

關關難過關關過— 精密的光學遙測酬載



福衛五號的正式名稱為福爾摩沙衛星五號，是我國福爾摩沙系列衛星的第四個衛星計畫，它是一顆重達 450 公斤的光學遙測衛星，屬於地球觀測衛星的一種。福衛五號上面搭載的主要任務酬載為光學遙測酬載，這顆酬載就像一顆巨大的數位相機，以掃描拍攝數位影像的方式從距離地表 720 公里的軌道高度對地球表面進行觀測。

一般數位相機的基本組成包含鏡頭、感光耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD) 或是互補性氧化金屬半導體 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) 影像感測器、相機內的影像處理電路及記憶卡等主要零組件，而福衛五號上面這顆大型的數位相機同樣也包含這些裝置，只是它們的體積都巨大且昂貴了許多。以光學遙測酬載所搭載的鏡頭為例，其通光口徑達 45 公分，而焦距長達 3600 公厘。可見為了要能在太空中清楚拍攝地面的景物，光學遙測酬載所搭載的這顆鏡頭是多麼地巨大。



作者／黃柏瑄

畢業於成功大學機械系，為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。於福衛五號計畫中負責光學遙測酬載之設計研發與光學系統整合之工作，現在擔任國家太空中心系統工程組正工程師，負責發展下世代次米級解析度光學遙測酬載之先進光學系統技術。

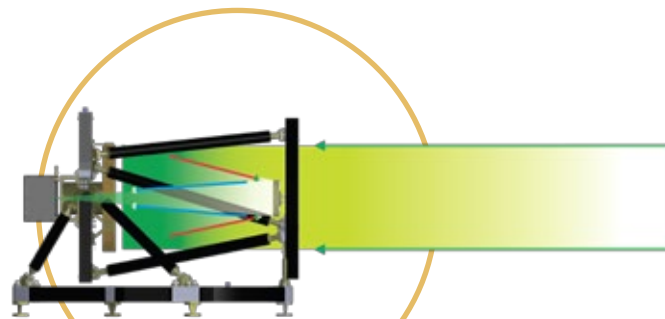
光學遙測酬載搭載的影像感測器使用 CMOS 感測器技術，屬於線型的影像感測器，這是因為福衛五號在地球軌道上會不斷地繞著地表飛行，因此它可以一邊飛行前進一邊掃描的方式來拍攝地球表面的影像。但是這顆 CMOS 影像感測器共有五條影像感測線，能同時拍攝紅、綠、藍和近紅外線等四種不同顏色光譜的影像，另外還有一條超高分辨率的影像感測線用來拍攝黑白影像。科學家或是地圖製作專家可以運用這些不同顏色的影像，來判斷地表上的森林植被、岩石土壤和水文變遷等種種資訊，以及進行製作地圖和災害預防等工作。

1

光學遙測取像儀

負責將地表景物聚焦成像的望遠鏡頭，是光學遙測酬載的光學系統。

(光線最後聚焦在聚焦組件)



福衛五號光學遙測酬載由遙測取像儀、聚焦面組件與電子單元等三個次系統組成。(國家太空中心提供)

困境與自主研發的決心

福衛五號的光學遙測酬載的自主研製和研究發展相當不容易，這是因為光學遙測酬載在國際上是屬於敏感科技技術，有能力設計及製造的各個先進國家都把它列為出口管制品，嚴格限制高精密度的光學遙測酬載相關技術的對外輸出。福衛五號光學遙測酬載最初規劃將從國外引進關鍵技術時就遇到重重的困難，這也令人回想起當初福衛二號的光學遙測酬載在法國進行光學校準及組裝時，法國人都不讓我國派駐的技術人員接觸到任何關鍵組裝技術的情景。因此在 2010 年的時候，國家太空中心下定決心由自主研發發展福衛五號的光學遙測酬載，這也代表包括大口徑非球面鏡片拋光製造、精密光學組裝校準、碳纖維複合材料結構、多光譜濾光片製鍍、影像壓縮處理電子單元及太空級影像感測器等關鍵組件都必須在國內自主研發。

這是一個規模相當龐大的自主研發計畫，研究人員以次系統來區分，分別開始進行各個次系統的關鍵技術的研究發展。在正式的系統的劃分上，光學遙測酬載由光學遙測取像儀、聚焦面組件及電子單元等三個次系統組成。

這個光學遙測酬載所配備的望遠鏡頭在計畫中的正式名稱為「遙測取像儀」，它的任務目標就是當福衛五號在軌道飛行時，能夠清楚拍攝 720 公里外的地物景像，並且達到 2 公尺的地面解析度。2 公尺地面解析度的意義是，我們

