



無人航空測繪於 災害應變輔助決策應用 — 以新竹秀巒大規模崩塌潛勢區為例

劉哲欣／國家災害防救科技中心 研究員

蘇文瑞*／國家災害防救科技中心 研究員、國立臺灣大學土木工程學系 副教授

楊鈞宏／國家災害防救科技中心 佐理研究員

李士強／國家災害防救科技中心 副技術師

張志新／國家災害防救科技中心 研究員、組長

黃俊宏／國家災害防救科技中心 助理研究員

陳毓樺／國家災害防救科技中心 佐理研究員

攝影測量是一種相對簡單且廣泛應用的無人機測繪技術。它通過拍攝照片，獲取地面的二維影像資料。攝影測量可以用來建立數值表面模型，提供了對地形的基本了解。此外，攝影測量還能提供正射影像，這對於長期監測潛在災害區域的環境變化非常有用。這些影像可以幫助我們了解災害環境的時間演變，為後續災害處理決策提供重要參考。因此，攝影測量的成果可應用於潛在災害區域的監測、地表位移、高程變化、以及崩塌土方量的評估等多方面。

相較之下，光達系統的應用稍微複雜。光達系統使用脈衝雷射掃描地面，能夠產生高精度的三維點雲數據。這使得光達系統能夠建立更詳細和準確的地形模型，包括地表特徵、建築物、植被等。然而，光達系統的成本高，技術門檻較高，並且在災後需要更多的時間和資源來處理和分析數據。因此，在實際應用中，攝影測量和光達系統通常需要結合使用，以快速獲得相關的分析資料。

為了提高無人航空測繪成果的分享和應用效率，國家災害防救科技中心借助災害情資網三維地理資訊系統技術進行情資共享。這個平台不僅提供了展示應用，還包括雲端運算功能，可以快速生成分析成果，協助坡地防災專業人員快速共享相關資訊。此外，災害情資網還提供了坡地防災所需的圖資，可用於協助災害防救決策評估。這使得防災人員可以隨時透過網頁瀏覽器使用雲端服務，進行即時的決策和應用。

總結以上，結合無人航空測繪技術在坡地防災領域的應用具有重要價值。攝影測量和光達系統各有其優勢，可以滿足不同情境下的需求。此外，災害情資網的建立和運用進一步提高了無人機測繪成果的分享和應用效率，為坡地防災工作提供了有力的支持。未來將持續發展適用於不同崩塌潛勢區類型的分析流程，以更有效地利用無人航空測繪技術來改善坡地防災工作。

關鍵詞：無人航空載具、攝影測量、光達、地理資訊系統

* 通訊作者，wrsu@ncdr.nat.gov.tw

ABSTRACT

Photogrammetry is a relatively straightforward and widely applied unmanned aircraft system (UAS) mapping technique that involves capturing two-dimensional image data of the Earth's surface through photography. Photogrammetry is used to construct digital elevation models, providing a fundamental understanding of terrain. Additionally, it can produce orthorectified images, which are highly valuable for monitoring environmental changes in potential disaster areas over time. These images aid in understanding the temporal evolution of disaster-prone environments, offering critical references for subsequent disaster management decisions. As such, the outcomes of photogrammetry can be applied in various aspects, including monitoring potential disaster areas, surface displacement, elevation changes, and assessing the volume of landslide material.

In contrast, lidar systems are slightly more complex in their application. Lidar systems employ laser scanning of the ground to generate high-precision three-dimensional point cloud data. This capability allows lidar systems to create more detailed and accurate terrain models, including surface features, buildings, vegetation, and more. However, lidar systems are costly, have a higher technical threshold, and require more time and resources for data processing and analysis post-disaster. Therefore, in practical applications, photogrammetry and lidar systems are often used in conjunction to quickly obtain relevant analytical data.

To enhance the sharing and application efficiency of UAS mapping results for disaster prevention, the National Science and Technology Center for Disaster Reduction (NCDR) utilizes the Disaster Geospatial Information Internet 3D Geographic Information System (GIS) technology for information sharing. This platform not only provides visualization capabilities but also includes cloud computing functionality for rapidly generating analytical results, assisting slope disaster prevention professionals in swiftly sharing relevant information. Furthermore, the Disaster Geospatial Information Internet provides the necessary cartographic data required for aiding disaster prevention and rescue decision evaluations. This enables disaster response personnel to utilize cloud services through web browsers for real-time decision-making and application.

In summary, the application of unmanned aerial mapping technology in the field of slope disaster prevention holds significant value. Both photogrammetry and lidar systems have their respective advantages and can meet different contextual needs. Additionally, the establishment and utilization of the Disaster Geospatial Information Internet further enhance the sharing and application efficiency of UAS mapping results, providing robust support for slope disaster prevention efforts. The future will see the continuous development of analytical workflows suitable for different types of landslide-prone areas, aiming to more effectively utilize UAS mapping technology to improve slope disaster prevention work.

