



無人飛行載具影像之 精度評估及山崩活動性之應用

Precision Assessment of Unmanned Vehicle Aerial Photogrammetry Technology and Application in Landslide Activity

吳庭瑜 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 助理研究員

謝有忠* / 經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 技正

本研究以搭載不同衛星定位模組市售測繪級與消費級無人飛行載具，進行測量成果誤差比較分析，選定宜蘭力霸產業道路旁崩塌地進行四期的空拍作業，並透過質點影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）進行分析，探討兩者所產製的正射影像成果之不確定性，同時也透過現場量測的 RTK 資料與影像空間資訊做比對，以評估影像之可能誤差規模，並了解市售測繪級與消費級無人飛行載具之差異；另案例探討選定桃園市復興區光華農道崩塌，藉由空拍建模及透過質點影像測速法分析，獲知崩塌整體移動方向及變量，作為崩塌調查及活動性參考資料。

關鍵詞：無人飛行載具（UAV）、質點影像測速法（PIV）、精度評估、地形變遷

ABSTRACT

In order to understand the error results of unmanned aerial vehicles equipped with different satellite positioning modules, in the first stage of this study, the shallow landslide next to Liba Industrial Road in Donshang District, Yilan Country was selected to conduct four times of landslide investigation. Then, analyzed error and stability of the orthoimage produced by the two UAV through the Particle Image Velocity method (PIV). At the same time, the RTK data measured on-site was compared with the orthoimage spatial information to evaluate the possible error scale of the orthoimage. In the second stage, the landslide at Guanghua Agricultural Road in Fuxing District, Taoyuan City, where has been relatively active, was conducted for modeling and analysis through Particle Image Velocity. This was used to determine the movement direction and variables of the landslide as a reference for investigation.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Particle Image Velocimetry (PIV), Precision assessment, Topological change

* 通訊作者，hsiehyc@gsmma.gov.tw

前言

近年無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicles, UAV）的技術日新月異，入門門檻逐漸降低，應用層面也越來越廣泛，針對不同領域應用的需求可選擇的無人飛行載具也越來越多樣。可在野外地質調查、山崩調查等進行遠距露頭或地形觀察，另外也可利用以 SfM 攝影測量範圍成像技術進行三維地形建模，獲取正射影像與數值地表模型資料，有助於地表地形分析。目前市面上一般消費級無人機眾多，也多可以用於產製前述建模、正射影像級數值地形等資料，也有少部分機型搭載即時動態定位模組（RTK, Real-time kinematic）之測繪級無人機，過去已有研究針對不同的無人飛行載具序列影像，在不加入控制點的情況下進行三維地形建模，並分析各地形模型的精度，從其研究成果可得知 DJI 之 PHANTOM 4 RTK 在不加入控制點進行建模的情況下，誤差規模是比較項目中最小的 [1]。為此，本研究在台灣山區複雜地形情況下，藉

由現有 DJI PHANTOM 4 PRO 及 PHANTOM 4 RTK 搭載不同衛星定位模組無人飛行載具，同時也透過質點影像測速法 (Particle Image Velocimetry, PIV) 來呈現其誤差規模，配合現地 RTK 測量加以佐證，以了解現有消費級及測繪級無人機之差異，並在後續地形變遷分析工作能提供不同機型產製資料之誤差來源與規模。

研究區概況

本研究區位於宜蘭縣冬山鄉力霸產業道路旁一裸露地，套疊山崩地質資訊雲端服務平台之五萬分之一地質圖，所在地之地層為南蘇澳層，以板岩、白色中至粗粒變質砂岩與板岩互層為主，偶夾千枚岩、薄層變質砂岩^[2]，地質年代屬始新世至漸新世，如圖 1；圖中方框為本研究進行無人飛行載具影像精度評估之範圍。

