



計畫編號：ARDSWC-112-059

農業部農村發展及水土保持署

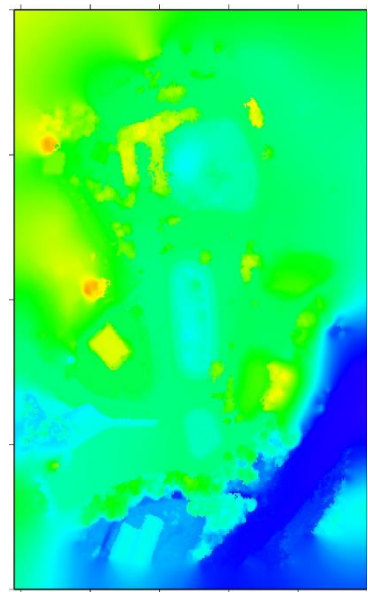
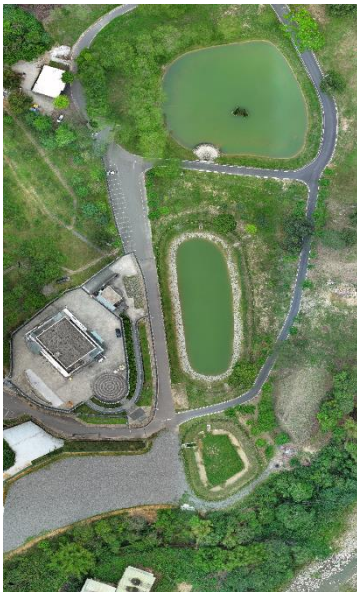
無人機無人船聯合執行農塘水域巡檢作業

資料整合模式建立

Data Integration Modeling from Farm
Pond Inspections with UAV-USV Joint

Implementation

(成果報告書)



執行單位：國立中興大學

執行期間：112 年 02 月 8 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：蕭宇伸 副教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 11 月

無人機無人船聯合執行農塘水域巡檢作業資料整合模式建立

摘要

本計畫選擇澧水溪慈恩滯洪農塘，利用無人機空拍建置水域周邊集水區之水上結構物與地形，並融合無人船測得的水下淤積地形，產製一水域環境水上水下之地形。研究重點包括：(1)分析無人機空拍 3D 建模精準度；(2)發展無人機空拍與無人船測深成果資料整合技術；(3)分析農塘集水區土壤流失量與農塘淤積量之關聯性；(4)分析植被生長偵測可行性。

根據五次空拍建模成果可以得知使用井字型航線的建模成果較使用 S 型航線的建模成果完整；在加入地面控制點前各任務測得地面高程有著 ± 2 公尺不等的差值，而加入地面控制點後各任務的高程差有明顯修正，使各任務測得地面高程差值近乎為 0。將 UAV LiDAR 測得之 DSM 與 DEM1、DEM2 相減後，農塘、草地與道路之高程誤差約為 0~4 公尺，可能為 DSM 檔案與 DEM1、DEM2 空間解析度不同所造成。最後將 UAV 及 USV 兩者作結合時可以發現在兩者護岸處較不吻合，可能是因為兩者解析度不同所造成。

關鍵詞：無人機、農塘、無人船

Data Integration Modeling from Farm Pond Inspections with UAV-USV Joint Implementation

Abstract

This project selects the Cien farm pond in Yushui River as the test area and utilizes Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to construct the water structures and terrain of the surrounding water catchment area. It also integrates the underwater sediment terrain measured by Unmanned Surface Vessel (USV) to generate a comprehensive representation of the aquatic environment both above and below the water surface. The research focuses on the following aspects: (1) analyzing the accuracy of 3D modeling using UAV, (2) developing techniques to integrate the data obtained from UAV and USV, and (3) analyzing the relationship between soil erosion and sediment accumulation in the farm pond catchment area. (4) Analysis of Feasibility for Vegetation Growth Detection.

Based on the results of five aerial photography missions, it is evident that the modeling outcomes using a grid-shaped flight route are more comprehensive than those using an S-shaped route. Before incorporating ground control points, there were elevation discrepancies ranging from ± 2 meters in the ground elevations measured for each mission. However, after the inclusion of ground control points, the elevation differences for each mission were significantly corrected, resulting in ground elevation differentials approaching zero. Upon subtracting the UAV LiDAR-derived Digital Surface Model (DSM) from Digital Elevation Models (DEM1 and

DEM2), elevation discrepancies for agricultural ponds, grasslands, and roads ranged from 0 to 4 meters. This variability may be attributed to differences in spatial resolution between the DSM file and DEM1/DEM2. Finally, when combining data from both UAV and Unmanned Surface Vehicle (USV), it is observed that discrepancies in shoreline areas are more pronounced. This inconsistency may be due to variations in resolution between the two data sources.

Keywords: UAV, USV, Farm Pond

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 緒論	1-1
1.1 前言	1-1
1.2 參考文獻	1-4
1.3 研究大綱	1-7
第二章 原理	2-1
2.1 UAV 原理	2-1
2.2 空載 LiDAR 原理	2-4
2.3 USV 原理	2-6
2.4 坐標轉換原理	2-7
第三章 研究設備	3-1
3.1 UAV 空拍設備	3-1
3.2 UAV LiDAR 設備	3-1
3.3 USV 設備.....	3-3
3.4 GNSS 設備	3-5
3.5 Pix4dmapper	3-5
第四章 研究區位與實驗設計	4-1
4.1 研究區位	4-1
4.2 實驗設計	4-2
第五章 研究成果	5-1

5.1	分析無人機空拍 3D 建模成果	5-1
5.2	分析 UAV LiDAR 多重回波建置地形成果	5-30
5.3	UAV 與 USV 成果整合	5-31
5.4	水工構造物巡檢可行性	5-41
5.5	植被生長偵測可行性	5-43
5.6	集水區土砂流失與農塘淤積關聯性	5-47
5.7	進度甘梯圖	5-48
第六章 結論及建議		6-1
參考文獻.....		參-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-1
附錄二、第一次期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-4
附錄三、第二次期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-11

表次

表 5-1 任務 1~5 空拍資訊	5-1
表 5-2 UAV LiDAR 檢核點	5-44
表 5-3 USV 任務 1 與 2 農塘測深成果	5-47
表 5-4 計畫甘特圖	5-48

圖次

圖 1-1 苗栗縣苑裡鎮開挖式農塘	1-2
圖 2-1 重疊率示意圖	2-1
圖 2-2 共線式方程式原理示意圖	2-2
圖 2-3 SFM 之示意圖	2-3
圖 2-4 空載光達的系統示意圖	2-5
圖 2-5 光達原理示意圖	2-5
圖 2-6 雷達多重反射示意圖	2-6
圖 2-7 二維平面坐標系統之旋轉	2-9
圖 2-8 二維平面坐標系統之平移	2-9
圖 2-9 非正交坐標系統轉至正交坐標系統	2-11
圖 3-1 AUTEL EVO II RTK	3-1
圖 3-2 CHC 01 飛行器	3-2
圖 3-3 YELLOWSCAN VX15	3-2
圖 3-4 OTTER PRO 船體外觀.....	3-3
圖 3-5 NORBIT iWBMS 多音束測深系統.....	3-4
圖 3-6 PENTAX G6 A+衛星定位接收器	3-5
圖 3-7 光雲原理.....	3-7
圖 4-1 澧水溪慈恩滯洪農塘位置示意圖	4-1
圖 4-2 澧水溪慈恩滯洪農塘配置圖	4-2
圖 4-3 GNSS 點位位置圖.....	4-3
圖 4-4 研究流程圖.....	4-4
圖 5-1 任務 1 航線軌跡示意圖	5-2
圖 5-2 任務 1 空拍建模成果	5-2
圖 5-3 任務 1 空拍建模成果側面圖	5-3

圖 5-4 無控制點之任務 1 高程圖	5-3
圖 5-5 有控制點之任務 1 高程圖	5-3
圖 5-6 任務 2 航線軌跡示意圖	5-4
圖 5-7 任務 2 空拍建模成果	5-5
圖 5-8 任務 2 空拍建模成果側面圖	5-5
圖 5-9 無控制點之任務 2 高程圖	5-5
圖 5-10 有控制點之任務 2 高程圖	5-6
圖 5-11 任務 3 航線軌跡示意圖	5-6
圖 5-12 任務 3 空拍建模成果	5-7
圖 5-13 任務 3 空拍建模成果側面圖	5-7
圖 5-14 無控制點之任務 3 高程圖	5-7
圖 5-15 有控制點之任務 3 高程圖	5-8
圖 5-16 任務 4 航線軌跡示意圖	5-9
圖 5-17 任務 4 空拍建模成果	5-9
圖 5-18 任務 4 空拍建模成果側面圖	5-9
圖 5-19 無控制點之任務 4 高程圖	5-10
圖 5-20 有控制點之任務 4 高程圖	5-10
圖 5-21 任務 5 航線軌跡示意圖	5-11
圖 5-22 任務 5 空拍建模成果	5-11
圖 5-23 任務 5 空拍建模成果側面圖	5-11
圖 5-24 無控制點之任務 5 高程圖	5-12
圖 5-25 有控制點之任務 5 高程圖	5-12
圖 5-26 任務 1 檢核點之精度	5-14
圖 5-27 任務 1 檢核點高程之精度	5-14
圖 5-28 任務 2 檢核點之精度	5-15
圖 5-29 任務 2 檢核點高程之精度	5-15

圖 5-30 任務 3 檢核點之精度	5-16
圖 5-31 任務 3 檢核點高程之精度	5-16
圖 5-32 任務 4 檢核點之精度	5-17
圖 5-33 任務 4 檢核點高程之精度	5-17
圖 5-34 任務 5 檢核點之精度	5-18
圖 5-35 任務 5 檢核點高程之精度	5-18
圖 5-36 任務 1 與任務 2 高程差	5-19
圖 5-37 任務 1 與任務 3 高程差	5-19
圖 5-38 任務 1 與任務 4 高程差	5-20
圖 5-39 任務 1 與任務 5 高程差	5-20
圖 5-40 任務 1 水平方向之精度	5-22
圖 5-41 任務 1 檢核點之高程精度	5-22
圖 5-42 任務 2 檢核點之精度	5-23
圖 5-43 任務 2 檢核點高程之精度	5-23
圖 5-44 任務 3 檢核點之精度	5-24
圖 5-45 任務 3 檢核點高程之精度	5-24
圖 5-46 任務 4 檢核點之精度	5-25
圖 5-47 任務 4 檢核點高程之精度	5-25
圖 5-48 任務 5 檢核點之精度	5-26
圖 5-49 任務 5 檢核點高程之精度	5-26
圖 5-50 任務 1 與任務 2 高程差	5-28
圖 5-51 任務 1 與任務 3 高程差	5-28
圖 5-52 任務 1 與任務 4 高程差	5-29
圖 5-53 任務 1 與任務 5 高程差	5-29
圖 5-54 DSM 套疊影像之三維圖	5-30
圖 5-55 DSM 與 DEM1 高程差	5-31

圖 5-56 DSM 與 DEM2 高程差	5-31
圖 5-57 農塘 A 池座標轉換控制點位置	5-32
圖 5-58 農塘 B 池座標轉換控制點位置	5-32
圖 5-59 A 池未進行座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果	5-34
圖 5-60 B 池未進行座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果	5-34
圖 5-61 A 池四參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果	5-35
圖 5-62 B 池四參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果	5-35
圖 5-63 A 池六參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果	5-36
圖 5-64 B 池六參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果	5-36
圖 5-65 A 池未進行座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果	5-38
圖 5-66 B 池未進行座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果	5-38
圖 5-67 A 池四參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果	5-39
圖 5-68 B 池四參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果	5-39
圖 5-69 A 池六參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果	5-40
圖 5-70 B 池六參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果	5-40

圖 5-71 UAV 任務 3 溢洪口點雲成果	5-41
圖 5-72 UAV 任務 3 護岸點雲成果	5-42
圖 5-73 DSM 減 DEM1 地形並套疊影像圖	5-45
圖 5-74 DSM 減 DEM2 地形並套疊影像圖	5-45
圖 5-75 UAV 任務 5 減 DEM1 剩餘地形成果	5-46
圖 5-76 UAV 任務 5 減 DEM2 剩餘地形成果	5-46

第一章 緒論

1.1 前言

農塘(圖 1-1)早期使用目的以農業灌溉與家庭用水為主，根據水土保持技術規範第 55 條，在低窪地區或溪流適當地點，構築堤壩攔蓄逕流，提供滯洪、農業用水及改進生態環境等多項用途，稱作農塘。農塘主要分成築壩式和開挖式，依據現地狀況採用自然或混凝土材料進行構築。現今農塘的兩大主要功能為水利與養殖，水利功能以儲蓄水源為主，以提供做為農業灌溉使用，是臺灣自有農塘以來最主要的功能，水土保持農塘多屬於此類；而養殖功能則用於飼養魚類，提供坡地農業的附加價值。近年來，開始針對農塘活用的問題進行討論，例如農塘除了上述之功用外，其儲存豐水期的水源，可解乾旱時缺水之苦、也可提供地下水之補注，另一方面也可調節暴雨季節洪水流量，防止淹水災害，其效用如同小型的滯洪設施。隨著氣候變異加劇及坡地開發增加洪患威脅，農塘滯洪防災的功能更顯重要，同時又可有效沉積土砂、減少土砂流出、降低水流含砂量，及減少因坡地農作而增加下游地區土砂衝擊，亦可調節農塘周邊的微氣候條件，進一步可供休閒遊憩之用。

農塘水源主要來自於降雨和逕流匯集而來，如何運用及管理這些珍貴的水資源，像是用作農業或是日常用水，是重要的保育治理課題。除此之外，農塘若有高低落差，還能利用此現象進行水力發電，也能將太陽能板設置於水面上，作為發電使用，像是桃園市政府在桃園的埤塘推動太陽能發電計畫，將太陽能板架設至埤塘上，進行太陽能發

電，不佔用土地也能達到相同的效果。在苗栗地區的農塘，在現今產業結構轉變的過程中，苗栗相較其他地區開發較少，樹林和農塘的數量保存較多，也因此為台灣地區絕大多數的鳥類棲息保留了豐富的生態環境。



圖 1-1 苗栗縣苑裡鎮開挖式農塘(農業部網站)。

由上述盤點農塘特性可發現，農塘具有民生經濟、防洪減災、綠能發電、生態保育等功能，然而農塘亦面臨到一些課題，本計畫盤點現存農塘常見問題主要有三種(鴻昇工程科技有限公司(2019);國立中興大學(2019);承峰工程顧問有限公司(2020))：

- 一、因為農塘之水源以攔蓄地表逕流或引水進流為主，若上游土砂發生位移，透過逕流移動至農塘，容易造成農塘淤積，使蓄水容量減少、壽命降低，且因為清淤需要大量人力和成本，較難以實行清淤作業。
- 二、若農塘施工不完善，底部未做好防水處理，或日後的維護管理失當，未修補農塘損壞的地方，日經月累下底部會有裂縫產生，或是結構物受到損壞，進而發生滲漏或漏水現象，影響農塘之蓄水

能力。

三、由於農塘位於灌溉區域的下游側，匯集了地面逕流及隨著逕流流出之土壤肥分，這些肥分富含氮、磷等植物營養物質，一旦過量進入水體後，會引起藻類及其他浮游生物的迅速繁殖，使水體溶解氧含量下降，造成藻類、浮游生物、植物、水生物和魚類衰亡甚至絕跡的污染現象，破壞了水體原有的生態系統的平衡，水質也會因氧氣的缺少而發臭。

上述三種狀況會使農塘的功效降低，失去其可用性，狀況嚴重甚至無法使用。由於現代社會經濟結構的改變，部分農塘被回填作為非農業使用，除了造成無法提供農業穩定水源外，水庫集水區滯洪保土與調節微氣候之功能亦隨之降低，造成諸多負面影響。另外由上述盤點的農塘面臨課題，可發現淤積是農塘面臨的第一種要課題，故如何精確量測淤積量，對後續農塘治理方式的選擇極為重要。另一方面，若農塘淤積地形能配合周邊地形一起建置，將能進一步提供土砂變遷與結構物巡檢等應用。

本計畫選擇一農塘待測區，利用無人船(Unmanned Surface Vessel, USV)測得的水下淤積地形，並與無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)空拍建置的水域結構物與地形做資料整合，獲取一農塘水上與水下完整地形，然而 UAV 與 USV 觀測時具有各自的坐標系統，故如何進行整合，例如以坐標轉換技術進行合併，是本計畫研究的重點項目。另一方面，本研究亦採用 UAV LiDAR 技術，蒐集研究區位之地形，利用 LiDAR 多重回波特性，來偵測樹冠和地表差異，評估此技術應用於植被生長之可行性。

1.2 參考文獻

本計畫研究重點包括 UAV 空拍技術、UAV LiDAR 技術與座標轉換技術，以下將分別說明近年來國內的研究情況。

1.2.1 UAV 空拍參考文獻

最近 UAV 的技術發展得相當快速，UAV 具有低成本、操作方便與較易運用等優勢，且機動性與解析度都較高，便於用來監控環境。UAV 的應用相當廣泛，能用於監測崩塌地、進行植生播種、進行天災如土石流、崩塌、水災、火災等防災勘查，進行景觀調查與規劃與建置三維數植模型等用途；林宥伯等(2020)整理了 UAV 實際應用的案例，在日本有運用 UAV 進行砂防構造物巡檢，以日本廣島縣個別設施維護管理指南為例，可以將檢查種類分為初次、巡視、定期、詳細及緊急檢查，以確認構造物的健全度與周遭植生狀態與河床變化情形，以利後續維護管理工作規劃；許愷岐等(2021)曾使用 S-1000 型八旋翼機於阿里山鄉樂野村進行植生噴植作業，此地在一八八風災曾崩塌過且植生未完全恢復，因此在此地進行植生噴植作業，並觀察此地在一年內植生覆蓋率的情形；蔡元融(2020)使用搭載光達的 UAV 取得崩塌淺地區的資料後進行剖面分析，找出此地區不安定的位置與滑動區域的相對關係，再利用分區分塊分析之塊體進行數值模擬，評估崩塌發生的過程；劉庭宇等(2021)利用 UAV 進行景觀調查並建立正射影像及三維模型，其中在地形起伏較大的地區，特徵物較不好提取，在建置三維模型時常有影像扭曲的情況，將重疊率提升增加資訊可以改善此問題，且航線採用井字型、上下及左右重疊率高於 70%，可以建置出最佳的三維模型；黃韋蒼等(2019)曾利用 UAV 取得果樹的影

像資料，在利用無人多足地面機補足 UAV 無法取得的影像，像是果樹底部、葉子下方的枝條等，結合兩者影像後建置出果樹完整的 3D 立體模型，以完整的監控果樹各方位生長的情形。

綜合上述文獻可知 UAV 在不同領域皆有良好的成果，可以任務需求搭載不同設備，目前常用於防災、勘災、監控、播種及構造物巡檢等應用。

1.2.2 UAV LiDAR 參考文獻

江晉霆(2018)利用 UAV LiDAR 執行飛航掃瞄作業，將擷取之資料進行分類，並建置出數值地形模型。對光達所獲取之點雲進行平差工作，以探討其模型精度，並比較不同區域、不同航次之飛航掃瞄成果。藉由光達的多重回波特特性，獲取較多的地面點點雲，將整個模型進行點雲分類，可分類出較多地面點，達到判釋地形及道路之目的；馬慧(2021)認為不同種類的 LiDAR 系統各具優勢及限制，藉由結合不同 LiDAR 系統來克服各自的限制，提供更完整的資訊。利用 UAV LiDAR 與移動式 LiDAR 進行立木調查，結合 UAV LiDAR 與移動式 LiDAR 提供的立木偵測及基本參數測計結果，來提升立木調查之精度；劉秉承(2019)使用 UAV LiDAR 於每個研究區域均進行兩次不同時期的 UAV LiDAR 掃描任務。透過各種分析航帶平差參數來尋找妥善且適中的航帶平差參數，再使用三種航帶平差方式來進行分析。比較兩期資料在這三種平差導正方式下的精度差別，以探討無人機光達資料之資料處理方式對資料品質之影響。另針對較高精度之 UAV LiDAR 資料，探討 LiDAR 資料的多重回波特特性，針對植被穿透特性及有效地面點之評估，來獲取地面點，獲得數值高程模型及數值地表模型並分析整體山崩潛勢區內的崩塌量及崩塌範圍；陳奕霖(2021)使

用不同種類之 UAV LiDAR 進行 LiDAR 掃瞄作業。完成掃瞄後首先針對不同 LiDAR 掃瞄出來的點雲進行空間上的精度評估及分析，探討不同 UAV LiDAR 之間所存在的差異，而後利用點雲建製數值地形模型，了解 UAV LiDAR 在使用不同 DTM 製作軟體上所形成的差別；王星為(2017)使用 UAV LiDAR 進行飛航任務，產製 UAV LiDAR 點雲，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，進而建置數值地形模型；蔡杰凱(2020)使用 UAV LiDAR 及地面光達雷射掃瞄儀進行地形資料之掃瞄工作。針對研究區，蒐集了五個時期的點雲資料(五個時期無人機光達與三個時期的地面光達)。首先進行資料之整體精度評估，並繼而進行資料處理及製作數值地形模型。針對多期之數值地形模型，計算地形差異，分析崩塌區之量體之虧損與加積，以及其量體變化，探討其在不同時間的高程變化量、滑落方向並評估其崩塌之地形特徵；葉正陽(2019)使用 UAV LiDAR 在藻礁海岸八個小時內執行了九次量測(涵蓋一個漲潮潮汐)；在沙岸七個小時內執行了八次量測(涵蓋一個漲潮潮汐)。量測藻礁海岸與沙岸的波浪能量消散，並在觀測同時，在底部放壓力計與無人機資料做比較；陳誼(2021)利用 UAV LiDAR 在斗六地區進行高時間解析度的氣象場與氣膠剖面觀測，以提供過去少有的高時間頻率大氣垂直剖面資訊，同時搭配地面空氣品質測站資料和 WRF 模式模擬的再分析場，整合分析空污事件之演變過程及成因，並確立此觀測技術能應用於將來大氣剖面研究。

綜合上述文獻可知 UAV LiDAR 是近年來滿熱門的研究題目，然而多數 UAV LiDAR 研究並未對植物生長監測的可行性進行評估。

1.2.3 座標轉換參考文獻

陳永川(1995)曾經探討在市地重劃區的平面控制測量與都市計畫樁座標轉換，都市計畫樁的座標轉換是利用四參數座標轉換暫時解決不同控制測量系統間樁位聯測的問題，因 TWD67 與 TWD97 兩者採用的基準不同，且 TWD67 缺少橢球資訊；許皓寧等(2004)曾使用四參數座標轉換、六參數座標轉換及七參數座標轉換，將區域大小不同的座標進行座標轉換，而實驗成果為方位角誤差可控制在 10 秒內，距離誤差可控制在 3 公分內；李添福(2006)曾將 TWD67 的地籍資料座標轉換為 TWD97 座標系統，以最小二乘法結合四參數及六參數進行座標轉換，轉換成果為平均點位誤差約為 0.5 公分，面積增減為 0.1%以內，因此可以視為無誤差；王奕鈞(2006)曾利用神經網路進行 TWD67 與 TWD97 之座標轉換，並與網格式地籍座標轉換與最小二乘法求得四參數座標轉換與六參數座標轉換間的參數相比，發現利用神經網路進行座標轉換成果最佳；張勳偉(2012)曾提出改良式四參數，利用觀測點位 VRS-RTK 與公告座標作為共同點，利用傳統四參數求出之東方向平移量約 2-7 公尺，北方向平移量約 8-12 公尺，而利用改良式四參數求出之東方向平移量約-0.05 公尺，北方向平移量約 0.15 公尺。

綜合上述文獻可知當兩者的座標系統基準不相同時，常以四參數與六參數進行座標轉換，為了降低轉換的誤差也有與多篇文獻改良座標轉換方式，以降低誤差。

1.3 研究大綱

本計畫主要選定之 UAV 拍攝地點為嘉義縣中埔鄉澗水溪慈恩滯

洪農塘，同步進行 2 次 UAV 空拍與 USV 水深測量(同步)，1 次 UAV 空拍與 UAV LiDAR(同步)及 2 次單純 UAV 空拍之任務，並分析各任務觀測精度。獲取各種無人載具的成果後，將融合各資料建置農塘水域環境最佳三維模型，其中各種坐標轉換方式為本計畫研究重點。本計畫以 UAS 與 USV 結合之最佳三維模型，探討分析水工構造物巡檢可行性、集水區土砂流失與農塘淤積關聯性等課題。也利用 UAV 光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)與 UAV 空拍進行精度比較，並分析 UAV LiDAR 應用於分析植物生長之可行性評估。

第二章 原理

2.1 UAV 原理

2.1.1 航線規劃

本計畫利用無人機拍攝多幅正射影像建立 3D 點雲模型，利用建模軟體建立 3D 點雲模型會利用照片中的特徵物進行匹配，進行影像連結作業，在進行匹配時，影像間的重疊率需達一定程度才有足夠數量的特徵點進行匹配。另外本研究利用 Pix4Dmapper 軟體建立點雲資料，Pix4Dmapper 在配特徵點時，UAV 航線左右重疊率建議在 50%-60%之間，前後重疊率則在 70%-80%之間為最佳，示意圖如圖 2-1。

