

多期無人機影像建模及光達測繪於落石型災害公路邊坡之 養護與減災應用

曾廷睿⁽¹⁾⁽²⁾ 吳宥增⁽³⁾ 劉昱緯⁽⁴⁾ 邱雅筑⁽⁵⁾

摘 要

台灣多山地形使公路邊坡易受落石災害威脅。台灣公路邊坡初期仰賴視野受限的目視巡查進行安全評估，為擴大監測範圍與提升評估能力，公路局逐步導入科技工具，其中無人機攝影測量透過三維建模擴展檢查視野並初步識別坡面狀況及浮落石，但在植林區域仍難以穿透獲取地表資料，形成監測盲區。本研究為克服此限制，進一步導入無人機光達（UAV LiDAR）技術，利用其高穿透性對林下區域進行地形資料蒐集。以台 21 線 141k+415 落石型災害邊坡為案例，運用多期無人機影像與光達數值高程模型，結合 M3C2 演算法進行變異比對。研究成果顯示，整合無人機攝影測量與光達的綜合技術為邊坡提供量化且全坡面的評估資料。不僅有效識別並追蹤浮落石料源、張力裂縫，更精準掌握落石的發生位置、範圍與大小，進而為短期清除與長期養護策略提供重要參考依據。為邊坡監測和地貌變化偵測提供了更全面且精確的研究成果。

(**關鍵詞**：落石、無人機、公路巡查、光達、地形變異)

Application on maintenance and hazard mitigation of rockfall-prone highway slope with multi-temporal UAV photogrammetry and UAV-LiDAR surveying

Ting-Jui Tseng ⁽¹⁾⁽²⁾ *Yu-Tseng Wu* ⁽³⁾ *Yu-Wei-Liu* ⁽⁴⁾ *Ya-Chu Chiu* ⁽⁵⁾

Ph.D. student ⁽¹⁾ Assistant Professor ⁽⁵⁾, Department of Soil and Water Conservation, National
Chung-Hsing University, Taiwan

Manager ⁽²⁾ Chien Kun Surveying & Mapping Technology Co., Ltd.

Station Director ⁽³⁾ Central Region Branch Office Highway Bureau. MOTC

Engineer ⁽⁴⁾ Chosen One Engineering Consultants Ltd.

(1)國立中興大學水土保持學系博士生

(2)乾坤測繪科技有限公司經理

(3)公路局中區養護工程分局信義工務段站長

(4)秋森萬工程顧問有限公司工程師

(5)國立中興大學水土保持學系助理教授(通訊作者 e-mail：clarice.chiou@gmail.com)

ABSTRACT

Taiwan's mountainous terrain makes highway slopes highly susceptible to rockfall hazards. Initially, the safety assessment of Taiwan's highway slopes relied on visual inspections with limited visibility. To expand the monitoring range and enhance assessment capabilities, the Highway Bureau gradually introduced technological tools. Among these, UAV photogrammetry has broadened the inspection field of view and provided preliminary identification of slope conditions and unstable rockfalls through 3D modeling. However, it struggles to penetrate vegetated areas to acquire ground surface data, creating monitoring blind spots. To overcome this limitation, this study further introduced Unmanned Aerial Vehicle Light Detection and Ranging (UAV-LiDAR) technology, utilizing its high penetration capability to collect topographic data in forested areas. Taking a rockfall-prone slope at Taiwan Provincial Highway 21, 141k+415, as a case study, multi-temporal UAV photogrammetric and LiDAR-derived Digital Elevation Models (DEMs) were used in conjunction with the Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) algorithm for change detection analysis. The research results indicate that the integrated technology of UAV photogrammetry and LiDAR provides quantitative and full-slope assessment data. This not only effectively identifies and tracks the sources of unstable rockfall material and tension cracks but also more accurately determines the location, extent, and size of rockfalls. This, in turn, offers crucial reference for short-term clearing and long-term maintenance strategies. The study provides more comprehensive and precise results for slope monitoring and geomorphological change detection.

(Keywords： Rockfall, Unmanned Aerial Vehicle, Highway inspection, LiDAR, Topographic variation)

一、前言

台灣地形多山，山區道路往往是周邊居民生活的重要通道，且不易建設替代道路。落石是山區道路邊坡災害類型之一，造成落石的主要因素包括自然因素(地質條件、地下水、風化效應、植生效應、地震)以及人為活動(開炸、過陡的人為削坡)(Wyllie, 2014)。

