

遙測酬載之實驗體研發

The Development of Experimental Model of Remote Sensing Instrument

林育全、黃柏瑄、林煒晟、張勝聰、徐名瑩、連俊傑、陳峰志、吳昆寰、
詹佳諺、蔡和霖、黃鼎名、黃柏涵

Yu-Chuan Lin, Po-Hsuan Huang, Wei-Cheng Lin, Shenq-Tsong Chang, Ming-Yin Hsu, Roger Lien, Fong-Zhi Chen, Kun-Huan Wu, Chia-Yen Chan, Ho-Lin Tsay Ting-Ming Huang, Po-Han Huang

儀科中心為自主研發高解析遙測取像儀器，在國研院整合下與太空中心合作，積極參與福衛五號衛星遙測酬載研發，已獲得相當重要技術能量。衛星遙測酬載整體光機結構，包括主反射鏡片、次反射鏡片、主結構體、修正鏡組及取像電路模組等，遙測酬載發展過程包含飛行模組 PFM (Proto-Flight Model) 及實驗模組 ExM (Experimental Model)，其中實驗模組設計研發主要目的為驗證遙測酬載光機結構組裝與調校能力。藉由實驗體之設計研製，不僅可驗證大口徑非球面鏡片設計分析、拋光檢測技術與太空等級鍍膜技術能量，同時更可驗證福衛五號遙測酬載之設計組裝程序。本文說明實驗體研發過程及建立技術。

Experimental model (ExM) of Remote Sensing Instrument (RSI) was developed prior to Proto-Flight Model (PFM). It was planned to verify the design and assembly processes in a short period time in order to gain some experience before PFM. Two versions of ExM were reported, where one used diamond-turned Aluminum mirrors and the other polished Zerodur mirrors. The experiences gained through ExM project is introduced, including optomechanical design and analysis, gluing, CMM-aided alignment and interferometer-aided alignment, et al.

一、簡介

福衛五號遙測酬載 (RSI) 為第一個國人自主研發的光學酬載，舉凡設計、製作、組裝及測試皆需建立可靠的傳承經驗，在此計畫之前雖已建立部份能量，但仍有為數不少的技術有待建立並確認，其中尤以組裝工藝為多，例如主鏡的膠合與固鎖、主次鏡的調校、光機分析等，此技術建立執行團隊

並非由零開始，而是具備基礎學理知識，但需由實務中驗證並排除飛行體研製過程中所有可能出錯機會，從而列出飛行體開發過程中所需的技術與輔助設備規格。此外，由於遙測酬載由原先規劃聘請顧問的執行方式轉向為國人自主研發，其中輔助設備有待時間建置，因而乃規劃利用當時現有設備與能量，以 30 公分口徑為限制的實驗體 (Experimental Model, ExM) 開發。

遙測酬載實驗體之光學設計，依據系統規格需求採用折反射式 Cassegrain 光學系統，整個光學設計包括非球面之主鏡、次鏡及四片球面修正透鏡組 (如圖 1 所示)。此設計由飛行體光學設計修改而成，遙測酬載的口鏡為 450 mm，實驗體口徑為 280 mm。因應開發時程與配合輔助設備建置時程，ExM 計有 2 個版本，分別為 ExM99 與 ExM100，主要差異為 ExM99 使用鑽石車削之鋁合金主次鏡，ExM100 使用拋光後之主次鏡。

而光機結構須能確保光學元件與系統之穩定性及維持原始光學設計之成像品質。由於遙測酬載須經歷地面組裝階段、裝載發射階段及太空軌道運行階段，故從設計、分析、製造到組裝與調校等過程，都必須考量每個階段所受到的各種外在環境負載影響，包括機械負載與振動、熱平衡與溫控、微重力場、真空環境及宇宙輻射等因素。而遙測酬載之優劣取決於鏡片光學表面之形貌，以及元件間相對位置之精度與穩定性，故光機系統設計設計重點除確保結構具備足夠之強度外，更重要是在於保證具有足夠的形狀、位置精度及穩定性。實驗體二版本的結構與福五遙測酬載類似，採桁架設計，主要目的為建立組裝飛行體所須的傳承經驗。

二、ExM99

ExM99 開發時期主要建立主鏡彈性支撐機構 (flexure) 設計分析、膠合技術、主次鏡的調校、光機分析等技術，所有技術建立的基本概念皆是能將所建立技術於程序應用飛行體上為前題。

