

複數刀口演算法之鏡頭品質量測

Multi-Edge Lens Quality Measuring System

陳永祥、蔡和霖、許家偉、郭慧君

Yung-Hsiang Chen, Ho-Lin Tsay, Chia-Wei Hsu, Hui-Jean Kuo

儀科中心開發以單軸複數刀口演算法進行鏡頭品質量測方法，係利用準直儀產生光源，將光源照射至特殊光學組件。移動單軸馬達對待測鏡頭進行對焦量測，經由感測器取像得到成像於軸上及離軸之數個刀口測試圖案。並讀取成像圖案資料傳給電腦，利用數位影像處理方式，將成像圖案由刀口演算法處理，求出物理上的光學調制轉換函數量測值。

A tilted edge algorithm was used to develop a measuring machine for imaging lens characteristics. We used an infinite conjugate setup and folding of collimating beam design. The device measured an imaging optics in several different field angles simultaneously. This measurement can be performed in a single snapshot, which is often less than one second. The dimension of this measurement setup up to be as small as a desktop instrument.

一、前言

鏡頭 MTF 量測方法可分為直接與間接量測。直接量測方法採用週期性圖樣，經由鏡頭成像，分析其成像而得，這種圖樣需由多個週期組成，且各自為單一空間頻率測量。若為多個空間頻率測量，圖樣須包含多個週期性圖樣。另一種方式為間接量測，經由鏡頭成像，將成像分析並取其傅立葉轉換 (Fourier transform)，取得各空間頻率之鏡頭傳遞係數，從而得出傳遞函數之曲線。採用之圖樣可為任意形狀、任意大小，最常見的有點、線與邊界等圖樣。這些圖樣函數都可利用傅立葉級數 (Fourier series) 展開，經由鏡頭成像之後，分析其成像並利用傅立葉轉換，可以得出各空間頻率之傳遞係數，進而量測出鏡頭 MTF 曲線。

若就量測裝置而言，可分為光源與感測器兩個部分。光源投射圖樣作為待測鏡頭之物，感測器分析待測鏡頭之成像。光源與感測器可以透過模組化設計使其各自獨立，互相搭配以因應各類鏡頭量測所需。光源方面可分為有限距離與無窮遠物兩種，有限距離利用光源投射有限距離圖樣於待測鏡頭，作為待測鏡頭之物。這種投射圖樣有多種形式，如 USAF1951、star pattern 及正弦波圖樣等⁽¹⁾，為單一或為多個單一空間頻率量測用；點、線與邊界等圖樣透過傅立葉轉換，可做為 MTF 曲線量測之用。另一種為無窮遠物。投射器將圖樣投射於無窮遠處，作為待測鏡頭之無窮遠物，其圖樣與有限遠物相同，具有多種選擇，準直儀最常被用於投射器。而準直儀分為兩類：折射式準直儀與反射式準直儀，折射式準直儀用於可見光波段量測，反射式準

直儀用於可見光與紅外光波段量測。可視量測波段採用不同形式之準直儀。除了投射器之外，光源之光譜組成決定量測系統之可量測波段範圍，透過加裝濾光片的方式可以調整量測波段範圍。

隨著製程發展，平面影像感測器的可靠度提升，用於取得待測鏡頭成像資訊的感測器也從單感測器、線感測器，轉為二維平面影像感測器。最大的誘因為可以同時量測兩個方向的成像品質。光學鏡頭設計時，將成像品質分為軸向與切線兩個方向，成像品質設計曲線便有所不同。對於離軸成像點的測量，兩個方向都要進行測量。利用二維平面感測器可以同時擷取這兩個方向之成像品質，進行同時測量。平面感測器的響應均勻性是不能用於量測鏡頭成像品質的關鍵。感測器的取樣頻率是否足夠也是一個考慮因素。若感測器取樣不足時，必須利用種種方法提高其取樣頻率。最常用的是於感測器前加一放大物鏡，利用此物鏡將成像放大至幾倍至幾十倍，以此提高其感測器取樣頻率。此種作法必須考慮物鏡對於量測值的影響，因此並非普通物鏡即可，必須經由波前誤差檢查確認才行。

