

結合地面與無人空中載具光達推估大葉桃花心木 人工林林分材積

劉鎮毅¹ 陳建璋² 魏浚紘^{3*}

摘要

本研究區域位於雲林縣古坑鄉大葉桃花心木 (*Swietenia macrophylla* King) 之平地人工林，以地面及無人空中載具光達 (以下簡稱空載光達) 推估林分性態值並評估其使用效率與準確度，並建立此樹種之樹高曲線式及地方材積式，最後藉由空載光達建立空中材積式推估蓄積量。研究結果顯示，點雲結合後可彌補地面光達對於獲取樹高及空載光達獲取胸徑及立木位置的不足，結合點雲後獲取資料的效率也有所提升，亦可透過結合點雲建立樹高曲線式及地方材積式。單獨使用空載光達也可建立空中材積式。因應不同調查目的及樣區現況選擇合適之光達系統，結合地面及空載光達點雲可有效提高調查林分性態值之效率及準確性。

關鍵詞：森林資源調查、遙感探測、林分蓄積、地面光達、無人空中載具光達

1. 前言

隨著科技進步，森林測計與資源調查使用遙感探測 (Remote Sensing, RS) 等技術，廣泛應用於森林生態經營及森林資源調查上，其中森林資源調查 (Forest Resource Inventory, FRI) 是針對林區內之林地、林木、動植物及生態環境為對象之資源調查，主要目的在查明現有森林資源面積、蓄積量及物種組成等，以利於後續經營規劃之用 (楊榮啟及林文亮，2003、陳朝圳及陳建璋，2015)。

近年來光達 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 為興盛之森林調查技術，光達系統具非破壞性量測技術、多重反射、資料可被保存並可重複檢核及高精度之特性 (彭炳勳等，2008、Barrett *et al.*, 2016)，光達系統產生之點雲 (Point Clouds) 資料具三維空間資訊，可建立三維立體之數值模型並獲取準確之林木性態值 (Polo *et al.*, 2009、Moorthy *et al.*, 2010)。各項光達系統皆有其使用之

特性及優缺點，對森林資源調查而言，小尺度樣區調查可透過地面光達、無人機光達及手持式光達，大面積則可使用有人機之空載光達，而應該如何使用各種類型之光達系統進行調查則因調查目的與環境等因素來選定 (Ryding *et al.*, 2015、Brede *et al.*, 2017、Giannetti *et al.*, 2018、Jurjević *et al.*, 2020)。

在臺灣第四次森林資源調查結果顯示，臺灣森林覆蓋率為 60.71%，人工林面積約 459,550 ha，其中闊葉樹人工林約 124,759 ha (行政院農業委員會林務局，2016)，而大葉桃花心木 (*Swietenia macrophylla* King) 為平地造林相當重要之樹種，故估算該樹種之蓄積量是對於大葉桃花心木平地人工林收穫相當重要的一環 (馮豐隆及黃志成，1993、鍾智昕等，2013、陳忠義等，2015、顏添明等，2020)。為了解林分之概況，可透過敘述性統計分析林分性態值以了解林分生長之情形，而林分性態值包含林木的平均胸徑、平均樹高、平均枝下高、平均樹冠幅、平均活冠長及每公頃蓄積量等，其中蓄積量又

¹ 正瀚生技股份有限公司研發部 飛航工程師

² 國立屏東科技大學森林系 教授

³ 國立屏東科技大學森林系 助理教授

* 通訊作者，電話：08-7703202 轉 7147, E-mail: aw711212@gmail.com

收到日期：民國 112 年 09 月 22 日

修改日期：民國 112 年 10 月 29 日

接受日期：民國 113 年 05 月 22 日

為最為重要之參數，但如需精準獲得蓄積量則必需將立木伐倒進行樹幹解析 (楊榮啟及林文亮, 2003) 測量，但若可透過光達技術則可不須伐倒立木取得樹幹解析所需之參數進而獲得蓄積量，又國內外森林狀況差異甚大，且因應不同之研究目的以及所具有的設施設備之限制所會採取不同之研究方法，故為求完整性本研究採取三種方式來建立平地大葉桃花心木人工林材積式並推估蓄積量。

本研究目的分述如下：

- (1) 探討地面光達與空載光達獲得各種林分性態值之準確度以及應用時機與限制。
- (2) 探討結合地面光達與空載光達點雲之林分性態值準確度效率評估及建立樹高曲線式與地方材積式。
- (3) 透過空載光達建立平地大葉桃花心木人工林中材積式推估蓄積量。

2. 研究材料與方法

2.1 研究材料

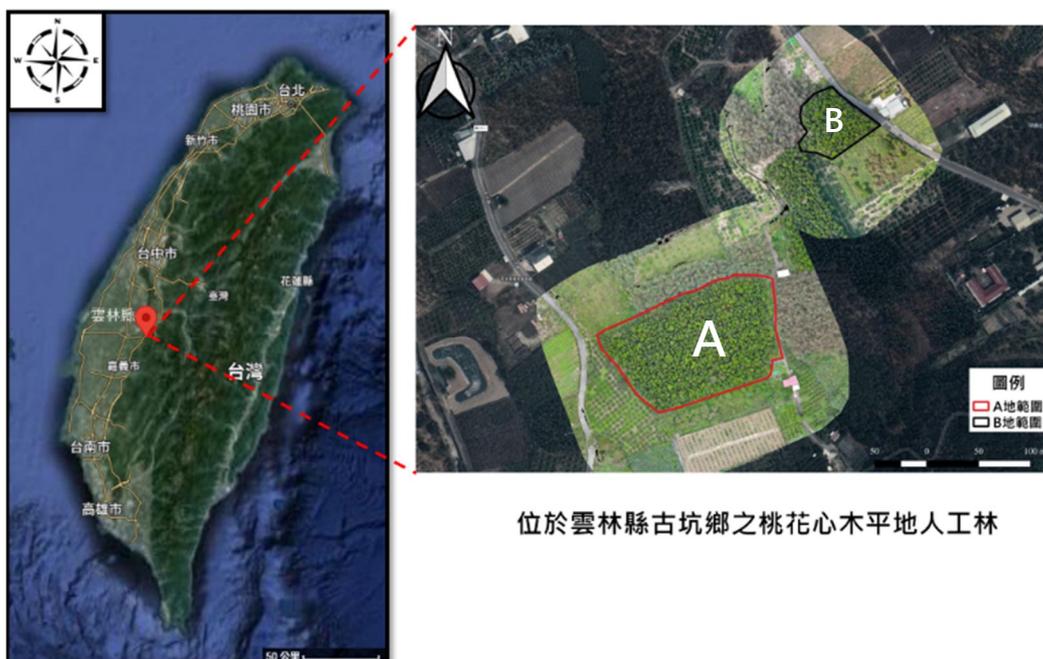
2.1.1 研究區域概況

本研究區域位於雲林縣古坑鄉之 2011 年種植之大葉桃花心木平地人工林 (*Swietenia macrophylla*

King), A 地 (建立模型樣區) 面積 1.55 ha 合計 1,656 株，林分密度為每公頃 (ha) 約 1,068 株；B 地 (驗證樣區) 面積 0.32 ha 合計 316 株，林分密度為每公頃約 988 株，為坡度平緩且均完整記錄並實施撫育作業 (如刈草、除蔓等) 之私有林地 (圖 1)。

本研究區域海拔高度為 130 m，根據中央氣象局之氣候資料服務系統 (CWB Observation Data Inquire Severic, CODiS) 統計，距離研究區域最近之氣象站為棋山氣象站，位置在於雲林縣古坑鄉棋盤村棋山 49 號 (23.6864, 120.6034)，海拔高度 120 m，設站日期 2015 年 10 月，本研究統計 2015 年 10 月至 2023 年 4 月之氣象資料，該地區年均溫約 23.6°C，平均年雨量約 2,235.79 mm，屬亞熱帶季風氣候，全年皆有降雨，5-9 月為特濕期 (Perhumid)，10-12 月為相對乾旱期 (Relative Drought) (圖 2)。

本研究樹種為大葉桃花心木為楝科 (Meliaceae) 桃花心木屬 (*Swietenia*) 的木本植物，自 1901 年由日本人於臺灣試種，該樹種多產於熱帶地區，屬中淺根性植物，樹種特性具耐高溫及乾旱，加上生長快速且容易更新，非常適合在臺灣中南部生長，亦為平地造林之重要樹種之一 (劉宣城等, 1981、馮豐隆等, 2010)。



位於雲林縣古坑鄉之桃花心木平地人工林

圖 1 研究區域位置概況圖

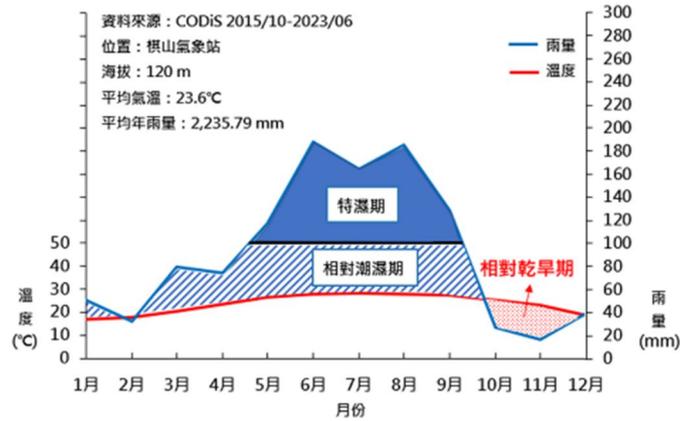


圖 2 棋山氣象站生態氣候圖

2.1.2 調查儀器及設備

(1) 地面光達系統 (TLS)

本研究使用型號為 Trimble TX8 之地面光達 (圖 3) 進行樣區掃瞄，屬於中遠距離之三維掃瞄系統，能在陽光直射下掃瞄最遠 340 m，垂直掃瞄角度可達 317°、水平掃瞄角度可達 360°，可藉由套疊照片進行點雲染色以取得真彩上色。本研究採多站掃瞄，在掃瞄前需先妥善規劃測站及共軛球擺放位置，避免遮蔽而產生測站間點雲套疊之誤差，並在每一站掃瞄時設置 6 個共軛球以利後續空間對位，此次掃瞄站數共為 24 站，透過掃瞄時架設的共軛球進行掃瞄資料拼接。



圖 3 Trimble TX8 地面光達 (本研究拍攝)

(2) 無人飛行載具 (UAV) 及空載光達系統 (ALS)

本研究使用之 UAV 型號為 DJI Matrice 300 RTK (圖 4 左)，搭載之空載光達系統型號為 DJI Zenmuse L1 (圖 4 右)，結合雷射雷達模組、高精度慣性導航、測繪相機、三軸雲台等模組。

2.2 研究方法

2.2.1 地面光達與空載光達計算林分性態值之準確度與效率評估

(1) 現地實測調查獲取林木性態值

於 2022 年 2 月於 A 地及 B 地進行實測調查並獲取以下性態值 (陳朝圳及陳建璋, 2015)：

- A. 胸高直徑 (Diameter at Breast Height, DBH)：胸高直徑 (以下簡稱胸徑)，顧名思義即位於胸高處之立木直徑，常用 DBH 代稱之，各國內外學者皆以離地 1.3 m 處設為量測處，以 cm 為單位，量測至小數第一位，本研究使用儀器為 Tenda 2.0 m 直徑尺。
- B. 樹高 (Tree Height, TH)：樹高即為地面至樹冠最頂端之高度，以 m 為單位，量測至小數第一位，使用儀器為 SENSIN FT-12 測高桿。



圖 4 DJI Matrice 300 RTK (左)、DJI Zenmuse L1 (右) (本研究拍攝)