Keywords: Unmanned Aircraft System (UAS), Photogrammetry, Lidar, Geographic Information Systems (GIS)

前言

防災科技中心目前對於無人航空載具 (Unmanned Aircraft System, UAS) 的應用, 主要有無人航空攝影測量 (UAS Aerophotogrammetry) 與無人航空光達系統 (UAS LiDAR) 等無人航空測繪作業, 目的是獲取正射影像圖資及高精度的三維點雲資料, 以產製各類型的數值高程資料。多時期的正射影像圖資, 除可觀測災害潛勢區隨時間的環境變化, 亦可應用於地表位移分析; 高精度的三維點雲資料, 可產製多種類別的數值高程地形資料, 提供高程變化、土方量評估、坡地植生、微地形特徵判釋等應用^[1]。研究中點雲資料的來源可分為兩大類, 一是光學相機經攝影測量後產製的三維地表點雲的資料; 另一類是雷射光達掃描儀產製的點雲資料。要說明此兩類型資料的差異, 需對於「數值高程模型」(Digital Elevation Model, DEM) 及「數值表面模型」(Digital Surface Model, DSM) 作一說明。

依據內政部地政司衛星測量中心^[2]的定義, DEM 係指除去植物覆蓋及人工建物後, 由地球表面礦物質最上層所形成的天然表面。但是以土石構築之人工構造物, 如: 堤、塹、壩、溝渠、道路等土方結構物, 雖非地表天然表面, 但若其尺寸大過 DEM 解析力所能明確表達者, 則其上層表面亦屬於 DEM。DSM 代表地球上固定物體最上層表面, 包含人工永久性建物及植物覆蓋 (內政部地政司網路資料)。圖 1 為新竹秀巒大規模崩塌潛勢區的正射影像、DSM 及 DEM 的成果範例, 圖 1(b) 的 DSM 為保留植生及建物的數值表面模型, 圖 1(c) 則是去除植生及建物的數值高程模型 (DEM), 剝除植生之後的高解析度 DEM, 可看出原本被植生遮蔽的農路和原有的地表特徵, 這樣的基礎資料在坡地災害的分析和應用是廣泛且有用的。

因此光學影像與光達所產製的數值地形資料最大的差別是, 光學影像經攝影測量定位後產製的點雲或高程資料 (DSM) 是最上層表面的資訊, 無法像光達儀器的雷射光線有機會穿透植生而量測到天然表面的高程資訊。這樣的差異就會影響到應用的面向, 若是在裸露的崩塌區內, 兩種量測來源都是記錄到表面的點雲, 沒有地表植生或人工構造物的差異性, 理論上數值高程地形的產製成果是一致的; 但若是在含有植生的地滑、崩塌區域, 則是需要使用光達掃描儀取得的點雲資料, 才能針對地表面、建物和植生等不同種類的點雲進行分類後, 留下地表面的點雲資料, 製作出數值高程模型 (DEM), 以利後續的各項運用。以下

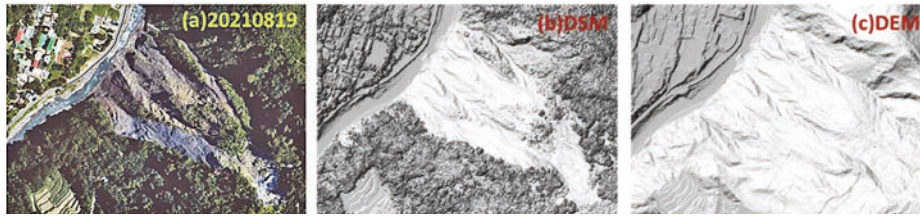


圖 1 新竹秀巒崩塌區正射影像及數值高程地形日照陰影圖 (2021 年 8 月)

即以新竹秀巒大規模崩塌潛勢區為說明例，說明各項測繪工作的內容以及如何透過災害情資網分享相關成果給防災人員進行後續決策參考。

研究區域概述

秀巒崩塌區 (新竹縣 - 尖石鄉 - T001) 位於新竹縣尖石鄉秀巒村秀巒國小後側 (竹 60 線 31K 處道路對岸) 白石溪右岸邊坡 (如圖 2 紅框處)，該崩塌區的坡趾鄰近控溪部落，坡頂則緊鄰新竹縣 - 尖石鄉 - D077 (泰崗) 大規模崩塌潛勢區，位處泰崗部落的範圍，秀巒崩塌區流域地質圖如圖 3。該崩塌區於 2001 年起，歷年來陸續發生大小規模的崩塌，護岸及邊坡經過多次整治，近期於 2021 年 9 月 13 日上午 10 時許，因受璨樹颱風雨勢影響，造成邊坡約 4 公頃面積的崩塌，崩落土石淤積白石溪河道，及左岸竹 60 線道路，因土砂阻塞河道形成堰塞湖，使水流溢淹道路並影響 4 處民房 [3-5]。

