

應用無人機觀測大氣邊界層結構

柯立晉¹ 王聖翔^{2*} 黃翔昱³ 王悅晨³ 莊翔富⁴ 洪若雅⁵
游志淇⁶ 張順欽^{7,8}

摘要

大氣邊界層(Planetary Boundary Layer)位在地球大氣最底層，除了反映地表、人類活動與植被的相互作用外，其發展和結構也會影響許多天氣現象與空氣品質。本研究旨在建構一套近地面無人機觀測系統，並利用此系統探討邊界層的垂直發展結構及對應的空氣污染物的變化。實驗觀測時間地點為 2017 年 8 月於板橋探空站及鄰近空域，共進行了 16 趟的飛行任務，其中 8 月 29 日為密集觀測日，整合 7 筆無人機、3 筆探空氣球氣象剖面及連續光達氣膠垂直分布資料，試圖完整解析出典型夏日北臺灣的邊界層發展結構。本研究分析結果顯示，無人機配載微型探空系統，並應用於 0-3 公里內的氣象剖面觀測，結果與氣象局例行施放的探空氣球觀測結果具良好的一致性，尤其於邊界層頂的高度偵測上幾乎吻合，兩者主要的誤差來源為是否考慮溫溼度傳感器的輻射加熱效應，這部分可以做為後續修正改良的參考。除此之外，比較光達的消偏振比連續觀測資料，氣膠垂直分布不連續處也與探空觀測逆溫的位置相吻合，驗證了本觀測系統之準確性。在未來，將持續推動此觀測系統能酬載更多傳感器，獲取更全面觀測資料，以應用於大氣邊界層內物理機制探討與氣象模式改善之方向。

關鍵詞：無人機、大氣邊界層、探空氣球、光達

1. 前言

大氣邊界層 (Atmospheric Boundary Layer, ABL)或稱行星邊界層(Planetary Boundary Layer, PBL)是對流層中直接受到地表作用例如熱力、摩擦力與水氣蒸發散等影響的一部分 (Stull, 1988)，同時也是與人類主要活動範圍最接近的大氣，許多天氣現象(如午後熱對流發展、海陸風環流)也發生在其中，而當弱綜觀天氣的條件下，局地排放的空氣污染物(主要為 $PM_{2.5}$)也大多分布於邊界層內，並隨著邊界層高度的演變間接影響地面空氣品質，因此觀測邊界層的垂直結構演變除了幫助我們了

解相關的天氣現象外，更有助於了解 $PM_{2.5}$ 或空氣污染物在時空演化下的過程。

大氣邊界層內的觀測資料在全球皆相當缺乏，過去曾有研究利用鐵塔建立連續性的邊界層內觀測資料(e.g., Sasakawa *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013; Andrews *et al.*, 2014)，但往往受限於高度，無法真正有效解析至邊界層頂的特性。繫留氣球的觀測雖可以達到一定的高度，但無法建立連續且密集的觀測，又經費與人力的耗費相當可觀。常規的氣象探空氣球觀測，除了成本偏高之外，每天一到兩筆的資料無法有效解析邊界層發展的過程。新一代的地面遙測技術，包括雲幕儀、剖風儀、大氣發射輻射

¹ 國立中央大學科學系 碩士班研究生

² 國立中央大學大氣科學系 副教授

³ 國立中央大學大氣科學系 博士班研究生

⁴ 萬里達工程有限公司 負責人

⁵ 國立中央大學大氣科學系 專任助理

⁶ 中央氣象局板橋探空站 主任

⁷ 行政院環保署監資處 處長

⁸ 國立國防醫學院公共衛生學系 助理教授

* 通訊作者, E-mail: shenghsiang.wang@gmail.com

收到日期：民國 107 年 04 月 01 日

修改日期：民國 107 年 04 月 26 日

接受日期：民國 107 年 05 月 04 日

干涉儀、微波輻射儀、光達雖可進行連續的觀測 (Emeis *et al.*, 2009 ; Banta *et al.*, 2013 ; Korhonen *et al.*, 2014 ; Hammann *et al.*, 2015)，但儀器設備價錢昂貴，且數據皆透過反演法與經驗參數計算得到，不見得適用於臺灣副熱帶條件下，因此反演數據具有一定的不確定性。

近幾年來，無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)於大氣科學的應用逐漸受到重視，其具有機動性、定點起降、低成本的優勢，但操作上需考量飛航安全、人員訓練、天氣條件、載重與飛行高度限制等因素，因此觀測門檻較高。但由於無人機可攜帶氣象觀測儀器進行現地(in situ)觀測，觀測結果較接近於探空氣球所觀測到的大氣剖面結果，數據結果相較於遙測方法更具可靠性，因此世界先進國家也著手研究將無人機的探空觀測做為常規性觀測的可行性評估，例如美國能源部針對北極測站觀測計畫(de Boer *et al.*, 2017)。本研究的主要目的為嘗試利用無人機的技術，掛載微型探空設備，觀測北臺灣夏季日間大氣邊界層高度的發展過程，並與氣象局板橋探空與環保署光達觀測結果進行比對與驗證，了解此新觀測方法應用於大氣邊界層研究之發展潛力。

2. 研究資料

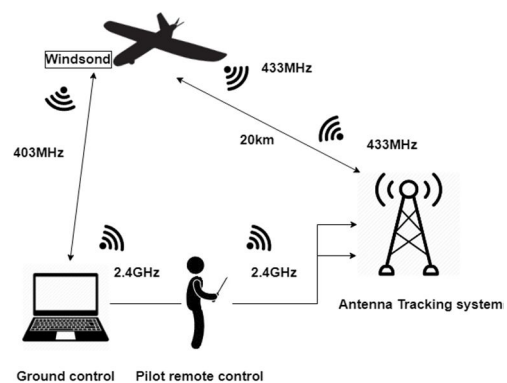
2.1 無人機觀測系統設備及架構

隨著無人機的發展朝向低成本、高便利性、以及能進行大範圍空間觀測，越來越多大氣科學以及環境觀測的研究開始使用無人機做為觀測平台。市面上根據無人機依據其機械構造、動力來源，可簡單分為固定翼、旋翼、多旋翼無人機三種，以本次實驗目的，需要建立大範圍且達一定高度的垂直剖面，因而選擇本團隊改裝的固定翼無人機，型號為 Sky-surfer X8 (X-UAV)，如圖 1(a)，無人機全長 92.5cm，翼展為 140cm，前方則配有攝像鏡頭，能即時記錄飛行影像，動力來源為無刷馬達搭配 5 吋的塑膠複合纖維螺旋槳，電力來源為 4S 5,200mah Li-Po 電池。飛行全程由地面操作員以頻率為 2.4GHz 遙控器遙控，並搭配地面天線追蹤系