主鏡彈性支撐機構 (如圖 2 所示) 除具備支撐主鏡使其能精準定位於設計所位置、通過火箭發射時的劇烈振動外，也需有阻隔因遙測酬載結構變形進而導致主鏡變形的功能。主鏡彈性支撐機構參考運動學支撐 (kinematic mounting) 設計、均衡掛載支撐 (Iso-Static Mounting; ISM) 設計等，依據運動學支撐原則光機結構自由度拘束點的設計，既不能拘束不足而產生多餘自由度，又不能過度拘束造成拘束點過多而使結構變形，其主要功能在確保光學元件的位置精度與穩定性，故對幾何外形、截面形狀設計、膠合位置及材料的選擇均有特別考量。

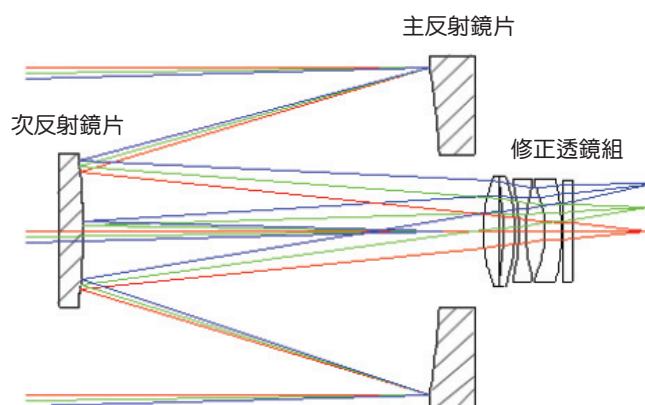


圖 1. 實驗體採用的折反射式 Cassegrain 光學設計。

光學鏡片膠合主要目的是，使用黏著劑將透鏡或反射鏡等光學元件與光機結構黏合在一起，並維持及保護光學系統之組裝與調校等。至於膠的選擇依據 NASA RP 1124、NASA MSFC-SPEC522B 及 NASA NSTS 1700.B 規範外，在光學應用上，膠材的揮發性對光學元件產生的污染須在一定規範內，以免污染光學元件⁽¹⁾。符合上述太空規格的膠材種類很多，為確認膠能均勻塗布於接合面並且不致產生過多漏膠情形，團隊成員規劃多種設計及施膠方式，最後選擇以灌膠方法，並先以壓克力之透明材質先施作利於觀察膠體流動，圖 3 所示為使用 DP490 進行灌膠黏著接合情形，圖 4 為鋁鏡與彈性支撐機構膠合振動測試情形，振動前後各軸之特徵頻率皆未變化，顯示膠合效果良好。

衛星發射成本高，故設計時需有效降低重量，在結構設計方面追求高比剛性 (specific stiffness，

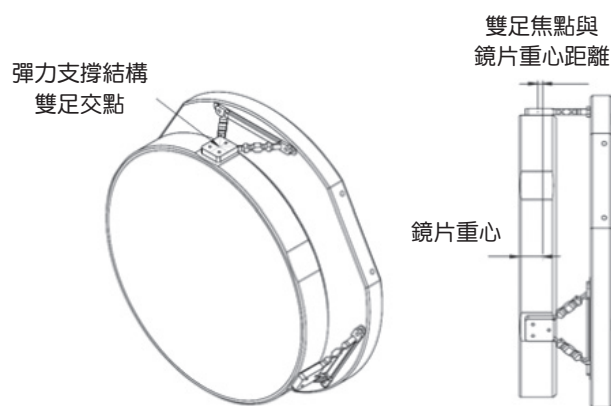


圖 2. 主鏡與彈性支撐機構。



圖 3. 結構膠材進行灌膠黏著接合。

即楊氏係數 Yong's Modulus 與密度的比值), 主鏡因口徑大, 因而也需要減重, 減重設計於計畫期間, 計畫成員建立有效主鏡減重分析方式⁽²⁾, 圖 4 中鋁鏡已經過減重, 以此方式為基礎計畫成員後來更發展出主鏡減重優化設計方法⁽³⁾。

