

# 刀口儀檢測之數位取像分析

自西元 1858 年傅科刀口儀 (Foucault knife-edge tester) 設計完成後，長久以來皆為鏡片製作時十分重要的檢測儀器，其不僅具有架設方便、精度高等優點，更重要的是可以提供非球面鏡表面之缺陷狀況。本文針對刀口儀的理論及量測方式作一探討，並進一步將數位影像擷取系統應用於其中，比較刀口儀與干涉儀之測試結果，以提供從事光學檢測人員做參考。

廖倌境、黃國政、王必昌、郭慶祥

## 一、前言

傅科刀口檢測技術是在西元 1858 年時由傅氏 (Foucault) 所提出，百年來雖然鏡片檢測方式推陳出新，但刀口儀仍為許多鏡片製造者所使用，特別是大型精密反射鏡面的檢測。主要原因為刀口儀僅需一組光源及刀片即可對於各式不同型態的鏡片進行表面品質檢驗。儘管某些測試中需使用到補償鏡或是反射鏡，但在所有的檢測方式中，其架設成本及簡便性仍是他法所無法比擬。在傳統檢測中，刀口儀採用肉眼進行影像辨識，雖然易於進行即時的檢測，但相對而言也容易因為個人判斷上的誤差及眼睛的疲勞而產生誤判，此時數位取像系統的迅速發展，即可提供我們在檢測時的一個解決方式。藉

廖倌境先生為國立臺灣大學機械碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

黃國政先生為國立臺灣大學機械博士，現任國科會精密儀器發展中心工程師兼課長。

王必昌先生為國立成功大學航太工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。

郭慶祥先生為大葉大學機械碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

由影像的數位化，不僅加速檢測流程的進行，並可克服上述的缺點，因此本文將數位取像系統引進刀口儀架設中，期望能提昇刀口儀檢測精度並提供一套量化的程序。刀口檢測法自傅氏發展後，Töpler (1864)、Ritchey (1904)、Hartmann (1908)、Wolter (1949) 等人也陸續以 Foucault 及 Schlieren 的理論及實驗方式為基礎發展出新型態的量測方式。此類型方法主要特徵為放置一遮蔽物或屏幕於待測波前收斂平面上，觀察待測波前經過調變後所產生的陰影圖形，並從中發現鏡片表面誤差。與其他鏡面檢測方式相較，刀口檢測法具有相當高靈敏度，幾乎所有鏡面上的高低起伏皆可藉由刀口調變成清晰的陰影圖形 (其誤差理論辨識值可達  $\frac{\lambda}{200\pi}$ )，也由於架設方式較其他光學檢測法簡便，故廣泛應用於鏡片製作時現場檢測。本文中將結合刀口儀及數位取像系統的優點，進行鏡片表面狀態分析，並與菲佐干涉儀 (Fizeau interferometer) 量測之結果作一比較。

## 二、常見的鏡面檢測技術

由於近代光學系統對於鏡片品質的要求逐漸提高，鏡片表面品質檢測也愈顯得重要。目前較常用

的鏡面檢測方式大略可分為表面輪廓法、光學干涉法、陰影成像法等三種，以下分別對其作一介紹。

### 1. 表面輪廓法

以輪廓儀進行量測，利用探針對待測物表面進行單點直線接觸（或光學掃描），檢測面形誤差。此種檢測法之優點是幾乎可量測各種表面，亦具有良好的精度。缺點則是一次僅能對於一直線作檢測，且若採接觸式量測則待測物表面有刮傷之疑慮，尤其是鍍膜後之鏡片更不適合使用輪廓儀進行量測。

### 2. 光學干涉法

光學干涉法是現行鏡面檢測方法中精度最高的檢測方式，係利用鏡面表面所造成的雷射光波前誤差與標準鏡片所產生的波前進行干涉，並藉由電腦軟體對於干涉條紋進行解析，以得到鏡面上的形狀精度。此種量測方式已廣泛運用於球面鏡的檢驗上，而在非球面鏡檢測應用上，較常見的有：

CGH（電腦全相片）：利用軟體模擬光路，並使用蝕刻或電子束（e-beam）的方式製作電腦全相片，其可將球面波前繞射成非球面波前，並以干涉儀進行解析，如圖 1 所示。

Null Lens（光學補償器）：利用一組補償性光學系統將球面波前折射為非球面波前，再利用干涉儀進行解析。圖 2 為 null lens 之光路架設方式。

這兩種測試方式都需要較精密的定位，故一精密移動平台在量測時是必需的。此外此類型量測方式的主要缺點為，一組電腦全相片或 null lens 僅可對應於一定規格範圍內的非球面型（conic constant 及曲率半徑），若光學系統中有一片以上的非球面鏡片，將會造成檢測成本大幅提昇。

