

UAV 應用於水土保持之現況與趨勢

林宥伯 農業科技研究院 農業政策研究中心研究助理
吳振佑 農委會水土保持局 技術研究發展小組研究助理
陳均維 農委會水土保持局 技術研究發展小組研究助理
林詠喬 農業科技研究院 農業政策研究中心研究助理
陳國威 農委會水土保持局 技術研究發展小組副工程司
林家興 農業科技研究院 農業政策研究中心研究員
陳振宇 農委會水土保持局 技術研究發展小組副總工程司

UAV 可克服交通限制 進行土石流防災勘查

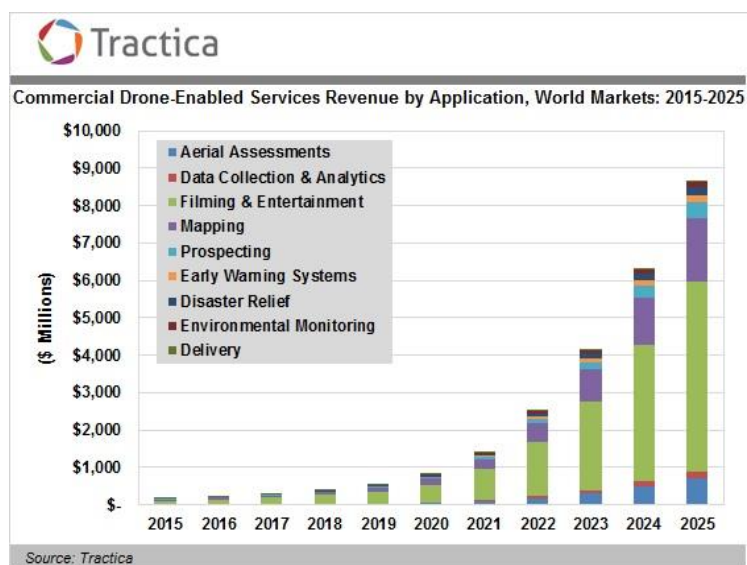
無人機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 目前已廣泛應用於各領域，依其服務型態大致可分為空中運輸、空中感測及空中作業等三大類。由於 UAV 具有高機動性及低空作業能力，故能克服災後交通中斷與雲蔽問題等限制，在水土保持及土石流防災業務扮演重要角色，例如，運用無人機執行地形測繪、區域巡查、植生撒播與防災勘查等任務。

然而，隨著民航法修正後將 UAV 納入管理，以及山區複雜多變的天候與地形條件，UAV 之應用也面臨了軟硬體、現地作業、通訊等瓶頸。本文藉由檢視既有業務及實務案例，嘗試綜整出 UAV 應用於水土保持領域之問題與挑戰，俾供後續應用與發展方向之參考。

無人機應用趨勢

一、發展現況

從國際應用趨勢上來看，Tractica (2016) 指出，市場預測 2015 年至 2025 年，全球商用 UAV 應用服務營收將從 1.7 億成長至 87 億美元 (圖一)。商用服務主要領域包含拍攝、娛樂、測繪與空中作業等多種服務，小部分為勘救災、預警系統、資料蒐集與分析、環境監測等。



圖一 UAV 市場應用與產值 (資料來源：Tractica, 2016)

目前 UAV 在臺灣應用領域相當多元 (表一)，當市場應用面擴大、產值增長與服務逐漸成熟，未來整合模式將包含硬體與 IoT (Internet of Things) 感測技術、大數據應用 (Big Data)、精準農業 (Precision Agriculture)、行動裝置與邊際運算 (Edge Computing) 及物流系統等服務 (圖二)。從市場趨勢來看，不論是臺灣或國際，皆已具備相當規模之產業鏈，下一節將從國外巡檢案例及 UAV 多機協作試驗說明應用與研發方向。

《每月專題／水保防災管理 UAV 好幫手》



圖二 UAV 服務模式

表一 UAV 發展現況

應用類別	項目
空間資訊	航空攝影、DSM、DEM、正射影像、製圖應用、地物屬性分類與調查、3D 建模、VR 實景等
災害應變	天災如土石流、崩塌、水災、火災、油汙、空汙等監控與救援
國土/ 城鄉規劃	國土計畫、區域計畫、都市計畫、農村規劃、都市更新、營建管理、區域開發、生活圈調調、集水區規劃
環境監測	海洋汙染監控、大氣天候研究、地質採勘研究、國土開發、國土利用調查、違規監測、地表探測等
農漁業/ 水土保持應用	農、林、牧業管理、崩塌地植生、農藥噴灑、病蟲害防治、農漁業災害查估、農漁業資源調查、精準農業研究等
娛樂應用	商業攝影記錄、特技拍攝、通訊中繼等
交通控制	交通事故調查、公路即時流量監控與管制、進出港船舶管理等
海岸防衛	偷渡及緝私、海岸巡防監控等
軍事運用	即時戰場偵察與監視、目標追蹤、通訊中繼、砲火校正、雷達誘餌、戰鬥訓練用靶機等
科學應用	野生動物觀測與追蹤、流體動力、結構、控制等實驗平台等

