

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

October
2023



ISSN 0253- 3804



NT\$350



Volume 50, No. 5

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

混合實境結合
工程全生命週期管理

工程技術及發展

專 輯

應用遙測技術
輔助山坡地調查及安全評估

夢想和幸福

零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

台北市11491內湖區陽光街323號
Tel:(02) 8797 3567 Fax:(02) 8797 3568
<http://www.ceci.com.tw> E-mail:pr@ceci.com.tw



可運用於決策輔助之圖資系統

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠營建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土木法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土木學會
- 土木南部分會
- 土木中部分會
- 土木東部分會

土木水利

社團法人中國土木水利工程學會會刊



發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木水利工程學會

主任委員：詹錢登（國立成功大學水利系特聘教授兼工學院院長、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木水利工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木水利工程學會第二十五屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：宋裕祺

常務理事：伍勝園 高宗正 楊偉甫 廖學瑞

理事：王宇睿 余信遠 李政安 林子剛 林聰利 胡宣德 高銘堂

張大鵬 張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃慧仁

壽克堅 歐善惠 賴建信 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：王藝峰 李建中 沈景鵬 林其璋 邱琳濱 劉國慶

中國土木水利工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木水利工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號

「應用遙測技術輔助山坡地調查及安全評估」專輯 (客座主編：曾志民教授／詹錢登特聘教授)

專輯序言：應用遙測技術輔助山坡地調查及安全評估	曾志民／詹錢登	3
應用無人機光達解密隱藏於密林中之古崩塌地	黃美甄／江晉霆／謝有忠／陳勉銘／張國楨	4
基於差分干涉合成孔徑雷達分析所得高程變形之山坡地管理模式—以臺北市為例	王國隆／林俊廷／林士淵／謝旻希／廖陳侃	11
應用人工智慧模組於流域集水區之雷達極化判釋	陳奕中／陳柔妃／郭志禹	18
利用邊坡活動性反演崩塌滑動面幾何型態	林冠璋／劉哲欣／張志新／郭賢立	27
無人飛行載具影像之精度評估及山崩活動性之應用	吳庭瑜／謝有忠	32
潛在大規模崩塌分級方法學初步研擬	陳德偉／吳庭瑜／魏倫璋／楊哲銘／曾佳漢／黃春銘／簡留玄／謝有忠／林錫宏	40
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／蘇文瑞／楊鈞宏／李士強／張志新／黃俊宏／陳毓樺	49
結合遙測技術與 3D 視覺化的山區洪水災害模擬	楊鈞宏／陳偉柏／李士強／張子瑩／蘇文瑞	58
以光達數值高程模型產製地形相關山崩潛感因子之最適量測尺度	李錫堤／張瓊文／謝有忠／林錫宏	65
應用 UAV 空拍影像和 BASEGRAIN 軟體分析河道泥沙粒徑分布之研究	陳祥偉／賴東暘／詹錢登	78
應用無人載具高解析影像及三維點雲於山區河床表層粒徑之判釋研究	曾志民／曾仁彥／張國楨／黃美甄／陳振宇	91

工程技術及發展

混合實境 (MR) 結合工程全生命週期管理於新北捷運工程之應用	李政安／林逸羣／陳加乘／黃正翰／謝禎謙／高士恩	99
---------------------------------	-------------------------	----

年會預告

中國土木水利工程學會 — 112 年年會大會暨土木水利工程論壇議程	封底
-----------------------------------	----

廣告特搜

台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌	封面裡
喜利得 — 提高從設計到施工的整個工作流程品質	封底裡
經濟部水利署 — 鄰鄰水岸 永續共生	64
慧築營建科技股份有限公司 — 營建施工・都更危老・創新整合・循環永續	90



應用遙測技術輔助 山坡地調查及安全評估 專輯序言

專輯客座主編 曾志民／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

詹錢登／國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

近年來遙測技術的快速發展，不同飛航高度的飛行載具，包含衛星、航機及無人機等，能夠獲取高品質、高頻率的多元影像，包含光學影像、雷達影像及多光譜影像。這些影像可被用以建置多元數值地形或是作為環境調查的工具。不同載具產製之多元、多時序影像及數值地形，給精進山坡地調查、災害潛勢評估及防救災規劃管理等工作提供了很好的機會。本專輯以「應用遙測技術輔助山坡地調查及安全評估」為

題，蒐整 11 篇論文，內容包含密林下古崩塌地分析、具高程變異特徵之山坡地管理模式、人工智慧輔助集水區雷達極化判釋、崩塌滑動面幾何型態辨識、山崩活動性評估、潛在大規模崩塌分級、坡地災害應變輔助決策系統建置、三維視覺化的山區洪水模擬、山崩潛感因子最佳分析尺度及山區河床表層粒徑判釋。期待本專輯內容能發揮拋磚引玉的功能，除了吸引更多各界人士瞭解遙測技術在山坡地調查及安全評估的應用之外，也期望能夠提升大家對於土木水利相關業務的瞭解與重視。

通訊方式：曾志民教授 cmtseng@gs.ncku.edu.tw
詹錢登教授 cdjan@mail.ncku.edu.tw



應用 無人機光達

解密隱藏於 密林中之 古崩塌地

黃美甄／國立臺北科技大學土木工程系土木與防災所 碩士

江晉霆／國立臺北科技大學土木工程系土木與防災所 碩士

謝有忠／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 技正

陳勉銘／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 組長

張國楨*／國立臺北科技大學土木工程系 教授

隨著電子、感測器以及電腦技術的快速發展，光達、非測量型相機以及慣性姿態量測系統等對地觀測儀器邁向小巧輕量化，加上無人飛行載具盛行，無人機光達之技術得以實現。本研究使用無人直升機 VAPOR 55 搭載高階無人機光達 RIEGL VUX-1 UAV 進行飛航任務。本研究之測區位於花東縱谷邊之中央山脈一側植生茂密之緩坡上，於暨有之空載光達資料內，已呈現為一大型之滑動區，故研究以該區為目標，評估無人機光達之可行性及成效。在本測區之飛航研究設計的飛航參數下，點雲密度可達每平方公尺兩百點以上。產製之無人機光達點雲，經航帶平差能獲得公分等級的精度，為高精度點雲資料。透過分析不同參數對點雲分類之影響，求得適當的分類參數，將地面點與非地面點進行分離，經分類後地面點的點雲密度大部份區域大於 25 點 / 平方公尺，進而建置數值地形模型，所建置之模型空間解析度為 20 公分，並於現地以 e-GNSS 及 RTK 等技術進行檢核點的量測，再將量測之數據與數值地形模型進行比對與較差，結果顯示模型高程精度為 -2.91 ± 1.9 公分，指示無人機光達可產製高解析度及高精度之數值地形模型。研究成果表明，雖坡面上植生非常茂密，經撥除植生後所得之無人機光達數值高程模型指示本區雖為一大型之複合式滑動體，但地貌特徵指示本區已為老的滑動體，坡面之微地形已受人為之整坡而呈梯田狀，指示本區久未再活動，唯其人為之整坡年代已久遠而不可考。

關鍵詞：無人機光達、空載光達、數值地表模型、數值高程模型

前言

面對全球氣候變遷的影響，超大颱風及豪雨事件亦趨頻繁，加上台灣島位於歐亞板塊以及菲律賓板塊擠壓聚合帶上，活躍的地質活動是宿命。台灣陡峭的地形導致山崩、土石流等災害頻傳，地貌亦隨之改變。如果能夠建置出高精度的數值地形模型（Digital

Terrain Model, DTM），即可立即作為災害防救，以及事後之災前、災後的比對依據。傳統空載光達（Airborne LiDAR）需要較多的時間、人力以及經費，而無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）近年來蓬勃發展，無人機硬體方面已經足夠完善可以裝載高精密度儀器，因此本研究以無人機搭載高階之輕型光達系統來進行研究區資料之收集及分析，以評估無人機光達之性、效能及應用之潛能。

* 通訊作者，epidote@ntut.edu.tw

無人飛行載具為近年來興新且熱門的科技，尤其在防災以及國土調查方面擁有許多優勢及發展空間。於前人的研究成果中，在較無植被遮蔽的平原地區，其建置之數值地形模型經平差後，精度可達十數公分內，相較於農航所影像所產製的數值地形模型可說是不小的突破。但如果將攝影測量之技術及研究的成果運用於植被遮蔽較嚴重的森林、山區，就可能產生疑問。以攝影測量的關點來看，若影像內的目標物位於裸露的空地上，真實地面特徵可以呈現於影像上，但若位於密植被所覆蓋的區域，影像上並無法從像片中指示出地面位置，故在受到遮蔽的影響下，影像上地形建置的成果會大打折扣，將無法滿足模型精度上以及真實地面的需求，並將無法呈現真實地面的高程。迫於環境以及精度要求上的限制，以往的影像式的測繪應用於植生較茂盛的區域，就可能導致基於影像所建置的數值地表模型（Digital Surface Model, DSM），是否能夠提供或建置數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM），亦或能代表多少真實地形，解答以上的問題是需要更多的真實資料來比對的。

研究區域

本研究之研究區位於花蓮玉里鎮及卓溪鄉間，位在三民車站南側，位處花東縱谷秀姑巒溪及太平（豐坪）溪兩側所夾之丘陵區內，無人機光達測區之大小約 350 公頃，如圖 1 所示，其中圖 1a 指示研究區之區域位置範圍，圖 1b 及圖 1c 各指示空載光達地形及本計畫所產製之無人機光達區域，圖 1a 上指示圖 1b 及 1c 位置範圍。本區內亦同時進行無人機攝影測量，施測之面積大小約 15 平方公里。

研究方法

本研究以美國 Pulse Aerospace 公司（已為 AeroVironment 所收購整併）所研發的無人直升機 VAPOR 55，再搭載奧地利 RIEGL 公司所製之輕量化光達 VUX-1 UAV（圖 2），來對地面進行空間資料擷取。任務執行掃描後，經由軟體生成點雲及數值地形模型，並以 e-GNSS 及 RTK 之現地測量成果來進行高程精度檢核，探討基於無人機光達技術下產製的模型精度。飛航掃描儀器規格如表 1、表 2 所示。

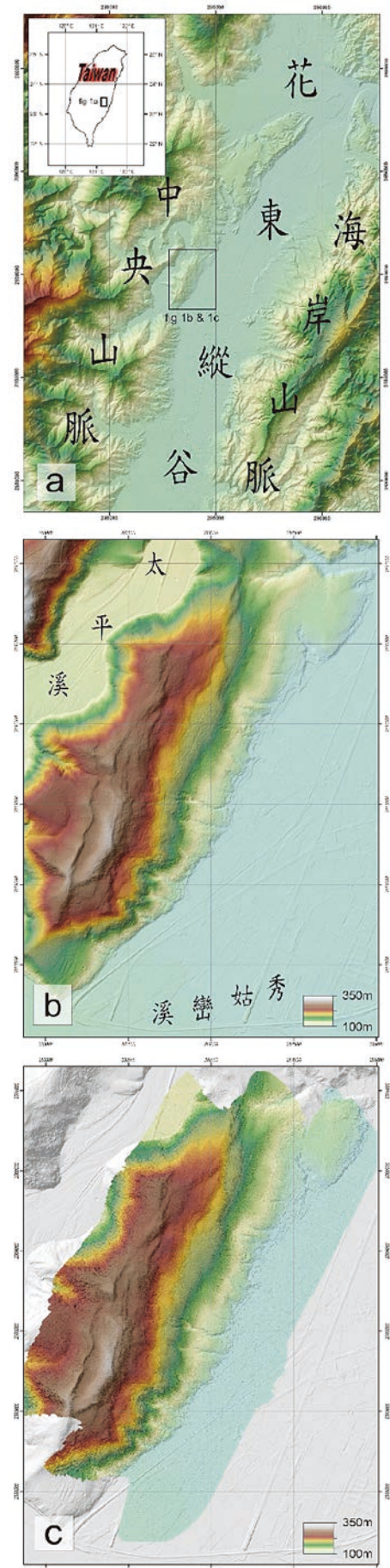


圖 1 研究區域地理位置及資料產製區域之地形特徵



圖 2 無人機光達系統測繪任務執行時之身影

表 1 VAPOR 55 規格

無人機 VAPOR 55 幾何尺寸	
機身長 (mm)	1,400
機身寬 (mm)	630
機身高 (mm)	480
螺旋槳直徑 (mm)	1,650
空機重 (kg)	8.5
無人機 VAPOR 55 性能參數	
最大起飛重量 (kg)	25
最大酬載 (kg)	15
飛行時間 (min)	60
懸停時間 (min)	45
抗風能力 (m/s)	13
飛行限高 (m)	3,600

表 2 RIEGL VUX-1 UAV 規格^[1]

重量 (g)	3500
尺寸 (mm)	227 × 180 × 125
測距方式	脈衝式
雷射波長 (nm)	1550
精度 (mm)	10
FOV (deg.)	330
掃描方式	旋轉鏡
掃描頻率 (scan/sec)	10 ~ 200
脈衝重複率 PRR (kHz)	550
作業高度 (m) AGL	50 ~ 350

無人機光達作業

無人機光達系統 (UAS LiDAR system) 為目前世界各國 LiDAR 技術發展之趨勢，有別於以往的空載光達，無人機光達能提供更經濟且快速的方式，獲得現地的空間資料，目前國外多用於林地與電塔纜線的調查^[2]。

無人機光達系統屬於空載光達之範疇，是由無人飛行載具 (UAV) 搭載全球定位系統 (GPS)、慣性導航系統 (INS) 和雷射掃描儀 (LiDAR) 組成，透過整合彼此間不同的測量技術進行觀測。本研究參考內政部

「LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序草案」，建立無人機光達作業程序 (圖 3) 來產製點雲圖，以利後續數值地形模型之建置與分析。

圖 3 無人機光達作業程序 (改編自內政部^[3])

飛航規劃

飛航規劃可分為參數設定與航線設計兩部分，其中飛航參數的設定須考慮參數間相互影響之關係，包括脈衝頻率、掃描頻率、航高、航速以及點雲密度。航線設計的部分則由航高、航帶寬度、航帶重疊率，設計出航線間距、數目和起終點。此外還需考慮天氣與區域環境因素，將脈衝頻率、航高與視野 (FOV) 做進一步的調整。基於研究區之飛航任務特性及目的，考量無人機之飛航高度，光達之開口視野 (FOV)，光達掃描方向之橫向點雲間距，飛航方向之縱向點雲間距，光達脈衝之頻率，光達掃描之頻率，無人機之飛航速度，無人機之航線間距等因素後即可獲得掃描寬度、點雲密度與航帶重疊率等不同之參數。本研究使用的飛航參數如表 3 所示。

表 3 無人機光達飛航掃描參數

掃描角度 (deg.)	掃描頻率 (Hz)	脈衝頻率 (kHz)	航高 (m)	航速 (m/s)	航線間距 (m)
120	20	300	150	2	200

資料獲取

飛航規劃完成且確認無誤後，即可著手進行飛航掃描的任務。除了雷射測距儀之設用外，光達系統仍需整合慣導系統。本研究內所用之慣性測量系統選用 Trimble 旗下公司 Applanix 所開發的 AP20，整合多頻全球導航衛星系統 (GNSS) 主機板和慣性測量單元 (IMU)，能在最大限度的情況下利用 GNSS 多頻定位技術與慣性測量數據。透過無人飛行載具搭載的光達、GNSS、IMU，獲取大量的原始點雲、GNSS 時

間、飛行位置、飛行速度、飛行姿態等數據，將其儲存於載具上的固態硬碟中，並配合設置於地面之靜態 GPS 參考站紀錄之數據，於日後進行系統的率定以及點雲的解算。

點雲解算

本研究使用 RiPROCESS 來進行點雲解算，解算點雲之前，須先求出無人機的飛航軌跡，本研究以 Applanix POSpac MMS 軟體來進行軌跡解算。解算飛航軌跡所需資料有地面靜態 GNSS 參考站資料以及無人機 POS（動態 GPS 及 IMU）資料。

點雲編輯

點雲解算完成後，須透過電腦軟體對其進行編修，其內容主要為資料分幅、錯誤點去除和點雲分類。經由上述處理，最終生成建置數值地形模型之點雲。

資料分幅

通常解算完的點雲資料非常龐大，在進行點雲分類時，會因電腦軟硬體效能的限制而無法運行，因此在點雲數量過多的情況下，須先進行點雲的分幅，再進行後續的處理。

錯誤點去除

於點雲分類前，須檢查點雲中是否含有明顯的錯誤點（雲霧或其他離散點），並予以刪除，如果未將其刪除，往往會造成點雲分類上的錯誤，進而影響後續建置的數值地形模型，產生錯誤資訊而無法利用。

點雲分類

點雲分類主要是將地面點與非地面點進行區分，並將所區分的點雲依狀況建置 DSM 與 DEM 兩種數值地形模型。本研究使用 TerraScan 點雲處理軟體，對點雲進行地面點的分類，分類所使用的參數含：最大建物的尺寸（Max building size）、地形角度（Terrain angle）、迭代角度（Iteration angle）、迭代距離（Iteration distance）等不同之參數，於平地分別對最大建物尺寸、地形角度、迭代角度與迭代距離進行調整，設計不同之試驗參數，對無人機光達點雲進行地面點的分類，並分析各組參數分類的成果，找尋適合之參數，藉此建立無人機光達地面點分類的建議參數^[4-6]。自動分類後之光達點雲資料，再經由人過以不同方向連續漸進式之剖面，一一檢核排除或重新分類來確認所有之點雲資料。

現地測量

為了提供無人機飛航軌跡解算之地面靜態 GNSS 參考站紀錄之數據，以及檢核光達點雲產製的數值地形模型精度，須前往現地進行真實三維座標的量測。本研究使用了靜態 GNSS、e-GNSS 及 RTK 技術來獲取真實三維資料，並透過該數據對數值地形模型進行高程資料的比對，以確保模型精度符合規範之要求。

檢核點規劃

檢核點的選擇儘量以人車能順利到達以及均勻分布於研究區域的原則下進行。本研究區域面積約 350 公頃，一共設有 14 個檢核點，各於 2017 年 10 月 3 日及 2018 年 1 月 15 日、1 月 16 日一共進行三次的 e-GNSS 及一次 RTK 測量。點位分佈如圖 4 所示。

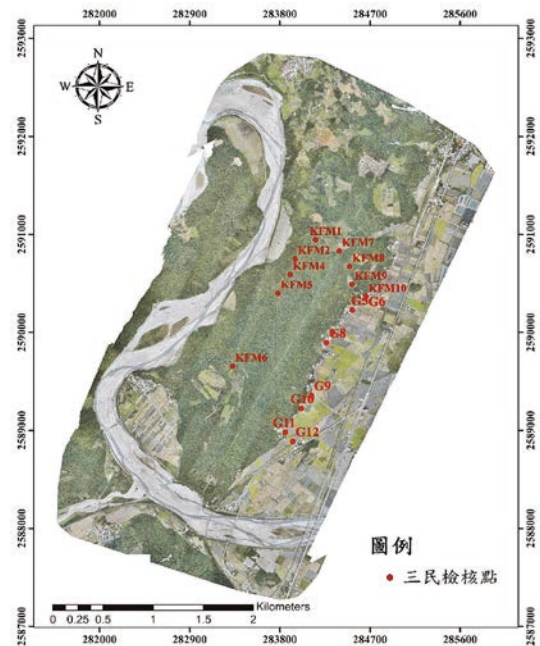


圖 4 研究區檢核點分布位置

研究成果

無人機光達點雲

初始點雲

點雲解算完成後，即可獲得初始點雲，但點雲在解算完成之後會因為有系統性的高程偏差，而呈現各航帶之間的點雲無法重疊，也就無法成為完整的數值模型。因此，我們必須使用航帶平差來對點雲進行誤差消除，才能產製出完整的數值地形模型。評斷航帶平差成效最直接也最簡單的方式，便是直接檢核模型平差後的狀態，於各個不同方向的剖面上，比較建物、道路及地

形等易辨識之地表特徵物上，來查核有無點雲分層的情況。本測區一共有六個航次、每航次分成四條航線，一共計二十四條航線。此一設定能讓各航次之間可以在 Riprocess 軟體中先進行航帶平差，待各航次平差成果不錯後，再將六航次合併再次進行航帶平差即可獲得完整的數值模型。以測區內的電塔為例，如圖 5 所示，圖中可見資料平差前後之點雲分布狀況。

點雲分類及穿透率

點雲資料經航帶平差後，再對點雲進行資料分幅及錯誤點去除，即可開始點雲的分類。根據研究設計不同試驗參數，利用 TerraScan 軟體對點雲進行分類，並對參數進行點雲分類成效的分析。點雲分類後之剖面及對比各如圖 6 及圖 7 所示，由圖 6 及圖 7 之對比，可以簡單評估地面點分類的成效，其中圖 6 內綠色點為植物，黃色點為地面點。圖 7 上下兩圖為同一視角下的點雲三維模型高程上彩，從上下圖比較可以看出植被下方仍保有不少的地面點。

本區域所獲得知總點雲數為 893,672,068 點，分類出之地面點點雲數為 119,120,556 點，估算之點雲穿透率為 13.32%。其中植被覆蓋區所獲得之總點雲數為 780,574,888 點，分類出地面點點雲數為 74,368,539 點，穿透率為 9.52%。從穿透率計算出來之成效顯示，獲取地面點的成效佳（詳如表 4），確實可以達到獲取完整地表資訊以及道路、地形判釋等目的。

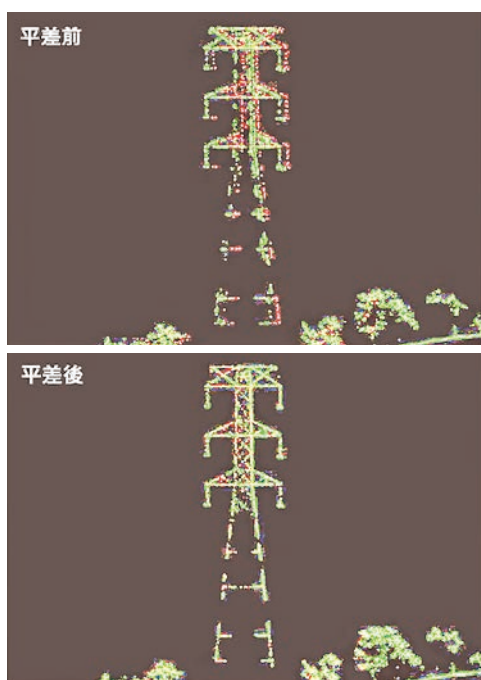


圖 5 研究區電塔附近剖面點雲航帶平差前、後比較



圖 6 點雲分類後之剖面圖

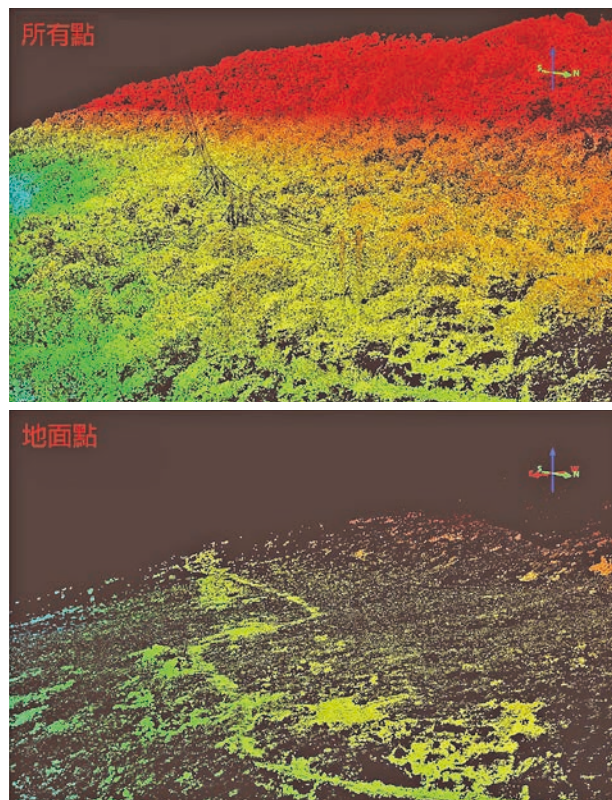


圖 7 無人機光達點雲三維模型上之點雲分類成果比較

表 4 穿透率計算結果

地區	總點雲數	地面點數	穿透率
全部區域	893,672,068	119,120,556	13.32%
植被覆蓋區	780,574,888	74,368,539	9.52%

點雲成果比較

2009 年莫拉克颱風之推動了全台空載光達（airborne LiDAR）資料庫的建立，已完成全台之空載光達地形資料建置，並應用於大規模崩塌潛勢區之判識等研究。就已認知之大規模崩塌潛勢區現況來看，現階段未演化為大規模、長距離之崩塌滑動，但以山崩之自然行為來看，在崩塌發生的早期，坡體已預先產生坡地潛移、或達到破壞之臨界狀態，爾後再遭遇極端之條件，如：地震及強降雨，有可能繼而誘發，並產生大規模的塊體運動。而這些坡體之潛移，通常事先伴隨許多崩塌的特殊地貌，這些地貌需使用精細、高解析的地形

資訊，以及相關的判識技術來輔助。但現有地形資料來源不一，本研究針對空載光達、無人機光達以及無人機影像等不同屬性資料做比較，提出簡單說明。

本研究區花蓮縣三民村已先在傳統的空載光達的數值高程模型（DEM）資料內發現疑似潛在大規模山崩的情況，礙於空載光達的 DEM 解析度為公尺等級。因此以該區為目標進行無人機光達掃描作業，利用無人機光達的低空掃描優勢，藉由十公分等級的 DEM，一方面比較資料庫差異，二方面探討資料庫之應用性。

圖 8 指示以三維側視來檢視同一視角下無人機光達對比空載光達之點雲於空間解析度之差異。圖 8 之上圖為無人機光達資料，下圖為空載光達資料，於上圖中鐵路之鐵軌，甚至於兩鐵軌間之枕木，以及電線桿及纜線，均清晰可辨；反之空載光達點雲僅能隱約呈現。

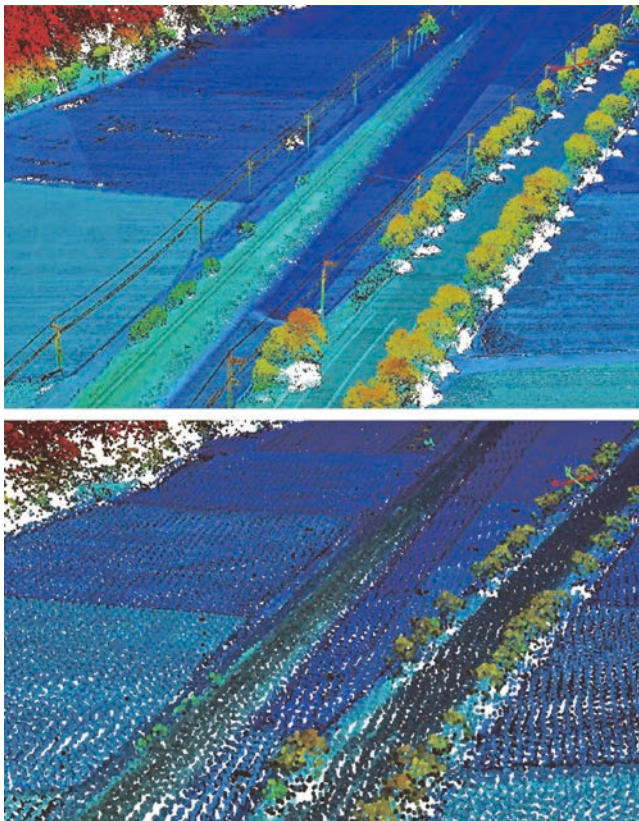


圖 8 光達點雲比較：無人機光達點雲（上）；空載光達點雲（下）

數值地形模型

點雲分類處理完成後，即可用來建置數值地形模型。本研究將無人機光達產製之數值地形模型與空載光達進行比較，圖 9 為數值地形模型建置成果之比較，圖 9 由上而下，各圖為之無人機光達點雲所建置之 DSM，無人機光達 DEM，以及同一區域範圍之 2m

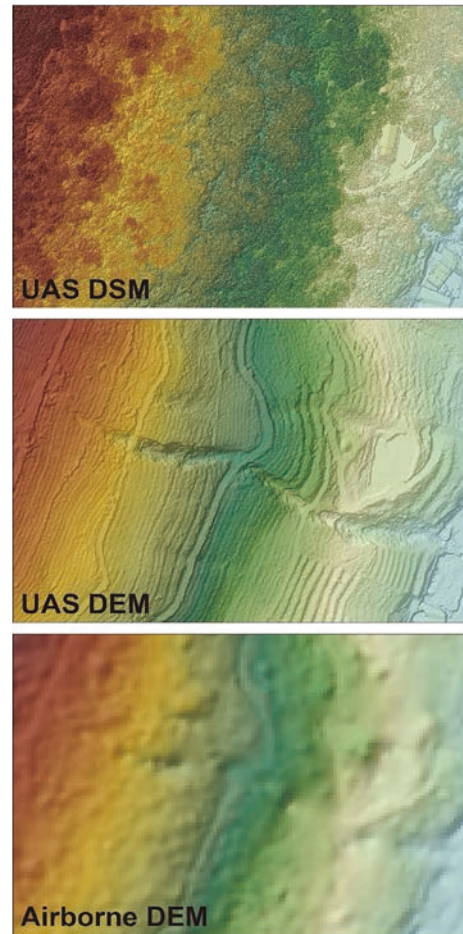


圖 9 數值地形模型比較。無人機光達 DSM（上），無人機光達 DEM（中），2 m 解析度之空載光達 DEM（下）

解析度空載光達 DEM。無人機光達所建置的模型解析度為 0.05 公尺，空載光達則為 2 公尺，有著 40 倍的差距，從圖 9 指出兩者於空間解析度的差異，於建物、道路和密植被區域，不論邊緣輪廓或是地形紋理上，無人機光達相對於空載光達都有不少的提升。

基於無人機光達因資料之精度及解析度的特性，可以分析更細緻之地形特徵。針對資料庫之應用，由暨有之傳統空載光達資料，由山崩構造地貌之線崖形態、位置分佈等特徵，本區已判定為大規模山崩潛勢區。因無人機光達之資料高解析特性，本區之構造地形可以予以更清晰地判釋。圖 10 由 (a) 無人機光達 DSM，(b) 無人機光達 DEM，(c) 無人機光達 DEM 陰影圖，(d) 2m 解析度之空載光達 DEM 陰影圖所組成，另外針對山崩線崖附近再予以放大，如 (e) 及 (f)，其中圖 10a, b, c, d 指示同一位置範圍，而 e 及 f 另指示同一區域。指示無人機光達

可判釋之解析出更細緻之構造線型，以及因山崩

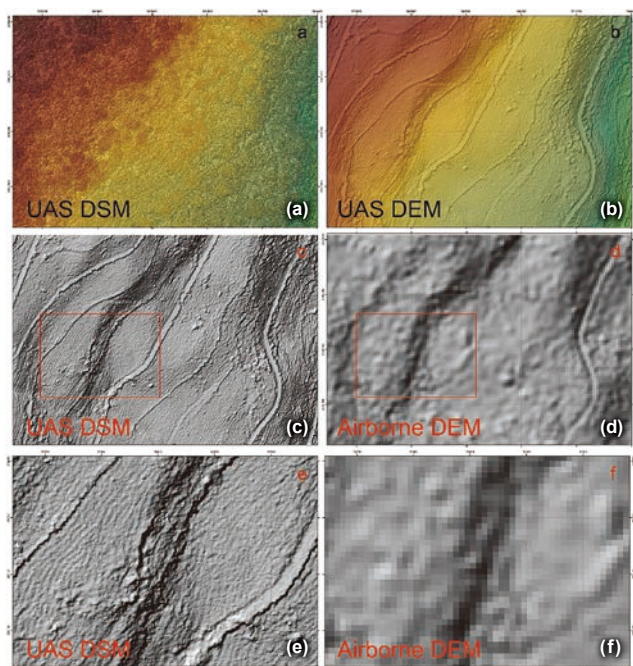


圖 10 數值地形模型比較及應用。(a) 無人機光達 DSM；(b) 無人機光達 DEM；(c) 無人機光達 DEM 陰影圖；(d) 2 m 解析度之空載光達 DEM 陰影圖；(e) 無人機光達 DEM 陰影圖放大；(f) 2 m 解析度之空載光達 DEM 陰影圖放大。圖 (e) 及圖 (f) 區域指示於圖 (c) 及圖 (d) 上。

區之構造線型以及因山崩區坡地變形引致之波浪狀微地形，並以褶皺軸之位置及延伸來呈現。另外坡面上可見帶狀線性之特徵分布，利用三維地形來呈現，則可清楚指示，本地形可以坡面上梯田來解釋，如圖 11 所示，但在同一位置及視角中，在傳統空載光達資料則無法清楚呈現梯田樣貌。上述的梯田論據，可由圖 11 中之放大（下圖）中，呈線地形梯面之不同高低及寬度來指引。以上論據指出了本區之地形及山崩動體特性，雖坡面上植生非常茂密，經撥除植生後所得之無人機光達數值高程模型指示本區雖為一大型之複合式滑動體，但地貌特徵指示本區已為老的滑動體，坡面之微地形已受人為之整坡而呈梯田狀，指示本區久未再活動，唯其人為之整坡年代已久遠而不可考。

結論

無人機光達於研究區域掃瞄之數據，經由點雲解算軟體運算後，能獲得點雲密度 200 點 /m²，與飛航設計之點雲密度相差無幾，表示所設定的參數於實際應用上並無太大的問題，可以依照需求調整使用。經軟體解算獲得之初始點雲，因受到 IMU、GPS 與 LiDAR 間不確定的系統誤差與偶然誤差影響，往往會造成航

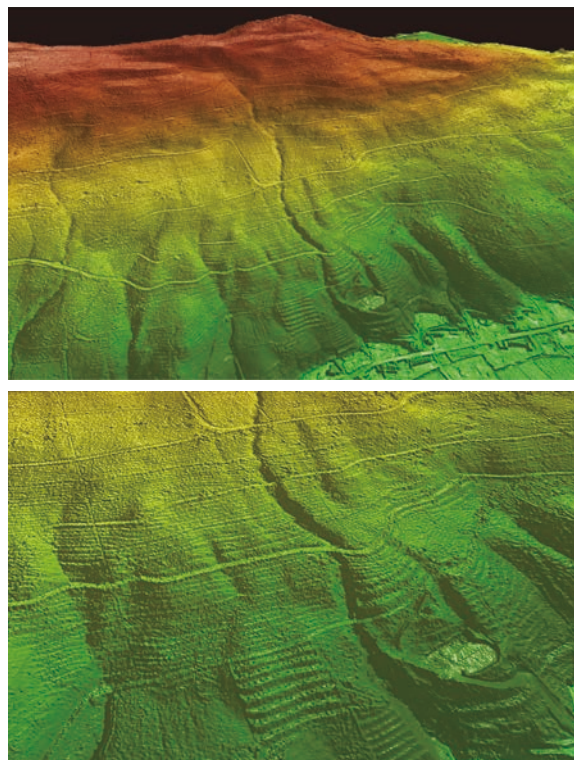


圖 11 無人機光達數值高程模型三維模成果（下圖為上圖之放大）

帶性的系統誤差，為了降低航帶間點雲在平面及高程上差異，因此需要對點雲進行航帶平差，經平差後不同航帶之點雲能夠修正至同一平面，並與真實空間位置保有 10 公分以內的精度，顯示航帶平差對於點雲建置的準確上有顯著的幫助。無人機光達所建置之數值地形模型，其空間解析度可達 5 公分，點雲過濾過，地面點之空間解析度亦可達 20 公分，如此的空間解析，於小區域之地形判識有很大的優勢，且與現地測量的檢核點比較後，整體高程誤差小於 5 公分，能提供較準確的空間資訊於實務應用上，因此無人機光達於防災及測繪上具有很大的潛力。

參考文獻

1. RIEGL, 2016, VUX-1UAV DATASHEET.
2. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., and Turner, D. (2011), "Error assessment and mitigation for hyper-temporal UAV-borne LiDAR surveys of forest inventory," SilviLaser 2011, Hobart, Australia.
3. 內政部 (2005), LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序草案。
4. 王星為 (2017), 無人機光達系統整合與精度評估, 國立臺北科技大學土木工程學系碩士論文, 台北。
5. 江晉霆 (2018), 無人機光達系統率定及平差之精度評估, 國立臺北科技大學土木工程學系碩士論文, 台北。
6. 王星為、江晉霆、彭德熙、鄭鈺雯、余翠紋、陳立邦、謝有忠、費立沅、張國楨 (2019), RIEGL VUX-1 無人機光達點雲資料處理及精度評估, 中國土木水利工程學刊, 第三十一卷, 第一期。



基於 差分干涉合成孔徑雷達分析 所得高程變形之 山坡地管理 模式 — 以 臺北市 為例

王國隆* / 國立暨南國際大學土木工程學系 教授

林俊廷 / 瑞模德科技有限公司 總經理

林士淵 / 臺北市政府工務局大地工程處 科長

謝旻希 / 臺北市政府工務局大地工程處 股長

廖陳侃 / 臺北市政府工務局大地工程處 幫工程司

近年合成孔徑雷達衛星的快速發展及部份合成孔徑雷達衛星可公開取得，使得利用雷達資料分析的可行性增加。臺北市在快速開發及市民遊憩需求的情形下，山坡地的使用檢討與滑動潛勢判斷成為重要課題。臺北市過去的災害與調查結果，顯示多數歷年發生的災害並非位於地調所公布之山崩與地滑地質敏感區域。為能對臺北市的山坡地進行全面性的篩選，本研究選擇以差分干涉合成孔徑雷達分析技術所得的地表變形為依據。透過分析所得的垂直地表變形速率結合斜坡單元，劃分臺北市各斜坡單元之變位潛勢。所得之各單元變位潛勢除長期結果以外，亦可取出每年或每次事件之變位結果，以利做為各機關後續規劃管理之用。

前言

臺北市位處臺北盆地，周邊被群山環繞，與市民的日常生活密不可分。根據統計數據，自 1959 年以來，臺北市已記錄約 1,066 起災害事件。根據臺北市坡地災害類型的統計結果顯示，淺層崩塌是最常見的災害類型，其次是落石和弧形滑動等類型的災害。歷史上的災害區位與地質調查所公布的臺北市山崩和地滑地質敏感區有 109 個重疊區域，僅佔 8.6%，這表示多數歷年來發生的災害並不處於山崩和地滑地質敏感區域之內。臺北市的坡地災害主要發生在盆地邊緣的山坡地，其中一部分區域鄰近市民經常活動的地區。

合成孔徑雷達訊號分析的發展從軍事用途為始，歷經數十年發展迄今，在各種不同波長感測器衛星及軌道控制條件均佳的情形下，加上各種演算法的發展，計算地表變形成為可信賴的技術。

臺北市政府自 2019 年起利用合成孔徑雷達及多期影像進行變形分析試辦調查標的邊坡 6 處區位，比對與觀測成果變形趨勢一致。為瞭解邊坡潛在滑移可能性，地表調查採用遙測技術全面性大範圍觀測，2020 年後採分期分區方式以遙測技術普篩臺北市行政區範圍，找尋變異區位、勘查及比對，至 2023 年完成全臺北市 2017 年迄今山坡地地表變形分析，針對變異的區位提出管理維護建議。

* 通訊作者，klwang@ncnu.edu.tw

差分干涉合成孔徑雷達分析發展與應用

遙感探測（以下簡稱遙測）區分很多種方法，感測器類型分為主動式與被動式，以衛星影像而言，多光譜衛星以太陽輻射能量為影像訊號來源產製多光譜影像，屬被動式遙測，其易受制於拍攝時間、天氣等條件限制。雷達衛星承載感測器主動發射雷達波後接受目標物反射訊號，其較不受日晝及天氣影響，週期性的獲取資料，目前已被廣泛應用於環境與災害觀測上。

雷達衛星於 1991 年由歐洲太空總署（European Space Agency, ESA）發射 ERS-1 衛星為第一顆民用雷達衛星，其後有加拿大航空局與美國合作的 RadarSat、日本 ALOS、義大利 CosmoSkyMed、德國（現由 AIRBUS 營運）TerraSAR-X、歐洲太空總署 Sentinel-1 衛星，現今也針對不同的應用需求，發展出不同再訪周期及波段的商用雷達衛星。

目前地球觀測衛星所使用的雷達波波長以 X、C、L 波段最為常見，一般而言，波長越長，穿透地物就越深，波長越短則相反，X 波段的波長約為 3.1 公分，C 波段約 5.6 公分，L 波段則約 23.4 公分，L 波段其長波長訊號對地物穿透性較佳，對於植被覆蓋區的地表監測能有較好較完整的資訊；C 波段雷達波，則可提供目標物表面或目標物以下的資訊。而 X 波段其短波長訊

號的特性，在都會區或植被稀少區域可處理出解析度高且資料點多的成果，以植被覆蓋區而言較適合用來對樹頂或樹葉的偵測。故選擇波段時應考慮偵測的目的與偵測地區的地表覆蓋情況，進行應用及分析，常見的衛星資訊如表 1 所示。

以差分干涉合成孔徑雷達分析方法（Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR）分析地表變形時，圖 1 為計算地表變形之簡圖，藉由兩次衛星通過待測物上空時，對待測物發射並接收的雷達波訊號。利用參考數值地形，取得地表物理是否產生移動的物理量，計算的簡易公式如公式 (1)：

Δφ = (4π / λ) d_los (1)

其中：
Δφ：相位差，代表的是雷達波傳送到地面待測物與原有應接收波之間的相位差值
λ：雷達波波長，例如使用的雷達波為 L 波段則約為 23.6 公分，C 波段則約為 5.6 公分
d_los：待測物與衛星距離的變位值
因此從上述公式可以得知，使用雷達波長控制每次偵測的變位範圍，例如一個 2π 的相位差值表示待測物對衛星的變位為 1/2 波長，此時恰為解算後干涉條紋的一個循環，此一相位差循環可用來快速檢視可能變位的量。

表 1 常見雷達衛星資訊一覽表

波段	衛星	國家	發射時間	波長 (cm)	再訪天數	費用	備註
X	Cosmo-SkyMed	義大利	2010	3.1	16	1,750 歐元	
	TerraSAR-X/ TerraDEM-X	德 / 法	2007	3.1	11	1,750 歐元	
	SRTM	美國	1994	3.1	10	-	
	ICEYE	商業	2018 ~	3.1	< 1		衛星群
	Capella Space	商業	2018 ~	3.1			衛星群
C	Sentinel-1 A/B*	歐盟	2014 ~	5.4	12	免費	
	ERS-1	歐盟	1993 ~ 2000	5.6	35	免費	除役
	ERS-2	歐盟	1995 ~ 2011	5.6	35	免費	除役
	Envisat	歐盟	2003 ~ 2012	5.6	35	免費	除役
	RadarSat-1	加拿大	1995	5.6	24	免費	沒有或較少台灣地區資料
	RadarSat-2	加拿大	2007	5.6	24	免費	
	RADARSAT Constellation Mission (RCM)	加拿大	2019	5.6	4		
L	JERS-1	日本	1992 ~ 1998	24	44		沒有或較少台灣地區資料
	SEASAT	美國	1978 ~	23.5	-		沒有或較少台灣地區資料
	ALOS-1	日本	2006	19	46	5 千日圓	除役
	ALOS-2	日本	2014	22.9	14	24 ~ 40 萬日圓	

*：Sentinel-1B 於 2021 年 12 月發生故障，經搶修雖仍於軌道運行但已無法取像，ESA 緊急提前下一代 SAR 衛星發射計畫中。1A 下降軌於 2022/2/8 後停止供應，經作者與 ESA 申請臺灣地區由於山脈主要為南北走向，以及上升及下降軌併存對臺灣山區防災之重要性，經 ESA 同意於 2022/7 月開始恢復供應。

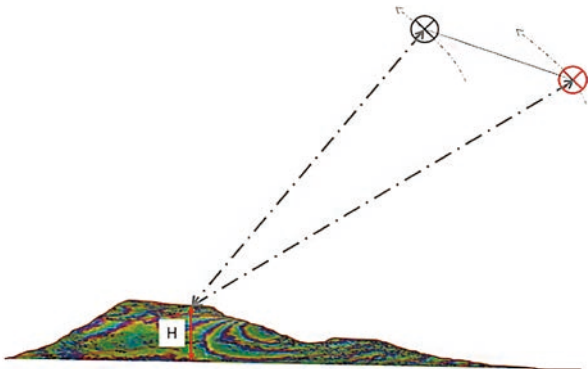


圖 1 差分干涉合成孔徑雷達地表變位偵測示意圖（以左視為例；王國隆等人^[1]）

採用合成孔徑雷達影像的地表位移訊號，使用差分干涉技術來取得衛星至地表變形量，此變形量也可用以監測地表或自然環境災害，然而單一組差分干涉技術所取得地表變形量可能存在多種誤差^[2-4]，利用時序性的合成孔徑雷達影像進行干涉分析時，主要產生的干涉相位資訊包含了地形、地表特徵變化、地表移動量以及大氣效應等，其中地形的相位變化資訊可以採用高精度數值地形及短基線長去除該項誤差，相干值的門檻調整則可以去除低相干區域的影響，以及副產品數值地形的精準度^[5]，大氣效應的誤差可以用長時間多影像的觀測降低，當消弭可能誤差來源後，僅剩下地表移動及雜訊相位差，可藉以取得較高精度且可信任之地表變形量^[6,7]。

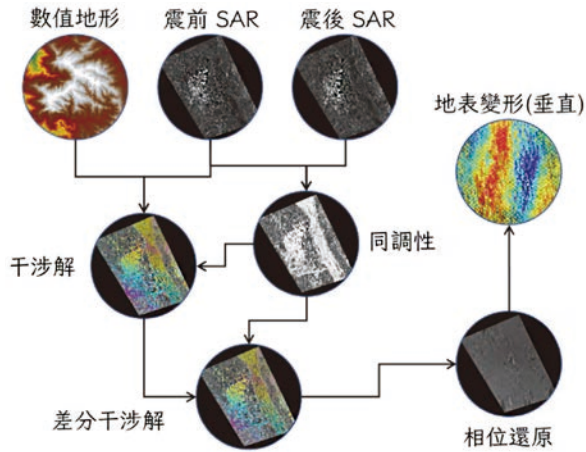
臺灣近年來使用 SAR 進行地表變形之研究發展相當迅速，雖常有不一分析名詞出現，如 TCP-InSAR 或

ATI-InSAR 等方法，其主要分析架構仍以 PS（永久散射體法）及 SBAS（短基線法）為區隔，綜整臺灣近年有關連續式 SAR 分析區分為 PS（永久散射體法）及 SBAS（短基線法），使用之軟體也不一，將所整理之分析結果如表 2 所示。

為了能系統性的解算地表變形資料，茲將差分干涉合成孔徑雷達分析流程繪製如圖 2 所示，藉由兩幅跨事件時序的 SAR 資料，首先產製成品為同調性（coherence）圖，當兩幅資料間同一位置雷達波反射訊號強度一致時為高同調性，然反射訊號強度亦與雷達波的波長、地表地物類別及植生強度有密切關係；此外，由兩幅 SAR 資料與參考數值地形，可以獲得地表大面積的干涉解算成果，此時亦稱為干涉條紋（interferometric fringe），干涉條紋的表現一般以 R-G-B 的顏色循環表示，如前所述當完整的 R-G-B 循環出現時，可視為半個波長的變形量，然此時僅為地面物體對衛星之間的變位，不等同於三軸方向的變位量；當取得干涉解及同調性後，可藉由同調性門檻的調整及地面控制點的設定，產生經過校正後的差分干涉解，此時的解算成過拋棄過大的誤差並經過糾正，然仍僅代表相位差值並非真實變位，而真實變位可能存在數個甚至數十個 R-G-B 循環，故此時需將真實的相位差值計算出來，此一步驟稱為相位還原或相位解纏（phase unwrapping）；將將相位還原的結果再經過公式轉換可獲得物體對衛星的變位量，再透過衛星入

表 2 臺灣近年使用之 SAR 分析方法及其標的（王國隆等人^[1]）

標的	方法	論文及使用軟體
地層下陷	PS	卜（2018） ^[8] 、林（2018） ^[9] 、陳（2019；StaMPS） ^[10]
	SBAS	魏（2021） ^[11] 、楊（2018） ^[12] 、阮（2018） ^[13] 阮蔡（2021；PCI-Geomatica） ^[14] 張（2021；GMT SAR） ^[15] 李（2020；GMT SAR） ^[16]
	PS, SBAS	歐（2018；StaMPS） ^[17]
邊坡變位	PS	王（2020） ^[18] 、戴（2016） ^[19]
	SBAS	謝（2020；GMT SAR） ^[20] 吳（2019；ISCE/ GInT /StaMPS） ^[21] 林（2021；SARscape） ^[22]
	PS, SBAS	努（2021；StaMPS） ^[23]
地表變位	PS	楊（2012；StaMPS） ^[24]
	SBAS	—
	PS, SBAS	洪（2012；StaMPS） ^[25]
其他	PS, SBAS	盧（2018；StaMPS） ^[26]

圖 2 差分干涉合成孔徑雷達解算分析流程^[1]

射角度與地面的方位角幾何關係，可將變位投影至三軸方向。

Fialko and Simons^[27] 提出將 line of sight 觀測資料轉換為三維觀測方法，其使用之方程式如公式 (2)：

$$[U_n \sin \phi - U_e \cos \phi] \sin \lambda + U_u \cos \lambda + \delta \text{los} = d_{\text{los}} \quad (2)$$

其中， ϕ 為衛星運行方向方位角， λ 為衛星發射至地面點之傾斜角， U_n 、 U_e 、 U_u 分別代表北南方向、東西方向及垂直方向變形， δlos 則是量測誤差，包含軌道誤差、大氣延遲、低同調性以及錯誤的數值地形等。

從上式可知，我們可以藉由多個不同角度觀測點利用上式解算出直角坐標變位。

Ng *et al.*^[28] 於 2011 年進一步依據 Fialko 方法重新將此一方法分離為兩種模式，由於 Fialko 當時所使用的 SAR 衛星為右視，故在右視情況下的三維變形計算可藉由公式 (3) 獲得：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \cos \alpha & \sin \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \\ D_n \end{bmatrix} = \Delta R \quad (3)$$

其中， θ 是衛星發射至地面點之傾斜角， α 為衛星運行方向之方位角， D_u 、 D_e 、 D_n 分別代表垂直方向、東西方向及北南方向之地表變形， ΔR 則為 line of sight 變形。

而當衛星為左視情形時，將其拆解為直角坐標三方向變形方程式則為公式 (4)：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \cos \alpha & -\sin \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \\ D_n \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (4)$$

由以上兩式可知，欲解算三維方向變形，必須由至少三個不同方向的量測值才能取得。

另外，由於 SAR 衛星運行方向為南北方向運行並側向觀測，所以對於南北方向的變形較為不敏感，一般情況下可能計算所得變形小於真實變形量，故 Ng *et al.*^[28] 為了將在計算過程中最小平方誤差降低，亦提出忽略南北方向僅採用東西方向及垂直方向之計算方式公式 (5)：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \mp \sin \theta \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (5)$$

上式中負號為右視情形使用，正號為左視情形使用。

然水平投影時注意各分量轉換時的參數是否合宜正確，本文僅就投影至垂直向的地表變位說明。

本文使用之軟體為 SARscape，為一公開且容易取得之商程式，沒有存在方法取得技術障礙。

限制條件

合成孔徑雷達衛星軌道運行方向為南北方向，加上訊號發射與接收均為側向，造成南向或北向邊坡正確性稍差，尤有甚者可能造成完全相反的結果，Wang 等人^[29] 利用連續式 GNSS 解算成果與 Sentinel-1 解算之地表垂直位移進行比較，所得結果如圖 3 所示。Wang 等人^[29] 使用差分觀測 GNSS 方法，於平坦無坡地位移位置設置參考站，假設參考站變位為零解算移動站（連續式觀測站），歷經四年 GNSS 觀測成果與 DInSAR 成果比對。從圖中可以明顯看出 GNSS1 所在位置使用上升軌道所得結果相當符合，而下降軌道與

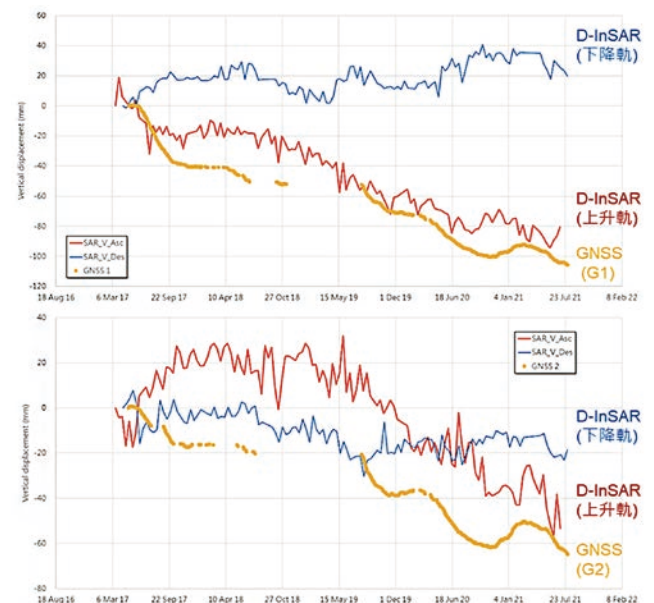
圖 3 GNSS 連續站觀測資料與 DInSAR 分析結果比對（改編自 Wang 等人^[29]）

表 3 GNSS 與 DInSAR 精度及相關性 (改自 Wang 等人 [29])

坡度 / 坡向	G1 GNSS 觀測站		G2 GNSS 觀測站	
	坡度 (度)	15.6	坡度 (度)	19.8
	坡向 (度)	88.9 (朝東)	坡向 (度)	169.8 (南偏東)
Sentinel-1 衛星上升 / 下降軌道	上升軌道	下降軌道	上升軌道	下降軌道
平均誤差 (mm)	13.21	84.74	24.43	25.76
標準誤差 (mm)	10.14	37.82	15.17	17.52
相關係數	0.95	-0.69	0.51	-0.20

GNSS 觀測結果並不一致；同樣於 GNSS2 位置之 GNSS 觀測成果與上升軌較為符合。

為求所得結果數值化，將坡度、坡向與不同軌道結果分別與 GNSS 觀測成果進行比對，將結果整理如表 3 所示。表中可以明顯看出在相關性方面，GNSS 安裝位置均以上升軌道要佳，當安裝位置 (DInSAR 觀測位置) 正確時，如 GNSS1 位置，其相關係數可達 0.95，四年間之平均誤差為 13.21 mm，如使用下降軌道進行分析，相關係數與誤差均顯示分析結果造成錯誤。另外，另處 GNSS2 位置，其所在坡向為接近南向但微偏向東邊，其上升軌道解算結果與 GNSS 相關係數仍較下降軌道佳，此時如僅以平均誤差分析，則難以分辨上升軌或下降軌孰佳。故檢討邊坡適用上升軌或下降軌時，除誤差外應計入相關性。

山區因地勢變化急遽，合成孔徑雷達的成像受到地形效應影響較大，在分析時雖可經過幅射校正減低影響，但仍需排除疊置及陰影效應的影響較嚴重區域，以避免將錯誤的地形變化值列入，影響統計結果。本文分析範圍為臺北市山坡地範圍，合成孔徑雷達衛星 Sentinel-1 為南北運行及左視觀測，部份陡峭地形及山凹可能無法觀測，將歐洲太空總署合成孔徑雷達衛星 Sentinel-1 通過臺北市之雷達衛星影像與 5 公尺

解析數值地形套疊分析，找出不能分析位置。

初步分析時先將臺北市可能無法分析區域列出，將平地排除僅以山坡地進行計算，所得上升軌道及下降軌道無法分析範圍分別為 8.19% 及 12.17%。南北坡偵測後，正確性較差。仍有小部份範圍無法分析，後續使用時宜參考不同坡向使用適當的軌道進行分析。實際分析時，計算每一斜坡單元主要坡向，由於上升或下降軌雷達波入射方向，比如上升軌道編號 69 入射方向約略為由東方入射，此時坡向朝東較為適合，而下降軌道編號 105 入射方向約略由西方入射，此時坡向朝西較為適合，但由於坡向並非單一，檢討時每一斜坡單元仍兩個入射方向皆加以考量。

臺北市變位基準之坡地管理模式

本研究基於差分干涉合成孔徑雷達分析流程，進一步擬定多時序坡體變位分析流程圖如圖 4 所示，加入地表變形模式模擬，由於分析像對較多且時間間隔僅 12 天，本研究中假設兩幅間之變形模式為線性，另短基線法 (SBAS) 連續處理中主要提升精度項目包含高精度參考數值地形、地面控制點以及大氣修正等步驟，藉由多時序的分析可以有效提升分析精度。