研究方法與流程

研究流程

本研究係利用 DJI PHANTOM 4 PRO 及可配合地面基站 D-RTK 2 使用的 PHANTOM 4 RTK 兩架搭載

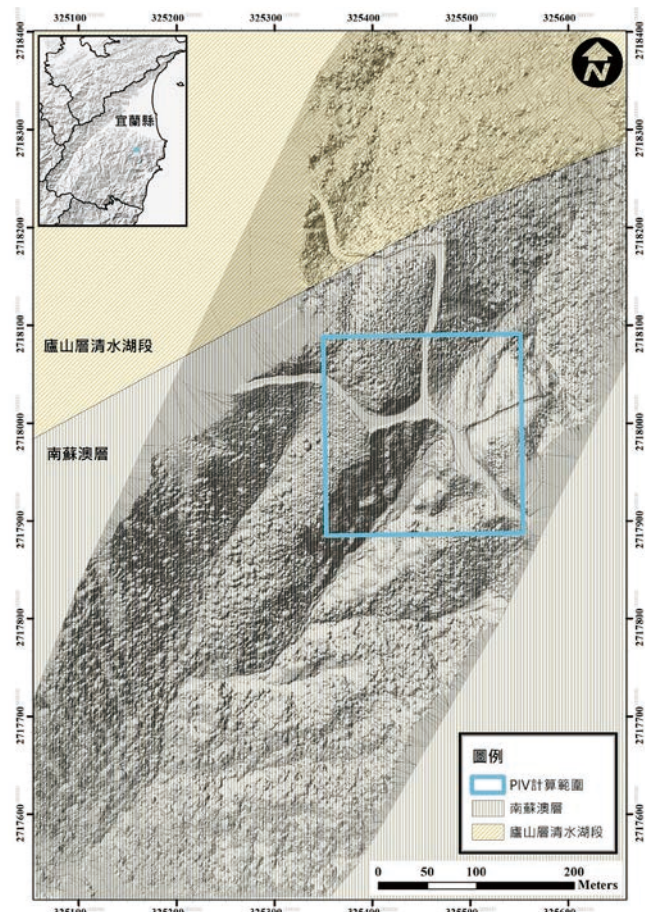


圖 1 研究區概況及精度評估之範圍

不同衛星定位模組之無人飛行載具，DJI PHANTOM 4 PRO 係屬較專業級消費型機種，具多星系之一般衛星定位系統 (GNSS)，PHANTOM 4 RTK 係屬測繪級無人機，具即時動態定位模組 RTK 模組，可配合地面基站 D-RTK 2 使用。本研究選定於宜蘭縣冬山鄉力霸產業道路一處裸露地進行 4 期的空拍建模工作，4 期時間分別為 2019 年 10 月、2019 年 11 月、2020 年 1 月及 2020 年 3 月。在進行空拍作業前，先於室內利用無人飛行載具操作軟體進行航線規劃，其中包含航拍範圍、飛航高度及重疊率等設定。每次的調查中執行三趟空拍作業，第一趟是利用 PHANTOM 4 PRO 飛行、第二趟則是利用 PHANTOM 4 RTK 飛行、第三趟再開啟地面基站 D-RTK 2 配合 PHANTOM 4 RTK 進行飛行。完成空拍作業後，將所得之影像透過 SfM 攝影測量成像技術進行三維地形模型建置及產製正射影像，共得 12 組正射影像及地形模型。

針對兩架無人飛行載具之正射影像成果，利用質點影像測速法 (Particle Image Velocimetry, PIV) 對不同時期之正射影像以及同時期利用不同無人飛行載具所產製之正射影像進行比較；同一地點對不同時期之正射影像進行比較可得知此處之地形、地貌有無變化，而同一地點且同時期、利用不同無人飛行載具飛行所產製的正射影像成果進行比較，則可得知搭載不同衛星定位模組之無人飛行載具所產製出的正射影像成果之差異。

此外，為評估各無人飛行載具所產製出的正射影像成果之穩定性，於研究區中共佈設 21 個航標點，並利用現地 RTK 測量各點位之空間座標資訊，後續透過無人飛行載具影像所生成的正射影像，尋找現地設置的航標點點位將其標示出來，並輸出其空間座標資訊，利用正射影像所輸出的空間座標資訊與現地 RTK 測量之點位資料進行平面誤差之計算，藉此得知透過無人載具所產製出的正射影像之誤差規模。透過上述之方式評估此誤差規模，探討無人飛行載具影像在無設置控制點所產製出的成果，能否直接應用於地表侵蝕差異分析及地表變動觀測等變動項目上，研究流程如圖 2。

無人飛行載具比較

本研究採用 DJI PHANTOM 4 PRO (圖 3，後以 P4P 稱) 及 PHANTOM 4 RTK (圖 4，後以 P4RTK 稱) 搭配地面基站 D-RTK 2 來執行空拍建模工作。在衛星定位模組上，P4P 僅能接收 GPS 及 GLONASS 兩衛星系統；

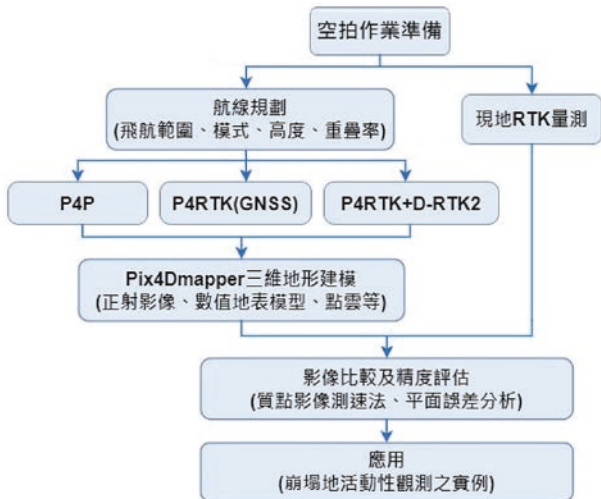


圖 2 研究方法流程圖



圖 3 DJI PHANTOM 4 PRO (P4P)



圖 4 PHANTOM 4 RTK (P4RTK) + 地面基站 D-RTK 2

而 P4RTK 除 GPS 及 GLONASS 外，尚可接收到 BeiDuo 及 Galileo 等兩衛星系統，增加了可接收到的衛星訊號，同時也提升其定位精度，此外，P4RTK 在配合地面基站 D-RTK2 使用時，地面基站可即時提供其觀測資料至 P4RTK 進行差分計算，藉以提高 P4RTK 定位精度。因此，在啟用地面基站 D-RTK2 且正常工作時，P4RTK 整體之定位精度可能會較 P4P 佳，兩者比較如表 1。

