



以無人機應用崩塌土方量推估與後期植生復原監測

吳芝伶^{1,*} 葉美伶² 周天穎³

¹ 易圖科技股份有限公司規劃師

² 逢甲大學空間地理資訊系統研究中心空間資訊與環境規劃處處長

³ 逢甲大學空間地理資訊系統研究中心主任

摘要

臺灣地形陡峭，又因九二一大地震使全臺地層鬆動，導致每逢極端降雨時，常產生崩塌災害。為即時掌握災後資訊，本文利用具機動性、高解析力之無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV），於 2017 年 6 月拍攝南投縣鹿谷鄉小半天之災後崩塌情形。經分析，崩塌總面積為 20,983 m²，其中 7,007 m² 的面積為裸露崩塌區域，陷落區面積為 13,976 m²，導致崩塌上游形成堰塞湖，其面積 1,114 m²。經 UAV 拍攝現場產製的數位地表模型（Digital Surface Model, DSM）資料，與災害前之數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）作土方量分析，崩塌土方遷移量為 17,032 m³。經 UAV 即時掌握災後資訊，即可迅速進行決策，施作因應工程及架設自動監控系統，若未來發生災害，即可透過自動監控系統，並搭配防災專員協助疏散居民。

關鍵詞：無人機、數位地表模型、土方量、崩塌地、植生復原監測

* 通訊作者：吳芝伶

電子郵件：bao@gis.tw

（收件日期：2023 年 2 月 3 日；修正日期：2023 年 4 月 21 日；接受日期：2023 年 4 月 22 日）



UAV Applications in Landslide Earth Quantity Estimation and Revegetation Monitoring

Chih-Ling Wu^{1,*}, Mei-Ling Yeh², Tien-Yin Chou³

¹Planner, EasyMap Digital Technology Inc.

²Manager, Geospatial Information & Environmental Planning Department, GIS Research Center, Feng Chia University

³Director, GIS Research Center, Feng Chia University

Abstract

Taiwan often suffers from landslides after extreme precipitation due to the widespread steep terrain and stratum loosening caused by the 921 earthquake. To collect instant disaster information, this study utilized highly mobile UAVs with high camera resolution to record the landslide that occurred in Hsiao Pan Tien, Lugu Township, Nantou County in June 2017. The analysis revealed that the landslide area was 7,007 m², with a 13,976 m² zone of depletion at the crown and the formation of a 1,114 m² landslide dam. By comparing the Digital Surface Model (DSM) captured by the UAV with the Digital Elevation Model (DEM) made before the disaster, the analysis showed that the landslide volume was 17,032 cubic meters. The UAV proved to be capable of collecting real-time post-disaster information, which can assist in rapid decision-making. By implementing onsite devices and setting up automatic monitoring systems, disaster prevention specialists can use this information for resident evacuation.

Keywords: unmanned aerial vehicle, digital surface model, landslide volume, landslide, vegetation recovery monitoring

* Corresponding Author: Chih-Ling Wu
E-mail: bao@gis.tw

壹、緒論

臺灣山區地形陡峭，自 1999 年發生九二一大地震後，造成全臺地層鬆動（洪逸如，2012；鄒明城、孫志鴻，2004），又因近年氣候變遷下的颱風及極端降雨等現象，導致山區崩塌、地滑及土石流等災害頻繁發生（施虹如等，2015）。因此在災前準備、災中應變，以及災後的整治，須快速且準確地採取各項防災措施與應變策略，減少民眾生命財產的損失，並且防止二次災害的發生，此為一重要之課題。

在防治工作前，首要動作是掌握周遭環境資訊，得到資訊後才可即時分析與判斷。當一處發生崩塌時，傳統方法可即時派遣監測人員進行崩塌勘查，但透過人力勘查崩塌地，將耗費人力與時間成本。故以遙感探測（Remote Sensing）方式作崩塌監測除去現地勘查之限制，並透過此方法進行崩塌面積及位置資訊之分析，但其中的航空照片或衛星影像因受雲朵遮蔽等天氣限制，且拍攝循環週期較長，無法即時更新災後影像。為彌補衛星影像與航空影像之限制，無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）具高機動性、高解析力，以及較不易受天氣限制等優點（謝佳諭、陳信安、蔡孟倫、林奕翔、張瑞隆、羅正方，2018），廣泛運用於空中攝影、地圖拍照、地質地形勘查、軍事用途等，亦可與現有之地形圖、航空照片，以及衛星影像等圖形整合及套疊，不但可在短時間內瞭解區域內狀況，更可簡化調查所需人力，且無人員傷亡之顧慮。因此，可於具危險性或人力無法到達之地區進行任務，其多利用於環境調查、變遷監測與災區現況等較難以人力進行調查之即時資訊蒐集，有關衛星影像、航空照片與無人機影像之各參數比較見表 1。

