

研究報告

樹木胸徑調查品質評估

邱祈榮¹⁾ 黃紀晴^{2,3)}

摘要

樹木具有多樣的生態系服務，在氣候變遷衝擊加劇以及社會對自然為本解方關注度的提升下，森林及都市林的經營管理更顯重要。然而，現地樹木調查經常受人為誤差影響，且目前臺灣缺乏對於人員調查品質與資料的檢核標準，因此需要一套管理機制進行品質控制與保證，並發展輔助工具提升量測精度。本研究設計一試驗評估調查人員量測品質表現，以盒鬚圖法篩選的離群值數量為評量依據，評估自製輔助工具—定位桿—對於胸徑量測精度的影響。同時，考量樹型、徑級兩變因進行資料分析，並提出建議設定的容許誤差範圍。研究結果顯示，離群值篩選機制可快速評估調查品質良窳，當設定MQO 90%為合格標準，本次試驗約有80%調查人員達成。以標準差與變異係數檢視胸徑量測精度，結果顯示使用定位桿有助於提升整體量測表現，而其對S型樹木可有最大提升。最後，根據實驗結果提出容許誤差設定的兩標準：一參考盒鬚圖內籬，設定中位數 ± 0.68 cm為容許誤差；二參考標準差，設定平均胸徑 ± 0.56 cm為容許誤差，作為臺灣樹木胸徑調查品質標準之參考，並使樹木調查指引與規範更加完整。

關鍵詞：樹木調查、品質控制與品質保證、胸高直徑、容許誤差。

邱祈榮、黃紀晴。2023。樹木胸徑調查品質評估。台灣林業科學38(4):303-19。

¹⁾ 國立臺灣大學森林環境暨資源學系，副教授。10617臺北市大安區羅斯福路四段一號 Associate Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University. 1 Roosevelt Road, Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan.

²⁾ 國立臺灣大學森林環境暨資源學系，碩士生。10617臺北市大安區羅斯福路四段一號 Masters student, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University. 1 Roosevelt Road, Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan.

³⁾ 通訊作者 Corresponding author, E-mail: r11625044@ntu.edu.tw

2023年6月送審2023年10月通過Received June 2023, Accepted October 2023.

Research paper

Evaluation of the Quality of Measurement of Diameter at Breast Height of Trees

Chyi-Rong Chiou,¹⁾ Chi-Ching Huang^{2,3)}

【 Summary 】

Trees provide various ecosystem services. Given the impact of climate change and increasing focus on nature-based solutions, effective management of forests and urban forests is increasingly crucial. However, field tree inventory data often suffers from human errors, and there is a lack of standardized quality requirements for both data and collectors in Taiwan. A management system is needed to ensure quality control and quality assurance, and the development of tools is also needed to improve measurement precision. This study conceived an experiment to assess the measurement quality of collectors based on the number of outlier results detected using the boxplot method. We also developed a tool - breast height pole (BH pole) - to aid in measuring diameter at breast height (DBH) and evaluated its impact on measurement precision. We also conducted analyses taking into account different tree shapes and DBH classes, and proposed a suggested tolerance range. The results showed that the outlier detection mechanism facilitates rapid examination of inventory quality. When the measurement quality objective (MQO) was set to 90%, approximately 80% of collectors passed the test. Evaluation of measurement precision using standard deviation and coefficient of variation of the data revealed a high level of error in DBH inventory. The BH pole proved helpful in improving measurement precision, especially for S-type trees among the four tree types analyzed. Finally, we recommend two tolerance standards based on the results: the first utilizes the inner fence of the boxplot method, setting the tolerance as median DBH \pm 0.68 cm; and the second employs standard deviation, setting the tolerance as mean DBH \pm 0.56 cm. The research aimed to develop results to serve as a reference for establishing inventory quality standards in Taiwan, thereby complementing existing tree inventory guidance and regulations.

Key words: Tree inventory, quality control and quality assurance, diameter at breast height, tolerance.

Chiou CR, Huang CC. 2023. Evaluation of the Quality of Measurement of Diameter at Breast Height of Trees.

Taiwan J For Sci 38(4):303-19.

一、前言

隨著氣候變遷衝擊加劇，森林作為陸域生態系最大的碳匯，其吸收二氧化碳、減緩(mitigation)溫室效應潛力受到國際矚目；同時，森林亦具有淨化空氣、供給資源、孕育生物多樣性等生態系服務(ecosystem service)，在人類面對氣候風險、糧食危機、缺水等社會挑戰下提供自然為本解方(nature based solutions)機會。因此，森林以及都市林的經營管理更顯重要，而管理的首要步驟則是樹木資源調查。

現地樹木調查可幫助我們建立樹木基本資料，根據經營目標進行量測、監測工作，調查項目包含樹種、樹木位置、胸高直徑、樹高、樹冠幅等。同時，樹木調查仰賴大量人力，若調查流程、調查人員訓練等未有統一規範，量測結果經常受人為誤差影響。未經過品質檢視、複查的資料，其可信度則有待保留。為確保資料品質，我們需要一套品質管理系統。

在國家林業部門溫室氣體清冊編撰，須遵照政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)公布之國家溫室氣體清冊指南，對於資料品質進行品質控制(quality control, QC)以及品質保證(quality assurance, QA)(Eggleston et al. 2006)。QC為檢查資料的準確性及文件保存工作，由編製單位各自負責品質控管；QA則以科學的角度驗證及評估數據的品質以及數據的取得是否符合其計算方法，由外部單位進行審查。

而根據美國森林調查與分析(Forest Inventory and analysis)規範，建議採用兩種指標建立森林調查品質稽核標準：一為容許誤差(tolerance)，對於量測結果訂定誤差容許範圍，可根據資料類型以級別、絕對值、比例等方式設定。當稽核發現量測結果超過容許誤差範圍，則予以紀錄；二為量測品質目標(Measurement Quality Objectives, MQO)，對於不同量測項目訂定符合容許誤差的比例，意指調查者在一段時間內調查的正確率，作為調查品質的稽核標準。當量測品質目標不符

合設定值，應採取適當措施加以補救。

胸高直徑(diameter at breast height, 後簡稱胸徑)為樹木調查常見項目，可藉此推估樹木截面積、材積，並透過定期量測推估生長量、碳吸存等功能。而胸徑屬於量測項目，相較於辨識項目(如樹種)或目視估算項目(如森林結構、鬱閉度)之技術門檻較低(Winter et al. 2008)，因此可藉由調查人員的訓練來挹注調查量能。然而，由於無法掌握缺乏經驗的調查者其可達成的量測精度，調查品質的研究與管理更顯重要(Kitahara et al. 2010)，國外亦有相關文獻針對胸徑量測品質進行分析討論(Kitahara et al. 2010, Roman et al. 2017, Westfall et al. 2021)。

