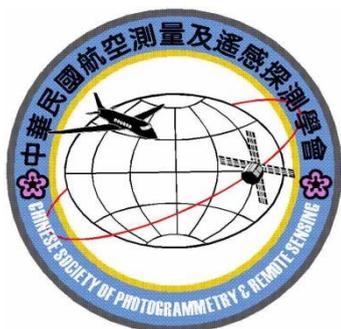


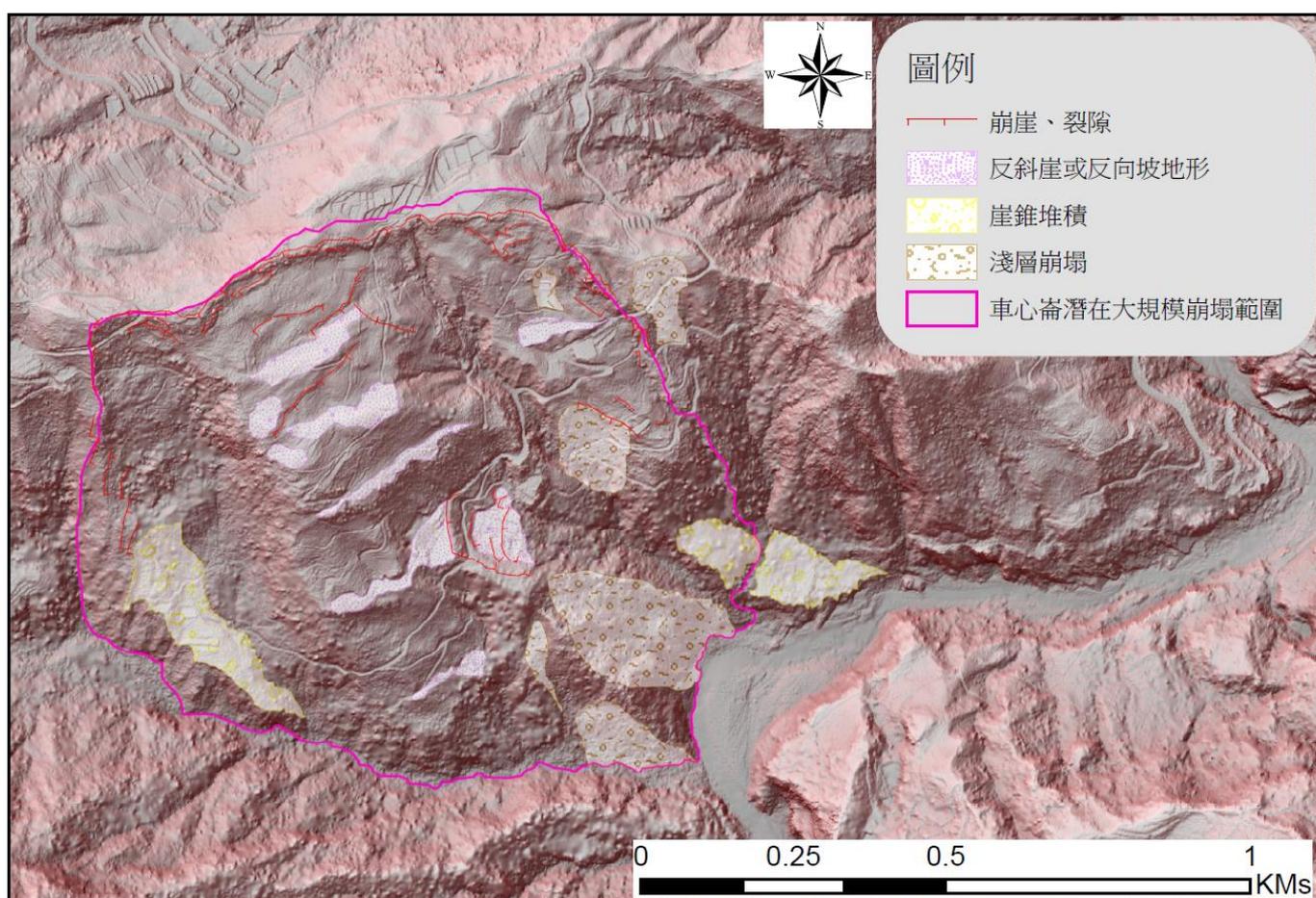
第二十卷第四期
中華民國一〇五年六月

ISSN 1021-8661
DOI: 10.6574/JPRS



航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 20 No.4

June

2016

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：史天元

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

PUBLISHER: Peter Tian-Yuan Shih

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

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

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

編輯委員(依中文姓氏筆劃排列)

王素芬 (彰化師大)

王聖鐸 (師範大學)

江凱偉 (成功大學)

何宗儒 (海洋大學)

林昭宏 (成功大學)

邱式鴻 (政治大學)

林老生 (政治大學)

林唐煌 (中央大學)

周天穎 (逢甲大學)

洪榮宏 (成功大學)

徐百輝 (臺灣大學)

陳朝圳 (屏東科大)

張中白 (中央大學)

黃金聰 (臺北大學)

曾義星 (成功大學)

詹進發 (政治大學)

楊明德 (中興大學)

蔡富安 (中央大學)

蔡榮得 (中興大學)

EDITORIAL BOARD

S. F. Wang (National Changhua University of Education)

S. Wang (National Taiwan Normal University)

K. W. Chiang (National Cheng Kung University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

C. H. Lin (National Cheng Kung University)

S. H. Chio (National Chengchi University)

L. S. Lin (National Chengchi University)

T. H. Lin (National Central University)

T. Y. Chou (Feng Chia University)

J. H. Hong (National Cheng Kung University)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

C. T. Chen (National Pingtung University of Science and Technology)

C. P. Chang (National Central University)

J. T. Hwang (National Taipei University)

Y. H. Tseng (National Cheng Kung University)

J. F. Jan (National Chengchi University)

M. D. Yang (National Chung Hsing University)

F. Tsai (National Central University)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

封面照片說明 About the Cover

本圖為雲林車心崙地區光達數值地形資料，分別經坡度、地形陰影及透空度分析等地形計測方法所得之結果，並將其視覺化套疊，其中紅色色階表示地形坡度變化，灰階則分別表示透空度以及地形陰影；坡度與透空度有助於細微地形特徵判釋，加上地形陰影則增加地形立體刺覺化的效果，此方法除了可避免地形受陰影覆蓋影響及與光源平行的特徵容易被忽略等缺點，針對於崩崖、裂隙、反斜崖或反向坡地形等地形細微特徵進行判釋分析。

光達技術應用於人工林之經營與監測

魏浚紘¹ 陳朝圳^{2*}

本研究利用地面光達探討如何以非破壞性方式，調查及監測森林樣區之立木三度空間資訊，及如何應用光達系統所量測之資訊應用於人工林經營。以自動化方式獲取疏伐作業所需之林分性態值資料，包括樹高、胸高直徑、樹冠高、立木位置圖等資料，並評估地面光達於人工林測計之可行性。結果顯示，透過地面光達系統確實可正確獲得立木資訊，對於永久監測樣區而言，以光達系統之不同拍攝位置，可消除掃描的遮蔽效應，藉由高密度的點雲資料，可直接測量立木樹高與不同樹幹位置之直徑，而單位體積之點雲資料量不同，會影響立木直徑推估之結果。而地面光達所獲得之樹高與樹徑之3D資料，可進行非破壞性之區分材積估算，並建立立木材積式。光達點雲資料之空間分布，所推估之樹冠高程模型，以樹冠高度之灰階值統計，藉由二值法所訂之閾值，可將林木與地表背景分離，獲取林冠孔隙之平面及垂直資料，此一林冠孔隙資訊可供為孔隙動態監測研究。地面光達所建立之林木測計、立木競爭指標、林冠孔隙及與疏伐監測資訊，可更準確的量化疏伐效益及增加林木狀態變化之資訊，對於人工林經營可提高森林資源調查效率，及擴充森林資源監測資訊。

關鍵詞：森林經營、疏伐作業、地面光達、三維雷射掃描、林分性態

1. 前言

全球利用天然林生產木材已日益減少，木材生產朝向以人工林為主，而集約的人工林經營必須以撫育技術與疏伐作業，來達成林木生產的目標。傳統疏伐作業，係根據人工林之經營目標，進行林分密度管理，以達成疏伐效益，並透過林分之定性與定量兩種方式，訂定疏伐木選定之位置與數量的作業準則，篩選出符合生產目的的留存木，但現地作業時，常因疏伐木之選定無法即時量化，因此很難控制疏伐強度，故僅能以單位面積株數、胸高斷面積或蓄積量為標準，來表示疏伐強度，而疏伐效益之監測，則須由疏伐試驗，以長時間定期的樣區資料收集分析，才能研判不同疏伐強度對林木生長的影响(Emmingham and Elwood, 2010)。

而如何準確有效率的收集疏伐監測樣區之立木生長資料，為疏伐效益評估的基礎，傳統森林測計必須利用直徑尺、測高器，進行立木生長資料的

測計(Measurement)，而準確的立木材積推估，則必須藉由伐倒標準樣木，以樹幹解析(Stem analysis)取得林木的材積及生長量，此種傳統的森林測計方法，必須進行破壞性的立木伐倒，費時費力，或因測計儀器本身之量測精度，其量測誤差高於林木短時間內的生長量，因此無法準確的顯示林木疏伐的生長效益。近年來由於光達系統(Light Detection and Ranging, LiDAR)的發展，其對於單株林木的測計，及大面積森林蓄積量調查，帶來新的量測模式(Maltamo *et al.*, 2004; 魏浚紘、等, 2010)。地面光達在森林測計上，可具有較高精度的單木測計準確度(Omasa *et al.*, 2002; Urano and Omasa, 2003)，亦可用於樹冠動態變化監測(Hosoi and Omasa, 2006; 魏浚紘、等, 2012)與立木位置及林木競爭(魏浚紘、等, 2013; Sanz *et al.*, 2013)等。地面光達高精度的測量技術亦用於樹幹測量，透過實際測量的結果與地面光達所萃取到的資料相較之下，其結果與均方根誤差範圍約為 1.5 cm 至 3.3 cm(Hopkinson *et al.*,

¹ 國立屏東科技大學生物資源研究所 博士

² 國立屏東科技大學森林系 教授

* 通訊作者, E-mail: cct@gisfore.npust.edu.tw

收到日期：民國 104 年 02 月 09 日

修改日期：民國 105 年 01 月 29 日

接受日期：民國 105 年 03 月 23 日

2004)。除上述應用外，國外已發展出應用光達點雲資料，進行森林生態系永續經營的應用，如應用地面光達永久記載林木結構，透過其參數測量森林立木結構(Hopkinson *et al.*, 2004)；單木葉子面積密度的推估(Hosoi and Omasa, 2007)；測量林木冠層以及孔隙分布(Danson *et al.*, 2007)；利用地面光達，重建樹幹與枝條(Pfeifer *et al.*, 2004；Cheng *et al.*, 2007；Côté *et al.*, 2009)等。

因地面光達系統可獲得細緻的地物三維資訊，本研究試圖利用三維雷射掃描系統(三維雷射掃描儀 3D Laser Scanner)，亦稱光達系統，配合傳統地面調查資料，發展自動化處理光達點雲資料技術；以地面光達進行單木或林分的測計調查，探討其調查精度是否可準確的掌握疏伐前後之林木生長資訊；並討論如何以光達系統應用於人工林疏伐監測資訊的取得，提升疏伐作業效益之量化評估效能。

2. 材料與方法

2.1 研究區位置

針葉樹試驗樣區位於屏東林管處荖濃溪事業區六龜工作站，小關山林道之紅檜(*Chamaecyparis formosensis* Matsum)人工林疏伐樣區。闊葉林試驗樣區，位於屏東老埤農場之臺糖平地造林地之大葉桃花心木(*Swietenia macrophylla* King)、白楊(*Populus davidiana* Dode)、白雞油(*Fraxinus griffithii* C. B. Clarke)、欒(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)人工純林及大葉桃花心木與台灣欒樹(*Koelreuteria henryi* Dummer)人工混淆林，如圖 1 所示。

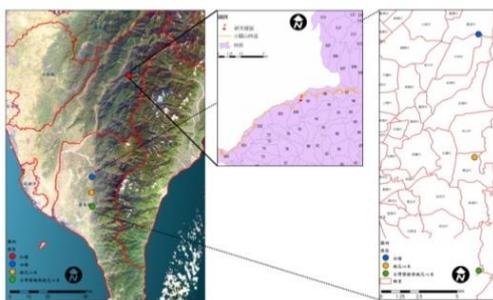


圖 1 研究區位置圖

2.2 研究材料

2.2.1 地面光達點雲資料

本研究以高精度、高解析度之 Trimble GS 200 系列地面光達為資料收集工具，以地面控制點進行林木光達點雲的掃描。每個樣區至少設置 6 個均勻分布在掃描範圍內的共軛點，以供點雲資料的接合，並以均方根誤差(Root Mean Squared Error, RMSE)控制林木位置誤差在 5 cm 以下。

由於 CCD 所拍攝原始影像之點雲染色為二維資料，因此必須藉由共線式如式(1)、式(2)轉換成三維座標(趙鍵哲、彭念豪，2005)，計算方式係以點雲之(X, Y, Z)為內外方位參數，將點雲對應於影像上形成點雲的染色；重建完成的彩色三維點雲資料，可供為量測物體的剖面測量、體積與高度測量等。

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + t \times \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ 0 \end{bmatrix} + z \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{cases} X_L = p + z \times a \\ Y_L = q + z \times b \\ Z_L = z \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

其中， X_0, Y_0, Z_0 與 X_L, Y_L, Z_L 為空間直線上兩點， dX, dY, dZ 為方向向量， a, b, p, q 為三維直線參數， t, z 為三維直線上之變數。

2.2.2 試驗樹種樣區概況

針葉樹種以六龜地區小關山林道之紅檜疏伐人工林為對象，地面光達之掃描樣區為 20 m×30 m，共選定兩個樣區，兩樣區相鄰約 10 m，此處均有撫育作業，地表適合架設地面光達，共進行三次掃描分別為疏伐前(2009 年)、疏伐後當年(2009 年)、疏伐後四年(2013 年)。

闊葉樹種以大葉桃花心木、白雞油、欒、白楊與台灣欒樹人工林為對象，大葉桃花心木試驗地之栽植距離為 2.2 m×3.3 m，其試驗面積為 0.825 ha，

合計 77 株林木，分別於 2010 年、2011 年與 2013 年三個不同時期進行地面光達掃瞄。白楊試驗樣區其試驗樣區面積為 0.5 ha，每 3 週進行林木樹高、胸徑、地徑與存活率調查，地面光達共掃瞄兩次，間隔時間為 3 週。闊葉樹種混植之試驗研究樣區，其栽植方式為四行，分別為大葉大葉桃花心木兩行內側(15 株)，台灣欒樹兩行外側(14 株，部分林木有雙岔或三岔)，樣區大小為 31 m×20 m 栽植距離為 4.8 m×4.9 m，於 2010 年與 2013 年進行地面光達掃瞄。

2.3 研究方法

地面樣木之胸徑量測真值係以有效數字一位之直徑尺，於林木 1.3 m 位置進行測量，樹高則以有效數字一位之測高器，進行樹高量測，樹高為樹頂至地表之高度。

2.3.1 光達點雲資料推估胸徑之準確性評估

將立木點雲資料，以 0.1 m×0.1 m 之運算視窗尋範圍內之高程最低點的點雲，視為地面點，以地面高度為基準(0 m)，向上延伸 1.3 m 切取光達點雲厚度 10 cm 的橫切面，供為量測立木之胸徑，為探討如何以光達點雲資料量測胸徑，本研究提出最大外切圓擬合法與鄰近點相連法之兩種電腦自動化處理方法，透過兩種自動擬合演算法與直接測量法，進行胸高直徑量測，並以 F 檢定探討地面光達量測林木胸徑與實地量測胸徑之差異性，以評估地面光達量測林木胸徑之準確度。

2.3.1.1 直接測量法

利用上述所切取離地 1.3 m 處之光達點雲橫切面，並以輪尺測計原理，以目視方式直接測量圓盤直徑。

2.3.1.2 以點雲資料利用演算法自動量測立木胸徑

2.3.1.2.1 最大外切圓擬合法

已知的各項座標值(X, Y)，求空間中未知三點 a1、a2、a3 座標，以線性代數，分離未知點及已知點，再用最小平方迴歸法，求出擬合 a1、a2、a3，擬合圓中心後，再求各點半徑最大值，即可求出最大外切圓。本研究透過上述概念修正擬合方程式，以 Taubin (1991)所發展出之演算法，進行點雲資料之最大外切圓，擬合林木圓盤周緣求解周長，並以圓周長公式推估直徑如式(3)。

2.3.1.2.2 鄰近點相連法

以圓盤上任一點 a，進行環域分析(Buffer)，以不斷擴張方式，當環域範圍碰到第一點 b，即連接 ab 兩點，接續進行 b 點環域分析，以不可逆向連接方式，尋找下一個更接近之點位，直到封閉為止。透過封閉線段長(周長)以圓周長公式推估直徑如式(3)。

$$R = P/\pi \dots\dots\dots(3)$$

其中，P 為周長， π 、R 各為圓周率及直徑。

由於在測量立木胸徑，影響最大的變數，為點雲密度與點雲分布形式，故本研究以 30 株點雲密度最高，且點雲平均分布之點雲比例 100% 樣木，並將胸徑範圍分成 0-10 cm 與 11-20 cm 兩個區間，分別進行變異數同質性檢定，檢定變異數是否相同，若相同則以單因子變異數分析(One-way ANOVA)與 Tukey 法，進行事後檢定，若檢定後變異數不相等，則以 Brown-Forsythe 未假設變異數相同進行分析，後續檢定則以 Dunnett's T3 檢定，探討三種不同演算法，對立木胸徑量測準確度的差異性。另為探討地面光達掃瞄之遮蔽效應，對立木胸徑量測的影響，以遮蔽概念分別將點雲密度依比例減少 50% 以及減少 75% 後，再進行立木胸徑的量測，並檢測其對胸徑擬合量測的準確度。

2.3.2 應用地面光達測計不同形態人工林的立木胸徑與樹高

以紅檜人工純林、大葉桃花心木人工純林及白楊人工純林及台灣欒樹與大葉桃花心木人工混濘林，四種不同人工林狀態為研究試驗樣區，以現地量測及利用光達掃瞄樣區之立木樹高、胸徑，以相關分析探討實測值與光達測量值兩者間差異性，討論不同樹種對於地面光達測計立木胸徑、樹高時所造成的影響。

2.3.3 以光達掃瞄資料量測人工林之立木材積

於針葉樹人工林樣區中選取 11 株紅檜標準木，在闊葉樹之大葉桃花心木、白雞油、櫟人工林各選取 10 株標準木，先以地面光達進行立木掃瞄，以非破壞性量測法，及利用破壞性之伐倒方式，由 1.3 m 為基準，每 2 m 為單位分段量測圓盤直徑與樹高，並以區分求積法(Sectional measurement)如式(4)與式(5)，獲得立木地面光達量測材積與伐倒木之實測材積(楊榮啟、林文亮，2003)，以平均

偏差 = $\frac{\sum |v_i - \bar{v}|}{\sum \bar{v}_i}$ ，評估地面光達對於立木材積量測之可行性。

$$V = (g_i + g_{i+1}) / 2 \times L_i \dots\dots\dots(4)$$

$$V_i = 1/3 \times g_n \times L_n \dots\dots\dots(5)$$

其中，V 為段木材積；V_i 為梢端材積；g_i 為第 i 段之斷面積；g_{i+1} 為第 i+1 段之斷面積；L_i 為第 i 之段長度；g_n 為梢端之斷面積；L_n 為梢端材積之長度。

2.3.4 以光達點雲資料自動化偵測林冠孔隙之空間分布與動態變化

本研究將林冠孔隙定義為調查範圍內林冠高程模型(Canopy Height Model, CHM)，CHM 在分析

前利用地理圖層將已知為非林地之位置去除；以疏伐前後地面光達所產生之 CHM，藉由影像處理並依照二值法(Fu and Mu, 1981; Sahoo et al., 1988; Horng et al., 2002)定義其門檻值，透過式(6)進行門檻值快速區分為兩類型。

$$h[f(x, y)] = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) < T \\ 0 & \text{if } f(x, y) \geq T \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

本研究以紅檜人工林疏伐樣區(40 m × 50 m)為試驗材料，探討疏伐前、疏伐後當年與疏伐後四年，地面光達所量測之林冠孔隙分布與現場調查之孔隙位置進行比對，以檢核孔隙量測之準確度。

2.3.5 應用地面光達進行疏伐作業模擬與碳吸存推估

本研究以 Bailey (1974)之最大似法與牛頓疊代法，求解 Weibull 機率密度函數(Weibull Distribution)(式 8)，將地面光達所量測之胸徑代入，並設定最小胸徑(a)，求解 b、c 參數，瞭解林分狀態與疏伐時機。

$$f(x) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(x-a)}{b}\right]^c\right\} \dots\dots\dots(7)$$

$$\begin{aligned} D_n^+ &= \text{Max}_{1 \leq i \leq n} \{F_i - \hat{F}_i\} \\ D_n^- &= \text{Max}_{1 \leq i \leq n} \{F_{i-1} - \hat{F}_i\} \dots\dots\dots(8) \\ D_n &= \text{Max}\{D_n^+, D_n^-\} \end{aligned}$$

$$D_\alpha = \sqrt{\frac{-\ln\left(\frac{1}{2}\alpha\right)}{2n}} \dots\dots\dots(9)$$

其中，D_n：臨界值；α：顯著水準；n：林木株數。

疏伐前、疏伐後當年與疏伐後四年之胸徑資料，以 Weibull 三介量之機率密度函數，模擬疏伐前後之徑級分布狀態，以 Kolmogorov-Smirnov

檢定(K-S Test)檢核模擬效果。

以地面光達所建立的紅檜立木材積式，計算各疏伐階段的林分蓄積量，並以全株碳蓄積公式如式(10)，進行蓄積量與生物量之轉換，並以式(11)計算地上部碳蓄積量，進行碳蓄積空間分布圖繪製。以多期樣區掃描資料，可進行 CO₂ 蓄積量如式(12)與式(13)的推估，並依照林齡計算其 C、CO₂ 年吸存量的變化，如式(14)與式(15)。

$$C_{\text{plant}} = V_{\text{stem}} \times V_{\text{whole/stem}} \times \frac{W_0}{V_g} \times C_{\text{con}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{Above_}C_{\text{plant}} = V_{\text{stem}} \times \frac{W_0}{V_g} \times C_{\text{con}} \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{CO}_{2\text{plant}} = V_{\text{stem}} \times V_{\text{whole/stem}} \times \frac{W_0}{V_g} \times C_{\text{con}} \times (\text{CO}_2/\text{C}) \dots\dots(12)$$

$$\text{Above_CO}_{2\text{plant}} = V_{\text{stem}} \times \frac{W_0}{V_g} \times C_{\text{con}} \times (\text{CO}_2/\text{C}) \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{Above_}C_{\text{plant_year}} = [V_{\text{stem}} \times \frac{W_0}{V_g} \times C_{\text{con}}] / \text{years} \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{Above_CO}_{2\text{plant_year}} = \frac{[V_{\text{stem}} \times \frac{W_0}{V_g} \times C_{\text{con}} \times (\text{CO}_2/\text{C})]}{\text{years}} \dots\dots\dots(15)$$

其中，C_{plant}：單株 C 蓄積量，CO_{2plant}：單株 CO₂ 蓄積量，Above_C_{plant}：單株地上部 C 蓄積量，Above_CO_{2plant}：單株地上部 CO₂ 蓄積量，Above_C_{plant_year}：單株地上部 C 吸存量，Above_CO_{2plant_year}：單株地上部 CO₂ 吸存量，V_{stem}：幹材材積，V_{whole/stem}：全株材積與幹材材積轉換係數，W₀/V_g：重量與材積轉換係數，本研究依照馬子斌、等(1992)所建立之紅檜重量與材積轉換係數(0.333)，C_{con}：碳含量轉換係數，碳含量轉換係數則是參考林裕仁、等(2002)所建立係數(0.4864)，CO₂/C：二氧化碳與碳轉換係數，CO₂ 分子量為 44，C 分子量為 12，years：林齡（修改自 IPCC <http://www.ipcc.ch/index.html>）。

3. 結果與討論

3.1 以不同圓周擬合法探討地面光達對立木胸徑量測的準確性

利用 1.3 m 位置不同點雲密度(100%，50%，25%)資料，以直接測量法、最大外切圓擬合法及鄰近點相連法進行量測，並於現地利用直徑尺進行對應實測以供為地真資料，評估地面光達量測立木胸徑之準確度，其結果如表 1 所示。由表 1 可知，在兩種胸徑大小範圍之三種計算方法，對於無遮蔽圓盤(點雲比例 100%)之胸徑量測具有顯著差異(P<0.01)；對於圓盤僅有 50%點雲密度之胸徑量測，無顯著差異(P>0.05)；對於圓盤僅有 25%點雲密度之胸徑量測有顯著差異(P<0.01)。由於點雲比例 100%與 25%分別在兩組區間及三種方法間，對圓盤直徑量測具有顯著差異，故透過 Tukey 法進行測量測方法間的差異性檢定，結果顯示當點雲密度完整時，胸徑大小範圍 0-10 cm 及 11-20 cm 之實測值、直接測量法與最大外切圓擬合法三種量測方法無顯著差異，但與鄰近點相連法則呈現顯著性差異，顯示當點雲密度完整時鄰近點相連法，在任何胸徑大小其量測效果差；而當點雲密度降為 25%時，不同的胸徑大小範圍，其實測值與最大外切圓擬合法無顯著差異，而另外兩種量測方法則與實測法，呈現顯著性差異，顯示當點雲密度低時，以最大外切圓擬合法可正確的量測立木胸徑，以地面光達量測立木胸徑之三種量測方法與實測法之誤差絕對值如表 2 所示。由表 2 可知，點雲密度為 100%以及 50%時，以地面光達量測立木胸徑之三種量測方法的平均誤差絕對值均小於 3 cm，但當點雲密度降為 25%時，三種量測方法之平均誤差絕對值均大於 3 cm，顯示當點雲資料不足時，胸徑量測誤差將會提昇。

表 1 三種不同量測直徑方法之單因子變異數分析

	直徑 0-10 cm			直徑 11-20 cm		
	100%	50%	25%	100%	50%	25%
點雲比例						
直接測量法 (mean±SD)	7.81±1.82 ^a	7.17±2.05	4.30±0.97 ^b	12.96±2.51 ^{ab}	12.63±2.36	7.12±1.66 ^b
最大外切圓 擬合法 (mean±SD)	6.70±1.64 ^a	6.31±2.04	7.71±5.72 ^a	11.67±2.10 ^a	11.97±3.15	13.89±8.76 ^a
鄰近點相連 法 (mean±SD)	10.12±2.48 ^b	7.19±2.23	4.41±1.52 ^b	15.82±2.46 ^b	11.52±2.05	6.31±1.20 ^b
實測值 (mean±SD)	7.49±1.96 ^a	7.49±1.96	7.49±1.96 ^a	13.41±2.89 ^{ab}	13.41±2.89	13.41±2.89 ^a
變異數同性 質檢定	0.242	0.929	0.053	0.708	0.768	0.057
F 值	10.23	1.15	6.71	4.30	0.87	6.53
p 值	0.00*	0.34	0.00*	0.01*	0.47	0.00*

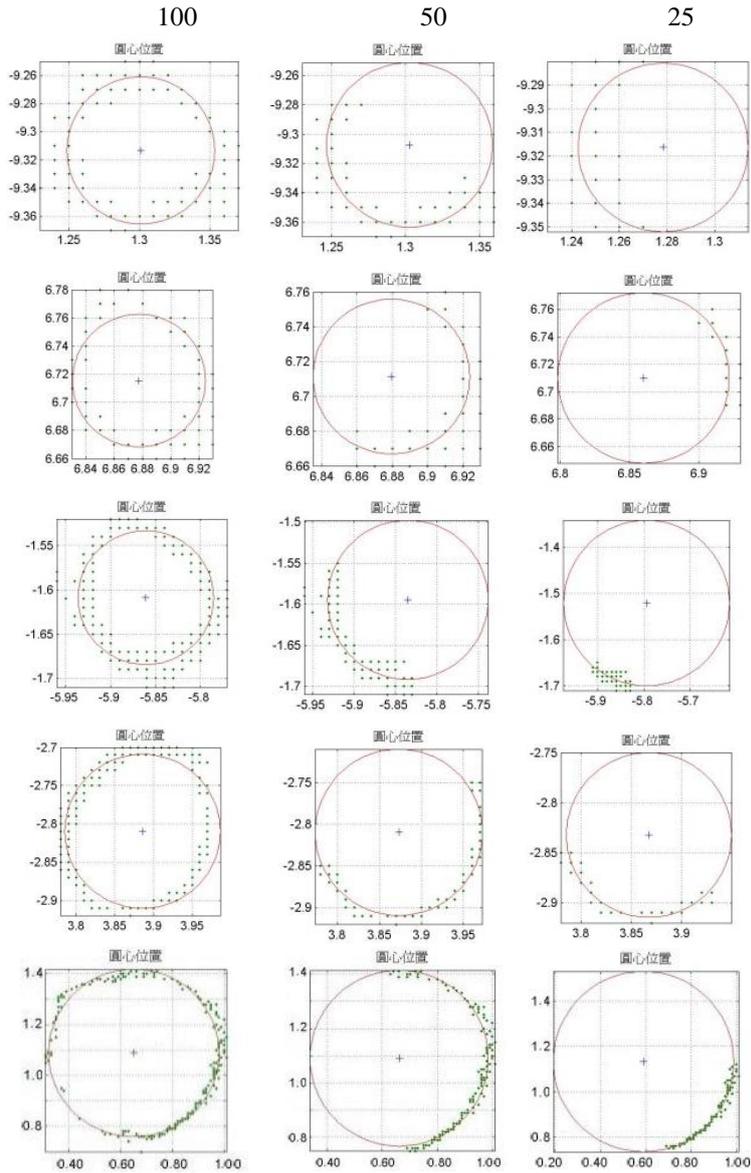
*英文字母不同者表示其間具有 P<0.01 之極顯著性差異

表 2 三種不同量測直徑方法之誤差絕對值

方法	點雲比例 100%			點雲比例 50%			點雲比例 25%		
	直接 測量 法	最大 外切 圓擬 合法	鄰近 點相 連法	直接 測量 法	最大 外切 圓擬 合法	鄰近 點相 連法	直接測量 法	最大 外切 圓擬 合法	鄰近點 相連法
最大誤差 絕對值(cm)	3.600	4.09	11.53	4.90	4.61	5.13	26.15	16.56	29.78
最小誤差 絕對值(cm)	0.000	0.16	0.28	0.20	0.03	0.13	0.10	0.24	0.13
平均誤差 絕對值(cm)	1.10	1.52	2.85	1.63	1.83	1.89	5.18	3.88	5.46

試驗結果顯示當點雲資料分布均勻且單位體積內點雲密度高時，地面光達量測立木胸徑，各種方法無顯著性差異，顯示高密度的點雲資料，無論使用何種量測方式均接近真值，其研究結果與 Bucksch *et al.*(2009)的試驗結果一致，所有有關地面光達對於立木胸徑測計準確度的影響(Watt and Donoghue, 2005; Moskal and Zheng, 2012)，皆認為地面光達掃描的遮蔽效應(Occlusion effect)，是造成立木胸徑量測準確度下降的主要因素，但對於不

同的立木圓周擬合方法，是否造成立木胸徑量測準確度的影響，其研究較少，本研究試驗發現最大外切圓擬合法量測時，當點雲密度完整其平均誤差絕對值為 1.52 cm，而當點雲不足時其平均誤差絕對值為 1.83 cm，其誤差變異不大，所量測的胸徑值與實測值最為接近，但當點雲密度由 100%降為 50%及 25%時，胸徑量測之準確亦會隨之下降如圖 2。



註:X 軸為 X 座標, Y 軸為 Y 座標(相對座標), 單位 m
 圖 2 以最大外切圓擬合法量測五株不同光達點雲密度下之立木直徑

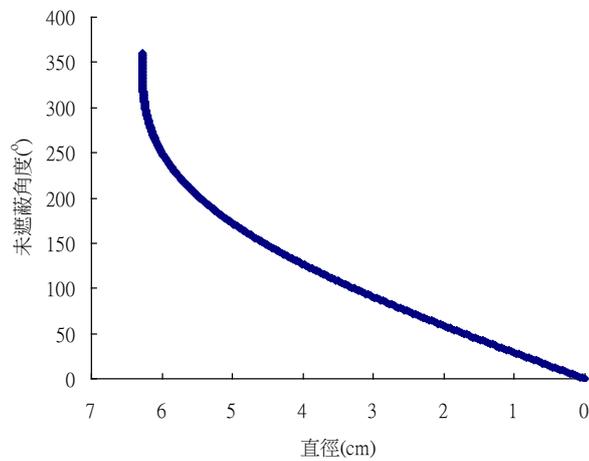


圖 3 點雲數量下降時鄰近點相連法造成扇形角加大而影響直徑量測的誤差量

而另外兩種方法則有明顯低估現象，其主要原因在於點雲數量不足時，直接測量法會因人為判斷的錯誤而低估；鄰近點相連法則因以弧長與最外側兩點距離，進行周長計算，而餘弦定律透過兩邊與一夾角，可求第三邊長度如式(16)，本試驗依據此概念修正公式如式(17)，依據(17)計算如點雲密度完整時，若胸徑為 15 cm 其周長為 15π cm，若點雲密度降為 50%時，則周長變為 $(7.5\pi+15)$ cm，若點雲密度再降為 25%時，則周長為 $7.5(\sqrt{2} + \pi/2)$ cm，由此可知，當點雲數量越少時，造成扇形角度縮小，量測直徑的誤差越大呈現對數下降趨勢，如圖 3 所示。

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\gamma) \dots\dots\dots(16)$$

其中，c 為 γ 角的對邊，a 與 b 為 γ 角的鄰邊。

$$p = 2\pi \frac{\theta}{360} + \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos(360 - \theta)} \dots\dots(17)$$

其中，p 為周長， θ 為扇形角度。

3.2 以地面光達測計不同型態人工林的立木胸徑與樹高

為探討地面光達對不同型態人工林之立木胸徑與樹高的可行性，本研究以上節所發展的最大外切圓擬合法，測計針葉樹的紅檜人工純林、闊葉樹的大葉桃花心木人工純林、白楊人工純林及大葉桃花心木與台灣欒樹混生林之樣區立木胸徑與樹高，並以併對相關性分析，檢測地面光達資料所測計之樣區立木胸徑、樹高與實測的立木胸徑與樹高的相關性，分析結果如圖 4，由圖 4 可知地面光達對於立木胸徑的量測實測值具有顯著性相關，除大葉桃花心木與台灣欒樹混生林之值 R^2 為 0.87，其它人工純林之 R^2 皆高於 0.96，而樹高測計方面其相關性較胸徑量測為低，其 R^2 在 0.83~0.91 之間。

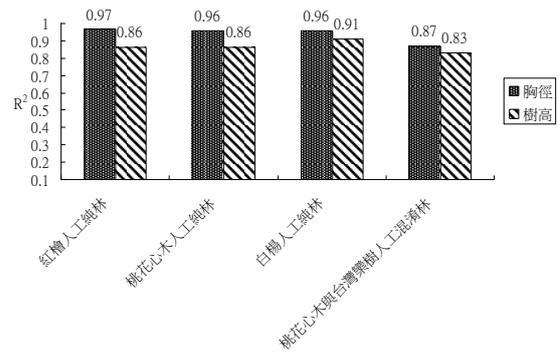


圖 4 地面光達測計不同型態人工林胸高直徑及樹高與實測值之相關性

各不同型態人工林之地面光達測計立木胸徑及樹高值與實測值之 1:1 之相關分析，如圖 5 至圖 8，由圖 5 至圖 8 可知樹高量測會因樹冠形態的不同，影響樹梢頂點的判釋，因此光達量測值與實測值差異變化較大，此為人為判釋誤差，如能增加樹冠的點雲密度，則可增加樹冠頂點的判釋準確性 (Moorthy *et al.*, 2010)。而胸徑的量測誤差來源，主要為林木與林木間的自我遮蔽，若增加測站數及增加點雲掃描密度，皆可降低遮蔽效應，並減少胸徑量測誤差。

