

遙測取像儀之凸面雙曲面反射鏡製作技術

Fabrication of Large Convex Hyperbolic Mirror for Remote Sensing Instrument

郭慶祥、余宗儒、何承舫、許巍耀、黃吉宏

Ching-Hsiang Kuo, Zong-Ru Yu, Cheng-Fang Ho, Wei-Yao Hsu, Chi-Hung Hwang

本文以卡賽格林反射式光學系統之次反射鏡為研究主題，結合拋光與大口徑凸面非球面鏡檢測流程，開發更高效率的大口徑非球面鏡拋光製程，並據以研究拋光參數及檢測系統誤差對拋光與量測結果之影響。針對口徑 $\phi 160$ mm 凸面雙曲面非球面鏡，以傳統研磨拋光法對成形後最近似球面鏡片進行預拋光，再以機械手臂式 CNC 數控拋光設備執行鏡片曲面非球面化拋光及最終的修正拋光。拋光過程中利用高精度表面輪廓儀進行二維曲面形狀精度量測，確認非球面化拋光之形狀修正程度，最後以雷射干涉儀搭配電腦全像片取得三維表面形狀誤差，依據所量測到的形狀誤差，經由拋光機進行最後之修正拋光。本研究以所建立的大口徑非球面鏡拋光製程及檢測技術，完成形狀誤差 P-V $0.15 \mu\text{m}$ 、RMS 17.9 nm 之非球面鏡製作。

In this study, we develop more efficient polishing processes and build inspection procedure for large convex hyperbolic mirror of Cassegrain optical system. We also investigate the effects of polishing parameters and metrology system errors during fabrication processes. The polishing process combines the techniques of conventional lapping and CNC polishing. The inspection procedure was carried out by using phase shift interferometer with CGH. In this study, we present an integration process of aspherical surface inspection and correction polishing. Based on this integration process, a $\phi 160$ mm convex mirror with hyperbolic surface was completed. The form error of the mirror was converged to $0.15 \mu\text{m}$ P-V, 17.9 nm RMS.

一、前言

光學系統為了得到更高的成像品質，必須將非球面光學元件導入光學系統中，降低光學系統像差，取代球面光學需借助複雜鏡片組合才得以降低像差之目的，進而縮減光學系統之體積與重量。而對於如天文望遠鏡、遙測衛星等大型光學系統，由

於其光學鏡片尺寸遠大於一般光學系統，因而更需要使用非球面光學鏡片，避免過大的球面像差，並利用折反射式光學設計，縮小光學系統之長度，卡賽格林 (Cassegrain) 反射式光學系統即為一例。此系統設計常見於地對空大型天文望遠鏡與可拍攝影像資料之遙測衛星，其系統組成主要為一凹面拋物面主鏡 (primary mirror) 與一凸面雙曲面次鏡

(secondary mirror)，以及修正透鏡組⁽¹⁾。使用類似設計之系統大多為口徑較大之光學系統，且由於對影像品質之要求，此類非球面光學鏡片之製程較傳統球面拋光為複雜且精度要求更高。

傳統球面或平面光學玻璃鏡片製作之程序大致可區分為成形 (curvature generation)、預拋光 (lapping)、拋光 (polishing) 及檢測等四大程序。成形的過程中必須大量地移除材料，為了提高製程效率，通常採用較粗顆粒的鑽石砂輪來進行研磨成形，但用粗顆粒之砂輪會造成較厚的「加工應力殘留層」，或稱為「次表層破壞層 (sub-surface damage layer)」。德國 SCHOTT 公司提出成形加工所造成的次表層破壞層厚度約等同加工所使用的鑽石砂輪其磨料粒徑⁽²⁾，因此必須在拋光前以預拋光的方式將次表層破壞層移除，以避免增加拋光時間。傳統球面拋光製程在預拋光及拋光因使用球面模具且均勻與鏡片接觸，因此能快速移除材料；而非球面鏡之局部曲率半徑會隨著徑向位置而改變，無法以傳統固定曲率之模具進行預拋光及拋光，因此非球面鏡之製程較為耗時。

傳統光學量測中，菲佐 (Fizeau) 干涉儀搭配適當的球面或平面標準鏡頭 (transmission sphere or transmission flat) 可以提供標準的球面參考波前或平面參考波前以量測球面或平面待測面之形狀誤差。但球面 (平面) 標準鏡頭無法產生非球面參考波前，所以量測非球面時，必須搭配額外的光學元件、架設或是演算法，才能直接或是間接取得非

球面之形狀誤差。其中使用標準鏡頭搭配 null lens、電腦全像片 (computer generated hologram, CGH) 以及次口徑拼接式 (sub-aperture stitching) 量測是較為普遍的做法。當量測凸面待測件時，其量測口徑又會受限於商用菲佐干涉儀 4 吋或是 6 吋標準鏡頭口徑，可量測範圍不會超過所使用的標準鏡頭口徑。基於上述原因，檢測大口徑非球面鏡片相當困難且與昂貴。Null lens 為特殊設計之透鏡組合，刻意產生球差並改變光線在徑向與角度上的分布，標準波前在通過 null lens 後能被轉換成待測面的參考非球面波前，因此 null lens 要求高精密度之製作與組裝，以降低 null lens 本身的系統誤差^(3,4)。

電腦全像片為特殊訂製品，以繞射方式準確轉換球面波前成檢測非球面時所需要的非球面波前。電腦全像片分為振幅式 (amplitude type) 與相位式 (phase type) 兩類，以相位式穿透率較高，多以電子束 (e-beam) 或光學式直寫 (optical writing) 等積體電路製程製作，可有效控制電腦全像片之表面品質。另外，次口徑拼接式量測也是近來常被使用的方法之一，若非球面與球面波前局部區域內的偏離量不大，量測到之干涉條紋足夠解析或解纏繞 (unwrapping) 出形狀誤差的情況下，便可藉由量測局部區域，再利用多個區域形狀誤差拼接成全域表面形狀誤差。拼接式量測也可以克服量測口徑受限標準鏡頭口徑的問題。但是如果非球面曲面變化過於劇烈，以及非球面曲面偏離最近似球面 (best fit sphere, BFS) 過大則不適用。

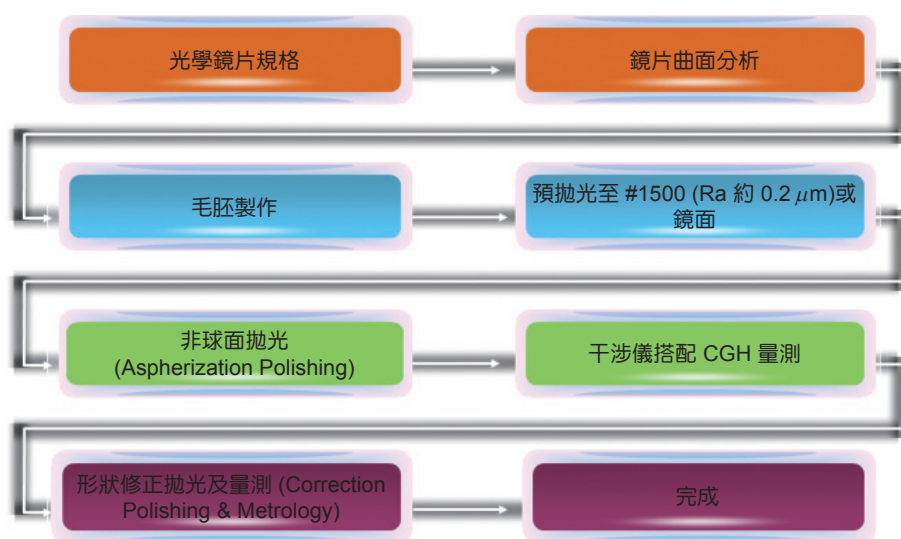


圖 1. 非球面製作流程圖。

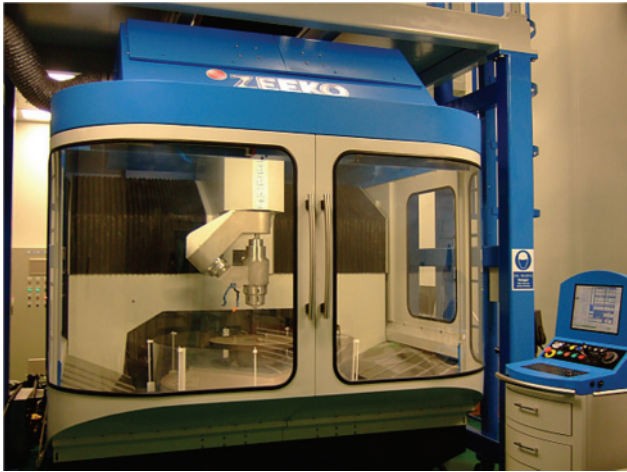


圖 2. 大口徑非球面鏡 CNC 數控拋光機。

本文以卡賽格林光學系統次反射鏡為研究主題，鏡片為 $\phi 160$ mm 之凸面非球面鏡。拋光製程研究的部分，首先將鏡片成形為最近似目標非球面形狀之球面，並以傳統研磨／預拋光方式快速移除次表層破壞層，最後利用機械手臂式 CNC 非球面拋光機，依據量測所取得的 2D/3D 表面誤差形貌 (error map)，搭配不同材料移除率 (material removal rate, MRR) 之拋光墊 (polishing cloth)，過程中再適當地調整拋光參數，最終完成鏡片之非球面化與修正拋光。檢測流程建立的部分，由於次鏡口徑超過 6 吋標準鏡頭口徑，量測採用對環境振動與氣流擾動較不敏感的動態雷射干涉儀搭配電腦全像片，並配合次口徑拼接以獲得鏡片之表面形狀誤差。