地面控制點及檢核點

無人航空載具的測繪作業中，地面控制點量測是重要的工作。在攝影測量中，需要高精度衛星定位儀的地面控制點量測成果，來約制所建置的三維模型，使得整體模型能有效做空間的校正，達到預期的精度成果；無人機的光達系統，雖然採用直接地理定位所掃描獲取三維點雲的空間資訊，但建置完成的數值高程地形資料，也是需要用地面控制點加以檢核，瞭解其成果的誤差情形。在地面控制點的量測部分，參考



圖 2 新竹縣尖石鄉 T001 秀巒大規模崩塌潛勢區位置圖

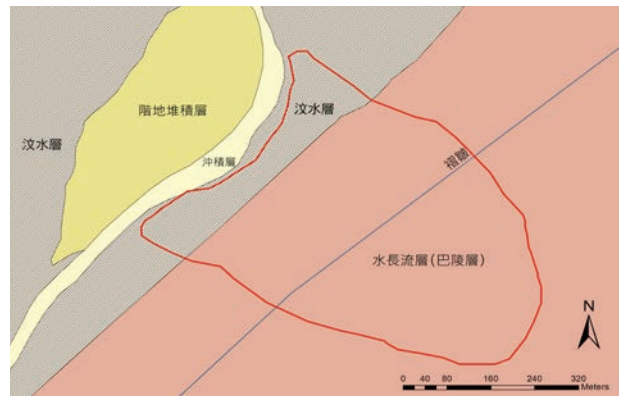


圖 3 新竹縣尖石鄉 T001 秀巒大規模崩塌潛勢區域流域地質圖

國土測繪中心採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊 [6]，針對點位觀測重複率、最少接收衛星顆數、觀測資料記錄筆數、座標成果品質控制等諸多事項，提供相關規範供遵循。

圖 4 為新竹縣秀巒大規模崩塌潛勢區地面控制點的分佈圖，表 1 則為各點位的座標、高程量測值成果。要

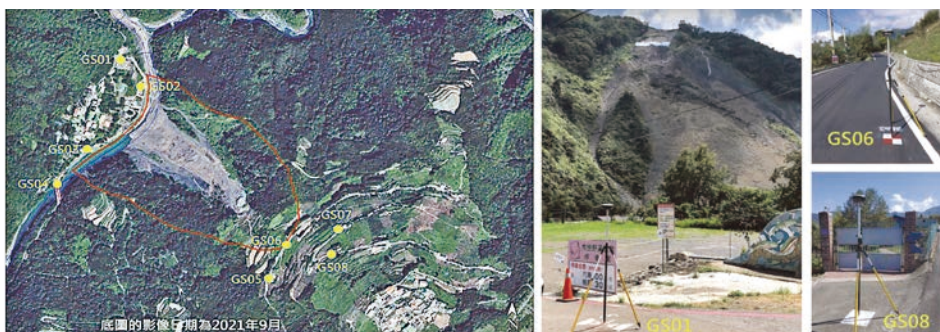


圖 4 新竹秀巒大規模崩塌潛勢區地面控制點位分佈

表 1 新竹秀巒大規模崩塌潛勢區地面控制點量測成果

點位	縱座標 平均值 (N)	橫座標 平均值 (E)	高程 平均值 (H)	平面較差 平均值	高程較差 平均值
GS01	2723728.422	279004.916	839.297	0.0106	0.0277
GS02	2723623.860	279081.233	831.795	0.0128	0.0271
GS03	2723408.175	278929.639	836.044	0.0122	0.0269
GS04	2723277.636	278796.283	843.166	0.01	0.0242
GS05	2722945.972	279532.452	1267.521	0.0139	0.041
GS06	2723024.835	279572.09	1267.621	0.009	0.0297
GS07	2723098.625	279767.349	1306.987	0.0095	0.0206
GS08	2723013.201	279728.016	1325.41	0.011	0.0234

特別說明的是，地面控制點的佈設除透空良好、於影像上可清楚辨識的原則外，也希望能在空間中達到均勻分布的要求，如此較能確保成果的精度要求。但崩塌潛勢區內，常因近期發生崩塌，或是山區邊坡面本來就沒有通行的道路或農路，因此無法找到適當的地面控制點或檢核點位，故無法達到點位均勻分布的要求^[7,8]。