表 1 兩無人飛行載具之衛星定位模組及懸停精度比較

DJI PHANTOM 4 PRO (P4P)	
衛星定位模組	GPS 懸停精度
GPS GLONASS	水平： ±0.3 m (視覺定位) ±1.5 m (GPS 定位) 垂直： ±0.1 m (視覺定位) ±0.5 m (GPS 定位)
PHANTOM 4 RTK (P4RTK) + 地面基站 D-RTK 2	
衛星定位模組	GPS 懸停精度
單頻高靈敏度 GNSS： GPS+BeiDou+Galileo (亞洲地區) GPS+GLONASS+Galileo (其他地區) 多頻多系統高精度 RTK GNSS： GPS、GLONASS、BeiDou、Galileo	未啟用 RTK： 水平：±0.3 m (視覺定位) ±1.5 m (GNSS 定位) 垂直：±0.1 m (視覺定位) ±0.5 m (GNSS 定位) 啟用 RTK 且 RTK 正常工作時： 水平：±0.1 m；垂直：±0.1 m

航線規劃

利用 DJI Go 4 及 DJI GS PRO 等兩操作軟體對 P4P 及 P4RTK 來進行航線規劃，於操作介面中針對研究區範圍進行適當圈選後，考量研究區的地勢起伏較大故給定飛航高度為 80 公尺、影像前後及左右重疊率各 80%，另因時間及無人飛行載具電量消耗之考量，不以懸停方式進行影像拍攝，而是採機體定速飛行時直接進行影像之拍攝。完成各個飛行參數設定後，軟體自動生成飛行路線規劃，再視需求進行些許調整。其中以 DJI Go 4 為 P4P 進行的航線規劃，因功能上的限制，採設定好之固定航高 80 公尺飛行（以起飛處為 0 公尺）；而以 DJI GS PRO 為 P4RTK 進行的航線規劃，則可匯入數值地形資料，依研究區之地形起伏採貼地 80 公尺的方式進行飛行。另外，在航線規劃上，P4P 以數條平行之航線進行飛行，P4RTK 則是再增加與原航線垂直之交叉航線飛行。

研究成果及討論

正射影像及 DSM

本研究利用 Pix4Dmapper 軟體進行空拍建模，在 SfM 攝影測量範圍成像技術運算架構下，將無人飛行載具所拍攝的序列影像進行匹配，生成宜蘭力霸產業道路旁崩塌地之正射影像及地表模型，如圖 5。如研究方法提及，於本研究區中有進行航標點之設置並進行現地 RTK 測量，不同於以往在處理序列影像時，會用手動的方式將設有航標點之影像挑選出來，給定該控制點由 RTK 量測所得之座標值，以提高產製成果的精