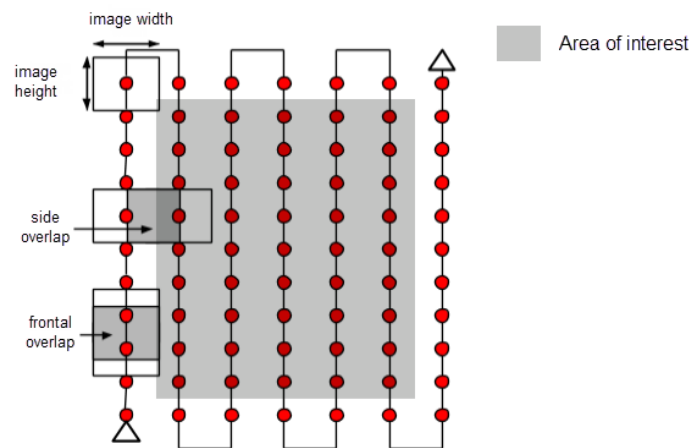


圖 2-1 重疊率示意圖。(<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition#gsctab=0>)

2.1.2 共線條件(Collinearity condition)

無人機空拍建模基本原理為共線條件(Collinearity Condition)，在拍攝測量成像系統中，地面上任一地形點(A)、投影中心(O)及像片上

之對應像點(a)，三點應位於同一條直線上，如圖 2-2 所示。共線方程式如下(Wolf and Dewitt (2000))：

$$x_a = x_0 - f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (1)$$

$$y_a = y_0 - f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (2)$$

式中 O 為指定像主點(Indicated Principal Point, IPP)，以影像長、寬之一半的交會處為指定像主點； x_a 、 y_a 為像點 a 的影像坐標； x_0 、 y_0 為像主點的影像坐標； f 為相機焦距； X_A 、 Y_A 、 Z_A 與 X_L 、 Y_L 、 Z_L 分別為地物點 A 與相機曝光點 L 在物空間中的坐標； m_{ij} 為飛機旋轉角 ω 、 φ 、 κ 所構成的相關函數。計算上述公式和此區域中已知的像點坐標後，可得到其餘大部分點位的未知物空間坐標。

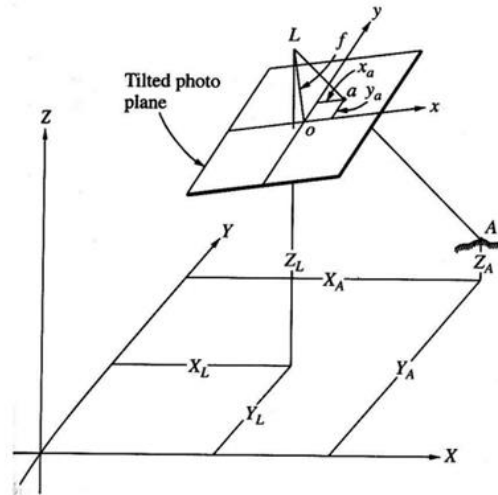


圖 2-2 共線式方程式原理示意圖(Wolf and Dewitt (2000))。

2.1.3 影像式建模

影像式建模(ImageBased Modeling, IBM)是二維影像建立三維模型的過程，欲求得二維影像物體的各點坐標且建立三維模型，其方式是利用已知拍攝二維影像時相機的位置後，可以計算影像中各特徵點

在中間中相對位置，接著運用運動回復結構(Structure from Motion, SFM)技術，將多張二維影像輸出正射鑲嵌圖且轉三維點雲模型，其流程為：特徵點提取和匹配、估算相機之位置和運動方向、優化運算成果以及多視立體計算，圖 2-3 為示意圖。

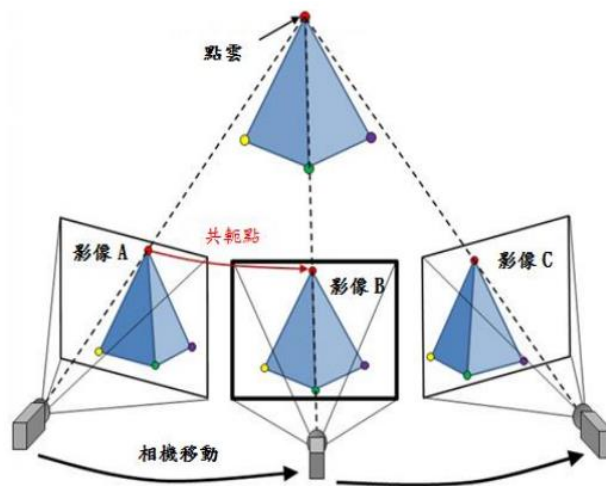


圖 2-3 SFM 之示意圖(趙智凡等，2016)。

SFM 包含下列四個步驟：

1. 特徵點提取和匹配

使用無人機拍攝完影像後，要進行特徵點的提取與匹配，要先使用共線方程式搜尋影像中較容易辨識的特徵點，例如：邊坡、溢洪口等，提取出影像中多個特徵點後，接著利用電腦視覺計算並對照多張影像中相同的特徵點。

2. 估算相機之位置和運動方向

提取出特徵點後，利用核線幾何關係，推斷相機之相對拍攝位置、移動方向和相機參數，建構出稀疏的三維場景結構點雲。

3. 優化運算成果

接著利用電腦計算坐標，在計算坐標過程中，若受到人為拍攝或電腦計算等因素影響，導致前後影像之間無法重疊，建模時會產生誤差。這時利用光束平差法將拍攝目標、相片和相機位置位在同一直線上，並同時計算多張影像，使投影誤差降至最低。

4. 多視立體計算

利用多視立體(Multi-View Stereo,MVS)演算法，利用影像群聚的方式，將產出的稀疏三維結構點雲，產製成更密集的點雲資料，建構出完整三維點雲模型。

2.2 空載 LiDAR 原理

空載 LiDAR 分別結合雷射測距、全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS) 及慣性測量裝置(Inertial Measurement Unit, IMU)等技術，透過雷射測距所得到之點雲資料與 GNSS 和 IMU 資料進行計算後，可在短時間內快速獲得掃描範圍的三維座標(經度、緯度高、高程)。目前在地質、測量、水土保持等方面都已有空載光達之應用，此外中央地調所也將空載光達運用在土石流、火山地質及地形構造上，且都有不錯的成效，空載光達的系統示意圖如圖 2-4 所示。

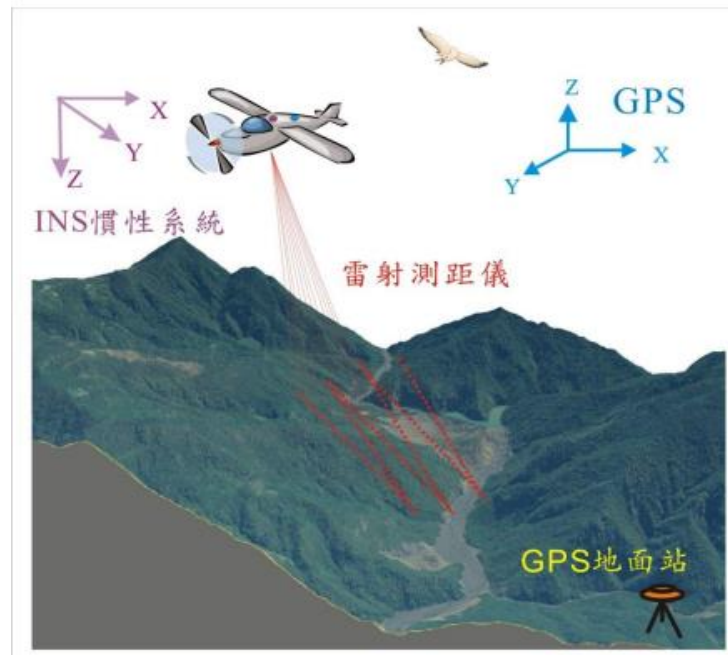


圖 2-4 空載光達的系統示意圖 (來源:侯進雄等 2012)。

光達原理示意圖如圖 2-5 所示，其中雷射測距，是透過向地面或植物發射脈衝雷射光後(速度為 C)，會反射部分光波至接收器，再利用計時器計算出脈衝雷射光往返儀器與目標物的時間(T)，進而得出距離量 d ，如下所示：

$$d = \frac{1}{2} C * T \quad (3)$$



圖 2-5 光達原理示意圖(王星為等，2017)。

當 LiDAR 打至地表時，單一脈衝最多可有四個反射回波訊號，當 LiDAR 打至樹葉時，會反射第一筆回波資料，未打到物體的 LiDAR 則繼續向前進直至反射樹幹、地表等物體。藉由第一個回波資訊可得出數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，最後一次回波則可得出數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，可過濾樹木等遮蔽物取得準確的地形資料(圖 2-6)。

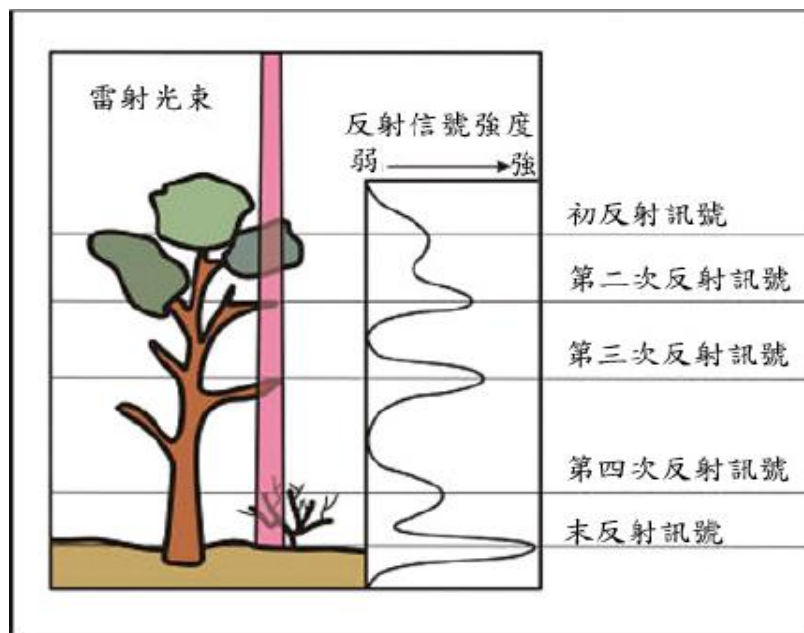


圖 2-6 雷達多重反射式意圖（來源:黃鐘、詹瑜章等 2004）。

2.3 USV 原理

船載測深原理是以聲納利用聲波在水中傳播速度，及傳播時間差測定水深。本計畫之 USV 採用多音束測深系統技術，是由多音束測深儀、船隻姿態收集器(motion sensor)、電羅經(gyrocompass)、聲速剖面儀(sound velocity profiler)或鹽溫深儀(CTD)、潮位站及地面 GNSS 站構成(劉金源，2001；Jong et al., 2002)，另外船隻上搭載 GNSS 接收儀進行平面位置定位。測深儀是將電能轉換成聲波能量，發射一個脈衝傳播至水體，當此脈衝接觸到一反射面後，此聲波能量會反射傳回，在接收此聲波後會將其能量轉換成電能強度，由紀錄器分析訊號

計算傳播經過時間，並轉換成距離予以紀錄，測得水深 c 可表示為下式(薛憲文等, 2012)

$$c = \frac{1}{2}(v \times t) + k + d \quad (4)$$

其中， v 代表水中聲速， t 為水中去回傳播時間， k 為因系統而異的訊號傳遞時間延遲之常數修正值， d 則為船隻吃水深，即從海面到音鼓安置位置之水深。

2.4 坐標轉換原理

本研究用於 UAV 與 USV 坐標轉換方式包括四參數正形坐標轉換與六參數仿射坐標轉換，以下分述如下。

2.4.1 四參數正形坐標轉換

四參數正形坐標轉換有四個未知參數，假設有兩個不同的坐標系統要進行坐標轉換，兩者的長度縮放比例可能不同，因此會有尺度參數。兩個坐標不會完全平行，因此需要調整兩坐標間的角度。且兩者的原點也不相同，X 軸及 Y 軸都會有一個平移量。綜合上述三個條件後可以得到四個參數。如圖 2.7 所示，圖中有兩個相同原點，不同坐標的坐標系統，兩坐標系統有一夾角 β ，假設 X_p 及 Y_p 已知， X_p 及 Y_p 可由式(5)與(6)得出。坐標系統在旋轉時若有固定比例的長度縮放，就需再加上一個尺度因子(S)，加入尺度因子後式(5)與(6)可改寫為式(7)與(8)，若將 $S \cos \beta = A$ ， $S \sin \beta = B$ ，則式(7)與(8)則可改寫為式(9)與(10)。若兩個坐標系統的原點不一致，如圖 2-8，轉換式中需再加入兩個原點間的平移量 C 及 D ，如式(11)與(12)所示。綜合上述之坐標轉換流程可以得出共有四個參數，分別為一個旋轉角度、一個尺度因

子及兩個平移量。式(11)與(12)即為四參數正形坐標轉換的線性函數公式，A、B、C、D 為轉換參數，若在兩坐標系統分別有兩點已知，即可求得轉換參數，若已知點超過兩點可利用平差求解(崔國強等, 2013)。

$$x_p = \cos \beta X_p + \sin \beta Y_p \quad (5)$$

$$y_p = -\sin \beta X_p + \cos \beta Y_p \quad (6)$$

$$x_p = S \cos \beta X_p + S \sin \beta Y_p \quad (7)$$

$$y_p = -S \sin \beta X_p + S \cos \beta Y_p \quad (8)$$

$$x_p = AX_p + BY_p \quad (9)$$

$$y_p = -BX_p + AY_p \quad (10)$$

$$x_p = AX_p + BY_p + C \quad (11)$$

$$y_p = -BX_p + AY_p + D \quad (12)$$

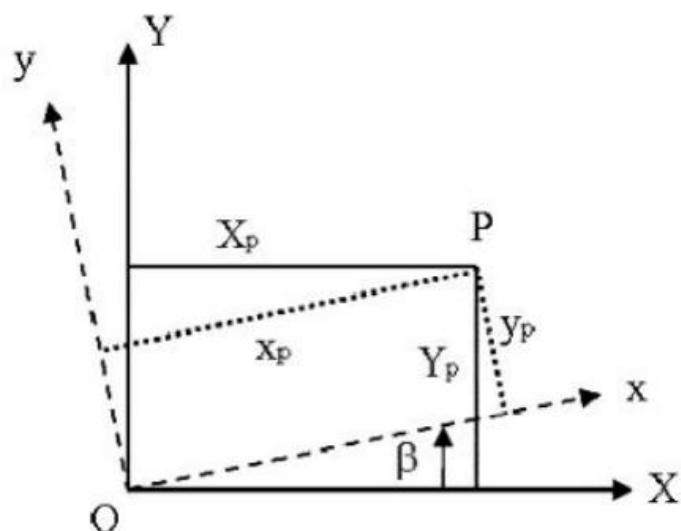


圖 2-7 二維平面坐標系統之旋轉(來源:崔國強等, 2013)。

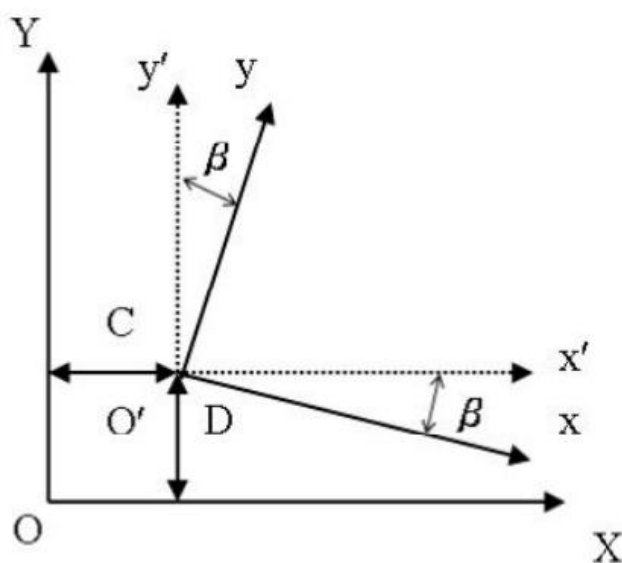


圖 2-8 二維平面坐標系統之平移 (來源:崔國強等, 2013)。

2.4.2 六參數仿射坐標轉換

仿射轉換的參數為欲轉換坐標系統的座標軸不同的尺度因子，並假設坐標軸間為非正交，有些微的偏差量，以及正形轉換使用的兩個平移參數及一旋轉參數，共有一個旋轉參數、一個非正交的微偏值、

兩個平移參數及兩個尺度因子，共六參數，各參數間的相關性如圖 2-9。假設 X 、 Y 為非正交坐標系統， X' 、 Y' ，則為正交坐標系統，兩坐標傾斜夾角為 θ ，公式為式(13)與(14)。X 軸尺度因子為 S_x ，Y 軸則為 S_y ，兩者平移量為 C_1 及 C_2 ，兩坐標間夾一旋角 β ，如式(15)與(16)。另外 A_1 、 B_1 、 A_2 及 B_2 可以式(17)~(20)表達，後續即可寫出仿射轉換公式，如式(21)與(22) (崔國強等, 2013)。

$$x'_p = x_p + y_p \sin \theta \quad (13)$$

$$y'_p = y_p \cos \theta \quad (14)$$

$$X = S_x \cos \beta x + S_y (\cos \beta \sin \theta + \sin \beta \cos \theta) y + C_1 \quad (15)$$

$$Y = -S_x \sin \beta x + S_y (-\sin \beta \sin \theta + \cos \beta \cos \theta) y + C_2 \quad (16)$$

$$A_1 = S_x \cos \beta \quad (17)$$

$$B_1 = S_y (\cos \beta \sin \theta + \sin \beta \cos \theta) \quad (18)$$

$$A_2 = -S_x \sin \beta \quad (19)$$

$$B_2 = S_y (-\sin \beta \sin \theta + \cos \beta \cos \theta) \quad (20)$$

$$X = A_1 x + B_1 y + C_1 \quad (21)$$

$$Y = A_2 x + B_2 y + C_2 \quad (22)$$

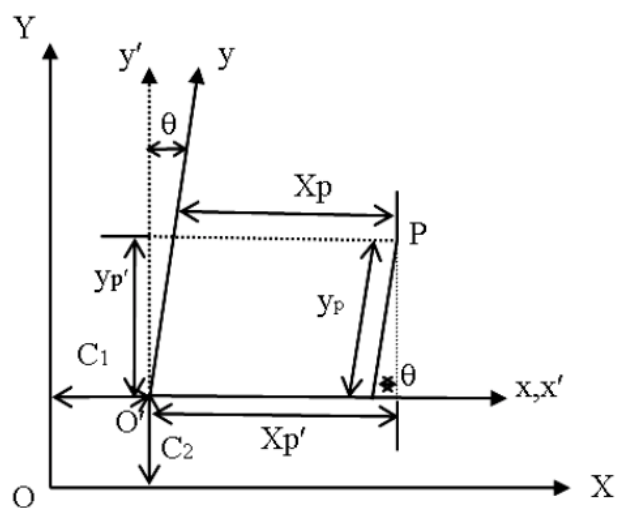


圖 2-9 非正交坐標系統轉至正交坐標系統(崔國強等, 2013)。

第三章 研究設備

3.1 UAV 空拍設備

本研究用於空拍的機型為 AUTEL EVO II RTK(圖 3-1)總重約 1.25 公斤(含電池)，最大飛行速度可達 20m/s，具備公分級高精度定位系統，傳輸距離 9 公里，最高解析度可達 5472x3648，供電系統採用 LiPo 3S 鋰電池，最長飛行時間可達 36 分鐘，最大風阻為 8 級風，因此在天氣情況不佳時也能穩定飛行，此外具備全方位感測系統，故有全向 720° 避障能力。



圖 3-1 AUTEL EVO II RTK (來源:Autel 官方網站)。

3.2 UAV LiDAR 設備

本次計畫使用的無人機 LiDAR 設備為 CHC 01 飛行器(圖 3-2)搭載 YellowScan Vx15(圖 3-3)LiDAR 掃描儀。CHC 01 飛行器是國產之

無人機，空機重 4.5 公斤，空載飛行時間可達 35 分鐘，共有六個旋翼防水防塵馬達，兼顧了飛行性能和便攜性，圖傳距離 2 公里，抗風能力為 12m/s(六級風)，因此在天氣情況不佳時也能穩定飛行。

YellowScan Vx15，集成 Riegl Mini-VUX LiDAR 和 Applanix APX-15 UAV 慣性導航系統，適合於高精度測繪，其續航時間可達 1.5 小時，供電系統採用鋰電池，重量為 2.6kg(含電池)，其優勢在於測量的精度及準確性、在不平坦的景觀和植被上有很高的穩定性、操作簡單、可以快速安裝在任何無人機上。



圖 3-2 CHC 01 飛行器。



圖 3-3 YellowScan Vx15 (來源:YellowScan 官方網站)。

3.3 USV 設備

本團隊農塘測深成果為國立成功大學測量及空間資訊學系郭重言教授團隊提供，無人船採用挪威 Maritime Robotics 公司之 Otter Pro 無人船，搭載挪威 NORBIT 公司之 iWBMS 多音束測深系統進行水深測量，以下內容為系統介紹(內政部，2022):

3.3.1 Otter Pro 船體介紹

Otter Pro 總重約 65 公斤（含兩顆電池），全長 2 公尺、寬 1.08 公尺、高 1.065 公尺，最大載重 40 公斤，如圖 所示。船體可拆卸為兩個浮箱、酬載支架、側板、控制模組、可掛載 SVP 絞盤的船桅以及其他感測器等部件。供電系統採用現成的 Torqeedo 鋰離子電池（Battery Ultralight 403/1103 (A/AC)–915 Wh），使欲取得備用電池較為容易。船上最多可以搭載 4 顆電池，在 3 節航速下可提供長達 9 小時的續航力。



圖 3-4 Otter Pro 船體外觀。

3.3.2 NORBIT iWBMS 多音束測深儀系統

NORBIT iWBMS 多音束測深儀系統(圖 3-5)其優勢在於高度集成、輕便小巧、安裝方便、操作簡單、便於攜帶及功耗低。NORBIT iWBMS 多音束測深系統整合多音束測深、Applanix GNSS/INS System 高精度慣性導航系統、表面聲速儀於一體，出廠時其姿態及聲納零安裝偏差，無需外業找特殊地形水域跑校準線計算 Roll、Pitch、Heading、Time 偏差，可減少外業及內業工作量，使用簡單測量更高效，並採用最新類比和數位訊號處理技術，是一款高度集成、高解析度的高端測深系統。

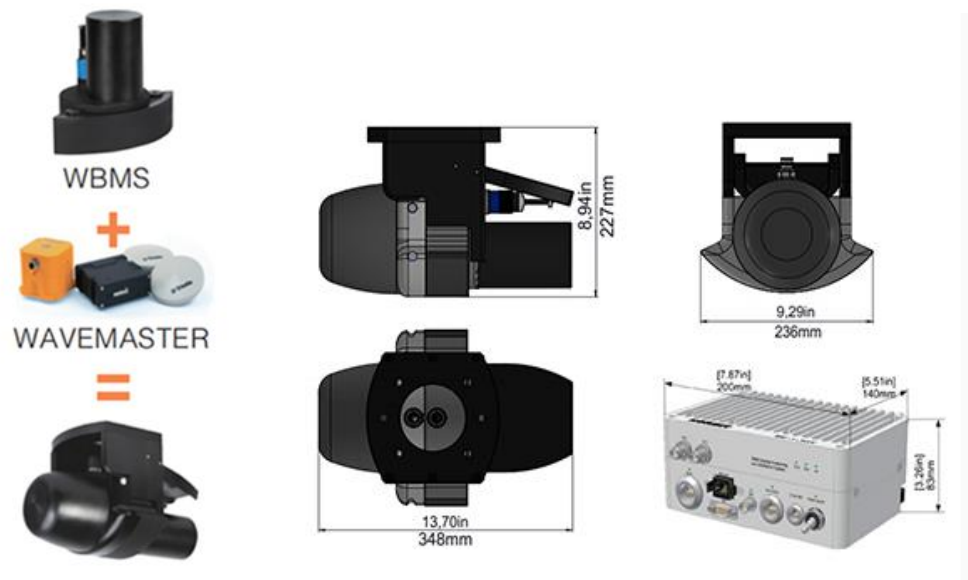


圖 3-5 NORBIT iWBMS 多音束測深系統（來源: NORBIT 網頁）。

3.4 GNSS 設備

Pentax G6 A+(圖 3-6),總重約 1 公斤,集成 GNSS 主機、GNSS 天線、網路通訊天線、RTK 電臺、4G 網路通訊模組、SD 卡、雙鋰電池,支持 555 個衛星通道,具有四饋點 GNSS 接收天線,能同時使用兩節電池供電,在 RTK 方面上,水平精度達 $8\text{mm}+1\text{ppm}$ 垂直精度達 $15\text{mm}+1\text{ppm}$;靜態測量方面,水平精度達 $2.5\text{mm}+0.5\text{ppm}$ 垂直精度達 $5\text{mm}+0.5\text{ppm}$,相容國內的各大電信手機 4G 網路,保證 GNSS 測量精度和作業距離。



