航測及遙測學刊　第二十一卷　第4期　第257-269頁　民國105年12月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume 21, No.4, 2016, pp. 257-269
DOI：10.6574/JPRS.2016.21(4).4

無人飛行載具搭載數位相機於地質構造判釋之應用

謝承恩[1*]　范書睿[2]　林彥廷[3]　黃文正[4,5]　羅偉[6]

摘要

隨著科技進步，野外地質調查的方法日新月異。結合現代化空間資訊技術的使用，野外資料的取得效率與精度大幅提升。本文將以近石門水庫大漢溪溪床露頭和大甲溪峭壁的三義斷層露頭為例，以無人飛行載具(Unmanned aerial vehicle, UAV)掛載數位相機，結合全球衛星定位系統(Global positioning system, GPS)靜態測量，獲取區域地面控制點坐標，處理所得之正射影像和立面影像，進行地質構造判釋。大漢溪溪床的正射影像中呈現一系列走向 N20°E 左移的斷層，及一振幅約 90 公尺、半波長約 120 公尺的 S 形褶皺。980 公尺寬的大甲溪峭壁立面影像中發現三義斷層以至少三條分支的逆斷層帶出現，由西往東分別為斷層 F1、 F2 和 F3。F1 切穿現代礫石層，判定為最活躍的斷層；F2 並無切穿上覆約 70 公尺的階地堆積層，西側未再出現早於四百萬年形成的桂竹林層青灰色砂岩，研判為具最大錯移量的分支；F3 上盤為為青灰色砂岩組成之桂竹林層，下盤為階地堆積層，近地表為風化層及植被所覆蓋。以上的地質構造判釋，皆得利於 UAV 所提供的影像，地面取樣距離(Ground sample distance, GSD)達 4cm/pixel；GPS 靜態觀測，經解算與平差後，地面控制點的平面精度達 0.5 公分，高程精度約為 1 公分內；數值地表模型(Digital surface model, DSM)的精度約莫為公分等級，足見 UAV 影像測繪搭配高精度地面控制點的高實用性，為未來地質調查不可或缺的工具。

關鍵字：三義斷層、構造地質、野外地質調查、攝影測量、UAV 影像測繪、無人飛行載具

1. 前言

野外地質調查為地質科學研究最直接也是最可靠的調查方式。但傳統人力調查方法常面臨許多窘境，如空間資料的精確度難以掌控、地形障礙區資料取得不易、亦或既費時又費力等等。近年來無人飛行載具及攝影器材性能的提昇及量產降價，特別是攝影技術的數位化，搭配日新月異的電腦科技，運算速度及儲存容量的與日倍增，目前即便家用型個人電腦安裝市售套裝軟體，即可將數位化的影像自動生成三維模型，如建物、風景和地形等，並展示於網路平台。

這些技術近十年來的進展，同樣衝擊地質領域，越來越多的學者開始使用各種空間資訊技術進行地表地質調查及分析。底下舉幾個例子，Smith *et al.* (2009) 利用風箏掛載消費型單眼相機，產生高程精度0.25公尺之數值高程模型 (Digital elevation model, DEM)，進行地形和地貌分析。Stumpf *et al.* (2013) 以航空照片加上影像自動判釋技術，分析山崩造成的地表裂隙，並結合光達(LiDAR)資料進行山崩之動態分析。Bemis *et al.* (2014) 於傳統槽溝開挖的古地震研究中，取代原本人工手動拼接牆

[1] 國立中央大學應用地質研究所　碩士生
[2] 國立中央大學地球科學學系　碩士生
[3] 國立台灣大學土木工程學系　博士生
[4] 國立中央大學應用地質研究所　副教授
[5] 國立中央大學地球科學學系　副教授
[6] 國立台北科技大學資源工程研究所　副教授
[*] 通訊作者，電話：03-4227151#65649，電子郵件：mc78962006@gmail.com

收到日期：民國 105 年 04 月 07 日
修改日期：民國 105 年 10 月 05 日
接受日期：民國 105 年 11 月 04 日

面照片方式，改以斜向和平面照片，以攝影測量方法數位化展現槽溝各階梯面之構造，達到快速且高精度地質資料的取得目的，並以三維生動的方式展現槽溝的真實情況。

全新的調查方法給了我們展新的視野，本研究結合全球衛星定位系統(Global positioning system, GPS)靜態測量(以下簡稱GPS靜態測量)，以無人飛行載具搭載數位相機，並搭配軟體Pix4Dmapper pro進行測繪，快速地取得河床露頭的平面影像、高聳峭壁的立面影像以及研究區域的數值地表模型(Digital surface model, DSM)。以下將依序介紹所使用的無人飛行載具、影像測繪流程，最後以桃園大漢溪溪床和三義斷層大甲溪峭壁露頭為例，整合空照影像判釋與現地地質調查結果，剖析兩地露頭的地質構造。

2. 無人飛行載具

近年無人飛行載具(unmanned aerial vehicle, UAV)，技術逐漸成熟，且售價親民，入門門檻相對降低，無論於攝錄影等娛樂用途，或是航空測繪皆可勝任。本研究選用 DJI 系統的旋翼型四軸飛行器與專業級旋翼型八軸飛行器，並搭載高解析度單眼相機進行航拍作業(圖 1)。小型四軸飛行器 DJI Phantom 3 Professional 內置高解析度數位相機；專業級八軸飛行器 DJI S1000^{+}搭載 Panasonic Lumix GH4 12mm Lens 高解析度數位相機。兩者最大差異為機架大小、抗風性與影像解析度，前者機動性高且方便攜帶，體積較小且重量較輕，因此抗風性較差。後者旋翼槳數及重量分別為前者的 2 倍及 7.5 倍，抗風性相對較佳，能勝任海邊等風勢較不穩定區域的調查工作，但續航力相對較差(表 1)。

圖 1 DJI S1000^{+}(黑色機體)與 DJI Phantom3 Professional(白色機體) 與遙控器。DJI S1000^{+}為雙遙控器系統，一為主要操控手操控機體姿態，二為雲台操控。DJI Phantom3 系列則為單遙控器版本，需搭配平板電腦與 APP 方能取得飛行器之即時影像和即時飛行姿態

