

地面和空中移動式測繪技術點雲融合之研究

林心婷^[1] 蕭宇伸^{[1]*}

摘 要 針對水土保持工程維護管制，有許多區域常利用無人飛行載具 (UAV) 技術進行水保構造物與周邊環境三維建模。本研究分別以地面和空中移動式測繪技術針對水土保持工程構造物進行三維建模，並分析點雲融合成果。地面和空中分別採用 viDoc RTK 光達系統和 SfM-UAV 技術進行測繪獲取點雲模型，將七參數坐標轉換法應用於點雲模型融合，最終分析融合後的相對及絕對精度。結果顯示，座標轉換後的中誤差為 0.068 公尺，且在 viDoc 建置的模型中，尺寸與實際測量完全相符。此外，模型融合後的坐標絕對分析成果中誤差為 0.152 公尺。這些結果表明，應用七參數坐標轉換能有效融合 UAV 及 viDoc 之間的模型，實現空地結合的效用，期望未來本方法能廣泛應用於水土保持構造物的檢查與製圖等多種用途。

關鍵詞：viDoc RTK、無人飛行載具、坐標轉換、點雲模型。

Fusion of Point Cloud Models Through Ground and Aerial Mobile Mapping Technologies

Sin-Ting Lin ^[1] Yu-Shen Hsiao ^{[1]*}

ABSTRACT Unmanned aerial vehicle (UAV) technology has been applied for three-dimensional (3D) modeling of soil and water conservation structures and their surrounding environments in numerous regions. This study employed both ground and aerial mobile mapping technologies to execute 3D modeling of these structures and analyzed the resulting point cloud fusion model. A ground-based viDoc real-time kinematic LiDAR system and SfM-UAV technology were used to acquire point cloud models, and a seven-parameter coordinate transformation method was applied for model fusion. The human error after coordinate transformation was 0.068 m, and the model constructed with viDoc aligned perfectly with actual measurements. Furthermore, the absolute analysis of the fused model yielded an error of 0.152 m. These findings demonstrate that the seven-parameter coordinate transformation method effectively integrated the UAV and viDoc models to successfully combine aerial and ground data. This method can be more broadly applied in the inspection and mapping of soil and water conservation structures in the future.

Key Words: viDoc RTK Rover, unmanned aerial vehicle (UAV), coordinate transformation, point cloud model.

一、前 言

每年執行之水土工程數量眾多，加上近幾年極端氣候頻發，土砂災害的威脅也逐年增加，對以往所建造之治山防災構造物可能造成衝擊，導致構造物損毀或功能受損，為了確保構造物的結構和功能都能正常發揮其用途，5 農村水保署及各分署每年定期針對水土保持設施進行巡查及維護管理。近年來，針對水土保持工程維護管制，有許多區域開始利用無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 技術對水保構造物及其周邊環境三維建模，然而，構造物常因植被遮擋而無法清晰拍攝，且即使沒有植被干擾，UAV 建模精度仍然有限，很難獲取高品質的構造物模型。

在過去幾年中，UAV 技術在不同領域展現出廣泛的應用潛力。許多研究利用 UAV 進行地表影像拍攝與三維建模，以提升調查作業的效率與精度。例如，Samad et al., (2013) 利用 UAV 拍攝高解析度地表影像，不僅革新了傳統地圖繪

製的方式，還提升了技術精確性，支持更精密的監測與分析，展示了 UAV 在多領域中的應用潛力。同樣地，張嘉強、黃仁興 (2020) 採用 GNSS 即時動態定位、地面 LiDAR 掃描及 UAV 空拍三種空間測量技術，進行土方量計算，並發現 UAV 建模在有無控制點情境下的差異比例僅約 1.2%，進一步證實了 UAV 在速度和精確度上的高效與可靠性；UAV 在防災應用中也具有重要價值。林育伯等 (2020) 的研究指出，在土石流防災中，UAV 可快速抵達受災現場，克服地形及交通限制，提供即時影像資料，顯著提升監測與應變效率。透過搭載光達並配合地面光達站，UAV 可產出高精度的地面模型，應用範疇涵蓋治山防災、防救災業務、山坡地監測管理及農村相關作業中；在農業領域，黃韋蒼等 (2019) 則將 UAV 與無人多足地面機技術相結合，利用 UAV 拍攝果樹上方並由無人多足地面機掃描果樹下方，成功建立果樹完整的三維模型，便於後續精確監測果樹生長情況，進一步支持智慧農業管理。

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw

上述研究案例顯示了 UAV 在精密測量、災害監測以及農業管理中的多元應用與潛力，且隨著技術發展，其功能與應用場域有望持續拓展。隨著低成本 LiDAR 感測器的普及及智慧型手機 (如 iPhone Pro 系列) 的發展，手機 LiDAR 技術在建築、地質、文化遺產記錄等領域的應用變得更加便捷 (Luetzenburg et al., 2021; Çakir et al., 2021)。儘管手機 LiDAR 的測量精度較專業手持雷射掃描儀低約 10 公分 (Gollob et al., 2021)，但其精度已足夠應用於多領域的日常研究與工程需求。例如，農業部農村發展及水土保持署 (2023, 2024) 報告中指出，智慧型手機可於土石流災害現場快速建置三維資料，並在短時間內掌握災情，為防災救災提供參考，對災情研判及緊急應變具有重要幫助。手機的優勢在於提升環境連結辨識能力、攜帶便利性及作業時效性，而在農業部農村發展及水土保持署 (2023) 報告中，關於 AI 手機建模的主題更是該署電子報中最受讀者關注的內容之一。

此外，李金輝等 (2023) 的研究顯示，智慧手機光達系統能有效輔助地籍測量與界址辨識，其掃描所得的點雲資料不僅能詳細記錄物體表面形狀，還能輔助測量與地籍調查，對現場界址的記錄與判讀提供重要支持。水保署近年來也在災區進行了多項利用手機三維建模的研究，顯示其在災後重建及應急應變中的重要應用價值。

目前有關空地結合的研究較少，但在精密測量與三維建模領域，坐標轉換技術扮演著至關重要的角色，其中七參數坐標轉換方法已在國際上廣泛應用。過去在坐標轉換研究中，Andrei(2006) 探討了全球大地坐標系到國家坐標系的三維轉換方法，提出基於 7 參數的 Helmert 轉換模型，進一步研究了包含 9 參數與 8 參數的模型，分別考慮水平和垂直比例因子的不同。該研究強調，選擇高精度的控制點並保持局部畸變局限性，對於精確估算轉換參數至關重要。另一方面，Liu et al.,(2014) 則提出了 PA-Pose 方法，通過對齊點雲之間的密集對應關係進行高效融合，實現了 6D 姿態追蹤，顯著提升了追蹤的穩定性與推斷效率。這些方法在提升坐標轉換精度的同時，還支持了多維空間中穩定且高效的追蹤，為地理測量和三維建模等應用提供了強有力的技術支撐。隨著技術的進展，結合地面和空中測量數據不僅能顯著提升精度，還能有效降低誤差，使得空地結合在多領域的應用中展現出更大的潛力。

本研究結合了 UAV、viDoc RTK rover 設備及智慧型手機 iPhone 15 Pro(具備 LiDAR 與相機鏡頭) 進行三維點雲模型的建置。UAV 影像資料具有範圍廣泛的優勢，手機則提供高機動性與高解析度，而 viDoc 設備則能解決手機 LiDAR 掃描在絕對坐標上的精度問題，進一步提升手機掃描結果的準確性，並補足 UAV 難以拍攝的區域。最終，通過七參數坐標轉換，將兩者模型進行融合，達到互補效果，從而提升建模品質與應用價值。

