

研究報告

透地雷達於樹木根系探測之訊號分析及標準化

殷楷智¹⁾ 李弘恩¹⁾ 鄭舒婷^{1,2)}

摘要

樹木根系的健全影響著樹木的健康與生長，然而，樹木根系大多位於地底，不易調查。為避免傳統破壞性檢測可能對樹木造成的傷害，非破壞性檢測之「透地雷達」為樹木根系或樹木健康檢測工具之另一種選擇。

本研究透過砂坑試驗，建立透地雷達訊號分析之標準作業流程與參數設定，再將此方法應用於溪頭人造針葉林，以網格狀測線施作並做資料分析。研究建立之訊號分析流程如下：(1)地面校正，以初達波位置為深度0；(2)計算介質波速；(3)樹根回波圖判別；(4)軌跡平滑，以雙曲線波型之明顯亮暗帶像素數判斷移動窗格寬度，進行移動平均；(5)增益處理，隨著深度進行訊號放大；(6)移位處理，將分散之半雙曲線回波特徵轉換為點狀特徵；(7)計算訊號振幅變化，並將振幅變化標準化為0-99的區間；(8)振幅變化與樹根尺寸相關性分析；(9)閾值篩選與設定；(10)核密度估算，以空間中訊號之機率分布描繪地底形貌。結果顯示，此流程可以順利捕捉樹木根系訊號，且在溪頭人造林網格狀測線試驗中，可將地下部反射訊號轉換成類似樹根之連續分布樣態呈現。未來我們將透過小規模破壞性檢測，驗證訊號分析結果，為林木生理、森林經營等領域之研究提供正確的地下部根系資訊。

關鍵詞：透地雷達、非破壞性檢測、訊號分析、樹木根系。

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。

¹⁾國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系，10617臺北市羅斯福路四段一號 School of Forestry and Resource Conservation, College of Bioresources and Agriculture, National Taiwan Univ., 1 Roosevelt Rd., Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan.

²⁾通訊作者 Corresponding author, e-mail:chengsuting@ntu.edu.tw

2021年7月送審 2021年10月通過 Received July 2021, Accepted October 2021.

Research Paper

Ground Penetrating Radar (GPR) Signal Analysis and Standardization for Tree Root System Detection

Kai-Chih Yin¹⁾ Hung-En Li¹⁾ Su-Ting Cheng^{1,2)}

【 Summary 】

The soundness of a tree's root system determines the health and growth of the tree. However, tree root systems are mostly underground making them difficult to investigate. To avoid damages caused by traditional destructive testing methods, a non-destructive method using ground penetrating radar (GPR) is an option for tree root system detection and tree health assessment.

In this study, we conducted a sandbox experiment to develop standard operating procedures (SOPs) for GPR data analysis and parameter setting. Afterward, we tested and applied the SOPs in a coniferous forest plantation in Xitou using grid lines followed by data analyses. The SOPs we developed for signal analysis were: (1) ground level calibration by taking the initial wave position as depth 0 ; (2) calculating the velocity of the medium; (3) interpreting the radar echo diagram of the tree roots; (4) smoothing by counting the pixels of bright and dark areas in a hyperbola as the window width to produce moving averages; (5) amplifying signals with depth; (6) migration by transforming the semi-hyperbola characteristics into point features; (7) calculating the amplitude difference and scaling the difference from 0 to 99; (8) conducting a regression analysis between the amplitude difference and the cross-sectional area of the tree roots; (9) setting thresholds to detect signals; and (10) delineating the underground morphology by estimating the kernel density of the spatial probability distribution of signals. Results showed that the developed SOPs could successfully determine the roots' signals and transform the underground signals into a continuous distribution that resembled the shape of the investigated tree roots using grid lines in a Xitou forest plantation. In the future, we will validate our analytical results by carrying out small-scale destructive testing, so that for research in the disciplines of forest physiology and forest management, information of the underground tree root systems can be accurately provided.

Key words: ground penetrating radar (GPR), non-destructive testing (NDT), signal analysis, tree root system.

Yin KC, Li HE, Cheng ST. 2021. Ground penetrating radar (GPR) signal analysis and standardization for tree root system detection. *J For Sci* 36(3):221-33.

緒言

樹木根系與樹木之生長及安全息息相關，就植物生理而言，健康的根系可透過細根(fine roots)吸收植物生理所需的土壤水分及養分(Pregitzer et al. 2002)，亦可透過粗根(coarse roots)維持樹體結構的穩定性(Wu et al. 2014)。

此外，在生物地球化學上，樹木根系扮演著諸多循環機制上的重要角色，其中，粗根相對於細根為長期的碳吸存重要碳庫(Sorgonà et al. 2018)，且為植物地下部固碳量主要來源之一(Stover et al. 2007)。估算樹木所儲存的碳量

為碳市場之重要議題，如何以科學監督及量化方法，進行量測、報告與驗證(measurement, reporting, verification, MRV)，為計算森林碳庫時不容忽略之程序(Gupta et al. 2012, Panagakos et al. 2019)。然而樹根因位於地下，調查不易，相關研究較為缺乏，致使樹根之碳量估算成為一待解決之問題。

樹根之調查，有利用傳統破壞性檢測(destructive testing)施作者，在細根調查中常使用土環採樣法(core sampling)進行細根採樣(Hruska et al. 1999)，或是以生長土環法(ingrowth core)來量化細根的生長速率(Alani & Lantini 2020)；而粗根的調查則仰賴中/大型的挖掘作業，直接了解根系分布狀況及生物量，例如進行土壤剖面(soil profile) (Alani & Lantini 2020)或是淺溝挖掘(shallow trenches) (Butnor et al. 2003)等調查作業。這些破壞性檢測雖可提供較直接且確切的根部資訊，卻十分耗時費力，且容易對樹木根系造成不可逆的傷害。為了避免對樹木的生長或健康造成危害，長期根系動態資料多仰賴非破壞性檢測(non-destructive testing, NDT)作為資訊提供的可能選擇。