表 1 DJI S1000^{+}與 DJI Phantom3 Professional 規格比較表

飛行器各項參數	DJI S1000^{+} 搭載 Lumix GH4 12mm Lens	DJI Phantom 3 Professional
軸距	1045 mm	590 mm
總重量(含電池)	9.7 kg	1.28 kg
最佳飛行時間	15 min	23 min
最大飛行速度	16 m/s	16 m/s
最大上升速度	6 m/s	5 m/s
GPS 模式	GPS 單系統	GPS / GLONASS 雙系統
鏡頭視野(FOV)	85°	94°
感光元件大小	17.3*13.0 mm	1/2.3 英吋
影像尺寸(pixel)	4608*2592 (16:9)	4000*3000 (4:3)

3. 影像測繪流程

影像測繪因用途不同，而有不同的比例尺以及精度要求。考量成本以及施測時安全性，事前制定測繪計畫實屬必要。本研究以 GPS 靜態測量，取得高精度的地面控制點坐標，以及 Pix4Dmapper pro 專業測繪軟體生成研究區域高解析度、高精度的空間資料。坐標系統採用 TWD97 (Taiwan Datum 1997)二度分帶大地坐標系統。以下為本研究的 UAV 影像測繪計畫內容以及作業程序(圖 2)：

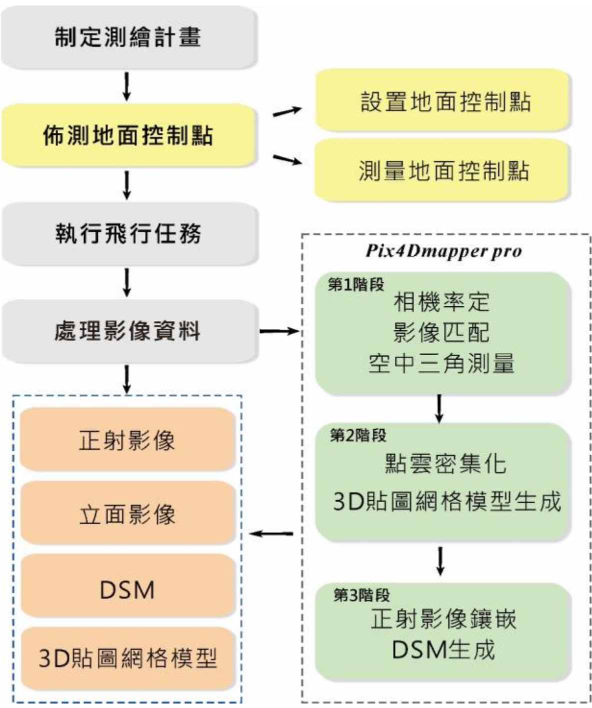


圖 2 UAV 影像測繪流程圖

(1)測繪計畫制定

根據測繪區域之地形、用途以及目的，確定測區範圍，選定無遮蔽之起飛地點，飛行高度、航線規劃考慮重疊率、控制點分布並選定適合飛行之工作日以及工作日數。本研究考慮所使用相機的鏡頭畸變於影像周圍較差，影像中心變形量較小，特以約 75%的重疊率拍攝影像，確保取得低影像畸變和較高解析度的影像以利地質判識，圖 3 以大漢溪測區為例展示棋盤式航點和影像重疊率。

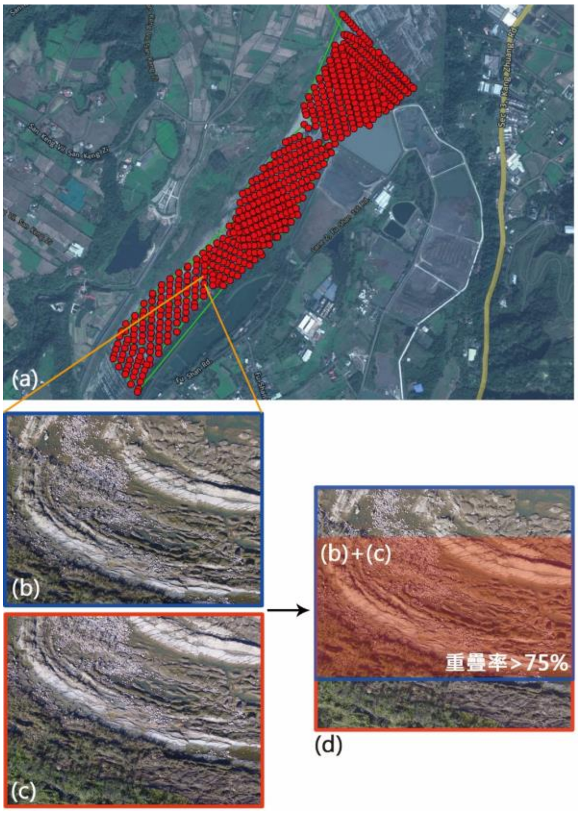


圖 3 UAV 影像位置與影像重疊率示意圖。(a)為大漢溪測區，紅點為 UAV 影像位置，以棋盤式航線掃描大漢溪河床(航高約 60 公尺)。(b)(c)為 UAV 影像，影像重疊率達 75%以上如(d)紅色區域所示

(2)地面控制點佈測

包括控制點的佈設及定位測量兩項。首先根據施測區域之大小和地形，規劃地面控制點的佈設，再於各控制點擺置航空標。航空標的設計依據內政部「基本圖測製說明」，航空標的佈設應選擇通透度良好的位置，並於航空攝影前設置航空標。而航空標的尺寸應使其可直接於影像上辨識為原則，中心標於影像上不可小於 2 個像素。本研究使用的航空標規格如圖 4b，中心為白色正方形，大小以影像地面取樣距離(Ground Sample Distance, GSD)的 3 倍，例如預期影像之 GSD 為 3cm，航空標需至少為 9 公分x9 公分之方形。塑膠板四角亦為同尺寸白色正方形，為方便辨識之用。此外，白色反照率高，建議標誌以白色為主要填色，而航空標底色的不同，為方便區別不同位置的控制點。

