

應用於工廠煙道環境之即時光學空氣品質監測系統

Real-time Optical-type Air Quality Index System Application in Industrial Flue Gas

邱裕中

Yu-Zung Chiou

在本研究計畫，我們研究團隊計劃開發一應用於工廠煙道環境之即時光學空氣品質監測系統。此系統由帶通光檢測器、雷射及 220 cm 光路傳輸組成。帶通光檢測器的吸收波長預計為 390 nm 到 420 nm。二氧化氮的檢測目前初估已達約 5 ppm。在此必須強調，相較於傳統的氣體感測器，本團隊開發的系統無需替換感測器頭。

This article introduces the manufacturing and design of the real-time optical-type air quality index system application in industrial flue gas. The system consists of a band-pass photodetector, a laser and a 220 cm light path. The wavelength of absorption of the band-pass photodetector is forecasted from 390 nm to 420 nm. The detect limit of nitrogen dioxide is estimated to be approximately 5 ppm. We have to emphasize that there is no need to replace sensor head in our system as compare to the traditional gas sensor.

一、前言

工業革命以來，人類生活日新月異、進步一日千里，然而藉由進步的科技而得的方便舒適生活並不是白吃的午餐，人類為此付出了環境污染的代價；其中又以空氣污染的影響範圍最廣，也最難以捉摸和防治。惡劣的空氣品質，不只危害人們的健康也是破壞環境的元凶，所以全世界都投入大量的人力與物力希望能改善空氣品質。目前國內環保署的空氣品質檢測站，大多使用大型儀器，並不適合機動防治；另一方面，空氣污染不止時間難以掌控甚且飄忽不定，不會侷限在一定範圍，以現行的固

定式環保署空氣品質檢測站，無法即時掌握到空氣污染源位置及其相關飄散資訊，若要進行即時數據分析困難甚多。因此本研究團隊致力發展一套完整的乘載於無人飛行器之可攜式空氣品質監測系統，不僅可提高儀器的機動性，達到機動監控與主動防治的目的，並可即時傳送資訊以利進行即時數據分析，提供決策或執法單位快速研擬防治空氣污染對策或稽查異常污染。

如圖 1 來說明本研究之使用情境：利用九架無人飛行載具追蹤空氣污染來源，執行日常空氣品質監測工作，當發現異常污染情形時，由本計畫研發之系統：『應用於工廠煙道環境之即時光學空氣品



圖 1. 本研究系統應用情境示意圖：九架無人飛行載具追蹤空氣汙染來源。

質監測系統』升空，進行汙染來源之追蹤；由九架無人飛行載具乘載九個可攜式光學空氣品質監測儀，透過聯網系統將汙染物分布狀況回傳至監控中心，經由後台數據分析研判汙染來源，並指揮機隊前往汙染來源地；到達汙染來源地後，滯空繼續監測，環保署即可據此派遣稽查人員至現場稽查開罰。除此之外，本計畫『應用於工廠煙道環境之即時光學空氣品質監測系統』可以用於定期或是不定期的空氣品質監測數據監測及分析，監控並防止工業廠房排放有害氣體與微粒，維護乾淨的空氣品質。

二、實驗方法

1. 現階段研究成果

如圖 2 所示，本研究團隊所開發的氣體感測器

是基於光學原理設計出來的，雖然市面上已有利用相同原理，設計出來的產品，但目前各家的產品規格不一，且各家儀器測出的數據也不盡相同，準確度實在令人質疑。有鑑於此，本團隊將針對此問題來進行氣體感測器的技術改造。本計畫研發團隊現階段研發成果說明如下：

本研發團隊之 Band-pass Photodetector (BP-PD) 的相關技術，已經成功地開發出可偵測特定窄波長頻寬之氮化鎵系列 BP-PD，元件結構及電極設計如圖 3 所示，透過此元件磊晶結構層的設計，我們可以掌握並控制出偵測接收任意特定波長範圍的光，來達成帶通的效果，而且此光波長範圍甚至可以小至幾十奈米，對於非常微細的懸浮微粒都能精密偵測，如圖 4 之元件光響應圖所示。

本研究團隊所開發的二氧化氮 (NO_2) 及細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) 氣體感測器系統是基於光學原理設計

