

太空光學遙測酬載之主鏡光機系統組裝

Primary Mirror Alignment and Assembly for a Spaceborne Cassegrain Telescope by Using CMM

林煒晟、張勝聰、林育全、蔡和霖、張勝雄、張展鵬、潘旭斌、黃柏瑄、張鈺婷、徐名瑩、黃鼎名

Wei-Cheng Lin, Shenq-Tsong Chang, Yu-Chuan Lin, Ho-Lin Tsay, Sheng-Hsiung Chang, Chen-Peng Chang, Hsu-Pin Pan, Po-Hsuan Huang, Yu-Ting Chang, Ming-Ying Hsu, Ting-Ming Huang

福衛 5 號光學遙測酬載為國人第一套自主研發之光學系統，該光學系統為一種常應用在天文、太空領域之中、大型望遠鏡型態—卡賽格林式望遠鏡 (Cassegrain telescope)。由反射式之主、次鏡與修正像差之折射式修正鏡組所組成，主鏡 (primary mirror, M1) 的型式是拋物面鏡，次鏡 (secondary mirror, M2) 則是雙曲面鏡。為符合火箭承載能力需求，亦可兼顧光學品質與結構強度，本文介紹之太空光學遙測酬載之主鏡透過雙足支撐結構 (bipod flexure) 與望遠鏡之主結構 (main plate) 結合，光學系統結構由六組碳纖維複合材料 (carbon-fiber-reinforced polymer, CFRP) 桿件所組成的桁架結構連結主鏡與次鏡的支撐結構。光機系統組裝除達到機械組裝之要求亦須兼顧光學成像品質，因此如何設計多自由度之調整機構與如何達到最佳之組裝型態是光機系統發展中重要的一環。本文介紹利用三次元量床 CMM (coordinate-measuring machine) 輔助太空光學遙測酬載主鏡姿態調整方法、調整治具 (mechanical ground support equipment) 的設計概念、主鏡次系統組裝程序，以及主鏡組裝後之光學品質檢測。

The currently developing spaceborne optical remote sensing payload is a typical Cassegrain telescope with 450 mm clear aperture. The primary mirror is made of ZERODUR® glass ceramic blank and lightweighted with hexagonal cell structure at a ratio about 50% for considering both effect of thermal deformation and the mass budget of the rocket. For this mirror, it is critical to reduce the astigmatism caused from the gravity effect, bonding process and the deformation from the mounting to the main structure of the telescope (main plate). In this article, the alignment of primary mirror, MGSE for the alignment and assembly process and the optical performance test for the primary mirror assembly (PMA) are presented. To get the best optical performance of PMA, the bonding position of the bipod flexure relative to primary mirror is a critical issue and shall be analyzed by finite element method (FEM) before alignment and assembly process of PMA. The mechanical shim is the interface between the bipod flexure and main plate. It is used to adjust the bonding position for the bipod flexure relative to primary mirror and also compensate the manufacture tolerances of components and differences of local co-planarity errors to prevent the local stress while bipod flexure is screwed to main plate.

After primary mirror assembly process, an optical performance test refer to “bench test” is used to analyze the astigmatism caused from the gravity effect and the deformation from the mounting or supporter. In an effort to

achieve the requirement for the tolerance in PMA, the astigmatism caused from the gravity and deformation by the mounting force can be controlled within P-V 0.02λ at 632.8 nm. The consequence of these demonstrations indicates that the assembly technique for the lightweighted primary mirror meet the critical requirements for PMA of the telescope.

一、前言

光學元件檢測技術發展已行之有年，一般而言，光學元件之形貌精度、曲率半徑、偏心量及有效焦長檢測大多分別以干涉儀、光具座與偏心量測儀等光學式量測系統執行；然而亦可以球徑計等機械式量測系統量測曲率半徑。若將光學元件檢測拓展至光機系統組裝，輔助的設備亦可區分為光學式與機械式。光學系統之組裝公差可分為光學元件之曲率半徑的變化、不規則度 (irregularity)、厚度、光學元件於系統中之鏡間距、偏心 (機構與光學元件)、傾斜、菱鏡與平板玻璃之角度誤差等⁽¹⁾。鏡片表面的加工精度與缺陷之規格往往須優於 P-V $1/10$ 雷射光波長 (常用之氦氖雷射干涉儀之波長為 632.8 nm)，此尺度之形貌量測須靠光學干涉儀進行量測。除上述提及之鏡片表面加工精度外，大部分的組裝公差皆可透過三次元量床 (coordinate measuring machine, CMM) 量測取得。三次元量床是一套快速且彈性的量測設備，可量測工件之尺寸、表面形貌與幾何公差，亦可在系統組裝時用來確認物件彼此間之相對關係對應於設計值之差異。近年來三次元量床亦應用於大型望遠鏡之組裝技術開發與利用光學元件之曲率半徑、偏心量的查驗⁽²⁻⁴⁾。

近幾年隨著太空科技、天文科技的尖端研究快速發展，太空光學酬載與天文望遠鏡之發展也趨向大口徑系統，進而得到較大之進光量，而提升光學品質，此趨勢造就了大型光學元件之檢測技術陸續發表。J. H. Burge 等人利用傾斜儀與自準直儀結合掃描式的五角菱鏡系統用來量測大型平面鏡之斜率變化，透過線性擬合的方式估算低階的形狀誤差⁽⁵⁾。為了得到大口徑光學元件更完整、較高精度的表面形貌量測資訊，拼接式量測技術也相繼被提

出，利用對震動不敏感之菲佐雷射干涉儀 (Fizeau phase shifting interferometer) 對大口徑平面鏡進行拼接量測，可得到次口徑 $< 2 \text{ nm rms}$ 之量測精度、全口徑達到 $< 5 \text{ nm rms}$ 之精度⁽⁶⁻⁸⁾。除光學量測之精進外，詹姆士韋伯太空級望遠鏡系統 (James Webb telescope) 發展利用 Leitz CMM 於主鏡、次鏡與第三次鏡初成型與預拋光階段量測曲率半徑、圓錐常數與非球面特徵，並於拋光完成以 Leitz CMM 與掃描式波前感測器量測系統 (Wavefront Sciences Scanning Shack Hartmann Sensor) 進行量測比對，兩者之量測誤差小於 P-V $0.1 \mu\text{m}$ (RMS $0.01 \mu\text{m}$)；此外，亦利用 Leitz CMM 輔助估算主鏡結構 (primary mirror structure assembly, PMSA) 組裝時調整墊片之厚度與驗證增加墊片後之主鏡系統姿態⁽⁹⁻¹⁰⁾。

三次元量床之量測精度取決於量測行程與環境溫度，高精密三次元量床其精度於環境溫度變化 $1^\circ\text{C}/\text{Hour}$ 內可達 $0.5 - 1.5 + (3/1000) * L \mu\text{m}$ ，其中 L 為量測長度。綜觀上述文獻資料，因傳統光學量測方式在量測大尺寸光學元件時有其限制，此一精度讓三次元量床成為中、大型光學系統之組裝中不可或缺之工具。此外，在鏡片初成型時亦可提供曲率半徑、圓錐常數之量測；於中大型尺寸光學有鑑於此，太空光學遙測酬載之工程模組開發時規畫建立利用三次元量床輔助系統組裝之技術，並成功地驗證該技術之可行性。透過三次元量床取得待測光學面之量測點資料，藉由光學軟體之優化功能擬合得光學面之曲率半徑、厚度及偏心量等參數，並將分析所得之結果回饋至主鏡之姿態調整量。本文介紹利用三次元量床於太空光學遙測酬載飛行體之主鏡系統組裝過程與結果，並將組裝後之結果透過光學元件絕對量測法評估主鏡次系統組裝之工藝。