無人航空攝影測量

無人航空載具的攝影測量主要是以光學相機進行影像的蒐集，經影像和地面控制點的校正、鑲嵌後，可得到高精度的正射影像、數值地表高程模型等成果，進一步對於災害潛勢區定期的環境監測、地表位移分析、崩塌裸露區高程變化及土方量的計算等應用，能夠提供良好的參考基礎圖資^[9,10]。

無人航空攝影測量相關的作業流程如圖 5 所示。大致可分為前置作業、航拍任務執行及資料處理，前置作業包含飛行任務的規劃、飛行空域、法規及飛手的確認、氣象條件及飛行安全場域的檢核、航拍範圍內地形、地貌的調查、各類設備飛行前的測試等；航拍任務執行方面，在拍攝前須場勘佈測地面控制點、設置無人機地面控制站、現地進行預設航線及範圍的修正、進行飛航拍攝的任務後，即時檢核拍攝的影像及品質；在內業的資料處理部分，將拍攝及檢核過的照片，使用地面控制點來糾正變形、傾斜和扭曲等進行幾何校正、從校正的照片中提取三維點雲數據後，生成包括建築物、植

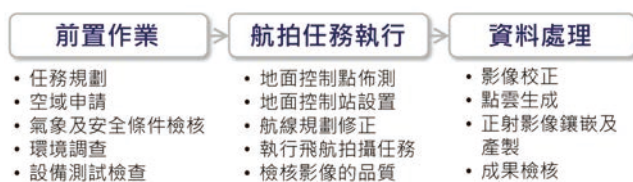


圖 5 無人航空攝影測量流程



圖 6 新竹秀巒崩塌潛勢區正射影像圖 (2020 年 1 月)

生等地物地表的數值表面模型 (DSM)，最後鑲嵌成正射影像圖資及成果的檢核，圖 6 為新竹秀巒大規模崩塌潛勢區，依據前述說明方式所產製的正射影像。有關坡地崩塌、土石流、河道及海岸聚落等災害熱區、實施定期的無人機影像監測，可以了解災害發生前後，整體環境的改變情況。

圖 7 即為新竹秀巒大規模崩塌潛勢區多期影像監測說明例，該區 2021 年 9 月 13 日上午 10 時許發生崩塌，由圖 7(a) 8 月 19 日災前 1 個月的影像，可看出溪床坡趾處遭白石溪水冲刷嚴重，坡面有大型蝕溝數條；圖 7(b) 9 月 14 日崩塌發生後隔天的影像可看出，崩塌土石堆積在溪床坡趾處形成堰塞湖，溪水游左岸堤防溢淹至道路及民宅處；圖 7(c) 9 月 22 日崩塌發生後隔周，可看出大型機具已完成堰塞湖的洩水道施作，將堰塞湖水體引流至主河道中，原道路及民宅的積水已消退，土砂堆積於道路和民宅待清淤；由圖 7(d) 2022 年 1 月 10 日的影像可看出，河道上堰塞湖已消退，堆積於道路和民宅的土石已移除，隨著時間的增加，原本由崩落土石填平陡峭的裸露坡面，漸漸地又沖蝕出數條明顯的蝕溝，因此由多期影像的觀測，可瞭解潛勢區的環境變化狀況^[11]。

無人航空光達系統

光達 (LiDAR) 為光學雷達或雷射雷達的簡稱，其獲取點雲資料的掃描原理為使用脈衝光照射目標並使用傳感器測量反射脈衝，來測量到目標的距離，其透過地理標記的反射目標點重建真實地表場景。由於光速是固定的，可利用量測雷射光反射的時間，推測出光達量測儀器與量測點位間的距離^[11]。



(a) 20210819



(b) 20210914



(c) 20210922



(d) 20220110

圖 7 新竹秀巒大規模崩塌潛勢區崩塌前後坡趾處影像的監測

研究中採用的光達點雲採集設備，硬體部分除了光達掃描儀外，無人機的載台為多旋翼無人機，加上衛星定位儀的地面基站，組成無人機光達系統。其經過對測區事前完整規劃及掃描，可得到高密度的空間點雲資訊，因在無人機上與地面上的全球定位座標系統是整合直接地理定位 (Direct Georeferencing)，配合慣性導航儀 (Inertial Measurement Unit, IMU)，可測得載具的三軸偏轉角及加速度等參數，計算出軌跡、姿態等定位定向 (Position and Orientation System, POS) 資訊 [12-14]。故點雲的三維空間資訊除了有完整的 GPS 時間、反射強度、回波數、掃描角度等，在高程座標方面也有相當的準確度。

光達點雲資料獲取及處理的流程如圖 8 所示。首先確認執行任務及光達掃描的範圍後，進行飛行前軟硬體裝備的整備、無人機航線預先規劃等工作，相關前置作業與無人機攝影測量的內容是相似的。現地無人機光達掃描作業，依序是光達系統安裝、靜態地面基站架設、系統初始化、起飛後的動態校準、執行飛行任務、降落