### 3. 陰影成像法

陰影成像法包含刀口測試法（knife-edge test），光柵測試法（Ronchi test）等，其特徵為觀察鏡面成像陰影即可判定鏡面品質之優劣，故具有檢測速度快、便於使用及架設等優點，且對於圖形的解析也較為直覺，方便鏡片製造者作即時的修正，但相對來說，亦較為依賴操作人員的操作經驗。

但隨著數位影像系統的進步，影像擷取將不再

僅依賴肉眼，而可交由 CMOS 或 CCD 等感測元件代勞。因此在本文中將以數位取像儀器搭配刀口儀系統，進行拋物面鏡的定性檢測，並對於定量的方式作一介紹，而檢測結果亦將與菲佐干涉儀系統所得之資料進行比較，以為實驗之佐證。

## 三、刀口檢測技術原理

刀口儀基本原理為利用鏡面上表面粗糙度或形狀上的誤差造成反射光束行進方向的變化，部分光線不受放置於鏡面理論聚焦處刀緣之影響，照射在取像系統上形成光亮區，而其他部分反射光線則被刀緣所擋住，形成陰影。在檢測時，微小缺陷已能夠造成很大的反射誤差，缺陷愈大，成像則愈明顯，黑白對比愈分明。

刀口儀之理論可以兩種方式做分析，一為幾何方式，另外一種方式則利用物理學方式進行解析。首先我們就幾何方式進行說明。

假設刀緣放置於距離鏡片光軸交叉點（平面

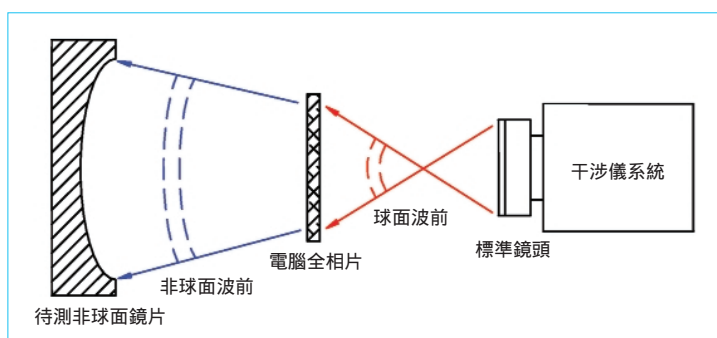


圖 1. 電腦全相片 (CGH) 光路架設。

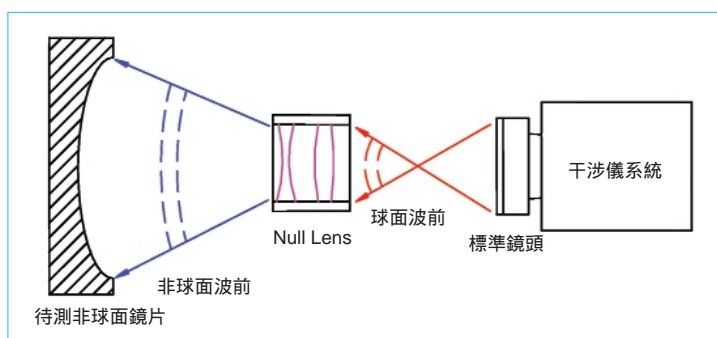


圖 2. Null lens 光路架設。

$X_1 - Y_1$  原點位置)  $r_1$  位置，並與  $Y_1$  軸成  $\phi_1$  角度，如圖 3 所示， $\phi_1$  數值之正負號與刀緣斜率相同。以式 (1) 定義刀緣：

$$x_1 \cos \phi_1 - y_1 \sin \phi_1 = r_1 \quad (1)$$

在此平面上之穿透率可表示成

$$T(x_1, y_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_1 \cos \phi_1 - y_1 \sin \phi_1 < r_1 \\ 0 & \text{if } x_1 \cos \phi_1 - y_1 \sin \phi_1 \geq r_1 \end{cases} \quad (2)$$

根據 Rayces 理論，平面  $X_1 - Y_1$  為波前  $W$  之近軸收斂平面，於平面上之任一點  $(x_1, y_1)$  將滿足方程式：

$$(x_1, y_1) = \left( -R \frac{\partial W}{\partial x}, -R \frac{\partial W}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$R$  值為  $X - Y$  平面與  $X_1 - Y_1$  平面的距離。

將式 (3) 代入式 (2) 中，並使刀緣平行  $X$  軸，即  $\phi_1 = 90^\circ$ ，則可得到穿透率方程式：

$$T\left(\frac{\partial W}{\partial y}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\partial W}{\partial y} < \frac{r_1}{R} \\ 0 & \text{if } \frac{\partial W}{\partial y} \geq \frac{r_1}{R} \end{cases} \quad (4)$$

