

# 非球面鏡之拋光與檢測技術

由於衛星科技與數位相機時代的來臨，許多光學廠商為改善鏡頭變焦比、視角及對比度等的成像品質，紛紛引用非球面鏡設計系統，本文即以技術層面來探討目前市場所引用的各種非球面技術。

黃國政、王必昌、廖偉境、郭慶祥

## 一、前言

由於世界上電子、資訊產品技術不斷的更新，致使國內掃描器、數位相機等各類光電新產品隨之增加，帶動了相關光學元件需求快速成長，也連帶使得台灣精密光學產業蓬勃發展，其中包含為數甚多的精密光學元件。根據光電協進會 PIDA 的預估，2003 年我國精密光學元件產值約為新台幣 80 億元，遠低於 96.65 億元的市場需求值，所以國內精密光學元件廠商的未來幾年獲利成長性相當看好。

在精密光學元件中，以透鏡、反射鏡及稜鏡鏡片等為數最多。目前透鏡及反射鏡製作陸續引進具有輕薄短小概念的非球面技術，不但能減少光學系統之元件數目，而且能讓設計者有更寬廣的設計空

間，故在光學系統上應用甚廣，包括 LCD 投影機、CD/DVD-ROM 讀取頭、傳統及數位相機等。另外，在相機上使用非球面鏡片，可將廣角及變焦鏡頭內的反射光斑及影像扭曲等情況減至最低，使原有的鏡頭有更好的遠攝效果(如圖 1)。

目前市面上的常見非球面的產品有 CD/DVD 讀取頭及相機內的非球面透鏡、LCD panel 背光板的 Fresnel 透鏡、紅外 IR 系統上的合成鏡片(hybrid lens)及天文望遠鏡上的主次反射鏡等。非球面鏡片因製作方式的不同區分為三種不同技術產品，分別為：非球面拋光鏡片(如圖 2)、非球面塑膠鏡片、非球面玻璃模造鏡片(如圖 3)。非球面塑膠鏡片由於耐候性差，不適用於溫度變化大的環境中，如汽車之光電產品或一些精度不需太高的儀器等。非球面玻璃模造鏡片應用在光學系統上甚廣，如在影像電話、數位相機、CD/DVD-ROM 讀取頭(如圖 4)等，唯適用於模造用的玻璃材質只限於一些低熔點的材質。非球面拋光鏡片雖然製程複雜且製造費時，卻是唯一適用各種非球面設計的鏡片，一般應用在觀賞、遙測及天文望遠鏡系統及金屬模具(如圖 5)。

另外，在非球面檢測技術上，以電腦全像(computer generating hologram, CGH)技術為最普遍

---

黃國政先生為國立台灣大學機械博士，現任國科會精密儀器發展中心副工程師。

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。

廖偉境先生為國立台灣大學機械碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

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。

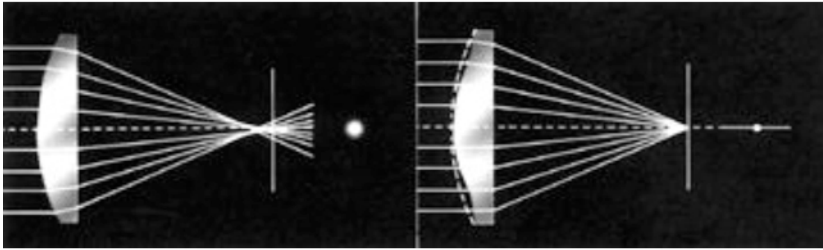


圖 1. OP-Fisheye Nikkor 10mm F/5.6 非球面鏡頭。

(資料來源：<http://www.mir.com.my/rb/photography/opinion/html/aspherical.htm>)

