



新一代低層大氣無人機探空系統

王聖翔^{1,2,3,*} 柯立晉⁴ 潘巧玲⁵ 劉豪聯⁵ 李育棋⁶ 游志淇⁷ 邱思翰⁸

¹ 國立中央大學大氣科學系教授

² 國立中央大學環境監測技術聯合中心合聘教授

³ 國立中央大學環境工程研究所合聘教授

⁴ 國立中央大學大氣科學系研究助理

⁵ 國立中央大學大氣科學系研究生

⁶ 交通部中央氣象署組長

⁷ 交通部中央氣象署科長

⁸ 交通部中央氣象署技佐

摘要

大氣垂直剖面的資料對於天氣預報、飛航安全、軍事活動皆相當重要。要取得詳細的大氣狀態（溫度、溼度、壓力）探空資料，過去經常使用的觀測方法多採用探空氣球，利用填充氦氣的乳膠氣球掛載芬蘭 Vaisala 公司生產的探空儀設備，藉由無線電接收即時資料，探空儀為一次性使用，進口成本高且會造成廢棄物環境污染。近年來無人機技術日趨成熟，亦有不少研究應用於大氣觀測與空氣污染上，惟達例行作業目標仍有一段差距。本研究介紹一套自主研發、全機未含中國製零組件，與中央氣象署（原中央氣象局）共同合作的低層大氣無人機探空系統，全系統包含四軸旋翼無人機、大氣感測儀 Aeromount 以及地面接收站。本系統所採用的無人機具備防潑水，可以於雨天作業，抗風性經過實際測試能抗七級風，垂直飛行高度能達到 3,000 公尺，透過地面飛控軟體，可以達成任務路徑規劃、飛航參數上傳、自動起飛與自動返航，及無人機飛航資料與狀態即時回傳等功能，完全實現自控飛行無需人為操作控制。大氣感測儀 Aeromount 整合探空常規的測項如溫度、溼度、氣壓外，還增加了 PM_{2.5} 與姿態感測等微型傳感器，其中姿態感測資料可用以反演垂直剖面上的風速和風向。

* 通訊作者：王聖翔

電子郵件：carlo@g.ncu.edu.tw

（收件日期：2023 年 4 月 12 日；修正日期：2023 年 5 月 18 日；接受日期：2023 年 5 月 18 日）

透過參與 2020 年宜蘭強降水觀測實驗，藉由和 Vaisala 探空資料比對，驗證此系統的可行性及穩定性，定量描述此探空系統觀測各項參數的不確定性及未來改進的方向。除此之外，我們也藉由三個觀測個案作為範例，展現此系統在劇烈降雨、PM_{2.5} 空污事件、海陸風環流的觀測應用潛力。整體而言，本研究所開發的新一代低層大氣無人機探空系統，展現國際領先的技術，具備提供大氣探空常規作業化的潛力。

關鍵詞：無人機、大氣觀測技術、探空儀、大氣感測器



A New Generation of Lower Atmosphere UAV Sounding System

Sheng-Hsiang Wang^{1,2,3,*}, Li-Jin Ke⁴, Chiao-Ling Pan⁵, Hou-Lun Lao⁵,
Yu-Chi Lee⁶, Zhi-Chi You⁷, Szu-Han Chiu⁸

¹Professor, Department of Atmospheric Sciences, National Central University

²Adjunct Professor, Center for Environmental Monitoring and Technology, National Central University

³Adjunct Professor, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Central University

⁴Research Assistant, Department of Atmospheric Sciences, National Central University

⁵Master Student, Department of Atmospheric Sciences, National Central University

⁶Division Head, Central Weather Administration

⁷Section Chief, Central Weather Administration

⁸Junior Technical Specialist, Central Weather Administration

Abstract

The data of atmospheric vertical profile are very important for weather forecast, aviation safety, and military activities. In order to obtain detailed atmospheric state (temperature, humidity, pressure) sounding data, the observation method often used in the past mostly used sounding balloons to mount the radiosonde produced by Vaisala Company in Finland. The radiosonde is for one-time use and can cause waste pollution. The import cost also considers high. In recent years, unmanned aerial vehicle (UAV) technology has become more and more mature, and many researches have been applied to atmospheric observation and air pollution, but there is still a gap in reaching the goal of routine operations. This study introduces a self-developed low-level atmospheric UAV sounding system that cooperates with the Central Weather Administration. The whole system includes a quadrotor drone, an atmospheric sensor unit (Aeromount), and a ground station for data transmission. This system is IP65 and can operate in rainy days. The maximum wind speed for allowing operation is 13.9 m/s. The maximum flight altitude reaches 3,000 meters. Through the ground flight control software, mission path planning, uploading flight parameters, automatic take-off and automatic return, and real-time

* Corresponding Author: Sheng-Hsiang Wang
E-mail: carlo@g.ncu.edu.tw

transmission of flight data can be done without human intervention. Aeromount integrates sensors such as temperature, humidity, and air pressure, $PM_{2.5}$ and motion. The motion sensing data can be used to retrieve the wind speed and wind direction on the vertical profile. An inter-comparison experiment was carried to evaluate the feasibility and reliability of this system during the Yilan heavy rainfall observation experiment in 2020. The uncertainty of various parameters was quantitatively described and the direction of future improvement were addressed. In addition, we also provide three observation cases as examples (e.g., severe rainfall, $PM_{2.5}$ air pollution, and land-sea breeze) to demonstrate the application potential of this system. Overall, the new generation of lower atmosphere UAV sounding system has world-leading technology and shows the potential to implement as routine operation.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), atmospheric observation technology, sounding, atmospheric sensors

壹、緒論

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 俗稱無人機, 廣義的定義為不需要駕駛員駕駛的各式飛行器, 但現今不論是無線電遙控或具備電腦自動駕駛等技術的飛行器, 通常也被稱作為無人機。與傳統飛機相比, 無人機起飛成本低、應用彈性大, 所需要的控制系統及人力相對的也比較少。雖然與飛機相比, 無人機的最大載重可能有所限制, 但可自由控制與近地面飛行為其重要優勢之一。無人機通常具備安全返航、自動起降, 以及航線規劃等功能, 其機型與功能多變, 能針對不同的任務搭配所需的機型。早期主要由軍方研製發展, 近年來因技術門檻降低, 所以民間與科學研究開始廣泛應用, 使得過去人類無法到達或是具危險性的地域得以探索與觀測。

無人機於大氣科學的應用發展上面, Konrad, Hill, Rowland, and Meyer (1970) 最早嘗試使用遙控飛機來建立溫度、相對溼度、壓力的垂直剖面, 但僅限於對大氣垂直熱力結構的初探。1991 年美國 Insitu 公司開始投入無人探空飛機 Aerosonde 主體的研發, 1993 年澳洲氣象署也加入贊助, 並由澳洲 Sencon 公司協助開發生產, 1995 年年底, Aerosonde 首度參與澳洲 Maritime Continent Thunderstone Experiment 聯合觀測實驗, 開啟了無人飛機在大氣科學觀測研究上的序曲。1998 年至 2018 年間, 國科會臺灣颱風洪水研究中心 (此單位已於 2015 年裁撤) 及臺灣大學大氣系亦採購一批 Aerosonde 無人機並執行一系列大氣觀測實驗。

早期 2000 年至 2015 年, 大氣科學界出現不少使用類似 Aerosonde 的中小型定翼無人機進行大氣觀測。德國科學團隊 Martin, Bange, and Beyrich (2011)、Spiess, Bange, Buschmann, and Vörsmann (2007) 與 Van den Kroonenberg, Martin, Buschmann, Bange, and Vörsmann (2008) 以無人機系統 M²AV 量測大氣邊界層內溫度、相對溼度、風速、風向、亂流通量與推估邊界層高度與發展, 並同時與地面測站、光達、聲波雷達、無線電聲波探測系統及直升機的風向量吊艙進行交叉比對以驗證其觀測能力。定翼無人機參與大型觀測實驗如 WAC (Western Pacific Autonomous UAV Campaign), Ramana, Ramanathan, Kim, Roberts, and Corrigan (2007) 以無人飛機為載具探究太平洋上灰塵、煙煤及雲的交互作用, 同時採集 O₃、VOCs、CO 等資料; MAC (Maldives AUAV Campaign) 於無人飛機上酬載微型化儀器進行印度洋上空的黑碳垂直觀測 (Ramana et al., 2007; Ramanathan et al., 2007); ScaleX 觀測實驗以無人飛機探討大氣邊界層內的微量氣體及近地表通量的交互作用 (Broisy et al., 2017); BLLAST (Boundary-Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence) 野外實驗中以小型無人機 SUMO (Small Unmanned Meteorological Observer) 探測亂流動能 (Turbulence Kinetic Energy, TKE) 和三維的風速、風向 (Båserud, Reuder, Jonasse, Kral, Paskyabi, and Lothon, 2016)。藉由這些觀測實驗中可以發現, 定翼無人飛機做為小尺度的觀測平臺相當的方便, 因為其可以控制飛行路徑, 以及更換酬載儀器, 整體採樣的頻率、觀測的方式和觀測項目的彈性相當高。