於航空標固定或噴漆標示於地面後，接續進行地面控制點的定位測量。本研究於大甲溪測區採用GPS 靜態測量法，因考量現地控制點網型及引入周邊內政部公告控制點資訊，首先我們將基站設於內政部一等水準點 B_{030}，另二站設於一等水準點 B_{031} 和地控點 A，此三點成三角形，如中最左側的三角形($B_{030}B_{031}A$)，進行 40 分鐘共同觀測，目的為利用已知的一等水準點 B_{030} 絕對坐標，解算控制點 A 與 B_{031} 的絕對坐標。而後再依序針對三角形 B_{031}AC、三角形 ACE、三角形 CDE 收集 GPS 靜態觀測資料，網形示意圖詳見圖 5。以上收集的 GPS 靜態觀測資料，依基站及測站時間同步觀測條件下，消除時間誤差和平差改正解算，可獲得平面精度約 0.5 公分、高程精度為 1 公分內精度品質。而本研究最終使用 A、C、D 和 E 控制點作為模型控制點。

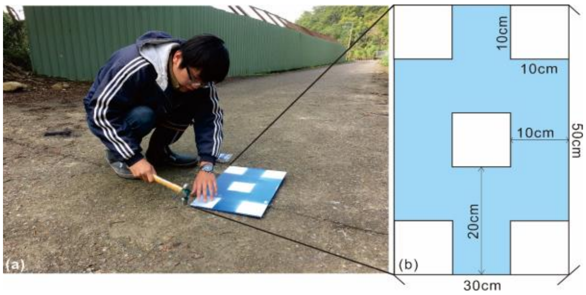


圖 4 (a)大甲溪測區現場佈置航空標情形。(b)此藍底航空標上之白色方形，大小為 10 公分x10 公分，方便於 Pix4Dmapper pro 軟體內，人工標定地面控制點

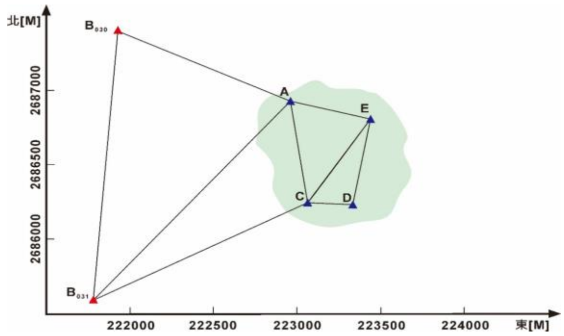


圖 5 大甲溪測區控制點的佈設與網型示意圖。紅色三角形代表一等水準點，深藍色為佈設的控制點，淺綠色區域為研究區，控制點組成的三角網型涵蓋大甲溪研究區，達到控制地面空間資訊的目的

(3)飛行計劃執行

飛行器之控制軟體、機械電路與相機參數設定確定無誤後，於預定之空曠且無信號遮蔽之場地執行飛行計劃。飛行中操作人員須注意地面控制站回傳之訊息，若發現飛行器有異常動作，立即通知飛控手以手動模式介入。

(4)影像資料處理

本研究使用 Pix4D 軟體公司所開發之 Pix4Dmapper pro 專業測繪軟體進行(https://pix4d.com/)，此軟體即是針對現今 UAV 影像測繪所設計，內建市售消費型數位相機鏡頭率定參數，以及大地坐標系統，方便使用者利用各廠牌 UAV 掛載數位相機，製作各式 3D 模型以及正射影像。Pix4Dmapper pro 首要步驟為利用軟體內建相機初始參數進行率定，再透過影像匹配和空中三角測量，解算匹配後點雲的坐標，接續進行點雲密集化、3D 貼圖網格生成等，最終成品為彩色 3D 模型、DSM、正射影像與立面影像(流程圖參考圖 2 處理影像資料部分)。此外軟體內建 3D 引擎，於軟體介面內即可展示測繪區域的 3D 點雲模型。

4. 空照影像之地質構造判釋

本研究選定台灣北部的大漢溪中游溪床(近石門水庫，圖 6b)及中部的大甲溪溪岸峭壁(圖 6c)，以這兩處的地質露頭點，闡述現代化空間資訊技術如何助益地質調查及地質構造的判釋。大漢溪溪床儘管地勢平緩，然而縱使於枯水期，裸露的岩層仍常為深邃河道或深潭區隔，造成地面地質調查的不易，相當費時且費力，以 UAV 空拍的傳統平面影像，提供快速且完整的區域性構造分布；大甲溪溪岸峭壁無法以傳統的地面地質調查方式進行，更甭談任何精確且量化的資料，因此我們針對峭壁面，以 UAV 拍攝斜向空拍照，再透過 Pix4Dmapper pro 處理得立面影像，做為構造分析之底圖，借此展現此類極佳的 UAV 探查方式，應用於構造地質領域。

4.1 大漢溪上游溪床

地質露頭區位於桃園市大溪區的溪洲，即位於石門水庫後池堰之北北東方向約 1.8 公里處的大漢溪溪床。大漢溪為大溪區主要河流，自石門水庫流出後以北北東方向繼續流往臺北盆地。本區雖廣覆河流沖積層，但因大漢溪長年下切侵蝕溪床，溪床得以在枯水期間出露二百萬年前所形成的沉積岩層。由於裸露岩層位於溪床當中，探查時易受水流阻隔與水勢大小影響，除了以傳統地質調查方式外，輔以空拍影像判釋地質構造可快速掌握野外露頭狀況。本區空拍以 DJI Phantom 3 Professional，設定航高約 60 公尺、影像重疊率約 75% (影像左右、前後)，且影像位置資訊來自於飛行器，最後由 Pix4Dmapper pro 製作正射影像進行判識。

正射影像 GSD 約為 3.02cm/pixel，而由影像判釋，顯見二種色調之岩層，見圖 7a；一者為沿續性佳之灰白色岩層，二者則為風化嚴重之深棕色岩層。根據 Pan *et al.* (2015)對此段岩層的岩性描述，此岩性組合即代表形成於約兩百五十萬年前，更新世早期楊梅層當中的砂頁岩互層。河床面上可見兩道白色砂岩層呈 S 形的彎曲形貌(如圖 7a 上半段)。相較於圖 7a 上半段，圖 7a 下半段中的岩層保持平行排列，但岩層中出現多道具有特定方向的破裂跡，且這些破裂跡兩側的岩層具有錯移現象。