所使用的影像感測器的 10 微米 × 10 微米大小的每一個畫素，透過這顆望遠鏡在地面投影大小為 2 公尺 × 2 公尺。要能夠達到這樣高的解析度，這顆望遠鏡頭必須要相當大，而且焦距要有相當的份量。

巨大卻極精密的太空級鏡頭

遙測取像儀這麼大的一顆望遠鏡頭如果使用一般常見商用鏡頭的設計方式，用許多片透鏡的方式組成的話，這顆鏡頭重量將會相當的驚人。但是衛星的重量在設計時卻是必須斤斤計較的，否則發射成本會非常高昂。因此光學設計師採用折反射式望遠鏡的光學架構 (Ritchey Chrétien Cassegrain telescope)，由 2 片非球面反射鏡加上 4 片球面透鏡所組成。2 片非球面反射鏡分別稱為主鏡 (primary mirror) 及次鏡 (secondary mirror)，主鏡是光學系統當中最大的鏡片，直徑有 45 公分。4 片球面透鏡則是共同組成一個修正透鏡組，負責進行像差的修正。光線進入望遠鏡後會先被主鏡接收後反射至次鏡，次鏡再將光線反射通過主鏡中間的圓孔之後進入修正透鏡組，最後成像至影像感測器上。

如此大型的一顆望遠鏡頭，必須有精密的組裝工藝，光學鏡片之間的距離和相對位置都要非常準確，才能夠完美的成像。而為什麼衛星的光學遙測酬載所使用的望遠鏡需要

2

聚焦面組件

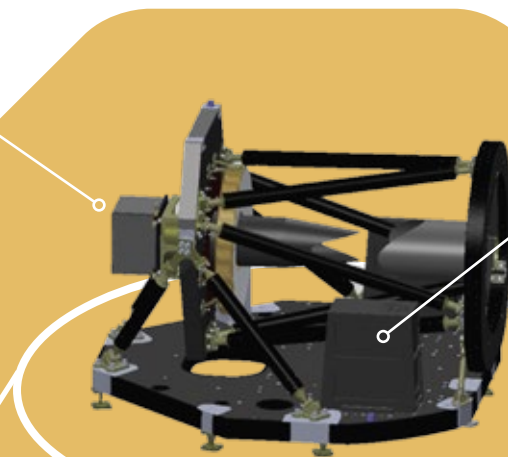
影像感測器模組，負責將望遠鏡的光學成像轉換成數位電子訊號。



3

電子單元

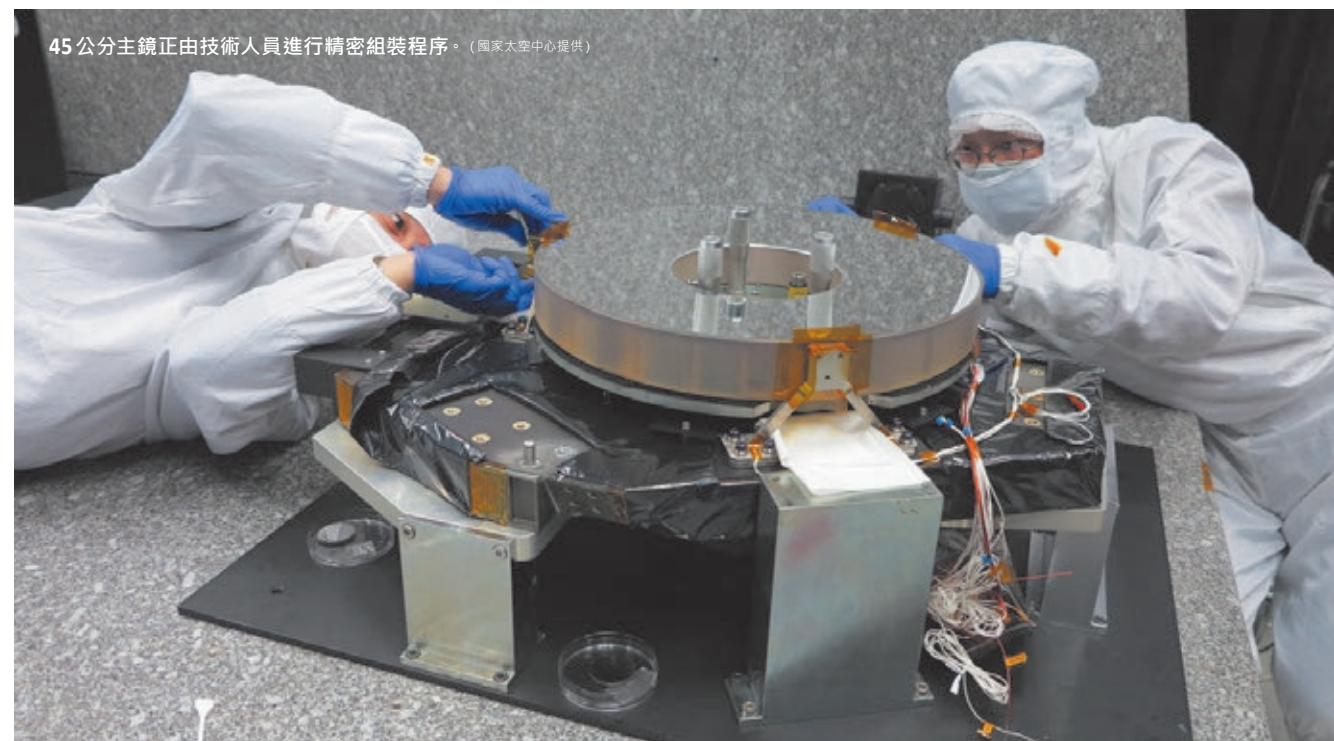
它有如商用數位相機中的電子電路和記憶體，負責處理數位影像並且進行壓縮後儲存，再送交給衛星的通訊單元以微波的方式下傳至地面的接收站。



