



公開  
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e102

## 行政院農業委員會林務局111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1年/全程2年)

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

計畫編號：**111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 111年1月1日 至 111年12月31日

計畫主持人：**鍾智昕**

研究人員：**陳廷安、黃謹毅、林珏、連鈞皓**

執行機關：**國立宜蘭大學**



1111347



## 一、執行成果中文摘要：

在林木收穫之前置作業調查技術，對於木材生產計畫、實施與森林經營滾動調整策略上提供基礎參考資料。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，後續需要將資料進行整理才可方便分析與利用。因此，為達成林業成長及產業化之目標，如何降低人力成本及經費將是未來林業重要課題。本研究透過導入智慧型工具，評估其在實務應用時的可行性與精確性，並針對胸高直徑、樹高測量與原木檢尺作業項目，分別已完成評估3種、3種與5種智慧型工具，同時輔以手持光達測量技術進行比較。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成本、精確性與適用性。結果顯示智慧型捲尺BAGEL-003在胸高直徑測量上與傳統捲尺有相似的精度。樹高測量方面，以雷射測距儀具有不錯的實用性，也具有好的測量精度，但是容易受到山區林分環境遮蔽與霧水的影響，而使測量數據產生偏差。以手持光達進行樣區資料蒐集，可蒐集林分3D環境資訊，亦可獲取精確的胸高直徑與林分高度資料，但儀器設備的成本高。原木檢尺的工具以Timbeter具有良好的使用者介面與簡易操作的優點，測量精確度也符合需求，可以做為未來原木檢尺的檢測輔助工具。本研究完成盤點1950-2020年，台灣重要針葉樹種之材積推估式78個，並分析其歷年發展趨勢。於林木收穫之前置調查作業，通常應用既有材積式先行推估林分立木材積量，但推估會受到林分中林木的胸高形數大小，產生高估與低估的情況。本研究以拔靴法分析柳杉與台灣杉2樹種造林木於推估時，不同林分密度與胸高形數對於材積推估的影響，結果顯示胸高形數會顯著影響林分材積的推估。本研究透過拔靴法分析的結果，以既有的材積式提出加入形數調整參數，可以提供未來評估立木材積之參考。近年來，在森林調查工作已逐漸導入無人機、光達、影像處理等智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。光達與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。

## 二、執行成果英文摘要：

Forest resource inventory is one of the important tasks to collect data and dynamic trends of forest. The log scale measurement is the basic data for wood harvesting, utilization and economy. The data is the key information that closely related with carbon storage, forest healthy, decision-making and support forest sustainable management. In traditional ground sample inventory, the investigators use traditional tools to measure trees and collect the characteristics data (including the number of trees, the breast height diameter, and the height of the trees) by field operations in forest. The traditional forest resource inventory is time-consuming and labors cost, it increases the cost of forest management and wood harvesting. It is an issue that must be faced. In view of this, to solve the labor-intensive problem of forest inventory and log scale measurement methods. The program will introduce new smart technology for forest resource inventory and log scale measurement, to improve the accuracy of data collected. In recent years, smart technology in drones, LiDAR, and smart measuring instruments are rapid increase. They already have miniaturization and capacity of various storage media, have made data collection more efficient and accurate. The program expects to improve the current methods of forest inventory and log scale measurement through introducing innovative smart instruments, to improve the efficiency and ensure accurate forest data, dynamics and future trends. The goals of this





program are (1) To evaluate the feasibility of smart technology tools for improving forest inventory and log scale measurement, (2) To review the current calculation equations for timber volume estimation, and (3) To apply smart technology to improve log scale measurement, (4) To use drone/Lidar technology construct 2D/3D spatial information of plantation forests, and (5) To enhance forestry workers using innovation inventory technology by workshop training. It is an important task for forest operations such as new planting and afforestation in the future. This program expect a smart management application system for collecting forest data with drones, LiDAR technology and timber volume data and smart technology, provide forest environment information through new smart technology and digital methods.

