

應用 UAV 空拍及地面人力調查進行 防砂設施調查比較研究

許振崑* 林伯勳** 陳俊愷*** 蕭震洋*** 邱世宜**** 李正鈞*****

摘 要

本文除導入 UAV 應用科技技術於現場防砂結構物調查外，並說明拍攝前中後之作業流程；文中選擇大甲溪流域內 10 處地點，透過無人飛行載具並搭配人力現地調查，瞭解其所加值建立防砂設施數值地形模型，如何輔助調查人力進行無法到達之防砂設施結構功能與周圍環境現況之判斷。同時，藉以探討不同調查方式其成果差異，說明該項技術對於現場防砂結構物調查之助益；最後，指出目前 UAV 使用時機、適用條件、優勢特性與限制性及改善建議等，以強化未來該項技術之應用層面，期以擴增實務應用價值。

關鍵字：防砂設施巡查、無人飛行載具、高程三維模型

一、前 言

為保護山坡地範圍內人民生命財產安全，行政院農業委員會水土保持局（以下簡稱水保局）投入大量經費，於各溪流及崩塌區域施設工程保護，建置一系列防砂設施，以有效攔阻砂石、緩和溪床坡降、防止縱向侵蝕及橫向淘刷，迄今已施作約計 2 萬多件工程（水保局，2015）。水保局自民國 103 年起為有效管理防砂設施資產維護，係以座為單位，且依據建立之標準調查作業程序與結構物編碼命名原則，遂針對部分流域與集水區辦理相關計畫，以進行轄內重要且防砂設施數量盤點及資料建置工作，藉以清查水保局現

有防砂壩數量、位置、受損及維護現況。然因自工程完工後，防砂設施所在地區，歷經多場颱風事件、現場植生復育改善、環境變遷與施工便道之復原等，常導致現場地形地貌之變化（如圖 1），使後續需至現場進行巡查之工程師無法順利以地面人力調查方式，抵達預定巡查地點及獲取相關所需資訊。

因應無人飛行載具 UAV（Unmanned Aerial Vehicle）發展日益普及，其應用領域包含國土與環境變遷監控、土地開發與土地利用調查、緊急土砂災害災監測、土石流監測、林務監測、河川水庫監控、海域監控及污染應變、環保稽查、堰塞湖監測、國道監測、農地調查、區域調查及展

* 中興工程顧問社防災科技研究中心正工程師
** 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長
*** 中興工程顧問社防災科技研究中心正研究員
**** 行政院農業委員會水土保持局保育治理組工程員
***** 行政院農業委員會水土保持局保育治理組科長

示、房地產景視野景觀、都市計畫與景觀應用。近年交通部運輸研究所(2016)及鐵路局(2015)，應用 UAV 空拍調查以進行鐵公路、橋梁構造物以及隧道邊坡之檢測，用以瞭解橋梁伸縮縫、制震塊與外觀結構是否有損壞之現象，以及周圍環境崩塌裸露、張力裂縫發展狀況，並進行可能滑動體之判釋，逐漸將 UAV 空拍調查導入結構物檢測與功能評估工作，以利快速檢測。

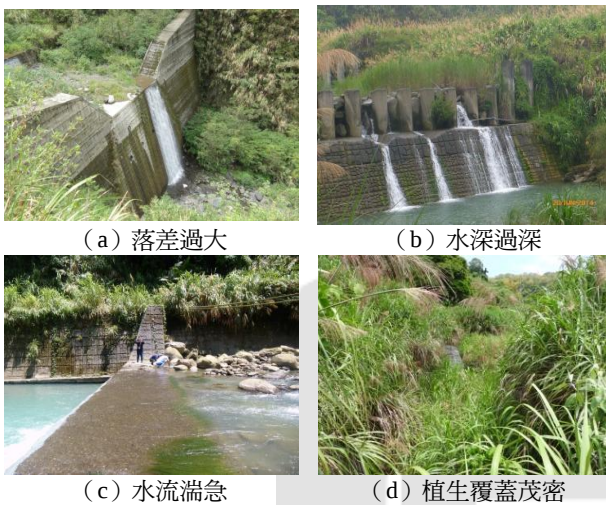


圖 1 環境現況影響現地調查工作情境示意圖

就防砂設施而言，過去常以地面人力調查為主，若對於現場調查因道路交通、地形因素或環境影響人員安全考量時，導致調查人員無法利用步行方式到達防砂構造物所在地點，便無法取得所需調查資訊；而 UAV 空拍調查具備高機動性，地面人員改採此工具協助於現地調查工作，藉以提高防砂設施調查效率及維護調查人員安全。

鑑此，為瞭解 UAV 空拍調查防砂設施使用時機、適用條件、優勢特性與限制性，以利該項技術推廣應用；本文挑選大甲溪流域內 10 處地點，計有 26 座防砂設施，選擇具不同調查環境之地點，包含獨立壩或連續壩型式、不同溪床坡度情形以及不同植生遮蔽環境等狀況，以涵蓋整體調查時可能遭遇之環境條件；藉由室內後處理，透