由圖 4 可獲得多時序之地表變形資料，然而大規

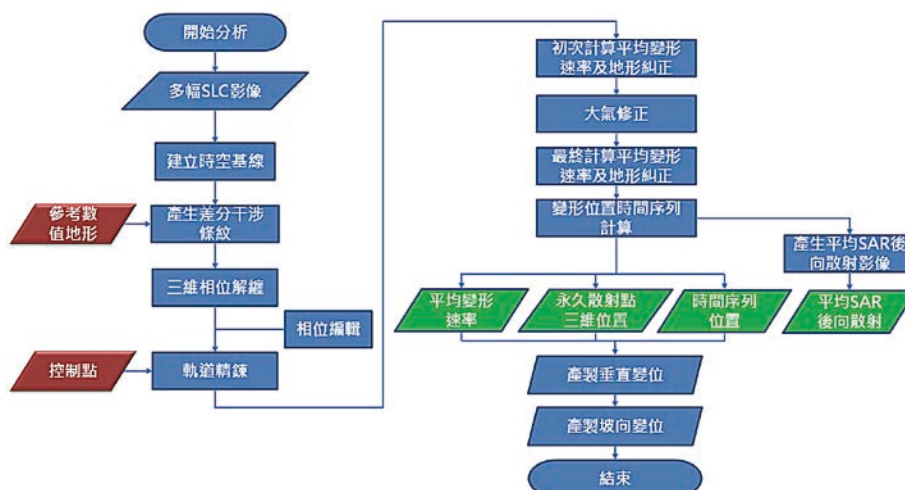


圖 4 多時序坡體變形分析使用短基線法之作業流程 (改繪自 SARscape [30])

模分析時獲得的地表變形資訊可能包含地表下陷及隆起，為先確認潛在滑動塊體區位，先取地表下陷位置進行篩選，如隆起區位在地表下陷區高程下邊坡，則可明顯區別地滑範圍，於此之前則暫以地表下陷做為潛在滑動塊體篩選依據；取得大規模地表變形下陷資料後，接著進行滑移原因研判。由於台灣山坡地產生滑移時常為連續式潛變，此一變形難以判斷是否可能產生破壞性災害，因此本研究將篩選變形速率於多時序資料中產生加速位置，此一加速情形可能因豪雨或地震等外力因素產生之滑動如圖 5 所示。變化斜率門檻值經檢討後採用 1.1 倍，詳圖 6。本研究使用 2017 年起之 Sentinel-1 影像，因每 12 天有一幅影像且為避免如圖中之雜訊條件產生斜率變化，採移動視窗法檢查為主，可有效降低誤判機會。

為利於統一辨識臺北市各區變位潛勢，對於連續變動之坡地，以每月 4 mm 為確認變動條件，惟此條件並非每個月均偵測出 4 mm 之變動量，其意義為長期變動狀態下平均每月達 4 mm。故使用每月 4 mm 之同向變位累積後達 288 mm 為基準。另 288 mm 代表意義有二，為相對活躍點位，但經篩選後單元較少時，可繼

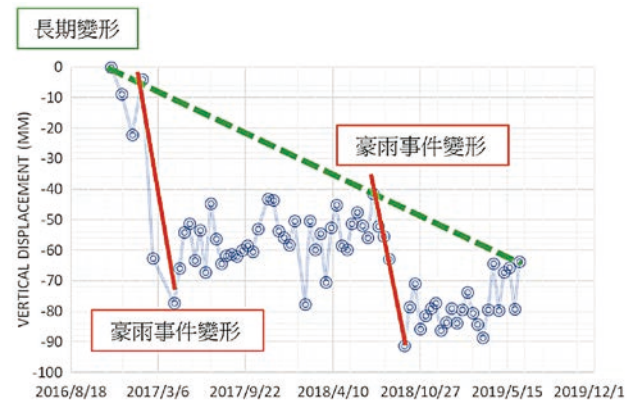


圖 5 事件變形與長期變形速率示意圖

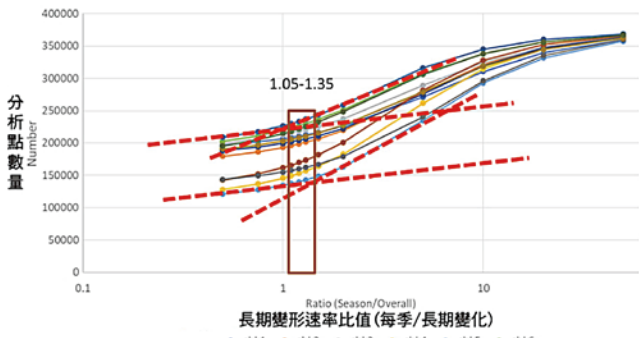


圖 6 變化斜率門檻值

表 4 分析結果之變位潛勢分類

變位潛勢	長期總變位 (mm)
高變位潛勢	> -288
中高變位潛勢	-288 至 -144
中變位潛勢	-144 至 -72
中低變位潛勢	-72 至 -36
低變位潛勢	-36 至 0

續往下排序其他坡單元進行檢視。依據分析結果提出表 4 之分類，分類之變位計算為使用每月 4 mm 變形量，於 6 年期間達 288 mm 設定為高變位潛勢，其後各分類則取半分類之。

解算後之點位依移動視窗法進行潛在滑動塊體偵測，偵測出滑動事件位置之點位篩選留下，篩選後之點位計算於坡單元內之平均變形量，萃取最後留下之單元內平均變形量，以前述變位速率將長期（2017.03 ~ 2023.05）變位潛勢分別繪製如圖 7 所示。由圖中可知臺北市山坡地多數為中低及低變位潛勢，但仍有中變位潛勢以上邊坡區位，所在位置分布於各行政區內之山坡地。此法之計算基準並無假設條件，僅以實際計算之地表垂直變位及活躍性程度篩選而來，可做為邊坡巡檢或巡勘之參考，提供潛在危險標之之用。

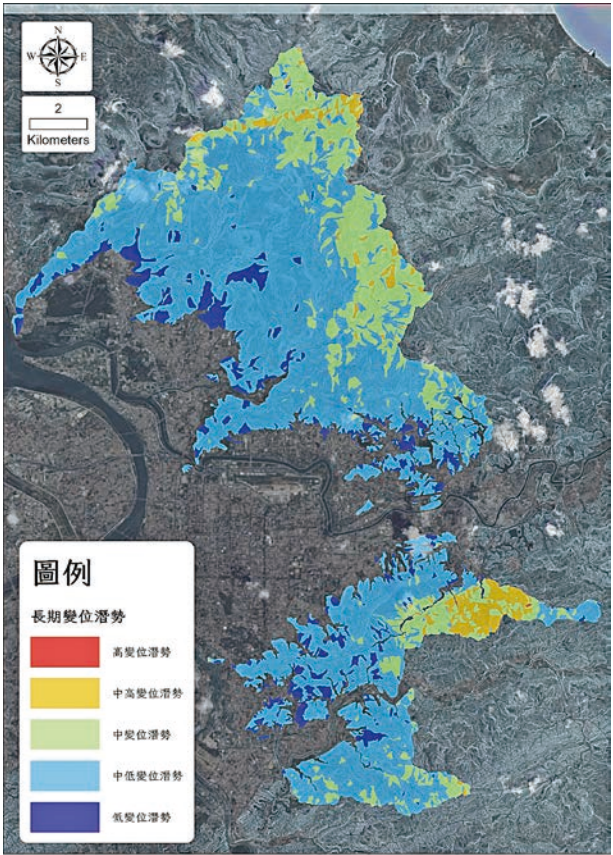


圖 7 臺北市長期地表變位潛勢分級圖（2017.03 ~ 2023.05）

結論與建議

本研究分析臺北市涵蓋 2017 年 3 月至 2023 年 5 月間資料，總計逾 6 年，且完成臺北市長期地表變位潛勢分級圖，分析方法開發及流程開發過程中所得結論與建議簡列如下：

1. 為利於統一辨識臺北市各區變位潛勢，依據分析結果提出變形量分類方法，分類之變位計算為使用每月 4 mm 變形量，於 6 年期間達 288 mm 設定為高變位潛勢，其後各分類則取半分數之。
2. 雖於本文中未說明，但分析過程中曾考量 2023 年尼莎颱風及降雨量較過去幾年較高，故將取得之災點現勘點位與短期變位潛勢套繪，發現現勘點位多數位於道路旁之小崩塌或落石事件，部份落於中變位潛勢坡單元內，由於大部份現勘結果災害面積較小，與本法適用情形存在面積可判大小之差異，亦即過小之崩塌無法由本法取得變位潛勢。
3. 潛勢圖成果顯示短期變位潛勢明顯高於長期變位潛勢，考量變位分類值為相對值，仍可滾動修正變位區間調整變位潛勢，取得更合理之短期變位潛勢結果。

參考文獻

1. 王國隆、林俊廷、李苡宣、張為光、郭安妮 (2023)，關山池上地震地表變形遙測觀察與衍生分析。地工技術，第 176 期，第 33-42 頁。
2. Wang, K.L., Dowman, I., and Lin, M.L. (2007a), "Estimation of Crustal Deformation From Newmark's Displacement and InSAR – The Case of Chi-Chi Earthquake", International Workshop – Applications of SAR Data in Taiwan, Taoyuan, Taiwan.
3. Wang, K.L., Lin, M.L., and Dowman, I. (2007b), "The observation of landslide coupling uplift of earthquake with Interferometric Synthetic Aperture Radar – the case study of Chi-Chi earthquake and Ju-Fen-Err mountain area", EGU General Assembly, Vienna, Austria.
4. Wang, K.L., Lin, M. L., Dowman, I., and Muller, J.P. (2005), "Assessment of Landslides Caused by Earthquake – Case Study of Chi-Chi Earthquake in Taiwan, 1999", The 2nd EGU General Assembly, Vienna, Austria.
5. 謝嘉聲、史天元 (1999)，以雷達干涉量測技術產生數值高程模型資料實作探討，地圖第十期，第 69-82 頁。
6. Lu, Ping, Casagli, Nicola, Catani, Filippo, Tofani, Veronica et al., Persistent scatterers interferometry hotspot and cluster analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides, International Journal of Remote Sensing 33(2), 466-489, (2012).
7. Greif, V. and J. Vlcko, (2012), Monitoring of post-failure landslide deformation by the PS-InSAR technique at Lubietova in Central Slovakia, Environmental Earth Sciences 66(6), pp 1585-1595.
8. 卜艾西 (2018)，「利用 SAR 干涉測量研究菲律賓雷伊泰 Tongonan 地熱場抽提地熱水引起的地面沉降」，碩士論文，國立臺灣大學地質科學研究所。
9. 林紹弘 (2018)，「利用持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術與數值模型探討臺北盆地地下水引起的地表變形與水力參數」，碩士論文，國立臺灣大學地質科學研究所。
10. 陳郁琪 (2019)，「PS-InSAR 技術於台灣山區地形變化偵測誤差因素分析」，碩士論文，國立成功大學資源工程學系。
11. 魏祥鴻 (2021)，「利用雷達測高衛星 Cryosat-2 及 ICESat 監測雲林及加州高鐵沿線嚴重地層下陷區：與水準、GPS 及 Sentinel-1A SAR 結果比較」，博士論文，國立陽明交通大學土木工程系。
12. 楊苡絮 (2018)，「以 Sentinel-1A SAR 及 SBAS 方法監測雲林地區地層下陷」，碩士論文，國立交通大學土木工程系。
13. 阮銘 (2018)，「應用 Sentinel-1 衛星 TOPS 合成孔徑雷達及最小基線長分析技術監測越南河內的地層下陷」，碩士論文，國立中央大學遙測科技碩士學位學程。
14. 阮蔡榮長 (2021)，「應用 SBAS-DInSAR 技術分析濁水溪沖積扇沈陷型態與地下水及降雨變化之關聯性」，碩士論文，國立中央大學應用地質研究所。
15. 張育璋 (2021)，「利用雷達干涉測定雲林地區地層下陷和儲水係數」，碩士論文，國立陽明交通大學土木工程系。
16. 李恩誠 (2020)，「應用 Sentinel-1A 影像與 SBAS 方法監測屏東沿海地區地層下陷」，碩士論文，國立交通大學土木工程系。
17. 歐司瓦 (2018)，「應用多時域雷達干涉技術於台灣屏東平原沿海區域測量抽水引致地層下陷」，碩士論文，國立中央大學應用地質研究所。
18. 王倍紋 (2020)，「應用 Sentinel-1A 合成孔徑雷達影像於邊坡變位監測之研究」，碩士論文，國立中興大學水土保持學系。
19. 戴于恒 (2016)，「應用合成孔徑雷達干涉技術監測山崩之潛移現象—以九份及烏來地區為例」，碩士論文，國立中央大學地球科學學系。
20. 謝淪棋 (2020)，「以 SBAS-InSAR 技術監測土壤沖蝕變化」，碩士論文，國立中興大學水土保持學系。
21. 吳笙緯 (2019)，「應用短基線集干涉技術探討六龜地區地形變」，碩士論文，國立交通大學土木工程系。
22. 林俊廷 (2021)，「以衛載雷達影像分析進行崩塌潛勢及潛在量體評估」，博士論文，國立暨南國際大學土木工程學系。
23. 努巴迪 (2021)，「用於滑坡監測的 PS- 和 SBAS-InSAR 處理的參數研究—以阿里山為例」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系。
24. 楊豐毓 (2012)，「多元衛星雷達影像於臺灣北部執行 PS-InSAR 之研究」，碩士論文，國立政治大學地政研究所。
25. 洪翊甯 (2012)，「應用 PS-InSAR 於大屯火山地形變之長期監測」，碩士論文，國立政治大學地政研究所。
26. 盧志恒 (2018)，「應用雷達影像分析地質災害的特性與時空分佈」，博士論文，國立中央大學應用地質研究所。
27. Fialko Y. and Simons M. (2001), The complete (3-D) surface displacement in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. Geophysical Research Letters, vol. 28, no 16, pp 3063-3066
28. Ng, Alex Hay-Man, et al. "Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR—Southern highland coalfield in New South Wales, Australia." International Journal of Remote Sensing 32.22 (2011): 7227-7256.
29. Wang, K.L., Lin, J.T., Chu, H.K., Chen, C.W., Lu, C.H., Wang, J.Y., Lin, H.H., and Chi, C.C. (2021), "High-resolution LiDAR digital elevation model referenced landslide slide observation with differential interferometric radar, GNSS, and Underground measurements," Applied Sciences, 11(23), 11389.
30. SARAscape (2010), SBAS tutorial, http://www.sarmap.ch/tutorials/sbas_tutorial.pdf



應用人工智慧模組於 流域集水區之雷達極化判釋

陳奕中／國立臺北科技大學資源工程所 博士班學生

陳柔妃*／國立臺北科技大學材料及資源工程系 助理教授

郭志禹／中央研究院應用科學研究中心 研究員

自從人工智慧圍棋程式「AlphaGo」屢屢戰勝棋王後，類神經網路以及深度學習技術成為眾所矚目的焦點。深度學習在遙感領域的應用日益廣泛，以目標物識別、土地覆被分類以及地表變異偵測等研究為主，利用機器學習工具發展不同影像來源之影像數據訓練，以做為進行廣域快速地表特徵變異之利器。隨著全球氣候變遷、極端災害事件頻傳，臺灣位於亞熱帶季風區、活躍的造山帶且地質材料破碎，經年累月受到颱風及地震等之自然災害侵襲，劇烈的地表作用造成大規模崩塌災害產生。為此，學術界以及相關主管機關長期投入坡地崩塌事件資料蒐集、致災因子評估與地質模型建置等工作，累積颱風、豪雨事件前後大量地表變異資料，提供深度學習在自動化崩塌判釋最佳之範例。本研究以旗山溪集水區為研究範圍，整合 ALOS 雷達與福衛光學影像，利用卷積神經網路學習工具進行自動化崩塌判釋。以莫拉克災前後光達數值地形，搭配福衛二號影像與航空照片，進行潛在大規模崩塌地形特徵判釋。配合卷積神經網路工具進行研究區域已發生之大規模崩塌區位目錄，進行福衛 2 號大規模崩塌之影像數據訓練。此外，利用日本太空總署 ALOS/PALSAR 衛星雷達雙偏極 HH 和 HV 影像，強化目標物在不同偏極電磁波之辨識能力，配合前述福衛 2 號判釋成果以及崩塌前後量體建立山崩面積－體積經驗迴歸公式，進行旗山溪流域地表變異分析。本研究成果包括：(1) 旗山溪流域福衛 2 號光學影像崩塌事件判釋成果與崩塌區位目錄；(2) 旗山溪流域 ALOS 雷達影像崩塌事件判釋成果與崩塌區位目錄；(3) 建立旗山溪流域歷次崩塌事件之卷積神經網路地表變異識別模式及圖像訓練資料庫。

前言

隨著全球氣候變遷、極端災害事件頻傳，臺灣位於亞熱帶季風區、活躍的造山帶且地質材料破碎，經年累月受到颱風及地震等之自然災害侵襲，劇烈的地表作用造成大規模崩塌災害產生。為此，學術界以及相關主管機關長期投入坡地崩塌事件資料蒐集、致災因子評估與地質模型建置等工作，累積颱風、豪雨事件前後大量地表變異資料，提供自動化崩塌判釋最佳之範例。

自從國人自主發展、發射福衛 2 號光學衛星以來，利用福衛 2 號進行地質災害相關研究已獲具體之成效^[1-3]。其中針對災害事件前後相關研究，劉正千等人^[4]，利用福衛 2 號影像在南亞海嘯事件，對印尼亞齊省進行衛星影像在地質災害特徵之分析研究。林慶偉等人^[5]利用福衛 2 號進行山區水位、流速，溪流底床力學參數推估等。劉守恆等人^[6]利用福衛影像發展之基因演算法用於自動輻射校正，以提高影像判釋成果。林恩如等人^[7]利用福衛 2 號高時空分辨率多光譜影像，進行自動化台灣全島崩場地判釋與災害分析，以及郭芳君^[8]運用高解析度衛星影像，進行自動判釋特定災害事件所誘發山崩等研究。

* 通訊作者，roufei@ntut.edu.tw

然而崩塌圈繪之依據主要利用事件前後影像特徵萃取，而光學影像往往受到天候條件影響而無法準確進行判釋。21 世紀以來，具有極化測量能力的極化雷達已成為主流趨勢，由於電磁波的極化對目標的介電常數、物理特性、幾何形狀和取向等比較敏感。透過不同收發極化組合下，量測地物目標的極化散射特性，可以提高成像雷達對目標各種信息的獲取能力，目前廣泛地運用在地質調查、土地利用和環境生態觀測等研究^[9-14]。

初步透過高精度地形資料之判釋與現地調查，可以篩選出台灣山區屬於深層重力邊坡變形的崩塌，惟具有地形特徵之潛在大規模崩塌，才有機會轉換成快速運動之災害性崩塌。一旦研判為崩塌區之數量與面積極為龐大，如何透過大數據分析與人工智慧學習，建立台灣山區崩塌事件與影像特徵資料庫？2017 年人工智慧圍棋程式「AlphaGo」首度戰勝圍棋棋王後，類神經網路以及深度學習技術成為眾所矚目的焦點。

為瞭解台灣崩塌圖像特徵，本研究擬利用光學影像判釋、雷達極化分析以及卷積神經網路（Convolutional Neural Networks, CNN）等技術，針對目前已判釋出之潛在大規模崩塌來進行分析，藉以評估這類崩塌的圖像特徵。這些特徵會捕捉衛星影像中的共通要素，以崩塌判釋為例，為了計算整張影像裡有多少符合崩塌特徵，並創造了一套篩選機制其數學原理被稱為卷積（convolution），也就是 CNN 的名稱由來^[15]。從 CNN 的原理可以計算時很耗運算資源，因此 CNN 另一個強大工具是池化（pooling），會在圖片上選取不同窗口（window），並在這個窗口範圍中選擇一個最大值，其功能為將一張張圖像池化成更小的圖片，可視為一個壓縮圖片並保留重要資訊的方法^[16-19]。

深度學習在遙感領域的應用日益廣泛，以目標物識別、土地覆被分類以及地表變異偵測等研究為主，利用機器學習工具發展不同影像來源之影像數據訓練，以做為進行廣域快速地表特徵變異之利器，據以評估特定災害事件後區域環境之災損程度。針對災害事件發生後快速進行崩塌判釋，強化自動化崩塌判釋的科學證據，同時有助於後續政府相關單位進行崩塌影響範圍之圈繪。

研究目的

台灣主要地質災害分為兩類，一類為地震活動，地震主要是因斷層錯動而造成，地震有大有小，僅有部分一些大地震會造成重大傷亡，機率上並不常發生；而另

一類則是無處不在的山坡地的潛在崩塌，台灣地質條件複雜，加之全年充沛降水，全台坡地皆無法避免崩塌的威脅。若遇短時極端強降水，極可能誘發大規模山崩。以高雄獻肚山山崩為例，2009 年莫拉克颱風帶來之強降水，使邊坡土壤含水量達到飽和、誘發大規模土石崩落，造成小林部落滅村及四百餘人罹難。

事實上，在重大災害發生後，外界往往無法立即知曉災區情況，亦無法立即進入災區勘察災情。隨著衛星遙測技術的發展，透過快速取得廣域影像來了解災區地表變形，成為一種安全且快速的方式。但往往在特定的颱風及降雨事件之後，山區受災地區天氣通常不佳，不利於光學衛星取得雲層覆蓋率低的影像，無法即時掌握崩落地範圍及現地現況；而雷達影像則較不受天候及雲層覆蓋影響，較能取得更多有效資料，更加適用於災後快速了解災區判釋及協助救援。

深度學習在遙感領域的應用日益廣泛，以目標物識別、土地覆被分類以及地表變異偵測等研究為主，利用機器學習工具發展不同影像來源之影像數據訓練，以做為進行廣域快速地表特徵變異之利器，據以評估特定災害事件後區域環境之災損程度。針對災害事件發生後快速進行崩塌判釋，強化自動化崩塌判釋的科學證據，同時有助於後續政府相關單位進行崩塌影響範圍之圈繪。

本研究以莫拉克災前後光達數值地形，搭配福衛二號影像與前期潛在大規模崩塌地形特徵判釋進行比對，同時利用卷積神經網路工具進行研究區域已發生之大規模崩塌區位目錄，配合影響因子（差態化差異植生指標（NDVI）、岩體強度、坡度、坡向、高程、河道距離、構造距離、順向坡），進行福衛 2 號大規模崩塌之影像數據訓練。透過比對 2005 年及 2010 年光達數值地形判釋之大規模崩塌潛勢發生區位的成果，結合 2009 年莫拉克風災發生面積大於 10 公頃之崩塌資料，做為卷積神經網路自動化崩塌判釋模組之驗證。

同時，使用衛星雷達雙偏極 HH 和 HV 影像強化目標物在不同偏極電磁波之辨識能力，配合前期福衛 2 號判釋成果進行地表變異分析。此外，針對旗山溪流域分析 2006 年至 2009 年間 ALOS 衛星雷達影像極化影像之崩塌成果，評估大規模崩塌發生潛勢與大規模崩塌活動性之關係，另納入福衛 2 號及空載光達之卷積神經網路自動化崩塌判釋模組，透過崩塌事件、發生度與活動性三者間之關係進行比對分析，建構合理的自動化大規模崩塌劃設方法評估。

研究方法

大規模崩塌判釋與識別

本研究以旗山溪流域試驗地區，整合 ALOS 雷達與福衛光學影像，利用卷積神經網路學習工具進行自動化崩塌判釋。第一年將以莫拉克災前後光達數值地形，搭配福衛二號影像與前期潛在大規模崩塌地形特徵判釋進行比對，同時利用卷積神經網路工具進行研究區域，比對 2005 年及 2010 年光達數值地形判釋之大規模崩塌潛勢發生區位的成果，結合 2009 年莫拉克風災發生面積大於 10 公頃之崩塌資料，做為卷積神經網路自動化崩塌判釋模組之驗證。

輔以日本太空總署 ALOS/PALSAR 衛星雷達影像，利用衛星雷達雙偏極 HH 和 HV 影像強化目標物在不同偏極電磁波之辨識能力，配合前期福衛 2 號判釋成果進行地表變異分析。利用 2009 年莫拉克風災後之 ALOS 衛星極化影像之崩塌成果，評估大規模崩塌發生潛勢與大規模崩塌活動性之關係。另納入福衛 2 號及空載光達之卷積神經網路自動化崩塌判釋模組，透過崩塌事件、發生度與活動性三者間之關係進行比對分析，建構合理的自動化大規模崩塌劃設方法評估。

在莫拉克風災於旗山溪流域所發生大規模崩塌均由 DSGSD 轉換而來之基礎下，本研究將潛在崩塌面積大於 10 公頃者為大規模崩塌潛勢區位之必要條件，利用 2005 年及 2010 年莫拉克颱風後之高精度光達數值地形產製日照陰影圖與坡度圖等資料進行判釋，配合前期判釋成果將歷次颱風事件，導入卷積神經網路自動化崩塌判釋模組，以找出具崩塌地形特徵的潛勢區位。

在大規模崩塌的發育過程中，地形上常存在一些地形特徵。大規模崩塌大致可以分為冠部、陷落區和隆起區，其主要特徵有主崩崖、次崩崖、冠部崩崖、冠部裂隙，反向坡與陷溝等線性構造如圖 1 所示 [20-26]。

福衛 2 號衛星為我國第 1 顆自主掌控之光學遙測科學衛星，因具有每日再訪之特性，可提供近乎即時之高解析度衛星影像，有利於掌握災害研判、救災工作等之時效性。本研究使用福衛二號全色態影像於崩塌特徵判釋，配合前人利用空載光達判釋潛在大規模崩塌之地形特徵，以旗山溪流域為例，萃取崩塌與光學影像之紋理特徵，以量化的方式探討監督式與非監督式分類的結果。同時經歷年崩塌事件前後影像置入卷積神經網路學習系統，建立客觀崩塌判釋標準。本研究同時使用前人使用 LiDAR 資料產製日照陰影圖和

坡度圖配合航照等相關資料，針對破壞之地形特徵進行判釋，配合崩塌事件前後福衛 2 號光學衛星影像，對於判釋崩塌更是有利 [27-29]，也更有機會觀察出潛在大規模崩塌之地形特徵。

ALOS/PALSAR 雷達極化分析

本研究使用日本太空總署（Japan Aerospace Exploration Agency，縮寫：JAXA）於 2006 年 1 月發射 ALOS（Advanced Land Observing Satellite）衛星雷達，PALSAR（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）為 L 波段之雷達影像系統，其 SAR 感測器發射電磁波的頻率為 1.27×10^9 赫茲，波長距離為 23.62 公分，平均軌道高度在赤道上為 691.65 公里，軌道與赤道傾斜角為 98.16 度，軌道週期為 46 天，已於 2011 年 5 月除役。

ALOS 衛星屬於太陽同步衛星，為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地進行觀測的衛星，其因具有雷達和光學觀測的特性，而較不受天候影響。所承載的儀器包括星座追蹤系統、GPS 天線、軌道通訊天線、太陽能板，以及三個遙測感應器，分別為全色遙感立體測繪儀器（PRISM：Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping）、可見光和近紅外輻射計（AVNIR-2：Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2）及雷達感測器（PALSAR：Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）。PALSAR 為合成孔徑雷達影像系統，可獲取全天候影像（圖 1）。

PALSAR 為延續 1992 年 JERS-1 之地球觀測任務而研發之新系統，其具有多重觀測角度特性外，其雷達為全極化（fully-polarization）系統，為世界首例。全極化雷達不同於多極化雷達系統，它除了紀錄 HH、VV、HV 強

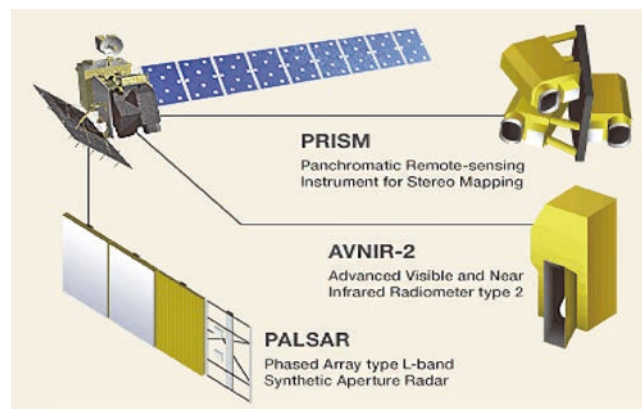


圖 1 日本 ALOS 衛星所承載之三項感測器

（資料來源：日本 JAXA 網站 [30]）

度反應之外，並紀錄各極化間之相位資訊，即可利用極化合成技術合成出各種不同的極化，進而對於目標物散射機制及目標辨識的應用上，提供相當豐富的特徵資訊。

衛星雷達回波強度 (intensity) 可構成灰階可視化影像，除了包含回波頻率、振幅以及相位等資訊，透過不同雷達極化方式可以強化地表特徵。所謂雷達極化就是電磁波在傳遞時，其方向和電場、磁場相互垂直，即代表電磁波的偏振方式。從空間傳播的特性來看，電場向量端點隨時間變化的軌跡為直線，稱之線極化，其中又分為水準極化和垂直極化^[31]。水準極化 (Horizontal polarization) 電場向量與入射面垂直，垂直極化 (Vertical polarization) 電場向量與入射面平行 (圖 2)。

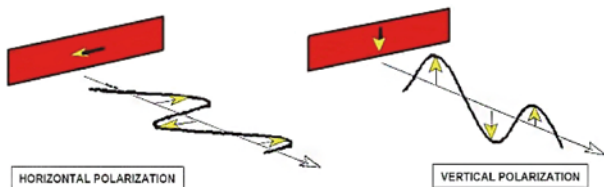


圖 2 極化雷達線極化示意圖
(資料來源：Freeman *et al.* [31])

常見雷達遙感系統可分為單極化、雙極化以及全極化三大類。單極化是指水平發射水平接收 (HH) 或垂直發射垂直接收 (VV)，用在多數的氣象衛星雷達亦稱為同向極化。雙極化是指在一種以上的發射模式，如水平發射垂直接收 (HV) 和垂直發射水平接收 (VH)，又稱為異向 (交叉) 極化模式。全極化技術難度最高，同時進行水平發射和垂直發射，也就是存在 HH、HV、VV、VH 四種極化方式^[32]。當衛星上同時發射水準極化和垂直極化波，採用雙極化正交接收天線，改變雷達發射天線的方向，就可以改變電磁波的極化方式。

本研究使用 ALSO/PALSAR 衛星雷達影像具有雙極化成像，其中 HH 偏極化影像針對二次散射特性的裸露地及人工建物較為顯著，例如房舍、道路以及橋樑等，而 HV 偏極化影像則是具有體散射特性的植被。透過雷達雙偏極化 HH 和 HV 影像融合，紫色 (R&B) 代表

HH 偏極化，綠色 (G) 代表 HV 偏極化影像，可強化目標物在不同偏極電磁波之辨識能力。以小林村獻肚山為例，利用 ALOS 衛星雷達多時序雙偏極 (HH、HV) 影像鑲嵌成果，配合 2009 年莫拉克颱風前後 SPOT 衛星影像，進行地表變異偵測分析。對照崩塌事件前後 HH 偏極化影像 (紫色) 及 HV 偏極化影像 (綠色) 之時空變化，由 SPOT 衛星影像指出 2008 年獻肚山尚未發生崩塌 (圖 3a)，從圖 3d 偏極化影像得到相同的結果。莫拉克風災後，2010 年 SPOT 衛星影像 (圖 3b) 及 HH 偏極化影像 (圖 3e)，皆可明顯觀察到崩塌裸露地。2015 年崩塌區 ALOS2 偏極化影像 (圖 3c) 由紫轉綠，則反映崩塌裸露區植生復育的現象 (圖 3f)。利用日本 JAXA 所提供 ALOS 衛星高精度的數據，可將雷達影像鑲嵌影像統一轉為臺灣大地坐標系統 TWD67 及 97，透過多時序的雷達影像鑲嵌資訊，配合卷積神經網路學習工具，將有助於達成地表變異偵測目的。

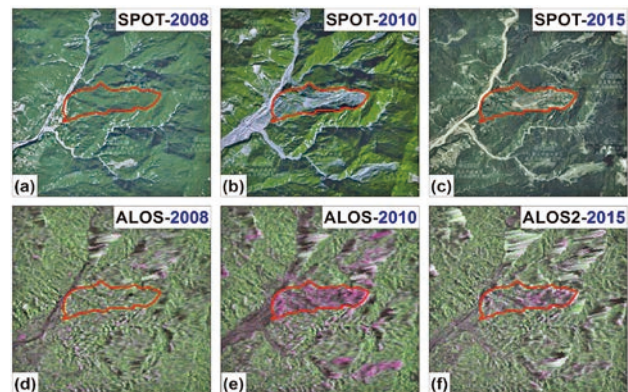


圖 3 小林村獻肚山大規模崩塌 SPOT 影像及衛星雷達雙極化影像圖

人工智慧學習模組

卷積神經網路 (Convolutional Neural Network) 簡稱 CNN，為一個或多個「層」所組成，包含卷積層 (convolutional layer)、池化層 (pooling layer)、全連接層 (fully connected layer) 及激活函數 (activation function)，該詳細流程架構如圖 4，圖像經過卷積層與池化層提取特

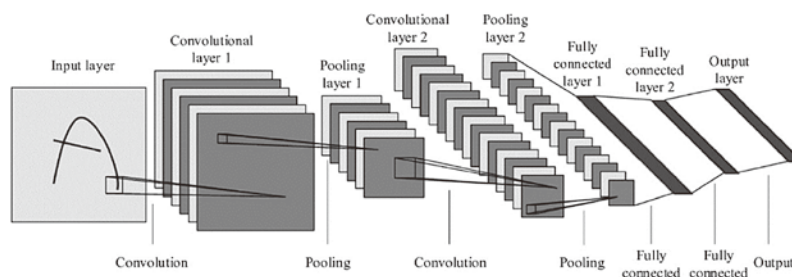


圖 4 卷積神經網路基本架構^[33]

徵及降低維度後，全連接層再利用提取到的特徵進行分類，激活函數將使層與層之間輸入及輸出成果為非線性，並使整體神經網路具較佳學習能力。由於 CNN 模式的發展以時俱進，表 1 目前常用神經網路模型。

表 1 常用神經網路模型

神經網路模型	作者	開發年份
LeNet	Yann LeCun	1998
AlexNet	Alex Krizhevsky	2012
VGG16、VGG19	Simonyan 和 Zisserman	2014
Inception V3	Szegedy 等人	2014
ResNet	He 等人	2015
Xception	François Chollet	2016

以下針對 CNN 分層計算與方法論原理進行說明：

卷積層 (Convolutional Layer)：卷積層藉由經訓練之卷積核 (Kernel)，再經由圖像進行運算並萃取影像局部特徵，卷積層是透過數個經過訓練的卷積核 (Filter/Kernel) 於圖片上進行卷積運算 (圖 5)，提取圖片的局部特徵，而卷積運算是原始圖像與卷積核逐元素做乘法再加總為一個值。

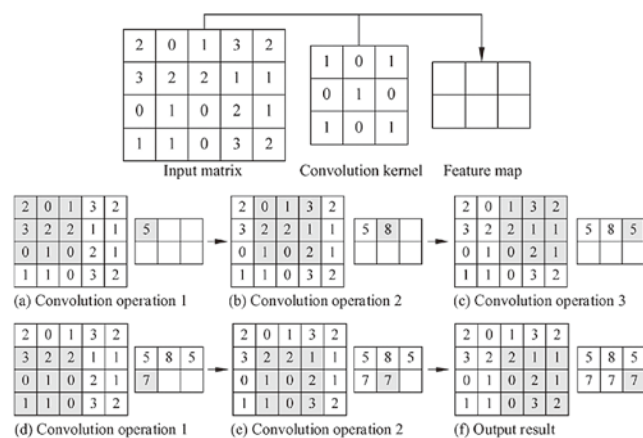


圖 5 卷積層數值運算與取樣模式 [33]

池化層 (Pooling Layer)：池化層之目的為降低度並預防過度擬合之情形，藉由該層之設定可減少過度雜訊之干擾。池化層使用移動視窗對特徵做局部運算，常用之池化層主要有最大池化 (Max Pooling)、平均池化 (Average Pooling)，最大池化是在滑動窗口中的局部數值當中挑出最大值 (如圖 6 所示)。

全連接層 (Fully Connected Layer)：全連接層主要將各池化運算後之運算成果進行分類並經由平坦化 (Flatten) 後輸入到全連接層，最後連接於神經網路架構，且各層神經元彼此相連接，各連結獨立且具相異的權重值 (圖 7)。

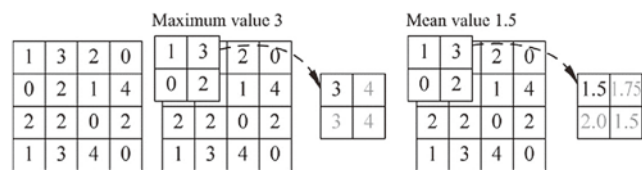


圖 6 池化運算原理與模式 [33]

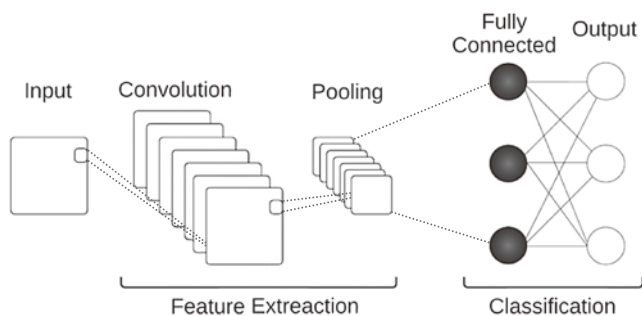


圖 7 全連接層基本原理與運算 [34]

激活函數 (Activation Function)：激活函數之功能主要引入非線性函數，作為使層與層之間關聯性更能符合自然情境中非線性分類。常見的激活函數有 Sigmoid 函數、tanh 函數以及整流線性單位 (Rectified Linear Units, ReLU) 函數。其中 Sigmoid 函數定義其輸出介於 0 ~ 1，當輸入值偏大或偏小將使輸出值變化小；tanh 函數定義輸出介於 -1 ~ 1；ReLU 函數定義輸入值為正則輸出該值大小，若為負數則輸出為 0，該分段線性之特性，可避免梯度消失問題。一般影像辨識常以 ReLU 作為激活函數，該函數可克服 Sigmoid、tanh 梯度消失問題。其他還有 Leaky ReLU、Maxout、ELU 等常用活化函數 (圖 8)。

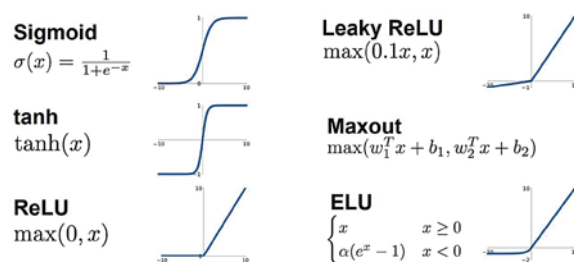


圖 8 活化函數圖形 [35]

研究成果

旗山溪流域潛在大規模崩塌智慧學習訓練案例

本研究參考前期研究成果 [36]，利用 2005 年及莫拉克風災後之高精度光達數值地形資料，配合福衛二號影

像與航空照片，在計畫範圍內深層邊坡重力變形共有 178 處；而莫拉克風災觸發大規模崩塌有 27 處。進一步計算災害前後量體分布後，其研究區域內深層邊坡重力變形總計共有 75 處，因莫拉克事件觸發崩塌計 75 處。以旗山溪流域潛在大規模崩塌及莫拉克風災觸發崩塌判釋成果為後續雷達極化深度學習之樣本，如圖 9 所示。

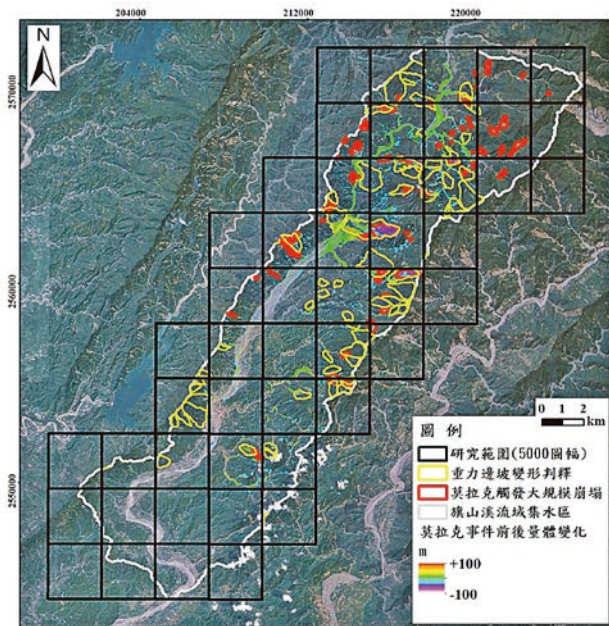


圖 9 旗山溪流域潛在大規模崩塌及莫拉克風災觸發崩塌案例分布圖

旗山溪深層山崩幾何及量體經驗關係

Cardinali *et al.* [37] 和 Guzzetti *et al.* [38] 藉由分析大量深層山崩的量體與崩塌面積歸納出對數線性迴歸關係，Klar *et al.* [39] 以簡化力學模式分析出該迴歸為一通用關係，然而單一個案的地形地質條件，為實際案例與理想迴歸關係偏差的次要因子。本研究應用受莫拉克颱風極端降雨所引發的 24 處深層山崩進行統計分析，以旗山溪流為例（圖 10），崩塌量體計算是利用 2005 及 2010 年施測的空載光達（LiDAR）數值地形，其中，紅色實線匡列的區域為崩塌區，負值代表崩塌區深度，正值為堆積區深度。

由經濟部中央地質調查所之地質資料整合查詢－五萬分之一圖幅，旗山溪流域之崩塌區主要發生於中新世的紅花子層及中新世上新世的糖恩山砂岩，紅花子層地質或稱南莊層地質，是屬堅硬石灰質砂岩層、砂岩、頁岩及砂岩與頁岩薄互層，內含大量的貝類化石，主要岩石組成則為厚層粉砂岩及粉砂岩與細砂岩巨厚互層。而

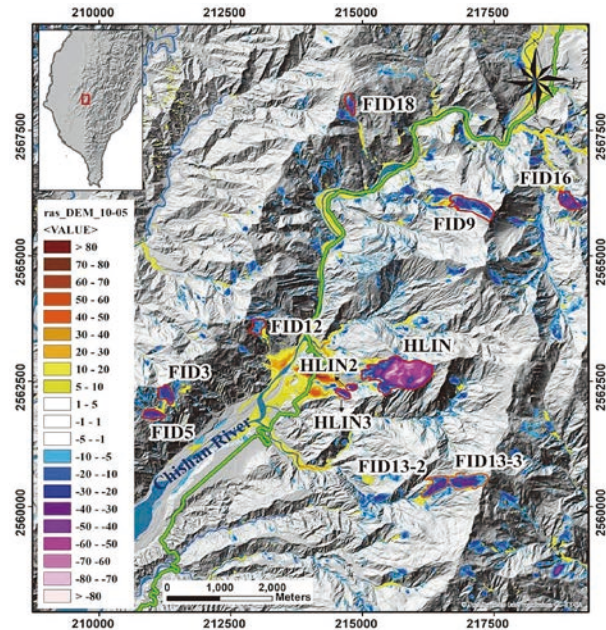


圖 10 高雄市甲仙區旗山溪集水區山崩分佈圖 [40]

糖恩山砂層地質或稱桂林竹層地質，是含化石的砂頁岩互層，主要由淡青灰色細粒砂岩所組成，砂岩呈塊狀，具有不規則之節理，在地形上常形成陡崖或深谷。荖濃溪流域之崩塌區主要發生於潮州層，主要岩性為硬頁岩或板狀頁岩，間夾透鏡狀砂岩體，相當於中新世中期。

本研究探討的山崩面積－體積經驗迴歸公式分析得以涵蓋寬廣的地質與構造的變異性，其結果如 11(a) 所示，而藉由這 24 組山崩所得之經驗式與 Guzzetti *et al.* [38] 所得之經驗式有極佳的一致性。由以上討論，藉由山崩面積－體積經驗迴歸公式及圓度－球度關係，來檢視崩塌體之形貌，輔助判定破壞面推估準確率區間。

以幾何特徵有助於評估破壞面推估參數，分別為圓度（roundness）與球度（sphericity），前者為崩塌區邊界的最大內切圓與最小外切圓的半徑比值，而後者為與山崩同量體積之球表面積與山崩塊體總面積（自由面與破壞面）之比值，兩者之值皆為介於 0 與 1 之間，而等於 1 時分別代表真圓與球，可對應至傳統山崩分析文獻中之崩塌區長寬比與長深比關係，在此廣義數學定義可避免選取任意形狀崩塌區之長、寬、深等幾何量的模糊性，圖 11(b) 顯示圓度與球度間之關係，灰色網底為 95% 信賴區間，顯見兩者之值約略呈現同時消長的趨勢。

旗山溪流域 ALOS 雷達影像崩塌事件判釋

本研究使用的雷達衛星為日本 JAXA 發射的 ALOS 衛星，衛星拍攝週期為 46 天一筆，其衛星飛行軌道如

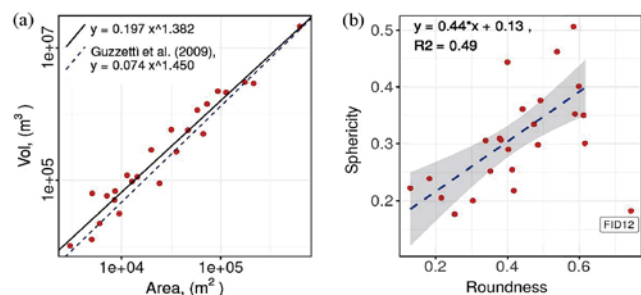


圖 11 (a) 山崩面積－體積經驗迴歸關係；(b) 圓度 (Roundness) 與球度 (Sphericity) 迴歸關係^[41]

圖 12 所示。ALOS 衛星搭載 PALSAR (相控陣型 L 波段合成孔徑雷達)，具備多重觀測角度與多偏極、全偏極等功能，其中包含高解析單偏極 (HH 或 VV) 與雙偏極 (HH + HV 或 VV + VH) 方式，其空間解析度分別為 7~44 公尺與 14~88 公尺。

根據本研究進行 2007~2010 多時序衛星雷達雙極化成果顯示 (圖 13)，由於水體表面平滑，難以有效反射雷達訊號構成回波而在強度影像上呈現低值，因此可在天候不佳的情況下有效偵測水體變化。雙偏極化成果有效強化地表裸露面之位置 (紫色部分)，進而呈現莫拉克風災 (2009 年) 前後之地表變異，整合前述福衛 2 號及量體分析結果指出災後地表變化位置與偏極 HH 訊號分布範圍一致，以上結果說明利用雙偏極衛星雷達影像進行即時觀測，對於未來臺灣在坡地災害後續管理決策、分析應用上，可提供可靠之參考。

旗山溪卷積神經網路自動化崩塌判釋模組

深度學習是機器學習一種技術，機器學習涵蓋機率學、統計學、最佳理論、運算與智能等，在於使用演算法來分析資料的實踐和學習，然後對真實事件做出決策或預測。卷積神經網路 (Convolutional Neural Network)，又稱 CNN，是一種常見的深度學習結構。

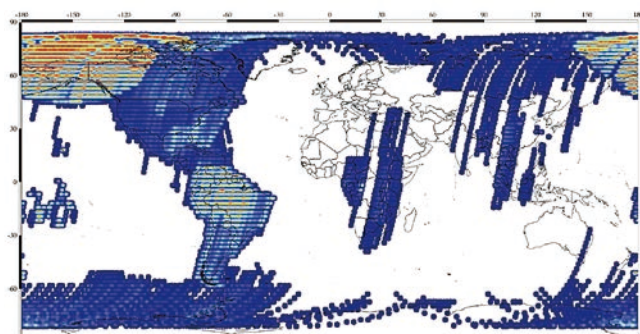


圖 12 日本 JAXA-ALOS 衛星全球衛星拍攝圖
(引自 JAXA 網站^[30])

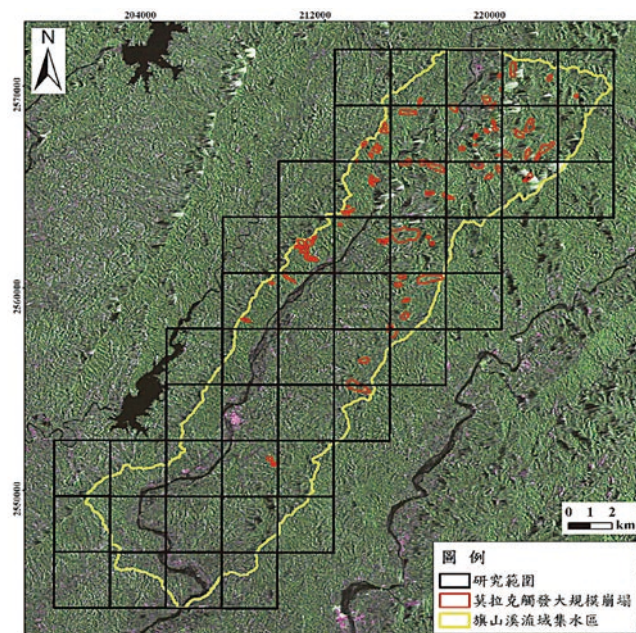


圖 13 研究區域 2007 雙極化雷達影像及判釋成果套疊

類神經網路為多層架構，層與層之間由一組相互連結的節點所構成。CNN 是目前深度神經網路 (Deep Neural Network) 領域的發展主力，也是讓深度學習在近幾年有許多重大的突破主因。深度學習模型的準確度在很大程度上取決於用於訓練模型的數據量，將學習到的特徵與輸入的數據進行迴旋積，因為使用 2D 的卷積層，這樣的架構適合用來處理 2D 數據，能夠直接從影像、文字、訊號等資料，以端對端 (end-to-end) 的形式學習有鑑別度的特徵。

本研究使用 MATLAB 底下類神經網路工具箱 (Neural Network Toolbox)，提供演算法，預訓練模型和應用程式 (APP) 來建立並訓練視覺化及模擬淺層和深層神經網路。透過光學及雷達影像判釋成果執行分類、迴歸、分群、降維處理、時間序列預測和動態系統建模與控制。對於時間序列分類和預測，此工具箱提供長短期記憶 (LSTM) 深度學習網路。當 CNN 演算法被大量標記的訓練資料集訓練之後，可以用來建立高準確度的分類器。

本研究匯入精進研究成果做為訓練資料 (圖 14)，進行自動配比產生最佳資料，利用 Attention model 特定模型，用在機器影像學習、辨識、與理解 (image caption)，其可以動態地找到兩邊最相符的資訊，並且將其重要的部份以權重的方式凸顯出來。圖 15 為利用 CNN 人工智慧模組於旗山溪流域集水區自動判釋成果。

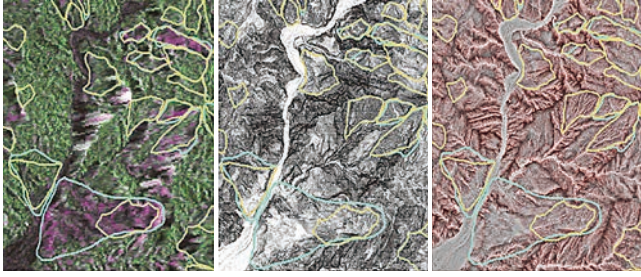


圖 14 以小林村為例，崩塌前後量體、雷達極化分析以及地形判釋成果圖

結論

1. 本研究利用 2005 年及莫拉克風災後之高精度光達數值地形資料產製日照陰影圖及坡度圖，配合福衛二號影像與航空照片所判釋之旗山溪集水區之深層邊坡重力變形為研究樣本，共計有 178 處；而莫拉克風災觸發大規模崩塌有 27 處。進一步計算災害前後量體分布，發現因莫拉克事件觸發崩塌共計 75 處。
2. 本研究利用山崩面積－體積經驗迴歸公式分析，得以涵蓋寬廣的地質與構造的變異性，藉由旗山溪集水區 24 處山崩所得之經驗式與 Guzzetti *et al.* [38] 有極佳的一致性。說明藉由山崩面積－體積經驗迴歸公式及圓度－球度關係，有助於檢視旗山溪集水區之崩塌體之形貌，輔助判定破壞面推估準確率區間。
3. 使用 ALOS 衛星雷達影像的雙極化成像，透過雷達雙偏極化 HH 和 HV 影像融合，可快速分辨植被覆蓋區及裸露地，釐清旗山溪集水區之崩塌區域。利用雙偏極化影像，搭配高精度數值地形模型，輔以地質圖，坡度陰影圖及崩塌地形特徵等資料，進行旗山溪集水區之大規模崩塌判釋。其成果顯示由 ALOS 雙偏極化圖可判讀絕大多數明顯裸露地，但由於受台灣地形陡峭影響，衛星拍攝之陰影區資料質量不佳，需輔以其他圖資協助判釋。結合雷達衛星產制之極化圖及精度數值地形模型等，提供後續研擬邊坡之活動性與潛在崩塌發育模式。
4. 深度學習是以人工神經網路為架構，對數據進行表征學習演算的算法深度學習下的卷積神經網路（CNN）是一種前饋神經網路，它的人工神經元可以回應一部分覆蓋範圍內的周圍單元，對於大型圖像處理有出色表現。簡單來說，CNN 是透過大量資料的運算，找出資料中的規律，進而進行預測。本研究使用深度學習下的卷積神經網路（CNN）進行所有資料的分析與建模。同時配合 ArcGIS Pro 下的 Python 模組導入 Deep Learning 相關資料，並在 Keras、TensorFlow 建立模型。

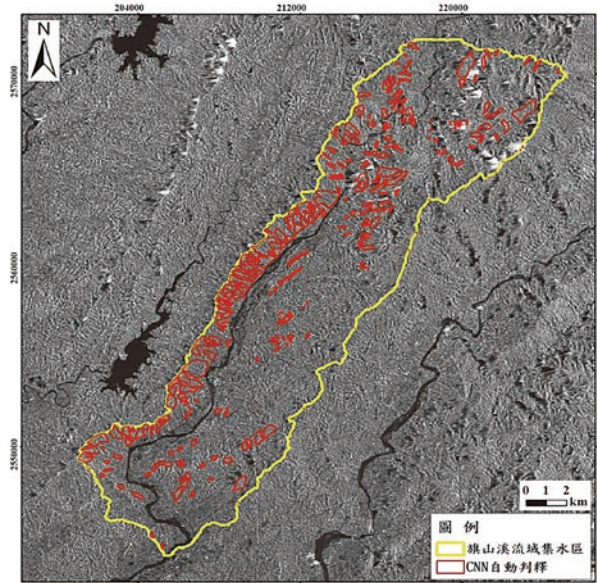


圖 15 旗山溪流域 CNN 大規模崩塌潛勢判釋成果圖

5. 本研究建置合成孔径衛星雷達雙偏極化判釋流程：以莫拉克風災前後雷達衛星極化資料，建置旗山溪流域歷次崩塌事件之卷積神經網路地表變異識別模式。使用前述研究成果為分析樣本，輔以具有空間視覺特徵之紅色地圖，訓練卷積類神經網路，建立卷積崩塌潛勢指標模式，並且成功運用在旗山溪集水區之大規模崩塌判釋。

參考文獻

1. 林家慶（2007），「應用福衛二號時間序列影像監測曾文水庫集水區崩塌地之時空變化」，國立成功大學地球科學系學位論文，第 1-83 頁。
2. 林正杰（2012），「運用多期福衛二號高時空分辨率影像建立崩塌災害預警模式」，國立成功大學環境工程學系學位論文，第 1-188 頁。
3. 陳婉君（2014），「深淺層崩塌之衛星影像自動判釋及潛感分析——以力行產業道路為例」，國立中興大學土木工程學系碩士論文，第 1-108 頁。
4. 劉正千、張智華、許華宇、譚子健、溫清光（2007），應用 ISIS 高頻譜光學遙測影像於曾文水庫之水質監測，科儀新知，第 161 期，第 29-42 頁。
5. 林慶偉（2009），台灣南部荖濃河流域崩塌與土石流發生特性與觸發基準之研究（I），政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，第 1-18 頁。
6. 劉守恆、林慶偉（2004），「SPOT 衛星影像之崩塌地自動分類研究」，航測及遙測學刊，第 9 卷，第 2 期，第 9-22 頁。
7. 林恩如、劉正千、張智華、鄭依凡、柯明勳（2013），「運用福衛二號高時空分辨率多光譜影像於台灣全島崩塌地判釋與災害分析」，航測及遙測學刊，第 17 卷，第 1 期，第 31-51 頁。
8. 郭芳君（2014），「運用高解析度衛星影像進行事件誘發山崩自動判釋」，國立中央大學應用地質研究所學位論文，第 1-102 頁。
9. Dellepiane, S., Bo, G., Monni, S., and Buck, C. (2000), "SAR images and interferometric coherence for flood monitoring." In IGARSS

- 2000.” IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120) (Vol. 6, pp. 2608-2610). IEEE.
10. Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S., and Zhu, Y.H. (2000), “Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes.” *Forest Ecology and Management*, 128(1), 109-120.
 11. Matsuoka, M. and Yamazaki, F. (2004), “Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes.” *Earthquake Spectra*, 20(3), 975-994.
 12. Moreira, A., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K., Younis, M., Lopez-Dekker, P., and De Zan, F. (2015), “Tandem-L: A highly innovative bistatic SAR mission for global observation of dynamic processes on the Earth's surface.” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(2), 8-23.
 13. Akbari, V., Doulgeris, A.P., and Eltoft, T. (2016), “Post-classification Change Detection in Arctic Glaciers by Multi-polarization SAR.” In *Multitemporal Remote Sensing* (pp. 125-144). Springer International Publishing.
 14. Capodici, F., Maltese, A., Ciraolo, G., D'Urso, G., and La Loggia, G. (2017), “Power Sensitivity Analysis of Multi-Frequency, Multi-Polarized,” *Multi-Temporal SAR Data for Soil-Vegetation System Variables Characterization. Remote Sensing*, 9(7), 677.
 15. Kim, Y. (2014), “Convolutional neural networks for sentence classification.” *arXiv preprint arXiv:1408.5882*.
 16. Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G.E. (2012), “Imagenet classification with deep convolutional neural networks.” In *Advances in neural information processing systems* (pp. 1097-1105).
 17. Vedaldi, A. and Lenc, K. (2015), “Matconvnet: Convolutional neural networks for matlab.” In *Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia* (pp. 689-692). ACM.
 18. Ding, A., Zhang, Q., Zhou, X., and Dai, B. (2016), “Automatic recognition of landslide based on CNN and texture change detection.” In *2016 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)* (pp. 444-448). IEEE.
 19. Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Gholamnia, K., Meena, S.R., Tiede, D., and Aryal, J. (2019), “Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection.” *Remote Sensing*, 11(2), 196.
 20. Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A., (2001), *Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics: Engineering Geology*, 59, pp. 83-102.
 21. Chigira, M. (2009), “September 2005 rain-induced catastrophic rock-slides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations,” *Kyushu, southern Japan: Engineering Geology*, 108, pp. 1-15.
 22. Chigira, M. and Kiho, K., (1994), “Deep-seated rockslide-avalanches preceded by mass rock creep of sedimentary rocks in the Akaishi Mountains,” *central Japan: Engineering Geology*, 38, pp. 221-230.
 23. Crosta, G.B., Frattini, P., and Agliardi, F. (2013), “Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps: Tectonophysics,” <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.028>.
 24. Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M., Loye, A., and Derron, M.-H. (2013), “From deep seated slope deformation to rock avalanche: Destabilization and transportation models of the Sierre landslide (Switzerland): Tectonophysics,” <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.016>.
 25. Varnes, D.J. (1978), “Slope movement types and processes: Washington,” *Transportation Research Board*.
 26. 日本国土交通省土木研究所 (2010)・「深層崩 の発生の恐れのある 流抽出マニュアル」。
 27. Chigira, M., Duan, F., Yagi, H., and Furuya, T. (2004), Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics *Landslides* 1, 203-209.
 28. Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D., and Dorsch, S.J. (2006), “Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity.” *Geomorphology*, 73, pp.131-148.
 29. Tarolli, P., Sofia, G., and Dalla Fontana, G., (2012), Geomorphic features extraction from high-resolution topography: landslide crowns and bank erosion: *Natural Hazards*, 61, pp. 65-83.
 30. 日本 JAXA 網站 <https://global.jaxa.jp/>
 31. Freeman, A., Shen, Y., and Werner, C.L. (1990), “Polarimetric SAR calibration experiment using active radar calibrators.” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 28(2), 224-240.
 32. Freeman, A. and Durden, S.L. (1998), “A three-component scattering model for polarimetric SAR data.” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(3), 963-973.
 33. Chen, L. (2021), “Deep learning and practice with mindspore.” *Springer Nature*, 61-65.
 34. Taheri, R., Ahmed, H., and Arslan, E. (2023), “Deep learning for the security of software-defined networks: a review.” *Cluster Computing*, 26(5), 3089-3112.
 35. Jayawardana, R. and Bandaranayake, T.S. (2021), “Analysis of optimizing neural networks and artificial intelligent models for guidance, control, and navigation systems.” *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*, 3(3), 743-759.
 36. 地調所 (2016)・應用大規模崩塌活動性與發生度整合資訊於山崩與地滑地質敏感區劃定成果報告，經濟部中央地質調查所。
 37. Cardinali, M., Paola, R., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M., and Salvati, P. (2002), “A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria,” *Central Italy. Natural Hazards Earth Sys. Sci.*, 2, 57-72.
 38. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M.R.M., and Valigi, D. (2009), “Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria,” *Central Italy. Earth Planet. Sci. Lett.*, 279(3), 222-229.
 39. Klar, A., Aharonov, E., Kalderon-Asael, B., and Katz, O. (2011), “Analytical and observational relations between landslide volume and surface area.” *J. Geophys. Res.*, 116, F02001.
 40. 郭志禹、詹雅馨、蔡碧紋、陳柔妃、戴義欽、林慶偉 (2019)・應用崩塌體積與最小平滑曲面法建構三維深層崩塌之近似破壞面，*中華水土保持學報*，第 50 期，第 143-153 頁。
 41. Kuo, C.Y., Tsai, P.W., Tai, Y.C., Chan, Y.H., Chen, R.F., and Lin, C.W. (2020), “Application assessments of using scarp boundary-fitted, volume constrained, smooth minimal surfaces as failure interfaces of deep-seated landslides.” *Frontiers in Earth Science*, 8, 211. 