非常高的技術層次及科技工藝，是各國的技術的尖端呢？

這有幾點主要原因，第一點是由於衛星從地面發射到太空的階段，負責推送衛星升空的火箭會給予衛星和衛星上所有元件非常大的衝力和振動的力量，如果結構強度不夠的衛星零組件是會在這種強大的力量下損壞的。光學鏡頭都是非常精密的組件，鏡片又是脆弱的脆性材料。組裝非常精密的望遠鏡在經歷火箭發射過程的巨大力量衝擊之下，不但不能有任何損壞，各個光學鏡片仍然保持在它們各自的精確位置上，這個技術難度非常高。

第二點主要原因是溫度變化的因素，太空中有著極端的溫度差異，被太陽照射時衛星會因為熱輻射變得非常熱，而衛星繞行地球軌道進入黑夜時，又會變得非常冷。劇烈的溫度差異會讓望遠鏡頭的結構熱脹冷縮，使各鏡片偏離它們應有的位置，導致影像品質變差。所以太空用的望遠鏡必須包覆特殊多層絕熱膜，阻擋太陽輻射，內部溫度也需精確的控制。同時太空望遠鏡本身需使用特殊的材料，例如碳纖維複合材料、鈦合金、鐵鎳合金和特殊低膨脹陶瓷玻璃等，以提高它對抗溫度變化的能力。