自 2007 年 iPhone 智慧手機問世, 2010 年 iPhone 4 的發表更是第一支內建 MEMS 陀螺儀的智慧型手機, 此後帶動了陀螺儀、GPS (Global Positioning System)、電子羅盤等技術普及, 加速了多軸旋翼無人機 (Drone) 的發展, 也就是俗稱空拍機, 而 2013 年大疆

創新科技有限公司 (DJI) 首推出大眾消費型的空拍機，使得相關應用蓬勃發展。早期大氣科學研究中多使用固定翼無人機，而近十幾年受多旋翼無人機日益普遍，不少研究實驗也開始使用以多旋翼無人機為主的觀測，例如垂直採樣近地面甲烷等溫室氣體 (Broisy et al., 2017)、水平風向風速估算 (Broisy et al., 2017; Neumann and Bartholmai, 2015) 及大氣煙塵、海鹽、VOCs、PM₁₀ 的量測 (Alvarado, Gonzalez, Erskine, Cliff, and Heuff, 2017; Alvarado, Gonzalez, Fletcher, and Doshi, 2015; Brady, Stokes, Bonnardel, and Bertram, 2016; Chang, Wang, Chang, Liang, and Lin, 2016)。ISOBAR (Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer) 實驗利用無人機進行 150 餘次的觀測，研究穩定大氣邊界層特性 (Kral et al., 2018)。

無人機應用於大氣觀測有其優缺點。使用無人機觀測除了需考慮其飛行、滯空及酬載能力外，在操作上仍需考慮飛航安全，人員訓練等因素，因此使用無人機觀測的門檻較高 (柯立晉等, 2018)。除此之外，無人機上搭載的儀器也需考慮諸多因素，如儀器大小、感測器位置、置於無人機的位置等。綜整上列所述，成熟的無人機觀測團隊應有自行研發無人機與其搭載儀器的能力，以應付不同天氣狀況與實驗目的。雖說無人機觀測門檻高，但其優點為其他儀器無法取代，以同樣現地 (in-situ) 觀測的探空氣球作比較，無人機掛載的氣象儀器具有可重複使用、時間解析度高、長期成本較低、自主控制等優勢 (柯立晉等, 2018)。但這並不代表無人機觀測可取代探空氣球，無人機觀測雖可程式化空間移動路徑，但空間移動距離受通訊及電池仍有限制，而探空氣球則無自主動力隨風飄移，可觀測的距離更遠；探空氣球可在強風強雨天氣條件下觀測，而無人機有其極限氣象條件之觀測能力；探空氣球的觀測高度極限約 10 mb，而無人機的觀測高度受限於電池的效能，目前國際上驗證僅達 6 公里高的大氣垂直剖面觀測 (Pinto et al., 2021)。

本研究將介紹現階段臺灣自主開發的低層大氣無人機探空系統，以及透過多個實驗，包括平行比對實驗、穩定和不穩定天氣條件下的實驗，驗證此系統之觀測能力。本研究將分為六部分，第一部分為緒論；第二部分為大氣無人機觀測技術，介紹本團隊的無人機觀測系統的開發歷程、無人機技術規格、大氣感測器規格與校正、風向風速反演技術；第三部分為系統驗證實驗，分別以同載具和不同載具的兩實驗，比較本團隊研發的大氣感測儀 Aeromount 和 Vaisala 公司出品的大氣感測器；第四部分為實際觀測個案分析與討論，討論本團隊的觀測系統分別於穩定和不穩定天氣中的表現；第五部分為結論；六為未來發展。

貳、大氣無人機觀測技術

無人機技術應用在大氣科學是極具挑戰的一項工作，主要原因是天氣現象變化多端，大氣觀測項目多元，因此有必要針對不同的天氣個案，整合適當的機型與觀測儀器。其次，大多值得探究的大氣科學議題都和劇烈天氣有關，也因不穩定天氣條件下，需特別考慮無人機的抗風、防水、遙控通訊等能力，而市售的無人機甚少擁有此規格。此章節將討論本研究團隊所發展的一套適用於全天候的無人機大氣探空觀測技術。

一、大氣感測儀開發歷程

自 2016 年開始，本團隊便投入發展氣象及空氣品質垂直剖面觀測技術，透過科研計畫資源挹注，持續開發一系列針對大氣觀測的無人機觀測系統（Unmanned Aircraft System, UAS），其中包含觀測酬載儀器、無人機本體、地面設備等。

在自主研發觀測酬載儀器方面，主要為微型大氣感測儀 Aeromount。Aeromount 為一套以 ARM 為核心的微控制主板（STM32F072C8），可外接多種感測元件，目前主要包含 PM_{2.5}（PMS7003）、溫溼度（SHT31）、氣壓（MS5611）、GPS（BN-280）、電子羅盤、三軸陀螺儀加速度器（mpu9250）等微型感測器。此系統透過無人機姿態數據即時反演風向、風速，還具備 SD 卡資料儲存與即時回傳數據兩種功能，以確保資料完整性，資料的採樣頻率皆保持在 1 Hz 以上，經測試與校正其參數量測的誤差範圍與特性如表 1 所示。Aeromount 原始資料經過處理後，可以提供每秒或 5 公尺垂直解析度資料，供不同用途使用（如本文第參、肆節所使用資料）。

表 1 微型大氣感測儀 Aeromount 規格及所量測的參數基本資料

參數	溫度	溼度	壓力	風速	風向	PM _{2.5}
精準度	±0.3℃	±4.0%	±1.0 hPa	±0.5 m/s	<10°	±10 µg/m ³
解析度	0.01℃	0.01%	0.01 hPa	0.1 m/s	0.1°	1 µg/m ³
工作溫度	-40℃ ~ +80℃					
資料頻率	1 Hz 以上					
儲存方式	具備記憶體儲存及數據即時回傳系統					
尺寸／重量	102 × 110 × 33 mm / 156.9 公克					
防水防塵等級	IP65					

資料來源：研究者自行產製。

為了提供 Aeromount 於無人機上準確量測到大氣環境資料，Aeromount 需要搭配一個外殼，此外殼共經歷三個版本改良，持續改良的主要原因為解決形狀阻力、進氣採樣流場、太陽輻射加熱所造成的溫溼度觀測誤差，以上因子影響無人機的飛行動力、大氣感測器溫溼度觀測準確度、風速風向反演。早期 Aeromount 外型可分為兩部分，進氣管和資料處理器艙體，兩者都是以 3D 列印輸出再拼接而成。圖 1（a）為最初的設計，Aeromount 主機置於長方形的防水盒中，防水盒側邊接出一組倒 T 型天線，為雙向資料傳輸之用途。而空氣進氣管道為一個圓柱形上部接一個圓錐形開口，內部結構為中空且上下通透。在管道中有溫溼度探頭及 PM_{2.5} 感測器，提供環境溫溼度及細懸浮微粒濃度的量測。在這版本中，因為長方形防水盒頂部為平整，因此無人機在飛行時會造成形狀阻力，導致無人機需要額外的動力去抵抗，同時也會影響風向風速的反演。除此之外，在有太陽輻射的觀測條件下，進氣管的外部會被太陽光直接加熱，而白色的採樣管內部會有些微太陽光入射後持續反射和蓄熱，上述兩個原因都會導致在有太陽輻射條件下產生觀測誤差。此版本的使用期間為 2020 年 7 月至 2021 年 10 月。

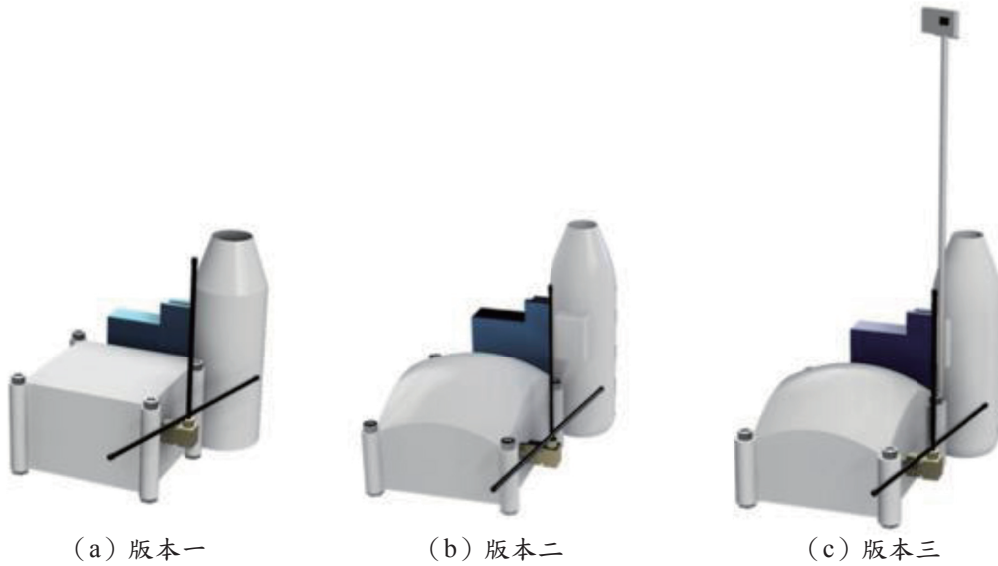


圖 1 微型大氣感測儀 Aeromount 整合於外殼後的示意圖

資料來源：研究者自行產製。

基於上述的形狀阻力、太陽輻射加熱和材料蓄熱的問題，本團隊製造了版本二的外殼（如圖 1〔b〕）。在解決形狀阻力的問題上，原本為長方體的資料收集器改為弧形屋頂，經數次飛行實驗後，確定可以解決形狀阻力的問題；在太陽輻射加熱和蓄熱的問題上，本團隊將進氣管的外壁以鋁箔包覆，以達到減少輻射加熱和材料蓄熱的問題，同時，還將進氣管內部噴上吸光漆，防止太陽輻射在內部反射。而這個版本的溫溼感測器電路板也整合到進氣管的外壁（如圖 1〔b〕中進氣管外壁上長方形凸起物），可以有效降低能進氣管內氣流的流暢性，也避免電路板的自熱效應對於觀測帶來的誤差。此版本的使用期間為 2021 年 11 月至 2022 年 1 月。