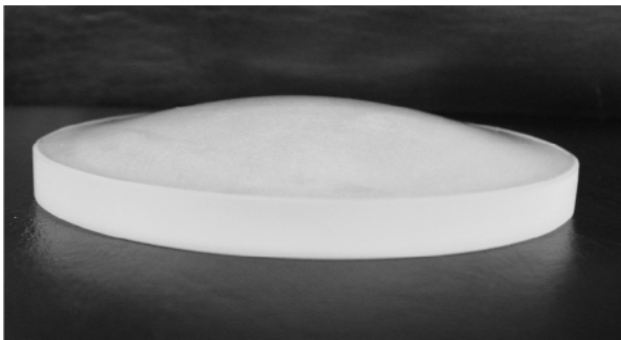


圖 2. 非球面拋光鏡片。

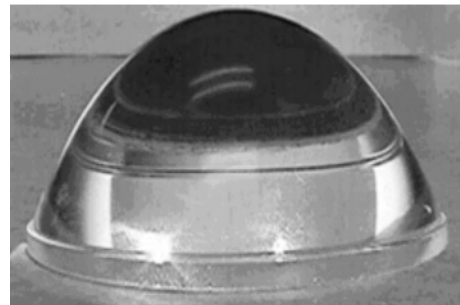


圖 3. 非球面玻璃模造鏡片。

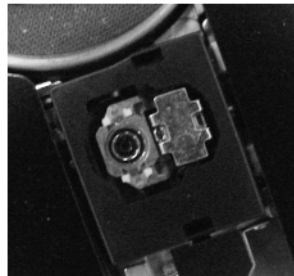
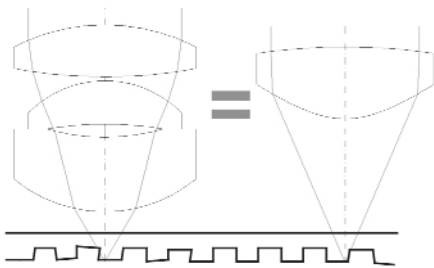


圖 4.

球面(左)、Note book 之 CD 讀取頭(右)與非球面(中) CD 讀取頭光學設計。

選用的標準，但全相玻片相當昂貴，並不適用於一些小件小批量的元件檢測，故目前有許多低成本的大量測方式，例如 null-lens 補償鏡、光學掃描、刀口儀及表面輪廓儀量測等方式。

## 二、非球面鏡拋光流程

近年來，非球面拋光技術流程逐步走向全自動化，其拋光參數的控制技術日益成熟，所以許多知名光機廠商紛紛推出最新的非球面拋光系統，至目前為止計有德國 LOH 的 SPS 系列、OptoTech 的

ASPH 150、日本 KURODA 的 KRP 系列及美國 Precitech 的 Microfinish 300、Rochester 大學的 Q-22 磁性拋光機等產品。不過由於全自動化的精密拋光機只能控制表面粗度 (roughness)，並無法有效修正其形狀誤差 (form error)，故對於高面精度 ( $< \lambda/2$ ) 的非球面鏡，目前自動化控制技術仍需以人工拋光配合。

非球面鏡拋光技術是以成形機將鏡胚成型到光學設計的表面，並以輪廓儀校驗非球面常數 ( $k, R_0$ )。細磨後的非球面在拋光機上做表面粗糙度 (RMS) 修正，再以 CGH 干涉儀確認其表面形狀精

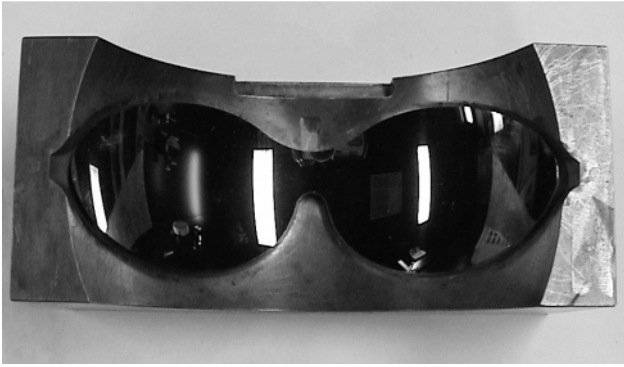


圖 5. 壓製眼鏡用的金屬模具。

度 (PV)，直到預定精度為止。一般表面精度要求在  $\lambda - \lambda/4$  (如圖 6)。另外，一般用在太空上的遙測鏡組主次鏡，則用離子束拋光對局部粗糙度不均勻做修正。

在非球面成型流程中，刀具的形狀與切削路徑的設計比一般 CNC 車床來得精細 (如圖 7 左)，因為切削會造成刀具磨損且後段流程 (研磨及拋光) 並不能大幅修正表面形狀，故必須精確成型到所需外型。通常成型後的物件表面並不能直接進行拋光，原因是刀具會在物件表面留下一些非常細的刀

痕 (約  $3 - 6 \mu\text{m}$ )，一般的肉眼不容易檢視到 (如圖 7 右)，所以比較有經驗的拋光工作者會在物件成型後，加上一道消除刀痕的細磨工作，以降低表面粗糙度並修正成適合拋光的輪廓外形。

