航測及遙測學刊　第三十一卷　第 3 期　第 193- 211 頁　民國 115 年 9 月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume 31, No.3, 2026, pp. 193 – 211
DOI：10.6574/JPRS.202609_31(3).0004

應用低成本光達於大葉桃花心木人工林測計之可行性評估研究

郭哲源 [1]　魏浚紘 [2]　陳建璋 [3*]

摘要

隨科技日新月異，光學雷達感測器已內建於部分智慧型行動裝置，本研究測試 iPhone 15 Pro 與 viDoc RTK Rover 兩設備於大葉桃花心木人工林進行林下定位及掃瞄可行性試驗。結果顯示，該設備能使手機定位誤差縮小至公分級，可替代傳統 RTK GNSS 接收儀於林下定位採點；有效點雲資料需連接 viDoc 掃瞄，標記地面控制點可提高準確度，胸徑量測以重疊度 90% 為最佳，立木位置則為重疊度 75%，經邊際效應分析運算時長與各測計結果，建議以連接 viDoc 於重疊度 70% 並標記地面控制點為最佳組合。此設備於減少成本同時取得有效點雲資料，然仍受限於掃瞄範圍且對立木胸徑小於 5 cm 偵測能力較弱。

關鍵詞：低成本光達、智慧型行動裝置、點雲分析、RTK GNSS

1. 前言

現今諸多領域已廣泛藉由航空攝影測量(Aerial Photogrammetry, AP)、近景攝影測量(Close Range Photogrammetry, CRP)及光學雷達(Light Detection and Ranging, LiDAR)等方式收集三維資料，相較傳統地面調查可於減少外業成本下，透過非破壞性方式取得可數位化資料(Balenović *et al.*, 2021、Tavani *et al.*, 2022、Martino *et al.*, 2024、Yan *et al.*, 2024)；光學雷達又稱光達，主要由雷射器、掃瞄儀及全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收器組成；作業原理為雷射器主動發射出雷射脈衝，並依飛行時間法(Time of Flying, ToF)、相位差(Phase Difference)或三角原理(Triangulation)計算脈衝接觸物體後反射回儀器之距離，推算出三維空間座標(X, Y, Z)，並可搭載於衛載、空載及地面(固定式或移動式)等平台(Platform) (林建忠，1999、魏浚紘，2014) ，相較 AP 及 CRP 具穿透性強、幾何精度穩定、環境適應性高等優勢。

光達於林業上可推估大面積蓄積量或生物量，亦可單獨計算單株立木之林木性態值，提供碳盤查方面極大的優勢(Balenović *et al.*, 2021)，然 LiDAR 系統之購買、資料處理、維護保養等綜合成本較高且儀器體積普遍較大，現今仍難以全面普及(Bi *et al.*, 2021)。而隨近年感測元件發展迅速及諸多關鍵性元件及技術上之突破，如固態光達(Solid-State LiDAR)、互補式金屬氧化半導體(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)、垂直共振腔面射型雷射(Vertical-Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)、單光子雪崩二極體(Single-Photon Avalanche Diodes, SPADs)等，LiDAR 感測器已內建於部分智慧型行動裝置，目前蘋果公司自 2020 年推出 iPhone Pro/Pro Max 及 iPad Pro 系列產品市占率最高(Martino *et al.*, 2024)，再藉由多樣開源軟體進行掃瞄、處理、分析和計算等作業，整體使用成本相較於傳統光達系統便宜，故該類型光達又有低成本光達(Low-cost LiDAR)或消費級光達(Consumer-level LiDAR)之稱，

[1] 國立屏東科技大學森林系 碩士
[2] 國立屏東科技大學森林系 副教授
[3] 國立屏東科技大學森林系 教授
[*] 通訊作者, E-mail: janchang17@gmail.com

收到日期：民國 115 年 01 月 02 日
修改日期：民國 115 年 03 月 27 日
接受日期：民國 115 年 08 月 13 日

其原理與移動式光達相似亦有即時定位與地圖建構技術(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)，近期已於工程、林業、文史、地球科學等領域進行試驗，探討其應用成果及替代傳統光達系統之可行性(Gollob *et al.*, 2021、Mokroš *et al.*, 2021、Tavani *et al.*, 2022、Büyükmıhçı *et al.*, 2023、Chioni et al., 2023、Tamimi & Toth, 2024)。

儘管該類型低成本光達已證實部分林木性態值之掃瞄量測結果不亞於地面式光達，然受限於設備 5 m 之有效掃瞄範圍，於部分環境如 5 m 內出現複數目標、立木徑級變化較大之林地、樹皮複雜度高、環境光強度變化大及立木歪斜等，仍易出現掃瞄異常或錯誤，且對於樹高及樹冠之林木性態值資料收集仍較為困難(Bobrowski *et al.*, 2023、Brach *et al.*, 2023)，若強化行動裝置之 SLAM 演算法或配合 RTK GNSS 設備，可於一定程度提升 LiDAR 感測器掃瞄範圍及準確度並使點雲資料具更精確定位資訊，亦可能與空中獲取之資料結合，以取得更全面之森林或樣區點雲資料(Mokroš *et al.*, 2021、Brach *et al.*, 2023、Tatsumi *et al.*, 2023、Tamimi & Toth, 2024)；PIX4D 與 vigram GmbH 共同研發並推出 viDoc RTK Rover，透過藍牙連接行動裝置並搭配 PIX4Dcatch 軟體，可獲取公分級定位之影像與高品質點雲，該設備目前僅支援內建 LiDAR 感測器之 iOS 系統行動裝置，現今已有研究應用於古蹟建築、戶外道路、地球科學等領域中進行測量及試驗(Büyükmıhçı *et al.*, 2023、Suleymanoglu *et al.*, 2023、Martino *et al.*, 2024、Tamimi & Toth, 2024)。

大葉桃花心木(*Swietenia macrophylla* King)為臺灣中南部平地主要栽植樹種，於日治時期引進至恆春林試所進行栽植試驗，經試驗後發現其高度中南部適應氣候 (馮豐隆等，2010)，因過度採伐與天然更新困難，已於 2002 年列入《瀕危野生動植物種國際貿易公約》(CITES)附錄 II 並被限制出口及貿易，其永續經營成全球關注議題。

目前在臺灣鮮少有應用智慧型行動裝置於林業領域之研究及相關文獻，故本研究以 iPhone 15 Pro 與 viDoc RTK Rover 作為研究設備，於大葉桃花心木平地人工造林地進行：(1)評估 viDoc RTK Rover 於大葉桃花心木人工林之定位準確度；(2)評估智慧型行動裝置掃瞄之點雲資料測計準確度；(3)建立智慧型行動裝置之最佳掃瞄組合等 3 項掃瞄可行性試驗，以作為未來於林業應用之基礎。

2. 材料與方法

2.1 研究地點

本研究地點位於屏東縣萬巒鄉 185 縣道之萬金營區旁大葉桃花心木平地人工林，該造林地隸屬於臺灣糖業股份有限公司屏東區處屏東農場管理，於 1997 年配合政府林業政策種植，位置如圖 1 所示，共設立 3 個樣區並由北自南分別為 A1、A2 及 A3。

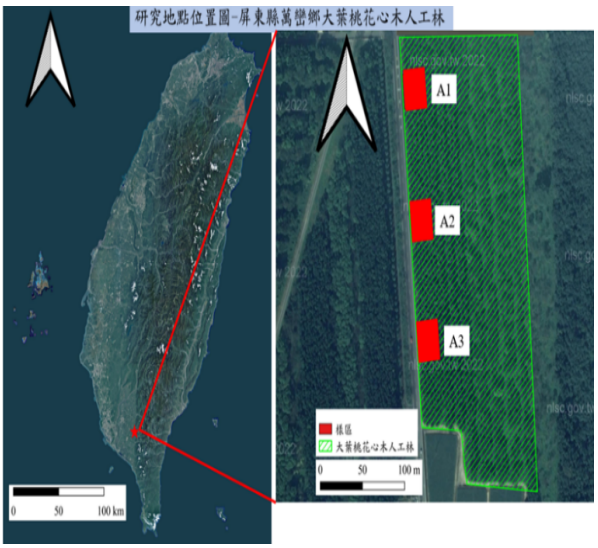


圖 1 研究地點位置圖

本研究地點海拔高度為 55 m，坡度為 5–10°，根據中央氣象署氣候觀測資料查詢服務(CWB Observation Data Inquire Severic, CODiS)統計，距離本研究地點最近之氣象站為赤山氣象站，設址於萬巒鄉建興路 40 號(22.592333, 120.614306)，海拔高度 32 m，本研究統計 2015 年 4 月至 2025 年 3 月之氣象資料，該地區年均溫約 25.7 ℃，平均年雨量約 3,019 mm，屬亞熱帶季風氣候類型，4–10 月為特濕期(Perhumid)，11–3 月為相對乾旱期(Relative Drought)，如圖 2 所示。

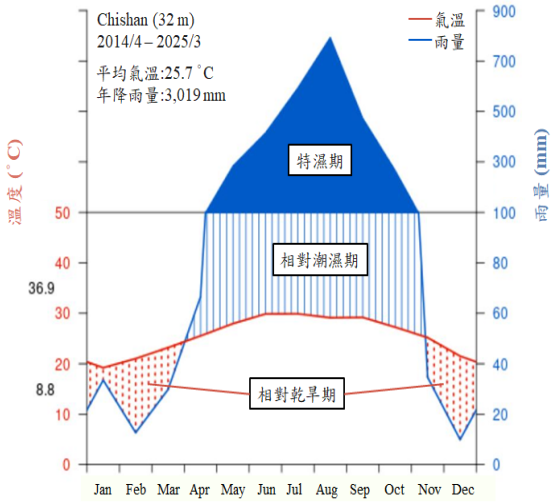


圖 2 研究地點生態氣候圖

2.2 研究對象

大葉桃花心木為楝科(Meliaceae)桃花心木屬(Swietenia)之大型落葉木本植物，原產自中南美洲，好生於低海拔之熱帶或亞熱帶地區，一般樹高可至 30 – 35 m，屬中淺根性植物且常有板根，葉為偶數羽狀複葉且於三、四月落葉，花為黃綠色不完全花，果實為卵形木質蒴果，種子為褐色扁長型且帶有長翅；枝葉生長茂密適合作為庭園或行道樹種，其木材性質優良，可用於製造家具、樂器及船艦等(馮豐隆等，2010)。

