

整合多元遙測技術於高速公路邊坡救災之應用

鄭宏達¹ 李魁士² 姜興華^{3*} 闕文鏈³

摘要

臺灣地區因地形環境因素，常有天然災害發生並造成環境損害，對民眾生命財產造成影響，故災害搶救具有急迫的時效性，對於災區的受害資訊須立即掌握，且對於潛在可能發生的二次災害更是不可忽略，所以對於災區空間資訊收集是非常重要的工作，資訊收集越完整對於救災任務越是有幫助。而如何能有效的針對不同的使用需求，採取因應的技術做法，提供可用的資訊實為一項重要的課題。本案例應用無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)進行空拍及 3D 建模、光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)掃描點雲(Point Cloud)建模及經緯儀等多元遙測技術獲取災區空間資訊，提供災區搶修及復建使用。

關鍵詞：無人機、光達、3D 建模、點雲

1. 前言

臺灣位居環太平洋地震帶，也處在西北太平洋地區颱風侵襲的主要路徑上(國家災害防救科技中心，2020)，所以經常會有地震、颱風等災害發生，往往造成山崩、土石流、洪水、房屋傾倒、道路中斷、農田毀損等災害，其衝擊十分巨大，對民眾生命財產造成影響。由於災害發生可能無法避免，但於災害發生後如何能快速救災、搶修、復建等實為災後處置的重要議題。

近年無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)掃描儀等設備已被廣為應用於工程建設、防救災等任務上。由於不同的設備及測量技術均各有其優點及使用特性，若能應用這些不同的設備技術互相搭配彌補不足，使資料更臻於完善且具有可用性，應對救災任務更有幫助，例如藉由 UAV 載具搭載攝影裝置或 LiDAR 掃描儀，除可快速的對災區進行資訊蒐集，亦可彌補地面人員無法到達區域之空間資訊取得；而光達掃描儀之雷射光其具有對植被穿透的能力，不論是地面式或空載式掃描儀透過其對植被之穿透能力，能更完整有效地蒐集地表現況，增加資訊

的可用性。

UAV、LiDAR、全測站儀等多元遙測技術用於邊坡災害勘查及監測作業目前已為廣泛應用。無人機技術在山坡地開發監管、地形測繪、危險公路崩塌復建工程等方面的應用已趨成熟，無人機智慧技術具有廣泛的潛力。以山坡地水土保持監管業務、山區公路邊坡因災害崩塌，河川野溪土砂淤積土方收方，水土保持計畫地形測量為例，探討無人機智慧技術在減少工程從業人員人力負荷及降低危險方面的應用，彙整典型案例，無人機搭載 RTK 結合 GNSS 全球衛星定位系統，進行測繪，獲取地形資料如正射影像、DSM(Digital Surface Model)、DEM(Digital Elevation Model)、點雲資料與 3D 模型等，利用 GIS 地理資訊系統與 CAD 數位化軟體，快速處理解析，建立地形資料，提供設計、施工端解決關鍵問題(鍾鳴峰，2024)。遙感探測利用不同的感測器及載具可以全面且有效地探索及調查不同區域的各種地物、地貌、資源、與現象等的變化。在災害發生時，遙感探測更是災害調查、監測、與評估的有效工具，並可提供決策者更廣泛與全面的資訊，以利災害防救等之決策支援(蔡富安，2020)。交通部運輸研究所「UAV 結合深度學習輔助公路

¹ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 資深協理

² 台灣世曦工程顧問股份有限公司防災工程技術整備中心 主任

³ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 副理

* 通訊作者, E-mail: chsh@ceci.com.tw

收到日期：民國 114 年 01 月 02 日

修改日期：民國 114 年 05 月 19 日

接受日期：民國 114 年 09 月 15 日

局「邊坡災防應用探討」可知欲進行 AI 深度學習影像辨識或目標偵測及分類等任務，除利用邊坡高解析度影像外，尚加入邊坡空間特徵資料(例如：點雲模型、DSM)，並配合環境因子(例如：邊坡坡度、坡向、地質等)共同分析，以達較好之判識效果(黃宇謙等，2025)。高解析度數值地形於山崩、土石流與淹水災害應用之重要性與日俱增，相較常用之航空攝影測量產製空間解析度 40 m (75 年林務局農航所測)與 5 m (94 年內政部測) DTM (Digital Terrain Model)，經濟部地質調查及礦業管理中心於 99 年起執行「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」運用空載光達測製全台 1 m 高解析度之 LiDAR/DEM，在土石災害模擬及多尺度崩塌量體評估等皆有顯著之應用成效(李璟芳等，2015、謝有忠，2016)。地面光達對於量測胸徑、枝下高及樹冠幅相當準確；空載光達對於量測樹高、枝下高、樹冠幅及活冠長相當準確。地面光達對於樹高、樹冠幅及活冠長量測不準確因素來自於掃描範圍的限制或因遮擋而無法有效正確掃描至樹冠，而造成測量不準確而產生低估誤差(劉鎮毅等，2024)。

Ghorbanzadeh *et al.* (2019) 利用 UAV 蒐集邊坡空拍影像並搭配 CNN(Convolutional Neural Network) 來進行邊坡穩定性檢測。該研究以 UAV 搭配全球導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS) 拍攝印度北部喜馬拉雅山靠近恆河地區之高度破碎和風化的岩層邊坡之影像，並擇定一範圍 3.7 km² 之邊坡為訓練影像(共拍攝 338 張影像)，另一範圍 2.45 km² 之邊坡為測試影像(共拍攝 169 張影像)，並利用空拍影像拼接成正射鑲嵌影像(Ortho-mosaic Image)及生成 DEM，再從取得坡度數據。再利用 CNN 模型進行學習，其比較 CNN 在不同取樣範圍、模型深度、資料集僅皆為空拍影像或納入坡度數據等情況，結論為使用空拍影像結合坡度數據之資料集，可大幅提高精度約 20~40%，取樣範圍則無太明顯優劣(Ghorbanzadeh *et al.*, 2019)。UAV LiDAR 能夠有效穿透樹冠，捕捉地形細節，與全站儀測量結果相比，UAV LiDAR 的垂直與水平誤差在可接受範圍內，適用於複雜地形的測繪(Tamimi & Toth, 2024)。在道路表面和平坦地形上，移動地面 LiDAR

與 UAV 攝影測量的高程與傳統測量結果相近；空載 LiDAR 在整體地形上提供了最接近傳統測量的高程數據(Khanal *et al.*, 2020)。

本文即針對高速公路邊坡救災任務使用 UAV、LiDAR、全測站儀等多元遙測技術進行邊坡災害勘查及監測作業之整合應用彙整說明，期能為未來相關工作應用參考。

2. 作業內容及方式

111 年 11 月間，歷經 918 地震及北臺灣連續降雨，國道 1 號南向 10.1k 汐止交流道南向出口集散道上方邊坡，於 11 月 1 日上午出現土石坍滑現象，並影響該路段正常通行。高速公路局北區養護工程分局隨即展開緊急搶修作業，台灣世曦工程顧問股份有限公司防災中心及地理空間資訊部(以下簡稱「台灣世曦」)亦隨即動員配合協助救災，於 11 月 2 日第一次由高速公路限飛區外先以 UAV 空拍取得工址影像(如圖 1)，供初步判識致災規模與狀況。11 月 2 日晚發生第二次邊坡坍滑，坍滑區更為擴大，更嚴重影響該路段南下車輛通行，坍滑現況如圖 2。為協助救災，台灣世曦於 11 月 3 日向高公局及民航局申請緊急 UAV 空拍，於 11 月 4 日開始針對災害現場展開關聯調查測量工作，以持續收集監測掌握現地災情，提供搶修工程及後續復建作業運用(高速公路局北區養護工程分局，2023)，期能協助搶修工程能順利執行，使國道盡早復通。

本案為高速公路邊坡坍滑事故，災害區土石鬆動且地表濕滑泥濘，而部分區域又位於高速公路車道雖有部分進行交維管制，但搶救工程車輛不斷進出，以致測量作業非常不便。為能在不影響搶修作業及維持高速公路正常運行之情況下，且能完整收集災區現況地形資料，實為本案調查作業執行方式須思考之重點。無人機、光達、全測站經緯儀等先進遙測設備為目前普遍運用於工地踏勘、工程監看、型變監測及地形測繪等作業使用，惟各項設備仍有其使用限制及不足處，如無人機空拍或無人機空載光達掃描，其雖有全面鳥瞰視角之優勢，但其對於遮蔽處如樹冠、屋棚或倒懸地形等地區即無法獲取

有效的資訊，而地面光達則可彌補前述遮蔽區之資訊；另全測站經緯儀則對於特定位置有快速取得數據之優勢，其對於立即的變化有很好的監測效果。彙整前述相關儀器設備之優缺點如表 1。