現今無人機測量技術已廣泛應用於地形變異調查中，特別是在搭配地面控制點(Ground Control Points, GCPs)條件下，具備高

精度的測繪能力。Wang et al. (2022)針對不同型號無人機於黃土高原邊坡所產製地形進行比較，結果顯示使用具即時動態技術(Real Time Kinematic, RTK)功能搭配 GCPs 可獲得最精確之地形點雲與數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)資料。此外，透過 Geomorphic Change Detection Software 進行地形變異分析，比較不同測量條件下點雲之差異，顯示無人機技術在地形變化監測中具高度可行性與實用價值。Sestras et al. (2025)分析 UAV-LiDAR 單獨產生的地形模型，其垂直 RMSE 為 0.441 m，雖然高於攝影測量

模型成果(RMSE 0.206 m)與融合模型(RMSE 0.060 m)，但在植被覆蓋與複雜地形條件下，UAV-LiDAR 依然提供穩定可靠的地形資訊，說明其單一技術亦具有可行性，尤其適於進行地形變異監測。

西班牙 A-7 高速公路邊坡滑動事件中，採用 UAV 航拍影像建構 DSM 與點雲模型，用於邊坡活動突發事故之緊急應變與復建支援。結果證實 UAV 影像測量技術能快速提供高解析度地形資料，協助調查滑坡範圍變化與穩定性評估，尤其適用於山區交通中斷情況之快速應對(Azañón et al., 2024)。

公路局對於轄下長逾 1 千 1 百公里的山區公路之公路邊坡養護管理，在民國 100 年以前僅明文規定目力巡查檢視公路各種狀況，必要時以徒步或攀登方式為之。民國 100~103 年間以主觀經驗中之易致災邊坡為「重點監測路段」，將「降雨觀測指標」、「管理值」、「預警性封路」等觀念納入標準作業程序，建置完成公路防災預警機制。公路養護手冊之民國 101 年修訂版新增經常及特別巡查、定期檢測及特別檢測規定，巡查同樣以目力檢視作為判斷，檢測則係以目力或輔以簡易器具進行(陳進發，2018)。

民國 103~106 年間公路局導入「風險控制」概念調整邊坡安全管理控制策略，將山區道路分為 A、B、C、D 四等級，完成邊坡定性分級管理制度，並開始推廣導入無人機(UAV)輔助巡檢及檢視坡頂狀況。民國 106 年後，將養護作法由「防止」逐步轉變到「管理」，運用無人機與光達等科技，成立「運用 UAV/S、LiDAR 等科技技術於公路養護管理，提升行車安全推動計劃」，增進山區道路

邊坡巡檢的效能。107 年 8 月起導入邊坡定量分級管理系統，依危害度制定不同之巡檢方式與頻率，並將危害度中、高風險邊坡單元列入定期科技巡檢，大幅提升巡檢效率，且將巡檢視角擴大至邊坡稜線(陳進發，2018)。本文以一落石型災害公路邊坡為案例，說明在最新公路管養架構下，結合無人機與無人機光達進行多時序監測之成果。運用無人機持續追蹤建立多期三維地形，並採用無人機光達(UAV-LiDAR)補充無人機拍攝不可及之林下遮蔽範圍，透過多期地形變異精準掌握落石發生位置、範圍、大小，協助判斷落石再發生區域，提供短期清除與長期擬定養護策略之參考。

二、研究區域與歷史災害

2.1. 研究區域概述

本研究以台 21 線 141k+415 邊坡作為案例邊坡，對其落石維護管理項目及災害事件紀錄進行整理與說明。研究區域位於南投縣信義鄉，鄰近東埔山與內政部國家公園署玉山國家公園管理處塔塔加遊客中心解說亭。公路里程自台 21 線 141+415 至 141k+585，邊坡單元如圖 1、圖 2，面積共約 8.74 km²，上邊坡面積約 1.79 km²，下邊坡面積約 6.95 km²，高程自 2110 m 延伸至 2597 m。