圖 3-6 Pentax G6 A+衛星定位接收器。

3.5 Pix4dmapper

Pix4Dmapper 軟體是 2014 年由瑞士 pix4D 公司研發的 UAV 影像處理軟體,其有別於傳統航測軟體在資料處理條件上有諸多的限制,該軟體核心技術是從瑞士洛桑聯邦理工學院(EPFL)計算機視覺實驗室的 Dr. Christoph Strecha 與其團隊,於 2011 年將相關研究成

果彙整，研發出來之新創公司 (Pix4D)，主要特色是針對 UAV 拍攝的影像、使用消費型數位相機和利用影像加密匹配 (dense image matching) 技術作為 UAV 航測處理的解決方案。

Pix4DMapper 是一款集全自動、快速、專業精度為一體的無人機數據和航空影像數據處理軟體，它可單次自動化處理 10,000 張航拍影像及整合各張影像相機拍攝參數，提供高精度影像拼接輸出之商用軟體 (Küng et al., 2011)，可以在短時間內將空拍影像進行拼接，並根據內建之演算法將空拍平面圖自動生成 DSM、正射影像圖、具有紋理的點雲數據和 3D 模型，點雲文件的導出格式有 LAS、LAZ、PLY、XYZ 等格式，而三維網格紋理的導出格式有 PLY、FBX、DXF、OBJ 等格式，相對於其它圖像處理軟體它具有更強的處理能力。

Pix4Dmapper 可在像對中自動匹配特徵點，進行內、外方位參數解算，而經自動空三與平差處理後，為使成果三維視覺化展示，Pix4Dmapper 產製光雲 (RayCloud) 進行後續 DSM 之解算，解算出 DSM 後，即可使用 DSM 進行正射糾正，產製正射影像。其中光雲產製之原理如下圖 3-7 所示，以立體製圖原理，可由兩曝光站與兩像點交會求出物點之絕對位置，而此點位若有第三張相片加入時，即可作為多餘觀測，使此點位結果經過更嚴謹之平差處理，計算出之誤點坐標精度較高，而 Pix4Dmapper 即是利用此方式產製光雲。(徐金煌，2017)

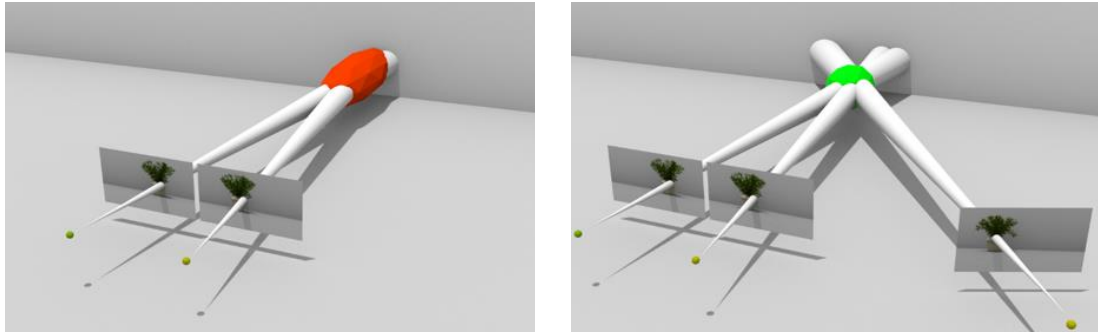


圖 3-7 光雲原理。(圖片來源：<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559139-What-is-the-Theoretical-Error-S-X-Y-Z-of-a-computed-3D-point>)

第四章 研究區位與實驗設計

4.1 研究區位

本計畫研究區域位於嘉義縣中埔鄉的漚水溪慈恩滯洪農塘，地理位置如圖 4-1 所示，農塘配置圖如圖 4-2 所示，漚水溪慈恩滯洪農塘有 ABC 三池，執行一到四次空拍作業時，A、B 池均有水，C 池則為無水狀態，執行第五次空拍時三池則都有水的狀態。拍攝影像的 UAV 為 AUTEL EVO II RTK。

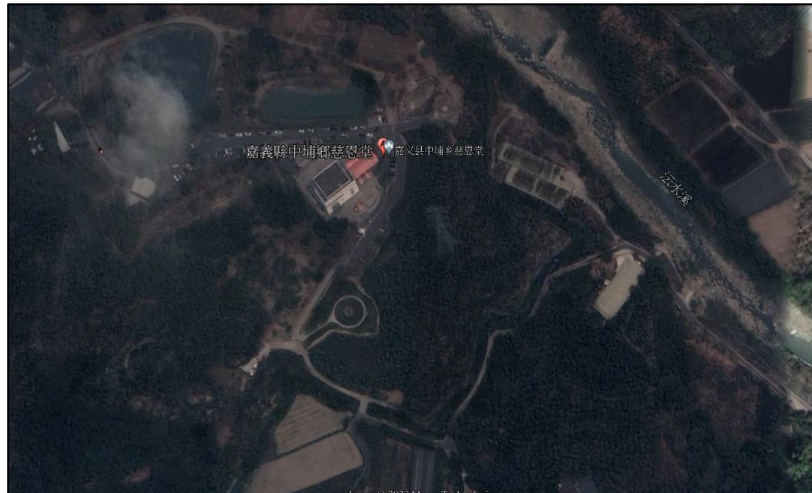


圖 4-1 漚水溪慈恩滯洪農塘位置示意圖。(來源:google earth)



圖 4-2 澗水溪慈恩滯洪農塘配置圖(圖片來源：農業部農村發展及水土保持署南投分署)。

4.2 實驗設計

本計畫對慈恩滯洪農塘共實施了5次 UAV 空拍、1次 UAV LiDAR 拍攝及兩次 USV 進行聯合施測，先使用 UAV 對澗水溪慈恩滯洪農塘進行一次拍攝(於 112 年 5 月 16 日完成)，後續與 USV 進行兩次聯合施測(分別於 112 年 6 月 20 日與 112 年 7 月 4 日完成)，及與 UAV LiDAR 進行一次的聯合施測(於 112 年 9 月 28 日完成)，空拍時有佈設 10 個 GNSS 控制點及 6 個 GNSS 檢核點，詳細的點位位置如圖 4-3 所示。

UAV 拍攝成果先建置成三維模型，後續再修正 UAV 與 USV 的坐標，最終進行模型的整合，以建置出農塘水域環境的三維模型(包括水上與水下)並分析農塘水域環境三維模型分析水工構造物巡檢可行性；在 UAV LiDAR 研究方面，主要將用於分析植被生長偵測研究。此外，UAV 空拍、UAV LiDAR 與 USV 船測可應用於分析集水區土砂流失與農塘淤積關聯性之研究。本計畫研究流程如圖 4-4 所示。

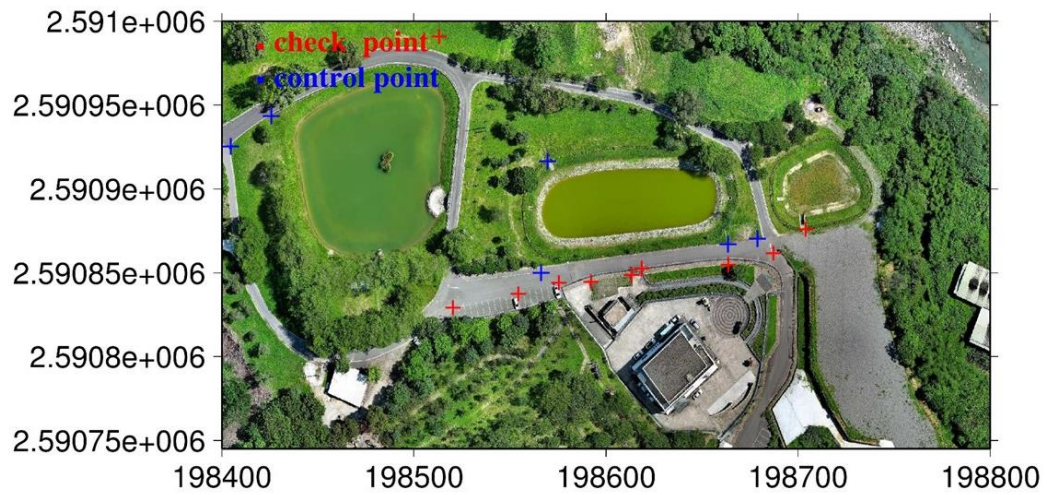


圖 4-3 GNSS 點位位置圖，其中藍色點位為控制點，紅色點位為檢核點。

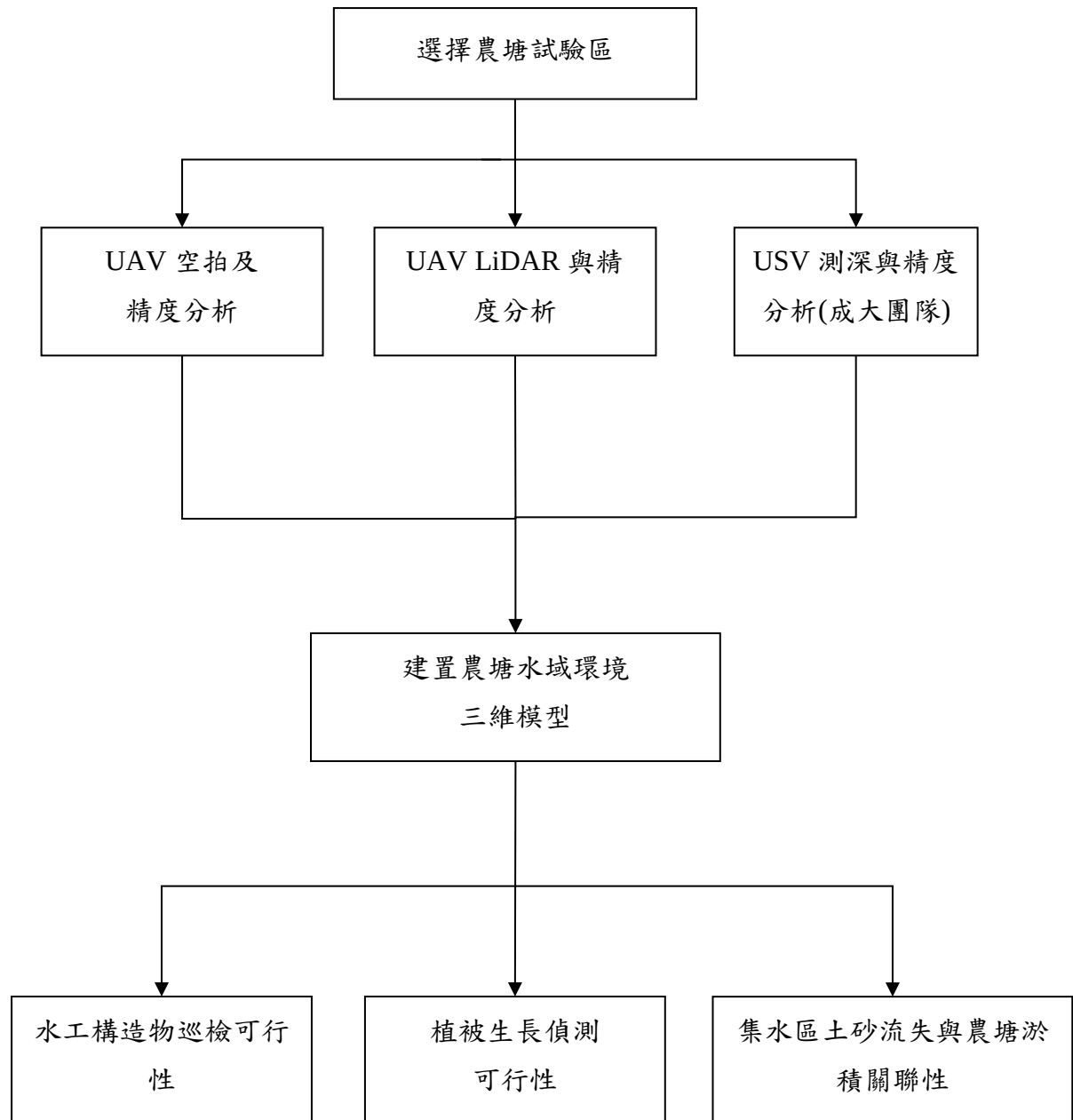


圖 4-4 研究流程圖。

第五章 研究成果

5.1 分析無人機空拍 3D 建模成果

本計畫無人機空拍共完成了五次空拍成果，以下以任務 1~5 名稱說明，任務 1~5 空拍資訊如表 5-1 所示。任務 1 與任務 5 為 S 型航線，任務 2~4 為井字型航線，可分析 S 型與井字型航線對航拍成果的影響；任務 2、任務 3 與任務 5 航拍高度與重疊率均一致，但任務 3 有成大郭重言老師團隊 USV 船測成果，故後續可結合兩者(UAV 與 USV)產製農塘環境水域地形，此外由於任務 2 與任務 3 UAV 拍攝方式一致，更可以分析 AUTELEVO II RTK (美國品牌)在重複觀測建模的穩定性；任務 3 與任務 4 同一天拍攝，當天亦有成大郭重言老師團隊 USV 船測成果，後續可進行 UAV 與 USV 結合產製農塘環境水域地形研究。由於任務 3 與任務 4 航拍重疊率不同，分別為前後重疊率 70%與 80%，後續也將分析重疊率在本研究空拍成果的影響。

表 5-1 任務 1~5 空拍資訊。

任務	拍攝日期	航高	航線	左右重疊率	前後重疊率	張數
任務 1	5/16	80 公尺	S 型航線	60%	70%	77
任務 2	6/20	80 公尺	井字型航線	60%	70%	157
任務 3	7/4	80 公尺	井字型航線	60%	70%	154
任務 4	7/4	80 公尺	井字型航線	60%	80%	272
任務 5	9/28	80 公尺	S 型航線	60%	70%	78

5.1.1 任務 1 建模成果

澧水溪慈恩滯洪農塘空拍任務 1 航線軌跡示意圖如圖 5-1，圖 5-

2 及圖 5-3 為無控制點之空拍建模成果，圖 5-4 及 5-5 為有控制點及無控制點之高程圖。由圖 5-5 可知在農塘及道路的高程明顯比圖 5-4 下降約五公尺。由圖 5-1~圖 5-3 成果來看，在樹木的部分破圖較多，其餘地方成果良好。相關三維建模成果可參考下列網址：

<https://www.pointbox.xyz/clouds/64a5405dab7709648b01cbba>

<https://www.pointbox.xyz/clouds/65361bd01b9a2c3041ad4f7c>，



圖 5-1 任務 1 航線軌跡示意圖。



圖 5-2 任務 1 空拍建模成果。



圖 5-3 任務 1 空拍建模成果側面圖。

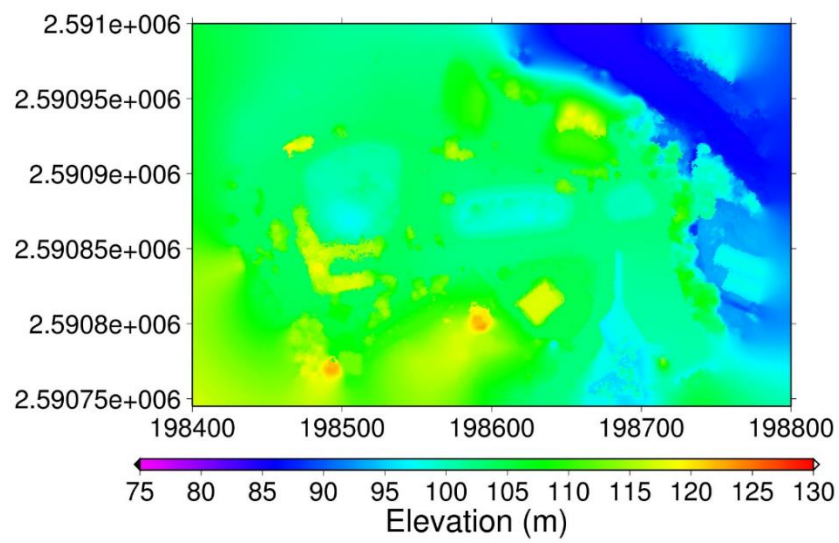


圖 5-4 無控制點之任務 1 高程圖。

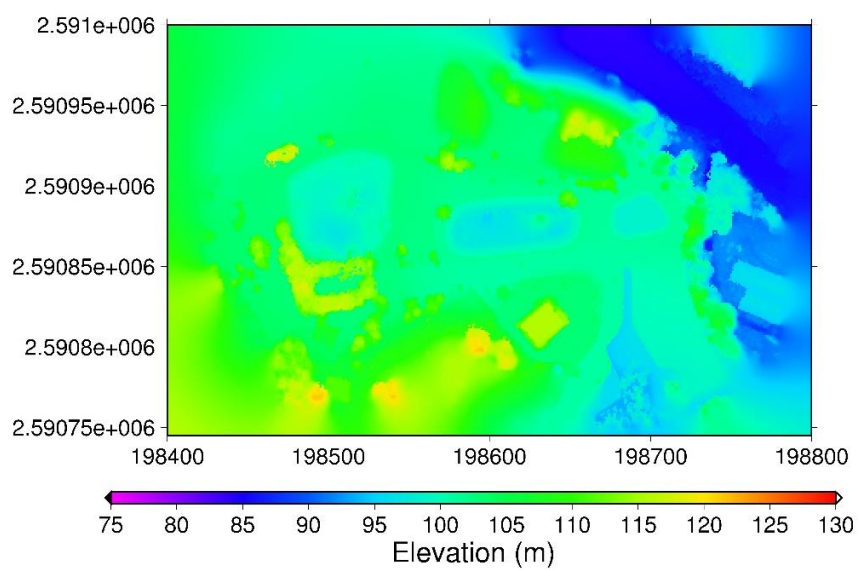


圖 5-5 有控制點之任務 1 高程圖。

5.1.2 任務 2 建模成果

澧水溪慈恩滯洪農塘空拍任務 2 航線軌跡示意圖如圖 5-6，圖 5-7 及圖 5-8 為無控制點之空拍建模成果，圖 5-9 及 5-10 為有控制點及無控制點之高程圖，由圖 5-10 可知在草地及樹木的高程明顯比圖 5-9 下降約五公尺。由圖 5-7 及圖 5-8 建模成果來看，成果較任務 1 好，破圖較少，代表井字型航線優於 S 型航線。相關三維建模成果可參考下列網址：

<https://www.pointbox.xyz/clouds/64a527d1ab770914b401cbb4>

<https://www.pointbox.xyz/clouds/65361b661b9a2c3e87ad4f7a>



圖 5-6 任務 2 航線軌跡示意圖。



圖 5-7 任務 2 空拍建模成果。



圖 5-8 任務 2 空拍建模成果側面圖。

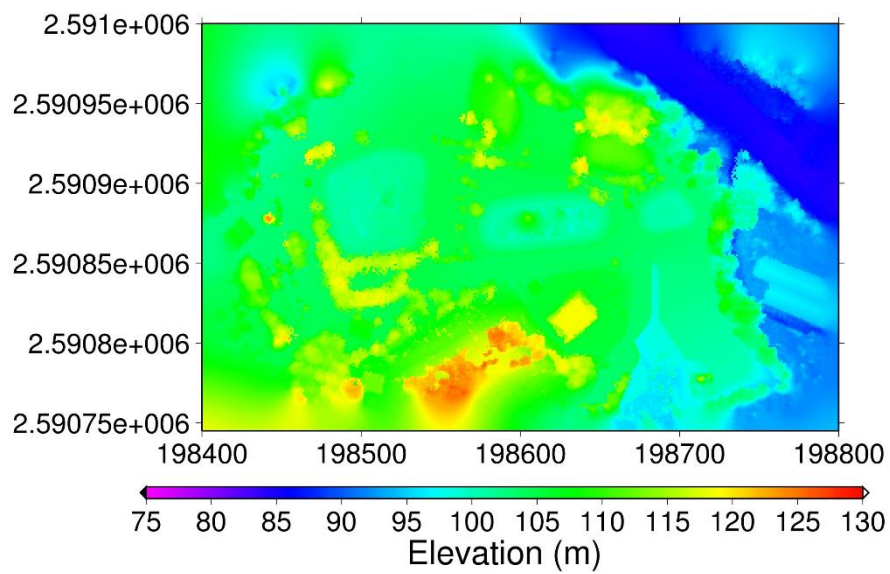


圖 5-9 無控制點之任務 2 高程圖。

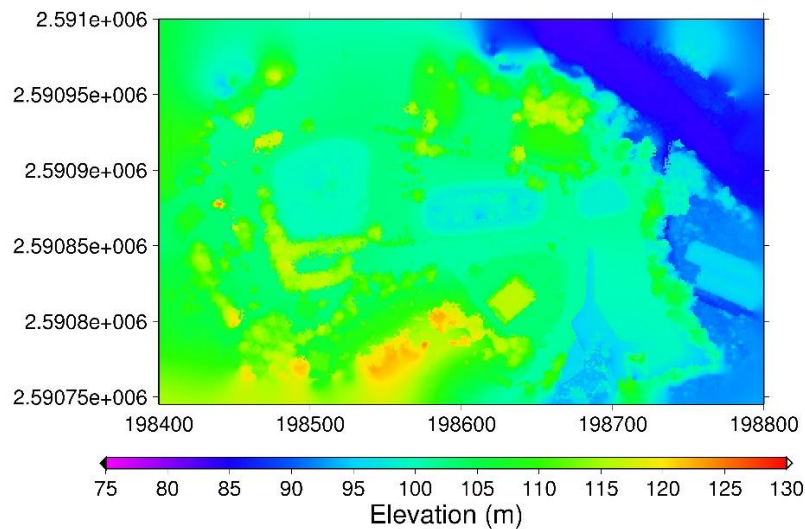


圖 5-10 有控制點之任務 2 高程圖。

5.1.3 任務 3 建模成果

澧水溪慈恩滯洪農塘空拍任務 3 航線軌跡示意圖如圖 5-11，圖 5-12 及圖 5-13 為無控制點之空拍建模成果，圖 5-14 及 5-15 為有控制點及無控制點之高程圖，由圖 5-15 可知整體的高程明顯比圖 5-14 下降約十公尺。由圖 5-12 及圖 5-13 建模成果來看，成果良好。相關三維建模成果可參考下列網址：

<https://www.pointbox.xyz/clouds/64a52871ab770910ae01cbb6>

<https://www.pointbox.xyz/clouds/653619c71b9a2cb1baad4f78>

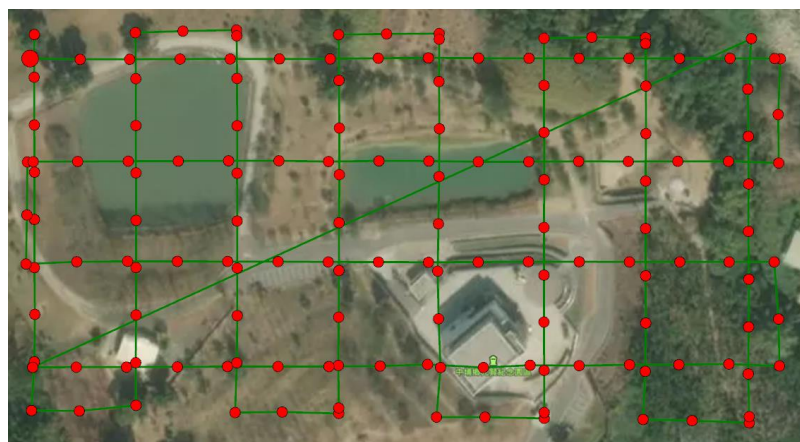


圖 5-11 任務 3 航線軌跡示意圖。



圖 5-12 任務 3 空拍建模成果。



圖 5-13 任務 3 空拍建模成果側面圖。

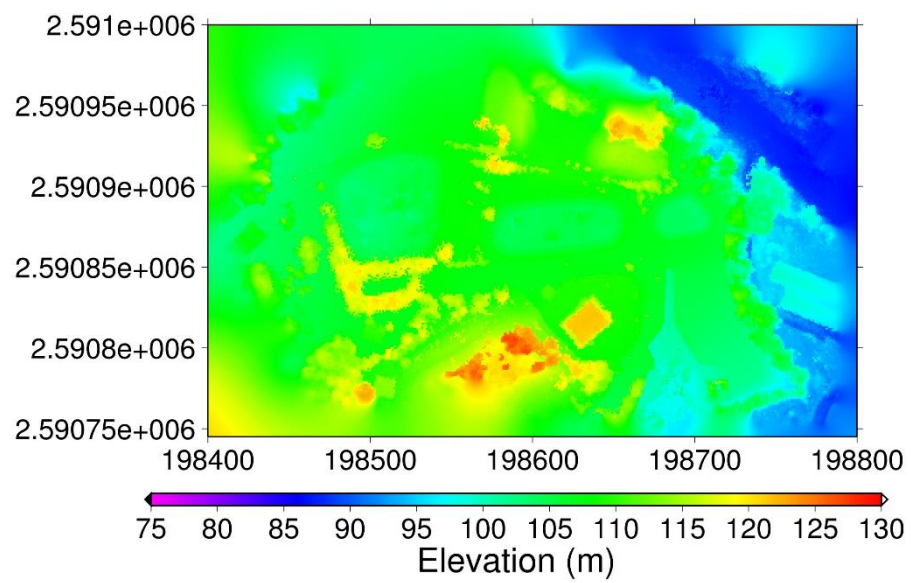


圖 5-14 無控制點之任務 3 高程圖。

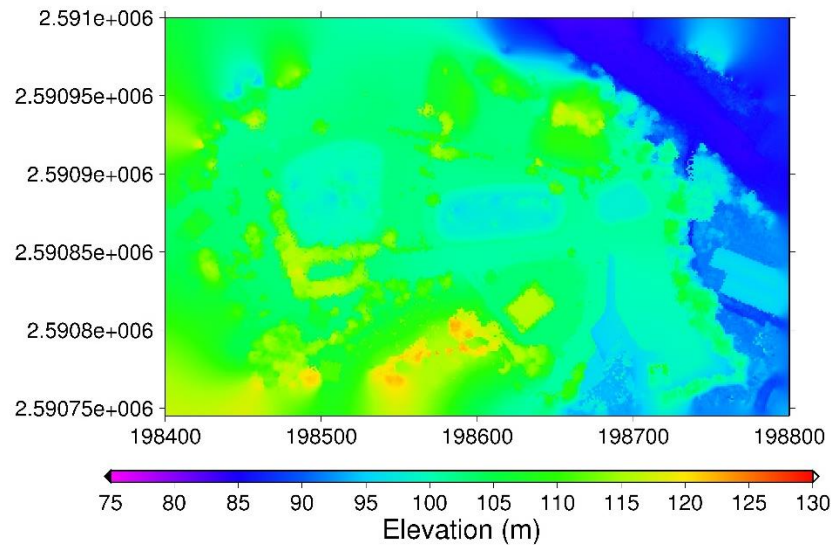


圖 5-15 有控制點之任務 3 高程圖。

5.1.4 任務 4 建模成果

澧水溪慈恩滯洪農塘空拍任務 4 航線軌跡示意圖如圖 5-16，圖 5-17 及圖 5-18 為無控制點之空拍建模成果，圖 5-19 及 5-20 為有控制點及無控制點之高程圖，由圖 5-20 可知整體高程與圖 5-19 變化不大，唯在上方草地有下降約 2-3 公尺。由圖 5-17 及圖 5-18 建模成果來看，成果良好，相關建模成果可參考下列網址：

