

第十九卷第二期
中華民國一〇三年十二月

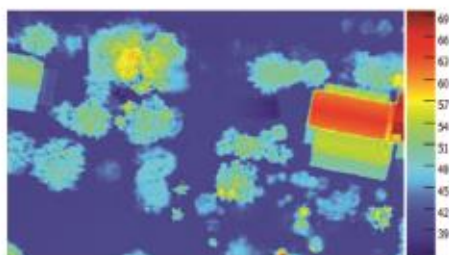
ISSN 1021-8661



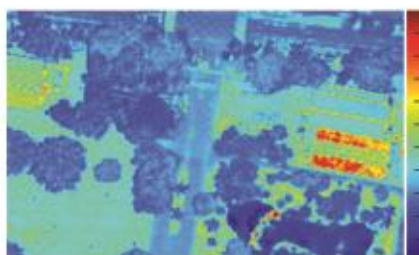
航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版

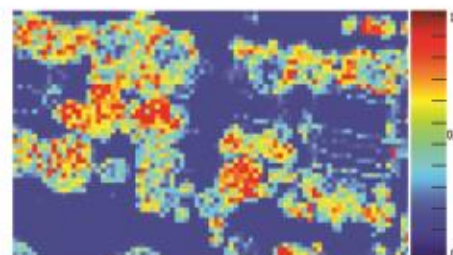
全波形空載光達特刊



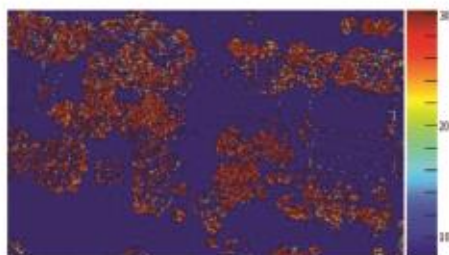
高程值 (Z)



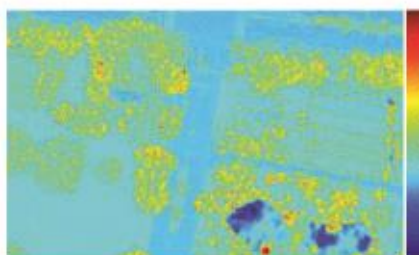
振幅 (Amplitude)



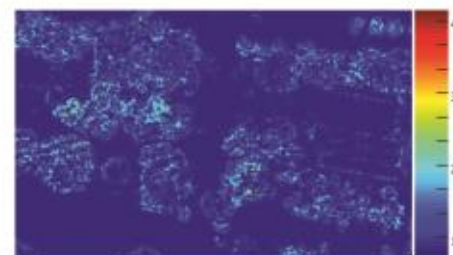
回波率 (Echo Ratio)



高程差異值 (dZ)



波寬 (Width)



回波編號值 (Echo Number)

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 19 No.2

December

2014

Published by Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

航測及遙測學刊

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

發行人：陳良健

出版者：中華民國航空測量及遙感探測學會

地址：台北市文山區羅斯福路五段 113 號三樓

信箱：台北市郵政 93-158 號信箱

電話：886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

傳真：886-2-2931-7225

電子信件：csprsmail@csprs.org.tw

網址：http://www.csprs.org.tw

總編輯

曾義星

國立成功大學測量及空間資訊學系

電話：886-6-275-7575 分機 63835

傳真：886-6-237-5764

電子信件：jprssubmit@gmail.com

編輯委員

◆ 農林

鄭祈全 (文化大學)

申雍 (中興大學)

◆ 海洋與大氣

劉振榮 (中央大學)

何宗儒 (台灣海洋大學)

◆ 防災

劉進金 (達雲科技有限公司)

徐百輝 (台灣大學)

◆ 土地利用與覆蓋

陳永寬 (銘傳大學)

詹進發 (政治大學)

◆ 地理資訊系統

何維信 (中華科技大學)

蔡榮得 (中興大學)

◆ 遙感探測

陳良健 (中央大學)

蔡富安 (中央大學)

◆ 攝影測量與光達

廖揚清 (成功大學)

史天元 (交通大學)

趙鍵哲 (台灣大學)

PUBLISHER: L. C. Chen

PUBLISHED BY: Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Address: 3F, No.113, Sec.5, Roosevelt Road, Taipei, Taiwan

Mail Address: P. O. Box. 93-158, Taipei, Taiwan

Tel: 886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

Fax: 886-2-2931-7225

E-mail: csprsmail@csprs.org.tw

Web Site: http://www.csprs.org.tw

EDITOR-IN-CHIEF

Yi-Hsing Tseng

Department of Geomatics, National Cheng Kung University

Tel: 886-6-275-7575 ext. 63835

Fax: 886-6-237-5764

E-Mail: jprssubmit@gmail.com

EDITORIAL BOARD

◆ Agriculture and Forestry

C. C. Cheng (Chinese Culture University)

Y. Shen (National Chung Hsing University)

◆ Oceanography and Atmospheric Science

G. R. Liu (National Central University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

◆ Disaster Management

J. K. Liu (LIDAR Technology Co., Ltd)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

◆ Land Cover and Land Use

Y. K. Chen (Ming Chuan University)

J. F. Jan (National ChengChi University)

◆ Geographical Information System

W. H. Ho (China University of Science and Technology)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

◆ Remote Sensing

L. C. Chen (National Central University)

F. a. Tsai (National Central University)

◆ Photogrammetry and LiDAR

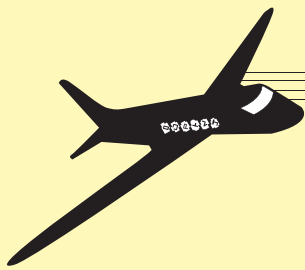
Y. C. Liao (National Cheng Kung University)

T. Y. Shih (National Chiao Tung University)

J. J. Jaw (National Taiwan University)

封面圖片說明 About the Cover

全波形光達記錄回波的連續波形，藉由波形分析得到更多的地表反射物理特性、地表細節及變化，提供較豐富及完整的地表資訊，有助於地形重建及地物判識。波形參數包含波寬、振幅、背向散射參數，光達幾何參數則包含高程、高程差、回波數、多重回波百分比，可結合波形及幾何參數進行地物分類。圖中由左至右由上至下依序為高程值、振幅值、回波率、高程差異值、波寬值、回波編號值。不同地物因反射率、幾何結構、粗糙度等特性差異，可透過全波形光達多元特徵作為地物判識的依據。



特刊引言

全波形空載光達

曾義星 教授

國立成功大學測量及空間資訊學系

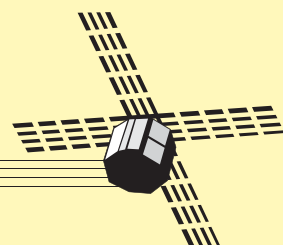
隨著光達技術的精進，商業型的空載光達系統已進化成能以密集取樣訊號強度之方式，將地物背向散射訊號波形完整記錄下來，又稱為全波形(full waveform)空載光達系統。相較於傳統光達僅能記錄少數的回波響應值(echoes)，全波形光達可完整地記錄雷射光行經物體間的反射強度(intensity)，且所記錄的波形除了可推算反射物距離外，亦隱含了反射物的物理性質，因此全波形光達具有更深遠的應用潛力。同樣應用全波形雷射技術於水域深度測量，稱為測深光達(Bathymetric LiDAR)，是淺海地區水深及水底地形觀測的利器。

全波形光達回傳訊號之波形會隨地物性質而改變，如地表反射性質、面向、粗糙度、構造等，所以回波波形資料含有地物類別及性質的資訊，透過波形資料的分析有助於解讀地物表面的型態，也提供了地物分類之依據。全波形光達資料為一連串雷射反射強度資訊，可透過響應偵測及擬合等方式將波形中隱含之特性萃取出來，並透過資料分析波形特徵或波形參數（如峰值、振幅、及波寬等），來解讀地表物的性質。波形特徵也提供我們更多的指標來區分不同種類的地物，對不同類型的地物更有區別能力，能夠進一步使用此資訊來進行地物分類。由於雷射具有部分地物穿透能力，尤其是針對森林地區的林木，其波形特徵提供了分析森林內部結構的契機，因此有別於應用光學影像之分類應用。

波形分析是全波形光達研究的主要議題，波形分析的目的是瞭解全波形光達數據中所隱含的資訊。因為波形資料其實是回收到不同地物回訊的疊置，因此可使用數學函數擬合及分解波形，數學函數中的參數可視為波形參數，可分析不同參數所代表的幾何意義，研究其對應的地物類別與地形之表現。為報導全波形空載光達的研究動向，並基於推廣新的航測及遙測技術，乃規劃出版「全波形空載光達」專刊，本刊所刊載之論文計五篇，其篇名依序為：

- 應用空載全波形光達資料於波形分析與地物分類
- Reliability Assessment of Gaussian Estimates Derived from Small-footprint Waveform Lidar
- 應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數
- 全波形空載光達資料之波形特徵分析與分類
- 以測深光達數據產製東沙塊礁分佈圖

這五篇論文所探討之課題包含全波形空載光達之波形分析、波形參數推導、地物分類、森林樹冠高度模型及葉面積指數估計、以及測深光達數據分析等，反映出全波形空載光達的研究與應用的面向。期望此特刊能呈現全波形空載光達目前的學術研究狀況，以推廣全波形空載光達在不同領域的應用。



應用空載全波形光達資料於波形分析與地物分類

林郁珊¹ 張智安^{2*}

摘要

全波形光達記錄回波的連續波形，藉由波形分析得到更多的地表反射物理特性、地表細節及變化，提供較豐富及完整的地表資訊，有助於地形重建及地物判識。本研究分別使用對稱函數(高斯函數)與不對稱函數(韋伯函數)進行擬合波形，並進行原始資料與擬合成果兩者間的精度評估，分析不同擬合函數對於全波形光達訊號處理的適用性。研究中萃取的波形參數包含波寬、振幅、背向散射參數，光達幾何參數則包含高程、高程差、回波數、多重回波百分比，結合波形及幾何參數進行地物分類。本研究以光達特徵配合人工判識選取訓練區，並使用支持式向量機(Support Vector Machine, SVM)與隨機森林(Random Forest)兩種分類器進行地物分類，並就地物分類成果進行精度評估，藉此比較使用全波形光達及多重回波光達進行分類之精度。研究結果顯示，雖然使用韋伯函數之波形擬合殘差較小，但在波形峰值位置的萃取成果與高斯函數之差異有限，因此高斯函數為一個簡易有效之擬合函數。在地物分類方面，全波形光達所提供的背向散射參數為一顯著性高的特徵，另隨機森林分類法的成果相較於支持式向量機為佳。

關鍵詞：空載光達、全波形光達、波形擬合、地物分類、支持式向量機、隨機森林

1. 前言

空載光達為一種主動式對地量測系統，脈衝式空載光達系統之原理是以飛行載具，搭載全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)與慣性量測裝置(Inertial Measurement Unit, IMU)，獲取定位資訊與姿態參數。利用脈衝雷射進行掃描，記錄反射訊號的回訊脈衝及時間再轉換為距離，進行直接地理定位。其高程精度可達 0.15 公尺，可將大量點位坐標(點雲)的地理幾何資訊與反射強度資料，運用在不同領域，如建立數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM、Digital Terrain Model, DTM)、三維空間模型、電力線偵測等等應用。

隨著科技技術的進步與硬體儲存設備的演進，商用空載陸域全波形光達從 2004 年開始普及並商用化，多數空載光達系統均具有獲取全波形資料的能力。全波形光達可接收與記錄連續的波形供給使

用者自行對波形進行後處理，獲得所需資訊。全波形光達與傳統脈衝式多重回波光達系統不同地方在於，多重回波光達僅輸出數個回波，記錄該點的強度值與三維離散坐標，其優點是提升存取的效能並節省儲存空間；而全波形光達藉由回波訊號的密集取樣，取樣間距可達 1ns 記錄 1 筆回波訊號，藉以描述接收到連續的回波訊號，提供使用者比傳統多重回波光達更多的地表資訊與更高密度的點雲，有助於地形重建及地物判識。

全波形光達依其使用目的分為以下三種類別：

(1)實驗光達(Experimental Lidar Systems)、(2)測深光達(Bathymetric Lidar Systems)、(3)商用光達(Commercial Lidar Systems)(Mallet and Bretar, 2009)。實驗光達設計目的為科學任務，主要載具是衛星，雷射足跡(Footprint)直徑約為在 10 至 100 公尺之間，例如 NASA 的 SLICER (Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery)、SLA (Shuttle Laser Altimeter)、LVIS (Laser Vegetation Imaging

¹ 國立交通大學土木工程學系 碩士

² 國立交通大學土木工程學系 副教授

收到日期:民國 102 年 04 月 08 日
修改日期:民國 102 年 07 月 21 日
接受日期:民國 102 年 08 月 19 日

*通訊作者，電話: 03-5712121 ext. 54929, E-mail: tateo@mail.nctu.edu.tw

Sensor)、MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter)與 ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)任務,對全球進行地形、植被等環境資料收集。測深光達主要目的是水深的量測,利用紅外光(1064nm)及綠光(532nm)分別量測水表及水底,例如 Fugro LADS、Optech SHOALS、AHAB HawkEye 等,可量測淺海水質清澈地區之水深及海底地形。商用光達大多是進行陸域掃描,利用掃描頻率高與掃描足跡小的特點,提供豐富且細緻的地形資訊,例如 Riegl、Trimble (Toposys)、Optech ALTM Gemini、Leica ALS 系列等。

由於全波形光達系統儲存的資料是回波波形資料,與多重回波光達相較之下,其回波資料較為完整,因此萃取波形參數(如峰值、振幅、波寬等),亦可增加點雲密度,利用於地面點的分類。研究成果顯示,波形資料能偵測出比傳統多重回波光達多 30%到 130%的點,植物密度愈高的地區其增加的點數愈多(Chauve *et al.*, 2007a),而這些多偵測出的點通常位於茂密的樹冠與地面點。因此全波形資料具有優勢的點雲密度,對於地面點的偵測有很大的幫助。

全波形光達研究中,波形分析是一項重要議題,波形分析之目的為瞭解與獲得全波形光達數據中所隱含的資訊。因為接收到的訊號是不同地物回訊的疊置,因此可使用數學函數擬合及分解波形,數學函數中的參數可視為波形參數,可分析其參數所代表的不同幾何意義,研究對應到的地物類別與地形表現。

由於大部分光達發射的脈衝訊號接近於高斯分布,因此假設接收之回波波形亦近似高斯分布,其函數主要包含振幅(Amplitude)與波寬(Width)兩個參數,可用以量化某一地物波形。藉由使用多個高斯函數疊加擬合波形訊號,可以快速地將資訊用兩個參數表示,所以高斯分解法廣泛應用於全波形之波形分析中(Chauve *et al.*, 2007b; Hofton *et al.*, 2000; Jutzi and Stilla, 2006; Wagner *et al.*, 2006)。另因反射回波因地表幾何不均造成時間延遲,會有些微不對稱的情形發生(Mallet and Bretar, 2009),所以波形分解亦可使用不對稱的函數進行擬合,並探

討使用不對稱的函數之成果(Chauve *et al.*, 2007b; Mallet *et al.*, 2009)。擬合波形亦可使用小波(wavelet)的方式(Laky *et al.*, 2010); B-spline 也被提出可以有效的對波形進行擬合(Roncat *et al.*, 2011)。

擬合回波的函數甚多並各有優缺點,但過去文獻中的文章中認為高斯分布是一個普遍且簡單的對稱函數(Wagner *et al.*, 2006),也可求得較佳的成果(Jutzi and Stilla, 2005),因此多數波形分析法以高斯模型為基礎。在不對稱函數中,Weibull 是一個普遍且相對簡易並具有意義的不對稱函數(Coops *et al.*, 2007)。

研究指出全波形光達可提高地物分類的準確度(Chauve *et al.*, 2007a),獲得更細微的地表物參數,常使用於森林區與都市區植被偵測。研究也針對於全波形光達資料於地物分類的幫助進行量化性評估。此外,全波形光達對森林地區的樹木參數萃取亦有所助益,萃取的參數有波寬、振幅與背向散射參數,這些參數可用於分辨不同樹種,例如:Larch、Oak、Beech (Höfle *et al.*, 2008),對於針葉林、茂密樹冠與落葉林也有顯著差別(Reitberger *et al.*, 2008),針葉林與闊葉林的分類總體精度更可達 91%(Heinzel and Koch, 2011)。

本研究動機是藉由波形分析提升光達資料處理品質。在波形數據中,不同的地物所反射的回波形狀不同,若是利用「分析波形」或是「參數萃取」等方法獲得全波形光達數據中所隱含的資訊,相信能獲得更詳細清楚的地形地貌,這也是目前全波形光達相關研究中十分重要的議題。所以本研究希望藉由數學函數擬合全波形光達數據,找出其波形代表的參數;同時比較不同的函數對於波形擬合成果是否有顯著影響。並且最後在地物分類的過程中加入波形的參數,藉以提升地物分類之精度。

本研究之目的包含波形擬合及地物分類,波形擬合中比較對稱與不對稱函數的擬合成果,進行分析;藉由整合萃取的波形參數與光達幾何資訊,進行不同地物的分類。波形擬合的目的是為找出適合擬合的函數,進而萃取幾何及波形特徵,本研究將使用不同的函數進行回波的分解,並且比較方法的

優缺點。採用的函數包含：(1)對稱高斯函數、(2)非對稱 Weibull 函數。地物的分類研究重點在於分析全波形特徵對分類的幫助，比較使用全波形資料加入分類前後的成果精度評估，利用不同的分類法分析全波形資料的必要性與其對於不同地表物分類的幫助。

2. 研究方法

本研究的方法主要分為兩部分：第一部分為全波形光達的波形分析，包含資料前處理、計算初始值、函數擬合、參數萃取與精度分析工作；第二部分為應用全波形光達於地物分類，包含建立分類圖層、隨機森林(Random Forest)分類、支持式向量機(Support Vector Machine, SVM)分類與精度評估工作，流程圖見圖 1 及圖 2。

2.1 波形分析

波形分析從資料前處理的部分著手，依據不同的使用資料給定不同的高斯平滑參數並濾除背景雜訊。接著對平滑處理過的波形微分進行區域最大值偵測，其目的是為提供下一步擬合解算的初始值。在擬合函數方面，本研究使用高斯函數與韋伯函數，主要的因素是為探討對稱與不對稱函數對於波形擬合成果的影響。

2.1.1 資料前處理

資料前處理目的是雜訊濾除，分為高斯平滑及濾除背景雜訊兩部份。高斯平滑使用高斯函數濾波，目的是降低局部雜訊的干擾，高斯平滑化必須給定罩窗大小及平滑因子 σ 兩個參數，當 σ 值越小的情況下，權值分布會向中央集中，濾波器形狀高且瘦，平滑效果不彰，因受到平滑因子 σ 的影響，罩窗範圍大，罩窗邊緣之權值趨近於零，因而需要設定門檻。圖 3(左)紅色線為全波形光達原始波形，藍色為經過高斯平滑後之成果，經過平滑後的波形在峰值的部分會較原始資料低。在此資料中，平滑因子設定為 5，罩窗大小為 9。

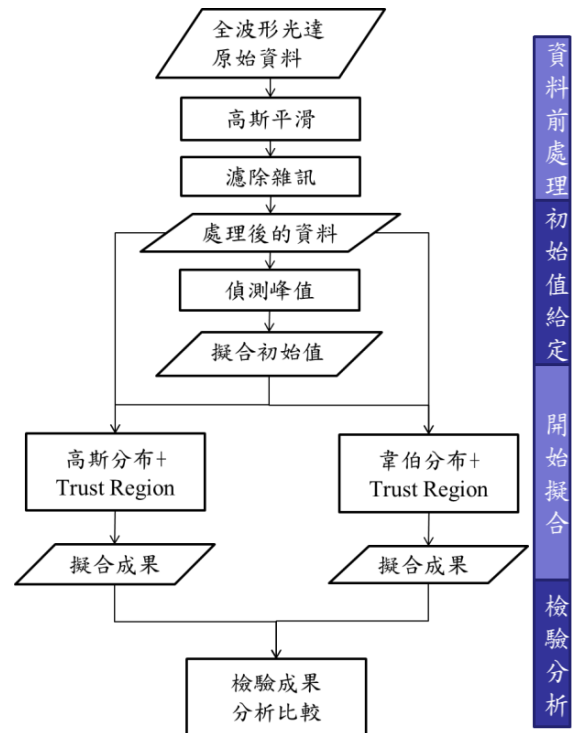


圖 1 波形分析研究流程

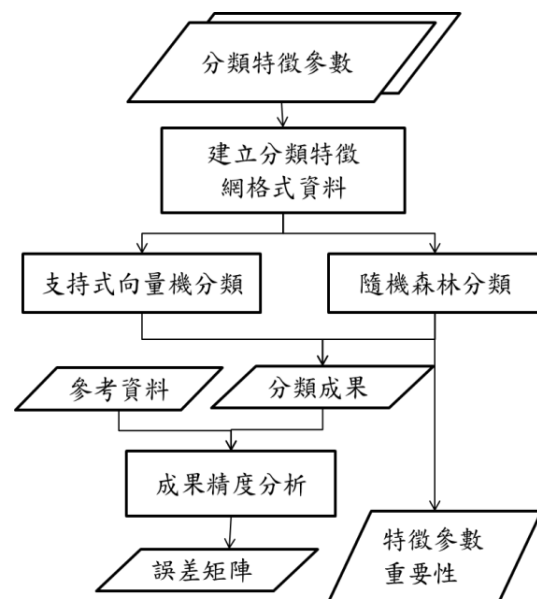


圖 2 地物分類流程圖

濾除背景雜訊為針對背景雜訊 (Background Noise) 進行處理，背景雜訊是指反射值小於光達系統訊雜比的反射值，因此以訊雜比設定門檻，若反射值小於門檻則去除。圖 3(右)綠色為濾除背景雜訊後的成果，正常而言在沒有接收到回波訊號時值應為 0。在此資料中，背景雜訊的均值約為 13。

2.1.2 計算初始值

由於擬合波形之函數為非線性函數，需使用迭代方式求解，求解時必需給參數初始值。由經過前處理的原始資料，利用斜率為 0 蒐尋局部最大值 (Local Maximum)，加上門檻設定以取得初始峰值位置，再依初始峰值的位置和其所對應之波寬作為迭代求解之初始值。此方法所找到的初始值運算效率佳，可做為高斯函數求解的良好初始值。而韋伯函數需要更精確的初始值，所以使用高斯函數所擬合的波形參數作為韋伯函數求解初始值。

圖 4(左)為直接使用斜率變化偵測的原始初始值，紅色箭頭的部分是一些錯誤點，可能是因為平滑的成果不理想所致。所以加上門檻值設定(例如水平與垂直方向上兩個極值距離太接近，則予以刪除)，刪除這些錯誤的點，再進行波形擬合解算，

即可求得擬合成果，如圖 4(右)所示，可以萃取出三個回波。

2.1.3 擬合函數計算

光達的回波波形與地物形狀相關，平坦地的回波寬度小，地物粗糙或是傾斜時的回波寬度大且較不對稱，因此在波形擬合時，分別使用對稱及非對稱函數進行比較分析。擬合函數計算包含波形分解公式、光達方程式與背向散射參數推導對稱與非對稱函數。

本研究所使用的高斯分解法 (Gaussian Decomposition) 其精神是將回波的波形，拆解成數個不同的高斯函數，如圖 5 就有 4 個回波；同理非對稱的函數也是將波形分解成數個不同的韋伯函數。其數學式如式(1)， y_i 是擬合之波形， $\phi_k(x_i)$ 為數學函數， b_i 為雜訊值。

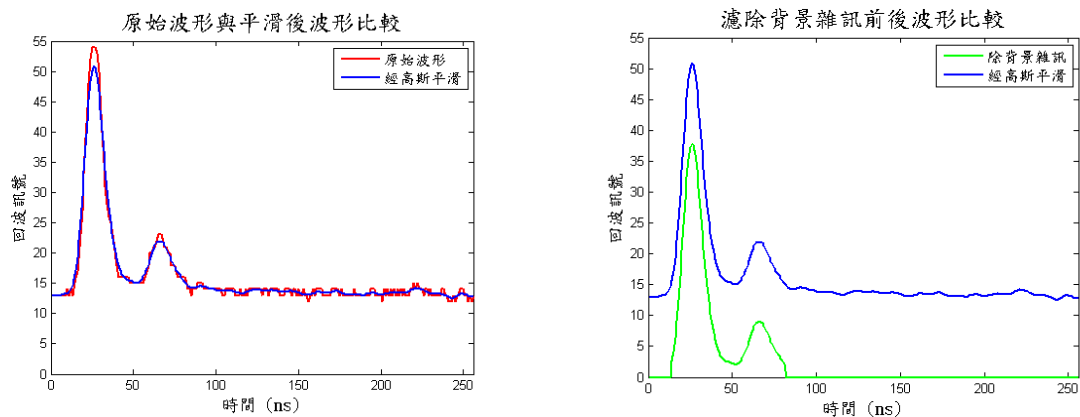


圖 3 資料前處理(左:高斯平滑；右:濾除背景雜訊)

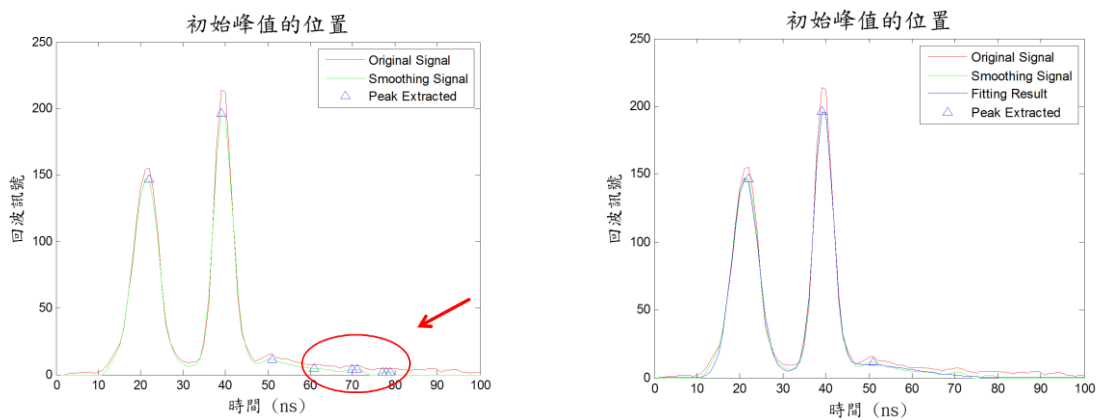


圖 4 計算初始值

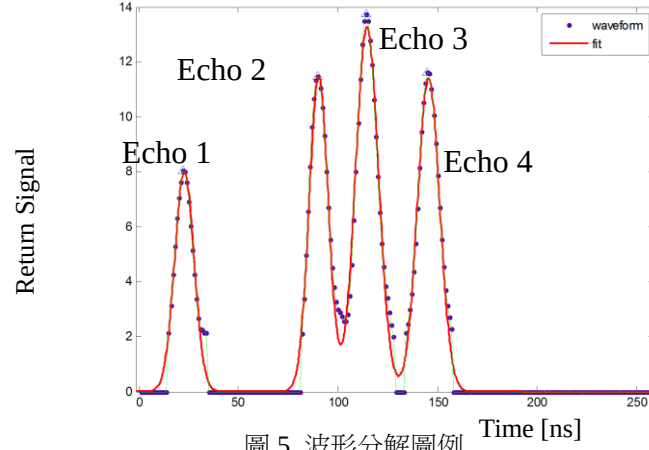


圖 5 波形分解圖例

$$y_i = \sum_{i=1}^n \phi_k(x_i) + b_i \quad (1)$$

式(2)及式(3)分別為高斯分布數學式與韋伯分布數學式，藉由此函數可以求得所需的波形參數，圖 6 是該函數示意圖，左圖為不同振幅及不同平移之高斯函數，右圖則是不同尺度參數及形狀參數之韋伯函數。圖 7 是使用兩種不同函數進行擬合的示意圖，此原始波形光達資料有些微的不對稱，使用不對稱的函數對擬合的成果將會有所助益。

$$y = a \times e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2)$$

$$y = a \times \frac{\kappa}{\lambda} \left(\frac{\kappa}{\lambda}\right)^{\kappa-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\kappa}} \quad (3)$$

x : 時間(Nanosec)

y : 接收訊號(Volt)

μ : 平移

a : 振幅(Amplitude)

Σ : 波寬(Echo width)

κ : 尺度參數(Scale Parameter)

λ : 形狀參數(Shape Parameter)

式(4)可經推導而得式(5)為背向散射參數(Backscatter cross-section)與回波振幅、回波波寬的關係式，(Wagner *et al.*, 2006)，已考慮系統與大氣對能量衰減的影響。而式(6)當中的 C_{cal} 為一校正常數，移項之後整理得式(7)。因此配合距離、回波振幅、回波波寬、反射率、光束發散寬度就可計算每個回波的背向散射參數。

在計算 C_{cal} 時，嚴密的作法是在地面設標量測

實際不同地物的反射率，而在此本研究我們引用文獻，在特定條件與波長下(雷射波長 1550 nm，光束直徑 0.15 m，距離 1-1.5 m)，柏油路的反射率經由量測而得等於 0.25 (Alexander *et al.*, 2010; Briesse *et al.*, 2008)。本研究簡化程序，假設同一航帶大氣條件相同，使用人工選取柏油路面點求出 C_{cal} ，再將其應用在整個航帶上。

$$P = \eta_{sys} \eta_{atm} \frac{D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \hat{S} \sigma \frac{S_s}{W} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{4\pi \beta_t^2}{\eta_{sys} \eta_{atm} D_r^2 \hat{S} S_s} R^4 P W \quad (5)$$

整合式(4)及式(5)

$$\sigma = \pi \rho R^2 \beta_t^2 = C_{cal} R^4 P W \quad \text{其中}$$

$$C_{cal} = \frac{4\pi \beta_t^2}{\eta_{sys} \eta_{atm} D_r^2 \hat{S} S_s} \quad (6)$$

$$C_{cal} = \frac{\rho \pi \beta_t^2}{R^2 P W} \quad (7)$$

(柏油路 $\rho = 0.25$ (Alexander *et al.*, 2010))

S_s : 散射能量密度

D_r : 接收器孔徑

R : 雷射發射器到物表的距離

β_t : 光速發散寬度

η_{sys} : 系統轉換因子

η_{atm} : 大氣轉換因子

S : 振幅

s : 標準差

C_{cal} : 校正常數

P : 回波振幅

W : 回波波寬

σ : 背向散射參數

ρ : 反射率

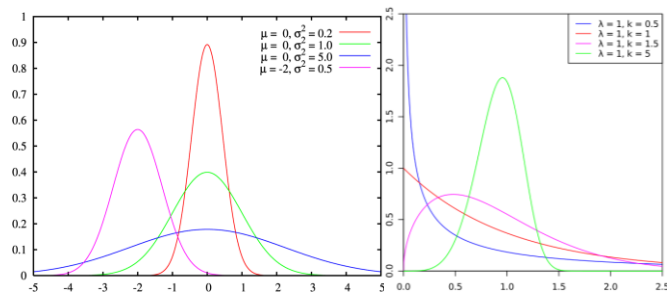


圖 6 高斯函數 (左) 與韋伯函數 (右)

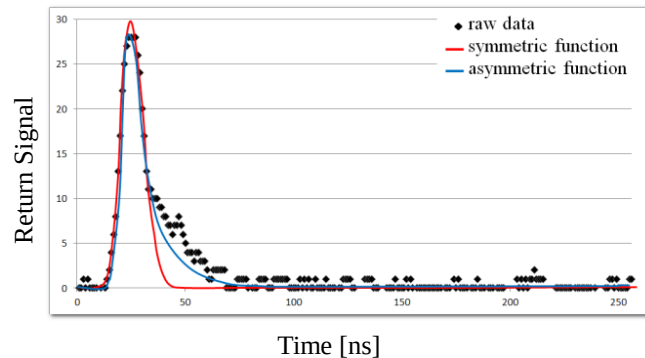


圖 7 對稱與不對稱函數之差異

2.2 地物分類

地物分類使用的全波形光達參數包含三維坐標幾何資訊、高程差、波寬、振幅、回波數目，這些分類特徵內插成為網格式的資料，納入分類器中進行分類。選用的分類法分別有隨機森林(Random Forest)與支持式向量機(SVM)兩種，最後進行精度評估與全波形資料所萃取特徵影響之探討。

2.2.1 分類特徵參數

本研究所使用的分類特徵參數皆來自於光達資料，分別有波寬(Echo Width)、振幅(Amplitude)、背向散射參數(Backscatter Coefficient)、高程值(Z)、高程差(dZ)、回波數(Echo Number)、多重回波百分比(Echo Ratio)。特徵參數完成萃取後，經由內插產生網格式資料圖層，再進行分類。

振幅與波寬則是從高斯函數擬合的結果所取得。所以根據式(7)，使用人工選取道路點求出 C_{cal} ，再將其應用在整個航帶上，計算出每個回波的背向散射參數。高程差(dZ)為一個代表地形粗糙度的參數，其計算方式為在一個固定範圍的空間中，找尋光達點雲高程最大與最小之差值(圖 8)。由於本研

究所測試的區域地形高程起伏不大，所以不考慮地形的影響，若是在地形起伏大的地方，必須使用對地形面鉛垂的高度差值。

回波數(Echo Number)則是點雲的回波數之比值，可從其得知回波的先後順序與地物的關係。多重回波百分比(Echo Ratio, ER)是一個計算多重回波比率的參數，此數值愈高就代表此區域有較多回波，地貌較為複雜，如式(8)所示， n_{first} 為第一回波的數量， $n_{intermediate}$ 為多重回波中非第一也最後回波的數量， n_{last} 為最後回波， n_{single} 為單一回波(Höfle *et al.*, 2008)。

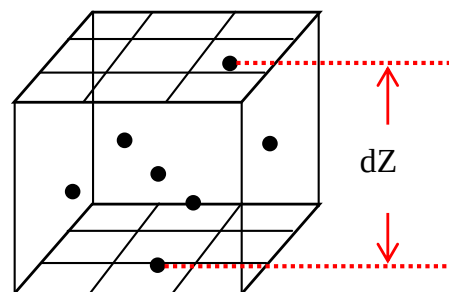


圖 8 高程差 dZ 示意圖

$$ER(\%) = (n_{first} + n_{intermediate}) / (n_{last} + n_{single}) \cdot 100 \quad (8)$$

2.2.2 分類方法

研究使用兩種分類方法，一是隨機森林分類，二是支持式向量機(SVM)。分類的一般作法是將訓練資料(由已知類別標記的資料所組成)建立分類模式，分類模式對未知類別的測試資料進行預測。隨機森林法是以決策樹分類為基礎，將許多不同決策樹的成果進行投票，選擇出最佳的分類決策樹。支持式向量機則廣泛使用於影像分類領域，是以統計學習理論提出的一種機器學習方法，主要特性是在特徵空間中尋求具最大邊界的區分 Hyper-Plane 以區分不同的兩個類別。

隨機森林是一個特別設計給決策樹分類的整合分類方法，其結合多個決策樹的預測結果，其由 Breiman (2001)所提出，此分類方法的優點為可提供分類特徵資料的重要性，並且其使用分類成果最佳的方針建立模型。隨機森林法需要控制的參數只有(1)決策樹的數量、(2)進入每個決策樹中的特徵參數數量。在 Bootstrap 抽樣的過程中，沒有被抽中的樣本為 Out-of-Bag(OOB)，可以用以估計模型的錯誤率(OOB-error)。理論上，當樹夠大時，隨機森林可以保證所產生的推論錯誤率之上限公式(9)如下：

$$\text{推論錯誤率} \geq \frac{\bar{\rho}(1 - s^2)}{s^2} \quad (9)$$

$\bar{\rho}$ ：表示樹間的平均相關程度

s ：表示樹分類法的分類能力

隨機森林法詳細演算步驟如下，隨機森林中的每棵決策樹都是根據隨機向量值所建立的，而隨機向量是依據固定機率分配所產生(流程如圖 9)：

- (1) 決定訓練區資料 n 組，分類特徵參數 m 種。
- (2) 於 m 個輸入分類特徵參數中，選出 T 個子集合， $T < m$ 。
- (3) 運用 Bootstrap 抽樣，從訓練資料重複抽樣形成 InBag。
- (4) 對每一個 InBag，隨機選擇 m 個分類特徵參數，根據這些分類特徵參數，計算決策樹，最後進行投票(Vote)，選擇出最佳的成果。
- (5) 注意每個決策樹都不需要進行修剪、完全生長。

隨機向量的決定方法：每個節點隨機選取 F 輸入特徵來進行分割，所要分割的節點是由選取的 F 特徵中決定，數目持續生長不需修改。如果原始特徵個數太少，難以隨機選出互相獨立的輸入特徵，就要增加特徵空間，從這些隨機結合的新特徵 F 中選出最適合分割的節點進行之。在每個節點上隨機從 F 個最好的分割點中選取一個產生隨機樹，演算法必須檢查所有節點上的分割特徵。

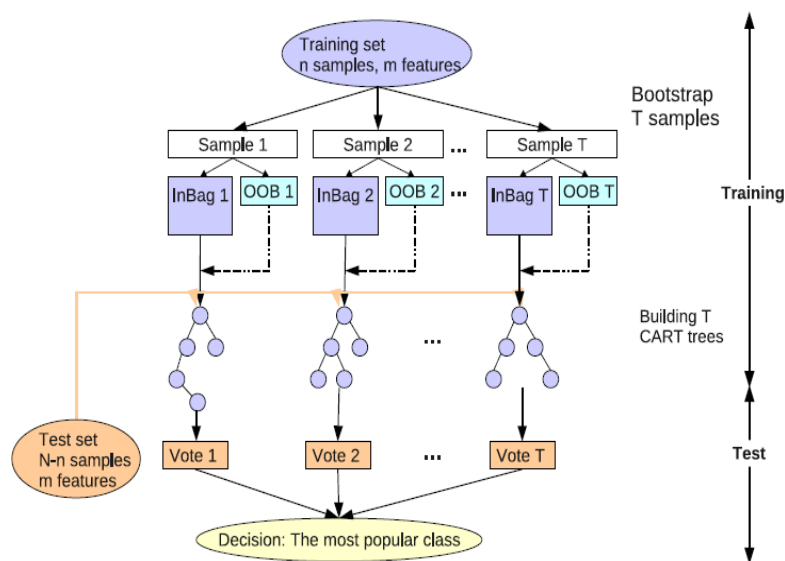


圖 9 隨機森林操作流程圖(Guo et al., 2011)