然而，目前臺灣樹木調查品質相關規範仍待發展，為提供規範制定參考依據，本研究設計一試驗評估調查人員調查品質表現，並與國外研究結果進行比較。此外，亦研發量測輔助工具定位桿，目的為提升胸徑量測精度(precision)，總括本研究目的有四：

1. 透過離群值篩選機制，快速評估調查人員調查品質良窳，作為調查人員是否適任之依據。
2. 評估定位桿對於提升量測精度效益。
3. 評估樣木型態對於量測精度的影響，分析因子包含樹型與徑級。
4. 提出臺灣樹木量測MQO與容許誤差設定的建議值。

二、材料與方法

(一)資料蒐集

筆者以國立臺灣大學森林環境暨資源學系111學年課程中學生參與樹木胸徑量測訓練的結果為研究材料，兩人一組共39組學生完成量測。訓練首先對學生進行約30分鐘操作講解，包含訓練流程、量測工具使用與量測規範。而後為約2小時的量測實作，每組學生需對選定之30株樹木逐一進行兩輪調查，一輪使用定位桿輔助量測、另一輪不使用定位桿，且不可有連續量測同株樹之狀況，避免誤差影響定位桿效益之評估。

1. 樣木選定

筆者首先於臺灣大學校園內，依照調查區域、樹種、樹木生長情形等因子選定30株樹木，分佈範圍以臺大生物多樣性中心周遭約100 m。樹木樹種選擇皆為喬木，挑選主幹明顯者為量測對象，樹種包含闊葉樹的欖仁、樟樹、錫蘭橄欖等，以及針葉樹種的臺灣肖楠、竹柏；樹木胸徑級介於12 cm至62 cm；而樹木生長情形則挑選較常見的4種樹型，分別為I型(直立)、S型(傾斜)、V型(1.3 m下分岔)、Y型(1.3 m上分岔)，數量依序為8棵、7棵、8棵、7棵，4種樹型對應量測標準位置示意如Fig. 1所示。由於本次研究目的之一為比較調查者對於4種樹型量測精度的差異，因此在樣木挑選上盡量以單一樹型特性為主，例如當分岔樹木同時有傾斜特性，則傾斜幅度相較於垂直線不可大於 10° ，以避免與S型樹木混淆。

2. 量測工具與規範

在胸徑調查上，筆者選用胸徑尺為工具，如Fig. 2所示。胸徑尺在量測上可提供高重複性(repeatability)(Kershaw Jr et al. 2016)，意指在相同量測條件下、對同一樹木進行調查的結果有較高一致性，因此適用於評估不同調查人員以及有無使用定位桿下調查品質之差異。使用胸徑尺時，首先需判別樹高1.3 m位置，可透過捲尺等量測工具確認，或仰賴經驗由身體特定部位判別高度。

而後將捲尺環繞、並貼齊於樹幹周圍量測。記錄時統一以公分為單位，最小讀數到0.1 cm，且不紀錄估計值。

林業對於樹木進行長期生長監測時，往往在樹木胸徑量測位置進行標記，確保日後進行重複量測時，能在相同位置進行量測，以減少因量測位置變動帶來的誤差。然而，位處於都市的行道樹或公園樹木，基於視覺景觀的考量，則會避免標記量測位置。基於此，本研究發展定位桿工具來協助調查者統一量測位置，預期其可減少樹木長期生長監測時因量測位置引起的誤差。定位桿以PVC管製成，其L型直角轉彎處設計離地1.3 m，即為胸高直徑所量測之高度，上方裝設水平氣泡儀與指北針於圓盤平台，如Fig. 3所示。

由於樹木外型隨樹種、生長環境以及個體差異等因素有所不同，若量測胸徑前未建立統一規範，量測結果可能因認知上落差產生差異。因此，筆者引用Kershaw Jr et al. (2016)胸徑量測標準為本次試驗量測的規範，其標準如Fig. 4所示。使用定位桿時，首先規定調查者面對統一方位，如本研究規範面對北方，此時調查者可利用平台上指北針確認北向，並站立於樹木南側，調整指北針於正北。當量測樹木為直立如Fig. 4 (a)，調查者可透過水平氣泡儀確認定位桿直立，此時定位桿L端短邊碰觸樹體的水管上緣即為胸徑量測

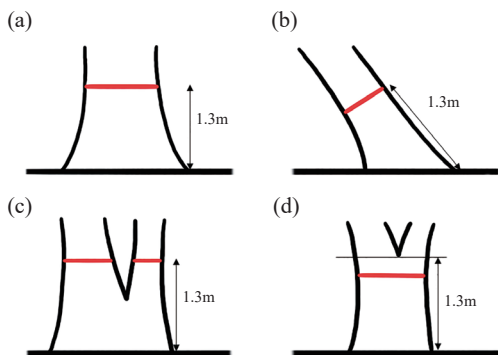


Fig. 1. Standard points for DBH measurement for the 4 tree types: (a) I type, (b) S type, (c) V type, (d) Y type. Note breast height is 1.3 m.



Fig. 2. DBH tape (Product: DCT120-12ft / 3.5m Diameter Pi Steel OD Tape Measure, The Perfect Measuring Tape Company).

的位置；當樹木生長於斜坡如Fig. 4 (b)，則統一於上坡處量測；當樹木為傾斜如Fig. 4 (d)，定位桿需與樹木傾斜方向平行，胸徑量測的位置則垂直於軸心；當樹木於1.3 m處或上方分岔如Fig. 4 (g)，為本研究定義之Y型樹型，量測位置需下移至胸徑尚未因分岔而增加之處；而當樹木於1.3 m下分岔如Fig. 4 (h)，即為本研究定義之V型樹型，分別紀錄各分枝之胸徑。本次量測樹木分岔數皆小於6，參考Monteiro et al. (2016)多主幹樹木胸徑公式，計算如公式1所示。DBH為胸高直徑 (diameter at breast height)，n為樹幹於1.3 m下分岔的數量。

$$DBH = \sqrt{\sum_{i=1}^n DBH_i^2} \dots\dots\dots(1)$$

定位桿使用目的為使樹木胸徑量測過程標準化，預期能使量測結果更加精準、降低量測誤差，其成效將於本研究結果與討論中闡述。

(二)資料分析

為評估調查人員量測品質與資料合格率，過去研究(Kitahara et al. 2010, Roman et al. 2017, Westfall et al. 2021)往往以專家學者或稽查小組調查數值為標準。然而，由於量測存在誤差，實務上並未能獲得每株樹的真值。因此本研究假設，

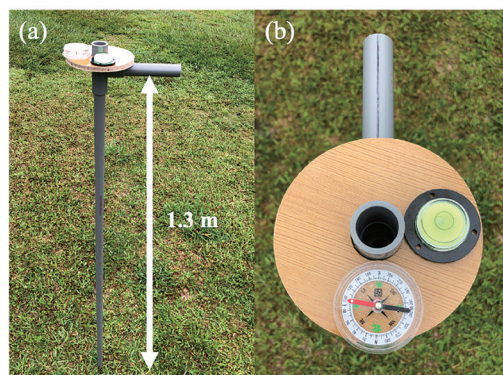


Fig. 3. BH pole (breast height pole): (a) the length of PVC pipe is 1.3 m, (b) round platform with a bubble spirit level and compass.