利用 邊坡活動性 反演崩塌滑動面 幾何型態

林冠璋*／國立成功大學地球科學系 副教授

劉哲欣／國家災害防救科技中心 研究員

張志新／國家災害防救科技中心 研究員

郭賢立／國立成功大學地球科學系 博士生

本研究整合了數位影像相關法（DIC）與崩塌厚度反演方法，以分析桃園光華崩塌的滑動面幾何型態。反演所獲得的厚度模型進而可用於計算體積、流變性和滑動面形狀。兩期 UAV 正射影像的 DIC 分析結果顯示 2021 年 3 月至 8 月底，光華崩塌的地表水平位移最大值為 39.7 公尺，平均值為 7.8 公尺，與 GPS 觀測結果大致相符。此外，將 DIC 分析的水平位移分解，顯示光華崩塌以向東位移為主。為了反演崩塌厚度，使用了 2023 年 3 月 1 日和 8 月 17 日的兩期數值地形模型，結果可提供三維滑動面幾何型態，進而估算崩塌塊體體積。光華崩塌的活動塊體最大深度為 54 公尺，體積約 58.5 萬立方公尺。

前言

大規模崩塌是山區地形中主要的侵蝕作用之一，準確地估計其運動速率、體積或流變參數對於確定不安定土砂總量以及評估災害風險至關重要。其中，崩塌塊體的體積是控制土砂運動距離、受影響區域和損害程度的重要因素之一^[1,2]。在缺乏崩塌活動性資訊的情況下，崩塌體積可以藉由邊坡面積乘以平均深度進行估計。透過更多的現地活動性觀測則可以精進崩塌體積的估算。然而，地表和地下的活動性觀測數據通常僅限於點測量（例如，鑽孔）以及有限的時間範圍，而導致估算崩塌塊體體積並不容易。在本研究中，將利用高解析度遙測影像來計算潛在崩塌邊坡的地表變形速率，並利用這些地表變形數據反演為崩塌厚度、流變性和破壞面幾何型態。

從前人研究可以得知，對同一地點重複拍攝的光學影像可以分析大型緩慢變形邊坡的地表位移資訊

[3-7]。地表位移量則可以用於推斷崩塌滑動面的幾何型態^[8,9]，但普遍較少進行三維滑動面重建。過去在冰川科學的研究已經發現，冰川表面流動速度可以用於反演冰川厚度^[10,11]。Booth *et al.*^[12] 便參考了冰川厚度反演方法，利用三維地表變形量反演出崩塌厚度。本研究將此方法應用於桃園光華崩塌（桃園市－復興區－T002，圖 1），該大規模崩塌潛勢區面積約 3.4 公頃，在 2020 年底至 2021 年初出現快速的地表位移，反演所得到的厚度模型可用來計算塊體體積、流變性，以及滑動面的幾何型態。

數位影像相關法分析邊坡活動性

數位影像相關法（Digital Image Correlation, DIC）是一種影像測量技術，透過比較變形前和變形後的數位影像，可以提供物體的表面位移或變形資訊。在 DIC 分析中，被測量物體不需要安裝感應器或反射器，因此可視為一種遙測技術。因為變形前影像中單一像素的強度值通常可能對應到變形後影像中的不只一個像

* 通訊作者，gwlin@mail.ncku.edu.tw



圖 1 光華崩塌位置圖及空拍圖
(引用自農村發展及水土保持署大規模崩塌開放資料專區)

素，單一像素的強度值在兩個影像中出現唯一對應是不可能的。因此，DIC 是分析物體表面所出現的斑點圖案，而不僅是單一像素。透過定義變形前影像中的子集 (f)，並在變形後影像中尋找具有相似斑點圖案的子集 (g) (圖 2)。在決定子集大小時必須小心，太小的子集可能無法正確搜尋較大的斑點圖案，而太大的子集無法描述大的變形，並且會導致準確性的下降。因此，子集大小至少應達到最大斑點圖案的尺寸。DIC 也必須在一個感興趣區域 (ROI) 中以特定的間隔進行分析，當採用的間隔較小時便會有較多的分析結果。

DIC 對變形前後影像中子集所進行的相關性分析有多種方式，目前主流即是採用常態化交叉相關分析 (NCC)，其方程式可表示為^[4]：

$$NCC = \frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x', y')^2}}$$

其中， $F(x, y)$ 和 $G(x', y')$ 分別代表變形前和變形後影像子集內的強度值； (x, y) 和 (x', y') 分別為變形前後某

子集的中心點座標。透過搜尋出最大 NCC 值所對應的 (x, y) , (x', y') 來獲得位移量。

本研究於農業部農村發展及水土保持署所建置的大規模崩塌開放資料專區 (<https://data.swcb.gov.tw/FieldSurvey/Landslide>) 申請取得 2021 年 3 月 5 日及 8 月 31 日所拍攝的兩幅 UAV 正射影像，以及國家災害防救科技中心所產製的兩期數值地型模型，並將其空間解析度重取樣統一為 1 公尺 (圖 3)。由於分析電腦資源的限制，進行 DIC 分析時正射影像解析度再重取樣為 10 公尺。



(a) 2021 年 3 月 5 日拍攝



(b) 2021 年 8 月 31 日拍攝

圖 3 本研究 DIC 分析所用之正射影像

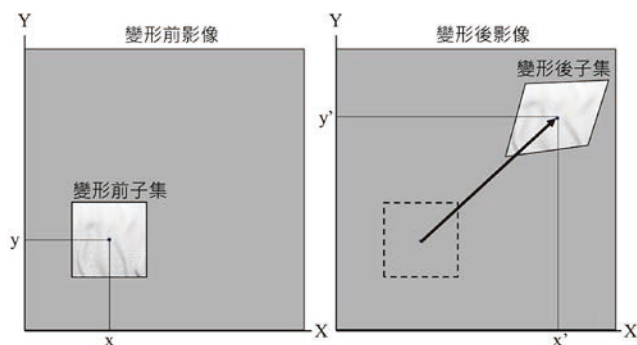


圖 2 數位影像相關法原理示意圖

崩塌滑動面幾何型態反演

Booth *et al.* [12] 根據 Farinotti *et al.* [10] 及 Morlighem *et al.* [11] 所提出的冰川厚度反演方法，修改為崩塌厚度反演方法。首先假設研究期間的滑動面沒有改變，表面速度代表了深度平均速度，且崩塌表面沒有顯著的侵蝕或沉積，因此崩塌材料的密度是均勻且恆定的。對於密度恆定且沒有侵蝕或沉積的崩塌，質量守恆的條件便能以方程式表達為：

$$v_u = -\nabla \cdot (\bar{u}h) + u_v \cdot \nabla z_{surf}$$

其中， v_u 為垂直向位移速率， h 為崩塌厚度， u_v 為水平向位移速率， $\bar{u}$ 則為平均水平位移速率，而 z_{surf} 則是地表高程。另外， $\bar{u} = fu_v$ ，其中 f 為一個常數，與崩塌塊體的流變條件有關聯，用於描述滑動面上剪切帶厚度與崩塌厚度間的比例關係。若 f 值越接近 1，則表示崩塌沿著狹窄的剪切帶，以類似剛體的方式滑動。 f 通常也代表平均水平位移速率與地表水平位移速率的比值 [13]。因此方程式可改寫為：

$$v_u = -\nabla \cdot (fu_v h) + u_v \cdot \nabla z_{surf}$$

後續便可利用中心有限差分法對水平向位移速率進行離散化，重新改寫為非負的線性方程式：

$$\|Ah - b\|^2 + \alpha^2 \|\nabla^2 h\|^2$$

其中， A 為深度平均水平速度的對角優勢矩陣， b 為 $u_v \cdot \nabla z_{surf} - v_u$ ，為阻尼參數。對該方程式求最小值，以獲得

最佳解時的 h ，即為崩塌厚度。該方法所反演出的厚度值應視為最佳解，並僅與崩塌活躍的塊體有關 [14,15]。

本研究將 2021 年 3 月 5 日及 8 月 31 日所拍攝的兩幅 UAV 正射影像運用 DIC 獲得水平向位移速率 (u_v)，兩期數值地形模型相減後獲得垂直向位移速率 (v_u)，再利用上述反演方法求得崩塌厚度 (h) 的最佳解。

光華崩塌滑動面反演結果與討論

農村發展及水土保持署的桃園市復興區光華崩塌應變措施階段報告中提及位於頭部崩崖附近的 GPS 監測結果顯示，3 月至 8 月底的平面位移量約為 7.8 mm/d，也就是累積位移量約 1.4 公尺，而便道迴彎處 4 月至 8 月底的平面位移量約為 38.2 mm/d。光華崩塌邊坡 2021 年 3 月及 8 月兩幅 UAV 正射影像的 DIC 分析結果顯示，水平向位移量最大值为 39.7 公尺，平均值為 7.8 公尺（圖 4）。DIC 分析結果與 GPS 監測結果不論是位移量數值的規模及分布狀態均相近，大呈現頭部崩崖位移量較小，而坡腹處位移較顯著。將 DIC 分析之水平向位移量分解為東西向及南北向分量（圖 5），可以觀察到光華崩塌以向東位移為主。以上說明均顯示，DIC 分析結果與崩塌邊坡的實際位移狀況一致，因此能運用於後續反演崩塌塊體厚度。

為了獲得垂直向位移量所使用的兩幅數值地形模型分別拍攝於 2021 年 3 月 1 日及 8 月 17 日的，雖拍攝日期與 DIC 分析用 UAV 正射影像不同，但差異不大，且用於反演崩塌厚度所需之數值為位移速率，因此仍能採

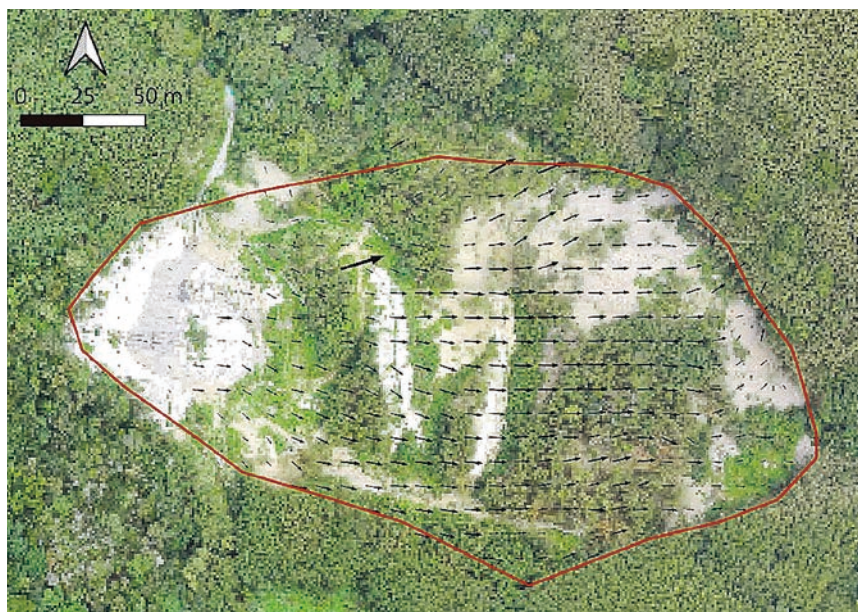
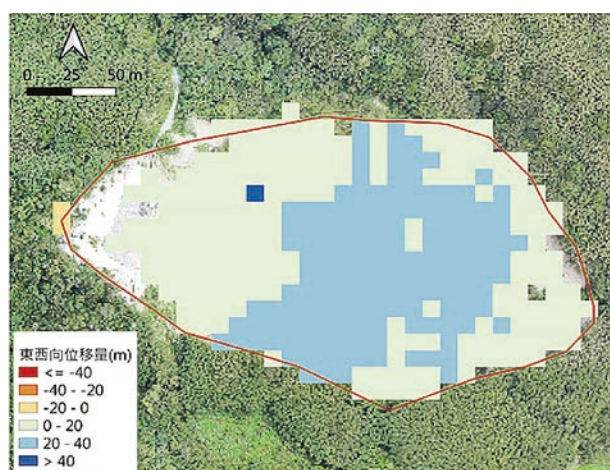


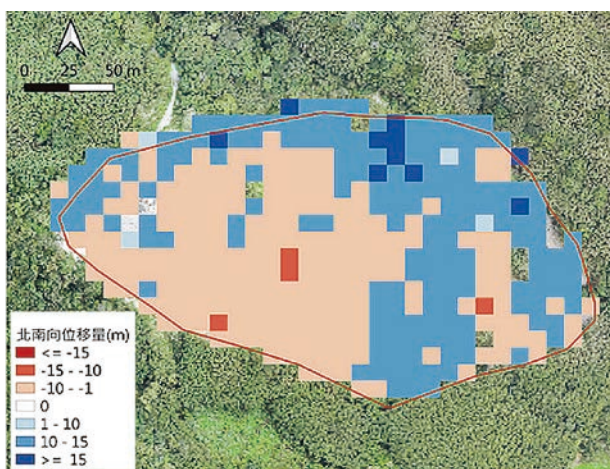
圖 4 DIC 分析之水平向地表位移

用。兩期數值地型模型的高程比較結果顯示（圖 5），光華崩塌上邊坡整體呈現高程下降的現象，最大下陷量約 7.6 公尺，而下邊坡則呈現高程上升的狀況，最大抬升量約 7.9 公尺。垂直向的變化表示崩塌塊體向下運動，導致上方塊體下陷，而下方塊體擠壓抬升。

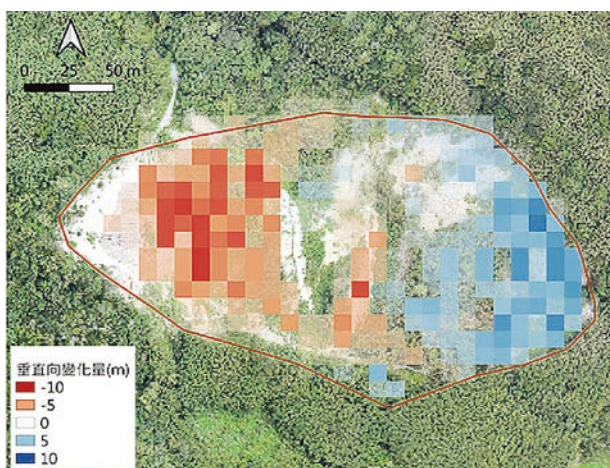
最後，將水平向位移分析結果與垂直向高程變化



(a) 東西向位移量



(b) 北南向位移量



(c) 垂直向變化量

圖 5 光華崩塌之三維地表變形

結果運用於反演光華崩塌的活動塊體厚度，其結果顯示最大崩塌深度達 54 公尺，平均深度約 13 公尺，體積約 58.5 萬立方公尺（圖 6）。比對 3 處孔內伸縮計觀察到的剪切深度，可以發現位於 K18-2BW 以及 K19-1BW 兩處的剪切深度與反演之塊體厚度一致，位於 K18-1BW 處的差異則較大。將崩塌厚度反演結果繪製成高程剖面，並與多種觀測資料所推估的崩塌機制進行比較，可以發現反演之崩塌滑動面高程可對應崩塌機制（圖 7）。其中主要滑動面型態可對應到崩塌機制中的破壞面 II（圖 7c），同時也可局部對應崩塌機制中的破壞面 III、IV 及 V。上述結果表示，崩塌厚度反演並不能取代現地觀測，但崩塌厚度反演有助於在缺乏或僅有少量的現地觀測狀況下，利用遙測影像及相關分析技術提供更細緻的三維滑動面幾何型態，同時提供崩塌塊體體積的推估量，也有助於選擇有效的現地監測點位。

結論

本研究將數位影像相關法（DIC）及崩塌厚度反演方法結合，分析光華崩塌滑動面的形態，得出厚度模型並計算活動塊體體積。在比對現地觀測資料後，得出以下結論：

1. 桃園光華崩塌的 GPS 監測指出，3 月至 8 月期間頭部崩崖附近的平面位移量約 1.4 公尺，迴彎處為 38.2 mm/d。DIC 分析顯示水平位移最大 39.7 公尺，平均 7.8 公尺。
2. 兩期數值地型模型分析可知，光華崩塌上邊坡高程下降 7.6 公尺，下邊坡上升 7.9 公尺，反映塊體運動導致上方下陷、下方擠壓。

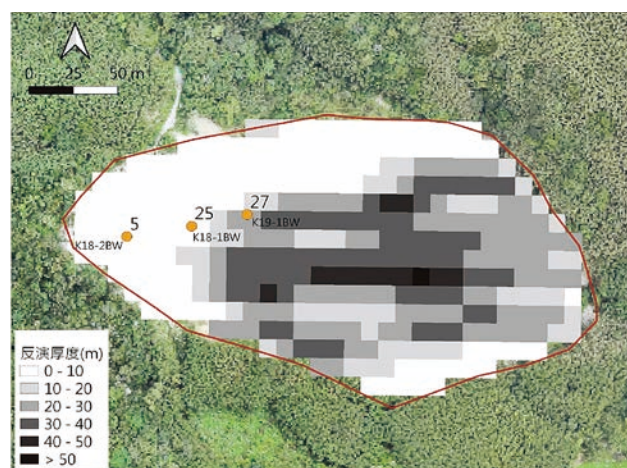


圖 6 崩塌厚度反演結果（圖中橘色點為孔內伸縮計觀測點及破壞深度）

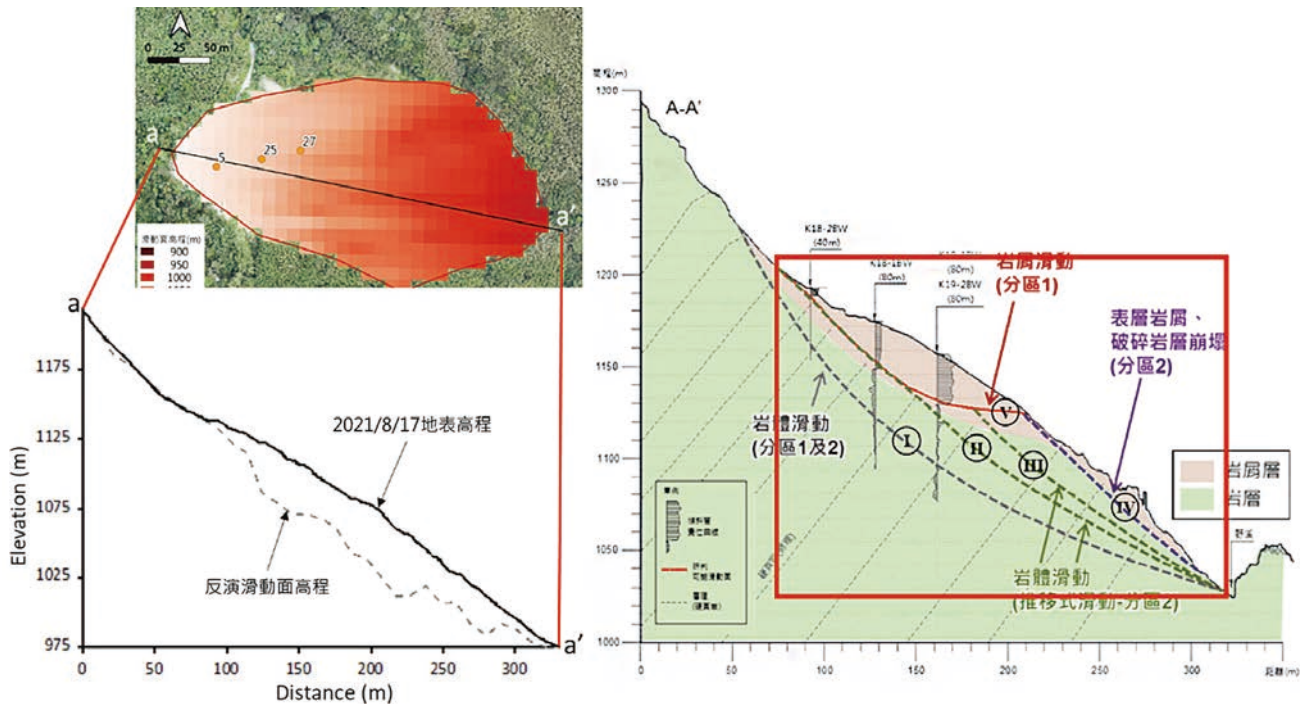


圖 7 反演滑動面與綜合多種觀測結果推測之崩塌機制比較，(a) 本研究反演之三维滑動面高程，(b) aa' 剖面之反演滑動面高程，(c) 光華崩塌崩塌機制示意圖（引用自農村發展及水土保持署大規模崩塌開放資料專區，紅色框為對應反演滑動面高程剖面的範圍，羅馬數字為推測之滑動面編號）。

3. 綜合水平位移與垂直高程變化，反演顯示最大崩塌深度 54 公尺，平均 13 公尺，體積約 58.5 萬立方公尺。反演結果與實際觀測相符，並且提供更細緻的滑動面形態及體積推估。

參考文獻

1. Jakob, M. (2005), "A size classification for debris flows." Eng. Geol. 79 (3), 151-161.
2. von Ruette, J., Lehmann, P., Or, D. (2016), "Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances." Landslides 13, 1097-1107.
3. Bontemps, N., Lacroix, P., and Marie-Pierre, D. (2018), "Inversion of deformation fields time-series from optical images, and application to the long term kinematics of slow-moving landslides in Peru." Remote Sensing of Environment, 210, 144-158.
4. Caporossi, P., Mazzanti, P., and Bozzano, F. (2018), "Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata, Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation." ISPRS Int. J. Geo-Inf., 7, 372.
5. Türk, T. (2018), "Determination of mass movements in slow-motion landslides by the Cosi-Corr method." Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9:1, 325-336.
6. Ali, E., Xu, W., and Ding, X. (2020), "Improved optical image matching time series inversion approach for monitoring dune migration in North Sinai Sand Sea: Algorithm procedure, application, and validation." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 106-124.
7. Mazzanti, P., Caporossi, P., and Muzi, R. (2020), "Sliding Time Master Digital Image Correlation Analyses of CubeSat Images for landslide Monitoring: The Rattlesnake Hills Landslide (USA)." Remote Sens. 2020, 12, 592.
8. Carter, M. and Bentley, S.P. (1985), "The geometry of slip surfaces beneath landslides: Predictions from surface measurements." Can. Geotech. J., 22, 234-238.
9. Bishop, K.M. (1999), "Determination of translational landslide slip surface depth using balanced cross sections." Environ. Eng. Geosci., 2, 147-156.
10. Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Truffer, M. (2009), "A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers." J. Glaciol., 55(191), 422-430.
11. Morlighem, M., Rignot, E., Seroussi, H., Larour, E., Ben Dhia, H., and Aubry, D. (2011), "A mass conservation approach for mapping glacier ice thickness." Geophys. Res. Lett., 38, L19503.
12. Booth, A.M., Lamb, M.P., Avouac, J., and Delacourt, C. (2013), "Landslide Velocity, Thickness, and Rheology from Remote Sensing: La Clapiere Landslide, France." Geophysical Research Letters, 40(16), 4299-4304.
13. Delbridge B.G., Bürgmann, R., Fielding, E., Hensley, S., and Schulz, W.H. (2016), "Three-dimensional surface deformation derived from airborne interferometric UAVSAR: Application to the Slumgullion Landslide." Journal of geophysical research, 121(5), 3951-3977.
14. Hu, X., Lu, Z., Pierson, T.C., Kramer, R., and George, D.L. (2018), "Combining InSAR and GPS to determine transient movement and thickness of a seasonally active low gradient translational landslide." Geophysical Research Letters, 45, 1453-1462. <https://doi.org/10.1002/2017GL076623>
15. Handwerger, A.L., Fielding, E.J., Sangha, S.S., and Bekaert, P.S. (2022), "Landslide Sensitivity and Response to Precipitation Changes in Wet and Dry Climates." Geophysical research letters, 49(13).



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 Guanghai 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

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；

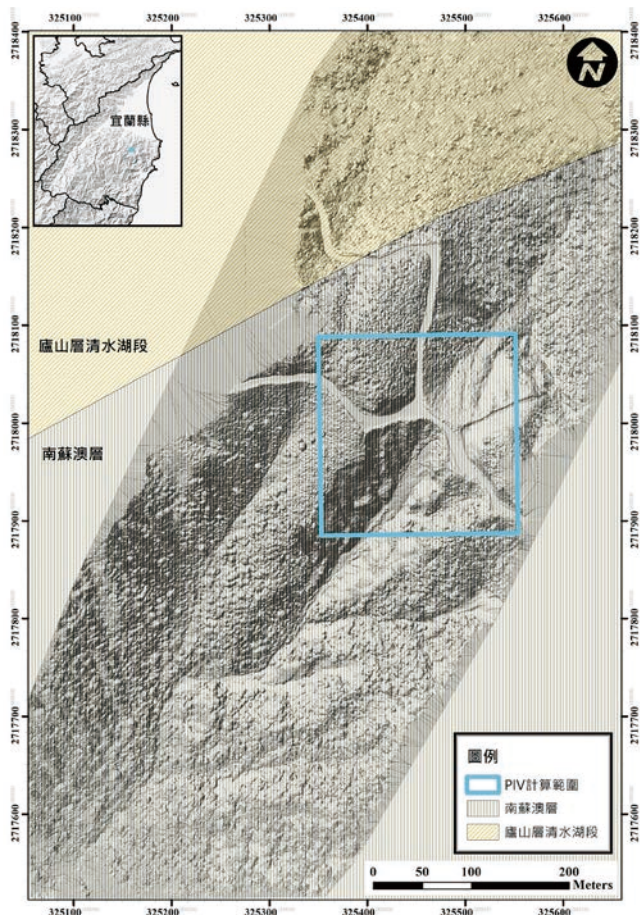


圖 1 研究區概況及精度評估之範圍

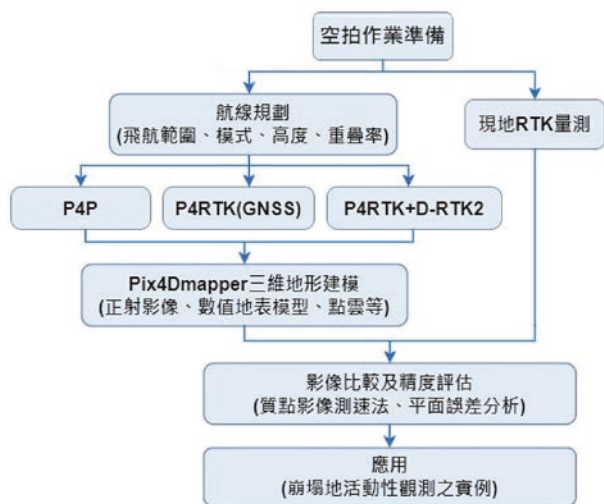


圖 2 研究方法流程圖



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 Gelileo 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

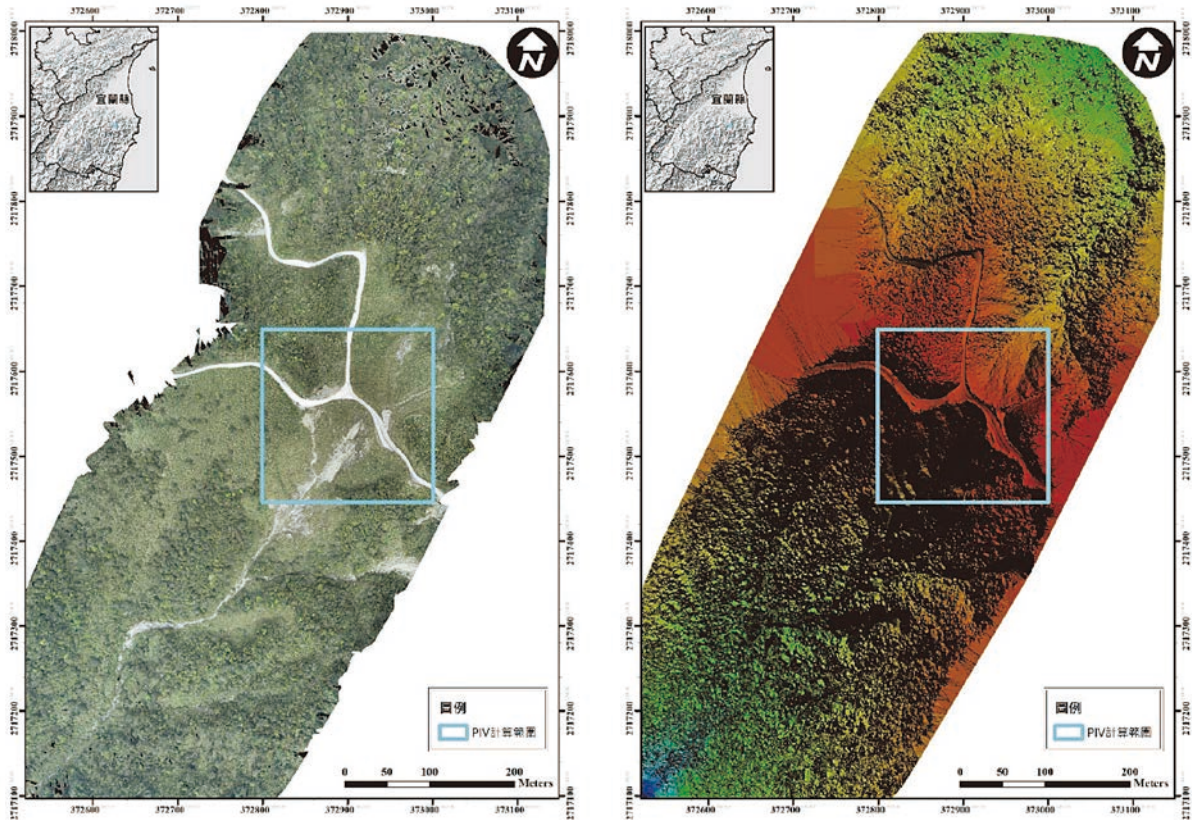


圖 5 力霸產業道路正射影像（左）及 DSM（右）

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

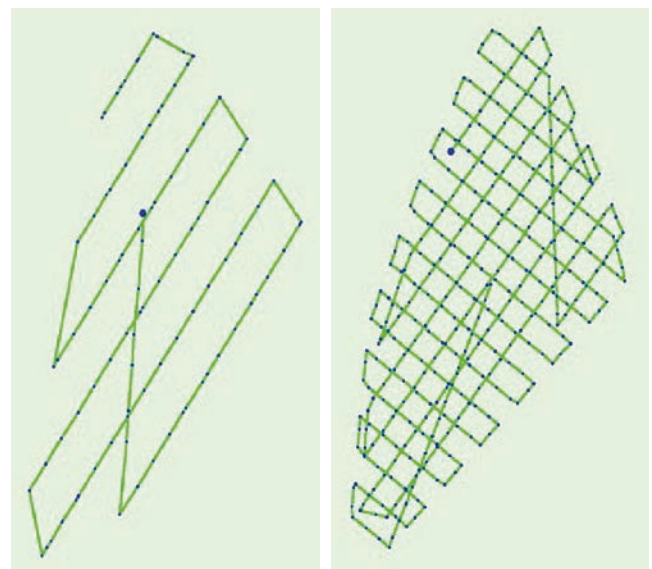


圖 6 透過 Pix4Dmapper 生成 P4P（左）及 P4RTK（右）之航線規劃

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

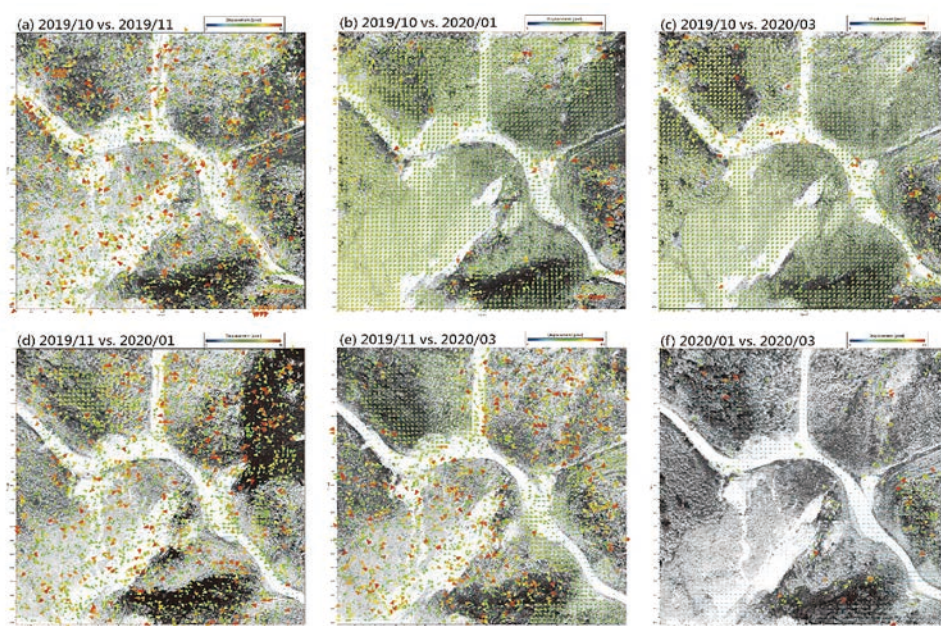


圖 7 P4P 各期正射影像之 PIV 比較

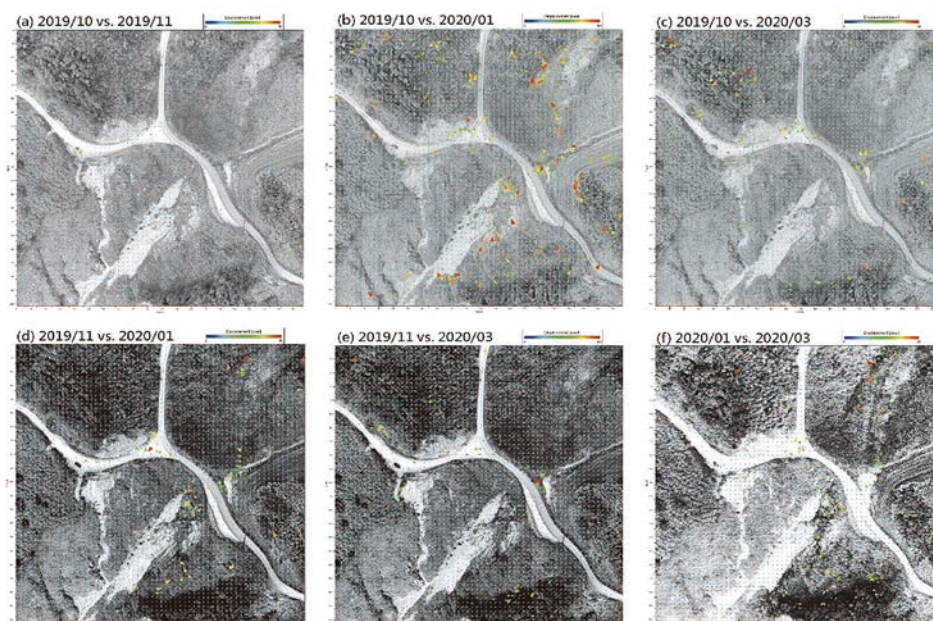


圖 8 P4RTK+D-RTK2 各期正射影像之 PIV 比較

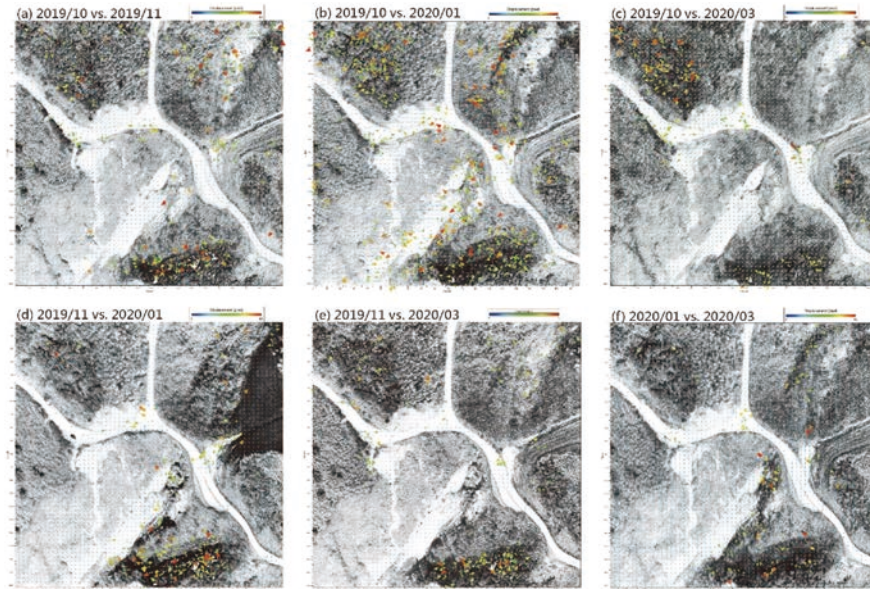


圖 9 P4RTK (GNSS) 各期正射影像之 PIV 比較

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

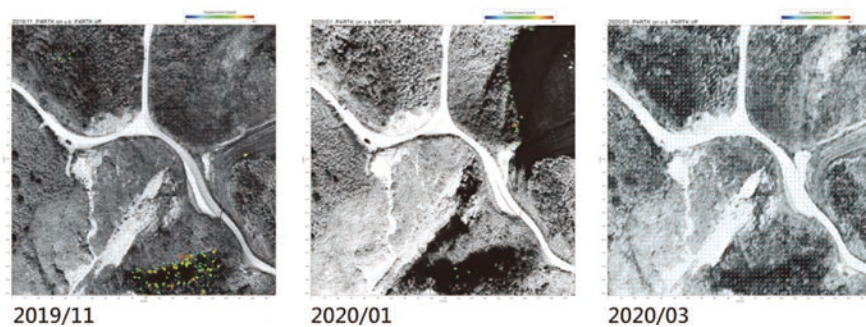


圖 10 P4RTK 與 P4RTK+D-RTK2- 同期正射影像之 PIV 比較

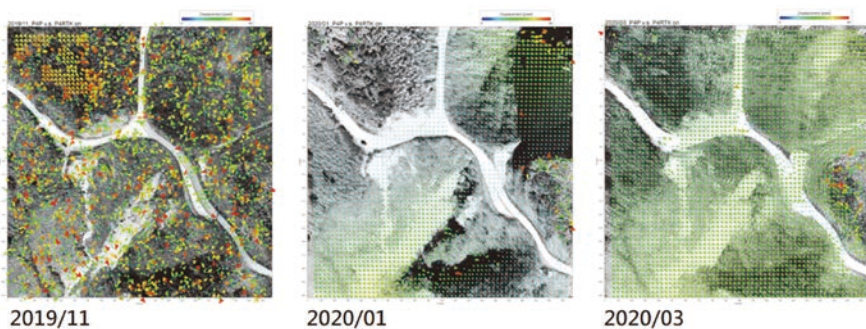


圖 11 P4P 與 P4RTK+D-RTK2- 同期正射影像之 PIV 比較

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

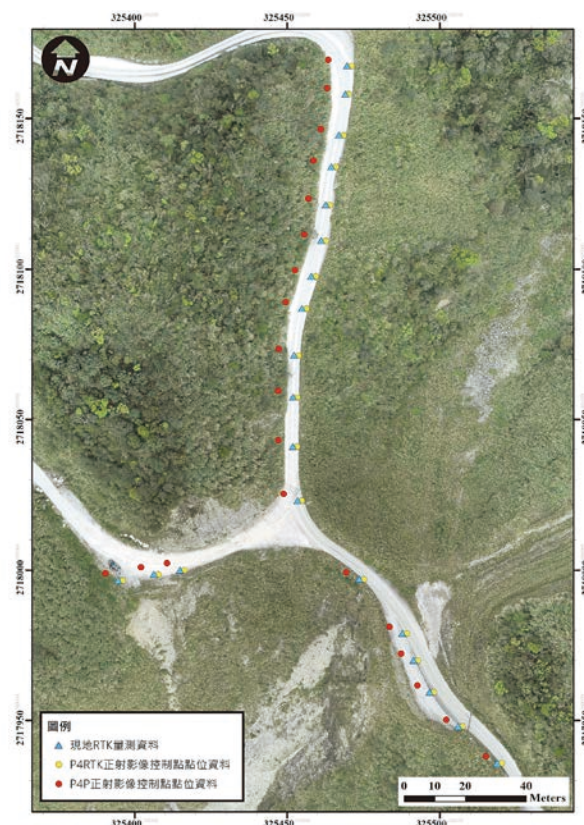


圖 12 現地 RTK 測量資料與無人飛行載具正射影像空間座標資訊相對位置圖

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

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 13 桃園市復興區光華農用道路約 5 公里處三期正射影像

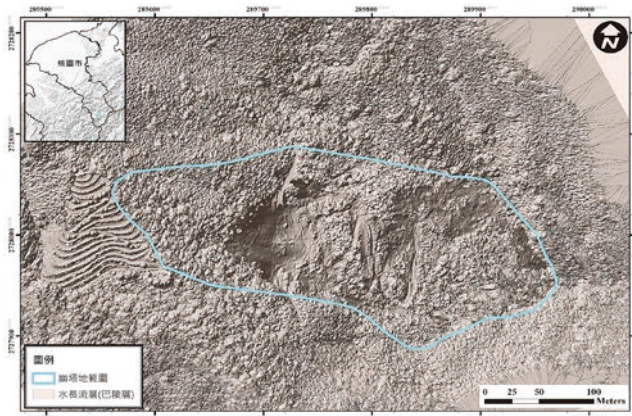


圖 14 桃園市復興區光華里光華農用道路約 5 公里處崩塌地

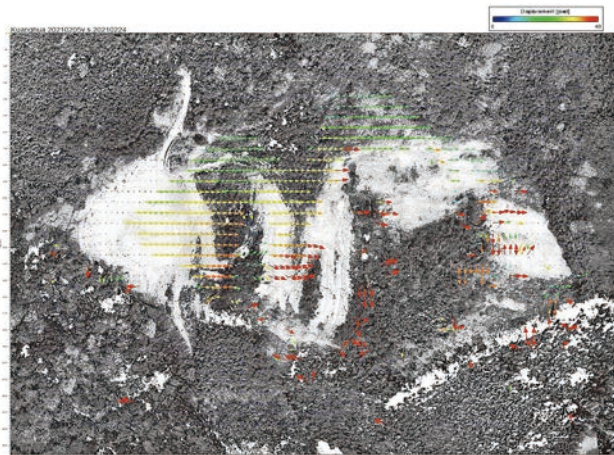


圖 15 無人飛行載具建模與 PIV 應用於觀測地表變動
(2021/02/05 vs. 2021/02/24)

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、黃全謐、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。



潛在 大规模崩塌 分級方法學 初步研擬

The Study of Potential Large-Scale Landslide Grading Method

陳德偉*／財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 副研究員

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

魏倫璋／財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 正研究員

楊哲銘／國立聯合大學土木與防災工程學系 助理教授

曾佳漢／中國文化大學地質學系 助理教授

黃春銘／財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 正研究員

簡留玄／財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 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

林錫宏／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 科長

近年來由於氣候變遷及降雨集中，造成大规模崩塌災害不斷，尤其是2009年莫拉克颱風導致的小林村大规模崩塌，造成巨大生命財產損失。為了解大规模崩塌之分布，經濟部地質調查及礦業管理中心在全臺灣已判釋出2,500處潛在大规模崩塌。本研究蒐集國外大规模崩塌分級方法，研擬出適合於臺灣之方法，並定名為「崩塌地形特徵潛勢分級表」。本文以南投縣境內336處潛在大规模崩塌進行實作填表後，共得A、B、C、D級分別為1、29、132及174處。評分較高者集中於力行產業道路，且現場勘查亦發現顯著現生崩塌現象，說明本研究擬定之分級表適用性良好，可以對潛在大规模崩塌正確評分，亦可合理呈現潛在大规模崩塌之潛勢等級。

關鍵詞：大规模崩塌分級、崩塌地形潛勢分級表、層級分析法、光達數值地形模型

ABSTRACT

In recent years, climate change and severe rainfall have caused large-scale landslides and disasters. In particular, the landslides occurred in Siaolin Village during typhoon Morakot in 2009 caused huge losses of lives and properties. In order to realize the distribution of large-scale landslides, the Central Geological Survey, MOEA had interpreted 2,500 potential large-scale landslides in Taiwan. This study collected large-scale landslide grading related references,

and integrated into a large-scale landslide grading method which was suitable for Taiwan, naming it as the Landslide Topographic Feature Susceptibility Table. After grading 336 potential large-scale landslides in Nantou County, there were 1, 29, 132 and 174 sites of grades A, B, C, and D respectively. The sites with higher scores were concentrated on the Lisheng Mountain Road, which showed that the scoring table proposed in this study were applicable and could correctly classify the grade of potential large-scale landslides.