然而，經數次飛行實驗的比較後，發現版本二的溫溼度感測器所量測的數值仍有高估的現象，且感測元件的反應時間（Response Time）不佳。因此，隨後進行版本三的改良（如圖 1〔c〕），為了使感測器探頭能快速與環境達成熱平衡，本團隊將探頭外露並將升高 15 cm 以遠離熱源干擾，此外，其外殼與排線以含銀之特殊材質包覆。2022 年 1 月 11 日平行比對實驗結果顯示（詳情見第參章），版本三不僅能減少輻射加熱，還能加速熱量的傳導，大幅度減少感測器蓄熱等問題。版本三的使用期間為 2022 年 1 月至今。

二、無人機技術規格

無人機可謂是整個觀測系統中最重要的部分，無人機的最高飛行高度、飛行時間、上升速度、載重能力等決定了整套大氣無人機探空觀測系統（如圖 2）的觀測能力。除此之外，無人機與其電池保養等問題也是無人機觀測系統的重點，但受限於篇幅，不在此文敘述。

本團隊自製四軸多旋翼無人機，主要組成包含四軸多旋翼機架、飛行控制器、螺旋槳、電池及遙控系統等，全機採輕量化設計，由碳纖維板組成，並進行防塵防水設計。無人機整

個外型可見圖 2，無人機由上至下一共分為三層，最上層設置了微型大氣感測儀 Aeromount（白色及銀色包裹部分）、GPS 定位系統與飛行遙控數據傳輸天線；中層設置了飛行控制器；最底層分別架設了四軸多旋翼機架、馬達與其螺旋槳及電池。值得一提的是，此套大氣無人機系統的重心位置為 Aeromount 所在位置，以確保無人機的姿態量測及後續風向風速反演之準確性。



圖 2 大氣無人機探空觀測系統設備圖

註：從左至右分別為通訊天線、四軸多旋翼無人機和地面站電腦（軍規筆電）。

資料來源：研究者自行產製。

四軸多旋翼無人機全機採用非中國製元件，其細部規格如下：對角馬達軸距 360 mm、全高 288 mm、最大起飛總重量為 2 kg、額外掛重上限為 600 g、最大上升速度為 10 m/s、最大下降速度為 5 m/s、最高飛行高度 3,000 公尺、無負載的懸停時間為 30 分鐘、最大抗風程度可達 7 級風、全機 IP65 防塵防潑水。飛行控制器為無人機的核心，主要包含陀螺儀、加速度計、磁力計等感測器組成的慣性量測單位 IMU（Inertial Measurement Unit）來偵測無人機的飛行姿態，即時修正飛行角度，以維持機體水平，以及全球定位系統 GPS 模組，接收 GNSS/GLONASS 衛星資料，使無人機即時獲取座標資訊與實現精準定位，定位系統精確

度為垂直 ± 0.5 m，水平 ± 2.5 m。通訊設備決定無人機的飛行距離，通常使用 5.8 GHz、2.4 GHz、433 MHz 等頻段，頻率越低無線電的穿透性越強，相對得通訊距離也越遠，例如 433 MHz 的頻段通訊距離大約可達 10 km，但若是飛行距離超過 100 km 級距的無人機，只能利用衛星通訊來達成。本系統採用 2.4 G 無線藍芽系統，用於起飛前確認系統狀態及航線規劃使用。全程採用衛星導航飛行，過程中無任何遙控通訊設備介入。無人機飛行距離限制依電池電量飛行時間為準，無遙控距離限制。

地面設備包含地面站電腦和通訊天線兩個部分。我們採用一款軍規筆電作為地面站電腦，電腦中安裝無人載具系統軟體和即時大氣探空資料接收軟體，分別負責進行無人機控制和 Aeromount 資料接收。兩組通訊天線透過 USB 介面進到地面站電腦，負責與無人機和 Aeromount 進行雙向資料傳輸與溝通。無人載具系統軟體具備自主規劃任務路徑、飛航參數上傳、自動起飛與自動返航，及無人機飛航資料與狀態即時回傳等功能；即時大氣探空資料接收軟體主要功能為即時顯示各項 Aeromount 觀測值與繪圖之外，還具備三維空間地圖展示、地面標準觀測誤差修正輸入等功能。

三、Aeromount 準確度驗證

低層大氣無人機探空系統中的 Aeromount 為本團隊自主研發的大氣感測儀，Aeromount 經中央氣象署委辦計畫「大氣邊界層內垂直剖面觀測系統建置案」驗證其可用性與準確性，此小節僅摘要感測器驗證流程。

Aeromount 感測器元件在購入時，首先會進行不良品的篩選，將離群值較大的感測器排除後，各觀測項目之感測器標準校驗流程如圖 3。在圖 3 地面校驗部分，針對溫溼度，本團

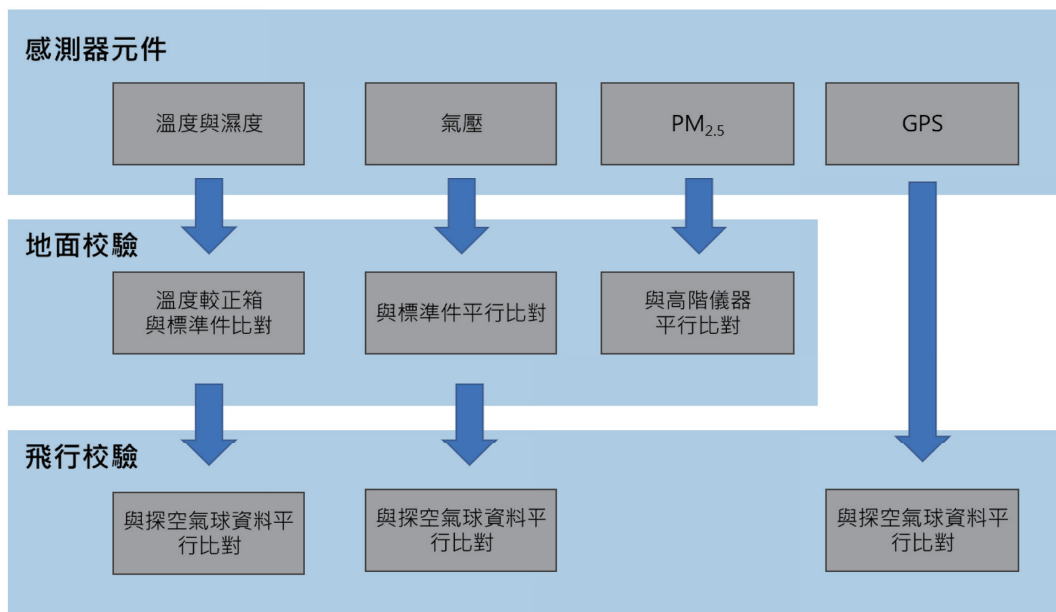


圖 3 微型大氣感測儀 Aeromount 的校驗流程圖

資料來源：研究者自行產製。

隊實驗室設有標準溫度與溼度校驗箱，以準確度層級較高的溫溼度儀器作為標準件，將待校件與標準件進行比對，溫溼度誤差範圍皆須符合設定標準才可通過校驗（如表 1 的精準度）。氣壓的校驗則為處於室內同一穩定的環境中，進行與標準件的平行比對，其案例結果如圖 4 所示，相關性相當良好，兩者的誤差大約為 1 hPa 以內，此部分的誤差會影響之後對於測高公式的使用，對於計算的飛行高度會有些微的影響（若採用 GPS 的高度會有較大的誤差值）。PM_{2.5} 的校驗主要以地面平行比對的方法進行，本實驗室有高階的即時 PM_{2.5} 監測儀當作標準件，與待校件進行比對，誤差不得超過 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 即通過校驗。每一組無人機上的感測器皆通過校驗程序的檢驗後才可以進行觀測。在飛行校驗部分，即透過一系列的戶外平行觀測比對實驗，以瞭解 Aeromount 與現行大氣探空觀測標準件的差異，而標準件指的是中央氣象署所採用的芬蘭 Vaisala RS41 探空系統。此部分，將於本文的第參節進行詳述。