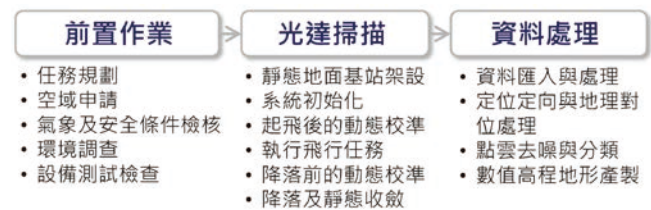


圖 8 無人航空光達系統作業流程

前的動態校準、降落及靜態收斂，最後進行系統關機步驟後，即可完成現地光達點雲資料的掃描。點雲資料處理方面，將現地光達掃描完成的點雲資料，加上衛星基站資訊及空拍影像匯入處理，依序將航線軌跡分離、點雲映射、各方位參數的誤差量計算後，即可完成軌跡線的校正。校正完成後，進行定位定向、地理對位及點雲著色等 3 個步驟，即可將灰階高密度的點雲資料加上座標、高程等空間資訊及色彩，最後將點雲去除噪點及分類，即可產製各種類型的數值高程地形圖資。圖 9 為光達原始點雲經過航線平差修正結果範例，圖 10 為新竹秀巒大規模崩塌潛勢區，原始光達點雲及依據前述步驟處理的數值高程地形日照陰影圖。

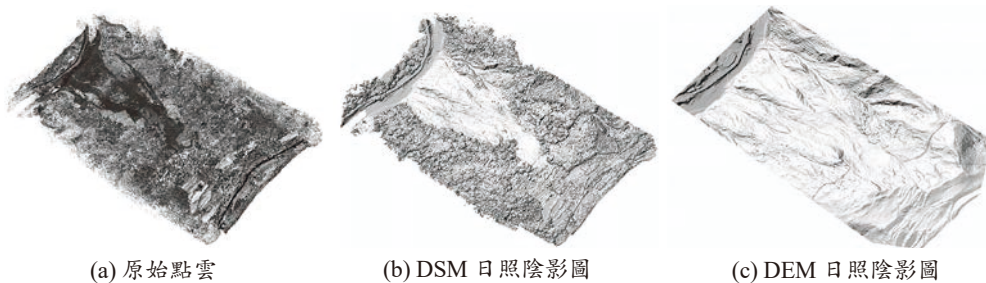
圖 11 至 13 為利用前述攝影測量和光達系統，所產製不同時期數值表面模型及數值高程模型後，所得到的區域內高程及土方量的變化分析。因要計算高程及土方

量的變化，數值表面模型只能應用於崩塌裸露區，故在分析前需要確認當期崩塌的範圍，可由兩期的正射影像比對，或是觀察坡面崩落土砂的顏色等，圈繪出不同時期的崩塌範圍，而數值高程模型因為已去除植生、建物等高程，因此可以直接計算其高程差值。

圖 11(b) 為 9 月 13 日發生崩塌後 1 日，以攝影測量方式測繪的緊急任務，其圈繪出此次的崩塌範圍後，以 DSM 與災害發生前約 1 個月的 DEM 相比較，可得到其崩塌裸露區的高程及土砂量的變化如圖 11(c)，其中因在坡趾處有堰塞湖的產生，因此水面下的高程值是無法量測的；圖 12 則為崩塌發生後約 1 年後的光達點雲產製的 DEM 資料的比較，由坡頂的圖



圖 9 點雲資料經航線平差修正前後說明例



(a) 原始點雲 (b) DSM 日照陰影圖 (c) DEM 日照陰影圖
圖 10 新竹秀巒大規模崩塌潛勢區光達點雲及數值高程地形圖資 (2022 年 9 月)