本研究於 2025 年 2 – 3 月設置共 3 個 25x 20 m 樣區，經地面調查後各樣區之資訊包括，A1、A2 及 A3 樣區之平均胸徑分別為 24.9、22.7 及 23.6 cm，最小胸徑為 4.0、3.5 及 6.4 cm，最大胸徑為 40.5、42.5 及 41.9 cm，立木株數為 39、46 及 55 株，立木密度為 780、960 及 1,100 trees/ha；將地面調查各樣區各立木胸徑值繪製成以 0 – 45 cm 為範圍並以 5 cm 為分級之胸徑級圖，直觀了解各樣區之立木胸徑概況，如圖 3 所示，其中立木胸徑小於 5 cm 共 3 株，分別為 A1 樣區 1 株及 A2 樣區 2 株。

2.3 研究設備

2.3.1 iPhone 15 Pro

蘋果公司之「iPhone Pro/Pro Max」及「iPad Pro」系列智慧型行動裝置均內建 LiDAR 感測器，採用直接式 ToF(directly Time of Flying, dToF)進行掃瞄，以 VCSEL 發射雷射脈衝，由 SPADs 接收並產生電流以記錄光子飛行時間，從而計算目標物空間位置；相比採樣頻率每秒數百萬點傳統光達系統的飛行時間法，dToF 採樣頻率僅每秒數十萬點，主要針對小範圍、室內或緩慢移動物體且視角固定，雖掃瞄範圍較短，然功耗低、環境光抗性增強且提高目標物細部成像；本研究以 iPhone 15 Pro 作為研究設備，其 LiDAR 感測器具深度感測能力，有效掃瞄範圍約 5 m，主相機鏡頭使點雲上色，如圖 4 所示，結合慣性測量單元(Inertial Measurement Unit, IMU)數據，經視覺里程計(Visual-Inertial Odometry, VIO)演算法獲取手機之姿態及位移資訊，A17 Pro 晶片可穩定進行掃瞄，1TB 容量可儲存資料，主機總重量為 187 g (Apple, 2024)。

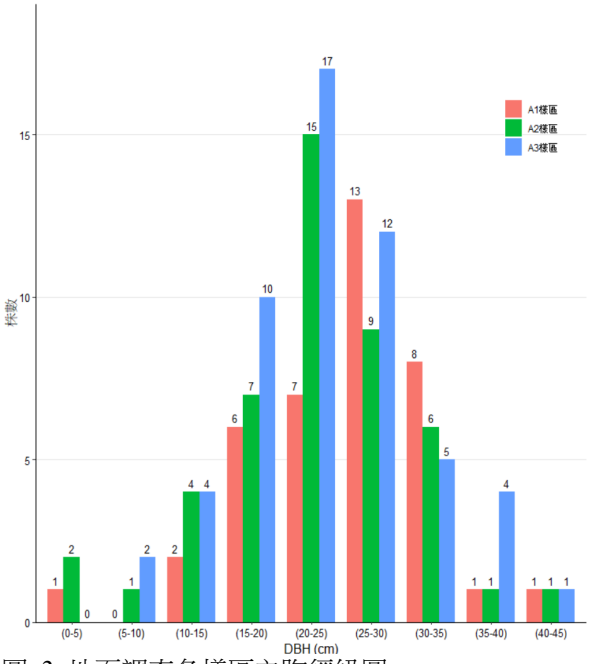


圖 3 地面調查各樣區之胸徑級圖



圖 4 iPhone 15 Pro 鏡頭配置圖

2.3.2viDoc RTK Rover

PIX4D 與 vigram GmbH 於 2021 年共同研發推出 viDoc RTK Rover，其設計目的在於使智慧型行動裝置具備公分級定位能力及透過自身 LiDAR 感測器進行掃瞄並立即生成點雲模型，用以取代傳統 RTK GNSS 基站或流動站及昂貴的光達系統，使建築工程人員能更輕鬆、快速且安全地完成決策流程及工程作業(viDoc, 2024)，其總重量約 261 g，目前主要搭配之智慧型行動裝置以 iOS 系統且內建 LiDAR 感測器之系列為主，設備外觀及各部位名稱如圖 5 所示。



圖 5 viDoc RTK Rover 外觀及各部位名稱

該設備進行作業需搭配 PIX4Dcatch 應用程式，當開機運行後需以藍牙方式與智慧型行動裝置連接，並透過固定端口連接行動裝置，方可於軟體介面中選擇 viDoc RTK Rover 以進行連線，連線後須設定網際網路傳輸 RTCM 協定(Network Transport of RTCM via Internet Protocol, NTRIP)以進行兩項作業：(1) RTK 定位，藉由 GNSS 接收器接收 GPS(含 L1C/A 及 L2C)、BeiDou(含 B1I 及 B2I)、Galileo(含 E1-B/C 及 E5b)、GLONASS(含 L1OF 及 L2OF)等四種衛星星系之訊號進行初步定位，再經由網路以 NTRIP 協定連結基地台傳輸 RTCM 即時校正資料，最後設備將自動校正大氣、多路徑及衛星軌道等多項誤差，最終於最大測量傾斜角 ± 20° 內取得約 1 cm ± 1 ppm 之定位精度 (viDoc, 2024)；(2)點雲模型生成，掃瞄原理為透過軟體內建之 GeoFusion 演算法，藉由行動裝置自身 GNSS 或 viDoc 取得 RTK 定位資訊即時結合 IMU、VIO 及 LiDAR 感測器之數據，並藉由連續影像估算設備位置，類似於視覺 SLAM 技術，當 短暫失去 RTK 訊號時，可藉由 IMU 與 VIO 之相對軌跡進行即時補償，以確保移動軌跡與姿態之連續性與精度 (PIX4Dcatch, 2026)；掃瞄時主鏡頭依影像重疊度或設備姿態進行影像觸發，LiDAR 感測器用於捕捉環境深度數據，影像及數據均具備經 GeoFusion 校正後之精確空間地理資訊，再經由密集影像匹配技術(Dense Image Matching Technology)即時生成點雲資料及模型，掃瞄完成後可匯出影像(.JPG)、點雲資料(.PLY)、網格模型(.OBJ)、紀錄檔(.LOG)及精度報告(.PDF)。

2.3.3 Stonex S9II RTK GNSS

本研究為進行 viDoc 於林下定位之準確性，以義大利 Stonex 公司之第二代 RTK GNSS 接收儀作為基準設備，其由全鎂合金外殼堅固且輕量化，可接收 7 種星系訊號，平面精度達 ±(8 mm + 1 ppm)，垂直精度為 ±(15 mm +1 ppm)，可藉由網路、外置電台、內置電台及 WiFi 四種方式連接。

2.3.4電腦設備

本研究生成和處理點雲模型及計算林木性態值所使用之電腦設備系統及硬體資訊如下，作業系統為 Windows 10 專業版 22H2，處理器為 Intel® CoreTM i7-7700 CPU @ 3.60GHz、24.0 GB 記憶體、NVIDIA® Corporation Quadro P2000/PCIe/SSE2 圖形處理器及 64 位元作業系統；因點雲資料具高密度數據特性，其資料生成、處理和計算之效率與電腦硬體效能呈正相關，增強硬體規格可有效減少運算時長。

2.3.5軟體設備

本研究所使用之軟體可分為外業掃瞄、模型生成及林木性態值提取等三方面，使用 PIX4D 公司開發之 PIX4Dcatch 應用程式進行掃瞄，並藉由 PIX4Dmatic 將影像生成為點雲模型，再透過 LiDAR360 提取所需之林木性態值，最後以 R 4.3.2 進行統計分析及繪製統計圖表，各軟體之版本及相關資訊，如下列所述：

(1) PIX4Dcatch 2.10.3，適用於內建 LiDAR 感測器之智慧型行動裝置的攝影測量軟體，藉由 GeoFusion 演算法與多感器器數據融合，以生成包含影像、點雲資料、網格模型及精度報表等資料。

(2) PIX4Dmatic 1.71.0，由 PIX4D 開發專用於處理無人機與地面測繪之影像拼接軟體，生成高精度點雲模型及網格模型，藉由 GPU 加速技術有效縮短運算時長，可於生成模型時進行地面控制點或手動標記連結點，進而提高資料之準確度；本研究應用其拼接 PIX4Dcatch 所拍攝之影像，並生成點雲模型，使用軟體時需先行率定步驟，方可選擇包含密集點雲、網格模型、數值地表模型等後續計算，本研究使用率定和密集點雲後即匯出精度報表及點雲模型。

(3) LiDAR360 v2.1，為專用於處理及分析來自地面及空載光達點雲資料之軟體，可進行裁減、躁點去除、自動化分類等運算，其設有專用於林業處理之模組，可進行單木分割、提取林木性態值及計算等功能；本研究應用其將生成之點雲模型進行處理並標記欲提取林木性態值之立木，以產出被標記立木之胸徑值及立木點位之.CSV。

(4) R 4.3.2，為專用於統計計算與圖形繪製之開源軟體環境，可於 UNIX、Windows 和 macOS 等多種平台運行，除提供多樣的統計模型及快速繪製相關圖表外，亦可藉由指令修訂及編輯圖表。

2.4 研究方法

本研究之研究目的為定位準確度及點雲資料準確度，並確立於人工林下之最佳掃瞄組合；本研究設置 3 個 25 × 20 m 樣區，每樣區內有 5 列立木，於每列立木中設置 2 個 GCP 及額外設置 1 個於樣區外作為掃瞄路徑之起終點，共計 11 個，如圖 6 如所示，GCP 除作為定位比較外，亦用於後續 PIX4Dmatic 拼接影像之標記點，設置完成後即進行地面調查及掃瞄試驗。