然而物鏡將成像放大，同時也將其取像範圍縮小，進行多像點測量時必須多次精準地移動感測器之位置，使量測時間大幅增加。若只用感測器不加物鏡則可以涵蓋所有的成像點，卻會有感測器取樣不足的情況。若於只用感測器的架構上，運用技術增加其取樣頻率，如此感測器可以涵蓋所有量測成

像點，同時避免感測器取樣不足問題，只要同時投射多個圖樣，即可同時進行多點量測。增加感測器空間取樣頻率的最直接方法就是降低感測器間距，舉例來說，感測器間距從 $10\ \mu\text{m}$ 降為 $5\ \mu\text{m}$ 時，其取樣空間頻率從 $100\ \text{lp/mm}$ 升高為 $200\ \text{lp/mm}$ 。理論上，只要一直降低感測器間距，就可以找到一個足夠取樣空間頻率。然而降低感測器間距，也同時降低單一感測器畫素面積及其響應。這必須一再增加光源強度才可應付，而光源卻無法無限制地增加其強度，這表示建構量測系統，依據光源強度，可以找到一個相匹配的感測器間距。這些匹配而得之感測器間距所代表的空間取樣頻率，無法滿足待測鏡頭之成像需求。若要直接用感測器進行鏡頭成像，必須運用內插的方式來增加其取樣頻率，最直接的內插方式是微掃描，也就是利用機構控制感測器進行次畫素的移動。這種方法可以根據取樣空間頻率需求進行一系列次畫素取像，透過影像重組來進行次畫素內插。採用這種方式必須機構精準，進行多次取像，並進行影像重組。除了量測所耗時間較多之外，感測器機構至少必須可以進行三個方向精準移動等基本要求。這些需求與使用放大物鏡的情況類似。另一種方法利用所謂空間取樣，配合特別圖樣，運用單張影像內容進行內插，提高感測器取樣頻率，降低量測時間，以達到快速量測的目的。這種量測方式可將移動軸數目降為 1，降低量測機台重量與體積以及成本。

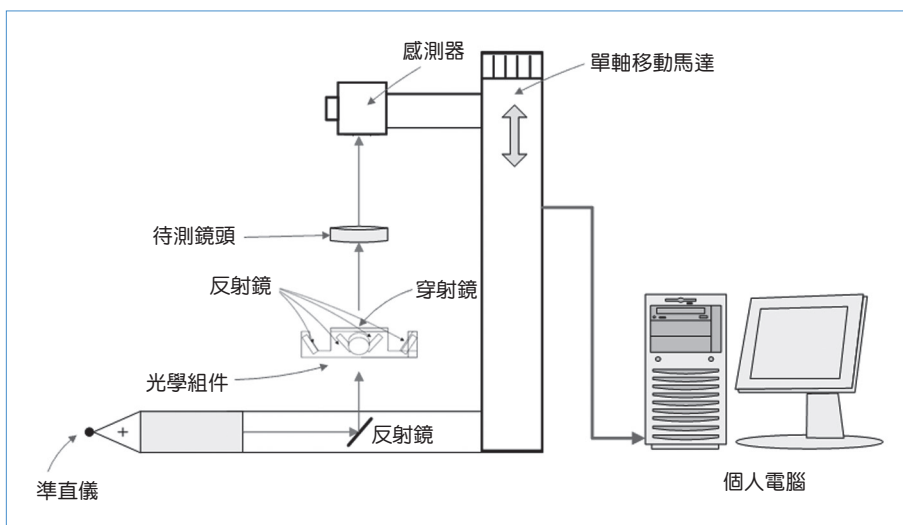


圖 1. 視訊 MTF 機台系統架構圖。

在有限距離的情況下，只需製作一個含有多個圖樣的標靶，並將其投射至預定位置即可。無限遠物的情況比較複雜，用於投射圖樣的準直儀只投射單一方向的光，對於無窮遠物而言，多點量測代表多個方向的平行光，代表多個準直儀。儀科中心採行新的概念⁽²⁾，運用一個準直儀，投射出多個方向的平行光，作為量測系統的多點目標。如此於無窮遠物的量測情況下，只需一個電動滑軌即可進行多點測量，大幅縮小其量測時間。