過影像匹配軟體 (PIX4D Mapper、Bentley ContextCapture、PhotoScan、Photomodeler、Skyline_TerraBuilder、Trimble Inpho 等)，進行防砂設施及環境現況三維模型建立，量化防砂設施現場長、寬、高等尺寸，與環境溪床坡度及堆積材料粒徑等，另與地面人力調查結果比較，藉以瞭解 UAV 空拍調查方式是否足以輔助調查人員進行無法到達之各防砂設施之結構功能與周圍環境現況之判斷，供以調查應用參考。

二、大甲溪流域環境概述

大甲溪發源於雪山山脈及中央脊樑山脈，主流長度約 124 公里，分水嶺最高海拔 3,884 公尺，流域面積廣達 1,236 平方公里，受高山地形挾制，河谷坡度甚為陡峻，為臺灣水資源最豐沛的河川及水力發電之重要地區，流域主要分布於臺中市，北與大安溪為鄰，南臨烏溪；區內以中橫公路（台 8 線）及台 7 甲為主要聯外道路，如圖 2 所示。

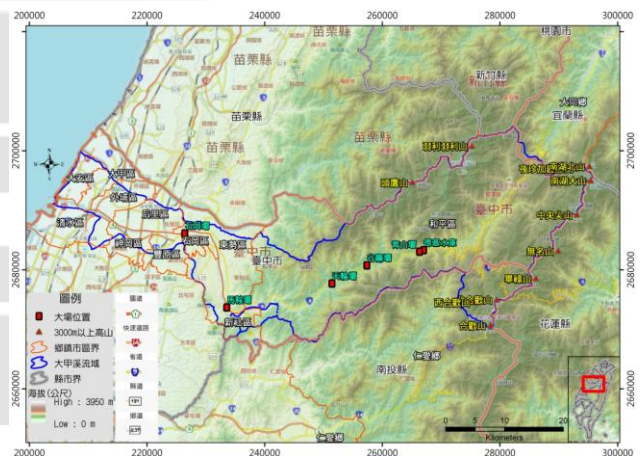


圖 2 大甲溪流域地理區位及主要道路分布圖

大甲溪流域歷年來經歷多次颱風豪雨肆虐，引發多次大規模土砂災害，尤其於民國 88 年 921 集集地震過後，加劇惡化流域地質，增加邊坡之不穩定性及造成流域中上游設施損壞，並誘發集

水區崩場地及土石流潛勢。其後民國 90 年 7 月桃芝颱風、民國 93 年 7 月敏督利颱風（七二水災）及民國 93 年 8 月艾利颱風，造成河床劇烈淤積與洪災事件及重大災害損失，同時使得流域集水區地形、地貌及河道斷面均產生極大變化。民國 97 年辛樂克颱風及民國 98 年莫拉克颱風，超大降雨帶來土石下移至河道，更造成后豐大橋 3 輛車掉落湍急的大甲溪並導致 6 人死亡。總以上述，大甲溪流域災害之主要成因為地形、地質不佳以及 921 地震影響，復以區域水文特性之雨量、流量，流域內崩場地及土石流潛勢溪流甚多，故相關土砂災害發生情況將無法避免。依水保局民國 106 年 2 月於土石流防災資訊網（<http://246.swcb.gov.tw>）公開更新之全臺土石流潛勢溪流 1,705 條，其中大甲溪流域中有土石流潛勢溪流 67 條，其中發生潛勢高者 29 條。另統計水保局、公路總局、報章媒體等歷史土砂災害點位，可知大甲溪流域內，計有 361 件歷史土砂災害紀錄，其空間分布繪製如圖 3 所示。

另經查水保局之工程管考資料統計自民國 90 年至 105 年底，大甲溪流域中之工程件數共約 1,298 件，其中依據工程內容描述，具有防砂壩、梳子壩等橫向河道構造物之防砂設施工程，初步統計達 684 件，如圖 4。

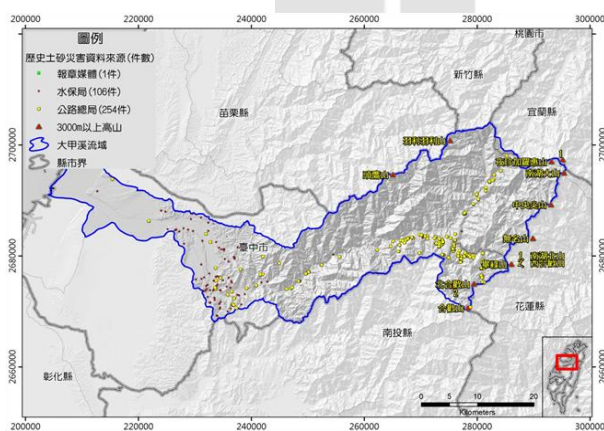
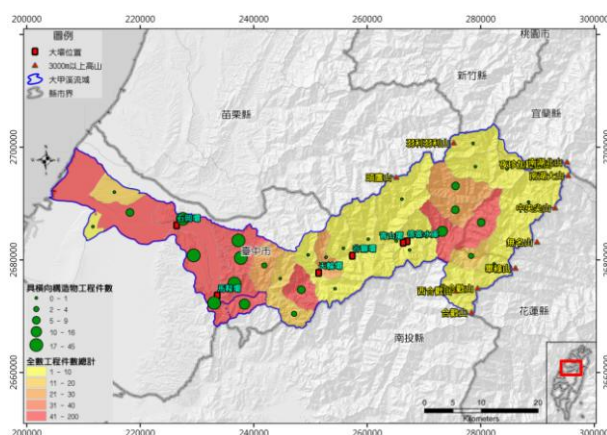