統將 2.4GHz 訊號轉換成 433MHz 訊號以控制飛行，原來的 2.4GHz 通訊方式最遠距離約 1~2km，但轉換成 433MHz 頻段之後通訊距離可增加到 20km，這樣一來 Sky-surfer X8 的最大將飛行航程將可達 20km 往返，無人機觀測系統通訊架構如圖 1(b)。Sky-surfer X8 最大飛行高度經實測過可達 4~5km，滯空時間則可到 1~2hr，酬載量大約在 200g 內。另外搭配地面天線追蹤系統，能即時回傳飛機影像、飛行路徑、海拔高度、飛行速度以及衛星數目和總航程。這些即時的飛機資訊均能確保無人機飛行時的航程安全，另外，一旦無人機的飛行控制電腦失去與地面監控站的通訊訊號，無人機會立刻啟動自動返航模式，以起飛點為目的地返航，以確保飛航任務的安全。



(a) 本次觀測實驗所使用的無人機



(b) 觀測系統通訊架構圖

圖 1 (a) 本次觀測實驗所使用的無人機、(b) 觀測系統通訊架構圖

2.2 無人機搭載儀器

本次無人機實驗搭載氣象探空儀 Windsond，如圖 2，Windsond 為瑞典的 Sparv Embedded AB 公司所生產的氣象探空儀，Windsond 的相關規格如表 1。Windsond 具備溫度、濕度、壓力傳感器，以及 GPS 天線模組，因此除了量測基本的氣象參數外，Windsond 也能提供風速及風向的資料，在通訊方面配有頻段 400~480MHz 的雙向的無線電晶片，能將資料即時回傳地面接收端，經過實際測試 Windsond 最遠通訊距離約為 13km。Windsond 量測溫度、濕度、壓力等氣象參數的資料採樣頻率為 1Hz，並即時顯示於電腦端視窗軟體上。觀測時 Windsond 會安裝於 Sky-surfer X8 的機艙位置，天線部分則會朝上放置以取得較良好的通訊品質，而溫濕度傳感器的探頭則是外露於機身側邊。



圖 2 本研究使用之 Windsond

2.3 光達

本研究所使用的光達為美國 Sigma 公司所生

產微脈衝光達(micro pulse lidar) (Welton *et al.*, 2000)，由環保署於 2016 年購入，並於 2017 年 6 月 21 日至 9 月 19 日間架設於板橋探空站，進行連續觀測實驗，當時目的為與板橋探空的觀測資料平行比對，確認光達資料所發展的邊界層高度反演法之可靠性。此光達系統發射 2,500Hz 高頻的綠光(527 奈米)雷射，由直徑 20 cm 光學鏡片之卡塞格林式望遠鏡(Maksutov Cassegrain)進行同軸發射接收，回波經由鐵電液晶(Ferroelectric Liquid Crystal)篩選出平行與垂直方向的背向散射光，再由雪崩式光電二極體(Avalanche photodiode)計算光子數目(Photon count)並記錄電腦。所記錄之資料格式以時間解析度為 1 分鐘，垂直解析度為 75m，系統接收兩組背向散射回波資料分為相對於發射波的垂直偏振方向(垂直偏振，cross-polarization)及平行偏振方向(平行偏振，co-polarization)，由此兩組數據可定義為消偏振比(depolarization ratio, δ)，其表示公式如下：

$$\delta = \left(\frac{NRB_{cross}}{NRB_{co} + NRB_{cross}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

其中 NRB_{cross} 和 NRB_{co} 分別表示垂直偏振和平行偏振標準化相對背向散(Normalized Relative Backscattering)。物理意義上，消偏振比可做為粒子對稱性的判定，數值越低表示氣膠對稱程度越高，例如長時間累積的霾害氣膠數值為低，呈現較高的對稱性，相較之下，沙塵氣膠有較高的消

表 1 本研究使用之觀測設備規格表

	WINDSOND 探空儀	HMP155	RADIOSONDE RS41	CS100
量測項目	溫濕度、壓力、風向風速	溫濕度	溫濕度、壓力、風向風速	壓力
工作溫度	-40~+80°C	-80~+60°C	-90~+60°C	-40~+60°C
精準度	±0.3°C /±2.0%RH /±1.0hPa	±0.2°C / ±1%RH	±0.1°C /±2.0%RH /±1.0hPa	±2.0mb
解析度	0.01°C /0.05%RH /0.02hPa	0.01°C /0.01%RH	0.01°C /0.1%RH / 0.01hPa	0.01mb
反應時間 (63.2%)	溫度： 5s 濕度： 8s	溫度： <20s 濕度： <20s	溫度： 0.5s 濕度： <0.3s	壓力： <0.1s

偏振比值。在都市的環境裡，氣膠來源主要為交通排放，消偏振比大約在 0.01-0.07 左右，相較於乾淨空氣數值約為 0.01 以下，因此可以藉由消偏振比資料判斷都市氣膠在大氣邊界層內的發展 (Barrett & Ben-Dov, 1967; Baars *et al.*, 2016)。