本文提出以單軸複數刀口演算法進行鏡頭品質量測。該方法包含準直儀、測試成像圖案、單軸馬達、待測鏡頭及影像感測器。係利用準直儀產生光源，將光源照射特殊光學組件，移動單軸馬達對待測鏡頭進行對焦量測，由影像感測器取像得到成像於軸上及離軸之數個刀口測試圖案。最後，讀取成像圖案資料並傳給電腦，利用數位影像處理方式將成像圖案由刀口演算法處理，求出物理上的光學解析調制轉換函數 (modulation transfer function, MTF) 量測值。以下將探討系統架構、檢測方法及實驗結果。

二、系統架構

圖 1 為 MTF 機台實驗架構示意圖，係利用準直儀產生光源，將光源照射特殊光學組件，移動單軸馬達對待測鏡頭進行對焦量測，由影像感測器取像得到成像於軸上及離軸之五個刀口測試圖案。利用數位影像處理方式將成像圖案以刀口演算法處理，求出物理上的光學解析調制轉換函數量測值。表 1 為系統規格說明。

表 1. 系統規格。

系統規格	數據
最大量測空間頻率	500 lp/mm
最小後焦長	0.1 mm
最大入瞳直徑	10 mm
量測精度	± 4%
量測重複性	2%
儀器尺寸	45 cm × 45 cm × 65 cm (L × W × H)
重量	40 kg
電源	110 V/60 Hz

圖 2(a) 至 (c) 為光學組件結構圖，圖 2(a) 為光學組件結構之俯視圖，圖 2(b) 與 (c) 為光學組件結構之側視圖。本系統利用準直儀裝置產生光源，並將光源照射由一個穿透鏡及多個鍍膜反射鏡構成的光學組件，其中穿透鏡用於產生軸上刀口測試圖案，鍍膜的反射鏡用於產生離軸刀口測試圖案。穿過待測鏡頭成像多個複數刀口測試圖案，利用移動單軸移動裝置對焦點於取像裝置上。利用多個反射鏡改變離軸上的光源入射角度。

圖 3 為開發的 MTF 機台實體照片圖，係將準直儀、測試成像圖案、單軸馬達、待測鏡頭及影像感測器整合為一鏡頭品質量測系統。主要利用數位影像處理方式將成像圖案由複數刀口 (multi-knife edge) 演算法處理，比對鏡頭品質 MTF 量測值。整個實驗模組置放於機台內部，外面設計機殼包裝，具有 ON/OFF 開關及緊急開關。

