



應用 無人機光達

解密隱藏於 密林中之 古崩塌地

黃美甄／國立臺北科技大學土木工程系土木與防災所 碩士
江晉霆／國立臺北科技大學土木工程系土木與防災所 碩士
謝有忠／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 技正
陳勉銘／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 組長
張國楨*／國立臺北科技大學土木工程系 教授

隨著電子、感測器以及電腦技術的快速發展，光達、非測量型相機以及慣性姿態量測系統等對地觀測儀器邁向小巧輕量化，加上無人飛行載具盛行，無人機光達之技術得以實現。本研究使用無人直升機 VAPOR 55 搭載高階無人機光達 RIEGL VUX-1 UAV 進行飛航任務。本研究之測區位於花東縱谷邊之中央山脈一側植生茂密之緩坡上，於暨有之空載光達資料內，已呈現為一大型之滑動區，故研究以該區為目標，評估無人機光達之可行性及成效。在本測區之飛航研究設計的飛航參數下，點雲密度可達每平方公尺兩百點以上。產製之無人機光達點雲，經航帶平差能獲得公分等級的精度，為高精度點雲資料。透過分析不同參數對點雲分類之影響，求得適當的分類參數，將地面點與非地面點進行分離，經分類後地面點的點雲密度大部份區域大於 25 點 / 平方公尺，進而建置數值地形模型，所建置之模型空間解析度為 20 公分，並於現地以 e-GNSS 及 RTK 等技術進行檢核點的量測，再將量測之數據與數值地形模型進行比對與較差，結果顯示模型高程精度為 -2.91 ± 1.9 公分，指示無人機光達可產製高解析度及高精度之數值地形模型。研究成果表明，雖坡面上植生非常茂密，經撥除植生後所得之無人機光達數值高程模型指示本區雖為一大型之複合式滑動體，但地貌特徵指示本區已為老的滑動體，坡面之微地形已受人為之整坡而呈梯田狀，指示本區久未再活動，唯其人為之整坡年代已久遠而不可考。

關鍵詞：無人機光達、空載光達、數值地表模型、數值高程模型

前言

面對全球氣候變遷的影響，超大颱風及豪雨事件亦趨頻繁，加上台灣島位於歐亞板塊以及菲律賓板塊擠壓聚合帶上，活躍的地質活動是宿命。台灣陡峭的地形導致山崩、土石流等災害頻傳，地貌亦隨之改變。如果能夠建置出高精度的數值地形模型 (Digital

Terrain Model, DTM)，即可立即作為災害防救，以及事後之災前、災後的比對依據。傳統空載光達 (Airborne LiDAR) 需要較多的時間、人力以及經費，而無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 近年來蓬勃發展，無人機硬體方面已經足夠完善可以裝載高精密儀器，因此本研究以無人機搭載高階之輕型光達系統來進行研究區資料之收集及分析，以評估無人機光達之性、效能及應用之潛能。

* 通訊作者，epidote@ntut.edu.tw

無人飛行載具為近年來興新且熱門的科技，尤其在防災以及國土調查方面擁有許多優勢及發展空間。於前人的研究成果中，在較無植被遮蔽的平原地區，其建置之數值地形模型經平差後，精度可達十數公分內，相較於農航所影像所產製的數值地形模型可說是不小的突破。但如果將攝影測量之技術及研究的成果運用於植被遮蔽較嚴重的森林、山區，就可能產生疑問。以攝影測量的關點來看，若影像內的目標物位於裸露的空地上，真實地面特徵可以呈現於影像上，但若位於密植被所覆蓋的區域，影像上並無法從像片中指示出地面位置，故在受到遮蔽的影響下，影像上地形建置的成果會大打折扣，將無法滿足模型精度上以及真實地面的需求，並將無法呈現真實地面的高程。迫於環境以及精度要求上的限制，以往的影像式的測繪應用於植生較茂盛的區域，就可能導致基於影像所建置的數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM)，是否能夠提供或建置數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，亦或能代表多少真實地形，解答以上的問題是需要更多的真實資料來比對的。

