

裂隙燈顯微鏡數位成像系統設計

Design of Digital Imaging System for Slit Lamp Microscope

陳德請、葉豐銘、林子文、李錫霖

Der-Chin Chen, Feng-Ming Yeh, Zi-Wen Lin, Lee Siak Lim

本文利用場鏡及接口透鏡設計一裂隙燈顯微鏡數位成像系統。裂隙燈被顯微鏡物鏡成像之影像經場鏡及接口透鏡傳遞至數位攝影機鏡頭，由此鏡頭成像於數位攝影機的電荷耦合影像感測元件 (CCD) 上。本文利用 ZEMAX 光學設計程式做多重組態設計完成具數位攝影機及顯微鏡雙功能的裂隙燈顯微鏡數位成像系統。數位攝影機使用 300 萬畫素的 CCD 元件，系統要求狹縫長為 18 mm、有效焦距為 11.23 mm、MTF 空間頻率為在 80 lp/mm 時軸上大於 0.6，且最大視場處大於 0.3、系統光學畸變小於 5%。設計結果滿足系統規格，使此裂隙燈數位成像系統具有良好的光學品質。因為照明鏡組與雙目顯微鏡組是採用共焦與共光軸，使系統縮小體積且組測時易於調校。

This paper using a field lens and an interface lens designed slit lamp microscope with a TV camera. Image of microscope objective through the field lens and interface lens are transmitted to the TV camera lens, and then imaged by the TV camera lens on the charge-coupled device (CCD) image sensor. Here, we use the function of zemax optics design program to multiple configuration designed, it include a television cameras of digital image and the microscopes bifunctional of slit lamp microscope. TV cameras use 3 million pixels charge-coupled device image sensor, the system required a slit length is 18 mm, the effective focal length is 11.23 mm, the spatial frequency of MTF is 80lp/mm on the axis greater than 0.6, and the maximum field of view is greater than 0.3, the aberrations less than 5%. The designed result must be satisfy system specifications, make this slit lamp digital imaging system having a good optical quality. Because the illumination and binocular microscope are confocal and coaxial, so can reduce the system volume and easy to adjust when the assembly.

一、前言

裂隙燈顯微鏡主要應用於眼部檢查，隨著時代的發展，它的功能和應用範圍也不斷擴大，例如：驗光 (optometry) 配鏡時，患有眼睛疾病的病人配戴隱形眼鏡 (contact lenses) 之前，必須使用它來評估眼睛是否適合配戴與配戴後適應性，同時

可以使用它來測試隱形眼鏡與眼球的服貼度及滑動狀況⁽¹⁾。裂隙燈顯微鏡由照明光源射出一裂隙光線，照亮受檢測眼睛，同時將眼球被聚焦部位作一光學切面，透過雙筒顯微鏡可清楚觀察及判斷眼內各層次組織的病變情況。裂隙燈顯微鏡是利用前後移動觀察機台來調整對焦，透過狹縫控制閘的調整設定狹縫的寬細、光線亮暗與光點大小的控制

等，經由這些調整後裂隙光線被清晰成像在左右擺動的圓心垂直面上，顯微鏡的聚焦同樣也必須聚焦在這個圓心垂直面上以觀察受檢測者眼部。受測者眼部因裂隙光線照明而清晰可見，在光線以外的部分仍為黑暗，形成強烈的明暗對比，且當裂隙光線分別以 10° 至 60° 角度照明眼睛各部位，以及顯微鏡從不同的角度觀察眼睛，可以分別觀察眼部外觀、眼角膜 (cornea)、房水 (aqueous humor)、玻璃體 (vitreous) 及晶狀體 (crystalline lens) 等透明組織 (transparent tissue) 之狀況，加大倍數甚至可以觀察到視網膜之狀況。由於它能製造出物體深淺陰影，因此能產生一個清晰的輪廓影像，這些組織在光線通過的地方可以顯示出淡灰色半透明的影像；當窄的裂隙光線通過角膜或晶狀體等透明組織時，可以顯示出這些組織的光學切面。利用裂隙燈光線通過透明組織形成的光學切面判斷病變的深淺層次，還可以藉助螢光顯影和紅外線 (infrared) 等技術進一步了解眼部生理和病理特徵，並實施部分眼科顯微手術⁽²⁾。

長期以來裂隙燈檢查所見資料皆由醫生用文字描述或用圖片表示，僅少數重要罕見病例附件採用普通相機拍攝照片記錄。這種檢查方式受普通相機限制不能立即觀察拍攝情況，影像品質和尺寸限制難以精確觀察與分析細微病變，資料管理與檢索複雜，使檢查結果的可比對性、存儲性受到很大的限制。若結合數位攝影機 (TV camera) 則有效避免影像存儲性差的缺陷，並且可以對檢測的眼睛影像進行對應的影像處理，有效針對眼底部位區域的診斷與專業判別。

在上述裂隙燈基本結構中，將顯微鏡成像光線引出，另擴展出照相光路。眼部組織反射 (reflection) 的光線經顯微鏡後，由移動反射鏡引出成像在場鏡 (field lens) 位置，光束通過場鏡壓縮，經反射鏡變換傳輸路徑傳遞至相機鏡頭，再由相機鏡頭成像於數位攝影機的電荷耦合影像感測元件 (CCD image sensor) 上。為了實現從場鏡到 CCD 的近距離成像，成像鏡頭焦距 (focal length) 比一般普通相機小⁽³⁾。近年來影像處理技術與電腦技術的高度發展，高解析度 (high resolution) 數位影像技術開始應用於醫學影像，也應用於裂隙燈顯微

鏡，可以有效克服現有裂隙燈使用中的種種不足，並可進一步對眼部數位影像中的病變部分進行量化分析，客觀準確地判斷病情變化⁽⁴⁻⁶⁾。

裂隙燈的第一個概念可以追溯到 1911 年偉大的眼科醫生阿爾瓦·古爾斯特蘭德 (Allvar Gullstrand) 及“大無反射眼底鏡”。該儀器是由蔡司 (Zeiss) 製造，其架構是通過一垂直可調柱連接一支架基座的特殊照明器，它可以在玻璃板上自由移動。照明燈採用一個遠心式 (telecentricity) 結構，通過一個簡單的光學系統轉換成一個縫隙，它是由非球面檢眼鏡 (ophthalmoscope) 透鏡成像到眼睛中。兩種鏡頭，即眼底鏡和伸縮式鏡頭 (zoom lens) 整合於手持式裝置中放大觀察。直到 1920 年，莫里茲·馮·羅爾 (Moritz von Rohr) 及奧托 (Otto Henker) 改善各種阿爾瓦·古爾斯特蘭德的裂隙燈，至今成為裂隙燈的藍本⁽⁷⁾。

二、基本原理

1. 裂隙燈顯微鏡數位成像

圖 1 所示為一般裂隙燈顯微鏡實體圖，無數位攝影機裝置。增加數位成像功能時首先將光源被集中成裂隙光線以 10° 到 60° 之間角度入射到眼睛，眼睛組織反射的光線經顯微鏡後，由移動反射鏡引出成像在場鏡位置，光束通過場鏡壓縮，經反射鏡變換傳輸路徑傳遞至相機鏡頭，再由攝影機鏡頭成像於 CCD 元件，進而對眼疾患部進行觀察。裂隙燈顯微鏡數位成像應實現一定品質的數位影像，以達到觀察所需解析度及後續影像處理的品質要求。為了觀察眼睛細部患位，裂隙光源需從不同的角度入射到眼球內各部位，而觀察者需仔細從顯微鏡多方角度觀察受測者眼睛，所以裂隙燈與觀察機台都需有一定的左右弧度擺動角^(8,9)。

眼科視光器材照明方式可分為三種：直接照明、臨界照明 (critical illumination) 及柯拉照明 (Koehler Illumination)。圖 2 所示為柯拉裂隙燈照明示意圖，其是一種最常用的照明方式。裂隙燈顯微鏡的照明鏡組，要求是能產生一個亮度高、照明均勻的清晰影像裂隙光線，且寬度可調的照明效果。為了達到這個要求，幾乎所有的裂隙燈都



圖 1. 裂隙燈顯微鏡實體圖。

選擇了柯拉照明方式。裂隙燈顯微鏡典型的照明鏡組是柯拉照明。柯拉照明的特徵是：由聚光鏡 (condenser lens) 和投射鏡 (projection lens) 這兩組透鏡組成；燈絲 (Filament) 經聚光鏡成像在投射鏡上或接近在投射鏡上，通過裂隙、光圈及投射鏡成像於眼部。

投射鏡的直徑通常都是較小的，其中有兩項好處：可以減少鏡片像差與增加裂隙光線影像景深，從而提高了眼的光學切片的品質。裂隙的寬度通過一個連續變化的機械結構 (或狹縫控制閘) 來控制，裂隙的高度可以利用裂隙前的一系列光圈的變化而達到非連續變化的效果，或者利用螺旋形光圈來達到連續變化的效果⁽¹⁰⁾。在照明光路中還放置了不同波長的濾光片 (optical filter)，可以根據各種檢查的需要，選擇各種不同顏色的裂隙光線。此外還可以轉動裂隙光源，以便檢測眼底 (fundus) 及前房角 (anterior chamber angle)。隙燈所使用的燈泡為鎢絲燈泡，為了安全起見，一般都是低電壓的。近一個時期有些裂隙燈使用了鹵素燈泡，它的亮度較高，燈泡在裂隙燈影像記錄或其他特殊檢查

如：角膜厚度測量等，是必備的。裂隙燈由照明光源投射一束裂隙光線，其裂隙邊切面必須要非常的平整，在圓心垂直面上成像，使同軸垂直照明和顯微鏡光軸的方向相同，成為同軸垂直照明系統。

裂隙燈顯微鏡由物鏡、目鏡和稜鏡組成。一定的放大率範圍和足夠的工作距離設計是該顯微鏡的基本要求。顯微鏡的物鏡與受測眼之間的距離稱為工作距離，這個距離使檢查者能有一定的預定空間作檢測或治療操作。顯微鏡的放大倍率範圍一般為 $6\times - 40\times$ 。低放大率用於病變定位，高放大率用於病變細部的觀察。改變放大率可採用以下四種方法：

(a) 使用不同的物鏡：

這是一種最經典的方法，目前仍然是最常用獲得不同放大倍率的方法，將不同的物鏡安裝在一個透鏡轉盤上，在檢測中根據需要轉動轉盤來改變放大倍率。由於裂隙燈顯微鏡的物鏡空間的局限性，一般只能設置兩組物鏡。

(b) 使用不同的目鏡：

該方法一般用於較低廉的裂隙燈顯微鏡，各種

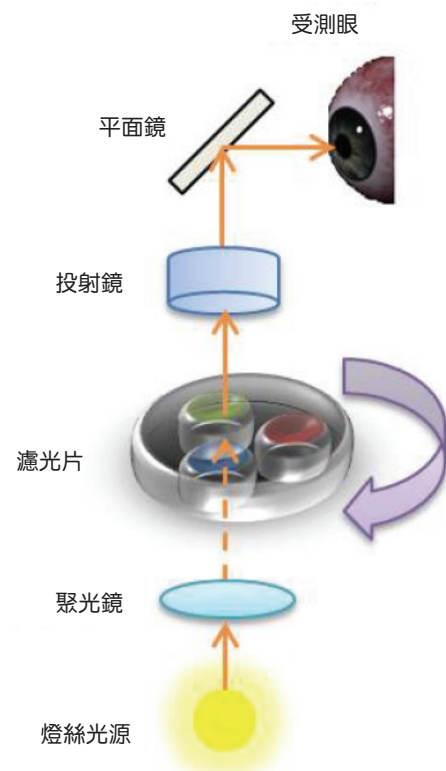


圖 2. 柯拉裂隙燈照明示意圖。

不同放大倍率的目鏡配置好後放在裂隙燈工作臺的抽屜中，在需要改變放大倍率的時候將目鏡取下，然後換上另一對目鏡。此方法使用起來不是很方便，一般配置兩對目鏡。

(c) 伽利略光學系統 (Galileo optical system) :

將幾種不同放大倍率的伽利略望遠鏡裝在一個變倍凸輪中，然後放置在顯微鏡光學系統中的物鏡及目鏡之間，通過轉動變倍凸輪來改變放大倍率。該方法能提供更多不同的放大倍率，稱之為伽利略系統。伽利略望遠鏡由一正物鏡和一負目鏡組成，為平行光線射出。

(d) 變焦光學系統 (zoom optical system) :

