



公開
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e102

農業部林業及自然保育署112年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**應用智慧化科技改善林木收穫作業調查技術** (第2年/全程2年)

(英文名稱) **The study of improving forest harvesting inventory method using smart Instrumentation**

計畫編號：**112農科-7.4.4-務-e1(2)**

全程計畫期間：自 111年1月1日 至 112年12月31日

本年計畫期間：自 112年1月1日 至 112年12月31日

計畫主持人：**鍾智昕**
研究人員：**陳瑩達、陳廷安、林珽**
執行機關：**國立宜蘭大學**



1122623



農業部林業及自然保育署 112 年一般科技計畫
研究報告

應用智慧化科技改善林木收穫作業調查技術
The study of improving forest harvesting inventory
method using smart instrumentation

計畫編號：112 農科-7.4.4-務-e1(2)

計畫主持人：鍾智昕 副教授

執行機關：國立宜蘭大學

中華民國 112 年 12 月





目錄

摘要	2- I
Abstract	2-III
一、前言	2-1
二、全程計畫目標	2-2
三、文獻回顧	2-5
四、執行成果	2-9
五、參考文獻	2-55
附錄一	2-60
附錄二	2-64
附錄三	2-76





摘要

精確的數位化與量化林木的胸徑、樹高與立木材積等林分特徵資料，是未來邁向智慧林業必然的發展趨勢。透過森林調查技術所蒐集的資料林木資訊，提供木材生產計畫與森林經營管理基礎參考資料。然而，傳統調查過程中，常需投入大量人力進行各種林業調查與紀錄，並需要額外將資料進行整理才可方便分析與利用，如何降低人力成本及經費，是必須面對的重要課題。本計畫特別導入智慧型工具，並透過實測與評估，期望可提升森林調查與林木收穫工作的作業效率與縮短資料數化的途徑。本研究規劃選定屏東、花蓮與嘉義地區之闊葉樹造林地，選定 3 種台灣重要闊葉樹造林樹種相思樹、烏心石與樟樹等，作為本次的研究對象。已完成 2 處樣區設置與調查工作，分別於屏東潮州事業區第 33 林班相思樹與嘉義大埔事業區第 104 林班相思樹與樟樹人工林各 3 個樣區設置與調查，並應用智慧型工具，評估其在應用於闊葉樹種立木調查作業的精確性。本年度持續導入智慧型工具並針對樹高測量與原木檢尺作業項目，評估 3 種智慧型工具評估，同時輔以手持光達測量技術進行比較。在原木檢尺的部分，本年度延伸智慧型捲尺 BAGEL-003 功能開發新的應用程式，結果顯示在原木檢尺測量上與傳統捲尺有相似的精度。樹高測量方面，導入非反射式的雷射測距儀，在實務作業可改善受到林冠遮蔽而無法測量的問題，同時也具有良好的測量精度。各種新引進之智慧型工具評估透過質性的功能分析與實際於林地蒐集資料，以客觀科學方法評估其成本、精確性與適用性。一般闊葉樹林木樹幹形狀變化大，常分岔與彎曲，致使材積估計不易，本計畫為瞭解各儀器與方法再估算闊葉樹材積所產的不確定性，採行應用最廣泛的區分求積法計算林木的材積，再與材積推估式與光達所測量所獲的材積式進行比較。各種新引進之智慧型工具評估透過質性的功能分析與實際於林地蒐集資料，以客觀科學方法評估其適用性與適用性。本計畫為改善林木收穫之前置作業調查技術，已完成蒐集國內外相關文獻資料 20 篇，整理自民國 1963-2020 年國內人工林闊葉樹造林樹種材積式，提供後續樣區調查立木材積估計使用，總計 15 種樹種(含竹類)，70 個材積式，並分析其歷年發展趨勢。今年度完成 3 場森林創新調查技術工作坊，邀請林務局各林區管理處的林業人員前來參加，共 80 人參加。近年來，在森林調查工作已逐漸導入無人機、光達、影像處理等





慧科技技術進行立木材積調查與原木材積量測，妥善的運用各種智慧型工具，可以有效改善人工林立木材積與原木材積的估算效率與準確性。本研究運用無人機技術，完成建構屏東潮州事業區第33林班與嘉義大埔事業區第104林班2處疏伐樣區的闊葉樹2D/3D空間資訊，透過無人機可建置林分層級2D/3D空間資訊，提供林分各項施業前後期的林分動態，亦可作為林分歷史資訊的數位化典藏，提供爾後森林經營管理的參考檔案，以達成智慧化永續經營管理的新世紀。





Abstract

Forest resource inventory provides basic information for timber production and forest management planning. However, the traditional forest resource inventory is time-consuming and labor-intensive, increasing the cost of forest management and wood harvesting. It is an issue that must be faced. This study has evaluated the feasibility and accuracy of smart tools, and has completed the evaluation of 3 types of smart tools for the log scale measurement, tree height measurement and comparison by handheld lidar measurement technology. Results show that BAGEL-003 intelligent tape measure had similar accuracy to the traditional tape measure. Tree height measurement, the non-reflector laser range finder has good practicability and good measurement accuracy. The hand-held LiDAR to collect sample area data can collect 3D forest stands and environmental information and can also obtain accurate data of DBH and stand height, but it has high cost. The new log scale measurement app can be used as a tool for log scale measurement in the future. This study has completed collected 15 Taiwan's broadleaf species volume estimation formulas between 1963 to 2020, and analyzed their development trends over the years. Based on the results of bootstrapping analysis, this study proposes to add shape adjustment parameters to fix existing volume formula, which can provide a fixing parameter for estimating stand timber volume. In recent years, intelligent technologies such as unmanned aerial vehicles, LiDAR, and image processing have been gradually introduced into forest survey work to conduct stand surveys and log volume measurements. LiDAR and UAVs can build landscape level 2D/3D spatial information to provide forest dynamics information (eg., before and after forest operations). The smart tools can also be used as a digital collection tool to provide new approach for documentation in forest inventory task.





一、前言

林木是人類生活中的重要的自然資源之一，除了滿足居住與生活用品的需求外，在減緩全球暖化與環境保護功能也扮演重要的角色。林業經營管理的時間跨度很長，對於森林資源現況與動態的掌握，是完善森林產品的供應鏈的關鍵。傳統的林木測量方式以使用傳統測量設備(例:捲尺、測高桿)，搭配記錄員抄錄調查資料，在林分調查工作上需求大量人力與時間，且資料在紀錄與輸入的過程，可能因為錯誤的紀錄，小數點的錯置或輸入的疏漏等問題，而造成資料的失真，增加森林經營管理與木材收穫的作業成本。如何有效率地蒐集林分資訊，精確的量化林木的胸徑、樹高與立木材積等特徵資料，是未來邁向智慧林業必須面對的重要課題。近年來，在世界各國的森林調查工作，已逐漸導入無人機、光達、影像處理等智慧科技技術，進行立木材積調查與原木材積量測，並藉自動化之方式快速與正確的獲取各種立木與原木資訊，提供作為擬定森林經營計畫、木材生產計畫與盤查森林碳匯的基礎參考資料。森林經營管理者需要透過調查的方式，蒐集林地立木的資料，並藉由數位化方式建立資料庫，建立產地、中間過程到生產端的鏈結紀錄，可以提升整個林業生產鏈的價值，亦可避免經營過程中的各種風險。許多國家的林業經營管理已朝向智慧林業發展，運用行動裝置、雲端科技、物聯網、遙測、人工智慧等技術，進行林分數據資料收集與分析，以達到即時、精確與有效改善調查工作及內業處理的人力與效率，但國內導入智慧型工具的研究與相關資料相對較少。本計畫期望透過智慧型工具的導入，更精確與有效率的數位化林業資訊，藉以降低森林資源調查與原木檢尺之成本及經費，並結合目前所使用的人工林立木材積與原木材積的計算方式，提升收穫前置作業與原木檢尺效率。本計畫不僅限於研究層面，更著重落實於實務上，配合各種的智慧創新工具的導入，規劃相對應的培訓課程，訓練現場調查人員熟悉各種新型工具，以增加林業從業人員運用智慧工具的培力，促進傳統林業調查技術轉型邁向智慧林業時代。





二、全程計畫目標

(一) 本計畫的目標包含：

本計畫期望透過導入無人機、光達技術、智慧測量儀器的技術，改善現行森林調查與林木檢尺工作方法，提高林木資源調查與原木檢尺的工作效率，確保精確掌握森林現狀、動態與未來趨勢的資料。本計畫的目標包含：

- (1)運用智慧型行動裝置，即時於樣區調查現地，蒐集胸高直徑、樹高、GPS 定位等林分資訊，提供森林測量一個新的途徑。
- (2)盤點現行針葉樹與闊葉樹材積式，透過智慧科技工具精進材積估算方法，亦作為未來評估森林碳量重要的基礎。
- (3)應用智慧化科技改善原木檢尺技術，並精進作業程序。
- (4)藉由無人機與光達技術進行 3D 數據資料的蒐集，透過數位化的方式典藏特定時期森林環境資訊，提供林產業管理的智慧管理應用系統，做為林分收穫、中後期撫育與未來規劃新植造林等各種森林作業的重要參考依據。
- (5)辦理森林創新調查技術工作坊，加強增能林業工作者科技培力。

(二) 本（112）年度目標

重要工作項目與實施方法

112 年

(1)發展應用智慧科技工具於森林資源調查與木材檢尺作業方法 1 式

近年來，智慧科技工具與測量技術的發展，以及許多個人移動裝置的計算效能提升，提供更有效率的數位化途徑與森林資源調查資料蒐集方式。目前有許多的智慧工具，像是多功能智慧捲尺、手持式光達、攝影測量等創新工具，皆可以取代現行森林調查所使用的傳統工具。然而，山區的環境與這些智慧型工具開發時的使用環境不盡相同，山區的調查工作常需要在崎嶇的林地移動、潮濕或下雨，都有可能造成儀器設備無法使用或發生故障，因此各種不同的工具在森林調查時的適用性，還是需要進行評估。本研究已於第一年引入智慧型捲尺與雷射測距儀，預定透過配合實際林分調查工作，瞭解不同的





智慧科技工具特性，篩選適合做為林木資源調查與原木檢尺工作的新型測量工具，並評估可行性。本研究第二年針對可行性評估結果，選擇適用的智慧科技工具，並導入現行林木資源調查與原木檢尺技術，發展應用智慧科技工具於森林資源調查與木材檢尺作業方法，提供未來各項林業工作之參考使用。

(2) 運用智慧科技工具改善 2 種闊葉樹人工林立木材積估算方式

人工林立木材積估算，係為收穫前置作業的重要調查工作，通常運用現有材積式估計時並需要考量樹種與場域的影響。以往的材積推估會需要透過繁複的樹幹解析方法，也只能求得某一特定時間或區域林分的材積。在全國與區域尺度確實不容易有一個通用式，現在有許多新的科技設備，可以讓我們快速的獲得林木的體積資訊，在林木收穫時可以比較容易與效率的掌握較貼近實際情況材積。過去長期所使用材積式，可能在人工林經歷多年的生長後，由於林木逐漸的成熟與老熟，外觀形狀著實產生變化，致使過去的材積式可能無法精確的估計立木材積。本計畫希望透過評估各種新的工具引入來改善現場作業的瓶頸，並以非破壞的方式蒐集林分中立木與原木資訊，可做為評估材積的重要新技術方法。本研究第一年已針對針葉樹進行材積的計算方式盤點與建置，第二年則對闊葉樹進行材積的計算方式盤點與建置。材積估算方式將配合新導入智慧工具，進行立木材積與原木材積計算，建立重要造林樹種材積式與形數，以期作為未來森林資源調查與林木收穫之木材材積推估計算的參考依據。

(3) 應用智慧化科技改善原木檢尺技術與精進作業程序

原木檢尺作業，常會因為材堆過高或是木材之堆填方式參差不齊，造成作業人員量測時之危險及困難。為達成提高原木檢尺作業時效率之目標，本計畫規劃應用智慧化科技，透過智慧捲尺與配合原木檢尺 APP，進行原木材積之測計。本計畫以引入與評估各種新式的森林儀器設備或軟體，提供未來林務局作為原木檢尺與立木材積的創新工具，期望可改善許多現場作業耗費人力的問題，提升工作效率。期望可快速且準確分析材堆中原木數量、大小與材積，迅速製作報表供查驗放行或原木進貨與出貨管理之用。本計畫於第一年度已完成引進影像辨識技術於原木檢尺技術之應用，在實務應用上有其優勢與





限制。第二年度，配合現地檢尺人員的工作方式，預定發展智慧捲尺與引進檢尺相關應用程式軟體，並選擇 2 種台灣闊葉樹造林各樹種，進行原木檢尺測定，評估其對於台灣原木檢尺應用的可行性，並與傳統方法之材積精度進行比較。

(4)運用無人機技術，建構闊葉樹人工林各 2 處林分層級 2D/3D 空間資訊

本計畫運用無人機技術或相關光達技術，配合本研究選定闊葉樹人工林樣區，依指定目標範圍規劃航線，進行林分層級之無人機空拍蒐集人工林高解析度之空拍影像。空拍影像除提供後續林分正射圖資訊外，亦可產致林分 3D 空間資訊，提供林分蓄積量推估使用。無人機光達影像技術，亦逐漸成熟，藉由影像匹配技術與空中三角測量原理，對已完成空拍影像前處理的標的區域，進行數值表面模型與光雲資料解算，產製高空間解析度的網格式數值表面模型與三維光雲資料，可提供做為推估林分蓄積量使用。本研究除使用無人機空拍蒐集林分資料外，亦使用無人機光達蒐集林分資料，第一年已完成針葉樹人工林之評估，在林分蓄積評估與作業區規劃的應用，具有良好的效益。第二年以闊葉樹人工林為對象，分年進行 2 處林分層級 2D/3D 空間資訊，共建立 4 處人工林林份影像與地理資訊資料，提供本計畫相關研究相互運用。

(5)辦理森林創新調查技術工作坊 1 場，加強增能林業工作者科技培力。

為推廣本研究應用智慧科技所發展的技術方法，擬每一年度辦理森林創新調查技術工作坊 1 場，2 年度共 2 場，內容包含介紹智慧型測量工具、無人機與光達技術。目前臺灣林業調查的工作，較少導入這些智慧型工具，使得林業工作者仍以傳統的測尺進行測量。以智慧行動裝置、無線網路傳輸與物聯網技術，發展森林資源調查與木材檢尺的創新工具為本計畫重要目標之一。透過辦理工作坊讓林業工作者可以熟悉這些新的測量工具，加強其科技培力，俾使未來林木資源調查與原木檢尺技術，可以更有效率與精確蒐集資料，期望可以降低森林資源調查與原木檢尺之成本及經費，提升收穫前置作業與原木檢尺效率。





期中與期末評核標準

(一) 期中評核標準

1. 完成盤點國內闊葉樹樹種材積式資料
2. 完成 2 種闊葉樹之人工林造林樣區設置與林分調查

(二) 期末評核標準

1. 完成建立 2 處 2D/3D 林分空間資訊
2. 辦理森林創新調查技術工作坊 1 場

三、文獻回顧

森林資源調查一直是森林經營管理中重要一部分，透過調查所蒐集的資料，提供作為林木收穫、生態保育、碳匯盤查與永續經營的重要基礎(Corona et al., 2011；Newnham et al., 2015, Tatsumi et al., 2022)。在世界許多國家，大多數森林資源都是公有的，公有森林的管理方式往往相對保守，使得林業長期以來被視為高勞力需求、低技術與低產業價值。傳統森林調查方法需求大量的人力與時間，常不易滿足經營者對林分資料即時的性需求。近年來，資通訊技術(Information and Communication Technology, ICT)的發展，使得數位化資訊蒐集和傳輸，已經相當普遍，並可達到即時交換資料的程度，在世界許多國家以經成為新一代林地調查的替代手段(Liang et al., 2016)。例如：美國林務署(USDA Forest Service)投入發展氣候智慧林業(climate-smart forests, Torresan et al., 2021)，關注氣候變遷影響，透過布設各種感測器蒐集森林環境資料，建構森林生態系統監測網路；歐洲與加拿大，將林業導入工業 4.0 的概念，推動林業 4.0 (Forestry 4.0, Gingras & Charette, 2017)；日本林業廳利用 ICT 技術提高林業生產率 and 安全性，藉以實現從採伐到造林，以及達成育林過程的收支平衡(Forestry Agency of Japan, 2021)。數位化的資料可以加速森林資源的視覺化，與結合 ICT 技術所形成的供應鏈，使森林管理機關與森林所有者共同分享資訊所帶來的效益，可以促進林木的銷售和建立木材供應鏈，有助於區域的林業振興和產業發展。





傳統森林管理系統正朝向智慧林業的典範轉移，未來在森林供應鏈各種智慧科技將扮演重要的關鍵角色，包括數位化工具(digital tools)、物聯網 (Internet of Things, IoT)、LiDAR、無線射頻技術 (RFID)、無人機技術、雲計算、大數據和決策支援系統 (Decision Support Systems, DSS)、機器學習(Machine Learning, ML)、人工智慧(Artificial Intelligence, AI)、商業智慧 (Business Intelligence, BI) 等。資通訊技術所帶來的數位化潮流，在世界各國的林業領域掀起革命，促使各國的傳統林業面臨著巨大的技術挑戰，也促使世界林業進一步發展智慧化林業資料蒐集和傳輸系統。由 Gingras & Charette (2017)所提出的林業 4.0，其內涵包括了四個研究方向 (1) 於林業活動中落實使用遙測技術、光達 (LiDAR)，以及無人機技術，並建立可持續的共用資訊網路系統；(2) 實施和開發遠端操作通訊系統，包括車對車、載具對載具、車/載具對基礎設施、互聯網即時通信系統，建立森林互聯網；(3)開發自動化、感測器、機器學習和機器人技術，加快下一代技術、硬體和軟體的開發和落實；(4)開發資料分析模型，並透過人工智慧和深度學習系統，達成林業生產流程管理和預測。林業 4.0 的框架期望透過智慧科技工具，提供解決方案，使林業供應鏈的各個環節，具備更高的反應能力和彈性。在林業 4.0 的框架中，首要解決的是導入創新的科技工具，採用行動裝置、感測器、LiDAR 和無人機等技術，實現林分數位盤查與資訊數位化 (Manger, 2018)，降低林業調查工作的負擔。林業數位化的轉型，可使資料提升精確性與具備可交換性，增進林業資料的應用價值。傳統的森林經營方式正在發生轉變，台灣森林經營者對資訊和通信技術的使用有限，更應積極導入新一代智慧科技，並落實數位化、自動化與智慧化的森林資訊蒐集，提供森林經營、林木收穫、政策制定的數據支持，以達成永續森林管理的目標。

在森林管理中，森林資源調查是管理項目中基本工作之一。為了評估與量化森林資源，傳統上由野外調查人員執行調查工作，蒐集包括樹種、樹齡、林木尺寸(胸徑與樹高)、蓄積生長情況等資訊。在僅有紙筆的年代，資料可能在調查至完成數化的過程中，可能會發生數次的錯誤。首先發生在現場的抄錄錯誤，測量員與記錄員的資訊傳遞可能因為現場作業與環境干擾(噪音、未確認、漏記等)，導致資料的錯誤。再者，通常透過野外調查所蒐集的資料，會於現場先將紀錄於紙上，等待攜回後才進行資料登打數化的作業，登打時可能在數字、小數位數或編號上產生錯誤。另外，其他像是資料被雨淋濕





損毀或是遺失等，皆會造成林分資料在不同的情況下產生誤差與損失。透過智慧化工具，可以縮短林分資料數位化的途徑，以達到即時、精確與有效改善調查工作及內業處理的人力與效率(Gabrys, 2020)。隨著行動裝置運算效能與功能快速發展，許多的專業林業測量設備逐漸具備數位化與無線通訊的功能，提供更方便的資料蒐集方法。世界許多國家林業單位積極發展智慧林業(Smart Forestry)，將智慧數位化技術用於森林管理與監測，以掌握森林現況或提供評估未來發展趨勢。智慧林業是將林業科學與資訊技術結合，實現林業數位化(digital forestry)的途徑，主要藉由科技獲取、整合、分析和應用數位化資訊來支持永續森林的發展(Zhao et al., 2005)。近年來，歐、美、日本等林業先進國家皆以國家層級積極推動智慧林業，並規劃數位森林供應鏈、林業智慧裝備研發、林業物聯網、智慧監測和保護等關鍵核心技術的研究。新一代數位化工具與智慧科技協作方式，可使林分數據蒐集的效率增加，以及數據分析和自動化，是建立數位森林供應鏈與森林生態系統的經營管理是重要的發展方向(Bruun Jensen, 2015; Pinho et al., 2018, Feng & Audy, 2021)。未來世界森林經營管理、林產品供應鏈與碳交易市場，將會需求更大量數位化資訊，台灣目前的林業調查工作，仍多以傳統的測量工具搭配紙本的紀錄的方式進行，有必要與時共進，發展適合於台灣數位化林業體系。目前臺灣較少導入智慧型工具，使得林業工作者仍以傳統的測尺進行測量，將影響實現數位化林業與建立木材供應鏈的進程。本計畫為改善森林資源調查與木材檢尺作業的工具的可行性與成效研究，期望導入智慧行動裝置、無線網路傳輸與物聯網技術，發展森林資源調查與木材檢尺的創新工具。透過智慧科技改善林木資源調查與原木檢尺技術，提升資訊準確性為本計畫重要目標之一。

林業是一長期性事業，森林特徵會隨著時間的增加而有所改變，詳細的森林動態資訊，可以更精確與有效的制定森林經營管理的方針與策略。林業數位化轉型不僅僅是簡單將資料數位化和自動化的問題，台灣人工林經歷多年的生長，林木的外觀形狀已著實產生變化，現行材積式可能在估算上具有限制，需要重新審視適用性，並透過形數(from factor)調整、機器學習方法或新模式建立調整估計式，以精確的進行材積估算，亦作為未來評估森林碳量重要的基礎。林地的立木材積是標售木材必須具備的基本資訊，一直以來透過立木材積調查來蒐集，但受限於僅有胸徑與樹高資訊，在材積推估尚將可能





含大量的偏差，特別式形狀多變的闊葉樹種。除了傳統的立木測計方法，無人機和 LiDAR 技術，提供詳細的空間資訊，提高林地調查的效率，更數位化的保存林地資訊，並可建立森林資源歷史資料庫。長期累積的林分歷史資料(森林調查資料)與各種的空間資訊整合到可攜帶的行動裝置上展示，並可即時的查詢林分的各種屬性資料現況，成為現場人員與經營決策者最重要的依據。森林二維資料可以藉由衛星、飛機或無人機遙測影像獲取，三維的資料可由 LiDAR 蒐集點雲資料。