表 1 各載具影像比較

參數	衛星影像	航空照片	無人機影像
飛行高度	500 km 以上	100 m ~ 10 km	m-km
地面解析力	m-km	cm-m	mm-m
拍攝範圍	km ²	km ²	m ² ~ km ²
拍攝週期性	半個月至一個月	半年	即時（無雨）
拍攝規劃	全自動	半自動	可全自動
雲覆蓋限制	常發生	偶爾發生	不常發生
應用類型	大尺度應用，如：海洋、森林、氣溶膠研究	中尺度應用，如：測繪、環境調查、城市 3D 模型建立	小至中尺度應用，如：災害監測、建物 3D 模型建立

資料來源：楊明德、許鈺群、曾信鴻、曾偉誠（2019）與 Eisenbeiss（2011）。

南投鹿谷鄉小半天因 2017 年 6 月 1 日的豪雨，於 6 月 3 日東埔蚋溪左岸邊坡發生崩塌，且河道堵塞，發生崩塌的區域形成堰塞湖。後續派遣無人機進行崩塌地拍攝，除測量出崩塌之面積外，亦透過高空角度拍攝崩塌地之樣貌，經空中三角測量進行拼接，可產出正射影像及數值地表模型（Digital Surface Model, DSM），並計算崩塌之土方遞移量，於短時間內掌握崩塌土方遞移之資訊。

貳、研究設計與實施

一、研究區域

本研究區域位於南投縣鹿谷鄉竹林村小半天段 1057-1 地號，TWD97 地理坐標位於 224706.478, 2622736.159（如圖 1），海拔約 630 m，該區有東埔蚋溪經過，其為濁水溪上游支流，平均年雨量約 2,800 mm。該地區於 2017 年 6 月 2 日至 4 日期間發生豪雨，其有效累積雨量達 605 mm，造成河流左岸崩塌產生堰塞湖；其下游 4.5 km 內無保全住戶，但已損毀一棟木造屋。因崩塌現地不易到達，故本研究將利用 UAV 快速蒐集此處的災後地理資訊。

