國立臺灣師範大學機電科技學系

碩士論文

指導教授：張國維博士

取像透鏡裝置之調變轉移函數量測系統的研討：以使用不同擴散函數量測方法為例

A Study on the MTF Measurement Systems for Imaging Lens Modules: Taking the Measurement Methods Using Various Spread Functions as an Example

研究生：潘世耀　撰

中華民國九十五年七月

致謝

在此很感謝我的指導老師、葉榮木老師和實驗室的所有同仁們，對我的幫忙與包容，也很感謝他們給我的鼓勵、不放棄，以及適時的幫助，從他們身上學習到了對學術的嚴謹、理論的重要以及掌握時間的重要性，無疑的使我受益匪淺，感謝口試委員 林巍聳老師以及 鄭超仁老師給我的指教與建議，讓我受益匪淺。也很感謝家人對我的支持，沒有他們我無法支持到現在，也很感謝曾經幫助過我的許多人。

最後祝福這些師長、實驗室同仁、我的家人和幫助過我的人能平安喜樂，健康萬福。

中文摘要

近年來廣泛使用的數位相機等取像裝置，在消費性電子產品市場中已經引起許多的重視。然而，與傳統的照相機相比，量測和提升數位相機的影像品質是很重要的；例如，數位取像光學模組的微小化所造成的繞射效應很容易地降低影像的解析度。調變轉移函數(modulation transfer function, MTF)已廣泛被使用來評估透鏡成像品質優劣的重要指標。因此，這篇論文的主要目的是以不同的擴散函數方法，進行 MTF 量測系統發展之優缺點分析。

在本論文中首先探討點、線、與邊緣擴散函數方法的學理以及其對應量測組態。這些組態所使用的準直光源，是利用準直透鏡與各別的圖樣（針孔、狹縫與刀邊）來產生。再分別利用這些準直光源來測試待測模組的成像品質，並使用影像感測器擷取相關資訊，根據個別的演算法，在電腦計算出待測成像模組的 MTF 值。針對這些組態的量測方法，我們經由學理分析與實驗來分別比較這些量測組的優劣點。

關鍵字：調變轉移函數、點擴散函數、線擴散函數、邊緣擴散函數

ABSTRACT

For many years, the widening use of digital imaging products, e.g., digital cameras, has given rise to much attention in the market of consumer electronics. However, it is important to measure and enhance the imaging performance of the digital ones, compared to that of conventional cameras. For example, the effect of diffraction arising from the miniaturization of the optical modules tends to decrease the resolution of the image. As a figure of merit, modulation transfer function (MTF) has been broadly employed to estimate the image quality. Therefore, the objective of this paper is to compare the advantage and disadvantages of the MTF measurement systems using different spread function methods.

In this paper, a theoretical framework is first briefly presented and then, a cost-effective approach is proposed. In this approach, we use pinhole, slit, knife-edge and collimating lens to produce the point, line and edge collimation light sources. Collimated light going through the lens module under test is consecutively detected by the imaging sensor of the proposed system. The images formed by the optical modules are acquired by a computer and then, they are processed by algorithms for computing the MTF. Finally, the advantages and disadvantages of the MTF measurement systems using different spread function methods are presented in this thesis.

Key words: modulation transfer function, point-spread function, line-spread function, edge-spread function

目錄

圖目錄

表目錄

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

近幾年來由於照相手機、數位相機的技術日益發達朝著輕薄短小的技術不斷的邁進，因此，不論是照相手機及數位相機內的鏡頭都趨向於微小化，因尺寸微小化的透鏡所造成的繞射現象，對成像的品質有很大的影響，因此量測透鏡的成像品質是必須的，而調制轉移函數(Modulation transfer function (MTF))一直以來是工業界判定透鏡成像品質優劣的重要指標[1]-[4]。

目前國內大多，對於取像透鏡裝置之MTF檢測儀器方面，大多依賴國外廠家，例如德國Trioptics以及OEG GmbH公司、以及美國Optikos等公司[5]- [7]，為提升國內鏡頭產量技術與品質管制之需求，自動化光學量測系統技術之研究與發展是刻不容緩的。多年來，許多學者針對鏡頭或數位影像之MTF量測技術，做了相當多的努力且持續不斷地進行技術改良。而量測MTF的方法有很多種，例如，Fujita[8]在1997年時，利用線擴散函數量測數位影像的MTF值，但是使用線擴散函數來量測MTF卻有著訊雜比不高的問題存在[1][3]，而在1991時，Hon-Sum[10]則利用邊緣擴散函數(edge spread function)方法來量測MTF，以此方法大大的提高了在量測時的訊號雜訊比[1]，而Pahk [11]在2001時，則利用了bar target方法來量測MTF，但此方法還需要將除了本身基頻之外的高頻與低頻訊號給率除掉；此外，Daniels [12]以及Backman[13]分別在1995年以及2004年時，提出了使用random target的方法來量測成像系統的MTF，此方法的優點在於一次能夠量測多個視場點。

由上述可以得知 MTF 量測的量測方法大致可以分為點擴散函數量測方法、線擴散函數量測方法、邊緣擴散函數量測方法、bar target 方法、還有random target 方法。而現今許多廠家儀器較多使用擴散函數的方法量測，因此本論文的重點主要著重於各種擴散函數方法的學理及實驗的研究與探

討，並且做分析與比較。

1.2 論文架構

本論文主要在針對現有 MTF 的量測方法做研究與探討，並針對現今常使用的擴散函數量測方法做實際的系統架設以及分析比較。第二章主要是在描述理論基礎，物、像以及透鏡的調製轉移函數，這三者之間的關係。第三章在說明整個系統的實驗設計與模擬，實驗設計。第四章則是在說明使用各個擴散函數方法以求得待測透鏡 MTF 所設計的實驗目標，系統電路方塊圖和工作流程，最後則是系統電路實作設計與實現。第四章在說明光學組態設計與分析，光機架構設計分析與信號處理，最後則是整個光機電系統的整合與量測。第五章為結論與未來工作規劃。

第二章 理論基礎

2.1 何謂 MTF？

光學成像系統或透鏡可概略分為以下三種類型[4]：

1. 理想(ideal imaging system)成像系統 (無繞射效應、像差)，
2. 無像差(Aberration-free or diffraction-limited imaging system)成像系統 (只存有繞射效應)，
3. 一般(Practical imaging system)成像系統。(有繞射效應與像差)。

針對理想的成像系統而言，由於此系統本身無像差且不受繞射效應之影響，故可將物平面上一個無限小的物點，完美的收斂且成像到另一個點，若以信號與信統的觀點來看，一個理想透鏡就像是頻寬無限大的系統，其可解析不同空間頻率的訊號，如圖 2.1(a)所示，一個無限小的物點就如同輸入信號為一脈衝函數$\delta(x)$，其輸入（物點$O(x)$）與輸出（像點$I(x)$）的關係表示如下：

$$\begin{aligned} &O(x)*h(x)=I(x) \\ &\rightarrow \delta(x)*h(x)=h(x)=\delta(x) \end{aligned} \tag{2-1}$$

式(2-1)中，$h(x)$為該系統的脈衝響應函數(impulse response)，經由物像關係式可知其值亦為$\delta(x)$，欲得知此系統的頻率響應，可經由傅氏轉換(Fourier transform)求得$F\{h(x)\}=H(f_x)=1,\ -\infty<f_x<\infty$，可發現此成像系統對於不同空間頻率的訊號均可解析，即頻寬無限大。但真實面上，光學系統的成像品質會受限於繞射效應與透鏡像差的影響，以一個修正像差後的透鏡組而言，如圖 2.1（b）所示，此成像系統雖不受像差的影響，但其因透鏡孔徑有限，因此會造成繞射效應讓輸出的像點有些許的擴散，而影響此成像系統的解析能力、限制了系統的頻寬。普遍而言，一般成像系統的成像品質除了受繞射效應外，還會受限於系統的像差，所以當輸入極小的物點到一般的成像系統時，其輸出擴散的現象將會比前述兩種系統更加的嚴重，如圖 2.1(c)所示。

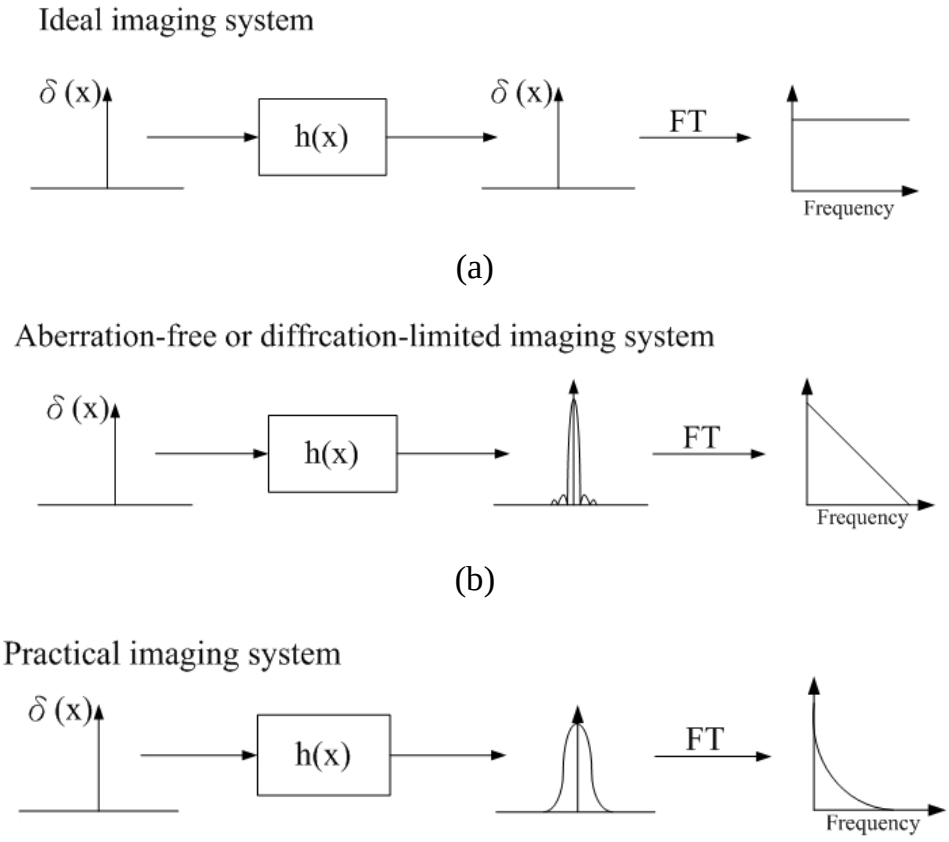
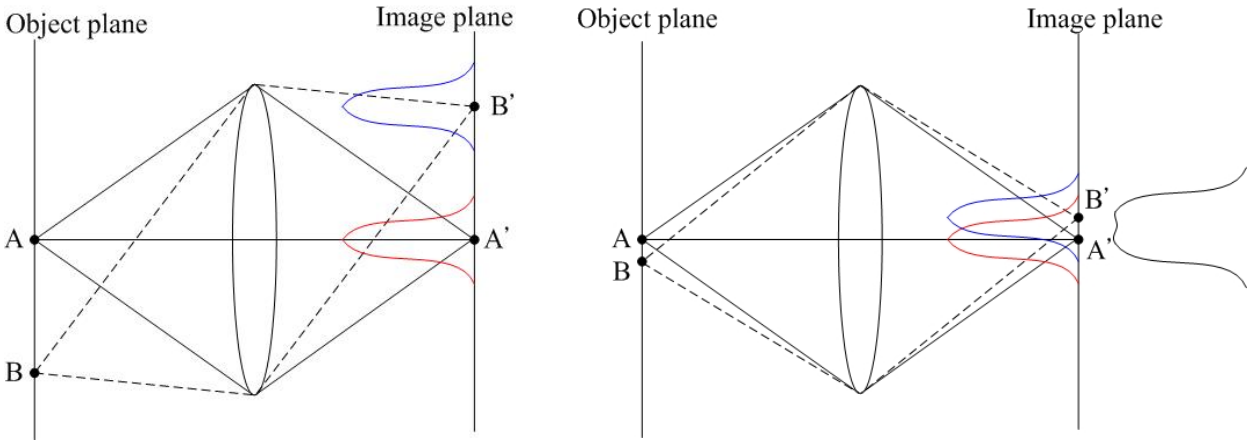


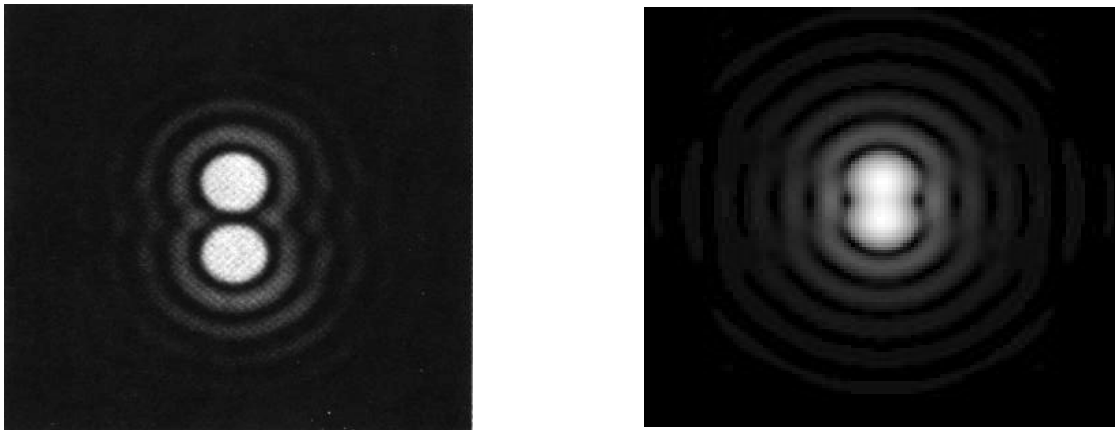
圖 2.1 三種類型的成像系統，分別為(a) 無繞射、像差(b) 有繞射、無像差(c) 有繞射、像差等三種成像系統

如上所述，在輸入為一極小物點（點光源）時，三種系統中的無像差成像系統與一般的成像系統在像平面上均會有擴散現象。正因如此，實際上成像系統的解析能力均有所限制，在空間頻率高到某個頻率時系統就無法解析。如圖 2(a)所示，在物平面輸入兩個極小點光源 A 與 B 點時，且 A、B 兩點相隔一段距離，在像平面各自所成的像點 A’點與 B’點，雖然都有擴散的現象，但因兩點隔一段距離（低空間頻率），所以在像平面上，依舊能清楚的辨認出對應的兩個成像點，如圖 2.2(c)所示。但是，當物平面上的點光源 B 向 A 靠近至很短距離時（高空間頻率），如圖 2.2(b)所示，在像平面上的像點 A’與 B’，兩者因擴散且彼此間的距離靠的很近，而重疊成為一個大的像點，如圖 2.12(d)所示。由上述可以得知，一般的光學成像系統，在低空間頻率時

皆有較高的清晰度，而在高空間頻率時清晰度較不理想。



(a) (b)



(c) (d)

圖 2.2 物平面與像平面之間的關係(a) A 點與 B 點距離很大(b) A 點與 B 點距離很小(c) 低空間頻率有較高的清晰度(d) 高空間頻率有較低的清晰度