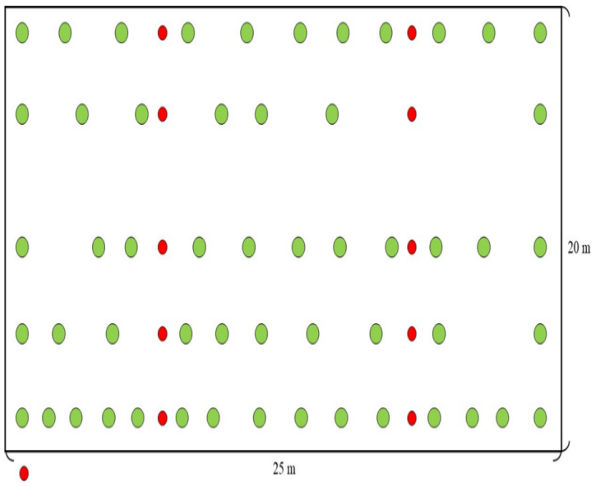


圖 6 樣區立木及 GCP 位置示意圖，綠色點為立木，紅色點為 GCP

2.4.1定位資料之準確度

本研究以三角錐作為 GCP，並於上方放置圓形球體作為球型共軛目標，如圖 7(a)所示。將三角錐放置完畢後，使用腳架搭載 S9II RTK GNSS，將腳架垂直置入三角錐之孔洞中後藉由腳架本身之水平氣泡儀定平，水平座標系統依 TWD97 EPSG:3826 設置，垂直座標系統依 Ellipsoidal height over the GRS 1980 ellipsoid 設置，當設備接收至固定解時，依每 2 秒採點 1 次共 20 次之設置進行 RTK 定位，如圖 7(b)所示；使用 viDoc RTK Rover 定位時，需於軟體上新增點位資料夾，座標系統與 S9II 使用相同設定，定位時行動裝置螢幕中綠色圓圈會顯示設備當前姿態，取得固定解後依每 1 秒採點 1 次共 15 次進行 RTK 定位，如圖 7(c)所示。使用 S9II 採點後會扣除標竿高，得實地高程資訊；viDoc RTK Rover 採點需開啟「底部雷射」，其底部會發射雷射光，高程是以雷射光接觸之目標物，非設備當下高度。

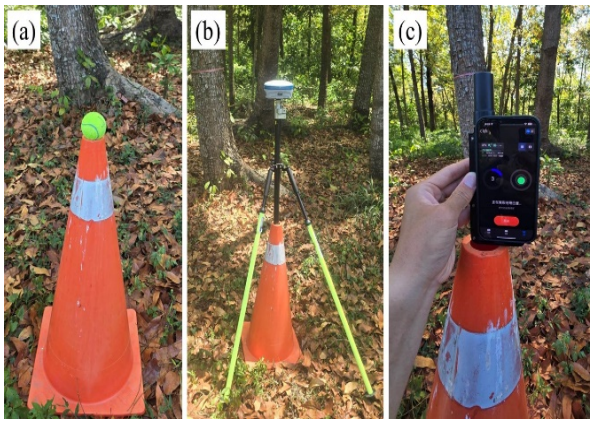


圖 7 GCP 設置與設備定位圖 (a)GCP 及共軛目標；(b) S9II 定位；(c) viDoc 定位

定位完成後，以 S9II 測量值為基準值，與 viDoc RTK Rover 測量值依北緯(以 N 表示)、東經(以 E 表示)及高程(以 h 表示)進行比較，計算逐點之差值及 RMSE、二維和三維之平均值、標準差，並透過成對樣本 t 檢定及 Pearson 相關係數(Pearson Correlation，以 r 表示)進行統計分析，各計算公式如下：

$$\begin{bmatrix}\Delta E\\ \Delta N\\ \Delta h\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}E_{s9II}-E_{viDoc}\\ N_{s9II}-N_{viDoc}\\ h_{s9II}-h_{viDoc}\end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix}\Delta_{2D}\\ \Delta_{3D}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sqrt{\Delta E^2+\Delta N^2}\\ \sqrt{\Delta E^2+\Delta N^2+\Delta h^2}\end{bmatrix} \quad (2)$$

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{d_i^2}{n}} \quad (3)$$

$$\overline{x}=\frac{\sum x_i}{n} \quad (4)$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}{n}} \quad (5)$$

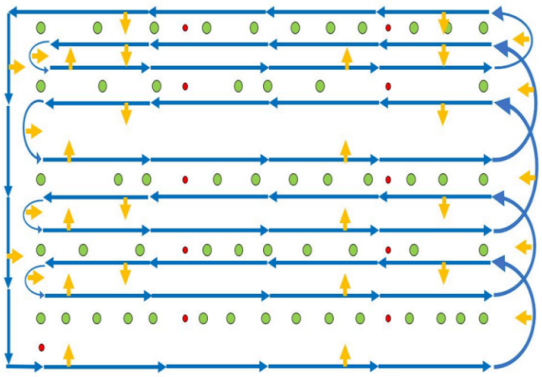
式中，$\overline{x}$為平均值(m)；i 為第 i 項差值；n 為總 GCP 數；d_i 為二維差值(Δ_{2D})或三維差值(Δ_{3D})，以 m 為單位。

2.4.2點雲資料測計準確度

本研究透過文獻回顧已知，藉由該類型設備於 5 m 外之林木性態值難以收集，故本研究以胸徑(Diameter at Breast Height, DBH)、立木位置(Tree Position, TP)、立木偵測率(Tree Detect Rate, TDR)、漏授率(Omission)及誤授率(Commission)進行比較，以地面調查值為基準值。

(1) 地面調查獲取林木性態值，本研究使用 Tanda 2.0M 胸徑尺於離地面高 1.3 m 處進行立木胸徑量測，以 cm 為單位；使用 Stonex S9II RTK GNSS 於樣區內每株立木旁並盡可能貼近樹幹進行立木位置採點，水平座標系統依 TWD97 EPSG:3826 設置，定平後依每 1 秒採點 1 次共 10 次進行 RTK 定位，將所獲取之立木位置資訊，分別以北緯及東經計算，以 TP_N 與 TP_E 表示，以 m 為單位；立木偵測率以目視方式，給與立木編號及統計每樣區立木數量。

(2) 掃瞄路徑設立，欲建置立木完整樹幹點雲資料，需至少以 2 個方向針對同一株立木進行影像獲取，本研究以手持設備離地面高約 1.3 m 處，鏡頭方向與行進方向夾 90° 角，始終將主鏡頭面朝左側並垂直正對立木，於樣區內每列立木繞行，如圖 8 所示，綠色圓圈為立木位置，紅色圓圈為 GCP 位置，藍色箭頭為行進方向，橘色箭頭為鏡頭方向。


圖 8 掃瞄路徑示意圖

(3) 掃瞄條件設立，本研究於每樣區中各使用 PIX4Dcatch(依手機自身 GNSS 定位，後以 PIX4Dcatch 表示)和 PIX4Dcatch + viDoc RTK Rover(依設備取得 RTK 定位，後以 viDoc 表示)進行掃瞄，影像觸發方式依 70%、75%、80%、85%及 90%共 5 種重疊度設定，而兩種定位模式及 5 種重疊度之每種組合於各樣區重複 3 次進行試驗；使用 viDoc RTK Rover 時，水平座標系統依 TWD97 EPSG:3826 設置，垂直座標系統依 Ellipsoidal height over the GRS 1980 ellipsoid 設置。

(4) 掃瞄過程，以不遮蔽相機鏡頭且朝向欲掃瞄方向，步行速度每秒約 0.5 – 1.0 m 平穩且勻速慢步前行；當連接上 viDoc RTK Rover 後，可藉由 PIX4Dcatch 介面知悉 GNSS 解算狀態，於固定解時螢幕上方會呈現綠色且顯示「固定解」，接收至固定解後再進行掃瞄，移動過程可能遇 RTK 信號中斷，此時螢幕上方會呈現紅色且跳出「遺失 RTK 定位訊號」，同時顯示「浮動解」或「GNSS 單點解」，當步行至上空開闊地或遠離障礙物後即恢復 RTK 訊號；螢幕左下方會顯示當前影像數量，如圖 9 所示。

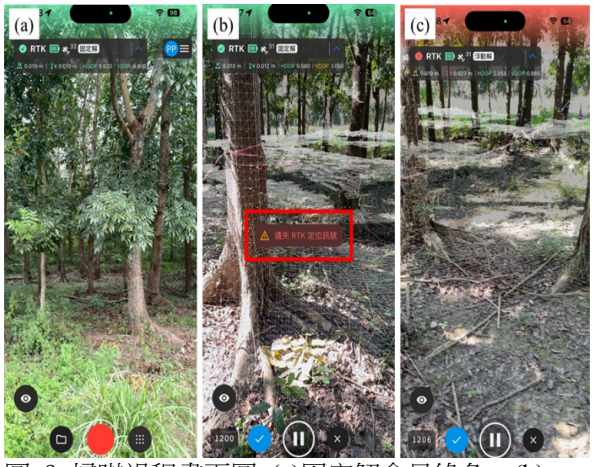


圖 9 掃瞄過程畫面圖 (a)固定解會呈綠色；(b) RTK 訊號中斷會出現警訊；(c) RTK 訊號中斷會呈紅色且顯示當前連線狀態

(5) 影像生成點雲模型，使用 PIX4Dmatic 作為影像拼接之軟體，其專為 PIX4Dcatch 建立處理範本，水平座標之座標系統為 TWD97 EPSG:3826，垂直座標之座標系統為 Ellipsoidal height over the GRS 1980 ellipsoid；點雲資料之生成需進行「率定」、「密集點雲」及「匯出檔」，率定之設定為使用 PIX4Dcatch 範本、依信任的位置及姿態計算、影像比為 1/1、自動計算特徵點、內方位參數可信度為低等，密集點雲之設定為使用硬體加速計算、影像比為 1/2、點雲密度最佳化、最小匹配數為 3、使用雜訊過濾等；匯出檔部分則勾選處理之精度報表及點雲模型。

(6) PIX4Dmatic 影像處理時進行標記，可行地面控制點(Ground Control Points, GCP)及手動連結點(Manual Tie Points, MTP)，兩者相同處均為透過運動恢復結構(Structure from Motion, SfM)建立點雲模型，計算原理為於每張影像中提取易辨認之特徵點，依有相似特徵點之影像進行初始分類，再藉由幾何約束進一步篩選相同或相似特徵之影像以提高建模準確性，而使用率較高之幾何約束包括光束法平差(Bundle Adjustment)、基礎矩陣(Fundamental Matrix)、RANSAC(RANdom SAmple Consensus) 和本質矩陣(Essential Matrix)等多種單個或多個組合方式，將篩選後影像之當時拍攝位置及姿態(本研究之研究設備掃瞄時即透過自身 IMU 感測器自行記錄相關數據)解算及分析其掃瞄路徑，再藉由三角化推估並建立點雲模型；兩者之不同處在於，GCP 為匯入已知精確之真實三維座標，藉由絕對幾何約束強制平差各特徵點，以使點雲模型符合現實座標，僅少量點即可提高準確度，MTP 則為於影像間建立虛擬三維座標之相對連結點，藉由相對約束以輔助提高模型相對精度，若於環境複雜地則需標記大量虛擬點；此外亦有驗證模型定位精度之檢核點(Check Points)，該點不參與平差及校正模型，僅根據真實三維座標計算與標記後特徵點之三維位置誤差、重投影誤差、精度及平均均方根位置誤差(PIX4Dmatic, 2025)，研究已證實結合 GCP 標記相比於單用 RTK 定位，可降低誤差(Tamimi & Toth, 2024)。本研究設置樣區時所放置之三角錐，除用於定位比較外，亦用於影響點雲資料準確度變因之一，探討有無標記 GCP 是否能糾正點雲資料以提高準確度。匯入 GCP 點位後，即可於單張影像中標定單個特徵點(本研究以圓形球體作為共軛目標)，每 GCP 各標定 20 張影像，其餘處理設定條件均相同；於標定時如圖 10，黃色十字為標記之特徵點，藍色十字為該真實點於影像中之位置，綠色十字則為標定後重投影推估位置。