非破壞性檢測根系的方法有許多，如根管法(rhizotrons)、電阻成像法(electrical resistivity tomography, ERT)、超聲波檢測法(acoustic detection)、X光斷層掃描法(x-ray computed tomography)以及透地雷達(ground penetrating radar, GPR)檢測法等(Alani & Lantini 2020)。其中，根管法須挖掘淺穴，將管狀探測器放入淺穴中探測根系生長情形；電阻成像法以及超聲波檢測法須在土壤表面或樹體插入多個探測器，透過電阻或超聲波探測地底形貌；X光斷層掃描法則須將待測物置於發射端與接收端之間，亦需要將儀器埋設於土壤中(Alani & Lantini 2020)。透地雷達是上述方法中，唯一不需於檢測時在樹木體或土表埋設訊號接受器等侵入式的施作方法，因此相對適用於各種不同覆蓋鋪面的狀況。

透地雷達施作的原理乃透過電磁波發射器(transmitter)將訊號垂直發射至地下，在不同介面會產生反射現象，再經由接收器(receiver)接收回波訊號，最後計算時間差推估地底層的形

貌(Hagrey 2007)。透地雷達之解析度與配載天線頻率有關，有研究使用單一中心頻率250 MHz天線、解析度7.5 cm之透地雷達，比較根系於上坡或下坡處之根系訊號像素數量(Tardío et al. 2016)，亦有研究使用載有兩個天線的雙頻(400及900 MHz)透地雷達來探討根系間之競爭與製作3D根系分布圖(Cui et al. 2020)等應用。此外，透地雷達之訊號品質會受到不同介質的介電常數(dielectric permittivity)、導電度(electrical conductivity)、磁導度(magnetic permeability)、波速(velocity)及電磁波訊號衰減(attenuation)速率等影響，當介質間介電常數差異越大，則反射波能量越強，越容易被透地雷達所偵測，因此土壤及根系之導電率或介電常數皆會影響透地雷達之施測成效。其中，水分為主要影響因子之一，乾燥的土壤與木材之特性接近於絕緣體，其介電常數與導電度等性質多決定於含水率之多寡(Hagrey 2007)。於乾燥的土壤中，根系含水率大於20%者較容易被探測到，然而受到透地雷達解析度之限制，若根與根之距離過近，則不容易被判別(Hirano et al. 2009)。反之，當土壤含水率較高，容易導致土壤與根部的介電常數相近，降低反射訊號的強度，使得根系不易被偵測，而土壤含水率過高或土壤鹽分過高，使土壤導電度上升時，亦會導致衰減常數上升，使得探測深度大幅減低且出現較多雜訊。

為使透地雷達順利捕捉地下待測物訊號，常以同心圓測線以及網格狀測線進行測線佈置施作(Butnor et al. 2001, Alani et al. 2017)。Liu et al. (2020)分析透地雷達回波資料發現，若地下待測物與施作測線呈現垂直正交(orthogonal)，會在回波圖呈現「雙曲線」(hyperbola)圖形，透過影像處理方法處理雜訊等問題，如訊號增益(amplification or gain)、常態化(normalization)、濾波處理(filtration)、移位(migration)等，可使處理過的訊號成為易判釋的回波圖，最後將雙曲線波型及出現位置一一標示出。然而在各式濾波處理中的參數設定方面，因這些參數會隨著施作之環境條件(如：土壤含水率)或待測物性質(如：樹根大小)等而有所不同，常需倚靠經驗或是因地制宜，依照

現地狀況配合雷達回波圖加以調整，設定適合的參數值，或依據所使用之分析工具等不同的軟體，進行不同之訊號處理(Hruska et al. 1999, Barton & Montagu 2004)。

透地雷達技術原多應用於工業領域，近二十年始被引用於樹木根系的探測。透地雷達的樹根調查主要可以分成根系結構(root architecture or mapping)及根系生物量(root biomass)兩大類型。根系結構的調查是透過精密的透地雷達施作以及影像判釋，將根系繪製成二維或是三維的空間分布圖，而根系的形貌亦可以透過此結果加以量化，如單位截面積的根密度或單位體積下的根密度(Hruska et al. 1999)。然而因樹根生長方向不規則，根系結構之調查往往需要較多的人為詮釋，才能將影像判釋結果繪製成連續根系分布，相較於根系結構之調查類型，根系生物量調查則是在完成雷達回波影像處理後，將位於給定振幅閾值區間的像素(pixels)取出，並將此像素總量與實際根生物量進行迴歸分析，便可以得到像素與生物量之關係(Butnor et al. 2003)，省略量化樹根雙曲線波型之步驟，大大降低了因影像判釋與解讀所造成之不確定性。

透地雷達雖可被廣泛應用於根系調查，然而，國內少有透地雷達與樹木根系相關的研究，為引入透地雷達技術於國內林業研究上，本研究欲透過實際的透地雷達測與訊號分析，訂立標準作業程序，使其能夠被廣泛應用。本研究具體的研究目的有二：

- 一、利用單一測線規劃法設計砂坑試驗，訂立透地雷達標準作業程序及相關參數設定。
- 二、依照訂立之作業程序及參數設定，將單一測線規劃法擴展成網格狀測線，於林地施作，並推估根系訊號之空間分布。

材料與方法

一、軟硬體設備

本研究使用瑞典MALA GeoScience公司製造之MALA Easy Locator PRO Wide Range

HDR透地雷達系統(Fig. 1A)，重要相關組件有雙天線，天線頻寬範圍為80~950 MHz，並搭載高解析度(1024×768像素)可於陽光下判讀之顯示器，及配載GPS之精密測距輪，可隨移動距離等距發射電磁波，每一次發射電磁波便會記錄一條雷達回波之軌跡(trace)，該軌跡由每一個沿深度方向的樣本(sample)記錄其振幅，並在雷達回波圖上以一個像素(pixel)呈現。