<https://www.pointbox.xyz/clouds/64a528f8ab77094d4501cbb8>

<https://www.pointbox.xyz/clouds/6543074182644bcf9fdd2c43>



圖 5-16 任務 4 航線軌跡示意圖。



圖 5-17 任務 4 空拍建模成果。



圖 5-18 任務 4 空拍建模成果側面圖。

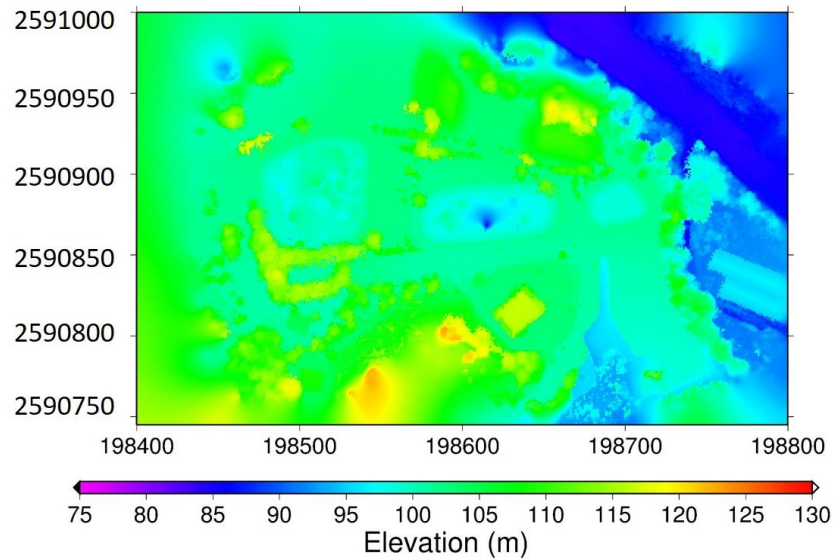


圖 5-19 無控制點之任務 4 高程圖。

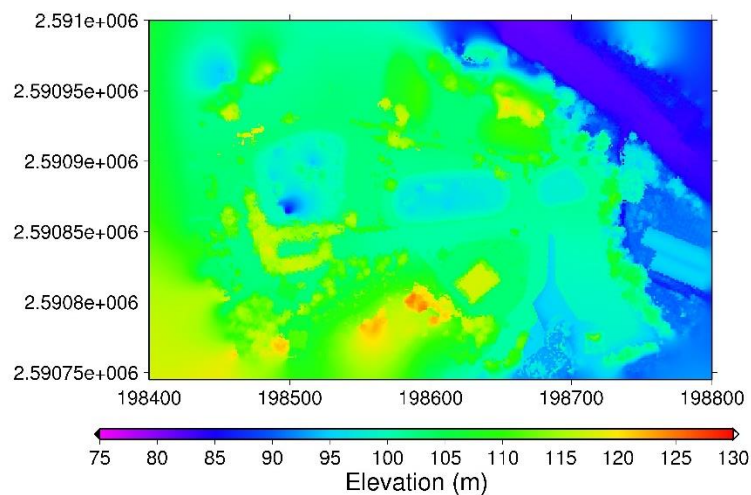


圖 5-20 有控制點之任務 4 高程圖。

5.1.5 任務 5 建模成果

澮水溪慈恩滯洪農塘空拍任務 5 航線軌跡示意圖如圖 5-22，5-22 及圖 5-23 為無控制點之空拍建模成果，圖 5-24 及 5-25 為有控制點及無控制點之高程圖，由圖 5-25 可知整體高程與圖 5-24 下降約 10 公尺。由圖 5-22 及圖 5-23 建模成果來看，在樹木的部分破圖較多，其餘地方成果良好，相關建模成果可參考下列網址：

<https://www.pointbox.xyz/clouds/651d22fb09617f19556100a7>

<https://www.pointbox.xyz/clouds/65436f0582644ba56bdd2c45>



圖 5-21 任務 5 航線軌跡示意圖。



圖 5-22 任務 5 空拍建模成果。

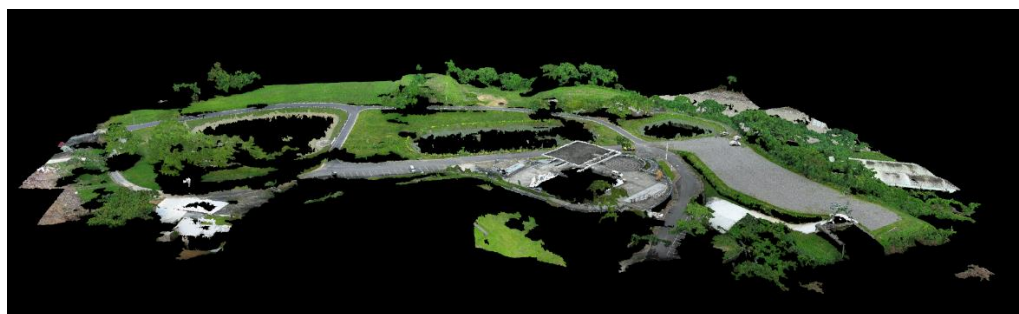


圖 5-23 任務 5 空拍建模成果側面圖。

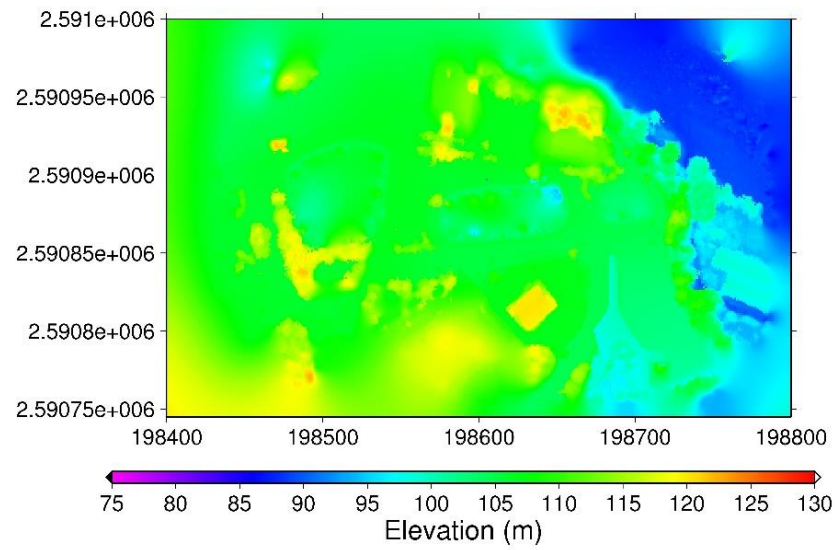


圖 5-24 無控制點之任務 5 高程圖。

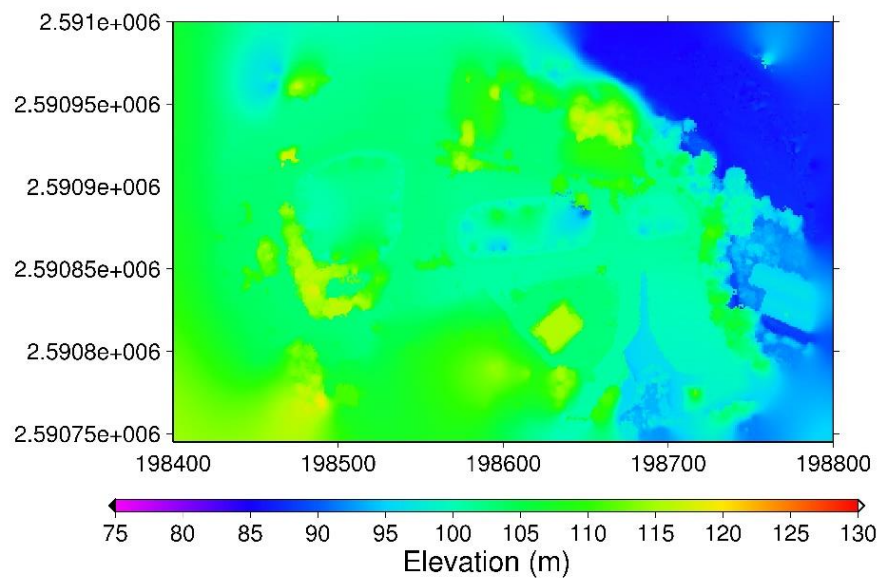


圖 5-25 有控制點之任務 5 高程圖。

5.1.6 各任務(無控制點)模型精度分析

圖 5-26~圖 5-35 分別為以 GNSS 檢核點檢核任務 1~5(無控制點)之成果圖，由圖 5-26 可知任務 1 在未加入 GNSS 地面控制點時，檢

核點的位移量約在 27-220 公分，大致都往東南及西南偏移，整體偏差量很大。由圖 5-27 可以知道檢核點的高程偏移量為 82-153 公分，整體位移量為負，代表在未加入控制點時的模型整體的高程偏高。

由圖 5-28 可知任務 2 在未加入 GNSS 地面控制點時，檢核點的位移量約在 100-300 公分，大致都往東南及西南偏移，整體偏差量很大。由圖 5-29 可以知道檢核點的高程偏移量為 30-300 公分，整體位移量為負，代表在未加入控制點時的模型整體的高程偏高。

由圖 5-30 可知任務 3 在未加入 GNSS 地面控制點時，檢核點的位移量約在 40-530 公分，大致都往東南及西南偏移，整體偏差量很大。由圖 5-31 可以知道檢核點的高程偏移量為 170-615 公分，整體位移量為負，代表在未加入控制點時的模型整體的高程偏高。

由圖 5-32 可知任務 4 在未加入 GNSS 地面控制點時，檢核點的位移量約在 180-400 公分，大致都往西南偏移，整體偏差量很大。由圖 5-33 可以知道檢核點的高程偏移量為-22-96 公分，整體位移量大多為正，代表在未加入控制點時的模型整體的高程是偏低的，任務四相對其他任務高程的變化是最小的，表示使用重疊率為 80%的任務高程可能較準確。

由圖 5-34 可知任務 5 在未加入 GNSS 地面控制點時，檢核點的位移量約在 81-250 公分，大致都往西南偏移，整體偏差量很大。由圖 5-35 可以知道檢核點的高程偏移量為 300-450 公分，整體位移量大多為負，代表在未加入控制點時的模型整體的高程偏高。

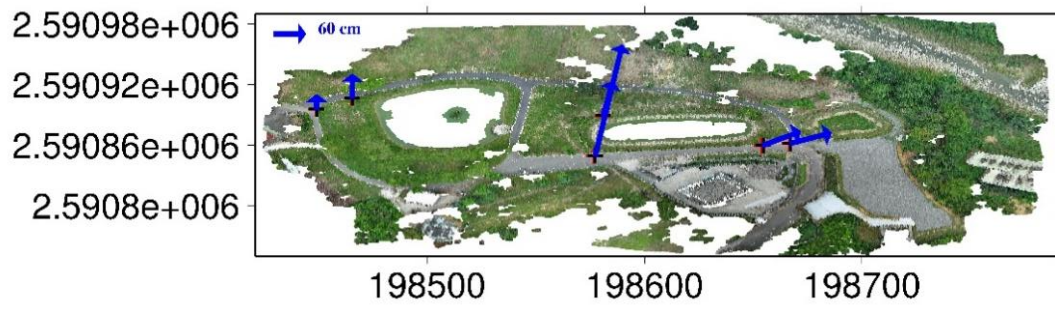


圖 5-26 任務 1 檢核點之精度。

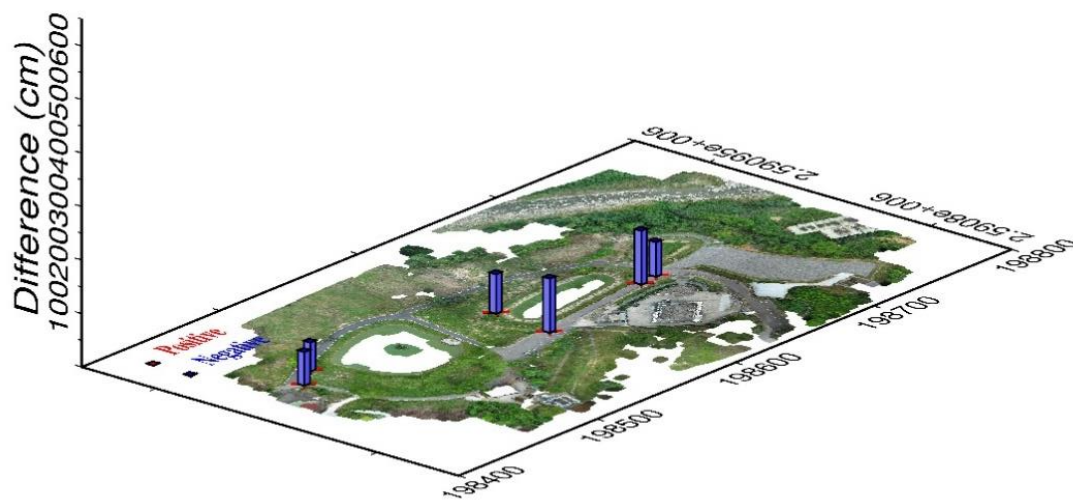


圖 5-27 任務 1 檢核點高程之精度。

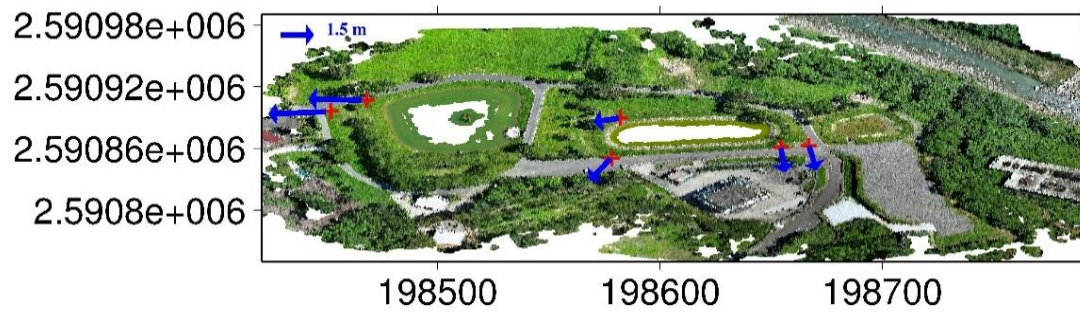


圖 5-28 任務 2 檢核點之精度。

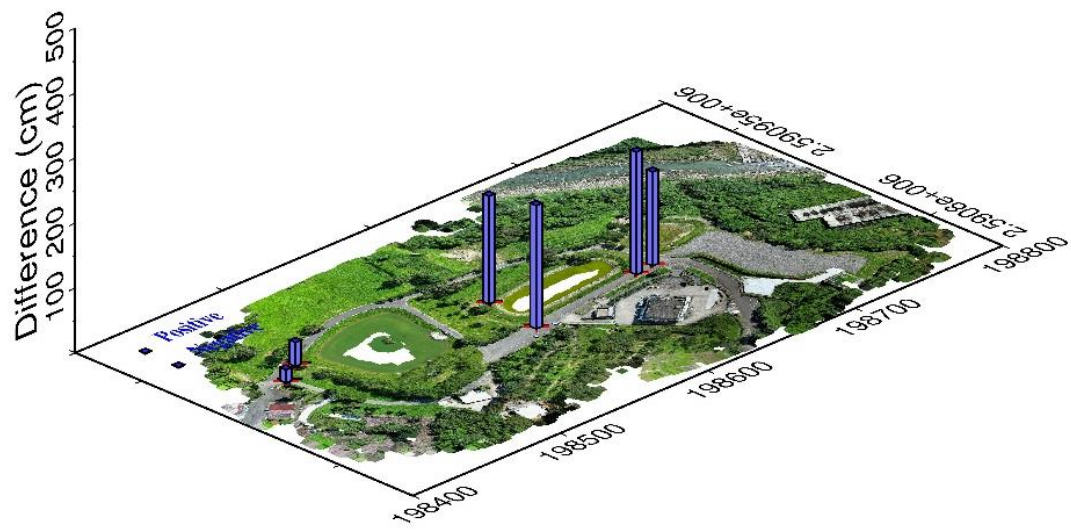


圖 5-29 任務 2 檢核點高程之精度。

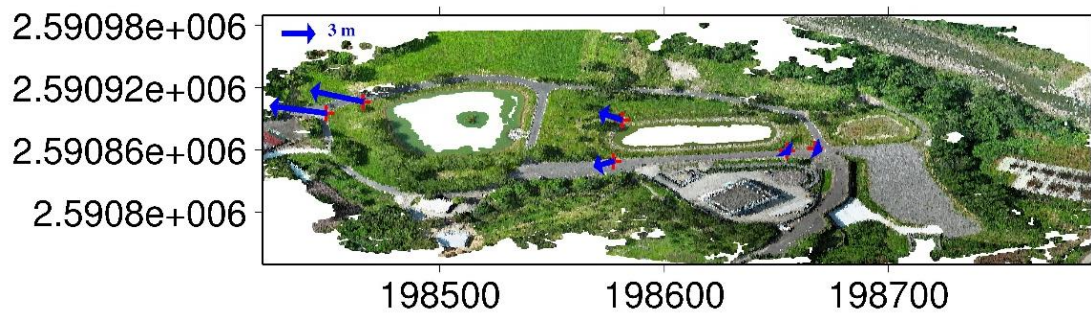


圖 5-30 任務 3 檢核點之精度。

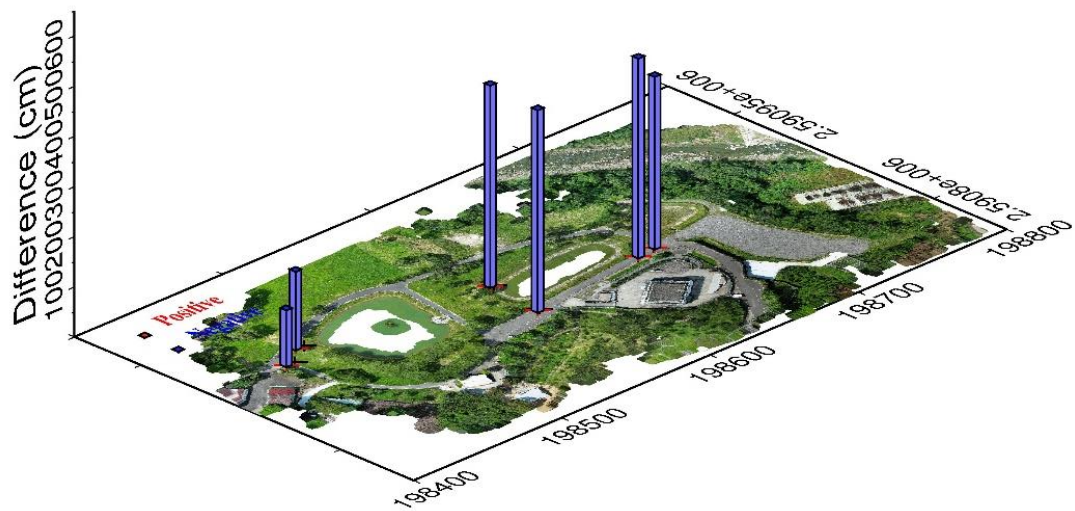


圖 5-31 任務 3 檢核點高程之精度。

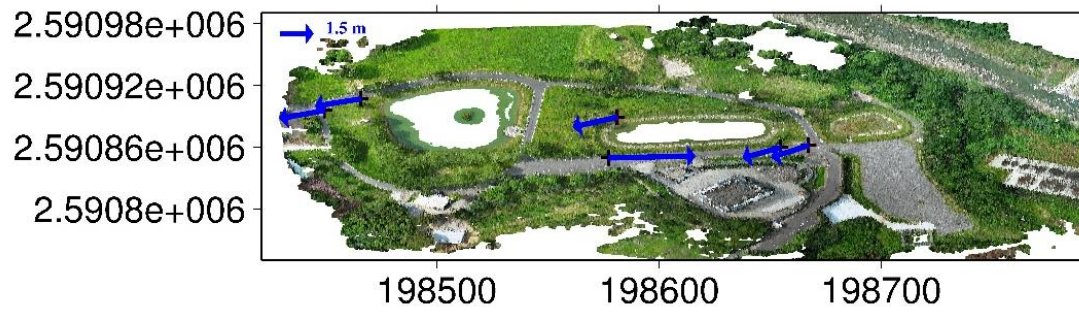


圖 5-32 任務 4 檢核點之精度。



圖 5-33 任務 4 檢核點高程之精度。

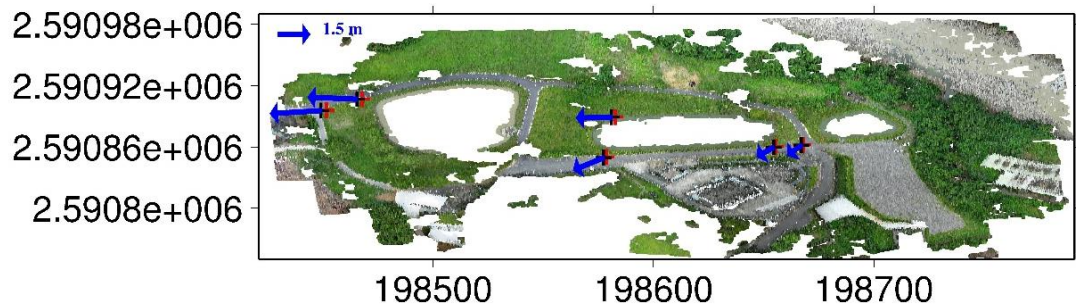


圖 5-34 任務 5 檢核點之精度。

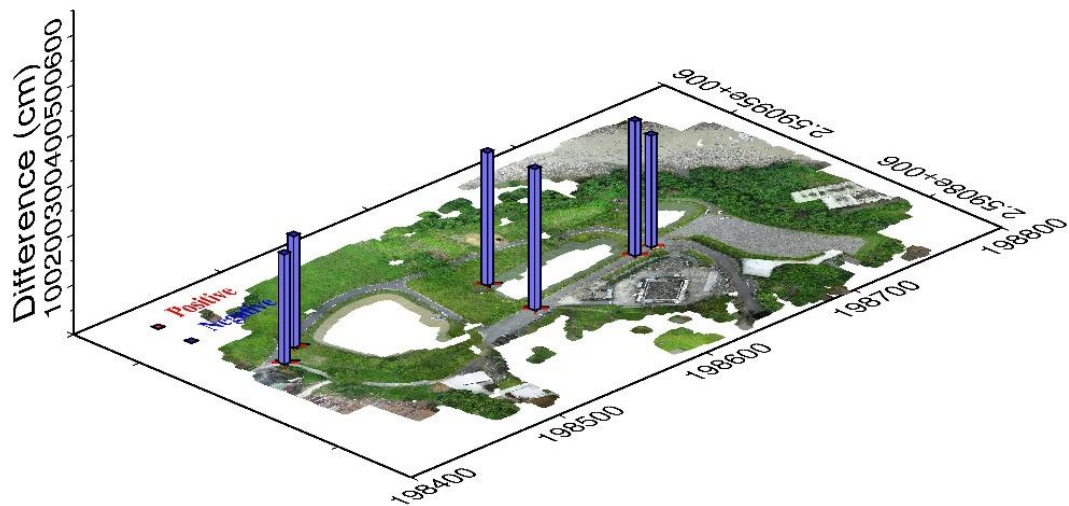


圖 5-35 任務 5 檢核點高程之精度。

圖 5-36~圖 5-39 分別為 任務 1 與 2、任務 1 與 3、任務 1 與 4、任務 1 與 5 之高程差成果。由圖 5-36 可發現，兩次空拍成果顯示在不透水鋪面(如道路)和草地的高程差差距不大，絕大部分區位在 ± 1 公尺以內，在樹林的位置高差較大；在任務 1 與 3 比較方面(圖 5-37)，成果顯示在道路和草地兩次空拍有一明顯約-2 公尺的系統誤差；在任務 1 與 4 比較方面(圖 5-38)，則呈現一明顯約+2 公尺的系統誤差，這代表任務 3 和任務 4 的地形差距頗大，然而此差距以系統誤差為主；在任務 1 與 5 比較方面(圖 5-39)成果顯示，不透水鋪面(如道路)和草