C.枝下高 (Crown Base Height, CBH)：枝下高即為地面至樹冠最底端之高度，以 m 為單位，量測至小數第一位，使用儀器為 SENSIN FT-12 測高桿。

D.樹冠幅 (Crown Width, CW)：樹冠幅即為樹冠之最大直徑，以 m 為單位，量測至小數第一位，以垂直 90 度角量測兩次後取得平均值，使用儀器為 KUDOS 手捲式纖維皮捲尺。

E.活冠長 (Live Crown Length, LCL)：活冠長指有葉片枝條的高度，因較難量測，通常以樹高減去枝下高而獲得之，透過活冠長進而推估活冠比，計算方法為活冠長除以樹高並乘以 100%而得活冠比。

F.立木位置：透過地面光達所獲得之 1.3 m 處圓盤進行立木位置 (圓心) 獲取。

(2)地面光達獲取林木性態值

於 2022 年 2 月以地面及空載光達進行掃瞄，因目的在於透過光達資料獲取立木的資訊，故只留下與林木相關之資訊，去除不合理之點雲，包含過高點、過低點、不合理之雜點與地被點雲資料，以減少人為判識上的誤差，並利用 LiDAR360 軟體將點雲資料 (地面及空載光達) 分割成單株立木後，以半自動化 (半自動化即是於軟體自動化量測後主動檢查數值是否有界外值，如有，則對該株立木進行手動量測) 獲取以下性態值 (蕭子淳等, 2020、Brede *et al.*, 2017)：

A.光達胸徑之量測：先尋找高程最低點之點雲，將其分類為地面點，並以地面點為基準，將單株立木 1.3 m 處之點雲圓盤切下並量測兩次直徑取平均值。

B.光達樹高之量測：先尋找高程最低點之點雲，將其分類為地面點，並以地面點為基準，量測最低點與最高點之垂直高。

C.光達枝下高之量測：先尋找高程最低點之點雲，將其分類為地面點，並以地面點為基準，量測最低點與第一個主幹分岔枝條點雲之垂直高。

D.光達樹冠幅之量測：樹冠幅即為樹冠之最大直徑，尋找樹冠平行線最外側兩點量測，以垂直 90 度角量測兩次後取平均值。

E.光達活冠長之量測：先尋找活冠層最低點之點雲，將其分類為活冠層最低點，並以該點為基準，量測與其樹冠最高處點雲之垂直高。

(3)林分性態值之計算推估

A.平均林分性態值之計算

將林分內所有立木之性態值加總除以總株數，即可計算平均林分性態值作為林分內單木生長狀況之指標，計算公式如式 (1) (陳朝圳及陳建璋, 2015)。

$$\bar{\chi} = \frac{\sum \chi_i}{N} \dots\dots\dots(1)$$

式中， $\bar{\chi}$ ：平均林分性態值； χ_i ：第 i 株樣木性態值 (cm)；N：總株數。

B.每公頃株數

試驗樣區內總株數除以面積即可推算每公頃株數，每公頃株數則可反應該林分之林分密度為何，計算公式如式 (2) (陳朝圳及陳建璋, 2015)。

$$\text{每公頃株數} = N/A \dots\dots\dots(2)$$

式中，A：面積 (ha)。

C.準確度評估

光達獲取之各項性態值與實測調查性態值進行成對樣本 T 檢定分析其相關性並計算各誤差差異，以此來應證地面光達精度是否可達可信賴之範圍，如式 (3)。

$$t = \frac{\bar{y} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \dots\dots\dots(3)$$

式中， \bar{y} =樣本平均數、 s =樣本標準差、 n =樣本數，該統計量 t 在虛無假說： $\mu=\mu_0$ 為真的條件下服從自由度為 n-1 的 t 分布。

透過 MAE、RMSE 以及 MAPE 三種不同評估準確度之指標即可確定推估式之準確性。(祝維蔚, 2019、Giannetti *et al.*, 2018)

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \text{abs}(y_i - \hat{y}_i) \right] \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \dots\dots\dots (6)$$

式中， \hat{y}_i = 光達量測值、 y_i = 傳統調查量測值，透過計算平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根誤差 (Root-Mean-Square Error, RMSE) 及平均絕對百分比誤差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 來表示光達量測值與傳統調查量測值之準確度分析。

(4) 調查效率評估

本研究於實測調查、地面光達及空載光達調查時，計算各項調查方式獲取資料之時間，如外業調查時間、內業整理資料時間及點雲拼接時間，透過比較各項調查方式之效率，找尋在每公頃約 1,068 株平地大葉桃花心木人工林最適合之調查方式。

各項時間計算皆由計時器計之，實測調查之外業調查時間以現場開始量測第一株立木至最後一株立木量測完畢計算之，內業整理資料時間則開始建檔至建檔完成而計之；使用光達之外業調查時間以開始第一次掃瞄至最後一次掃瞄完畢計算之，點雲拼接時間以將資料匯入軟體後開始拼接至拼接完成之時間，內業時間則以開始量測第一株立木之性態值至最後一株立木之性態值量測完畢計算之。

2.2.2 結合地面光達與空載光達點雲建立樹高曲線式及地方材積式

本研究將兩種光達點雲藉由建立地面控制點，並對位坐標後進行合併，並在結合點雲後建立樹高曲線式及地方材積式，樹高曲線式及地方材積式可作為推估樹高及材積之工具，其方法如下：

(1) 透過點雲結合後建立樹高曲線式

本研究使用合併後點雲於 A 地 (建立模型樣區) 量測之胸徑及樹高，透過多項式迴歸分析建立樹高曲線式如式 (7)，並將此樹高曲線式帶入 B 地 (驗證樣區) 所量測之胸徑值推估樹高，以計算誤差來驗證該式是否具推估樹高之預測能力。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_d x_i^d + \epsilon_i \dots\dots (7)$$

式中， β_0 為迴歸模型的截距， $\beta_1 \dots \beta_d$ 為未知且需估計之迴歸係數， ϵ_i 為誤差項。

(2) 透過點雲結合後建立地方材積式

單位面積內所有單株立木材積的總和，即為林分蓄積量，蓄積量可作為林分收穫時之重要指標，亦可透過蓄積量了解林分生長之狀態，材積式使用兩者光達結合點雲後以區分求積法如式 (8) 及式 (9) 計算單木材積並使用多元線性迴歸建立地方材積式如式 (10) (陳朝圳及陳建璋，2015)。

$$V = (r_1 + r_2 + r_n)L + v_t \dots\dots\dots (8)$$

$$v_t = \frac{1}{3} g_n \times L_t \dots\dots\dots (9)$$

式中， V 為林木材積 (m^3)， r 為各高度斷木體積 (m^3)， L 為高度 (m)， v_t 為梢端材積 (m^3)， g_n 為梢端斷木體積 (m^3)， L_t 為梢端長度 (m)。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \dots\dots (10)$$

式中， β_0 為迴歸模型的截距， $\beta_1 \dots \beta_k$ 為未知且需估計之迴歸係數， ϵ 為誤差項。

2.2.3 應用空載光達資料推估林分蓄積量

(1) 林分高

空載光達掃瞄後之資料可建立樹冠高度模型 (Canopy Height Model, CHM) (郭鎮維，2022、Webster *et al.*, 2018、Xu *et al.*, 2018)，再進行萃取林分高，本研究將最高立木之樹高、三株優勢木之平均樹高、第三四分位數平均樹高及平均樹高四種量測方式作為林分高，並在後續討論何種量測方式最適合推估空中材積式。最高立木之樹高即為樣區內最高單一立木之樹高；三株優勢木之平均樹高即為樣區內最高三株立木之平均樹高；第三四分位數平均樹高即為樣區內所有立木樹高由小到大排列後第 75% 之樹高值；平均樹高即為該樣區所有立木樹高之平均值。

(2)枝下高及活冠長

枝下高即為先尋找高程最低點之點雲，將其分類為地面點，並以地面點為基準，量測最低點與第一個主幹分岔枝條點雲之垂直高；活冠長即為先尋找活冠層最低點之點雲，將其分類為活冠層最低點，並以該點為基準，量測與其樹冠最高處點雲之垂直高。

(3)樹冠幅及樹冠體積

以Lidar360進行半自動化判釋推估樹冠幅及樹冠體積。

(4)林分密度

本研究以「樣區株數」來代表林分密度。

依照空載光達點雲獲之林分性態值與實測調查蓄積量探討是否具顯著相關性，以來驗證推估式的成立，以空載光達所獲取之 A 地林分性態值為自變數 (Independent Variable)，A 地蓄積量為應變數 (Dependent Variable)，以逐步迴歸分析法 (Stepwise Regression Analysis)，進行篩選適當變數以建立最佳的推估模式如式 (10)。

利用上述所篩選之林分性態值建立空中材積式並推估 B 地之林分蓄積量，並以 MAE 及 RMSE 與實測調查林分蓄積量進行準確性評估，其誤差公式如式 (4) 及式 (5)，將以計算誤差驗證該空中材積式是否具正確預測能力。

2.2.4研究流程圖

根據上述程序與內容繪製本研究之流程圖，如下圖 5 所示。

3. 結果與討論

3.1地面及空載光達推估林分性態值之準確性評估

本研究以實測調查之林分性態值為真值 (表 1)，探討地面及空載光達獲取之林分性態值與真值之差異。

3.1.1地面光達

以地面光達 Trimble TX8 進行掃瞄，獲得株數共 1,656 株，與實際值相同，並萃取以下林分性態值。

(1)胸徑

地面光達所量測之平均胸徑為 14.77±5.45 cm，胸徑 0.1-12.0 cm 共 505 株，佔 30.51%；胸徑 12.1-24.0 cm 共 1,105 株，佔 66.69%；胸徑 24.1-36.0 cm 共 46 株，佔 2.80% (表 2)。現地調查量測之平均胸徑為 15.76±5.79 cm，經過現場實測調查及地面光達計算誤差後，MAE=1.17 cm、RMSE=1.54 cm。

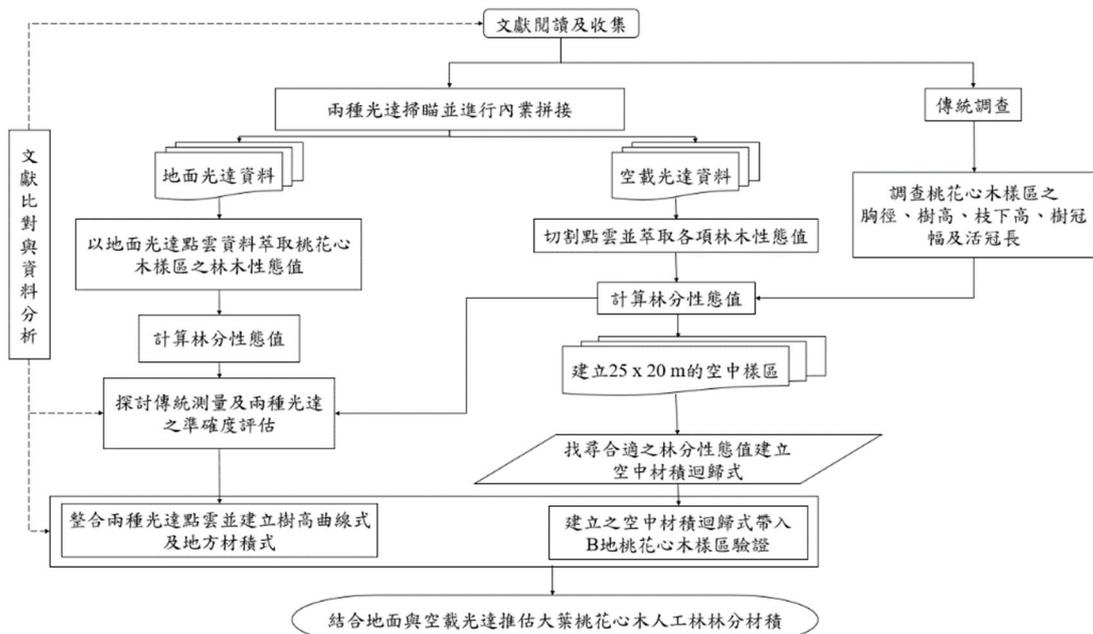


圖 5 研究流程圖

表 1 實測調查之林分性態值

株數	胸徑 (cm)	樹高 (m)	枝下高 (m)	樹冠幅 (m)	活冠長 (m)
1,656	15.76±5.79	13.00±4.05	5.34±2.16	4.22±1.07	7.66±3.18

