中華水土保持學報, 56(3):153-164(2025)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 56 (3)*: 153-164* (2025)
DOI: 10.29417/JCSWC.202509_56(3).0005

應用智慧型手機於土石流災害勘查空間資訊數位化

李哲宇[1,2]　林駿恩[1]*　陳俊廷[1,2]　李易諭[1,2]　葉雯婷[1,2]　黃偉宸[1,2]

摘　　要　當颱風豪雨過後土砂災害頻繁，如何於災害發生後快速蒐集整理災情資訊相當重要。災害發生時常受限於高雲覆或降雨影響，加之傳統測量儀器昂貴、攜帶不易，不利於即時取得災後現地資料。為於災害發生後快速獲取現地情資，本研究利用智慧型手機進行工程構造物、堆積土砂、崩塌源頭等勘查，並將調查成果結合 UAV 與遙測影像進行輔助與驗證作業，以提供數位化地理空間資訊，作為後續防災規劃及工程改善參據。結果顯示，智慧型手機可快速建置 3D 模型並完成幾何量化分析，提供災後勘查所需數位化資訊，再配合 GIS 等軟體進行加值分析與水土保持工作應用，提升傳統調查方式與工作效率，可作為防救災單位進行災害後勘查與防減災工程規劃工具的新選擇。

關鍵詞：智慧型手機、三維模型、現地調查、土石流、工程規劃

Application of Smartphones in Field Surveys for the Digitization of Postdisaster Debris Flows and Spatial Information

Che-Yu Li[1,2]　Chun-En Lin[1]*　Chun-Ting Chen[1,2]　Yi-Yu Li[1,2]　Wen-Ting Yeh[1,2]
Wei-Chen Huang[1,2]

ABSTRACT　Rapid collection of postdisaster spatial information during field investigations after typhoon seasons is imperative. Persistent cloud cover and heavy rainfall make it difficult to use costly, bulky survey instruments for ground surveys in disaster settings. In this study, we used smartphones to conduct rapid field surveys and obtain spatial information for disaster mitigation and engineering design. Smartphones facilitated the digitization of engineering structures, riverbed sediments, and upstream slump areas. The results were validated using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-derived three-dimensional models. Our findings suggest that smartphones can rapidly generate and document three-dimensional models for geometry data processing and can thus be integrated with the GIS system to enhance water and soil conservation engineering applications. Overall, smartphones represent a new, efficient approach to field surveillance and can serve as an effective tool for postdisaster surveys and engineering planning.

Key Words: smartphones, 3D model, field survey, debris flow, engineering planning

一、前　　言

由於傳統測量儀器費用動輒數十萬至數百萬元，除了設備不易攜帶外，其操作上需具備有專門測量背景知識，難以普及化於民眾使用。過往於現場調查進行地形測量時，大抵是使用全測站、光學雷達掃描儀等儀器，其重量與體積龐大，不具攜帶便利性。自 2020 美國蘋果公司在 iPhone Pro 機型推出具有 LiDAR 功能後，目前使用智慧型手機進行 3D 掃描並配合各式應用軟體，已大幅度降低測量及 3D 模型建置的技術門檻 (Corradetti et al., 2021; Luetzenburg et al., 2021)。再者，隨著智慧型手機於現地勘查的應用，其提高工作效率和數據收集的靈活性，減少時間和人力成本。通過手機的應用程式幫助，研究人員可即時觀看與量測數值，並且可將成果整合於地理資訊系統、工程規劃軟體等，方便進行綜合性分析 (Tavani et al, 2022; Zhang et al., 2018)。

目前 iPhone LiDAR 掃描測繪法與攝影測量法之 3D 高斯潑濺法 (3D Gaussian Splatting, 3DGS) 是不同的 3D 模型建置技術。前者是量測雷射脈衝從發射到反射來回所需要的時間，即飛時測距 (Time of Flight) (Tondo et al., 2023)；後者是手機拍攝多角度影像並利用運動回復結構 (Structure from Motion, SfM) 技術，進行 3D 渲染與重建，再由 3D 高斯潑濺法 (3DGS) 還原拍攝物體紋理、顏色等以生成高度擬真的 3D 模型 (Wu et al., 2024; Wolf et al., 2024)。因此，iPhone LiDAR 掃描測繪法適合應用於快速現場量測、室內空間建模或是需要即時空間幾何資訊的場域；而在攝影測量法之 3D 高斯潑濺法 (3DGS) 則是適合應用於需要高細節、高度擬真 3D 模型、複雜紋理、廣域場景。熱門的手機應用程式如 Scaniverse 和 Polycam 兩者皆支援 LiDAR 和 3D 高斯潑濺法 (3DGS) 等方法，讓研究者針對分析標的物需求採不同

〔1〕農村發展及水土保持署 減災監測組
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA, Taiwan, R.O.C.
〔2〕財團法人農業科技研究院
Agricultural Technology Research Institute, Taiwan
* Corresponding Author. E-mail: jasonsinlin@gmail.com

3D 建模方式。

但需要注意的是，iPhone LiDAR 掃描對於標的物尺寸小於 10 公分的物件，其精度明顯下降，對於標的物細節無法完全補捉。且由於 iPhone 硬體限制，其最大掃描距離約 5 公尺，並且對於植物、透空或是表面反光等物件掃描時將降低點雲品質 (Luetzenburg et al., 2021; Tavani et al, 2022)。目前利用 iPhone 搭配應用程式進行地質調查 (Corradetti et al., 2021; Luetzenburg et al., 2021; Tavani et al., 2022)、文化資產保存 (Abbas & Abed, 2024; Martino et al., 2024)、建築測繪 (Treccani et al., 2024)、道路建設測繪 (Suleymanoglu et al., 2023)、虛擬博物館 (Noviana et al., 2024)、地形量測及河道糙度分析 (Monsalve et al., 2023; Tavani et al., 2022)、犯罪現場記錄 (Kottner et al., 2023) 等三維文件化 (Three-dimensional documentation) 已有相當多成果，其誤差等級約在 1 到 10 公分間，但對於土石流災害現場調查仍未有深入研究與應用。

本研究實際於嘉義縣中埔鄉中崙村土石流潛勢溪流 (嘉縣 DF051) 地區，在發生土砂災害後使用智慧型手機 iPhone 14 Pro，以及搭配 Trimble R6 GNSS、UAV 航拍進行災區勘測。主要研究目標為量測不同標的物項目如工程構造物、堆積土砂量體、河道粒徑勘查等，並將手機調查成果結合 UAV 與 RTK 量測成果進行輔助與驗證作業，用以評估量測標的物品質、準確性及實用性。初步研究成果顯示，使用智慧型手機 LiDAR 進行掃描，能夠確保災後快速災情資訊取得及勘查紀錄數位化。此外，目前具備 LiDAR 掃描功能之智慧型手機價錢約在 1 至 5 萬元間，比較動輒數十萬至數百萬傳統測量儀器，可提供災害場域勘查工具的新選擇。