由於細磨後的物件表面無法充分反射以產生干涉圖，故物件輪廓在做粗修時，普遍使用表面輪廓儀做檢測。一般表面輪廓儀可分成兩型，一種是常見的表面接觸型 (機械式)，另外一種是非接觸型 (光學式)，後者較適用在直徑小於 20 mm 的物件。其次，在做輪廓量測時，也必須先尋得物件中心點的位置，因為探針要經過中心點，所量出來的數值才有參考價值。

非球面的拋光與檢驗的方式大致與傳統製作球面鏡時相同，所不同的是自動化拋光機可以對拋光時間、工具與物件轉速及接觸壓力等做循環控制，另外在檢測時亦須加上一些補償器 (詳細流程如後段) 做為非球面波前修正用。

此外，對於非球面拋光而言，不管是在面精度或製作時程上的控制，都較球面拋光來得困難，兩者間的難易度可以藉由表 1 比較得知，例如，物件直徑 10 cm，拋光表面精度  $\lambda/2$  非球面鏡，其難度

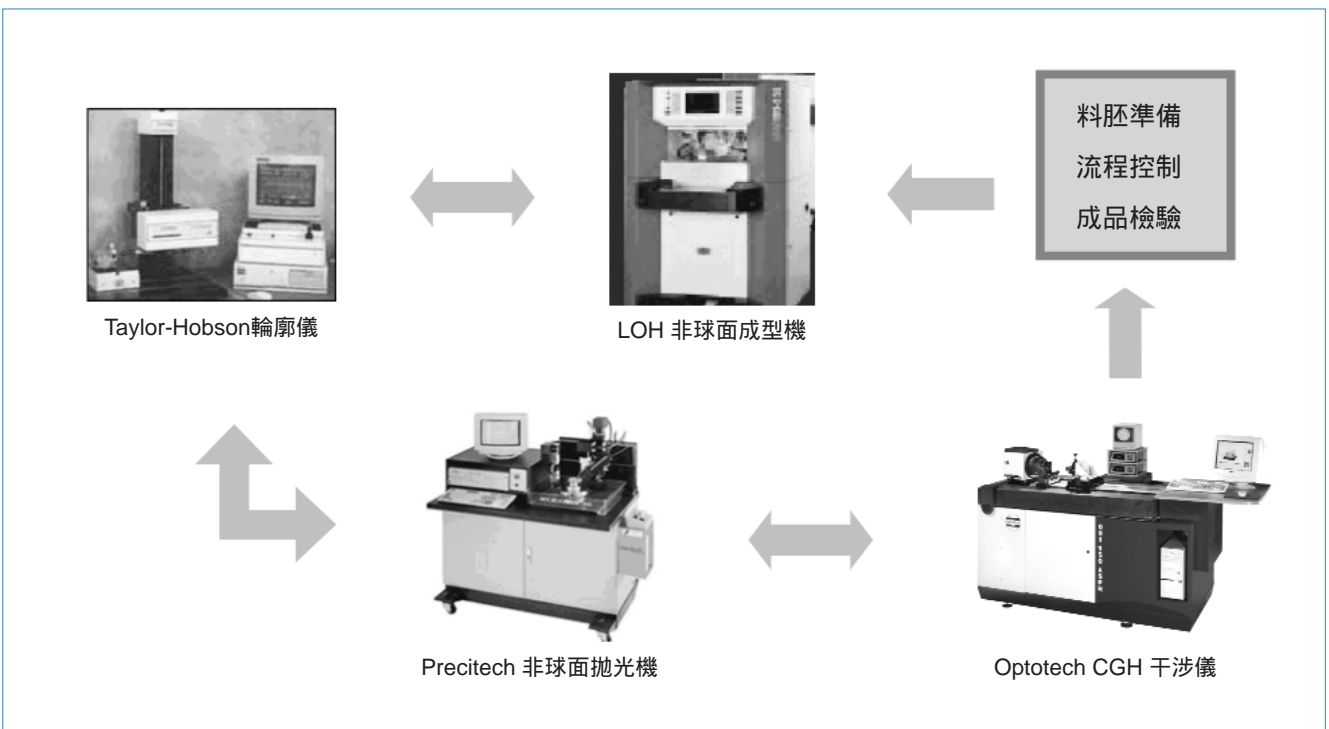


圖 6. 非球面鏡拋光技術流程圖 (成型 輪廓檢驗 拋光 精度檢驗)。

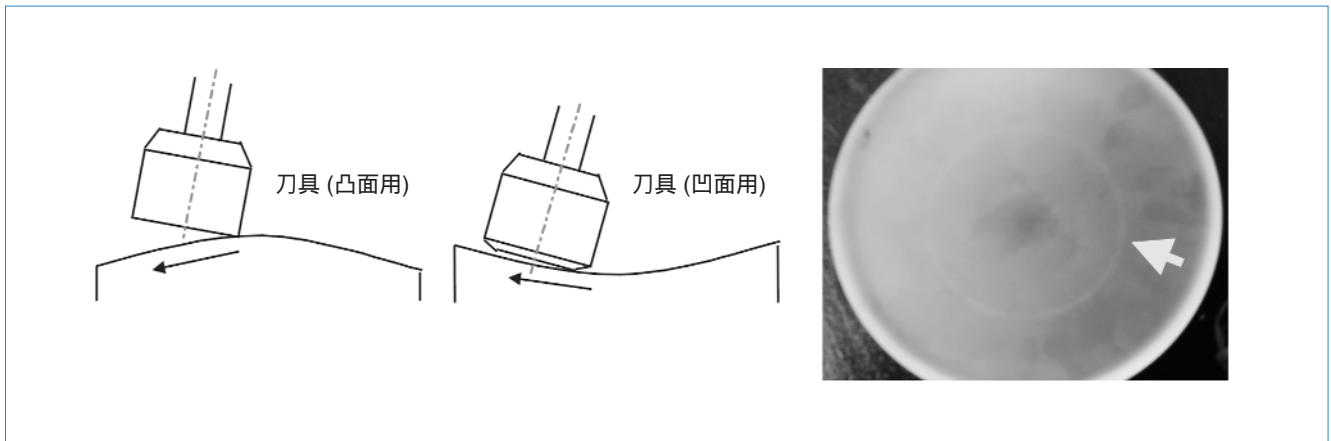


圖 7. 成型刀具外型(左) 極細的成型刀痕(右)。

表 1. 各形鏡片面精度等級對照

形狀	一般片	標準片	高精度
球面 (Spherical)	$< \lambda/4$	$< \lambda/10$	$< \lambda/20$
球 (Ball)	$< \lambda$	$< \lambda/4$	$< \lambda/10$
平面 (Plano)	$< \lambda/10$	$< \lambda/20$	$< \lambda/50$
柱面 (Cylindrical)	$< \lambda$	$< \lambda/4$	$< \lambda/8$
錐面 (Conic)	$< 2\lambda$	$< \lambda/4$	$< \lambda/10$
非球面 (Aspheric)	$< 4\lambda$	$< \lambda/2$	$< \lambda/8$

Shape for  $\phi = 100$  mm,  $\lambda = 632.8$  nm

