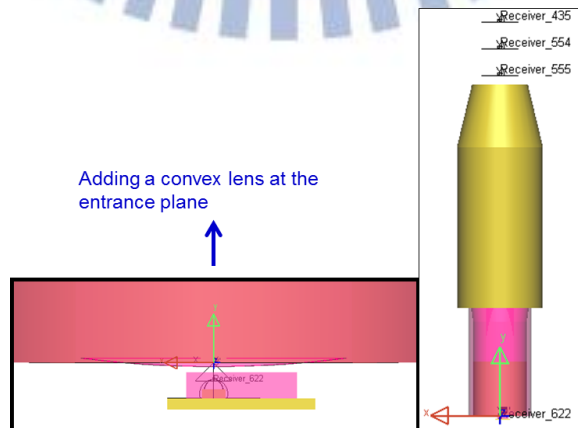


圖 6.20 於入光口加一透鏡，圖右為示意圖；圖左為局部放大圖

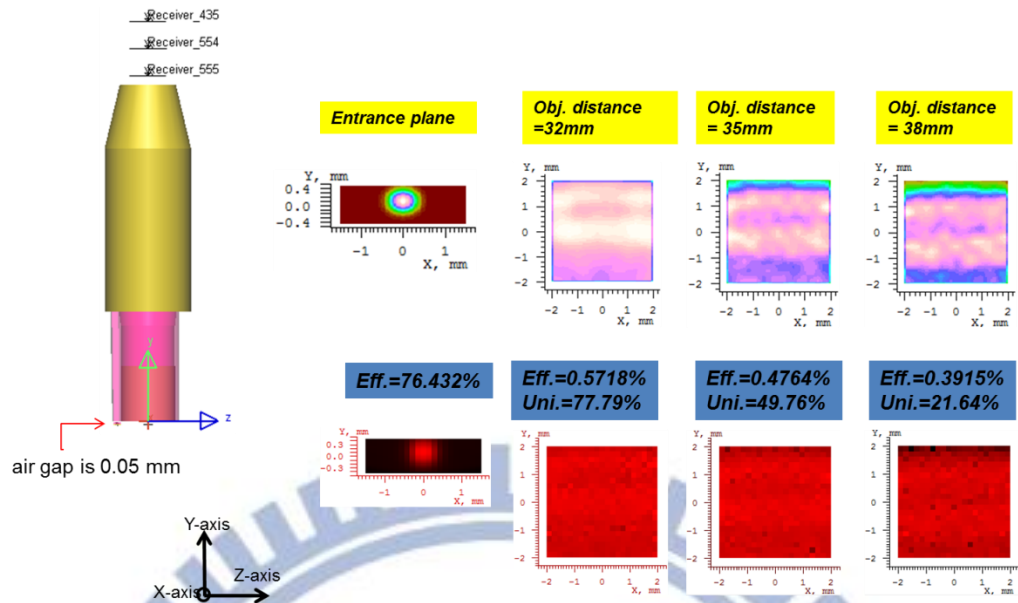


圖 6.21 於入光口加一透鏡設計，空氣間隙為 0.05mm。圖右由左至右依序為為入光口、前組態、中組態與後組態之照度模擬圖與真實色彩照度模擬圖

表 6.7 入光口設計於感光元件有效範圍之入光效率、均勻度比較表（由上往下依序為前組態、中組態與後組態）

| File name          | Efficiency | Uniformity | Remarks                                      |
|--------------------|------------|------------|--|
| Original           | 0.499%     | 80.21%     |  |
|                    | 0.411%     | 46.42%     |  |
|                    | 0.335%     | 27.51%     |  |
| Rectangular Skin_i | 0.4955%    | 79.23%     | Rectangular taper                            |
|                    | 0.4088%    | 46.75%     |  |
|                    | 0.3336%    | 27.63%     |  |
| Lens_iii           | 0.5718%    | 77.79%     | Adding a convex lens ;The air gap is 0.05 mm |
|                    | 0.4764%    | 49.76%     |  |
|                    | 0.3915%    | 21.64%     |  |

以上述圖表可得知，對矩形入光口設計而言，即使光導入光口收光效率稍微提升，然而於待測面之入光效率皆比原始設計略差，均勻度的表現則無顯著差異；反之，若在

入光口加上透鏡，所有組態之收光效率皆能提升大約 13%，另外由於設計時給定較大光斑公差範圍，於是若考慮中心位置，均勻度亦滿足要求。

### 6.2.5 分析與討論

由 6.2.3 和 6.2.4 小節的修正，以目前一般市售光學滑鼠作比較。因為目前市售光學滑鼠大多皆使用一般發光二極體，發光強度比表面黏著型發光二極體強上許多，然而體積較大，價格較貴。表 6.6 為本設計與市售光學滑鼠接收光通量比較。

表 6.8 本論文設計值與一般市售光學滑鼠之光通量比較表

| Type<br>(Red light) | 發光強度     | 光通量轉換         | 經過光導剩餘效率    | 最後待測面之光通量  |
|---------------------|----------|---------------|-------------|--|
| 設計值<br>(使用 SMD LED) | 180 mcd  | 0.61065 lumen | 0.39%~0.57% | $2.382 \times 10^{-3} \sim 3.48 \times 10^{-3}$<br>lumen |
| 比較值<br>(使用一般 LED)   | 3200 mcd | 1.6242 lumen  | 2.90%       | 0.0471 lumen   |

由上表可知，使用表面黏著型之發光二極體（SMD LED）會有較高的光通量轉換效率，此為其優勢，但由於發光強度起始值的差距，再加上此筆型滑鼠設計之長度較長、景深較深，於是經過光導之效率較低，導致到達最後待測面之光通量比起一般市售光學滑鼠使用一般發光二極體大約為二十分之一倍，相差甚鉅！

然而因為 SMD LED 之光通量轉換效率較高，於是我們可預測，若今後有同樣規格條件的 SMD LED，發光強度只要大約為本論文使用 SMD LED 之十倍（即 1800mcd），那麼到達待測面的亮度便提高十倍，此時亮度雖然仍不比一般 LED，但可預期若在光學元件設計上做修改，例如將待測面的距離拉近，削減成像品質來作平衡，此項設計勢必在未來能夠實現。

## 第七章 結論與未來展望

### 7.1 結論

有別於傳統光學滑鼠不便攜帶的體積結構，筆滑鼠提供了另外一種便利性給使用者。更進一步，與市面上雷同的筆滑鼠結構做比較，此論文提出體積更小、更省能進而更接近使用者一般用筆大小的筆滑鼠設計。針對光學鏡頭，設計了一  $f$ -number 為 3.34 且結構為 PN type (Positive-Negative) 的雙鏡片鏡頭，如圖 4.4。在景深容忍 6mm (對應物距為 32mm-38mm) 內，對應之 MTF 成像品質皆在感光元件最大空間頻率範圍 (16 lp/mm) 處達 0.2 以上，為人眼所能接受範圍，如圖 4.8、4.13、4.18。使用材質皆為壓克力 (PMMA)。除了景深的公差分析，亦進行了角度的公差分析，確定在傾斜角  $\pm 25^\circ$  以內皆有良好的成像品質，以及對應孔徑的公差容忍度，如表 5.5。