二、應用案例

1.砂防構造物巡檢

以日本廣島縣個別設施維護管理指南（廣島縣，2012）為例，巡檢種類分為初次檢查、巡視檢查、定期檢查、詳細檢查及緊急檢查等五類（表二）。

表二 設定檢查的種類概要

檢查種類	檢查目的概要	檢查時間點
初次檢查	工程建設完成後或是初期狀態的第一次檢查	工程竣工或初次定期檢查
巡視檢查	調查設施的劣化、損傷等早期發現	隨時
定期檢查	透過檢查判定各部位劣化及損傷情形，並確定後續對策	每 5 年一次
詳細檢查	檢討必要的補強改善方法，更詳細調查劣化和損壞狀態	依定期檢查結果判斷執行
緊急檢查	地震、颱風、豪雨、大雪等災害事件發生時	異常事件發生後儘速執行

（資料來源：廣島縣，2012）

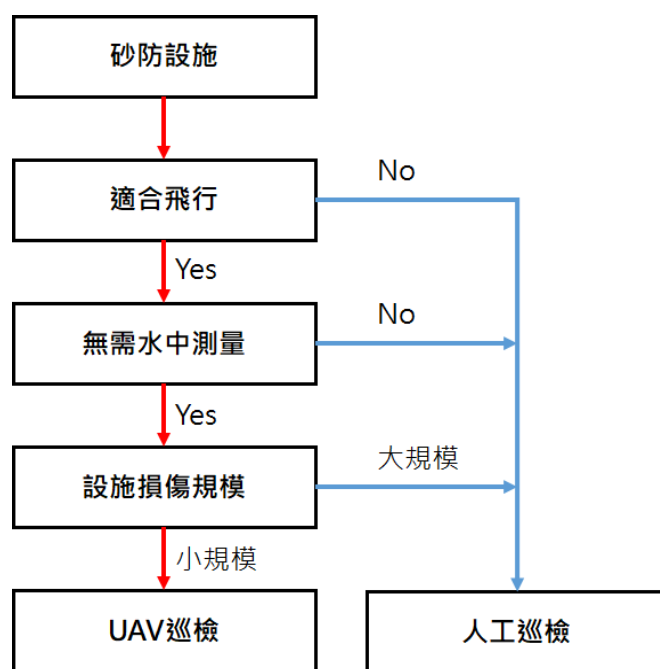
表三 砂防堰堤修繕方法—健全度分級

健全度	健全度評估內容	設施健全度
良 ↓ 悪	5 劣化や変状がほとんどなく、施設の機能上問題はな い。	A
	4 軽微な劣化や変状が見られるが、施設の機能低下はな く、経過観察を行う。	B
	3 劣化や変状が進行しており、施設の機能低下を起こさ ないよう対策を行う必要がある。	C
	2 劣化や変状が広範囲に進行し、施設の機能が低下して いるため、速やかに対策を行う必要がある。	-
	1 劣化や変状が著しく進行し、施設の機能が大きく低下 しているため、緊急に対策を実施する必要がある。	E

（資料來源：廣島縣土木建築局砂防課，2014）

對於檢查後構造物之狀態則進行健全度分級，依優劣等級共分為 A-E 五類，其中 A 級為設施功能完好，E 級則是劣化和損壞顯著，代表設施功能大幅下降，需立即進行補強、改善，相關級別如表三所示。

由於調查人員常受限於交通可及性及環境狀況，難以接近砂防設施進行檢查，故日本近年開始使用 UAV 輔助砂防設施巡檢，除可解決人員安全問題外，亦可確認固床工、防砂壩等設施之健全度、周遭環境綠化狀態及河床變化情況等，以利後續維護管理工作規劃。此外，橋爪健夫（2018）提及，若天候狀況適合飛行、無須進行水下量測且構造物為小規模損傷時，可選用 UAV 進行檢測；反之，則建議以人工巡檢較為恰當，其 UAV 檢測選用流程如圖三所示。