表 2. 非球面物件之表面參數。

參數名稱	數學式
非球面方程式	$Z = r^2/R_0 / \{1 + [1 - (1+k)r^2/R_0^2]^{1/2}\} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12} + Fr^{14} + Gr^{18} + Hr^{20}$
非球面方程式 (二次曲線)	$Z = r^2/R_0 / \{1 + [1 - (1+k)r^2/R_0^2]^{1/2}\}$
圓錐常數	$k$
中心曲率半徑	$R_0$
表面粗糙度	$RMS = (1/n \sum_n \Delta Z_n^2)^{1/2}$
表面形狀精度 (peak-to-valley)	$PV = Z_{max} - \Delta Z_{min}$

註：1.  $\Delta Z$  偏離設計非球面值

2. A、B.....G、H 為高階非球面係數值

約與拋光表面精度  $\lambda/10$  球面鏡大略相同。當然未來隨著拋光技術的改進，非球面拋光的困難度將與球面拋光逐漸拉近。

由上述流程可知，非球面拋光精度決定在是否有搭配的成型機 (curve generator)、前拋光用的細磨機、檢驗儀器 (刀口儀、CGH 干涉儀或輪廓儀等) 及有經驗的操作人員等，所以非球面拋光技術的建立首重系統連結之完整性。

### 三、非球面鏡檢測

非球面檢測是指使用表面接觸或光學干涉等方式，量取非球面相關的表面參數，例如圓錐常數 (conic constant)  $k$ 、中心曲率半徑  $R_0$  及表面形狀誤差等 (如表 2)。

一般光學系統可分為照相機系統、顯微鏡系統與望遠鏡系統三種，目前以大型的望遠鏡系統 (口徑 150 mm 以上) 較常使用非球面鏡片，例如圖 8 為一折反射式遙測鏡頭系統，其主次反射鏡皆使用雙曲面外形。另外，由於數位相機產業的發達，相機業者為增加鏡頭廣角及變焦的範圍，光學設計人員已在鏡頭上加上一至三片的非球面透鏡，至於何種光學系統需要使用非球面鏡，完全取決於市場的需求與設計者的企圖心，但製作人員是否能夠製造出滿足這些設計需求值，其非球面檢測的能力將是最關鍵的因素。