Keywords: Large-scale landslide scoring, Landslide Topographic Feature Susceptibility Table, Analytic Hierarchy Process, LiDAR DEM

* 通訊作者，twchen@sinotech.org.tw

前言

臺灣由於位於歐亞板塊交界，板塊活動導致造山運動活躍，也造成地質較為破碎，梅雨季及颱風季又常帶來豪大雨而導致崩塌發生。近年來由於豪雨事件或颱風事件所帶來之降雨量愈發驚人，進而導致大規模崩塌之發生，如 2009 年莫拉克颱風即造成小林村及高雄市楠梓仙溪、荖濃溪兩側發生許多大規模崩塌。臺灣過去已發生多起大規模崩塌，如 1990 年梨山地區發生大範圍地滑導致交通中斷；同年於新竹湖口台地也發生大面積崩塌，破壞面積約為 20 公頃。1999 年 921 地震引致九份二山大面積滑動，崩塌面積達到 200 公頃，也造成多人傷亡；該地震亦引致草嶺大山崩，崩塌及堆積範圍面積超過 500 公頃，而草嶺從 1862 年有歷史紀錄以來，已發生五次大規模崩塌^[1,2]。

由於 2009 年莫拉克颱風所挾帶之豪大雨，導致臺灣南部地區多處發生大規模崩塌，也造成許多道路中斷及生命財產之損失。故經濟部地質調查及礦業管理中心於莫拉克風災事件後 10 餘年間，於臺灣全島進行潛在大規模崩塌判釋，目前亦已判釋出 2,500 處。然而，長久以來潛在大規模崩塌缺乏適切之分級標準，不易提供防災策略規劃參考，亦造成山崩與地滑地質敏感區劃設之困擾，更不利於將山崩災害知識推廣予社會大眾，故針對潛在大規模崩塌進行合理之分級，並給予其適當之潛勢等級為一重要課題。

研究方法

大規模崩塌分級文獻回顧

大規模崩塌在國際上之定義繁多，通常依據崩塌之面積、體積、深度而定，但常因不同地區或地質條件而有不同的定義標準^[3-15]。大規模崩塌一詞約為 2009 年莫拉克颱風造成小林村大範圍滑動導致重大災害後而興起。大規模崩塌在國際上有許多不同的稱呼，例如日本稱為深層崩壞，在臺灣亦有文獻將深層崩壞譯為深層崩塌，最後，由行政法人國家災害防救科技中心於 2015 年公開之大規模崩塌災害防治行動綱領報告中，統一命名為大規模崩塌，並定義為崩塌面積超過 10 公頃、土方量超過 10 萬立方公尺或崩塌深度在 10 公尺以上^[16]。

本研究蒐集國內外對於大規模崩塌分級方法之文

獻，加以歸納彙整後，主要以日本地滑學會所使用之地滑分級層級分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP），以及挪威地質調查所（Norges geologiske undersøkelse, NGU）所提出之大型岩坡活動性評分表為基礎，研擬提出適用於臺灣之大規模崩塌分級項目與表格，以利於後續大規模崩塌分級使用。

日本地滑學會等學者發表之邊坡防災危險度（susceptibility）評估手冊與相關文章所使用之量化評估方法^[17-20]，起初發展於日本岩手縣、日本東北地區、福島縣與新潟縣阿賀野川流域之大規模崩塌，並藉由航照立體影像進行地形判釋與分析其地表地形特徵，以對崩塌地形進行評分，如表 1 所示。表格中包含立體影像對、地滑地形圖以及各項因子之評分，其主要包含三大項目並各別包含兩小項評分項目，包括：(1) 滑動體微地形特徵，包含運動類型與地形新鮮程度評分；(2) 滑動體邊界，包含頭部範圍與趾部範圍評分；(3) 滑動體鄰近區域，包含移動體前端與下邊坡坡型評分。各項分數高低以邊坡各種不同滑動型態之示意圖搭配簡易說明，由層級分析法（Analytic Hierarchy Process Theory, AHP）依據崩塌區位、發育階段與活動度高低進行評估給予量化分數。表 2 則是日本岩手縣與宮城縣所採用之山崩危險度評分表，其細分為 9 小項地形特徵，分別為 (1) 運動類型；(2) 地形新鮮程度；(3) 滑動體分化與蝕溝狀態；(4) 地滑活動徵兆；(5) 主崩崖地形特徵；(6) 主崩崖與滑動體地形特徵；(7) 滑動體與其前緣地形特徵；(8) 滑動體前緣環境；(9) 滑動體下部地形特徵。上述日本兩種不同大規模崩塌之層級分析表，均會經由多位專家於不同地區不同案例進行大量評分，透過不斷修正調整後，來得到各項對應評分，並劃分相對應之大規模崩塌評分等級，以作為大規模崩塌之潛勢評分。

挪威地質調查所（NGU）建立之大規模崩塌分級方法，為針對大型岩坡破壞所建議之災害與風險分級系統，並依據項目設定規則分數等級，主要用於評估與觀測大型岩坡破壞之活動性，尤其針對邊坡之移動速率項目佔有較高比重之分數。在挪威地質調查所（NGU）提出之正式報告第三章，建議採納九大項目（表 3）^[21,22] 來描述大型岩坡之狀態，包含：(1) 崩崖或張裂縫之發育規模；(2) 潛在破壞面之有無、傾角是

表 1 地滑危険度 (susceptibility) AHP 評価法表單 [20]

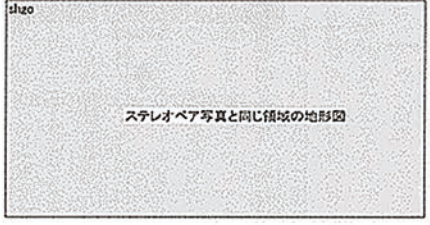
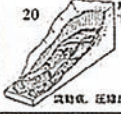
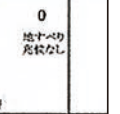
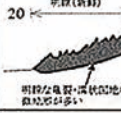
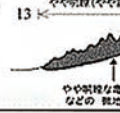
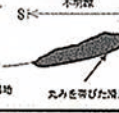
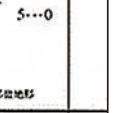
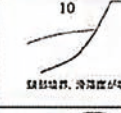
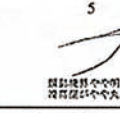
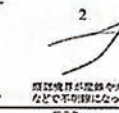
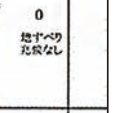
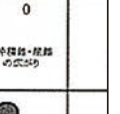
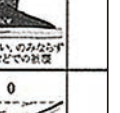
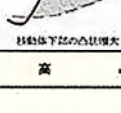
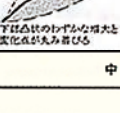
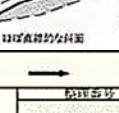
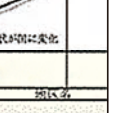
ステレオ写真 と 地すべり地形図		詳細チェックリスト				AHP スコア			
		レベルⅡ	レベルⅢ	不安定化要因					
				高い	低い				
1) カルテチェック項目は左側危険度の高いアイテム、右側低いアイテムが並ぶように配置されている。右隣者はこの項目と類似するところにチェックして点数を付ける。 2) このスペースにはステレオペア写真を付け、またステレオペアと同じ領域の平面図をつけて、右のチェック項目に従い、どこをどのように見たかを記載する。  ステレオペア写真  ステレオペア写真と同じ領域の地形図	移動体微地形	a	運動様式	 20	 13	 8	 0	地すべり 発現なし	
		b	新鮮さの程度	 20	 13	 8	 5...0		
		β	c	地すべり境界の境界部	 10	 5	 2	 0	地すべり 発現なし
			d	末端境界	 20	 12	 6	 0	地すべり 発現なし
γ	e	移動体先端部	 20	 12	 6	 2	 0	地すべり 発現なし	
	f	移動体	 10	 5	 2	 0	地すべり 発現なし		
		危険度スコア		高	中	低			
		特記事項							

表 2 岩手県宮城縣之 AHP 評価表 [20]

地すべり地形の危険度評価チェックリスト				AHP				
大分類	概要	観察アイテム	不安定化要因	規模	位置			
			大 → 小 (もしくは 安定化要因)					
移動体の微地形	運動特性に関する指標	A: 運動様式	流動性圧縮丘 12.1	副滑落崖 4.9	分離崖 2.0			
		B: 新鮮さの程度	微地形多 19.5	微地形境界が鮮明 12.5	境界が不明 6.0	微地形境界の消滅 5.5		
		C: 移動体不安定化	先端2次アッパ(分化)先端崩壊 13.9	ガリの進入 3.6	侵食谷の侵入 1.5			
		D: 地すべり活動兆候	亀裂 18.8	樹冠の開き 6.3				
		その他	(例: 湿地、池、表層崩壊、雁行状亀裂 他)					
地すべり境界部の地形	時間経過に関する指標	E: 不動域/主滑落崖	雁行亀裂 3.8	崩壊壁のみ 3.2	勾斜面化 1.8	ガリーの伸長 1.5	全体が侵蝕化 1.3	
		F: 主滑落崖/移動体	左記地形のみ 3.1	崖壁あり 1.8	大規模な崖壁 1.1	滑落崖・崖壁・移動体が連続 0.6		
		G: 移動体/前地表	左記地形のみ 1.0	ガリー・沖積物有 0.5	地表の侵蝕化 0.4	移動体表面の消失 0.3		
地すべり周辺地形	地形に関する指標	H: 移動体先端部	河川攻撃斜面に面する 8.6	(河川に面する) 4.4	斜面途中に出る 1.6	平坦面にのる 0.9	対岸衝突	
		I: 移動体下部	増加 19.2	起伏量(移動体の形状変化) 9.2		低下 2.7		
地すべり移動体内特記すべき小ブロック		あり ・ なし (位置及び全体との関係は:)						
記事	地すべりの成因その他							
		AHP評価合計点 点						
地すべり発生危険度		高い → 中位 → 低い			カルテ危険度点数 点			
参考事項		※AHPのcheck位置の点数を合計してAHP評価合計点とする。						
		整理番号 地区名						
		※活動履歴・災害履歴・地質・地質構造他 あれば記入						

表 3 挪威地質調查局 (NGU) 建議邊坡狀態評估表 [21,22]

1. Back-scarp	Score
Not developed	0
Partly open over width of slide body (few cm to m)	0.5
Fully open over width of slide body (few cm to m)	1
2. Potential sliding structures	Score
No penetrative structures dip out of the slope	0
Penetrative structures dip on average < 20 degree or steeper than the slope	0.5
Penetrative structures dip on average > 20 degree and daylight with the slope	1
3. Lateral release surfaces	Score
Not developed	0
Partly developed on 1 side	0.25
Fully developed or free slope on 1 side or partly developed on 2 sides	0.5
Fully developed or free slope on 1 side and partly developed on 1 side	0.75
Fully developed or free slope on 2 sides	1
4. Kinematic feasibility test	Score
Kinematic feasibility test does not allow for planar sliding, wedge sliding or toppling	0
Failure is partly kinematically possible (movement direction is more than $\pm 30^\circ$ to slope orientation)	0.5
Failure is kinematically possible (movement direction is less than $\pm 30^\circ$ to slope orientation)	0.75
Failure is partly kinematically possible on persistent discontinuities (movement direction is more than $\pm 30^\circ$ to slope orientation)	0.75
Failure is kinematically possible on persistent discontinuities (movement direction is less than $\pm 30^\circ$ to slope orientation)	1
5. Morphologic expression of the rupture surface	Score
No indication on slope morphology	0
Slope morphology suggests formation of a rupture surface (bulging, concavity-convexity, springs)	0.5
Continuous rupture surface is suggested by slope morphology and can be mapped out	1
6. Displacement rates	Score
No significant movement	0
0.2 - 0.5 cm/year	1
0.5 - 1 cm/year	2
1 - 4 cm/year	3
4 - 10 cm/year	4
> 10 cm/year	5
7. Acceleration (if velocity is >0.5 cm/yr and <10 cm/yr)	Score
No acceleration or change in displacement rates	0
Increase in displacement rates	1
8. Increase of rock fall activity	Score
No increase of rock fall activity	0
Increase of rock fall activity	1
9. Past events	Score
No post-glacial events of similar size	0
One or several events older than 5000 years of similar size	0.5
One or several events younger than 5000 years of similar size	1

否低於抗剪摩擦角以及是否見光 (daylight)；(3) 兩翼之發育規模；(4) 岩坡破壞類型；(5) 基底破裂面形貌有無或相關特徵；(6) 位移速率；(7) 加速行為；(8) 落石活動紀錄增加；(9) 歷史災害紀錄；其第 1 至第 5 項需藉由高解析度光達數值高程模型產製灰階陰影圖或坡度圖來判釋評分，然而第 6 至第 9 項則需要有長時間且有代表性之監測數據與歷史影像才能評分。

大規模崩塌分級方法研擬

經濟部地質調查及礦業管理中心至今已判釋之 2,500 處潛在大規模崩塌為數眾多，且尚待進行合理之評分及危險分級，故本研究彙整前節所述日本地滑學會及挪威地質調查所之大規模崩塌分級方法，嘗試建立適用於臺灣之大規模崩塌分級評分表，期能適當針對經濟部地質調查及礦業管理中心已圈繪判釋之大規模崩塌進行合理分級。

本研究參考國內外大規模崩塌相關文獻之地形判釋與調查經驗，歸納需考量之因素包含地質特徵、地形特徵及山崩運動行為等 [14,15,23-27]。其中，在地形特徵部分，可由高精度光達數值地形模型產製陰影圖後，針對

不同崩塌特徵項目給予評分並進行分級。典型之崩塌地特徵可參考 Cruden and Varnes 於 1996 年提出之元素，如圖 1 所示 [28]。圖中可看出崩塌完整發育之各種特徵，由坡頂朝坡趾依序包含：冠部、主崩崖、頭部、張力裂隙、次崩崖、右翼（兩翼）、滑動主體、滑動面、趾部等，上述特徵和日本地滑學會所考量之大規模崩塌分級項目有相似之處。文獻中亦可得知崩塌相關微地形包含崩崖、張裂縫、多重山稜、反向坡、橫向裂縫、側向邊界、挫曲或隆起等，而水系與蝕溝亦可呈現大規模崩塌潛勢區之坡面活動歷史 [22,29,30]，上述這些崩塌特徵，均有助於判斷邊坡之穩定區域範圍及空間分布。

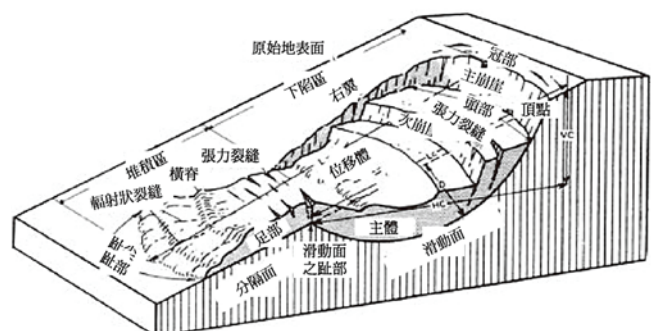


圖 1 典型山崩滑動體在發育過程中之地形特徵 [28]

本研究主要參考 2021 年日本地滑學會與 2013 年挪威地質調查所之分級評分方法^[20,22]，並以其他相關文獻與報告書為輔^[18,31-34]，建立適合臺灣之大規模崩塌分級評分方法與評分操作流程。本研究建立之大規模崩塌分級操作流程架構如圖 2 所示。首先採用光達數值高程模型產製高解析度坡度圖，並將坡度圖三維化以在三維空間進行崩塌地微地形特徵判釋，並參考區域地質圖評估該處之地質特性與主要不連續面之位態趨勢，配合正射影像及過去歷史山崩目錄研判此潛在大規模崩塌之過去活動情形，並將判釋結果依照評分項目填入本研究研擬之大規模崩塌分級評分表中。

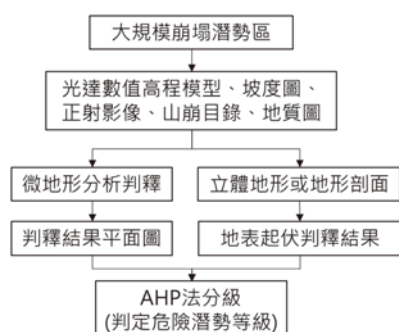


圖 2 本研究研擬之大規模崩塌分級操作流程

綜合上述，本研究研擬之臺灣潛在大規模崩塌分級評分表，將崩塌地形特徵分級項目主要分為兩大項目：(1) 滑動體之崩塌地形特徵；(2) 周邊環境可能之影響。前者主要包含：冠部、崩崖、滑動體、兩側邊界（側翼或蝕溝）、趾部等 5 個區位地形特徵來進行評分；後者則主要包含：(1) 潛勢區前緣之河岸侵蝕；(2) 滑動體下邊坡之坡型等 2 個區位地形特徵，其詳細分級大項、細項與其對應之評分值，如表 4 所示。由於本研究擬定之潛在大規模崩塌分級評分表主要以地形特徵作為評分項目，故本研究將其名稱命名為「崩塌地形特徵潛勢分級表」(Landslide Topographic Feature Susceptibility Table, LTFST)。並參考日本地滑學會所建立之分級評分等級間距，將評分值範圍訂為 0 至 100 分，共分為四個等級，包含：A 級（80 ≤ 總分 ≤ 100）、B 級（60 ≤ 總分 < 80）、C 級（40 ≤ 總分 < 60）、D 級（0 ≤ 總分 < 40）。

潛在大規模崩塌分級成果

本研究目前完成南投縣境內 336 處潛在大規模崩塌之崩塌地形特徵潛勢分級，評分統計成果如圖 3 所示。

表 4 崩塌地形特徵潛勢分級表 (LTFST)

崩塌地形特徵潛勢分級表(LTFST)		評分
滑動體之崩塌地形特徵	A: 冠部	1: 發育張裂縫或線型陷落，且有圓合現象 10 2: 發育零星張裂縫或線型陷落 5 3: 未見張裂縫或線型陷落 0
	B: 崩崖	1: 同時具有主崩崖與次崩崖(滑動體內 非趾部破壞)，且形貌與邊界清晰銳利 15 2: 同時具有主崩崖與次崩崖(滑動體內 非趾部破壞)，但形貌已受侵蝕而呈圓潤狀 10 3: 僅具主崩崖但形貌圓潤(次崩崖少且不明顯)，或次崩崖明顯但主崩崖難以辨識 5 4: 未見崩崖或上邊界落差小 0
		1: 滑動體邊界大致清楚，且具凸肚地形(上坡凹陷、下坡凸起) 15
		2: 滑動體邊界(部分模糊)仍可辨，但不具明顯凸肚地形 10
	C: 滑動體	3: 滑動體邊界模糊受地表侵蝕，僅殘留部分材料或呈凹坡 5 4: 未見滑動體或厚度小與邊界難以辨識 0
		1: 兩翼(或兩側邊界)皆完整發育，且邊界清晰銳利 15
		2: 兩翼(或兩側邊界)均有發育，但形貌已受侵蝕或堆積而呈圓潤狀 10
		3: 僅有一翼(或一側邊界)發育較清楚可辨識，另一側則模糊，或兩側皆模糊 5 4: 未見側翼(或邊界)發育 0
	D: 兩側邊界(側翼或蝕溝)	1: 具崩塌堆積材料，且近年來有發生新鮮崩塌 15 2: 具崩塌堆積材料，但暫時穩定存在(有崩塌地形特徵但近期影像無揭露) 10 3: 僅殘存部分堆積材料，受地表侵蝕而發育蝕溝或扇狀地 5 4: 趾部未見局部崩塌跡象或其他侵蝕作用 0
		1: 主要河道之攻擊岸 15
		2: 次要河道(支流)之攻擊岸 10
		3: 僅有河道平行通過或有蝕溝侵蝕趾部 5 4: 無河道直接通過或有階地存在 0
	E: 趾部	1: 保有滑動體下邊坡地形且坡度陡峭 15 2: 滑動體下邊坡地形稍有凸起且有些許侵蝕 10 3: 滑動體下邊坡地形稍有凸起但坡型平坦 5 4: 滑動體下邊坡地形為平整斜坡面 0
		1: 具崩塌堆積材料，且近年來有發生新鮮崩塌 15 2: 具崩塌堆積材料，但暫時穩定存在(有崩塌地形特徵但近期影像無揭露) 10 3: 僅殘存部分堆積材料，受地表侵蝕而發育蝕溝或扇狀地 5 4: 趾部未見局部崩塌跡象或其他侵蝕作用 0
		1: 主要河道之攻擊岸 15 2: 次要河道(支流)之攻擊岸 10 3: 僅有河道平行通過或有蝕溝侵蝕趾部 5 4: 無河道直接通過或有階地存在 0
		1: 保有滑動體下邊坡地形且坡度陡峭 15 2: 滑動體下邊坡地形稍有凸起且有些許侵蝕 10 3: 滑動體下邊坡地形稍有凸起但坡型平坦 5 4: 滑動體下邊坡地形為平整斜坡面 0

AHP總分

AHP分級: 0 ≤ D < 40 ≤ C < 60 ≤ B < 80 ≤ A ≤ 100

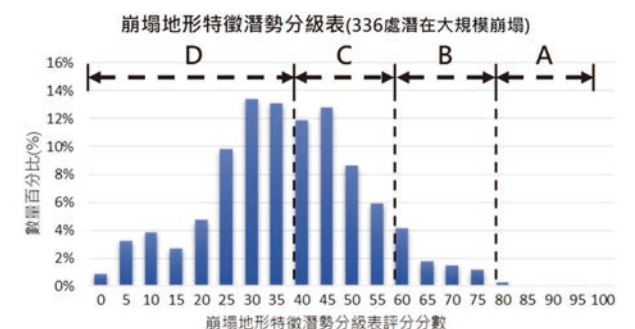


圖 3 潛在大規模崩塌進行崩塌地形特徵分級表實作成果 (336 處)

由圖中可看出，不同分數間距內之潛在大規模崩塌數量很接近鐘形分佈，評分歸類為 A 級之潛在大規模崩塌有 1 處（佔總數 0.30%）、B 級有 29 處（佔總數 8.63%）、C 級 132 處（佔總數 39.29%）、D 級 174 處（佔總數 51.79%）。詳細各評分之數量百分比如表 5 所示，其中數量最多的為 D 級 30 分與 35 分，其數量分別占 13.39% 與 13.10%，而 A 級僅有 1 處且分數為 80 分。若將 336 處之分級套疊於坡度圖及縣市鄉鎮圖上（圖 4），可看出之 336 處潛在大規模崩塌評分為 B 及 C 等級者大多集中於南投縣仁愛鄉力行產業道路，代表力行產業道路沿線之大規模崩塌具有較高之崩塌潛勢，此現象和力行產業道路每逢豪大雨，常發生崩塌導致道路中斷之情形相吻合，也說明本研究擬定之崩塌地形特徵分級表應用於潛在大規模崩塌之評分及分級成果良好。

表 5 潛在大規模崩塌分級及評分成果統計 (336 處)

評分	潛在大規模崩塌個數	數量百分比	累積百分比
0	3	0.89%	0.89%
5	11	3.27%	4.17%
10	13	3.87%	8.04%
15	9	2.68%	10.71%
20	16	4.76%	15.48%
25	33	9.82%	25.30%
30	45	13.39%	38.69%
35	44	13.10%	51.79%
40	40	11.90%	63.69%
45	43	12.80%	76.49%
50	29	8.63%	85.12%
55	20	5.95%	91.07%
60	14	4.17%	95.24%
65	6	1.79%	97.02%
70	5	1.49%	98.51%
75	4	1.19%	99.70%
80	1	0.30%	100.00%
85	0	0.00%	100.00%
90	0	0.00%	100.00%
95	0	0.00%	100.00%
100	0	0.00%	100.00%

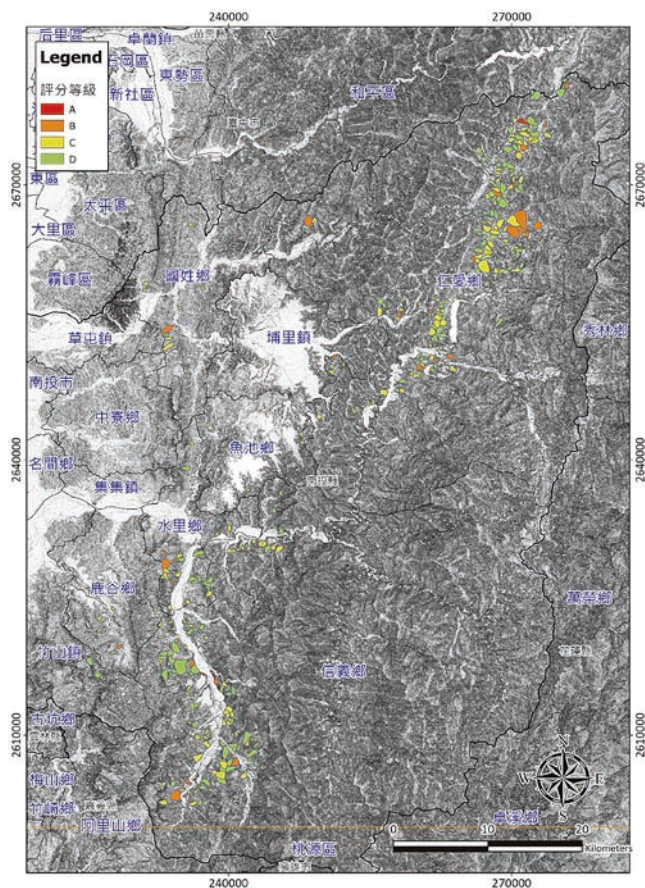


圖 4 大規模崩塌實作填表評分等級分布成果

潛在大規模崩塌典型案例

本研究在前述章節進行潛在大規模崩塌實作崩塌地形特徵分級表填表過程，發現有數處潛在大規模崩塌案例之崩塌地形特徵評分項目（如崩崖、崩塌體兩側邊界

等) 到達 15 分, 表示這些潛在大規模崩塌具有很高之崩塌潛勢, 以下列舉一典型潛在大規模崩塌案例進行說明。

潛在大规模崩塌編號南投縣仁愛鄉 D003（簡稱南投仁愛 D003），位於南投縣仁愛鄉翠華村的翠巒聚落附近，翠巒地區一直是力行產業道路上常常出現道路破壞之位置，此路段亦於 112 年 1 月方因降雨造成道路中斷。南投仁愛 D003 之光達數值地形陰影圖、套疊崩塌圈繪圖、三維化後之光達數值地形陰影圖（左視及右視圖）、正射航照圖及地質圖，如圖 5 至圖 10 所示。比較潛在大规模崩塌南投仁愛 D003 有無套疊崩塌圈繪之光達數值陰影圖，可清楚看出崩塌兩側線型明顯。而三維化之光達陰影圖，則可以看出南投仁愛 D003 之主要及次要崩崖明顯且清晰，崩場地兩側線型有非常清楚明顯之陷落及段差，崩塌圈繪內之滑動塊體呈現上半部凹陷，下半部凸出之典型大规模崩塌滑動現象，且崩塌堆積量體明顯已滑落堆積至坡趾且突出於河道，崩塌體內部也可看出多處崩塌滑動及蝕溝發育

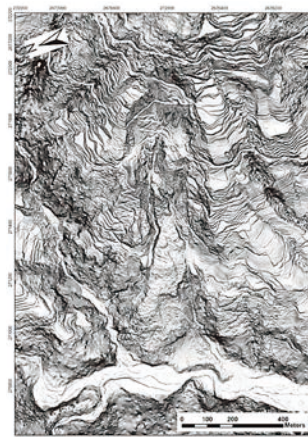


圖 5 南投仁愛 D003 光達
陰影圖



圖 6 南投仁愛 D003 光達
陰影圖 (圈繪)



圖 7 南投仁愛 D003 三維
光達陰影左視圖

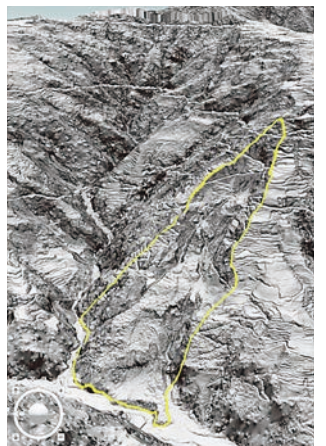


圖 8 南投仁愛 D003 三維
光達陰影右視圖

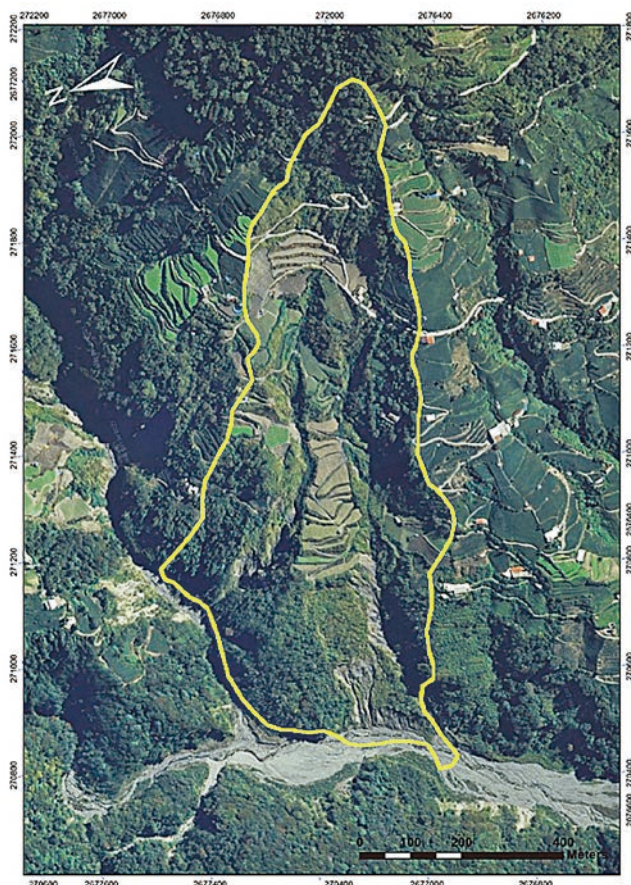


圖 9 南投仁愛 D003 正射航照圖

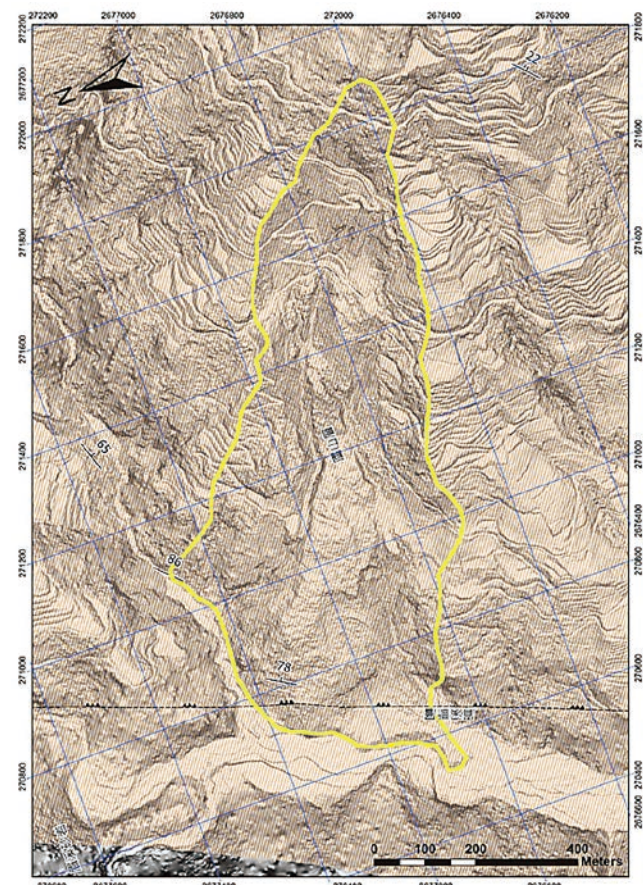


圖 10 南投仁愛 D003 地質圖

現象。由正射影像可看出多處蝕溝呈現大範圍陷落，且蝕溝兩側仍呈現崩塌裸露情形。由地質圖可知南投仁愛 D003 屬於廬山層，下邊坡靠近坡趾處有眉溪斷層通過，此斷層可能為造成此處地質較為破碎之其中一個原因。本研究實作南投仁愛 D003 崩塌地形特徵潛勢分級表之填表成果，如表 6 所示，由表中可看出在崩崖、滑動體、兩側邊界及趾部均評分為 15 分，潛勢區之河岸侵蝕及滑動體下邊坡之坡型，均為 10 分，合計 80 分，其評定等級為 A 級，屬於高危險之潛勢等級。

為瞭解南投仁愛 D003 大規模崩塌之活動性，本研究蒐集既有之時序性航遙測影像進行判釋，如圖 11 所示。由圖中可看出於 2006 年時崩塌體尚無明顯破壞滑動，但由 2007 年之 SPOT 衛星影像發現，南投仁愛 D003 出現大面積崩塌，原本 2006 年影像中既有之道路大多損壞，多處民宅也因崩塌造成損毀。由 2017 年影像，未看出大範圍之破壞，2018 年之 SPOT 影像可看出部分邊坡已進行整治，2022 年之 SPOT 影像則未發現明顯崩塌裸露，由上可知，本大規模崩塌確實具有多次活動歷史，評定為 A 級應無疑慮。

表 6 南投仁愛 D003 崩塌地形特徵潛勢分級表 (LTFST)

崩塌地形特徵潛勢分級表 (LTFST)			評分	南投仁愛 D003
滑動體之崩塌地形特徵	A: 冠部	1: 發育張裂縫或線型陷落，且有圓合現象	10	
		2: 發育零星張裂縫或線型陷落	5	
		3: 未見張裂縫或線型陷落	0	0
	B: 崩崖	1: 同時具有主崩崖與次崩崖(滑動體內 非趾部破壞)，且形貌與邊界清晰銳利	15	15
		2: 同時具有主崩崖與次崩崖(滑動體內 非趾部破壞)，但形貌已受侵蝕而呈圓潤狀	10	
		3: 僅具主崩崖但形貌圓潤(次崩崖少且不明顯)，或次崩崖明顯但主崩崖難以辨識	5	
		4: 未見崩崖或上邊界落差不大	0	
	C: 滑動體	1: 滑動體邊界大致清楚，且具凸凹地形(上坡凹陷、下坡凸起)	15	15
		2: 滑動體邊界(部分模糊)仍可辨，但不具明顯凸凹地形	10	
		3: 滑動體邊界模糊受地表侵蝕，僅殘留部分材料或呈凹坡	5	
		4: 未見滑動體或厚度小與邊界難以辨識	0	
	D: 兩側邊界(側翼或趾溝)	1: 兩翼(或兩側邊界)皆完整發育，且邊界清晰銳利	15	15
		2: 兩翼(或兩側邊界)均有發育，但形貌已受侵蝕或堆積而呈圓潤狀	10	
		3: 僅有一翼(或一側邊界)發育較清楚可辨識，另一側則模糊，或兩側皆模糊	5	
		4: 未見側翼(或邊界)發育	0	
	E: 趾部	1: 具崩塌堆積材料，且近年來有發生新鮮崩塌	15	15
		2: 具崩塌堆積材料，但暫時穩定存在(有崩塌地形特徵但近期影像無揭露)	10	
		3: 僅殘存部分堆積材料，受地表侵蝕而發育趾溝或扇狀地	5	
周邊環境可能之影響	F: 潛勢區前之河岸侵蝕	1: 趾部未見局部崩塌跡象或其他侵蝕作用	0	
		2: 主要河道(支流)之攻擊岸	15	
		3: 次要河道(支流)之攻擊岸	10	10
		4: 僅有河道平行通過或有趾溝侵蝕趾部	5	
	G: 滑動體下邊坡之坡型	1: 無河道直接通過或有陷地存在	0	
		2: 有河道直接通過下邊坡地形且坡度陡峭	15	
		3: 滑動體下邊坡地形稍有凸起但坡度平坦	10	10
		4: 滑動體下邊坡地形有平坦或坡面	5	
	AHP總分			80
	AHP分級: $0 \leq D < 40 \leq C < 60 \leq B < 80 \leq A \leq 100$			A

結論

本研究蒐集國際上針對大規模崩塌之分級方法，主要採用日本地滑學會之層級分析法，輔以挪威地質

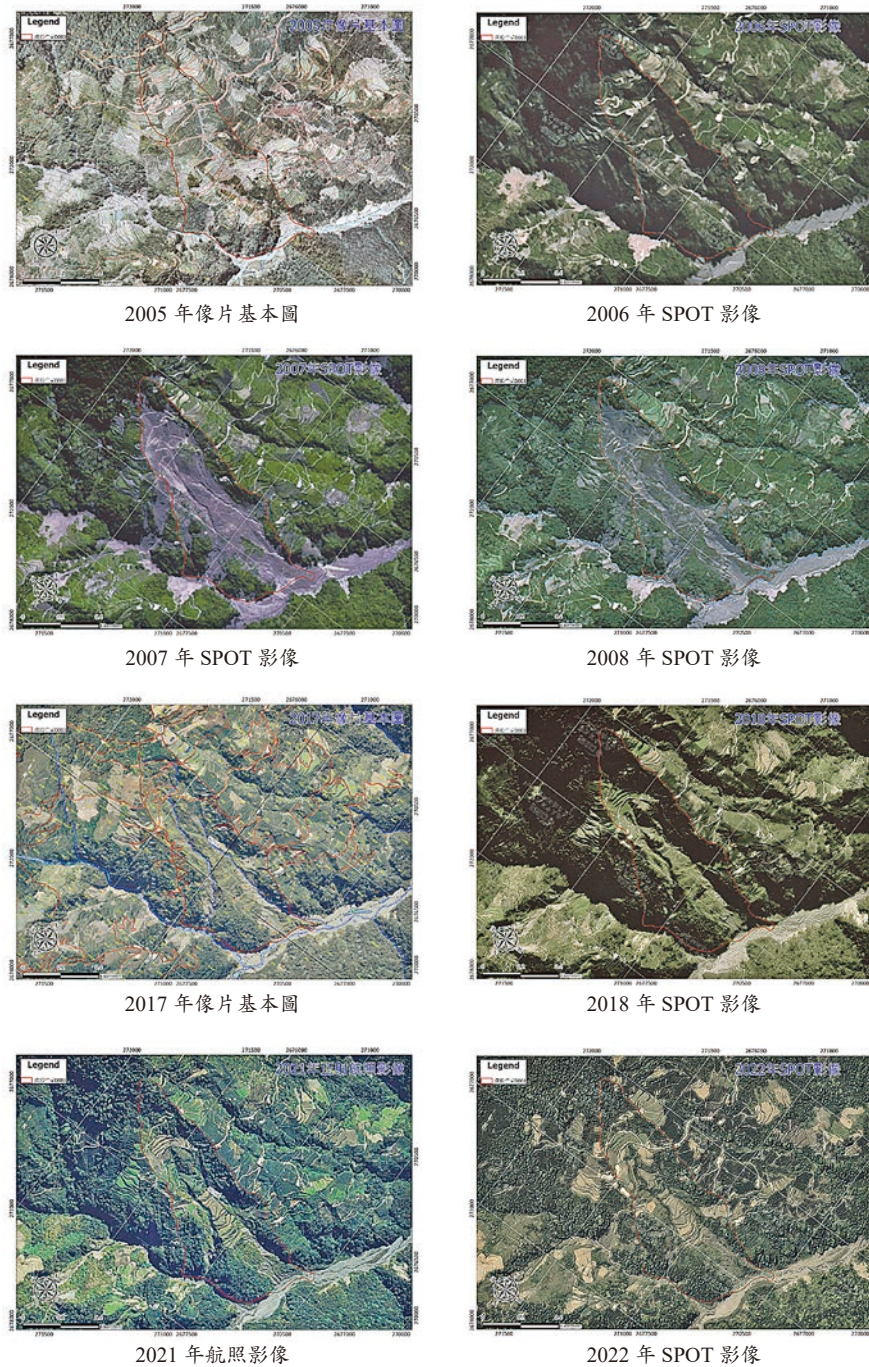


圖 11 南投仁愛 D003 時序性航遙測影像資料

調查所對於大型岩坡之分級方法及其他國內外文獻，並初步擬定適用於臺灣之大規模崩塌分級方法，並定名為崩塌地形特徵潛勢分級表（LTFST）。根據已完成之南投縣境內 336 處潛在大规模崩塌分級結果並經初步統計分析後，可知 A 級者有 1 處、B 級有 29 處、C 級 132 處、D 級 174 處。潛在大规模崩塌評分之數量呈現鐘形分佈，而評分為 B 級和 C 級之潛在大规模崩塌，大多集中在力行產業道路沿線，和現況相符，說明本研究擬定之崩塌地形特徵潛勢分級表適用性良好，可

對潛在大規模崩塌進行正確評分和分級，也可合理呈現潛在大規模崩塌之潛勢等級。本研究也列舉典型崩塌特徵之 A 級潛在大規模崩塌—南投仁愛 D003，建議需持續密切關注後續活動性。本研究未來將持續精進崩塌地形特徵潛勢分級表，並應用於不同地區及不同類型之潛在大規模崩塌，並持續檢討改進評分表格，期能對於潛在大規模崩塌分級建立一套廣泛適用性之評分表，據以針對潛在大規模崩塌進行適當分級，以提供後續敏感區劃設或推廣防災教育使用。

參考文獻

- 李錫堤 (2011), 「草嶺大崩山之地質與地形演變」, 中華水土保持學報, 第四十二卷, 第四期, 第 325-335 頁。
- 經濟部中央地質調查所 (2000), 臺灣山崩災害專輯 (一), 經濟部中央地質調查所出版, 臺北。
- Zischinsky, U. (1969), "Über sackungen," *Rock Mechanics*, Vol. 1, No. 1, pp. 30-52.
- Nemcok, A. (1972), "Gravitational slope deformation in high mountains," *Proceedings of the 24th International Geological Congress*, Montreal, Canada, Vol. 13, pp. 132-141.
- Mahr, T. (1977), "Deep-reaching gravitational deformations of high mountain slopes," *International Association of Engineering Geologists Bulletin*, Vol. 19, pp. 121-127.
- Mahr, T. and Nemcok, A., "Deep-seated creep deformations in the crystalline cores of the Tatry Mts," *International Association of Engineering Geologists Bulletin*, Vol. 16, No. 1, pp. 104-106 (1977).
- Radbruch-Hall, D.H. (1978), *Gravitational creep of rock masses on slopes*, In: *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 14, pp. 607-657.
- Bovis, M.J. (1982), "Uphill-facing (antisllope) scarps in the Coast Mountains, southwest British Columbia," *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 93, No. 8, pp. 804-812.
- Savage, W.Z. and Varnes, D.J. (1987), "Mechanics of gravitational spreading of steep-sided ridges (sackung)," *International Association of Engineering Geologists Bulletin*, Vol. 35, No. 1, pp. 31-36.
- Varnes, D.J., Radbruch-Hall, D.H., and Savage, W.Z. (1989), "Topographic and structural conditions in areas of gravitational spreading of ridges in the western United States," *United States Geological Survey Professional Paper*, pp. 1496.
- Chigira, M. (1992), "Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep," *Engineering Geology*, Vol. 32, No. 3, pp. 157-184.
- Bovis, M.J. and Evans, S.G. (1995), "Rock slope movements along the Mount Currie "fault scarp", southern Coast Mountains, British Columbia," *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 32, No. 12, pp. 2015-2020.
- Crosta, G. and Zanchi, A. (2000), "Deep seated slope deformations: huge, extraordinary, enigmatic phenomena. In: Landslides in Research, Theory and Practice," *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*, Finisterre, Spain pp. 351-358.
- Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A. (2001), "Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics," *Engineering Geology*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 83-102.
- Stead, D. and Wolter, A. (2015), "A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology," *Journal of Structural Geology*, Vol. 74, pp. 1-23.
- 行政法人國家災害防救科技中心 (2015), 大規模崩塌災害防治行動綱領, 行政法人國家災害防救科技中心, 臺北。
- Hamasaki, E., Hirai, T., and Miyagi, T., (2003), "Evaluation of the probability of landslide occurrence by AHP based on the results of aerial-photo interpretation," *Proceedings of the 42nd annual meeting of Japan Landslide Society*, Toyama, Japan, pp. 19-22.
- Yagi, H. and Higaki, D. (2008), "Methodological study on landslide hazard assessment by interpretation of aerial photographs combined with AHP in the middle course area of Agano River, Central Japan," *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol. 45, No. 5, pp. 358-366.
- 伊藤陽司、石丸聡、中村研、川上源太郎 (2014), 「北海道東部、津別地域での AHP 評価シートを用いた地すべり活動性の評価」, 日本地すべり学会誌, 第五十一巻, 第三期, 第 100-105 頁。
- 日本地すべり学会 (2021), 斜面防災危険度評価ガイドブック 編集委員会, 斜面防災危険度評価ガイドブック—斜面と地すべりの読み解き方—, 朝倉書店, 日本。
- Hermanns, R.L., Oppikofer, T., Anda, E., Blikra, L.H., Böhme, M., Bunkholt, H., Crosta, G.B., Dahle, H., Devoli, G., Fisher, L., Jaboyedoff, M., Loew, S., Sætre, S. and Yugsi Molina, F.X. (2012), "Recommended hazard and risk classification system for large unstable rock slopes in Norway," *Norges geologiske undersøkelse (NGU) REPORT 2012.029*, 49p.
- Hermanns, R.L., Oppikofer, T., Anda, E., Blikra, L.H., Böhme, M., Bunkholt, H., Crosta, G.B., Dahle, H., Devoli, G., Fisher, L., Jaboyedoff, M., Loew, S., Sætre, S. and Yugsi Molina, F.X. (2013), "Hazard and risk classification for large unstable rock slopes in Norway," *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Vol. 6, pp. 245-254.
- Chigira, M. (1992), "Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep," *Engineering Geology*, Vol. 32, No. 3, pp. 157-184.
- Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L. (2014), "The Varnes classification of landslide type, an update," *Landslides*, Vol. 11, No. 2, pp. 167-194.
- 王文能 (2016), 崩塌的地質特性與防災, 中華防災學會出版委員會, 臺南。
- 經濟部中央地質調查所 (2017), 「山崩觀測技術發展應用研究 (3/4)」, 經濟部中央地質調查所報告, 臺北。
- 經濟部中央地質調查所 (2018), 「山崩觀測技術發展應用研究 (4/4)」, 經濟部中央地質調查所報告, 臺北。
- Cruden, D.M. and Varnes D.J., "Landslide types and processes," *United States Geological Survey Special Report*, 247, pp. 36-75 (1996).
- 經濟部中央地質調查所 (2013), 潜在大規模崩塌作業手冊, 經濟部中央地質調查所出版, 臺北。
- 侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉 (2014), 「空載光達數值地形產製與地質災害應用」, 航測及遙測學刊, 第十八卷, 第二期, 第 93-108 頁。
- 濱崎英作、戸来竹佐、宮城豊彦 (2003), 「AHP を用いた空中写真判読結果からの地すべり危険度評価手法」, 第 42 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 日本, 第 227-230 頁。
- 八木浩司、檜垣大助 (2009), 日本地すべり学会平成 14 年度第三系分布域の地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員会, 「空中写真判読と AHP 法を用いた地すべり地形再活動危険度評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用」, 日本地すべり学会誌, 第四十五巻, 第五期, 第 358-366 頁。
- 石丸聡、川上源太郎、田近淳、雨宮和夫、伊藤陽司、坪山厚美、中村研、横田寛、若山茂 (2013), 地すべり活動度評価手法マニュアル, 土砂災害軽減のための地すべり活動度評価手法マニュアル本篇, 地方独立行政法人北海道立総合研究機構地質研究所, 日本, 第 1-27 頁。
- 伊藤陽司、石丸聡、中村研、川上源太郎 (2014), 「北海道東部、津別地域での AHP 評価シートを用いた地すべり活動性の評」, 日本地すべり学会誌, 第五十一巻, 第三期, 第 100-105 頁。





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

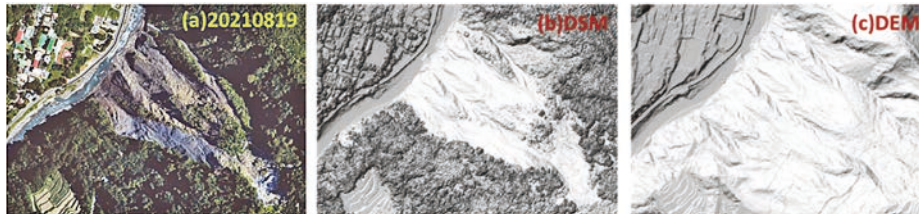


圖 1 新竹秀巒崩塌區正射影像及數值高程地形日照陰影圖（2021 年 8 月）

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

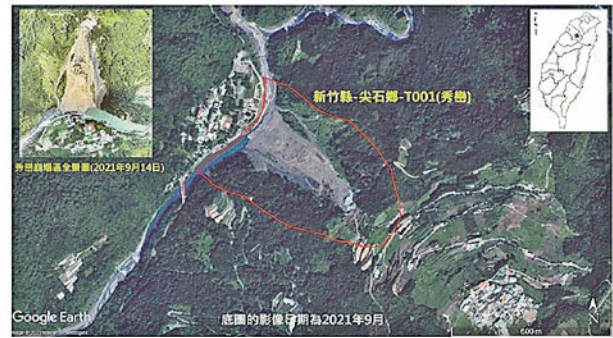


圖 2 新竹縣尖石鄉 T001 秀巒大規模崩塌潛勢區位置圖



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

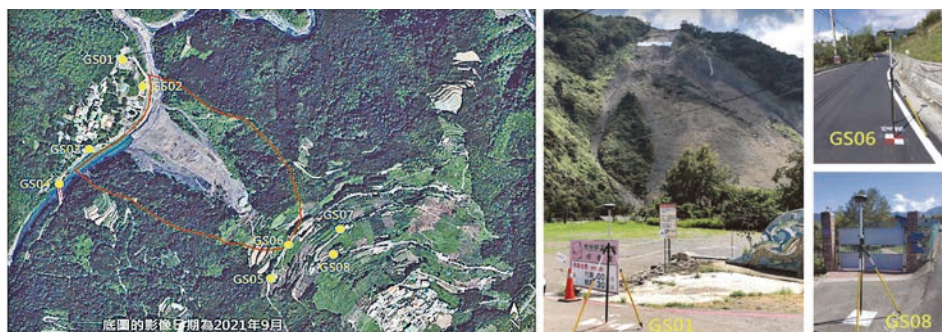


圖 4 新竹秀巒大規模崩塌潛勢區地面控制點位分佈

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

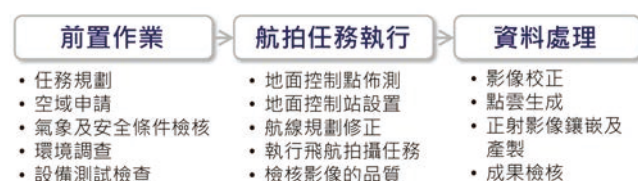


圖 5 無人航空攝影測量流程



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

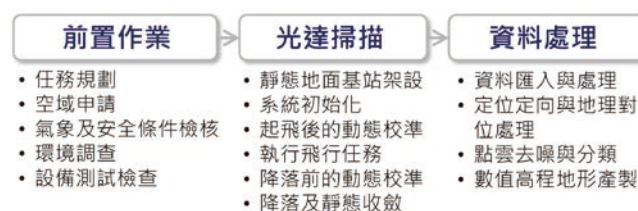


圖 8 無人航空光達系統作業流程

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。

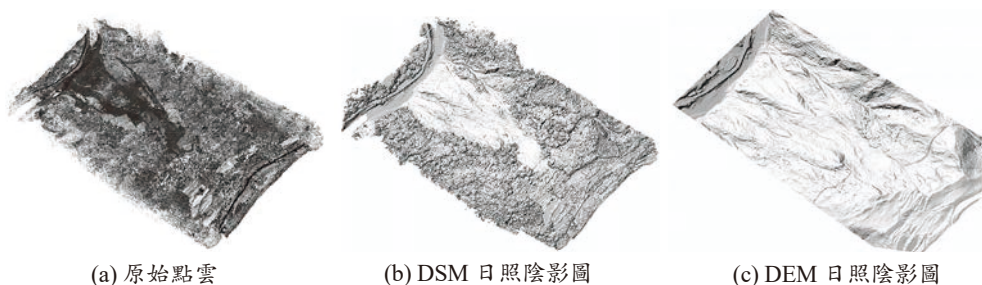
圖 11 至 13 為利用前述攝影測量和光達系統，所產製不同時期數值表面模型及數值高程模型後，所得到的區域內高程及土方量的變化分析。因要計算高程及土方



圖 9 點雲資料經航線平差修正前後說明例

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



(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)

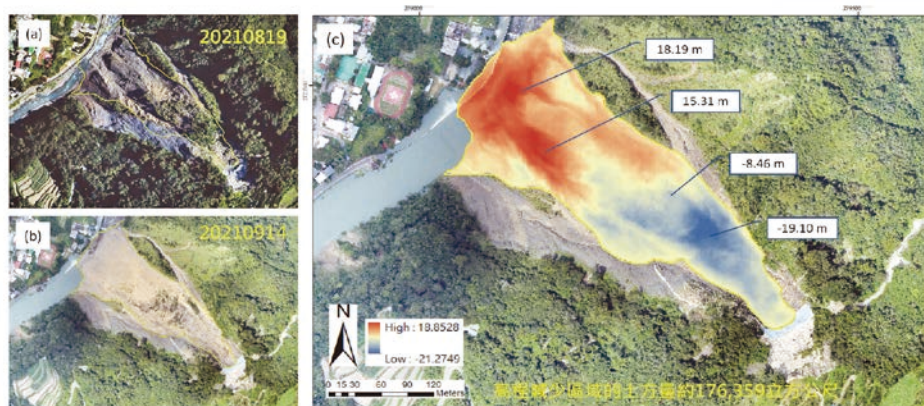


圖 11 20210914 (DSM) 與 20210819 (DEM) 崩塌裸露區高程及土方量變化

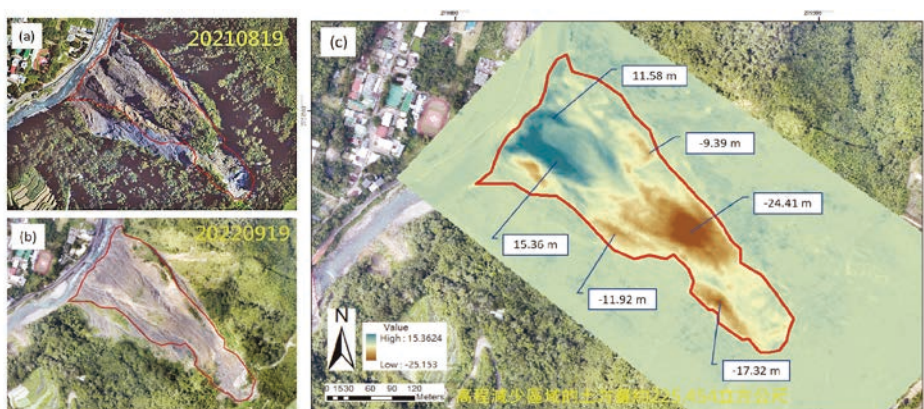


圖 12 20210919 (DEM) 與 20210819 (DEM) 崩塌區高程及土方量變化

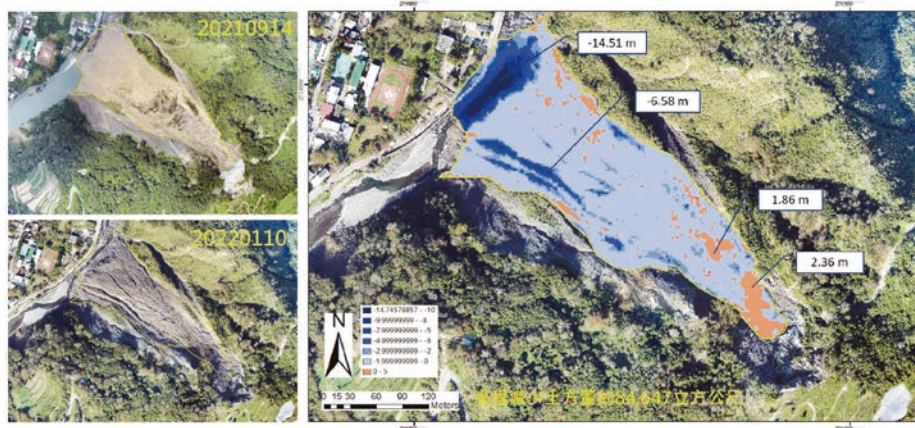


圖 13 20220110 (DSM) 與 20210914 (DSM) 崩塌裸露區高程及土方量變化

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

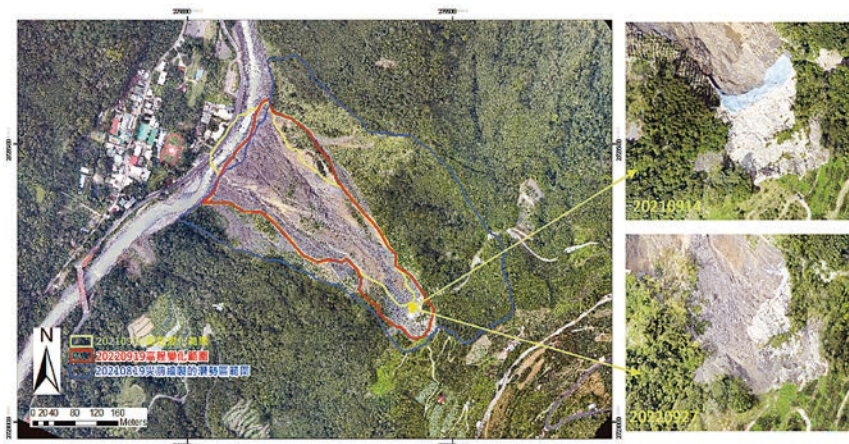


圖 14 潛勢區範圍及不同時期崩塌範圍圈繪

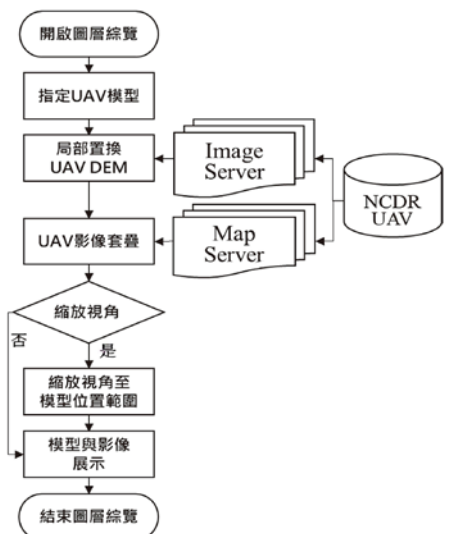


圖 15 無人航空測繪影像於災害情資網之整合運用和流程

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，其中藍色為冲刷侵蝕區，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 年災例複勘報告 [https://246.swcb.gov.tw/AllFiles/PDF/Re/105年-其他-新竹尖石-001\(106年-複勘\).pdf](https://246.swcb.gov.tw/AllFiles/PDF/Re/105年-其他-新竹尖石-001(106年-複勘).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>。



結合 遙測技術 與 3D 視覺化的 山區洪水災害 模擬

Mountain Flash Flood Simulation Using Remote Sensing and 3D Visualization Technologies

楊鈞宏／國家災害防救科技中心 佐理研究員

陳偉柏^{*}／國家災害防救科技中心 研究員

李士強／國家災害防救科技中心 副技術師

張子瑩／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

臺灣經常遭遇颱風、地震和山區滑坡等天然災害，因應氣候變遷的影響，山區在洪水事件中面臨著日益嚴峻的挑戰。2009 年莫拉克風災事件中高屏溪支流荖濃溪，是受創最嚴重的地區之一，2021 年盧碧颱風降為熱帶性低氣壓後之豪雨使玉穗溪土石流爆發，將 2017 年完工通車位於荖濃溪上游的明霸克露橋沖毀，該事件因洪水與土石流沖斷多處聯外道路，許多部落與知名風景區（不老溫泉、茂林國家風景區、寶來溫泉與六龜風景區等）受創嚴重，為避免相同憾事發生，洪災前的預警便顯得極為重要。

近年來，隨著無人航空載具（Unmanned Aerial System, UAS）技術和三維地理資訊系統（3D Geographic Information System, 3D GIS）的快速發展，為山區洪水模擬和預警帶來了新的契機。有鑑於此，國家災害防救科技中心（以下簡稱災防科技中心）以智慧災防為目標，運用網路服務、三維地理資訊等技術，打造防災整備及應變決策的「山區閃洪災害熱點三維預警展示系統」。系統採用之數據由災防科技中心坡洪組開發的山區洪氾預警系統所產出，此系統由氣象局天氣預報模式、降雨逕流模式及水動力模式所建構而成，產出空間解析度為 1.25 公里，預報未來 72 小時水動力河道模擬。本次研究區域為荖濃溪沿岸的高雄市桃源區勤和部落，並透過無人機空拍資料建置 3D 河道及聚落地形模型並結合水動力情境展示。透過三維空間圖台以視覺化技術將多維度及即時性的資料進行整合模擬展示，將有助於提升人員判斷防救災應變之決策能力。

關鍵詞：閃洪、作業化預警模組、數值模式、無人航空載具

ABSTRACT

Taiwan frequently experiences natural disasters such as typhoons, earthquakes, and mountainous landslides. Moreover, due to the impact of climate change, mountainous areas face increasingly severe challenges during flood events. For instance, in 2009, Typhoon Morakot, and in 2021, Typhoon

Lupit, both caused severe damage to the Laonung River, a tributary of the Gaoping River, leading to the destruction of the “Minbaklu Bridge.” These events also inflicted significant harm on numerous scenic areas. Therefore, flood disaster warnings take precedence over other types of disasters.

In recent years, opportunities have emerged through technological advancements, including Unmanned Aerial Systems (UAS) and Three-Dimensional Geographic Information Systems (3D GIS). The National Science and Technol-

^{*} 通訊作者，wbchen@ncdr.nat.gov.tw

ogy Center for Disaster Reduction (NCDR) is dedicated to disaster prevention through means such as web services and Three-Dimensional Geographic Information Systems (3D GIS), with the goal of developing the “Mountainous Flash Flood Disaster Early Warning System.” The NCDR has created an Operational Forecasting System (OFS) by integrating atmospheric, hydrological, and hydrodynamic models. This system provides a spatial resolution of 1.25 kilometers and forecasts hydrodynamic river channel simulations for the next 72 hours. The research utilizes high-density and high-accuracy UAV DEM data to simulate rapid water level rises and flooding resulting from intense rainfall within the Laonung River watershed in Kaohsiung City, Taiwan. The integration of three-dimensional spatial technology with real-time data simulation in this study contributes to improved decision-making accuracy and resilience.