(7)點雲資料提取林木性態值，藉由 LiDAR360 分別進行點雲資料裁切、躁點去除、分類地面點、根據地面點常態化及 TLS 種子點編輯。點雲資料裁切主要移除非目標點雲，降低檔案大小及運

算負擔；躁點去除為針對每個點計算到鄰近設定點之平均距離，並計算中位數及標準差，移除其餘大於設定標準差倍數之點雲，本研究設定鄰近點數為 10，倍數為 5；分類地面點為計算重要基礎步驟之一，旨在區分地面及其他物體之屬性，可有效減少計算量與誤差並高分析效率與精度，該軟體由改良式漸進加密三角網格濾波(Improved Progressive TIN Densification, IPTD)進行地面點分類，本研究設定最大建物尺寸 20 m、最大地形坡度 88°、迭代角度 10°及迭代距離 1.3 m 進行分類；常態化可降低因地形起伏造成之誤差，該軟體可根據 DEM 及地面點進行計算，本研究選用根據地 面點最後以 TLS 種子點編輯，設定斷面高度為 1.25–1.35 m，其會以 2D 呈現該高度之點雲，再根據地面調查之立木編號依序將點雲圈選，並使用最佳擬合圓(Fit Circle)計算胸徑，每筆資料完成後即可匯出每株立木之編號、二維座標及胸徑之.CSV 檔；二維座標部分，LiDAR360 提取立木性態值時，會以最佳擬合圓之圓心座標表示。



圖 10 標定特徵點過程圖，黃色標記點，藍色為真實點，綠色為重投影點

(8)評估準確度，本研究以地面調查值為基準值，變數為胸徑、立木位置(TP)及立木偵測率(TDR)，前 2 者分別計算平均值、標準差、變異係數、MAE 及 RMSE，後者以百分比表示；透過成對樣本 t 檢定及 Pearson 相關係數，計算各組合與地面調查值之精準度與系統性差異；此外為消除點雲量測可能存在之系統性偏差並提升資料精確度，本研究將採用普通最小平方法(Ordinary Least Squares, OLS)建立簡單線性迴歸校正模型(Calibration Models)，各計算公式如下：

$$\overline{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n}} \quad (7)$$

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{\overline{x}} * 100 \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon_i \quad (11)$$

式中，$\overline{x}$為平均值；x_i為第 i 株立木數值；n 為總株數；y_i為第 i 株立木真實值；$\hat{y}_i$為第 i 株立木推估值；β_0為迴歸模型截距；β_1為迴歸模型斜率；ε_i為誤差項。

2.5 評估最佳掃瞄組合

為從 2 種定位模式、5 種重疊度及建立點雲模型時是否標記 GCP 共 3 種變因評估出最佳掃瞄組合，本研究應用邊際效應(Marginal effect, ME)作為評估方式，將其定義為軟體運算單位時間增加所帶來的精度改善率(Incremental Accuracy Gain per Unit Time)，將依立木胸徑及立木位置之 RMSE 與各組合之運算時長進行分析以找出最佳點，並應用 R 繪製成圖，其公式如下：

$$ME = \frac{RMSE_{i-1} - RMSE_i}{\text{運算時長}_i - \text{運算時長}_{i-1}} \quad (12)$$

式中，$RMSE_i$為第 i 項組合之立木胸徑或位置 RMSE 值；運算時長$_i$為第 i 項組合之運算時長(min)。

2.6 研究流程圖

本研究之目的分為評估定位準確度及探討最高效且準確之掃瞄流程，前者與傳統 RTK GNSS 進行定位比較，後者之變因包含 GNSS 和 RTK、5 種重疊度及影像拼接時是否標記 GCP，架構如圖 11 所示。

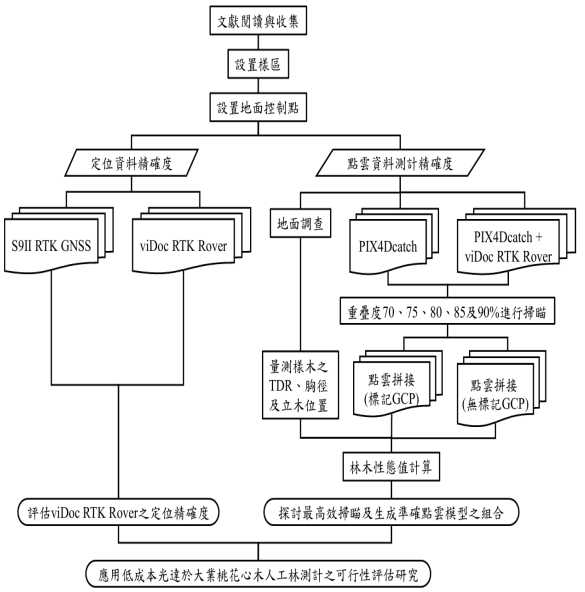


圖 11 本研究之流程圖

3. 結果與討論

3.1 定位準確度

本研究以 S9II 之定位採點值做為基準值，驗證 viDoc RTK Rover 作為 RTK GNSS 定位之準確度，於各樣區之 GCP 進行定位採點，將各方向性及誤差彙整成表 1，表中 N 為北緯、E 為東經、h 為高程(本研究僅以橢球高進行兩設備之相對精度驗證)、2D 為二維平面方向而 3D 為三維空間方向。由表可知在 N 及 E 兩方向之總平均差值均小於 0.003 m，且各標準差均大於平均值，說明誤差分布較隨機，而 h 方向各樣區均為負偏差且總平均差值為 -0.019 m，表示高程之測量存在微小的系統性偏差；3 樣區中 N 及 E 兩方向測量差值有減少之趨勢，而 h 方向則逐漸增加，二維平均差值中 A1 最高(0.026 m)，A3 最低(0.016 m)，三維平均差值中 A1 最高(0.043 m)，A2 最低(0.036 m)；RMSE2D 於各樣區分別為 0.027、0.022 及 0.018 m，與 N 及 E 兩方向相同呈減小趨勢，而 RMSE3D 為 0.045、0.040 及 0.048 m，說明高程方向於 A3 樣區影響最為明顯。

將 3 樣區中各方向性之測量值依成對樣本 t 檢定進行統計分析，N 方向之 S9II 與 viDoc 平均值分別為 2499639.378 及 2499639.077 m，E 方向分別為 211018.077 及 211018.076 m，h 方向分別為 55.971 及 55.989 m，N、E 及 h 之差值分別為 0.301、0.001 及 0.018 m，同時 r 均大於 0.998，表示兩儀器之定位數據呈高度相關；經 t 檢定後發現，N 及 E 方向 t 值分別為 0.671 及 0.539，P-value 均大於 0.05，顯示定位結果於二維平面方向無顯著差異，而 h 方向之 t 值為 -3.241，P-value 為 0.003，具有顯著差異，雖平均值差僅 0.018 m，然並非隨機誤差所導致，而為系統性誤差。

依據各 GCP 之各方向性位移數值繪製成盒鬚圖，如圖 12 所示，(a)、(b)及(c)分別為樣區 A1、A2 及 A3，由圖中可知 ΔN 在各樣區之中位數均趨近於 0，ΔE 之變異數稍大於 ΔN，且於 A1 樣區中出現離群值，然測量結果仍優於 Δh，因此 Δ2D 數值相較穩定；Δh 在各樣區中變異性明顯，為主要造成 Δ3D 位移量明顯之主要因子。

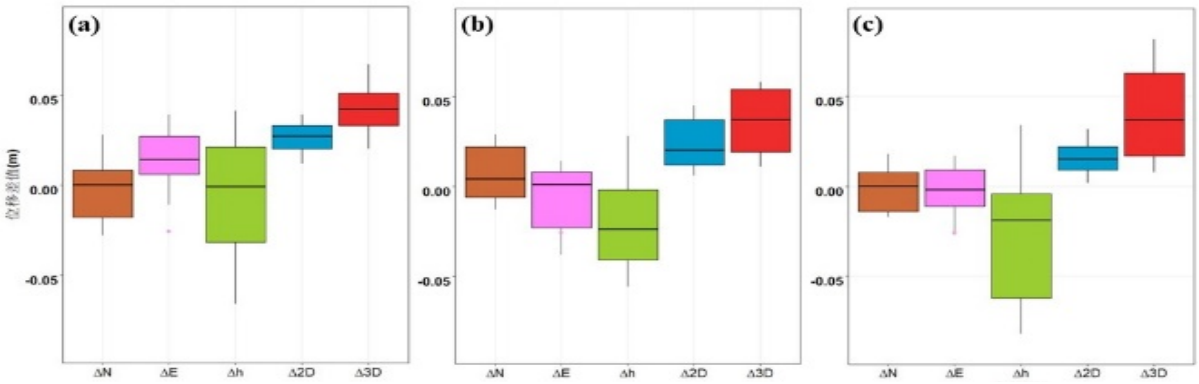


圖 12 各樣區 GCP 方向性差值之盒鬚圖與折線圖，ΔN 為棕色，ΔE 為粉色，Δh 為綠色，Δ2D 為藍色及 Δ3D 為紅色 (a)為 A1 樣區；(b)為 A2 樣區；(c)為 A3 樣區