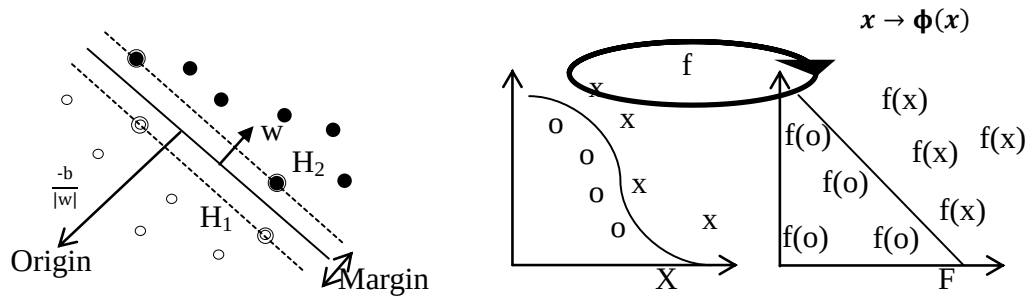


圖 10 SVM 分類法示意圖(左:最大超平面；右:非線性分割核函數轉換)

支持式向量機(Support Vector Machine, SVM)在航遙測的領域中，被廣泛利用在影像分類(Vapnik, 1995; Burges, 1998)。起源於統計學習理論，已成功用在一些應用問題中，像是手寫辨識或是文件分類，也可以處理高維度的資料。其分類法主要的精神是對於一群在特徵空間中的資料，希望能夠在該空間之中找出一 Hyper-Plane，並且希望此 Hyper-Plane 可以將這群資料切成兩群(例如：群組 A、群組 B)。而屬於群組 A 的資料均位於 Hyper-plane 的同側，而群組 B 的資料均位於 Hyper-plane 的另一側(如圖 10(左))。而為了可以群組 AB 明確地分辨，所以兩個群組間的邊界(Margin)愈大愈好分離。

一般分類可以使用線性分割的函數，而處理非線性的資料，線性函數無法分割，必須進行屬性轉換，把資料轉至更高維度的空間或是特徵空間，才能加以分辨(如圖 10(右))。通常轉換函數是一個複雜且不容易求得的函數，所以會將轉換函數做內積，得到一個較為簡單的函數，稱作核函數 Φ (Kernel Function)。

本研究使用三個不同的核函數(Kernal)進行分類成果的討論：(1) Polynomial Kernel、(2) a universal kernel function based on the Pearson VII function (PUK Kernel)、(3) Radial Basis Function (RBF) Kernel。第一個 Polynomial Kernel 為一個基礎的多項式核函數，而第二個 PUK Kernel 是一個通用的核函數，其具有大的強鈍性(Robustness)，具有很好的屬性轉換能力，且其成果不亞於其他核函數，因此常用來替代一般常見的多項式核函數或是 RBF 函數(Üstün et al., 2006)。這三個核函數皆

較基礎且較多人使用，也被常用於 SVM 分類中做為討論比較的项目(Pal, 2009)。

2.2.3 精度評估

此部分的精度評估提供兩項成果，一為使用參考地真資料所產生的正確率、錯誤率、Kappa 值、及 RMSE 指標。二為隨機樹分類中各類別的重要性評估統計圖。正確率與錯誤率，公式如下：

$$\text{正確率} = \frac{\text{正確預測的個數}}{\text{總預測個數}} \quad (10)$$

$$\text{錯誤率} = \frac{\text{錯誤預測的個數}}{\text{總預測個數}}$$

Kappa 值之公式如下：

$$\begin{aligned} \text{Kappa} &= \frac{\text{總體準確度} - \text{期望準確度}}{1 - \text{期望準確度}} \\ &= \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{i+} \times X_{+i})} \end{aligned} \quad (11)$$

n:類別

N:檢核點數

X_{ii} :誤差矩陣對角線元素

X_{i+} :列總合

X_{+i} :行總合

3. 實驗成果

本章節內容為測試成果與討論，分別為研究資料簡介及波形分析與地物分類之成果與討論。研究中之測試區有二(如圖 11 及圖 12)，圖 13 為測區二之地物類別，地物類別使用航照影像以人工方式數化而得。測區一(70 m*50 m)資料的飛行時間為 2010 年 8 月 2 日，由 Leica ALS60 系統所蒐集得，

記錄成 LAS1.3 格式，地面位置在台灣中部山區(中央山脈)，地物多為樹林；測區二(160 m*100 m)位於成功大學附近之台南都市區，掃描時間是 2010 年 8 月 4 日，由 RIEGL LMS-Q680i 系統所蒐集，其記錄的資料格式為 SDW，記錄內容有 Range, X, Y, Z, Amplitude, Echo Width, Return Number, Class ID 等，但是缺少波形的原始資料。

表 1 為研究資料與實驗內容為本研究的資料與實驗內容整理表，因不同測區的地物型態不同、其原始的資料類型不同，所以各個測區之實驗內容探討也根據資料的差異而變化。測區一因其地物類型單一，參考地物分類不易取得，所以並未做地物分類；而測區二的資料並沒有波形資料的原始檔，只有經過處理後的波寬振幅，所以只有使用此測區進行地物分類的探討。

LAS 格式是空載光達系統的標準資料格式，由 2003 年美國攝影測量與遙感學會所發布的 LAS 1.0 為標準格式，其後還有相繼發布 1.1、1.2、1.3、1.4 與 2.0 版。本研究所使用的全波形光達資料格式為 LAS1.3。其與 LAS 1.0 最大的不同點在於，從原本資料格式的三個部份多加了波形數據記錄的區域(Waveform Package)。另外 Riegl 自行制訂一個記錄處理後波形資訊與參數的檔案格式 SDW，SDW 是二進位儲存的檔案，檔案當中記錄了 Range, X, Y, Z, Amplitude, Echo Width, Return Number, Class ID 等資訊，所以本研究在資料來源只有 SDW 時(測區二)，測區二採取直接應用其檔案中所提供之波寬及振幅資訊，並未自行對於波形進行分析處理。

表 1 研究資料與實驗內容

		測區一	測區二
地點		中部南投山區	台南成大校區
地物型態		林區	都市區
掃描儀器		Leica ALS60	RIEGL LMS-Q680i
實驗內容	波形分析	○	X
	地物分類	X	○
資料類型		LAS1.3	SDW
掃描時間		2010/08/02	2010/08/04

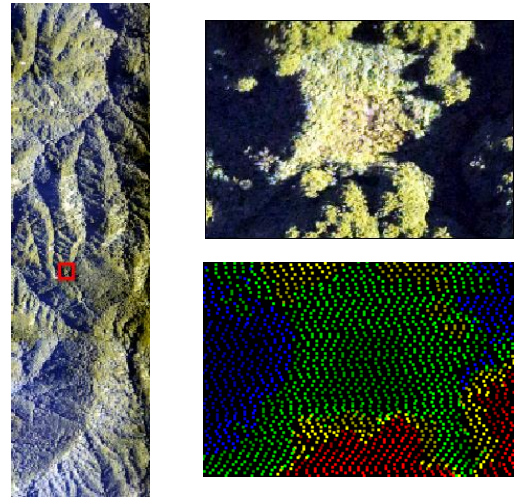


圖 11 測區一

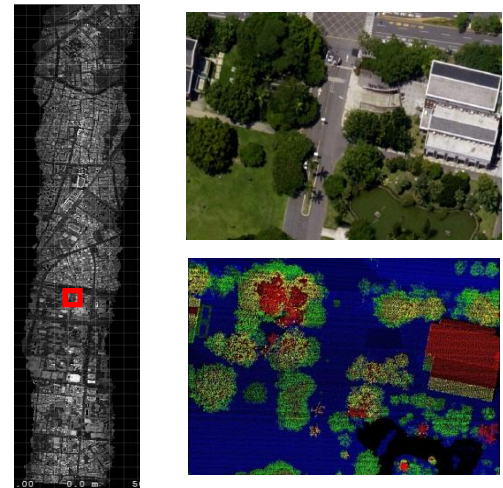


圖 12 測區二

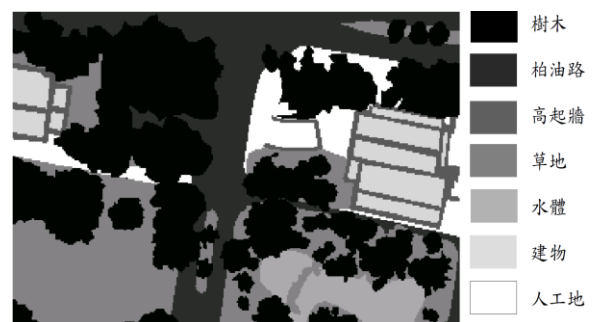


圖 13 測區二地物類別

3.1 波形分析成果

圖 14 左邊十字的中心為無植被覆蓋的裸露地，因此就會產生右邊單一回波的波形。但是當雷射光掃到多個物體時，就會產生多個回波，圖 14 下展

示雷射光穿透植被到達地面時會產生數個回波，可幫助瞭解地物的垂直分布。但回波數量除了顯示地物的類型之外，跟光達能量的穿透性也有很大的關係，如果穿透性不佳，還是沒有辦法獲得覆蓋在植物冠層以下的地面回波。

在波形分析擬合成果的部分，僅使用測區一的資料進行實驗，這是由於此測區有提供全波形光達回波波形的原始數據可以供分析。表 2 為測區一使用對稱與不對稱函數擬合成果的三維坐標(XYZ 值)與 Las1.3 原始檔記錄之三維坐標(XYZ 值)的差異，高斯函數與原始資料的差異比韋伯函數小，代表高斯函數的成果與原始資料較為接近；但是韋伯函數的標準差較高斯函數低，這代表韋伯函數資料較集中，精密度高，而波形擬合成果的優勢是萃取得較密集的點。

錯誤! 找不到參照來源。 3 為兩種函數的擬合精度評估指標，第一列為波形擬合使用的點數。高斯函數原始資料的點數量為 1981 個點，但因當中

有部分的回波資料不完整或是訊號太弱，所以實際使用的點數會較少。而韋伯函數使用的資料比高斯函數少的原因是其解算參數較多導致求解發散，因此資料上的限制會比較多。第二列是經過本實驗擬合波形所得到的點數，兩種函數的結果都會比原始資料多，這表示自行使用函數擬合波形可以萃取得更多更密集的點資料。SSE 的涵義為殘差的平方和，RMSE 為 SSE 除以樣本數再開根號，這兩個指標皆為愈小愈接近 0 成果愈好。R-squared 則是統計中預測觀測值好壞的指標，其範圍介在 0 到 1 之間，其值愈接近 1 代表愈好。在 SSE、RMSE 與 R-Square 三項精度評估指標中，韋伯函數的成果都較高斯函數好，此結果顯示不對稱函數的確更接近真實的回波波形。

圖 15 為高斯函數與韋伯函數的 RMSE 分布直方圖，韋伯函數的分布較集中，且接近 0。但是在 RMSE 大的部分，會比高斯函數大，這代表本實驗中韋伯函數解算時較容易出現明顯錯誤的原因。

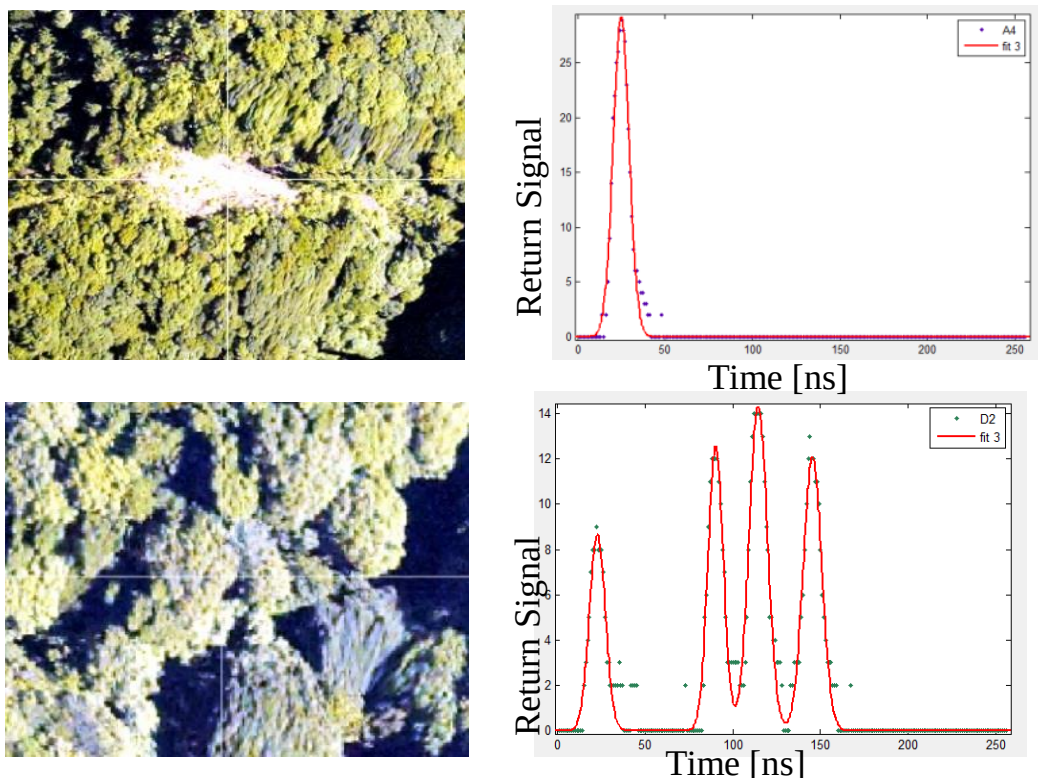


圖 14 地物類別與波形的關係

表 2 測區一擬合成果的 XYZ 與原始記錄 XYZ 的差異 (單位:公尺)

	Gaussian Model	Gaussian Model
Mean(X)	0.0138	0.0175
Std.(X)	0.0116	0.0085
Mean(Y)	0.0312	0.0396
Std.(Y)	0.0244	0.0154
Mean(Z)	0.3004	0.3805
Std.(Z)	0.2338	0.1478

表 3 測區一波形擬合精度評估成果

	Gaussian Model	Weibull Model
Raw data peaks	1923	1832
Increased peaks	137	87
SSE	255.0697	151.9003
RMSE (m)	0.9982	0.7703
R-Square	0.9879	0.9927

圖 16 為三個測區的波形參數圖，由左至右由上至下分別為高程值(Z)、振幅、高程差異值、波寬、ER(%)與回波編號(Echo Number, EN)值。這些參數圖除了測區一位處台灣中部山區因地真資料取得不便之外，其他兩個測區都作為分類的特徵圖層。波形參數圖層皆經過內插，每個網格大小皆為 0.5m×0.5m，此處網格大小的決定因素為光達點雲之密度，因此當使用資料的點密度不同時，需選擇合理對應的網格大小。

另外，背向散射改正的目的是在於校正角度及距離所產生的影響。從圖 17(左)就可以很明顯看出，在航帶的邊緣，顏色比較黯淡，航帶的正中間顏色較亮。這種現象就是由於掃描的角度大，導致距離比較遠，能量衰減所致。而經過研究方法公式(7)背向散射改正後，就可以改善此現象，全區的顏色較為平均(如圖 17(右))，因此可以提高分類的成功率、減少分類的錯誤。

本研究採取人工圈選柏油路進行計算，接著將各個柏油路小區塊算出的值取平均，應用在整個測區上，如此一來可以消除隨機誤差。圖 18 則為測區二背向散射參數圖，與前一小節的波形參數圖一起作為分類的特徵圖層。

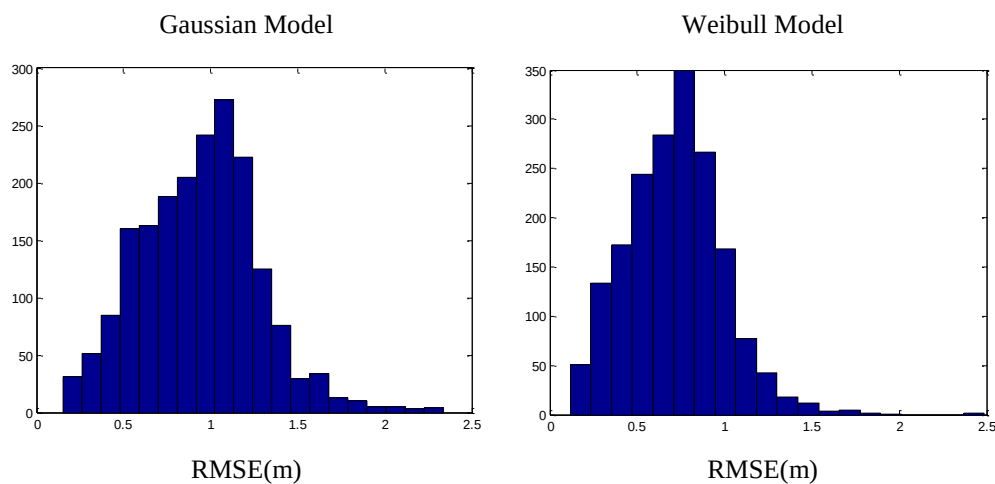


圖 15 測區一 RMSE 分布直方圖

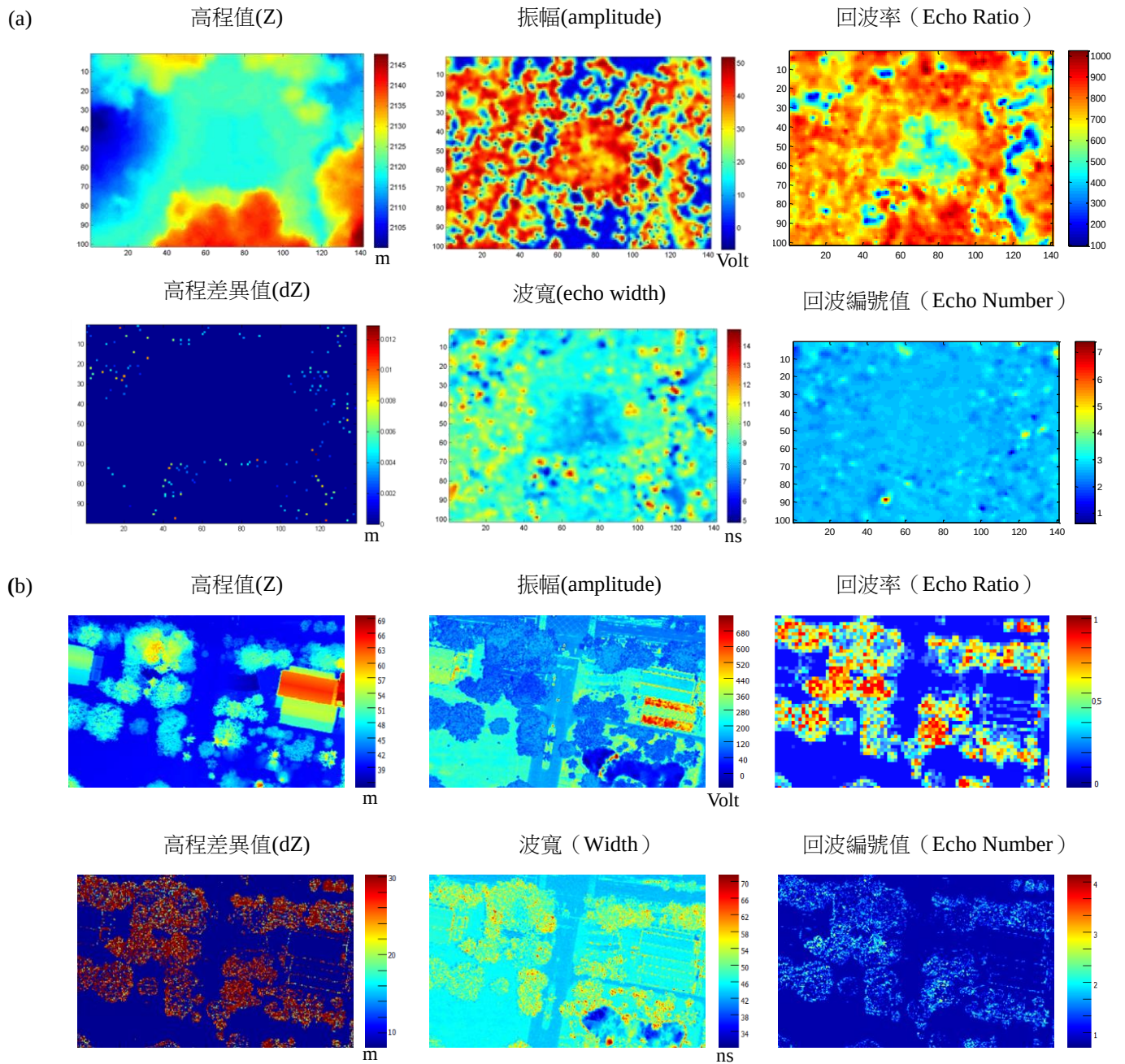


圖 16 測區一(a)測區二(b)的波形參數圖

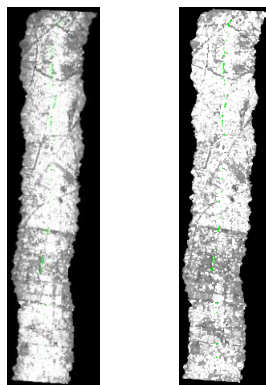


圖 17 全區背向散射參數改正成果

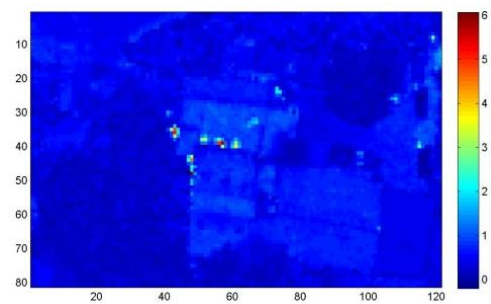


圖 18 測區背向散射參數圖(測區二)

3.2 地物分類成果

本研究使用 Weka 軟體進行地物分類的操作，Weka 是一個以 JAVA 語言為基礎的 Data Mining 工具，使用者可以自行開發與加值(Machine Learning Group at University of Waikato, 2012)，藉由 Weka 軟體內建分類模組中的隨機森林與支持式向量機模組進行實驗。以下為進行隨機森林分類與支持式向量機分類的成果，並在隨機森林分類法中討論：(1)不同大小的訓練區成果、(2)隨機森林不同棵數成果、(3)使用振幅和校正後的背向散射參數成果三大項。

由統計表(如表 4 及表 5)的正確率可知，使用隨機森林分類法成果較支持式向量機法好。而本研究所使用的支持式向量機三種 Kernel 的分類成果較隨機樹分類差，且在複雜係數愈高的時候，執行

的時間較長，效率較低。統計表中紅色矩形的部分是不同條件下，正確率最高的狀況，可以顯示參數與成果的關係。

由圖 19 可瞭解隨機森林分類法的成果會隨著訓練區的比例提高而變好，也會隨著分類棵數的增加而變好。但是訓練區的影響量比棵數的影響量要來得大(差約 1%)，棵數的影響會隨著數量增加到一定程度而趨緩，過度增加棵數對分類結果並無實際幫助(例如 10 棵樹和 100 棵樹的分類成果差很多，但是 100 棵樹和 300 棵樹的分類成果卻近乎相同)。

表 4 及表 5 比較未校正的振幅和校正後的背向散射參數成果，使用背向散射參數的成果較好，但在訓練區大(Training：900)的地方卻是相差不大、改善有限。這表示訓練區大小與背向散射參數對分類成果皆有一定的影響。

表 4 測區二精度成果(使用振幅未使用背向散射參數)

訓練區大小		精度評估				
隨機森林分類						
棵數		10	50	100	200	300
Training:450 Test:1800	正確率(%)	80.31	81.12	81.25	81.40	81.32
	Kappa值	0.7703	0.7797	0.7813	0.7831	0.7820
	RMSE(m)	0.2033	0.1964	0.1953	0.1948	0.1946
Training:900 Test:1800	正確率(%)	81.59	82.67	82.94		
	Kappa值	0.7852	0.7979	0.8009		
	RMSE(m)	0.1968	0.1888	0.1878		
SVM分類						
Kernel類型*		a	a	a	b	c
複雜係數		1	1000	2000	2000	2000
Training:900 Test:1800	正確率(%)	62.46	73.90	73.91	78.52	73.56
	Kappa值	0.5620	0.6956	0.6956	0.7494	0.6915
	RMSE(m)	0.3168	0.3101	0.3101	0.3086	0.3102

* a: Polynomial Kernel b:PUK Kernel c:RBF Kernel

表 5 測區二精度成果(使用背向散射參數未使用振幅)

訓練區大小		精度評估				
隨機森林分類						
棵數		10	50	100	200	300
Training:450 Test:1800	正確率(%)	80.46	81.48	81.56	81.63	81.69
	Kappa值	0.7720	0.7840	0.7848	0.7857	0.7865
	RMSE(m)	0.2032	0.1961	0.1949	0.1944	0.1942
Training:900 Test:1800	正確率(%)	81.59	82.66	82.86		
	Kappa值	0.7852	0.7977	0.8000		
	RMSE(m)	0.1958	0.1886	0.1878		
SVM分類						
Kernel類型*		a	a	a	b	c
複雜係數		1	1000	2000	2000	2000
Training:900 Test:1800	正確率(%)	60.87	73.99	74.03	78.44	73.52
	Kappa值	0.5434	0.6966	0.697	0.7485	0.691
	RMSE(m)	0.3181	0.3101	0.3101	0.3087	0.3101

* a: Polynomial Kernel b:PUK Kernel c:RBF Kernel

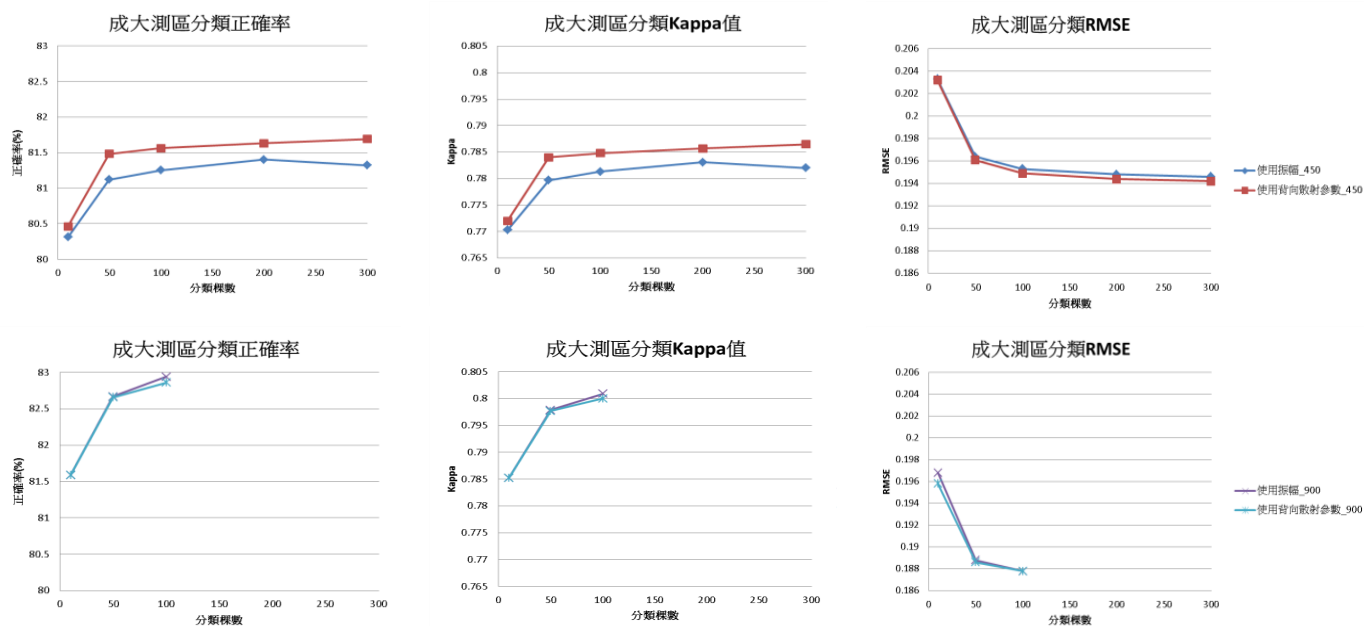


圖 19 測區二分類成果

圖 20 為隨機森林分類特徵重要性直條圖，x 軸為使用的分類特徵參數圖層(Z:高程值、A:振幅、W:波寬、dZ:高程差異值、 σ : 背向散射參數、EN: 回波數、ER:多重回波百分比)，y 軸為在隨機森林分類過程中所使用該特徵的次數，左邊為使用振幅

A 配合其他分類參數的成果，右邊為使用校正後的背向散射參數 σ 配合其他分類參數的成果，波形參數（背向散射參數）的影響有一定的重要性。在測區二當中，背向散射參數 σ 更是隨機森林分類中，最為重要的分類特徵。

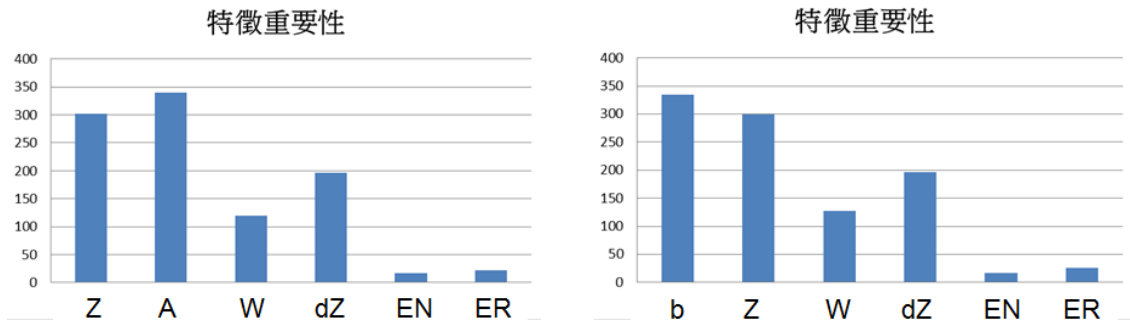


圖 20 測區二隨機森林分類特徵重要性直條圖

4. 結論及建議

本研究目的為建立全波形光達波形分析及地物分類之程序，研究中完成不同函數之波形分析方法之比較，並分析波形參數之分類精度。就本實驗成果提出結論如下：

- (1) 在波形分析部分，高斯函數會是一個簡單快速且容易操作的方法，在測區一當中，可以萃取出較韋伯函數多的點；而韋伯分布則可以得到較高斯函數佳的擬合成果，而且比高斯函數多萃取出尺度與形狀兩個參數。但也是因為參數較多的關係，實際進行韋伯函數擬合解算時，容易因為不穩定導致求解失敗。因此若是單就萃取出波峰三維坐標，不要求整個波形擬合的完美性，對稱與不對稱函數的成果差異小(低於光達的精度誤差範圍)，使用簡便快速的高斯函數擬合不失為一個省時省力的作法。
- (2) 在地物分類的實驗中，顯示增加全波形光達參數（背向散射參數）資訊進行分類的成果，較一般無全波形資訊的分類佳。而使用背向散射參數的成果較振幅的成果佳，測區二正確率提高 0.5%，因此將振幅參數改為背向散射參數有其必要性，對於分類的成果有相當的助益，從隨機森林的特徵重要性數值來說亦有很高重要性。
- (3) 從實驗結果顯示隨機森林分類法的精度較支持式向量機好，整體而言，本實驗區隨機森林分類法的正確率較支持式向量機高出 4%。受限於實驗工具，隨機森林分類法在實際操作的部分，會因建立樹木模型資料量太龐大，容易

出現記憶體不夠的問題；雖然支持式向量機不會發生此問題，但為了提升分類成果，必須設定一複雜係數，這會影響分類法的計算時間，導致支持式向量機的運算時間較隨機森林長。此外，隨機森林分類法只需要設定兩個參數即可進行分類，但是支持式向量機所需要設定的參數甚多，對一般使用者而言較難上手。研究成果顯示，隨機森林分類的樹木棵數超過 100 棵之後，其正確率會趨於平緩，所以不需要過度的增加樹木棵數，如此一來也能降低記憶體不足的發生率。總體來說，隨機森林分類法的變數少、計算效能高，本研究認為隨機森林分類法較佳。

誌謝

本研究承蒙國科會計畫 (NSC 101-2628-E-009-019-MY3) 支援得以順利完成，感謝達雲科技有限公司及自強工程顧問有限公司資料提供，並感謝兩位審查委員對本論文所提出的寶貴意見，謹此致謝。

參考文獻

- Alexander, C., Tansey, K., Kaduk, J., Holland, D., Tate, N.J., 2010. Backscatter coefficient as an attribute for the classification of full-waveform airborne laser scanning data in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(5): 423-432.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(1): 5-32.
- Briese, C., Höfle, B., Lehner, H., Wagner, W., Pfennigbauer, M., Ullrich, A., 2008. Calibration

- of full-waveform airborne laser scanning data for object classification, *Proceedings of SPIE*, 6950: 1-8.
- Burges, C.J.C., 1998. A tutorial on support vector machines for pattern recognition *Data Mining Knowledge Discovery*, 2: 121-167.
- Chauve, A., Durrieu, S., Bretar, F., Pierrot Deseilligny, M., Puech, W., 2007a. Processing full-waveform lidar data to extract forest parameters and digital terrain model: Validation in an Alpine Coniferous Forest. Retrieved from : http://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/docs/00/29/31/32/PDF/p168_Chauve.pdf
- Chauve, A. Bretar, F., Durrieu, S., Deseilligny, M.P., Puech, W., 2007b. Processing full-waveform lidar data: modelling raw signals. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3/W52). Retrieved from : http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final_papers/Chauve_2007.pdf
- Coops, N.C. Hilker, T., Wulder, M.A. St-Onge, B., Newnham, G., Siggins, A., Trofymow, J.A., 2007. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. *Trees-Structure and Function*, 21(3): 295-310.
- Guo, L., Chehata, N., Mallet, C., and Boukir, S., 2011. Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1): 56-66.
- Höfle, B., Hollaus, M., Lehner, H., Pfeifer, N., Wagner, W., 2008. Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data, *Proceedings of SilviLaser 2008*, 229-235.
- Heinzel, J., Koch, B., 2011. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): 152-160.
- Hofton, M.A., Minster, J.B., Blair, J.B., 2000. Decomposition of laser altimeter waveforms., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(4): 1989-1996.
- Jutzi, B., Stilla, U., 2005. Measuring and processing the waveform of laser pulses. *Optical*, 3: 194-203.
- Jutzi, B., Stilla, U., 2006. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(2): 95-107.
- Laky, S., Zaletnyik, P., Toth, C., 2010. Land classification of wavelet-compressed full-waveform LiDAR data. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38(3):115-119.
- Machine Learning Group at University of Waikato, 2012. Weka 3: Data Mining Software in Java. Retrieved from : <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- Mallet, C., Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1): 1-16.
- Pal, M., 2009. Kernel methods in remote sensing: a review. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 15: 194-215.
- Reitberger, J., Krzystek, P., Stilla, U., 2008. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1407-1431.
- Roncat, A., Bergauer, G., Pfeifer, N., 2011. B-spline deconvolution for differential target cross-section determination in full-waveform laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4):418-428.
- Üstün, B., Melssen, W., Buydens, L., 2006. Facilitating the application of Support Vector Regression by using a universal Pearson VII function based kernel. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 81(1): 29-40.
- Vapnik, V., 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer Verlag. New York.
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2): 100-112.

Waveform Analysis and Landcover Classification Using Airborne Full-Waveform Lidar Data

Yu-Shan Lin ¹ Tee-Ann Teo^{2*}

ABSTRACT

Full-waveform (FWF) lidar receives one dimensional continuous signal. It offers useful information about the structure of the target. Therefore, the analysis of received signal of FWF lidar and obtaining the implicit information is helpful for land cover classification. In the processing of full waveform Lidar data, the waveform parameter extraction and analysis are the important steps. The major objective of this study is to analyze the received waveform and extract its parameters. We select Gaussian distribution as a symmetric function and Weibull distribution as an asymmetric function in waveform decomposition. Then, we calculate several accuracy assessment indicators between raw waveform data and fitting function for quality assessment. We use echo width, amplitude, backscatter cross-section coefficient, elevation, elevation difference, echo number, and echo ratio as waveform parameter of classification. After waveform parameter extraction, we employ Support Vector Machine (SVM) and Random Forests (RF) as classifier for land cover classification. This study employs echo width, amplitude, backscatter cross-section coefficients and other features for classification. Error matrix is used to compare the performance of the classifiers. The experimental results indicate that the accuracy of asymmetric function is slightly better than symmetric function. However, the extracted peak positions from the Gaussian and Weibull are very close. Moreover, Gaussian distribution is relatively simple and easy to implement in the waveform analysis. The result of land cover classification shows that waveform parameters are helpful for classification and Random Forests classifier is slightly better than SVM in our study cases.