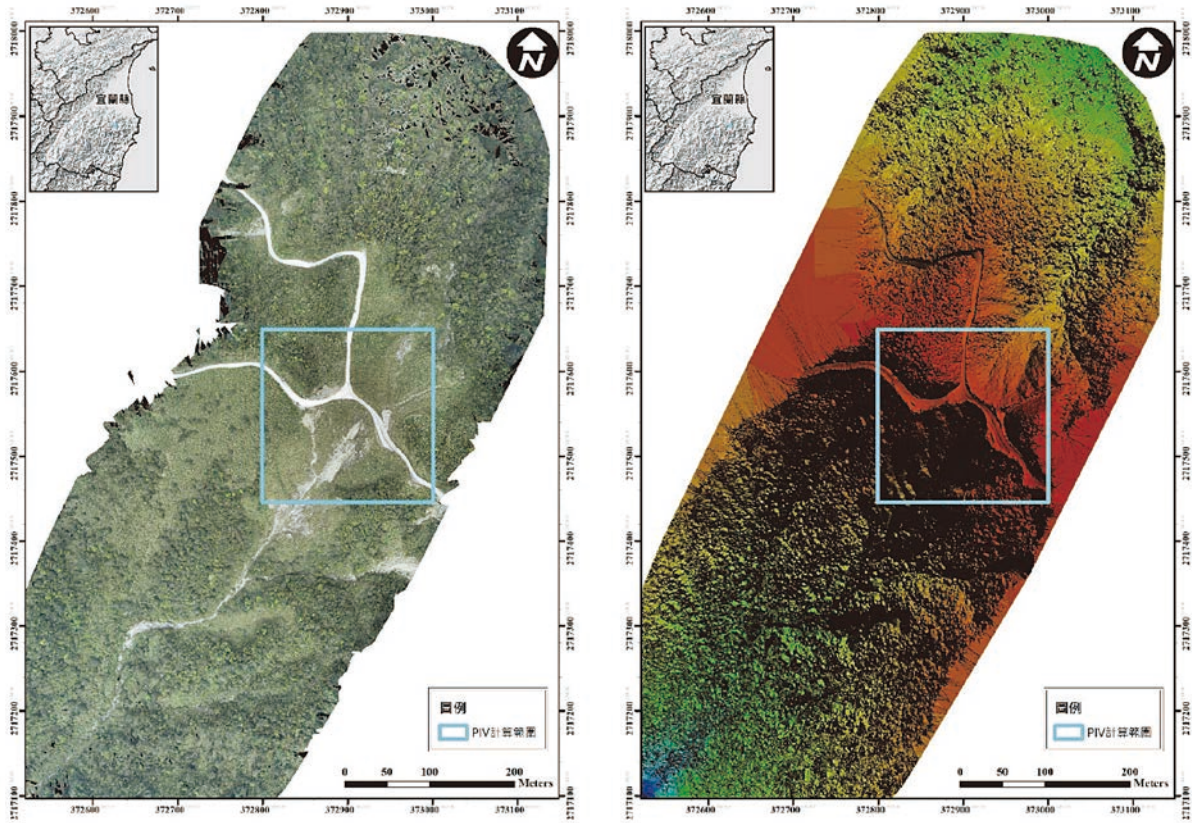


圖 5 力霸產業道路正射影像（左）及 DSM（右）

度。本研究在利用 Pix4Dmapper 產出正射影像及地表模型的過程中，並無手動加入控制點作約束，以利後續進行無人機影像之質點影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）及空間座標資訊的比較。

此研究區面積約為 30 公頃，以 P4P 飛行所獲得之序列影像約 160 至 220 張，以 P4RTK 飛行所獲得之序列影像則為 350 至 400 張，造成此序列影像數量之差異乃航線規劃不同所致，如圖 6（藍點為無人飛行載具所拍攝之影像位置，綠線則為無人飛行載具之航線）；在密集點雲生成的成果方面，前者之數量約落在 2,000 萬至 2,500 萬點，而後者之數量則落在 3,500 萬至 4,000 萬點，似乎與影像數量有直接的關係。但兩者所產製出的正射影像地面解析度（Ground Sampling Distance, GSD）皆在 3.5 至 4.5 公分左右的範圍中。

正射影像之 PIV 比較成果

質點影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）在流體力學的領域已發展多年，在技術逐漸成熟後，除了被應用在河道水流流速分析^[3]、土石流之觀測^[4]等流體研究上，也被運用在大地工程上，如邊坡位移^[5]及崩

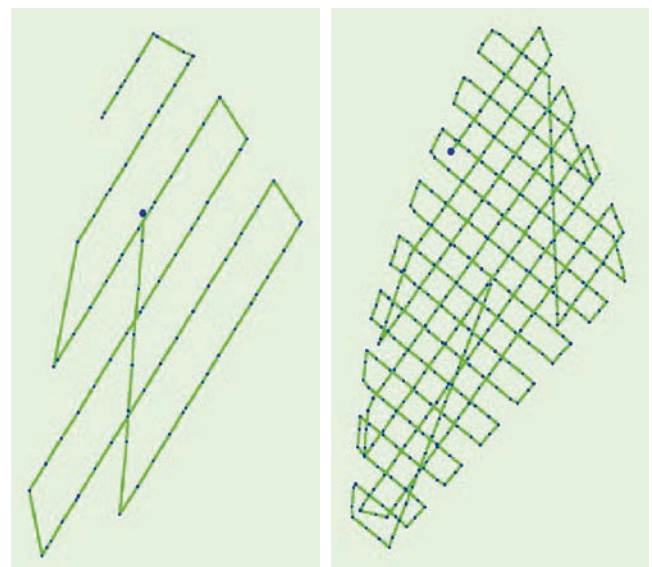


圖 6 透過 Pix4Dmapper 生成 P4P（左）及 P4RTK（右）之航線規劃

塌地活動性之評估^[6]上。此方法係將任兩張影像進行疊合，將影像分割為數個搜尋視窗（window size），透過搜尋視窗之移動（step size）來找到兩影像中關聯性較高的區塊，並分析其水平位移的方向及變量，再配合兩張影像的時間，則可計算其移動速率。

本研究先使用 ESRI ArcGIS 軟體將欲分析之正射影像範圍切割出來（設置航標點之範圍），並以 Lempel-Ziv-Welch (LZW) 無損資料壓縮法的方式進行壓縮，以符合後續質點影像測速法 (PIV) 分析使用之格式需求。本次使用之質點影像測速法 (PIV) 程式為德國 PIVTEC GmbH 所開發的 PIVview2C Demo v.393，透過搜尋視窗 (window size)、搜尋視窗移動量 (step size)、相關模式 (correlation mode) 等參數之設定後，進行分析並輸出成果，如圖 7 至圖 9；圖中箭頭方向為質點的位移方向，而不同的顏色則代表其位移之變量，

可由各圖中右上的圖例計算（由冷色系往暖色系方向為 0 至 50 個 pixel，此正射影像壓縮為 0.1 m/pixel，可將 pixel 數乘以 0.1 換算各個質點之位移量）。

圖 7 為利用 P4P 進行空拍所得的四期正射影像成果，選定任兩期之影像來進行 PIV 比較，PIV 成果顯示其質點位移方向紊亂且變量差異較大，多落 30 ~ 50 個 pixel 間，意即其移動量差異多大於 3 公尺，質點位移方向紊亂方面則可推測有隨機偏差的情況發生。然利用 P4RTK 且開啟地面基站進行空拍所得的正射影像成果（如圖 8），經 PIV 比較後，整體呈現一致性的方向