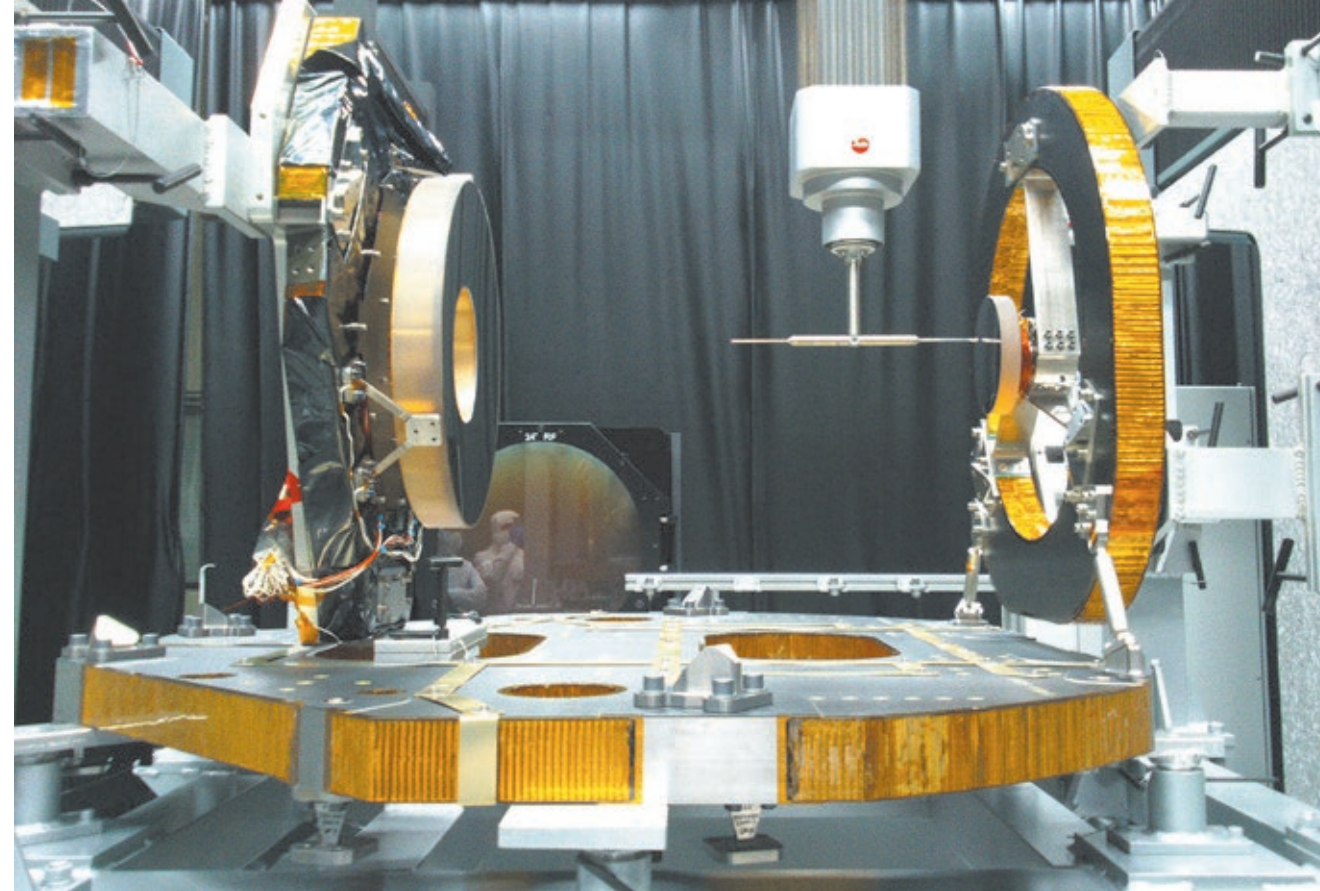


45公分主鏡正由技術人員進行精密組裝程序。(國家太空中心提供)

從最基礎開始研發

在以往有限的福衛二號光學遙測酬載發展經驗基礎之下，設計及研究人員必須一步步地從基礎發展光學遙測酬載望遠鏡所需要的技術開始。首先進行初步的設計，並使用各種科學工具來進行模擬分析所設計的模式效能。遙測取像儀就是從實驗體開始研發，然後發展結構體及工程體，最後才是製造真正要使用於發射升空的飛行體。遙測取像儀先後發展了兩套實驗體，它的尺寸是真正飛行體的三分之二大小，用於發展與驗證整個望遠鏡的鏡片安裝、鏡片之間的精確校準到成像品質測的整套流程和技術，同時發展配套的輔助設備和支援軟體。

雖然歷經多年的規劃和準備，光學遙測酬載望遠鏡真正進入正式的飛行體製造和組裝時，還是遭遇了重重的困難。當年研發人員在太空計劃的沉重壓力下，面對眼前高昂的飛行體元件，面臨技術瓶頸的那種心境，可能還是非常難以用文字傳達的。



光學遙測酬載之主鏡及次鏡完成安裝於結構組裝型架。(國家太空中心提供)