Keywords: Airborne Lidar, Full-Waveform, waveform fitting, land cover classification, Support Vector Machine (SVM), Random Forests (RF)

¹ Master, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

* Corresponding Author, Phone: 886-3-5712121 ext. 54929, E-mail: tateo@mail.nctu.edu.tw

Received Date: Apr. 08, 2013

Revised Date: Jul. 14, 2013

Accepted Date: Aug. 19, 2013

Reliability Assessment of Gaussian Estimates Derived from Small-footprint Waveform Lidar

Yu-Ching Lin ^{1*} Jon P. Mills ² Chun-Lin Lin ³

ABSTRACT

The Gaussian decomposition technique has to date played an important role in processing both large- and small-footprint lidar waveforms. When fitting Gaussian functions to received waveforms or the surface response estimated by a deconvolution process, Gaussian coefficients for each detected return can be estimated. These are the temporal position of the Gaussian peak, pulse width and amplitude, which indicate feature characteristics. However, in some circumstance, the estimates may not be fully certain. Little attention has been paid to assessing the reliability or uncertainty of Gaussian estimates. It is necessary to take such indicators into account when application of multiple waveform features is attempted. This study aims to fill this research gap. Whether the reliability of the estimates is affected by the complexity of the waveform shape was investigated. Waveform data collected from simulation experiment and a Riegl LMS-Q560 field campaign was analyzed. Several targets were designed and set in the field to observe how the shape of waveforms varies with the separation distance between two returns and their amplitude magnitude. It was found that the RMSE values for the pulse width estimates based on data simulation were increasingly large when the separation distance was decreased (< 6 ns). The RMSE values for the range estimates based on data simulation remained consistently small (~ 0.04 ns) when decreasing the separation distance.

Keywords: waveform, lidar, Gaussian decomposition

1. Introduction

Airborne lidar has developed rapidly to become the technique of choice for high-resolution 3D model or bare-terrain generation. Over the past two decades, the majority of Airborne lidar systems in commercially operation are small-footprint, discrete-return. Latest generation full-waveform lidar systems that store the entire waveform of each received laser pulse have increasingly available, for example, Leica ALS60, Riegl LMS-Q680i and Optech ALTM Pegasus HD400. There has been increasing interest in maximizing the potential of waveform data. Overall, there are two main research interests: echo detection and the extraction of waveform information.

Waveform data offer users a significant

opportunity to apply their own pulse detection methods to overcome the shortcomings of those typically used in discrete-return systems. The Gaussian decomposition technique has to date played an important role in processing laser waveforms. It has been widely applied to several large-footprint waveform systems for range estimation, such as the LVIS (Hofton *et al*, 2000), SLA-02 (the second flight of the Shuttle Laser Altimeter) (Carabajal *et al*, 1999) and GLAS (Brenner *et al*, 2003). It has also become the most popular method applied to small-footprint waveform systems (Reitberger *et al*, 2008; Wagner *et al*, 2006). Also, in order to store echo shape information and offer a parametric description, waveforms are popularly modeled by a mathematical function such as the Gaussian distribution. Pulse detection using Gaussian decomposition makes the assumption that each return is Gaussian in nature and that

¹ Assistant Professor, Department of Environmental Information and Engineering
National Defense University

² Professor, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University,
Newcastle upon Tyne

³ Assistant Researcher, Information & Communication Research Division, Chunf-Shan Institute of Science & Technology

* Corresponding Author, Phone: 886-3-3800364 ext. 135, E-mail: yuching.ncl@gmail.com

Received Date: Feb. 26, 2013

Revised Date: Nov. 10, 2013

Accepted Date: Nov. 25, 2013

the received waveforms are a sum of individual Gaussian distributions (Hofton *et al*, 2000). In addition, some researchers (Jutzi and Stilla, 2006; Wagner *et al*, 2006) have claimed that the received waveform is a convolution of the system waveform (the transmitted waveform) and the cross section of the target, and that the scattering properties of targets can be described by a Gaussian function. When fitting Gaussian functions to received waveforms or the surface response estimated by a deconvolution process, Gaussian coefficients for each detected return can be estimated. These are the temporal position of the Gaussian peak, pulse width and amplitude. Typical surface features extracted from these parameters are range, roughness, and reflectance (Jutzi and Stilla, 2005). Therefore, the estimated parameters provide a direct physical interpretation (Wagner *et al*, 2006). Wagner *et al* (2006) adapted the radar equation for lidar application in order to convert the received power into backscatter cross-section σ . The σ is a measure of how much energy is scattered backwards towards the sensor. It has been suggested that backscatter cross-section should be considered to be a standard product in laser scanning (Wagner *et al*, 2008).

Although several studies have demonstrated that waveform features derived from Gaussian coefficients were of great potential in different fields, little attention has been paid to assessing the reliability of Gaussian estimates. In some circumstance, the estimates may not be fully certain and complete. For example, At low amplitudes, the reliability for the estimate of pulse width can be problematic (Wagner *et al*, 2008). Mücke (2008) applied the weight concept, based on the relationship between the amplitude and pulse width. The distribution of the pulse width against amplitude was analyzed to assign the weight to individual points. Several studies (Doneus *et al*, 2008; Höfle *et al*, 2008; Wagner *et al*, 2008) have urged that carrying out detailed analysis of waveform estimates is of fundamental importance for waveform applications.

The aim of this study is to assess the reliability of Gaussian estimates derived from waveform data. Whether the reliability of the estimates is affected by the complexity of the waveform shape was investigated. Waveform data collected from simulation experiment and a field campaign was analyzed.

2. Methodology

2.1 Gaussian decomposition

Small-footprint Waveform data from each laser pulse can be modelled using Equ.(1). The principle of Gaussian decomposition is to fit Gaussian functions to waveforms in order to find individual returns (Gaussian components) and estimate the elapsed time between transmission of the signal and the return. It is assumed that waveform data is an amplitude-against-time dataset (i.e. amplitude on y axis and time on x axis). The position of the peak of each Gaussian component (x_i) can be used to estimate elapsed time for each return. The A_i and $width_i$ are derived waveform parameters that describe the shape of the pulse. N_{level} is an offset value of a signal from zero, which is usually regarded as the noise level of the waveform.

$$y = N_{level} + \sum_{i=1}^n A_i \exp \left[- \left(\frac{x - x_i}{width_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

where

A_i = the amplitude of i th Gaussian

x_i = the i th Gaussian peak

N_{level} = noise level of the waveform

n = the number of Gaussians

$width_i$ = pulse width of i th Gaussian = $\sqrt{2} * \sigma_i$

y = quantized amplitude values

σ_i = the standard deviation of i th Gaussian

x = sampled time values

Fitting equations (e.g. Gaussian functions) to data is a typical process of mathematical modelling or curve fitting. The purpose may be to determine a theoretical model or to obtain calibration curves based on a mass of data (Daniel and Wood, 1980). The well-known least-squares method has been widely employed to fit equations to data. It finds a solution that minimises the sum of the squared deviations of the observations (y_k) from values predicted (fitted) ($\hat{y}_k$) by the equation. That is to say, the goal is to find a minimum value for S (the summed square of residuals, Eqn.(2)) and derive the “best values” of the parameters of the Gaussian function, which is a nonlinear model. Therefore, nonlinear least-squares fitting is

required and an iterative optimization algorithm is used to search for the coefficients (i.e. A_i , x_i , N_{level} and $width_i$) that minimise S . The search process starts with initial parameter values, which are critical in solving for the correct parameters. When the rate at which S decreases from iteration to iteration is stable and is satisfactorily small, the best fit is found.

$$S = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (2)$$

where S is the summed square of residuals; N is the number of data points; $\hat{y}_k$ is the k th fitted value; and y_k is the k th measured value.

Moreover, one of essential assumptions of the least-squares method to provide maximum likelihood is that the correct form of the equation has been chosen. Failure to choose the correct equation prevents convergence to the true values (Daniel and Wood, 1980). Since the return signals are varying (dependent on the complexity of illuminated targets), this causes difficulties in determining the number of Gaussian components within a waveform (i.e. n in Equ.(1)). It is evident that the number of Gaussian components is required to be estimated correctly prior to a fitting process. Alternatively, this estimation has to be undertaken in an optimization process to find the best equation for each received waveform.

2.2 Simulation of complex waveform

This research utilized data from a Riegl LMS-Q560 full-waveform laser scanner. The waveform stream was stored in the data recorder (DR560). For each timestamp the transmitted waveform, received waveform and scan angle were stored. The pulse length (FWHM) was 4 ns and the sampling rate for digitizing the waveform was 1 GHz (i.e. waveforms were sampled with 1 ns interval). In order to obtain a large dynamic range for recording signal magnitude, the low and the high receiver channels could each be used to record waveforms with an 8 bit quantization level. Sample digital number (DN) values from each channel ranged from 0 to 255 (i.e. 8 bit DN). The low channel is a sensitive channel; the high channel is less sensitive, but provides a larger dynamic range, which can accommodate strong amplitude samples. Once amplitude exceeds a threshold value which is set by the system, waveform data can be recorded by both channels.

Waveforms from the both channels are composed of Gaussian-like distributions.

The waveform is constructed as an amplitude-against-time dataset. The shape of the transmitted waveforms is a Gaussian-like distribution (Wagner *et al*, 2006), as shown in Figure 1(a). The received waveform is the record of the returned energy from each laser pulse. The simplest cases of received waveforms are also composed of Gaussian-like distributions. For example, Figure 1(b) shows the received waveform with two returns which are both similar to the shape of the transmitted pulse. Waveforms with weak pulses also exist (e.g. Figure 1(c)), as do more difficult cases where waveforms have complex shapes that are different in form to the transmitted pulse (see Figure 2). Inspection of different examples of typical received waveforms reveals a number of challenges to waveform analysis, including determining how many individual targets are hidden within a complex waveform; where the corresponding point for range estimation to individual targets is located; and whether or not weak pulses are real targets or noise.

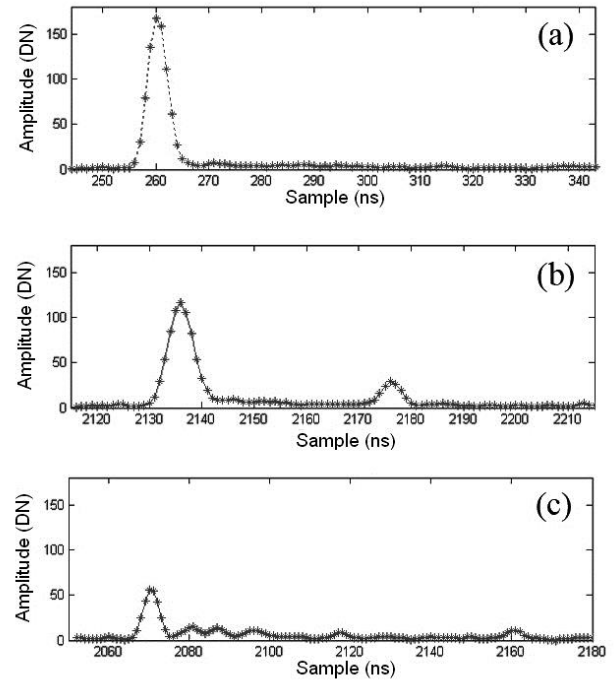


Figure 1. Examples of (a) transmitted waveform, (b) received waveform with nearly perfect peaks, and (c) received waveform with weak return pulses.

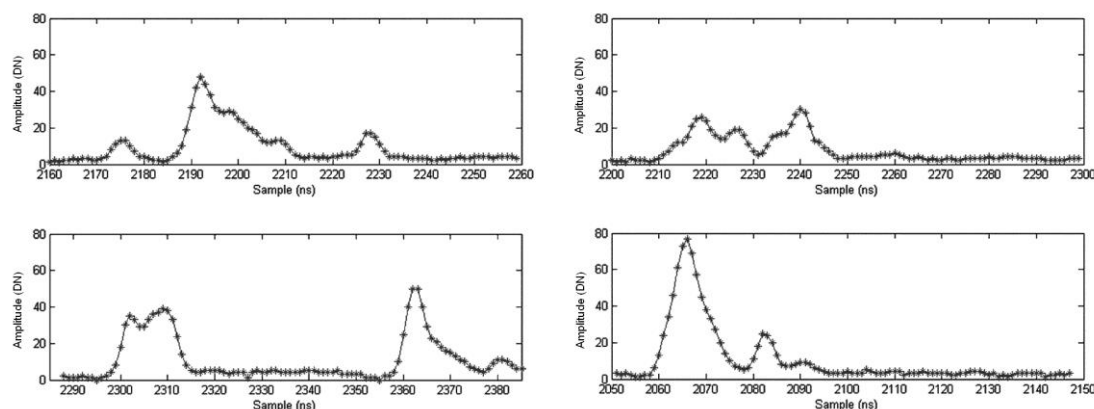


Figure 2. Examples of received waveforms with complex shapes.

In order to understand the formation of complex waveforms based on the assumption of Gaussian decomposition, signals were simulated by varying the separation distance between successive returns (Gaussian components) and their amplitude magnitude. In addition, since a signal is always affected to a certain extent by noise, the noise level of real received waveforms were observed and added into the simulation.

A received signal is assumed to be a sum of individual Gaussian distributions. Once the number of Gaussian distributions (i.e. the number of returns) is decided, the fitted function will be determined. N_{level} was specified as a DN value of 2, which is equivalent to the Direct Current (DC) offset value of the test waveform systems. DC offset is the variation of a signal from zero. The coefficients of each Gaussian distribution were assigned based on the desired Gaussian peak positions (i.e. received amplitude and arrival time) and Gaussian pulse widths. The arrival time of each return was set based on the test separation distance. The pulse width of each Gaussian distribution was the mean pulse width of 12,000 recorded transmitted pulses (i.e. 2.6 ns). An amplitude-against-time dataset was then generated with a 1 ns sampling interval, which is the sampling rate of the Riegl LMS-Q560 system. Furthermore, additional noise was added into the y samples. The noise values were generated from a random distribution with a specific mean and variance. Here, random numbers with a mean of 1.0 that were distributed with a variance of 0.81 (i.e. standard deviation was 0.9) were applied based on the observations of recorded received waveforms. The values of 1.0 and 0.9 were the mean and standard deviation respectively of 1,000 recorded waveforms where no visible peaks were present.

2.3 Target design for complex waveform

In order to justify the assumptions of the Gaussian decomposition, an experiment was conducted in a grass field during data capture (nominal footprint size is 0.18 m; mean point density is 15 pts/m²; average flying altitude is 375 m). Several targets were designed and set in the field to observe how the shape of waveforms varies with the separation distance between two returns and their amplitude magnitude. The Gaussian decomposition method was then employed to carry out pulse detection from the observed waveforms.

Since data capture from lidar systems are indiscriminate, it is impossible to point a laser at a specific object. Therefore, in order to increase the possibility of acquiring multiple-return waveforms, different sizes of target were set in a grass field. Firstly, in order to observe waveforms with two returns at a separation of greater than the pulse length of the Riegl LMS-Q560 system, three circular lidar targets (with 1 m diameter), designed in accordance with specifications presented by Csanyi and Toth (2007), were levelled and elevated above the ground on standard survey tripods. As shown in Figure 3, the targets were set at heights of 0.6 m, 1.0 m and 1.6 m and positioned in a partially overlapping manner in order to acquire waveforms with multiple returns. Secondly, in order to capture waveforms with two returns at a separation of close to or less than the pulse length, two arrays of foam blocks with heights of 0.3 m and 0.6 m respectively, and a consistent width and length of 0.05 m, were adhered to two white boards (63.5 × 88.5 cm). The boards were then elevated 0.24 m (0.3 m foam blocks) and 0.15 m (0.6 m foam blocks) above the ground

(see Figure 4). Finally, to observe waveforms with two returns at a separation of much less

than the pulse length, a 0.28 m height green box was set as shown in Figure 5.



Figure 3. Three lidar targets set at different heights above the ground: 0.6 m, 1.0 m, and 1.6 m.

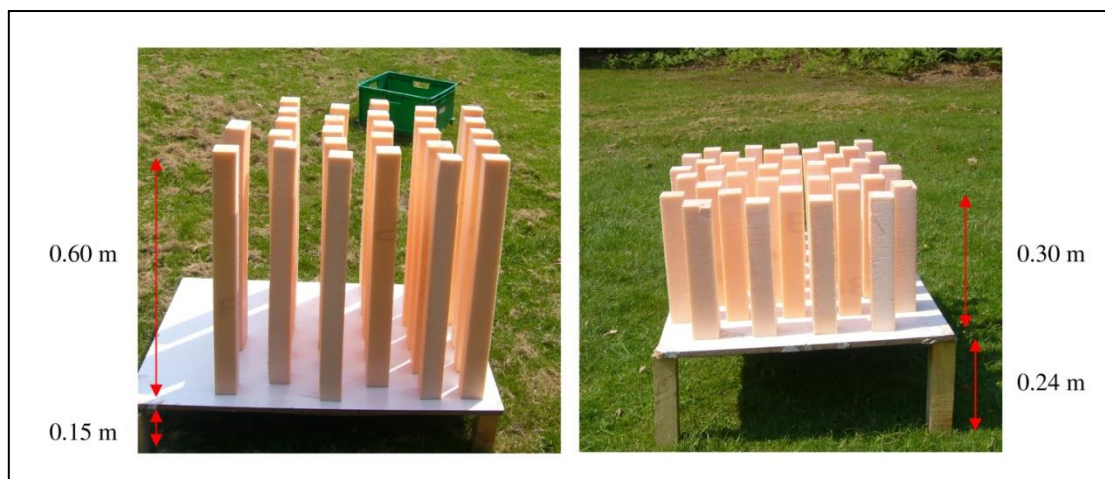


Figure 4. Foam arrays of 0.6 m (left) and 0.3 m (right) in height.



Figure 5. Green box, 0.28 m in height.

3. Results and Discussion

3.1 Simulation results

Simulation of received waveforms from two returns was performed with different values for separation and amplitude. According to Wagner *et al.* (2006), when the separation is comparable to or smaller than the resolution of the lidar system (i.e. one pulse length: 4 ns at FWHM for the Riegl LMS-Q560 system), the waveform becomes a scattering cluster. Here, waveforms with close to 4 ns separation (i.e. 3, 4

and 5 ns) were simulated, and waveforms with 10 ns separation were also simulated for comparison purposes, as is illustrated in Figure 6. In addition, different amplitudes were tested for the two returns to observe the influence on the shape of the waveform. Figure 6(a) illustrates the waveforms of the two targets with DN values of 50 and 50; Figure 6(b) illustrates the targets with DNs of 50 and 30; and Figure 6(c) illustrates the waveforms with DNs of 50 and 15 respectively.

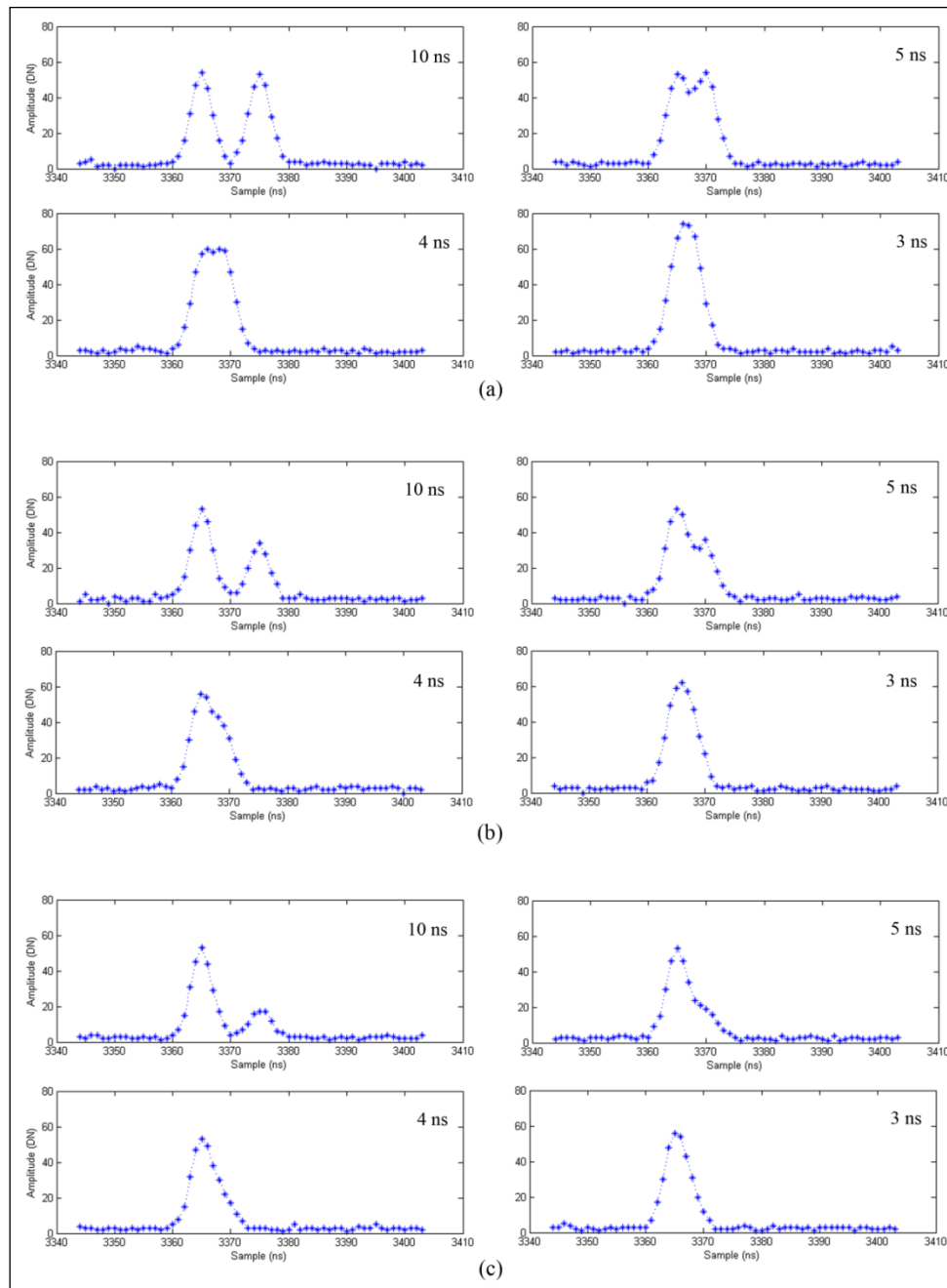


Figure 6. Simulation of received waveforms from two returns with different amplitudes (a): 50, 50 DN (b): 50, 30 DN (c): 50, 15 DN at separations of 10ns, 5ns, 4ns and 3 ns respectively.

It is evident, and indeed intuitive, that with the decreasing separation distance, the two returns become increasingly merged together. At a separation of 10 ns, two visible peaks were found by human interpretation in the simulated waveforms with all amplitude combinations tested. At a separation of 5 ns, except for the waveform with 50 and 15 DN, two visible peaks were found in waveforms with the other two amplitude combinations (i.e. 50 and 50; 50 and 30). The exception (50 and 15 DN, with 5 ns separation) appeared as an asymmetric waveform instead. At the separation of 4 ns, the highest ratio of two amplitudes in a waveform (i.e. the combination of 50 and 50 DN) produced two barely visible peaks. However, the other two combinations displayed asymmetric waveforms with only one visible peak. Finally, at the separation of 3 ns, only one visible peak, which was entirely similar to a standard Gaussian

distribution, appeared in the waveforms resulting from any amplitude combinations.

Sample waveforms containing three returns of differing amplitude were then simulated in terms of different separations (3, 4, 5 and 10 ns). Figure 7(a) illustrates the waveforms with the amplitude combination of 50, 30 and 15 DN (first, second and last return). Figure 7(b) illustrates the waveforms with the amplitude combination of 30, 50 and 15 DN (first, second and last return). At the separation of 10 ns, three visible peaks were found for both simulated waveforms. At a separation of 5 ns and 4 ns, one main peak was found and the shape varied with different amplitude combinations. Finally, at a separation of 3 ns, the three returns merged together and became a cluster, which is similar to a Gaussian distribution. In addition, such a cluster consisting of three returns appears broader than that consisting of two returns.

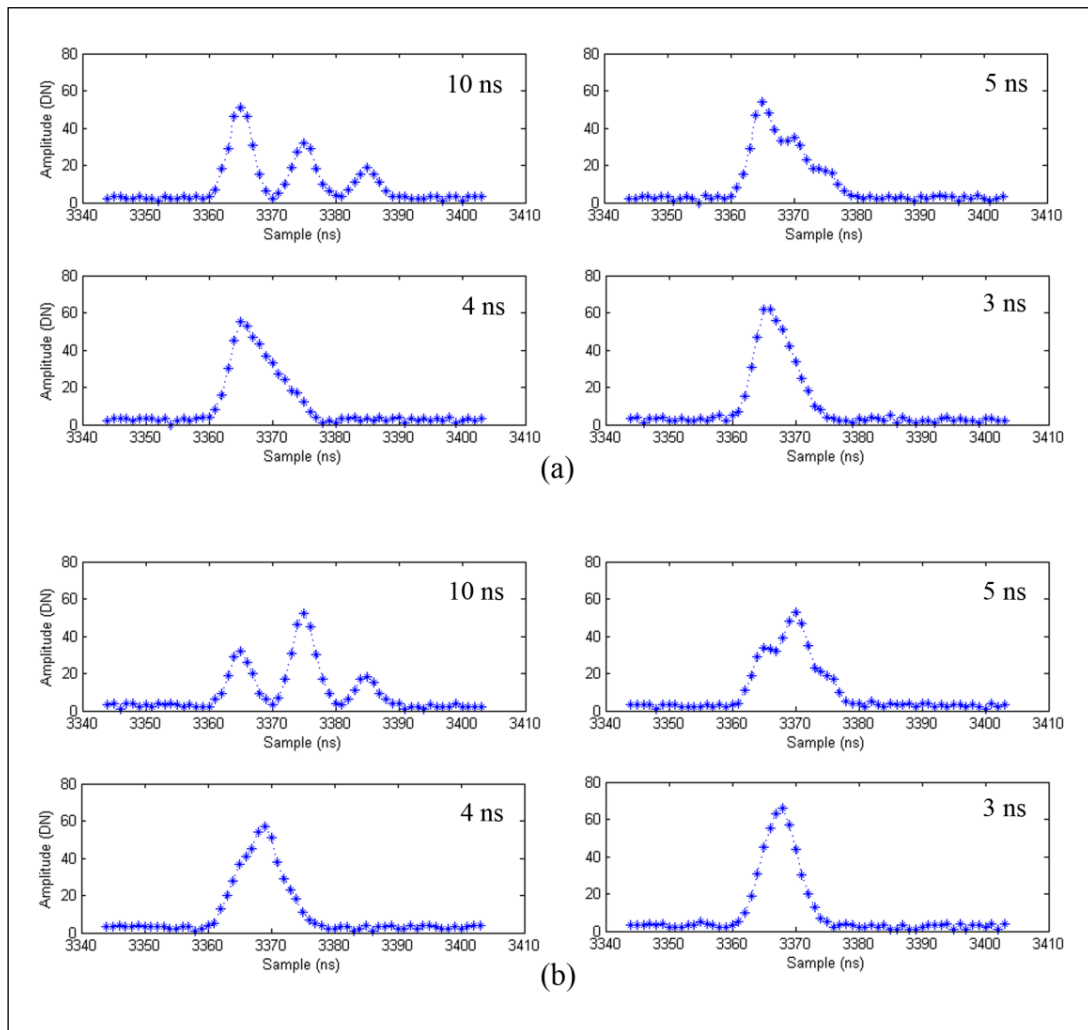


Figure 7. Simulation of received waveforms from three returns with different amplitudes (a): 50, 30, 15 DN (b): 30, 50, 15 DN at the separation of 10 ns, 5 ns, 4 ns and 3 ns respectively.

Based on the simulation results, the shape of the waveform has been proven to be variable and dependent on the separation distance between successive returns, individual amplitude and the number of returns in a waveform. The more targets illuminated with a separation approaching 4 ns, the more complex the shape displayed by the waveform. The shorter the separation (≤ 3 ns) between successive returns, the more likely it is that a cluster with a Gaussian-like shape will emerge. That is to say, a broad, Gaussian-like waveform could be produced by several targets with extremely small separations (≤ 3 ns).

It is evident that if a standard detection method, for example *peak detection*, were applied to detect returns in an asymmetric or complex waveform, which is likely to occur as target separation tends to 4 ns, only one return would be detected. In addition, detection may fail in those waveforms that contain barely visible peaks, for example, the waveform with 4 ns separation in Figure 6(a) and that with 5 ns separation in Figure 6(b). As a consequence, range resolution would be limited and range estimation may be in error. Moreover, even if Gaussian decomposition was employed with initial parameters estimated by the *peak detection* approach, the same difficulty (i.e. failure to estimate the correct number of returns in an asymmetric waveform) could still remain. Therefore, in order to achieve optimal range resolution and range accuracy, it is necessary to estimate correct initial values for the number of returns or to estimate the “best number” of returns in an asymmetric waveform through an optimization procedure.

3.2 Reliability of Gaussian estimates derived from simulation

Prior to the application of Gaussian estimates, it is necessary to assess the reliability. Wagner *et al.* (2006) pointed out that the estimates from weak pulses are unreliable when Gaussian decomposition is applied. Such a conclusion is based on the observation of the waveforms without complex shapes. It is of interest to investigate whether the reliability of the pulse width estimated is affected by the complexity of the waveform shape. Since overlapping pulses can result in complex waveforms, the pulse width estimates from those with the varying separations between successive returns are investigated.

Waveforms with two returns at separation distances of 10, 8, 7, 6, 5 and 4 ns were investigated, which were close to the pulse length of the Riegl LMS-Q560 system. Two return amplitudes of 50 and 50 DN and a Gaussian width of 2.6 ns were specified to simulate waveforms. For each separation distance investigated, 300 simulations were performed. Then, the Gaussian decomposition method was employed to fit the waveforms and estimate individual pulse widths for the two returns. The separation between them can also be derived based on the temporal position of two Gaussian peaks. With known pulse widths (2.6 ns) and separations (10, 8, 7, 6, 5 and 4 ns), the RMSE of the pulse width and separation estimated can be computed to assess the reliability of the estimates. As shown in Figure 8, when separation distance decreases, the RMSE for the pulse width increases. However, the separation estimates obtain consistent RMSE values (~ 0.04 ns).

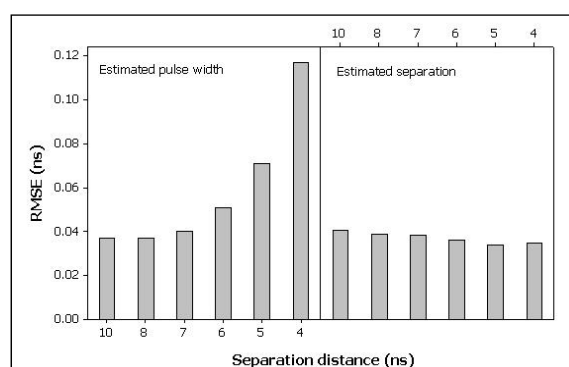


Figure 8. RMSE of the pulse width and separation estimated from the simulated waveforms with varying separation distances (10, 8, 7, 6, 5 and 4 ns).

To further investigate whether the estimates between different groups reached the same level of accuracy in a statistical context, the Analysis of Variance (ANOVA) based on the error of individual estimates was carried out. The ANOVA developed by Sir Ronald Fisher (1970) is the principal statistical method for the analysis of data. It measures two sources of variation in the data, including variation between groups and variation within groups, and compares their relative sizes. A significance level of 0.05 was applied. If $p\text{-value} < 0.05$, the groups were significantly different. Here, each “group” represented 600 error values of the pulse width estimates or 300 error values of the separation estimates. Table 1 presents the p-value for each paired groups based on the error of the pulse width. The p-value between the 10, 8, 7 and 6 ns groups are > 0.05 , thus, it can be concluded that the same accuracy is achieved within these groups. In addition, this indicates that caution must be applied when using the pulse width estimated from overlapping pulses with a separation distance of < 6 ns. Moreover, Table 2 presents the p-value for each paired groups based on the error of the estimated separation. All of the p-values are found > 0.05 , which indicates that the accuracy of the estimated separation (i.e. range estimation) is not affected by decreasing separation. Additionally, this implies that the range estimation from overlapping pulses is reliable, thus providing precise geometric information.

3.3 Waveforms of targets designed

Examples of the waveforms that were found with two returns from the three lidar targets are illustrated in Figure 9. It is evident that with decreasing target separation, the two visible peaks gradually merge together. When the height difference reaches ~ 0.6 m, which equates to 4 ns separation and the pulse length of the scanner system employed, an asymmetric shape is present. Furthermore, Figure 10 to Figure 14 present the recorded waveforms from the experimental targets (i.e. foam arrays and green box). When a laser pulse hits the foam and then the ground, with a separation of 0.75 m, two peaks (dependent on the amplitude magnitude) are visible or barely visible (see Figure 10). When a laser pulse hits the foam and then the table, with a separation of 0.6 m, only one main peak can be discriminated (see Figure 11). In addition, the shape is variable and

asymmetric. However, for those with 0.30 m and 0.28 m separations, the shape is symmetric and entirely similar to a standard Gaussian distribution (see Figure 12 and Figure 13). It is encouraging that the test results overwhelmingly agree with those of the simulations presented. Essentially, this proves that Gaussian decomposition should be adequate for small-footprint waveform processing.

Table 1. P-value for difference ($P < 0.05$) between the pulse width error by separation distance

Group	10ns	8ns	7ns	6ns	5ns
8 ns	1.000				
7 ns	0.995	0.994			
6 ns	0.062	0.060	0.212		
5 ns	0.000	0.000	0.000	0.000	
4 ns	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 2. P-value for difference ($P < 0.05$) between the estimated separation error by separation distance

Group	10ns	8ns	7ns	6ns	5ns
8 ns	1.000				
7 ns	0.999	1.000			
6 ns	0.761	0.804	0.892		
5 ns	0.115	0.139	0.206	0.842	
4 ns	0.310	0.354	0.469	0.979	0.997

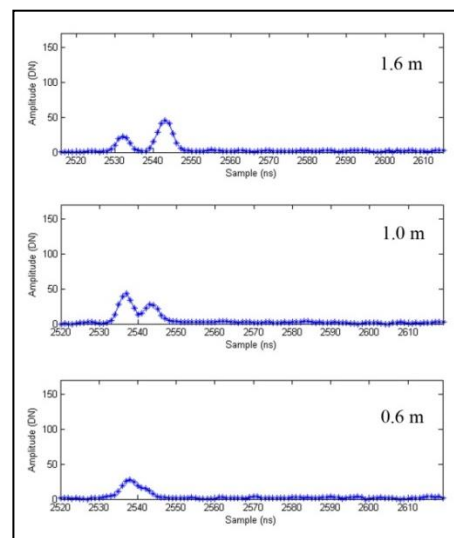


Figure 9. Received waveforms from the lidar targets set up as shown in Figure 3, with heights of 1.6 m, 1.0 m, and 0.6 m

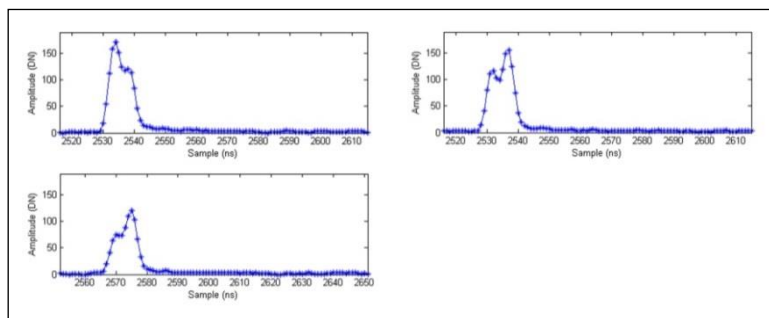


Figure 10. Examined waveforms: a laser pulse hitting the foam test object and then the ground, with 0.75 m separation distance.

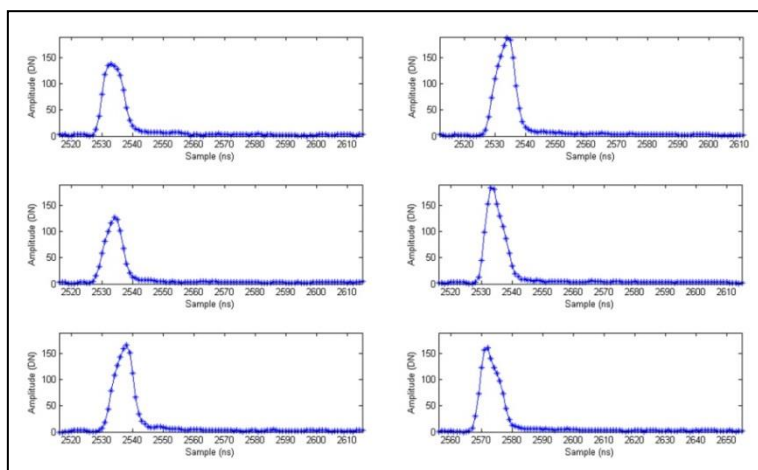


Figure 11. Examined waveforms: a laser pulse hitting the foam test object and then the table, with 0.60 m separation distance.

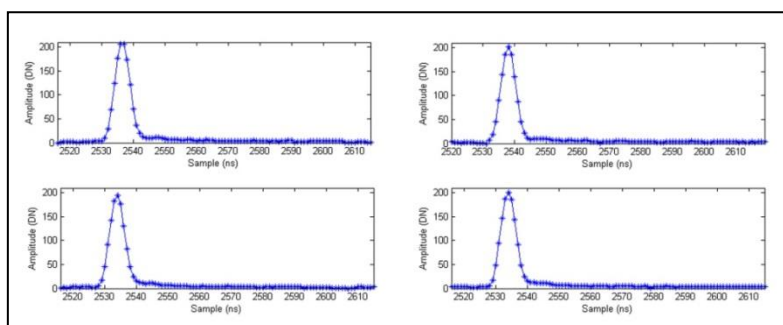


Figure 12. Examined waveforms: a laser shot hitting the foam test object and then the table, with 0.30 m separation distance.

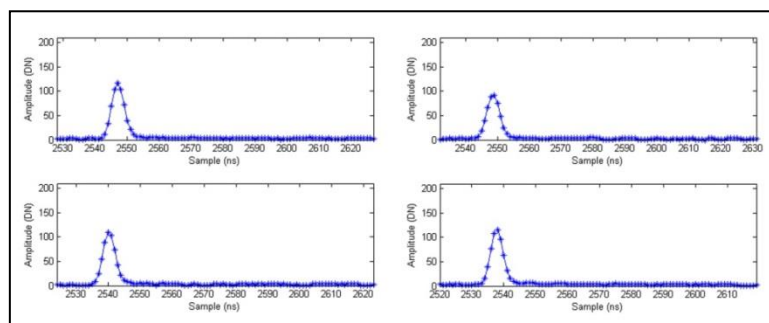


Figure 13. Examined waveforms: a laser shot hitting the top of the green box and then the ground, with 0.28 m separation distance.

