應用透地雷達非破壞性量測樹木根部生質量

農試所農化組 許健輝 鄭佳怡 賴俊融 顏淳阡

一、前言

樹木根部的健康狀態與其對於養分和水分吸收效率息息相關，同時也影響樹體結構的穩定性(殷等人，2021)。此外，樹根生質量也為林木地下部固碳量及森林或坡地土壤碳匯主要來源。傳統樹根生質量調查主要以破壞性方法為主，包含細根調查使用土環採樣法或生長土環法(ingrowth core)，粗根調查使用淺溝挖掘法(Alani and Lantini 2020)，儘管該方法較為準確，但對於樹木的傷害性較大。因此，許多研究陸續發展非破壞性的方法來估算樹木地下部生質量，如電阻成像法、超聲波法及透地雷達法等(Alani and Lantini 2020)。本報告就以避免對樹木造成不可逆傷害的透地雷達法(ground penetrating radar，簡稱GPR)，加以簡述其原理及其應用。

二、透地雷達檢測原理及其應用

透地雷達是一種使用雷達脈衝對地下進行成像的地球物理方法，對地表下埋藏的物體、結構或地質特徵進行檢測和成像(Tanikawa et al., 2021; Rocha et al., 2024)。透地雷達是藉由發射雷達波探測地表以下狀況的儀器，雷達波是一種高頻電磁波，頻率介於10 MHz～1500 MHz，雷達波因地層的介電常數差異而產生反射波，經由地表天線接收並分析反射波來回所需要的時間、波型、振幅等資料，可獲取反射層性質、位置等資訊。使用的雷達波頻率越高，解析度相對提高，探測深度則較淺；若使用的雷達波頻率越低，雖探測深度加深，解析度也較低。透地雷達探測技術可應用在許多方面，例如軍事用途中掃描殘存地雷及地下掩體調查，建築工程中的道路鋪面孔洞、地下管線調查及混凝土結構物非破壞性檢測，地質調查研究中淺層礦脈調查及岩層結構調查。在農業方面可應用於地下水位偵測及土壤調查工作，或可應用於查核公糧穀倉，藉由雷達天線所接收到之反射訊號圖快速清查出穀倉內是否有架空鐵架、木箱或其他異物，相較於傳統人工搬運查核方式可以節省人力、財力及時間。

近年透地雷達的應用逐漸增加，主要歸功於高頻天線的發展，使透地雷達的檢測和適用性更廣泛。許多研究也證

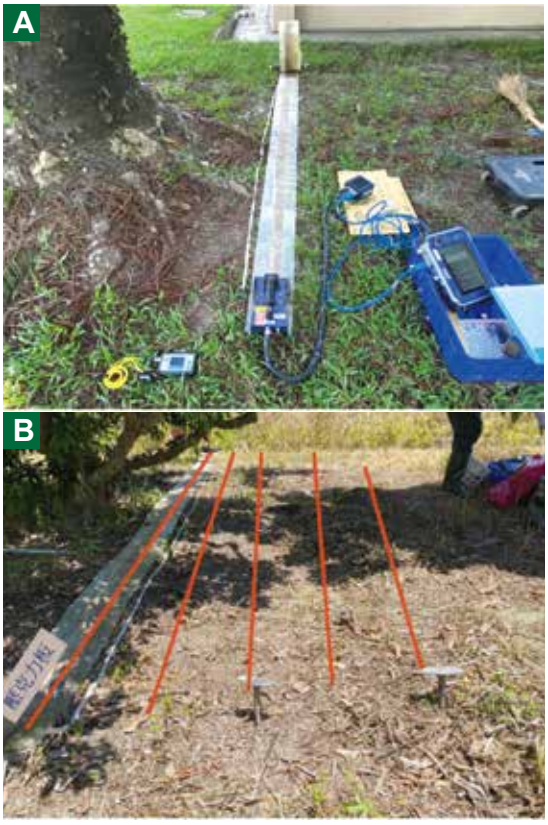
作　　者：許健輝副研究員
連絡電話：04-23317435

實透地雷達訊號與根部直徑或生質量都具有高度相關性(Borden et al., 2014)。然而，實際林地根系多為交錯或相鄰生長，如何正確及有效地估算地下部根系直徑或生質量則需更多研究來驗證(Lantini et al., 2020)。透地雷達在使用上也受到現地環境條件的影響，例如土壤粘粒含量、含水量、電導度值等，皆會直接導致透地雷達的訊號衰減(Doolittle and Butnor, 2009)。不同性質土壤及不同介質間介電常數具有差異，由於電磁波衰減與介質的電導度成正比，土壤的電導度越高，電磁波的衰減就越高。此外，土壤中的石礫和岩石也會影響透地雷達的訊號，石礫會被誤判為根，這對於評估根部生質量可能會產生誤差來源(Tanikawa et al., 2021)。目前林木地下部尚未納入森林碳匯之計算，然而，森林碳庫除了地上部生質量外，也包括地下部生質量、枯木及枯枝落葉、土壤有機質。以下介紹為建立透地雷達量測根部生質量之流程並評估其可行性，作為後續森林地下部碳匯估算的基礎。