圖 3 大甲溪流域歷史土砂災害點位分布圖





(資料來源：http://www.dji.com/)

圖 6 DJI PHANTOM 4 Pro 外觀示意圖

表 1 DJI PHANTOM 4 Pro 相關設備技術參數

項目	類別	規格
UAV	重量 (含電池及槳)	1388 克
	最大上升速度	6 m/s (運動模式)
	最大下降速度	4 m/s (運動模式)
	最大水平飛行速度	72 m/s (運動模式)
	最大飛行海拔高度	6000 米
	飛行時間	約 30 分鐘
	GPS 模式	GPS / GLONASS 雙模
雲台	可控轉動範圍	俯仰：- 90°- +30°
	穩定系統	3-軸 (俯仰，橫滾，偏航)
相機	影像傳感器	1 英寸 CMOS;有效像素 2000 萬
	鏡頭	FOV 84° 8.824 mm (35 mm 格式等效) f/2.8 -f/11
	電子快門速度	8 - 1/8000 秒
	照片最大解析度	5472×3648
	錄影解析度	C4K：4096×2160 24/25/30p @100Mbps
		4K：3840×2160 24/25/30p @100Mbps
		2.7K：2720×1530 48/50/60p @80Mbps
		FHD：1920×1080 120p @100Mbps
		HD：1280×720 120p @60Mbps
	圖片格式	PEG，DNG (RAW)，JPEG + DNG
	視頻格式	MP4/MOV (AVC/H.264；HEVC/H.265)

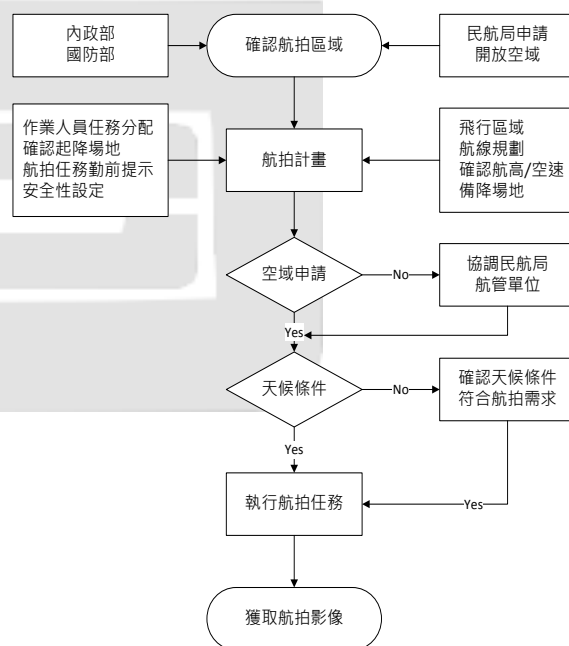
(資料來源：http://www.dji.com/)

本文建議 UAV 空拍調查作業，可分為「UAV 空拍調查作業前航拍工作流程規劃」、「UAV 空拍調查作業中現場拍攝張數與範圍」，以及「UAV 空拍調查作業後之高程三維模型建置」，各作業流程分述如後。

(一) UAV 空拍調查作業前航拍工作流程規劃

航拍工作流程規劃一般依據「民用航空法」第三十四條暨「交通部民用航空隊機場四周施放有礙飛航安全物體實施要點」及「無人駕駛航空器系統在臺北飛航情報區之作業」，故規劃航拍工作區域時，仍受以下限制。交通部民用航空局針對特定對象之 UAV 空拍調查作業需進行審查，並於作業前十五天函送提出申請表。此外，民用航空法已於民國 107 年 4 月進行部分條文修正，將遙控無人機相關管制納入規定，以「遙控無人機」增訂專章方式完整規劃管理制度，編列於該法第九章之二，並訂定有關罰則。UAV 航拍規劃標準作業流程如圖 7。

1. 航拍區域若位於機場周圍禁、限航區，則無法執行任務。
2. 航拍區位於訓練空域、軍方管制空域、目視航線等，則需視與民航局及軍方單位協調後狀況方可執行任務。
3. 鄰近禁、限航區，可能影響民航機或軍機起降及其他航空器安全，亦需與相關單位協調後方能進行航拍。



(摘自 水保局，2016)