### 三、計畫目的：

- (1) 評估導入智慧科技工具改善林木資源調查與原木檢尺技術之可行性1式。
- (2) 盤點材積式與運用智慧科技工具改善人工林立木材積估算方法。
- (3) 應用智慧化科技改善原木檢尺技術
- (4) 運用無人機技術建構針葉樹人工林2處林分層級2D/3D空間資訊。
- (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。

### 四、重要工作項目及實施方法：

- (1) 評估導入智慧科技工具改善林木收穫之前置作業調查技術

新智慧科技工具與測量技術的發展，許多個人移動設備的計算效能提升，改變應用在森林資源調查工具，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) 盤點現有材積式與運用智慧科技工具改善人工林立木材積估算方法

人工林立木材積估算，係為收穫前置作業的重要調查工作，而影響形數之因子相當多，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。所以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。本研究擬針對台灣4種重要的人工造林樹種，包括分兩年度分別針對針葉樹與闊葉樹的造林樹種，建構智





慧工具的立木材積估算標準程序，第一年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

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，透過影像辨識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。本計畫預定引進檢尺相關應用程式軟體，並選擇台灣針葉樹與闊葉樹造林各2種樹種進行原木檢尺測定，由於原木的橫斷面顏色會受到樹種的影響，可能會造成應用軟體使用上的限制，故引入應用軟體需要評估其對於台灣原木檢尺應用的可行性，進行可行性評估，並與傳統方法之材積精度進行比較。

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

運用無人機技術或相關光達技術配合本研究選定針葉樹與闊葉樹人工林樣區，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，建構第一年以針葉樹人工林為主要對象，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。

## 五、結果與討論：

本計畫「應用智慧化科技改善林木收穫作業調查技術」為兩年期計畫，於111年度工作項目包含針對柳杉、台灣杉兩樹種進行智慧型工具的實地評測，第一個部分為改善林木收穫前的立木調查技術與方式，另一個部分為引進新型的木材檢尺工具，探討及評估引進的智慧工具的實用性、精確性及作業效率，以及與以往調查工具和調查方法上的差異性，以供未來在長期森林經營計畫上可以達到節省人力資源及增加作業效率等目標；以及盤點現有材積式運用現有智慧工具改善人工林立木材積的估算方法，以應未來之趨勢達到可以精準估計材積提供未來擬定森林經營計畫或計算二氧化碳當量的重要數據；最後為利用無人機與光達技術進行3D數據資料的收集，將傳統的紙本調查資料透過數位化的方式典藏特定時期的森林環境資訊，提供具有可複查





性的資料在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。

歸納整理本計畫所執行的各工作項目成果如下：

## 一、引進智慧工具

### 1. 立木調查

於立木調查本團隊於太平山與阿里山的柳杉、台灣杉人工林造林第一共設置了6個樣區，總共評估了6種智慧工具，包含胸徑測量工具數位輪尺(Haglof MDii)、智慧捲尺(Bagel-003)和樹高測量工具Nikon Forestry ProII(Nikon)、Haglof GeoVertax及iPin Ruler，經辦理森林創新調查工作坊後與第一線調查人員討論進行綜合評估，Haglof MDii因體積太大攜帶不易、Haglof GeoVertax使用上不直觀學習門檻太高和iPin Ruler測量誤差會因人為使用方式變大、續行不足等因素而沒有進入到最後的樣區實地評測。而本團隊為了解不同掃描方式對森林內3D資訊蒐集與建立的影響，特別針對立木調查設計了四種不同的手持式光達掃描方式，分別為方形掃描法、八字形掃描法、日字形掃描法與中心點掃描法，最後將各掃描法與胸徑尺和智慧捲尺所調查到的胸徑及樹高數據統整後做為上述智慧工具的評估資訊。

經實地評測過後發現於胸徑測量的部分不論是智慧捲尺還是光達所蒐積的資料經T-test檢定皆沒有顯著的差異，其中智慧捲尺所測得的數據與胸徑尺最為相近，其次依序為方形掃描法、八字形掃描法最後為中心點掃描法。於樹高部分Nikon與光達掃描法所測得之數據經T-test檢定過後幾乎沒有顯著差異，僅於太平山樣區一中Nikon與光達八字形掃描法出現顯著差異， $p$  value為0.004，但同樣在該樣區中利用無人機所測得之林分高為17.43，其值與光達八字形掃描法較為相近。

於手持式光達的部分，在實地評測初期就發現日字形掃描法會有嚴重的殘影所以在後續的評測終究移除掉該掃描法，而方形與八字形掃描法所蒐集到的數據較為集中，中心點掃描法所蒐集到的數據則較為發散，且在胸徑的部分與胸徑尺所測得之數據RMSE最大可以來到15公分。而在山區中平地難尋，在本次實測中方形掃描法為最萬用的掃描方式，而中心點掃描法則會出現樹幹點雲闕漏甚至是林木點雲無法成形進一步出現林木缺失的情形。