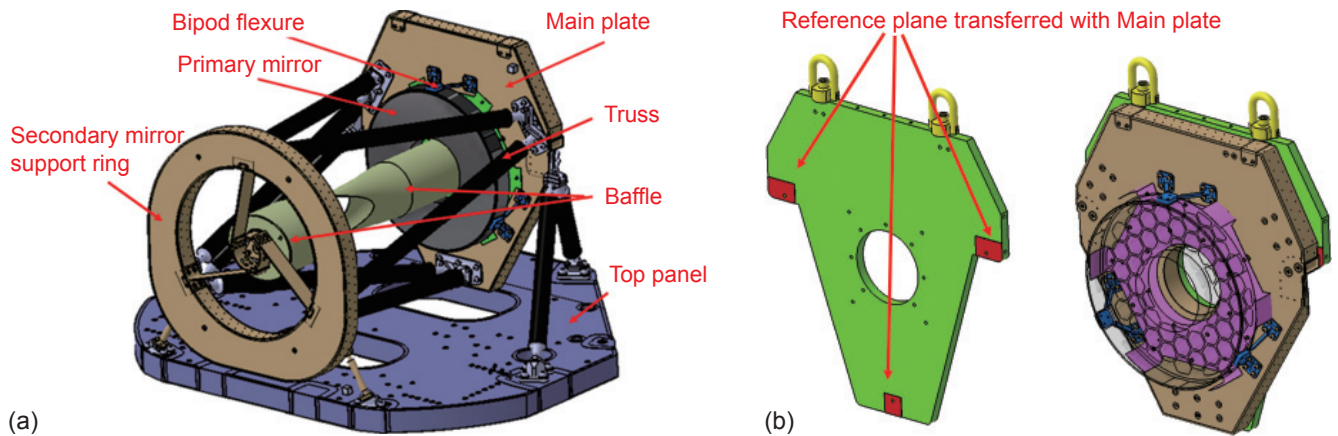


圖 1. 太空光學遙測酬載之系統與主鏡次系統架構圖：(a) 太空光學遙測酬載之系統架構，(b) 主鏡次系統架構圖。

二、太空光學遙測酬載系統規格

國人第一套自主開發之太空光學遙測酬載系統為光圈值 $F/8$ 之卡賽格林式望遠鏡，其系統之有效口徑 (clear aperture) 為 450 mm、有效焦長 (effective focal length) 是 3600 mm。光學系統由主鏡 (primary mirror)、次鏡 (secondary mirror) 與修正透鏡組 (corrector lens) 組成，修正鏡組之目的為像差修正，以提高系統光學品質。主鏡的型式是拋物面鏡，次鏡則是雙曲面鏡。考量溫度變化對影像品質劣化的效應，光學酬載之光機組件採低熱膨脹係數的材料，主、次鏡的部分，採用 SCHOTT 熱膨脹係數 0 級之極低熱膨脹係數玻璃陶瓷 (ZERODUR® glass ceramic Class0)、修正透鏡之材料選用石英玻璃 (fused silica)；主結構 (main plate)、主次鏡衍架 (truss) 及遮光罩 (baffle) 選用碳纖維複合材料 (CFRP)；在玻璃與結構元件之介面則選用熱膨脹係數為 1 ppm/K 的鐵鎳合金 (Invar 36® Alloy / Fe-36Ni)。系統架構如圖 1 所示。考量火箭之載重能力，太空光學遙測酬載之光學與結構元件須透過減重設計達到輕量化之目標，本套自主開發之主鏡考量減重後之剛性，其減重結構採用六角形蜂窩狀之構型與 60 度對稱的方式達到 50% 之減重比，如圖 1(b) 所示，主鏡於減重構型成形後，須以酸蝕 (acid etching) 移除表面殘留應力，避免火箭升空過程中產生之震動造成鏡片崩裂。

三、主鏡組裝程序

1. 三次元重建光學參數原理

本研究使用三次元量床量測光學元件光學面之形貌，並重建光學幾何參數之方法，結合光學設計軟體中光線追跡、計算、分析與優化等功能，自行設計巨集程式，由待測光學面之設計參數計算三次元量床量測之點位座標與路徑規劃。量測後，再將各量測點之量測值傳回巨集，並由模擬探頭球面與待測面碰觸點之法線 (探頭球面或待測面於接觸點處切面之垂直線) 單位向量，進行量測值之探頭補正。補正後之座標值為探頭球面與待測面真正碰觸點之座標，亦即以接觸點矢高表示待測面輪廓。最後透過光學軟體優化功能，以測得之輪廓矢高為目標值建構優化函數 (merit function)，優化出光學表面最佳解，如曲率半徑、圓錐常數 (conic constant)、鏡片厚度及偏心 (decenter) 與擬合光軸之傾斜 (tilt) 等⁽³⁾，依據分析擬合後之結果作為光機系統調整之依據。

本研究使用之三次元量床為 Leitz PMM-F 30.20.16 CMM，其量測範圍於空間座標 X 、 Y 與 Z 方向為 3000*2000*1600 mm，空間量測精度為 $[2.3 + (1/400)*L] \mu\text{m}$ ， L 為量測長度 (mm)。

2. 主鏡調整治具、雙足支撐結構調整治具設計概念

主鏡調整治具可區分為四部分 (如圖 2 所

示)，包含主結構吊掛輔助治具 (main plate hanging MGSE)、主結構吊掛輔助治具支撐結構 (main plate hanging MGSE supporter)、主鏡姿態調整裝置 (M1 posture adjustment MGSE) 與雙足支撐結構固定機構與調整治具 (bipod flexure fixture and adjusted MGSE)。

主鏡吊掛治具除提供主結構於系統組裝之吊掛功能外，亦在組裝中扮演組裝基準轉移的角色，將主結構背面之基準面轉移至吊掛治具上方之三個承靠面 (如圖 1(b) 所示之 3 個紅色區塊)。主鏡姿態調整裝置包含一貼附軟墊之支撐圓盤，其中間有一階層提供主鏡中心位置之初始拘束，彈性軟墊之使用在避免主鏡因圓盤加工平坦度問題造成變形或應力集中之影響。該圓盤固鎖於符合運動學拘束條件 (Kinematic constrain) 治具上，配合三個調整螺絲與壓縮彈簧固定 z 軸方向之姿態，並提供 z 軸方向線性位移與 z 軸之兩個傾斜角度之姿態調整。該支撐圓盤次系統整合一旋轉平台與一兩軸線性調整平台 (x 、 y 方向)，整個主鏡姿態調整裝置提供主鏡姿態五個自由度 (高度、兩軸傾斜、旋轉角度與兩軸線性位移) 調整功能，如圖 3 所示。