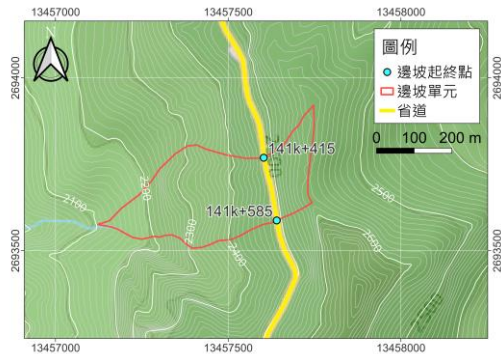


圖 1 研究區域地形圖

Figure 1 Topographical map of the study area

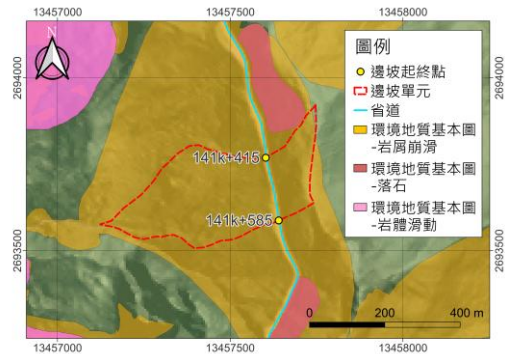


圖 3 研究區域環境地質圖

Figure 3 Environmental geological map of the study area

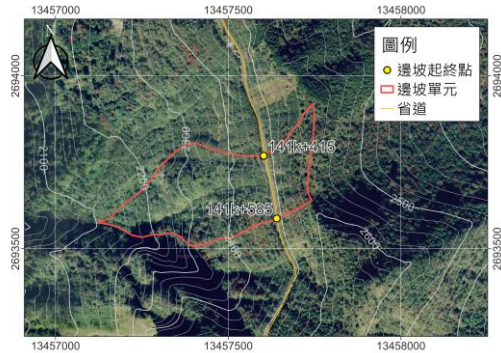


圖 2 研究區域 2010 年正射影像

Figure 2 Orthophoto of the study area taken in 2010

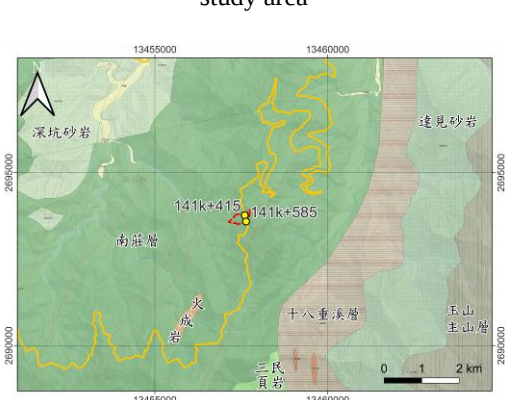


圖 4 研究區域地質圖

Figure 4 Geologic map of the study area

根據經濟部中央地質調查所(現稱經濟部地質調查及礦業管理中心)2008 年出版之都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集, 研究區域鄰近區域有岩屑崩滑及落石區(圖 3), 但無岩體滑動、惡地、棄填土區與土石流扇狀地。

研究區域範圍內地層全屬南莊層, 以白砂岩、灰色砂岩、暗灰色頁岩、砂頁岩薄頁互層以及薄煤層等組成(圖 4)(陳勉銘等, 2020)。

2.2. 2023 年落石事件

研究區域在 2023 年 6 月 26 日至 28 日曾發生落石災害事件。事件發生後, 公路局進行了落石清除與搶通作業(圖 5a-b), 現場目視巡查觀察距路面 10 m 高度以下坡面和坡趾有岩塊堆積(圖 5c-d)。10 m 以上高陡區位以無人機進行了飛航攝影, 並從空中捕捉到坡頂浮石堆積、落石源頭及坡面岩塊堆積的情況(圖 5e-g)。單一落石最大量體約為 $4\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$, 約 16 m^3 。

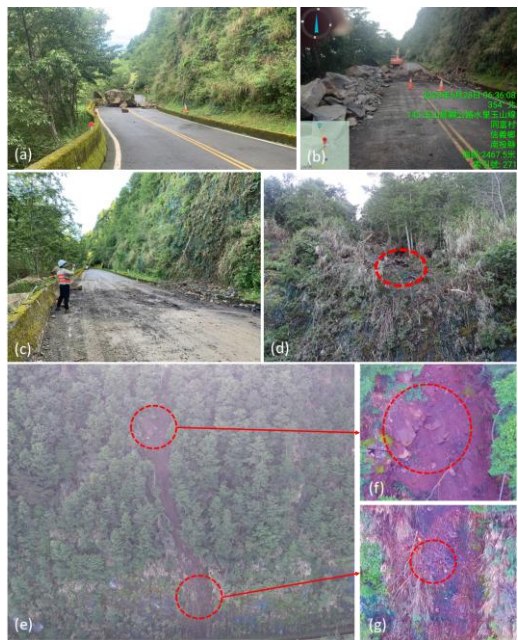


圖 5 2023/6/26~28 現場落石事件及無人機影像記錄，(a)落石事件發生(2023/6/26)，(b)落石清除搶通(2023/6/28)，(c) 現場目視巡查，(d) 目視坡面岩塊堆積，(e) 航拍調查坡面，(f、g) 航拍坡面岩塊堆積

Figure 5 Rock fall event in June 26-28th, 2023 and its UAV images. (a) rock fall event occurred (June 26th, 2023), (b) rockfall clearance and road reopening (June 28th, 2023), (c) on-site visual inspection, (d) visual inspection of rockfall accumulation on the slope, (e) UAV imagery of slope conditions, (f)(g) UAV imagery of rockfall deposits on the slope