結合野外調查的資料顯示， 圖 7a 上部幅中的岩層位態由 N45°W/45°W 轉為 N45°E/40°E 後，再轉回 N45°W/45°-50°W，為一視振福約 50 公尺、半視波長約 200 公尺的 S 形褶皺，褶皺軸跡(axial trace)約為南北走向。由褶皺兩翼岩層的位態交線，可分別求得該 S 形褶皺的兩褶皺軸(fold axis)位態，結果顯示皆向南傾沒約 30 度，走向與褶皺軸跡約略一致為南北向，再將這 S 形褶皺投影到與褶皺軸垂直的平面上，求得其真正的半波長值及振幅大小，分別為 120 公尺及 90 公尺。圖 7b 下部幅中，清楚可見灰白色和深棕色岩層交互出露於溪床，為走向約 N20°W 的砂頁岩互層。此砂頁互層岩層被一系列走向為 N20°E 的左移斷層截切，斷層跡的長度約 10 餘公尺至近 100 公尺，沿走向之錯動量約為數公尺至 10 餘公尺。

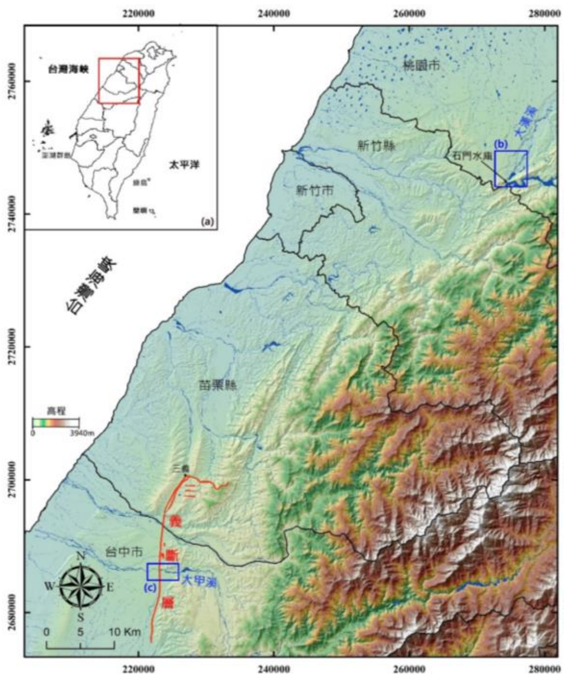


圖 6 研究區域位置圖(資料來源：中央研究院 GIS 中心)。(a)紅框內為圖 6 範圍。(b)藍框範圍內為大漢溪上游河床研究區域。(c)藍框範圍內為大甲溪溪岸峭壁研究區域。坐標系統採用 TWD97 二度分帶系統，30 公尺數值地形資料

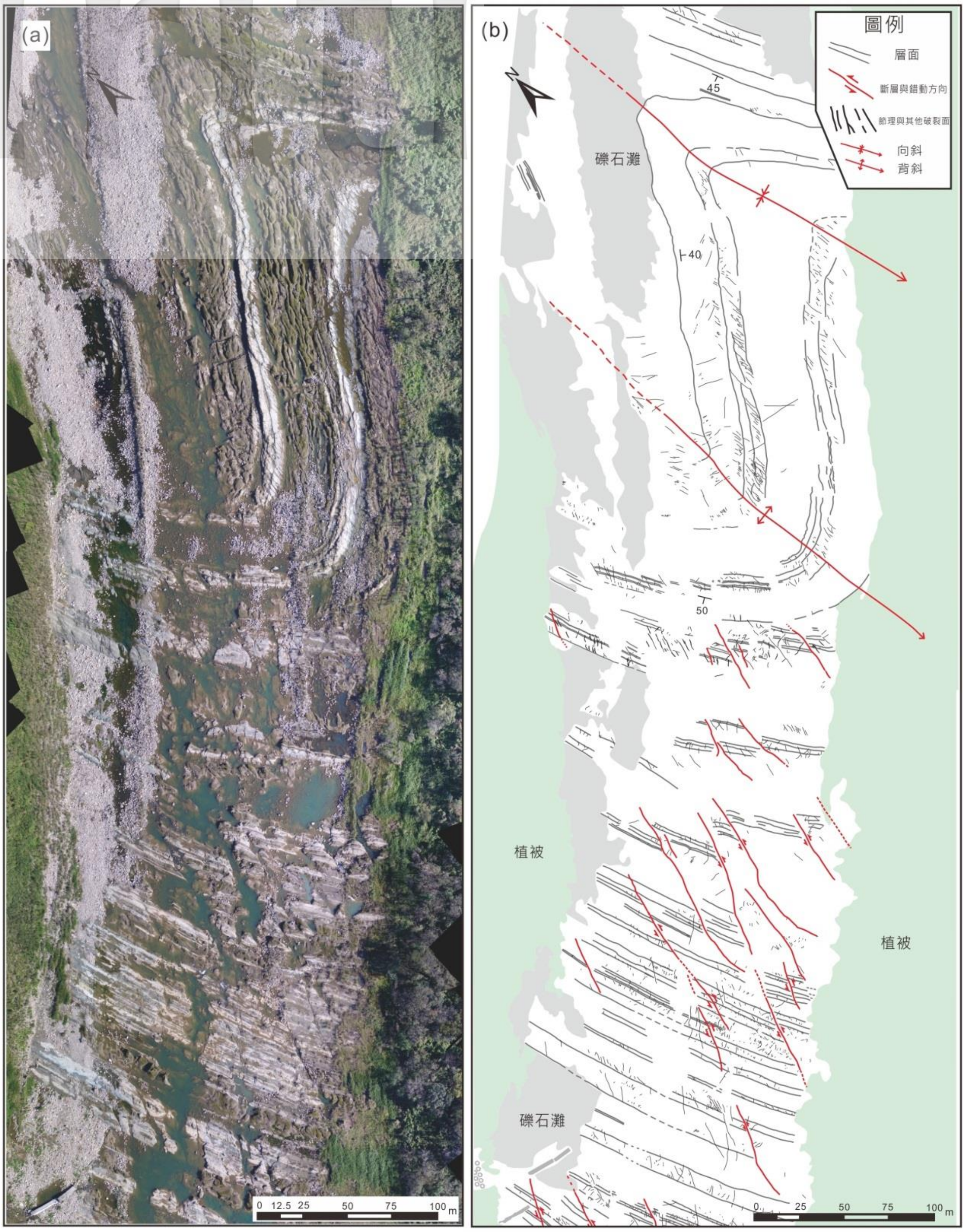


圖 7 桃園大溪區溪洲大漢溪河床露頭 (a)正射影像，GSD 約為 3.02cm/pixel。(b)構造地質圖。上半段可顯見兩道S形褶曲砂岩層，為向南傾沒的褶皺構造，箭頭方向為褶皺軸傾沒方向。下半段中的平行岩層具多道斷層，都為左移斷層