針對照明物件，根據最大筆寬 (10mm) 的限制採取迥異於傳統筆滑鼠的側入式結構，如圖 4.2。而選擇了同軸照明的應用，如圖 6.1。並且使用表面黏著型發光二極體 (SMD LED) 以節省能源消耗和簡化製程。本論文選用的發光元件為億光電子 (EVERLIGHT ELECTRONICS) 的 19-217R6C 系列紅光發光二極體。對其進行製造位置偏差的公差分析，得知在縱向 (如圖 6.7 之 Z 方向) 出光效率之公差容忍度較低 (在  $\pm 0.1\text{mm}$  之間)，均勻度大致維持在 30% 左右的表現。(如表 6.6)

最後以市面上一般光學滑鼠之出光效率做基準，發現最後接收面之光通量設計值比起實際值小了二十倍，主要原因是採用發光元件表面黏著型發光二極體 (SMD LED) 本身之發光強度比一般型發光二極體 (LED) 即少了將近十八倍，這是為了符合當初訂下的省能規格。然而最後發現 SMD LED 之光通量轉換效率較高，於是假定之後能使用發光強度大十倍的 SMD LED，再把待測面的距離拉近，利用光學品質的削減做補償，想必仍是有機會可堪量產使用。

## 7.2 未來展望

筆型光學滑鼠與一般光學滑鼠最大迥異之處在於：筆滑鼠之物面會因使用者習慣不同而有差異；同時筆滑鼠會因為使用者不同而造成物面傾斜的情況。物距的差異已在本論文中納入規格並作仔細的模擬比對（見第四章），然而物面傾斜除了用 MTF 指標來觀察（見第五章），應再納入扭曲（Distortion）考量，對應至感光元件上，畫素扭曲程度的不同，可能會使得滑鼠方向偵測靈敏度降低。

考慮到使用者握筆姿勢的不同，於這方面可能必須將傾斜角傾斜至  $50^\circ$ ，確保修正後的公差容忍維持在一範圍內，下圖 7.1 是傾斜角度傾斜至  $50^\circ$  時的扭曲情況，圖 7.2 是傾斜角度至  $-50^\circ$  的扭曲情況。

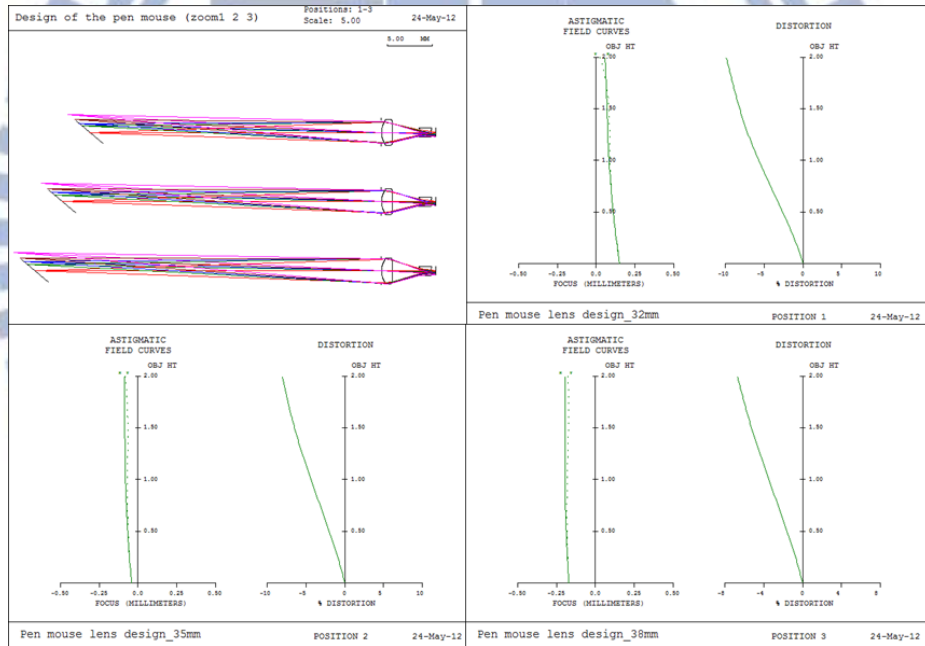


圖 7.1 傾斜角度  $50^\circ$  的扭曲 (distortion) 分布。左上圖為 2D 模擬圖，由上往下分別為不同物距；右上圖為物距 32mm，圖中顯示扭曲達  $-9.93\%$ ；左下圖為物距 35mm，扭曲達  $-8.07\%$ ，右下圖為物距 38mm，扭曲為  $-6.74\%$

針對傾斜角極大造成扭曲情形的解法，可依賴數位影像處理的方式，於晶片中作後處理，將變形的圖形補償修正。一般而言有兩種方法：布朗扭曲模型 (Brown's distortion model) 與使用幅狀基底方程 (Radial Basis Function)。

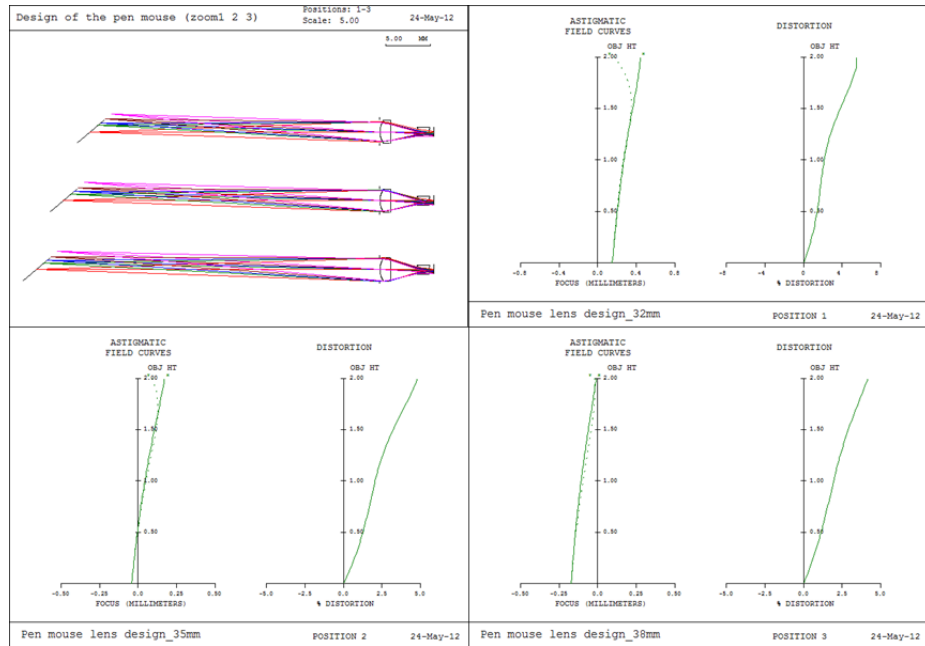


圖 7.2 傾斜角度 $-50^\circ$  的扭曲 (distortion) 分布。左上圖為 2D 模擬圖，由上往下分別為不同物距；右上圖為物距 32mm，圖中顯示扭曲達 5.5%；左下圖為物距 35mm，扭曲達 4.82%，右下圖為物距 38mm，扭曲為 4.17%