根據上述，針對一個光學系統成像品質的好壞，制定一套衡量的準則，即為 MTF。其定義如下所述，主要是利用不同空間頻率的弦波圖樣做測試，將經透鏡成像後影像的調制度(modulation)，除以弦波圖樣本身的調制度，如數學式(2-2)所示[1][3][4]：

$$MTF(f_X) = \frac{M_I}{M_O} \tag{2-2}$$

其中 f_X，為弦波圖樣的空間頻率， M_O、M_I 分別為物與像的調制度，如數學式(2-3)所示：

$$M_O = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{O_{\max} + O_{\min}} \quad ， M_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \tag{2-3}$$

其中 $O_{\max}$、$O_{\min}$ 分別為弦波圖樣的波峰及波谷的強度值，而 $I_{\max}$、$I_{\min}$ 則分別代表經透鏡成像後影像的波峰及波谷強度值，如圖 2.3 所示。

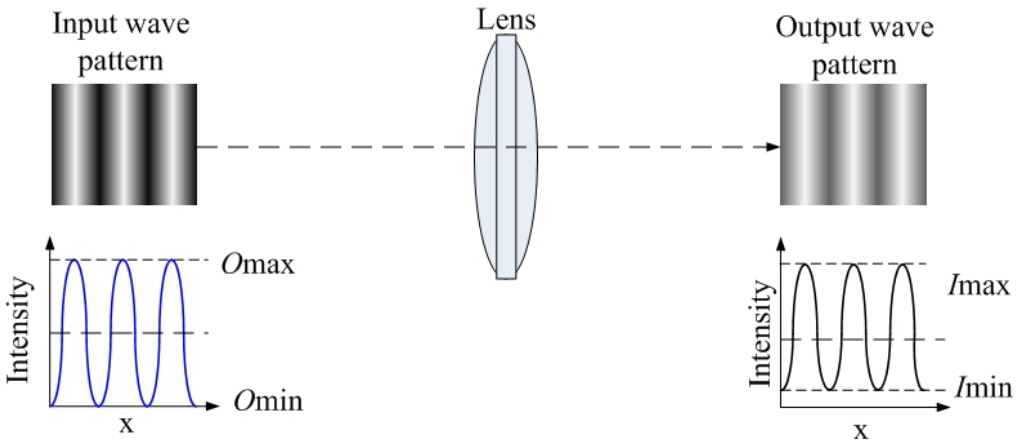


圖 2.3 MTF 的定義

隨著弦波圖樣空間頻率的增加，就會有不同的調制度。相較下，在高空間頻率時，影像變的較模糊許多，即原本數值為零的影像波谷強度準位整個向上提升，造成影像清晰度降低。因此，由上述我們可以得知一成像系統對於不同空間頻率的影像會有不同解析程度，即當物平面為一點，但對應的成像並非為一點時，此時的光學系統或透鏡就必須要有 MTF 來做衡量成像品質的指標。

由以上的基本的學理可以得知如何去用簡單的方法測得一個透鏡的 MTF 值，即是對透鏡輸入不同空間頻率的正弦圖樣後取其成像平面的影像，計算成像影像和輸入圖樣的調制度，將其兩者相除之後即為 MTF 值，此種方法相似於一般量測電子電路頻率響應之方法。

2.2 MTF 的基本原理

針對一個一維的線性非時變系統而言，在時域(time-domain)中若得知此系統的脈衝響應(impulse response)，對於任何的輸入訊號只要將其訊號和脈衝響應做迴旋積分(convolution)的數學操作後，即可以得知其對應的輸出訊號。而由頻域的觀點則是將轉移函數和輸入訊號頻譜做相乘即可得到對應的輸出訊號頻譜。時域與頻域間的關係可以由傅氏轉換和反傅氏轉換作為聯繫，如圖 2.4 所示：

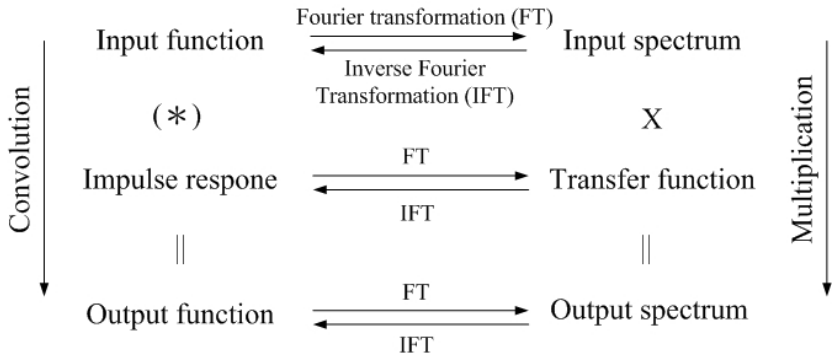


圖 2.4 時域-頻域關係轉換圖

對於一個光學成像系統（線性非空間變），亦遵循著相同的概念，差別在於成像系統考慮的為空間域(spatial domain)以及空間頻域(spatial frequency domain)，本章節主要針對物體、透鏡、影像及 MTF 之間的關係，分別針對物光源為同調、非同調等條件下做探討。

2.2.1 同調光的成像系統(Coherence imaging system)

如圖 2.5 所示，為一線性非空間變且無像差的光學成像系統，圖中的 $U_o(\tilde{\xi},\tilde{\eta})$ 與 $U_i(u,v)$ 分別代表物平面上的物點與像平面上的像點。

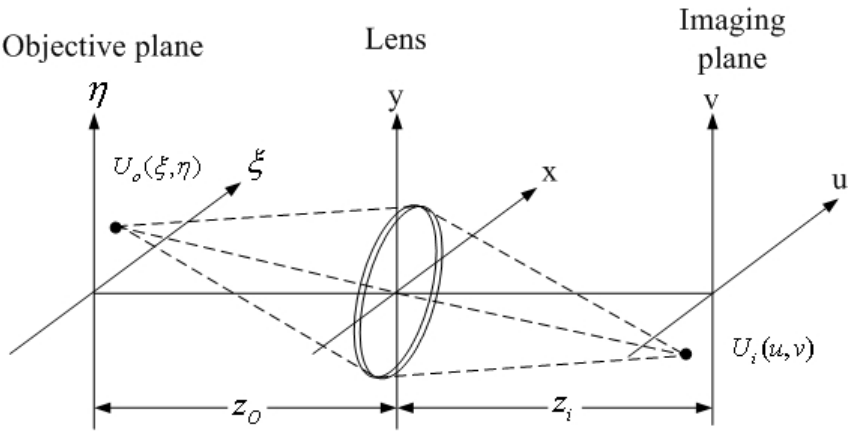


圖 2.5 成像系統的座標表示

針對同調光源，可知物點與像點兩者與透鏡轉移函數間的關係式為二維迴旋積分的數學操作，如式(2-4)所表示[2]：

$$U_i(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty}\int U_g(\tilde{\xi},\tilde{\eta})\, h(u-\tilde{\xi}, v-\tilde{\eta})\; d\tilde{\xi}d\tilde{\eta} \qquad (2\text{-}4)$$

其中，

$$U_g(\tilde{\xi},\tilde{\eta}) = \frac{1}{|M|}U_o(\frac{\tilde{\xi}}{M},\frac{\tilde{\eta}}{M}), \quad \tilde{\xi} = M\xi, \quad \tilde{\eta} = M\eta$$ （M 為透鏡放大倍率）

而 $h(u-\tilde{\xi}, v-\tilde{\eta})$ 為該成像系統於同調光條件下之脈衝響應，稱之為振幅的點擴散函數(amplitude point spread function, APSF)。其表示式如下：

$$h(u-\tilde{\xi}, v-\tilde{\eta}) = \frac{A}{\lambda z_i}\int_{-\infty}^{\infty}\int P(x,y)\exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda z_i}[(u-\tilde{\xi})x + (v-\tilde{\eta})y]\right\}dxdy \quad (2\text{-}5)$$

其中 A:單色光（同調光）之振幅大小

λ:光波長

$P(x,y)$:光瞳函數(pupil function)，在光瞳內其值為 1，光瞳外其值為 0。

z_i:光瞳至影像平面之距離。

由(2-5)式中，可以明確的得知成像系統的脈衝響應，為該成像系統的光瞳函數之傅氏轉換結果。針對一個線性非空間變的光學系統，其必滿足線性疊

加的性質，因此可經由傅式轉換，求得該系統於頻域的關係式，如(2-6)式所示：

$$G_i(f_X, f_Y) = H(f_X, f_Y)\, G_g(f_X, f_Y) \tag{2-6}$$

其中，物像平面的頻域可表示為，

$$G_g(f_X, f_Y) = F\{U_g(u,v)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\int U_g(u,v)\exp[-j2\pi(f_X u + f_Y v)]dudv,$$

$$G_i(f_X, f_Y) = F\{U_i(u,v)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\int U_i(u,v)\exp[-j2\pi(f_X u + f_Y v)]dudv\,.$$

而系統脈衝響應的頻域為

$$H(f_X, f_Y) = F\{h(u,v)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\int h(u,v)\exp[-j2\pi(f_X u + f_Y v)]dudv \tag{2-7}$$

在此，$H(f_X, f_Y)$ 稱之為該成像系統的振幅轉移函數(amplitude transfer function, ATF)。由(2-5)及(2-7)式，可得知 $H(f_X, f_Y)$ 與 $P(x,y)$ 間的關係為：

$$H(f_X, f_Y) = F\left\{\frac{A}{\lambda z_i}\int_{-\infty}^{\infty}\int P(x,y)\exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda z_i}(ux+vy)\right\}dxdy\right\}$$

$$= (A\lambda z_i)P(-\lambda z_i f_X, -\lambda z_i f_Y) \tag{2-8}$$

其中 $A\lambda z_i$ 為一常數項（含光瞳函數的負號），將此項忽略掉則可將(2-8)式改寫成

$$H(f_X, f_Y) = P(\lambda z_i f_X, \lambda z_i f_Y) \tag{2-9}$$

在此要特別注意的是 APSF 並無法用一般的方法去量測，因為感測器或 CCD 抓取的是強度值(intensity)而無法抓取電場的振幅值。而 APSF 與 ATF 兩者之間的關係圖，如圖 2.6 所示。

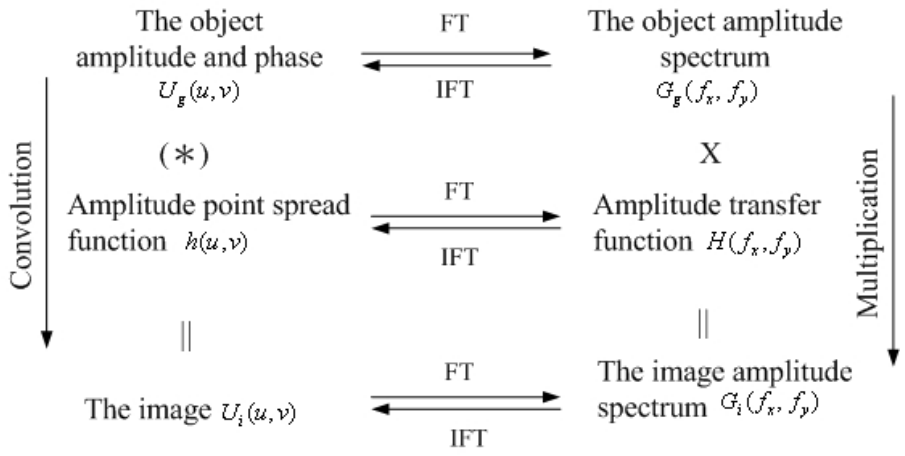


圖 2.6 APSF 和 ATF 之間的關係

2.2.2 非同調光的成像系統(Incoherence imaging system)

考慮如上述同調光之光學系統之架構，同圖 2.5 所示。 有別於 2.2.1 節，在此是針對非同調光源，只考慮電場強度(intensity)的部分，所以物像以及透鏡三者間的關係為[2]：

$$I_i(u,v) = K\int_{-\infty}^{\infty}\int h^2(u-\tilde{\xi},v-\tilde{\eta})\, I_g(\tilde{\xi},\tilde{\eta})\, d\tilde{\xi}d\tilde{\eta} \qquad (2\text{-}10)$$

其中 $I_g(\tilde{\xi},\tilde{\eta})$ 及 $I_i(u,v)$ 分別為物與像平面影像強度的表示式，並非是電場的振幅。其中 $h^2(u-\tilde{\xi},v-\tilde{\eta})$ 為該成像系統的脈衝響應，稱之為點擴散函數(point spread function, PSF)。

根據(2-10)式得知此成像系統亦滿足線性疊加的性質，相同的，藉由傅式轉換可得知其在頻域的關係式，如(2-11)式：

$$G_i(f_X, f_Y) = \mathcal{H}(f_X, f_Y)\, G_g(f_X, f_Y) \qquad (2\text{-}11)$$

其中 $G_g(f_X, f_Y)$ 以及 $G_i(f_X, f_Y)$ 別為

$$G_g(f_X, f_Y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int \mathrm{I}_g(u,v)\exp[-j2\pi(f_X u + f_Y v)]dudv}{\int_{-\infty}^{\infty}\int \mathrm{I}_g(u,v)dudv} \quad , \qquad (2\text{-}12)$$

以及

$$G_i(f_X, f_Y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int \mathrm{I}_i(u,v)\exp[-j2\pi(f_X u + f_Y v)]dudv}{\int_{-\infty}^{\infty}\int \mathrm{I}_i(u,v)dudv} \quad . \qquad (2\text{-}13)$$

而此系統脈衝響應的頻域$\mathcal{H}(f_X, f_Y)$為

$$\mathcal{H}(f_X, f_Y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int \left|h(u,v)\right|^2 \exp[-j2\pi(f_X u + f_Y v)]dudv}{\int_{-\infty}^{\infty}\int \left|h(u,v)\right|^2 dudv} \qquad (2\text{-}14)$$

上式所描述的$\mathcal{H}(f_X, f_Y)$為光學轉移函數(optical transfer function,OTF)，若將$\mathcal{H}(f_X, f_Y)$取決對值之後的結果即為一般所認知的 MTF。由數學式(2-14)中可以發現 APSF、ATF 和 OTF 之間有密切的關係，因為

$$H(f_X, f_Y) = \mathcal{F}\{h(u,v)\}$$

且根據 Rayleigh 理論[2][3]，OTF 可以表示為：

$$\mathcal{H}(f_X, f_Y) = \frac{\int\int_{-\infty}^{\infty} H(p',q')\,H^*(p'-f_X, q'-f_Y)dp'dq'}{\int\int_{-\infty}^{\infty}\left|H(p',q')\right|^2 dp'dq'} \qquad (2\text{-}15)$$

令

$$p = p' - f_X/2,\ q = q' - f_Y/2$$

(2-15)式可改寫成

$$\mathcal{H}(f_X, f_Y) = \frac{\int\int_{-\infty}^{\infty} H(p+\frac{f_X}{2}, q+\frac{f_Y}{2})\,H^*(p-\frac{f_X}{2}, q-\frac{f_Y}{2})dpdq}{\int\int_{-\infty}^{\infty}\left|H(p,q)\right|^2 dpdq} \qquad (2\text{-}16)$$

