

掃描單光應用於高光譜響應量測

Applying Tunable Light Source with Monochromator for Calibration of Hyperspectral Imaging

劉兆峰、黃紘其、呂國豪、翁俊仁、黃升龍

Chao-Feng Liu, Yun-Chi Huang, Guo-Hao Lu, Chun-Jen Weng, Sheng-Lung Huang

本文將介紹如何建置與調整掃描單光，並說明此架構所用到的儀器原理與操作，透過 LabVIEW 撰寫人機控制介面，將此系統應用於檢測 HSI 相機的光譜響應量測。實驗架構使用單光儀搭配光學元件建立高解析度的系統，光學元件包含可調狹縫、對焦鏡頭、弧光燈源、濾光片建立而成，實驗中透過光譜儀量測此系統發出的 600 nm 波段的單光，最後將優化後不同波長的單光導入 HSI 相機量測 470–800 nm 波段的光譜響應，觀察發現 HSI 相機的響應的半高寬在 4 nm–8 nm 之間。

This article will introduce how to build and adjust the tunable light source with monophotometer, and explain the principle and operation of the instrument used in this architecture. Through LabVIEW to write a human-machine control interface, this system is applied to the measurement of spectral response of the HSI camera. The experimental architecture uses tunable light source and optical components to establish a high-resolution system. The optical components include an adjustable slit, a focusing lens, an arc light source, and a filter. In this experiment, a spectrometer is used to measure the 600 nm emitted by the system. Finally, the optimized tunable light source in different wavelength bands is imported into a HSI camera to measure the spectral response in band 470–800 nm. It is observed that the FWHM of the HSI camera's response is between 4 nm and 8 nm.

一、前言

光學製程的日益進步，市售的高光譜相機尺寸越做越小，將高光譜相機的技術擴展至不同領域上的應用，應用從外太空的遙測到農業檢測⁽¹⁾、水質檢測⁽²⁾等，至今應用領域進步到顯微鏡中的微奈米材料檢測。本實驗所架設的高解析掃描單光系統，是為了量測高光譜相機，高光譜相機種類與規格眾多，藉由此系統來量測高光譜相機的光譜準確度與解析度，導入高解析的單光，觀察高光譜的響應。人眼所見的波長約為 380–780 nm 的可見光範圍，然而可見光在電磁波頻譜中只占了其中很小的部分，其他如近紅外光、紫外光、無線電波等波頻，人類不使用儀器是很難單從肉眼做觀測的。隨著科技的進步，科學家發展出光譜影像

儀器去捕捉物質的光譜，透過吸收率、反射率、折射率的偵測建立出不同物質獨立的「指紋」，也就是光譜特性，其中以光學頻譜波段數的多寡又可區分為多光譜、高光譜、超高光譜，常見的區分方法為波段數在 100 個以下為多光譜，100 個以上為高光譜，400 個以上為超高光譜。在遙測影像上常使用多光譜以及高光譜，而高光譜相較於多光譜來說提供了更多資訊，有著較高的光譜解析度。傳統 RGB 影像在分類上即為多光譜影像，而高光譜影像可收集整個跨電磁波光譜的資訊，收集的範圍廣、資料量豐富，並且可利用光譜特徵進行物質的分析⁽³⁾。此研究中的架構核心為單光儀，單光儀可將輸入寬頻範圍的光 (如鹵素光、日光) 輸出成指定波長的光。此儀器可應用於高光譜影像的取像，透過單光儀打出特定波長的光，使用 CDC 擷取多張由不同波長的光打出來的影像，再將所有資訊集合得高光譜影像。單光儀亦可用於生化分析檢測儀上，因檢驗項目所需的光譜波長不盡相同，常見的方法為選用多種濾波片及 PD (Photodiode) 感測器使儀器有完整的功能，但若是搭配單光儀使用，由單光儀控制檢驗所需的波長，可使分析儀使用上更加彈性。單光儀也常用於光學測量儀器上或是用於需要可調單色光的其他機器⁽⁴⁾。