ExM99 採用全鋁件方式實踐, 為求周延, 在開出鋁件公差規格製作元件與輔助設備前, 計畫成員先利用壓克力與快速成型材料製作接近尺寸的元件, 進行模擬組裝 (mockup)。所有組裝程序皆經過團隊討論, 圖 5 為模擬組裝時情形。組裝時發現程序部份需再修正, 輔助設備也依組裝經驗更佳完整; 此 mockup 因為質輕搬動方便, 於飛行體設計期間也做為計畫成員討論時最佳的參考實體。

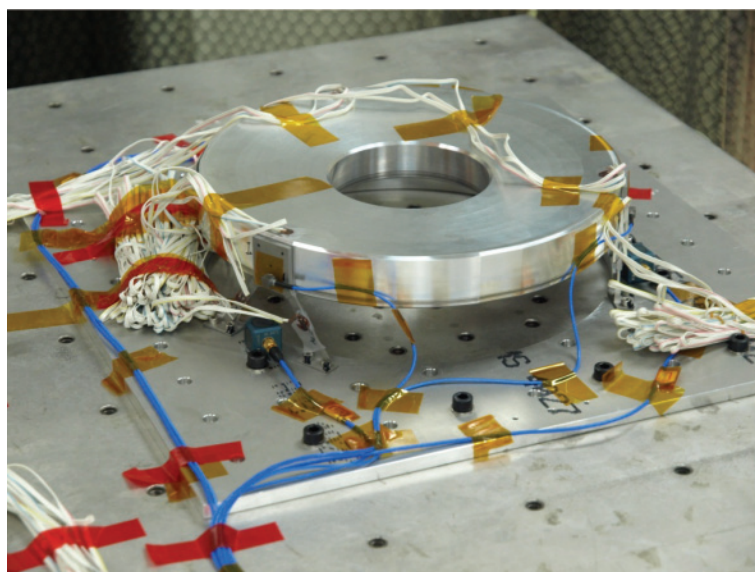


圖 4. 主鏡與彈性支撐機構膠後振動測試。

依據 mock 的組裝經驗, 實驗體組裝時需有一機構於尚未完全組裝完成之前固定個別元件, 以利於量測主次鏡距離與個別姿態, 也能於確認調整量後有效率的調整各元件, 圖 6 顯示桁架結構 (truss) 及主次鏡組裝過程裝之輔助機構情形。ExM99 使用鋁合金做為主次鏡材料, 因其密度與 ExM100 主次鏡採用的陶瓷玻璃相近。此外, 主次鏡距離於光學設計時已決定, 於組裝時主次鏡距離略有偏離設計值對系統焦長有影響, 故使用三次元量床 (CMM) 量測主、次鏡面上的點資料, 搭配中心自心開發的分析程序與光學設計程式計算出主、次鏡中心點位置與光軸方向, 據此計算後續之調整量, 組裝後次鏡相對於主鏡中心於光軸方向距離偏差量為 $50 \mu\text{m}$, 而二者光軸方向偏離 14.9 弧秒, 此微小角度差異在光學容差範圍內。利用 CMM 評估量測鏡片曲率半徑結果也經嚴謹的實驗驗證, 可參考 Chang 等人的論文⁽⁴⁾。

三、ExM100

ExM100 開發時期主要強化光機分析並建立主次鏡的細調校等技術。

遙測酬載欲獲得良好的光學性能, 結構力學分析是個相當重要的環節, 此乃因結構應力與溫度變化所導致的熱應力均會導致光學元件產生表面變

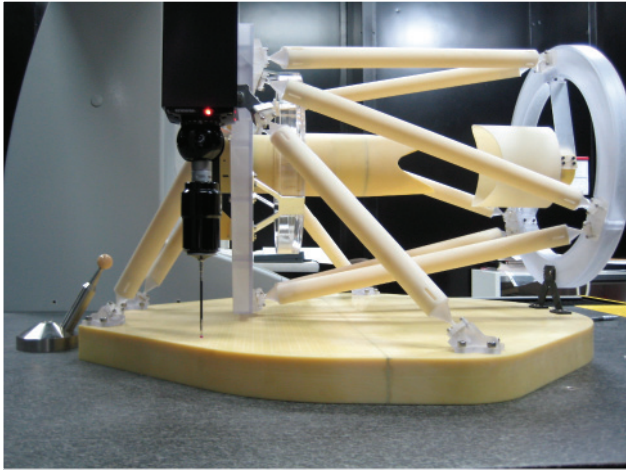


圖 5. 實驗體 mockup。

形。遙測酬載於地面受到重力影響而導致結構變形，引起光學鏡片間的相對位移，同時鏡片也產生形變；結構變形在系統整測調校時，可透過調整光學元件間的相對位置來消除剛體位移，卻不易消除表面形變，尤其是自重變形所造成的像散。因此，有效分析形變對光學系統影響變得極為重要，Lin 等人對於主鏡最佳膠合位置 (即像散最低) 有所探討⁽⁵⁾，圖 2 中的彈性支撐機構與主鏡膠合位置經分析後可決定最佳膠合位置，在此位置上主鏡因重力產生的像散形變最低。