根據(2-16)式可以得知 OTF 為 APSF 做自相關(autocorrelation)數學操作且正規化後的結果。

由上述可以得知，若已知一成像系統的 OTF 時，要求得此成像系統 MTF 值，只要對 OTF 取絕對值即為該系統之 MTF。因為 OTF 與 MTF 之間的關係如(2-16)式所示：

$$OTF = (MTF)^{e^{i(PTF)}} \qquad (2\text{-}16)$$

其中 PTF 為相位轉移函數(phase transfer function)，是指在像平面上影像相位部份。

依(2-10)、(2-11)以及(2-16)式可以整理出 PSF、OTF 以及 MTF 之間關連性，如下圖 2.7 所示。

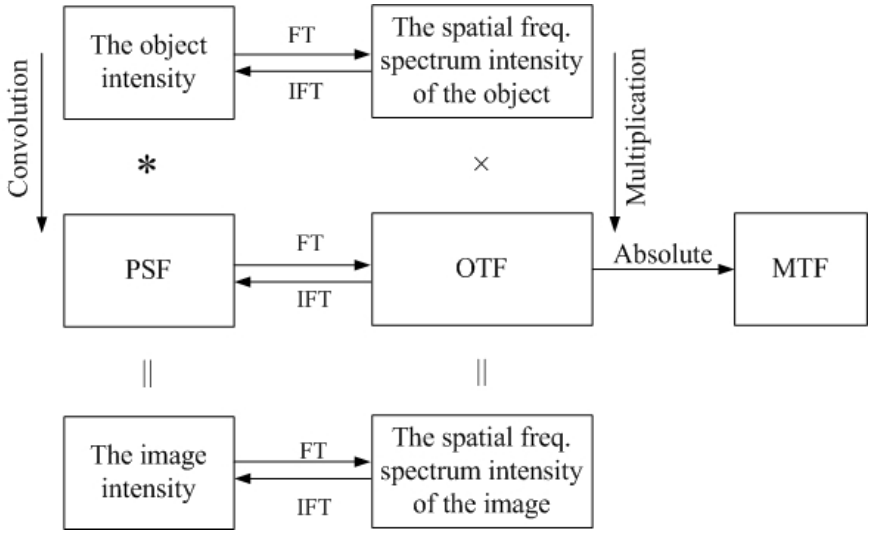


圖 2.7 MTF 與 OTF 的關係圖

由上圖 2.7 可清楚得知，若得到一個光學系統或透鏡的 PSF 後，就可以利用傅立葉轉換求得 OTF，而再將 OTF 取其絕對值及可以得到此光學系統的 MTF。

2.3 學理模擬

2.3.1 繞射極限成像系統的 MTF

由上述 MTF 的基本學理的部份可以得知各個函數之間關係的數學表示式。因此，在此利用 Matlab 做無像差成像系統的 MTF 模擬。根據定義，一個繞射極限的成像系統為無像差系統，而成像品質只與本身系統的光瞳函數(即孔徑尺寸)有關。因此，在此先假設已得知透鏡或光學系統的光瞳函數(在此只針對圓孔以及方孔)，接著再根據學理數學式(2-5)以及(2-10)，利用光瞳函數求出成像系統的 PSF，如圖 2.9 (a)、(b)所示，其中圖 2.10 (a)為成像系

統為光瞳函數為圓孔時的 PSF，而圖 2.9 (b)則為方孔時的 PSF。

模擬的流程圖如圖 2.8 所示，根據箭頭路徑求得 APSF、ATF、PSF、OTF，最後在求得 MTF。

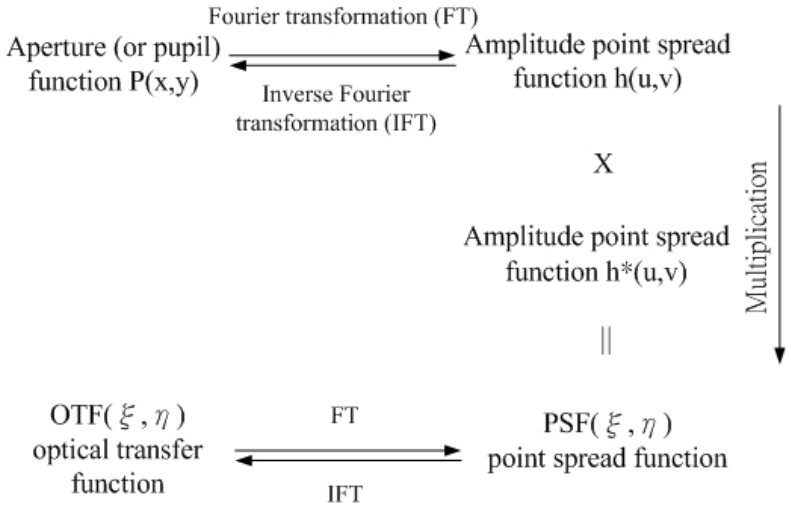
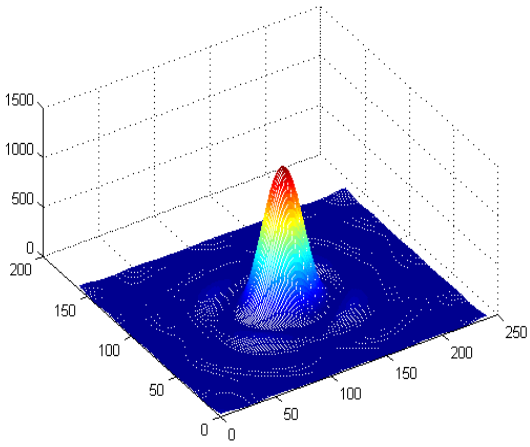
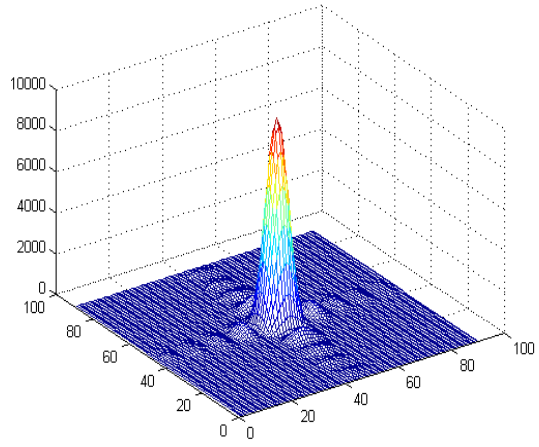


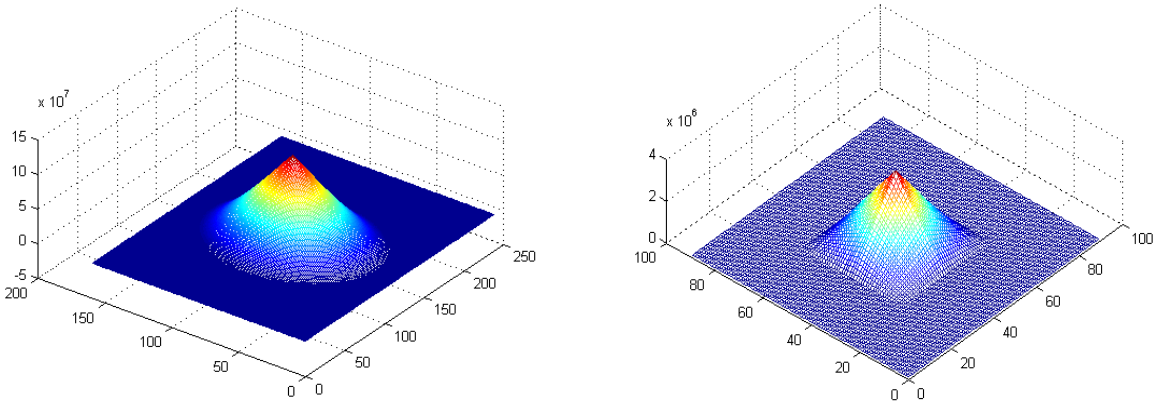
圖 2.8 模擬 MTF 的流程圖



(a) 光瞳為圓孔的 PSF



(b) 光瞳為方孔的 PSF

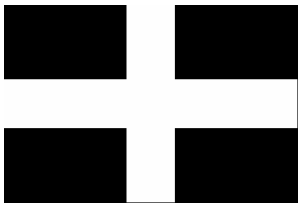


(c) 光瞳為圓孔的 MTF　　(d) 光瞳為方孔的 MTF

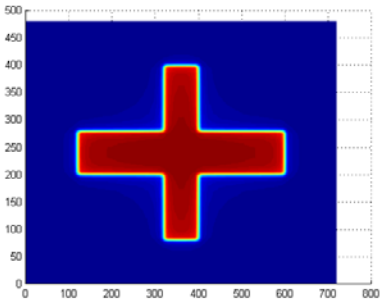
圖 2.9 模擬結果(a)、(c) 分別為光瞳為圓孔時的 PSF 和 MTF，(b)、(d)則分別為光瞳為方孔時的 PSF 和 MTF

2.3.1 繞射效應對成像品質之影響

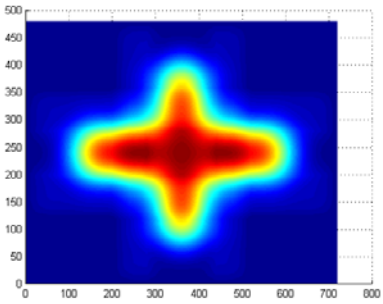
根據前述的理論可以發現到，成像系統的光瞳函數和該系統的 PSF、OTF 以及 MTF 有密切的關係。因此，在此模擬成像系統之光瞳尺寸大小所造成的繞射效應對成像系統成像品質之影響。在此輸入一個十字的圖片(如圖 2.11(a))到不同光瞳尺寸的成像系統，並且觀察輸出像平面上的影像。此針對三種光瞳尺寸（三種尺寸之間比例為$1:\frac{1}{10}:\frac{1}{100}$）的成像系統模擬，其結果如圖 11 所示，之中，(b)圖、(c)圖以及(d)圖分別為此三種光瞳尺寸所模擬的輸出影像結果，由模擬的結果我們可觀察到，當光瞳的尺寸越來越小時，繞射效應越嚴重，導致輸出圖片的清晰度越模糊。顯然的，繞射效應會對一個成像系統的成像品質造成很大的影響。



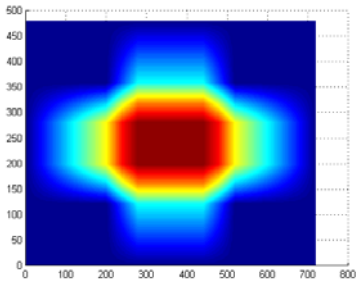
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2.10 模擬結果

第三章 MTF 量測方法研究

本章節主是針對現有幾個常使用的 MTF 量測方法，以及 MTF 在量測上必須要注意的幾個課題做研究及探討。

現今常使用量測 MTF 的主要方法分別有三種擴散函數和 bar target 等方法。本章節分別針對現有幾種 MTF 量測方法做介紹，並且對各個方法的優缺點做研究及探討。

3.1 擴散函數方法(spread function method)

現今許多廠家均是採用擴散函數的方法來量測成像系統的 MTF 值，而脈衝響應的方法主要分為以下三大類：

1. 點擴散函數方法(point spread function, PSF)，
2. 線擴散函數方法(line spread function, LSF)，
3. 邊緣擴散函數方法(edge spread function, ESF)。

此三種方法都是利用光學系統脈衝響應的概念，即前面 MTF 學理所探討的理論基礎來做為量測的依據；根據上述的學理可統整出一個觀念，即任何的型態光源經由透鏡或光學系統所成的像，都可以視為由數個點擴散函數的合成，如下圖 3.1 所示：

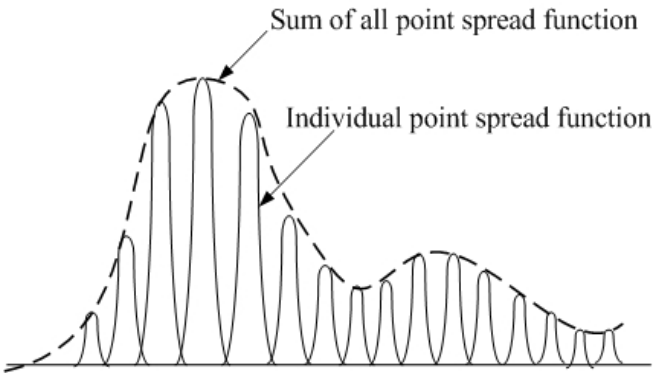


圖 3.1 影像是由無數個 PSF 建構而成

圖中虛線所表示的為所成的像，實線則為數個 PSF。因此，不同的物光源所成的像，均可以透過不同的處理而與 PSF 有相同的型態，再根據 PSF 與 MTF 間的關係式求得 MTF 值。以下針對 PSF、LSF、ESF 等 MTF 量測方法進行探討。

3.1.1 點擴散函數方法(point-spread function method, PSF)[1][3]

此方法就是去製造一個點光源$\delta(\xi,\eta)$，來測量成像系統的脈衝響應$PSF(u,v)$，如圖 3.2 所示，物像平面與透鏡脈衝函數之間的關係式為：

$$\delta(\xi,\eta) * PSF(x,y) = PSF(u,v)$$

若得知成像系統之 PSF 即可以運用前面章節裡所描述的數學式，求得 MTF 值為:

$$MTF(f_X, f_Y) = \mathcal{F}\{PSF(u,v)\} \tag{3-1}$$

在此要特別注意的是點光源經過透鏡後會向四面八方的擴散，如圖 3.2 所示。故經由數學式(3-1)可以求出二維的 MTF 值，但現實上光源尺寸是有限的，因此，只能去製造一個近似於$\delta(\xi,\eta)$的點光源，並且還須經過修正才能求得成像系統實際之 MTF 值，其基本的實驗架構如下圖 3.2 所示。

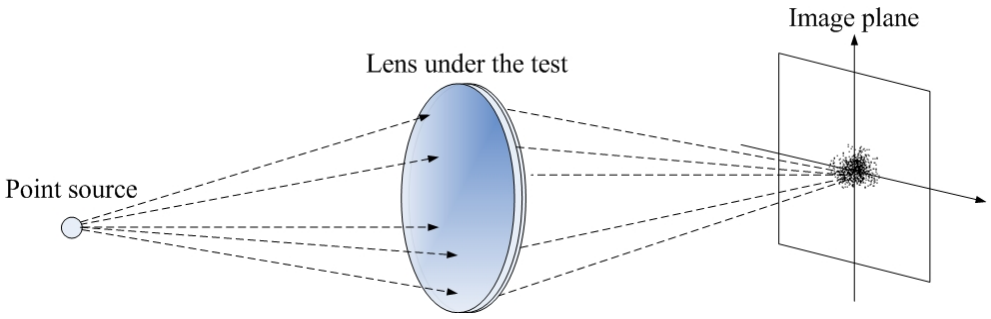


圖 3.2 PSF 基本量測架構

此種方法，是一種很快速且便捷的方法，成本也很低廉但卻有著明顯的問題存在，即訊號雜訊比(SNR)很低，因為若要求得待測的高成像品質的光學系統之 MTF，必須要製造一個近似於脈衝函數$\delta(\xi,\eta)$的點光源[1]，此點

光源的尺度必須要十分的微小，在加上經過待測透鏡後，能量會變的更加的微弱，也因為如此，此種方法的訊號雜訊比很低。

3.1.2 線擴散函數方法(line-spread function, LSF)[1][3][4][8]

由於點擴散函數量測方法的訊雜比不高，因此就衍生出線擴散函數的方法。線擴散函數的方法和前面所敘述的 PSF 方法十分雷同，只不過不同於前面的方法，在此是利用單狹縫來製造某特定方向的線光源，也就是可以視為數個 $\delta(\xi,\eta)$ 的集合如圖 3.3 所示，