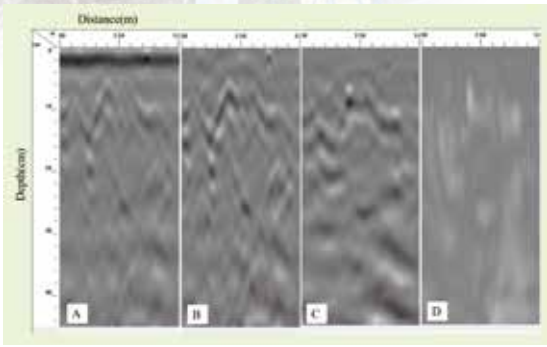
三、透地雷達現地量測及數據分析流程

森林環境大多坡面較陡地勢起伏較大，地被層有枯枝落葉等腐質層，可能會造成透地雷達施作上的障礙以及後續圖譜資料上處理的困難，因此會先測試環境條件的影響與儀器參數設定，例如地面平整度、天線推車移動速度及土壤水分含量等條件對GPR圖譜收集的影響。本次試驗使用的透地雷達(GSSI SIR-4000)搭配1600MHz高頻天線，對於樹木地下部進行非破壞性量測。

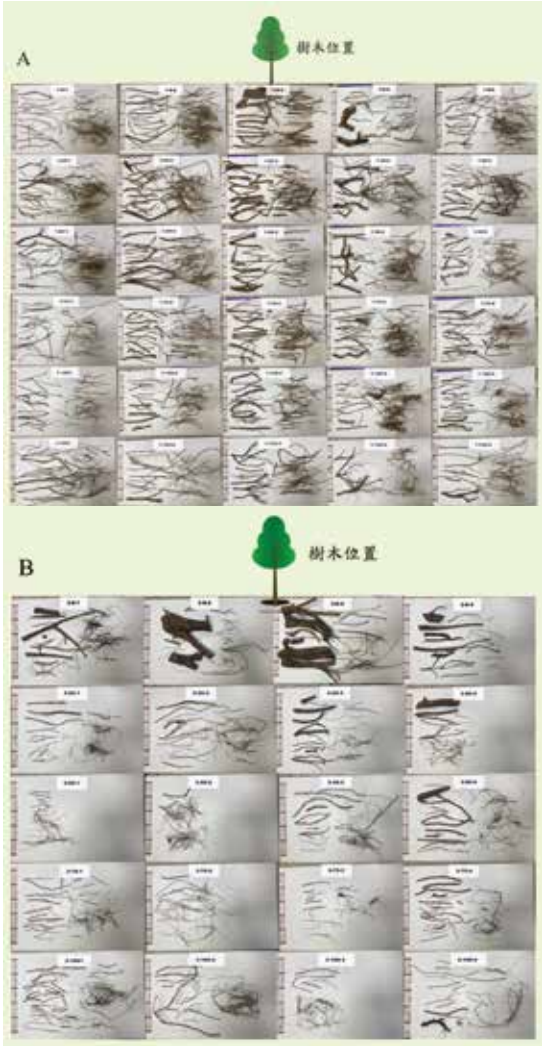
研究場址有兩處，分別為農業試驗所及宜蘭大學。農業試驗所試驗區位於荔枝園，宜蘭大學試驗區位於該校實驗林場(礁溪鄉二結村)。在試驗區內選定單棵林木進行透地雷達試驗，在林木單側將地表雜草及樹木殘枝清除使地面平整，並於表面鋪設塑膠壓克力板(圖一A)，每次調查均沿著4公尺的剖面進行數據收集(圖一B)，等距25公分(0、25、50、75、100公分等處)。透地雷達數據蒐集完成後會進行採集根部樣本來獲取根部生質量，每個取樣方格長寬高分別為25、50、30公分，每棵樹木採集20個



圖一、(A)透地雷達及(B)量測路線規劃。



圖二、透地雷達數據處理流程(A)Raw data (B) Background removal (C)Kirchoff migration (D)Hibert transformation。