三、邊坡評估及調查方法

本研究主要利用目視巡查紀錄、無人機攝影測量三維建模與無人機光達三種方法進行調查。

目視巡查記錄：公路局已執行多年的邊坡管理制度，可查詢歷年災害與修復紀錄。

無人機攝影測量三維建模：共執行案例邊坡三期無人機建模成果，用於追蹤裸坡及全坡面的新增落石和地貌變異。無人機使用 SkyMini A+，拍攝解析度達 2,400 萬畫素(表 1)。

無人機光達：利用案例邊坡三期無人機光達數值高程模型與地形變異比對結果，用於追蹤林下的浮落石和侵蝕狀況。無人機光達技術可穿透林下，有效降低地形遮蔽問題。使用光達為 RIEGL miniVUX-HA，最高精度為 10 mm，最大掃描速度下每秒 300,000 點或每秒 125 條線(表 1)。

表 1 設備規格一覽表

Table 1 Equipment specifications table

無人機	無人機光達
SkyMini A+	RIEGL miniVUX-HA
畫素:2400 萬 傳輸距離:4.5 km 具備傾斜攝影	頻率:100 kHz / 200 kHz / 300 kHz 精度:10 mm 速率:300,000 points /s 速度:125 line/s 測距:270 m FOV (視場角): 360

3.1. 目視巡查及邊坡管理分級

公路局現行邊坡定性與定量邊坡分級管理系統能有效量化邊坡單元之危害度，提升路段養護管理之效率。其中定量邊坡分級系統修改自 RHRS(Rockfall Hazard Rating System)(陳進發，2018)。評分項目包括地形特徵、地質狀況、邊坡植被狀況、排水設施、近三年平均落石坍方歷史、落石坍方規模大小、交通流量狀況、道路寬度及腹地有無、

區域聯外交通影響，以及現有防護設施加權等(表 2)。案例邊坡在 2023 年災前之評分為 201 分，事件發生後列管之評分則為 439，屬於信義工務段維護等級最高之優先關注邊坡。

表 2 邊坡危害度評估因子評分項目(陳進發，2018)

Table 2 Rating items of Slope Hazard Rating System (Chen, 2018)

代碼	說明
A1	地形特徵
A2	地質狀況
A3	邊坡植被狀況
A3	排水設施
B1	氣象加權
C1	近三年平均落石坍方歷史
C2	落石坍方規模大小
C3	交通流量狀況
C4	道路寬度及腹地有無
C5	區域聯外交通影響
D1	現有防護設施加權
總得分公式= 【(A1+A2+A3)*B1+(C1+C2+C3+C4+C5)】*D1	

3.2. 多期無人機影像建模

為彌補人工巡查無法抵達地點的不足，本研究使用無人機拍攝道路邊坡以擴大檢查視野，實現全坡面監看。定期拍攝的影片照片(解析度 50 mm)可用於觀測邊坡不同時期的狀態。經資料處理與建模可產製高精度數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，提供判釋分析及比對(圖 6)。

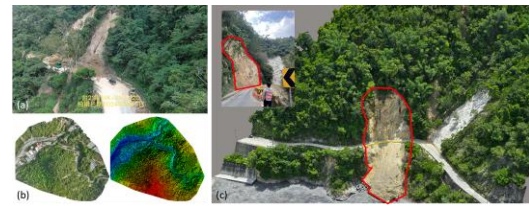


圖 6 UAV 攝影提升檢測效果，(a)快速執行攝錄，(b)正射影像及 DSM 成果，(c)邊坡三維模型克服目視巡查範圍限制

Figure 6 Enhanced inspection effectiveness using UAV photogrammetry: (a) rapid execution of aerial imaging and video recording, (b) generation of orthophotos and digital surface models (DSM), (c) 3D slope modeling to overcome limitations of visual inspection coverage.

3.3. 無人機光達測繪

相較於攝影測量，無人機光達同樣具備作業時間快速、可蒐集高區位調查資料的優點，且光達可穿透林下，較無地形遮蔽問題。多時期的點雲資料具備極高的比對價值，可用於進行進階的三維坡面穩定分析。本研究利用 UAV 光達成果獲得了高穿透率的全坡面叢密點雲如圖 7。



圖 7 高穿透率之全坡面叢密點雲成果

Figure 7 High-penetration dense point cloud data for entire slopes

四、台 21 線 141k+415 公路邊坡
調查結果

4.1 目視巡查及邊坡分級結果

此邊坡自落石事件發生後(2023 年 6 月 29 日)啟動定期巡期並辦理評分追蹤,至 2024 年第二季因處置工法完工後評分由 439 分降至 252 分如圖 8。