2.4 實驗地點及時間

實驗地點位於新北市新莊的西盛遙控飛機場 (24.02°N, 121.44°E)，西盛遙控飛機場位在大漢溪河道兩旁的河谷地形上，海拔高度約 27m。於觀測期間盛行風向主要為西南風，但偶爾會有東北風，之所以選擇於此起飛主要是因為其鄰近氣象局的板橋觀測站，能與板橋觀測站所使用探空儀 (RS41, Vaisala, Helsinki, Finland) 互相做垂直比對，而板橋觀測站在觀測期間除了每日的早上 8 點及晚上 8 點所施放的兩次高空觀測任務之外，於早上 11 點時也有加放探空氣球觀測任務。本次實驗時間為 2017 年 8 月 7 日至 29 日，一共進行了 16 趟的無人機大氣垂直觀測任務。由其是 8 月 29 日有進行從早上 6 點開始至下午 6 點的全天大氣邊界層觀測，數據較為完整，因此本篇以分析 8 月 29 日的個案分析為主。

2.5 大氣穩定度

大氣穩定度代表大氣所處的平衡狀態，簡單來說，當大氣中的氣塊受到擾動產生移動時，穩定的大氣能使氣塊回到原來的位址，而不穩定的大氣則會使氣塊持續受到外力作用而偏移原來的位址。大氣的穩定度是大氣邊界層中一個重要的指標，尤其與氣象及氣膠息息相關，例如：當邊界層內大氣穩定度較高時，可能會造成地面排放的污染物或大氣中的氣膠不容易向上擴散而累積於近地面，進而危害到人體或呼吸道健康。

大氣狀態通常由大氣溫度遞減率(γ_v)、乾絕熱遞減率(γ_d)及濕絕熱遞減率(γ_w)判斷穩定與否，因為飽和空氣和未飽和空氣的絕熱遞減率不同，所以當大氣溫度遞減率(γ_v)小於濕絕熱遞減率(γ_w)時，大氣必穩定 (Absolutely stable atmosphere)，反之如果大氣溫度垂直遞減率(γ_v)大於乾絕熱遞減率(γ_d)

時，大氣則必不穩定 (Absolutely unstable atmosphere)，而如果大氣溫度遞減率(γ_v)介於乾絕熱遞減率(γ_d)及濕絕熱遞減率(γ_w)之間，此時對乾空氣而言為穩定大氣，但對於濕空氣卻是不穩定的大氣，此稱之為條件不穩定大氣 (Condition unstable atmosphere)。在氣象學中，描述大氣穩定度的指數及判斷的方法很多，例如：Bulk Richardson Number、K-index、Convective available potential energy (CAPE)等。本篇研究主要以位溫的垂直梯度 ($\frac{\partial\theta}{\partial z}$) 判斷大氣的穩定度， $\frac{\partial\theta}{\partial z} > 0$ 代表大氣穩定、 $\frac{\partial\theta}{\partial z} < 0$ 代表大氣不穩定，而 $\frac{\partial\theta}{\partial z} = 0$ 代表大氣處於中性狀態。

3. 儀器平行比對與驗證

為了掌握儀器的特性及可能誤差，我們進行以下三種平行比對實驗，相關使用儀器列表如表 1 所示。

3.1 室內平行比對

室內平行比對以溫度校驗箱作為實驗場域，溫度校驗箱能提供穩定且不容易受外界影響 (例如：輻射熱或風) 的實驗環境，將同廠牌的三個 Windsond (S/N: 1699, 1703, 1704) 與 HMP155 溫濕度計、CS100 壓力計同時進行平行比對。圖 3 為挑選完整 1 小時的平行比對結果，我們發現三組 Windsond 彼此間有些微的差異，溫度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、濕度 $\pm 1.0\%$ 、壓力 $\pm 1.0\text{hPa}$ ，都還在原廠所提供的標準範圍內。相較之下，HMP155 的溫度呈現較大的上下振幅，由於 HMP155 的設計為應用在標準氣象站上，為求資料的穩定性及準確性，感應器有比較長的反應時間，也不容易受到外界紊流變動影響，時間擷取解析度大多設定在一分鐘，因此次實驗採用 1 秒的觀測頻率，出現溫度抖動現象應屬合理，此抖動現象亦發生在 HMP155 溼度及 CS100 壓力觀測上。相較之下，Windsond 在高時間解析度 (1Hz) 表現較為合理及穩定，但溫度及濕度接略微高估 (依然在誤差範圍內)，用於探空觀測應相當可靠。