二、研究方法

1. UAV 建模原理

三維數值模型的建置原理採用運動回復結構 (Structure from Motion, SfM) 技術。此技術透過一系列具有一定重疊率

的連續影像中的共同特徵點進行匹配，計算出每張影像的透視中心，進而建置三維數值模型，以確立模型中物體、每張影像及其透視中心之間的空間關係。SfM 技術源於攝影測量學中的共線方程式，因此三維模型、物體、影像及其透視中心之間的關係可通過共線方程式加以描述。以下將針對航線規劃、共線條件及 SfM 技術進行說明。

(1) 航線規劃

本研究使用 UAV 拍攝研究區域的多幅正射影像，並利用 Pix4Dmatic 軟體生成點雲資料。由於在建置三維模型時，需從各影像中提取物體的特徵點並進行匹配與影像連結，因此相片之間必須達到一定的重疊率才能進行匹配。

(2) 共線條件 (Collinearity condition)

UAV 進行航空拍攝後，利用共線條件 (Collinearity Condition) 即可計算出影像與地面間的幾何關係，其原理為將地面上任一地形點 (A)、影像位置 (a) 及相機曝光位置 (L) 應位於同一條直線上。共線方程式如下 (DeWitt, and, Wolf, 2000)：

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

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

上式中， x_a 、 y_a 為影像中任意點 a 的影像坐標； x_0 、 y_0 為像主點的影像坐標 (以影像長、寬之一半的交會處為指定像主點)；f 為相機焦距； X_A 、 Y_A 、 Z_A 為點 A 在三維空間中的實際坐標； X_L 、 Y_L 、 Z_L 則為相機曝光位置在三維空間中的實際坐標； m_{ij} 為坐標轉換時旋轉矩陣所需的係數。計算上述公式即可求得其餘點位的空間坐標，建立出點雲模型。

(3) SfM 技術

SfM 技術是一種從多張重疊影像中生成三維模型的方法，主要步驟為：1. 特徵點提取與匹配，2. 相機位置與運動方向估算，3. 優化運算結果，4. 多視立體計算 (MVS)，5. 將密集點雲轉為三角網格，並應用影像中的顏色和紋理，完成三維模型。圖 1 為 SfM 示意圖。

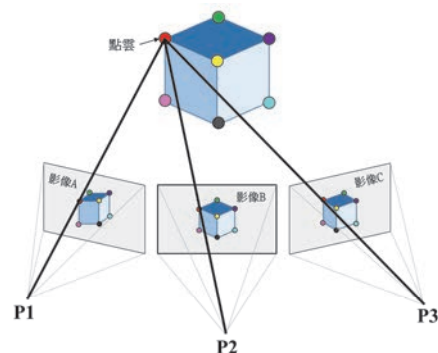


圖 1 SfM 之示意圖

Fig.1 Schematic diagram of SfM2. LiDAR (Light Detection and Ranging) principle

LiDAR 是一種光學遙感技術，以高效率、高解析度和高精度的方式進行測量。其運作原理是透過儀器發射雷射光，對目標進行高精度掃描，並將回傳數據坐標化，最終生成三維點雲資料。此技術於 1960 年代發展初期主要應用於航空領域 (Yilmaz and Yakar, 2006; Zeybek, 2019)。到 1970 年代，LiDAR 成為遙感測繪的重要工具，廣泛應用於森林、海洋、大氣及地形的測繪 (Özdemir et al., 2021)。隨著 1980 年代末全球定位系統 (GPS) 和慣性測量單元 (IMU) 技術的結合，LiDAR 的應用進一步擴展，逐步發展為空中和地面兩種類型 (Mehendale and Neoge, 2020)。現今的 LiDAR 系統通常配備攝影機、全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 及 INS 系統，並採用雙向測量技術。系統通過反射光的能量強度，生成帶有 RGB 色彩的點雲。如果配備攝影機，則點雲可根據拍攝的影像進行著色 (Kuçak et al., 2020; Özendi, 2022)。

近年來，由於低成本 LiDAR 感測器的普及，加上智慧型手機 (如 iPhone Pro 系列) 的發展，使其在建築、地質、文化遺產記錄等多個領域的應用更加便捷 (Luetzenburg et al., 2021; Çakir et al., 2021)。研究顯示，相比專業手持雷射掃描儀，手機 LiDAR 的測量精度約差 10 公分 (Gollob et al., 2021)。儘管其精度精度相對於專業地面雷射掃描儀較低，但已足夠應用於多領域的日常研究及工程需求。

3. GNSS-RTK

GNSS 為利用多頻之衛星定位接收儀獲取多系統結合衛星訊號，以提供接收設備三維坐標、速度及時間資料，而即時動態定位技術 (Real-Time Kinematic, RTK) 是利用兩部衛星定位儀器進行高精度即時定位技術，其中一部為參考站，另一部為移動站。參考站持續接收載波相位觀測量，並將數據透過無線電或其他通訊方式傳送給移動站。移動站在接收參考站與自身的觀測數據後，通過 OTF (On-the-Fly) 搜索法解算週波未定值，並利用差分定位概念，實時計算出移動站的瞬時坐標，使其能在純動態環境下，任意時刻求解高精度位置。本研究將 GNSS 結合 RTK 技術，GNSS 測量和 GPS (或 GPS+GLONASS) 相比，最大的特點是在於單位時間內，儀器接收多顆衛星資料並加以計算，所以它可以克服 GPS 量測時所面臨到的問題，也就是觀測衛星增多，觀測時間縮短，精度卻維持不變。將 GNSS 定位精度結合 RTK 快速定位的特性，GNSS-RTK 技術可精進作業時效、和在預估精度上不受影響 (邱建華, 2019)。

4. 七參數坐標轉換

本研究使用由詮華國土測繪有限公司提供之坐標參數轉換程式 V1.0 Ader，求得各參數值後，將參數值帶入自製 Fortran 程式。七參數坐標轉換為將三度空間中同一點的兩組地心坐標進在考慮沒有網形變形的理想情形下進行坐標的正交轉換工作，其中七參數為一個尺度參數、三個原點平移參數以及三個軸旋轉參數。

在三度空間同一點的兩組卡式坐標進行坐標轉換，假設兩者一個線性轉換，如式 2-3 (Rapp, 1993)。考慮兩組卡式坐標在三度空間中為直角正交之情形，可將式 2-3 以六參數之形式表示，如式 2-4。於兩坐標系統間有一尺度之差異，因

此需加入一尺度參數 (S) 如式 2-5。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = SR(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

七參數坐標轉換使用的模式有 Bursa-Wolf (Rapp, 1993) 及 Molodensky-Badekas 模式 (Fritzensmeier et al., 1985)，由於 Bursa-Wolf 模式的參數則較容易受到共同坐標間各種誤差影響，無法計算出坐標間準確的關聯性 (黃華尉, 2001)，而 Molodensky-Badekas 模式係將坐標原點平移至區域重心後再進行坐標轉換，可避免旋轉與平移參數間產生高度相關之情形，因此本研究採用 Molodensky-Badekas 模式，如式 2-6。且因式中為七個參數，故最少需要三個在同一點的坐標才能求解。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + S * R \begin{bmatrix} X - X_m \\ Y - Y_m \\ Z - Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