為連續變倍系統，有些裂隙燈顯微鏡的放大倍率能連續變化，這就需要變焦光學系統。但是變焦光學系統往往不能做到連續變化範圍內，各種放大倍率的像差都維持最佳狀況。

然而，在臨床應用過程中，並沒有特別需要放大倍率的連續變化，所以大部分的眼科醫師和驗光師都選擇光學品質高、非連續放大倍率變化的裂隙燈顯微鏡。如果擁有上述的不同的物鏡系列，又配合不同的目鏡系列，裂隙燈顯微鏡的放大範圍就擴大了，至少可以搭配出有四種放大倍率。一般顯微鏡最後成的像是倒置的，為了解決這個問題，該顯

微鏡使用一對稜鏡來倒像，且目鏡和稜鏡還能繞顯微鏡物鏡的光軸轉動，以適應對不同瞳孔距離的調整。顯微鏡解析度的大小與數值孔徑 (numerical aperture, NA) 有關，數值孔徑公式為

$$NA = n \cdot \sin u \quad (1)$$

其中 n 為物鏡和眼球之間的介質折射率 (通常在空氣中為 $n = 1$)， u 為孔徑角 (aperture Angle)，即物鏡邊緣的光線投射到觀察點與光軸的夾角。因此其解析度的大小，即顯微鏡的 NA 取決於工作距離和物鏡的直徑。典型的裂隙燈 NA 為 0.085。對顯微鏡成像品質的要求是：視場清晰、無明顯色差，各項像差數據應控制在一定範圍內。因此物鏡和目鏡都不能採用單透鏡，而是採用雙膠合鏡頭⁽¹¹⁾。圖 3(a) 及 (b) 所示分別為單筒及雙筒裂隙燈顯微鏡光路 (optical path) 示意圖，其中橙色框框為觀察者、紫色框框為物鏡、綠色框框為放大鏡組、黃色框框為鏡筒、紅色框框為轉像稜鏡、黑色框框為光圈、藍色框框為目鏡組及棕色框框為受測眼。整體光學系統放大倍率 (magnification) 為⁽¹²⁾

$$G = \frac{f_2}{f_1} \times g \times \frac{250}{f_3} \quad (2)$$

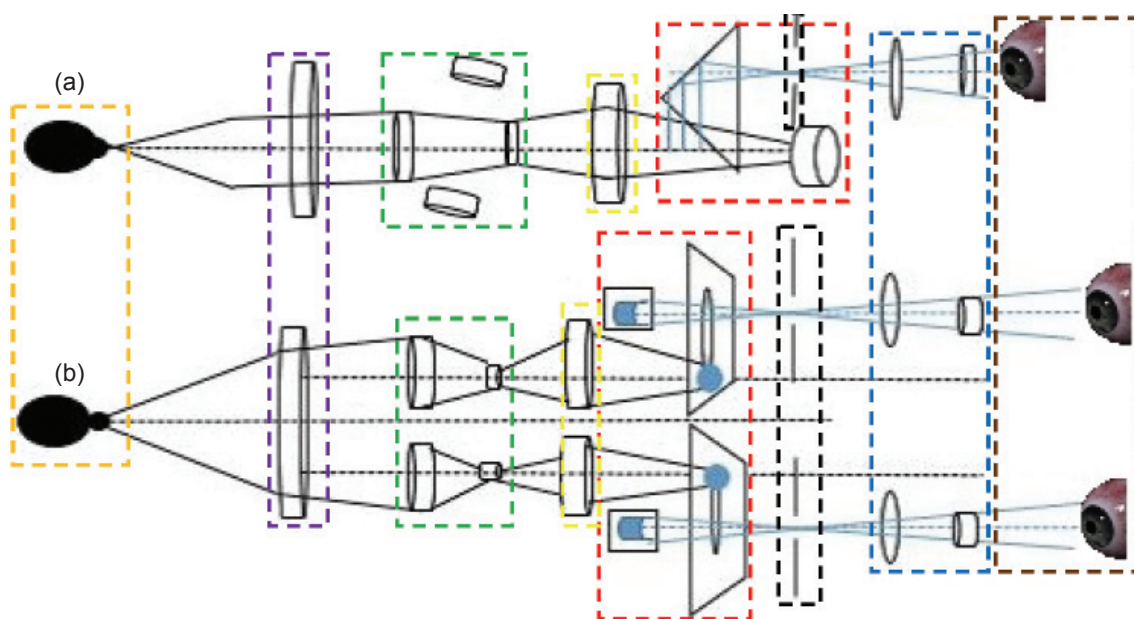


圖 3. 裂隙燈顯微鏡的光路示意圖。

其中 f_1 為物鏡 (Objective Lens) 焦距、 f_2 為鏡筒 (lens barrel) 焦距、 g 為望遠鏡鏡組及 f_3 為目鏡 (eyepiece) 焦距，單位為 mm。整體裂隙燈顯微鏡光學系統必須具備：

- (a) 清晰的成像。
- (b) 可調節目鏡焦距，以適應操作者不同的眼睛屈光度數。
- (c) 可調節兩目鏡的距離，以適應不同操作者的瞳距 (interpupillary)⁽¹³⁾。

在觀察中時，裂隙長度寬窄必須是可調的，一般裂隙寬度在 0—14 mm 範圍內；裂隙長短為 1—14 mm 範圍內，當長寬都是 14 mm 時，裂隙燈光實際是一個圓形光斑 (light spot)。

裂隙燈光源亮度可依受測者可接受的明亮程度作調整，其裂隙所觀察的方向及角度亦為旋轉可調，即裂隙光源可以依 360° 做不同的改變，以方便觀察受測者病因，所觀察的裂隙像必須在視野中央不能跑出顯微鏡視野。

2. 影像感測元件

影像感測元件有：CCD、互補式金屬氧化

物半導體 (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) 與接觸式影像感測元件 (contact image sensor, CIS) 三種⁽¹⁴⁾。CCD 元件乃是由眾多陣列排列的感光元件所構成，每一個感光元件都是一個金屬氧化物半導體電容，也代表著一個像素 (Pixel)。當照射光線在半導體中生成的電荷被存於暫存器。由於要同時將所有感光元件中的電荷數量取出來並不容易，因此 CCD 元件以序列化的方式來將電荷訊號輸出並儲存，接著再將每一行像素中所暫存的電荷訊號利用電壓控制閘由上往下平移，直到到達最底層時再由左向右輸出經由編碼電路形成影像訊號進行輸出或儲存。CCD 元件主要優點有：

- (a) 高解析度 (high resolution)：像素大小為 μm 級，可偵測細微的物體，提高影像品質。一般 CCD 常見規格有 1 寸、1/2 寸、2/3 寸及 1/4 寸等，尺寸越大的規格能夠取得範圍較大的可視區域。像素寬和高總數為感測影像尺寸寬度和高度。解析度則是指點矩陣影像的精細度，每立方寸的像素越多，解析度就越高。

- (b) 低雜訊 (low noise)：CCD 元件具有低雜訊與暗電流雜訊 (dark current noise)，因此提高了訊號雜訊比 (signal noise ratio, SNR)。
- (c) 高靈敏度 (high sensitivity) 與高量子轉換效率 (high quantum efficiency)：光強度很低的光源照射到 CCD 也能夠偵測，其訊號不會被雜訊掩蓋。
- (d) 良好的線性特性曲線 (linear characteristic curve)：照射的光源強度與輸出訊號大小成正比關係。
- (e) 動態範圍廣 (high dynamic range)：同時可以偵測強光與弱光，提高系統使用環境範圍。不會因為環境亮度差異大小造成訊號反差現象。
- (f) 低影像失真 (low image distortion)：使用 CCD 元件，其影像處理不會像使用影像光放管 (image pickup tube) 有失真的情況發生，而是使原物體的資訊忠實反應。
- (g) 體積小與重量輕。
- (h) 低耗電力，不受強電磁場影響。

CMOS 主要是利用矽或鉻元素所做成的半導體，使其在 CMOS 上共存著帶負電型金屬氧化物半導體場效電晶體 (N-type MOSFET) 和帶正電金屬氧化物半導體場效電晶體 (P-type MOSFET)，這兩個互補效應所產生的電流即可被晶片儲存和解讀影像。然而，CMOS 優點是在感測器上的電子元件少，相對使得感測面積較大，對光線的響應靈敏度 (response sensitivity) 高；缺點則是容易產生雜訊及動態範圍小，導致影像品質不佳。

近年來開發的主動像素感測元件，主要是針對被動像素感測元件高雜訊的缺點做改良，其方式是直接在每一單位像素上加上放大器 (amplifier) 及帶通濾波器 (band-pass filter)，使影像品質得到明顯的改善，但缺點是增加感測器製造複雜度，且每一像素的感光面積因容納較多元件而相對縮小，降低像素所能接收到的光⁽¹⁵⁾。好的數位攝影機必須具有高解析度、色彩飽和度 (color saturation) 與影像清晰度等特質，而這些全須靠好的光感測器 (optical sensor) 來作搭配。光感測器如同人眼睛視網膜，對於光的變化需能一一真實反應，數位攝影機最關鍵的元件即為光感測器，因應不同需求將選擇適當的光感測器。

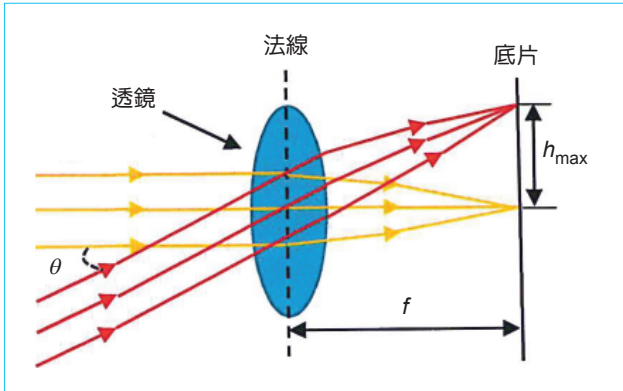


圖 4. 有效焦距與視場角有對應關係圖。

一般而言，較高解析度影像在輸出時可獲得較佳品質。本研究數位攝影機即採用 RGB 彩色 CCD 元件當做數位影像攝取之光電元件。RGB 彩色 CCD 元件具三原色感光畫素，數位攝影機電子電路還需具備有色彩抽取功能如色彩二值、色彩濃淡、灰色及 RGB 平均灰色，才能進行彩色處理確保持線性投影之正確性。

三、光學參數評價設定

在設計 CCD 數位攝影機鏡頭時，考量光學參數有以下幾個要點：

- (a) 鏡頭之成像圓需要大於 CCD 元件的對角線。
- (b) 鏡頭之解析度依 CCD 元件的像素大小 (pixel size) 而定，其中線對 (line pairs, LP) 大小等於 $1/(2 \times \text{pixel size})$ 。
- (c) 主光線夾角 (chief ray angle)。
- (d) 鏡組有效焦距 (effective focal length, EFL)。
- (e) 視場角 (field of view)。
- (f) F 數 (F/number)。
- (g) 解析度。
- (h) 調制轉換函數 (modulation transfer function, MTF)
- (i) 畸變 (distortion)。
- (j) 相對照度 (relative illumination)。
- (k) 鏡頭成像範圍。
- (l) 鏡頭鏡片數。
- (m) 系統總長度。
- (n) 後焦距 (back focus length)。
- (o) 紅外線截止濾光片 (infrared cut-off filters) 或稱紅外線濾光片⁽¹⁶⁾。

1. 視場角、有效焦距與光圈

裂隙燈數位成像鏡頭的視場角能同時觀察到最大範圍，對於特定視場角的目鏡，視場角和接口鏡組焦距成反比。本研究視場角是以一狹縫高為 18 mm 當作設定值。在使用時，使目標物移動也能有足夠的視野來幫助追蹤，同時可清楚的觀測狹縫之外的視野。

有效焦距與視場角有對應關係，當視場角度越大相對焦距越短，設計與加工難度高，周圍亮度較差，形變量較難控制；視場角度越小相對焦距越長，設計與加工難度低，亮度較均勻，形變量較易控制等，這些均需要考量到。圖 4 所示為有效焦距與半視場角之對應關係，其計算公式為

$$h = f \times \tan \theta \text{ 或 } h_{\max} = f \times \tan \theta_{\max} \quad (3)$$

其中 f 為有效焦距、 θ 為觀看者與顯示屏幕的半視場角、 $h_{\max}$ 為所採集影像目標點距離影像中心點的距離。公式 (3) 中 $h_{\max} = (\text{CCD 元件對角尺寸})/2$ 、 $\theta_{\max} = h \times \text{FOV} = \text{FOV}/2$ 、FOV 為視場角與 CCD 元件大小有關聯性。