當量測數量越大，所得之量測平均越接近真值，並藉由多位調查者量測同一樹木之結果評估單一人員的調查品質。為分析數據的品質良窳，筆者以離群值(outlier)作為評估依據。離群值為一組數據中與多數數值有明顯分布差異的數值，本研究假設離群值主要源自於人為誤差，包含調查人員因調查流程、量測方法、個人因素所產生的誤差。

首先，以個別人員調查結果中離群值比例作為評估人員調查品質之依據，而後將數據排除離群值，避免誤差影響量測精度的分析效度，並進行定位桿效益評估、量測精度影響因子包含樹型與徑級之分析，最後藉由試驗結果提供容許誤差設定之建議值，研究架構如Fig. 5所示。

1.離群值篩選與MQO設定

常見篩選離群值的描述性統計方法包含盒鬚圖法、Hampel identifier法、標準化分數法等(Tam 2008)，由於本研究目的為以簡易、快速方式評估調查品質，因此選用較廣為人知的盒鬚圖法作為評估方法。

盒鬚圖法運用四分位數概念，將觀測資料由小至大排序，排名前25%數值稱為第1四分位數(Q1)；第75%數值則稱為第3四分位數(Q3)，而四分位距(Interquartile Range, IQR)即為Q1與Q3之

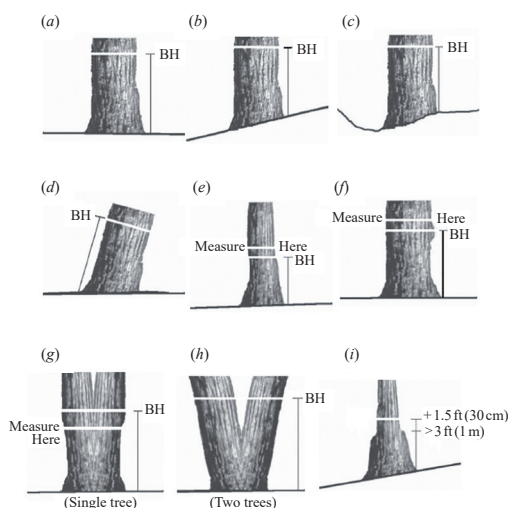


Fig. 4. Standard points for measurement of DBH (Kershaw Jr JA et al. 2016).

差。此外，內籬(inner fence)為距離 Q1與Q3外1.5個 IQR之值；外籬(outer fence)則為距離Q1與Q3外3個IQR之值；而上下鄰近值(adjacent value)則為內籬之外第一個數值，一般判斷離群值的標準包含內籬、外籬以及上下鄰近值等(Tam 2008)。本研究取內籬作為篩選標準，當數值位於上下內籬範圍之外，則視為極端值。對應概率密度函數，約有99.3 %資料位於內籬範圍內，如Fig. 6所示。應用此方法於篩選之優勢在於其排除最極端的數值，可減少錯誤量測影響到篩選機制的進行。然

而，Shiffler (1988)即指出盒鬚圖法之弱點，例如當具備一定樣本數的數據皆由相同數值組成，此時調動某一數值，無論調動幅度極小，仍會被判定為離群值；Schwertman et al. (2004)亦指出，對於常態或偏態分佈(asymmetric distribution)數據，需要更有彈性的方式制定離群值範圍。

針對調查者量測結果，本研究以離群值發生比率作為MQO，當調查者在所有量測中符合容許誤差的比率未達設定之MQO標準，則被視為不合格。首先，依照上述盒鬚圖法篩選離群值，並計算個別調查者在所有量測結果中離群值佔比，而後參考FIA國家核心現地調查指引中胸徑調查之MQO為95 % (FIA, 2022)，試設立95 %與90 %為MQO標準，意即離群值比例不可超過5 %與10 %，最後根據人員表現結果評估合適、具可行性的標準。

2.量測精度指標

本研究透過多人量測同一株樹木胸徑，計算該組數據標準差(standard)、變異係數(coefficient of variation)作為評估精度指標。標準差表示個別量測對樣本平均數的變異情形，也就是樣本間離散程度。當標準差小，代表不同調查者對同一株樹量測結果較為一致；反之則代表調查者對同一株樹量測差異大。變異係數亦表示樣本間離散程度，然而其考量不同數據間測量尺度差異，為一種相對的測度值。

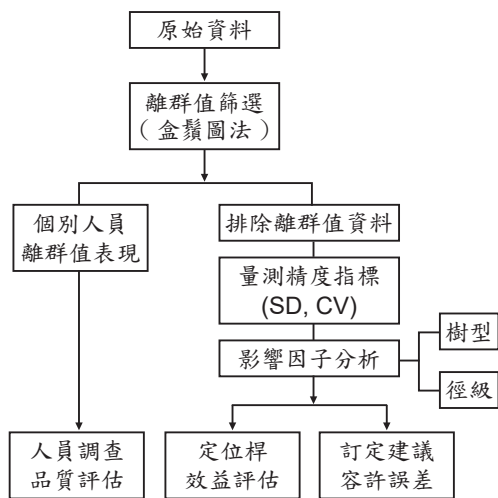


Fig. 5. Flowchart.

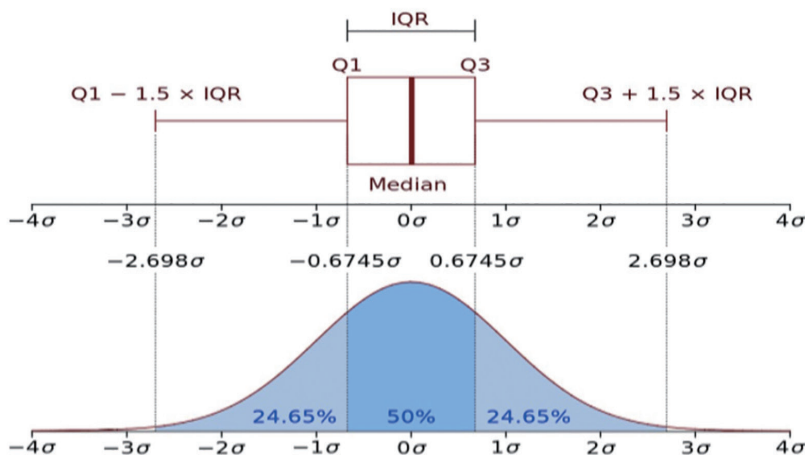


Fig. 6. Boxplot and a probability density function (Torkey et al., 2022).