### 7.2.1 布朗扭曲模型 (Brown's distortion model)

為 Brown DC 於 1966 年發表的論文所提到[35]，他主要將扭曲分布分成幅狀扭曲 (radial distortion) 與切線扭曲 (tangential distortion)。幅狀扭曲主要來自於光學鏡片設計導致之桶型畸變 (barrel distortion) 或枕型畸變 (pincushion distortion)；切線扭曲則起因於離軸的偏差產生之畸變，並給予其不同扭曲各一係數以做修正。公式如下：

$$\begin{aligned}
 x_u &= x_d + (x_d - x_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_1(r^2 + 2(x_d - x_c)^2) + 2P_2(x_d - x_c)(y_d - y_c))(1 + P_3 r^2 + \dots) \\
 y_u &= y_d + (y_d - y_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_1(r^2 + 2(y_d - y_c)^2) + 2P_2(x_d - x_c)(y_d - y_c))(1 + P_3 r^2 + \dots) \\
 r &= \sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}
 \end{aligned}$$

Eq.7-1

其中  $(x_u, y_u)$  為無扭曲的像點、 $(x_d, y_d)$  為扭曲的像點、 $(x_c, y_c)$  為待測圖形中心、 $K_n$  為  $n$  階幅狀扭曲係數、 $P_n$  為  $n$  階切線扭曲係數。



由於在此論文之光學件不考慮離軸變化，於是可針對幅狀扭曲去做分析。我們可利用像高、預測扭曲比率，來推得K值，接著再依原始像高做比例的反推，其中將修正函示簡化，如式 7-2。參照扭曲量+10%做模擬圖如下：

$$R_d = f(R_u) = R_u + K \cdot R_u^3 + \dots \approx R_u + K \cdot R_u^3 \quad \text{Eq. 7-2}$$

$$\approx x_d = x_u(1 + K \cdot x_u^2); y_d = y_u(1 + K \cdot y_u^2), \text{ where } R_u^2 = x_u^2 + y_u^2$$

利用數學模擬軟體 Matlab[36]將給定扭曲量輸入，並編譯上述方程式以尋找適當還原係數K，最後模擬以 400x400 畫素值之方格圖來模擬，分別建立桶型與枕型扭曲並修正，如圖 7.3、圖 7.4。

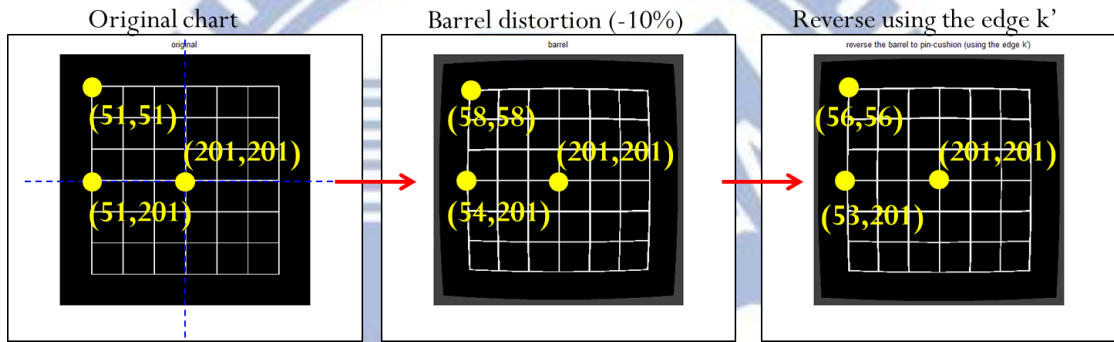


圖 7.3 以 400x400 畫素個數的方格進行-10%之桶型畸變修正

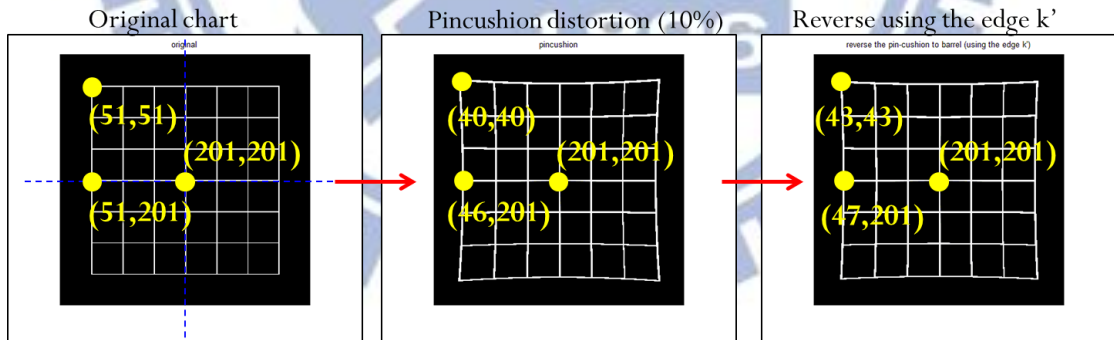


圖 7.4 以 400x400 畫素個數的方格進行+10%之枕型畸變修正

並整理修正數值如表 7.1。

表 7.1 依圖 7.3、7.4 所計算之桶型與枕型扭曲修正

| Distant alignment | Original | Barrel distortion | Reverse by k'    | Pincushion distortion | Reverse by k'    |
|-------------------|----------|-------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| X-axis            | 150mm    | 147mm→-2%         | 148→<br>-1.3%    | 155→3.3%              | 154→<br>2.67%    |
| Diagonal line     | 150      | 202.23→-4.7%      | 205.06→<br>-3.3% | 227.69→7.34%          | 223.45→<br>5.34% |

由上表可知，利用預測扭曲失真再計算係數反推，的確能使扭曲場型修正至一合理範圍，然而此方法僅限於修正”純桶型”與”純枕型”的扭曲圖形，對於梯形或不規則型之扭曲失真則無法完全修正，如此一來便需要使用下個方法—幅狀基底方程。

### 7.2.2 幅狀基底方程 (Radial Basis Function)

幅狀基底方程為一真值運算方程，其變數只和「與中心點的距離」有關，進而對檔案內容作內插置換以及決定其基底方程的係數。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i R(d_i(x)) + p_m(x) \quad \text{Eq. 7-3}$$

因為基底方程 R 只與檔案中心點的距離有關，故稱作幅狀方程 (Radial Function)， $p_m(x)$  為一 m 次多項式，而  $\alpha_i$  係數則是將資料數據加至 7-3 式再進行求解而得的權變係數。

基於幅狀基底方程的概念，我們可先將 CODE V 中的扭曲圖分離，如圖 7.5。藉此輸入對應點 (Correspondence)，並使用下列式子以求得權變量，最後將資訊反推藉此修正扭曲情形。