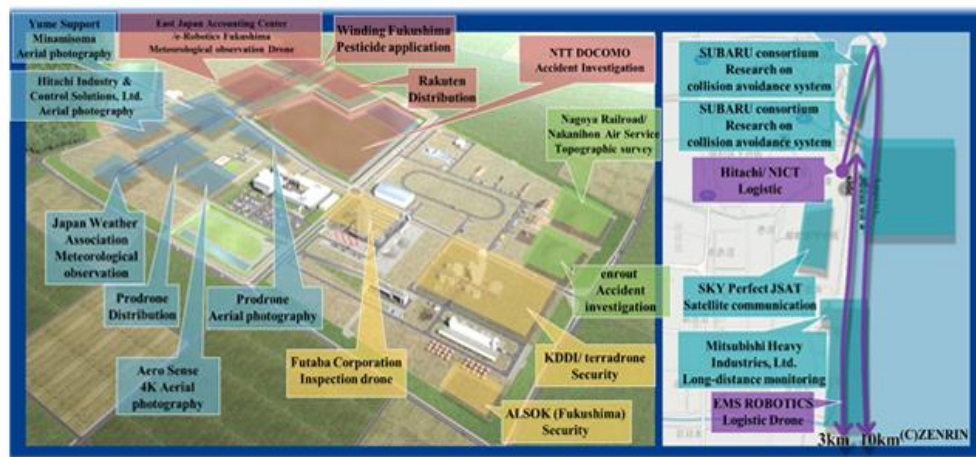


圖三 砂防設施 UAV 檢測選用流程（資料來源：橋爪健夫，2018）

2.多機協同作業管理平台

除一般常應用之測繪分析外，UAV 亦用於災後應變搜索與救援領域；指揮官就現場狀況及空域分配考量，需要同時協調不同 UAV

任務與應變團隊，執行不同搜索及救援行動 (Alotaibi et al., 2019)，因此日本 NEDO 協會發展無人機系統協作平台，在福島 UAV 試驗場，藉由其發展之流量管理方式，測試多人操作多台 UAV，同時進行不同任務編組，如氣象觀測、地形調查及航空攝影等任務，以建立 UAV 通訊與多機協同作業需求 (圖四)。



圖四 日本多系統無人機操作試驗 (資料來源：日本 NEDO，2019)

整體而言，目前國內外 UAV 應用之軟硬體解決方案日趨完備，各領域應用 UAV 進行空中作業、空中感測及空中運輸的比例日益增加。例如日本發展 i-Construction 結合 ICT 與土木工程，搭配 UAV 即時測繪成果，可大幅解決日本勞動力不足的問題；此外，UAV 應用於災後勘查，不僅可降低人員傷亡風險，更可在災後快速獲取情報。下一節將透過水土保持領域相關案例，說明規劃調查、坡地保育與軟硬體精進研發等應用情形及挑戰。

水土保持領域相關應用

依據水土保持局之業務職掌，目前 UAV 輔助水土保持及防災應用大致可分為四個領域 (如表四)：

表四 水土保持局 UAV 應用領域

治山防災	集水區基礎資料調查（土石流、崩塌地）、地形測繪、3D 模型、河床質調查、生態環境調查、工程規劃、構造物巡檢、工程效益評估、崩塌地治理（撒播植生）
防救災業務	保全對象調查、災害緊急調查、即時回傳影像、防災巡查、物流運輸
山坡地監測管理	土地利用調查、違規巡查、調查、即時回傳影像、水土保持施工檢查、設施巡檢
農村相關應用	農村空間調查、精準農業與農噴、災損評估、影像辨識

如以業務執行面來看，則可概分為「**規劃調查、坡地保育、軟硬體精進研究**」三個面向。規劃調查要求快速蒐集符合精度要求之現地資料，俾利用於後續治理規劃；坡地保育著眼於 UAV 擴充性，如載重、滯空、通訊等以強化空中作業效能；另一方面，由於山坡地與平地作業環境差異甚大，故針對山區作業之所使用之 UAV，應加強軟體輔助與平台管理，以及硬體改裝強化其作業能力。

一、規劃調查

規劃調查是水土保持治理上極重要的基礎工作，藉現地測繪與長期數據的蒐集與整合，從工程設計到數值模擬皆仰賴於調查作業成果，以工程生命週期為例，其應用 UAV 情境如下表五所示，其中，UAV 光達資料之整合應用與河床質粒徑影像分析判釋為水土保持工程應用的項目之一，將詳細說明如下：