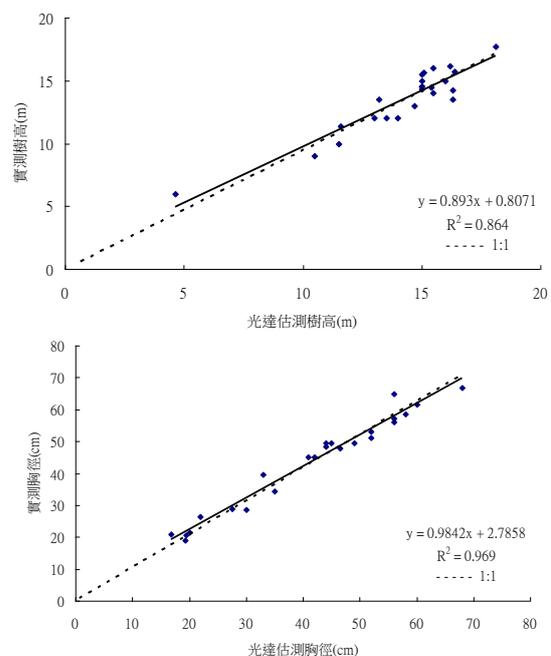


圖 5 紅檜人工純林之光達點雲量測胸徑與樹高與實測值之比較

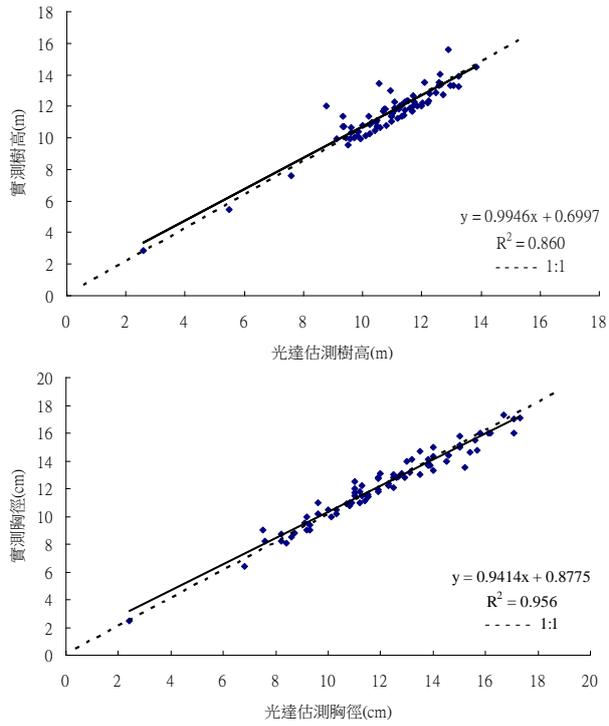


圖 6 大葉桃花心木人工純林之光達點雲量測胸徑與樹高與實測值之比較

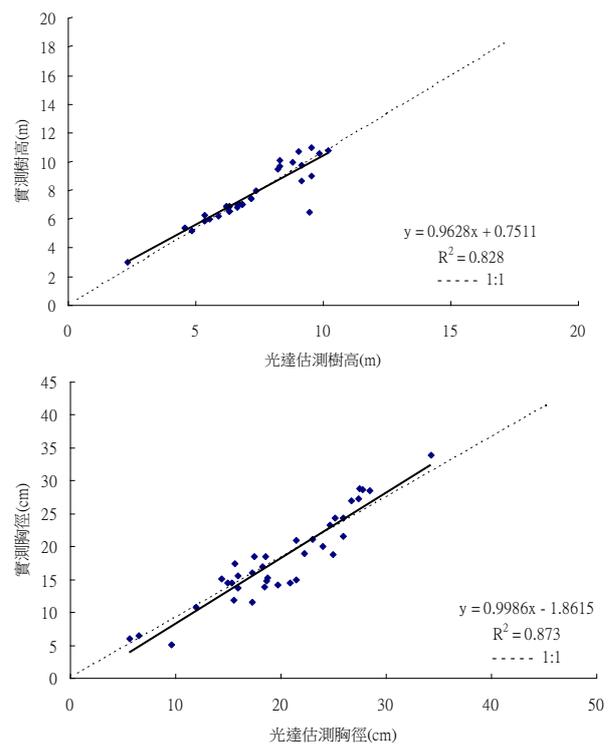


圖 8 大葉桃花心木、台灣欒樹人工混交林之光達點雲量測胸徑與樹高與實測值之比較

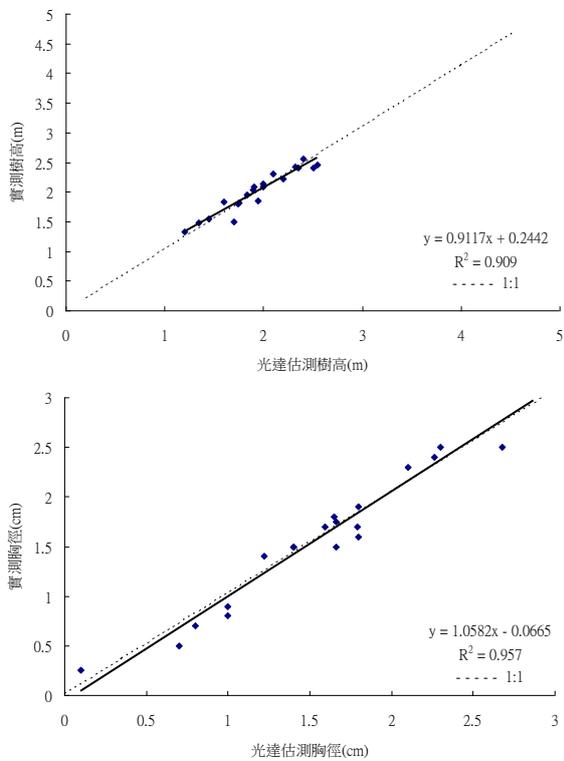


圖 7 白楊人工純林之光達點雲量測胸徑與樹高與實測值之比較

前人研究顯示如地面光達資料能與空載或衛載光達結合，則可增加林木點雲資料的完整性，進而增加立木測計的準確性 (Leeuwen and Nieuwenhuis, 2010; Yao *et al.*, 2011)。地面光達掃瞄時，需注意拍攝距離之問題，距離樣木越近且拍攝角度越小，則無法掃瞄到較高處之樹冠，進而影響立木高度的量測，而造成量測低估的誤差(Palleja *et al.*, 2010)。地面光達藉由雷射光至物體表面再反射回來，以其計算距離獲得空間座標，但林木樹冠間相互遮蔽，導致掃瞄立木於較遠處易受到前面立木遮蔽，無法獲得足夠點雲資料，本研究之樹高測量，受遮蔽效應的影響，造成光達量測樹高時有低估現象。而當林分樹種組成複雜時，因不同樹種之生長速度及樹冠形態有所不同，會造成樹冠相互重疊、或因樹幹生長傾斜、地表植生狀態及地形變化等，皆會影響樹高量測的準確性(陳永寬、等，2005)，而魏浚紘、等(2013)亦指出以光達量測樹高和胸直均具有高度相關性，但同樣會有樹冠重疊等問題，另外坡度傾斜亦會造成準確度下降，但光達資料與

實際調查資料依然會呈現直線相關；Moorthy *et al.* (2010)亦認為地面光達應用於複雜森林獲取資料，包括林下植被複雜或樹冠重疊，會造成樹種混淆及相互遮蔽等問題，使光達量測的準確性下降。除上述前人研究所論之造成地面光達量測誤差問題之外，由於地面光達之林木三維點雲資料量測，係依據雷射光至林木表面位置所獲得，故風所造成的林木晃動，會使所獲取的點雲資料產生誤差，造成立木量測的誤差，此為進行樣區林木地面光達掃瞄作業時必須注意的要項。

3.3 以地面光達量測人工林的立木材積

為探討地面光達的立木掃瞄資料，是否能以非破壞性方式，代替傳統以樣木砍伐方式建立立木材積推估模式，以紅檜、大葉桃花心木、台灣檫及白雞油等四種台灣重要造林樹種，選取不同徑級之樣木，每一樹種 10-11 株，砍伐前先以地面光達進行全株點雲資料的掃瞄，砍伐後之樣木進行傳統式區分求積法，計算單木材積視為實測材積。單木全株掃瞄之點雲資料，先濾除枝葉之點雲資料後，以區分求積法求算立木材積，以平均偏差評估地面光達量測立木材積的可行性，其結果如表 3 所示。由表 3 可知樹幹通直之立木如紅檜及大葉桃花心木，其量測準確度(平均偏差 7%~9%)高於樹幹彎曲分叉之立木如台灣檫、白雞油(平均偏差為 11%)。

表 3 地面光達點雲資料量測立木材積之可行性評估

	紅檜	大葉桃花心木	台灣檫	白雞油
$\sum v_i - \bar{v}_i $	0.753	0.049	0.015	0.025
$\sum \bar{v}_i$	8.010	0.689	0.129	0.222
平均偏差	0.094	0.070	0.116	0.113

Hopkinson *et al.* (2004) 曾利用地面光達量測加拿大多倫多北部的紅松(*Pinus resinosa* Ait.)人工林及糖楓(*Acer saccharum* Marsh.)混淆林之立木材

積，結果顯示兩種不同形態的林分，地面光達量測之林分蓄積量與實測蓄積量之誤差皆在 7% 以內，顯示地面光達對於林木材積量測確實有其可行性；Polo *et al.* (2009)則利用拖拉機式的雷射掃瞄光達，進行果園果樹的掃瞄作業，同樣以非破壞性的方式，獲取果樹的材積與葉表面積等資訊，結果顯示不論是蘋果、梨子或葡萄等果樹，光達所獲得的量測資訊與破壞性量測所獲取的資訊，且實測材積與光達材積之相關性 R^2 達 0.97，顯示光達系統為高科技、快速且非破壞性的遙測技術，確實可用來推估植物的材積、葉面積與結構。透過地面光達，不僅可以提供表面特徵 0.05-10.00 cm 之單株立木三維空間資料 (Omasa *et al.*, 2002 ; Urano and Omasa, 2003)，更能經多次掃瞄或多個掃瞄器聯合使用，達到提供詳細地表覆蓋三維空間資訊之目標。根據前人研究可知，以地面光達進行林分立木的測量，不論是生物量、材積或葉表面積均可獲得準確資訊，透過地面光達建立立木材積式確實可行，但必須注意拍攝距離的差異所造成之誤差，當掃瞄距離過遠時則應增加測站由其他角度進行掃瞄，增加立木之光達點雲數量，以減低量測誤差。

3.4 以地面光達點雲資料自動化偵測林冠孔隙之空間分布與動態變化

3.4.1 利用地面光達點雲資料以二值化技術進行林冠孔隙分類

本研究以 40m × 50 m 之紅檜疏伐樣區為研究材料，進行疏伐前、疏伐後當年與疏伐後四年之林冠孔隙(Canopy gap)監測，探討冠層與林冠孔隙位置、面積大小與動態變化，以地面光達點雲資料，推估空間解析力 0.5 m × 0.5 m 之 CHM 為材料，計算林冠高度分布的峰谷位置，作為林冠孔隙判斷之閾值(Thresholding)如圖 9，由圖 9 可知，疏伐前之峰谷約為 10.5 m，疏伐後之峰谷約為 9.5 m，以峰谷之林冠高為閾值，進行影像二值化(Image binarization)，產生孔隙與非孔隙影像，結果如圖

10 所示。雖然利用大尺度的被動式的遙測影像，進行林冠孔隙分類研究已有豐碩成果 (Negrón-Juárez *et al.*, 2011)，但因被動式遙測屬於二維影像，其對於三維的生態系物體的描述，仍然具有其侷限性 (Lefsky *et al.*, 2002)，因光達點雲資

料屬於三維空間資訊之影像，因此在立木樹冠形態的模擬、林分垂直結構的量化等，皆為傳統被動式遙測影像所未及 (Lefsky *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2015)。

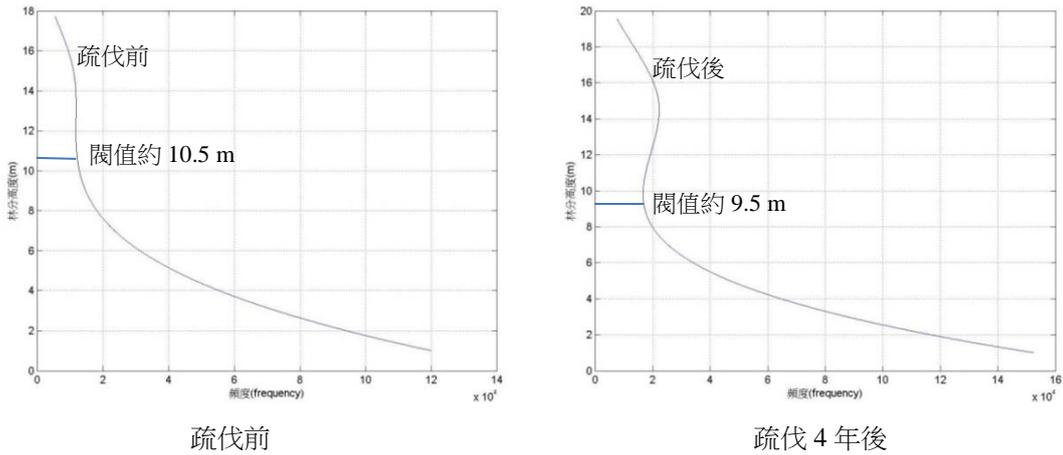


圖 9 以林冠高度分布之峰谷為影像二值化之閾值

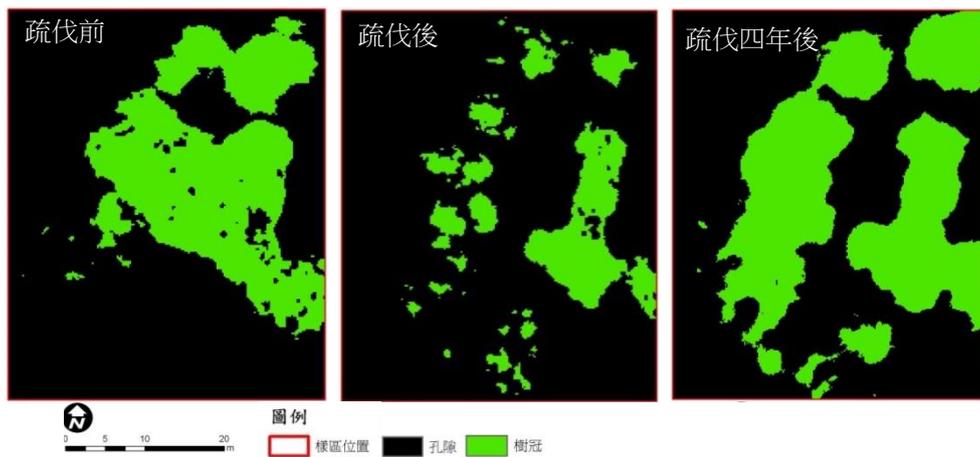


圖 10 疏伐前後及疏伐後四年之林冠孔隙變化

表 4 樹冠與孔隙面積動態變化統計表

	疏伐前	疏伐後當年	疏伐後四年
樹冠面積(m ²)	585.2(29.3%)	274.7(13.7%)	749.3(37.5%)
孔隙面積(m ²)	1414.8(70.7%)	1725.3(86.3%)	1250.7(62.5%)
樹冠面積變化量(m ²)		-310.4(-15.5%)	474.6(23.7%)
孔隙面積變化量(m ²)		310.4(15.5%)	-474.6(-23.7%)
年平均樹冠面積變化量(m ² y ⁻¹)			118.6(5.9%)
年平均孔隙面積變化量(m ² y ⁻¹)			-118.6(-5.9%)

3.4.2 樹冠與孔隙空間分布與動態變化

經影像二值化自動分類後之疏伐樣區之林冠孔隙變化如表 4，由表 4 可知樣區疏伐前樹冠面積為 585.2 m²(29.3%)，孔隙面積為 1,414.8 m²(70.7%)；疏伐後樹冠面積為 274.7 m²(13.7%)，孔隙面積為 1,725.3 m²(86.3%)；疏伐後四年為 749.3 m²(37.5%)，孔隙面積為 1,250.7 m²(62.5%)，疏伐後樹冠面積減少 310.4 m²(15.5%)，孔隙面積增加 310.4 m²(15.5%)；疏伐後四年樹冠面積增加 474.6 m²(23.7%)，孔隙面積減少 474.6 m²(23.7%)，平均每一年樹冠面積可增加 118.6 m²(5.9%)，孔隙面積減少 118.6 m²(5.9%)。

樣區之地面光達點雲影像，以影像二值化進行林冠孔隙分布的量測，並與實地調查的林冠孔隙相核對，結果顯示樣區中如孔隙中具有較多的入侵雜木時，會使影像二值化分類時產生誤差，讓孔隙與非孔隙區域產生混淆現象，而產生誤判，其主要原因在於樣區經過疏伐後，形成的孔隙因非目標物種的入侵，造成孔隙中有少數非目標林木或高莖類草本植物，致使孔隙判斷產生混淆，將來可藉由點雲的三維資料，計算單位面積之立木株數、平均林分高等多因子介量，加入孔隙判斷的決策因子，以增加孔隙量測的準確度，而 Yang *et al.* (2015)整合二維的光學遙測影像與三維的 LiDAR 點雲資料，進行林冠孔隙的量測，結果顯示單獨使用光學遙測影像及 LiDAR 點雲資料，其分類之準確度分別為 68.54%±9.03% 與 64.51%±11.32%，而整合兩種影像進行分類時可提升為 80.28%±6.16%，顯然不同的遙測方式對於孔隙的量測具有互補優缺點的效

力，未來值得嘗試探討。而利用不同時期地面光達影像，進行林冠孔隙動態監測研究，或以影像二值化方式，進行林冠孔隙量測，確實可快速獲得孔隙面積變化情形，其對於快速、大面積取的林冠孔隙分布資訊、疏伐林分之林冠孔隙監測，及疏伐效益的評估，有利於提供人工林經營資訊(St-Onge and Vepakomma, 2004; Vepakomma *et al.*, 2008)。

3.5 應用地面光達進行疏伐作業模擬與碳吸存推估

3.5.1 以 Weibull 機率密度函數進行疏伐作業模擬

以地面光達所量測之紅檜人工林疏伐樣區之立木位置及胸徑資料，以三介量之 Weibull 機率密度函數，進行林分疏伐前後之胸徑分布模擬，結果如表 5，模擬結果以 Law and Kelton(2000)所提出之 K-S 適合度檢定，疏伐前後其林分理論胸徑分布與實測值分布的差異性。由表 5 與表 6 可知，本研究利用 Weibull 機率密度函數模擬疏伐前後之胸徑分布，以 K-S 適合度檢定通過率達 100%，顯示 Weibull 機率密度函數可有效模擬疏伐前後之胸徑分布。Bailey and Dell (1973)指出 Weibull 機率密度函數之參數，可以解釋人工林生長競爭之情況，其中 c 值決定分布曲線形狀，當 c 值 ≤ 1 時，則直徑分布呈現倒 J 型曲線，極盛相天然林之直徑分布會呈現此種分布狀態，而一般同齡人工林其 c 值會大於 1，而當 c 值介於 1 至 3.6 時，分布形態呈現正偏歪 (Positively skewed) 分布，當人工林立木間產生生長競爭時，會出現此種直徑分布狀態；當 c 值等於

3.6 時，呈現常態分布；而當 c 值 >3.6 時，呈現負偏歪(Negatively skewed)分布； b 值為尺度參數， b 值越大表示林分之平均胸徑越大；而 a 值為位置參數，代表人工林之最小直徑。由表 10 可知，疏伐前至疏伐後四年其 b 值由 27.7 降為 23.4， b 值在疏伐後有下降的趨勢，而在疏伐後四年則有上升趨勢，顯示疏伐四年立木胸徑生長已受到生長競爭的紓解，而有加速生長的趨勢， c 值由 1.99 降為 1.55，在疏伐後四年之 c 值呈現正偏歪分布如圖 11，而 b 值在疏伐後四年依然小於疏伐前，且 c 值有變小的趨勢，其現象與強度疏伐有關。理論上經疏伐作業之樣區能獲得較大的生長空間，故 b 值會隨林

齡增加而變大，因本研究之紅檜人工林疏伐樣區，其林齡較大，強度疏伐會造成上層立木之伐除，疏伐四年後其立木生長尚未完全反應生長空間疏開後之生長潛力，故 b 值變化不明顯。利用地面光達量測林分立木之點雲資料，因具備三維空間資訊，不但可量測林分中每株立木的胸徑、樹高，亦可進行單株立木位置之定位，因此藉由 Weibull 機率密度函數得參數值，可以建立林分層級不同徑階的胸高段面積、材積分布(Thomas *et al.*, 2008)，並可應用於人工林疏伐作業的模擬(李久先、陳朝圳，1990)。

表 5 以統計介量表示各樣區之 Weibull 函數參數

疏伐狀況	Weibull 函數參數統計介量			
	n	a 值	b 值	c 值
疏伐前	46	16.50	27.761	1.986
疏伐後當年	27	20.80	23.054	1.797
疏伐後四年	27	24.40	23.425	1.552

表 6 以 K-S 式合度檢定林分理論徑級分布與實際觀測值之差異

疏伐狀況	$\sqrt{n}D_n$ 值		臨界值為 $C_{1-\alpha}$	通過檢測之百分比
	$\sqrt{n}D_n^-$	$\sqrt{n}D_n^+$		
疏伐前	0.4635	0.5154	0.819	100%
疏伐後當年	0.4101	0.5746		
疏伐後四年	0.5107	0.7031		

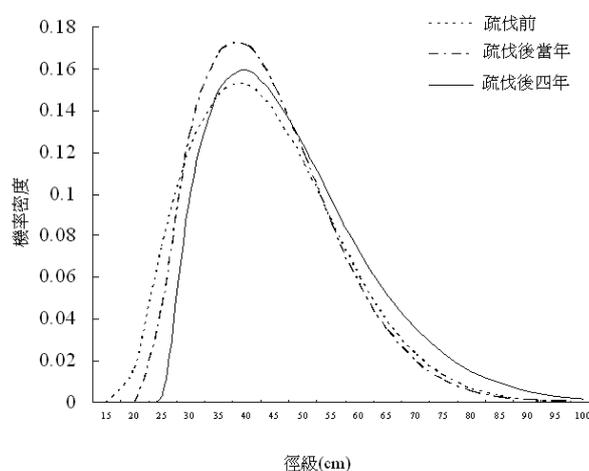


圖 11 紅檜人工林疏伐樣區疏伐前後與疏伐後四年之徑級分布

為探討以地面光達所建立之疏伐樣區之立木量測資料，如何應用於疏伐作業模擬，本研究以樣區之疏伐強度(株數保留率為 58.70%)，進行疏伐規劃，調整立木於樣區中具有均勻的生長空間分布，以樣區中立木相互間距離的變異數大小表達立木空間分布之狀態，當變異數越小時，表示立木相互間的距離越均勻。紅檜疏伐樣區實際進行作業其結果顯示，疏伐前胸高斷面積為 65,395.57 cm²，疏伐後胸高斷面積為 39,569.09 cm²，立木相互間之距離變異數為 15.55，如以地面光達量測之立木位置圖於疏伐前進行疏伐模擬，其疏伐後之胸高斷面積為 47,193.93 cm²，立木相互間之距離變異數為 15.39，模擬結果確實可降低立木間之距離變異數，使立木生長空間分布均勻如圖 12 所示，實際疏伐作業之疏伐前、疏伐後及疏伐模擬之徑級分布如圖 13，由圖 12 及圖 13 可知，實際疏伐作業所砍伐之林木徑級較大，故樣區內保留徑級較小之林木，且林木

空間分布較不均勻且緊密，故疏伐後依然產生林木競爭 (c 值為 1.797)，透過疏伐作業模擬，伐採徑級較小之林木，保留較大徑級之林木，使林木空間分布較為均勻，可增加保留木生長空間，使其持續生長，並減少競爭的產生。疏伐作業會因其目的，而在選木上有所差異，但仍以伐除不良立木以增加留存木的生長空間為主，由本研究結果證實，藉由地面光達所獲取之胸徑資料，可推估 Weibull 直徑分布之參數，確實可模擬疏伐樣區在各生長階段之直徑分布情形，而傳統上在疏伐木的選擇，大多數僅依據疏伐強度的指標性資料，進行疏伐作業，其對於立木空間配置之參考資訊較為薄弱，如疏伐作業前能以立木位置圖，依據疏伐目的，進行選木規劃方案的擬訂，藉由疏伐模擬結果，瞭解疏伐後樣區立木徑級及相互間距離的空間分布，其可確保疏伐的最佳化效益。

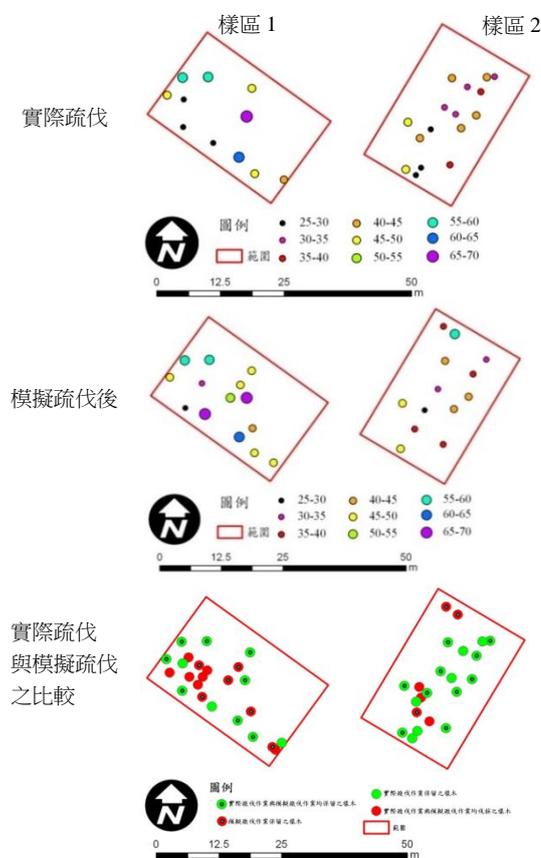


圖 12 紅檜人工林疏伐樣區之實際疏伐作業與模擬疏伐之立木空間分布

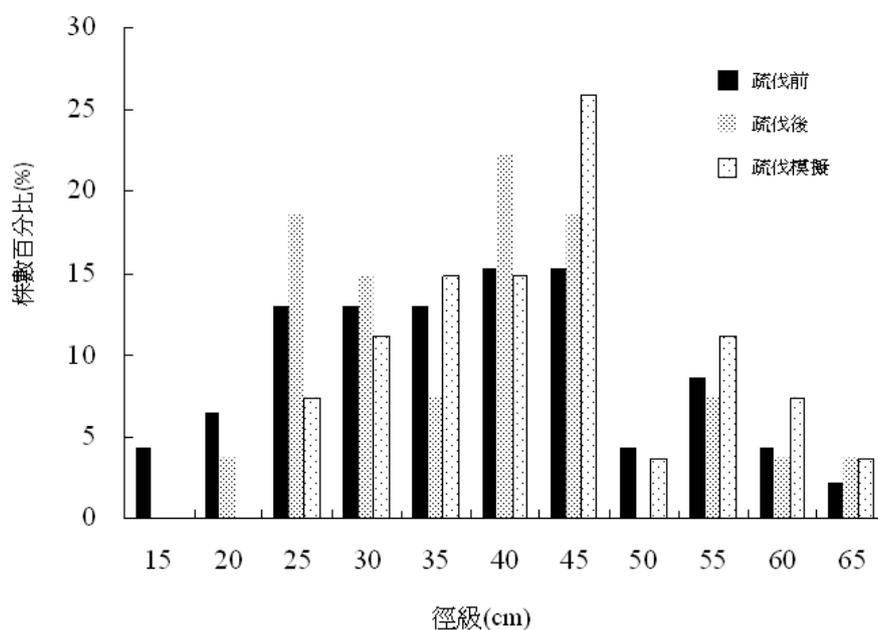


圖 13 紅檜人工林疏伐樣區實際疏伐作業與模擬疏伐之徑級分布

3.5.2 以地面光達進行碳吸存推估

本研究以兩個紅檜人工林疏伐樣區之疏伐前、疏伐後與疏伐後四年資料，進行樣木空間分布繪製，並進行地上部碳及 CO_2 蓄積量計算，透過兩期地面光達之掃瞄資料，計算碳及 CO_2 吸存量，其中重量與材積轉換係數與碳含量轉換係數，會因樹種不同有所差異，故本研究依照馬子斌、等(1992)所建立之紅檜重量與材積轉換係數(0.333)，而碳含量轉換係數則是參考林裕仁、等(2002)所建立係數(0.4864)。

疏伐前平均地上部碳蓄積量為 40.00 Mg ha^{-1} ，平均地上部 CO_2 蓄積量 $146.83 \text{ Mg ha}^{-1}$ ；疏伐後平均地上部碳蓄積量為 23.08 Mg ha^{-1} ，平均地上部 CO_2 蓄積量 84.58 Mg ha^{-1} ；疏伐後四年平均地上部碳蓄積量為 30.92 Mg ha^{-1} ，平均地上部 CO_2 蓄積量

$113.17 \text{ Mg ha}^{-1}$ ，平均地上部碳吸存量為 $1.96 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ，平均地上部 CO_2 吸存量 $7.15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 。透過疏伐前與疏伐後之資料相減可獲得疏伐量，疏伐所獲得之平均地上部碳蓄積量為 16.92 Mg ha^{-1} ，平均地上部 CO_2 蓄積量 62.25 Mg ha^{-1} 。本研究以地面光達所建立之非破壞性立木材積式，可獲得與實測值高度相關之材積量，此種非破壞性材積式的建立，可解決傳統上，推估碳蓄積或碳吸存等相關數據時，需透過破壞性方式取得材積量的問題。而疏伐作業後，可透過碳蓄積量分布如圖 14 進行相關監測，未來可利用地面光達建立重要樹種的地方材積表，除了可評估該地區之碳吸存效益外，亦可比較疏伐前後與不同疏伐強度對林木生長情形所帶來的影響，而疏伐作業對森林碳吸存之效益，可供為林木經營管理的參考。

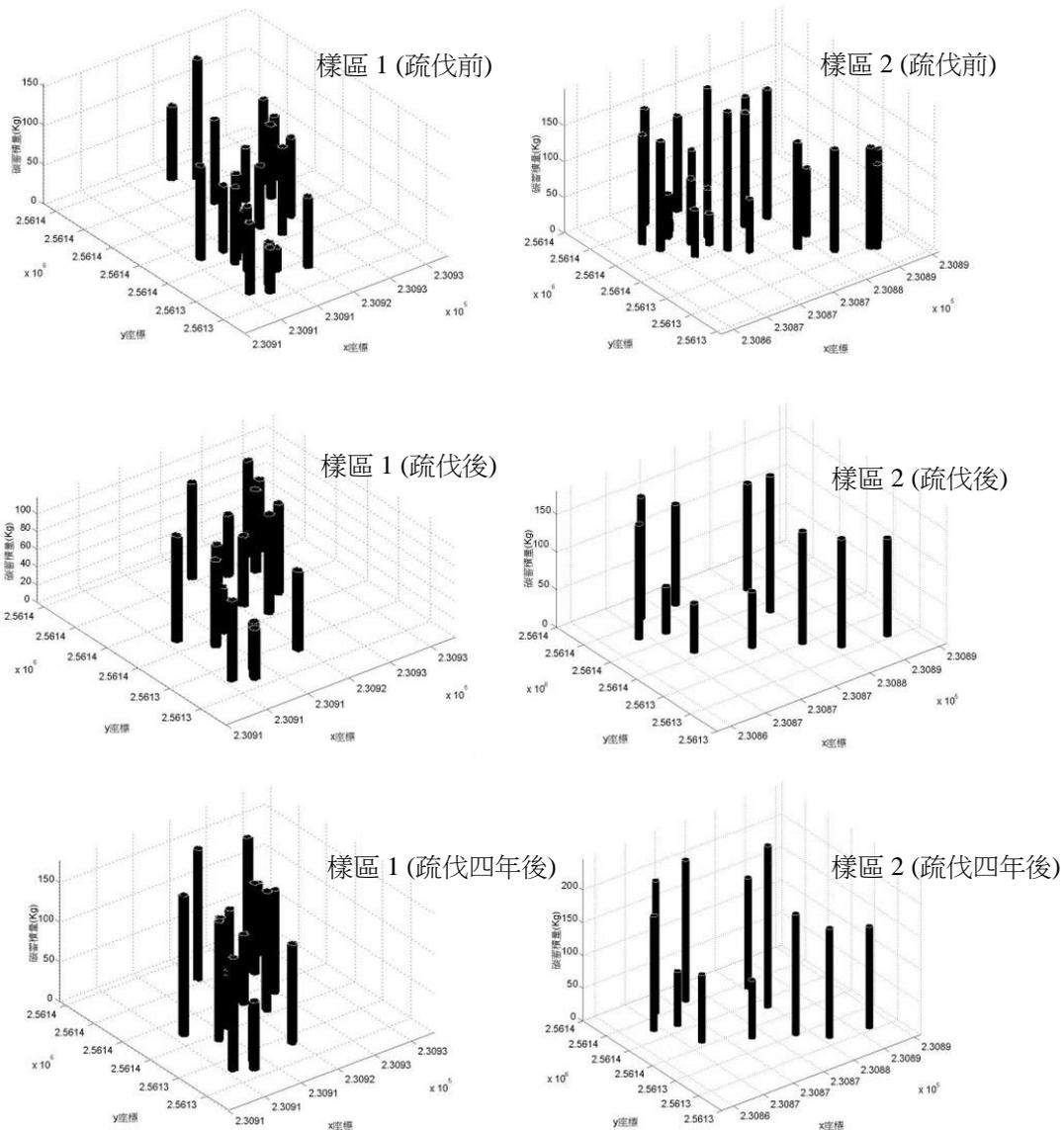


圖 14 紅檜人工林疏伐樣區之碳蓄積量分布變化圖

4. 結論與建議

以地面光達掃瞄之點雲資料，利用最大外切圓擬合法可有效的測量立木胸高直徑，而在林分測計的使用上，因點雲資料具有三維的空間資訊，可有效的量測立木高度、不同樹高位置的直徑級立木位置，不同形態之人工林其量測之準確度有所不同，而點雲密度的高低及立木是否有掃瞄的遮蔽效應，是立木量測準確度的主要影響因子。利用地面光達可以選擇不同徑級的樣木進行掃瞄，立木枝、葉與主幹之點雲資料，可加以分離，進而以非破壞性方

式，量測區分求積法計算幹材積所需之各樹幹區段直徑，此種非破壞性的區分求積法，對於建立立木材積式為一便捷、省力的方法。

而光達影像藉由影像二值化技術，可自動化的量測林冠孔隙之空間分布，其對於疏伐前後之林冠疏開及鬱閉，提供有利於監測林冠動態變化之資訊，唯如欲增加孔隙量測之準確度，建議可整合光達點雲資料與光學遙測，進行孔隙的量測，可有效增加量測的準確度。

地面光達所建立之樣區立木量測資料，包括立木位置圖、胸徑、樹高、材積等，如配合相關議題

之分析，如林分直徑分布之 Weibull 機率密度函數的模擬，可進行疏伐作業模擬，規劃選木方案，藉由疏伐模擬結果，瞭解疏伐後樣區立木徑級及相互間距離的空間分布，可確保疏伐的最佳化效益。如配合碳儲存及碳吸存的計算，可以表達疏伐作業在碳吸存議題上之效益，以增加林木經營決策資訊。

致謝

本研究感謝屏東林區管理處與六龜工作站所提供之資料、國立屏東科技大學地理資訊系統與遙感探測研究室成員協助、力弘科技股份有限公司技術支援、財團法人中華扶輪教育基金會與斗六東區扶輪社林先生忠佑(Uncle Nephro)給予研究上之支持，得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

- 李久先，陳朝圳，1990。Weibull 機率函數應用於人工林疏伐作業之研究，中華林學季刊，23(2):9-15。
- 林裕仁，劉瓊霖，林俊成，2002。台灣地區主要用材比重與含碳量測定，台灣林業科學，17(3):291-299。
- 馬子斌，陳政靜，熊如珍，黃清吟，陳欣欣，翟思湧，1992。重要商用木材之一般性質，台灣省林業試驗所林業叢刊第 1 號，205 頁。
- 陳永寬，詹進發，葉堃生，鄭祈全，施瑩瑄，2005。應用地面雷射掃描儀測算樹高之研究，航測及遙測學刊，10(4):327-336。
- 楊榮啟，林文亮，2003。森林測計學，國立編譯館，309 頁。
- 趙鍵哲，彭念豪，2005。以光達資料之控制直線求解單張像片外方位參數之模式探討與可行性評估，航測及遙測學刊，10(1):89-102。
- 魏浚紘，吳守從，彭炳勳，陳朝圳，2010。應用空載光達建立阿里山地區柳杉人工林之林分材積式，地理學報，59:67-80。
- 魏浚紘，吳守從，黃韋傑，謝依達，鍾玉龍，陳朝圳，2012。影像二值化在空載光達影像林冠

- 孔隙分類上之應用，地理學報，66:53-66。
- 魏浚紘，陳朝圳，彭炳勳，李崇誠，陳建璋，2013。地面光達應用於林木競爭之研究，航測及遙測學刊，16(4):279-287。
- Bailey, R.L., and Dell, T.R., 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Journal of Forest Science*, 19(2):97-104.
- Bucksch, A., Lindenbergh, R., Menenti, M., and Raman, M.Z., 2009. Skeleton-based botanic tree diameter estimation from dense LiDAR data. In: *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, Lidar remote sensing for environmental monitoring No. 10*, San Diego CA.
- Cheng, Z.L., Zhang, X.P., and Chen, B.Q., 2007. Simple reconstruction of tree branches from a single range image. *Journal of Computer Science and Technology*, 22:846-858.
- Côté, J.F., Widlowski, J.L., Fournier, R.A., and Verstraete, M.M., 2009. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 113(5):1067-1081.
- Danson, F.M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., and Allgöwer, B., 2007. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 4:157-160.
- Emmingham, W.H., and Elwood, N.E., 2010. *Thinning: An Important Timber Management tool*. A Pacific Northwest Extension Publication, Oregon State University, Washington State University, University of Idaho PNW 184.
- Fu, S.K., and Mu, J.K., 1981. A survey on image segmentation. *Pattern Recognition*, 13(1):3-16.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., and Treitz, P., 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34:573-583.
- Hornig, W.B., Hsiao, Y.F., and Chen, C.W., 2002. Watershed-aid historical document reconstruction. in the 2002 15th IPPR Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing, Hsinchu, Taiwan, R.O.C., August 25-27, 79.
- Hosoi, F., and Omasa, K., 2007. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging. *Journal of Experimental Botany*, 58(12):3463-3473.