研究區域

本研究之研究區位於花蓮玉里鎮及卓溪鄉間，位在三民車站南側，位處花東縱谷秀姑巒溪及太平（豐坪）溪兩側所夾之丘陵區內，無人機光達測區之大小約 350 公頃，如圖 1 所示，其中圖 1a 指示研究區之區域位置範圍，圖 1b 及圖 1c 各指示空載光達地形及本計畫所產製之無人機光達區域，圖 1a 上指示圖 1b 及 1c 位置範圍。本區內亦同時進行無人機攝影測量，施測之面積大小約 15 平方公里。

研究方法

本研究以美國 Pulse Aerospace 公司（已為 AeroVironment 所收購整併）所研發的無人直升機 VAPOR 55，再搭載奧地利 RIEGL 公司所製之輕量化光達 VUX-1 UAV（圖 2），來對地面進行空間資料擷取。任務執行掃描後，經由軟體生成點雲及數值地形模型，並以 e-GNSS 及 RTK 之現地測量成果來進行高程精度檢核，探討基於無人機光達技術下產製的模型精度。飛航掃描儀器規格如表 1、表 2 所示。

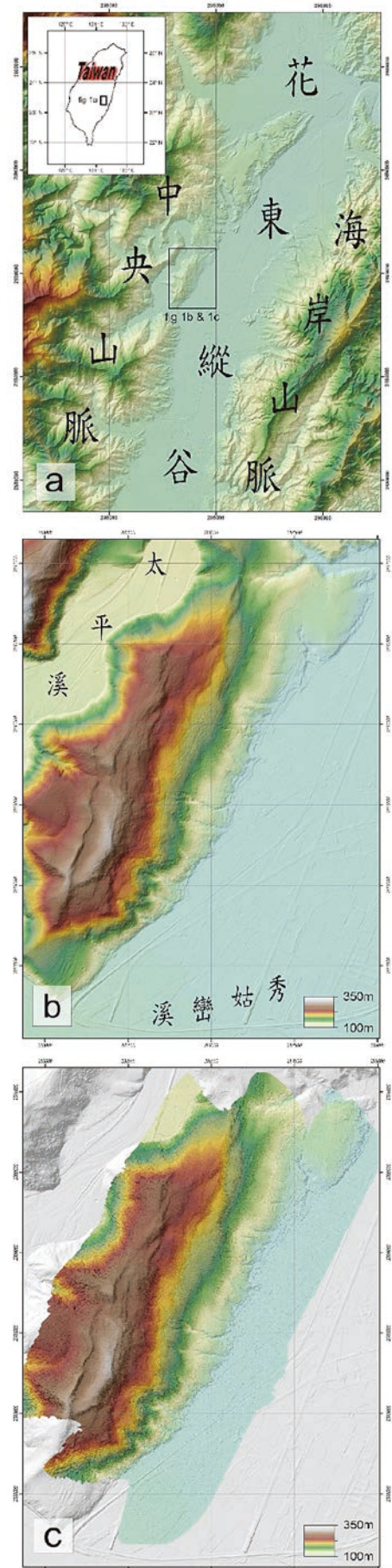


圖 1 研究區域地理位置及資料產製區域之地形特徵



圖 2 無人機光達系統測繪任務執行時之身影

表 1 VAPOR 55 規格

無人機 VAPOR 55 幾何尺寸	
機身長 (mm)	1,400
機身寬 (mm)	630
機身高 (mm)	480
螺旋槳直徑 (mm)	1,650
空機重 (kg)	8.5
無人機 VAPOR 55 性能參數	
最大起飛重量 (kg)	25
最大酬載 (kg)	15
飛行時間 (min)	60
懸停時間 (min)	45
抗風能力 (m/s)	13
飛行限高 (m)	3,600

表 2 RIEGL VUX-1 UAV 規格^[1]

重量 (g)	3500
尺寸 (mm)	227 × 180 × 125
測距方式	脈衝式
雷射波長 (nm)	1550
精度 (mm)	10
FOV (deg.)	330
掃描方式	旋轉鏡
掃描頻率 (scan/sec)	10 ~ 200
脈衝重複率 PRR (kHz)	550
作業高度 (m) AGL	50 ~ 350