雙足支撐結構之固定機構與調整治具之目的在夾持雙足支撐結構，並提供對應之 5 個自由度調整，該治具在三軸 (x 、 y 與 z 方向) 線性移動平台

上以 4 個壓縮彈簧螺絲組連結雙足支撐結構固定機構，該彈簧提供雙足支撐結構，可自適應於主鏡切邊之姿態達到最佳貼合效果。另外，利用彈簧螺絲組穿過雙足支撐結構底端 4 個固鎖螺牙孔，達到調整水平姿態之目的。該治具於雙足支撐結構與主鏡結構固鎖後移除，該治具提供之調整模式如圖 4 所示。

3. 主鏡組裝程序

相關文獻提及，雙足支撐結構相對於主鏡之黏貼位置將影響組裝後之品質，雙足支撐結構之雙足交叉中心點須穿過主鏡之質心位置，該黏貼位置造成之主鏡受重力產生之像散 (astigmatism) 最小，避免太空光學酬載系統於地面組裝時將重力變形誤判為組裝誤差，予以錯誤之補償⁽¹¹⁻¹³⁾。組裝前透過有限元素分析法 (finite element method, FEM) 進行雙足支撐結構之黏貼位置對應主鏡受重力變形之關係，依據像散對應黏貼位置曲線，可找出像散最小之雙足支撐結構貼合位置，此一步驟是主鏡組裝中最重要一環。

依據有限元素分析得之雙足結構最佳貼合位置，可由雙足支撐結構之尺寸公差量測與主結構固鎖面相對於吊掛治具基準面之位置，量測估算墊片厚度，估算之結果如圖 5 所示，其中雙足支撐結構

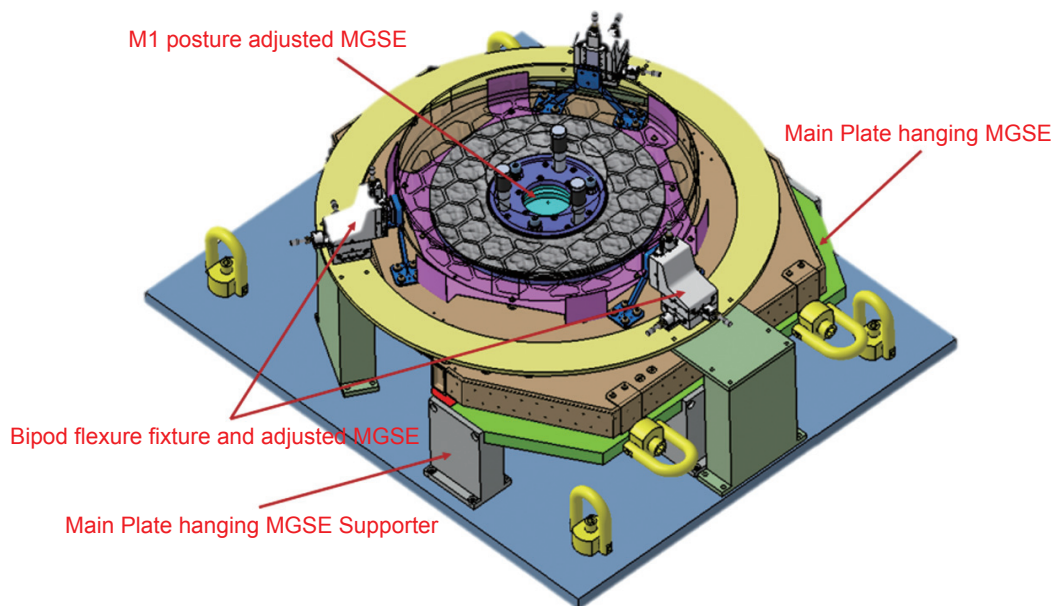


圖 2. 主鏡調整治具系統架構示意圖。

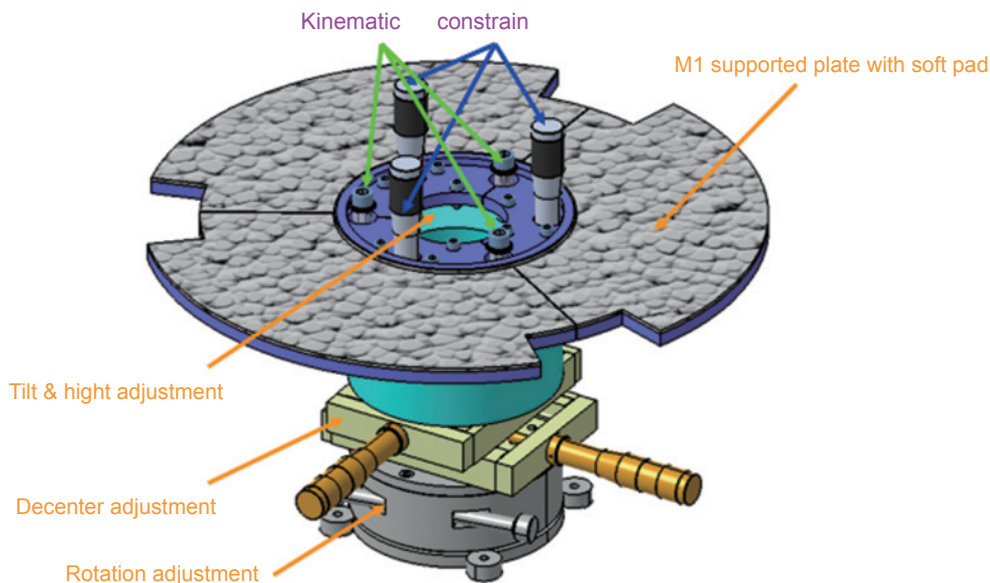


圖 3.
主鏡姿態調整治具系統
架構示意圖。

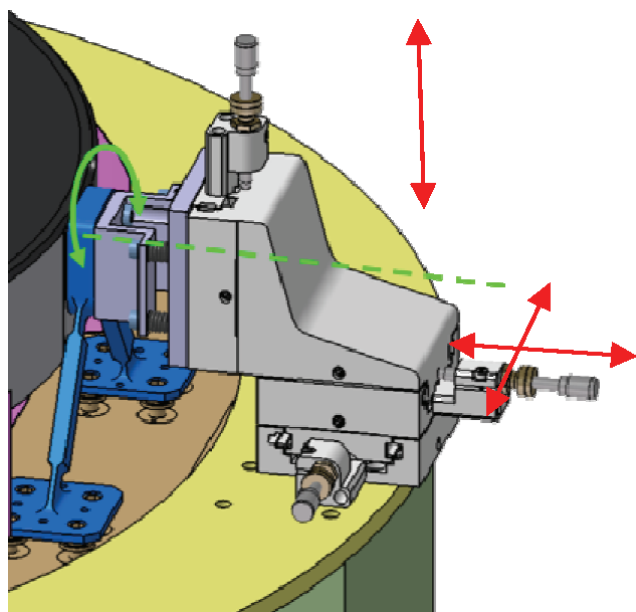


圖 4. 雙足支撐結構之固定機構與調整治具架構示意圖。

黏貼位置調整間隙片 (solid shim) 為厚度 8 mm 之墊塊與厚度 0.01 mm 之墊片組合，雙足支撐結構相對於基準面之高度為 159 mm。主鏡調整、組裝程序之流程如圖 6 所示。組裝前，主鏡與雙足支撐結構之清潔依據 ASTM 規範與 SCHOOT 玻璃表面處理之建議，主鏡以酸洗、雙足支撐結構則以鹼洗方式達到最佳清潔效果。同時為達到主鏡與雙足支