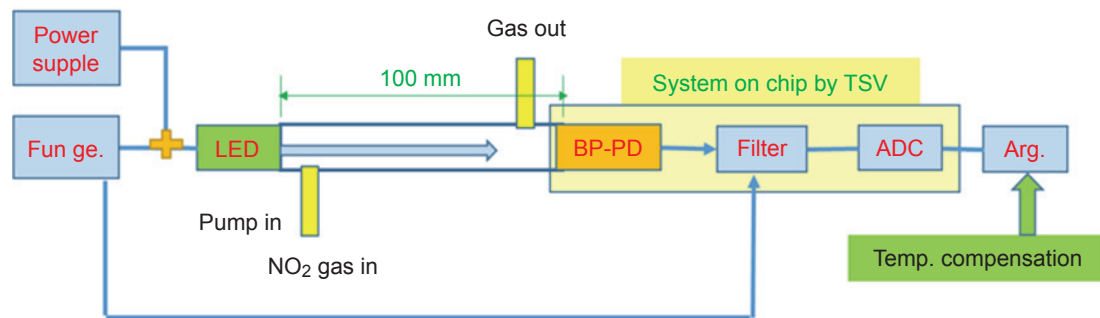


圖 2. 本團隊開發之光學式氣體感測器系統結構示意圖。

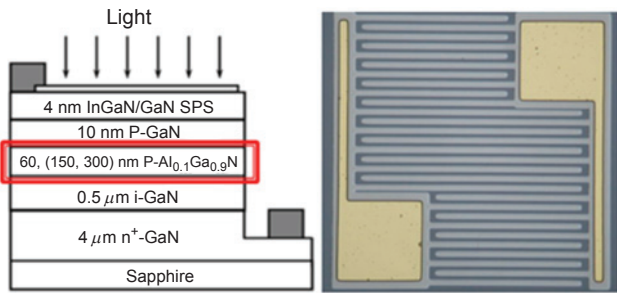


圖 3. 本團隊開發 GaN BP-PD 結構示意圖。

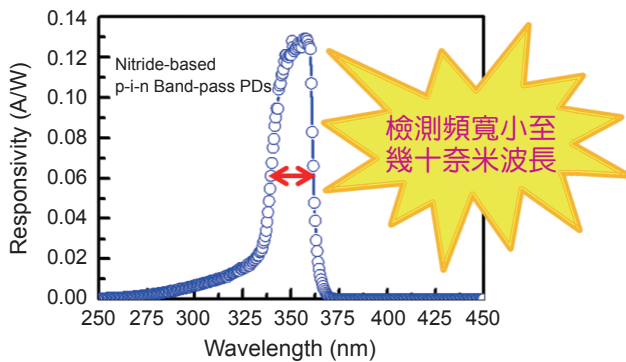


圖 4. 帶通紫外光檢測器之光響應頻譜圖。

的，市面上雖已有利用相同原理所設計出的數種產品，但各廠牌的產品不僅規格不一，測出的數據也不盡相同，準確度令人難以信服。

為改善上述缺點，提升偵測品質，本研究團隊將針對此問題來進行氣體感測器的技術改造，期能提供快速、準確且具公信力的檢測數據。

相關開發說明如下：

2. 二氧化氮偵測器

本團隊研究二氧化氮 (NO₂) 偵測設計，是採用光學式的方式製作，二氧化氮對於特定的波長光線 400 nm–550 nm 光線會吸收，偵測範圍跟光學路徑總長有關，也就是光學路徑越長所能偵測的範圍越小，但是解析度卻最高，透過二氧化氮的特定波長以及光學路徑由接收器接收數值，將訊號呈現在電腦或是手機介面上，得知即時數據。