無人機光達作業

無人機光達系統 (UAS LiDAR system) 為目前世界各國 LiDAR 技術發展之趨勢, 有別於以往的空載光達, 無人機光達能提供更經濟且快速的方式, 獲得現地的空間資料, 目前國外多用於林地與電塔纜線的調查^[2]。

無人機光達系統屬於空載光達之範疇, 是由無人飛行載具 (UAV) 搭載全球定位系統 (GPS)、慣性導航系統 (INS) 和雷射掃描儀 (LiDAR) 組成, 透過整合彼此間不同的測量技術進行觀測。本研究參考內政部

「LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序草案」, 建立無人機光達作業程序 (圖 3) 來產製點雲圖, 以利後續數值地形模型之建置與分析。



圖 3 無人機光達作業程序 (改編自內政部^[3])

飛行規劃

飛行規劃可分為參數設定與航線設計兩部分, 其中飛行參數的設定須考慮參數間相互影響之關係, 包括脈衝頻率、掃描頻率、航高、航速以及點雲密度。航線設計的部分則由航高、航帶寬度、航帶重疊率, 設計出航線間距、數目和起終點。此外還需考慮天氣與區域環境因素, 將脈衝頻率、航高與視野 (FOV) 做進一步的調整。基於研究區之飛行任務特性及目的, 考量無人機之飛行高度, 光達之開口視野 (FOV), 光達掃描方向之橫向點雲間距, 飛行方向之縱向點雲間距, 光達脈衝之頻率, 光達掃描之頻率, 無人機之飛行速度, 無人機之航線間距等因素後即可獲得掃描寬度、點雲密度與航帶重疊率等不同之參數。本研究使用的飛行參數如表 3 所示。

表 3 無人機光達飛行掃描參數

掃描角度 (deg.)	掃描頻率 (Hz)	脈衝頻率 (kHz)	航高 (m)	航速 (m/s)	航線間距 (m)
120	20	300	150	2	200

資料獲取

飛行規劃完成且確認無誤後, 即可著手進行飛行掃描的任務。除了雷射測距儀之設用外, 光達系統仍需整合慣導系統。本研究內所用之慣性測量系統選用 Trimble 旗下公司 Applanix 所開發的 AP20, 整合多頻全球導航衛星系統 (GNSS) 主機板和慣性測量單元 (IMU), 能在最大限度的情況下利用 GNSS 多頻定位技術與慣性測量數據。透過無人飛行載具搭載的光達、GNSS、IMU, 獲取大量的原始點雲、GNSS 時

間、飛行位置、飛行速度、飛行姿態等數據，將其儲存於載具上的固態硬碟中，並配合設置於地面之靜態 GPS 參考站紀錄之數據，於日後進行系統的率定以及點雲的解算。

點雲解算

本研究使用 RiPROCESS 來進行點雲解算，解算點雲之前，須先求出無人機的飛航軌跡，本研究以 Applanix POSpac MMS 軟體來進行軌跡解算。解算飛航軌跡所需資料有地面靜態 GNSS 參考站資料以及無人機 POS（動態 GPS 及 IMU）資料。

點雲編輯

點雲解算完成後，須透過電腦軟體對其進行編修，其內容主要為資料分幅、錯誤點去除和點雲分類。經由上述處理，最終生成建置數值地形模型之點雲。

資料分幅

通常解算完的點雲資料非常龐大，在進行點雲分類時，會因電腦軟硬體效能的限制而無法運行，因此在點雲數量過多的情況下，須先進行點雲的分幅，再進行後續的處理。

錯誤點去除

於點雲分類前，須檢查點雲中是否含有明顯的錯誤點（雲霧或其他離散點），並予以刪除，如果未將其刪除，往往會造成點雲分類上的錯誤，進而影響後續建置的數值地形模型，產生錯誤資訊而無法利用。