4.2 三義斷層大甲溪北岸峭壁露頭

經濟部中央地質調查於民國八十七年將三義斷層列為活動性存疑的活動斷層，之後於民國九十七年將其更列為一萬年內曾經滑移過的第一類活動斷層。然而目前我們收集到的三義斷層露頭點報導，僅苗栗上湖(林啟文、等，2008)、大安溪以北伯公坑溪(李錦發，1994)以及新台鐵山線大甲溪北岸(黃鑑水及張憲卿，1994；李錦發，1994)，各處

的露頭皆發現斷層截切更新世以後形成之礫石層。本研究鎖定露頭狀況最佳，且範圍最廣的新台鐵山線大甲溪北岸峭壁，對三義斷層進行構造剖析。首先在露頭面周遭區域，設置地面控制點，以 GPS 靜態測量定位各點空間坐標，同時進行研究區域的平面 UAV 影像拍攝設定航高 100 公尺以及 120 公尺，前者航高較低是為 DJI Phantom 3 Professional 規劃，因其感光元件較小解析度也較差(表 1)，為使 DJI Phantom3 Professional 和 DJI S1000+所得影像空間解析度略同，因而使用二台飛行器以不同航高飛行。此外我們也以斜向拍攝的方法取得峭壁面的影像(圖 8)。此模型除可作為斷層地表跡分布的研判外，亦可供未來三義斷層引致地震地表變形之研究根據。

4.2.1 地面控制點測量結果和鄰近區地表模型

我們以內政部一等水準點 B_{030} 做為基站，將絕對坐標引至一等水準點 B_{031}、A、C、D 和 E 控制點，進行解算與平差，各控制點解算結果和精度詳見表 2。

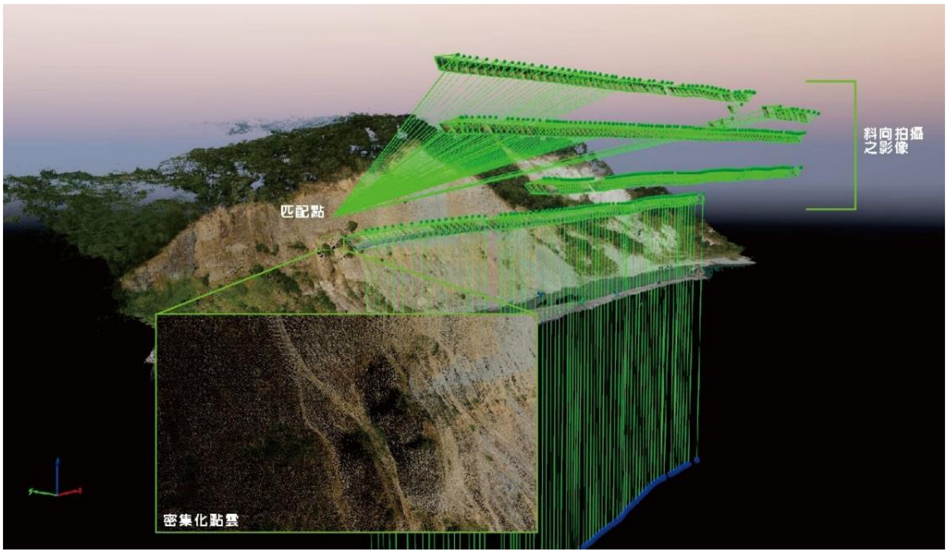


圖 8 三義斷層峭壁露頭的影像拍攝。以 UAV 搭載之相機斜向拍攝峭壁面，透過影像匹配技術生成露頭峭壁模型

表 2 GPS 靜態測量結果與精度表

控制點	GPS 靜態測量值			精度		
	東[m]	北[m]	高程(m)	東[m]	北[m]	高程(m)
B_{031}	221782.369	2685595.213	212.23	0.002	0.003	0.006
A	222951.179	2686927.553	252.596	0.002	0.003	0.007
C	223059.532	2686242.788	214.615	0.003	0.003	0.006
D	223326.986	2686234.973	221.814	0.003	0.003	0.007
E	223433.352	2686805.207	284.53	0.005	0.004	0.013

(1)控制點測量結果與已知點檢核

檢核內政部一等水準點 B_{031} 解算所得值與公告值，各方向分量之差異量為東西向 0.007 公尺、南北向0.016公尺與高程差異量0.008公尺(表 3)。此外我們根據內政部一等、二等和三等水準點所公告的精度標準，評估本次 GPS 靜態測量的測量品質。而各等級的水準點閉合差計算方式以即應達到的閉合差如表 4。我們假設 B_{031} 起始測量值即為內政部公告值，檢核表 4 應達閉合差和表 3 高程的差異量，顯示本次 GPS 靜態測量品質不足二等水準點，但高於三等水準點所規範。

表 3 一等水準點 B_{031} 公告值與測量值比較表

一等水準點	東[m]	北[m]	高程(m)
B_{031}(公告值)	221782.376	2685595.197	212.2378
B_{031}(測量值)	221782.369	2685595.213	212.23
差異量	0.007	0.016	0.008

表 4 水準點閉合差計算公式以及相對應本次測量應達之閉合差表。K 為單一線段長度的公里數，即為 B_{030} 到 B_{031} 於三維空間的線段長

水準點等級	計算公式	應達閉合差(m)
一等水準點	$\pm 2.5\text{mm}\sqrt{K}$	0.003
二等水準點	$\pm 5\text{mm}\sqrt{K}$	0.007
三等水準點	$\pm 8\text{mm}\sqrt{K}$	0.011

(2)Pix4Dmapper pro 生成之模型結果與模型檢核

我們共結合1003張UAV影像進行影像匹配，而每張影像平均含有 13945.4 個匹配點。點雲密集化後，共產生 104,690,336 個點雲，而模型的平均 GSD 為 4.38cm/pixel。此外研究區域彩色點雲模型和 A、C、D 和 E 地面控制點位置，紅色線為根據 DSM 地形陰影圖地形的變化，初步判識的三義斷層地表跡位置如圖 10 所示。