二、大口徑非球面鏡製作流程

目前玻璃非球面鏡的製作方式大致有傳統光學拋光⁽⁵⁾、CNC 數控拋光^(6, 7) 及玻璃模造等方法，其中傳統光學拋光與 CNC 數控拋光法適合應用於大口徑非球面鏡，玻璃模造方式僅適用於大量生產的小口徑非球面鏡的製作。傳統光學拋光法使用一個可提供微量變形的拋光工具 (polishing tool)⁽⁸⁾，裝設在擺動機構上，進行非球面的誤差修正拋光，此法具有高度的拋光工具設計及拋光製程技術。CNC 數控拋光法大多採用固定型態的拋光頭 (polishing head)，藉由拋光頭在特定的拋光參數下，提供穩

定的材料移除率，以 CNC 數控的方式精確地將拋光頭定位在待拋光的表面上，並控制拋光頭在鏡面上的停留時間 (dwell time)，達到非球面修正拋光的目的。且拋光頭尺寸可依照鏡片尺寸與幾何形狀而更換，避免產生刀具干涉的問題。由於拋光作用區 (polishing spot) 較小且拋光機制之材料移除率低，對於大口徑光學鏡片而言，所需的拋光時間會較長。

大口徑非球面鏡製程大致仍分為成形、預拋光及修正拋光等程序，其流程如圖 1 所示。在光學設計規格確認後，必須先進行鏡片曲面分析得到最近似球面及其曲率半徑值，並計算此非球面與最近似球面之偏離量值 (departure from BFS)。依據最近似球面曲率半徑值，可向光學玻璃材料供應商訂製此球面玻璃毛胚。以球面毛胚取代非球面毛胚是因為在玻璃進行曲面成形時，為了大量且快速移除材料，通常使用鑽石磨料較粗的砂輪來進行研磨 (grinding)，此加工方式勢必會產生次表層破壞層，為了能快速移除次表層破壞層，使用傳統球面鏡預拋光的方式是最快速的製程。因此在大口徑非球面鏡製程中，成形為最近似球面而非直接成形為非球面，再以傳統球面預拋光方式移除大部分次表層破壞層，是較有效率且兼顧成形後鏡片強度的方式。在球面預拋光製程中，僅需控制其曲率半徑符合所要求的公差與表面品質，過程中利用球徑計 (spherometer) 進行快速曲率半徑檢測，最終再以三次元量床 (coordinate measuring machine, CMM) 或表面輪廓儀確認最後的形狀，可有效節省量測時間。

利用 CNC 數控拋光機搭配適當尺寸之拋光頭，並以穩定的材料移除率及停留時間將球面鏡片修正為非球面曲面，此過程稱為非球面化拋光 (aspherization polishing)。由於此階段已不再使用傳統球面拋光技術來執行，因此鏡片毛胚成形為最近似球面是為了盡量減少非球面化所需移除之材料。在非球面化完成後，鏡片形狀精度及表面粗糙度已達光學等級，因此可使用雷射干涉儀搭配電腦全相片來量測鏡片形狀誤差。將殘餘的形狀誤差輸入至 CNC 數控拋光機，以適當材料移除參數進行最後的誤差修正拋光，直到量測結果符合規格即完成大口徑非球面鏡製作。

三、大口徑凸面雙曲面非球面鏡拋光製程

本研究欲拋光之鏡片為卡賽格林反射式光學系統之次鏡，口徑 $\phi 160$ mm 凸面雙曲面非球面鏡，其最近似球面之曲率半徑為 804.23 mm，形狀精度要求為在光學有效徑 $\phi_e 154$ mm 內 $RMS \leq 35$ nm。鏡片材料為德國 SCHOTT 公司所生產常使用於光學遙測酬載之主次鏡、大型天文望遠鏡以及作為高精度儀器中的參考平面之 ZERODUR[®]，鏡片毛坯已委託玻璃生產商成形為最近似球面，曲率半徑值為 805 mm，因使用 D64 鑽石砂輪成形，預估所產生之次表層破壞層厚度約 $64 \mu\text{m}$ ，將於預拋光製程中移除。本研究所使用之量測儀器包含 Taylor Hobson 之 Form Talysurf 表面輪廓儀，用來量測球面鏡片之曲率半徑及修正拋光前的形狀誤差；以及 4D Technology 之雷射干涉儀，用來量測非球面化完成後之鏡片三維形狀誤差。

1. 機械手臂式 CNC 數控拋光機

本研究所使用之 CNC 數控拋光機為英國 Zeeko 公司所製造之 IRP 1000 拋光機，如圖 2 所示。此拋光機為機械手臂式架構，拋光頭為橡膠中空球體 (bonnet)，可藉由 X、Y、Z、A 及 B 等運動控制軸準確定位於鏡片表面。拋光時中空球體將填充約 1–1.5 bar 之氣體，維持其球面曲率；拋光時工具軸將傾斜一特定角度 (precess angle)，拋光頭接觸鏡片表面產生拋光作用區 (spot size) 進行形狀誤差修正拋光，此法可避免拋光頭旋轉中心的速度靜點，其示意圖如圖 3 所示。如此可使拋光作用區之材料移除量分布為近似高斯形狀 (near-

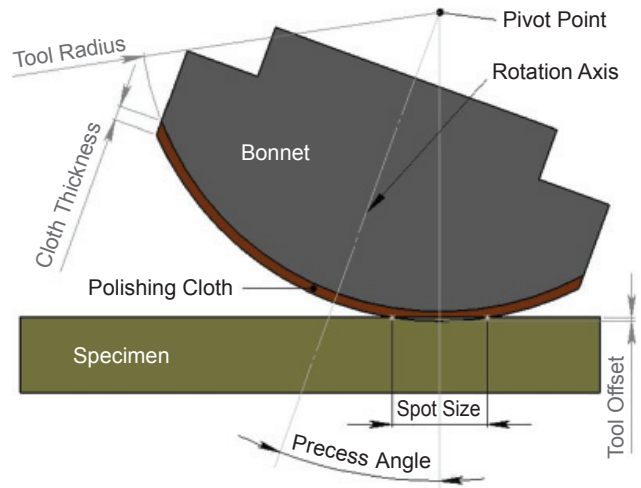


圖 3. 拋光頭於拋光時之示意圖。

Gaussian)，此材料移除輪廓 (removed profile) 或稱為影響函數 (influence function) 較能準確計算出拋光頭在工作表面上正確的停留時間。拋光參數包含拋光頭傾斜角度、拋光頭轉速 (head speed)、拋光頭接觸鏡片的干涉量 (tool offset)、拋光頭內部壓力 (tool pressure)、拋光路徑之間距 (track spacing) 及拋光頭進給速率 (surface feed) 等。拋光頭貼附不同的拋光墊並搭配不同的拋光參數將改變其影響函數，使適用於不同的拋光製程，如圖 4 所示^(9, 10)。

拋光路徑與停留時間是依據材料移除率與鏡片形狀誤差由拋光路徑產生軟體轉換為拋光頭移動進給速度，在鏡片表面形狀誤差大的位置以緩慢移動拋光頭換取較多的拋光時間 (即停留時間較長)，反之則快速移動拋光頭避免過量移除鏡片材料。由於鏡片通常具有非軸對稱形狀誤差，因此拋光採用 S 型 (raster) 的拋光路徑。