- Law, A.M., and Kelton, W.D., 2000. Simulation Modeling and Analysis 3rd ed. McGraw-Hill. New York: 760 p.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., and Parker, G.G., 1999. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing Environment*, 70:339-361.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., and Harding, D.J., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, 52(1):19-30.
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J., and Vehmas, M., 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90: 319-330.
- Moorthy, I., Miller, J.R., Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P., Hu, B., and Chen, J. 2010. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(2):204-214.
- Moskal, L.M. and Zheng, G., 2012. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*, 4:1-20.
- Negrón-Juárez, R.I., Chambers, J.Q., Marra, D.M., Ribeiro, G.H., Rifai, S.W., Higuchi, N., and Roberts, D., 2011. Detection of subpixel treefall gaps with Landsat imagery in central amazon forests. *Remote Sensing Environment*, 115:3322-3328.
- Omasa, K., Urano, Y., Oguma, H., and Fujinuma, Y., 2002. Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 22:550-557.
- Palleja, T., Tresanchez, M., Teixido, M., Sanz, R., Rosell, J.R., and Palacin, J. 2010. Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150:1420-1427.
- Pfeifer, N., Gorte, B., and Winterhalder, D., 2004. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. *ISPRS - international archives of photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV. B5:114-119.
- Polo, J.R.R., Sanz, R., Llorens, J., Arno, J., Escolà, A., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Camp, F., Graàcia, F., Solanelles, F., Palleja, T., Val, L., Planas, S., Gil, E., and Palacià, J., 2009. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. *Biosystems Engineering*, 102(2):128-134.
- Sahoo, P.K., Soltani, S., and Wong, A.K.C., 1988. A survey of thresholding techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 41(2): 233-260.
- Sanz, R., Rosell, J.R., Llorens, J., Gil, E., and Planasa, S., 2013. Relationship between tree row LiDAR-volume and leaf area density for fruit orchards and vineyards obtained with a LIDAR 3D Dynamic Measurement System. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172:153-162.
- St-Onge, B., and Vepakomma, U., 2004. Assessing forest gap dynamics and growth using multi-temporal laser-scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI - 8/W2.
- Taubin, G., 1991. Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11):1115-1138.
- Thomas, V., Oliver, R.D., Lim, K., and Woods, M. 2008. LiDAR and Weibull modeling of diameter and basal area. *The Forestry Chronicle*, 84(6):866-875.
- Urano, Y., and Omasa, K., 2003. Accurate estimation of forest stand parameters in Japanese cedar woods using a portable scanning LiDAR. In: *Proceedings of IAWPS2003*. Daejeon, Korea, 403-407.
- Leeuwen, M.V., and Nieuwenhuis, M., 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129(4):749-770.
- Vepakomma, U., St-Onge, B., and Kneeshaw, D., 2008. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2326-2340.
- Watt, P.J., and Donoghue, D.N.M., 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*. 26:1437-1446.
- Yang, J., Jones, T., John, C., and He, Y. 2015. Object-based canopy gap segmentation and

classification: quantifying the pros and cons of integrating optical and LiDAR data. *Remote Sensing*, 7(12):15917-15932.

Yao, T., Yang, X., Zhao, F., Wang, Z., Zhang, Q., Jupp, D., Lovell, J., Culvenor, D., Newnham, G., Ni-Meister, W., Schaaf, C., Woodcock, C., Wang, J., Li, X., and Strahler, A., 2011. Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using Echidna ground-based lidar. *Remote Sensing of Environment*, 115(11): 2965-2974.

Application of LiDAR System for Monitoring and Management of Artificial Forest

Chun-Hung Wei¹ Chaur-Tzuhn Chen^{2*}

ABSTRACT

In this study, using 3D scanning Light Detection and Ranging (LiDAR) systems, which are the non-destructive methods, to investigate and monitor individual trees in artificial forest sample areas. Using ground-based LiDAR and traditional field survey data to obtain individual tree characteristic values which included tree height, diameter at breast height, canopy height, tree location map and evaluated the feasibility of ground-based LiDAR data in artificial forest areas. Results showed that the accurate information from the ground-based LiDAR system in permanent sampling plots, and different scanning stations could decrease occlusions. By using high density point cloud data, the height and diameter at different height of the tree could also be measured directly by the LiDAR systems. Different number of point cloud affected the accuracy of diameter. Results also showed that the systems could establish tree volume model non-destructively with tree height and DBH data obtained from ground-based LiDAR. Using threshold value to classify gap fraction, results showed that were accurate. Therefore, the results could be used to analyze the horizontal and vertical canopy structure, it was beneficial for the monitoring of plot dynamics in forest areas. Ground-based LiDAR could be used to determine tree measurements, tree competition and canopy gap which solve the problems of quantification and spatial research and also help with the stimulation of thinning operations. Results of this study were beneficial to artificial forest management and improved the forest resource inventory methods.

Key Words : forest management, thinning operations, ground-based LiDAR technology, 3D laser scanning, stand characteristics

¹Ph.D. Graduate, Institute of Bioresources, National Pingtung University of Science and Technology.

²Professor, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology.

* Corresponding Author, E- Mail: cct@gisfore.npust.edu.tw

Received Date: Feb. 09, 2015

Revised Date: Jan. 29, 2016

Accepted Date: Mar. 23, 2016

評估台灣常綠闊葉森林之衛星影像植生指標與空載 光達穿透率之相關性

李崇誠¹ 王驥魁^{2*} 洪子敏³ 吳坤真⁴

摘要

由於空載光達系統其雷射光會穿透森林樹冠層到達地表，植生的密度會影響到穿透率程度之大小，而穿透率的推估方式為統計雷射光穿透森林冠層到達地面之比率，故穿透率越高所獲得的地面點相對增加，對於DEM產製有高度的影響，然穿透率屬於執行飛航任務事後獲得的資訊，本研究目的探討衛星影像植生指標與空載光達穿透率之關係，主要目的為提供光達掃瞄規劃之參考，在森林植生覆蓋度高的區域，可以增加入射森林之雷射光能量的方式來提升穿透率。本研究總共測試台灣南北兩個光達樣區，分別為北部金山的火山樣區與南部曾文水庫樣區，掃瞄面積分別為36km²與21km²，並取得Fomosat-2、SPOT-5、Worldview-2與GeoEye共7幅衛星影像，分別計算4種植生指標(NDVI、RVI、PVI與SAVI)，拍攝時間與空載光達掃瞄時間相近，結果顯示衛星影像需經過大氣糾正處理消除水氣和地形之影響因子，並以Pearson相關性檢定其植生指標與穿透率之相關，結果為兩指數有顯著負相關性，表示當穿透率越高時植生指標相對減少，並以線性回歸探討兩者之關係，其R²值均高於0.8以上，代表衛星影像植生指標與空載光達穿透率有程度上之相關。

關鍵字：空載光達、森林穿透率、大氣糾正、衛星影像植生指標

1. 前言

一般光達飛航規劃多以高度、地形、山勢走向與點雲密度為主要考量因子，然在森林區域，植物冠層覆蓋情形會影響到雷射光穿透之能力，要產製良好的DEM (digital elevation model)，森林區域光達穿透能力則為重要的影響因素，當穿透能力高時獲得的地面點會較多。由於光達穿透能力為事後獲得的資訊，是否有其它的遙測資料能與光達穿透能力建立相關性，是本研究主要探討的目標。

植物覆蓋調查主要是依靠野外調查觀測為基礎，但需耗費大量人力與物力來達成，隨著衛星技術的成熟，植物的生長狀態可以利用衛星影像來觀察，相較於森林調查常有地形或交通上的限制，是一個可靠的資料獲取方式，由於綠色植物具有吸收藍光、紅光及強烈反射紅外光之特性，利用該特性推估植物生長情形，稱為植生指標(vegetation index) (Lillesand *et al.*, 1987)。植生指標推估的公式眾多，常被拿來運用的指標為RVI (ration vegetation index) (Pearson & Miller, 1972)、NDVI (normalized

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 博士班候選人

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 副教授

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士

⁴ 國立成功大學測量及空間資訊學系 研究助理

* 通訊作者, E-mail: chikuei@mail.ncku.edu.tw

收到日期: 民國 104 年 07 月 28 日

修改日期: 民國 105 年 03 月 24 日

接受日期: 民國 105 年 03 月 30 日

difference vegetation index) (Rouse *et al.*, 1974)、PVI (perpendicular vegetation index) (Richardson & Wiegand, 1977)與 SAVI (soil-adjusted vegetation index) (Huete, 1988), 其推估研究均有為數不少的文獻, 因此瞭解大面積森林區域的植物生長情形, 可藉由衛星影像推估之植生指標來達成, 而較高的植生指標數值, 代表森林覆蓋程度密(Jin *et al.*, 2014)。

在空載光達儀器方面, 執行掃瞄任務時航高、雷射入射角與雷射掃瞄頻率均會影響到雷射光接觸到目標之能量多寡 (黃清美及史天元, 2008; Chasmer *et al.*, 2006; Morsdorf *et al.*, 2008; Næsset, 2009; Zhao & Popescu, 2009), 當高密度的森林冠層覆蓋時, 必須增加雷射光能量來穿透森林表面, 以獲得較多的地面點雲, 而地面點雲密度對於 DEM 產製之品質有高度的影響(Chu *et al.*, 2014), 並且會影響樹高(Gaveau & Hill, 2003)與生物量(魏浚紘、等, 2012)之推估, 而空載光達穿透率(laser penetration index, LPI)為量化森林垂直結構的推估方法(Zhao & Popescu, 2009), 主要是統計雷射脈衝穿透森林之比例, 而比例越高表示樹冠層間的孔隙較大, 反之為孔隙較小(MacArthur & Horn, 1969)。故本研究探討衛星影像之植生指標與空載光達穿透率之關係, 當兩者有明顯相關時, 可提供未來空載光達飛機規劃時, 在穿透率較低之區域增加掃瞄密度而提高地面點雲數量之參考依據, 並探討 FS-2、SPOT-5、Worldview-2 與 GeoEye 等四種衛星影像與穿透率之相關, 提供衛星影像選取上之參考。

2. 材料與方法

2.1 實驗區域

研究共兩研究樣區分別為水庫樣區(嘉義與高雄交界曾文水庫內), 如圖 1(a)、火山樣區(新北市金山區), 如圖 1(b), 均屬於低海拔森林, 為亞熱帶氣候常綠闊葉林。水庫樣區位於曾文水庫東北方

向, 行政區域屬嘉義縣阿里山鄉茶山村, 部分包括嘉義縣大埔鄉和平村及高雄市那瑪夏區達卡努瓦, 面積約 21km², 樣區海拔高度約在 230 至 1100 m 之間, 在近溪谷環境較為潮濕, 主要樹種組成以榕樹、大葉楠、火燒柯、木荷、竹類與相思樹, 並有經濟作物檳榔、茶園與果園。另一個為火山樣區屬於北部火山區之部分範圍, 面積約 36km², 樣區海拔高度在 0 至 900 m 之間, 為金山地區往陽明山之省道台 2 甲線鄰近, 主要的樹種以大葉楠、紅楠、九節木、大頭茶、桑科雀榕以及相思樹人工林居多, 其中樣區缺角部分為飛航管制區域, 故需遮蔽該區地形資訊。

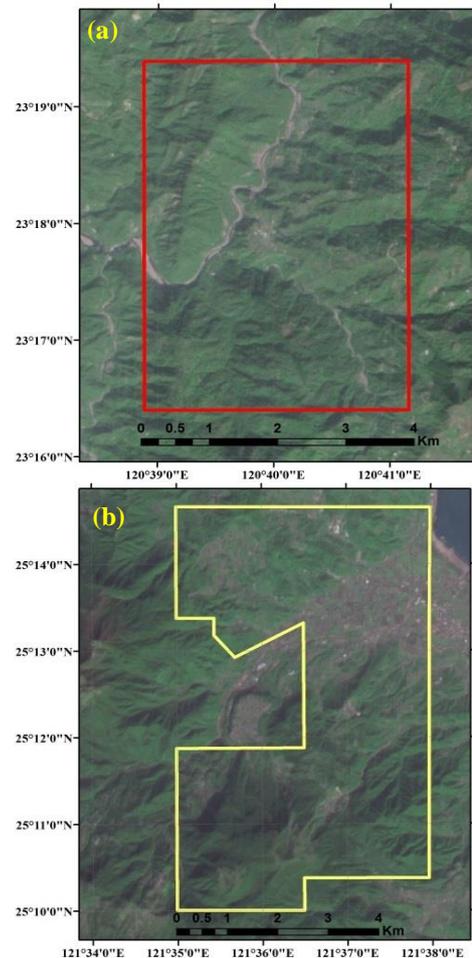


圖 1 空載光達掃瞄範圍與研究樣區(a)水庫樣區; (b)火山樣區

2.2 研究方法

2.2.1 空載光達飛航參數與資料獲取

空載光達系統為整合雷射測距、光學掃瞄、全球定位系統及慣性導航系統等技術，並快速獲得掃瞄點之三維坐標，而研究使用光達掃瞄儀器為 Optech ALTM Pegasus HD400，掃瞄旋角視域最大 60°，雷射脈衝率 100~400kHz，掃瞄鏡頻率 0~140Hz。在飛航規劃之執行，火山樣區其空載光達與正射影像掃瞄作業於 2012 年 8 月 14 日完成飛航任務；水庫樣區於 2013 年 7 月 24 日完成飛航掃瞄任務，2 日完成掃瞄作業。兩樣區航帶重疊率均達 50% 以上，並均有 2 條交叉航帶，有利於平差

後處理之準確度，各架次之作業掃瞄參數如表 1。

表 1 兩研究樣區之空載光達飛航掃瞄資料與參數設定

	火山樣區	水庫樣區
日期	2012/ 8/ 14	2013/ 07/ 23~24
離地高(m)	1500	1500
航速(KTS)	100	100
點雲密度 (pts/m ²)	2.3	5.2
FOV (°)	±20	±9
PRF (kHz)	100	150
航帶數	21	39

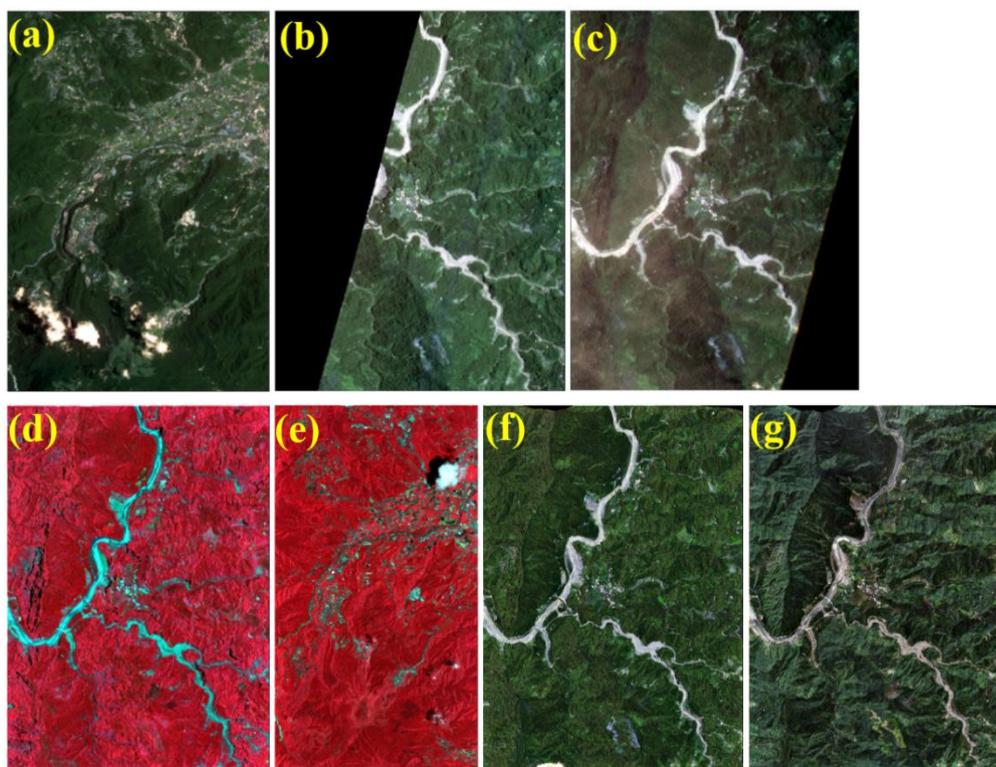


圖 2 火山樣區與水庫樣區之衛星影像。(a) Formosat-2 火山樣區 2012/08/19；(b) Formosat-2 水庫樣區 2013/07/30；(c) Formosat-2 水庫樣區 2013/07/28 水氣含量高；(d) SPOT-5 水庫樣區 2013/07/24；(e) SPOT-5 火山樣區 2012/08/16；(f) GeoEye 水庫樣區 2013/08/04；(g) WorldView-2 水庫樣區 2013/09/14

2.2.2 衛星影像資料獲取

樣區內總共取得 3 幅 Formosat-2 衛星影像，多光譜解析度 8m，如圖 2(a)至(c)；2 幅 SPOT-5 衛星影像，多光譜解析度 10m，如圖 2(d)與(e)；1 幅 GeoEye，多光譜解析度 2m，如圖 2(f)；1 幅 WorldView-2，多光譜解析度 2m，如圖 2(g)，總共 7 幅衛星影像。影像挑選拍攝日期是配合兩樣區空載光達掃瞄時間(火山測區：2012 年 8 月 14 日、水庫測區：2013 年 7 月 23-24 日)相近的衛星影像，以避免植生有太大之變異。樣區資料部分，北部火山樣區衛星影像其拍攝日期為 2012 年 8 月 19 日 (Formosat-2)與 2012 年 8 月 16 日(SPOT-5)共 2 幅衛星影像，如圖 2(a)與 2(e)。南部水庫樣區衛星影像拍攝時間分別為 2013 年 7 月 28 日至 2013 年 9 月 14 日共有 5 幅衛星影像，其中水庫樣區 2013 年 7 月 28 日影像成色不良，如圖 2(c)，當天雲含量較高，其挑選原因為後續探討大氣糾正成效時對照組用，其餘 4 幅衛星影像均挑選雲量少與水氣低之衛星影像。

2.2.3 大氣糾正與植生指標計算

ATCOR-3 大氣糾正模型是由德國 Wessling 光電研究所提出的一種有效糾正方法，ATCOR-3 為基於 MODTRAN 5 輻射傳導模式所開發的大氣糾正模組，此模式適合於寬視野的衛星影像(Richter & Schlapfer, 2011)。由於在山區地形起伏導致地形效應的存在，其輻射量在傳輸過程中，會受地形影響而引起變化。相較於 ENVI FLAASH 大氣糾正模組，ATCOR-3 可以糾正地形背光面之陰影等影響，而文獻指出植生指標經過 ATCOR-3 大氣糾正後，其可以提高與葉面積指數(leaf area index, LAI)之相關性(Mannschatz *et al.*, 2014)，故本研究不詳加探討 ATCOR-3 的處理效益，僅就各衛星影像間與地形背光面的糾正後情形論述。DEM 的取得是利用空載光達點雲資料轉換，空間解析度為 1m。

研究利用四個常見之植生指標分別為 NDVI、PVI、RVI 與 SAVI，各種指標有其推估的特性，其中 RVI 指標為 1972 年所提出，主要是利用紅光波

段與近紅外光波段的比例進行推估，屬於較簡單的植生指標，如公式(1)；而 NDVI 是大量廣泛運用的植生指標，最主是其常態化的特性，NDVI 值介於-1~1 之間，而水體大多為負值，如公式(2)；PVI 主要是考慮多重散射條件下土壤線性方程式，A 為 0.011，B 為 1.16(蔡光榮及陳建富，2005)，如公式(3)；另一個指標為 SAVI 是以 NDVI 為主體，利用 L 值大小來調整權重的大小，如公式(4)，而 L 值主要是參考 LAI 指標，本研究利用 LAI-2000 儀器，量測南北兩研究樣區各 30 個點位之平均 LAI 值，北部火山樣區平均 LAI 為 4.0，而南部水庫樣區平均為 3.5，參考 Huete(1988)發表的 L 值與 LAI 之相關，火山樣區 L 值應為 0.9，而水庫樣區 L 值應為 0.8。

$$RVI = \frac{NIR}{RED} \dots\dots\dots (1)$$

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \dots\dots\dots (2)$$

$$PVI = \frac{NIR-(B \times RED)-A}{\sqrt{1+B^2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$SAVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED+L} (1+L) \dots\dots\dots (4)$$

2.2.4 穿透率之計算

過往文獻已提出多種推估公式，可分為點雲推估方式 (point-based) 與強度值推估方式 (intensity-based) 二種(黃清美，2006；林莉萍，2013；Zhao & Popescu, 2009)。以點雲推估方式多利用統計單位面積內總點雲數與地面點數量之比例，另一方式為統計雷射脈衝到達林下地面之比例 (Barilotti *et al.*, 2006)；而以強度值推估方式主要是統計單位面積總強度值與接觸地面強度值之比例 (Hopkinson & Chasmer, 2007)。其推估方式各代表不同的物理意義，本研究探討執行飛航規劃前，預

期發射多少雷射數量才能獲得足夠的地面點為研究目的，故以雷射數量為單位推估穿透率。

LPI 計算方式為配合衛星影像的解析度 2 m、8 m 與 10 m 網格大小，統計網格範圍內的雷射發射數量與接觸地面的雷射數量比例(李崇誠、等，2014)，如公式(5)，並須以 DEM 加 2 m 厚度搜尋未被分類到之地面點，2m 厚度為內部測試後之最佳選擇。

$$LPI = \frac{N_{grad}}{N_{pulse}} \dots\dots\dots(5)$$

N_{grad} ：穿透森林冠層並接觸地面之雷射數量

N_{pulse} ：雷射發射數量

3. 實驗成果與分析

衛星影像的取得相較易於空載光達穿透資料，故研究探討衛星影像計算 4 種之植生指標，是否可以反映空載光達穿透率資料。由於資料分析圖繁多，故報告內文以 NDVI 指標為主，其餘指標僅以統計圖表表示。

3.1 空載光達穿透率之計算結果

穿透率的計算是利用雷射光接觸地面的比例來推估，理論上第一回波數量可以代表雷射發射數量，但由於執行飛行掃瞄時，大氣中會有雲氣或是鳥群等雜訊，其產生之點雲需經由人工濾除掉，故將缺少部分第一回波資訊，而本研究為達成資料計算正確性，以 GPS Time 來判斷雷射發射數量，主要是由於同一雷射脈衝所產生之點雲，均有相同的 GPS Time，但由於本空載光達系統為雙頻的資料，須將資料按照兩個不同雷射端分離，再進行穿透率之計算，並以 matlab 自行撰寫穿透率計算之程式，總共 60 條航帶資料含水庫與火山樣區，並配合衛星影像之解析度 2m、8 m 與 10m 網格大小與網格位置，如圖 3(a)、(c)為水庫與火山樣區 8m 網格大

小之穿透率分布圖，地物分布情形主要有大面積河谷、聚落分布與森林，從穿透率分布圖與正射影像可以清楚展現聚落與森林之差別。

3.2 大氣糾正對衛星影像植生指標推估之影響

本研究建構空載光達穿透率與衛星影像植生指標之關係，不探討穿透率大於 0.9 的區域如河系、建物、道路、空地與少數果園，衛星影像經大氣糾正後，是否可以消除個影像間的差異，特別選擇南部水庫樣區 2 幅大氣條件相異的 Formosat-2 衛星影像，影像拍攝日期為 2013 年 7 月 30 日(FS2_1)與 2013 年 7 月 28 日(FS2_2)，其中 FS2_2 水氣含量最高。

大氣糾正後之衛星影像單位為反射率(reflectance)，相較於為大氣糾正前之衛星影像單位輻射量(radiance)，反射率代表地物對於各波段對於反射的程度多寡，其數值較為穩定，而輻射量為衛星感測器接收到的光子數量，輻射量較易受到大氣氣融膠與水氣的影響，而大氣糾正模式可有效轉換輻射量為反射率。研究利用 ATCOR-3 大氣糾正軟體處理，處理過後之衛星影像能減少大氣或陰影對植生指標的影響，圖 4 為 SPOT-5 衛星影像，圖 4(a)與 4(c)，分別為未經大氣糾正之影像與 NDVI 指標，可以明顯看出地形造成輻射量的差異，而經過大氣糾正後如圖 4(b)與 4(d)，明顯減少山勢陰影的影響，而箭頭處為大氣糾正前後差異較大的區域。

在各衛星影像間之比較，主要利用水庫樣區之 5 張衛星影像，如圖 5 顯示，大氣糾正前 5 張衛星影像之 NDVI 分布趨勢較為離散，最大(GeoEye)與最小(FS2_2)的 NDVI 曲線之間差距約有 0.3，如圖 5(a)，經大氣糾正後 NDVI 曲線之間差距減少為 0.15，表示大氣糾正模式可以有效糾正各種不同衛星影像間的差異。而 FS2_1 與 FS2_2 同為 Formosat-2 衛星影像但水氣差異較大，在經大氣糾正後已減少兩者間的差異，但還是存在明顯的差異，故衛星影像在取得時必須考慮成相品質，才能獲得一致的趨勢。

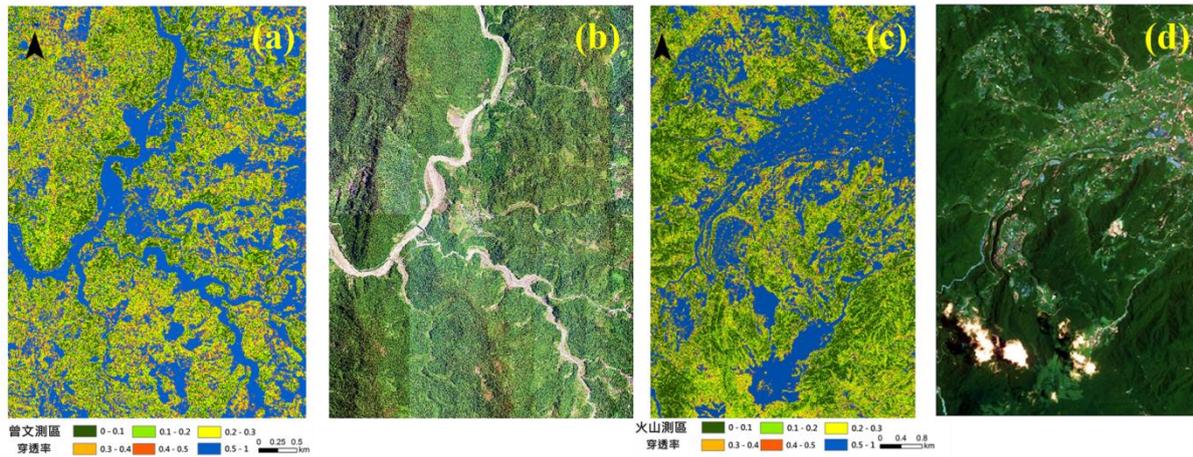


圖 3 樣區 8m 網格大小之穿透率分布圖與正射影像(a)水庫樣區穿透率分布；(b)水庫樣區正射影像；(c)火山樣區穿透率分布；(d)火山樣區正射影像

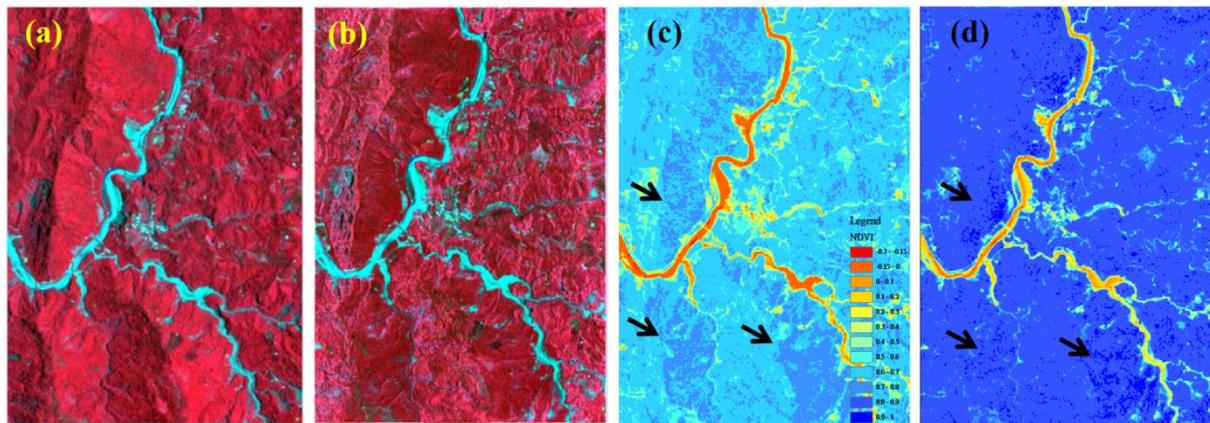


圖 4 SPOT-5 水庫樣區 2013/07/24 衛星影像 (a)原始 SPOT-5 衛星影像；(b)大氣糾正後之 SPOT-5 衛星影像；(c)原始 NDVI(SPOT-5)影像；(d)大氣糾正後之 NDVI(SPOT-5)影像

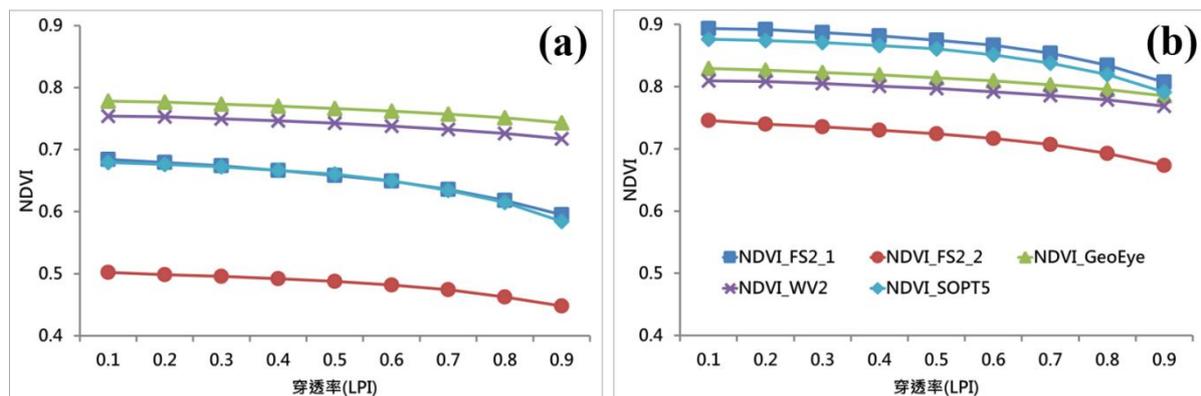


圖 5 衛星影像 NDVI 與穿透率之趨勢分布圖 (a)大氣糾正前；(b)大氣糾正後

3.3 空載光達穿透率與衛星影像植生指標之關係

3.3.1 植生指標與空載光達穿透率間之敘述性統計及相關性

本研究植生指標與空載光達穿透率的統計資料去除穿透率高於 0.9(非植生)與影像黑邊(nodata)之區域，總共有 7 幅衛星影像與 4 種植生指標，指標已經過大氣糾正處理，統計資料如表 2 中所示，N 為樣本數量與影像網格數量相同，統計其平均(mean)與標準差(Std.)值，可展示資料之分布特性，結果顯示，水庫_SOPT5 衛星影像，其空間解析力為 10 m，網格數量為 186,507，水庫_GeoEye 影像空間解析力 2 m，網格數量為 4,135,142，各指標之網格數量差異相當大，並且僅保留穿透率小於 0.9 之植生覆蓋區域，在敘述性統計的結果，各衛星影像間平均與標準差差異不大，僅有水氣含量較高的水庫_FS2_2 植生指標均小於相同水庫樣區之衛星影像，表示衛星影像之品質會影響的植生指標之推估。

在相關性檢定方面，研究利用 Pearson 相關係數 r 值，探討植生指標與穿透率統計上的相關性，Pearson 相關主要是討論兩樣本之線性分布趨勢，值域介於-1~1 之間，正值為兩樣本正相關，負值為兩樣本負相關，接近 0 表示兩樣本線性相關性低，而其首要參考的值為顯著水準，在表 2 中，各植生指標與穿透率均呈現相關顯著(雙尾 0.01)，表示穿透率與植生指標是有相關，而相關程度之多寡需參考 r 值，研究相關係數 r 均為負值，表示當穿透率愈高時，植生指標愈低，為合理的結果。在 r 值大小方面在 $|r|=0\sim 0.3$ 稱為低度相關；在 $|r|=0.3\sim 0.6$ 之間稱為中度相關；而在 $|r|=0.6\sim 0.9$ 為高度相關；若是 r 值為正負 1，即表示完全相關，在各衛星影像中以火山_SOPT5 之 RVI 植生指標相關性最高，可達-0.5280，表示其為中度接近高度相關，而水庫_WV2 之 PVI 植生指標 r 值為-0.068，表示相關程度較低。總體植生指標與穿透率之相關係數為 SPOT5 優於 Formosat-2，最低的為 Geoeye 與

WorldView2，但相關係數僅能表示兩樣本之相關程度高低，並無法解釋自變數(independent variable)與依變數(dependent variable)間的關係，因此利用迴歸分析為探討兩種變數間之關係。

3.3.2 穿透率各組距平均值與植生指標之迴歸統計分析

穿透率與植生指標相關趨勢如圖 6(a)~(d)所示，由於植生指標數分布區間各衛星影像均不同，為方便判讀故將 X 軸為穿透率，Y 軸為植生指標，與自變數通常為 X 軸相反，穿透率組距為 0.1，統計組距區間之平均植生指標，平均之理由為植生指標值為非規則分布(unbalance)，即大多數值分布於 0.6~0.9 穿透率之區間，直接進行迴歸分析較不適合，故以各組距大小平均其植生指標。圖 6(a)為 NDVI 指標之結果，除水氣含量較高的 FS2_2 衛星影像有明顯趨勢上的差異外，其餘的衛星影像當穿透率增加時，NDVI 指標亦相對的減少，另外 RVI、PVI 與 SAVI 指標，FS2_2 衛星影像均有偏低指標值，雖然影像經過 ATCOR3 大氣糾正處理，但衛星影像的品質亦會影響到迴歸的結果，而 Worldview2 與 Geoeye 高解析度衛星影像，植生指標的趨勢並無優於解析度較低的 Formosat-2 與 SPOT5 衛星影像，其理由推測是在於當解析度較高時紋理特性會高於光譜特性，地形所產生的陰影會影響到整體的趨勢。

表 3 為植生指標與穿透率之線性迴歸方程式，其中將植生指標定為自變數，而穿透率為定依變數，即 $LPI = a \times VI + b$ ， a 為斜率 b 為截距，結果 a 斜率均為負值，與 Pearson 相關係數檢定結果相同，當穿透率越高時植物覆蓋度越少，植生指標與穿透率之 R^2 值均超過 0.8，表示該方程式合理性。另一方面，在相同植生指標與不同的衛星影像中，其線性迴歸方程式斜率值(a)越低時，表示關聯性越不明顯，從表 3 顯示，相較於其他衛星影像 SPOT5 與 Formosat-2 衛星影像斜率值較高，表示兩種衛星影像可以有效的評估穿透率，而 worldview2 與 GeoEye 衛星影像雖然趨勢為合理的負相關，但穿透率與植生指標間關連並不明顯(趨勢線較平緩)

與 Pearson 檢定相關結果相同，關聯程度以 SPOT5 與穿透率間的關係，並且提供植生指標推估穿透率優於 Formosat-2，而最低之關聯度為 Geoeye 與之參考。WorldView2，故線性迴歸方程式可以量化植生指標

表 2 各衛星影像植生指標之敘述統計並計算與穿透率之相關係數

NDVI	網格數量(N)	平均值(Mean)	標準偏差(Std.)	相關係數 r
火山_FS2	484721	0.8309	0.1274	-0.2724**
火山_SOPT5	370217	0.7989	0.1104	-0.4135**
水庫_FS2_1	189178	0.8729	0.0799	-0.2999**
水庫_FS2_2	260087	0.7247	0.0942	-0.2133**
水庫_GeoEye	4135142	0.8185	0.0739	-0.1719**
水庫_WV2	4129713	0.7990	0.0900	-0.1392**
水庫_SOPT5	186507	0.8587	0.0612	-0.3556**
PVI	網格數量(N)	平均值(Mean)	標準偏差(Std.)	相關係數 r
火山_FS2	484721	0.1651	0.0451	-0.1913**
火山_SOPT5	370217	0.2000	0.0464	-0.3266**
水庫_FS2_1	189178	0.1897	0.0506	-0.2350**
水庫_FS2_2	260087	0.1660	0.0393	-0.1034**
水庫_GeoEye	4135142	0.1982	0.0590	-0.0933**
水庫_WV2	4129713	0.2582	0.0717	-0.0680**
水庫_SOPT5	186507	0.2240	0.0473	-0.2223**
RVI	網格數量(N)	平均值(Mean)	標準偏差(Std.)	相關係數 r
火山_FS2	484721	13.7104	5.1170	-0.3247**
火山_SOPT5	370217	10.2423	2.7948	-0.5280**
水庫_FS2_1	189178	17.4368	6.4455	-0.2992**
水庫_FS2_2	260087	6.6917	1.5670	-0.2620**
水庫_GeoEye	4135142	10.9654	2.8503	-0.1971**
水庫_WV2	4129713	9.9512	2.8010	-0.1423**
水庫_SOPT5	186507	14.4072	3.4430	-0.4255**
SAVI	網格數量(N)	平均值(Mean)	標準偏差(Std.)	相關係數 r
火山_FS2	484721	0.4132	0.0891	-0.2094**
火山_SOPT5	370217	0.4686	0.0854	-0.3520**
水庫_FS2_1	189178	0.4721	0.0896	-0.2634**
水庫_FS2_2	260087	0.4150	0.0724	-0.1323**
水庫_GeoEye	4135142	0.4768	0.1022	-0.1081**
水庫_WV2	4129713	0.5590	0.1067	-0.0882**
水庫_SOPT5	186507	0.5263	0.0793	-0.2566**