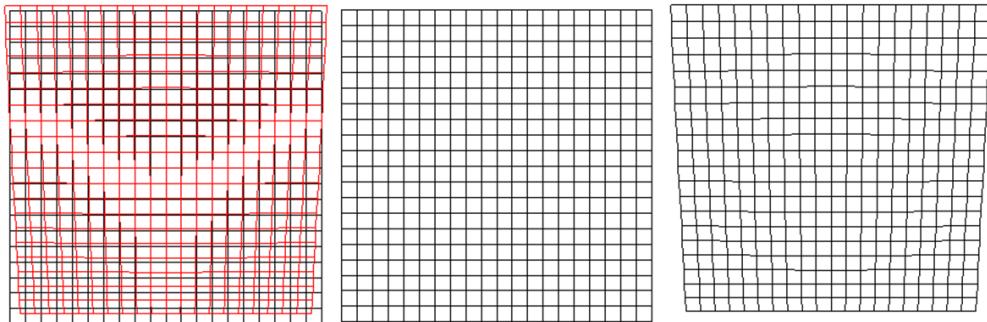


圖 7.5 CODE V 內建扭曲格線圖。左圖為傾斜+50°之扭曲格線圖，約-10%之梯形變形；

中圖為分離後的原始格線圖；右圖為分離後的扭曲格線。

接著以  $N$  次幅狀基底方程多項式的式子一一對應[37]，納入計算以求得權變函數，如式 7-4、7-5、7-6。

$$x'_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{x,i} R_i(d) + p_m(x_j, y_j), \quad \text{Eq.7-4}$$

$$y'_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{y,i} R_i(d) + p_m(x_j, y_j), \quad \text{Eq.7-5}$$

$$R_i(d) = (d^2 + \chi r_i^2)^{\mu/2} = [(x_j - x_{\text{basis\_center\_}i})^2 + (y_j - y_{\text{basis\_center\_}i})^2 + \chi r_i^2] \quad \text{Eq.7-6}$$

其中  $M'_j(x'_j, y'_j)$  為近軸點而  $M_j(x_j, y_j)$  為扭曲之對應點。 $R_i$  表示第  $i$  階的基底方程，且此基底方程中心落於  $(x_{\text{basis\_center\_}i}, y_{\text{basis\_center\_}i})$ ；權重為  $\alpha_{xy,i}$ ； $p_m(x_j, y_j)$  是納入準確計算的  $m$  次多項式； $j$  為從 1 至  $N$  的整數，最後  $\chi$  則是因特定需求而選擇的比例因子。[38]

納入計算後，我們便能估算權重值並使用數學軟體替我們畫出預測的扭曲點，比對使用幅狀基底方程畫出之扭曲格線是否與光學軟體內之模擬格線一致，若一致則可有效再反推。可惜的是此部分因軟體編譯量較為繁複，短時間內難以編譯，若以此方向延伸，想必能使本論文之產品更為完整。

## 參考文獻

- [1] 陳智信，楊智慧，黃耿祥，「掌上明珠－滑鼠」，科學發展月刊第 460 期第 60-65 頁，2011 年 4 月
- [2] “An Innovation Brief—Logitech® Darkfield Laser Tracking: The World Is Your Mouse Pad,”Logitech, 2009
- [3] 網路資料，「滑鼠感應器類型對於特殊材質的適性」，  
<http://www.computerdiy.com.tw/all-articles/articles-mouse/1105-mouse-type>
- [4] 網路資料，“Q&A with Mark DePue, Platform Engineering Manager, Hardware Group,“  
[http://www.maximumpc.com/article/features/everything\\_you\\_need\\_know\\_about\\_microsofts\\_bluetrack\\_mouse\\_technology?page=0%2C1](http://www.maximumpc.com/article/features/everything_you_need_know_about_microsofts_bluetrack_mouse_technology?page=0%2C1)
- [5] Genius website, <http://www.geniusnet.com/wSite/ct?xItem=47795&ctNode=651&mp=4>
- [6] Fentek Industries website,  
<http://www.fentek-ind.com/mwpen.htm>
- [7] FingerSystem website,  
<http://www.ipen4you.com/products/detail/55>
- [8] Salient Technology website,  
<http://www.pen-mouse.com/wireless.htm>
- [9] 網路資料, Ultra U12-40871 eXo Bluetooth Wireless Pen Mouse & Presenter,  
<http://www.tigerdirect.com/applications/SearchTools/item-details.asp?EdpNo=6101297&CatId=2391#>
- [10] 網路資料，中國 SMD 市場分析，  
[http://www.neo-semi.com/tw/news\\_detail.php?id=30](http://www.neo-semi.com/tw/news_detail.php?id=30)
- [11] [13][31][33] Warren J. Smith, “Modern Lens Design”, 4<sup>th</sup> Edition page 70, McGraw-Hill, New York, 2008
- [12][15][30] 牟益弘，「三百萬畫素二點七五倍光學變焦手機鏡頭設計」，中央大學光電科學所，碩士論文第 18 頁，民國九十七年
- [14] Eugene Hecht, “Optics”, 4<sup>th</sup> Edition page 266, Addison Wesley, 2002
- [16] Joseph W. Goodman, “Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> Edition page 127, New York, 1996
- [17] 「超高容量光碟片的開發」，科學發展第 406 期第八十三頁，2006 年 10 月
- [18] 網路資料, <http://www.efg2.com/Lab/ImageProcessing/TestTargets/>
- [19] CodeV material 2009 Section 1-Optics
- [20] Agilent’s Data Sheet, “Optical Mice and how they work”
- [21] 葉德川，「深具潛力的 CMOS 影像感測器」，PIDA (Photonics Industry & Technology Development Association) 月刊，32 頁，2001 年三月
- [22] 朱濟群，「光學滑鼠位移感測器軌跡線性量測研究」，國立交通大學，電機資訊學院電子與光電學程碩士論文，2004

- [23] 蔡建文，「光學滑鼠用之光學元件設計」，國立中央大學，光電科學研究所碩士論文，2005
- [24] Yui-Lam Chan; Wai-Lam Hui; Wan-Chi Siu, "A block motion vector estimation using pattern based pixel decimation," Circuits and Systems, 1997. ISCAS'97, Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on Volume2, 1997, Pages1153-1156 vol.2
- [25] PAW3204DB-TJDE Low Power Wireless Mouse Sensor Specification Page1, PixArt Imaging Inc., Jul. 2010
- [26] 網路資料, SMD LED 解釋頁,  
[http://fund.bot.com.tw/z/glossary/glexp\\_41.djhtm](http://fund.bot.com.tw/z/glossary/glexp_41.djhtm)
- [27] Code V Introduction User's Guide, Optical Research Association
- [28] Code V Reference Manual, Optical Research Associates
- [29] Code V Prompting Guide
- [32] 談智偉，「背投影電視鏡頭光學設計與公差分析」，中原大學應用物理研究所，碩士論文，民國九十五年
- [34] Lighttools 為 ORA (Optical Research Association) 公司的光學模擬軟體
- [35] Brown DC, "Decentering distortion of lenses.", Photogrammetric Engineering. 7: 444-462, 1966
- [36] Matlab version. R2010a, The MathWorks.Inc
- [37] D. Ruprecht, and H. Muller, "Image warping with scattered data interpolation methods", Computer Graphics and Applications **15**(2), 37-43, 1995
- [38] Aaron Bauer, Sophie Vo, Keith Parkins, Francisco Rodriguez, Ozan Cakmakci, and Jannick P. Rolland, "A radial basis function-based mapping method for computational optical distortion correction", Optical Society of America, 2012