本案採用多種測量作業方式進行現場地形資料收集，包括利用 UAV 空拍獲取災區即時影像；UAV 光達掃描快速掌握大範圍地表之地形變化，並

作為各期土方清運量之估算；地面光達則針對崩塌區不規則地形(包括懸浮石塊等)進行掃描以有效掌握地形現況，並用以與空載光達資料比對；全測站經緯儀則用於有潛勢坍滑之特定地點進行監測，以避免二次坍滑造成災害。配合現場搶災及陸續動員之遙測監測作業紀要如表 2，作業方式及相關成果如表 3，各項遙測作業內容及應用如後述。



圖 1 國道 1 號南向 10.1k 邊坡第一次坍滑(111.11.02 拍攝)

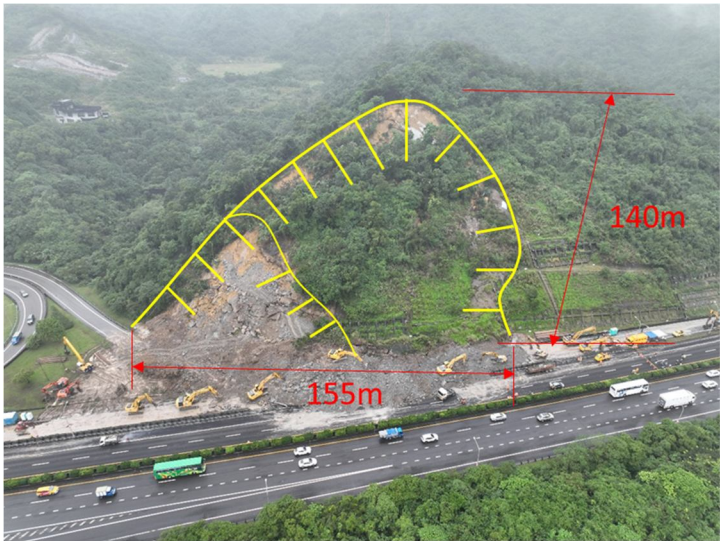


圖 2 國道 1 號南向 10.1k 邊坡第二次坍滑(111.11.03 拍攝)

表 1 使用儀器設備優缺點

設備	無人機空拍	無人機光達	地面光達	全測站經緯儀
優點	1. 機動性高 2. 快速收集地貌影像資訊 3. 鳥瞰影像視覺感受佳，地物易於判釋 4. 減少人員進入災區之危險	1. 機動性高 2. 快速獲取大量三維資料 3. 精度佳，地形較細緻 4. 減少人員進入災區之危險	1. 快速獲取大量三維資料 2. 精度佳，地形較細緻 3. 彌補空拍遮蔽區之資訊	1. 作業直接單純 2. 直接量取目標物之三維坐標 3. 固定目標監測效果佳
缺點	1. 空中視角易受地面物遮蔽 2. 空域管制 3. 空拍影像須後處理	1. 空中視角易受地面物遮蔽 2. 空域管制 3. 點雲成果須後處理 4. 資料量龐大	1. 缺乏物體頂部資訊 2. 點雲成果須後處理 3. 資料量龐大	1. 資訊獲取量少 2. 通視問題

表 2 遙測監測作業紀要表

日期	緊急施工搶災處理	台灣世曦團隊遙測科技監測作業
11/1 (二) (雨)	封閉汐止交流道南下出口匝道，拆除受損護欄燈具。	赴現場協助提供工程技術支援。
11/2 (三) (雨)	土石清理。 18:50 現場第二次坍滑。	1. 研討救災復舊作業。 2. 限飛區外 UAV 影像拍攝。 3. 收集衛星影像/LiDAR DEM/InSAR 等歷史資料，評析致災因子與範圍。
11/3 (四) (雨)	自南北兩側同時施作 H 型鋼樁等擋土設施、穩固坡趾及截排水，採日夜施工加速工進。	1. 啟動後續遙測監控作業。 2. 申請緊急 UAV 空拍。
11/4 (五) (雨)	06:00 完成第一階段主線內側車道搶通。	1. 地面 LiDAR 第 1 次掃描地形測繪。 2. 取得 UAV 許可，緊急啟動 UAV LiDAR 測量地形，受工址航高、塔台許可時段、天候降雨條件，11/4 僅能拍攝影像。
11/5 (六) (雨)	高公局、世曦、弘義營造廠商討復舊設計對策。	1. 11/5 UAV LiDAR 第 1 次掃描地形測繪，DEM 製作。 2. UAV 持續監控空拍。
11/7 (一) (雨)	03:30 完成主線 2 車道搶通，並完成第一排 H 型鋼樁。	評析事故前後 LiDAR/DEM，掌握受災環境與受損狀況與範圍，推測岩層滑動深度與量體，供復舊設計與施工運用。
11/8 (二) (雨)	施作 H 型鋼樁等擋土設施、穩固坡趾及截排水，清理土石之作業。	1. 地面 LiDAR 第 2 次掃描地形測繪。 2. 地面 LiDAR 即時現場解算(11/8~11/10)、雷射經緯儀(11/8)監測即時、密集之遙測量化數據，監測關鍵岩塊。 3. 雷射經緯儀邊坡單點變動監測。
11/10 (三) (雨)	土石清理。	1. UAV 持續監控空拍。 2. UAV LiDAR 第 2 次掃描地形測繪，DEM 製作。

表 3 作業項目及主要成果

工作項目	執行日期	主要工作內容及成果
無人機 空拍	111.11.02 (雨)	正射影像
	111.11.03 (雨)	正射影像
	111.11.04 (雨)	俯瞰影像
	111.11.05 (雨)	正射影像、3D 模型
	111.11.10 (雨)	正射影像、3D 模型
無人機 光達掃描	111.11.05 (雨)	10cm 網格 DEM
	111.11.10 (雨)	10cm 網格 DEM
地面 光達掃描	111.11.04 (雨)	3D 點雲
	111.11.08 (雨)	3D 點雲
地面光達 掃描監測	111.11.08 (雨)	裸露邊坡斷面監測
	111.11.09 (雨)	裸露邊坡斷面監測
	111.11.10 (雨)	裸露邊坡斷面監測
雷射經緯儀監測	111.11.08 (雨)	裸露邊坡單點變動監測

3. 測量作業

3.1 作業規劃

本次調查測量共執行五大項目，包括「UAV 空拍」、「UAV 光達掃描」、「地面光達掃描」、「地面光達掃描監測」及「經緯儀單點監測」等工作，即時且快速地收集現況資訊分別提供不同資訊於災區

搶救、復建工程設計及施工參考使用。因屬緊急動員作業，作業期間天候不佳持續下雨，且搶修工作人員機具不斷進出影響作業順暢，故相關測量作業均於惡劣環境情況下進行。

針對不同設備應考量其設備特性及精度於，避免於成果解算時相互影響。UAV 光達主要係使用無人載具掛載光達掃描設備由空中向下進行掃描，為行進間同時進行掃描，故其影響精度來源來自於設

備本身的包括有 IMU 誤差(慣性測量單元)、GNSS 誤差、雷射發射角度誤差、時間同步誤差等，目前高階酬載設備及掃描儀均已將此類誤差降至級低。本次使用設備為 RIEGAL Mini-Vux-1-UAV，儀器精度可達 15 mm。而來自於外部因素的包括有氣候(晴/雨)、地面控制點、點雲後處理等，該等則為主要影響點雲成果精度的重要因素。地面固定站光達掃描主要為固定式掃描作業，其影響精度來源來自於設備本身的包括有掃描器校準誤差、鏡頭/雷射光軸偏移、雷射測距系統的誤差等，所使用的設備在定期校正保養的形況下可排除此類誤差，本次使用設備為 RIEGL VZ-400i，儀器精度可達 3 mm。而來自於外部因素則包括有氣候(晴/雨)、站點規劃、目標球或反射標籤位置、控制點測量、點雲後處理等則為主要影響點雲成果精度的重要因素。所以在作業規劃時須特別注意控制點的布設及量測作業，避免造成系統上的差異，影響成果的可靠性。而點雲處理則採分別計算 DEM，並套疊比對檢核是否有系統性偏差。

另由於本作業區位於民航局無人飛行載具之禁限航區(如圖 3)，同時為松山機場飛機起飛航線範圍及高速公路局管轄限制範圍，於執行空拍任務前，除須洽民航局申請許可外，亦另須獲得管轄單位(交通部高速公路局)同意，並藉由民航局災防需求規定申請緊急飛行許可，並於執行任務期間，派駐一名聯繫員親赴近場塔台，與塔台督導人員當場確認 UAV 起飛與降落時間，以確保飛航安全。