表 1 各樣區ΔN、ΔE、Δh、Δ2D 及Δ3D 之差值及誤差表

樣區	A1	A2	A3	Total
ΔN (m)	-0.010 ± 0.018	0.007 ± 0.014	0.0 ± 0.012	0.002 ± 0.015
ΔE (m)	0.013 ± 0.018	-0.005 ± 0.017	-0.003 ± 0.015	0.002 ± 0.018
Δh (m)	-0.007 ± 0.036	-0.021 ± 0.027	-0.029 ± 0.036	-0.019 ± 0.033
Δ2D (m)	0.026 ± 0.009	0.019 ± 0.013	0.016 ± 0.009	0.020 ± 0.011
Δ3D (m)	0.043 ± 0.014	0.036 ± 0.016	0.042 ± 0.025	0.040 ± 0.019
RMSE2D (m)	0.027	0.022	0.018	0.023
RMSE3D (m)	0.045	0.040	0.048	0.044

本研究以傳統 RTK GNSS 接收儀 Stonex S9II 為基準值，應用 iPhone 15 Pro 連接 viDoc RTK Rover 於人工林下進行定位準確度評估，在二維及三維之 RMSE 測量結果與 Tamimi(2022)每約 203 m 誤差為 0.3 m 及 Demirel & Türk(2024)之 13 個 GCP 於二維和三維 RMSE 分別為 0.049 m 和 0.056 m 兩研究結果相符，然經統計分析後具有顯著差異，觀察各樣區數值可發現，當立木密度增加時，高程誤差亦隨之增加，造成此誤差可能與樹冠對 GNSS 訊號的遮蔽程度以及地形起伏有關，魏浚紘(2014)研究表明樹冠遮蔽可能導致部分衛星訊號接收不穩定，尤其影響高程方向的精度，或受周圍環境物體(如建物、地形、立木等)反射而產生多條傳播路徑現象之多路徑效應有關，該效應會造成設備同時接收直接訊號與延遲之反射訊號(Dong & Chen, 2017、Bian & Xu, 2024)，而 Stonex S9II 作為傳統測繪級接收儀具備較大之天線開口面與優異之多路徑效應抑止能力，其於高程測量展現較高之穩定度；viDoc 可於森林環境中進行定位採點，其中二維資料可信度高，而高程資料較不穩定，本研究建議實地應用時需待設備之垂直精度衰減因子(Vertical Dilution of Precision, VDOP)數值最低或穩定時再行採點，該數值可於連接之設備螢幕所見；或於林外訊號穩定處架設 RTK GNSS 設為固定站，以 viDoc 作為流動站連接固定站訊號，可於遮蔽環境下取得精確定位資訊。

3.2點雲資料測計準確度

3.2.1點雲資料測計準確度

本研究分別比較兩種定位模式，依行動裝置自身 GNSS(PIX4Dcatch)或外加設備以 RTK(viDoc)訊號進行掃瞄，兩種定位模式之點雲資料立木外觀具明顯差異；於 A1 樣區及重疊度 90%進行掃瞄並標記 GCP 之點雲資料，分別以樣區視角及離地面 1.3 m 高之水平截面進行比較，應用 PIX4Dcatch 且無論重疊度及是否標記 GCP，其點雲資料均如圖 13(a)所見之立木外觀分岔、重疊或重複顯像嚴重，1.3 m 截面均如圖 13(b)，難以簡單且快速辨別單株立木，對後續應用 TLS 種子點編輯進行林木性態值提取造成困難，故本研究後續將不予計算及討論 PIX4Dcatch 之點雲資料，而藉由 viDoc 且無論重疊度及是否標記 GCP，其點雲資料均如圖 13(c)所見之立木外觀完整且排列整齊，而 1.3 m 截面均如圖 13(d)，胸徑點雲分布完整且容易辨別，減少後續人工或自動化提取及計算之時間及錯誤率，故後續以 viDoc 掃瞄之點雲資料作為主要探討測計準確度。

3.2.2胸高直徑(DBH)

本研究針對 140 株立木，以地面調查值(後以 Ground 表示)作為基準值，與 viDoc 各組合之點雲資料依平均值、標準差、CV、MAE 及 RMSE 計算並進行成對樣本 t 檢定統計分析，將結果彙整於表 2，由表可知 Ground 之平均值、標準差及 CV 分別為 23.7 cm、7.6 cm 及 32.0%，viDoc 各掃瞄組合之平均值最高及最低為 viDoc-90-GCP 及 viDoc-70-GCP，標準差之最高為 viDoc-70，最低為 viDoc-80 和 viDoc-90，CV 最高為 viDoc-70，最低為 viDoc-80 和 viDoc-90，MAE 之最高及最低為 viDoc-80 及 viDoc-90-GCP，RMSE 之最高及最低為 viDoc-80 及 viDoc-90-GCP；成對樣本 t 檢定統計分析後可知，各組合之 r 值介於 0.899 - 0.987 之間，表量測結果與地面調查具高度線性關係，t 值介於 4.672 – 10.126， P-value 均小於 0.001，表示無論重疊度及標記 GCP 與否，均有極顯著差異且有系統性偏差。為評估並校正點雲資料之系統性偏差，進一步將各組合建立 OLS 迴歸校正模型及誤差分析，由表 3

迴歸校正後可知，各組合絕對誤差呈縮減趨勢，有效降低系統性偏差所造成的量測誤差，其中以 viDoc-90-GCP 為最佳，RMSE 為 1.2 cm。

剖析每筆立木胸徑資料發現，未標記 GCP 時，小於 10 cm 者有較大誤差且多為高估，大於 35 cm 者亦有較大誤差且多為低估，介於 15–35 cm 之間者則誤差值較小；標記 GCP 後各重疊度之平均誤差值均明顯下降，亦可於表 2 及表 3 之 MAE 及 RMSE 所見差異，由此可證其可降低量測誤差，具有糾正點雲資料且提高準確度之功能。

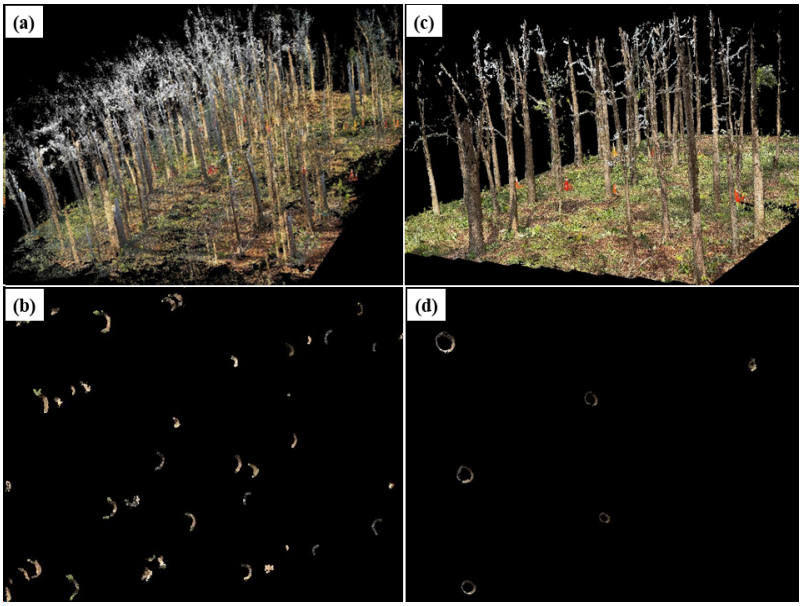


圖 13 相同樣區及重疊度之不同定位模式點雲資料圖 (a) PIX4Dcatch 樣區視角；(b) PIX4Dcatch 1.3m 高截面；(c) viDoc 樣區視角；(d) viDoc 1.3m 高截面

表 2 地面調查與各掃瞄組合掃瞄之胸徑結果表

Group	平均值 (cm)	標準差 (cm)	CV (%)	MAE (cm)	RMSE (cm)	r	t (df=139)	P-value
Ground	23.7	7.6	32.0	-	-	-	-	-
viDoc-70	22.0	7.5	34.1	2.4	3.0	0.948	8.222	<0.001***
viDoc-75	22.2	7.4	33.2	2.3	3.0	0.937	6.745	<0.001***
viDoc-80	22.4	6.8	30.3	2.8	3.5	0.899	4.672	<0.001***
viDoc-85	22.3	6.9	31.1	1.8	2.5	0.965	8.513	<0.001***
viDoc-90	22.4	6.8	30.3	1.7	2.2	0.977	9.141	<0.001***
viDoc-70-GCP	21.9	7.3	33.6	2.2	3.0	0.949	9.193	<0.001***
viDoc-75-GCP	22.4	7.4	33.0	2.1	2.8	0.944	6.094	<0.001***
viDoc-80-GCP	22.1	7.1	31.9	2.0	2.5	0.968	9.895	<0.001***
viDoc-85-GCP	22.5	7.0	31.3	1.5	1.9	0.982	10.126	<0.001***
viDoc-90-GCP	22.7	7.2	31.8	1.4	1.6	0.987	9.959	<0.001***

註：*為 p<0.05、**為 p<0.01、***為 p<0.001

表 3 各掃瞄組合之簡單線性迴歸模型表

Group	線性迴歸模型	MAE (cm)	RMSE (cm)	r
viDoc-70	$y_i = 2.635 + 0.9572X_i$	1.8	2.4	0.899
viDoc-75	$y_i = 2.2822 + 0.9654X_i$	1.9	2.6	0.879
viDoc-80	$y_i = 1.1636 + 1.0064X_i$	2.3	3.3	0.810
viDoc-85	$y_i = 0.1846 + 1.0569X_i$	1.3	2.0	0.932
viDoc-90	$y_i = -0.7192 + 1.0918X_i$	1.2	1.6	0.956
viDoc-70-GCP	$y_i = 2.3045 + 0.9799X_i$	1.6	2.4	0.901
viDoc-75-GCP	$y_i = 2.0157 + 0.968X_i$	1.9	2.5	0.891
viDoc-80-GCP	$y_i = 0.6995 + 1.0415X_i$	1.2	1.9	0.937
viDoc-85-GCP	$y_i = -0.0442 + 1.0584X_i$	1.0	1.4	0.965
viDoc-90-GCP	$y_i = 0.1484 + 1.0397X_i$	0.9	1.2	0.975

3.2.3立木位置(TP)