地的高程差約在 ± 2 公尺以內，5.1.7 節將以 GNSS 地面控制點修正其地形，並以 GNSS 地面檢核點檢核各 UAV 模型之絕對精度。

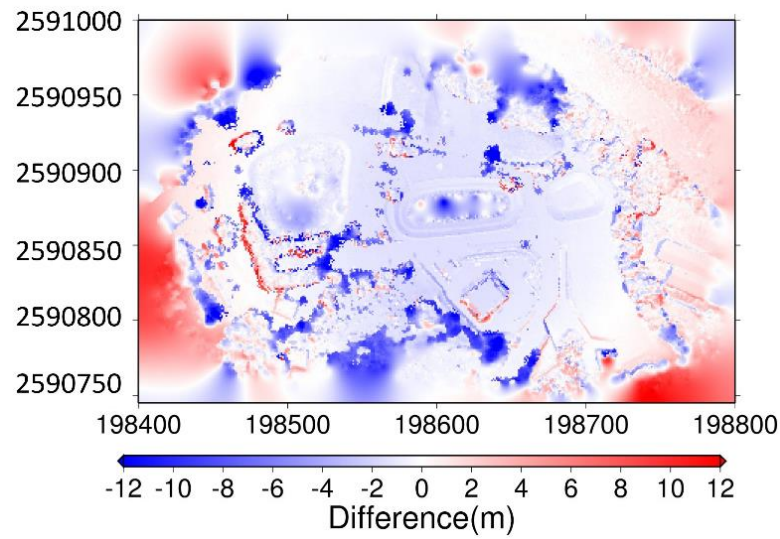


圖 5-36 任務 1 與任務 2 高程差。

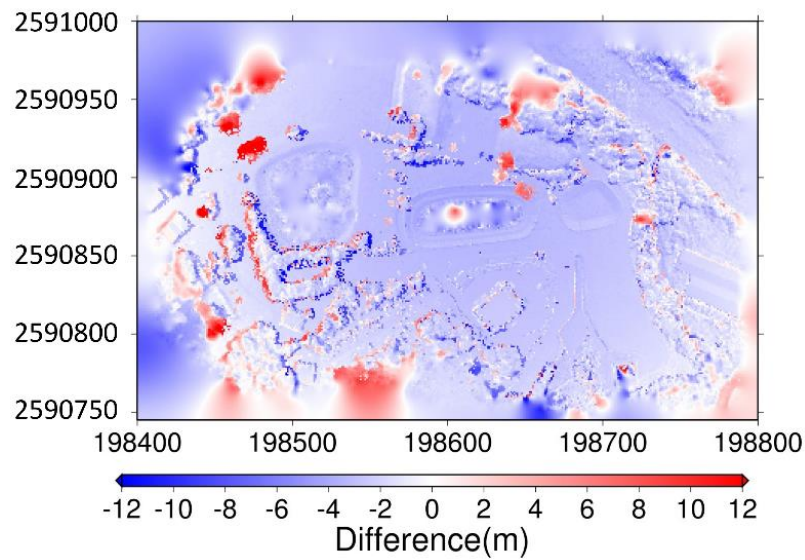


圖 5-37 任務 1 與任務 3 高程差。

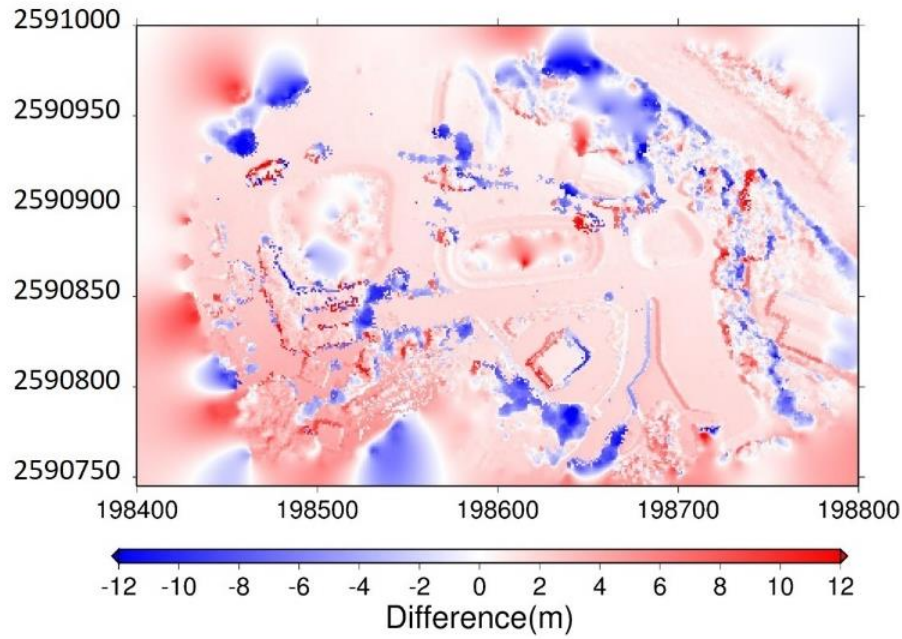


圖 5-38 任務 1 與任務 4 高程差。

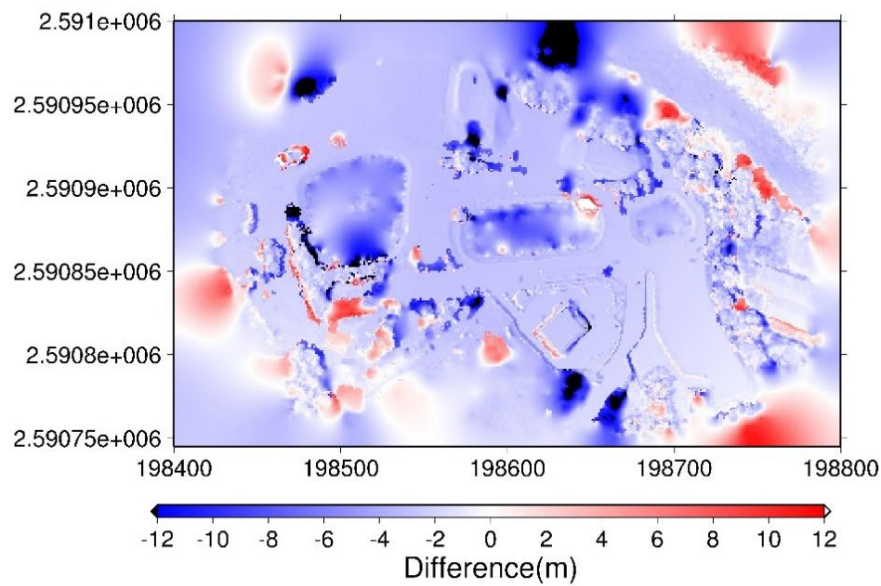


圖 5-39 任務 1 與任務 5 高程差。

5.1.7 各任務有控制點高程差成果

圖 5-40 至圖 5-49 為各任務加入 GNSS 地面控制點後，利用檢核點檢核各任務精度之示意圖。由圖 5-40 可知任務 1 在加入 GNSS 地面控制點後，檢核點的位移量約在 4-24 公分，大致都往西南位移，

整體偏差量都很小。由圖 5-41 可以知道檢核點的高程偏移量為-58-2 公分，東邊的偏移量大多為正，西邊的偏移量大多為負，因此東邊最多可能有-58 公分的誤差，西邊則最多有 46 公分的誤差。

由圖 5-42 可知任務 2 在加入 GNSS 地面控制點後，檢核點的位移量約在 5-26 公分，大致都往東北與西南偏移，整體偏差量都很小。由圖 5-43 可以知道檢核點的高程偏移量為-69-48 公分，東邊的偏移量大多為正，西邊的偏移量大多為負，因此東邊最多可能有 48 公分的誤差，西邊則最多有 69 公分的誤差。

由圖 5-44 可知任務 3 在加入 GNSS 地面控制點後，檢核點的位移量約在 1-32 公分，大致都往東南及西北偏移。由圖 5-45 可以知道檢核點的高程偏移量為-4-47 公分，偏移量大多為正，高程落差最多有 47 公分的誤差。

由圖 5-46 可知任務 4 在加入 GNSS 地面控制點後，檢核點的位移量約在 7-23 公分，大致都往東南及西北偏移。由圖 5-47 可以知道檢核點的高程偏移量為-67-42 公分，東邊的偏移量大多為正，西邊的偏移量大多為負，因此東邊最多可能有 42 公分的誤差，西邊則最多有 67 公分的誤差。

由圖 5-30 可知任務 5 在加入 GNSS 地面控制點後，檢核點的位移量約在 2-26 公分，大致都往西南偏移。由圖 5-31 可以知道檢核點的高程偏移量為-69-48 公分，東邊的偏移量最大值為正，西邊的偏移量大多為負，因此東邊最多可能有-69 公分的誤差，西邊則最多有 48 公分的誤差。

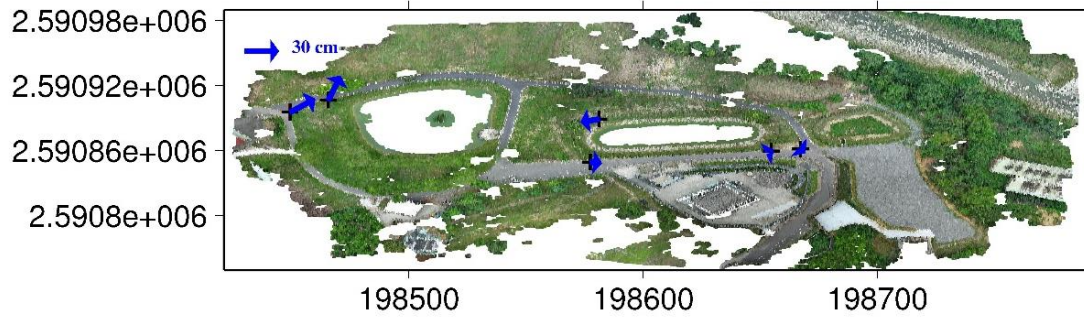


圖 5-40 任務 1 水平方向之精度。

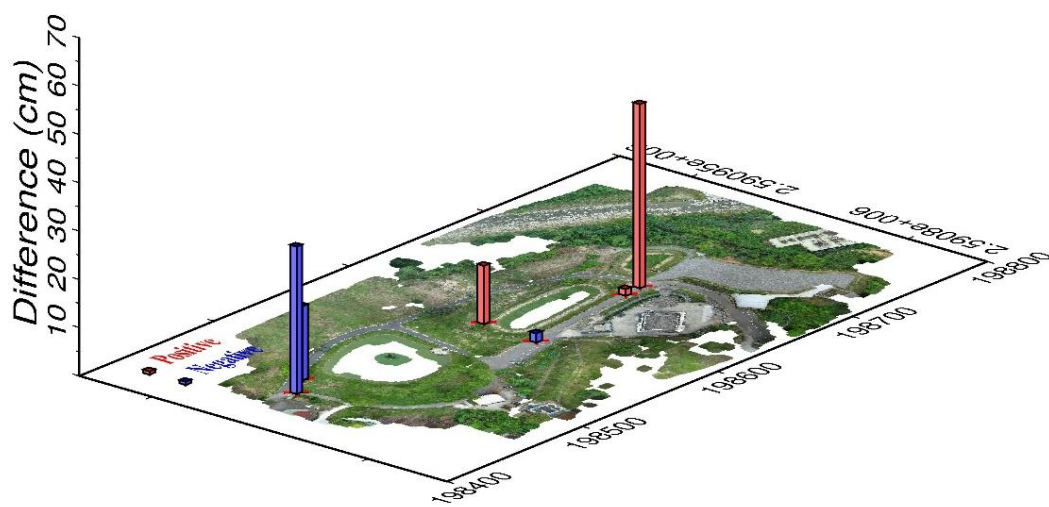


圖 5-41 任務 1 檢核點之高程精度。

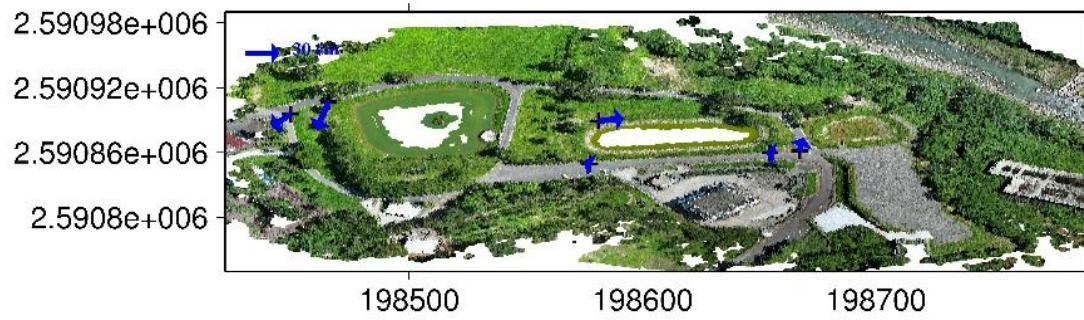


圖 5-42 任務 2 檢核點之精度。

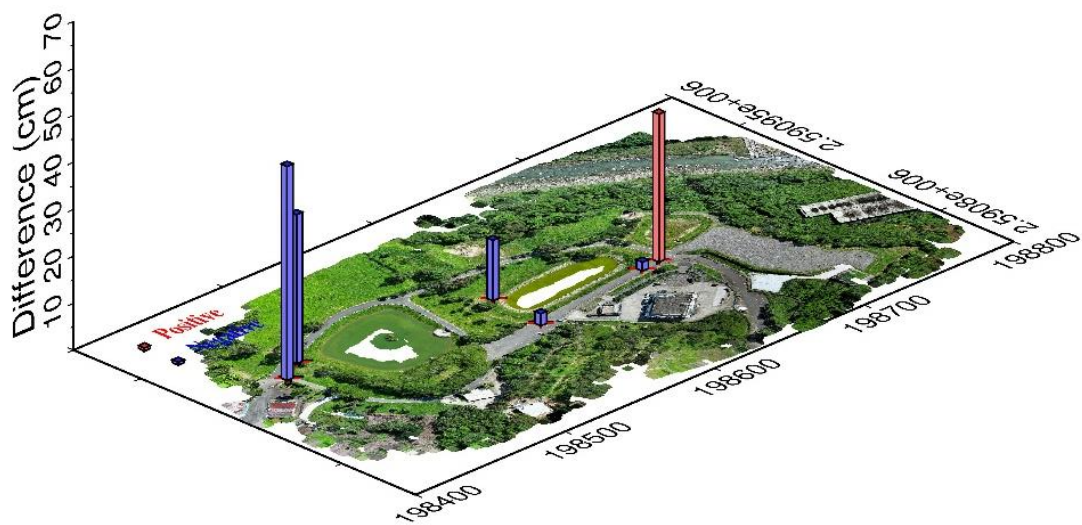


圖 5-43 任務 2 檢核點高程之精度。

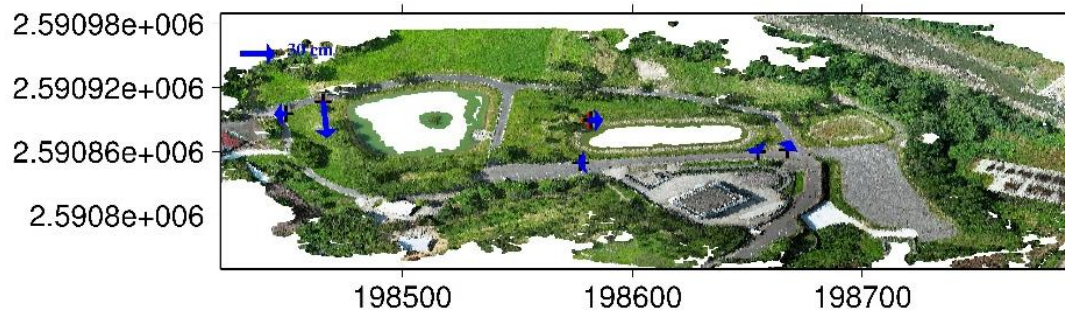


圖 5-44 任務 3 檢核點之精度。

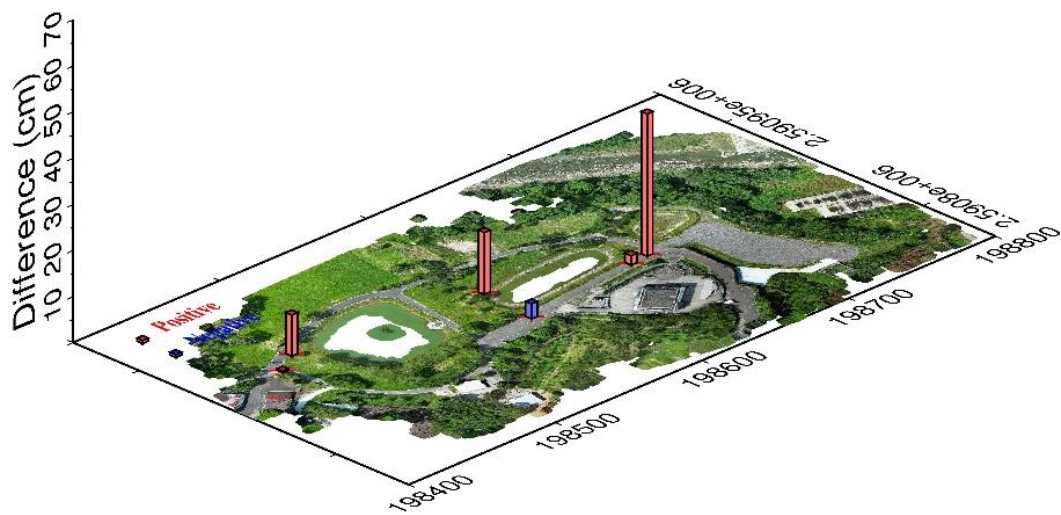


圖 5-45 任務 3 檢核點高程之精度。

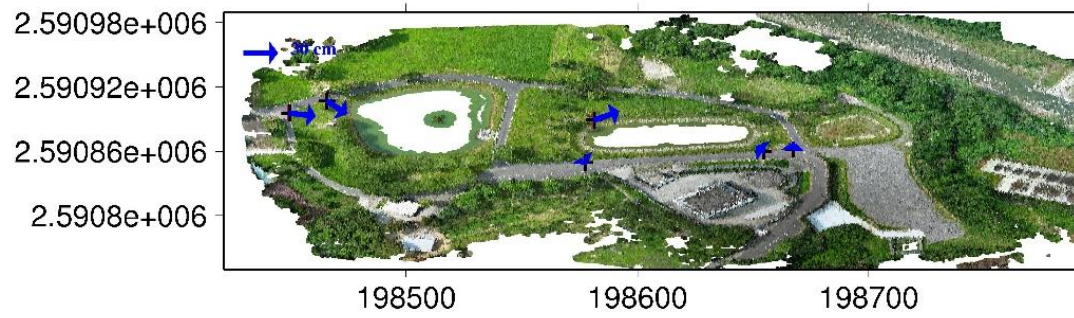


圖 5-46 任務 4 檢核點之精度。

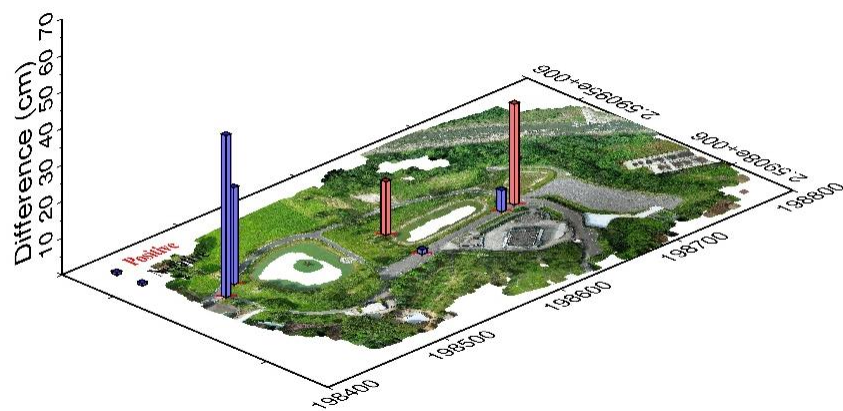


圖 5-47 任務 4 檢核點高程之精度。

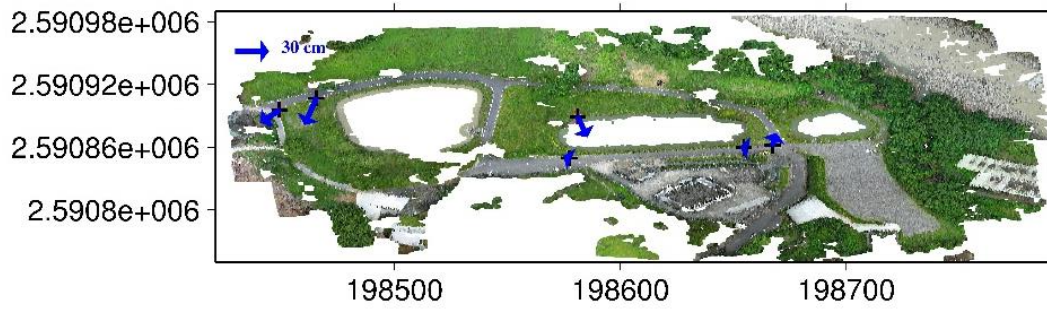


圖 5-48 任務 5 檢核點之精度。

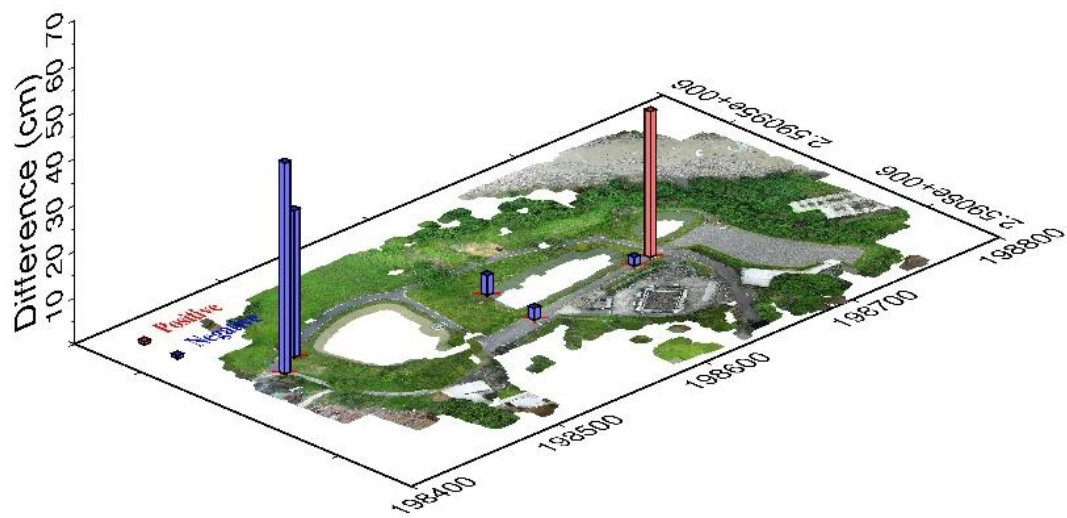


圖 5-49 任務 5 檢核點高程之精度。

圖 5-50~圖 5-53 分別為加入地面控制點後 任務 1 與 2、任務 1 與 3、任務 1 與 4、任務 1 與 5 之高程差成果。由圖 5-50~圖 5-53 可發現，五次空拍成果顯示在不透水鋪面(如道路)和草地的高程差幾乎為 0，由圖 5-50 可發現，任務 1 及任務 2 兩次空拍成果顯示在樹林的位置高差則較大，約有 ± 2 公尺；在任務 1 與 3 比較方面(圖 5-51) 與任務 1 與 4 比較方面(圖 5-52)，成果顯示在樹林的位置高差也較大，約有 ± 2 公尺；在任務 1 與 5 比較方面(圖 5-53)成果顯示，成果顯示在樹林的位置高差則較大，但是呈現正值，表示任務 1 樹木較任務 5 高；在未加入地面控制點的 (圖 5-36~圖 5-39)不透水鋪面(如道路)和草地的高程差約在 ± 2 公尺以內，而加入地面控制點後的模型 (圖 5-50~圖 5-53)相較於加入控制點前，不透水鋪面(如道路)和草地幾乎無高程差，成果檢視加入控制點後會將各模型的高程修正到正確的位置，因此原本在不透水鋪面(如道路)和草地的系統誤差會被修正，使地面無明顯之高程差。