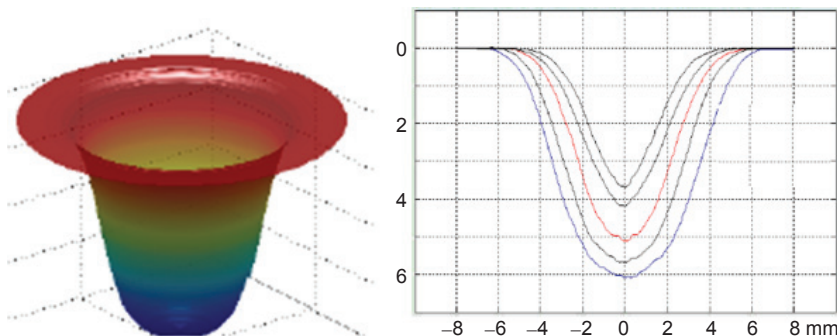


圖 4. 不同拋光參數下之影響函數^(9, 10)。

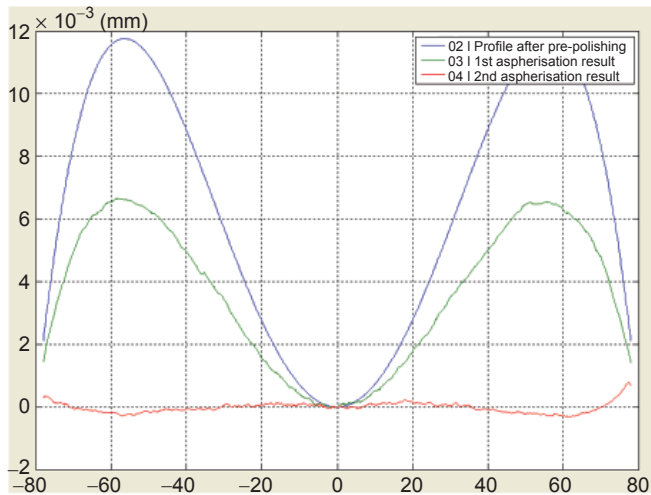


圖 5. 非球面化拋光之結果。

2. 預拋光

本研究之球面毛胚鏡片以傳統球面預拋光製程移除次表層破壞層，使用 #500、#800 與 #1200 之氧化鋁 (Al_2O_3) 磨料，粒徑分別為 $19\ \mu\text{m}$ 、 $11.3\ \mu\text{m}$ 與 $7.1\ \mu\text{m}$ 。D64 鑽石砂輪成形後，大約會產生 $64\ \mu\text{m}$ 次表層破壞層，同時也會在鏡片表面留下較深的研磨刀紋。預拋光製程先以球面模具搭配研磨力較強的 #500 研磨液，將表面的刀紋移除，當表面結構 (surface texture) 改善且均勻後，更換較細的 #800 研磨料繼續移除鏡片表面殘留的細刮傷與刺孔，直到完成 #1200 之研磨。研磨後進行鏡面拋光，由於鏡片是凸面，且口徑超過 6 英吋，無法以干涉儀進行表面誤差量測，因此改以 Form Talysurf 表面輪廓儀進行 2D 輪廓檢測，鏡片預拋光後最終之曲率半徑為 $804.2\ \text{mm}$ 。

3. 非球面化拋光

非球面化拋光及修正拋光均使用 CNC 數控拋光機，移除鏡片形狀誤差模式採材料移除率計算停

留時間方式進行。本研究之非球面離最近似球面之最大偏離量為 $11.8\ \mu\text{m}$ ，亦指在形狀偏差量最大的鏡片表面需移除 $11.8\ \mu\text{m}$ 深度的材料，才能將球面鏡片修正為非球面曲面。本文以預拋光完成後之曲率半徑值建立一非球面化拋光之初始鏡片條件，其徑向不同位置之形狀誤差如圖 5 藍色線所示。為了能縮短非球面化次數與時程，本研究使用聚氨酯素材 (polyurethane) 之拋光墊。此拋光墊表面具有較粗的孔洞，且本身含有二氧化鈾磨料，其材料移除能力較強，同時使用粒徑介於 $1-2\ \mu\text{m}$ 之二氧化鈾 (CeO_2) 拋光粉，與水調合成比重 1.03 之拋光液 (slurry)。

鏡片長時間與拋光墊接觸或過長的拋光時間容易生熱，使鏡片表面產生橘皮組織 (orange peel) 而降低鏡片表面品質；而使用材料移除率較強的影響函數來降低拋光時間時，又會在鏡片表面留下較深的拋光路徑痕跡，同樣會影響鏡片表面品質。因此本研究將此非球面化製程分為 2 次來執行，設定以形狀偏離量的一半 $5.9\ \mu\text{m}$ 做為單趟非球面化拋光欲移除材料最大深度，拋光後以 Form Talysurf 表面輪廓儀進行鏡片之形狀誤差量測。非球面化拋光前，先測試拋光墊在特定拋光參數之材料移除深度 (DC removal)，為了得到與實際非球面化所需的拋光機制，使用一片曲率半徑與 BSF 相當且材質相同的球面鏡進行拋光測試，材料移除深度測試所使用的拋光參數與預設的非球面化拋光相同，拋光測試後經由輪廓儀量測，得到 DC removal 為 $2\ \mu\text{m}$ ，非球面化拋光即以此結果為計算拋光停留時間的依據。經過 2 趟非球面化拋光，鏡片形狀誤差變化如圖 5 所示，非球面化所使用的拋光參數如表 1 所列，鏡片實際拋光的情況如圖 6 所示。圖 5 中綠色輪廓為第一次非球面化拋光後之結果，形狀精度為 P-V $6.7\ \mu\text{m}$ ，總共移除的誤差比預期少 $0.8\ \mu\text{m}$ ，顯

表 1. 非球面化拋光參數。

Run #	H speed (rpm)	Tool offset (mm)	Track Spacing (mm)	Tool Pressure (bar)	DC Removal (μm)	Time (min)
01	800	0.25	0.3	1	2	402
02	800	0.25	0.28	1	2	430

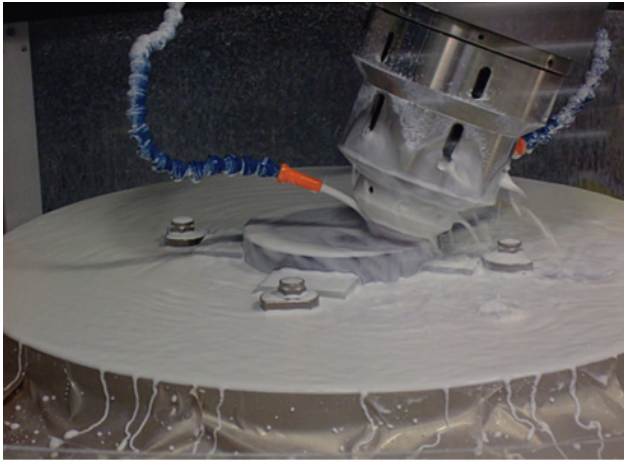


圖 6. 鏡片實際拋光情況。

然設定的材料移除率稍小。因此，調整第二趟非球面化拋光的 track spacing 至 0.28 mm，將材料移除率提高一點，且為了避免兩趟的拋光路徑相同，會造成明顯的拋光路徑痕跡 (tool marks)，第二次非球面化時改變鏡片夾持的角度，以交錯的拋光路徑，降低拋光路徑重複的路徑痕跡效應。紅色輪廓為經過第二次非球面化拋光之結果，形狀精度為 P-V 1.1 μm ，此結果已符合非球面化所需達到的形狀精度。

非球面化拋光完成後，以干涉儀搭配 CGH 進行曲面 3D 誤差形貌的拼接量測，量測結果其形狀精度為 P-V 1.12 μm ，如圖 7 所示。從圖 5 與圖 7 可明顯看出，2D 與 3D 的形狀誤差在誤差量與誤差輪廓都相當一致，皆為中間與邊緣區域偏高。

4. 修正拋光

執行修正拋光時，必須因應殘餘的鏡片形狀誤差大小，宜採用軟質拋光墊，並配合調整拋光參數，以較微量的材料移除率進行精確的形狀誤差修正。本研究採用 3M 所生產的 Uni-nap 作為修正拋光時之拋光墊，並使用與非球面化拋光同樣條件的二氧化鈾拋光液。修正拋光所使用的 DC removal 及拋光參數是參考原廠針對 Uni-nap 拋光 ZERODUR[®] 材料之建議值，再依據實際的差異量調整，Uni-nap 拋光頭及拋光參數建議值如圖 8 所示。

根據非球面化拋光的結果，第一次修正拋光所需移除的誤差約為 1.12 μm ，原廠所建議的拋光

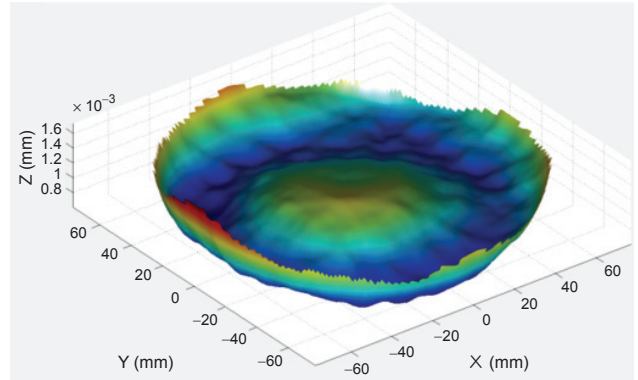


圖 7. 非球面化拋光後之 3D 誤差形貌。

參數其材料移除能力較為保守，所需的拋光時間增加，因此第一次修正拋光時提高拋光頭轉速至 1200 rpm，並且縮小拋光路徑的 track spacing 至 0.35 mm，理論上 DC removal 將提高至 0.28 μm ，但尚無法確認拋光參數的適用性，為了避免發生過度拋光 (over correction) 的情況，因此第一次修正拋光將 DC removal 設定為 0.3 μm 。第一次修正拋光的結果如圖 9 所示，鏡片形狀精度為 RMS 105.2 nm、P-V 0.66 μm 。

第一次的修正拋光僅移除約一半的形狀誤差，顯然刻意增加 DC removal 是不必要的，因此第二次修正拋光完全依照原廠的建議值，將拋光頭轉速設定為 1000 rpm，track spacing 縮小至 0.3 mm，直接使用 DC removal 的理論值 0.274 μm 。第二次修