3.4 Reliability of Gaussian estimates of designed targets

The Gaussian decomposition method was applied to the waveforms. R-square and RMSE values can be used to check the quality of the fitting results. R-square is known as the coefficient of determination, which evaluates how well the fit approximates the real data points, or how successful it is in explaining the variation of the data. It can be treated as a relative measure of fit, with a value close to 1.0 indicating a good fit. The RMSE is an absolute statistic that measures how close the observed data points are to the predicted values based on the fitted model. A value close to 0 indicates a good fit. Table 3 presents the results of the target waveforms, including the error of height estimates, the extracted waveform parameters (amplitude and width), and the statistics (R-square and RMSE) that measure the quality of the fit. It is evident that the majority of R-square values are greater than 0.99, which

indicates good relative fits. However, the RMSE values are only close to zero at the small amplitudes. This result is similar to that demonstrated by Wagner *et al.* (2006). They observed that the RMSE increased slightly from low to high amplitudes, and stated that this was a consequence of the signal noise in the data at small amplitudes and a real system waveform with slight deviation from an ideal Gaussian pulse at high amplitude. Although the absolute error of the heights estimated are between 0.00 and 0.11 m, it is necessary to further assess the height estimates in a statistical manner, on the basis of more samples (e.g. > 30). In addition, at the target height of ≤ 0.30 m, only one return is detected in the waveforms, and this is entirely similar to a standard Gaussian. Nevertheless, such waveforms seem have broader widths than those with two visible peaks, (i.e. target height: 1.0 and 1.6 m). The widths estimated from a target height of 0.30 m are broader than those from a target height of 0.28 m.

Table 3. Gauss-Fitting of the target waveforms

Target height (m)	Height Error (m)	Amplitude (DN)	Width (ns)	Fitting	
				R-square	RMSE (DN)
1.60	0.00	20.67; 44.19	2.17; 2.63	0.997	0.414
1.00	0.01	41.05; 25.71	2.39; 2.68	0.996	0.530
0.60	0.05	25.36; 10.14	2.76; 2.02	0.991	0.484
0.75	0.05	161.45; 114.15	2.41; 2.89	0.997	2.096
0.75	0.01	110.62; 151.60	2.35; 2.74	0.997	1.925
0.75	-0.01	68.42; 116.24	2.40; 2.75	0.998	1.250
0.60	-0.07	74.89; 124.58	2.01; 3.55	0.996	2.052
0.60	0.01	79.20; 184.77	2.20; 3.21	0.998	2.093
0.60	-0.03	34.54; 123.75	2.02; 3.34	0.997	1.488
0.60	-0.11	128.55; 110.01	2.33; 3.63	0.998	1.664
0.60	0.01	68.37; 161.90	2.18; 3.26	0.997	2.068
0.60	-0.02	132.11; 102.01	2.37; 3.27	0.998	1.596
0.30	-	209.90	3.27	0.997	2.410
0.30	-	200.38	3.21	0.998	1.987
0.30	-	192.99	3.25	0.995	2.567
0.30	-	199.99	3.29	0.996	2.606
0.28	-	114.38	2.73	0.996	1.322
0.28	-	90.76	2.80	0.998	0.753
0.28	-	108.38	2.69	0.997	1.036
0.28	-	114.14	2.69	0.996	1.269

4. Conclusion

This study investigated the reliability of Gaussian estimates from waveforms with overlapping pulses at separation distances of close to the pulse length of the Riegl LMS-Q560 system. It was found that the RMSE values for the pulse width estimates were increasingly large when the separation distance was decreased (< 6 ns). The RMSE values for the range estimates remained consistently small (~ 0.04 ns) when decreasing the separation distance. This indicates that there is no practicable way to ascertain to what extent the pulse width of overlapping pulses, with a separation distance of < 6 ns, has been contributed to by individual returns. Although those from a separation distance of < 6 ns may not provide reliable pulse width estimates, the range can be reliably estimated. Overall, it is suggested that caution must be exercised in the estimation of pulse widths resulting from weak, extremely strong pulses, and overlapping pulses with a small successive separation.

When subsequently exploiting these estimated parameters for potential applications, it is recommended that such precision measures (i.e. RMSE) are taken into account. This precision measure may provide an additional indicator when handling multiple waveform features or multisource classification problem. For example, the choice of weighting each feature will reflect the knowledge of the reliability and result in objective applications.

Reference

- Brenner, A.C., Zwally, H.J., Bentley, C.R., Csatho, B.M., Harding, D.J., Hofton, M.A., Minster, J.-B., Roberts, L., Saba, J.L., Thomas, R.H. and Yi, D., 2003. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) - derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights. <http://www.csr.utexas.edu/glas/atbd.html> (accessed 12 March. 2009)
- Carabajal, C.C., Harding, D.J., Luthcke, S.B., Fong, W., Rowton, S.C. and Frawley, J.J., 1999. Processing of shuttle laser altimeter range and return pulse data in support of SLA-02. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 32(3/W14): 65-72.
- Csanyi, N. and Toth, C.K., 2007. Improvement of lidar data accuracy using lidar-specific ground targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(4): 385-396.
- Daniel, C. and Wood, F.S., 1980. *Fitting equations to data: computer analysis of multifactor data*. John Wiley & Sons, New York, 458 pp.
- Doneus, M., Briese, C., Fera, M. and Janner, M., 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, 35(4): 882-893.
- Fisher, R.A., 1970. *Statistical methods for research workers*, Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Höfle, B., Hollaus, M., Lehner, H., Pfeifer, N. and Wagner, W., 2008. Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data, *SilviLaser 2008*, Edinburgh, UK.
- Hofton, M.A., Minster, J.B. and Blair, J.B., 2000. Decomposition of laser altimeter waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(4): 1989-1996.
- Jutzi, B. and Stilla, U., 2005. Measuring and processing the waveform of laser pulses. *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, 1: 194-203.
- Jutzi, B. and Stilla, U., 2006. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61(2): 95-107.
- Mücke, W., 2008. Analysis of full-waveform airborne laser scanning data for the improvement of DTM generation. Master Thesis, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 67 pp.
- Reitberger, J., Krzystek, P. and Stilla, U., 2008. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1407 - 1431.
- Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C. and Ducic, V., 2008. 3D vegetation mapping using

small-footprint full-waveform airborne
laser scanners. *International Journal of
Remote Sensing*, 29(5): 1433-1452.

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T.
and Studnicka, N., 2006. Gaussian
decomposition and calibration of a novel
small-footprint full-waveform digitising
airborne laser scanner. *ISPRS Journal of
Photogrammetry & Remote Sensing*, 60:
100-112.

空載波形光達資料之高斯估值可靠度評估

林玉菁^{1*} Jon P. Mills² 林俊霖³

摘 要

目前在處理大足跡或小足跡波形光達資料，高斯分解回波技術扮演相當重要之角色，當以高斯函數擬合所接收之回波或地表反應，可獲算得各回波之高斯係數，主要包含對應為回波時間點之高斯波峰值、回波寬度與回波振幅值，這些屬性隱含雷射掃描目標物之特徵。然而在某些情況下，所估算得的參數具不確定性，目前僅少數研究評估高斯估算值之可靠度或不確定性，在應用波形高斯估值時，實必須考量此不確定性之指標值。本文主在研究此議題，調查波形複雜度對高斯估值可靠度之影響，測試資料為包含模擬波形資料與 Riegl LMS-Q560 真實波形資料，另掃描當天設置所設計之目標物於野外現地，觀察波形形狀隨多重回波間之距離與振幅大小之影響。模擬資料發現高斯波寬估值之均分根誤差會隨著多重回波間之距離縮短（<6ns）而增加，回波時間距離之均方根誤差則可維持一致之精度（0.04ns）。

關鍵詞：波形、光達、高斯分解

¹ 國防大學理工學院環境資訊及工程學系 助理教授

² 英國新堡大學空間資訊系 教授

³ 中山科學研究院資訊通信研究所 助理研究員

*通訊作者，電話：03-3800364 ext. 135, E-mail: yuching.ncl@gmail.com

收到日期：民國 102 年 02 月 26 日

修改日期：民國 102 年 11 月 10 日

接受日期：民國 102 年 11 月 25 日

應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及 葉面積指數

林莉萍^{1*} 王正楷² 曾義星³ 朱宏杰⁴

摘 要

空載光達系統可直接獲取高精度三維坐標的點雲資料，且其雷射光具有穿透樹葉縫隙的特性，能快速偵測得森林林分結構的三維空間資訊。透過其蘊涵的森林厚度及林木密度資訊，可用來估計樹冠高度模型(Canopy Height Model, CHM)和葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)。本研究目的是探討如何應用空載光達資料估計森林地區之樹冠高度模型和葉面積指數。在推估 CHM 方面，本文是以點雲資料產製數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)及數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，將森林區域的 DSM 減 DEM 即得 CHM。並以三種不同的空載光達系統產生之原始點雲及全波型資料進行實驗，比較六個推估得的 CHM，實驗結果發現，整體差異均小，少數差異較明顯的地方主要發生在森林表面高度落差較大處。在 LAI 方面，則是以點雲資料計算五種雷射穿透率指標(Laser Penetration Index, LPI)來推估，LPI₁是地面點占全部點的比例，LPI₂是地面點強度值和全部點強度值的比例，LPI₃是地面點與所有雷射光束的比值，LPI₄是改良自 LPI₁，但增加單一回波地面點的權，LPI₅則是以全波形資料計算的雷射光照射地物間面積與非地面的面積比。五種 LPI 與實際地面量測資料迴歸後的成果顯示，在本研究測區的低航高點雲資料中，LPI₄都能得到高於 0.5 的 R² 值，說明 LPI₄具有較穩定且準確的 LAI 估計能力。而相較於即時解算的多重回波點雲，使用全波形的光達點雲穿透率指標，可提升對 LAI 的估計，R²可達到 0.8 以上，增加利用小範圍地面實測資料來推估大範圍森林區資料的可行性。

關鍵詞：樹冠高度模型、葉面積指數、空載光達、雷射穿透率、全波型

1. 前言

森林中的資訊包含了林分高度、林木材積、葉面積指數、樹種等等，不同的指標都代表著森林生長的情形。因此利用觀測儀器探測森林的相關參數指標，有利於我們了解在整個森林環境的變化。為了能快速且能經常性監測森林生長，除了應用現地量測的方式外，利用航遙測的技術進行大規模的森林量測亦趨於普遍(吳守從及陳永寬，2004)。常見的遙測有多光譜影像或可見光之航空影像，然其缺點為其影像所記錄之觀測物體大多為樹冠層，樹冠下的資訊則難以得知，而另一遙測技術—空載光達系統，因其具有穿透樹冠層之能力以及可直接提

供三維資訊的優勢(Danson *et al.*, 2009)，相比於傳統遙測之多光譜或可見光之航空影像，空載光達之使用已逐漸普遍應用在森林的測繪應用上，許多文獻也根據空載光達資料發展出多種點雲處理方法以推估森林的相關參數指標，例如偵測立木位置、林木高度、分辨樹種、生物量及葉面積指數等(Koetz *et al.*, 2006)。

樹冠高度模型包含了森林的高度，以及整體的森林體積、範圍等，可透過量測樹冠表層及地面的三維資訊來得到。空載光達系統可提供高密度的掃描點三維坐標，這些點位多數分佈於樹冠層，但約有 30% 穿透樹冠表層的點，分佈於森林內部或地表

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

⁴ 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

*通訊作者，電話：06-2383876 ext. 852, E-mail:s3350839@gmail.com

收到日期：民國 103 年 03 月 21 日

修改日期：民國 103 年 10 月 13 日

接受日期：民國 103 年 10 月 30 日

面，經過點雲過濾篩選處理，可產製數值表面模型(DSM)及數值高程模型(DEM)，將森林區域的 DSM 減 DEM 即得 CHM。本研究應用同地區多種空載光達資料分別製作 CHM 並比較其差異，以評估應用空載光達點雲製作 CHM 的穩定性及精度。

本研究另一主要目的是利用空載光達資料估計森林葉面積指數(LAI)，森林 LAI 的分佈可展示森林區域內的林木樹冠生長情形，而由於植冠密度的分佈直接影響森林整體環境，如光合作用、蒸散作用、呼吸作用等，都與整個地球的水資源循環、碳含量的變化息息相關。藉由地面直接量測、地面光學儀器、或光譜影像等方式都能得到森林中某地點的葉面積指數(Jonckheere *et al.*, 2004；Masona *et al.*, 2012)，但若需要全面性的觀測，則有賴航遙測的作法。而由於空載光達具備直接獲取三維的點資訊及穿透之特性，適合用來獲取森林樹冠及內部之幾何結構。依據 LAI 的定義，LAI 與樹林葉片的總面積成正比，而雷射光可穿透樹冠層的比例與葉片總面積成反比，因此可透過此反比關係將空載光達的樹林穿透率指標(Laser Penetration Index, LPI)來估計 LAI。Morsdorf *et al.* (2008)、彭炳勳(2007)、及 Solberg(2010)皆曾利用光達點雲的 LPI 來推估針葉林的 LAI，其成果顯示 LPI 與 LAI 的相關性判定係數 R^2 都能達到 0.7 以上。

台灣低海拔森林屬闊葉林，森林型態複雜且明顯異於針葉林，值得進一步探討空載光達是否同樣可以用來估計闊葉林的 LAI，本研究嘗試以多種 LPI 推估闊葉林的 LAI，並探討全波型光達對 LAI 的估計是否有幫助。

2. 研究資料及方法流程

2.1 實驗區域

實驗區域位於台灣東南部的南仁山生態保護區，此區為熱帶季風型雨林，是台灣僅存的低海拔原始林，其森林型態複雜，孕育非常豐富的生態景觀。由於此地區地形複雜、樹冠遮蔽嚴重，造成定位、取樣不易，因此我們實驗區的選擇乃尋找其

鄰近位置具備可接收 GPS 衛星資料之區域，再利用導線測量的方式將 GPS 獲取的控制點資訊導入選定樣區。本研所選取了兩個小範圍區域如圖 1 所示。其中 A 區附近具備良好的空闊地點，可接收 GPS 衛星訊號(以 e-GPS 方式進行)，因此此區的實驗資料適合用來進行 LAI 之估計，而 B 區由於 GPS 訊號仍不穩定，難以解算，因此缺少控制資訊，無法計算對應的 LAI 資料，而對於 CHM 的估計，兩區則都有進行。

對於兩區的森林型態，A 區為迎風面的位置，整體樹高不超過 15 公尺，呈現樹幹較細且立木間距較近的森林型態，整區其大小約為 $300 \times 250 \text{m}^2$ 。而 B 區位於背風面，其範圍大小約 $250 \times 250 \text{m}^2$ ，該區的樹冠生長茂密，整體的林木高度較 A 區來的高，其中的優勢樹種的高度約在 15~20 公尺左右，地形包含了中間低兩側高的溪谷型態。

2.2 空載光達資料

研究中共使用了三種空載光達系統，分別是 Leica ALS60、Riegl LMS-Q680i 和 Optech Pegasus HD400，為了能獲取高密度的地面點雲來製作數值高程模型，皆使用低航高(離地面高度 1000 公尺)且光跡直徑小於 1 公尺的掃描方式進行森林區的量測(表 1)。另外，在 Leica 系統的部分，則是增加了高航高(離地面高度 2500 公尺)的資料來進行估計葉面積指數的比較。其中 Leica ALS60 和 Optech Pegasus HD400 光達系統是利用加裝全波形資料記錄器的方式，因此可同時提供即時解算的多重回波光達點雲和全波形資料；而 Riegl LMS-Q680i 儀器則是提供經全波形資料後處理過的三維點雲以及原始全波形資料。而本研究對於三家儀器所提供的全波形資料，利用小波偵測器搭配高斯擬合的方式，能夠再重新萃取出新的點雲，為了有所區別，系統所給予的即時解算點雲我們稱為系統點雲(System LiDAR Points)，而利用小波偵測器再重新由波型解算之點雲稱為全波形點雲(Waveform LiDAR Points)。

對於各種低航高光達系統的資料而言，本研究

使用了三個高重疊航帶的 Leica 光達資料，來提升在單位面積上的點雲數，期望能得到更完整的森林結構提高計算穿透率指標的準確性，進而提升葉面積指數的估計。而在相同航帶的資料下，透過全波形萃取出的點雲總數量可以增加約百分之三十左右(與系統點雲比較)，地面點的數量也有明顯的增加(表 2、表 3)；Riegl 的部分相較於多重回波，利用小波方式萃取出的點雲數量增加的比例較 Leica 的資料少。其原因為 Riegl 原有的資料即是利用全

波形資料萃取得來，在單一光束的回波訊號沒有受到點數的限制，因此與本研究中使用的全波形點雲數量較為一致；雖然 Optech 在單位雷射數量上的地面點比例較高。但在本樣區只用了單一航帶的 Optech 點雲進行樹冠模型的製作，因此地面點相較於其他兩種資料來的要少。而經全波形資料萃取出的總點雲雖有些許的增加，但主要增加的部分都是屬於地表上樹冠層的區域，地面的數量反而有減少的現象。

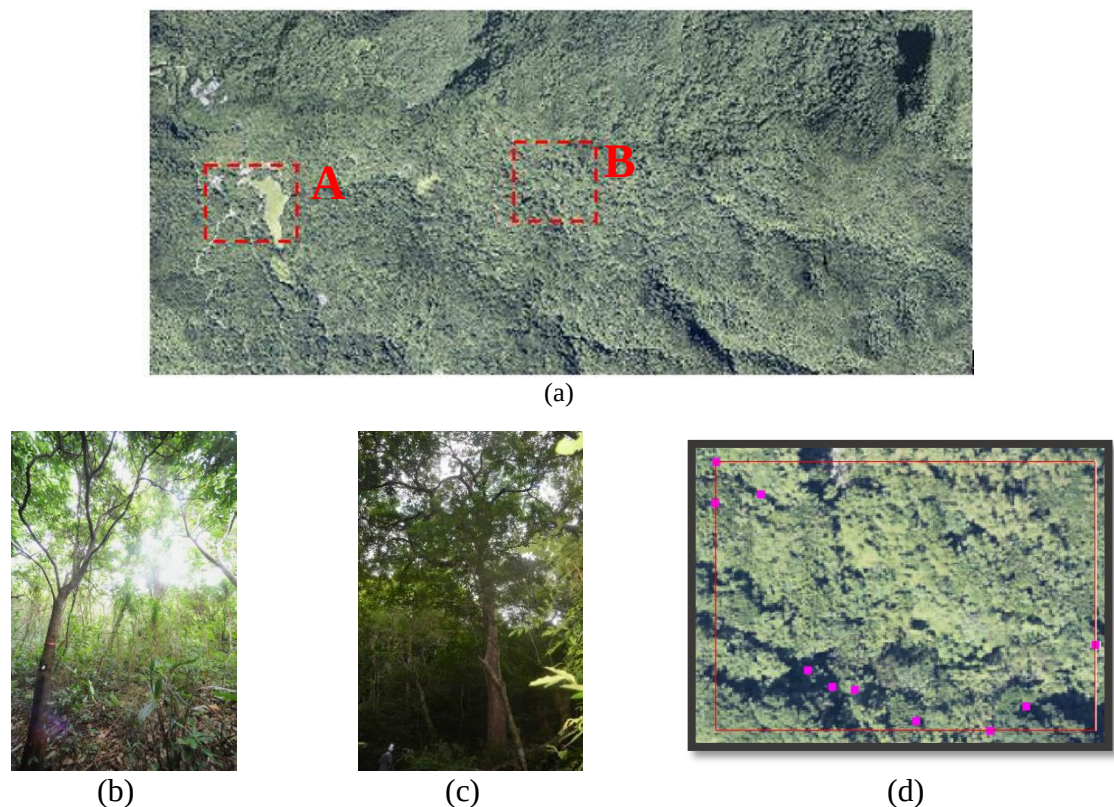


圖 1 樣區範圍圖(a) 南仁山保護區，框選處為本研究的兩個實驗區；(b) A 區的現地實景圖；(c) B 區現地實景圖；(d)A 區中取樣 LAI 的樣本分佈

表 1 光達系統掃描參數

	Leica ALS60		Riegl LMS-Q680i	Optech Pegasus HD400
AGL	1000m	2500 m	1000m	1000m
雷射脈衝頻率	99 kHz	99 kHz	210 kHz	150 kHz
FOV	28°	20°	60°	40°
波長	1064nm	1064nm	1550 nm	1064nm
發散角	0.22 mrad	0.22 mrad	≤ 0.5 mrad	0.25 mrad
光跡大小	0.22 m	0.55 m	0.5 m	0.25 m
掃描日期	2011/10/21 2011/10/24	2011/10/24	2012/01/08	2011/11/3
飛行速度	185 KM/H	185 KM/H	180 KM/H	203.5 KM/H

表 2 A 區光達點雲資料

	總雷射 光束	雷射密度 (pt/m ²)	總點數	點雲密度 (pt/m ²)	地面點點 數	地面點雲密 度(pt/m ²)
Leica 多重回波	547758	7.3	600802	8.0	106975	1.4
Leica 全波形光達	541059	7.2	697642	9.3	115498	1.5
Riegl 多重回波	491364	6.5	657740	8.7	128060	1.7
Riegl 全波形光達	491296	6.5	723564	9.6	121432	1.6
Optech 多重回波	105884	1.4	161215	2.1	38885	0.5
Optech 全波形光達	106040	1.4	163837	2.2	36511	0.5

表 3 B 區光達點雲資料

	總雷射 光束	雷射密度 (pt/m ²)	總點數	點雲密度 (pt/m ²)	地面點點 數	地面點雲密 度(pt/m ²)
Leica 多重回波	875503	12.3	1027138	14.4	22949	0.32
Leica 全波形光達	875518	12.3	1337504	18.8	38209	0.54
Riegl 多重回波	638711	9.0	930788	13.1	30406	0.43
Riegl 全波形光達	638663	9.0	1026081	14.4	33904	0.48
Optech 多重回波	96269	1.4	168830	2.4	12701	0.18
Optech 全波形光達	96291	1.4	179382	2.5	12413	0.17

2.3 現地觀測資料

對於葉面積估計的現地觀測部分，我們一共在 A 樣區內選擇了 10 個樣本點進行葉面積指數的量測。為了確認各樣本點中心的位置，我們先在樣區附近較空曠的地方架設 E-GPS，進行多次量測，並利用 E-GPS 量測測區周圍一等水準點 Q029、Q028 的坐標來進行修正，以得到較準確的控制點坐標。利用測得的控制點坐標，我們以全站儀進行閉合導線的量測，於測區中釘定臨時木樁，作為測區內控制資訊之用，藉以獲取各樣本的中心位置。在定位完成後，我們以 LAI-2000 進行葉面積指數的量測。

LAI-2000 的儀器是利用樹冠透光的原理，以魚眼鏡頭的光感應器水平向上接收樹冠底下的光線，並同時以另一台儀器接收未受到遮蔽的全天光進行光量的比較，藉由其中的亮度比值求得葉面積指數。本研究量測各樣本點中心的方式是在距離樣本中心點 0~1 公尺的位置，分別朝八個不同方向，

高度約 1 公尺處向上接收樹冠層下的光量(圖 2)。為了降低量測時受到操作人員或其它鄰近物體之遮蔽、以及陽光過度曝曬的影響，本研究中使用 90° 的透鏡遮蓋輔助 LAI-2000 的量測。最後再將接收的八個平均亮度與全天光下的亮度相比，即可得到該樣本點的葉面積指數。

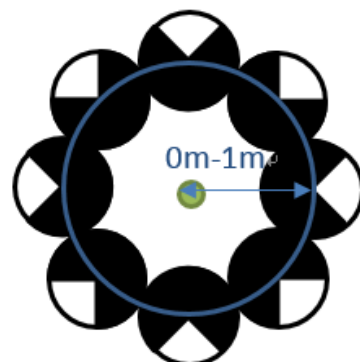


圖 2 LAI-2000 測量方式之俯視圖

2.4 樹冠高度模型估計

樹冠高度模型(Canopy Height Model, CHM)是由數值表面模型(DSM)和數值高程模型(DEM)兩

種模型所相減而得，圖 3 展示森林區典型的光達點雲剖面圖，以及所萃取得的 DEM 及 DSM 剖面。CHM 可以用於描述森林區域樹木的形狀和範圍，諸如林木高度、樹體積、林木位置等。由於森林的地形複雜，人員不易進入測量該地區的地形變化，且森林區有茂密的樹冠覆蓋，難以用遙測影像找尋匹配點進行立體製圖，甚至無法觀測到地形起伏的情況製作 DEM，因此目前多使用空載光達點雲的資料來進行樹冠高度模型的製作。Naesset(1997)以光達點雲的最後回波值高度，加上胸高直徑來推算樹的平均高度，最後得到的結果普遍有低估的情形。其主要原因為當光達系統在進行掃描時，可能會錯過樹木最高點的位置，或是因為最高點的樹梢回訊較弱而無法取得，因此取到的樹高通常會比實際樹高要來的低。

數值高程模型的精度也會影響森林體積的估

算，尤其是在地勢起伏較大的山區，若是能有較準確的地形模型(DEM)，才能夠得到較好的樹冠高程模型(蕭淳伊，2008)。因此我們在製作 CHM 之前會針對 DEM 的部份，比較利用全波形光達點雲和一般光達點雲製作成果的差異。而模型的網格大小也是個考慮的重點，因為若單位網格內的點雲數量過少會容易造成取樣不足有產生錯誤(Naesset, 1997)。在彭炳勳 (2007)研究中也顯示，樹冠模型的網格大小和計算面積對評估林分平均高都會有影響。在其測試下，以空間解析力為 3 公尺之網格，搭配 15 公尺×15 公尺的計算面積可以得到最符合實際樹高的成果。因此本研究利用了三種不同的光達系統點雲資料，並配合點雲密度切割適合的網格大小製作樹冠高度模型，來比較其中的差異和製作之精度評估。

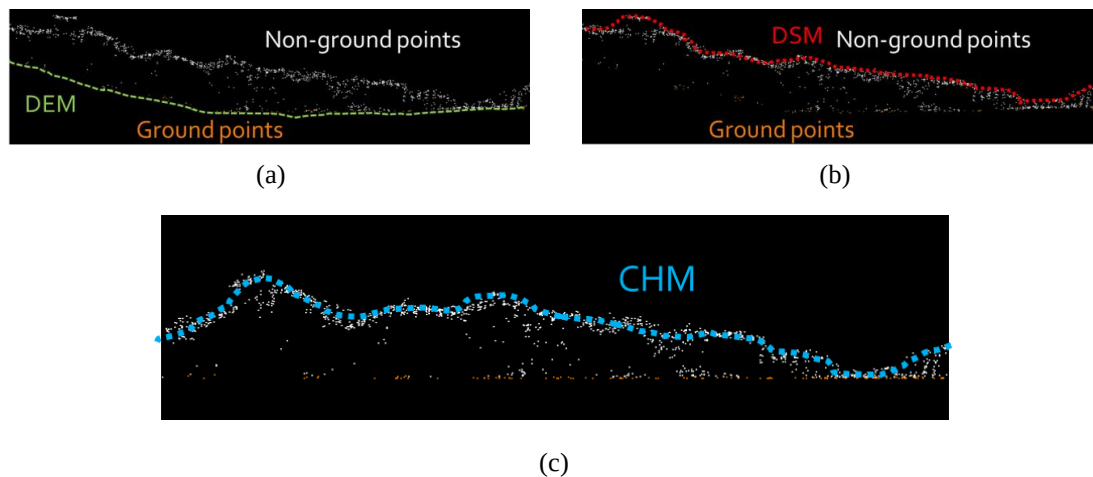


圖 3 利用空載光達點雲製作樹冠高程模型示意圖(a)數值高程模型(DEM)；(b)數值表面模型(DSM)；(c)樹冠高度模型(CHM)

2.5 森林葉面積指數估計

利用光達資料推估葉面積的方式，乃藉由點雲的分佈，計算出能夠表示林分樹冠與地表間關係的穿透率指標(Laser penetration index, LPI)。將 LPI 和已知的現地量測葉面積指數資料進行迴歸計算，可得到 LPI 推估葉面積指數的模型參數，利用此參數就能透過 LPI 來估計森林葉面積指數。其中，由於無法確認地真資料量測時所涵蓋的區域，因此以測試的方式，找出相對應穿透率指標推估葉面積指

數的計算範圍。最後再以最佳的迴歸參數，針對大範圍的森林區進行葉面積推估。以下之各小節分別針對點雲穿透率指標，敘述估計葉面積指數作業流程(圖 4)中各個步驟的詳細做法。

本研究按照不同點雲的特性，並參考研究文獻中推估葉面積或孔隙率的穿透率指標計算方法，統整出五種葉面積的推估方法(Solberg *et al.*, 2006; Hopkinson & Laura, 2009; Arnaud *et al.*, 2011)。其中，為了要和地面葉面積指數觀測資料進行比較，將 LAI-2000 地面測量的高度(一公尺)設為門檻值，

將此高度之下的點皆視為地面點雲。

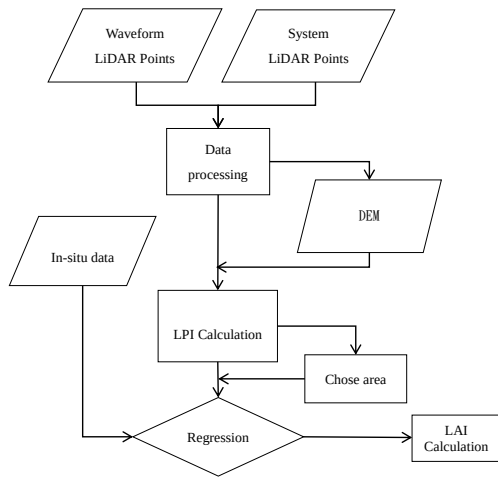


圖 4 利用光達點雲推估葉面積指數流程圖

2.5.1 計算穿透率指標

第一種穿透率指標(LPI₁)為較直觀的算法，是以地面點占全部點的點數來計算(式 1)。

$$LPI_1 = \frac{\sum Ng}{\sum N_{total}} \quad (1)$$

其中的Ng為地面點點數；Ntotal表示所有點點數。為多數研究文獻採用的算法(Solberg *et al.*, 2006; Arnaud *et al.*, 2011)，與植被覆蓋率也有較好的相關性(黃清美, 2007)；第二種穿透率指標(LPI₂)也是計算地面點和全部點的比例，但改以點雲的強度值為比例的計算(式 2) (Solberg, 2008)。

$$LPI_2 = \frac{\sum Ig}{\sum Itotal} \quad (2)$$

式中，Ig=地面點強度值；Itotal=所有點強度值。

第三種穿透率指標(LPI₃)是全部雷射光束的數量(NI)和地面點的點數比(式 3) (黃清美, 2007; Zhao & Popescu, 2009)

$$LPI_3 = \frac{\sum Ng}{\sum NI} \quad (3)$$

第四種穿透率指標(LPI₄)是改良自第一種指標，對單一回波的地面點進行加權。此方法的想法來自在許多文獻中(Solberg, 2010; Koetz B. *et al.*, 2006; Arnaud *et al.*, 2011)，除了使用第一種穿透率指標外，也使用了單一回波的點雲做穿透率指標的計算，以全部單一回波的地面點和雷射數的關係推算葉面

積指數。由於雷射光經過樹冠層得到的多重回波訊號較為複雜，難以確定得到的點數與茂密程度呈現絕對的正比關係，因此本研究將其合併使用，強調單一回波地面點在森林中顯示的直接穿透性。LPI₄如式(4)，其中以Ng1代表所有單一回波且為地面點的點數。

$$LPI_4 = \frac{\sum (Ng + Ng1)}{\sum N_{total}} \quad (4)$$

Solberg(2010) 利用點雲強度值和測試的物體反射率比值，推算雷射光照射地物間面積的比例。因此本研究依據面積比例的概念，提出第五種穿透率指標(LPI₅)，主要透過全波形資料中之 cross section (σ) 指標來推導出雷射照射面積。從 cross section 的定義(Wagner *et al.*, 2006) (式 5)，我們得知雷射光接觸物體的面積可由物體反射率和 cross section 計算而得(式 6)。

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho A \quad (5)$$

式中，σ=cross section。

Ω=物體反射角≈2π。

A=雷射光與物體接觸的面積。

ρ=物體反射率。

$$A = \frac{\Omega}{4\pi\rho} \sigma = \frac{\sigma}{2\rho}, \Omega = 2\pi \quad (6)$$

而穿透率的指標 LPI₅即定義為(雷射光到地面的面積總和)/(雷射光到地面的面積總和+雷射光打到樹冠的面積總和)，如式 7，式中 k 值乃地面反射率和植被反射率之比值，由於單一回波的雷射光打到地物的面積可視為相同大小，因此由(式 8)之定義得知，利用單一回波的反射強度值可估算雷射光在森林中地面和非地面的反射率比例(亦即求 k 值)，再帶入(式 7)即可求出 LPI₅之數值。

$$LPI_5 = \frac{\sum Ag}{\sum (Ag + Ac)} = \frac{\sum \frac{\sigma_g}{\rho_g}}{\sum \left(\frac{\sigma_g}{\rho_g} + \frac{\sigma_c}{\rho_c} \right)} = \frac{\sum \sigma_g}{\sum (\sigma_g + k\sigma_c)}, k = \frac{\rho_g}{\rho_c} \quad (7)$$

$$\rho = I/A, \quad I = \text{反射強度值} \quad (8)$$

基本上這五種穿透率指標都是利用穿透過樹冠的地面點雲，來計算樹冠的穿透性。在這些指標中不同的地方在於有的使用點數上的比例，有的是計算強度的比值，或是利用隱含全波形資料中的雷射光照射地物的面積比去計算。當光達點雲資料均勻且完整的分布在森林中時， LPI_1 可以以簡單的點數比就能表示森林樹冠的疏密程度。但是在茂密的樹冠區中，點雲於冠層的個數會受到雷射光的波長影響萃取時的解析能力，造成較茂密區的冠層點未必比較稀疏區的冠層點多，造成點數計算上的錯誤。因此出現 LPI_2 和 LPI_3 ，分別以強度值或直接捨棄樹冠層點數用雷射數進行比例上的計算。而 LPI_4 也是以類似的概念，增加直接穿透點雲的比例，來強調在較稀疏區域的穿透性。最後一個穿透率指標則是利用了全波形資料中的資訊，計算出雷射光照射到地面的面積比，期望增加隱含在波形中的特徵提高對推估葉面積指數的準確性。

2.5.2 尋找最適合計算範圍

本研究使用 LAI-2000 的地面觀測資料為地真資料，與計算得的光達穿透率指標進行迴歸分析。由於 LAI-2000 的設計為接收鏡頭上方距離天頂角 $0^\circ \sim 74^\circ$ 內的光線，而其實際接收範圍會受到整體森林的種類和型態、樹冠的密度等影響，無法確定儀器接受的光照範圍(彭炳勳，2007)。對應光達點雲資料，各範圍內計算出的穿透率指標因點雲的分佈或是掃描時的密度，都會有所不同。因此為了尋找本區域最適合計算穿透率指標來推估 LAI 的範圍大小，本研究測試了距離樣本點中心半徑 1 公尺至 15 公尺圓範圍內的光達點雲分別計算 LPI(圖 5)，並透過與現地 LAI 資料迴歸找出最佳的迴歸參數。

2.5.3 葉面積指數的迴歸模式和評估方式

由於森林範圍廣大，在進行森林研究時難以實際量測到所有的資訊，因此常利用迴歸的方式，以測量的部分的樣本資料來進行整體的推估。本研究

利用現地量測的 LAI 為依變數(y)，LPI 為自變數(x)，進行線性模式的迴歸(式 9)。利用已知的樣本點，計算方程式中的參數(β_0 、 β_1)。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \times x_i, \quad i=1, \dots, n \quad (9)$$

利用迴歸的方式可以了解穿透率指標和葉面積指數間是否相關、相關的方向與強度，並且可以透過判定係數來估計迴歸方程式之適合度。而相關性判定係數 (Coefficient of determination, R^2) 即是迴歸造成的平方和(SSR)占總平方和(SST)的比例，利用最小二乘法的概念，找出誤差項平方和、迴歸項平方和計算得來。(式 10~12)

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

R^2 的數值範圍介於 0~1。當 R^2 愈大，表示估計的誤差量越小，代表此迴歸模式能夠解釋全體 y_i 變異量的比例愈大。因此 R^2 愈接近 1.0，代表此模式愈有解釋能力。但當樣本數(n)較少時，對於式 12 而言，容易會有高估的現象，因此本研究中利用校正後 R^2 (式 13) 進行評估，減少樣本數量造成的膨脹效果。最後使用迴歸得到之參數建立模型，來推估大範圍葉面積指數得分佈。

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1-R^2)(n-1)}{n-k-1}, \quad k = \text{解釋變異之個數} \quad (13)$$

在計算出最佳的迴歸方程式後，即可透過已知的參數建立推估方程式來推算整區森林的葉面積指數。

3. 研究成果分析

3.1 樹冠高度模型估計成果

以三種光達系統之多重回波及全波形資料，A 及 B 實驗區皆可獲得六種點雲(三種系統點雲、三種全波形點雲)資料來分別產製 DEM、DSM 及 CHM。而不同點雲資料所產製的 CHM 都有些許差異，本研究利用六種 CHM 在相同網格位置的高度

值進行平均值及標準偏差的計算，得到的成果如圖 6，標準偏差之直方圖如圖 7。從圖 6 我們可以明顯的看出，在森林區的邊緣、植生厚度差異較大的地方，由不同點雲資料得到的 CHM 高度差異也較大，導致標準偏差容易會有較大的偏差值產生。

CHM 的資訊除了可以用來推估森林中林木之樹高(圖 8)，也可以用來計算森林的樹體積。Lefsky *et al.*,(1999)提出樹體積的定義為包含樹本身的體

積以及樹冠底下的空間，相對於樹冠高度模型來說，樹體積可利用樹冠表面到地表的距離累積量來得到。應用本研究中所製作之 CHM 來推估兩個實驗區整體範圍的樹林體積如表 4，整體的標準偏差占整體體積的 2%~3%。顯示了用不同光達點雲製作出的 CHM，在森林樹體積得推算上沒有太大的差異。