世界各國越來越多應用 LiDAR 所蒐集的 3 維資料於森林管理，以監測森林資源，如每公頃樹木、樹高和樹幹直徑，其資料維度更高、資訊更豐富，可提供更好的森林資訊(Choudhry & O'Kelly, 2018)。以數位化方式累積的林業大數據資料，可以透過地理資訊系統，全面檢視造林木不同生育地生長的狀況，提供規劃林木收穫的依據。光達點雲資料也可以完整地蒐集林木的外觀形狀，數位化的立木空間資訊，結合地理資訊系統可以進行木材採伐預測的模擬結果，可以精確估計伐採收穫的利潤。立木經過伐採、造材後成為原木，其數量是原本立木的數倍，在檢尺工作上常耗費許多人力與時間。而原木檢尺的精確性，攸關林產品的產銷市場，因此透過影像或是智慧工具，協助原木檢尺作業，同時達成資料的數位化，是建立木材供應鏈的第一步。透過網際網路串聯的全球木材供應鏈，從產地到林木產品，數位化的資訊可以在世界任何地方進行交換(Feng & Audy, 2021)。運用行動裝置即時展示整合性各種的林分資料，提供森林到林產品的智慧管理應用系統，是當前國內林業必須要積極發展的重要工作之一。

本計畫期望透過導入無人機、光達技術、智慧測量儀器的技術，改善現行森林調查與林木檢尺工作方法，提高林木資源調查與原木檢尺的工作效率，確保精確掌握森林現狀、動態與未來趨勢的資料。運用智慧型行動裝置，即時於樣區調查現地，蒐集胸高直徑、樹高、GPS 定位等林分資訊，提供森林測量一個新的途徑。探討現行材積式與形數間的關係，以精確的進行材積估算，亦作為未來評估森林碳量重要的基礎。藉由無人機與光達技術進行 3D 數據資料的蒐集，透過數位化的方式典藏特定時期森林環境資訊，提供林產業管理的智慧管理應用系統，做為林分收穫、中後期撫育與未來規劃新植造林等各種森林作業的重要參考依據。





四、執行成果

(一)、發展應用智慧科技工具於森林資源調查與木材檢尺作業方法 1 式。

本研究為發展應用智慧科技工具於林木收穫之前置作業與檢尺作業，於本年度持續延伸開發智慧捲尺之功能，目前已完成木材檢尺作業之智慧型手機應用程式軟體 1 套。並對目前國際上已成熟且商品化的智慧科技工具，透過關鍵字與功能需求進行廣泛搜尋，並進行評估與導入。前一年度運用智慧捲尺，配合 DBHnote 對於立木調查中的胸徑量測，可有效的提升使用傳統測尺的作業效率，並具有直接將資料數位化的優勢。因此，本年度導入的智慧型工具，針對樹高測量、檢尺作業，以及手持式光達設備為主要評估對象。本計畫之智慧工具評估流程，如圖 1，就上述林木收穫之前置作業調查長蒐集的基礎資訊，分別對不同儀器或軟體進行適用性、效率與優缺點測試，統整出各軟硬體之優劣，針對引進設備之成本、實用性與精確性進行評估並給予建議。透過計畫執行的過程，發展一套應用智慧科技工具於森林資源調查與木材檢尺作業方法(圖 2)，作為未來林務局應用於林木收穫之前置調查及其它例行性資源調查作業，可選擇之智慧科技工具的參考依據。

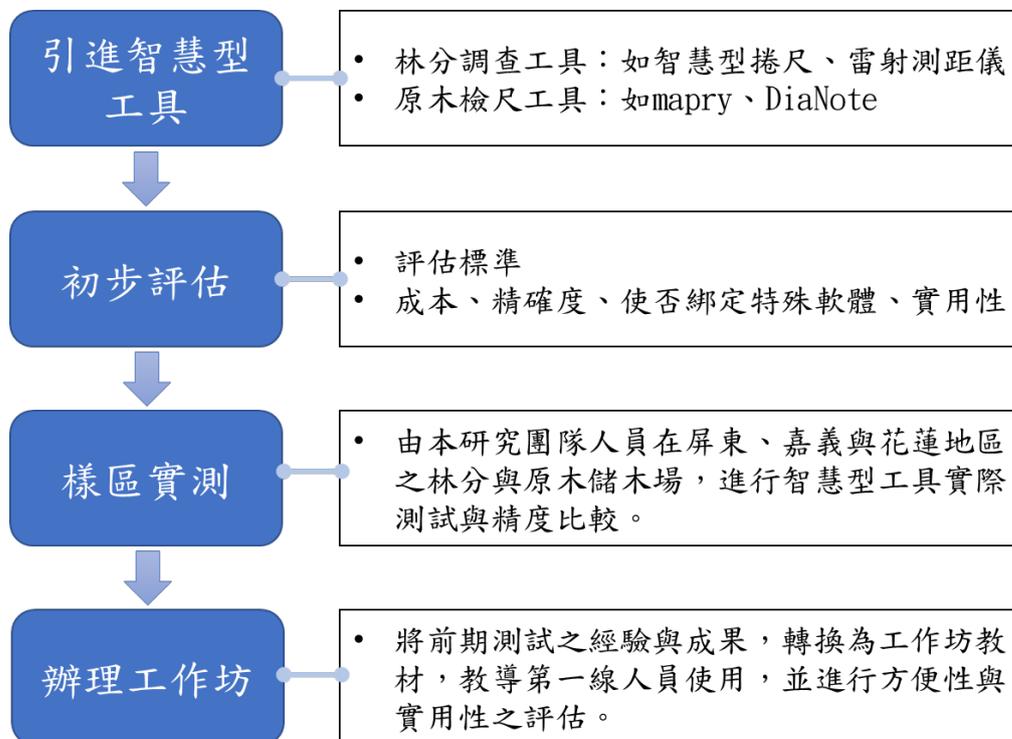


圖 1、智慧工具評估流程圖



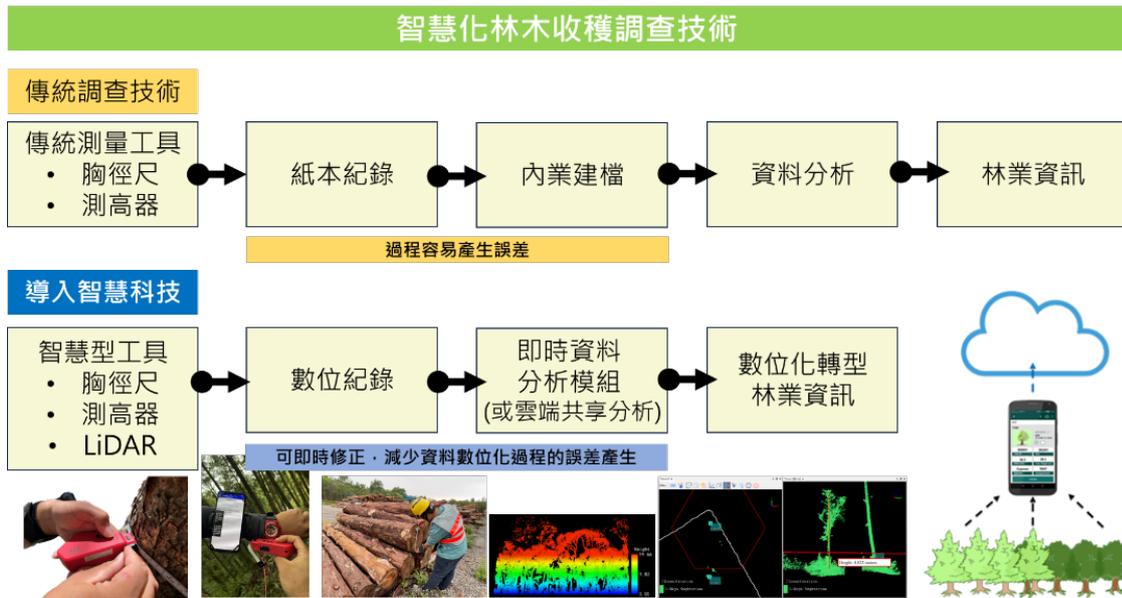


圖 2、發展應用智慧科技工具於森林資源調查與木材檢尺作業方法

本年度持續引進與評估可應用林分調查與原木檢尺的智慧型工具，後續將分別就樹高、胸徑與原木檢尺之智慧型工具評估進行說明，如次：

1. Leica S910 雷射測距儀應用於樹高(tree height, TH)測量

樹高是森林經營管理和森林生態中的重要特徵參數，對於評估林分蓄積、地位指數、碳收支和生物多樣性的關鍵變量之一。通常，樹高資料需要透過現地調查進行蒐集，一般林地作業使用伸縮式測高桿，傾斜儀或激光高度計從地面進行評估，這使得難以進行長期或大規模的空間監測。傳統測高桿因有時候因為地形因素或是被樹冠遮蔽則無法觀察是否已經到達樹冠頂層，其體積大攜帶上較為不便利。除了以測高桿對林木進行直接的測量外，利用數學三角函數作為樹高測量工具，還有 Haga 測高儀及雷射測距儀，透過以知水平距離和頭部的仰俯角來進行林木高度換算，是目前森林資源調查中比較主流的作法。樹高是長久以來森林資源調查時，相當耗時且勞動強度大的工作最項目之一，在樹冠緻密的森林中，透過現地調查方法蒐集高精度樹高資料極具挑戰性。

前一年度所導入的 ForestryProII、VertexLaserGeo 反射式雷射測距儀，在較為樹頂較無受到遮蔽影響的區域，可以提供良好的樹高測量精度，但是在緻密的林地內，則容易因為枝葉的遮擋，而無法測量出準確的樹高，對於現場工作人員，仍具有使用上的限制。本年度引進 Leica 手持雷射測距儀 DISTO S910(圖 3)，其並非使用反射式雷射測距





的原理，而是利用雷射測量距離的優勢，搭配三角函數的運算機制，進行空間上的高度、任意兩點距離、面積與體積的量測，並可以數位放大顯示遠端的物體，這可以協助調查員在林分中尋找林木頂端的位置，有助於提升樹高測量的精確性。

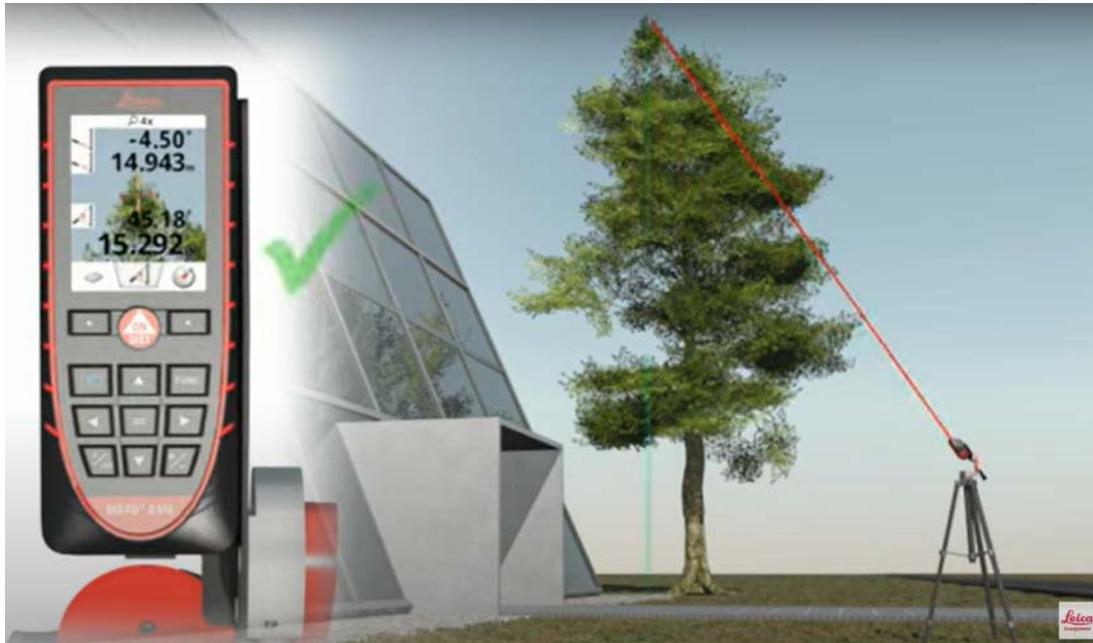


圖 3、本年度引進 Leica 手持雷射測距儀 DISTO S910，可以提供樹高量測。

本研究選定於屏東潮州事業區第 33 林班(圖 4)與嘉義大埔事業區第 104 林班(圖 5)2 處闊葉樹人工林，分別設置 3 個樣區設置，並進行林分調查工作，蒐集林分之胸高直徑與樹高，作為後續相關研究資料。



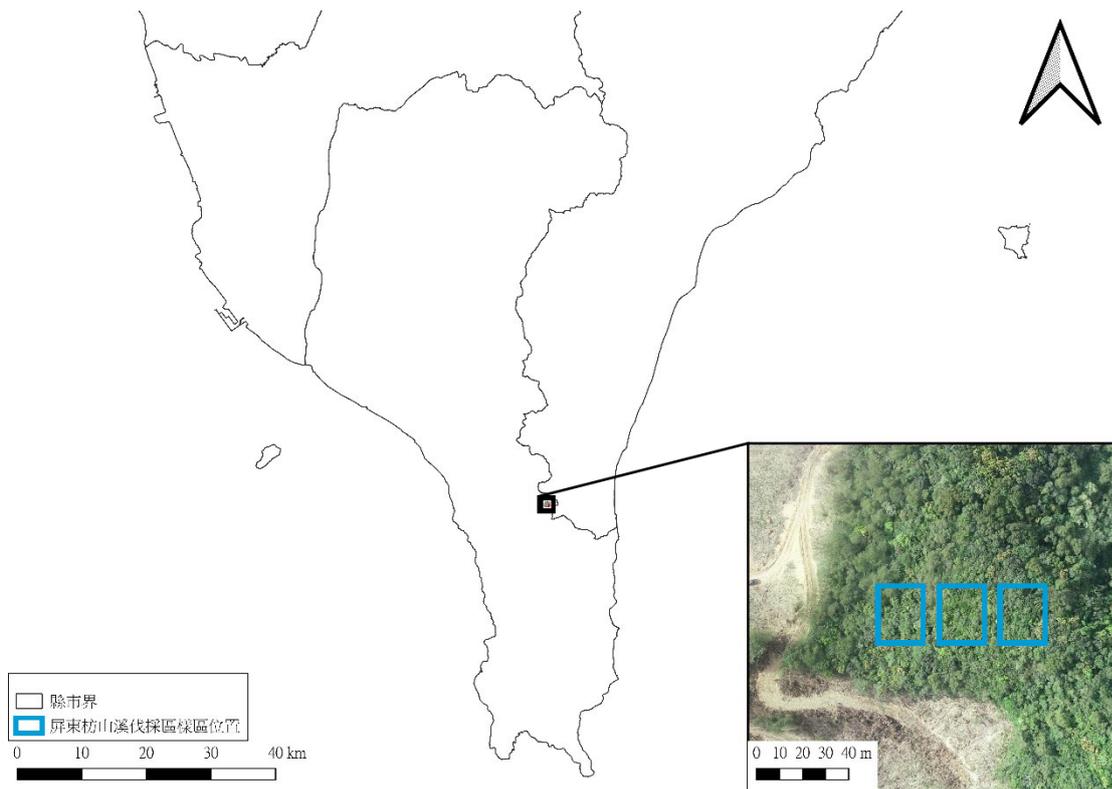


圖 4、本研究選定於屏東潮州事業區第 33 林班的闊葉樹人工林作為研究地點



圖 5、本研究選定於屏嘉義大埔事業區第 104 林班的闊葉樹人工林作為研究地點





本年度研究比較傳統測高桿、Leica S910 雷射測距儀與 LiDAR 的樹高測量精度，將於屏東研究區(表 1)及嘉義研究區(表 2)的樹高調查資料，將不同研究區與樣區，分別進行以 ANOVA 進行分析，結果顯示三種測量工具，分別在 2 個研究區，3 種工具間所測量的資料，在統計上是不具有顯著差異(p 值皆大於 0.05)。然而可以觀察資料趨勢，在光達的樹高測量中，當林分內的樹高有部分林木較高時，LiDAR 會有低估林木樹高的現象。可能是因為台灣的闊葉樹林冠層枝葉茂密，使用手持式 LiDAR 不容易獲得到樹木頂端的高度，造成樹高有略低的現象。而使用本次引進的 Leica S910 雷射測距儀，則因為與傳統的測高桿樹高測量時，以肉眼判斷樹頂的方法相似，所以其所可以測得與測高桿相近的樹高。

表 1、屏東潮州事業區第 33 林班樣區樹高數據摘要

樣區	測量方法	數量	平均值 (m)	標準差 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)
1	測高桿		8.7	3.0	15.4	4.6
	S910	65	8.5	2.7	15.8	4.4
	LiDAR		8.0	2.7	15.3	4.1
2	測高桿		9.2	3.0	13.7	4.3
	S910	61	8.8	2.8	13.8	4.1
	LiDAR		8.7	1.8	12.8	4.1
3	測高桿		9.0	3.2	14.6	4.5
	S910	62	8.8	3.0	14.2	4.3
	LiDAR		8.5	2.0	14.6	4.3





表 2、嘉義大埔事業區第 104 林班樣區樹高數據摘要

樣區	測量方法	數量	平均值 (m)	標準差 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)
1	測高桿	17	8.9	2	13.2	5.6
	S910		8.5	1.9	11.6	5.7
	LiDAR		8.3	3.2	12.6	3.6
2	測高桿	28	13.6	8.3	38.7	5.1
	S910		13.4	7.6	32.8	5.1
	LiDAR		12.8	7.6	33.4	5.0
3	測高桿	26	9.8	3.2	16.4	2.7
	S910		9.9	3.0	17.2	6.1
	LiDAR		9.5	2.2	15.8	7.7

2. Leica S910 雷射測距儀應用於胸徑(Diameter at breast height, DBH)量測

本年度所引進的 Leica S910 雷射測距儀，其功能中具有量測圓柱直徑的功能，本研究位測試其森林調查的應用的可行性，於嘉義大埔事業區第 104 林班樣區研究樣區中選定 30 株林木進行測試，並與智慧捲尺所測量到的胸高直徑數據進行比較，期望可提供做為較危險地形之林木胸高直徑之遠端測量技術(ex, 樹木生長於懸崖邊、山溝對面、其他不利站立之地形等)。將以智慧捲尺測量的胸徑與 Leica S910 雷射測距儀所測量的數據，以 t-test 檢定，結果顯示 2 種測量工具，在統計上是不具有顯著差異($t = -0.10$, $p = 0.92$)，RMSE 於約 2.3 公分(表 3)。結果雖然顯示使用 Leica S910 雷射測距儀中量測圓柱直徑的功能，與智慧捲尺所測量胸徑的相近，但在實際操作上，使用者需要注意透過遠端測量時，所量測的高度必須要在離地 1.3 公尺高的位置，方可得到精確的數值。本量測方法建議在較為平坦且可容易透過固定儀器，識別林木胸高位置之林地使用，而地形起伏較大之林地則需花費較多時間標定位置。





表 3、Leica S910 胸徑量測數據摘要

方法	株數 (n)	平均值 (cm)	標準差 (cm)	最大值 (cm)	最小值 (cm)	RMSE (cm)
智慧捲尺	30	18.0 ^a	4.7	26.5	7.4	2.3
Leica	30	17.9 ^a	4.3	27.5	7.0	2.3

3.原木檢尺(timber scaler)

傳統原木檢尺使用直尺或是輪尺對砍伐經造材後的段木，進行確定原木材積之量測作業，檢尺的範圍包括長度、直徑及材積之計算或利用容積重量轉換為材積。目前台灣的儲木場為有效的管理原木，在檢尺後會於原木的端面標記編號，或是紀錄該支原木的樹種、伐採日期等相關資料。但，一般原木堆的數量眾多，且必須對整堆後的原木一一進行首末兩端的徑級大小的測量，使得現場檢尺做業的工作繁重且工作量大。有效的數位化原木的資料，目前在國際上已經有許多相關的應用軟體，本研究針對樹種原木檢尺相關軟體進行評估，以期提供原木檢尺的現場作業一個便利且有效率的智慧型工具。

前一年度引進藉由影像處理技術的 **Timbeter**，可對原木堆進行徑級大小、數量、端面位置與材積計算的辨識作業，可以提供現場作業不錯的檢尺工具。然而，在現場的作業時，有部分檢尺人員表示實際的使用尺進行原木的測量，還是有其必要性，可以免除影像辨識的誤差，也比較貼近既有的測量方式。因此本研究，於今年度特別延伸開發智慧捲尺的功能，加入原木檢尺的 APP，期望現場作業人員，可以最方便的方式進行檢尺工作。另外亦持續的蒐尋原木檢尺相關軟硬體，日本的 **mapry** 公司，有提供一款木材檢收的免費的應用程式，使用者可以運用 iPhone 上的 LiDAR 來蒐集點雲資料(point cloud)，這些三維資料可以進行原木直徑和原木材體的估算。本年度將前一年度所引進的 **Timbeter**、智慧捲尺與 **mapry** 的木材檢收 APP 進行比較，整理的檢尺相關應用軟硬體(表 4)。





表 4、原木檢尺應用程式一覽表

APP 圖示			
軟體名稱	Timbeter	DiaNOTE	Timber 木材檢收
語言	英文、簡體中文等	中文	日文
公司	Timbeter	-	mapry
國家	愛沙尼亞	台灣	日本
功能	支援事後檢測、 直徑量測、 GPS 位置記錄、 材積換算	材堆直徑數據紀錄、 材積推估、 資料輸出	原木直徑和木材體 積等
比例尺校正	需要	不用	不用
手機系統	IOS/Android	Android	IOS
雲端數據管理系統	有	無	有
價格	99.9 歐元/50 次測量	-	免費
硬體	手機/平板鏡頭	智慧捲尺/手機	手機/LiDAR

4. 光達技術

近年來，同步定位與製圖技術（Simultaneous Localization And Mapping, SLAM）與光達技術的進步，使光達的使用更加方便，為森林資源調查提供了有效的解決方案 (Vaglio Laurin et al., 2019)。光達是一種主動式光學遙感技術，透過由測站發射雷射光束，並由感測器偵測撞擊後反射的光束，計算來回感測器之光束飛行時間，藉以獲取目標物件之相對距離。光達具備可高效率同時蒐集高空間解析度影像與 3D 點雲資料蒐集優勢，已成為許多生態研究的重要工具。光達是國際先進林業國家，廣泛應用的遙測技術，





評估森林資源重要的工具。光達遙測技術，與其他被動式光學遙測技術相比，光達能夠捕獲三維（3-D）森林結構，用來測量林木的三維結構具有良好的能力成為森林測繪的關鍵數據資料。光達具有高度的精確性，廣泛的被作為評估林分樹高、蓄積量與林木空間分布的重要工具。光達在台灣的森林資源調查上行之有年，已經有多數研究，表明光達在輔助資源調查上是可利用的工具(詹進發, 2005；彭炳勳等, 2009；魏浚紘等, 2012；魏浚紘與陳朝圳, 2020；Chung et al., 2020；鍾智昕, 2022)。