二、系統架設與量測原理

本研究重要關鍵係為建置掃描單光儀系統，如圖 1 為掃描單光儀系統架構，此次的架構是使用弧氬燈光源導入單光儀中，光源進入單光儀的途中架設濾光輪與可調狹縫，濾光輪可以先將不必要的波段在導入單光儀系統前先過濾掉，光進入單光儀再透過衍射光柵色散原理將複合光線分開為連續分段波長，透過改變衍射光柵的角度來選擇需要的波長範圍，色散出的光再透過千分尺可調狹縫元件調整狹縫寬度，可控制光線的波段解析度，相對的解析度越高光的強度越弱，所以需要調整至接收器能偵測到的範圍內，最後高解析的單光再透過對焦鏡頭將光聚焦至導光管中。衍射光柵 (diffraction grating) 為單光儀中最重要之分光光學元件，透過夫琅禾費衍射 (Fraunhofer diffraction) 效應，將導入的光源分離為不同波長的光，實驗中所使用的單光儀中能安裝三個衍射光柵，依照所需要的規格做切換，不同的衍射光柵影響到的參數有波長範圍、解析度等數值，此次實驗主要使用的波段為 400 nm – 800 nm，單

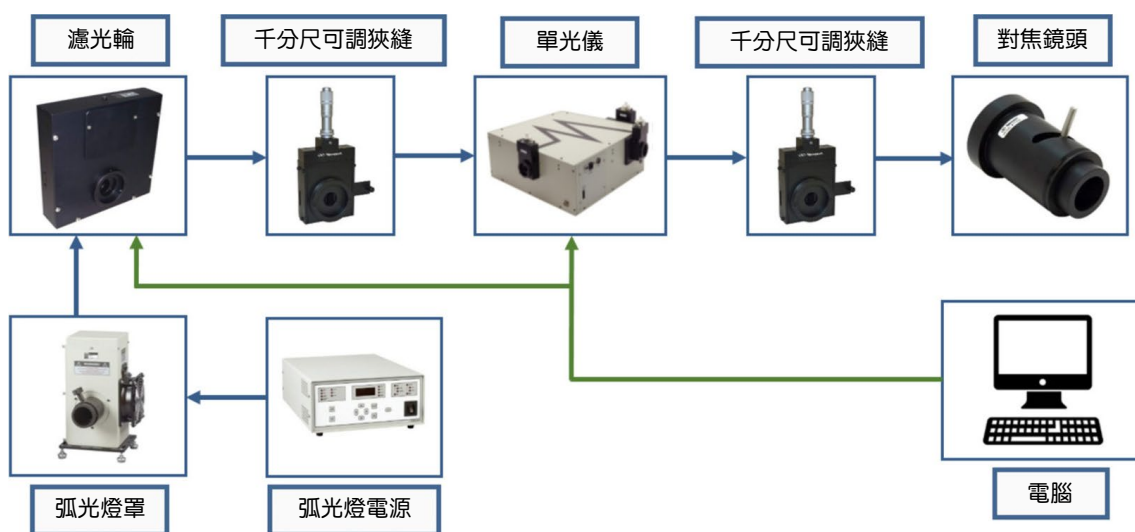


圖 1. 掃描單光儀系統架構。

光儀出光與入光處皆安裝光千分尺可調狹縫，可調狹縫節寬度與高度，寬度可調節 3 mm 到完全密合，此調節影響到導出光的波長解析度，狹縫的寬度數值越小解析度相對越小，但相對的光強度會變小，高度可調節 2–12 mm，高度調節影響導出光的強度，數值越大光強度越強，因本系統希望達到高解析度與高光譜相機能對高解析光有響應，因本系統希望達到高解析度與高光譜相機能對高解析光有響應，因此在將狹縫條小時需確認高光譜相機是否能有效的產生響應訊號。

1. 儀器元件原理與功能說明

接下來介紹整個系統與單光儀架構所使用的元件說明⁽⁵⁾。

(1) 單光儀光學配置 (optical configuration)

圖 2 為單光儀內部的光學元件配置示意圖，多波段光源從入口進入，透過反射鏡聚焦在衍射光柵上，衍射光柵將多波段的光源分散成連續的單波段光再透過輸出鏡導出單光，並可透過改變導出鏡的角度切換至兩個出口。