基於製造成本與可量測工具的考量，過去在量測非球面物件表面時，多半使用表面輪廓儀。雖然輪廓儀可以方便取得表面的形狀參數，卻無法取得整個非球面的形狀誤差，而且量測範圍也有限制

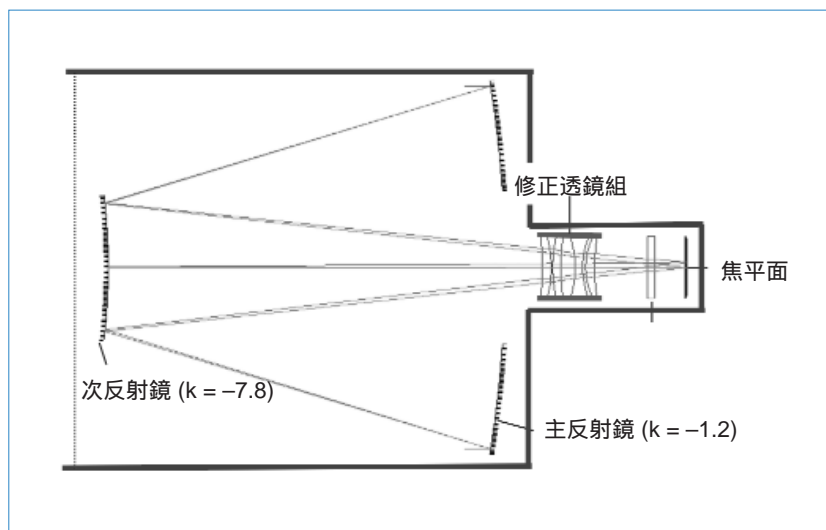


圖 8.  
折反射式遙測鏡頭系統。

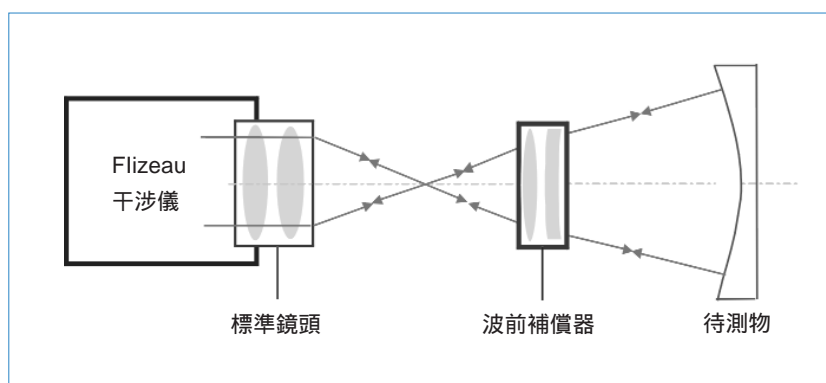


圖 9.  
(凹) 非球面鏡面架設圖。

(市面上常見的輪廓量測範圍都在 300 mm 以下)，故目前最常使用的非球面鏡量測系統以干涉儀最多。

以干涉儀量測非球面的架設方式有數種，例如一折反射式望遠鏡頭是由凹的主反射鏡、凸的次反射鏡及修正鏡組等組成 (如圖 8)，其中凹的主反射鏡與凸的次反射鏡的量測可採行附加波前補償器 (wavefront compensator) 的方式，如圖 9 及圖 10。兩者之間的差異在於波前補償器的位置，檢測凸面時，置於焦點前；而檢測凹面時，置於焦點後。至於波前補償器需內含幾片球面透鏡，則完全依照離球面 (sphere aberration departure) 的程度而定，依據光學設計 Code-V 軟體設計經驗，一般非球面檢測時僅需兩片透鏡即可，對於離球面的大型鏡片，亦可採用 Hindle Sphere 佈置方式來檢驗 (如圖 11)。

每個波前補償器對應一組非球面外形 (如圖 12)，其曲率半徑或圓錐常數的適用範圍並不一定，一般說來，波前設計偏離值愈小，可適用的範圍愈大。波前補償器的定位精度也會影響量測結果 (形狀精度)，實用上的定位精度通常要求在 0.1 mm 以內，所得到的量測誤差 (PV) 也可保持在  $\lambda/4$  之內。