Precess Angle (degs)	20	
Head Speed (rpm)	950	
Tool Offset (mm)	0.25	
Tool Overhang (mm)	2	
Tool Pressure (bar)	1.5	
Rotation (degs)	0	
Point Spacing (mm)	0.5	Removal Test Info DC Removal (μm): 0.13 Feed (mm/min): 1000 Head Speed (rpm): 1200 # Precess: 2
Track Spacing (mm)	0.6	
Surface Feed (mm/min)	1000	

圖 8. Uni-nap 拋光墊及原廠建議之拋光參數。

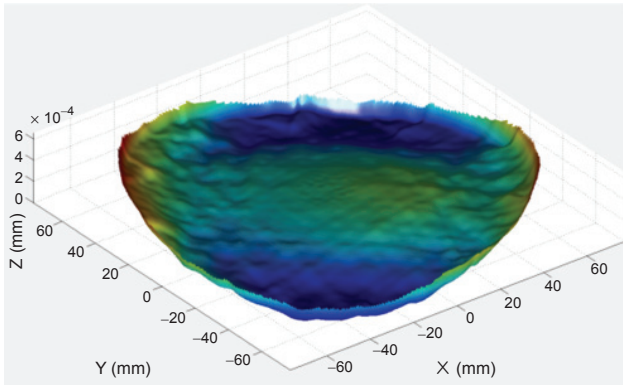


圖 9. 第一次修正拋光結果。

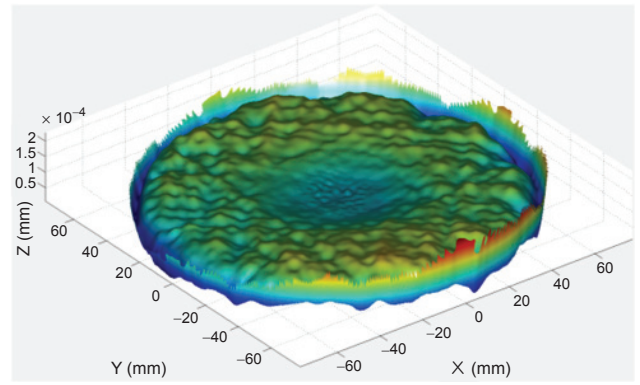


圖 10. 第二次修正拋光結果。

正拋光的結果如圖 10 所示，鏡片形狀精度為 RMS 22.6 nm、P-V 0.22 μm 。

第二次修正拋光的參數確實有效地移除鏡片的誤差，也達到形狀誤差 $\text{RMS} \leq 35 \text{ nm}$ 的規格要求，但卻有邊緣翹起情形；本研究再度修正拋光參數，進行第三次修正拋光，改善鏡片邊緣翹起的部分。經過 3 次的修正拋光，總共花費 446 分鐘，最終結果如圖 11，在鏡片有效口徑 $\phi_e 154 \text{ mm}$ 範圍內，形狀精度為 RMS 17.9 nm、P-V 0.15 μm 。表 2 為三次的修正拋光所使用的參數。

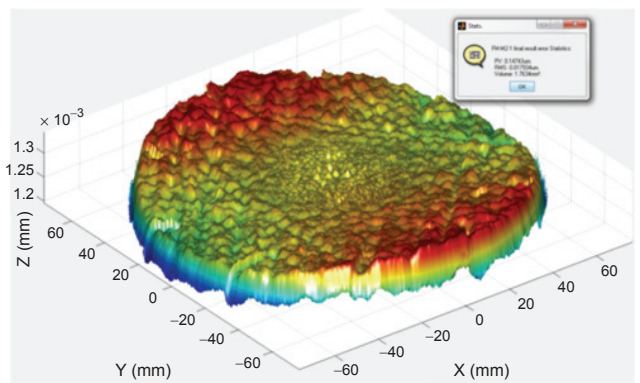


圖 11. 凸面雙曲面鏡拋光量測結果。

四、大口徑凸面雙曲面非球面鏡檢測

大口徑凸面雙曲面鏡之量測光路及架設如圖 12 所示，干涉儀採垂直式架設並搭配 6 吋平面標準鏡頭，電腦全像片則根據鏡片規格製作，安裝於標準鏡頭與待測鏡片之間。垂直量測時，平面標準鏡頭與電腦全像片會受重力影響而變形，當口徑增大時，變形量也會隨之增加。為了取得待測非球面正確的形狀誤差，除了干涉儀本身系統誤差之外，也必須考慮平面標準鏡頭與電腦全像片受重力影響

產生之波前誤差。

以干涉儀搭配 CGH 進行非球面量測時，量測波前通過標準鏡頭、電腦全像片經由待測非球面反射成為待測波前誤差，圖 13 為量測架設示意圖。待測波前誤差包含標準鏡頭參考面形狀誤差、電腦全像片波前誤差、系統誤差及待測鏡面的誤差，如公式 (1) 所表示，其中 ΔW_{test} 為量測時總波前誤差， ΔW_{system} 為系統誤差， n 為標準鏡頭鏡片折射率， ΔS_{ref} 為標準鏡頭參考面形狀誤差， ΔW_{CGH} 為

表 2. 修正拋光參數。

Run #	H speed (rpm)	Tool offset (mm)	Track Spacing (mm)	Tool Pressure (bar)	DC Removal (μm)	Time (min)
01	1200	0.25	0.35	1.5	0.3	187
02	1000	0.25	0.3	1.5	0.274	206
03	1200	0.25	0.5	1.5	0.197	53

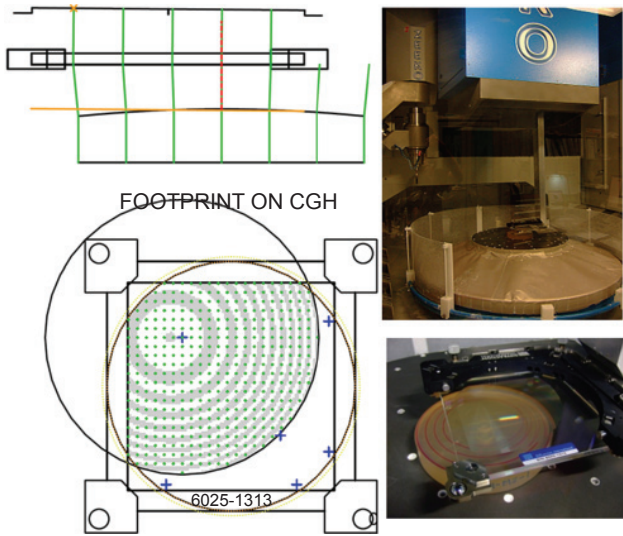


圖 12. 凸面雙曲面鏡之量測光路及架設。

電腦全像片產生的波前誤差， ΔS_{test} 為鏡面的形狀誤差。實際的非球面表面形狀誤差必須將系統誤差、標準鏡頭參考面形狀誤差及電腦全像片波前誤差扣除方能得之。光學干涉量測是以標準鏡頭參考面所產生的參考波前 (reference wavefront) 與待測鏡面所回射待測波前 (test wavefront) 做比較式的量測，其中參考波前誤差 ΔW_{ref} 如公式 (2) 所示。待測非球面的形狀誤差 ΔS_{test} 可由公式 (1) 減去公式 (2) 後得到，如公式 (3) 所示。以下將詳細說明如何取得 ΔS_{ref} 與 ΔW_{CGH} ，並且應用於凸面雙曲面非球面鏡之量測。

$$\Delta W_{\text{test}} = \Delta W_{\text{system}} + 2(1-n)\Delta S_{\text{ref}} + 2\Delta W_{\text{CGH}} + 2\Delta S_{\text{test}} \quad (1)$$

$$\Delta W_{\text{ref}} = \Delta W_{\text{system}} - 2n\Delta S_{\text{ref}} \quad (2)$$

$$\Delta S_{\text{test}} = \frac{1}{2}(\Delta W_{\text{test}} - \Delta W_{\text{ref}}) - \Delta S_{\text{ref}} - \Delta W_{\text{CGH}} \quad (3)$$

1. 雷射系統誤差與標準鏡頭參考面形狀誤差量測

本研究量測時使用 6 吋平面標準鏡頭，面精度為 $P-V \leq 35 \text{ nm}$ 。因採垂直式架設，在重力影響下，標準鏡頭參考面會產生變形。為了取得標準鏡頭參考面變形後的形狀誤差，採用校正球 (radom ball) 檢測概念⁽¹¹⁾，經由多次量測不重複的表面形貌並加以平均，以獲得重力變形所產生的形狀誤