早期因技術瓶頸光達設備體積大，多已固定站形式或是需要配合載具，使其便利性受到限制。光達技術在感測元件的小型化，使得許多的智慧型設備開始搭載光達元件，提升行動裝置的測繪能力。例如: iPhone 和 iPad 在部分型號中加入了 LiDAR 感測器。已經有相關的研究使用 iPhone 和 iPad 的 LiDAR 感測器，蒐集森林的三維點雲 (Gollob et al., 2021；Mokroš et al., 2021；Tatsumi et al., 2023)。光達設備配合 SLAM 技術逐漸發展出手持式光達，可快速建立 2D 或 3D 的空間資訊的技術。運用光達感測器取得的空間資料，可以同時計算空間中各個物件的形狀尺寸資訊，其可提供林業調查工做，在森林環境中建構並更新該環境的物件定位和環景現況 3D 地圖。將光達用於資源調查可以視為把樣區複製一份到電腦裡作業，其資料具有可複查性，是一個值得引入作為森林資源調查的輔助工具。然而，光達資料的分析與處理，具有一定的技術性，不易讓林業人員接受。但，綜觀世界各國已有許多的案例，利用光達資料作為達成林業數位轉型的重要工具。因此本研究配合評估各項智慧型工具，亦同時使用光達與導入相關分析軟體，評估光達設備未來投入林木收穫之前置作業調查與原木檢尺的應用可行性。

闊葉樹的樹幹形狀外觀變異性高，一般不易透過材積估算式準確計算不同林分的蓄積量，因此有必要新的科技技術發展一套解決的方法。LiDAR 的點雲資料提供的準確目標物三維空間資訊，適用於描述闊葉樹的外觀變化，特別是活立木材積的計算，提供非破壞、快速、精確的測量材積測量解決方案。

光達掃描所獲取的點雲，雖可以詳細描述的樹木結構資訊，但是其在 3D 的空間中是由許多離散的點所構築的林木形狀。這些光達的點並沒有實體的面或體積，必須仰賴光達資料分析技術，雖然可以透過配適圓的技術，自動量測獲取林木樹幹直徑資訊，但常需要人為的方式依不同分段截取橫斷面，獲取木材分段長度與斷面值徑，才可求取





木的體積，在操作上需要熟悉光達分析技術，對於現場同仁而言，需要花費一段培訓的時間，才具有基礎的光達分析能力。

光達在測量精度與外業資料蒐集作業效率上，具有一定的優勢，但在內業的分析常花費許多的時間。因此本年度嘗試導入 AdQSM 點雲重建三維樹木模型的技術(Fan et al., 2020)，將單木點雲轉換為封閉完整的多面體，以求解單木材積(圖 6)。Raumonen et al.(2013)發展了一套將點雲轉換為樹木模型的方法稱為定量結構模型(quantitative structure model, QSM)，是一種由點雲層次順序，來描述樹木的幾何模型。而後 Du et al., (2019)提出 AdTree 方法，可以更精確由地面光達點雲資料重建樹木的三維幾何和拓撲結構。而 AdQSM 是建立在 AdTree 模型的基礎上，由 Fan et al., (2020)所提出，採用最小生成樹演算法(minimum spanning tree, MST) 從輸入點雲中萃取樹木的骨架，然後擬合一系列圓柱體，來近似樹幹和樹枝的幾何形狀，並將這些圓柱體組成一株樹木的多面體，可用於計算胸高直徑、樹高、材積、樹冠、枝下高等林木特徵參數。作者使用 C++ 語言進行開發，也在 git hub 上分享程式(<https://github.com/GuangpengFan/AdQSM>)，提供相關使用者與研究者使用。

本研究以簡化光達點雲分析的複雜步驟為目標，期望透過簡單的程式，將光達點雲資料，轉換為我們林木收穫作業所需要的林木基本資料。為瞭解利用光達與 AdQSM 點雲重建三維樹木模型所估算單木材積的可行性與精度，本計畫以花蓮地區的烏心石人工造林木為研究對象(圖 7、8)，伐採 30 株烏心石樣木，並以 Smalian 區分材積計算方法實際計算材積(圖 9)。首先將伐倒之樣木以紅漆於樹幹上標示北方，於每 1 公尺進行標記與分段，蒐集分段處之圓盤與記錄圓盤之直徑大小，並依據 Smalian 區分材積計算方法(圖 9 與公式 1)，計算各樣木單木材積。

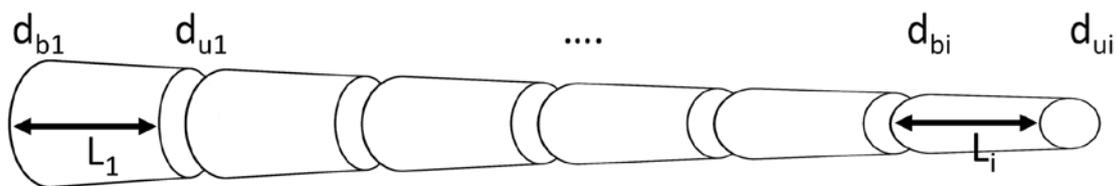


圖 9、Smalian 區分材積計算方法。

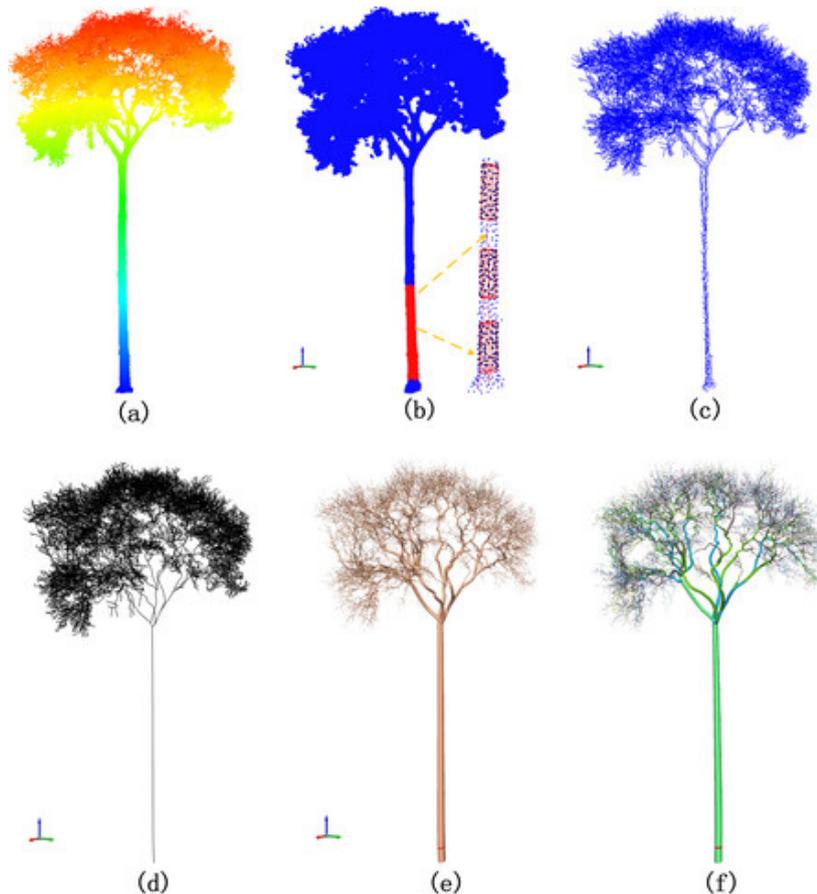




$$V = \sum_{i=1}^n \frac{d_{bi} + d_{ui}}{2} \times L_i \quad (\text{公式 1})$$

式中， V 為材積(m^3)， d_{bi} 為第 i 分段樹幹下端部直徑(m^3)， d_{ui} 為第 i 分段樹幹上端部直徑(m^3)， L_i 為第 i 分段樹幹長度(m)。

本研究將現地所量測烏心石的胸高直徑、樹高與單木材積，與透過 AdQSM 點雲所重建三維樹木模型所獲得的胸高直徑、樹高與單木材積，以 t -test 分別進行比較。結果顯示胸高直徑($t=-1.795, p=0.077$)、樹高($t=0.363, p=0.717$)與單木材積($t=-0.493, p=0.623$)皆無顯著差異，表示透過 AdQSM 點雲重建三維樹木模型，可作為林木收穫作業調查技術萃取林木特徵資訊的新途徑。另外，將 2 種方法所獲得胸高直徑(圖 10)、樹高(圖 11)與單木材積(圖 12)繪製成散布圖，可以發現皆有高度的線性相關。從散布圖中可以瞭解，使用 AdQSM 點雲所重建三維樹木模型所獲得的胸高直徑有低估胸高直徑的趨勢，而在樹高與單木材積的推估上，則有良好的推估表現。



The modeling process of AdQSM. (a) Guyana's Grandiflora tree point clouds (TreeID=GUY06_000); (b) manual selection of the point clouds to fit the initial cylinder; (c) the initial skeleton; (d) the final skeleton after trimming; (e) the reconstructed cylinder model; (f) the reconstructed model after RGB rendering.

圖 6、本計畫導入 AdQSM 點雲重建三維樹木模型的技術，將單木點雲轉換為封閉完整的多面體，以求解單木材積 (Fan et al., 2020)。





圖 7、於花蓮烏心石造林木，以區分求積法進行林木材積之計算

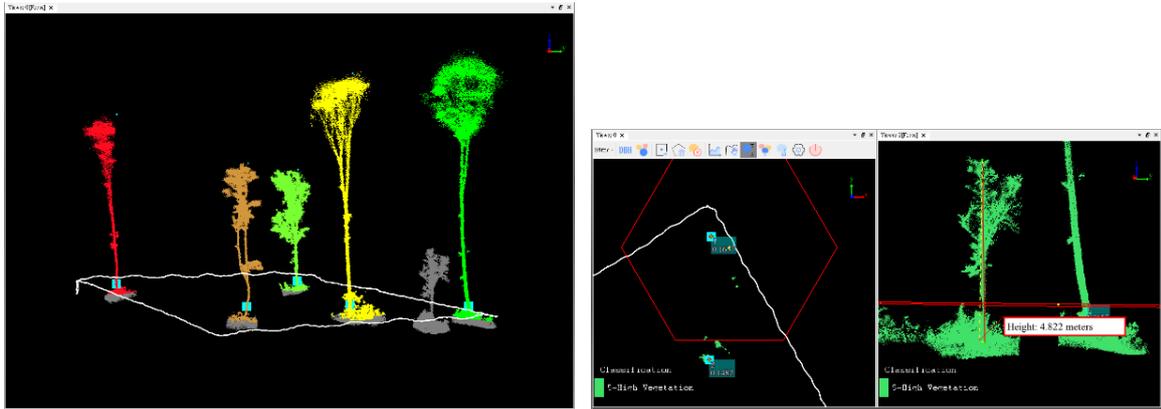


圖 8、使用光達掃描花蓮烏心石造林木，並篩選林地選定之樣木量測胸徑與樹高。

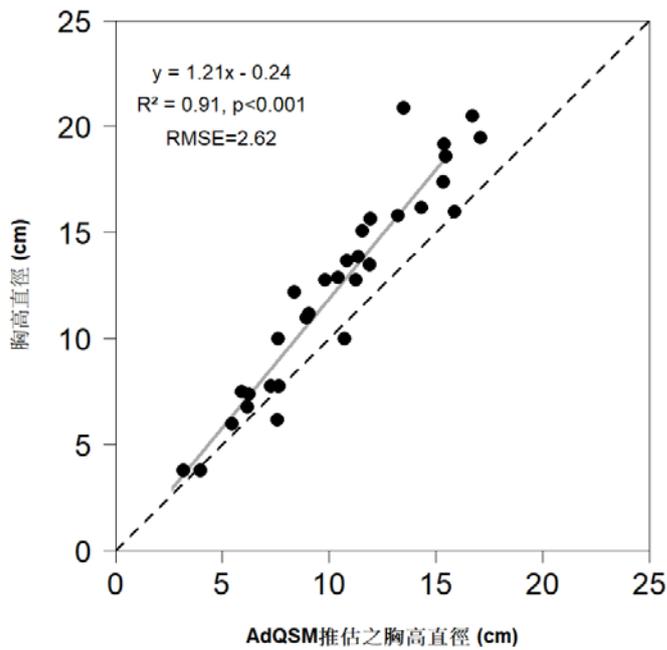


圖 10、烏心石的胸高直徑與透過入 AdQSM 點雲所重建三維樹木模型所獲得的胸高直徑散布圖。



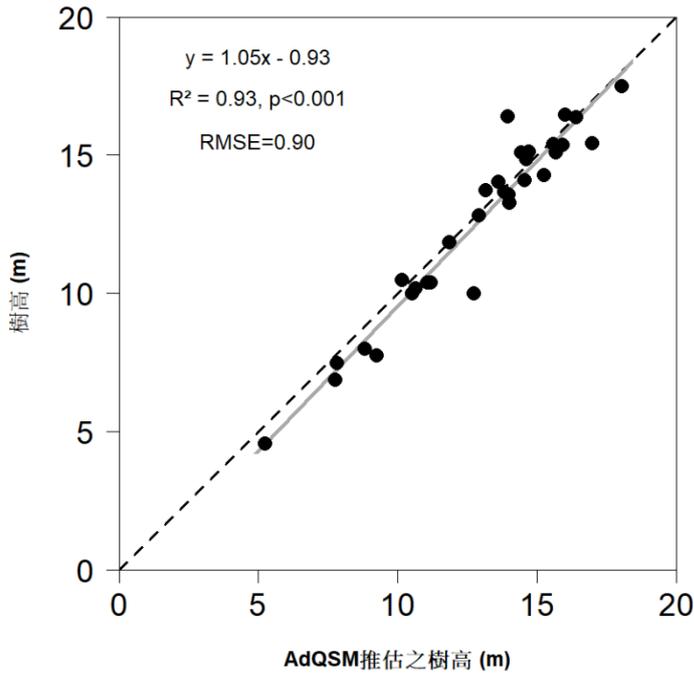


圖 11、烏心石的樹高與透過入 AdQSM 點雲所重建三維樹木模型所獲得的樹高散布圖。

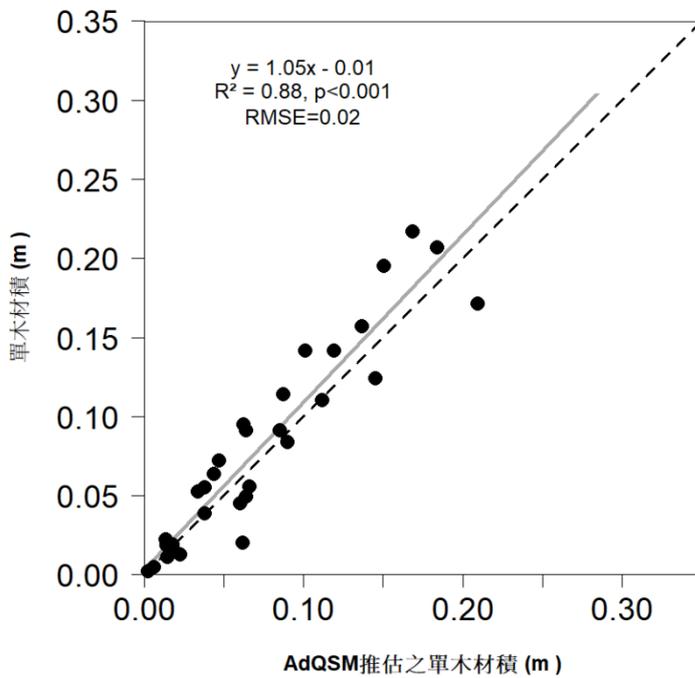


圖 12、烏心石的單木材積與透過入 AdQSM 點雲所重建三維樹木模型所獲得的單木材積散布圖。





(二)、運用智慧科技工具改善 2 種闊葉樹人工林立木材積估算方式。

1. 盤點現有材積式

林分蓄積係指森林中所有立木材積的總和，可作為評估森林資源狀況、林產收穫與碳管理重要的指標(Avitabile and Camia, 2018)。林木材積的估算可以分為單木模式(tree model)與林分模式(stand model)，一般會利用數學模式，將林木性態值(胸徑、樹高、形數等)或林分屬性參數，與單木材積或林分蓄積建立數學模型，藉以推估相對應層級的材積(陳朝圳 & 陳建璋，2015)。早期的材積估算，主要透過砍伐樹木，並以樹幹解析法測量林木體積，可以獲得準確的材積資料，但費時費力，是一種破壞性取樣估計方法(Feng et al., 2005)。因此，森林研究者與經營者希望建立一種能夠快速、準確測量立木體積的無損檢測方法，例如利用全林分模式(whole stand model)、直徑分布推估模式(diameter distribution prediction model)、材積方程(volume equations)、材積表(volume table)等。材積是林木收穫作業中不可或缺的關鍵資訊，中興大學馮豐隆教授曾整理 1953 年至 1991 年國內針闊葉樹重要樹種的材積推估式，並收錄於森林測計學之講義中。有鑑於材積式之重要性，並可提供林木收穫之前置作業使用，本研究參考馮豐隆整理之材積式，使用華藝線上圖書館，以闊葉樹、材積式、蓄積量、重要樹種名稱等作為關鍵字，自 1991 年開始至 2023 年進行搜尋，盤點台灣現有重要樹種材積式(表 4)。





表 4、盤點 1950 至 2023 年國內文獻現有闊葉樹材積式

樹種 編號	樹種	地點 (樣本數)	迴歸式	文獻
206	大葉桃	中埔	$V=0.0100-$	劉宣誠等(1981)
	花心木	(-)	$0.00871296D+0.00060626D^2+0.00047815D\times H$	
206	大葉桃	石弄	$V=0.0088-$	劉宣誠等(1981)
	花心木	(-)	$0.00727189D+0.00055226D^2+0.00047152D\times H$	
206	大葉桃	社子	$V=0.0104-$	劉宣誠等(1981)
	花心木	(-)	$0.00984010D+0.00029846D^2+0.00085657D\times H$	
206	大葉桃	六龜	$V=0.0101-$	劉宣誠等(1981)
	花心木	(-)	$0.00679346D+0.00058996D^2+0.00033654D\times H$	
206	大葉桃	恆春	$V=0.0046-$	劉宣誠等(1981)
	花心木	(-)	$0.00473431D+0.00040606D^2+0.00040815D\times H$	
206	大葉桃	太麻里	$V=0.0096-$	劉宣誠等(1981)
	花心木	(-)	$0.00850270D+0.00028041D^2+0.00086209D\times H$	
206	大葉桃	屏東	$V=-0.0159+0.5218D+0.0004H$	朱宗威等(2014)
	花心木	(30)		
301	樟樹	全臺 (99)	$V=4.89823\times 10^{-5}\times D^{1.60450}\times H^{1.25502}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)
350	楠木類	全臺 (-)	$V=0.0000853D\times H$	陳松藩(1972)
350	楠木類	全臺 (-)	$V=0.0000863\times D^{1.8742}\times H^{0.8671}$	陳松藩(1972)
350	楠木	全臺	$V=0.0000464\times D^{1.53575}\times H^{1.50657}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)
	樟樹	(-)		
350	楠木 樟樹	全臺 (-)	$V=-0.309942+0.004553D+0.000505D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)





350	楠木	全臺	$V=-0.179200+0.001526D+0.000519D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=0.2826+0.003875D+0.000473D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=0.75894-0.039825D+0.000833D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=0.409438-0.022048D+0.000704D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=1.1045-0.048499D+0.000836D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=0.79305-0.040112D+0.000811D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=0.4565-0.021812D+0.000679D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
350	楠木	全臺	$V=-0.702808+0.019461D+0.000398D^2$	楊寶霖&石子材
	樟樹	(-)		(1963)
450	櫛木類	全臺 (928)	$\text{Log}V=-$ $4.0038576+1.8751297\text{Log}(D)+0.745544\text{Log}(H)$	林子玉(1975)
450	櫛木類	北部 (-)	$V=0.2225-0.013141D+0.000584D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	中部 (-)	$V=-0.6897+0.017390D+0.000448D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	南部 (-)	$V=0.5903-0.032226D+0.000760D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	北部 (-)	$V=-0.0874+0.000890D+0.000501D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)





450	櫛木類	中部 (-)	$V=0.1585-0.009700D+0.000610D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	南部 (-)	$V=0.35736-0.019005D+0.000625D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	北部 (-)	$V=-0.6290+0.022200D+0.000375D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	中部 (-)	$V=0.3257-0.022200D+0.000720D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	南部 (-)	$V=0.491953-0.027304D+0.000733D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	北部 (-)	$V=-0.2979+0.005254D+0.000532D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	中部 (-)	$V=0.1542-0.009830D+0.000608D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	櫛木類	南部 (-)	$V=0.31845-0.018914D+0.000620D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
450	殼斗科	全臺 (286)	$\text{Log}V=1.8742\text{Log}D+0.8671\text{Log}H-4.0642$	陳松藩(1972)
502	相思樹	全臺 (20)	$V=0.0002045 \times D^{1.4366684} \times H^{0.8480426}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)
502	相思樹	中南部 (-)	$V/B=0.4769+0.4773H$	林子玉(1972)
502	相思樹	中南部 (32)	$\log(V)=-$ $4.35079+1.535731\log(D)+1.150657\log(H)$	林子玉(1968)





502	相思樹	中南部 (788)	$\log(V)=-$ $4.080211+1.599870\log(D)+1.089275\log(H)$	林子玉等(1978)
510	木油桐	全臺 (773)	$V=-4.109545+1.770289\log(D)+0.982390\log(H)$	林子玉等(1978)
514	泡桐	全臺 (88)	$V=0.095701-0.015306H-$ $0.006139D+0.001436H\times D+0.000013H\times D^2$	劉宣誠(1974)
516	光蠟樹	全臺 (22)	$V=0.0000772\times D^{1.8780277}\times H^{0.8124601}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)
516	光蠟樹	潮州 (42)	$V=0.0018+0000002D^3-0.0021H+0.0004H^2$	劉宣誠&吳萬益 (1984)
516	光蠟樹	潮州 (42)	$V=0.0003+0.00002D^3-0.0012H+0.0003H^2$	劉宣誠&吳萬益 (1984)
516	光蠟樹	關山 (42)	$V=0.0026-0.0038D+0.0005D^2+0.0003D\times H$	劉宣誠&吳萬益 (1984)
516	光蠟樹	屏東 (30)	$V=-0.0058+0.0003\times D+0.2762H$	朱宗威等(2014)
524	銀合歡	屏東 (30)	$\ln(V)=-9.800+1.65041\times \ln(D)+1.26416\times \ln(H)-$ $0.00245828D^2$	陳朝圳&范貴珠 (1989)
-	銀合歡	三民 (60)	$V=D^2\times H\times 0.5$	劉宣誠&高毓斌 (1987)
-	台灣檫	屏東 (30)	$V=-0.0035+0.0001\times DBH+0.1829\times H$	朱宗威等(2014)
-	桉樹	花蓮 (52)	$V=0.000113-0.001348D+0.000617D^2$	陳正豐等(1972)
-	桉樹	花蓮 (67)	$V=0.003241-0.001968D+0.000644D^2$	陳正豐等(1972)