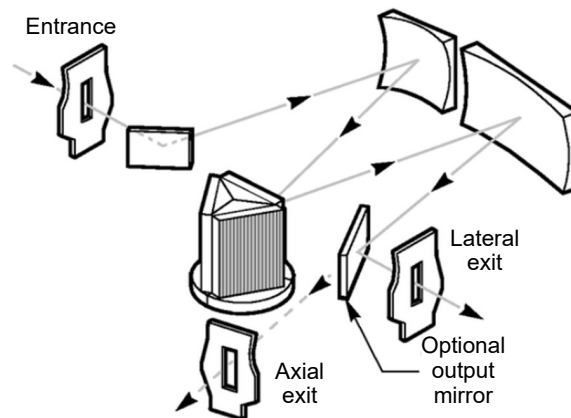


圖 2. 單光儀內部光學配置示意圖⁽⁵⁾。

(2) 連接口 (Connector)

單光儀可透過 USB、RS232 或 GPIB 三種方式進行訊號控制，在進行任何裝置的連接前要確定單光儀的電源開關有關閉，原廠有提供控制軟件，安裝後可透過 USB 連接電腦控制單光儀元件，或是使用者自行編寫程式控制。

(3) 快門 (shutter)

Shutter 安裝在單光儀的輸入端入口內，通常為關閉狀態。在不需要光線時關閉 Shutter，使得光源能保持預熱狀態，以提供穩定的性能。每一次的鹵素燈開啟關閉會磨損燈絲，因此若在短時間不需要光線，關閉 Shutter 即可。

(4) 狹縫 (slit)

狹縫使用在輸入/輸出端口上，其長寬必須和端口大小一樣。其中又可依功能分為固定狹縫、千分尺可調狹縫、電動狹縫。固定狹縫不能調整寬度與高度，但可直接更換其他狹縫尺寸，其特點為價格低廉及精度較高。微米可調狹縫可在完全閉合至 3 mm 寬度範圍內連續

變化，高度調節滑塊可在 2–12 mm 間調整高度，滑塊往外拉 (圖 3 中方向往右) 得到最短高度，滑塊往內壓 (圖 3 中方向往左) 得到最高高度，狹縫寬度由測微器讀取。電動狹縫可在寬度 $6\ \mu\text{m}$ –2 mm 以步長 $6\ \mu\text{m}$ 調整寬度。其優點為在掃描過程波長範圍發生改變時，可透過程式調整狹縫寬度，本系統使將使用千分尺可調狹縫如圖 3。



圖 3. Newport 千分尺可調狹縫⁽⁵⁾。

(5) 衍射光柵 (diffraction gratings)

衍射光柵用於分散光，類似於三稜鏡的功能將光分成不同波長。在本台儀器中可裝置三個衍射光柵於旋轉台上，如圖 4，使用者可依照所需切換不同規格的衍射光柵，可在特定波長處選擇效率最高的光柵，在掃描時可以自動切換最合適的光柵，達成連續掃描。



圖 4. 可安裝 Newport 三種規格的衍射光柵旋轉台⁽⁵⁾。

(6) 光源 (lamp)

實驗中使用 300 W 的弧氙燈，弧氙燈具有功率大、亮度大等優點，燈泡內部為充滿 5–20 bar 的純淨氙氣，是利用電弧來產生光源，光源的使用上會隨著使用時間光強慢慢減弱，使用壽命約 900 小時。

(7) 濾光輪 (filter wheel)

因此架構中的單光儀在分光時會有二倍頻問題，例如設定分光 800 nm 的單光，也會跟著導出 400 nm 的單光，因此就需要濾光片將多餘的波段濾掉，在實驗中需要隨時切換不同的濾光片，因此搭配如圖 5 的電控濾光輪，此濾光輪可同時放置 6 個不同規格的 1 英寸濾光片，用電控的方式任意切換⁽⁶⁾。