撐結構組裝之強度，雙足支撐結構與主鏡皆須先塗佈各自對應之底漆，並須於 8 個小時內完成貼合程序。

(1) 主鏡姿態調整程序

主鏡調整之目的主要在確認主鏡光學面與主結構 (main plate) 之相對姿態，這部份包含光學面擬合中心與主結構基準之相對位置 (X , Y 與 Z 軸方向偏移量) 以及光學面之擬合光軸相對於主結構背面基準之傾斜，整個調整程序在三次元量床上完成。調整的第一步首要建立座標系，將主結構組裝於吊掛治具上，在固鎖於吊掛輔助治具支撐結構上，以吊掛治具上之三個基準面定義 z 軸方向之基準 ($z = 0$ 與 z 平面法線方向)、以主結構之基準定義中心 ($x = 0$, $y = 0$)。定義座標系後，將支撐圓盤固鎖於旋轉平台上，並將主鏡擺放於上，並以中心階層拘束主鏡 X 與 Y 方向之位移。此一作用在提供主鏡一初始條件，將 x 、 y 方向偏心率控制在一範圍內。

主鏡之調整程序為避免多次以三次元量床之測針接觸主鏡光學面造成鍍膜損傷，故調整分為粗調與微調兩階段，粗調部份分為三個步驟：(1) 量測主鏡之光學面上平邊倒角進行 z 軸高度、光軸傾斜之量測，並予以調整；(2) 透過外徑之量測定義主鏡於 x 、 y 方向之偏差量，並予以調整；(3) 以其中一面之側邊切邊定義旋轉角度關係，並予以調整。利用主鏡姿態調整治具之三個精密調整螺絲相對於

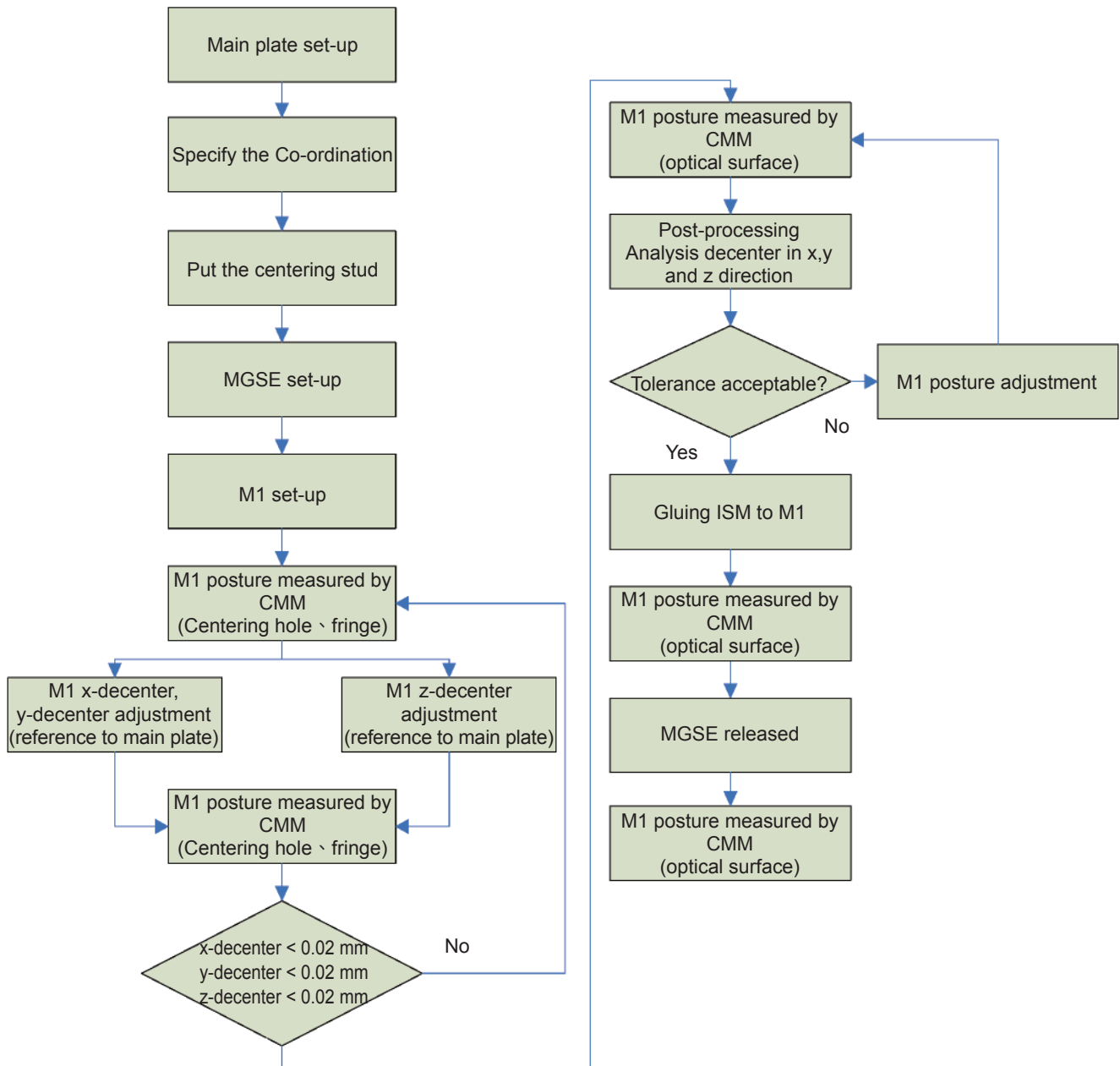


圖 5. 主鏡組裝流程圖。

光軸中心之位置相對關係，可估算各調整螺絲須調整之位移量，進而快速地收斂主鏡各軸偏移量至 0.01 mm 內、光軸傾斜角度誤差小於 0.01 度。

主鏡之精調階段主要在調整主鏡光學面擬合之光軸相對於主結構基準軸之姿態。利用光學軟體之巨集程式產生量測光學面之量測點座標位置，此步驟產生之量測點座標系基於主鏡初調時之座標系統。於三次元量床量測後，將量測點之座標值匯

出，再透過光學分析軟體進行分析主鏡光學面相對於主結構基準座標之 x 、 y 與 z 方向之偏移量。此分析藉由光學軟體之優化功能，設主鏡之圓錐係數為設計值，其餘光學面之曲率半徑、厚度與偏心率等參數設為變數，利用軟體之優化功能擬合出光學曲面姿態最佳解。依分析結果以調整治具進行主鏡姿態調整直至各軸偏移量收斂至公差範圍內。圖 7(a) 為以三次元量床量測主鏡姿態之示意圖。