表 2 研究區域地面光達之徑級株數統計表

徑級 (cm)	株數	百分比 (%)
<12.0	505	30.51
12.1-24.0	1,105	66.69
24.1-36.0	46	2.80
總計	1,656	100.00

Bauwens *et al.* (2016) 使用地面光達 (FARO Focus 3D 120) 對天然針闊葉混合林進行調查，其調查得出的胸徑與實測調查比較後，其 RMSE 為 1.3 cm，本研究得出之 RMSE 為 1.5 cm，其誤差大約相同，這也代表大部分林木的胸徑處都有正確掃描且成像清晰可被量測。蕭子淳等 (2020) 使用地面光達 (FARO Focus3D X330) 對闊葉樹人工林調查時，主要在探討點雲處理方法之效率評估，其使用地面光達量測胸徑時之 RMSE 分別為 0.53 cm (手動測量)、1.19 cm (半自動化偵測法)、2.57 cm (去除界外值之自動化偵測法)，本研究也採用半自動化偵測法，與上述提到之均方根誤差差異不大，印證地面光達可正確量測胸徑。

(2) 樹高

地面光達所量測之平均樹高為 9.96±3.75 m，樹高小於 5 m 共 258 株，佔 15.58%；5.1-10.0 m 共 337 株，佔 20.35%；10.1-15.0 m 共 1052 株，佔 63.53%；15.1-20.0 m 共 9 株，佔 0.54% (圖 6)。現地實測調查量測之平均樹高為 13.00±4.05 m，將實測調查及地面光達所量測之樹高經由計算誤差後，MAE=3.05 m、RMSE=3.10 m，且地面光達量測之平均樹高與真值相差約 3 m，地面光達明顯低估較高立木之樹高，推測原因為林分密度過高而導致遮蔽過多，或因地面光達掃描範圍有限，無法正確掃描至樹冠，或是被壓木及次優勢木因點雲數量不足，而造成測量不準確而產生低估誤差 (圖 7)。

Cabo *et al.* (2018) 研究中顯示，當樹高超過 10 m 時，地面光達之樹高量測值明顯低估，造成誤差原因為地面光達本身的測量範圍有所限制，雖該地面光達 (FARO Focus 3D) 之最大掃描範圍為 120 m，但可能因遮蔽等因素，而導致無法正確量測樹高。

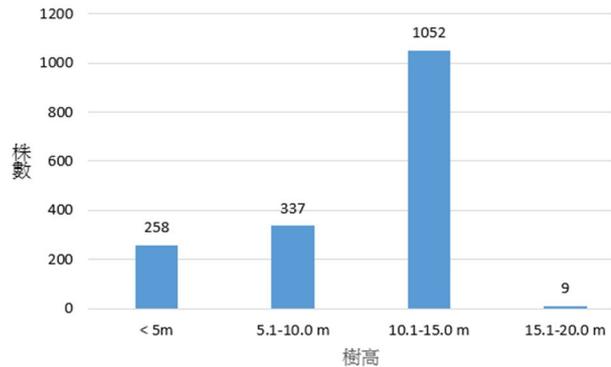


圖 6 地面光達樹高分布直方圖

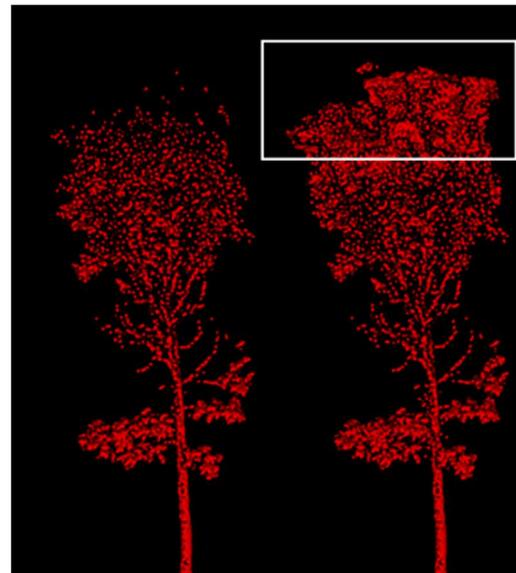


圖 7 地面光達量測樹高誤差示意圖

(3) 枝下高

地面光達所量測之平均枝下高為 5.40±2.20 m，枝下高小於 3.0 m 共 210 株，佔 12.68%；3.1-6.0 m 共 936 株，佔 56.52%；6.1-9.0 m 共 379 株，佔 22.89%；9.1-12.0 m 共 131 株，佔 7.91%。實測調查測量之平均枝下高為 5.34±2.16 m，實測調查及地面光達所量測之枝下高結果非常相同，透過計算誤差

後， $MAE=0.31\text{ m}$ 、 $RMSE=0.38\text{ m}$ ，也同樣發現兩者並無顯著差異。

Giannetti *et al.* (2018) 以地面光達 (FARO Focus 3D) 量測枝下高與實測調查比較後，得出 $RMSE$ 為 0.88 m ，該研究區域位於義大利某針闊葉混合林，林分密度為每公頃約 106 株，可說是相當稀疏的森林樣區，故減少因遮蔽而產生之誤差，本研究林分密度為每公頃約 1,068 株，與上述研究之林分密度差異甚大，但誤差卻較小。

(4)樹冠幅

現地實測調查測量之平均樹冠幅為 $4.22\pm 1.07\text{ m}$ ，地面光達所量測之平均樹冠幅為 $3.29\pm 0.95\text{ m}$ ，實測調查及地面光達所量測之樹冠幅結果有些差異，經由計算誤差後，結果為 $MAE=1.12\text{ m}$ 、 $RMSE=1.18\text{ m}$ ，地面光達所量測之平均值與實測調查誤差約 1 m ，可正確量測。

Paris *et al.* (2015) 使用地面光達量測樹冠幅的 $MAE=1.83\text{ m}$ 、 $RMSE=2.63\text{ m}$ ，研究地點位於加州一處草原上調查 25 株闊葉樹，理論上應不會產生太大誤差，但因當時僅採用單次掃瞄且每站掃瞄強度弱，單站掃瞄時間僅花不到 1 分鐘完成，而導致點雲密度不佳，本研究使用多站掃瞄且掃瞄强度高，每站掃瞄時間約 15 分鐘，故有降低誤差之情形。

(5)活冠長

現地實測調查量測之平均活冠長為 $7.66\pm 3.18\text{ m}$ ，地面光達所量測之平均活冠長為 $4.56\pm 3.00\text{ m}$ ，將實測調查及地面光達所量測之活冠長經由計算誤差後，其結果為 $MAE=3.12\text{ m}$ 、 $RMSE=3.28\text{ m}$ ，且地面光達量測之平均活冠長與真值相差約 4.37 m ，推測原因為地面光達掃瞄範圍有限，可能因遮

擋而無法有效正確掃瞄至樹冠，或是被壓木及次優勢木因點雲數量不足，而造成測量不準確而產生低估誤差 (圖 7)。

活冠長可經由算式推算活冠比，一般而言，活冠比在 60%以上的樹木才有足夠的葉片去保持此樹的正常健康生長，60%以下的樹木因為葉片不足而會產生種種生長障礙，例如抗病蟲能力低、發根困難、開花結果困難等，抗風能力也較差，此類樹木在未完全紮根前容易隨風左搖右擺，難以長出新根，較易倒塌，但因各樹種不同而會有各自適合之活冠比比，故正確量測樹冠長可進而評估樣區內立木之健康情形 (Stăncioiu *et al.*, 2021)。

地面光達對於量測胸徑、枝下高及活冠長之準確性佳，但對於量測樹高及活冠長準確性欠佳，主要受限於在樹幹密度高的林木冠層底下進行掃瞄時，真正的樹頂位置常受樹體自身冠層與鄰近立木之樹冠相互交疊而產生遮蔽，無法準確獲取該立木之樹頂位置，因此地面光達在量測樹高及活冠長上往往可能產生較大的誤差，也有其他相關研究建議，若搭配空載光達掃瞄獲取冠層頂部的點雲資料，可以彌補量測上的不足 (謝漢欽等, 2022、Kankare *et al.*, 2013、Krooks *et al.*, 2014、Liang and Hyypä, 2013、Maas *et al.*, 2008、Paris *et al.*, 2015)。

3.1.2空載光達

空載光達僅可掃瞄至樹冠層 (圖 8)，雷射光無法穿越樹冠獲得樹幹處之點雲，而導致無法正確判別立木位置，本研究透過先行建立之立木位置區分單株立木，進而萃取以下林分性態值。



圖 8 空載光達點雲資料 (本研究資料)

(1) 胸徑

本樣區共 1,656 株立木，每公頃約 1,068 株，因空載光達無法正確掃描樹幹之點雲，所有立木因胸徑量測處掃描不完全而無法進行量測，以該研究區域之林況，使用空載光達是完全無法量測胸徑的，所有立木之胸徑量測處並無正確掃描生成點雲，因無人機在空中掃描角度不佳及樹冠遮蔽，僅能接收來自樹冠層的雷射值反射，而造成無法以空載光達資料量測立木胸徑。

雖然空載光達對於單株立木調查及分割已有不錯的精準度，但如遇到樹冠形狀重疊及不規則或是林分密度較高的林分時，準確度即會大幅降低，故空載光達在胸徑的量測上，除林分密度較低的林分外，其餘林分對於胸徑的量測困難度是相當高的 (Yin & Wang, 2019、Picos *et al.*, 2020、Xu *et al.*, 2021)。

Brede *et al.* (2017) 的研究中使用空載光達與地面光達掃描做比較，結果顯示空載光達可萃取胸徑值，並擁有不錯的精準度，但該研究區域的林分密度僅每公頃約 204 株，而且掃描時間正好是春季剛發芽的時間，所以樹冠遮蔽較少，並調整無人機在空中的拍攝角度為 30-40 度，該研究使用之調查方法於本研究並不適用，因林分密度較高，樹冠遮蔽較多，如調整拍攝角度僅能掃描樣區外圍之立木，並無法獲取整個樣區的立木胸徑。

(2) 樹高

現地實測調查量測之平均樹高為 13.00 ± 4.05 m，空載光達所量測之平均樹高為 12.63 ± 4.02 m，將實測調查及空載光達所量測之樹高經由計算誤差後，其結果為 $MAE=0.49$ m、 $RMSE=0.63$ m，空載光達量測之平均樹高與真值相差約 0.37 m，準確度高，空載光達可以被用來正確量測樹高。空載光達在掃描樹幹所產生之點雲較少及被壓木會無法正確被掃描，故本研究透過立木位置點位來確定立木位置，進而正確量測該立木之樹高。

使用空載光達確認單株立木位置時，大部分的誤差來源來自於樹冠，因樹幹並不是完全通直，故空中看到的樹冠中心點會與實際立木位置有所偏移，尤其是闊葉樹，無人機空中看到的立木位置與

現場實際立木位置依舊有些許誤差 (Xu *et al.*, 2021) (圖 9)。Edson & Wing (2011) 透過空載光達掃描出的立木位置與現地實際使用 GPS 定位之坐標相比，空載光達的立木位置約偏移 2.05-2.31 m。