圖 7 UAV 空拍調查前作業流程

(二) UAV 空拍調查作業中現場拍攝張數與範圍

於現場拍攝時需首先確立拍攝目標及範圍，觀察周圍空域及植生狀況，以便規劃現場防砂設施細部拍攝航線，另應避免陽光過度照射或陰影產生時間，導致取得之相片受到遮蔽或過曝，而影響後續成果。此外，於執行 UAV 空拍調查時，優先拍攝防砂設施周圍環境現況，再拍攝防砂設施主體外觀，當完成拍攝工作後，於現場隨即下載拍攝照片，初步檢核拍攝張數及範圍是否滿足後續分析要求，若未達要求時，再重新進行現場 UAV 拍攝，以達工作要求，調查拍攝作業中作業流程如圖 8。其中為達使用精度（空間解析度優於 25cm 以下）與量測項目需求，並於無人機飛行操作安全條件下，針對單一防砂設施，建議相關拍攝照片至少近距離且涵蓋防砂設施正視、後視、左右側視以及俯視方向等需求，故至少能有 10 張以上之拍攝數量。

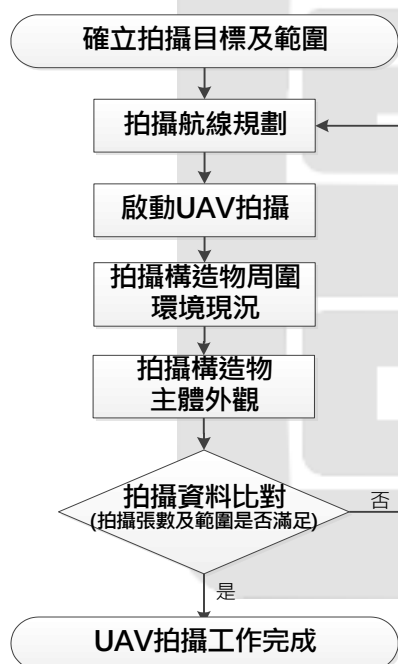


圖 8 UAV 空拍調查中作業流程

(三) UAV 空拍調查作業後之高程三維模型建置

圖 9 所示為以 UAV 航拍影像進行自動化空三平差及後處理程序，除可產製高程三維模型，亦

可產生正射影像。其中，由於影像成像時因為透鏡畸變所造成的扭曲變形會導致整體成果的誤差，因此可先針對像機進行內方位參數的率定，或直接採 PIX4D Mapper 的軟體自率定。另外，因 UAV 搭載 GPS，即可提供初始的方位資訊，而概略知道影像的分布以加速影像匹配時的搜尋。接著，經過自動化的影像匹配共軛點及人工量測控制點後便能利用 GPS 輔助空三平差或以人工量測控制點進行空三平差求解外方位參數。一旦外方位參數已知，便能透過影像的密集匹配以獲取三維點雲資料，產生高程三維模型，並結合原始影像產生正射影像。此外，航照空間解析度（GSD）為產製 DSM 成果品質的關鍵因素，且產製高程三維模型的目的為分析地形高程變化量，故初步設定 GSD 要求後，即可透過相機焦距、感光元件尺寸進行航高規劃（如圖 10）；接著，拍攝角度採取垂直角度進行空拍為原則，空拍傾角不得大於 10 度；最後，航空攝影應於天氣晴朗，能見度佳，以無雨或風勢不大且無雲為原則，影像雲覆率不得大於 5% 的條件下，配合現場天候狀況進行拍攝。

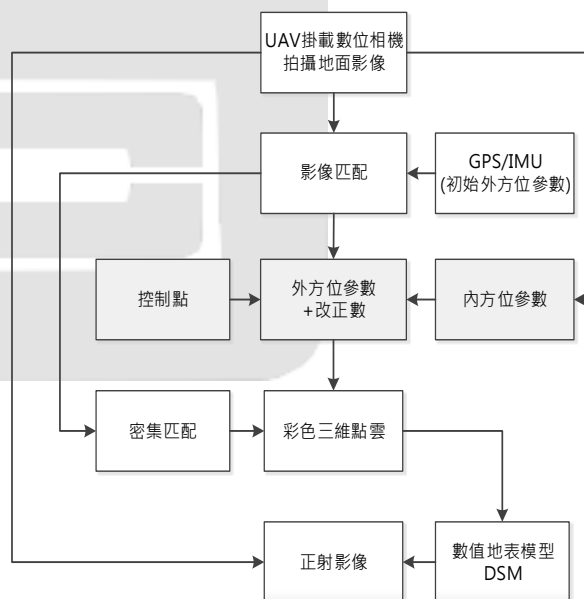
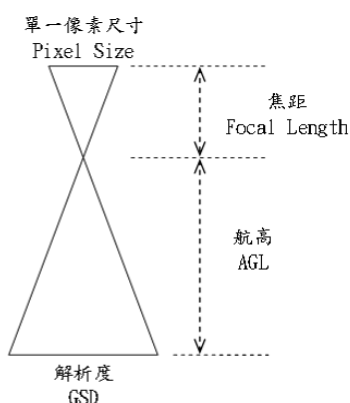