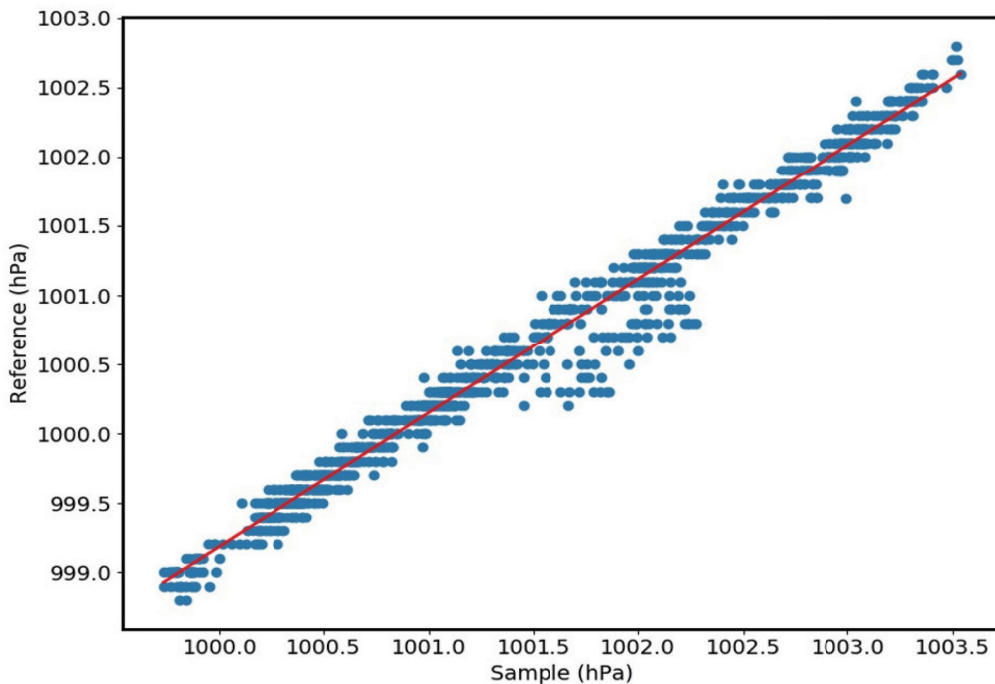


圖 4 氣壓感測器與標準件相關性圖

註：x 軸為大氣感測器量測值，y 軸為標準件量測值，藍點為兩者同時測量值，紅線為平均值。
資料來源：研究者自行產製。

四、無人機風剖面反演技術

垂直剖面上的水平風場觀測一般可由探空或測風氣球取得，亦可利用剖風儀或風光達等遙測方式來量測。施放氣球有成本與安全上的考量，且無法長時間進行密集觀測，遙測儀器昂貴且量測高度與資料解析度有其限制，近地表也有量測誤差。若要以無人機酬載風速計，受限於風速計的重量與無人機的載重限制，因此量測的高度有所限制，且無人機本身螺旋槳產生的亂流會導致風速、風向會受到嚴重干擾，因此成效不佳。本團隊採用無人機的風速風

向反演技術，能以不外掛風向風速計於無人機上，而是使用無人機自身受到環境風的吹拂而產生的傾角來推算風速風向。無人機反演的風場資料有一定可靠度，根據柯立晉（2018）早期的研究，無人機與剖風儀在風向和風速的均方根誤差（Root Mean Squared Error, RMSE）分別為 19 m/s 和 1.91 m/s，而本研究所使用的四軸無人機在機構上有進一步改良設計，風向風速的反演已更精準。

柯立晉（2018）所描述的反演技術為利用風三角原理，即無人機運動與風之間的向量關係，是由飛行向量（ $\vec{v}$ ）、對地向量（ $\vec{w}$ ）以及風向量（ $\vec{u}$ ）所組成，其中飛行向量（ $\vec{v}$ ）為無人機的真實速度與方向，是以移動中的無人機作為坐標系統；對地向量（ $\vec{w}$ ）則是指無人機的對地速度，其坐標系統為大地座標系統，通常會以 GPS 的資料為主。因此若是能求出飛行向量（ $\vec{v}$ ），利用已知的對地向量（ $\vec{w}$ ）以及兩者的夾角 α ，便可以餘弦定理求得風向量（ $\vec{u}$ ），並由此估算出風向與風速。

飛行向量的速度可以拖曳力的計算公式求得。在理想的情況下，當無人機瞬間受風拖曳力作用時，當有陣風時，無人機會因此產生俯仰角（Pitch angle, θ ）與滾轉角（Roll angle, ϕ ），而無人機的重力與風曳力會達到平衡。由此就能求出飛行向量的速度，而其飛行向量的方向是以飛行向量與 x 軸的夾角加上磁偏角得出，磁偏角為真實北極與磁羅盤所量的北極的差異，各地區略有不同。

得出飛行向量（ $\vec{v}$ ）後，與已知的對地向量（ $\vec{w}$ ）以及兩者的夾角 α 進行計算，便可計算風向（ θ_u ）與風速（ r_u ），如方程式（1）和（2），其中 r_v 和 θ_v 分別為飛行向量速度和飛行向量角度， r_w 和 θ_w 分別為對地向量速度和對地向量角度， β 為對地向量和風向量間的角度。

$$r_u = \sqrt{r_v^2 + r_w^2 - 2 \cdot r_v \cdot r_w \cdot \cos \alpha} \quad (1)$$

$$\alpha < 180^\circ \begin{cases} \theta_w < \theta_v \text{ \& } \theta_w - \beta > 0, & \theta_u = \theta_w - \beta \\ \theta_w < \theta_v \text{ \& } \theta_w - \beta < 0, & \theta_u = 360^\circ + \theta_w - \beta \\ \theta_w > \theta_v, & \theta_u = \theta_w + \beta \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha > 180^\circ \quad \theta_u = \theta_w + \beta$$

參、系統驗證實驗

一、實驗說明

為驗證微型大氣感測儀 Aeromount 在垂直飛行時的資料穩定度及觀測可信性，共執行兩組系統驗證實驗（飛行校驗），進行 Aeromount 和 Vaisala 探空系統平行比對，其中 Vaisala 探空系統視為標準件。兩組實驗的儀器配置根據實驗目的而有所不同，實驗 1 採用 Aeromount 與 Vaisala 都放置在無人機上，比較在同一上升速度，同一位置，兩大氣感測器的差異，最高飛行高度為約 500 公尺，共進行 11 次比較；而實驗 2 的採用 Aeromount 放置

在無人機上，而 Vaisala 放置在探空氣球上，比較在同一地點釋放，探空和無人機載具兩者的資料上差異為何，而比較高度設在無人機任務中較常設定的最高飛行高度，為約 2,500 公尺，亦共進行 11 次比較。

二、中大測站驗證實驗

實驗一的執行時間為 2022 年 1 月 11 日，測試地點為中央大學校內的中大測站無人機起降場，我們採用版本三的 Aeromount 與 Vaisala RS41 探空儀進行平行比對。溫溼度比對結果如圖 5、圖 6 所示，版本三的 Aeromount 溫度量測與 Vaisala 探空儀的溫度測值有極佳的相關性，兩者在溫度的誤差控制在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 內，實際上的 RMSE 為 0.1°C ，表現相當優異。相較之下，溼度的觀測較為不理想，尤其在高層的量測，有明顯的低估的情況，但整體來說，RMSE 為 3.41%，符合表 1 中觀測精確度所規範的 $\pm 4\%$ 範圍。另外，我們也發現溼度的量測在部分的剖面觀測有不錯的表現，而當有較強的太陽輻射條件下時，誤差值會提高，將列為未來進一步改進的方向。

三、2020 年 11 月宜蘭驗證實驗

實驗二的執行時間為 2020 年 11 月 22 日至 24 日，測試地點為宜蘭氣象站，我們採用版本一的 Aeromount 與 Vaisala RS41 探空儀進行平行比對。因為此個案為多雲至降雨天氣條件，

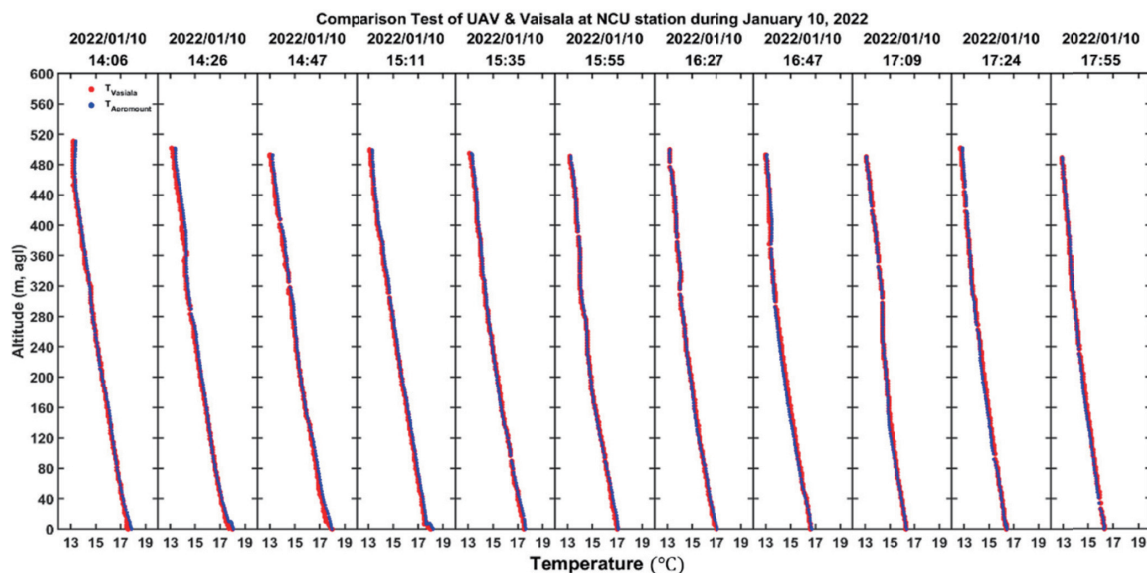


圖 5 中大測站平行實驗溫度剖面圖

註：x 軸為溫度 ($^{\circ}\text{C}$)，單位為攝氏度，y 軸為距地高，單位為公尺，藍點為 Aeromount 量測值，紅點為 Vaisala 探空儀量測值，共分別量測 11 次。