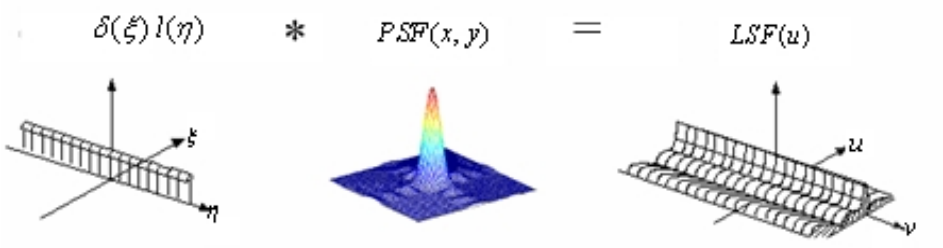


圖 3.3 LSF 和 PSF 之間的關係圖

而 $PSF(x,y)$ 和 $LSF(x)$ 之間的關係可以表示成:

$$g(\xi,\eta) = \delta(\xi)\, l(\eta)$$

$$\Rightarrow I(u,v) = [\delta(\xi)\, l(\eta)] * PSF(x,y)$$

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} I(u,v)\, dy = LSF(u) \qquad (3\text{-}2)$$

由數學式子(3-2)中及圖 3.3 所示，顯然的 $LSF(u)$ 是由無數個 $PSF(u,v)$ 的集合所建構而成，是由許多點所建構成的線，也因此稱之為線擴散函數。

而圖 3.4 則為基本線擴散函數量測實驗的架構圖。

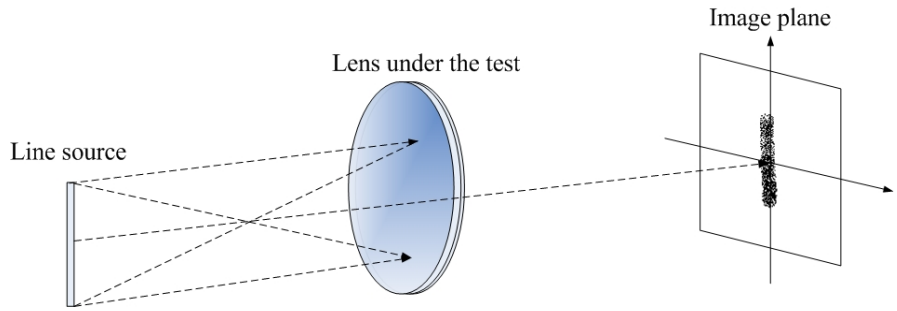
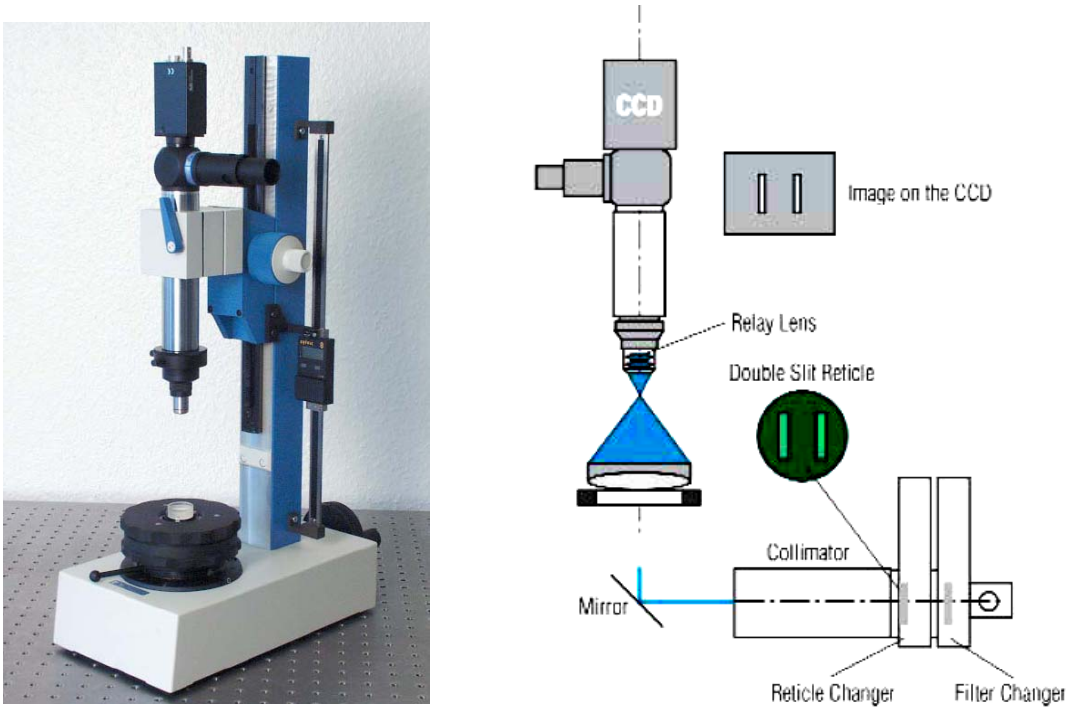


圖 3.4 線擴散函數基本量測架構

線擴散函數在計算上和前述點擴散函數量測方法大致相同，但在此必須要注意的地方在於線擴散函數量測方法只針對影像左右擴散的程度作分析，如圖 3.3 和圖 3.4 所示，從圖上可以很清出的看到寬度極窄的線光源經過透鏡後，所成的影像寬度比原先的寬了許多，而分析成像品質只限於擴散的方向，故所求的 MTF 值並不是四面八方的數值，只限定於某特定的方向。由上述的數學式子(3-2)可以推出 LSF 和 MTF 之間的關係，如數學式子(3-3)所示:

$$\left|\mathcal{F}\{LSF(u)\}\right| = MTF(f_X,0) \tag{3-3}$$

線擴散函數量測方法是現今許多廠家如 Trioptic 和 Optikos 常使用的方法之一，如圖 3.5(a)所示為 Trioptic 所出廠的 MTF 量測儀實體圖，而圖 3.5(b)則為此儀器的架構圖，由圖 3.5(b)可以得知此儀器主要是由一個內含狹縫圖樣的的準直儀(collimator)、面鏡、顯微物鏡、自準直儀(autocollimator)，以及 CCD 所組合而成的，其中準直儀和狹縫主要是用來產生無窮遠處的線光源，其無窮遠處的光線經反射面鏡折射至待測透鏡後，再經由自準直儀和顯微物鏡和 CCD 所組成的取像系統擷取待測透鏡所成的影像做分析。此方法和前述的點擴散函數方法，有著相同的優點(快速、便捷、成本低)，但亦存在著相同的問題，因為線光源的尺寸是有限的，因此線光源的寬度會影響到量側系統頻寬，且還須對量測結果做修正，雖然 LSF 方法的 SNR 比相對於 PSF 方法來的高，但還是略顯不足[1][3]。



(a) (b)

圖 3.5 Trioptics MTF 儀

3.1.3 邊緣擴散函數方法(edge-spread function, ESF)[1][4][9][10]

由於前述的點擴散函數量測方法，以及線擴散函數量測方法皆有著 SNR 比很低的問題存在，因此而衍生了邊緣擴散函數的方法，此方法與前面所敘述的兩個方法有很明顯的差異，但其原理還是基於 PSF 的原理。其類似於成像系統的步階響應，其中的原理為，當輸入一個步階函數(step function)的圖樣到成像系統時，原本完美的步階函數圖樣在經過成像系統成像後邊緣會呈現擴散平滑化，接者在針對擴散平滑部分去做分析，以求得待測成像系統的 MTF，其只針對影像的邊緣作分析，故此種量測 MTF 的法則稱之為邊緣擴散函數，如下圖 3.6 所示。

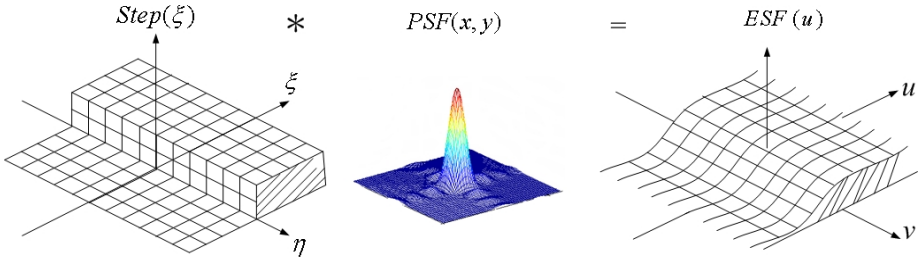


圖 3.6 ESF 與 PSF 之間的關係圖

ESF 可以當成數個 LSF 的集合，因為面是由無數個線條所構成的，因此 ESF 和 LSF 關係以數學式子(3-4)來表示：

$$ESF(\xi) \approx \sum_{i=1}^{\infty} LSF(\xi - \xi_i) \tag{3-4}$$

由(3-4)式可以很明顯的得知 ESF 趨近於 LSF 的總和。因此，若得知了 ESF 後只要將其做微分的運算就可求得系統的 LSF，如(3-5)式所示：

$$\frac{d}{dx}\{ESF(\xi)\} = \int_{-\infty}^{x} LSF(\xi')d\xi' = LSF(\xi) \tag{3-5}$$

根據(3-5)式，只要能夠計算出 LSF，就能利用前述的數學式(3-2)、(3-3)來推導出 ESF 和 PSF 的關係，並求出待測成像系統的 MTF 值。邊緣擴散函數的基本量測架構如圖 3.7 所示：

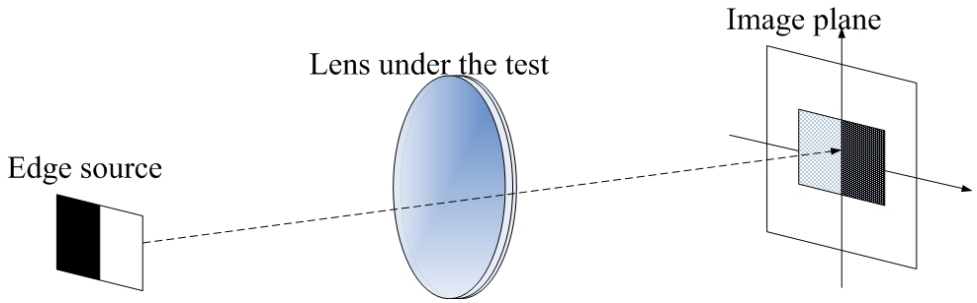


圖 3.7 邊緣擴散函數基本量測架構

圖 3.7 的方法是利用黑白對比很高的圖樣輸入到待測成像系統中，此外可以利用刀邊(knife edge) [1][4]的方式來進行 ESF 的量測，如圖所示

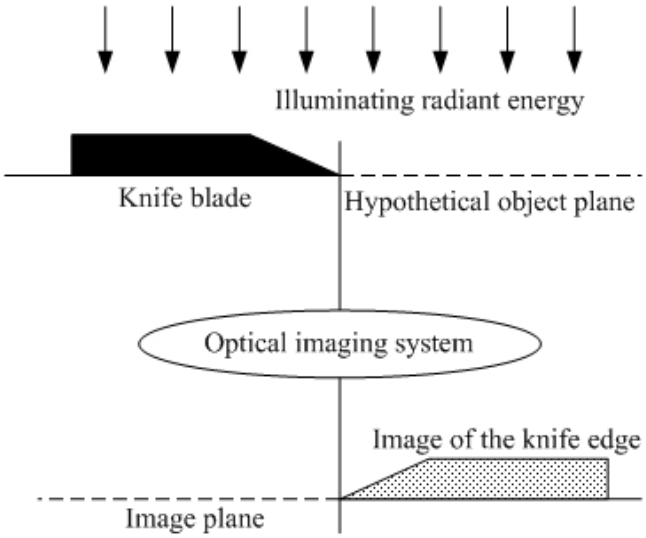


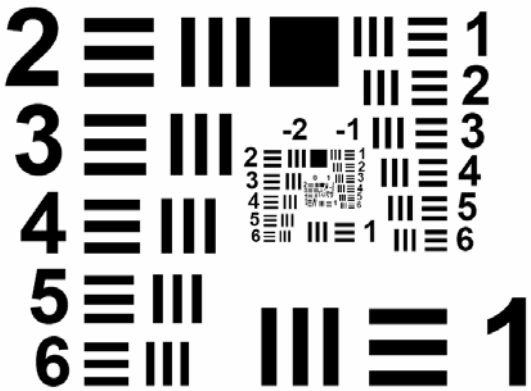
圖 3.8 使用刀邊掃描方式求得邊緣擴散函數

如圖 3.8 所示，將刀邊放置於光源前面，將部分光源擋住，或者是將刀邊放置於影像平面，此種方法和圖 3.7 的原理是一樣的，目的是要製造一個步階訊號輸入到待測系統。

邊緣擴散函數量測方法相較於前述兩種方法有很高優勢，因為使用邊緣擴散量測方法的 SNR 比很高，這是因為邊緣擴散函數的量測架構裡，在物平面上使用了大面積的圖樣或面光源，相較於點擴散和線擴散等方法有很高的光通量(flux)，因此不用去擔心訊號微弱的問題，在做量測資料上的擷取也比較方便。

3.2 其他方法-Bar target 方法[1][3][4][11]

Sin target 和 bar target 這兩種方法十分的類似，主要都是利用調變不同的空間頻率圖樣來做成像系統的 MTF 量測，如圖 3.9 (a)和圖 3.9(b)所示：



(a) Bar target 圖樣

(b) Sin target 圖樣

圖 3.9 (a) Bar target 和(b) sin target 圖樣

使用 sin target 來做 MTF 測試可以直接的使用前述的數學式(2-2)和(2-3)來做計算，量測出待測成像系統的 MTF 值，此種方法雖然簡易，但卻有輸入圖樣不易製造的問題[1]，因為 sin target 在製造時必須要有效的控制圖樣灰階強度成弦波的型態分佈，如圖 3.9(b)所示，此外 sin target 製造的材質也會影響製造的結果。因為 sin target 的種種問題而衍生出 bar target 的量測方法，bar target 和 sin target 差異主要在於 bar target 是利用不同空間頻率的方波圖樣來測試成像系統的 MTF，此種圖樣相較於 sin target 的弦波圖樣較容易製造。在使用 bar target 來測試成像系統的 MTF 時，在計算時同樣也是利用類似於前述的數學式(2-2)以及(2-3)的計算型態，但在此必須要注意的是利用數學式(2-2)以及(2-3)型態所計算的結果並非待測系統的 MTF 值，而是為對比轉移函數(contrast transfer function)[1]，故在此需將(2-2)及(2-3)式修正為下列兩式：

$$CTF(f_X) = \frac{C_I}{C_O}\ , \tag{3-6}$$

$$C_O = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{O_{\max} + O_{\min}}\ ,\ C_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \tag{3-7}$$

其中 CTF 為對比轉移函數，f_X 為方波圖樣的空間頻率，C_I、C_O 分別為影像以及物體的對比度。利用 bar target 所量測出來的為成像系統之 CTF 而非 MTF，這是因為方波是基頻弦波與許多奇次諧波所組成，除了基頻外還含有許多其他頻率的成份，故利用 bar target 量測出來的 CTF 數據還需要做數值轉換(去除高頻成份)，才能得到成像系統真正的 MTF 值。CTF 轉換至 MTF 的方法主要是利用傅立葉轉換的推導來做近似，假設有一空間頻率為 $\frac{1}{\xi_f}$ 的 bar target 圖樣，如圖 3.10 所示：