點雲分類

點雲分類主要是將地面點與非地面點進行區分，並將所區分的點雲依狀況建置 DSM 與 DEM 兩種數值地形模型。本研究使用 TerraScan 點雲處理軟體，對點雲進行地面點的分類，分類所使用的參數含：最大建物的尺寸（Max building size）、地形角度（Terrain angle）、迭代角度（Iteration angle）、迭代距離（Iteration distance）等不同之參數，於平地分別對最大建物尺寸、地形角度、迭代角度與迭代距離進行調整，設計不同之試驗參數，對無人機光達點雲進行地面點的分類，並分析各組參數分類的成果，找尋適合之參數，藉此建立無人機光達地面點分類的建議參數^[4-6]。自動分類後之光達點雲資料，再經由人過以不同方向連續漸進式之剖面，一一檢核排除或重新分類來確認所有之點雲資料。

現地測量

為了提供無人機飛航軌跡解算之地面靜態 GNSS 參考站紀錄之數據，以及檢核光達點雲產製的數值地形模型精度，須前往現地進行真實三維座標的量測。本研究使用了靜態 GNSS、e-GNSS 及 RTK 技術來獲取真實三維資料，並透過該數據對數值地形模型進行高程資料的比對，以確保模型精度符合規範之要求。

檢核點規劃

檢核點的選擇儘量以人車能順利到達以及均勻分布於研究區域的原則下進行。本研究區域面積約 350 公頃，一共設有 14 個檢核點，各於 2017 年 10 月 3 日及 2018 年 1 月 15 日、1 月 16 日一共進行三次的 e-GNSS 及一次 RTK 測量。點位分佈如圖 4 所示。

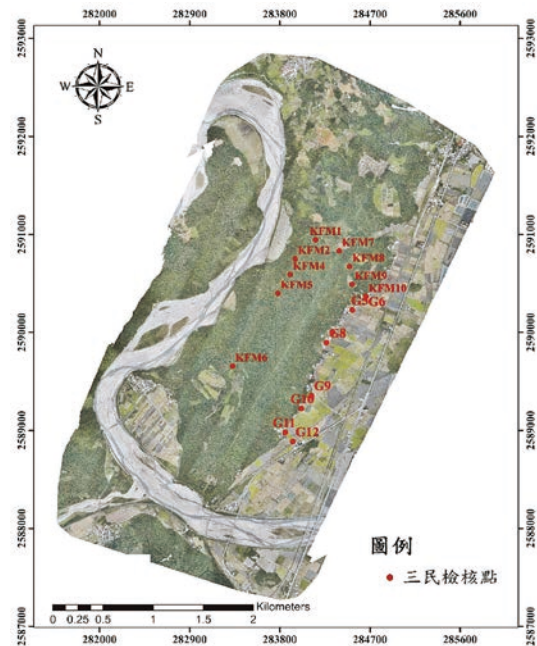


圖 4 研究區檢核點分布位置

研究成果

無人機光達點雲

初始點雲

點雲解算完成後，即可獲得初始點雲，但點雲在解算完成之後會因為有系統性的高程偏差，而呈現各航帶之間的點雲無法重疊，也就無法成為完整的數值模型。因此，我們必須使用航帶平差來對點雲進行誤差消除，才能產製出完整的數值地形模型。評斷航帶平差成效最直接也最簡單的方式，便是直接檢核模型平差後的狀態，於各個不同方向的剖面上，比較建物、道路及地

形等易辨識之地表特徵物上，來查核有無點雲分層的情況。本測區一共有六個航次、每航次分成四條航線，一共計二十四條航線。此一設定能讓各航次之間可以在 Riprocess 軟體中先進行航帶平差，待各航次平差成果不錯後，再將六航次合併再次進行航帶平差即可獲得完整的數值模型。以測區內的電塔為例，如圖 5 所示，圖中可見資料平差前後之點雲分布狀況。

點雲分類及穿透率

點雲資料經航帶平差後，再對點雲進行資料分幅及錯誤點去除，即可開始點雲的分類。根據研究設計不同試驗參數，利用 TerraScan 軟體對點雲進行分類，並對參數進行點雲分類成效的分析。點雲分類後之剖面及對比各如圖 6 及圖 7 所示，由圖 6 及圖 7 之對比，可以簡單評估地面點分類的成效，其中圖 6 內綠色點為植物，黃色點為地面點。圖 7 上下兩圖為同一視角下的點雲三維模型上色，從上下圖比較可以看出植被下方仍保有不少的地面點。