為探討 viDoc RTK Rover 獲取立木位置之準確性，本研究應用其各組合掃瞄之點雲資料提取立木位置，並藉由 S9II 以靠近樹幹方式定位為基準值進行成對樣本 t 檢定，將結果彙整於表 4，表中因各組合存在不同程度點漏授問題而缺少 1–3 株立木資訊，使 df 值不相同，在北緯(TP_N)及東經(TP_E)方向各掃瞄組合均呈高度線性相關，TP_N 僅 viDoc-75-GCP 和 viDoc-85-GCP 與 S9II 無顯著差異，而 TP_E 為 viDoc-80、viDoc-75-GCP 和 viDoc-85-GCP 三種組合無顯著差異。將各掃瞄組合與 S9II 量測值相減得差值，再依平均值、標準差、MAE 及 RMSE 計算並整理成表 5，由表可知 TP_N 平均值最高及最低為 viDoc-80 及 viDoc-85，標準差之最高及最低為 viDoc-90 及 viDoc-70 -GCP，MAE 之最高及最低為 viDoc-85 及 viDoc-70，RMSE 之最高及最低為 viDoc-85 及 viDoc-75-GCP，TP_E 平均值最高及最低為 viDoc-80 及 viDoc-85，標準差最高及最低為 viDoc-90 及 viDoc-70 -GCP，MAE 最高及最低為 viDoc-85 及 viDoc-80-GCP，RMSE 最高及最低為 viDoc-85 及 viDoc-75-GCP。標記 GCP 之誤差均有降低，不同於胸徑結果之影像重疊度增加則誤差降低，而此兩方向均於較低重疊度時有較低之量測誤差，尤為重疊度 75% 時均有最低，重疊度 85% 且未標記 GCP 均有最大測量誤差。

將立木位置之誤差分為有或無標記 GCP 兩組，橫軸為 TP_N 誤差和縱軸為 TP_E 誤差繪製成圖 14，圖 14(a)為未標記 GCP，各重疊度之 TP_N 誤差介於 -4.0–2.0 m 之間，TP_E 誤差介於 -2.0–2.0 m 之間，其中重疊度 70 % 出現 1 最大誤差點，而經標記 GCP 後如圖 14(b)所示，整體誤差有明顯下降，各重疊度之 TP_N 誤差介於 -2.0–2.0 m 之間，TP_E 誤差介於 -1.0–1.0 m 之間，對於重疊度 70% 之校準效果最為顯著。

表 4 各掃瞄組合與地面調查值之立木位置統計分析表

Group	df	TP_N			TP_E		
		r	t-value	P-value	r	t-value	P-value
viDoc-70	137	0.999	-2.822	0.006**	0.999	2.827	0.005**
viDoc-75	137	0.999	5.462	<0.001***	0.999	-7.322	<0.001***
viDoc-80	137	0.999	7.646	<0.001***	0.999	1.187	0.237
viDoc-85	137	0.999	-7.853	<0.001***	0.999	-5.767	<0.001***
viDoc-90	138	0.999	2.373	0.019*	0.999	-5.181	<0.001***
viDoc-70-GCP	137	0.999	5.121	<0.001***	0.999	-2.337	0.021*
viDoc-75-GCP	137	0.999	-1.292	0.197	0.999	0.214	0.831
viDoc-80-GCP	138	0.999	7.297	<0.001***	0.999	-3.695	<0.001***
viDoc-85-GCP	138	0.999	0.639	0.524	0.999	1.370	0.173
viDoc-90-GCP	139	0.999	2.967	0.004**	0.999	-4.559	<0.001***

註：*為 p<0.05、**為 p<0.01、***為 p<0.001

表 5 地面調查與各掃瞄組合掃瞄之 TP_N 及 TP_E 結果表

Group	TP_N				TP_E			
	平均值 (m)	標準差 (m)	MAE (m)	RMSE (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	MAE (m)	RMSE (m)
viDoc-70	-0.091	0.380	0.165	0.390	0.036	0.162	0.113	0.164
viDoc-75	0.211	0.460	0.339	0.505	-0.124	0.182	0.148	0.219
viDoc-80	0.256	0.398	0.326	0.472	0.110	0.275	0.169	0.295
viDoc-85	-0.297	0.450	0.360	0.538	-0.187	0.368	0.289	0.422
viDoc-90	0.100	0.499	0.330	0.507	0.096	0.300	0.209	0.314
viDoc-70-GCP	0.147	0.341	0.257	0.370	0.054	0.141	0.103	0.147
viDoc-75-GCP	-0.034	0.314	0.251	0.315	0.013	0.146	0.112	0.143
viDoc-80-GCP	0.241	0.392	0.317	0.459	-0.038	0.167	0.095	0.171
viDoc-85-GCP	0.021	0.388	0.277	0.387	0.063	0.258	0.165	0.264
viDoc-90-GCP	0.099	0.395	0.260	0.406	-0.066	0.195	0.123	0.218

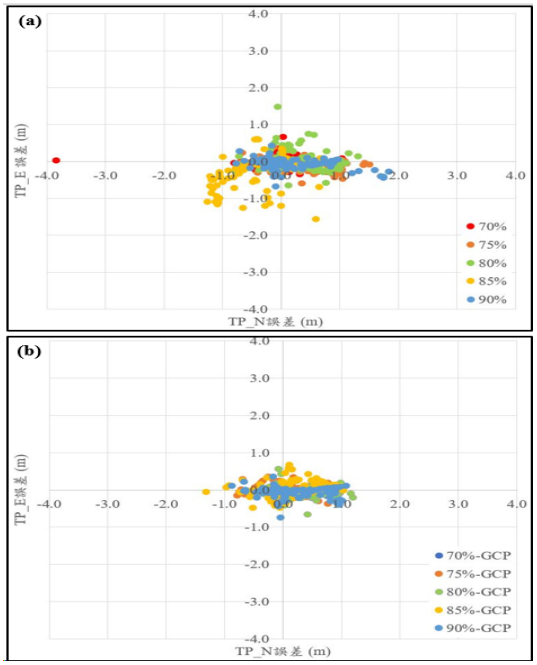


圖 14 標記 GCP 與 TP 誤差散佈圖(a)無標記 GCP；(b)有標記 GCP

3.2.4立木偵測率(TDR)、漏授率及誤授率

立木偵測率、漏授率及誤授率均是依照點雲資料中所出現之立木株數做比較，TDR 為統計所出現之總株數比例，Omission 為統計實際存在於現實而未被掃瞄到或偵測到導致資料中無顯現之比例，Commission 為統計不存在於現實卻於資料中顯現之比例。將各樣區 140 株立木掃瞄結果依掃瞄組合進行分類，並整理於表 6，由表中可知各重疊度均無完全被偵測，TDR 介於 97.9 – 99.3 % 之間，漏授率介於 0.7 – 2.1 % 之間，而誤授率均為 0 %，本研究發現於各樣區中共有 3 株胸徑小於 5 cm 之立木，分別為 3.5、4.0 及 4.4 cm，3.5 cm 之立木於各重疊度下均 100 % 未被偵測，而其餘二者均有機率被漏偵測；普遍而言，重疊度增加時可降低立木被漏授之機率，尤為 90 % 且標記 GCP 時有最低比例，而標記 GCP 可提高重疊度大於 80 % 之立木偵測能力；本研究發現若立木胸徑小於 4.0 cm，無論何種組合均無法被偵測，若介於 4.0 – 5.0 cm 之間則有機率被漏授，而立木大於 5.0 cm 者均可被 100 % 偵測。

表 6 各掃瞄組合之立木偵測率、漏授率及誤授率比例表

Group	TDR (%)	Omission (%)	Commission (%)
viDoc-70	97.9	2.1	0.0
viDoc-75	97.9	2.1	0.0
viDoc-80	97.9	2.1	0.0
viDoc-85	97.9	2.1	0.0
viDoc-90	98.6	1.4	0.0
viDoc-70-GCP	97.9	2.1	0.0
viDoc-75-GCP	97.9	2.1	0.0
viDoc-80-GCP	98.6	1.4	0.0
viDoc-85-GCP	98.6	1.4	0.0
viDoc-90-GCP	99.3	0.7	0.0

3.2.5綜合討論

點雲資料準確度為本研究第二探討面向，以 2 種定位模式、5 種影像重疊度及標記 GCP 與否進行試驗。結果顯示僅依靠設備自身 GNSS 定位無法取得有效之點雲資料，造成此結果可能包含：(1)智慧型手機不同於傳統測繪級 GNSS，其天線高度較短，故 GNSS 定位誤差介於 1–5 m，因手機定位之不穩定性而影響影像之座標，造成點雲資料成像困難(Mokroš *et al.*, 2021、Bian & Xu, 2024)；(2)行動裝置本身 SLAM 功能不足應用於該面積之掃瞄(Chioni *et al.*, 2023)，若降低掃瞄面積或立木株數可減少後續誤差；(3)樹冠遮蔽和樹葉反射會降低接收衛星訊號，導致信號重疊和不穩定，從而造成累積誤差(魏浚紘，2014；Dong & Chen, 2017)，此項因子影響程度次於 GNSS 天線高度，尤其樹冠結構不固定時，影響更明顯(Bian & Xu, 2024)；(4)林下環境複雜，包含立木間距過近可能造成重複掃瞄(Mokroš *et al.*, 2021、Gollob *et al.*, 2021、Brach *et al.*, 2023)，或立木樹皮複雜、光照量及角度不均等其他環境因素造成(Bobrowski *et al.*, 2023、Chioni *et al.*, 2023)。而藉由 RTK 定位輔助後點雲資料品質有顯著性地提升，除立木點雲均完整且易辨識外，亦發現最大高度可至 8 m，超文獻所提之 5 m 掃瞄範圍(Gollob *et al.*, 2021、Guenther *et al.*, 2024)。於不同重疊度及標記 GCP 與否之組合中，提高影像重疊度可提取越多特徵點，因此有助於提升胸徑測量精度，藉由標記 GCP 可有效校正點雲之整體位置和方向偏差，進一步提高胸徑資料之準確度，而本結果

與 Tamimi & Toth(2024)研究結果相符，藉由 RTK 定位並加入 GCP 進行運算校正，能顯著降低點雲誤差，本研究最低誤差組合為使用 viDoc RTK Rover 與 90 %影像重疊度及標記 GCP，然而經過成對樣本 t 檢定後發現，各組合均與地面調查值存在極顯著差異，表明存在系統性偏差，造成此因可能與掃瞄路徑有相關，因相機與立木僅呈垂直掃瞄，故將缺乏立木兩側之影像，致使點雲資料建模時缺乏直接性依據，導致立木量測均普遍出現低估之情形，如圖 15 中可直觀了解。