資料來源：研究者自行產製。

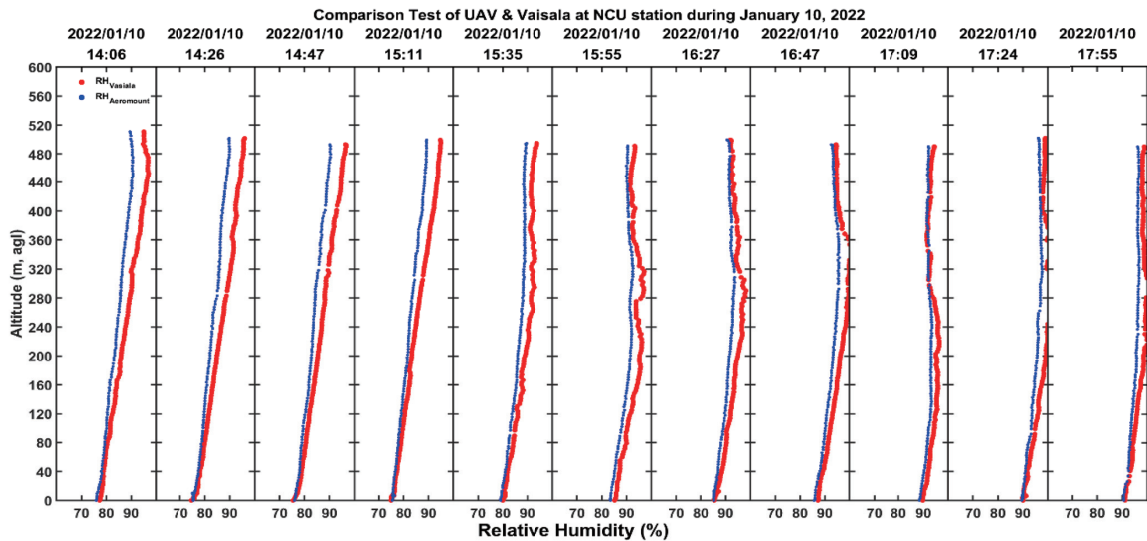


圖 6 中大測站平行實驗溼度剖面圖

註：x 軸為溼度，單位為百分比，y 軸為距地高，單位為公尺，藍點為 Aeromount 量測值，紅點為 Vaisala 探空儀量測值，共分別量測 11 次。

資料來源：研究者自行產製。

太陽輻射加熱效應較不顯著，因此 Aeromount 版本一和版本三的表現可以視為相當接近。此次的實驗設計，主要是瞭解四軸多旋翼無人機的大氣探空觀測是否可以接近於常規使用的探空氣球觀測，尤其在風的反演上是否合理。無人機觀測方式主要以單點垂直上升和下降進行觀測，而觀測資料僅取用上升過程；而探空氣球則是以充滿氦氣的氣球掛載 Vaisala RS41 探空儀，氣球的移動受氣流牽引，並無法完全代表定點垂直大氣剖面。

根據圖 7 和圖 8 溫溼度平行比對結果表現，兩者溫溼度的剖面變化趨勢一致，數值也相當接近，若以 RS41 為標準值，Aeromount 的溫溼度 RMSE 分別為 0.46°C 和 4.04% ，略超過表 1 中的精準度範圍，而誤差較大主要發生在高度較高位置，可能原因為探空氣球因為隨風飄移，在高層的位置已經遠離無人機所觀測的位置，在比對上已經無代表性。另外，我們也注意到此次實驗的無人機觀測資料較為平滑，相較於 RS41 無法展現隨環境快速變化的特性，Aeromount 版本二的溫溼度感測器當時設置於進氣管中，容易造成量測反應延遲，也是資料表現較為平滑的主要原因，這個問題已於版本三中有很好的改善。

圖 9 為 Aeromount 與 Vaisala 探空儀的風速風向的比較圖。不論是在風向的轉變或是風速上的加強，無人機與 Vaisala 探空儀反演的風速風向都有相當的一致性。然而，透過整體數據的計算，無人機與 Vaisala 探空儀兩者的風向風速 RMSE 數值來到 30° 和 1.57 m/s ，為表 1 的三倍之多。實際上之所以會有如此大的誤差主要發生在風向風速轉變之處，無人機因為形狀阻力，無人機姿態受風的影響反應不若氣球快速，也造成無人機風場的反演有延遲的效應，因此，若扣掉風向風速轉折的時間再進行比較，精準度數據皆能達到表 1 所規範。

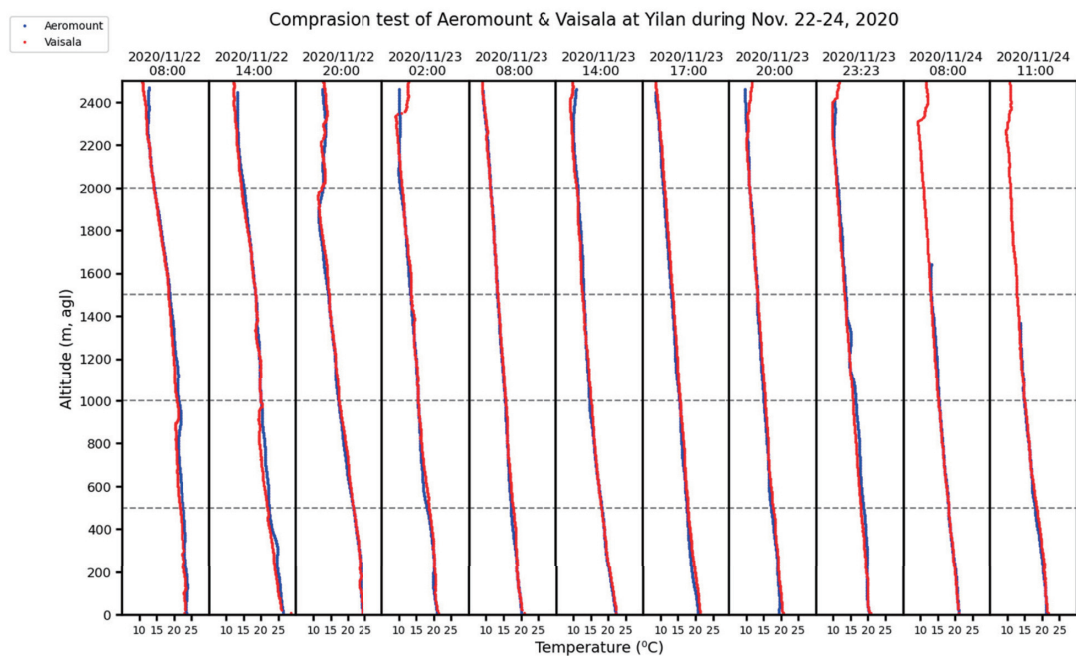


圖 7 宜蘭平行比對實驗溫度剖面圖

註：x 軸為溫度 (°C)，單位為攝氏度，y 軸為距地高，單位為公尺，藍點為 Aeromount 量測值，紅點為 Vaisala 探空儀量測值，共分別量測 11 次。