光圈 (F/number) 依使用環境決定，室內使用需較亮的亮度；而室外使用可適度減低亮度。圖 5 所示為光圈 (F/number) 示意圖，其計算公式為

$$(F/\text{number}) \text{ 或 } (F/\#) = \frac{\text{有效焦距 (f)}}{\text{入瞳口徑 (D)}} = \frac{1}{2 \sin U} \quad (4)$$

其中 u 為邊緣光線與光軸夾角。

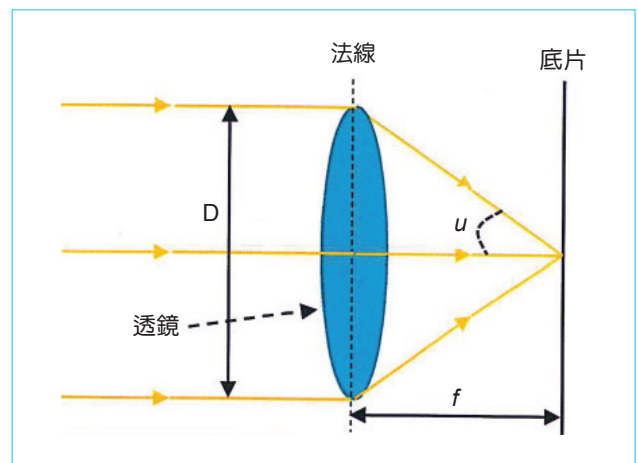


圖 5. 光圈示意圖。

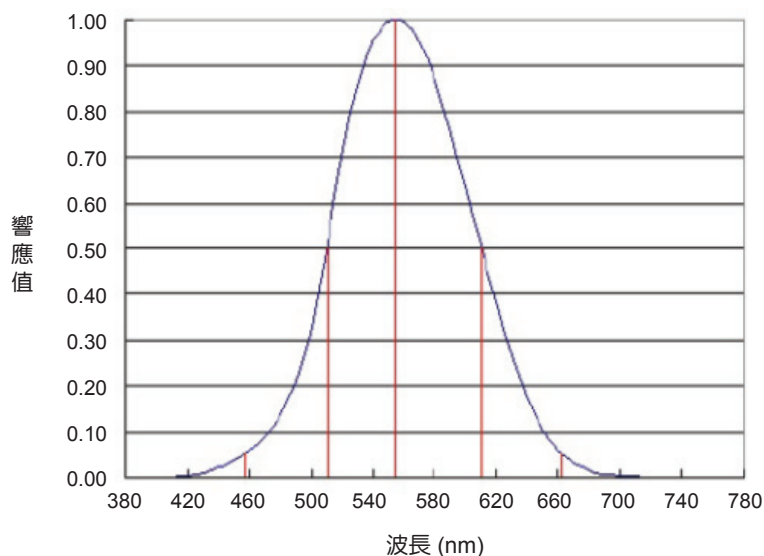


圖 6. 可見光譜符合人眼明視覺函數圖。

2. 波長範圍的設定

在觀察及判斷眼內各層次組織的病變，需使用特定波長範圍的光來辨識取得所需要的影像。一般常見光波長範圍檢查有下列數種：第一種在 1931 年由國際照明委員會 (CIE) 證實以人眼 2 度視角統計出，圖 6 所示為在可見光譜符合人眼明視覺函數需求，適合一般檢測使用^(17, 18)；第二種為紫外光，適合細微影像；第三種為紅外線，適合做單色微光檢測。數位攝影機使用 CCD 或 CMOS 元件在 (700-1100 nm) 近紅外波段有良好響應，加上濾光片濾除其它光波，以免造成影像色偏。圖 7 所示為

近紅外截止濾光片光譜響應曲線⁽¹⁹⁾，圖中黑色曲線為未加上近紅外截止濾光片；紅色曲線為加上近紅外截止濾光片。

圖 8 所示為 CCD 元件光譜響應曲線⁽²⁰⁾，可以發現人眼明視的波長範圍為 380—780 nm。我們通常以 3 個或以上的波長，並給予相對比重來描述波段範圍及光譜能量分佈。本篇主要以 490 nm、590 nm 及 640 nm 這三波長為設計波長，並給予相對比重來描述波段範圍及光譜能量分佈，其權重如表 1 所列。

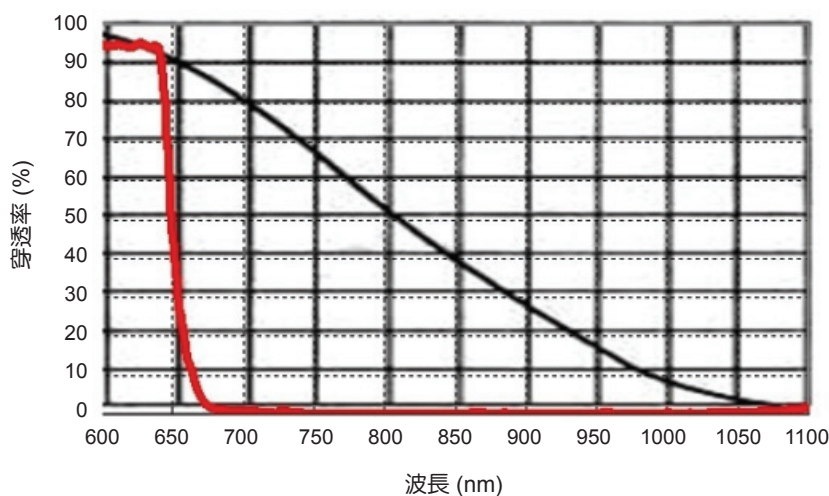


圖 7. 近紅外截止濾光片光譜響應曲線圖。

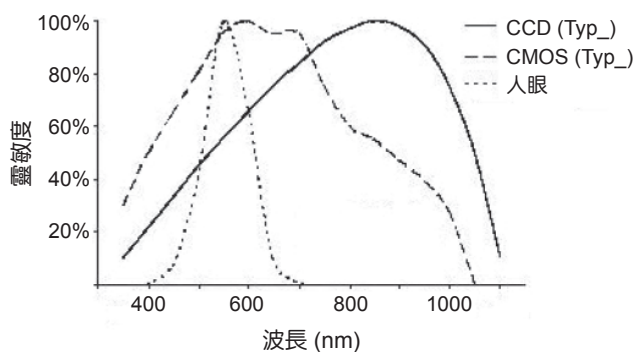


圖 8. CCD 元件光譜響應曲線圖。

3. 光學像值評價

(a) 調制轉換函數 (MTF)：由於裂隙燈顯微鏡數位成像系統的感測元件是人眼，因此光學品質評價標準理所當然是以人眼為設計目標，而人眼的最小解析能力為 1 分角，故在 1 度時人眼為最佳解析能力，其空間頻率為⁽²¹⁾

$$\frac{1}{2 \times \frac{1}{60}} = 30(\text{lp/deg}) \quad (5)$$

本系統所需 MTF 在光軸上 30 (lp/mm) 應大於 0.3 及最大視場處 30 (lp/mm) 應大於 0.2。影像感測器是 CCD 元件，接口鏡組及物鏡之解析度依 CCD 元件的像素大小而定，即

$$\text{LP} = \frac{1}{(2 \times \text{像素大小})} (\text{LP/mm}) \quad (6)$$

表 1. 裂隙燈顯微鏡數位成像系統之波長及權重。

波長 (nm)	權重
490	0.7
590	1
640	0.7

其中 LP/mm 為每 1 mm 有多少明暗條紋。在裂隙燈顯微鏡數位成像系統設計上，由於必須考慮許多因素與設計之難度，在成像品質上要求 MTF 的空間頻率為 80 (lp/mm) 在軸上必須大於 0.45，最大視場處的空間頻率為 80 (lp/mm) 必須在 0.3 以上。圖 9 所示為三種光學系統 MTF 圖，其中空間解析度定義為 1 mm 的範圍內填入多少對黑與白相間的線條，填入線條越多越密，鏡頭未必能清晰呈現每一條線，理論上空間解析度與鏡頭 F 數有關，其截止頻率 f_c 為

$$f_c = \frac{1}{\lambda \times F/\#} \quad (7)$$

其中 λ 為截止波長， $F/\#$ 為 F 數。圖 10 所示為解析度相對照度圖，假設物體與影像皆為正弦函數輸入與輸出，但因為系統頻率響應不足，造成輸出正弦函數會變形。對光學系統而言如果此情況嚴重，影像將會產生模糊。水平坐標為空間頻率；縱軸坐標為 MTF 值。

(b) 子午面方向及弧矢面方向：MTF 中分為子午面方向 (MTF_t) 及弧矢面方向 (MTF_s)，其兩者之絕對值差異量在各個視場角下需小於 10%。

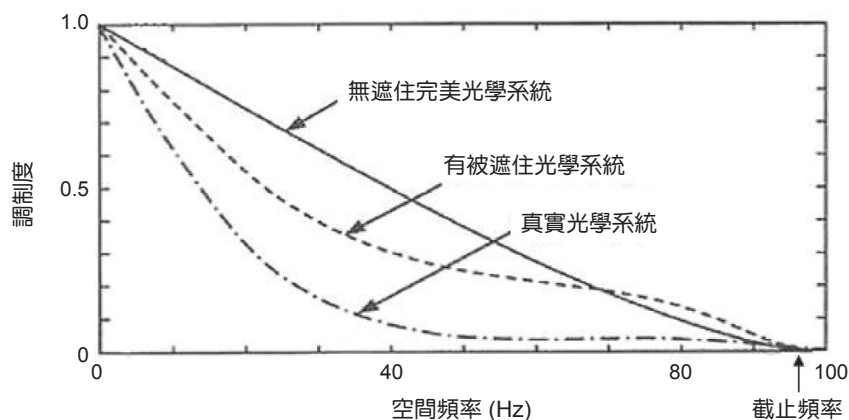


圖 9. 三種光學系統 MTF 圖。

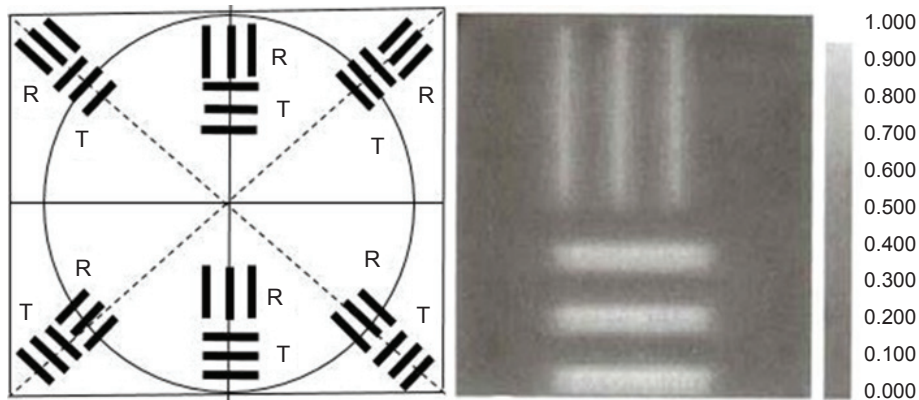


圖 10. 解析度相對照度圖。

(c) 畸變量：畸變是由於放大倍率隨物高或視場角改變，造成影像的變形，視場角越小越好，在廣角的情況下很難縮小畸變量。如果像點所在成像位置與理想位置更接近光軸，稱桶型畸變 (barrel distortion)，若成像位置與理想位置偏離光軸，則稱為枕型畸變 (pincushion distortion)。圖 11 所示為光學畸變圖，(a) 為理想影像；(b) 為枕型畸變；(c) 為桶型畸變⁽²²⁾。

圖 12 所示為電視 (TV) 畸變，一般被定義為視場角在 0.6 時與視場角在 1.0 時的畸變絕對值差異，TV 畸變率 D_{TV} 為投影在 TV 監視器上的影像歪斜的現象，其計算公式為⁽²³⁾

$$D = \frac{y' - \bar{y}'}{\bar{y}'} \times 100\% \quad (8)$$

$$D_{TV} = \frac{\Delta h}{2h} \times 100\% \quad (9)$$

$$D_{TV} = \frac{1}{2}(1 - m^2)D \quad (10)$$

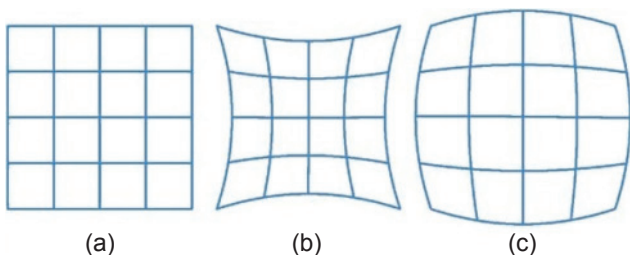


圖 11. 光學畸變圖。

其中 D 為光學畸變率， Δy 代表理想影像 $\bar{y}'$ 與實際影像 y' 的對角大小差， Δh 為理想影像高度與實際影像高度的差； h 為實際影像的高度； m 為 0.6； D_{TV} 為 0.32 D。