若考慮一鏡片具有完美表面品質，但刀緣檢測位置並非放置於收斂平面  $X_1 - Y_1$  上，亦即代表某種程度的焦距誤差 (focus error) 被引進此實驗內，以像差方程式 (aberration function) 表示為：

$$W(x, y) = F(x^2 + y^2) \quad (5)$$

將 (5) 式帶入 (4) 式中，當  $F \neq 0$ ，影像明暗邊緣可以表示為

$$y_1 = \frac{r_1}{2FR} \quad (6)$$

因此，根據刀緣位置，當刀緣在焦距內時 ( $F$  為負

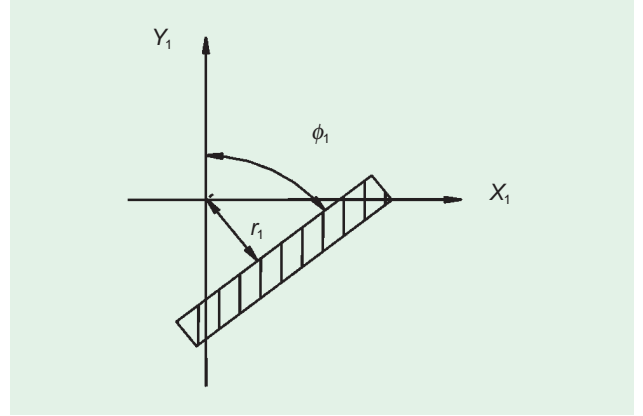


圖 3. 刀緣與光軸座標相對位置。

值)，或是刀緣位於焦距外時 ( $F$  為正值)，沿著  $Y$  軸的影像將會出現反相的情形。而當刀緣與光軸重疊時， $r_1$  為零，而使  $y_1$  亦為零，所觀測到的圖形將會形成半圓為明亮區、半圓為暗區的情形。

考慮第二種情形，鏡面表面具有球差 (spherical aberration) 及焦距誤差，以方程式表示為：

$$W(x, y) = S(x^2 + y^2)^2 + F(x^2 + y^2) \quad (7)$$

代入式 (4)，影像邊緣可表示為：

$$y^3 + \left( \frac{F}{2S} + x^2 \right) y - \frac{r_1}{4SR} = 0 \quad (8)$$

在式 (8) 中，隨著  $F$  及  $S$  參數變化的情形，將會有三種不同的解分佈情形，圖形亦會有不同的型態，在此不逐一運算，僅就刀緣與光軸接觸 ( $r_1 = 0$ ) 之特殊狀況作討論。

當  $r_1$  為零時，陰影圖形與  $y$  軸的交點為：

$$y = 0 \quad (9)$$

及

$$y = \pm \sqrt{-\frac{F}{2S}} \quad (10)$$

圖形將呈現三個部分，包含兩組暗區及一處亮區。以目視觀點來說，中間部分會呈現微凸或微凹的狀態，當陰影圖形呈現此種現象，即代表鏡面含有部分球差。同樣的運算亦可運用於慧差 (coma) 及散光誤差 (astigmatism) 的檢驗上，可由陰影圖形所呈現的特徵，與理論值進行比對，找出誤差特性。

以上是以幾何的方式將各種光學鏡片表面誤差所造成的刀口陰影圖形作一介紹，但一個真實的鏡片表面並不僅有一種表面誤差，通常是由數種誤差共同影響，因此下面將以物理學的角度對於傅科檢測陰影圖作推導。假設反射自光學表面的光波振幅為

$$A(x, y) = \begin{cases} \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} W(x, y)\right] \cong 1 + i \frac{2\pi}{\lambda} W(x, y), & x^2 + y^2 \leq S_{\max}^2 \\ 0, & x^2 + y^2 > S_{\max}^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中  $S$  為待測物平面範圍，藉由傅立葉光學推導，

波前誤差經刀緣調變之後，反映在成像平面上的將變化為

$$W'(x_2, y) = W'_r(x_2, y_2) + iW'_i(x_2, y_2) \quad (12)$$

計算其像平面之輻射照度 (irradiation) 可得：

$$I'(x_2, y_2) = 1 - (4\pi/\lambda) W'_i(x_2, y_2) \quad (13)$$

由上式可明顯得知成像之輻射度分佈與波前誤差有絕對的關係。刀口儀成像圖形之對比明暗是由鏡片表面之誤差所決定，以  $\gamma$  表示其對比值，則其表示式為：

$$\gamma = \frac{4\pi}{\lambda} W'_i(x_2, y_2) \quad (14)$$

以肉眼而言， $\gamma$  約為 2%，引進式 (14) 中，可估算出刀口儀對於鏡片表面誤差之理論量測精度可達  $\frac{\lambda}{200\pi}$ 。