資料來源：研究者自行產製。

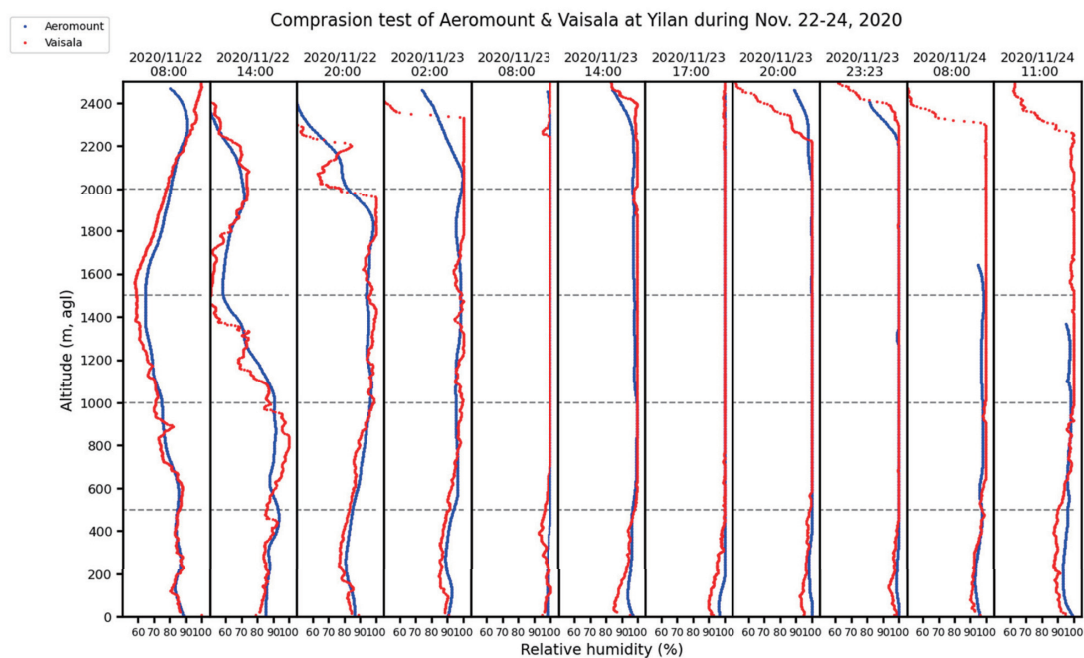


圖 8 宜蘭平行比對實驗溼度剖面圖

註：x 軸為溼度，單位為百分比，y 軸為距地高，單位為公尺，藍點為 Aeromount 量測值，紅點為 Vaisala 探空儀量測值，共分別量測 11 次。

資料來源：研究者自行產製。

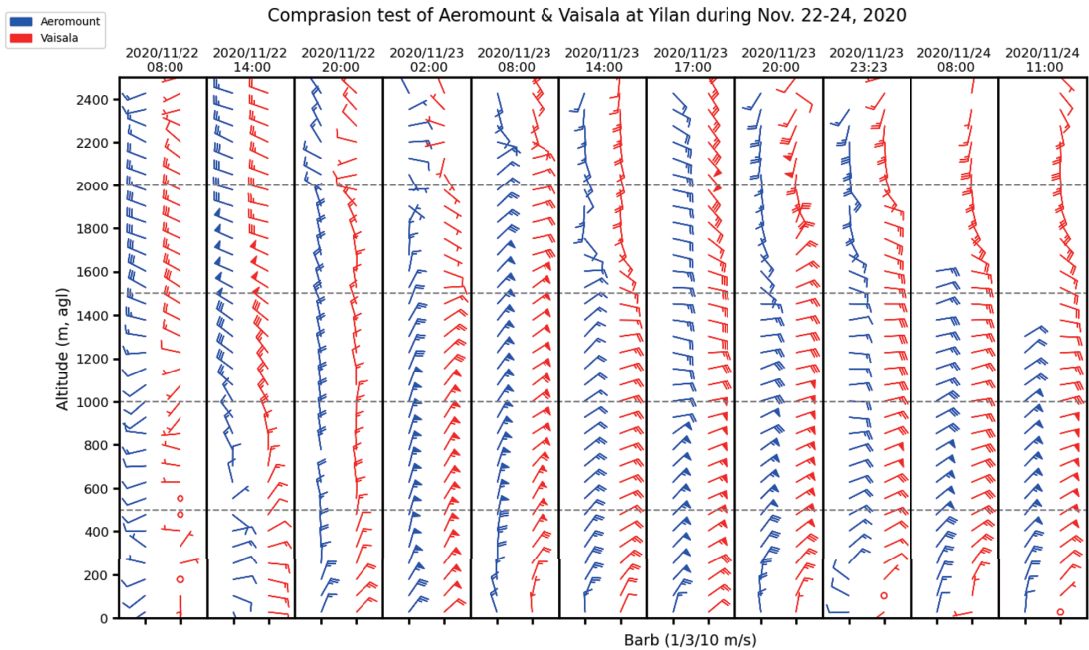


圖 9 宜蘭無人機與探空系統比對實驗風標圖

註：y 軸為距地高，單位為公尺；藍風標為無人機反演的風向風速，紅風標為 Vaisala 探空儀反演的風向風速；風標的半桿、全桿、風旗分別代表 1、3、10 m/s，共分別量測 11 次。

資料來源：研究者自行產製

肆、實際觀測個案分析與討論

上一章節中，我們分別討論了 Aeromount 與 Vaisala RS41 探空儀分別在同載具和不同載具的資料比較，而結果都符合期待，驗證此低層大氣無人機探空系統所量測的資料具備可信度。兩組實驗共 22 次的大氣剖面觀測資料，也說明了此系統設備收集資料的穩定性。大氣觀測實驗往往進行至少一天以上，若維持觀測頻率為一小時，一天將會 24 趟的無人機飛行任務，而長時間的觀測無疑會對整個無人機觀測系統造成負擔，更不論在不同的天氣狀況下。

為了確認低層大氣無人機探空系統的穩定性，本章節將以三個觀測個案作為範例，分別檢視此觀測系統在不穩定和穩定天氣中的表現。在這三個觀測個案中，觀測方式皆為四軸無人機搭載 Aeromount 進行垂直上升與下降飛行，並只使用上升過程所收集的觀測資料。因本篇研究的主軸為大氣無人機探空觀測技術之討論，以下內容主要聚焦在此無人機觀測系統的觀測成果呈現，對於天氣個案發生條件及物理動力過程將發表於其他研究論文。

一、2021 年 11 月宜蘭降水個案

宜蘭縣境內蘭陽平原西側到南側被高山包圍，形成特別的漏斗形地形，當冬季東北季風盛行時，受此特殊地形影響，其迎風面會經常有降雨的發生，並產生特有的地形西風 (Su et al., 2022)。截至目前，科學家對於此特殊地形產生的西風和降雨間的相互影響尚不清楚，

而無人機的單點連續垂直觀測十分適合進行地形西風的研究，但若要達到此觀測目的，無人機觀測系統需要具備防風與防水能力。此次個案執行時間為 2021 年 11 月 26 日至 27 日，觀測地點為三星國中附近，共進行 46 趟無人機觀測，最高觀測高度為 1,500 公尺左右，使用的 Aeromount 為版本二。

圖 10 為此次宜蘭無人機觀測與三星氣象站的時序圖。圖上的黑風標代表著有西風分量的風標，可清楚看見在降雨前，在高度 1,000 公尺以下有明顯的西風，可能代表著地形與東北季風的相互影響可到 1,000 公尺，個案期間無人機觀測的最大風速達 19.2 m/s。而 26 日 9 時至 13 時之間，因降雨強度過強，為飛行安全考量，因此中斷觀測。在降雨期間，無人機則觀測得整層的東風或東北風，而比溼比降雨前高；在主要的降雨過後（26 日 18 時），近地表出現西風，但厚度沒有降雨前高，只有約 600 公尺，比溼也比降雨時低。雖然此次個案在最強的降雨發生時，選擇中斷觀測，但在往後幾個降雨個案中，我們也一再驗證無人機觀測系統的防水性和抗風性。

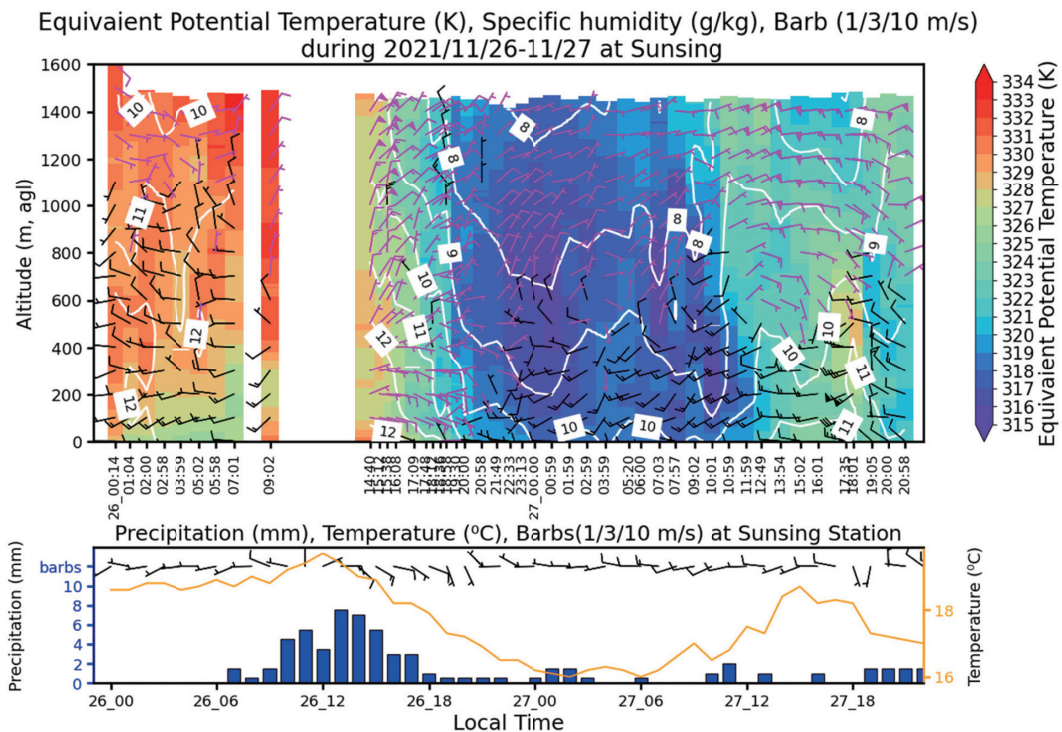


圖 10 宜蘭觀測實驗時序圖

註：上半部為無人機觀測， x 軸為當地時間， y 軸為距地高，單位為公尺；底色為相當位溫，單位為 K；等值線為比溼，單位為 g/kg；黑風標為有西風分量的水平風，而桃紅風標為有東風分量的水平風，他們的半桿、全桿和風旗分別代表 1、3、10 m/s。下半部為中央氣象署三星自動測站時序圖， x 軸為當地時間，左 y 軸為降雨量，為藍色直方圖，單位為 mm；右 y 軸溫度溼度，為黃色折線圖，單位為攝氏度；風標的半桿、全桿和風旗分別代表 1、3、10 m/s。