負畸變會提高照度，有些超廣角鏡頭有很大負畸變，有可能邊緣相對照度高於中心。一般人眼在畸變量 5% 以下並不易察覺，所以對於畸變量的大小我們以小於 5% 為標準。

(d) 橫向色差 (lateral color)：是指由於離軸光線在不同波長的情況下，因為放大率關係造成不同波長光在同一焦平面上被聚焦在不同位置。本系統以人眼對色差的最小分辨值小於 2 arc-min 為比標準。

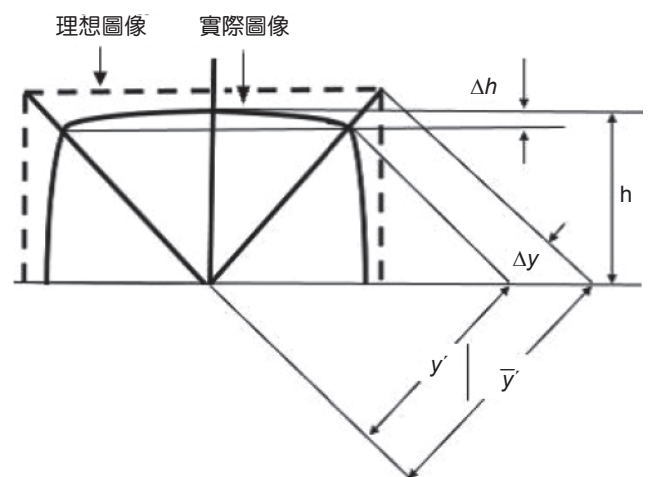


圖 12. TV 畸變。

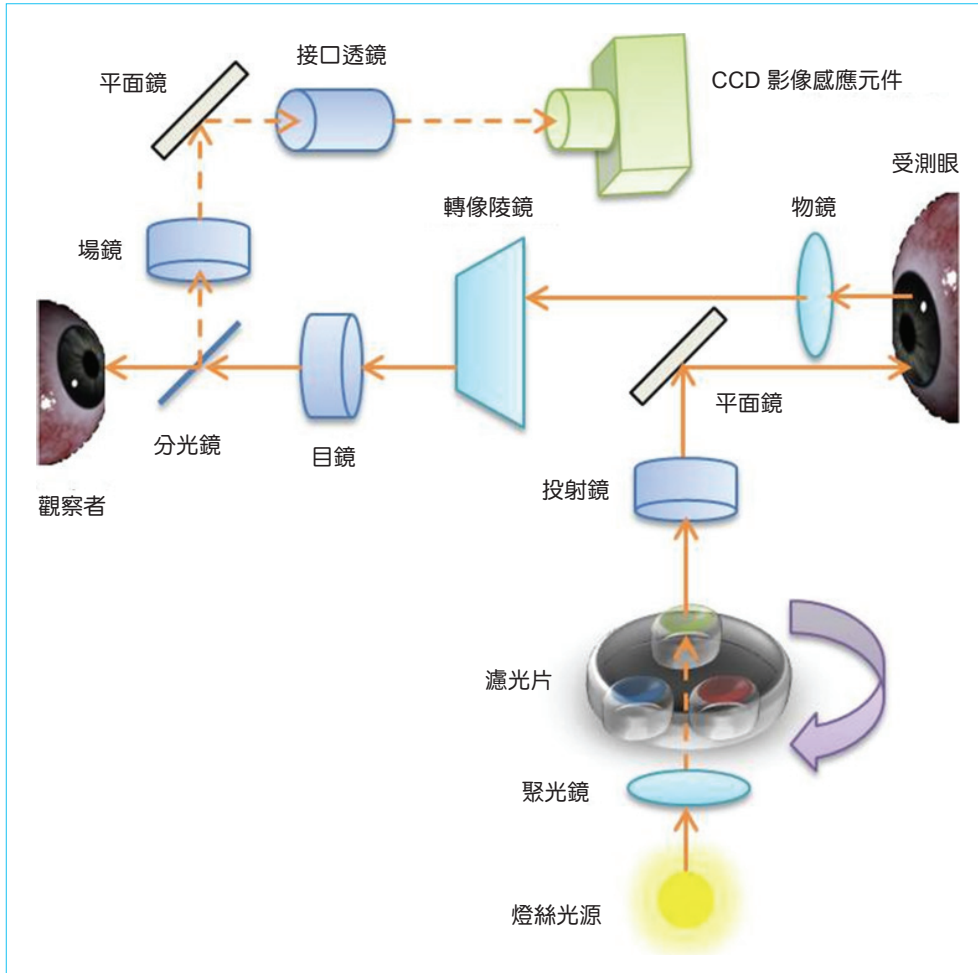


圖 13.
整體裂隙燈顯微鏡數位
成像光路示意圖。

四、系統架構圖與光學設計流程圖

1. 系統架構

裂隙燈顯微鏡數位成像系統的結構，主要是由裂隙燈顯微鏡鏡組、照明鏡組和 CCD 數位攝影機所組成。在裂隙燈基本結構上，將顯微鏡成像光線引出，還可以擴展出照相光路。裂隙燈機台構造除了具備有：

- (a) 左右角度可擺動功能外，還要具備可移動調整的工作台。
- (b) 托架裝置使受測者頭顱可貼近，領托上下調整以適應受測者不同的頭部大小，使其調整至合適觀察位置。
- (c) 固視燈 (fixation lamp) 可使受測者的眼睛固定在觀察位置，避免眼睛不自覺的轉動。

光學系統中的照明 (illumination) 與顯微鏡需具備共同光軸，旋轉時此共同光軸 (optical axis) 不

能有誤差。圖 13 所示為一個整體裂隙燈顯微鏡數位成像光路示意圖⁽²⁴⁾。

物鏡是傳統顯微鏡結構中靠近受測者的鏡頭。一般使用 10x 與 16x 的物鏡，觀測影像的品質就是取決於物鏡的性能。要改變總放大倍率就要改變物鏡的放大倍率，放大倍率是物鏡和目鏡焦距之比。即物鏡焦距愈長，放大倍率愈高。放大率亦可以從入射瞳孔與出射瞳孔的直徑求得，入射瞳孔通常為物鏡的直徑，這是因為受測者部位的解析度由物鏡的數值孔徑決定。

目鏡是顯微鏡上靠近人眼觀察的那一端鏡頭。參考現有裂隙燈顯微鏡規格，目鏡的放大倍率為 10x。物體的像在目鏡的焦點內，靠近焦點附近成倒立、縮小的實像；目鏡焦距較短，作用相當於一個放大鏡，用來把這個實像放大，相對地眼睛觀察到的像為成正立、放大的虛像。

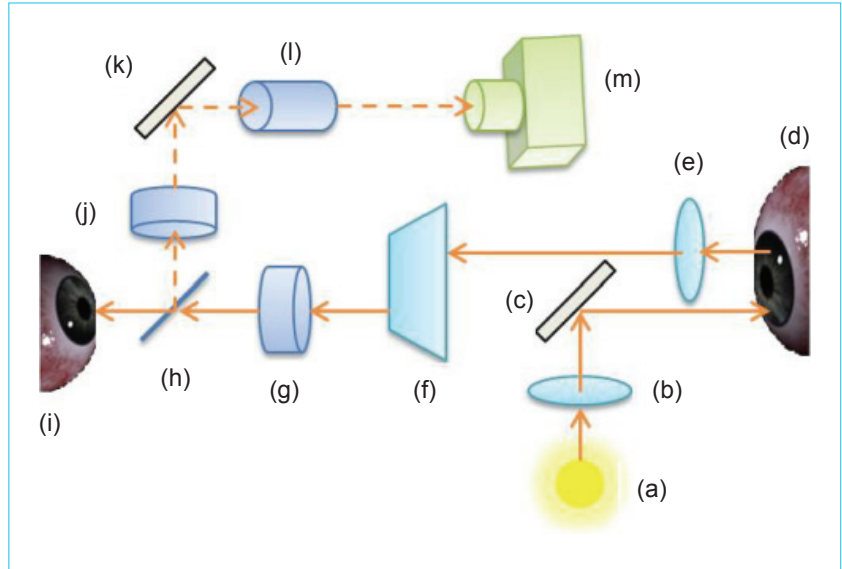


圖 14.
簡易裂隙燈顯微鏡數位成像光路示意圖。

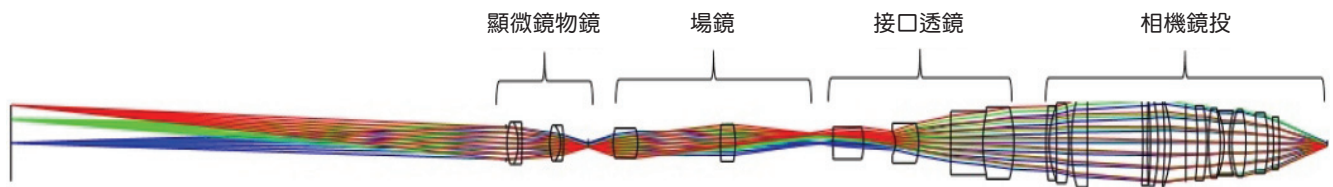


圖 15. 裂隙燈顯微鏡數位成像系統示意圖。

因此，無論目鏡放大倍率增加多少，影像的解析度都不會增加。顯微鏡物鏡為觀察 18 mm 裂隙大小，再經由場鏡將光束縮小，然後使用數位攝影機作為影像拍攝設備，在照相光路中的場鏡和照相物鏡之間設計一套接口透鏡，因為場鏡位於接口透鏡的前焦面處，將場鏡處的像成在無窮遠處以滿足照相物鏡物距的要求，再透過照相物鏡最終成像在 CCD 元件上。

圖 14 所示為簡易裂隙燈顯微鏡數位成像光路示意圖，其中實線為顯微鏡成像光路；虛線為 CCD 成像光路；(a) 為裂隙燈光源；(b) 為聚光鏡；(c) 與 (k) 為平面鏡；(d) 為受測眼；(e) 為顯微鏡物鏡；(f) 為轉像稜鏡 (Prism)；(g) 為顯微鏡目鏡；(h) 為分光鏡；(i) 為觀察者；(j) 為場鏡；(l) 為接口透鏡及 (m) 為 CCD 鏡頭。圖 15 所示為裂隙燈顯微鏡數位成像系統示意圖，結構包括：顯微鏡物鏡、場鏡、接口透鏡、CCD 鏡頭。

本系統設計是以 ZEMAX 的多重組態設計一

裂隙燈顯微鏡數位成像系統，分成兩部分：第一部分為數位攝影機，內部結構包含：場鏡、接口透鏡 (interface lens) 及數位攝影機鏡頭；第二部分為顯微鏡，內部結構包含：物鏡、轉像稜鏡及目鏡。其中在這兩部分之間引用了分光鏡，把成像的影像訊號同步傳送到顯微鏡目鏡與 CCD 鏡頭。

表 2. 裂隙燈數位成像系統規格。

狹縫長	18 mm
有效焦距	12 mm
入瞳大小	7.5 mm
系統總長	260 mm
波長	490 nm/590 nm/640 nm
波長權重	0.7/1/0.7
MTF	在 80 lp/mm 軸上 > 0.45；在 80 lp/mm 最大視場處 > 0.3
畸變量	< 5%
相對照度	> 65%

2. 制訂規格

在設計之前我們必須先確立光學系統的各項光學參數，並制定出符合需要的系統規格或客戶需求，了解系統性能，在制定規格時必須要考慮到各種不同的限制狀況，比如說：系統大小限制；在製造鏡片時光軸之偏心與傾斜之控制的技術極限等；CCD 元件的解析度與色彩飽和度等條件限制；考慮機構的要求，如：有效焦距與後焦距；影像品質主要包括：清晰度、幾何畸變、顏色深淺及視場範圍等問題。

在進行設計時，必須了解並制定規格，才有辦法進行光學設計，在設計的時候每項規格的製定都要考慮進去，如此才能將兩個組態的鏡組結合設計出符合系統的規格，表 2 所列為系統規格。缺乏經驗的設計者在制定規格時，並不一定能夠馬上知道規格中那些規格不能符合要求，所以設計過程中，如果發現規格有矛盾之處，應該在合理範圍內加以改正。