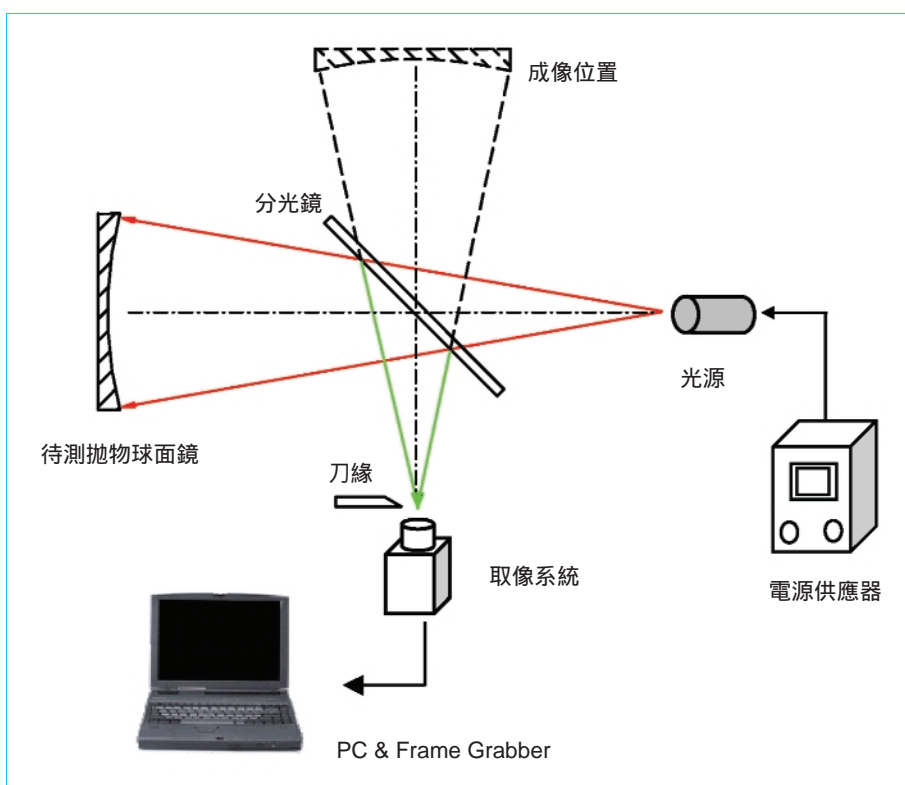


圖 4.  
刀口儀架設 (方式一)。

圖 5.  
刀口儀架設 (方式二)。

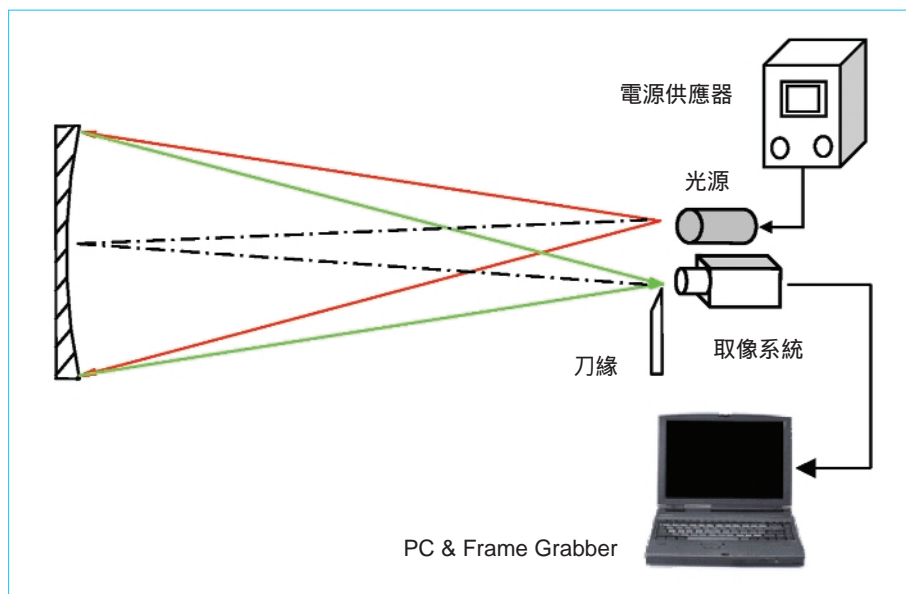
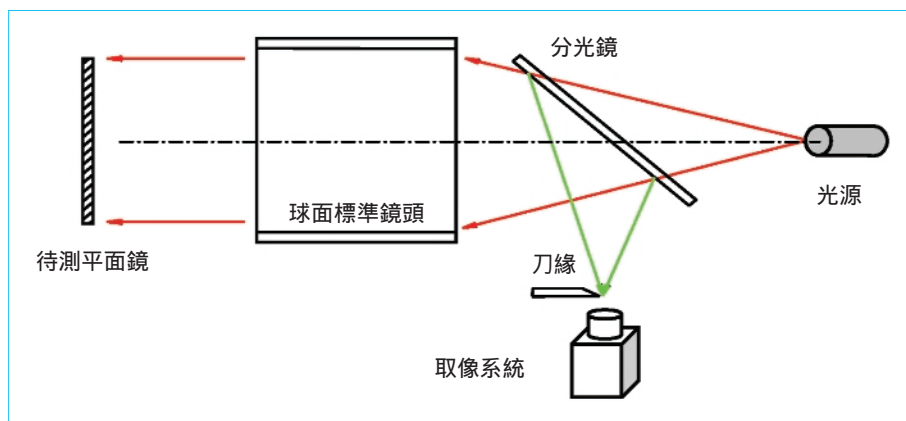