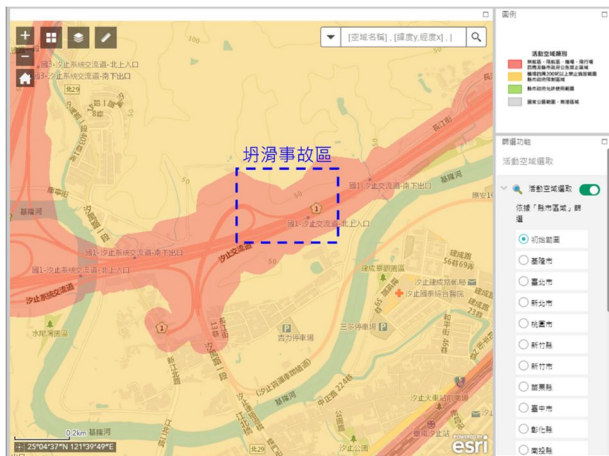


圖 3 本案作業範圍禁限航區

3.2 UAV 空拍

本計畫使用無人機執行空中影像拍攝作業，主要用於災害現況影像收集，並透過 3D 影像建模作為災區影響範圍初判，以及救災任務之作業規劃，並以多時期的持續空拍以掌握災區的變化，本案共分別於 111 年 11 月 2、3、4、5、10 日執行五次空拍作業，其中 11 月 4 日為坍滑區取景拍照，其餘四次均為垂直正拍製作正射影像及 3D 建模，UAV 正射影像產製流程如圖 4，作業過程說明如下。

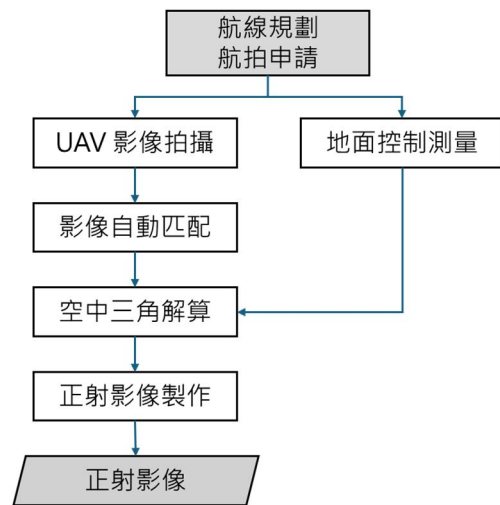


圖 4 UAV 正射影像產製流程

3.2.1 控制測量

- (1) 平面坐標使用內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態坐標系統，坐標系統為內政部公佈之 TWD97[2010]國家坐標系統；高程系統依據內政部公告之大地起伏轉換高程至 TWVD2001 正高系統。
- (2) 採內政部國土測繪中心 VBS-RTK 即時動態定位技術測量方式，收斂筆數大於 180 筆，計算每次觀測之平均坐標值作為控制測量成果。
- (3) 共測量 2 個現地特徵點位 ST01 以及 ST02 作為臨時基地站，坐標成果如表 4，現地測量作業照片如圖 5。
- (4) 基地站：無人飛行載具執行期間，為了能獲得準確的空中姿態與外方位，同時於測區鄰近位置架設基地站，並於無人機啟動與紀錄期間蒐集 GNSS 資料，用於後解算精密軌跡。



圖 5 控制測量作業

3.2.2 UAV 空拍及影像處理分析

採用 Zenmuse P1 相機執行 UAV 空拍作業，相機規格詳如表 5。於 111 年 11 月 2、3、4、5、10 日共執行五次空拍作業，其中 11 月 4 日為坍滑區取景拍照，側拍像片成果如圖 6，其餘四次均為垂直

正拍製作正射影像，影像地面解析度(GSD)為 2cm，正射影像成果如圖 7。

將無人機空拍影像使用 ContextCapture 軟體進行正射影像拼接處理及 3D 影像模型建置，利用正射影像評估坍滑區影響範圍，概估坍滑影響範圍約 6,800 m²(如圖 8 紅色虛線範圍)；另利用空拍影像產製之 3D 影像模型來產製數值地形 DSM，與崩塌前 DEM 套疊進行高程差異比對，透過兩種不同色系的變化代表土石崩塌及堆積的程度(如圖 9 紅色虛線範圍)，圖 9 紅色虛線範圍暖色系代表土石崩塌；冷色系代表土石堆積，然後分別標出紅區及藍區，分別以後期 DEM 值減去前期 DEM 值估算各區土方量，依此概估坍滑土方量約 4,600 m³；坍滑之土方堆積至下邊坡及高速公路路邊，其產生之堆積土方(鬆方)約 6,900 m³ (高速公路局北區養護工程分局，2023)。

表 4 控制點成果

單位：公尺(m)

點號	橫坐標	縱坐標	橢球高	正高	類型
ST01	316419.405	2774333.101	42.959	22.446	自然特徵點
ST02	316237.386	2774244.915	43.489	22.979	自然特徵點

表 5 Zenmuse P1 相機規格參數 (摘錄自：先創國際股份有限公司，2024)

儀器圖片	參數名稱	規格參數
	尺寸	198 × 169 × 129 mm
	重量	800 g
	IP 保護等級	IP4X
	感測器尺寸	35.9 × 24 mm (全片幅) 34 × 19 mm (影片)
	影像尺寸	8192 × 5460 pixels；4500 萬畫素
	像素大小	4.4 μm
	鏡頭	FOV 63.5°；焦距 35 mm FOV 84°；焦距 24 mm
	GSD	2.5 cm (35 mm，航高 200 m)
		3.7 cm (24 mm，航高 200 m)



圖 6 111 年 11 月 04 日空中側拍取景照片



圖 7 空拍正射影像



圖 8 坍滑影響範圍(紅色虛線範圍)

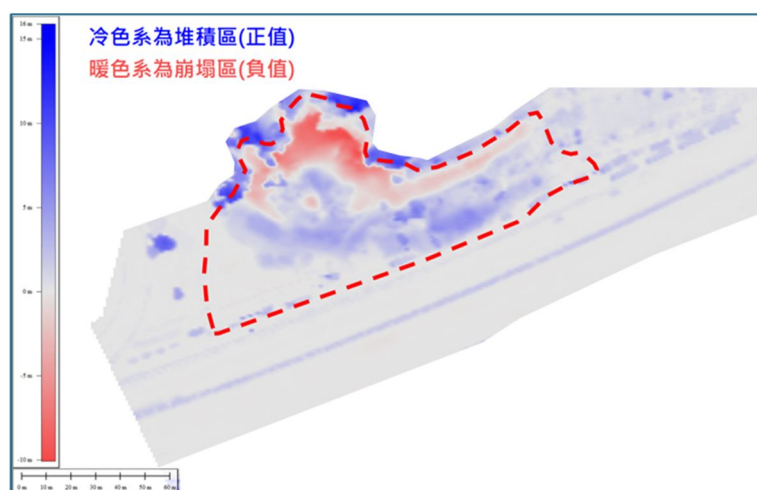


圖 9 3D 影像模型 DEM 與崩塌前 DEM 套疊比對

3.3 UAV 空載光達掃描

本計畫同時使用無人機執行空載光達(LiDAR)進行掃描作業，藉由光達對植被穿透的能力，取得分類後地表回波之三維點雲(Point Cloud)，獲得更真實之地表資訊，可更精準的估算土方量，並瞭解邊坡上是否仍有裂縫、孤石等，故分別於 111 年 11 月 5、10 日執行二次空中掃描作業，作業流程如圖 10，作業過程說明如下。

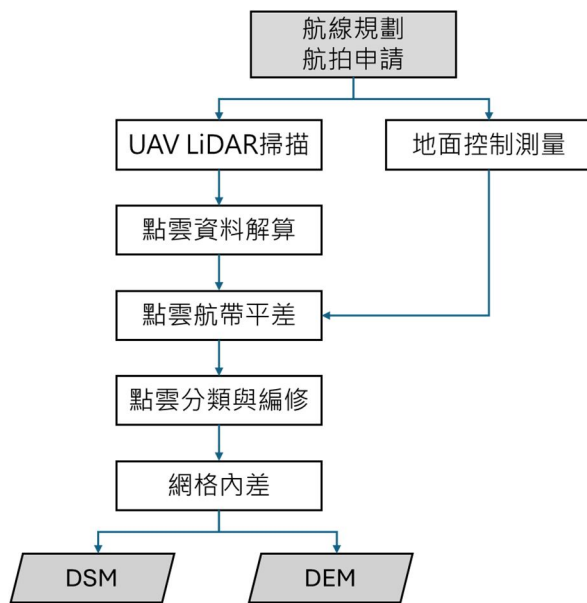


圖 10 UAV 光達產製 DEM 作業流程

3.3.1 控制測量

採內政部國土測繪中心 VBS-RTK 即時動態定位技術測量方式，收斂筆數大於 180 筆，計算每次觀測之平均坐標值作為控制測量成果。以自行車架設之臨時基地站(Base Station)作為無人載具軌跡算依據。

3.3.2 UAV 光達掃描及點雲處理

採用 Riegl Mini-VUX-1 UAV 雷射掃描儀，搭配 Applanix APX-15 慣導系統進行無人載具光達掃描，掃描儀規格如表 6。

(1) 掃描作業

針對邊坡坍塌區分別於 11 月 5 日及 11 月 10 日各進行一次坍塌區邊坡 UAV 光達掃描作業，現場飛航掃描任務執行依照所採用的定位定向系統

之校準程序進行，同時架設靜態衛星接收儀(或採用距離測區 10 km 半徑以內之衛星追蹤站資料)，據以進行定位定向系統後處理，以確保成果點雲品質。接續利用軌跡解算軟體檢核軌跡分布以及解算精度。