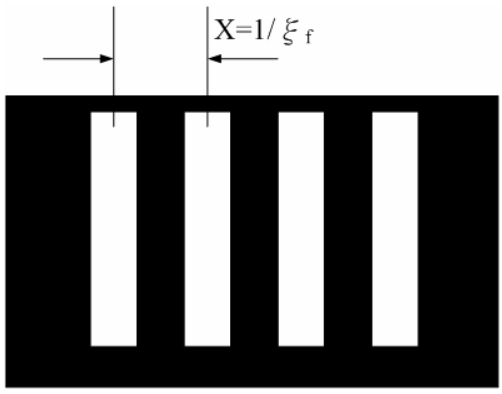


圖 3.10 空間頻率為 $\frac{1}{\xi_f}$ 的 bar target 圖樣

而 bar target 的 CTF 與 MTF 間的關係式如下所示：

$$CTF(\xi_f)=\frac{4}{\pi}\left\{MTF(\xi=\xi_f)-\frac{MTF(\xi=3\xi_f)}{3}+\frac{MTF(\xi=5\xi_f)}{5}-\cdots\right\} \qquad (3\text{-}8)$$

$$\Rightarrow MTF(\xi)=\frac{\pi}{4}\left\{CTF(\xi_f=\xi)+\frac{MTF(\xi_f=3\xi)}{3}-\frac{MTF(\xi_f=5\xi)}{5}+\cdots\right\} \qquad (3\text{-}9)$$

式子(3-8)及(3-9)中的高頻項由於很小，故可以將其省略，因此 CTF 和 MTF 之間的關係式（3-8）可修改為:

$$CTF(\xi_f)\approx(4\diagup\pi)MTF(\xi_f)$$

$$\Rightarrow MTF(\xi_f) \approx (\pi/4) CTF(\xi_f) \tag{3-10}$$

因此利用 bar target 方法來量測成像系統的 CTF 時，還須藉由(3-10)式來做 MTF 值得近似轉換。

使用 bar target 的方法和前述的 PSF 方法、LSF 方法以及 ESF 方法最大不同點是在於，bar target 的方法需要對待測的成像系統，輸入許多不同空間頻的圖樣來做測試，在量測速度上明顯的慢許多。

3.5 MTF 量測的課題

本章節主要針對於實際上在量測 MTF 時所遇到的課題作研究與探討，這些課題分別為，MTF 的串連性(cascade property of MTF)、量測系統上的輔助光學元件品質(auxiliary optics)、有限尺度光源的影響(針對 PSF 以及 LSF 方法)等課題來做探討。

3.5.1 MTF 的串聯性

一套 MTF 量測系統中會含有許多的輔助元件，如物像產生器(objective generator)、輔助光學元件(如:自準直儀、顯微物鏡)以及 CCD 攝影機，若這些元件彼此為線性且獨立，則此量測系統和待測的成像系統在空間域的關係可以表示成[1][3]：

$$h_{measurement} = h_{object} * h_{auxiliary\ optical\ components} * h_{DUT} * h_{CCD} \tag{3-12}$$

其中 $h_{measurement}$ 為系統量測結果，而 h_{object}、$h_{auxiliary\ optical\ components}$、$h_{CCD}$ 以及 h_{DUT} 分別為物產生器、輔助光學元件、CCD 攝影機以及待測透鏡的脈衝響應。根據前述的理論以及(3-12)式，此量測系統和待測成像系統在空間頻域的關係可以表示成：

$$MTF_{measurement} = MTF_{system} \times MTF_{DUT} \tag{3-13}$$

其中,

$$MTF_{system} = MTF_{object} \times MTF_{auxiliary\ optical\ components} \times MTF_{CCD} \tag{3-14}$$

由(3-13)與(3-14)式，可以得知量測系統所量測出來的結果，為系統中每一個元件本身 MTF 值相乘的結果，而並非是待測光學元件的 MTF 值，如圖 3.11 所示，

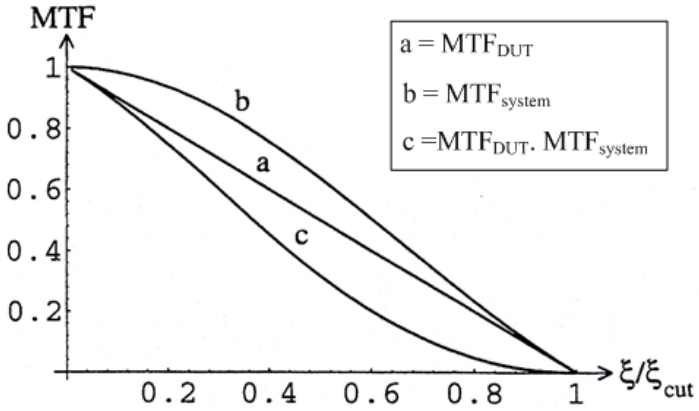


圖 3.11 量測系統與待測光學元件 MTF 之關係圖

由圖 3.11 可以明顯的得知系統所測出來的 MTF 值(即曲線 c)的空間頻寬比待測光學元件本身實際的 MTF 值低了許多，故若不將系統的 MTF 濾除掉則會影響量測的真實性。要量得待測光學元件真實的 MTF 數值，則必須要將所量測出來的 MTF 數據，扣除掉系統上其他輔助光學元件的 MTF 值[1][3]，如(3-15)式所示:

$$MTF_{DUT} = MTF_{measurement} / MTF_{system} \tag{3-15}$$

上式所成立的條件是量測系統上的每個元件間須是獨立的（即不存在有相依關係），且滿足線性疊加原理。若 MTF 量測系統不滿足上述的條件時，則無法適用於(3-12)與(3-13)式。例如，消像差透鏡組，為了提高光學元件的成像品質而使用多個透鏡來達到修像差的效果，降低像差對成像品質的影響。如圖 3.12 所示，此兩個透鏡本身的 MTF 值都不高（存有像差），

但經過互補後，整體的 MTF 卻提高，具有較佳的成像品質，兩透鏡間具有互補（相依）的效果。因此，此種系統則無法適用於 MTF 的串聯性。

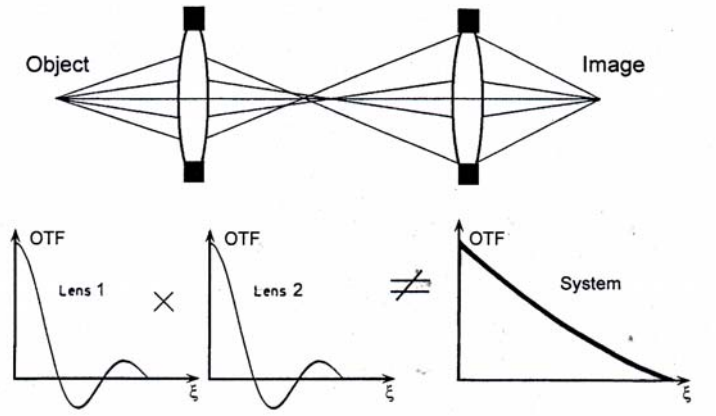


圖 3.12 互補透鏡不滿足 MTF 串聯的特性

故在量測 MTF 時必須要確認量測系統每個元件的獨立性與線性，尤其是輔助光學元件和待測的成像系統必須互為獨立的系統，才能滿足 MTF 的串聯性。

3.5.2 輔助光學元件的品質

輔助光學元件包含有打平行光的準直鏡、擷取待測系統成像的顯微物鏡以及其他輔助的光學元件等等。輔助光學元件在 MTF 量測上為其中重要的一環，若是系統本身的輔助光學元件品質不佳則會影響到量測的結果。因此有幾個重要細節必須要注意到，首先是量測系統上的準直鏡的孔徑必須要夠大足以涵蓋待測的成像系統[1]，因為在量測時才能將待測光學元件中所有的資訊(如，像差)涵蓋在量測結果裡，如圖 3.13 所示。

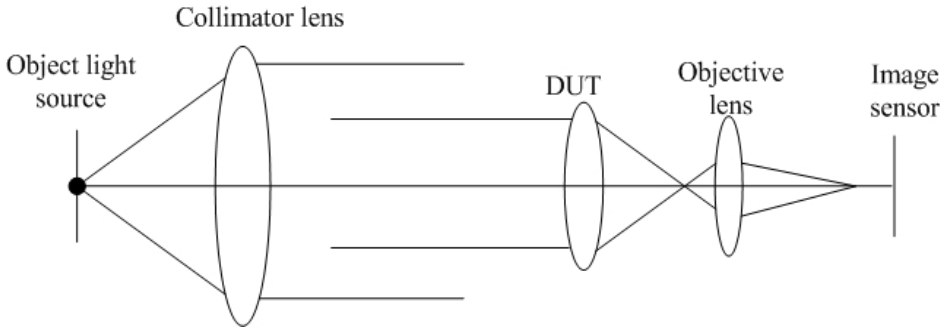


圖 3.13 量測系統的輔助光學元件孔徑須大於待測透鏡

第二必須要注意的是顯微物鏡的孔徑也必須足夠大[1],以致於不會限制待測光學元件的聚焦光束，而造成繞射的效應，如圖 3.13 所示。此外，輔助光學元件必須是趨近於繞射極限，若輔助光學元件本身趨近於繞射極限(即具有較佳的像差修正)，則對量測系統的量測結果不會有太大的影響，且能夠真實的呈現待測光學元件的真實資訊,避免量測結果受限於輔助光學元件的頻寬影響。若輔助光學元件並非趨近於繞射極限，則會因輔助元件本身具有像差而降地了整個量測系統的量測頻寬範圍。因此，量測 MTF 時必須要注意輔助光學元件的幾個重要特性。

3.5.3 有限尺寸的光源(針對點擴散函數方法及線擴散函數方法)

此章節是針對於點擴散及線擴散量測方法做探討，根據前述(3-1)以及(3-2)式所示,可以得知使用點擴散函數以及線擴散函數的點光源與線光源尺度，必須要很小才能測得待測透鏡全空間的頻寬。若使用有限寬度的光源時，將可能因光源尺寸的限制而無法測得待測透鏡全空間之頻寬，因為非趨近於脈衝函數的點光源與線光源的頻寬變窄,相對的亦會限制了量測系統的頻寬。所以在使用點擴散及線擴散量測方法，光源尺度大小必須恰當，光源尺寸越小將會衍生出訊雜比太低的問題,若選擇太大則會限制量測系統的頻寬。至於如何選擇適當的光源尺寸，其主要是利用待測系統在繞射極限時的

截直頻率來決定點光源和線光源的尺度[4]。假設現有一個待測透鏡的孔徑為 D 焦距為 f，光源波長為 λ，且量測時所用的線光源尺度為 $2\xi_s$。藉由待測元件的孔徑、焦距以及光源波長，就可以計算出此元件在繞射極限下時的截止頻率 ω_c 為：

$$\omega_c = \frac{D}{\lambda f} = \frac{1}{\lambda \mathrm{F\#}} \tag{3-16}$$

而線光源的空間頻譜 $S(\omega)$ 為:

$$S(\omega) = \frac{\sin(2\pi\xi_s\omega)}{2\pi\xi_s\omega} \tag{3-17}$$

上式(3-17)為一 sinc 函數，其頻譜中第一個零點是在於

$$2\xi_s = 1/\omega_s \tag{3-18}$$

根據(3-17)與(3-18)式，只要滿足下述條件:

$$\omega_s > \omega_c \tag{3-19}$$

則此寬度的線光源就足以量測出待測元件的全頻寬，因為此線光源的空間頻寬需大於待測系統在繞射極限時的頻寬，如圖 3.14 所示。

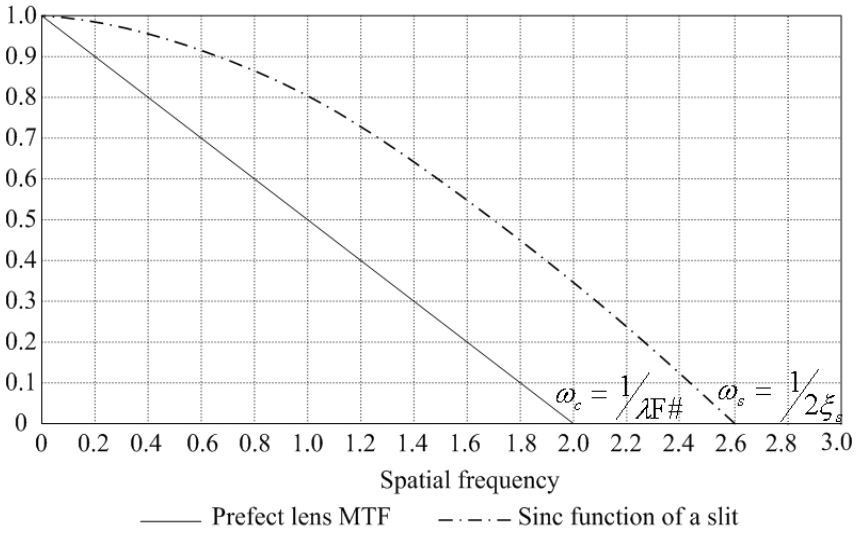


圖 3.14 狹縫寬度與量測元件繞射極限時之空間頻譜

除此之外，使用點擴散和線擴散函量測時還需要將量測結果做修正[1][7][15]，如(3-20)與(3-21)式所示：

$$MTF_{measurement}(f_X) = FiniteSizeSource(f_X) \times MTF_{DUT}(f_X) \tag{3-20}$$

$$\frac{MTF_{measurement}(f_X)}{FiniteSizeSource(f_X)} = MTF_{DUT}(f_X) \tag{3-21}$$

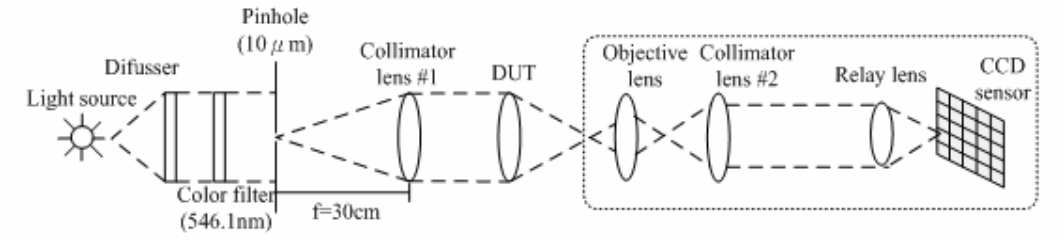
其中 $FiniteSizeSource(f_X)$ 、 $MTF_{DUT}(f_X)$ 以及 $MTF_{measurement}(f_X)$ 分別為光源空間頻譜、待測透鏡 MTF 以及系統量測結果，從(3-20)與(3-21)式可得知使用點擴散和線擴散函量測時，還需要將光源尺寸的空間頻譜扣除才能得到待測透鏡實際的 MTF 值。

第四章 實驗設計

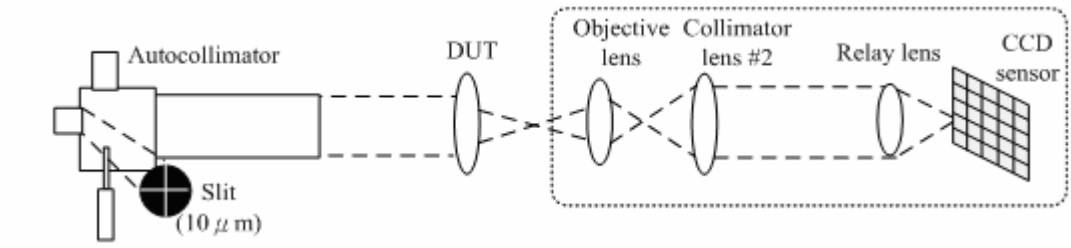
此章節的實驗設計項目主要是針對前述的三種擴散函數之 MTF 量測方法來進行 CCTV 鏡頭的量測，此三種方法分別為：點擴散函數量測法、線擴散函數量測法與邊緣擴散函數量測法做實驗設計。