### 2. 原木檢尺

於原木檢尺的部分本團隊於太平山、二萬坪臨時貯木場、根源木材廠及台大實驗林內茅埔營林區22林班，初期一共評估了6種應用程式Timbeter、iFovea Pro、MOTI、mScale及sScale，最後考慮到是否有綁定特殊機器和是否有中文介面等因素，僅Timbeter有加入到後續的實測當中，與智慧輪尺(Haglof MDii)、智慧捲尺(Bagel-003)和手持式光達一同進行評估。

本次實地評測因二萬坪臨時貯木場有當時原木的台帳故以該台帳為真值，其餘地方皆以智慧捲尺所測量之數據為真值，在後續T-test檢定的結果中出現顯著差異的地點也是在二萬坪臨時貯木場，經資料比對發現材堆有少數紙本數據與另外兩者差異甚大，有可能為當初量測或記錄謄寫時錯誤所導致。

直接測量的工具如智慧捲尺及智慧輪尺其在原木材堆直徑的調查上與傳統的調查方法並無二致，但在資料的紀錄上智慧工具則有較大的優勢。而Timbeter與光達在原木材堆的資料精度上皆與原木的擺放整齊度有一定的關係，Timbeter在擺放整齊的材堆所測得的數據精度較高，而在擺放有前後參差不齊的原木材堆上其RMSE也較大，原因為與比例尺在不同平面的關係導致其胸徑換算會出現誤差，而光達在擺放較整齊的平面上若遇到材堆堆置緊密的情況下容易誤判原木邊緣的範圍進而導致其測量精度下降。

智慧工具加入調查工作中為現有的調查方式帶來巨大的改變，帶有儲存功能的智慧工具可以省去野外記錄的人力，也配合各種配套軟體的發展漸漸的也能省去室內作業的時間，同時避免在數據登打時出現錯誤的機會，而光達則是可以將林分整個複製回室內進行測量作業的新型作業方式，平均收集完一個樣區的資料只需要耗費10分鐘，其產生的點雲資料具有可複查性，這使的在大範圍調查作業的時程安排上可以更有彈性，但智慧工具相較於傳統的測量儀器使用上較





為不值觀，在調查人員培訓初期需要花費一定的時數進行培訓，才可以在往後的調查工作上取得更高的精度及效率。

## 二、盤點材積式

本團隊以第三次森林資源調查所公布的材積式，其為期刊論文與林務局使用最為廣泛的材積式，以柳杉與台灣杉進行模擬不同胸徑與樹高，經模擬結果顯示當固定胸徑調整樹高，則形數的變化較大，顯示材積式受到林木樹高的影響顯著。本研究於宜蘭大學育林研究室使用蒐集先前的試驗樣本，利用拔薛法進行不同林分密度與胸高形數的模擬，以第三次森林資源調查的通用材積式作為調整式，建立出柳杉與台灣杉在不同形數變化時推估林分材積時建議之形數調整參數表，其中柳杉不管是使用第三次森林資源調查的材積式與通用材積式，在胸高形數自0.35-0.55範圍內，皆呈現良好的線性關係而台灣杉因本研究所使用之數據樣本分布的關係在胸高形數大於0.53時會出現材積比例下降的趨勢，故部分胸高形數大於0.53，所計算的材積比例應不納入參考與使用。而本研究透過蒐集的圓盤資料所建置的柳杉材積式為 $V=0.0000508568 \times DBH^{2.16945} \times H^{0.68741}$ ，台灣杉材積式為 $V=0.0000005057 \times DBH^{2.22055} \times TH^{0.41436}$ 。

## 三、建構無人機2D/3D環境資訊

利用無人機建立森林環境資訊做為大面積調查之輔助資料為相當有效率的方式之一，在太平山疏伐作業中偵測出實際伐採面積為2.89ha，且在伐採蓄積量的推估上也是以無人機資料所推估的1384.10m<sup>3</sup>最為相近，羅東林區管理處所公告的利用材積為1312m<sup>3</sup>，利用相同的估算方法推估台大實驗林內茅埔營林區22林班地每公頃蓄積量為296.02m<sup>3</sup>。而利用無人機不僅可以透過其產製的高程模型計算林分蓄積量，也可以利用其建立的3D模型作為不同時期林份資績的儲存方式，同時利用該模型能測量出單木樹高、林分體積、路邊材堆的材積等。