二、材料及方法

1. 研究材料與方法

(1) 智慧型手機 iPhone 14 Pro

美國蘋果公司自 2020 年 10 月發布 iPhone 12 Pro 系列開始，即搭載 LiDAR 感測器，以強化擴增實境 (Augmented Reality, AR) 功能。LiDAR 其特點利用感測器發出雷射脈衝 (Laser pulse) 量測與物體反射之飛時測距 (Time of flight, TOF)，即可測得與目標物距離。再者，除 LiDAR 感測器外，使用相機攝影功能 (Photogrammetry) 則可以獲取實際環境資訊，如顏色與形狀資訊等，以呈現量測物體表面樣貌，配合各式應用軟體，已有相當多研究及工程勘測等投入工程規劃與設計應用。在使用限制上，目前 iPhone LiDAR 量測距離為 5 公尺，其次因使用手持移動方式進行物體掃描，對於超過 5 公尺範圍需多次掃描來拼接成果。此外，由於 iPhone LiDAR 所具備的掃描密度較低 (Tondo et al., 2023)，無法對細微物體進行 3D 掃描，但其絕對精度可達±1 公分，整體精度±10 公分 (Kottner et al., 2023; Suleymanoglu et al., 2023; Treccani et al., 2024)，已足以應用於地形測繪、建築建模、文化資產保存、犯罪現場記錄等。在本研究所使用智慧型手機設備為 iPhone 14 Pro，其相關屬性如表 1 所示。

(2) Trimble R6 GNSS 系統

Trimble R6 GNSS 系統是一個靈活且具備未來擴充性的系統，可依未來不同需求靈活地進行擴充。它將 GNSS 接收儀、天線、電池和通訊裝置整合在強固的機盒中，提供整合式蜂巢、UHF 和藍芽通訊選項。系統核心採用 220 通道 Trimble Maxwell™ 6 晶片與先進的 Trimble R-Track™技術，並在系統中支援 GPS (包含 L2C, L5 等增強訊號) 和 SBAS/QZSS，透過升級選項可支援 GLONASS、Galileo 和北斗系統，進一步增強在困難環境下的衛星追蹤能力。Trimble R6 提供高精度的 RTK 定位性能，例如即時動態單基線的水平精度可達 8 mm + 1 ppm RMS，初始化時間通常少於 8 秒，可靠性超過 99.9% (表 1)。

表 1 iPhone 14 Pro 及 Trimble R6 屬性功能表

Table 1 Main specifications of iPhone 14 Pro and Trimble R6 features

iphone14 Pro 尺寸	71.5 x 147.5 x 7.85 毫米；206克	Trimble R6 尺寸	190 x 102 毫米；1520克
感測器	LiDAR 掃描儀、高動態範圍陀螺儀、高 g 值加速度計、接近感測器、雙環境光度感測器	同步追蹤衛星訊號	GPS：L1C/A、L1C、L2C、L2E、L5 GLONASS ：L1C/A、L1P、L2C/A、L2P、L3 SBAS：L1C/A、L5 (支援L5的SBAS衛星) Galileo ：E1、E5A、E5 北斗 (COMPASS)：B1、B2
相機	主相機：4800萬像素，24 mm，f/1.78 光圈 超廣角相機：1200萬像素，13 mm，f/2.2 光圈，120° FOV 望遠相機：1200萬像素，0.5 倍、1 倍、2 倍、3倍光學變焦，77mm，f/2.8 光圈，光學影像穩定功能		
防水性能	IP68 (在最深達6公尺水中最長達30分鐘)	RTK 定位性能	定位速率：1Hz、2Hz、5Hz and 10Hz 後處理動態 (PPK) GNSS測量： 水平：8 mm + 1 ppm RMS 垂直：15 mm + 1 ppm RMS 即時動態測量 (單基線<30km)： 水平：8 mm + 1 ppm RMS 垂直：15 mm + 1 ppm RMS 網路 RTK： 水平：8 mm + 0.5 ppm RMS 垂直：15 mm + 0.5 ppm RMS
價格	999 USD	價格	12,000 USD

source：https://www.apple.com/iphone/compare/?modelList=iphone-15-pro,iphone-14-pro,iphone-16-pro;
https://old.agis.sk/produkty/geodeticke-prijimace-gnss/trimble-r6-gnss--datasheet.pdf

(3) 手機 3D 掃描與應用程式

過去在針對標的物掃描時，傳統作業方式是以光學雷達掃描儀進行作業，現場除光學雷達掃描儀本身外需搭配三腳架進行作業，後續掃描點雲資料無法即時於現場處理，需由數據處理軟體配合電腦解算及模型建置等作業 (表 2)，其在 3D 掃描時因工具繁多、成本高與較難試錯等問題，造成使用 3D 掃描與模型建置門檻過高。但自 iPhone 12 Pro 內建 LiDAR 功能後，其在處理中小型物體或是地形上具有相當程度的準確性和實用性 (Luetzenburg et al., 2021; Zaczek-Peplinska and Kowalska, 2022; Abbas and Abed, 2024; Suleymanoglu et al., 2023; Corradetti et al., 2021; Harley et al., 2019)，人人均能自建 3D 掃描的時代便開始普及 (表 3)。

表 2 傳統 3D 掃描儀與智慧型手機 3D 掃描差異比較表

Table 2 Comparison of 3D scanning between Terrestrial Laser Scanning and smartphone

類型	傳統3D掃描儀	手機3D掃描
使用儀器	光學雷達掃描儀、三腳架、數據處理軟體、高性能電腦	具有LiDAR感測器與攝影功能之手機
成本	3D掃描儀 (Terrestrial Laser Scanning) 約20,000至110,000USD以上	以iPhone 14 Pro為例約999 USD
普及性	成本高昂、容錯率低、需具專業測量知識。 一般大眾難以入手使用。	成本相對便宜、無測試限制、不需具備專業測量知識。 一般大眾或研究使用皆可輕易入手。

Note：修改自農村水保署-電子報 https://tech.ardswc.gov.tw/EPaper/Home/EPaper?PaperID=c746e5a3-9528-494c-9698-712605de2b8b

表 3 智慧型手機 LiDAR 掃描測繪法與攝影測量法應用程式

Table 3 Smartphone application of LiDAR scanning and photogrammetry

使用應用程式	3d Scanner APP	Scaniverse	WIDAR	Polycam
適用系統	IOS	IOS/Android	IOS/Android	IOS/Android
建模方式	LiDAR/攝影測量			
模型類型	網格/點雲			
輸出格式	模型匯出格式 OBJ、FBX、GLTF、USDZ、STL、DAE	OBJ、FBX、GLB、USDZ、STL	OBJ、FBX、GLB、STL、USDZ	DAE、FBX、GLTF、OBJ、STL、USDZ
	點雲匯出格式: PCD、PLY、PTS、LAS、e57	PLY、LAS、SPZ	PLY、XYZ	DXF、LAS、PLY、PTS、XYZ
特色	1. 可計算體積 2. 具虛擬實境 (Virtual Reality) 功能 3. 可匯出常用工程軟體SKETCHUP、AutoCAD等)使用格式	1. 無網路狀態可製作模型 2. 長度、周長測量 3. 具虛擬實境 (Vir-tual Reality) 功能 4. 線上模型展示功能 5. 介面簡單適合初學者	1. 支援Android系統且免費 2. 具有改變紋理、模型比例和旋轉等功能 3. 線上模型展示功能	1. 快速自動對齊測繪功能 2. 360環景模式功能 3. 部分無網路狀態可製作模型 4. 長度、周長測量 5. 具虛擬實境 (Vir-tual Reality) 功能 6. 線上模型展示功能

source：https://docs.3dscannerapp.com/faq/supported-formats；https://community.scaniverse.com/t/which-formats-can-scaniverse-export-to/50; https://learn.poly.cam/hc/en-us/articles/27756102599572-What-File-Types-Can-Polycam-Export。