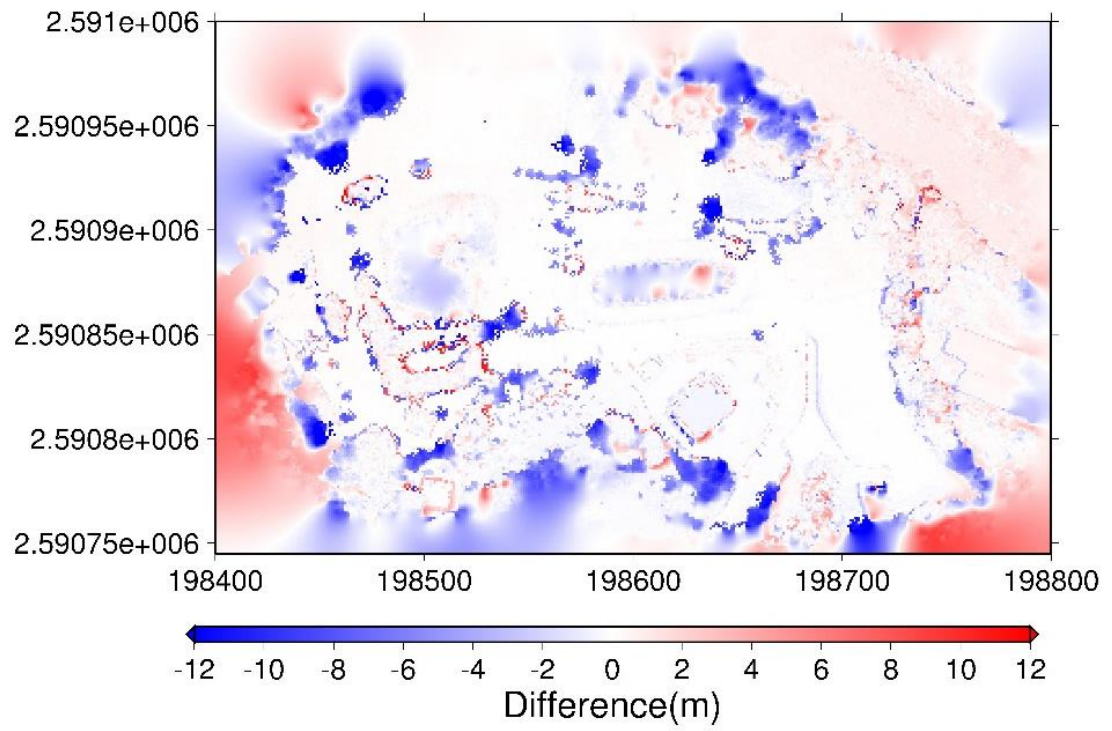


圖 5-50 任務 1 與任務 2 高程差。

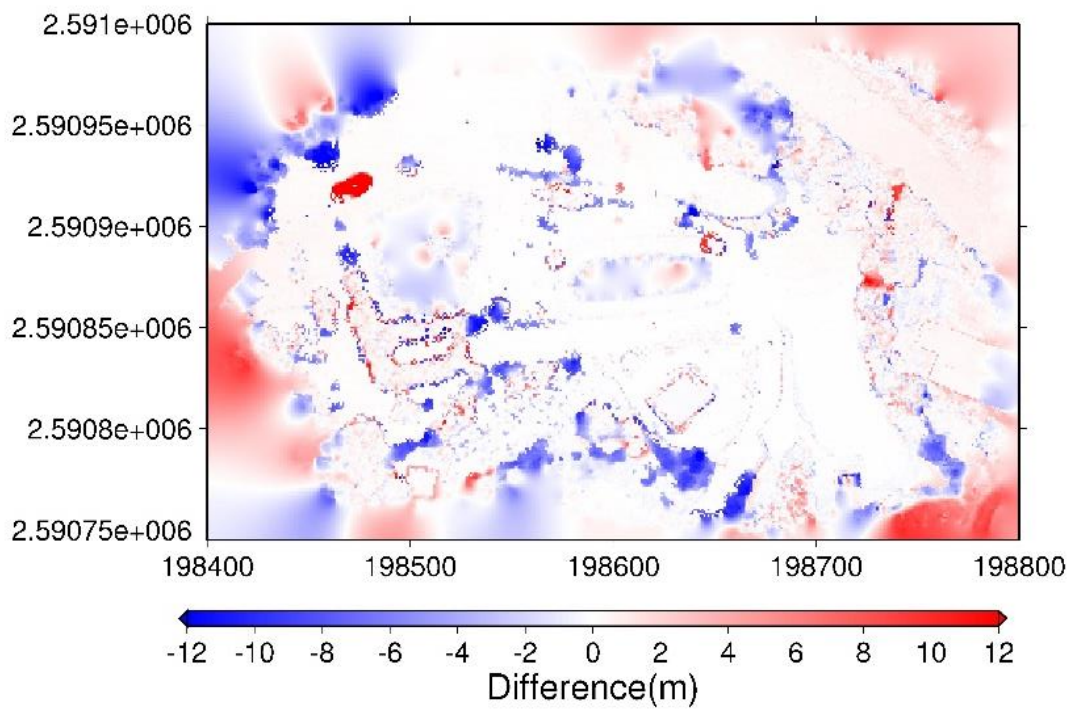


圖 5-51 任務 1 與任務 3 高程差。

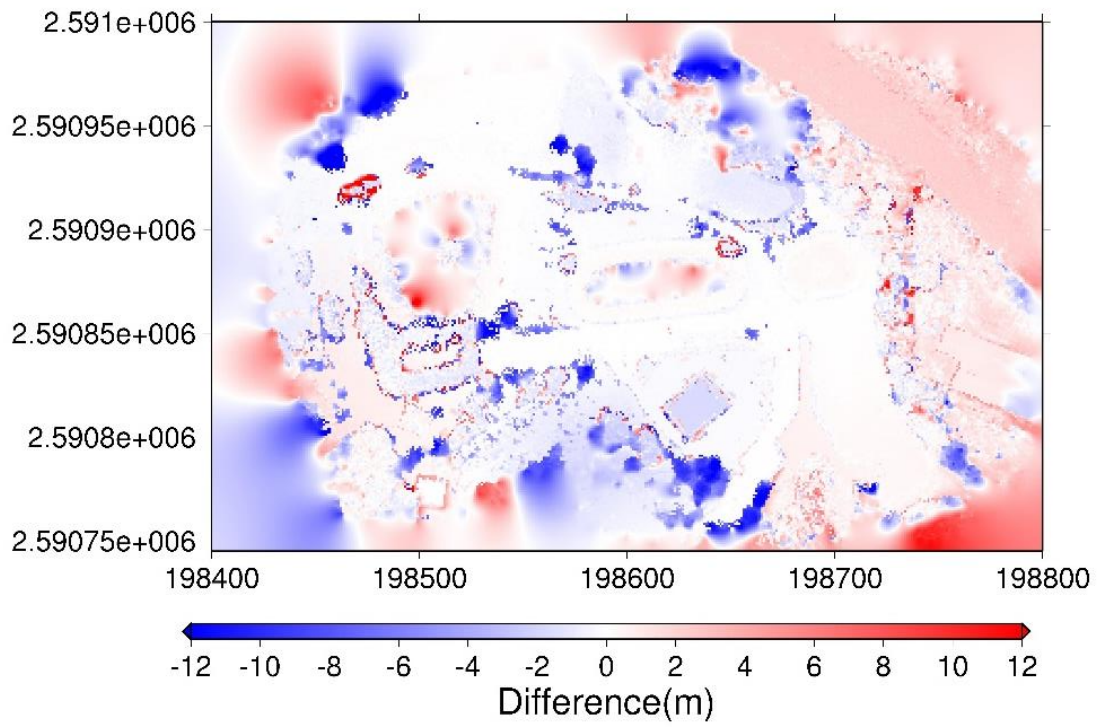


圖 5-52 任務 1 與任務 4 高程差。

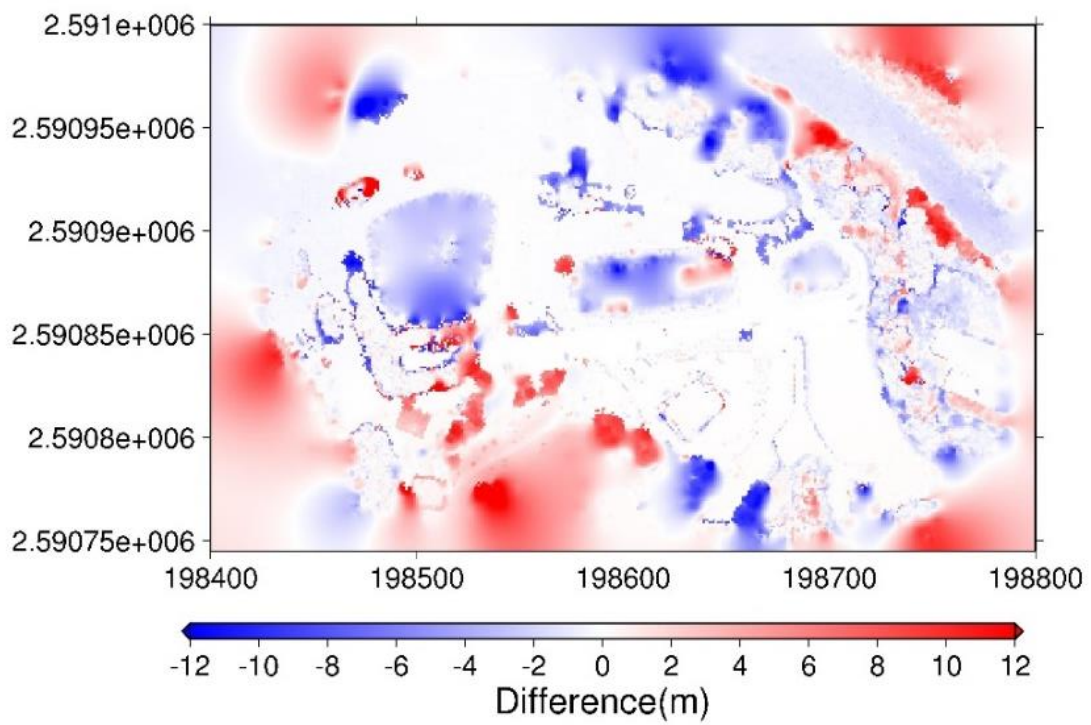


圖 5-53 任務 1 與任務 5 高程差。

5.2 分析 UAV LiDAR 多重回波建置地形成果

本計畫 UAV LiDAR 共產製一個 DSM 與兩個 DEM(DEM1 與 DEM2)模型，DSM 約 40 點、DEM1 約 11.6 萬點、DEM2 約 5500 點。

DEM1 與 DEM2 相比，DEM1 的空間解析度較高，但點雲中包含較多回波誤差。圖 5-54 為利用 UAV 空拍成果 DSM 套疊影像所繪製出的三維圖，而由此圖可發現高程較高位置位於植被與建物，可初步判定本計畫 DSM 數據無誤。

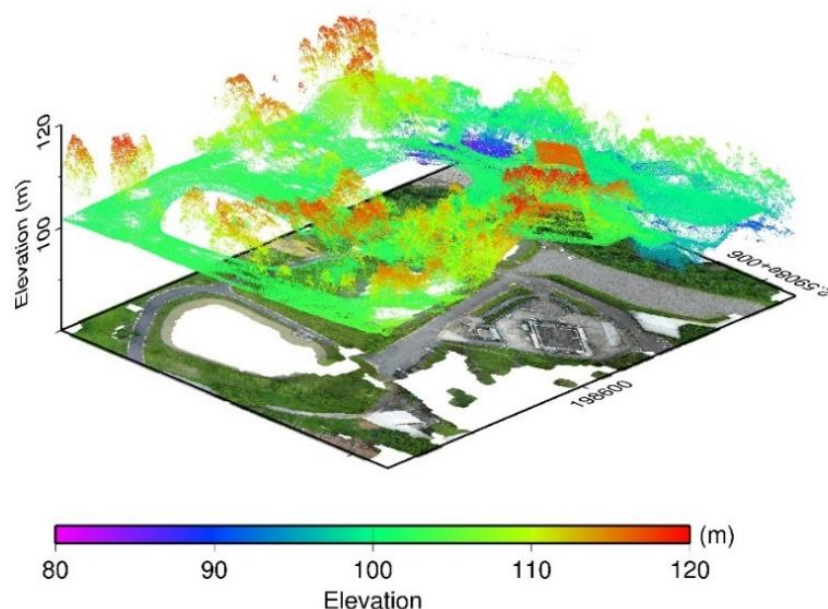


圖 5-54 DSM 套疊影像之三維圖。

將無人機空拍成果 DSM、DEM1 與 DEM2 內插成為規則網格檔案，並將內插後的 DSM 檔案與 DEM1、DEM2 檔案進行相減，即可得出兩者之間的高程差，如圖 5-55、圖 5-56 所示。在圖中道路、草地與農塘差值應為 0，而由圖 5-55、圖 5-56 中得知道路的誤差大約為 0~2 公尺，草地的誤差大約為 0~1 公尺，而農塘的誤差大約為 0~4 公

尺，推測主因為 DSM 檔案與 DEM1、DEM2 空間解析度不同所造成。

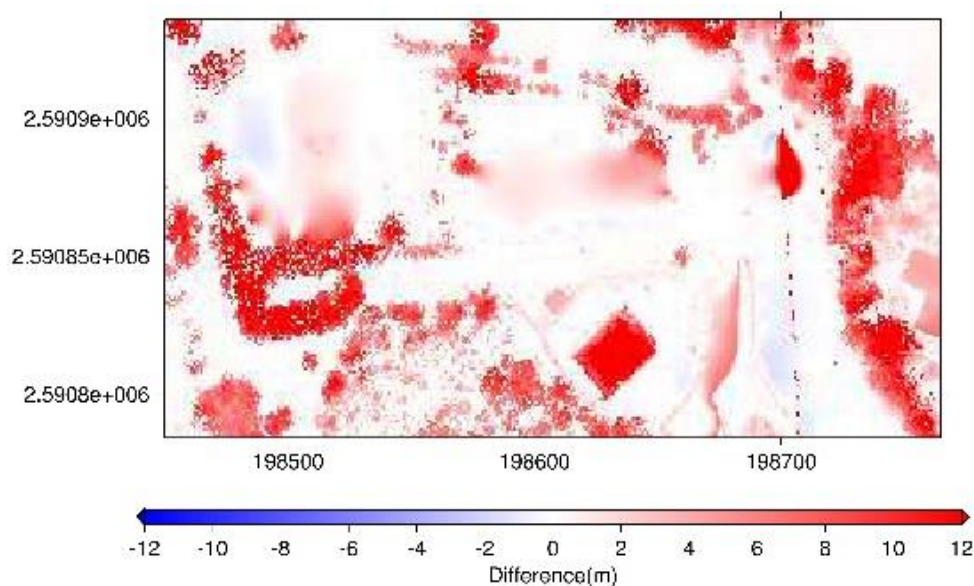


圖 5-55 DSM 與 DEM1 高程差。

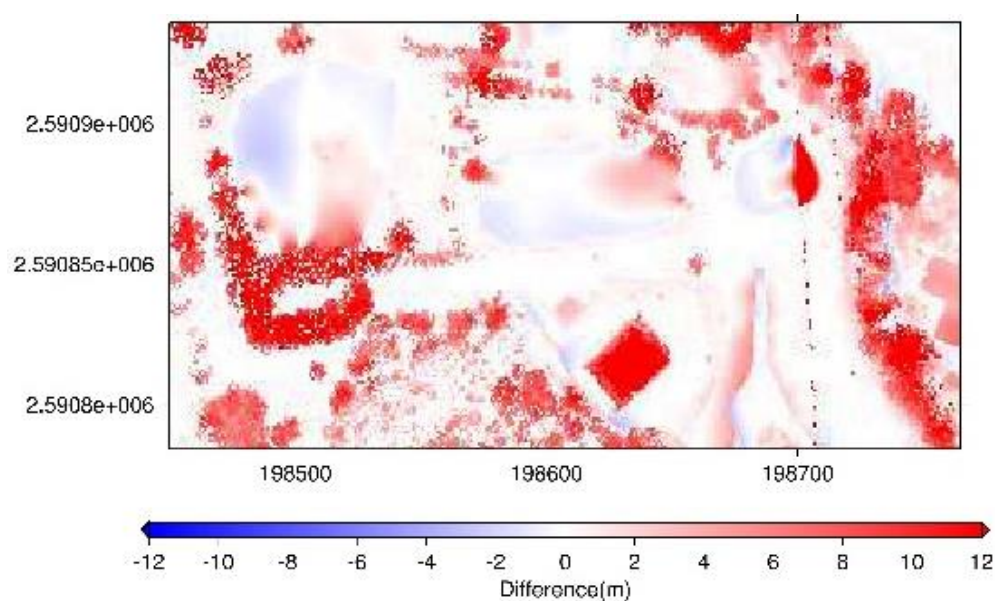


圖 5-56 DSM 與 DEM2 高程差。

5.3 UAV 與 USV 成果整合

USV 共完成兩次任務，USV 任務 1 於 6 月 20 日施測，與 UAV 任務 2 為同一時段作業，USV 任務 2 於 7 月 4 日施測，與 UAV 任務 3 同一時段作業。兩次 USV 任務皆為 50 公分為一點量測水深深度。

後續以四參數與六參數進行座標轉換，以 USV 座標為基準，轉換 UAV 模型的座標後，結合兩者的模型，探討座標轉換前與座標轉換後 UAV 與 USV 兩者模型的結合成果。以四參數與六參數進行座標轉換時，本計畫在農塘 A 池與 B 池各選 4 個控制點(已知點)進行座標轉換，控制點如圖 5-57 與 5-58 所示。控制點皆位於 UAV 與 USV 交界具明顯特徵之處，例如溢洪口位置。

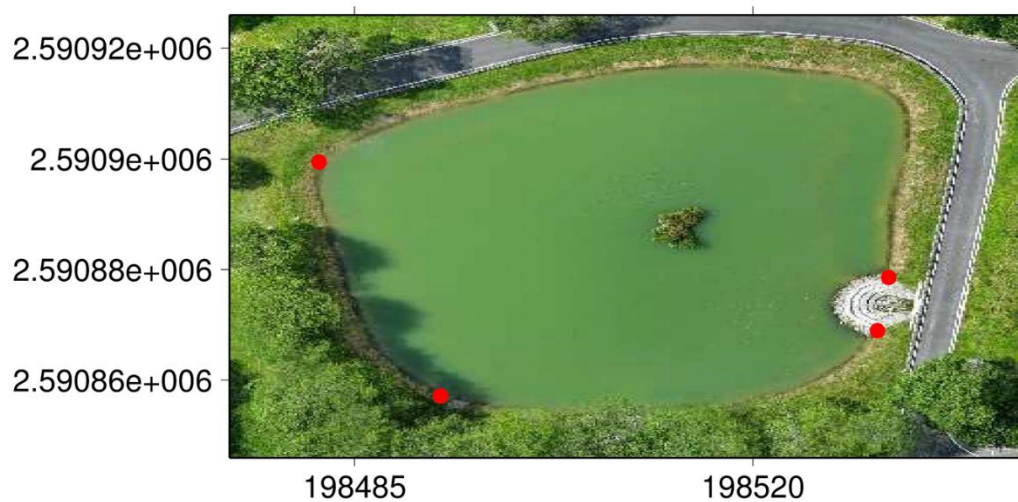


圖 5-57 農塘 A 池座標轉換控制點位置(紅點)。

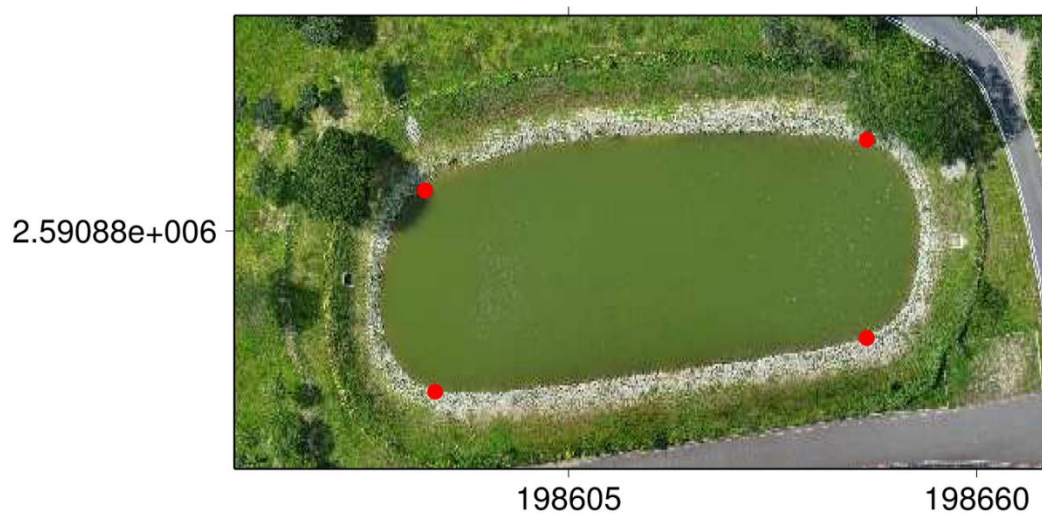


圖 5-58 農塘 B 池座標轉換控制點位置(紅點)。

5.3.1 UAV 任務 2 結合 USV 任務 1 成果

圖 5-59~圖 5-64 為 UAV 任務與 USV 任務 1 資料整合之成果，圖 5-59 及圖 5-60 為未使用座標轉換之成果，圖 5-59 為 A 池成果，由圖可知在溢洪口部分 UAV 模型較 USV 測深成果偏東，圖 5-60 為 B 池成果，由圖可知在 B 池護岸 UAV 模型與 USV 測深成果大致相同，無明顯偏移。

圖 5-61 與圖 5-62 為以 USV 座標為基準，將 UAV 座標進行四參數轉換後之成果，圖 5-61 為 A 池座標轉換結合之成果，由圖可知在溢洪口部分 UAV 模型與無人船測深成果近乎吻合，但在北方之護岸則較不吻合，圖 5-62 為 B 池座標轉換結合之成果，由圖可知在 B 池護岸 UAV 模型與無人船測深成果大致相同，無明顯偏移。

圖 5-63 與圖 5-64 為以 USV 座標為基準，將 UAV 座標進行六參數轉換後之成果，圖 5-61 為 A 池座標轉換結合之成果，由圖可知在溢洪口部分 UAV 模型與無人船測深成果吻合較圖 5-61 高，但在北方之護岸偏移量則又更大，圖 5-64 為 B 池座標轉換結合之成果，由圖可知在 B 池護岸 UAV 模型與無人船測深成果大致相同，無明顯偏移。