## 六、結論：

本研究為改善林木收穫前的立木調查與原木檢尺的作業效率與精確度，在本年度導入了測量胸高直徑與樹高的智慧型工具，並且選定太平山的柳杉與阿里山的台灣杉人工林與原木堆檢尺進行智慧型工具的實地評測。總共針對胸高直徑、樹高測量與原木檢尺作業項目，分別已完成評估3種、3種與5種智慧型工具，同時輔以手持光達測量技術進行比較。

1. 智慧工具的部分，由各項評估的結果顯示，胸徑測量的部分以智慧捲尺所測得的數據與胸徑尺最為相近，樹高的測定擇以光達有相對較佳的精度表現，雷射測距儀容易受到林分冠層遮蔽的影響而產生測量誤差。顯示選定適當的智慧工具，可有效的改善精確性及作業效率，減少野外調查時的誤判、資料記錄錯誤與內業登打錯誤等問題的發生，並達到數據分享的功效，可提供未來作為林業數位轉型的重要基礎。智慧性工具可以優化調查工作的人力配置，在長期森林經營計畫上可以達到節省人力資源及增加作業效率等目標。除了智慧型工具，本研究亦透過現地調查方式，導入手持式光達，為探討不同掃描方式對森林內3D資訊蒐集與建立的影響，特別針對立木調查設計了四種不同的手持式光達掃描方式，分別為方形掃描法、八字形掃描法、日字形掃描法與中心點掃描法，結果以方形掃描法可提供良好的測量精度與資料蒐集時效性，可提供後續光達技術應用於林木收穫做業調查技術的參考。光達除了具有高度的精確性外，各項的測量作業具有高度的再現，可以數位化保存調查林分三維空間資料，提供各種林分作業前後期的比較。

2. 原木檢尺的部分本團隊於太平山、二萬坪臨時貯木場、根源木材廠及台大實驗林內茅埔營林區22林班，初期一共評估了6種應用程式，其中以Timbeter具有良好的測量實用性與精確度，透過手機或平板擷取原木堆影像，使用上非常直覺與方便，可以有效率的透過AI程式判釋大量的原木端面直徑，並提供儲存、調用、分析與輸出報表的功能，可提升原木檢尺作業的效率。





3. 本研究盤點現有材積式，透過拔靴法探究人工林立木材積式，在林木胸高形數變化時所產生的影響，並提出調整參數，期望可利用既有的材積式，達到因應不同區域之林分材積估算之目的。另外本研究亦蒐集樹幹解析圓盤，並以非線性迴規模形建置柳杉材積式為 $V=0.0000508568 \times DBH^{2.16945} \times H^{0.68741}$ ，及台灣杉材積式為 $V=0.0000005057 \times DBH^{2.22055} \times TH^{0.1436}$ 。以上相關成果，期望未來可提供各區林木收穫調查作業、森林經營計畫或計算二氧化碳當量的重要數據。
4. 智慧工具加入調查工作中為現有的調查方式帶來巨大的改變，帶有儲存功能的智慧工具可以省去野外記錄的人力。但智慧工具相較於傳統的測量儀器使用上較為不值觀，在調查人員培訓初期需要花費一定的時數進行培訓，才可以在往後的調查工作上取得更高的精度及效率。本計畫於本年度辦理2場「智慧型工具於林分資源調查應用」的工作坊，提供林務局、林區管理處與相關領域人員瞭解智慧型工具的優點與限制，期望培訓新一代的林業從業人員，增加其對智慧科技的認識，並可直接於實際工作上應用。
5. 建構無人機2D/3D環境資訊，本計畫利用無人機蒐集林分收穫前後期的資料，建置正射影像與數值高程模型資料(包括數值表面高程模型、數值地形模型與冠層高程模型)，並充分運用這些空間資訊在太平山疏伐作業中偵測出實際伐採面積為2.89ha，且在伐採蓄積量的推估上也是以無人機資料所推估的1384.10m<sup>3</sup>最為相近，羅東林區管理處所公告的利用材積為1312m<sup>3</sup>。利用無人機與光達技術進行3D數據資料的收集，將傳統的紙本調查資料透過數位化的方式典藏特定時期的森林環境資訊，提供具有可複查性的資料，並有效率監測林分尺度的空間資料，在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與經營管理的重要參考圖資。