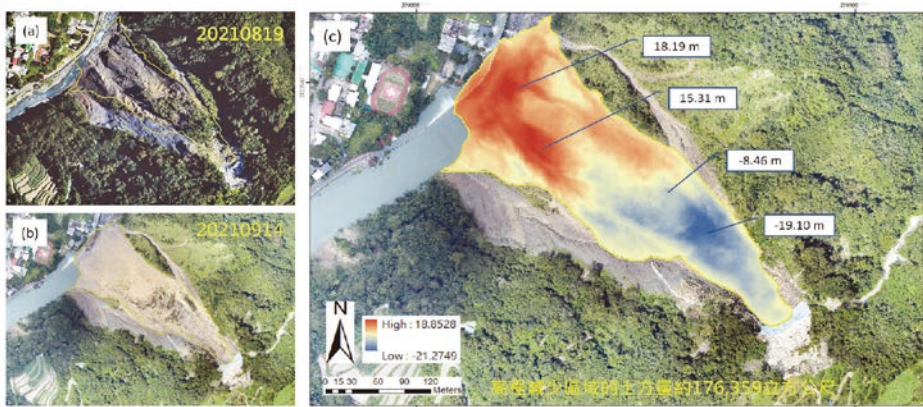


圖 11 20210914 (DSM) 與 20210819 (DEM) 崩塌裸露區高程及土方量變化

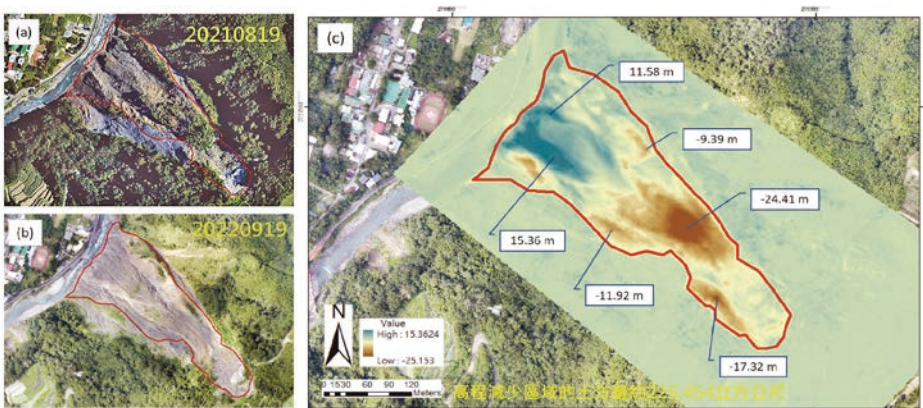


圖 12 20210919 (DEM) 與 20210819 (DEM) 崩塌區高程及土方量變化

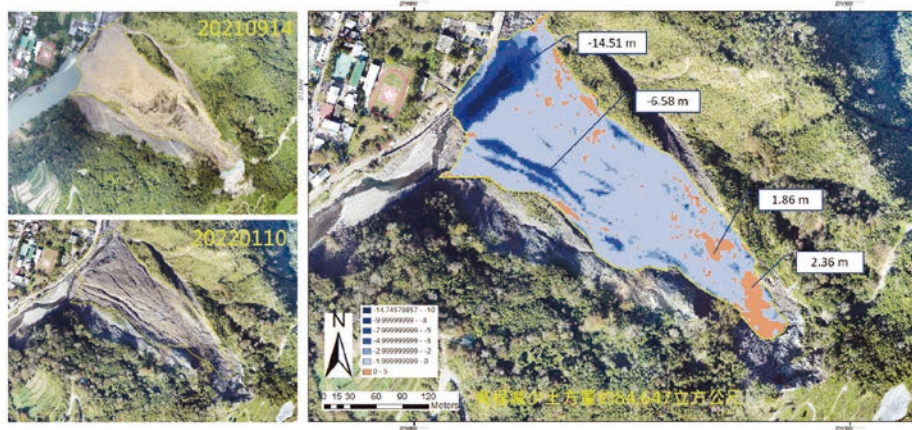


圖 13 20220110 (DSM) 與 20210914 (DSM) 崩塌裸露區高程及土方量變化

資可看出，其崩塌有向源頭侵蝕的現象產生，坡頂的崩塌範圍有擴大的趨勢；圖 13 為崩塌發生後 4 個月的攝影測量成果比較，由圖中可以看出高程減少最多的區域是在坡趾部分，由於原先崩落土石堆積在坡趾處形成堰塞湖，經過清除及沖刷後恢復至原有的河道高程，另外在坡面的部分，隨著時間的增加，原本由崩落土石堆積出平整的坡面，漸漸又沖蝕出明顯的蝕溝；圖 14 為這些不同時期的圖資，圈繪出的崩塌潛勢及實際崩塌的範圍，這些環境的變化情形，可以清楚地由這些圖資觀測及分析而得。

結合無人航空測繪成果於決策輔助應用

災防科技中心為了讓無人航空測繪成果能夠快速提供防災人員決策輔助，因此建立一套從災害發生後到其災後空拍影像上網輔助決策的流程與機制，如圖 15。

當相關影像測繪完成後，災防科技中心便將影像成果分別萃取正射影像、數值地形以及進行三維建模並發佈成網路服務，包含正射影像服務、數值高程地形服

務。正射影像服務可以提供災害發生後整體地貌變化情形，並透過災害發生前後之不同時期比對以瞭解其變化。數值高程地形服務，主要提供與不同時期所獲得之空拍成果進行體積運算，以了解崩塌地之沖刷淤積情形。