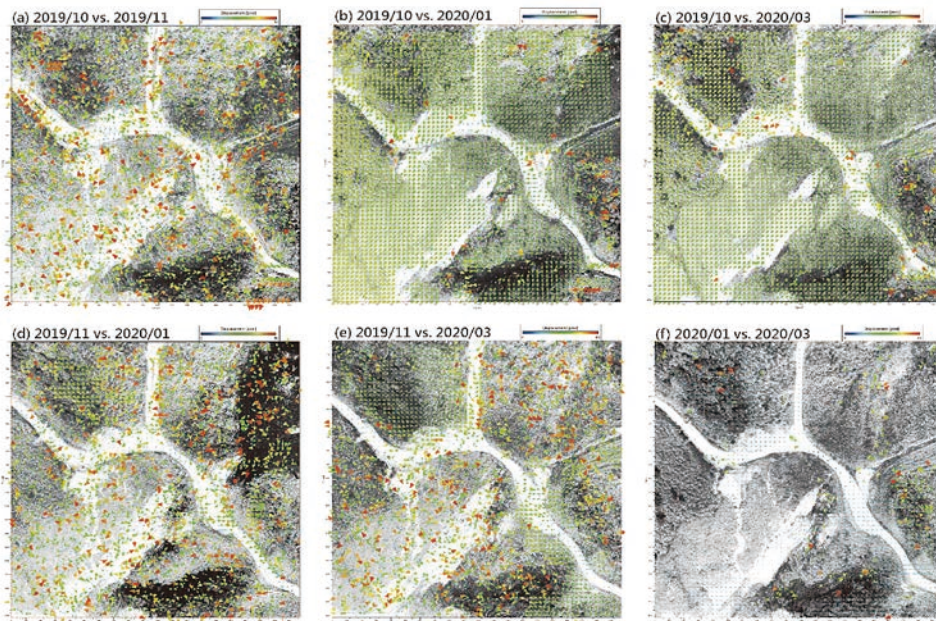


圖 7 P4P 各期正射影像之 PIV 比較

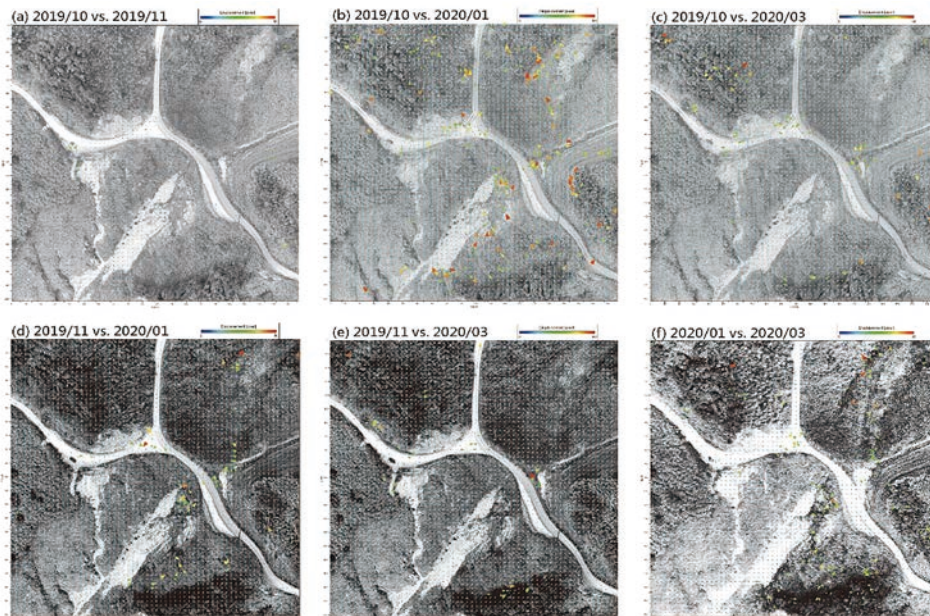


圖 8 P4RTK+D-RTK2 各期正射影像之 PIV 比較

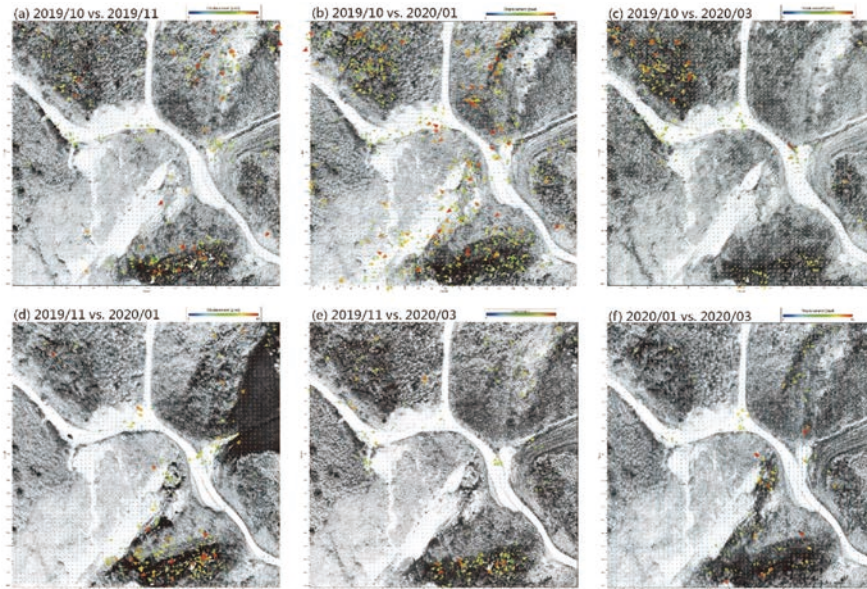


圖 9 P4RTK (GNSS) 各期正射影像之 PIV 比較

移動及較小的變異量，其變量多落在 10 個 pixel 內，意即其偏差值多小於 1 公尺，可推測其為系統性偏差所造成，惟部分質點位移方向紊亂及移動量較大的地方，皆在植被較茂密的區域，推測其受植被生長所影響進而產生較大的變異；以 P4RTK 進行空拍（未開啟地面基站，僅接收 GNSS）所得的正射影像成果（如圖 9），經 PIV 比較後，結果相似於以 P4RTK 進行空拍且開啟地面基站之成果，但在植被茂盛的區域也有出現不規律變化的情況。

倘若將同期利用 P4RTK 進行空拍所得的兩正射影像成果（開啟及關閉地面基站）進行 PIV 比較，其方向多呈一致性且移動變量多小於 10 個 pixel（如圖 10），所得之成果呈現系統性偏差的情況；而利用 P4P 所得影像分別與同期兩 P4RTK 影像進行 PIV 比較後，所得成果則顯示質點移動方向較無規律、變量也較大，呈現隨機偏差的現象（如圖 11）。綜合前述利用 PIV 來評估各無人飛行載具正射影像成果之精度，可得知利用 P4RTK 進行空拍，無論是否開啟地面基站，其

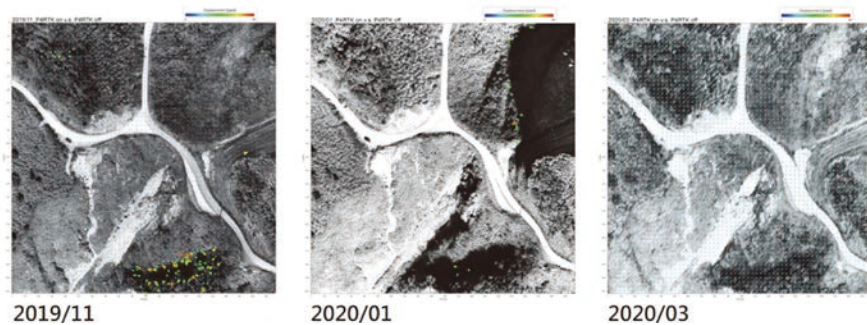


圖 10 P4RTK 與 P4RTK+D-RTK2- 同期正射影像之 PIV 比較