處置工法以型框植生、噴凝土護坡及設置截水溝進行短期及長期處置,後續將持續評估至 3 年內無再產生落石等災害後才可解除列管。

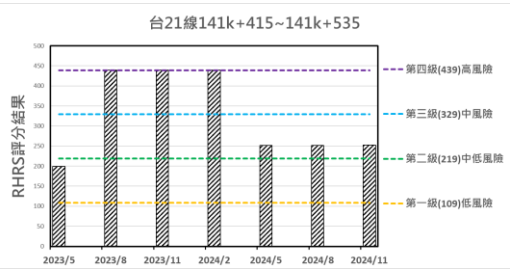


圖 8 案例邊坡 RHRS 評分趨勢圖

Figure 8 Trend chart of RHRS scores for the case study slope

4.2 多期無人機建模成果

本研究針對案例邊坡進行了飛行作業,建立邊坡多期三維模型,顯示落石事件後的追蹤情況。

案例為高陡邊坡,坡趾接近 90 度,若單純依靠目視巡查方式,僅能站立於邊坡兩側或道路面上人工巡查,對於坡高 10 m 以上位置無法評估,造成視角有限的問題進而延伸落石隱憂如圖 9。



圖 9 目視巡查邊坡視角受限

Figure 9 visual blind spots in slope inspections

透過無人機攝影測量建模,本研究對案例邊坡的坡面進行了檢視,並成功識別出浮落石料源以及張力裂縫,後續自發生落石事件後根據連續三期(共計四次建模)作業追蹤案例邊坡之中長期穩定狀況如圖 10,由各期無人機建模之空三報告節錄模型解析度(GSD)及控制點精度(RMSE)整理如表 3。

表 3 無人機建模精度及解析度

Table 3 UAV Modeling Accuracy and Resolution

日期	Average Ground Sampling Distance (GSD)	Root mean square error
2023/11/25	4.41 cm / 1.74	25 mm
2024/04/25	4.27 cm / 1.68	24 mm
2024/8/06	4.38 cm / 1.73	25 mm



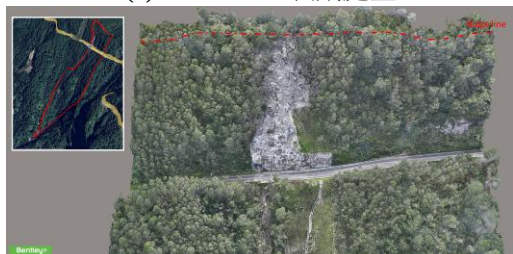
(a) 2023/08/25 落石發生後



(b) 2023/11/25 臨時處置後



(c) 2024/04/25 長期處置



(d) 2024/8/06 後續追蹤

圖 10 歷次無人機影像建模成果
Figure 10 Previous UAV photogrammetry results

依據無人機影像可以清晰顯示坡面上距道路 52 m 及 48 m 高度存在的浮落石堆積區域(約 20 m×15 m)，坡頂處為浮、落石源頭區，經量測尺寸高達 4 m，堆積範圍如圖 11，

若以目視巡查將無法確認該區位情況。



圖 11 無人機建模浮落石料源判釋成果
Figure 11 UAV-based modeling results for identifying loose rockfall sources

張力裂縫為邊坡不穩定的重要徵兆，案例邊坡坡趾接近 90 度，如依靠目視巡查方式，僅能站立於邊坡兩側或道路上巡查，將無法檢視坡高 10 m 以上位置，而透過無人機有效地檢視到坡面上距道路 11 m 高度，存在長達 20 m 以上局部裸露岩壁之層面解壓裂隙，開口達公分級如圖 12。

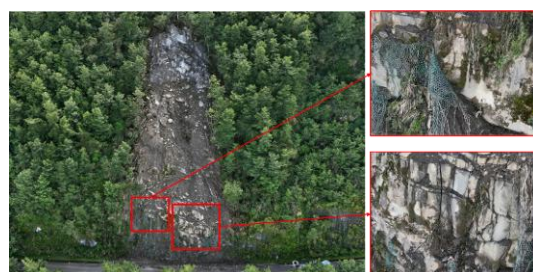


圖 12 無人機建模張力裂縫判釋成果
Figure 12 UAV-based modeling results for identifying tension cracks

4.3 無人機光達測繪成果

UAV 光達技術提供了高穿透率的全坡面叢密點雲成果，這使得林下及難以目視的區域也能進行詳細的地形分析，本研究配合落石發生後以無人機光達進行三次資料收集，

以初值與第二期比對評估臨時處置時期之變異情況，第二期與第三期比對評估長期處置時期之變異情況如表 4，三期無人機光達收測資料之精度及點雲密度如表 5 無人機光達成果如圖 13。

表 4 無人機光達作業時間
Table 4 LiDAR data acquisition date

編號	日期	備註
初值	2023/11/25	評估臨時處置時期
第二期	2024/04/25	
第二期	2024/04/25	評估長期處置時期
第三期	2024/8/06	