Keywords: Flash flood, Operational forecasting system, Numerical model, Unmanned Aerial System

前言

臺灣常受到颱風、地震和山區滑坡等自然災害的影響。尤其是山區，它在洪水災害中面臨著嚴重的挑戰。山區閃洪的預警相對於平地淹水更加重要，特別是對於山區需要分秒必爭進行疏散避難的居民。當山區洪水爆發前，預警的時間非常有限，如果預警時間太短，居民可能無法在洪水抵達之前安全到達避難處所。且在極端的天氣型態下，山區複雜多變的地形，以及交通不易等問題，這些情況使得山區的洪水模擬和預警更顯得重要^[1,2]。

近年來隨著電池、傳感器和通信技術的不斷改進和成熟，無人飛行器（UAS）的應用已經有顯著的進展。這些技術的進步使得 UAS 更加穩定及安全^[3,4]。同時，UAS 的應用領域也擴展至災害防救及環境監測、土地利用調查及地形測繪、森林資源及海洋環境探索等等^[5-8]。因 UAS 具有低空飛行的優勢，可用於拍攝高

解析度的影像和數據，這些數據對於建立地形模型、進行水文建模以及洪水模擬具有相當的重要性^[9]。

隨著數值模擬技術及電腦運算資源與日俱進，現今，整合各種數值模式，預報小區域尺度的閃洪，是洪水災害防治的未來趨勢，並且已經被世界各國所廣泛採用。因此災防科技中心在 111 年開發了山區閃洪預警模式，並建立 24 小時作業化運算淹水預報模式，以每 6 小時預報未來 72 小時的作業化模式，進行淹水模擬，並提出可能的淹水預警範圍，提升颱風應變期間災害預警的準確性及即時性^[10]。

此外在洪水模擬方面，3D GIS 的優勢在於它能夠以三維形式呈現地理資訊，這使得人員更快速了解地形、地貌和地理特徵。因此 3D GIS 的發展將使得洪水模擬能夠更真實地呈現地理情境，更可幫助防災單位更準確地預測及模擬^[11]。學者 Faisal and Khan^[12] 更是將遙測結合感測器透過地理資訊系統進行洪水風險分析。

綜上所述，UAS 技術與 GIS 系統技術的提升，對於山區洪水模擬和預警領域帶來了新的契機，更有助於提升山區的洪水風險管理能力，減少災害損失，並保護山區居民和生態系統。因此本研究目的在將提升 UAS 資料建模及 3D 視覺化在山區洪水事件中的模擬，以應對山區洪水災害這一嚴峻的挑戰。

研究區域概述

本研究研究區域為高雄市荖濃溪主河道旁的勤和部落，圖 1。該區域位於高雄市桃源區省道台 20 線旁，緊鄰荖濃溪河道。聚落與主河道的高差僅有 2 公尺，且聚落旁有土石流潛勢溪流（高市 DF082）匯入荖濃溪。在 2017 年 6 月初的豪雨事件中，溪水暴漲導



圖 1 荖濃溪東側高位段丘的勤和平臺^[13]

致地基被掏空，造成勤和平台多戶民宅被洪水淹沒。而在 2021 年盧碧颱風後豪雨事件中，溪水再次暴漲，導致位於勤和部落北邊的明霸克露橋被沖毀^[13]。

空拍任務建構

為了實現數位孿生 (iTwin) 的效果，需要建立高精度高解析的三維聚落模型。然而，常見的垂直拍攝航線規劃方法，主要用於建立正射影像和數值地形，但其鑲嵌後的三維模型難以呈現現實細節。因此，為了確保鑲嵌後的三維模型能夠呈現現地景物的細節，需結合低空傾斜攝影航線與手動細節補強的方式，提升三維模型的精細度。

空拍過程中所使用的傾斜攝影航線規劃相關參數可參考表 1，除執行航線規劃之外，為了捕捉更多聚落周邊的細節，以等速 (4 m/s) 和等時 (2 秒) 以及不同高度下，45 度角進行手動拍攝。手動拍攝的位置和航線位置可以參考圖 2。

表 1 相關拍攝參數

傾斜角度	45 度	航線高度	110 米
前後覆蓋率	85%	地面解析度	4.63 cm/pix
側向覆蓋率	85%	拍攝面積	28 公頃



圖 2 照片拍攝相對位置圖

空拍路線規劃

本研究總計拍攝總計 946 張照片，並測量地面控制點 3 個。使用 Bentley Context Capture 軟體進行三維模型的鑲嵌。所使用的三維模型採用 3D tile 格式，這種格式具備多層次細節 (LOD) 能力，當視點距離增加時，會對模型的網格進行簡化，以減少運算負擔。這樣的技術能夠減少設備讀取平台所需的時間，也能減少記憶體的使用量。通過較近視角比較圖 3 及圖 4，可知三維模型的精細度與實際場景幾乎無異。

由上述成果可知，透過使用無人機低空航線進行傾斜拍攝，結合手動外環拍攝以及地面控制點座標高



圖 3 實地照片 (荖濃溪東側勤和平台)



圖 4 三維模型 (荖濃溪東側勤和平台)

程，利用建模軟體完成河岸聚落的三維模型已達到數位孿生模型的標準，將實際地形地貌在虛擬環境中詳細呈現。

山區水資料模擬

本研究模擬的山區閃洪預警模擬範圍，包括荖濃溪主流河道，以及荖濃溪的河岸洪氾區域，如圖 5 所示。主要預警範圍位於藍色水域及其所有河川、陸地面積。水動力模式計算區域所涵蓋的尺度已經足夠用以模擬山區強降雨所觸發之河川閃洪淹水。模式由約五萬個格點建構出約七萬個三角形網格，在遠離可能淹水區域設定上下游邊界，模式採用 10 公尺空間解析度網格；而 5 公尺空間解析度網格則被用來分配在勤合聚落街區，即易發生山區閃洪淹水災情區域，以及荖濃溪的主河道。儘管使用更高解析度網格可以提高淹水空間識別度，然而，網格細緻化會大幅提高網格總數量，模式所需之運算資源與預警所需之計算時間將隨網格數量而增加。本研究所產製之數值網格尺度，足以描述荖濃溪勤合聚落及其洪水平原之水動力特徵。



圖 5 荖濃溪河川斷面資料模擬

山區水理資料模擬作業化預報

本研究於枯水期空拍預警區域，在取得高畫素影像後，轉換成高解析（1 公尺解析度）數值高程資料，而這些數值高程資料即可用來建置水動力模式所需之地形檔案，在完成數值網格產製後，即可應用插值方式，將數值高程資料內插至每個格點上。由圖 6 可知，使用高解析（1 公尺解析度）數值高程資料可以表示非常細緻之地形變化。於水動力模式計算範圍內，荖濃溪上游設置有一個入流點，即其邊界流量條件，而在荖濃溪勤合聚落下游處則設置一個出流點，水體可自由流出模擬區域。根據河床底部之地文特性與模式之穩定性，以及荖濃溪歷史水位校驗結果，水動力模式採用的曼寧係數設定為 0.025，而水動力模式的計算時距則設定為 2 秒。

作業化預報視覺展示技術

透過前節的空拍及山區洪水模擬結合，此河道斷面資料已結合氣象降雨預報模式，將網格化雨量轉換成水動力模式輸入格式，經過淹水模式計算後，產生作業化預報，每 6 小時提供未來 72 小時可能積淹水之空間分布、積淹水範圍及積淹水深度。此章節則針對水動力數據進行視覺化處理。

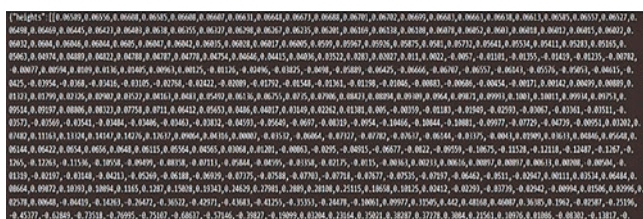


圖 7 水動力解析後之二維網格陣列數值

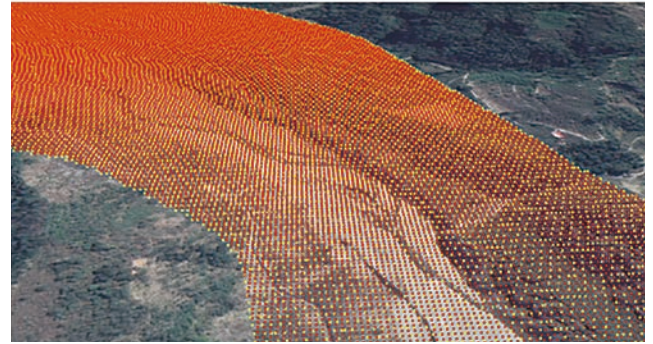


圖 6 水動力解析後之二維網格陣列空間分布

水理料視覺化

近年由於數值分析技術成熟，二維水理模式已廣泛應用於各領域，對於大多數水理狀況皆可充分掌握，如圖 7。然而二維水理在使用上亦有其限制，對於波動、湍急或崎嶇水域之流況，無法如真實世界一般針對水動態生成實況。為此針對二維度水動力數據進行三維視覺化模擬，用以達到場域之水動力模型擬真情境，及動態呈現水面時序變化，觀測異常情形及樣態分析，如圖 8 所示。

水資料可視化

水面可視化的處理，包括去除雜訊、校正數據。本研究使用 Delaunay 三角網格法對水理點資料進行過濾，透過 Concaveman 算出水面點位範圍，並將水點位資料進行各點高度配置，並濾除河道外及範圍內的異常數據，除了將資料進行篩選之外，同時進行資料的配對，如圖 9。



圖 8 水動力二維轉換三維資料

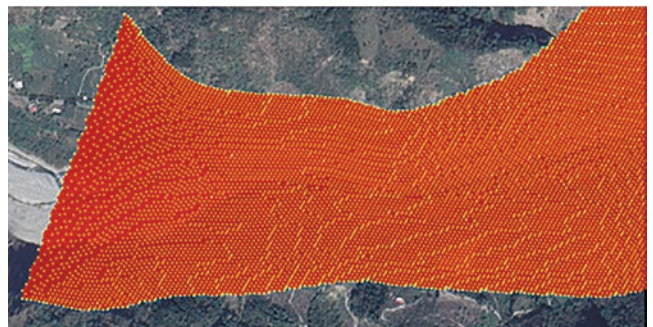


圖 9 使用演算法將點位配對

原始點資料的過濾，將使呈現之水理表面越平滑，更利於進行河道水面模擬。後續則將收集到的水面數據套疊到三維模型表面上。而為了使水面狀態更接近真實水面視覺效果，將水位資料進行渲染，模擬水面的材質和反射，使模型看起來更像真實的水面，如圖 10。



圖 10 數值轉換水面波紋呈現

視覺化開發成果

為了有效呈現高解析度水淹資訊，並依淹水模擬結果整合於三維視覺展示模式。系統以 Web JavaScript API 技術建構三維平台，從河川數據、地形高程，透過視覺化方式呈現大量三維模型數據的建構，實現三維可視化需求。

LOD 建物環境分析匯入

多維度可視化展示為現今趨勢，不僅可提升視覺化查詢、展示應用外，亦可提供專業的空間資訊分析，而三維數位城市為現今空間資訊領域發展之重要關鍵，其中人造建築之三維房屋模型乃是最為重要之基礎物件之一，基於三維模型可完整記錄地物本身屬性資料與相位關係，提供使用者在不同應用層面時，結合數位化運算模式，達到資料分析的目的，如圖 11。

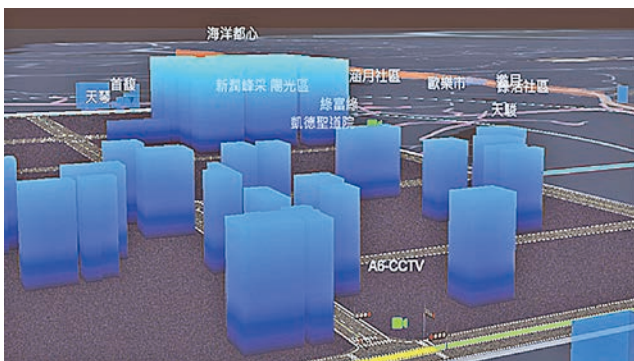


圖 11 三維圖台 Web 技術開發

透過資料細緻層次 (Level of Detail, LOD) 的設定，可以有效提升電腦圖形中複雜場景重現的速度，當 LOD 越高，資料量愈多，物件描繪的內容就越豐富細膩。為此系統匯入立體擬真建物模型 LOD1 建物模型，分批導入三維展示圖台中並同步媒合於數值地形中，以達成建物與地形融合之樣態，如圖 12 所示。

環境分析部分，則以 LOD 建物呈現告警，LOD 建物採用多點判定，水動力資料網格與建物所在區域觸發，則表示該棟建物發生水淹情形，會以建物變色作為告警提示，並依水點碰觸情況，使 LOD 建物逐一渲染上色，如圖 13 所示。

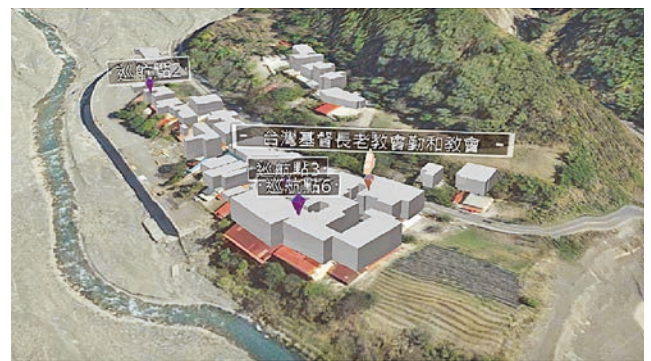


圖 12 LOD 模型結合 3D 圖台



圖 13 淹水分析結合 LOD 建物上色

UAS 模型與水資料視覺化

本節則針對 UAS 模型匯入並結合水理數據、水文模型等資訊完成數值轉換，並於加入相關圖標定位，最後將轉換後之資料匯入系統中，完成荖濃溪勤和部落三維空間畫面呈現，如圖 14 和圖 15。

三維熱力圖渲染效果

水淹高度渲染則結合水理資料之導入，開發貼地與浮空兩種模式之動態三維熱力圖視覺呈現，模擬山區閃洪水淹樣態。將水的高度資料與該水點位內的地形資料做比對，對應的差值即為水深；透過差值的大



圖 14 UAS 模型結合三維圖台

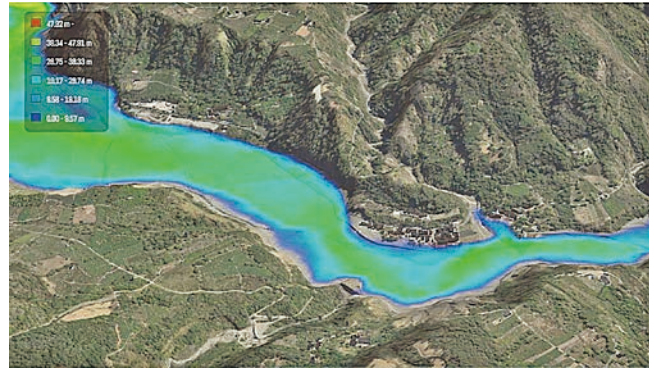


圖 16 水位高度熱力－貼地



圖 15 圖標結合三維圖台

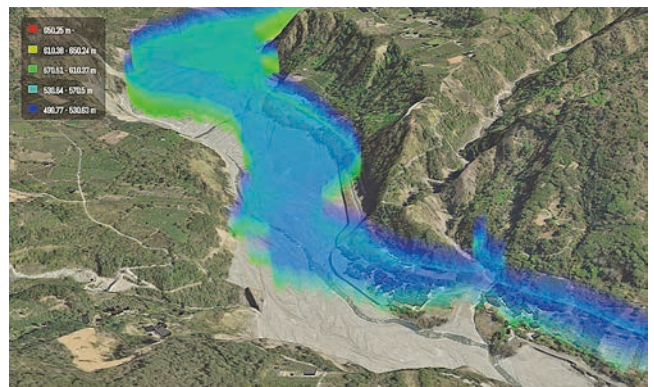


圖 17 水位高度熱力－浮空

小，呈現熱力圖效果。水越深所呈現的熱力圖顏色則越深，藉此可作為防救災應變之參考。圖 16 與圖 17 分別呈現三維水深熱力圖的貼地及浮空展示。

渲染擬真效果

本研究為了強化擬真效果，山區暴雨的雨水往往較混濁，含有大量泥沙，這使水面呈現出不同的色調和濁度。這種變化對於模擬及可視化至關重要，因為它影響了整體的真實感和視覺效果。因此，在三維模型的開發過程中，納入了河川沖刷之動態效果顯示，水面可根據高度進行清轉濁的特效，以確保模型可反映出真實世界的水體特徵，有助於提高模型的精度和逼真度，如圖 18。

結論與建議

本研究係將如何應用視覺化技術結合水理、水動力模式，打造接近實景的視覺化 3D 地理資訊系統，針對臺灣南部山區的集水區（荖濃溪），建置一個作業化山區流域洪氾溢淹預警暨視覺化展示模組。本預資料組由大氣、水文、水理等三個數值預測模式，及一個視覺化展示系統所構成。



圖 18 荖濃溪動和部落水文模型媒合於地表之樣態（河川清轉濁過程）

此外，為確保山區流域洪氾溢淹預警的準確性，在每次颱風或強降雨事件後，災防科技中心將透過無人飛機重新拍攝預警區域影響，以建置符合現況之數值高程。目前本研究所建置之山區流域洪氾溢淹預警暨視覺化展示模組已在國家災害防救科技中心運算平台上作業化運作，未來，在運算設備擴充且可取得山區高解析數值地形的條件下，可考慮預警其他臺灣山區流域。

參考文獻

1. Borga, M., Gaume, E., Creutin, J.D., and Marchi, L., Surveying flash flood response: gauging the ungauged extremes. Hydrol Process 2008,

- 22(18), 3883-3885.
2. Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., and Jakob, M., Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *J Hydrol.* 2014, 518, 194-205.
 3. 施錦揮、游政恭、鄒慶敏、蔡季欣、林志清、林燕山 (2010), 「無人飛行載具應用於防救災圖資供應之研究—以北二高崩塌地為例」, 台灣水利季刊, 第六十二卷, 第二期, 第 35-49 頁。
 4. 劉丹、梁濤、田銀枝、曹紅杰 (2014), 「無人機航測技術在長江航道整治工程中的應用」, 地理信息世界, 第二十一卷, 第四期, 第 59-63 頁。
 5. Horritt, M.S. and Bates, P.D., Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *J. Hydrol.* 2001, 253, 239-249.
 6. Horritt, M.S., Bates, P.D., and Mattinson, M.J., Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. *J. Hydrol.* 2006, 329, 306-314.
 7. Cook, A. and Merwade, V., Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *J. Hydrol.* 2009, 377, 131-142.
 8. Caviedes-Voullieme, D., Morales-Hernandez, M., Lopez-Marijuan, I., and García-Navarro, P., Reconstruction of 2D river beds by appropriate interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation. *Environ. Model. Softw.* 2014, 61, 206-228.
 9. 劉丹、梁濤、田銀枝、曹紅杰 (2014), 「無人機航測技術在長江航道整治工程中的應用」, 地理信息世界, 第二十一卷, 第四期, 第 59-63 頁。
 10. 劉哲欣、李士強、郭文達、江申、魏曉萍、葉森海、施虹如、梁庭語、陳偉柏、張志新 (2022), 山區流域洪氾溢淹預警暨視覺化展示模組開發, 國家災害防救科技中心技術報告。
 11. Borga, M., Gaume, E., Creutin, J.D., and Marchi, L., Surveying flash flood response: gauging the ungauged extremes. *Hydrol Process* 2018, 22(18), 3883-3885.
 12. Faisal., H. A. H. Khan., Application of gis and remote sensing in disaster management: A critical review of flood management .*Proceedings, International Conference on Disaster Risk Mitigation,* 2017, 23-32.
 13. 國立自然科學博物館 (2000), 台灣地景—地理環境—南台灣海岸地貌, http://digimuse.nmns.edu.tw/taiwanlandform2/01_south/pageB/pageB_14_280.html 





以光達數值高程模型產製地形相關 山崩潛感因子之最適量測尺度

Optimum Measurement Scale for Producing Topography-Related Landslide Susceptibility Factors Using LiDAR Dem

李錫堤／國立中央大學地震災害鏈風險評估及管理研究中心 專案研究員

張瓊文*／國立中央大學地震災害鏈風險評估及管理研究中心 研究助理

謝有忠／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 技正

林錫宏／經濟部地質調查及礦業管理中心應用地質組 科長

本研究於曾文水庫上游集水區選取四期颱風降雨事件之誘發山崩目錄，以平滑化移動視窗法及大核心網格法，進行山崩潛感因子之最適量測尺度研究。透過一系列不同大小的核心計算地形因子數值，並以成功率曲線法評估各因子不同尺度之效度，曲線下面積最大者視為最適尺度。再以最適尺度因子建置四組事件型山崩潛感模型，並交叉驗證計算彼此間的預測率。結果顯示最適因子模型的成功率及預測率，較之以 3×3 核心所計算因子建立的原始模型，都有明顯的增長情形。這充分顯示了採用最適量測尺度計算地形因子的重要性及必要性。

關鍵詞：山崩潛感模型、潛感因子、最適量測尺度

ABSTRACT

A test area was selected at the catchment of the Zengwen Reservoir in southwestern Taiwan. Four event landslide inventories, which were mapped from high-resolution satellite images before and after rain events, are selected for study. Susceptibility factors were analyzed by using the moving window smoothing method and large kernel grid method, with a series of kernels in different sizes for comparison. In addition, success-rate curve method was used to evaluate the effectiveness of each factor in interpreting landslide distribution. Highest AUC is selected as the most effective one and the kernel size which yield that is the optimal measurement scale of the factor.

Factors calculated from an optimal measurement scale are selected for construction of a landslide susceptibility model. Totally, four models are constructed. These models are validated individually, and cross-validated each other. The success rates and prediction rates of these optimal models are significantly increasing as compared with the model built

from conventional 3×3 kernel calculated factors. Finally, this optimal susceptibility model was used to construct a landslide hazard model for prediction of landslide distribution under different triggering events. This fully demonstrates the importance and necessity of using the optimal measurement scale to calculate topographic-related factors.

Keywords: Landslide susceptibility model, Susceptibility factor, Optimal measurement scale

前言

山崩地形因子為山崩潛感分析之基礎資料，如坡度、粗糙度及地形曲率等多使用數值高程模型（DEM）加以計算。在不同尺度下的地形資料運算出來的因子會有不同的輸出值，且並非高解析度地形資料就可以直接得到高效度的因子。對一個特定區域的特定目的而言，每個因子都會有一個的最適量測尺度^[1]。高效度因子的選取是山崩潛感分析成效的關鍵^[1]，而山崩潛感模型的優

* 通訊作者，joan@gis.geo.ncu.edu.tw

劣更是山崩預測模型的基礎^[2,3]。一個優良的山崩預測模型可提供一個地區的山崩災害預測、災害製圖、工程選址、防災決策及土砂災害預估之用^[2,3]。光達 (LiDAR) 具有快速獲取大量三維坐標點資訊的優點，可提供每秒數千點至數萬點的觀測數據，由光達點雲資訊可以產製比傳統航空測量更高解析度之數值高程模型，光達數值高程模型 (LiDAR DEM) 有別於傳統的航測數值高程模型，前者可有效取得植被下真實的地表高度，因此近十餘年來開始廣泛地被運用到山崩的研究^[4]，包括：山崩測繪^[5]、山崩監測^[6]、大型山崩研究^[7]及山崩潛感/災害分析^[7-9]等。近年對於以 LiDAR DEM 進行山崩潛感分析之地形因子最適量測尺度探討，日漸受到重視。

從 DEM 產製地形因子通常是以 3×3 網格做計算^[10]，當要改變尺度時，一般以內插方式產生較小網格的資料，或以重新取樣 (resampling) 方式產生較大網格的資料，再以 3×3 網格計算，但亦可採用更大的核心如 5×5 或更大的視窗進行因子計算。李錫堤等人於 2003 年已開始使用較大視窗從高解析度 DEM 產製地形粗糙度因子^[11]，並於 2007 年開始在雨量內插上聯合較大視窗平滑化 DEM 產製雨量因子，並探討何種尺度的因子較具有解釋山崩的物理意義^[12]。

山崩潛感模型基本上是網格結構而網格解析度控制了成果的優劣^[13,14]。一般被認為採用網格大小與研究區大小成正相關^[15]，但適當的網格大小之採用亦須考慮山崩平均面積的大小^[16]。近十餘年來已發表的文章中，山崩潛感模型暨其採用的因子多數是 10 m 網格，這大體上反應了計算地形相關因子的 3×3 核心共 900 m²，約為一般完整山崩目錄的最小面積。當山崩潛感模型的解析度是 10 m 時，建模的因子也是 10 m 解析度。Schlögell *et al.* 指出約 10 m 數值地形網格能可靠的表現出山崩源頭區^[17]。在數值地形減幅的過程中，山崩樣本點數也會減少，可能因此犧牲細部地形特徵^[16]。因此，實務上以重新取樣方式產生不同量測尺度的網格資料較不適當，而以不同大小的移動視窗來產製不同尺度的因子比較實際^[17-19]。岩橋純子等使用 LiDAR DEM 透過改變取樣之網格視窗大小試圖找出坡度及凹凸度應用於山崩評估之最適尺度^[20]。Sirbu *et al.* 透過不同視窗大小之平滑化 DEM 產製不同尺度之因子，並嘗試找出最適尺度因子應用於山崩評估^[21]。繆念澤以石門水庫集水區為例，建立四個颱風事件誘發山崩目錄，並以平滑化

移動視窗法及大核心網格法分別產不同尺度的因子，以找出各個地形因子在各個山崩目錄下的最適量測尺度，再利用各事件最適尺度因子建立每一個事件的山崩潛感模型。研究結果顯示，以最適尺度因子建立之潛感模型於成功率及預測率的表現皆有所提升^[22]。

至於篩選高效度因子的方法，早年許多研究者對因子的篩選多於建模時採逐步回歸 (stepwise regression) 對因子做取舍。Lee, C.T. 2013 年開始運用山崩組與非山崩組次數分布曲線的區別度 (discriminator)、崩壞比曲線 (probability of failure curve) 的形狀及成功率曲線 (success rate curve) 的曲線下面積 (area under curve, AUC) 大小來篩選有效因子^[23]。Paudel *et al.* 建議用 ROC (receiver operating characteristics) 曲線下面積 AUC 的大小來判別因子的適用性^[1]。因為同一筆資料無論計算成功率曲線或 ROC 曲線其 AUC 的大小極為相近，在山崩領域的研究者通常是採用成功率曲線來評估模型的優劣。

研究區域及資料來源

本研究區為位於臺灣嘉義縣之曾文水庫集水區，如圖 1，集水區形狀由東北而西南呈狹長袋形，縱長約 41 公里，最寬處 17 公里，集水區面積約 485 平方公里。曾文溪發源於阿里山山脈西南側，集水區地形以流域東北端的溪流源頭地勢最高，往西南方向地勢逐漸遞減，全區除了樂野、達邦、大埔等數處小型盆地外，均屬山地。河床亦因地勢關係，呈陡急現象，沖蝕作用旺盛、輸砂作用強烈，使上游地區兩岸地形更顯陡峻。曾文水庫集水區內水系以曾文溪及其支流為主，其次為草山溪，其餘皆為短急之小溪流。地層主要為中新世至上新

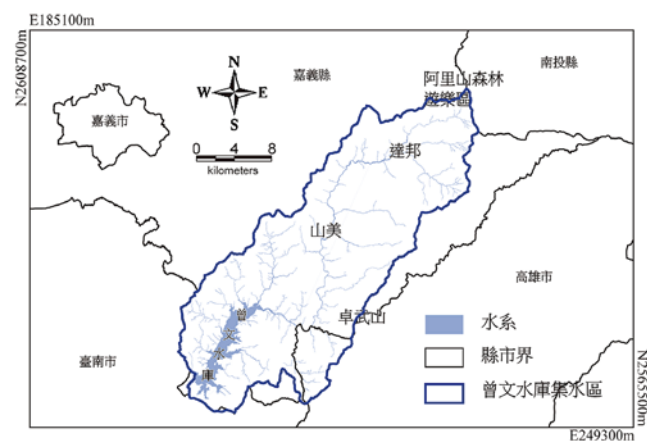


圖 1 研究區位置圖

世沉積岩層，包括南莊層、長枝坑層、糖恩山砂岩、隘寮腳層等，以及上新世至更新世之北寮頁岩等。斷層線及褶皺軸線大多呈北北東—南南西走向或南北向延伸，主要斷層有獺頭斷層及頂坪林斷層等，主要褶皺為樂野向斜、新美背斜及頂坪林向斜等。

本區受到夏季颱風及西南季風帶來豐沛降雨，時有降雨誘發山崩災害發生，本研究以 1996 年賀伯颱風、2004 年敏督利颱風、2005 年海棠颱風及 2009 年莫拉克颱風四場暴雨事件之誘發山崩目錄，如圖 2，探討解釋山崩分布之地形因子最適量測尺度。事件誘發山崩目錄為經濟部中央地質調查所 100 年度委辦計畫

「集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫（1/3）」計畫^[24]，判釋自颱風前後 SPOT 衛星影像，並經由正射航照重新檢查是否誤判，及以 LiDAR DEM 明暗影像（shading map）及坡度圖做堆積區的篩除修正。為使因子最適量測尺度分析及山崩潛感分析具代表性，所挑選之事件誘發山崩目錄盡量滿足山崩數量較多及均布於研究區的特點，四場山崩目錄之山崩面積分布如圖 3。

本研究採用之數值高程模型為經濟部中央地質調查所在 2010 年至 2015 年間，陸續委託成大防災中心及國內民間測量公司完成之全國 1 公尺解析度高精度

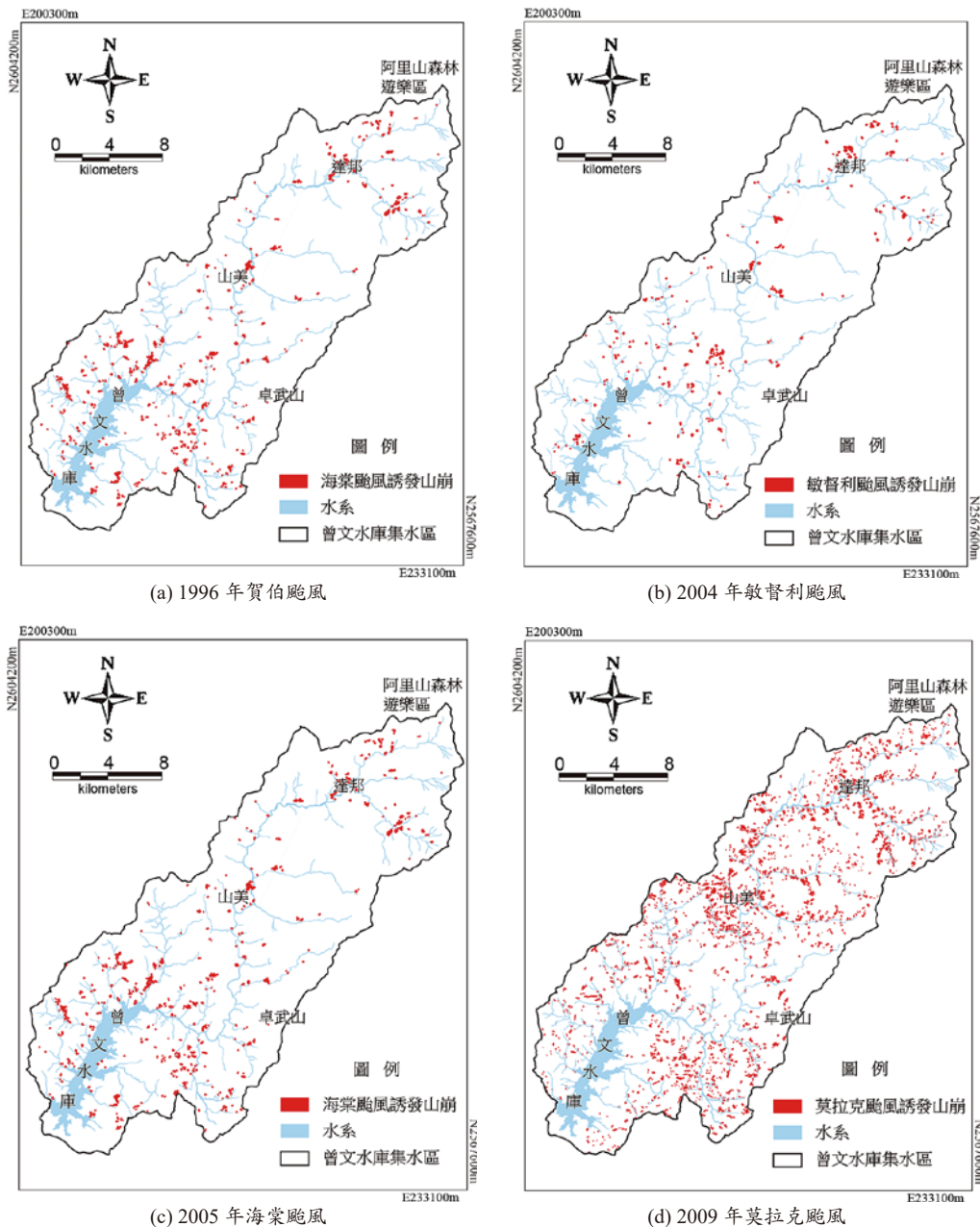


圖 2 本研究選取颱風事件誘發山崩分布圖

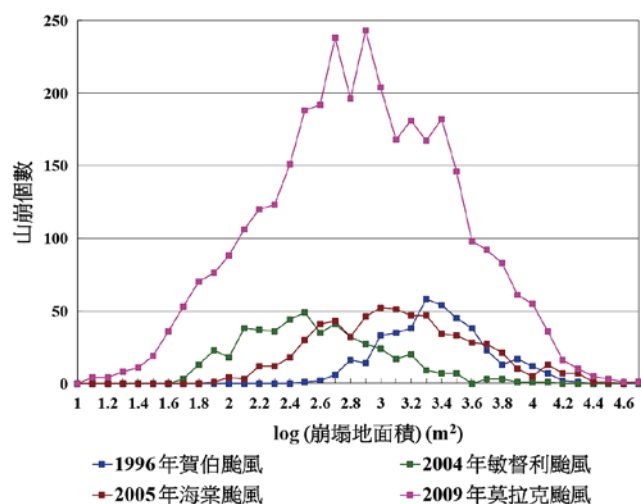


圖 3 本研究選用山崩目錄面積個數分布圖

LiDAR DEM，此 LiDAR DEM 精確度為水平 30 mm 及垂直 75 mm^[25]。考慮判釋自 SPOT 衛星影像之山崩目錄其解析度並沒有那麼高，且研究區範圍高達 485 平方公里，須做有效運算速度的考量下，因此將原始 LiDAR DEM 減幅為 2 公尺解析度，做為後續分析之用。

研究方法

因子量測尺度及其方法

本研究採用兩種因子量測尺度方法，一為「平滑化移動視窗法」(moving window smoothing method)，以不同大小的移動視窗來產生平滑化 DEM，再採用 3 × 3 核心 (kernel) 計算各地形因子值^[10]。另一方法為「大核心網格法」(large kernel grid method)，大核心網格法是以不同大小核心 (kernel) 直接計算因子值，在網格大小為 2 m 的 DEM 中，使用 3 × 3 核心做計算時，其量測尺度即為視窗大小，相當於 6 m，如圖 4；使用 5 × 5 核心做計算時，其量測尺度相當於 10 m，如圖 5；依此類推。

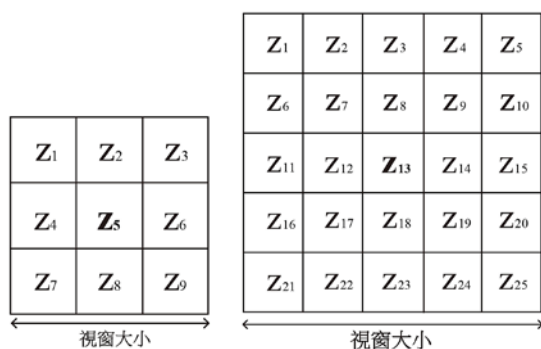


圖 4 3 × 3 核心示意圖

圖 5 5 × 5 核心示意圖

以坡度及坡向的計算為例說明如次。地形高度資料的一次微分即為坡度與坡向。對於任意一點而言，其斜率可以向量表示為：

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

此向量的大小為：

$$\text{mag}(\nabla f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

對網格化資料而言，上式可簡化為：

$$\text{mag}(\nabla f) = \sqrt{\left[\left(\frac{Z_6 - Z_4}{2h}\right)^2 + \left(\frac{Z_2 - Z_8}{2h}\right)^2\right]} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{\left[\left(\frac{Z_6 - Z_4}{2h}\right)^2 + \left(\frac{Z_2 - Z_8}{2h}\right)^2\right]} \quad (4)$$

$$\theta_p = \sqrt{\left[\left(\frac{Z_6 - Z_4}{2h}\right)^2 + \left(\frac{Z_2 - Z_8}{2h}\right)^2\right]} \times 100\% \quad (5)$$

其中， h 為格點間距， Z_i 為網格點，其相對位置如圖 4， θ 為坡度， θ_p 為坡度百分比，計算結果放在 Z_5 。

對 5 × 5 核心而言，

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{Z_{15} - Z_{11}}{4h} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{Z_3 - Z_{23}}{4h} \quad (7)$$

其中， h 為格點間距， Z_i 為網格點，其相對位置如圖 5，計算結果放在 Z_{13} 。

此向量與 X 軸正方向的夾角 α' 為：

$$\alpha' = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\frac{\partial f}{\partial y}} \right) \quad (8)$$

其方位角則為：

$$\alpha = 90^\circ - \alpha' \quad \frac{\partial f}{\partial x} \geq 0 \quad (9)$$

$$\alpha = 270^\circ - \alpha' \quad \frac{\partial f}{\partial x} < 0 \quad (10)$$

上述， α 為坡向。

地形因子最適尺度分析

常用且容易取得的山崩潛感因子，經複核國內外相關研究，包括：岩性、坡度、坡向、地形粗糙度、坡度粗糙度、平面曲率、縱向曲率、切向曲率、總曲率、全坡高、相對坡高、濕度指數、植被指數、道路距、斷層距、河道距、河灣距、源頭距等地形地質因子，及最大時雨量、事件總雨量、愛氏震度等促崩因子。其中，計算自數值地形之因子包括：坡度、坡向、地形粗糙度、坡度粗糙度、平面曲率、縱向曲率、切向曲率及總曲率等^[10]，可進行最適尺度分析；須利用地形資料做共克里金（CoKriging）分析的促崩因子暫不在本研究中討論。

地形粗糙度之定義為描述一區域內的地形變化程度，為了更確切的表現地形局部起伏的狀況，本研究以空間域濾波的方式，先將數值地形進行不同尺度平滑化，去除地表起伏較為劇烈的部分，僅留下大範圍的地勢的起伏，再將原始地形面扣除平滑化後的地形，得到地表起伏較為劇烈的高頻特徵，然後以不同核心尺度半徑計算圓形區域範圍內的標準差來代表此區域地形之粗糙度。因此地形粗糙度解釋事件誘發山崩目錄的效度受到數值地形不同平滑化尺度及不同計算核心尺度共同影響。坡度粗糙度則是以不同核心尺度半徑計算圓形視窗範圍內的坡度標準差值^[10]，所使用之坡度圖層為 3×3 核心計算之坡度值，以此反映出區域範圍內坡度變化的程度，因此坡度粗糙度僅有核心尺度變化。

最適尺度分析中以大核心網格法較為直觀，本研究將 2 m LiDAR DEM 以不同核心尺度 3×3 、 5×5 、 7×7 、 9×9 、 11×11 、 21×21 、 31×31 、 41×41 、 51×51 、 61×61 、 71×71 、 81×81 及 91×91 計算因子值，也就是量測尺度 6 m、10 m、14 m、18 m、22 m、42 m、62 m、82 m、102 m、122 m、142 m、162 m 及 182 m。而平滑化移動視窗法則是將 2 m LiDAR DEM 先做 3×3 、 5×5 、 7×7 、 9×9 、 11×11 、 21×21 、 31×31 、 41×41 、 51×51 、 61×61 、 71×71 、 81×81 及 91×91 之移動視窗平滑化，產生不同平滑程度的衍生 DEM 做為不同量測尺度的 DEM，再以 3×3 核心去計算因子值。雖然平滑化視窗大小與大核心網格法的量測尺度在意義上近似，又略有 1 個等級的差異，但為避免混淆，本研究後續仍以平滑化視窗尺度做為平滑化移動視窗法的量測尺度。

模型解釋資料的能力常以 ROC 曲線及其曲線下面積 AUC（area under curve）來表示^[26]。在山崩領域，一般較常用成功率曲線（success rate curve）及其曲線下面積 AUC 來表示模型解釋資料的能力^[27]。對同一組資料而言，兩種方法通常都能得到極為相近的 AUC 值。但成功率曲線的優點是，不但可以用來評估一個山崩潛感模型解釋山崩分布的能力，也適用於評估特定因子解釋山崩分布的能力^[23]。因子效度的測定，本研究採用成功率曲線法，計算該因子圖層解釋每一組山崩目錄的成功率曲線及 AUC 值，AUC 值越大表示該因子圖層解釋山崩目錄的效度越高。因此在不同尺度下，AUC 值最大者為該因子的最適尺度。

完成各個因子的最適尺度分析後，在進行山崩潛感分析前，尚須進行因子分布之統計檢定，剔除非常態分布的因子，再進行因子兩兩間之相關係數分析，剔除相關係數過高的因子。最後檢查山崩組與非山崩組次數分布曲線及崩壞比曲線確認決選因子^[2,3]。

山崩潛感分析

本研究採用多變量分析之羅吉斯迴歸（logistic regression）進行山崩潛感分析。山崩潛感分析原則是運用一組實際發生的山崩資料做為訓練資料來建立最佳預測模型，供預估山崩之發生及做為區域性潛感製圖之用，其方法前人已經充分討論^[15,28-31]。

羅吉斯迴歸模型是對數線性模型的一種特殊形式，當應變數為二元變數時即屬之，其形式如下：

$$\ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^K \beta_k x_{ki} \quad (11)$$

其中， p_i 為第 i 點在給定一系列自變數 x_{1i} 、 x_{2i} 、 $\dots$ 、 x_{ki} 值時的事件發生機率， α 、 β_k 為係數。在山崩潛感分析中， x_{ki} 是第 i 點的因子向量，該點若為山崩 $p_i = 1$ ，非山崩點 $p_i = 0$ 。以訓練資料迴歸後即得係數 α 、 β_k 。此模型經代入各個格點的因子向量後即得各個格點的羅吉斯值 p_i ， p_i 會介於 0 與 1 之間，值越大代表越容易發生山崩。在山崩潛感分析中，吾人可將 p_i 視為山崩潛感值，並用來繪製山崩潛感圖。

事件型山崩潛感分析是在過去的 15 年中，由經濟部中央地質調查所及本研究團隊發展出來，是能達成大區域的山崩潛感分析及災害圖測繪的方法^[32]。此方法

是以統計學為基礎，不須使用長時期的山崩目錄，也不須使用岩土強度資料或地下水文資料。此方法有兩項與定值法相同的需求，即：(1) 須使用震度或降雨強度做為促崩因子，(2) 須使用事件誘發之山崩目錄^[29,30]。

在評估山崩潛感模型的成功率時，一般以 $AUC > 0.9$ 為極佳 (excellent)， $0.9 > AUC > 0.8$ 為佳 (good)， $0.8 > AUC > 0.7$ 為可 (fair)， $0.7 > AUC > 0.6$ 為差 (poor)， $AUC < 0.6$ 為極差 (very poor)^[29,30]。用於評估山崩潛感因子的成功率或效能時，則以 $AUC > 0.8$ 為極佳， $0.8 > AUC > 0.7$ 為佳， $0.7 > AUC > 0.6$ 為可， $0.6 > AUC > 0.55$ 為差及 $AUC < 0.55$ 為極差^[23]。在比較同一因子在不同量測尺度下 AUC 的改善程度時，本研究採用 (12) 式計算其提升率；因有意義的 AUC 最小值為 0.5，故計算提升率時僅考慮 AUC 大於 0.5 的部分。

$$\text{提升率} = \frac{(\text{新 AUC} - \text{原 AUC})}{0.5} \times 100\% \quad (12)$$

對一個模型而言，用來繪製成功率曲線的資料一般就是建立模型的資料，它解釋的是模型擬合建模資料的程度。如果使用同一地區或不同地區的另一筆資料來建立曲線時，被稱之為預測率曲線 (prediction rate curve)^[33]，其解釋的是模型預測之能力。

研究成果

曾文水庫集水區山崩潛感因子最適量測尺度分析

本研究在曾文水庫集水區共選擇了 1996 年賀伯颱風、2004 年敏督利颱風、2005 年海棠颱風及 2009 年莫拉克颱風 4 場降雨誘發山崩事件，建立山崩目錄並進行分析。納入最適尺度分析的因子包括：坡度、坡向、平面曲率、縱向曲率、切向曲率、總曲率、地形粗糙度及坡度粗糙度等。本研究採用平滑化移動視窗法及大核心網格法等兩種尺度量測方法。以坡度、坡向、切向曲率、總曲率及地形粗糙度為例，在不同量測尺度下的 AUC 變化情形如圖 6 至圖 10。

各山崩潛感因子解釋事件誘發山崩目錄最適量測尺度彙整如表 1，坡度因子的最適尺度約在 42 m 至 62 m 左右，敏督利颱風誘發山崩之坡度最適尺度雖偏大，但是在 62 m 之後 AUC 提升很少且趨於穩定。坡向因子的最適尺度雖較不固定，但各尺度 AUC 值的差異並不大，尺度效應較不顯著。地形粗糙度與坡度粗糙度於不同山崩目錄之最適尺度略有不同，山崩面積偏大的賀伯颱風及莫拉克颱風目錄，其最適尺度較小，可能因為面積較大的山崩本身就已經包含比較多

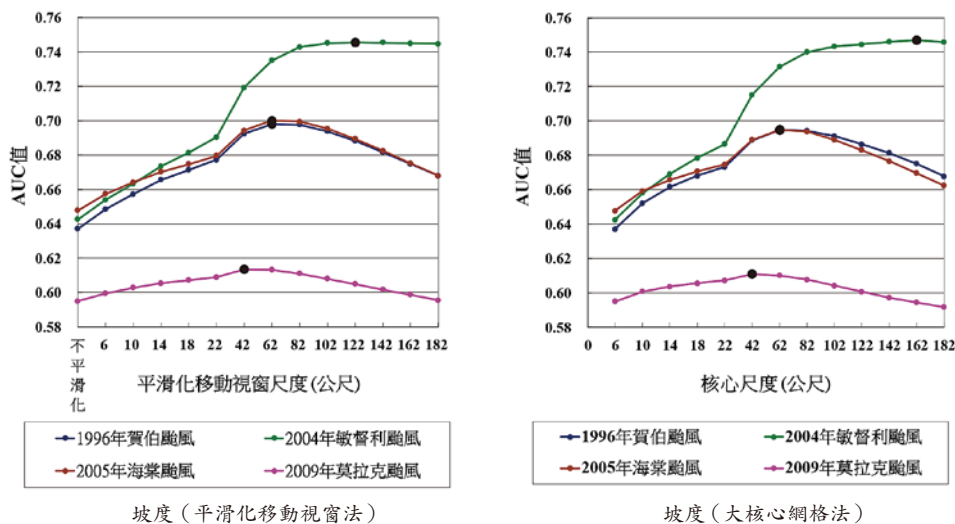
表 1 曾文水庫集水區山崩潛感因子最適量測尺度一覽表

事件山崩目錄 地形因子		賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
坡度	平滑化 移動視窗法	62 m	122 m	62 m	42 m
	大核心網格法	62 m	162 m	62 m	42 m
坡向	平滑化 移動視窗法	82 m	162 m	62 m	22 m
	大核心網格法	62 m	82 m	62 m	22 m
地形粗糙度 (空間域濾波平滑化尺度 / 核心尺度)		6 m / 102 m	6 m / 182 m	6 m / 122 m	6 m / 62 m
坡度粗糙度 (核心尺度)		82 m	182 m	162 m	82 m
平面曲率	平滑化 移動視窗法	162 m	42 m	42 m	62 m
	大核心網格法	182 m	102 m	82 m	122 m
縱向曲率	平滑化 移動視窗法	162 m	82 m	162 m	82 m
	大核心網格法	182 m	162 m	182 m	182 m
切向曲率	平滑化 移動視窗法	122 m	62 m	42 m	62 m
	大核心網格法	182 m	122 m	82 m	122 m
總曲率	平滑化 移動視窗法	不平滑化	不平滑化	不平滑化	不平滑化
	大核心網格法	6 m	6 m	6 m	6 m

區域地形變化的特性，而山崩面積偏小的敏督利及海棠颱風目錄，則需要以較大的核心尺度以顯示區域的地形變化特性。

平面曲率、縱向曲率及切向曲率之大核心法比平滑化移動視窗法量測尺度略大，但是 AUC 值較高，顯示對此三種曲率而言，較大的計算核心更能突顯不同地形切面上與山崩相關之地形特徵。總曲率與其他曲率因子不同，其為地表三維的綜合曲率，總曲率越大代表地形較為複雜，而總曲率以 3×3 核心所計算出的值 AUC 最高，顯示細部的地形變化對於解釋山崩分布也具有顯著性。

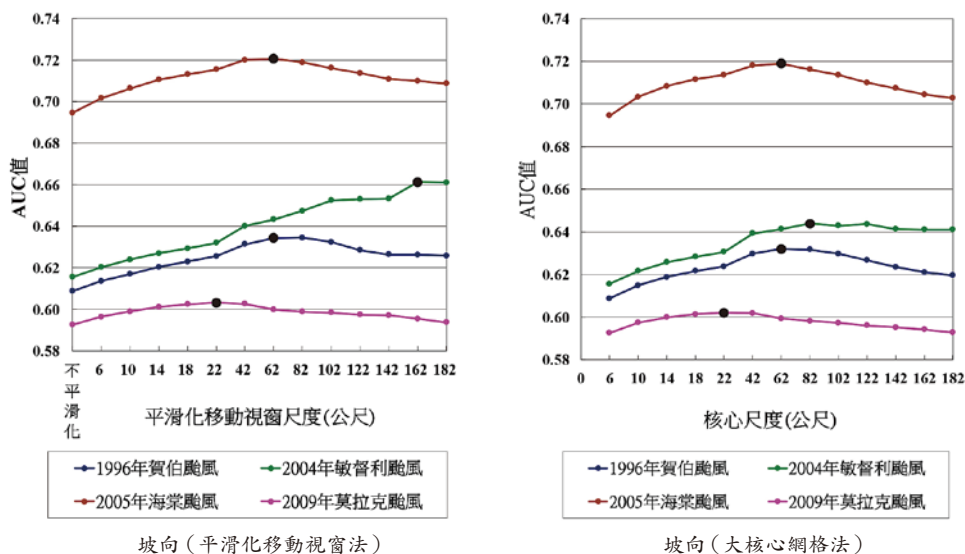
本研究在曾文水庫集水區所測試的 8 個潛感因子中，以 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 網格 LiDAR DEM 及 3×3 核心所計算之坡度及坡向因子 AUC 其顯示的效度均為可或接近可（圖 6 及圖 7）；平面曲率、縱向曲率及切向曲率（圖 8）的原始因子 AUC 均為極差的等級；總曲率的原始因子 AUC 則為可（圖 9）；地形粗糙度的原始因子 AUC 均為可（圖 10）；坡度粗糙度的原始因子 AUC 多為差。經分析不同量測尺度的因子之 AUC 後，坡度、地形粗糙度及坡度粗糙度因子最適尺度 AUC 提升到可至佳的等級；其餘各因子亦有改善，多能提升到可或接近可。各因子最適尺度較原始因子 AUC 提升的百分



坡度（平滑化移動視窗法）

坡度（大核心網格法）

圖 6 曾文水庫集水區坡度因子不同尺度因子解釋事件誘發山崩之 AUC
（黑色圓點為 AUC 最大值）



坡向（平滑化移動視窗法）

坡向（大核心網格法）

圖 7 曾文水庫集水區坡向因子不同尺度因子解釋事件誘發山崩之 AUC
（黑色圓點為 AUC 最大值）

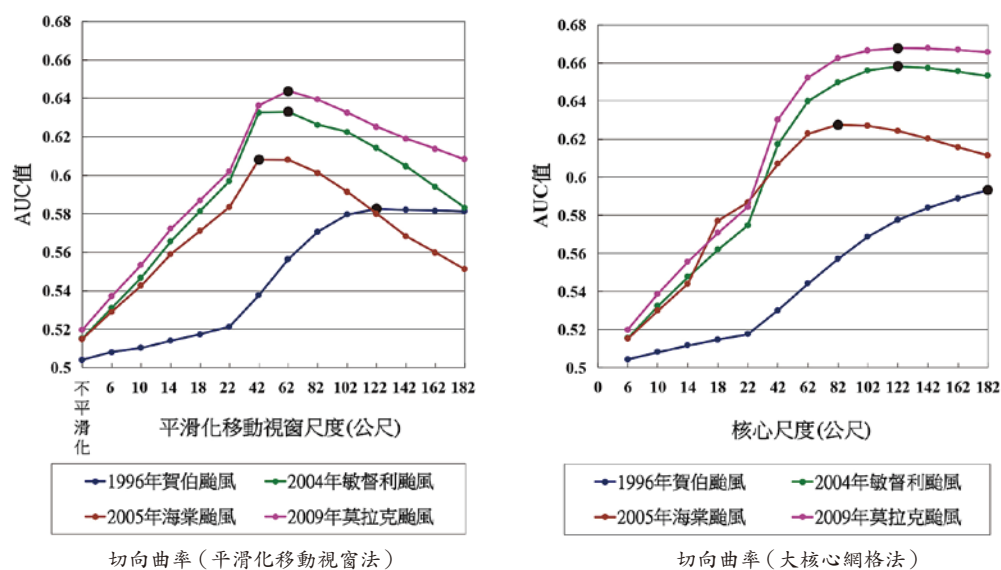


圖 8 曾文水庫集水區切向曲率因子不同尺度因子解釋事件誘發山崩之 AUC
(黑色圓點為 AUC 最大值)

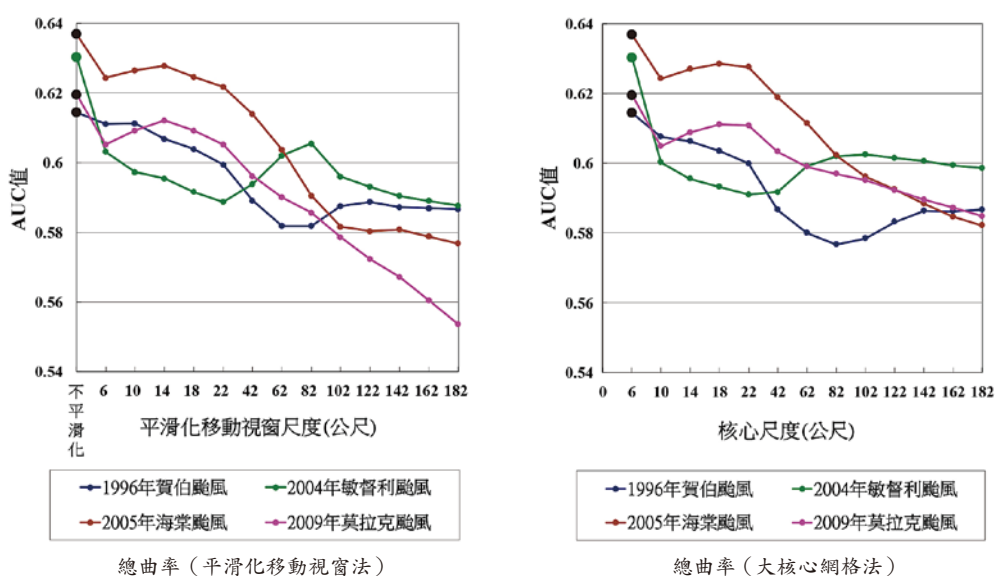


圖 9 曾文水庫集水區總曲率因子不同尺度因子解釋事件誘發山崩之 AUC
(黑色圓點為 AUC 最大值)

比分別為 (表 2): 坡度 3.0% 至 20.6%, 坡向 1.9% 至 21.3%, 地形粗糙度 9.8% 至 28.5%, 坡度粗糙度 9.9% 至 27.9%, 平面曲率 7.1% 至 27.6%, 縱向曲率 11.7% 至 30.2%, 切向曲率 2.7% 至 6.3%。可見最適量測尺度確實有明顯提升地形因子解釋山崩分布的效果。

最適尺度因子山崩潛感模型

本研究選取了曾文水庫集水區 1996 年賀伯颱風、2004 年敏督利颱風、2005 年海棠颱風、2009 年莫拉克颱風等 4 場降雨誘發山崩事件，所建立的山崩目錄為

訓練資料，各因子經山崩與非山崩次數分布圖、崩壞比圖、成功率曲線、P-P 機率圖及相關係數的分析後，選取原尺度 (3 × 3 核心) 及最適尺度之坡度、坡向、地形粗糙度、切向曲率以及相對坡高為潛感因子，最大時雨量與總雨量為促崩因子，以多變量分析中的羅吉斯迴歸方法進行山崩潛感分析，建立山崩潛感模型。由於部分事件山崩目錄於各岩性間並不均布，岩性權重會影響到地形因子及雨量權重分布，也不利於預測其他山崩目錄，為利於不同事件模型之比較，故本研究未採用岩性因子。

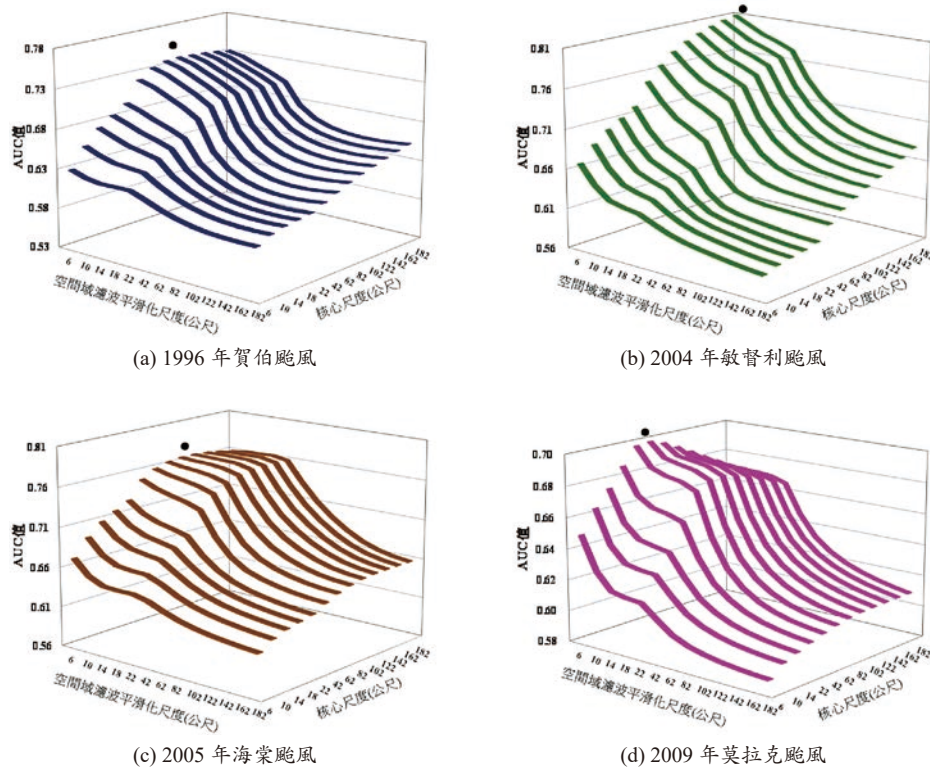


圖 10 曾文水庫集水區地形粗糙度因子不同尺度因子解釋事件誘發山崩之 AUC
(黑色圓點為 AUC 最大值)