**在顯著水準為 0.01 時(雙尾)，相關顯著

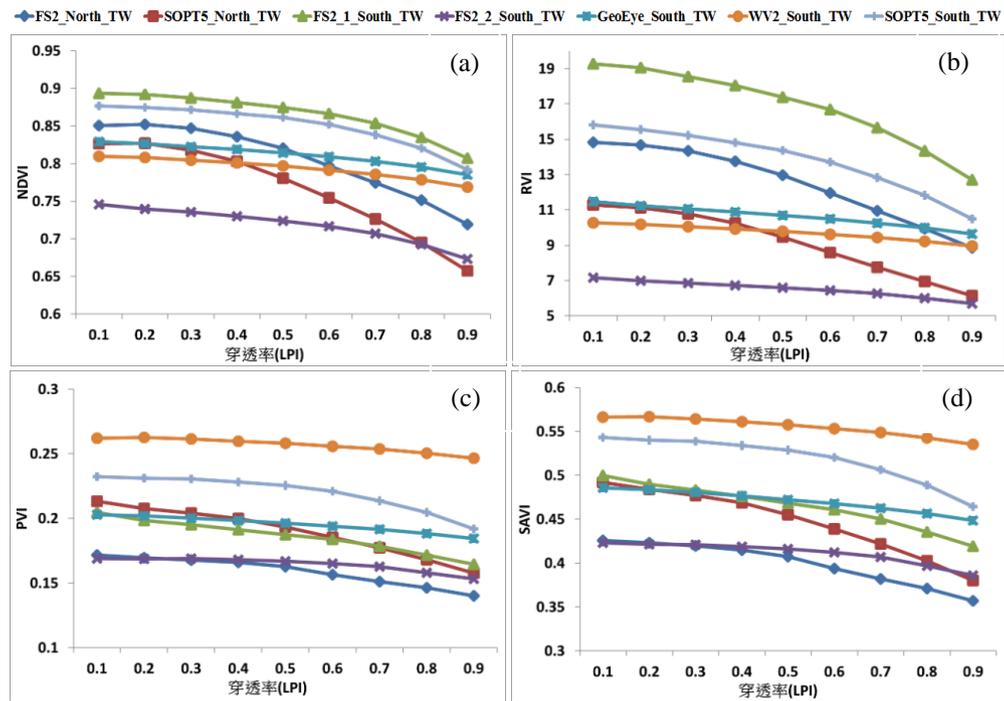


圖 6 空載光達穿透率與 4 種植生指標之趨勢圖

表 3 衛星影像植生指標與穿透率之線性迴歸方程式

NDVI	a	b	R ²	RVI	a	b	R ²
火山_FS2	-5.47	4.91	0.92	火山_FS2	-0.12	2.04	0.96
火山_SOPT5	-4.32	3.81	0.94	火山_SOPT5	-0.14	1.80	0.97
水庫_FS2_1	-8.85	8.16	0.88	水庫_FS2_1	-0.12	2.50	0.94
水庫_FS2_2	-11.17	8.52	0.93	水庫_FS2_2	-0.57	4.22	0.98
水庫_GeoEye	-18.32	15.37	0.96	水庫_GeoEye	-0.45	5.31	0.99
水庫_WV2	-19.20	15.75	0.96	水庫_WV2	-0.60	6.36	0.98
水庫_SOPT5	-8.88	8.05	0.86	水庫_SOPT5	-0.15	2.52	0.93
PVI	a	b	R ²	SAVI	a	b	R ²
火山_FS2	-24.03	4.33	0.95	火山_FS2	-10.75	4.78	0.95
火山_SOPT5	-14.28	3.21	0.97	火山_SOPT5	-6.94	3.60	0.96
水庫_FS2_1	-21.00	4.41	0.98	水庫_FS2_1	-10.32	5.30	0.97
水庫_FS2_2	-44.54	7.83	0.82	水庫_FS2_2	-20.10	8.77	0.86
水庫_GeoEye	-42.90	8.88	0.97	水庫_GeoEye	-21.29	10.52	0.97
水庫_WV2	-47.03	12.58	0.93	水庫_WV2	-24.02	13.84	0.94
水庫_SOPT5	-18.15	4.49	0.86	水庫_SOPT5	-9.44	5.40	0.86
回歸方程式 LPI=a×VI+b							

4. 結論與建議

衛星影像的品質會影響推估的結果，研究測試水氣含量高之 Formosat-2 衛星影像，其統計與趨勢上均偏離其他衛星影像之成果，建議在推估植生指標時，衛星影像之品質為必須考慮之因子。在衛星影像大氣糾正方面，本研究利用 ACTOR-3 對 7 幅衛星影像進行大氣糾正，結果顯示大氣糾正可以減少各衛星影像間植生指標的差異，並且對於地勢產生的陰影能有效減少其影響，並有文獻指出植生指標需經過大氣糾正後才能正確推估其指標，故在長期或多種感測器的衛星影像計算植生指標時，大氣糾正為必要之手段。

在空載光達穿透率與衛星影像之植生密度的關係建構，由 Pearson 相關性檢定的結果顯示，兩者有顯著負相關性(雙尾 0.01)，表示植生指標與穿透率統計上有其關聯性，就相關係數 r 值而言，SPOT-5 衛星影像相關係數均高於其他衛星影像，其次為 Formosat-2，最後為 Geoeye 與 WorldView2，表示影像解析度越高時，對於植生指標與穿透率之關聯並無太大之成效，本研究推測由於 Geoeye 與 WorldView2 為高解度衛星影像，相較於 SPOT-5 與 Formosat-2 衛星影像，其陰影網格數量明顯較多(Wu *et al.*, 2014)，迴歸分析時將陰影網格與植生網格一併和穿透率進行分析，造成整體相關係數較低，而利用 SPOT-5 或 Formosat-2 即可獲得良好的穿透率推估之成效，故衛星影像選用上可利用成本較低之多光譜 10m 或 8m 解析度影像，至於高解析度 2m 之衛星影像在降解析度(resample)後是否會提高植生指標與穿透率之相關，是未來後續研究的方向，本文僅就衛星影像選擇上提供分析結果。建議未來對於空載光達執行飛航任務時，可以參考衛星影像植生指標，瞭解施測區域森林植生密度情形，在衛星影像植生密度高之區域，進而決定是否需要降低航高或減少雷射掃瞄頻率等方法，來增加雷射光入射森林樹冠層之能量。

致謝

感謝內政部 103 年度發展高光譜與光達技術結合之應用工作案(SYC1030219)經費提供與協助。

參考文獻

- 李崇誠，邱珮榕，王驥魁，2014。比較各種空載光達儀器與飛航參數對於森林穿透率影響，航測及遙測學刊，19(1):63-73。
- 林莉萍，2014。應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 黃清美，2006。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論文。
- 黃清美，史天元，2008。雷射入射角與空載光達穿透率關係探討，航測及遙測學刊，13(1):67-73。
- 蔡光榮，陳建富，2005。遙測技術應用於台灣中部集集地震災區崩塌地植生處理工程之植生指數評估，航測及遙測學刊，10(2):203-212。
- 魏浚紘，吳守從，黃冠理，陳朝圳，陳建璋，2013。以空載光達資料推估柳杉人工林地上部生物量，臺灣大學實驗林研究報告，26(2):23-33。
- Barilotti, A., Turco, S., and Alberti, G., 2006. LAI determination in forestry ecosystem by LiDAR data analysis. Paper presented at the Proceedings of Workshop 3D Remote Sensing in Forestry. Vienna, Austria.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., Smith, B., and Treitz, P., 2006. Examining the influence of changing laser pulse repetition frequencies on conifer forest canopy returns. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(12):1359-1367.
- Chu, H.J., Wang, C.K., Huang, M.L., Lee, C.C., Liu, C.Y., and Lin, C.C., 2014. Effect of point density and interpolation of LiDAR-derived high-resolution DEMs on landscape scarp identification. GIScience & Remote Sensing, 51(6):731-747.
- Gaveau, D.L.A., and Hill, R.A., 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser

- scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):650-657.
- Hopkinson, C., and Chasmer, L. E., 2007. Modeling canopy gap fraction from lidar intensity. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. Espoo, Finland.
- Huete, A.R., 1988. A soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25:295-309.
- Jin, Y.X., Yang, X.C., Qiu, J.J., Li, J.Y., Gao, T., Wu, Q., and Xu, B., 2014. Remote sensing-based biomass estimation and its spatio-temporal variations in temperate grassland, northern China. *Remote Sensing*, 6(2):1496-1513.
- Lillesand, T.M., and Kiefer, R.W., 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 2nd edition. John Wiley and Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 721p.
- MacArthur, R.H., and Horn, H.S., 1969. Foliage profile by vertical measurements. *Ecology*, 50(5):802-804.
- Mannschatz, T., Pflug, B., Borg, E., Feger, K.H., and Dietrich, P., 2014. Uncertainties of LAI estimation from satellite imaging due to atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, 153:24-39.
- Morsdorf, F., Frey, O., Meier, E., Itten, K.I., and Allgöwe, B., 2008. Assessment of influence of flying altitude and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5):1387-1406.
- Næsset, E., 2009. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 113(1):148-159.
- Pearson, R.L., and Miller, L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grassland, Colorado. 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1357-1381.
- Richardson, A.J., and Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43:1541-1552.
- Richter, R., and Schlaepfer, D., 2011. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery, ATCOR-2/3 User Guide Vers. 8.0.2. DLR-German Aerospace Center. Remote Sensing Data Center, 202p.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., and Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Greenbelt, MD, NASA/GSFC, type III, final report, 371p.
- Wu, S.T., Hsieh, Y.T., Chen, C.T., and Chen, C.J., 2014. A Comparison of 4 Shadow Compensation Techniques for Land Cover Classification of Shaded Areas from High Radiometric Resolution Aerial Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(4):315-326.
- Zhao, K., and Popescu, S., 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(8):1628-1645.

Assessment of the Relationship between Satellite-Derived Vegetation Index and Lidar-Based Laser Penetration Index in Evergreen Broadleaf Forest

Chung-Cheng Lee¹ Chi-Kuei Wang^{2*} Tzu-Min Hong³ Kun-Jen Wu⁴

ABSTRACT

The forest canopy affects the laser penetration rate of airborne LiDAR system (ALS). The denser the forest canopy, the higher the laser penetration rate, and vice versa. For an ALS survey project, with the goal to acquire sufficient ground surface points, the flight planning should be conducted according to the distribution forest canopy thickness. The information of forest canopy can be easily accessed via the satellite-derived vegetation index. In this study, we examined the correction relationship between the satellite-derived vegetation index and laser penetration index (LPI). The study area was 21 km² located in Tseng-Wen Reservoir and 36 km² located in Jin-Shan volcanic region. The ALS data were collected with an Optech HD400 instrument. The LPI is the ratio between the total number of laser pulses reaching at the ground surface and the total number of transmitted laser pulses. The vegetation indices were calculated from Formosat-2, SPOT-5, WorldView2 and GeoEye, all of which were acquired near the time of ALS data acquisition. This study calculated four vegetation indices, i.e., NDVI, RVI, PVI, and SAVI. The effect of atmospheric correction (conducted by ATCOR-3) were also discussed. The results show high linear correlation between LPI and LAI.

Key Words : airborne LiDAR, laser penetration index of forest, atmospheric correction, satellite-derived vegetation index

¹ Ph.D. Candidate, Dept. Geomatics, National Cheng Kung University

² Associate Professor, Dept. Geomatics, National Cheng Kung University

³ Master, Dept. Geomatics, National Cheng Kung University

⁴ Assistant, Dept. Geomatics, National Cheng Kung University

* Corresponding Author, E-mail: chikuei@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Jul. 28, 2015

Revised Date: Mar. 24, 2016

Accepted Date: Mar. 30, 2016

地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋

謝有忠¹ 侯進雄^{2*} 胡植慶³ 費立沅⁴ 陳宏仁⁵ 邱禎龍⁶ 詹瑜璋⁷

摘要

莫拉克風災後，針對大規模崩塌的研究顯得刻不容緩。本研究利用中央地質調查所現有之 1 米數值地形資料，有別於傳統判釋方法，空載光達資料更能應用於坡地災害的分析。本研究以不同之地形計測方法來進行資料分析，其中透過融合坡度、地形陰影、地形開闊度等方法之結果，可以突顯細微地形特徵或變化處，此法不僅可提升崩塌地特徵之判釋速度，也能減少人為誤判而有效找出潛在大規模崩塌的位置，確實對潛在大規模崩塌的判釋和調查有很大的助益。未來搭配後續調查研究，進一步探討坡面地質災害的可能成因和規模或影響範圍，可為現今防救災策略上必需的重要資訊。

關鍵字：數值地形模型，空載光達，地形測計學，大規模崩塌，自然災害

1. 前言

臺灣地區夏季常受颱風暴雨侵襲，加上位居活躍板塊運動地區，造山運動快速，地震頻仍且偶有大規模地震發生，在地理位置和地質條件等因素，各類型地質災害經常會造成生命財產巨大損失，近年來更由於極端氣候所帶來的影響，在 2009 年 8 月侵台的莫拉克颱風(Morakot)在台灣中南部地區造成嚴重傷亡及財物損失，其中因小林村崩塌之埋村災變而引起國際關注，小林村遭受之災害包含大規模崩塌、土石流、堰塞湖及洪水等四種不同災害類型影響，此一複合型坡地災害議題，進而開啟大規模崩塌災害相關防治工作之研究。

以崩塌研究而言，主要多利用衛星影像、航空照片、現地調查及數值高程模型等基本資料來進行分析研究，這些傳統判釋方法應用在台灣地區則易受植生遮蔽之影響，而影響判釋結果。以地形資料方面，則受限於過去較低解析度和精度的資料，間

接影響判釋的結果。綜合來說，這些技術方法對於淺層崩塌或是新生崩塌的判釋，大多可以在影像上判釋出，但對於前述大規模崩塌地調查，則因缺乏現地狀況較高精度與高解析度之地形資料，研究上仍有所瓶頸。

近年來由於獲取數值地形模型的技術快速發展，尤以空載光達技術所製成的數值地形，具有足夠可靠的解析度、精度，在地表地質作用領域可以提供極佳的應用，更重要的是此項技術可以濾除建物與樹木遮蔽，還原原始地面形貌，能確實符合地質與地形之分析研究，目前空載光達在臺灣已經成功應用在地質、測量、水土保持、森林等各領域，尤其近年來中央地質調查所利用此技術，在火山地質、構造地形、活動斷層、山崩及土石流，都有極佳的應用成果，空載光達技術將是未來環境科學中很重要的工具技術。

地形計測方法(Geomorphometric analysis)是將地表地形量化分析的科學方法，應用在地形、地質、水文、生態等環境科學。早期以判讀地形圖、等高

¹ 國立台灣大學地質科學系 博士生、經濟部中央地質調查所 技士

² 經濟部中央地質調查所 主任

³ 國立台灣大學地質科學系 教授

⁴ 經濟部中央地質調查所 組長

⁵ 經濟部中央地質調查所 技士

⁶ 經濟部中央地質調查所 技正

⁷ 中央研究院地球科學所 副研究員

* 通訊作者，電話：02-29462793 ext.261, E-mail: hcs@moeacgs.gov.tw

收到日期：民國 103 年 08 月 11 日

修改日期：民國 105 年 05 月 04 日

接受日期：民國 105 年 05 月 16 日

線方式來進行量度，進行坡度、坡向等較簡略之分析應用(石慶德，1984；賴進貴，1996)。隨著現代測量技術演進，在臺灣數值高程模型(DEM, Digital Elevation Model)從 40 米、5 米提升至近期空載光達產製之 1 米解析度資料，使得地形計測方法也有不少的發展與應用(陳柔妃，1999；孫稜翔及蔡衡，2008；陳彥傑，2008)，也更能有效地降低這些複雜地形的研究的困難度，並解決過去無法判釋或解讀的資訊，對於地質科學研究上具有很大的助益。

過去崩塌研究中，利用空載光達可以過濾植被的特性，將 DSM(Digital Surface Model)與 DEM 差值所得結果，快速找出無植被或矮植被區域，結合航空照片即可快速判釋崩塌地(劉治中、等，2010)。利用數值地形資料計算之地形張量，得到地形面的法線向量，以這些法線向量所求取特徵值 S_1 、 S_2 之比值並取自然對數($\ln(S_1/S_2)$)之結果，也可表示地形面的崎嶇度 (McKean and Roering, 2004; Kasai *et al.*, 2009)，應用數學和統計的方法來量化地形地貌特徵進行崩塌的研究。本研究利用中央地質調查所現有以空載光達技術所測製之高解析度數值地形資料，藉由地形計測學之方法，來突顯崩塌範圍內之細微地形特徵，以有利於潛在大規模崩塌視覺化判釋作業的進行，提升判釋效率及準確性，配合野外調查，未來亦可進一步探討潛在大規模崩塌的可能成因與影響。

1.1 大規模崩塌的定義

國際間針對坡地土砂災害等現象之分類方法眾多，多以移動材料、移動方式、移動速度、發生規模等因子進行分類，常見的方法為 Varnes 之分類方法(Varnes, 1978)，以移動物質的材料及移動方式來分類。經濟部中央地質調查所參考此山崩分類方法並加入順向坡地形、風化侵蝕、礦坑、棄填土等環境地質基本因子來做為分類之方式，此方式可以利用目前常見的地形或影像資料，進行有效且方便的山崩判釋(經濟部中央地質調查所，2008)。近年來氣候變遷或極端氣候影響，短時間強降雨事件

或長延時降雨事件的頻率和規模都比過去增加，大規模崩塌事件發生頻率也隨著增加，為防減災策略考量，以發生之規模的調查研究，成為首要目的，本文即以崩塌土方量達 10 萬立方米以上，亦即長、寬、深分別為 100 米 × 100 米 × 10 米以上者視為「大規模崩塌」之定義，除在圖面上可清楚劃分崩塌的規模，亦對室內判釋或野外調查作業皆提供方便、容易及有效的操作與定義。

1.2 大規模崩塌可能出現之地表特徵

本文中大規模崩塌主要以移動塊體之規模來定義，具一定規模之重力變形現象即可找出可能存在大規模崩塌的位置，這些重力變形現象包括山頂緩斜面、崩崖、反斜崖、裂縫、二重或多重山稜線、線狀凹地、圓弧型滑動體、坡趾隆起、坡面及側邊蝕溝、岩盤潛變現象、其它老崩塌地地形，部分特徵位置分布如圖 1，這些山崩地形特徵名詞的定義也有專文明確說明 (IAEG Commission on Landslides, 1990)，並列入聯合國文教組織做為全球防災策略之參考。

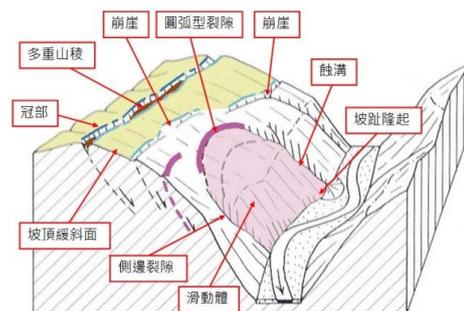


圖 1 大規模崩塌各地形特徵示意圖(修改自鈴木隆介, 2000)

2. 研究區域及數值地形模型資料背景

2.1 研究區域背景

本研究將藉由地形計測學之方法，來突顯崩塌範圍內之細微地形特徵，以有利於潛在大規模崩塌判釋作業的進行，故選擇具有此類地形特徵的古坑車心崙地區來做為研究區域，並以此範圍的數值地形資料來進行分析。

車心崙位於雲林縣古坑鄉樟湖地區，鄰近知名景點草嶺地區，屬濁水溪流域之清水溪中游(圖2)。海拔高程自 250 米至 860 米，崩塌地範圍約 81 餘

公頃，範圍內仍有零星住戶，坡面植生主要以茶葉、檳榔及雜林等，本研究區域屬台灣西部麓山帶地質區，出露之地層由老而新依序為中新世晚期桂竹林層之關刀山砂岩、十六份頁岩、大窩砂岩。由研究區域南側山脊鳥瞰研究區域(圖 3)，約略可觀察到此坡面分布的崩塌地形特徵，如冠部崩崖、次崩崖、坡頂緩斜面、反斜崖、線狀凹地、圓弧型滑動體、坡趾隆起等，經由剖面圖(圖 3)也可觀察到這些細微之地形特徵。

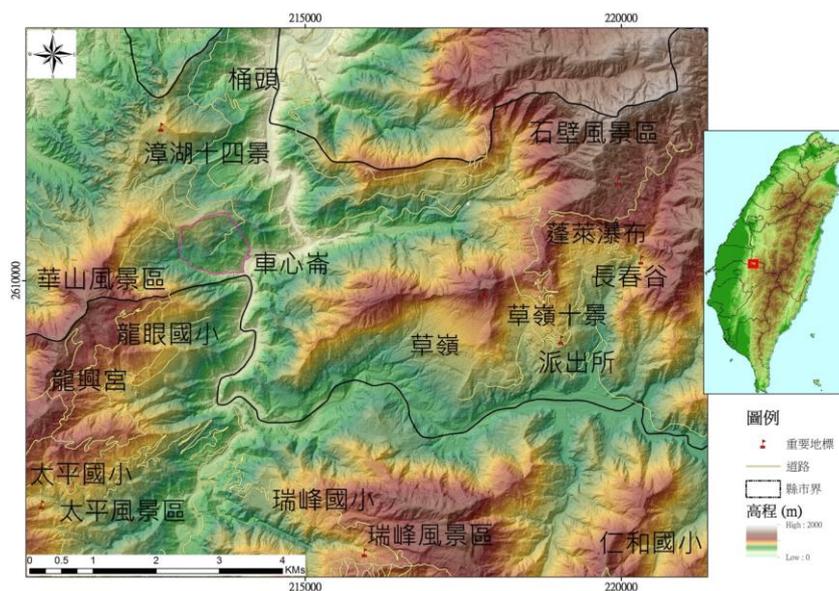


圖 2 研究區域地理位置圖

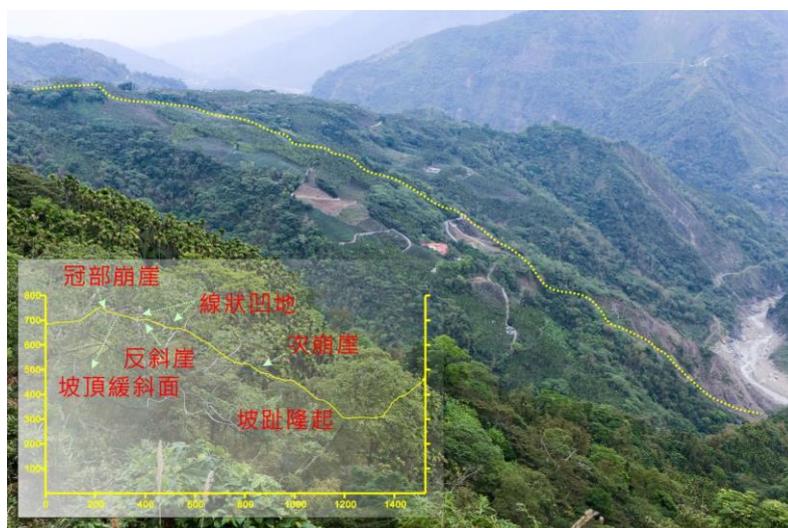


圖 3 鳥瞰研究區域全景以及研究區域剖面圖

2.2 空載光達數值地形資料背景

本研究主要利用經濟部中央地質調查所執行「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」施政計畫時，利用空載光達技術(LiDAR)所獲取高解析度之數值地形模型(DEM & DSM)。整個空載光達數值地形測製作業包含飛航測製作業規劃、飛航率定作業、空載光達資料獲取、高精度 DEM 及 DSM 製作(中興測量公司, 2011; 財團法人成大研究發展基金會, 2011)。前述計畫自 2010 至 2012 年執行，其所獲取的數值地形資料為 1 米解析度，並以每條航線重疊率達 40% 以上，各航帶原始數據之第一或最後回波之平均密度，800 米以下區域點密度需達到 2 點/每平方米，800 米以上區域點密度需達到 1.5 點/每平方米等原則為資料獲取之目標，成果資料之平面座標系統採用 TWD97_CGS 座標系統，與內政部公告 TWD97(2010)相同。本研究區域之飛航規畫參數如表 1(中興測量公司, 2011)。

表 1 古坑車心崙地區之飛航測製參數列表

儀器	ALTM Pegasus	ALTM3070
載具	直升機	直升機
測製日期	1000727、0818	1000815
掃描帶寬(m)	1601.47	1601.47
航高(m)	2500	2200
航速(KTS)	100	70
掃描角度(deg.)	±20	±20
雷射脈衝率(KHz)	100	50
重疊帶寬(%)	60	40
點雲密度 (pt/m ²)	2.6	1.09

由精度評估結果來看(中興測量公司, 2011)，資料之高程誤差多介於 10 公分以內，對於點雲穿透率較差的區域如茂密植生區，誤差最高約為 50 公分，與一般所知空載光達之誤差等級為公分級相當，精度主要仍受地形坡度及植生茂密程度而影響。

3. 研究方法

地形計測方法(Geomorphometric analysis)是將地表地形量化分析的科學方法，利用計量、統計或影像分析等技術將地表地形特徵以各類量化指標來描述，可以應用在地形、地質、水文、生態等環境科學的分析研究。本研究以中央地質調查所現有之 1 米空載光達數值地形資料，利用 Esri Arcgis 軟體進行空間資料之運算和分析，主要有坡度分析(Slope angle)、日照陰影計算(Hillshade)、坡向分析(Aspect)、曲率(Curvature)、地表粗糙度(Surface roughness)、特徵比值(Eigenvalue ratio, ER)、透空度分析(Openness)等地形計測方法。各地形計測方法原理及運算方式說明如下。

坡度主要用以表示地形斜坡的斜度，亦即坡度為表示水平距離內，高程值的平均變化量，表示的方式有度和百分比，以高程變化除以水平距離結果的正切函數值即為坡度(度)，以高程變化除以水平距離結果再乘以 100 即為坡度百分比。在地理資訊系統(GIS)中，坡度計算多利用規則式網格資料，以移動網格的方法，基本運算為 3*3 網格大小，將每個網格與鄰近 8 個網格的最大高程變化值統計而得，其演算法可參考 ARCGIS 操作說明(ESRI, 2012; Burrough and McDonell, 1998)。藉由地理資訊系統的計算，可將數值地形資料處理後，以數值方式表示坡面的傾斜程度，並且將數值資料圖像化，而有助於在地形的研究與應用。

坡向主要用以表示空間上某個平面所面向的方位，如同坡度計算一般，坡向計算也是以移動網格的方法，基本運算為 3*3 網格大小，將每個網格與鄰近 8 個網格的最大高程變化差值而得。坡向計算方程式可參考 ESRI 操作說明(ESRI, 2012; Burrough and McDonell, 1998)，其主要以 X 方向和 Y 方向高程統計變化差值計算之變種正切函數值，計算結果再經邏輯運算表示，即可表示坡向。經由 GIS 圖像化處理後，坡向的資訊對於坡地災害的研究上，為重要參考因素之一。

地形陰影為地形分析判釋上常用的方法之一，

其表示方式為透過假定的光源方向和角度，來演算每個網格的陰影值(灰階值)。此方法的優點為利用模擬陽光方向角度，讓地表覆蓋能生成視覺化的效果，讓地貌呈現較美觀及立體化。此法藉由光源的控制，可以呈現不同角度的陰影效果，卻也是此方法的缺點之一，不易顯示出地形特徵平行於光源之地表特徵，且部分區域也受陰影覆蓋影響而無法呈現其地形特徵，易造成錯誤判讀，因此透過重覆地使用不同角度光源分析來克服此項缺點(Challis *et al.*, 2011)。在地形陰影運算過程，主要為光源角度和光源方向的計算，再加上前述的坡度與坡向計算等，綜合後再計算而得，其計算之關係方程式可參考 ESRI 操作說明(ESRI, 2012；Burrough and McDonell, 1998)。

曲率為地形計測中用來表示地形曲面幾何型態的參數之一，又可依方向性區分 profile curvature 及 plan curvature，profile curvature 為坡面方向上的曲率值，plan curvature 為垂直坡面的曲率值。一般曲率運算的方式也有多種，本文以常見的 GIS 軟體中的運算式來說明，以規則式網格地形資料，利用 3*3 移動網格來計算，將地形面二次微分的值來表示地形曲率(Zeverbergen *et al.*, 1987；Moore *et al.*, 1991；ESRI, 2012)，計算式可參考 ESRI 操作說明(ESRI, 2012)。

openness 透空度由 Yokoyama *et al.* (2002)所提出的地形參數，用以表示不規則地表面在不同位置俯視或向上開闊的程度，經由地表起伏和水平距離之關係來量測此角度，此角度量測綜合地形的視線原則，沿八方位計算天頂角和天底角之角度和平均值。透空度包含了正向和負向兩種計算值，正向值表示量測位置水平面之上，較高的凸形地形面，而負向值表示量測位置水平面之下以及較高的凹形地形面。sky-view factor 也是以類似天頂視角計算來表示地形特徵(Štular *et al.*, 2012; Zakšek *et al.*, 2011)，這些方法可以避免地形陰影法中，陰影覆蓋以及與光源平行的特徵容易被忽略的缺點，目前已在火山地形(Chiba *et al.*, 2008; Prima and Yoshida, 2010; Prima *et al.*, 2006)、構造地形分析(Lin *et al.*, 2013)和人類遺跡判釋(Štular *et al.*, 2012)等研究上

應用。

地表粗糙度為地形的變異程度，主要利用數值統計的方法來表示地表平坦、地形高差變化的參數，包含有地形高程標準差、坡度標準差、坡度和坡向的變異數等(McKean and Roering, 2004; Glenn *et al.*, 2006; Frankel and Dolan, 2007)，而 Pelletier *et al.* (2009)。這些以數值地形資料來計算相鄰網格最大高程與最小高程差值來表示地表粗糙度，主要多以移動網格的方式來計算，用以表示地形資料中相對變化或差異較大的區域，而應用至各種地形變化的研究。

特徵比值方法(Eigenvalue ratio, ER)也是一種地表粗糙度的表示方法之一，為利用空間資料的分布狀況，以方向張量(orientation tensor)為基礎所衍生的空間資料分析表示方法，最早分別由 Scheidegger 和 Fara 提出(Fara and Scheidegger, 1963; Scheidegger, 1964)，此方法過去多在構造地質學上應用，分析空間中特徵面、構造組構的分布狀況。當空間中特徵向量越集中，可表示地形較平坦，相反地則表示地形越崎嶇。每個地形特徵面都可利用坡度和坡向的計算來得到方向餘弦，進一步即可計算特徵向量的數值，式(1)為表示特徵面的空間矩陣，當 T 正歸化後，即可表示為方向張量， $T = t / N$ 。計算後特徵向量(Eigenvector)即為 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 (式 2)，特徵值(Eigenvalue)相對為 S_1 、 S_2 、 S_3 (式 3)，可用來描述資料叢集向量方向的量值和性質(Guth, 2003; McKean and Roering, 2004)。

$$T = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i y_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Eigenvectors } (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), \quad \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \approx N \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Eigenvalues } S_i = \lambda_i / n, \quad \text{when } S_1 + S_2 + S_3 = 1 \dots\dots\dots(3)$$

利用所獲得的三個特徵值的相互比值關係，可

以得到對應地形面法線向量的兩參數(Guth, 2003)。平坦參數(flatness parameter)為選擇 S_1 、 S_2 之比值並取自然對數之結果,來表示每個空間面的法線向量,亦即表示此空間面的平均坡度,向量分布也表示空間面許多不同的方向,或可表示地形面的崎嶇度(McKean and Roering, 2004)。叢集參數(organization parameter)為選擇 S_2 、 S_3 之比值並取自然對數之結果,來表示空間面的順排方向及量值,在構造地質上可以分析出組構面的優勢順排方向,進而分析可能的應力應變關係(Guth, 2003)。

4. 結果與討論

4.1 傳統判釋方法與高解析數值地形的應用

傳統崩塌研究方法,大多利用衛星影像、航空照片等圖像資料,在室內進行崩塌特徵判釋和圈繪,搭配較低解析度和精度的數值地形資料來進行分析研究,以車心崙地區航空照片(圖 4(A))來看,僅部分坡腳區域出現淺層崩塌而植生裸露的現象,其餘則多植生覆蓋。再配合以往臺灣地區較常使用的數值地形模型資料,包括行政院農委會製作之 40 米數值地形模型資料(圖 4(B))、2005 年由內政部所測製之 5 米航測數值地形模型資料(圖 4(C)、4(D))。40 米的資料約略可判釋出研究區域內山脊、河道及坡面空間狀況,5 米的資料則大致上地形的趨勢變化,山脊、河谷蝕溝、平緩坡地都可觀察到,各類不同地形地貌分布也可大致分辨出,但對於崩塌所造成細微地形變化,上述兩者資料狀況則多無法呈現。這些結果顯示傳統判釋方法應用在臺灣地區,對於淺層崩塌或是新生崩塌的判釋,大多可以在影像上判釋出,但對於大規模崩塌地調查,則易受植生遮蔽或資料解析度限制之影響,會間接影響判釋的結果。

隨著數位航測、光達等技術的發展,數值地形模型資料解析度也越提升,國內較常使用的數值地形模型資料,也由行政院農委會製作之 40 米網

格解析度到 2005 年由內政部測製完成全島 5 米網格資料;本研究則應用地調所產製之 1 米之數值地形模型資料,以車心崙地區為例(圖 4),展現各種不同解析度的資料結果,也顯示出各種資料結果有很大的差異。40 米和 5 米的 DEM 結果(圖 4(B)、4(C)、4(D))大致上可觀察出各類不同的地形地貌,且隨地形趨勢變化亦可判斷出山脊、河谷蝕溝、平緩坡地等,相較於 1 米 DEM 結果(圖 4(E)、圖 4(F)),除了地形分布之位置更明確外,坡面上有更多的細微地貌特徵被顯示出來,從圖 4 中不同解析度資料成果比較後,可呈現地形變化約 1 至 2 米的地表特徵正適合應用於坡地災害的分析研究。圖 4 中,紫紅色研究區域範圍正是利用 1 米解析度資料,依據觀察到的地形特徵來研判,就一般崩塌判釋之經驗法則,將已經發育或潛在發育的崩塌範圍圈繪出。也就是說在使用數值地形資料上,因資料取得和資料產製成本等因素下,數值地形資料解析度須考量這些因素,而選擇適合使用目的之資料等級,並非所有用途都需使用最高階解析度之資料,或較低階解析度都無其應用之價值。在數值地形資料的使用上,隨著不同的任務導向與使用者需求之應用目的、比例尺大小,而選擇適宜之解析度數值地形資料。

4.2 不同計測方法之應用討論

本研究利用坡度分析(Slope angle)、日照陰影計算(Hillshade)、坡向分析(Aspect)、曲率(Curvature)、地表粗糙度(Surface roughness)、特徵比值(Eigenvalue ratio, ER)、透空度分析(Openness)等地形計測方法,利用車心崙地區之數值地形資料進行分析,每種地形計測方法以不同計算方式或原理運算,藉由這些不同運算方式的結果所代表的意義,都有助於後續各方面應用判讀。如坡度分析的結果,就直接顯示地形坡度資訊,對於地形起伏、坡面傾斜等趨勢變化都可以直接觀察出,而在 GIS 系統中,用不同色階方式呈現,也會造成不同視覺化判讀效果,如圖 5 以紅黃綠色階和灰階等兩種方式來呈現坡度分析的結果,就有不同的效果,紅黃綠色階方式可以觀察出坡度變化的

趨勢，而灰階方式則有類似地形陰影的效果，可以視覺化來觀察地形起伏，讓雙眼能有三維地形的視覺感受。

坡向分析結果，可直接提供地形面方向的資訊；日照陰影計算 Hillshade 則以模擬日光來源的方式，所得影像因明暗變化而讓地形資訊具有三維

立體的視覺化效果，肉眼可以容易感覺出地形起伏或變化，包括山谷、山峰、河道等各類地形特徵，但日光光源方向和高低角度不同所造成陰影、平行光源方向等，也會造成地形特徵遮蔽或不容易判釋。