資料來源：研究者自行產製。

二、2022 年臺西空污個案

空氣污染的主要來源可分為境外污染和當地排放，兩者的傳播特徵各有不同，境外污染主要在 1~5 公里內進行傳輸；而當地排放主要於邊界層內進行傳輸，邊界層的高度每天不一，主要在 1~2 公里。目前，空氣污染的觀測除了地面空氣品質測站外，垂直的懸浮微粒濃度可以採用氣膠光達遙測等遙測設備取得，光達雖具備連續高時空解析度的觀測，但其儀器價格昂貴且部署不易，相較之下，無人機可以提供較為便宜的經費需求，且可取得更完整的氣象及空品參數，作為短期或任務性的空氣品質觀測，大氣無人機探空觀測系統是十分適用的工具。

此次個案執行時間為 2022 年 2 月 27 日至 3 月 1 日，觀測地點為雲林臺西水試所，共進行 51 趟無人機觀測，最高觀測高度為 1,500 公尺左右，使用的 Aeromount 為版本三。圖 11 為此次觀測的 $PM_{2.5}$ 時序圖，顯示大部分的空氣污染都在 1,000 公尺以下，而最高濃度甚至累積在近地面 200 公尺以內，濃度高的時間主要在凌晨至清晨期間；從濃度高的地方可見當地的邊界層的發展，在中午時可發展至約 1,000 公尺高。此個案為冬季裡經常發生於臺灣中南部的高污染事件，在太平洋高壓出海之後，臺灣東半部為東風，而西半部位於背風處，天氣穩定不利空氣擴散，造成當地污染污物累積，形成高污染事件。大氣無人機探空系統可以一次包含空氣品質及氣象監測項目，對於空污事件有極佳的解析能力。

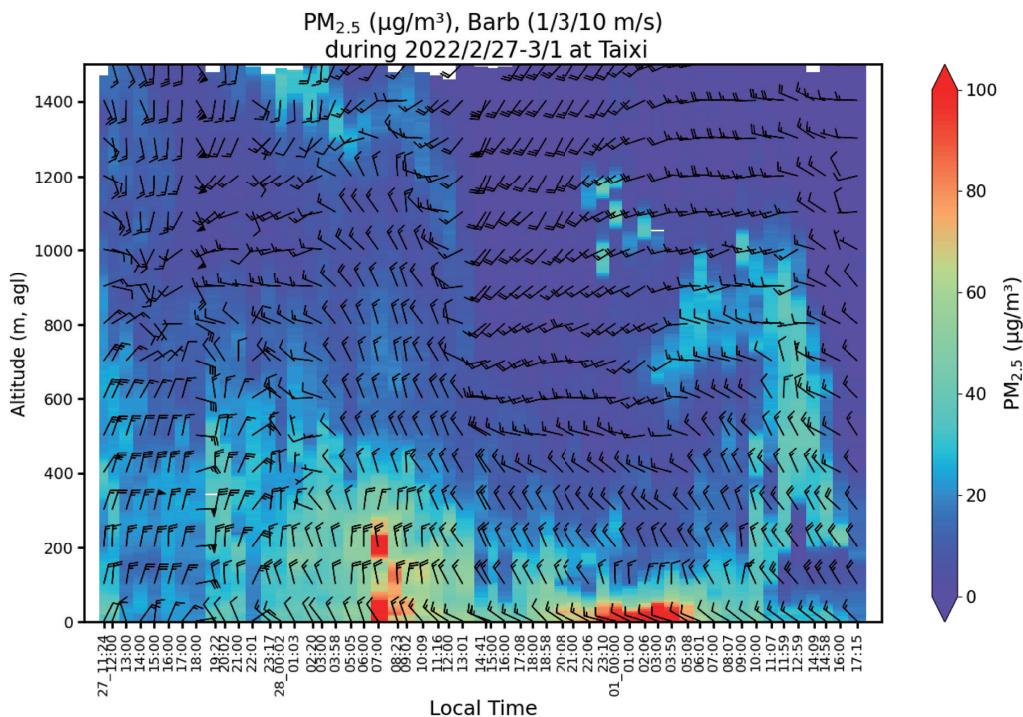


圖 11 臺西觀測實驗無人機觀測時序圖

註：x 軸為當地時間，y 軸為距地高，單位為公尺；底色為 $PM_{2.5}$ 濃度，單位為 $\mu g/m^3$ ，風標的半桿、全桿和風旗分別代表 1、3、10 m/s。

資料來源：研究者自行產製。

三、2022 年臺南海陸風個案

海陸風是一種區域性的中尺度熱力環流，為世界各地濱海地區常見的天氣現象。臺灣屬於海島型國家，海陸風環流在沿海地區影響顯著，支配著一日當中的天氣變化，在眾多研究中顯示，臺灣各地的污染物濃度分布、降水時機強度會受到海陸風的影響。過去海陸風研究多以地面測站或是模式模擬，較少提及高解析度大氣垂直結構觀測，因此此觀測實驗希望藉由無人機觀測系統的高時空解析度及單點垂直觀測的特點，探討臺南典型海陸風垂直結構日夜變化及三維局地環流特徵。此次個案執行時間為 2022 年 7 月 15 日至 17 日，觀測地點為臺南北門，共進行 40 趟無人機觀測，最高觀測高度為 2,000 公尺左右，觀測間隔基本上為 1 小時，而中間空缺的時間主要因為空軍需使用該段時間的空域，因此無法進行觀測。此次實驗使用的 Aeromount 為版本三。

圖 12 為無人機的逐時氣象剖面資料，15 和 16 日早晨大約 7 點至 9 點之間，可以明顯地看到低層風場的轉變，海陸風垂直結構上的變化也清楚被掌握，早上海風移入前沿岸盛行陸風，陸風高度約為 300 公尺，8 點後海風漸漸移入，海風的厚度大約 600 公尺厚。此次個案也觀測到相對於海風，陸風發展的較淺薄，且陸風風速較弱，移動速度較慢。相較於過去地面觀測資料，三維空間資料更能剖析降雨和海陸風之間的相關性。

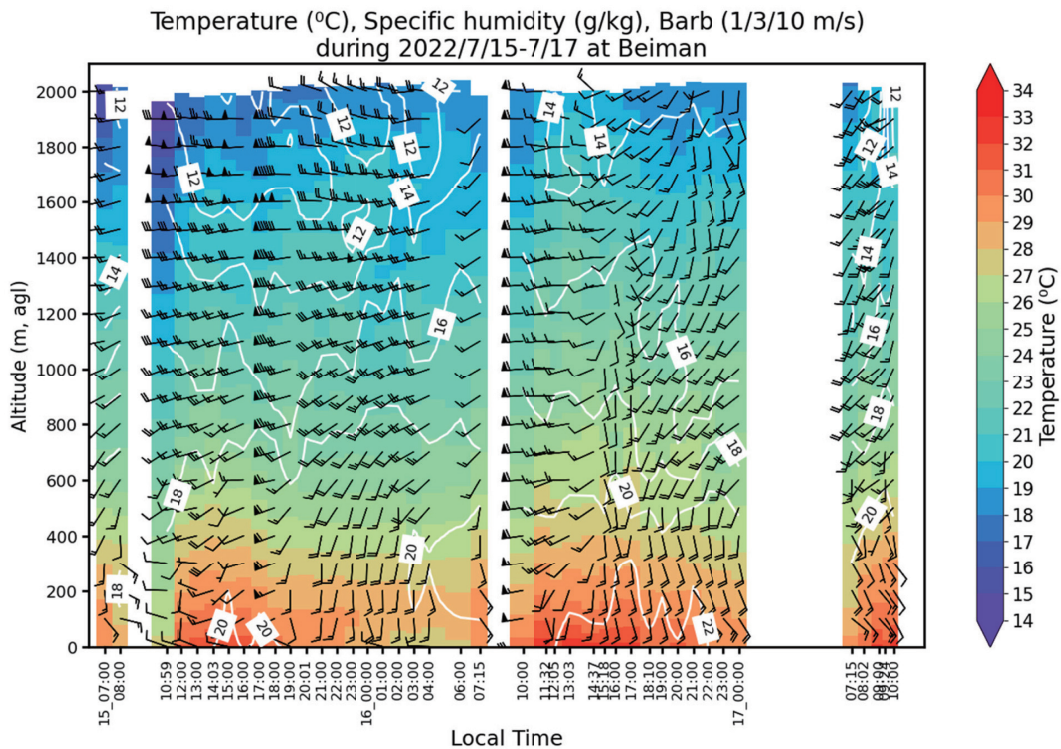


圖 12 北門觀測實驗無人機觀測時序圖

註：x 軸為當地時間，y 軸為距地高，單位為公尺；底色為溫度，單位為攝氏度；等值線為比溼，單位為 g/kg；風標的半桿、全桿和風旗分別代表 1、3、10 m/s。