圖 9 以 UAV 空拍調查地面影像進行自動化空三平差工作流程圖



$$\frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} = \frac{\text{GSD}}{\text{AGL}}$$

圖 10 GSD 與航高換算方式示意圖

四、案例選擇及比較

本文根據大甲溪流域內蒐集工程清單，並依前述 UAV 空拍調查作業前中後作業流程，選擇大甲溪流域內涵蓋整體調查時可能遭遇之不同調查環境條件之 10 處代表性地點，包含獨立壩或連續壩型式、不同溪床坡度情形以及不同植生遮蔽環

境狀況等，共計 26 座防砂設施，進行 UAV 空拍調查，並同時搭配地面人力調查方式，進行兩調查方式調查成果比較，以瞭解其差異，詳細地點清單整理如表 2。另外，為利於評估應用 UAV 空拍於防砂設施調查適用性，茲就水保局現行防砂設施調查表中需現地填表項目，逐一檢視 UAV 空拍是否可完成該項內容填寫，並探討不同調查方式調查成果與時間成本差異。

針對調查表格內容之環境現況、河岸邊坡崩塌、防砂設施本體外觀裂化檢視以及防砂設施周遭等不易量化，採定性資料成果比較說明。另一方面，防砂設施尺寸之溢洪口寬度與有效壩高、防砂設施周遭上游溪床坡度、防砂設施周遭堆積材料粒徑概況（目視最大粒徑之長軸）、河岸邊坡崩塌面積等易於量化項目，採定量量測成果比較說明，如表 3。本文針對 UAV 施測比較成果，分為「同一防砂設施之定性比對」（以乙處防砂設施為例）以及「不同坡地環境量測結果定量比對」，相關比對結果說明如后。

表 2 本文所選擇之 10 處比對地點清單

項次	工程序號	工程名稱	比對座數(座)	備註
1	94ND-003	松鶴一溪沉砂池工程	4	連續壩、不同溪床坡度
2	101S-WF-2-B10-002	白毛台下坪路上游坑溝整治二期工程	1	受植生遮蔽
3	91EG01-027	大坑野溪整治工程	3	受植生遮蔽、連續壩、不同溪床坡度
4	97S-WF-2-L10-009	抽藤坑溪(中興街 33 號)災害復建工程	1	獨立壩
5	97S-WF-2-L10-013	中 99 線 2 號野溪災害復建工程	2	連續壩、獨立壩、不同溪床坡度
6	99S-SC-2-L02-001	東勢大灣地滑地地表排水及坑溝整治工程	2	連續壩、獨立壩、不同溪床坡度
7	102S-SC-2-B02-002	大湍坑上游崩塌野溪整治二期工程	2	受植生遮蔽、連續壩、獨立壩、不同溪床坡度
8	103-SCWF-02-2-023	東勢東坑石麻巷旁野溪整治工程	4	連續壩、獨立壩、不同溪床坡度
9	94ND-111	抽藤坑溪出口災害復建工程	3	連續壩、不同溪床坡度
10	101S-SC-2-B17-004	東勢石麻巷坑溝崩塌整治工程	4	連續壩、獨立壩、不同溪床坡度
總計			26(座)	

表 3 定性及定量比對項目列表

比對方式	項目
定性比對	1. 環境現況
	2. 河岸邊坡崩塌
	3. 防砂設施本體外觀裂化檢視
	4. 防砂設施周遭
定量比對	5. 溢洪口寬度
	6. 有效壩高
	7. 防砂設施上游溪床坡度
	8. 堆積最大材料粒徑長軸尺寸
	9. 河岸邊坡崩塌面積

（一）同一防砂設施之定性比對

本文以「大湍坑上游崩塌野溪整治二期工程」之現地調查為例，針對防砂設施編號大湍坑上游-09-A11-102 大型防砂設施，茲就表 3 所列定性比較項目，並進行比較說明，詳見表 4 所示。由表 4 可知 UAV 空拍調查較不受限於地形與環境影響，其拍攝視角上較為全面，可獲得較詳細環境影像資訊，但針對防砂設施表面細部裂縫以及植生遮蔽的部分，無法透過 UAV 拍攝獲得相關調查資訊，仍需藉由地面人力調查使能完成。

（二）不同坡地環境量測結果定量比對

考量 UAV 拍攝使用環境，於拍攝取像時，常會於現場發現防砂設施受植生影響，而有全遮蔽、部分遮蔽以及無遮蔽等狀況，就植生遮蔽情況，由所拍攝之照片影像，針對防砂設施調查表內是否可填寫的資訊，歸納整理如表 5 所示。整體來說，若現場因受地形與溪流河幅寬度之影響，導致防砂設施遭受兩岸植生部分遮蔽及全遮蔽時，所拍攝之影像照片將無法進行完整防砂設施模型現況壩長、有效壩高、溢洪口寬度等本體尺寸後製量測，但其防砂設施周遭之環境現況以及河岸邊坡仍可藉由飛行高度以及視角避開遮蔽