圖 4 為本文之鏡頭品質量測軟體人機界面程式，讓使用者即時看到所擷取出的影像畫面。人機

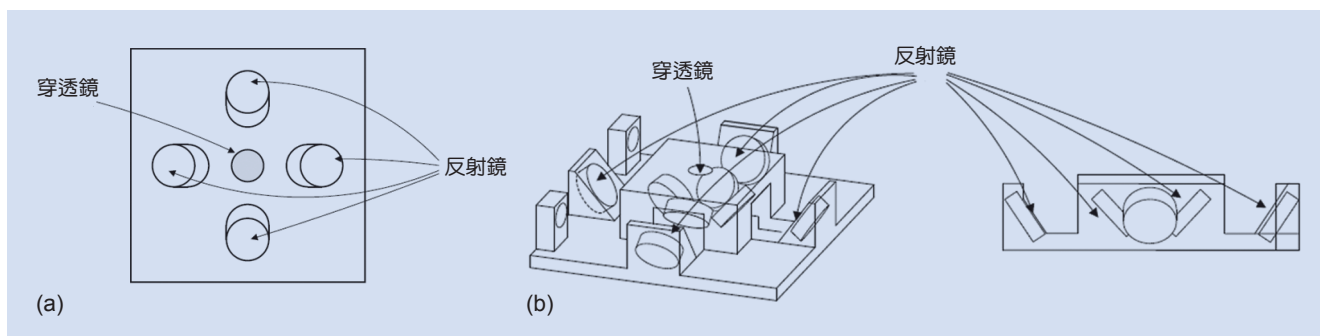


圖 2. 光學組件結構圖。

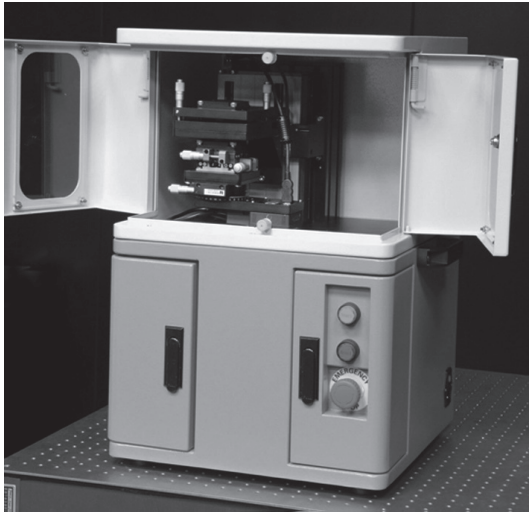


圖 3. 視訊 MTF 機台實體照片圖。

界面視窗的左上角設置有一「即時影像顯示區」，將影像感測器擷取的影像即時顯示。以單軸複數刀口演算法進行視訊鏡頭品質量測，可得到一個軸上 MTF 量測曲線及五個離軸 MTF 量測曲線顯示於左下角的人機界面視窗，並可由右上角的人機界面視窗查看此五條軸上及離軸的 MTF 量測曲線於特定空間頻率的數據。另外，右下角的人機界面視窗為顯示待測鏡頭之過焦曲線。

三、檢測方法

本系統以間接方法，透過分析成作品質進行量測，圖 5 為系統處理流程圖。單一斜向邊界影像，經過刀口演算法處理，求出物理上的光學解析調制轉換函數。本系統原型設定一個軸上及四個離軸之量測點。這些設定之量測點成像透過影像處理取得曲線，經由內插運算組成邊緣函數、曲線擬合、微分運算、線函數及傅立葉轉換等運算，求出物理上的光學調制轉換函數。

斜向刀口方法並非新創，本系統將其應用於多點量測上，利用平行處理方式，同時將各點量測結果擷取出來。圖 6 為複數刀口影像成像圖案圖示說明。圖 6(a) 表示系統可設定包含一個軸上及四個離軸之五個搜尋區域 (region of interest, ROI) 影像畫面。其中 ROI 影像畫面可針對水平取樣區域及垂直取樣區域做處理。圖 6(b) 為擷取影像，邊緣函數曲線由擷取影像資料內插運算而得，線擴散函數由微分處理得到。MTF 曲線進一步由傅立葉轉換運算得到。