圖 9 空中立木位置誤差示意圖 (本研究資料)，紅點為空中判釋之立木位置；綠點為實際立木位置

(3) 枝下高

現地實測調查測量之平均枝下高為 5.34 ± 2.16 m，空載光達所量測之平均枝下高為 5.04 ± 2.13 m。實測調查及空載光達所量測之平均枝下高相近，透過計算誤差後，結果為 $MAE=0.31$ m、 $RMSE=0.40$ m，也同樣發現兩者間沒有顯著差異。

(4) 樹冠幅

現地實測調查測量之平均樹冠幅為 4.22 ± 1.08 m，空載光達所量測之平均樹冠幅為 4.14 ± 1.05 m，經由計算誤差後，結果為 $MAE=0.20$ m、 $RMSE=0.24$ m，兩者間沒有顯著差異，不過在和量測樹高上相同，需要透過確定立木位置來正確量測該立木之樹冠幅。

Paris *et al.* (2015) 研究中使用空載光達量測樹冠幅的 $MAE=3.09$ m、 $RMSE=4.47$ m，研究地點位於加州一處草原上調查 25 株闊葉樹，理當來說應該不會有太大的誤差產生，但因當時設備上的較不成熟，空載光達點雲密度僅有 2 pt/m^2 ，所以產生較

大的誤差，如今空載光達點雲密度已可達 2,500 pt/m²，可大幅降低誤差並量測正確數值。

(5)活冠長

現地實測調查量測之平均活冠長為 7.66±3.18 m，空載光達所量測之平均活冠長為 7.29±3.16 m，將實測調查及地面光達所量測之活冠長經由計算誤差後，其結果為 MAE=0.47 m、RMSE=0.57 m，誤差低且準確性高。

以空載光達調查之平均活冠長及平均樹高計算活冠比，得出數值約為 57.7%，上述提及健康樹木之活冠比應達 60%以上，本樣區之活冠法靠近 60%但並未達到，推測可能原因為林分密度過高，導致競爭激烈故無法形成較為健康的活冠比狀態。

空載光達對於量測樹高、枝下高、樹冠幅及活冠長之準確性佳，但對於量測胸徑準確性欠佳，主要受限於胸徑量測處掃描不完全而無法進行量測，因無人機在空中掃描角度不佳及樹冠遮蔽，僅能接收來自樹冠層的雷射值反射，而造成無法以空載光達資料量測立木胸徑；另外，立木位置需透過先行建立單株立木點位，才能準確區分該立木，如可透

過地面光達產生之點雲坐標進行對位，即可解決空載光達無法辨識立木位置之弊端。

3.1.3 單獨應用地面及空載光達於大葉桃花心木人工林之優劣

(1)準確性

比較兩種光達對於林分性態值的準確性後可發現 (表 3)，地面光達對於胸徑、枝下高的量測較為準確、誤差較小；空載光達則在樹高、枝下高、樹冠幅及活冠長的量測上表現較佳，但空載光達會因樹冠重疊，無法準確找出立木位置，如能使兩種光達點雲合併，一定會使量測林分性態值上更為準確，且提高內業量測之效率。

Brede *et al.* (2017) 的研究中使用地面光達及空載光達調查荷蘭某一林分密度較低的闊葉人工林，在立木點雲成像上可以很明顯可見地面光達表現較佳，空載光達於樹幹區域的點雲密度較低，上層樹枝及樹葉區域的兩種光達點雲密度差不多(圖 10 左)，但胸徑處明顯可見空載光達點雲數量比地面光達少了許多，地面光達之點雲資料可完整表現該立木胸徑處之樣貌，但空載光達無法達到(圖 10 右)。

表 3 各項調查方式之準確性評估表

		胸徑(cm)	樹高(m)	枝下高(m)	樹冠幅(m)	活冠長(m)
實測調查	平均值	15.76±5.79	13.00±4.05	5.34±2.16	4.22±1.07	7.66±3.18
	MAE	1.17	3.05	0.31	1.12	3.12
地面光達	平均值	14.77±5.45	9.96±3.75	5.40±2.20	3.29±0.95	4.56±3.00
	RMSE	1.54	3.10	0.38	1.18	3.28
空載光達	平均值	/	12.63±4.02	5.04±2.13	4.14±1.05	7.29±3.16
	RMSE	/	0.63	0.40	0.24	0.57

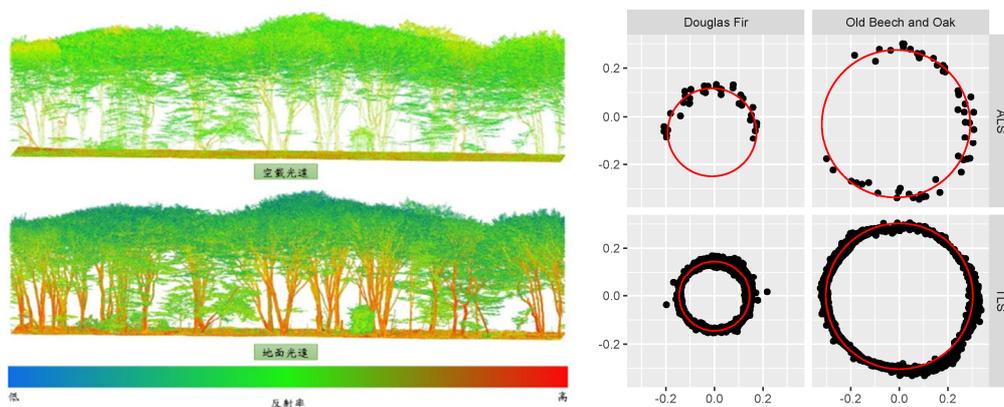


圖 10 空載光達與地面光達點雲顯示資料(左) 及胸徑點雲資料(右) (Brede *et al.* 2017)

(2)效率

前人文獻中，以同樣的調查模式，外業調查時間最快為空載光達，其次為地面光達，最後則是實測調查，本研究調查時間結果與其相同 (Bauwens *et al.*, 2016、Brede *et al.* 2017)，如表 4。三種調查方式的不安定因子同為天氣，如天氣狀況不佳，可能會導致調查時間更長，實測調查在外暴露的時間較多，因此也需承擔天候不佳的風險；在點雲拼接上，空載光達點雲的處理時間較短，地面光達拼接點雲的時間會因掃描站數而有所變化，而且地面光達需要將各站間之資料拼接，因此會花較長的時間；內業時間則是以實測調查較短，而兩種光達需要將處理好的點雲資料進行量測並萃取出所需要的各項性態值；總時間以空載光達最短，地面光達其次，實測調查最長。

綜合上述準確性及效率評估，認為必須透過結合地面及空載光達點雲來提升準確性及效率，因光達具有極高的精度、非破壞性檢測、快速獲取三維空間資料及可重複檢視資料之特性，可使外業時間大幅降低，減少因天氣不佳而造成無法獲取林分資料之風險。

3.2 結合兩種光達點雲並建立樹高曲線式及地方材積式

3.2.1 結合兩種光達點雲

本研究使用 LiDAR360 軟體進行空間對位後，將地面光達及空載光達之點雲資料合併，並有效將單株立木之點雲完整呈現，雖檔案資料容量大，但

可提高量測資料的準確性。

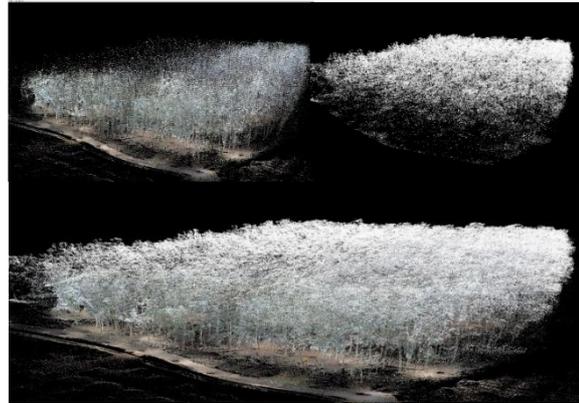


圖 11 地面光達(左上)、空載光達(右上)及兩種光達點雲結合資料(下)

3.2.2 林分性態值之準確性及效率評估

經由表 5、表 6 的比較後可以知道，地面及空載光達點雲的合併可以有效使各項林分性態值之準確性提高並降低誤差，地面光達在量測樹高上較為不準確，空載光達則在量測胸徑上較為不準確，因此兩項光達系統正好可以互相彌補彼此的缺點，進而將準確度提升，更貼近現地真實的樣貌，其中在五項林分性態值量測上的平均絕對百分比誤差 (MAPE) 有很顯著的降低。

上述地面光達因掃描範圍有限，無法有效正確掃描至樹冠，為解決此情形，將地面光達及空載光達點雲合併後測量之平均樹高為 12.78 ± 4.02 m，樹高小於 5 m 共 258 株，佔 15.58%；5.1-10.0 m 共 337 株，佔 20.35%；10.1-15.0 m 共 1052 株，佔 63.53%；15.1-20.0 m 共 9 株，佔 0.54% (表 7)。

表 4 實測調查、地面光達及空載光達調查效率比較表

	人數	外業調查時間	點雲拼接時間	內業時間	總時間
實測調查	4 人	96 小時	無	4 小時	100 小時
地面光達	2 人	6 小時	3 小時	80 小時	89 小時
空載光達	2 人	40 分鐘	20 分鐘	80 小時	81 小時

註：調查區域為每公頃約 1,068 株之大葉桃花心木人工林

表 5 不同調查方法之林分性態值比較表

	平均胸徑(cm)	平均樹高(m)	平均枝下高(m)	平均樹冠幅(m)	平均活冠長(m)
實測調查	15.76 ± 5.79	13.00 ± 4.05	5.34 ± 2.16	4.22 ± 1.07	7.66 ± 3.18
地面光達	14.77 ± 5.45	9.96 ± 3.75	5.40 ± 2.20	3.29 ± 0.95	4.56 ± 3.00
空載光達	無	12.63 ± 4.02	5.04 ± 2.13	4.14 ± 1.05	7.29 ± 3.16
地面+空載光達	14.97 ± 5.46	12.78 ± 4.02	5.35 ± 2.20	4.23 ± 1.05	7.52 ± 3.16

再與實測調查之樹高計算相關誤差外， $MAE=0.43\text{ m}$ 、 $RMSE=0.56\text{ m}$ ，兩者間誤差小且沒有顯著差異，透過地面光達與空載光達的點雲結合能使誤差減小，與前人文獻中的研究結果相似 (祝維蔚，2019、Paris *et al.*, 2015、Giannetti *et al.*, 2018)，都是將地面光達與空中載具點雲合併後有效降低誤差，且平均樹高兩者僅相差約 0.22 m ，成功彌補地面光達對於量測樹高上的不足，並將準確性大幅提升。

以調查效率來說，外業調查時間為兩種光達掃描時間勝過於實測調查，依照前面所說，兩者調查方式皆需要視天氣狀況而定，光達掃描僅花 8 小時就可結束外業，暴露在不安定環境下的時數較少，可以有效提升獲得資料的效率；地面光達與空載光達之點雲拼接時間可同時進行，各自點雲拼接完成後還需要兩者光達點雲合併，檔案容量較大，不過可永久保存及重複檢視是使用光達系統調查最大

的特點；實測調查內業只需將外業調查獲取之數據建檔即可，光達系統的內業工作較多，需要花 80 小時的時間才可以獲得相同數據；以總時間來說，光達系統可節省 8 小時的時間來獲取數據，準確度與實測調查相差不大，使用光達系統來獲得闊葉人工林之各項性態值是相當有利的調查方式 (表 8)。