## 附錄

### 附錄一 優化巨集 Macro

!!RDM

!!LEN "Creation Date: 2011/07/19"

!!TITLE 'Pen mouse lens'

!! constrand image height (0.44mm~0.5mm);

!! DOF ~6mm

!! optimization

CCY S1 0

CCY S2 0

CCY S3 0

CCY S4 0

CCY S5 0

THC S1 0

THC S2 100

THC S3 0

THC S4 100

THC S5 0

!!KC S1 100

!!AC S1 0

!!BC S1 0

!!CC S1 0

!!DC S1 0

!!EC S1 0

KC S2 0

AC S2 0

BC S2 0

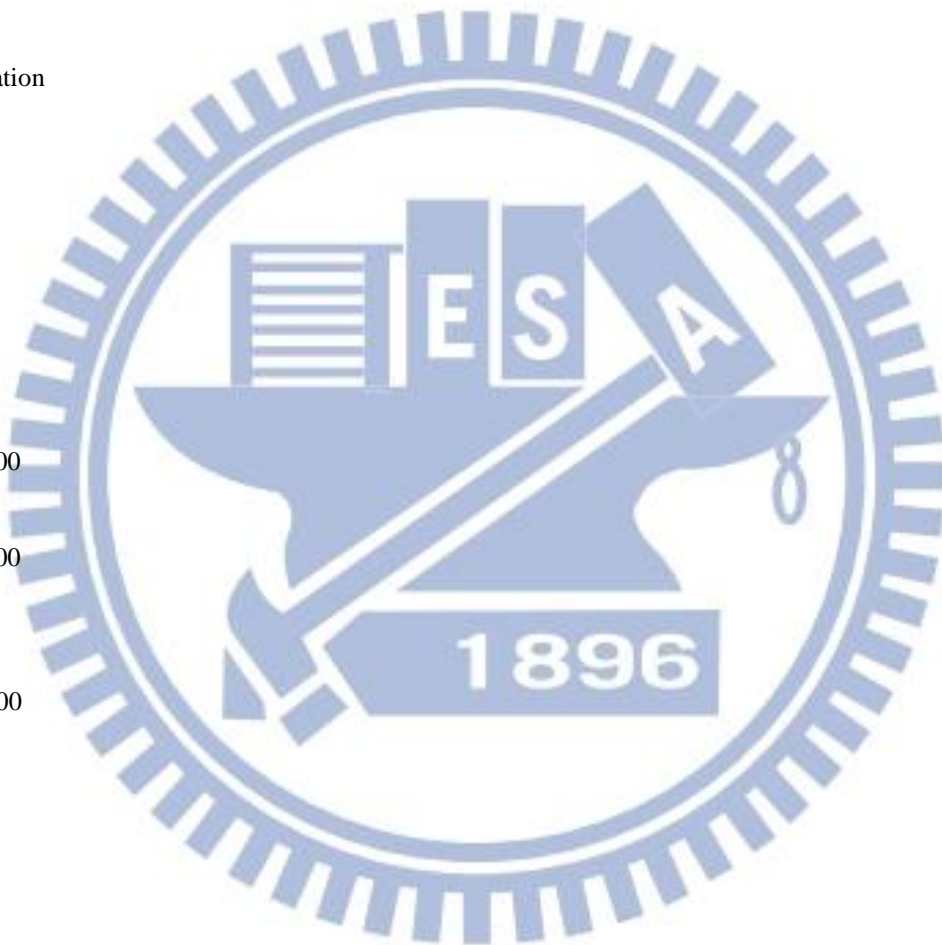
CC S2 0

DC S2 0

EC S2 0

FC S2 0

GC S2 100



HC S2 100

KC S3 0

AC S3 0

BC S3 0

CC S3 0

DC S3 0

EC S3 0

FC S3 0

GC S3 100

HC S3 100

KC S4 0

AC S4 0

BC S4 0

CC S4 0

DC S4 0

EC S4 0

FC S4 0

GC s4 100

HC S4 100

KC S5 0

AC S5 0

BC S5 0

CC S5 0

DC S5 0

EC S5 0

FC S5 0

GC S5 100

HC S5 100

AUT

MNA 0.05

!Minimum axial air spacing

MNE 0.14

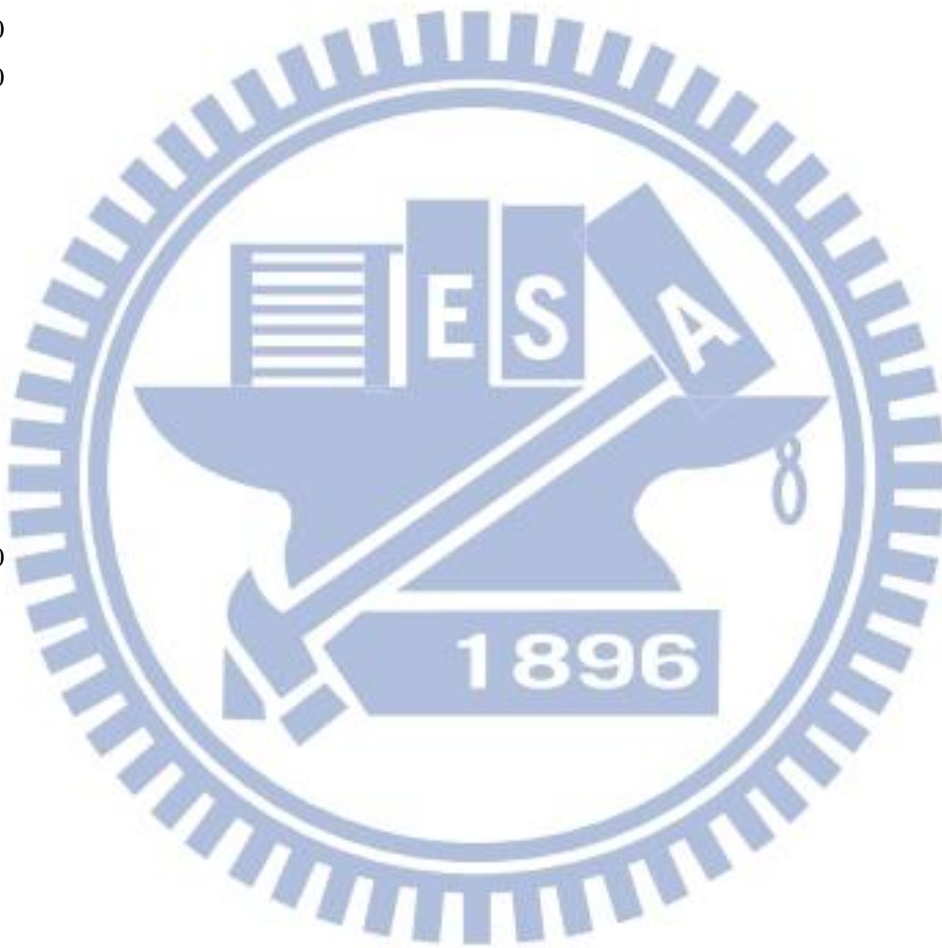
!Minimum edge thickness

MAE 0.0025

!Maximum air edge separation

!!MNT 0.14

!Minimum center thickness