分析軟體使用ReflexW vers. 9.1.3，並以R程式語言協助訊號判釋與地下反射訊號之估算。其中，ReflexW軟體相容市面上各家透地雷達儀器公司之資料格式，可用於繪製透地雷達之雷達回波圖，以及提供常見之濾波處理、增益處理等套裝功能。

二、試驗設計與透地雷達施作

為測試該透地雷達之解析度，並訂立透地雷達施作流程與分析步驟，本研究先於國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處水里營林區杉木造林地剛被移除之杉木上截取不同直徑之樹根六根及較大直徑之樹枝一根，現地量測其水平直徑(D_h , cm)、垂直直徑(D_v , cm)及濕重(W_{wet} , g)，並加以記錄及計算待測物截面積(A , cm^2) (Table 1)，再至水里營林區附近河床進行砂坑試驗。於試驗結束後，我們將各待測物放入100°C烘箱烘乾至重量不再減少時(10天)，紀錄該重量為乾重(W_{dry} , g)，以濕重減去乾重得到水的重量，再除以乾重作為木材含水率(M_{Root} , %) (Table 1)。

砂坑試驗之進行則於河床上選取較為平整之沙洲，整理一長約500 cm、寬50 cm、深20 cm之砂坑，並加以整平。接著，將一皮尺沿著平行砂坑長邊方向之上方加以固定，佈置單一測線，並以垂直於皮尺方向之50 cm處擺放訊號明顯之鐵錘，以鐵錘上緣對準深度20 cm作為定位之參考，之後於每50 cm與皮尺交接處，垂直擺放一待測樹根，並記錄該樹根位置。最後將沙填回砂坑中，加以踏實與整平(Fig. 1B)。設置完畢後，我們透過體積土壤含水量儀器FieldScout® TDR 350量測每一待測物處的沙含水量(M_{Soil} , %) (Table 1)，並沿著皮尺進行單一

Table 1. Information of the sandbox experiment, number of root samples (Root #), root diameter in the horizontal direction (D_h), root diameter in the vertical direction (D_v), root cross-sectional area (A), wet weight (W_{wet}), dry weight (W_{dry}), root moisture content (M_{Root}), and the corresponding soil moisture content (M_{Soil}) of the sand where the root samples were placed

Root #	D_h (cm)	D_v (cm)	A (cm ²)	W_{wet} (g)	W_{dry} (g)	M_{Root} (%)	M_{Soil} (%)
1	7.9	7.5	46.5	3304	1541	114.4	3.7
2	6.4	4.3	21.6	704	356	97.8	4.2
3	6.2	2.9	14.1	478	225	112.4	4.8
4	2.5	2.2	4.3	134	66	103.0	6.4
5	2.0	1.6	2.5	82	42	95.2	8.4
6	4.0	2.0	6.3	213	114	86.8	6.4
7	6.0	4.0	18.8	291	140	107.9	7.0

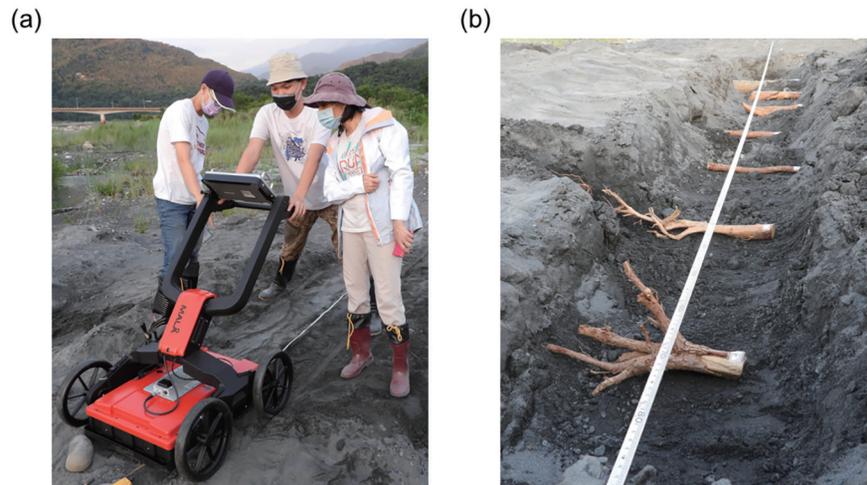


Fig. 1. (a) Photo of the ground penetrating radar (GPR) instrument. (b) Photo of the sandbox experiment setup using a mono-line method in a riverbed in Shuili Township, Nantou County. Root samples were placed at a depth of 20 cm with 50-cm spacing. A tape was positioned in the vertical direction to the root samples to guide the GPR investigation route.

測線透地雷達施作，最後利用砂坑試驗所取得樹根於透地雷達回波圖上對應位置出現之雙曲線波型作為訊號分析依據，建立標準分析作業流程及相關參數設定。

三、透地雷達訊號分析之應用

為測試砂坑試驗所訂立之透地雷達訊號分析於實務上之應用，我們於溪頭自然教育園區內紅樓前之坡度平緩人造林，佈置長8 m、寬2 m之網格狀測線，網格間距0.5 m，以探

測地下根系狀況(Fig. 2)。網格樣區x軸方向略微下坡，平均坡度約10°，樣區夾於一棵香杉(*Cunninghamia konishii*)與一棵柳杉(*Cryptomeria japonica*)之間，香杉位於坡地上方，距離樣區0.9 m，胸高直徑79.1 cm，樹高33.6 m；柳杉位於坡地下方，距離樣區0.5 m，胸高直徑93.2 cm，樹高31.1 m (Fig. 2)。接著利用已建立之分析流程，於林地環境進行之網格狀測線透地雷達施作，並依據所建立之標準分析作業流程及參數，分析資料，以了解林地根系分布狀況。