圖 5. 電控六孔濾光輪⁽⁶⁾。

2. LabVIEW 程式之儀器自動化控制與 UI/UX 設計

在此實驗中使用圖形化程式編譯軟體 LabVIEW 來控制整個系統，控制的部分包含濾波片 (filter)、快門開關 (shutter)、光柵 (grating)、波長 (wave)，並增加掃描指令，輸入指定的起始波長 (start wavelength)、結束波長 (end wavelength)、間隔的波長 (interval wavelength) 以及波長移動間隔時間 (pause)。如圖 6 為此實驗架構所設計出的使用者介面 (user interface, UI)，介面的整體設計如按鈕設計與排版等規劃皆在向量的圖形製作軟體 Adobe Illustrator 先繪製而成，再將所設計好的圖案移到 LabVIEW 軟體上。在使用者經驗 (user experience, UX) 設計上增加使用者使用上能快速上手的排版與功能，在排版上將單一指令的操作集中放在頁面上半部，如濾波片、快門開關、光柵，這些初始設定指令使用者在開始執行光譜掃描前能先確認上半部是否完成設定，而下方的版面放置掃描波長所需的設定欄位，如起始波長、結束波長、波長間隔、間隔時間，在功能上也設計防呆，如衍射光柵 2 只能 400 到 800 的波長，當切換到衍射光柵 2，數值會自動填寫起始波長 400，結束波長 800，也設定填寫範圍不能超過 400 到 800 的範圍，相對的切換到衍射光柵 1 或 3，也會自動帶入對應的起始與結束波長的數值。圖 7 為程式架構圖，當程式開始運行時，會先進行一系列初始化的動作，將 Filter、Grating 等配置調整至使用者較為常使用的位置，並在完成後處於待機模式，當使用者經由程式調整單光儀的任何設定值 (filter、grating...等)，單光儀將會有相對應的移動並在動作完成後程式回到待機模式，程式將持續運行直到使用者按下 Stop 鍵。

三、實驗結果與討論

實驗主要分成兩個階段，第一個階段是調整單光儀架構，讓單光儀所發出的波段光解析度能達到最佳值，此系統的單光最後是要導入 HSI 相機中觀察其響應狀態，因此在調整最佳解析度時須考量到高解析的單光強度需讓高光譜相機能感測到為主，透過調整入光與出光的千分尺可調狹縫來調整系統所輸出的單光解析度。第二階段是將調整至最佳解析度的單光光源導入至 HSI 相機，挑選 400–800 之間的高解析單光觀察光譜的響應狀態。



圖 6. LabVIEW 單光儀使用者控制介面設計。

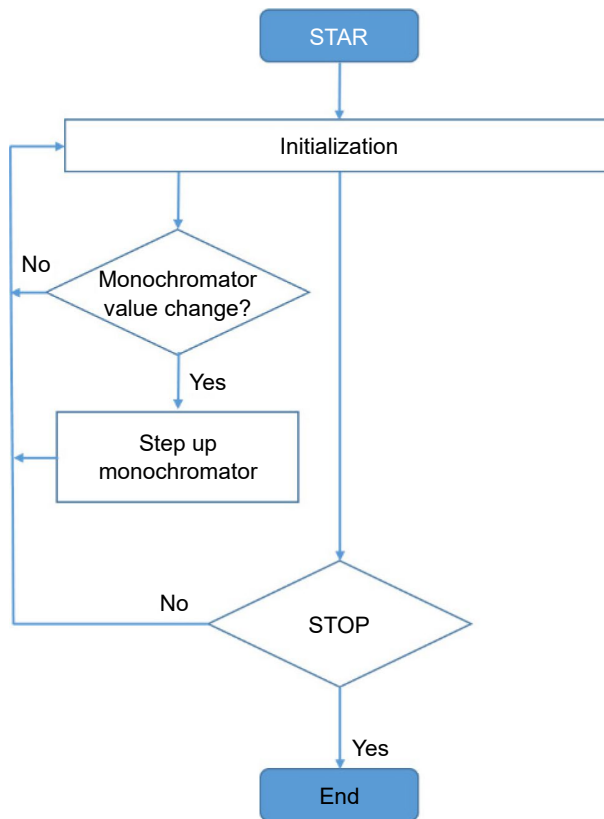


圖 7. LabVIEW 程式架構圖。

1. Spectrometer 與 HSI 光譜之解析度分析與比較

此實驗是驗證使用不同光譜解析度量測光譜儀與 HSI 相機光譜響應之結果，本實驗中二倍頻光譜波段不在光譜儀感測範圍內，故此實驗無使用濾光片。光纖採用 SMA 接口連接光譜儀，聚焦透鏡調整到光線聚焦的位置。鹵素光通過單光儀發出一定波長的光，然後通過光纖送到光譜儀檢測波長和半高寬。實驗中的自變量是千分尺可調狹縫的寬度。調整光的出／入口狹縫的寬度以找到 FWHM 的最佳值。先透過光譜量測儀器量測光譜的半高寬，半高寬為函數圖的一個波形中前後兩點的數值相加為峰值 (最大值) 的一半的兩點之間的寬度，因此半高寬愈小代表波頻愈集中也就是解析度愈高，在本實驗中利用半高寬數值進行解析度分析。首先將出光與入光狹縫調整至最大，單光儀設定輸出 600 nm 波段的光，光譜儀量測結果波長為 598.917 nm，半高寬 (FWHM) 為 10.246 nm，接著將光源導入 HSI 相機中量測光譜響應數值，半高寬量測結果為 13.89 nm，將光譜儀與 HSI 相機所量測的數值相疊製作比較圖如圖 8 所示。