二氧化氮偵測光路設計製作，採用 405 nm LASER 發射，220 cm 光路傳輸，光路傳輸採用封閉腔體以便後續氣體輸入及偵測濃度變化。在初始測試過程中最重要的是確認二氧化氮可以吸收 405 nm 波長的光線，因此先對光路注入不同濃度的氣體以便了解吸收狀態，結果如濃度分析曲線圖所呈現，見圖 5。光學腔體穩定度高，針對氣體濃度有再現性重現性，曲線會呈線性關係，腔體設計預估可以偵測最高濃度為 1200 ppm，可以偵測最低濃度為 5 ppm，經實際操作，第一次測試的 5000 ppm 比二、三次測試低，是因為 NO₂ 存放時間的關係導致下降，也在這次的測試經驗中發現二氧化氮氣體容易滯留於袋子內表面，以至於實際濃度無法採用空氣比值法認定。圖 6 所呈現為本偵測系統的實際成品圖，圖 7 所呈現為本系統實際灌入氣體的測量情形。

針對此氣體感測模組，我們將設計使用雷射當作光源，而且是利用偵測的氣體對於光子吸收頻譜最強的波長範圍來挑選合適的雷射，當雷射光源經

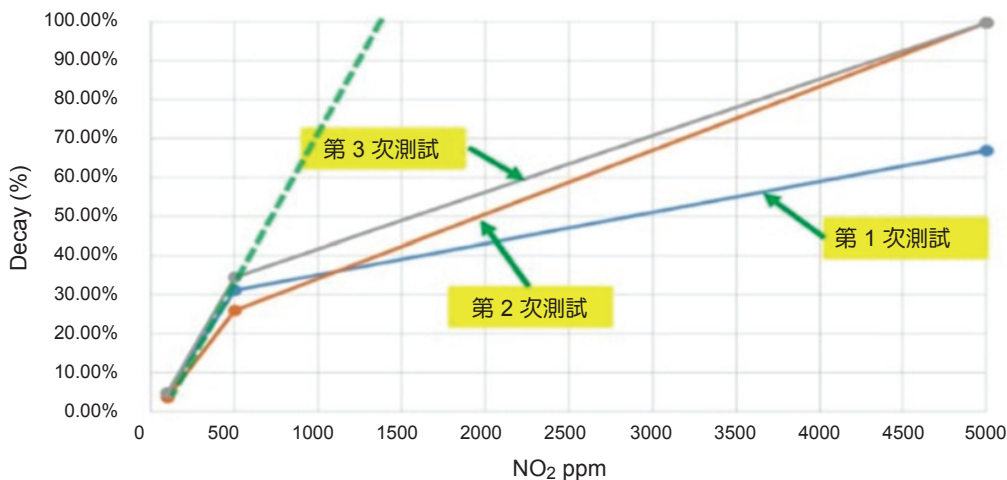


圖 5. 注入不同濃度二氧化氮測試衰減量。

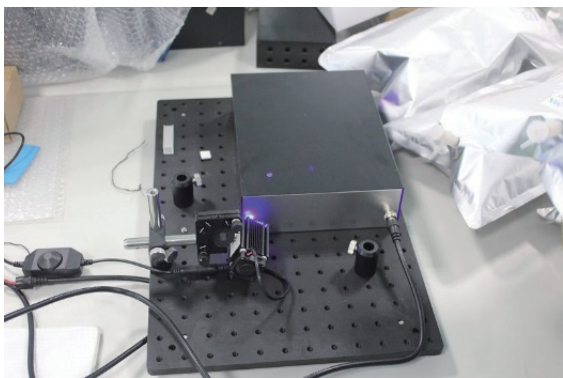


圖 6. 實際完成之系統照片。

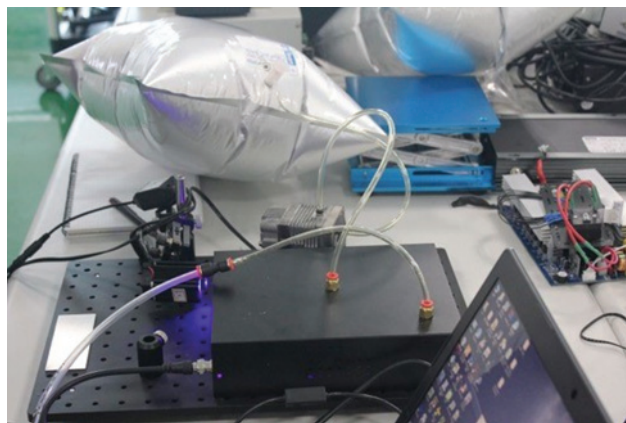