表 2 曾文水庫集水區山崩潛感因子最適量測尺度對原尺度之 AUC 提升率

事件山崩目錄		賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
地形因子					
坡度	平滑化移動視窗法	12.2%	20.6%	10.4%	3.6%
	大核心網格法	11.6%	20.8%	9.4%	3.2%
坡向	平滑化移動視窗法	5.2%	9.0%	5.2%	2.0%
	大核心網格法	4.6%	5.6%	4.8%	1.8%
地形粗糙度		21.8%	28.6%	19.0%	10.0%
坡度粗糙度		14.6%	27.8%	19.0%	12.4%
平面曲率	平滑化移動視窗法	13.8%	21.0%	16.4%	23.2%
	大核心網格法	16.0%	24.2%	19.4%	27.6%
縱向曲率	平滑化移動視窗法	18.4%	19.8%	11.6%	18.2%
	大核心網格法	20.2%	28.2%	21.4%	28.6%
切向曲率	平滑化移動視窗法	15.8%	23.6%	18.6%	24.8%
	大核心網格法	17.8%	28.6%	22.6%	29.6%
總曲率	平滑化移動視窗法	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	大核心網格法	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

由賀伯颱風、敏督利颱風、海棠颱風及莫拉克颱風誘發山崩事件分別建立的山崩潛感模型，各模型解釋其誘發山崩之成功率曲線 AUC 值如表 3 所示，山崩潛感圖以賀伯颱風為例，如圖 11。平滑化移動視窗法及大核心網格法最適尺度因子建立之事件型山崩潛感

模型其成功率曲線 AUC 值相近，與原尺度山崩潛感模型相比，敏督利颱風及海棠颱風之事件型山崩潛感模型成功率曲線之 AUC 值由可提升為佳；賀伯颱風及莫拉克颱風也有明顯提升。

表 3 曾文水庫集水區事件型山崩潛感分析 AUC 值

模型降雨事件 尺度量測方法	賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
3 × 3 核心 (原尺度)	0.717	0.734	0.793	0.705
平滑化移動視窗法 (最適尺度)	0.774	0.841	0.857	0.753
大核心網格法 (最適尺度)	0.772	0.845	0.855	0.754

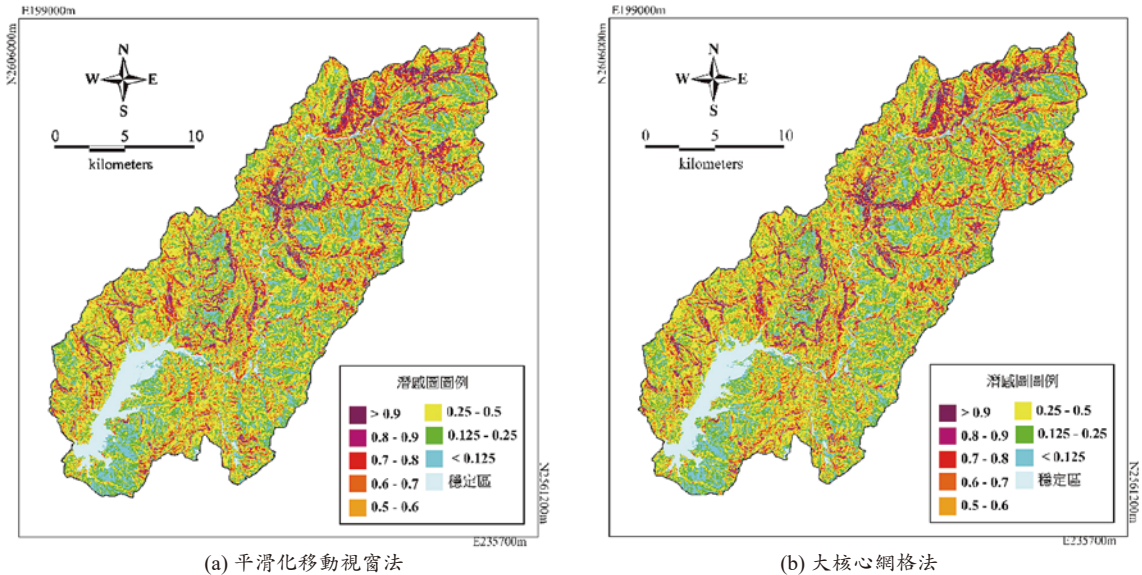


圖 11 曾文集水區賀伯颱風事件型山崩潛感圖

山崩潛感模型交叉驗證

事件型山崩潛感模型在預測其他事件也能表現良好時，表示該模型為一個穩定的山崩潛感模型。本研究使用共 4 場颱風誘發山崩目錄建立事件型山崩潛感模型，將模型進行交叉驗證，討論個別模型預測結果的穩定性，如表 4 至表 6。其中，賀伯颱風的兩種方法最適尺度山崩潛感模型均表現出對其他事件優秀的預測能力，是 4 個事件型山崩潛感模型中最佳者，其次是敏督利颱風模型。

由表 4 至表 6 可知，4 個事件最適尺度山崩潛感模型比原尺度 3 × 3 核心模型的成功率及預測率之 AUC 值均提升不少。由表 7 及表 8，各事件最適尺度山崩潛感模型的模型成功率提升了約 10% 至 20% 以上；模型預測率最高可提升到 18%，平均提升了 11% 以上。

表 4 曾文水庫集水區事件型山崩潛感分析交叉驗證 AUC (原尺度)

事件模型 驗證	賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
賀伯颱風	0.717	0.713	0.708	0.699
敏督利颱風	0.724	0.734	0.707	0.712
海棠颱風	0.736	0.727	0.793	0.741
莫拉克颱風	0.673	0.649	0.685	0.705

表 5 曾文水庫集水區事件型山崩潛感分析交叉驗證 AUC (平滑化移動視窗法)

事件模型 驗證	賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
賀伯颱風	0.774	0.756	0.753	0.742
敏督利颱風	0.815	0.841	0.791	0.789
海棠颱風	0.800	0.787	0.857	0.794
莫拉克颱風	0.719	0.712	0.710	0.753

表 6 曾文水庫集水區事件型山崩潛感分析交叉驗證 AUC (大核心網格法)

事件模型 驗證	賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
賀伯颱風	0.772	0.756	0.751	0.741
敏督利颱風	0.816	0.845	0.792	0.790
海棠颱風	0.801	0.781	0.855	0.793
莫拉克颱風	0.723	0.710	0.713	0.754

表 7 曾文水庫集水區平滑化移動視窗法對比原尺度事件型山崩潛感分析交叉驗證 AUC 提升率

事件模型 驗證	賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
賀伯颱風	11.40%	8.60%	9.00%	8.60%
敏督利颱風	18.20%	21.40%	16.80%	15.40%
海棠颱風	12.80%	12.00%	12.80%	10.60%
莫拉克颱風	9.20%	12.60%	5.00%	9.60%

表 8 曾文水庫集水區大核心網格法對比原尺度事件型山崩潛感分析交叉驗證 AUC 提升率

事件模型 驗證	賀伯颱風	敏督利颱風	海棠颱風	莫拉克颱風
賀伯颱風	11.00%	8.60%	8.60%	8.40%
敏督利颱風	18.40%	22.20%	17.00%	15.60%
海棠颱風	13.00%	10.80%	12.40%	10.40%
莫拉克颱風	10.00%	12.20%	5.60%	9.80%

討論

因子量測尺度與判別山崩 / 非山崩地形能力之關係

一般認為因子量測尺度大小可能與山崩平均面積大小有關，更重要的原因是在 DEM 平滑化或是取大核心的過程中，整體 DEM 的因子值分布都發生變化，對山崩潛感分析而言，最適尺度其實是最能區分山崩與非山崩地形的尺度。以海棠颱風山崩目錄的坡度百分比分布為例（圖 12），研究區內原始 2 m DEM 非山崩組的高坡度佔比很高，雖然山崩的坡度分布有更偏高的趨勢，但是區別尚不大。以經由 31×31 網格平滑化 DEM 所產製之坡度百分比，非山崩組的坡度分布趨向更緩，山崩組的坡度分布雖亦趨緩，但仍具有顯著的高坡度分布特性，而使山崩組與非山崩組產生顯著的差異，此點亦可由圖中判別子數值佐證之，判別子是以山崩與非山崩組的平均數差值除以該因子的綜合標準差（pooled standard deviation），以此標準化差異值可顯示兩組資料的區別性。而以 DEM 平滑化後與未平滑化之坡度分布相比，高坡度區的非山崩組減少比例較山崩組大，對應到成功率曲線中將可使 AUC 值變高。

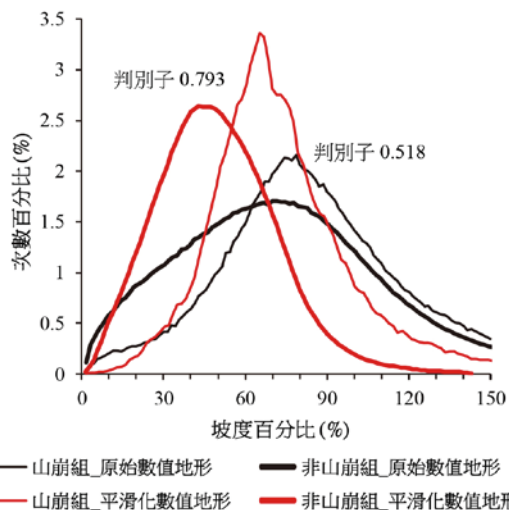


圖 12 海棠颱風山崩目錄以原始 DEM 與 31×31 平滑化 DEM 所得坡度百分比因子之山崩與非山崩組次數百分比分布圖

因子量測尺度與不同事件山崩目錄之關係

各因子解釋不同颱風誘發的山崩目錄時，AUC 會有變化，最適尺度也會有變化，直觀上會認為可能山崩規模較大的山崩目錄，最適量測尺度也會比較大，但實際上並非如此。以坡度因子為例，最適尺度最大者為 2004 年敏督利颱風，最適尺度最小者為 2009 年莫拉克颱風。敏督利颱風所誘發的山崩多為面積 0.1 公頃以下的小型岩屑崩滑（圖 3）；而莫拉克颱風在曾文水庫集水區全區降下 2,000 mm 以上的雨量，比其他事件誘發更多大面積的山崩（圖 3），山崩範圍較大自然會包含到較多坡度較緩的坡面，山崩組的坡度分布就比其他事件趨緩，如圖 13。若平滑化或計算核心尺度過大，反而會使山崩組坡度分布更加趨緩而與非山崩組趨近以致無法有效區別。

曲率類因子跟山崩目錄的山崩面積分布似乎較無關聯，可能因為不同山崩目錄其雨場分布不同，山崩主要分布區位的地形地質特性也會有所不同，山崩組的因子數值分布也就有所差異，而非山崩組則大略近似，因此達到山崩組與非山崩組最大區別的尺度會不一樣。

因子量測尺度與不同量測方法之關係

由表 2 可觀察到，本研究兩種不同量測方法中，平滑化移動視窗法對坡度及坡向的 AUC 值提升率是比較高的，不過兩種量測方法對坡度及坡向的提升率是相近的；而大核心網格法對平面曲率、縱向曲率及切向曲率的 AUC 值提升率則有更顯著的優勢，可能因為以較大的核心對原始 DEM 所取得的曲率值，比平滑化後的 DEM 更能表現與山崩相關的較大範圍山坡坡型，

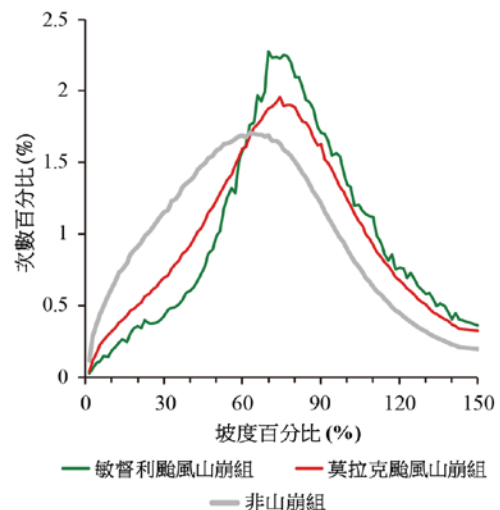


圖 13 敏督利颱風與莫拉克颱風山崩目錄之坡度百分比因子山崩與非山崩組次數百分比分布圖（原始 DEM 3×3 核心計算）

這也與繆念澤 2021 年在石門水庫集水區以 10 m × 10 m DEM 進行因子量測尺度研究的成果相同^[22]。

因子量測尺度與不同解析度數值地形之關係

本研究以減幅為 2 m 的 LiDAR DEM 與減幅為 10 m 的航測 DEM 之地形因子最適尺度^[22,34]進行比較。對坡度因子而言，以不同解析度數值地形所得之最適量測尺度相近，約落在 40 m 到 70 m 之間。曲率類因子除總曲率之外，不同解析度數值地形對尺度略有 20 ~ 60 m 差異。總曲率因子於 10 m 航測 DEM 依誘發山崩事件不同及量測方法不同會有大小不一定的最適量測尺度，但於 2 m LiDAR DEM 無論哪一期山崩目錄之總曲率因子，AUC 值最高者都是於未平滑化 DEM 以 3 × 3 核心計算（圖 9），也就是最適尺度為 6 m，且 AUC 值較 10 m 航測 DEM 之總曲率有顯著提升，這可能顯示 LiDAR DEM 更精細的地形資訊對於以總曲率解釋山崩是更有幫助的。

結論

山崩潛感分析中的許多潛感因子是直接或間接取自地形資料，例如：坡度、粗糙度、曲率等地形因子。使用不同的量測尺度時，地形資料運算出來的因子會有不同的輸出值，且並非高解析度地形資料就可以得到高效度的因子。對一個特定區域的特定目的而言，會有一定的最適量測尺度。

本研究分析結果，不同山崩潛感因子有不同的最佳的量測尺度，而非最小量測尺度或某固定的量測尺度。同一地區坡度因子解釋不同颱風誘發的山崩目錄時，AUC 會有變化，最適尺度也會有變化，這是因為不同降雨量所誘發的山崩目錄規模不同，山崩面積較大者會包含到更多坡度較緩的坡面，山崩組的坡度分布偏緩，若量測尺度過大，可能會使山崩組坡度分布數值與非山崩組趨近而更無法有效區別，因此最適量測尺度會比較小。另外，受雨場分布不同影響，各山崩目錄之主要山崩分布區位其地形特性也會有所不同，山崩組的因子數值分布也就有些差異，在變化量測尺度時，達到山崩組與非山崩組最大區隔的尺度也就不一樣。

本研究利用平滑化移動視窗法及大核心網格法產製不同量測尺度的地形因子，發現大核心網格法對於地

形曲率的 AUC 提升效果比平滑化移動視窗法更顯著，兩種方法的最適量測尺度略有差異；坡度因子則以平滑化移動視窗法產製效果更佳，而兩種方法的最適量測尺度幾乎相同，這也與繆念澤在石門水庫集水區以 10 m DEM 所得之坡度因子最適量測尺度近似^[22]，坡度因子大致以 40 m 至 60 m 左右為最適量測尺度。

本研究在曾文水庫集水區針對不同的四場颱風誘發山崩事件，分別以三種尺度建立事件型山崩潛感模型，包括原尺度 3 × 3 核心（6 m × 6 m）、平滑化移動視窗法最適尺度及大核心網格法最適尺度。平滑化移動視窗法及大核心網格法所建立之事件型山崩潛感模型其成功率曲線 AUC 值相近，與原尺度山崩潛感模型相比，敏督利颱風及海棠颱風之事件型山崩潛感模型 AUC 值由可提升至佳；賀伯颱風及莫拉克颱風模型 AUC 值也有明顯提升。

本研究並將各山崩潛感模型進行交叉驗證，討論個別模型預測結果的穩定性。賀伯颱風的兩種方法最適尺度山崩潛感模型均表現出對其他事件優秀的預測能力，是四個事件型山崩潛感模型中最佳者，其次是敏督利颱風模型。四個事件最適尺度山崩潛感模型比原尺度 3 × 3 核心模型的成功率及預測率之 AUC 值均提升不少。各事件最適尺度山崩潛感模型的模型成功率提升了約 10% 至 20% 以上；模型預測率最高可提升到 18%，平均提升了 11% 以上。

誌謝

本研究為科技部專題研究計畫 109 年度（編號：MOST 109-2116-M-008-017）之研究成果，承蒙科技部經費補助使本研究得以順利完成。所使用之 2 m LiDAR 數值地形係由經濟部中央地質調查所提供，並於地調所內產製各尺度地形因子圖層，助益良多，謹致謝忱。

參考文獻

1. Paudel, U., Oguchi, T., and Hayakawa, Y., (2016), "Multi-resolution landslide susceptibility analysis using a DEM and random forest," *International Journal of Geosciences*, Vol. 7, No. 5, pp. 5-18.
2. Lee, C.T. (2014), Multi-stage statistical landslide hazard analysis: earthquake-induced landslides, *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Vol. 3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 205-211.
3. Lee, C.T. (2014), Multi-stage statistical landslide hazard analysis:

- rain-induced landslides, *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Vol. 3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 291-298.
4. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loya, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A., (2012), "Use of LIDAR in landslide investigations: a review," *Natural hazards*, Vol. 61, No. 1, pp. 5-28.
 5. Schulz, W.H. (2004), "Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington," *US Geological Survey Open-File Report*, Vol. 1396, pp. 1-11.
 6. Derron, M.H. and Jaboyedoff, M., (2010), Preface "LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, No. 9, pp. 1877-1879.
 7. Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., and Fujisawa, K. (2009), "LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan," *Geomorphology*, Vol. 113, No. 1-2, pp.57-69.
 8. Haneberg, W.C., Cole, W.F., and Kasali, G., (2009), "High-resolution lidar-based landslide hazard mapping and modeling, UCSF Parnassus Campus, San Francisco, USA," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 68, No. 2, pp. 263-276.
 9. Lee, C.T. and Ji, T.C., (2020), "The Use of LiDAR DTM in Landslide Susceptibility/Hazard Analysis," *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vol. 30, pp. 7694.
 10. Wilson, J.P. and Gallant, J.C. (2000), *Terrain analysis, principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 51-58.
 11. 李錫堤、潘國樑、林銘郎 (2003), 「山崩調查與危險度評估－山崩潛感分析之研究 (1/3)」, 經濟部中央地質調查所報告, 第 92-11 號, 新北。
 12. 李錫堤、潘國樑、林銘郎、董家鈞 (2007), 「山崩土石流調查及潛感分析研究－大漢河流域、大甲河流域及濁水河流域」, 集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫, 經濟部中央地質調查所委辦計畫編號 095-B-08-12-2-001-01-0, 新北。
 13. Sulaiman, W.N.A., Rosli, M.H., Abu Samah, M.A., and Kamarudin, M.K.A., (2017), "Landslide susceptibility mapping: effect of spatial resolution towards the prediction of landslide prone area in a tropical catchment," *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 44, No. 2, pp. 494-507.
 14. Wang, T., Liu, J.M., Shi, J.S., and Wu, S.R. (2017), "The influence of DEM resolution on seismic landslide hazard assessment based upon the Newmark displacement method: a case study in the loess area of Tianshui, China," *Environmental Earth Sciences*, Vol. 76, No. 17, pp. 1-10.
 15. Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., Mihir, M., and Guzzetti, F., (2018), "A review of statistically based landslide susceptibility models," *Earth Science Review*, Vol. 180, pp. 60-91.
 16. Claessens, L., Schoorl, J.M., and Veldkamp, A. (2007), "Modelling the location of shallow landslides and their effects on landscape dynamics in large watersheds: an application for Northern New Zealand," *Geomorphology*, Vol. 87, pp. 16-27.
 17. Schlögel, R., Marchesini, I., Alvioli, M., Reichenbach, P., Rossi, M., and Malet, J.P. (2018), "Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models," *Geomorphology*, Vol. 301, pp. 10-20.
 18. Iwahashi, J., Kamiya, I., and Yamagishi, H. (2012), "High-resolution DEMs in the study of rainfall- and earthquake-induced landslides: use of a variable window size method in digital terrain analysis," *Geomorphology*, Vol. 153-154, pp. 29-38.
 19. Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H.R., Besalatpour, A.A., Conoscenti, C., and Van Oost, K. (2018), "Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping," *Geoderma*, Vol. 330, pp. 65-78.
 20. 岩橋純子、神谷泉、山岸宏光 (2009), 「LiDAR DEM を用いた表層崩壊のアセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定」, 地形, 第三十巻, 第一號, 第 15-27 頁。
 21. Sirbu, F., Drăguț, L., Oguchi, T., Hayakawa, Y., and Micu, M., (2019), "Scaling land-surface variables for landslide detection," *Earth and Planetary Science*, Vol. 6, No. 44, pp. 1-13.
 22. 繆念澤 (2021), 「山崩潛感因子最適測量尺度探討－以石門水庫集水區山崩潛感分析為例」, 碩士論文, 國立中央大學應用地質研究所, 桃園。
 23. Lee, C.T. (2013), Re-evaluation of Factors Controlling Landslides Triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, *Earthquake-Induced Landslides*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 213-224.
 24. 侯秉承、黃建忠、李錫堤、胡賢能 (2011), 「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置－集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫」, 經濟部中央地質調查所研究報告, 第 410-423 頁, 新北。
 25. 侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉 (2014), 「空載光達數值地形產製與質災害的應用」, 航測及遙測學刊, 第十八卷 第二期, 第 93-108 頁。
 26. Swets, J.A. (1988), "Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems," *Science*, Vol. 204, No. 4857, pp. 1285-1293.
 27. Chung, C.F. and Fabbri, A.G. (1999), "Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping," *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, Vol. 65, No. 12, pp. 1389-1399.
 28. Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S., and Gupta, R.P. (2012), "Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping – a review," *Journal of South Asia Disaster Studies*, Vol. 2, No. 1, pp. 81-105.
 29. Lee, C.T., Huang, C.C., Lee, J.F., Pan, K.L., Lin, M.L., and Dong, J.J. (2008), "Statistical Approach to Earthquake-Induced Landslide Susceptibility," *Engineering Geology*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 43-58.
 30. Lee, C.T., Huang, C.C., Lee, J.F., Pan, K.L., Lin, M.L., and Dong, J.J. (2008), "Statistical approach to storm event-induced landslide susceptibility," *Natural Hazard and Earth System Sciences*, Vol. 8, pp. 941-960.
 31. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P. (1999), "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy," *Geomorphology*, Vol. 31, pp. 181-216.
 32. Lee, C.T. and Fei, L.Y. (2015), Nationwide landslide hazard analysis and mapping in Taiwan, *Engineering Geology for Society and Territory*, Springer International Publishing, 2, pp. 971-974.
 33. Chung, C.F. and Fabbri, A.G. (2003), "Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping," *Natural Hazards*, Vol. 30, pp. 451-472.
 34. 李錫堤 (2020), 「山崩潛感因子之測量尺度及解釋山崩分布的最適尺度探討」, 科技部補助專題研究計畫成果報告, 第 4-12 頁, 台北。



應用 UAV 空拍影像 和 BASEGRAIN 軟體 分析 河道泥沙粒徑分布 之研究

Research on Analyzing Riverbed Sediment Particle Size Distribution Using UAV Aerial Imagery and Basegrain Software

陳祥偉／國立成功大學水利及海洋工程系 碩士

賴東暘／國立成功大學水利及海洋工程系 博士候選人

詹錢登*／國立成功大學水利及海洋工程系 特聘教授

泥沙是河床的重要組成物質，泥沙的顆粒大小與分布會影響河道水流及輸沙特性，進而影響河道形貌及生態環境，因此瞭解河道泥沙顆粒大小與分布對於河道環境管理具有重要意義。傳統河道泥沙調查方法需要大量時間和人力去執行，成本高昂，無法進行大範圍及高頻率的調查。本研究探討使用無人機空拍技術和 BASEGRAIN 顆粒判釋軟體進行河床泥沙顆粒尺寸調查的適宜性。首先進行礫石顆粒的 BASEGRAIN 影像判釋室內試驗，並將結果與人工線採樣方法所取得的粒徑分布進行比較，選取合適之 BASEGRAIN 影像分析參數以獲取較佳的判釋結果。然後進行現地河道的無人機空拍，取得河道高解析度照片及正射影像，使用 BASEGRAIN 軟體判釋河床顆粒粒徑大小與分布。研究結果顯示合理的參數設定是提升 BASEGRAIN 判釋結果的重要因素，室內試驗的分析對象及工作環境較為單純，可取得比較好的結果。河道現地試驗的結果顯示因為河道現場環境較為複雜，BASEGRAIN 影像判釋和人工線採樣法所得河床粒徑差異較大，其相對差異約在 $\pm 70\%$ 以內。

關鍵詞：泥沙粒徑、BASEGRAIN 軟體、影像判釋、粒徑分布

ABSTRACT

Sediment is a crucial component of riverbeds, and the size and distribution of sediment particles can impact the flow dynamics and sediment transport of rivers, thereby influencing river morphology and ecological environment. Therefore, understanding the sediment-size distribution is of significant importance for riverine environmental managements. Traditional methods for sediment investigation in riverbeds require a substantial amount of time and manpower, resulting in high costs, making it challenging to conduct large-scale and high-frequency surveys. This study explores the suitability of utilizing unmanned aerial vehicle (UAV) aerial imaging technology and the BASEGRAIN software for assessing riverbed sediment. Initially, indoor experiments

were conducted using BASEGRAIN interpretation for gravel particle analysis, and the results were compared with that obtained by a manual line-sampling method, so as to determine appropriate BASEGRAIN parameters. Subsequently, UAV aerial imaging was carried out in the field to obtain high-resolution photographs and orthoimages of the riverbed, and the BASEGRAIN was used to interpret sediment-size distribution of riverbed. The research findings indicate that appropriate parameter settings are a crucial factor in improving BASEGRAIN interpretation results. Indoor experiments, with simpler analysis subjects and environments, yielded better interpretation results. Field investigations showed that due to the complexity of the riverine environment, there were significant differences in sediment size distributions by the BASEGRAIN interpretation and the manual line sampling, with a relative difference within $\pm 70\%$.

* 通訊作者，cdjan@ncku.edu.tw

Keywords: Sediment size, BASEGRAIN software, Image interpretation, Size distribution

前言

河床粒徑為河道內地形的最小尺度，粒徑之分布影響了水流阻力、底床剪應力和河床質傳輸，且為數值模擬的重要參數—粗糙度，瞭解其大小的分布與變異將有助於釐清水流流動與泥沙運輸與堆積^[1-3]，亦可用於土石流流變參數之推估。因此，河床質粒徑分佈對於河道流況理解、河流調控和管理極為重要。

河床質調查主要目的在於了解河床粒徑大小及分布。篩分析是泥沙粒徑分布分析常用的方法。河道的中、上游河段，常為礫石河段，河床泥沙粒徑分布廣泛，細顆粒泥沙可以現地取樣之後帶回試驗室進行篩分析，但是過大的礫石顆粒常超出人力可操作範圍，無法現地取樣進行篩分析。依據前人之研究，礫石河床取樣方法大致可區分為體積取樣法、網格取樣法與面積取樣法^[4-7]。因調查目的不同，河床質調查取樣應有表層與底層分別。當需要取樣底層樣品時，僅能採用體積取樣法，表層樣品可以用網格法與面積法進行取樣。

目前台灣較常使用的河床質採樣方法為體積採樣法，採取 1.0 m 長 × 1.0 m 寬 × 1.0 m 深的試體進行分析，相當費時費力。由於河道又寬又大，使用體積採樣法常出現取樣範圍過小，或是取樣區顆粒過大，無法採樣的問題。對於礫石河床，網格取樣法是一種選擇，例如卵石取樣法（Pebble count），取得河床表面的礫石顆粒大小及分布。近年來無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）空拍技術及正射影像的處理技術的快速發展，以及粒徑判釋軟體的出現，例如 BASEGRAIN 粒徑判釋軟體，使得大範圍河道泥沙粒徑的調查，出現了嶄新的機會^[8-11]。

有鑑於此，為了探討 BASEGRAIN 粒徑判釋軟體適用性，本研究首先進行室內礫石粒徑判釋實驗，用以檢測 BASEGRAIN 軟體對於顆粒粒徑判釋結果的準確度。然後再進行河道泥沙卵石取樣法現地調查，以及進行 UAV 空拍取得河道表面顆粒影像，運用 BASEGRAIN 軟體判釋河道粒徑分布，判釋結果與卵石取樣法^[12,13] 現地調查相比較，分析其間之差異。研究流程圖如圖 1 所示^[14]。

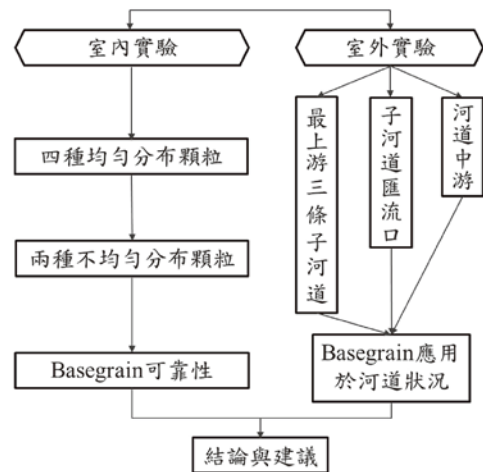


圖 1 影像粒徑判釋室內與現地實驗流程圖

粒徑判釋 BASEGRAIN 軟體

本研究使用 BASEGRAIN Version 2.2.0.4 版進行泥沙粒徑判釋分析。BASEGRAIN 是種以 MATLAB 為基礎的自動目標檢測軟體，應用於河道無黏性礫石底床的俯視圖照片進行粒徑分析。該軟體由瑞士蘇黎世聯邦理工學院水利、水文及冰河工程實驗室所開發出來的影像判釋軟體^[15]。本研究使用 BASEGRAIN Version 2.2.0.4 版。其特色如下：

1. 以數位相機拍攝照片，可進行大面積拍攝，資料收集迅速，且如果照片有標記經緯度，若於 GoogleEarth 開啟粒徑分布結果則會自動進行地理位置標記。
2. 此軟體免費且源代碼開放。軟體中有五步驟，其中有許多參數可進行調整，讓影像中不同顆粒狀況可以有對應參數組合，進而得到較佳結果。
3. 在參數調整完後，可透過圖形用戶介面（Graphical User Interface, GUI）進行手動後處理，調整判釋不完整之顆粒，最後粒徑分布結果可用 Excel 或 KML 檔進行輸出。

BASEGRAIN 藉由圖形用戶界面進行預處理及後處理。是應用雙灰度閾值進行確認間隙和預估可能間隙，接著應用底帽濾波器將噪聲去除。利用 Canny 和 Sobel 方法判斷強邊緣以及弱邊緣，降低噪聲對邊緣判定的干擾。以分水嶺方法確認顆粒切割是否會過度切割。使用 BASEGRAIN 軟體進行顆粒粒徑影像判釋流程如圖 2 所示。

各步驟簡述如下：

影像拍攝

相機以垂直地面方式拍攝，照片與照片之間重疊

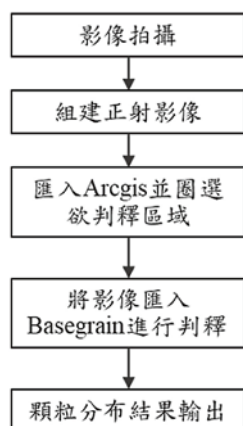


圖 2 使用 BASEGRAIN 粒徑判釋流程

率保持 75%。在室內實驗，以 1.0 m × 1.0 m 方框為實驗區域，拍攝高度約為 20 cm。室外現地調查以 1.0 m × 1.0 m 河道表面為調查區域，拍攝高度約為 20 m，地面解析度約為 0.55 cm/px。

組建正射影像

將拍攝照片匯入 pix4D 軟體，以運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 輸出稀疏點雲，再接著以 Clustering Multi-View Stereo (CMVS) 進行照片聚類以及密集匹配算法 (Patch-based Multi-View Stereo, PMVS) 輸出稠密且質量較高的點雲，產製正射影像。再搭配控制點矯正空間誤差。接著利用地理資訊系統 (Arcgis) 將目標影像以 600 dpi (dot per inch) 輸出，將此結果進行影像判釋。

影像匯入 BASEGRAIN

將正射影像匯入 BASEGRAIN 進行判釋分析，處理過程如圖 3 所示。不同步驟負責處理不同圖像特性，尤其雙灰度閾值以及分水嶺切割法尤為重要。

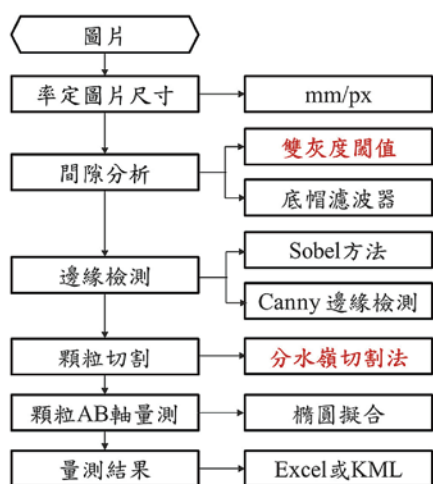


圖 3 BASEGRAIN 影像判釋處理過程

BASEGRAIN 判釋處理過程說明：

間隙分析 (步驟一、二)

第一個步驟是使用雙灰度閾值做間隙的分割，如大津演算法 (Otsu's method) 做二值化的閾值分割，大津算法也稱為最大方差法，是一種用於自動圖像閾值處理的有效算法，Otsu's method 的目標是找到一個最佳的閾值，將灰階影像分為目標和背景兩類。閾值的選擇是使得目標和背景區域內的方差最大化，而區域與區域之間的方差最小化。使用此方法來確認真正間隙，以及預估可能間隙。接著是底帽濾波器 (Bottom-hat transformation) 處理，它是圖像形態學中的方法。意指在原始圖像中應用一個結構元素，並將與其原始圖像進行差分。對原始圖像進行膨脹，而後將膨脹後的圖像減去原始圖像。底帽轉換可以用來增強圖像中小尺度的細節。

邊緣檢測 (步驟三)

在 BASEGRAIN 模式中邊緣檢測採用的是 Canny 邊緣檢測法。使用高斯濾波器於邊緣檢測前平滑圖像，減少噪聲 (noise) 以及不必要的邊緣檢測。計算圖像中每個像素的梯度大小和方向。Sobel 算子是一種用於圖像處理中的梯度計算算子，其能在圖像中找到梯度變化最大的位置，進而檢測出圖像中的邊緣。使用非極大值抑制提取圖像中的邊緣，再來應用雙閾值來將強邊緣與弱邊緣分開，最後一步是將弱邊緣連接到強邊緣。若發現弱邊緣連接於強邊緣，則將其視為邊緣的一部分。此過程重複進行，直到所有弱邊緣都連接到強邊緣或被刪除為止。

顆粒切割 (步驟四)

分水嶺變換 (Watershed Transform) 是一種基於圖像強度或梯度的分割方法，可用於將圖像分割成不同的區域，從而提取圖像中的對象或邊界 [16]。分水嶺變換的基本概念是將圖像看作一個地形圖，其高度表示像素的強度或梯度值。通過將高度較低的區域看作「山谷」，高度較高的區域看作「山峰」，則可以在圖像中找到「分水嶺」，使得水從這些分水嶺流下去，並最終流入「匯聚盆地」，形成不同的分割區域。

顆粒 AB 軸量測 (步驟五)

以正交化二階中心矩方式，橢圓擬合目標顆粒俯視圖。而短軸即 b 軸是顆粒特徵直徑，最後在消除未完全包含在邊界內顆粒，避免統計特徵粒徑時產生誤差。

量測結果

軟體是以線採樣法 Fehr^[17] 統計顆粒數量，進而去計算影像中顆粒的特徵粒徑。粒徑分布結果以 Excel 檔案或帶有地理標記之 KML 檔案輸出，KML 檔案可由 Google Earth 開啟。

BASEGRAIN 參數檢定

BASEGRAIN 在影像處理過程大致上可以分為五個步驟。分析時需要進行相關參數的選擇與調整。雖然有預設參數值，但是不同情況需要不同參數組合，才能達到較好的判釋結果。其中確認灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 以及分水嶺橋最小允許長度 (areaCutWW [px]) 對於影像判釋結果的影響最為明顯。其次是中值濾波器參數 (medfiltsize10 [px])、灰度閾值的大小 (bloSizG [px])、無法檢測細粒料比例 (Corrfine1) 及影像線採樣間距 (distFehr [px]) 等參數。

接下來對確認灰度閾值乘數、分水嶺橋最小允許長度、與中值濾波器大小進行介紹。由於步驟二、三及五的參數變動對判釋結果不顯著，本研究採用預設值。影像判釋中須注意目標顆粒內判釋情況以及目標顆粒和背景 (細粒料區域，如泥沙區域) 判釋狀況，以下說明兩情況。首先是顆粒內判釋情況，圖 4 上方判釋圖設置 facgrayhr1 (0.8)。facgrayhr1 (0.8) 較大時對於顏色深淺分割的較細，對於確認間隙 (圖中黑色區域為確認間隙區域，非綠色區域為可能間隙區域) 較為敏感。若單顆顆粒表面因凹凸不平導致有陰影遮擋，顆粒中顏色差異較大區域，就會導致判讀結果將單一顆粒分成不同的顆粒。圖 4 下方判釋圖設置 facgrayhr1 (0.4)，facgrayhr1 (0.4) 數值較小的時候可以改善大顆粒因為表面凹凸造成的過度切割。

再來觀察目標顆粒和背景，圖 5 上方判釋圖設置 facgrayhr1 (1)。當 facgrayhr1 (1) 較大時，可以觀察到一些較為平坦無顆粒的區域被較正確的判釋出來，並沒有因為背景顏色相近而被判釋成為一個大顆粒。圖 5 下方判釋圖設置 facgrayhr1 (0.6)，當 facgrayhr1 (0.6) 較小時雖然大顆粒被判釋的較符合真實顆粒輪廓且過度分割情況有較為減少，可是一些本該不是顆粒的區域，因為背景顏色相同，所以被判釋為一顆大顆粒。

如圖 6 所示，調整分水嶺橋最小允許長度 (areaCutWW [px]) 可以檢測其顆粒的噪聲 (noise)，避免顆粒過度分割，或是避免將多顆顆粒判釋為單顆顆粒的錯誤判釋情況。圖 6 上方及下方判釋圖分

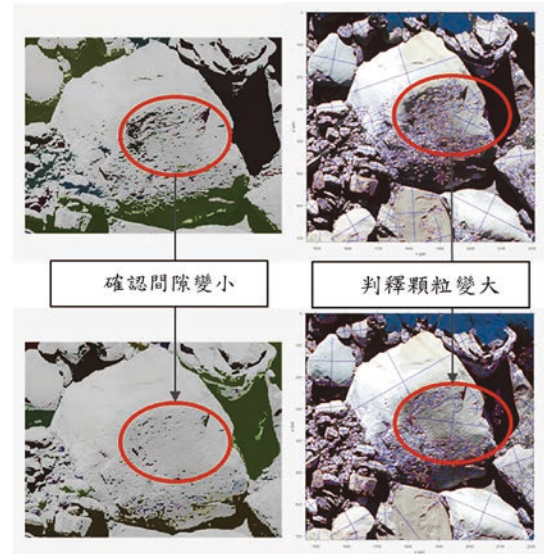


圖 4 調整灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 提升判釋結果

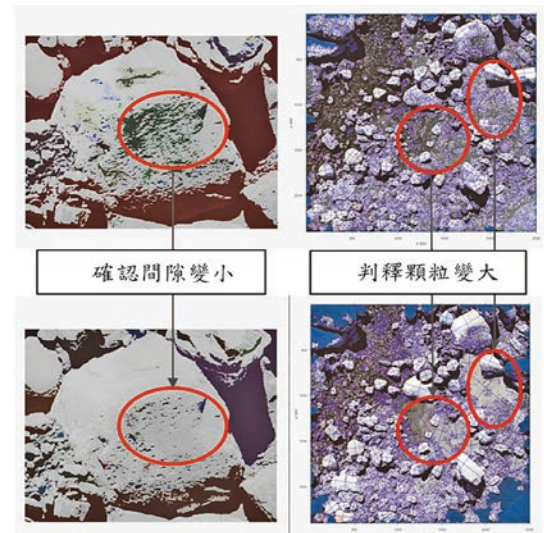


圖 5 調整灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 提升判釋結果

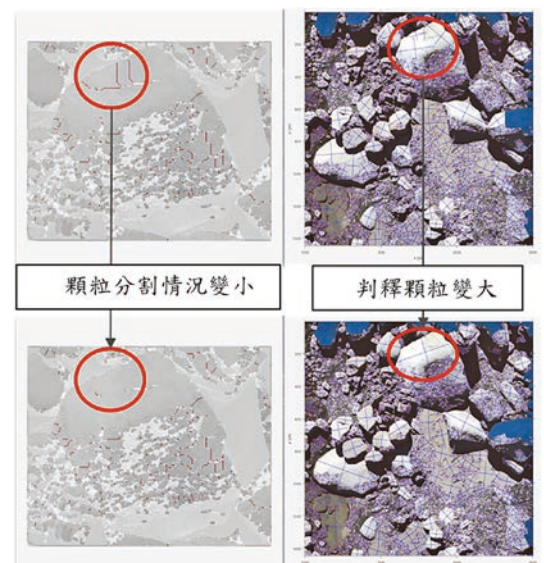


圖 6 調整分水嶺橋最小允許長度提升顆粒判釋結果

別設置 areaCutWW (80) 及 areaCutWW (40)。當 areaCutWW (80) 較大時，較適合在確認 facgrayhr1 較小時的情況，可以去判讀因為背景顏色差異較小所導致沒有被完整分割的顆粒。當 areaCutWW (40) 較小時，會將所被判讀的顆粒盡量不被過度切割，較適合在 facgrayhr1 較大時的情況，去避免因為背景顏色差異而被過度分割的顆粒。

粒徑判釋室內試驗

判釋試驗材料及流程

本研究室內粒徑判釋試驗採用的礫石材料，包含不同大小、表面紋理、顏色的白卵石、中白石、黑卵石、黑扁石，如圖 7 所示，其中白卵石表面較為光滑，紋理較一致，而中白石與黑扁石次之，黑卵石紋理較複雜。以白卵石為例，它的粒徑介於 8.5 mm 至 30.5 mm 之間。試驗時，如圖 8 所示，將礫石顆粒以單層緊密排列在 1.0 m × 1.0 m 的灰色方框內，單層緊密排列為顆粒緊密靠著相鄰粒徑，但不堆疊在一起。圖 8 中顯示紅色點為相機拍照點位。以相機離地約 20 公分



圖 7 室內粒徑判釋試驗所採用的礫石材料

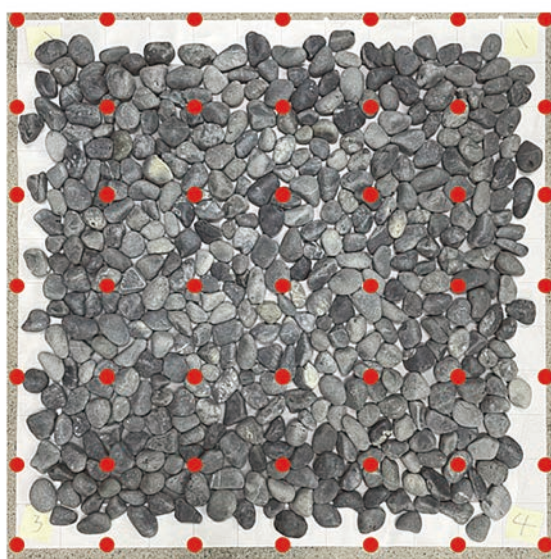


圖 8 礫石緊密排列在 1.0 m × 1.0 m 的方框內

且垂直俯視對準紅點拍攝總共 49 張照片，相鄰兩張照片的重疊率約 75%。將照片輸入 pix4D 軟體組建正射影像，照片重疊率達 75%，較容易取得效果較好的正射影像。將正射影像匯入 BASEGRAIN 軟體進行顆粒的判釋，影像判釋結果以人工方式檢視，並手動做必要之調整（切割、合併、消除）已取得較佳之粒徑判釋結果，最後將判釋結果輸出，進行粒徑分布分析。

接著，如圖 9 所示，以網格採樣法進行人工粒徑採樣，將採樣繩對準外框之直線，每隔 10 公分取樣一次，採樣基準為採樣繩正下方，輔以繫帶往正下方對準顆粒並採樣。總共取樣 121 顆顆粒，並以量測每顆顆粒的 a 軸（長軸）、b 軸（中軸）及 c 軸（短軸）。最後以顆粒 b 軸為代表粒徑，計算分析所有取樣顆粒粒徑的累積分布，並將此粒徑分布與影像判釋結果的粒徑分布做比較。室內試驗，每一組試驗所需時間大約三個小時，本研究室內顆粒粒徑判釋試驗流程圖如圖 10 所示。

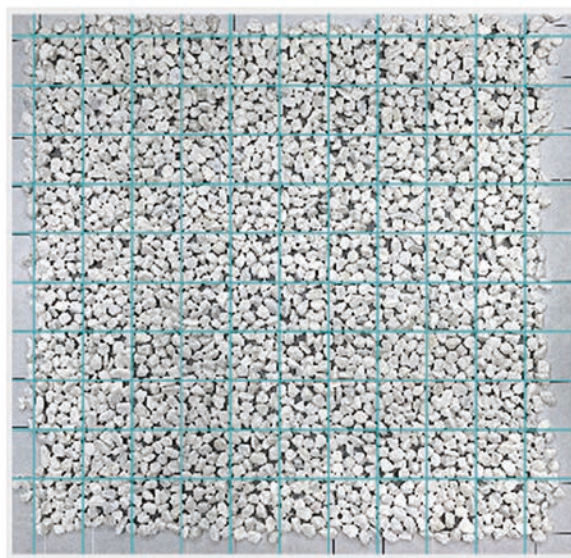


圖 9 網格採樣法進行人工粒徑採樣

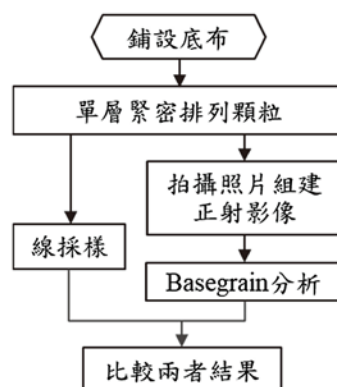


圖 10 顆粒粒徑判釋室內試驗流程圖

判釋結果與分析

首先對白卵石進行三次試驗，以了解試驗結果的一致性。白卵石的大小，大致均勻，平均 a 軸約 30 mm、b 軸約 23 mm、c 軸約 17 mm。每次試驗顆粒材料都是以單層、緊密、不堆疊的原則排列在 1.0 m × 1.0 m 的灰色方框內，如圖 11 所示。使用 BASEGRAIN 影像判釋分析結果如圖 12 所示，圖中藍線十字符號代表顆粒的長軸和短軸。三次試驗結果列於表 1 及圖 13，三次試驗結果的粒徑分布與其平均值的差異相當小，在 -5.03% 至 4.25% 之間，顯示相同材料顆粒判釋結果相當一致，具有很好的重複性。

表 2 顯示白卵石三次粒徑判釋試驗平均結果比較，由表中可知 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，粗顆粒有高估現象（圖 13）。如表中所列，在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約高估 7.94%；在細顆粒方面，

如 D_{16} ，前者約低估 6.83%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估 15.45%。

圖 14 為中白石粒徑判釋試驗結果比較圖，中白石粒徑大小相似，平均 a 軸約 27 mm、b 軸約 18 mm、c 軸約 10 mm。圖中也顯示 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象。在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約低估 1.0%；在細顆粒 D_{16} ，前者約低估 15%；但是在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者和後者大致相同，沒有顯著差異。

表 2 室內白卵石三次粒徑判釋試驗平均結果比較

代表粒徑 (mm)	影像判釋平均 (mm)	人工線採樣平均 (mm)	相對差異 (%)
D_{10}	17.50	19.67	-11.02
D_{16}	18.63	20.00	-6.83
D_{30}	21.33	21.67	-1.54
D_{50}	24.47	22.67	7.94
D_{60}	26.00	23.33	11.43
D_{84}	29.63	25.67	15.45

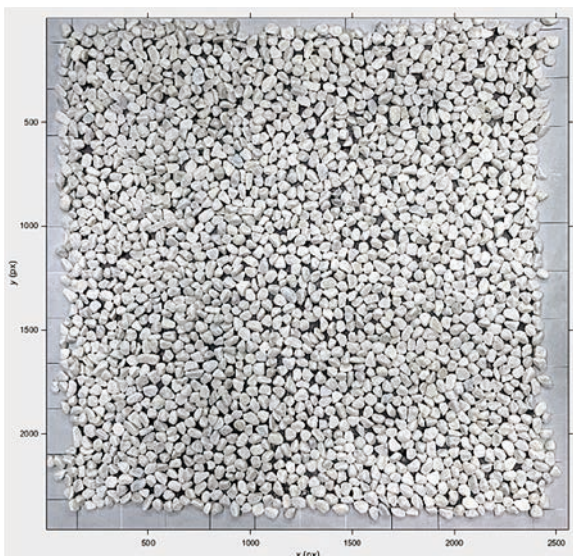


圖 11 白卵石材料鋪設在 1.0 m × 1.0 m 的方框內

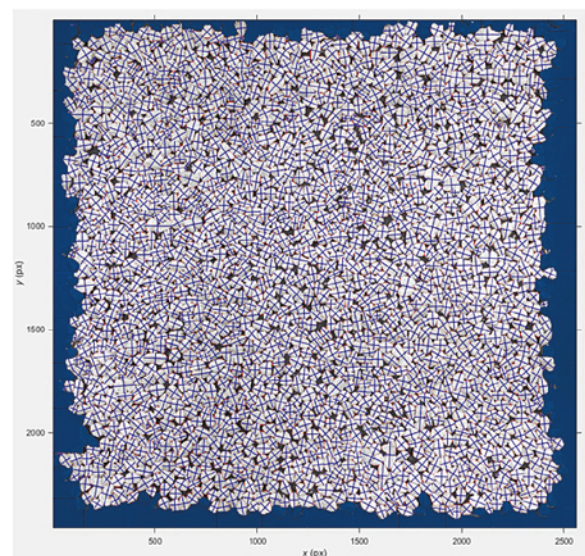


圖 12 使用 BASEGRAIN 影像判釋分析結果

表 1 室內白卵石三次試驗 BASEGRAIN 影像粒徑判釋結果及比較

累積機率 (%)	第 1 次 A (mm)	第 2 次 B (mm)	第 3 次 C (mm)	平均 D (mm)	(A-D)/D (%)	(B-D)/D (%)	(C-D)/D (%)
99	31.99	31.85	31.91	31.92	0.23	-0.21	-0.02
98	31.81	31.71	31.77	31.76	0.15	-0.17	0.02
95	31.30	31.27	31.35	31.31	-0.02	-0.12	0.14
90	30.45	30.54	30.66	30.55	-0.33	-0.03	0.36
84	29.42	29.66	29.83	29.64	-0.73	0.08	0.65
65	26.18	26.88	27.20	26.75	-0.14	0.47	1.67
50	23.62	24.68	25.13	24.48	-0.50	0.83	2.67
35	21.09	22.45	23.06	22.20	-0.00	1.13	3.87
30	20.25	21.49	22.23	21.32	-0.03	0.78	4.25
16	17.90	18.82	19.20	18.64	-0.97	0.97	3.00
10	16.90	17.67	17.91	17.49	-0.39	1.01	2.38

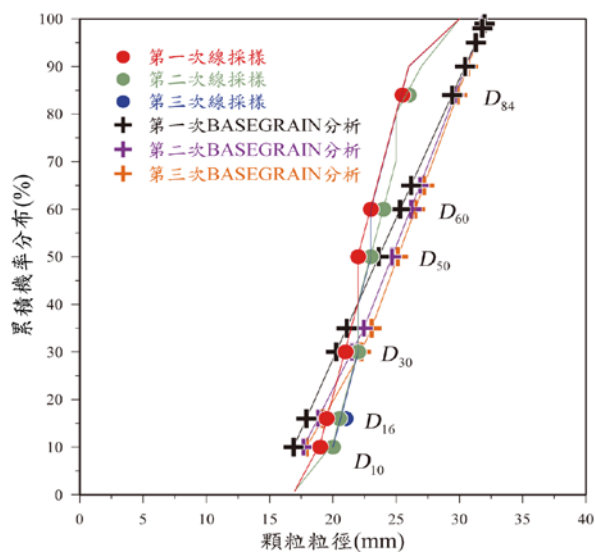


圖 13 白卵石三次粒徑判釋試驗結果比較圖

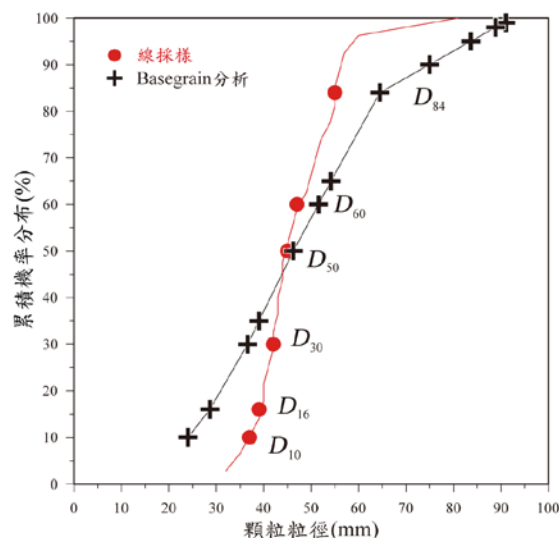


圖 15 黑卵石粒徑判釋試驗結果比較圖

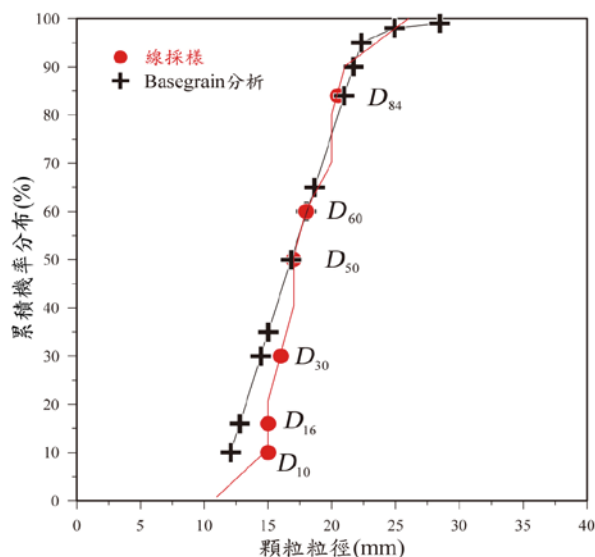


圖 14 中白石粒徑判釋試驗結果比較圖

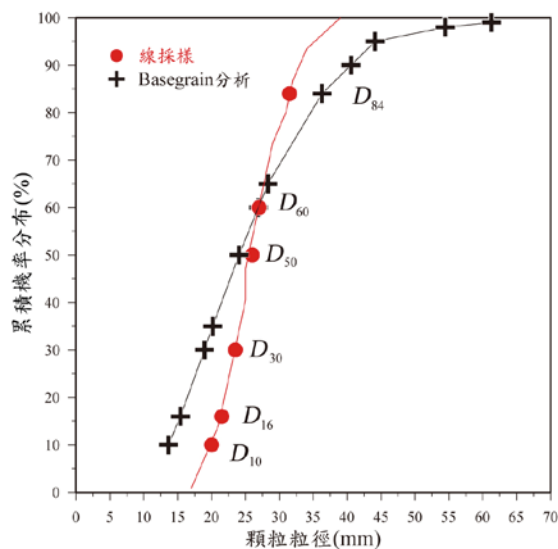


圖 16 黑扁石粒徑判釋試驗結果比較圖

圖 15 為黑卵石粒徑判釋試驗結果比較圖，黑卵石粒徑大小相似，平均 a 軸約 67 mm、b 軸約 47 mm、c 軸約 35 mm，相較於其他試驗材料，試驗採用的黑卵石比較大。圖中也顯示 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，而粗顆粒有高估現象。在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約高估 3.0%；在細顆粒 D_{16} ，前者約低估 27%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估 17%。黑卵石表面紋理為四種石頭中最為複雜之顆粒，BASEGRAIN 分析參數調整不好調整，小顆粒有過度分割的現象，而較大顆粒也有些許兩顆合併為一顆現象，導致細顆粒低估而粗顆粒高估的現象更為明顯。所幸，中值粒徑的判釋結果相當接近。

圖 16 為黑扁石粒徑判釋試驗結果比較圖，黑扁石粒徑大小相似，平均 a 軸約 39 mm、b 軸約 26 mm、c 軸約 19 mm。圖中也顯示 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，而粗顆粒有高估現象。在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約低估 8.0%；在細顆粒 D_{16} ，前者約低估 32%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估 17%。由黑扁石粒徑判釋試驗結果可知，細顆粒低估而粗顆粒高估的現象更為明顯，可能是由於黑色卵石上的顏色分布較不一致。所幸，中值粒徑的判釋結果大致相近。