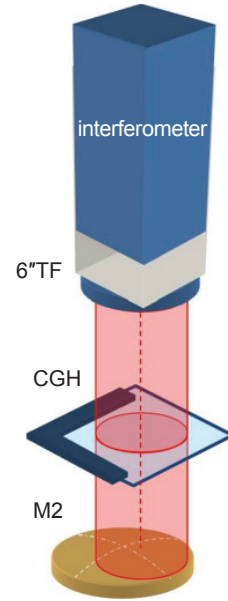


圖 13. 干涉儀搭配 CGH 進行非球面量測示意圖。

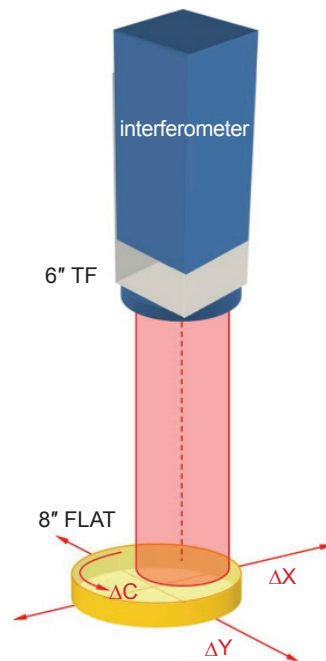


圖 14. 標準鏡頭參考面形狀誤差量測示意圖。

差 ΔS_{ref} 。以干涉儀量測一待測面時，待測波前誤差 ΔW_{test} 包含了 ΔW_{system} 系統誤差、標準鏡頭參考面形狀誤差 ΔS_{ref} 與待測面形狀誤差 ΔS_{test} ，其數學表示式如公式 (4) 所表示，其中 n 為標準鏡頭鏡片折射率。參考波前可表示為 ΔW_{ref} ，如公式 (2) 所列。在經過參考波前與待測波前比較式的量測後，

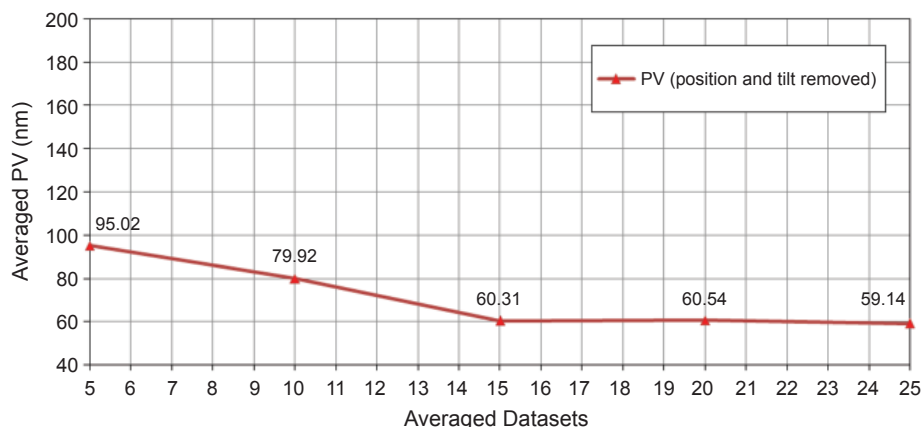


圖 15. 標準鏡頭參考面形狀誤差量測結果。

在干涉儀取得的量測結果 W 可由公式 (4) 減去公式 (2) 後得到，如公式 (5) 所示。

$$\Delta W_{\text{test}} = \Delta W_{\text{system}} + 2(1-n)\Delta S_{\text{ref}} + 2\Delta S_{\text{test}} \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{2}(\Delta W_{\text{test}} - \Delta W_{\text{ref}}) = \Delta S_{\text{test}} + \Delta S_{\text{ref}} \quad (5)$$

若 W_n 為第 n 次量測所取得的波前誤差，這當中包含了標準鏡頭參考面所反射的形狀誤差 ΔS_{ref} 以及第 n 次量測時的待測表面之形狀誤差 $(\Delta S_{\text{test}})_n$ ，如公式 (6) 所示。在 n 次量測不重複之表面後，其平均波前 W_{ave} 如公式 (7) 所示，如果量測取

樣數 n 足夠多 ($\lim_{n \rightarrow \infty} (\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta S_{\text{ref}})_n) = 0$)，以及標準鏡頭在每次量測時均不變動，所以 $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta S_{\text{ref}})_n = \Delta S_{\text{ref}}$ ，公式 (7) 將會收斂成 $W_{\text{ave}} = S_{\text{ref}}$ ，參考面之形狀誤差即為多次量測不重複表面形狀誤差的平均值。

$$W_n = (\Delta S_{\text{test}})_n + (\Delta S_{\text{ref}})_n \quad (6)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{ave}} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((\Delta S_{\text{test}})_n + (\Delta S_{\text{ref}})_n) \quad (7) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta S_{\text{test}})_n + \Delta S_{\text{ref}} \end{aligned}$$

一般校正球檢測通常用於量測球面標準鏡頭，由於本研究量測是使用平面標準鏡頭，所以參考 Zygo 干涉儀取得系統誤差的方法⁽¹²⁾，以表面精

度 $P-V \leq 110 \text{ nm}$ 的八英吋 Pyrex 平板取代待測球體，量測系統之架設如圖 14 所示。在每次量測後隨意移動 (ΔX 與 ΔY) 與旋轉 (ΔC) 待測平板，使得每次的測試可以量測到不重複的表面形貌。圖 15 為個別量測 5 次、10 次、20 次及 25 次後移除位準 (position/piston) 與傾斜 (tilt) 像差項次的平均結果，量測次數約 15 次時開始收斂，最終量測 25 次時，標準鏡頭參考面形狀誤差 ΔS_{ref} 為 P-V 59.14 nm。最後以 120 項次之 Zernike 函數擬合 (fitting) 後 P-V 為 59.14 nm、RMS 為 13 nm，誤差型貌為三葉形 (trefoil) 形式之變形，如圖 16 所示。

2. 電腦全像片波前誤差 (ΔW_{CGH}) 量測

本研究中量測所用的電腦全像片為熔融石英玻璃 (fused silica) 基材，尺寸為 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。當電腦全像片裝置在夾具上時，輔助對準用的回射干涉條紋 (retro fringe) 呈現出像散 (astigmatism) 形式變形，如圖 17 所示，此變形產生的穿透波前誤差 ΔW_{CGH} 必須加以扣除，以取得真實的表面形狀誤差。量測上必須分別以含有電腦全像片以及沒有電腦全像片 (empty cavity) 兩種光路量測同一個標準平面，如圖 18 所示，兩者間的差異即為電腦全像片波前誤差 ΔW_{CGH} 。在這兩次量測中，除了光路中有無裝設電腦全像片的差異之外，其餘如干涉儀及標準平面的定位均須保持一致，避免引入額外的誤差。根據公式 (3) 的概念，這兩次量測取得的資訊 ΔS_{test1} 及 ΔS_{test2} 如公式 (8) 與公式 (9) 所示，其中電腦全像片波前誤差 ΔW_{CGH} 即為兩式相減後之結

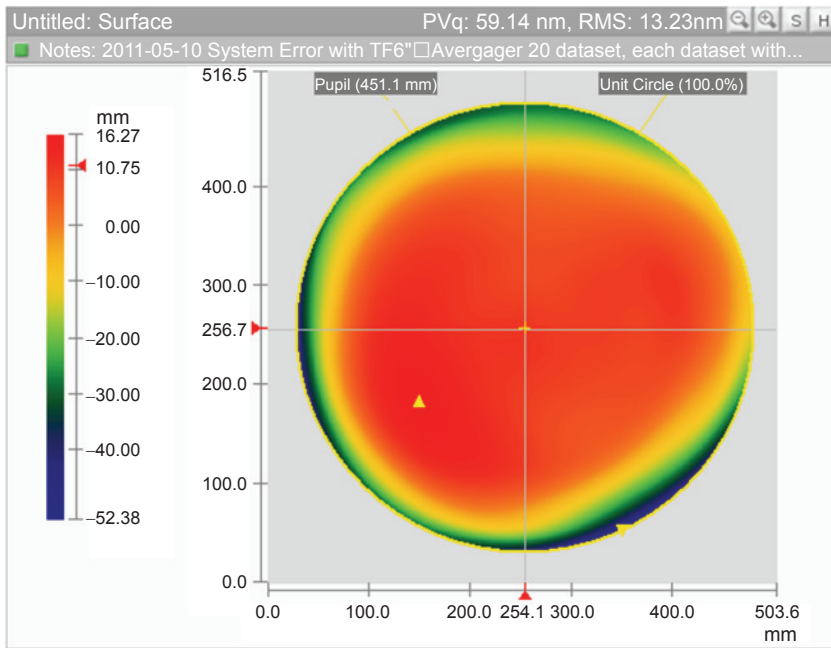


圖 16. 25 次平均後之標準鏡頭參考面形狀誤差 ΔS_{ref} 。

果，如公式 (10) 所示。

$$\Delta S_{test1} = \frac{1}{2}(\Delta W_{test} - \Delta W_{ref}) - \Delta S_{ref} - \Delta W_{CGH} \quad (8)$$

$$\Delta S_{test2} = \frac{1}{2}(\Delta W_{test} - \Delta W_{ref}) - \Delta S_{ref} \quad (9)$$

$$\Delta W_{CGH} = \Delta S_{test2} - \Delta S_{test1} \quad (10)$$

量測過程中發現，電腦全像片波前誤差會與電腦全像片在夾治具上的姿態有極大的關連，因此每次量測時電腦全像片必須控制在相同姿態，其波

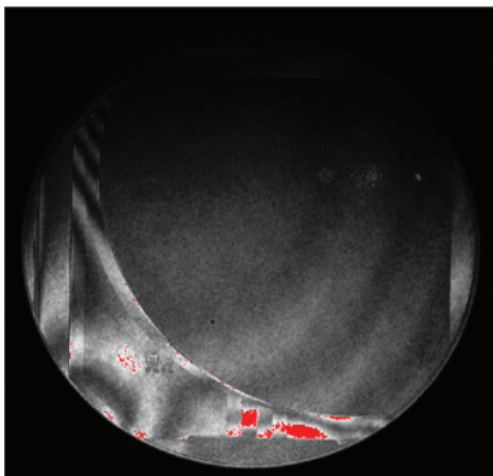


圖 17. 左下角為輔助對準用的回射干涉條紋。

前誤差值才會具有重複性，利用輔助對準用的回射干涉條紋可以有效地監控電腦全像片姿態。調整時必須盡可能讓條紋呈現無像差 (null)，並確認每次量測之干涉條紋呈現一致。圖 19 為 4 次量測平均後之電腦全像片波前誤差 ΔW_{CGH} ，資料以遮罩 (mask) 保留量測需要區域，並移除位準與傾斜