-	桉樹	花蓮 (84)	$V=0.002656-0.001401D+0.000542D^2$	陳正豐等(1972)
-	桉樹	全臺 (66)	$V=0.00400-0.00003D^2 \times H$	汪大雄&王兆桓 (1996)
-	桉樹	全臺 (66)	$V=0.00423-0.00004D^2 \times H$	汪大雄&王兆桓 (1996)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=-$ $0.6172929499+0.0290345210D+0.000271665D^2$ $\times H$	賴清二(1971)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=-$ $0.2343485022+0.0005023267D^2+0.0004289683$ DH $+0.0000135119D^2 \times H$	楊榮啟&賴清二 (1970)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=0.0000464 \times D^{1.53578} \times H^{1.50657}$	劉慎孝&林子玉 (1968)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=0.0000862 \times D^{1.8742} \times H^{0.8671}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=0.2262-0.012267D+0.000596D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=-0.3721+0.007362D+0.000489D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=-0.3159+0.006255D+0.000505D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=0.2072-0.013181D+0.000642D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)





600	其他闊	全臺 (-)	$V=-1.5211+0.053000D+0.000177D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=-0.2675+0.005054D+0.000507D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=0.0038-0.013205D+0.000639D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=-1.4719+0.052453D+0.000119D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
600	其他闊	全臺 (-)	$V=0.0000834 \times D^{1.8761885} \times H^{0.8058127}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)

註:V 為單木材積，D 為胸高直徑，H 為樹高。(-)為株數未於文獻中記載。

材積式經資料搜尋與整理，自 1950 年至 2023 年間闊葉樹材積式總共包括 15 種重要闊葉樹樹種 (圖 13)，總計有 20 篇文獻，總計 67 個材積式(圖 14)。分析台灣建立闊葉樹材積式的年代，可以發現主要的材積式產出於 1970's，10 年間共有 10 個材積計算式，佔 70 年來材積式文獻資料的 50.0%。在 1980's-2000's 以後的年代所發表闊葉樹材積式(含竹類)的文獻每 10 年約 2~3 個材積式，佔闊葉材積式文獻資料的 40.0%，進十年內僅顏添明等(2020)有針對大葉桃花心木發表一篇，顯示近年來針對闊葉樹所發表的材積相當稀少，對於闊葉樹材積的估算將產生明顯的缺口。林務局在歷次的森林資源調查闊葉樹的部分主要分為四大類，以珍貴闊葉樹($V=0.000035555H \times D \times D$)、樟樹楠木類($V=0.0000489823D^{1.60450} \times H^{1.25502}$)、槠櫟類一般闊葉樹($V=0.00008626D^{1.8742} \times H^{0.8671}$)與鐵刀木等其他闊葉樹($V=0.0000464D^{1.53573} \times H^{1.50657}$)，其中樟樹楠木類與槠櫟類一般闊葉樹是使用羅紹麟&馮豐隆(1986)的材積推估式，鐵刀木等其他闊葉樹是使用劉慎孝&林子玉(1968)的材積推估式。闊葉樹的材積式，估計式以沒有對樹種分類的其他闊葉樹最多，共有 14 式，佔所有估計式的 19.7%；槠木類次之，共有 13 式，佔所有估計式的 18.3%；楠木樟樹類，共有 12 式，佔所有估計式的 16.9%。



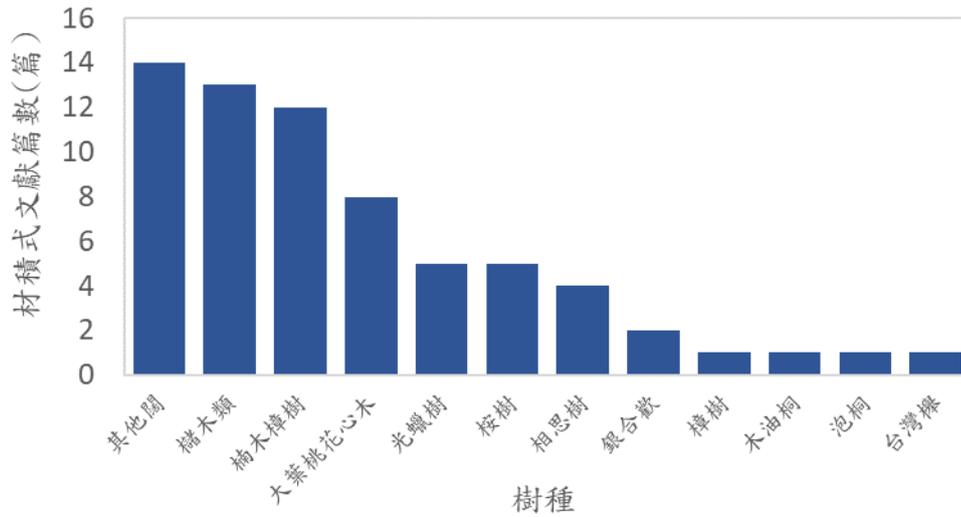


圖 13、自 1950 至 2023 間以樹種分類的闊葉樹材積式文獻篇數

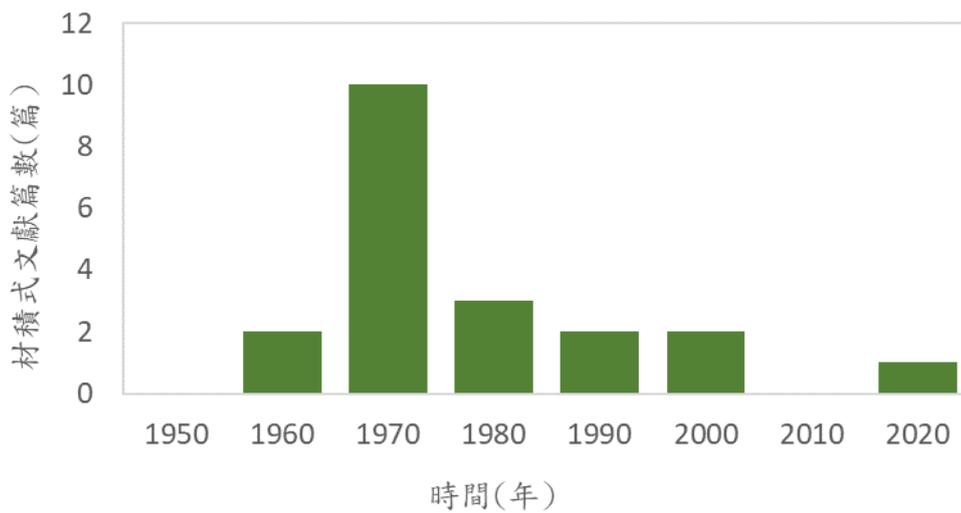


圖 14、自 1950 至 2023 間以年代分類的闊葉樹材積式文獻數分布





2.闊葉樹胸高直徑變化對材積式估算影響

為瞭解不同胸徑大小對闊葉樹材積式推估的影響，先前的分析顯示，材積式以其他闊葉樹的材積式數量最多，因此，本研究先就文獻之其他闊葉樹這個類別的材積式，進行胸高直徑變化對材積式估算影響的分析，並與森林資源調查中所使用的貴重闊葉樹材積式與其他闊葉樹材積式(表 5)，進行比較與討論。研究設定不同的胸徑級大小，自 1cm-100 cm，樹高曲線由胸高直徑推估，採用林務局(2010) (現為農業部林業及自然保育署)林木生長模式應用於常見平地造林樹種之碳吸存量推估計畫成果之樹高曲線式 $TH=2.19034 \times DBH^{0.5502}$ ，並分別將胸高直徑與樹高帶入各個材積式中，並將胸徑級與所計算出來的材積繪製成圖(圖 15)。結果顯示，由楊榮啟&賴清二(1970)所推導的其他闊葉樹材積式(公式_02)，在所有的其他闊葉樹這個類別中，所估計的材積具有較高的推估值，次者是林務局所使用貴重闊葉樹材積式與其他闊葉樹材積式，材積推估量最低的是由楊寶霖&石子材(1963)所推導的材積式(公式_11)。林務局在林產物處分與森林資源調查，所使用的通用式與貴重闊葉樹材積推估式，兩者推估材積的結果相似，推估單木材積量只低於楊榮啟&賴清二(1970)所推導的其他闊葉樹材積式(公式_02)。將林木處分較常使用的通用式，分別與楊榮啟&賴清二(1970, 公式_02)與楊寶霖&石子材(1963, 公式_11)所推的其他闊葉樹材積式進行比較，當胸徑級為 20cm 時，最高(公式_02)的其他闊葉樹推估式，比通用式低估約-0.036m³(若每公頃密度為 1000 株，則相差 36 m³)，而最低(公式_11)的其他闊葉樹推估式，比通用式低估約-0.216 m³(若每公頃密度為 1000 株，則相差 216m³)，差距明顯。當胸徑級為 50cm 時，最高(公式_02)的其他闊葉樹推估式，比通用式低高約 0.358m³(若每公頃密度為 200 株，則相差 71.8 m³)，而最低(公式_11)的其他闊葉樹推估式，比通用式低估約-0.826 m³(若每公頃密度為 200 株，則相差 165.2m³)，差距明顯。由本模擬結果顯示不同的材積式，在相同的胸高直徑級會產生不同的蓄積量推估結果，主要受到使用之曲線式類型與係數大小之影響。由此可以瞭解材積式的選擇不同，將會明顯的影響材積的推估結果，致使立木材積調查與標售材積間產生明顯的差異。在估算闊葉樹單木材積時，由於林木外觀形狀的變異性，很難根據林木特徵選擇適合的估計式，也很難量化其不確定性。透過材積估計式這種間接估算方法容易產生誤差傳播，而可能造成大尺度空間的材積推估產生高度的不確定性(Momo et al., 2017)。





表 5、森林資源調查使用之材積式與文獻之其他闊葉樹材積式

編號	樹種	材積式	參考文獻
貴重	貴重	$V=0.000035555 \cdot H \cdot D^2$	林務局(1995)
闊葉樹	闊葉樹		
通用式	通用式	$V=D^2 \cdot (\pi/4) \cdot H \cdot F$	林務局(1995)
公式_01	其他闊	$V=-0.6172929499+0.0290345210D+0.000271665D^2 \times H$	賴清二(1971)
公式_02	其他闊	$V=-0.2343485022+0.0005023267D^2+0.0004289683DH$ $+0.0000135119D^2 \times H$	楊榮啟&賴清二 (1970)
公式_03	其他闊	$V=0.0000464 \times D^{1.53578} \times H^{1.50657}$	劉慎孝&林子玉 (1968)
公式_04	其他闊	$V=0.0000862 \times D^{1.8742} \times H^{0.8671}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)
公式_05	其他闊	$V=0.2262-0.012267D+0.000596D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_06	其他闊	$V=-0.3721+0.007362D+0.000489D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_07	其他闊	$V=-0.3159+0.006255D+0.000505D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_08	其他闊	$V=0.2072-0.013181D+0.000642D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_09	其他闊	$V=-1.5211+0.053000D+0.000177D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_10	其他闊	$V=-0.2675+0.005054D+0.000507D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_11	其他闊	$V=0.0038-0.013205D+0.000639D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_12	其他闊	$V=-1.4719+0.052453D+0.000119D^2$	楊寶霖&石子材 (1963)
公式_13	其他闊	$V=0.0000834 \times D^{1.8761885} \times H^{0.8058127}$	羅紹麟&馮豐隆 (1986)

註:V 為單木材積, D 為胸高直徑, H 為樹高, F 為胸高形數。



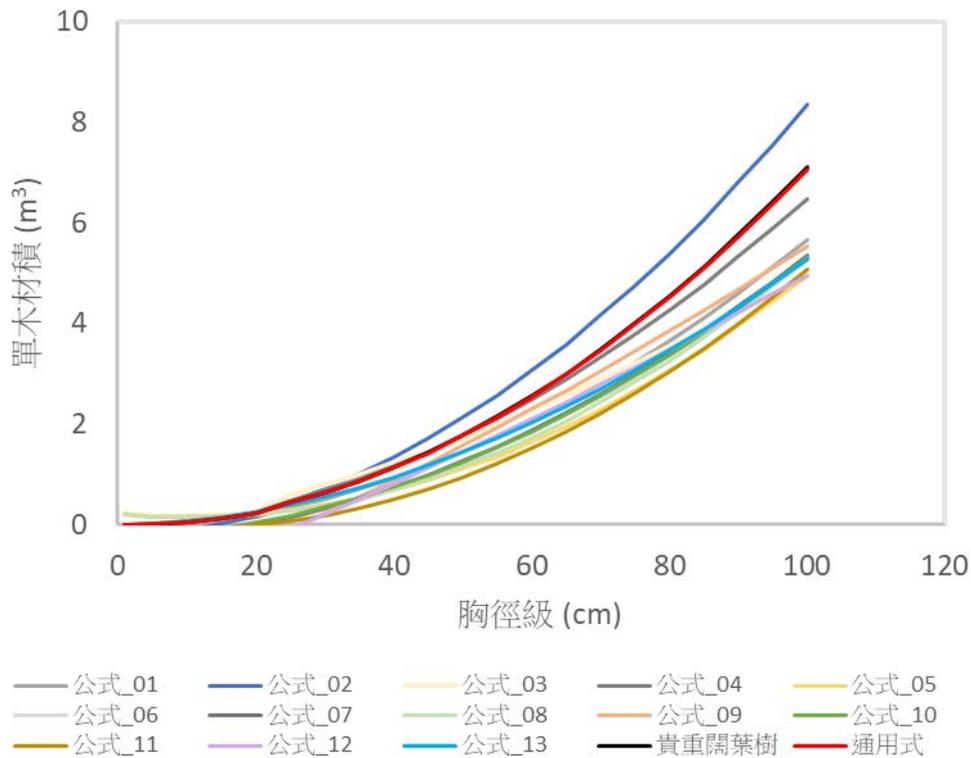


圖 15、不同胸徑級與其他闊葉樹不同材積式所計算出之材積

3.應用智慧化科技改善原木檢尺技術，並精進作業程序。

本計畫原木檢尺作業係依照中華民國國家標準 CNS442 木材之分類之第 5 點木材之尺度標準。原木之直徑量測，以原木正長末端最短之直徑與其呈直角之直徑求之，平均拾取偶數，如末端之形狀不規則時，應聯測四個直徑平均求之。測定時讀數止於公分。本計畫分別透過 Timbeter、智慧捲尺、LiDAR 三種工具，對闊葉樹的原木材堆進行量測。材堆量測前，會先於末徑切面標記編號，並拍照以記錄各編號間相對位置，Timbeter 與 LiDAR 分別透過相對位置辨識其編號，以利核對原木數據。Timbeter APP 透過拍攝平整堆放之材堆以計算末徑大小，進行拍攝時需放置至少 1 公尺長度之比例尺，並將其貼齊末徑切面，影像透過軟體之演算法分割木材末徑輪廓，並計算其直徑，最後再透過人工將明顯誤差處微調。由於闊葉樹樹幹生長較不如針葉樹通直，材堆堆置後，末徑切面大多不在同一平面，拍攝時會依各個段木末徑切面位置擺放比例尺以便進行拍攝與計算末徑使用，Timbeter 圈選末徑時，皆以圓形選取其範圍，而本次研究所測之材堆形狀多較不規則，長短軸差異大，因此軟體判釋時如遇長短軸差異較大之原木，則於調整階





段人工量測其長短軸，並以平均值表示。

本年度係以前一年導入之工具與軟體，應用於闊葉樹上，並持續尋找適當之軟體，將各工具之性能與應用性進行評估(表 6)，提供林業相關單位瞭解工具特性與實務之應用。智慧捲尺量測方法與傳統原木檢尺相同，皆透過人工量測原木長短軸，唯其資料可於測量當下實時寫入手機等終端內，本次研究量測時透過配套開發之 APP，現地量測時可同時進行規整與材積計算，量測資料可透過手機網路同步至雲端，方便進行資料彙整。

LiDAR 資料則透過英國製的手持式光達—GeoSLAM zeb horizon 量測，掃描過程中，勻速朝向材堆末徑位置環繞一圈，並於環繞範圍內放置兩米尺，以供檢視點雲數據誤差，各個材堆皆掃描兩次，以避免天氣或儀器等因素導致產製資料無法使用。點雲掃描並產製完成後，透過 LiDAR 360 軟體處理，以剖面圖功能，逐一量測各原木長短軸。

表 6、本計畫導入各項智慧工具盤點與應用性評估

原木檢尺智慧工具	導入年度	應用性評估
Timbeter	111	可安裝於手機端，以影像的方式拍攝現場原木之端面，由軟體自動判釋原木直徑，可輸出報表。但需要攜帶比例尺，以及當林木材堆，堆疊的端面前後有較大差異時，容易產生誤差。
LiDAR	111	光達具有良好之精度，資料蒐集效率高，可有效保存原木材堆 3D 資訊。然後續資料處理之門檻較高，需有專業的軟體操作能力。
智慧捲尺 (DiaNOTE)	112	智慧捲尺將量測數據自動化紀錄，使用方法與傳統捲尺相同，在使用上可與傳統作業模式銜接。雖可減少一位記錄之人力，但是作業方式仍需要花費時間與人力。
Timber 木材檢收	112	與光達技術相同，具有一定之精度。可於行動客被端使用，但需要具有搭載光達的行動設備，作業系統目前僅限於 ISO，目前在推廣上會相對較難。





本年度研究分別於屏東潮州事業區第 33 林班與永在林業量測相思樹與印度紫檀材堆，屏東潮州事業區第 33 林班材堆如圖 16 所示，總計原木數量相思 50 根，但因現場材堆堆置雜亂，部分原木被上方及前方原木掩蓋，導致後續以 Timbeter 與光達僅能量測 36 個原木。永在林業的現地材堆如圖 17 所示，總計原木數量，相思 64 根、印度紫檀 38 根，因材堆前後差異較大，同一材堆於 Timbeter 拍攝時移動比例尺位置，拍攝多張照片，重複量測之原木數據選用以比例尺附近或與智慧捲尺相近者。本研究為瞭解不同原木檢尺檢尺方法的精確性，針對三種原木檢尺方法之比較，計算各方法平均值、標準差，並以單因子變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)比較三者間平均值是否有顯著差異。以智慧捲尺量測數據當作為實際值，並與 Timbeter 與 LiDAR 配適線性回歸式，計算不同工具間之間均方根誤差(Root mean square error, RMSE)與 R^2 值。



圖 16、屏東潮州事業區第 33 林班相思樹材堆(影像分析軟體於圖片上會顯示直徑到小數位 1 位，於報表內會依 CNS442 之規定，以公分計，平均為偶數之標準)





圖 17、永在相思樹與印度紫檀材堆(影像分析軟體於圖片上會顯示直徑到小數位 1 位，於報表內會依 CNS442 之規定，以公分計，平均為偶數之標準)

原木材堆量測資料統計如表 7 所示，本研究所測量的 2 種樹種，以智慧捲尺所量測的相思樹原木端面直徑(圖 18、圖 19、圖 20)，永在林業儲木場的平均直徑為 26cm(sd=5.53)、枋山溪的平均直徑為 32cm(sd=7.85)，與永在林業儲木場的印度紫檀平均直徑為 22cm(sd=4.50)。以 ANOVA 方法分析三種原木檢尺測量方法是否具有差異，結果顯示皆無顯著差異。





表 7、原木材堆以三種方法量測末徑統計摘要表

地區	樹種	方法	個數	原木端面直徑 (cm)				
				Mean	SD	RMSE	R ²	Group
永在	相思樹	智慧捲尺	26	5.53				A
		Lidar	64	26	5.41	1.46	0.93	A
		Timbeter	26	5.91	2.12	0.87	A	
	印度紫檀	智慧捲尺	22	4.50				A
		Lidar	38	22	4.00	1.51	0.90	A
		Timbeter	22	4.90	1.73	0.87	A	
屏東 坊山 溪	相思樹	智慧捲尺	32	7.85				A
		Lidar	36	32	7.85	1.01	0.98	A
		Timbeter	32	8.92	3.12	0.88	A	