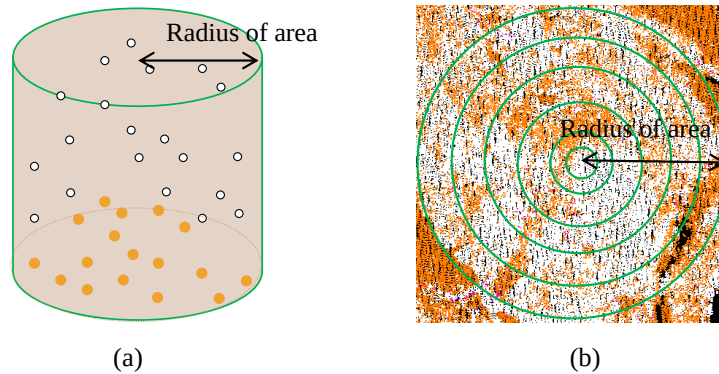


圖 5 光達穿透率指標計算範圍(a)側視示意圖(b)俯視示意圖

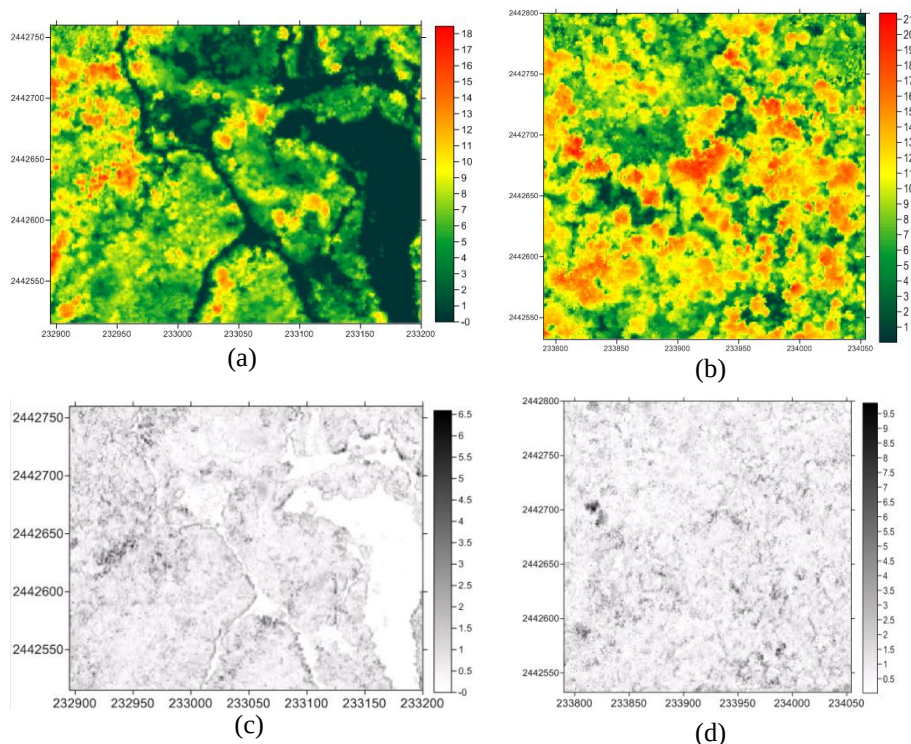


圖 6 A、B 區分別之 CHM 網格點的平均值(a)(b)及標準偏差(c)(d)分佈圖

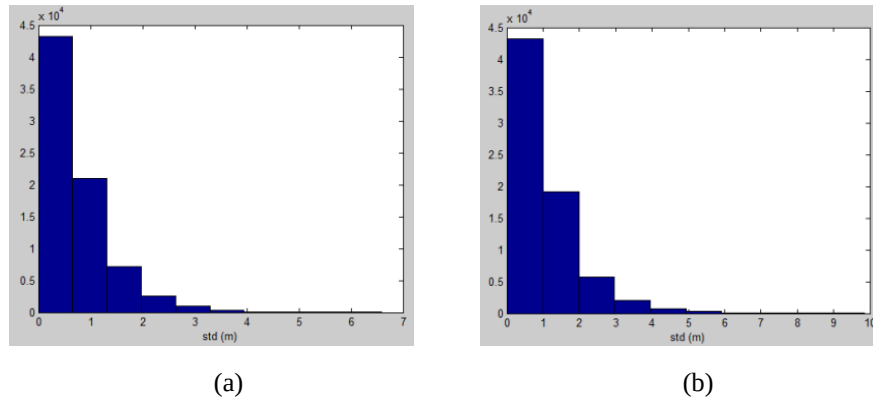


圖 7 六種點雲資料產製之 CHM 標準偏差統計直方圖(a) A 區；(b) B 區

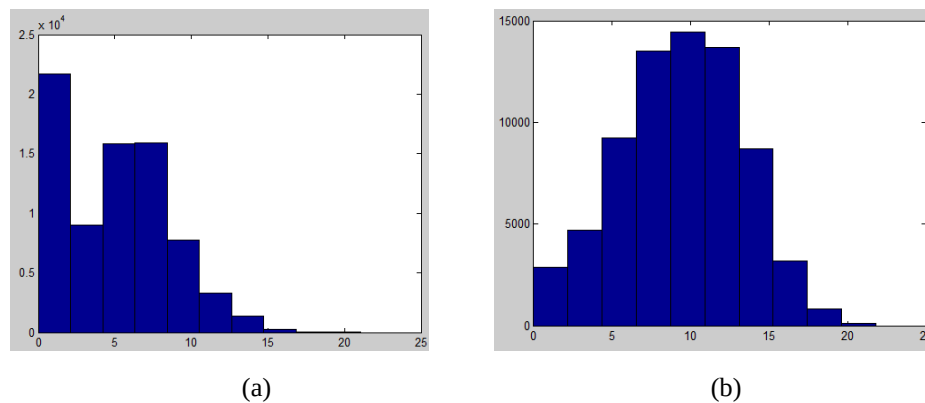


圖 8 CHM 高度統計直方圖(a)A 區；(b)B 區(橫軸為高度(m)；縱軸為累計量)

表 4 CHM 用於樹體積之推估

	A 區 (306m*246m) 樹體積(m ³)	B 區 (256m*269m) 樹體積(m ³)
Leica 多重回波	370961	630319
Leica 全波形	366338	676975
Reigl 多重回波	381245	677702
Reigl 全波形	379134	674281
Optech 多重回波	391125	685498
Optech 全波形	373516	665603
平均樹體積	34788	19895
標準偏差(std)	8767.653	19722.94
std 占總體積的比例	2.3%	3.0%
平均植生厚度(m)	4.928	9.1531

(平均植生厚度：dsm 的平均高度，可顯示出在該區域內平均植生的表面高度)

3.2 森林葉面積指數估計成果

本研究中利用 Leica 和 Riegl 兩種光達系統的資料來進行葉面積指數的推估，除了比較此兩種系統外，在 Leica 光達系統上，我們亦有獲取不同航高的點雲資料，以茲進行不同航高是否會對穿透率指標之計算有所影響。在進行穿透率指標計算之前，必須將所有點雲進行分類處理，把點雲分成地面和非地面點，且利用人工的方式將非地面點中如房屋等高於一公尺的人工建物去除，避免建物的低穿透率造成森林葉面積指數的高估。接著將所有點雲值與產製出的 DEM 相減，讓每個點雲的高程值都為地面上高度。得到含地面高度的點雲後，我們設定高程門檻值為 1 公尺，將高程為 1 公尺以下的點雲設成本研究穿透率指標中的地面點(圖 9)。

經過資料的前處理後，即可利用各個點雲分類後的屬性，包含回波數、強度值資訊進行穿透率指標的計算。其中，由於 LPI₅ 必須要有 cross section

的資訊，因此只適用於全波形點雲，而其計算公式中的 k 值透過選取單一回波中地面點與非地面點的比值得到，在各光達資料中使用之 k 值如表 5。由其中的比值可以發現，地面點與非地面點的比值在兩種光達系統的資料下並沒有相同的趨勢。其原因可能是因為在森林中的地表有許多植生覆蓋，加上本研究中將 1 公尺以下的點都設成非地面點，在這 1 公尺高度範圍內可能包含低矮植物、草叢等類似於樹冠層反射的地物，因此得到的結果並沒有一致。

表 5 單一回波 intensity 統計平均值

	地面點	非地面點	k
Leica 光達系統 (低航高)	90.0	96.2	0.94
Leica 光達系統 (高航高)	48.6	51.1	0.95
Riegl 光達系統 (低航高)	60.4	51.5	1.17

為了要和地面觀測資料進行比較，LPI 計算範圍的選取方式是根據地面量測樣本點的中心位置，切割半徑 1~15 公尺圓柱範圍內的點雲進行計算。接著將計算之成果與現地測得之葉面積指數做線性迴歸的分析，得到在不同範圍內的相關性判定係數 (R^2)。利用 LPI 與 LAI 之間的 R^2 來判定 LPI 在不同大小的點雲範圍內對於 LAI 解釋的能力，並選定較好的計算範圍得到 LPI 推估 LAI 的估計方程式。

由圖 10 可以看出，該區穿透率指標對葉面積

指數最大的解釋能力約在 13、14 公尺的計算範圍。表示出當利用 13、14 公尺範圍內的點雲計算的穿透率指標，可能和現地量測資料接受的光量範圍有較一致的現象。因此在本研究中選取最佳推估半徑來進行計算，得到的各穿透率指標與葉面積指數的 R^2 如表 6 所示。整體而言，在 Riegl 的資料下，各種穿透率指標對於 LAI 都有較好的解釋能力；而利用 Leica 多重回波光達點雲計算得到的成果則是最差。其可能的原因為 Leica 多重回波資料的光跡較小，且在一個反射回訊中只能得到最多四個點雲，容易造成弱回訊的地物被遺漏，造成樹冠層點雲和地面點之間的分佈無法完整表達森林林分的結構，使得推估的成果較差。

對於不同的穿透率指標而言， LPI_4 在各種的光達點雲下都能得到高於 0.5 的 R^2 值，顯示出該指標對於估計葉面積指數上有較穩定且準確的表現，其與現地觀測葉面積指數的線性迴歸模式展示如圖 11。表現次之的為利用強度值所獲取的 LPI_2 ，此指標尤其應用在全波形點雲所計算的 R^2 值有較明顯的提升。顯示利用對點雲之波形振幅大小所賦予的強度值能有效的推估 LAI，對於兩種的全波形資料而言，利用強度值計算的穿透率指標 (LPI_2) 在估計葉面積指數上都有良好的表現。而本研究中利用面積概念推導出 LPI_5 ，雖然與其他的穿透率指標相比之下並非最具解釋力的指標，但在兩個低航高的全波形資料下都能達到 70% 以上的預測能力。

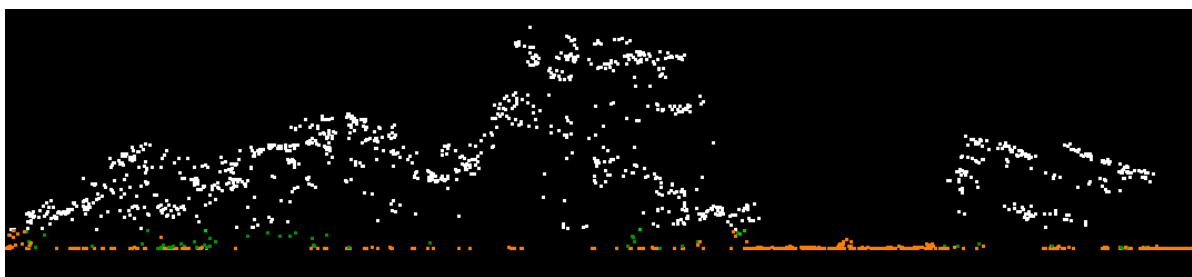


圖 9 前處理後的點雲 (橘色點為原分類的地面點；白色點為非地面點；綠色點為經 1 公尺門檻後增加的地面點)

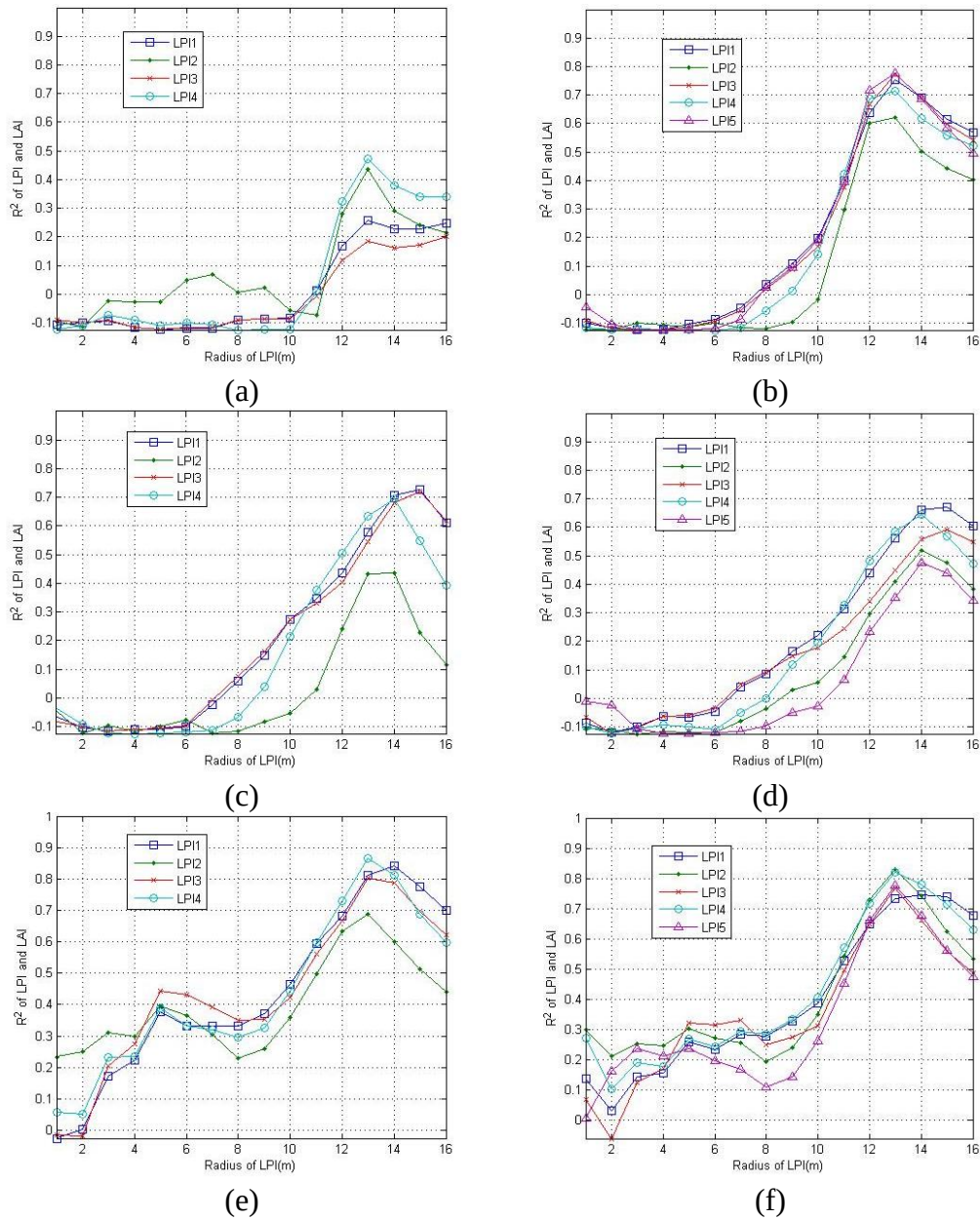


圖 10 葉面積指數和(a) Leica 低航高的多重回波點雲；(b) Leica 低航高的全波形點雲；(c) Leica 高航高的多重回波點雲；(d) Leica 高航高的全波形點雲；(e) Riegl 低航高的多重回波點雲；(f) Riegl 低航高的全波形點雲資料中的各種穿透率指標在不同範圍下的相關性判定係數(R^2)

表 6 穿透率指標與葉面積指數的相關性判定係數 R^2

	LPI_1	LPI_2	LPI_3	LPI_4	LPI_5
Leica 多重回波光達點雲(低)	0.30253	0.43644	0.20938	0.55610	
Leica 全波形光達點雲(低)	0.48964	0.77171	0.46812	0.68276	0.72653
Leica 多重回波光達點雲(高)	0.63376	0.51218	0.53831	0.61938	
Leica 全波形光達點雲(高)	0.66135	0.51752	0.55851	0.64417	0.47414
Riegl 多重回波光達點雲(低)	0.80765	0.67251	0.80174	0.85793	
Riegl 全波形光達點雲(低)	0.73431	0.83006	0.83663	0.82152	0.78721

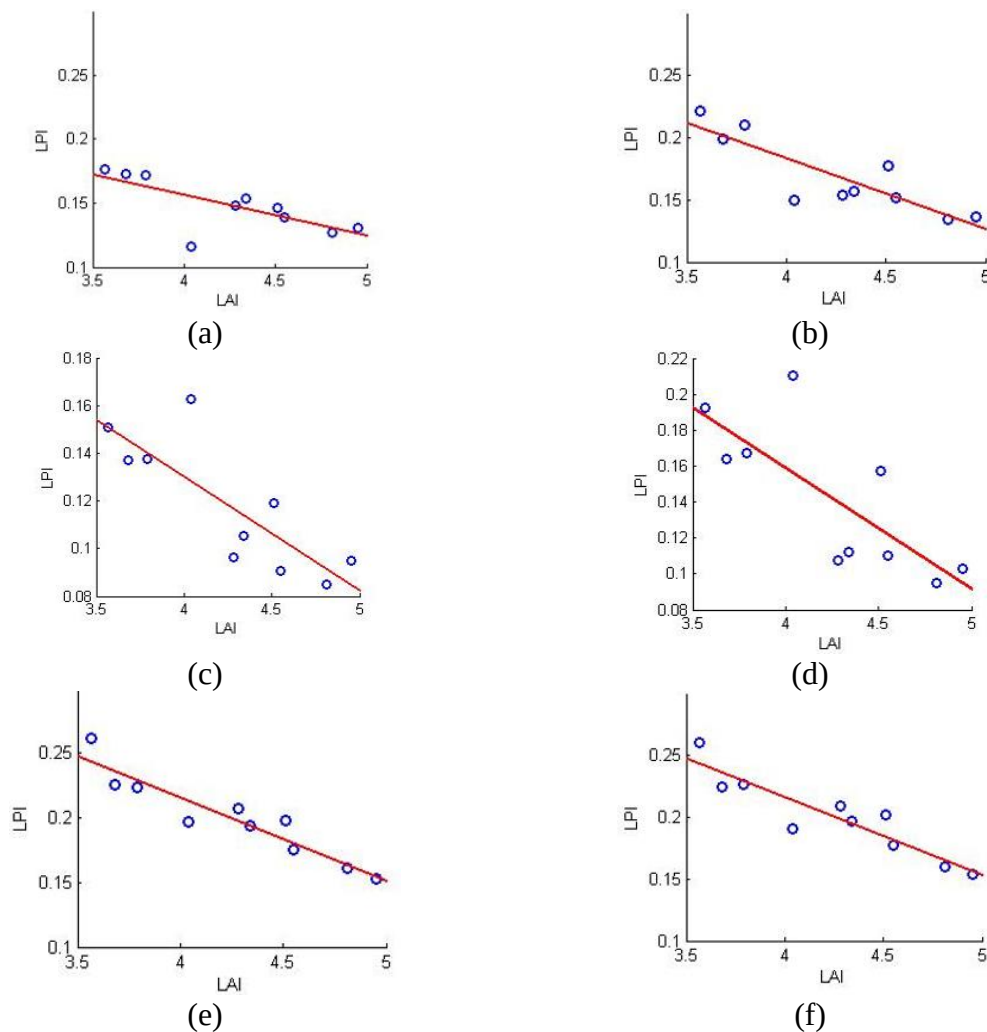


圖 11 (a) Leica 低航高的多重回波點雲；(b) Leica 低航高的全波形點雲；(c) Leica 高航高的多重回波點雲；(d) Leica 高航高的全波形點雲；(e) Riegl 低航高的多重回波點雲；(f) Riegl 低航高的全波形點雲資料中的 LPI4 與現地觀測葉面積指數的直線迴歸模式

除了比較不同光達系統的資料外，本研究也加入了 Leica 光達系統高航高的資料，利用已知的 DEM 進行穿透率指標的計算來推估葉面積指數。相較於單獨使用低航高的多重回波點雲資料，利用點數比計算得到的 LPI_1 、 LPI_3 及 LPI_4 ，都有明顯的提升。但對於 LPI_2 和 LPI_5 而言，由於不同航高的強度值及雷射光光束照射地物的面積的大小不同，因此若是低航高和高航高的資料一起做計算，容易會產生估計上的錯誤，如圖 12。由此結果能看出，雖然高航高的掃描方式會因為距離較遠造成雷射光減弱，而較難得到地面點的回訊。但對於

利用點數比例來計算的穿透率指標而言，對於估計葉面積指數還是能有不錯的成果。

利用 LPI 與地面觀測之葉面積指數樣本資料進行迴歸，即可得到推估葉面積指數的估計方程式，如表 7。本文以低航高的資料中，選取表現較佳的 LPI_4 來進行測區附近約 350 公尺×350 公尺範圍的葉面積指數估計。計算的方式為將測區範圍進行網格的切割，計算每單位網格內的點雲穿透率指標，接著利用估計方程式推算各網格內的葉面積指數，即可得到整區的成果(圖 14)。

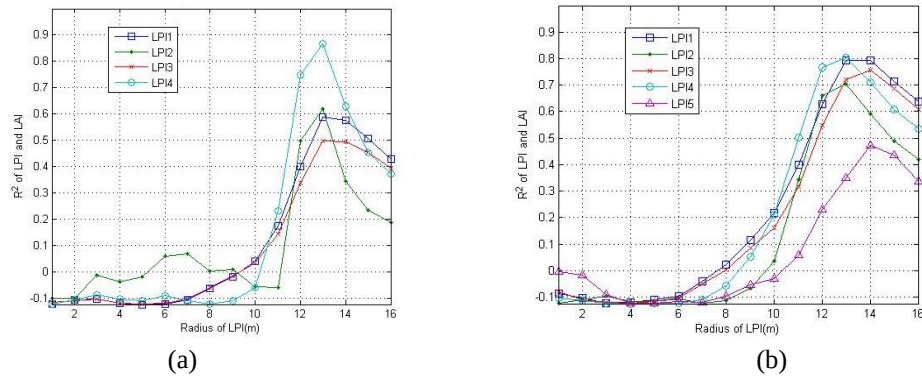


圖 12 葉面積指數和各種穿透率指標在不同範圍下的相關性判定係數(R^2) (a) Leica 低航高+高航高的多重回波點雲；(b) Leica 低航高+高航高的全波形點雲

表 7 各 LPI 推估 LAI 之估計方程式

$y_i = \beta_0 + \beta_1 \times x_i$	LPI ₁	LPI ₂	LPI ₃	LPI ₄	LPI ₅
Leica 一般光達光達點雲(低航高)	$\beta_1 = -20.0789$ $\beta_0 = 6.6153$	$\beta_1 = -29.1139$ $\beta_0 = 5.7236$	$\beta_1 = -14.1775$ $\beta_0 = 6.1526$	$\beta_1 = -19.0732$ $\beta_0 = 6.9327$	
Leica 全波形光達點雲(低航高)	$\beta_1 = -14.0471$ $\beta_0 = 6.8429$	$\beta_1 = -26.4962$ $\beta_0 = 6.8142$	$\beta_1 = -10.8338$ $\beta_0 = 7.1862$	$\beta_1 = -13.4004$ $\beta_0 = 6.9551$	$\beta_1 = -20.067$ $\beta_0 = 7.1522$
Leica 一般光達光達點雲(高航高)	$\beta_1 = -14.9156$ $\beta_0 = 5.6945$	$\beta_1 = -30.1255$ $\beta_0 = 5.5857$	$\beta_1 = -12.1656$ $\beta_0 = 5.5517$	$\beta_1 = -14.0729$ $\beta_0 = 5.9115$	
Leica 全波形光達點雲(高航高)	$\beta_1 = -10.8053$ $\beta_0 = 5.5327$	$\beta_1 = -13.3573$ $\beta_0 = 5.3523$	$\beta_1 = -7.2155$ $\beta_0 = 5.2504$	$\beta_1 = -8.8458$ $\beta_0 = 5.5073$	$\beta_1 = -26.2298$ $\beta_0 = 5.2351$
Riegl 一般光達光達點雲(低航高)	$\beta_1 = -15.7229$ $\beta_0 = 7.2919$	$\beta_1 = -13.8335$ $\beta_0 = 6.5266$	$\beta_1 = -11.5581$ $\beta_0 = 7.5642$	$\beta_1 = -14.95$ $\beta_0 = 7.4346$	
Riegl 全波形光達點雲(低航高)	$\beta_1 = -14.5435$ $\beta_0 = 6.7992$	$\beta_1 = -14.7289$ $\beta_0 = 6.484$	$\beta_1 = -11.6239$ $\beta_0 = 7.407$	$\beta_1 = -13.2666$ $\beta_0 = 6.7473$	$\beta_1 = -15.2182$ $\beta_0 = 6.3788$

圖 13 以不同點雲分別計算所得到的推估成果，設定的網格大小為 1 平方公尺。由於本研究估計的是森林的葉面積指數，當得到的葉面積為零時即表示該區在單位面積上的林木沒有葉子，與正射影像相較下，可以發現穿透率指標利用點雲在垂直方向的分佈，能大致區分出樹林和非樹林的區域。

就整個區域而言，以不同光達點雲推估的成果顯示，利用估計方程式得到的整區葉面積指數彼此之間的 R^2 可達到 0.8 以上，標準偏差在 0.9 以下(表 8)。從四種點雲計算得到的標準偏差分佈圖如圖 14 中，可以發現在不同光達點雲下使用穿透率指標進行大範圍面積的葉面積指數估計時，容易在森林區與非森林區邊界、草地等，與現地取樣區域樣貌差

異較大的地方產生較大的錯誤。其中最大的葉面積指數差值可達到 3 以上，由不同光達系統得到的剖面圖如 15 可以看出，應該是由於時間差造成地物變化所造成。顯示了利用穿透率指標推估葉面積指數的方法，應用在不同光達系統點雲下的成果，除了在森林邊界、樹冠高度差異較大的地方外，都能夠呈現一致的成果。

表 8 利用 LPI₄ 得到整區葉面積指數估計之比較

	標準偏差
Leica 多重回波	0.8414
Leica 全波形	0.6445
Riegl 多重回波	0.7263
Riegl 全波形	0.6194

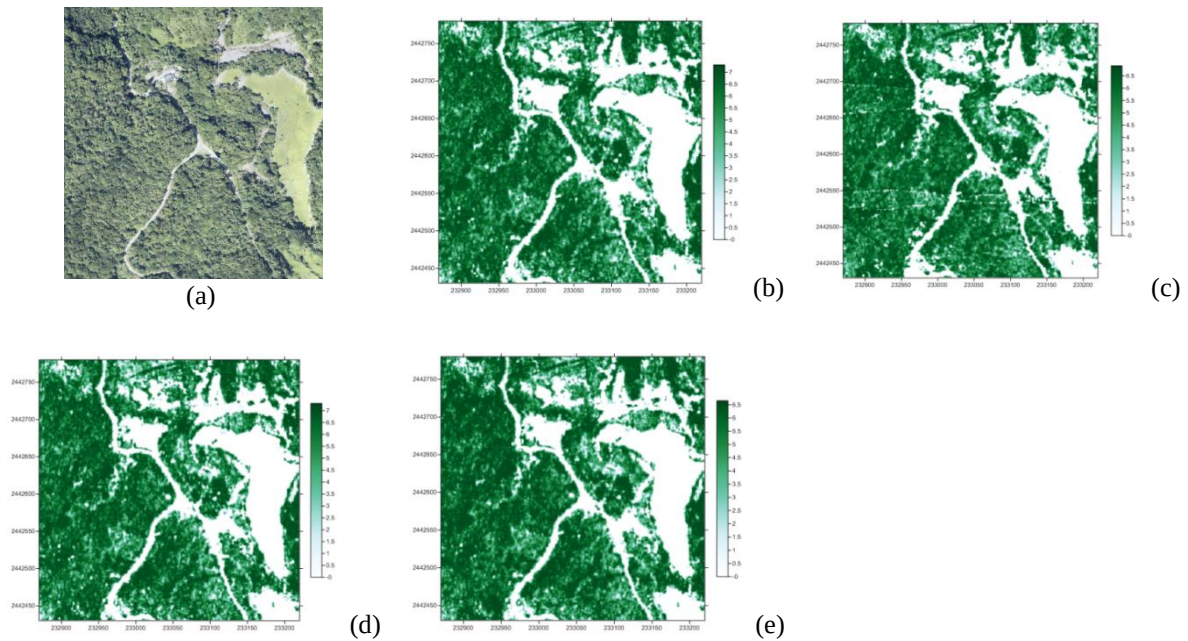


圖 13 利用整區葉面積指數的計算成果圖(a)測區正射影像；(b) Leica 多重回波;(c) Leica 全波形;(d) Riegl 多重回波;(e) Riegl 全波形

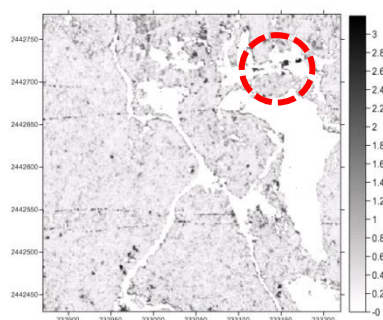


圖 14 四種不同點雲資料得到的葉面積指數估計之標準偏差分佈圖，圈選處為差異較大的地方

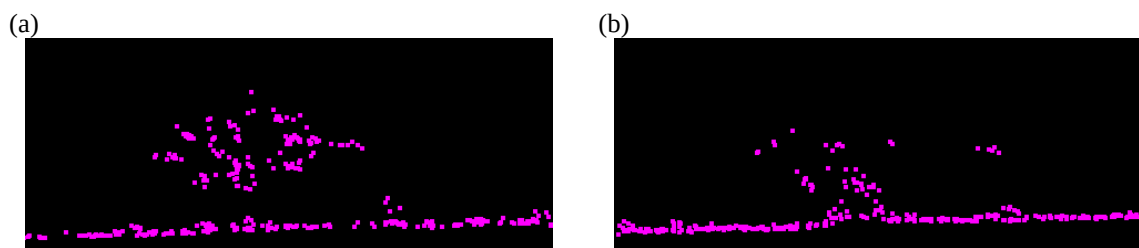


圖 15 (a)Leica 和(b)Riegl 光達系統在圖 14 圈選處的點雲的剖面圖

4. 結論

空載光達技術能直接獲取森林結構的三維空間分布，有助於樹冠高度模型的製作。但其成果的精度受限於點雲的密度，若得到的地面點過於稀疏，則難以表示實際的地形起伏情況。因此實際應用上

在做人工編修時，應對於地面點數較少的區域進行加強檢視，以防止有較大的誤差產生。本研究，三種光達系統的點雲密度在每平方公尺內都有 2 個點以上，在森林範圍內所製作出來的數值高程模型，其相對精度皆在 50 公分以內。而在 DSM 製作上，容易在樹冠孔隙、及森林邊界的地方有較明

顯的差異，尤其是在林木較高的森林區中，最大的高度差異值超過 10 公尺。利用 1 公尺網格的 DSM 及 DEM 產製出的樹冠高度模型的標準偏差約在 1.5 公尺內，顯示利用不同光達系統得到的數值模型對於森林的應用有足夠的一致性，能提供有效且快速的量測方法。

對於葉面積指數估計方面，實驗結果發現當使用高點雲密度、地面點點數比例較高的光達資料，在推估森林葉面積指數能有較好表現。其中，以單一回波地面點加權計算的 LPI_4 在不同光達點雲資料下的表現最為穩定，各種資料計算出的成果對於估計葉面積指數都能達到 50% 以上的預估能力。就單一航高的資料中，利用全波形回訊萃取出的點雲，在計算以強度值比例的 LPI_2 時，相較於多重回波而言有明顯的提升。顯示經波形萃取出的振幅大小，在樹冠層及樹冠下地表的比例能有效的反映森林結構，進而有利於推估葉面積指數。對於不同航高的 Leica 多重回波光達資料而言，利用高航高的點雲計算以點數為比例的穿透率指標(LPI_1 、 LPI_3 、 LPI_4)，再進行葉面積指數的估計上有較好的表現。但若是將不同航高的資料疊加進行穿透率指標的計算，其中的 LPI_2 和 LPI_5 會因為不同航高在掃描時，光束打到地物的雷射強度及光跡大小有所不同，造成得到的強度值及面積的比例無法表示實際的現象，使得與現地資料進行迴歸的相關性有下降的情形。

由於葉面積為一個動態的森林參數指標，會隨樹種、樹高的變化而改變，因此應在量測前進行森林樹種的調查，並按樹林樣貌進行劃分來分別進行葉面積指數的估計。而本研究中所使用的現地觀測資料與光達掃描時間相差超過 1 年，且量測季節略有不同，森林生態環境的改變對於葉面積指數的估計可能會造成影響，若是能夠使用時間較相近的資料進行推估，較能獲得準確的估計方程式，來達到以小範圍的現地實測資料即可推估大範圍及無法到達之森林區域的資料。目前空載光達能進行飛航掃描的時間受限許多環境及政策等因素影響，或許能發展使用衛載光達進行森林葉面積指數的探測，以達到長時間對森林的進行監控的目的。

致謝

感謝國立屏東科技大學森林系借用 LAI-2000 儀器，以及國科會計畫 (NSC101-2221-E-006-181-MY3) 經費的贊助，讓本研究能順利進行，特此致謝。

參考文獻

- 吳守從，陳永寬，2004。應用數位航測技術探討南仁山生態保護區林分高生長量，航測及遙測學刊 第九卷 第四期 第 21-34 頁
- 黃清美，2007。空載光達點雲穿透率探討，國立交通大學土木工程學系碩士學位論文。
- 彭炳勳，2007。應用空載光達資料推測林木樹高與葉面積指數，國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。
- 蕭淳伊，2008。應用空載光達資料與遙測影像推估樹林分布及體積，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士學位論文。
- Arnaud, Jacob, Yi-Hsing Tseng, Chi-Kuei Wang (2011), "Investigating the penetration capability of airborne LiDAR for high vegetation of subtropical evergreen forest." The 30th conference on Surveying and Geomatics, Taiwan.
- Danson, FM, Morsdorf, F and Koetz, B (2009), "Airborne and terrestrial laser scanning for measuring vegetation canopy structure", in: Laser Scanning for the Environmental Sciences, Wiley-Blackwell.
- Hopkinson Chris, Laura Chasmer (2009), "Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones" Remote Sensing of Environment 113, Pages 275-288
- Jonckheere Inge, Stefan Fleck, Kris Nackaerts, Bart Muys, Pol Coppin, Marie Weiss, Frédéric Baret (2004) "Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography" Agricultural and Forest Meteorology 121, 19-35
- Koetz B., F. Morsdorf, G. Sun, K. J. Ranson, K. Itten, B. Allgöwer (2006) "Inversion of a Lidar Waveform Model for Forest Biophysical Parameter Estimation IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters, Vol. 3, No. 1 P.49-P53
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S.A., Parker, G.

- G., Spies, T. A. , Harding, D.(1999), "Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests" *Remote Sensing of Environment*, Vol. 70(3), pp. 339-361
- Masona Euan G., Mathijs Diepstratenb, Guy L. Pinjuvc, Jean-Pierre Lasserred (2012) "Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don" *Agricultural and Forest Meteorology* 166– 167 113– 119
- Morsdorf F., O. Frey, E. Meier, K.I. Itten , B. Allgöwer (2008) "Assessment of the influence of flying altitude and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning" *International Journal of Remote Sensing* Volume 29, Issue 5, pages 1387-1406
- Næsset E.(1997), "Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data" *Remote Sensing of Environment* Volume 61(2), Pages 246–253
- Solberg, S., Næsset, E., Hanssen, K.H. and Christiansen, E. (2006), "Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning." *Remote Sensing of Environment*, 102, pp. 364–376.
- Solberg, S. (2008),"Comparing discrete echoes counts and intensity sums from ALS for estimating forest LAI and gap fraction." In *Proceedings of SilviLaser: 8th International Conference on LiDAR Applications in Forest Assessment and Inventory*, R.A. Hill, J. Rosette. and J. Sua´rez (Eds), September 2008, Edinburgh, UK, pp. 446–455.
- Solberg, S. (2010),"Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables." *International Journal of Remote Sensing*, 31(5): 1227-1244.
- Wagner, W., A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer and N. Studnicka, (2006)" Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner" *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60(2), pp. 100-112.
- Zhao Kaiguang, Sorin Popescu (2009) "Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA" *Remote Sensing of Environment* 113: 1628–1645

Estimation of Forest Canopy Height Model and Leaf Area Index Using Airborne LiDAR data

Li-Ping Lin¹ Cheng-Kai Wang^{2*} Yi-Hsing Tseng³ Hone-Jay Chu⁴

ABSTRACT

Efficiently obtaining the information in forest region such as forest structure, forest ecosystems is important for forest management. The purpose of this study is to estimate the Canopy Height Model (CHM) and the Leaf Area Index (LAI) of a dense forest area by using airborne LiDAR data. CHM is estimated by taking the difference of DSM and DEM derived from LiDAR data. Estimation of LAI is achieved based on the calculation of Laser Penetration Index (LPI). Five calculations of LPI were applied in this paper: (1.) The ratio between the number of ground points and that of all the points; (2.) the ratio between the intensities of ground points and that of all the points; (3) the ratio between the number of ground points and the number of laser beams; (4) a weighting method modified from index (1); and (5) the ratio between the area of ground points and that of all the points.