圖 7. 本系統實際灌入氣體的測量情形。

過充滿氣體的感測器腔體時，部分的光子會被偵測的氣體分子所吸收，使得雷射光源發射出的光強度會因為光子被吸收而衰減。以我們設計欲偵測的 NO_2 濃度為例，圖 8 為 NO_2 氣體的吸收光譜圖，從圖中可以看出吸收範圍約為 200 nm 至 650 nm，吸收光譜的波長峰值約為 400 nm。但是光源峰值波長如果低於 410 nm 的話， NO_2 氣體分子就會產生光解，光解後的副產物 NO 會再次吸收，因此將會影響偵測的準確度，化學反應式如下所示：



因此，我們選用發光波長峰值為 405 nm 左右的藍光雷射來當作氣體感測器的光源。

圖 9 為本團隊設計 NO_2 氣體感測器模組以及公測模組之系統示意圖，其中感測模組部分包含了雷射與 BP-PD 兩種元件及其電源供應器以及訊號產生器、總長度為 220 cm 且為 S 型的光通道結構、光通道腔體之壓力控制系統、以及類比轉數位訊號電路 (ADC)。另外，光通道腔體設有一溫度感測器，是本系統設計用來對環境溫度會影響 NO_2 氣體偵測的數值來做補償，以增加氣體偵測的準確度。

目前團隊二氧化氮 (NO_2) 偵測模組開發已經達到可辨識 5 ppm – 1200 ppm 等級，解析度可達 1 ppm，測量反應時間小於 5 秒內，量化尺規校正採用 SGS 校正氣體分析儀器。