以此流程得出之 MTF 曲線為包含感測器與待測鏡頭的 MTF 曲線。而感測器與待測鏡頭之各空間頻率的 MTF 值為相乘關係。因而測量將感測器

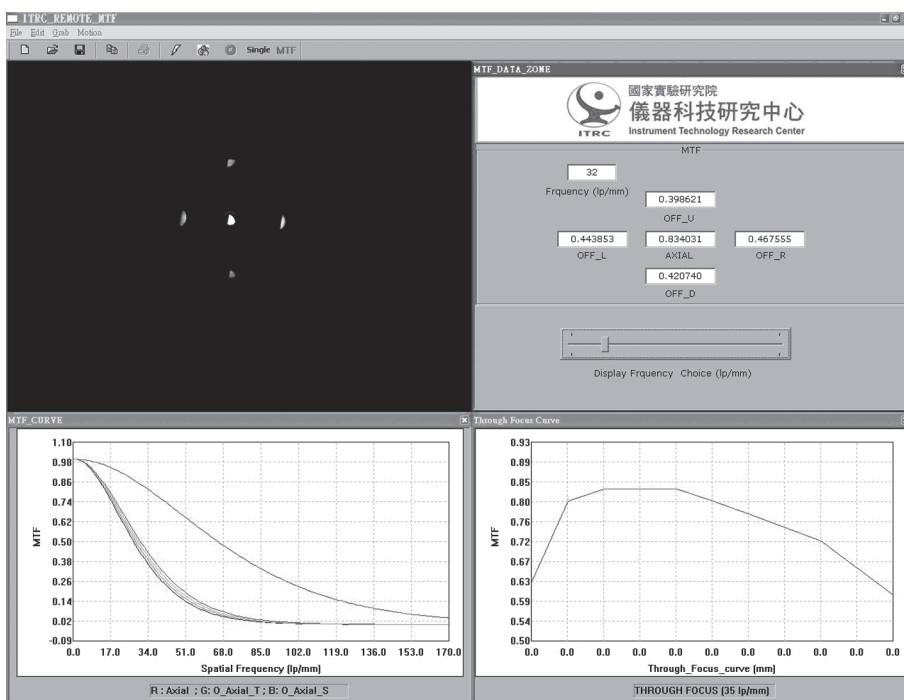


圖 4. 軟體人機界面程式。

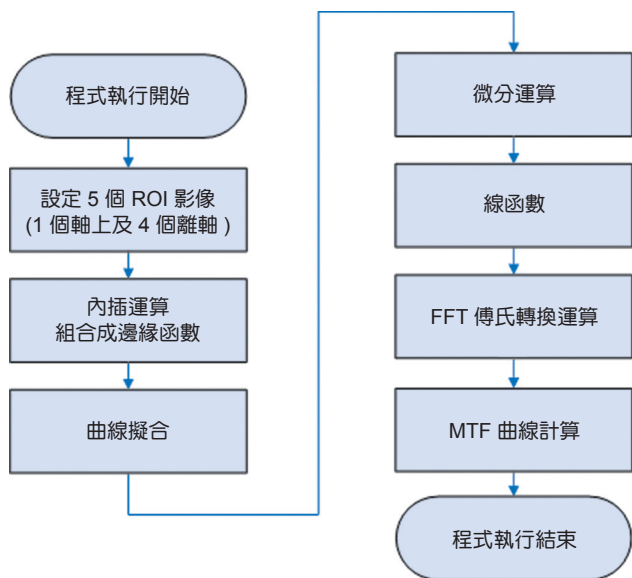


圖 5. 系統處理流程圖。

與待測鏡頭視為一待測模組，將其 MTF 曲線量出，再除以每個空間頻率感測器之 MTF 值即可得待測鏡頭之 MTF 曲線。本系統用相同的感測器進行測試，不同鏡頭的量測結果可以除以同一感測器 MTF 曲線即可得鏡頭之量測結果。

進行取像量測之前必須進行過焦曲線測試。藉由對特定空間頻率的 MTF 值的量測，界定最佳成像點並於此進行測量。過焦量測的流程與一般量測相同，差異在於選定特定空間頻率。結果也只有特定空間頻率的 MTF 值。

1. ROI 影像處理⁽³⁾

為了避免影像計算量過大，搜尋區域的設定須恰到好處。在輸入刀口影像成像圖案的影像平面上建立一個相對位置固定的搜尋區域 (region of interest, ROI)，即檢測刀口影像成像可能在影像平面出現的範圍。擷取矩形視窗影像，設定四點座標值來表示這個矩形擷取影像視窗，產生一個只含擷取區域的原始影像，並將區域中的刀口影像成像擷取出來。藉由訊號處理，分別就此五個量測點進行量測。

2. 刀口演算法

斜向刀口演算法 (knife edge method) 為一成熟的技術⁽⁴⁾，然而此演算法常因取得影像之雜訊而影

響量測結果。其關鍵在於刀口影像選取範圍及選取方式。量測系統採用的方法除了基本的斜向刀口法之外。其運算過程中於曲線擷取過程加入曲線擬合的步驟，此步驟有效地降低雜訊對於量測結果的影響。斜向角度也是刀口演算法的重點，量測系統採用固定的角度，此角度透過邊界量測而得，且為邊界曲線內插的依據。