表 3 所列為 CCD 元件規格，依規格衡量計算出實際光學參數。尺寸大小為 1/4 寸的 CCD，水平方向的解析度要求為 2048 像素；垂直方向的解析度要求為 1536 像素，所以像素總數目為 $2048 \times 1536 = 3,145,728$ 。而成像面積的水平方向長度為 5.31 mm；垂直方向長度為 3.98 mm，所以成像面積為 $5.31 \times 3.98 = 21.13 \text{ mm}^2$ 。水平或垂直方向像素大小公式為

$$\text{(水平或垂直) 方向像素大小} = \frac{\text{(水平或垂直) 方向 CCD 之 (長或寬)}}{\text{(水平或垂直) 方向陣列 (長或寬) 之像素}} \quad (11)$$

由上式可以算出水平方向像素大小為 $5.31 \times 10^{-3} / 2048 = 2.59 \mu\text{m}$ ；垂直方向像素大小為 $3.98 \times 10^{-3} / 1536 = 2.59 \mu\text{m}$ 。本系統設計使用三百萬畫素解析度的 CCD 元件當做數位影像攝取之光電元件，鏡組焦距為 16.2 mm。由於孔徑光欄 (Aperture) 對光束的限制，從裂隙燈顯微鏡目鏡中觀察顯微鏡物面觀察範圍為 18 mm，因此數位成像光路設計的目標是將 18 mm 的物面成像在 CCD 元件有效長度範圍的 5.31 mm 內。

表 3. CCD 元件的規格。

解析度陣列像素 (長 × 寬)	2048 × 1536
成像面積 (長 × 寬)	5.31 mm × 3.98 mm
像素大小 (長 × 寬)	$2.59 \mu\text{m} \times 2.59 \mu\text{m}$
相對照度	> 50%
光學畸變	< 5%

$f_{\text{interface lens}}$ 為接口透鏡焦距、 $Y_{\text{field lens}}$ 為場鏡處的像高、 f_{CCD} 為照相物鏡焦距與 Y_{CCD} 為照相物鏡有效尺寸之間的關係⁽¹⁹⁾：

$$\frac{f_{\text{interface lens}}}{Y_{\text{field lens}}} = \frac{f_{\text{CCD}}}{Y_{\text{CCD}}} \quad (12)$$

由上可以得知接口透鏡焦距為 $(16.2/5.31) \times 18 = 55 \text{ mm}$ 。焦距 55 mm 接口透鏡於照相光路場鏡後 55 mm 處發現觀察到的視場範圍小於 18 mm，且視場的感光面沒被填滿電荷，分析原因是因為物面 18 mm 範圍發出光束經物鏡、場鏡、接口透鏡後受到數位攝影機鏡頭孔徑的限制，部份物點發出的光線沒有被接收。

依據初始設計分析後，後續進行光路調整改善。本系統設計出物鏡口徑為 18 mm，放大倍率為 10 倍的光學顯微鏡，藉由 ZEMAX 軟體模擬、分析與優化，本系統所需達到的標準為在光軸上 30 lp/mm 應大於 0.3 及最大視場處 30 lp/mm 應大於 0.3。

3. 光學系統設計流程

在制定規格之後，就要根據規格著手進行光學設計，由於幾何光學的計算繁瑣又複雜，若從零開始設計，很難在一開始就順利的建立良好基本架構，往往在設計初始階段就遇到瓶頸，所以通常設計者在制定好規格後，第一步會去尋找挑選適當相似的專利，利用專利所建構的鏡組做為初始值，這樣可以節省許多時間來建立初始的架構。

我們所需要的規格與專利的規格並不完全相同，且每個系統架構都有其限制，若無法順利將初始規格朝著想要的方向優化時，我們可以另外找尋其他合適的專利代替或是在原始架構中加入自行設

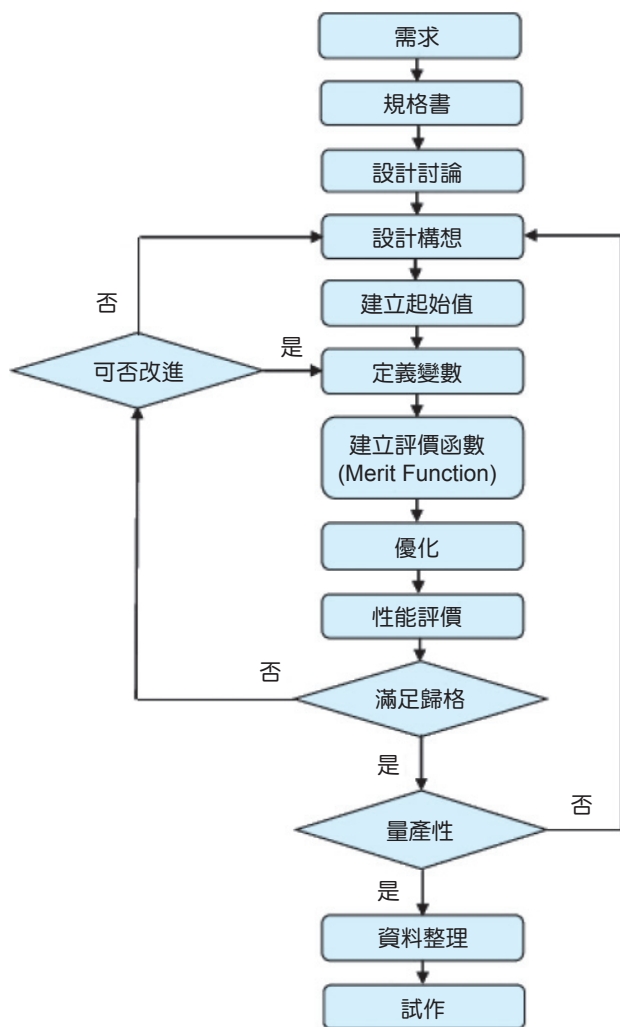


圖 16. 光學系統設計流程圖。

計參數做修改，例如：在原始系統上增加或減少鏡組、替換原始所使用的材料，使用膠合鏡片或將單一鏡片拆成許多透鏡等。藉由這些做法，讓系統整體優化方向朝著我們所要求的規格，在設計上這是不可缺的概念，所以選定一合理的初始架構是很重要的。

在優化過程中我們需要常注意系統的趨勢是否符合我們的方向，如果優化時發現系統所呈現的趨勢是不合理的，立即終止設計並重新檢討所設定的變數、優化條件是否過於寬鬆或是初始架構有問題。透過反覆檢討

與糾正優化趨勢才能完成符合規格的設計，圖 16 所示為光學系統設計的流程圖。

表 4. ZEBASE 專利鏡頭資料庫之規格。

狹縫長	18 mm
物鏡口徑	7.5 mm
有效焦距	15 mm
系統總長度	25.68 mm
波長範圍	可見光
畸變量	< 10%

五、設計方法與結果分析

1. 設計方法

使用 ZEMAX 軟體進行多重組態設計、光學計算、優化與分析。裂隙燈顯微鏡成像系統設計過程為規格訂定、定義變數與設計像值要求、成像品質分析與公差分析 (tolerance analysis)，以確保設計成像品質。裂隙燈顯微鏡鏡組的設計，不只考慮到規格的要求，還需要考慮到體積大小、成本低、重量限制及製造精度等。

表 4 所列為裂隙燈顯微物鏡專利鏡頭資料庫之規格，此系統設計是以 ZEMAX 的 ZEBASE 專利鏡頭資料庫中選一合適鏡頭當作設計的初始值；數位攝影機鏡頭以美國專利 U.S.5519538 為初始值⁽²⁵⁾。這些初始值與我們所制定的規格相近，場鏡與接口透鏡部分皆自行設計，其中專利的顯微物鏡皆使用 2 片球面透鏡 (spherical lens)；專利的 CCD 鏡頭則採用 1 片非球面透鏡 (aspheric lens) 與 9 片球面透鏡。由於專利上的物鏡有一定的穩定度及優點，所以通常都會採用專利的系統來做為參考的初始架構，然後將選定專利初始架構的數值建立至 ZEMAX 軟體中，其中包含每片鏡片的焦距、位置及厚度等，這樣才能夠對系統進行優化。

接口透鏡鏡組設計首先必須制定光學系統各項光學參數，其光學參數的設定取決於使用目的，表 5 所列為接口透鏡的初始結構參數。由於本系統設計接口透鏡的相對孔徑與照相物鏡視場角相當小，因此可以採用簡單的天塞鏡頭 (tessar lens)，其相對孔徑達 (1/3.5 – 1/2.8) 及視場角為 50° – 55°。表 6 所列為數位攝影鏡頭部分以美國專利 U.S.5519538 為初始值，其原先設計專利是用於數位攝影機鏡頭中，其設計有效焦距在 82.65 mm、

表 5. 接口透鏡結構參數。

曲率半徑 (r)	厚度 (D)	玻璃型號
25.729 mm		
-921.21 mm	6 mm	ZK11
-53.672 mm	3.91 mm	
23.503 mm	1.7 mm	F2
-506.74 mm	6.51 mm	
29.671 mm	1.6 mm	BaF2
-38.117 mm	5.8 mm	LaK2

表 6. 美國專利 U.S.5519538 之規格。

物鏡口徑	12 mm
有效焦距	82.65 mm
系統總長度	121.43 mm
波長範圍	可見光
場曲量	< 0.2 mm
畸變量	< 2%

系統總長度為 121.43 mm、場曲 (field curvature) 量小於 0.2 mm、畸變量小於 2%，與本設計規格有部份差異，所以需把此專利部分參數修改後才能符合本系統設計的規格。

優化開始之前必須謹慎的設定好初始規格，避免優化的方向往不符規格的地方走，根據不同規格，依需要定義所需的評價函數 (merit fuction)，限制系統在所需規格條件下進行優化，才能夠符合規格需求。藉由評價函數中的指令，控制系統的邊界條件，如：中心厚度最大與最小值及邊緣厚度最大與最小值等。變焦鏡頭靠著內部某群鏡組相對位置不同以改變焦距，所以必須使用多重組態 (multi-configuration) 設定鏡組間間距。每個組態將會分別定義一組透鏡鏡組之間的距離關係，將其串連能得到鏡頭的變焦移動軌跡，而每個組態需要分別定義所需的評價函數以區別每個組態之間的不同。本研究利用多重組態進行 CCD 鏡頭與顯微鏡同軸設計，以滿足系統需求。

2. 設計結果

本系統使用 ZEMAX 計設一多重組態裂隙燈數位成像鏡頭由數位攝影機及顯微鏡所組成。組

態 1 為裂隙燈顯微鏡數位成像系統的數位攝影機，內部結構可分為：顯微鏡物鏡、場鏡、接口透鏡及 CCD 鏡頭，最大場曲為 9 mm。組態 2 為顯微鏡鏡組，由物鏡及目鏡鏡組所組成，顯微鏡物鏡放大 10 倍及最大場曲為 8 mm。以上兩個組態使用設定輸入藍光波長為 486 nm、綠光波長為 587 nm、紅光波長為 656 nm。

在設計裂隙燈顯微鏡數位成像系統時，數位攝影機及顯微鏡鏡組先分開設計，設計好之後利用多重組態方法將其整合為一光學系統。為了得到理想成像品質，必須將兩個光學系統互相匹配，即數位攝影機物鏡鏡組與顯微鏡鏡組透過分光鏡組成同一光軸，整合後的系統再進行優化。表 7 所列为整合後多重組態裂隙燈數位成像系統透鏡資料表，其中 (a) 為顯微鏡物鏡鏡組的參數；(b) 為分光鏡的參數；(c) 為場鏡鏡組的參數；(d) 為接口透鏡鏡組的參數及 (e) 為數位攝影鏡組的參數。表 8 所列为多重組態裂隙燈顯微鏡透鏡資料表，其中 (a) 為物鏡鏡組的參數；(b) 為分光鏡的參數及 (c) 為目鏡鏡組的參數。表 9 所列为多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統設定資料表，其中 CRVT 代表曲率、THIC 代表厚度、GLSS 代表玻璃材料，SEIA 代表半徑及 PARM 代表參數。圖 17 圖 18 別所示為多重組態鏡組 2D 圖與 3D 圖、圖 19 示為多重組態