		Height of insert from the reference			Height of main plate around insert			Div.	Thickness of Shim	Height of solidshim	ISM Height
		Z	PA_PXPZ	PA_PYPZ	Z	PA_PXPZ	PA_PYPZ				
ISM III	B1	56.22598	90.12696	90.00253	56.22966	90.05408	89.95634	-0.00368	0.801	63.827	94.9590
	B2	56.22139	90.04447	89.99370				-0.00827	0.806	63.827	
	B3	56.26004	90.25082	89.87039				0.03038	0.767	63.827	
	B4	56.24802	90.12065	89.84586				0.01836	0.779	63.827	
	B5	56.19738	89.96282	89.93676	56.19761	90.04645	89.94909	-0.00023	0.804	63.801	94.9849
	B6	56.20050	89.83090	89.92178				0.00290	0.801	63.801	
	B7	56.23547	90.25841	89.96312				0.03786	0.766	63.801	
	B8	56.21324	90.05351	89.95718				0.01563	0.788	63.801	
ISM I	B9	56.46676	90.00042	90.02579	56.44958	89.98367	89.93307	0.01717	0.556	63.823	94.9631
	B10	56.46777	89.98288	89.95791				0.01819	0.555	63.823	
	B11	56.48374	89.99669	89.97597				0.03416	0.539	63.823	
	B12	56.47503	89.99854	89.96939				0.02545	0.548	63.823	
	B13	56.49069	89.95727	90.04630	56.46450	89.97632	90.01769	0.02619	0.530	63.821	94.9650
	B14	56.47900	89.96954	90.07103				0.01450	0.542	63.821	
	B15	56.48852	89.99740	90.04382				0.02402	0.533	63.821	
	B16	56.47394	90.00920	89.93516				0.00944	0.547	63.821	
ISM II	B17	56.39483	89.96681	89.95796	56.40459	90.03100	89.97154	-0.00976	0.603	63.798	94.9877
	B18	56.41584	90.12731	89.96247				0.01125	0.582	63.798	
	B19	56.39447	90.05109	89.87795				-0.01012	0.604	63.798	
	B20	56.41650	89.96462	89.88679				0.01191	0.582	63.798	
	B21	56.47287	89.93923	89.94933	56.47650	90.03295	89.98415	-0.00363	0.522	63.795	94.9911
	B22	56.49323	89.93670	89.99389				0.01673	0.502	63.795	
	B23	56.46572	90.18672	89.85019				-0.01078	0.529	63.795	
	B24	56.48489	89.89105	89.89775				0.00839	0.510	63.795	

圖 6. 主結構與雙足支撐結構結合介面之墊片厚度估算。

(2) 雙足支撐結構姿態調整程序與膠合程序

雙足支撐結構相對於主鏡之黏貼位置會影響主鏡之重力變形，透過三次元量床進行雙足支撐結構貼合介面之頂端量測，並依據圖 5 顯示之墊片厚度確認 z 方向位置，量測雙足支撐結構貼合端側壁，得到貼合位置相對於該主鏡切邊之水平偏移量與相對於光軸之角度差。依據量測之結果，透過設計之調整治具進行姿態調整，直至符合規格需求，同時利用厚薄規控制填膠之間隙 (0.02 mm)，為使雙足支撐結構組裝後之受力均勻，雙足支撐結構與主鏡切邊須調整至平行已得到均勻膠厚。當雙足支撐結構姿態調整完畢後，即進行螺絲固鎖程序，固鎖時採交叉孔位固鎖，並陸續以扭力扳手分階段上磅數，避免應力造成雙足支撐結構扭轉變形，並於磅數上足後將調整治具拆除，以便進行主鏡膠合程序，雙足支撐結構固鎖於主結構之過程，如圖 7(b) 所示。

主鏡與雙足支撐結構之黏貼，利用 3M EPX(tm) Adhesive EC 2216 結構膠，EC 2216 為一

A、B 兩劑混合之結構膠，將攪拌後之膠料填入針筒，再利用真空幫浦將混合過程中產生之氣泡移除。黏貼的步驟先將雙足支撐結構固鎖於主結構上，由雙足支撐結構貼合部位之中心孔進行灌膠，直至二個溢料孔與側邊都溢料為止 (如圖 8(a) 所示)，再將多餘殘料清除，清除完畢後再以牙醫鏡進行灌膠成果確認，確保填膠過程中無氣泡造成貼合強度下降之疑慮，如圖 8(b) 所示。EC 2216 於室溫下需 7 天成化，填膠後至完全固化期間利用應變規與波前感測器監控黏貼過程中膠固化產生之應力對主鏡變形之影響。圖 9 與圖 10 分別為監控主鏡與雙足支撐結構貼合後之主鏡光學品質變化所得之 Zernike coefficient 之像散 (astigmatism) 與三葉像差 (trefoil) 對應固化時間之曲線圖，監控時以 30 分鐘截止一次量測點資料。

EC 2216 結構膠經過 7 天成化後即可達到最佳黏貼強度，此時會先以波前感測器 (wavefront sensor) 進行主鏡支撐圓盤拆除前之波前誤差量測，並於拆除後再次複驗進行比對。拆除治具前之

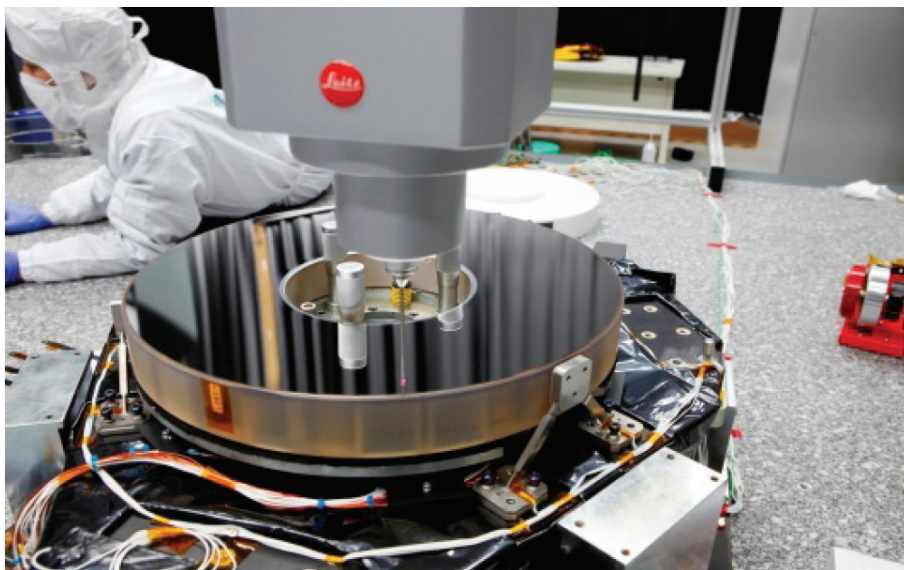


圖 7.
利用三次元量床進行主鏡姿態
量測。

波前像差量測與對應之 Zernike coefficient 如圖 11 所示，該量測結果是相對於 EC2216 結構膠固化前之量測結果，由結果得知 EC 2216 於固化過程中，並為因膠的收縮造成主鏡產生像散之變形。拆除後

利用三次元量床進行主鏡姿態量測，以確認最後之組裝結果供後續系統組裝參考，組裝過程中主鏡姿態與雙足支撐結構之調整結果與治具拆除後之量測結果整理，如表 1 與表 2 所示。