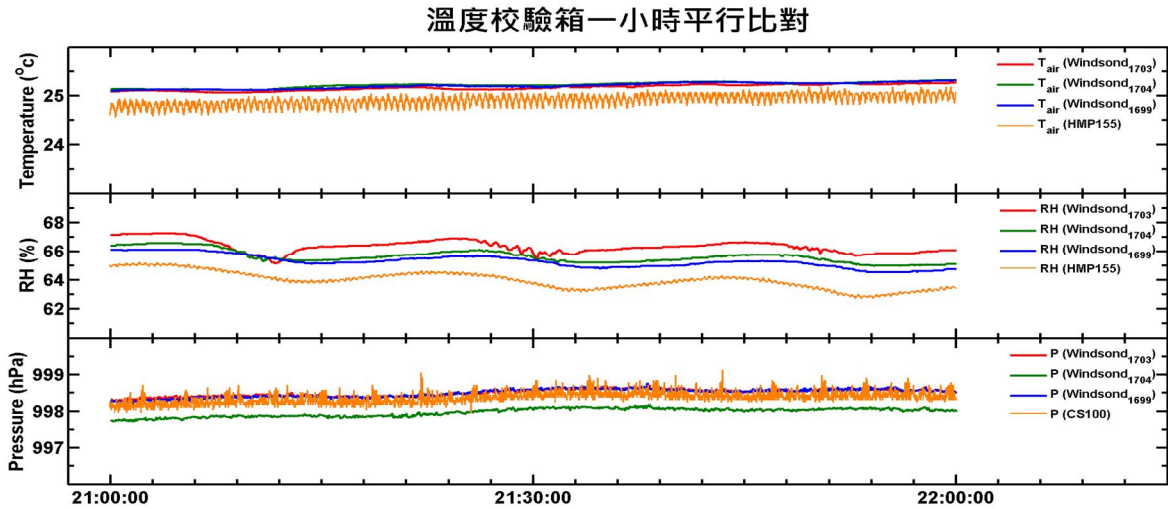


圖 3 溫度校驗箱內各儀器設備之平行比對觀測時序圖

3.2 板橋探空平行比對

板橋探空平行比對於 2017 年 11 月 9 日早上 8 點執行，我們設計與氣象局板橋 RS41 探空儀同步升空，擺放的方式如圖 4 所示。其中白天的探空實驗釋放採用前一節室內比對結果中，表現較一致的 2 個 Windsond (SN : 1699, 1704)，白天和夜間釋放的比對結果如圖 5 (僅分析 SN 1699，同為第 4 章個案分析採用的儀器序號)，由結果可看到在溫度量測的表現上 Windsond 與 RS41 的差距隨高度升高越來越大，到 12km 處時溫差約為 7°C，除了兩者所使用的感測器晶片的量測誤差外，也有可能是因為超過了 Windsond 的最低工作溫度(-40°C)而產生較大的不確定性，另外一個可能的原因為感應器受輻射加熱效應的影響，高於 2.6km 以上，因為大多沒有雲，感應器可能直接受熱而增溫，此加熱增加的效應在 RS41 中不明顯，主要是為 RS41 的資料中有考慮此修正值。在相對濕度的表現上，雖然隨升空相對溼度變動的趨勢兩者一致，但相較於 RS41 相對濕度的劇烈變動，Windsond 呈現較穩定的溼度變化，且無法達到 100%相對溼度測值，此為 RS41 所使用高靈敏且反應時間短的溼度晶片優勢。綜合分析結果，若以 RS41 觀測為標準值，Windsond 觀測雖然有部分差異，但以考量價錢成本及針對 3km 以下的邊界層內觀測，Windsond 有很令人滿意之表現，做為無人機的酬載儀器相當適

合。



圖 4 2017 年 11 月 9 日早上 8 點 Windsond 與 RS41 平行比對儀器擺放方式

3.3 UAV 與探空氣球剖面個案比對

此次平行比對實驗為由實驗期間的 16 趟 UAV 飛行任務資料中，挑選最為接近板橋探空作業的時間，進行為 UAV Windsond 與 RS41 探空資料比對。圖 6 為 2017 年 8 月 22 日早上 8 點與 2017 年 8 月 25 日早上 11 點兩組觀測結果比較，圖 6(a)中顯示大氣於 870hPa 處出現逆溫層，UAV Windsond 與 RS41 表現十分一致，於 900hPa 及 850hPa 處 Windsond 觀測溫度略高於 RS41；970hPa 處 Windsond 露點溫度也有部分較高，此與前小節指出，Windsond 可能受輻射加熱影響，造成溫度高

估有關。兩者其他些微的觀測差異，可視為兩者觀測上空位置與釋放時間的差異，氣球在垂直運動過程中，隨大氣風場飄動，UAV 觀測盡量維持在方圓 2km 內進行垂直剖面觀測。在圖 6(b)的分析結果顯示，大氣於 850hPa 處出現逆溫層，當時 UAV 溫度及露點溫度測值皆高於探空，與圖 6(a)之觀測相比，此個案溫度的高估更為顯著，比較兩個案的環境風場，22 日因為正值颱風來臨前夕，相較於 25 日較弱的環境風場平均風速高 12m/s。吾人認為，高風速有助於儀器的輻射加熱誤差調節，讓觀測更接近真實大氣環境。經由此實驗分析比較，我們可以確認 UAV 搭配 Windsound 可以提供很好的垂直剖面觀測數據，尤其於鑑定邊界層高度上，與氣象局常規施放的 RS41 探空儀有很好的的一致性。

4. 日間大氣層結構之觀測與分析

為完整探討邊界層垂直結構與發展，本研究選

定 2017 年 8 月 29 日密集觀測個案資料進行分析，試圖解析在弱綜觀天氣條件下，雙北都會區夏季邊界層及空氣污染物晝夜變化趨勢。當日天氣及環境條件顯示(圖 7)，白天地表受太陽短波輻射持續加熱作用影響，地表溫度上升及相對溼度下降，地表輻射加熱作用同時加強大氣不穩定度，造成底層大氣擾動增加，並強化地面風場。圖 8 為當日板橋測站全天空影像儀觀測資料，全天空影像顯示早上 6 點至 9 點期間晴空無雲(雲量：0/8)，10 點至 11 點期間雲量增加(雲量：1/8)，且太陽受雲層遮蔽，地表短波輻射略為下降，12 至 17 點期間仍有部分雲層(雲量：1/8)，但並未遮蔽太陽，此結果造成地表向下短波輻射大致呈現鐘形分布。若將此地表輻射加熱作用機制與板橋及鄰近地面測站污染物(PM_{2.5}濃度)觀測比較，則可發現污染物受邊界層內大氣擾動影響，於日間持續增加，直至日落(17:00)才逐漸下降。