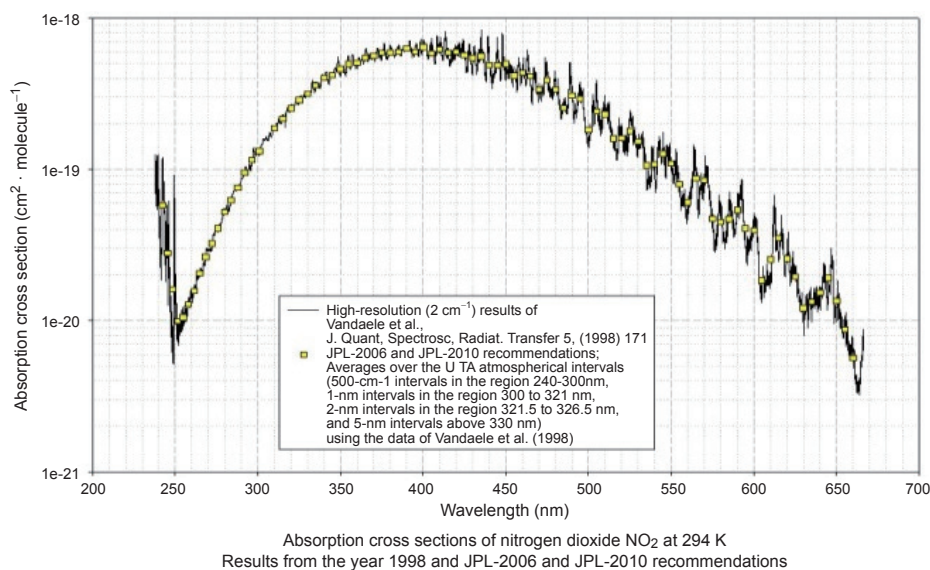


圖 8. NO_2 的吸收光譜圖。

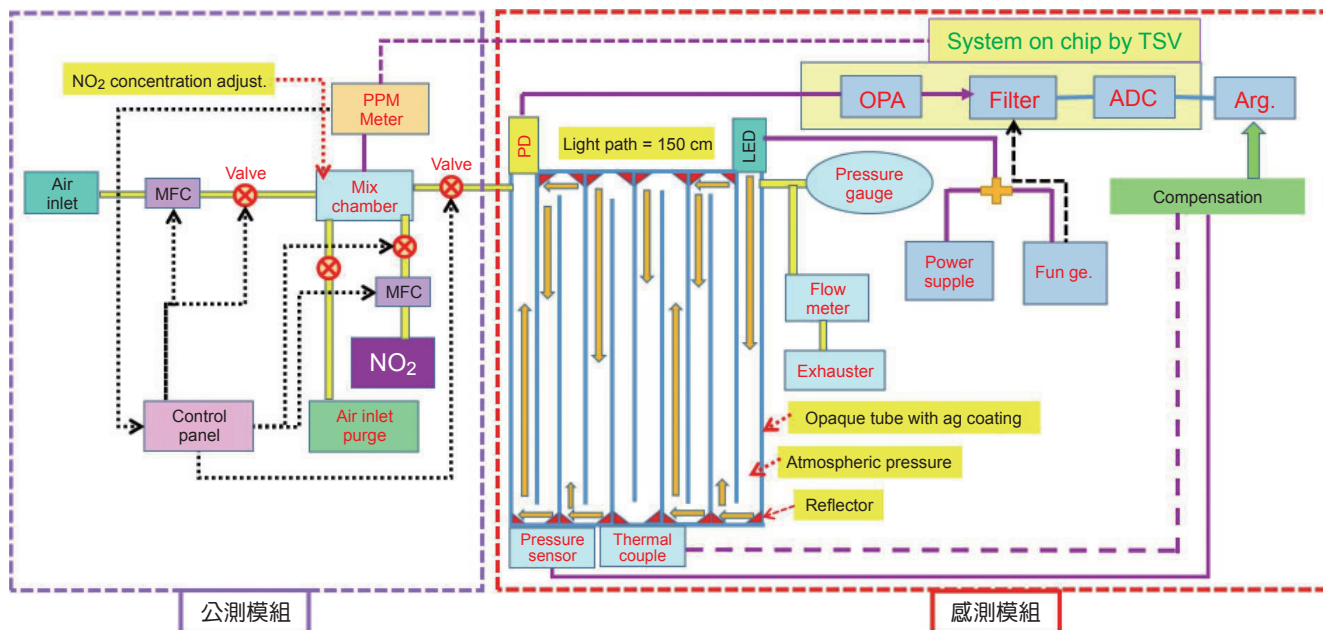


圖 9. NO₂ 氣體感測器與公測模組之系統示意圖。

3. PM2.5 懸浮微粒偵測器

PM2.5 懸浮微粒偵測器設計，是利用一個 IR 940 nm LED 發射器，光會照射懸浮粒子上，而光會因為懸浮粒子大小不一樣，導致散射結果也不一樣，光偵測器 CIS 以陣列的形式當接收端，接收懸浮粒子散射光數值，將訊號呈現在電腦得知即時數據。唯獨測試公信力無標準對照驗證，本研究團

隊將建置有公信力的腔體來模擬各種空氣微粒濃度並進行標準化驗證。

傳統 PM2.5 是以單一光偵測器偵測懸浮粒子，本研究以新技術取代單一光偵測器的可行性，利用光偵測器 CIS 接收影像，再藉由影像二質化，判斷粒子數量，精確度比單一光偵測器高。