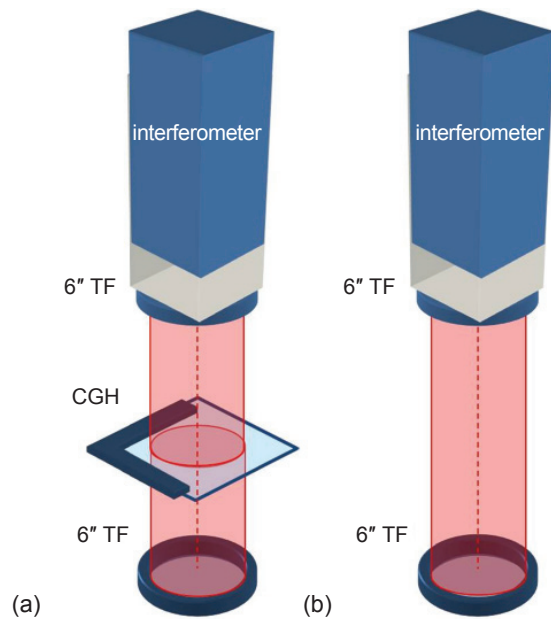


圖 18. CGH 波前誤差量測架設示意圖，(a) 含 CGH，(b) 不含 CGH。

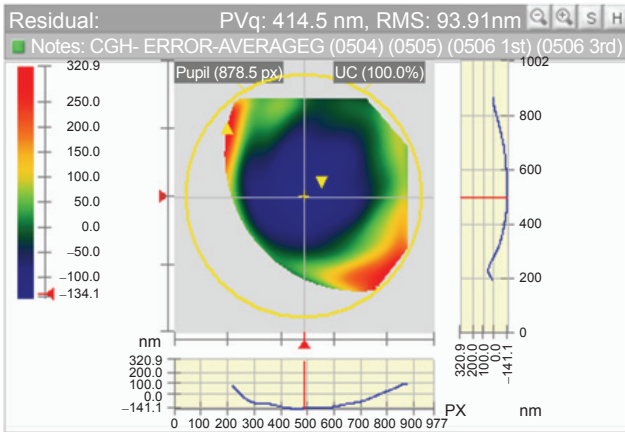


圖 19. 電腦全像片波前誤差。

像差項次，得到穿透波前誤差 ΔW_{CGH} 為 P-V 414.5 nm、RMS 93 nm。

3. 大口徑凸面雙曲面非球面拼接量測

根據 CHG 的設計規格，此全像片僅能涵蓋部分待測區域，所以必須分區域量測，最後拼接成全域的表面形貌。此全像片為非對稱式設計，全像片中心與待測非球面頂點在 x 方向與 y 方向各有 25 mm 與 30 mm 的偏位 (offset)，干涉儀、全像片以及待測非球面間的姿態與方位必須對準。本研究的量測規劃是以每 36 度為區間 (rotation spacing) 旋轉鏡片，以 10 個次口徑 (sub-aperture) 之表面形貌拼接成全域的表面形貌。姿態與方位的調校可以五軸移動平台的數控資料為基準，觀察不同次口徑區域干涉條紋變化，盡可能調整每個次口徑的干涉條紋到無像差位置 (null)。在實務上，干涉儀姿態若有偏差時，形狀誤差會引入傾斜 (tilt) 與彗差 (coma) 等像差，調校時盡量收斂傾斜與彗差像差在一個相對極小的量值之內，即可有效地調整干涉儀姿態，在確定特徵區域如 0 度、90 度、180 度與 270 度等次口徑的干涉條紋 (如圖 20 所示) 與傾斜及彗差量值後，便可依序量測各個次口徑的表面形狀誤差，如公式 (3) 所示，再扣除參考面形狀誤差 ΔS_{ref} 與電腦全像片波前誤差 ΔW_{CGH} 之表面形狀誤差後可得到正確的次口徑形狀誤差，如圖 21 所示，再透過軟體拼接成全域的表面形狀誤差，如圖 7 所示，量測的結果將作為計算修正拋光路徑之依據。

五、結果與討論

1. 大口徑雙曲面非球面鏡拋光製程

以傳統球面研磨預拋光來移除鏡片成形所產生的次表層破壞層，是一種非常成熟且可靠的製程，具有時間短與效率高的優點。以本研究口徑 $\phi 160$ mm 雙曲面非球面鏡來說，預拋光僅需三天時間，即可將鏡片表面之次表層破壞層及刮傷與刺孔完全移除。非球面化拋光製程亦可視為修正拋光，將球面修正為非球面曲面，因材料移除量較修正拋光多，因此使用移除率大的拋光墊。本鏡片二趟非球面化拋光分別花費 402 與 430 分鐘，第一次約修正 $5.1 \mu\text{m}$ 誤差量，第二次約修正 $5.58 \mu\text{m}$ 誤差量，因為本研究於非球面化時使用新的拋光墊，由於新的拋光墊經過第一次非球面化拋光後，拋光墊已飽含二氧化鈾拋光粉而使得材料移除能力增加。非球面化拋光在大口徑鏡片製程中有重要的影響，在修正鏡片形狀時，必須避免留下較深的拋光路徑痕跡，同時對鏡片邊緣不可有過量移除材料的情形出現，因上述情形會造成後續修正拋光時，在計算鏡片不同位置之拋光停留時間比例相差過大，而無法正確執行材料移除。