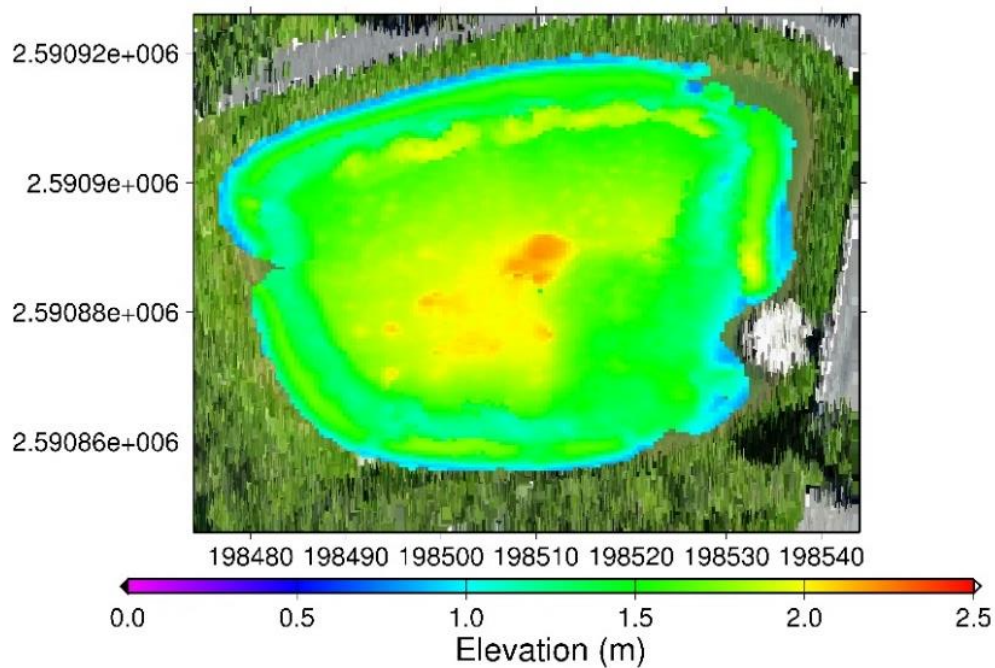


圖 5-59 A 池未進行座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果。

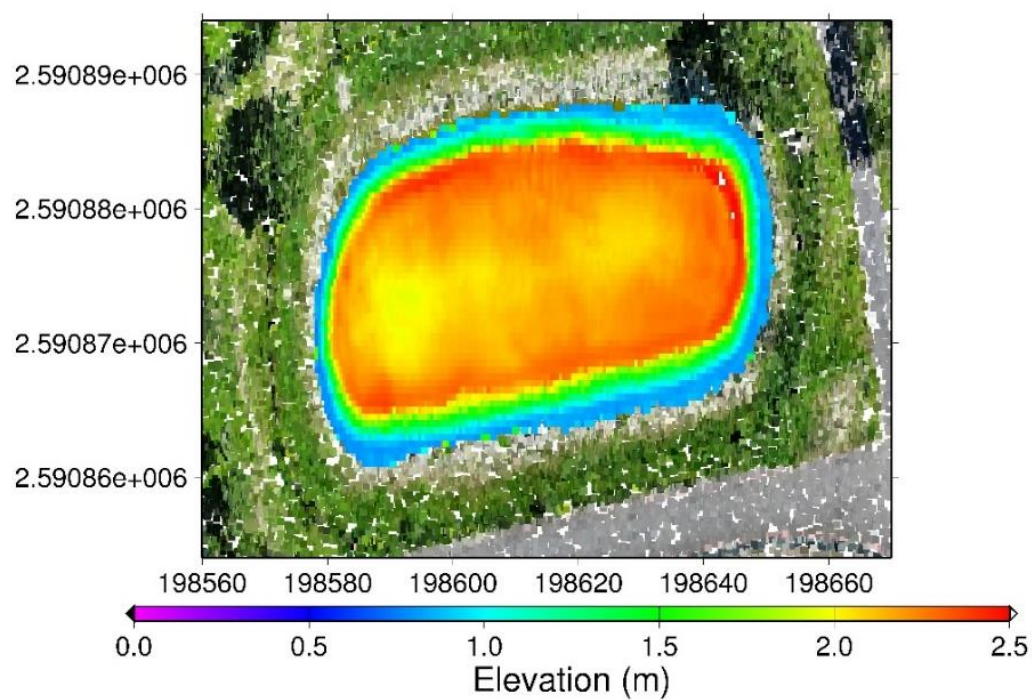


圖 5-60 B 池未進行座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果。

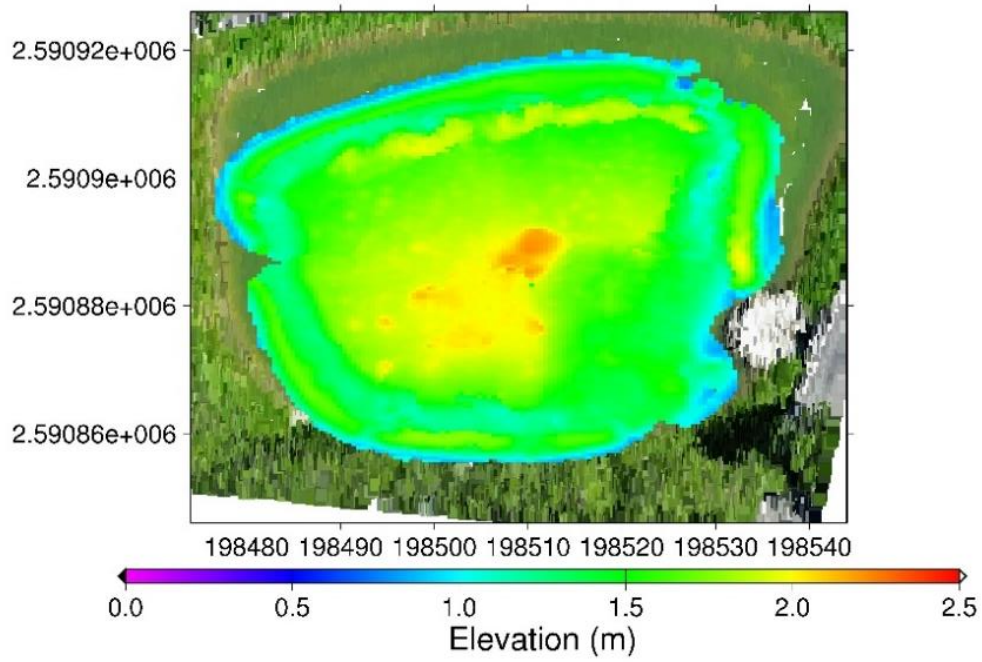


圖 5-61 A 池四參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果。

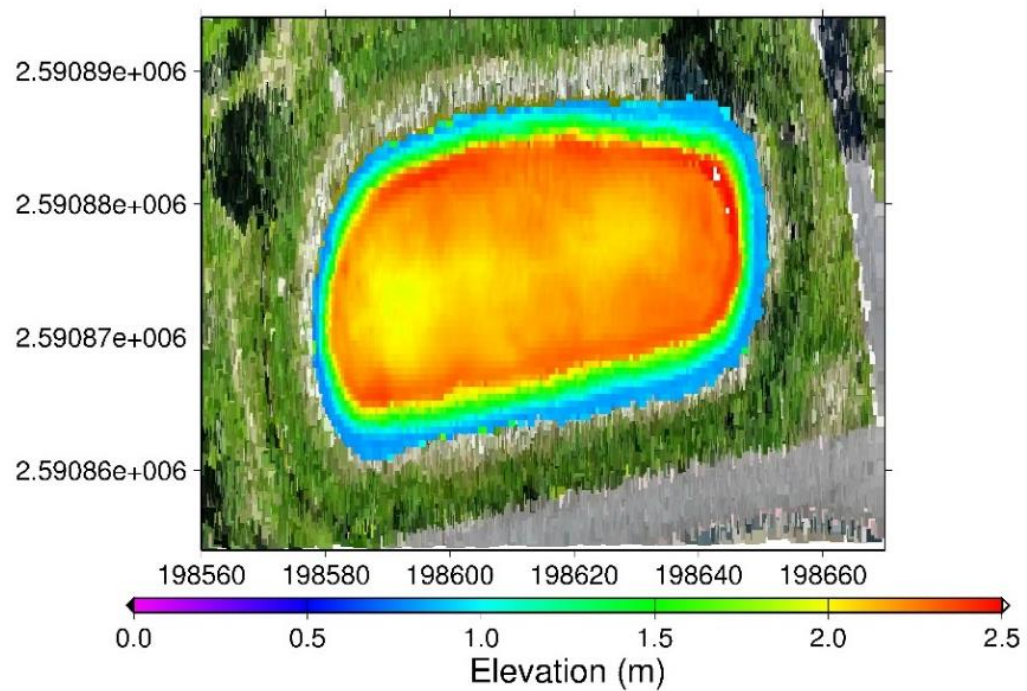


圖 5-62 B 池四參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果。

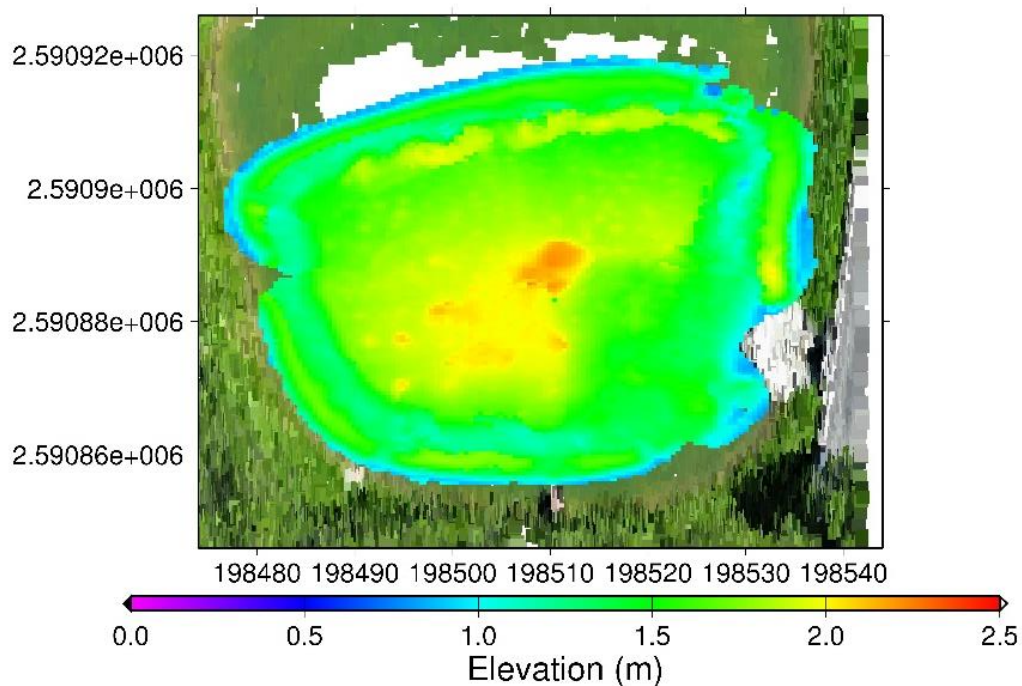


圖 5-63 A 池六參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果。

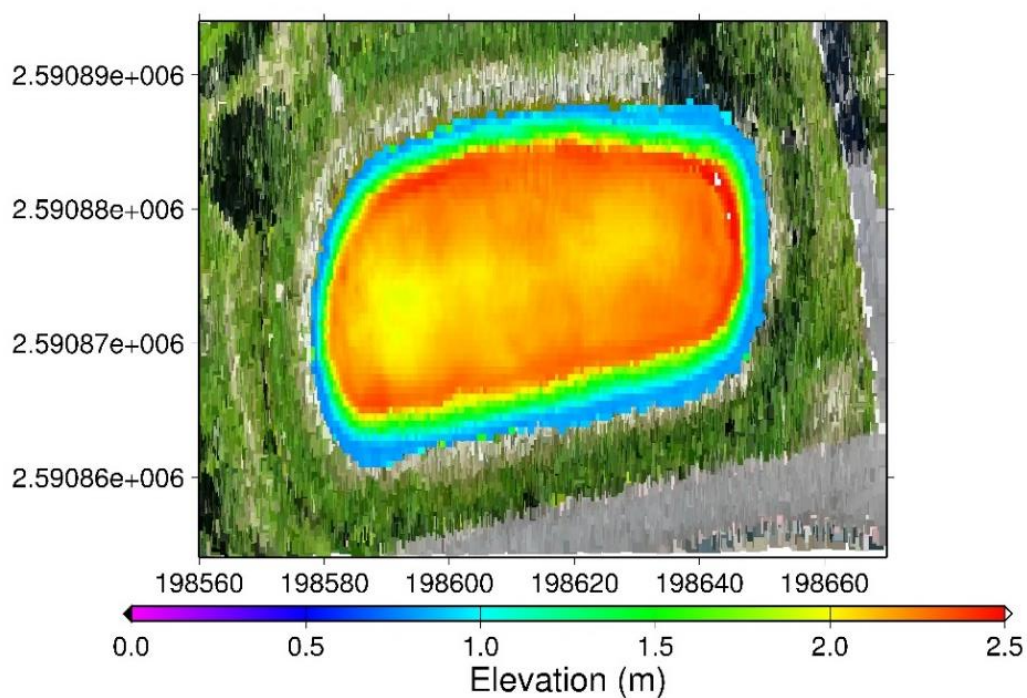


圖 5-64 B 池六參數座標轉換之 UAV 任務 2 與 USV 任務 1 整合成果。

5.3.2 UAV 任務 3 結合 USV 任務 2 成果

圖 5-65~5-70 為 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 資料整合之成果，圖 5-65 及圖 5-66 是未使用座標轉換之成果，圖 5-65 為 A 池成果，由圖可知在溢洪口部分 UAV 模型較 USV 測深成果偏東，圖 5-66 為 B 池成果，由圖可知在 B 池護岸 UAV 模型與 USV 測深成果大致相同，無明顯偏移。

圖 5-67 及圖 5-68 為進行四參數座標轉換之整合成果，圖 5-67 為 A 池之成果，由圖可知在溢洪口與護岸 UAV 模型與 USV 測深成果大致吻合，圖 5-68 為 B 池之成果，由圖可知在 B 池護岸 UAV 模型與 USV 測深成果大致相同，無明顯偏移。

圖 5-69 及圖 5-70 為進行六參數座標轉換之整合成果，圖 5-69 為 A 之成果，由圖可知在溢洪口與護岸 UAV 模型與 USV 測深成果大致吻合，圖 5-70 為 B 池之成果，由圖可知在 B 池護岸 UAV 模型與 USV 測深成果大致相同，無明顯偏移。

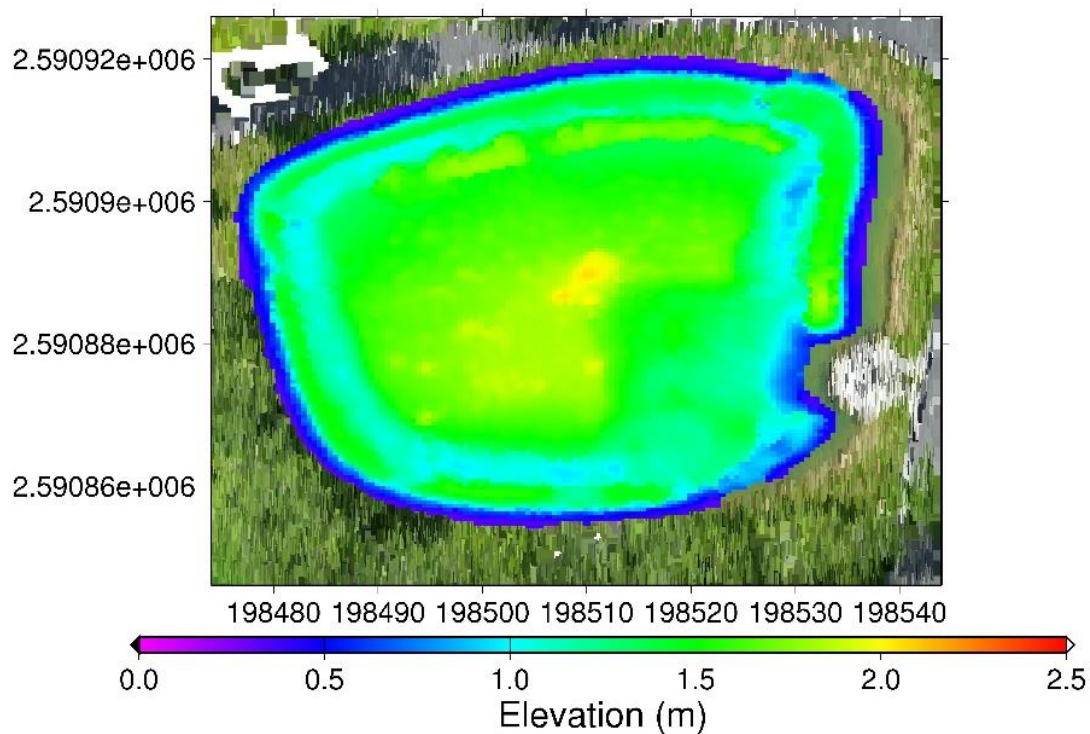


圖 5-65 A 池未進行座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合
成果。

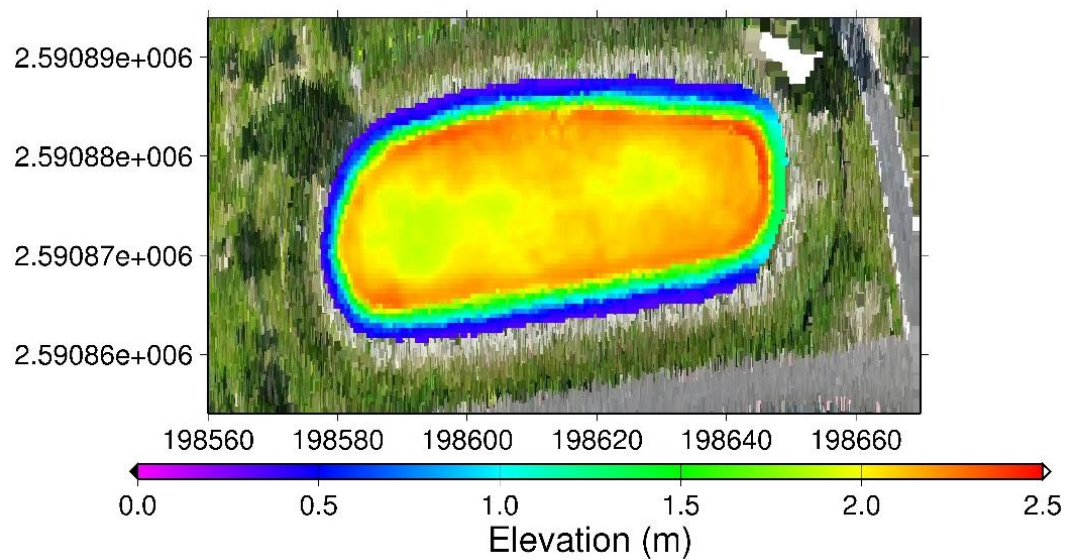


圖 5-66 B 池未進行座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合
成果。

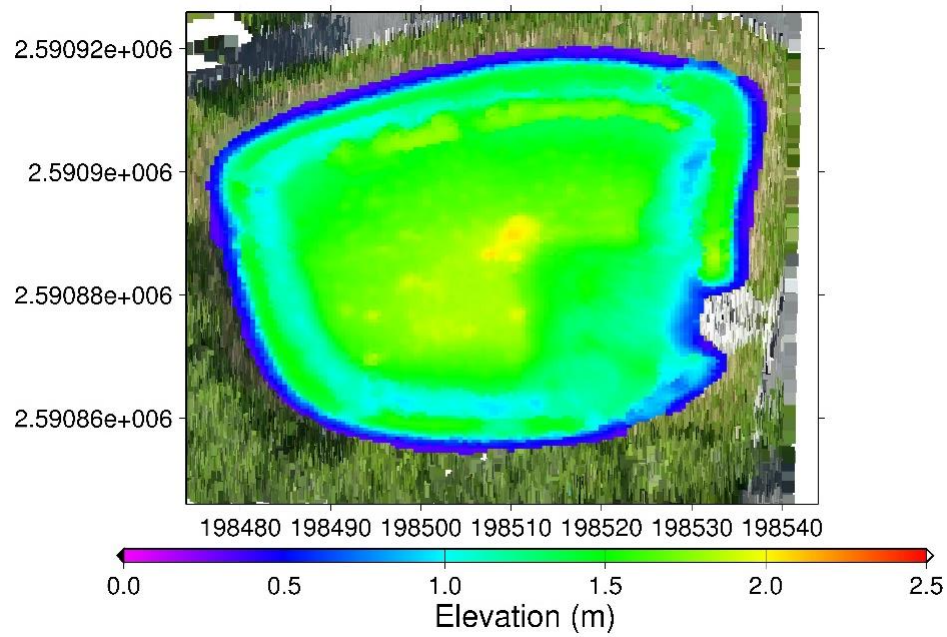


圖 5-67 A 池四參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合
成果。

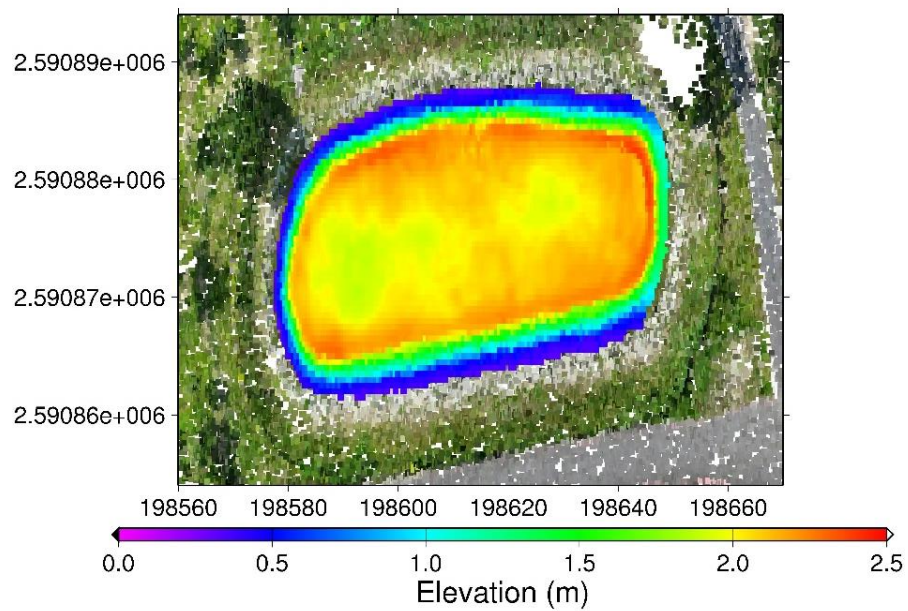


圖 5-68 B 池四參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合
成果。

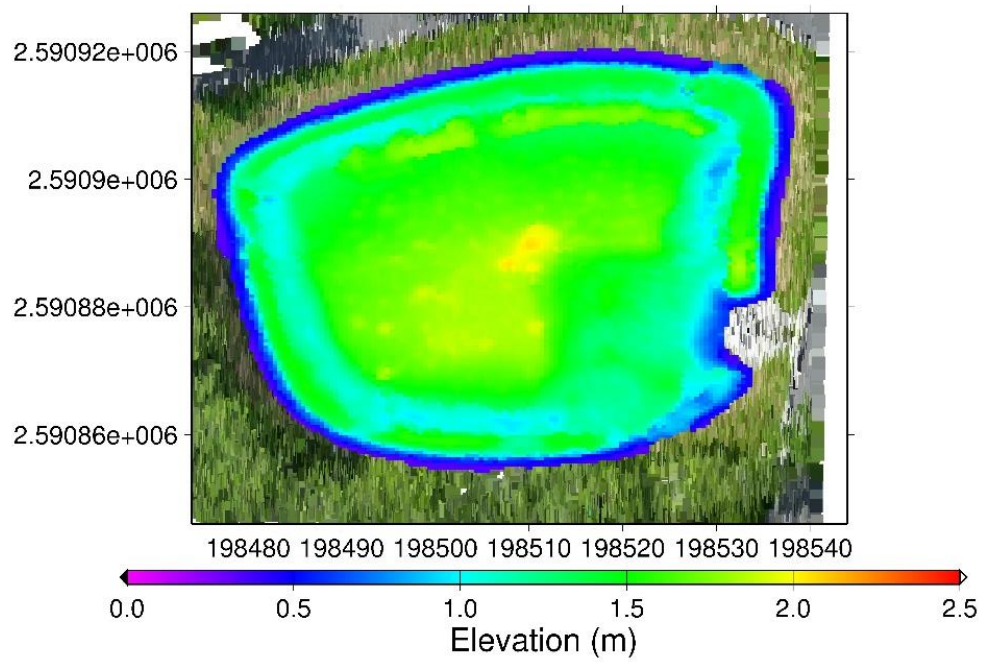


圖 5-69 A 池六參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果。

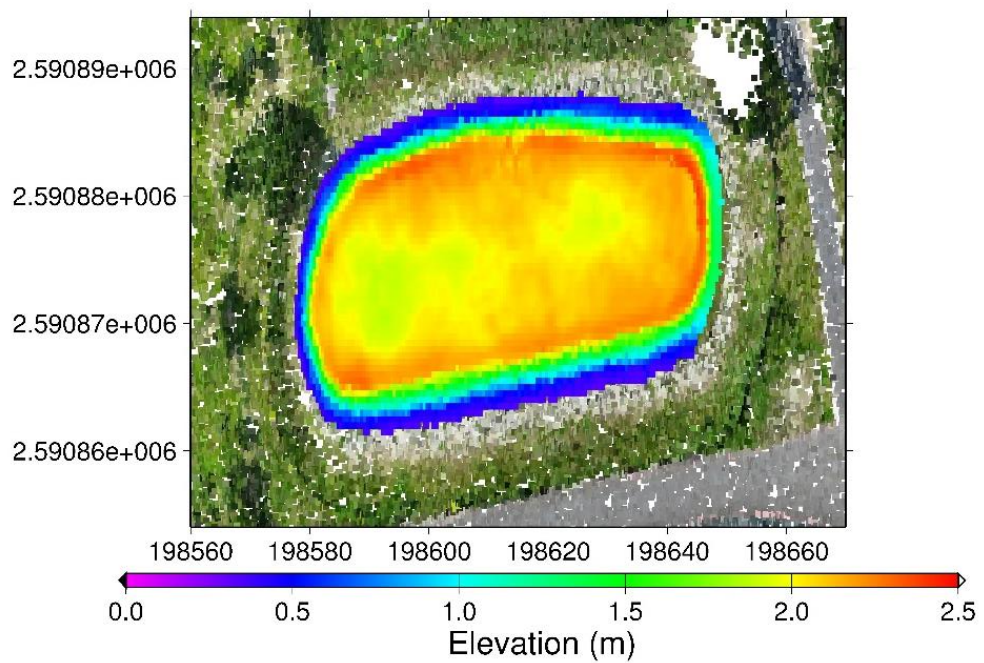


圖 5-70 B 池六參數座標轉換之 UAV 任務 3 與 USV 任務 2 整合成果。

5.4 水工構造物巡檢可行性

慈恩滯洪農塘於 111 年 9 月 28 日剛完成整修，至今才經過 1 年，因此水工構造物並無破損可做為水工構造物巡檢之範例，然而由 UAV 任務 1~任務 5 建模之成果，水工構造物(例如溢洪口、護岸等)因為具有高解析度之點雲(10 公分以內之空間解析度)，如圖 5-71 與 5-72，故水工構造物水上部分巡檢具可行性；水下部分由於 USV 兩次任務空間解析度僅 50 公分，造成部分護岸位置較不吻合，故本計畫水工構造物水下部分較無巡檢之可行性。