物件外形偏離球面的值若不大於  $3 \mu\text{m}/50 \text{ mm}$  (約五條牛頓圈)，該非球面的表面精度量測可以直接使用傳統球面檢測的結果，再經由影像處理的方式，得到真實的干涉條紋；但如果偏離球面值大於五條牛頓圈，如圖 13，一近拋物面鏡，其偏離值約十條 / 50 mm，此時會因條紋過密及不規則性而無法進行數值運算，則必須使用附加波前補償器等的方式，才能得到正確的非球面干涉條紋 (如圖 14)。

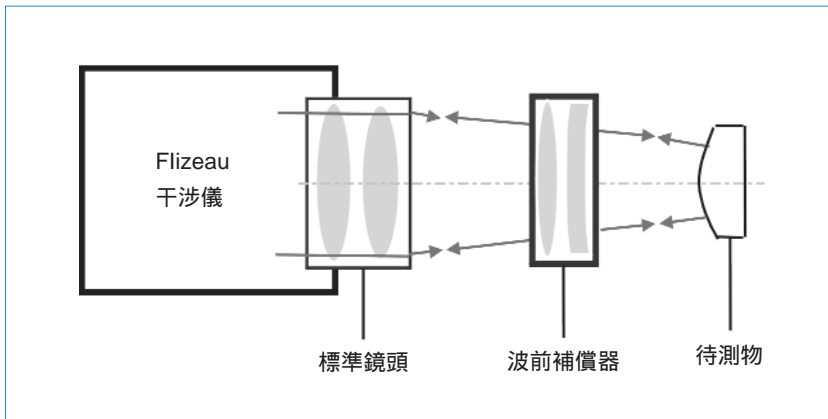


圖 10.  
(凸) 非球面鏡面架設圖。

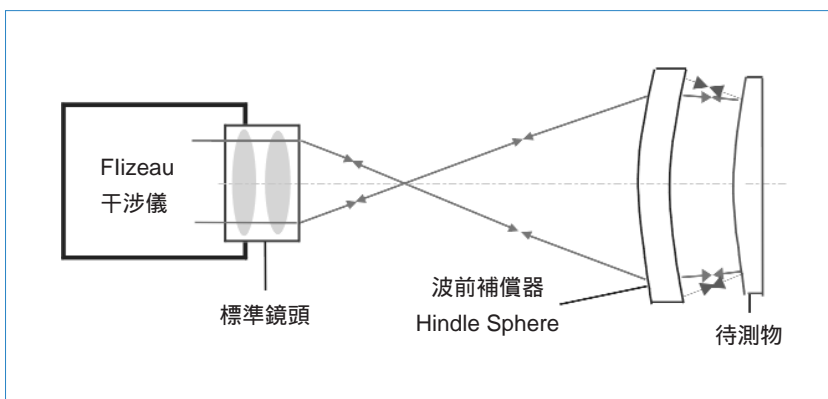


圖 11.  
(凸) 非球面鏡面架設圖 (Hindle Sphere)。

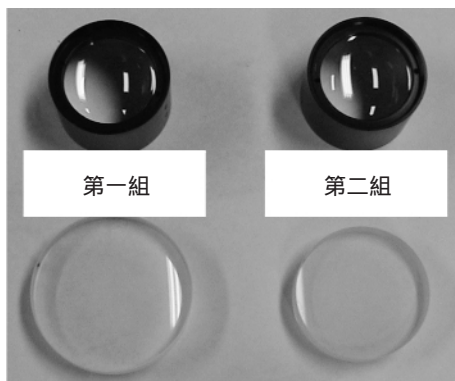


圖 12. 波前補償器與非球面外形。

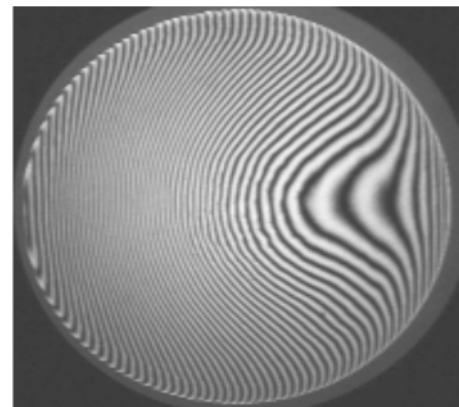


圖 13. 非球面干涉條紋 (無補償器)。

儘管附加波前補償器的干涉方式在市面上相當普遍，但受到補償器尺寸及設計偏離值不易控制的限制，目前許多廠商改由利用一全像片繞射產生非球面波前，此法係使用一電腦全像玻片代替波前補償器，其餘的架設方式大致與附加波前補償器法相同 (如圖 15)。