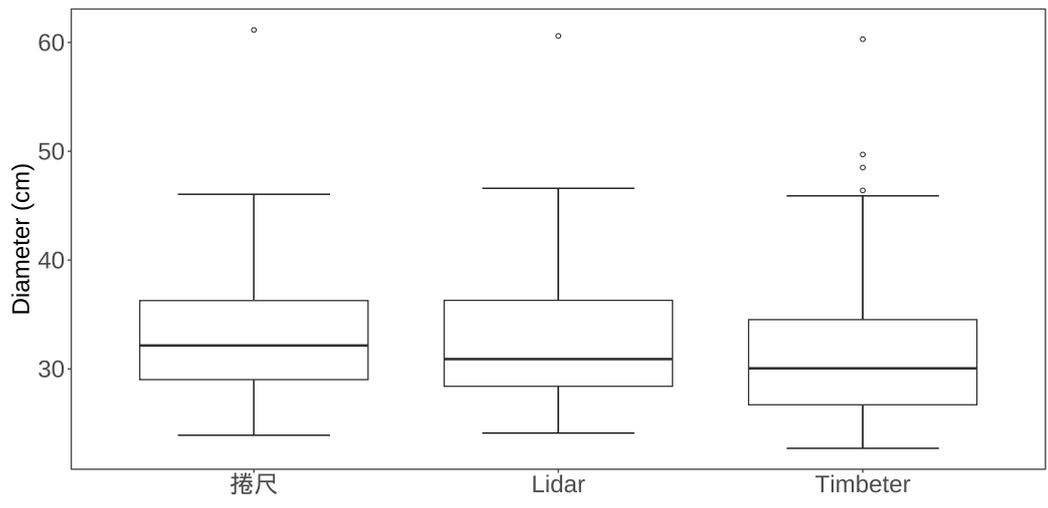


圖 18、屏東潮州事業區第 33 林班相思樹材堆末徑盒鬚圖

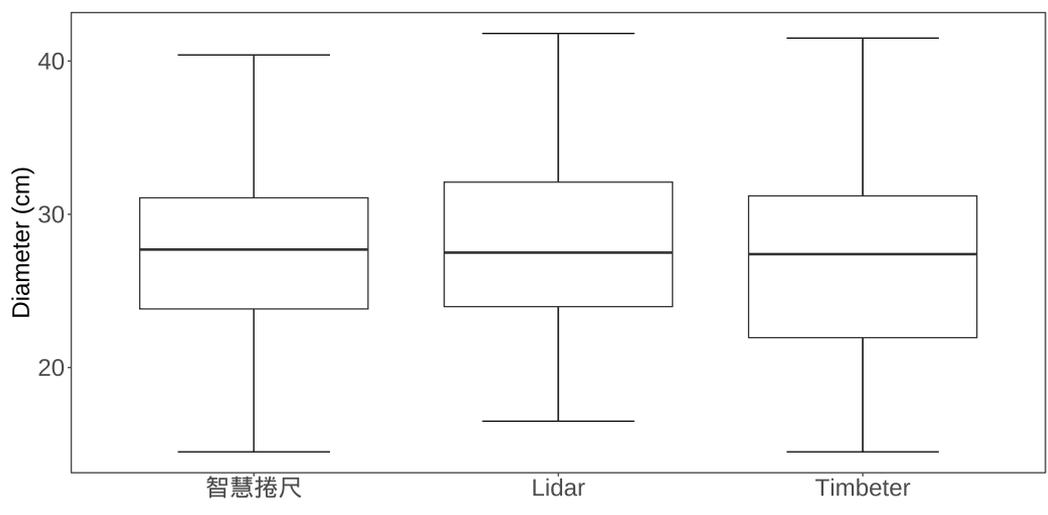


圖 19、永在相思樹材堆末徑盒鬚圖

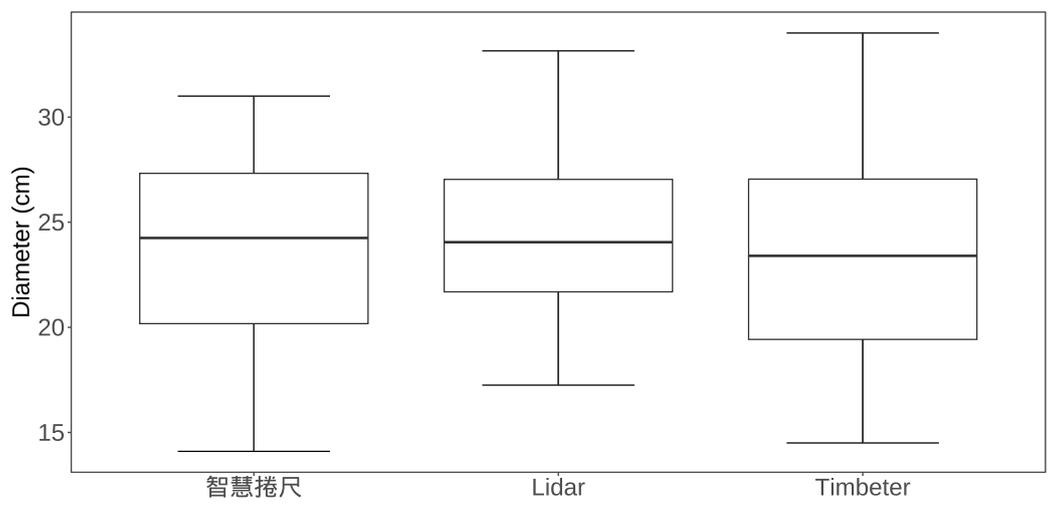


圖 20、永在印度紫檀材堆末徑盒鬚圖





將使用智慧捲尺所量測的資料，分別與 Timbeter 及 LiDAR 所測量的資料，以兩兩的方式繪製迴歸分析圖(圖 21、圖 22、圖 23)，可以發現不同的工具，用於測量不同地區與不同樹種間都具有良好的線性關係，其中 LiDAR 與智慧捲尺間較接近 1:1 的關係，分別在屏東潮州事業區第 33 林班相思樹材堆斜率為 0.992、永在相思樹材堆斜率為 0.986 與印度紫檀材堆斜率為 1.080。使用 Timbeter 所測量的結果，相較於 LiDAR 差，分別在屏東潮州事業區第 33 林班相思樹材堆斜率為 0.827、永在相思樹材堆斜率為 0.875 與印度紫檀材堆斜率為 0.869。不論各樹種線性回歸模型都以 LiDAR-智慧捲尺配置模型 R^2 最高。在 RMSE 部分(表 4)，以 LiDAR 數值差異較小，屏東潮州事業區第 33 林班相思樹 1.01 cm、永在相思樹 1.46 cm、印度紫檀 1.51 cm。依據研究結果顯示，智慧型工具再不同樹種間，測量所產生之誤差都在尚可接受的範圍，並未因為木材樹種產生明顯的差異。本研究在使用 Timbeter 測量不同樹種原木末徑時，發現運用影像分析時，容易在原木斷面具有不規則、破損、腐朽菌、著色菌、不平整等缺點時，容易使原木直徑低估，雙心材則是容易辨識成 2 根原木。若原木堆疊的參差不齊時(圖 16)，因為原木的端面距離不同，容易產生較大的誤差，建議應避免使用影像分析方式測量。前述的原木端面缺點在測量出現時，建議使用者應檢視自動判釋的結果，並使用手動的方式進行調整，以減低林木原木斷面出現缺點時的誤差。在使用不同的智慧工具時應瞭解其工具特性，以避免產生過大誤差。在使用智慧捲尺的部分，因為使用的方式與傳統的捲尺相同，因此沒有明顯的差異存在。光達則在量測原木端面直徑時，同樣也是依循 CNS442 原木末端最短之直徑與其成直角之直徑平均之，因此也沒有明顯的差異存在。



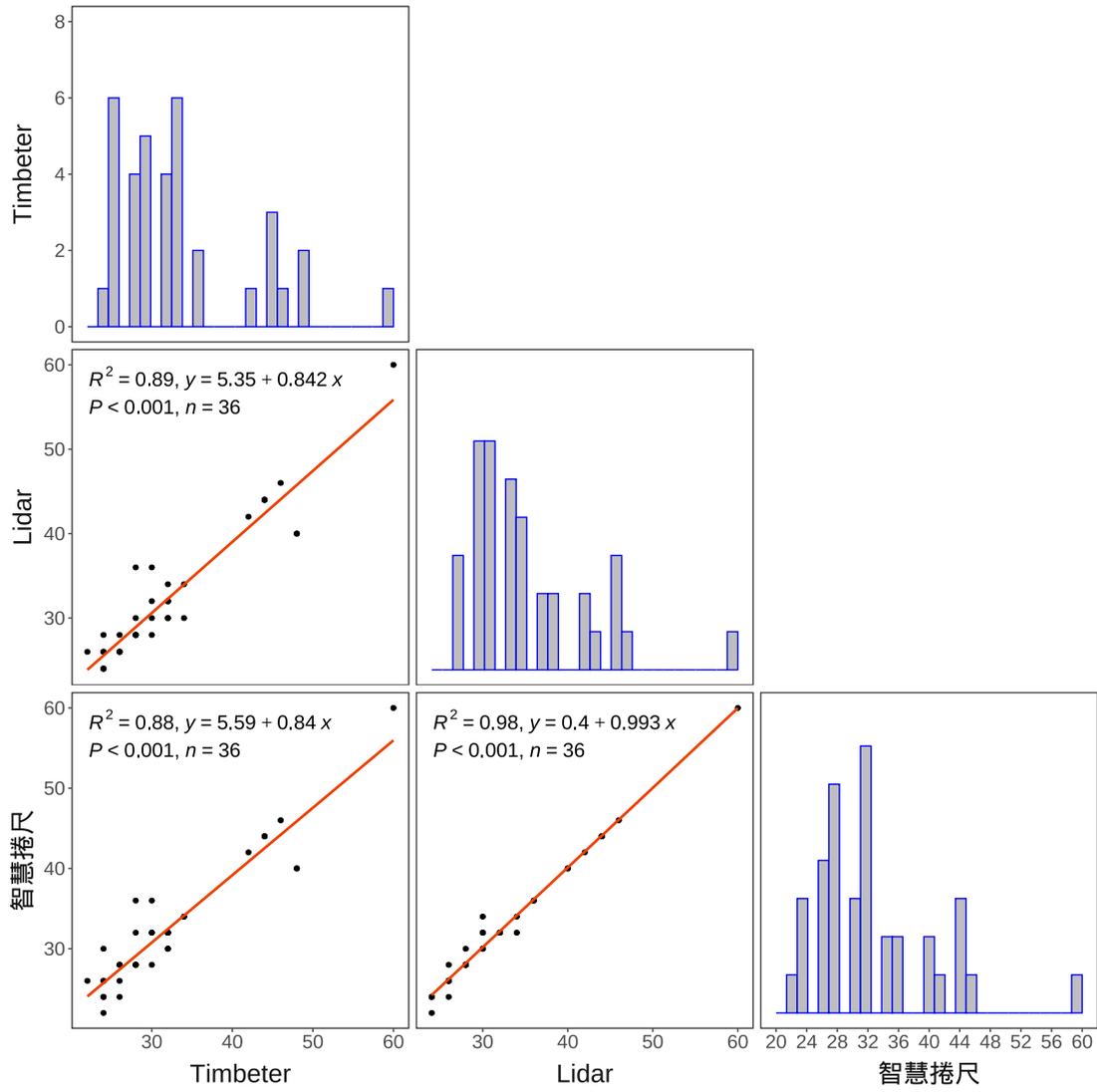


圖 21、屏東潮州事業區第 33 林班相思樹材堆三種檢尺方式線性回歸



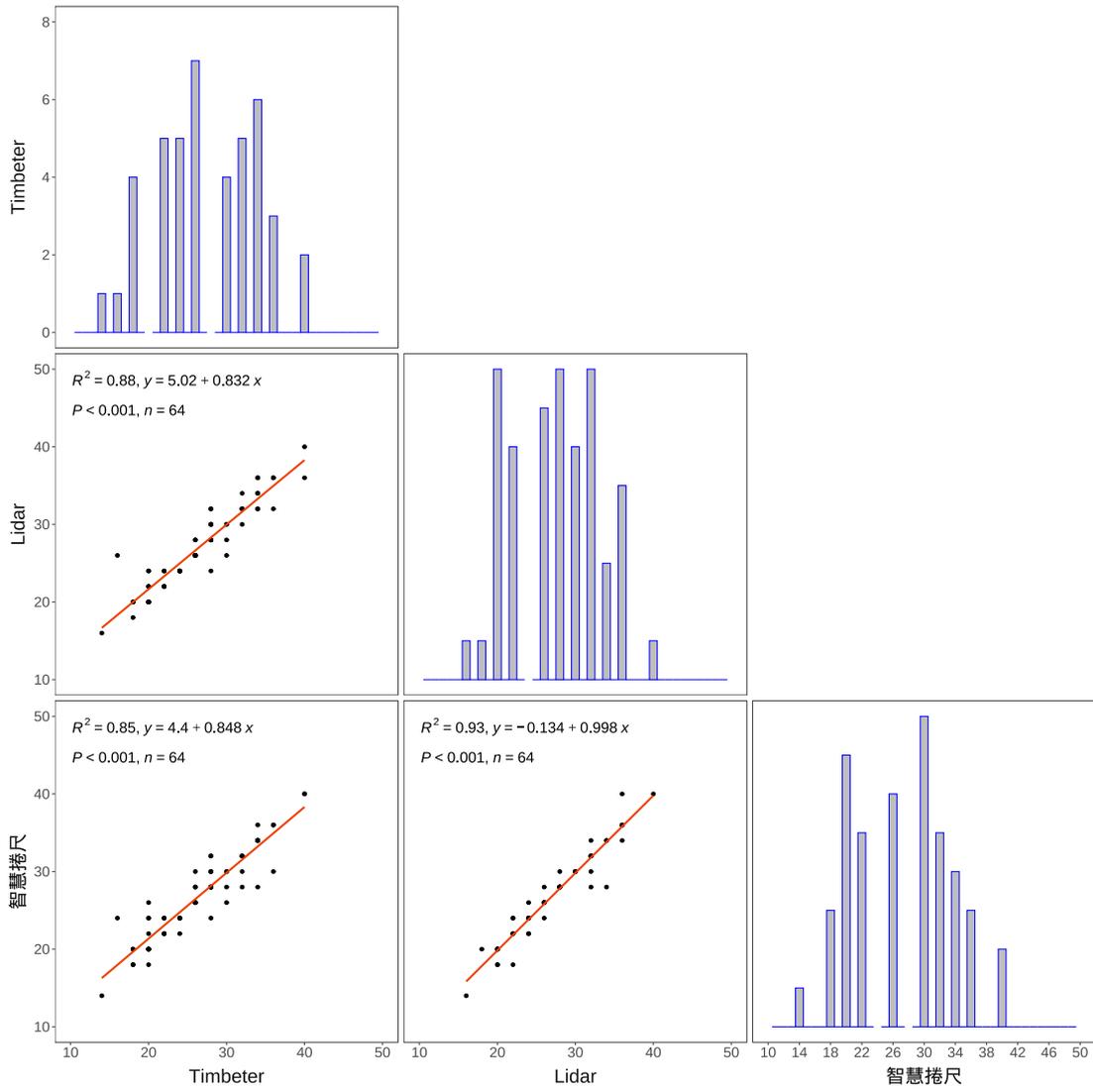


圖 22、永在相思樹材堆三種檢尺方式線性回歸



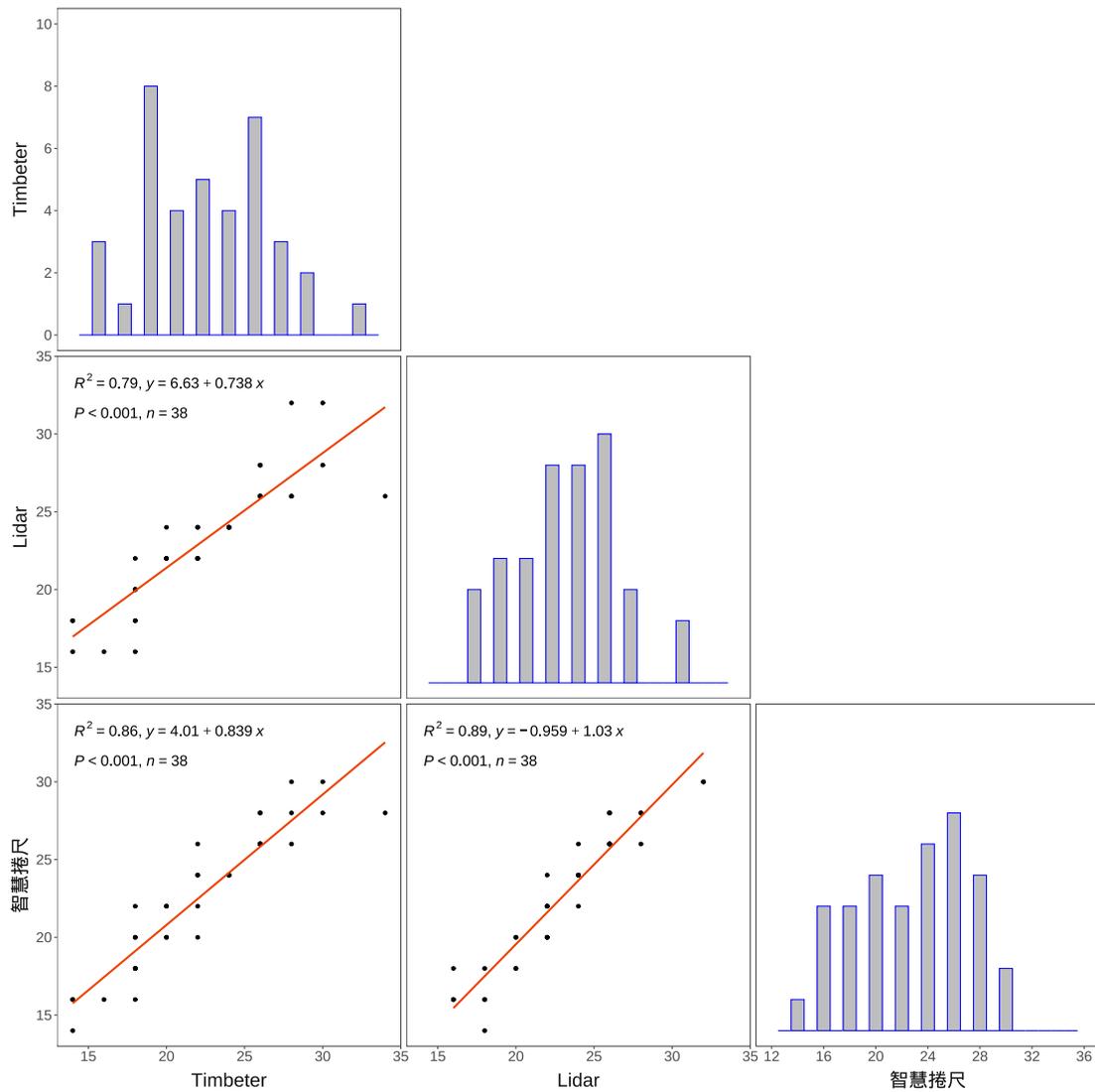


圖 23、永在印度紫檀材堆三種檢尺方式線性回歸

由於闊葉樹的樹幹形狀多變，在造材時容易產生彎曲的圓木，本計畫為瞭解彎曲情況，依照 CNS442 對於原木彎曲的定義，特利用先前所蒐集的光達點雲資料，從各材堆中挑選彎曲原木 30 支，量取材堆內原木內曲面之最大弦高對其直徑(圖 24)，並分析二者比例。結果顯示，彎曲的原木在造材長度 3.3 公尺的情況下，彎曲的比例為 10.3%(表 8、圖 25)。



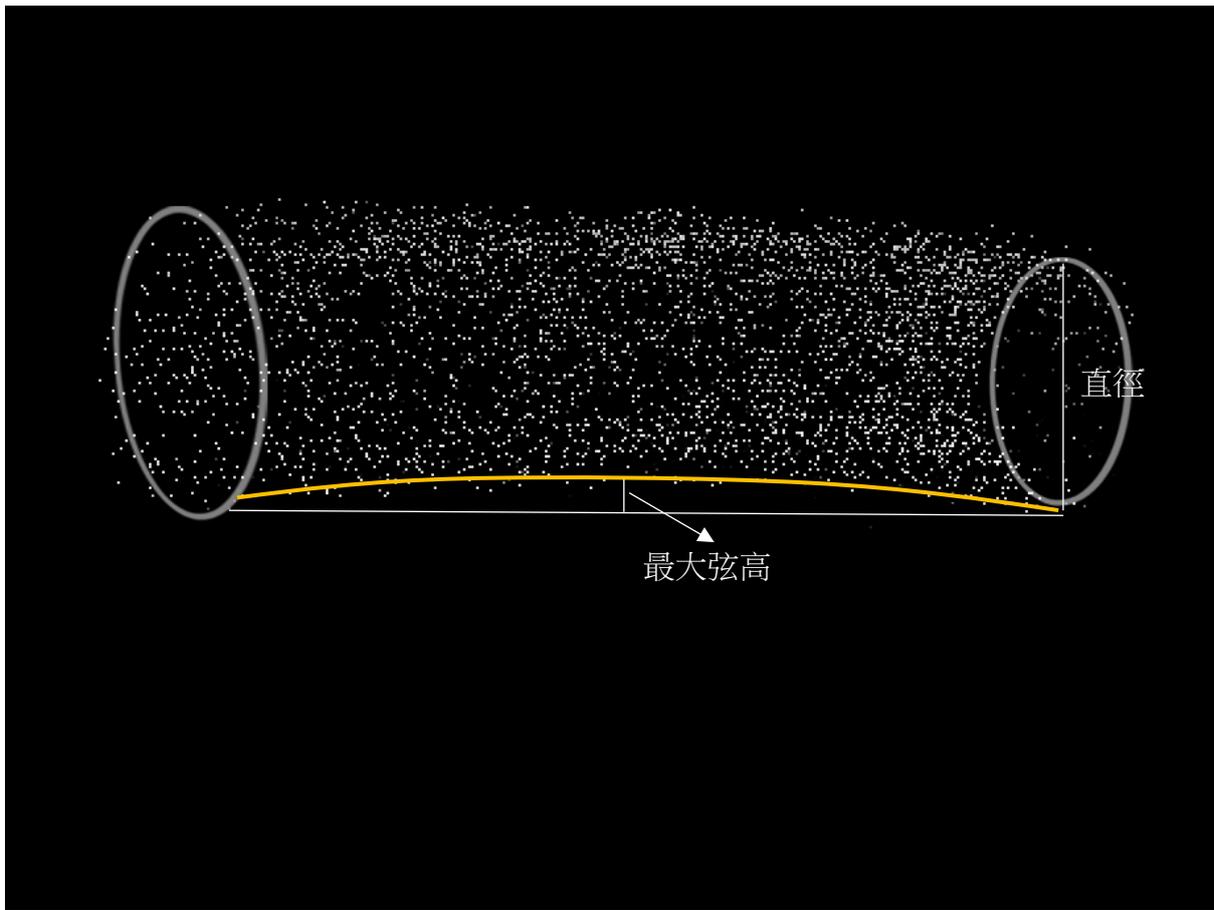


圖 24、運用光達點雲資料，量測闊葉樹原木內曲面之最大弦高對其直徑

表 8、闊葉樹原木內曲面之最大弦高對其直徑之比例數據(n=30)

測量方式	Mean (cm)	sd	p-value
直徑	32.1	4.5	0.442
最大弦高	3.3	0.6	
彎曲比(%)	10.3		

4.運用無人機技術/光達技術，建構闊葉樹人工林 2 處林分層級 2D/3D 空間資訊。

本研究選定於屏東潮州事業區第 33 林班(圖 25)與嘉義大埔事業區第 104 林班(圖 26) 2 處闊葉樹人工林，已完成樣區設置與林分調查工作。本研究除運用智慧工具和手持光達於林地內實測外，也搭配無人機航線拍攝技術於進行拍攝，並利用匹配技術與空中三角測量原理，將所收集的 RGB 影像拼接成正射影像圖，並且透過其產生的數值地





表模型來估算該區總材積量。本次航線拍攝所使用機種為 Parrot Anifi、航線高度為 120m、航線重疊率為 75%，所產製的正射影像圖平均地面解析度為 5cm，為避免兩期影像位移誤差過大，本次拍攝有在現地設置三個地面控制點，以利後續多期正射影像產製校正使用。本研究運用無人機技術建構屏東潮州事業區第 33 林班與嘉義大埔事業區第 104 林班 2 處疏伐樣區的闊葉樹 2D/3D 空間資訊(圖 27、28)，可提供做為疏伐區現況之基本圖資林分各項施業前後期的林分動態。後續透過定期拍攝可作為後續林地經營、碳匯管理與監測之基線數值影像資料。