表五 水土保持(含農村)工程生命週期應用 UAV 之情境

項 目	說 明
調查	集水區調查、土石流及崩塌地調查、土地利用調查、坡地違規 農村資源調查、農塘調查
測量	河道沖淤、河道疏通、工程規劃測量、崩塌地測量、農村規劃測量
設計	UAV 攝影或掃描，產製 DSM、DEM 地形圖及 3D 建模
施工	1. 配合河道疏通工程推展，以 UAV 快速測量疏通數量 2. UAV 進行崩塌裸露地空中植生作業
檢查、 維護管理	UAV 進行水土保持構造物檢查，納入維護管理機制
其他	河床質調查研究、3D 建模及 VR 技術、水土保持相關工作教育訓練

1.UAV 光達資料整合應用

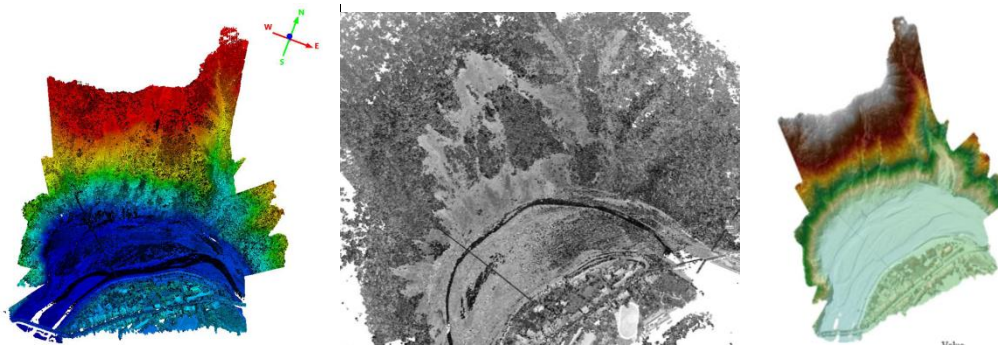
由於搭載一般光學鏡頭之 UAV 拍攝時，難以克服植生遮蔽等問題，為獲取更細緻之地表地形資訊，水土保持局運用無人單旋翼直升機搭載輕量型光達 RIEGL VUX-1UAV (圖五)，以航線高度 100 至 250 公尺進行飛行掃描及地面光達測量任務，其測區點雲密度可達每平方公尺 400 點以上。

由於雷射波具穿透植被之特性，故能有效獲取地面點及精確三維坐標，同時利用 UAV 光達與地面站光達之密點雲 (Point Clouds) 資料拼接技術及航帶平差方法，可產製出公分等級的 DTM 數位模型(圖六)，並建置多時序高解析空間資料庫，以利後續分析整體山區的崩塌地活動性。



圖五 無人載具 (UAS-Vapor 55)、輕量型光達 (VUX-1UAV)

(資料來源：張國楨，2019)