電腦全像玻片 (computer generating hologram) 製作的方法，是將電腦軟體所產生出來的繞射條紋，用化學蝕刻的方式將繞射條紋複製於一非常薄且平行的玻片上，將此全像玻片架於定位平台即可做量測。以化學蝕刻製作出來的全像玻片，由於其繞射率過低 (25%)，檢測精度也因而降低，故目前

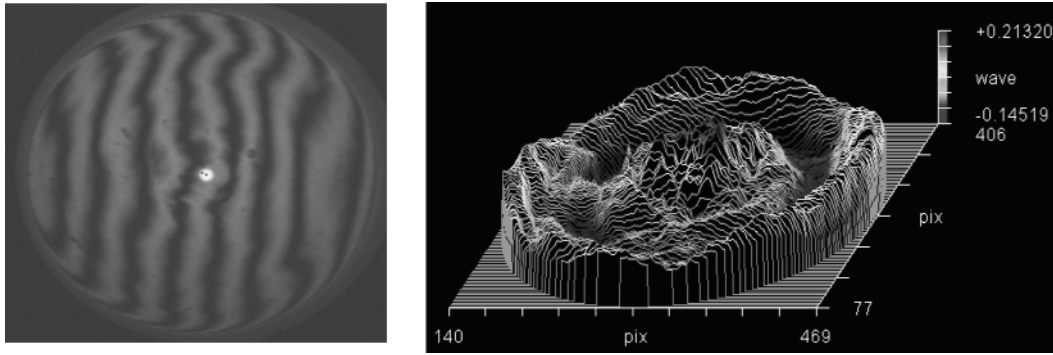


圖 14. 非球面干涉條紋 (附加補償器) 及其 3D 圖(面精度 $0.35 \lambda$ )。

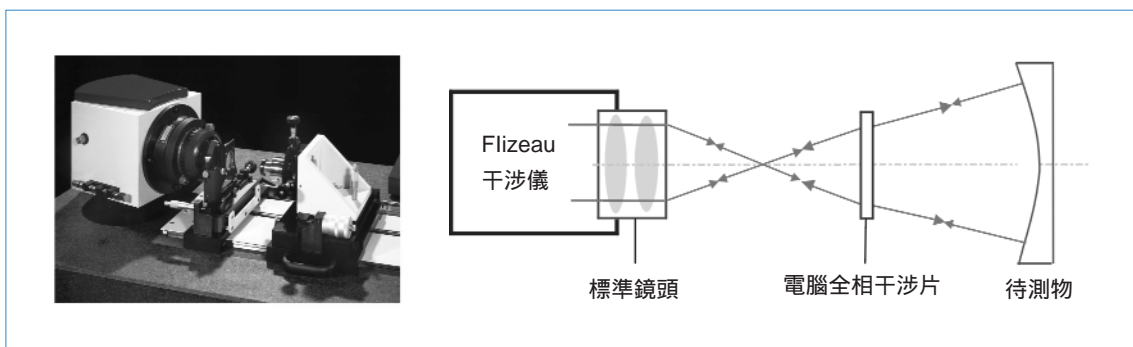


圖 15. OptoTech CGH 干涉儀 (左), CGH 干涉儀示意圖 (右)。

逐漸改用離子束加光罩的方式來製作，單階的繞射率可提高為 40%，若使用二階方式製作，其繞射率可提高為 81% (如圖 16)。

除了上述的附加波前補償器與 CGH 干涉儀方式外，傳統的非球面檢測亦有使用刀口儀 (knife-edge) 來做物件表面檢測。刀口儀具有成本低及靈敏度高的優點，但由於所得到的影像無法直接判讀 (如圖 17)，目前多半使用在現場或不易架設干涉儀之處。另外，刀口儀的操作人員必須具備有非常多的經驗及影像判讀能力，其所得到的量測結果方有參考價值。

#### 四、結論

非球面拋光與檢測技術發展至今已數十年，但因為直接拋光之非球面鏡的產量與成本不若傳統球面拋光來得多且低廉，故一直無法有效推廣於產業界，加上國內的光學人才非常缺乏，對於不易培養

的非球面光學技術，目前多半拋光的關鍵技術仍需依賴國外光學廠。

隨著光電及衛星產業的蓬勃發展，市場對光學儀器產品需求激增，對於系統品質的要求也愈趨精準。基於未來產業需求，未來國內若能建立精密成型 (如非球面金屬模具成型或鑽石輪磨)、非球面拋光及相關量測技術，即可開發各式非球面拋光鏡片 (含高精度非球面金屬模具)，不但可以提高國內光電產業及衛星遙測技術相關的能量，亦可每年為國內光電產業帶來近百億的產值。