2. 手機 3D 掃描的操作方法

(1) 掃描使用方法

根據日本行動掃描協會的行動裝置掃描手冊 (モバイル端末スキャンマニュアル) 資料，其建議手機 3D 掃描時可與地面傾角 30 度，距離物體 1.5~2 公尺距離，移動時以個人的步伐間距進行移動，當前方有牆壁時可貼近掃描。另外，以掃描區域的短邊方向為前進移動路徑來增加掃描的品質，以及可使用有三軸穩定器的自拍棒提升掃描距離 (目前 LiDAR 距離極限為 5 公尺)。但掃描時也必須注意：(1) 避免對物體以外的透空處掃描； (2) 避免以跑步速度進行掃描；(3) 掃描距離盡量在 5 公尺內，才能確保掃描成果品質 (圖 1)。

(2) 手機 3D 掃描應用

①幾何空間資訊量測

以野外現勘查拍照紀錄為例，由於相機單張拍攝範圍無法納入災害周遭全部地景，難以瞭解現場全貌。利用手機 3D 掃描可在 3 分鐘內掃描約 800 平方公尺的區域，並快速建立比照片視角更全面的 3D 模型。再者，通常於現地勘查時，需要使用捲尺、箱尺、TLS (Terrestrial Laser Scanner, TLS) 測量儀器等進行目標物體的幾何資訊量測，此方法不僅費力耗時，且量測時需至少 2 人以上協力操作。但若是利用手機物體測量 APP，如「3d Scanner APP」進行 3D 掃描，則可現場即時計算物體的長、寬、高、面積與體積等資訊 (Martino et al., 2024)，並可將掃描檔案輸出後導入「CloudCompare」軟體內，加入控制點以精確計算土方高程與體積等幾何資訊，作為後續規劃設計應用。

②導入控制點

若要在手機掃描成果中加入控制點時，其布標設置可參考日本行動掃描協會的行動裝置掃描手冊所使

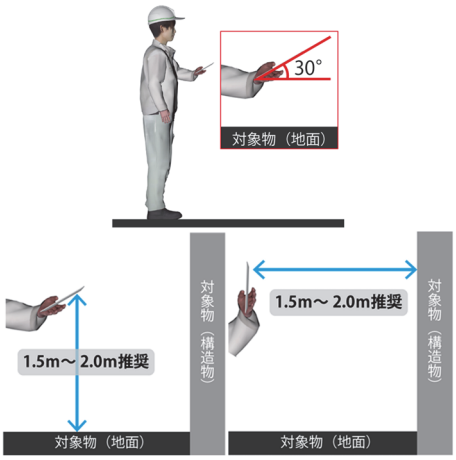
用的兩色邊長 10 公分形式布標作為控制點。在欲掃描區域內，每 50 平方公尺擺放控制點在四個角落與中心位置，並可增加檢核點後進行掃描 (圖 2)。於手機掃描完成後，利用 RTK 量測各控制點之三維坐標，可於 CloudCompare、TREND-POINT 等軟體輸入標定，即可使點雲資料得到正確三維坐標。

③身臨其境的 AR、VR 展示系統

在 3D 模型建置完成後，即可以第一人稱視角觀看 3D 模型，例如以「3d Scanner APP」進行展示，可漫遊於虛擬世界中，且多數手機 3D 掃描 APP 均內建有 AR 展示功能，可讓掃描成果投放到現實世界，展現虛實整合應用。此外亦可將成果上傳至 3D 展示平台-「Sketchfab」，透用 VR 功能讓使用者輕鬆地感受沉浸式體驗。

④工程規劃設計應用

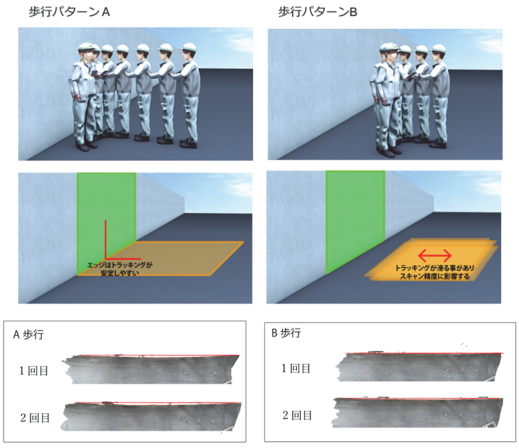
傳統工程規劃設計需經由現場勘查、測量、平面規劃、施工圖套繪等繁複過程，且工程規劃主要以平面設計圖呈現，若未經專業識圖訓練者，較難以理解設計圖說資料，再者若須使用到 BIM (Building Information Modeling，建築資訊模型) 技術工具來呈現，其所需技術與經費亦難普及於一般大眾。目前手機 3D 掃描利用「3d Scanner APP」可匯出 Sketchup 相容之 DAE 檔案至 Sketchup 進行繪圖設計，其後可再將檔案匯入 AutoCAD 進行工程規劃設計與應用。此外，手機 3D 掃描所建立的 3D 模型相較 2D 平面設計圖容易理解，其整體執行僅需一台手機，再搭配既有繪圖工具，成為當前工程規劃設計新選擇 (Abbas and Abed, 2024; Martino et al., 2024)。

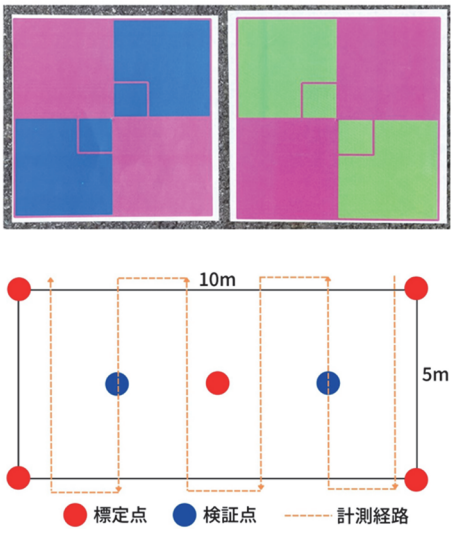


Note：モバイル端末スキャンマニュアル　https://mobilescan.jp/

圖 1　手機掃描的操作方法示意圖

Fig.1　Operating methods for Smartphone scanning





Note：モバイル端末スキャンマニュアル　https://mobilescan.jp/

圖 2　手機掃描控制點布標與放置示意圖

Fig.2　Smartphone scanning of control point markers and location

3. 研究區域與案例

本研究以嘉義縣中埔鄉中崙村土石流潛勢溪流 (嘉縣 DF051) 為例，其於 2024 年 6 月 7 日豪雨事件發生土石流災害事件，土砂沿支流河道向下游流動，其阻塞與主流匯流之過路箱涵，因而溢流於嘉 141 線及台 3 線，該事件造成土砂堆積於道路長度約 130 公尺，並使得民宅遭土砂淤埋 (圖 3)。於 6 月 7 日豪雨過後，查詢農村水保署 BigGIS 平台之資源衛星 (Sentinel-2) 影像資料，雖然 6 月 23 日影像有拍到整體集水區，但正值汛期面臨經常性降雨及雲覆率高影響，整體影像品質不佳 (圖 4)。遙測影像具備大範圍檢視災害影響區域優點，但因資源衛星提供之影像解析度僅 10 公尺，對於受災地面細部之標的物或是受樹木遮蔽處，仍有無法即時取像及獲取災害狀況問題。為確保災後快速災情資訊取得及勘查紀錄數位化，提高工作效率和數據收集，利用智慧型手機進行土砂災害之現場調查與防災規劃。現地勘查的目標是利用手機掃描獲取 360 環景及 3D 建模資料，以進行快速量化分析，其二將手機成果匯出至桌機端相關軟體，製作防災規劃應用範例，並利用 UAV 與遙測影像進行輔助與驗證，