!!MXT 2.5           !Maximum center thickness

OAL S1..I < 6

!! field 3 HT

Y R2 SI W2 F3 Z1 < -0.25

!!Y R2 SI W2 F3 Z2 < -0.24

!!Y R2 SI W2 F3 Z3 < -0.23

!!Y R2 SI W2 F3 Z4 < -0.22

!!Y R2 SI W2 F3 Z5 < -0.21

!!Y R2 SI W2 F4 Z1 <0.35

Y R2 SI W2 F5 Z1 > -0.54

Y R2 SI W2 F5 Z1 < -0.50

!!Y R2 SI W2 F5 Z2 > -0.50

!!Y R2 SI W2 F5 Z2 < -0.48

!!Y R2 SI W2 F5 Z3 > -0.48

!!Y R2 SI W2 F5 Z3 < -0.44

!!Y R2 SI W2 F5 Z4 < -0.44

!!Y R2 SI W2 F5 Z5 < -0.42

!!K S2 < 98

!!K S2 > -98

!!K S5 < 98

!!K S5 > -98

DIY F1 Z1 < 0.03

DIY F1 Z1 > -0.03

DIY F2 Z1 < 0.03

DIY F2 Z1 > -0.03

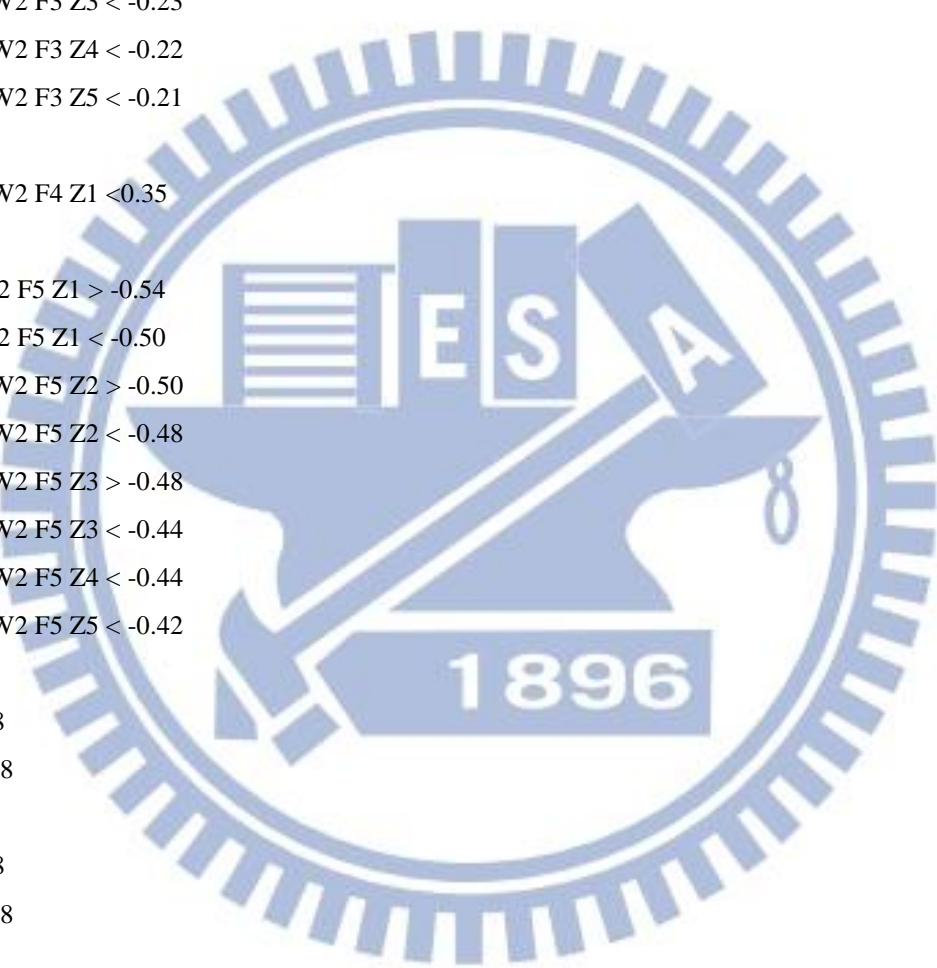
DIY F3 Z1 < 0.03

DIY F3 Z1 > -0.03

DIY F4 Z1 < 0.03

DIY F4 Z1 > -0.03

DIY F5 Z1 < 0.03



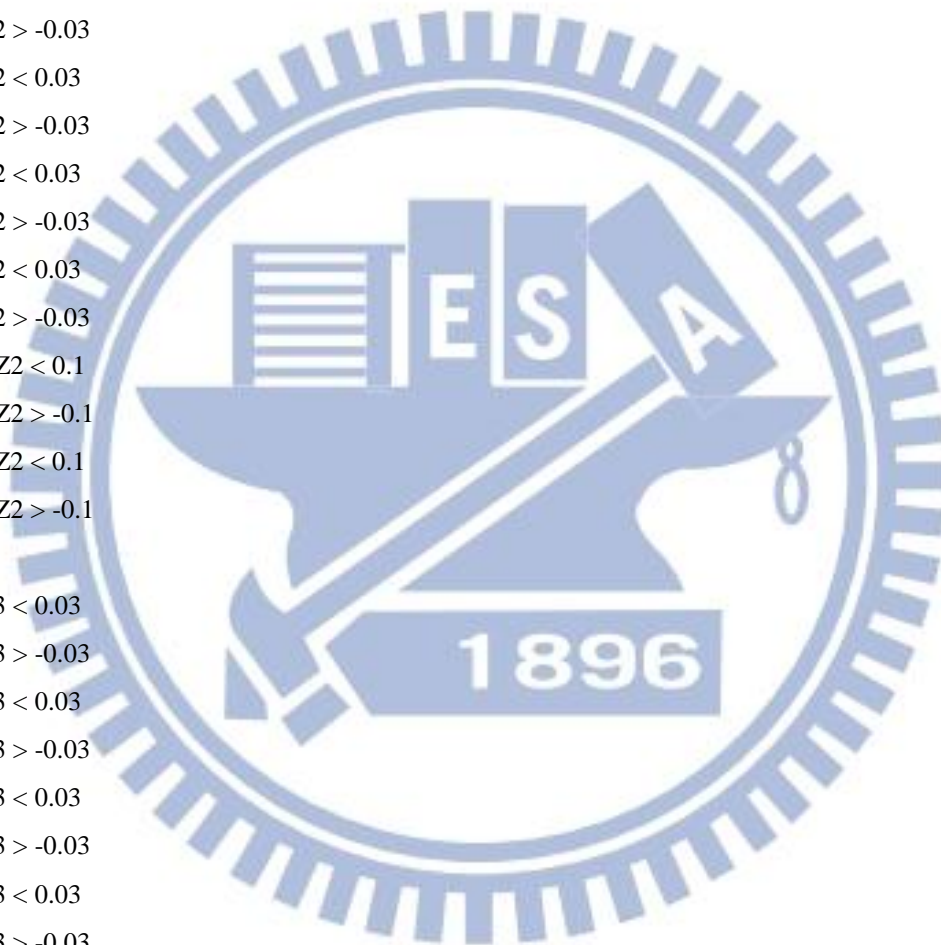


DIY F5 Z1 > -0.03  
!!DIY F6 Z1 < 0.1  
!!DIY F6 Z1 > -0.1  
!!DIY F7 Z1 < 0.14  
!!DIY F7 Z1 > -0.14

DIY F1 Z2 < 0.03  
DIY F1 Z2 > -0.03  
DIY F2 Z2 < 0.03  