圖 25、屏東潮州事業區第 33 林班與選定劃設樣區位置



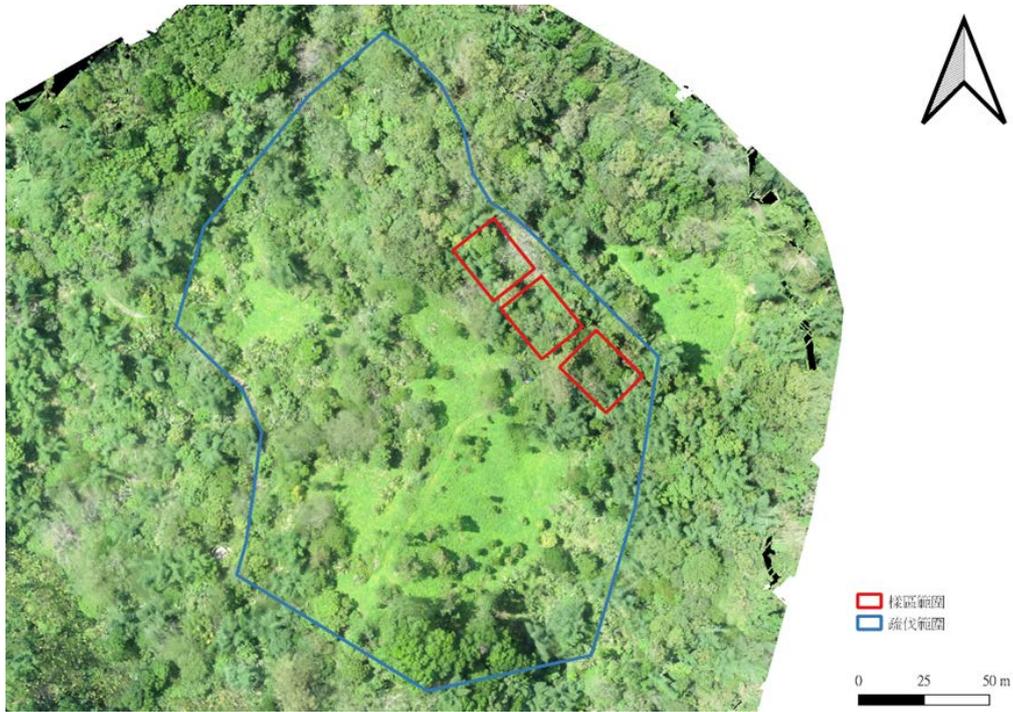


圖 26、嘉義大埔事業區第 104 林班與選定劃設樣區位置

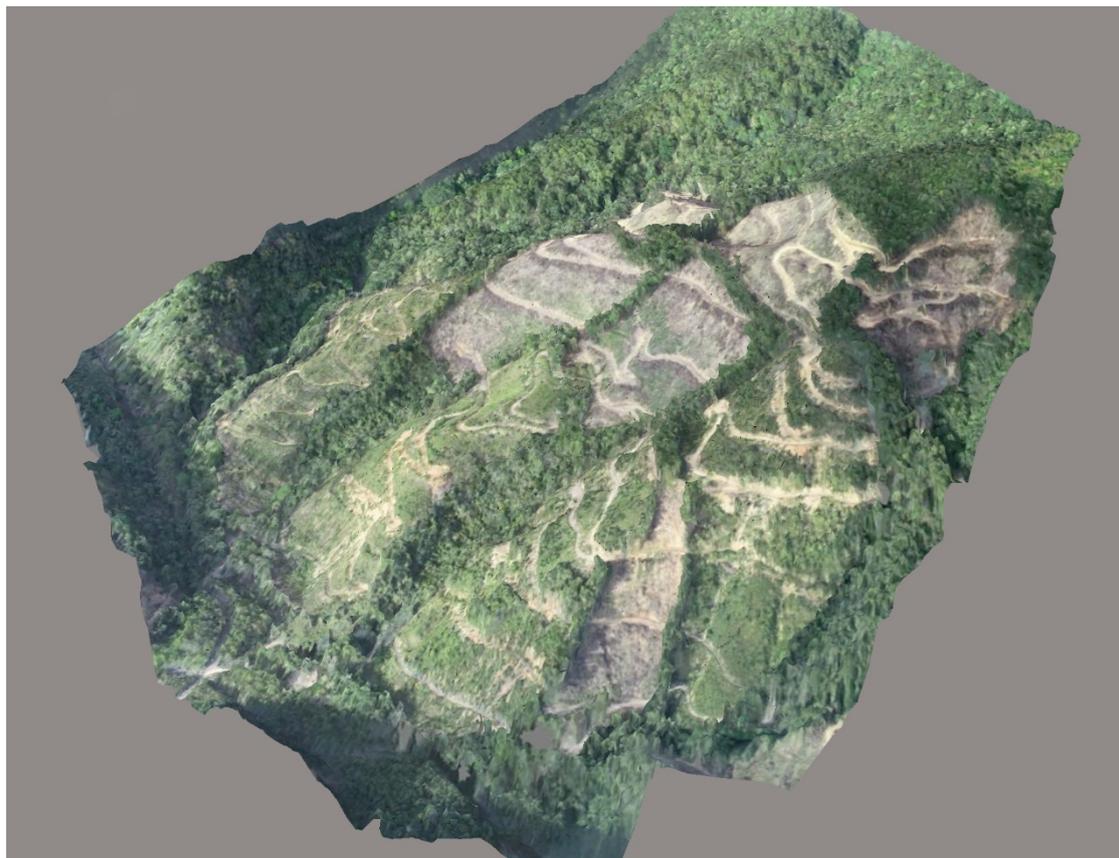


圖 27、嘉屏東潮州事業區第 33 林班 3D 建模成果，可提供林地 3D 數位資訊保存，提供估算林分高度、蓄積與相關林分資料萃取使用



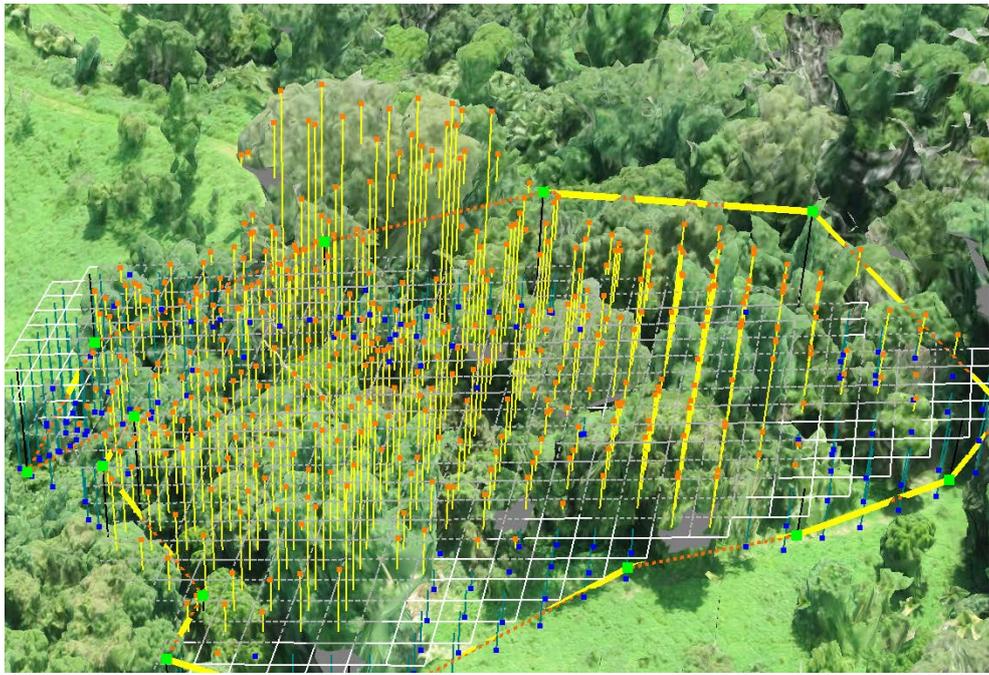


圖 28、嘉義大埔事業區第 104 林班 3D 建模成果，3D 資訊可以提供估算林分高度





依據樣區調查結果，在屏東潮州事業區第 33 林班的相思樹，三個樣區的平均胸徑約 16.8-17.1cm，樹高為 8.7-9.2m，將株數換算成平均林分密度為 1220-1300 n./ha；嘉義大埔事業區第 104 林班的樣區調查結果，平均胸徑約 19.2-32.9cm，樹高為 8.9-13.6m，將株數換算成平均林分密度為 340-560 n./ha (表 9)。本年度所選定之闊葉樹研究區域，在屏東潮州的樣區因前往空拍時已經完成疏伐作業(圖 27)，故於周圍林地設置樣區，並透過智慧工具與光達(圖 29)蒐集造林木資料，提供作為林分蓄積量之推估；嘉義大埔事業區第 104 林班的研究區域有透過智慧工具與光達(圖 30)，蒐集到疏伐前之蒐集造林木資料。

本計畫將使用智慧工具、無人機與光達所蒐集的造林地與林木資訊，作為林分蓄積量推估之基礎，並與分署所透過現地調查所獲得的蓄積量推估進行討論。本計畫位與現行作業方式進行比較，單木材積推估依據行政院農業委員會辦理國有林產物處分作業要點，使用林務局(1995)的通用式，形數使用 0.45，材積推估的結果，屏東潮州事業區第 33 林班傳統調查作業，平均每公頃蓄積量 112.1 (sd=22.7) m^3/ha ，使用智慧型捲尺與雷射測距儀，推估之林分蓄積量為 119.5(20.1) m^3/ha ，運用光達推估林分蓄積量為 123.3(11.9) m^3/ha 。嘉義大埔事業區第 104 林班的蓄積量，本區的林分密度低，且研究區域範圍內有許多低矮之草地與灌叢，因此本區之蓄積量相對較低，依據嘉義分署的全區每木調查作業結果換算為每公頃，平均每公頃蓄積量 55.2 m^3/ha (因為設置樣區，所以沒有標準差)，使用智慧型捲尺與雷射測距儀，推估之林分蓄積量為 51.3(12.2) m^3/ha ，運用光達推估林分蓄積量為 47.2(12.1) m^3/ha (表 10)。就平均而言，結果顯示透過智慧工具所做的調查，因與傳統調查技術的方法相同，所以林分蓄積量推估的結果較接近分署現地調查的結果，屏東潮州事業區第 33 林班與嘉義大埔事業區第 104 林班的蓄積量推估每公頃蓄積量所產生的差異，分別略為低估 6.6%與 7.1%。運用光達技術所推估的蓄積量，在屏東潮州事業區第 33 林班的結果顯示，約比現地調查資料高估 10.0%；在嘉義大埔事業區第 104 林班的蓄積量則低估約 14.5%，低估主要的原因係為本研究區範圍內的冠層致密且部分林木高度較高，使用地面光達蒐集林木資訊時，在林木樹高的部分有低估的情形，進而造成推估林分蓄積量時產生低估的結果。





表 9、屏東潮州事業區第 33 林班與嘉義大埔事業區第 104 林班林地調查胸徑與樹高平均資料

事業區	Plot	n		Mean	SD	Max	Min
屏東潮州 事業區	1	65	DBH(cm)	17.1	9.5	42.7	7.9
			TH(m)	8.7	3.0	15.4	4.6
	2	61	DBH(cm)	16.8	4.6	24.6	9.5
			TH(m)	9.2	3.0	13.7	4.3
	3	63	DBH(cm)	17.0	5.5	33.7	8.7
			TH(m)	9.0	3.2	14.6	4.5
嘉義大埔 事業區	1	17	DBH(cm)	19.2	8.5	42	7.6
			TH(m)	8.9	2	13.2	5.6
	2	28	DBH(cm)	32.9	28.7	94.5	6
			TH(m)	13.6	8.3	38.7	5.1
	3	26	DBH(cm)	25.6	22.0	114.9	7.5
			TH(m)	9.8	3.2	16.4	2.7

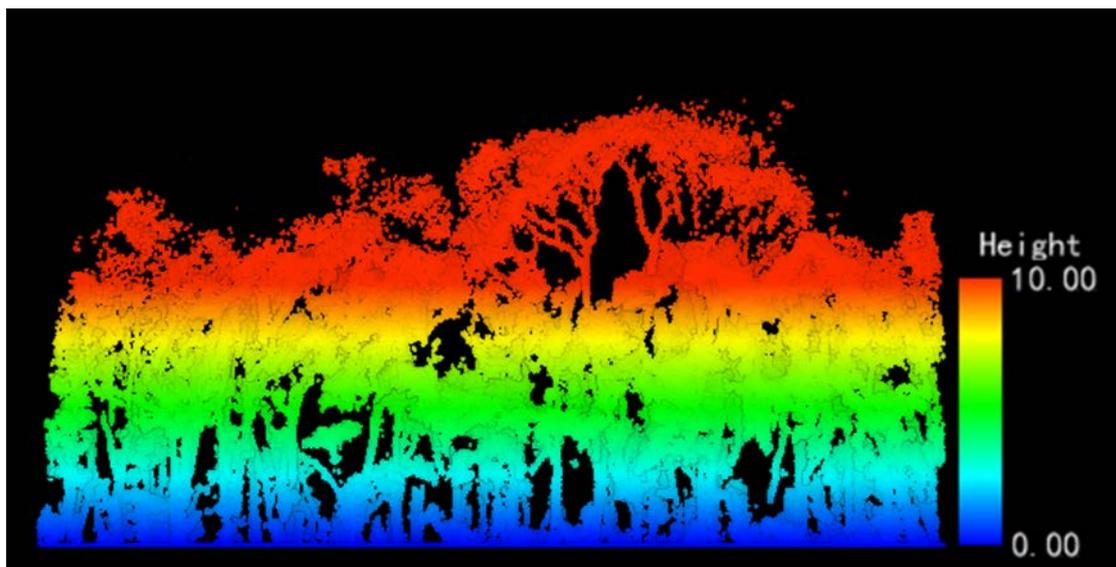


圖 29、屏東潮州事業區第 33 林班(樣區 1) LiDAR 剖面圖



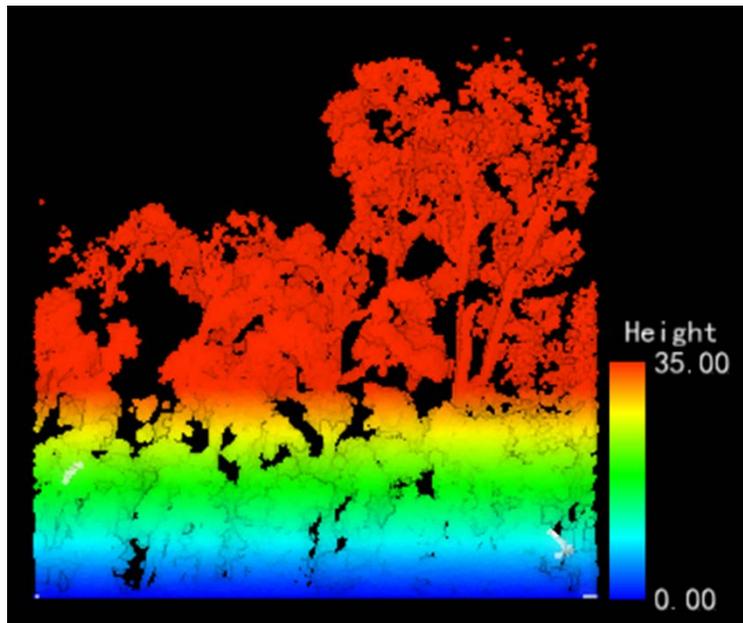


圖 30、嘉義大埔事業區第 104 林班(樣區 2) LiDAR 剖面圖

表 10、運用現地調查、智慧工具(智慧捲尺與雷射測距儀)與光達推估林分平均每公頃蓄積量

	面積 (ha)	分署現地調查 (m ³ /ha)	智慧工具 (m ³ /ha)	LiDAR (m ³ /ha)
屏東	19.19	112.1(22.7)	119.5(20.1)	123.3(11.9)
嘉義	2.87	55.2 (-)	51.3(12.2)	47.2(12.1)

5.辦理森林創新調查技術工作坊 3 場，加強增能林業工作者科技培力。

本計畫辦理應用智慧化科技工具於林木資源調查技術工作坊，培養林業工作者科技力量，將新興科技引入資源調查，也把目前國外的測量方法介紹給林業工作者，讓在第一線的現地調查人員與國際接軌。今年度工作坊分別於 7 月 13 日、11 月 9 日與 11 月 16 日，假嘉義分署觸口工作站、花蓮分署南華工作站與新竹分署大楠林道，邀請林務局各林區管理處的林業人員前來參加，共辦理 3 場次工作坊，各場次參加人數分別為共 24 人、42 人與 14 人，共計 80 參加。在工作坊中由本團隊介紹初步評測的智慧工具，並教導學員使用，並請與會者協助評估其在現地使用性、方便性及便攜性等，以供未來各林業單位參考使用。

於觸口工作站之第一場次有 24 人參加講習訓練(圖 31)，回收學員學習問卷 24 份。





參訓的學員填答問卷經統計分析後，每一道題目的結果如次，1. 您對本課程主題安排之滿意程度的部分，表示非常同意的佔 79.2%，同意的佔 20.8%；2. 活動內容規劃符合專業需求的部分，表示非常同意的佔 75.0%，同意的佔 25.0%；3. 講者表達清晰，透過實例佐證淺顯易懂的部分，表示非常同意的佔 70.8%，同意的佔 29.2%；4. 本次活動場地與設備的部分，表示非常同意的佔 75.0%，同意的佔 25.0%；5. 參與本次活動對我有實質的收穫的部分，表示非常同意的佔 70.8%，同意的佔 29.2%；6. 參與本次活動對於日後工作或研究有所幫助的部分，表示非常同意的佔 66.7%，同意的佔 33.3%；7. 參與本次活動可增進現有的知識的部分，表示非常同意的佔 79.2%，同意的佔 20.8%；8. Q & A 確實針對問題給予回覆的部分，表示非常同意的佔 79.2%，同意的佔 20.8%。從學員的問卷調查結果，就整體而言，學員們幾乎是同意本次辦理訓練班的成效，並認為對未來的工作有所幫助。在質性的問題中，學員的反應如次：

9. 參與此活動，讓您感到之收穫:

- (1).運用智慧工具提升調查的效率及精準率，增加新興技術的知識。
- (2).了解到有新的儀器可使用。
- (3).立木材積式由來。
- (4).學習不同科技器材運用對業務實用程度。
- (5).透過智慧型儀器可增加調查效率。
- (6).智慧調查工具結合手機 APP，可減少輸入錯誤，提升調查效率。
- (7).希藉智慧型裝置提升林地內工作效率。
- (8).現代化測量設備之操作。
- (9).新工具使用上可以有效減少現場作業人力及克服許多困難。
- (10).了解新工具的應用，使現場調查更有利。





10. 其他建議（其他建議開設之課程、需改善之處或想說的話）：

(1).無人機應用於林分調查。

(2).如果可以，分區(北中南東)辦理會減少很多困難(交通、住宿)

(3).應用電子問卷(ex.google 表單)，更有利於後端資料統整又省紙。



圖 31、應用智慧化科技工具於林木資源調查技術工作坊(觸口工作站之第一場次)

於南華工作站之第二場次有 42 人參加講習訓練(圖 32)，回收學員學習問卷 24 份。參訓的學員填答問卷經統計分析後，每一道題目的結果如次，1. 您對本課程主題安排之滿意程度的部分，表示非常同意的佔 92.9%，同意的佔 7.1%；2. 主題和內容之相關性的部分，表示非常同意的佔 95.2%，同意的佔 4.8%；3. 您對講師/助教整體表現的滿意程度的部分，表示非常同意的佔 90.5%，同意的佔 9.5%；4. 您對課程進行整體的滿意程度的部分，表示非常同意的佔 92.9%，同意的佔 7.1%；5. 本次研習中提供的資料充分且有用的部分，表示非常同意的佔 88.1%，同意的佔 11.9%；6. 課程時間的安排的





部分，表示非常同意的佔 90.5%，同意的佔 9.5%；7. 場地與設備的部分，表示非常同意的佔 92.9%，同意的佔 7.1%；8. 工作人員的態度的部分，表示非常同意的佔 97.6%，同意的佔 2.4%。9. 課程對您未來工作（教學/學習）的幫助的部分，表示非常同意的佔 88.1%，同意的佔 9.5%，尚可的佔 2.4%；10. 整體而言我對本次活動滿意程度的部分，表示非常同意的佔 92.9%，同意的佔 7.1%。從學員的問卷調查結果，就整體而言，學員們幾乎是同意本次辦理訓練班的成效，並認為對未來的工作有所幫助。

11. 參與此活動，讓您感到之收穫：

- (1)很棒。
- (2)講師及助教們辛苦了!從原理到實務面都體驗到!
- (3)點心太棒了，辛苦了。
- (4)實際操作及課前教學都很詳細。
- (5)學習不同領域知識技能。



圖 32、應用智慧化科技工具於林木資源調查技術工作坊(南華工作站之第二場次)





於大楠林道之第三場次有 14 人參加講習訓練(圖 33)，回收學員學習問卷 14 份。參加的學員填答問卷經統計分析後，每一道題目的結果如次，1. 您對本課程主題安排之滿意程度的部分，表示非常同意的佔 64.3%，同意的佔 35.7%；2. 活動內容規劃符合專業需求的部分，表示非常同意的佔 64.3%，同意的佔 35.7%；3. 講者表達清晰，透過實例佐證淺顯易懂的部分，表示非常同意的佔 71.4%，同意的佔 28.6%；4. 本次活動場地與設備的部分，表示非常同意的佔 64.3%，同意的佔 35.7%；5. 參與本次活動對我有實質的收穫的部分，表示非常同意的佔 64.3%，同意的佔 35.7%；6. 參與本次活動對於日後工作或研究有所幫助的部分，表示非常同意的佔 71.4%，同意的佔 28.6%；7. 參與本次活動可增進現有的知識的部分，表示非常同意的佔 57.1%，同意的佔 42.9%；8. Q & A 確實針對問題給予回覆的部分，表示非常同意的佔 50.0%，同意的佔 50.0%。從學員的問卷調查結果，就整體而言，學員們幾乎是同意本次辦理訓練班的成效，並認為對未來的工作有所幫助。在質性的問題中，學員的反應如次：

9. 參與此活動，讓您感到之收穫:

- (1)可以學習新的智慧化設備，增長見聞
- (2)下次可以在其他區域也辦理，讓各區人員可以交流
- (3)新的捲尺與傳統的使用方法相似，但省去了紙本記錄，很方便
- (4)老師講解的很清楚





圖 33、應用智慧化科技工具於林木資源調查技術工作坊(大楠林道之第三場次)

五、結論建議

1. 結論

本計畫以數位轉型技術，導入智慧型林業測量工具，包括智慧捲尺、非反射式雷射測高儀，並建立林木檢尺與野外調查數位化表單，提供林業現地調查作業應用，落實科技政策管理之目標。結果顯示適當的運用智慧型工具可達到優化調查工作的人力配置，在長期森林經營管理實務上達到節省人力資源及增加作業效率等目標。