(2) 無人機光達掃描點雲處理

使用 RIEGL 原廠建議之套裝軟體 RiPROCESS 融合定位定向資料進行後處理以及點雲平差計算，解算後輸出 LAS 格式點雲資料，並保留點雲的地面三維坐標值、反射強度值、回波順序、GNSS 時間戳記等資料。

(3) 點雲分類與編修

採用 Microstation 進行點雲自動化分類，再以人工編修方式全面確認點雲分類成果，點雲人工分類畫面如圖 11。經濾除植被後之點雲資料，如圖 12。

(4) 數值模型 DEM 製作

利用編修後的地表點雲，以 QTM LiDAR 點雲處理軟體進行規則化網格內插為 10cm 解析度 DEM，111 年 11 月 05 日及 111 年 11 月 10 日 DEM 成果如圖 13。

3.4 地面光達掃描

本計畫使用 UAV 空載光達進行上部地形點雲資料收集外，由於 UAV 係由空中向地面正向之掃描，其對於側向的資訊如地形倒懸情況則無法獲得點雲資訊，故本案同時使用地面固定式光達掃描儀(RIEGL VZ-400i)進行全區邊坡的側向掃描，期能更全面完整的收集現況地形資訊，亦希望透過不同時期對坍塌區邊坡的掃描比對以確認是否仍有整體坍塌的情況，並作為邊坡土方清除作業之參考。故分別於 11 月 4、8 日二日進行坍塌邊坡掃描，11 月 8、9、10 日三天進行邊坡變異監測，作業統計如表 7。

3.4.1 坐標系統

平面坐標使用內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態坐標系統，坐標系統為內政部公佈之 TWD97[2010]國家坐標系統；高程系統依據內政部公告之大地起伏轉換高程至 TWVD2001 正高系統。

並依據本案於現地布設之 2 個現地特徵點 ST01 以及 ST02 作為點雲成果之坐標轉換基準點。

3.4.2掃描作業

使用 RIEGL VZ-400i 地面光達掃描儀進行掃描作業，儀器參數規格如表 8。針對邊坡坍塌區分別於 11 月 4 日及 11 月 8 日各進行一次坍塌區邊坡地

面光達掃描，掃描作業如圖 14。

(1)11 月 4 日坍塌區掃描：

共計架設 28 處掃描站，掃描站分布如圖 15，原始光達點雲約 15,000 萬點，掃描點雲須經拼接、清除雜訊及雜點，以及濾除非地面點及植被等保留地面點，光達點雲成果如圖 16。

表 6 RIEGAL Mini-Vux-1-UAV 規格參數 (摘錄自：迅聯光電有限公司，2020)

儀器圖片	參數名稱	規格參數
	尺寸 (mm)	243×111×85
	重量 (g)	1600
	IP 防護等級	IP64
	最大測量範圍(m, 物體反射率)	170, 20
	掃描模式	旋轉鏡
	掃描速度 (轉/秒(等於次/秒))	10-100
	點雲資料率(點/秒)	100,000
	測距準確度(Accuracy) (mm)	15
	測距精確度(Precision) (mm)	10
	最多回波數	5, 全波形
	FOV (°)	360