DIY F2 Z2 > -0.03  
DIY F3 Z2 < 0.03  
DIY F3 Z2 > -0.03  
DIY F4 Z2 < 0.03  
DIY F4 Z2 > -0.03  
DIY F5 Z2 < 0.03  
DIY F5 Z2 > -0.03  
!!DIY F6 Z2 < 0.1  
!!DIY F6 Z2 > -0.1  
!!DIY F7 Z2 < 0.1  
!!DIY F7 Z2 > -0.1

DIY F1 Z3 < 0.03  
DIY F1 Z3 > -0.03  
DIY F2 Z3 < 0.03  
DIY F2 Z3 > -0.03  
DIY F3 Z3 < 0.03  
DIY F3 Z3 > -0.03  
DIY F4 Z3 < 0.03  
DIY F4 Z3 > -0.03  
DIY F5 Z3 < 0.03  
DIY F5 Z3 > -0.03  
!!DIY F6 Z3 < 0.1  
!!DIY F6 Z3 > -0.1  
!!DIY F7 Z3 < 0.14  
!!DIY F7 Z3 > -0.14

DIY F1 Z4 < 0.03  
DIY F1 Z4 > -0.03



DIY F2 Z4 < 0.03  
DIY F2 Z4 > -0.03  
DIY F3 Z4 < 0.03  
DIY F3 Z4 > -0.03  
DIY F4 Z4 < 0.03  
DIY F4 Z4 > -0.03  
DIY F5 Z4 < 0.03  
DIY F5 Z4 > -0.03

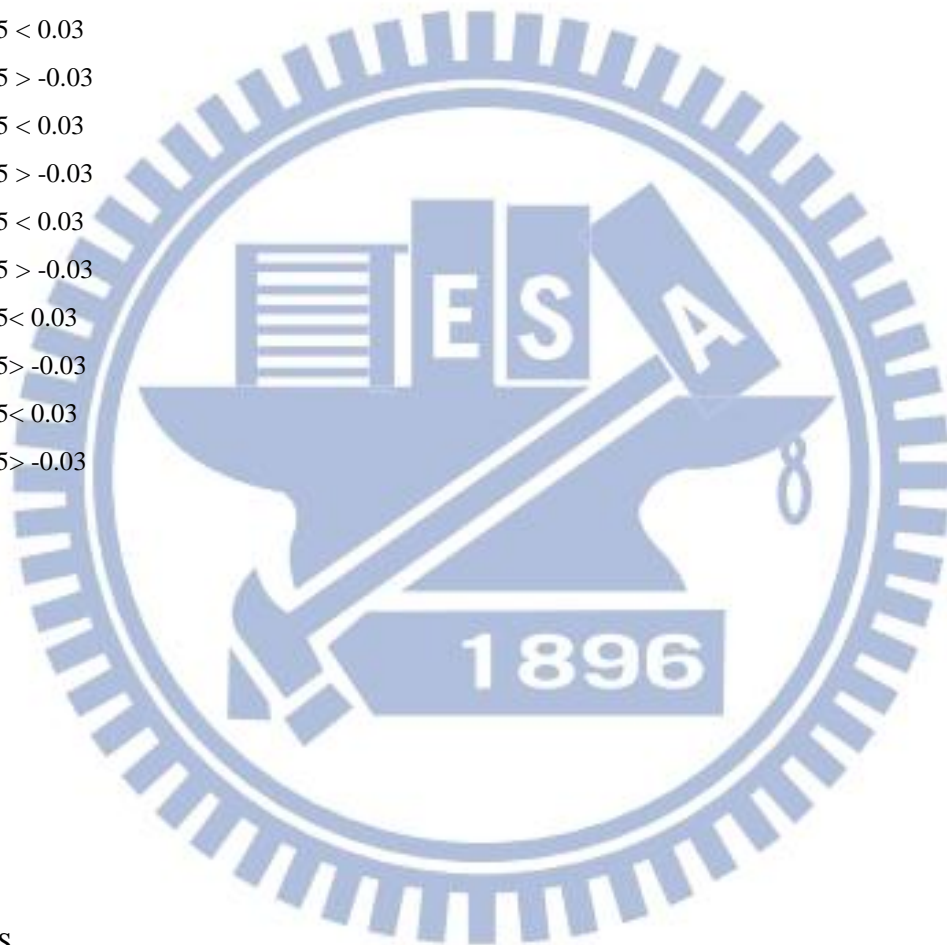
DIY F1 Z5 < 0.03  
DIY F1 Z5 > -0.03  
DIY F2 Z5 < 0.03  
DIY F2 Z5 > -0.03  
DIY F3 Z5 < 0.03  
DIY F3 Z5 > -0.03  
DIY F4 Z5 < 0.03  
DIY F4 Z5 > -0.03  
DIY F5 Z5 < 0.03  
DIY F5 Z5 > -0.03