4.1 PSF、LSF、ESF 量測方法之實驗架構

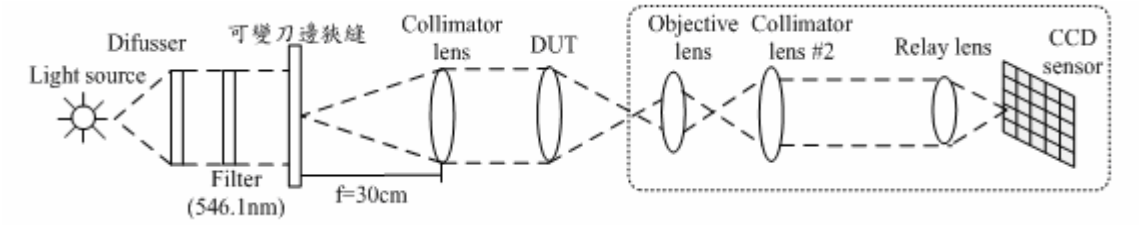
點擴散函數、線擴散函數以及邊緣擴散函數量測方法之實驗架構，皆架設一個無窮遠共軛條件(infinity)的架構，因為待測鏡頭為一般常見的 CCTV 鏡頭，針對此類行的待測透鏡，在量測需要製造一個無窮遠處的物光入射至待測透鏡做測試。在本論文所提及的三種量測方法，其中的線擴散函數量測，是直接利用廠家 Trioptics 所出廠的自準直儀來製造無窮遠的物光，而點擴散函數及邊緣擴散的實驗則是利用修正過的透鏡來產生無窮遠的物光。此三種實驗的架設器材主要有：鹵素燈光源、擴散版、線性移動平台、10x 顯微物、波長為 546.1nm 色彩濾片、自準直儀、黑白 CCD 攝影機和影像擷取器。三種擴散函數量測方法之實驗架構分別如圖 4.1 (a)、(b)及(c)所示。



(a)



(b)



(c)

圖 4.1 實驗架構示意圖，(a)點擴散函數、(b)線擴散函數與(c)邊緣擴散函數

此外，在圖 4.1 所標示的輔助光學元件（例如，準直鏡與顯微物鏡等）均是採用儀器等級（instrument-grade），元件本身的各種像差均已被適當的修正，其 MTF 值相對高於一般的光學元件，可視為一個無像差系統（只存在繞射效應）。若在實驗中，我們有效的控制每部分的光束大小，將光束尺寸限制於光學元件尺寸範圍內，則可以忽略到輔助光學元件本身的繞射效應，如圖 4.2 所示，一個經實驗設計後降低繞射效應的光學輔助元件（儀器等級），其 MTF 值很高，幾乎趨近於完美的光學元件。因此，在本量測系統的實驗上，除了使用儀器等級的光學輔助元件外，並有效的控制實驗因素，讓量測系統上的輔助光學元件之繞射效應降低（假設自準直儀以及顯微物鏡的 MTF 值皆趨近於 1），藉此忽略掉輔助光學元件之 MTF 對量測結果的影響，如(4-1)式所示。

$$MTF_{Measure} = MTF_{DUT} \times \left[MTF_{Objectivelens} \times MTF_{Autocollimator} \right] \times MTF_{CCDchip} \quad (4\text{-}1)$$

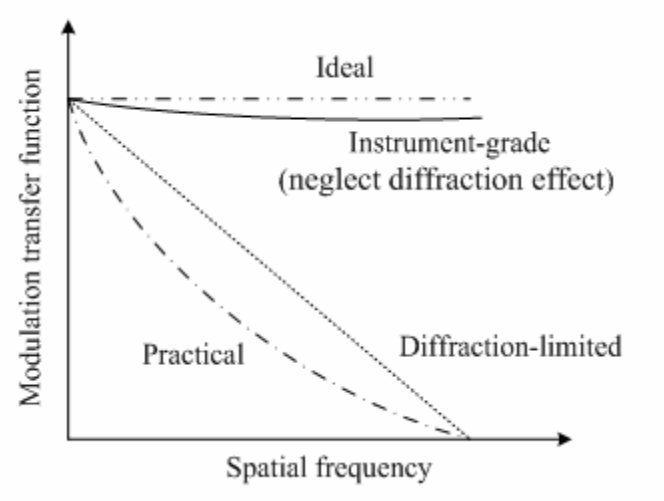


圖 4.2 輔助光學元件的假設條件之示意圖

由於點擴散函數、線擴散函數以及邊緣擴散函數量測方法之實驗架構類似，故此三個實驗所預期量測的流程如圖 4.3 所示。

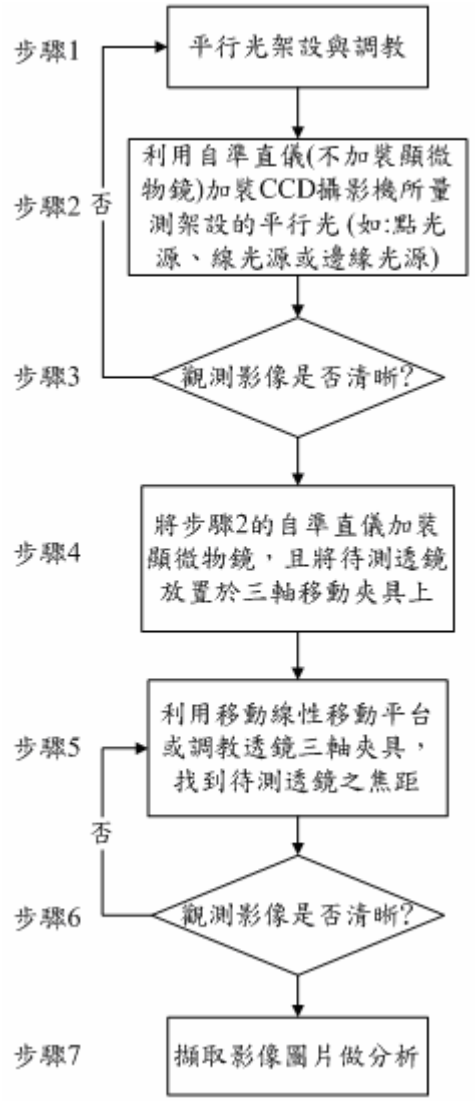


圖 4.3　PSF、LSF 以及 ESF 實驗流程圖

4.2 系統校正

(a) CCD 攝影機線性度校正

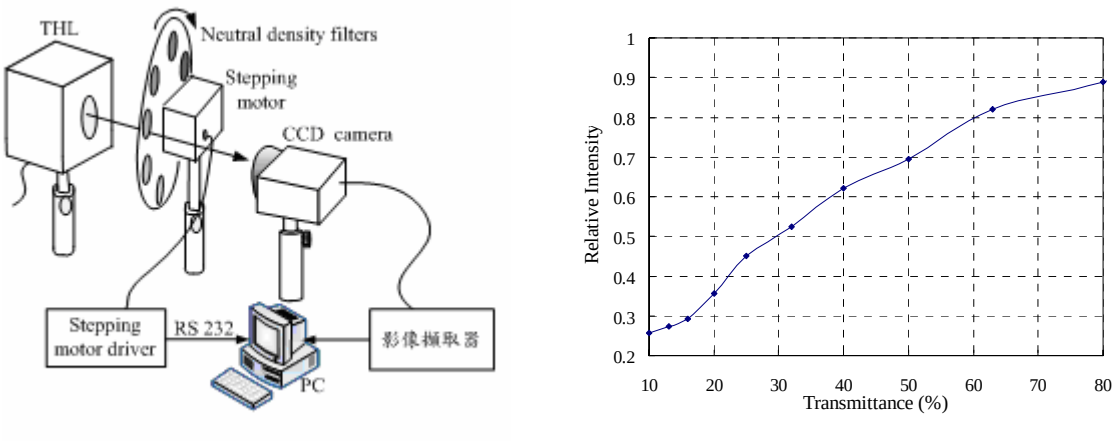
首先要對在實驗中所使用的黑白CCD攝影機做線性度校正，若CCD對光強度的響應為非線性則會影響到實驗結果的準確性，因此必須要先做攝影機

線性度量測，若量測結果為非線性則必須要做軟體上的校正。而CCD攝影機的線性度量測實驗主要是利用不同穿透率的neutral density filters (ND filter)來做量測[]，ND filter的規格如表1所示，而實驗架構如圖4.4(a)所示，量測方法主要是將光源透射至不同穿透率的ND filter，如表1所示：

表 4.1 ND filter 規格列表

編號	密度	穿透率(%)
1	0.1	80
2	0.2	63
3	0.3	50
4	0.4	40
5	0.5	32
6	0.6	25
7	0.7	20
8	0.8	16
9	0.9	13
10	1.0	10

藉由不同規格之 ND filter 來產生不同光強度之測試光源（強度間的變化為線性），接著使用 CCD 攝影機擷取影像，測得 CCD 對於不同光強度的響應值。圖 4.4 (b)為實驗結果，從圖中可得知此 CCD 攝影機的線性度十分良好，對實驗結果的影響程度並不大，在此可忽略不計。

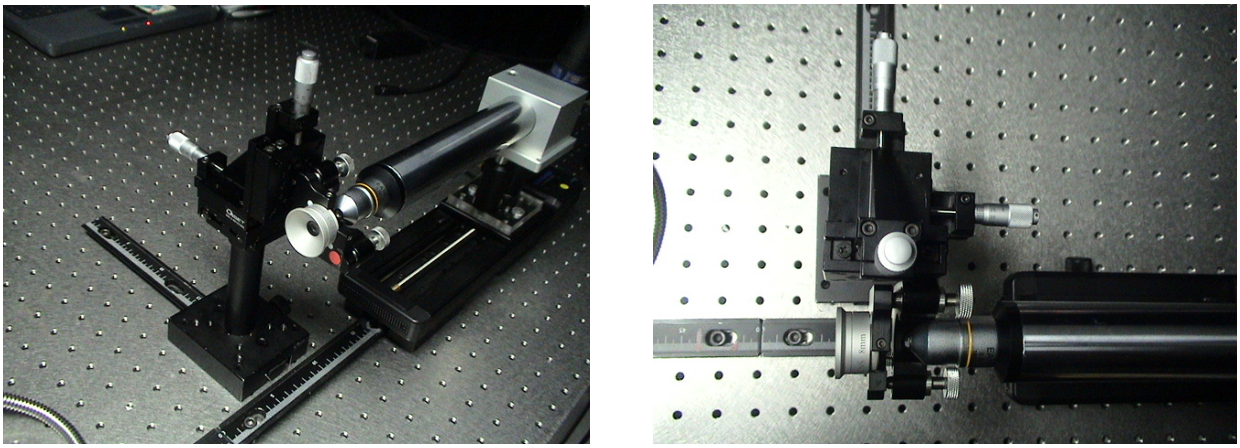


(a) (b)

圖 4.4 (a) CCD 攝影機線性度量測架構圖及其(b)量測結果

(b) 光機校正

本論文的目的主要是針對現有三種擴散函數之量測方法做分析與比較，為了有效的比較各種量測方法，在實驗上需控制許多變因，讓三種方法的實驗基於相同條件下做比較。諸多變因中，首先要克服的就是光機的穩定性，其不僅會影響實驗的架設便利與否還會影響到實驗的量測結果，因此，在此利用三軸可動機構以及小尺寸的面鏡夾具來固定 CCTV 鏡頭,藉此有效的校準光機的偏差，提高量測系統的穩定性，該機構如圖 4.5(a)、(b)所示。



(a) (b)

圖 4.5 自組裝三軸可動的 CCTV 鏡頭夾具(a)斜視圖(b)上視圖

除此之外，為了使量測透鏡時每次量測的視場點皆為光軸點，在此利用自準直儀和雷射光輔助作校正。

4.3.1 點擴散函數方法實驗及其結果

如圖 4.6 所示,為 PSF 實驗的實際照片,在此使用孔徑為 10μm 的 pinhole 來做點光源的圖樣以及焦距 30 公分的透鏡來做為準直，而待測透鏡為焦距 8mm 的 CCTV 鏡頭。點擴散函數的實驗流程，依照前述的圖 4.3 流程進行；首先需利用自準直儀做平行光的校正，如圖 4.7 所示為平行光校正的實驗照片，接著將待測透鏡移入量測系統中，並將在線性移動平台上的自準直儀裝

上 10 倍的顯微物鏡，接著調校線性移動平台和三軸可動鏡頭夾具，找到待測透鏡（CCTV）上的量測點，並獲得最清晰的影像。在上述圖 4.3 流程中要特別留意步驟 2、3、5 和 6，因為若是影像沒有對焦的情況下，會降低待測透鏡的 MTF 值，而影響量測的準確度，因此要特別注意不論是在打無窮遠處的平行光時、或是擷取待測透鏡的影像時，都必須要確認是否是在對焦的情況下。

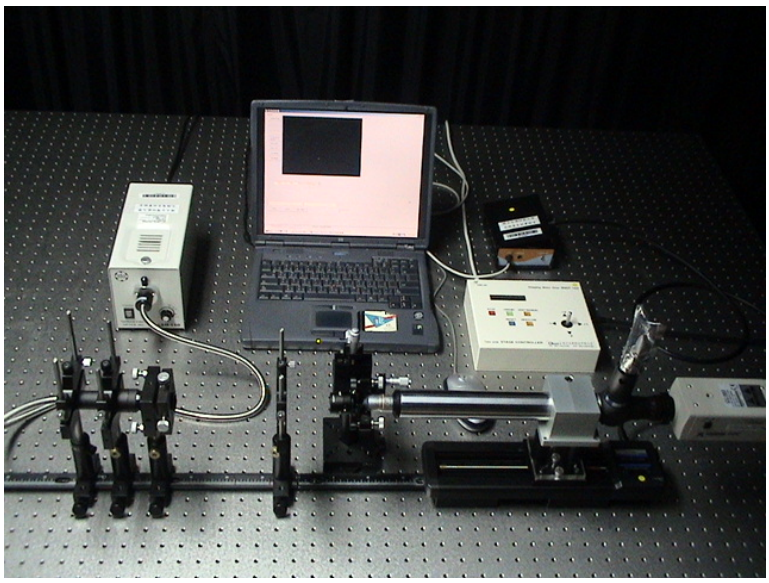


圖 4.6 點擴散函數實驗架設圖

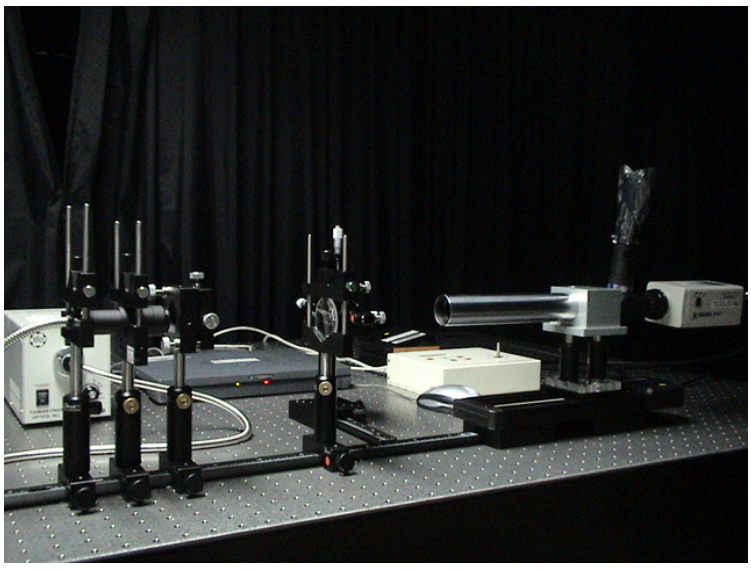


圖 4.7 利用自準直鏡校正平行光

至於影像數據處理部份，則根據前述學理畫出本實驗的數據分析流程圖，如圖 4.8 所示。在此要特別註明一點，因前數學式(4-1)的假設，所以自準直儀和顯微物鏡的 MTF 值均趨近於一，故在計算的流程中可以忽略。