圖 6.  
平面鏡刀口檢測系統。



#### 四、刀口檢測法架設方式

刀口檢測法經過長時間的發展及應用後，已有許多不同的架設方式。在本文中以拋物面鏡檢測為例，並採用了兩種不同的方式進行架設，架設方法如圖 4 及圖 5 所示。取像系統方面則應用了彩色 CMOS (解析度為  $352 \times 288$ ) 及廣角鏡頭，以方便全場取像。在量測過程中發現，兩種架設方式皆能有效取得鏡片表面情形。但在精確度上，第二種架設方式，由於光源與 CMOS (CCD) 在同一方向上，因此兩者間必定會夾一角度，而導致部分散光誤差 (astigmatism) 被引進量測系統內，容易造成檢測人員的誤判。因此假若架設空間允許，第一種架設方法是較好的選擇。但在許多量測應用上，並沒

有足夠的空間及時間來作經常性的光路調整及架設，在此情形下，第二種架設可提供較方便的量測流程及較小的量測空間，而散光誤差則可藉由光源的變化，以狹縫 (slit) 光源代替點光源，使其雜光

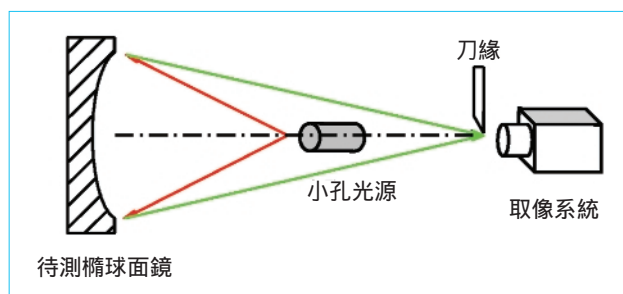


圖 7. 橢球面鏡刀口檢測系統。



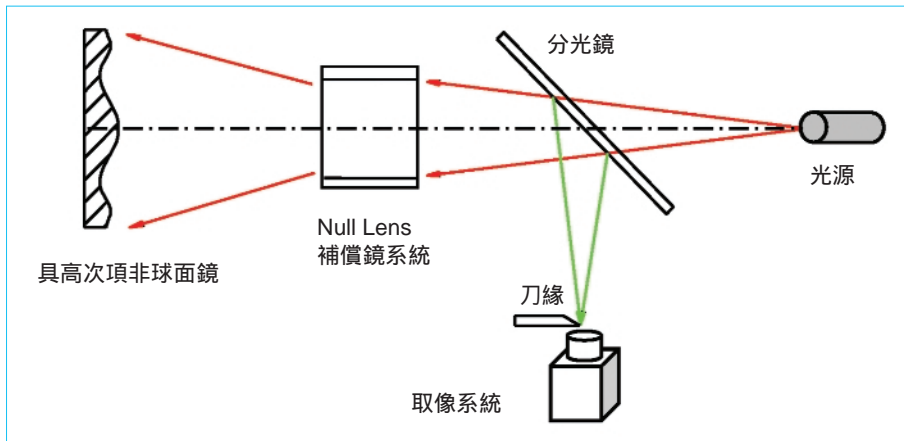


圖 8.  
具高次項非球面鏡刀口檢測系統。

影響降至最小。

另外，亦有對應特定面型鏡片之架設方式，如圖 6 及 7 即是對應於平面及橢球面形之鏡片。若非球面鏡中包含高階項，則需採用類似 null lens 的概念，在光路中多放置一補償器，如圖 8 所示，使其波前得以收斂於近軸平面上。採用補償器的量測方式其應用範圍幾可包括所有類型鏡片，此種架設方式未來將成為刀口儀改良的重點。刀口檢測系統主要由刀口元件（刀口、光源、定位平台）及取像系統所組成，其細部架設說明如下。