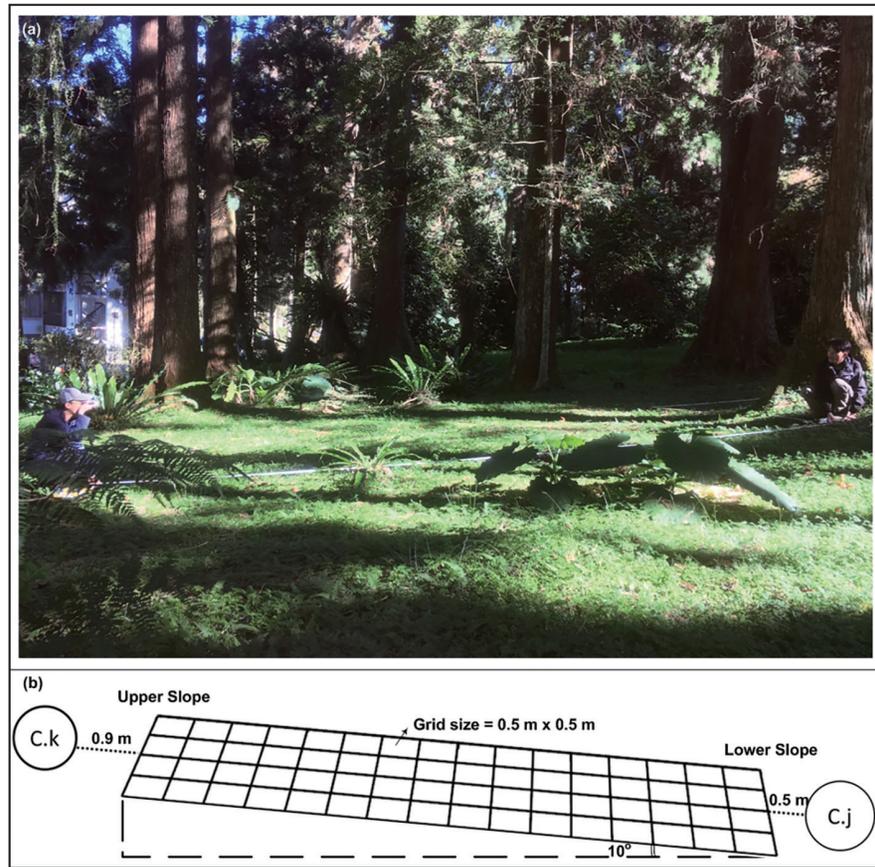


Fig. 2. (a) Photo of the plot in a coniferous forest plantation in Xitou. (b) Schema of the grid line design with a slope angle of 10° , where C.k represents the position of the *Cunninghamia konishii* tree on the upper slope, and C.j the *Cryptomeria japonica* tree on the lower slope.

四、透地雷達訊號特性計算與分析

為方便後人利用透地雷達做訊號分析，本研究訂立出下列標準化訊號分析流程：

(一) 地面校正(ground level calibration)

透地雷達發射器於台車之上未與地面直接接觸，雷達波由空氣進入土壤層時為一明顯之介面，因此會產生振幅相對較大之初達波，將該初達波深度位置校正為0，以利估算土壤層中其他訊號的深度。

(二) 介質波速計算

透地雷達會記錄不同時間下所得之回波訊號，因此可以藉由埋設已知深度之金屬物體(本

試驗利用鐵鏟，將鐵鏟上表面埋設於20 cm深處)，於雷達回波圖上相對應之雙曲線頂點之訊號，由地面傳送至該點之時間，再利用波速=距離/時間之物理公式，即可計算出雷達波於介質中行進的波速。

(三) 待測物回波圖判別

依上式所求出之波速，可定位出鐵鏟基準點的深度位置。再依此深度對照樹根擺放位置，可於回波圖中選取出現雙曲線之位置，加以選取，作為待測物回波分析用之訊號。

(四) 軌跡平滑(smoothing)

因地下部並非完全均質之構造，因此在

雷達回波中會包含許多背景雜訊，為消除部分雜訊以利後續分析進行，本研究透過移動平均(moving average)的方式，使每一條雷達回波軌跡平滑化。而進行移動平均需設定移動窗格(moving window)之寬度，需以目標待測物之雷達回波圖為基準，利用其雙曲線波型之明顯亮暗帶像素數判斷移動窗格寬度，加以訂定之。

(五) 訊號增益處理(amplification or gain)

透地雷達回波能量會在介質中持續地衰減，為使訊號較容易判釋，本研究利用ReflexW軟體將回波圖隨著深度進行增益處理。

(六) 移位處理(migration)

本研究使用ReflexW軟體提供之史拓氏頻率波數域移位法，將地下的同一待測物(如：樹根)在雷達回波圖上呈現分散於不同軌跡(trace)之半雙曲線(semi-hyperbola)回波特徵，運用半雙曲線最大凸函數(semi-hyperbola maximum-convexity function)的概念將訊號值取出，並加總至該雙曲線頂點(Barton & Montagu 2004)後，藉由適當介質波速之設定，轉換為點狀特徵(Sava et al. 2005)，以利訊號分析處理。本研究依據ReflexW軟體內建之功能，套疊雙曲線波型，所得移位處理之介質波速為 0.1 m ns^{-1} 。