PM2.5 設計製作，採用 IR 發射，光偵測器 CIS 接收器，採用封閉腔體以便後續氣體輸入及偵

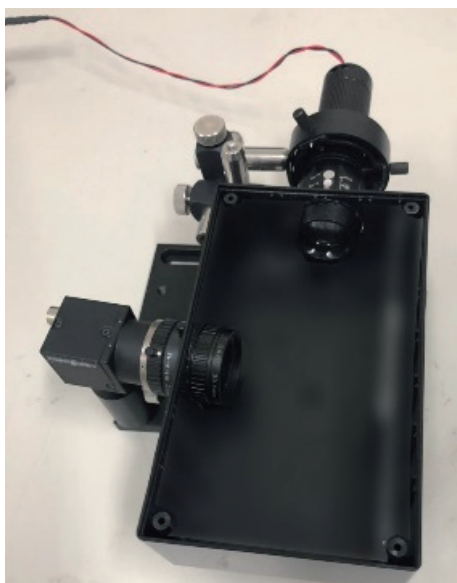


圖 10. PM2.5 結構與模組。

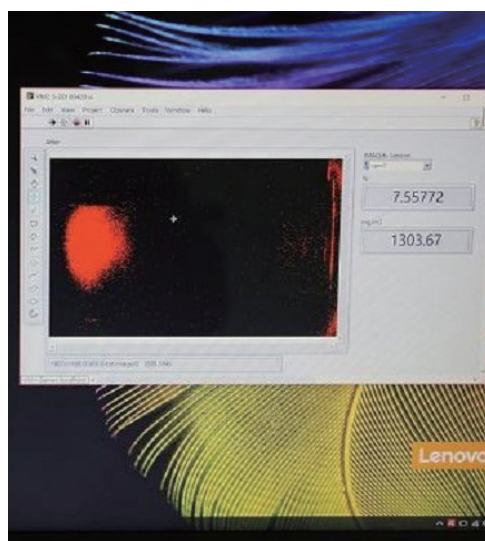


圖 11. 訊號的數值。

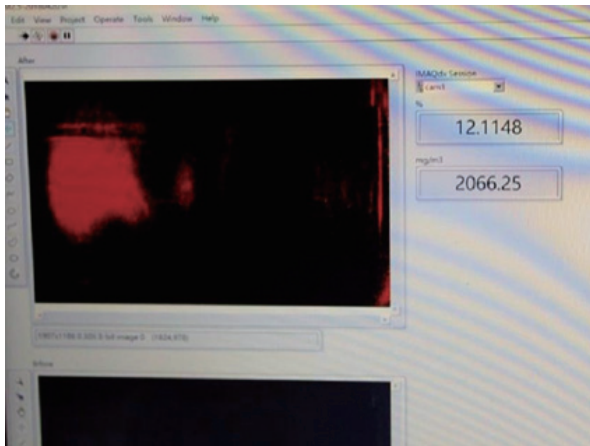


圖 12. 線香 PM2.5 微粒。

測變化，如圖 10。

空氣的懸浮微粒進入腔體，IR 發射器打入懸浮微粒散射，利用光偵測器 CIS 接收影像，再藉由影像二質化，判斷粒子數量，將訊號的數值顯示在電腦介面，並完成連線即時測試，圖 11。

本系統 PM2.5 微粒來源由線香提供，如圖 12，目前很難控制線香濃度，因為在演算法學習，需要高中低不同濃度，目前正積極調整來校正學習線性度。

目前團隊 PM2.5 懸浮微粒偵測模組開發已經達到可辨識密度 $0 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，測量反應時間小於 5 秒內，腔體體積 $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ ；工作溫度 $0 - 100^\circ\text{C}$ ，濕度範圍 $0 - 99\%$ 。至於 PM2.5 懸浮微粒偵測模組開發當初所使用的是未經

過 SGS 校正過的檢測器，因此測試公信力無標準對照驗證，這些缺點會在第二年計畫中改善。

因為光學式氣體感測的優勢就是快速且無需耗材更換，因此非常適合進行工業廠房煙道排放的即時監控，為了強化彰顯本技術開發的優勢，將設計一個腔體來模擬煙道會產生的有害氣體與微粒 (NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$)，並對這些物質進行快速監測讀出數值，無線傳送給監控平台，讀出速度必須小於 3 秒且與標準 SGS 認證儀器相比較誤差必須小於 10%。詳細測試模式、周邊環境設備與驗證載具請參閱圖 13。

4. 設計規格

本研究基於先前 BP-PD 的相關技術，開發一個整合二氧化氮 (NO_2) 及細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) 氣體感測器模組，並借助本校各個老師研發團隊的專長，除整合二氧化氮 (NO_2) 及細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) 氣體感測器模組外，尚有下列特點：(1) 搭配感測器信號 IC 讀取電路，進行相關資料轉換及處理並設計相關演算法。(2) 建構空氣品質聯網平台，即時分析氣體濃度分佈情形及記錄。(3) 無人飛行載具搭載二氧化氮 (NO_2) 及細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) 氣體感測器模組及感測器信號 IC 讀取電路，以升空進行細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) 量測及二氧化氮 (NO_2) 氣體追蹤，並透過無線網路回傳二氧化氮 (NO_2) 及細懸浮微粒 ($\text{PM}_{2.5}$) 氣體相關數據信號給空氣品質監測平台以做後續相關分析。