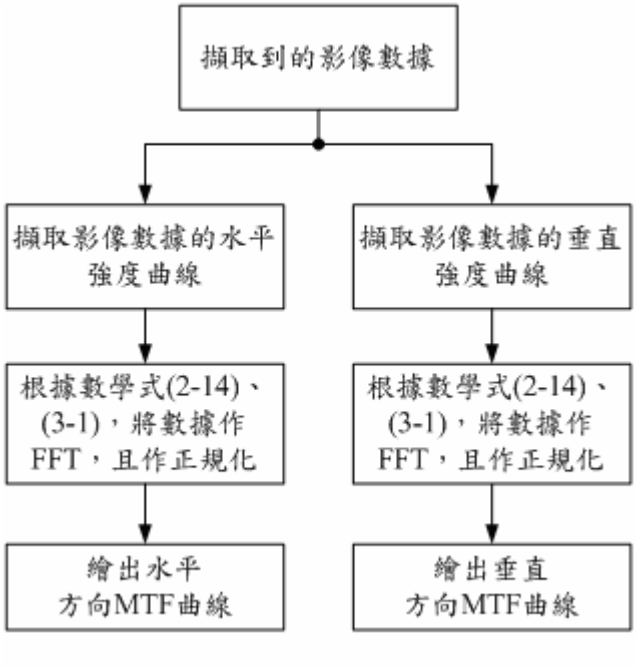
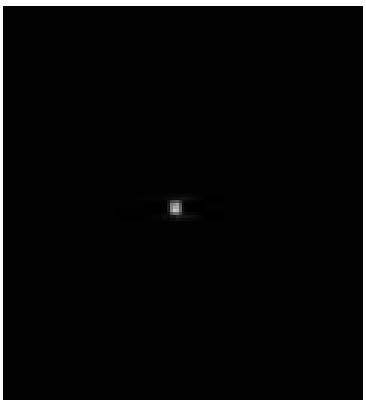
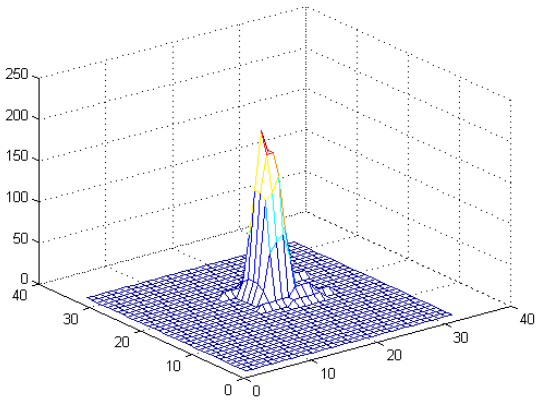


圖 4.8 點擴散函數數據分析流程圖

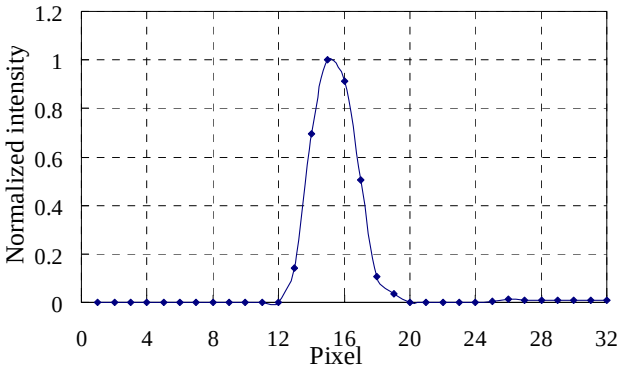
因為此實驗是使用點擴散函數的量測方法，故在流程圖 4.8 中列出了在前述幾個重要演算數學式(2-14)及(3-1)來推算 MTF 值。而圖 4.9(a)至圖 4.9(f)為實驗量測數據與經分析後的數據，其中圖 4.9(a)、(b)分別為實驗數據影像及 3D 強度分布圖；此外在本實驗中，只針對透鏡鏡心點（光軸處）做量測，主要考慮水平與垂直的 MTF 數據。故在資料擷取上，只針對特定的光強度剖面數值作分析，如圖 4.9(c)與(d)所示，其分別為水平及垂直方向之強度分布曲線，而圖 4.9(e)和(f)則是對應於圖 4.9(c)和(d)之 MTF 計算結果。



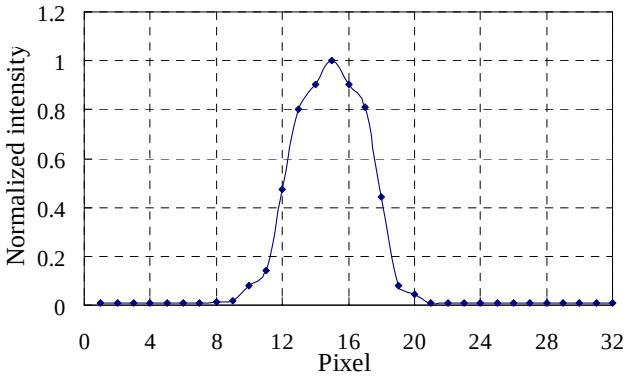
(a)



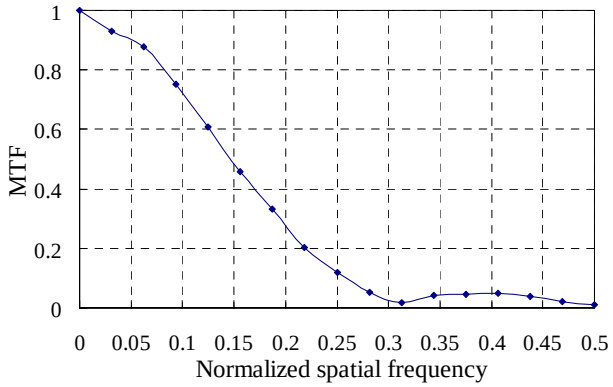
(b)



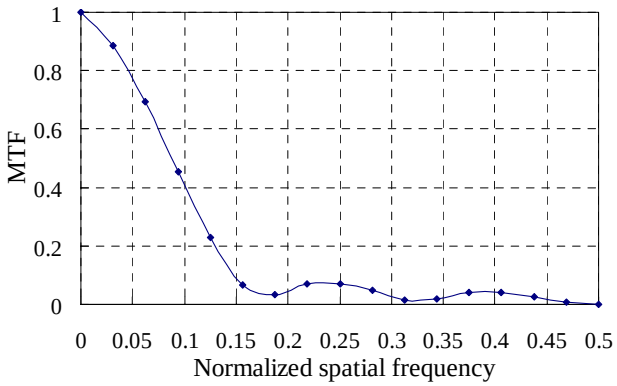
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 4.9 點擴散量測方法之實驗結果，(a)實驗數據影像，(b)3D 強度曲線，(c)水平方向強度曲線，(d)垂直方向強度曲線，(e)水平方向之 MTF 曲線，(f)垂直方向之 MTF 曲線

4.3.2 線擴散函數方法實驗及其結果

如圖 4.10 所示，為 LSF 實驗架設照片，與前述 PSF 方法不同處，是在於無窮遠處的平行光架設是直接利用另一套自準直儀來建構，此準直儀中內含寬度為 10μm 的十字線的狹縫，並利用一焦距為 30 公分的透鏡做準直，產生一似無窮遠處的線光源，藉此來做此實驗中的測試物光源。其他部分的元件規格和 4.3.1 節中談及的 PSF 實驗皆相同，待測的透鏡亦為同一個 CCTV 鏡頭。

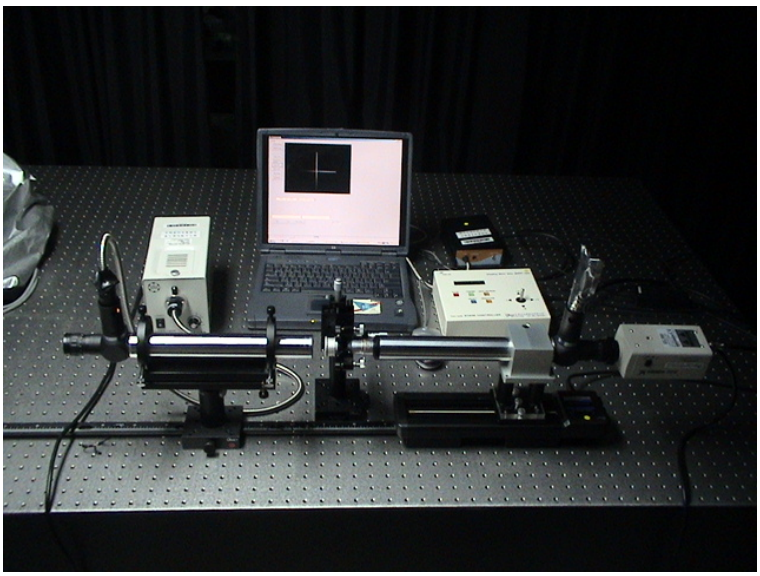


圖 4.10 線擴散函數實驗架設圖

本實驗的實驗步驟參照圖 4.3 的流程進行，實驗時所要注意的步驟和前述的 PSF 均為相同，而圖 4.11 為本實驗數據分析流程圖，在此要特別注意的是使用線擴散函數方法所測的 MTF 資訊只有針對某特定方向（即像平面上影像的擴散方向），而並非與前述之 PSF 實驗一樣，可以得知透鏡在該點四面八方的資訊，LSF 只可測得某一維方向的 MTF 值。

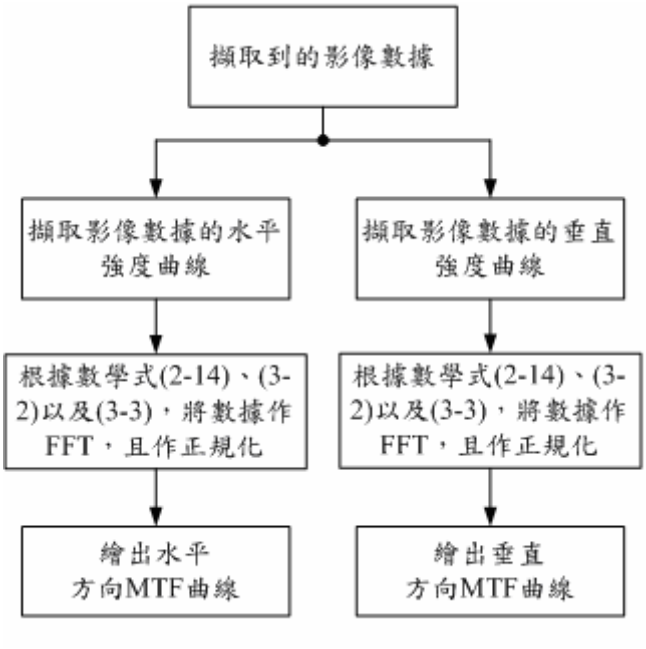
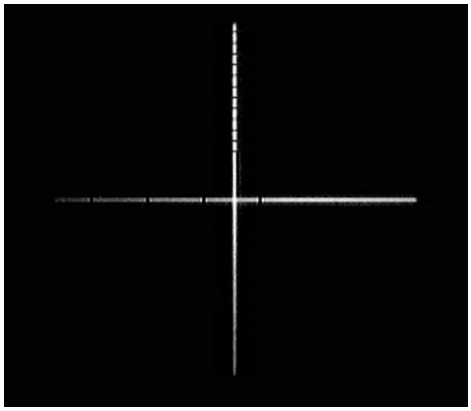
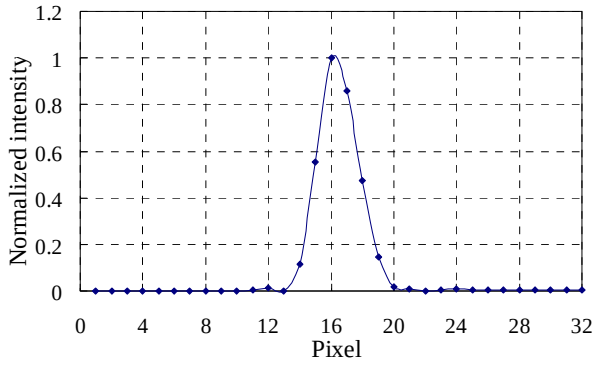


圖 4.11 線擴散函數數據分析流程圖

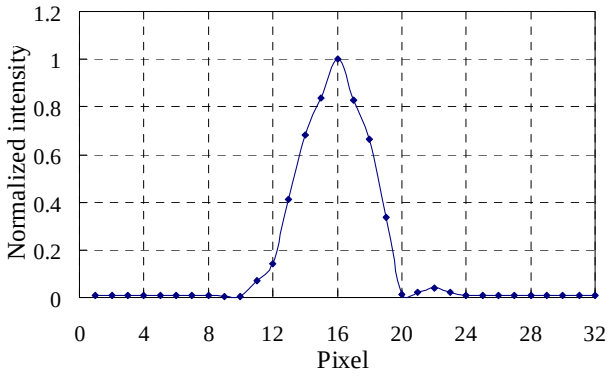
本實驗所考慮的情況和前述的點擴散函數量測實驗相同，皆根據數學式(4-1)所假設的情況，而主要是以(2-14)、(3-2)以及(3-3)等數學式子來做 MTF 值的估算。圖 4.12(a)至圖 4.12(e)，為 LSF 方法之實際數據以及其 MTF 計算的結果，其中圖 4.12(a)為實驗擷取的影像，圖 4.12(b)、(c)分別是改變狹縫擺設方向後，於待測透鏡鏡心上所測得之水平與垂直方向的強度曲線圖，而圖 4.12(d)、(e)分別為對應圖 4.12(b)與(c)計算後的 MTF 曲線。



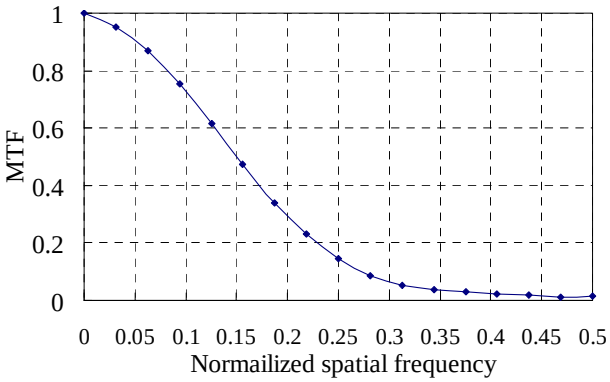
(a)



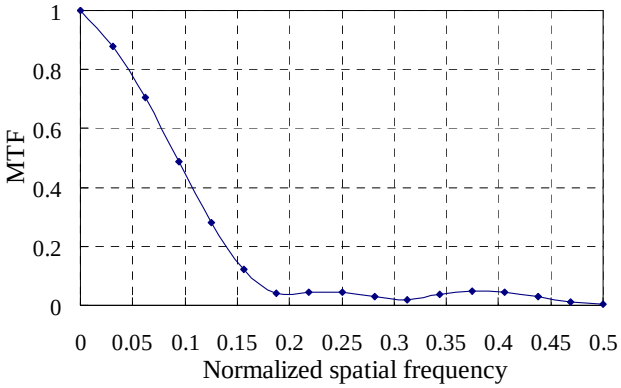
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 4.12 線擴散量測方法之實驗結果，(a)實驗數據影像，(b)水平方向強度曲線，(c)垂直方向強度曲線，(d)水平方向之 MTF 曲線，(e)垂直方向之 MTF 曲線