(七) 計算兩介質交界處訊號之振幅變化

雷達波於行進時，因不同介質之介電常數差異，會造成雷達波的振幅變化，因此可藉由選取振幅變化最大的地方，作為判別土壤與根系交界處之標準，定位根系出現之位置。

為計算兩介質交界處的振幅變化，本研究將每一個樣本減去前一個深度的樣本，計算振幅變化，作為兩個波長深度範圍內之振幅差值，並將振幅變化值標準化於0-99區間。於前人研究常見將振幅標準化為0~255的區間(Butnor et al. 2003)，因其做法為將雷達回波圖以灰階呈現，本研究直接將振幅變化值取出，標準化則以較為直觀之0~99的區間，更有利於該分析流程之推廣應用。

(八) 振幅變化與樹根尺寸之相關性分析

為了解透地雷達回波訊號振幅變化與樹根尺寸之關聯性，我們選取砂坑試驗中各樹根樣本處曲線波型位置經以上程序處理完之振幅變化量，找出該變化量之最大值、最小值、與平均值，分別與樹根截面積做相關性分析。

(九) 閾值設定

透地雷達之回波圖若呈現雙曲線波型，常為介質改變所造成之反應，可用振幅變化加以判別。然而於不同之介質環境條件下，透地雷達之解析度會有所差異，亦會影響其振幅變化。為捕捉地底下樹根反射時之雙曲線訊號，我們利用溪頭人造林裸露於地面之樹根於回波圖上出現的訊號，經過增益、移位及標準化處理後所呈現之振幅變化，作為閾值，並觀察利用此閾值所選取到之點位是否為回波圖中出現雙曲線之位置，來判斷閾值設定的合適與否。

(十) 核密度估算(kernel density estimate)空間中訊號點的分布情形

為補足網格間隙中無資料的現象，以核密度估算空間上的機率分布，藉以代表可能的反射物分布樣態。估算方法以觀察點的位置擬合出空間上的機率分布，估算空間中事件發生(點出現)的機率，如下式：

$$f(x) = n^{-1} \sum_{i=1}^n k(x - X_i),$$

式中，為估計點位之機率分布值，為樣區中觀測點總數量，為該估計點位與第*i*個觀測點之距離，*k*為核密度函數(kernel function)，依常態分布機率為每一段距離進行加權，計算空間上之機率分布。

結果

一、透地雷達訊號參數

本研究利用砂坑試驗探測所得之透地雷達回波訊號，建立分析流程中所需之參數。首先，以每一條軌跡由空氣進入土壤層時產生振幅相對較大之初達波位置，校正為0，作為該測線之地面與空氣邊界層位置(Fig. 3)，以利估算

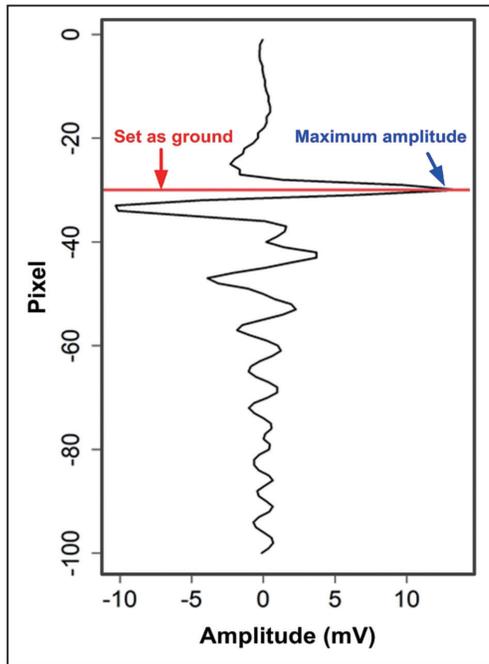


Fig. 3. By processing ground level calibration, the position of the ground can be depicted (i.e., the red line in the figure).

土壤層中其他訊號的深度。接著，利用基準點鐵錘位置與雷達回波所記錄之時間計算介質沙的波速為 0.1587 m ns^{-1} ，並依照樹根樣本大小及擺放位置，選取雷達回波圖樹根對應位置所出現之雙曲線波型(Fig. 4)，計算該波型之明顯亮帶及暗帶之寬度，約為4個像素寬(Fig. 5)，因此以此數值作為計算移動平均中所需之移動窗格寬度。

二、透地雷達訊號分析結果

依據增益及移位處理後樹根位置軌跡之振幅變化，我們計算振幅變化之最大值、最小值、平均值與標準差 (Table 2)。分析結果發現各樹根訊號表現振幅差值的最大值(數值= 87.4)發生於截面積最大之樹根(編號1, 截面積= 46.5 cm^2)，而振幅差值的最大值與樹根截面積有高線性相關性($R^2 = 0.857$)，此外，振幅差值的平均值亦與樹根截面積呈現高線性相關 ($R^2 = 0.830$)，但振幅差值的最小值則與樹根截面積之相關性低 (Fig. 6)。

三、溪頭人造林根系探測結果

溪頭人造林網格測線施測後，將測線依據訊號分析流程以及參數設定進行分析，捕捉雷達回波圖中亮暗明顯以及類雙曲線位置，以振幅變化落在36至59之間作為閾值(Fig. 7)，將所有測線資料分析後依其座標位置繪製成立體圖(Fig. 8)。依據此圖可發現圖左方(x負方向)反射訊號較右方(x正方向)為多(Fig. 8A)。將網格資料進行核密度估算後繪製立體圖發現，左方的反射點位連續性的由左上逐漸往右下分布蔓延，而右側卻僅在靠近地表之淺層土壤有反射物訊號出現(Fig. 8B)。再將反射訊號量沿深度變化整理繪製如Fig. 9。於各深度中，閾值擷取訊號點數量與核密度估算平均訊號點出現機率皆呈現在近地表有較多的反射物訊號分布，約在0.5至1.5 m深度分布穩定，隨後漸少。這樣的結果顯示於此溪頭人造林樣區中，根系多分布於靠近地表之區域，最深約分布至地下2 m處。