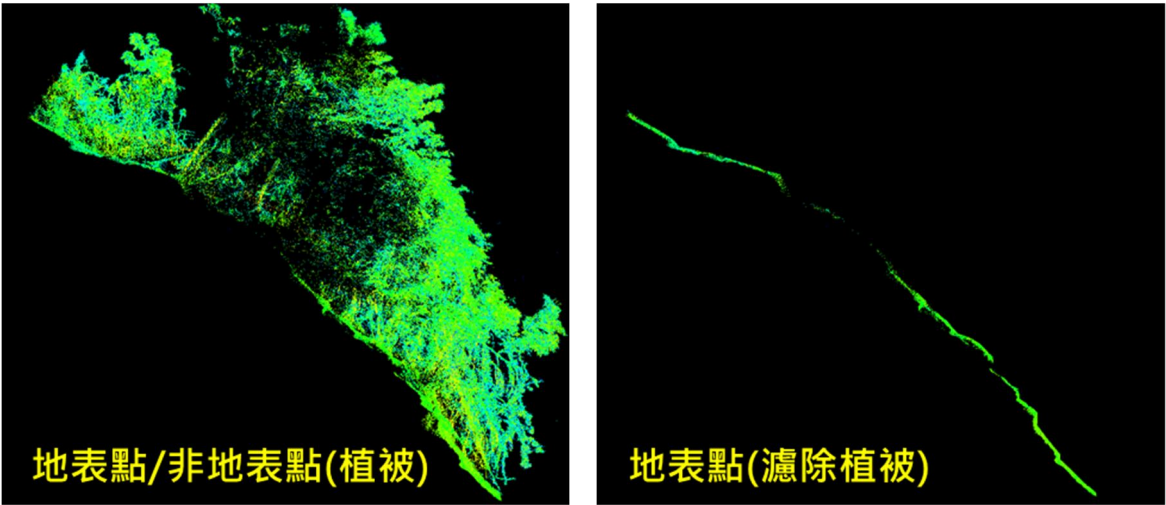


圖 11 點雲編修分類成果示意圖

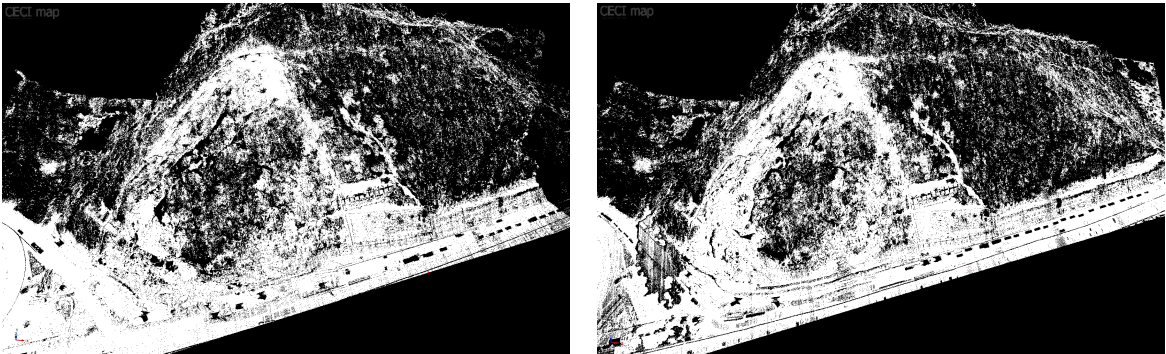


圖 12 濾除植被後之點雲成果

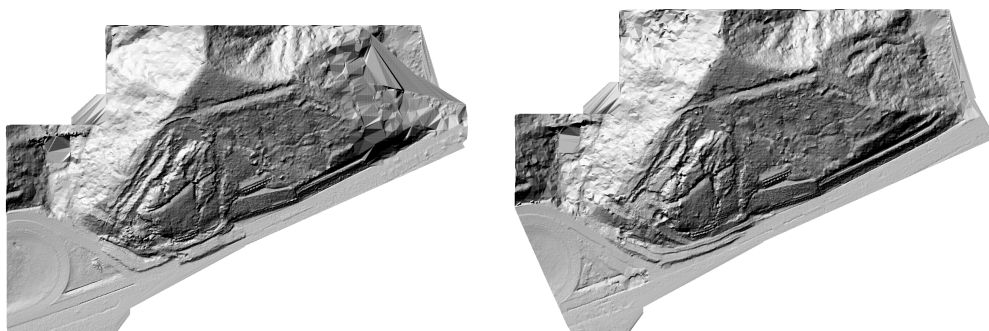


圖 13 UAV 光達 DEM 模型



圖 14 地面光達掃描作業

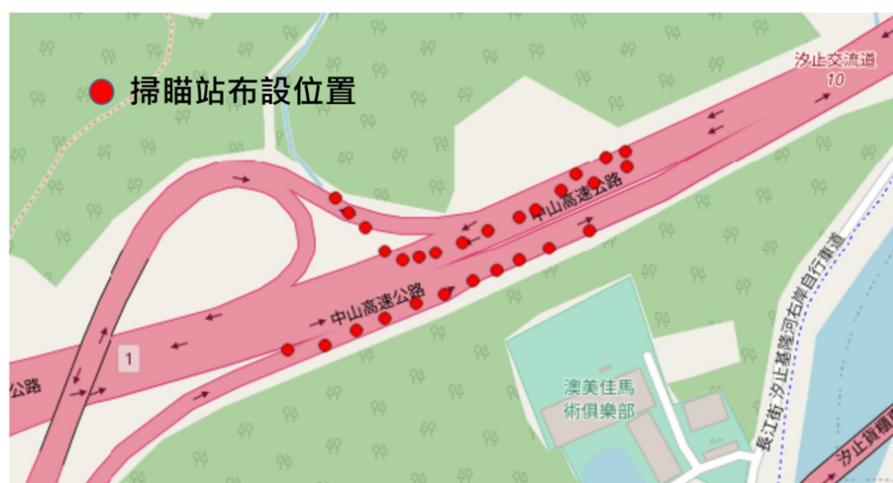


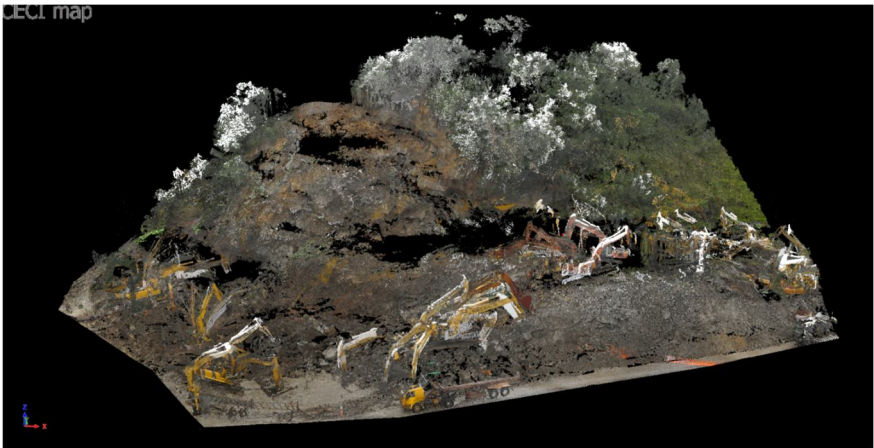
圖 15 光達掃描站分布圖(111.11.04)

表 7 地面光達作業項目及主要成果

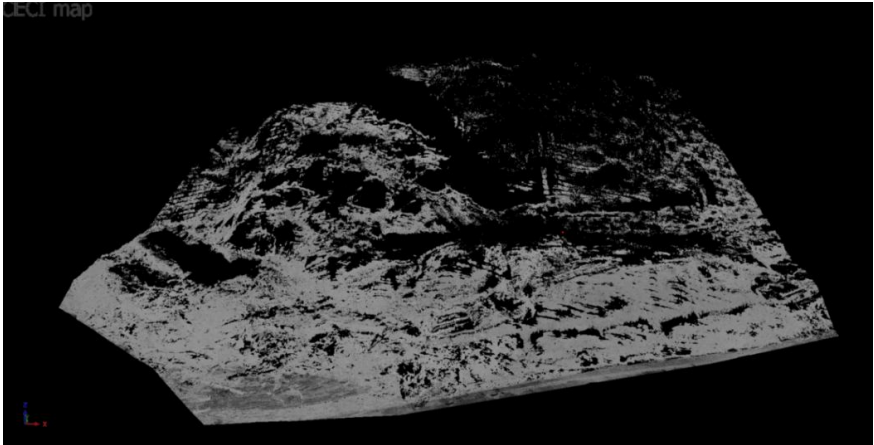
執行日期	主要工作內容及成果
111.11.04	土石坍滑區掃描，3D 點雲
111.11.08	土石坍滑區掃描，3D 點雲
111.11.08	裸露邊坡斷面監測，12:00~15:30(單站@30min)，共 6 筆
111.11.09	裸露邊坡斷面監測，10:00~15:30(單站@30min)，共 12 筆
111.11.10	裸露邊坡斷面監測，10:30(單站)，共 1 筆

表 8 RIEGL VZ-400i 基本規格參數

儀器圖片	參數名稱	規格參數
	掃描型式	脈衝式
	測量速率	42,000~500,000 (meas./sec)
	最大測量範圍	1.5m~800m
	精度	3mm
	視野範圍 (FOV)	100° 垂直 360° 水平
	數位相機	Nikon D850 (4,575 萬畫素)



(a) 原始光達點雲



(b) 濾除非地面點及植被後
圖 16 地面光達點雲成果(11.11.04)

(2)11 月 8 日坍滑區掃描：

共計架設 18 處掃描站，掃描站分布如圖 17，原始光達點雲約 18,000 萬點，掃描點雲須經拼接、清除雜訊及雜點，以及濾除非地面點及植被等保留地面點，光達點雲成果如圖 18。

3.4.3地面光達點雲分析

掃描資料後處理使用 RIEGL 原廠建議之套裝軟體 RiSCAN PRO 進行點雲拼接、雜點清除及植被濾除等工作；另使用 Global Mapper 軟體進行點雲分類及萃取地面點雲資料。原始點雲資料經濾除非地面點及植被後計算 DEM 資料(如圖 19)，並將二期之 DEM 成果套疊後，可明顯看出工程進行中邊坡斷面土方的變化情形(如圖 20)。

3.5 地面光達掃描監測

於搶修期間因考量邊坡土石仍有滑動之風險(如圖 21)，滑動將可能影響清運之作業人員與機具

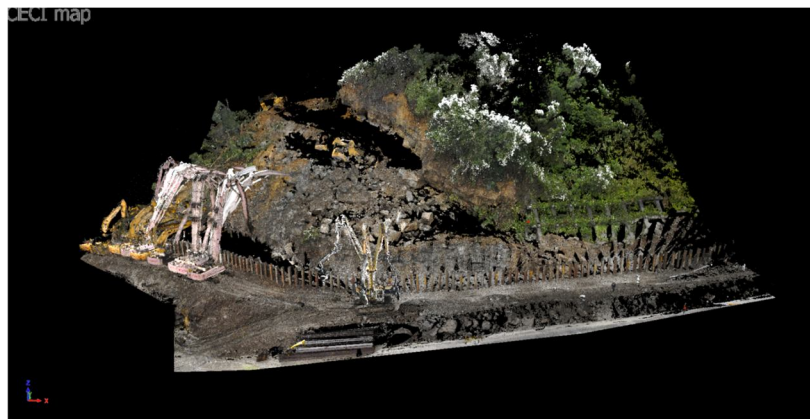
安全，故於現場選定該處可能坍滑之坡面位置使用地面固定式光達掃描儀(RIEGL VZ-400i)進行定時定點之斷面掃描監測。於 11 月 8 日 12:00 開始監測，並以此次掃描之資料作為初始值，提供後續變異之比對，以每隔 30 分鐘掃描一次作比對，掃描作業時間彙整如表 9，掃描坡面以及初始基準點雲成果(如圖 22)。

表 9 邊坡光達掃描作業日期與時間

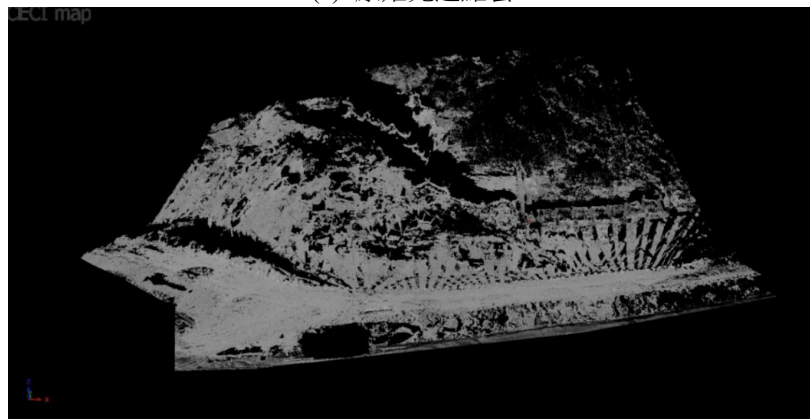
日期	時間	日期	時間
11/8	12:00	11/9	12:00
11/8	13:00	11/9	12:30
11/8	13:30	11/9	13:00
11/8	14:00	11/9	13:30
11/8	14:30	11/9	14:00
11/8	15:30	11/9	14:30
11/9	10:00	11/9	15:00
11/9	10:30	11/9	15:30
11/9	11:00	11/10	10:30
11/9	11:30		



圖 17 光達掃描站分布圖(111.11.08)



(a) 原始光達點雲



(b) 濾除非地面點及植被後

圖 18 地面光達點雲成果(111.11.08)

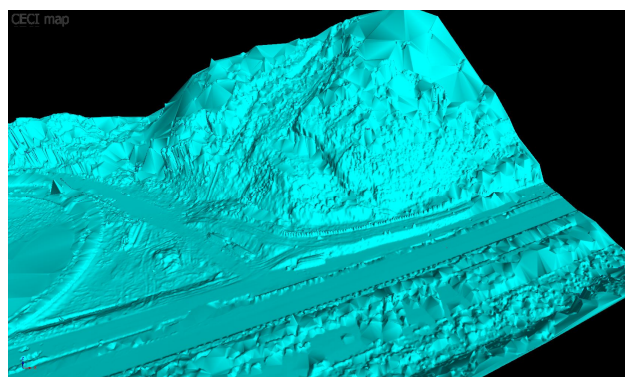


圖 19 地面光達 DEM 模型



圖 20 邊坡斷面土方變化情形



圖 21 地表岩屑隨時掉落之裸露危險岩面



圖 22 地面光達掃描坡面位置與基準面點雲(111.11.08)