然而，由於測區多數區域為受河流侵蝕，地貌變化快速之區域，因此本研究並未設置額外檢核點於控制點網形內，但以農林航空測量所約 25 公分解析度之正射影像做為參考值，於 GIS 軟體內丈量各參考地物的尺寸，再與本研究 UAV 影像測繪所得正射影像所見得相同地物，測量二者的差異量做比較。測量示意圖如圖 9，我們測量鐵道雙向、單軌的寬度、橋墩南北向距離以及影像中能夠清楚辨識的地物房舍尺寸。鐵道單軌部分由於以農林航測所正射影像無法辨視確切的單軌寬度，因此我們比較台灣鐵路局所公告的開普軌寬距(Cape gouge)和本研究製做的正射影像的鐵道寬距。開普軌寬距官方公告為 1.067 公尺，而本研究所測得的軌道寬距界於 1.105 至 1.157 公尺之間，與軌道標準寬差異量為 0.038 至 0.090 公尺，平均差異量約 0.065 公尺；而測量其他地物尺寸的結果如表 5 所示，平均差異量為 0.417 公尺，最小差異量為 0.254 公尺，最大差異量為 0.748 公尺。此外，我們以方均根誤差(Root-mean-square error, RMSE)評估差異量的離散程度。RMSE 的計算方式為：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\Sigma {e_i}^2}{N-1}} \quad (1)$$

e_i 為各控制點 DSM 計算值和 GPS 靜態測量的差異量，N 為控制點總數。結果顯示地物之測量差異量 RMSE=0.533。

以上由 4 個控制點納入模型計算之結果與農林航空測量所測繪結果比較，顯示以地面控制點約制模型內空間資訊，並和農林航測所正射影像、鐵軌單軌距比較，差異量平均約 0.417 公尺、0.065 公尺。然而除了以地物測量討論模型誤差，本研究亦將地面控制點的測量值和 DSM 上之計算值比較二者的差異量，此方法亦為 Kršák *et al.* (2016)計算 UAV 影像測繪結果和測量的地面控制點差異量的方法。檢核控制點於 DSM 中的坐標結果如下表 6。計算結果為東西向 RMSE(x)=0.129，南北向 RMSE(y)=0.031，高程 RMSE(z)=0.095，顯示 DSM 結果和 GPS 靜態測量在東西向誤差的離散程度較大。而檢視表 6 的差異量，僅控制點 E 東西向差異量為 0.221 公尺，其於控制點的水平差異量均在 0.05 公尺以內，表示經人工辨識之地面控制點所產生的誤差，大多控制在框標的白色方形框範圍內($10\times10\text{cm}^2$)，屬合理範圍內。

(a)測區台鐵橋，測量其雙向鐵軌寬度以及橋墩距　(b)測區房舍屋頂長度丈量(民房 02)。

圖 9 地物尺寸測量示意圖

表 5 地物尺寸測量結果比較表

測量地物	農航所正射影像測量值(m)	本研究正射影像測量值(m)	差異量
雙向鐵軌寬度	5.564	5.179	-0.385
橋墩寬距	32.285	32.031	-0.254
民房 01	20.048	20.331	0.283
民房 02	29.782	30.530	0.748
AVG			0.417
RMSE			0.533

表 6 地面控制點測量值和 DSM 上地面控制點計算值比較表

控制點	**GPS 靜態測量值**			**DSM 計算值**			**差異量**		
	東[m]	北[m]	高程(m)	東[m]	北[m]	高程(m)	東[m]	北[m]	高程(m)
A	222951.179	2686927.553	252.596	222951.201	2686927.586	252.451	0.022	0.033	0.145
C	223059.532	2686242.788	214.615	223059.537	2686242.812	214.549	0.005	0.024	0.066
D	223326.986	2686234.973	221.814	223326.965	2686234.984	221.778	0.021	0.011	0.036
E	223433.352	2686805.207	284.530	223433.573	2686805.241	284.506	0.221	0.034	0.024
RMSE							0.129	0.031	0.095