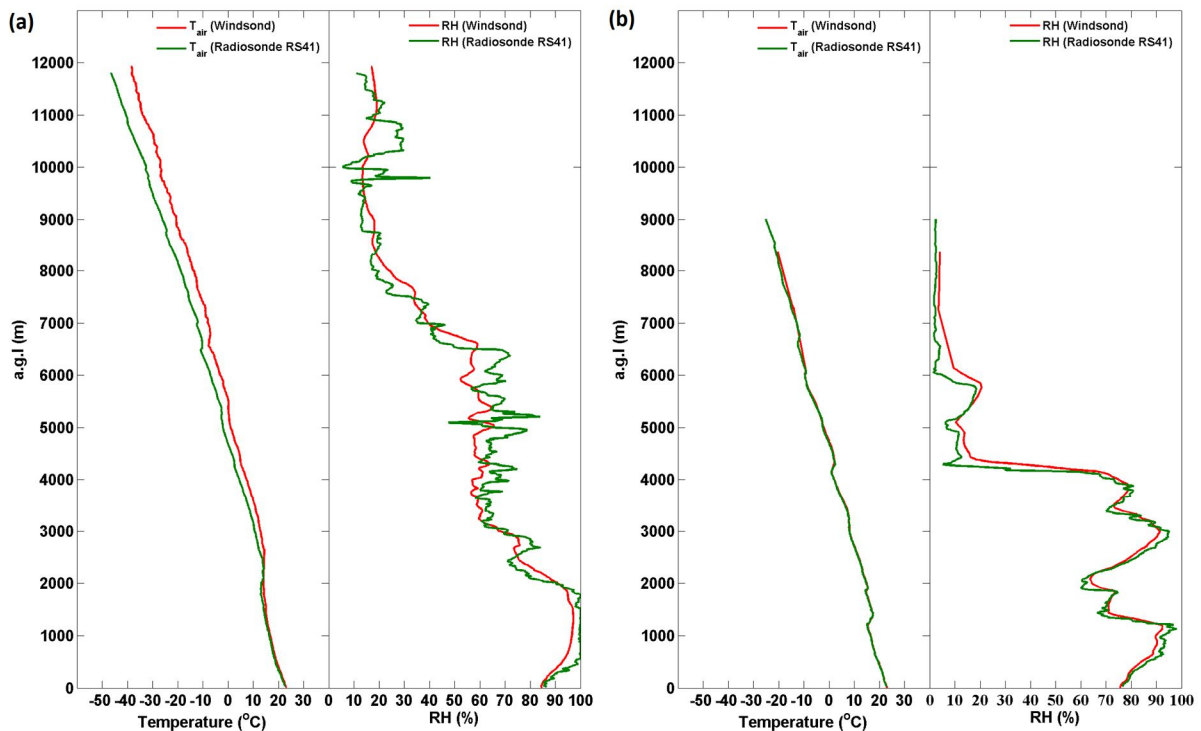


圖 5 (a) 2017 年 11 月 9 日白天 8 點與(b) 2017 年 11 月 27 日夜間 8 點 Windsound 與 RS41 平行比對結果

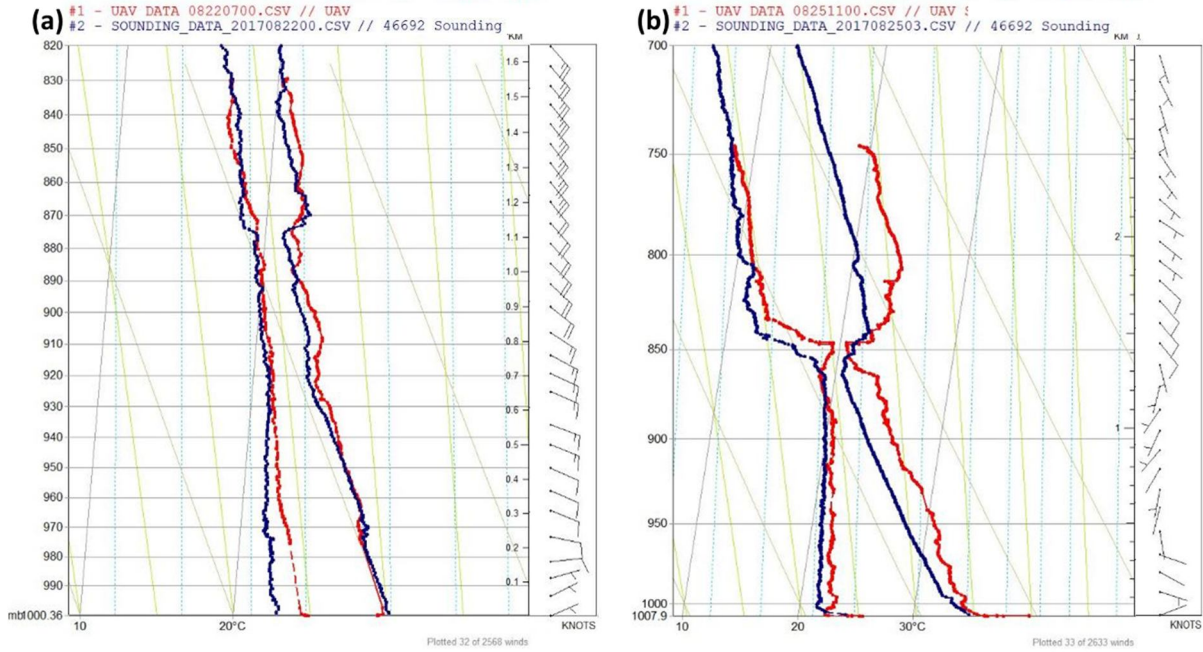


圖 6 (a) 2017 年 8 月 22 日早上 8 點、(b)2017 年 8 月 25 日早上 11 點期間，UAV Windsonde(紅色)與板橋 RS41 探空(藍色)平行比對探空圖，圖中風標為 RS41 探空之風向風速