GO

VIE

SF Z1 10  
SF Z2 10  
SF Z3 10  
SF Z4 10  
SF Z5 10  
ID Z1 YES  
ID Z2 YES  
ID Z3 YES  
ID Z4 YES  
ID Z5 YES

RET Z5 NO  
RET Z1 YES  
RET Z2 YES  
RET Z3 YES



RET Z4 YES

OFS Z1 0-2.4 0

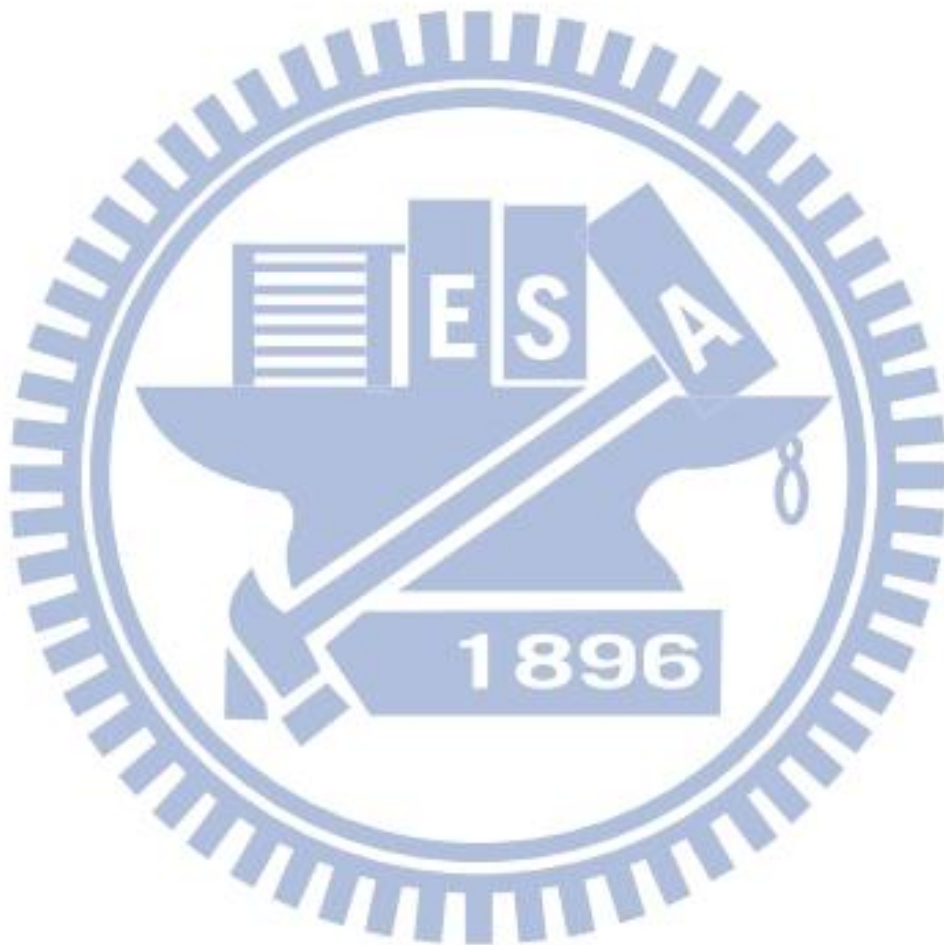
OFS Z2 0-1.2 0

OFS Z3 0 0 0

OFS Z4 0-1.2 0

OFS Z5 0-2.4 0

GO



## 附錄二 Matlab指令—Brown's distortion model

`%Calculating the coefficient k using the distortion form the diagonal line`

```
clear all;
```

```
clc;
```

```
syms k k_p;
```

```
%type the distortion what you need
```

```
d=10 ;           %percent
```

```
distype = 0;    %distortion type =1 :barrel      ;=0 :pin-cushion
```

```
disp('-----Calculating the distortion and coefficient k-----');
```

```
if (distype==1)
```

```
    fprintf('distortion= %d %%\n',d*(-1));
```

```
else;
```

```
    fprintf('distortion= %d %%\n',d);
```

```
end
```

```
d=d*0.01 ;
```

```
img_in = imread('grid400.bmp');
```

```
img_in = rgb2gray(img_in);
```

```
I = double(img_in);
```

```
figure(1);
```

```
imshow(I);
```

```
title('original');
```

```
disp('-----')
```

```
if (distype==1)
```

```
    disp('Do barrel distortion');
```

```
else;
```

```
    disp('Do pincushion distortion');
```

```
end
```

```
disp('-----')
```

```
%Apply Barrel Transform to Checkerboard
```

```
%radial barrel distortion
```

```
[nrows,ncols] = size(I);
```

```

[xi,yi] = meshgrid(1:ncols,1:nrows);
imid = round(size(I,2)/2); %Find index of middle element

%solve the radial distortion coefficient "k"
ru = imid*sqrt(2); %both ru, rd are aligned to x-axis
rd = ru*(d+1);
ru_x = ru/sqrt(2);
fprintf('Input image with pixels %d x %d \n', (imid*2),imid*2);
disp('COMPUTING RADIAL DISTORTION COEFFICIENT K');
sol = solve((k*ru^3)+ru-rd);
k=double(sol);
fprintf('K= %d \n',k*(-1));

if (distype==1)
    rd_x = (ru_x)+((ru_x)^3)*k*(-1);
else;
    rd_x = (ru_x)+((ru_x)^3)*k;
end

fprintf('at x-axis,ru=%d, rd=%d \n',ru_x,rd_x);

if (distype==1)
    ru_45d = ru;
    rd_45d = ru*(1+d*(-1));
    fprintf('at 45 degree alignment, ru=%d, rd=%d\n',ru_45d,rd_45d);
else;
    ru_45d = ru;
    rd_45d = ru*(1+d);
    fprintf('at 45 degree alignment, ru=%d, rd=%d\n',ru_45d,rd_45d);
end

xt = xi(:) - imid;
yt = yi(:) - imid;
[theta,r] = cart2pol(xt,yt); %Transform Cartesian coordinates to polar

%decide the distortion type
if (distype==1)
    a=k;
else;

```

```

    a=k*(-1);
end

s= r+a*r.^3;
[ut,vt] = pol2cart(theta,s); %Transform polar or cylindrical coordinates to
Cartesian
u = reshape(ut,size(xi)) + imid; %reshape:reshape array
v = reshape(vt,size(yi)) + imid;
%cat(dim,A,B):concatenates the arrays A and B along dim
tmap_dis = cat(3,u,v);
%makeresampler(interpolant,padmethod):create resampling structure
resamp = makeresampler('linear','fill');
%Apply spatial transformation to N-D array
I_dis = tformarray(I,[],resamp,[2 1],[1 2],[],tmap_dis,.3);
%subplot(335);

if (distype==1)
    figure(2);
    imshow(I_dis);
    title('barrel');
else;
    figure(2);
    imshow(I_dis);
    title('pincushion');
end

disp('-----calculating the reverse k'-----');
disp('(if we want to reverse the distortion using the k' of edge)');

rd_p = ru;
sol_p = solve((k_p*(rd)^3)+(rd)-(rd_p));
k_p = double(sol_p);
%disp(['K'=', num2str(k_p)]);
fprintf('K'=' %d \n',k_p);

disp('-----');
%do reverse (pin-cushion to barrel)
xt = xi(:) - imid;

```

```

yt = yi(:) - imid;
[theta,r] = cart2pol(xt,yt); %Transform Cartesian coordinates to polar

if (distype==1)
    c=k_p*(-1);
else;
    c=k_p;
end

s_r= r+c*r.^3;
[ut,vt] = pol2cart(theta,s_r); %Transform polar or cylindrical coordinates to
Cartesian
u = reshape(ut,size(xi)) + imid; %reshape:reshape array
v = reshape(vt,size(yi)) + imid;
%cat(dim,A,B):concatenates the arrays A and B along dim
tmap_r = cat(3,u,v);
%makeresampler(interpolant,padmethod):create resampling structure
resamp = makeresampler('linear','fill');
%Apply spatial transformation to N-D array
I_rev = tformarray(I,[],resamp,[2 1],[1 2],[],tmap_r,.3);
%subplot(335);

if (distype==1)
    figure(3);
    imshow(I_rev);
    title('reverse the barrel to pin-cushion (using the edge k')');
else;
    figure(3);
    imshow(I_rev);
    title('reverse the pin-cushion to barrel (using the edge k')');
end
end

```