## 1. 刀口元件

在刀口元件中，系統的準直度、平台位置讀數及光源種類等，會影響其量測準確度。

### (1) 光學系統準直度

為求得精密量測結果，系統準直通常為光學架設中十分重要的一部份。刀口儀所使用的光源為點光源，不易看出其光軸的行進路線，因此在進

行系統準直時，可將光源更換為雷射二極體，將系統定位完畢後，再將之更換為測量光源。

### (2) 定位平台

刀口儀架設中，刀緣須切過近軸平面上之成像點，距離上些微差距將導致成像結果變化，因此平台之定位誤差應小於 0.05 mm。

### (3) 光源種類

一般使用點光源進行刀口儀檢測時，孔洞越小量測精度越高，影像對比越明顯。同樣的狀況亦發生於狹縫光源上，若檢測時採用狹縫光源，則其寬度最好可在 0.05 mm 以內，方能獲得良好檢測結果。

## 2. 取像元件

在本文中為獲得完整陰影圖形，嘗試使用各種不同的取像系統於刀口檢測系統中，以下就其結果作比較。

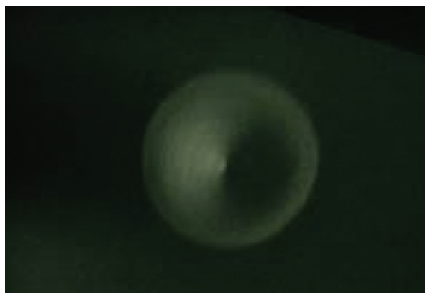


圖 9. 陰影圖投影至屏幕上。



圖 10. 取像系統視角不足。



圖 11. 高解析度取像系統。



圖 12. 動態取像系統。

### (1) 投影法

如圖 9 所示，是以間接的方式將影像投影至屏幕上後再進行取像，其優點是不需廣角鏡頭，便可以拍攝到整個鏡片的狀況。但由於是採用間接的取像方式，在亮度上並不十分理想，且對於較小的缺陷並不能確實反映。

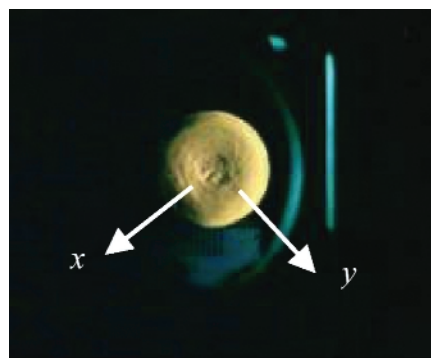
### (2) 一般鏡頭搭配 CCD

如圖 10，由於鏡頭視角不足，導致量測區域

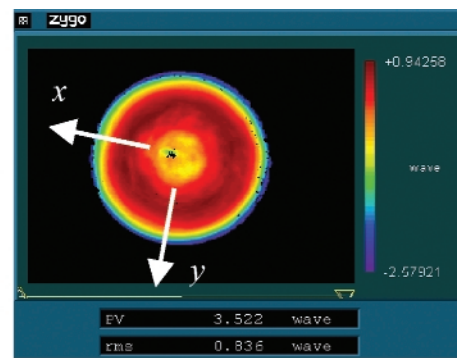
縮小，雖然無法進行全鏡面檢測，但對於較小的誤差卻可以作細部檢驗。

### (3) 廣角鏡頭搭配高解析度 CCD

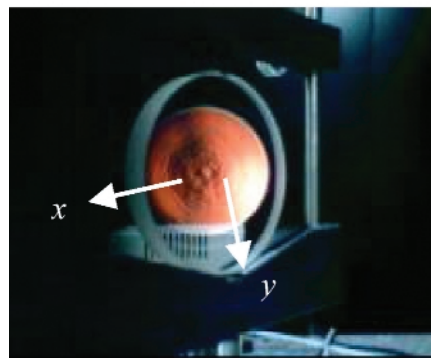
圖 11 是利用解析度  $640 \times 480$  的 CCD 並搭配廣角鏡頭進行取像，可獲得高解析度的影像品質，適於靜態的鏡面量測。但若要進行動態擷取陰影圖形時，受限於記憶體大小，則必須犧牲解析度以換取較順暢的拍攝品質。