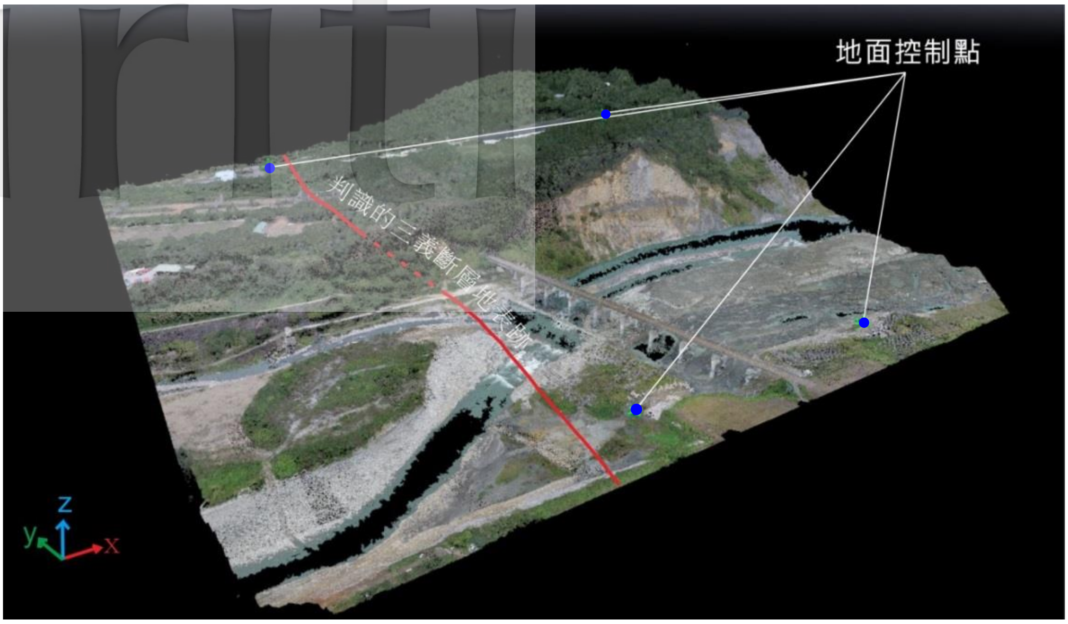
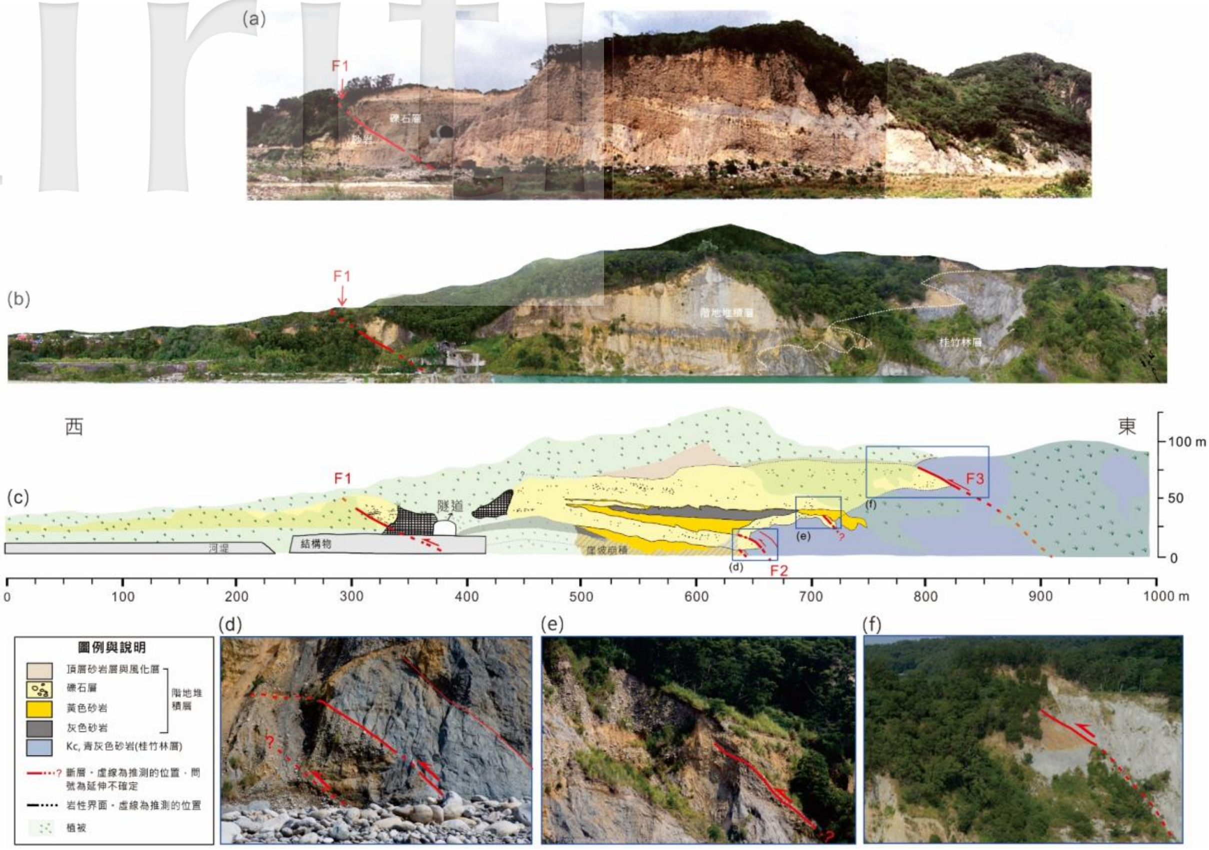


圖 10 測區彩色點雲模型示意圖。藍色圓球為地面控制點位置，約略均布於測區內。紅線為初步判識的三義斷層地表跡

4.2.2 影像判釋及地質構造剖析

我們以內政部一等水準點 B_{030} 做為基站，將絕對坐標引至一等水準點 B_{031}、A、C、D 和 E 控制點，進行解算與平差，各控制點解算結果和精度詳見表 2。

本研究所得大甲溪北岸峭壁露頭立面影像如圖 11b，東西向總長 980 公尺，自河面算起，高度 110 公尺，東側為四百萬年前形成之青灰色砂岩組成的桂竹林層，西側為較頭嵙山層更為年輕的紅土化階地堆積層或階地堆積層(Chen *et al.*, 2003)。地形則由西而東漸升高。與黃鑑水與張憲卿(1994)所拍攝的露頭照片相較(圖 11a)，明顯地植被覆蓋區域較廣。結合兩者及地質資料，以立面影像為底圖，繪製成圖 11c 的立面圖，其上可見數道向東傾斜的斷層，其中幾道相對錯移量較大，由西至東分別為斷層 F1、F2 和 F3。斷層 F1 位於台鐵隧道西側近處，黃鑑水與張憲卿(1994)報導其切穿上部現代礫石層，且為大甲溪北岸峭壁露頭中發現的最前緣斷層，故又稱前鋒斷層；F2 位於立面圖西起約 650 公尺處，研判由三道相鄰的分支斷層組成(圖 11d)，最西側的分支其下盤為黃棕色礫石層，其上盤亦是中間分支的下盤，為桂竹林層的青灰色砂岩組成，砂岩上覆有礫石層，其中的礫石受到中間分支斷層的擾動，可見礫石長軸的變化由離斷層較遠處的近水平，轉為於貼近斷層處的與斷層近乎平行(圖 11e)，最東側的分支存在於青灰色砂岩中，斷面可察見，但兩側砂岩未見明顯擾動，可能僅數公分的錯移量，F2 以西未再有桂竹林層的青灰色砂岩出現，研判為具最大錯移量的分支斷層，再者，F2 並未切穿上覆 70 公尺的階地堆積層；於立面圖約 700 公尺處，有一斷層發育於礫石層中(圖 11b)，並無發現該斷層向下延伸至桂竹林層中的證據(圖 11e)。F3 斷層位於約 800 公尺處(圖 11c)，其上盤為桂竹林層的青灰色砂岩組成，下盤為黃棕色的礫石層及桂竹林層，下盤礫石層的西側為植被覆蓋約有一、兩百公尺寬，更西緊鄰厚層的礫石層，推測植被之下也應為礫石層，斷層頂部為風化層及植被所覆蓋。綜合以上的判釋結果，由斷層 F1 至 F3 的水平距離，可知三義斷層於本區域之斷層帶寬度可達 500 公尺以上。此外，F1 前鋒斷層截切近地表的現代礫石層(黃鑑水與張憲卿，1994)，本研究認為其為三義斷層帶中最活躍的分支，且最接近由地形判識的三義斷層地表跡(圖 10)。



(a)民國 83 年的露頭狀況。從圖中清楚可見於隧道西側有一斷層。(照片摘自黃鑑水與張憲卿，1994)