(1)本計畫導入智慧測量儀器、無人機與光達技術，改善現行森林調查與林木檢尺工作方法，提高林木資源調查與原木檢尺的工作效率。將智慧工具與傳統測量工具所量測結果，進行統計分析，結果顯示兩者間無顯著的差異。顯示運用智慧型行動裝置，即時於樣區調查現地，蒐集胸高直徑、樹高、GPS 定位等林分資訊，提供森林測量一個新的途徑。

(2)本計畫完成盤點自 1950 年至 2023 年間闊葉樹材積式總共含括 15 種重要闊葉樹樹種，總計有 20 篇文獻，總計 67 個材積式，可提供估算闊葉樹材積式之參考。本計畫同





時透過光達技術精進材積估算方法，亦作為未來評估森林碳量重要的基礎。

(3)為使新型工具與傳統工具可順利銜接，本計畫以智慧捲尺為主要推廣工具，另外搭配影像辨識與光達技術，提供各種不同智慧化科技應用方式改善原木檢尺技術，並精進作業程序。

(4)無人機與光達資料可以蒐集 3D 林分空間資訊，精確掌握森林現狀、動態與未來趨勢的資料。藉由無人機與光達技術進行 3D 數據資料的蒐集，透過數位化的方式典藏特定時期森林環境資訊，提供林產業管理的智慧管理應用系統，做為林分收穫、中後期撫育與未來規劃新植造林等各種森林作業的重要參考依據。

(5)為推廣本計畫導入之智慧型工具，於計畫期間以林業署各分署估作同仁為對象，辦理 3 場森林創新調查技術工作坊，加強增能林業工作者科技培力。

2.建議

(1)各種科技工具之導入，工具之類型與應用方式，可能與傳統工具不同，將改變傳統之調查方式，應增加辦理森林創新調查技術工作坊，或將智慧型工具於林業人員基本訓練時加入訓練課程，增能林業單位與相關單位智慧科技工具應用之培力。

(2)光達技術為國際之中要發展趨勢，包括美國、歐洲與日本等林業先進國家，其可大幅的減少林地調查的現地資料蒐集時間，並具有數化化保存林地 3D 資訊的效益，可以做為林分生長量、蓄積量、碳匯盤點與監測之工具。近年來光達技術門檻，隨著軟硬體的進步，已具備操作簡單與高效率的優勢，廣泛的應用於生活領域中，光達技術具有高精度與優越的效益特性，應於林業單位進行推廣，並於各分署訓練專業之光達技術應用人員，以期落實林業科技之應用。

(3)無人機技術可提供近即時林地現況影像資料，具有蒐集廣泛森林區域資料的功能，其可提供蒐集林地收穫作業前與後的資料，並提供評估林地蓄積量。無人機技術在操作性、經濟性與技術性上皆具備優勢，建議可增加林業人員對於無人機應用技術之培養，提升林業現場人員巡護、評估與監測林地之能力與效益。





六、參考文獻

- 汪大雄、王兆桓(1996) 本省桉樹人工林幼齡生長和收穫之研究。臺灣林業科學，11(2):123 - 136。
- 林務局 (1995) 第三次台灣森林資源及土地利用調查。P63。
- 林務局 (2010) 林木生長模式應用於常見平地造林樹種之碳吸存量推估。行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 99-00-5-17。P24。
- 林子玉 (1972) 相對幹距應用在相思樹林分收穫預測之研究林分生長量查定方法與預測法之研究。中華林學季刊 5 (3): 73-84。
- 林子玉(1975) 台灣天然生櫟類樹種材積表之編制。國立中興大學農學院森林學系，p148-190
- 林子玉、楊豐昌、伍木林 (1978) 台灣產相思樹材積表 國立中興大學農學院研究報告 第 171 號，pp32。
- 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。臺大實驗林研究報告 28(1): 45-54。
- 彭炳勳、魏浚紘、陳朝圳 (2009) 應用空載光達資料推測阿里山地區單木樹高與林分高度之研究。中華林學季刊，42(1):, 167-180。
- 詹進發 (2005) 空載雷射掃描資料於推估樹冠高度之應用。航測及遙測學刊 10(1): 1-14。
- 陳松藩 (1972) 臺灣產殼斗樹種材積表及形數表之編製研究。臺灣林業試驗所報告第 224 號。
- 陳朝圳、范貴珠 (1989) 恆春地區巨葉銀合歡生長與收穫之研究。屏東農專學報 30: 66-83。
- 陳朝圳、陳建璋 (2015) 森林經營學。正中書局股份有限公司。P212。
- 楊寶霖、石子材(1963) 空中判釋用林分材積表(二)。台北，台灣省農林航空測量隊叢刊第十號。





賴清二 (1970) 台灣中部數種潤葉樹立木材積表及重量表的編製研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文，共 86 頁。

顏添明、林政融、謝傅凱 (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 - 146

劉慎孝、林子玉 (1968) 台灣中南部相思樹林分收穫表及材積表。中興大學農學院森林學系。

劉宣誠 (1974) 台灣泡桐生長與生育地狀況關係之研究。林業試驗所報告第 251 號。

劉宣誠、林銘輝、曲俊麒 (1981) 大葉桃花心木造林木之生長及木材性質之研究。林試所試驗報告第 351 號。

劉宣誠、吳萬益 (1984) 光臘樹造林木生長與生育地狀況關係之研究，林業試驗所報告第 403 號。

劉宣誠、高毓斌 (1987) 銀合歡人工林生物量估算方法之比較，林試所研究報告季刊，2(1):43-64。

魏浚紘、陳朝圳 (2020) 光達技術應用於人工林之經營與監測。航測及遙測學刊，20(4)P231 - 250。

鍾智昕(2022)應用遙測技術分析棲蘭山 100、160、170 線林道人工林資源成果。國軍退除役官兵輔導委員會榮民森林保育事業管理處研究報告。

羅紹麟、馮豐隆 (1986) 生物量調查及分析方法在樟樹資源調查之應用。興大實驗林研究報告 8: 67-87。

Avitabile, V., Camia, A. (2018) An assessment of forest biomass map in Europe using harmonized national statistics and inventory plots. *For. Ecol. Manage.* 409, 489–498. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.047>.

Bruun Jensen, C. (2015) Experimenting with political materials: Environmental infrastructures and ontological transformations. *Distinktion: Journal of Social Theory* 16(1): 17–30.

Corona, P., Chirici, G., McRoberts, R. E., Winter, S., & Barbati, A. (2011). Contribution of





- large-scale forest inventories to biodiversity assessment and monitoring. *Forest Ecology and Management*, 262, 2061–2069.
- Choudhry, H., & O’Kelly, G. (2018). *Precision forestry: a revolution in the woods*. McKinsey&Company, Paper & Forest Products.
- Chung, C.-H., Wang, C.-H., Hsieh, H.-C., Huang, C.-Y. (2019) Comparison of forest canopy height profiles in a mountainous region of Taiwan derived from airborne lidar and unmanned aerial vehicle imagery, *GIScience & Remote Sensing*, 56:8, 1289-1304, DOI: 10.1080/15481603.2019.1627044
- Chung, C.-H., Huang, C.-ying (2020) Hindcasting tree heights in tropical forests using time-series unmanned aerial vehicle imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* 290, 108029.
- Du, S., Lindenbergh, R., LeDoux, H., Stoter, J., Nan, L. (2019) AdTree: Accurate, detailed, and automatic modelling of laser-scanned trees. *Remote Sens.* (11) 2074.
- Forestry Agency of Japan. (2021) *Annual Report on Forest and Forestry in Japan*.
- Feng, Y., & Audy, J. F. (2020). *Forestry 4.0: a framework for the forest supply chain toward Industry 4.0*. *Gestão & Produção*, 27.
- Feng, Z., Xu, Z., Wang, X., Kong, W. (2005) Precision for method to determine standing wood volume. *J.BeijingForestryUniv.*87–91. <https://doi.org/10.3321/j.issn:10001522.2005.05.015>.
- Fan, G., Nan, L., Dong, Y., Su, X., Chen, F. (2020) AdQSM: A New Method for Estimating Above-Ground Biomass from TLS Point Clouds. *Remote Sens.* 2020, 12, 3089. <https://doi.org/10.3390/rs12183089>
- Gingras, J.-F., & Charette, F. (2017). *FPInnovations’ Forestry 4.0 Initiative*. FPInnovations.
- Gabrys, J. (2020). Smart forests and data practices: From the Internet of Trees to planetary governance. *Big data & society*, 7(1), 2053951720904871.
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology.





- Remote Sensing, 13, 3129.
- Methods in Ecology and Evolution, 14, 1603–1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- Mokroš, M., Mikita, T., Singh, A., Tomaščík, J., Chudá, J., Wężyk, P., Kuželka, K., Surový, P., Klimánek, M., Zięba-Kulawik, K., Bobrowski, R., & 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.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63–77.
- Manger, J. (2018). Forestry 4.0: digitalization in the forest industry. In 13th International Key Trade Fair for Forestry and Forest Technology with Scientific Conferences and Special Shows. Messe München, Germany. Retrieved in 2019, July 23, from www.interforst.com
- Momo, S.T., Ploton, P., Sonké, B., Hackenberg, J., Grion, S., De Coligny, F., Kamdem, N.G., Libalah, M., Mofack, G.I., Le Moguédec, G. (2017) Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods Ecol. Evol.* 9, 905–916.
- Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., & Mark Danson, F. (2015). Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*, 1, 239–251.
- Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., Lewis, P. (2013) Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sens* (5), 491–520.
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., Furuya, N. (2022) ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022.
- Torresan, C., Benito Garzón, M., O'grady, M., Robson, T. M., Picchi, G., Panzacchi, P.,





- Tomelleri, E., Smith, M., Marshall, J., Wingate, L., Tognetti, R., Rustad L. E., Kneeshaw, D. (2021). A new generation of sensors and monitoring tools to support climate-smart forestry practices. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(12), 1751-1765.
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., & Furuya, N. (2023). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad.
- Pinho, T.M., Coelho, J.P., Oliveira, J. (2018) An overview on visual sensing for automatic control on smart farming and forest management. In: 13th APCA international conference on automatic control and soft computing (CONTROLO), Ponta Delgada, Azores, Portugal, 4–6 June 2018. pp.419–424.
- Vaglio Laurin, G., Ding, J., Disney, M., Bartholomeus, H., Herold, M., Papale, D., Valentini, R., (2019) Tree height in tropical forest as measured by different ground, proximal, and remote sensing instruments, and impacts on above ground biomass estimates. 101899. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 82. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101899>.
- Zhao, G., Shao, G., Reynolds, K. M., Wimberly, M. C., Warner, T., Moser, J. W., Rennolls, K., Magnussen, S., Koehl, M., Anderson, H.-E., Mendoza, G. A., Dai, L., Huth, A., Zhang, L., Brey, J., Sun, Y., Ye, R., Martin, B. A., Li, F. (2005). Digital forestry: A white paper. *Journal of forestry*, 103(1), 47-50.





附錄一

應用智慧化科技改善林木資源調查與原木檢尺技術 計畫書審查意見

審查意見	執行單位回覆
陳委員朝圳	
1.本計畫以引進新的調查設備，以提升調查之精度及節省成本為宗旨，因此建議研究結果宜針對這兩項目標進行討論。	感謝委員建議，已於期末報告中補充。
2.未來決定採用何種儀器時，建議建立調查之工作程序與儀器操作方法之技術規範。	感謝委員指正，已於附錄補充調查時使用儀器與其操作方法。
3.第 2-22 頁，闊葉樹材積式，建議列出該研究之地點、取樣數及取樣誤差等資料，以利後人選用材積式之參考。	感謝委員建議，以依委員建議補充相關資料。
4.第 2-29 頁，有關闊葉樹胸高直徑變化對材積式估算影響，其討論內容宜針對每一條材積式之相同徑級為何會有不同的單木材積量，其原因是否代表不同地位之影響，建議討論之。	感謝委員建議，已於報告中補充討論。
5.第 2-31 頁，有關木材檢尺技術建議以 CNS 為基準。	感謝委員悉心審閱，已依委員意見修正。
6.第 2-44 頁，參考文獻建議增加搜尋並研讀分析，並列入計畫相關之研究項目的討論。	已依委員意見，增加與本案研究相關文獻與討論。
7.建議將過去委員審查意見條列，並進行回覆。	已依委員意見修正。
楊委員德新	
1.本計畫已完成期中評核標準相關工作。	感謝委員。





2.本案去年亦導入智慧化工具，本年度持續導入，以原木檢尺部分為例，建議說明不同年度間差異，及設備陸續更新緣由，另建議在導入各項設備工具時，亦作前期需求盤點，以及各項智慧工具之差異後，再評估導入。	感謝委員建議，本年度係以前一年導入之工具與軟體，應用於闊葉樹上，並持續尋找適當之軟體，提供林業相關單位瞭解工具特性與實務之應用，已依委員意見補充相關說明。
3.本計畫利用智慧捲尺，Lidar Tibeter，三種方法量測末徑(第 2-34 頁)，宜注意末徑量測應依 CNS 標準讀法進行。	感謝委員建議，已依委員意見修正。
顏委員添明	
1.本計畫所列期中審查標準共有兩項，經審查期中報告書內容，均有完成該項目。	感謝委員給予正面肯定。
2.報告書內容有些部分需改進，如第 2-5 頁（二）的後面有多一”.”；第 2-10 頁智慧林業的英文重複；第 2-21 頁材積表後面括號的英文應為（volume table）而非（volumetable）。	感謝委員建議，已依委員意見修正。
3.第 2-22 頁所列樹種編號 207 桃花心木的材積式，作者並非本人，請予以查證。	感謝委員悉心審閱，已依委員查證與修正。
4.第 2-3 頁所繪的單木 DBH 與材積之關係所採用的公式，有些是含樹高變數，不知在圖 9 中，樹高是如何處理，建議在內文中，予以說明。	感謝委員建議，已依委員意見於報告中補充。
森林產業組	
應用智慧化科技改善林木收穫作業調查技術訓練課尚有 2 場，倘有相關訓練手冊可提供各地區分署視需求，自行辦理。	已於 11 月 9 日與 11 月 16 日，假花蓮分署南華工作站與新竹分署大楠林道辦理訓練課程。





應用智慧化科技改善林木資源調查與原木檢尺技術
計畫書期末審查意見

審查意見	執行單位回覆
陳委員朝圳	
1. 該計畫強調以智慧科技科技，進行林木特徵值的測計，包括胸高直徑、樹高與材積。其目的在於解決傳統的測量方法之低成本及準確度較低之問題。研究涵蓋了屏東、花蓮和嘉義的區域，以三種主要闊葉造林樹種為標的。研究工具包括智慧卷尺的新應用以及雷測距儀的樹高量測等。	感謝委員悉心審閱，本計畫期望導入智慧科技工具，並改善林業傳統測量在人力成本與精度之問題，提供林業應用工具新途徑。
2. 期末報告已針對期中審查意見進行修正，且已完成所有工作項目，符合期末審查標準，建議審查通過。	感謝委員悉心審查。
3. 未來森林資源調查可利用研究結果進行推廣應用，並提出可進一步修正之事項，以利科技應用的演進。	感謝委員建議，會積極與承辦單位爭取有關後續教育訓練計畫，透過推廣應用瞭解使用上不周全的部分，以完善智慧工具之應用，補充於建議中。
楊委員德新	
1. 本案已如期末審查要求完成相關工作。	感謝委員悉心審查。
2. 本案比較智慧捲尺、Timbeter、LiDAR之量測結果，並以統計、回歸斜率、RMSE等比較差異，事實上仍應以智慧捲尺為基礎，比較不同場域之相思樹與印度紫檀似較無意義，建議宜就原木末徑徑級、品質等差異究明造成分析差異之原因，以及未來應用如何改善，提出建議或方法。	感謝委員建議，已補充原木所造成之測量差異相關資訊。
3. 彎曲原木之長度計算，CNS有明定計算方法，建議團隊確認。	已依CNS442之彎曲算法修正計算方式。
4. 建議團隊增加結論與建議，以提供林業保育署後續施政與推動參考。	感謝委員建議，已補充相關建議。
5. 智慧型量測工具之操作手冊建議如子計畫一方式另行出刊。	已依委員意見修正。
顏委員添明	





1.本計畫所列期末審查標準，紙本計畫書均有詳列對映之內容及頁數，符合期末審查標準之規定。	感謝委員悉心審查。
2. 題英文題目文字的大小寫要一致。	已依委員意見修正。
3. 事業區之林班應加上“第”，因此摘要至內文中所列之「屏東潮州事業區 33 林班」、「嘉義大埔事業區 104 林班」應修正為「屏東潮州事業區第 33 林班」、「嘉義大埔事業區第 104 林班」，請全文 format。	已依委員意見修正。
4. 第 2-33 頁，表 4 所列之闊葉樹材積式中含竹類，一般闊葉樹不包含竹類，因竹類屬禾本科，稈為中空，計算材積的意義不大，一般大多以胸徑推估生物量。	感謝委員建議，已刪除竹類部分資料。
5. 第 2-47 頁，表 10 所列「公頃」欄位，建議修正為「面積（公頃）」或「面積（ha）」。	已依委員意見修正。
6. 研究所得的結果可以提供林業及自然保育署的建議，建議可以寫在結論處。	已依委員意見補充建議。





附錄二

林木收穫作業調查之智慧型工具儀器操作手冊

(一)林木胸高直徑調查(Diameter at Breast Height)

在台灣，胸高直徑為立木離地面高 1.3 公尺處之樹幹連皮直徑。可應用捲尺、輪尺或是適當之工具進行量測。

直徑測定基準(行政院農業委員會辦理國有林林產物處分作業要點)：

- 1)立木之直徑以胸高直徑為測定標準。
- 2)胸高直徑定為立木離地面（坡地以上坡處為準）一·三公尺處之樹幹連皮直徑。
- 3)胸高以下之分歧木，各以獨立木測定其直徑。
- 4)胸高點不正圓之立木，應以其長短兩徑之平均數為直徑，如胸高點枝節瘤或腐朽者，應以緊接枝節瘤或腐朽上下兩端直徑之平均數為直徑。

(二)林木樹高調查(Diameter at Breast Height)

樹高係指自樹幹基部至樹冠頂端枝葉最高處的垂直距離，在林分中要獲取樹高的資訊通常較為困難，主要原因為林木具有一定之高度，不易直接量測，一般係透過工具測量或運用數學方法間接量測，以獲得林地內林木之高度資訊。

樹高測定基準(行政院農業委員會辦理國有林林產物處分作業要點)：

- 1)樹高以自地面（坡地以上坡處為準）至林木主幹梢端之高度為測定。
- 2)各胸徑級平均樹高，應以測高器抽樣測定各胸徑級之樹高樣木，成樹高曲線推算之。
- 3)每木調查時，每十五株應利用測高器實測一株林木樹高，或砍伐木實測樹高比較，以推估樹高。

3.現地測量林木胸高直徑與樹高之量測位置(參考馮豐隆教授講義修改)

當量測時於坡地或不規則林木之量測位置如圖 1 所示：

- 1)立木在胸高上方分叉時，當作一株立木測定之。測量位置應選在緊接分叉下方樹幹無膨大處。
- 2)立木在胸高下方分叉時，每一分叉木留作一株獨立木測定之，測量位置應選在分叉處上方適當樹幹無膨大處，並記錄位移之高度。
- 3)胸高處有枝條、樹瘤等不正常時，測量位置應選在此等畸形消失之上方處適當樹幹無膨大處，並記錄位移之高度；或取離胸高上下等距無膨大現象之兩直徑平均之。
- 4)樹幹膨大高度在地上 1 公尺以上時，直徑點應在膨大消失處上方 30 公分，但膨大部分能造二公尺長圓材者不在此限。



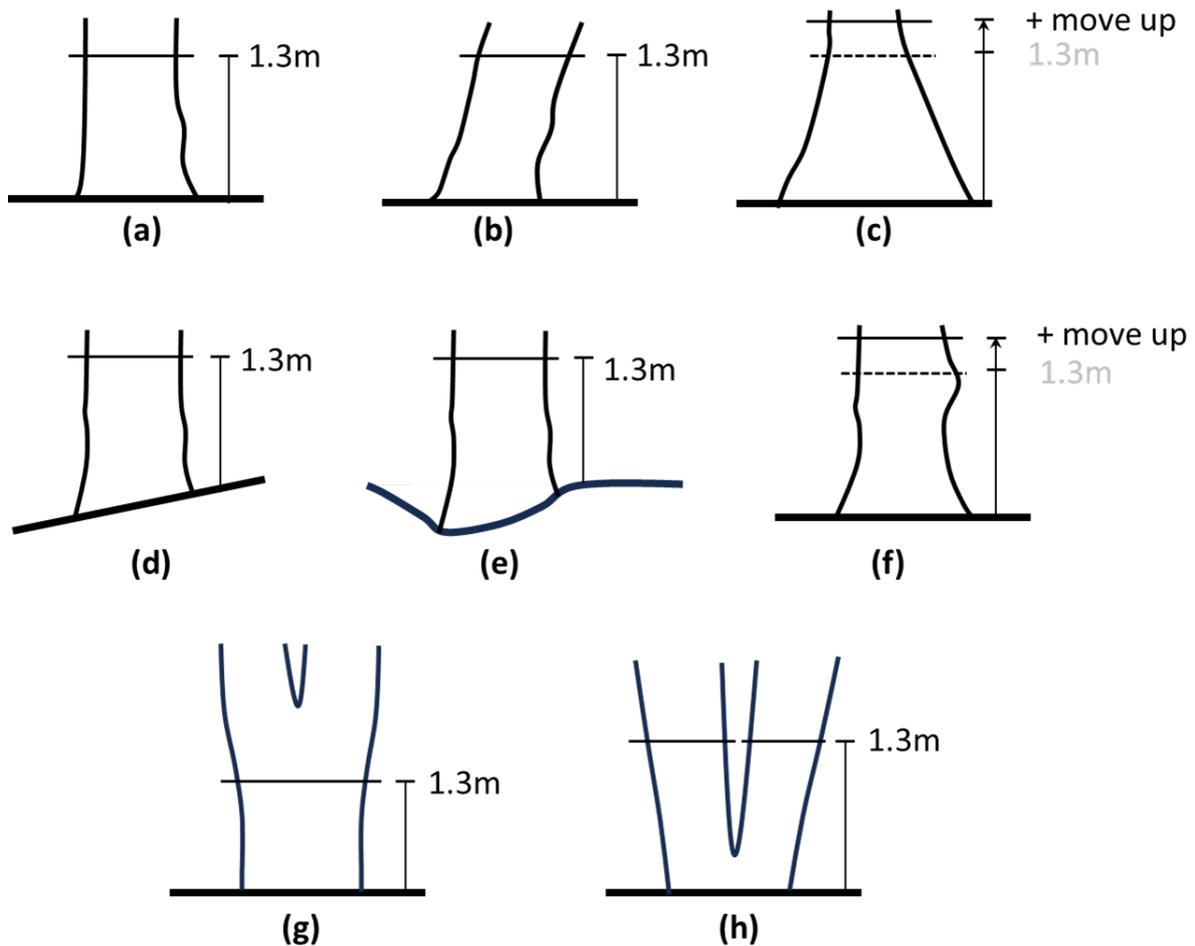


圖 1、現地測量林木胸高直徑與樹高之量測位置，(a)正常林木地形平緩，於離地 1.3m 的高度位置量測；(b)樹木傾斜時，以離地 1.3m 的高度位置量測為標準；(c)當林木離地 1.3m 的高度位置有明顯根張時，應避免於根張處量測，將量測點上移至沒有根張影響之高度位置進行量測，並記錄高度位置；(d)當地形有高低坡度時，胸高直徑之測量需於上坡處進行量測；(e)當地形有凹陷高低差時，胸高直徑之測量應避免於凹陷處量測，選擇於林木周圍平緩處進行量測；(f)當林木樹幹於離地 1.3m 的高度位置，具有明顯膨大或異常時，應避免於異常處量測，將量測點上移至沒有異常影響之高度位置進行量測，並記錄高度位置；(g)分岔林木之量測，當分岔處高於離地 1.3m 的高度位置，則量測 1.3m 的高度位置，若有因分岔而造成明顯膨大，應將測量點下移並記錄高度位置；(h)分岔林木之量測，當分岔處低於離地 1.3m 的高度位置，則依分岔樹幹之數量分別量測 1.3m 的高度位置之胸高直徑。