影響遙測酬載成像品質及主、次鏡片表面變形的因素相當多，主要有外在環境溫度變化、材料內部殘留應力、光學元件支撐及調校等，不當的支撐方式會對鏡片本身的應力分布及鏡片面變形造成很大影響，進而降低成像品質，包括離焦及各式表面形狀誤差，如球面像差、彗差、像散及環狀三次波等變形非常複雜。這些形狀誤差的分析預測可藉由 Zernike 多項式進行擬合，並透過調制轉換函數 (Modulation Transfer Function, MTF) 預估鏡片成像的基本性能，此為測試光學系統反差對比度及解析度的評估方法，可反映出光學系統中心到邊緣不同視角的成像品質⁽⁶⁾。圖 7 為實驗體於不同重力方向下模擬分析結果，左方為光軸與重力垂直情形，右方為光軸與重力平行。圖中可知當光軸與重力平行時，由於彈性支撐機構安排而致主鏡上存在一個三葉項 (trefoil) 像差，此像差於衛星軌道之微重力環

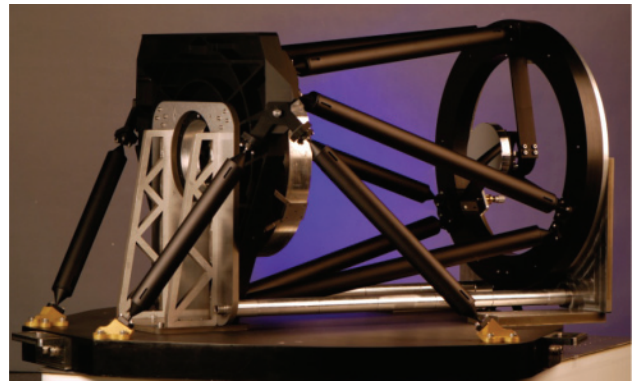


圖 6. ExM99 的結構構型與組裝過程中之輔助機構。

鏡下並不存在，地面組裝時也無法消去，若以圖 2 方式支撐鏡片，組裝時之量測調校宜以光軸與重力垂直的構型進行。

ExM100 使用拋光後的主次鏡，鏡片材質為膨脹係數很低的陶瓷玻璃，可以利用此套主次鏡量測干涉條紋，而非僅以 CMM 輔助量測，可進行比 ExM99 更精細的光學調校，此光學系統焦長為 1400 mm，主徑口徑為 280 mm。量測干涉條紋情形如圖 8，圖中顯示將 ExM100 倒立量測 -1 g 時干涉條紋情形，此量測有助於預測軌道中微重力狀態下的光學性能。干涉條紋輔以光學設計軟體可以計算下一階段光學元件的調整量，圖 9 為調整過程中次鏡偏心量逐漸收斂過程。經由一連串的量測與調整，ExM100 組裝後型態如圖 10，經量測其 MTF 如圖 11，分別為垂直與水平方向之 MTF，結果符合預期。

當 RSI 的焦平面 (FPA) CMOS 電路製作完成後，ExM100 搭配 FPA 的工程體 (Engineerinf Model, EM) 於野外取像測試，向九份方向取像情形如圖 12，圖 12 中山坡上一批建物即為九份地區。FPA 的 EM 全波段畫素尺寸為 $10\ \mu\text{m}$ ，計有 12,000 畫素，多波段畫素尺寸為尺寸為 $20\ \mu\text{m}$ ，計有 6,000 畫素，將 12,000 畫素以垂直方向排列，ExM10 下方以旋轉平台旋轉後，可得一極大篇幅影像，當只開啟全波段取像功能時，取得影像局部顯示如圖 13，可清晰看到山上的廟宇名稱 (昭靈廟) 及馬克村莊等字體，可知此實驗體解像力極高。野外取像也拍攝 101 大樓、野柳、大溪等地區。