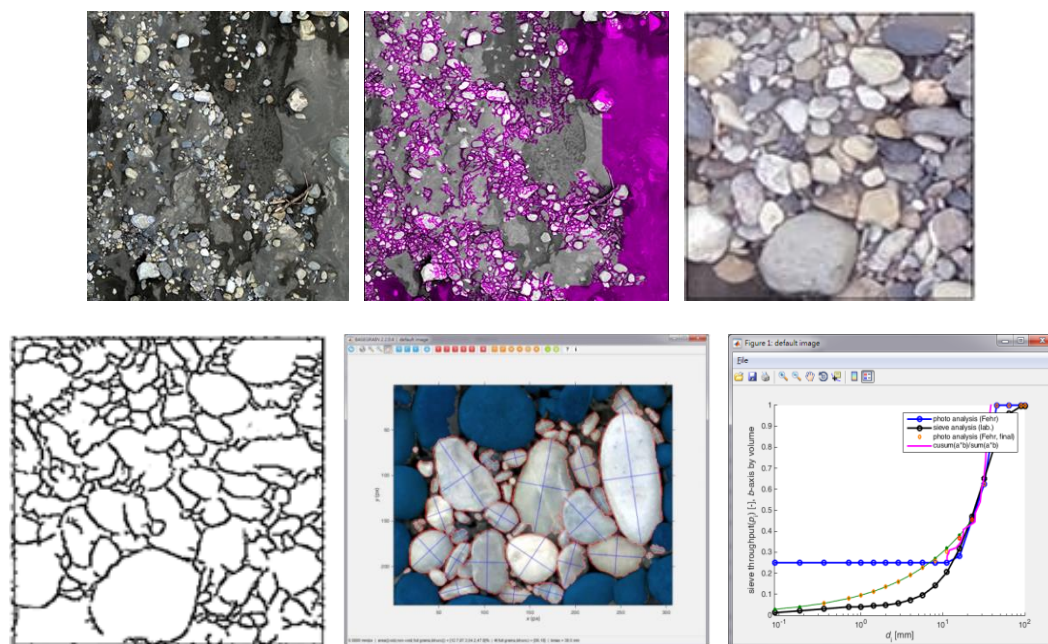


圖六 點雲資料 (左：航帶平差後；中：空中及地面光達整合；右：DSM 模型)

(資料來源：張國楨，2019)

2.河床質粒徑影像分析判釋

傳統河床質粒徑現地調查，多依賴局部河段開挖進行篩分析或現地表面層粒徑調查，其受限於作業型態，難以提供大範圍與多時序分析需求。利用 UAV 以不同航高進行航拍，產製高解析度正射影像及三維密點雲，建立河床粒徑基本資料庫，並搭配後端輔助判釋軟體，可提升採樣效率、減少作業時間並擴大調查範圍。此外，可快速進行表面層顆粒糙度特性分析，探討最適糙度、分析移動視窗尺寸並推估河床表面指標粒徑，以瞭解河床質組成，進而分析河道特性，作為水理模式參數及土砂遞移之治理依據 (圖七)。



圖七 影像分析處理過程（影像 Grey 處理-上左、影像 Overlay 處理-上中、影像判釋範圍圈選-上右）與粒徑判釋範圍確認（下左）、粒徑長短軸辨識（下中）、粒徑判釋曲線（下右）。（資料來源：曾志民、張國楨，2019）

二、坡地保育

崩塌地之植生復育為降低二次災害風險的重要措施。然而，部份崩塌地位處偏遠或地形陡峭，人員與機具難以抵達，故近年來水土保持局嘗試以 UAV 進行撒播植生取代傳統人力作業，期能維護人員安全並提升作業效率與植生復育率，惟尚待克服與強化之議題如下：

1. 通訊品質提升

以 UAV 進行崩塌地植生作業時，操作員常需克服山區地形對於訊號之干擾，以即時影像圖傳為例，水土保持局創新研究計畫藉由比較並測試相關傳輸設備，將現有市售設備進行強化，以獲得更好的圖像傳輸品質（圖八），有助於提升 UAV 於山區作業之安全性。



圖八 強化圖傳效果（修改自張集豪，2019）

2.播種與噴植設備改良

崩塌地類型各異，適合的撒播植生設備亦不相同。如高陡坡需要橫向噴植（圖九）；緩坡則適用垂直撒播投擲（圖十），因此 UAV 須能彈性搭載不同設備。此外，植生團粒劑的改良與強化材料、造形特性，亦為水土保持局近年重要之研究方向（詹勳全、林政侑，2019；唐琦，2019）。



圖九 水平噴植研發（資料來源：張集豪，2019）



圖十 單旋翼與六軸 UAV 投擲設備

（資料來源：林信輝、大冠塢空中攝影公司提供，2019）

三、軟硬體精進研發

前述各類 UAV 應用成果，其數位資訊資料量相當龐大，如何有效管理歷次產製成果，並強化 UAV 於山區之作業能力，水土保持局亦已進行軟、硬體及管理機制方面之精進。

1. UAV 成果管理平台

為有效整合與應用歷年大量的 UAV 空拍成果，水土保持局已建置了統一上傳及檢核窗口—「UAV 成果管理平台」。此平台除分類各種 UAV 產品及制定統一規格外，亦提供快速分享、精度評估與搜尋比對之功能(圖十一)。同時，藉由建立完整詮釋資料、開發標準 API，使之與策略聯盟單位資源共享。

自上線服務以來，總計已整合 3 個不同機關，累積達 20 萬公頃之正射影像、約 300 處數值地表模型及超過 100 處 3D 模型，深獲各界好評，並榮獲 2019 年第 15 屆金圖獎。歷年 UAV 空拍成果可於水土保持局巨量空間資訊系統 (BigGIS, <https://gis.swcb.gov.tw/>) 查詢使用。