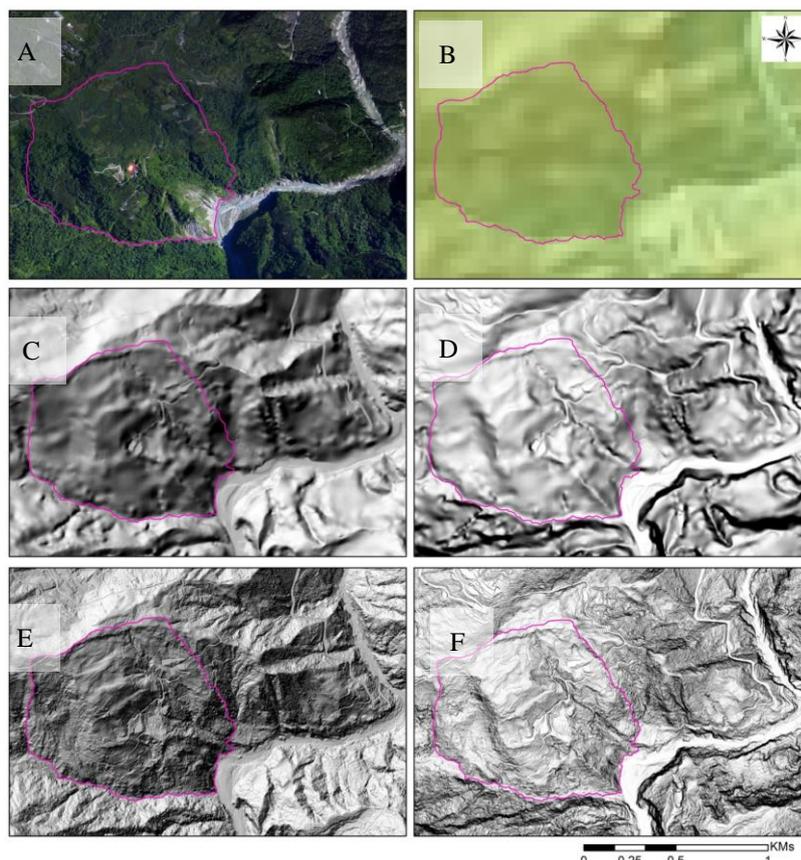


圖 4 研究區域航照圖(A)及以不同解析度、不同日光光源下之數值地形資料所呈現之地形陰影圖結果。B 為 40 米網格解析度資料之地形陰影搭配高程暈渲圖，C、D 為 5 米網格解析度資料，分別以日光光源角度為方位角 315°，高度角 45°以及方位角 0°，高度角 90°之結果；E、F 為 1 米網格解析度資料，分別以日光光源角度為方位角 315°，高度角 45°以及方位角 0°，高度角 90°之結果

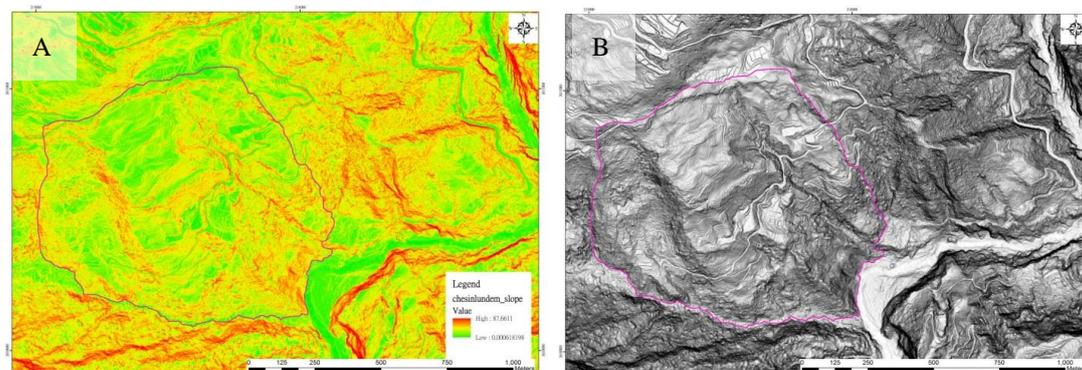


圖 5 利用 1 米網格解析度資料以不同色階方式所呈現之研究區域坡度圖結果，並分別以紅黃綠色階(A)和灰階(B)等兩種方式來呈現坡度分析的結果

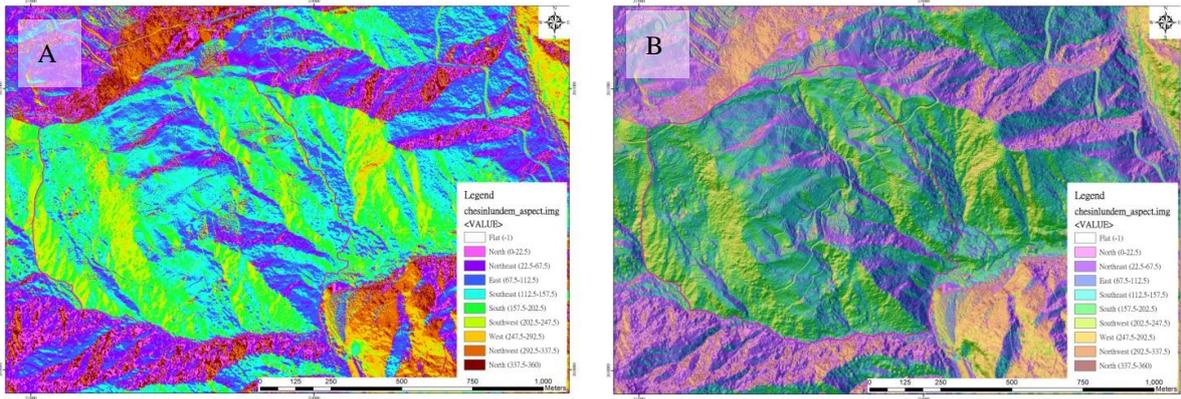


圖 6 A 圖為研究區域數值地形資料經處理後所得之坡向圖，B 圖為坡向圖疊加地形陰影圖

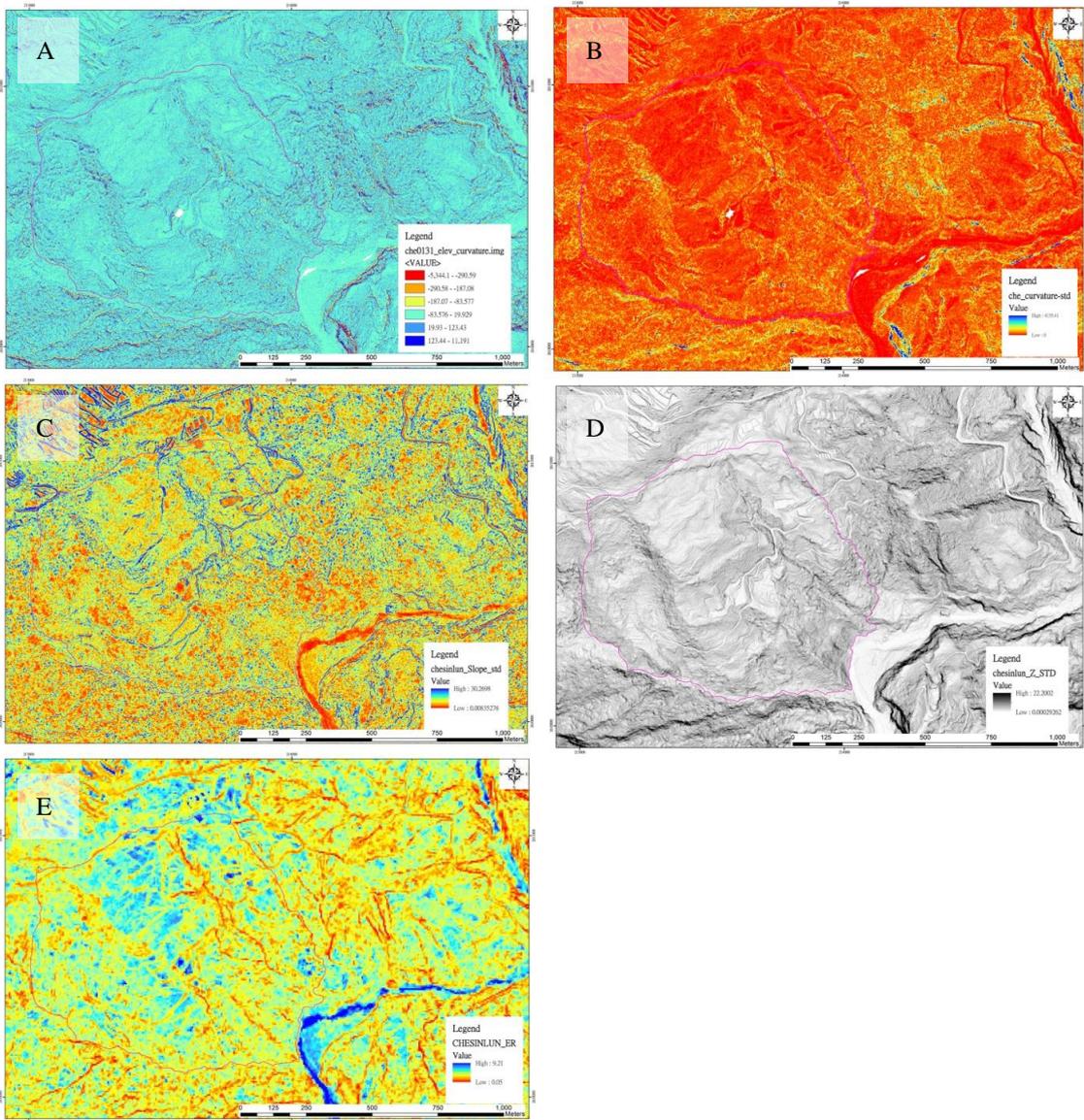


圖 7 車心崙地區數值地形資料經不同計測方法處理後所得之結果，A 為曲率圖，其中 B-D 代表不同地表粗糙度計算方法之結果(B 為曲率標準差結果圖，C 為坡度標準差結果圖，D 為高程標準差結果圖)、E 為特徵比值圖

曲率 (Curvature)、地表粗糙度 (Surface roughness)、特徵比值(ER)等資料(圖 7)，多為計算式或統計方式的結果，可表示為地形變化特徵處，其數值表示的物理意義不見得適用於視覺化判釋分析，需要再利用數值分析、統計方法或疊加上具視覺化效果的圖像，才有利於視覺化判釋或萃取所需地形資訊。

綜合上述，地形計測方法將數值地形資料分析處理後，其結果大致上可分為兩類，1.分析坡度 (Slope angle)、日照陰影計算 (Hillshade)、坡向 (Aspect)、透空度 (Openness) 等結果可以得到具視覺化效果的影像，讓雙眼可以直接判讀地形起伏與變化，2. 曲率 (Curvature)、地表粗糙度 (Surface roughness)、特徵比值(ER)等(圖 7)可以得到數值化的成果，但需要利用後續資料統計分析配合或再萃取，始可獲得所需資訊成果。因此在數值地形資料的分析處理上，可以依據欲分析之目的，選擇適用的方法來進行。

4.3 透空度及紅色立體投影圖的應用

透空度分析 Openness 為由 Yokoyama *et al.* (2002)所提出的地形參數，主要以一區域地表水平距離與高程間的角度關係($\tan\theta$)該地不規則地表的主要形貌。透空度計算又分為正值與負值(圖 8)透空度分析的結果，在正值結果方面可以很明顯將稜線、緩階地或高程差變化處表現出來，而負值之結果則可以很明顯將水系分布表現出來。此法所表現的陰暗變化，除可將立體地形視覺化的表現，而類似日照陰影圖或坡度圖，又更加強調了地表的主要凹凸特徵，這不僅可以去除日照陰影圖因光源方向不同而有的差異與降低數值高程模型雜訊的影響，還能突顯角度變化強烈處，如階地、崩崖等，使得透空度分析的結果對於地貌或地形分析等判釋，可以提供極方便的訊息。然而以類似天頂視角計算的方式來表示地形特徵(Štular *et al.*, 2012; Zakšek *et al.*, 2011)，這方法可以避免地形陰影法中，受陰影覆蓋的範圍及與光源平行的特徵容易被忽略等缺

點，此法目前已在火山地形(Chiba *et al.*, 2008; Prima and Yoshida, 2010; Prima *et al.*, 2006)、構造地形分析(Lin *et al.*, 2013)和人類遺跡判釋(Štular *et al.*, 2012)等應用。

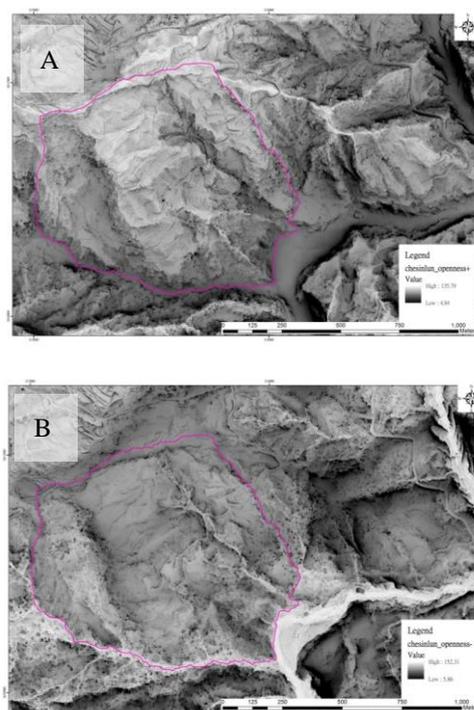


圖 8 車心崙地區數值地形資料經透空度處理後所得之結果，A 圖為透空度正值、B 圖為透空度負值

Chiba *et al.* (2008)提出紅色立體投影圖“Red Relief Image Map (RRIM)”，如圖 9(A)所示，紅色色階越紅表示坡度越陡，灰階越淡表示透空度越高，較深表示透空度較低，此方法除了避免地形受陰影覆蓋影響及與光源平行的特徵容易被忽略等缺點，也保有原地形資料解析度，且對於細微特徵變化，可成功以此法將之視覺化，如在新期構造所造成地形高差變化，利用高解析度數值地形，配合此法也可成功判釋出(Lin *et al.*, 2013)。應用在崩塌判釋方面，經由大規模崩塌造成的地形特徵，也多屬於很細微的特徵變化，利用此方法也可將崩崖、山頂緩斜面、反斜崖或反向坡地形、裂縫、線狀凹地、圓弧形滑動體、坡趾隆起、坡面及側邊蝕溝等地形特徵凸顯，並能利用地形立體視覺化的效果進行分析判釋(圖 9(B))。

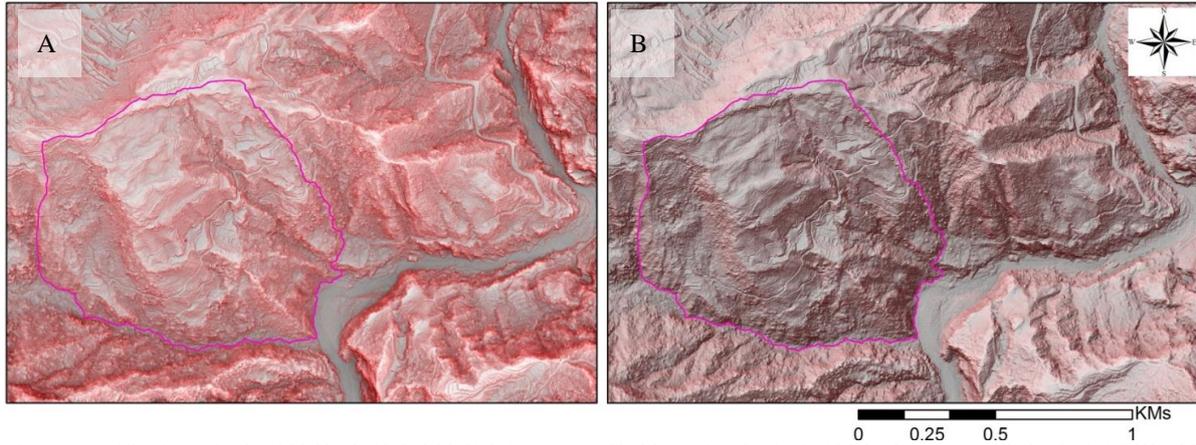


圖 9 A 圖為車心崙地區數值地形資料經透空度處理後所呈現之紅色立體模型圖，B 圖為紅色立體模型疊加地形陰影圖

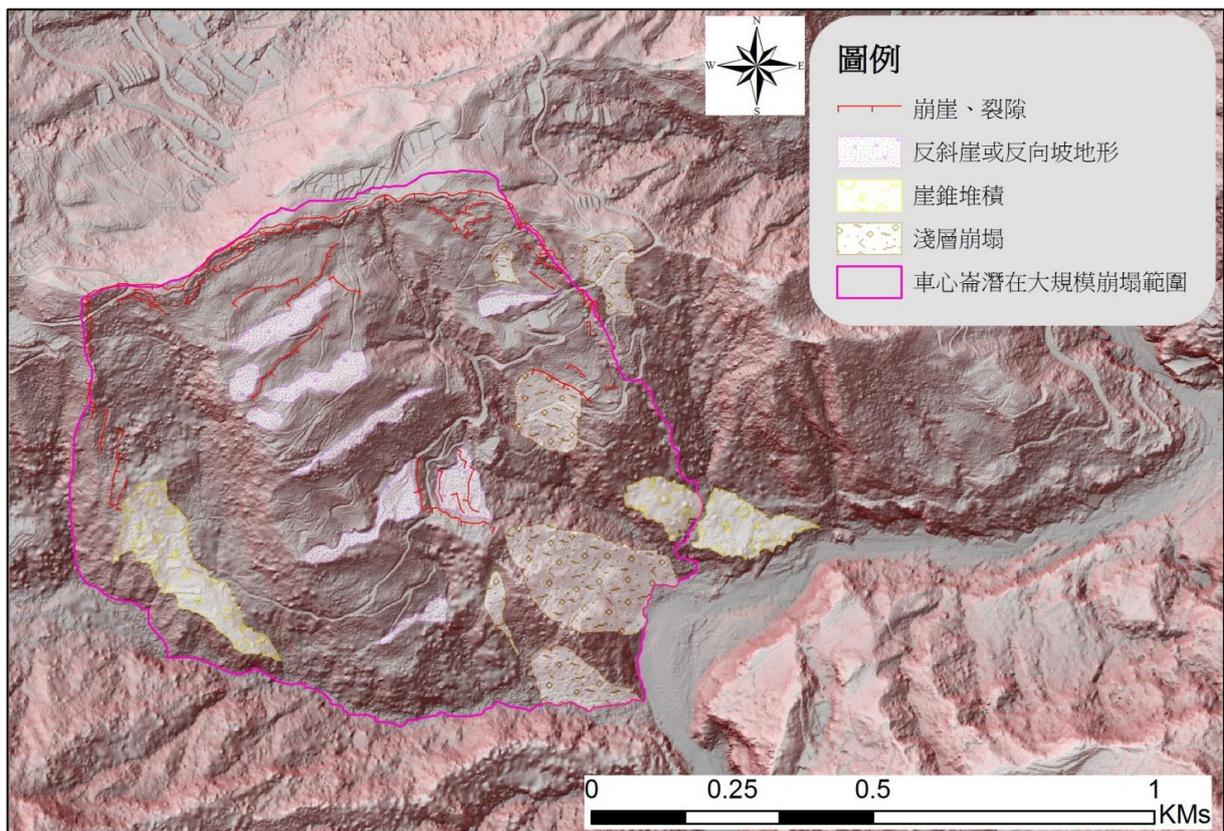


圖 10 車心崙地區經判釋後所得之地形特徵結果，底圖為紅色立體模型疊加地形陰影圖

4.4 潛在大規模崩塌的判釋

崩塌判釋分析中，傳統研究的各類方法多數不具立體地形視覺化效果，也多數未直接顯示山崩位置，皆僅找出地形變化較大的特徵處，故仍需要再

利用數值分析、統計方法或疊加上具視覺化效果的圖像，才有利於視覺化判釋或萃取所需地形資訊。

比較各種地形計測方法的結果，本研究發現利用坡度、地形陰影及透空度分析之結果(圖 9)，較能顯示出地形特徵紋理和地形坡度的高低起伏，並直接將其視覺化，有助於人為判釋。判釋結果(圖

10)可以清楚呈現車心崙地區所出現的大規模崩塌之地形特徵，包括崩崖、山頂緩斜面、反斜崖或反向坡地形、裂縫、線狀凹地、圓弧形滑動體、坡趾隆起、坡面及側邊蝕溝等。以此方法應用在臺灣中部地區的大規模崩塌判釋，以雲林、嘉義地區為例，在莫拉克颱風事件後本區域內也有多處坡地發生大規模崩塌，藉由高解析度光達數值地形，加上坡度、地形陰影及透空度分析之結果，反映大規模崩塌可能存在之細微地形特徵，可辨識出傳統上航空照片加上等高線或 5 米解析度數值地形資料等所無法分辨之地形特徵，有助於崩塌地的判釋作業。利用此類地形計測方法，已可在臺灣中部地區判釋出 473 處大規模崩塌潛勢區位(謝有忠、等人,2012)，已判釋出的點位範圍如阿里山、瑞里、草嶺、石桌、神木等地區，其中部分點位經野外調查發現確實有發生過或具有潛在大規模崩塌的現象；相較於過去傳統判釋方法，利用光達數值地形資料配合此地形計測方法，不僅可提升判釋速率，也能減少誤判而有效找出潛在大規模崩塌的位置，確實對潛在大規模崩塌的判釋和調查有很大的助益。

4.5 數值地形資料品質、精度與點雲之關係

數值地形模型的精度，一般指的是模型表示的地形高程與真實高程之間差值的標準偏差。一般高程由離散點雲值經內插方法而得，離散點雲越密集的範圍，所內插的高程就能越接近真實高程值，而當點雲分布稀疏時，選擇的內插函數就會影響高程值或精度。

空載光達掃瞄時所獲取的地面點多寡，主要受植被疏密程度與雷射光入射角度之影響，部分植被茂密區域甚至可能完全沒有雷射光能穿透，尤其在臺灣地形陡峭且植生茂密，如何提高有效地面點獲取比率確實為目前所遭遇的難題之一。而有效地面點密度之品質指標也可進而表示數值地形模型的品質指標。此項指標主要受地形限制、飛航規劃和光達點雲分類作業等影響。本研究利用 ESRI

ARCGIS 空間分析模組，讀入分類後點雲資料，以每平方米為計算單位來求取有效地面點雲密度，以車心崙地區來看，此範圍平均地面點雲密度約為 $0.98\text{Pt}/\text{m}^2$ ，結果如圖 11 中所示，有效地面點主要仍受地形限制和植生覆蓋等影響，較平緩地形密度明顯高於較陡之地形範圍，低矮植生(茶園)明顯高於茂密植生(雜林)地形範圍，緩地形、低矮多有 $2\text{Pt}/\text{m}^2$ 以上，但部分茂密植生之陡坡則低於 1，甚至無地面點雲。

以車心崙地區來看，綜合地調所計畫中各類植生覆蓋的精度評估成果為 0.146-0.237 米(中興測量公司, 2011)，整體結果符合數值地形資料製作規範要求，也與一般空載光達技術所知的精度相當；惟一般精度評估多為整批資料以抽樣方式進行評估，較無法了解局部研究區域其資料的品質；對局部研究地區的資料品質或精度來看，有效地面點雲密度分布也就提供一項可靠的參考指標。由車心崙區域來看，雖範圍內多數細微之地形特徵都能清楚呈現，疊上點雲密度分布後(圖 11(A))，在這些地形特徵不明顯區域中，其有效地面點雲分布密度都出現密度較低或缺少點雲分布的狀況。也就是說當點雲密度高時，內插高程值與真實高程的差異會很小，接近真實地表狀況，點雲密度低或缺乏點雲時，內插值會與真實高程有較大差異，此點即可讓使用者在利用數值地形進行分析時，可分辨出此研究區域數值地形資料的品質和精度。另外經由正射航照的比較(圖 11(B))，點雲密度稀疏多分布於較陡坡面和竹林、雜林區，在緩坡以及低矮茶園則有較高的點雲密度分布，此點就與理論上有效地面點多寡主要受植被疏密程度與雷射光入射角度之影響相符。以車心崙崩塌地來看，可判釋出多數僅有 1-2 米變化的崩崖和裂隙等之細微地形特徵，顯示目前空載光達技術所產製的數值地形已足可供崩塌調查分析使用。此外在使用數值地形資料時，仍須注意點雲穿透力較差的範圍，在地形陡坡或茂密雜林內因點雲密度較低而無法較真實呈現地表狀況。

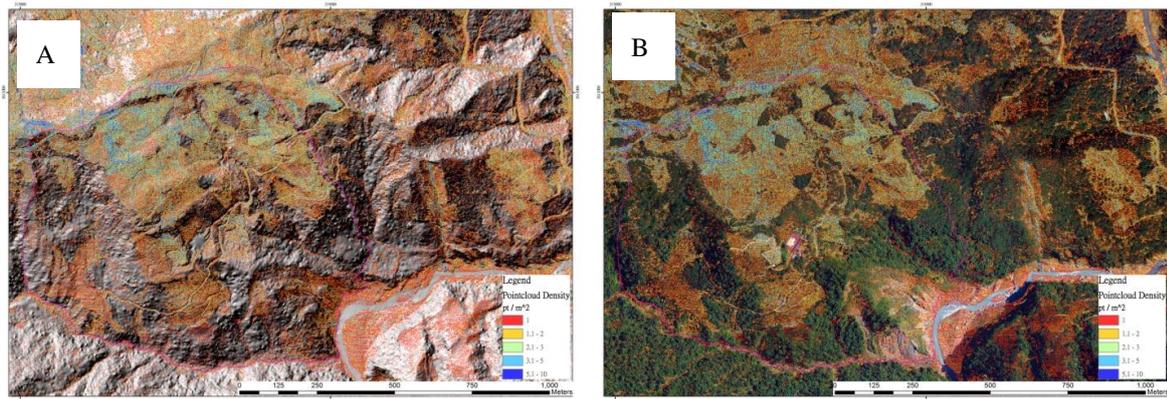


圖 11 研究區域光達掃描所獲取有效地面點雲密度之結果與地形陰影圖、正射航空影像之比較

5. 結論

傳統崩塌判釋研究方法應用在台灣地區，對於淺層崩塌或是新生崩塌的判釋，大多可以在影像上判釋出，但對於大規模崩場地調查，則易受植生遮蔽或資料解析度限制之影響，會間接影響判釋的結果。隨著數位航測、光達等技術的發展，數值地形模型資料解析度也越提升，以車心崙地區為例，藉由各種不同解析度資料展現的結果，也顯示出各種資料結果有很大的差異。隨著解析度的提升，細微的地形變化也才能被觀察出，從不同解析度資料成果比較後，其中可呈現地形變化約 1 至 2 米的地表特徵的解析度正適合應用於坡地災害的分析研究。

本研究利用坡度分析(Slope angle)、日照陰影計算(Hillshade)、坡向分析(Aspect)、曲率(Curvature)、地表粗糙度(Surface roughness)、特徵比值(Eigenvalue ratio, ER)、透空度分析(Openness)等地形計測方法，將雲林古坑車心崙地區之數值地形資料進行分析，其結果大致上可分為兩類，1.坡度分析(Slope angle)、日照陰影計算(Hillshade)、坡向(Aspect)、透空度(Openness)等結果可以得到具視覺化效果的影像，讓雙眼可以直接判讀地形起伏與變化，2. 曲率(Curvature)、地表粗糙度(Surface roughness)、特徵比值(ER)等可以得到數值化的成果，但需要利用後續資料統計分析配合或再萃取，始可獲得所需資訊成果。因此在數值地

形資料的分析處理上，可以依據欲分析之目的，選擇適用的方法來進行。並了解每種地形計測方法的原理和計算過程，可以選擇最適用或最佳效率的方法，則有助於後續應用分析，也不會有誤用或錯用之情形。

比較各種地形計測方法的結果，本研究發現以坡度、地形陰影及透空度分析後所得之結果，較能顯示出地形特徵紋理和地形坡度的高低起伏，並直接將其視覺化，有助於人為判釋。此方法除了避免地形陰影覆蓋以及與光源平行的特徵容易被忽略的缺點，也保有原地形資料解析度，對於細微特徵變化，亦可成功將之視覺化。應用在崩塌判釋方面，在大規模崩塌可能存在的地形特徵，亦都屬於很細微的特徵變化，利用此方法也可將崩崖、山頂緩斜面、反斜崖或反向坡地形、裂縫、線狀凹地、圓弧形滑動體、坡趾隆起、坡面及側邊蝕溝等地形特徵凸顯，並能利用地形立體視覺化的效果進行分析判釋；相較於過去傳統判釋方法，不僅可提升判釋速率，也能減少誤判而有效找出潛在大規模崩塌的位置，確實對潛在大規模崩塌的判釋和調查有很大的助益。未來搭配後續的地質調查或細部研究，更能進一步探討坡面地質災害的可能成因和規模或影響範圍，可為現今防救災策略上必需的重要資訊。

在數值地形資料的選擇考量方面，因資料取得和資料產製成本等因素下，可選擇適合使用目的之資料解析度等級，並非所有用途都需使用最高階解析度之資料，或較低階解析度都無其應用之價值。

亦即在數值地形資料的使用上，隨著應用目的、比例尺大小的不同，而選擇適宜之解析度數值地形資料。

數值地形模型資料的精度主要受植被疏密程度與地形坡度之影響所致，點雲密度分布也提供一項可靠的參考指標，以車心崙崩塌地來看，除部分陡坡和雜林區點雲較稀疏，使得陡坡和雜林區部分地形特徵較不明顯外，多數崩崖和裂隙等細微地形特徵可經由數值地形資料判釋出，而這些地形特徵顯示目前所產製的數值地形已足可供調查分析使用。此一訊息也提醒在使用數值地形資料時，仍須注意點雲密度較低穿透力較差，而無法較真實呈現地表狀況的範圍。

致謝

本研究感謝經濟部中央地質調查所支持及環境與工程地質組光達科同事的協助，並感謝中興測量公司、詮華國土測繪有限公司、群立科技股份有限公司、自強工程顧問有限公司等參與光達數值地形資料測製之團隊，以及國立成功大學團隊對測製成果資料嚴格之監著作業。

參考文獻

- 中興測量公司，2011。國土保育之地質敏感區調查分析計畫-莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作(2/3)-100 年度 2-1 分區，經濟部中央地質調查所，臺北。
- 石慶得，1984。地形計測法及其作業模式之研究，文化大學地學研究所，臺北市。
- 孫稜翔，蔡衡，2008。八卦山背斜集水區地形計測指標於活動構造意義之探討，師大「地理研究」，49: 23-141。
- 財團法人成大研究發展基金會，2011。國土保育之地質敏感區調查分析計畫-莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作之檢核與監審(2/3)-100 年度，經濟部中央地質調查所，臺北。
- 陳彥傑，2008。臺灣山脈地形演育的測高曲線與高程頻率分佈形態，國立臺灣大學理學院地理地理學報，54:79-85。
- 陳柔妃，1999。嘉南地區活動構造之地形計測指標研究，國立成功大學地球科學研究所，臺北市。
- 鈴木隆介，2000。建設技術者のための地形図読図入門第3卷 段丘・丘陵・山地，古今書院，東京。
- 經濟部中央地質調查所，2008。都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集說明書，65 頁。
- 劉治中，蕭國鑫，饒見有，劉進金，吳哲榮，黃群修，2010。結合空載 LiDAR 與彩色航照應用於崩塌地研判，航測及遙測學刊，15(1)：111-122。
- 賴進貴，1996。數值高度模型與地形計測研究：資料解析度問題，國立臺灣大學理學院地理地理學報，20:61-73。
- 謝有忠，陳宏仁，邱禎龍，侯進雄，2012。高解析度數值地形在坡地地質災害之研究，經濟部中央地質調查所 100 年度研究發展專題，1-60 頁。
- Burrough, P.A., and McDonell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 190 p.
- Challis, K., Forlin, P., and Kincey, M., 2011. A Generic Toolkit for the Visualization of Archaeological Features on Airborne LiDAR Elevation Data. Archaeological Prospection, 18: 279-289
- Chiba, T., Kaneta, S.I., and Suzuki, Y., 2008. Red Relief Image Map: New Visualization Method for Three Dimensional Data. Remote Sensing and Spatial Information Sciences vol. XXXVII, Part B2. Beijing, 1071-1076.
- ESRI, 2012. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, <http://resources.arcgis.com/>
- Fara, H.D., and Scheiddegger, A.E., 1963. An eigenvalue method for the statistical evaluation of fault plane solution of earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America,

- 53:811-816.
- Frankel, K.L., and Dolan, J.F., 2007b. Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D., and Dorsch, S.J., 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73:131-148.
- Guth, P.L., 2003. Eigenvector Analysis of Digital Elevation Models in a GIS Geomorphometry and Quality Control. Concepts and Modelling in *Geomorphology*, 199-220.
- IAEG Commission on Landslides, 1990. Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 41:13-16.
- Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., and Fujisawa, K., 2009. LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. *Geomorphology*, 113:57-69.
- Lin, Z., Kaneda, H., Mukoyama, S., Asada, N., and Chiba, T., 2013. Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey. *Geomorphology*, 182:104-115.
- McKean, J., and Roering, J., 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57:331-351.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., and Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5:3-30.
- Pelletier, J.D., Mitasova, H., Harmon, R.S., and Overton, M., 2009. The effects of interdune vegetation changes on eolian dune field evolution: a numerical-modeling case study at Jockey's Ridge, North Carolina, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34:1245-1254.
- Prima, O.D.A., Echigo, A., Yokoyama, R., and Yoshida, T., 2006. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 78:373-386.
- Prima, O.D.A. and Yoshida, T., 2010. Characterization of volcanic geomorphology and geology by slope and topographic openness. *Geomorphology*, 118:22-32.
- Scheidegger, A.E., 1964. The tectonic stress and tectonic motion direction in Europe and Western Asia as calculated from earthquake fault plane solutions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54(5A):1519-1528.
- Štular, B., Kokalj, T., Oštir, K., and Nuninger, L., 2012. Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science*, 39:3354-3360.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. *Transportation Research Board Special Report*, 176:11-33.
- Woodcock, N.H., 1977. Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geological Society of America Bulletin*, 88:1231.
- Woodcock, N.H., and Naylor, M.A., 1983. Randomness testing in three-dimensional orientation data. *Journal of Structural Geology*, 5(5):539-548.
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., Pike, R.J., 2002. Visualizing topography by Openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68:257-265.
- Zakšek, K., Oštir, K., and Kokalj, Z., 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing*, 3:398-415.
- Zevenbergen, L.W., and Thorne, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12:47-56.

Potential Catastrophic Landslides Mapping by Using Geomorphometric analysis

Yu-Chung Hsieh¹ Chin-Shyong Hou^{2*} Jyr-Ching Hu³ Li-Yuan Fei⁴
Hung-Jen Chen⁵ Cheng-Lung Chiu⁶ Yu-Chang Chan⁷

ABSTRACT

Extreme weather events have induced more frequent geological hazards in Taiwan. The heavy rainfall brought by the Typhoon Morakot has triggered a large amount of landslides including the Xiaolin village which was demolished by a catastrophic Landslides. The study of such catastrophic landslides is urgently needed. It is considered that the creep phase of a landslides is a preparatory stage of progressive failure and gives enough signals before turning into a catastrophic landslides. This study used high-resolution airborne LiDAR-derived DEM data from the Central Geological Survey, MOEA. We used different geomorphometric analyses to process the high resolution and high accuracy DEM data including the hillshade, aspect, slope, eigenvalue ratio & openness. Among these geomorphometric analyses, which to converged openness, slope and hillshade method of the results, the capacity to discuss the possible cause and the influence analysis of the catastrophic Landslides in view of the slight terrain features has increased drastically through DEM processing. Our results indicate that over hundreds potential catastrophic landslides may present in southern Taiwan after the Typhoon Morakot event. The quantitative methods used in this study highlight the terrain features of the creep phase of catastrophic landslides and is helpful for landslide feature interpretation and hazard assessment.