#### 參考文獻

1. 泉谷徹郎, 光學玻璃.
2. 許招墉, 光學元件與製圖.
3. 許志榮, 光學元件研磨分析與技術探討.
4. 張榮森, 鏡片研磨中變化因素及運動軌跡研究.
5. Laurin Publishing Co. Inc., *Issue of Photonics Spectra*, Zygo (1989).
6. L. A. Selberg, *Optical Engineering*, **31** (9), 1961 (1992).

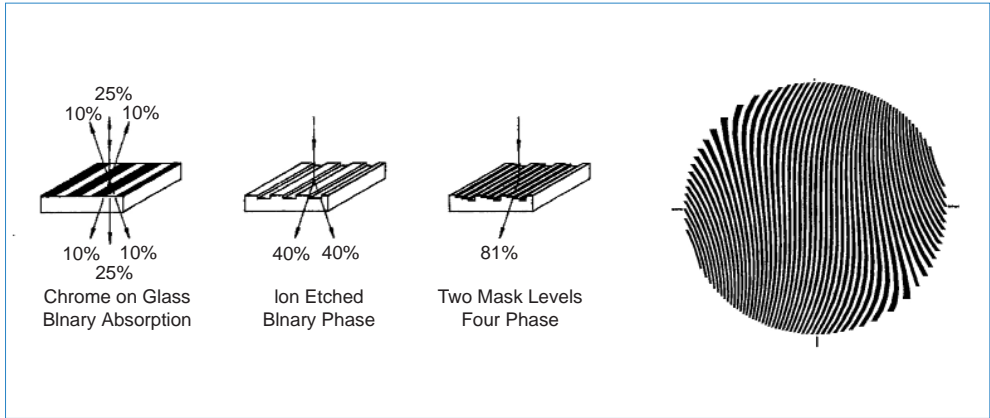


圖 16.  
全像玻片製作之繞射率  
分析 (左), 全像玻片條  
紋 (右)。

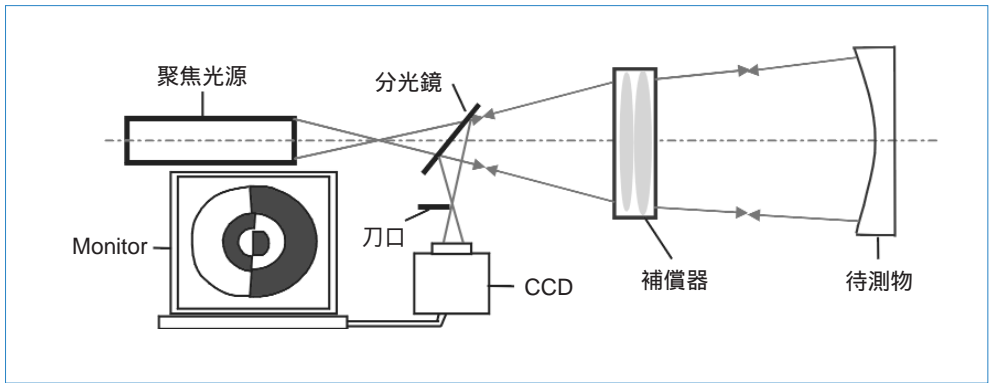


圖 17.  
刀口儀 (knife edge) 架設  
圖。

7. D. Golini, W. I. Kordonski, P. Dumas, and S. Hogan, *SPIE*, **3782**, 80 (1992).  
 8. S. M. Arnold, *The International Society for Optical Engineering*, 1052, Jan. (1989).  
 9. S. M. Arnold and A. K. Anil, *SPIE*, **1396**, 27 (1990).  
 10. K. M. Leung, S. M. Arnold, and J. C. Lindquist, *SPIE*, **306**, 112 (1981).  
 11. D. G. Bruns, *Appl. Opt.*, **22**, 12 (1990).  
 12. A. Offner, *Appl. Opt.*, **2**, 153 (1963).  
 13. W. Silvertooth, *J. Opt. Soc. Am.*, **30**, 140 (1940).  
 14. J. Schlauch, *Sky Telesc.*, **18**, 222 (1959).  
 15. M. Daniel, *Optical Shop Testing*, Ch. 8 - 15 (1982).  
 16. Loh Co., *Operation Manual of SPM120* (1999).