5. 研究流程

本研究完整研究流程圖如圖 2 所示，流程詳細說明如下：

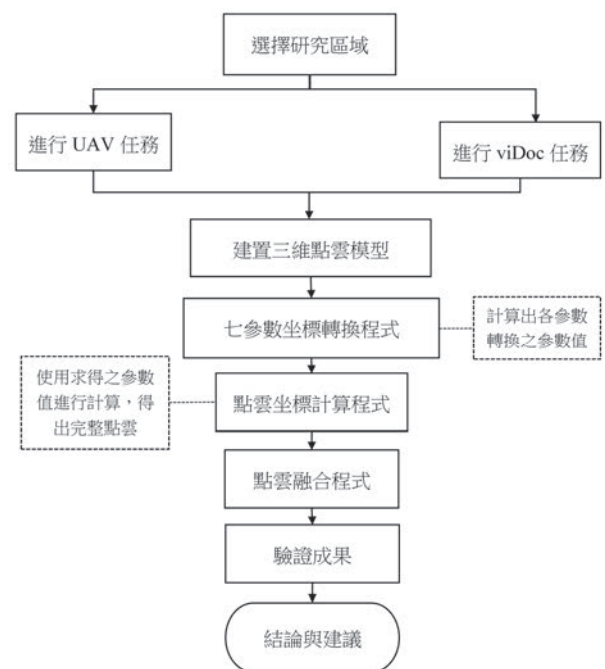


圖 2 研究流程圖

Fig.2 Research process

(1) 選擇研究區域

擇一山坡地，其具有植被遮蔽，並設有一種或一種以上之水土保持工程構造物之區位，本研究選取南

投縣國姓鄉南港村南港路的金九高山咖啡周遭區域作為研究區域。

(2) 建置三維點雲模型

選定研究區域後，使用 UAV 進行影像拍攝後利用 PIX4Dmatic 產製出密集點雲模型；在構造物區域使用 viDoc 進行影像拍攝後產製出密集點雲模型及網格模型，利用 PIX4Dmatic 內建功能輸出從網格模型生成的點雲資料，並上傳至 pointbox 中以便進行查看。

(3) 坐標轉換參數求解程式

選定已知坐標之點雲模型與欲轉換之點雲模型之控制點後，利用銓華坐標轉換程式計算求得各參數之轉換值。

(4) 七參數坐標轉換程式

將 V1.0 Ader 程式求得之參數值帶入自製的坐標轉換程式中進行計算，將完整之點雲模型進行坐標轉換，得出完整點雲。

(5) 點雲融合程式

在自製的程式中，設定門檻值將轉換後之點雲模型成果與已知坐標之點雲模型間重合之點雲進行篩選優化後，調整轉換之點雲模型之亮度以利於成果分辨後融合兩者模型，或直接調整兩者點雲模型其中之一後，將兩者點雲模型進行融合。

(6) 驗證成果

檢核模型與構造物實際尺寸誤差，及檢核進行坐標轉換後兩模型間的坐標相對即絕對誤差，判定兩者模型融合之完整性，最後進行成果討論與結論與建議。

三、研究區位與設備

1. 研究區位

本研究範圍選取位於南投縣國姓鄉南港村南港路的金九高山咖啡周遭區域，該地區為海拔高度約 480 至 550 公尺的山坡地，周邊多為植被覆蓋，並設有擋土牆、L 型排水溝及道路鋪墊等設施，如圖 3 所示。

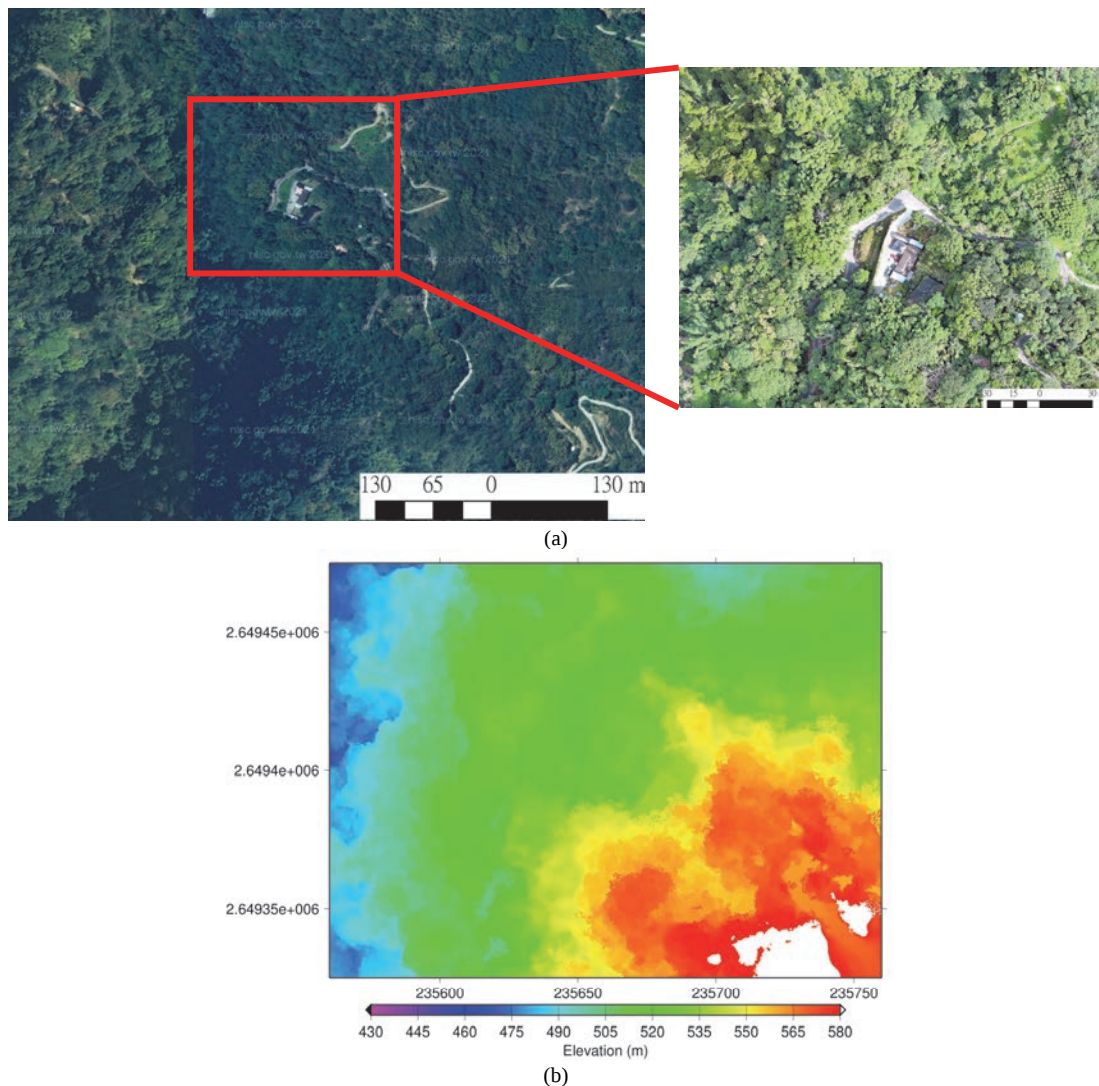


圖 3 (a) 研究區位圖；(b) 區位地形圖

Fig.3 (a) Location of study area; (b) Topographic map of study area

2. 研究軟硬體設備

(1) UAV 空拍設備

本研究應用 AUTEL EVO II RTK 拍攝, 如圖 4(a) 所示。其機型適中攜帶方便且穩定性高, 不容易受風干擾影響拍攝, 能夠拍攝高解析度約 5472x3648 的 RGB 影像, 具有 360 度全方位避障系統, 能降低機身撞擊機率, 且具備公分級的高精度定位系統, 因此經常用於山區監測、設施巡檢或影像拍攝建模等用途。本研究將應用 AUTEL EVO II RTK 進行拍攝並建立 3D 點雲模型, 提供後續進行坐標轉換之應用。