考量標準差與變異係數數據本身具比例關係，以幾何平均數計算平均值，且該方法相較算數平均數較不會受到離群值影響，如公式2所示。G為幾何平均數，n為樣本數量，x為量測值。

$$G = \sqrt[n]{x_1 * x_2 \dots x_n} \dots\dots\dots(2)$$

為比較定位桿對於樹木量測精度影響，以數據標準差與變異係數作為統計值，計算使用定位桿時的調查精度相較於未使用之提升率，如公式3所示。為避免離群值干擾，將分別比較去除離群值前後，定位桿對於提升精度的表現。同時，以成對樣本T檢定檢視統計顯著性，設定p value標準為0.05。

$$\text{精度提升率(\%)} = \frac{(\text{未使用定位桿之統計值} - \text{使用定位桿之統計值})}{\text{未使用定位桿之統計值}} \dots(3)$$

3.容許誤差設定

根據研究假設，當資料經盒鬚法內籬排除離群值，則代表量測品質經初步檢驗、未有明顯誤差干擾，而後以排除離群值的資料，提供兩種容許誤差設定方法。一為再次進行盒鬚圖分析，統計中位數至上下內籬之幾何平均數，以作為容許誤差標準。二為以標準差作為容許誤差，假設資料為常態分佈，約有95.45%數據位於平均胸徑± 2個標準差。

三、結果

(一)離群值篩選

檢視本次訓練之原始資料，計算30棵樹木經多人調查之平均胸徑、標準差與變異係數，並將有無使用定位桿結果區分呈現，結果如Table 1所示。胸徑量測結果於不同樹木間表現差異極大，標準差數值介於0.13至5.59間，變異係數則介於0.44至11.42間。標準差與變異係數越大，顯示數據離散程度越大，推測存在品質不良、甚至錯誤量測的情形。在使用定位桿時，整體標準差幾何平均為0.67，變異係數幾何平均為1.98；而在未使用定位桿時，整體標準差幾何平均為0.84，變異

係數幾何平均為2.48。

設定盒鬚圖內籬為離群值標準，當數值小於 Q1 1.5個IQR之下內籬(即Table 2 Lower boundary)或大於Q3 1.5個IQR之上內籬(即Table 2 Upper boundary)，則視為離群值，並計算所有量測離群值之百分比，結果如Table 2所示。離群值比例介於0 %至25.64 %不等，在使用定位桿時，約有7.09 %數值經判定為離群值；在未使用定位桿時，約有7.18 %數值經判定為離群值。

除樹木編號21使用定位桿量測之數據外(於四、討論(一)說明)，而後將離群值直接排除於原始數據，並重新計算平均胸徑、標準差及變異係數。在使用定位桿時，個別樹木調查結果之標準差幾何平均為0.26，變異係數幾何平均為0.76；而在未使用定位桿時，標準差幾何平均為0.28，變異係數幾何平均為0.81，結果如Table 3所示。

(二)人員調查品質評估

統計39組調查者在有無使用定位桿下共60次量測中離群值數量與比例，並統計調查人員達成MQO的表現，結果如Table 4所示。當設定MQO標準為95%，若調查人員量測結果中離群值比例超過5%，意即離群值數量達4個(含)以上，認定該量測人員量測品質屬不合格，而本次39組量測人員共有18組調查人員通過標準，也就是43.6%人員量測品質屬合格。依此概念，設定MQO標準為90%，當量測人員離群值數量達7個(含)以上則認定不合格，結果有31組調查人員通過標準，也就是約有79.5%人員量測品質屬合格。

(三)定位桿效益評估

為避免量測誤差對於分析效度之影響，本研究以排除離群值後資料為主要評估對象，結果顯示精度提升率於標準差可達6.76%，於變異係數則可達4.58%，定位桿有助於提升量測精度。針對未排除離群值之原始資料，精度提升率在標準差為19.81%，變異係數則為20.09%，整體有更大幅度提升，結果如Table 5所示。

統計上以成對樣本t檢定檢視在有無使用定位

Table 1. Mean, SD and CV of DBH measurements taken with a BH pole (BH) and conventional measurements (C). Measurements with a BH pole were taken using a BH pole to determine the 1.3 m height. Conventional measurements were taken at a height corresponding to 1.3 m on the body

Tree ID	Tree species	Tree type	BH			C		
			Mean (cm)	SD (cm)	CV (%)	Mean (cm)	SD (cm)	CV (%)
1	<i>Terminalia catappa</i>	S	30.68	1.56	5.07	30.01	0.82	2.73
2	<i>Terminalia catappa</i>	S	49.63	1.84	3.71	49.72	0.64	1.28
3	<i>Terminalia catappa</i>	S	37.01	0.60	1.62	37.26	0.51	1.38
4	<i>Terminalia catappa</i>	V	28.53	1.06	3.72	28.61	1.67	5.84
5	<i>Terminalia catappa</i>	S	45.09	0.53	1.18	45.08	0.53	1.18
6	<i>Michelia compressa</i>	I	20.31	0.44	2.14	20.26	0.34	1.69
7	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	51.85	0.72	1.38	51.75	0.40	0.78
8	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	40.04	0.41	1.02	39.93	0.29	0.71
9	<i>Calocedrus formosana</i>	S	22.46	0.68	3.04	21.81	0.63	2.91
10	<i>Cinnamomum camphora</i>	Y	62.14	1.39	2.23	62.01	1.45	2.33
11	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	48.37	4.17	8.62	48.44	4.03	8.32
12	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	49.64	2.72	5.48	48.91	5.59	11.42
13	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	63.71	1.14	1.79	63.68	1.16	1.81
14	<i>Michelia compressa</i>	Y	28.41	0.24	0.85	28.45	0.35	1.22
15	<i>Machilus zuihoeusis</i>	S	31.44	0.27	0.85	31.27	0.59	1.88
16	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	34.65	0.50	1.44	34.57	0.50	1.45
17	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	53.01	4.82	9.09	53.60	3.48	6.49
18	<i>Cassia fistula</i>	I	32.36	0.23	0.72	32.35	0.26	0.79
19	<i>Elaeocarpus serratus</i>	Y	38.19	0.30	0.77	38.00	0.61	1.60
20	<i>Elaeocarpus serratus</i>	I	50.60	0.70	1.39	50.58	2.01	3.98
21	<i>Calocedrus formosana</i>	I	29.23	0.13	0.44	29.32	0.43	1.47
22	<i>Nageia nagi</i>	I	22.40	0.78	3.50	22.71	1.54	6.76
23	<i>Nageia nagi</i>	V	16.68	0.13	0.77	16.27	1.56	9.56
24	<i>Nageia nagi</i>	V	28.71	0.66	2.31	28.41	1.82	6.39
25	<i>Liquidambar formosana</i>	Y	30.70	0.21	0.68	30.17	3.02	9.99
26	<i>Prunus campanulata</i>	Y	12.88	0.24	1.86	12.90	0.14	1.12
27	<i>Bischofia javanica</i>	Y	55.89	1.06	1.90	55.65	0.85	1.52
28	<i>Bischofia javanica</i>	Y	37.28	1.76	4.73	37.31	0.50	1.34
29	<i>Barringtonia racemosa</i>	V	17.43	0.71	4.05	17.22	0.57	3.34
30	<i>Michelia compressa</i>	S	27.61	1.00	3.62	27.84	0.99	3.56
Geometric mean		-	-	0.67	1.98	-	0.84	2.48