(b)本研究立面影像。斜向拍攝之影像，再經影像匹配、立面正射化所得，露頭西半部為階地堆積層，東半部為桂竹林層的青灰色砂岩。

(c)地質構造立面圖。岩層中可見數道斷層。

(d)、(e)及(f)斷層近照。各位置點標示於(c)。

圖 11 台鐵隧道大甲溪北岸三義斷層峭壁露頭

5. 結論與建議

本研究利用 UAV 搭載的相機取得空拍影像，經由 Pix4Dmapper pro 影像測繪軟體將其正射化，再藉由正射影像以及立面影像判釋地質構造。其中大漢溪溪床露頭正射影像顯示一系列走向為 N20° E 之左移斷層，及一振幅約 90 公尺、半波長約 120 公尺的 S 形褶皺，未來將做更深入之地質構造演育探討，了解該區域地質構造的演育模式。三義斷層大甲溪峭壁露頭，我們使用 GPS 靜態測量，平差解算後，獲得地面控制點平面精度平均約 0.5 公分、高程精度平均為 1 公分內精度品質之控制點，以利未來探討三義斷層相關之同震變形行為之依據；由立面圖判釋地質構造所得結果，三義斷層於大甲溪北岸之斷層帶寬至少有 500 公尺，有數道斷層分布於此斷層帶中，自西而東有 F1、F2 和 F3 三道相對錯移量較大的斷層，其中 F1 前鋒斷層截切現代礫石層，判定為最活躍的分支斷層，且最靠近由 DSM 所判識的三義斷層地表跡位置；F2 則未切穿上覆 70 公尺厚之階地堆積層，且其西側未再有早於四百萬年形成的桂竹林層的青灰色砂岩，研判為具最大錯移量的分支斷層；F3 斷層上盤為青灰色砂岩組成之桂竹林層，下盤為 200 萬年後沉積之礫石層及其下伏的桂竹林層，斷層頂部為風化層及植被所覆蓋。而藉由以上的兩個例子，證實無人飛行載具搭載數位相機，已成為當今地質學家進行野外調查的利器之一。

誌謝

特別感謝萬里達工程負責人莊翔富，於野外施測部分提供協助。感謝國立台灣大學，韓仁毓教授提供測量領域相關諮詢以及 GPS 靜態測量相關的協助。

參考文獻

李錦發，1994。三義斷層及其在新構造上的意義，地質，14(1)：73－96。

林啟文，盧詩丁，石同生，林偉雄，劉彥求，陳柏村，2008。台灣中部的活動斷層，兩萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，21：21－31。

黃鑑水，張憲卿，1994。台中縣大甲溪右岸之三義斷層露頭，地質，14(1)：248－249。

Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Darren, T., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T., and Bangash, H.A., 2014. Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. Journal of Structural Geology, 69: 163-178.

Chen, W.S., Chen, Y.G., Shih, R.C., Liu, T.K., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H., and Lee, K.J., 2003. Thrust-related river terrace development in relation to the 1999 Chi-Chi earthquake rupture, western foothills, central Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, 21: 473-480.

Kršák, B., Blišťan,P., Pauliková, A., Puškárová, P., Kovanič, Lˇ., Palková, J., and Zelizňaková ,V., 2016. Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. Measurement, 91: 276-287.

Smith, M.J., Chandler, J., and Rose, J., 2009. High Spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. Earth Surface Processes and Landforms, 34: 155-161.

Stumpf, A., Malet, J.P., Kerle, N., Niethammer, U., and Rothmund, S., 2013. Image- based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics. Geomorphology, 186: 12-27.

An Application of Unmanned Aerial Vehicle with an Onboard Camera to Structural Geology

Cheng-En Hsieh[1*] Shu-Jui Fan[2] Yan-Ting Lin[3] Wen-Jeng Huang[4,5] Wei Lo[6]

Abstract

Taking advantage of spatial information technology, the efficiency of collecting data in the field and the data accuracy have been dramatically enhanced for geologists nowadays. In this research, by using UAVs (unmanned aerial vehicles) with a digital camera, and ultra-high accuracy ground control points, we produce ortho- and elevation images in order to recognize and analyze geological structures. We take a 750-meter-wide Dahan River riverbed near the Shihmen reservoir and a Dajia River cliff outcrop of the Sanyi active fault as examples to illustrate the usefulness of UAV for geologists. At the Dahan Riverbed, there are a series of left-lateral sense faults with orientation of N20°E. Furthermore, an S-shaped fold has been recognized with a 50-meter amplitude and 200-meter half-wavelength in the orthoimage. At the Dajia River cliff, a 980-meter-long elevation image has been produced. At least three fault branches can be recognized on the elevation image. They are labelled as F1, F2 and F3 from west to east in this Sanyi fault zone. F1 cutting into the modern gravelly layer has been acknowledged as the most active branch fault in the research area. F2 did not cut into the overlaid 70-meter-high terrace layer. It may be the fault branch with a maximum separation because the greenish grey sandstone of Kueichulin formation formed earlier than 4 million ago is not exposed west of F2 on the cliff. The hanging wall of F3 is composed of the greenish grey sandstone of Kueichulin formation and the footwall of F3 is composed of gravelly layer formed after 2 million years ago. The F3 is overlaid with regolith and vegetation. The results of the geologically structural analyze above all benefit from the images taken via UAV. Moreover, the GSD (ground sample distance) of the high-quality models presented in this study reaches 4 cm/pixel. With the accuracy of static GPS (global positioning system) reaches about 0.5cm in horizontal and 1cm in elevation. DSM accuracy is about in centimeters. To sum up, UAV-based photogrammetry with high accuracy ground control points, showing a high efficiency and high flexibility indispensable technology in the field survey for geologists.

Keywords: Sanyi fault, geological field survey, structural geology, photogrammetry, UAV mapping and unmanned aerial vehicle (UAV)

[1] Master student, Graduate Institute of Applied Geology, National Central University
[2] Master student, Department of Earth Sciences, National Central University
[3] Ph.D., student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University
[4] Associate Professor, Graduate Institute of Applied Geology, National Central University
[5] Associate Professor, Department of Earth Sciences, National Central University
[6] Associate Professor, Institute of Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology
[*] Corresponding Author, Tel: 886-3-4227151 ext.65649, E-mail: mc78962006@gmail.com

Received Date: Apr. 07, 2016
Revised Date: Oct. 05, 2016
Accepted Date: Nov. 04, 2016