於立木位置將其拆分為北緯及東經兩方向性進行分析，RMSE 方面不同於立木胸徑量測結果，重疊度與其較無規律性之關係，共同之處在於標記 GCP 後各組合之誤差均有降低，再證明其具糾正點雲模型之功能，且各組合之量測值均與地面調查有高相關係數；然經成對樣本 t 檢定統計後發現，僅部分組合與地面調查值呈無顯著差異，該結果存在系統性偏差，與 Brach *et al.* (2023)研究相符均受地面調查之限制，因應用 S9II 難以取得立木真實中心點位，而利用點雲資料提取之立木位置為透過最佳擬和圓方式所推估正中心或靠近中心之點位，應藉由其他傳統光達系統並於相同軟體及條件下處理，較易進行比較及驗證。

立木偵測率部分，於 A1 及 A2 樣區中各有 1－2 株胸徑小於 5.0 cm 之立木，隨影像重疊度之提高，在其餘條件相同下每筆資料可偵測到立木之比例將有所提高，且標記 GCP 及提高影像重疊度可提高立木偵測率，各組合於 A2 樣區中之最小立木 100%漏授，胸徑為 3.5 cm，此與 Brach *et al.* (2023)表明內建於智慧型行動裝置之 LiDAR 感測器對於直徑小於 5.0 cm 物體解析度不足相符，本研究建議可嘗試藉由多角度掃瞄以提高每株立木之被掃瞄面積。

於 Mokroš *et al.* (2021)、Gollob *et al.* (2021)、Brach *et al.* (2023)及 Chioni *et al.* (2023)等研究中，均於人工林或都市林內進行掃瞄試驗，其試驗地為上空開闊且之立木間距較大之都市林或於經營完善且林木整齊之人工林地進行掃瞄，不依靠 viDoc RTK Rover，立木胸徑之準確度即與地面光達量測值相近(RMSE 介於 4.2－24.2 cm)，然 Guenther *et al.* (2024)提及當立木密度提高及林下植被越茂密時，測量誤差均會隨之提高，本研究各組合立木胸徑 MAE 介於 1.4－2.8 cm，而 RMSE 介於 1.6－3.5 cm，均低於所回顧之文獻，證實該設備於人工林下進行掃瞄時可有效提高點雲資料之準確性，同 Tamimi (2022)研究提及，單獨使用智慧型行動裝置之 LiDAR 感測器有效掃瞄範圍有限，難以收集遠距離物體之數據，未來研究可探討如何結合不同視角掃瞄或使用其他技術來提取高度相關之林木性態值及提高對小徑木的偵測能力。

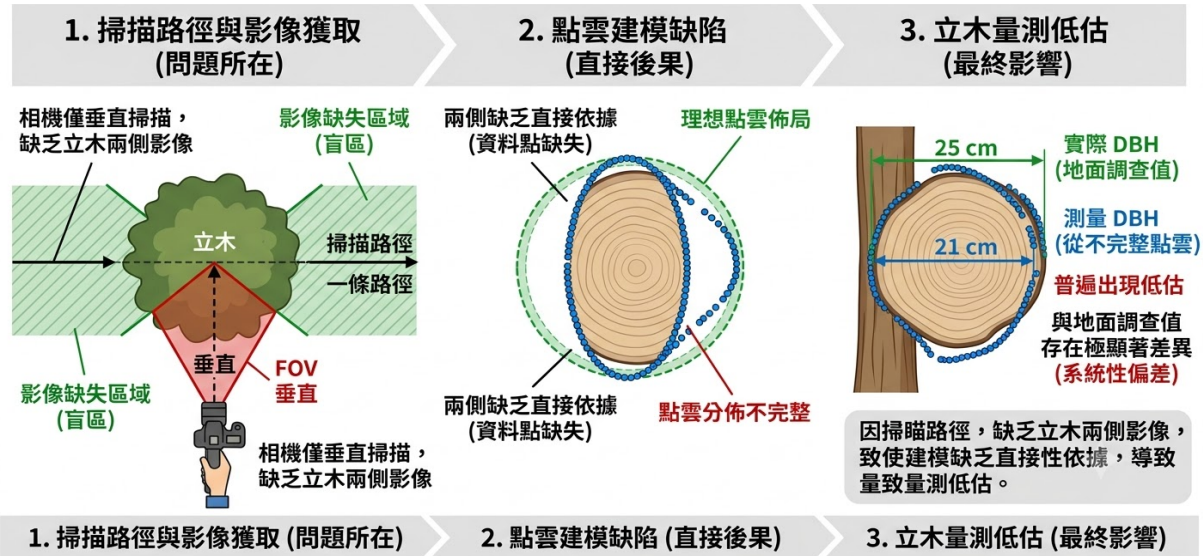


圖 15 立木點雲資料產生系統性誤差之核心原因與演變過程圖

3.3探討最佳掃瞄組合

3.3.1viDoc 各組照片數及運算時長

應用 PIX4Dmatic 建模點雲資料時產出之精度報表中，包含所處理之照片張數與進行率定及點雲模型兩項處理所花費之時長(以分鐘計算)，將各樣區各組合之影像張數、率定運算時長、點雲模型運算時長及兩者處理時長之總和依是否標記 GCP 進行分組，並分別計算平均值及標準差，並繪製如圖 16，由圖可知重疊度、影像張數及運算時長互為正相關，而有標記 GCP 之運算時長普遍高於未標記 GCP，且無論標記 GCP 與否，重疊度 90 %之運算時長需花費其他約 2－10 倍；此外本研究於每樣區針對 11 個 GCP 共標記 220 張影像，無論重疊度為何均平均花費約 20 分鐘時間進行標記作業，故標記 GCP 之總和運算時長加上標記所花費時間，方為整項作業之時間成本。

3.3.2最佳掃瞄組合

最佳掃瞄組合係指花費最少時間取得最準確資料，亦可視為運算時間與測量誤差之最佳平衡，而應用 viDoc 為首要條件；重疊度為主要影響運算時長之因子，普遍而言重疊度提高時其資料誤差越小；最後為 GCP 標記，經文獻回顧及本研究結果均證實標記後可有效提高點雲資料準確度，亦可增加小徑木之偵測能力。

為探討最佳掃瞄組合，本研究將各重疊度及標記 GCP 與否之組合，藉由胸徑 RMSE 和兩方向性立木位置 RMSE 分別與運算時長進行邊際效應評估，於各誤差及時間成本間決策出最佳之掃瞄組合，藉由 R 進行計算並繪製成圖 17，如圖 17 所示橫軸為運算時長，縱軸為 RMSE，圖 17(a)胸徑、圖 17(b)TP_N 及 圖 17(c)TP_E，經分析後發現立木胸徑及兩方向立木位置之最佳掃瞄組合均為藉由 viDoc RTK Rover 和重疊度 70 % 進行影像獲取並標記 GCP。

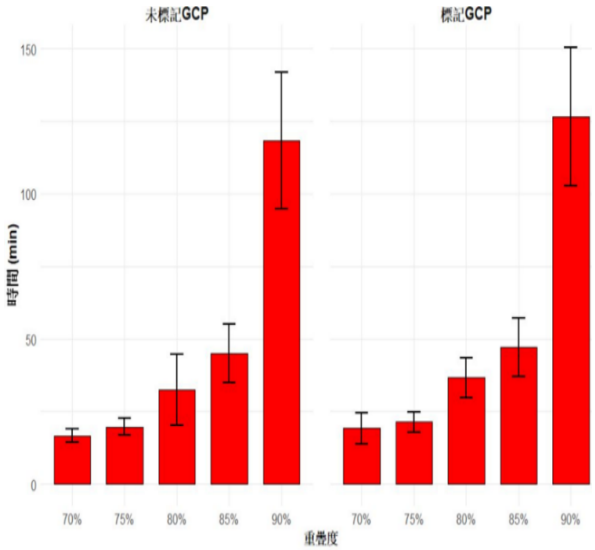


圖 16 各影像重疊度與標記 GCP 與否之運算時長圖

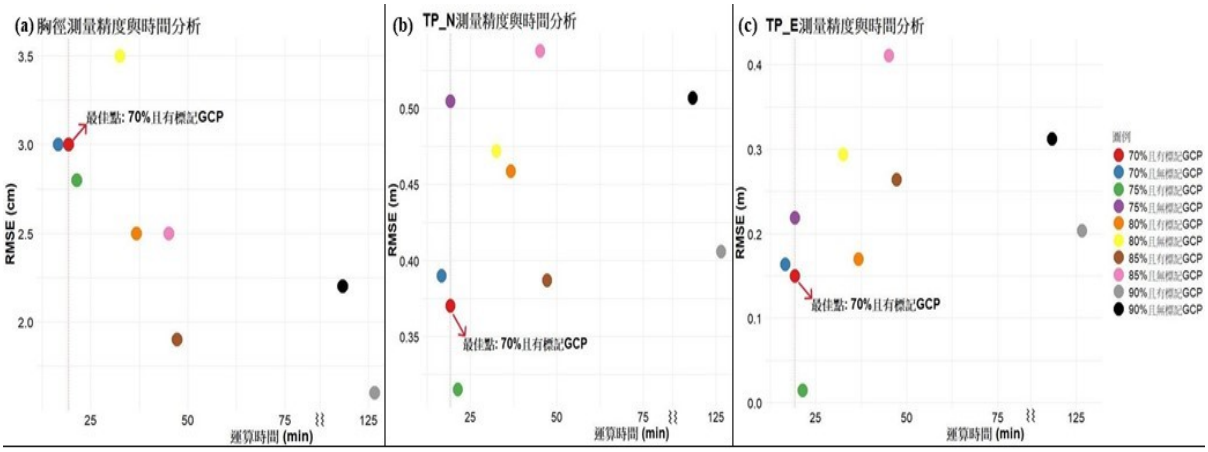


圖 17 各數值之精度與時間分析圖 (a)胸徑；(b)TP_N；(c)TP_E

藉邊際效應評估出各誤差與時間成本之最佳掃瞄組合，然不可忽略各組合仍各有優缺點，故本研究依自身研究結果進行幾項建議之應用分類，若需大量樣區掃瞄以取得全林分之胸徑及立木位置之點雲資料，精度之要求較低且以縮短作業時間為主，建議以重疊度 70 %進行掃瞄，並額外標記 GCP 以提高點雲資料之準確度；若於少量樣區掃瞄，以點雲資料精度為首要要求，不考量時間成本下，以重疊度 90 %且標記 GCP 為首要選擇，雖運算時長為其於組合之 2–10 倍，然其誤差為最低，而若考量時間成本，則建議重疊度降低；應用於上空開闊之都市林，其 RTK 之訊號接收應較為穩定，重疊度 90 %以下測量之精度應高於本研究(本研究掃瞄時，半數時間均於林下，故訊號中斷時長較長)，若考量時間成本，建議以重疊度 70 %，若上空遭遮蔽又欲取得高精度之測量結果，重疊度 90 %且標記 GCP 應為最佳組合。