## 七、參考文獻：

- 王亞男、周宏祈、王介鼎、陳秋萍(2010)。溪頭三叉崙柳杉生長量及碳貯存量效益之研究。臺大實驗林研究報告，24(2)，157-167。
- 王培蓉、汪大雄、林俊成(2013)。台灣柳杉造林歷史回顧及經營方式探討。中華林學季刊，46(2)，179-188。
- 石哲宇(2014)。應用生長收穫模式模擬不同栽植密度柳杉人工林胸高斷面積生長之探討。國立中興大學森林學系碩士班碩士學位論文。
- 汪大雄(2012)。赴美國研習森林生長模式之發展和森林結構空間數量化之研究報告。行政院農業委員會林業試驗所出國報告。
- 李良山(2007)。應用系統動力學軟體探討牡蠣在瀉湖中對生態環境的影響。國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文。
- 卓志隆(2018)。國產材供需與利用之問題現況。林產工業，37(2)，121-126。
- 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬(2015)。第4次全國森林資源調查成果概要。台灣林業，41(4)，3-13。
- 邱祈榮、林俊成、何幸耘(2012)。REDD施行對臺灣進口原木與制裁衝擊之評估。中華林學季刊，45(2)，271-288。
- 邱祈榮(2019)。臺灣林業的升級之路-從林業永續多元輔導方案看森林經營模式運用。豐年雜誌，69(9)，64-72。
- 林子玉(1963)。林分生長量表簡易編製法及預測方法比較之研究。農林學報，12，142-174。
- 林俊成、王培蓉、徐韻茹(2021)。應用智慧林業發展新創事業促進森林效益。林業研究專訊28(4):33-39。
- 林俊成、李國忠、林裕仁(1999)。柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究。臺大實驗林研究報告，13(1)，51-60。





- 林俊成、邱祈榮（2017）。臺灣進口實木產品曝險程度分析。林業研究專訊，24（6），44-49。
- 林俊成、陳幸君、吳孟珊（2015）。1991~2013年台灣木材伐採與生產量分析。台灣林業科學30（2）：121-30。
- 林俊成（2018）。2017-2030年全球森林策略計畫。台灣林業，44（4），26-33。
- 林務局（1995）。第三次台灣森林資源及土地利用調查。台灣省農林廳林務局印。
- 林務局（1998）。全民造林運動手冊。臺北：行政院農業委員會林務局。
- 林務局（2003）。大雪山林業史話。臺中：行政院農業委員會林務局。
- 林務局（2016）。第四次森林資源調查報告。擷取自：<https://www.forest.gov.tw/0002393>。最後擷取日期：2020/04/01。
- 林華慶（2017）。永續林業・生態臺灣。台灣林業，43（2），10-19。
- 周楨（1968）。森林經理學。臺北：正中書局。
- 姚鶴年（1987）。臺灣主要樹種立木材積求積式之解析。台灣林業，13（5），3-13。
- 財團法人農業科技研究院農業政策研究中心編譯（2017）聯合國2030永續發展目標（SDGs）簡介。
- 張森、陳麗琴、任憶安（1897）。林務局普通施業地人工林生長與收穫之分析。林業試驗所研究報告季刊，2（1），17-29。
- 許立達（2011）。國產材產銷分析及資訊系統建置規劃。行政院農業委員會林務局委託研究計劃系列，100-00-5-22。
- 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處（2019）。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林經營計畫（民國一〇七年七月至民國一一六年十二月）。南投：國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處編。
- 陳忠義、林亨勳、王經文、王亞男（2017）。植林減碳-淺談森林的碳吸存。自然保育季刊，99，3-15。
- 陳朝圳、陳建璋（2015）。森林經營學。新北市：正中書局股份有限公司。
- 陳麗琴、林俊成、吳俊賢、黃進睦、陳溢宏（2012）。臺灣地區木質材料需求量之現況分析。林業研究季刊，34（4），287-296。
- 陳廷安、黃謹毅、曾榮崧、鍾智昕（2022）應用手持式光達於都市林林木碳儲存量調查之研究-以宜蘭運動公園為例。111年森林資源永續發展研討會。
- 黃裕星（1999）。全民造林與提高木材自給率之探討。臺灣林業，25（4），4-7。
- 黃凱洛、王兆桓、顏添明（2011）。臺灣主要四種針葉樹人工林地位指數建立之研究。中華林學季刊，44（4），553-566。
- 馮豐隆、吳昶清（2002）。森林生長模式之發展及應用。台灣林業，28（5），14-19。
- 馮豐隆、林子玉（1991）。百分數法在直徑分布模式上應用之研究。興大實驗林研究報告，13（2），65-80。
- 馮豐隆、林子玉（1992）。台灣林分結構生長模擬模式系統的建立。興大實驗林研究報告，14（2），55-58。
- 馮豐隆<http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/flfeng/lesson/284.pdf>（access in 2022/05/05）
- 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。
- 彭炳勳、陳建璋、蔡佳彬、魏浚紘、黃睦宇、廖和順、羅卓昱、陳朝圳（2022）光達點雲技術應用於人工林智慧化管理。111年森林資源永續發展研討會。
- 楊筑雲（2015）。建構台灣林地蓄積量之估算-以苗栗縣為例。國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系碩士論文。