本區域所獲得知總點雲數為 893,672,068 點，分類出之地面點點雲數為 119,120,556 點，估算之點雲穿透率為 13.32%。其中植被覆蓋區所獲得之總點雲數為 780,574,888 點，分類出地面點點雲數為 74,368,539 點，穿透率為 9.52%。從穿透率計算出來之成效顯示，獲取地面點的成效佳（詳如表 4），確實可以達到獲取完整地表資訊以及道路、地形判釋等目的。

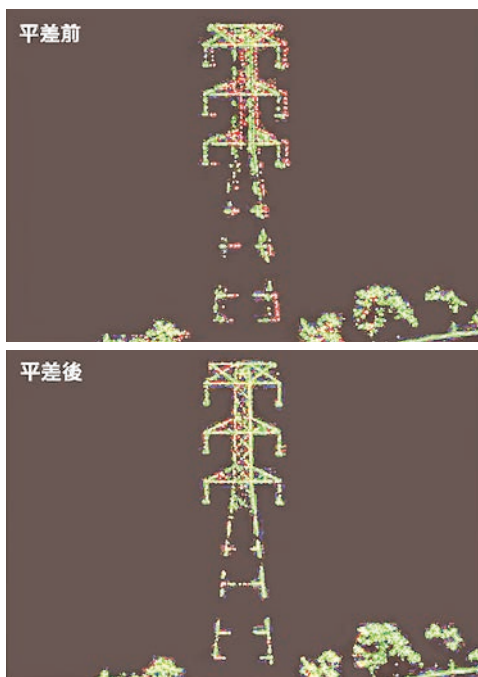


圖 5 研究區電塔附近剖面點雲航帶平差前、後比較



圖 6 點雲分類後之剖面圖

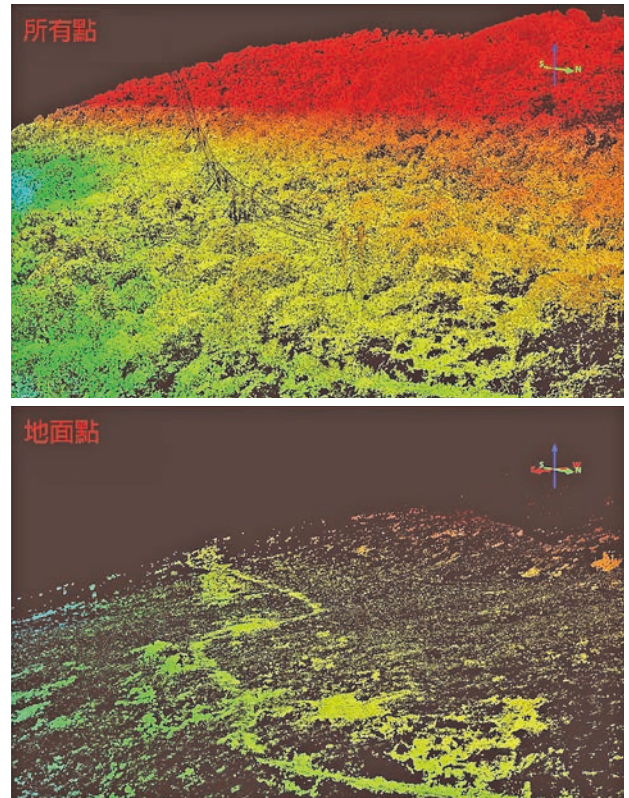


圖 7 無人機光達點雲三維模型上之點雲分類成果比較

表 4 穿透率計算結果

地區	總點雲數	地面點數	穿透率
全部區域	893,672,068	119,120,556	13.32%
植被覆蓋區	780,574,888	74,368,539	9.52%

點雲成果比較

2009 年莫拉克颱風之推動了全台空載光達 (airborne LiDAR) 資料庫的建立，已完成全台之空載光達地形資料建置，並應用於大規模崩塌潛勢區之判識等研究。就已認知之大規模崩塌潛勢區現況來看，現階段未演化為大規模、長距離之崩塌滑動，但以山崩之自然行為來看，在崩塌發生的早期，坡體已預先產生坡地潛移、或達到破壞之臨界狀態，爾後再遭遇極端之條件，如：地震及強降雨，有可能繼而誘發，並產生大規模的塊體運動。而這些坡體之潛移，通常事先伴隨許多崩塌的特殊地貌，這些地貌需使用精細、高解析的地形