Table 2. Mean of DBH measurements, outlier boundaries set by the lower and upper inner fences of the boxplot, and percent of outliers for measurements using a BH pole (BH) and conventional measurements (C)

Tree ID	BH				C			
	Mean DBH (cm)	Lower Boundary (cm)	Upper Boundary (cm)	Percent of outliers (%)	Mean DBH (cm)	Lower Boundary (cm)	Upper Boundary (cm)	Percent of outliers (%)
1	30.68	28.81	32.31	15.38	30.01	28.67	31.61	5.13
2	49.63	47.99	51.21	7.69	49.72	47.85	51.45	0.00
3	37.01	35.43	38.41	2.56	37.26	36.25	38.25	7.69
4	28.53	25.16	31.54	2.56	28.61	25.12	31.50	2.56
5	45.09	44.16	45.66	15.38	45.08	44.00	46.00	7.69
6	20.31	19.80	20.60	10.26	20.26	19.90	20.50	7.69
7	51.85	50.78	52.67	7.69	51.75	50.94	52.49	7.69
8	40.04	39.21	40.66	7.69	39.93	39.18	40.74	0.00
9	22.46	21.06	23.96	2.56	21.81	20.44	23.14	2.56
10	62.14	61.39	63.29	2.56	62.01	61.51	62.81	7.69
11	48.37	47.15	48.35	5.13	48.44	47.06	48.56	5.13
12	49.64	48.55	49.75	10.26	48.91	48.33	50.13	10.26
13	63.71	63.21	64.51	2.56	63.68	62.70	64.84	7.69
14	28.41	27.73	29.13	2.56	28.45	27.68	29.08	5.13
15	31.44	31.00	31.80	12.82	31.27	30.11	32.41	7.69
16	34.65	33.82	35.36	7.69	34.57	33.78	35.29	10.26
17	53.01	53.57	55.54	10.26	53.60	53.67	55.09	10.26
18	32.36	31.90	32.70	10.26	32.35	31.83	32.83	5.13
19	38.19	37.36	38.86	5.13	38.00	37.33	38.73	7.69
20	50.60	49.88	51.28	7.69	50.58	49.88	50.88	25.64
21	29.23	29.13	29.33	25.64	29.32	28.89	29.59	5.13
22	22.40	22.14	22.84	10.26	22.71	22.18	22.78	12.82
23	16.68	16.28	17.03	2.56	16.27	16.20	17.03	7.69
24	28.71	28.23	29.13	5.13	28.41	28.37	29.00	7.69
25	30.70	30.10	31.30	0.00	30.17	29.62	31.56	5.13
26	12.88	12.65	13.05	2.56	12.90	12.60	13.14	12.82
27	55.89	54.95	57.15	2.56	55.65	54.13	57.13	7.69
28	37.28	36.05	38.85	5.13	37.31	36.46	38.10	5.13
29	17.43	15.74	19.09	2.56	17.22	15.98	18.41	2.56
30	27.61	26.05	28.85	7.69	27.84	25.64	29.74	5.13
Mean	-	-	-	7.09	-	-	-	7.18

Table 3. Mean, SD and CV of DBH measurements using a BH pole (BH) and conventional measurement (C) with outliers removed

Tree ID	Tree species	Tree type	BH			C		
			Mean DBH (cm)	SD (cm)	CV (%)	Mean DBH (cm)	SD (cm)	CV (%)
1	<i>Terminalia catappa</i>	S	30.65	0.62	2.02	30.14	0.59	1.97
2	<i>Terminalia catappa</i>	S	49.67	0.56	1.13	49.72	0.64	1.28
3	<i>Terminalia catappa</i>	S	36.97	0.53	1.44	37.22	0.40	1.08
4	<i>Terminalia catappa</i>	V	28.45	0.95	3.33	28.38	0.90	3.15
5	<i>Terminalia catappa</i>	S	44.89	0.19	0.43	44.96	0.33	0.73
6	<i>Michelia compressa</i>	I	20.19	0.09	0.47	20.18	0.09	0.45
7	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	51.67	0.27	0.52	51.67	0.29	0.57
8	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	39.95	0.26	0.64	39.93	0.29	0.71
9	<i>Calocedrus formosana</i>	S	22.41	0.60	2.67	21.76	0.56	2.55
10	<i>Cinnamomum camphora</i>	Y	62.36	0.36	0.59	62.18	0.23	0.37
11	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	47.72	0.20	0.41	47.77	0.23	0.48
12	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	49.14	0.20	0.41	49.19	0.29	0.59
13	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	63.89	0.22	0.34	63.75	0.33	0.52
14	<i>Michelia compressa</i>	Y	28.39	0.21	0.73	28.39	0.23	0.81
15	<i>Machilus zuihoeusis</i>	S	31.37	0.15	0.49	31.31	0.45	1.42
16	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	34.60	0.30	0.86	34.54	0.26	0.74
17	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	54.62	0.31	0.57	54.45	0.27	0.50
18	<i>Cassia fistula</i>	I	32.29	0.12	0.37	32.31	0.16	0.49
19	<i>Elaeocarpus serratus</i>	Y	38.14	0.22	0.59	38.04	0.24	0.63
20	<i>Elaeocarpus serratus</i>	I	50.57	0.26	0.51	50.41	0.20	0.39
21	<i>Calocedrus formosana</i>	I	29.23	0.13	0.44	29.24	0.13	0.45
22	<i>Nageia nagi</i>	I	22.48	0.16	0.70	22.45	0.10	0.45
23	<i>Nageia nagi</i>	V	16.66	0.11	0.67	16.64	0.14	0.83
24	<i>Nageia nagi</i>	V	28.68	0.12	0.42	28.68	0.13	0.44
25	<i>Liquidambar formosana</i>	Y	30.70	0.21	0.68	30.61	0.34	1.12
26	<i>Prunus campanulata</i>	Y	12.85	0.08	0.62	12.87	0.08	0.63
27	<i>Bischofia javanica</i>	Y	56.05	0.44	0.79	55.60	0.49	0.88
28	<i>Bischofia javanica</i>	Y	37.50	0.47	1.27	37.28	0.32	0.87
29	<i>Barringtonia racemosa</i>	V	17.38	0.62	3.56	17.16	0.44	2.56
30	<i>Michelia compressa</i>	S	27.36	0.39	1.43	27.69	0.69	2.51
Geometric mean		-	-	0.26	0.76	-	0.28	0.81