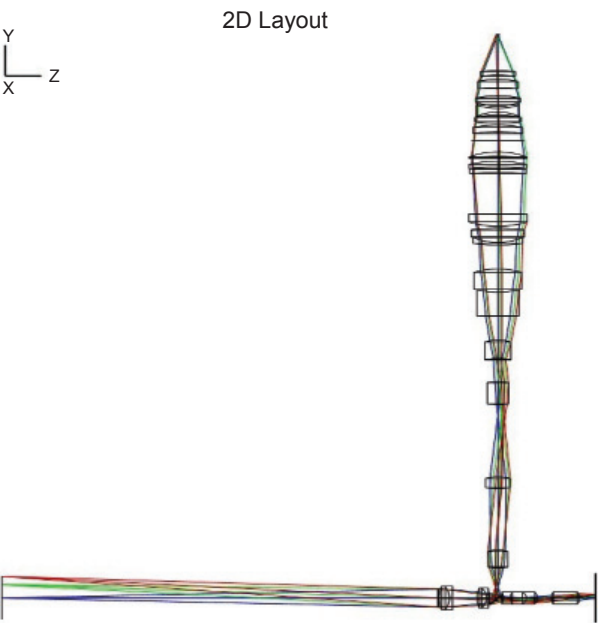


圖 17. 多重組態鏡組 2D 圖。

表 7. 多重組態裂隙燈數位成像系統透鏡資料表。

	表面類型		曲率	厚度	材料	半徑	
0	發光物	標準球面	0.000000	154.320600		9.000000	(a)
1	光圈	標準球面	0.000000	0.304800		3.750000	
2	光圈	標準球面	0.076417	3.530600	K5	4.953000	
3	光圈	標準球面	-0.106636	1.168400	F2	4.953000	
4	光圈	標準球面	-0.008909	8.636000		4.953000	
5	光圈	標準球面	0.087083	3.352800	K5	4.191000	
6	光圈	標準球面	-0.166470	0.965200	F2	4.191000	
7	光圈	標準球面	-0.047054	3.045000		4.191000	(b)
8		坐標斷點	0.000000	0.000000		0.000000	
9	光圈與傾斜	標準球面	0.000000	0.000000	MIRROR	3.000000	
10		坐標斷點	0.000000	0.000000		0.000000	(c)
11	光圈	標準球面	0.000000	-12.398200		0.000000	
12	光圈	標準球面	-0.105309	-7.679897	SILICA	3.118659	
13	光圈	標準球面	0.105548	-25.754594		3.511335	
14	光圈	標準球面	-0.025146	-4.690276	SILICA	4.264591	
15	光圈	標準球面	0.061093	-30.440393		4.375448	
16	光圈	標準球面	-0.014520	-9.521710	SK2	3.284360	(d)
17	光圈	標準球面	0.082425	-10.000000		3.802023	
18	光圈	標準球面	0.232659	-7.234971	LAK23	2.763515	
19	光圈	標準球面	0.082133	-10.000000		4.667970	
20	光圈	標準球面	-0.000213	-9.954502	N-SF64	6.446809	
21	光圈	標準球面	-0.039750	-9.720739	E-FEL1	7.493272	
22	光圈	標準球面	0.038913	-10.000000		8.473161	(e)
23	光圈	標準球面	-0.017975	-1.000000	NBFD8	8.772495	
24	光圈	標準球面	-0.054223	-2.300000		8.632477	
25	光圈	標準球面	0.000058	-3.755000	NSL7	8.690314	
26	光圈	標準球面	0.016924	-0.815200		9.415956	
27	光圈	偶次非球面	-0.030144	-5.022100	S-BAL41	10.372732	
28	光圈	偶次非球面	0.000007	-17.295000		9.244055	
29	光圈	標準球面	0.007723	-1.410800	LAKN13	9.878999	
30	光圈	標準球面	-0.004250	-0.950000		9.989443	
31	光圈	標準球面	0.011697	-2.427700	PBH13W	10.007985	
32	光圈	標準球面	0.025524	-2.000100		10.209368	
33	光圈	標準球面	0.013497	-1.935700	BSC3	10.246303	
34	光圈	標準球面	0.040419	-4.709500		10.269379	
35		標準球面	0.000000	-3.612700		9.235822	
36	光圈	標準球面	0.017751	-2.870800	FD12	8.800901	
37	光圈	標準球面	0.027521	-0.588400		8.734018	
38	光圈	標準球面	-0.021910	-3.633600	N-PSK53	8.222456	
39	光圈	標準球面	0.033551	-1.167300		7.852705	
40	光圈	標準球面	0.061088	-1.557800	PBH4	7.659673	
41	光圈	標準球面	-0.046550	-0.867800		7.530139	
42	光圈	標準球面	-0.053300	-4.413700	ATC1	7.884922	
43	光圈	標準球面	0.033291	-3.274000		7.879058	
44	光圈	標準球面	0.014206	-3.614100	S-TIH14	7.150935	
45	光圈	標準球面	0.039669	-1.711000		6.983701	
46	光圈	標準球面	0.021166	-1.800000	PBM2Y	6.149301	
47	光圈	標準球面	0.017786	-15.000000		5.809026	
48	成像	標準球面	0.000000	0.000000		0.661961	

裂隙燈顯微鏡數位成像系統場曲與畸變圖，其中 (a) 為場曲圖；(b) 為畸變圖、圖 20 圖 21 別所示為多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統光斑圖 (spot diagram) 與多色光繞射 (polychromatic diffraction) MTF 圖、圖 22 圖 23 別所示為多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統相對照度圖與橫向色差 (lateral color) 圖、圖 24 示為多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統橫向光扇 (transverse ray fan) 圖及圖 25 示為多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統縱向像差 (longitudinal aberration) 圖。

六、結論

本裂隙燈顯微鏡數位成像系統設計為配合數位化需求，整合傳統裂隙燈顯微鏡與眼底照相機構想於裂隙燈顯微鏡加入數位攝影機。在數位成像系統設計上運用 ZEMAX 軟體進行優化，成像物鏡全部使用球面鏡可以降低系統的成本。不同屈光能力的眼睛透過補償鏡設計，呈現在眼底的影像能夠通過 CCD 數位攝影機輸出到液晶顯示模組，進行相應的顯示與存儲，同時可以上傳至電腦，進行後續影像資料處理。

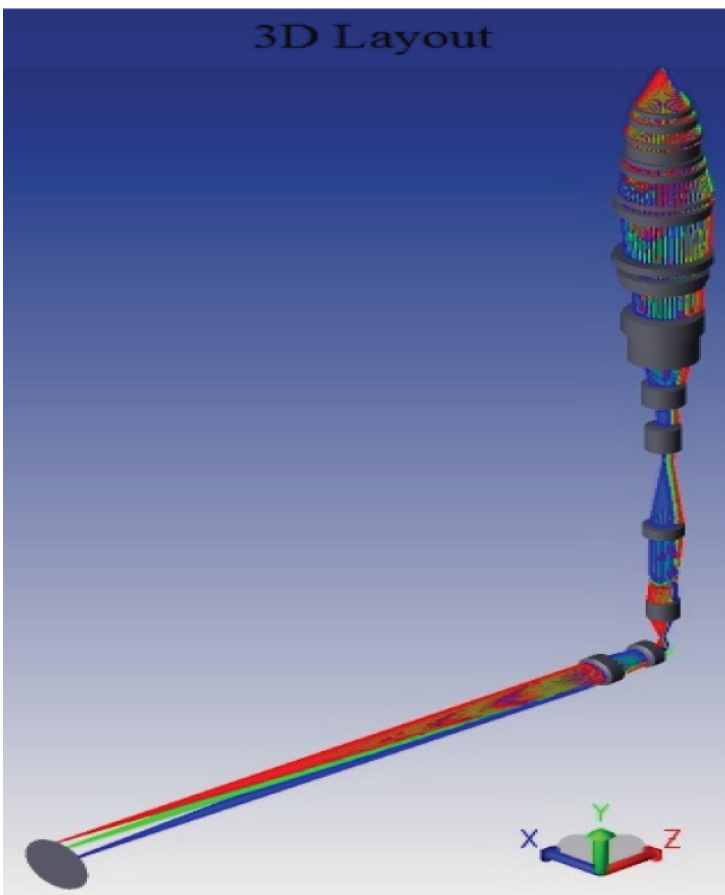


圖 18. 多重組態鏡組 3D 圖。

表 8. 多重組態裂隙燈顯微鏡透鏡資料表。

	表面類型		曲率	厚度	材料	半徑	
0	發光物	標準球面	0.000000	154.320600		9.000000	(a)
1	光圈	標準球面	0.000000	0.304800		3.750000	
2	光圈	標準球面	0.076417	3.530600	K5	4.953000	
3	光圈	標準球面	-0.106636	1.168400	F2	4.953000	
4	光圈	標準球面	-0.008909	8.636000		4.953000	
5	光圈	標準球面	0.087083	3.352800	K5	4.191000	
6	光圈	標準球面	-0.166470	0.965200	F2	4.191000	
7	光圈	標準球面	-0.047054	5.045000		4.191000	(b)
8		坐標斷點	0.000000	0.000000		0.000000	
9	光圈與傾斜	標準球面	0.000000	0.000000		0.000000	
10		坐標斷點	0.000000	0.000000		0.000000	(c)
11	光圈	標準球面	-0.193125	2.487000	PSK2	2.500000	
12	光圈	標準球面	0.166778	5.555000	BASF1	2.500000	
13	光圈	標準球面	-0.331895	3.920000	K11	2.500000	
14	光圈	標準球面	-0.265887	5.020000		2.500000	
15	光圈	標準球面	0.178031	10.000000	BAL15Y	2.500000	
16	光圈	標準球面	-0.250125	5.646000		2.500000	

表 9. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統設定資料表。

	優化項目		組態 1			優化項目		組態 1		組態 2	
1	CRVT	11	0.000000	-0.193125	50	THIC	22	-10.000000	0.000000		
2	CRVT	12	-0.105309	0.166778	51	THIC	23	-1.000000	0.000000		
3	CRVT	13	0.105548	-0.331895	52	THIC	24	-2.300000	0.000000		
4	CRVT	14	-0.025146	-0.265887	53	THIC	25	-3.755000	0.000000		
5	CRVT	15	0.061093	0.178031	54	THIC	26	-0.815200	0.000000		
6	CRVT	16	-0.014520	-0.250125	55	THIC	27	-5.022100	0.000000		
7	CRVT	17	0.082425	0.000000	56	THIC	28	-17.295000	0.000000		
8	CRVT	18	0.232659	0.000000	57	THIC	29	-1.410800	0.000000		
9	CRVT	19	0.082133	0.000000	58	THIC	30	-0.950000	0.000000		
10	CRVT	20	-0.000213	0.000000	59	THIC	31	-2.427700	0.000000		
11	CRVT	21	-0.039750	0.000000	60	THIC	32	-2.000100	0.000000		
12	CRVT	22	0.038913	0.000000	61	THIC	33	-1.935700	0.000000		
13	CRVT	23	-0.017975	0.000000	62	THIC	34	-4.709500	0.000000		
14	CRVT	24	-0.054223	0.000000	63	THIC	35	-3.612700	0.000000		
15	CRVT	25	0.000058	0.000000	64	THIC	36	-2.870800	0.000000		
16	CRVT	26	0.016924	0.000000	65	THIC	37	-0.588400	0.000000		
17	CRVT	27	-0.030144	0.000000	66	THIC	38	-3.633600	0.000000		
18	CRVT	28	0.000007	0.000000	67	THIC	39	-1.167300	0.000000		
19	CRVT	29	0.007723	0.000000	68	THIC	40	-1.557800	0.000000		
20	CRVT	30	-0.004250	0.000000	69	THIC	41	-0.867800	0.000000		
21	CRVT	31	0.011697	0.000000	70	THIC	42	-4.413700	0.000000		
22	CRVT	32	0.025524	0.000000	71	THIC	43	-3.274000	0.000000		
23	CRVT	33	0.013497	0.000000	72	THIC	44	-3.614100	0.000000		
24	CRVT	34	0.040419	0.000000	73	THIC	45	-1.711000	0.000000		
25	CRVT	35	0.000000	0.000000	74	THIC	46	-1.800000	0.000000		
26	CRVT	36	0.017751	0.000000	75	THIC	47	-15.000000	0.000000		
27	CRVT	37	0.027521	0.000000	76	GLSS	9	MIRROR			
28	CRVT	38	-0.021910	0.000000	77	GLSS	11			PSK2	
29	CRVT	39	0.033551	0.000000	78	GLSS	12	SILICA		BASF1	
30	CRVT	40	0.061088	0.000000	79	GLSS	13			K11	
31	CRVT	41	-0.046550	0.000000	80	GLSS	14	SILICA			
32	CRVT	42	-0.053300	0.000000	81	GLSS	15			BAL15Y	
33	CRVT	43	0.033291	0.000000	82	GLSS	16	SK2			
34	CRVT	44	0.014206	0.000000	83	GLSS	18	LAK23			
35	CRVT	45	0.039669	0.000000	84	GLSS	20	N-SF64			
36	CRVT	46	0.021166	0.000000	85	GLSS	21	E-FEL1			
37	CRVT	47	0.017786	0.000000	86	GLSS	23	NBFD8			
38	THIC	7	3.045000	5.045000	87	GLSS	25	NSL7			
39	THIC	11	-12.398200	2.487000	88	GLSS	27	S-BAL41			
40	THIC	12	-7.679897	5.555000	89	GLSS	29	LAKN13			
41	THIC	13	-25.754594	3.920000	90	GLSS	31	PBH13W			
42	THIC	14	-4.690276	5.020000	91	GLSS	33	BSC3			
43	THIC	15	-30.440393	10.000000	92	GLSS	36	FD12			
44	THIC	16	-9.521710	5.646000	93	GLSS	38	N-PSK53			
45	THIC	17	-10.000000	0.000000	94	GLSS	40	PBH4			
46	THIC	18	-7.234971	0.000000	95	GLSS	42	ATC1			
47	THIC	19	-10.000000	0.000000	96	GLSS	44	S-TIH14			
48	THIC	20	-9.954502	0.000000	97	GLSS	46	PBM2Y			
49	THIC	21	-9.720739	0.000000							