Keywords: : airborne LiDAR, DEM, catastrophic landslides, Geomorphometry, natural hazard

¹ Associate Technical Specialist, Central Geological Survey, MOEA ;

Ph.D. Student, Department Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

² Chief of Planning Office, Central Geological Survey, MOEA

³ Professor, Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

⁴ Chief of Environmental & Engineering Geology Division, Central Geological Survey, MOEA

⁵ Associate Technical Specialist, Central Geological Survey, MOEA

⁶ Technical Specialist, Central Geological Survey, MOEA

⁷ Associate Research Fellow, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan

* Corresponding Author, Phone : 02-29462793 ext.261, E-mail: hcs@moeacgs.gov.tw

Received Date: Aug. 11, 2013

Revised Date: May 04, 2016

Accepted Date: May 16, 2016

應用空載光達資料自動化萃取建物邊界線

洪曉竹^{1*} 曾義星² 朱宏杰³

摘要

建物邊界線乃二維與三維圖資中重要的地物空間資訊，目前仍以航測立體測繪方式產製為主，產製效率不高。空載光達提供地物表面密佈的三維取樣點雲，隱含豐富的地物幾何特徵及三維空間資訊。理論上可從光達點雲萃取出屋頂面與牆面特徵，取其交會線特徵獲得建物邊界線，但空載光達點雲分佈於牆面的點通常較稀疏，不易萃取牆面特徵，以獲得建物邊界線。此外，由於屋頂面的附屬結構使得點雲分佈更雜亂，常使萃取得的邊界線特徵不連貫。本文針對上述課題提出自動化萃取建物邊界線之程序，演算法包含兩步驟，第一步驟是萃取三維平面點雲與邊界點偵測，結合多重回訊點，先獲得邊界線的候選點雲；第二步驟是透過 Hough transform、直線擬合與線段分割等步驟萃取邊界線段。本研究選出十棟不同類型的建物進行測試，檢視邊界線萃取方法的成功率及效能，與現有地形圖比較之量化評估成果顯示，約 70% 的建物邊界線可被正確萃取出來，對屋頂結構線的正确萃取率也約可達 85%，顯示出本研究所提出之演算法，對於從空載光達點雲資料萃取建物邊界線及結構線是有成效的。所萃取之建物邊界線及結構線乃三維建物模型重建的基本資料元素。

關鍵詞：空載光達、點雲、建物邊界萃取、建物模型重建

1. 前言

1.1 動機與目的

二維地形圖是目前國家都會地區記錄地表地物現狀的主要圖資，並且為國土資訊系統九大資料庫中的基礎資料，可說是市政建設最常應用的空間資料。近年來，隨著電腦資訊科技與空間資訊獲取技術的快速精進，二維的地理資訊系統逐漸朝三維立體的整合系統發展，即三維數碼城市。二維數值地形圖多採用攝影測量方式生產，經過立體測繪與實地踏勘調繪補測產製而成。三維房屋模型的產製亦多採用攝影測量方式，從全景影像、近景攝影測量、或是在立體製圖儀上量測航拍影像中房屋特徵的三維坐標，能獲取精確的房屋模型。立體測繪之時間與人力成本相當龐大，因此有必要藉由電腦演

算分析取代人力，發展自動化的房屋建模。光達點雲資料中含有建物的三維資訊，用於重建模型能達到較高的自動化程度，但點雲不規則的離散分佈，使得特徵萃取成為首要面對的課題。因光達點雲資料具備平面精度高與平均密度高之特性，屬於同一物體的點位分佈可視為均勻且連續，萃取涵蓋範圍較大的面特徵較直觀且便利，因此大部分研究由面特徵萃取著手，再由面交會的方法獲取線特徵或點特徵 (Dorninger and Pfeifer, 2008; Kim and Habib, 2009)。理論上，採用相鄰平面交會的方式，萃取得得的線特徵較精準，例如，山形屋之各個屋頂面會相交於屋脊線，屋頂面與垂直牆面相交於建物輪廓線。但在空載光達點雲資料中，牆面的點雲密度通常較為稀疏，或甚至沒有牆面點，因此有時候無法利用此法求得房屋外部輪廓線。如何從空載光達

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 教授

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

* 通訊作者, E-mail: piggyyo@gmail.com

收到日期：民國 103 年 03 月 21 日

修改日期：民國 105 年 04 月 11 日

接受日期：民國 105 年 04 月 20 日

點雲自動化萃取隱含之房屋線邊界線特徵是一門相當重要的課題，因此本研究的目的是發展一套自動化演算法，從空載光達點雲資料自動化萃取建物邊界線。

1.2 文獻回顧

不論是二維(2D)數值地形圖亦或是三維(3D)房屋模型，建物邊界線是主要且重要的組成元素之一。從資料導向的觀點來看，許多文獻顯示只要能獲取建物邊界線之三維資訊，就能完成模型重建之工作，也就是說，進行三維房屋模型重建之前，萃取房屋邊界線是必要且不可忽略之程序。因此，有許多研究針對空載光達資料之特性，提出多種從空載光達資料萃取建物邊界線之方法，而這些方法主要都包含建物區塊偵測、邊界點偵測、建物邊界線一般化 (generalization) 與正規化 (regularization) 等步驟。建屋區塊偵測分為點雲分類與平面特徵萃取，點雲分類主要是從空載光達點雲資料中分離建物與非建物點雲。平面特徵萃取則是使用區塊化方法 (Segmentation) 從建物點雲中萃取出屋頂平面，常見的方法為群聚法 (Clustering) (Dorninger and Pfeifer, 2008) 和區域成長法 (Region growing) (Kada and Wichmann, 2012)，除了利用點雲的幾何特性，大部分研究將點雲內插成二維網格資料，運用影像處理的方法進行特徵萃取 (Ma, 2005; Jarzabek-Rychard, 2012)。但是，內插後的資料可能造成重要特徵資訊遺失，且結果受網格細密度影響。建物邊界點偵測目的是從建物點雲尋找能描述建物外圍輪廓的點，常用的方法為不規則三角形網 (Triangulated Irregular Network, TIN) (Vosselman and Dijkman, 2001)、 α -shape 演算法 (Dorninger and Pfeifer, 2008; Wei, 2008; Kada and Wichmann, 2012) 或凸殼演算法。建立 TIN 為最直觀之方式，但由於建物邊界線萃取只需要保留建物輪廓線附近的點，輪廓線以內的三角網通常予以忽略，因此多出許多不必要的計算； α -形狀演算法是藉由調整圓形半徑，建物點雲外圍與此圓形相切的點視為邊界點，若點雲密度較稀疏，則內部可能產生錯誤的

空洞；凸殼演算法是目前較為廣泛使用，且能依使用者需求加以彈性修改的方法 (Kim and Habib, 2009; Sampath and Shan, 2007; Lee *et al.*, 2011; Al-Durgham *et al.*, 2012)。邊界線一般化則是指透過簡化方法濾除細碎的線段，保留較具代表性的特徵點，而規則化則是透過幾何約制條件，整合屬於相同邊界線的線段，使最後的建物邊界線與現實世界中的建物結構線一樣相互垂直或平行。建物邊界線萃取的流程與作法較多元，困難程度與建物的複雜度成正比，加上建物結構相當多樣且多變，目前沒有一套統一的做法可適用於所有類型之建物。

1.3 研究流程

現實世界中，建物種類相當多元，但大致可拆解成建物本體與附著於牆面之物體兩大構造，其中建物本體係指建築物外牆與屋頂面構成的三維立體空間。建築面積的定義為建築物外牆中心線以內之最大水平投影面積 (茂榮編輯部, 2011)，若將三維建物點雲投影至二維水平面，則最外圍點雲連線形成的二維面積即為建築面積。依屋頂面結構之不同，可將建物區分為以下幾種，有屋脊結構之建物如組合式、山形屋、天幕式，不包含屋脊結構之建物如平頂建物、圓弧頂建物。其中屋頂面上可能有附屬結構，包含水箱、水塔、防火牆、煙囪、避雷針等。此外，為了安全性之考量，常在屋頂面上建造女兒牆之結構。本研究討論之範疇為含有女兒牆結構之有屋脊建物與多層結構之平底建物，建物邊界線均為直線段，不包含圓弧頂建物。數值地形圖中，房屋邊界線之施測以永久性構建部分外緣之滴水線為準，凡面臨汽車通行道路之臨時性突出物如遮雨棚、頂樓加蓋違建突出之屋簷、招牌廣告物等如超出道路外者，均應截去不予測繪。航照影像數化建物邊界線時，若女兒牆沒有內縮，則沿著女兒牆的邊緣逐步數化；若女兒牆內縮而看得見屋頂面，則沿著屋頂面之邊緣逐步數化。空載光達點雲資料中，建物邊界線是指能描繪建物外圍形狀的三維離散點雲於水平面上投影點連線形成的二維多邊形輪廓 (Dorninger and Pfeifer, 2008)。由上述定

義可知，建物的特徵線可分成內部結構線與外部邊界線，內部結構線是指屋頂面交會形成的屋脊線，外部邊界線則是代表建築面積多邊形之線特徵。

本研究提出的演算法主要針對有女兒牆結構之含屋脊建物與多層平頂建物，進行外部邊界線之自動化萃取，主要流程如圖 1 所示，包含三個步驟：點雲預處理、建物邊界點偵測、建物邊界線萃取。點雲預處理包含從空載光達點雲提取建物點雲，針對多層平頂建物萃取三維共平面點群；建物邊界點偵測則以凹殼演算法追蹤外部輪廓點；因邊界點雲不規則之分布，使得邊界點連線呈鋸齒狀，有時因屋頂突出物之遮蔽，造成邊界點分布不連續，故加入第一與中間回訊點作為輔助。另外，邊界點與邊界點之間沒有空間關係連結，為了因應各式各樣的建物種類，本研究提出一套整合性的自動化萃取流程，包含應用霍夫轉換 (Hough Transform) 萃取共線點、由共線點進行空間擬合至最適直線、以及線段偵測。

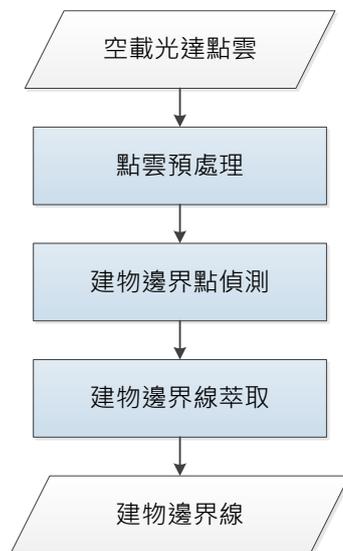


圖 1 本研究提出的演算法之主要步驟流程圖

2. 建物邊界點偵測

2.1 建物點雲提取

本研究方法的設計乃針對同屬於一棟目標建物的空載光達點雲，因此主要目的為將建物類點雲

與非建物類點雲區分開來，非建物類點雲包含地面、植被、樹木、路燈、以及建物間的連接通道等。因本研究最終目標為萃取建物邊界線，為降低因分類錯誤而影響線特徵萃取成果的程度，故採用現有點雲處理軟體 TerraScan 搭配人工編修，針對平均高度較高與較低矮之建物進行建物點雲之提取。在地面點分類的部分，此套軟體是通過反覆地建立地表不規則三角網 (TIN) 來分離地面點與非地面點。首先選擇局部最低點作為地面點組成初始不規則三角網模型，初始點的選定與給定的網格大小有關，而透過最大建物尺寸 (Max building size) 參數可控制網格大小，假設預設的最大建物尺寸為 60 公尺，則網格大小為 60 公尺 X 60 公尺，代表每 60 公尺至少會保有一個位於地面上的點。建立初始不規則三角網模型後，逐一對其它各點進行條件判定，若滿足條件則視為地面點，並更新不規則三角網，直至沒有產生新地面點為止，每次加入的點都會使模型更接近地表起伏。主要判斷條件有二：該點與三角面的垂直距離及夾角 (圖 2)，以此兩條件來決定該點與三角面間的距離，若視為地面點則加入三角網模型中。

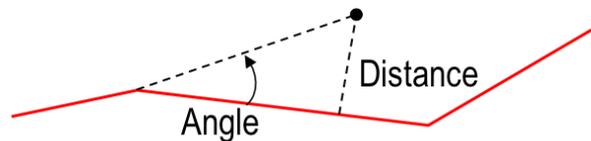


圖 2 不規則三角網點雲過濾法示意圖

在進行植被與樹木分類之前，需確認地面點已被正確分類，因此套軟體是以地面點產生的地表三角網模型為高程基礎，逐一比對其餘各點距離三角網模型的相對高差，若某點至地表模型的相對高差小於門檻值，則認為該點為植被點或樹木點。使用者可根據自身需求調整此門檻值，本研究設定此門檻值的原則於不同實驗區域有所不同，若區域內的建物平均高度遠大於植被或樹木的高度，則以區域內高度最高樹木距地表的相對高差為門檻值；若區域內的建物平均高度與植被或樹木的高度相當，則以區域內植被或樹木距離地表的平均相對高差之

二分之一為門檻值。經過上述兩步驟可得到除了地面點與植被點以外的未分類點雲。而在提取建物點的部分，可透過一較直觀的方法，即以未分類點雲的絕對高度平均值為基準，向 Z 軸正方向與負方向給定相同的高度緩衝區 (buffer)，位於此區域內的點雲均視為建物點。透過此步驟可確保建物點被區分出來，但若區域內的建物平均高度與植被或樹木的高度相當，則可能發生植被或樹木被誤分成建物點的情形，此時需透過人眼判斷明顯的錯誤分類並直接改變點雲的分類屬性，例如建物點雲通常分布較均勻而平整，相對地，植被或樹木點雲分布較為不規則且高度較不一致。經由人為編修後可獲取正確的建物點雲資料，並減少分類錯誤的機率。

2.2 三維平面點雲萃取

目前點雲區塊化的方法有許多種 (Huang *et al.*, 2013; Ma, 2005)，部分方法需先將點雲網格化，但在內插成網格時可能產生資訊遺漏的問題。本實驗採用基於八分樹結構之分割－合併演算法 (Octree-based split-and-merge algorithm) (Wang and Tseng, 2010)，萃取共平面點，此方法無需將點雲內插為網格式，因此可避免內插導致的資料遺漏問題。由於點雲資料量龐大，資料搜尋耗時，使用八分樹將點雲結構化後，可將每個節點的位置對應到類似三維陣列的空間索引，加快點搜尋的速度。且每個節點皆必須計算點雲資料的最適平面參數，其方法為檢查此節點中每一個點到平面的距離是否小於預設的臨界值，若該距離大於臨界值，則判定此節點中之點雲資料不共面，需加以分割。經由分割程序找出的最適平面，可透過合併程序將相鄰平面合併為較大的平面，主要以下兩步驟判定：第一，若兩平面之間的夾角小於設定的臨界值，則判定此二平面可能可以合併；第二，通過前項判定的平面，則以兩平面所有的點雲資料重新計算最適平面參數，並以距離條件檢查，通過此兩項條件的平面才正式合併。經由上述分割－合併的程序，即可將不同平面的點雲分隔開來，並得到最適平面參數，詳細流程如圖 3。

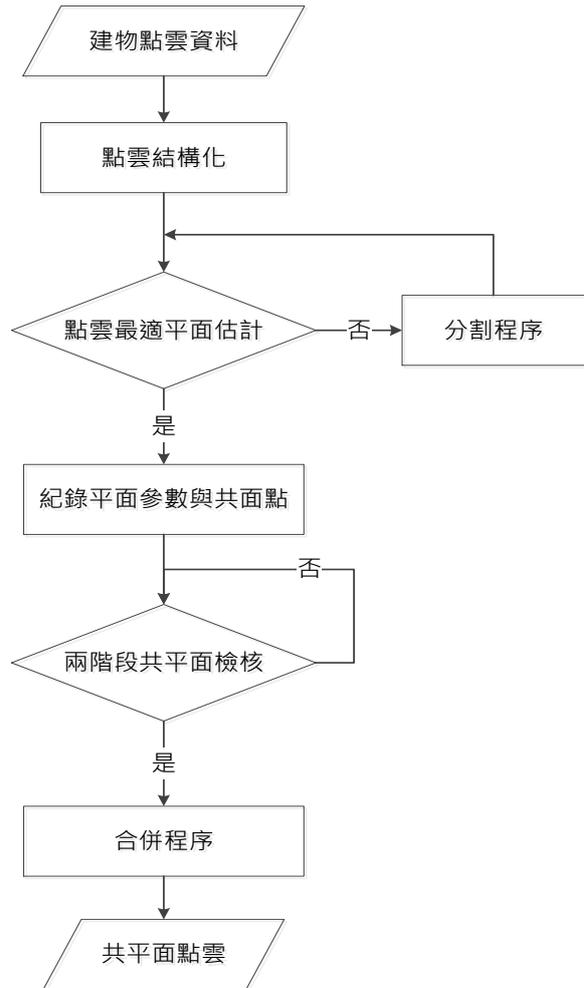


圖 3 基於八分樹結構理論之分割－合併法流程圖

2.3 邊界點追蹤

不論平頂屋或山形屋，若建物屋頂是沒有其他附屬構造之平整面，則雷射光束接觸到屋頂即反射，產生單一回波。當建物屋頂包含其他較複雜的附屬結構或女兒牆等屋頂突出物，雷射光束可能先接觸屋頂突出物，再接觸屋頂面，甚至繼續接觸到地面，則會產生兩個以上回訊點的多重回波，圖 4 乃空載光達掃描一棟包含屋頂突出物之建物的示意圖，大部分為單一回訊 (藍點)，在高度落差的部分多產生至少兩個回訊的多重回波，如黃點、綠點、紅點分別為多重回波之第一回訊、中間回訊、以及最後回訊。一般而言，中間回訊點多發生在森林區域，建物區域較少見，但出現在建物區域的中間回訊點可能代表重要的建物邊界資訊。雷射光束依序接觸屋頂突出物、屋頂面、地面，因此中間回

訊點反映了建物邊界，若忽略中間回訊點，可能使得邊界點連線發生缺角或不連續等與實際情況不符之現象。

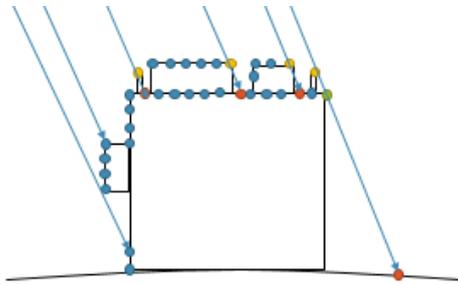


圖 4 多重回訊點分布圖

若一棟建物以屋頂面為分隔線，屋頂面上突出物之點雲通常具有以下共通點：一為高度較屋頂面高，二為水平投影面積較屋頂面面積小，三為第一回訊或少部分之中間回訊會產生於輪廓線附近；而屋頂面以下與之相互垂直之牆面，因光達系統掃描方式與牆面結構高度落差之影響，點雲數雖不及水平面的點雲數多，但大部分為多重回波。因此本研究認為，可使用屋頂面將建物點雲資料切割成兩部分，屋頂面以上的部分為邊界點偵測演算法的作用對象，藉以找出屋頂面與各平面的輪廓點；屋頂面以下的部分因點雲數目較少甚至沒有，可直接以多重回波之第一回訊點與中間回訊點為代表，故進行邊界點偵測之前，需先找出建物的屋頂面高度。經由前述區塊化的流程，落在屋頂面上的點雲可能因屋頂附屬結構的遮蔽造成不連續之現象，而將屋頂面切割成兩個以上之平面。換句話說，三維平面萃取之結果可能尚需經過平面間之判斷與整合才能完整找出屋頂面涵蓋範圍，此判斷與整合過程可能因不同建物而異。本研究提出較一般化且直觀的判斷方式，判定步驟有二：首先，透過區塊化所得各平面之面積與建築面積的面積比需大於臨界值，通過此條件的平面視為屋頂面之候選平面。接著逐一計算候選平面中所含點雲的平均高度值，並將這些平均高度值加以排序，選出最小值作為屋頂面之高度值，圖 5 為屋頂面判斷示意圖。

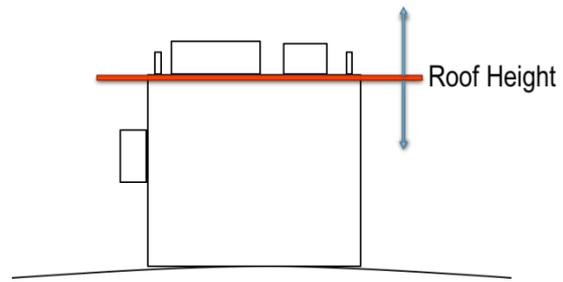


圖 5 屋頂高度估計之流程圖

針對每一共面點群，可追蹤其輪廓點形成外包多邊形，稱為凸殼 (Convex Hull) 演算法 (Andrew, 1979; Sampath and Shan, 2007; Lee *et al.*, 2011)。凸殼的定義是指包含這群點的所有可的外殼中，表面積與容積最小的外殼，即殼內任意兩點之連線不會與外殼相交。若應用於二維平面點雲，凸殼指的是包含這些點的所有多邊形中，面積最小的多邊形，如圖 6 (a)。雖然凸殼演算法能追蹤平面點雲的外圍輪廓點，但可能遺漏完整包覆平面點邊界線的重要細節，為克服此項問題，Sampath and Shan (2007) 將凸殼演算法修改為凹殼演算法。原本的凸殼演算法只考慮角度條件，較易遺失平面多邊形的細部資訊，因此凹殼 (Concave Hull) 演算法引入搜尋視窗的概念，即在將某邊界點與其他鄰近點連線之前，以搜尋視窗篩選等待判斷之鄰近點，形成較具細節的外包多邊形，如圖 6(b)。若搜尋視窗太大，亦會發生遺失多邊形細節之問題，故需根據不同的點雲間距採用不同的搜尋視窗，例如圓形、矩形或橢圓形 (Lee *et al.*, 2011)。或者，直接以平均點雲間距的倍數作為線段長度門檻值 (Sampath and Shan, 2007)，其概念與搜尋視窗類似，但執行上較簡潔且能達到與使用搜尋視窗相同之效果。

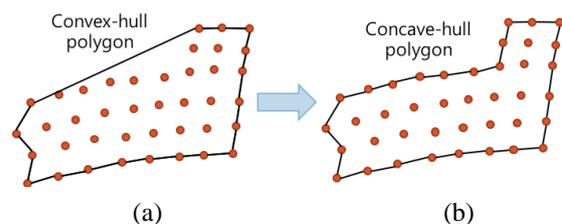


圖 6 (a)凸殼與 (b)凹殼多邊形示意圖

本研究採用以平均點雲間距的倍數為線段長度臨界值，做法係先利用凸殼演算法偵測初始的凸殼多邊形，計算各初始邊界點之間的距離，並逐段檢查距離是否超過邊長臨界值，若大於臨界值，表示兩點之間尚有其他可能為建物邊界點之點雲，故進一步搜尋更鄰近的點雲，找到滿足角度條件與邊長條件的邊界線，最後所得的邊界點連線可完整呈現平面點雲的形狀。本研究於實驗中人為調整線段長度臨界值，測試此參數對邊界點偵測之影響程度。

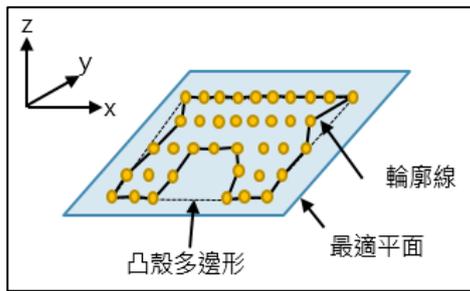


圖 7 二維平面點之輪廓線與凸殼多邊形示意圖

3. 建物邊界線萃取

3.1 霍夫轉換(Hough Transform)

霍夫轉換最早是用在偵測影像中的直線，在影像空間中通過一個任意點的一條直線，映射到參數空間為一個點，通過此任意點的直線可能有無限多條，映射到參數空間則為一條參數直線。若影像空間中存在第二點，通過此點的直線也有無限多條，但同時通過此兩點的直線則是唯一的。因此影像空間的兩個點映射到參數空間時，參數直線會交於一點，此點即代表通過影像空間中此兩點所形成的二維直線參數。依此類推，當影像空間中有數個共線點，則映射到參數空間的直線會交於一點。簡言之，霍夫轉換有幾項特性：第一、影像空間中某一點，對應於參數空間中的一條直線；第二、參數空間中某一點，對應於影像空間中的一條直線。因此將影

像空間特徵點轉換到參數空間，在參數空間找出多條直線的交會點，即能求得共線點的直線參數。

二維空間的直線方程式可以表示為：

$$y = mx + b \dots\dots\dots (1)$$

其中 (m, b) 分別代表直線的斜率與y軸截距。當直線與y軸平行時，斜率為無窮大，若有共線點的排列接近於平行y軸，便無法求解直線參數。為避免此問題，可將直線方程式改以二維直線法距(Normal Distance)及法角(Normal Angle)表示(Duda and Hart, 1972)：

$$\rho = x_i \cos\theta + y_i \sin\theta, \theta = [0, \pi] \dots\dots\dots (2)$$

其中 (ρ, θ) 分別為直線到坐標原點的法距和此法距與x軸之夾角，稱為法角， (x_i, y_i) 則為影像空間中的點坐標，故影像空間中一點映射至參數空間為一曲線。

因光達系統掃描方式的影響，建物邊界點雲並非完全共線，而是呈鋸齒狀分布，因此，物空間點雲映射至直線參數空間中的曲線不會精準地交於一點，而是交會於一區域。點雲的共線趨勢越顯著，參數空間中交會點的特徵也越顯著，如何決定交會點得到最具代表性之直線參數，成為應用霍夫轉換首要面對的問題。

累增器(Accumulator)是應用霍夫轉換時，在參數空間中累計每組直線參數出現次數的記錄器。累增器的橫軸與縱軸分別是法角與法距，法角區間由0度到180度，依使用者需求劃分角度間距，法距區間係以霍夫轉換中出現的所有法距的最小值和最大值作為下邊界和上邊界，間距則是以上下邊界的差值除以角度的格數，目的為使累增器橫軸與縱軸的網格數相同。其中網格的細緻程度稱為累增器解析度，解析度越高，萃取之共線點間共線趨勢較顯著，能萃取包含點數較少之直線，但易將同一群共線點分成兩條以上的直線(peak split)(Tu et al., 2011)，計算時間也相對變長。本研究採用最直觀的方式，由建物邊界點雲資料中各點的 (x, y) 坐

標透過直線式映射至參數空間，以參數空間累增器中出現次數最高的為最具代表性直線，萃取第一條直線後即移除所屬的點，剩餘的點雲再進行一次霍夫轉換，重複上述步驟逐一萃取邊界線。

3.2 空間直線擬合

若點雲資料於空間中呈現連續直線狀分布，可用最小二乘擬合(Least Squares Fitting)找到一條屬於這些點的最適直線（劉嘉銘，2005），以所有點雲資料到此直線垂直距離之平方和為最小的條件，利用最小二乘平差法解算直線參數，如圖 8 所示。平差解算後所得的最佳擬合直線亦需滿足「所有點到最佳擬合直線之距離必須小於給定之臨界值」之條件。

空間直線擬合有兩種做法，第一種係直接於三維空間中偵測點雲的線性結構並加以擬合，第二種是先不考慮點雲高程資訊，於二維平面空間中進行直線擬合，再納入高程資訊，賦予位於不同高度之

直線高程資訊，本研究採取第二種作法，此流程包含兩步驟：平面擬合與高度擬合。

欲求得一群近似共線點的擬合直線，首先以最小二乘平差解算初始擬合直線參數，然後計算所有點到初始擬合直線之平均垂直距離與距離中誤差，若點到直線的垂直距離與平均距離之較差大於臨界值，則剔除此點，並重新計算擬合直線，直至所有點到擬合直線之距離與平均距離之較差小於臨界值，則此直線稱為最佳擬合(best-fit)直線，詳細流程如圖 9。

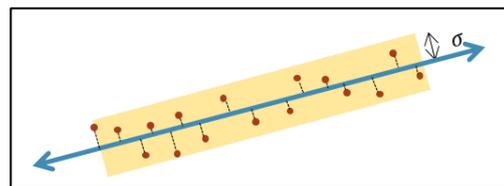


圖 8 直線擬合示意圖

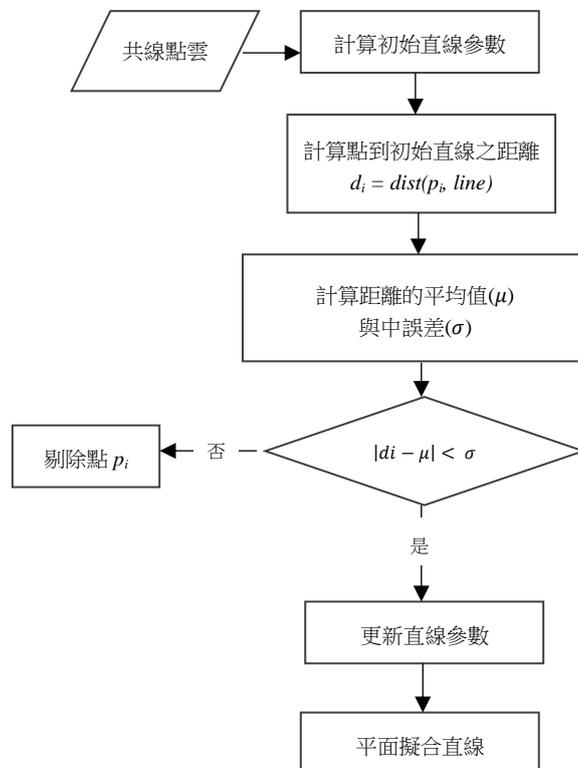


圖 9 平面直線擬合流程圖

劉嘉銘 (2005) 使用逐次縮小臨界值的方式，每次平差所得之擬合直線能逐漸逼近共線點雲的線形分布趨勢，並依不同光達資料設定不同的停止臨界值，即當距離較差之臨界值等於停止臨界值則停止擬合之動作。然此做法較不彈性，需經人為不斷修改臨界值參數並測試才能得到最佳臨界值，故本研究加以改良，以點到擬合直線的距離中誤差作為臨界值，不僅符合其逐漸逼近點雲線狀分布之本質，並達到自動化之目的。

平面擬合所得之直線，未考慮二維線段在三維空間中可能為不同高程之資訊，舉例說明，圖 10(a) 為共線點雲經平面擬合後所得之最佳擬合直線，若轉至直線軸向之立面 (圖 10(b))，包含了三種不同高度之線段與單獨的點，故平面直線擬合後，本研究單獨處理高程資訊，在三維空間中將平面與高程資訊整合。

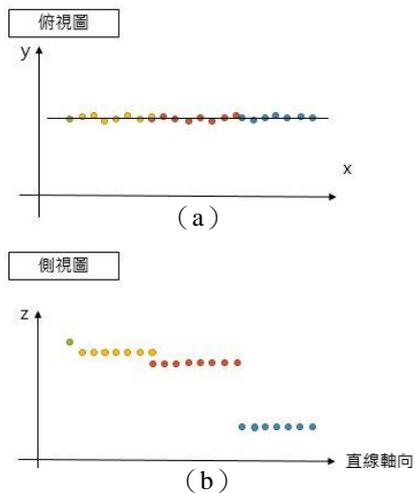


圖 10 平面直線擬合後之 (a)俯視及 (b)側視圖

欲分離不同高程之離散點，蔡函芳 (2009) 提出空間直線追蹤與擬合，作法為三維空間中離散點投影至兩平面上分別進行線追蹤。首先將點雲投影至 xy 平面上，進行二維平面線追蹤，接著將 xy 平面上各點轉至該直線軸向之立面，再次進行線追蹤，分離不同高程之離散點後，於三維空間中擬合直線。由於本研究已先進行平面直線擬合，故參考此概念，將直線包含的點雲轉至該直線軸向之立面，進行高度擬合。首先，以通過高度最高點的水

平面作為初始平面，偵測所有點雲與此初始面之高度較差是否小於臨界值。若小於臨界值，則視為此高度之離散點，接著此平面等間距下降，每下降一次即進行前項之判斷，逐漸分離出不同高度層之點雲，各層直線高度為該層的所有點雲 z 坐標之平均值。

3.3 線段偵測與分割

經由霍夫轉換得到的線，實際上可能是不相連的兩個線段或接近邊界線的離散點，若這些共線點的高度相當，則無法透過前述之高度擬合加以分離，三維擬合直線之結果將與實際情況不符，故需進行線段偵測。線段偵測包含二步驟，分別為線段分割與線段端點萃取。

空載光達點雲資料中呈現線狀分布的點雲，投影至擬合直線之投影點會連續且依序排列，若為屬於相同線段的點雲，某投影點位與其下一投影點位間的距離較接近，因此，線段分割步驟檢查二個相鄰點於直線的投影點之間的距離，判斷點雲是否屬於同一線段。若相鄰投影點間的距離小於給定的門檻值，則此兩點屬於同一線段，否則此二點屬於不同的線段。透過前項線段分割分離屬於不同線段之共線點後，再利用最小二乘平差法找出各共線點群的最適直線，將屬於線段端點的點投影至直線上，則可得到最適直線的二個端點，如圖 11 所示。

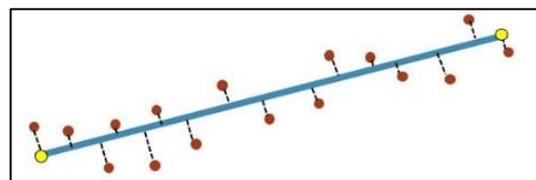


圖 11 直線端點示意圖

4. 實驗與成果分析

4.1 實驗資料

實驗資料是以 Optech ALTM30/70 雷射掃描儀觀測而得的空載光達點雲資料，點雲資料的內涵是每個掃描點的三維空間坐標 (x, y, z) 與雷射反射強度 I ，以及掃描時設定的掃描參數資料，光達點雲基本資料如表 1 所列。掃描區域包含台南市國立成功大學校區及其附近地區（如圖 12）。本研究於國立成功大學的光復、成功、自強等三個校區挑選

十棟建物作為實驗對象，如圖 13。表 2 為詳細的建物分類表，其中除了案例一不含女兒牆結構，其餘九個案例之屋頂面均包含女兒牆。實驗中分析不同類型之建物點雲對於成果可能產生的影響，以及分析回波資訊對自動化萃取建物邊界線是否有輔助效果。

表 1 空載光達點雲資料基本資訊

項目	內容
儀器型號	Optech ALTM30/70
航高 (m)	約 500
FOV (°)	36
航帶數	8
點密度 (點/m ²)	約 8.7
平均點雲間距 (m)	約 0.45

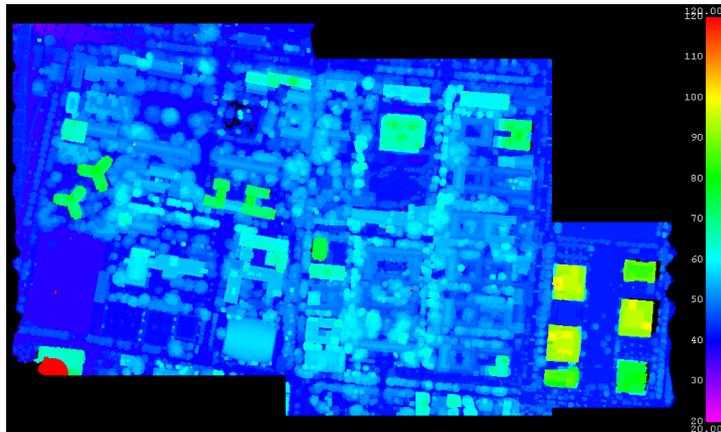


圖 12 成功大學三校區光達點雲資料

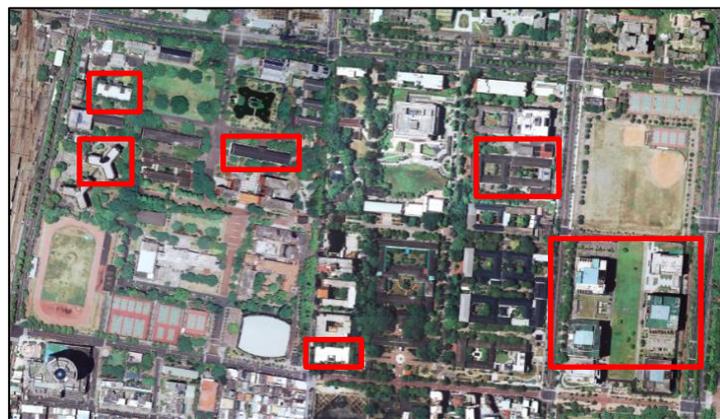


圖 13 國立成功大學校區 2008 年正射影像與實驗建物

表 2 建物結構分類說明

編號	建物名稱	結構類型	女兒牆
1	軍訓室	天幕式	無
2	歷史系館	組合式	有
3	綜合大樓	天幕式	有
4	土木系館	組合式	有
5	台文系館	多層平頂	有
6	化工系館	多層平頂 </td <td>有</td>	有
7	精密大樓	多層平頂	有
8	電機系館	多層平頂	有
9	機械系館	多層平頂	有
10	光復宿舍	多層平頂	有

4.2 參數測試與分析

本研究提出之方法包含多個階段，由於各階段使用的參數值與建物邊界線萃取之正確度有直接的影響，因此實驗中藉由調整各階段之參數，觀察與分析萃取之成果。

平面萃取採用八分樹分割-合併區塊化演算法，程序中影響偵測成果優劣的主要參數有二：分割步驟之距離門檻值與合併步驟之距離門檻值。距離門檻值即節點中點到最適平面的容許距離。在分割步驟時，若節點內任一點到最適平面的距離大於門檻值，則節點中的點雲資料需進行分割。圖 14 為固定合併距離參數，觀察分割距離參數對共平面點偵測之影響，由(a)(c)兩張圖比對可發現，當分割距離門檻值變小，屋頂面被切割成較多平面，女兒牆被分成較多群。虛線圈選的部分，因(b)圖的分割距離較大，部分女兒牆和附屬結構之平面被視為共平面。

在合併步驟時，相鄰二個節點中的點若均小於合併距離門檻值，則將二個節點中的點群予以。圖 15 為固定分割距離參數，觀察合併距離參數對共平面點偵測之影響，由(a)(b)兩張圖比對可發現，當合併距離變大，能整合被切割得過於細碎的平面如屋頂面，虛線圈選的部分，圖 15(a)遺漏了女兒

牆的點雲資料，因為分割距離較小使得點雲被分離成數個點群，合併距離又過於嚴格，故不足以構成一個完整的平面。整體而言，分割距離參數主要控制共平面點群的多寡，而合併距離參數通常需大於分割距離參數，會得到較適當的結果。

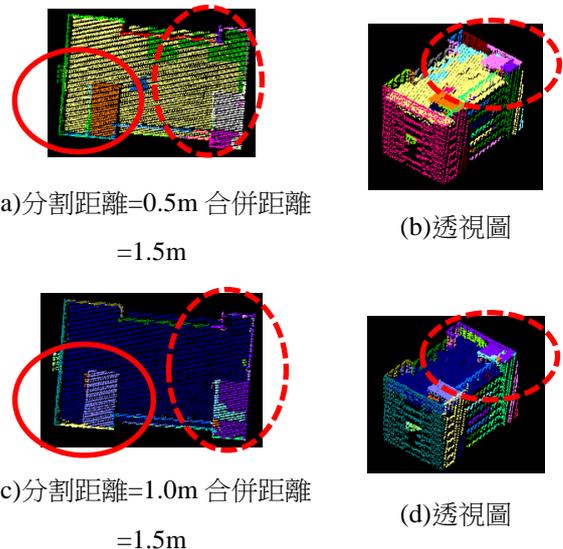
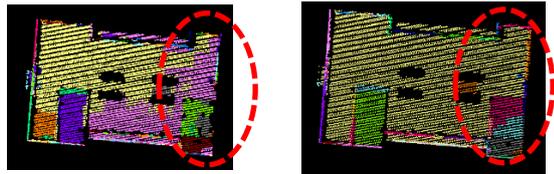


圖 14 共平面點雲區塊化分割距離參數說明。(相同顏色之點雲屬於相同平面)



(a)分割距離=0.1m 合併距離=0.2m (b)分割距離=0.1m 合併距離=0.5m

圖 15 共平面點雲區塊化合併距離參數說明。(相同顏色之點雲屬於相同平面)