4. 結論與建議

本研究應用 viDoc RTK Rover 於大葉桃花心木人工林進行定位準確度之結果與傳統RTK GNSS 資料無顯著差異，當其連接網路並取得固定解進行採點後，可取得平面(0.023 m)及空間(0.044 m)之高精度結果，於應用時需額外注意 VDOP 之數值，其為主要影響定位誤差之因子，然該設備之輕巧及便攜等優勢，未來可作為替代傳統 RTK GNSS 接收儀之潛力，此外本研究僅以橢球高進行兩設備之純粹相對精度驗證，若未來應用於工程實務，可透過 TWVD2000 大地水準面模型轉換為正高使用；點雲資料測計準確度方面，依靠 iPhone 15 Pro 自身 GNSS 定位進行掃瞄產出之點雲資料無法使用，而藉由 viDoc RTK Rover 取得公分級定位則顯著輔助提升點雲資料品質及準確性，儘管掃瞄過程遺失 RTK 訊號，起始時確保可連接上，仍可取得高精度資料；當重疊度增加時，立木胸徑之精度及偵測率均可有效提高，而立木位置則較無明顯關聯，然當重疊度為 90 % 時將花費最長運算時長，為其他重疊度約 2–10 倍，標記 GCP 後將增加些許運算時長，然可確保其誤差與不標記相比更小；無論何種組合於立木胸徑和位置均與地面調查相比多具有顯著差異且存在系統性誤差，然均具有高相關性且各 RMSE 與其他文獻相當或更勝於。於最佳掃瞄組合部分，建議均使用 RTK 定位以獲得可用之點雲資料，標記 GCP 能有效糾正點雲資料，明顯降低誤差，雖邊際效應評估後得重疊度 70 %且標記 GCP 為最佳組合，然本研究建議仍應考量掃瞄目的之精度及時間再選擇合適組合，若不考量時間成本則建議重疊度 90 %，因其可取得最高精度之點雲資料且可高小徑木之偵測率。本研究證實 iPhone 15 Pro 連接 viDoc RTK Rover 是可應用於平地人工林收集 8 m 內之部分林木性態值，然胸徑小於 5 cm 之立木及超 8 m 範圍之目標物有高機率無法順利掃瞄獲取，此情形將可能降低測量精度和提高誤授、漏授及誤差，而對於收集冠層與樹高相關資訊須仰賴與其他技術之結合，如空載光達或航空攝影等；建議未來研究可探討多角度掃瞄或結合其他軟硬體設備，此外亦需於不同環境及林相進行試驗，以進一步提高該類型設備於森林應用之可行性。

參考文獻

林建忠，1999。雷射測距技術與研究現況，光電產業與技術情報，19：30-33。[Lin, J.Z., 1999. Laser ranging technology and research status, Optolink, 19:30-33. (in Chinese)]

馮豐隆、張愷玲、張鈞媛，2010。大葉桃花心的生物、生態與利用，生物科學，52(2)：15-24，DOI： 10.29981/CB.201012.0002。[Feng, F.L., Chang, K.L., and Chang, J.Y., 2010. Biology, ecology and usage of big-leaf mahogany, Chinese Bioscience, 52(2):15-24, DOI:10.29981/CB.201012.0002. (in Chinese)]

魏浚紘，2014。應用光達技術於人工林之經營與監測，國立屏東科技大學生物資源研究所，博士學位論文。[Wei, C.H., 2014. Application of LiDAR system for monitoring and management of artificial forest, PhD Thesis, National Pingtung

University of Science and Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese)]

Apple, 2024. Compare iPhone Models, Available at: https://www.apple.com/iphone/compare/?modelList=iphone-15,iphone-15-pro, Assessed October 22, 2024.

Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyyppä, J., Seletković A., and Kukko A., 2021. Hand-held personal laser scanning–current status and perspectives for forest inventory application, Croatian Journal of Forest Engineering, 42(1): 165-183, DOI:10.5552/crojfe.2021.858.

Bian, X., and Xu, Z., 2024. Research on multipath error detection model in forest based on Signal-to-noise ratio, Journal of Physics: Conference Series, 2849(1): 012055, DOI:10.1016/j.ufug.2022.127815.

Bobrowski, R., Winczek, M., Zięba-Kulawik, K., and Wężyk, P., 2023. Best practices to use the iPad Pro LiDAR for some procedures of data acquisition in the urban forest, Urban Forestry and Urban Greening, 79: 127815, DOI:10.1016/j.ufug.2022.127815.

Brach, M., Tracz, W., Krok, G., and Gąsior, J.,. 2023. Feasibility of low-cost LiDAR scanner implementation in forest sampling techniques, Forests, 14(4): 706, DOI:10.3390/f14040706.

Büyükmıhçı, G., Akşehirlioğlu, A., and Koca, M., 2023. Advantages and disadvantages of laser scanning with ViDoc Rtk antenna: Ali Cafer Kümbeti, Advanced LiDAR, 3(2): 41-46.

Chioni, C., Maragno, A., Pianegonda, A., Ciolli, M., Favargiotti, S., and Massari, G.A., 2023. Low-Cost 3D virtual and dynamic reconstruction approach for urban forests: The Mesiano University Park, Sustainability, 15(19): 14072, DOI:10.3390/su151914072.

Demirel, Y., and Türk, T., 2024. Assessment of the location accuracy of points obtained with a Low-Cost Lidar scanning system and GNSS method, Mersin Photogrammetry Journal, 6(2):60-65, DOI:10.53093/mephoj.1540159.

Dong, P., and Chen, Q., 2017. LiDAR Remote Sensing and Applications, CRC Press, USA, DOI:10.4324/9781351233354.

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(16): 3129, DOI:10.3390/rs13163129.

Guenther, M., Heenkenda, M.K., Morris, D., and Leblon, B., 2024. Tree diameter at breast height (DBH) estimation using an iPad Pro LiDAR scanner: A case study in boreal forests, Ontario, Canada, Forests, 15(1): 214, DOI:10.3390/f15010214.

Martino, A., Lingua, A.M., and Maschio, P., 2024. Affordable sensors for speditive and accurate documentation of built heritage: First tests and preliminary results, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48: 487-493, DOI:10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-487-2024.

Mokroš, M., Mikita, T., Singh, A., Tomaštík, J., Chudá, J., Wężyk, P., Kuželka, K., Surový, P., Klimánek, M., Zięba-Kulawik, K., Bobrowski, R., and Liang, X., 2021. Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 104: 102512, DOI:10.1016/j.jag.2021.102512.

PIX4Dcatch, 2026. How Does PIX4Dcatch Achieve Professional Accuracy?, Available at: https://www.pix4d.com/blog/advantages-of-pix4dcatch/, Assessed Augest 6, 2026.

PIX4Dmatic, 2025. Tie points - PIX4Dmatic, Available at: https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360045074152#Check_errors, Assessed May 18, 2025.

Suleymanoglu, B., Tamimi, R., Yilmaz, Y., Soycan, M., and Toth, C., 2023. Road infrastructure mapping by using iPhone 14 Pro: An accuracy assessment, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48: 347-353, DOI:10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-347-2023.

Tamimi, R. 2022. Relative accuracy found within iPhone data collection, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43: 303-308, DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-303-2022.

Tamimi, R., and Toth, C., 2024. Experiments with combining LiDAR and camera data acquired by UAS and smartphone to support mapping, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48: 619-627, DOI:10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-619-2024.

Tatsumi, S., Yamaguchi, K., and Furuya, N., 2023. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad, Methods in Ecology and Evolution, 14(7): 1603-1609, DOI:10.1111/2041-210X.13900.

Tavani, S., Billi, A., Corradetti, A., Mercuri, M., Bosman, A., Cuffaro, M., Seers, T., and Carminati, E., 2022. Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones, Earth-Science Reviews, 227: 103969, DOI:10.1016/j.earscirev.2022.103969.

viDoc, 2024. viDoc Official Website, Available at: https://vidoc.com/en/use-cases, Assessed October 23, 2024.

Yan, X., Chai, G., Han, X., Lei, L., Wang, G., Jia, X., and Zhang, X., 2024. SA-Pmnet: Utilizing close-range photogrammetry combined with image enhancement and self-attention mechanisms for 3D reconstruction of Forests, Remote Sensing, 16(2): 416, DOI:10.3390/rs16020416.

Feasibility Study of Using Low-cost LiDAR to Measure the *Swietenia macrophylla* King Plantation's Characteristics

Che-Yuan Kuo [1] Chun-Hung Wei [2] Jan-Chang Chen [3*]

Abstract

With technological advancements, LiDAR sensors have been integrated into some Smart handheld devices. This study assesses the feasibility of using the iPhone 15 Pro paired with the viDoc RTK Rover for under-canopy positioning and scanning within a *Swietenia macrophylla* plantation. The results indicate that this setup can reduce smartphone positioning error to centimeter-level accuracy, demonstrating its potential to replace traditional RTK GNSS receivers for under-canopy point collection. To obtain valid point cloud data, connection to the viDoc for scanning is necessary, and marking ground control points (GCPs) can improve accuracy. Regarding specific measurements, a 90% overlap rate yielded optimal results for Diameter at Breast Height (DBH) estimation, while a 75% overlap was optimal for determining tree positions. Based on a marginal effect analysis of processing time and various measurement outcomes, the recommended configuration is to connect the viDoc with a 70% overlap rate and mark ground control points. This equipment combination effectively reduces costs while acquiring usable point cloud data, though it remains constrained by scanning range and shows limited detection capability for trees with DBH less than 5 cm.

Keywords: Low-cost LiDAR, Smart Handheld Devices, Point Clouds Analysis, RTK GNSS

[1] Master, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology
[2] Associate Professor, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology
[3] Professor, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology
[*] Corresponding Author, E-mail: janchang17@gmail.com

Received Date: Jan. 02, 2026
Revised Date: Mar. 27, 2026
Accepted Date: Aug. 13, 2026