資訊，以及相關的判識技術來輔助。但現有地形資料來源不一，本研究針對空載光達、無人機光達以及無人機影像等不同屬性資料做比較，提出簡單說明。

本研究區花蓮縣三民村已先在傳統的空載光達的數值高程模型 (DEM) 資料內發現疑似潛在大規模山崩的情況，礙於空載光達的 DEM 解析度為公尺等級。因此以該區為目標進行無人機光達掃描作業，利用無人機光達的低空掃描優勢，藉由十公分等級的 DEM，一方面比較資料庫差異，二方面探討資料庫之應用性。

圖 8 指示以三維側視來檢視同一視角下無人機光達對比空載光達之點雲於空間解析度之差異。圖 8 之上圖為無人機光達資料，下圖為空載光達資料，於上圖中鐵路之鐵軌，甚至於兩鐵軌間之枕木，以及電線桿及纜線，均清晰可辨；反之空載光達點雲僅能隱約呈現。

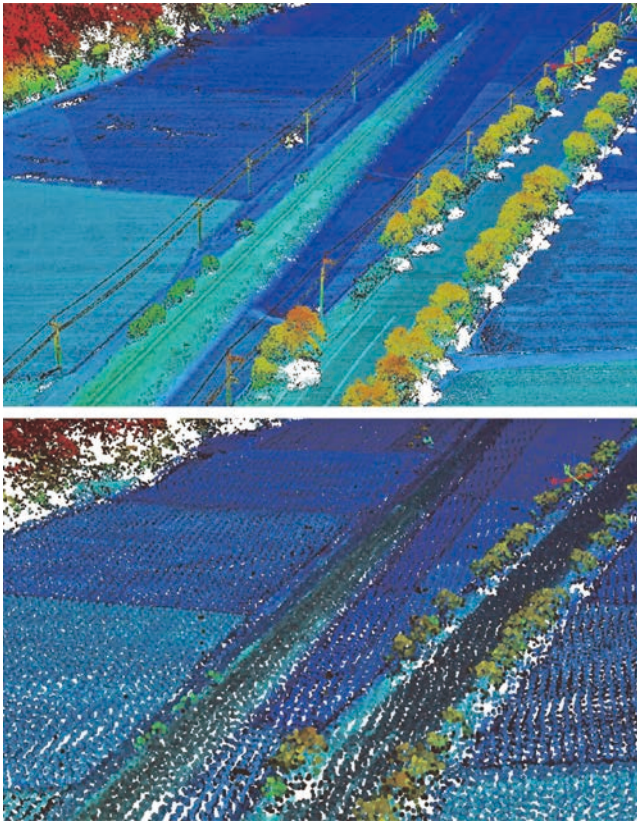


圖 8 光達點雲比較：無人機光達點雲 (上)；空載光達點雲 (下)

數值地形模型

點雲分類處理完成後，即可用來建置數值地形模型。本研究將無人機光達產製之數值地形模型與空載光達進行比較，圖 9 為數值地形模型建置成果之比較，圖 9 由上而下，各圖為之無人機光達點雲所建置之 DSM，無人機光達 DEM，以及同一區域範圍之 2m