表 5 無人機光達精度及點雲密度

Table 5 UAV-LiDAR accuracy and point cloud density

日期	Georeferencing	Point Density
2023/11/25	5.41 cm	428 pt/m ²
2024/04/25	5.27 cm	515 pt/m ²
2024/8/06	5.38 cm	332 pt/m ²



圖 13 案例邊坡無人機光達成果圖

Figure 13 UAV LiDAR for the study slope

無人機以攝影測量原理進行建模，利用照片重疊率組合完整模型，應用於邊坡資料蒐集時若坡面(特別於崩塌邊界處)存在如灌

叢、針葉或闊葉植生，便會產生遮蔽問題無法尋找冠層底下之隱藏浮石，而光達本身為雷射，有機會穿透樹葉間隙取得地面資料。

將兩種資料進行植生濾除處理(只保留坡面區域)後可發現於 DEM 的完整成度有顯著差異，模型濾除之後，其下方產生許多空洞處，表示移除植生後空洞處幾乎沒有地表資料圖 14(a)(b)，而光達點雲雖然密度降低，範圍內仍有地表點雲如圖 14(c)(d)。

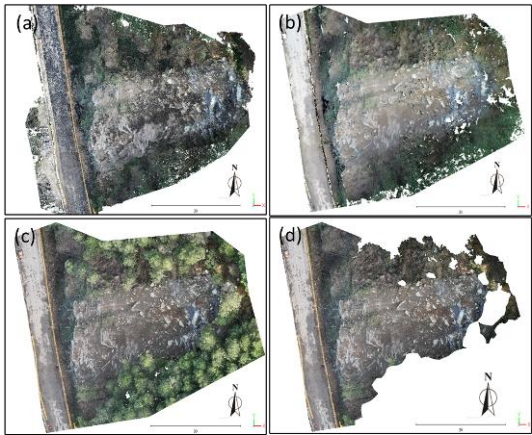


圖 14 無人機建模與光達之林下穿透性比較，(a)光達未濾除植被，(b)光達濾除植被，(c)無人機模型未濾除植被，(d)無人機模型濾除植被

Figure 14 Comparison of ground surface detection: UAV photogrammetry vs. LiDAR (a) LiDAR point cloud without vegetation filtering (b) LiDAR point cloud with vegetation filtering (c) UAV-derived model without vegetation filtering (d) UAV-derived model with vegetation filtering

五、多期地形變異分析於公路養護與減災之應用

UAV 光達技術提供了高穿透率的全坡面叢密點雲成果，這使得林下及難以目視的區域也能進行詳細的地形分析。地形變異分析主要透過開源軟體 CloudCompare 支援的 M3C2(Multiscale Model-to-model Cloud Comparison)演算法進行。

此演算法可以 3D 方式比較兩期點雲資料，量化地形變化，並在岩石邊坡穩定性評估中提供高度精確的結果。M3C2 演算法是地形變異偵測的尖端方法，分析時須先經過濾除萃取地形資料，再依變異程度進行上色如圖 15。本研究根據多期地形變異分析成果，對公路養護提出之建議及主管機關對應之減災作為如下。

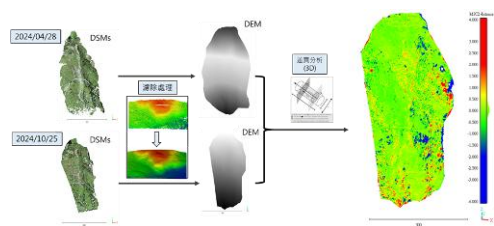


圖 15 地形變異分析流程

Figure 15 Point cloud comparison of hillslope change

1. 臨時性處置期之變異分析：以表 4 之第二期減去初值進行分析掌握期間之坡面變化，變異分析成果圖顯示了涵蓋林下全坡面的變異情況。在臨時性刷坡工程後，M3C2 分析確認仍有移動的浮落石堆如圖 16，經建議已由工務段清除。
2. 長期處置期之變異分析：以表 4 之第三期減去第二期進行分析掌握期間之坡面變化，在坡面長期處置(如噴漿固結)後，M3C2 分析結果顯示因浮石移動造成變異區域已大幅減少，表示人工設施

位置及坡面已達到穩定如圖 17。

3. 總體變異程度高斯分佈：比對兩期崩塌裸露坡面的變異值，高斯常態分佈均值分別為-0.041 公尺和-0.032 公尺，標準差約為 20 公分。這顯示坡面無明顯大規模崩滑變異情形，第二期堆積來源主要為坡面噴漿如圖 18。

六、結論

透過案例邊坡測試，本研究證實了無人機搭配攝影測量並結合光達技術，可望達到全坡面穩定性評估的量化資料。這對於公路局針對落石相關問題的處置前完成更全面的評估具有重要意義。此整合技術克服了傳統目視巡查的視野限制和無人機攝影測量在林下穿透性的問題，為邊坡監測和地貌變化偵測提供了更全面且精確的研究成果。