(2) viDoc RTK 光達系統

本研究使用 viDoc RTK rover 設備搭配智慧型手機 iPhone 15 Pro(硬體具 LiDAR 與相機鏡頭) 進行拍攝, 如圖 4(b) 所示。viDoc 透過 NTRIP 技術運作, 可安裝在智慧型手機背面, 搭配 Pix4Dcatch 一起使用。viDoc 機型輕巧, 方便攜帶使用, 且 Bureau Veritas(必維) 集團於 2022 年 6 月認證 viDoc 的測量精度小於 5 公分, 體積計算誤差幅度小於 5%, 其成果精準。

(3) 坐標轉換程式

本研究將利用詮華 V1.0 Ader 程式進行坐標轉換, 針對七參數計算出轉換後之點雲詳細資料, 由於此程式僅針對坐標進行計算, 無法產製出包含 RGB 格式之點雲資料, 且最多僅能計算約 2 萬點點雲資訊, 而點雲模型的點雲數量遠超於兩萬點, 因此本研究將利用詮華 V1.0 Ader 程式所計算出之參數值, 帶入自製坐標轉換程式, 以求得完整點雲。

(4) PIX4Dcatch

PIX4Dcatch 為 PIX4D 所開發的攝影測量 APP, 可將具 LiDAR 功能的手機或平板電腦等移動設備作為 3D 掃描儀, 透過錄影或靜態拍照模式來進行資料蒐集, 並可將拍照位置定位資訊寫入影像檔中。

(5) PIX4Dmatic

PIX4Dmatic 為 PIX4D 所開發的快速大規模影像圖資處理軟體, 其可將 UAV 所拍攝之影像進行快速計算, 且可利用攝影測量和 LiDAR 技術的優勢, 處理 PIX4Dcatch 的 LiDAR 和 RGB 影像輸出, 並提供三維點雲、數值地表模型 (DSM)、網格模型與正射鑲嵌圖, 提供後續有效之地理分析與整合。本研究將利用 PIX4Dmatic 將 UAV 及 viDoc 拍攝之影像產製出點雲模型後, 再利用坐標轉換將兩者點雲模型進行融合, 產製一完整的點雲模型。

(6) Pointbox

Pointbox 為一免費網站, 使用者創建一個帳號後即可上傳點雲模型, 可接受之檔案規格包括 xyz、laz、las、pst 等, 但檔案大小不可超過 2.2GB。將檔案上傳至 Pointbox 後, 任何人皆可通過模型上傳後所產製出的連結觀看模型成果。



(a)



(b)

圖 4 UAV 和 LiDAR 儀器, (a) AUTEL EVO II RTK ; (b) viDoc RTK rover 和 iPhone 15 Pro

Fig.4 The UAV and LiDAR instruments. (a) AUTEL EVO II RTK; (b) viDoc with iPhone 15 Pro

四、實驗設計

1. UAV 航拍

本研究以南投縣國姓鄉南港村南港路的金九高山咖啡周邊區域為拍攝範圍, 選取長約 200 公尺、寬約 125 公尺的矩形區域, 並設置左右重疊率為 85%、前後重疊率為 90%、航高為 60 公尺, 進行大範圍拍攝。於 2024 年 9 月 27 日時, 透過六條航線共拍攝了 131 張照片, 如圖 5 所示。完成拍攝後, 將影像資料導入 PIX4Dmatic 軟體, 生成三維點雲。

2. viDoc RTK rover 拍攝

本研究於 2024 年 9 月 27 日時, 針對南投縣國姓鄉南港

村南港路的金九高山咖啡周遭道路及其水土保持工程構造物使用 viDoc RTK rover 搭配 iPhone 15 Pro 及 PIX4Dcatch 進行拍攝，其中拍攝所使用之前後重疊率為 90% 共拍攝了 892 張照片，拍攝路線如圖 5 所示。拍攝完畢後，將像片從 PIX4Dcatch 匯出，並將其所拍攝之 LiDAR 和 RGB 影像導入 PIX4Dmatic 產製出三維點雲。

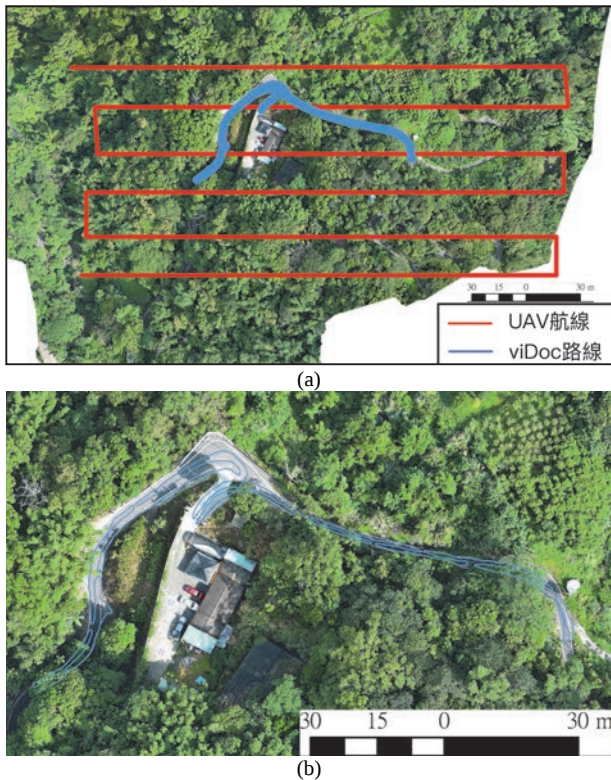


圖 5 (a) UAV 空拍和地面 viDoc 掃描路線 (紅色線條為 UAV 航線，藍色線條為 viDoc 路線)；(b) viDoc 詳細掃描路線

Fig.5 (a) UAV aerial photography and ground viDoc scanning routes. (Red lines represent UAV flight paths, and blue lines represent viDoc scanning routes); (b) Detailed viDoc scanning routes.

3. 坐標轉換

在 UAV 拍攝生成的點雲模型中，水土保持工程構造物的細節通常難以精確呈現，且易因植被遮蔽而導致模型中出現缺失的點雲資料。因此，本研究將融合 UAV 和 viDoc 生成的點雲模型。然而，由於兩者模型所使用的坐標系統不同，導致無法完美結合。本研究將在兩者模型中選取 12 個相同位置的點雲坐標作為控制點 (如圖 6 中紅點所示)。接著，將這 12 個點導入坐標轉換程式，進行七參數坐標轉換。再將轉換後的結果以及 UAV 拍攝生成的點雲模型輸入到本研究自製的 Fortran 坐標轉換程式中，將其轉換至 viDoc 點雲模型的坐標系統，最終輸出轉換後完整的 UAV 點雲模型。