(三)智慧型裝置(Intelligent device)

智慧型裝置是一種電子設備，具有智慧性多功能的裝置，一般可透過藍牙、Zigbee、NFC、Wi-Fi、LiFi、5G 等，不同的無線或網絡技術與其他設備連接，可在一定程度上實現交互和自主操作。簡而言之，智慧型裝置即是具有獨立作業計算能力的設備、儀器或機器。

(1)智慧捲尺(Bagel-003 搭配 DBHnote)

操作步驟

本 APP 與智慧捲尺相互配合，操作方式與傳統選尺相同，其可與行動裝置相連結，將所量測長度的資訊，直接以數位化的方數紀錄，並轉換為直徑。

A.基本外觀、按鈕與功能介紹

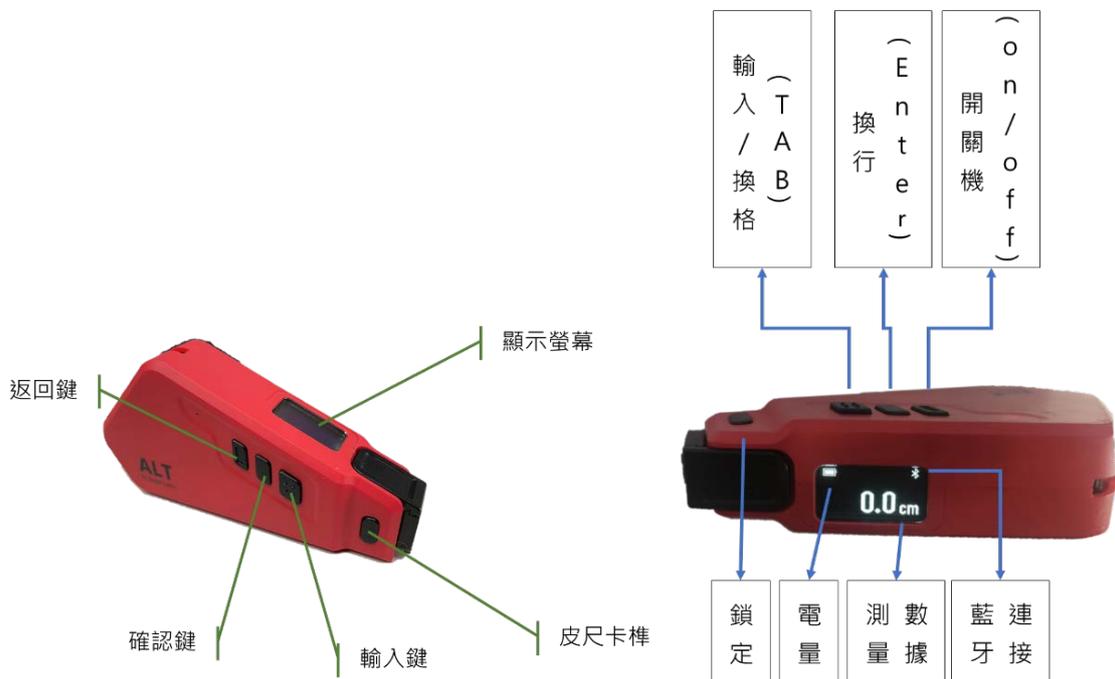


圖 2、智慧捲尺基本功能鍵與相關說明

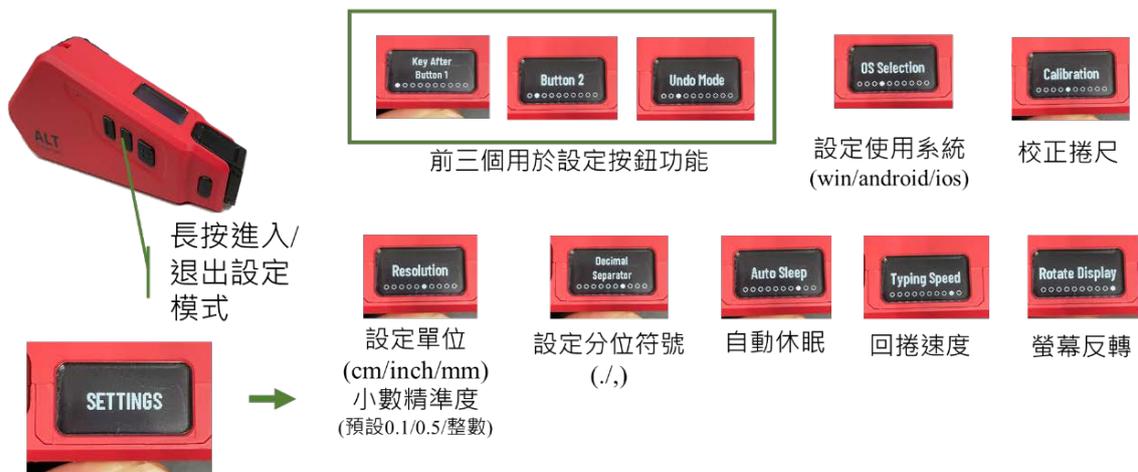




B. 手機無線連接方式



C. 捲尺內部設定



智慧捲尺可以當作一般捲尺使用，亦可與行動裝置連線，當作無線輸入設備，或是搭配，本計畫所開發的 APP 軟體(DBHnote 與 DiaNOTE)，做為林地調查、





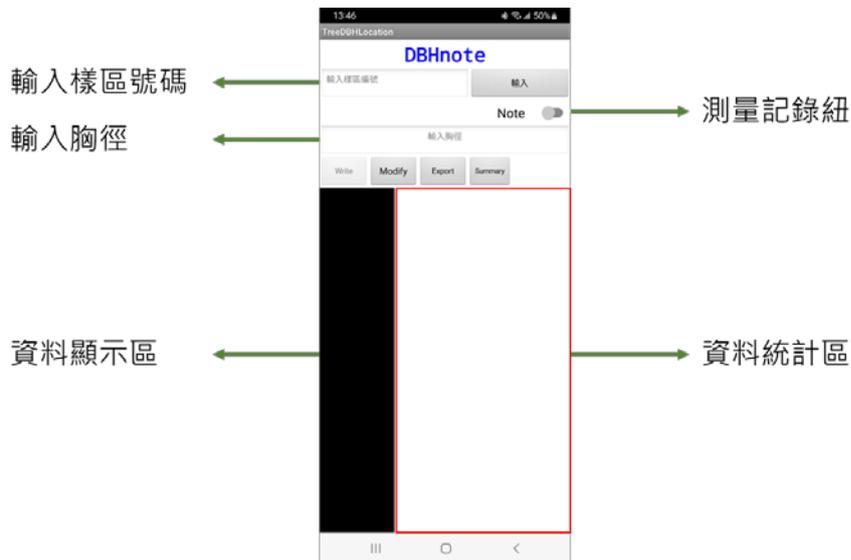
(2)原木檢尺之工具。

A.DBHnote



1. 可手動輸入或搭配智慧捲尺使用，不用綁定設備使用方便
2. 支援檔案輸出可直接上傳雲端，省去內業時間
3. 可現地觀看統計數據，找出有疑慮的數據進行重新測量
4. 支援語音播報，測量時不必一直盯著螢幕

B.DBHnote 系統介面



C.使用步驟

- 第一步，開啟 DBHnote app
- 第二步，輸入作業樣區編號(也可以最後再輸入)
- 第三步，連接智慧捲尺(開機後自動連上)
- 第四步，開始測量!



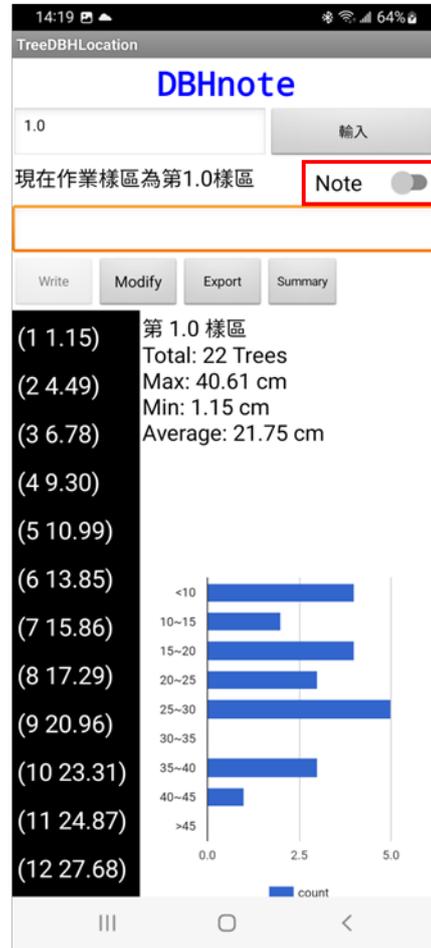


開啟 DBHnote app，啟用數據編修，開始進行測量

開啟



未開啟



1. 按第一個按鍵為輸入長度
2. 按第二個按鍵為記錄



1. 按第一個按鍵為輸入長度



2. 按第二個按鍵為記錄





量錯修正

直接量測胸徑並且按下Modify

3. 選取後會顯示在此，可以直接量測新的數據。

2. 點選欲修改的數據。

1. 關閉紀錄鈕。

修正前數值

修正後數值

查看調查資料概況

1. 關閉紀錄鈕。

2. 按下Summary。

1. 統計測量多少樹
2. 最大值
3. 最小值
4. 平均值
5. 每五公分為一級繪製統計圖表

檔案輸出

按下Export鍵
系統會詢問是否要選擇輸出項目，按下Yes即可選擇要輸出檔案，選擇No則繼續繼續測量數據。

點選要輸出的檔案，按下Export即可分享到其它裝置。





(3) DiaNOTE

本軟體係為原木檢尺作業 APP，依照中華民國國家標準 CNS442 木材之分類之第 5 點木材之尺度標準。原木之直徑量測，以原木正長末端最短之直徑與其呈直角之直徑求之，平均拾取偶數，如末端之形狀不規則時，應聯測四個直徑平均求之。測定時讀數止於公分。

臺灣杉 3.6
直徑 Enter Modify Cancel

Summary DataView ExportFile

A. 操作步驟

本 APP 與智慧捲尺相互配合，操作方式與傳統選尺相同，其可與行動裝置相連結，將所量測原木斷面直徑的資訊，直接以數位化的方數紀錄。



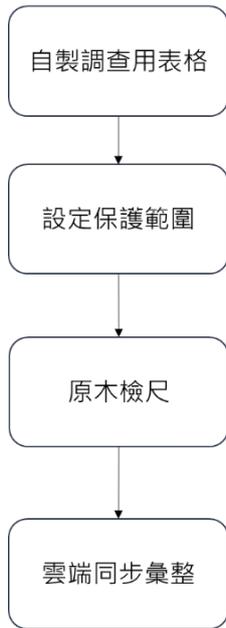
(4) 智慧捲尺與 Excel 配合操作

智慧捲尺除了可使用本計畫所開發的 APP 軟體(DBHnote 與 DiaNOTE)，亦可由使用者自行開發 excel 表單配合使用。





A.操作步驟

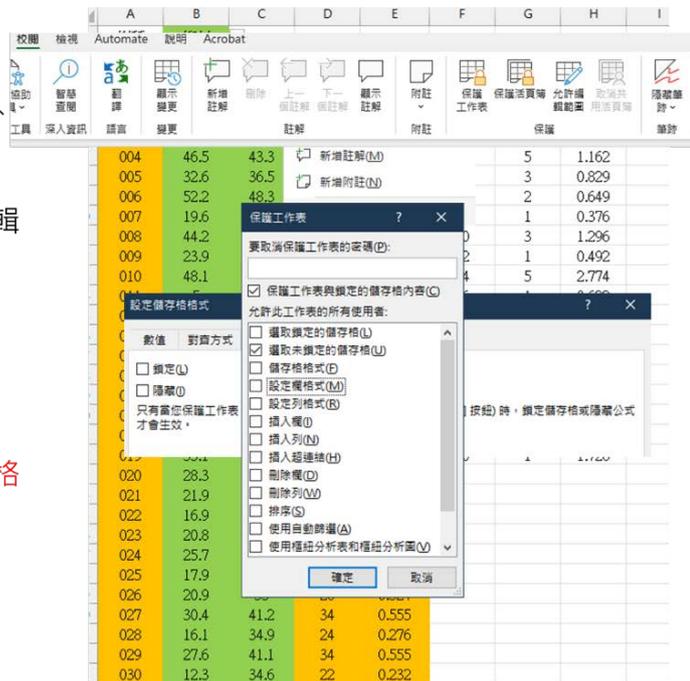


樹種	材長	第一軸	第二軸	規整平均	材積	平均直徑	個數	累積材積
柳杉	4.8							
001	37.9	28.8	32	0.492	8	1	15.500	
002	42.3	36.3	38	0.693	16	1	0.123	
003	19.6	26	22	0.232	20	2	0.384	
004	46.5	43.3	44	0.929	22	5	1.162	
005	32.6	36.5	34	0.555	24	3	0.829	
006	52.2	48.3	50	1.200	26	2	0.649	
007	19.6	22.9	20	0.192	28	1	0.376	
008	44.2	38.2	40	0.768	30	3	1.296	
009	23.9	26.3	24	0.276	32	1	0.492	
010	48.1	42.6	44	0.929	34	5	2.774	
011	5	12.8	8	0.031	36	1	0.622	
012	42.3	35.4	38	0.693	38	2	1.386	
013	22.8	25	22	0.232	40	2	1.536	
014	16.4	16.9	16	0.123	42	1	0.847	
015	44.9	41.5	42	0.847	44	2	1.859	
016	62.1	59.1	60	1.728	46	1	1.016	
017	47.9	50.4	48	1.106	48	1	1.106	
018	44.4	51.1	46	1.016	50	1	1.200	
019	33.1	36.2	34	0.555	60	1	1.728	
020	28.3	31.7	28	0.376				
021	21.9	25.2	22	0.232				
022	16.9	31.1	22	0.232				
023	20.8	43.3	30	0.432				
024	25.7	36.4	30	0.432				
025	17.9	34.4	24	0.276				
026	20.9	35	26	0.324				
027	30.4	41.2	34	0.555				
028	16.1	34.9	24	0.276				
029	27.6	41.1	34	0.555				
030	12.3	34.6	22	0.232				

EXCEL內可先新建材積計算、規整、統計摘要等相關報表。

表格完成後，將外業量測時需要編輯之表格解除鎖定：
 選取→右鍵→儲存格式→保護→將**鎖定**取消勾選

設定完成後，由工具列：
 校閱→保護工作表：
 勾選允許使用者**選取未鎖定的儲存格**





2) 樹高測量工具

本操作手冊以 Nikon Forestry ProII 做為示範工具，進行樹高測量之介紹。

A. 基本外觀、按鈕與功能介紹

Nikon Forestry ProII 具有 6 種測量模式，可記錄 250 筆數據，但數據無法輸出。



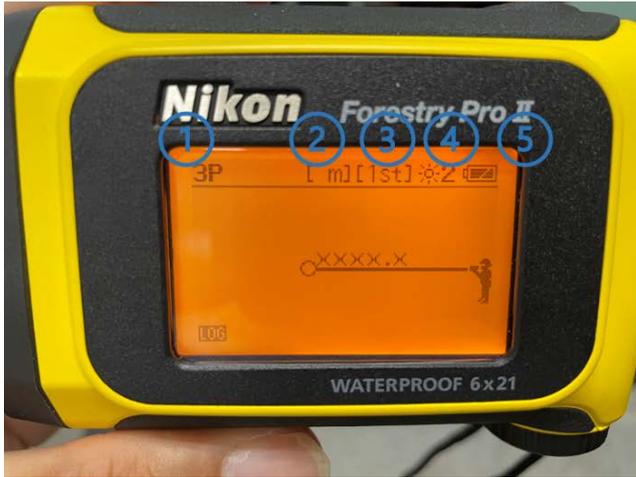
B. 操作模式介紹

英文名稱	中文名稱	觀景窗內	外部顯示器
Actual Distance mode (Act)	實際距離模式		
Horizontal Distance mode (Hor)	水平距離模式		
Height mode (Hgt)	高度模式		
Angle mode (Ang)	角度模式		
Two Point (2P)	兩點模式		
Three Point (3P)	三點模式		



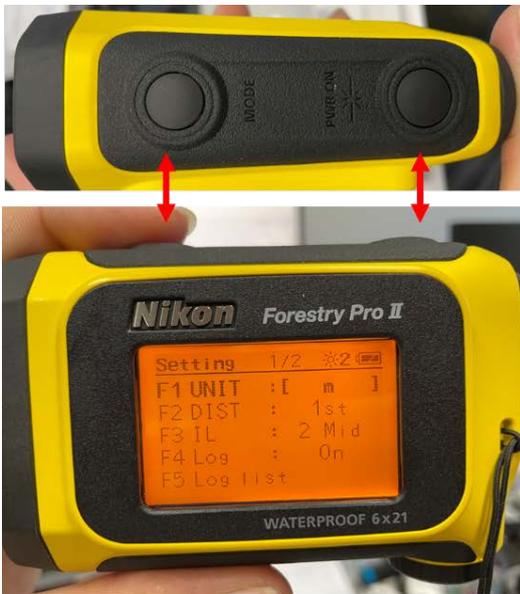


C.操作面板介紹



1. 目前使用模式
(可透過MODE鈕更換)
2. 測量單位
3. 優先模式
4. 螢幕亮度
5. 電量

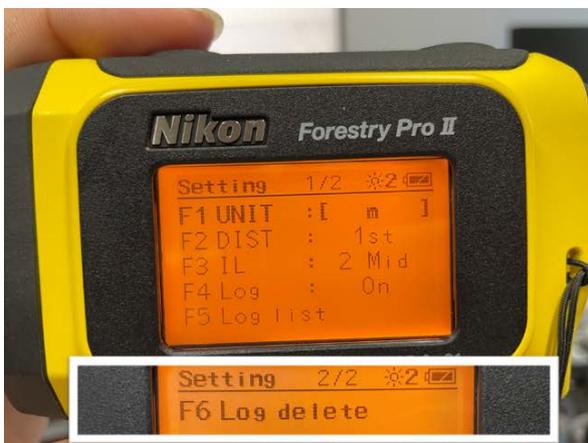
D.功能設定



開機後長按MODE進入設定
頁面

MODE : 下一個

PWR/ON : 確定



- F1 :設定單位有(yd/ft/m)可以選
- F2: 測量優先順序 · 1st近物優先 ;
Dst遠物優先
- F3: 螢幕亮度
- F4:數據紀錄(開/關)
- F5:數據清單
- F6:刪除數據清單





E. 樹高之測定可使用三點模式進行測量



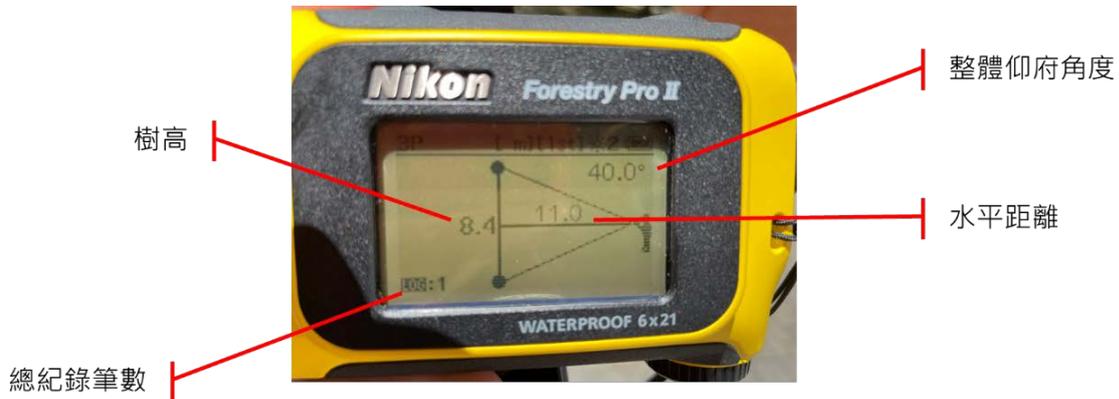
第一步測量水平距離，不用瞄準胸徑位置，僅須盡量保持水平

每次瞄準後僅需按下PWR/ON按鈕即可完成測量。



接下來觀測樹頂與樹根位置，沒有固定順序，機器會自動判斷你目前觀測的是樹頂還是樹根。

F. 測量數據之判讀





附錄三

智慧型工具於林分資源調查應用技術訓練課程問卷調查

親愛的學員：

感謝您的熱情參與，這份無記名問卷是為了瞭解各位學員對於此次研習課程的滿意度，並作為日後課程改善之參考，敬請放心填答。謝謝您的寶貴意見

國立宜蘭大學森林暨自然資源學系 敬啟

以下各題均為單選，請在合適□中打勾，如有勾選非常不同意之題次，請加註說明，以作為我們改進的參考

■課程規劃	非常同意 (5)	同意 (4)	普通 (3)	不同意 (2)	非常不同意 (1)
1. 您對本課程主題安排之滿意程度					
2. 活動內容規劃符合專業需求					
3. 講者表達清晰，透過實例佐證淺顯易懂					
4. 本次活動場地與設備					
5. 參與本次活動對我有實質的收穫					
6. 參與本次活動對於日後工作或研究有所幫助					
7. 參與本次活動可增進現有的知識					
8. Q & A 確實針對問題給予回覆					
9. 參與此活動，讓您感到之收穫：					
10. 其他建議（其他建議開設之課程、需改善之處或想說的話）：					