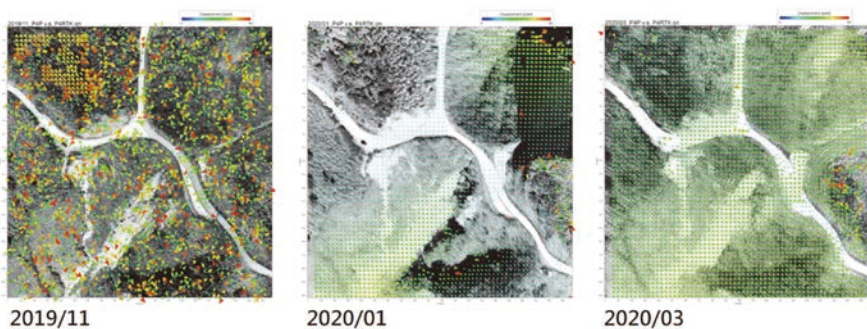


圖 11 P4P 與 P4RTK+D-RTK2- 同期正射影像之 PIV 比較

所得正射影像成果之穩定性較佳、誤差較 P4P 小，且皆呈現系統性的偏差。

RTK 量測資料及正射影像空間資訊比較

為評估本研究產製之各正射影像的空間資訊精度，需取得現地較精確的空間座標才得以進行比較，故於研究區中設置航標點，並使用 RTK 針對各點位進行量測，共取得 21 個點位的空間座標資訊；接著再由無人飛行載具正射影像中搜尋此 21 個點位，並將其空間座標資訊輸出；最後，再將各無人飛行載具正射影像所擷取出來的空間座標資料，與現地 RTK 測量所得之空間座標進行平均誤差及均方根誤差的計算。誤差計算成果顯示：搭配地面基站之 P4RTK 成果與 RTK 測量資料的平面均方根誤差界於 0.02 ~ 0.09 公尺之間，而 P4P 成果與 RTK 測量資料的平面均方根誤差則界於 0.1 ~ 0.8 公尺之間，如表 2 所示。若將現地 RTK 量測之點位空間座標資訊，與透過 P4P 及 P4RTK 正射影像提取出的空間座標資訊置於同一張圖，可明顯看出 P4RTK 正射影像空間座標資訊（黃色點）與 RTK 量測之點位空間座標資訊（藍色三角形）較相近，而 P4P 正射影像空間座標資訊（紅色點）則較前兩者遠，如圖 12 所示。

以此誤差計算成果來看，搭配地面基站做使用的 P4RTK 正射影像成果之精度明顯較 P4P 正射影像成果之精度佳；在不加入控制點所產出的數值地表模型及正射影像之均方根誤差規模在此範圍內是可被接受的，倘若未來使用 P4RTK 在地表起伏較大或不易到達