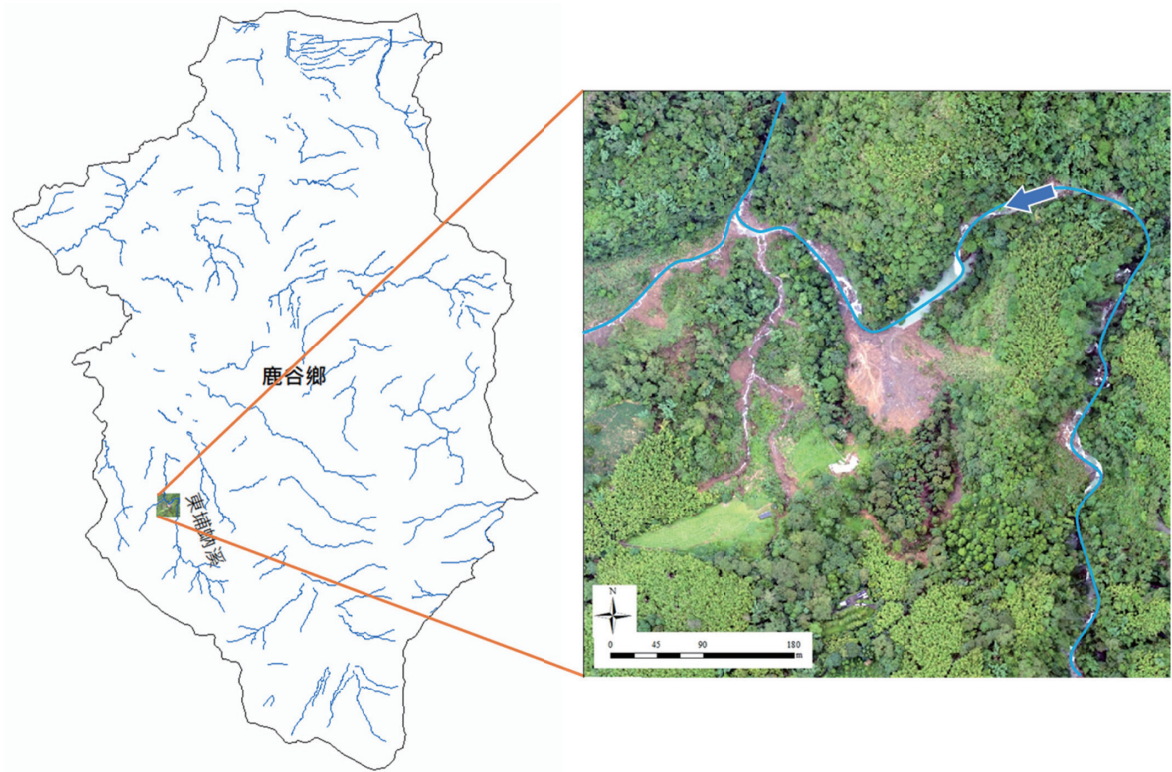


圖 1 研究區域位置圖

資料來源：本研究繪製。

二、研究材料

（一）無人機（UAV）

本研究使用多旋翼無人機（如圖 2），其特性、功能及規格如下。

1. 航高 500 m；滯空時間 20 分鐘。

2. 旋翼無人飛機具垂直起降能力（ 2 m^2 內完成起降作業），起降場為平坦之地面或平面（如車頂）。
3. 最大航程 14 km；最大可承受風速 10 m/s。
4. 內建通訊裝置，最大可控制範圍 7 km。
5. 動力採鋰電池；由無刷馬達推動螺旋槳前進。
6. 內建飛航控制器，可自動導航拍照及起飛降落；且具自動返航功能，電力不足或超出作業範圍時會自動返航。
7. 相機有效畫素 1,240 萬，快門 1/8000 秒至 8 秒。



圖 2 本研究所使用之無人機

資料來源：DJI (n.d.)。

（二）數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）

一般開放式資料庫僅提供 20 m 解析度之 DEM，但因 UAV 所產製之 DSM 地面解析度大多為 20 cm 以下，為避免分析資料的精細程度差異太大，故本研究向內政部地政司申請 2010 年至 2012 年產製的 1 m 地面解析度 DEM，以其進行災後地理資訊空間分析。

三、研究方法

（一）執行 UAV 空拍任務

於空拍作業前蒐集預計飛行日的氣象資料，以及透過 Google Earth 軟體蒐集崩塌地周遭之地形、海拔高度，並確認該區域是否為飛航管制區。針對研究區域進行空中垂直拍攝，使用旋翼型無人飛行載具，利用系統控制航道以 450 m 的高度進行自主飛行拍攝，其照片前後與左右重疊率各為 80%，以供後續多幅影像鑲嵌，完整呈現任務區域影像，並使其作為後續分析之重要資訊。

（二）空中三角測量

當人以左右兩眼分別注視由二個不同攝影位置對同一地區所拍攝之相片時，便會看到三維的立體影像，此自然現象稱為「立體觀察」。立體觀察可用光學儀器或肉眼觀察，而相片

判讀時藉由立體觀察幫助辨別物體種類、測定其高度、判斷地形之斜面坡度，尤其以細部地物判讀分析時，立體觀察為最常見之基本方法。透過航空立體像取得 DEM 已經是一項成熟技術，其量測容易、大範圍且成本低。其原理簡單來說，就是從兩張重疊的空拍相片地區，還原出空照時的三維地形（Wolf and Dewitt, 2000），然後進行地形量測。

而空中三角測量之幾何結構成像如圖 3，圖中的兩張空照是由不同姿態的攝影機所拍攝，而向量 B 是兩張空照的光學垂直軸之距離。因為兩張照片只有移動 x 方位，故此二垂直軸是平行的。圖中物件的（地面）坐標為 (X, Y, Z) ，與第一張空照的相機坐標 (x', y', f) 重疊，假設第一張空照是從地面坐標 $(0, 0, 0)$ 處拍攝，而第二張空照只往 x 軸移動距離 B ，故第二張空照是從地面坐標 $(B, 0, 0)$ 處拍攝。