3. 正投影量測

鏡頭量測常需考慮鏡頭使用的方式。舉例來說，成像鏡頭與投影機鏡頭使用的方式不同，成像鏡頭將景物投影到影像感測器上成像，投影機將小的影像投到大的屏幕上。量測成像鏡頭與投影機鏡頭的投影方向也不同。描述鏡頭成像品質的 MTF 曲線是屬於像平面的曲線。對於成像鏡頭而言，其像平面就在影像感測器所在的平面，影像品質分析應於像平面進行。這種直接於像平面分析影像品質的量測稱為正投影量測。反之，若在物平面分析影像的量測稱為逆投影量測。逆投影測量必須將物平面量測結果經由多一次的轉換到像平面，才可得其對應之像平面的成像品質。這個轉換透過理論進行，運用物像點對點關係進行轉換，並沒有實際通過鏡頭。如果是理想鏡頭，理想的點對點關係，其轉換可行，並不會影響量測結果。然而待測鏡頭通常非理想鏡頭，這多出來的物像轉換就影響量測結果。因此量測鏡頭品質，還是以正投影為量測方式。本系統用於量測成像鏡頭，以正投影的方式進行量測，直接分析像平面的成像品質，得成量測結果。

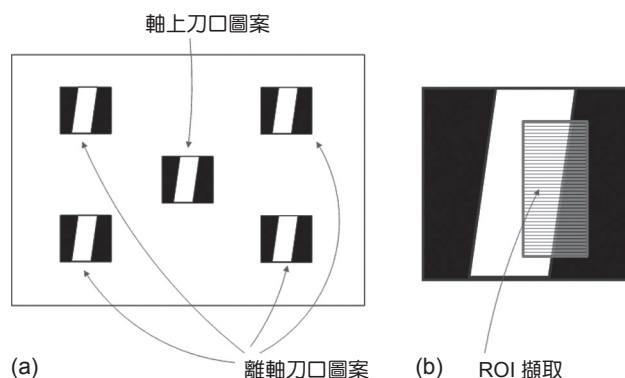


圖 6. 複數刀口影像成像圖案。

四、實驗結果

本系統工作方式為利用準直儀產生光源，將光源照射特殊光學組件。移動單軸馬達對待測鏡頭進行對焦量測，經由影像感測器取像得到於軸上及離軸之五個刀口影像。以下將分別就刀口演算法測試結果及鏡頭品質測實驗結果探討之。

1. 刀口演算法測試結果

圖 7 為刀口演算法之測試結果。圖 7(a) 為影像感測器取得的原始刀口影像畫面，經由 ROI 影像處理後可得到刀口 ROI 影像畫面。圖 7(b) 為 3D 空間的刀口 ROI 影像畫面，有利於刀口影像觀測。此刀口影像畫面為取得水平方向邊緣線輪廓，