資料來源：研究者自行產製。

伍、結論

近年來無人機技術已廣泛使用在大氣科學領域。本研究旨在介紹一套新一代大氣無人機探空觀測系統，主要分為無人機、大氣感測儀 Aeromount、地面設備三部分，而本系統所量測的變數為溫度、溼度、壓力、風速、風向和 $PM_{2.5}$ 。Aeromount 的開發歷經三次改版，第三版的 Aeromount 解決了原先的形狀阻力和輻射加熱問題，每個 Aeromount 在出廠前都有經過一套校驗流程，提供有信賴度的觀測數據。為能滿足全天候的大氣觀測任務需求，本文所介紹的大氣無人機探空觀測系統，具備抵抗 7 級風並防塵防水之能力；最高垂直飛行高度可達 3 公里；最大儀器負載重量為 600 公克；無負載的懸停時間為 30 分鐘。本觀測系統就不同的任務目的下，可彈性地改變其觀測策略，如適時的調整策略高度、調整觀測之間的時間差、飛行航線等。

為了驗證此系統的可行性與觀測準確度，透過兩次驗證實驗，結果展現 Aeromount 和 Vaisala RS41 探空資料具有相當高的一致性，也清楚描繪出觀測不確定性的可能原因，做為系統持續改良的方向。本研究團隊至今已成功執行大氣無人機觀測 1,000 趟以上，當中不乏各種不同天氣狀況、任務目的和長時間觀測，本文也藉由三個觀測個案作為範例，展現此系統在劇烈降雨、 $PM_{2.5}$ 空污事件、海陸風環流的觀測應用潛力。整體而言，本研究所開發的新一代低層大氣無人機探空系統，展現國際領先的技術，具備提供大氣探空常規作業化的潛力。

陸、未來發展

無人機應用極具發展潛力，目前各國都積極進行無人機的發展計畫。本文所介紹之無人機觀測系統，可以應用於臨時性或任務性的觀測作業，若要執行長時間或常態觀測，人力將無法負擔。因此基於現有的基礎上，構建出一套包含無人載具起降、收納、充電、換電及資料處理呈現與回傳等功能之全方位的無人載具飛行平臺系統，落實無人機常規探空觀測作業之需求，為未來發展的重要方向之一。此發展將可領先國際各氣象作業單位，更可進一步搭配氣象模式資料同化系統，有效提升國家即時天氣預報的能力。

致謝

感謝中央氣象署「大氣邊界層內垂直剖面觀測系統建置案」（採購編號：1082242E）之系統開發建置經費支持。中央氣象署委託研究計畫「臺灣南部弱綜觀海陸風無人機觀測」（計畫編號：MOTC-CWB-111-M-06）、國科會計畫「邊界層結構及熱動力過程之觀測與分析」（計畫編號：109-2111-M-008-015、110-2111-M-008-020）、國科會卓越領航研究計畫「山區雲氣候——臺灣山區亂流邊界層之高解析觀測與模擬分析」（計畫編號：111-2123-M-002-014）之研究經費挹注，使本研究能順利進行。另外感謝氣象署同仁林昆緯、邱思翰、洪甄聲等人提供相關的技術支援與協助。

參考文獻

- 柯立晉，2018，《開發適用於大氣邊界層觀測的無人機系統》，國立中央大學大氣科學研究所碩士論文。
- 柯立晉、王聖翔、黃翔昱、王悅晨、莊翔富、洪若雅、游志淇、張順欽，2018，〈應用無人機觀測大氣邊界層結構〉，《航測及遙測學刊》，23（2），頁 103-113。doi:10.6574/JPRS.201806_23(2).0003
- Alvarado M., Gonzalez F., Erskine P., Cliff D., and Heuff D., 2017, “A Methodology to Monitor Airborne PM₁₀ Dust Particles Using a Small Unmanned Aerial Vehicle,” *Sensors*, 17(2), 343, doi:10.3390/s17020343
- Alvarado M., Gonzalez F., Fletcher A., and Doshi A., 2015, “Towards the Development of a Low Cost Airborne Sensing System to Monitor Dust Particles after Blasting at Open-Pit Mine Sites,” *Sensors*, 15(8), 19667-19687. doi:10.3390/s150819667
- Båserud L., Reuder J., Jonassen M. O., Kral S. T., Paskyabi M. B., and Lothon M., 2016, “Proof of Concept for Turbulence Measurements with the RPAS SUMO During the BLLAST Campaign,” *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(10), 4901-4913. doi:10.5194/amt-9-4901-2016
- Brady J. M., Stokes M. D., Bonnardel J., and Bertram T. H., 2016, “Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements,” *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1376-1383. doi:10.1021/acs.est.5b05320
- Broisy, C., Krampf K., Zeeman M., Wolf B., Junkermann W., Schäfer K., Emeis S., and Kunstmann H., 2017, “Simultaneous Multicopter-Based Air Sampling and Sensing of Meteorological Variables,” *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(8), 2773-2784. doi:10.5194/amt-10-2773-2017
- Chang C.-C., Wang J.-L., Chang C.-Y., Liang M.-C., and Lin M.-R., 2016, “Development of a Multicopter-Carried Whole Air Sampling Apparatus and its Applications in Environmental Studies,” *Chemosphere*, 144, 484-492, doi:10.1016/j.chemosphere.2015.08.028
- Konrad T. G., Hill M. L., Rowland J. R., and Meyer J. H., 1970, “A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors,” *APL Technical Digest*, 10(2), 11-19.
- Kral S. T., Reuder J., Vihma T., Suomi I., O'Connor E., Kouznetsov R., Wrenger B., Rautenberg A., Urbancic G., Jonassen M. O., Båserud L., Maronga B., Mayer S., Lorenz T., Holtslag A. A. M., Steeneveld G.-J., Seidl A., Müller M., Lindenberg C., Langohr C., Voss H., Bange J., Hundhausen M., Hilsheimer P., and Schygulla M., 2018, “Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR)—The Hailuoto 2017 Campaign,” *Atmosphere*, 9(7), 268, doi:10.3390/atmos9070268
- Martin, S., Bange J., and Beyrich F., 2011, “Meteorological Profiling of the Lower Troposphere

- Using the Research UAV ‘M²AV Carolo’,” *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(4), 705-716. doi:10.5194/amt-4-705-2011
- Neumann P. P., and Bartholmai M., 2015, “Real-Time Wind Estimation on A Micro Unmanned Aerial Vehicle Using its Inertial Measurement Unit,” *Sensors and Actuators A: Physical*, 235, 300-310, doi:10.1016/j.sna.2015.09.036
- Pinto J. O., O’Sullivan D., Taylor S., Elston J., Baker C. B., Hotz D., Marshall C., Jacob J., Barfuss K., Piguet B., Roberts G., Omanovic N., Fengler M., Jensen A. A., Steiner M., and Houston A. L., 2021, “The Status and Future of Small Uncrewed Aircraft Systems (UAS) in Operational Meteorology,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(11), E2121-E2136, doi:10.1175/BAMS-D-20-0138.1
- Ramana M. V., Ramanathan V., Kim D., Roberts G. C., and Corrigan C. E., 2007, “Albedo, Atmospheric Solar Absorption and Heating Rate Measurements with Stacked UAVs,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(629), 1913-1931. doi:10.1002/qj.172
- Ramanathan V., Li F., Ramana M. V., Praveen P. S., Kim D., Corrigan C. E., Nguyen H., Stone E. A., Schauer J. J., Carmichael G. R., Adhikary B., and Yoon S. C., 2007, “Atmospheric Brown Clouds: Hemispherical and Regional Variations in Long-Range Transport, Absorption, and Radiative Forcing,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D22), doi:10.1029/2006JD008124
- Spiess T., Bange J., Buschmann M., and Vörsmann P., 2007, “First Application of the Meteorological Mini-UAV ‘M²AV’,” *Meteorologische Zeitschrift*, 16(2), 159-169. doi:10.1127/0941-2948/2007/0195
- Su S.-H., Chang Y.-H., Liu C.-H., Chen W.-T., Chang W.-Y., Chen J.-P., Chen W.-N., Chung K.-S., Hou J.-P., Hsieh M.-K., Jang Y.-S., Kuo H.-C., Lee Y.-C., Lin P.-L., Lin P.-Y., Lin P.-H., Lo M.-H., Wang S.-H., Wu C.-M., Yang J.-H., and Yang M.-J., 2022, “Observing Severe Precipitation Near Complex Topography During the Yilan Experiment of Severe Rainfall in 2020 (YESR2020),” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(745), 1663-1682. doi:10.1002/qj.4271
- Van den Kroonenberg A., Martin T., Buschmann M., Bange J., and Vörsmann P., 2008, “Measuring the Wind Vector Using the Autonomous Mini Aerial Vehicle M²AV,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(11), 1969-1982. doi:10.1175/2008JTECHA1114.1