物而概略瞭解，故若於現場拍攝時需進行防砂設施本體狀況與尺寸觀測時，仍需配合地面人力進行調查，以完整獲得所需調查資訊。

由前述定性比對結果，首先剔除各工程中受植生全遮蔽以及部分遮蔽而無法獲得完整防砂設施資訊的部分（白毛台-03-A51-101 及馬鞍寮 D-01-A41-91，計 2 座），接著針對無受植生遮蔽影響的部分進行「不同坡地環境量測結果比對」，故僅針對無植生遮蔽之 24 座防砂設施運用 UAV 拍攝防砂設施及其周邊範圍影像（其空間解析度 GSD 優於 25cm），產製 DSM、正射影像及三維模型（如圖 12），進以量測溢洪口寬度、有效壩高、防砂設施上游溪床坡度、堆積最大材料粒徑長軸尺寸及河岸邊坡崩塌面積等資訊；然後，再將其空間維度量測成果與人力調查結果，並配合竣工圖中現場可有完整出露之尺寸（如溢洪口寬度），以進行量化比較，並彙整相關比較資料（如表 6 及表 7 所示），針對所比較之相對誤差說明與重要觀察結果，分述條列整理如下：

1. 溢洪口寬度：整體而言，除松鶴一溪 D-15-A11-94 以及中崙里-27-A11-99 防砂設施受植生部份遮蔽影響，相對誤差較大外（11.43% 及 13.29%），其餘 22 座防砂設施相對誤差大致上均控制在 10% 以下，尤以大湍坑上游-09-

表 4 同一防砂設施之定性比對說明

方式	地面人力調查	UAV 空拍調查
(A) 環境現況	全景視域較侷限。 	全景視域較廣。 
(B) 河岸邊坡崩塌	可拍攝角度與位置較為侷限。 	可多角度且近景瞭解坡面狀況。 
(C) 防砂設施本體外觀裂化檢視	地面調查較可近距離檢視防砂設施外觀狀況。 	受限於安全飛行距離及解析度，若無較明顯傾倒、錯動或裂縫較無法直接判斷。 
	可直接量測與判斷其發生位置與相關尺寸資訊，以判斷對結構之影響性。 	受限拍攝解析度、防砂設施接合處施工縫判斷與輕微位移或變形較不易判斷。 
(D) 防砂設施周遭	可利用地面人力排除遮蔽物，以直接判斷檢視區的狀況，或後方剩餘淤砂高度。 	若遇植物生長於河道上，易受遮蔽物之影響而無法獲得遮蓋區下方資訊。 

A11-102 之相對誤差 (0.78%) 最小，整體平均相對誤差約為 4.25%。

- 有效壩高：整體而言，除松鶴一溪 D-16-A51-94、松鶴一溪 D-18-A11-94、抽藤坑-84-A11-97 防砂設施受水流以及植生部分遮蔽之影響，相對誤差較大外，其餘 21 座防砂設施相對誤差大致上均控制在 10% 以下，尤以麻竹坑-28-A51-103 之相對誤差 (1.26%) 最小，整體平均相對誤差約為 6.67%。
- 上游溪床坡度：整體而言，溪床坡度易受床面土砂材料以及水流之影響，導致數值量測資料易受不平整面與長流水水流的因素，而與現地差異較大，整體相對誤差約介於 0.27%~86.73% 之間，平均相對誤差約為 19.89%。
- 堆積材料粒徑 (目視最大粒徑長軸尺寸為比較基準)：本項僅有 21 座比較樣本數，大坑野溪 1 座 (馬鞍寮 D-03-A41-91)、東勢大灣地滑 2 座 (中崙里-26-A11-99、中崙里-27-A11-99)、東勢東坑石麻巷旁野溪 1 座 (麻竹坑-43-A51-101)，因現地量測材料尺寸過小而無法與數值資料比較。整體而言，全部防砂設施最大粒徑尺寸比較，其相對誤差大致上均控制在 10% 以下，尤以麻竹坑-44-A51-101 之相對誤差 (1.20%) 最小，整體平均相對誤差約為 5.18%。
- 河岸邊坡崩塌面積：本項有 4 座比較樣本數，主要為大湳坑上游崩塌野溪之大湳坑上游-10-A11-102 上游以及抽藤坑溪出口處左岸抽藤坑-03-A51-94、抽藤坑-04-A51-94 以及抽藤坑-05-A51-94 等 4 座。整體而言，相對誤差約介於 4.32%~29.26% 之間，平均相對誤差約為 15.27%，相對誤差值域區間較大之原因，可能係因受限地面調查人員視角與測量邊界判斷的問題，而造成差異之最大來源。



(a) DSM 暈渲圖 (b) 正射影像圖 (c) 三維模型
 (以 97S-WF-2-L10-009 抽藤坑溪(中興街 33 號)災害復建工程為例)