表 2 正射影像空間資訊與現地 RTK 量測資料之誤差計算

(單位：公尺)

誤差計算項目	座標	平均誤差	均方根誤差
20191112 P4RTK (基站) 與現地量測資料	x	0.679	0.084
	y	-1.120	0.026
	z	0.551	0.028
20200116 P4RTK (基站) 與現地量測資料	x	0.827	0.089
	y	0.035	0.023
	z	-0.400	0.021
20200317 P4RTK (基站) 與現地量測資料	x	1.411	0.075
	y	-0.097	0.022
	z	-0.695	0.020
20191112 P4P 與現地量測資料	x	-4.863	0.797
	y	2.122	0.116
	z	-59.126	2.691
20200116 P4P 與現地量測資料	x	-0.496	0.513
	y	0.556	0.366
	z	-31.397	1.039
20200317 P4P 與現地量測資料	x	-0.995	0.164
	y	0.650	0.369
	z	-69.225	0.273

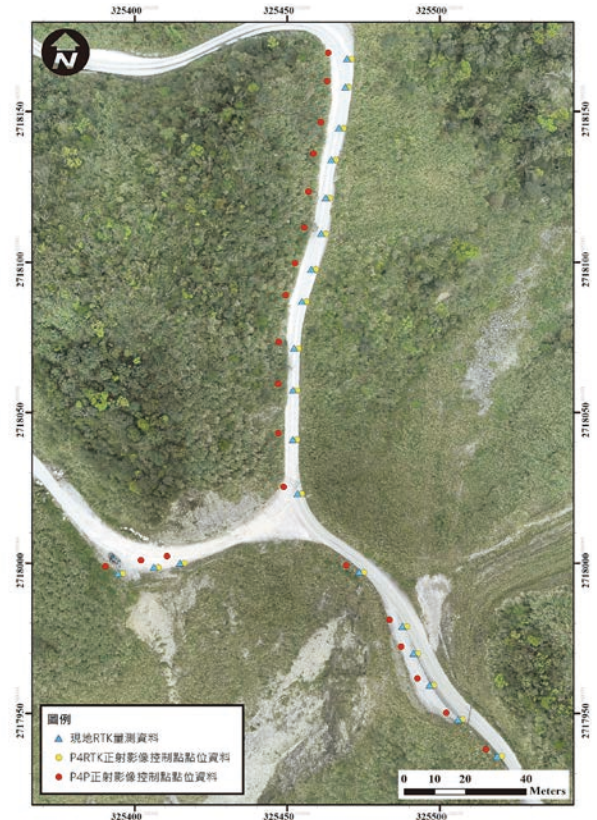


圖 12 現地 RTK 測量資料與無人飛行載具正射影像空間座標資訊相對位置圖

之處進行空拍建模時，則可不同於以往為提升成果精度而進行航標點之佈設及量測，大幅度降低在危險處佈設航標點之風險，同時也節省許多時間。

應用—桃園市復興區光華里

2021 年初，桃園市復興區光華地區一處農用道路有崩塌地持續滑動現象，故選定此處滑動範圍，評估無人飛行載具空拍資料對山崩活動性的可行性及應用性。本研究分別於 2021/02/05、2021/02/24 及 2021/07/30 進行三次空拍建模，從 2 月至 7 月的正射影像中可看出此崩塌地具有高度的活動性（圖 13）。此處套疊山崩地質資訊雲端服務平台之五萬分之一地質圖，所在地之地層為水長流層（巴陵層），以暗灰色至灰色之硬頁岩及板岩為主，下段偶含灰色細粒泥質薄層砂岩 [7]。地質年代屬漸新世晚期；圖中圈繪處為本崩塌地範圍（圖 14）。

如前面所述，質點影像測速法（Particle Image Velocimetry, PIV）除被用來觀察流體外，也被應用在崩塌地活動性的評估上，故本研究也嘗試將此處之正射影像透過質點影像測速法進行分析，以此得知崩塌地整體移動方向及變量，由圖 15 可看到在崩塌地坡