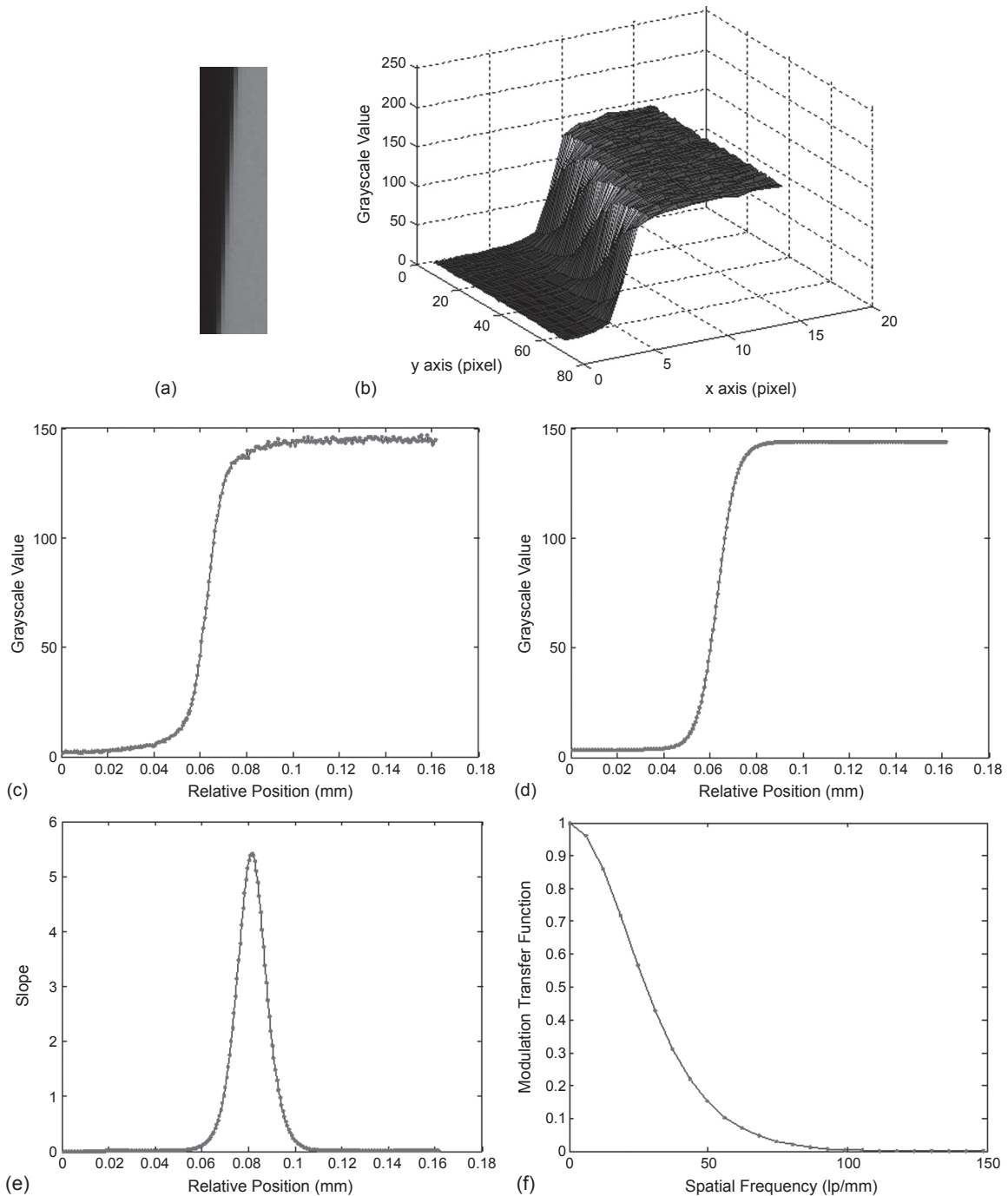


圖 7. 刀口演算法測試實驗結果。

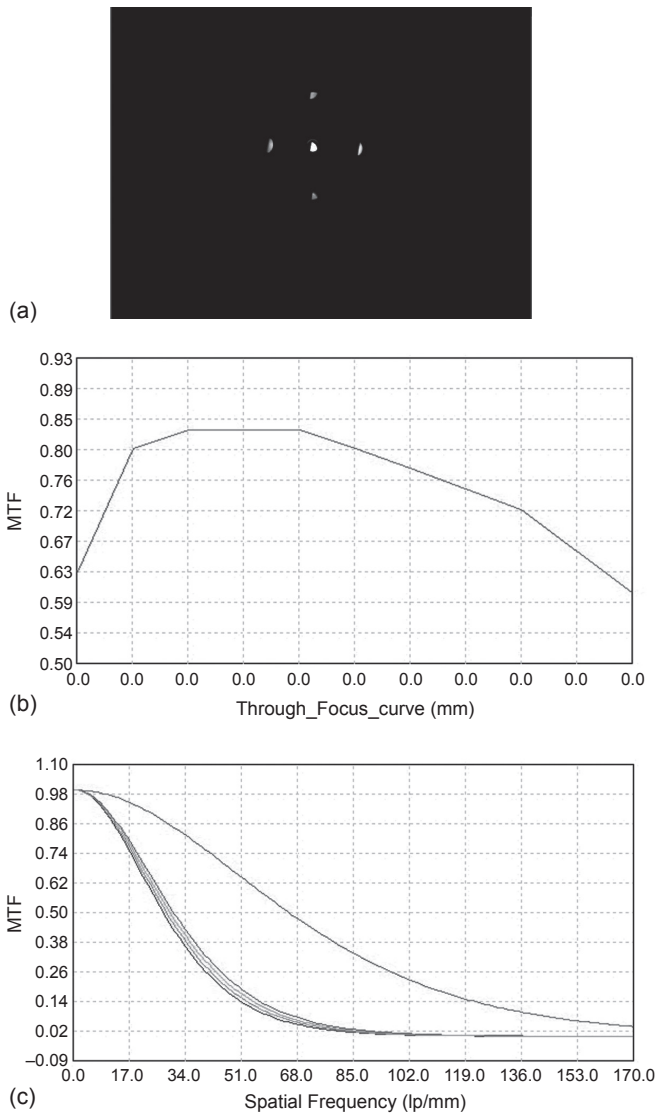


圖 8. 鏡頭品質量測實驗結果。

其內插運算組合成邊緣函數。計算此刀口影像後，可得到如圖 7(c) 所示。然而從圖 7(c) 得知此曲線存在不少雜訊，造成系統量測試誤差產生。為了解決此問題，設計一擬合曲線函數正規化此曲線，處理後如圖 7(d) 所示。經由微分處理，得到線函數如圖 7(e) 所示。最後，經由傅立葉轉換運算，得到 MTF 曲線，並將成像圖案由刀口演算法處理，求出物理上的光學調制轉換函數，比對計算量測值，並顯示於圖 7(f) 中。

2. 品質量測實驗結果

圖 8 為本系統之鏡頭品質量測實驗結果。圖 8(a) 為影像感測器取像得到成像於軸上及離軸之五個刀口測試圖案的原始影像，可設定包含一個軸上及四個離軸之五個 ROI 影像畫面。其中 ROI 影像畫面可針對水平取樣區域及垂直取樣區域做處理。針對一 ROI 影像畫面，取得多條水平方向邊緣線輪廓，其內插運算組合成邊緣函數。經由微分處理得到線函數，及傅立葉轉換運算得到 MTF 曲線。最後，可同時得到軸上及離軸對焦點的 MTF 曲線。圖 8(b) 為移動單軸馬達對待測鏡頭進行對焦量測過程量測的過焦曲線 (through focus curve)。最後，讀取成像圖案資料並傳給電腦，利用數位影像處理方式，將成像圖案由複數刀口演算法處理，得出軸上及離軸之 MTF 量測曲線。

五、結論

本文提出一個利用無窮遠物的鏡頭量測方法。採行新的概念，運用一個準直儀，透過專利設計之光學模組，投射出多個方向的平行光，作為量測系統的多點目標。如此於無窮遠物的量測情況下，只需一個單軸馬達即可進行多點測量。其關鍵技術係利用數位影像處理方式將成像圖案由刀口演算法處理，同時求出軸上及離軸之物理上的光學調制轉換函數量測值，可大幅縮短計算時間，有助於建立光學鏡頭相關量測儀器開發技術。

參考文獻

1. F. R. Sidney, *Applied Photographic Optics: Lenses & Optical Systems for Photography, Film, Video & Electronic Imaging*, Butterworth-Heinemann (1996).
2. 蔡和霖, 陳永祥, 江偉傑, 許家偉, 單軸複數刀口演算法之 MTF 量測裝置專利 (2010).
3. C. G. Rafael and E. W. Richard, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2nd ed. (2002).
4. G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*, SPIE-International Society for Optical Engine, 2nd ed. (1998).



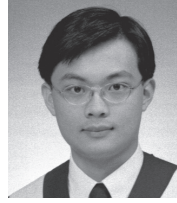
陳永祥先生為國立彰化師範大學電機工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Yung-Hsiang Chen received his M.S. in electrical engineering from National Changhua University of Education. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蔡和霖先生為國立中山大學電機工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Ho-Lin Tsay received his Ph.D. in electrical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



許家偉先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Chia-Wei Hsu received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



郭慧君小姐為國立中央大學天文碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Hui-Jean Kuo received her M.S. in astronomy from National Central University. She is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.