4. 點雲融合

本研究以自製坐標融合程式，首先設定一個門檻值 (門檻值一)，並由兩者模型的點雲資料中各取一點，其取出的兩

點相差距離在門檻值以下之點雲進行過濾，刪除為轉換後的 UAV 之點雲者，留下已知坐標的 viDoc 點雲資料。而後再設定兩個門檻值 (門檻值二、門檻值三)，將由兩者模型經過第一步篩選後的點雲資料中各取一點，其取出的兩點相差之水平距離在門檻值二以下且同時兩者間高程數值相差在門檻值三以下之點雲進行過濾，將原先 UAV 點雲模型中精度不足的點雲資料進行刪除。在本研究中，門檻值一設定為 0.1 公尺、門檻值二設定為 0.05 公尺、門檻值三設定為 1.8 公尺。將轉換後的 UAV 點雲模型成果與已知坐標的 viDoc 點雲模型間重合之點雲進行篩選過濾後，調整 UAV 點雲模型之亮度，本研究將其點雲 RGB 數值範圍由 0 到 255，縮減為 0 到 100，使其整體模型亮度變暗，以利於融合成果後易分辨兩者模型。

又因本研究成果為上傳至 Pointbox 進行呈現，而 Pointbox 內調整點雲大小的功能並不是十分精細，viDoc 點雲模型點雲資料數量過大，若是將完整模型直接上傳，其模型呈現效果極差，因此本研究將 viDoc 點雲模型資料以每五點取一點的方式篩選出一點雲數量較少之 viDoc 點雲模型，最後，融合兩者調整過後之點雲模型。除此之外，本研究也將未經過濾篩選的 UAV 模型調整亮度後，直接將兩者點雲模型進行融合，在後續可與坐標轉換過後的模型成果進行比較分析。



圖 6 控制點與檢核點分布圖 (紅點為 UAV 與 viDoc 模型融合連接點位置，藍點為絕對精度分析選點位置)

Fig.6 Distribution Map of Control Points and Check Points. (Red points indicate tie points for UAV and viDoc model integration, and blue points indicate points for absolute accuracy analysis)

五、成果與討論

本研究 UAV 所拍攝生成的點雲成果縮略圖如圖 7(a) 所示，viDoc 拍攝生成的點雲模型成果如圖 7(b) 所示，兩者模型詳細成果皆可由其連結 (請參閱圖 7 說明) 查看，以下將針對兩者的點雲模型成果以及兩者間坐標轉換、點雲融合的

成果進行討論：

1. 模型建置成果

(1) UAV 點雲成果

由 UAV 拍攝所建置出的點雲模型成果可以看出，雖然 UAV 可拍攝大範圍之圖資，但 SfM 技術在建置模型時，因植生遮蔽不易找尋到像片中的匹配點，使得建製模型時部分點雲資料缺失造成破圖，如圖 8 中紅框所示，且因拍攝像片時距離較遠及相機解析度不夠精細，導致模型中構造物外觀成果較為粗糙，如圖 8 中藍框所示。

(2) viDoc 點雲成果

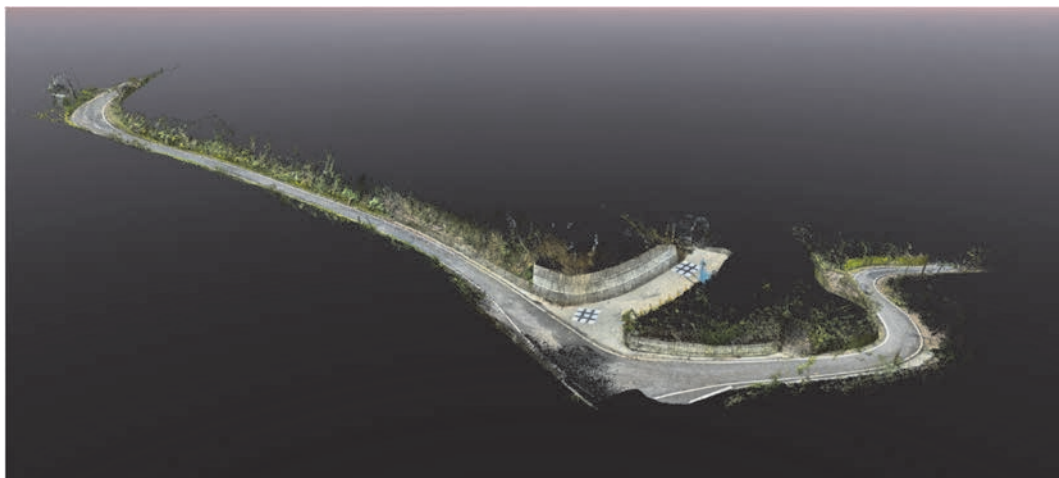
雖然無法像 UAV 一樣快速建置大範圍之模型，但由 viDoc 拍攝所建置出的點雲模型成果，而可以看到構造物外觀較為精細如圖 9(a) 所示，且網格模型成

果外觀更加清晰，如圖 9(b) 所示，其因密集點雲的建置成果較為精細，導致雜訊較多，後續再建置網格模型時，軟體會進行除錯、規則化、內差點雲資料等動作，將點雲模型中的雜訊及錯誤去除，並補足了原先缺失點雲資料而導致的破圖。

針對實際尺寸與模型量測尺寸進行比較，位置選擇如圖 10，其模型中量測尺寸與實地量測尺寸如表 1 所示，根據表 1 可以看出無論是左側矮牆高、洩水孔內徑、左側道路寬又或者是右側矮牆高、右側道路寬、兩洩水孔連線長，其尺寸大至左側道路寬 3.770 公尺，小至洩水孔內徑長 0.078 公尺在模型中量測尺寸與實地量測尺寸誤差皆在 0.010 公尺內，由此可知 viDoc 所建置出的模型其相對精度是較為準確的。



(a)



(b)

圖 7 三維模型建置成果。(a) UAV 點雲模型；(b) viDoc 點雲模型

Fig.7 3D model construction results. (a) UAV point cloud model;(b) viDoc point cloud model



圖 8 UAV 點雲模型，其中紅框和藍框分別顯示點雲缺失和粗糙的構造物外觀

Fig.8 UAV point cloud model, where the red box and blue box indicate areas of point cloud loss and rough appearance of structures, respectively



圖 9 viDoc 模型。(a) 點雲模型；(b) 網格模型

Fig.9 viDoc models. (a) point cloud model; (b) mesh model

表 1 viDoc 構造物建模與實際尺寸比較表

Table 1 Comparison of viDoc structure modeling and actual size.

位置	量測位置	實際尺寸 (公尺)	模型量測尺寸 (公尺)
1	左側矮牆高	0.880	0.885
2	洩水孔內徑	0.078	0.072
3	左側道路寬	3.770	3.766
4	右側矮牆高	1.090	1.083
5	右側道路寬	3.130	3.121
6	兩洩水孔連線長	1.650	1.646