- 楊榮啟 (1975)。台灣大學實驗林產柳杉之生長與收穫的研究。台灣大實驗林研究報告，116，1-149。
- 楊榮啟 (1987)。森林生物統計學。國立編譯館。661頁。
- 管立豪 (2003)。國有林地分區及經營規範建立。農政與農情，135，41-48。
- 劉慎孝、楊寶霖、徐煥榮、陳松藩 (1955)。臺灣柳杉林收穫表。臺灣省林業試驗所合作報告，1。臺北：臺灣省林業試驗所印。
- 劉慎孝 (1975)。台灣柳杉林分理想立木度之查定研究。農林學報，24，129-142。
- 劉知好、王兆桓 (2008)。以林齡-蓄積量模式估算柳杉及檜木人工林的碳吸存量。宜蘭大學生物資源學刊，4 (1)，35-45。
- 劉業經、林文鎮、林維治 (1979)。台灣經濟樹木育林學 (一)。臺中：國立中興大學教務處出版組。
- 劉興旺、王亞男、蔡明哲、洪志遠、楊勝驛、鄭景鵬 (2012)。溪頭地區臺灣杉人工林不同林齡胸徑與樹高生長之研究。臺大實驗林研究報告，26 (2)，103-111。
- 臺灣大雪山林業公司 (1966)。大雪山林業公司大製材工廠經營之研討。臺中：臺灣大雪山林業公司編。
- 鄭景鵬、楊勝驛、王亞男、蔡明哲、邱祈榮 (2014)。溪頭地區柳杉長期樹高生長與胸徑-樹高曲線之研究。臺大實驗林研究報告，28 (1)，17-29。
- 鄭智馨、洪志祐、黃于軒、李俊佑、陳秋萍、白創文 (2014)。溪頭台灣杉人工林之林分特性與發展。中華林學季刊，47 (2)，155-168。
- 顏添明 (1997)。台灣大雪山地區紅檜人工林生長收穫系統之研究。國立中興大學森林學研究所博士論文。178頁。
- 顏添明、李久先 (1998)。七種生長模式模擬紅檜人工林疏伐林分單木胸高斷面積生長適用性之比較。中華林學季刊，31 (1)，13-24。
- 簡義倫 (2010)。日式伐木系統與美式伐木系統之比較—以八仙山林場及大雪山林業公司為例。人文暨社會科學期刊，6 (2)，35-45。
- 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。
- 劉政諺、郭哲源、鍾智昕 (2022) 無人機光達對於萃取林木特徵之影響。111年森林資源永續發展研討會。
- 魏浚紘、吳守從、黃韋傑、謝依達、鍾玉龍、陳朝圳 (2012) 影像二值化在空載光達影像樹冠孔隙分類上之應用。地理學報 第六十六期：1-14 (2012)
- 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 (2021) 應用航拍影像與空載光達資料分析編號第2703號保安林防風功能。行政院農業委員會林務局羅東林區管理處研究報告。
- 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 (1985)。林相變更之柳杉造林地的林分構造與收穫。興大實驗林研究報告，6，73-91。
- 大隅真一 (1976)。RICHARDS ソ生長函數シガソ林木生長デソ應用。日本林學大會論文集87回。
- Asner G. P., Kellner J. R., Kennedy-Bowdoin T., Knapp D. E., Anderson C., Martin R. E. (2013) Forest canopy gap distributions in the southern Peruvian Amazon. PLoS ONE. 8, 4, e60875. doi:10.1371/journal.pone.0060875
- Aguiar, A.S.; dos Santos, F.N.; Cunha, J.B.; Sobreira, H.; Sousa, A.J. (2020) Localization and Mapping for Robots in Agriculture and Forestry: A Survey. Robotics 2020, 9, 97. <https://doi.org/10.3390/robotics9040097>