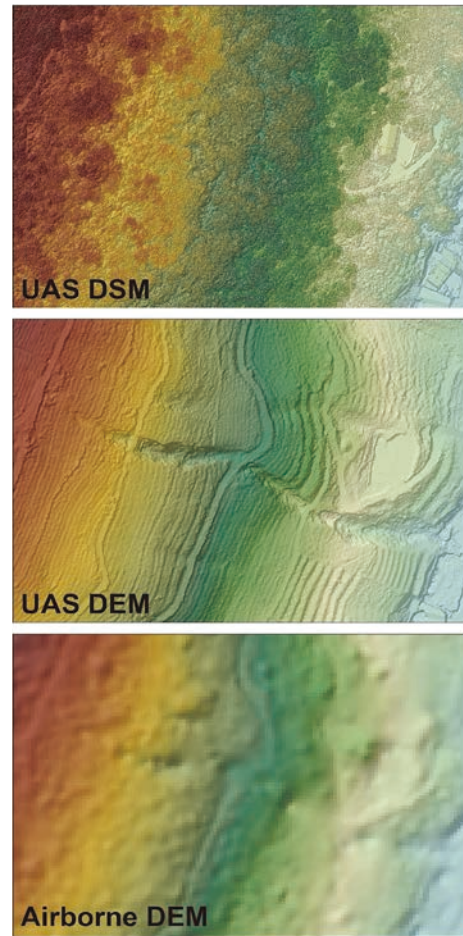


圖 9 數值地形模型比較。無人機光達 DSM (上)，無人機光達 DEM (中)，2 m 解析度之空載光達 DEM (下)

解析度空載光達 DEM。無人機光達所建置的模型解析度為 0.05 公尺，空載光達則為 2 公尺，有著 40 倍的差距，從圖 9 指出兩者於空間解析度的差異，於建物、道路和密植被區域，不論邊緣輪廓或是地形紋理上，無人機光達相對於空載光達都有不少的提升。

基於無人機光達因資料之精度及解析度的特性，可以分析更細緻之地形特徵。針對資料庫之應用，由暨有之傳統空載光達資料，由山崩構造地貌之線崖形態、位置分佈等特徵，本區已判定為大規模山崩潛勢區。因無人機光達之資料高解析特性，本區之構造地形可以予以更清晰地判釋。圖 10 由 (a) 無人機光達 DSM，(b) 無人機光達 DEM，(c) 無人機光達 DEM 陰影圖，(d) 2m 解析度之空載光達 DEM 陰影圖所組成，另外針對山崩線崖附近再予以放大，如 (e) 及 (f)，其中圖 10a, b, c, d 指示同一位置範圍，而 e 及 f 另指示同一區域。指示無人機光達

可判釋之解析出更細緻之構造線型，以及因山崩

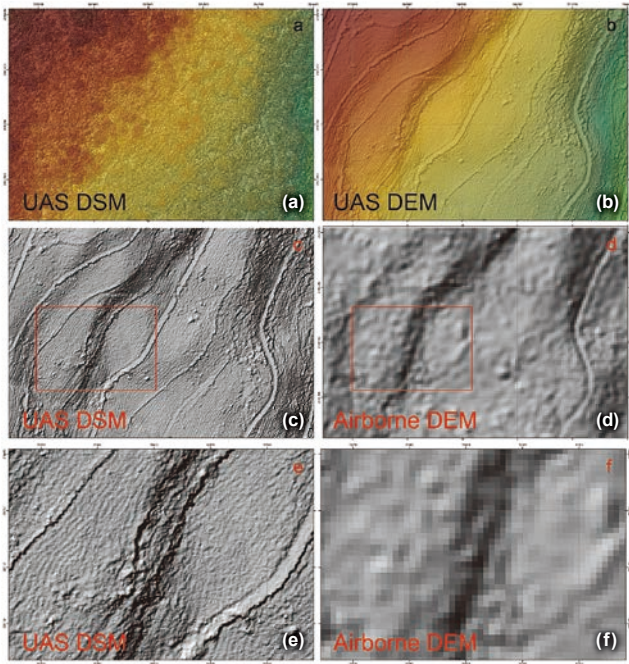


圖 10 數值地形模型比較及應用。(a) 無人機光達 DSM；(b) 無人機光達 DEM；(c) 無人機光達 DEM 陰影圖；(d) 2 m 解析度之空載光達 DEM 陰影圖；(e) 無人機光達 DEM 陰影圖放大；(f) 2 m 解析度之空載光達 DEM 陰影圖放大。圖 (e) 及圖 (f) 區域指示於圖 (c) 及圖 (d) 上。