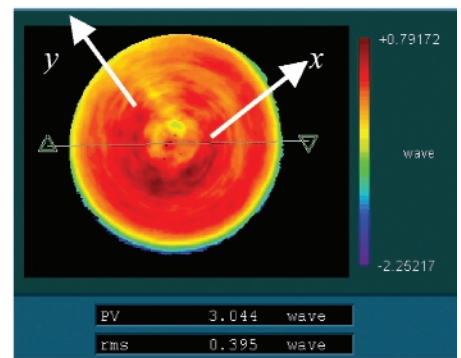
鏡片一之刀口儀量測圖形



鏡片一之干涉儀量測圖形



鏡片二之刀口儀量測圖形



鏡片二之干涉儀量測圖形

圖 13.  
刀口儀量測圖形與干涉儀檢測  
圖形比對。

#### (4) 廣角鏡頭搭配 CMOS 感測元件

圖 12 的影像即採用 CMOS 進行影像擷取，雖然解析度稍微下降，但仍可有一定的品質，且可進行動態的量測。搭配廣角鏡頭後，亦可以進行鏡面全場的取像，相較於上述的幾種取像模式，應是目前較為適當的方式。

### 五、量測結果及驗證

檢驗結果如圖 13 所示，檢測取樣為兩片  $k = -1$ 、 $R_0 = -150 \text{ mm}$  之拋物面鏡，左圖是刀口儀量測所得之結果，右圖則是以干涉儀進行檢驗之圖形（此干涉儀並未用 null lens 或 CGH 片作補償，因此僅可對於中間部分曲率近似處作檢測）。藉由數位取像系統的輔助，吾人可將影像擷取後，與其他量測方式進行比較，也可對於量測過程進行動態拍攝，如圖 14 及圖 15 所示，供量化程序使用。

#### 1. 刀口儀與干涉儀量測結果比較

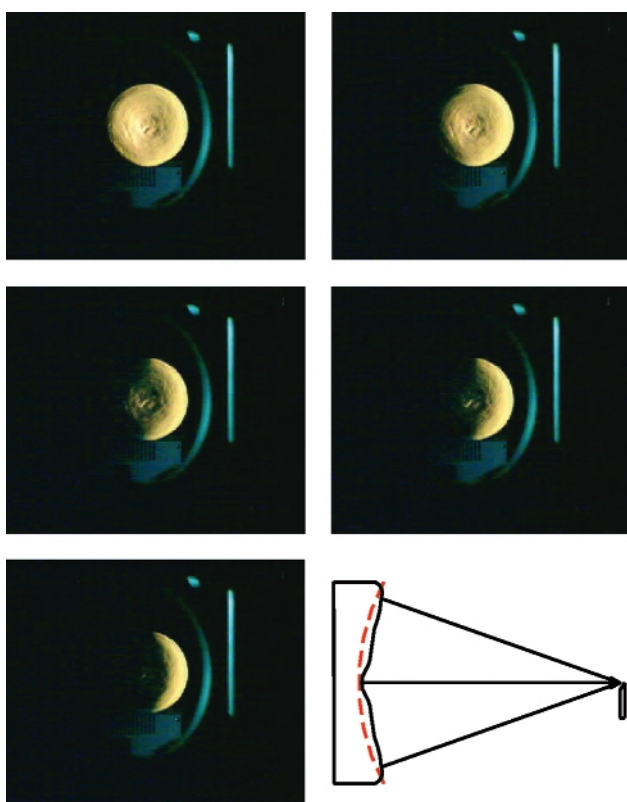


圖 14. 鏡片一之刀口陰影圖影像變化。

在圖 13 的比較中可發現，刀口陰影圖形與干涉儀所分析出來的鏡面情形十分近似。觀察鏡片一，由干涉儀所分析出來的圖形可清楚看到鏡面中間有一凹陷部分，由於落差過大，造成干涉儀解析軟體無法辨識，但由刀口陰影圖則可看到其缺陷狀態及位置，可知刀口儀對於劇烈變化之缺陷具有良好的檢驗能力。另外，由兩張圖形對照中亦可得知，刀口儀與干涉儀檢驗結果具有良好的一致性。在第二片拋物面鏡的檢測中，干涉儀可檢驗的部分僅為中間一小區域，對於全場的量測助益並不大；但使用刀口儀檢測時則可便捷的取得全場的誤差分佈，供鏡片製造時作即時的修正。此外，對於中間部分的凸起 (peak) 以及鄰近區域的檢測上，亦有近似的結果。

#### 2. 定性及定量程序

在圖 14 及圖 15 中，每張圖片刀緣移動前後間距為  $0.05 \text{ mm}$ ，而待測鏡片表面誤差情形則如光路模擬圖所示，可比較待測鏡面與理想拋物面型之誤