圖十一 水土保持局 UAV 成果管理平台

（資料來源：水土保持局技術研究發展小組，2019）

2.現勘觀測應用

當現勘遭遇難題、不易判讀時，往往需尋求具判斷經驗之專家學者協助，此時可藉由圖傳技術與軟硬體整合，例如結合 VR 眼鏡與無人飛行載具感應器，由專業操作人員執行視距外飛行，透過高空俯視角度勘查崩塌災害，讓專家學者進行視距外現勘作業，掌握現地災情資訊，克服交通不便與兼顧人員安全（圖十二）。



圖十二 UAV 與 VR 眼鏡結合之應用（資料來源：水土保持局，2018）

山區實作案例

一、面臨問題

僅管 UAV 可有效輔助水土保持業務推動，然以水土保持領域來說，災害或工程現場多位於集水區上游峽谷區、土石流潛勢溪流、野溪等，易受地形蔽障、通訊不佳或有雷達站等因素影響，UAV 之訊號常遭屏蔽。現場也常遭遇交通中斷之超視距任務、訊號干擾、現地圖資更新不及、植生與邊坡高度限制、山區谷風過大、電池低溫壓降、山嵐濃霧遮蔽、瞬間降雨、棲地鳥類襲擊等問題。

二、實施對策

在山區執行任務時，如發生前述情況造成 UAV 墜毀，後續回收難度極高，故執行任務時應注意事項如下：

(一) 任務規劃

於山區執行 UAV 飛行任務，其類型包含數值地表模型(DSM)、正射影像、構造物拍攝、現地全景拍攝等，亦包含高精度三維模型拍攝與建置，為確保人員與器材安全以完成任務，建議在任務前確認並規劃下列作業事項：

1. 行前準備事項，規劃飛行任務與室內前置作業 (是否為限/禁航區、飛行任務區域周邊有無雷達站、確認飛行高度、空域申請)。
2. 飛行前檢查，現場設備檢查包含機體 (機體結構、電力系統、動力系統、飛控系統)、遙控設備與地面裝備、通訊及控制信號、UAV 導航校正。
3. 執行飛行任務，注意天氣、風速、周遭環境有無磁場或無線電干擾源，評估現場是否適合起飛，並隨時注意雷雨胞等雷達迴波資訊。
4. 飛行後檢查與資料檢視，UAV 設備回收及檢查機體、遙控設備、通訊及控制信號。不同飛行任務間更換使用獨立之記憶卡，並於電池更換時傳輸備份，降低風險。

因此，在執行飛行任務時，應特別確認現地條件是否適合飛行、電力是否充足、飛航系統地理圖資之正確性、機體有無損壞、遙控與通訊軟硬體之間的訊號連接性、地形環境之通視性 (在起飛轉換區、降落區內及目標物間是否有足夠的避障距離性)、飛行任務區內是否有其他信號干擾等，以確保安全飛行以達成任務。

（二）避礙因應

在任務執行中，UAV 操作者需全神貫注於飛行任務，儀表飛行時難以兼顧 UAV 周遭狀況，然任務現場地形條件較為嚴峻且多變之環境，由於拍攝角度不同，UAV 與周圍障礙物常產生視覺死角，操作人員無法全面掌握飛行後之空中狀態，導致 UAV 撞上樹枝、電線或遭受野鳥攻擊等情形而發生墜毀。因此，在執行相關任務時，建議除操作者外，須有另一觀測人員協助確認 UAV 與拍攝目標物間之安全距離，並輔助避開障礙物，如飛航高度是否足夠避開障礙物，如電線、樹冠及飛行動物如鳥群或大型禽類等，一旦 UAV 有失穩或迷航情形，須立即警告操作人員，並協助指引 UAV 返回安全區域。

另外，當任務執行區域為山區時，常面臨到山風、谷風、山嵐等現象造成濃霧、強風或瞬間降雨的情形，故須特別注意現場天候狀態，若已有零星降雨或起霧，因雨水與霧氣皆可能影響到通訊傳輸品質，建議及早將 UAV 駛回安全區域或操作者目視範圍之區域，以免操作者與 UAV 兩者間傳接訊號形成暫時性斷訊。在利用圖台規劃飛行航線任務時，建議採用現地海拔高程資料，並考量植生樹高資料設定安全飛行高度，以免任務執行時飛航高度不足，飛機發生墜毀；若起降點為特殊情況，如泥灘地、河谷、強側風等環境氣候，為降低作業風險，可由觀測手協助以手持方式起飛（圖十三）。