光學的技術瓶頸

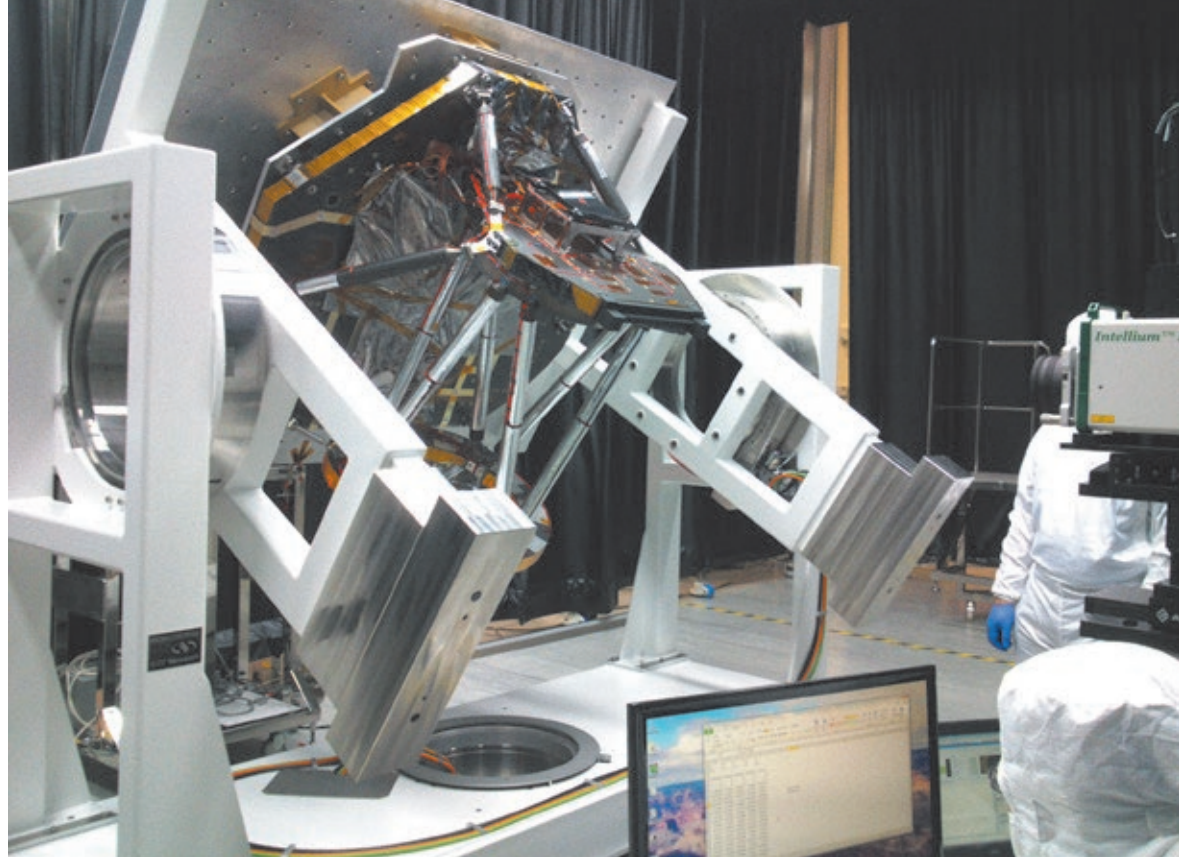
在過去國內不曾製造過口徑如此巨大的非球面鏡片。為了執行福衛五號計畫並且建立大口徑非球面拋光及製造技術，儀科中心特別從國外引進了一台拋光直徑可達 1 公尺鏡片的大型拋光機以及一台大型鍍膜機，以發展非球面拋光技術及光學檢測技術。為了達到非常優異的光學解析度和光學品質，光學遙測酬載所使用的鏡片都必須拋光到非常精準，拋光完成的鏡面與設計值的位置偏差值以幾十到幾百奈米的尺度評估，因此鏡片拋光的精密度以及鏡片檢測的精確度都變得非常重要。

這片直徑 45 公分的主鏡是凹面的雙曲面非球面鏡，中央最薄的地方有 4.5 公分厚，若沒有進行減重，整片鏡片將重達 20 公斤以上，這樣的重量會造成望遠鏡整體結構的沉重負擔。因此光機工程師將這片主鏡片背後以特殊設計後的形狀將部分材料挖掉，使整個鏡片的重量減輕至 10 公斤左右。但是也使這片 45 公分大的主鏡片變得極度敏感，若沒有用適當方式支撐

它，光是本身重量就會讓它自己稍微變形。所以負責拋光的光學工程師必須將拋光好的鏡片，小心翼翼地用變形最小的方式，來支撐它進行光學量測。若是支撐鏡片的方式稍微有點差錯，量測出來的鏡面數據資料就非常難以判斷誤差到底是鏡片變形造成的，還是拋光精度還未達完美所殘留的誤差。

遭遇前所未有的困境

這片又大又精密的鏡片要如何安裝於望遠鏡結構上，也讓研發人員傷透了腦筋吃足了苦頭。由於要抵抗衛星發射時的巨大振動和力量，裝在衛星或是光學遙測酬載上的零組件都要鎖得牢牢的。整顆望遠鏡第一個安裝的鏡片就是這片重達 10 公斤的 45 公分主鏡片，它必須很牢固的安裝在結構上，而且必須通過最高達 25 倍地球重力加速度（25 G）的振動測試而不能有任何損壞或位置偏移。但是這片鏡片是如此精密和敏感，螺絲用力上足磅數鎖緊時的力道是非常強大的，只要有一點點的力量被傳遞到鏡片就會造成鏡片些微的變形。