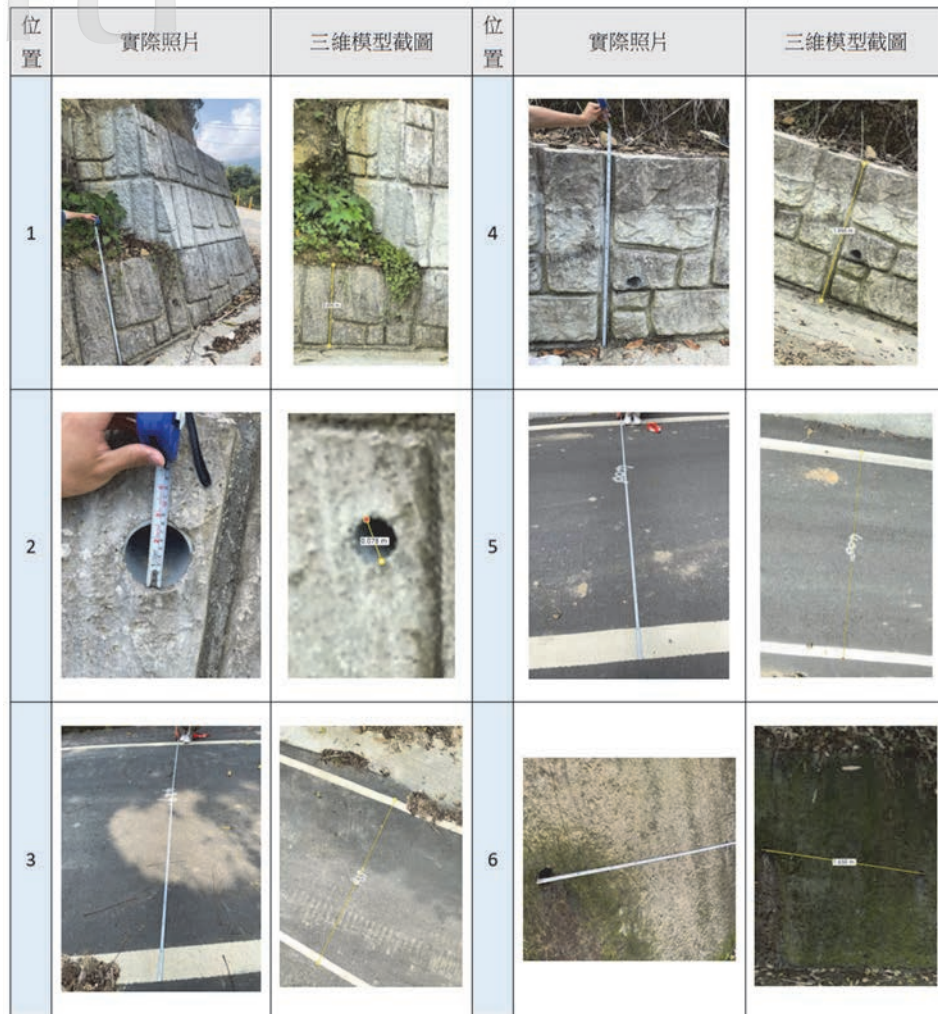


圖 10 viDoc 構造物建模成果與實際尺寸比較圖

Fig.10 Comparison of results from viDoc structure modeling and actual size

2. 坐標轉換成果

圖 11(a) 為無坐標轉換點雲融合之成果，圖 11(a) 中顏色較暗的為 UAV 模型，較亮的為 viDoc 模型，兩者模型因坐標系統不一致，融合後有著顯著的高程落差及些微的水平差距，因此其成果無法接合。本研究將 UAV 點雲成果經坐標轉換程式進行七參數轉換後，其坐標轉換精度評估成果如表 2 所示，由表 2 中可以看出在 X、Y、Z 各項點位誤差正負值隨機不固定說明模型無系統誤差，X 方向平均點位誤差值較 Y、Z 方向小，其中 a、j、l 三點點位誤差較大，由圖 6 中紅點位置可以看出可能是因為 j、l 三點點位皆位於植物遮蔽及破圖邊緣處，而所有點位經七參數轉換完中誤差為 0.068 公尺，誤差大為縮小，在後續進行點雲融合時，可以使得兩者融合得更加吻合。

3. 點雲融合成果

在本研究中通過自製的 Fortran 坐標融合程式中，在其設定門檻值設定門檻值，若兩點點雲距離一公分內，只取第一個模型之點雲減少點雲數量，並在設置另一門檻值，將原先建置 UAV 模型時即存在於兩者模型重複範圍內的點雲進行優化，最後將 UAV 點雲模型進行調色，其坐標轉換點雲

融合之成果如圖 11(b) 所示。經過點雲融合程式篩選過後的點雲模型的點雲資料優化了許多，其成果如圖 12 所示，除此之外，經過七參數坐標轉換後的模型在其高程方面有著明顯的修正，使得兩者融合成果更精細。由圖 13 可以看到兩者模型雖然在接合處沒有到非常吻合，從接合處可以直觀的看出誤差值已經明顯縮小約在 0.06 公尺到 0.15 公尺，且在模型重疊的範圍內，viDoc 模型成功補足了 UAV 模型的不足處，並優化了原先的點雲資料，使其成果更加精美，因此由模型成果得知利用七參數坐標轉換能將兩個建築物進行融合，產製出一完整之點雲模型。

使用融合後的點雲模型以及使用 viDoc RTK rover 測量獲得的控制點坐標 (如圖 6 中的藍點所示) 對模型進行絕對精度分析，分析結果如表 3 所示，顯示中誤差為 0.152 公尺。此誤差可能是由於 pointbox 網頁上的模型解析度不足，導致選擇點位時的精確度受限。此外，從表 3 中可以看出，相較於點位 M 和 N，點位 O 和 P 的誤差相對較小。由圖 6 中的藍點搭配圖 13 可知 O 和 P 點位來自 viDoc 模型，而 M 和 N 點位來自 UAV 模型，因 UAV 模型經過七參數轉換，於七參數轉換時中誤差 0.068 公尺，再因解析度原因而導致選點不夠精確，使得其誤差變得較大。

表 2 坐標轉換精度評估成果 (單位：公尺)

Table 2 Coordinate transformation accuracy assessment results. (Unit: Meter)

點位	X方向誤差	Y方向誤差	Z方向誤差	點位誤差	中誤差
a	-0.022	0.023	0.116	0.120	0.068
b	0.050	-0.038	0.047	0.078	
c	0.029	-0.036	-0.047	0.066	
d	0.043	-0.046	-0.073	0.096	
e	0.033	-0.010	-0.017	0.038	
f	-0.012	0.037	0.059	0.071	
g	-0.032	-0.038	-0.057	0.076	
h	-0.037	0.019	-0.054	0.069	
i	0.023	0.060	-0.019	0.067	
j	-0.031	0.111	0.028	0.118	
k	-0.027	0.051	0.051	0.062	
l	-0.017	-0.133	-0.003	0.134	