圖三、農試所試區(A)及宜蘭大學試區(B)採樣方格根部照片。

方格，採集深度為0-30公分。將取樣方格內的根部取出後，經過清洗後以70℃烘乾後秤重。透地雷達影像進行分析前，需透過下列影像處理步驟(Bain et al., 2017)，並使用ReflexW和ImageJ進行影像處理，步驟如下(圖二)：

(1) Background removal：從影像中移除與目標無關的背景雜訊，減少水平反射及非目標反射，以提高前景目標的清晰度。

(2) Kirchoff migration：雷達波從震源傳播後會遇到不同的地層，並產生反射與折射。然而，由於地層的褶皺與傾斜，接收到的訊號通常會錯位，導致原始地震圖譜扭曲、模糊或重疊，此步驟的作用是校正地下目標物的位置，獲得更準確的地下結構影像。

(3) Hibert transformation：增強目標物反射訊號，提高圖譜對比度及清晰度，提升影像的可解釋性。

(4) 萃取根部GPR訊號；使用ImageJ將影像轉換為8位元影像，計算判斷為根部範圍內的面積，即為GPR訊號。

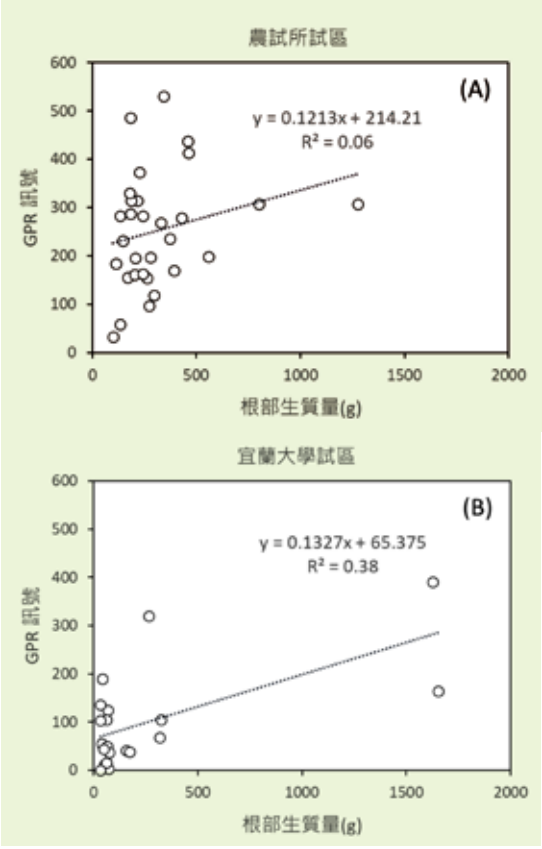
(5) 計算GPR訊號與生質量之對應關係。

四、初步試驗結果

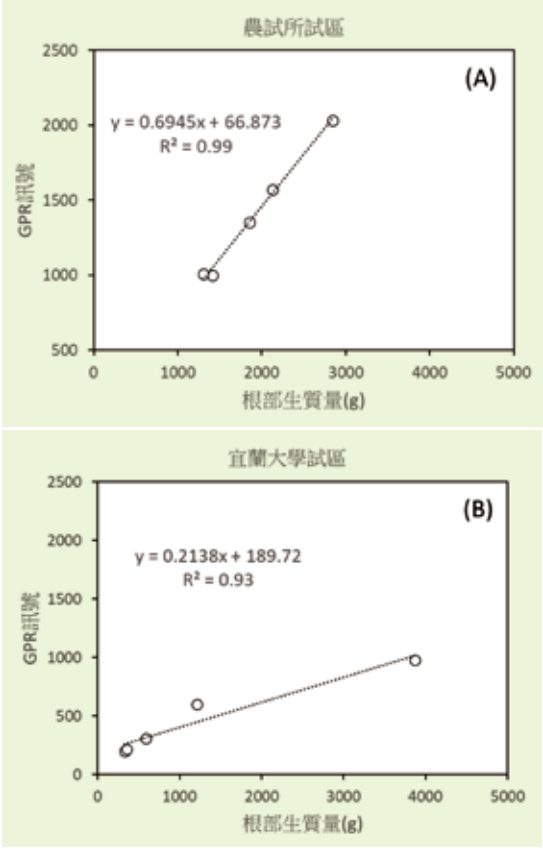
由於透地雷達是搭載一台具有測距輪功能的推車上作測定，推車在測定過程需緊密貼齊地面移動來收集數據，如果地面不平整則會影響透地雷達數據蒐集，但大部分樹木周邊會因枯枝落葉或地表浮根使地面不平整，因此後續在測定時會以鋪設壓克力板來改善此影響。推車移動速度會影響數據收集品質，經