以及後續現場調查研究工具及土砂災害防災規劃加值應用分析，如表 4 所示。在此研究中主要是評估智慧型手機於土砂災害事件現場獲取資料能力，以作為未來土砂災害快速評估與規劃工作之新選擇。

LiDAR 掃描測繪法利用手機具備之 LiDAR 感測器進行掃描測繪，由雷射脈衝掃描物體並轉換為真實物體之點雲資料，進一步建置網格模型，再配合攝影鏡頭取得之 RGB 彩色資料，以彩色影像拼貼功能對網格模型表面上色，形成具有彩色樣貌之 3D 模型。攝影測量法部分，採用 3D 高斯潑濺法 (3DGS) 進行作業，其提供顯示 (Explicit) 的 3D 場景代表性，使電腦能以快速且高效地渲染生成圖像 (Barthel et al., 2024; Papantonakis et al., 2024; Pham et al., 2024)。3D 高斯潑濺法 (3DGS) 以優異的視覺質量和快速訓練而聞名，使其適合實時渲染，該方法為先利用傳統的運動回復結構（SfM）技術，作為處理輸入影像的第一步，提供影像點的 3D 位置，其後 3D 高斯潑濺法 (3DGS) 過程會開始優化高斯點的屬性資料，但只疊合照片特徵點生成模型點雲而省略複雜點雲坐標點計算 (Hu et al., 2024; Wolf et al., 2024)。

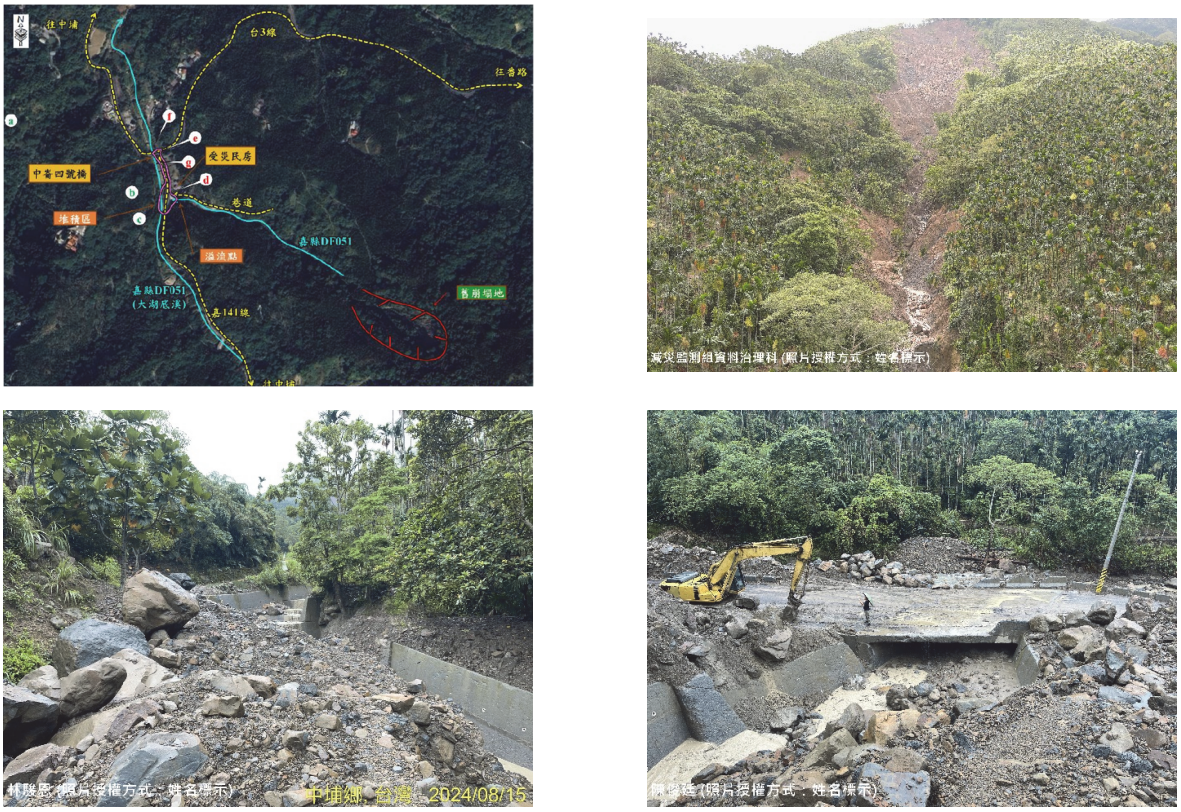


圖 3 2024 年 6 月 7 日豪雨事件引發嘉縣 DF051 土石流事件

Fig.3 Debris flow disaster triggered by heavy rainfall event on June 7, 2024

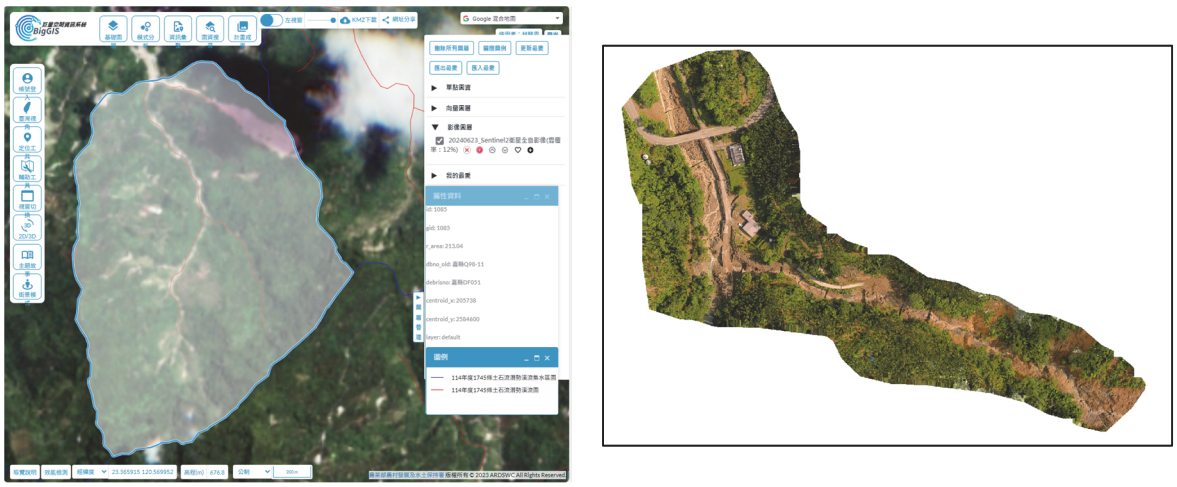


圖 4 2024 年 6 月 7 日豪雨事件之 6 月 23 日災後集水區 Sentinel-2 衛星影像

Fig.4 Sentinel-2 image (June 23, 2024) of post-disaster situation in debris flow potential torrent (DF051)