3.5.1 監測作業方式

於固定時間掃描同一坡面(如圖 22)，並取 3 條斷面(A1、A2、A3)進行比較(如圖 23)。

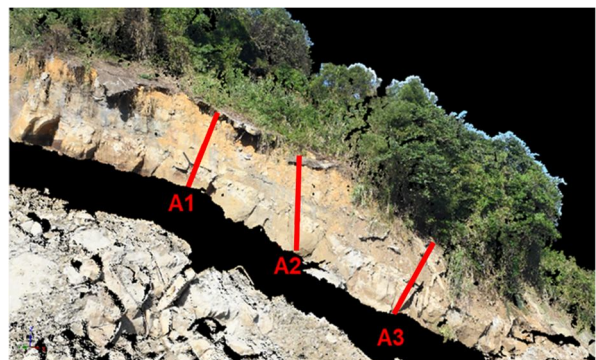


圖 23 斷面取樣位置

3.5.2 監測結果

(1) A1 斷面：

各期斷面資料比對如圖 24，最後一筆(11.10 AM10:30)監測資料與初始值資料(11.08 AM12:00)比較，最大差值約 4.2 cm。由於監測期間邊坡仍持續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

(2) A2 斷面：

各期斷面資料比對如圖 25，最後一筆(11.10 AM10:30)監測資料與初始值資料(11.08 AM12:00)比較，最大差值約 7.7 cm。由於監測期間邊坡仍持續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

(3) A3 斷面：

各期斷面資料比對如圖 26，最後一筆(11.10 AM10:30)監測資料與初始值資料(11.08 AM12:00)比較，最大差值約 7.2 cm。由於監測期間邊坡仍持

續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

3.6 全測站雷射經緯儀監測

由於災區作業在邊坡尚未穩定之情況下，對於搶修人員機具仍有存在一定的風險，為使工作人員在安全無虞的情況下安心作業，應確保各項監測數據之正確可靠，故本案針對地面光達監測的同一坡面，另選擇 5 處特定位置同時以全測站雷射經緯儀施測該等特定位置之三維坐標，以作為光達掃描監測結果之雙重確認。於 111 年 11 月 08 日每 5~10 分鐘施測該等特定點 1 次絕對坐標，執行時間分別為 11:42~12:20 及 13:23~15:11，計施測 5 個位置，共 26 筆資料，將各點每次施測成果均與第一次初測值比對，比對結果如表 10。由於監測期間邊坡仍持續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

表 10 特定點位測量結果比較表

單位：公尺(m)

項次	點號-時間	N 坐標	E 坐標	ΔN	ΔE	Z	ΔZ
1	A1-11:42	2774306.687	316240.569			42.132	
2	A1-11:45	2774306.690	316240.568	0.003	-0.001	42.133	0.001
3	A1-11:50	2774306.691	316240.569	0.004	0.000	42.132	0.000
4	A1-11:55	2774306.687	316240.567	0.000	-0.002	42.139	0.007
5	A1-12:00	2774306.689	316240.569	0.002	0.000	42.135	0.003
6	A1-12:05	2774306.688	316240.571	0.001	0.002	42.136	0.004
7	A1-12:10	2774306.688	316240.573	0.001	0.004	42.134	0.002
8	A1-12:15	2774306.688	316240.574	0.001	0.005	42.133	0.001
9	A1-12:20	2774306.690	316240.576	0.003	0.007	42.127	-0.005
10	A2-13:23	2774304.175	316242.638			41.002	
11	A2-13:29	2774304.176	316242.638	0.001	0.000	41.004	0.002
12	A2-13:34	2774304.170	316242.633	-0.005	-0.005	40.991	-0.011
13	A2-13:39	2774304.171	316242.634	-0.004	-0.004	40.992	-0.010
14	A2-13:44	2774304.171	316242.635	-0.004	-0.003	40.993	-0.009
15	M1-14:10	2774311.653	316232.195			42.43	
16	M1-14:20	2774311.645	316232.195	-0.008	0.000	42.435	0.005
17	M1-14:29	2774311.672	316232.234	0.019	0.039	42.435	0.005
18	M1-14:38	2774311.673	316232.235	0.020	0.040	42.435	0.005
19	M2-14:10	2774310.603	316234.369			42.384	
20	M2-14:20	2774310.613	316234.377	0.010	0.008	42.386	0.002
21	M2-14:29	2774310.608	316234.380	0.005	0.011	42.389	0.005
22	M2-14:38	2774310.620	316234.380	0.017	0.011	42.381	-0.003
23	K1-14:41	2774302.607	316246.798			42.733	
24	K1-14:56	2774302.600	316246.793	-0.007	-0.005	42.727	-0.006
25	K1-15:01	2774302.598	316246.792	-0.009	-0.006	42.725	-0.008
26	K1-15:11	2774302.606	316246.796	-0.001	-0.002	42.729	-0.004

(高速公路局北區養護工程分局，2023)

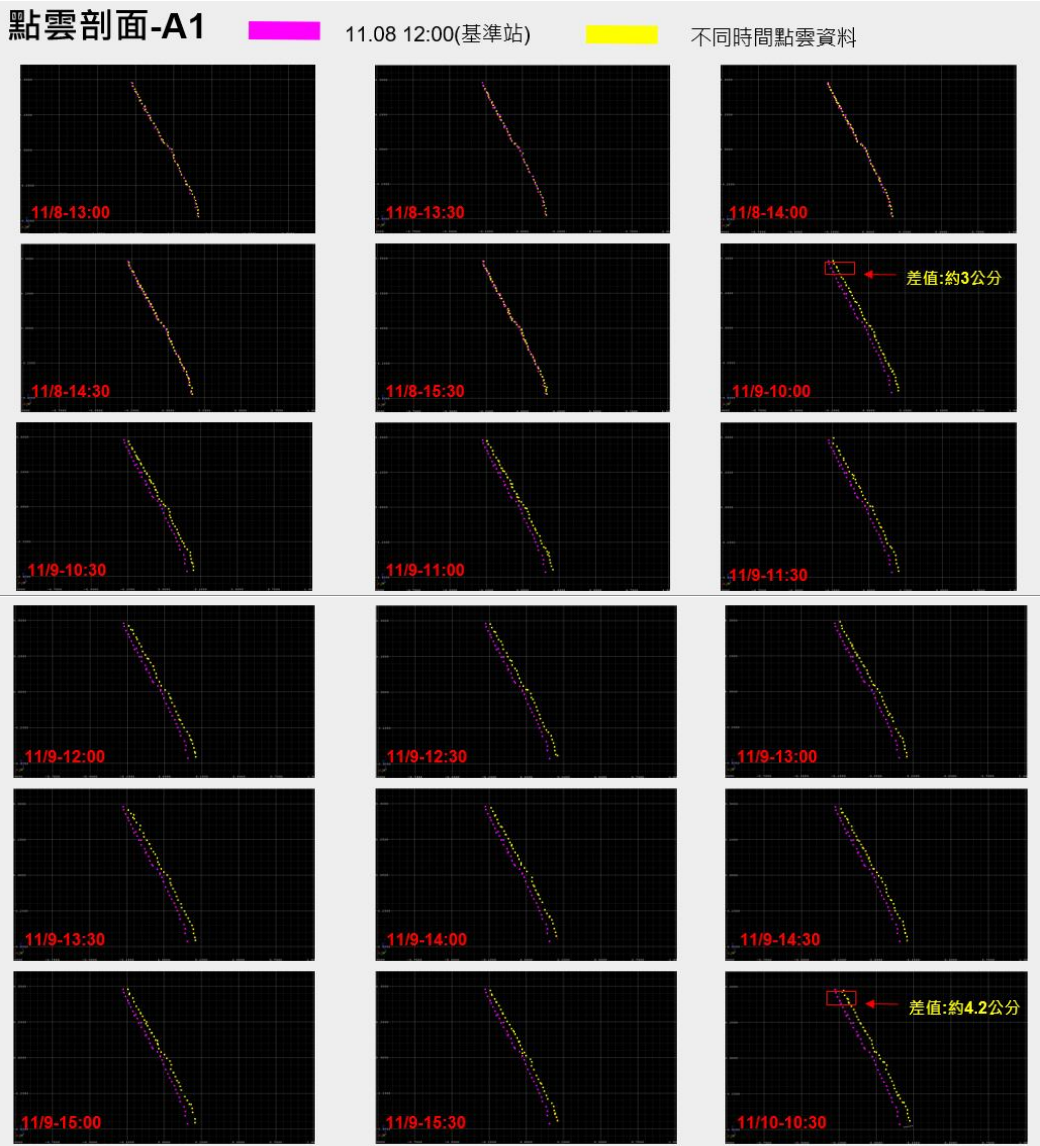
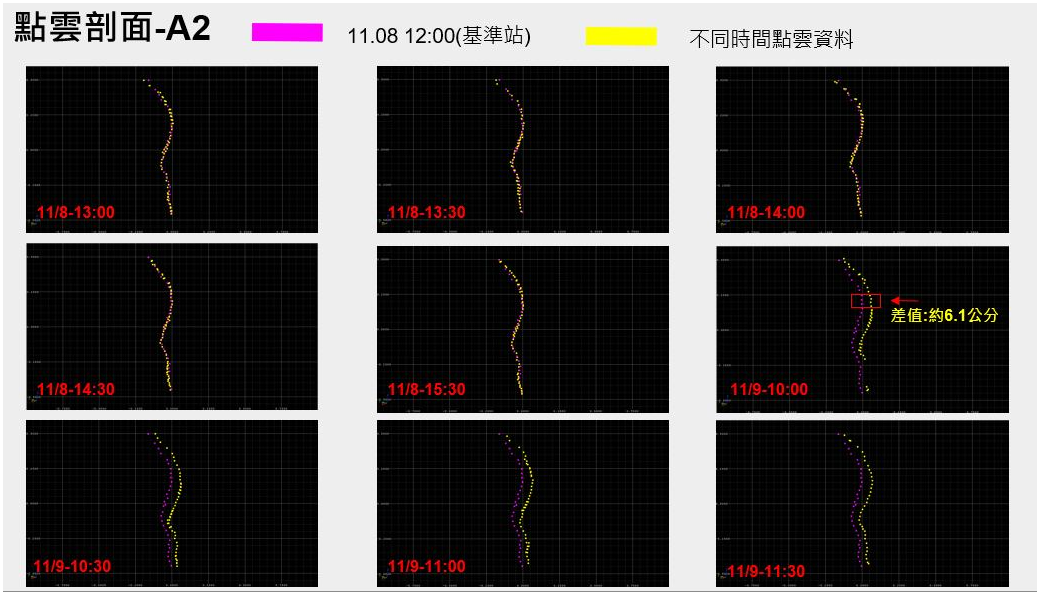