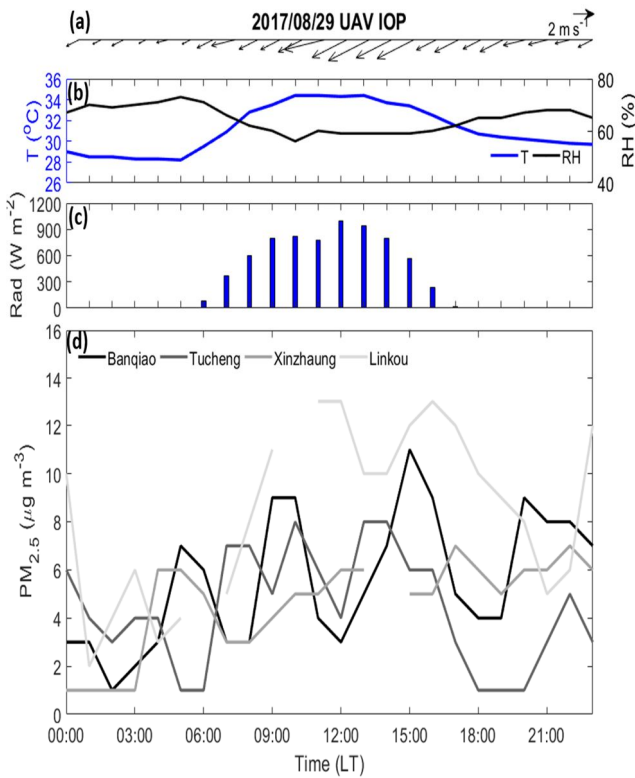


圖 7 密集觀測期間各地面測站監測資料。(a) 板橋測站風向及風速；(b) 板橋測站溫度濕度；(c) 板橋測站地表向下短波輻射；(d) 土城、板橋、新莊及林口測站 PM_{2.5} 質量濃度

圖 9 為 2017 年 08 年 29 日整合無人機、板橋探空、光達及地面測站之觀測結果。為方便比對光達及位溫剖面資料，圖 9 中位溫剖面經標準化之前處理後，再繪製於相對時間點上，以達視覺上符合各觀測資料點對應邊界層結構變化一致。因當日為弱綜觀天氣條件，各位溫垂直剖面顯示高層大氣為穩定型態($\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$)，而邊界層內大氣受地表輻射加熱作用影響，大氣均勻混和為中性狀態($\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$)，故可將穩定大氣($\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$)及中性大氣($\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$)之交界處視為邊界層頂高度。

清晨期間，位溫垂直剖面(5:50、7:16、7:38)顯示邊界層頂高度約為 0.5 km，日出後受太陽輻射影響地表產生紊流，於邊界層內均勻混，且紊流隨時間向上傳遞，09:42 及 10:21 位溫垂直剖面顯示邊界層高度達到 1 km，於正中午(11:26)位溫垂直剖面顯示邊界層發展至最高(約 1.5 km)，其後因太陽短波輻射作用減弱，進而削弱邊界層之發展，直到日落後(19:21) 邊界層高度再次回到 0.5 km。此個案單由密集的無人飛機與氣球垂直探空觀測，即可完整描繪出夏天日間邊界層的發展結構，此觀測結果有助於氣象模式或邊界層理論模型的驗證。