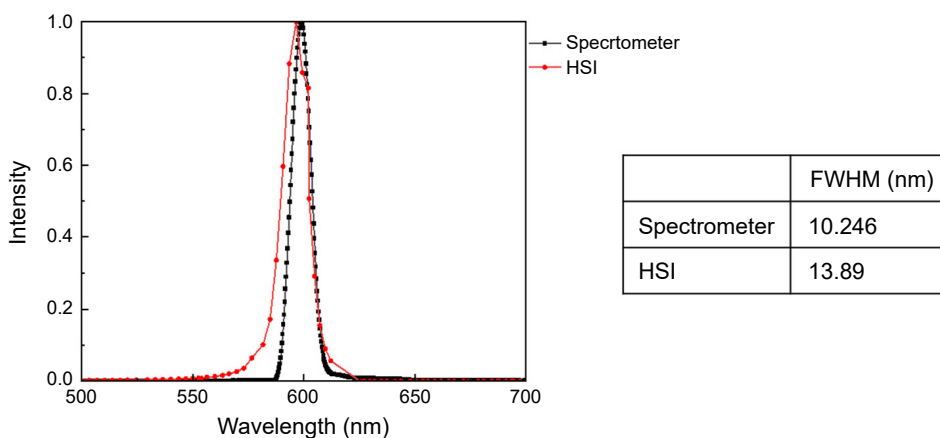


圖 8. 出光入光狹縫調整至最大半高寬比較。

接下來將單光儀的半高寬解析度調整至最佳狀態，調整出光與入光狹縫，讓單光儀能讀取一定的光強度，並讓 FWHM 值達到最小，如圖 9 光譜儀量測結果波長為 599.625 nm，FWHM 為 4.462 nm，波長準確度與解析度明顯提升，接著將光源導入 HSI 相機中量測光譜響應數值，半高寬量測結果為 9.52 nm，從此數據可以觀察出 HSI 相機的半高寬數值大於光譜儀量測的數值，因為高光譜相機的解析度較光譜儀差，高光譜相機在響應量測時會響應更寬的光譜範圍。

2. HSI 相機掃描單光光譜響應量測

建立此單光儀架構目的是用於量測 HSI 相機對於不同波長時的響應，在測試前先將單光儀的 600 nm 波段的光透過狹縫調整至半高寬最佳解析度的位置，將調整好的光導入至 HSI 相機，並輸入 400–800 nm 之間不同波段的單光，結果如圖 10 所示。將輸入的波段與量測的半高寬製作如表 1，在實驗中所輸入的波段選擇是根據此 HSI 相機中的感測元件所能感應的最佳波段位置來選擇要導入的單光波段，可以看出波長 400–800 nm 解析度為 4–9 nm，從結果來看是符合此 HSI 相機的規格。