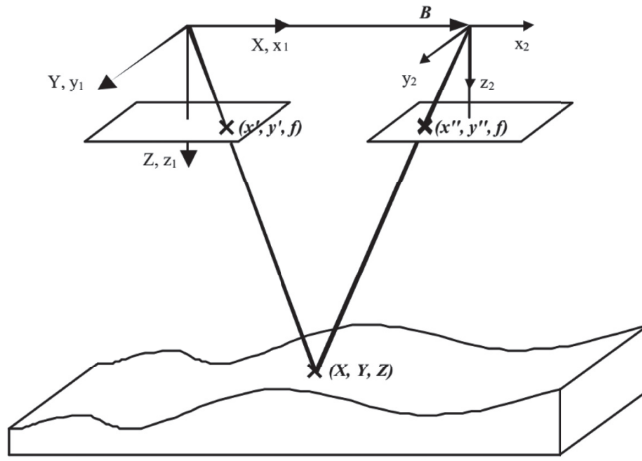


圖 3 立體像對量測原理

資料來源：Heimonen, Hannuksela, Heikkilä, Leinonen, and Manninen (2001)。

從以上說明，任意一個物體點 $P(x, y, z)$ 在第一、二張空照中的相機坐標可以下列式子呈現。

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & z'' \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X - B & Y & Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

當距離 B 、相機的焦距 f 和視差 $x' - x''$ 是已知時，可以下列視差方程式求解物體坐標。

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} = \frac{B}{x' - x''} \begin{bmatrix} x' & y' & f \end{bmatrix} \quad (3)$$

透過這樣的觀念使用精確的機制去形成基線 B ，使用亞像素程序以確定（測量）精確的空照 x' 、 y' 與 x'' ，並使用精確的相機校準來推估焦距 f (Heimonen et al., 2001)。

（三）影像處理

本研究將使用 Agisoft PhotoScan 影像處理軟體分析三維空間坐標的影像，利用演算法將照片一一匹配 (Fisher, Dawson-Howe, Fitzgibbon, Robertson, and Trucco, 2005; Szeliski, 2010)，軟體會從照片中提取特徵點，接著利用相機參數校準，以彌補照片系統性的畸變（圖像校正）(Heimonen et al., 2001)，將經校準的特徵點皆展示於空間中會形成點雲模型。空間中每 3 個點連線形成 1 個面，將所有點連線後可重建出三角網格模型 (Triangular Irregular Network, TIN)，並產出 DSM，再依高度分別套上不同顏色則可渲染出地表高程，明顯可以分辨崩塌地；而正射影像的部分是將校準好的照片紋理渲染到 TIN 模型，並將 TIN 以平面呈現，即產出正射影像。軟體整體操作流程依序為照片對齊（特徵點萃取）、優化對齊（相片校準）、建立點雲、模型建立、紋理建立、建立 DEM、建立正射拼接，如圖 4 所示。