The study area is in a natural broadleaf forest of south Taiwan. In this study, we use three sets of airborne LiDAR data acquired with different full waveform LiDAR systems including Leica ALS60, Riegl LMS-Q680i and Optech Pegasus HD400. All of these LiDAR systems are capable of recording full waveform data, then we can get the waveform point clouds by the echo detector to do the comparison. Our experiments results show that the accuracy of CHM by different LiDAR data is about 1.5 meter. And the fourth LPI index has the highest coefficient of determination (about 0.8) and the estimation of LAI can be improved by using the waveform points.

Keywords: Canopy Height Model (CHM), Leaf Area Index (LAI), Airborne LiDAR, Laser Penetration Index (LPI), Waveform

¹ Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

² Ph.D, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

³ Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁴ Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

* Corresponding Author, Phone: 886-6-2383876 ext. 852, E-mail: s3350839@gmail.com

Received Date: Mar. 21, 2014

Revised Date: Oct. 13, 2014

Accepted Date: Oct. 30, 2014

全波形空載光達資料之波形特徵分析與分類

洪宇佳^{1*} 王正楷² 曾義星³ 朱宏杰⁴

摘要

隨著光達技術的發展，近年來商業型的空載光達系統已經能夠記錄雷射與地物交會之完整的反射強度變化，稱為全波形(full waveform)空載光達系統。相較於傳統光達僅能記錄少數的回波響應值(echoes)，全波形式光達可完整地記錄雷射光行經物體間的反射強度(intensity)，且所記錄的波形除了可推算反射物距離外，亦隱含了反射物的物理性質，因此全波形式光達具有更深遠的應用和潛力。地物表面的反射性質、幾何結構和粗糙度皆會影響雷射的反射波形，因此透過對全波形式光達資料所記錄的波形進行分析，有助於解讀地物表面的型態，這些性質也提供了地物分類之依據。本研究針對從波形資料中偵測得之所有地物響應波形，分析各類地物響應波形特徵的特性，並交叉比對不同地物類別之波形特徵的可區分性，以利於選擇有效的分類特徵，並依據其分析成果，設計一套以波形為主的全波形式光達資料分類方法與流程。

實驗資料包含三個廠牌之儀器(Leica、Riegl 及 Optech)，根據實驗區的主要地物類別，從正射影像挑選出欲分類目標類別，即植被、道路、裸露地、建物、草地農地等五類，並針對這些類別進行樣本選取與波形分類特徵分析。根據單響應及多響應的波形特徵分析結果，選擇適合的分類特徵，接著將選取的特徵輸入支持向量機(SVM)進行監督式分類。本研究之實驗方法分為三種，包含以響應為基礎、以波形為基礎與以波形為基礎並加入影像的分類法。實驗成果顯示相較於以響應為主的分類法，以波形為主的方法能提升約 20%的分類精度，且加入影像後整體精度最高可達 86%，對於地物的三維分類具有相當之潛力。

關鍵詞：空載光達、全波形式光達、波形特徵分類

1. 前言

1.1 研究背景

空載光達 (Airborne Light Detection and Ranging, Airborne LiDAR)，亦被稱為空載雷射掃描系統 (Airborne Laser Scanner, ALS)，為一主動式的遙測技術。透過搭載於飛行載具上之雷射掃描儀，記錄雷射發射訊號與接收之物體反射回傳訊號之時間差，來計算載具與地物之間的相對距離，並透過定位定向系統 (Position and Orientation System, POS) 紀錄飛機之動態軌跡，以直接地理定位的方

式快速獲取高精度之地物三維空間資訊，其資料可視為對地表面進行密集的三維點取樣之成果，通稱為點雲 (Point Cloud)，是現今製作數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM)、城市模型模型及森林調查等應用的重要來源之一 (Means *et al.*, 1999; Rottensteiner, 2003)。光達點雲的分類不僅可用於地表覆蓋分類，更有利於地表模型的重建、建物偵測、植物分類等用途。傳統的光達點雲分類，多是利用其隱含之地物幾何來進行。然而，不同的地物仍有許多相似之幾何情形，使得分類效果有限，亦有學者透過光達系統尚提供地物之反射雷射光強

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

⁴ 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

*通訊作者，電話：06-2383876 ext. 852, E-mail: grassnono@gmail.com

收到日期：民國 103 年 03 月 21 日

修改日期：民國 103 年 05 月 07 日

接受日期：民國 103 年 05 月 21 日

度資訊之輔助進行分類(Song *et al.*, 2002)，然其值可能受到外在因素影響，並不穩定，仍無法得到滿意之自動分類成果。而全波形資料的出現使我們有更多指標以區分不同種類地物，對不同類型的地物更有區別能力。近年來，隨著技術發展，光達系統已進化能密集取樣訊號強度之方式，將地物背向散射訊號波形完整記錄下來，又稱為全波形光達。此回傳訊號之波形會根據地物性質而改變，如地表粗糙程度、反射情形等，故根據地物性質的不同波形也會隨之改變。全波形光達資料為一連串強度資訊，使用者必須透過響應偵測及擬合等方式將波形中隱含之特性萃取出來，並透過分析波形資料特徵，來解讀地物表面的型態，其中，波形特徵也提供我們更多的指標來區分不同種類的地物，對不同類型的地物更有區別能力，因此我們能夠進一步使用此資訊來進行地物分類。

全波形光達資料大部分應用於森林區及都市區的地物分類，相較於傳統光達分類，其特性為擁有波形特性來分辨不同型態或材質的地物。森林區之應用大部分為樹種分類、立木位置的偵測或是森林相關參數的計算。另一方面亦被應用於樹種分類或分辨針、闊葉林等用途上。Neuenschwander *et al.* (2009)透過全波形光達資料進行樹種分類，並與多光譜影像分類之成果進行比較，結果顯示全波形光達資料之分類結果精度較多光譜影像多 15%，表示全波形資料特徵有助提升分類精度。此外也有文獻透過組合不同全波形資料特徵進行分類，其實驗對於針闊葉林之分類精度可達到約 90%(Liang *et al.*, 2007；Heinzel and Koch, 2011)。Mallet *et al.* (2011)比較傳統波形與全波形資料特徵用於地物分類之能力，實驗中針對地面、建物及植物進行分類，成果證明全波形對於點雲之萃取能力是優於傳統多回波光達。Lin *et al.* (2009)透過波形上之波寬特徵，改善過濾方法之成果，以提升 DEM 產製品質。此外，此特徵也被利用於分辨植物及非植物區，並獲

得不錯之成果(Wagner *et al.*, 2008；Alexander *et al.*, 2010)。綜合以上文獻討論，可發現全波形光達之資訊，如，響應波寬、cross-section、響應振幅等等參數，對於地物之分類確實有幫助，且其效果優於傳統光達。

1.2 動機

由於全波形光達資料能反映不同地物之特性，因此反過來可推論出，回波波形中隱含之特徵能夠用以表示不同地物類別。根據文獻回顧發現，大部分所使用之特徵乃針對各個響應所訂定，相當於將傳統多回波光達之資料點增加額外屬性以提供作為分類特徵使用，較少人討論到以一整條波形為分類目標。然而，完整波形中，可能含有光達訊號穿過程之資訊，對於地物可以有更多的了解，因此，本研究即根據全波形之資料特性，對於各地物類別完整波形形狀做觀察。接著萃取其中所隱含之特徵，交叉比對不同地物類別之波形特徵的可區分性，以利於選擇有效的分類特徵，並依據其分析成果設計一套合適的流程方法，最後以此分類方法進行區分地物類型，並評估其分類精度，用以驗證全波形光達特徵是否可區分不同地物。

1.3 研究方法與流程

本研究透過以波形為單元進行觀察，研究方法流程如圖 1 所示，主要分成四個步驟：資料前處理、波形特徵萃取、波形特徵分析、地物分類。波形資料是由多個地物回訊所組成，可視為多個響應疊加而成，因此前處理之目的是為了要找出各響應於波形上之位置，並以數學函式擬合，將波形資料以數學參數描述，以利後續波形特徵之萃取。研究中透過小波轉換為基礎的波形偵測器進行響應偵測，並以高斯函數進行波形之擬合，以數學函數模型描述各響應。



圖 1 研究流程

特徵萃取包含三類，分別為響應特徵、整波形特徵及考慮其空間局部範圍內特徵之平均及標準偏差等統計特性。響應特徵用以描述各個響應之型態，此特徵可由擬合之數學參數計算而得，如振幅、波寬等等。而整波形特性為波形當中各響應之間的關係，如前後重疊面積、響應之間時間差等等。最後透過計算空間局部範圍內特徵來了解波形與其鄰近波形間之關聯性。

接著透過特徵分析，對道路、植被、草地農地、裸露地及建物等定義之地物類別波形進行特徵分析。分析方法可分成三個部分進行探討，第一部分為繪製各類別一維特徵分佈區間以檢視各地物類別特性間相似性以及特徵之值域，第二部份由三維特徵空間散佈圖，觀察選定之三特性區分各類別之成果於空間中之分佈，第三部分為分離度之計算，將特徵對於各類別之區分性進行量化比較。

根據分析結果提出以波形為基礎之分類方法，此方法分別考慮單響應與多響應之波形之差異，將其分開進行分類後，才合併輸出成定義類別。並與一般研究文獻常見以響應為基礎之分類方法(Wagner *et al.*, 2008 ; Alexander *et al.*, 2010 ; Heinzel *et al.*, 2011)進行比較。另外，波形為基礎加上影像輔助之分類方法則是用以比較額外特性對於分類幫助之提升效果。

2. 波形特徵性質

2.1 全波形空載光達系統

光達回波訊號如圖 2(a)所示，為一連續的訊號，傳統光達記錄上，只偵測出各響應(echo)波峰的位置

置及其反射強度值(圖 2(b))，通常最多記錄四個回波。而全波形光達系統則完整記錄回波訊號，連續密集取樣回波強度值(圖 2(c))，通常其取樣間距為 1 奈秒(nano second, ns)。因此回傳之響應數量較不受限制，且能自訂響應偵測及擬合方式，來得到更完整的回波響應。全波形光達系統所記錄的波形除了可推算反射物距離外，也隱含了反射物的物理性質。

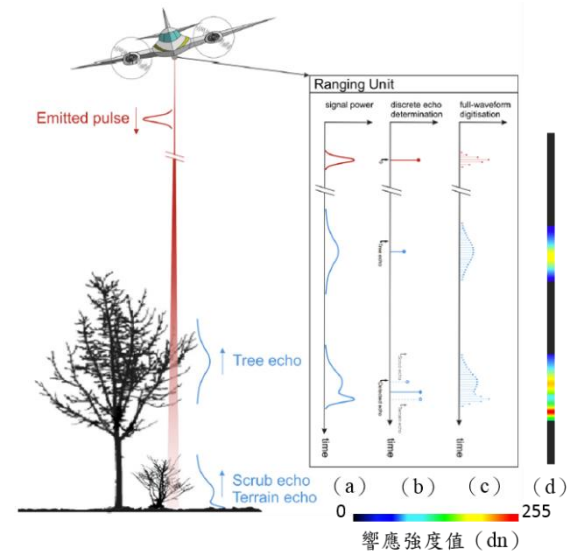


圖 2 光達資料記錄方式(Doneus *et al.*, 2008)

圖 3 為各種地物之回波波形，使用之儀器為 Riegl LMS-Q680i，詳細資訊請參考第三節實驗資料。圖 3(a)中顯示隨著地物之不同，波形上會略有所不同；但當地物之反射很接近時，波形上仍可能會很相似，如裸露地及建物。由 3(b)可更明顯的看出多響應重疊之情形。而建物之穿過程較單純，因此波形上能夠很清楚的看見兩個響應。因此根據觀察結果顯示，波形之變化能夠作為全波形資料之特徵。

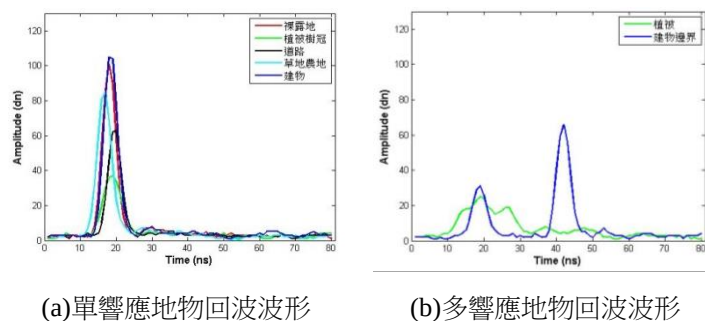


圖 3 各種地物之回波波形

2.2 波形響應偵測與分解

在進行特徵萃取前，需進行波形的偵測和波形擬合，從波形資料中尋找地物響應在波形中的位置，並由選定的數學函數來描述波形中各個響應。分解的好處乃是這些波形所隱含的資訊，可表現在這些函數參數上，在分類的應用上，是即為重要的資訊。波形偵測採用的是以小波轉換為基礎的波形偵測器 (Wang, 2012)，如圖 4(a) 和圖 4(b)。此偵測器之原理是在小波轉換中運用適當的尺度計算小波和全波形資料之間的相似性，相似性最高的尺度參數代表了波峰的位置，如此，即可找出了每一個響應 (Echo) 的位置，如圖 4(a)。而每一個響應代表的是每一個地物的坐標點位。此方法的優點是能夠找出重疊或是訊號較弱的響應，因此，可以更完整地找出全波形光達隱含的資訊。波形擬合是透過高斯函數來模擬波形，原理是將波形的資料套入高斯函數，並用最小二乘法進行解算，最後找出誤差最小的套和結果，當作是最佳的擬合解算。圖 4(b) 即為解算成果展示，其中藍線代表原始波型資料扣掉雜訊的結果，紅線展示擬合後的成果。

2.3 波形特徵性質

波形資料及響應資料當中隱含著豐富之地物資訊。波形中可透過響應之間的關係來觀察地物之穿透情形，而響應中可顯示每樣地物對原始訊號所產生之影響。最後透過計算空間局部範圍內之平均值及標準偏差為特性，以了解波形之鄰近關係是否因地物種類而異。因此本節將全波形光達資料中所隱含之特徵分成三種類：響應特徵、整波形特徵及空間局部範圍內統計特性，並對於其中各項特徵之定義、計算方式及其性質做討論，其項目如表 1

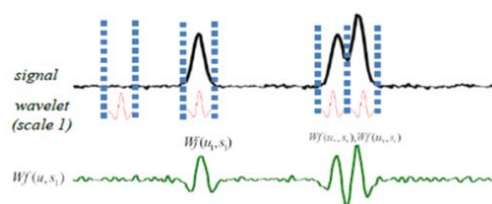
所示。

表 1 波形特徵測試項目列表

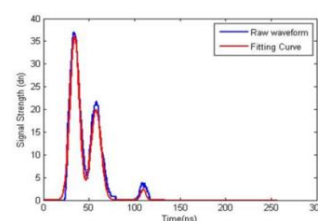
特徵	項目
響應特徵	振幅、波寬、面積、Cross-section、偏態、峰度
整波形特徵	第一響應和最後響應之時間差、面積差、振幅差、波寬差、Cross-section 差、第一回波第二響應重疊面積、重疊寬度、波形內響應數
空間局部範圍內統計特性	空間局部範圍內振幅、波寬、面積、Cross-section 和整波形特徵之平均值及標準偏差

2.3.1 響應特徵

響應特徵由波形擬合後所得之高斯擬合參數而得，此類特徵可用來描述響應每個響應中的物理特性與幾何特性。振幅為響應的能量最大值，可用以表示響應的強度，如圖 5(a)。波寬透過響應的半高寬度 (Full width at half maximum, FWHM) 帶入式(1)計算而得(Alexander *et al.*, 2010)，如圖 5(b)。面積如圖 5(c)所示，代表訊號和地物作用過程產生的能量累積。Cross-section 由式(2)算出，此特性與掃描起到物體的距離 R 、振幅 P 、波寬 W 、光速發散寬度(divergence angle) β_t 及地物反射率 ρ 有相關，可反映出地物和訊號之間作用面積(Wagner *et al.*, 2008)。式(2)中 C_{cal} 為一常數值，其中反射率會根據不同波長之訊號而產生改變，通常透過測定實驗區內柏油路之反射率來得到(Wagner *et al.*, 2006；Alexander *et al.*, 2010)。實驗所使用的儀器廠牌為 Leica、Riegl 及 Optech，其中，Leica 和 Optech 儀器波長皆為 1064nm，柏油路之反射率透過 PSR-1100 光譜儀測定，得其值為 0.17，Riegl 之儀器波長為 1550 nm，根據文獻中測定之結果(Alexander *et al.*, 2010)，以 0.25 帶入計算 C_{cal} 。



(a) 以小波轉換為基礎的波形偵測器(Wang, 2012)



(b) 高斯函數波形擬合成果

圖 4 波形響應偵測與分解

$$W = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (1)$$

$$\sigma_i = C_{cal} R_i^4 PW \quad (2)$$

$$\text{其中, } C_{cal} = \frac{\rho\pi\beta_t^2}{R^2 PW}。$$

另外，各響應原始波形形狀可計算出響應的偏態(skewness)及峰度(kurtosis)。偏態(圖 5(d)) 用以表示分布偏移情形，計算如式(3)，計算出的值若為零，表示波形對稱且符合高斯常態分佈；為負，則稱為左偏或負偏；為正，則稱為右偏或正偏。峰度(圖 5(e)) 用來表示波峰高低，當 Kurtosis 接近 3，表示波形符合高斯常態分佈，因此減去 3 後，如式(4)，即可以由正負看出峰型，若 Kurtosis 大於 0，表示波形呈高狹峰(lepto kurtosis)；小於 0，則為低潤峰(platy kurtosis)。

$$\text{Skewness} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)^3} \quad (3)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} - 3 \quad (4)$$

2.3.2 整波形特徵

在多重回波中，涵蓋多個響應，而響應之間的關係也隱含著地物資訊，因此，根據對整條波形所涵蓋之內容觀察，可列出以下幾種特性。

● 第一和最後響應之時間差

如圖 6(a)所示計算響應發生的時間差，將最後一響應發生之時間與第一響應發生之時間相減而得。時間差也代表著距離，故第一回波和最後回波的時間差代表光達訊號穿透的厚度。此外，時間差也代表著下一個響應發生的速度有關，時間越短代表響應發生的速度越快，因此，若周遭物理環境越複雜，訊號打到其他物體的機會增加，時間也因此縮短，故除了物體高程較低外，抑可能是雷射訊號無法穿透而造成時間差較短。

● 第一第二響應之間重疊的面積大小及寬度

如圖 6(b)所示，以計算是前後兩個響應之間重疊的面積大小及寬度，面積越大代表穿透路徑的物理環境越不單純，除了下個響應發生的速度變快之外，也使波形變得較寬，進而造成重疊。

● 第一及最後響應之間特性差異

圖 6(c)計算出第一及最後響應之間的特性差異，包含振幅差、波寬差、面積差、cross-section 差及時間差，隨著多個響應的發生，回波能量也會衰弱，從前後響應的特性差異，來判斷物體的種類。

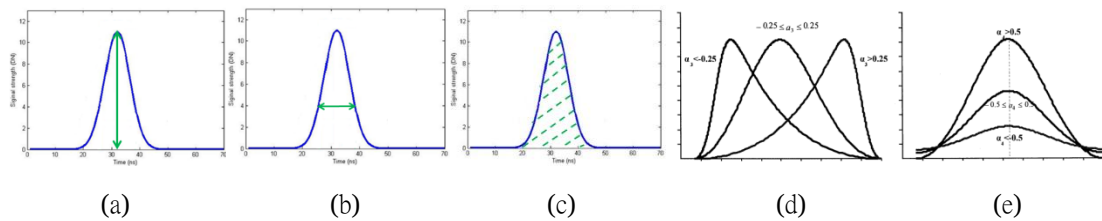


圖 5 響應特性示意圖(Matsatsinis and Samaras, 2000) (a)振幅；(b)波寬；(c)面積；(d)、(e)偏態、峰度

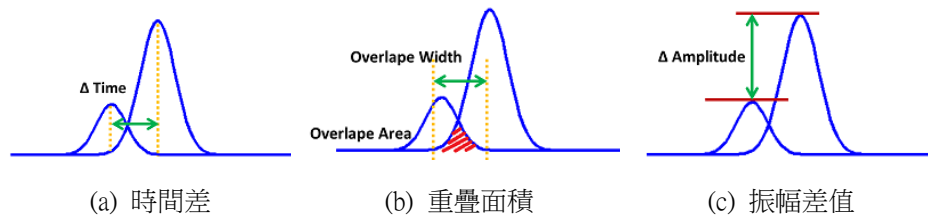


圖 6 整波形特徵示意圖

2.3.3 空間局部範圍內統計特性

透過統計鄰近空間局部範圍內響應特性和整波形特性之平均和標準偏差來做為範圍內統計特徵。此特性之計算方式由圖 7 所示: (1). 首先決定一點作為起始圓心，並決定合適的半徑，以計算一個圓柱範圍內波形資料的特性。圖 7(a) 左邊圓柱中的，線條代表每一個光達訊號的光束，彩色的部分為響應強度值，紅色最強，越接近藍色，其能量逐漸變弱，黑色代表能量為零。又每個響應可透過波形偵測找出地物坐標點，故每個響應可視為一個點位，同理，圖 7(a) 左邊圓柱之能量可視為右邊圓柱之點位。圖中紅點代表起始圓心，半徑定義為最小地物類別範圍邊長的一半，經人工觀察後，選定實驗區中建物屋頂為最小範圍之地物類別，故定義屋頂最小寬度的一半作為半徑，經人工測量後訂為四公尺。(2). 再來，因光束不一定是直線，因此須將範圍內空間中的點先投影到二維平面上以確定範圍，再進

行進一步的計算，如圖 7(b)。(3). 最後，因我們無法得知光達穿透的情形，只能透過影像來推測光達最先打到的物體，也就是單一回波或第一回波打到的位置，其餘的多重回波則難以確定打到的是何種物體，故計算上只選擇單一回波或多重回波的第一回波點，做為每條波形的代表，來計算範圍內之特性，如圖 7(c)。最後，逐一的計算空間局部範圍內響應特徵和波形特徵之平均值及標準偏差作為範圍內之統計特性及平均回波數，此特性可用以了解波形與其空間局部鄰近波形特性之關聯性，如樹林區之穿透性較高，則其空間局部範圍內之平均回波數會大於建物區。

3. 實驗資料

實驗區研究資料乃使用三種廠牌型號之全波形光達系統掃描而得，即 Leica ALS60、Riegl LMS-Q680i 與 Optech ALTM PEGASUS HD400，儀器飛行掃描參數如表 2 所示。

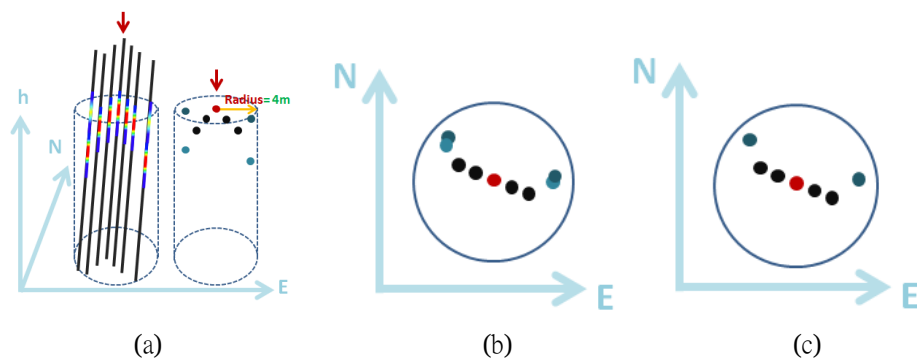


圖 7 空間局部範圍內之特性計算概念圖 (a) 波形資料在空間中之能量分布及點位 (b) 將三維點位投影到平面 (c) 只留下單一回波或第一回波

表 2 儀器飛行掃描參數

Sensor	Leica ALS60	Riegl LMS-Q680i	Optech ALTM PEGASUS HD400
Date	2011/10/30	2012/01/08	2011/10/07
Wave length (nm)	1064	1550	1064
Pulse Rate (kHz)	55	220	150
Scan Rate	61 (Hz)	199.96 (lines/s)	35 (Hz)
FOV (°)	6	60	20
Flight Hight (m)	2900	1000	2000&3000
Range Resolution (ns)	5	4	8
Divergence (mrad)	0.22	0.5	0.2
波形記錄長度 (ns)	256	80	浮動

此實驗區為山區聚落，地形包含山地平坦地及河流，山區之地物大部分為植被，平坦地因有人群居住，因此地物涵蓋多元。由於缺乏現地調查，能了解之細節有限，從本研究使用之光達解析度約為 0.6~1.2 公尺，又點雲密度約為 1.1~4.2 點每平方公尺，因此面積太小或是高程差異不大之物體皆不容易分辨。綜合以上，我們定義出道路、植被、草地農地、裸露地及建物等五種地物類別，進行後續之探討。若波形資料中只有一個響應，則為單響應波形；若含二個以上之響應，則稱為多響應波形。在實驗中，多響應波形之類別由波形內第一個響應所接觸到之地物作為代表，如第一回波接觸到建物邊界，則整條波形資料之類別即為建物邊界，如第一回波接觸到植被，則整條波形資料之類別即為植被。Jutzi and Stilla (2003)指出，多響應的點絕大多數落在建物邊界和植物上，因此資料中具有多響應特性之點，在分類的策略上僅分成建物和植被二類。

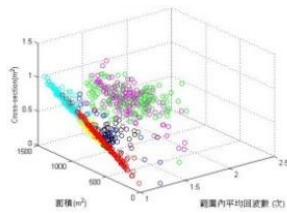
4. 全波形特徵分析

4.1 特徵分析方法

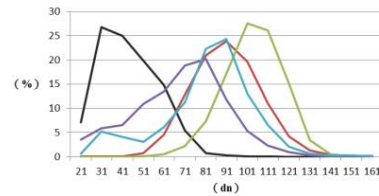
在分類中，通常可以依照地物(欲分類之物體)所具有各個特徵，展繪在特徵空間(Feature Space)上，將特徵空間想像成 n 維直角座標系統，此時若假設各特徵之間為等權不相關，則每筆資料均可以表示成特徵空間中的一個向量或坐標點，並可用多

維度直角座標系統來表示。其中，為了便於分析並簡化圖形，通常只顯示到三維(包順安，1999)。如圖 8 (a)所示，可用任三種特徵組成三維空間來表示點位散佈圖，圖中各點表示各資料點在特徵空間中的位置，顏色代表不同地物類別。再者，可針對每一項特性，描繪各類在每一個特徵下的機率密度分佈圖(圖 8 (b))以觀察地物在各特徵之分佈情形。

由圖 8 可知，在特徵空間中各類別之間並非完全獨立分離的，各類別之間多少會發生重疊交錯之情形，透過計算分離度來量化特性間分佈之距離，能客觀估算特徵對於各類別之間的分離性是如何。其概念為計算兩類別間最小錯誤機率等價的最大機率距離量(徐百輝及曾義星，2000)。研究中採用 Bhattacharyya distance (B-distance) 來進行實驗(Landgrebe and Biehl, 1997)。B-distance 是根據貝式誤差(Bayes Error)推導之產物，定義為式(5)，其中 M_i 及 C_i 分別為樣本 x_i 之平均值向量及協變方矩陣。Bhattacharyya Distance 不具任何單位，其值介於 0 到無窮大。B-distance 越大，表示特性之區別性越好，使得分類誤差下降，整體精度提升(Choi and Lee, 2003)，如圖 9 所示，圖中 X 軸為 B-distance；Y 軸為分類錯誤比例，隨著 B-distance 增加，其誤差比例也逐漸下降，當 B-distance 大於 0.8 後，其分類錯誤之比例已低於 10%，且其下降速率也趨於和緩。當 B-distance 大於 5 後，分類誤差比例已趨近於 0，這表示特徵可將類別完全區分開來。



(a)特徵空間三維點位散佈圖



(b)一維特徵機率密度分佈圖

圖 8 單響應特徵分析示意圖

$$B_{ij} = \frac{1}{8} (M_i - M_j)^T \left(\frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (M_i - M_j) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(|C_i + C_j|/2)}{(|C_i| \cdot |C_j|)^{1/2}} \right] \quad (5)$$

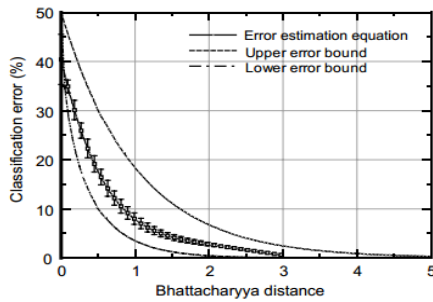


圖 9 Bhattacharyya Distance 與分類精度之關係圖
(Choi and Lee, 2003)

4.2 單響應波形特徵分析

單響應波形所涵蓋之類別為道路、植被樹冠、草地農地、裸露地及建物，而其特徵包含響應特徵外，另加入空間局部範圍內之平均回波數之特性。由於一個單響應之波形皆只代表一樣地物，因此，若平均可能會影響其特性反映，而平均回波數並不影響其物理性質。故除了空間局部範圍內之平均回波數之特性外，沒有考慮其餘響應特徵之空間局部範圍內統計特性。以下即透過特徵分析方法對每項地物之波形特性進行單響應波形特徵分析。

4.2.1 各類別一維特徵機率密度分佈圖

圖 10(a)~(g)為單響應之一維特徵機率密度分佈圖，其中 X 軸為特徵值，Y 軸為機率。以下透過各類別之峰值位置、分佈範圍及與各類別之間重疊比例之多寡三項指標做說明：

- 峰值位置代表的是每樣地物最可能出現之值，其位置偏左代表地物於該特徵之值較小，偏右則代表特徵值較大。理論上同種類樣本之峰值應只有一個，若出現兩個峰值則表示樣本可能內存在兩種類型之地物。
- 分佈範圍用以表示地物類別於某特徵軸向所分佈範圍，分佈範圍越廣代表特性之分佈範圍較不集中，也就是該地物樣本之特徵較不一致且物理性質不穩定，容易使得其特徵分佈與其他地物類別重疊部分增加，降低區別效果。反之，若分佈範圍很小，則代表其樣本峰值很一致，

- 重疊比例可表示地物類別間特徵分佈範圍相同之比例多寡。重疊比例越高，代表特徵分佈越相似，故若兩類別之間重疊率越高，越不容易區分此兩類別，反之，重疊比例越少則代表兩類別之物理特性相差甚遠，區分效果較顯著。

圖 10(a)-(g)為單響應特徵分布圖，我們依據以上三項指標來分析判斷各特性之有效性。在響應振幅(a)的部分，顯示了道路與草地農地兩類別之區分性較高，而裸露地、建物與植被樹冠之區分性則較低。在響應波寬(b)中，該特性對於區分植物與非植物最有幫助，而於道路與非道路間有些許區分作用。相較於響應振幅(a)，響應面積(c)在建物與植被樹冠類別之重疊比例下降，稍稍提高可分辨性。Cross-section(d)中可發現道路、裸露地與建物類別之分佈中出現兩個峰值，表示此三類別樣本中可能皆具有兩種不同類型的地物存在。Cross-section對於道路與植物類別之區分性較高，對於裸露地與建物類別之區分性則較低。

圖 10(e)、(f)為各類別峰度及偏態之一維特徵機率密度分佈圖，兩特徵皆與響應形狀有關。圖中兩特性對於區別這五類樣本的效用較不顯著，大部分的波形為右偏，峰度都符合標準高斯分布波形的範圍內，雖然看不出各類別之間原始回波形狀的明顯差異，卻能用以證明透過高斯方式來擬合光達之波形是合理的。

圖 10(g)為各類別之空間局部範圍內平均回波數之一維特徵機率密度分佈圖，由分布範圍來看，道路、裸露地及草地農地周圍區域內多為單響應，其平均數多為 1。建物區之邊界有機會出現多響應，因此，其類別中部分樣本之空間局部範圍內平均回波數高於 1。植被樹冠之空間局部範圍內平均回波數分布區間最廣，因其根據不同植被密度或樹種變化等等因素都可能造成回波數之變化，故其空間局部範圍內平均回波數之值偏高且較不穩定。於此特性中，對於區別植被樹冠及草地農地有一定之幫助，且對於區別裸露地及建物也有一定之效果。

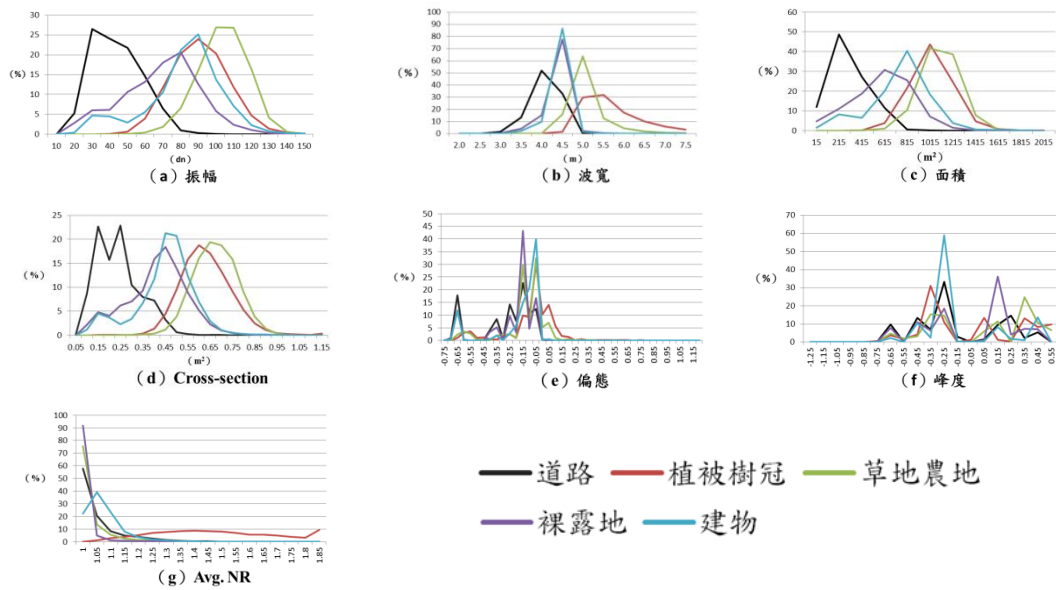
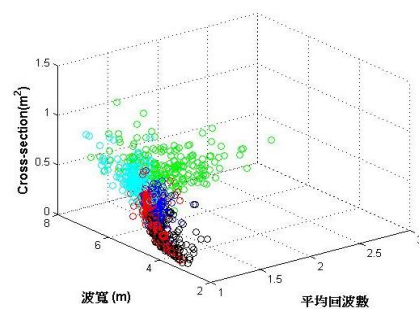


圖 10 單響應特徵分布 (a)~(f)地物響應特徵分布圖；(g)空間局部範圍內之平均回波數

4.2.2 各類別特徵空間三維點位散佈圖

經一維特徵機率密度分佈分析之結果，選擇響應波寬、cross-section 及空間局部範圍內平均響應個數來繪製特徵空間散佈圖。圖 11 為各類別特徵空間中波寬、cross-section 及空間局部範圍內平均回波數之散佈圖。圖中顯示，特徵空間中波寬、振幅及 cross-section 之散佈情形，圖中顯示植物(植被樹冠、草地農地)與其他類別(道路、裸露地、建物)可以很容易的區別開來。此外，透過範圍內平均回波數可提高植被樹冠及草地農地之可區分性。而道路與建物之間也有相同之情形，且裸露地之特徵點散佈於道路與建物之間，使得此三種種類之樣本特徵點不易區分開來。反之較能清楚分辨的為植物與非植物。其餘三種非植物類別則不易分辨，可能是地形較複雜之緣故，造成波形變化起伏較多。再者可能因為裸露地包含了河床及土壤地，在本質上即有些許差異，造成裸露地的分布較為分散，又有些裸露地類別的材質和柏油路類似，因此造成其與有部分重疊之結果。而建物和道路具有不錯的分離程度，建物之振幅值雖與道路有重疊的部分但大部分之值都較大，唯獨其仍與裸露地有部分的重疊。就各類別特徵空間三維點位散佈圖而言，三維展示較一維更能了解特徵之分佈情形及使區別能力之優

劣視覺化，而分析結果與一維特徵機率密度分佈分析之結果相同。



●：道路 ●：植被樹冠 ●：草地農地
●：裸露地 ●：建物屋頂

圖 11 特徵空間中波寬、空間局部範圍內平均回波數及 Cross-section 分布圖

4.2.3 各類別特徵分離度

將所有特徵都用以計算 B-Distance，如表 3，成果顯示道路與裸露地區分性較低(接近於 1)，而道路與建物屋頂、植被樹冠與草地農地、及裸露地與建物屋頂之區分性次之(約低於 2)，其他地物間的區分性皆相當好，表示使用這些特徵對於區分本文所定義的類別是有效的。

4.3 多響應波形特徵分析

多響應波形類別為建物及植被兩類，其特徵包

含了響應特徵、整波形特徵及以上特徵之空間局部範圍內之平均值及標準偏差。多響應特徵以波形中第一回波之響應為代表，因其他回波之響應可能有重疊的情形，造成看不出原始響應的波形，因此沒有針對多響應計算波形進行響應偏態及峰度。故響應特性為響應振幅、波寬、面積及 cross-section。由於多響應特徵較多種，故我們以下先以一維特徵機率密度分佈圖觀察波形特徵區分此兩類別之效用，再透過計算分離度及相關係數，找出區分性較高之特性展示特徵空間三維點位散佈圖，以進行特徵分析。

4.3.1 一維特徵機率密度分佈圖

多響應之波形特徵分別列於表 4 及表 5，表中

欄代表特性類型，列代表計算之特性。第一欄分別為響應特徵及整波形特徵，第二欄為第一欄特性空間局部範圍內之平均，第三欄為第一欄特性範圍內之標準偏差。表 4 為波形響應特性及其空間局部範圍內統計特性，表中可看出第一欄響應特徵特性分佈區間重疊性很高，其中分離度最高為響應波寬，其重疊比例仍超過 50%，因此，響應特徵對於此兩類別之區分性不高。第二欄可看出計算空間局部範圍內之平均有助於增加某些特徵之區別性，如響應波寬，但對於區分性不高之特性，如響應振幅及響應面積，則幫助不大，區分性提升效果較不顯著。第三欄中可看出計算特徵範圍內之標準偏差對於所有特徵之區別性皆有提升之作用，使兩類之間重疊性降低。