圖 12 DSM 暈渲、正射影像及三維模型圖

表 5 植生遮蔽狀況可否進行調查項目說明

調查項目	遮蔽狀況		
	全遮蔽	部分遮蔽	無遮蔽
防砂設施尺寸	不可	不可	可
環境現況	可	可	可
河岸邊坡	可	可	可
功能評估	不可	不可	不可

表 6 不同調查方式資料成果比較

項次	防砂設施 編號	溢洪口寬度(m)			有效壩高(m)			防砂設施周遭溪床坡度(%) (上游)			防砂設施周遭堆積材料粒徑 概況(m) (目視最大粒徑之長軸)			河岸邊坡崩塌面積(m ²)			模型平均 精度(GSD) (cm)	備註
		竣工 圖說 (A)	UAV 空拍 (B)	相對誤差 % A-B A	人力 調查 (A)	UAV 空拍(B)	相對誤差 % A-B A	人力調查 (A)	UAV 空拍(B)	相對誤差 % A-B A	人力 調查(A)	UAV 空拍(B)	相對誤差 % A-B A	人力 調查(A)	UAV 空拍(B)	相對誤差 % A-B A		
1	松鶴一溪 D-15-A11-94	30.00	33.43	11.43	1.70	1.78	4.66	3.70	3.71	0.27	2.30	2.47	7.34	NA	NA	NA	12.97	連續壩、不同 溪床坡度
2	松鶴一溪 D-16-A51-94	30.00	32.60	8.68	1.80	2.01	11.67	3.70	4.20	13.51	1.50	1.45	3.28	NA	NA	NA		連續壩、不同 溪床坡度
3	松鶴一溪 D-17-A11-94	30.00	30.31	1.03	2.30	2.17	5.70	3.00	2.60	13.33	1.80	1.87	4.03	NA	NA	NA		連續壩、不同 溪床坡度
4	松鶴一溪 D-18-A11-94	30.00	29.60	1.32	2.40	2.69	11.89	6.10	7.80	27.87	1.50	1.56	3.70	NA	NA	NA		連續壩、不同 溪床坡度
5	馬鞍寮 D-02-A41-91	2.50	2.45	2.02	2.10	2.16	2.76	4.40	3.28	25.51	0.62	0.57	8.06	NA	NA	NA	2.09	連續壩、不同 溪床坡度
6	馬鞍寮 D-03-A41-91	2.50	2.57	2.66	3.80	3.51	7.53	1.50	1.12	25.62	0.25	NA	-	NA	NA	NA		連續壩、不同 溪床坡度
7	抽藤坑 -84-A11-97	13.00	13.20	1.54	2.90	2.58	11.21	4.50	4.73	5.13	1.45	1.52	5.05	NA	NA	NA	2.38	獨立壩
8	矮山坑 -09-A11-97	12.00	11.00	8.37	0.90	0.82	8.74	13.40	15.42	15.06	0.70	0.74	5.81	NA	NA	NA	2.02	連續壩、不同 溪床坡度
9	矮山坑 -10-A11-97	12.00	12.23	1.92	3.00	3.16	5.42	11.50	10.66	7.28	0.95	1.04	9.26	NA	NA	NA		獨立壩
10	中料里 -26-A11-99	1.50	1.45	3.60	1.70	1.65	2.69	1.50	1.38	7.74	0.01	NA	-	NA	NA	NA	1.93	連續壩、不同 溪床坡度
11	中料里 -27-A11-99	0.40	0.35	13.29	2.60	2.47	4.98	10.00	13.80	38.00	0.01	NA	-	NA	NA	NA		獨立壩
12	大浦坑上游 -09-A11-102	6.40	6.35	0.78	6.50	6.12	5.85	2.40	2.50	3.96	1.05	1.10	4.76	NA	NA	NA	4.29	連續壩、不同 溪床坡度
13	大浦坑上游 -10-A11-102	6.00	6.07	1.18	8.20	8.87	8.16	1.20	0.91	24.08	0.40	0.41	1.92	875	1,131	29.26		獨立壩

表 7 不同坡地環境量測結果平均相對誤差與值域區間彙整表

項次	比較項目	相對誤差值域區間 (%)	平均相對誤差 (%)	差異過大可能原因
1	溢洪口寬度	0.78~13.29	4.25	-
2	有效壩高	1.26~11.89	6.67	-
3	上游溪床坡度	0.27~86.73	19.89	溪床坡度易受床面土砂材料以及水流影響
4	堆積材料粒徑	1.20~10.03	5.18	-
5	河岸邊坡崩塌面積	4.32~29.26	15.27	受限地面調查人員視角與測量邊界判斷

五、結論與建議

本文針對挑選案例進行 UAV 空拍調查及三維模型建置，並與地面人力調查進行比較，另彙整 UAV 空拍與地面人力調查適用性比較表（如表 8），便於未來相關工程界同好應用參考。由定性比較結果發現 UAV 空拍調查較不受限於地形與環境影響，相較地面人力調查，其拍攝視角上較為全面，可獲得較廣域之環境影像資訊，但針對防砂設施表面細部裂縫以及植生遮蔽的部分，仍需藉由地面人力排除，或近距離調查始能完成；由定量比較結果發現，結構物本體尺寸（溢洪口寬度、有效壩高）與堆積材料粒徑之量測，樣本相對誤差量差異較小；而溪床坡度與河岸邊坡崩塌面積，主要受不平整面與水流的因素，以及兩者拍攝視角不同而與地面人力調查結果差異較大。另一方面，未來 UAV 調查作業仍建議搭配現場地面控制點的施作，強化點雲模型或網格模型之精度，以盡量減少模型空間上誤差。整體而言，於現地調查時，若能配合 UAV 空拍與地面人力兩者調查方式操作，將可達事半功倍之效。