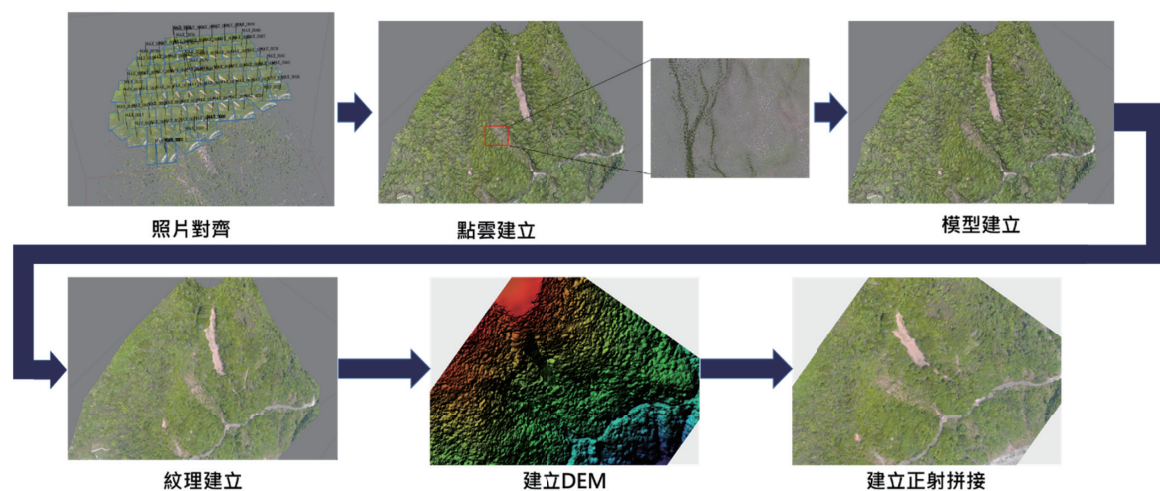


圖 4 正射影像拼接軟體操作流程

資料來源：本研究繪製。

（四）崩塌土方量計算

本研究參考 Hsiao, Lin, Chen, and Chang (2014) 各期所產製的數值地形比對前述的差分校準法 (Procedure of Calibrating Multi-Temporal DEMs)，其計算土方遞移量所需之基本資料包含崩塌前及崩塌後之地形網格資料。分析原理為網格計算，是將後期網格資料的同一地理位置之網格值扣除前期同一地理位置之網格值，扣除後為負值的網格，即為漸少的高程；扣除後為正值的網格，為增加的高程，將各高程變異結果網格資料值乘上網格基本單位尺寸，即為整體土方遞移量（分析示意圖如圖 5）。本研究利用崩塌前 2010 年至 2012 年 1 m 解析度的 DEM，崩塌後之地形資料則以 UAV 拍攝產製之 0.12 m 解析度之 DSM，利用 ArcGIS 將兩期之地形資料疊合後，利用軟體的土方量分析工具與網格計算工具進行土方遞

移量計算。因計算之部分為土方變化區域，該區域於拍攝時已形成崩塌裸露地，因此崩塌區域高程無樹高之影響；在不需考量樹高的前提下，直接使用 ArcMAP 的空間分析模組即可進行地形變化之比較與分析。本研究在初步分析土方遞移量後，會再將減少與增加的變異結果網格值分別統計，以表示土方崩落量與土方堆積量。

網格內的值表示高程

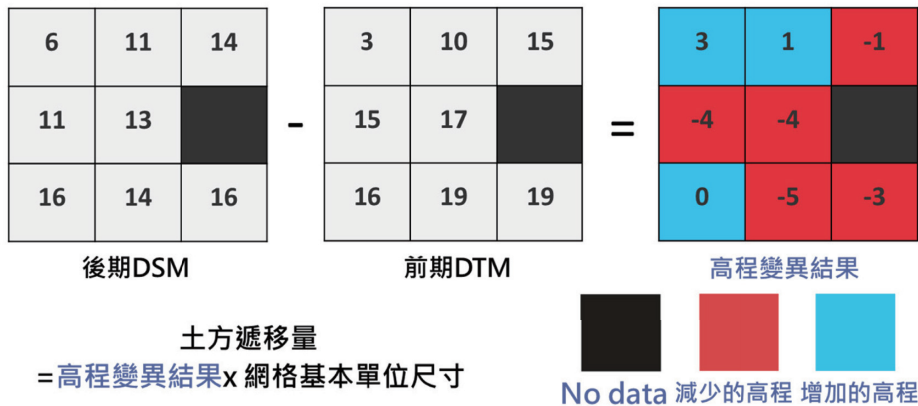


圖 5 土方遞移量計算示意圖

資料來源：Hsiao et al. (2014)。

四、研究流程

本研究於 2017 年 6 月利用無人機拍攝小半天崩塌情形，進行影像後製處理產出正射影像、DSM，判斷崩塌範圍，並利用災前之 DEM 與本研究上述方法所產製之 DSM，進行崩塌土方遞移量分析，分析後的數據可作為處置建議之參考依據。空拍所產製之正射影像與 2017 年 11 月及 2020 年 4 月無人機正射影像進行崩塌地長期監測，以瞭解崩塌地植生恢復之狀況，研究流程如圖 6。

參、結果與討論

本研究於 2017 年 6 月 13 日上午於小半天進行空拍作業，飛行高度設定為 450 m，前後及左右重疊率各為 80%。空拍作業完成後進行影像後處理，其所得之正射影像資訊如表 2，三期之 UAV 影像地面解析度皆為 15 cm 以下，可清晰判別影像中之災害情形。

利用此正射影像進行測量分析（如圖 7），經分析結果崩塌的總面積為 20,983 m²，其中崩塌裸露區域面積為 7,007 m²，崩塌陷落區面積為 13,976 m²，崩塌地冠部具有明顯的張力裂縫 45 處，冠部上方有產業道路經過，坡面的排水皆由路面往崩塌區域漫流。使用 ArcGIS 進行計算，崩塌土體滑落堆積產生 6 m 高的天然壩，形成迴水長度 101 m，平均寬 17 m，迴水面積 1,145 m²，壩體後方蓄水體積為 4,458 m³。經研判，此崩塌區位於東埔蚋溪之凹岸，