綜整前述室內粒徑判釋試驗有白卵石（三組）、中白石、黑卵石及黑扁石共 6 組試驗。比較人工網格線採樣結果及 BASEGRAIN 影像分析結果，如圖 17 所

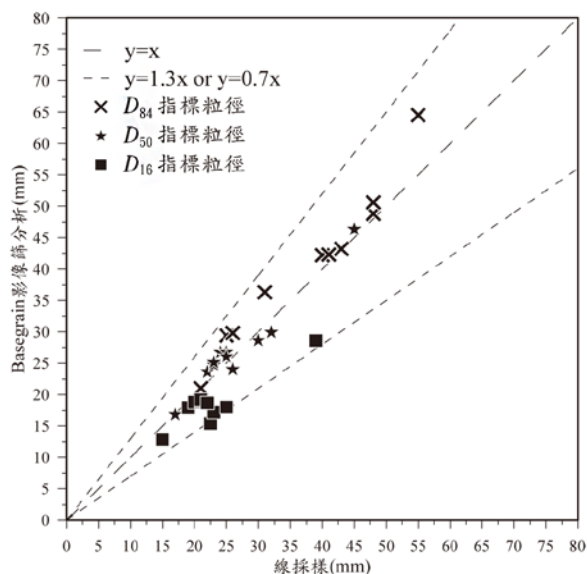


圖 17 本研究人工網格線採樣及 BASEGRAIN 影像分析結果之比較

示。BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，而粗顆粒有高估現象。在細顆粒 D_{16} ，前者約低估達 32%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估達 17%。細顆粒的差異高於粗顆粒的差異，所幸，中值粒徑的判釋結果大致相近，差異在 8% 以內。

根據本研究在參數調整方面所得經驗，若欲判釋影像中有部分大塊細粒料區域（如細沙），則參數設定範圍 medfilsiz10 (3)、facgrayhr1 (0.8 ~ 1)、blocSizG (32)、areaCutWW (0 ~ 20)，較能將大塊細粒料區域不被判釋出來，且顆粒分割較完整盡量不被過度分割。若判釋影像中顆粒佈滿影像且無部分大塊細粒料區域（如細沙），參數設定範圍為 medfilsiz 10 (8 ~ 12)、facgrayhr1 (0.5 ~ 0.7)、blocSizG (32)、areaCutWW (20 ~ 40)，有利粒徑判釋、確認間隙，避免過度分割。我們的經驗 facgrayhr1 與 areaCutWW 是影響影像判釋結果最為顯著的兩個參數。

此外，本研究室內試驗 BASEGRAIN 影像判釋經過測試最終採用的主要分析參數 medfilsiz10、blocSizG、facgraythr1、areaCutWW、corrfinel 及 distFehr 分別列於表 3。其餘參數採用軟體預設值。表 3 中 A 代表軟體預設值，B、C 及 D 代表白卵石三組（3 次）試驗採用值，E 代表中白石試驗採用值，F 代表黑卵石試驗採用值，及 G 代表黑扁石試驗採用值。這些參數值的設定會影響到 BASEGRAIN 影像判釋結

果，表中僅是本研究室內試驗 BASEGRAIN 影像判釋採用的較佳參數值。在實際應用時，這些參數除了參考採用軟體所提供的預設值之外，需要看影像及辨識主體的特性，調整較佳的參數以獲得較佳的 BASEGRAIN 影像判釋結果。

表 3 室內試驗四種材料採用 BASEGRAIN 影像判釋參數彙整表

參數	A	B	C	D	E	F	G
medfilsiz10	3	3	3	3	3	10	8
blocSizG	32	32	32	32	32	32	8
facgraythr1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8
areaCutWW	40	40	40	40	40	50	40
corrfinel	0.25	0	0	0	0	0	0
distFehr	50	224	227	233	220	100	290

現地河道粒徑採樣及空拍影像

河道礫石粒徑採樣及影像拍攝規劃

河道現地礫石粒徑採樣及影像拍攝地點在南投縣信義鄉神木村和社溪上游之三條子河道上，如圖 18 所示。河道粒徑採樣點位分別在愛玉子溪 A1 及 A2 處、在霍薩溪 B1 及 B2 處、在出水溪 C1 及 C2 處、以及在河道匯流口 D1 及 D2 處、在匯流口下游 E1、E2、E3 及 E4 處、以及在和社溪中游 F1 及 F2 處。這裡的河道

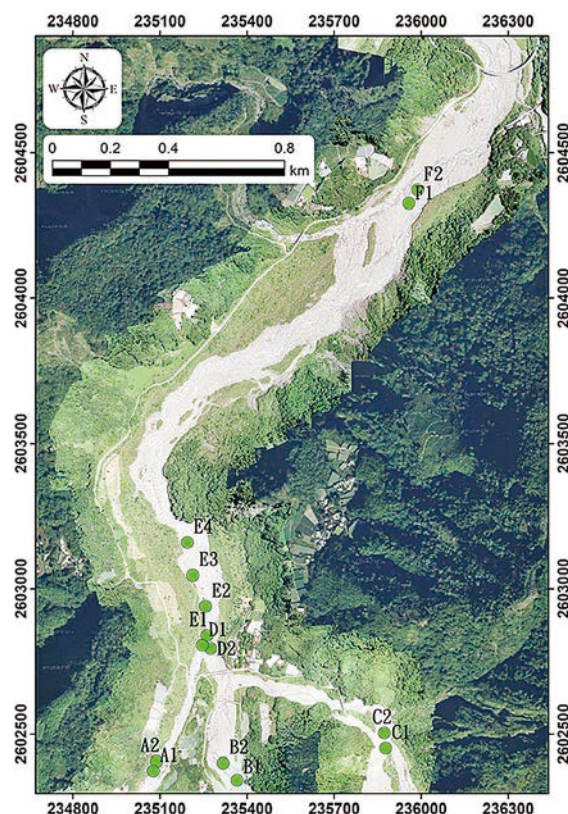


圖 18 本研究河床表面粒徑採樣及空拍位置

屬於土石流好發區域，河道粒徑大小分布較廣。每個點位採樣範圍為 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ，採用網格採樣法循線採樣，以取得人工採樣粒徑資料。本文僅呈現前述 A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1 及 D2 等 8 處之結果。

本研究以 Phantom 4 Pro V2.0 無人飛行載具 (UAV) 進行空拍及使用 BASEGRAIN 進行影像分析。河道粒徑採樣及影像判釋作業流程如圖 19 所示。現地河道空拍作業，首先在調查區域設控制點，以利後續正射影像矯正空間誤差。規畫調查區域 UAV 飛行任務，飛行高度約 20 公尺，垂直拍攝高精度河道照片，以利建置之地面解析度介於 0.57 公分至 0.79 公分之高精度影像。

人工粒徑採樣方面，在採樣點處劃設 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 正方形區域，鋪上 $10.3\text{ m} \times 10.3\text{ m}$ 白色方框，在方框內執行網格線採樣。避免不同操作者誤差，及同一採樣人員於不同採樣區域之誤差，在網格線上每間隔 1.0 m 綁上尼龍繩繫帶，使用開口採樣版（如圖 20）採取繫帶正下方顆粒。最後統計出人工採樣所得的礫石顆粒數量、粒徑與其分布。將正射影像輸入到地理資訊系統 ArcGIS，圈選出人工粒徑採樣選定的採樣區域，以 600dpi (dot per inch) 的精度輸出，進行後續 BASEGRAIN 影像判釋。最後比較人工網格線採樣粒徑結果以及 BASEGRAIN 判釋結果兩者之差異。

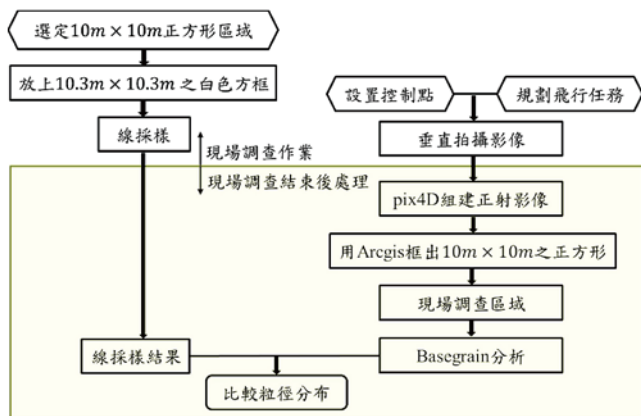


圖 19 河床粒徑採樣及影像判釋作業流程圖

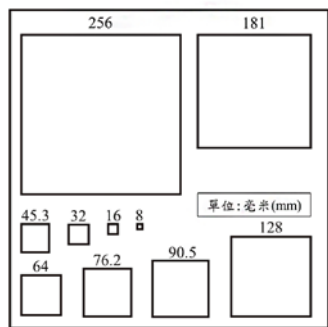


圖 20 不同尺寸的開口採樣版

河床礫石採樣及影像判釋結果

研究區域河道上游為崩塌及土石流好發區，底床質粒徑尺寸範圍極廣，有小於開口採樣版最小開口 8 mm 之泥沙，也有許多礫石及巨石，最大巨石粒徑達 7,239 mm。圖 21a、圖 21b 及圖 22a、圖 22b 分別呈現愛玉子溪 A1 (愛 1) 及 A2 (愛 2) 兩處的河床表面空拍照片及使用 BASEGRAIN 軟體進行影像粒徑判釋的成果。影像判釋出來的顆粒標記有藍色的十字線，十字線的長短代表顆粒的長短軸長度。

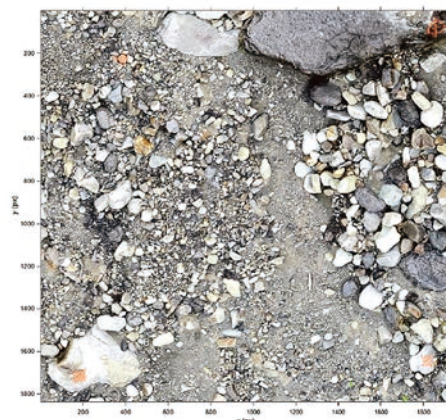


圖 21a 愛玉子溪 A1 處河床空拍照片

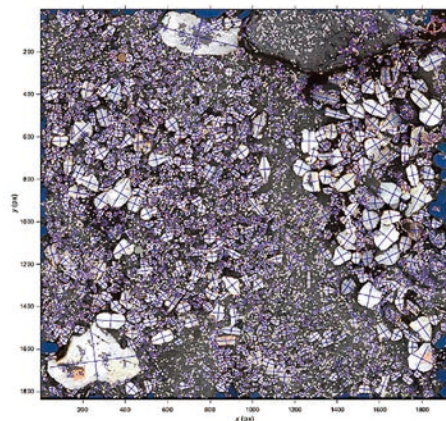


圖 21b 愛玉子溪 A1 處 BASEGRAIN 判釋成果

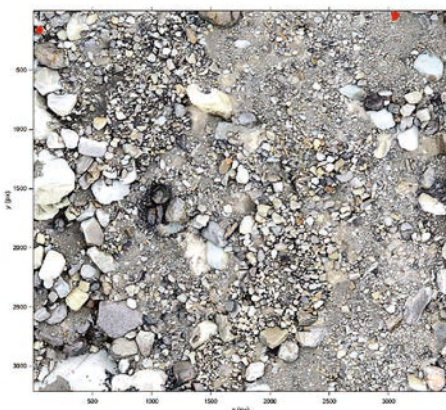


圖 22a 愛玉子溪 A2 河床空拍照片

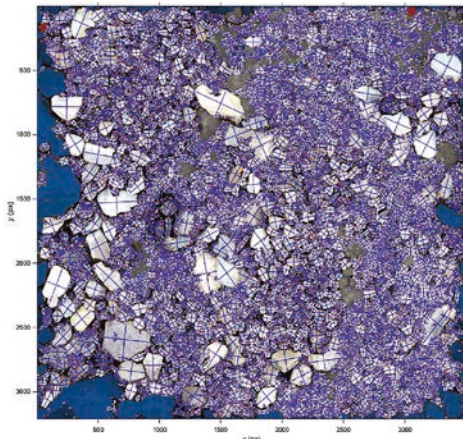


圖 22b 愛玉子溪 A2 處 BASEGRAIN 判釋成果

表 4 列出愛玉子溪 A1 及 A2、霍薩溪 B1（霍 1）及 B2（霍 2）、出水溪 C1（出 1）及 C2（出 2）、以及匯流口 D1（匯 1）及 D2（匯 1）等 8 處 BASEGRAIN 粒徑判釋成果。由表中可知此 8 處現場河床泥沙粒徑大小分布相當寬闊。以愛玉子溪 A1 處為例，較細粒徑 $D_{10} = 3.3$ mm，中值粒徑 $D_{50} = 75.2$ mm，而較大粒徑 $D_{84} = 213.4$ mm，而極大粒徑 $D_{99} = 727.7$ mm，均勻係數 $C_u = D_{60}/D_{10} = 101.9/3.3 = 30.9$ ，顯示泥沙粒徑大小差異很大。其他 7 處的粒徑分布有相似情形，都顯示泥沙粒徑大小差異很大。

表 5 列出 BASEGRAIN 影像粒徑判釋成果與人工網格線採樣法所得結果之比較。此結果顯示兩者之差異相當大。在愛玉子溪 A1 處，影像判釋所得河床粒徑比人工線採法所得河床粒徑明顯偏小，如圖 23 所示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 -68.6%、-53.6%、-32.1%、-18.5%、-22.0% 及 -57.1%。然而，在愛玉子溪 A2 處，影像判釋所得河床粒徑比人工線採樣法所得河床粒徑大許多，如圖

24 所示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 46.2%、7.8%、40.2%、32.4%、36.0% 及 24.5%。這一點與前面章節室內試驗結果有明顯差異。顯然現場環境較為複雜，無論是 BASEGRAIN 影像判釋或是人工線採法所得河床粒徑具有較大的不確定性。

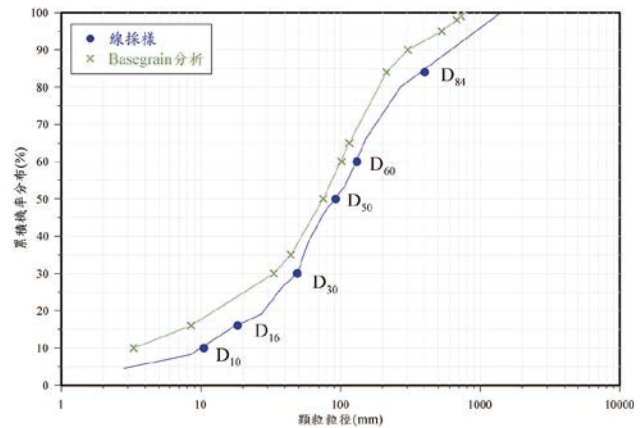


圖 23 愛玉子溪 A1 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

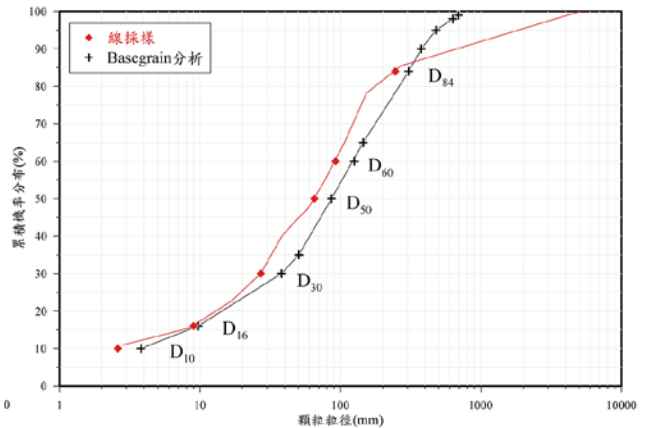


圖 24 愛玉子溪 A2 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

表 4 使用 BASEGRAIN 進行河道現地影像粒徑判釋成果彙整表

累積機率 (%)	愛玉子溪 A1 (mm)	愛玉子溪 A2 (mm)	霍薩溪 B1 (mm)	霍薩溪 B2 (mm)	出水溪 C1 (mm)	出水溪 C2 (mm)	匯流口 D1 (mm)	匯流口 D2 (mm)
99	727.7	690.7	605.8	499.6	894.1	897.7	913.5	560.5
98	678.2	631.4	485.0	456.3	788.3	795.3	827.0	434.1
95	529.6	479.0	360.7	371.0	614.6	478.5	660.7	295.5
90	302.9	376.0	251.9	289.4	419.5	370.6	463.9	238.1
84	213.4	305.8	185.6	224.2	324.8	283.5	299.9	188.1
65	115.3	145.2	91.4	111.3	155.6	154.6	124.8	102.6
50	75.2	86.2	54.7	62.6	82.1	87.6	67.4	67.7
35	44.1	50.5	32.9	38.0	37.0	41.7	38.4	41.8
30	33.3	38.0	25.3	31.3	27.3	31.1	29.1	32.8
16	8.5	9.7	6.6	7.0	7.6	8.6	7.8	8.5
10	3.3	3.8	2.6	2.7	3.0	3.4	3.0	3.3

表 5 愛玉子溪 A1 及 A2 兩處影像判釋與人工採樣河床粒徑結果之比較

代表粒徑 (mm)	愛玉子溪 A1 處			愛玉子溪 A2 處		
	影像判釋 (mm)	人工採樣 (mm)	相對差異 (%)	影像判釋 (mm)	人工採樣 (mm)	相對差異 (%)
D_{10}	3.3	10.5	-68.6	3.8	2.6	46.2
D_{16}	8.5	18.3	-53.6	9.7	9.0	7.8
D_{30}	33.3	49.1	-32.1	38.0	27.1	40.2
D_{50}	75.2	92.3	-18.5	86.2	65.1	32.0
D_{60}	101.9	130.6	-22.0	125.5	92.3	36.0
D_{84}	213.4	496.9	-57.1	305.8	245.7	24.5

在霍薩溪 B1 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較如圖 25 所示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 -66.2%、-42.6%、17.7%、48.2%、41.4% 及 60.0%，此顯示影像判釋對於小粒徑泥沙顆粒的判釋結果有偏小現象，但是對於較粗泥沙的判釋有高估現象，與先前室內試驗結果相似。然而，在霍薩溪 B2 處，影像判釋所得河床粒徑卻是整體性的比人工線採法所得河床粒徑小一些，如圖 26 示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 -64.9%、-53.6%、-28.4%、-24.4%、-5.1% 及 -1.6%。這

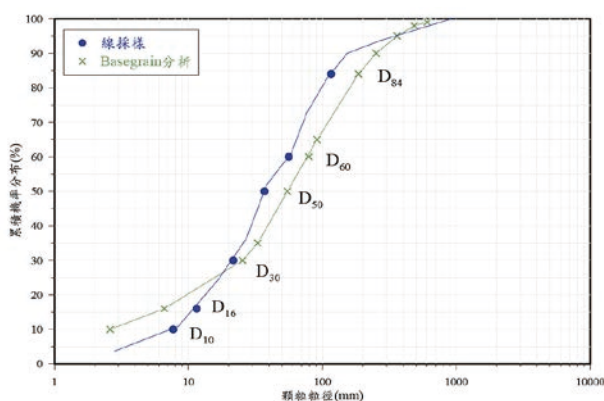


圖 25 霍薩溪 B1 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

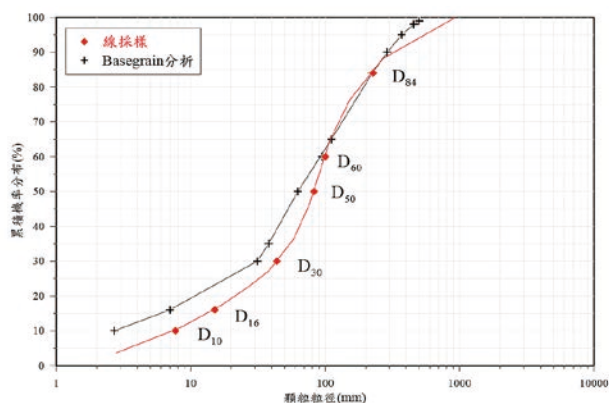
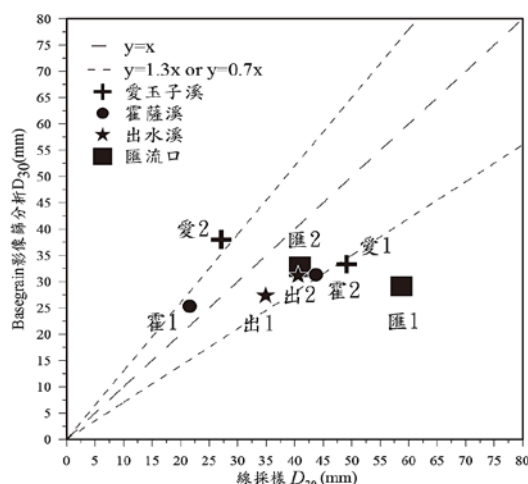
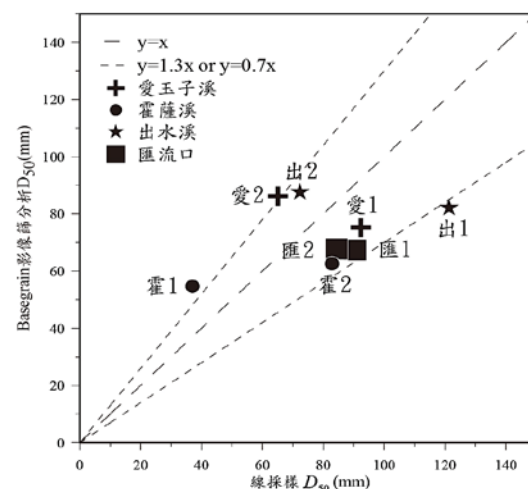


圖 26 霍薩溪 B2 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

一點與愛玉子溪 A1 處相似。這再次顯示現場環境較為複雜，BASEGRAIN 影像判釋與人工線採法所得河床粒徑具有較大的不確定性，它們的差異較大。

圖 27、圖 28 及圖 29 呈現前述 A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1 及 D2 等 8 處之結果之比較，為了方便連結點位在溪流位置，它們圖中分別又稱愛 1、愛 2、霍 1、霍 2、出 1、出 2、匯 1 及匯 2。此 3 個圖分別比較影像判釋與人工線採法所得河床粒徑 D_{30} 、 D_{50} 及 D_{84} 。比較此 3 圖結果顯示中值粒徑 D_{50} 的差異較小一些，其差異大致在 $\pm 30\%$ 內。圖 27 顯示對於較細顆粒 D_{30} 而言，BASEGRAIN 影像判釋大致偏小，其中匯流口 D1 處（匯 1）偏小 50.4%。圖 29 顯示愛 1 和匯 1 兩處 BASEGRAIN 影像判釋偏小程度達 57.1% 及 50.7% 其中匯 1 處有水流區，如圖 30 所示，增加判釋困難，須以手動消除方式消除水流流經區域，降低誤差。

圖 27 比較 8 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑 D_{30} 之差異圖 28 比較 8 處影像判釋與人工線採法所得河床中值粒徑 D_{50} 之差異

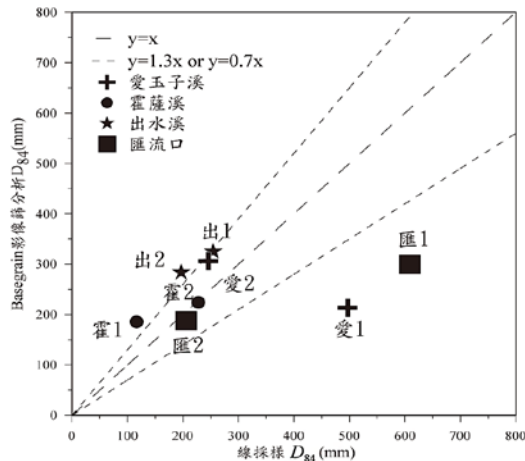


圖 29 比較 8 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑 D_{84} 之差異



圖 30a 匯流口 D1 處河床空拍照片

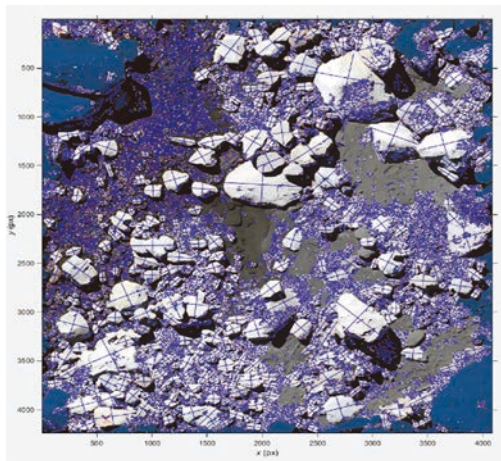


圖 30b 匯流口 D1 處河床影像判釋需增加手動消除方式消除水流流經區域來降低誤差

結論與建議

本研究探討使用無人機空拍技術和 BASEGRAIN 顆粒判釋軟體進行河床泥沙顆粒的適宜性。首先進行室內試驗，採用不同顏色及大小的礫石顆粒進行試驗，以驗證影像判釋軟體 BASEGRAIN 對於粒徑判釋結果的可信度，並

掌握軟體參數調整方法以提升粒徑判釋結果。然後在南投縣陳有蘭溪上游神木村河道進行現場試驗，用無人飛行載具拍攝河道表面高精度照片，組建高精度正射影像，進行 BASEGRAIN 影像粒徑判釋，並與人工線採樣所得粒徑分布進行比較。

研究結果顯示合理的參數設定是提升 BASEGRAIN 判釋結果的重要因素，室內試驗的分析對象及工作環境較為單純，可取得比較好的結果。BASEGRAIN 判釋軟體中灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 及分水嶺橋最小允許長度 (areaCutWW [px]) 兩個參數值對於影像判釋結果影響最為明顯，其次是中值濾波器參數 (medfiltsize10 [px])、灰度閾值的大小 (bloSizeG [px])、無法檢測細粒料比例 (CorrFine1) 及影像線採樣間距 (distFehr [px]) 等參數，這些參數需要視實際需要做調整，以取得較佳的粒徑判釋結果。其他參數影響不顯著，可以採用軟體提供的預設值。

室內實驗對不同礫石進行人工線採樣及 BASEGRAIN 影像判釋以取得礫石粒徑分布，其中白卵石三次重複試驗結果所得粒徑分布大致相同，說明人工線採樣及 BASEGRAIN 影像判釋均具有可重複性。礫石顏色、大小及表面糙度會影響 BASEGRAIN 判釋結果。就 BASEGRAIN 判釋與人工線採樣法所得粒徑之相對差異而言，白卵石試驗為 $-11\% \sim 15\%$ ，中白石試驗為 $-19\% \sim 0\%$ ，黑卵石試驗為 $-35\% \sim 17\%$ ，黑扁石試驗為 $-32\% \sim 17\%$ 。BASEGRAIN 軟體對於判釋黑色細礫石的效果較差。室內試驗 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，粗顆粒有高估現象，中值粒徑方面兩者大致相近。但是現地試驗沒有此趨勢，這可能是現地環境較為複雜，影響影像判釋結果所致。

本研究空拍機飛行高度設定為 20 m，現地試驗顯示所得到之影像解析度約為每像素 0.87 ~ 1.3 mm，於 BASEGRAIN 軟體可判釋出來的最小粒徑約為 20 ~ 30 mm。若無人飛行載具高度過高 (100 m 以上)，所得照片輸出影像畫質較低，可能會影響粒徑判釋結果，或者無法辨別顆粒間隙，造成無法判釋。建議河道空拍機飛行高度設定為 20 m 為宜。

現地試驗影響因素很多，例如：光照陰影、地形起伏、顆粒掩埋、顆粒傾斜等等皆會影響判釋結果。就 BASEGRAIN 判釋與人工線採樣法所得粒徑之相對差異而言，兩者相對差異大部分在 $\pm 45\%$ 以內，但有些達 $\pm 70\%$ 。現地河道環境及河床泥沙組成本來就很複雜，要精確掌握河床泥沙粒徑分布，本屬不易，影像判釋結果相對差異在 $\pm 70\%$ 以內，雖有改善空間，大致上應可接受。

誌謝

本研究承蒙國科會計畫經費補助（111-2625-M-006-012），現地調查工作承蒙國立成功大學水土保持研究中心的設備及人力支援，特此致謝。

參考文獻

1. Bunte, K. (2001), Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel-and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
2. 陳柏翰 (2006), 「河床質粒徑於河川縱、橫向之變化—以頭前溪與鳳山溪為例」, 國立交通大學土木系碩士論文 (指導教授: 廖志中)。
3. 陳嘉欣、邵允銓、王驥魁、吳富春 (2008), 「河床質粒徑分布之數位影像光篩分析」, 農業工程學報, 第 54 卷, 第 4 期, 第 16-32 頁。
4. Kellerhals, R. and Bray, D. I. (1971). "Sampling procedures for coarse fluvial sediments." Journal of the Hydraulics Division 97.8 1165-1180.
5. Mosley, M.P. and Tindale, D.S. (1985). "Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers." Earth Surface Processes and Landforms 10(5), 465-482.
6. Diplas, P. and Sutherland, A.J. (1988). "Sampling techniques for gravel sized sediments." Journal of Hydraulic Engineering 114(5), 484-501.
7. 傅志偉 (2004), 「河床質調查的方法, 位置與頻率—以頭前溪為例」, 國立交通大學土木系碩士論文 (指導教授: 廖志中)。
8. Ibbeken, H. and Schleyer, R. (1986), "Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces." Earth Surface Processes and Landforms 11(1), 59-77.
9. Chardon, V., Piasny, G., and Schmitt, L. (2022), "Comparison of software accuracy to estimate the bed grain size distribution from digital images: A test performed along the Rhine River." River Research and Applications 38(2), 358-367.
10. 丁怡瑄 (2020), 「正射影像應用於河床質辨識與流路變化探討」, 國立交通大學土木系碩士論文 (指導教授: 葉克家、廖達峻)。
11. 廖達峻、張國楨、曾志民、黃敏郎 (2017), 「應用無人飛行載具於山崩及河道變遷之量測分析—以社寮溪為例」, 土木水利, 第 44 卷, 第 2 期, 第 67-73 頁。
12. Wolman, M.G. (1954), "A method of sampling coarse river-bed material." EOS, Transactions American Geophysical Union 35(6), 951-956.
13. Wohl, E.E., Anthony, D.J., Madsen, S.W., and Thompson, D.M. (1996), "A comparison of surface sampling methods for coarse fluvial sediments." Water Resources Research 32(10), 3219-3226.
14. 陳祥偉 (2023), 「應用 UAV 空拍影像和 BASEGRAIN 軟體進行河道泥沙粒徑分布之研究」, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文 (指導教授: 詹錢登)。
15. Detert, M. and Weitbrecht, V. (2012), Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains—a free stand-alone tool. River flow, Taylor & Francis Group London.
16. Canny, J. (1986), "A computational approach to edge detection." IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence(6), 679-698.
17. Fehr, R. (1987), "Einfache bestimmung der korngrößenverteilung von geschiebmaterial mit Hilfe der Linienzahlanalyse." Schweizer Ingenieur und Architekt 105(38), 1104-1109.



慧築營建科技股份有限公司

營建施工 | 都更危老 | 創新整合 | 循環永續

對於工程技術、工程品質優化與跨領域整合上力求精益求精。

運用科技方法及專精營建技術在各施工階段導入永續循環的策略，以求達成環境友善與資源的有效運用為環境永續善盡企業之社會責任。





應用 無人載具高解析影像 及 三維點雲 於 山區河床表層粒徑 之判釋研究

曾志民*／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

曾仁彥／長榮大學土地管理與開發學系 碩士

張國楨／國立臺北科技大學土木工程學系 教授

黃美甄／國立臺北科技大學土木工程學系 碩士

陳振宇／農村發展及水土保持署減災監測組 組長兼技術研究發展平台 組長

近年無人載具 UAV 航拍技術快速發展演進，目前已可高效率進行廣域航拍，利用航拍影像產製高階析度正射影像，也可進一步利用影像立體像對進行特徵點匹配產製三維密點雲。本研究選取一處山區河段作為研究區域進行表層粒徑現場調查分析，其次利用無人載具 UAV 於研究區域以不同日照光源條件下進行航拍，產製高解析度正射影像及三維密點雲，進一步分別利用影像判釋表層粒徑分布，以及點雲糙度特性分析進而推估表層指標粒徑，並以現場調查成果驗證比較。研究成果顯示，在數公分之較小粒徑且接近正射光源時，影像點雲分析成果明顯優於影像判釋分析結果，影像點雲分析之整體誤差平均值約僅為影像判釋分析成果之一半。不同光源角度對於數公分等級之較小粒徑影響較為明顯，若航拍採用近午之正射光源，影像判釋分析之誤差平均值可改善約 28.3%，影像點雲分析之誤差平均值則可改善達 57.5%。

關鍵詞：山區河川、粒徑調查、無人載具、高解析影像、點雲

前言

廣域山區河床表面粒徑資料對於集水區降雨逕流、泥砂運移及土砂收支分析等相關數值模擬之曼寧 n 值訂定非常重要，對於模擬成果之合理性與正確性影響甚鉅。曼寧 n 值為一重要時空變量，由於颱風事件造成之河道變化、防砂構造物之興建、土地利用之改變等皆會造成曼寧 n 值有所變化。因此，除需廣域獲得不同河段之曼寧 n 值外，定期針對上述環境因素改變後之曼寧 n 值檢討有其必要性。

目前河床粒徑資訊之調查仍依賴局部河段開挖進行篩分析，或進行現地表層粒徑調查，惟受限於人力

及時間成本，現地調查分析仍僅限於部分局部河段，分析成果資訊無法有足夠之空間及時間頻率代表性。目前已有相關研究利用河床現地拍攝表層粒徑材料像片進行影像判釋獲得河床材料粒徑資訊，惟此種作法仍無法有效克服作業時間效率問題。近年無人載具 UAV 航拍技術快速發展演進，目前已可高效率進行廣域航拍，利用航拍影像產置高階析度正射影像，也可進一步利用影像立體像對進行特徵點匹配產製三維密點雲，並進一步產製高精度數值地形。

本研究以高雄寶來荖濃溪河段作為研究區域，首先進行表層粒徑現場調查分析，其次利用無人載具 UAV 於研究區域以不同航高及日照光源進行航拍，產製高解析度正射影像及三維密點雲，進一步分別利用

* 通訊作者，cmtseng@gs.ncku.edu.tw

影像判釋表層粒徑分布，以及點雲糙度特性分析進而推估表層指標粒徑，並以現場調查成果驗證比較。

研究區域

本文研究區域位於高雄市寶來區荖濃溪寶來部落後方大河彎處，河床顆粒材料以卵礫石為主，材料粒徑約介於 $(10 \sim 1000) \times n \text{ mm}$ ，儘量選取級配優良區位，亦即河床表面較均佈不同尺寸之卵礫石材料，以利探討顆粒判釋分析之限制條件。

研究方法與材料

河床表層粒徑現場調查

依據「河床質調查方法之比較研究」^[1]及「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究 (2/2)」^[2]所述，眾多調查方法中一般較傾向採用標準方法 (standard method)，如 Bunte and Abt^[3]提及 Wolman^[4]之 100 顆粒網格式卵石採樣方法 (pebble counts) 常被當成是表面顆粒採樣之標準方法，簡要說明如下：

在一選定的區域內拉相互平行的測線，並沿著測線上等間距的點採樣，直到取得所需要的樣品數量為止，此法一般適用範圍約在 100 m^2 。此法可分為步伐測距採樣 (heel-to-toe)、採樣繩測距採樣 (measuring tape) 等兩種作業方法，此兩種方法實質上之意義大致相同，皆是利用一等間距方法進行採樣。本研究採用採樣繩測距採樣方式，在採樣範圍內拉設採樣繩，採集採樣繩上預先設定標誌 (等距離) 正下方之樣品，數量上一般依照 Wolman^[4]建議之 100 顆為主。網格式採樣作業程序^[5]：

1. 設備：採樣繩、開口樣版、捲尺、工作手套、採樣記錄表、筆、照相機、GPS。
2. 人員：2 人一組。
3. 選定採樣位置，進行放樣，以噴漆或其他方式標示採樣範圍。
4. 決定採樣間距，以 $1 \sim 2$ 倍 $D_{\max}$ ，同一顆粒不重複採樣為原則。於採樣繩上依據採樣間距做記號標示，採樣繩的材質需使用剛性較佳之材質，可降低伸縮性而避免操縱上的誤差。
5. 於灘地或砂洲時，在採樣位置上開始拉設採樣繩，採樣繩之放置方向以平行河流流向為準，並固定由左岸往右岸方向施作，固定之採樣順序可降低施作過程產生之誤差

6. 放置好採樣繩即開始由上游方向往下游方向撿拾採樣繩標記正下方之樣品。
7. 將撿取之樣品以開口樣版進行樣品粒徑分級並紀錄各取樣繩標記下樣品之粒徑大小，當標記下之樣品粒徑尺寸小於 8 毫米時則不取樣，並在紀錄表將該位置之樣品以「X」紀錄之，同一測線樣品採樣完成後平移測線至下一個測線位置，繼續採樣直至收集數量超過 100 個後，該測線即為最後一條測線。

本研究之調查範圍為圖 1 紅色框線範圍內約 $65 \text{ m} \times 65 \text{ m}$ 之正方形範圍，測線縱向及橫向皆採用 0.5 公尺之採樣間距，總撿拾河床材料粒徑數約為 16,900 顆。在 $65 \text{ m} \times 65 \text{ m}$ 之正方形調查範圍進一步劃分 25 個 $13 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 之樣區網格式，樣區網格式分布如圖 2，各樣區之撿拾粒徑數約為 676 顆，即使為 1 公尺之採樣間距，撿拾粒徑數亦有 169 顆，皆已遠大於 Wolman^[4]建議之現場撿拾取樣值 100 顆。

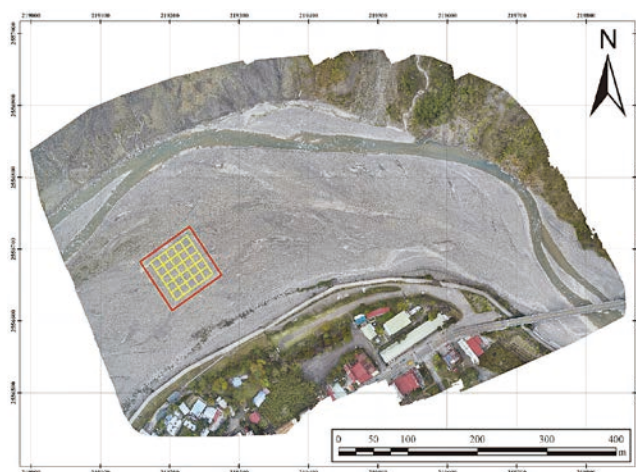


圖 1 研究範圍

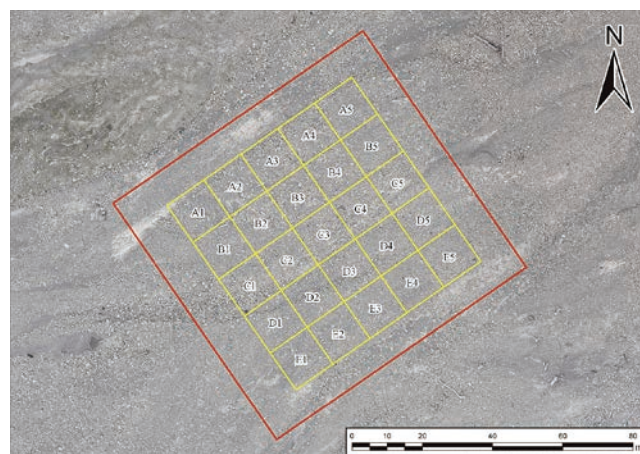


圖 2 河床表層粒徑現場調查之樣區網格式分布

表 1 為兩種採樣間距（0.5 公尺及 1 公尺）分別獲得之四種指標粒徑（ D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 、 D_{90} ）比較，表中顯示 25 個調查樣區共 100 個誤差值數值，其中 91 個誤差值絕對值皆在 10% 以內，7 個誤差值絕對值介於 10%～15% 之間，僅有 2 個誤差值絕對值介於 15%～20% 之間。綜合兩種採樣間距之比較分析可知，依據 Wolman^[4] 建議之 1 公尺採樣間距，以及至少 100 顆採樣數目應該即足以獲得具現地代表性之調查成果。

本研究進一步依據粒徑級配及顆粒尺寸特性針對 25 處樣區網格分類，其中均勻係數（Coefficient of uniformity）定義如下：

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

當 C_u 介於 1～4 時為均勻土壤（Uniform soil）； C_u 介於 5～8 時為級配好之土壤（Graded soil）； C_u 大於或等於 9 為級配良好之土壤（Well-graded soil）。樣區網格粒徑特性分類結果如表 2 所示，其中 12 區屬於均勻土壤類別：A1、A3、B1、B4、C2、C3、C4、C5、D4、D5、E3、E5；13 區屬於級配好類別：A2、A4、A5、B2、B3、B5、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E4。

表 1 兩種採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果比較

指標 粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)
A1	26	26	-1.56	52	53	0.93	171	147	-14.27	231	194	-16.27
A2	30	29	-3.85	67	65	-3.68	241	216	-10.47	314	289	-7.99
A3	39	39	0.55	74	76	3.51	298	325	8.86	373	419	12.13
A4	38	36	-4.09	86	82	-4.58	249	244	-1.90	307	303	-1.32
A5	32	35	8.87	69	74	7.02	217	237	9.09	272	306	12.27
B1	47	47	0.45	98	89	-9.63	242	238	-1.61	293	285	-2.46
B2	38	36	-5.69	86	85	-1.11	308	324	5.31	401	443	10.47
B3	36	35	-2.11	80	80	-0.11	301	307	2.16	383	415	8.44
B4	40	40	1.18	84	78	-8.12	245	240	-2.09	317	313	-1.21
B5	39	38	-3.71	89	87	-2.61	224	229	1.80	283	290	2.34
C1	54	56	2.74	153	157	2.10	378	395	4.44	461	463	0.42
C2	47	47	-0.49	113	104	-8.25	320	327	2.36	405	408	0.97
C3	57	62	8.39	143	151	5.86	356	359	1.06	438	442	0.83
C4	66	64	-2.03	139	130	-6.46	333	334	0.32	398	408	2.32
C5	63	64	0.65	142	136	-4.35	325	312	-4.19	400	379	-5.11
D1	41	41	-0.68	105	105	0.27	300	305	1.47	353	359	1.64
D2	44	44	-0.24	122	124	1.18	293	299	1.96	347	353	1.77
D3	40	39	-1.31	92	86	-6.41	253	252	-0.14	340	334	-1.71
D4	43	42	-1.13	84	83	-2.13	223	215	-3.41	274	272	-0.65
D5	43	42	-2.90	80	81	1.08	204	200	-2.08	247	241	-2.47
E1	20	20	-0.58	55	53	-3.88	188	165	-12.55	243	224	-7.78
E2	20	20	1.48	46	48	4.65	207	196	-5.41	273	253	-7.40
E3	27	29	7.06	52	50	-3.43	158	168	6.35	232	254	9.37
E4	33	34	3.28	71	72	1.52	177	187	5.44	226	230	2.08
E5	37	37	-0.24	72	72	-0.40	172	175	1.79	229	236	3.24

無人載具 UAV 航拍及密點雲產製

本研究使用可搭載較高階相機之多旋翼型無人飛行載具 Microdrones MD4-1000（如圖 3），搭載 SONY QX1 APSC 等級片幅相機，表 3 為 MD4-1000 飛行載具基本資料，無人飛機航拍範圍（80 m × 80 m）為圖 1 之紅色框線區位。

點雲（point cloud）為物體表面資訊以點的形式記錄，每個點都含有 X、Y、Z 座標，部份資料並具備顏色、強度等屬性資訊。點雲一詞主要來自於空載光達（airborne LiDAR）技術掃描地表資訊時產生龐大的數據時，因密集的空間資料點呈雲霧狀而得名。現今因無人載具及影像的普及，透過立體影像對特徵點的匹配，而可以求取匹配點之點位空間位置，從而建立密集的點雲。本研究一共規劃四種不同陽光光源（8 時、11 時、14 時、17 時），航高則規劃 25 公尺、50 公尺、100 公尺及 200 公尺四種。四種光源之航拍正射影像產製成果如圖 4 所示，影像地面解析度（Ground Sample Distance, GSD）分別為 0.68 公分（8 時）、0.63 公分（11 時）、0.62 公分（14 時）及 0.68 公分（17 時）。圖 5 則為四種光源之三維點雲產製成果，航拍範圍之產製點雲數量約

表 2 調查樣區粒徑特性分類結果

樣區	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	分類名稱
A1	49	37	22	10	4.96	Uniform
A2	73	51	26	12	6.35	Graded
A3	76	60	38	19	4.09	Uniform
A4	89	73	43	15	5.96	Graded
A5	72	53	32	12	6.28	Graded
B1	96	79	51	24	4.04	Uniform
B2	89	72	42	15	5.82	Graded
B3	82	67	37	15	5.66	Graded
B4	86	71	42	19	4.61	Uniform
B5	90	75	50	15	5.88	Graded
C1	142	108	71	24	5.97	Graded
C2	108	85	53	23	4.64	Uniform
C3	127	101	67	29	4.43	Uniform
C4	127	98	70	36	3.55	Uniform
C5	123	101	68	34	3.65	Uniform
D1	103	82	47	18	5.77	Graded
D2	110	88	55	19	5.71	Graded
D3	89	77	44	17	5.19	Graded
D4	83	71	44	18	4.58	Uniform
D5	80	67	44	20	3.98	Uniform
E1	58	39	16	8	7.68	Graded
E2	48	32	14	8	5.95	Graded
E3	45	37	22	11	4.17	Uniform
E4	70	56	32	13	5.42	Graded
E5	70	57	36	17	4.16	Uniform



圖 3 多旋翼型無人載具 Microdrones MD4-1000 外觀

表 3 Microdrones MD4-1000 無人飛行載具基本資料

機身尺寸	1.03 m（對角機電軸距），展開直徑：1,750 mm，儲存直徑：700 mm
最大荷載	1,200g（2,000 g）
機身自重	2,650 g
最大起飛重量	5,550 g（6,500 g）
飛行時間	約 25～30 分鐘（空載時≥75 分鐘，800 g 任務載重時≥42 分鐘，2,000 g 任務載重時：≥20 分鐘）
最大巡航速度	12 m/s
最大爬升速率	7.0 m/s
抗風情況	12 m/s
工作海拔	達 4,000 m 以上
遙控距離	5,000 m
環境溫度	-30°C~55°C
相對飛行高度	≥ 1,000 m
抗雨能力	防水等級 IP3，可在暴雨（24 小時降雨量 50.0～99.9 毫米）下可持續安全飛行
抗強電場干擾能力	距離 220 kV 高壓輸電線 3 米距離時，飛行器控制、通訊線路不受影響
飛行半徑	≥ 5,000 m

為 9,076,515 點，點雲密度每平方公尺約為 2,148 點，呈現優異之水平密度。

河床表層粒徑影像判釋

本研究利用英國拉夫堡大學地理系的 David Graham、

Ian Reid 及 Stephen Rice 共同開發之 Digital Gravelometer 軟體進行河床表層粒徑影像判釋，Digital Gravelometer 能夠從數位影像中，快速地分析礫石沉積物。使用 Digital Gravelometer，可以獲得與使用傳統現地調查測量技術類似的粒徑分布資訊^[6]。Digital Gravelometer 軟體影像處理之程序流程如圖 6 所示^[7]，軟體內主要 5 個參數為：中值濾波（Median filter）矩陣大小值 m（預設值 m = 3 pixels）、底帽轉換（Bottom-hat）結構元素大小值 s（預設值 s = 15 pixels）、影像二侢化門檻值 T1（預設值 T1 = 35%）、影像二侢化門檻值 T2（預設值 T2 = 1%）、分水嶺最小深度門檻值 w（預設值 w = 1）。

點雲糙度特性粒徑分析

原始點雲在進行糙度特性分析之前需先將點雲之離群值（outlier values）及植生範圍之點雲濾除，圖 7 及圖 8 分別為調查樣區點雲平面分布及側視分布，圖中可明顯看出植生區域之點雲分布，這部分植生區點雲在進一步進行粒徑判釋分析前應先加以濾除。離群值可透過設定河床表層點雲高度之合理分布範圍加以濾除，至於植生範圍之點雲資料，本研究利用綠度指數（Greenness）作為初步篩選植生覆蓋區域之依據，綠度指數係以可見光波段的綠光與紅光來計算，計算公式如下：

Greenness = (G + R) / (G - R) (2)

其中 R 為紅光波段影像灰值，G 為綠光波段影像灰值。完成初步植生覆蓋區域濾除後，再輔以人工檢核確認濾除之正確性與合理性。

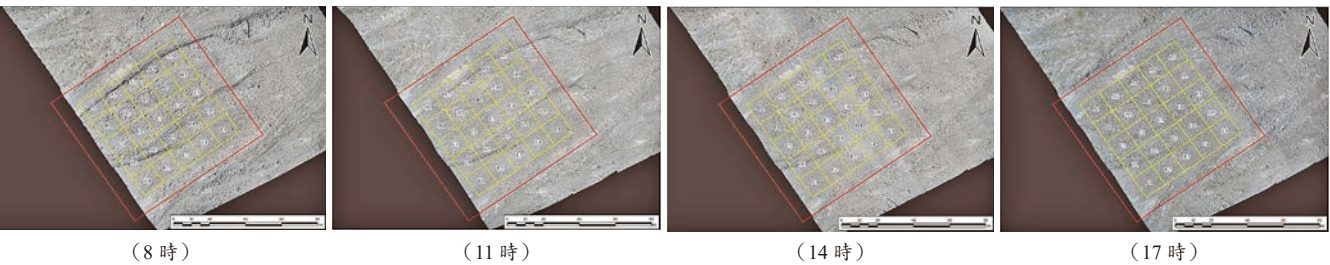


圖 4 無人飛機航拍正射影像產製成果



圖 5 無人飛機航拍三維點雲產製成果

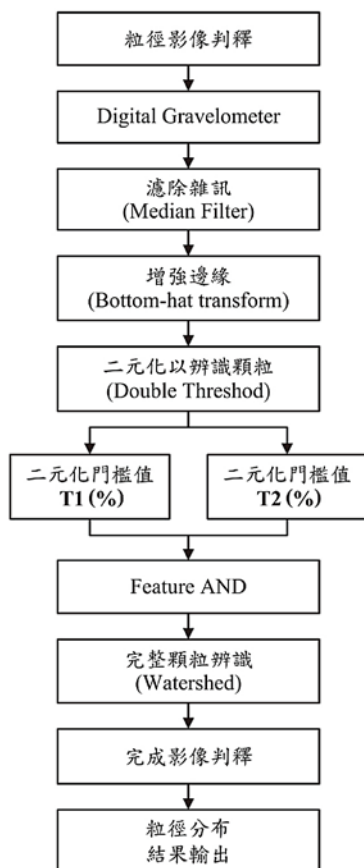


圖 6 Digital Gravelometer 影像處理流程

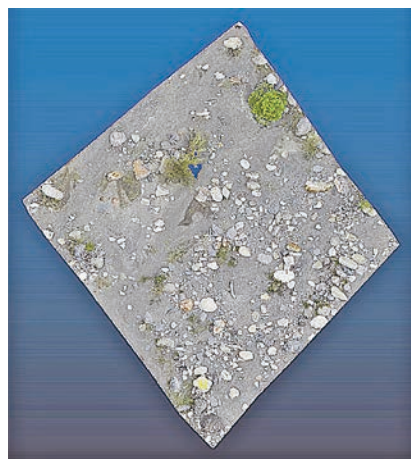


圖 7 河床調查樣區之點雲平面分布

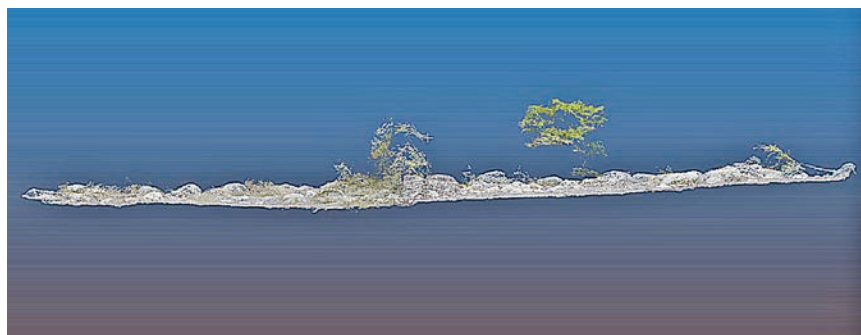


圖 8 河床調查樣區之點雲側視分布

針對點雲之糙度特性，本研究主要分析在一特定區域內之點雲高程偏差 σ_z [8]，首先劃分特定尺寸網格，然後分析落於每個網格內點雲之高程標準偏差，分析示意如圖 9 所示。然而當點雲分布於非平坦河床時，標準偏差可能受到地形坡度影響而未能合適反映河床糙度特性，因此在標準偏差分析過程中需去除地形坡度趨勢之影響 (detrend)。分析方法係透過計算點雲中每個點與指定大小核心距離 (kernel) 最近鄰域內的最小二乘最佳擬合平面 (least-squares best-fitting plane) 之間的高程差異而得，分析示意如圖 10 所示，然後得到在特定範圍內去除平均坡度趨勢後之標準偏差高度 [9-11]，進一步以 ToPCAT (Topographic Point Cloud Analysis Toolkit) 來推估 4 種指標粒徑： D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 、 D_{90} 。

研究成果說明

影像粒徑判釋成果

圖 11 為針對不同航高之最小可判釋粒徑分析比較，以航高 25 公尺為例，最小可判釋粒徑大約為 3 公分，約略為影像解析度 (0.81 公分) 之 3.7 倍；航高 50 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 8 公分，約略為影像解析度

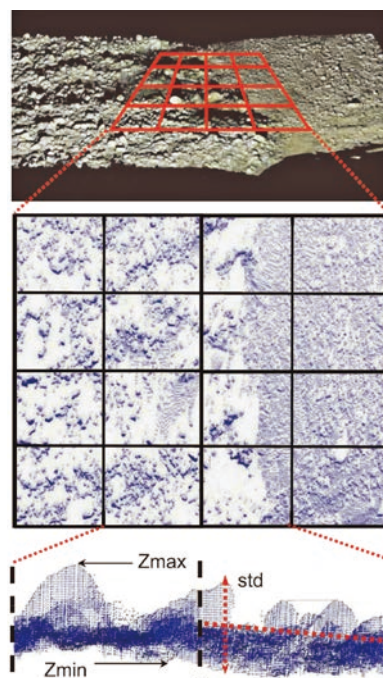


圖 9 點雲標準偏差之分析示意圖

資料來源：Rychkov et al. [8]

(1.62 公分) 之 5 倍；至於航高 100 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 15 公分，大約為影像解析度 (2.92 公分) 之 5.1 倍；航高 200 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 28

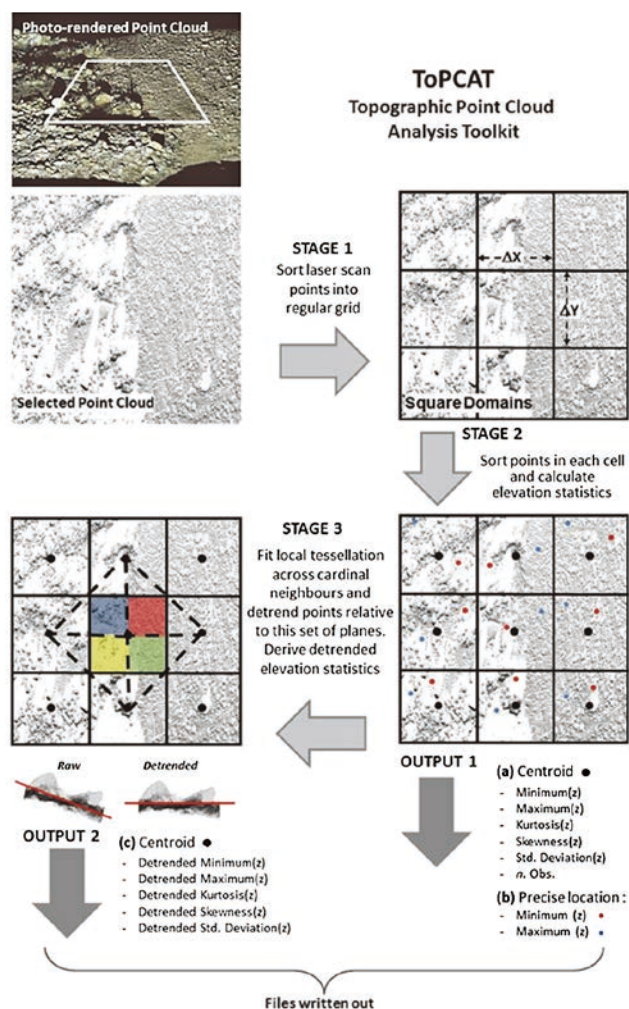


圖 10 濾除地形坡度趨勢影響之分析流程

資料來源：Brasington *et al.* [8]

公分，約略為影像解析度（5.53 公分）之 5.1 倍。綜合上述，在本研究之航高範圍（25 m ~ 200 m）內，利用影像分析之最小判釋粒徑大致為影像解析度之 3 ~ 5 倍。

整體來說，影像粒徑分析之判釋正確性雖明顯受到不同航高產製影像解析度影響外，航拍時之環境光源條件是否能让粒徑顆粒與周邊物體形成較明顯之色差對比亦為影像判釋品質之關鍵因素。因此，本研究進行四種不同日照光源角度（8 時、11 時、14 時、17 時）之 UAV 產製影像河床材料判釋分析。採用之影像判釋參數則依據 108 年度檢定成果 [12]，均勻細顆粒群（Uniform fine soil）最佳參數為：m = 5 pixels，s = 15 pixels，T1 = 35%，T2 = 1%，w = 1；均勻粗顆粒群（Uniform coarse soil）最佳參數為：m = 9 pixels，s = 8 pixels，T1 = 35%，T2 = 2%，w = 3；級配好（Graded soil）類別最佳參數為：m = 9 pixels，s = 8 pixels，T1 = 35%，T2 = 2%，w = 3；級配良好（Well-graded soil）類別最佳參數為：m = 9 pixels，s = 8 pixels，T1 =