表 4 研究工具與防災規劃應用軟體

Table 4 Research Tools and Software for Disaster Prevention Planning

研究工具	現場調查功能	3D模型建置應用軟體	桌機端防災規劃應用軟體
IPhone 14 Pro	360環景；360度影像取景； 攝影測量法 (3D高斯潑濺法)：3D建模； LiDAR掃描測繪法：3D建模	Scaniverse、Polycam	CloudCompare：點雲測量後製 FreeCAD：斷面設計 QGIS：空間展示及疊圖
Autel Robotics EVO II	正射影像、3D建模	Bentley Context Capture	QGIS：空間展示及疊圖
資源衛星影像 Sentinel-2	大範圍檢視災害影響區域	農村水保署BigGIS平台	BigGIS：空間展示及疊圖

三、成果與討論

1. 土砂災害現場調查

本研究於 2024 年 8 月 16 日針對嘉縣 DF051 之保全對象、集水區之上游崩塌地、中下游河道等進行調查，利用手機測繪、UAV 航拍及人工地面調查等，分別完成土砂災害 360 度環景影像及不同標的物 3D 建模成果。智慧型手機搭配 Polycam APP 拍攝 360 度環景影像，提供周邊環境與災害點位之關聯性，以輔助單張照片資訊量不足處，對災害特徵與災情資訊進行註解，並可將成果上傳至線上展示平台提供大眾閱覽。

手機 Polycam APP 拍攝成果顯示，由 360 度環景影像可以連結受災的保全對象與土石流潛勢溪流兩者間關係，由環景影像可知下游土石流因版橋阻塞而溢流於路面，並堆積淤埋位於溪流下游右側民宅。若僅單獨拍攝民宅受土砂淤埋或是下游道路版橋土砂堆積情況，難以掌握環境周邊構造物與具體土砂淤埋位置兩者間關係 (圖 5)。此外，以 UAV 輔助大範圍災害區域拍攝，並由 360 度環景影像與 UAV 正射影像進行比較，由 UAV 拍攝任務進行廣泛的災區資料蒐集，呈現各災害特徵標的物間空間相對位置。兩者之間主要差異點在於手機 360 度環景模式產製之成果著重於呈現局部重點與周遭環境狀況，提供連結特徵標的物間的關係，兩者相互搭配由高空俯視與地面視覺成果綜合判斷，可讓人更清晰掌握現場狀況 (圖 6)。

2. 3D 模型建置與即時量化分析成果

藉由智慧型手機調查土砂災害現場並建置 3D 模型，利用 Scaniverse APP 應用程式進行現場即時量化分析，可快速獲取災害現場地理空間三維資料，用以評估災害影響狀況 (Corradetti et al., 2021; Tavani et al., 2022; Zhang et al., 2018; Monsalve et al., 2023)。針對下游受土砂淤埋保全對象部分，利用 UAV 正射影像成果進行標的物比對，其檢核尺寸相差約 0.24%與 0.39%，顯示現場調查使用手機測量之誤差小於 5 公分 (圖 7)。手機測量產製之 3D 模型相較於 UAV 正射影像，除結構物外部尺寸量化分析外，更可紀錄結構物立面及內部狀態之土砂堆積高度，方便快速數位化 3D 文件資料 (3D documentation) (Martino et al., 2024)。

在土石流潛勢溪流下游與主流交會處，河道既有固床工與護岸工等構造物，現場土石流主要沿著右岸往下游運移，造成土砂堆積於右岸側。針對工程構造物受土砂堆積淤埋情況，分別利用智慧型手機與 UAV 產製正射影像成果進行比對，檢核尺寸相差約 0.9%、1.7%、2.5%不等。現場拍攝完既有固床工與淤埋處後，藉由手機 Scaniverse APP 應用程式約 5 分鐘內可製作完成 3D 模型資料，即可進行幾何尺寸量測，如固床工右岸土砂淤埋高度為 7.6 公尺，該處土砂堆積面積約 40 平方公尺，河道上土砂堆積長度為 11 公尺、寬度為 9.5 公尺 (圖 8)。

在土石流潛勢溪流 DF051 中游部分，調查順序由上游至下游分別對應為 1、2 及 3 號防砂壩進行紀錄，其中 1 號與 3 號防砂壩並無受到巨大撞擊毀損，其表面結構完整。再者，大量土砂堆積於 1 至 3 號系列防砂壩間，以致 2 號防砂壩受土砂掩埋，僅兩岸露出部分壩翼，其中 3 號防砂壩堆積大粒徑塊石並阻塞溢流口 (圖 9)。針對 1 至 3 號防砂壩 3D 建模及量化成果，以手機與 UAV 檢核不同位置的驗證尺寸相差約 0.33、1.75%、2.46%不等。現場 1 號與 2 號防砂壩結構露出部分高差為 3.08 公尺，量測兩者之間儲砂空間面積為 72 m^2，進一步估算可求得災後 2 號壩後囚砂空間已攔阻至少 216 m^3 土砂量體。此外，3 號壩溢流口雖有較大粒徑塊石阻塞，但目前並未造成防砂壩功能受到影響，利用手機建置 3D 模型量測現場堆積之大塊石材料，可得知該土石流運移時其粒徑分布為 0.8 公尺至 1.5 公尺 (圖 10)。

此外，現地勘查時對土石流崩塌源頭之崩塌面積量測相當困難，其面臨狀況包括無道路可及、崩塌落石持續發生外，其量測需藉由遙測影像或是 UAV 空拍影像後處理，配合 GIS 軟體以獲取崩塌地幾何資訊。但目前使用手機 Polycam 應用程式配合 UAV 影像資料，即可以攝影測量法現場即時產製三維資料，其需搭配使用鄰近特徵物進行相對比例尺校正三維資料，以量化現場 3D 模型幾何資訊。本研究藉由航空布標 (尺寸 1 公尺見方) 進行比例尺校正以估算崩塌地尺寸，手機量測崩塌地面積為 66,320m^2、長度 598.8m、寬度 122m，UAV 影像量測崩塌地面積為 61,734m^2、長度 556.1m、寬度 120m，兩者尺寸相差分別為 7.4%、7.6%、1.6% (圖 11)。依據目前比對結果，對於現地勘查欲即時評估崩塌幾何資訊時，建議可搭配 UAV 拍攝影像後匯入手機 Polycam 應用程式產製 3D 模型，即可於現場完成三維幾何資訊量化分析。