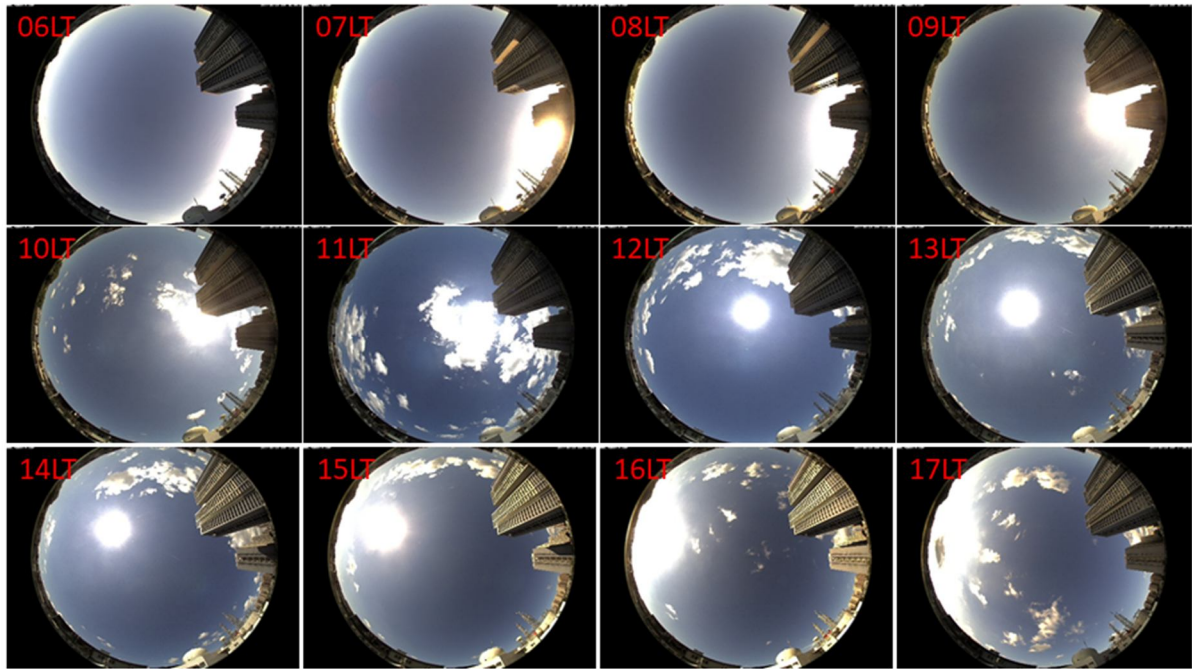


圖 8 2017 年 8 月 29 日板橋測站全天空影像儀觀測資料

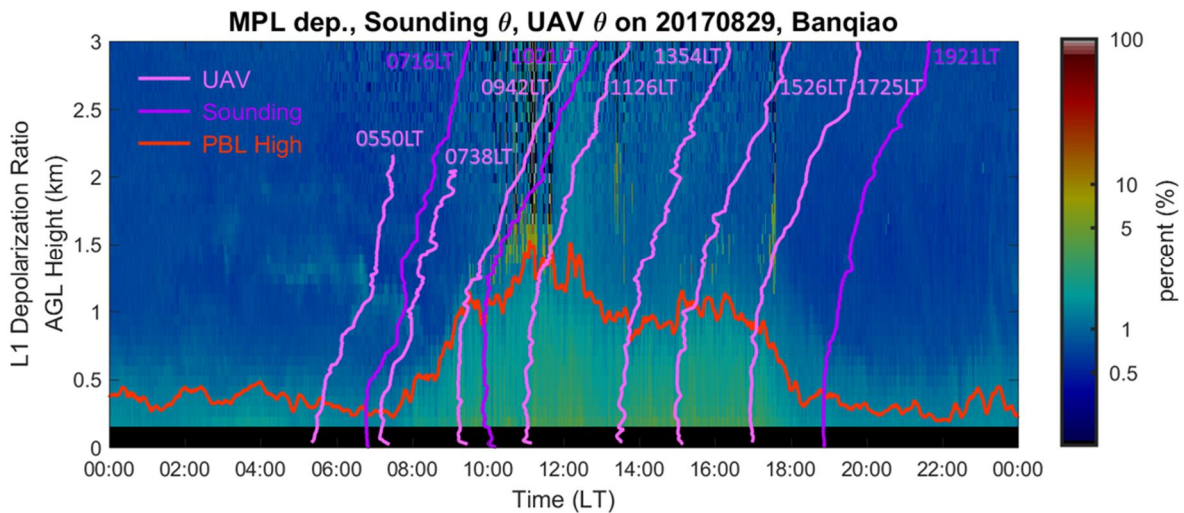


圖 9 密集觀測期間板橋測站光達消偏振比、UAV(淺紫色)及探空氣球(深紫色)標準化位溫垂直剖面時序圖，位溫剖面之時間標註為該筆觀測之起始時間。橘色實線為光達消偏振比推估之邊界層高度

圖 9 中光達消偏振比於地表附近有一層形狀較不規則之氣膠，其光達消偏振比約 1-5%，Baars *et al.* (2016) 其針對不同氣膠種類進行光達監測，並整理出各類氣膠消偏振率，其中都市污染源消偏振比為 $4 \pm 4\%$ ；生質燃燒氣膠消偏振比為 $5 \pm 1\%$ ，此結果與本實驗觀測一致，而近地表層氣膠會隨大氣邊界層高度變化，因紊流影響均勻分布於大氣邊界層內。若以無人機及探空氣球垂直剖面作

為參照，便可得到簡易經驗式，設消偏振比 1.3% 為門檻值，則可約略估計大氣邊界層高度(圖 9 橘色實線)。個案當日夜間大氣邊界層高度約為 0.5 km，早上 8 點後受地面輻射加熱作用影響邊界層高度開始上升，早上 11 點邊界層高度達到最高(約 1.5km)，並開始下降，於下午 16 點邊界層高度出現第二峰值，18 點之後邊界層高度回到夜間高度(約 0.5 km)，整體而言，光達的消偏振比所估算出

邊界層高度與無人機及探空結果一致，對於未來連續性的大氣邊界層觀測(如光達觀測)提供一個很好的驗證方式。

5. 結論與建議

本研究旨在利用無人機搭配微大氣傳感器技術，進行邊界層的垂直發展結構觀測研究，並比較傳統大氣探空及地面光達遙測技術，以期望對白天邊界層高度變化與空氣污染物時間演變進行更好的闡述。實驗觀測時間地點為 2017 年 8 月於板橋探空站及鄰近空域，共進行了 16 趟的無人機飛行任務，其中 8 月 29 日為密集觀測日，單日有 7 筆無人機觀測資料、3 筆探空氣球氣象剖面及連續光達氣膠垂直分布資料，以作者所知，此為在臺灣本土第一次有如此高解析度的探空剖面資料，足以完整解析出典型夏日北臺灣的邊界層發展結構。主要研究成果如下：

- (1) 儀器平行比對與驗證結果顯示，此 UAV 探空系統所使用的溫溼壓傳感器具有一定的準確度，但在由太陽直接輻射加熱的情況下，觀測數值會有高估的情形，而高風速條件有助於溫溼傳感器的輻射加熱誤差調節，讓觀測更接近真實大氣環境。
- (2) 我們使用的 UAV 探空系統可以提供很好的垂直剖面觀測數據，尤其於鑑定邊界層高度上，與氣象局常規施放的 RS41 探空儀有很好的的一致性。
- (3) 比較光達的消偏振比連續觀測資料，氣膠垂直分布不連續處也與探空觀測逆溫的位置相吻合，驗證了本 UAV 探空系統之準確性，同時也說明無人機觀測系統對於未來連續性的大氣邊界層觀測(如光達觀測)提供一個很好的驗證方式。

在未來，將改善溫溼傳感器的輻射加熱誤差，並持續推動此觀測系統能酬載更多傳感器，獲取更全面觀測資料，以充足的資料將有助於大氣邊界層內物理機制探討，同時亦可提供於氣象模式進行驗證與模式改善。

致謝

本研究承蒙科技部計畫 (MOST 106-2111-M-008-008) 、環保署計畫 (EPA-107-FA11-03-A071) 支持，國家高速網路計算中心之計算資源協助，謹此致謝。

參考文獻

- Andrews, A.E., Kofler, J.D., Trudeau, M.E., Williams, J.C., Neff, D.H., Masarie, K.A., Chao, D.Y., Kitzis, D.R., Novelli, P.C., Zhao, C.L., Dlugokencky, E.J., Lang, P.M., Crotwell, M.J., Fischer, M.L., Parker, M.J., Lee, J.T., Baumann, D.D., Desai, A.R., Stanier, C.O., De Wekker, S. F.J., Wolfe, D.E., Munger, J.W., and Tans, P.P., 2014. CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: Instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(2): 647–687.
- Banta, R.M., Pichugina, Y.L., Kelley, N.D., Hardesty, R.M., and Brewer, W.A., 2013. Wind energy meteorology: Insight into wind properties in the turbine-rotor layer of the atmosphere from high-resolution Doppler lidar, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(6): 883–902.
- Baars, H., Kanitz, T., Engelmann, R., Althausen, D., Heese, B., Komppula, M., Preissler, J., Tesche, M., Ansmann, A., Wandinger, U., Lim, J.H., Ahn, J.Y., Stachlewska, I.S., Amiridis, V., Marinou, E., Seifert, P., Hofner, J., Skupin, A., Schneider, F., Bohlmann, S., Foth, A., Bley, S., Pfuller, A., Giannakaki, E., Lihavainen, H., Viisanen, Y., Hooda, R.K., Pereira, S.N., Bortoli, D., Wagner, F., Mattis, I., Janicka, L., Markowicz, K.M., Achtert, P., Artaxo, P.,