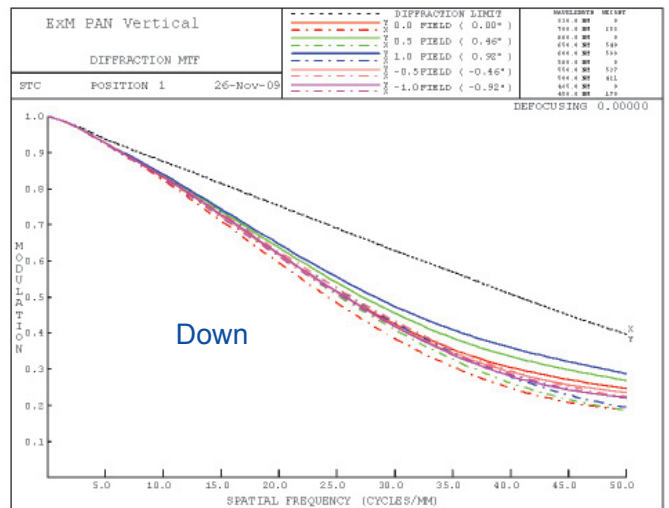
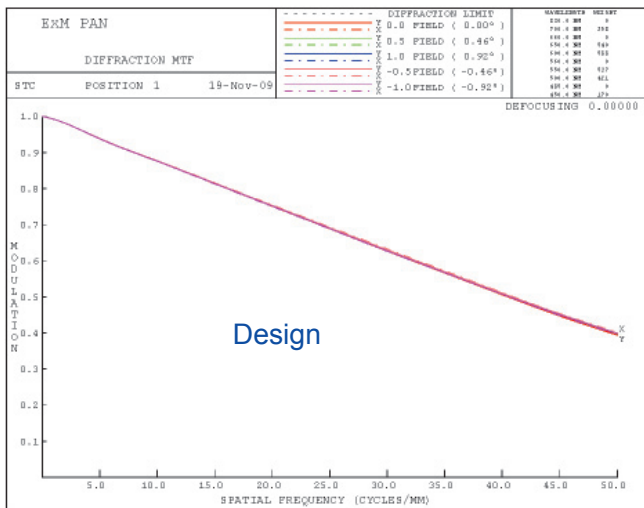
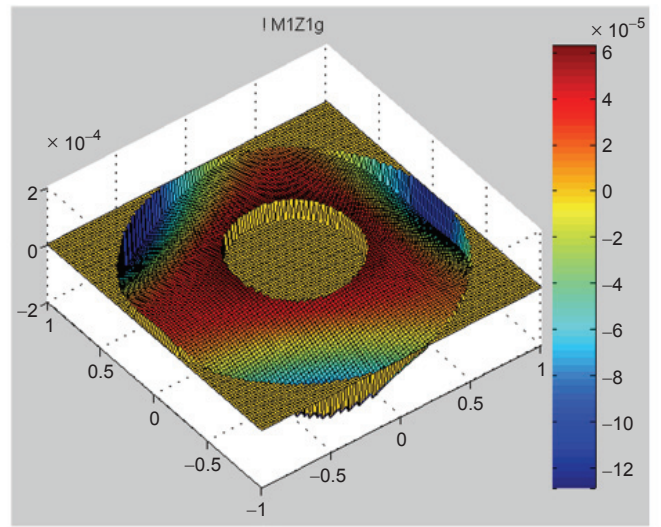
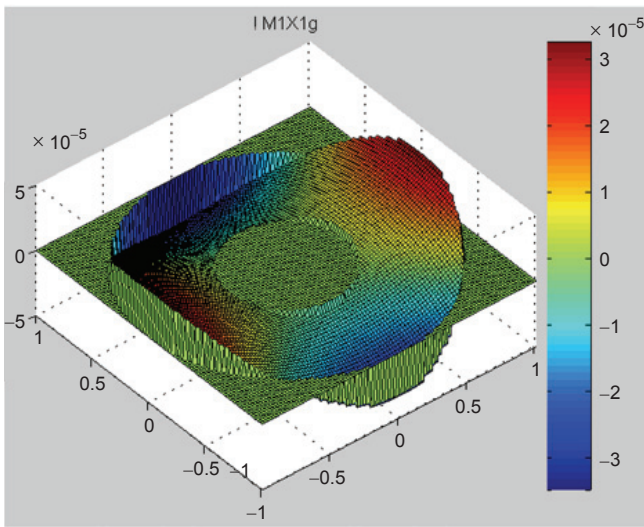