表 3 整合所有單響應特徵之 B-Distance

單響應特徵	道路	植被樹冠	草地農地	裸露地	建物屋頂
道路	0	7.458	7.191	1.151	1.873
植被樹冠		0	1.948	5.994	5.548
草地			0	4.419	5.227
裸露地				0	1.983
建物屋頂					0

表 4 響應特徵與其空間局部範圍內統計特性分布比較圖(——植被 — — 建物邊界)

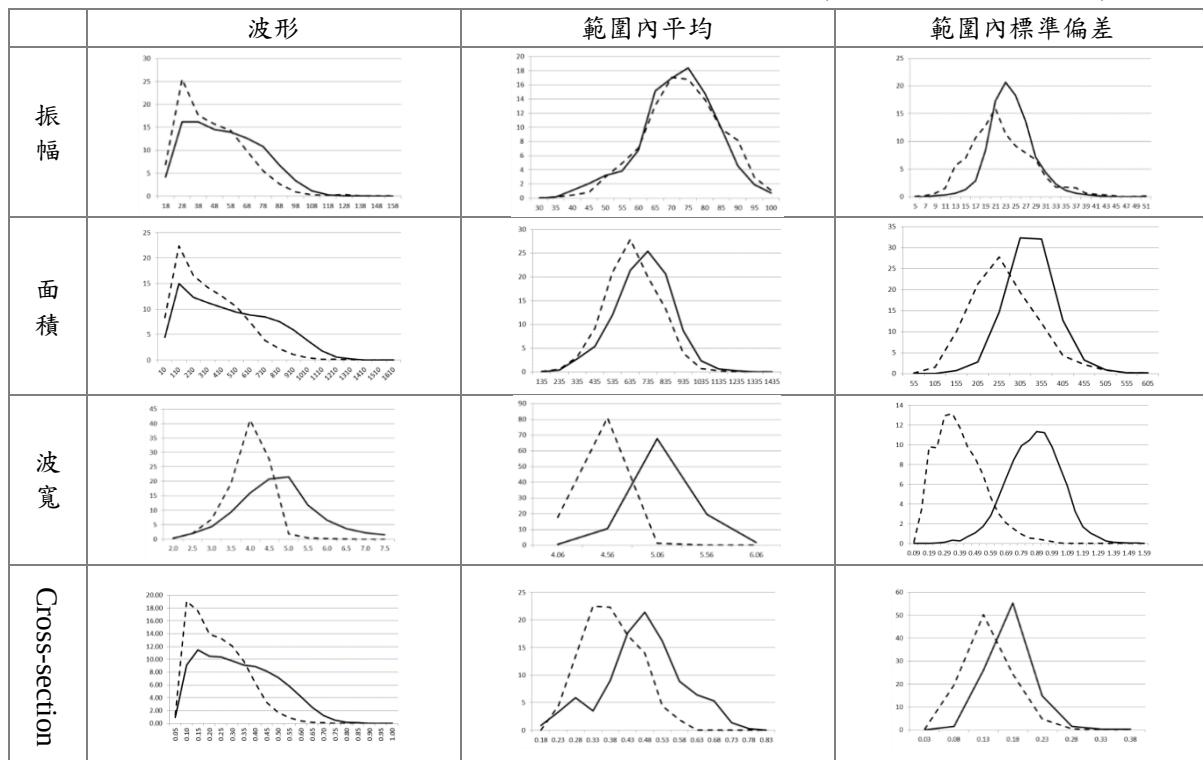


表 5 為波形整波形特性及其空間局部範圍內統計特性。表中第一欄為整波形特徵特性分佈區間，可發現兩類別間之特性分佈重疊性也很高，此外建物邊緣之特徵值分佈較樹林區集中，這代表樹林區之特徵變化較多。因此推論植被之樣本種類較多，因此特徵值分佈較廣，而建物邊緣樣本間相似性較高，其特徵值分佈也較集中。植被區有部分特性與建物邊緣類似，因此造成分佈區間之重疊。在第一欄中，無區分性特別顯著之特徵。第二欄為空間局部範圍內特徵之平均值，其中某些特性，如響應前後重疊面積、重疊寬度、時間差及回波數之範圍內平均值等，特徵分佈區間較集中，尤其是建物邊緣，且兩類樣本特性分佈區間之重疊性降低。第三欄為空間局部範圍內之特徵標準偏差，其特徵區分性皆有明顯之提升，且分佈皆很相似，為建物邊緣之特性空間局部範圍內標準偏差小於植被之特性空間局部範圍內標準偏差，這是合理的延續第二欄之計算，平均值分佈較集中也因此標準偏差較低。

4.3.2 特徵分離度

由章節4.3.1可發現，多響應之特徵個數很多，且每個特徵之分佈區皆很類似，因此，由特性分佈

圖不易找出最有效之特徵，故透過計算 B-Distance 以篩選出最具效果之特徵，以進行三維之特徵分析。圖 12 為建物邊緣及植被於各特徵中之 B-Distance，X 軸為特徵名稱，Y 軸為 B-Distance。圖中可看出大部分以範圍內作為統計算出的特徵其 B-Distance 明顯大於整波形特性及響應特性。根據圖 9，以門檻 0.8 做為區分效果顯著與否之判斷(如圖 13 中虛線所示)，最後選出效果較顯著之特徵為：Avg. NR、Avg. W、Avg. ΔT 、Std. ΔAm 、Std. ΔW 、Std. ΔA 、Std. ΔCS 、Std. CS 及 Std. Ow。由此九個特徵算出之 B-Distance 為 7.485，具有顯著之區分效果。最後，將這九個特徵當作是特徵選取之結果，並使用於後續之多響應資料分類。

4.3.3 特徵空間三維點位散佈圖

根據 4.3.2 所選出之效果較顯著之特徵進行三為點為散佈圖之繪製，經由測試選出分離效果最佳之組合，如圖 13 所示，圖中三軸分別為範圍內平均回波數、範圍內面積差值標準偏差及範圍內波寬差值標準偏差，其中植被樹冠為綠色點，建物邊緣為紅色點，圖中顯示大部分之兩類樣本皆可清楚被區別。

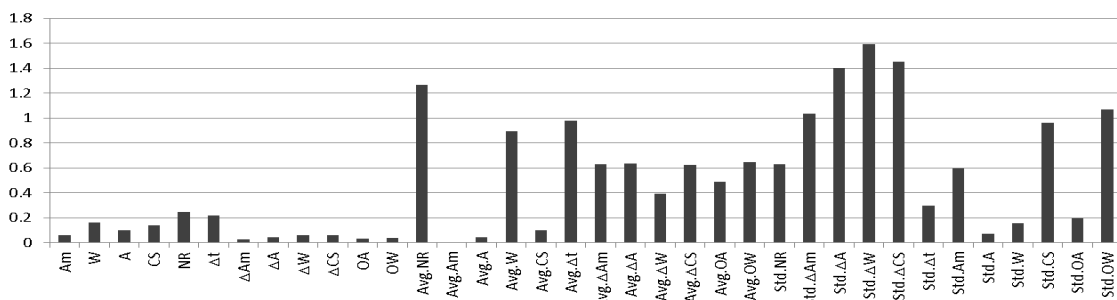


圖 12 多響應所有特徵之 B-Distance

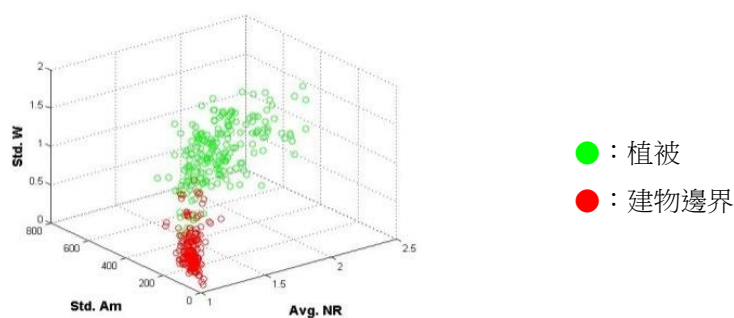


圖 13 特徵空間中空間局部範圍內之平均回波數、面積差值標準偏差及波寬差值標準偏差分佈圖

5. 分類方法與分類器

5.1 分類器

根據特徵分析結果，部分波形特徵對於區別不同地物類別明顯具有幫助，因此將這些特徵，透過分類器進行分類，以分類成果精度優劣來驗證波形特徵對於區別地物類別之有效性。在研究中選用之分類器為支持向量機(Support Vector Machine, SVM)，其原理為透過最佳化工具找出高維度向量空間中最佳的超平面(optimal separating hyperplane, OSH)，使類別間區分距離最遠，以達到最佳分類效果。SVM 又可分為線性及非線性，在研究中我們使用的是非線性之 SVM，其透過核函數(kernel)將資料投射到更高為度的特徵空間，用以解決更複雜的分類問題，研究中所使用之核函數為 RBF 核函數。

5.2 分類方法

研究中嘗試比較分析三種分類方法：方法一是以響應為主(echo based)的分類方法，是研究文獻常見的分類方法(Wagner *et al.*, 2008；Alexander *et al.*, 2010；Heinzel *et al.*, 2011)；方法二是本研究提出的新方法其概念是以完整波形做考量(waveform based)；方法三則為方法二加上影像之 RGB 資料輔助分類。而在各分類方法中所使用之樣本皆相同，並根據不同方法選用不同的特性，經由分類器進行分類，最後輸出的成果包含道路、植被樹冠、草地農地、裸露地及建物屋頂等五類別如圖 14 所示。以下依序介紹三種分類方法及其選用之特徵。

● 方法一：以響應為基礎

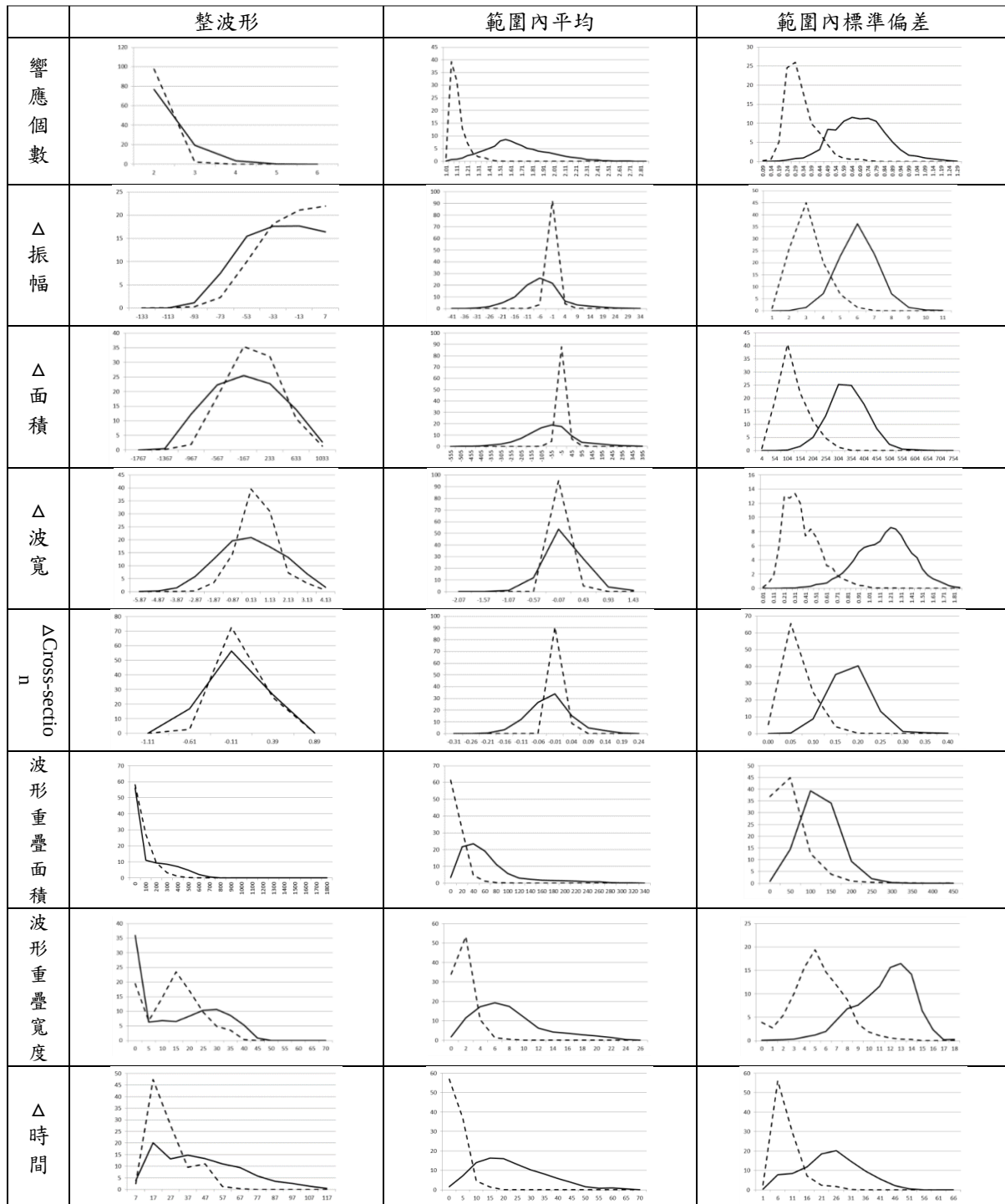
以響應為基礎之分類方法，是以響應偵測時所找出的每個響應作為分類單元以進行分類並不包含波形之間的關係，因此，我們訂定其分類時所使用的特性為響應特性，然而多響應中之波形為每個響應疊加之成果，因此無法計算每個響應之峰度及偏態。因此為了使特性一致，方法一用以分類之特性為振幅、波寬、面積及 cross-section，不使用峰度及偏態。由於每個響應又相當於一回訊點，因此，

方法一之分類方式可視為對三維點雲進行分類，又被稱為三維分類(3D classification)，其中響應特性可視為每個點所增加之特徵。此方法是研究文獻常見的分類方法(Wagner *et al.*, 2008；Alexander *et al.*, 2010；Heinzel *et al.*, 2011)。在此研究中，方法一之分類流程如圖 14(a)所示，首先將全波形資料進行響應偵測與分解，並進行波形特徵萃取計算所需之特性，選定樣本輸入分類器進行監督式分類。最後輸出結果為道路、植被、裸露地、建物與草地農地等五類。

● 方法二：以波形為基礎

根據特徵分析結果可知，單響應與多響應中除了波形上有明顯差異外，其波形資料中所涵蓋之性質並不相同，如多響應波形多了其波形中響應之間的關係，因此在研究中採取將單響應與多響應之波形分開來進行分類之策略。此方法之分類單元為波形資料中所記錄之一條條波形。其中，單響應波形於分類中所使用特徵分別為響應特性及空間局部範圍內平均回波數。若為多響應之資料，則以該波形中之第一響應作為代表，其特性如章節 4.3.2 最後選出效果較顯著之特徵分別為 Avg. NR、Avg. W、Avg. ΔT、Std. ΔAm、Std. ΔW、Std. ΔA、Std. ΔCS、Std. CS 及 Std. 0w。分類流程如圖 14(b)所示，首先將全波形資料進行響應偵測與分解，並進行波形特徵萃取計算所需之特性。在此先不加入影像資訊，因此下一步為將波形資料區分為單響應與多響應之波形，分別選定樣本並進行訓練。由於將這兩類型資料分開處理，我們可以獲得更仔細之類別，如建物之單響應為建物屋頂，多響應則為建物邊界，而植被之單響應及多響應之第一回波則稱為植被樹冠，多響應之其餘響應則為植被下層，如此之分類結果對於找尋建物邊界或是計算植被厚度之應用可提供額外之資訊。最後將多響應及單響應之分類結果合併，建物邊界與建物屋頂合併為建物，植被樹冠及植被下層則合併為植被，則最後輸出類別與方法一相同，分別為道路、植被、裸露地、建物與草地農地等五類。

表 5 整波形特徵與其空間局部範圍內統計特性分布比較圖(——植被 —— 建物邊界)



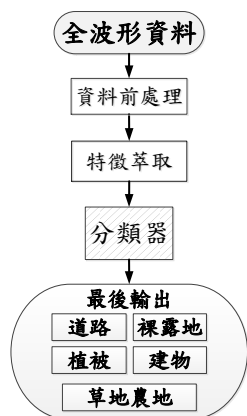
● 方法三：以波形為基礎並加入影像輔助

以方法二之分類方式加上影像色彩資訊 (R、G、B)，進行影像輔助之分類。由於缺少方位資訊，因此研究僅以內插方式由正射影像獲取色彩資訊，此正射影像為廠商所提供，是以光達掃描時所拍之航照影像後製而成。

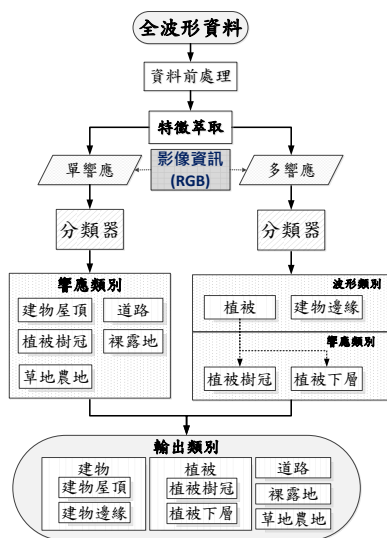
5.3 地真資料

由於測試區廣大且包含的地物類型相當廣泛，我們在測試區內人工選取部分資料當作地真資料，由於並未進行現地調查，地真資料為參考光達掃描時拍攝影像後製之正射影像並經由人工判釋選取，

統稱為檢核樣本，並隨機選取檢核樣本內 1% 作為訓練樣本，作為分類器之分類依據。檢核樣本用以檢驗分類器之分類成果精度，所選取之各廠牌儀器資料之檢核樣本分佈如表 6 所示。其中，Optech 廠牌之資料因缺少正射影像，故由掃描日期最接近之 Leica 資料所產製的正射影像作為參考，進行樣本選取。在三家廠牌資料的選取部分，各類別樣本於資料中的分佈大致上相同，表示各廠牌之資料樣本所對應之地物並不會相差太多，因此，可用以比較不同廠牌資料間最後之分類成果。



(a) 以響應為基礎(方法一)



(b) 以波形為基礎(方法二&方法三)

圖 14 分類流程圖(a、b 圖)

6. 研究成果與分析

實驗成果如表 7 所示，其內容為不同廠牌之儀器資料於三種方法下使用分類器進行分類，其中三

種廠牌儀器分別為 Leica ALS60、Riegl LMS-Q680i 及 Optech ALTM PEGASUS HD400。方法一、方法二及方法三分別為 echo-based、waveform-based 及 waveform-based 加上色彩資訊輔助分類。使用之分類器為 SVM。成果精度如表 8 所示。

由圖 15 中可以發現，隨著方法改變，各廠牌資料之分類精度改變趨勢皆相同，其中，方法二及方法三相對於方法一精度明顯有顯著提升，而相較於 NBC 分類器，SVM 之成果皆能達 80%，也應證了其非線性分類的可靠度。方法一的整體精度較差，平均約為 60%，其中精度較高的為 Optech 於 SVM 分類器及 Riegl 於 NBC 分類器之成果，可達 67%，但精度仍遠低於方法二及方法三。故整體來說，此結果驗證了透過波形為基礎的分類方式之分類效果，較以響應為基礎之分類方法來的好。此外，加入影像資訊對於提升分類結果也有一定之幫助，我們可以看到在 SVM 之分類成果中(表 8)，其顯示無論何種儀器對於方法三之精度皆有效提升，而其中 Riegl 提升最多，約為 8%。

接下來，我們針對整體成果精度最佳之 Leica 儀器資料使用 SVM 分類器之分類成果，進一步分析方法二與方法三中各類地物之分類情形。表 9 為方法一之成果精度，在 4-2 節單響應特性分析中，我們發現響應特徵能夠將植物與非植物做分別，從各類別的使用者與生產者精度可以看出，裸露地、道路與建物間容易被分類錯誤，是因為其材質廣泛，會有相似的情況發生，如：道路與建物皆有可能為水泥材質。而少了波形特性中之回波數這個重要的指標，造成建物邊界不容易被偵測，且植被與草地農地也容易有混淆之情形。

表 10 為方法二之成果精度，其中，根據使用者與生產者精度我們可以發現其植被之分類成果最好，皆達 95% 以上，而草地農地次之，精度達 80%，而裸露地精度較差。其中裸露地與道路易有誤判之情形，其誤判比例為 29.82%，其餘較多部分則誤判為草地農地，比例為 7.2%，造成錯誤分類的原因可能為，裸露地與道路之材質相近，如水泥路與河床石塊，故其散射情形也會很類似，進而

造成誤判之情形。而裸露地錯誤分類之原因可能是裸露地樣本中多少含有植物，如河床石縫中之雜草，亦或是枯黃雜草在影像上不易辨識，造成裸露地錯分為草地農地之情形。另外，可以發現建物之生產者精度也稍微偏低，這可能是因為建物屋頂之材質相當多元，因此這些材質當中可能有部分與道路及

裸露地類似，進而造成錯誤分類之結果，由圖 16 中可看出建物類別被錯分之屋頂材質多為綠色鐵皮及水泥材質。此外，可發現分錯建物樣本點中之建物邊界是分對的，是因為建物邊界為多響應，在方法二中與單響應是分開分類，也證明了此種分類法其較響應為基礎的方法來得好。

表 6 各廠牌儀器資料之檢核樣本分佈

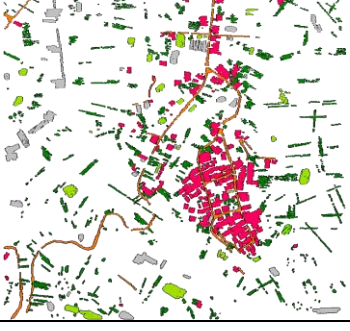
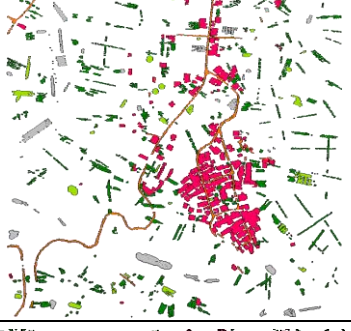
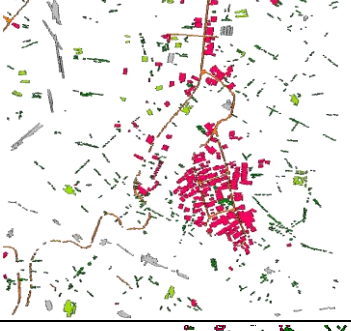
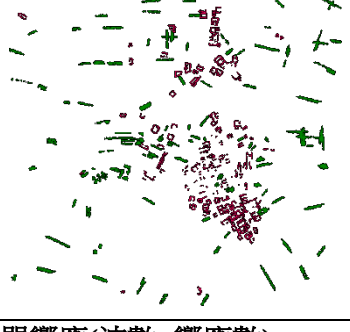
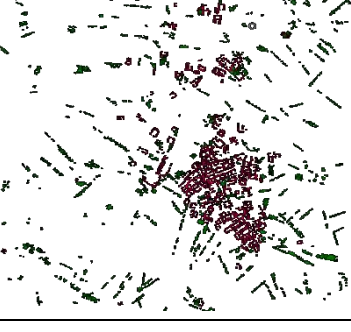
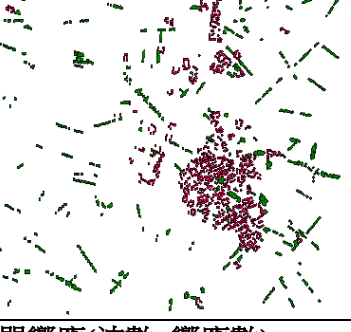
●：道路 ●：植被 ●：草地農地 ●：裸露地 ●：建物			
	Leica	Riegl	Optech
參考之正射影像			
單響應檢核樣本			
多響應檢核樣本			
檢核樣本波數	單響應(波數=響應數) 道路：32286 植被：67733 草地農地：37762 裸露地：46485 建物：120570 多響應(波數/響應數) 植被：29135/37099 建物：7498/15165	單響應(波數=響應數) 道路：16214 植被：42590 草地農地：15058 裸露地：18765 建物：78402 多響應(波數/響應數) 植被：14030/29016 建物：6207/12577	單響應(波數=響應數) 道路：7061 植被：10936 草地農地：7537 裸露地：9209 建物：37084 多響應(波數/響應數) 植被：5979/12905 建物：2219/4466

表 7 不同廠牌之儀器於三種方法之 SVM 分類成果

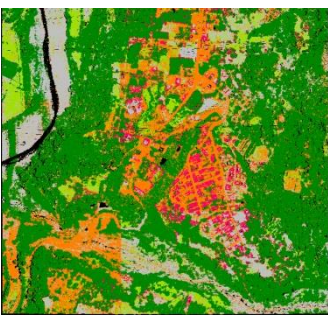
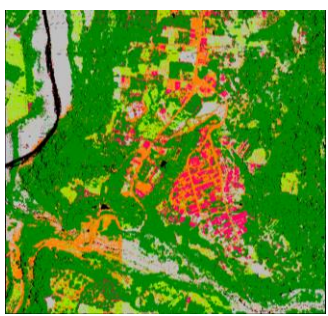
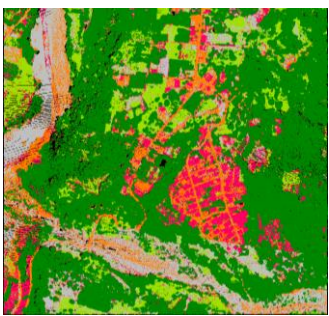
● ：道路 ● ：植被 ● ：草地農地 ● ：裸露地 ● ：建物			
	Leica	Riegl	Optech
參考之正射影像			
方法一			
方法二			
方法三			

表 8 SVM 分類成果-整體精度比較(%)

	方法一	方法二	方法三
Leica	58.63	80.69	86.01
Riegl	66.87	77.41	85.76
Optech	64.52	77.18	82.82

表 11 為方法三之成果精度，其中顯示了加入影像後所有類別之分類成果精度皆略有提升，其中精度提升最多之類別為建物，其生產者精度提升

11%，主要差異為減少了建物錯分為裸露地的情形，如圖 17 所示 (b)，可明顯看出加入色彩資訊後其建物分類之正確比例提升。

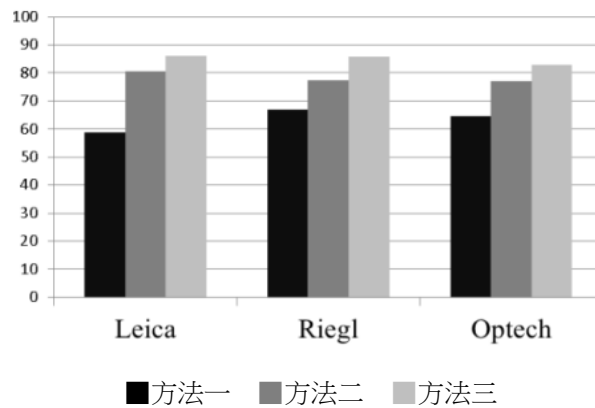


圖 15 各廠牌儀器資料於各方法之分類精度直方圖(單位：%)

表 9 方法一之誤差矩陣與成果精度(SVM_Leica)

SVM_Method 1_Leica			預測類別				
	樣本數	(%)	道路	植被	草地農地	裸露地	建物
實際類別	32286	道路	96.04	0.75	0.11	2.59	0.51
	133967	植被	14.69	79.83	2.87	1.59	1.01
	37762	草地農地	0.21	57.48	37.47	2.79	2.06
	46485	裸露地	43.98	3.04	7.25	40.45	5.28
	135735	建物	25.58	3.96	6.38	23.17	40.91
使用者精度			29.27	78.82	47.06	34.65	92.11
生產者精度			96.04	79.83	37.47	40.45	40.91
			整體精度 (%)：58.63				
			Kappa：0.54				

表 10 方法二之誤差矩陣與成果精度(SVM_Leica)

SVM-Method 2-Leica			預測類別				
	樣本數	(%)	道路	植被	草地農地	裸露地	建物
實際類別	32286	道路	94.96	0.14	0.07	2.25	2.58
	96868	植被	0.07	97.88	0.94	0.05	1.06
	37762	草地農地	0.10	8.12	87.77	1.13	2.87
	46485	裸露地	29.82	0.42	7.20	58.96	3.59
	128068	建物	16.25	0.91	2.14	10.82	69.89
使用者精度			46.85	95.50	82.51	64.55	95.10
生產者精度			94.96	97.88	87.77	58.96	69.89
			整體精度 (%)：80.69				
			Kappa：0.77				

表 11 方法三之誤差矩陣與成果精度(SVM_Leica)

SVM_Method 3_Leica			預測類別				
	樣本數	(%)	道路	植被	草地農地	裸露地	建物
實際類別	32286	道路	93.37	0.13	0.13	3.22	3.14
	96868	植被	0.06	97.75	0.99	0.06	1.14
	37762	草地農地	0.24	8.42	89.44	0.68	1.22
	46485	裸露地	24.85	0.38	4.77	67.31	2.69
	128068	建物	12.52	1.07	0.87	4.49	81.04
使用者精度			52.08	95.21	88.61	81.49	96.45
生產者精度			93.37	97.75	89.44	67.31	81.04
			整體精度 (%) : 86.01				
			Kappa : 0.83				

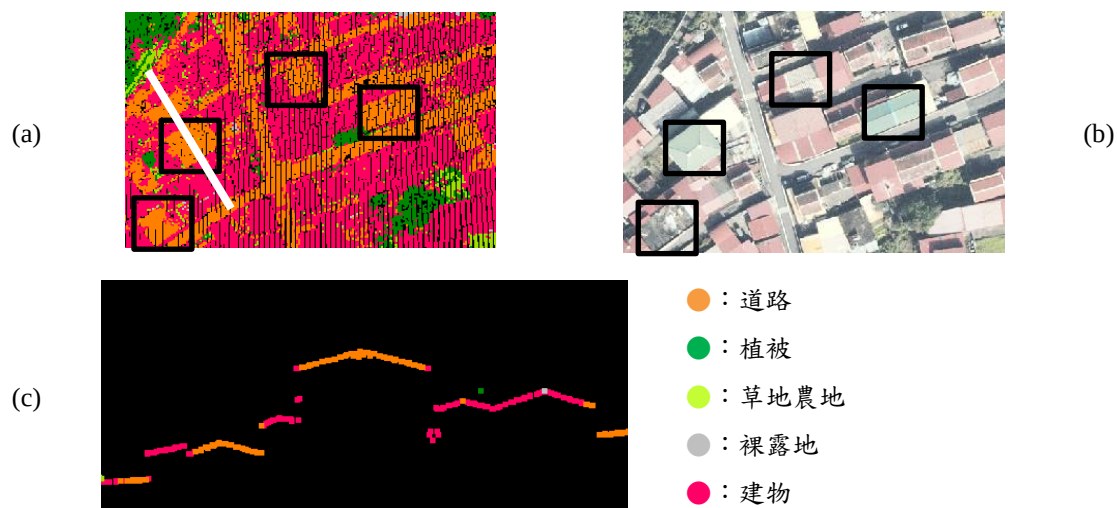


圖 16 方法二建物錯分為道路之情形(黑框處)：(a)分類結果俯視圖；
(b)對照影像；(c)分類結果側視圖圖(白線處剖面情形)

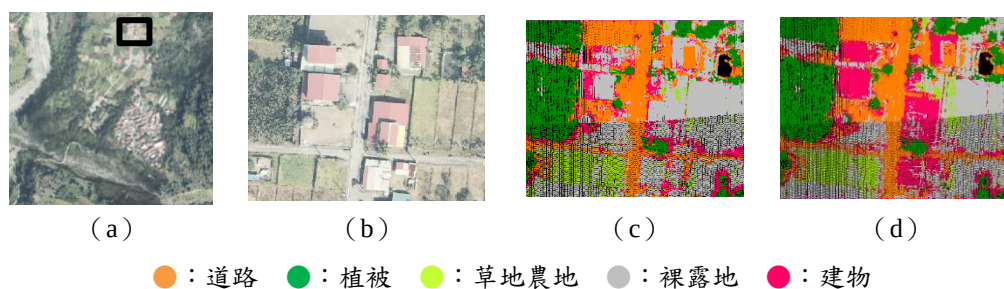


圖 17 方法三建物精度提升之情形 (黑框處)：(a) 整區參考影像；
(b) 局部參考影像；(c) 方法二局部分類結果；(d) 方法三局部分類結果；

7. 結論

全波形光達較傳統光達保留了更多資訊，研究中透過對不同地物進行波形分析，並訂定了一套對於全波形光達資料的分類流程，來驗證波形特徵是否足以反映不同型態的地物。研究中，我們以五類地物樣本即植被、建物、草地農地、裸露地及道路為主進行特性統計，波形特性包含響應特徵、整波形特徵及空間局部範圍內統計特性，經由各樣本繪製之一維特徵機率密度圖與三維特徵空間散佈圖，以及各類樣本間分離度計算來進行特徵分析，分析結果顯示波形特徵能夠有效地區分不同地物類別。實驗中使用了三家廠牌儀器(Leica、Optech、Riegl)、三種分類方式(方法一：以響應為基礎；方法二：以波形為基礎；方法三：以波形為基礎並加入影像)，最後，以 SVM 進行分類，透過誤差矩陣評估成果。結論如下：

- I. 單響應波形特徵統計分析中顯示響應振幅能區分道路與草地農地兩類別，而響應波寬對於區分植物與非植物最有幫助，
Cross-section 對於道路與植物類別之區分性較高。對應方法一之成果顯示，植物與非植物類別雖具可區分性，但因缺少整波形特性與鄰近空間局部範圍內統計特性，草地農地與高植被容易混淆，導致成果精度下降，且具有多回波特之建物邊緣也不易被偵測。而裸露地、道路與建物等類別則因部分材質相似的關係，造成誤判情形。
- II. 在多響應特徵中，利用分離度挑選出九個較具區分性之特徵，以觀察植被與建物邊界的區別性。分析結果顯示該兩類別在這些特徵中能被清楚區別。方法二即是以整條波形為主並加入選取之多響應特徵進行分類，其分類整體精度較方法一有大幅提升，也證明了加入多響應特性後植被與草地農地類別能順利區別，而建物邊界亦能正確分類，且裸露地的分類精度也明顯上升。
- III. 分類方法中，當使用 Leica 資料與 SVM 分類器時其整體精度最高，可達 80.69%，kappa

值為 0.77。方法三之整體精度可達 86.01%，kappa 值為 0.83。由方法三的誤差矩陣可看出，加入影像對於改善建物類別分類成果最為顯著，對裸露地之效果則較不顯著，因裸露地大部分錯分為道路是因其兩者顏色相近之緣故。

- IV. 成果顯示研究中提出以波形為基礎的分類法較以響應為基礎的分類法好上許多，其主要原因為，在多響應波形中，每個響應之性質可能受到較多因素之影響，若將每個響應皆視為一單元比較，會忽略了訊號穿透時所受到之影響，進而造成多響應中各個響應的特性無法與單響應波形之特性進行比較。另一方面，由於無法得知其穿過程所接觸到之地物，故亦無法確定多響應中第二回波以上之波形類別。因此，在定義波形類別過程中可能有定義錯誤的情形發生，造成原本正確的分類被誤判為錯誤的分類。故檢核資料的誤差可能使方法一精度下降。然各類別樣本數相當大，故推測下降幅度並不足以影響整體的分類成果。

致謝

本研究承蒙國科會部份經費補助（計畫編號 NSC 101-2221-E-006-181- MY3），特此致謝。

參考文獻

- 包順安，1999。高光譜影像平滑與特徵萃取對分類精度之影響，國立成功大學測量工程研究所碩士論文。
- 徐百輝、曾義星，2000。高光譜影像特徵萃取方法之探討，航測與遙測學刊，第五卷第二期，1-14 頁。
- Alexander, C., Tansey, K., Kaduk, J., Holland, D., Tate, N.J., 2010. Backscatter coefficient as an attribute for the classification of full-waveform airborne laser scanning data in urban areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, pp. 423-432.

- Choi, E. and Lee, C (2003), Feature extraction based on the Bhattacharyya distance. *Pattern Recognition*, 36, 1703 – 1709.
- Doneus, M., Briese, C., Fera, M. and Janner, M., 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 35, 882-893.
- Heinzel, J., Koch, B., 2011. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, pp. 152-160.
- Landgrebe, D. and Biehl, L., 1997. An Introduction to Multispec.
- Liang, X., Hyypä, J., Matikainen, L., 2007. Deciduous-coniferous tree classification using difference between first and last pulse laser signatures. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, pp. 253-257.
- Lin, Y.C., Mills, J., 2009. Integration of full-waveform information into the airborne laser scanning data filtering process. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3/W8), 224–229.
- Mallet, C., Bretar, F., Roux, M., Soergel, U., Heipke, C., 2011. Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Matsatsinis, N.F., Samaras, A.P., 2000. Brand choice model selection based on consumers' multicriteria preferences and experts' knowledge. *Computers & Operations Research*(27), pp. 689-707.
- Means, J.E., Acker, S.A., Harding, D.J., Blair, J.B., Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harmon, M.E., McKee, W.A., 1999. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, Volume 67, issue 3, pp. 298-308.
- Neuenschwander, A.L., Magruder, L.A., Tyler, M., 2009. Landcover classification of small-footprint, full-waveform lidar data. *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 3, 033544.
- Rottensteiner, F., 2003. Automatic generation of high-quality building models from LIDAR data. *Computer Graphics and Applications*, 23 (6), pp. 42–50
- Song, J.H., Han, S.H., Yu, K., Kim, Y.I., 2002. Assessing the possibility of land-cover classification using LiDAR intensity data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, 34 (Part 3B), pp. 259–262.
- Wagner, W., A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer, N. Studnicka, 2006. Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full waveform Digitising Airborne Laser Scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 2, pp. 100-112.
- Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C., Ducic, V., 2008. 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5), pp. 1433-1452
- Wang, C.K., 2012, Exploring weak and overlapped returns of a LiDAR waveform with a wavelet-based echo detector. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B7.