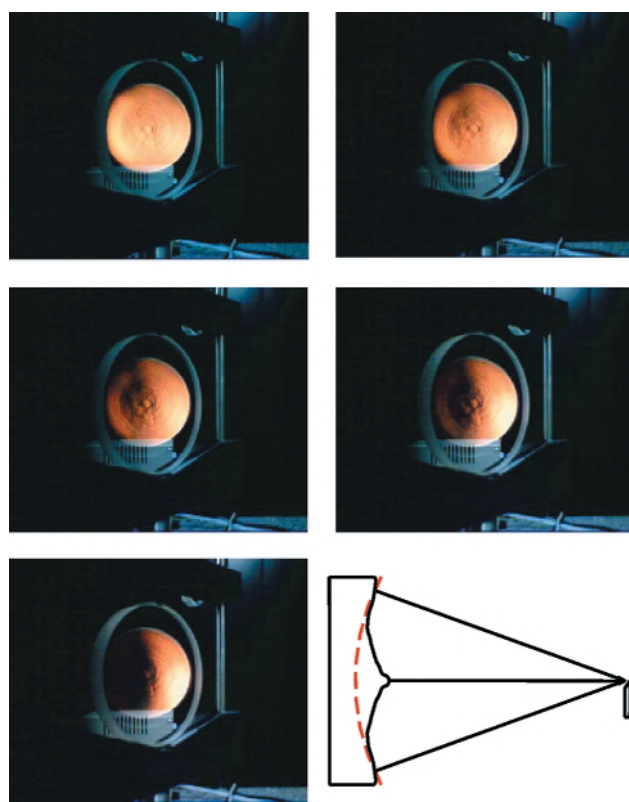


圖 15. 鏡片二之刀口陰影圖影像變化。



差。在取得刀口陰影圖形後，即可看出其缺陷分佈位置及相位變化情形。若要以數值定義其誤差量，目前最廣為使用的量化方式為遮罩 (mask) 法，利用一特製屏幕 (couder screen，圖 16) 覆蓋於鏡片之上，記錄刀口於聚焦點區域前後移動時每一區域亮度的變化，再與完美輪廓所產生的陰影圖形進行比對後，定義出各區域的斜率。刀口儀檢測搭配上數位取像系統，除了可以更快的速度進行取像外，遮罩也可運用軟體模擬，不必實際將遮罩放置於鏡面上，對於亮度的判別，也不需依賴檢測人員的經驗判斷，而將有更精確的定義。

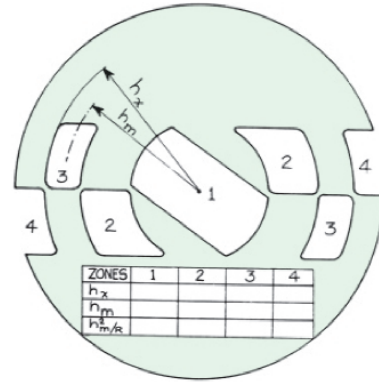


圖 16. Couder screen。

## 六、結論

隨著國內光電產業的迅速發展，光學鏡面之品質檢測技術所扮演的角色也日益重要。本文所論述的刀口檢測技術主要即應用於光學元件表面檢測，特別是大型精密反射鏡面的檢測。結合數位取像系統的便利性，期望能以低成本、高精度的方式，提供給光學元件製作者在進行現場品質檢測時一個可以信賴的資料。目前現有技術能量已可對於表面誤差作定性檢測，並進行數位取像的程序執行影像後處理。未來結合自動定位系統，亦可開發成一全自動化且可量化的刀口檢測儀器。除此之外，波前補償器的應用也將為刀口儀開展更廣泛的應用空間，不僅可應用於典型的拋物球面鏡、橢球面鏡等，更將適用於具有高階項非球面鏡表面品質檢測。

## 參考文獻

1. 徐德衍, 科儀新知, **22** (1), 30 (2000).
2. 黃國政, 王必昌, 廖偉境, 郭慶祥, 科儀新知, **23** (3), 96 (2001).
3. 黃國政, 光學鏡片製作, 光學技術研習班, 國科會精密儀器發展中心 (2001).
4. 黃國政, 林洵焜, 王必昌, 廖偉境, 科儀新知, **23** (5), 49 (2002).
5. 王廷飛譯, 表面組織解說 (英文), 前程出版社 (2001).
6. D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd ed., Ch. 8, John Wiley & Sons, Inc. (1992).
7. F. M. Yu and B. C. Wang, *Proceedings of the Eighth National Conference on Combustion Science and Technology*, 523 (1998).
8. J. Bescos and L. R. Berriel-Valdos, *Opt. Commun.*, **57**, 10 (1986).
9. R. K. Dakin, *Sky Telesc.*, **33**, 45 (1967).
10. W. T. Welford, *Opt. Commun.*, **1**, 443 (1970).
11. R. K. Dakin, "A Single-Edge Slit Foucault Tester" in *Advanced Telescope Techniques, Vol. 1: Optics*, A. Mackintosh, Ed., Willmann-Bell, Richmond, VA, 30 (1987).
12. S. M. Arnold and K. Anil, *SPIE*, **1396**, 27, (1990).
13. E. M. Granger, *SPIE*, **429**, 174 (1983).