圖 24 A1 斷面各時期比對結果



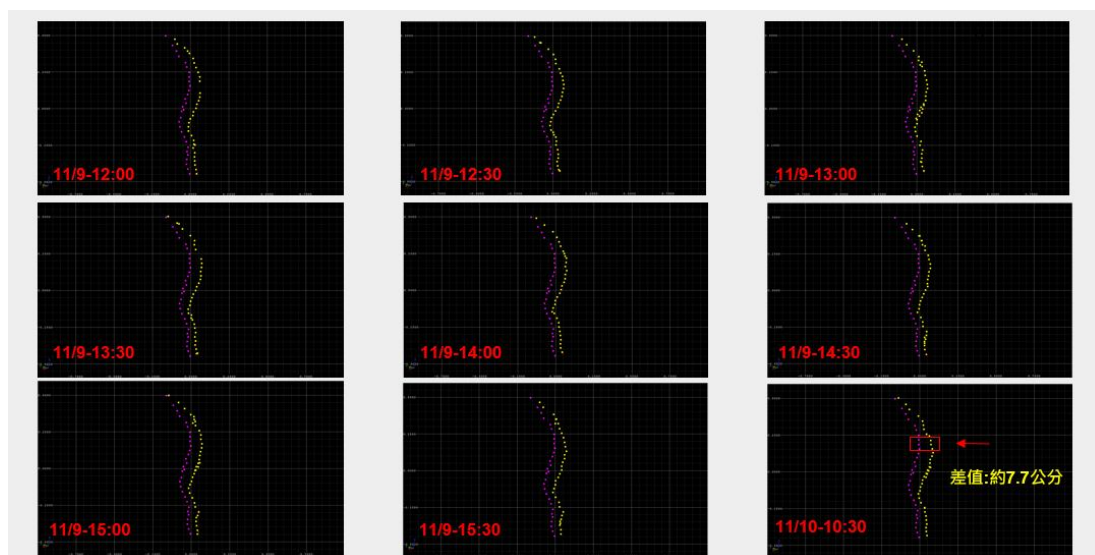


圖 25 A2 斷面各時期比對結果

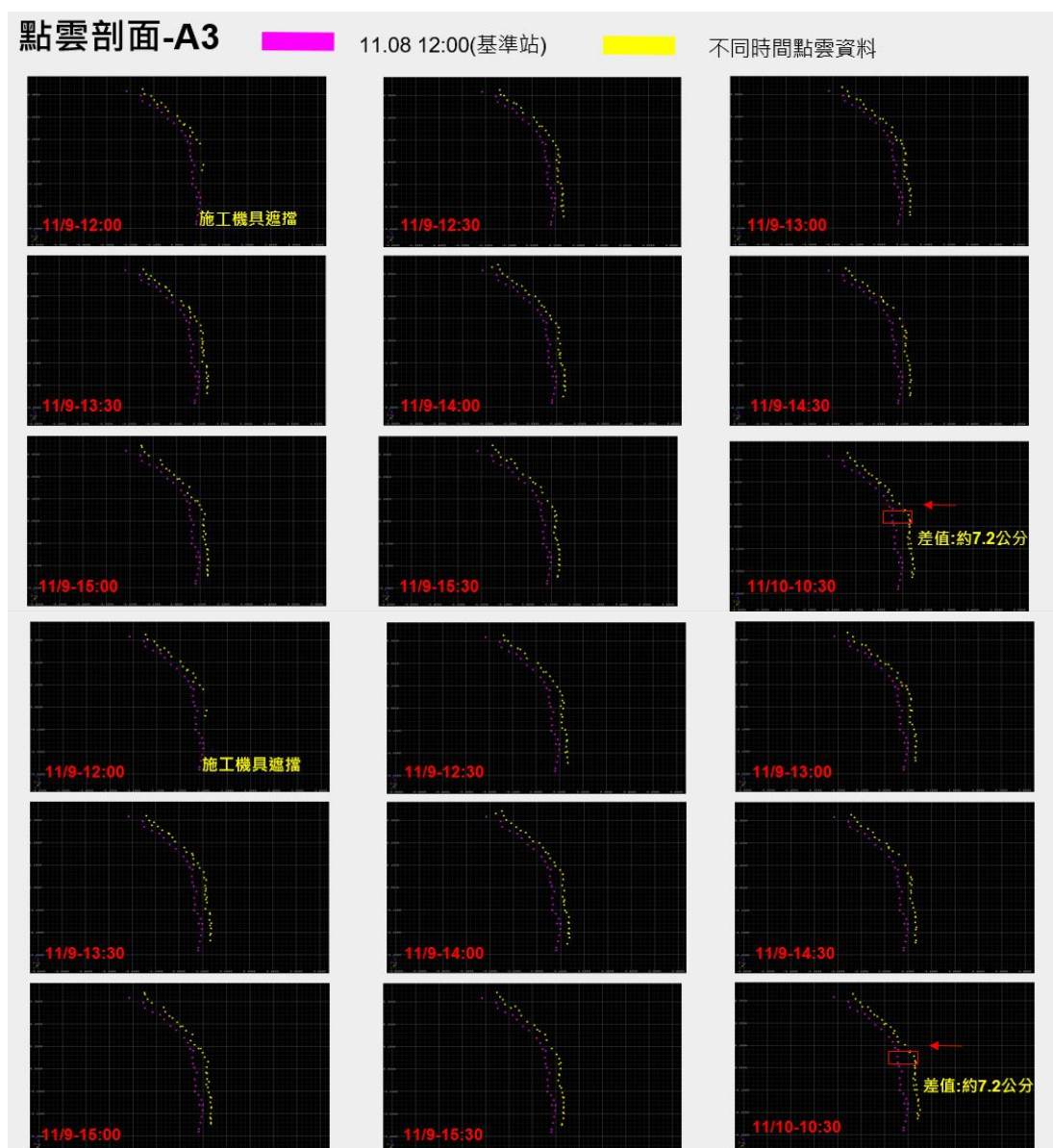


圖 26 A3 斷面各時期比對結果

4. 結論與建議

本項救災階段測量調查作業，作業期間為 111 年 11 月 2 日至 111 年 11 月 8 日，作業目的主要為因應緊急搶修需求，迅速提供災害現地地形情況和即時的訊息輔助搶修，並利於現地指揮中心作業及突發狀況之即時應變以確保救災安全，故相關測量成果皆為當下階段性或臨時性的成果。本文僅針對災害區空間資訊收集之遙測技術探討說明提供參考，而對於邊坡、地質或工程等專業評析議題，則可藉由本遙測技術所收集到之相關地形資訊作為後續評析及復健等工程設計參考。