研發人員非常小心翼翼地規劃安裝的程序，並且先用同樣大小的實驗鏡片先進行探路測試。第一次實驗的結果，主鏡片的鏡面變形竟然有 10 微米（10 μm ）之多，這數字也許在一般機械結構中算是很微小不起眼的變形量，但是在光學上代表的卻是這片鏡片是完全無法成像的。在理想的成像條件下，這片主鏡片在組裝後的變形量應該被控制在 150 奈米（150 nm ）以下。研發人員們開始努力集思廣益找尋問題原因，經過修正一些技術問題後再次進行測試，這次鏡片的變形量雖然縮小了，但還是高達 3 微米（3 μm ）之多，距離小於 150 奈米變形量的目標還好幾個數量級。沒想到光學遙測酬載的望遠鏡的組裝的第一關就遭遇如此重大的打擊，萬一這個關卡無法解決，整個衛星計畫就會面臨無法走下去而失敗的風險。

研發人員探討問題發生的原因，並且分頭進行實驗尋找問題的答案，甚至想辦法詢問國外在這個領域的學者專家，但是得到的回答都是：「這是我們國家光學遙測衛星的關鍵技術，不能透露。」聽到這樣的回應，

國家太空中心的研發人員都徹底的領悟到，未來一切只能靠自己了，這條路必須靠自己的雙腳走下去。

突破難關

經過數個月不斷追根究底地尋找問題的根源，採用了新設計的鏡片組裝程序和技術之後終於有所突破，鏡片的變形量總算進一步縮小至 0.3 微米（0.3 μm ）的水準，但是仍差 150 奈米變形量的目標還有一大步。研發人員拼盡了全力，最後一共歷經了六個月的時間，總共進行了六次全尺寸鏡片組裝的探路實驗，終於以自力研發出的獨特技術，在正式的飛行體鏡片組裝中達到只讓主鏡片產生 10 奈米（10 nm ）變形量的成果。有這樣的優異結果，讓研發人員鬆了口氣。但是這才只是光學遙測酬載組裝的第一關，後面還不知道有多少難關要過。而的確在整個光學遙測酬載的組裝過程中，後來發生了數次讓研發人員相當挫折的難關，但是大家都憑著永不放棄的精神，也都終於能克服關卡。

光學系統的精密校準

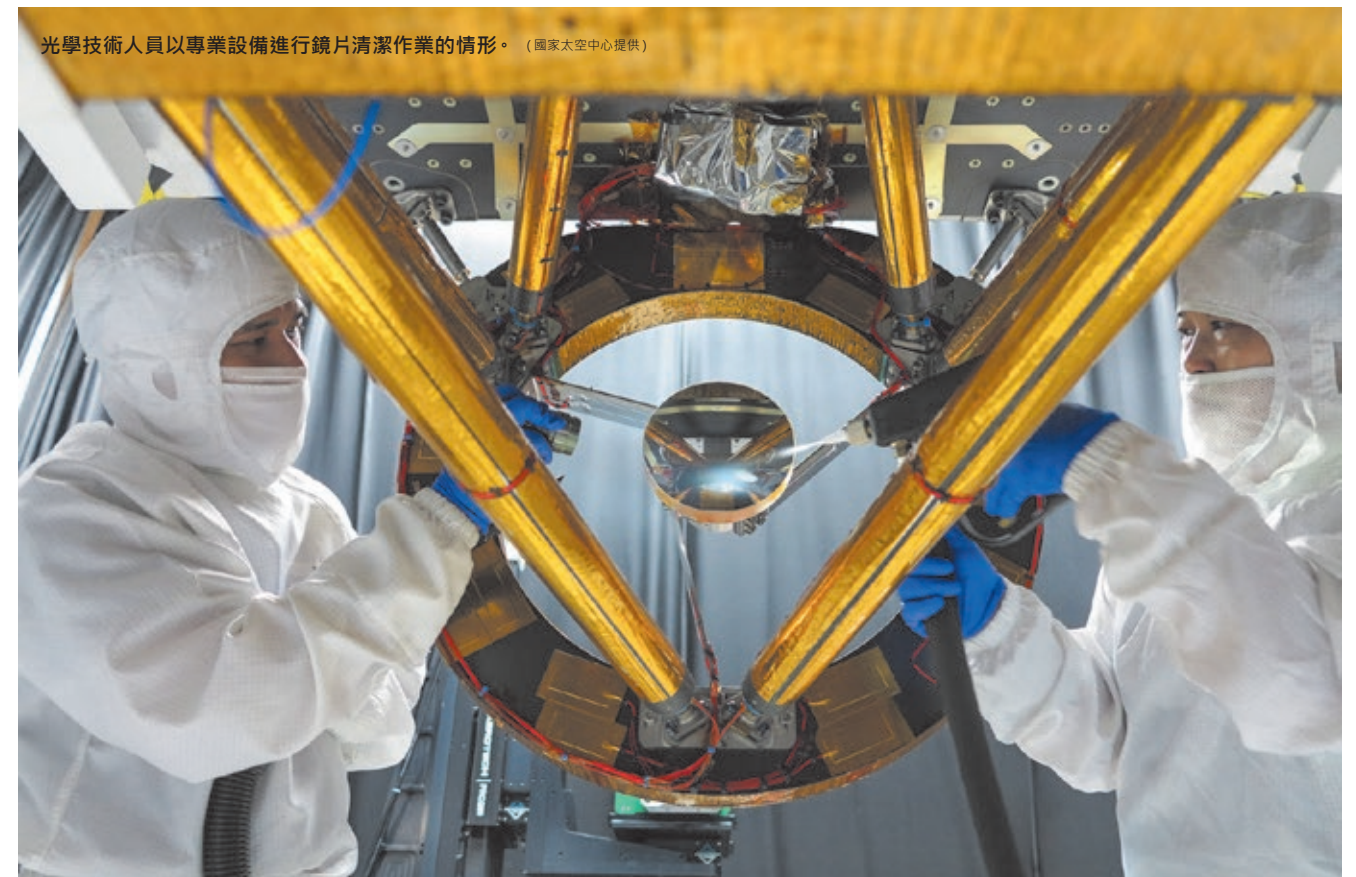
整個光學遙測酬載的望遠鏡的長度超過 1 公尺，大部分結構是由碳纖維複合材料以及鈦合金材料所建造而成。在主鏡安裝完成之後陸續安裝的是次鏡以及修正透鏡組，並且使用干涉儀的精密量測來輔助進行非常高精度的光學校準。以主鏡到次鏡的距離為例，其設計值為 69.986 公分，為了達到極高的光學品質，鏡片之間的位置誤差卻是以幾微米的單位來評估的，由此可見其精密度和困難度。