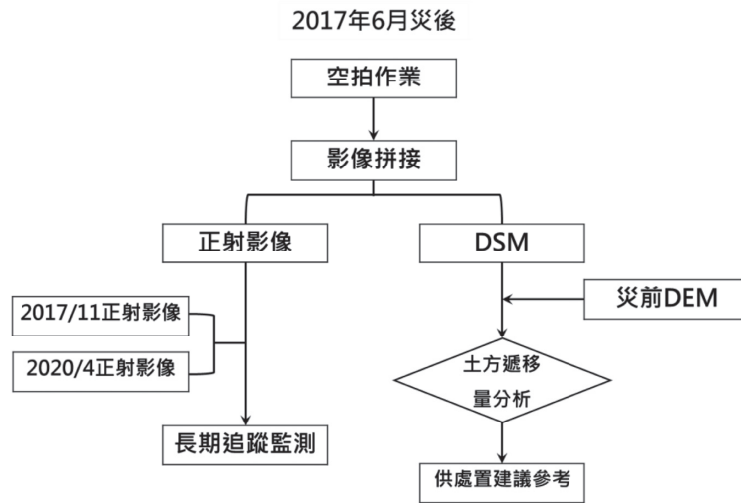


圖 6 本研究流程

資料來源：本研究繪製。

表 2 UAV 拍攝影像資訊

影像資訊	第一次監測	第二次監測	第三次監測
拍攝期間	2017 年 6 月	2017 年 11 月	2020 年 4 月
飛行高度 (m)	452	359	782
照片數量 (張)	79	398	61
地面解析度 (cm/pix)	12	9	7

資料來源：本研究整理。



圖 7 2017 年 6 月所拍攝之正射影像

資料來源：本研究繪製。

又經歷 6 月 3 日至 4 日連續 2 日的豪雨，總有效累積雨量達 605 mm，造成凹岸坡腳沖刷，以致河道左岸崩塌，形成堰塞湖。

進一步分析崩塌裸露區範圍內，本研究利用 UAV 影像後處理所產製的 DSM 進行地形分析，（如圖 8），其崩塌地區域之海拔高程介於 580 ~ 625 m 之間，崩塌冠部至東埔蚋溪約有 45 m 的高程差；以坡度分布圖觀察平均坡度為 36.8°，崩塌地冠部較陡，愈靠近河道坡度愈趨緩；透過 3D 模型量測崩塌土體所造成的天然壩高約 6 m，堵住東埔蚋溪形成堰塞湖，且溪水已自然溢流至下游，出流量與上游進水量有達平衡，暫時無潰壩風險。