1111347



- Arnó, J.; Vallès, J.M.; Llorens, J.; Sanz, R.; Masip, J.; Palacín, J.; Rosell-Polo, J.R. Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner. *Precis. Agric.* 2013, 14, 290-306.
- Adame, P., Del Río, M., & Cañellas, I. (2010). Model individual-tree mortality in Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) stands. *Annals of forest science* 67,810. <https://doi.org/10.1051/forest/2010046>.
- Alenius V., Hökkä H., Salminen H., & Jutras S., 2003. Evaluating estimation methods for logistic regression in modelling individual-tree mortality. In: Amaro A., Reed D., and Soares P.(Eds.), *Modelling forest systems*, CAB International, Wallingford, 225-236.
- Avery, H. E. & Burkhart, H. E. (1994) *Forest measurements*. 4th ed. McGraw-Hill. Inc.
- Bruun Jensen, C (2015) Experimenting with political materials: Environmental infrastructures and ontological transformations. *Distinktion: Journal of Social Theory* 16(1): 17-30.
- Cao, L.; Liu, H.; Fu, X.; Zhang, Z.; Shen, X.; Ruan, H. (2019) Comparison of UAV LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry Point Clouds for Estimating Forest Structural Attributes in Subtropical Planted Forests. *Forests*, 10, 145.
- 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.
- Chung, C.-H., Wang, C.-H., Hsieh H.-C., Huang, C.-ying (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.
- Cheng, C. H., Hung, C. Y., Chen, C. P., & Pei, C. W. (2013) Biomass carbon accumulation in aging Japanese cedar plantations in Xitou, central Taiwan. *Botanical studies*, 54 (1) , 60.
- Chiu, C. M., Chien, C. T., & Nigh, G. (2016) Density-dependent mortality in *Taiwania cryptomerioides* and *Chamaecyparis formosensis* stands in Taiwan. *Cogent Environmental Science*, 2(1), 1148301.
- Clutter, J. L. (1963) Compatible growth and yield models for Loblolly pine. *Forest Science* 9(3), 354-371.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H. & Bailey, R. L. (1983) *Timber management : A quantitative approach*.
- Costanza, R., & Voinov, A. (2001) Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III. *Ecological Modelling*, 143, 1-7.
- Gao, Q., Kan, J. (2022) Automatic Forest DBH Measurement Based on Structure from Motion Photogrammetry. *Remote Sens.* 2022, 14, 2064. <https://doi.org/10.3390/rs14092064>
- 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 Sens.* 13, 3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- Gabrys, J. (2020). Smart forests and data practices: From the Internet of Trees to planetary governance. *Big data & society*, 7(1), 2053951720904871.
- FAO (2016). *Sustainable Development Goals*.