本研究經測試無人機光達及攝影測量精度及解析度皆落於公分等級，惟查找落石及討論變動仍需考量其形態特徵，因此塊體大小之平均偵測極限約為 30~50 公分，小於此範圍之塊體及低於測繪資料精度及解析度之變位分析僅供參考。

誌謝

本研究主要為交通部公路局埔里工務段、信義工務段優先關注邊坡光達應用暨進階檢測圖資建置計畫(第五期)計畫成果，執行期間蒙計畫團隊上升空間資訊股份有限公司及乾坤測繪科技有限公司協助測繪資料蒐集，特此銘謝。

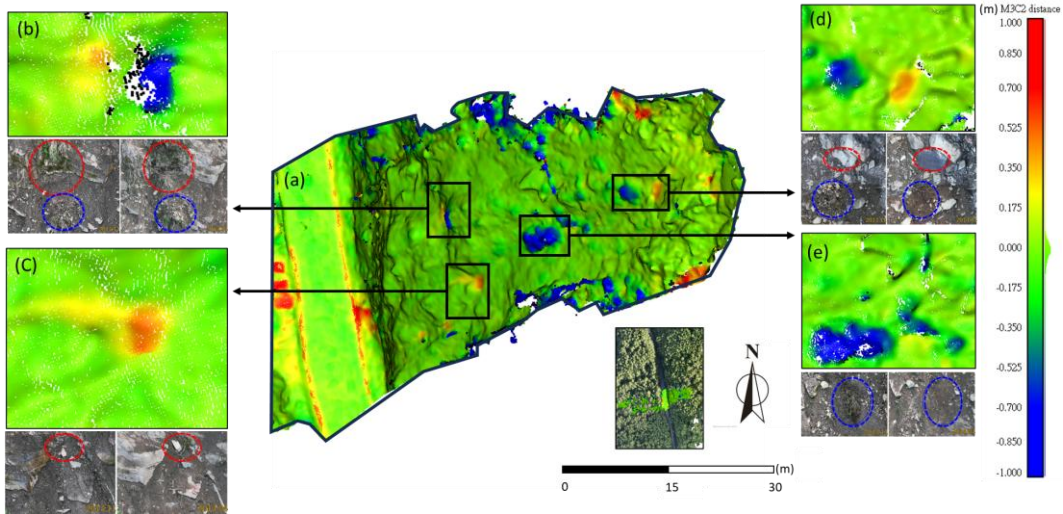


圖 16 臨時性處置期間變異分析成果(a)涵蓋林下全坡面變異分析(b)(c)(d)(e)變異熱點及影像
Figure 16 Change detection results during temporary mitigation perio (a) Full-slope change detection including Sub-canopy areas (b)–(e) Change hotspots and corresponding imagery

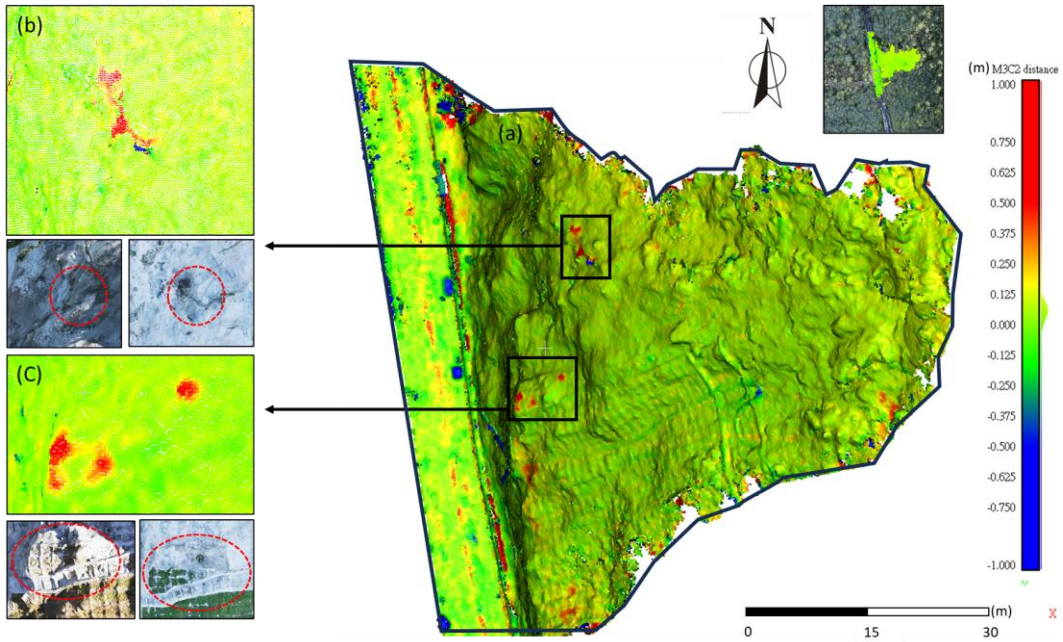


圖 17 長期處置期間變異分析成果(a)涵蓋林下全坡面變異分析(b)(c)變異熱點及影像
Figure 17 Change detection results during long-term mitigation period (a) Full-slope change detection including Sub-canopy areas (b)–(e) Change hotspots and corresponding imagery