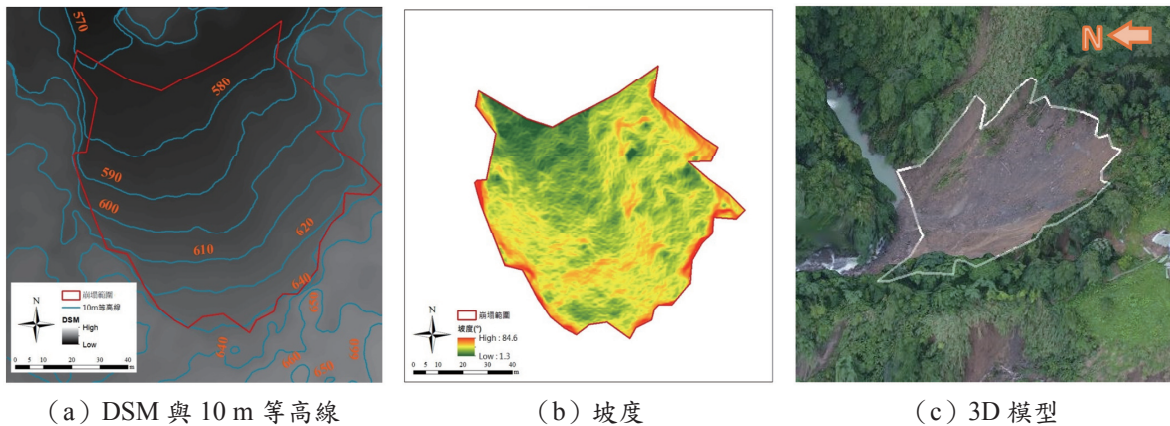


圖 8 小半天崩塌地地形因子分析圖

資料來源：本研究繪製。

比較 2017 年 UAV 拍攝產製的 DSM 與 2012 年的 DEM，針對崩塌裸露區範圍內的土方變化程度，觀察土方量變化分的減少與增加，若減少則表示發生崩落現象（如圖 9）。崩落現象多發生於崩塌範圍內的陷落區，以黃、橘與紅色表示，顏色愈深表示崩落愈嚴重，紅色區塊崩落最嚴重，經分析其網格每平方公尺減少 10 ~ 14 m 高程差的土方，其黃、橘與紅色之崩落面積為 4,251 m²，分析之崩落土方遞移量計 17,032 m³（如表 3）。崩塌地隆起區土方有堆積的情形，以藍色表示，顏色愈深亦代表堆積愈多，面積為 2,763 m²，崩塌範圍內之堆積土方遞移量為 9,137 m³，堆積最多之處為崩塌地的下方邊坡。另外，透過 2012 年 ArcGIS 的 DEM 與 2017 年 UAV 所產製之 DSM 分析計算，可以得到東埔蚋溪形成高約 6 m 的天然壩體，並且產生堰塞湖；本研究亦利用兩期的 DSM 與 DEM 初步分析堰塞湖的蓄水量，推估其蓄水量為 4,458 m³。

本研究於 2017 年 6 月進行第一次無人機的災後拍攝，如前述崩塌裸露區面積為 7,007 m²，針對此區域進行後續長期監測，故於同年 11 月再次拍攝同一崩塌地（如圖 10），發現裸露地面積為 4,525 m²，2020 年 4 月再進行 UAV 空拍追蹤，經分析裸露面積已減少至 499 m²（如表 4），表示此處植生恢復良好。

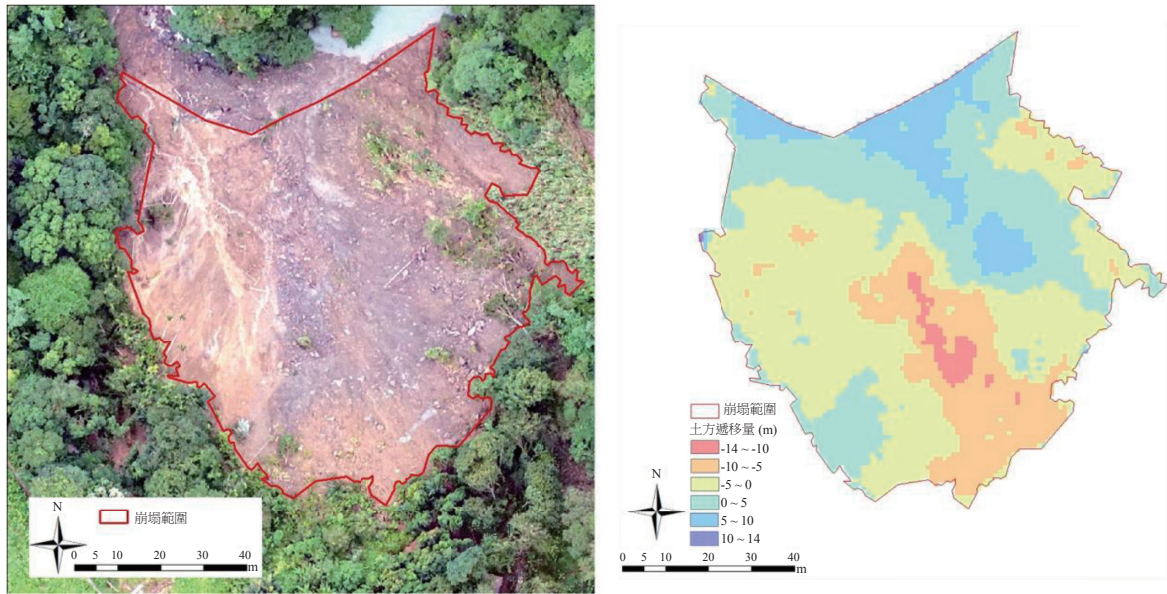


圖 9 遞移土方量分布圖

資料來源：本研究繪製。

表 3 崩塌裸露區的崩落與堆積量

單位	崩落區	堆積區
面積 (m^2)	4,251	2,763
土方遞移量 (m^3)	17,032	9,137

資料來源：本研究整理。

透過無人機蒐集災後即時、高解析度之影像，除可節省時間及人力成本，執行無法至現地調查之災害地點的困難、掌握第一時間的災害資訊之外，還可利用空拍正射影像、DSM 及立體模型之方式呈現災害地理資訊，快速估算崩塌面積及土方量。依照所拍數的地理資訊，可即時研擬緊急處理工程，避免第二次災害發生。後續建置自計式雨量站，可隨時掌握此災害點的雨量資訊，協助預防性疏散。