討論

本研究利用砂坑試驗，建立透地雷達訊號分析之標準作業流程與參數設定，並應用於溪頭人造針葉林以網格狀測線施作，推估根系分布狀況。研究結果顯示，透地雷達可清楚呈現砂坑中所埋設樹根的雙曲線波型，且訊號分析結果顯示振幅差值的最大值或平均值皆與樹根截面積有高線性相關，可依據此相關性，利用雷達回波圖的訊號振幅變化回推樹根或生物量大小等實務應用。

根據溪頭人造林樣區進行樹根探測的結果發現，透地雷達可順利捕捉樹木根系訊號，並將地下部反射訊號轉換成類似樹根之連續分布樣態呈現。結果顯示位於上坡處的香杉，可在其下坡處探測到較多之樹根，約可延伸約3公尺，而位於下坡處的柳杉，利用透地雷達測得其上坡處之樹根較少，僅靠近地表有些許分布。此林地雖看似平緩，卻有約為 10° 的傾斜坡度，坡面上根系之水平及垂直分布，對於坡面穩定性以及土壤水分布等研究具有相當的價值(Yanagisawa & Fujita 1999, Tardío et al.

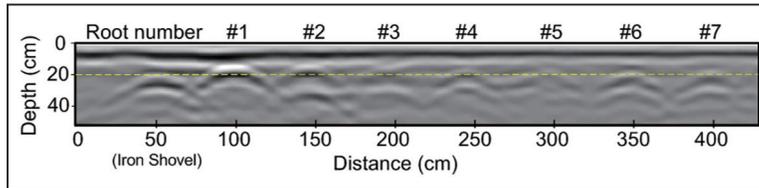


Fig. 4. Radar echo diagram of an iron shovel positioned at a depth of 20 cm and a distance of 50 cm as a reference point for the 7 root samples (root numbers: #1~#7) placed at an interval of 50 cm in the sandbox experiment.

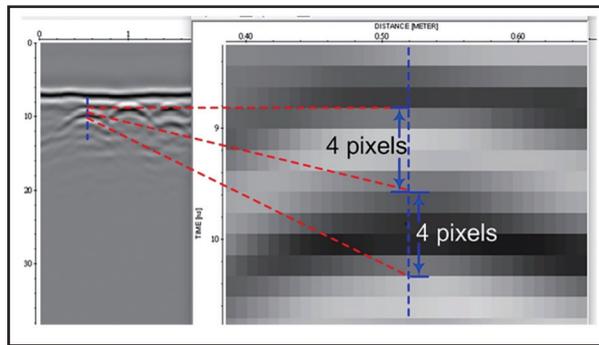


Fig. 5. Determination of pixel numbers from the hyperbola curve as the value of the moving window for the smoothing procedure.

Table 2. Maximum, minimum, average, and standard deviation of the amplitude variation (no units) calculated from the processed signal at the center of each root sample

Root #	Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
1	87.4	2.6	54.8	29.5
2	37.8	3.0	21.2	17.4
3	13.6	6.1	11.1	4.3
4	9.4	0.9	5.2	6.0
5	6.0	1.7	3.8	3.0
6	26.0	1.0	16.9	13.8
7	15.6	0.2	7.1	6.8

2016)。依據此結果，我們推測在坡地上的針葉樹可能呈現下坡處根系較上坡處發達的現象。然而在前人研究中，有研究指出針葉樹下坡處根系發達(Sun et al. 2008)，亦有研究指出闊葉樹上坡處根系發達(Tardío et al. 2016)，另有研究意見相佐(Yanagisawa & Fujita 1999)。對此日後可針對單株木進行上坡處、等高處以及下坡處三方面之透地雷達樣區施作，以說明香杉及柳杉樹種根系分布與坡面之關係。

除了將透地雷達運用於樹木根系樣態的探勘與根系生物量的調查外，亦有研究嘗試將透地雷達探測技術與樹木健康檢測結合，例如應用透地雷達檢測樹幹的空洞(Alani et al. 2017, 2020, Lantini et al. 2020)，或是透過根系結構調查繪製三維的空間根系密度圖，並且透過探測時雷達回波的波形特徵來判斷根系是否死亡(Zhang et al. 2019)。然而，根據使用透地雷達探測經驗，我們實際操作時卻遇見一些問題。

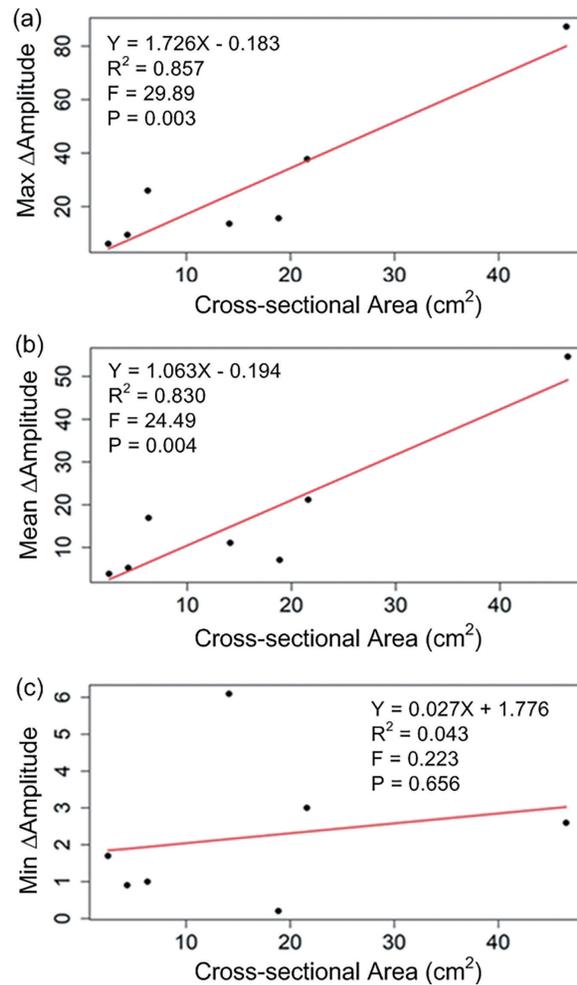


Fig. 6. Results of the correlation analysis between the root cross-sectional area and (a) maximum amplitude difference, (b) mean amplitude difference, and (c) minimum amplitude difference.