Table 4. Participant performance for DBH measurements. Outliers were data beyond the inner fence range of the boxplot. The Measurement Quality Objectives (MQO) was set to 95 % or 90 %. Compliance rate means the percent of participants achieving MQO (%)

MQO		Compliance rate (%)
Number of outliers	Percent of outliers (%)	
0	0	0.0
1	1.7	15.4
2	3.3	35.9
3	5.0	43.6
4	6.7	61.5
5	8.3	69.2
6	10.0	79.5
7	11.7	89.7
8	13.3	94.9
9	15.0	94.9
10	16.7	97.4
11	18.3	97.4
12	20.0	97.4
13	21.7	97.4
14	23.3	97.4
15	25.0	100.0

Table 5. SD and CV of DBH measurements using a BH pole (BH) and conventional measurements (C) for processed and raw data. Processed data has the outliers removed. Raw data does not include outlier detection

Measurements	Processed data		Raw data	
	SD (cm)	CV (%)	SD (cm)	CV (%)
BH	0.26	0.76	0.67	1.98
C	0.28	0.81	0.84	2.48
Precision improvement rate (%)	6.76%	4.58%	19.81%	20.09%

桿下量測精度的表現是否具顯著差異，結果顯示在標準差與變異係數上，有無使用定位桿之結果皆未有顯著差異。

(四)量測精度影響因子分析

為了解量測結果精度與樹型之關係，將資料以I型(直立)、S型(傾斜)、V型(1.3 m下分岔)與Y型(1.3 m上分岔)四種樹型分開討論，計算其平均標準差與平均變異係數，結果如Table 6所示。

整體而言，調查者在I型樹木量測精度最高，而使用定位桿下的精度相較於未使用定位桿，亦有明顯提升；精度次之的為Y型樹木，其在使用定位桿下精度表現未有明顯差異；相反的，S型樹木量測精度最差，在使用定位桿下精度提升度為四組最大，約可提升24%；而在V型樹木中，使用定位桿精度的表現則未有所提升。

為了解量測結果變異與平均胸徑之關係，將平均胸徑分別與標準差及變異係數以散佈圖作

圖，並以線性迴歸預測其趨勢，結果如Fig. 7及Fig. 8所示。標準差與平均胸徑無顯著趨勢，線性迴歸模型不具預測性；而在變異係數，由於計算上考量樣本平均，可見變異係數隨平均胸徑的上升而降低，且線性迴歸模型 $y = -0.0223x + 1.8018$ ($R^2 = 0.1446$)顯著($p \text{ value} = 0.0027, < 0.05$)，具備預測能力。由此可推測不同調查者間量測結果的變異，並不會隨胸徑大小而有變化。

(五)容許誤差設定

針對排除離群值的數據，計算每組數據盒鬚圖上下內籬與中位數的距離，並以幾何平均數評估整體容許範圍表現，作為容許誤差範圍參考，結果如Table 7所示。結果顯示，在使用定位桿時，容許誤差幾何平均為+0.69 cm與-0.66 cm；未使用定位桿時，容許誤差幾何平均為+0.71 cm與-0.66 cm，可見調查者較常高估胸徑值(Roman et al. 2017)。

Table 6. SD and CV of DBH measurements using a BH pole (BH) and conventional measurements (C) for the 4 tree types

Measurements/Tree type	SD (cm)				CV (%)			
	I	S	V	Y	I	S	V	Y
BH	0.16	0.39	0.29	0.25	0.45	1.15	0.93	0.73
C	0.17	0.51	0.28	0.25	0.47	1.51	0.90	0.72
Precision improvement rate (%)	5.79	23.69	-3.04	-0.66	12.23	23.98	-2.76	-0.36

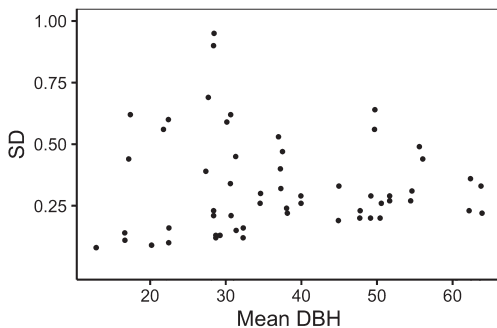


Fig. 7. A scatter plot of mean DBH and SD.

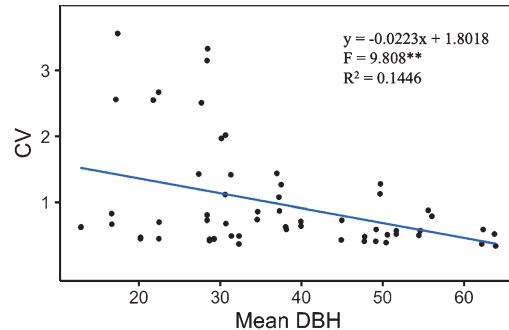


Fig. 8. A scatter plot of mean DBH and CV.

檢視中位數與上下內籬距離之關係，結果如 Fig. 9所示，隨著徑級上升，平均容許誤差並無顯著變化，且迴歸模型不具預測性。檢視容許誤差與四種樹型之關係，結果如Table 8所示。

此外，參考胸徑量測精度表現設定容許誤差，檢視以標準差設定之容許誤差與四種樹型之關係。在一般未使用定位桿情境下，當多人量測同一株樹木胸徑，量測結果標準差約會落在0.28，可設定平均胸徑 ± 2 個標準差約為 ± 0.56 cm為容許誤差，結果如Table 9所示。

四、討論

(一)離群值篩選

有鑒於以盒鬚法篩選離群值會因四分位距大小而產生偏誤，意即當資料分佈集中，則因四分位距極小而設定出較窄的內籬範圍，進而篩選出大量極端值。筆者進一步檢視各組數據四分位距與離群值數量的散佈圖，並以95%信賴區間衡量，結果如Fig. 10所示。逐一檢視圖中信賴區間外的4筆資料，在使用定位桿時，樹木編號1數據的四分位距為0.9，共篩選出6個離群值；樹木編號4數據的四分位距為1.6，在較寬鬆的內籬標準僅篩選出1個離群值，推測原因為V型樹木量測誤差較大；樹木編號21數據的四分位距為0.05，在較窄的內籬標準則篩選出10個離

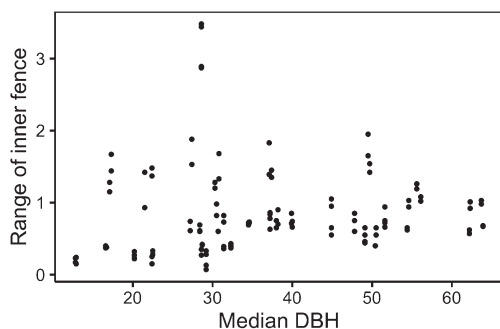


Fig. 9. A scatter plot of median DBH and the range of the inner fence. The range of the inner fence is the distance between upper/lower inner fences and the median.