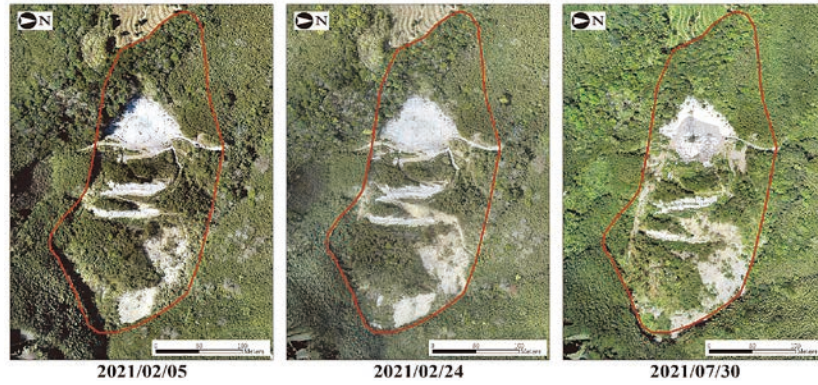


圖 13 桃園市復興區光華農用道路約 5 公里處三期正射影像

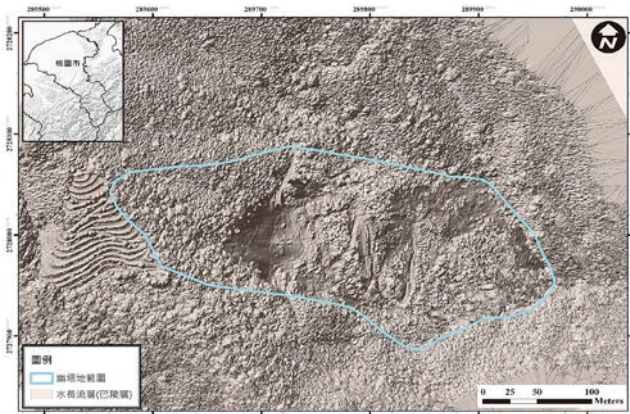


圖 14 桃園市復興區光華里光華農用道路約 5 公里處崩塌地

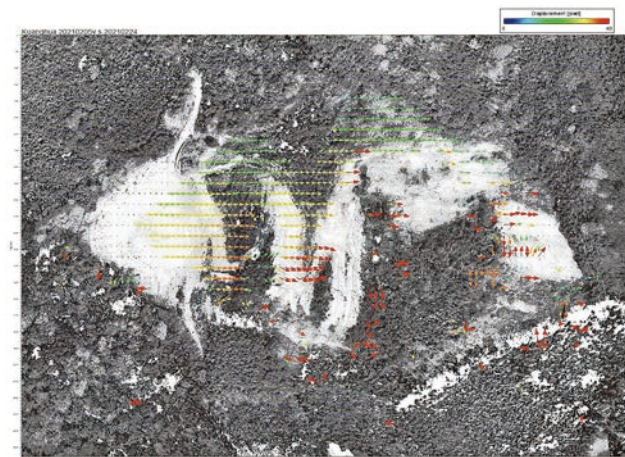


圖 15 無人飛行載具建模與 PIV 應用於觀測地表變動 (2021/02/05 vs. 2021/02/24)

腹的部分明顯具有較大的位移變量，在不到一個月的時間，發生了超過 3 公尺的滑動，此 PIV 呈現出的成果，也符合兩次對於崩塌地的調查，可驗證測繪級無人載具空拍成果可應用於山崩活動性觀測。

結論

本研究使用消費級無人飛行載具 DJI PHANTOM 4 PRO (P4P) 及測繪級無人飛行載具搭配地面基站 D-RTK 2 的 PHANTOM 4 RTK (P4RTK) 兩款搭載不同

衛星定位模組之無人飛行載具，於同一地區，利用未加入地面控制點所拍攝的影像產製之正射影像成果，透過質點影像測速法 (Particle Image Velocimetry, PIV) 進行分析並探討兩者所產製的正射影像成果之穩定性，也透過平面誤差計算，得知測繪級無人飛行載具 P4RTK 所產製出的正射影像成果之誤差規模在可接受之範圍內，大幅增加空拍建模之便利性。此外，也透過 P4RTK 於桃園市復興區光華產業道路的崩塌地進行空拍建模，將正射影像成果及 PIV 應用於地表變動觀測，可確實應用於山崩活動性觀測上。

誌謝

本研究感謝經濟部地質調查及礦業管理中心與國科會專題研究計畫 (MOST 110-2625-M-047-001-) 支持，感謝應用地質組孫武群、李祖鈺協助野外調查與測繪工作。

參考文獻

1. Margaret Kalacska, Oliver Lucanus, J. Pablo Arroyo-Mora, Étienne Laliberté, Kathryn Elmer, George Leblanc, Andrew Groves, "DACCuracy of 3D Landscape Reconstruction without Ground Control Points Using Different UAS Platforms," Drones, Vol. 13, No. 4(2), (2020).
2. 林啟文、高銘健 (2009), 蘇澳「臺灣地質圖幅及說明書 1/50,000」第二版, 五萬分之一臺灣地質圖及說明書, 第 16 號, 經濟部中央地質調查所。
3. 賴進松、韓仁毓、張文鑑、劉寅春、康仕仲、謝其泰、譚義績、黃振家、李豐佐、林彥廷、林聖峯、張睿宇、溫明璋 (2015), 「UAV 影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析」, 中國土木水利工程學刊, 第二十七卷, 第三期, 第 231-240 頁。
4. Theule, J.I., Crema, S., Marchi, L., Cavalli, M., and Comiti, F. (2018), "Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field," Nat. Hazards Earth Syst. Vol. 18, No. 1, pp. 1-13.
5. 潘在祥、徐松圻、邱振原 (2014), 「應用質點影像測速技術於崩塌地之滑動方向分析」, 2014 年岩盤工程研討會。
6. 魏倫璋、林榮潤、黃全溢、張國欽、蕭震洋、柯建仲 (2021), 「無人飛行載具與質點影像測速法於崩塌地活動性評估之應用」, 中興工程, 第一百一十五期, 第 3-9 頁。
7. 塗明寬、陳文政 (1991), 竹東「臺灣地質圖幅及說明書 1/50,000」, 五萬分之一臺灣地質圖及說明書, 第 13 號, 經濟部中央地質調查所。