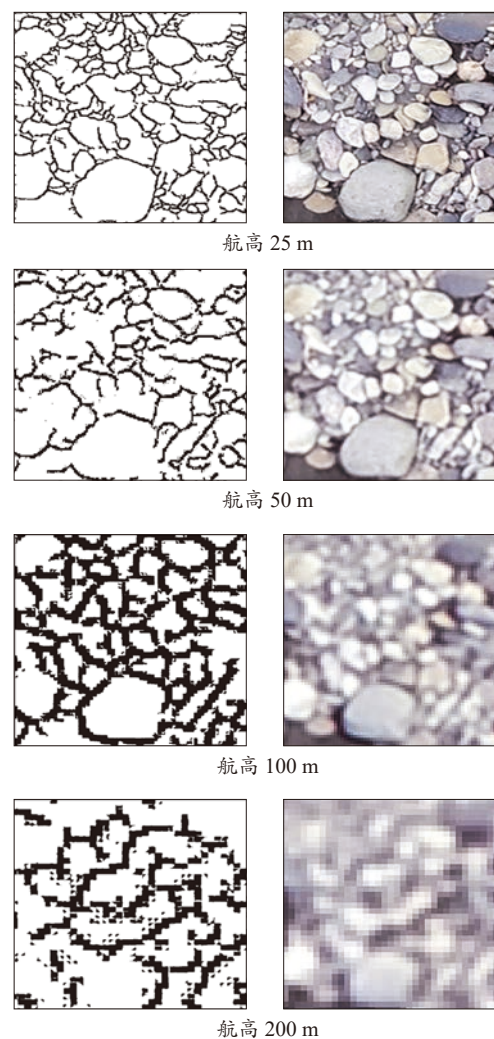


圖 11 不同航高影像之粒徑判釋成果比較

35%，T2 = 2%，w = 3，4 個土壤特性分群中除均勻細顆粒群外，其他 3 群類別皆可以採用同一組最佳參數。表 3 為不同光源之影像判釋結果與現調結果之整體誤差率分析，其中大、小顆粒判釋結果有所差異，在屬於較小顆粒之 D_{16} 方面，誤差率略為偏高，原因應係現場調查之 D_{16} 粒徑值大抵介於 1 ~ 4 公分，約略在最小可判釋粒徑值附近。整體而言，判釋誤差率隨粒徑尺寸增加而下降，在上午 8 時光源時， D_{16} 誤差平均值為 51.16%， D_{50} 誤差平均值為 28.56%， D_{84} 誤差平均值為 17.63%， D_{90} 誤差平均值為 10.51%；近午光源 11 時， D_{16} 誤差平均值為 44.41%， D_{50} 誤差平均值為 24.02%， D_{84} 誤差平均值為 12.47%， D_{90} 誤差平均值為 6.08%；下午 14 時光源時， D_{16} 誤差平均值為 44.75%， D_{50} 誤差平均值為 27.64%， D_{84} 誤差平均值為 11.03%， D_{90} 誤差平均值為 9.49%；接近傍晚 17 時之光源時， D_{16} 誤差平均值為 61.91%， D_{50} 誤差平均值為 30.76%， D_{84} 誤差平均值為 14.04%， D_{90} 誤差平均值為 15.29%。

表 3 影像判釋指標粒徑之誤差率(%)分析成果

指標粒徑 光源	D_{16} (mm)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{90} (mm)
8 時	51.16	28.56	17.63	10.51
11 時	44.41	24.02	12.47	6.08
14 時	44.75	27.64	11.03	9.49
17 時	61.91	30.76	14.04	15.29

整體來說，4 種光源以接近正午前（11 時及 14 時）呈現相對較佳的判釋成果， D_{16} 誤差平均值由 51.16%（8 時）及 61.91%（17 時）降為 44.41%（11 時）及 44.75%（14 時）； D_{50} 誤差平均值由 28.56%（8 時）及 30.76%（17 時）降為 24.02%（11 時）及 27.64%（14 時）； D_{84} 誤差平均值由 17.63%（8 時）及 14.04%（17 時）降為 12.47%（11 時）及 11.03%（14 時）； D_{90} 誤差平均值由 10.51%（8 時）及 15.29%（17 時）降為 6.08%（11 時）及 9.49%（14 時）。正午前（11 時及 14 時）日照較接近正射光源，8 時（接近日出）及 17 時（接近日落）則為斜射光源，陽光斜照時，顆粒周邊之陰影遮蔽面積較大，小粒徑容易受到周遭陰影的遮蔽影響造成誤判，正射光源對於小顆粒間之區隔對比有明顯助益。

點雲粒徑分析成果

表 4 為不同光源之點雲粒徑分析結果與現調結果之整體誤差率分析，與影像判釋結果類似，不同光源之影像點雲分析成果也有明顯差異，光源對點雲分析成果之影響明顯大於影像判釋分析。整體而言，判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，在上午 8 時光源時， D_{16} 誤差平均值為 46.50%， D_{50} 誤差平均值為 21.76%， D_{84} 誤差平均值為 16.13%， D_{90} 誤差平均值為 11.77%；近午光源 11 時， D_{16} 誤差平均值為 22.09%， D_{50} 誤差平均值為 17.84%， D_{84} 誤差平均值為 13.85%， D_{90} 誤差平均值為 13.15%；下午 14 時光源時， D_{16} 誤差平均值為 27.06%， D_{50} 誤差平均值為 16.87%， D_{84} 誤差平均值為 14.92%， D_{90} 誤差平均值為 15.18%；接近傍晚 17 時之光源時， D_{16} 誤差平均值為 51.93%， D_{50} 誤差平均值為

表 4 點雲粒徑指標粒徑之誤差率(%)分析成果

指標粒徑 光源	D_{16} (mm)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{90} (mm)
8 時	46.50	21.76	16.13	11.77
11 時	22.09	17.84	13.85	13.15
14 時	27.06	16.87	14.92	15.18
17 時	51.93	24.72	16.95	15.42

24.72%， D_{84} 誤差平均值為 16.95%， D_{90} 誤差平均值為 15.42%。整體來說，4 種光源以接近正午前（11 時及 14 時）呈現相對較佳的判釋成果， D_{16} 誤差平均值由 46.50%（8 時）及 51.93%（17 時）降為 22.09%（11 時）及 27.06%（14 時）； D_{50} 誤差平均值由 21.76%（8 時）及 24.72%（17 時）降為 17.84%（11 時）及 16.87%（14 時）； D_{84} 誤差平均值由 16.13%（8 時）及 16.95%（17 時）降為 13.85%（11 時）及 14.92%（14 時）； D_{90} 誤差平均值由 11.77%（8 時）及 15.42%（17 時）降為 13.15%（11 時）及 15.18%（14 時）。

圖 12 為 25 個調查樣區 4 種指標粒徑（ D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 、 D_{90} ）影像判釋分析與影像點雲分析成果在 4 種光源下之整體誤差平均值比較，圖中顯示在中小粒徑（ D_{16} 、 D_{50} ）分析成果方面，影像點雲分析明顯優於影像判釋分析，且小顆粒 D_{16} 更為明顯，以 11 時光源為例，影像點雲分析之整體誤差平均值（22.09%）約僅為影像判釋分析成果（44.41%）之一半；在較大粒徑（ D_{84} 、 D_{90} ）方面，影像點雲分析（13.85%、13.15%）與影像判釋分析成果（12.47%、6.08%）約略有相近之整體誤差平均值。至於不同光源對分析結果之影響程度也有所差異，光源對點雲分析成果之影響明顯大於影像判釋分析，此影響程度也因粒徑大小而異，光源對於較小粒徑 D_{16} 影響最為明顯，若航拍採用近午之正射光源，影像判釋分析之誤差平均值可改善約 28.3%，影像點雲分析之誤差平均值則可改善達 57.5%。至於 D_{50} 、 D_{84} 、 D_{90} 等指標粒徑，不論影像判釋分析或點雲精度分析兩種方式皆僅略為受到不同光源之影響。

結論與建議

本研究於高雄市六龜區寶來里寶來一橋上游約 600 公尺處之荖濃溪河床完成兩種採樣間距（0.5 公尺及 1.0 公尺）之表層粒徑現場調查工作，調查範圍約為 65 m × 65 m 之正方形範圍，並進一步劃分 25 個 13 m × 13 m 之樣區網格，作為影像粒徑判釋及點雲粒徑判釋之比較基礎。依據不同航高產製正射影像之粒徑區隔效果比較，以航高 25 公尺為例，最小可判釋粒徑大約為 3 公分，約略為影像解析度（0.81 公分）之 3.7 倍；最大航高 200 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 28 公分，約略為影像解析度（5.53 公分）之 5.1 倍。在本計畫的航高範圍（25 m ~ 200 m）內，利用影像分析之最小判釋粒徑大致為影像解析度之 3 ~ 5 倍。依據影像判釋分析與影像點雲

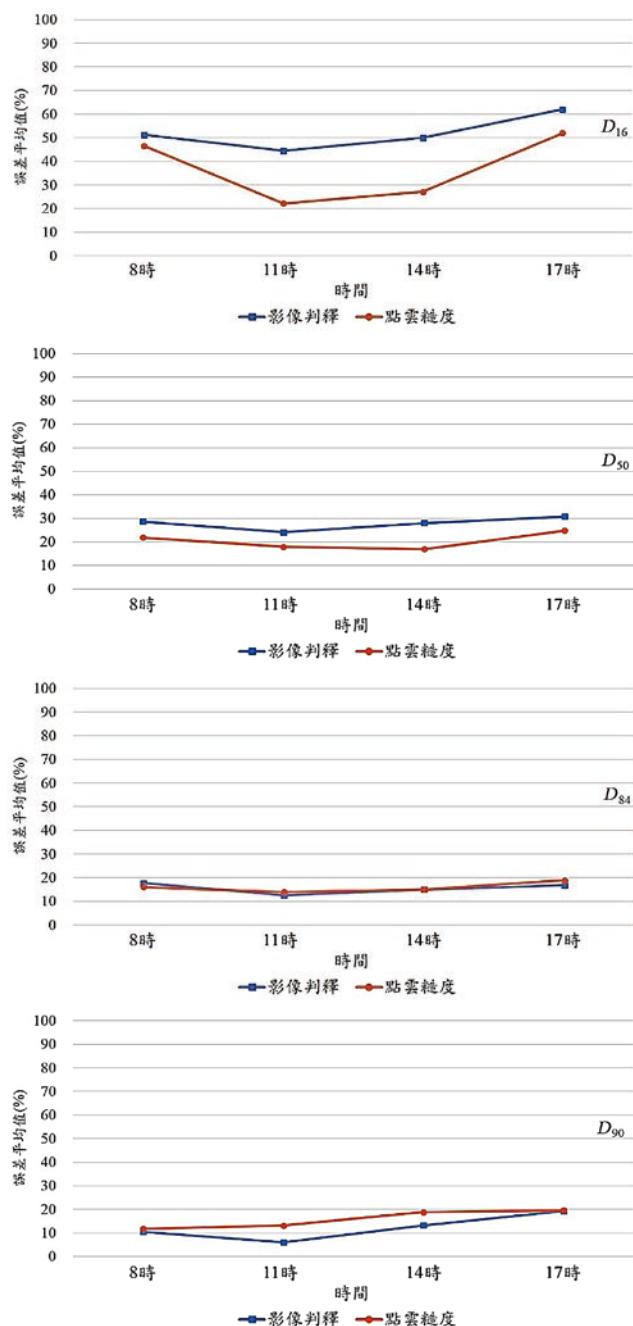


圖 12 影像判釋分析與影像點雲分析在 4 種光源之整體誤差平均值比較

分析成果在 4 種光源下之整體誤差平均值比較，在中小粒徑 (D_{16} 、 D_{50}) 分析成果方面，影像點雲分析明顯優於影像判釋分析，且小顆粒 D_{16} 更為明顯，以 11 時光源為例，影像點雲分析之整體誤差平均值約僅為影像判釋分析成果之一半；在較大粒徑 (D_{84} 、 D_{90}) 方面，影像點雲分析與影像判釋分析成果之整體誤差平均值兩者大致相近。不同光源對點雲分析成果之影響明顯大於影像判釋分析，此影響程度也因粒徑大小而異，光源對於較小粒徑 D_{16} 影響最為明顯，若航拍採用近午之正射光源，影像判釋分析之誤差平均值可改善約 28.3%，影像點雲分

析之誤差平均值則可改善達 57.5%。至於 D_{50} 、 D_{84} 、 D_{90} 等指標粒徑，不論影像判釋分析或點雲糙度分析兩種方式受到不同光源之影響並不明顯。

本研究建議未來針對表層粒徑介於數公分至數十公分之山區河床，可採用無人機航拍產製影像點雲來分析表層粒徑，在兼顧廣域作業效率及可判釋粒徑條件下，可採用約 20 公尺 ~ 25 公尺之航拍高度，航拍時間則盡量選擇接近正午前之正射日照，可得到最佳之粒徑判釋成果。

誌謝

本研究為 108 及 109 年度農村發展及水土保持署創新研究計畫（計畫編號：108 保發 -10.1- 保 -01-06-001(42)；109 保發 -11.1- 保 -01-06-001(28)）之部分成果，承蒙農村發展及水土保持署經費補助使本研究得以順利完成。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2006)，「河床質調查方法之比較研究」。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2009)，「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究 (2/2)」。
3. Bunte, K. and Abt, S.R. (2001), Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. General Technical Report RMRS-GTR-74. Fort Collins, Colo.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 428.
4. Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. Transactions of the American Geophysical Union, Vol. 35, No. 6, 951-956.
5. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2007)，「河床質調查作業參考手冊」。
6. Graham, D.J., Reid, I., and Rice, S.P. (2005b), Automated sizing of coarse grained sediments: Image-processing procedures. Math. Geol., 37, 1-28.
7. Graham, D.J., Reid, I., and Rice, S.P. (2005a), A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. Water Resour. Res., 41, W07020, doi:10.1029/2004WR003868.
8. Heritage and Milan (2009), Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel bed river. Geomorphology, 113(1), 4-11.
9. Aberle, J. and Smart, G.M. (2003), The influence of roughness structure on flow resistance in mountain streams. J. Hydraul. Res., 41(3), 259-269.
10. Brasington, J., Vericat, D., and Rychov, I. (2012), Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. Water Resour. Res., 48, W11519.
11. Storz-Peretz, Y. and Laronne, J. (2013), Morphotextural characterization of dryland braided channels. Geol. Soc. Am. Bull., 125(9-10), 1599-1617.
12. 農委會水土保持局 108 年度創新研究計畫 (2019)，「無人載具高解析影像及點雲於山區河川表層粒徑分析之可行性研究」。



混合實境（MR）結合工程全生命週期管理 於新北捷運工程之應用

李政安／新北市政府捷運工程局 局長

林逸羣／新北市政府捷運工程局 副總工程司

陳加乘／新北市政府捷運工程局 科長

黃正翰／財團法人臺灣營建研究院 博士、組長

謝禎謙／財團法人臺灣營建研究院 專案副理

高士恩*／財團法人臺灣營建研究院 助理工程師

在捷運工程中早已有建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）輔助施工，但由於 BIM 設備要求較高且在施工現場不易檢討，本研究透過 BIM 延伸混合實境技術（Mixed Reality, MR）並應用於捷運工程的虛擬設計及施工技術（Virtual Design and Construction, VDC）的優勢，本研究將深入探討 MR 技術在捷運興建的生命周期在設計階段、施工階段和維護管理階段中的應用場景，在設計階段導入工程介面檢討會議、透過 MR 設備建立釋疑點、雲端紀錄等，施工階段現場施工模型檢核、設備安裝定位確認、工程 BIM 驗收與維護管理階段即時遠端協助與設備巡檢等三階段，使施工現場在 MR 技術的輔助下，透過 1：1 疊合提升施工品質減少施工誤差並降低各式風險如早期檢討、紀錄追蹤等方式使問題得到確實的解決，並且運用 MR 技術可大幅節省時間成本，如原需要技師到場協助，透過 MR 技術可遠端即時支援透過與專業技師合作解決問題，透過各階段的應用，引入 MR 技術透過視覺化技術加速決策過程，減少傳統溝通方式帶來的誤差，提升捷運工程施工品質和施工安全性。

前言

隨著近年來資訊科技的快速發展，以及元宇宙風潮的興起，將混合實境技術（MR）導入營造產業中，應用於設計施工階段，並進一步交付業主協助後續營運維護。採用混合實境技術（MR）不僅可以實現即時的互動體驗，還可以應用於解決工程介面的衝突和設備維護等相關問題。

捷運工程的施工複雜性與難度較高且後續有長期的設備維護需求，本研究透過既有專案中已有建置的建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）並結合混合實境技術，透過混合實境技術（MR），協助在設計施工階段所遇到的工程問題，與提升設備維護管理的效率，減少捷運施工過程中的困難，並解決管線衝突等挑戰。透過融合 BIM 和 MR 技術，有助於在施工現場設備安裝與以及系統維護的財產管理應用，以其能夠在工程領域中創造更為智慧化和前瞻性的應用情境。

* 通訊作者，p2586033@tcrci.org.tw

文獻回顧

國內軌道工程 BIM 實際案例

BIM 整合土建、系統機電及軌道

淡海輕軌及三鶯線捷運將 BIM 技術應用於房屋建築、土木及基礎設施類、系統機電與軌道，以高架候車站整合機電系統（如圖 1(a)）及橋樑基礎整合地下管線（如圖 1(b)）之設計及施工為例，透過 BIM 可直接執行衝突檢查，並視覺化呈現，有效率的解決介面衝突問題，並以此模型資料供未來營運管理階段使用^[1,2]。

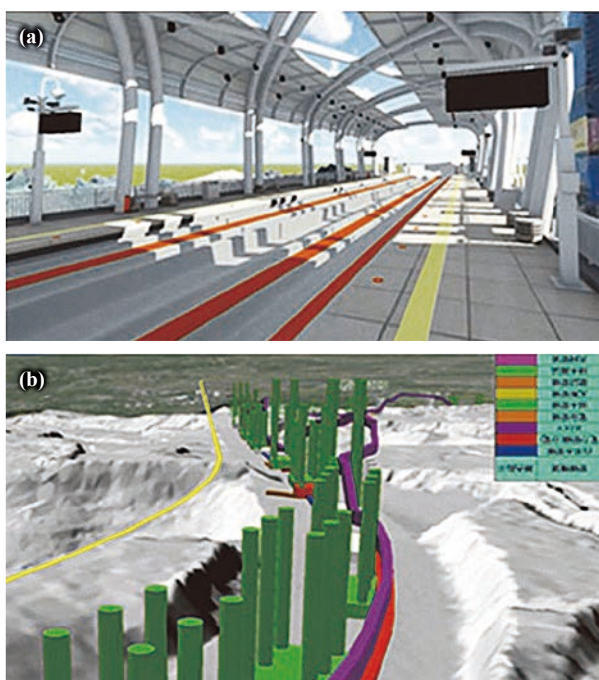


圖 1 (a) BIM 整合模型（高架站）展示；(b) BIM 橋樑與管線整合展示圖（資料來源：李等人^[1]）

運用 BIM 技術進行 4D 施工模擬

BIM 技術也能進行 4D 施工模擬，如懸臂工作車及相關橋樑吊裝組裝等施工過程，淡海輕軌也利用 BIM 來整合並模擬施工時程，透過 4D 技術以視覺化呈現展示施工組裝順序，如淡海輕軌在濱海路口大轉彎路段則是利用 BIM 的 4D 技術模擬鋼梁吊裝作業（如圖 2）^[1]，可以檢討及評估施工可行性、工序合理性及安全性等問題；三鶯線則用來模擬帽樑剪力鋼箱與鋼筋介面、主筋偏移或剪力鋼箱開孔，若利用 MR 混合實境設備來進行模擬，可讓工程師更瞭解整體施作方式^[2]。安坑輕軌安心橋工程則也有導入 BIM 模擬計算進行，分階段檢討於各個設計和施工階段進行碰撞檢討，以確保設計和施工的一致性、根據各階段的設計需求，設定碰撞檢討

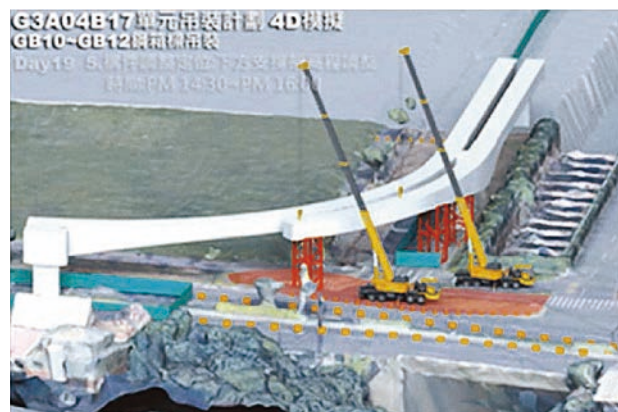


圖 2 BIM 模擬鋼橋吊裝施工
（資料來源：李等人^[1]）

的目的和範圍、建立動作樣板，將碰撞檢討的流程和方法進行系統化，以提升效率和品質^[3]。日本 JR 線也利用 BIM/CIM 引入了可以附加資訊的 3D 模型，在施工、維護和管理的各個階段實現協作和開發，並實現各種考慮，這是為了提高設計、施工與營運維護管理的效率^[4]。

BIM 結合 VR 沉浸式視野應用

虛擬實境（Virtual Reality, VR）是目前科技應用的熱門趨勢，淡海輕軌將 BIM 結合 VR 技術（如圖 3(a)），建立候車站及輕軌列車的 VR 場景（如圖 3(b)），透過讓使用者得到如在現場環境之體驗，並探討設計議題及設計成果。



圖 3 (a) 以 VR 技術討論設計成果；(b) 模擬候車站列車進站 VR 圖（資料來源：李等人^[1]）

AR、VR、MR 差異性

AR (Virtual Reality)

擴增實境 (AR) 是一種將虛擬元素融合到現實世界的技術，透過相機和感應器捕捉現實環境，然後在螢幕上顯示虛擬物體，讓使用者同時體驗真實和虛擬世界。AR 廣泛應用於遊戲、導航、教育和工業等領域，提供豐富的互動體驗。使用者可以透過智慧手機、平板電腦或 AR 眼鏡來體驗 AR。

VR (Virtual Reality)

虛擬實境 (VR) 顯示技術採用包覆式頭盔，讓使用者感覺身歷其境，VR 指在體驗虛擬空間，使用者可以參與互動與探索虛擬世界。使用者戴上 VR 頭盔後，感官被完全包圍，他們只能感受到虛擬世界中的視覺和聽覺刺激，從而實現沉浸式體驗^[5]。

MR (Mixed Reality)

混合實境 (MR) 是結合了虛擬實境 (VR) 和擴增實境 (AR) 的技術，透過混合實境可以讓使虛擬物件與真實世界的物件進行疊合，且有空間定位等功能，讓使用者不須再架設感應器或是手持等裝置，使用者相較於 AR 與 VR 兩者有良好的互動體驗和解決問題方面具有潛力。

選擇 MR 研究原因

快速對比虛實差異

捷運工程在工程界屬於施工難度高且管線複雜性較高的工程，工程師需要能夠在現場施工時進行實時比對設計和實際現場情況，迅速識別並解決潛在的問題和衝突。為了有效縮短了團隊溝通時差，捷運工程透 BIM 導入 MR 設備，利用虛實場景融合，使用者透過視覺化的方式有助於工程團隊更快了解狀況，減少不必要的時間成本。

便利性與安全性

透過 MR 設備不需要手持其他裝置，使工作人員可以在施工現場增加靈活性，並且可搭配施工安全帽，使穿戴裝置也能符合安全規定。

研究方法

傳統捷運機廠的 BIM，概念上即為將傳統紙本圖面的資訊數位化，BIM 以資料庫的方式儲存運用，過去皆利用電腦軟體檢視的方式，利用其

3D 畫面排除衝突及問題，由於許多施工人員對於 BIM 軟體不太會操作且施工現場也不適合攜帶電腦至施工現場檢討，在維護管理方面若當發生設備異常等狀況需要立即性排解，但現場技師難以解決時，需要透過方便與即時性的溝通方式。

因此，本研究透過 MR 技術協助捷運工程在設計階段檢核設計空間與機電管線建置合適性，解決不會使用 BIM 的現場施工人員或業主與工程師進行討論，施工階段於結構體剛完成時，可使用 MR 將機電管線呈現於施工現場，預先檢核結構物體內管線走向，降低機電工程管線與空間規劃變更設計之風險，維護管理部分，可透過 MR 混合實境結合 BIM 或現場設備實境，檢視相關元件資訊如（製造廠商、型號等）或讓非駐廠技師、遠端工程師即時協助指導，為營運人員帶來更為便利的營運維護效益，以下將針對各階段導入 MR 技術應用內容說明。本研究採用的為微軟的 Microsoft HoloLens 2 設備可偵測眼球、手勢之動作並可載入 BIM 操作相關軟體^[6]，利用眼鏡內投影技術呈現現況與實際完工或施工中之樣貌整合，來讓工程師瞭解施工及介面整合以及後續執行方式。

各階段導入 MR 技術應用說明

於設計施工階段應用

由於捷運工程較於複雜且管路眾多，當各分包團隊依照自己的施工圖施作時，經常會發生現場管線空間預留不足，或管線設備過多，使淨高不足等因素導致實際施工產生大量修改設計，導致工程延宕等因素，因此，當設計階段透過實務經驗豐富的工程先進，帶起 MR 設備模擬現場正在建造或安裝時，以實境方式去檢視所需要的預留與安裝方式進行討論，對於後續進行施工時會較為有利，MR 導入設計階段執行流程（如圖 4），利用 MR 設備進行設計檢討。

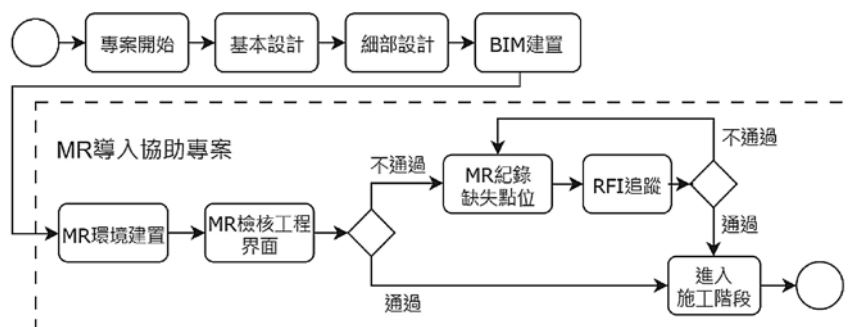


圖 4 MR 導入設計階段執行流程（資料來源：本研究彙整）

前期準備階段

在工程開始時，此時 BIM 在基本設計階段設備管線等未建置，這階段引入 MR 設備效益有限，因此建議在工程進入細部設計階段，BIM 已有機電資料，在此時導入 MR 設備檢討，能輔助工程人員討論再裝設機電設備時是否會與結構發生衝突，虛擬環境中檢查配置是否符合圖說設計與施工規範。

MR 環境建置

MR 設備上進行檢核，首先需要使用 BIM 軟體生成 FBX 檔案，在匯出過程中，須盡可能減少三角網格的數量，否則可能會導致 MR 設備出現導入失敗和效能較低等問題。在 BIM 軟體匯出前，建議三角網格面的數量不超過 50 萬面，如圖 5 所示之檢核模型三角網格數量，確認完成後再將模型轉入 MR 設備中。

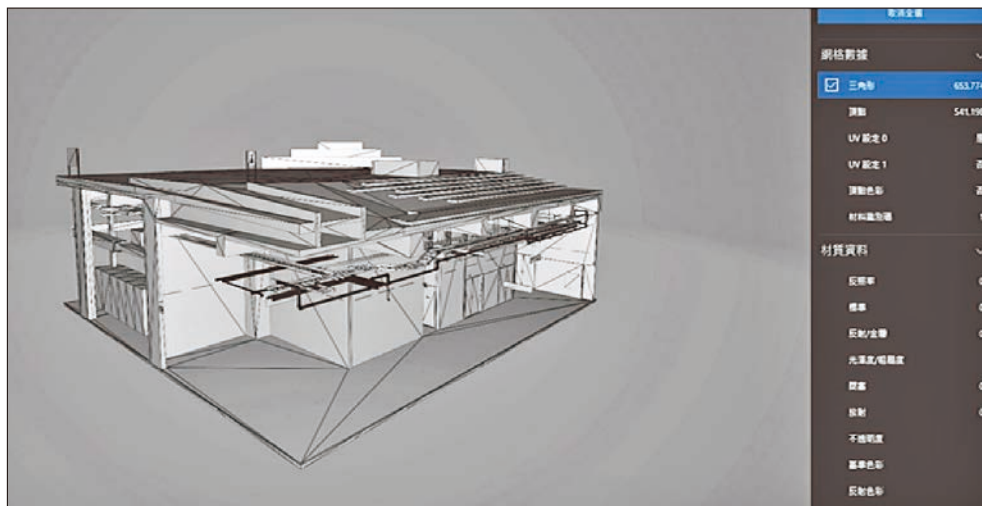


圖 5 BIM 三角網格數據（資料來源：本研究彙整）

MR 檢核工程界面

目前公共工程中在設計與施工階段要求統包團隊定期召開工程介面檢討會議，檢討工程中所發現的問題，並在會議中討論並留下紀錄，但在傳統介面檢討會議中如檢討管線高程時，在圖紙上難以發現問題。導入 MR 來檢核施工議題，使工程師能在會議中以視覺化的方式檢查管線高程，複雜區域並檢討施工性，如圖 6 所示，MR 設備使用者可分享畫面供其他參與會議的工程師協同合作討論管線路徑等議題。

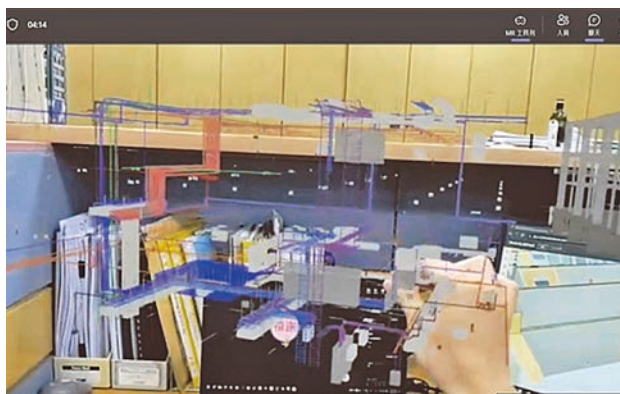


圖 6 多系統拆解畫面（資料來源：本研究彙整）

MR 記錄缺失點

前一階段會議中檢核模型過程所發現的缺失點，施工與監造、專管單位須將本次發現之問題建立 RFI 釋疑點，本研究在 MR 設備加入直接紀錄缺失點的功能，有助於後續追蹤後續並以視覺化方式查看模型，並將已建立的缺失點同步上傳至雲端當中。

本研究情境中採用安坑機廠之維修廠，並實際在工務所中透過 MR 設備的 BIM 檢核軟體將模型切割，（如圖 7）位於維修廠挑高的空間中，設有消防管路，在傳

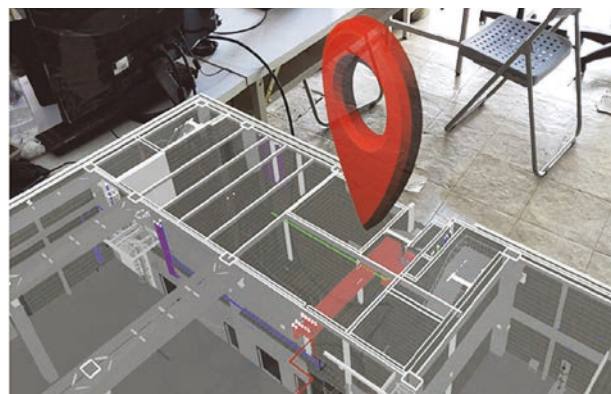


圖 7 MR 設備實際呈現畫面（資料來源：本研究彙整）

統 2D 圖紙中同樓層垂直管路較難於圖面判讀，本研究透過會議中使用 MR 設備檢核此管線，工程師並研判此處管線安裝不易，且較容易出錯並於模型標示需至現場檢核之議題點。

雲端 RFI 追蹤

本研究上一階段模擬情境中透過 MR 建立缺失點，透過雲端系統來管理本次建立的議題，過程中若需要多方技術顧問協調，可藉由雲端平台統一紀錄、追蹤、管理，讓專案參與人員能在 MR 環境下協同討論，並於平板裝置或個人電腦管理相關紀錄（如圖 8），在專業團隊提供建議後，於雲端紀錄。



圖 8 透過雲端平台追蹤議題點（資料來源：本研究彙整）

MR 於工程施工階段應用

施工過程中由於工程介面複雜與時程因素，使工程師會依據現況調整，若缺少會議紀錄與後續追蹤，可能導致 BIM 和施工現場之間存在差異，後續將導致更多修改成本問題。本研究導入 MR 設備於現場施工，透過虛實融合的方式，可以發現與解決 BIM 與現場的差異，即時檢核各分包商是否依照圖說施工，避免日後可能發生管線預留不足問題，本研究研擬施工階段 MR 設備導入流程（如圖 9），可以透過 MR 設備協助施工現場模型檢核、輔助施工、完工驗收等，達成有效的協調與提升工作效率。

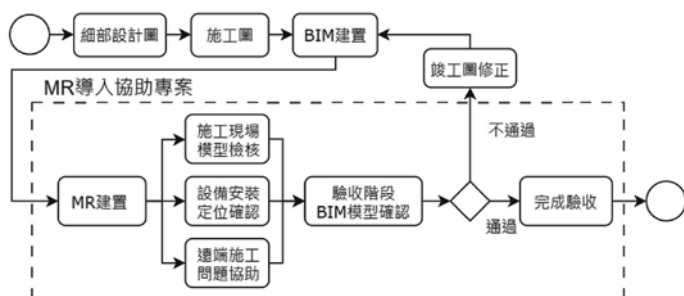


圖 9 施工階段 MR 設備導入流程（資料來源：本研究彙整）

前期準備

在導入 MR 設備前須先完成施工圖說和 BIM 的建置，再透過 BIM 軟體將模型檔案進行轉檔後導入本研究開發之 BIM 轉換軟體，轉換後傳輸至 MR 設備，並導入至施工階段。

施工模型檢核

現場 1:1 實景套疊

MR 設備於施工現場進行 1:1 實景套疊功能時，快速也有效檢核模型是否與現場是否一致，先在現場放置 QR Code 定位點（如圖 10），此動作是使 MR 設備能夠將 BIM 模型套疊在實體位置，定位完成後即可檢視套疊畫面（如圖 11）。

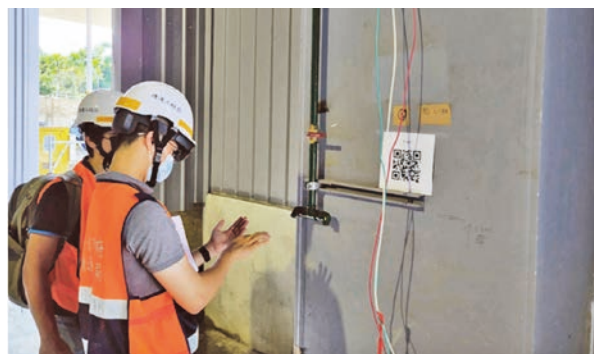


圖 10 MR 設備透過 QR Code 進行 1:1 定位（資料來源：本研究彙整）



圖 11 MR 設備現場套疊畫面（資料來源：本研究彙整）

設備安裝定位確認

透過 MR 設備於施工現場使用 1:1 實景套疊，如圖 12 所示，目前畫面中有一部分管線已安裝與一部分未安裝，透過 MR 設備可快速確認未來安裝的路徑，若管路此時發生穿樑與碰撞時，工程師就能透過 MR 設備進行截圖標示，建立表單後於施工會議中提出，可大幅節省紀錄時間與溝通成本。



圖 12 MR 設備現場套疊畫面
(資料來源：本研究彙整)

遠端施工問題協助

若施工過程中發生突發事件或需緊急協助，可透過 MR 設備請求遠端支援協助，現場工程師可透過 MR 設備求助遠端技師顧問（如圖 13），進行多方通訊，並同步將現場畫面傳送給遠端技師顧問，如圖 14，遠端技師顧問可及時給予協助，減少雙方溝通時差與縮減差旅支出。



圖 13 透過 MR 設備尋求遠端技師協助
(資料來源：本研究彙整)

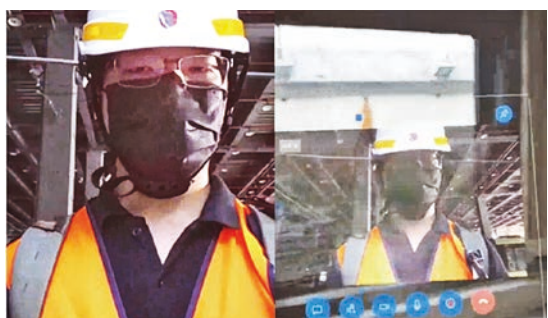


圖 14 遠端技師顧問給予即時指導 (資料來源：本研究拍攝)

驗收階段 BIM 檢核

為使 BIM 專案模型與實際竣工現況相符，利用混合實境技術實景套疊 BIM 是否與現場相符，本階段需請施工單位於待驗收空間，建立 MR 視點與相對應的 QR Code，於驗收時業主透過 MR 設備，檢視套疊於實體空間的 BIM，有利於驗場 BIM 的比對與確認，如圖 15 所示。



圖 15 透過 MR 設備驗收 BIM 與現場是否一致
(資料來源：本研究彙整)

MR 於維護管理應用

透過 MR 設備可在風險較高的時期，例如流行疾病疫情嚴峻時期，工程可能會限制進入工地人員數，這會使工人在需要時難以獲得幫助，無法到現場的主管或遠端技術顧問，與現場人員在溝通上產生障礙，也無法親自解決問題，且後續維護管理階段需要進行臨時維護以及定期巡檢時，可以透過 MR 技術提供現場進行維護管理的便利性，如圖 16。

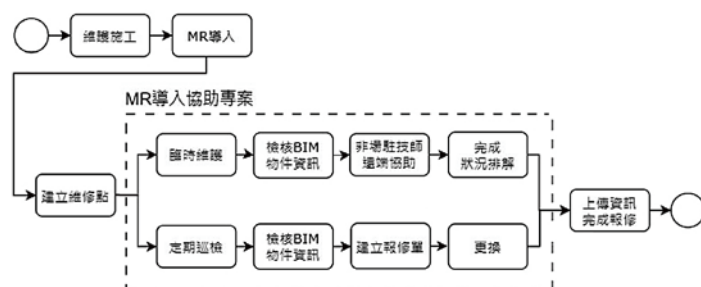


圖 16 維護管理階段 MR 設備導入流程
(資料來源：本研究彙整)

臨時維護

檢核 BIM 物件

維運階段情境模擬若發生緊急狀況檢修人員透過 MR 設備進行設備定位後，至現場後針對所需檢視之設備進行查看，如圖 17、圖 18，可透過 MR 檢核 BIM 中的元件資訊，並可立即透過 BIM 中的設備資訊進行通報或緊急維護。

非駐廠技師顧問遠端協助

若發生緊急狀況，設備涉及專業廠商維護範疇無法即時到現場維修時，現場人員可以使用 MR 設備與非駐廠技師共享即時畫面。如圖 19，非駐廠技師，可以直接從他們的電腦螢幕上看到 MR 設備中看見現場

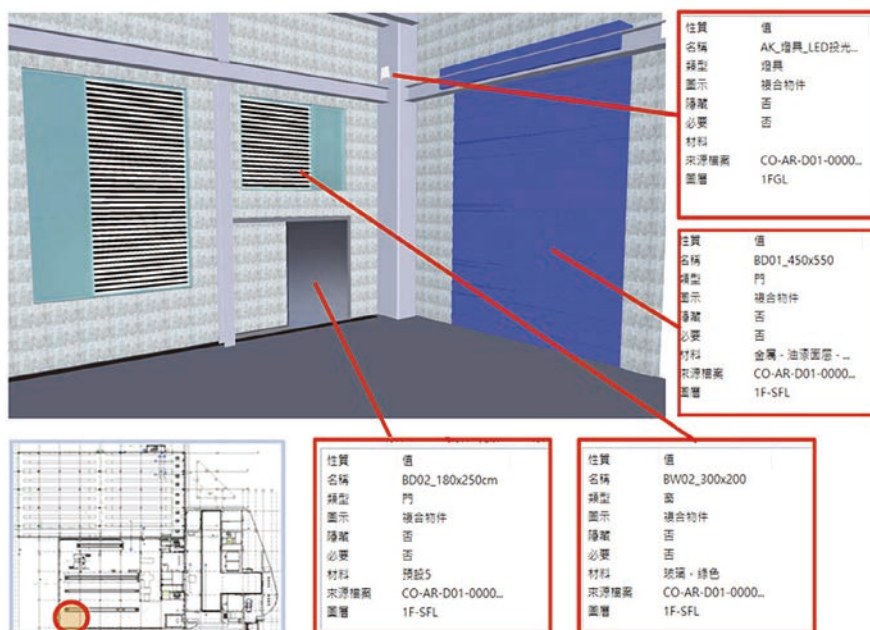


圖 17 於停留點中檢修人員所檢核之相關元件資訊 (資料來源：本研究彙整)

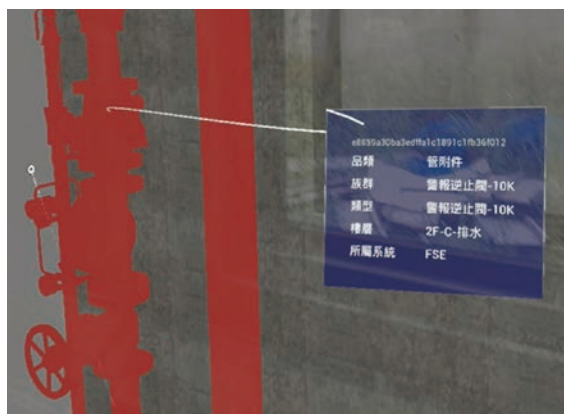


圖 18 MR 設備檢視 BIM 元件資訊 (資料來源：本研究彙整)



圖 19 MR 設備現場維護檢修狀況 (資料來源：本研究彙整)

人員相同的工程現場，且現場人員可以透過空出的雙手使用工具來進行即時維修，而非廠駐技師顧問可以在現場人員施作時透過標記、檔案傳輸、照片分享等功能輔助現場人員更能理解修復過程。

定期巡檢

檢核 BIM 物件

在傳統發生設備異常等狀況時，常需查找圖說與送審資料才可知設備名稱與維護廠商，本研究在維護管理階段中現場定期巡檢人員透過 MR 設備進行設備定位後，至現場後對設備進行查看 (如圖 20)，若發現設備異常可透過 MR 檢核 BIM 中元件資訊，並立填寫報修單使維護廠商到場協助修復，可大幅減少查找圖說與資料的時間。

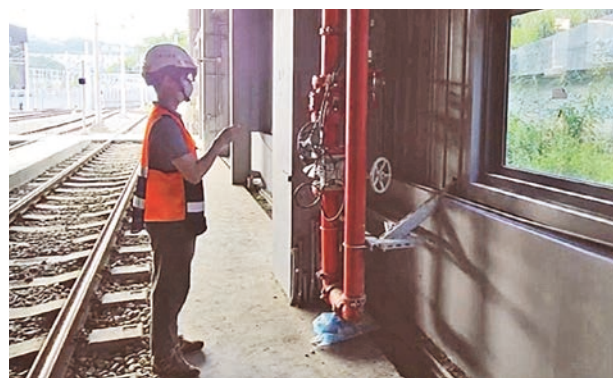


圖 20 MR 設備現場維護檢修狀況 (資料來源：本研究彙整)

建立報修單

使用 MR 設備查看 BIM 資訊，將需維修的設備資訊填寫於維修工單中，透過 Field Service 網頁建立檢修工單，進行後續維修時之狀況追蹤亦可進行管理及查看，如圖 21。



圖 21 Field Service 網頁建立檢修工單
(資料來源：本研究彙整)

新北捷運工程 BIM 導入 MR 設備呈現設計、施工及維護管理階段模型於實際案場，將 MR 設備結合 BIM，透過設計前檢討施工前後比對，進而模擬工程結構與機電系統碰撞衝突；維護管理階段透過機械設備維護管理資訊管理、維修派工作業等項目，使營建產業結合更多元的智慧科技應用。

結論與建議

為提升工程品質，在新北捷運工程生命週期導入混合實境（MR）之新技術，減少施工問題避免發生管線與工程結構衝突，透過 MR 設備更能了解管線於圖面上配置，利用虛實疊合技術，使工程施能快速了解現場管線配置與走向後可減少不按圖施工等問題，進而控制進度與成本。於後續維護管理方面，捷運工程各式設備在完工之後被使用的過程中，關於當初採購供應商、保固商、產品規格、操作手冊等相關資訊，都可以在 BIM 技術的幫助下更有效的完整保存，以下舉例幾項運用 MR 實境技術可協助施工現場的優勢：

1. 虛實疊合視覺化呈現

利用 MR 設備的虛實疊合視覺化技術可以解決平面視圖上無法確認的碰撞問題，也可於現場疊合 BIM 與現場做 1：1 比對，讓現場工程師可在各階段發揮不同效益，在設備安裝前可確認預留空間是否足夠，設備安裝後可查閱 BIM 模型資訊協助維護階段檢修使用。

2. 降低各式風險

透過 MR 設備進行前期檢討後期確認，可避免於施工階段發生管線衝突問題，減少後續重工或結構體打除等問題，提升工程進度，且 MR 的輕巧與簡易操作性相較於 BIM 軟體，可提升施工人員使用意願。

3. 節省時間成本

有鑑於新冠疫情期間各項交通皆受到影響，而新北捷運安坑線於工程內有許多設備及特殊工項如集電弓線路、號誌系統仍須非駐廠工程師技術服務與協助，若未來發生相似狀況，以致於許多須急迫解決問題遭到延遲，工程師能攜帶 MR 設備至現場，利用設備遠距技術支援，當遇到較為複雜之技術問題時，可透過系統遠端請求非駐廠技師協助，並利用現場 1：1 實景套疊功能確認設備所在位置，配合專業技師快速針對狀況做排除。

4. 提升專案品質

在設計階段透過 MR 設備在各系統之檢討會議中可快速確認衝突位置，並檢討相對應策略；施工階段利用 MR 設備可以在工地現場確認與檢核施做位置並在三維空間標記，使釋疑時能夠更準確的確認現場狀況；維護管理階段利用 MR 設備可於現場快速檢查各設備的狀況，以保持設備在良好狀況下運轉。

透過前述等優勢本研究運用 MR 技術之經驗以期導入更多類型工程，使營建產業結合更多元的智慧科技應用，提升工程上混合實境的應用成效，增進相關產業科技發展。

參考文獻

1. 李政安、凌建勳、涂貫迪（2018），「淡海輕軌 BIM 技術應用與設計施工整合特色」，土木水利，第四十五卷，第一期，第 73-81 頁。
2. 林建輝，「BIM 在捷運三鶯線之施工應用—BIM 在智慧化運用」。
3. 李政安、鄒宏基、周茂益、劉泰儀、吳崇弘（2021），「建築資訊模型（BIM）於安坑輕軌系統安新橋設計施工應用實務探討」，土木水利，第四十八卷，第一期，第 29-36 頁。
4. JR 東日本，進行中の建設プロジェクト最新技術を活用したプロジェクト推進：JR 東日本。
5. 周淵清、陳宜民（2019），「BIM 結合 VR 之工程應用」，中興工程，第 145 期，第 15-20 頁。
6. Microsoft，HoloLens 2 功能並檢閱技術規格，取自：<https://www.microsoft.com/zh-tw/hololens/hardware>





茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木水利工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏／封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3 期 9 折， 4 期以上 8.5 折	

刊登月份：

○ 50.6 ○ 51.1 ○ 51.2 ○ 51.3 ○ 51.4 ○ 51.5 共 次
(12月) (2月) (4月) (6月) (8月) (10月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)
商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木水利工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款 帳號	0	0	0	3	0	6	7	8	金 額 新台幣 (小寫)	仟萬	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	--------------------	----	----	----	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- ☐ 常年會員年費 1,200 元
☐ 初級會員年費 300 元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

- ☐ 國內・個人會員 新台幣 300 元
☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 1,800 元
自第 卷第 期起， 年期雙月刊 份

訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期

- ☐ 國內・個人會員 新台幣 1,600 元
☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 3,600 元
☐ 國外・個人 美金 80 元
☐ 國外・機關團體 美金 200 元
自第 卷第 期起 年期學刊 份

收款 戶名	社團法人中國土木水利工程學會	
寄 款 人	主管：	
姓 名		
地 址	□□□—□□	
電 話	經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

- ◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款 帳號戶名	
存款 金額	
電腦 紀錄	
經辦 局收款戳	

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓 名		款 別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	繳納會費 ☐ 常年會員年費 1,200 元 ☐ 初級會員年費 300 元
會員證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 ☐ 國內・個人會員 新台幣 300 元 ☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 1,800 元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
身分證號碼			訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期 ☐ 國內・個人會員 新台幣 1,600 元 ☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 3,600 元 ☐ 國外・個人 美金 80 元 ☐ 國外・機關團體 美金 200 元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
卡 別 ☐ VISA ☐ MASTER CARD ☐ JCB			白天聯絡電話
信用卡卡號			通訊地址
信用卡末三碼			
信用卡有效期限 (月 / 年)			
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請 寄 款 人 注 意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

提高從設計到施工的整個工作流程品質

解決對後置植筋品質和效率的擔憂

近來，建築業已經認識到，當涉及到維護標準和後置植筋的品質時，人們越來越關注。根據英國新土木工程師（NCE）的研究，高達21%的受訪者對混凝土附掛物在現場的正確安裝表示懷疑。錨栓破壞可能導致傷亡，如波士頓大隧道（2006）和日本筭子隧道（2012）。

應對這一挑戰需要決心，這需要創新和尖端的解決方案。喜利得了解到對整體解決方案的需求，打造了一套解決方案，超越了單一的產品或服務，包括設計、安裝和現場拉拔測試服務，都是為了提升整個工作流程的品質。

透過 Hilti PROFIS Engineering 實現卓越設計

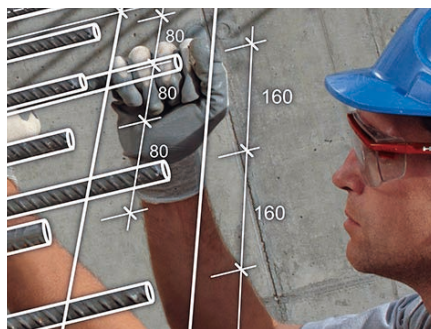
在設計後置植筋方案時，雲端軟體 PROFIS Engineering 是一個改變遊戲規則的工具。它可以計算和分析多種固定方式，包括底板連接、新舊混凝土之間的連接，更可靠、更經濟、更符合規範。該軟體還配有特定應用的工程培訓，使您能夠釋放 PROFIS 的全部潛力。

新推出的“新舊混凝土連接”設計模組也是對 PROFIS 平台的加強，使使用者能夠對樓板/牆的擴展、結構連接或混凝土增厚的應用進行建模。它還允許使用者在設計方法之間快速切換，減少產生錯誤的可能性並確保符合建築規範。



PROFIS Engineering 的雲端功能還允許使用者與同事和相關者進行計畫合作，減少溝通錯誤的可能性，確保每個人都在為同一個目標努力。

為了進一步支持使用者，喜利得提供全面的服務，這包括線上和電話諮詢，以及培訓和認證課程，就是為了幫助使用者最大程度地利用該軟體。



專業的安裝服務有助於確保品質和安全的執行

正如任何建築專業人士所知，安裝過程與設計過程同樣重要。工作現場的一個大挑戰是擁有熟練和有經驗的工人，以實現高品質的執行。與產品應用有關的安裝服務對於確保後置植筋連接的安全、品質和效率非常重要。因此，不可發生重工或驗證測試失敗的情況。

喜利得專業安裝人員培訓服務提供理論和實踐相結合的培訓，專為安裝人員和工務設計。它解釋了關於如何正確安裝鋼筋的基本知識，並對安裝過程中的健康和 safety 提出建議。根據 EOTA（歐洲技術評估組織）的規定，只有經過培訓的人員才能安裝後置植筋，這一點非常重要。

安裝鋼筋的方法不正確，可能造成結構損壞，並為工程的承包商和業主帶來潛在的責任。它還可以防止重工，這可能會導致工程的延誤和額外的費用。

除了安裝人員的培訓，在整個安裝過程中還有持續的支援，以幫助確保工作以最高標準進行。

針對獨特的應用，喜利得有多種錨固系統和工具，所有這些安裝系統和服務都是為了確保後置植筋達到品質、安全和效率的最高標準。

現場測試服務，縮小信心差距

為了進一步保證後置錨栓的安全，檢測起到了重要作用。喜利得的現場拉拔服務提供一系列的測試服務，以評估錨固系統、後置植筋和其他安裝的關鍵因素的安裝品質。

他們的專家團隊使用先進的測試設備，進行全面的測試，驗證已安裝的錨栓和鋼筋連接的性能。這包括破壞性的拉出測試或非破壞性的負載驗證測試。

除了測試服務外，喜利得還提供全面的支援，包括技術援助和指導，以及培訓和認證計劃，以幫助建築專業人士獲得最大的服務效益。

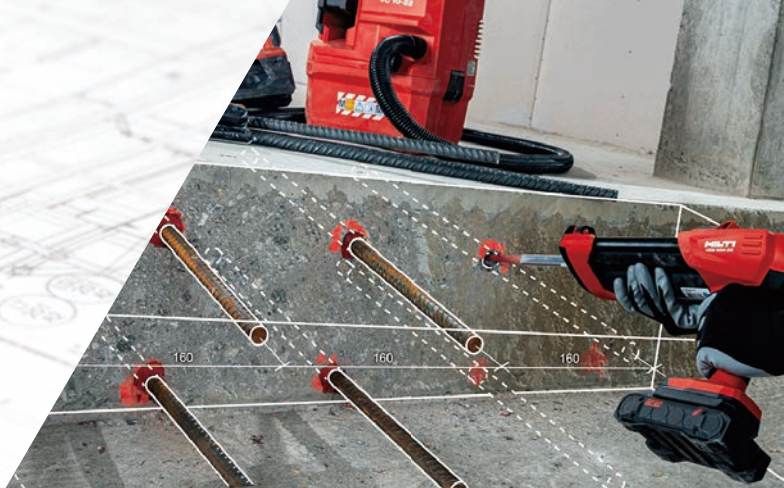
喜利得致力於讓建築業更美好

喜利得是為建築業提供創新和技術先進的產品、系統和服務的全球領導者，決心與建築專業人士合作，通過其創新和前瞻的產品和服務，提高從設計到後置植筋的整個工作流程品質。

更多關於喜利得後置植筋解決方案的訊息，包括雲端計算的軟體 PROFIS Engineering、安裝培訓和現場測試服務，請訪問喜利得網站。



www.hilti.com.tw





社團法人中國土木工程學會 112 年年會大會暨土木工程論壇

日 期：112 年 12 月 1 日（星期五）

地 點：【高雄萬豪酒店 8F】 高雄市鼓山區龍德新路 222 號

時 間	議 程		
9:00-9:30	相見歡（註冊、報到與領取資料）【8F 萬享 A 廳】		
9:30-12:00	112 年年會大會 1. 開幕式 2. 主席致詞 3. 介紹貴賓及貴賓致詞 4. 專題演講：工研院 張培仁副院長「台灣科技產業發展趨勢」 5. 評獎委員會報告、頒發「工程獎章」、得獎人致詞 6. 頒發「中技社土木水利學術獎」、頒獎人致詞、得獎人致詞 7. 「曾元一工程特殊貢獻獎」頒獎儀式、頒獎人致詞、得獎人致詞 8. 頒發「會士證書」 9. 頒發「論文獎」 10. 頒發「獎學金」 11. 資訊委員會報告「2023 工程數位創新應用獎評選」、頒獎 12. 工程美化委員會報告「112 年工程環境與美化競賽」、頒獎 13. 技顧公會青年委員會報告「2023 全國大專院校學生工程創意競賽」、頒獎 14. 112 年 50 周年慶及會務報告、年會籌備報告 15. 第二十六屆理事長交接典禮 16. 唱大禹歌、禮成		
	【8F 萬享 A 廳】		
12:00-13:00	午 餐（餐 盒）【8F 萬享 A 廳】		
13:00-15:00 (120 min)	論壇一 土木工程論壇 營造業缺工現況及因應方案	論壇二 112 年工程環境與美化獎 [工程美化與景觀類] 優勝發表	論壇三 2023 工程數位創新應用獎 成果發表
	【8F 萬享 E 廳】	【8F 萬享 C 廳】	【8F 皇愉會議室 8-1】
15:00-15:30	茶 敘		
15:30-17:30 (120 min)	論壇四 水利工程論壇 永續多元水資源的政策及執行	論壇五 112 年工程環境與美化獎 [工程生態與環境類] 優勝發表	論壇六 2023 全國大專院校 學生工程創意競賽 優勝發表
	【8F 萬享 E 廳】	【8F 萬享 C 廳】	【8F 皇愉會議室 8-1】
18:00-20:30	大 會 晚 宴 【8F 萬享 BD 廳】		



社團法人中國土木工程學會、國立高雄科技大學、正修科技大學 聯合主辦