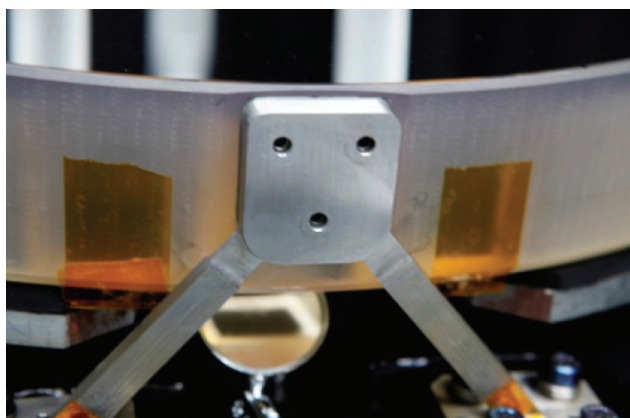


圖 8. 利用牙醫鏡檢視 iso-static mount 灌膠成果。

四、主鏡光學量測

主鏡組裝之目的主要在發揮雙足支撐結構於光學系統中之效益，避免地面組裝測試時主鏡受重力影響之變形被當成是製作或組裝公差，而進行錯誤的系統優化或誤差補償。為驗證主鏡之組裝品質與雙足支撐結構之效應，於主鏡次系統完成組裝後，須透過光學量測進行驗證。過去有許多光學量測方法之研究聚焦於消除大口徑鏡片受重力之影響，大部分利用待測光學元件於承受 +1G 與 -1G 兩個測試狀態下所得之結果進行平均，並無法明確判定因

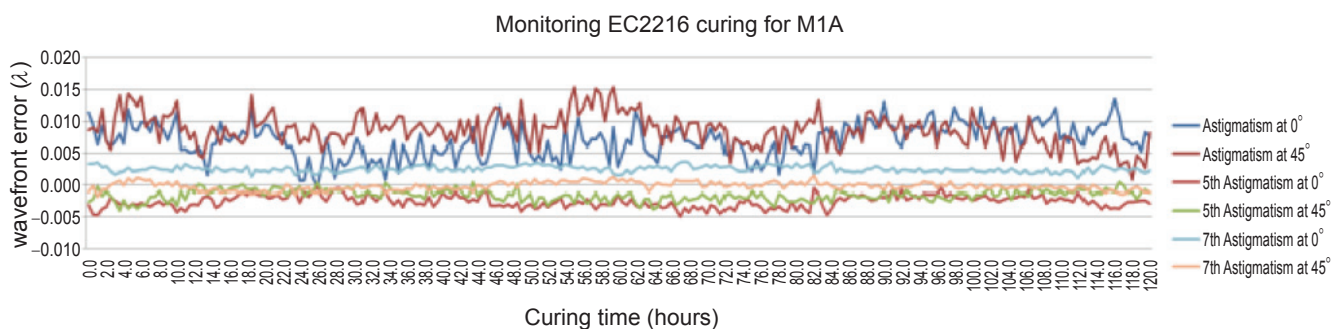


圖 9. EC2216 固化時間與主鏡面形變化擬合 Zernike coefficient 之像散分項對應時間關係圖。

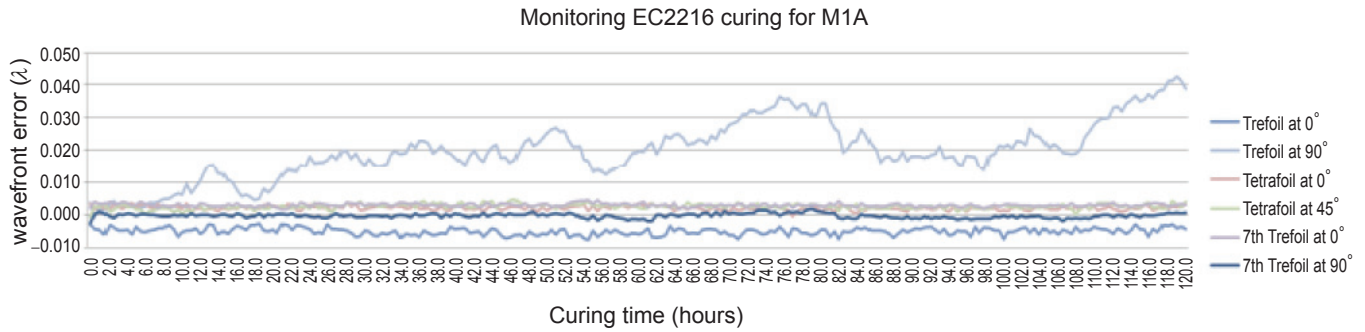


圖 10. EC2216 固化時間與主鏡面形變化擬合 Zernike coefficient 之三葉像散分項對應時間關係圖。

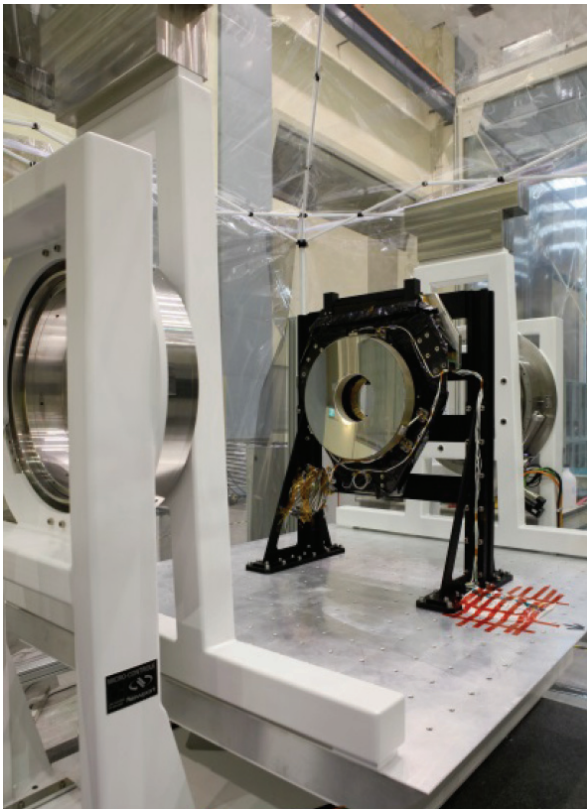


圖 11. 主鏡組裝後之光學量測架設示意圖。

重力造成之像差、夾持造成之像差⁽¹²⁾。本研究之光學元件絕對誤差量測方法稱為「Bench test」，將光學元件繞光軸旋轉一圈，取得個不同姿態之波前像差圖 (wavefront error map) 與表示光學像差之 Zernike coefficient，並透過 Zernike coefficient 之週期特性，可將待測元件之面形誤差與外界干擾因子予以分離，達到絕對量測之目的⁽¹⁴⁾。主鏡次系統繞光軸旋轉，以每 30 度量測一次，並旋轉主鏡至少一圈，透過取得之 Zernike coefficient 之週期特性，將主鏡之面形誤差、主鏡受重力變形之像差與主鏡因夾持變形之像差予以分離。於光學量測時利用吊掛治具將主鏡從三次元量床吊掛至量測之輔助治具 (MGSE) 上，並將吊掛治具與該輔助治具之固鎖介面進行固鎖，為避免固鎖時的應力傳遞至主鏡固鎖時以三點為固鎖點、以球面華司座為組裝介面，此兩步驟可避免過度拘束造成吊掛治具變形。整個主鏡次系統與量測輔助治具固鎖於一電控兩軸旋轉平台上。主鏡次系統組裝於量測輔助治具時，須注意主鏡之光軸需與旋轉平台之旋轉軸同軸，量測架構如圖 12 所示。