- Forrester, J. W. (1993) System dynamics and the lessons of 35 years. In A systems-based approach to policymaking. Springer, Boston, MA., 199-240.
- Fukuda, M., Iehara, T., & Matsumoto, M. (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management*, 184, 1-16.
- Henning, J. G., Mercker, D. C. (2009). Conducting a simple timber inventory. Department of Forestry, Wildlife and Fisheries, Institute of Agriculture, University of Tennessee, USA.
- Hasenauer, H. (2006) Sustainable forest management: growth models for Europe (No. 634.92 S964) . Berlin : Springer.
- Hazarika, R & Jandl, R. (2019) The nexus between the Austrian forestry sector and the Sustainable Development Goals :A review of the interlinkages. *Forests*, 10 (3) , 205.
- Hiroshima, T., Toyama, K., Suzuki, S. N., Owari, T., Nakajima, T., & Ishibashi, S. (2020) Long observation period improves growth prediction in old Sugi (*Cryptomeria japonica*) forest plantations. *Journal of Forest Research*, 25 (3) , 183-191.
- Husch, B., Miller, C. I. & Beers, T. W. (1982) *Forest mensuration*. 3rd ed. New York: The Ronald Press Co., 276-364.
- Labbe, M., Michaud, F. (2019) Rtab-map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. *Journal of Field Robotics* 36(2) 416-446
- Lefsky, M.A.; Cohen, W.B.; Parker, G. G.; Harding, D. J. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*. 2002, 52, 19-30.
- Lam, T. Y., & Guan, B. T. (2020) : Modeling stand basal area growth of *Cryptomeria japonica* D. Don under different planting densities in Taiwan. *Journal of Forest Research*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/13416979.2020.1733171>.
- Liang X, Kankare V, Hyyppä 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 J Photogramm Remote Sens* 115:63-77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997) A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95 (3) , 209-228.
- Liu, J., & Ashton, P. S. (1995) Individual-based simulation models for forest succession and management. *Forest Ecology and Management*, 73, 157-175.
- Mokroš, M., Mikita, T., Singh, A., Tomaščík, J., Chudá, J., Wyk, P., Kuelka, K., Surový, P., Klimánek, M., Ziba-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.
- Pierzchaa, M., Giguère, P., Astrup, R. (2018). Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 217-225.
- Piermattei, L.; Karel, W.; Wang, D.; Wieser, M.; Mokroš, M.; Surový, P.; Koren, M.; Tomaščík, J.; Pfeifer, N.; Hollaus, M. (2019) Terrestrial Structure from Motion Photogrammetry for Deriving Forest Inventory Data. *Remote Sens*. 11, 950





- Puliti, S.; Dash, J.P.; Watt, M.S.; Breidenbach, J.; Pearse, G.D. (2019) A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *For. An Int. J. For. Res.*
- Pinho, TM, Coelho, JP, Oliveira, Jet al. (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.
- Peet R.K. & Christensen N.L., 1987. Competition and tree death. *Bioscience* 37 : 586-595.
- Piao, T., Chun, J. H., Yang, H. M., & Cheon, K. (2014) Negative density dependence regulates two tree species at later life stage in a temperate forest. *PloS one*, 9 (7) .
- Pothier, D., & Mailly, D. (2006) Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation. *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 1631-1640. <http://dx.doi.org/10.1139/x06-062>.
- Pretzsch, H. (2009) Forest dynamics, growth, and yield. In *Forest dynamics, growth and yield*, 1-39. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ritter, T.; Schwarz, M.; Tockner, A.; Leisch, F.; Nothdurft, A. (2017) Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. *Forests*, 8, 265.
- Ryding, J.; Williams, E.; Smith, M.J.; Eichhorn, M.P. Assessing Handheld Mobile Laser Scanners for Forest Surveys. *Remote Sens.* 2015, 7, 1095-1111. <https://doi.org/10.3390/rs70101095>
- Tomašík, J.; Salon, Š.; Tunák, D.; Chudý, F.; Kardoš, M. (2017) Tango in forests-An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Comput. Electron. Agric.* 141, 109-117.
- Shao, J., Zhang, W., Mellado, N., Wang, N., Jin, S., Cai, S., Lei L., Lejemble T., Yan, G. & Jin, S. (2020). SLAM-aided forest plot mapping combining terrestrial and mobile laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 214-230.
- Sharma, M., & Parton, J. (2007) Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*, 249, 187-198.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., & Skovsgaard, J. P. (1996) Conclusions and summary. In *Growth trends in European forests*, 369-372. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sweda, T. & Koide, T. (1981) Applicability of growth equations to the growth of trees in stem radius ( I ) application to white spruce. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 63(4), 113-124.
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw Jr, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons.
- Walford, A (2012) Data moves: Taking Amazonian climate science seriously. *Cambridge Anthropology* 30(2): 101-111.
- Vandendaele, B.;Martin-Ducup, O.; Fournier, R.A.; Pelletier, G.; Lejeune, P. (2022) Mobile Laser Scanning for Estimating Tree Structural Attributes in a





Temperate Hardwood Forest. *Remote Sens.* 2022,14, 4522. <https://doi.org/10.3390/rs14184522>

Yang, B.; Fang, L.; Li, J. Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2013, 79, 80-93.

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.