圖 7. 遙測酬載光機擬合與成像品質分析；(左) 光軸與重力垂直時，(右) 光軸與重力平行時。

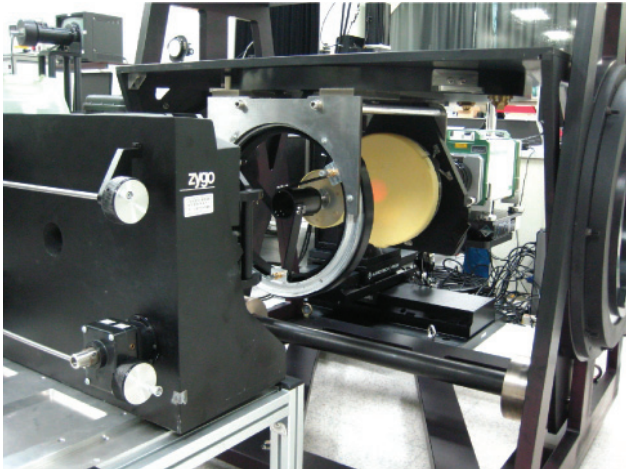


圖 8. ExM100 於 -1 g 時干涉儀量測。

四、結論

實驗體的發展，對於飛行體有重大影響，計畫執行開發出多項飛行體開發過程所需的技術能量，包括：(1) 利用三次元量床 (CMM) 量測鏡片之中心與光軸方向，(2) 建立以 CMM 為基準的粗調方式，(3) 建立以干涉條紋解算光學元件調整量方法，(4) 建置飛形體量測干涉儀之輔助設備，(5) 完成鋁鏡膠合後之振動測試，確認膠合程序與膠強