4.3.3 邊緣擴散函數方法實驗及其結果

圖 4.13 為邊緣擴散函數的實驗架設圖，邊緣擴散函數的實驗架設方法與前述的 PSF 實驗大致相同，所使用的大部分元件規格也和 PSF 的實驗相同，待測透鏡亦為相同之 CCTV 鏡頭，唯一不同點是在於本實驗係利用可變刀邊狹縫來當作測試的圖樣，將刀邊狹縫的寬度調整至適合尺寸來量測透鏡的邊緣擴散函數。此實驗的流程亦參照前述圖 4.3 的實驗流程來進行實驗架設。

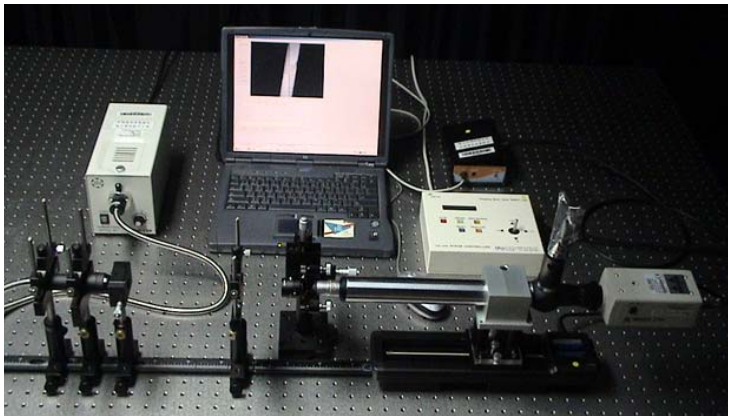


圖 4.13 邊緣擴散函數實驗架設圖

在此要特別注意的是做完水平方向的邊緣擴散實驗後，必須將可變的刀邊狹縫旋轉 90 度後，再次的進行圖 4.3 的實驗流程，方能夠取得垂直方向的邊緣擴散函數數據。

本實驗所假設的情況和前述兩個實驗皆相同（皆假設(4-1)式的成立），故本實驗的數據分析流程如圖 4.14 所示，實驗數據的分析與計算主要是先利用微分的數學操作（即上述(3-5)式）計算出 LSF 後，接著就和前述的 LSF 一樣，使用(2-14)、(3-2)以及(3-3)式來推算出待測透鏡之 MTF 數值。

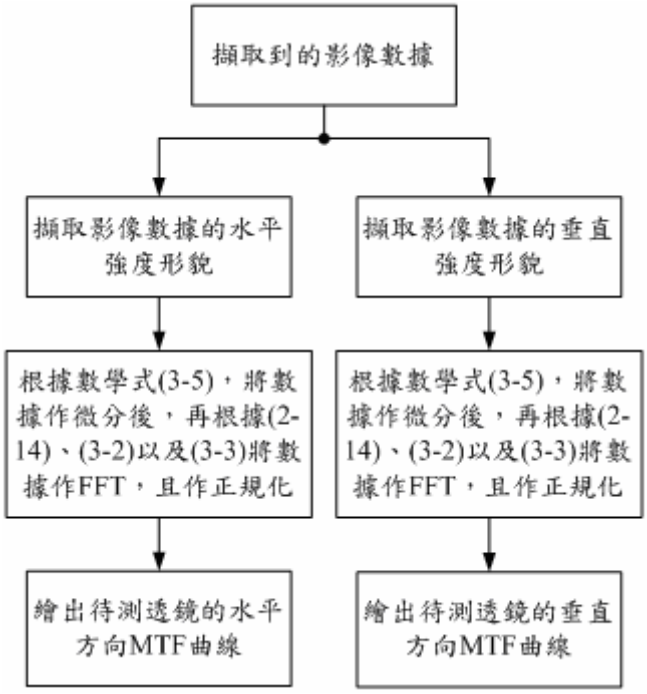
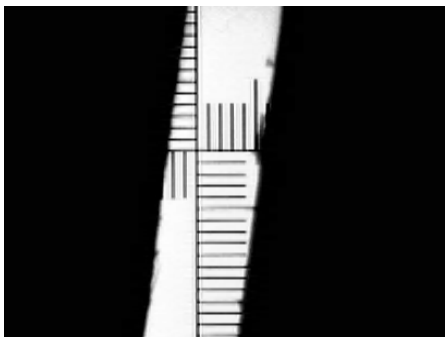
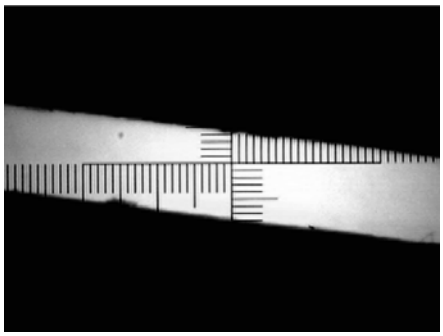


圖 4.14 邊緣擴散函數數據分析流程圖

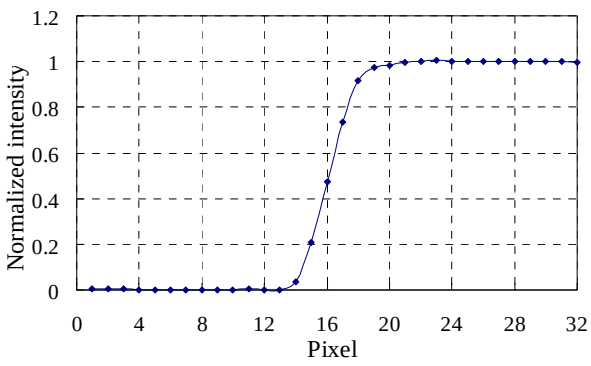
而圖 4.15(a)至圖 4.15(f)，為 ESF 方法之實驗數據以及 MTF 值推算的結果，其中圖 4.15(a)、(b)為實驗擷取的影像圖，圖 4.15(c)、(d)分別為影像數據的水平方向及垂直方的強度曲線圖，而圖 4.15(e)與(f)分別為對應圖 4.15(c)與(d)計算後的 MTF 曲線圖。



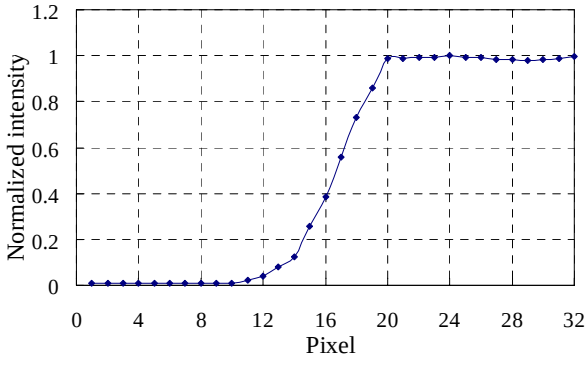
(a)



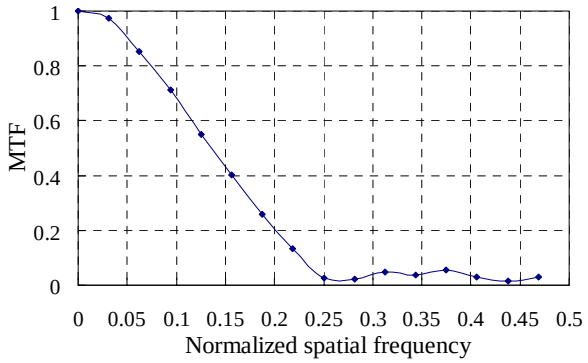
(b)



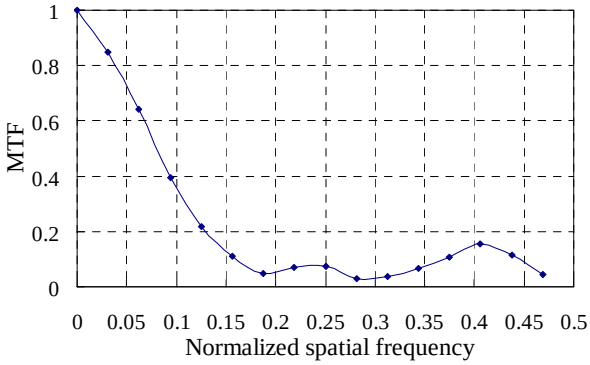
(c)



(d)



(e)

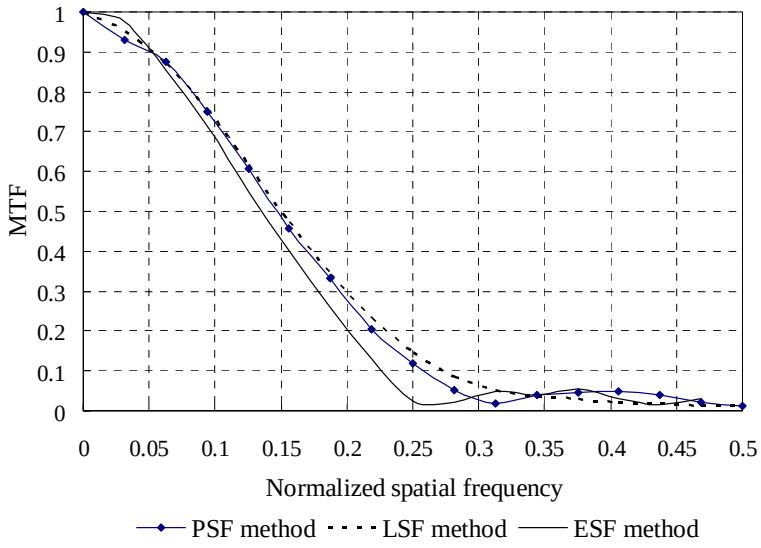


(f)

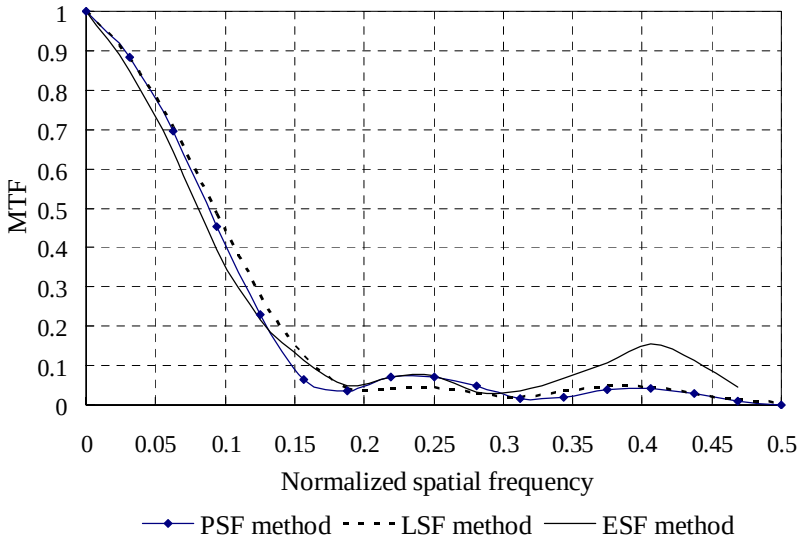
圖 4.15 邊緣擴散量測方法之實驗結果， (a)實驗數據影像（水平），(b)實驗數據影像（垂直），(c)水平方向強度曲線，(d)垂直方向強度曲線，(e)水平方向之 MTF 曲線，(f)垂直方向之 MTF 曲線

4.3.4 比較三種擴散函數方法之量測結果

最後將點擴散函數、線擴散函數以及邊緣擴散函數等三種 MTF 量測方法的量測結果做統整與比較，其水平與垂直方向之 MTF 量測值，分別如圖 4.16(a)、(b)所示：



(a)



(b)

圖 4.16 三種擴散函數量測結果(a)水平與(b)垂直方向

第五章 結論與未來工作

從實驗過程以及結果中得到以下結論：

1. 雖然從4.16(a)、(b)可以明顯的得知此三種擴散函數的量測結果十分相近，但此結果不符合理論，因為根據理論（(3-21)式）所示，使用點擴散與線擴散函數量測時必須要做光源尺寸的修正，而在第四章所顯示的實驗結果（PSF與LSF）在未做此修正下，其結果卻相近，根據理論在未加修正前此三種方法量測結果應不會相近；而會導致此三種量測方法的量測結果會彼此相近的主因，可能出自於此三種量測結果皆受限於CCD感測器本身的MTF值，其量測結果的可信性度還需更進一步的去確認。

2. 以點擴散函數和線擴散函數量測方法來量測MTF，此兩者在實驗架設上相較於邊緣擴散函數量測方法來的困難許多，其存在著訊雜比過低的問題。此外，在使用點/線擴散函數時，其需要有高精度的pinhole/slit才能有效的做光源尺寸的修正，以提高量測的精準度。相較之下，使用邊緣擴散函數方法則不需要高精度的物光源圖樣，且其具有較高的訊雜比。

在此我們根據學理去建構了點擴散函數、線擴散函數以及邊緣擴散函數等低成本的取像模組之MTF量測系統雛形，然而不可否認的，我們最後實現的雛形並非完美，仍有許多待改進的地方，因此我們將這些待改進處放在未來的工作，重點如下：

1. 扣除量測結果中系統本身每個元件的MTF值(例如:自準直儀、顯微物鏡以及CCD等)，以提升該系統的精準度於量測待測透鏡之MTF值[1]。

2. 在使用點擴散函數以及線擴散函數量測時，能夠做光源尺寸的修正以求得更精準的MTF量測值。

3. 光機的穩定性改善，在實驗的過程中發現光機穩定度對實驗進行有很大的困擾，此外亦會影響到實驗量測結果的精度，因此，光機的穩定度是必須要做改善。

參考文獻

[1] Glenn D. Boreman, *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-optical systems*, 2th ed., SPIE, Washington, pp. 69–107, 2001.

[2] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 137–154, 1996.

[3] R. R. Shannon, *The Art and Science of Optical Design*, Cambridge U. Press, Cambridge, UK, pp. 265–333, 1997.

[4] C. S. Williams and O. A. Becklund, *Introduction to the Optical Transfer Function*, Wiley, New York, pp. 149–158, 1989.

[5] http://www.trioptics.com/

[6] http://www.oeg-messtechnik.de/

[7] http://www.optikos.com/

[8] H. Fujita *et al*, "A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography, " *IEEE. Med. Img.*, vol. 11, no.1, 1992

[9] E. Samei *et al*, "Comparison of edge analysis techniques for determination of the MTF of digital radiographic systems, " *IOP.*, 2005

[10] W. Hon-Sum, "Effect of knife-edge skew on MTF measurements of CCD imagers employing a knife-edge," *Opt. Eng.*, 30, pp. 1394–1398, 1991.

[11] H. J. Pahk *, Suk Won Lee, Dong Sung Lee, "Computer aided measurement and compensation system for focal length of lenses in camera manufacture based on the MTF performance using the line CCD sensor" *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, pp.1493–1511, 2001.

[12] A. Daniels, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and E. Sapir, "Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the

visible and infrared region," *Opt. Eng.*, 34, pp. 860-868, 1995.

[13] Sampo M. Backman and Anssi J. Makynen, "Random target method for fast MTF inspection," *JOSA*, 2004

[14] E. Levy, D. Peles, M. O. Lipson, and S. G. Lipson, "Modulation transfer function of a lens measured with a random target method," *Appl. Opt.*, 38, pp. 679-683, 1999.

[15] J. C. GRISOLIA, "A Device for the optical transfer function measurement," J. *Optics (Paris)*, 1985, vol. *16,* no 2, pp. 77-81.