表 1. 利用三次元量床進行主鏡姿態調整量測之結果。

	After fine alignment	Release ISM MGSE	Gluing EC2216	Release MGSE	Div.
X de-center	-0.0040	N.A	0.0501	0.0491	-0.0010
Y de-center	0.0002	N.A	-0.0212	0.0162	0.0374
Z (mm)	147.9913		147.9933	0.0020	147.9632
Tilt_X (Degree)	-0.0019		-0.0015	0.0004	-0.0026
Tilt_Y (Degree)	0.0003		0.0019	0.0016	0.0031
Rotation angle (Degree)	179.9962	179.9972	179.9972	179.9968	0.0032

表 2. 利用三次元量床進行 iso-static mount 姿態調整量測之結果。

		Distance from ISM to M1 Apex.				Div.
		Target value	Alignment level	After release MGSE	Offset coordination	refer to target
ISM No.1	ISM No.1	10.765681	10.756986	10.757441	10.758313	-0.007368
ISM No.2	ISM No.2	10.765681	10.755024	10.760854	10.760675	-0.005006
ISM No.3	ISM No.3	10.765681	10.757972	10.763812	10.763205	-0.002476

由於主鏡為一非球面元件，若以干涉儀進行光學量測時需透過 Null lens 或 CGH 來修正經由非球面反射回干涉儀之波前才能進行量測，有鑑於使用 null lens 或透過 CGH 進行量測時之光路系統架設困難，且 CGH 之製造價錢高昂，且跟 null lens 架設一樣需繁瑣、精密的校正程序，本研究之光學量測採用反射式波前感測器 (wavefront sensor) 進行量測，波前感測器具有高動態範圍適合量測非球面元件，但缺點是空間解析度相對於干涉儀來說有很大的落差，本研究使用之波前感測器為 HASO 128 R-Flex 搭配 $F/4.2$ 之聚焦模組，其空間解析度為 128×128 ，而一般常見的干涉儀之解析度可達 $1K \times 1K$ 以上。但本檢測的目的是觀察低頻像差的變化、組裝前後之光學品質差異，因此選用對環境空氣擾動、震動不敏感的波前感測器作為執行光學量測之設備。

量測時將波前感測器於每 30 度量測結果之 Zernike coefficient 相對於旋轉角度畫出曲線圖 (如圖 13 與圖 14 所示)，可以發現若無外在之干擾因素存在時，每一像散具有其特殊的週期表現，如

astigmatism 之週期表現為 180 度、trefoil 的周期表現為 120 度 (如圖 14 所示)，而 coma 之週期表現為 360 度，依據此一特徵，可以將屬於鏡片跟著鏡片旋轉之特徵像差予以分辨出來；因主鏡減重構型之對稱性因重力造成之像散周期表現為 60 度週期。如此一來，透過進一步分析可以將影響主鏡量測之干擾因素予以分離，分析後之結果整理如表 3 所示。

五、結論

本文介紹利用三次元量床 (CMM) 輔助國人第一套自主發展之太空光學遙測酬載之主鏡次系統組裝，於初階調階段可將主鏡與基準座標之各軸偏移量修正至 0.02 mm 以下。完成初階調整後，以三次元量床執行主鏡之光學面量測，以光學設計軟體擬合之表面形貌與光軸為精密調整之基準。由本研究提出之調整治具設計概念，進行擬合後之主鏡曲率中心位置與光軸傾斜角度修正，配合大承載力、高精密之調整螺絲，只需五個循環即可將主鏡姿態

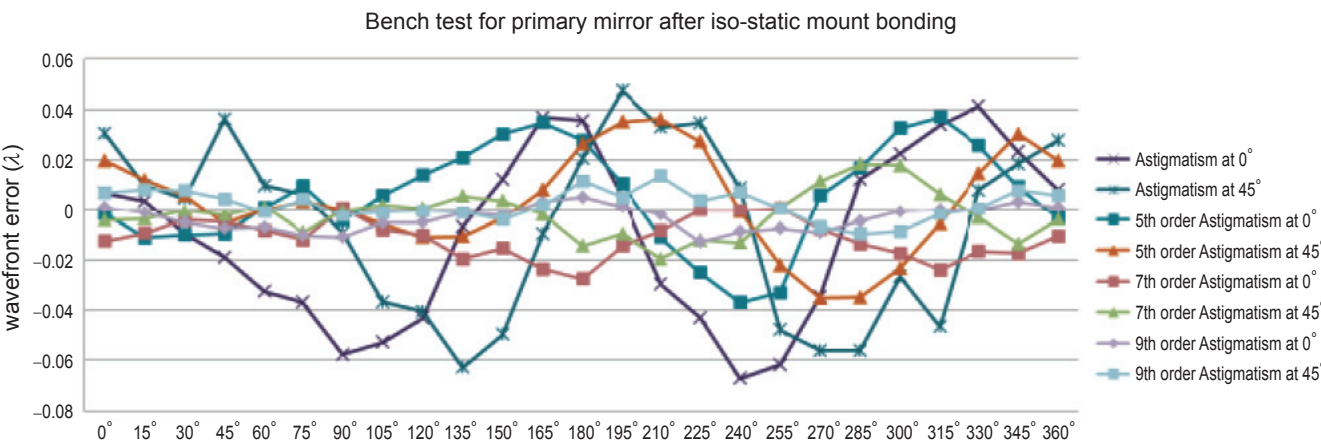


圖 12. 主鏡組裝後之光學量測之各階像散對應量測角度曲線圖。

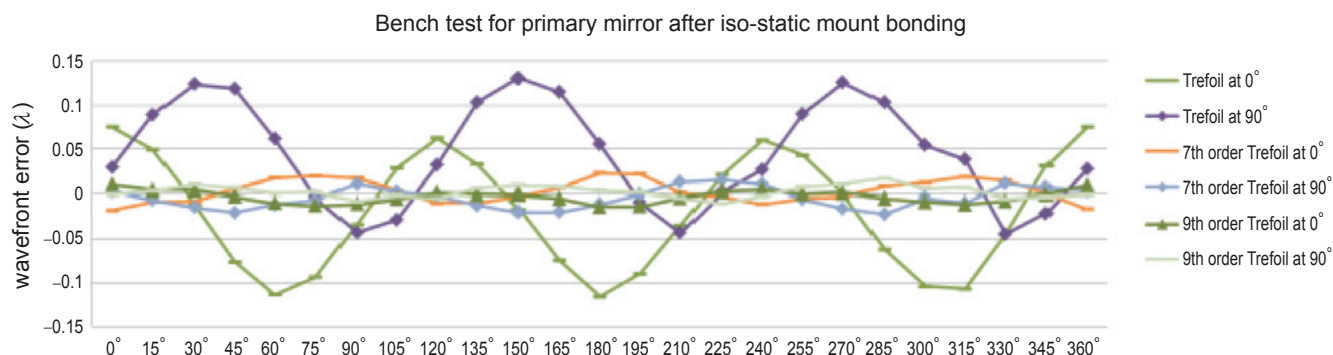


圖 13. 主鏡組裝後之光學量測之三葉像散對應量測角度曲線圖。

調整至公差範圍內 (偏心與光軸高度之偏移量 $< 5 \mu\text{m}$ 、傾斜角度誤差小於 0.001 度)，並可維持主鏡於膠合過程中 (成化 7 天) 之姿態穩定性，調整結果如表 1 所示。

依據主鏡次系統組裝過程中，每一環節之三次元量床量測記錄顯示，可知三次元量床是一套在中大型光學系統組裝時之良好工具，所設計之調整治具亦可達到修正主鏡 (M1) 與主結構 (main plate) 相對姿態之功能。儘管雙足支撐結構黏貼過