表 9. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統設定資料表。(續)

	優化項目		組態 1		組態 2			優化項目		組態 1		組態 2	
98	SDIA	9	3.000000		0.000000		107	PARM	27	0.000000		0.000000	
99	SDIA	11	0.000000		2.500000		108	PARM	28	-0.000002		0.000000	
100	SDIA	12	3.118659		2.500000		109	PARM	27	0.000000		0.000000	
101	SDIA	13	3.511335		2.500000		110	PARM	28	0.000000		0.000000	
102	SDIA	14	4.264591		2.500000		111	PARM	27	0.000000		0.000000	
103	SDIA	15	4.375448		2.500000		112	PARM	28	0.000000		0.000000	
104	SDIA	16	3.284360		2.500000		113	PARM	27	0.000000		0.000000	
105	PARM	27	0.000078		0.000000		114	PARM	28	0.000000		0.000000	
106	PARM	28	-0.000175		0.000000		115	PARM	8	45.000000		0.000000	

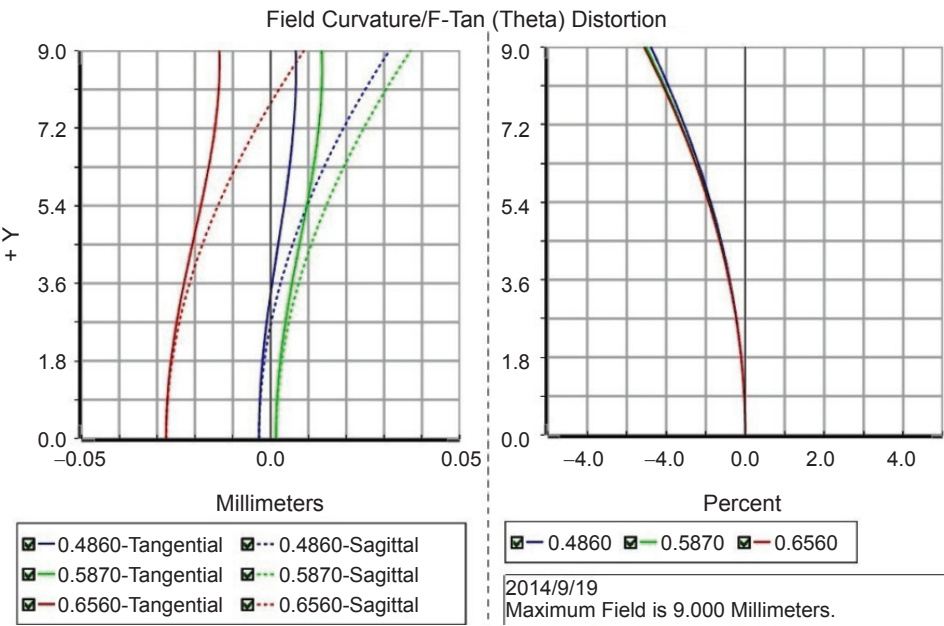


圖 19.
多重組態裂隙燈顯微鏡數位
成像系統場曲與畸變圖。

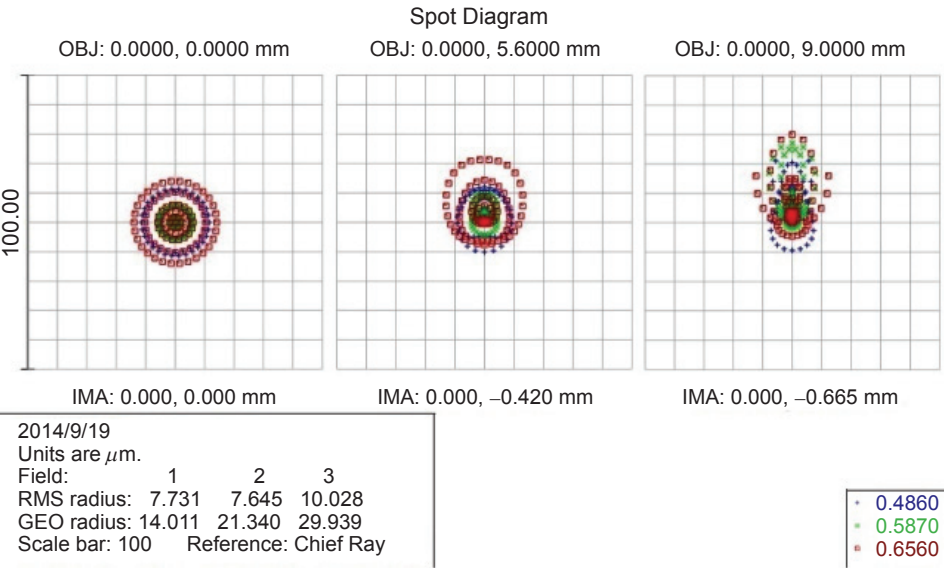
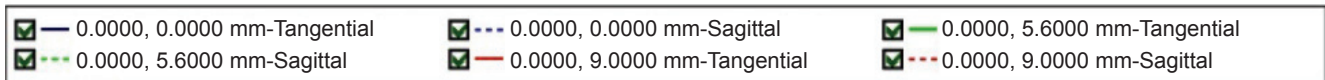
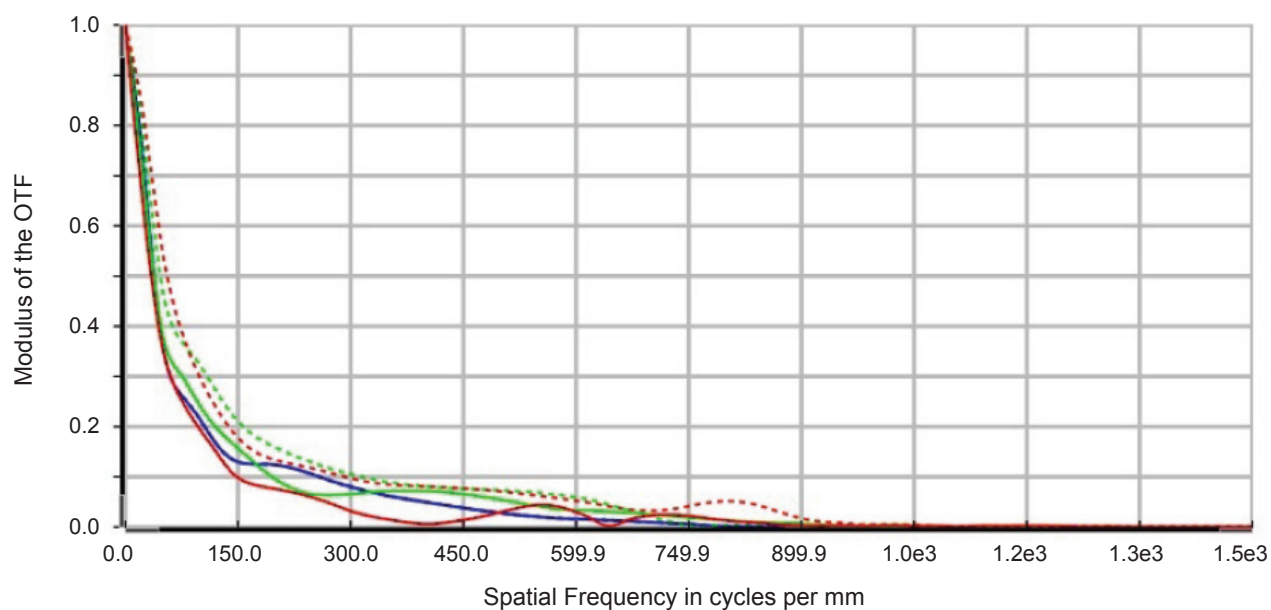


圖 20.
多重組態裂隙燈顯微鏡數位
成像系統光斑圖。

Polychromatic Diffraction MTF

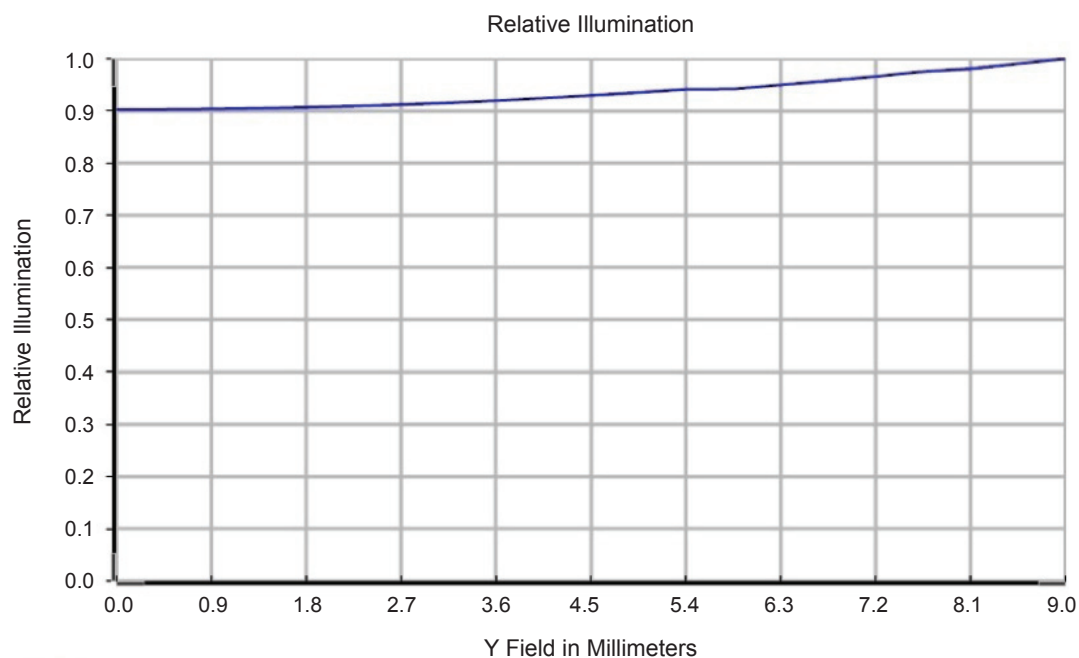


2014/9/20

Data for 0.4860 to 0.6560 μm .

Surface: Image

圖 21. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統多色光繞射 MTF 圖。



2014/9/20

Wavelength: 0.587000 μm .