致謝

本研究由農村發展及水土保持署南投分署補助，感謝所提供之近期空拍照片與 1 m 地面解析度 DEM 之資料，特此謝忱。

影像日期：2016年4月



(a) 災害前期衛星影像

影像日期：2017年6月



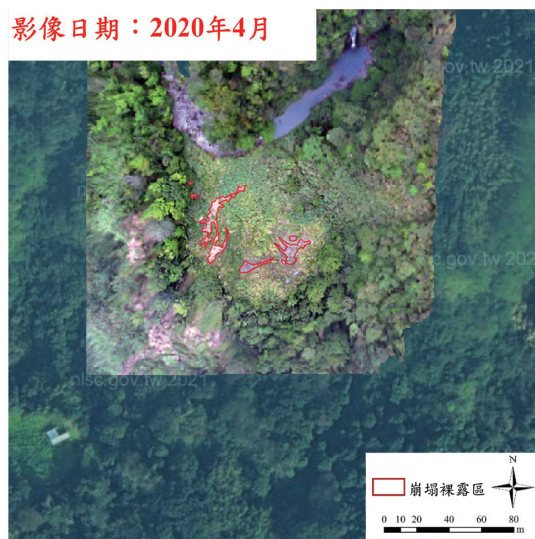
(b) 災害後第一次監測 UAV 影像

影像日期：2017年11月



(c) 災害後第二次監測 UAV 影像

影像日期：2020年4月



(d) 災害後第三次監測 UAV 影像

圖 10 災害前與災害後崩塌（裸露地）監測之情形

資料來源：本研究繪製。

表 4 災後崩塌（裸露）地之面積

影像資訊	第一次監測	第二次監測	第三次監測
拍攝期間	2016 年 4 月	2016 年 11 月	2020 年 4 月
崩塌（裸露）地面積 (m ²)	7,007	4,525	499

資料來源：本研究繪製。

參考文獻

- DJI, n.d., 〈Phantom 4 Pro V2.0〉, 《DJI》, https://www.dji.com/tw/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=landing_page (瀏覽日期: 2023 年 1 月 30 日)。
- 施虹如、吳亭燁、蘇元風、劉哲欣、李欣輯、陳永明、張志新, 2015, 〈極端降雨事件下淺層崩塌潛勢衝擊評估分析〉, 《工程環境會刊》, 34, 頁 77-95。doi:10.6562/JEE.2015.34.5
- 洪逸如, 2012, 《山區道路邊坡致災兩型分析與風險頻率模型初探——以大甲溪流域為例》, 國立成功大學土木工程學研究所碩士論文。
- 鄒明城、孫志鴻, 2004, 〈資料探勘技術在集集大地震引致山崩之研究〉, 《地理學報》, 36, 頁 117-131。
- 楊明德、許鈺群、曾信鴻、曾偉誠, 2019, 〈無人機於精準農業之應用〉, 《科儀新知》, 220, 頁 20-39。
- 謝佳諭、陳信安、蔡孟倫、林奕翔、張瑞隆、羅正方, 2018, 〈無人飛機系統於空間資訊與防災科技之應用〉, 《國土測繪與空間資訊》, 6 (2), 頁 75-95。
- Eisenbeiss H., 2011, "The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping," in *Photogrammetric Week 2011*, Berlin, Germany: Wichmann, 135-145.
- Fisher R. B., Dawson-Howe K., Fitzgibbon A., Robertson C., and Trucco E., 2005, *Dictionary of Computer Vision and Image Processing*, Chichester, UK: Wiley.
- Heimonen T., Hannuksela J., Heikkilä J., Leinonen J., and Manninen M., 2001, "Experiments in 3D Measurements by Using Single Camera and Accurate Motion," in *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Piscataway, NJ: IEEE, 356-361. doi:10.1109/ISATP.2001.929051
- Hsiao C.-Y., Lin B.-S., Chen C.-K., and Chang D.-W., 2014, "Application of Airborne LiDAR Technology in Analyzing Sediment-Related Disasters and Effectiveness of Conservation Management in Shihmen Watershed," *Journal of GeoEngineering*, 9(2), 55-73. doi:10.6310/jog.2014.9(2).2
- Szeliski R., 2010, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, London, UK: Springer-Verlag London. doi:10.1007/978-1-84882-935-0
- Wolf P. R., and Dewitt B. A., 2000, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 3rd ed., Boston, MA: McGraw-Hill.