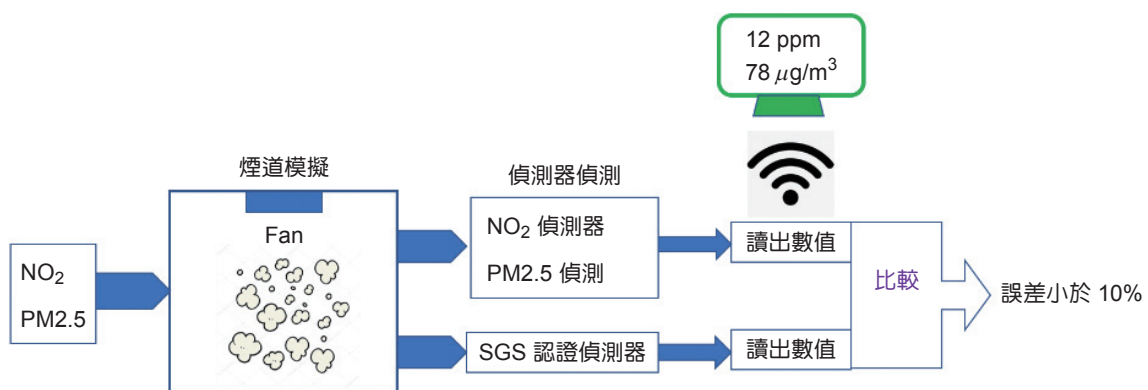


圖 13. 感測器模組搭載驗證平台測試模式。

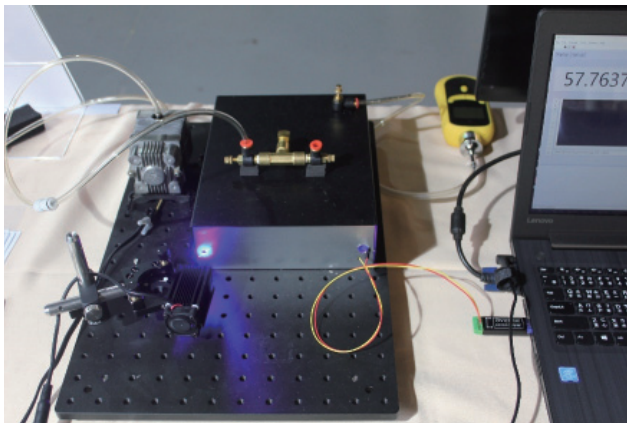


圖 14. 光學結構與模組。

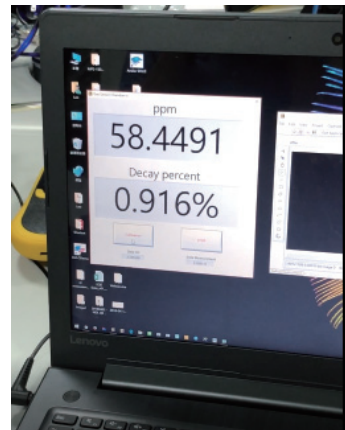


圖 15. 電腦畫面介面。

三、結果討論

1. 實測規劃使用儀器與測試結果

目前的設計，發射器和接收器還需要手動進行調整，未來團隊會將發射器以及接收器的部分固定住形成模組，避免晃動和碰撞損壞到此元件，就算元件壞掉，維修的元件也不必向特定廠商購買，也不會因為模組體積太大而占空間。

2. 二氧化氮偵測器

先將雷射發射對準 PD 接收，把氣袋裡未知數的二氧化氮濃度，利用幫浦將氣袋裡的氣體灌入腔體中，透過二氧化氮的特定波長以及光學路徑由接收器接收，經由演算法，把氣袋裡的未知二氧化氮濃度，圖 14，顯示出在電腦畫面上，得知濃度數據，圖 15。

3. PM2.5懸浮微粒偵測器

空氣的懸浮微粒進入腔體，IR 發射器打入懸浮微粒散射，利用光偵測器 CIS 接收影像，如圖 16，再藉由影像判斷粒子數量，將訊號的數值顯示在電腦介面，並完成連線即時測試。