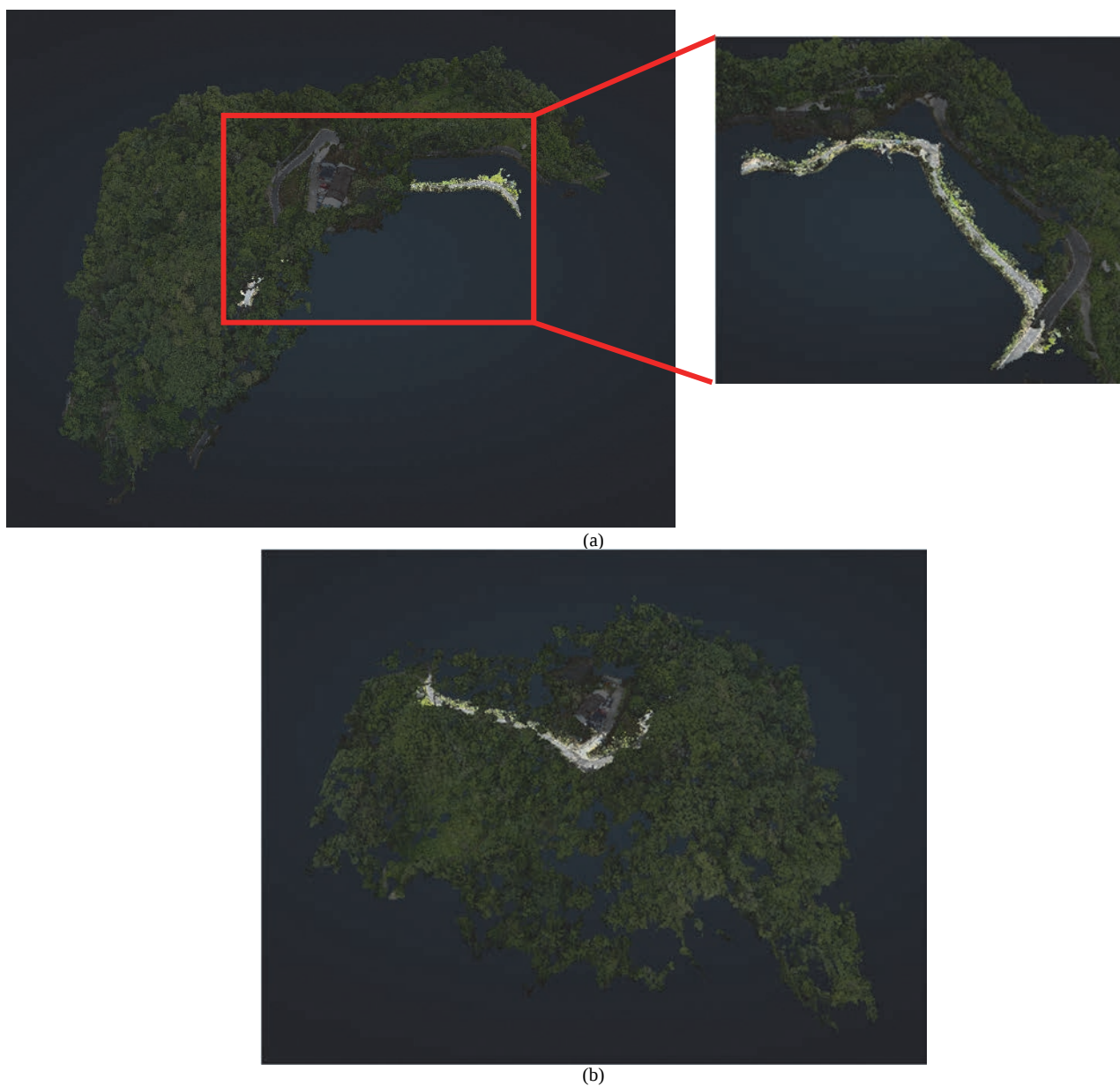


圖 11 UAV 與 viDoc 三維模型融合成果 (a) 座標參數未轉換；(b) 七參數座標轉換

Fig.11 3D model integration results of UAV and viDoc. (a) without coordinate transformation; (b) with 7-Parameter coordinate transformation



(a)



(b)

圖 12 點雲優化篩選示意圖。(a) 優化前點雲模型；(b) 優化後點雲模型

Fig.12 Schematic diagram of point cloud models (a) before and (b) after optimization



圖 13 點雲模型接合處示意圖

Fig.13 Schematic diagram of point cloud model joints

表 3 絕對精度分析成果 (單位：公尺)

Table 3 Absolute accuracy analysis results. (Unit: Meter)

點位	X方向誤差	Y方向誤差	Z方向誤差	點位誤差	中誤差
M	0.083	-0.197	-0.088	0.231	0.152
N	0.031	-0.120	-0.053	0.135	
O	-0.002	-0.008	-0.141	0.141	
P	0.089	0.008	-0.043	0.100	

六、結論與建議

針對目前成果可以給出以下結論：

1. 本研究使用 Fortran 程式撰寫出批次轉換點雲坐標之坐標轉換程式及用於融合有重複區位之點雲模型之程式，將重複區位之重複點雲進行篩選並優化後將成果上傳至 pointbox 呈現。
2. 根據成果可以得知進行七參數坐標轉換後能將 UAV 及 viDoc 間的模型進行融合，達到空地結合的效用，空地結合的應用帶來多項優勢，包括提高解析度與精度——以 viDoc 作為控制點，有效提升 UAV 生成點雲的準確性；

優化模型成果——UAV 提供大範圍數據，而 viDoc 補足細節內容，使三維模型更加完整。

此外，此技術可應用於防災工程，包括設計階段、施工監測與災後評估：在設計階段，可以精確掌握地形與構造物特徵，提高規劃精度；在施工監測方面，可以用於監控地形變化，確保其工程之穩定性；而在災後評估時，能快速建立受災區域三維模型，協助進行決策及修復規劃。其測量方法精度、點雲密度、優勢、使用限制與防災工程應用比較如表 4 所示，且由成果可知使用 viDoc 建置的模型中量測的尺寸與實地量測尺寸相比誤差甚小，應能應用於水土保持構造物檢查和製圖等用途。

表 4 測量方法精度、點雲密度、優缺點、使用限制與防災工程應用之比較

Table 4 Comparison of measurement method accuracy, point cloud density, advantages and disadvantages, usage limitations, and applications in disaster prevention engineering.

測量方法	精度 (cm)	點雲密度 (點/m ²)	優點	缺點	使用限制	防災工程應用
viDoc (地面測繪)	±1-3	500-2000	高精度、適用於細部測繪	需逐點測量，效率較低	測量範圍受限，需人工操作	適用於結構物細節建模、變形監測
UAV (空中測繪)	±5-20	100-500	廣域快速測繪	受天氣、光線影響大，需較多地面控制點校正	精度受地形與影像品質影響	適用於大範圍地形監測、災後變化分析
viDoc+ UAV (空地結合)	±3-15	300-1500	兼具廣域與細部高精度等優勢	需進行點雲對齊與誤差修正，後處理較繁瑣	需要較高計算資源與技術門檻	提供高完整性3D模型，協助工程設計與施工

3. 在本研究中，viDoc 點雲模型展現了較高的相對精度，如表 1 所示，誤差大多在 0.010 公尺內。最初，兩者模型融合後呈現顯著的高程落差與些微的水平偏差。然而，經過七參數坐標轉換後，UAV 點雲模型的誤差縮小至 0.068 公尺 (如表 2 所示)。最終，兩者點雲模型在坐標轉換與融合後的整體中誤差為 0.152 公尺 (如表 3 所示)，相較於七參數轉換後的 0.068 公尺有所增加。這一誤差擴大的可能原因包括 Pointbox 網頁上的模型解析度不足，影響選點的精確度，以及 M、N 選點方式的影響。

針對未來研究項目有以下建議：

1. 由於本研究需先使用 V1.0 Ader 程式取得各參數值後，才能將其帶入本研究中自製的 Fortran 程式進行計算，其過程相當繁瑣，期望後續能將所有過程簡化為一個 Fortran 程式，以一併完成上述操作。
2. 因本研究於兩者模型間重複點雲數量眾多，導致在進行點雲篩選時會耗費較長時間，期望後續能精進程式以改縮短點雲篩選之時長。
3. 由於 pointbox 內建程式中，調整點雲大小的功能並不是十分精細，導致構造物外觀的界線受其影響而較為模糊，期望後續能尋找到其他替代程式或改善方法，精進模型的展現效果。
4. 由於本次融合成果接合處仍有些許誤差，期望後續能通過在七參數轉換時，改善控制點的選擇以利減小其中誤差，使得模型可以接合得更加吻合，並在測量絕對坐標時，選擇更多的檢核點，以利於後續分析成果。
5. 期望後續可以選擇其他場域，拍攝更多種的構造物，去執行成果分析數據，使得研究數據更加多樣及完整。