此外，為強化未來該項技術之應用層面，期以擴增實務應用價值，本文亦歸納 UAV 空拍調查使用時機、適用條件、優勢特性與限制性及改善建議等，條列如下說明：

（一）使用時機

UAV 空拍可配合地面人力進行防砂設施輔助調查，雖增加經費成本，但針對險峻之地形環

境，勢必可減少人力調查之危害。於使用 UAV 空拍調查時，建議考慮同時符合「道路不可及或現場地形，以及路徑不適於人力直接調查」及「防砂設施（河道）無植生遮蔽可明顯判釋且周圍無大水流」之環境條件下，俾利獲得可參考之調查量化資訊。

（二）限制條件

UAV 空拍調查需符合適航天氣，以及目標物鄰近空域無障礙及遮蔽，再進一步評估以 UAV 空拍執行調查。另受限於拍攝照片影像解析度，以及與目標物距離，結構物較細微之裂縫與變型，不易判斷。

（三）優勢特性

可廣域調查較不受限地面視角的影響，且可多角度拍攝目標物，進行大範圍環境調查時，可減少調查人力與時間，並快速瞭解河道整體狀況。惟調查成果可能因距離、植生覆蓋影響以及周圍空域條件，使後製模型精度較不易掌控，故僅能輔助人力調查使用。

（四）改善建議

建議未來可搭配人力調查找尋到達防砂設施路徑，以加速現場調查作業。另 UAV 空拍調查在機具設備安全與操作人力技術可控制之條件許可下，藉由降低對地航高或避開豐水期，再增加航拍照片空間精度及解析力，據以改善並提昇使用

表 8 UAV 空拍與地面人力調查適用性比較表

性質	填寫項目		調查方式（最小精度）		備註	UAV 是否適合進行調查
			人力調查	UAV 空拍		
量化數據	防砂設施尺寸		可（0.1m）	可（0.1m）	UAV 空拍調查可用以進行防砂設施尺寸量測（建模後量測溢口寬及有效壩高）	適合
	環境現況	防砂設施周遭堆積材料粒徑概況	可（0.1cm）	可（5cm）	UAV 空拍調查可用以進行堆積粒徑量測（建模後量測比較最大材料粒徑）	適合
		防砂設施周遭溪床坡度	可（3%）	可（2%）	UAV 空拍調查易受不平整面與水流影響，但可用以粗略快速獲得平均坡度（建模後量測比較溪床坡度）	適合
	河岸邊坡	河岸淘刷崩塌	可（50m ² ）	可（50m ² ）	UAV 空拍調查邊坡崩塌面積拍攝視角較全面（建模後量測比較面積量測範圍）	適合
		山腹崩塌	可（50m ² ）	可（50m ² ）		
型態或類型	功能評估	防砂設施本體外觀劣化	可	不佳	UAV 空拍調查僅能觀察大變形或大位移	不適合
		防砂設施周遭劣化型態	可	不佳	易受植生覆蓋影響，且輕微位移或變形 UAV 不易研判	不適合
		劣化營力	可	可	UAV 空拍調查可整體研判河道及邊坡之狀況，以及對應劣化營力之判別	適合
其他比較	調查所需時間		約 1 小時	約 20 分	-	-
	後續室內作業時間		約 2 小時	約 8 小時	-	-
	調查花費		6,000 元	10,000 元	-	-

UAV 空拍調查方式準確性。針對小變形或小位移等不易由 UAV 空拍調查觀察研判的部分，如防砂設施本體外觀劣化及功能評估上，仍需搭配地面人力調查，以近距離調查方式或排除遮蔽物，才能完整判斷檢視區域全面狀況。

參考文獻

- 行政院農業委員會水土保持局（2015）水土保持工程管考大數據資料集分析暨智慧應用先期計畫
- 行政院農業委員會水土保持局（2017）106 年水庫集水區土砂環境檢查與評估
- 行政院農業委員會水土保持局（2017）大甲流域防砂設施調查建置
- 交通部運輸研究所（2016）UAV 自動飛行檢測模組
- 交通部臺灣鐵路管理局（2015）臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫

誌謝

感謝行政院農業委員會水土保持局，提供計畫（編號 SWCB-106-097）經費補助，作者深表謝忱。

水利工程應用程式 公開發售

SEC-HY21（二維泛用地表水分析軟體）

- 網格及地形建立等前處理介面、電腦繪圖及流場視覺化
- 定床水理模組
- 水中生物物理棲地分析模組

訂購電話：(02)8791-9198 轉 473 馬小姐
傳 真：(02)8791-2198
E-MAIL：pony@sinotech.org.tw