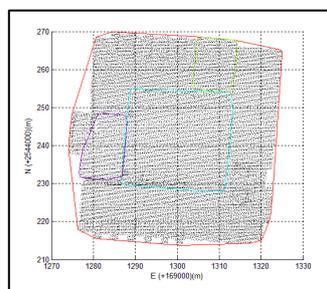
本研究用於偵測屋頂面以上所有建物點雲與共平面點之邊界點的凸殼演算法，其影響成果的參數主要為邊長臨界值。為求得最適當的臨界值，故先測試不同邊長值對邊界點偵測之影響，並分析比較臨界值與所得邊界點點數的關係。實驗依據平均點雲間距的倍數，逐倍增加邊長臨界值。圖 16(a)是測試的共面點群，透過篩選共平面點的點數以及組成面積與建物面積之比例，選出認為有興趣且應被萃取的屋頂附屬結構平面(星號區域)，圖 16(b)~(i)中紅線是屋頂面以上所有建物點雲的邊界點連線，其他則是屋頂附屬結構平面的邊界點連線。因凸殼演算法只有角度條件為判定條件，所得的邊界點會由所有點雲資料的最左下點為起始，順時針方向依序排列，找到最外圍的輪廓點，如圖 16(b)。當邊長臨界值等於平均點雲間距時，可能因邊界點之間的距離超過臨界值，而繼續找其他鄰近點雲，造成邊界點沿著雷射光掃描方向排列之情形(圖 16(c))。若逐倍增加邊長臨界值，邊界點連線的鋸齒狀漸趨平滑。實驗結果顯示，當臨界值約等於平均點雲間

距的六倍時，開始遺漏建物形狀的細節，即建物的直角或凸出凹入的部分被忽略。若將距離門檻值增加為邊界點間距離的最大值時，偵測得的邊界點幾乎無法完整表達建物形狀。當邊長臨界值等於兩倍或三倍的平均點雲間距時，能獲得較適當的成果。當臨界值越大，邊界點點數會越少。邊界點點數太多無法得到建物的主要輪廓位置，太少則會遺失建物形狀的細部資訊，其中又以凸殼演算法所得之邊界點點數最少。

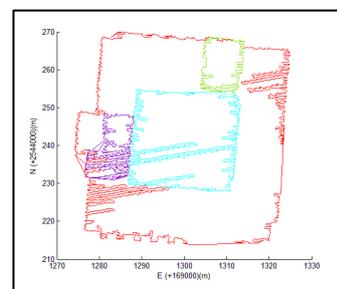
霍夫轉換中直線參數空間累增器解析度對於共線點萃取的影響測試，實驗對象係整合建物邊界點與第一和中間回訊點的點雲資料，藉由改變斜角的取樣間距，調整累增器的網格大小，由小到大分別為 0.5 度、1 度、2 度、3 度、以及 5 度。邊界線萃取的結果如圖 17(b)~(f)所示，左圖是以不同點群著色的共線點雲，右圖則是以最小二乘法計算二維直線參數的結果。整體而言，累增器解析度越高，萃取出之共線點的共線趨勢較高，可濾除較雜亂的點，但原本共線的點雲也可能會被分離成許多群。當解析度降低，直線參數空間中參數點位的顯著性也隨之降低，因此共線點的共線趨勢變低，如圖 17(b)~(e)深藍色圈選的部分。當解析度持續降低，網格數太少，甚至會產生萃取之直線偏斜或錯誤的情況，如圖 17(e)~(f)。共線趨勢較明顯的點群，只需要較細緻的網格就能得到適當的結果，共線趨勢較不明顯的點群，則需要較粗的網格才能完整萃取屬於同一條線的點雲(圖 17(c)~(e)紅色圈選部分)。



(a) 共平面點雲



(b) 凸殼多邊形



(c) 平均點雲間距

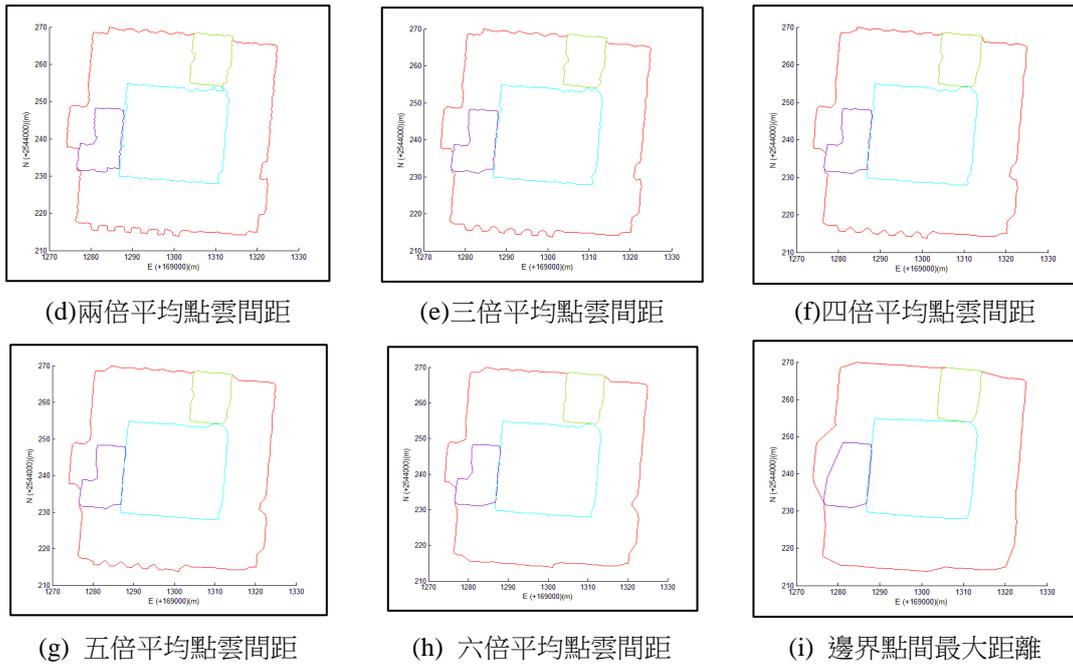
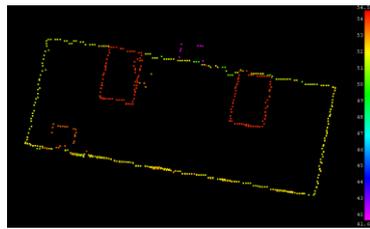
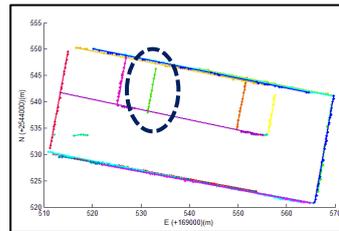
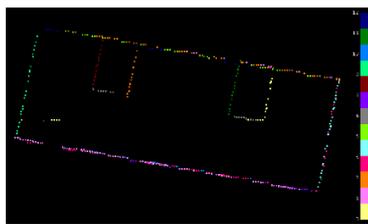


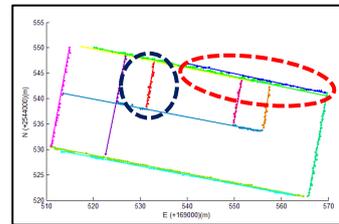
圖 16 邊長臨界值對建物邊界點連線之影響



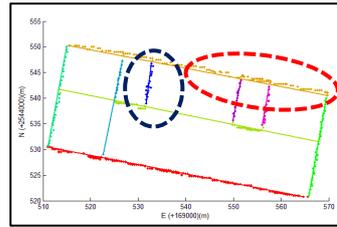
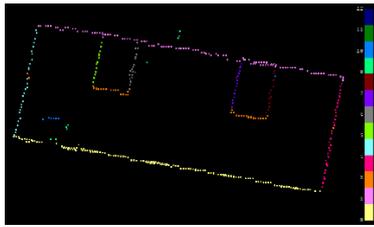
(a) 台文系館邊界點



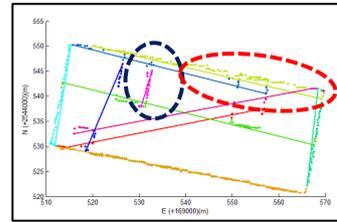
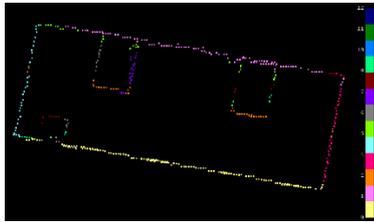
(b) 累增器網格數 360*360



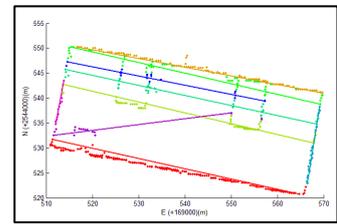
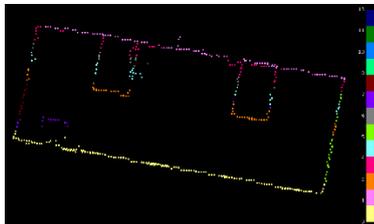
(c) 累增器網格數 180*180



(d) 累增器網格數 90*90

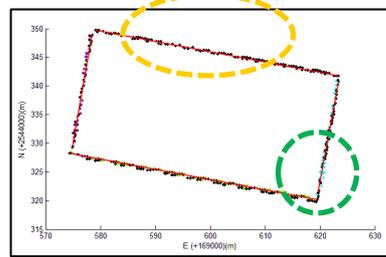
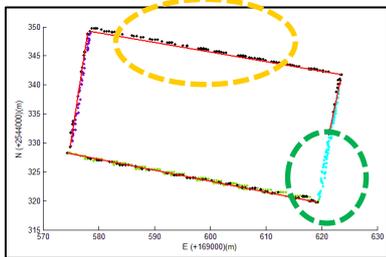


(e) 累增器網格數 60*60

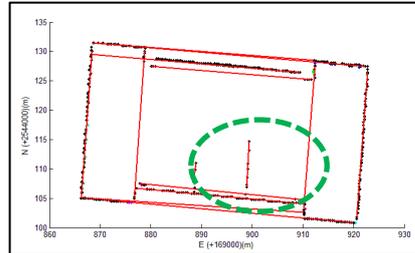
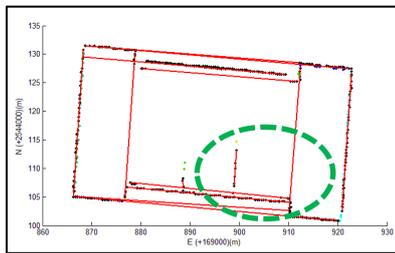


(f) 累增器網格數 36*36

圖 17 累增器解析度對共線點萃取之影響



(a)



(b)

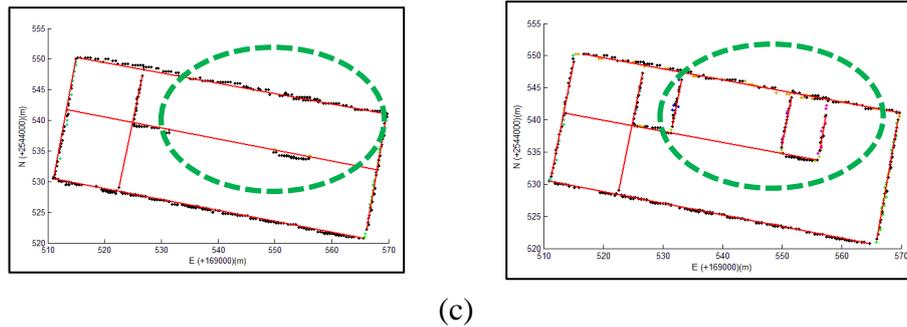


圖 18 不同距離臨界值之平面擬合 (a)軍訓室，(b)綜合大樓，(c)台文系館

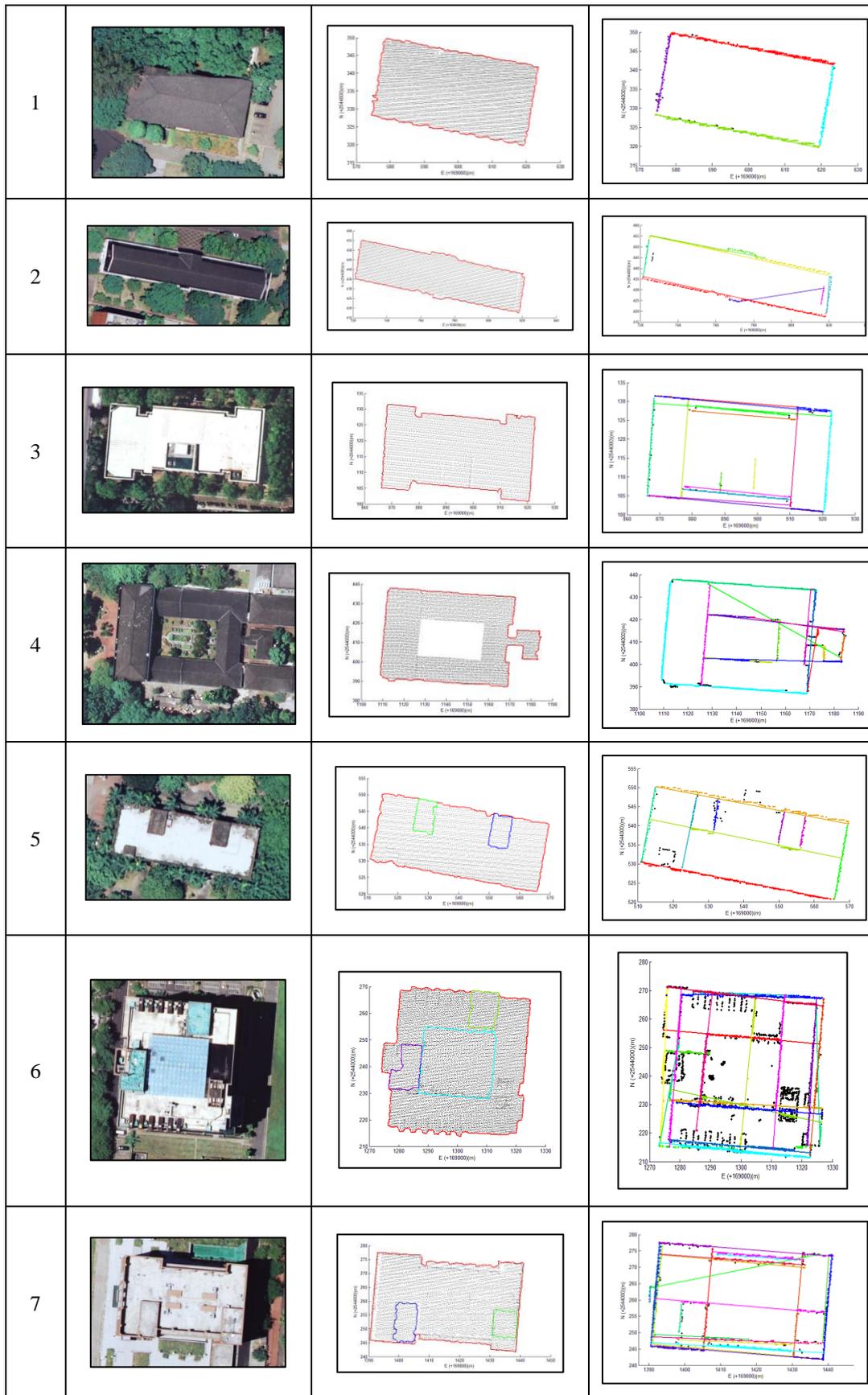
距離臨界值對直線擬合結果影響之測試如圖 18 所示，係針對三種不同的建物各自測試兩種擬合方法，主要有兩種給定距離門檻值（buffer）的方法，第一，設定初始 buffer、終止 buffer、以及 buffer 遞減值，結果如左欄，第二，以每一個點到擬合直線的距離中誤差為臨界值，結果如右欄。圖中彩色點代表不同的共線點群，黑色點是擬合後保留的點群，紅線則是以最小二乘法解算而得的最佳直線。

圖 18(a)是針對形狀為標準矩形的建物進行測試，第二種方法改善第一種方法造成的擬合直線偏斜與濾除過多點雲的情形，因此擬合成果較符合共線點雲的分布趨勢。圖 18(b)是針對形狀為南北兩側對稱凹入且含屋頂突出物（綠色圈選部分）的矩形建物進行測試，因光達系統掃描方式之影響，第一與中間回訊有時無法完整傳達高度落差區域之資訊，但第二種方法確實改善第一種方法濾除過多點雲之情形。圖 18(c)是針對含有屋頂附屬結構的平頂建物進行測試，因光達系統掃描方式與點雲區塊化之影響，偵測得的附屬結構平面的邊界點雲共線趨勢較不明顯，第一種方法可能因臨界值設定較嚴格，故無法擬合點雲分布較雜亂的區域（如綠色圈選部分），但第二種方法能濾除雜訊點雲不受點雲分布影響。測試結果顯示本研究改良後的方法不受點雲分布之影響，擬合結果都能符合點群的共線

趨勢，擬合後不會濾除過多的共線點雲造成擬合直線偏斜或邊界資訊遺失之錯誤，而由使用者設定初始臨界值、終止臨界值、以及遞減值的方式，需透過不斷測試才能獲取較好的擬合結果，經本研究改良後，符合自動化與彈性的特性，且擬合結果較優。

4.3 成果正確性綜合評估

圖 19 是十個案例的各階段成果，第一欄是正射影像，第二欄是由凹殼演算法偵測得的邊界點，其連線形成的粗略建物輪廓線能確實代表建物點雲的外圍形狀，其中案例 4 係中間含露天庭院之組合式建物，內部的邊界點無法透過凹殼演算法偵測而得，但可透過第一或中間回訊點彌補。第三欄則是透過 Hough 轉換萃取得之共線點與初步解算的邊界直線，案例 1~5 的建物構造形狀較單純，萃取得的共線點解算的初始直線大部分都符合邊界線的走向，而案例 6~10 因屋頂與牆面凸出物較多，加入第一與中間回訊點，可能使得邊界點雲的共線趨勢降低，造成初步解算的直線有歪斜或錯誤之現象，但這些都可透過後續的直線擬合與線段偵測加以改善，除此之外，大部分的邊界線特徵都能有效快速地萃取出。



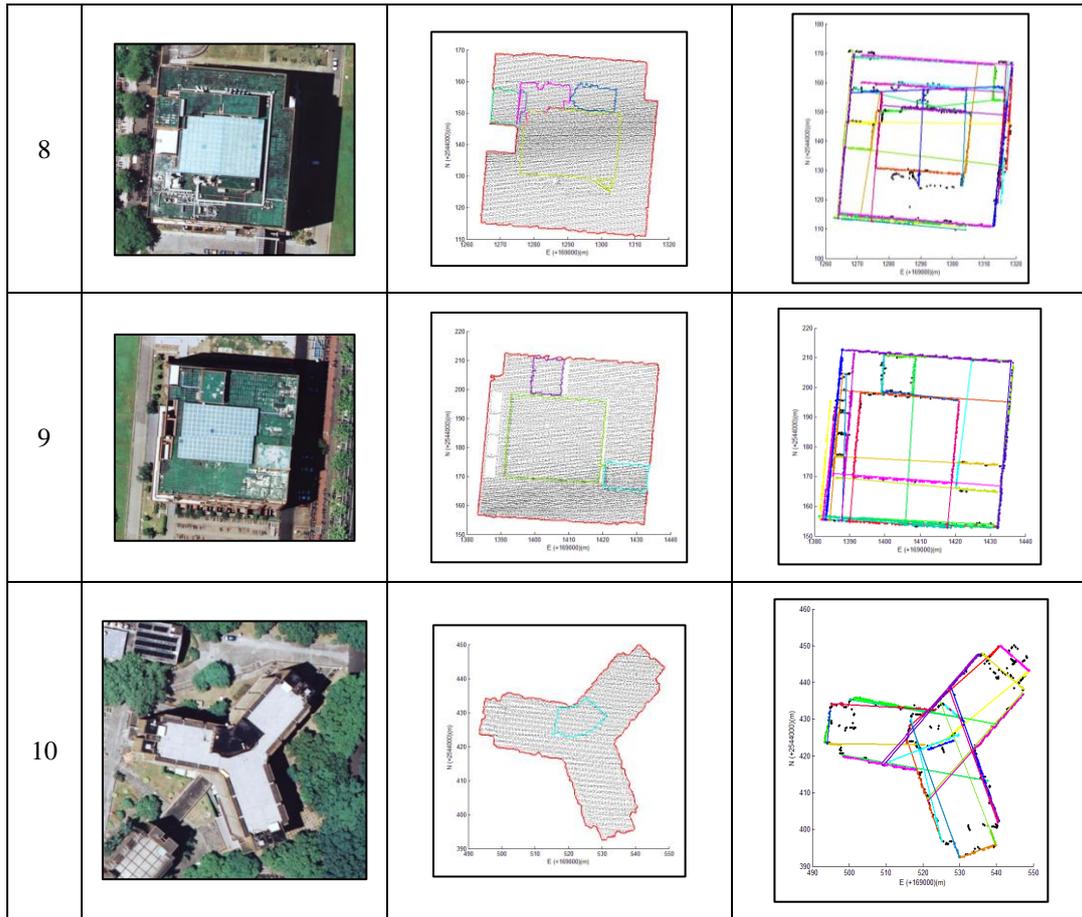
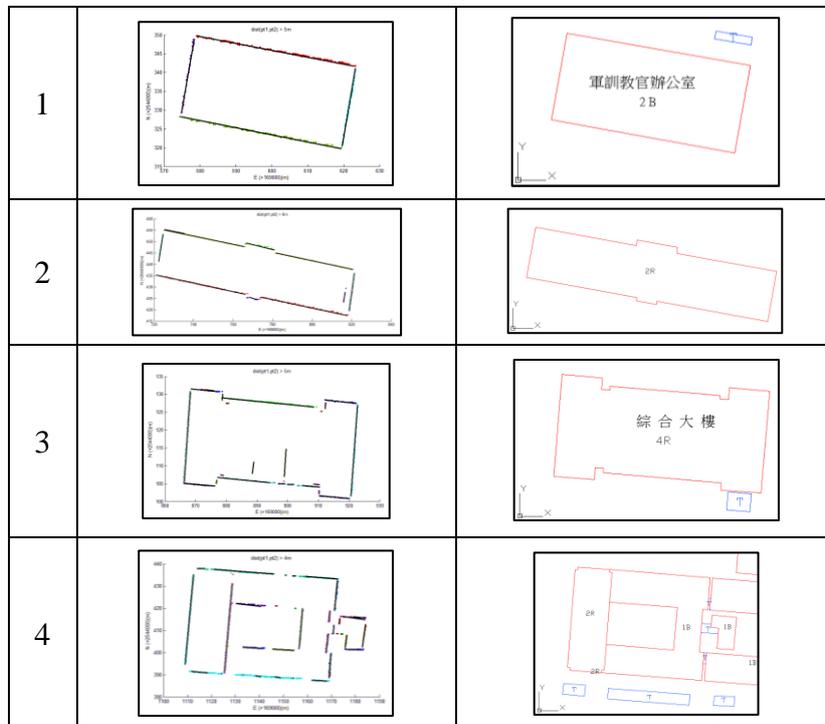


圖 19 各階段之成果圖



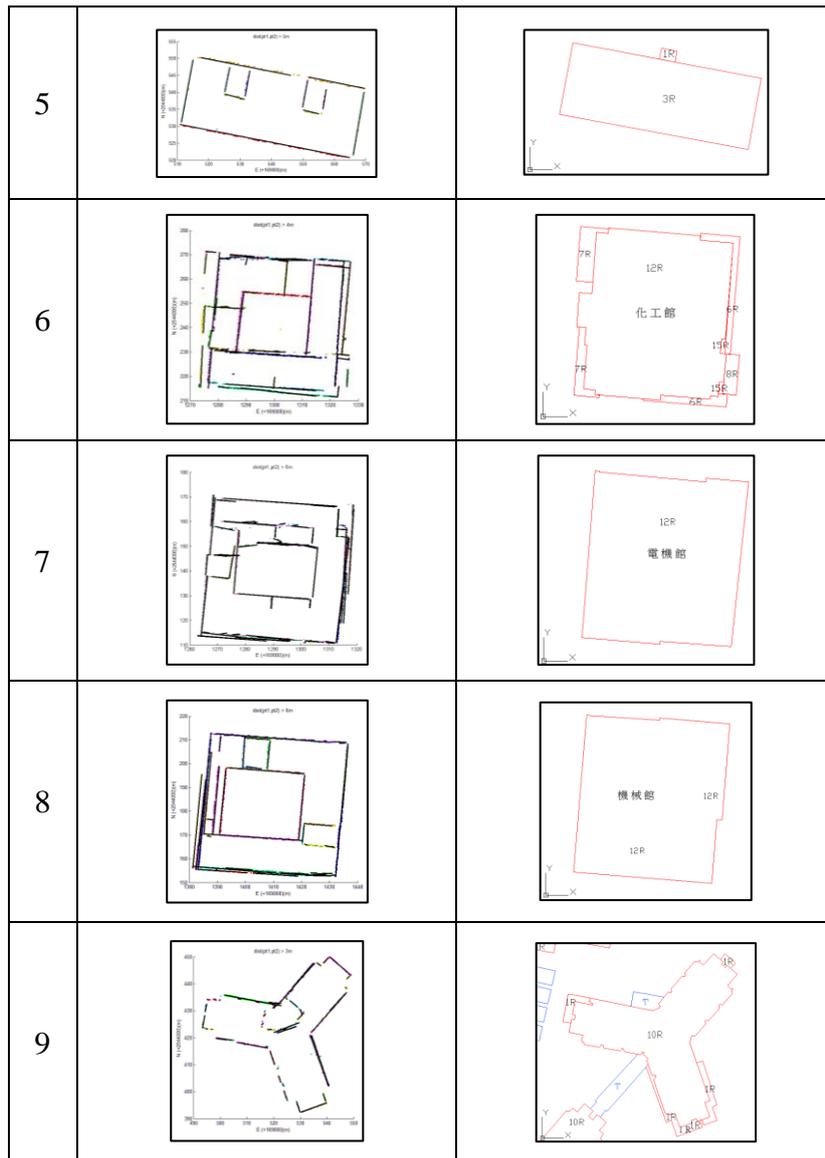


圖 20 偵測得之邊界線與數值地形圖之比較

圖 20 係二維建物邊界線與數值地形圖邊界線之比較，第一欄是直線擬合與線段偵測得的線段，第二欄則是數值地形圖的邊界線段。直線擬合時，以每一個點到擬合直線的距離中誤差為臨界值。此法能依據點雲分布的離散程度，自動彈性調整最適合之臨界值，使擬合情況良好，而線段偵測時的距離門檻值，則需經過多方測試與調整，才能使得邊界線不被過於分割，且避免錯誤或漏授之情況。由案例 4 可發現，回訊點雲的確能彌補遺漏的內部邊界線資訊；而較複雜的案例 5~9，雖然邊界線存在不閉合或細碎的重複線段，但只要能被偵測出，就有機會透過後續的整併使邊界線條更加完

整。

依據本研究對建物邊界線的定義，本研究所萃取的建物邊界線可分為兩類：(I)屬於建物最外緣之邊界線，亦即傳統地形圖會繪製的邊界線；(II)屬於建物屋頂附屬結構物之邊界線(屋脊線不包含在內)，這些邊界線乃建立房屋三維模型必要的線特徵，但傳統地形圖不一定會繪製。因此針對本研究實驗成果之正確度與完整度的評估，採用地形圖的邊界線及透過人工判斷的屋頂附屬結構物邊界線為依據，因此其評估量化指標有二：(I)應有的地形圖邊界線，被成功萃取得之線條數，及沒被萃取出之線條數，(II)屋頂面附屬結構物之邊界線，被

成功萃取得之線條數，及沒被萃取出之線條數。

表 3 顯示偵測得之線條數與遺漏之線條數與其各佔的比例，含屋脊結構之建物，第 I 類邊界線之平均正確率約為 71%，第 II 類邊界線之正確率約 50%，原因可能為大部分均為屋脊線，附屬結構平面所占比例較低，第一回訊與中間回訊點無法完整記錄邊界線資訊，而發生遺漏之情況。而多層結構之平頂建物，第 I 類邊界線之正確率大部分約為 60%，部分能達到 80%以上，化工系館與光復宿舍

正確率較低，原因可能為長度短的邊界線較多，透過實地踏勘能被輕易地調繪，但因光達系統點雲密度之影響，使得點雲資料無法如同人工判斷來得細緻，但主要的邊界線還是能被偵測而得。第 II 類邊界線之正確率約在 85%以上，甚至 90%以上，原因為本研究之演算法主要針對平頂建物的附屬結構進行處理，也就是屋頂高度估計，以及共平面點區塊化分離附屬結構之平面。

表 3 建物邊界線萃取成果之量化評估統計表

		應有數量	正確	遺漏
軍訓室	I	4	4 (100%)	0 (0%)
	II			
歷史系館	I	12	8 (67%)	4 (31%)
	II	4	2 (50%)	2 (50%)
綜合大樓	I	18	15 (63%)	3 (17%)
	II	4	2 (50%)	2 (50%)
土木系館	I	28	17 (61%)	11 (39%)
	II			
台文系館	I	7	4 (57%)	3 (43%)
	II	8	8 (100%)	0 (0%)
化工系館	I	38	21 (55%)	17 (45%)
	II	14	12 (86%)	2 (14%)
精密大樓	I	16	14 (88%)	2 (12%)
	II	8	7 (88%)	1 (12%)
電機系館	I	8	5 (63%)	3 (17%)
	II	17	16 (94%)	1 (6%)
機械系館	I	8	6 (75%)	2 (25%)
	II	12	12 (100%)	0 (0%)
光復宿舍	I	80	28 (35%)	52 (65%)
	II	7	6 (86%)	1 (14%)

I：應有的地形圖邊界線；II：屋頂面附屬結構平面之邊界線

5. 結論與建議

本研究發展一套自動化演算法，針對不同屋頂結構之建物，以第一回訊點與中間回訊點為輔，從空載光達點雲資料萃取房屋邊界線。此演算法包含點雲預處理、建物邊界點偵測、以及建物邊界線萃取三部分，點雲預處理係從空載光達資料中提取建物點雲，並對多層平頂建物萃取三維平面特徵；建物邊界點偵測包含估計多層平頂建物之屋頂面高度，再利用凹殼演算法追蹤建物點雲之外部邊界點；建物邊界線萃取則應用霍夫轉換分離屬於不同邊界之點群，以點到直線之距離小於一倍距離中誤差為約制條件，迭代求解最佳擬合直線之二維參數，再加入點位的高程資訊，賦予直線高度，最後以點與點間距離偵測並區分線段。

實驗對象包含四棟山形屋、天幕式建物、含露天庭院之組合式建物，以及六棟含有多層結構且形狀複雜之平頂建物，其中九棟建物之屋頂面上有女兒牆之構造。本實驗欲從離散的光達點雲資料，驗證演算法是否能萃取女兒牆與屋頂面之邊界線，從完整度與正確度的角度，評估演算法之可行性。流程中有五個主要影響參數，參數數量相當少。從自動化層面考量，本研究提出的演算法自動化程度高，但參數設定仍然需要人為經驗判斷，故本實驗也探討了點雲分布與參數之關係，歸納出能因應多元複雜建物之最適參數。

正確度與完整度之評估量化部分，在含有屋脊之建物部分，第 I 類邊界線之平均正確率約為 71%，在多層結構之平頂建物部分，第 I 類邊界線之正確率約為 60%，部分可達 80% 以上，第 II 類邊界線之正確率都在 85% 以上，甚至可達 90% 左右，顯示出本研究提出之演算法，對於從空載光達點雲資料萃取建物邊界線是有成效的。

由實驗結果顯示，第一與中間回訊點對於建物邊界線的萃取確實達到彌補之作用，特別是含露天庭院之建物邊界線，但對於長度較短之線條或轉折較多的建物，萃取之成功率較低，原因可能如下：第一、受限於光達資料之點雲密度，與屋頂面區域

之點雲相比，邊界線區域之點雲分布較不規則且不連續，故無法獲得與地形圖一樣細緻的建物邊界線（如化工系館、光復宿舍）；第二、因高度落差之部分增加，第一與中間回訊點的數量也增加，在霍夫轉換的程序中，增加的點使得原本的邊界點共線趨勢降低，較容易萃取出錯誤的線條。未來可利用空照影像來互補光達資料的不足，增加萃取邊界線的正確率。

整體上，本研究主要針對建物之外部輪廓線進行萃取，由數值地形圖之比較分析，顯示本研究所發展之演算法，確實對建物邊界線之萃取有一定程度的成效，由自動化程度而言，萃取之流程中不須經過太多的人為介入，且萃取之成果的確對未來的建物模型重建是有潛力的。

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。並感謝中興測量公司提供本研究使用之實驗區點雲資料。

參考文獻

- 茂榮編輯部，2011。最新建築技術規則，臺北：茂榮書局。
- 劉嘉銘，2005。光達點雲資料特徵萃取之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 蔡函芳，2009。多重影像匹配於房屋邊緣線三維定位，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
- Al-Durgham, M., Kwak, E. and Habib, A., 2012. Automatic Extraction of Building Outlines from LiDAR Using the Minimum Bounding Rectangle Algorithm. Proceedings of Global Geospatial Conference.
- Andraw, A.M., 1979. Another Efficient Algorithm for Convex Hulls in Two Dimensions. Information Processing Letters, 5(9):216-219.
- Dorninger, P. and Pfeifer, N., 2008. A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization

- from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *Sensors*, 8(11):7323-7343.
- Duda, R.O. and Hart, P.E., 1972. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Communications of the ACM*, 1(15): 11-15.
- Huang, H., Brenner, C. and Sester, M., 2013. A Generative Statistical Approach to Automatic 3D Building Roof Reconstruction from Laser Scanning Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79: 29-43.
- Jarzabek-Rychard, M., 2012. Reconstruction of Building Outlines in Dense Urban Areas Based on LiDAR Data and Address Points, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, August:121-126.
- Kada, M. and Wichmann, A., 2012. Sub-surface Growing and Boundary Generalization for 3D Building Reconstruction. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, August:233-238.
- Kim, C. and Habib, A., 2009. Object-Based Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Automated Generation of Complex Polyhedral Building Models. *Sensors*, 9(7): 5679-5701.
- Lee, J., Han, S., Byun, Y. and Kim, Y., 2011. Extraction and Regularization of Various Building Boundaries with Complex Shapes Utilizing Distribution Characteristics of Airborne LiDAR Points. *ETRI Journal*, 4(33): 547-557.
- Ma, R., 2005. DEM Generation and Building Detection from LiDAR Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 7(71):847-854.
- Sampath, A. and Shan, J., 2007. Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne LiDAR Point Clouds. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Journal*, 7(73): 805-812.
- Tseng, Y.H., and Wang, S., 2003. Semi-automated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2(69):171-180.
- Tu, C., Wyk, B.J.V., Djouani, K., Hamam, Y., and Du, S., 2011. A Super Resolution Algorithm to Improve the Hough Transform. *Image Analysis and Recognition Lecture Notes in Computer Science*, 6753:80-89.
- Vosselman, G. and Dijkman, S., 2001. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, October: 37-43.
- Wang, M. and Tseng, Y.H., 2010. Automatic Segmentation of LiDAR Data into Coplanar Point Clusters Using an Octree-based Split-and-merge Algorithm. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 4(76):407-420.
- Wei, S., 2008. Building Boundary Extraction Based on LIDAR Point Clouds Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, July:157-162.

Automatic Building Boundary Extraction From Airborne LiDAR Data

Hsiao-Chu Hung^{1*} Yi-Hsing Tseng² Hone-Jay Chu³

ABSTRACT

Building boundary is one of the important components for the mapping of 2D digital topographic maps and the modeling of 3D city buildings. Photogrammetry is currently the common technique applied for building boundary generation, which are labor intensive. Airborne LiDAR data provides abundant 3D information of the scanned objects. The characteristics of objects are implicitly contained in the data set. Usually top surfaces, such as roofs, may have densely distributed points, but vertical surfaces, such as walls, usually have sparsely distributed points or even no points. Building boundaries, referring to the intersections of roof and wall planes are, therefore, not clearly defined in point clouds. To overcome this problem, this paper develops an algorithm to acquire building boundary from airborne LiDAR data.

Three major process steps are included in the algorithm. Firstly the point clouds are classified as building points and non-building points. Then, octree-based split-and-merge segmentation is implemented to extract plane features. Second, those building points and coplanar points are used to trace the boundary points by concave-hull algorithm. Boundary points of coplanar point group and building points and the first and intermediate echo points of multi-return scan are selected as candidates of building boundary points. Finally, methods of the Hough transform, line fitting and line segmentation are applied to find line segments belonging to building boundaries.

The experiment results show the effectiveness of the proposed method for automatic building boundary extraction from airborne LiDAR data, and that combining the information of the first and intermediate echo points of multi-return and the boundary points increases the completeness of boundaries. And, it is promising to use the extracted boundaries for 3D building modeling in the future.