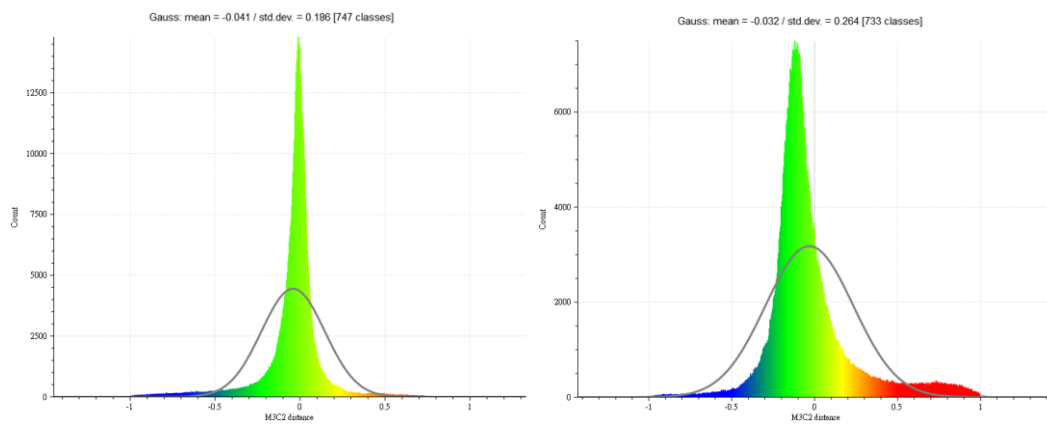


圖 18 變異程度高斯分佈 (a)臨時性處置期間 (b)長期處置期間

Figure 14 Gaussian distribution of change detection (a) During temporary mitigation period(b)
During long-term mitigation period

參考文獻

1. 陳進發(2018),「落石災害評分系統於省道邊坡分級管理之應用」,台灣公路工程,第44卷,第十期,第2-19頁。
2. 經濟部中央地質調查所(2006),「環境地質與地質災害敏感區測繪作業準則」,經濟部中央地質調查所。
3. 劉進金、翁勳政、黃金鴻、楊明宗(2001)。「豪雨型崩塌地之遙測影像分析」,航測及遙測學刊,第十五卷,第一期,第79-95頁。
4. 陳勉銘、謝有忠、陳棋炫、林柏逸、陳秀雲(2020),「阿里山」,五萬分之一臺灣地質圖幅及說明書,經濟部中央地質調查所。
5. Choi S.-K., Ramirez R. A., Kwon T.-H. (2023), "Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAV-LiDAR system: System development and field demonstration." *Heliyon* 9, e20225
6. Chigira, M., Matsushi, Y., Tsou, C. Y., Hiraishi, N., Matsuzawa, M., Matsuura, S. (2012), "Deep-seated Catastrophic Landslides Induced by Typhoon 1112 (Talas)." *Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University*, 55, 193-212 (In Japanese with English Abstract).
7. Chigira, M. (2011), "The Potential Area of Large-Scale Landslides (In Chinese)." Scientific & Technical Publishing Co., Ltd: Taipei, Taiwan.
8. Soeters, R., and van Westen, C. J. (1996), "Landslides: Investigation and Mitigation," *Transportation Research Board Special Report*, 247, 129-177.
9. Wyllie, D.C. (2014), "Rock Fall Engineering", CRC Press, Boca Raton.
10. Mao, Z., Hu, S., Wang, N., & Long, Y. (2021). Precision evaluation and fusion of topographic data based on UAVs and TLS surveys of a loess landslide: A case study of the Beiguo landslide. *Frontiers in Earth Science*, 9, Article 801293.

11. Sestras, P., Badea, G., Badea, A. C., Salăgean, T., Oniga, V.-E., Roșca, S., Bilașco, Ș., Bruma, S., Spalević, V., Kader, S., Billi, P., & Nedevschi, S. (2025). A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regards to terrain feature. *Engineering Geology*, 346, 107890.
12. Azañón, M., Navarro, G., Sarychikhina, O., & Warrick, J. (2024). Applications of UAV Digital Photogrammetry in landslide emergency response and recovery activities: the case study of a slope failure in the A-7 highway (Southern Spain). *Landslides*.

114 年 07 月 14 日收稿

114 年 09 月 22 日修改

114 年 09 月 24 日接受