圖十三 拉克斯溪汛期前現勘—UAV 定點起降與手持起飛
（資料來源：水土保持局技術研究發展小組，2019）

三、執行成果

任務期間所拍攝之影像數據，因應不同需求可產製為高精度三維模型、360 度環景、正射影像、點雲或熱影像圖等，為求足夠之解析度，任務航線規劃與建議事項如下：

1. 一般測繪或尺寸放樣、拍攝 3D 建模用之正射照片，建議橫向重疊率 70%，前後重疊率 85% 以上，建模成果較佳。部份 3D 建模軟體亦可用影格切割方式進行建模，但 GPS 資料易遺失，一般較不建議。當建模目標缺乏特徵點時，可利用定位點圖卡，增加建模精度（圖十四）。



圖十四 大湖口溪建模—砌石損壞狀況（左上）、壩體基礎刷處建模（右上）、QR 碼輔助特徵點設置（左下、右下）。

（資料來源：水土保持局技術研究發展小組，2019）

2. 在利用坐標進行後續定位校正時，需搭配地面控制點。藉由即時動態定位技術（Real Time Kinematic，RTK）等儀器輔助或各單位既有水準點所提供地面定位點資訊，可將垂直與水平誤差

控制至 0.5m 內。以 RTK 測量輔助定位時，可選用搭載 RTK 模組之 UAV，或 UAV 搭配地面 RTK 控制點測量方式；若於山區等環境，建議搭配地面 RTK 作業方式，以分散風險。

3. 由於 UAV 於空中拍攝，受標的物之摺曲、凹凸面等影響，易造成 3D 建模失真。針對拍攝死角，可由地面人員於不同角度手持 UAV，不起飛但啟動拍攝的方式獲取死角與立面之斜拍資料。原理主要利用其三軸雲台模組、機身 GPS 模組以及內建之拍攝角度，使用地心地固坐標系 (Earth Centered Earth Fixed Frame, ECEF) 解算得出，搭配空中拍攝角度，可更精準建置全面之模型與加值應用。

適時研提防災應變建議 供法規檢討參考

目前臺灣在不同專業領域使用無人載具之成效上，皆有良好成果，如搭載光達 (light detection and ranging, LiDAR) 或微型孔徑雷達相機 (synthetic aperture radar, SAR)，配合地面光達站等，可獲取更高精度之地形模型。此外，UAV 亦可依任務需求掛載不同設備進行植生粒劑撒播、快速勘災及測繪蓄水量體等各類案件，輔助執行任務以提升業務效率。但目前受環境差異與法規實施影響，應用上仍面臨續航力、酬載量、感測器成本與精度、法規與空域限制等問題。

從軟硬體供給面來看，UAV 產業蓬勃發展，相關技術門檻逐步突破，以動力系統來說，受限於電池容量及機身重量平衡，目前 UAV 續航性仍有精進空間。以常見之四旋翼 UAV 電量為例，一顆電池僅能飛行約 20-30 分鐘，對於廣域性之任務飛行需耗時來回更換電池。而在其他專業領域中，已有使用類似燃料電池或油電混合供電之案例，後續如能導入應用，將能增加任務時間或酬載強度，有效提升作業效率。

考量任務對於地面解析度 (Ground sampling distance) 之要求，目前市售 UAV 搭配之光學裝置重量與鏡頭像素足以提供一般任務所需，但其球面像差對數據仍有影響。此外，更高精度或特殊應用如紅外線熱影像 (Thermal infrared image)、多光譜儀 (可見光至近紅外光波段)、高光譜影像 (Hyperspectral imaging)、光達、合成孔徑雷達等特殊感測器，機構重量遠大於光學鏡頭，未來若能減輕這類感測器重量，將可提升任務應用彈性。

除軟硬體支援外，未來作業空域已由各地縣市政府設定正面或負面表列，並須事先申請解除限制航高，對一般作業來說，相較於過去有諸多不便。未來如遇防災應變等緊急任務需求，勢必遭遇現場指揮官權責溝通與臨時空域資源分配之問題；因此，有關此類緊急任務之運作、現場協調與訊號頻段分配等機制將是後續急需考量的一環。

水土保持局為因應民航局 UAV 相關管理法規之實施，除持續關注相關法規動態，針對可能影響相關業務推動或災害應變者，適時研提建議供民航局納入法規檢討之參考，亦協助委辦團隊 (公司、法人或機關) 瞭解 UAV 法規動態，適時取得操作證及通過能力審查，期能循序輔導本局及各分局通過相關能力審查，在安全無虞的前提下建立 UAV 自主操作能力。