近年來，三維建模圖資服務技術已逐漸成熟，因此，結合無人航空之高解析度測繪成果，可以更真實呈現原地面貌，讓決策者更清楚了解並掌握現地情況。為讓上述之成果能快速分享給防災人員，災防科技中心透過建置之災害情資網^[15]提供各項情資服務。以下將以新竹秀巒崩塌事件說明運用狀況。

透過不同時期影像比對掌握崩塌情資

2021 年秀巒地區發生崩塌，災防科技中心在取得無人航空測繪成果後，隨即透過上述之機制快速進行影像處理與圖資發布，並將所有圖資上架至災害情資網，之後運用影像比對功能提供崩塌前後地貌影響狀

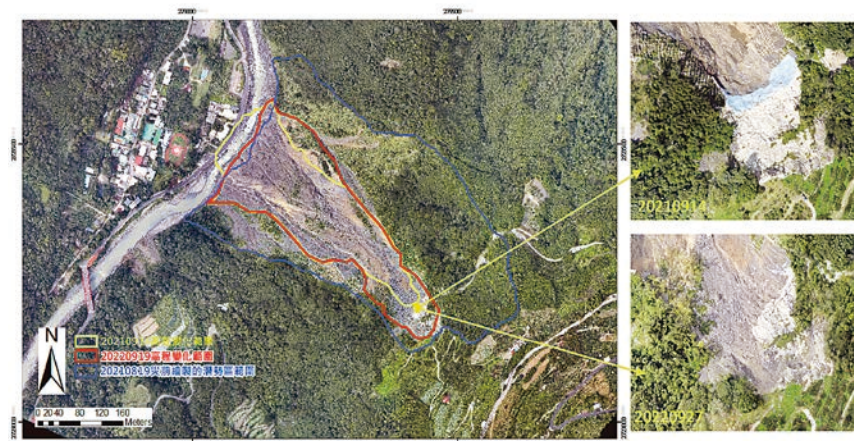


圖 14 潛勢區範圍及不同時期崩塌範圍圈繪

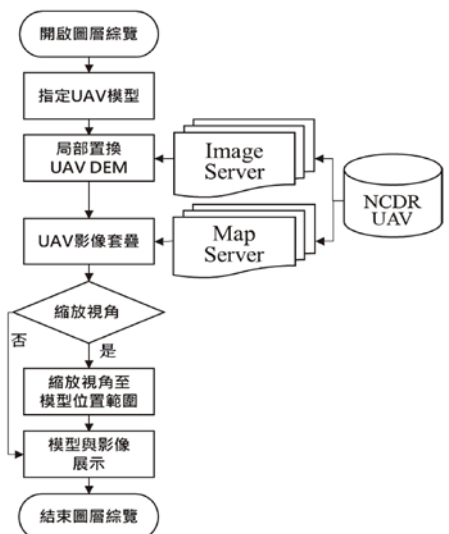


圖 15 無人航空測繪影像於災害情資網之整合運用和流程

況，透過地貌比對方式可以了解崩塌影響狀況，如圖 16 所示，此次崩塌造成白石溪河道阻塞，由於其臨近秀巒聚落，透過災害情資網之三維呈現，可以快速掌握聚落可能面臨之風險，並進行災害評估。

透過數值地形運算了解崩塌情況

災害情資網已介接內政部地政司之全國數值地形圖資，因此在完成無人空拍載具測繪後，運用發布之數值地形服務，可以線上估算災害發生前後之體積變化，如果有多時期的數值地形資料，則可自訂選擇不同時期數值地形，進行體積估算。如圖 17 所示，其中藍色為沖刷侵蝕區，橘色區域為土石堆積區。透過線上快速估算，讓使用者可以快速評估災害發生規模，並作為後續救災之參考。

結合相關圖資輔助評估後續狀況

由於秀巒崩塌區域主要影響白石溪，土石崩塌堆積造成白石溪河道阻塞，恐影響到對岸的秀巒部落，因此，災害情資網，透過三維地理資訊系統呈現當地地貌狀況。此外，透過災防科技中心的聚落調查資料，可以得知此聚落有 60 戶以上，且此區域鄰近兩處土石流災害潛勢區域範圍，因此後續需持續監控其影響情況。目前農村水保署已在當地架設即時攝影機，透過攝影機可以隨時監控該崩塌地即時狀況，如圖 18 所示。

由以上應用案例可知，災害情資網透過整合無人航空測繪之圖資，以及各類災害情資，除了可掌握現況外，也可以運用相關圖資，輔助坡地防災人員進行防災決策應用，以新竹秀巒崩塌案例來說，當取得災害發生後影像，透過已建立的分析處理以及共享機制，相關成