群值。而在未使用定位桿時，樹木編號20數據的四分位距為0.25，亦篩選出10個離群值，推測原因為樹木編號20與21皆為I型樹木，因此四分位距皆小。

因此，筆者建議設立兩階段篩選機制，第一階段以盒鬚圖內籬，篩選出潛在離群值。第二階段根據四分位距，檢視離群值對於量測品質的代表性，避免產生判斷偏誤。由於樹木編號21於使用定位桿之數據四分位距為本試驗中最小值(0.05)，其量測精度亦高(標準差為0.13、變異係數為0.44)，因此判定盒鬚圖法篩選出10個離群值為極端表現，無法象徵量測品質不佳，故不予以排除。然而此狀況亦顯現錯誤量測干擾與離群值篩選誤差為本研究限制之一。

(二)人員調查品質評估

MQO目標的達成基於容許誤差設定範圍。根據FIA國家核心現地調查指引，其設定胸徑量測之MQO目標需達95%(FIA, 2022)，Kitahara et al. (2010)則指出此標準對於較少經驗的調查者此標準過於嚴苛，而在Westfall et al. (2021)研究中，都市林胸徑量測MQO達成率為84%。因此筆者建議，考量執行可行性，在QA與QC機制發展初期可採用較寬鬆之MQO標準。以本次試驗為例，當設定MQO為90%，約有80%調查人員調查品質合格。未來可依照容許誤差標準，訂定更

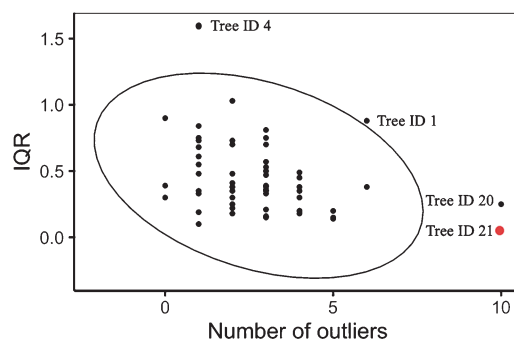


Fig. 10. A scatter plot of the number of outliers and IQR with 95% confidence interval.

Table 7. Tolerance range of DBH measurements using a BH pole (BH) and conventional measurements (C). Tolerances were set according to the distance between the lower inner fence and median DBH (-) and the distance between the upper inner fence and median DBH (+)

Tree ID	Tree species	Tree type	Tolerance (cm)			
			BH		C	
			-	+	-	+
1	<i>Terminalia catappa</i>	S	1.68	1.33	1.28	1.20
2	<i>Terminalia catappa</i>	S	1.54	1.42	1.65	1.95
3	<i>Terminalia catappa</i>	S	1.83	1.39	0.84	0.86
4	<i>Terminalia catappa</i>	V	3.44	2.87	3.48	2.89
5	<i>Terminalia catappa</i>	S	0.65	0.55	0.95	1.05
6	<i>Michelia compressa</i>	I	0.27	0.32	0.23	0.22
7	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	0.75	0.94	0.66	0.72
8	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	0.74	0.66	0.71	0.85
9	<i>Calocedrus formosana</i>	S	1.37	1.48	0.93	1.42
10	<i>Cinnamomum camphora</i>	Y	0.92	1.01	0.62	0.57
11	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	0.60	0.60	0.75	0.85
12	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	0.44	0.46	0.55	0.65
13	<i>Cinnamomum camphora</i>	I	0.68	0.67	0.98	1.03
14	<i>Michelia compressa</i>	Y	0.61	0.69	0.60	0.60
15	<i>Machilus zuihoensis</i>	S	0.39	0.36	0.82	0.73
16	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	0.72	0.73	0.69	0.72
17	<i>Elaeocarpus serratus</i>	V	0.94	1.03	0.65	0.62
18	<i>Cassia fistula</i>	I	0.40	0.40	0.37	0.43
19	<i>Elaeocarpus serratus</i>	Y	0.90	0.70	0.65	0.75
20	<i>Elaeocarpus serratus</i>	I	0.55	0.65	0.40	0.40
21	<i>Calocedrus formosana</i>	I	0.07	0.13	0.28	0.33
22	<i>Nageia nagi</i>	I	0.28	0.33	0.15	0.25
23	<i>Nageia nagi</i>	V	0.38	0.38	0.40	0.37
24	<i>Nageia nagi</i>	V	0.41	0.42	0.27	0.35
25	<i>Liquidambar formosana</i>	Y	0.60	0.60	0.82	0.98
26	<i>Prunus campanulata</i>	Y	0.17	0.23	0.24	0.15
27	<i>Bischofia javanica</i>	Y	1.02	1.08	1.19	1.26
28	<i>Bischofia javanica</i>	Y	1.35	1.45	0.63	0.78
29	<i>Barringtonia racemosa</i>	V	1.44	1.67	1.15	1.28
30	<i>Michelia compressa</i>	S	0.61	0.74	1.53	1.88
Geometric mean		-	0.66	0.69	0.66	0.71

適當的MQO數值，做為調查人員調查品質評估標準。

而在人員訓練方面，Kitahara et al. (2010)比較三種程度的訓練課程下人員量測精度之差異，結果顯示當人員參與前組人員量測結果之品質討論、理解量測誤差發生的可能情境，有助於提升其量測精度。而在人員素質上，一般認為越有經驗的調查人員量測品質越佳，然Roman et al. (2017)比較初學(novice)與中等(intermediate)人員之調查品質，結果則顯示兩組表現並無差異。由此可知，訓練課程設計以及人員素質皆為影響本研究結果與MQO達成率的因子之一。

(三)定位桿效益評估

樹木胸徑調查結果存在較高誤差情形，尤其在都市林中大徑級樹木或多分枝的情況(Westfall

et al. 2021)。根據本試驗結果，定位桿的使用無論在排除離群值資料或原始資料，皆有助於提升精度。即使有無使用定位桿的調查結果在統計上尚無顯著差異，筆者推測現階段資料量限制為原因之一，有待未來持續累積。並且，定位桿可提供調查者明確參考量測位置基準，包含方位、量測位置與水平，使得眾多調查者量測過程更加標準化。而對於樹木長期生長監測，定位桿亦提供量測基準，可協助後續的調查者更精準找到原調查位置，避免因量測位置差異所造成的誤差，提升整體量測精度。