鏡片完成非球面化拋光後，因修正拋光所需移除的材料量較小，且拋光機進給軸之移動速度有其

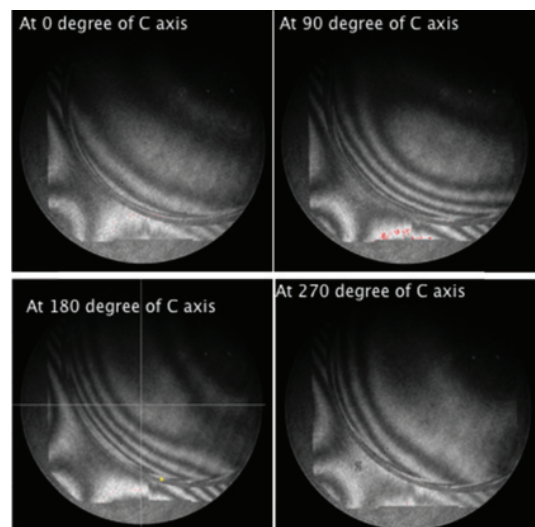


圖 20. 鏡面在 0° 、 90° 、 180° 與 270° 之次口徑干涉條紋。

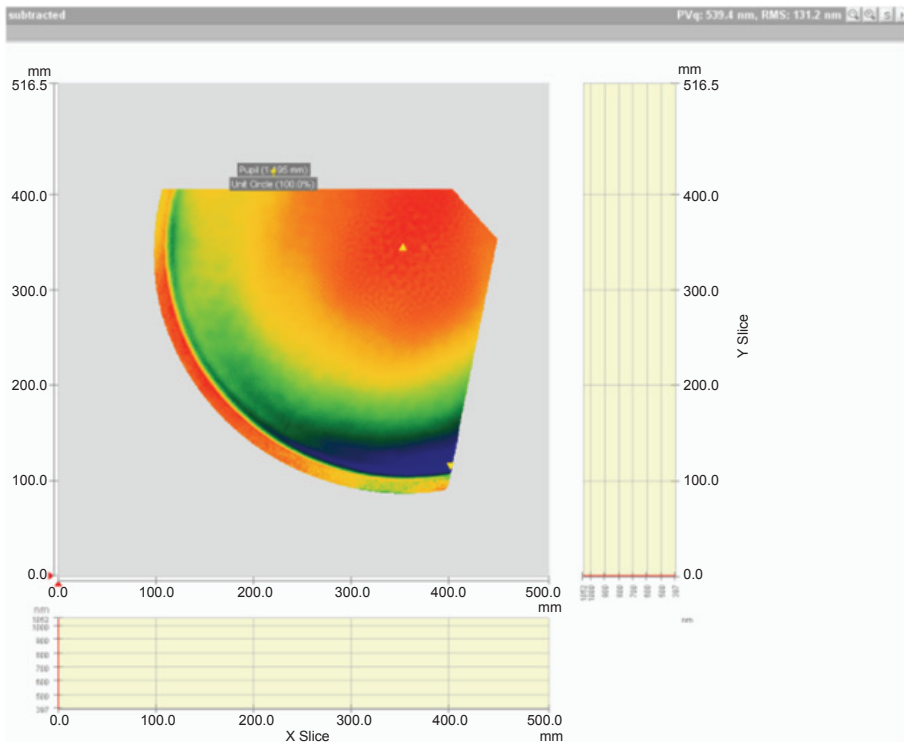


圖 21.
鏡片之次口徑形狀誤差。

上限，若持續使用材料移除率高的拋光墊會有過度拋光 (over correction) 及移動速度過快的情況發生，因此修正拋光採用材料移除率較低的軟質拋光墊來解決上述的問題，且軟質拋光墊可以得到更細緻的鏡片表面結構。修正拋光為大口徑鏡片製作的最後一階段，需謹慎評估材料移除率，避免過度修正曲面形狀，修正拋光過程中依據量測的結果，適度地調整拋光參數，以得到正確的材料移除率。由圖 7、圖 9、圖 10、圖 11 的量測結果可知，鏡片形狀誤差隨著每一次修正拋光而收斂，過程中所產生的像散誤差 (astigmatism error) 亦被精確修正，代表本研究所使用的影響函數 (材料移除率) 是準確的。最終結果雖呈現微量的像散，但已符合本研究之光學規格要求，此像差推估是第三次修正拋光時夾持鏡片所產生的應力所造成。由於鏡片形狀誤差尺度變小，因此鏡片表面細微之形貌逐一顯現。由圖 11 可知，中高頻的表面形貌應是交錯的拋光路徑所留下，尤其以非球面化時所留下的痕跡最為明顯。本研究因受限於拋光頭的尺寸，無法移除此一誤差，未來將嘗試以不同拋光方式，如離子束拋光、磁流拋光或流體噴射拋光⁽¹³⁻¹⁵⁾，來提升鏡片表面品質。

2. 大口徑凸面雙曲面非球面鏡檢測

本研究的量測設施以直立式高塔搭載五軸電動平台，並將干涉儀安裝在五軸電動平台上，實現機上量測 (on-machine metrology) 的概念。但是垂直式的架構會因為重力而導致標準鏡頭變形，搭配干涉儀使用的全像片也因為自身基材、夾治具及重力因素而產生穿透波前誤差，這些變形與誤差都會直接影響到最終量測的結果，必須加以扣除，以取得正確的待測非球面形狀誤差。本研究參考校正球量測與 Zygo 干涉儀取得系統誤差的方法，利用多次量測不重複的表面形貌，以獲得使用中的 6 吋標準鏡頭因重力變形所產生的形狀誤差 ΔS_{ref} ，誤差為 P-V 60.87 nm、RMS 13 nm 之三葉狀變形。 ΔS_{ref} 形狀誤差相較來說較為單純，因為標準鏡頭在本研究中調整至定位後便不再變動，變形量也因此固定。相對於參考面形狀誤差 ΔS_{ref} ，全像片波前誤差 ΔW_{CGH} 的差異性就很大。原因在於 ΔW_{CGH} 波前誤差與全像片在夾治具上的姿態有很大關係，因為每次量測時干涉儀的姿態與全像片的位置與姿態都略有不同，使得全像片的姿態在每次量測時都必須重新調整。為了取得一致的 ΔW_{CGH} 波前誤差，每次量測時必須確認輔助對準用的回射干涉條紋與之

前條紋的一致性，以確認全像片保持在相同的姿態。量測過程中再經過反覆確認後，遮罩區域內之全像片波前誤差 ΔW_{CGH} ，在移除位準與傾斜像差項次後為 P-V 414.5 nm、RMS 93 nm，呈現凹陷狀之變形。

取得參考面形狀誤差 ΔS_{ref} 與電腦全像片波前誤差 ΔW_{CGH} 後，依據公式 (3)，即可求得正確的非球面表面形狀誤差。因為全像片僅涵蓋待測非球面部分區域，必須以次口徑拼接的方式才能取得全域的表面形狀誤差，拼接時每個次口徑必須重疊 1/3 以上的區域，以提供軟體擬合與拼接時足夠的資訊。本量測規劃以每 36 度為區間、以 10 個次口徑

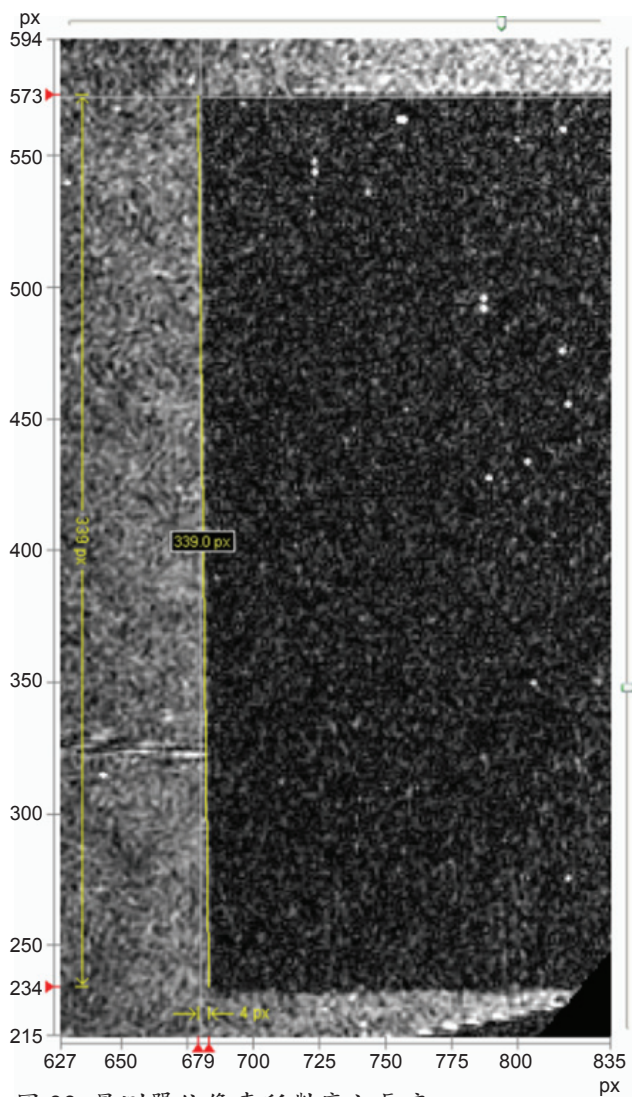


圖 22. 量測單位像素所對應之長度。

拼接完成。量測前，必須調整干涉儀、全像片以及待測非球面間的相對姿態，使每個次口徑的干涉條紋能有一致性，並接近無像差位置。如此便可以依序對各個次口徑的干涉條紋取像，計算出其表面形狀誤差，扣除 ΔS_{ref} 與 ΔW_{CGH} ，並以軟體拼接成全域的表面形狀誤差。

拼接前，必須指定單位像素之相對長度 (mm/pixel)，軟體拼接後將直接輸出為實際尺寸。單位像素之相對長度可藉由量測一已知長度之物件與其對應之像素得知，圖 22 為量測名片長度所對應的像數。此對應關係與干涉儀之變焦比與對焦相關，當上述兩者一經變動，則必須重新確認此對應關係。拼接前亦必須指定拼接之基準中心，理論上拼接基準中心必須與待測非球面中心一致，各個次口徑表面形狀誤差必須以此為基準，再依照各個次口徑量測先後順序加以拼接。完成所有次口徑之量測後，可旋轉 C 軸，並於待測非球面表面上畫出數個半徑不同的同心圓。擷取含有同心圓註記的干涉條紋相位調變影像 (modulation)，找出各同心圓圓心對應的中心像素位置，並以其平均值作為拼接時的基準中心，如圖 23 所示。當軟體完成拼接後，須檢視各個次口徑重疊區域拼接後的殘餘誤差量，並適當微調拼接之基準中心位置，以盡量縮小殘餘誤差量，但微調以數個像素為限，如圖 24 所示。

完成拼接後，全域的表面形狀誤差仍然需要一些後處理，如邊緣資料的去除修整以及傾斜像差的移除等，才能用於修正拋光。量測上為了保留待測面邊緣的資訊，遮罩區域會大於干涉條紋可視範圍，軟體利用干涉條紋解算表面形狀誤差時，會擬合並填補干涉條紋可視範圍至遮罩區域間的表面形狀誤差。在使用拼接後的全域表面形狀誤差或是任何量測結果前，均必須反覆確認資料範圍與干涉條紋可視範圍相符，用於修正拋光之表面形狀須為實際量測資訊，擬合填補的資料必須用遮罩加以去除修整 (trim)。利用 Zernike 多項式分析表面形狀誤差能瞭解各個像差之貢獻，傾斜 (tilt) 項次來自於調整誤差或是待測面本身之傾斜，可以藉由組裝調整得到補償，修正拋光時通常不考慮傾斜項次之影響而將其移除。