數次測試後，以30~40秒/公尺的速度最佳。而土壤含水量較高的時候，使土壤與根部的介電常數相近，會降低反射訊號的強度，使得根部不易被偵測到。因此在使用透地雷達前，會先用水分含量計測定場址周圍的水分含量，作為設定透地雷達儀器中介電常數的參數值。

初步試驗結果顯示在土壤深度0~30公分內較能看到地下根部GPR訊號，而超過30公分訊號較不明顯，距離樹木基部較近的區域其生質量會越高，距離越遠則越低，與實際採樣結果相符。圖三為農業試驗所荔枝園試區及宜蘭大學實驗林場試區採樣方格根部照片，樹木位置如圖所示(左邊代號第一碼為試驗區代號，第二碼為與樹木距離(公分)，第三碼是採樣區1~5，如1-0-1、1-25-1…等)。圖四顯示無論在農試所荔枝園(圖四A)及宜蘭大學實驗林(圖四B)，單一採樣方格內GPR訊號和生質量的相關性都偏低，R^2分別為0.06及0.38，若將距離相同(例如距離樹木0公分的1-0-1~1-0-5共五個採樣區)區域內採樣方格GPR訊號和根部生質量數據分別加總後進行迴歸分析，兩者R^2分別可達0.99及0.93(圖五)。該結果指出，由距離相同的數個採樣方格所得到



圖四、農試所試區(A)及宜蘭大學試區(B)採樣方格根部生質量和GPR訊號之迴歸分析圖。



圖五、農試所試區(A)及宜蘭大學試區(B)相同距離採樣方格根部生質量總和與GPR訊號總和之迴歸分析圖。

的GPR訊號和根部生質量數據具有高度的相關，代表透過GPR量測來估算樹木生質量具高度可行性。然而，單一採樣方格GPR訊號和根部生質量數據相關性低之原因，推測為數據處理過程仍無法有效的區分根和其他介質，後續將持續評估不同透地雷達數據收集方法(如環狀量測)及優化數據處理程序，以提高量測之準確度。

五、展望

初步結果指出，透地雷達對於樹木根部之非破壞性量測具有潛力，但因自然界的地層組成成分及狀況都較複雜，產生雜訊的狀況更為明顯，後續除了需持續優化數據收集流程及數據處理程序，也需近一步界定適合使用該技術之場域、土壤性質及環境條件，以及建立不同樹種根部生質量與GPR訊號之相關性，期望該方法未來可實際落地應用於林木、果樹或其他樹種根部地下部之量測，完善整體農業自然碳匯之估算。

六、參考文獻

殷楷智、李弘恩、鄭舒婷。2021。透地雷達於樹木根系探測之訊號分析及標準化。台灣林業科學，36(3):221-33。

Alani A.M., and L. Lantini. 2020. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: a focus on ground penetrating radar. Surv Geophys 1-42.

Bain, J.C., F.P. Day, and J.R. Butnor. 2017. Experimental evaluation of several key factors affecting root biomass estimation by 1500 MHz ground-penetrating radar. Remote Sensing. 9, 1337.

Borden, K. A., M. E. Isaac, N. V. Thevathasan, A. M. Gordon, and S. C. Thomas. 2014. Estimating coarse root biomass with ground penetrating radar in a tree-based intercropping system. Agrofor. Syst. 88:657–669.

Doolittle, J. A., and J. R. Butnor. 2009. Ground penetrating radar: theory and applications. in Chapter 6: soils, peatlands, and biomonitoring. Editor H. M. Jol. Elsevier Science.

Lantini, L., F. Tosti, I. Giannakis, L. Zou, D. Egyir, D. Mortimer, and A. M. Alani. 2020. Health assessment of trees using GPR-derived root density maps. IEEE Radar Conference (RadarConf20), Florence, Italy, pp. 1-5.

Rocha, A. A., W. R. Borges, M. G. V. Huelsen, F. R. F. R. d. O. Sousa, S. T. R. Maciel, J. d. A. Rocha, and T. K. B. Jacobson. 2024. Imaging tree root systems using ground penetrating radar (GPR) data in Brazil. Front. Earth Sci. 26:1-13.

Tanikawa, T., H. Ikeno, K. Yamase, M. Dannoura, K. Aono, and Y. Hirano. 2021. Can ground-penetrating radar detect adjacent roots and rock fragments in forest soil? Plant Soil. 468:239-257.