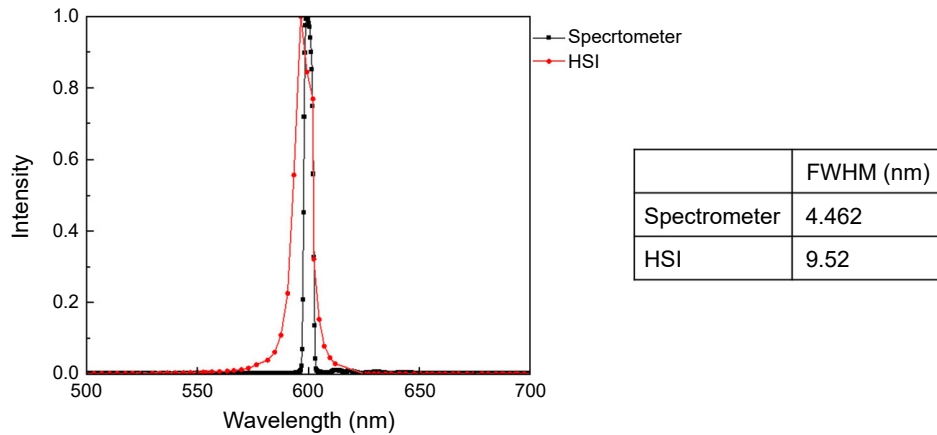


圖 9. 出光與入光狹縫調整至最佳位置半高寬比較。

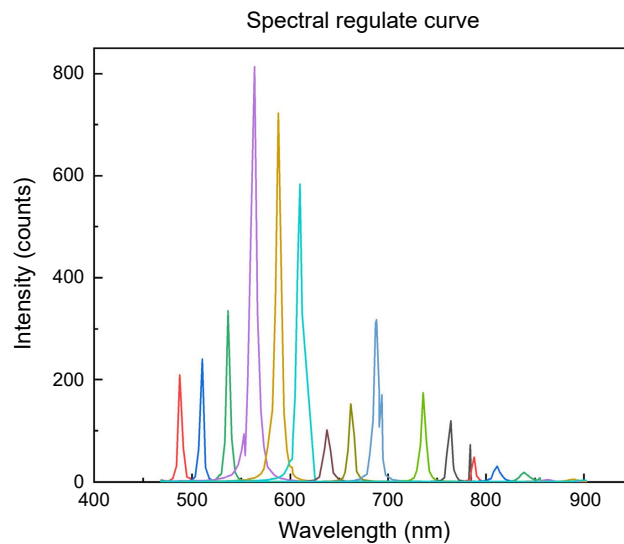


圖 10. HSI 單光光譜響應 (400—800 nm)。

表 1. HSI 響應半高寬。

輸入波段 (nm)	491	513	540	566	590	612	641
FWHM (nm)	4.77	4.37	4.91	7.97	6.96	6.66	8.24
輸入波段 (nm)	665	690	716	739	766	790	
FWHM (nm)	6.19	7.83	7.83	5.71	5.25	4.03	

四、結論

本研究論文主要敘述高解析掃描單光量測系統的建置，其中詳細說明組裝的架構與各元件的功能介紹，應用於高光譜相機的光譜響應量測，最後將優化後的單光輸入不同波段波長導入 HSI 相機量測 470—800 nm 波段的光譜響應，觀察發現 HSI 相機的響應的半高寬在 4 nm—8 nm 之間。本文實驗光譜量測範圍為 400—800 nm，為了因應各種高光譜相機的波長規格，後續將開發更廣的波段量測。

誌謝

感謝科技部計畫 MOST 110-2221-E-492-007、MOST 111-2221-E-492 -002 -MY2 之部分經費補助。

參考文獻

1. Lanthier, Yannick, et al. "Hyperspectral data segmentation and classification in precision agriculture: A multi-scale analysis." *IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **2**, IEEE, (2008).
2. Mbuh, Mbongowo. "Use of Hyperspectral Remote Sensing to Estimate Water Quality", *Processing and Analysis of Hyperspectral Data*. IntechOpen, (2019).
3. 李龍正, 科儀新知, **161**, 12 (2007).
4. 黃文雄, 儀器總覽－化學分析儀器, 初版二刷, 新竹: 台灣儀器科技研究中心, (2003).
5. Newport "Cornerstone™ 260 1/4m Monochromator Family User's Manual" (2015).
6. Newport "T Model 74010 Motorized Filter Wheel" (2014).

作者簡介

劉兆峰先生為國立陽明交通大學機械所所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理研究員。

Chao-Feng Liu received his M.S. in Machinery Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Rresearch Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

黃紘其為國立清華大學動力機械所學士生。

Yun-Chi Huang is currently a B.S. student in the Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.

呂國豪先生為國立嘉義大學生物機電工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理研究員。

Guo-Hao Lu received his M.S. in Biomechatronic Engineering from National Chiayi University. He is currently a Rresearch Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

翁俊仁先生為國立陽明交通大學光電工程研究所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Chun-Jen Weng received his Ph.D. in Electro-optical Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

黃升龍先生為美國馬里蘭大學電機工程博士，現為國立台灣大學光電工程學研究所暨電機工程學系教授。

Sheng-Lung Huang received his Ph.D. in the Department of Electrical Engineering from University of Maryland, College Park. He is currently a Professor in Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics, and Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.