3. 土砂災害之防災規劃應用成果

土砂災害勘查後，所取得之 3D 數位化資料，藉由匯出其點雲和模型資料並配合相關開源軟體，再加值分析後作為防災規劃與水土保持工作使用。本研究套用 CloudCompare、FreeCAD、QGIS 等三套軟體，分別完成點雲分析、工程繪圖規劃與地理位置定位等輔助防災規劃使用。在手機應用 Scaniverse APP 成果之加值應用部分，分別以 3D 高斯潑濺法 (3DGS) 及 LiDAR 掃描測繪法匯出相應之點雲與模型格

式，其中本研究採用點雲格式為 PLY 與 LAS 兩種格式進行後續應用分析。在手機資料結合點雲軟體 CloudCompare 應用部分，將手機點雲資料匯入 CloudCompare 軟體後，其匯出資料格式相容於 CloudCompare 軟體，並可展示整體三維量測成果。該軟體可進一步執行三維資料量化分析，包括保全對象的淤埋狀況、防砂構造物幾何尺寸資訊與土砂堆積狀況等均可進行量測。此外，除上述幾何資訊量測外，對於土石流地形起伏與河道縱、橫斷面量測等，皆可取得所需資訊，並進一步匯出 DXF 格式供後續繪圖軟體進行工程規劃使用。以 CloudCompare 匯出縱斷面 DXF 檔案資料，利用 FreeCAD 編輯該縱、橫斷面並配合河道長度、高程差、淤砂坡度、河道寬度、通洪斷面、河道坡度等資料，可供防災規劃之參據 (圖 12)。

在 QGIS 地理資訊系統應用部分，手機 LiDAR 掃描測繪法 (Scaniverse APP) 匯出 LAS 點雲檔案格式其附加 GPS 參數，可於 QGIS 內正常顯示地理位置；然而攝影測量法 (3D 高斯潑濺法成果) 匯出 PLY 點雲格式檔案，該檔案無附加 GPS 參數，當匯出檔案套疊於 QGIS 上無法顯示實際地理位置。以嘉縣 DF051 土石流潛勢溪流下游保全住戶之 3D 模型為例，LiDAR 掃描點雲資料具有 GPS 資訊，並與利用 RTK 控制點校正後的 UAV 正射影像比較，坐標 X 方向差異為 0.215 公尺，坐標 Y 方向差異為 5.005 公尺，且兩棟房屋之屋角偏移距離約 5 至 7 公尺間 (圖 13)。此外，以嘉縣 DF051 土石流潛勢溪流中游之大粒徑塊石量測為例，坐標 X 方向差異為 0.145 至 0.492 公尺，坐標 Y 方向差異為 0.338 至 0.517 公尺，其量測粒徑差異約 0.008 至 0.053 公尺間 (圖 14)。由此兩個案例顯示手機 LiDAR 掃描 3D 模型雖具有 GPS 資訊，但其偏移程度較大，如需精確之坐標資訊，建議後續可搭配 RTK 量測控制點，校正空間定位偏移問題。



圖 5 災後集水區調查手機 360 度環景影像成果

Fig.5 360 panoramic view of post-disaster situation in debris flow potential torrent (DF051)



範圍	360度環景影像 (局部廣域重點)	UAV正射影像 (廣泛地理位置)
細節	標的物及地貌呈現細節高	空間相對位置呈現細節高
輔助功能	1. 補充大範圍正射影像之災害現場局部重點細節 2. 快速展示多現場多時序地貌變遷	1. 輔助360度環景影像 2. 調查場域之地物地貌間相對位置

圖 6 手機 360 度環景影像與 UAV 正射影像災後集水區調查成果

Fig.6 360 panoramic view and UAV orthophoto of post-disaster situation in debris flow potential torrent (DF051)

建模模式	智慧型手機與無人飛行載具UAV (TWD97: 205433, 2585576)		
三維尺寸	智慧型手機量測成果	無人飛行載具UAV測量成果	智慧型手機量測成果
	白色房屋屋頂長: 9.27m 紅色房屋屋頂長: 9.31m	白色房屋屋頂長:9.292m 紅色房屋屋頂長:9.273m	1. 外觀牆壁土砂淤積高:84-92cm 2. 房屋內部牆壁土砂淤積高:26-27cm
保全對象白色房屋尺寸量測			
保全對象紅色房屋尺寸量測			
驗證模型	手機相較UAV驗證尺寸相差約0.24%	手機相較UAV驗證尺寸相差約0.40%	UAV無資料

圖 7 手機 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析成果 – 下游區域 (1)

Fig.7 Comparison of the geometric information between the 3D model and UAV orthophoto - downstream area (1)

建模模式	智慧型手機與無人飛行載具UAV (TWD97: 205412, 2585551)				
手機量測	左岸壩翼長: 1.72m	右岸護岸長: 5.05m	右岸護岸長: 5.61m		
UAV測量	左岸壩翼長: 1.703m	右岸護岸長: 4.925m	右岸護岸長: 5.513m		
手機構造物量測					河道土砂堆積 底寬5.37m、 垂直高7.6m、 斜距長9.31m
UAV構造物量測					河道土砂 堆積面積40m²
驗證模型	手機與UAV驗證尺寸相差約 0.9%	手機與UAV驗證尺寸相差約 2.5%	手機與UAV驗證尺寸相差約 1.7%		主支流河道交會處 河道長度11m 水面寬9.5m

圖 8 手機 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析成果 - 下游區域 (2)

Fig.8 Comparison of the geometric information between the 3D model and UAV orthophoto - downstream area (2)

建模模式	智慧型手機			無人飛行載具UAV
3D模型Qrcode				
嘉縣DF051 1號與2防砂壩				
	1號防砂壩後方河道堆積大粒徑塊石	2號防砂壩已被土砂掩埋、堆積大粒徑塊石		
嘉縣DF051 3號防砂壩				1號防砂壩 (TWD97: 205586, 2585493) 2號防砂壩 (TWD97: 205578, 2585496) 3號防砂壩 (TWD97: 205547, 2585501) 大粒徑塊石 (TWD97: 205557, 2585513)
	3號防砂壩結構尚完整，河道堆積大粒徑塊石並阻塞防砂壩溢流口			土石流堆積於中游系列防砂壩，其因砂功能發揮效果

圖 9 手機 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析成果-中游區域 (1)

Fig.9 Comparison of the geometric information between the 3D model and UAV orthophoto - midstream area (1)



圖 10　手機 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析成果-中游區域 (2)

Fig.10　Comparison of the geometric information between the 3D model and UAV orthophoto - midstream area (2)