圖 22. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統相對照度圖。

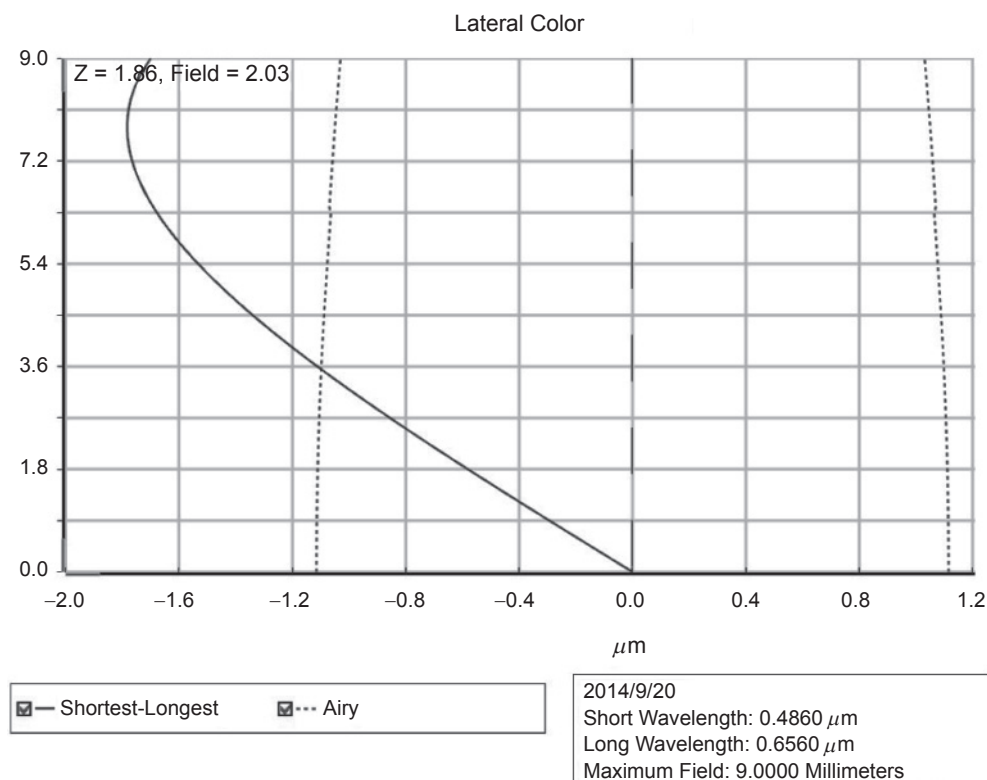


圖 23. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統橫向色差圖。

本裂隙燈數位成像系統 CCD 鏡頭設計是以美國專利鏡組 U.S.5519538 為出發點，進行修正設計。因為選擇的鏡組本身成像品質有一定規格需求，所以在調整系統參數之下，鏡組的設計必須有所取捨。當改變系統參數時，需考慮成像品質與像差，有時無法同時獲得改善，要透過不斷的檢討與修正，才能

達到規格所需。在應用 ZEMAX 這套軟體中進行裂隙燈數位成像系統設計時，需在容許範圍內找尋各種像差及色差之間的平衡點，進而設計出一符合規格且成像品質良好的光學鏡組。

表 10 所列為裂隙燈數位成像系統設計規格比較。本研究設計出的裂隙燈數位成像系統狹縫長為 18 mm、有效焦距原本在 12 mm 縮短在 11.23 mm、MTF 大於 0.6 在軸上 80 lp/mm，在最大視場處 MTF 大於 0.3、系統光學畸變小於 5%。系統設計規格皆滿足所有預期的初始規格，使此裂隙燈數位成像鏡頭達到良好的光學品質。

裂隙燈數位成像系統設計對於現今運用，可說是非常重要的，藉由高解析 CCD 元件與裂隙燈顯

微鏡的結合，使原本僅能用文字描述或用簡圖表示的病徵能夠進行影像拍攝、儲存及傳輸等，(部分具有、全色域顯示、具有大尺寸投影能力等)。依據科技持續不斷進步，未來這項應用方式應當隨著使用方式以及需求持續的發展下去。

表 10. 裂隙燈數位成像系統設計規格比較表。

	初始規格	最終規格
狹縫長 (mm)	18	
有效焦距 (mm)	12	11.23
入瞳大小 (mm)	7.5	
系統總長 (mm)	260	256.13
波長 (nm)	490/590/640	
波長權重	0.7/1/0.7	
MTF	在軸上 80lp/mm 大於 0.45，在最大視場處大於 0.3	在軸上 80 lp/mm 大於 0.6，在最大視場處大於 0.3
畸變量 (%)	小於 5%	
相對照度 (%)	大於 65%	大於 90%

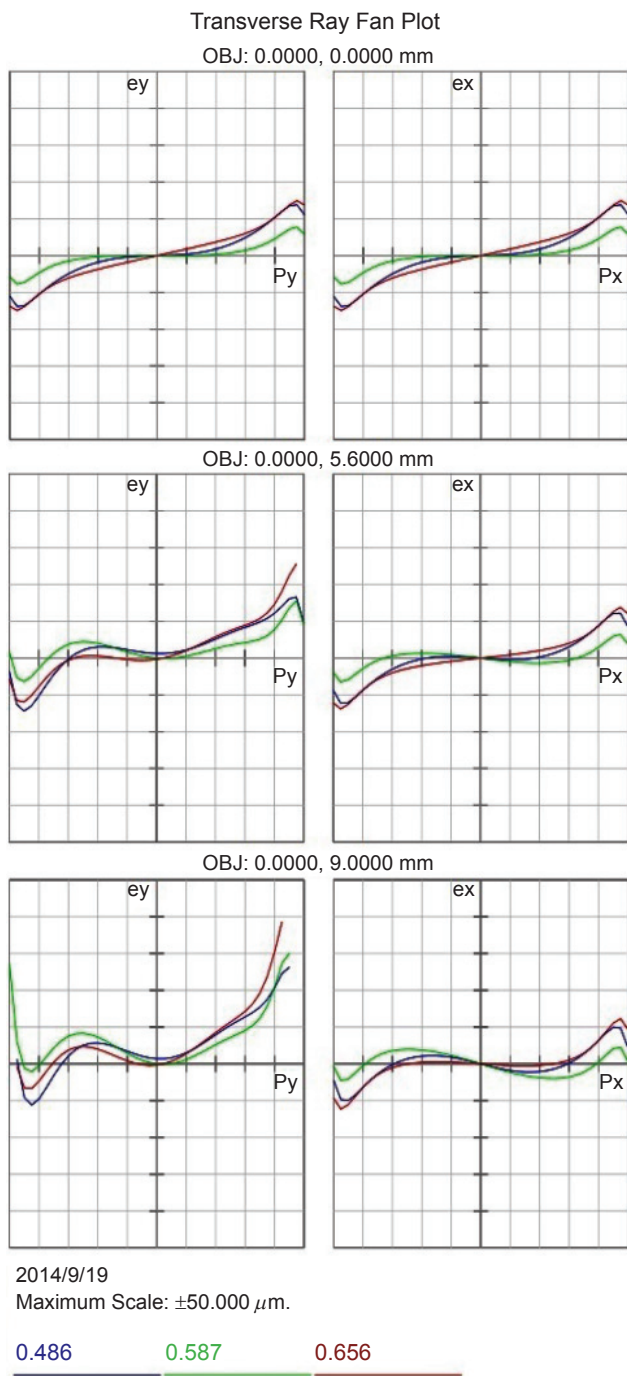


圖 24. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統橫向光扇圖。

參考文獻

1. O. A. Vinogradova, V. A. Zverev, T. V. Tochilina and K. Ramin, Variable magnification system in a microscope illuminator, *Journal of Optical Technology*, **73** (10), 678 (2006).
2. Ning Qian, Binocular Disparity and the Perception of Depth,

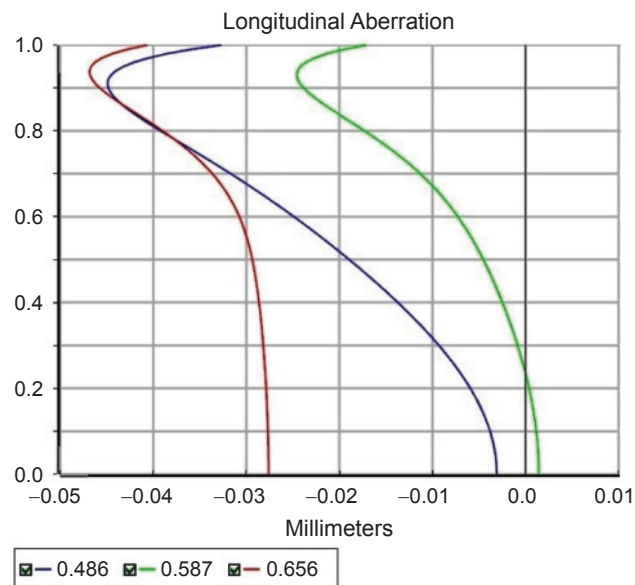


圖 25. 多重組態裂隙燈顯微鏡數位成像系統縱向像差圖。

Neuron, **18**, 359 (1997).

3. M. Abramowitz, K. R. Spring, H. E. Keller and M. W. Davidson, Basic Principles of Microscope Objective, *BioTechniques*, **33** (4), 772 (2002).
4. 衛保國、王興偉、劉黨輝及沈蘭蓀, 數位化裂隙燈生物顯微鏡外眼影像分析系統, *現代科學儀器*, **4**, 43 (2001).
5. 衛保國、沈波及王興偉, 基於裂隙燈的外眼影像採集與處理系統, *測控技術*, **20** (5), 9 (2001).
6. 張新明、沈蘭蓀及沈波等, 裂隙燈生物顯微鏡影像分析系統的研制 [J], *中國醫療器械雜誌*, **26** (1), 10 (2002).
7. The Magazine from Carl Zeiss-Innovation 17, Carl Zeiss AG (2006).
8. 汪超, 手持裂隙燈顯微鏡, 中華人民共和國國家知識產權局, CN 203493618U (2014).
9. 胡冰, 一種裂隙燈顯微鏡, 中華人民共和國國家知識產權局, CN 203414668U (2014).
10. 蘇哲俊, 雙稜鏡式單通道立體顯微鏡, 雲林科技大學電子與光電工程研究所碩士班 (2013).
11. 林宸生及陳德請, 近代光電工程導論, 第五版, 全華圖書, (2011).
12. Takanori Takeda, Slit Lamp Microscope, United States Patent, US 7410257B2, 12 Aug 2008.
13. 呂帆, 眼視光器械學, 人民衛生出版社 (2011).
14. Prof. A. Gullstrand, Eye Examination with the Slit Lamp, Ophthalmic Instruments from Carl Zeiss.
15. Tomohiro Uchida, Microscope-use Digital Camera, United States Patent, US 7969464B2, 28 Jun 2011.

16. W. J. Smith, Modern Lens Design, 2nd Edition, McGraw-Hill (1992).
17. R. G. Kuehni, Color Space and Its Divisions: Color Order from Antiquity to the Present, A John Wiley & Sons Publication (2003).
18. Mark Q. Shaw, Mark Fairchild, Evaluating the 1931 CIE Color Matching Functions, Color Research and Application, **27** (5), 316 (2002).
19. 杭州科丁光學科技有限公司, 紅外截止濾光片-IR-Cut 光譜曲線和電荷耦合影像感測元件光譜回應對比。
20. WP's SloMo CCD and CMOS Sensor Info, <http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/slomoinf.html>
21. R. E. Fisher, B. Tadic-Galed, P. R. Yoder, Optical System Design, Second Edition, McGraw-Hill (2008).
22. J. Mendez Tessera, 影像感測模組之常見測試問題, 半導體科技 (2009).
23. Myutron Inc. 用語說明, http://www.myutron.com/normal/glossary/glossary_ch.html
24. 蔡軼珩、沈蘭蓀, 裂隙燈生物顯微鏡數位化成像系統設計, 測控技術, **23** (5), 48 (2004)。
25. Koichi Maruyama, Zoom lens for preventing image from being blurred, United States Patent, US 5519538A, 21 May 1996.



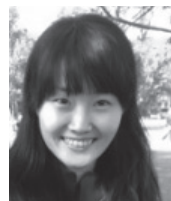
陳德請先生為國立中央大學光電研究所博士，現任逢甲大學電機系專任教授。

Der-Chin Chen received his Ph.D. in optoelectronics research from the National Central University. He currently is a full-time professor in the Department of Electrical Engineering Optoelectronic group at Feng Chia University.



葉豐銘先生為大葉大學生物產業科技研究所博士候選人，現任元培醫事科技大學視光系專任講師。

Feng-Ming Yeh is a ph.D. candidate in the Institute of Biological Industry Technology at Da Yeh University. He currently is a full-time lecturer in the Department of Optometry at Yuanpei University.



林子文小姐為逢甲大學資訊電機工程研究所碩士在職專班學生。

Zi-Wen Lin received her Master's degree in the Institute of Information Electrical Engineering from the Feng Chia University.



李錫霖先生來自馬來西亞現為逢甲大學電機工程光電組研究所碩士班學生。

Lee Siak Lim come from Malaysia currently is a Master student in the Institute of Electrical Engineering Optoelectronic group at Feng Chia University.