以都市環境而言，例如：花圃、水溝、埋設管線、建物牆面、其他人造物以及不同的鋪面等，都會造成根系生長受到阻攔而無法完成根系調查，或是提高透地雷達儀器之施測困難度 (Cermak et al. 2000)。而於森林環境中，若為坡度較陡、起伏較大或是森林地被層及有過厚腐質層等林地，都可能造成施作上的障礙或後續資料判釋上的困難 (Butnor et al. 2001)。因此在坡度過陡峭，地形起伏不一、地被層繁茂等區域，皆不易施作透地雷達。臺灣的森林常位於坡度陡峭之區域，施測透地雷達時建議挑

選地勢平緩，例如平地造林等重要森林資源調查，於數日晴天後施作較為合適。

雖然透地雷達可藉由介質間介電常數差異反射訊號，以線性回歸之方式探討訊號數量與根系生物量之關係 (Butnor et al. 2003)，但於施作時常會遭遇環境中其他反射物 (如石頭、中空) 或其他背景雜訊所產生之干擾，本研究雖設計出一套標準化流程，以利透地雷達訊號之解讀與分析，如何更有效地篩選並挑出由根系反射出的訊號，尚待根系挖掘試驗加以驗證，以利更精準地評估樹木根系生物量或垂直生物量分布等應用。

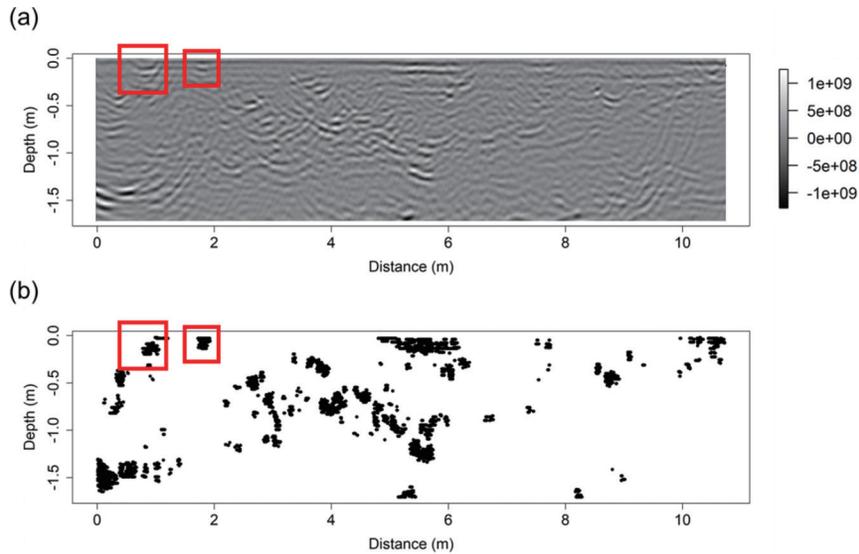


Fig. 7. Results of the ground penetrating radar (GPR) investigation of tree root systems in a coniferous forest plantation in Xitou using grid lines. (a) GPR echo diagram after ground level calibration, where the red box represents the observable roots above ground used to set up the threshold range of the amplitude difference. (b) Captured pixels which corresponded with the radar echo diagram using the developed threshold standard of 36 to 59.

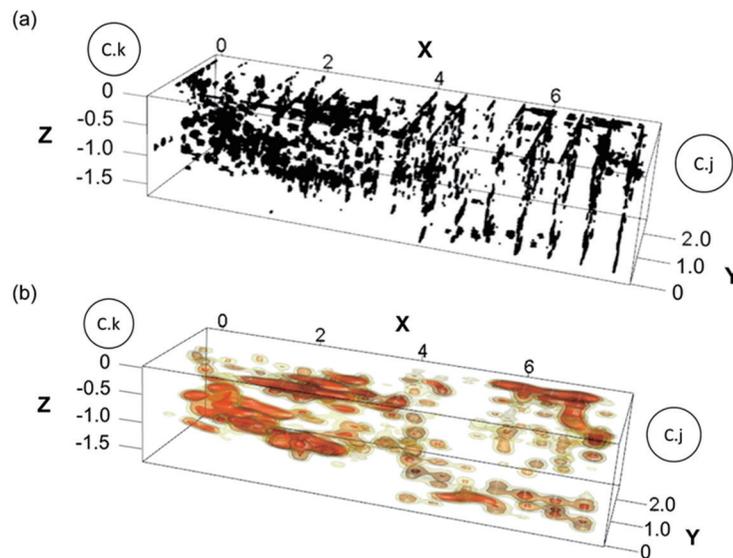


Fig. 8. (a) 3D distribution of captured underground signals following the developed ground penetrating radar (GPR) signal analysis standard operating procedures (SOPs). (b) Estimated kernel density. In this figure, C.k represents the position of a *Cunninghamia konishii* tree on the upper slope, and C.j the position of a *Cryptomeria japonica* tree on the lower slope.