圖 5-71 UAV 任務 3 溢洪口點雲成果。



圖 5-72 UAV 任務 3 護岸點雲成果。

5.5 植被生長偵測可行性

在 5-2 節中，將內插後的 DSM 檔案與 DEM1、DEM2 檔案相減後，分別得到 DEM1、DEM2 的剩餘地形，再與影像進行套疊後，即可得出圖 5-73 與 5-74。由兩圖中可以看出除了建築物之外的植被大致可由 DEM 與 DSM 的高程差所求出，代表本研究 UAV LiDAR 成果正確。

為了進一步確認 UAV LiDAR 應用於植被生長偵測可行性，研究中選取 10 個 UAV LiDAR 檢核點(表 5-2)，先以 UAV 空拍任務 5 計算 10 個檢核點 DSM 與 DEM 的差值(在草地與柏油路面，差值為 0，在建物屋頂與樹頂，差值為建築物高度與樹高)，接著計算這些差值與 DEM1、DEM2 的剩餘地形位置的差距，結果如圖 5-75 和 5-76 所示。由圖可發現，UAV 任務 5 減 DEM1 剩餘地形成果約 0~30 公分，而 UAV 任務 5 減 DEM2 剩餘地形約 0~60 公分，代表 DEM1(11.6 萬點)較 DEM2(5500 點)成果更佳，另外由圖 5-75 和 5-76 發現樹頂與建物屋、草地、柏油路面相比，誤差並沒有明顯偏大，若單純比較樹頂位置，DEM1 剩餘地形誤差約 0~30 公分，DEM2 剩餘地形誤差約 0~40 公分，差距不大。整體而言，本研究 UAV LiDAR 在樹高偵測方面誤差約 30 公分以內，應能良好偵測林相生長情況。

表 5-2 UAV LiDAR 檢核點。

點號	位置	點號	位置
1	建物屋頂	6	樹頂
2	草地	7	樹頂
3	草地	8	樹頂
4	柏油路面	9	樹頂
5	柏油路面	10	樹頂

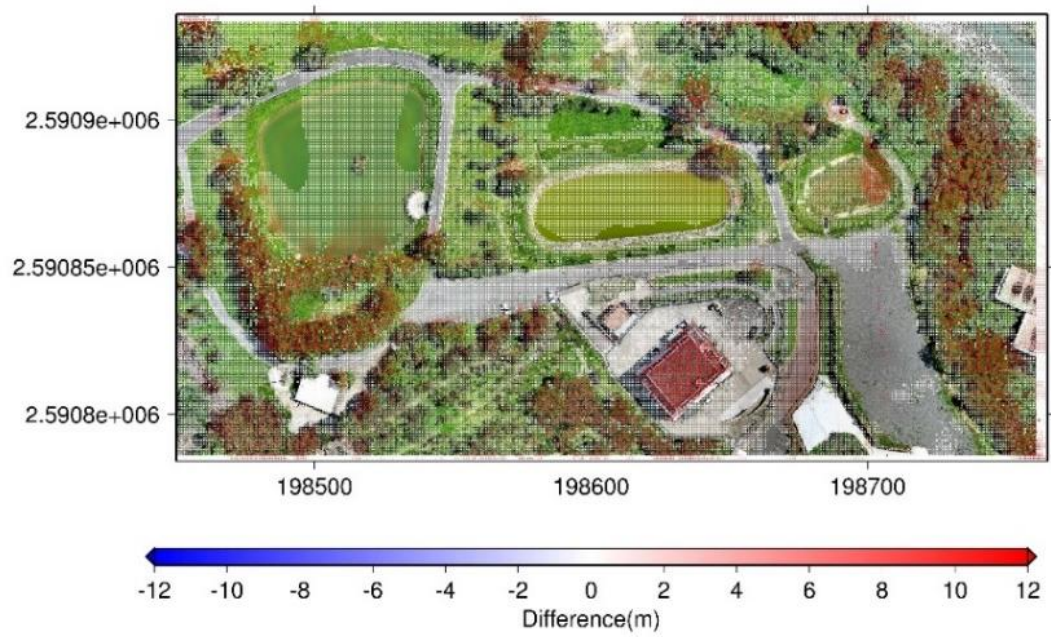


圖 5-73 DSM 減 DEM1 地形並套疊影像圖。

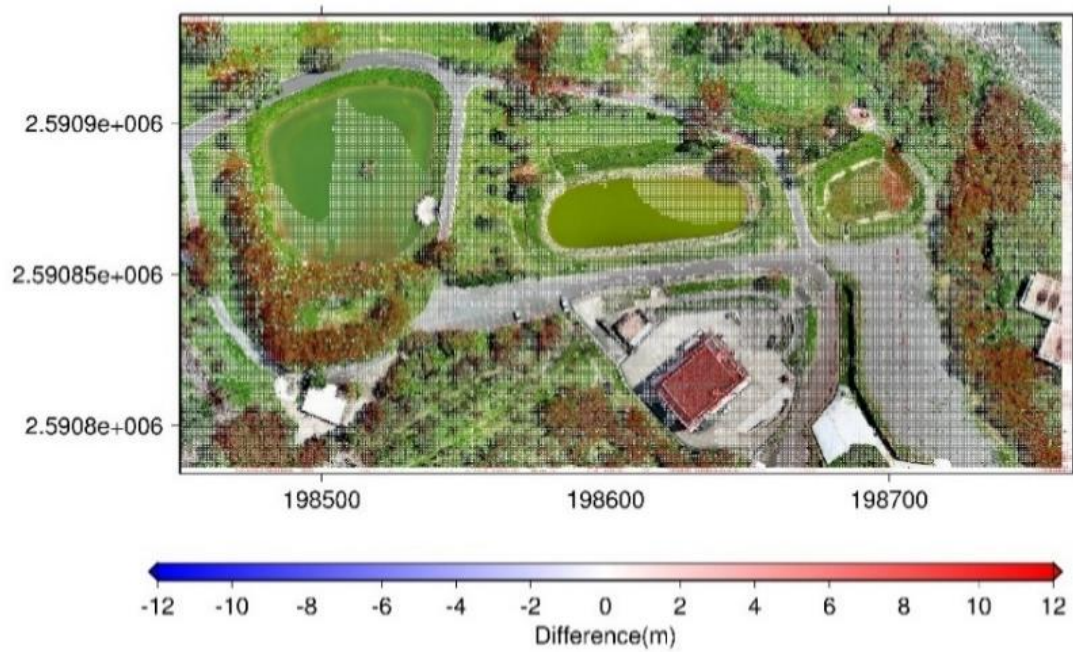


圖 5-74 DSM 減 DEM2 地形並套疊影像圖。

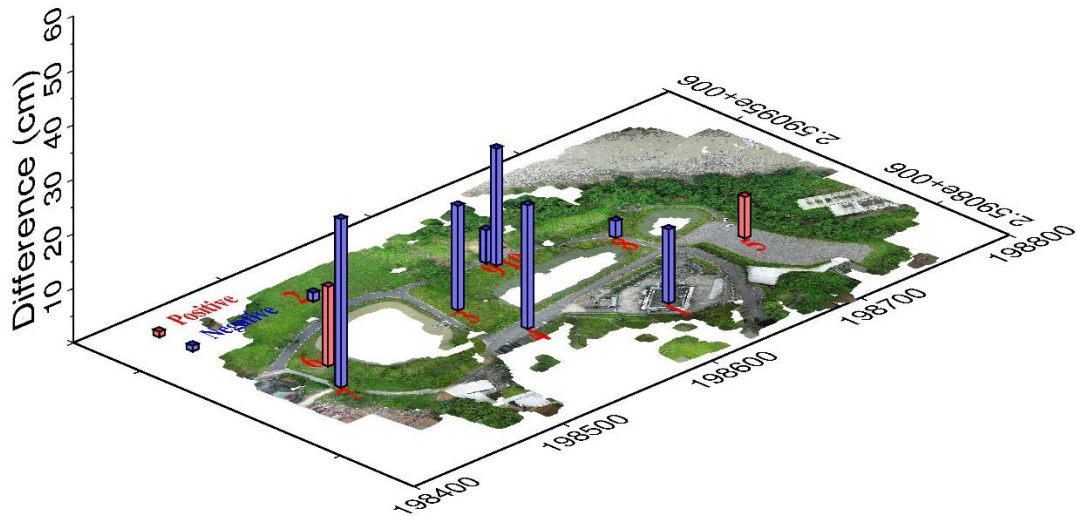


圖 5-75 UAV 任務 5 減 DEM1 剩餘地形成果。

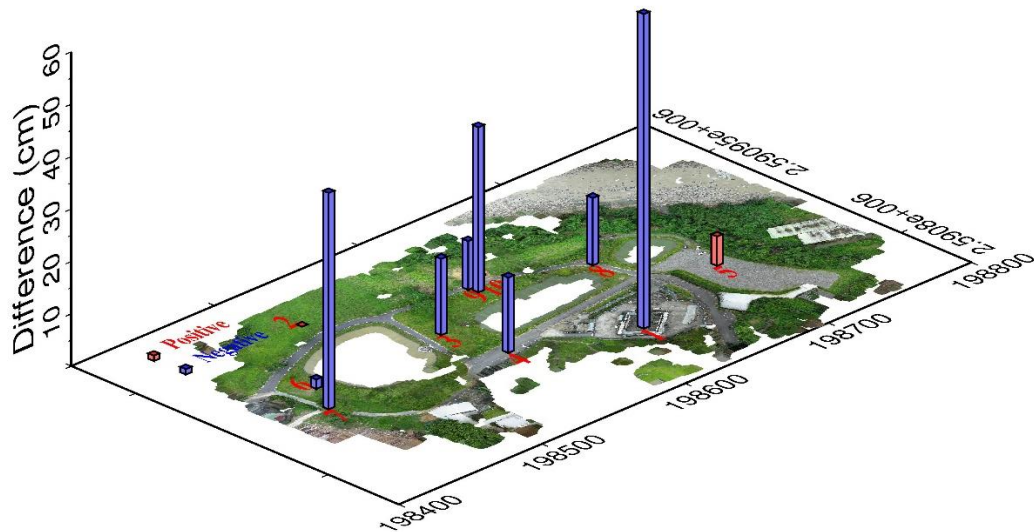


圖 5-76 UAV 任務 5 減 DEM2 剩餘地形成果。

5.6 集水區土砂流失與農塘淤積關聯性

表 5-3 USV 任務 1 與 2 農塘測深成果，兩次測深任務只相距約 20 天，A 池與 B 池仍有約 10~20 公分的深度差距，但農塘周邊土砂變化的情形需要至少 2 次 UAV LiDAR 成果才能計算，本計畫僅進行一次 UAV LiDAR 任務，故無法看出農塘淤積與土砂流失量之間的關係關聯性。

表 5-3 USV 任務 1 與 2 農塘測深成果。

	最大值(公尺)	最小值	平均值
USV 任務 1 A 池深度	2.22	0.73	1.56
USV 任務 1 B 池深度	2.51	0.73	1.87
USV 任務 2 A 池深度	2.05	0.30	1.33
USV 任務 2 B 池深度	2.39	0.31	1.74

5.7 進度甘梯圖

本計畫甘特圖如表 5-4 所示。

表 5-4 計畫甘特圖

工作名稱	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	第 9 月	第 10 月	第 11 月
一、分析無人機空拍 3D 建模精準度											
二、分析無人機光達多重回波建置地形精準度											
三、發展無人機空拍、無人機光達與無人船測深成果資料整合技術											
四、水工構造物巡檢可行性											
五、植被生長偵測可行性											
六、集水區土砂流失與農塘淤積關聯性											
七、工作報告											

第六章 結論及建議

1. 根據 UAV 參考文獻可以知道 UAV 在不同領域皆有良好的成果，搭採不同的設備可以運用在防災、巡檢、播種等作用；UAV LiDAR 曾運用在建置數值地形分析山崩潛勢區內的崩塌量及崩塌範圍或進行高時間解析度的氣象場與氣膠剖面觀測等，因此本計畫嘗試利用 UAV LiDAR 進行植物生長監測的可行性進行評估。
2. 由圖 5-2、圖 5-7、圖 5-12、圖 5-16 及圖 5-21 與圖 5-7、圖 5-12 及圖 5-16 可以知道使用 S 型航線的 UAV 任務 1 與任務 5 成果比使用井字型航線的任務 2~4 成果要更容易產生破圖，因此建議 UAV 空拍應以井字型航線為主，降低破圖之機率。
3. UAV 空拍可以看出在道路的部分明顯有 ± 2 的高程差，明顯有系統誤差存在，在後續加入地面控制點修正 UAV 模型後再次比較任務 1 與各任務之差值，如圖 5-50~圖 5-53 可以發現在道路方面的高程差近乎為 0，顯示加入地面控制點後的確能修正模型的座標，降低系統誤差。
4. 由 UAV 空拍成果 DSM 套疊影像所繪製出的三維圖，高程較高處為植被與建物，因此可以初步判定本計畫 DSM 數據無誤。
5. 由圖 5-55 與圖 5-56 可發現在道路、草地與農塘誤差約 0-4 公尺，可能為 DSM 檔案與 DEM1、DEM2 空間解析度不同所造成。
6. 本計畫選取 10 個 UAV LiDAR 檢核點，以 UAV 空拍任務 5 計算檢核點 DSM 與 DEM 的差值，在樹頂與建物屋、草地、柏油路面無明顯誤差，在樹高偵測方面誤差則為 0~30 公分，應能良

好偵測林相生長情況。

7. 比較任務 1~5 可發現，在 A 池及 B 池的高程有逐漸升高，在 6 月底水位上升較七月初較明顯，九月底的高程是上升最多的。根據圖 5-50、圖 5-51 與圖 5-62 可以看出在 6 月時 A 池與 B 池的水位較 7 月多，根據表 5-3 可以知道 USV 測出之成果顯示 6 月底的水深也是較 7 月初的水深深約 10~20 公分，而圖 5-53 可以看出原本無水的 C 池也有蓄水且 A 池 B 池的水深也較五月上升許多，但因此次無無人船之數據，因此無法相互驗證。
8. 由表 5-3 可知兩次 USV 任務 A 池與 B 池約有 10~20 公分的差距，因本計畫只有一次 UAV LiDAR 成果，因此無法看出農塘淤積與土砂流失量間的關聯。
9. 因 UAV 解析度較高(10 公分內之空間解析度)，而 USV 空間解析度為 50 公分，在部分護岸位置較不吻合，因此水上水工構造物巡檢具可行性，而水下水工構造物較無巡檢之可行性。

參考文獻

1. Küng, O. and Strecha, C. and Beyeler, A. and Zufferey, JC. and Floreano, D. and Fua, P. and Gervais, F., (2011). The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-light UAV Imagery. UAV-g Conference, Zürich.
2. Wolf, P.R. and Dewitt, B.A. (2000) ,Elements of Photogrammetry with Applications in GIS ,3rd Edition.
3. 111 年度優良農建工程-設施類，澧水溪慈恩滯洪農塘改善工程，農業委員會水土保持局，2021。
4. 王星為、彭德熙、余翠紋、謝有忠、費立沅、張國楨(2017)。無人機高階應用—光達系統測繪，地質 36 卷第 3 期，pp. 36-37。
5. 王奕鈞(2006)。神經網路應用於地籍坐標轉換之研究，國立政治大學碩士論文。
6. 內政部(2022)。110-111 年測深無人船辦理水深測量及建置線上精密單點定位服務系統研究工作方案，第三期成果報告。
7. 林宥伯、吳振佑、陳均維、林詠喬、陳國威、林家興、陳振宇(2020)。UAV 應用於水土保持之現況與趨勢，營建知訊 448 期，pp4-8。
8. 江晉霆(2018)。無人機光達系統率定及平差之精度評估，國立台北科技大學碩士論文。
9. 李添福 (2006)。以最小二乘配置法進行小區域地籍資料坐標轉換經度之研究-以宜蘭縣壯圍鄉吉祥段為例，國立宜蘭大學碩士論文。
10. 承峰工程顧問有限公司(2020)。108 年度四重溪、保力溪及東門溪集水區 農塘盤點調查、評估與初步規劃,水土保持局臺南分局成果報告書，pp. 4-1-4-4。
11. 侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉，航測及遙測學刊，第十八卷，第 2 期，第 93-108 頁。

12. 徐金煌(2017)。以 Pix4DMapper 進行 UAV 影像快速空間資料產製之探討，國立臺灣師範大學地理學系第一屆空間資訊碩士在職專班論文。
13. 馬慧(2021)。應用 UAV 光達與移動式光達於立木調查之研究，國立政治大學碩士論文。
14. 陳永川(1995)。談台南市政府市地重劃區的平面控制測量及都市計畫樁座標轉換，中華民國地籍測量學會會刊，第 14 卷，第 2 期，pp32-42。
15. 陳誼(2021)。整合無人機與光達觀測解析斗六地區空汙事件之演變過程，國立中央大學碩士論文。
16. 陳奕霖(2021)。無人機光達點雲資料評估及差異分析，國立台北科技大學碩士論文。
17. 國立中興大學(2019)。108 年度新竹縣浪漫台三線沿線農塘盤點調查、評估與初步規劃，水土保持局台北分局成果報告書，pp. 4-46-4-53。
18. 張勳偉(2012)。應用迴歸法改良四參數轉換推估之研究-以宜蘭地區為例，逢甲大學碩士論文。
19. 許皓寧，蔡燦得(2004)，台北市地籍資料 TWD67 與 TWD97 坐標轉換之研究，中華民國地籍測量學會會刊第 23 卷第 1 期，pp39-63。
20. 許愷岐、宋國彰、林信輝、蕭惠民 (2021)。UAVs 於崩塌地植生播種作業與實施應用，中華水土保持學報，pp17-18。
21. 崔國強、業大綱(2013)，結合衛星基準站進行 e-GPS 與 GPS 相對定位之研究。
22. 黃鐘、胡植慶、陳于高、詹瑜章、李建成、史天元(2004)。空載雷射掃描數值高程模型簡介，地質，第 23 卷第 1 期，pp.44-46。
23. 黃韋蒼、于鈞、顏永哲、施睿庠、李易昇、林修國、陳宗正、黃基倬、陳怡君、邱俊誠、歐陽盟(2019)。空中與地面無人載具應用於 3D 果樹與樹林建模，智慧光電農業機器人專題，pp40-49。
24. 葉正陽(2019)。無人機光達系統應用於沙岸與藻礁地區之波浪能

- 量消散之研究，國立中央大學碩士論文。
25. 趙智凡、潘偉庭、楊明德(2016)。應用多視立體及運動回復結構之三維場景重構，航測及遙測學刊，第二十卷，第 2 期， pp.129-137。
 26. 蔡元融(2020)。高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究，農業委員會水土保持局委託研究，pp1-1~1-3。
 27. 蔡杰凱(2020)。多時期光達資料精度分析及應用-以寶來地區為例，國立台北科技大學碩士論文。
 28. 劉金源，2001。水中聲學：水聲系統之基本操作原理，國立編譯館，619 頁。
 29. 劉秉承(2019)。無人機光達多時期掃描資料之精度評估及應用，國立台北科技大學碩士論文。
 30. 劉庭宇、吳振發、朱恬儀(2021)。無人載具應用於景觀調查，Journal of Agriculture and Forestry，pp149-150。
 31. 薛憲文、史天元、徐佳筠，（2012）。水域測深方法暨原理探討，航測及遙測學刊，第 16 卷，第 3 期，pp. 203-217。
 32. 鴻昇工程科技有限公司(2019)。108 年度長濱沿海等集水區農塘盤點調查、評估與初步規劃,水土保持局台東分局成果報告書，pp. 3-48。

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	業務單位(組、中心、小組) 審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分：	
1.	空域、平面及水域的量測精度是否不同，建議補充說明整合應用之因難點。	感謝委員指正，空域、平面及水域的載具不同，故量測精度不同，本計畫將會分析水下地形和水上地形在接合處的資料銜接與整合的成果。
2.	巡檢、土壤流失、淤積等議題均須較多時期之資料，本案 2 次的拍攝是否可獲得足夠之分析資料。	2 次的空拍將會選擇汛期前後土壤流失差距較大的時期，故應有足夠之分析資料。目前已進行 3 次空拍，預計於汛期後進行至少 1 次空拍。

項次	業務單位(組、中心、小組) 審查意見	回覆辦理情形
3.	在農塘已蓄水的情況下，水工構造物之巡查採何種方式巡檢？UAV Lidar 或多音束聲納？精度及解析度是否可行？	水上將以 UAV 空拍巡檢水工構造物為主，水下則以無人船。本計畫將全面評估精度及解析度之成果。
4.	點雲資料放置於 pointbox 網站是否有相關法令之限制或規範？	感謝委員指正，本團隊將深入了解 pointbox 網站是否有此問題。目前認定無相關法令之限制或規範。
5.	其他:有關計畫書格式及經費審查部分	目前已依照審查意見完成修改。

附錄二、第一次期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	P2-5，” 由於無人機LiDAR目前主力機型均為大疆，若執行有資安風險，本研究可能暫停無人機LiDAR研究”，來說明實際處理狀況，若無法執行，可有替代方案？	感謝委員指證，目前國內有採用非大疆之 UAV LiDAR 執行政府相關計畫，亦有相關成果產出，本計畫將優先採用此設備技術，故應可完成此工項。已刪除原本”UAV LiDAR 停辦”之內容。此部分修改見 P2-6。
2.	完成澧水溪慈恩滯洪農塘空拍任務，惟此任務建模皆為農塘外圍之三維模型，對農塘水域巡檢並無相關性，請加強說明。	感謝委員指證，農塘的溢洪口結構、漿砌塊石護岸等均有可能在水下和水面上，此時必須結合農塘空拍與船測模型，來建構完整之結構物模型。已於

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
		P3-1 加強說明。
3.	題目為「無人機無人船聯合執行...」，惟報告中全未提及如何整合河、空測量資料的架構，應加與無人船相關計畫之溝通整合。	感謝委員指證，農塘的溢洪口結構、階梯式緩坡護岸等均有可能在水下和水面上，此時必須結合農塘空拍(無人機)與船測(無人船)模型，來建構完整之結構物模型。由於無人機與無人船各自執行任務，各有屬於自己的坐標系統，故如何將兩者轉換至相同坐標系統使結構物完整，將是本研究重要研究課題，此部分將於期末報告完整

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
		呈現。此部分已於 P3-1 加強說明。
4.	圖 3-6、3-10 及 3-18~3-20 之縱坐標應為 TWD97 的 Y 坐標，其表示方式不宜用科學記號。	感謝委員指證，已修改完成。詳見 P3-15 之圖 3-19~圖 3-21。
5.	本計畫之重點在將水上(UAV)及水下(無人船)建置之 3 維模型整合，惟在工作執行方法與步驟上，完全未提水上與水下模型整合的方法？期末報告請補充。	感謝委員指證，由於無人機與無人船各自執行任務，各有屬於自己的坐標系統，故如何將兩者轉換至相同坐標系統使結構物完整，將是本研究重要研究課題，一般而言可利用數個特徵點，採用四參數或六參數，並搭配最小二乘配置法進行轉換，此部

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
		分將於期末報告完整呈現。目前於 P3-1 先加強說明。
6.	原規劃無人機光達多重回波建置 DSM 及 DEM 經度之工項以資安問題為由停辦，應思考其他方式或工項來處理。	感謝委員指證，目前國內有採用非大疆之 UAV LiDAR 執行政府相關計畫，亦有相關成果產出，本計畫將優先採用此設備技術，故應可完成此工項。
7.	P3-1，請補充說明不同色條之代表意義，及補充甘特圖實際執行情形，並補充實際時間(第 1 月是否即為 1 月)，從圖中並無法得知實際執行情形與其時間。	感謝委員建議，以補充說明完畢，請見 P3-2。

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
8.	請補充說明第四項任務個別目的與差異性，另為何分成任務 2 與任務 3-1？	感謝委員意見，已將任務 3-1 與 3-2 分別改名為任務 3 與 4。任務 2~4 的空拍目的與差異性已補充說明，請見 P3-4。
9.	請補充說明圖 3-18~圖 3-20 的成果目的與分析。	感謝委員意見，新的圖編號為圖 3-19~圖 3-21。相關補充說明見 P3-13~P3-15 所示。
10.	請後續補充圖 2-4 最後提及的預期分析成果於第三章中。	感謝委員指證，已將圖 2-4 中的「水工構造物巡檢可行性」和「植被生長偵測可行性」放入表 3-1 計畫甘特圖，並於 P3-1 補充說明。

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
11.	為因應機關組織改造，機關名稱修正為農業部農村發展及水土保持署，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載 (https://elibrary.ardswc.gov.tw/)。	感謝委員指證，已將封面改為「農業部農村發展及水土保持署」，署徽也一併修正完畢，相關格式已遵照最新範本格式撰寫。

附錄三、第二次期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	業務單位(組、中心、小組)審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	P1-2，圖1-1，行政院農業部請改為農業部。	已將內文行政院農業部改正為農業部。
2.	UAV LiDAR 儀器部分請補充使用之廠牌。	UAV LiDAR 儀器已補充於 3.2 節
3.	UAV 與 USV 之間座標轉換分析方式請補充詳細說明。	UAV 與 USV 之間座標轉換原理已補充於 2.4 節，詳細分析方式請見 5.3。