程中，因為人為灌膠因素造成主鏡相對於基準中心位置產生約 $50 \mu\text{m}$ 的位移，但不影響主鏡光軸傾斜姿態之變異，於治具移除後光軸傾斜偏差仍小於 0.002 度，光軸高度位置 (z 方向) 小於 $2 \mu\text{m}$ ，整體來說，成功地驗證了大口徑望遠鏡主鏡次系統之結構組裝程序。

此外，本研究也利用波前感測器驗證 EC 2216 結構膠於固化過程中對主鏡鏡面變形並無影響。並以儀科中心建立之光學元件絕對量測法 (bench

表 3. 主鏡組裝後之光學量測分析結果。

Item	Aberration _{gravity}	Aberration _{constant}	Aberration _{rotated}	Aberration _{bond}
Magnitude of Pri Astigmatism	0.0188	0.0135	0.0399	0.0157
Phase of Pri Astigmatism	-1.2392	-18.9544	66.7979	28.3719
Magnitude of Pri Coma	0.0077	0.0061	0.0091	0.0091
Phase of Pri Coma	52.6339	37.5018	-19.0168	-19.0168
Pri Spherical				
Magnitude of Pri Trefoil	0.0079	0.0519	0.0853	0.044
Phase of Pri Trefoil	-39.3537	21.0795	-56.5437	-45.2141
Magnitude of Sec Astigmatism	0.0149	0.0065	0.0231	0.0298
Phase of Sec Astigmatism	2.4883	78.5587	53.7866	46.8467
Magnitude of Sec Coma	0.0025	0.0064	0.0055	0.0158
Phase of Sec Coma	19.8314	-162.6444	135.6541	175.0159
Sec Spherical				
Magnitude of Pri Tetrafoil	0.0031	0.0037	0.0117	0.0171
Phase of Pri Tetrafoil	16.0501	25.8218	36.4571	32.406
Magnitude of Sec Trefoil	0.0023	0.0059	0.0154	0.0178
Phase of Sec Trefoil	33.9108	-42.3125	10.1218	19.3635
Magnitude of Third Astigmatism	0.006	0.0113	0.0093	0.0075
Phase of Third Astigmatism	-83.7696	-3.7045	-24.5739	-37.4965

test) 進行主鏡次系統組裝後之光學量測、Zernike coefficient 對應主鏡旋轉角度變化之解析，可得因組裝工藝造成主鏡產生之像散小於 $P-V\ 0.02\ \lambda\ @632.8nm$ 、三葉像差約 $P-V\ 0.04\ \lambda$ ，因雙足支撐結構黏貼位置誤差造成重力作用之像散小於 $P-V\ 0.02\ \lambda\ @632.8nm$ 。

太空光學酬載中主鏡對系統之光學品質影響極為敏感，對於主鏡之雙足夾持機構之設計研究、主鏡之組裝技術一直是太空光學酬載系統發展中極為重要之研究課題。從文獻搜尋得知相關技術也可應用於半導體製程高階曝光機之光機系統組裝，綜合上述因組裝貢獻之誤差已與國際上相關研究單位之組裝工藝相距不遠，面對未來國內在太空光學酬載、曝光機投影鏡頭等中大型尺寸光學系統之開發將更足以迎接挑戰。

參考文獻

1. P. R. Yoder, *Opto-Mechanical Systems Design*, New York, 21 (1993).
2. E. F. Howick, D. Cochrane, and D. Meierc, *SPIE*, **6676** (2007).
3. W.-C. Lin, S.-T. Chang, Y.-C. Lin, M.-Y. Hsu, Y.-T. Chang, S.-H. Chang, and T.-M. Huang, *SPIE*, **8491**, 84910M (2012).
4. S. T. Chang, W. C. Lin, T. M. Huang, M.Y. Hsu, and P. H. Huang, *Applied Mechanics and Materials*, **284-287**, 488 (2013).
5. J. H. Burge, P. Su, J. Yellowhair, and C. Zhao, *SPIE*, **7018** (2008).
6. C. Zhao, R. A. Sprowl, M. Bray, and J. H. Burge, *SPIE*, 6293 (2006).
7. M. Otsubo, K. Okada, and J. Tsujiuchi, *Optical Engineering*, **33** (2), 608 (1994).
8. P. Su, J. H. Burge, R. Sprowl, and J. Sasian, *SPIE*, 6342 (2006).
9. H. P. Stahl, C. Alongi, and A. Arneson, *et al.*, *SPIE*, **7790**, 779002 (2010).
10. C. Wells, M. Mallette, D. Fischer, M. Coon, J. Amon, L. Kuipers, and J. Spina, *SPIE*, **7793**, 779309 (2010).
11. Y. C. Lin, S. T. Chang, L. J. Lee, and T. M. Huang, *Lecture Notes in Information Technology*, **19** (2012).
12. H. Kihm, H.-S. Yang, Il K. Moon, J.-H. Yeon, S.-H. Lee, and Y.-W. Lee, *Applied Optics*, **51** (2012).
13. R. W. Besuner, K. P. Chow, S. E. Kendrick, and S. Streetman, *SPIE*, **7018**, 701816 (2008).
14. W.-C. Lin, S.-T. Chang, Z.-R. Yu, Y.-C. Lin, C.-F. Ho, T.-M. Huang, and C.-H. Chen, *Measurement Science and Technology*, **25** (2014).



林煒晟先生為國立清華大學動力機械工程學系博士班研究生，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副工程師
Wei-Cheng Lin is a Ph. D. graduate student in the Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University. He is currently an associate engineer at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



張勝聰先生為美國天主教大學物理碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
Shenq-Tsong Chang received his M.S. in physics from The Catholic University of America, USA. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



林育全先生為國立台灣大學工程科學與海洋工程博士班研究生，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
Yu-Chuan Lin is a Ph.D. graduate student in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蔡和霖先生為國立中山大學物理博士，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 physics from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



張勝雄先生現任國家實驗研究院國家太空中心衛星機械組副技術師。

Sheng-Hsiung Chang is currently a vice technical engineer at National Space Organization, National Applied

Research Laboratories.



張展鵬先生現任國家實驗研究院國家太空中心正工程師。

Chen-Peng Chang is currently a principal engineer at National Space Organization, National Applied

Research Laboratories.



潘旭彬先生為美國紐約州立大學碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Hsu-Pin Pan received his M.S. from State University of New York at

Buffalo, USA. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃柏瑄先生為國立中興大學機械工程暨國立中央大學光電科學與工程碩士，現任國家實驗研究院國家太空中心副研究員。

Po-Hsuan Huang received his M.S.

in mechanical engineering from National Chung Hsing University and Optics and Photonics from National Central University. He is currently an associate researcher at National Space Organization, National Applied Research Laboratories.



張鈺婷小姐現任國家實驗研究院儀器科技研究中心技術員。

Yu-Ting Chang is currently a senior technician at Instrument Technology Research Center, National Applied

Research Laboratories.



徐名瑩先生為國立成功大學機械博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Ming-Ying Hsu received his Ph.D. in mechanical engineering from National

Cheng Kung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃鼎名先生為國立成功大學航太博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Ming-Ying Hsu received his Ph.D. in aeronautics and astronautics from

National Cheng Kung University. He is currently a research fellow at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.