(四)量測精度影響因子分析

針對四種樹型量測精度表現以及定位桿提升精度的成效，調查者在I型樹木量測精度最高，而使用定位桿時的精度亦有明顯提升，推測定位桿

Table 8. Tolerance range of DBH measurements using a BH pole (BH) and conventional measurements (C) for 4 the tree types based on the boxplot method

Tree type	Tolerance (cm)	
	BH	C
I	0.43	0.49
S	1.10	1.22
V	1.09	0.99
Y	0.81	0.70

Table 9. Tolerance range of DBH measurements using a BH pole (BH) and conventional measurements (C) for 4 the tree types based on the standard deviation

Tree type	Tolerance (cm)	
	BH	C
I	0.34	0.38
S	0.88	1.04
V	0.74	0.68
Y	0.58	0.56

可幫助調查者找到一致量測位置，其有助於降低量測的誤差(Westfall et al. 2021)；在Y型樹木，由於調查者須將量測位置下移至未受分岔增寬影響的區域，推測定位桿的影響則較小；在S型樹木量測精度最差，推測原因應為在樹木傾斜的狀態下，調查者在樹木基部位置、傾斜角度、量測位置等判定會有較大差異，然而使用定位桿對於其精度提升度為四種樹型中最大，可見定位桿有助於調查者量測傾斜樹木之結果更加一致；而在V型樹木，由於需分別量測各分岔胸徑，量測誤差發生的較大，因此定位桿效益較有限。

而針對相異徑級樹木，結果顯示徑級與調查精度並未有明顯關係，也就是隨著徑級增加，標準差並無顯著增長。而Westfall et al. (2021)則顯示隨著徑級增加，標準差有增加的趨勢。筆者認為，由於試驗樹木胸徑橫跨幅度較該研究小、且包含樹型變因，徑級並非顯著影響因子，因此在下段討論將不一依照胸徑級距設定對應容許誤差建議值。

(五)容許誤差設定

綜合本研究結果，筆者提出兩個胸徑量測容許誤差設定建議。一為參考盒鬚圖內籬，設定中位數 ± 0.68 cm為容許誤差範圍。考量樹型對於量測誤差的影響，以未使用定位桿結果為例，由大到小可設立S型樹木容許誤差為 \pm 中位數 1.22 cm；V型樹木為 ± 0.99 cm；Y型樹木為 ± 0.70 cm；而I型樹木為 ± 0.49 cm；二為參考標準差，設定平均胸徑 ± 0.56 cm為容許誤差。考量樹型對於量測誤差的影響，以未使用定位桿情境為例，由大到小可設定S型樹木容許誤差為平均胸徑 ± 1.04 cm；V型樹木為 ± 0.68 cm；Y型樹木為 ± 0.56 cm；而I型樹木為 ± 0.38 cm。

為了解各組樹木量測數據的常態分佈性，筆者使用R語言Shapiro-Wilk檢定分別檢視原始資料與移除離群值的資料。結果顯示，在調查30棵樹、累積60組量測，原始資料中有4組為常態分佈，移除離群值的資料中則有25組資料為常態分佈。由於本次試驗樣本數有限，筆者推測其為樣本數據非常態分佈的原因，同時保留以標準差設

定容許誤差作為參考。

根據FIA國家核心現地調查指引(Forest Inventory and Analysis 2022)，其設定一般活存樹木在每個胸徑 50.8 cm區間之容許誤差為 ± 0.254 cm，而林地樹種胸徑之容許誤差則為 ± 0.508 cm (FIA, 2022)，此標準亦成為常見容許誤差參考值。Kitahara et al. (2010)除引用FIA容許誤差，亦分別討論調查人員對於闊葉樹與針葉樹量測精度差異。Westfall et al. (2021)則指出，調查者對於都市林與森林樹木的MQO達成率具有一定差異。由此可知，除了單一容許誤差標準外，亦應考量不同樹木特性設定標準。本研究調查校園樹木胸徑範圍介於 12 cm至 62 cm、且包含四種樹型生長情形，可作為都市林樹木胸徑量測容許誤差參考，並依照現地樹木型態進行適度調整。

五、結論

在樹木調查中，胸徑為常見且可廣泛應用之調查項目，透過人員訓練亦可補足調查人力空缺，然而其量測結果亦存在高誤差。本研究以盒鬚圖法進行離群值篩選，可快速評估人員量測品質，並建議納入兩階段篩選機制避免偏誤。而定位桿工具藉由提供調查者明確量測基準，可提升整體量測精度，尤其針對S型傾斜樹木。最後，筆者提供兩種胸徑量測容許誤差建議，分別參考盒鬚圖內籬與標準差設定，讀者可視量測情境與目的進行標準調整，以上結果可作為樹木調查流程建立、調查品質評估之參考依據。然而，由於調查品質評估受到參與人員調查素質、樣木型態、數據量等變因與限制影響，未來有待更多研究分析討論，並期許能使臺灣樹木調查指引與規範更加完整。

謝誌

感謝參與樹木胸徑量測訓練的學生提供本研究分析數據，以及編審委員的評論與建議，使論文得以完善，以此致謝。

引用文獻

- Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006.** 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- Forest Inventory and Analysis. 2022.** National Core Field Guide, Version 9.2. US Department of Agriculture Forest service.
- Kershaw Jr JA, Ducey MJ, Beers TW, Husch B. 2016.** Forest mensuration. John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118902028.
- Kitahara F, Mizoue N, Yoshida S. 2010.** Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. *Silva Fennica* 44(4):57-667.
- Monteiro MV, Doick KJ, Handley P. 2016.** Allometric relationships for urban trees in Great Britain. *Urban Forestry & Urban Greening* 19:23-236. doi:10.1016/j.ufug.2016.07.009.
- Roman LA, Scharenbroch BC, Östberg JP, Mueller LS, Henning JG, Koeser AK, et al. 2017.** Data quality in citizen science urban tree inventories. *Urban Forestry & Urban Greening* 22:124-35.
- Schwertman NC, Owens MA, Adnan R. 2004.** A simple more general boxplot method for identifying outliers. *Computational statistics & data analysis* 47(1):165-74. doi: 10.1016/j.csda.2003.10.012.
- Shiffler RE. 1988.** Maximum Z scores and outliers. *The American Statistician* 42(1):79-80.
- Tam HP. 2008.** Introduction of outlier detection methods. *NTTU Educational Research Journal* 19(1):131-50. doi:10.6778/NTTUERJ.200806.0131.
- Westfall JA, Henning JG, Edgar CB. 2021.** Urban tree measurement variability and the contribution to uncertainty in estimates of ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening* 64: 127302.
- Winter S, Chirici G, McRoberts R, Hauk E, Tomppo E. 2008.** Possibilities for harmonizing national forest inventory data for use in forest bio-diversity assessments. *Forestry* 81(1):33-44.