補充資料

本文各點雲成果均整理於 pointbox 網站，使用者可自行瀏覽。資訊如下：圖 7 三維模型建置成果 (a) UAV 點雲模型 (b) viDoc 點雲模型，完整 UAV 與 viDoc 點雲模型成果可參閱 <https://www.pointbox.xyz/clouds/6703a1d63d5dfe8010b9e144> 和 <https://www.pointbox.xyz/clouds/6724508d3d5dfe3fb2b9e1d5>；圖 9 viDoc 模型 (a) 點雲模型 (b) 網格模型，完整的點雲與網格模型可參閱 <https://www.pointbox.xyz/clouds/6724508d3d5dfe3fb2b9e1d5> 和 <https://www.pointbox.xyz/clouds/672451ba3d5dfe7988b9e1d7>；圖 11 UAV 與 viDoc 三

維模型融合成果 (a) 座標參數未轉換 (b) 七參數座標轉換，完整的座標參數未轉換點雲模型與七參數座標轉換點雲模型可參閱 <https://www.pointbox.xyz/clouds/671b73193d5dfe130eb9e1c5> 和 <https://www.pointbox.xyz/clouds/671cc2393d5dfe1212b9e1c7>。

參考文獻

- [1] 李金輝、梁崇智、曾冠凱 (2023)，「以智慧型手機光達系統輔助地籍測量實地界址辨識應用評估－以草屯鎮地籍圖重測區為例」，地籍測量：中華民國地籍測量學會會刊，42(1)，23-33。(Li, J.H., Liang, C.Z., and Tseng, K.K. (2023). "Application of Smartphone LiDAR System for Land Surveying and Boundary Identification: A Case Study of the Land Re-survey Area in Caotun Township." *Journal of Land Surveying*, 42(1), 23-33. (in Chinese))
- [2] 林育伯、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，448，48-68。(Lin, Y.B., Wu, C.Y., Chen, J.W., Lin, Y.Q., Chen, K.W., Lin, J.H., and Chen, C.Y. (2020). "Current Status and Trends of UAV Applications in Soil and Water Conservation." *Journal of Construction Knowledge*, 448, 48-68.) (in Chinese)
- [3] 邱建華 (2019)，「應用 GNSS-RTK 技術在古蹟工程 3D LiDAR 雷射掃描之研究」，碩士論文，國防大學理工學院環境資訊及工程學系。(Qiu, J.H. (2019). *Comparison and Analysis of GNSS-RTK Combined with 3D LiDAR Technology on Monument Maintenance Project*. Master's Thesis, National Defense University, Taiwan.) (in Chinese)
- [4] 張嘉強、黃仁興 (2020)，「土方量測算技術之運用及比較」，測量工程 59，18-31。(Chang, C.C., and Huang, J.S. (2020). "Application and Comparison of the Measurements for Earthwork Volume." *Journal of Surveying Engineering*, 59, 18-31. (in Chinese))
- [5] 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，40-49。(Huang, W.C., Yu, J., Yen, Y.C., Shih, R.S., Lee, Y.S., Lin, S.K., Chen, T.C., Huang, C.C., Chen, Y.J., Qiu, J.C., and Ouyang, M. (2019). "Application of Aerial and Ground Unmanned Vehicles in 3D

- Fruit Tree and Forest Modeling.” *Smart Photonic Agricultural Robotics*, 40-49.) (in Chinese)
- [6] 黃華尉 (2001), 「TWD97 與 TWD67 二度 TM 坐標轉換之研究」, 碩士論文, 國立成功大學。(Huang, H.W. (2001). *A Study of Geodetic Datum Transformation between TWD97 and TWD67 by Using Transverse Mercator Coordinates*. Master's Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan.) (in Chinese)
- [7] 農業部農村發展及水土保持署 (2023), 「112 年度氣候變遷下大規模土砂災害衝擊與調適對策研究」, 期末報告書。(Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA. (2023). *Study on Large-Scale Sediment Disaster Impacts and Adaptation Strategies under Climate Change in 2023*, Final Report.) (in Chinese)
- [8] 農業部農村發展及水土保持署 (2024), 「113 年度氣候變遷下大規模土砂災害衝擊與調適對策研究」, 期末報告書。(Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA. (2024). *Study on Large-Scale Sediment Disaster Impacts and Adaptation Strategies under Climate Change in 2024*, Final Report.) (in Chinese)
- [9] Andrei, O. (2006). 3D Affine Coordinate Transformations.
- [10] Çakir, G.Y., Post, C.J., Mikhailova, E.A., and Schlautman, M.A. (2021). “3D LiDAR Scanning of Urban Forest Structure Using a Consumer Tablet.” *Urban Science*, 5(4), 88. <https://doi.org/10.3390/urbansci5040088>.
- [11] DeWitt, B.A., and Wolf, P.R. (2000). *Elements of Photogrammetry (with Applications in GIS)*. McGraw-Hill Higher Education.
- [12] Fritzensmeier, K., Kloth, G., Niemeier, W., Eichholz, K., and Berggewerkschaftskasse, W. (1985). “Simulation Studies on the Improvement of Terrestrial 2D-Networks by Additional GPS-Information.” *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und*.
- [13] Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., and Nothdurft, A. (2021). “Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology.” *Remote Sensing*, 13, 3129.
- [14] Kuçak, R.A., Erol, S., and İşiler, M. (2020). “Comparative Accuracy Analysis of LiDAR Systems.” *Turkish Journal of LIDAR*, 2(2), 34-40.
- [15] Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., and Rundquist, D., 2002. “Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction.” *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76-87.
- [16] Li, H.M., and Yakar, M. (2006). “LiDAR (Light Detection And Ranging) Tarama Sistemi.” *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 23-33.
- [17] Liu, Z., Wang, Q., Liu, D., and Tan, J. (2024). *PA-Pose: Partial point cloud fusion based on reliable alignment for 6D pose tracking*. *Pattern Recognition*, 148, 110151.
- [18] Louhaichi, M., Borman, M.M., and Johnson, D.E. (2001). “Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat.” *Geocarto International*, 16(1), 65-70
- [19] Luetzenburg, G., Kroon, A., and Björk, A.A. (2021). “Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences.” *Scientific Reports*, 11(1), 1-9.
- [20] Mehendale, N., and Neoge, S. (2020). “Review on LiDAR Technology.” *SSRN*. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3604309>.
- [21] Özdemir, S., Akbulut, Z., Karşı, F., and Acar, H. (2021). “Automatic Extraction of Trees by Using Multiple Return Properties of the LiDAR Point Cloud.” *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(1), 20-26. <https://doi.org/10.26833/ijeg.668352>.
- [22] Özendi, M. (2022). “Kültür Varlıklarının Yersel Lazer Tarama Yöntemi ile Dijital Dokümantasyonu: Zonguldak Uzun Mehmet Anıtı Örneği.” *Geomatik*, 7(2), 139-148.
- [23] Rapp, R.H. (1993). *Geometric Geodesy Part 2*.
- [24] Samad, A.M., Kamarulzaman, N., Hamdani, M.A., Mastor, T.A., and Hashim, K.A. (2013). “The Potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Civilian and Mapping Application.” *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, 313-318.
- [25] Yılmaz, H.M., and Yakar, M. (2006). “LiDAR (Light Detection And Ranging) Tarama Sistemi.” *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 23-33
- [26] Zeybek, M. (2019). “El-tipi LiDAR ölçme sistemleri ve 3B veri işleme.” *Türkiye LiDAR Dergisi*, 1(1), 10-15.

2024 年 12 月 24 日 收稿

2025 年 02 月 24 日 修正

2025 年 03 月 27 日 接受