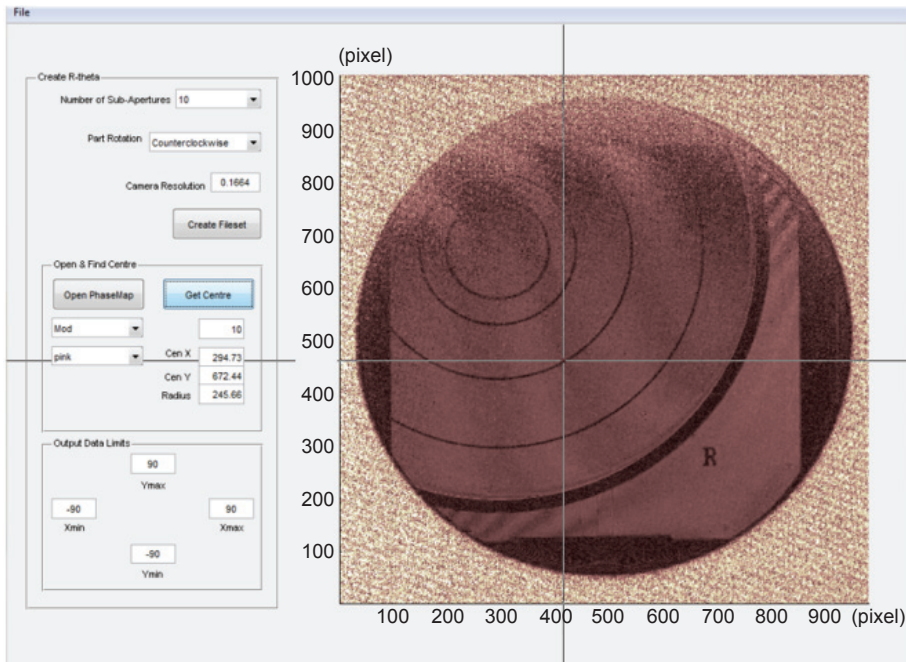


圖 23. 含有定位用同心圓註記的干涉條紋相位調變影像 (modulation)。

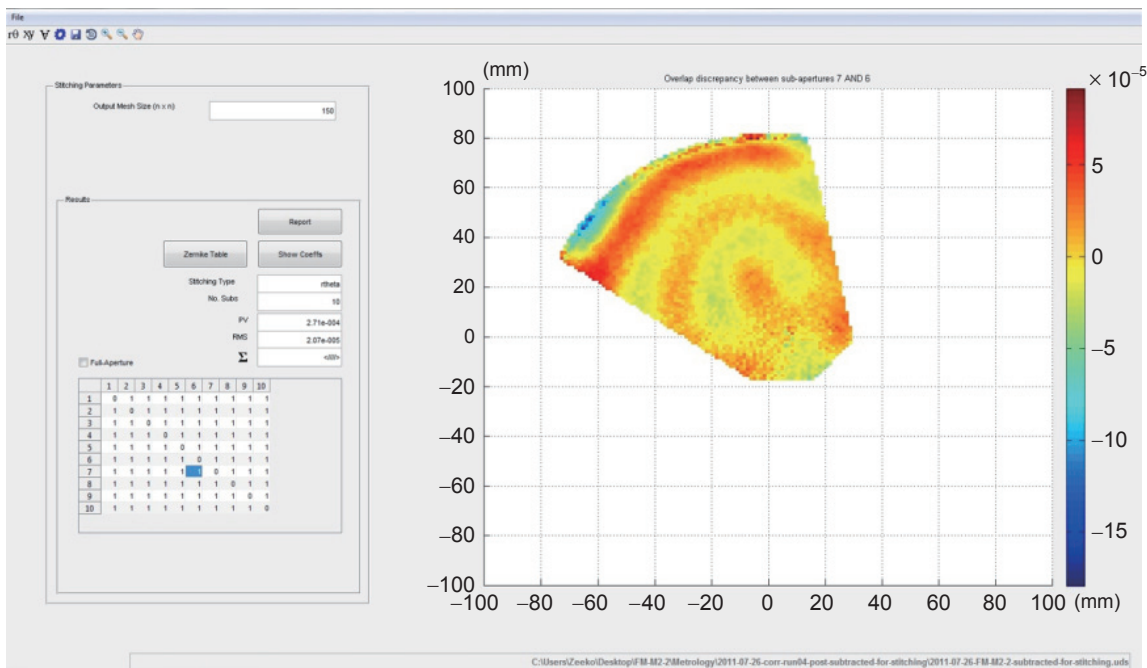


圖 24. 次口徑相關矩陣與拼接殘餘誤差。

六、結論

本文以傳統球面鏡研磨預拋光技術搭配機械手臂式拋光技術，並結合干涉儀與 CGH 進行次口徑拼接量測，完成高效率的大口徑非球面鏡拋光製程及大口徑凸面非球面鏡檢測流程之開發，建立完整的大口徑非球面鏡拋光及檢測技術。本研究並

完成口徑 $\phi 160$ mm、非球面偏離量 $11.8 \mu\text{m}$ 之雙曲面凸面非球面鏡製作，其最終形狀精度為 P-V $0.15 \mu\text{m}$ 、RMS 17.9 nm ，已符合太空等級光學元件之要求。未來本研究將繼續投入更大尺寸之非球面鏡製作，包含拋光及檢測技術都將進一步探討與研究，期能建立更具效率且更精確之拋光及檢測技術，提升國內大口徑精密光學製作技術之能量。

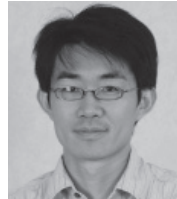
參考文獻

1. G. H. Smith, *Practical Computer-Aided Lens Design*, Willmann-Bell Inc., 339 (1998).
2. [http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/schott_tie-38_zerodur_lightweighting_v3_march_2008_en.pdf?highlighted_text=subsurface damage](http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/schott_tie-38_zerodur_lightweighting_v3_march_2008_en.pdf?highlighted_text=subsurface%20damage)
3. J. H. Burge, "Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics", *Proc. SPIE*, **2576**, 258 (1995).
4. J. H. Burge and D. S. Anderson "Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates" *Proc. SPIE*, **2199**, 181 (1994).
5. J. H. Burge, B. Anderson, and S. Benjamin, M. Cho, K. Smith and M. Valente, "Development of optimal grinding and polishing tools for aspheric surfaces", *Proc. SPIE*, **4451**, 153 (2001).
6. D. D. Walker, A. T. H. Beaucamp, D. Brooks, R. Freeman, A. King, G. McCavana, R. Morton, D. Riley and J. Simms, "Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces", *Proc. SPIE*, **4767**, 99 (2002).
7. D. D. Walker, A. T. H. Beaucamp, V. Doubrovski, C. Dunn, R. Evans, R. Freeman, J. Kelchner, G. McCavana, R. Morton, D. Riley, J. Simms, G. Yu, and X. Wei, "Automated optical fabrication—first results from the new Precessions 1.2 m CNC polishing machine", *Proc. SPIE*, **6273**, 91 (2006).
8. M. T. Tuell, J. H. Burge, and B. Anderson, *Opt. Eng.*, **41** (7), 1473 (2002).
9. D. D. Walker, A. T. H. Beaucamp, D. Brooks, R. Freeman, A. King, G. McCavana, R. Morton, D. Riley, and J. Simms, "The First Aspheric Form and Texture Results From a Production Machine Embodying the Precession Process" *Proc. SPIE*, **4451**, 267 (2001).
10. D. D. Walker, D. Brooks, A. King, R. Freeman, R. Morton, G. McCavana, and S. W. Kim, *Optics Express*, **11**, 958 (2003).
11. U. Griesmann, Q. Wang, J. Soons, and R. Carakos, "A simple ball averager for reference sphere calibrations", *Proc. SPIE*, **5869**, 58690S (2005).
12. ZYGO, MetroPro Reference Guide OMP-0347, pps. 4-10 (2004).
13. 余宗儒, 許巍耀, 陳俊成, 郭慶祥, 氣動式流體噴射拋光研究, 中國機械工程學會第二十七屆全國學術研討會論文集, 非傳統加工類, DD15-013, 台北, 台灣 (2010).
14. Z.-R. Yu, C.-H. Kuo, C.-C. Chen, W.-Y. Hsu, and D.-P. Tsai, "Study of Air-driving Fluid Jet Polishing", *Proc. SPIE*, **812611** (2011).
15. O. W. Föhnle, H. van Brug, and J. Frankena, *Appl. Opt.*, **37** (28), 6671 (1998).



郭慶祥先生為大葉大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Ching-Hsiang Kuo received his M.S. in mechanical engineering from Da-Yeh University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



余宗儒先生為國立台灣海洋大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Zong-Ru Yu received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan Ocean University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



何承舫先生為國立成功大學物理碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Cheng-Fang Ho received his M.S. in physics from National Cheng Kung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



許巍耀先生為國立中正大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任廠長。

Wei-Yao Hsu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chung Cheng University. He is currently a researcher and Division Manager at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃吉宏先生為國立清華大學動力機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任副主任。

Chi-Hung Hwang received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a researcher and Deputy Director General at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.