Waveform Feature Analysis and Classification of Airborne LiDAR Data

Yu-Chia Hung¹ Cheng-Kai Wang^{2*} Yi-Hsing Tseng³ Hone-Jay Chu⁴

ABSTRACT

Thanks to the development of LiDAR technology, recording full waveform information of return laser signal has become available. Compared with the conventional LiDAR system, waveform LiDAR further encodes the intensity of return signal along the time domain, which enables the users to utilize the continuous return signal for the interpretation of ground objects. Potential of more applications than the use of traditional LiDAR can be expected with the use of full waveform LiDAR. A LiDAR waveform is a recorded energy of the backscattered laser pulse along the time domain. The shape of a waveform is formed according as the characteristics surface reflectance, geometric structure and roughness of the laser footprint. It would be possible to extract the information of surface characteristics from waveform data, and this information can be used for the classification of ground surface. This study focuses on the analysis of LiDAR full-waveform data. The effects of various ground objects and surfaces on the waveform data will be analyzed, and the reparability of waveform features among categories of ground objects will be identified. Based on this analysis, a classification approach is developed for LiDAR full-waveform data. The estimation of classification accuracy will be reported as well.

The experiment data were collected with three airborne LiDAR systems of different brands, namely Leica 、 Riegl and Optech. The land cover objects of the experimental area are mainly categorized into road, canopy, grass & crop, bare ground and buildings. Waveform features were analyzed with respect to the single and multiple return laser paths samples, and waveform classification features were selected according to the analysis. Then, the supervised classification by using Support Vector Machine (SVM) was performed in three defined methods which include echo-based, waveform-based and waveform-based with images. The experiment results show that the overall accuracy of waveform-based method increases about 20% comparing to echo-based method and it can achieve 86% with the images. This study reveals the potential of 3D object classification using airborne LiDAR waveform data.

Keywords: Airborne LiDAR 、 Full-waveform LiDAR 、 Waveform feature classification

¹ Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

² Ph.D, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

³ Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁴ Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

* Corresponding Author, Phone: 886-6-2383876 ext. 852, E-mail: grassnono@gmail.com

Received Date: Mar. 21, 2013

Revised Date: May. 07, 2013

Accepted Date: May. 21, 2013

以測深光達數據產製東沙塊礁分佈圖

林暉尊¹ 史天元^{2*} 侯尚儒³ 陳杰宗⁴

摘要

測深光達(Bathymetric Lidar)使用綠光雷射以掃描方式獲得水深及底質資訊，採用以航空器為載台施測時，於近岸水淺及多礁區域具有高效率及安全性之特性，極適合珊瑚礁區域之測量。本研究以地形分析方式處理測深光達獲取之地形數據，由兩種不同尺度之測深位置指標(Bathymetric Position Index, BPI)及坡度建立地形特徵分類流程，對東沙環礁測深光達測區進行地形分類，並且比較使用不同尺度 BPI 之成果差異。研究成果以測區人工數化塊礁檢核，顯示採用大、小尺度 BPI 分別為 600m 及 50m 時分類成果最佳，整體分類精度與 KAPPA 指標分別為 92.61%與 0.66。

關鍵詞：測深位置指標、海底地形、分類、坡度

1. 前言

珊瑚礁生態系統具有高生物含量及高生物多樣性之特性，為珍貴自然生態資源，故對於珊瑚礁之監測有其重要性。目前對於海洋棲地及底質種類之測繪及監測以根據將衛星影像、航拍影像、或測深資料等數據整併後直接於電腦顯示器上進行人工抬頭數化(head-up digitization)方式實現，如美國國家公園管理局(U.S. National Park Service, NPS)與美國地質調查局(U.S. Geological Survey, USGS)所發表夏威夷群島珊瑚礁海底棲地分佈研究報告中，即是以地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)平台整合航拍影像、測深資料與現地調查，由人工數化編修進行底質及棲地分類(Cochran-Marquez, 2005; Cochran-Marquez *et al.*, 2006)；Finkl *et al.* (2005)透過給予測深地形資料不同濾波方式產出各尺度下之地形特徵，作為輔助人工數化參考。

Brock *et al.* (2006)及 Wedding *et al.* (2008)藉由測深光達施測所得海底地形計算地形粗糙度

(rugosity)，並與水下攝影以及現地探勘資料建地地形資料與珊瑚礁及生物棲地關聯；Lundblad *et al.* (2006)及 Erdey-Heydorn(2008)提出以結合測深位置指標(Bathymetric Position Index, BPI)、坡度及地形粗糙度等地形指標作為棲地分類；Wilson *et al.* (2007)計算坡度、坡向、曲率、BPI、地形變化度(terrain variability)等地形指標，並探討各指標於不同尺度下作為棲地分類依據之可行性。本研究使用測深光達數據進行東沙環礁內部之塊礁偵測，由地形資料計算測區BPI及坡度並建立地形分類流程，由地形分類成果產製塊礁分佈圖，並以人工數化塊礁檢核其成果。

2. 研究數據

本研究使用 AHAB HawkEye II 測深光達系統獲取之海底地形數據，此系統發射雷射波長為 1064nm 紅外光及波長 532nm 綠光兩個波段(LaRocque, *et al.*, 2004)，接收訊號頻道除了紅外光、綠光波段外，另接收因綠光雷射與水分子產生非彈性碰撞所散射波長 650nm 紅光，稱為拉曼散射

¹ 國立交通大學土木工程學系測量及空間資訊組 博士

² 國立交通大學防災與水環境研究中心 教授

³ 國立交通大學土木工程學系測量及空間資訊組 碩士

⁴ 內政部地政司 科長

*通訊作者，電話：03-5712121 ext. 54940, E-mail: tyshih@mail.nctu.edu.tw

收到日期：民國 103 年 04 月 28 日

修改日期：民國 103 年 09 月 26 日

接受日期：民國 104 年 01 月 12 日

(Raman scattering)。綠光波段由於具有較佳穿透水體能力，故作為水底位置之偵測使用；而紅外光與拉曼紅光分別屬於水面反射及近水面水體散射，故此兩波段主要為水面位置偵測使用。HawkEye II 使用後處理軟體 CSS(Coastal Survey Studio)進行波形處理及分析，最終解算得測區點雲資料(Isaksson, 2009)。

本研究區域為東沙環礁(Dongsha atoll)，距離台灣本島約 240 哩，位處於南海東部。東沙環礁近似圓形，除西側之南、北水道外，均有礁台，環礁內部潟湖中塊礁密佈(如圖 1，以色彩展示高程)。本研究使用之測深光達數據，施測點密度為 3.5mx 3.5m 一點，點雲內插為 5m 網格後作為塊礁偵測使用(Shih *et al.*, 2011)。

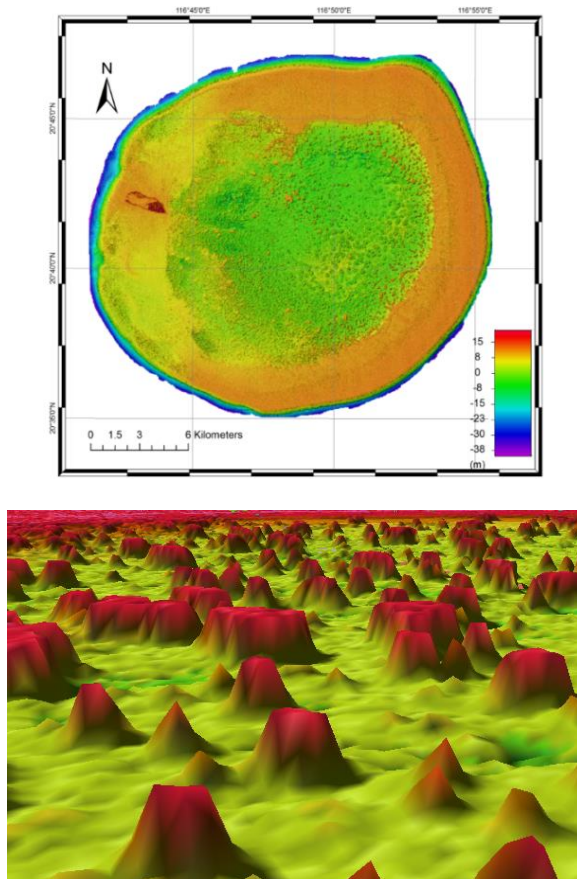


圖 1 東沙環礁地形數據(上)及其內部潟湖塊分布示意圖(下)

3. 研究方法

本研究使用測深光達測深數據進行塊礁分佈之萃取。由海底地形數據計算地形指標作為地形特

徵分類後，再由地形指標以分類方式將塊礁分佈區域偵測出。方法細節說明如下。

3.1 測深位置指標

測深位置指標(BPI, Bathymetric Position Index)為一描述海底地形面上某一點相較於周圍高程之指標，其定義源自於 Weiss (2001)及 Iampietro and Iampietro & Kvitek (2002)所提出應用於陸域之地形指標 TPI (Topographic Position Index)。BPI 定義為計算中央點高程與焦平均(focal mean)之差。焦平均為以中央點為圓心，網格數 *rad* 為半徑所涵蓋所有網格高程值之平均。計算如公式(1)所示，*circle* 表計算焦平均方式之搜尋面為圓，使用者可依需求自行定義形狀；計算出差值加 0.5 後取其整數(int)。根據 Lundblad *et al.* (2006)，此一設計方式目的為節省數據儲存空間。由於此一指標之後續應用，以整數處理便已足夠，本研究延用原始定義。

$$BPI(scale\ factor) = \text{int}((bathy - focal\ mean(bathy, circle, rad)) + 0.5) \quad (1)$$

其中 *rad*：搜尋半徑，以網格個數定義

bathy：中央點高程值

scale factor：該 BPI 之尺度因子，以網格大小乘以 *rad* 定義

BPI 值為判斷地形面點相對於周圍之高程，屬於區域內之相對高程，其值受比較範圍改變而有所差異。如圖 2 所示，地形面上同一點之相對高程隨尺度不同而改變。藉由不同尺度因子之 BPI 值可輔助對地形特徵之分類。

3.2 地形分類

BPI 為與尺度大小有關之地形指標，故使用該指標進行地形特徵分類時需選用適當之尺度。本研究目的在於珊瑚塊礁偵測，此處將海底地形中塊礁周圍地形示意如圖 3，其中黑色曲線表海底地形面，而塊礁則屬於地形面中隆起部分，可進一步分為標示為紅底之小尺度(fine scale)與綠底之大尺度(broad scale)兩區塊，小尺度區塊屬於塊礁外緣，其坡度較陡且窄；大尺度區塊為塊礁頂部平坦區域，

且因各塊礁尺寸均不盡相同造成寬度差異甚大。由於塊礁尺寸差異之影響，使用單一尺度 BPI 進行塊礁偵測不易，故本研究採用兩種尺度 BPI 對海底地形面進行分類，再由分類方式找出塊礁位置。此處將地形面粗略分為礁崖(Cliff)、礁底(Base)、礁坪(Flat)與礁坡(Gentle slope)四類。礁崖為塊礁周圍陡峭部分；礁底為塊礁最外圍部分，連接塊礁上部與塊礁外平坦區域；礁坪為一般平坦之低地；礁坡為地勢相對較周圍略高，但坡度較緩之區域。

選擇使用的兩個 BPI 尺度時，一般取決於欲偵

測出物件之最大與最小尺寸(Lundblad *et al.*, 2006)。經概略量測後，實驗區東沙環礁內最大塊礁長約 600m，即以此值訂為大尺度 BPI(Broad scale BPI, B-BPI)尺度因子；小尺度 BPI(Fine scale BPI, F-BPI)則以偵測塊礁邊緣為目標，由人工量測數個塊礁樣本後得塊礁邊緣寬度約介於 50~100m，並以此作為大尺度 BPI(Broad scale BPI, B-BPI)尺度因子。本研究根據前述條件，設定大尺度 BPI 之尺度值 150m、300m、600m，小尺度 BPI 之尺度值 50m、75m、100m。

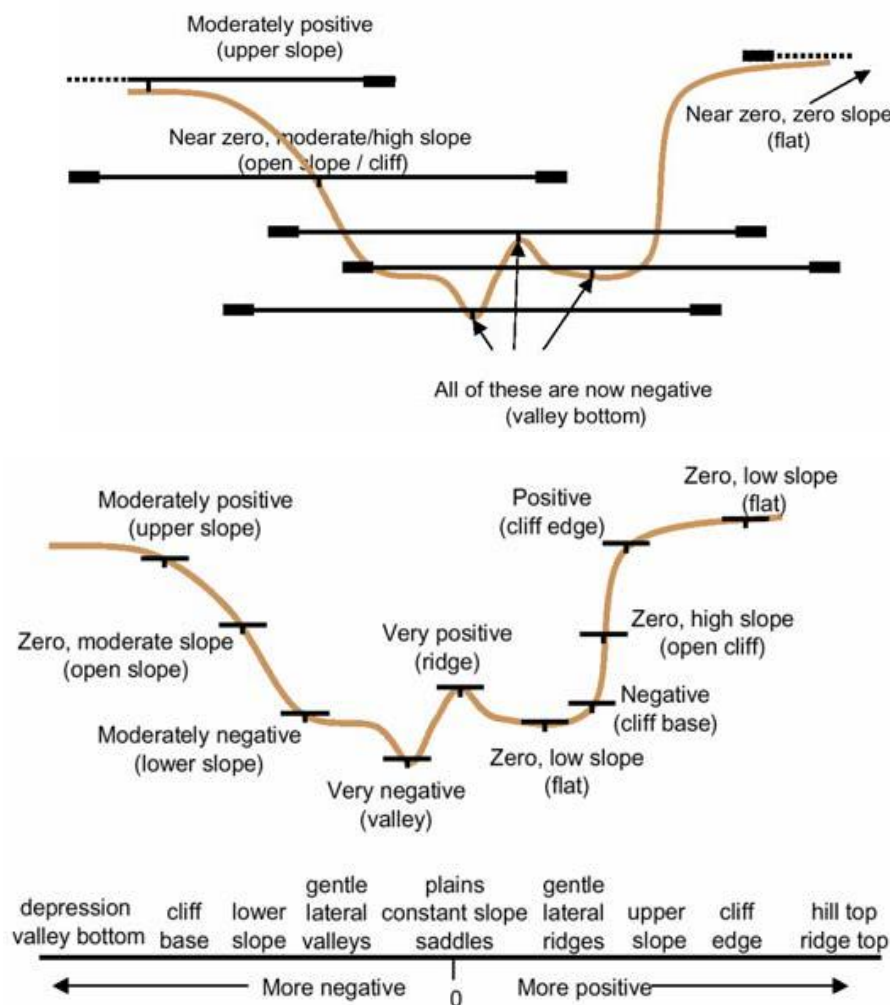


圖 2 不同地形面於大(上)、小(下)尺度 BPI 關係(Weiss, 2001)

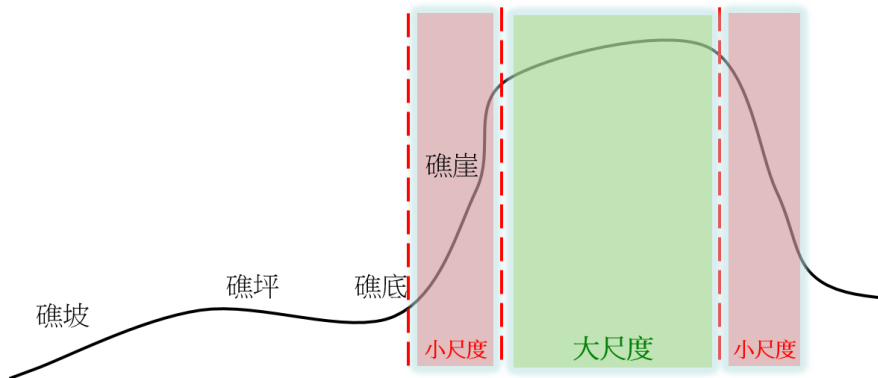


圖 3 海底地形剖面分類示意圖

圖 4 為本研究所採用地形分類流程，首先利用 B-BPI 值找出不屬於塊礁之低地，以 B-BPI 值不大於 0 之網格分類為礁坪。剩餘網格以 F-BPI 值大於 0 將塊礁周圍頂部偵測出，並分類為礁崖。其餘未分類網格最終根據地形面所計算坡度值分類，以坡度值大於 10 度認定為塊礁周圍較低部分之礁底，否則視為坡度緩和的地形起伏礁坡。

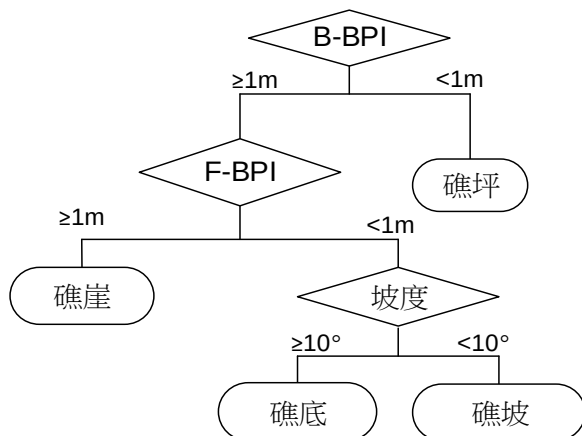


圖 4 本研究採用地形分類流程

4. 成果與討論

本章將就實驗成果驗證資料說明與成果檢核分述如下。驗證資料包含資料產製方式及條件；成果檢核包含量化之成果精度以及誤差探討。

4.1 驗證資料

本研究選取 1 幅 1/5000 圖幅範圍作為塊礁偵測方法檢核，其塊礁輪廓乃根據水下 DEM 以人工數化方式圈選後平滑化而得，並將面積小於 100m²

者移除。該圖幅中數化塊礁共 105 個，面積總和約為 618133m²。圖幅內水下 DEM 高程以灰階展示如圖 5(上)，白色區塊即為塊礁所在，對應手繪塊礁圖如圖 5(下)。

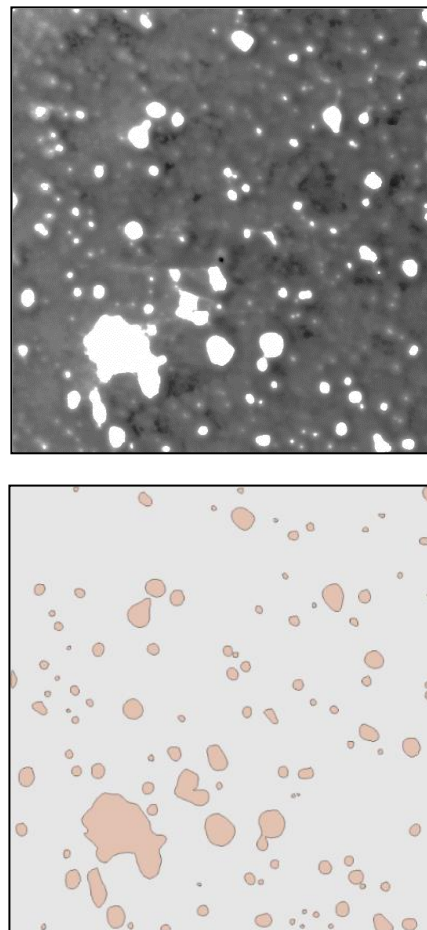


圖 5 驗證區域水下 DEM 及其手繪塊礁圖

4.2 成果檢核

本研究將海底地形依 BPI 及坡度條件將水下

DEM 分為礁崖、礁底、礁坪與礁坡四類，而其中礁崖與礁底兩類均屬於塊礁之外圍部分，故將分類後 DEM 以二元影像方式呈現，並且令礁崖、礁底兩類像元值為 1，其餘為 0。由於部分塊礁面積較大，在二元影像中塊礁接近中心處可能未被分類為塊礁而呈空心狀，故分類後之二元影像需再以形態學運算子之填滿(filling)方式處理以獲得完整塊礁(如圖 6)。最終將填滿後塊礁轉換為向量後即為本研究所偵測塊礁。

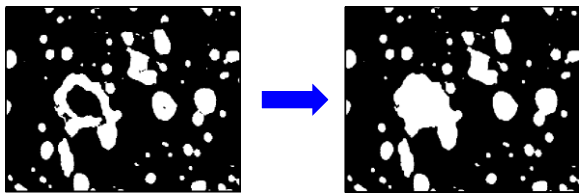


圖 6 塊礁區域填滿處理範例

以手繪塊礁作為檢核，分別求得由不同尺度 BPI 組合之誤授(commision)與漏授(omission)面積如表 1 及表 2。由表 1 中塊礁之誤授面積可歸納出，B-BPI 尺度大、F-BPI 尺度小時具有較少誤授面積，且於 BPI(600, 50)，即大、小尺度 BPI 分別為 600m、50m 之組合時為最佳；由表 2 所呈現漏授面積均明顯小於誤授面積，同樣以 B-BPI 尺度大、F-BPI 尺度小時成果較佳，且於 B-BPI 尺度為 600m 時成果提升效果更為顯著。

表 1 不同 BPI 組合偵測塊礁誤授面積(m²)

scale factor		B-BPI		
		150	300	600
F-BPI	50	627257	569825	529666
	75	818428	674911	610086
	100	952151	745695	660145

表 2 不同 BPI 組合偵測塊礁漏授面積(m²)

scale factor		B-BPI		
		150	300	600
F-BPI	50	92580	83541	2904
	75	67854	10390	2761
	100	20145	10540	2886

9 組 BPI 組合分類之整體精度(overall accuracy)均達 90%以上，並以 BPI(600, 50)之 92.61%最佳；而各組之 KAPPA 分類精度指標雖然亦是以 BPI(600, 50)最佳，但其精度值僅 0.66。表 3 呈現 BPI(600, 50)之混淆矩陣(confusion matrix)，顯示出分類精度主要受誤授面積過多影響，其誤授誤差(commission error)與漏授誤差(omission error)分別為 46%與 0.47%。

表 3 以 BPI(600, 50)偵測塊礁之混淆矩陣(m²)

		人工數化	
		True	False
分類	Positive	615230	529666
成果	Negative	2904	6058840

比對手繪與 BPI(600, 50)所偵測之塊礁，兩者套疊如圖 7 所示。偵測塊礁總數為 209 塊，若以兩者重疊定義為偵測出對應之同一塊礁，則無漏授塊礁；誤授塊礁共 107 塊，分佈如圖 8 所示。其中大部分為高差小於 6m 之塊礁，表示若高差較小時可能因水下 DEM 呈現灰度值差異較不顯著，容易造成手繪時疏漏。

 手繪塊礁
 BPI (600, 50)

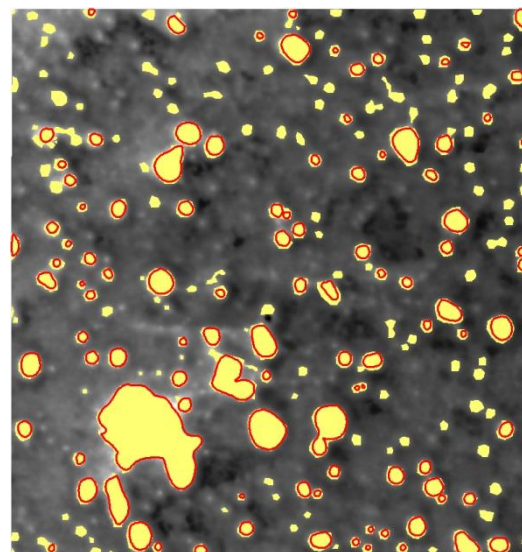


圖 7 手繪與 BPI(600, 50)偵測塊礁套疊成果

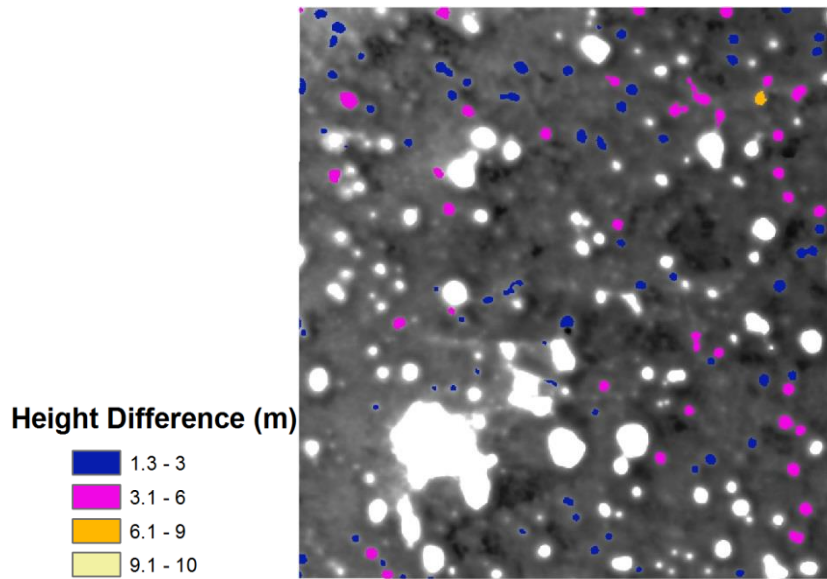


圖 8 誤授塊礁分佈圖

5. 結論與建議

本研究使用測深光達施測獲得之海底地形數據繪製珊瑚塊礁分佈圖，藉由不同尺度地形指標 BPI 以及坡度為依據，以地形分類方式進行塊礁萃取。以研究區 DEM 為底圖人工數化塊礁分佈圖作為成果檢核，整體分類精度為 92.61%，而受較多誤授塊礁面積之影響，KAPPA 指標僅 0.66。經比對後誤授塊礁多為高差較小而造成人工數化時將之忽略，而本研究方法則被偵測出。未來於繪製方法上可將塊礁條件明確定義，獲得符合期望之成果。

參考文獻

- Brock, J. C., C. W. Wright, I. B. Kuffner, R. Hernandez, and P. Thompson, 2006. Airborne lidar sensing of massive stony coral colonies on patch reefs in the northern Florida reef tract. *Remote Sensing of Environment*, 104(1):31-42.
- Cochran-Marquez, S.A., 2005, Moloka'i benthic habitat mapping, USGS Open-File Report: 2005-1070.
- Cochran-Marquez, S.A., Gibbs A.E., Logan J.B., 2006, Geologic resource evaluation of Pu'uho'ua O Honaunau National Historical Park, Hawai'i, Part II: Benthic habitat mapping, USGS Scientific Investigations Report: 2006-5258.
- Erdey-Heydorn, M. D., 2008. An ArcGIS seabed characterization toolbox developed for investigating benthic habitats, *Marine Geodesy*, 31(4): 318-358.
- Finkl, C. W., L. Benedet, and J. L. Andrews, 2005. Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry, *Journal of Coastal Research*, 21(3): 501-514.
- Iampietro, P., and Kvitek R., 2002, Quantitative seafloor habitat classification using GIS terrain analysis: Effects of data density, resolution, and scale, *Proceedings of the 22nd Annual ESRI User Conference*, San Diego, CA.
- Isaksson, A., 2009, Coastal Survey Studio Mark II Manual Version 2.X, Airborne Hydrography AB.
- LaRocque, P. E., J. R. Banic, and A. G. Cunningham, 2004. Design description and field testing of the SHOALS-1000T airborne bathymeter, SPIE conference, Orlando Florida, April 13 -15, 2004.
- Lundblad, E., Wright D.J., Miller J., Larkin E.M., Rinehart R., Naar D.F., Donahue B.T., Anderson S.M., Battista T., 2006, A benthic terrain classification scheme for American Samoa, *Marine Geodesy*, (29) 89-111.
- Shih, P.T.Y., Dushan Arumugam, and Shiahn-Wern Shyue, 2011. Bathymetric Lidar Survey of Penghu Islands and Dongsha Atoll, *Sea Technology Magazine*, 2011(Nov):42-45.
- Weiss, A.D. 2001, Topographic position and landforms analysis, *Proceedings of the 21st Annual ESRI User Conference*, San Diego, CA.

- Wilson, M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J., 2007, Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope, *Marine Geodesy*, (30) 3-35.
- Wedding, L. M., A. M. Friedlander, M. McGranaghan, R. S. Yost, and M. E. Monaco, (2008). Using bathymetric lidar to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii. *Remote Sensing of Environment*, 112(11):4159-4165.

Coral Patch Mapping with Bathymetric Lidar Data

Wei-Tsun Lin ¹ Tian-Yuan Shih ^{2*} Shang-Ju Hou ³ Jie-Chung Chen ⁴

ABSTRACT

Bathymetric Lidar utilizes green laser and scanning mechanism to derive the water depth and substrate information. It has been proven to be effective for mapping shallow water and coral reef area due to the airborne manner. In this study, terrain analysis is performed with data collected in an airborne bathymetric Lidar mission for mapping coral patches. Classification with features such as bathymetric position index (BPI) and slope are explored for Dongsha atoll. The classification is validated with manually digitized coral patches based on human interpretation. The applied scale factors of BPI with 600m and 50m reach best result, which is 92.61% for overall accuracy and 66.01% for the KAPPA coefficient.

Keywords: Bathymetric position index, Seafloor terrain, Classification, Slope

¹ PhD student, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

² Professor, Disaster Prevention & Water Environment Research Center,
National Chiao Tung University

³ Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

⁴ Section Chief, Department of Land Administration, Ministry of Interior

*Corresponding Author, Phone: 886-3-5712121 ext. 54940, E-mail: tyshih@mail.nctu.edu.tw

Received Date: Apr. 28, 2014

Revised Date: Spr. 26, 2014

Accepted Date: Jan. 12, 2015

中文稿件投稿注意事項（英文稿件請參閱下頁 Author Guidelines）

本學刊定期出版攝影測量及遙感探測領域之學術論著、技術短文及應用性報導。所收錄之稿件皆須通過本編輯委員會安排之專家學者審查程序，並由通訊作者簽署著作權讓渡書。作者可自行聲明文稿屬學術論著、技術短文或應用性報導之類別，但本編輯委員會將依據審查委員意見決定收錄文稿之類別。本學刊不接受已經刊載過之文稿，於研討會發表過之論文，經適當增補其內容者為例外。

投稿之電子郵件信箱地址為 jprsubmit@gmail.com，請以電子郵件附件方式寄送稿件之 WORD 檔及 PDF 檔各一份。為便利編審作業，請於稿件 PDF 檔中移除作者之相關資料（如姓名、服務機關、電話、及電子郵件信箱等）。稿件撰寫要點如下：

1. 頁面：採用 A4 規格頁面。
2. 字體：(1) 中文均以**新細明體**橫式打字；(2) 英文均以 **Times New Roman** 字體橫式打字。
3. 單位：內文、圖表及符號中之度量單位皆採用 SI 公制單位。
4. 首頁：首頁應含內容依次為「題目、作者姓名、摘要、關鍵詞、及作者服務機關及職稱（置於頁尾）」，接續文稿內文。
5. 末頁：末頁應含內容與首頁相同，但皆以英文書寫。
6. 題目：論文題目宜簡明，字體大小為 20，英文題目每字第一位字母以大寫字體打印。
7. 作者：作者姓名列於題目之下方，字體大小為 14，其服務機關及職稱以^{1,2,...}上標編號註記於頁尾，字體大小為 12。
8. 摘要：摘要字數以 250 字為限，字體大小為 12。
9. 關鍵詞：列出三至五個關鍵詞，字體大小為 12。
10. 章節及標題：(1) 章節標題置中，編號一律為阿拉伯數字，如 1, 2, ...，標題字體大小為 18；(2) 小節標題靠左，編號一律為 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2.....，字體大小為 14。
11. 內文：內文之長度(含圖表)以不超過 25 頁為原則，各段落第一行應縮排，字體大小為 12。
12. 數學式：所有數學式均須標式號於圓括弧內，數學式內所有符號須於符號第一次出現時，應於數學式下方逐一加以定義。
13. 圖及影像：(1) 圖及影像均須數位化置於文稿中適當位置；(2) 所有圖及影像下方須附圖流水編號及說明；(3) 本刊接受彩色圖及影像，但紙版印刷一律採灰階印刷。
14. 表格：(1) 表格均須數位化置於文稿中適當位置；(2) 所有表格上方須附表流水編號及說明；(3) 本刊接受彩色表格，但紙版印刷一律採灰階印刷。
15. 參考文獻：(1) 參考文獻應列於文末，文稿中未直接引用者不得列入；(2) 先排列中文參考文獻，再排列英文參考文獻，其他文字參考文獻列於英文參考文獻之後；(3) 中文參考文獻以第一作者姓名筆劃順序排列，英文參考文獻以第一作者之姓依英文字母順序排列。當作者相同時，依發表年代排列，作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 順序。第一作者姓名相同時，先排列單一作者之參考文獻，其次為多作者文獻；(4) 參考文獻之格式如下列：
 - 期刊論文：作者姓名，年代。文章標題，期刊名稱，卷數(期數)：起始頁數—結束頁數。
 - 書籍：作者姓名，年代。書名，出版者，出版地。
 - 論文集：作者姓名，年代。篇名，論文集名稱，發表地點，卷(期)：起始頁數—結束頁數。
16. 參考文獻引用：(1) 作者為一人時，以作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如李良輝(1991)或(李良輝, 1991)、Jones (1979)或(Jones, 1979)；(2) 作者為二人時，以二作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如施學延及陳良健(2011) 或(施學延及陳良健, 2011)、Jones & Smith (1979)或(Jones & Smith, 1979)；(3) 作者為多人時，以第一作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)，之後加「等」(中文文獻)或「et al.」(英文文獻)及發表年代，如(郭寶章等, 1976)或郭寶章等(1976)、Jones et al. (1979)或(Jones et al., 1979)；(4) 作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 引用，如 Jones & Smith (1979a)、Jones & Smith (1979b)。

Author Guidelines

The Journal of Photogrammetry and Remote Sensing periodically publishes academic articles, technical short papers and application reports addressing topics in photogrammetry and remote sensing. Acceptance of submitted manuscripts for publication is based on a peer-reviewing process arranged by the editorial board. A manuscript will not be formally accepted until a copyright agreement is received. Although authors can indicate their submitted manuscripts belonging to one of the categories of academic articles, technical short papers or application reports, the editorial board will make the final decision based on the suggestions of reviewers. This journal does not accept any paper has ever been published, but a paper only published in conference proceedings and revised appropriately is an exception.

The E-mail address for manuscript submission is jprssubmit@gmail.com. Please send your manuscript in both WORD and PDF formats via e-mail attachments. In the WORD file, please provide author information. However, for blind reviewing, please eliminate author information in the PDF file. Instructions for authors to prepare a manuscript are as follows:

1. Typing format: Manuscripts should be typed single-column and double-space on A4 page size using font-type of 12pt **Times New Roman**. The pages should be numbered.
2. Units: Manuscripts must use SI (Metric) units in text, figures, or tables.
3. Cover page: The cover page should contain manuscript title, author names, abstract, key words, and author affiliations.
4. End page: The end page contains the same information as the cover page, but in Chinese.
5. Title: The title of the manuscripts should be concise and informative. Please use font size of 20pt and capitalize the initial letter of each word in the title.
6. Authors: Authors names (using font size of 14pt) are listed below the title, affiliations (using font size of 12pt) are listed at the end of the first page marked with ^{1, 2, ...}.
7. Abstract: The abstract should be shorter than 250 words and typed using font size of 12pt..
8. Keywords: Keywords (no more than 5 words) should be given and placed below the abstract.
9. Sections and Sub-sections: Section heading (using font size of 18pt) should be centered and numbered in 1, 2... etc. Sub-sections (using font size of 14pt) are justified to the left in 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2...etc.
10. Paper length: Published papers are limited to 25 pages.
11. Equations: Type formulae and equations clearly in black and numbered in curved brackets. All symbols in equations should be clearly defined when they firstly appear in the manuscripts.
12. Figures and Tables: Figures and tables are numbered and described in short. When papers are accepted, original figures, tables, and photographs are expected for reproduction. Color figures and tables are acceptable in digital version, but they will be printed in gray levels in hard copies.
13. References: Only works cited in the text will be included. References should be cited in the text by giving the last name of the author(s) and the year of publication of the reference, such as Lee and Huang (1979) or (Lee and Huang, 1979). With three or more names use the form “Huang *et al.* (1995) or (Huang *et al.*, 1995)” in the text. When two or more references have the same text identification, please distinguish them by appending “a”, “b”, etc., to the year of publication. References should include the complete title(s), the number of the volume and the page(s) of the information cited. References should be listed in alphabetical order, according to the last name of the first author, at the end of the paper.

Volume 19 No. 2
December 2014

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

(Special Issue on Airborne Full-Waveform LiDAR)

CONTENTS

Introduction to the Special Issue

Airborne Full-Waveform LiDAR
(Yi-Hsing Tseng)

Regular Issue Papers

Waveform Analysis and Landcover Classification Using Airborne Full-Waveform Lidar Data (Yu-Shan Li, Tee-Ann Teo)	75
Reliability Assessment of Gaussian Estimates Derived from Small-footprint Waveform Lidar (Yu-Ching Lin, Jon P. Mills, Chun-Lin Lin)	93
Estimation of Forest Canopy Height Model and Leaf Area Index Using Airborne LiDAR data (Li-Ping Lin, Cheng-Kai Wang, Yi-Hsing Tseng, Hone-Jay Chu)	107
Waveform Feature Analysis and Classification of Airborne LiDAR Data (Yu-Chia Hung, Cheng-Kai Wang, Yi-Hsing Tseng, Hone-Jay Chu).....	131
Coral Patch Mapping with Bathymetric Lidar Data (Wei-Tsun Lin, Tian-Yuan Shih, Shang-Ju Hou, Jie-Chung Chen).....	153

航測及遙測學刊

(全波形空載光達特刊)

目 錄

特刊引言

全波形空載光達
(曾義星)

學術論著

應用空載全波形光達資料於波形分析與地物分類
(林郁珊、張智安).....75

空載波形光達資料之高斯估值可靠度評估
(林玉菁、Jon P. Mills、林俊霖).....93

應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數
(林莉萍、王正楷、曾義星、朱宏杰).....107

全波形空載光達資料之波形特徵分析與分類
(洪宇佳、王正楷、曾義星、朱宏杰).....131

以測深光達數據產製東沙塊礁分佈圖
(林暉尊、史天元、侯尚儒、陳杰宗).....153