地面光達雖可獲得最多的點雲數量，在立木成像、立木位置、胸徑及枝下高時擁有較為準確的數據，但缺點在於掃描時間過久及可能因遮擋或樹木高度過高而無法準確獲得樹高；空載光達掃描時間較短，且提供樹高及枝下高的數據上相當精準，但缺點是無法精準辨別立木位置及無法量測胸徑，兩者光達系統的合併正好可將彼此的缺點補足並保有原先的優點，使在平地大葉桃花心木人工林進行調查時更加有效率，能夠以比實測調查更短的時間獲得需要之數據，且資料可重複檢視，未來希望能夠成為一種可靠的調查方式供經營規劃使用。

表 6 三種不同量測點雲方法之林分性態值誤差表

		平均胸徑(cm)	平均樹高(m)	平均枝下高(m)	平均樹冠幅(m)	平均活冠長(m)
地面 光達	MAE	1.17	3.05	0.31	1.12	3.12
	RMSE	1.54	3.10	0.38	1.18	3.28
	MAPE	10.1%	26.2%	7.7%	28.1%	62.5%
	MAPE 平均值			26.9%		
空載 光達	MAE	無	0.49	0.31	0.20	0.47
	RMSE	無	0.63	0.40	0.24	0.57
	MAPE	100%	4.6%	6.3%	5.2%	12.8%
	MAPE 平均值			25.8%		
點雲 合併	MAE	0.99	0.43	0.31	0.20	0.40
	RMSE	1.35	0.56	0.37	0.23	0.50
	MAPE	7.5%	4.1%	7.6%	5.4%	12.7%
	MAPE 平均值			7.5%		

表 7 研究區域結合點雲量測之樹高統計表

樹高(m)	株數	百分比 (%)
<5.0	258	15.58
5.1-10.0	337	20.35
10.1-15.0	1,052	63.53
15.1-20.0	9	0.54
總計	1,656	100.00

表 8 實測調查及地面及空載光達調查效率比較表

	外業調查時間	點雲拼接時間	內業時間	總時間
實測調查	96 小時	無	4 小時	100 小時
地面+空載光達	6 小時 (可同時進行)	6 小時 (可同時進行)	80 小時	92 小時

註：每公頃約 1,068 株之大葉桃花心木人工林

3.2.3 建立樹高曲線式

胸徑與樹高為單株立木測計上較重要之性態值，可探討立木之可利用木材品質，並用以計算單株立木材積，並可推估森林蓄積量、生物量與炭儲存量等 (Clutter *et al.*, 1983、Avery & Burkhart, 1994)。樹高曲線式 (height-diameter model) 為量測胸徑後推估樹高之重要方法，在森林資源調查中，如遇較陡峭之林地或因遮蔽較多時，量測樹高相較於胸徑較不容易且需花費較多時間，增加測計難度，為解決此問題，常透過胸徑及樹高之關聯性建立樹高曲線式來使獲取樹高更有效率 (林政融及顏添明，2021、Colbert *et al.*, 2002、王亞男等，2012)。

使用 A 地共計 1,656 株立木之胸徑及樹高建立之多項迴歸式如下，該式之 $R^2=0.77$ ，即代表該式與胸徑及樹高具有高度相關性。

$$H = -0.0369D^2 + 1.6492D - 2.5349 \dots \dots (11)$$

式中，H=樹高(m)、D=胸徑(cm)。

B 地實測調查共計 337 株立木，平均樹高為 13.39 ± 3.83 m；將樹高曲線式帶入使用地面光達量測之胸徑值後，預測 B 地之平均樹高為 13.48 ± 2.98 m，MAE=2.00 m、RMSE=2.70 m，預測值與實際值並無顯著差異且可有效預測，此結果也與相關研究相同 (王亞男等，2012、林政融及顏添明，2021、顏竹均等，2023、Bronisz & Zasada, 2020)。本研究建立之樹高曲線式可用於推估與本研究區域相同林況之樹高，僅量測胸徑值後帶入此式即可獲取具一定預測能力之樹高值，亦可彌補地面光達量測樹高上之不足。

3.2.4 建立地方材積式

單位面積內各單株立木之材積合計，即為林分材積或林分蓄積量，森林植群長年發展後自然達到極盛相 (Climax Vegetation)，其材積達最高量時會呈現穩定平衡之狀態，此時，林分內之林木將不再生長或生長緩慢，時常利用疏伐及擇伐等作業以緩和林木競爭，增加最終之收穫量 (陳朝圳及陳建璋，2015)。欲曉單株立木之材積量，必定得將其伐下後

以各式求積法計算，但計算的同時，林木即會死亡，如立木尚未到達輪伐期就將其伐下，並無法使木材收穫量最大化，故歷年研究經常使用材積式估算蓄積量，透過量測胸徑及樹高估算材積，以了解目前林分內各立木木材之生長狀況，而光達可利用非破壞性調查之方式，建立材積式。

本研究於 A 地挑選總株數 5% 之單株立木，以各徑級進行分級，使用結合點雲進行區分求積法後進行迴歸分析，建立地方材積式，並將此材積式帶入 B 地後，探討與歷年大葉桃花心木材積量相關研究之差異。

A 地總株數為 1,656 株，其中胸徑 0.1-9.9 cm 共 327 株，約佔總株數 20%，取樣 16 株；胸徑 10.0-19.9 cm 共 1,028 株，約佔總株數 60%，取樣 52 株；胸徑 20.0-29.9 cm 共 301 株，約佔總株數 20%，取樣 15 株，總計挑選 83 株單株立木進行區分求積法，於每株立木 1.3 m、2 m、3 m 處向上量測直徑，直到無法量測為止 (圖 12)，樹冠層帶入梢端公式進行計算，材積計算結果如表 9。

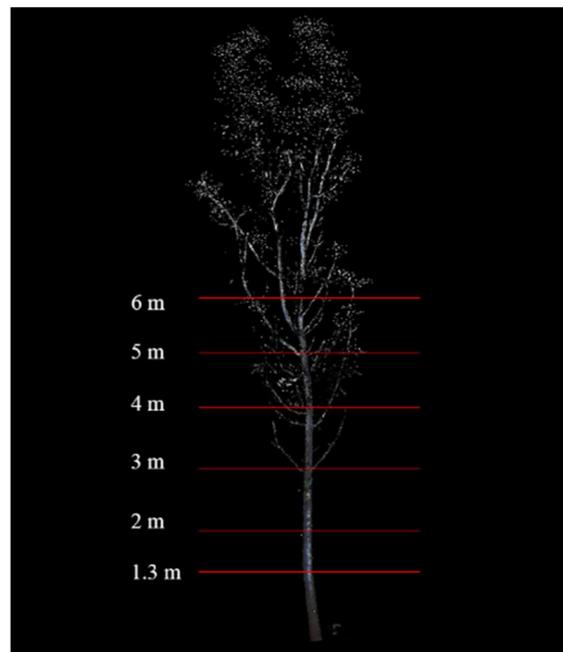


圖 12 以光達點雲資料區分求積示意圖

將區分求積法得出之材積作為應變數，胸徑及樹高作為自變數，進行迴歸分析後，得出迴歸式如下式， $R^2=0.92$ ， p 值 < 0.05 ，該材積式具顯著性相關且具預測能力。

$$V = -0.09227 + 0.02D + (-0.007H) \dots \dots (12)$$

式中，V=材積(m³)、D=胸徑(cm)、H=樹高(m)。

將實測調查之胸徑及樹高帶入上述材積式計算 A 地與 B 地之蓄積量，A 地蓄積量為 140.84 m³/ha⁻¹、平均胸徑為 15.76 cm 及平均樹高為 13.00 m；B 地蓄積量為 151.21 m³/ha⁻¹、平均胸徑為 16.48 cm 及平均樹高為 13.39 m。探討往年推估大葉桃花心木蓄積量

之相關研究後發現，如表 10，馮豐隆及黃志成 (1993) 的研究結果顯示，在 12 年生、每公頃 775 株、平均胸徑 17.08 cm 及平均樹高 12.30 m 之大葉桃花心木蓄積量為 137.36 m³/ha⁻¹，本研究區域為 12 年生，建立地方材積式推估之蓄積量較高，因本研究區域之每公頃株數約 1,028 株，株數較多而導致蓄積量提高，因此，可驗證本研究建立之地方材積式可有效推估蓄積量且與各相關文獻無顯著差異。

表 9 A 地取樣 83 株立木區分求積材積表

立木編號	胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m ³)	立木編號	胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m ³)
451	3.57	2.04	0.00	729	15.63	14.74	0.09
1128	4.66	5.44	0.01	741	15.63	13.51	0.08
1213	4.77	5.5	0.01	520	15.64	14.88	0.12
178	4.83	4.71	0.00	591	15.64	15.21	0.11
1501	5.92	7.2	0.01	1081	15.65	13.33	0.07
905	7.08	4.01	0.01	1452	15.65	13.55	0.09
1158	7.18	4.09	0.01	111	15.67	13.45	0.08
1356	8.04	5.04	0.01	494	15.68	15.11	0.11
457	8.20	8.27	0.03	354	15.68	13.66	0.10
1263	8.41	8.17	0.02	346	15.71	14.01	0.11
1147	8.78	5.97	0.03	42	15.74	14.46	0.10
1357	8.85	3.86	0.01	953	19.33	14.63	0.16
525	8.92	12.09	0.03	960	19.33	16.98	0.19
1032	9.89	11.46	0.04	1416	19.36	15.73	0.19
1055	9.61	10.44	0.03	1572	19.38	17.29	0.15
216	9.62	9.72	0.04	286	19.39	16.47	0.18
468	11.69	12.13	0.04	1031	19.39	15.82	0.20
544	11.72	13.53	0.07	1651	19.39	13.66	0.16
1116	12.14	15.12	0.07	368	19.40	15.91	0.18
951	12.15	13.46	0.06	143	19.41	15.39	0.17
836	12.47	15.55	0.06	728	19.41	14.76	0.16
732	12.48	14.52	0.07	1074	19.96	16.11	0.22
385	12.51	15.01	0.06	1486	19.96	15.57	0.11
1351	12.51	9.57	0.06	1296	19.97	16.94	0.15
586	13.96	14.64	0.08	1576	19.97	15.56	0.16
261	13.97	14.77	0.08	1394	19.99	16.58	0.19
1272	14.00	13.45	0.06	855	23.76	15.71	0.26
304	14.03	15.15	0.09	373	23.77	15.67	0.32
391	14.04	13.86	0.08	865	23.78	16.34	0.28
1427	14.08	13.8	0.07	97	23.81	16.21	0.28
944	14.11	16.25	0.09	156	23.85	17.61	0.30
1226	14.15	14.53	0.08	1201	23.87	16.7	0.33
560	14.17	14.71	0.11	125	23.88	15.13	0.24
594	15.56	15.08	0.11	67	23.95	15.4	0.24
1258	15.57	15.37	0.11	977	23.98	15.79	0.28
356	15.60	11.75	0.09	1497	26.48	15.69	0.31
1235	15.60	14.57	0.11	1631	26.62	16.25	0.31
1307	15.60	16.28	0.12	1410	27.02	14.95	0.38
1435	15.60	13.29	0.08	759	27.07	15.98	0.34
160	15.61	13.97	0.10	123	28.92	15.26	0.48
1457	15.62	13.34	0.10	1652	28.94	16.08	0.40
1636	15.62	10.88	0.09				