參考文獻

1. 田屋科技 AVIX Tech, 「田屋科技 AXH 無人直升機參加海巡署防走私緝毒演習」, 2018 年。
2. 田屋科技 AVIX Tech, 「田屋科技獲國內首張無人機型式認證」, 2020 年。
3. 交通部民用航空局, 「遙控無人機管理規則」, 2019 年。取自：
<https://www.caa.gov.tw/Article.aspx?a=2292&lang=1>
4. 行政院農業委員會水土保持局, 「土石流防災科技應用與創新」, 107 年土石流年報, 2018 年, p62。
5. 吳怡慧, 「應用無人機釋放天敵昆蟲平腹小蜂防治荔枝椿象」, 無人機於農林應用研討會, 2019 年。
6. 亞際工程技術顧問有限公司, 「108 年度樟湖溪等集水區農塘盤點調查、評估與初步規劃」, 水土保持局, 2019 年。
7. 林信輝, 「無人飛行載具 (UAV) 播種植生案例與技術整合彙整」, 水土保持局, 2019 年。
8. 唐琦, 「陡坡崩塌地微立地條件與應用無人飛行載具(UAV)播種植生之介面整合性試驗」, 水土保持局, 2019 年。
9. 張國楨, 「整合光達技術於寶來溫泉區之多時序高解析坡地監測」, 水土保持局, 2019 年。
10. 張集豪, 「無人飛行載具(UAV)播種作業機具與噴植設備之精進研發」, 水土保持局, 2019 年。
11. 陳欣倫, 「UAV 納入陸戰隊情監偵運用之研究」, 海軍學術雙月刊, 第 51 卷第 2 期, 2017 年。
12. 陳國威, 「UAV 輔助水保防災應用及因應遙控無人機法規之規劃」, 水土保持局, 2018 年。
13. 曾志民、張國楨, 「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」, 水土保持局, 2019 年。

14. 黃宗仁、葉堃生，「UAV 技術發展及林業實務應用面之探討」，臺灣林業，44(2)，2018 年，p46-53。
15. 楊明德、莊子毅、韓仁毓，「結合光學與紅外線熱影像正射鑲嵌處理」，航測及遙測學刊，23(2)，2018 年，p71-81。
16. 楊明德、許鈺群、曾信鴻、曾偉誠，「無人機於精準農業之應用」，科儀新知，220，2019 年，p20-39。
17. 楊明德、蔡慧萍，「無人飛行載具發展現況與未來趨勢」，2018 年。
18. 詹勳全、林政侑，「陡坡崩塌地無人飛行載具(UAV)噴植工法作業與驗證」，水土保持局，2019 年。
19. 蔣曜宇，「飛越海拔一千公尺的使命--台灣無人機公司帶蛇毒血清上阿里山」，數位時代，2019 年。
20. 簡志維，「全球無人載具發展現況及未來趨勢」無人機研發與產業發展趨勢論壇，2019 年。
21. Harada Farm，「ドローンで鉄コーティング種子播種（散布）と除草剤散布 DJI MG-1 粒剤散布機」，2018 年。
22. 矢野智徳，「西日本豪雨-被災現場からの報告土砂崩れの隠された要因とその対策①」，2018 年。取自：
<https://www.youtube.com/watch?v=vKTAIV-1l6U>
23. 青山祐介，「MG-1P RTK のフライトに見る最新農薬散布技術 -DJI JAPAN とシンジェンタジャパンが実証実験を公開」，2019 年。取自：
<https://drone-journal.impress.co.jp/docs/special/1182658.html>
24. 日本國土交通省，「i-Construction～建設現場の生産性革命～」，2016 年。
25. 廣島縣土木建築局技術企画課，「個別設施維護管理指南」，2012 年。

26. 廣島縣土木建築局砂防課，「【 砂防堰堤 】 定期点検の結果に基づく修繕の実施」，2014 年。
27. 橋爪健夫，「砂防設備点検の新たな取り組みの紹介」，スキルアップセミナー関東，2018 年。
28. Alotaibi, E. T., Alqefari, S. S., & Koubaa, A.. LSAR: Multi-UAV Collaboration for Search and Rescue Missions. IEEE Access, 7, 2019 年,p 55817–55832。
29. NEDO，「 Successful interconnection test of a drone traffic management system with the participation of general drone operators」， 2019 年。
30. Tractica，「 Commercial Drone-Enabled Services Revenue Will Reach \$8.7 Billion Annually by 2025 」， 2016 年。取自：
<https://tractica.omdia.com/newsroom/press-releases/commercial-drone-enabled-services-revenue-will-reach-8-7-billion-annually-by-2025/>。