- Pauliquevis, T., Souza, R.A.F., Sharma, V.P., van Zyl, P.G., Beukes, J.P., Sun, J.Y., Rohwer, E.G., Deng, R.R., Mamouri, R.E., Zamorano, F., 2016. An overview of the first decade of Polly^{NET}: An emerging network of automated Raman-polarization lidars for continuous aerosol profiling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(8):5111-5137.
- Barrett, E.W., and Ben-Dov, O., 1967. Application of the lidar to air pollution measurements, *Journal of Applied Meteorology*, 6(3): 500-515.
- de Boer, G., Lawrence, D., Palo, S., Argrow, B., LoDolce, G., Curry, N., Weibel, D., Finnamore, W., D'Amore, P., Borenstein, S., Nichols, T., Elston, J., Ivey, M., Bendure, A., Schmid, B., Long, C., Telg, H., Gao, R., Hock, T., and Bland, G., 2017. Evaluation of routine atmospheric sounding measurements using unmanned systems (ERASMUS) field campaign report, DOE Office of Science Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program, United States, 17(009).
- Emeis, S., Schäfer, K., and Münkel, C., 2009. Observation of the structure of the urban boundary layer with different ceilometers and validation by RASS data, *Meteorologische Zeitschrift*, 18(2): 149-154.
- Hammann, E., Behrendt, A., Le Mounier, F., and Wulfmeyer, V., 2015. Temperature profiling of the atmospheric boundary layer with rotational Raman lidar during the HD (CP)² observational prototype experiment, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(5): 2867-2881.
- Korhonen, K., Giannakaki, E., Mielonen, T., Pfüller, A., Laakso, L., Vakkari, V., Baars, H., Engelmann, R., Beukes, J.P., Van Zyl, P.G., Ramandh, A., Ntsangwane, L., Josipovic, M., Tiitta, P., Fourie, G., Ngwana, I., Chiloane, K., and Komppula, M., 2014. Atmospheric boundary layer top height in South Africa: Measurements with lidar and radiosonde compared to three atmospheric models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(8): 4263-4278.
- Sasakawa, M., Shimoyama, K., Machida, T., Tsuda, N., Suto, H., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A., Krasnov, O., Saeki, T., Koyama, Y., and Maksyutov, S., 2010. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia, *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 62(5): 403-416.
- Stull, R., 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* (9th Edn.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Welton, E.J., Voss, K.J., Gordon, H.R., Maring, H., Smirnov, A., Holben, B., Schmid, B., Livingston, J.M., Russell, P.B., Durkee, P.A., 2000. Ground-based lidar measurements of aerosols during ACE - 2: Instrument description, results, and comparisons with other ground - based and airborne measurements, *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 52(2): 636-651.
- Wang, J.M., Murphy, J.G., Geddes, J.A., Winsborough, C.L., Basiliko, N., and Thomas, S.C., 2013. Methane fluxes measured by eddy covariance and static chamber techniques at a temperate forest in central Ontario, Canada, *Biogeosciences*, 10(6): 4371-4382.

Observations on Atmospheric Boundary Layer Structure Using An Unmanned Aerial System

Li-Jin Ke¹ Sheng-Hsiang Wang^{2*} Hsiang-Yu Huang³ Yueh-Chen Wang³
Hsiang-Fu Chuang⁴ Rou-Ya Hung⁵ Zhi-Chi You⁶ Shuenn-Chin Chang^{7,8}

Abstract

Planetary boundary layer (PBL), the skin layer of atmosphere, has strong interactions with earth surface, human activities, and vegetation. The PBL structure and development has effects on many weather phenomena as well as air quality. In this study, we aim to observe the PBL structure and the evolution of air pollution vertically using an unmanned aerial system (UAS). The experiment was carried out in the New Taipei city nearby the Taipei sounding station in August of 2017. We had conducted 16 flights in total and 7 of them on 29th August. In addition, data from three sounding balloons and lidar observations enhance the data set for studying the PBL development for a typical summertime day on 29th. Our results show that the UAS provides the low-level (0-3 km) atmospheric profile with parameters (temperature, RH, and Pressure) in good agreement with the data observed by meteorological soundings, especially for the PBL height detection. The uncertainty analysis suggests that the radiation heating effect is the main issue causing the overestimation of temperature and RH. This potential error can be considered in the next generation sensor design. Furthermore, we compare the UAS observations with lidar depolarization ratio profiles. Normally, aerosols distributed within the PBL top height and lidar can easily detect the discontinuous layer between aerosol and clean air (above PBL). The discontinuous layer is associated to an inversion layer which can be observed by sounding data. Our lidar observation and UAS sounding has good agreement on the evolution of PBL top height during the daytime. All the observational results show the accuracy and reliable of the UAS for PBL application. In the future, this UAS will continue to promote the deployment of more sensors to obtain more comprehensive observation data. The understanding of PBL thermodynamic mechanism and numerical simulation can be improved with the new UAS technology applied.

Keywords: UAS, PBL, Sounding balloon, Lidar

¹ Master Student, National Central University

² Associate Professor, National Central University

³ PhD Student, National Central University

⁴ Director, Wan-Li-Da company

⁵ Research Assistant, National Central University

⁶ Director, Central Weather Bureau Taipei Sounding Station

⁷ Director, Taiwan Environmental Protection Administration (EPA) Department of Environmental Monitoring & Information Management

⁸ Assistant Professor, School of Public Health, National Defense Medical Center

* Corresponding Author, E-mail: shenghsiang.wang@gmail.com

Received Date: Apr. 01, 2018

Revised Date: Apr. 26, 2018

Accepted Date: May. 04, 2018