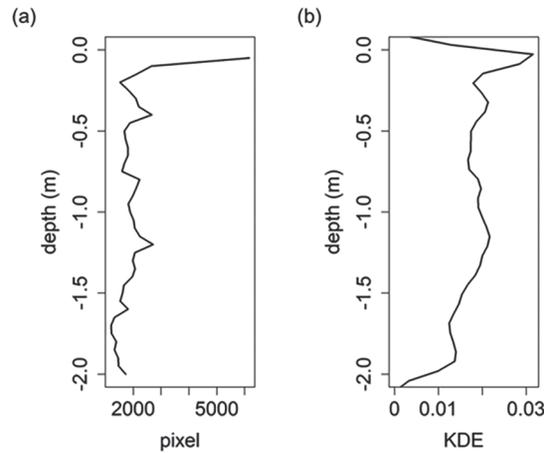


Fig. 9. Vertical distribution of the underground signals. (a) Vertical distribution of pixels captured using the developed threshold standard of 8 to 15. (b) Vertical probability distribution of the kernel density estimation (KDE).

結論

本研究透過砂坑試驗，進行透地雷達檢測施作，並針對擺放有樹根之位置，建立訊號分析處理的標準流程與參數設定，再利用建立之流程於溪頭人造針葉林進行網格狀測線施作與訊號分析，透過地下部反射訊號在水平與垂直的立體空間中分布發現，有部分呈現連續分布的樣貌，可能為根系訊號，未來將輔以破壞性檢測挖掘剖面、淺溝或是土環，驗證根系訊號之判斷，以利推估根系生物量、林木生長量及樹木碳儲存等。

謝誌

本研究特別感謝臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處協助提供砂坑試驗所需之根系樣本，以及研究室伙伴戴嘉瑩及汪子洋辛苦協助透地雷達搬運與探測。另外，本研究承蒙科技部研究計畫MOST108-2621-M-002-010-MY3之補助，特此致謝。

引用文獻

Alani AM, Lantini L. 2020. Recent advances in tree root mapping and assessment using

non-destructive testing methods: a focus on ground penetrating radar. *Surv Geophys* 1-42.

Alani A, Bianchini Ciampoli L, Tosti F, Brancadoro MG, Pirrone D, Benedetto A. 2017. Health monitoring of a matured tree using ground penetrating radar—investigation of the tree root system and soil interaction. (Extended Abstract). In: *Metroarchaeo 2017*. p 23-25. Oct 2017, Lecce, Italy.

Alani A, Giannakis I, Soldovieri F, Benedetto F, Tosti F. 2020. Novel approaches in GPR data processing for health monitoring of trees. In: *International Radar Symposium 2020*. p 5-8. October 2020, Warsaw, Poland.

Attia al Hagrey S. 2007. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *J Exp Bot* 58(4):839-54.

Barton CV, Montagu KD. 2004. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions. *Tree Physiol* 24(12):1323-31.

Butnor JR, Doolittle JA, Johnsen KH, Samuelson L, Stokes T, Kress L. 2003. Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems. *Soil Sci Soc Am J* 67(5):1607-15.

- Butnor JR, Doolittle JA, Kress L, Cohen S, Johnsen KH. 2001.** Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiol* 21(17):1269-78.
- Cermak J, Hruska J, Martinkova M, Prax A. 2000.** Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant Soil* 219(1-2):103-16.
- Cui X, Liu X, Cao X, Fan B, Zhang Z, Chen J, et al. 2020.** Pairing dual-frequency GPR in summer and winter enhances the detection and mapping of coarse roots in the semi-arid shrubland in China. *Eur J Soil Biol* 71:236-51.
- Gupta A, Lövbrand E, Turnhout E, Vijge MJ. 2012.** In pursuit of carbon accountability: the politics of REDD+ measuring, reporting and verification systems. *Curr Opin Environ Sustain* 4(6):726-31.
- Hirano Y, Dannoura M, Aono K, Igarashi T, Ishii M, Yamase K et al. 2009.** Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant Soil* 319(1-2):15.
- Hruska J, Čermák J, Šustek S. 1999.** Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiol* 19(2):125-30.
- Lantini L, Tosti F, Giannakis I, Zou L, Egyir D, Mortimer D, Alani A. 2020.** Health assessment of trees using GPR-derived root density maps. In: *IEEE Radar Conference 2020*. p 21-25. September 2020, Florence, Italy.
- Liu X, Chen J, Butnor JR, Qin G, Cui X, Fan B, et al. 2020.** Noninvasive 2D and 3D mapping of root zone soil moisture through the detection of coarse roots with ground-penetrating radar. *Water Resources Res* 56(5):e2019WR026930.
- Pregitzer KS, DeForest JL, Burton AJ, Allen MF, Ruess RW, Hendrick RL. 2002.** Fine root architecture of nine North American trees. *Ecol Monogr* 72(2):293-309.
- Sava PC, Biondi B, Etgen J. 2005.** Wave-equation migration velocity analysis by focusing diffractions and reflections. *Geophysics* 70(3):U19-27.
- Sorgonà A, Proto AR, Abenavoli LM, Di Iorio A. 2018.** Spatial distribution of coarse root biomass and carbon in a high-density olive orchard: effects of mechanical harvesting methods. *Trees* 32(4):919-31.
- Stover DB, Day FP, Butnor JR, Drake BG. 2007.** Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. *Ecology* 88(5):1328-34.
- Sun HL, Li SC, Xiong WL, Yang ZR, Cui BS. 2008.** Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. *Ecol Engin* 32(1):60-7.
- Tardío G, González-Ollauri A, Mickovski SB. 2016.** A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach. *Ecol Engin* 97:46-57.
- Wu Y, Guo L, Cui X, Chen J, Cao X, Lin H. 2014.** Ground-penetrating radar-based automatic reconstruction of three-dimensional coarse root system architecture. *Plant Soil* 383(1):155-72.
- Yanagisawa N, Fujita N. 1999.** Different distribution patterns of woody species on a slope in relation to vertical root distribution and dynamics of soil moisture profiles. *Ecol Res* 14(2):165-77.
- Zhang X, Derival M, Albrecht U, Ampatzidis Y. 2019.** Evaluation of a ground penetrating radar to map the root architecture of HLB-infected citrus trees. *Agronomy* 9(7):354.