4. 搭載於無人飛行載具

目前團隊已嘗試於飛行器上裝置腔體進行試飛，如圖 17、圖 18，初步測試已成功將偵測數值無線傳輸至網路平台，見圖 19。



圖 16. PM2.5 結構與模組。

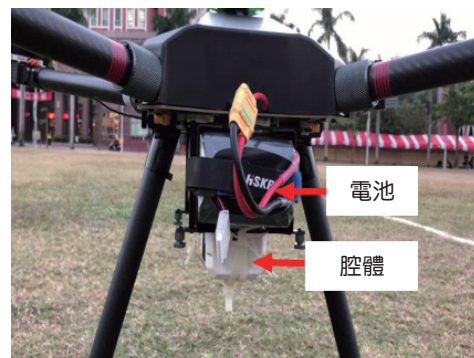


圖 17. 飛行器上裝置腔體。

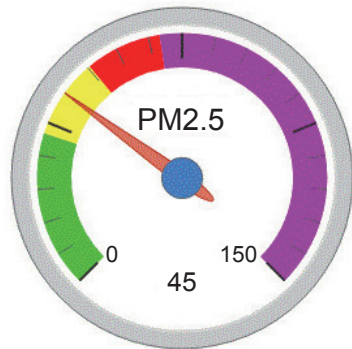


圖 18. 飛行器實際飛行偵測空氣品質。

時間：Thu Nov 29 2018 17:30:41 GMT+0800 (台北標準時間)

地點：

溫度：24.5 °C；濕度：62.3%

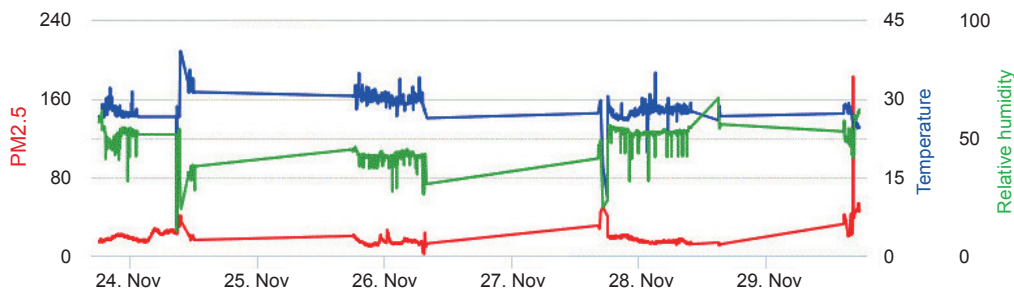


• 一般民眾活動建議：

正常戶外活動。

• 敏感性族群活動建議：

有心臟、呼吸道及心血管疾病的成人與孩童
感受到癢狀時，應考慮減少體力消耗，特別
是減少戶外活動。



資料來源：中研院 PM2.5 開放資料入口網站 https://pm25.lass-net.org/data/show.php?device%20id=FT1_050

圖 19. 偵測數據無線傳輸至網路平台，並即時顯示空氣中 PM2.5 的污染資訊，且可長期紀錄 PM2.5 的濃度變化。

四、結論

有鑑於乾淨空氣與人類健康及環境品質息息相關，本團隊持續的研究開發，希望朝「商業量產」的目標努力，除了偵測準確性也期望能降低此偵測系統的成本並使偵測儀器能更具機動性。此系統除了可裝載於無人飛行器上，進行空域監控外，未來尚可應用於情境上，例如：在工廠煙道附近，多點布置，就近監控工廠所排放之氣體，並迅速將測得數值回傳，即時分析後，提供準確數據給政府相關單位參考，據以研擬防治對策或稽查防堵汙染，讓空汙元凶無法遁形，冀能藉由此研究，來改善台灣的空氣品質、維護民眾健康。

誌謝

感謝國家實驗研究院提供研究經費上的支持 (NARL-AQI-107-003)，以及台灣儀器科技研究中心提供本團隊充分的技術建言，讓本團隊無後顧之憂的研究開發來促成此光學感測技術應用在空氣汙染偵測。



邱裕中先生為國立成功大學電機工程研究所博士，現為財團法人南臺科技大學教授。

Yu-Zung Chiou received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a professor in the Department of Electronic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology.