

OAC-114-012 (研究報告)

融合 Auditory SLAM 海底模型和 UAV 海上模型進行精

確三維模型建置

(成果報告)

海洋委員會補助研究

中華民國 114 年 9 月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

OAC-114-012 (研究報告)

融合 Auditory SLAM 海底模型和 UAV 海上模型

進行精確三維模型建置

(成果報告)

學校：國立高雄科技大學

指導教授：黃凱翔

學生：蔡長榆

研究期程：中華民國 114 年 4 月至 114 年 10 月

研究經費：新臺幣 101,000 元

海洋委員會補助研究

中華民國 114 年 9 月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

「本研究報告絕無侵害他人智慧財產權之情事，如有違背願自負民、刑事責任。」

目次

目次.....	1
表次.....	3
圖次.....	4
摘要.....	7
第一章 前言.....	8
第一節 研究緣起.....	8
第二節 問題背景.....	8
第三節 研究目的及研究重點.....	9
第四節 現況分析.....	10
第五節 研究目的及研究重點.....	11
第六節 預期目標.....	13
第二章 研究方法及過程.....	14
第一節 使用軟體.....	15
第二節 研究地點.....	19
第三節 研究硬體設備.....	22
第四節 影像預處理.....	28
第五節 模型建置.....	31
第三章 結果與討論.....	44
第一節 期中報告審查意見回覆.....	44
第二節 GoPro 與 Metashape 之參數的相互影響.....	44

第三節	建模成果.....	45
第四節	檢討與改進.....	58
第四章	結論.....	60
參考文獻	62

表次

表 1 GoPro HERO 13 詳細規格.....	24
表 2 GoPro 影片模式 (FOV) 比較表.....	25
表 3 UAV 可見光感測器詳細規格	27

圖次

圖 1 外出實作流程圖	11
圖 2 研究流程圖	15
圖 3 UAV 建置三維模型流程	18
圖 4 第一練習區域：土木館前空地（資料來源：Google Map）	20
圖 5 第二練習區域：高科大游泳池（資料來源：Google Map）	21
圖 6 實驗區域：屏東萬里桐沿岸（資料來源：Google Map）	22
圖 7 GoPro 各拍攝模式效果圖	25
圖 8 SFM 特徵點計算示意圖	28
圖 9 陸地試作時單張影像產生之畸變圖	29
圖 10 Agisoft 初始參數設定圖	30
圖 11 Agisoft 之參數調整圖	31
圖 12 選擇 Add Folder 加入照片	32
圖 13 選擇 Single camera 加入照片	33
圖 14 Align Photo 前所選擇之參數	34
圖 15 未勾選引導式影像匹配之結果	35
圖 16 勾選引導式影像匹配之結果	36
圖 17 更新相機內外參數指標圖	37
圖 18 完成密集重建後之全彩點雲	38
圖 19 以 Metashape 由深度圖重建之三角網格結果	39
圖 20 研究區之紋理化三維模型成果	40

圖 21 經建立磚塊式模型產製研究區之多層級 (LOD) 圖磚化模型與貼圖成果.....	41
圖 22 5/28 當天潮汐表	44
圖 23 8/22 當天潮汐表	44
圖 24 第一次實作之 UAV 飛行範圍圖	45
圖 25 第二次實作之 UAV 飛行範圍圖	46
圖 26 紅框範圍約為第一次實作 GoPro 之場域.....	47
圖 27 紅框範圍約為第二次實作 GoPro 之場域.....	47
圖 28 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果俯視圖	48
圖 29 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果左側視圖	49
圖 30 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果右側視圖	49
圖 31 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果前視圖	49
圖 32 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果俯視圖	50
圖 33 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果右側視圖	50
圖 34 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果左側視圖	50
圖 35 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果前視圖	51
圖 36 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果俯視圖.....	51
圖 37 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果右側視圖.....	52
圖 38 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果左側視圖.....	52
圖 39 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果前視圖.....	53
圖 40 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果前視圖.....	54
圖 41 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果右側視圖.....	54

圖 42 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果左側視圖.....	55
圖 43 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果俯視圖.....	55
圖 44 第一次實作兩點雲合併之前視圖.....	56
圖 45 第一次試驗兩雲配準後之疊合結果（紅：水上；綠：水下）.....	56
圖 46 第二次實作兩點雲合併之前視圖.....	57
圖 47 第二次試驗兩雲配準後之疊合結果（紅：水下；綠：水上）.....	57

摘要

隨著科技的進步，三維建模技術在多種應用中越來越重要，例如水下探測、海洋研究和海上監測等領域，然而，傳統三維建模方法在複雜的環境中面臨著挑戰，例如水下會因光線折射導致空間重建時產生錯位；泥沙揚起導致能見度低；動態水流導致特徵點不穩定之影響等，使傳統光學感測器的效果有限，而聲學技術（如聲納和 Auditory SLAM）因其對水下環境的高適應性，使其成為建構水下模型的重要工具。另一方面，無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle ,UAV)因其靈活性和廣闊視野，能夠高效捕捉地表、海面、沿岸區域的地形數據。且為進一步提升模型的完整性與精度，本研究亦導入 GOPRO 等低成本光學影像裝置作為水下近距離建模的輔助工具。雖然光學方法在混濁或深水環境中受限，但在淺水、潮間帶或水質清澈的條件下，其高解析度影像對特定區域的細部建模仍具高度價值。目前打算融合 Auditory SLAM 的水下建模能力、UAV 所取得的海面、沿岸的地形資訊，再用 GOPRO 的水下影像進行輔助，以進行局部的精細重建，實現跨平台的數據融合，生成較精確且完整的三維環境模型，這對於海洋科學研究、資源勘探以及環境監測等領域皆具重大的應用潛力。

《關鍵詞》：三維建模、無人機(UAV)、跨平台數據融合、Auditory SLAM、GOPRO
水下影像

第一章 前言

第一節 研究緣起

本研究旨在整合 Auditory SLAM 技術生成的水下模型與 UAV 生成的海上模型，並加入光學裝置(GOPRO)所提供之淺水與潮間帶影像數據，利用跨域數據融合方法，建立高精度的三維模型。具體內容包括：

一、探索適用於水下、海上、沿岸地區數據的統一建模框架，克服不同環境中感測器(聲學、空拍、光學)的數據結構差異。

二、開發精確的數據融合算法，以結合水下聲學資料、海上影像數據、高解析淺水影像成果，實現跨來源資料拼接。

三、構建完整的三維模型，適用於海洋探測、環境監控及潮間帶研究等相關應用場景。

第二節 問題背景

Auditory SLAM 處理水下聲學數據與無人機高解析度影像的處理皆需大量計算資源來進行特徵提取和匹配，而來自 GOPRO 的多張環繞影像，也將增加資料存儲與三維重建的負擔。多源數據融合與三維模型建構需強大的硬體與高效自動化演算法的支持。方可同時兼顧準確性與效率。整體而言，如何動態選擇主導感測來源（聲學或光學），並根據環境條件決定資料融合策略，是本研究的關鍵挑戰。過去研究中仍缺乏快速且可靠的方法來實現水下、海上與岸邊資料的即時整合與建模處理，本研究目前進度嘗試將聲學設備所生成點雲與 UAV 影像 SFM 所生成點雲進行整合因重疊控制點較少難以進行 ICP 融合為了解決此問題，後續研究計畫將導入中介影像資料來源，例如以 GoPro 拍攝水下影像，並利用 SfM 技術建立水下影像點雲，以作為聲納點雲與空拍影像點雲之間的中介橋梁。這樣不僅可改善三種資料間的幾何連續性，也能為聲納點雲補足缺乏的紋理資訊與空間結構細節，本次計畫所遇到困難：

一、水下環境的複雜性問題:

光線吸收和散射影響了傳統光學相機的表現，使得基於視覺的建模方法(GOPRO+SfM)在深水或混濁水域中的精度下降。但使用 GOPRO 仍可以為清澈水域、潮間帶與岸邊淺水區的影像資料仍可提供局部細節建模的補強支援，彌補聲學建模解析度較低之缺點。

二、水下環境不穩定:

水流、懸浮顆粒和不穩定的環境條件導致聲學數據出現雜訊將影響聲學類 Auditory SLAM 的精確性。同時，水下聲學數據和海上影像、GOPRO 光學資料之間因感測原理、資料格式、解析度、時間同步性上存在顯著差異，導致跨域資料之整合遇到尺度不一致與配準困難。

三、水下環境的動態:

波浪、海洋生物移動和船隻干擾也提高了建模的時間穩定性需求，其中 GOPRO 受水流與光線干擾影響較大，因此必須針對拍攝時機（如退潮、順光、靜水狀態）進行最佳化選擇與影像濾波處理。

第三節 研究目的及研究重點

本研究目前欲使用融合 Auditory SLAM 技術所建立之海底三維模型，與利用 UAV 與 GoPro 所取得之水面與潮間帶區域影像資料，進行高精度三維模型建置與點雲配準。Auditory SLAM 系統透過水下聲學資料進行自主定位與環境建模，可有效重建複雜地形的海底結構。然而，受限於聲波傳播特性與環境干擾，海底模型常存在定位誤差或區域缺漏。為補足水下模型於水面與近岸區域的資訊，本研究同步採集 UAV 航拍影像與 GoPro 潛拍資料，透過 Structure-from-Motion (SfM) 與 Multi-View Stereo (MVS) 技術生成水面及岸際區域的密集點雲。接著，應用特徵配準方法（如 ICP 與 RANSAC）進行海底與水面點雲的空間對齊與融合，形成一體化、高完整度的三維場景模型。

水下三維模型建置自聲學測繪到光學 SfM，長期被深入研究。Palomer 等以多波束

聲納結合機率式配準完成水下 SLAM，奠定大範圍地形建模的穩健基礎[1]。Nocerino 等在跨水面情境提出兩法：於水線佈設編碼標靶做獨立模型調整，或以同步水上／水下相機取得相對定向，於半淹沒案例達厘米級精度[2]。Benjamin 等人則將考古應用的實作經驗，討論在理想淺水清澈條件下可用「空拍穿水」與水下資料整合；規劃「水上影像佈局＋水下採集」的交界帶重疊[3]。綜上可見，「水上×水下」整合已有成熟路徑。

而本實作的拍攝手法是參考 Karaki 等在 2025 年所提出之論點，為解決水面交界處缺乏共視特徵、導致水上與水下模型難以拼接的問題所提出之以時間同步與視域連結為核心的整合流程，先以 UAV 取得水面以上的高精度影像與正射成果，再藉由同步時間戳與在空拍影像中可辨識的水面載台／潛水者軌跡，將水下相機（如 GoPro）的外方位參數轉換到 UAV 的同一座標框架中。此法避免在潮間帶架設跨水線標靶或依賴水下 GNSS，特別適合作業受限或標靶難固定的近岸環境。

第四節 現況分析

為實現跨環境三維建模之整合與精確度提升，本研究以融合 Auditory SLAM、GoPro 海底模型與 UAV 海上模型為核心，透過多感測資料融合技術，建構兼具水上與水下場景的高解析三維模型。考量現地環境變動劇烈、水質與光源不一等挑戰，研究採用多源資料（聲學、光學、影像）整合方式，並透過 GoPro 裝置輔助淺水區與潮間帶影像補全，彌補 UAV 空拍與聲學探測於近岸區域的盲點。

為確保模型輸入資料的時空一致性與品質，本計畫設計了一套標準化之外出實作流程，涵蓋事前飛行準備、現場影像採集與資料整併等階段。流程依據潮汐條件區分拍攝策略，滿潮時進行 GoPro 水下攝影與 UAV 空拍，乾潮則僅進行空拍影像蒐集。所有資料皆即時標記、整合處理，作為後續 SfM 重建與 Auditory SLAM 融合建模之基礎。以下為本研究所採用之外出拍攝與資料蒐集流程圖，作為現地操作與系統建構之標準作業參考。本計畫之外出實作流程圖如下圖 1。

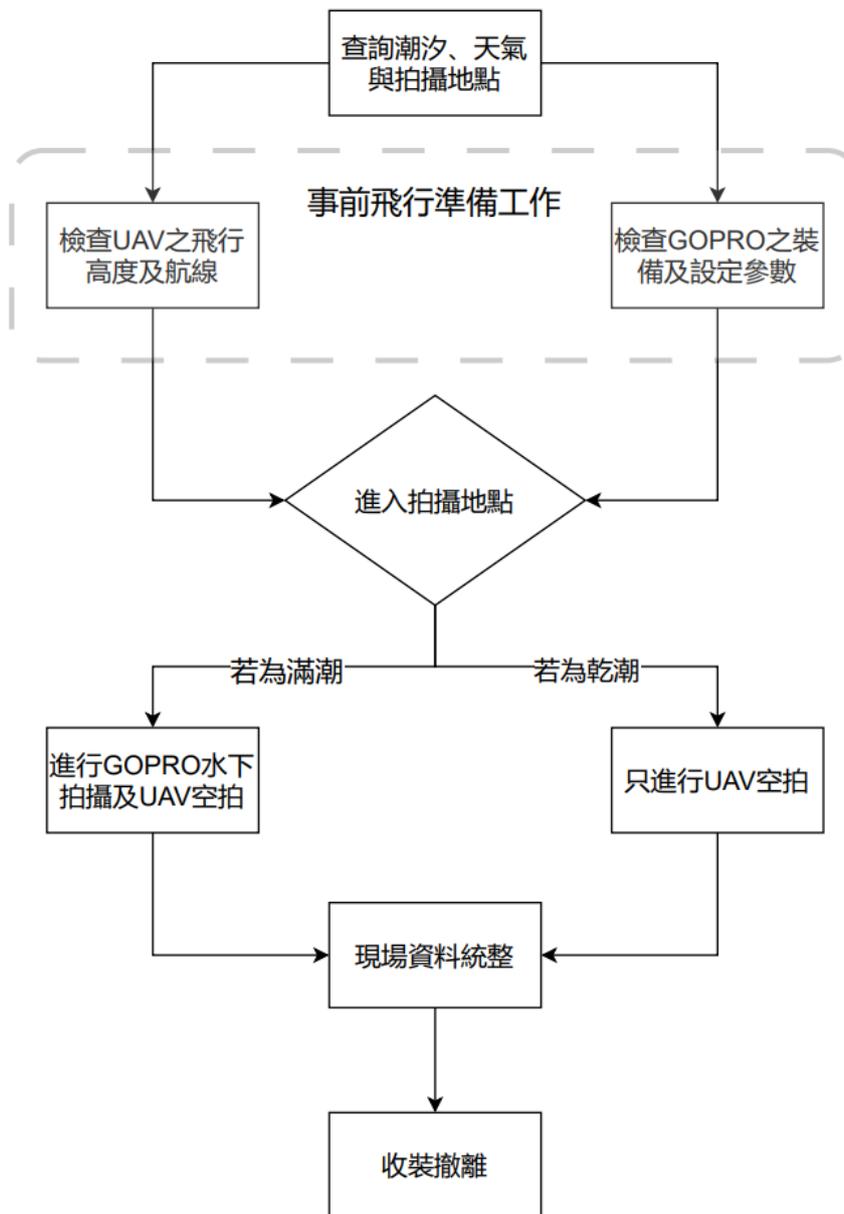


圖 1 外出實作流程圖

第五節 研究目的及研究重點

為因應複雜多變的海洋環境及其對三維建模技術所提出的新挑戰，本研究致力於發展一套能夠整合水下、海上與淺水近岸數據的跨感測平台建模系統。隨著聲學技術（如 Auditory SLAM）、空拍技術（UAV）以及光學影像裝置（如 GoPro）等多樣化感測設備的普及與成熟，如何有效融合來自不同來源、尺度與性質的資料，建立高精度

且具實用性的三維模型，已成為海洋探測、環境監控與地形重建中一項關鍵課題。

為此，本研究規劃以下四項目標，分別從架構設計、模型品質、資料融合與實地應用等面向切入，以建立一套涵蓋聲學、光學與影像數據的完整建模流程。

一、建立統一的跨環境三維建模框架

開發能整合水下與海上環境數據的三維建模技術，實現 Auditory、UAV 以及 GOPRO 模型的高效融合。架構適用於不同感測器數據的標準化處理流程，其中涵蓋聲學、光學和影像數據的前處理與統一格式轉換，以克服數據類型和尺度的差異。

二、提升三維模型的精確性與完整性

透過改進資料融合演算法，實現水下聲學數據 (Auditory SLAM)、海上影像數據 (UAV)、淺水區域的高解析度光學圖像 (GOPRO) 之間的無縫拼接，生成細節豐富且高度準確的三維模型。且 GOPRO 所拍攝之淺水區與潮間帶場景，將補足 UAV 模型再近距區域的盲點，同時補償因動態環境條件（如水流、波浪或噪聲）對建模過程的影響，以提升模型的穩定性。

三、開發高效的數據融合與處理方法

針對多源數據的特性，開發自適應資料融合與加權處理技術，支援動態選擇光學或聲學數據做為主導建模來源，確保不同來源數據的準確整合與運算效率。同時針對 GOPRO 影像的特徵特性與 SfM/MVS 相容性開發自動化處理流程，減少建模過程中的資源計算與手動干預的時間，實現大規模與局部兼顧的高效建模。

四、驗證模型在真實場景中的適用性

在多樣化的水下與海上場景中進行建模測試，驗證三種模型之穩定度與重建完整度，評估其在不同環境條件下之表現。其中探討的面向包括水質清澈度、浪況、潮差等，同時規劃實地應用案例分析（如潮間帶監測、海底地形測繪、災害變異觀測等），以突顯 GOPRO 在局部解析度提升與現地部署彈性上的實際應用價值。

綜合而言，本研究擬透過架構化的跨域建模設計與高效資料融合策略，建構一套適用於水下、海上及沿岸場景之三維重建系統。透過 Auditory SLAM、UAV 與 GoPro 等異質感測來源的整合，不僅提升模型的空間解析度與建模完整性，亦增強系統對於動態與複雜環境條件的適應能力。此外，研究亦著重於減少重建過程中的資源耗用與手動干預，提高建模效率與應用彈性。預期本研究成果將能為海洋探測、災害應對與環境監測等應用場域提供具實務價值之技術支援與建模解決方案。

第六節 預期目標

此點雲配準與整合技術可提升模型跨介面一致性，並為後續進行地形變遷監測、水下設施檢測或環境模擬分析等應用提供完整基礎。最終目標為建立一套可支援海陸整合、跨感測器資料融合之三維建模工作流程，可望在未來對不管是軍事用佈雷選址、海岸治理決策、沿岸地形監測、珊瑚礁/水下資產維運，以及離岸工程與環境模擬提供高時空解析、可重複且標準化的三維底圖與流程支援。

第二章 研究方法及過程

為因應潮間帶與岩岸環境於水文變化下之監測建模需求，本研究建構一套結合水上與水下影像資料來源的三維建模與點雲配準流程。相較於傳統仰賴單一來源建模技術，於複雜海岸環境下易受浪況、視角遮蔽與感測限制影響，本流程整合多平台感測器，包括無人飛行載具（UAV）、消費型光學裝置（GoPro）與水下影像拍攝，以擷取不同潮位下之岸際地形資訊，進而建構具有空間連續性與多尺度精度的三維地形模型。

本流程採用結構光建模技術（Structure from Motion, SfM）進行特徵點重建與稀疏點雲生成，並透過密集重建（Dense Reconstruction）取得高密度地形資訊。資料來源經分類處理後，分別生成水上與水下模型，後續再透過特徵點初對齊（FPFH + RANSAC）與迭代最近點法（ICP）進行精準配準，完成跨平台資料之整合建模。此外，針對點雲資料亦納入裁切、降密與格式轉換等後處理步驟，以支援後續可視化應用與環境分析作業。

本研究所擬定之點雲建模與配準流程如圖所示，涵蓋拍攝計畫、資料整理、建模重建、模型配準與輸出應用等階段，期能提供一套適用於潮間帶、岩岸環境之完整建模技術架構，如下圖 3-1。

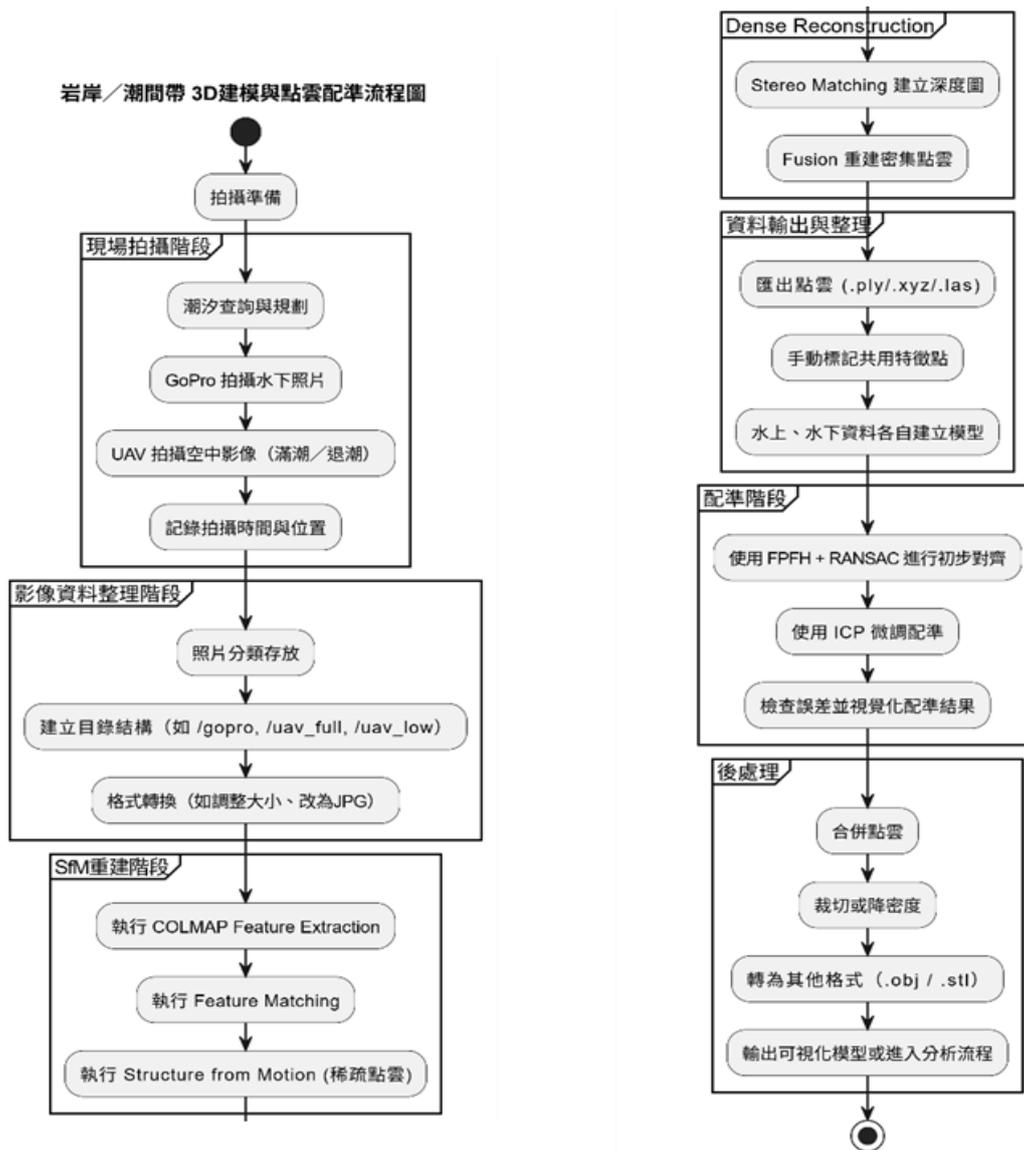


圖 2 研究流程圖

第一節 使用軟體

一、SLAM

建置未知環境的地圖並定位機器人的位置是移動机器人的主要任務。許多研究集中在如何表示環境和机器人位置的問題上。SLAM 算法是机器人领域中針對未知環境的地圖構建和机器人定位的最廣泛研究的主題之一。隨著先進傳感器的快速改進，SLAM 算法在現實生活中的應用越來越廣泛。

SLAM 需要解決的問題包含了隨著机器人在環境中移動，估計机器人的軌跡和環

境地圖。由於傳感器測量中固有的雜訊，SLAM 問題通常使用概率工具來描述。假設機器人立處在未知環境中進行移動，其軌跡由隨機變量序列 $x_{1:T} = \{x_1, \dots, x_T\}$ 述。在移動過程中，機器人獲取了一系列的里程計 (Odometry) 測量 $z_{1:T} = \{z_1, \dots, z_T\}$ 完整的 SLAM 問題包括估計機器人軌跡 $x_{1:T}$ 和環境地圖 m 的後驗概率，這是基於所有測量值加上初始位置 x_0 [4]。可表示為式 二-1。

$p(\mathbf{x}_{1:T}, \mathbf{m} \mid \mathbf{z}_{1:T}, \mathbf{u}_{1:T}, \mathbf{x}_0).$	式 二-1
--	-------

- P 表示概率分佈
- $x_{1:T}$ 表示從時間 1 到 T 的機器人位置序列
- m 表示環境地圖
- $z_{1:T}$ 表示從時間 1 到 T 的感知測量序列
- x_0 表示初始位置

二、Auditory SLAM

聽覺 SLAM 是一種利用聽覺感知資訊進行的 SLAM 技術。與傳統的視覺或深度傳感器不同，聽覺 SLAM 使用聽覺感知來探測和分析周圍環境的聲音資訊，以實現導航和定位。Peng 等人透過從麥克風的播放器發出專門設計的聲音訊號來估計兩個非同步麥克風的位置[5]。Pertila 等人開發了一種在不使用特殊聲音訊號的情況下估計每個具有麥克風和揚聲器的設備的位置和方向的方法[6]。Choi 等人所提出的聲納特徵檢測方法[7]，為 SLAM 演算法提供了良好的特徵檢測。使用特徵檢測演算法，可以從聲納傳感器資料中穩定獲得點特徵和線特徵。使用了 TBF(Time-Based Filter)方案以及三個額外的過程，包含穩定的交點檢測、高效的滑動窗口更新和移除牆面上的虛假點特徵。提出的點特徵檢測對於聲納數據的範圍誤差具有很好的穩健性。此外，相較於原始的 TBF 算法，成功檢測到的特徵能夠維持更多步驟，因此，這些點特徵可以很好地用於基於 EKF 的 SLAM 中。

聲音導航與測距（Sound Navigation and Ranging, SONAR）是一種利用聲波傳播特性，透過電氣設備來完成水下探測與通信任務的技術。在水中，聲音的傳播速度主要受溫度的影響。聲波可用來計算飛行時間，以測量傳感器與海床或物體之間的距離。目前，聲納已成為商船、漁船及軍艦等不可或缺的設備。聲納可分為主動式和被動式兩種類型。主動式聲納會發射聲波並接收回波來探測目標，而被動式聲納則僅接收來自周圍物體的聲波。主動式聲納可用於探測水雷、發出噪音或進行水下探險；而被動式聲納廣泛應用於潛艇探測。以下介紹常見聲納傳感器

（一）前視聲納

前視聲納是一種專門設計用於水下探測的聲納技術，其工作原理是利用聲波的傳播特性，通過發射聲波並接收反射波來獲取目標物體的位置和形狀。在水下環境中，聲波的傳播能夠穿透水體，與傳統的側掃聲納不同，前視聲納的主要功能是向前方發射聲波，這樣能夠提供目標物體在前方的實時圖像或點雲資料。

（二）側掃聲納

側掃聲納由四個部分組成：接收來自全球定位系統（GPS）的定位資訊的導航系統、包含聲波發射器和接收器的 tow fish、將聲納回波信號數字化、記錄數據並接收定位數據的中央計算機，最後是將控制命令發送到拖曳魚並將回波信號返回到計算機的控制單元。此外，數據處理軟體可用於即時顯示水下影像。

（三）多波束回聲測深儀(Acoustic Lens-based Multibeam Sonar, ALMS)

多波束回聲測深儀實際上是多個聲納設備的組合，發射多個扇形聲波。它能一次捕獲數百個深度掃描，形成完全覆蓋的水深帶，並繪製海底的高精度地圖。該回聲測深儀大大提高了海底地形探測的效率。此外，它還可以根據聲波反射回來的回聲強度對不同材料的海床基質進行分類。它在海洋資源勘探、天然氣水合物探測及其他類型的大範圍勘查中具有廣泛應用。

三、UAV-SfM

UAV-SfM 已成為近岸與地形監測的主流工具，能以低成本取得公分級三維模型與正射成果，並可透過控制點或 RTK/PPK 提升絕對精度。本研究採用多旋翼 UAV，規劃高重疊與交叉航向的飛行模式，以 Agisoft Metashape 進行對齊、相機校正、密集重建與品質控管等工作，如 Zhang 等系統檢驗穿水 SfM 的折射效應，指出水深與透明度會引入深度偏差。結合簡化折射修正並以乾區控制點約束，可明顯降低系統誤差、提升與測深資料的一致性，並提供近岸實務作業的配置建議[8]；Jaud 等以雙 GoPro + Agisoft Metashape 示範低成本流程，透過相機分組標定、嚴謹對齊與深度濾波，生成高解析水下點雲[9]

為大範圍觀測實驗區域之地上環境，本研究擬用無人航空載具搭配可見光之感測器對實驗區域拍攝影像以作數位表面模型(Digital Surface Model)建置，主要是透過多張重疊影像，偵測特徵點並進行匹配，藉此快速建立三維空間資訊產生立體模型，其流程如下圖 4-7。

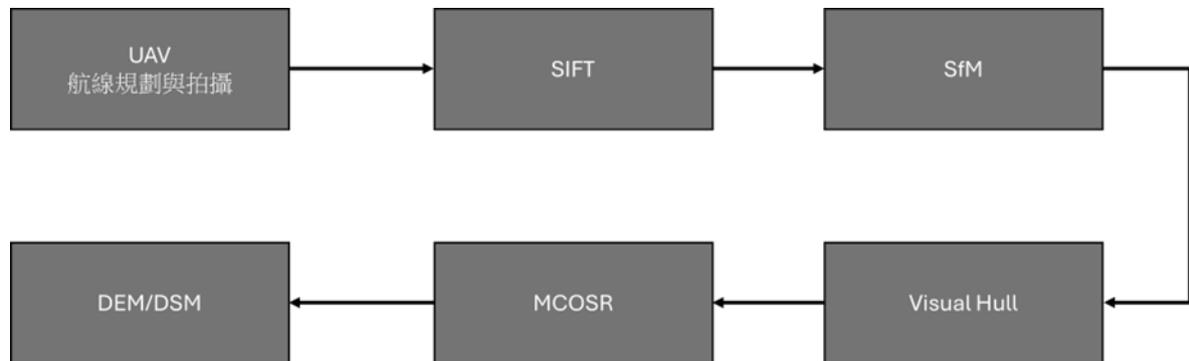


圖 3 UAV 建置三維模型流程

四、Agisoft

本研究擬使用三維數據處理軟體 Agisoft Metashape 以協助相關點雲數據之處理。Agisoft Metashape 是基於 SFM 技術的影像處理軟體，能將多張 2D 照片轉化為高精度的 3D 模型。它支援自動對齊照片、生成高密度點雲、紋理映射、數位高程模型和正射影像，適合地形測量、建築、環境監測等應用。Agisoft Metashape 為商業軟體，適合不同研究人員或單位使用，其操作流程如下：

- (一) 輸入空拍影像數據：將空拍影像匯入至軟體
- (二) 影像對齊：軟體會嘗試搜尋影像數據間重疊的匹配點，並計算相機每張照片中
之位置，以建構稀疏點雲模型
- (三) 設定控制點：作為精度評估之依據
- (四) 建置密集點雲：利用先前影像預先偵測的匹配點，計算與推估可能適合之對應
點位
- (五) 建置網格：基於密集點雲建置網格，以生成初步模型
- (六) 紋理填充：為模型適當填充對應之紋理，以提高模型視覺化效果
- (七) 建置平鋪模型：建置可供垂直觀測之模型
- (八) 建立數值高程模型：建置類似地形圖之模型，可匯出不同資料格式供後續分析
應用
- (九) 建置正射影像：疊合每張影像以輸出至完整正射影像

第二節 研究地點

一、高科大校內

本實作的第一個練習場域選在本校土木系系館門口，其原因為系館前廣場具備規模適中的開放空間與可控的人車動線，並兼具多樣且清晰的幾何元素（平坦柏油、地面標線、路緣與階梯），紋理對比明確、邊界分明，適合進行 SfM/MVS 特徵擷取與點雲重建，場域緊鄰實驗室，供電與網路便利、器材調度與重複拍攝成本低，可在不同光照與參數（FOV/重疊率、曝光、白平衡等）下高頻迭代流程，形成進入水域情境前的基線資料集。相較港區或開放海域，校園環境安全且較易取得拍攝許可與臨時管制，能有效降低風、雨、潮汐與人為干擾帶來的不確定性；因此綜合可控性、可重複性與驗證便利性，故系館門口作為首個練習場域可支撐後續海陸整合建模流程的建立與優化。

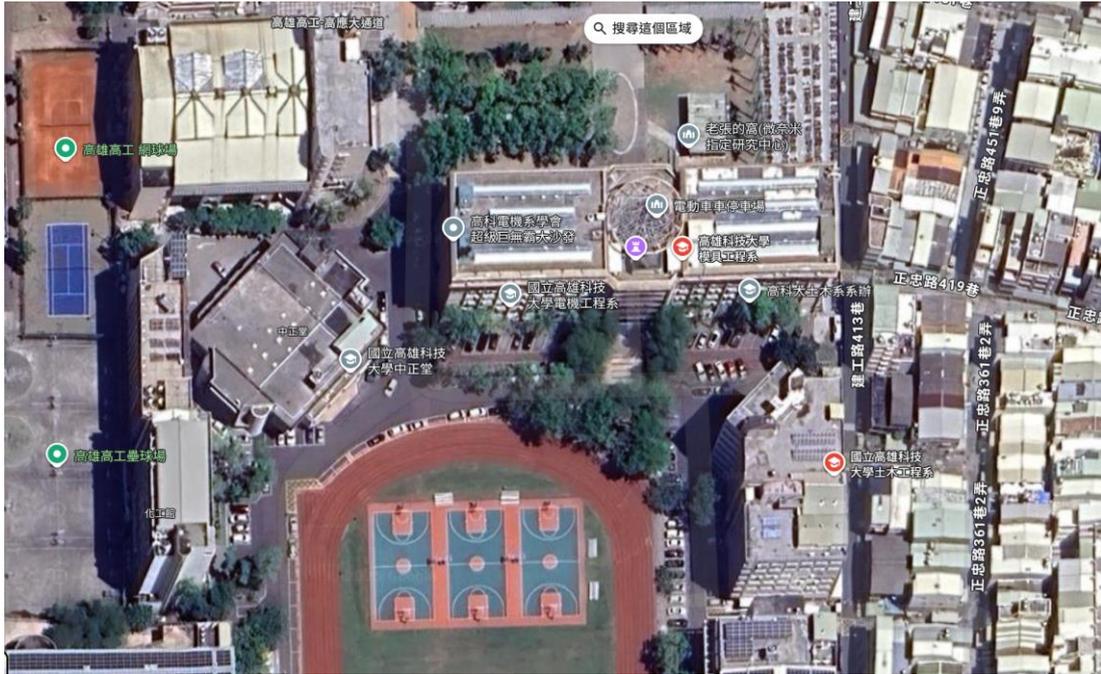


圖 4 第一練習區域：土木館前空地（資料來源：Google Map）

二、高科大游泳池

本實作的第二個練習場域選在高科大游泳池，其原因為泳池具備水深可控、能見度高、流速極慢等條件，可作為進入開放水域前的低風險驗證場。池底方格磚與池壁直線等規則幾何與高對比紋理，有利於 SfM/MVS 特徵擷取與重建品質評估，亦便於布設比例尺、標靶與控制點以完成相機內外參與尺度校正。本階段將先以自購之小玩具進行試拍，系統化測試 FOV 線性/窄鏡頭(Linear/Narrow)、固定白平衡/曝光、影片固定影像擷取速率與折射補償對成像與建模之影響，建立標準作業參數與品質指標。場域鄰近實驗室、申請與管制作業簡便，器材調度與重複試驗成本低、可重現性高，可快速迭代流程與比較不同設備表現。綜合安全性、可控性與驗證效率等優勢，故優先選擇游泳池作為第二個練習場域；待池內成像與模型表現達標後，再移轉至萬里桐進行實地驗證與海陸模型融合測試。



圖 5 第二練習區域：高科大游泳池（資料來源：Google Map）

三、萬里桐

本實作的第三個實作場域選在屏東萬里桐，其原因為萬里桐擁有高雄市區海岸線難見的珊瑚礁台地、礁岩與沙灘交錯之沿岸結構，從潮間帶、礁台、礁緣到外緣斜坡形成連續的近岸—淺海梯度，可提供由岸際至水下的完整紋理與高差資訊，極適合進行跨環境的三維模型融合測試；且萬里桐水質清澈、能見度佳，在非極端海況下浪流相對溫和，便於以 GoPro 與 UAV 分別進行光學建模，兩者資料可互補以降低誤差；又因其為常見的岸潛教學與練習場域，岸上出入口與水下路線明確、定點回測與重複航線規劃較為友善，現場操作風險與後勤負擔可控。由此可知，萬里桐與前述的港灣環境（如安平港）在地形尺度、底質材質與人為構造上差異明顯，能有效補足資料多樣性並驗證演算法的泛化能力，特別適合比較天然礁岩紋理與人工幾何邊界下之特徵提取、配準與跨模態融合表現，因此在綜合安全性、可操作性與研究價值後，最終選擇萬里桐作為第三個實作場域。

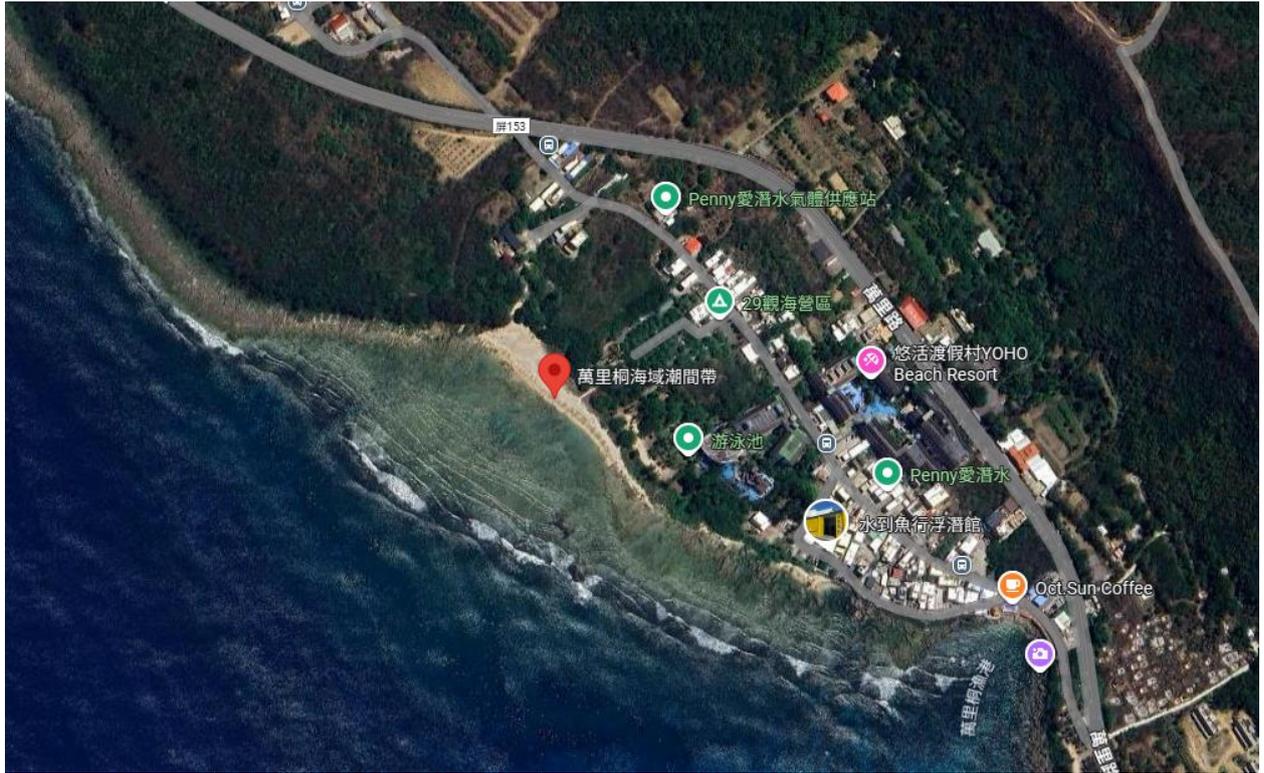


圖 6 實驗區域：屏東萬里桐沿岸（資料來源：Google Map）

第三節 研究硬體設備

一、GoPro

本計畫所使用之水下及潮間帶區域光學攝影設備為 GoPro HERO 系列運動攝影機，具備輕巧、耐水、高解析度等特性，適用於潮間帶與清澈淺水環境中的近距離三維建模作業。其機體重量約為 153 克，支援防水深度達 10 米（搭配防水殼可達更深），影像解析度可達 5472×3648（5.3K 影片或 1800 萬畫素靜態照片），視角範圍可達 149° 超廣角，內建穩定功能並具多種拍攝模式。該設備適用於攝氏 -10°C 至 35°C 操作環境，並支援縮時、連拍與環繞攝影功能，有利於建立具有足夠視角差的影像資料集。

為從 GoPro 拍攝之多角度影像中萃取特徵點並重建三維模型，本研究將使用運動推斷結構（Structure from Motion, SfM）技術，結合尺度不變特徵轉換演算法（Scale-Invariant Feature Transform, SIFT）進行特徵點檢測與匹配。

SIFT 演算法透過多層金字塔影像處理架構，有效降低高解析圖像之計算成本，並穩定偵測在不同角度與尺度下之特徵點。其演算流程分為六大步驟：(一) 建立尺度空間：對原始影像生成不同解析度版本，以提升多尺度特徵檢出能力；(二) 高斯濾波：於每一尺度下進行模糊處理，降低雜訊干擾；(三) 計算高斯差分 (DoG) 影像：提取不同解析度間的邊緣與角點變化；(四) 特徵點篩選：去除低對比度與不穩定特徵，以保留有效匹配區域；(五) 特徵點方向分配：根據梯度資訊為每個特徵點指定主方向，提高旋轉不變性；(六) 特徵描述子建立：在主方向範圍內擷取鄰域資訊，形成具代表性的 128 維特徵向量。

SfM 為一種以多視角影像建構稀疏三維模型之方法，適用於小型場域之逐步建模。在本研究中，將使用 GoPro 拍攝潮間帶岩岸或淺水區域之多張照片，搭配 SIFT 技術進行特徵點檢測。這些特徵點通常分布於局部幾何顯著之位置（如岩面凹凸、裂縫邊緣或礁岩縫隙）。完成特徵匹配後，進行相機姿態估算與場景三維點雲重建。

相機姿態估算部分，根據已配對之特徵點對建立基本矩陣與本質矩陣，以解算相機在場景中的相對位置與姿態變化；三維點雲重建部分，則利用相機位置與對應特徵點三角測量其空間位置，逐步生成場景稀疏點雲結構。所產生之點雲將用於後續密集重建 (MVS) 與地形模型輸出。

由於 GoPro 所獲取之影像易受水流干擾與光折射影響，拍攝時需選擇能見度良好、低浪或退潮狀況，並透過視角控制與後處理手段（如濾波與穩定化）以提高模型精度。本研究亦將分析不同水質與光源條件下 SfM 成效之差異，並比較其與 UAV 資料在建模解析度與穩定性上的互補性。

表 1 GoPro HERO 13 詳細規格

圖片		
型號		GoPro HERO13 Black 相機
售價		-
感光元件	感應器	1/1.9 吋 CMOS 感測器
	像素	27MP (2760 萬像素)
	解析度	- 5.3K @ 60fps - 4K @ 120fps - 2.7K @ 240fps
	FOV	最大可達 156°
鏡頭	焦距	12-39 mm，可調整
規格	螢幕	前置 1.4 吋彩色顯示屏 後置 2.27 吋觸控式螢幕
	防水性能	裸機 10m 加裝防水殼後可達 60m
	影像穩定技術	HyperSmooth 6.0 電子防震技術
	電池容量	1080p @ 30fps 可用 100-105 分鐘 4K @ 60fps 可用 75-80 分鐘 5.3K @ 60fps 可用 60-65 分鐘
	尺寸及重量	71.8 x 50.8 x 33.6 mm，154 克

在經過實作後發現，GoPro 在進行建模作業時，其最佳參數設定值為 Linear 或 Narrow，而非 Wide 或 SuperView，其比較表如下：

表 2 GoPro 影片模式 (FOV) 比較表

項目	Wide 及 SuperView	Linear 及 Narrow
相對視角	寬	窄
幾何失真	桶狀變形較明顯	去中心化後較不明顯
覆蓋面積	較大	較小
後處理 (SfM/MVS) 難度	較難	較易
水下建模表現	較差	較好

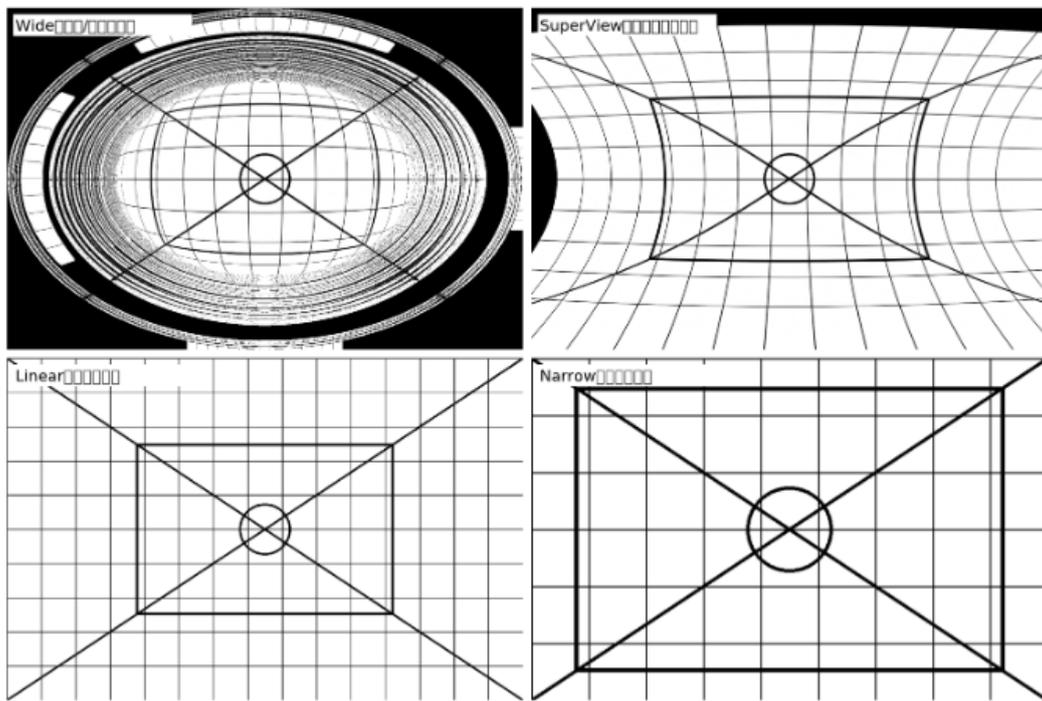


圖 7 GoPro 各拍攝模式效果圖

在開啟 Hypersmooth (防震動模式) 後，HyperSmooth 會依照陀螺儀資料對影像做動態扭曲與數位裁切。對 SfM 來說，畫面不再是「固定相機模型」的投影，而是每幀都略有不同的非剛性變形，此情況也會間接導致特徵點相對位置不穩，匹配率下降。且 HyperSmooth 為了穩定畫面會自動裁切、縮放，等效焦距/主點位置在幀與幀之間改變，但這些變化不會寫進相機內參，導致求解困難。也會與水平鎖定/鏡頭修正疊加：若同時開啟水平鎖定或魚眼修正，畫面幾何變動更大，配準更不穩。

將白平衡設定為 native 是為了避免逐幀色溫飄移，自動白平衡會連續改變 RGB 增

益，造成相鄰影像色調/亮度不連續，影響特徵匹配與密集重建的相似度量（NCC、ZNCC）。且水下特別容易導致自動白平衡（AWB）不穩定、來回擺動，紅光吸收、濁度與背散射讓 AWB 反覆修正；Native 讓相機少介入，整段色彩一致，後製再一次性校色。更可保留更可預測的色域與動態，Native 相當於最少處理的感測器色彩回應（非鮮豔調教），利於批次色彩校正與多次重測前後的一致性。

理想情況下，為了保留較大的垂直視角並降低重疊率敏感度，會優先選 4:3（或 8:7）。但在本次實作中，HERO 13 的 2.7K 4:3 檔位僅提供 120 fps，高幀率造成單張畫質受壓縮；而 8:7 在 GoPro 多為 Wide/HyperView，需以魚眼模型處理、畸變較重。為了保留 Linear 的低畸變幾何並取得 4K 解析度 + 30/60 fps 的穩定畫質，本次改用 16:9 + Linear。

二、UAV

本計畫使用之設備如研究設備規格如下表 4-3，無人飛行載具為 DJI 研發之 Mavic 2 Pro，用於拍攝空中影像建立全局點雲地圖，其飛行器之重量為 907 克，軸距 354mm，最大上升與下降速度分別為 5m/s 與 3m/s，GPS 垂直與水平懸停精度分別為 $\pm 0.5\text{m}$ 與 $\pm 1.5\text{m}$ ，在無風環境下之最大水平飛行速度為 72 公里/小時，而最大起飛海拔高度為 6000 米，適用於 0°C 至 40°C 的作業環境，最大飛行時間約 31 分鐘，其感測器解析度為 5472×3648 ，可視角為 77° ，焦距為 28mm。

表 3 UAV 可見光感測器詳細規格

圖片		
型號		DJI Mavic 2 Pro 相機
售價		-
感光元件	感應器	1" CMOS
	像素	2000 萬
	解析度	5472×3648
	FOV	77°
鏡頭	焦距	28 mm

為從空拍影像中萃取特徵建立實驗區域之 DSM 模型，本研究將使用運動推斷結構 (Structure from motion, SFM) 之技術以完成上述工作。為從多張空拍影像中找出各影像中之特徵點作匹配，本研究擬用尺度不變特徵轉換演算法 (Scale-invariant feature transform, SIFT) 協助。

在 SIFT 演算法中，主要利用金字塔分層之方式將把計算量較大的運算在初期步驟完成，以降低計算量方便後續之演算。此方法在資訊量較大的影像中具有能有效且均勻地提取大量特徵點，並提供足夠的資訊供後續完成物件匹配與識別的工作其操作流程可分為 6 個步驟，(一) 建立尺度空間，建立一組具有不同解析度的影像，以便在不同尺度上找到特徵點；(二) 進行高斯濾波，對影像在不同尺度下進行高斯模糊，以減少影像中的噪聲，使特徵點更容易識別；(三) 灰階影像進行卷積運算，計算不同解析度之間的差異，進行高斯差分卷積運算，以強化影像中的特徵邊緣和角點，便於後續特徵點的檢測；(四) 篩選特徵點，消除對比度較低或位置不穩定的特徵點，如邊緣點或雜訊，以保留穩定的特徵點；(五) 決定特徵點方向，根據特徵點周圍的梯度方向與大小，為每個特徵點分配一個主方向，以確保特徵點的方向不變性；(六) 特徵點描述，在特徵點之

主方向附近，計算其周圍區域的梯度方向與強度，以生成一個特徵描述子。

而 SFM 是一種由多視角影像中重建三維模型之遙測技術，尤其適用於從多張影像生成三維模型，如圖 4-8 所示。SFM 之重點為同時估算影像之相機參數(位置和姿態)與周圍場景之三維空間資訊(點雲)。首先，會從多張空拍影像中利用 SIFT 進行特徵點檢測，一般而言，這些特徵點為具有局部顯著性之區域，如邊緣或角落等，後續則會對檢測到的特徵點進行匹配，隨後基於匹配成功的特徵點進行相機姿態之估算與周圍環境之重建。前者主要利用匹配成功之特徵點對計算影像之間的基本矩陣，以描述影像間的相對位置和視角，若影像具備內部參數(相機內部參數矩陣)，則可計算本質矩陣，作為相對姿態估計的基礎。最後基於上述矩陣，演算影像的相對位置和旋轉角度，以逐步確定相機在場景中之三維位置；後者則基於每對影像的相機姿態與匹配特徵點對，計算每個匹配點之三維座標，而這些三維座標即形成稀疏點雲，以重建周圍場景的基本三維空間。

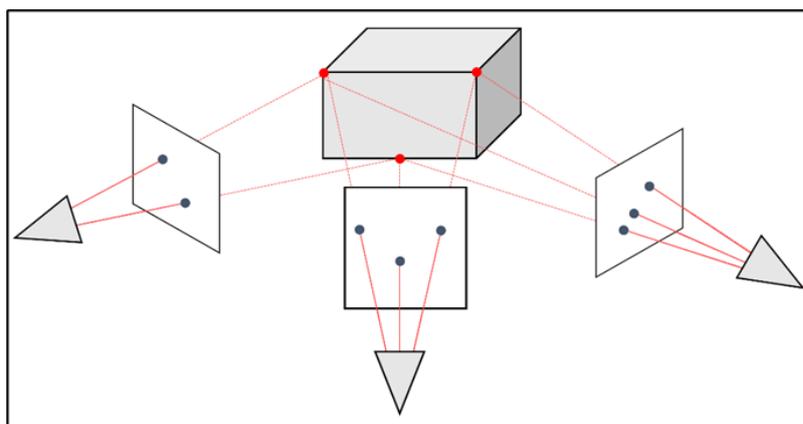


圖 8 SFM 特徵點計算示意圖

第四節 影像預處理

GoPro 的錄影參數會直接影響後續以 Agisoft Metashape 進行 SfM/MVS 重建之匹配穩定度與幾何精度。首先，視場與鏡頭模式 (Linear/Wide/SuperView) 決定徑向畸變與邊緣伸展程度；視角越大雖可提升覆蓋，但會加劇高階畸變並增加內方位元素估計難度。其次，電子防手震 (HyperSmooth) 涉及逐幀重採樣與裁切，會引入非剛體形變，破壞相對幾何，建議關閉。第三，幀率與快門影響運動模糊；移動拍攝宜在 60 fps

搭配 $\geq 1/240$ s 快門以抑制模糊。第四，ISO、位元率/壓縮，以及銳利度與降噪會改變紋理對比：高 ISO 與強降噪易抹除特徵，高銳利化可能產生光暈；應採高位元率、保守銳化並固定白平衡與曝光。上述參數宜在整段拍攝中保持一致，以提升自動校正與光度一致性。



圖 9 陸地試作時單張影像產生之畸變圖

圖 9 顯示廣角拍攝造成的徑向畸變與邊緣伸展。因應此現象，圖 10 在 Metashape 的相機校正改採 Frame/Auto，並將 f 、 c_x 、 c_y 、 k_1-k_4 等內參重置為 0 交由軟體估計，暫不鎖定固定參數與滾動快門補償，以免過度約束。此做法先以陸地資料完成穩定內參、降低重投影誤差，再作為後續水面/水下建模的基準；同時建議拍攝維持一致設定並關閉自動防手震(HyperSmooth)，以提升匹配穩定度。

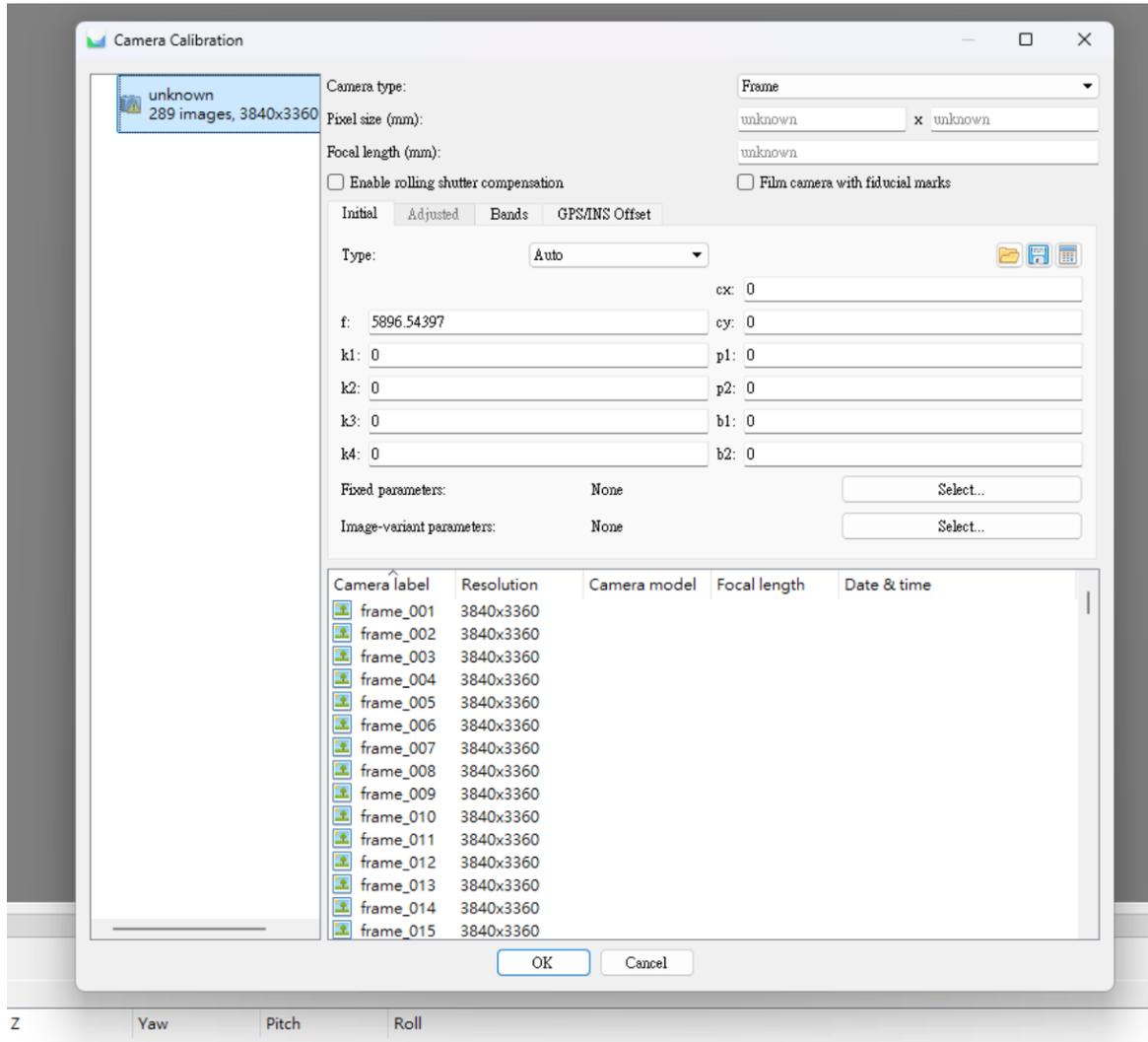


圖 10 Agisoft 初始參數設定圖

本研究於 Metashape 「Camera Calibration」中，初始時對 289 幀（3840×3360）採用 Frame + Auto 模型，如圖 10 在後續第二次試誤會將相機模式(Camera Type)修改為魚眼 (Fisheye)模式；初始將 f, c_x, c_y 與徑向／切向畸變係數 ($k_1- k_4, p_1- p_2, b_1- b_2$) 清零且不鎖定，以避免先驗誤差對自校正造成偏置，並暫不啟用 rolling-shutter 補償以聚焦於透鏡幾何。完成校正後，將以重投影誤差與殘差分佈檢核模型適切性；但因該次實作所採用之畫面比例為 8：7，故影像結果仍然呈現系統性畸變，如圖 9，故改以魚眼模型或部分固定參數再優化。最終內參將於跨場域（陸／水）建模時鎖定，以降低尺度漂移與幾何失真。

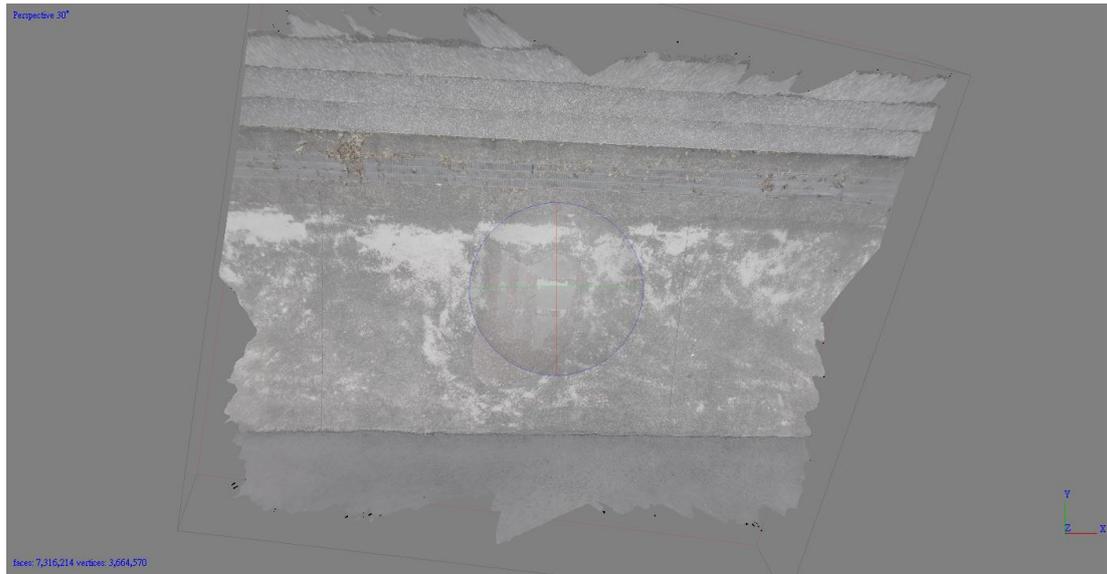


圖 11 Agisoft 之參數調整圖

圖 11 為採用魚眼相機模型並進行內參自校正後之重建成果。相較於以 Frame 模型之初步處理，地面平面性與邊緣幾何一致性明顯改善，圓形標記與階梯紋理連續且可辨，點雲覆蓋度與局部細節亦提升。結果顯示在大視角 GoPro 影像下，魚眼模型能更準確描述徑向畸變，提升特徵匹配穩定度與幾何精度，適合作為後續跨場域配準之內參基準。

第五節 模型建置

一、利用 PyCharm 進行固定影像擷取

本研究於潮間帶以 GoPro 錄影模式進行連續掃描，影格率 60 fps（時間解析度 16.7 ms），沿既定航線等速前進以確保視角覆蓋。回程後在 PyCharm 環境以 Python 撰寫程式，自影片定頻擷取影格（依需要每 20 幀取一張），並剔除模糊與曝光異常影格，且以時間戳命名以保持時序。此流程無須更動原始錄影參數，即可建構具高前向／側向重疊度之影像集，供後續進行 SfM 重建、相機自標定與網格／貼圖生成。

二、使用 Agisoft 進行模型建置

（一）水下點雲

首先將照片匯入 Agisoft，由於資料放置於同資料夾中，因此選擇 Add Folder，如

圖 12，若在未來有針對影像做分類，需要加入特定影像時，才會選擇 Add Photo。

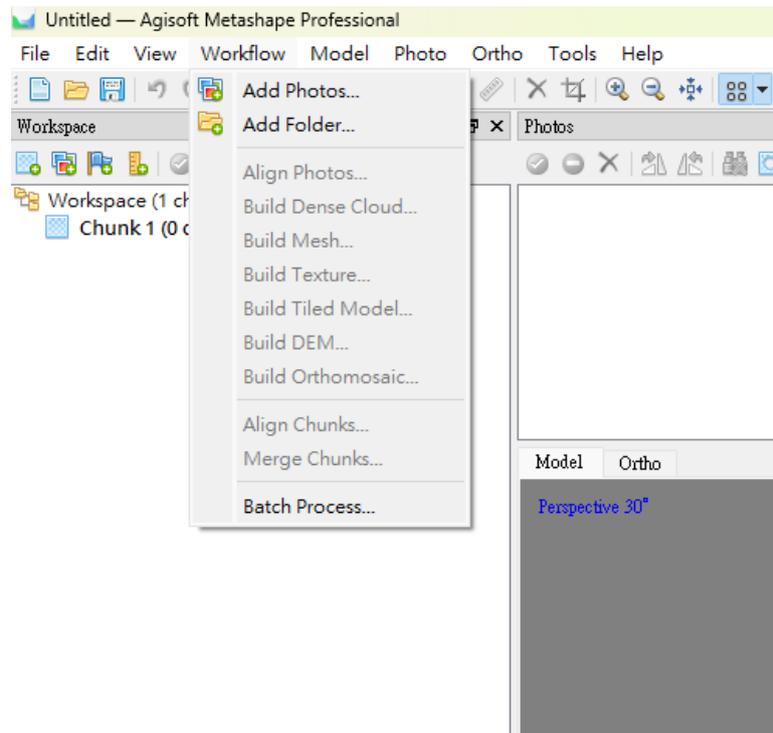


圖 12 選擇 Add Folder 加入照片

Agisoft 的建模模式分為兩種，一種為單相機(Single camera)，另一種為動態場景(Dynamic scene)。本研究選擇「Single cameras」，如下圖 13。此設定假設場景為靜態，適用於 UAV 航拍、GoPro 影片固定影像擷取與一般測量攝影，能有效重建地景、建築、地形與水下物體之三維模型。相對地，動態場景針對隨時間變化之場景（如人員活動、施工或多時相觀測），並依時間片段分組以利時序分析。鑒於本研究所處理之地形與水下環境在拍攝期間近似靜止，故採前者。

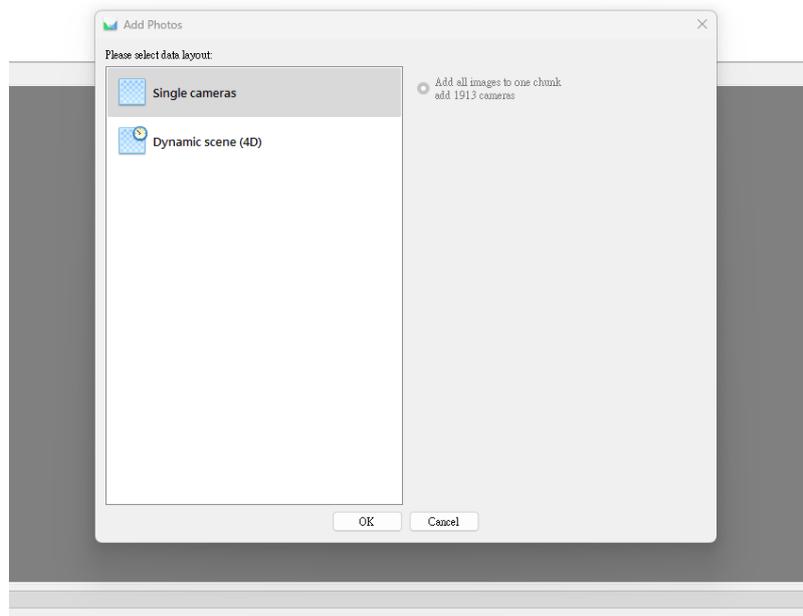


圖 13 選擇 Single camera 加入照片

後續進行照片對齊(Align photos)，這個步驟是重建流程的首要核心步驟，原理為自動估計各影像之相對姿態與初步場景幾何。系統先於各影像偵測具有尺度、旋轉不變性的特徵點並生成描述子，跨影像比對形成連結點(tie points)，經 RANSAC 與非線性最小平方優化(bundle adjustment)剔除離群點並同時解算相機外參與必要內參。其輸出為稀疏點雲與每張照片的相機位置與方向，後續的 Dense Cloud、Mesh 與量測皆以此結果為基礎。

照片對齊前有許多參數需要進行預調整，由於此次實作打算執行精確建模，故選擇 Highest，即為不對影像進行縮圖或任何裁切進行對齊。為了先將影像內容中較為明顯的重疊特徵挑出並進行對位，以減少整體配對的時間及計算量，選擇開啟通用預選(Generic preselection)。Agisoft 的參考預選(Reference preselection)分為三類，如下圖 14。序列式模式(Sequential)依影像時間序與前後 $\pm N$ 張配對，無需 GPS，適合影片固定影像擷取與等間距往返式掃掠航線等連續拍攝；惟跨航線重疊易漏，宜併用通用預選以補強。原始模式(Source)以來源位置 (EXIF GPS / 外部位姿) 預選鄰近影像，定位可靠時可有效處理多航線場景；若誤差較大則可能造成漏配。估計值模式(Estimated)以已估之

相機位姿進行預選，主要用於二次對齊與加速。本研究未提供外部座標，故採用序列式模式。

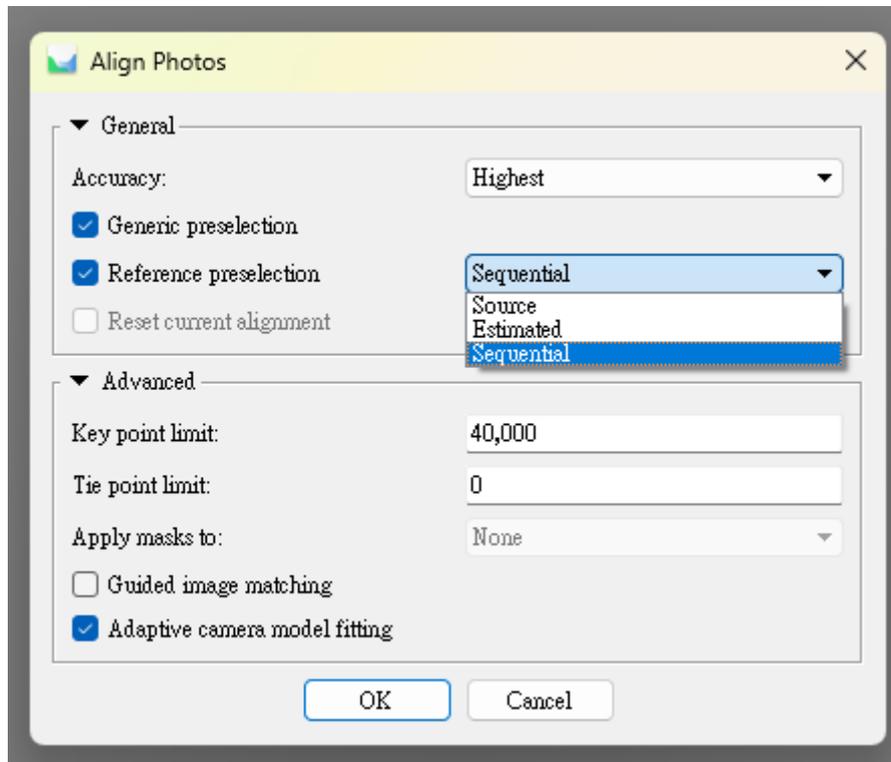


圖 14 Align Photo 前所選擇之參數

而這些參數當中最為重要的所屬關鍵點上限(Key point limit)和連結點上限(Tie point limit)，前者為每張影像最多偵測的特徵點數；後者為稀疏點雲的保留上限。前者越大雖越穩定，但也對設備之要求越高、且相對時間也越長，正常值約在 20000-60000 之間，本次實作選擇較為保守的 40000；而後者越小對資料完整度保留程度越高，但同樣對硬體要求越高，本實作將其全部保留，之後再進行點雲清理。

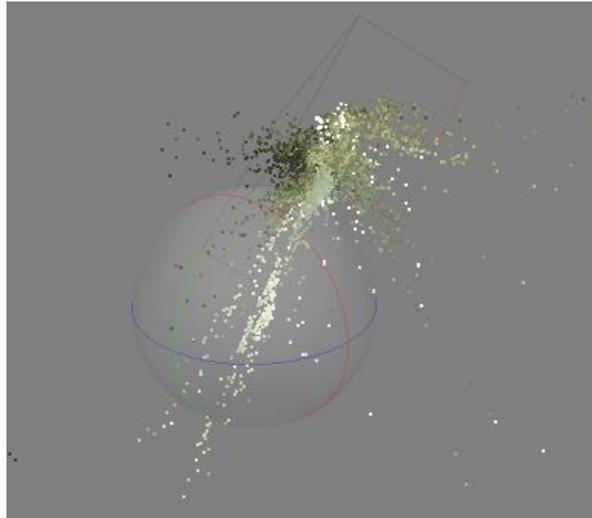


圖 15 未勾選引導式影像匹配之結果

第一次對齊時不會開啟引導式影像匹配(Guided image matching)，如圖 15，通常為第一次配準失敗或結果較為不理想時，讓其利用幾何引導去蒐集更多可配準之特徵點對。而自適應相機模型擬合(daptive camera model fitting)功能會利用演算法自動選擇要優化的鏡頭內參(如：焦距、主點、畸變係數等)，由於 GoPro 屬於廣角鏡頭，故選擇開啟。本實作為比較差異，共進行了兩次影像對齊，第二次之結果明顯優於第一次，如圖 16，由於開了引導式影像匹配，導致其尋找更多的配準機會，最終結果也從 6611 個點提升至 16818 個點，可發現配準點數顯著提升。為使最終結果較為精確，後續統一使用經引導式影像匹配之結果。

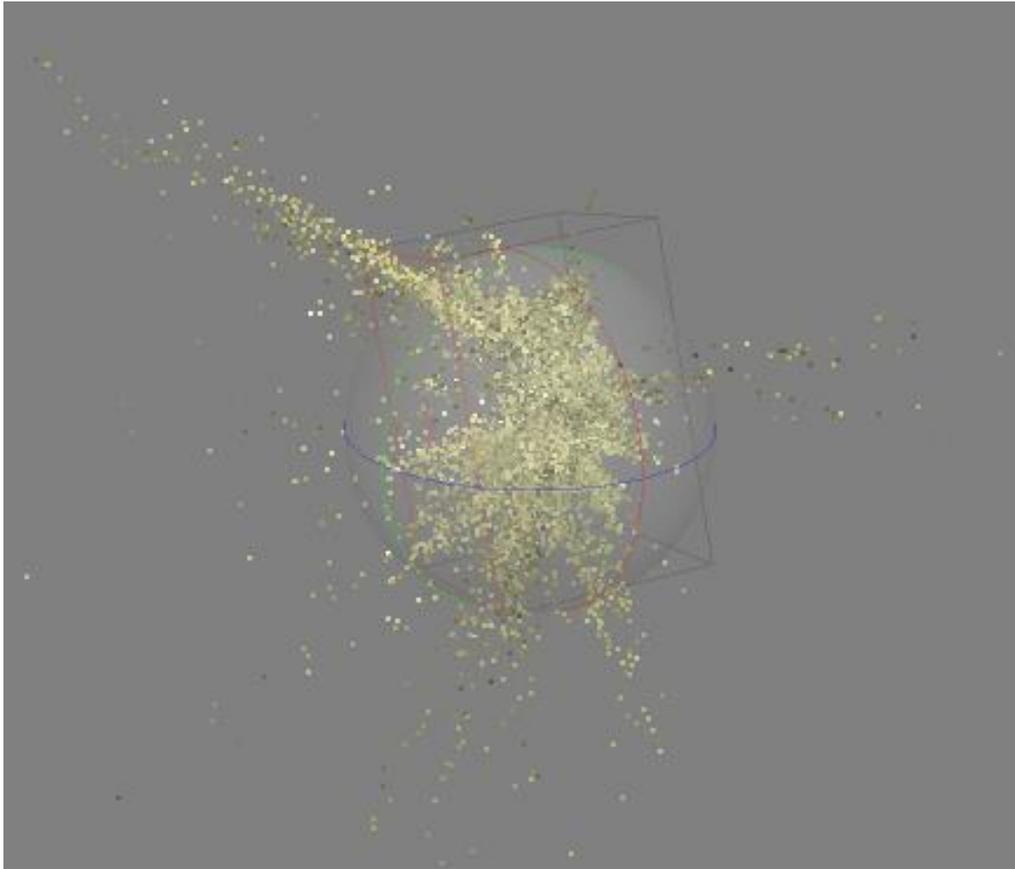


圖 16 勾選引導式影像匹配之結果

影像對位後，使用漸進式篩選(Gradual Selection)用於對稀疏點雲的連結點進行品質控管。流程通常依序以重建不確定度(Reconstruction Uncertainty)、投影精度(Projection Accuracy)、重投影誤差(Reprojection Error)與影像出現次數(Image Count)逐步剔除低品質點，單次剔除約 10% 的高值點，其後 PA 與 RE 依同原則重複執行，直至點雲收斂，且每一輪均以優化相機參數(Optimize Cameras)更新相機內外參。此程序可抑制錯配、降低平均殘差，提升相機參數穩定度與稀疏幾何一致性，為後續深度估計與網格重建提供更可靠的初始解。

漸進式篩選有分四個指標，分別是重建不確定度(RU)、投影精度(PA)、重投影誤差(RE)、影像出現次數(IC)，分別對應清掉「幾何先天差」(RU)、清掉「量測品質差」(PA)、尋找「最終殘差大」的點(RE)，在執行完上述每個步驟後皆須執行優化相機參數以進行調整：在稀疏連結點上聯合估計相機外參與內參(f 、主點 c_x 、 c_y 、徑向畸變

k1-k3、切向畸變 p1、p2)，如圖 17，並更新三維點座標，使重投影殘差最小化。此步驟可有效抑制錯配造成的系統性偏差，降低平均殘差與幾何扭曲，提升相機標定與稀疏結構的穩定度，為後續深度估計與網格重建提供可靠初始解。直至每次選取的數值約 10-20，且篩出的點<5-10%，方可停止。

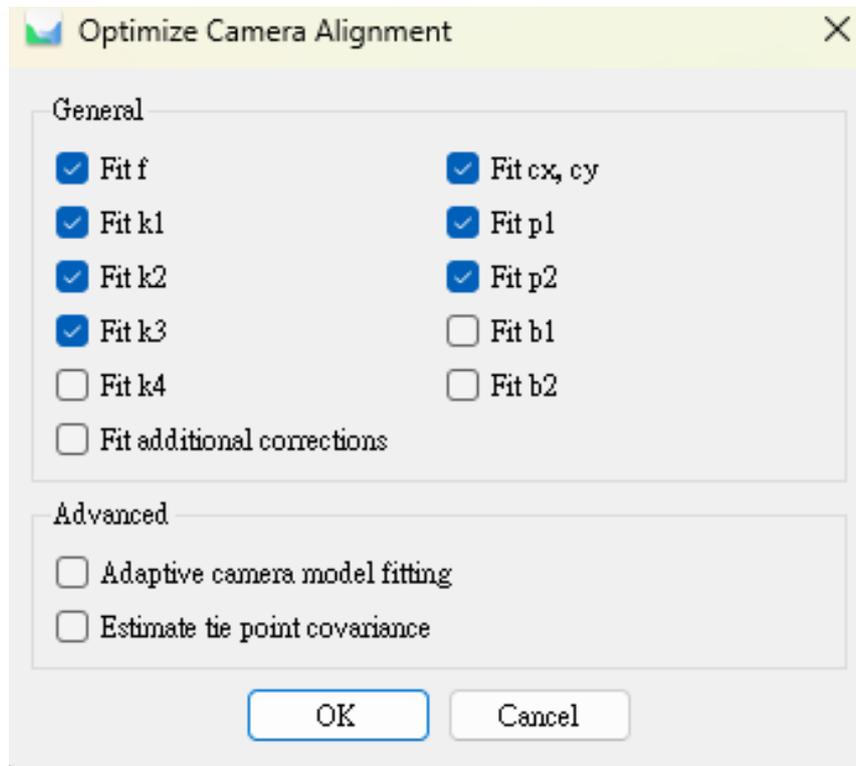


圖 17 更新相機內外參數指標圖

在相片配準後，本研究以 Metashape 建密集點雲(Build Dense Cloud)執行密集重建。此步驟採多視角立體(MVS)由各影像估計深度圖，並融合為密集點雲，配合濾波以抑制錯配與離群點。參數如下：品質採用 High，兼顧細節與運算成本；深度過濾(Depth filtering)設為強力深度過濾(Aggressive)，以降低水面反射與低紋理區帶來的雜訊；並勾選啟用計算點色彩(Calculate point colors)以保留色彩供後續紋理化與分類；勾選計算點可靠度(Calculate point confidence)以輸出信心值，利於之後門檻化清理與加權建模；而重新使用深度圖(Reuse depth maps)選項不勾選是因未先生成相同層級深度圖，避免跨層重用造成不一致。完成後再依信心值過濾低可靠點，並以深度圖為來源建立網格。

完成密集重建後，獲得約 5,800 萬點之彩色密集點雲，完整覆蓋目標地形，細部起

伏清楚；周緣零散點多由水面反射與低紋理造成。圖 18 中粉色為相機視線／軌跡，呈環繞拍攝且重疊充足，提供足夠視差與穩定深度估計。此成果顯示影像品質與配準精度足以支撐後續以深度圖建網格與紋理化、進行幾何量測；並將依信心值與統計濾波清理離群點，以進一步提升模型可靠度。

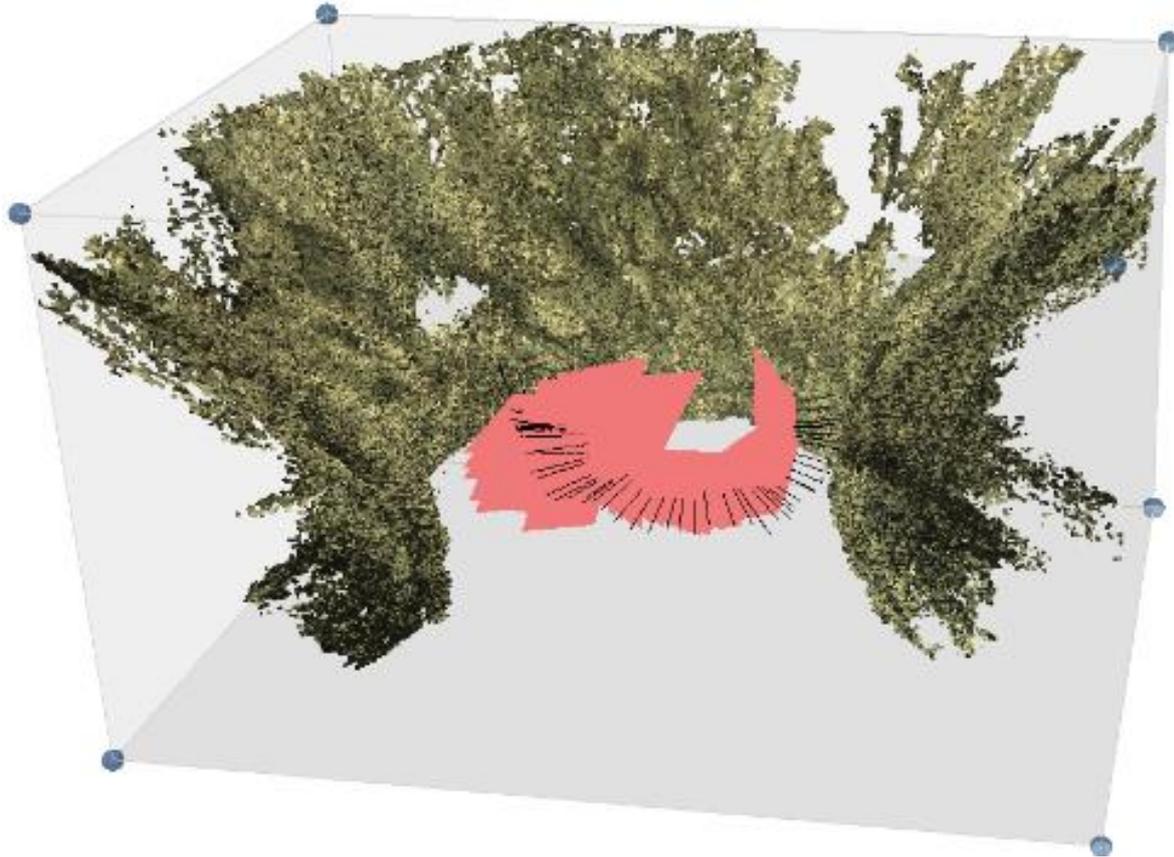


圖 18 完成密集重建後之全彩點雲

在完成密集重建後，建立網格(Build Mesh)係將深度資訊轉為三角網面，使離散點成連續曲面，便於貼圖、量測與後續配準。場景起伏複雜，故將表層類型選擇任意三維曲面(Arbitrary(3D))；來源選深度圖(Depth maps)可得較穩定且細節完整之網格，並勾選重新使用深度圖以沿用既有深度、降計算量並保一致性。品質與密集重建同級或降一級以控資源。網格三角形的目標數量(Face count)先以 8-10M 試跑、確認後再升至 15-30M。插值(Interpolation)選擇啟用以補小孔；若需保留真實孔洞則改為不啟用。勾選計算網格頂點顏色(Calculate vertex colors)，利於視覺檢核與日後貼圖。

如圖 19 所示，已由深度圖生成三角網格（約 439,582 面、219,981 頂點），並套用

頂點色彩以利幾何檢核。重建呈現盆狀地形與兩側陡壁，整體曲面連續、無明顯翹曲，顯示相機定向與深度估計穩定。中央藍色區域為局部未重建／孔洞，推測源於水面反光、低紋理或視差不足；邊界亦見細碎鋸齒，屬框外噪點與遮擋影響。本模型屬保守面數之試跑結果，可作為後續提高面數、調整插值（保洞／補洞）與生成貼圖的基準，並可支援剖面量測與 STL/PLY 輸出。

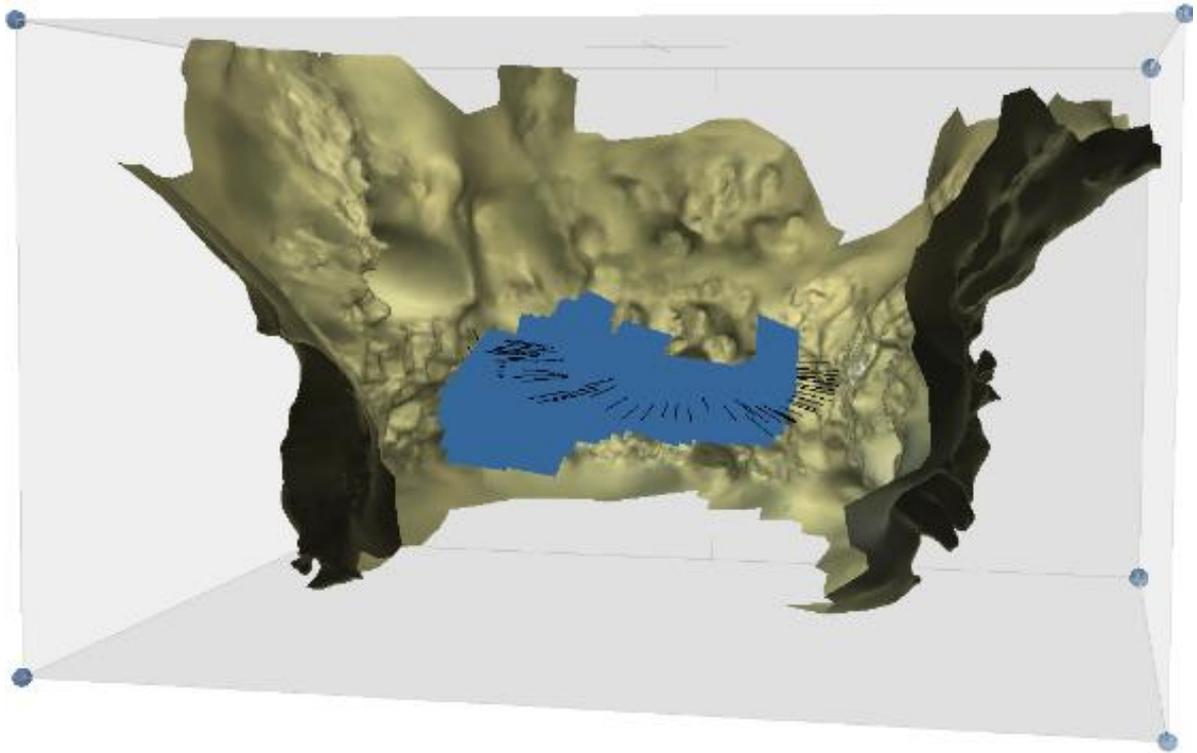


圖 19 以 Metashape 由深度圖重建之三角網格結果

生成 UV 貼圖影像(Build Texture)旨在將多視影像投影至重建網格，生成真實貼圖以強化可視化與判讀，不改變幾何。本文採：漫反射貼圖(Diffuse map)，用來描述材質在白光下的漫反射顏色；通用 UV 展開(Generic)，用以對任意 3D 曲面自動切割並展開 UV，不假設是地形或單一視向；適合有立面、懸垂、複雜曲率的模型，適合水下模型；馬賽克融合(Mosaic)，以單視角最優像素為主並局部羽化銜接，兼顧銳利度與接縫控制，較能抑制動態造成的重影；每張圖之解析度/張數(Texture size/count：8192×1)，用以決定總像素預算與其在 UV 上的分配；在等總像素下，增加張數可降低 UV 拉伸、提高局部清晰度，而提高尺寸則提升單張解析度但對平台與顯存要求更高；啟用孔洞填補

(Hole filling)，將網格缺口以邊界三角化方式小幅補面，以提升連續性與貼圖完整性；本研究僅對小孔洞採保守修補，對大面積缺測則保留為孔洞標示；啟用色彩校正(Color correction)，以對跨視角影像施加輻射一致化（增益/偏移估計），降低曝光與白平衡差異導致的接縫與色偏；啟用重影濾除(Ghosting filter)，用以偵測並抑制跨影像時間不一致之畫素，降低動態場景造成的重影，同時搭配 Mosaic 融合與遮罩以提升視覺一致性；關閉(Keep UV)，沿用網格上已存在的 UV 座標，僅把照片顏色依現有 UV 重製作成貼圖。此組合可於地形與水面並存之場景獲得連續、銜接良好且色調一致之紋理。

本次以通用 UV 展開映射與馬賽克融合混合生成 8K×2 紋理後，如圖 20 所示，地形表面連續度佳，坡向、沖蝕溝與山脊陰影層次分明，岸線過渡自然；水面區在重影濾除作用下重影已受抑制，仍見少量模糊屬反射與遮擋所致。整體色調經校正一致、拼縫不明顯，可支援視覺化展示、航跡與測區判釋；若需更高細節，可提升貼圖尺寸或對重點區域局部加密。

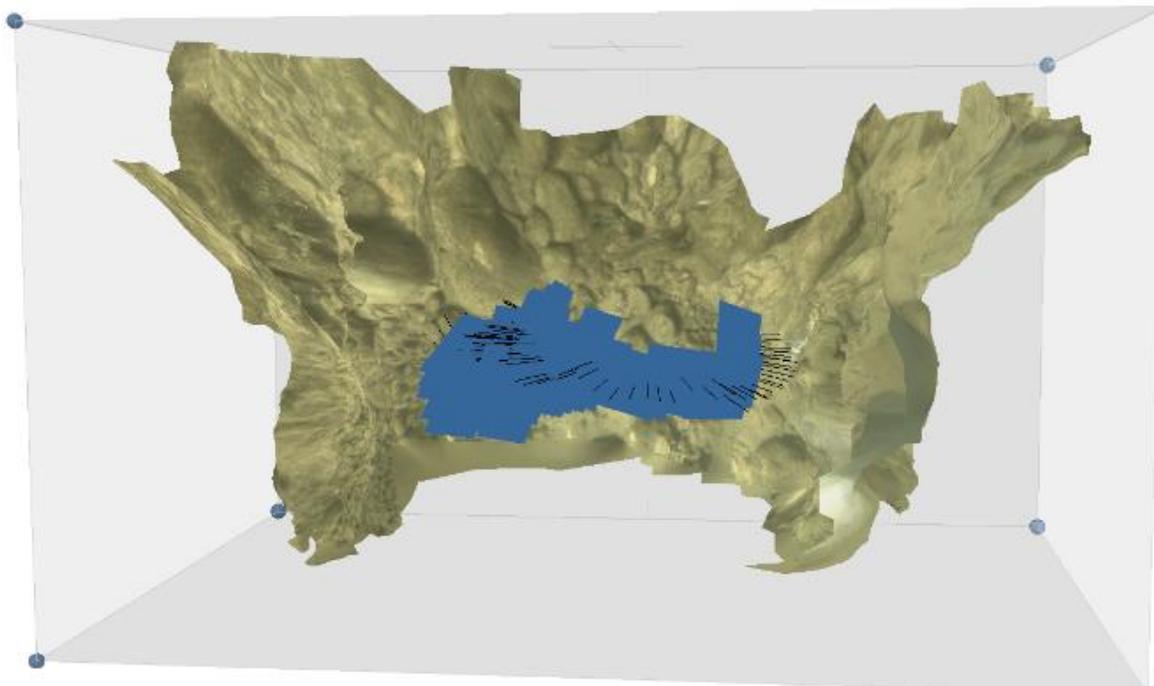


圖 20 研究區之紋理化三維模型成果

將此次研究區之紋理呈現出來後，接著執行建立磚塊式模型(Build Tiled Model)，以產製多層級 (LOD) 圖磚化網格與貼圖，以漸進載入與空間分割降低記憶體負載，

適用大面積地形可視化。來源以密集點雲為主，幾何精度要求較高時採用深度圖。Pixel size 代表地面解析度（0 為自動）；Tile size 決定圖磚尺度（大者接縫少但資源耗用增）；網格三角形的目標數量控制三角面密度。貼圖採通用 UV 展開與馬賽克融合，啟用孔洞補償、色彩校正與重影抑制，並關閉維持 UV 以減縫。

結果顯示已成功生成 LOD 圖磚並載入貼圖，整體地形起伏與岩壁紋理可辨，如圖 21。惟邊界仍有零星碎片與孔洞，右側外緣可見雜點；中央水域因反光、低紋理造成幾何不連續與貼圖缺失。色彩整體一致但局部亮暗跳變。之後會針對收緊重建區域重建區域排除無效區、網格三角形的目標數量提至中等並將紋理由 4096 升至 8192；或改以深度圖顯示或加遮罩處理水面，以求得更好的結果。

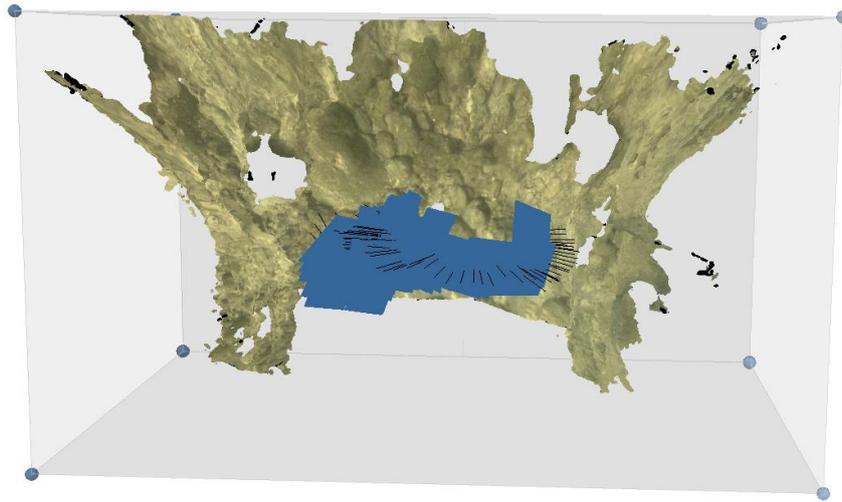


圖 21 經建立磚塊式模型產製研究區之多層級（LOD）圖磚化模型與貼圖成果

（二）水上點雲

本研究之水上三維模型以無人機（UAV）影像為基準資料建置，合計納入 385 張照片。為確保跨介質成果之可比性，水上與水下皆採用一致之影像重建流程與參數設定（含相機對齊、密集重建、網格生成與貼圖），以降低方法學差異對後續點雲配準與誤差分析之影響，並強化模型間之可比性與可重現性。

採 UAV 作為水上基準可提供穩定視域覆蓋與可控 GSD，並弱化遮蔽與反射干擾；然而跨介質成像仍受折射、散射與色衰減影響，建議同步通報控制點配置、前/側向重疊率與 GSD，並以檢核點 RMSE 與重投影誤差量化一致性；必要時於水下加入折射校正或輻射標準化，以避免同流程下之系統性偏差被低估，由於生成結果之步驟與水下點雲相同，故將結果置於第三章與水下建模之成果一同展示。

三、基於控制點之配準

在一般的點雲配準中，基於控制點之配準十分常見，能有效將兩個點雲模型合併至相常座標系統下，以便後續之分析。而水上水下模型之配準同樣能以基於控制點之方式進行。首先，在水上水下模型建置前，先於兩個模型之共通點加入控制點，而控制點主要利用 GNSS 系統協助建立。利用內政部國土測繪中心提供之虛擬基準站即時動態定位技術與網路建立之全國性電子化即時動態定位系統(E-GNSS)對控制點作測量，以得出控制點之座標，應用之後續之點雲模型配準。由於水上水下模型可能重疊的部分不多，故本研究需詳細討論控制點的合適位置，再作後續之測量。

四、迭代最近點

迭代最近點 (Iterative Closest Point, ICP) 是一種常用於點雲配準之演算法，能有效協助配準兩個或多個點雲數據集，使其對應關係得以準確對齊或合併。ICP 演算法因其穩定和穩健的表現被廣泛應用於各種點雲相關之領域中，如三維重建與物件辨識等[10]。為了提高 ICP 的效率，研究主要集中於以下幾個方向：減少運算點數量、提升最近鄰搜尋速度、增強點對應關係的可靠性以及採用多視圖配準。此外，減少迭代次數同樣被證實有助於提高效率。每次迭代中，ICP 算法會計算兩個點雲之間最近鄰點的距離以確立點對點的對應關係，因此，減少參與計算的點數能顯著縮短運算時間。通常，點雲簡化或下採樣技術，如均勻採樣、隨機採樣以及基於特徵的採樣，被用來達成此目標。同時，由於 ICP 使用目標數據集中每個點的最近鄰作為來源數據的對應點，因此最近鄰搜尋方法直接影響算法效率。隨著 KD 樹(k-d tree，是一種用於多維資料的空間索引)等資料結構之應用，最近鄰之問題得以解決，提高了整體 ICP 的運算效率。此外，

通過加快收斂速度、減少迭代次數也能提升計算效能，其中基於點到線和點到面的準則以及點的特徵資訊的應用在一定程度上促進了收斂速度[11]。

第三章 結果與討論

第一節 期中報告審查意見回覆

感謝評審委員給予之期中建議，本次實作全程於淺水區作業，且遵守漲、退潮時間，5/28 於早上約 6.40 左右到達現地，並於大約早上 9.30 左右結束 GoPro 實作，於下午約 14.30 左右到達現地，並於 15.30 左右離開；8/22 當天於早上約 6.00 左右到達現地，並於早上 10.00 左右結束實作並且全程在有救生員的環境下執行。

13 ○	06:10	58	148	H	28	06:31	86	176	H
	14:06	-65	26	L		14:44	-86	4	L
	20:07	-2	88	H		20:51	-7	83	H
	23:45	-21	69	L		23:43	-18	72	L

圖 22 5/28 當天潮汐表

7	04:35	68	159	H	22	05:39	82	172	H
	12:49	-55	36	L		13:17	-57	34	L
	18:57	9	100	H		19:03	14	104	H
	22:27	-4	87	L		23:21	-15	76	L

圖 23 8/22 當天潮汐表

第二節 GoPro 與 Metashape 參數影響

本研究於影像擷取端採評估 GoPro 線性模式與後端自我標定(self-calibration)之權衡：Linear 透過數位去畸變讓直線保持筆直、邊緣伸展減輕，對人工設施（碼頭、防波堤）等幾何邊界較友善；代價是有效視角縮小、畫面經重採樣後周邊細節與像素尺度不均，邊緣特徵可重複性略降。相對地，若以原始廣角拍攝並交由 Metashape 的魚眼／廣角鏡頭模型自我標定，雖需較多特徵與計算量，但保留更多視角與紋理，對大場景的相對

幾何約束較強。基於場域同時包含天然礁岩與人工結構，兩種做法皆具價值：線性模式有利於人工直線幾何的匹配穩定；原始廣角則有利於提升覆蓋與幾何剛性。計畫中將視任務分別採用，但避免在同一套重建中混用兩者，以免內參不一致降低配準穩定度。

第三節 模型建置成果

本研究之實作場域位於屏東縣恆春鎮萬里桐沿岸，並共計做了兩次實作，第一次之實作場域位於萬里桐聚落南側近岸，選取礁台—潮間帶—淺海梯度帶為測區基準。UAV 於 30 m 高度飛行（預估 GSD ≈ 0.70 cm/px），採等間距往返式掃掠航線，覆蓋約 64×77 m 的矩形區域，如圖 24。惟當次任務多為水面與岸線覆蓋，未納入足量陸域與人工構造物，且未佈設控制點，導致可用特徵點不足、幾何約束薄弱，重建之對齊與尺度表現受限。基於上述限制，第二次實作遂擴大涵蓋至岸線與聚落前緣並增設控制點，以增加穩定特徵、降低水面反光／折射影響，提升模型配準與精度。



圖 24 第一次實作之 UAV 飛行範圍圖

第二次之實作範圍僅選取聚落前緣之礁台—潮間帶—淺海梯度帶作為統一基準。圖 25 為 UAV 之地表建模，規劃在 60 m 高度飛行（預估 GSD ≈ 1.5 cm/px），採等間距往返式掃掠航線覆蓋約 217 \times 179 m 的矩形範圍，共拍攝 385 張照片，且為避免僅掃海面而因反光、水面折射等原因無法成像並建模，故本次拍攝之範圍涵蓋岸線、礁台及鄰近人工構造物，使其有更多特徵點以供對齊。

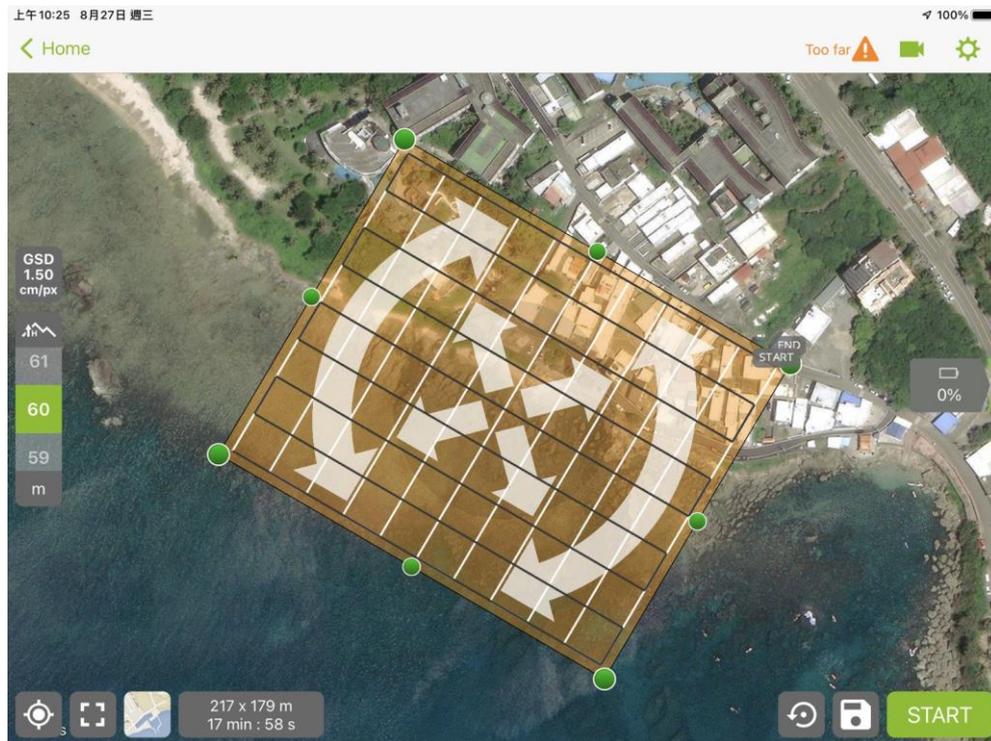


圖 25 第二次實作之 UAV 飛行範圍圖

本研究另以 GoPro 建立近岸實測圖層，兩次皆涵蓋萬里桐聚落前緣之礁台—潮間帶—淺海帶，並採等間距往返式掃掠航線往返拍攝，覆蓋約 2m \times 2m 之類矩形區域（如圖 26、圖 27 之紅框範圍），且影片以 4K/60 fps 連續採樣後固定影像擷取進行 SfM 重建。兩次實作之差異為，第一次實作未佈設控制點，第二次實作增加了五個控制點，透過前、側向高重疊提升幾何穩定度，並作為與 UAV 與水下資料之跨介面配準基礎。



圖 26 紅框範圍約為第一次實作 GoPro 之場域

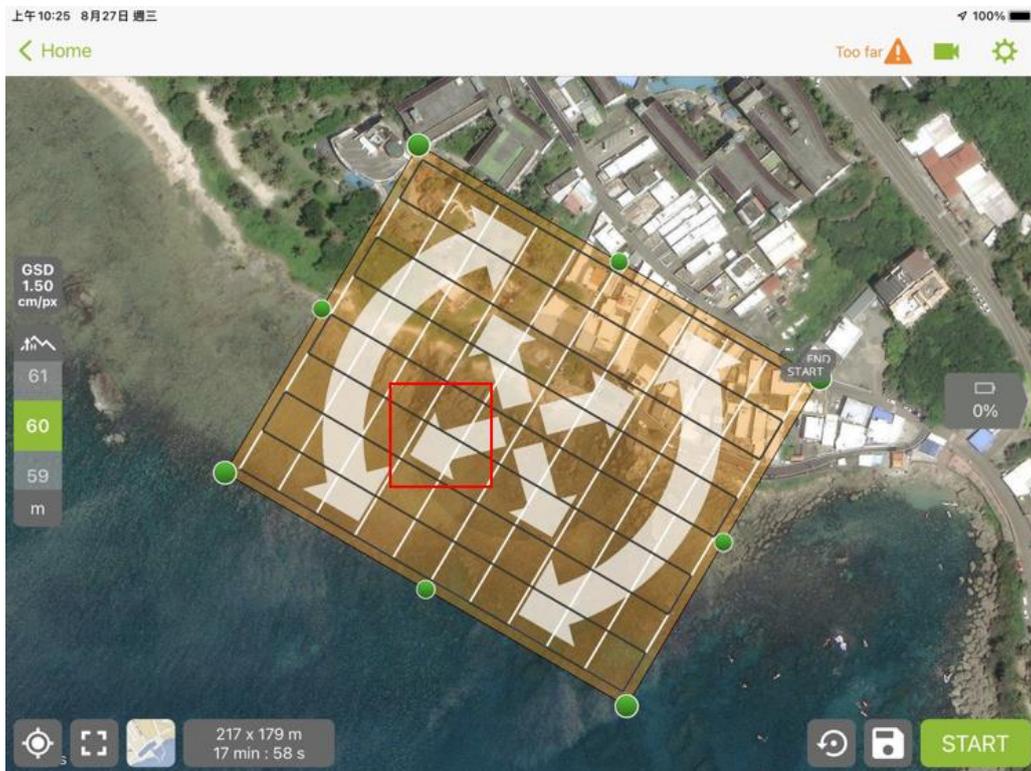


圖 27 紅框範圍約為第二次實作 GoPro 之場域

本實作兩次皆以 SfM/MVS 流程在 Agisoft 建立萬里桐岸際水上模型，而首次實作之水上模型以 30 m 高度、等間距往返航線拍攝建模，覆蓋約 64×77 m 之礁台—潮間帶區，如圖 28 至圖 31。成果可辨識潮溝、礁體與藻被分布等紋理，平面幾何連續，足供局部地形判釋。然而因未佈設控制點且陸域與人工構造物納入不足，穩定特徵稀少，邊緣略顯破碎，定位與尺度仍屬相對座標。後續將擴大涵蓋並增設控制點以改善配準精度。

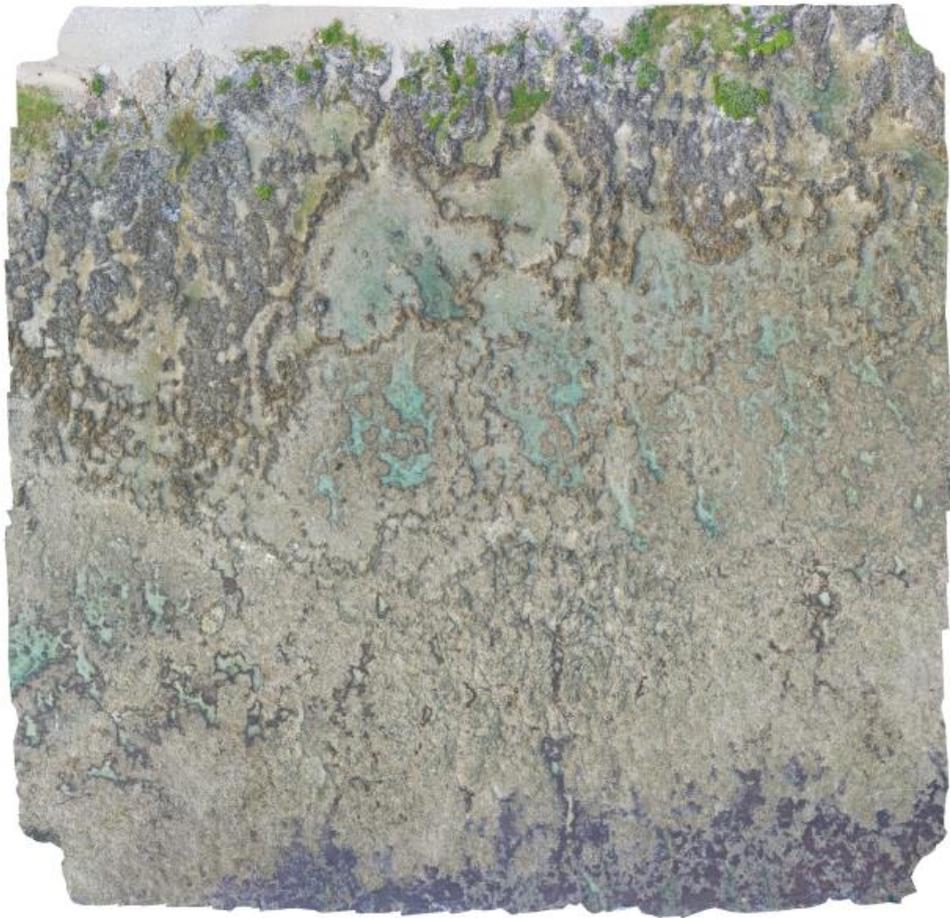


圖 28 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果俯視圖

且本區左、右側視圖及前視圖近似平坦，主因為礁台—潮間帶之自然起伏本即微弱（多為公分級），且本次航測以純俯視為主，基線與視角變化不足，使光束交會角度偏小，致 Z 向精度顯著劣化；同時水面薄層之折射與鏡面反射造成紋理平滑，未佈設控制點亦使垂直尺度缺乏約束，深度圖濾波進一步削弱微地形表現。後續將增設控

制點及折射修正改善高程復原能力。



圖 29 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果左側視圖



圖 30 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果右側視圖



圖 31 實作地點之第一次 UAV 空拍建模成果前視圖

本研究第二次實作覆蓋聚落前緣至礁台外緣之帶狀區域。成果清楚辨識道路、建築邊界與潮間帶微地形，提供跨介面（陸—海）配準之剛體基準。與水下模型對照可觀察礁溝連續性與坡折位置大致一致；惟受潮位變化、浪花覆蓋及濕面鏡面反射影響，局部區塊特徵較稀疏。圖 32 至圖 35 展示以 Agisoft 所建模之水上三維模型。



圖 32 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果俯視圖

第二次 UAV 重建之側視表現顯著優於首次。其主因在於佈設控制點，有效控制垂直尺度漂移與抑制整個影像生成地表呈現碗狀或拱狀的系統性彎曲；同時將陸域建築納入視域，提供高對比之垂直邊緣與較大視差，提升 Z 向幾何敏感度；配合俯／斜攝組合使基線長度與飛行高度比(B/H 比)增大，三角交會角度改善；且水面反光與紋理重複的干擾相對降低。綜上，網路幾何與控制條件的同步強化，使高程起伏得以可靠復原，側視起伏清晰可辨。



圖 33 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果右側視圖



圖 34 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果左側視圖



圖 35 實作地點之第二次 UAV 空拍建模成果前視圖

本研究以相同之 SfM/MVS 流程，將兩次 GoPro 以 4K/60 fps 影片進行固定影像擷取後於 Agisoft 重建萬里桐淺海地形圖。首次水下重建未佈設控制點，視覺上較平順且孔洞較少，但經分析係由小範圍、紋理豐富與無控制約束下之束調平滑效應所致，屬「假性優化」；相對地，加入控制點後之模型雖暴露更多局部不一致與孔洞，然其幾何更貼近真值。環境能見度、波動與焦散差異亦影響配準穩定度。後續將以關鍵影格與視差門檻控制基線、實施水下內參校正與邊帶遮罩，並優化控制點分布與權重，以在維持視覺完整度的同時提升幾何精度與可量化可靠性。下圖 36 至圖 39 展示以 Agisoft 所建模之水上三維模型。



圖 36 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果俯視圖



圖 37 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果右側視圖



圖 38 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果左側視圖



圖 39 實作地點之第一次 GoPro 水下建模成果前視圖

第二次所建之模型可辨識礁台起伏、塊狀礫石與礁溝等微地形，足以作為海陸融合配準之水下基礎。惟受濁度、氣泡與鏡面反射影響，局部貼圖偏軟、邊界略有破碎。後續將以控制點約束並採 ICP 精化配準，量化 RMSE 與局部偏移以評估一致性。下圖 40 至圖 43 圖 40 展示以 Agisoft 所建模之水上三維模型。