圖 9. 調整過程中次鏡偏心量變化。

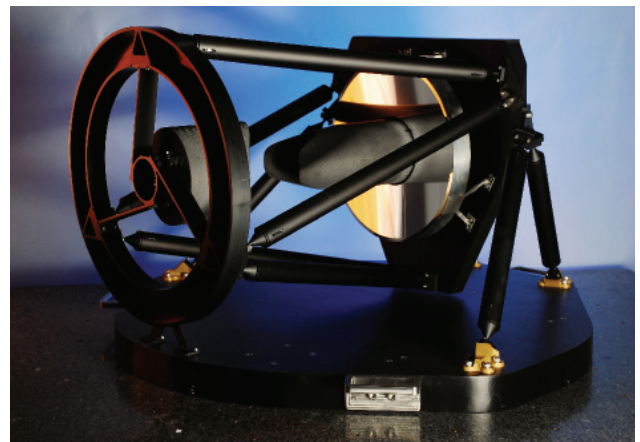


圖 10. ExM100 組裝完成情形。

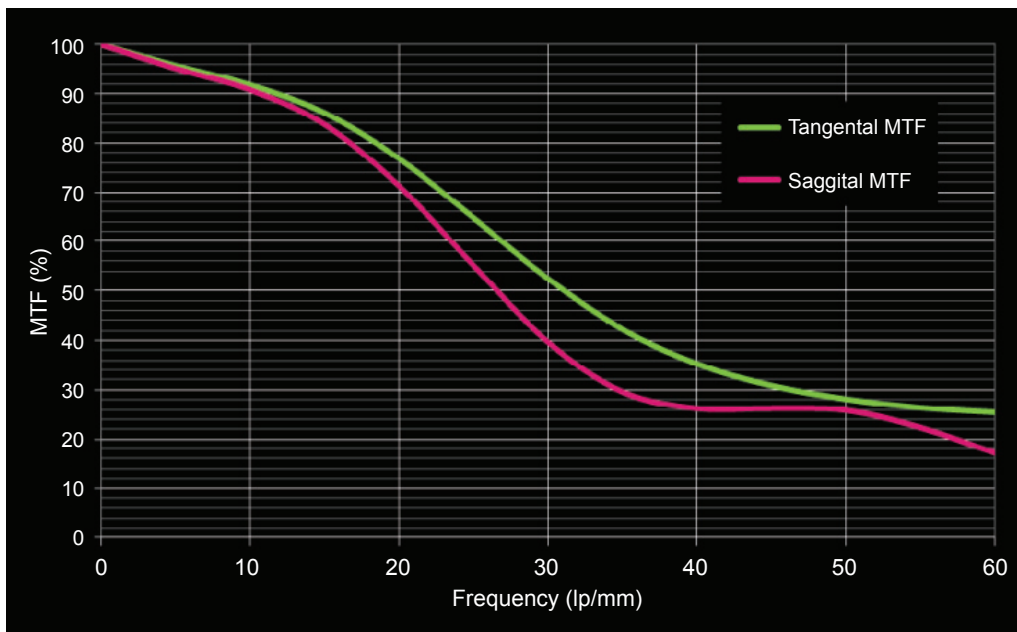


圖 11. ExM100 之 MTF 量測。



圖 12. ExM100 搭配 FPA EM 野外取像測試。



圖 13. ExM100 搭配 FPA EM 掃瞄之九份局部全波段影像。

度符合需求，(6) 建立有限元素分析與光學設計程式間的資料轉換方法，(7) 建立計算變形量預測光學成像品質方法，(8) 確認飛行體次鏡調整機構，(8) 建立主鏡減重結構設計與分析程序，(9) 建立主鏡彈性支撐設計與主鏡影響評估經驗。此外，實驗體搭配 FPA EM 地面取像，也有助於計畫對外說明 FPA 新開發的 CMOS 感測器性能。

參考文獻

1. 林育全, 儀科中心簡訊, **101**, 12 (2010).
2. 林育全, 李龍正, 科儀新知, **166**, 65 (2008).
3. Yi-Cheng Chen, Bo-Kai Huang, Zhenting You, Chia-Yen Chan, Ting-Ming Huang, *Applied Optics* **55** (36), 10382 (2016).
4. Shenq-Tsong Chang, Wei-Cheng, Lin, Ting-Ming Huang, Ming-Yin Hsu, Po-Hsuan Huang, "Measurement of Radius of Curvature by Coordinate Measurement Machine," ICETI2012

D1060 (2012)

5. Yu-Chuan Lin, Shenq-Tsong Chang, Long-Jeng Lee, and Ting-Ming Huang, "Optimization and Analysis of the Primary Mirror Mounted Position for Cassegrain Telescope," 2012 International Conference on Materials and Manufacturing Research (ICCIT2012), 19 Dec (2012).

6. 林育全, 李龍正, 張勝聰, 科儀新知, **175**, 80 (2010).



林育全先生為國立台灣大學工程科學及海洋工程博士候選人，現為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. candidate in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



黃柏瑄先生得到中興大學機械研究所碩士與中央大學光電科學與工程研究所碩士學位，現為國家實驗研究院國家太空中心系統工程組正工程師。

Po-Hsuan Huang received his M.S. in mechanical engineering from National Chung Hsing University and a M.S. in optics and photonics engineering from National Central University. He is currently a principal engineer in System Engineering Division of National Space Organization, NALabs.



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，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

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 researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



張勝聰先生為美國天主教大學物理碩士，現為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. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



徐名瑩先生為國立成功大學機械博士，現為國家同步輻射中心副研究員。

Ming-Ying Hsu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an associate researcher at National Synchrotron Radiation Research Center.



連俊傑先生為國立中興大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心副工程師。

Roger Lien received his M.S. in mechanical engineering from National Chung Hsing University. He is currently an associate engineer at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



陳峰志先生為國立成功大學機械工程學博士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心副主任。

Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently the Deputy Director General at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



吳昆寰女士為國立高雄應用科技大學模具工程研究所碩士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Kun-Huan Wu received her M.S. in Department of Mold and Die Engineering from National

Kaohsiung University of Applied Sciences. She is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



詹佳諺先生為國立清華大學動力機械工程學系博士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Chia-Yen Chan received his Ph.D. in power mechanical engineering

from National Tsing Hua University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



蔡和霖先生為國立中山大學電機工程研究所博士，現為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, NARLabs.



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。

Ting-Ming Huang received his Ph.D. in aeronautics and astronautics

engineering from National Cheng-Kung University. He is currently a research fellow at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



黃柏涵先生為國立彰化師範大學機電工程研究所碩士，現為美商陸得斯科技股份有限公司半導體工程師。

Po-Han Huang received his M.S. in electro-mechanical engineering

from National Changhua University of Education. He is currently a semiconductor engineer at Rudolph Technologies, inc.