區之構造線型以及因山崩區坡地變形引致之波浪狀微地形，並以褶皺軸之位置及延伸來呈現。另外坡面上可見帶狀線性之特徵分布，利用三維地形來呈現，則可清楚指示，本地形可以坡面上梯田來解釋，如圖 11 所示，但在同一位置及視角中，在傳統空載光達資料則無法清楚呈現梯田樣貌。上述的梯田論據，可由圖 11 中之放大（下圖）中，呈線地形梯面之不同高低及寬度來指引。以上論據指出了本區之地形及山崩動體特性，雖坡面上植生非常茂密，經撥除植生後所得之無人機光達數值高程模型指示本區雖為一大型之複合式滑動體，但地貌特徵指示本區已為老的滑動體，坡面之微地形已受人為之整坡而呈梯田狀，指示本區久未再活動，唯其人為之整坡年代已久遠而不可考。

結論

無人機光達於研究區域掃瞄之數據，經由點雲解算軟體運算後，能獲得點雲密度 200 點 /m²，與飛航設計之點雲密度相差無幾，表示所設定的參數於實際應用上並無太大的問題，可以依照需求調整使用。經軟體解算獲得之初始點雲，因受到 IMU、GPS 與 LiDAR 間不確定的系統誤差與偶然誤差影響，往往會造成航

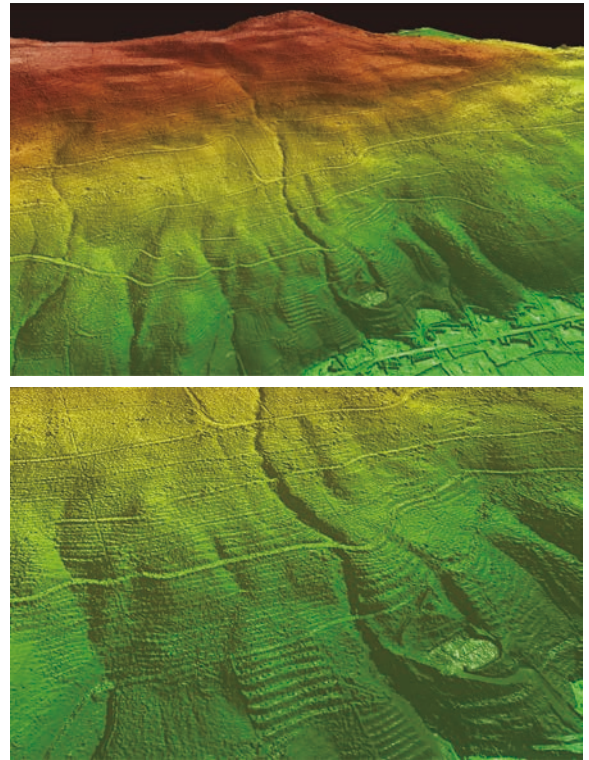


圖 11 無人機光達數值高程模型三維模成果（下圖為上圖之放大）

帶性的系統誤差，為了降低航帶間點雲在平面及高程上差異，因此需要對點雲進行航帶平差，經平差後不同航帶之點雲能夠修正至同一平面，並與真實空間位置保有 10 公分以內的精度，顯示航帶平差對於點雲建置的準確上有顯著的幫助。無人機光達所建置之數值地形模型，其空間解析度可達 5 公分，點雲過濾過，地面點之空間解析度亦可達 20 公分，如此的空間解析，於小區域之地形判識有很大的優勢，且與現地測量的檢核點比較後，整體高程誤差小於 5 公分，能提供較準確的空間資訊於實務應用上，因此無人機光達於防災及測繪上具有很大的潛力。

參考文獻

1. RIEGL, 2016, VUX-1UAV DATASHEET.
2. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., and Turner, D. (2011), "Error assessment and mitigation for hyper-temporal UAV-borne LiDAR surveys of forest inventory," SilviLaser 2011, Hobart, Australia.
3. 內政部 (2005), LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序草案。
4. 王星為 (2017), 無人機光達系統整合與精度評估, 國立臺北科技大學土木工程學系碩士論文, 台北。
5. 江晉靈 (2018), 無人機光達系統率定及平差之精度評估, 國立臺北科技大學土木工程學系碩士論文, 台北。
6. 王星為、江晉靈、彭德熙、鄭鈺雯、余翠紋、陳立邦、謝有忠、費立沅、張國楨 (2019), RIEGL VUX-1 無人機光達點雲資料處理及精度評估, 中國土木水利工程學刊, 第三十一卷, 第一期。