由於緊急搶修作業時間緊迫，整體作業流程由第一時間緊急動員 UAV 進行空拍及光達掃描、建立地面控制點，快速取得災區地形現況，建立 3D 地形模型，標註災害範圍，並利用內政部 5 m DEM 資料概估坍塌範圍土方量，提供救災人員進行動線安排及清運規劃。於搶修期間為避免其他未坍塌處因土石鬆動而再次坍塌，應用地面光達及全測站經緯儀進行定點定時監測，隨時掌握地形變化，提供搶修決策並確保搶修人員安全。各項作業過程順暢，有效的收集地形資訊協助救災作業。針對本次任務執行結果所遭遇困難限制及建議，提出以下幾點供未來遭遇此類災害搶修作業時參考：

(1) 作業限制：

- A. 天候影響：天候情況不佳連續下雨，影響測量作業進行。
- B. 二次災害：災害區土石鬆動且地表濕滑泥濘，邊坡有再次坍塌的可能，作業安全風險高。
- C. 測量精度：在產製災區 DEM 的過程，由於作業時程緊迫，對於測量控制點之來源及分布、共同基準點之引用、天候環境、測量方式等均不能等同一般正常作業，故在精度評估上難有一可靠的基準；又加上對比既有資料的來源基準不一(如災前地形資料等)，此方面也可能會造成成果些許差異。
- D. 測量與搶修工程同時進行：工程機具不斷進出，影響測量作業之效率。

(2) 未來建議：

- A. 應即時彙整對於測量的需求：因緊急搶修作業時間緊迫，針對不同的需求綜合評估、搭配使用相應的測量技術，使測量資訊能發揮效用。
- B. 審慎評估選用測量設備：多項設備一起作業或多次作業，測量設備的資訊整合及資料的一致性須事先審慎評估，以避免無效作業。
- C. 多項技術同時應用須考量成果界面銜接：應優先布設共同使用之控制點，以利相關測量作業能有一致的控制基準，亦可作為後續施工之依據。
- D. UAV 空拍作業須掌握時效即刻進行：如按民航局一般程序申請航飛，恐將緩不濟急，建議對於緊急救災之無人機空拍能有特許程序，以掌握救災時效。
- E. 本文主要說明災害緊急搶修作業所作之監測應用，對於未來邊坡穩定之監測，建議可應用合成孔徑雷達(SAR)技術進行廣域之監測，藉由定期監測數據進行潛勢分析，達到預警之效果。

本文僅針對災害區空間資訊收集之遙測技術探討說明提供參考，而對於邊坡、地質或工程等專業評析議題，則可藉由本遙測技術所收集到之相關地形資訊作為後續評析及復健等工程設計使用。

致謝

另由於本次任務作業時程急迫，緊急動員，也感謝自強工程顧問公司配合緊急調度支援 UAV 光達，經緯儀，地面光達等人力設備。本次作業動員無人機空拍、無人機光達掃描、地面光達掃描、全測站雷射經緯儀等多項先進設備技術共同作業，各項遙測監測技術確實對災區搶修復建作業發揮實質效用，使搶修行動能在安全監測情況下進行，順利完成。

參考文獻

- 先創國際股份有限公司，2024。DJI 禪思 Zenmuse P1 全片幅鏡頭，
<https://www.esentra.com.tw/product/dji-zenmuse-p1/>，引用 2024/09/20。[SENTRA, 2024.
DJI Zenmuse P1 integrates a full-frame sensor,

- Available at: <https://www.esentra.com.tw/product/dji-zenmuse-p1/>, Accessed 2024/09/20. (in Chinese)]
- 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉萍、冀樹勇，2015。微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬，中華水土保持學報，46(2)：96-105。[Lee, C.F., Huang, W.K., Tsao, T.C., Chang, Y.L., and Chi, S.Y., 2015. A study of the numerical simulation of debris flow hazard combined with micro-photography interpretation, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 46(2): 96-105. (in Chinese)]
- 迅聯光電有限公司，2020。RIEGL UAV 光達，<https://www.linkfast.com.tw/?action=product&id=17>，引用2024/09/20。[LinkFast Technology Co., Ltd., 2020. RIEGL UAV LiDAR, Available at: <https://www.linkfast.com.tw/?action=product&id=17>, Accessed 2024/09/20. (in Chinese)]
- 高速公路局北區養護工程分局，2023。國道 1 號南下路段 10.1 K 邊坡坍塌緊急遙測科技監測報告。[Northern Region Branch Office, Freeway Bureau, Ministry of Transportation and Communications, 2023. Guo dau 1 hau nan shia lu duan 10.1 K bian po tan hua jin ji yau tse ke ji jian tse bau gau. (in Chinese)]
- 國家災害防救科技中心，2020。臺灣歷史天然災害統計，<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/Cli mateDetail/BAL00000005>，引用 2024/09/20。[National Science and Technology Center for Disaster Reduction, 2020. Taiwan li shr tian ran tzai hai tung ji, Available at: <https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/Cli mateDetail/BAL00000005>, Accessed 2024/09/20. (in Chinese)]
- 黃宇謙、胡啟文、闕嘉宏，2025。UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討，交通部運輸研究所。[Huang, Y.C., Hu, C.W., and Chueh C.H., 2025. Exploring the Application of UAV Combined with Deep Learning for Slope Disaster Prevention in Highway Bureau Operations, Institute of Transportation Ministry of Transportation and Communications. (in Chinese)]
- 劉鎮毅、陳建璋、魏浚紘，2024。結合地面與無人空中載具光達推估大葉桃花心木人工林林分材積，航測及遙測學刊，29(2)：91-114，DOI：10.6574/JPRS.202406_29(2).0003。[Liu, C.Y., Chen, J.C., and Wei, C.H., 2024. Integrating terrestrial and airborne laser scanning to estimate stand volume of *Swietenia macrophylla* king plantations, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(2): 91-114, DOI: 10.6574/JPRS.202406_29(2).0003. (in Chinese)]
- 蔡富安，2020。多元遙測災害調查評估與分析，臺灣研究亮點，https://trh.gase.most.ntnu.edu.tw/tw/article/content/158?utm_source=chatgpt.com，引用 2025/05/19。[Tsai, F., 2020. Versatile remote sensing and spatial analysis for hazard investigation, Taiwan Research Highlight, Available at: https://trh.gase.most.ntnu.edu.tw/tw/article/content/158?utm_source=chatgpt.com, Accessed 2025/05/19. (in Chinese)]
- 謝有忠，2016。以多期數值地形資料評估山崩區及河道地形之變遷，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，DOI：10.6342/NTU201603713。[Hsieh, Y.C., 2016. Evaluation of landslide area and fluvial changes using multi-period digital elevation models, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC, DOI: 10.6342/NTU201603713. (in Chinese)]
- 鍾鳴峰，2024。無人機智慧技術於山坡地水保工程

- 與工程災害復建地形測繪精進應用，水保技術，18：32-45。[Chung, M.F., 2024. Advanced applications of smart drone technology in slope land soil and water conservation engineering, *Journal of Soil and Water Conservation Technology*, 18: 32-45. (in Chinese)]
- Ghorbanzadeh, O., Meena, S.R., Blaschke, T., and Aryal, J., 2019. UAV-based slope failure detection using deep-learning convolutional neural networks, *Remote Sensing*, 11(17): 2046, DOI: 10.3390/rs11172046.
- Khanal, M., Hasan, M., Sterbentz, N., Johnson, R., and Weatherly, J., 2020. Accuracy comparison of aerial lidar, mobile-terrestrial lidar, and UAV photogrammetric capture data elevations over different terrain types, *Infrastructures*, 5(8): 65, DOI: 10.3390/infrastructures5080065.
- Tamimi, R., and Toth, C., 2024. Accuracy assessment of UAV LiDAR compared to traditional total station for geospatial data collection in land surveying contexts, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2-2024, 421–426, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-421-2024.

Integration of Multi-Remote Sensing Technologies for Slope Disaster Recovery on Highways

Hong-Kuei Cheng ¹ Kweishr Li ² Hsing-Hua Chiang ^{3*} Wen-Liang Chueh ³

Abstract

Taiwan's unique topography and environmental conditions make it highly susceptible to natural disasters, which often result in significant environmental damage and pose threats to human lives and property. Given the urgent nature of disaster response, it is imperative to obtain timely and accurate information regarding affected areas. Furthermore, the risk of secondary disasters must not be underestimated, underscoring the importance of comprehensive spatial data collection in disaster-stricken regions. The completeness and accuracy of such data directly influence the efficiency and effectiveness of emergency response and recovery operations. This study presents a case in which a combination of remote sensing technologies—including Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for aerial imagery and 3D reconstruction, Light Detection and Ranging (LiDAR) for point cloud modeling, and total stations for geodetic surveying—was employed to rapidly acquire spatial information in disaster areas. The integrated approach provided critical support for emergency repair and post-disaster reconstruction, demonstrating the value of adopting diverse technologies to meet varying operational requirements.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Light Detection and Ranging(LiDAR), 3D Modeling, Point Cloud

¹ Associate Vice President, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

² Director, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

³ Deputy Manager, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

* Corresponding Author, E-mail: chsh@ceci.com.tw

Received Date: Jan. 02, 2025

Revised Date: May 19, 2025

Accepted Date: Sep.15, 2025