在這個光學調整的階段，研發人員必須不斷來回地使用干涉儀對整個望遠鏡進行非常高精度的量測，甚至會把整個望遠鏡上下顛倒過來做光學量測。這是因為光學遙測酬載將在太空中微重力環境中工作。但是在地面上進行量測時，永遠會有地球重力施加於望遠鏡，

若是根據這樣的條件把望遠鏡調整到最好，望遠鏡在軌道上運作時反而不會在最佳狀態。所以研發人員要將望遠鏡不斷地在正置與倒置之間來回做量測，並根據電腦模擬計算預測零重力的狀態來將望遠鏡調整至最佳狀態，目的就是要讓這顆望遠鏡在地球軌道上執行任務時擁有最優異的性能。

突破困難準備升空

光線經過光學遙測酬載的望遠鏡聚焦後，最後會成像在聚焦面組合件的 CMOS 影像感測器上，由 CMOS 影像感測器將光的訊號轉換成數位電子訊號，這是在光學遙測衛星上一個非常關鍵的元件。在國際上能夠製造使用於光學遙測衛星的高品質太空級影像感測器的國家非常少，甚至掌握在少數幾間大公司手中。這些幾乎都是使用 CCD 技術的影像感測器，能夠承受太



光學技術人員以專業設備進行鏡片清潔作業的情形。(國家太空中心提供)