3.3 透過空載光達之林分性態值推估空中材積式並驗證

先於 A 地範圍建立 30 個 25 × 20 m 的空中樣區，探討空載光達所獲得之林分性態值與實際林分蓄積量是否有顯著之相關性，透過實測調查及空載光達資料獲得之 A 地林分蓄積量及性態值來推估空中材積式，並以接近相同林況之 B 地驗證該材積式是否能成功推估。以 A 地樣區空載光達可獲取之 10 種林分性態值作為自變數 (表 11)、實測調查樣區蓄積量作為應變數來建立迴歸模型。如自變數選取不佳，則將影響迴歸模型之解釋能力優劣及材積式之準確性，故先透過逐步迴歸分析法，過濾出較為合適之林分性態值作為自變數，進而建立空中材積式，並將 B 地所獲得之林分性態值帶入空中材積式後探討其蓄積量之準確性。

將上述所萃取之各項林分性態值，進行逐步迴歸分析後，選入的自變數為株數、平均樹冠幅及平均樹高，逐步迴歸模型只選取至第三項自變數平均樹高後則不再進行迴歸模式推估，即代表後續其他之林分性態值對於推估蓄積量之迴歸式並無明顯幫助，故不再進行模型推估。

魏浚紘等 (2010) 以平均樹高作為林分高進行阿里山柳杉人工林分材積之推估；朱宗威等 (2014) 以優勢木平均樹高、次優勢木與優勢木平均樹高及最高樹高作為林分高建立空中材積式；Alonzo *et al.* (2018) 以第三四分位數樹高作為林分高推算蓄積量。表示林分高之方式甚多，本研究將最高樹高、

三株優勢木平均樹高、第三四分位數平均樹高與平均樹高進行迴歸分析後，以平均樹高作為表示林分高，即代表平均樹高最可表達本樣區之立木高度變化且與蓄積量有高相關性。

經由迴歸模型摘要可見 (表 12)，如僅使用株數作為自變數建立迴歸模型時，調整後的 $R^2=0.75$ ；使用株數及平均樹冠幅作為自變數建立迴歸模型時，調整後的 $R^2=0.85$ ；使用株數、平均樹冠幅及平均樹高作為預測變數時，調整後的 $R^2=0.90$ 。調整過的 R^2 值會嘗試更正 R^2 值的過度預估，調整後的 R^2 值可看出線性模型的精確度，數值越大則代表越為準確，而摘要表中測量調整後的 R^2 值已有相當不錯的水準，數值不斷上升也代表著該模型距離實際值的程度越好。黃睦宇等(2021) 透過四種不同林分高之表示方式以建立楓香人工林空中材積式，其最高樹高之 $R^2=0.74$ 、三株優勢木平均樹高之 $R^2=0.73$ 、第三四分位數樹高之 $R^2=0.72$ 及平均樹高之 $R^2=0.74$ ，印證本研究之空中材積式精確度佳且具高相關性。

雙因子變異數分析 (Two way ANOVA) 中，F 值=84.57、顯著性 p 值<0.05，證明使用這三項自變數建立該迴歸模型是具有顯著性相關且具有預測能力。建立可靠的線性迴歸式時還有一個要點，殘差間不得存在自相關，經由 Durbin-Waston 檢定後得出該值為 1.55，在 Durbin-Watson Table 中 $n=30$ 、 $k=4$ 的 $d_L=0.94$ 、 $d_U=1.51$ ，本研究獲得之 Durbin-Waston 值 $1.55 > d_U$ ，則代表殘差間各自獨立，此迴歸式具有良好的解釋能力。

表 10 大葉桃花心木蓄積量文獻整理表

文獻	林齡	每公頃株數	平均胸徑(cm)	平均樹高(m)	每公頃蓄積量(m ³ /ha ⁻¹)
(陳忠義等，2015)	6	1,111	5.65	5.05	11.72
(馮豐隆及黃志成，1993)	7	815	8.66	8.61	18.96
(林金樹等，2012)	7	1,796	9.48	8.93	69.66
(陳忠義等，2015)	7	1,070	7.07	6.00	18.33
(蔡馨儀，2012)	8	957	12.07	10.24	51.52
(蔡馨儀，2012)	9	957	13.62	11.57	98.60
(馮豐隆及黃志成，1993)	10	811	14.79	11.48	90.96
(馮豐隆及黃志成，1993)	12	775	17.08	12.30	137.36
(馮豐隆及黃志成，1993)	14	636	17.94	12.78	135.53
(馮豐隆及張鈞媛，2007)	29	654	24.21	15.12	235.98
(顏添明等，2020)	44	653	32.06	15.70	425.70
(顏添明等，2020)	45	653	32.72	未調查	436.90

表 11 空載光達所萃取之林分性態值

樣區編號	株數	最高樹高 (m)	三株優勢木平均樹高 (m)	第三四分位數樹高 (m)	平均樹高 (m)	平均活冠長 (m)	平均樹冠幅 (m)	平均枝下高 (m)	平均樹冠面積 (m ²)	平均樹冠體積 (m ³)
1	42	16.19	16.03	14.35	12.05	6.85	4.37	4.94	8.51	51.13
2	24	17.37	16.65	15.05	13.05	8.02	4.37	4.77	9.07	57.67
3	57	16.26	16.11	15.02	12.12	7.02	4.06	4.86	10.94	65.16
4	63	18.09	17.34	15.63	12.97	7.66	4.07	4.97	8.54	51.34
5	34	17.32	17.22	15.39	13.28	7.96	4.30	5.00	8.63	47.00
6	59	16.97	16.67	15.59	13.20	7.67	4.19	5.20	8.65	54.33
7	67	16.99	16.44	15.10	12.06	6.83	3.84	4.89	11.67	75.80
8	67	18.81	17.91	15.91	13.04	6.93	3.93	5.78	11.04	75.67
9	78	18.05	17.41	15.83	12.03	6.49	3.60	5.27	10.70	82.57
10	33	16.01	15.79	15.10	13.40	8.14	4.35	4.92	8.69	49.34
11	57	17.64	17.34	15.28	12.38	7.22	3.95	4.71	9.92	58.02
12	60	17.91	17.71	16.76	13.14	7.16	4.06	5.69	9.70	69.21
13	59	19.03	18.25	15.78	13.26	7.17	3.96	5.80	10.61	74.28
14	56	19.20	17.84	15.40	11.85	6.58	4.01	4.94	9.17	63.05
15	60	16.72	16.40	15.19	13.05	7.91	4.16	4.81	11.65	71.60
16	68	18.07	17.49	15.84	12.58	6.99	3.83	5.28	10.13	66.25
17	60	17.49	16.99	15.49	12.81	7.04	3.88	5.47	10.57	65.49
18	61	17.02	16.95	15.57	12.53	7.01	4.03	5.25	10.20	67.38
19	50	17.62	16.84	15.57	12.63	7.51	4.47	4.80	11.87	81.91
20	21	16.44	16.27	15.48	14.36	9.02	5.04	4.99	9.28	53.94
21	52	17.08	16.91	15.29	12.50	7.82	4.23	4.33	11.22	73.55
22	71	17.11	16.94	15.65	12.48	7.12	3.75	5.03	12.17	83.44
23	58	17.02	16.97	15.78	12.36	7.07	4.08	4.97	9.24	56.13
24	57	17.92	17.28	15.89	12.75	7.35	4.29	5.09	9.46	62.39
25	15	16.92	16.51	15.08	10.67	6.23	5.35	4.22	8.60	48.08
26	46	16.39	16.35	15.31	12.71	7.89	4.49	4.50	8.16	49.34
27	47	17.81	17.49	15.97	12.75	7.73	4.38	4.80	12.81	93.99
28	56	16.38	16.17	15.61	12.46	7.43	4.16	4.72	10.13	76.30
29	38	17.87	16.35	14.74	11.27	6.25	4.51	4.71	9.74	58.35
30	66	17.26	17.02	15.28	13.35	8.50	4.87	4.56	8.91	58.83

表 12 逐步迴歸式雙因子變異數分析及 Durbin-Watson 檢定表

迴歸式	選入自變數	調整後的R ²	Anova-F	顯著性	Durbin-Watson檢定
1	株數	0.75	87.96	0.00	
2	株數、平均樹冠幅	0.85	85.57	0.00	
3	株數、平均樹冠幅、平均樹高	0.90	84.57	0.00	1.55

從表 13 可知，標準化係數 B 值皆大於 0，可從該值的大小了解各項自變數在迴歸模型中的重要程度；非標準化係數與標準化係數的 T 值皆大於 0 且顯著性 p 值小於 0.05，代表這三項林分性態值對於推估蓄積量有著顯著的影響，且對該迴歸模型有一定程度的解釋能力；當 2 個或 2 個以上的自變數彼此具有相關性時，則具有共線性，共線性會使迴歸模型中存在著重複的自變數，提高某一自變數的解釋力與預測力，使得理論的建構不正確。判定共線性強弱時，會使用變異數膨脹因素值 (Variance Inflation Factor, VIF) 來判定，三種逐步迴歸模型共線性 VIF 值最高為 2.55，Cohen *et al.* (2003) 認為當

VIF 值大於 10 為嚴重共線性，本研究得出之 VIF 值不大於 10，因此判定各項自變數間的共線性問題不大，迴歸模型能有效的預測蓄積量。

迴歸線性模型中，殘差應會依照真實的迴歸線隨機波動，假設迴歸模型有效且合理，那殘差便會有變異數同質性、趨近於常態分佈以及各自獨立的三種特性，上述提到的 Durbin-Watson 值大於 d_U ，代表殘差間各自擁有獨立性，經由殘差散佈圖也可發現，各項標準化殘差隨機分佈在 0 的中心線周圍並沒有明顯的規律在，看起來像是以 0 為中心而各自獨立的一群點，殘差直方圖也趨近於常態分佈

(圖 13)，代表模型中變異數同質性，故印證建立迴歸模型中殘差之特性，該迴歸線性模型假說成立。

經由上述逐步迴歸分析後所得出之空中材積式如下：

$$V = -22.86598 + 0.18352 \times N + 0.66025 \times H + 2.99902 \times CW \dots (13)$$

式中，V=林分蓄積量(m³)、N=株數、H=平均樹高(m)、CW=平均樹冠幅(m)。

A 地林分密度為每公頃約 1,068 株，B 地林分密度為每公頃約 988 株，在與 A 地擁有近相同林況之 B 地中建立 6 個 25 x 20 m 之空中樣區，並以空載光達資料獲取其林分性態值後，將獲取出的株數、平均樹高、平均樹冠幅帶入空中材積式，並探討其準確性及誤差。株數為迴歸式中最為重要的自變數，以軟體自動化判釋後，株數判釋正確率為

98.5%，其獲取株數時誤差主要來自於分岔立木，軟體會將分岔立木之樹冠視為兩株獨立立木，進而產生計算上之誤差 (表 14)。

帶入推估之空中材積式後 (圖 14)，經迴歸式預測之林分蓄積量為 182.93 m³/ha⁻¹，而透過實測調查量測胸徑樹高計算材積之林分蓄積量為 176.76 m³/ha⁻¹，其 MAE=0.71 m³、RMSE=0.79 m³，預測值與實際值差異甚小，其誤差也在可容許範圍，並無顯著差異，以此印證該式可作為 12 年生、每公頃株數約 1,028 株及平均樹高約 13 m 之平地大葉桃花心木人工林空中材積式做使用，未來如有相同林況之林型，即可使用空載光達萃取該林分之株數、樹冠幅及平均樹高後，帶入上述之空中材積式，快速並準確的預測該林分之蓄積量，以利後續經營及收穫等作業。

表 13 空中材積式自變數相關性及共差比較表

迴歸式	選入自變數	平均值	標準差	標準化係數 β 值	T 值	顯著性	共線性允差	共線性 VIF 值
1	株數(株)	52.73	15.22	0.87	9.38	0.00	1.00	1.00
2	株數(株)	52.73	15.22	1.27	11.24	0.00	0.39	2.54
	平均樹冠幅(m)	12.64	0.70	0.52	4.57	0.00	0.39	2.54
3	株數(株)	52.73	15.22	1.27	13.28	0.00	0.39	2.55
	平均樹冠幅(m)	12.64	0.70	0.51	5.36	0.00	0.39	2.54
	平均樹高(m)	4.22	0.38	0.21	3.48	0.00	1.00	1.00