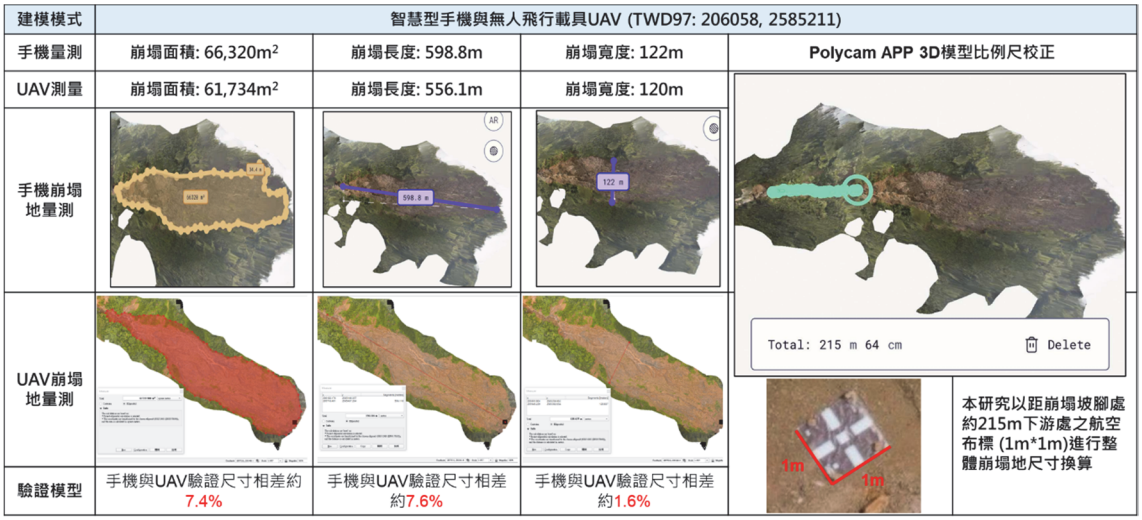


圖 11　手機 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析成果-上游區域

Fig.11　Comparison of the geometric information between the 3D model and UAV orthophoto - upstream area

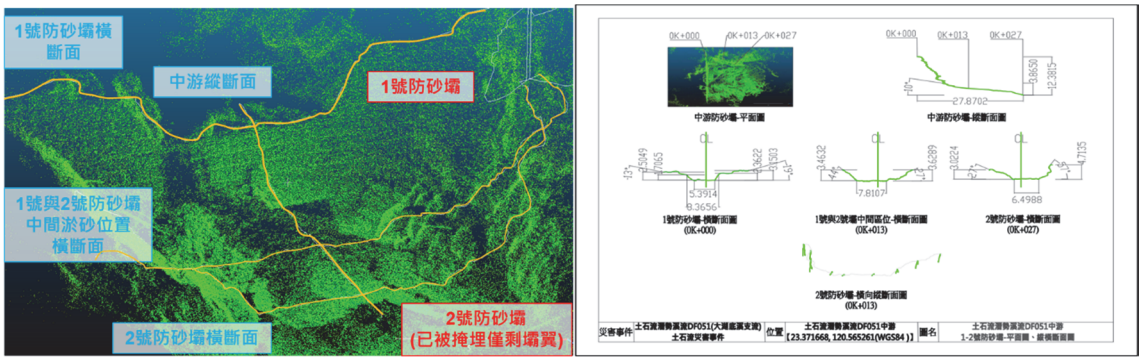


圖 12　手機 3D 建模匯出至 Cloud Compare 及 Free CAD 作規工程規劃應用

Fig.12　Export the smartphone 3D model data to Cloud Compare and Free CAD for Engineering design

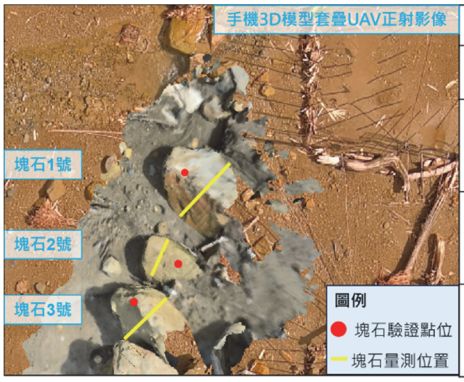


手機LiDAR模型與UAV正射影像套疊於QGIS展示 (TWD97: 205433, 2585576)

位置	工具	TWD97-X (m)	TWD97-Y (m)	點位斜距 (m)	差異值 (m)
紅色房屋屋角	手機	205423.011	2585579.668	7.663	X: 0.215 Y: 7.602 斜距: 7.663
	UAV	205423.226	2585572.066		
白色房屋屋角	手機	205428.729	2585583.789	5.067	X: 0.784 Y: 5.005 斜距: 5.067
	UAV	205429.513	2585578.784		

圖 13　手機 LiDAR 掃描保全住戶之 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析比對

Fig.13　Comparison of house geometric between the 3D model and UAV orthophoto



手機大粒徑塊石LiDAR模型與UAV正射影像套疊於QGIS展示 (TWD97: 205557, 2585513)

位置	工具	TWD97-X (m)	TWD97-Y (m)	量測粒徑 (m)	差異值 (m)
塊石1號	手機	205558.241	2585518.700	1.490	X: 0.145 Y: 0.517 粒徑: 0.010
	UAV	205558.096	2585518.183	1.500	
塊石2號	手機	205557.859	2585517.393	0.903	X: 0.319 Y: 0.421 粒徑: 0.053
	UAV	205557.540	2585516.972	0.956	
塊石3號	手機	205557.487	2585516.280	1.135	X: 0.492 Y: 0.338 粒徑: 0.008
	UAV	205556.995	2585515.842	1.127	

圖 14　手機 LiDAR 掃描大粒徑塊石之 3D 建模與 UAV 正射影像量化分析比對

Fig.14　Comparison of sediment particle geometric between the 3D model and UAV orthophoto

四、結　　論

本研究以 2024 年 6 月 7 日豪雨事件所造成土石流災害為例，利用智慧型手機快速建置 3D 模型並完成幾何量化分析，提供災後勘查所需數位化資訊，主要研究結論如下：

1. 在土砂災害現地勘查中，具備 LiDAR 感測器的智慧型手機適合作為「初步勘查工具」，其搭配多種應用軟體可快速建置災害現場 3D 模型、3D 資料數位化、空間幾何資訊量化分析等成果。但若要達到工程等級精度，仍需結合後處理軟體，並結合 RTK 與 UAV 空拍等數據資料，進一步依照各項工程精度規範進行後續分析作業。
2. 利用手機掃描所建立 3D 模型資料，不管是利用 LiDAR 或是 3D 高斯潑濺法 (3DGS)等方法，其與 UAV 正射影像之檢核點比對，以上游崩塌地空間幾何資訊量測而言，崩塌長度為 7.6%、寬度為 1.6%、面積為 7.4%等差異率，對於偏遠山區災後勘查精度已相當良好，於現場即可產製成果進行量化析，以快速提供災害緊急應變中心人員所需情資，提升調查作業及災害情資研判效率。
3. 相較過往需等待合適之衛星影像來進行崩塌判釋，並由現勘人員使用地面雷達掃描儀、箱尺、UAV 等儀器進行現地調查，後續內業影像後處理仍需 1 至 3 天，才能取得標的物之空間幾何資訊。智慧型手機於土砂災害後現地調查，約 10 至 40 分鐘內即可產出 3D 模型，其展現出高度便利性、快速性與即時性。
4. 智慧型手機搭配之應用程度支援多種點雲格式，配合 CloudCompare、Free CAD 及 QGIS 等開源軟體進行加值應用，分析掃描標的物之三維尺寸、縱橫斷面資料、工程規劃設計等，具相當多元應用空間。
5. 由於智慧型手機 LiDAR 掃描受 5 公尺長度限制，因此在土砂災害現地勘查時，原則上以人員可到達拍攝標的物位置為優先採用，若為無法到達處，如本研究上游崩塌地時，可搭配 UAV 空拍後將影像資料匯入手機，採用攝影測量法 (3D 高斯潑濺法) 進行 3D 模型建置。
6. 本研究手機 LiDAR 掃描及攝影測量之成果，其空間定位偏差較大，Tamimi and Toth (2024) 研究指出單獨採用 RTK 及 PPK 皆可提升精度 (precision)，但在資料處理過程中如包含控制點則可以增強整體資料的準確性 (accuracy of the data)。建議後續以智慧型手機結合 UAV 進行災後勘查工作時，配合控制點、RTK、PPK 等技術以改善地理空間製圖 (geospatial mapping) 精度，並可利用手機定位輔助器 (如 Pix4D ViDoc RTK Rover) 進行測繪，以提高 3D 模型於地圖空間定位精度及準確性。