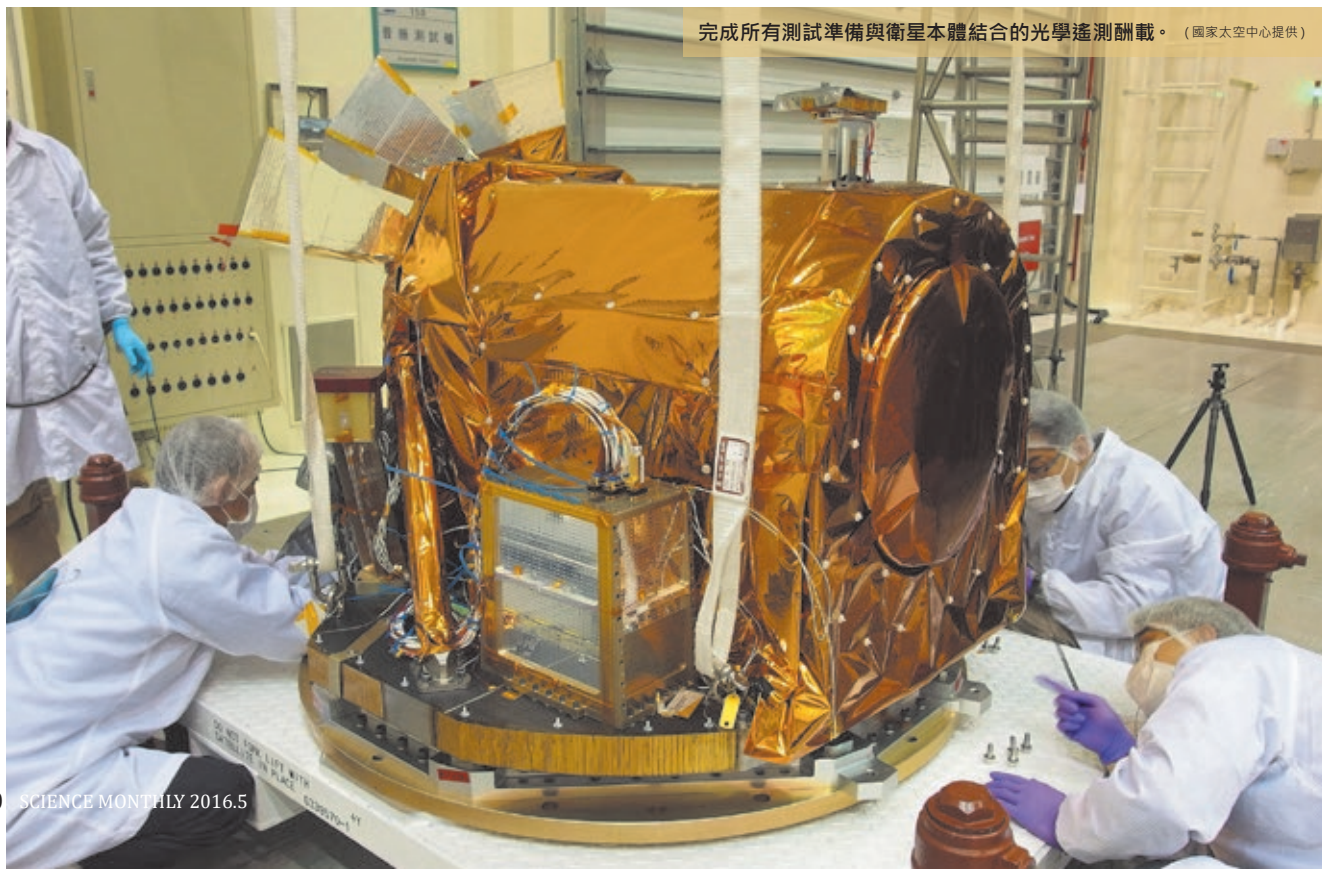
空中惡劣的高能輻射環境，又能夠提供非常優異的低訊噪比的高品質影像，使得這些影像感測器成為各先進國家的輸出管制品，嚴格控管出售。假設我們要發展一顆新的光學遙測衛星，想要採購這些 CCD 影像感測器時，都要以正式文件說明用途和目的，並且要得到對方國家政府正式核准的輸出許可，這些廠商才能出售 CCD 影像感測器給我們。

有句話說：「有了影像感測器，光學遙測衛星計畫才能開始進行任務規劃與設計。」因為影像感測器的性能和特性，直接影響光學遙測衛星所能夠執行的任務內容，也影響了所有相關設計。國家太空中心於 2010 年決心與國內廠商合作自力發展影像感測器，並且為了要運用臺灣成熟的半導體技術能量，選擇發展 CMOS 影像感測器。這顆大型的 CMOS 影像感測器在一個基板上整合了五條線型 CMOS 影像感測陣列，並且封裝成一個大型的影像感測器。CMOS 影像感測器前方有一片含有五種顏色濾光片的多光譜帶通濾光片，將通過望遠鏡的光線分成五道不同顏色的光，

分別讓五條 CMOS 線型感測器接收。整合以上關鍵元件以及數位電路的聚焦面組合件在通過太空級的環境測試以及功能測試之後，於 2015 年正式遞交給國家太空中心，隨即進行聚焦面組合件與望遠鏡的光學校準與系統整合。

光學遙測酬載於 2015 年 3 月完成測試並且組裝於福衛五號衛星本體上，從這時候福衛五號正式進入整顆衛星的整合測試工作，研發人員開始對它做一系列的環境測試，例如熱真空測試，振動測試，爆震分離測試和噪音測試等，還有一系列的性能測試以及衛星特性量測。

現在的此時，福衛五號已經完成所有的測試，在國家太空中心整測廠房無塵室中等待 5 月底啟程運送前往美國加州，預定在 7 月中將從加州的范登堡空軍基地由 SpaceX 的 Falcon9 火箭發射升空。這一次，我們將用我們自己親手打造的衛星，從太空中，看見臺灣，看見我們家鄉美麗的稻穗。



完成所有測試準備與衛星本體結合的光學遙測酬載。(國家太空中心提供)