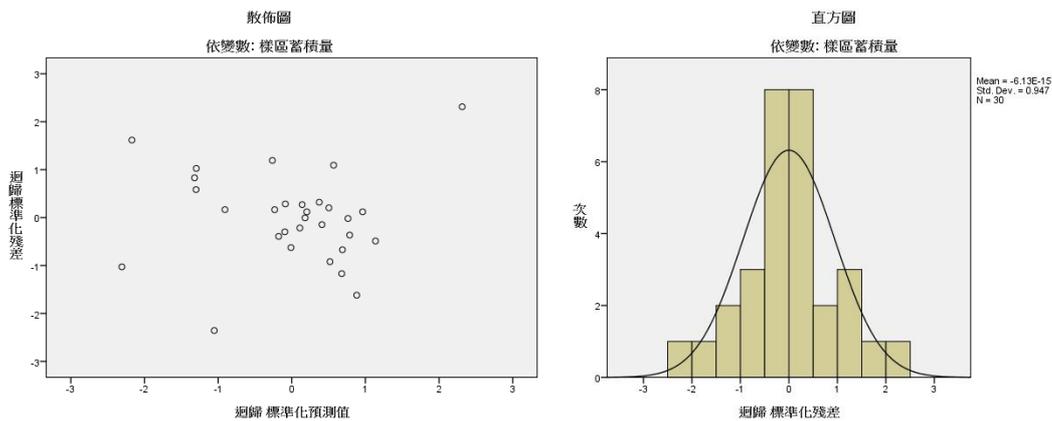


圖 13 殘差散佈及直方圖

表 14 B 地樣區空載光達萃取之林分性態值

樣區編號	實際株數	軟體判釋株數	平均樹高(m)	平均樹冠幅(m)
1	51	53	13.55±3.20	4.49±1.02
2	63	64	13.64±3.53	4.49±1.04
3	51	53	12.71±5.02	4.07±1.41
4	52	52	14.23±3.77	4.27±0.97
5	45	45	12.16±3.65	4.79±2.27
6	54	54	13.84±1.41	4.66±3.37

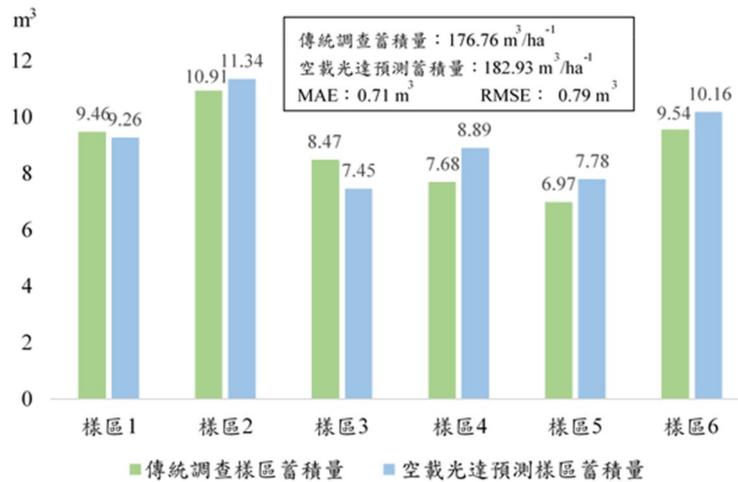


圖 14 B 地樣區預測蓄積量與真值比較圖

4. 結論

透過實測調查、地面光達及空載光達於 A 地獲取林分性態值，研究結果顯示地面光達對於量測胸徑、枝下高及樹冠幅相當準確；空載光達對於量測樹高、枝下高、樹冠幅及活冠長相當準確。地面光達對於樹高、樹冠幅及活冠長量測不準確因素來自於掃描範圍的限制或因遮擋而無法有效正確掃描至樹冠，而造成測量不準確而產生低估誤差。空載光達雖在獲取性態值上表現較佳，但因樹冠遮擋而無法獲取立木位置，需透過先行建立立木位置點位來劃分樹冠，才能獲取正確之性態值，另一隱憂則是立木樹幹處無法產生點雲，而導致無法量測胸徑。

兩種光達在使用上各有利弊，將兩者光達點雲合併，亦可達到相輔相成、互相抵銷彼此缺點之效果，透過軟體進行空間對位後，成功將點雲合併，五項林分性態值之平均絕對百分比誤差僅 7.47%，比兩種光達單獨使用的 26.92% 及 25.77% 下降許多，彌補地面光達對於獲取樹高及空載光達獲取胸徑及立木位置的不足，同時也提升調查效率，獲取林分性態值比實測調查節省 8 小時。並藉由完整之立木點雲資料成功建立樹高曲線式及地方材積式，為後續推估樹高及蓄積量打下良好基礎，也更容易了解林分生長狀況。

使用空載光達建立空中材積迴歸並推估林分蓄積量，透過逐步迴歸分析後，選入株數、平均樹

冠幅及平均樹高作為自變數，實測調查蓄積量作為應變數，得出迴歸式，並將其式帶入 B 地，預測之林分蓄積量為 $182.93 \text{ m}^3/\text{ha}^{-1}$ ，實測調查之林分蓄積量為 $176.76 \text{ m}^3/\text{ha}^{-1}$ ，其 $\text{MAE}=0.71 \text{ m}^3$ 、 $\text{RMSE}=0.79 \text{ m}^3$ ，印證此式可應用在相同林況之森林推估蓄積量。

因應不同調查目的及樣區現況選擇合適之光達系統，結合地面及空載光達點雲可有效提高調查林分性態值之效率及準確性，單獨使用空載光達可建立空中材積式推估林分蓄積量，本研究盼能為平地大葉桃花心木人工林增添高效率且準確之調查方法。

參考文獻

- 王亞男、石哲宇、顏添明、李隆恩，2012。溪頭地區紅檜人工林樹高曲線式及樹高生長模式建立之研究，國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告，26(2)：93-102，DOI：10.6542/EFNTU.201206_26(2).0001。 [Wang, Y.N, Shih, C.Y., Yen, T.M., and Li, L.E., 2012. Study of height-diameter equations and tree height growth equations for Taiwan red cypress ("*Chamaecyparis formosensis*") plantations in Xitou area, Journal of the Experimental Forest of National Taiwan University, 26(2): 93-102, DOI: 10.6542/EFNTU.201206_26(2).0001. (in Chinese)]

- 朱宗威、陳建璋、陳朝圳，2014。無人空中載具數位影像應用於林分蓄積量之推估，國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告，28(1)：45-54，DOI：10.6542/EFNTU.201403_28(1).0004。[Chu, T.W., Chen, J.C., and Chen, C.T., 2014. Estimating stand stocks by unmanned aerial vehicle image, *Journal of the Experimental Forest of National Taiwan University*, 28(1): 45-54, DOI: 10.6542/EFNTU.201403_28(1).0004. (in Chinese)]
- 林金樹、鄭景鵬、王亞男、馬曉恩、劉哲璋，2012。九鬮農場大葉桃花心木、印度紫檀及小葉南洋杉人工林的林分初期生長特性，中華林學季刊，45(2)：151-167，DOI：10.30064/QJCF.201206.0002。[Lin, C.S., Chang, C.P., Wang, Y.N., Ma, S.E., and Liu, C.W., 2012. Early Stand Growth of *Swietenia*, *Pterocarpus* and *Araucaria* Plantations on Jiujiu Farm Forest, *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 45(2): 151-167, DOI: 10.30064/QJCF.201206.0002. (in Chinese)]
- 林政融、顏添明，2021。應用不同結構樹高曲線式模擬臺灣杉人工林之效果評估，臺灣林業科學，36(2)：111-125。[Lin, Z.R., and Yen, T.M., 2021. Assessing prediction effects among height-diameter models with varied structures for a *Taiwania (Taiwania cryptomerioides)* Hayata plantation, *Taiwan Journal of Forest Science*, 36(2): 111-125. (in Chinese)]
- 行政院農業委員會林務局，2016。第四次森林資源調查報告，行政院農業委員會林務局，78頁。[Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, 2016., *The Fourth Time of State-owned Forest Working Circle Revision Investigations*. (in Chinese)]
- 祝維蔚，2019。應用手持式雷射掃瞄儀與無人飛行載具於森林樣區測計，國立屏東科技大學森林系碩士論文，DOI：10.6346/NPUST201900236。[Chuk, W.W., 2019. Integration of hand-held mobile laser scanner and unmanned aerial vehicle to measure trees based on plot-scale data, Master Thesis, National Pingtung University of Science and Technology, Taiwan, ROC, DOI: 10.6346/NPUST201900236. (in Chinese)]
- 郭鎮維、徐廣達、蘇美婷，2022。應用光載光達於公共工程規劃之大面積樹木調查，中興工程，155：57-67。[Kuo, C.W., Hsu, K.T., and Su, M.T., 2019. Ying yung guang tzai guang da yu gung gung cheng guei hua jr da mian ji shu mu tiau, *Sinotech Engineering*, 155: 57-67. (in Chinese)]
- 陳忠義、余瑞珠、王亞男，2015。屏東萬隆農場大葉桃花心木之生長及CO₂吸存量，中華林學季刊，48(4)：331-342。[Chen, C.I., Yu, J.C., and Wang, Y.N., 2015. Growth and CO₂ sequestration of *Swietenia macrophylla* in the wan-long farm, Pingtung, *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 48(4): 331-342. (in Chinese)]
- 陳朝圳、陳建璋，2015。森林經營學，正中書局股份有限公司，417頁。[Chen, C.T., and Chen, J.C., 2015. *Forest Management*, Cheng Chung Book Co., Ltd. (in Chinese)]
- 彭炳勳、謝依達、陳朝圳，2008。空載光達雷射穿透率指數與柳杉林葉面積指數之關係探討，臺灣林業科學，23(Supplement)：S63-73，DOI：10.7075/TJFS.200810.0006。[Peng, B.S., Hsieh, Y.T., and Chen, C.T., 2008. Relationship between the airborne laser penetration index and leaf area index by LiDAR data analysis of a Sugi Plantation, *Taiwan Journal of Forest Science*, 23(Supplement): S63-73, DOI: 10.7075/TJFS.200810.0006. (in Chinese)]
- 馮豐隆、張鈞媛，2007。桃花心木永續經營管理-以新化林場為例，行政院農業委員會林務局，<https://ir.lib.nchu.edu.tw/handle/11455/57292?mode=simple>，引用 2023/5/15。[Feng, F.L., and Chang, J.Y., 2007. Sustainable Management of