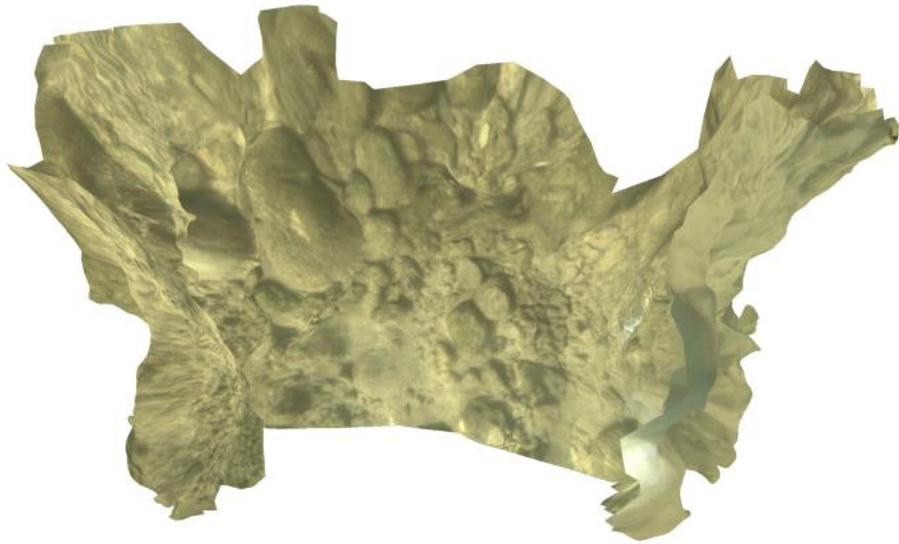


圖 40 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果前視圖

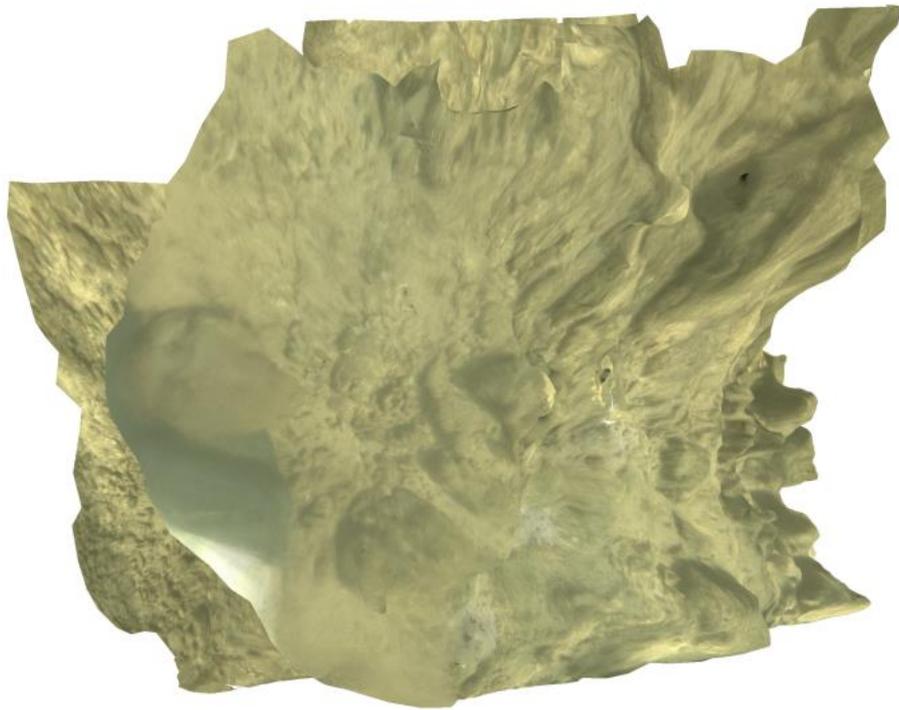


圖 41 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果右側視圖

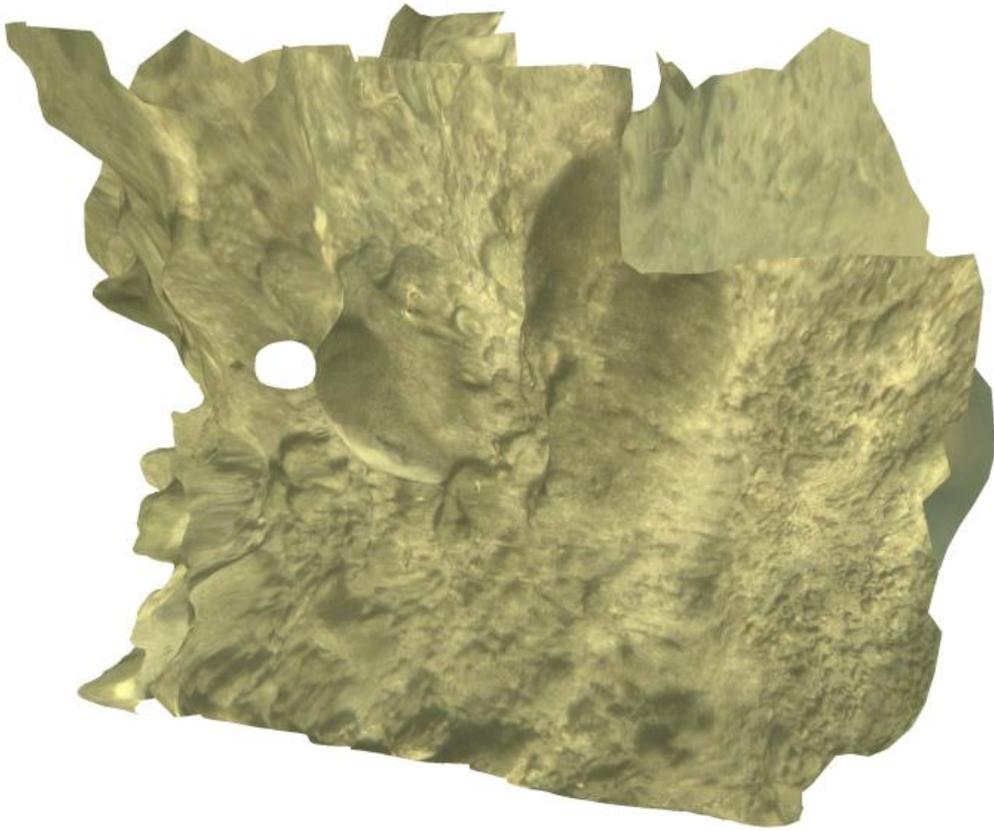


圖 42 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果左側視圖

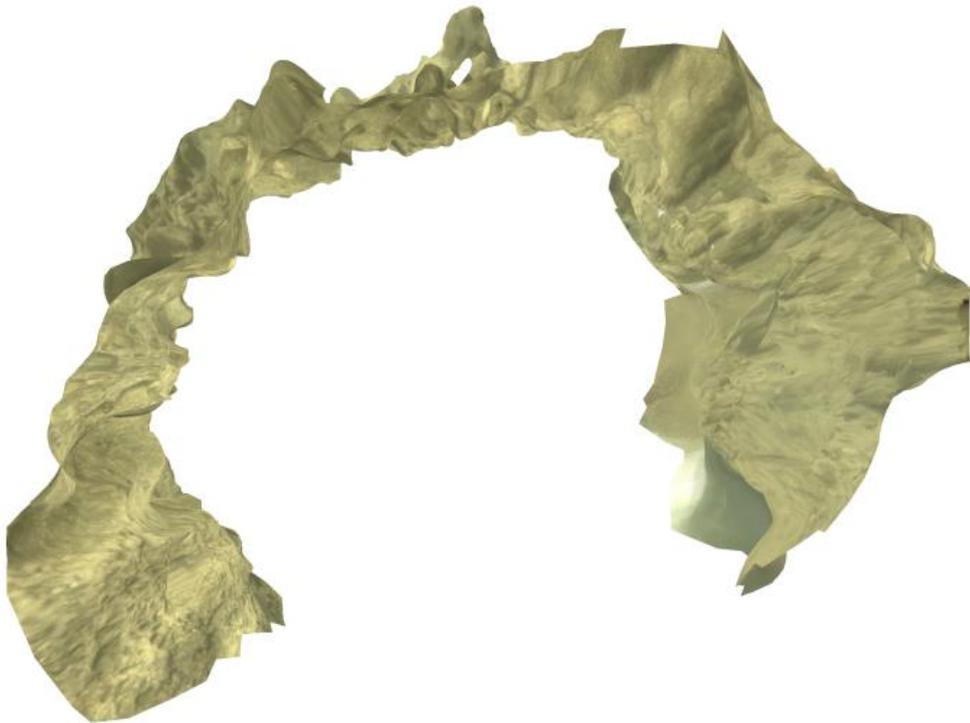


圖 43 實作地點之第二次 GoPro 水下建模成果俯視圖

將「水上」與「水下」兩雲對到同一座標系的兩階段配準。先對點雲做體素降採樣、估算法向並萃取 FPFH 特徵，以快速全域配準(Fast Global Registration, FGR)求得粗略位姿；再以點對平面 ICP 在容許距離門檻下最小化對應殘差，迭代收斂出剛體變換矩陣。最後依此矩陣將 source 轉到 target 座標並輸出合成雲，並以 fitness/RMSE 等指標評估重疊區域的幾何一致性。第一次未設 GCP 的重建在視覺上較完整、孔洞較少，如圖 44，主因測區較小且底質紋理均一，束調在缺乏絕對約束時傾向以低階彎曲吸收畸變與尺度誤差，形成「平滑假象」。

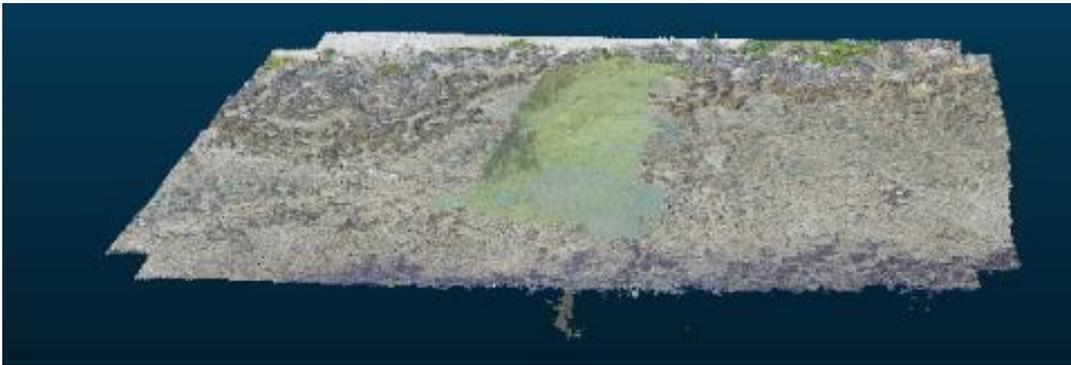


圖 44 第一次實作兩點雲合併之前視圖

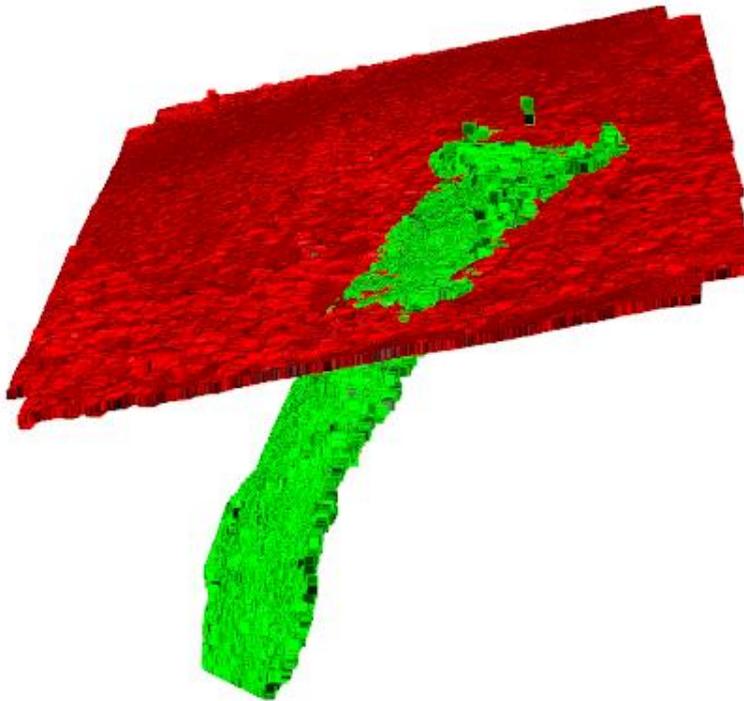


圖 45 第一次試驗兩雲配準後之疊合結果（紅：水上；綠：水下）

相較之下，第二次加入控制點並納入陸域立體物後，圖 46 為 CloudCompare 檢視兩點雲配準結果。場景載入 target（水上點雲資料，具 RGB、連續度高）與 transformed_source（水下點雲資料，單色、稀疏塊狀），網路幾何與尺度被嚴格約束，水面反光、折射與局部錯配被顯性化，遂出現懸浮雜點與不連續。此並非品質退步，而是模型更接近真值所致。後續將以關鍵影格與視差門檻控制固定影像擷取、遮罩反光區、優化控制點分布與權重，並採較溫和之深度濾波，以兼顧視覺完整度與幾何精度。



圖 46 第二次實作兩點雲合併之前視圖

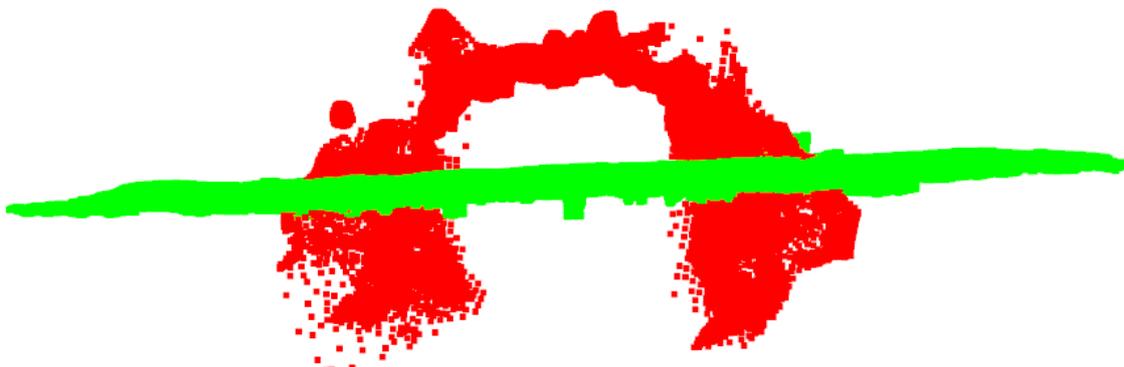


圖 47 第二次試驗兩雲配準後之疊合結果（紅：水下；綠：水上）

第四節 檢討與改進

本次成果顯示，海岸—海底複合建模仍受資料異質性與水下成像限制影響。雖已取得 UAV 與 GoPro 的影像，然水下 SfM 重建品質不佳：1913 張影像僅部分成功配準，模型局部出現破洞與起伏，難以與空拍結果直接融合。其原因包括：水下濁度與波紋造成紋理不穩定與鏡面反射；影片固定影像擷取密度過高但有效基線不足，致使重複/模糊影像拉低匹配可靠度；平面玻璃艙與折射未被正確建模，內參（等效焦距、主點、畸變）偏離理想針孔模型；缺乏可見之水下控制點，導致尺度漂移與外參優化受限。也因為水下點雲之重建結果不佳，進而影響整體配準結果。為改善上述問題，往後實作時將針對上述可能造成失敗之原因提出假設性解法：

一、濁度波紋與反光

本研究後續將優先尋找更合適的拍照時間或地點（小潮、浪低、陰天或背光、接近潮停等等），並採固定參數與穩定路徑之拍攝策略：鎖白平衡與曝光、ISO 定值、1/240–1/480 快門、4K 錄製後以 1–2 fps 擇優固定影像擷取，等間距往返式掃掠航線配斜向交叉以確保更高的前/側向重疊；必要時再購置離軸雙燈與擴散罩抑制背散射。

二、過密取像、基線不足

為避免「固定影像擷取過密而基線不足」導致匹配不穩，將以基線設計與關鍵影格策略提升穩定度：依工作距離 D 與速度 v 設定基線比 $r=0.2-0.3$ ，取 $B=rD$ ，固定影像擷取頻率 $f=v/Bf=v/Bf=v/B$ （現地約 2–3 fps，擇優至 1–2 fps）。外場維持恆速恆高，採等間距往返式掃掠航線並加斜向/正交補掃，確保前/側向重疊 $\geq 70\%/60\%$ 。影像端以清晰度（Laplacian var）與相似度（SSIM>0.95 剔除）篩關鍵影格，視差不足（中位位移 <30–60 px）者棄用。

三、控制點不足致尺度漂移

為抑制尺度漂移並強化外參，本研究於水下佈設可視控制點與校準尺度桿：使用防水編碼標靶（ $\geq 6-10$ 個）及 0.5–1.0 m 尺度桿，分布於不同深度與方位，確保單張影

像可見 ≥ 3 標靶且重疊區含尺度約束；岸際另以 RTK/TS 建立基準點，透過出水立桿將水下影像系統與岸上座標銜接。於 Metashape 以 Markers/Scale bars 輸入座標與長度並設定精度權重，Align 後執行優化相機參數，使束調同時受控制點與尺度雙重約束，並以保留之檢核尺度桿驗證殘差，從而消除尺度漂移並提升海陸融合幾何一致性。

綜合採行上述三項優化後，預期可有效提升水下影像特徵穩定度與有效基線、修正平面艙折射造成的內參偏移，並以控制點約束穩固尺度與外參；進一步降低配準殘差與孔洞比例，強化海陸與聲納之跨平台融合的幾何一致性與地理精度。最終將形成一套可重製、可量化驗證之工作流程，以取得更為可靠且可用性更高的研究成果，支援後續海岸侵蝕監測、礁體形變分析與棲地結構評估等應用。

第四章 結論

本研究針對海岸與海底複合地形建模的需求，提出融合 GoPro（水下影像感測器）影像與 UAV（無人載具）所蒐集海上空拍資料的方法，進行跨介面、跨平台的精確三維模型建置。實作過程中，UAV 與 GOPRO 提供多視角空、海影像資料，並進一步進行點雲配準，以提升模型的完整性與準確度。

期中以安平港作為穩定驗證場域，後延伸至萬里桐實測，分別建立 UAV 水上模型與 GoPro 影像式水下模型。結果顯示：水上模型能清楚描繪岸線與礁台微地形，具作為剛體基準之可用性；水下模型則受環境與成像物理限制，出現影像僅部分配準、局部孔洞與幾何起伏等問題，兩者點雲之直接融合仍不理想，驗證了資料在密度、色彩、尺度與重建準則上的落差確為主要瓶頸。

經檢討，歸納四項關鍵限制：① 濁度、焦散與鏡面反射降低特徵穩定；② 固定影像擷取過密但有效基線不足，導致重複/模糊影像拉低匹配可靠度；③ 平面艙折射未被正確建模，內參偏離理想針孔；④ 缺乏可見水下控制點，使尺度與外參易漂移。相對地，本研究提出可複製的改良方案：控制外場條件並採固定曝光參數與離軸雙燈+擴散罩；以基線比設計固定影像擷取（約 1-2 fps 的關鍵影格）並以視差/相似度篩選；實施水下專用內參校正與相機分組（透視/魚眼模型，先固定後優化）；佈設編碼標靶與尺度桿並以控制點施加約束。同時建立「UAV—水下影像」兩源串接與 FGR→ICP 的兩階配準流程，並在 Metashape 採序列式模式，或是 Reference 預選(用外部位置/姿態先驗篩出「可能重疊」的影像對，降低匹配複雜度並抑制跨區域錯配)、引導式匹配與遮罩策略，以提升海陸跨介面幾何一致性。

整體而言，成果報告仍存在水下模型完整度不足與局部失配，但已明確定位品質衰減主因並建立成套改進管線與評估指標（RMSE、覆蓋率、孔洞比例、接合區偏移）。後續將於墾丁具代表性岩岸（如小巴里島岩、佳樂水、出水口）擴充測試，導入自動關鍵影格挑選、統一時空基準（UAV GPS/IMU × 影像相對定位）與深度學習影像增益/

去噪，並配合更高階潛水殼以擴大可作業水深。綜合採行上述優化後，預期可有效降低配準殘差與孔洞比例，強化海陸跨介面融合精度，最終形成可重製、可量化驗證的三維建模工作流程，支援海岸侵蝕監測、礁體形變分析與生態棲地評估等應用

參考文獻

- [1] A. Palomer, P. Ridaou, and D. Ribas, “Multibeam 3D Underwater SLAM with Probabilistic Registration,” *Sensors*, vol. 16, no. 4, p. 560, Apr. 2016, doi: 10.3390/s16040560.
- [2] E. Nocerino and F. Menna, “Photogrammetry: Linking the World across the Water Surface,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 2, p. 128, Feb. 2020, doi: 10.3390/jmse8020128.
- [3] J. Benjamin *et al.*, “Integrating Aerial and Underwater Data for Archaeology: Digital Maritime Landscapes in 3D,” in *3D Recording and Interpretation for Maritime Archaeology*, J. K. McCarthy, J. Benjamin, T. Winton, and W. van Duivenvoorde, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 211–231. doi: 10.1007/978-3-030-03635-5_14.
- [4] G. Grisetti, R. Kümmerle, C. Stachniss, and W. Burgard, “A Tutorial on Graph-Based SLAM,” *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 31–43, 2010, doi: 10.1109/MITS.2010.939925.
- [5] C. Peng, G. Shen, Y. Zhang, Y. Li, and K. Tan, “BeepBeep: a high accuracy acoustic ranging system using COTS mobile devices,” in *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, in SenSys '07. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 6 2007, pp. 1–14. doi: 10.1145/1322263.1322265.
- [6] P. Pertilä, M. Mieskolainen, and M. S. Hämmäläinen, “Closed-form self-localization of asynchronous microphone arrays,” in *2011 Joint Workshop on Hands-free Speech Communication and Microphone Arrays*, May 2011, pp. 139–144. doi: 10.1109/HSCMA.2011.5942380.
- [7] J. Choi, S. Ahn, and W. K. Chung, “Robust sonar feature detection for the SLAM of mobile robot,” in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Aug. 2005, pp. 3415–3420. doi: 10.1109/IROS.2005.1545284.
- [8] C. Zhang, A. Sun, M. A. Hassan, and C. Qin, “Assessing Through-Water Structure-from-Motion Photogrammetry in Gravel-Bed Rivers under Controlled Conditions,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 21, p. 5351, Jan. 2022, doi: 10.3390/rs14215351.
- [9] M. Jaud *et al.*, “Low-Tech and Low-Cost System for High-Resolution Underwater RTK Photogrammetry in Coastal Shallow Waters,” *Remote Sens.*, vol. 16, no. 1, p. 20, Jan. 2024, doi: 10.3390/rs16010020.
- [10] P. Li, R. Wang, Y. Wang, and W. Tao, “Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 68030–68048, 2020, doi:

10.1109/ACCESS.2020.2986470.

[11] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, Jun. 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.

[12] [Online]. Available:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=d2daca8e0e381d2124455057bf3f3e94e0323e62>

[13] You Z., Yang Y., Wang X., and Yin W., “Two-Stage Learning to Branch in Branch-Price-And-Cut Algorithms for Solving Vehicle Routing Problems Exactly,” Nov. 13, 2023, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 4630549. doi: 10.2139/ssrn.4630549.