7. 由於在山區作業時，若利用 UAV 空拍影像匯入智慧型手機進行 3D 模型建置時，需注意利用相對比例尺進行量化的特性，取像周遭需盡量包含具有相對比例尺以提供量化的特徵物，如房屋、車子、道路、航拍布標等。

為於災害發生後快速獲取現地情資，本研究應用智慧型手機於現地調查應用上，對於崩塌幾何尺寸量化、工程構造物或堆積土砂粒徑分析等，其能快速產製 3D 模型、評估現場狀況並數位化資料，提供數位化地理空間幾何資訊，更可利用開源軟體進行後續加值分析，對於工程構造物的建立與土砂災害的防災整備與應變上將有莫大助益，可作為防救災單位進行災害後勘查工具的新選擇。

參考文獻

[1] Abbas, S.F., and Abed, F.M. (2024). “Evaluating the Accuracy of iPhone Lidar Sensor for Building Façades Conservation.” *Proceedings of the 2nd MedGU 2022*, Springer Cham, 141-144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48715-6_31

[2] Barthel, F., Beckmann, A., Morgenstern, W., Hilsmann, A., and Eisert, P. (2024). “Gaussian Splatting Decoder for 3D-aware Generative Adversarial Networks.” *2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Seattle, USA, 7963-7972. https://doi.org/10.1109/CVPRW63382.2024.00794

[3] Corradetti, A., Seers, T., Billi, A., and Tavani, S. (2021). “Virtual Outcrops in a Pocket: The Smartphone as a Fully Equipped Photogrammetric Data Acquisition Tool.” *GSA Today*, 31(9), 4-9. https://doi.org/10.1130/GSATG506A.1

[4] Harley, M. D., Kinsela, M. A., Sánchez-García, E., and Vos, K. (2019). “Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images.” *Coastal Engineering*, 150, 175-189. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.003

[5] Hu, Y.S., Mao, D., Chen, Y., and Zelek, J. (2024). “Towards Real-Time Gaussian Splatting: Accelerating 3DGS through Photometric SLAM.” *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03825> (July 14, 2025).

[6] Kottner, S., Thali, M.J., and Gascho, D. (2023). “Using the iPhone’s LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes.” *Forensic Imaging*, 32(200235), 1-7. https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535

[7] Luetzenburg, G., Kroon, A., and Bjørk, A.A. (2021). “Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences.” *Scientific Reports*, 11(1), 1-9. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9

[8] Martino, A., Lingua, A. M., and Maschio, P. (2024). “Affordable Sensors for Speditive and Accurate Documentation of Built Heritage: First Tests and Preliminary Results.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1-2024, 487-493. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-487-2024

[9] Monsalve, A., Yager, E. M., and Tonina, D. (2023). “Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams.” *Journal of Ecohydraulics*, 10(2), 181-191. https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087

[10] Noviana, E., Plank, U., and Wand, E. (2024). “Photogrammetry and iPhone LiDAR in Remote Places for Preparation of 3D-Objects in a Virtual Museum.” *INFORMATIK 2024*, Gesellschaft für Informatik, Bonn, 1007-1016. https://dl.gi.de/handle/20.500.12116/45255

[11] Papantonakis, P., Kopanas, G., Kerbl, B., Lanvin, A., and Drettakis, G. (2024). “Reducing the Memory Footprint of 3D Gaussian Splatting.” *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 7(1), 1-17. https://doi.org/10.1145/3651282

[12] Pham, P., Conover, D., and Bera, A. (2024). “FlashSLAM: Accelerated RGB-D SLAM for Real-Time 3D Scene Reconstruction with Gaussian Splatting.” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.00682> (July 14, 2025).

[13] Suleymanoglu, B., Tamimi, R., Yilmaz, Y., Soycan, M., and Toth, C. (2023). “Road Infrastructure Mapping by Using iPhone 14 Pro: An Accuracy Assessment.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-1-2023, 347-353. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-347-2023

[14] Tamimi, R., and Toth, C. (2024). “Experiments with Combining LiDAR and Camera Data Acquired by UAS and Smartphone to Support Mapping.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1-2024, 619-627. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-619-2024

[15] Tavani, S., Billi, A., Corradetti, A., Mercuri, M., Bosman, A., Cuffaro, M., Seers, T., and Carminati, E. (2022). “Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones.” *Earth-Science Reviews*, 227, 103969. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103969

[16] Tondo, G. R., Riley, C., and Morgenthal, G. (2023). “Characterization of the iPhone LiDAR-Based Sensing System for Vibration Measurement and Modal Analysis.” *Sensors*, 23(18), 1-23. https://doi.org/10.3390/s23187832

[17] Treccani, D., Adami, A., and Fregonese, L. (2024). “Assessing the effectiveness of LiDAR-based apps on Apple devices to survey indoor and outdoor medium sized areas.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2-W8-2024, 431–438. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-431-2024

[18] Wolf, Y., Bracha, A., and Kimmel, R. (2024). “GS2Mesh: Surface Reconstruction from Gaussian Splatting via Novel Stereo Views.” arXiv.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.01810> (July 14, 2025).

[19] Wu, N., Lin, W., Cheng, R., Chen, B., Zhu, Y., Nahrstedt, K., and Han, B. (2025). “Advancing Immersive Content Delivery with Dynamic 3D Gaussian Splatting.” *Proceedings of the 26th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Association for Computing Machinery, New York, USA, 109-114. https://doi.org/10.1145/3708468.3711886

[20] Zaczek-Peplinska, J., and Kowalska, M.E. (2022). “Evaluation of the LiDAR in the Apple iPhone 13 Pro for use in Inventory Work.” XXVII *FIG Congress Volunteering for the future - Geospatial excellence for a better living*, Warsaw, Poland, 1-19. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2022/papers/ts03g/TS03G_zaczek-peplinska_kowalska_11458.pdf

[21] Zhang, J., Calabrese, C., Ding, J., Liu, M., and Zhang, B. (2018). “Advantages and challenges in using mobile apps for field experiments: A systematic review and a case study.” *Mobile Media & Communication*, 6(2), 179-196. https://doi.org/10.1177/2050157917725550

[22] モバイルスキャン協会. (2022). “モバイル端末スキャンマニュアル (Mobile Scan – Manual).” *モバイルスキャン協会*, <https://mobilescan.jp/> (July 14, 2025) (in Japanese).

2025 年 06 月 19 日 收稿
2025 年 07 月 02 日 修正
2025 年 07 月 18 日 接受