- Mahogany- An Example of Hsin-Hwa Experimental Forest Station, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Available at: <https://ir.lib.nchu.edu.tw/handle/11455/57292?mode=simple>, Accessed May 15, 2023. (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)]
- 馮豐隆、黃志成，1993。新化林場大葉桃花心木生長收穫之探討，*國立中興大學實驗林研究報告*，15(1): 121-141。[Feng, F.L., and Huang, C.C., 1993. Studies on growth and yield of *Swietenia macrophylla* in Hsin Hua forest station, *Bulletin of Experimental Forest And Department of Forestry College of Agriculture National Chung Hsing University*, 15(1):121-141. (in Chinese)]
- 黃睦宇、魏浚紘、黃上權、彭炳勳、陳朝圳、陳建璋，2021。應用無人飛行載具影像密匹配點雲建立花蓮大農大富平地森林園區楓香人工林蓄積量推估模式，*林業研究季刊*，43(2): 53-64。[Huang, M.Y., Wei, C.H., Huang, S.C., Peng, B.S., Chen, C.T., and Chen, J.C., 2021. Using unmanned aerial vehicle (UAV) image dense matched point clouds data to estimate the stand volume equation of *Liquidambar formosana* plantation in Danongdafu forest park in Hualien county, *Quarterly Journal of Forest Research*, 43(2):53-64. (in Chinese)]
- 楊榮啟、林文亮，2003。森林測計學，國立編譯館，309 頁。[Yang, Y.C., and Lin, W.L., 2003. *Forest Measurement*, National Institute for Translation and Compilation. (in Chinese)]
- 劉宣城、林銘輝、曲俊麒，1981。台灣大葉桃花心木造林木之生長與木材性質之研究，*林業試驗所試驗報告*第 351 號，38 頁。[Liu, S.C., Lin, M.H., and Chu, C.C., 1981. Growth and wood properties of planted Honduras mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in Taiwan, *Taiwan Forestry Research Institute BULLETIN* No.351. (in Chinese)]
- 蔡馨儀，2012。以地面光達資料重建大葉桃花心木三維模型，*國立屏東科技大學碩士學位論文*，DOI: 10.6346/NPUST.2012.00183。[Tsai, H.Y., 2012. Using ground-based LiDAR data to reconstruct the three dimensional model of *Swietenia macrophylla* King, Master Thesis, National Pingtung University of Science and Technology, Taiwan, ROC, DOI: 10.6346/NPUST.2012.00183. (in Chinese)]
- 蕭子淳、陳建璋、陳朝圳、魏浚紘，2020。地面雷射掃描系統於小樣區之立木測計，*航測及航遙測學刊*，25(3): 129-148，DOI: 10.6574/JPRS.202009_25(3).0001。[Shiao, T.C., Chen, J.C., Chen, C.T., and Wei, C.H., 2020. Terrestrial laser scanning systems for measuring tree based on small plot data, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25(3): 129-148, DOI: 10.6574/JPRS.202009_25(3).0001. (in Chinese)]
- 謝漢欽、李隆恩、王韻皓、黃俊元，2022。地面光達掃描技術於森林測計的應用，*林業研究專訊*，29(2): 1-5。[Hsieh, H.C., Li, L.E., Wang, Y.H., and Huang, J.Y., 2022. Di mian guang da sau miao ji shu yu sen lin tse ji de ying yung, *Forestry Research Newsletter*, 29(2): 1-5. (in Chinese)]
- 鍾智昕、林謙佑、林振榮，2013。臺灣南部大葉桃花心木徑向生長量季節性差異之研究，*中華林學季刊*，46(1): 15-26。[Chung, C.H., Lin, Q.Y., and Lin, C.J., 2013. Radial growth increment of mahogany growing in southern Taiwan, *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 46(1): 15-26. (in Chinese)]
- 顏竹均、林政融、林志銓、顏添明，2023。惠蓀林場香杉人工林樹高曲線式、材積式及地上部生

- 物量模式之建立及應用於林分碳貯存量之推估，林業研究季刊，45(1)：35-50。[Yen, C.C., Lin, Z.R., Lin, C.C., and Yen, T.M., 2023. Development of tree height, volume and aboveground biomass equations to predict carbon storage for a Konishi fir (*Cunninghamia konishii*) plantation in Huisun Experimental Forest Station, Quarterly Journal of Forest Research, 45(1):35-50. (in Chinese)]
- 顏添明、林政融、謝傳凱，2020。新化林場大葉桃花心木人工林直徑分布量化及碳吸存能力評估，林業研究季刊，42(3)：137-246。[Yen, T.M., Lin, Z.R., and Hsieh, F.K., 2020. Quantifying diameter distribution and assessing carbon storage capacity of a mahogany (*Swietenia macrophylla*) plantation in Hsinhua Forest Station, Quarterly Journal of Forest Research, 42(3):137-246. (in Chinese)]
- 魏浚紘、吳守從、彭炳勳、陳朝圳，2010。應用空載光達建立阿里山地區柳杉人工林之林分材積式，地理學報，59：67-80，DOI：10.6161/jgs.2010.59.04。[Wei, C.H., Wu, S.T., Peng, B.S., and Chen, C.T., 2010. Using airborne LiDAR data to establish the stand volume equation of *Cryptomeria japonica* in Alishan Area, Journal of Geographical Science, 59: 67-80, DOI: 10.6161/jgs.2010.59.04. (in Chinese)]
- Alonzo, M., Andersen, H.E., Morton, D.C., and Cook, B.D., 2018. Quantifying boreal forest structure and composition using UAV structure from motion, Forests, 9(3): 119, DOI: 10.3390/f9030119.
- Avery, T.E., and Burkhart, H.E., 1994. Forest Measurements, 4th ed., New York: McGraw-Hill, p.408.
- Barrett, F., McRoberts, R.E., Tomppo, E., Cienciala, E., and Waser, L.T., 2016. A questionnaire-based review of the operational use of remotely sensed data by national forest inventories, Remote Sensing of Environment, 174: 279-289, DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.029.
- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., and Lejeune, P., 2016. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning, Forests, 7(6): 127, DOI: 10.3390/f7060127.
- Brede, Benjamin., Lau, A., Bartholomeus, H.M., and Kooistra, L., 2017. Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR derived canopy Height and DBH with terrestrial LiDAR, Sensors, 17(10): 2371, DOI: 10.3390/s17102371.
- Bronisz, K., and Zasada, M., 2020. Taper models for black locust in west Poland, Silva Fennica, 54(5): 10351, DOI: 10.14214/sf.10351.
- Cabo, C., Pozo, S.D., Rodríguez-González, P., Ordóñez, C., and González-Aguilera, D., 2018. Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level, Remote Sensing, 10(4): 540, DOI: 10.3390/rs10040540.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H., and Bailey, R.L., 1983. Timber Management: A Quantitative Approach, New York, NY: John Wiley, p.333.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S.G., and Aiken, L.S., 2003. Applied Multiple Regression/ Correlation Analysis for the Behavioral Sciences (3rd ed.), Lawrence Erlbaum Associates: Mahwah, NJ, USA, p.736.
- Colbert, K.C., Larsen, D.R., and Lootens, J.R., 2002. Height-diameter equations for thirteen midwestern bottomland hardwood species, Northern Journal of Applied Forestry, 19(4): 171-176, DOI: 10.1093/njaf/19.4.171.
- Edson, C., and Wing, M.G., 2011. Airborne light detection and ranging (LiDAR) for individual tree stem location, height, and biomass measurements. Remote Sensing, 3(11): 2494-2528, DOI:

- 10.3390/rs3112494.
- Giannetti, F., Puletti, N., Quatrini, V., Travaglini, D., Bottalico, F., Corona, P., and Chirici, G., 2018. Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single tree attributes in Mediterranean forest stands, *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 795-807, DOI: 10.1080/22797254.2018.1482733.
- Jurjević, L., Liang, X., Gašparović, M., and Balenović, I., 2020. Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous forest, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169: 227-241, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.09.014.
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H., and Alho, P., 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75: 64-75, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003.
- Krooks, A., Kaasalainen, S., Kankare, V., Joensuu, M., Raunonen, P., and Kaasalainen, M., 2014. Predicting tree structure from tree height using terrestrial laser scanning and quantitative structure models, *Silva Fennica*, 48: 1–11., DOI: 10.14214/sf.1125.
- Liang, X., and Hyypä, J., 2013. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels, *Sensors*, 13: 1614–1634, DOI: 10.3390/s130201614.
- Maas, H.-G., Bienert, A., Scheller, S., and Keane, E., 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data, *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1579–1593, DOI: 10.1080/01431160701736406.
- Moorthy, I., Miller, J.R., Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P., Hu, B., and Chen, J., 2010. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(2):204-214, DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.10.005.
- Paris, C., Kelbe, D., Van Aardt, J., and Bruzzone, L., 2015. A precise estimation of the 3D structure of the forest based on the fusion of airborne and terrestrial LiDAR data, in proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, pp.49–52, DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325694.
- Picos, J., Bastos, G., Miguez, D., Alonso, L., and Armesto, J., 2020. Individual tree detection in a eucalyptus plantation using unmanned aerial vehicle (UAV)-LiDAR, *Remote Sensing*, 12(5): 885, DOI: 10.3390/rs12050885.
- Polo, J.R.R., Sanz, R., Llorens, J., Arno'a, J., Escolà, A., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Camp, F., Gràcia, F., Solanelles, F., Pallejà, T., Val, L., Planas, S., Gil, E., and Palacín, J., 2009. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: a comparison with conventional destructive measurements, *Biosystems Engineering*, 102(2): 128-134, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.10.009.
- Ryding, J., Williams, E., Smith, M.J., and Eichhorn, M.P., 2015. Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys, *Remote Sensing*, 7: 1095-1111, DOI: 10.3390/rs70101095.
- Stăncioiu, P.T., Șerbescu, A.A., and Duteă, I., 2021. Live crown ratio as an indicator for tree vigor and stability of turkey oak (*Quercus cerris* L.): A case study, *Forests*, 12(12): 1763, DOI: 10.3390/f12121763.
- Webster, C., Westoby, M., Rutter, N., and Jonas, T., 2018. Three-dimensional thermal characterization of forest canopies using UAV photogrammetry,

- Remote Sensing of Environment, 209: 835-847, DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.033.
- Whiteside, T.G., and Bartolo, R.E., 2018. A robust object-based woody cover extraction technique for monitoring mine site revegetation at scale in the monsoonal tropics using multispectral RPAS imagery from different sensors, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73: 300-312, DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.003.
- Xu, Dandan., Wang, H., Xu, W., Luan, Z., and Xu, X., 2021. LiDAR applications to estimate forest biomass at individual tree scale: Opportunities, challenges and future perspectives, Forests, 12(5): 550, DOI: 10.3390/f12050550.
- Xu, F., Gao, Z., Jiang, X., Shang, W., Ning, J., Song, D., and Jinquan, A., 2018. A UAV and S2A data-based estimation of the initial biomass of green algae in the South Yellow Sea, Marine Pollution Bulletin, 128: 408-414, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.01.061.
- Yin, D., and Wang, L., 2019. Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: Possibilities and challenges, Remote Sensing of Environment, 223: 34-49, DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.034.

Integrating Terrestrial and Airborne Laser Scanning to Estimate Stand Volume of *Swietenia macrophylla* King Plantations

Chen-Yi Liu ¹ Jan-Chang Chen ² Chun-Hung Wei ^{3*}

Abstract

The study area is located in the flat artificial forest of *Swietenia macrophylla* King in Guken Township, Yunlin County. TLS and ALS were used to estimate the stand structure and evaluate their efficiency and accuracy. Height-diameter equations and local volume equations for this tree species were established, and the ALS was used to estimate the volume. The results showed that the point cloud can compensate for the limitations of TLS in obtaining tree height and ALS in obtaining diameter at breast height and tree position. The efficiency of data acquisition was also improved by combining the point cloud, and height-diameter equations and local volume equations were established using the point cloud. Using ALS alone can also establish the airborne volume equation. Choosing the appropriate LiDAR system according to different survey purposes and site conditions, and combining TLS and ALS point clouds can effectively improve the efficiency and accuracy of surveying stand structure.

Keywords: Airborne Laser Scanning, Forest Resource Inventory, Remote Sensing, Stand Stock, Terrestrial Laser Scanning

¹ Engineer, CH Biotech R&D Co., Ltd

² Professor, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology

³ Assistant Professor, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology

* Corresponding Author, Tel: 886-8-7703202 ext.7147, E-mail: aw711212@gmail.com

Received Date: Sep. 22, 2023

Revised Date: Oct. 29, 2023

Accepted Date: May.22, 2024