圖 16 影像比對工具輔助掌握災害前後變化



圖 17 災害發生前後期數值高程體積估算模組



圖 18 圖資整合運用於決策輔助

果可以快速提供防災決策者進行後續救災決策研判，對於縮短決策研判以及加速救災工作已發揮其成效。

結論與建議

國家災害防救科技中心於無人航空測繪的應用，分為攝影測量及光達系統兩類。無人機光達系統相較於攝影測量，無論在內外業相關的程序都繁瑣許多，但由於光達系統可獲取地面點的高精度三維點雲，因此除了攝影測量可產製的數值表面模型外，可另外產製數值高程模型，提供了更廣的應用面向。攝影測量產製的正射影像，可提供潛勢區多期的環境監測，瞭解災害環境隨時間變化的情形，可提供後續處置決策的參考，因此這些圖資的產製，可以應用在整體潛勢區環境的監測、崩塌區地表的位移、高程的變化，崩塌土方量體的評估等多方面的應用。

光達系統所建置的地形資料因有詳細的地表訊息，其應用的層面較廣，惟其製作相關圖資的成本、技術門檻較高，無法快速在災後處理及分析出相關的成果，因此需要以攝影測量的技術輔助，才能有效的在災後快速建構出相關的分析資料。所以如何依據不同的崩塌潛勢區類型，提出適宜的分析流程，建議可以列為無人機應用於崩塌潛勢區分析的未來重點工作。

為了讓無人航空測繪成果快速分享應用於坡地防災人員，災防科技中心透過「災害情資網三維地理資訊系統」之技術進行情資共享。有別於以往以展示應用為主，本平台也納入雲端運算功能，透過快速雲端運算提供分析成果，輔助坡地防災人員快共享分析成果；除此之外，災害情資網也提供坡地防災所需圖資，讓防災人員隨時可透過雲端服務，使用網頁瀏覽器即可快速進行災害應變輔助與決策評估之用。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局 (2021)，110 年坡地科技防災落實應用成果報告彙編_第一篇_光達系統監測在大規模崩塌潛勢區之應用，國家災害防救科技中心。
2. 內政部地政司衛星測量中心，<https://gps.moi.gov.tw/sscenter/introduce/IntroducePage.aspx?Page=DTM3>。
3. 農業部農村發展及水土保持署 110 年其它重大土砂災例最速報 <https://246.swcb.gov.tw/Achievement/DisastersContent?EventID=593>。
4. 農業部農村發展及水土保持署 105 年災例復勘報告 [https://246.swcb.gov.tw/AllFiles/PDF/Re/105年-其他-新竹尖石-001\(106年-復勘\).pdf](https://246.swcb.gov.tw/AllFiles/PDF/Re/105年-其他-新竹尖石-001(106年-復勘).pdf)。
5. 呂家豪、陳家棟、黃靖惠、白朝金、蕭仲富、李明彥、黃致維、吳佳威、郭芳慈，(2021)，山崩機制調查技術於大規模崩塌區之應用案例介紹，中華水土保持學報，第五十二卷，第四期，第 231-240 頁。
6. 內政部國土測繪中心 (2021)，採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊。 https://www.nlsc.gov.tw/Nlsc_Law_Standard.aspx?n=1577&sms=11271
7. Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., and Reynolds, J.M., (2012), 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications., *Geomorphology*, 179, 300-314.
8. James, M.R. and Robson, S. (2012), "Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
9. 洪維屏、林彥廷、甘翊萱、黃春嘉、李政軒、韓仁毓 (2021)，自動化 UAV 巡檢測繪及港區構造物偵測—以台中港為例，*土木水利*，第四十八卷，第五期，第 4-9 頁。
10. Che-Hsin Liu, Jui-Yi Ho, Chung-Ray Chu, Chih-Hsin Chang, and Hongey Chen (2022), A pixel analysis technique and unmanned aircraft system for horizontal displacement in the landslide potential area., *Geoscience Letters*, 9:17.
11. 行政院農業委員會水土保持局 (2022)，111 年坡地科技防災落實應用成果報告彙編_第一篇_坡地災害地表動態特徵觀測技術研發，國家災害防救科技中心。
12. 饒見有、陳智揚、詹鈞評、劉暹、李文慶 (2014)，無人機攝影測量與直接地理定位之精度分析，*國土測繪與空間資訊*，第二卷，第一期，第 1-22 頁。
13. 何心瑜、陳大科、史天元、徐偉城 (2008)，人工編修空載光達資料產製 DEM 成果之探討，*航測及遙測學刊*，第十三卷，第四期，第 231-239 頁。
14. 郭素秋、鄭玠甫、黃鐘、林柏丞、胡植慶 (2017)，空載光達技術在臺灣山區舊社考古學研究的應用：以排灣族文樂舊社為例，*考古人類學刊*，第 87 期，第 67-88 頁。
15. 災害情資網，<https://eocdss.ncdr.nat.gov.tw>。