Keywords: airborne LiDAR, point cloud, building boundary extraction, 3D building reconstruction

¹ Master, Dept. of Geomatics, National Cheng Kung University

² Professor, Dept. of Geomatics, National Cheng Kung University

³ Assistant professor, Dept. of Geomatics, National Cheng Kung University

* Corresponding Author, E-mail: piggyyo@gmail.com

Received Date: Mar. 21, 2014

Revised Date: Apr. 11, 2016

Accepted Date: Apr. 20, 2016

利用衛星影像探討龜山島周圍海域熱液 與地震的關係

李聿文¹ 張中白^{2*} 任玄²

摘要

龜山島的後火山活動包含熱液和地震，熱液變化可能反應出活動的劇烈程度，所以本研究將地震當作活動指標，比對熱液變化與地震，借此得出熱液變化與火山活動之間的關係。龜山島東側的熱液因含有硫，顏色與周圍海水不同可被衛星影像偵測，衛星影像分析有三個的步驟：(1)去除陸地的干擾；(2)去除雲的干擾；(3)進行影像分類。分類出熱液後，使用相關係數與前後發生的地震比對，共有四種方式(1)熱液面積與地震數量；(2)熱液面積與地震規模；(3)熱液量與地震數量；(4)熱液量與地震規模。結果顯示熱液面積與前後 1 天和 2 天有較大的相關，且相較於前幾天的地震，後幾天發生的地震與熱液面積的關聯較大。

關鍵詞：龜山島、熱液、地震、光學式衛星影像、影像分類

1. 前言

龜山島位於沖繩海槽的西南端，海槽底部的熱液活動十分活躍，且微震活動平凡，當然龜山島也不例外，在島嶼的東側有許多熱液噴口，是台灣目前仍有後火山活動的島嶼，過去對此島的研究有針對地震、地質、海流和熱液等，其中 Chen、等人(2001)用熱螢光定年法測量該島西北海岸火山碎屑岩中的補獲岩，得出岩石的形成年代約在 7000±700 年前，可將龜山島視為一座活火山，未來有再噴發的可能性。大規模的火山活動發生前通常會有頻繁的地震活動，一旦發生大地震，可能會引發海嘯，為了預防可能的自然災害，本研究希望能找到新的提前預警方式，避免重大財產損失。

中央地質調查所的大台北地區特殊地質災害調查與監測-地熱流與海域海底火山調查與監測成果報告書(2007)表示龜山島上的地溫監測證實有熱流脈衝現象，這種現象可能和地下岩漿活動和熱

水循環有密切的關係，龜山島值得繼續監測。

龜山島的後火山活動伴隨著熱液和地震(郭富雯，2001；Konstantinou *et al.*, 2013)，本研究擬探討在龜山島附近兩者之間的關聯，目前島上並沒有對海底的熱液活動有長時間的觀測，不過在 Mantas *et al.*(2011)的文章提供了另一種方式，因為含有熱液的海水與普通的海水在波長 469 奈米的反射強度明顯不同，利用此特性可觀測海洋表層含熱液海水的分布範圍，因此本研究使用衛星影像來觀察熱液的活動情形，藉此估算含熱液海水的面積進而評估海底熱液活動的活躍程度，再與龜山島附近地震比對，以達探討兩者關連性的目的。

2. 研究區域

2.1 龜山島之地質

位於宜蘭縣頭城鎮海岸以東約 10 公里處的火

¹ 國立中央大學遙測科技碩士學位學程 碩士

² 國立中央大學太空及遙測研究中心 教授

* 通訊作者，電話：03-4227151 分機 57627, E-mail: cpchang@csr.r.ncu.edu.tw

收到日期：民國 104 年 07 月 29 日

修改日期：民國 105 年 01 月 20 日

接受日期：民國 105 年 03 月 18 日

山島嶼，因其形似海龜而得名，全島東西長 3.3 公里，南北長 1.7 公里，面積只有 2.85 平方公里，海岸線長約 10 公里，最高點 401 公尺，依地勢可以分成龜首、龜甲及龜尾三部分。龜山島主要由兩座火山組成，較大的火山為龜甲，由層層的熔岩流和火山碎屑岩組成，另一個較小的火山是由火山礫和火山塊組成，這兩座火山皆為典型的複式火山，熔岩流有阿 Y 熔岩、塊狀熔岩和塊熔岩，並無枕狀熔岩的出露，且阿 Y 熔岩的表面被氧化成棕紅色，這些證據顯示龜山島的火山作用主要是陸上噴發(宋聖榮，2013；Chiu *et al.*, 2010)。

2.2 龜山島之熱液活動

沖繩海槽是位於琉球島弧系統的弧後盆地，張裂範圍從九州西南部到台灣東北部，沖繩海槽的北部和中部經歷了兩次的擴張，第一次在晚中新世(約 10~6Ma)，第二次在更新世(約 2~0.1Ma)(Letouzey and Kimura, 1985; Sibuet *et al.*, 1998)。沖繩海槽南部有強烈的熱液和岩漿活動，地球化學的證據顯示是個正在發展的張裂帶(Chen *et al.*, 1995; Chung *et al.*, 2000)。

沖繩海槽的岩漿庫可能和低 V_p 、低 V_s 和高 V_p/V_s 有密切的關係，來自隱沒帶大約 60 公里深的岩漿庫從南沖繩海槽的東南底部向北上方移棲，可能沿著正斷層流動，形成海底火山(王天楷等人，2007；林靜怡，2006)，地磁的資料指出，龜山島周圍有高磁力異常帶，中心為低磁力異常區，可能是受高溫影響導致磁力相對減小，低磁力異常區可能是岩漿庫的位置(董倫道、等人，2012)。

對後火山活動最早的文獻紀錄是在日治時期的日日新新聞，內容描述龜山島海岸有陸地與海底噴硫磺和水蒸氣的濃煙引起魚群大量死亡，但是到了 1993 年陸地上已經沒有噴氣現象，劇烈的噴氣目前已不復見，此變化是漸進式的，由地表朝海面下逐漸消失，顯示火山地熱現象逐漸移位(莊文星、等人，2013)。根據龜山島 2006 年 7 月到 2011 年

11 月的探針紀錄溫度有慢慢下降的趨勢，大約每年 0.002~0.39°C (Chiang *et al.*, 2010；宋聖榮、等人，2011)，雖然這些地表現象代表龜山島的後火山活動在慢慢衰退，但是龜山島東南側約 8 公里處發現熱流值約 734 mW/m²，而且島附近海床底層水溫變化很大，可能是受海床熱液噴發頻繁的影響，高熱流和底層水溫變化顯示龜山島的後火山活動還很強烈(江協堂，2010)。

海底熱液的形成和地底岩漿庫還有地表裂隙有關，海水通過裂隙滲入地底，海水被加熱後密度變小、體積膨脹形成熱液，向上流動經由熱液噴口噴出。龜山島海底的熱液噴口有些在岩石縫中，這些噴口沒有硫磺，其他多數屬於土丘狀和煙囪狀，由硫磺堆積而成，最高的黃色煙囪約 6 公尺是目前世界上首次發現淺海煙囪，硫同位素含量($\delta^{34}\text{S}=-0.5\sim 2\%$)少於普通海水，也跟弧後環境的分佈數值不同，而是與無沉積物覆蓋的中洋脊相似，這證明硫是來自地函深部。龜山島的熱液有兩種，溫度較低的熱液(30~65°C)有較高的 pH 值；溫度較高的熱液(78~116°C)有較低的 pH 值(1.52)，是目前世界上測量到最低的值，溫度同時也是全球淺海熱液所測量到的最高溫度。熱液中的氣體包含 CO₂、少量 H₂S 和其他物質，3He/4He 同位素比值是一般空氣的 7.4~7.6 倍，代表此區地函物質來自地函，可以再次確認岩漿的來源(郭富雯，2001；Chen *et al.*, 2005)。

2.3 龜山島之地震

Konstantinou *et al.*(2013)的文章顯示龜山島周圍的地震大多為高頻(>10Hz)，不過有少數地震是顯示低頻(<5Hz)，可能是代表流體岩漿從岩漿庫通過裂隙流到淺層。上部地殼的流體循環產生局部應力場讓龜山島周圍產生區域性的裂隙向西北東南方向延伸，從低頻的地震分布也可以看到地震約沿西北東南方向分布(圖 1) (Konstantinou *et al.*, 2013)。

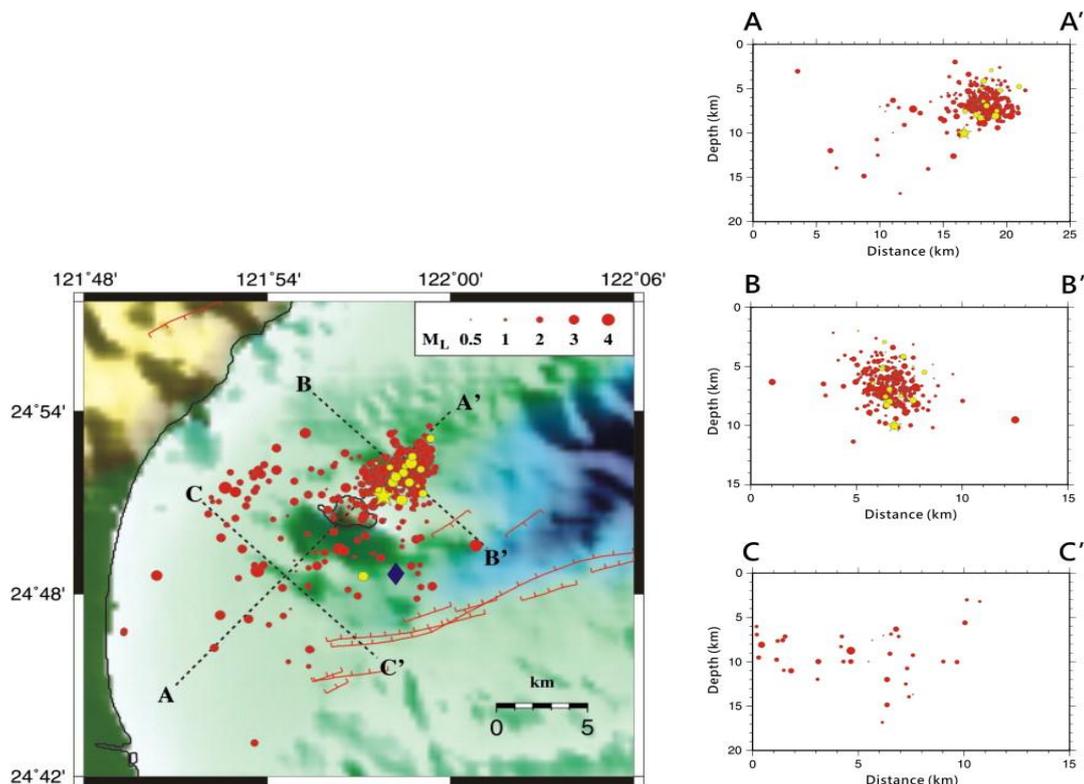


圖 1 左圖是 2008 年間 425 個地震的分布。紅色點是代表高頻的地震；黃色星形是 12 月 17 日 $4.4M_L$ 的地震，黃色點是之後發生的低頻地震；藍色菱形是發生在 12 月 17 日前的低頻地震。右圖顯示震源沿剖面的分布，多數的地震發生在 4 到 10 公里間(Konstantinou *et al.*, 2013)

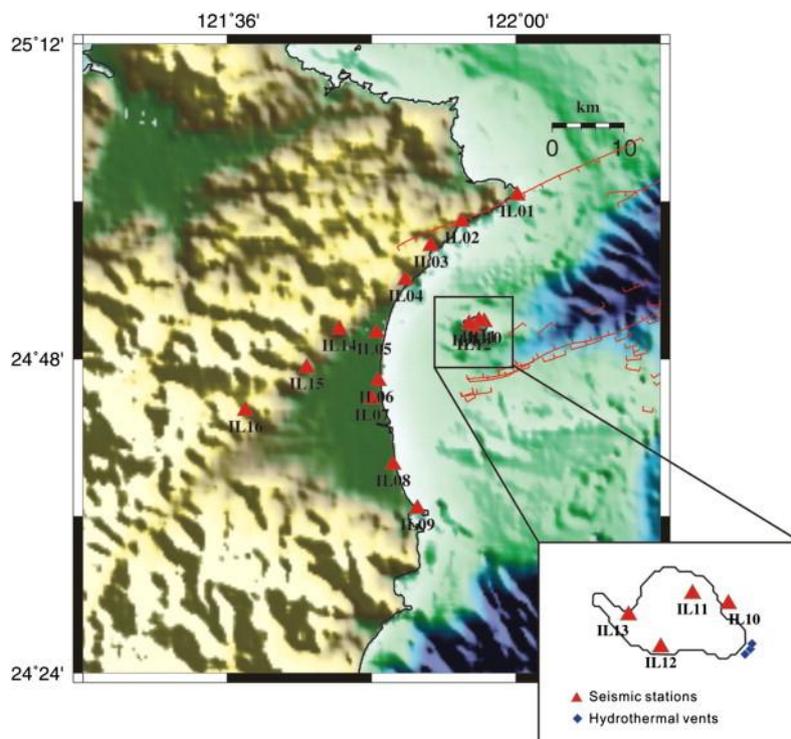


圖 2 中央研究院架設的 16 個地震站還有熱液噴口的位置(Konstantinou *et al.*, 2013)

3. 資料來源

3.1 地震

地震資料是來自 Konstantinou *et al.*(2013)發表的文章,不過文章中沒有提供各地震的詳細資料,只有每個月的統計,詳細的資料是直接來自 Konstantinou。

該研究使用中研院架設的 16 個地震站,十二個在宜蘭,四個在龜山島(圖 2),時間從 2008 年 1 月到 2008 年 12 月,剛好跨越整個年度。地震網總共收集了 1087 個地震,透過手動挑選出 425 個區域性地震,區域性地震的挑選標準是(1)至少有五個地震站紀錄到高訊雜比的訊號,(2)至少有兩站清楚地紀錄到 S 波,(3)五個地震站中至少有一個是龜山島的地震站(圖 3)。

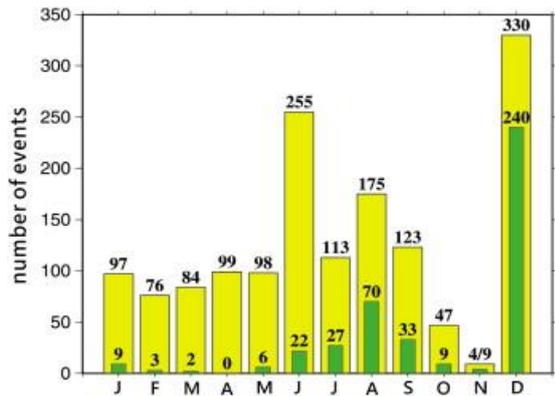


圖 3 2008 年 1 月至 12 月的地震數量。黃色是每個月所記錄的地震數量;綠色是經過人工挑選過後的結果,代表區域性地震,可以看到峰值在 1 月、8 月和 12 月,2008 年大部分的地震都發生在 12 月(Konstantinou *et al.*,2013)

3.2 衛星影像

SPOT 系列衛星屬於太陽同步衛星,平均航高約 823 公里,軌道與赤道的傾斜角為 98.77 度,通過台灣上空時約為 10 點到 11 點之間。SPOT-2 有兩組感測器,每組感測器分別有多光譜及全色態,多光譜分別為綠光(0.49-0.61 μm)、紅光(0.61-0.68 μm)和近紅外光(0.78-0.89 μm),SPOT-4 和 SPOT-5

比 SPOT-2 多了短波紅外線波段(1.58-1.75 μm)和專門用來分析地表植被的儀器(Vegetation Instrument)(表 1)。因為 SPOT-2 沒有短波紅外波段,所以本研究只使用綠光、紅光和近紅外光。

表 1 SPOT 衛星各波段的波長範圍和空間解析度

Bands	Spectral range	SPOT-2	SPOT-4	SPOT-5
		Spatial resolution		Onboard
B1 (Green)	0.49-0.61 μm	20 m	20 m	10 m
B2 (Red)	0.61-0.68 μm	20 m	20 m	10 m
B3 (NIR)	0.78-0.89 μm	20 m	20 m	10 m
B4 (SWIR)	1.58-1.75 μm		20 m	20 m

資料來自國立中央大學太空遙測中心 level 3 的影像,研究區域在 2008 年有一百多張影像,有雲的影像非常的多,其中只有 36 張的熱液沒被雲完全遮住。每張影像的座標都是使用 TWD97 坐標系統:北邊為 2752040m,南邊為 2744060m,東邊為 350560m,西邊為 340860m。

4. 研究方法

4.1 去除陸地與雲層干擾

因陸地與雲層是不需要的,為了避免誤判和減少分類的類別,在分類之前要去除陸地和雲層區域。

4.1.1 建立遮罩

本研究利用 ENVI 軟體建立遮罩,將陸地去除。龜山島會因為不同時間和角度拍攝而形狀有些差異,所以只用一張影像建立遮罩是不行的,要建立一個能覆蓋所有影像內龜山島的遮罩,就要打開每張影像確認。建立遮罩的步驟:(1)打開第一張影像。(2)建立一個能覆蓋龜山島全島的遮罩。(3)

打開下一張影像。(4)將前一張做的遮罩套用在這張影像。(5)如果有陸地沒有被覆蓋，就將它填滿。(6)重複上述的動作直到最後一張影像，這樣就能得到一個最大的遮罩，能覆蓋所有影像中的龜山島。

建立遮罩也是為了避免近岸海浪和懸浮物的影響，所以比龜山島大一點的遮罩是可以接受的。

4.1.2 自動閾值選取

去除完陸地之後剩下海洋，接下來要去掉雲層，利用厚雲層在近紅外光的高反射特性，可在近紅外光中將雲和海洋分離，在定門檻值之前可用影像加強的方式(histogram specification)，重新分配光譜反射值分布直方圖，增加分類的準確性。

Otsu(1979)的 ATSA 是最常使用而且簡潔的閾值自動化選取方式，假設每張影像都是由雲和背景所組成，雲的直方圖會分布在值較高的部分，背景則是較低的部分，理想中兩者在直方圖中會形成雙峰的形式，在兩者之間能找到一個閾值，就能將雲和背景分開。另 h_i 等於影像中每個灰階值的累計次數， $i \in \{1, \dots, n\}, n = 256$ ，每個灰階值發生的機率如下

$$p_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \dots\dots\dots (1)$$

$p_i \geq 0$ ，且 p_i 加總為 1。若要在 i 之間找到一個 k 值作為暫定的閾值，可計算直方圖第 m 階的累積動差分別為

$$M_k^m = \sum_{i=1}^k i^m p_i \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{M}_k^m = \sum_{i=k+1}^n i^m p_i \dots\dots\dots (3)$$

ATSA 以統計中辨別分析為基礎，目的要找到

能將群組間的變異數 σ_B^2 達到最大， $k \in \{1, \dots, n\}, n = 256$ ，公式如下

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[M_n^1 M_k^0 - M_k^1]^2}{M_k^0 [1 - M_k^0]} \dots\dots\dots (4)$$

使 σ_B^2 為最大值的 k 就是最佳閾值 t

$$\sigma_B^2(t) = \max_{1 \leq k \leq n} \sigma_B^2(k) \dots\dots\dots (5)$$

4.2 完全限制最小平方法

衛星影像中一個像素內可能包含兩種以上的物質，在這個研究中含有熱液的像素也有海水在裡面，其與普通的海水在綠光和紅光波段有較高的值(圖 4)，所以使用線性頻譜混和分析(linear spectral mixture analysis)來處理，除了分類之外，還能知道不同物質的比例。假設在影像中有 p 個目標物， L 個波段， \mathbf{r} 向量代表影像中的一個像素，每個像素的維度是 L ，建立一個 $L \times P$ 大小的目標物頻譜特徵矩陣 $\mathbf{M} = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_p]$ ，另外建立一個 $p \times 1$ 大小的向量 $\alpha = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_p)^T$ ，代表物質含量的比例， \mathbf{n} 是誤差值，方程式如下

$$\mathbf{r} = \mathbf{M} \cdot \alpha + \mathbf{n} \dots\dots\dots (6)$$

找到 α 就可以得到 \mathbf{r} 中各物質的含量比例，為了得到個物質含量的近似百分比，可用最小平方誤差當作標準，如下

$$E = (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha)^T (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha) \dots\dots\dots (7)$$

求 E 的最小值可估計出 α

$$\alpha_{LS} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{r} \dots\dots\dots (8)$$

為了讓最小平方法估計更準確和可靠，必須針對每個像素的含量加入兩個限制，一個是總含量總合為 1，一個像素中各物質的含量總合為 100% (sum-to-one constrained least squares, SCLS)，方程式如下

$$\min_{\alpha \in \Delta} \{(\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha)^T (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha)\} \dots\dots\dots(9)$$

$$\Delta = \left\{ \alpha \mid \sum_{j=1}^p \alpha_j = 1 \right\}$$

(9)解為

$$\alpha_{SCLS} = \mathbf{P}_{\mathbf{M},1}^\perp \alpha_{LS} + (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{1} [\mathbf{1}^T (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{1}]^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

$\mathbf{P}_{\mathbf{M},1}^\perp$ 是物質頻譜矩陣 \mathbf{M} 的正交子空間投影算子，定義為

$$\mathbf{P}_{\mathbf{M},1}^\perp = \mathbf{I} - (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{1} [\mathbf{1}^T (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{1}]^{-1} \mathbf{1}^T \dots\dots\dots (11)$$

第二個是含量不能為負，大於等於 0 的值才具有物理意義 (Nonnegativity Constrained Least Squares, NCLS)，方程式如下

$$\min_{\alpha \in \Delta} \{(\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha)^T (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha)\} \dots\dots\dots(12)$$

$$\alpha \geq 0$$

建立常數向量 $\mathbf{c} = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_p)^T$ ，其中 $c_j > 0$ ，透過 \mathbf{c} 建立拉格朗日(Lagrange)

$$J = \frac{1}{2} (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha)^T (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha) + \lambda (\alpha - \mathbf{c}) \dots\dots\dots(13)$$

對 α 微分取最小值可得

$$\alpha_{NCLS} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{r} - (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \lambda \dots\dots\dots(14)$$

$$= \alpha_{LS} - (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \lambda$$

和拉格朗日乘數向量

$$\lambda = \mathbf{M}^T (\mathbf{r} - \mathbf{M}\alpha_{NCLS}) \dots\dots\dots(15)$$

接著建立被動集合 \mathbf{P} 和主動集合 \mathbf{R} ： \mathbf{P} 包含對應到 α_{LS} 為正值的索引， $\mathbf{P}=\{1,2, \dots,p\}$ ； \mathbf{R} 包含所有對應到 α_{LS} 為負值或 0 的索引，一開始設為空集合。 \mathbf{P} 和 \mathbf{R} 用來疊代(13)和(14)，找出最佳解時， λ 會滿足庫恩-塔克條件(Haskell *et al.*, 1981)：

$$\lambda_j = 0 \quad j \in \mathbf{P} \dots\dots\dots(16)$$

$$\lambda_j < 0 \quad j \in \mathbf{R}$$

最後 \mathbf{P} 中索引相對應的 α 就是最後的結果。

這些條件發展出了部分限制最小平方法，也就是只含其中一種限制的方法，後來 Heinz、等人(2001)發表的演算法可同時加入兩種限制條件，能更精確地找出物質特徵的含量。

此方法可同時加入總合為 1 與值不為負的兩個限制條件，可以更準確地得到物質含量(魏子軒，2005；Heinz *et al.*, 2001)。

含量總和為 1 的限制條件包含在特徵矩陣 \mathbf{M} 中，形成新的特徵矩陣 \mathbf{N} ，定義為

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{dM} \\ \mathbf{1}^T \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

其中 $\mathbf{1}=(1,1,\dots,1)^T$ 。一個像素向量 \mathbf{r} 更新為向量 \mathbf{s} ，定義為

$$s = \begin{bmatrix} \delta r \\ \mathbf{1}^T \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

用 δ 來控制含量總合為 1 的限制。利用(16)(17)式代換前面 NCLS 中的 M 和 r ，便可得到 FCLS。

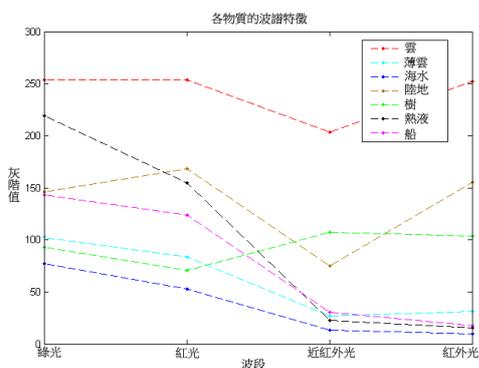


圖 4 以 2008 年 9 月 6 日 SPOT-5 衛星影像為例，各物體相對應的波譜特徵。可以看出熱液相較於一般海水在綠光和紅光有較高的值

5. 結果與討論

5.1 結果

5.1.1 去除陸地

有原始影像後，對影像使用 ENVI 建立的遮罩 (圖 5) 去除陸地，減少陸地對分類的影響。因為空間解析度不同，所以影像大小也會不一樣，要使用不同的遮罩。SPOT-2 和 SPOT-4 的邊界因解析度較低，所以比較模糊 SPOT-5 因為解析度較高，所以在建立遮罩的時候比 SPOT-2 和 SPOT-4 還要準確。



圖 5 因為空間解析度不同而得到的兩個遮罩。左圖為 SPOT-2 和 SPOT-4 的遮罩，右圖為 SPOT-5 的遮罩。

5.1.2 去除雲

去除陸地的影像可以讓 ATSA 分類的結果不受陸地影響，整個影像只剩雲、海和海上的物體，不過 ATSA 只能去除厚雲的部分，所以薄雲會留下 (圖 6)。短波紅外光的雲比近紅外光明顯，比起近紅外光短波紅外光更適合拿來使用，但是礙於 SPOT-2 沒有短波紅外光，為了整體一致性，每幅影像都使用近紅外光。

5.1.3 分類結果

熱液的擴散範圍會隨著海流變動，不過基本上熱液量多的話，被帶離源頭也能被明顯偵測到；量少，就會因為擴散濃度降低，而使得值變的很低，所以擴散的範圍才能作為熱液量大小的指標。

FCLS 是監督式分類，需要建立訓練樣本，訓練樣本有熱液、海水、薄雲、混濁海水和船，每張影像的訓練樣本有 3 到 4 個，都是由以上五種所組成，依照影像內所包含的物體而有不同，例如圖 7 的訓練樣本就是熱液、海水、薄雲和船，分類完之後，可以看到有四張圖，分別代表不同的物體，左上是熱液，右上是船，左下是薄雲，右下是海水，圖中的值就是該物體所含的量，越偏紅色該物體的含量越多，越偏藍色該物體的含量越少。在分類中最容易產生誤判的是船，因為船形成的尾波與熱液的光譜性質非常的相似，如果不管怎麼更改訓練樣本都沒辦法解決問題的話，最後只能手動刪除被誤判點。

此研究需要的是熱液的範圍，所以只會使用熱液那張圖，門檻值根據多張圖的比對後，認為大於 0.5 可視為熱液，最後計算熱液的像素數量，SPOT-2 和 SPOT-4 的一個像素大小是 100 平方公尺，SPOT-5 是 25 平方公尺。在圖 8 中可以看到隨時間熱液面積的值，1 月和 8 月有較高的值。



圖 6 以 2008 年 9 月 6 日 SPOT-5 衛星影像為例，去除雲的結果，因為 ATSA 只能去除厚雲，所以在影像中還是可以看到薄雲。以 2008 年 9 月 6 日為例

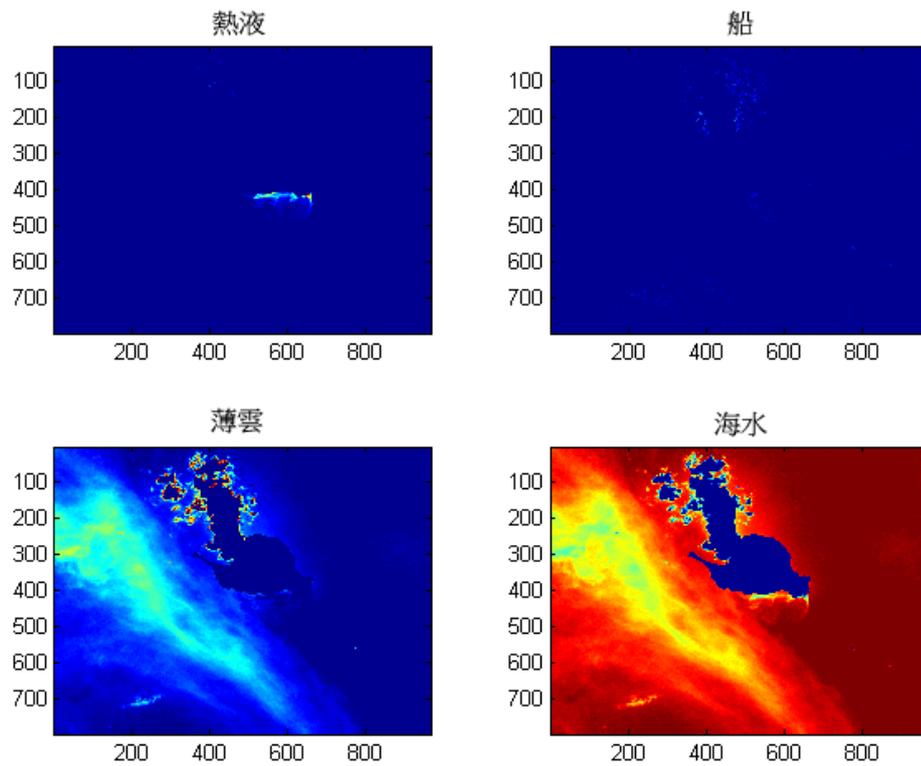


圖 7 FCLS 的分類結果。右邊的颜色條對應到像素的值，越偏紅色該物體的含量越多，越偏藍色該物體的含量越少

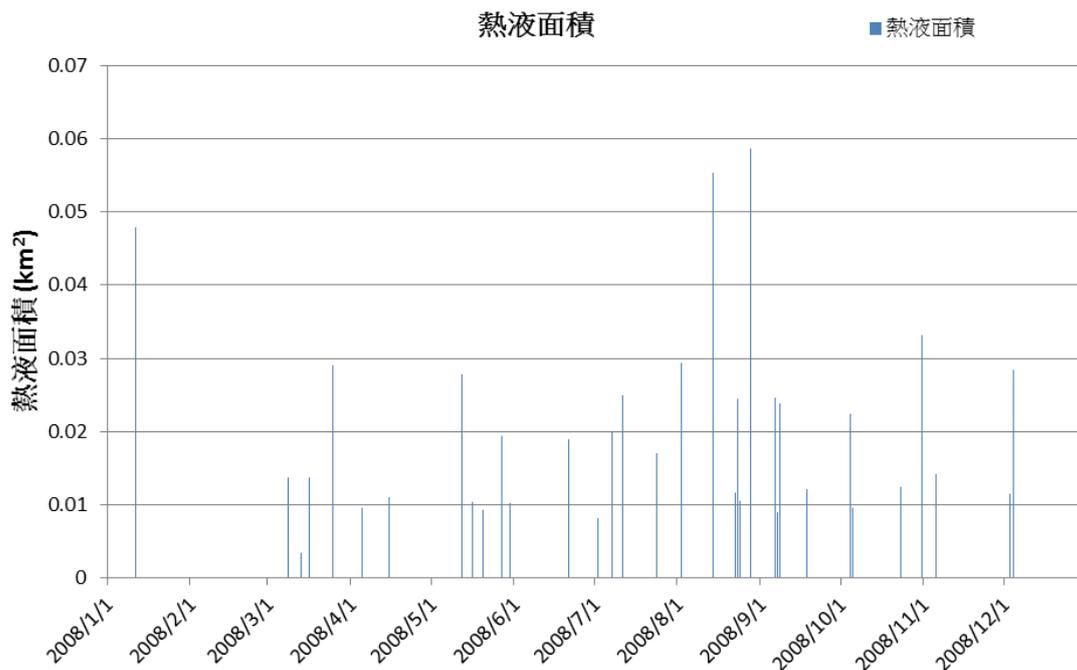


圖 8 分類結果，無影像之處便無值

5.2 結果與海流之比較

此研究要探討熱液與地震的關係，熱液面積的大小也可能與潮汐、颱風或任何引起水體擾動的事件有關，在討論地震之前，將粗略地排除其他事件影響。Chen *et al.* (2005) 的研究發現熱液的溫度變化和潮汐還有颱風有關，在潮汐的作用下，龜山島海域因潮差引起的水位變化約有 0.1~0.2 bar 的壓力差，在水深 10 米處，此壓力差約可使水的沸點產生 2°C 的變化(郭富雯，2001)。

SPOT 衛星影像是在 10 點到 11 點之間拍攝沒有一天的變化，所以看不出一天內的潮汐現象，龜山島也沒有驗潮站，所以也沒辦法得知確切的潮汐，不過可以透過熱液流向估計潮汐。張振乾、等人(2000)發表的文章中探討漲潮和退潮時的海水流向(圖 9)，根據流向趨勢圖可以依照熱液流動方向判斷衛星影像拍攝時是漲潮還是退潮，從結果看來潮汐與熱液的面積似乎沒有多大關係，例如在 8 月熱液面積最大的兩個時間，雖然面積都很大，但是一個是漲潮一個是退潮，沒有因為是漲潮還是退潮就會有比較大的面積。圖 10 表示熱液面積和當時的潮汐，若只用此方式判斷，便無相關。

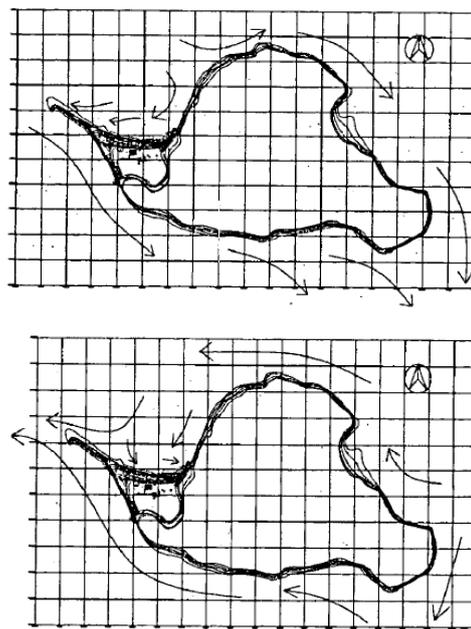


圖 9 上圖表示漲潮時的海水流向。下圖表示退潮時海水流向(資料來源：張振乾、等人，2000)

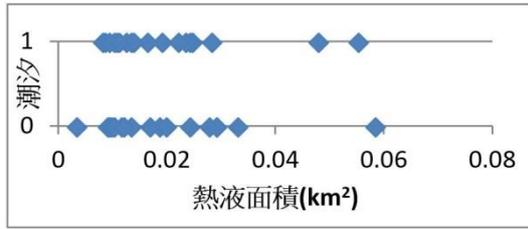


圖 10 統計結果表示面積與潮汐無關，面積 0.04 以下的結果更突顯這個結論。Y 軸的 1 是漲潮，0 是退潮

表 2 2008 年有發布颱風警報的六個颱風(資料來源：中央氣象局)

颱風名稱	時間	程度
薔蜜	09/26~09/29	強烈
哈格比	09/21~09/23	中度
辛樂克	09/11~09/16	強烈
如麗	08/19~08/21	中度
鳳凰	07/26~07/29	中度
卡玫基	07/16~07/18	中度

先前提到颱風也會影響熱液溫度，Chen *et al.*(2005)測量到颱風過境時熱液的溫度有顯著的下降，另一篇文章(Chiang *et al.*, 2010)提到龜山島的地溫偵測在颱風來襲時有明顯的變動，從 2006 年到 2008 年共有五次較劇烈的變化，都發生在颱風大量降雨後，影響機制目前還不清楚。

針對 2008 年的地溫現象做討論，2008 年有六個颱風(表 2)，其中哈格比和如麗沒有侵台。在颱風前後的熱液沒有一定規律，不會因為颱風前就特別高或特別低，而且颱風來襲時雲量很多，龜山島被雲層覆蓋，那段時間都無法分析，所以也不確定是否會有變化。

5.3 結果與地震之比較

在 2008 年有 425 個區域地震，但是影像的數量能用的只有 36 個，所以沒辦法讓影像和地震完全對應，只能針對有影像的時段討論(圖 11)。整體

在時間序列上熱液面積較大的時候多發生在群震的周圍，較細部來看地震數量在 1 月、8 月和 12 月有一個峰值，1 月和 8 月的熱液面積較大跟地震數量峰值吻合，1 月 11 日的面積較大，剛好發生在 1 月的群震後；8 月 14 日和 8 月 28 的面積也較大，剛好發生在 8 月的群震之中。Konstantinou *et al.*(2013)發表的文章表示 12 月的地震和地底岩漿有關，比較可惜的是 12 月只有 12 月 3 日和 12 月 4 日有可用的影像，SPOT-2、SPOT-4、SPOT-5 和福衛二號這些衛星影像中，2009 年最接近而且能用的也只有 SPOT-2 在 1 月 21 日的影像，當天的熱液面積是 0.0148 平方公里，時間間格很大而且面積也沒有特別高，所以這天的值並不會算在接下來的討論內。

圖 11 中兩者看似有關又好像沒有關聯，或許與地震跟熱液的距離有關。將熱液的位置定為緯度 24.83 度，經度為 121.96 度，再計算震源到熱液位置的距離，就可得到圖 12，大多數的地震都發生在 5 到 15 公里之間，距離跟面積沒有太明顯的關聯，不過可以看到八月的時候有比較近的地震，熱液面積也比較大。

此研究主要想找到熱液與地震的關係，在地震發生前後熱液面積可能會有所改變，藉此做為地震預警，不過從圖 11 和圖 12 中沒辦法直接看出，所以引用相關係數來表示兩者間的關聯性。

相關係數的計算方程式如下

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \dots\dots\dots(19)$$

回歸線的計算方式是使用 Matlab 的 polyfit，以多項式函數尋找配合 x 資料的取縣，方程式如下

$$y(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1} \dots\dots\dots(20)$$

x 是熱液面積，y 是地震數量。

圖 13 可以看到時間間隔越長點也越發散，面

積最大的熱液顯示衛星影像拍攝時間之前地震比較少，拍攝時間之後的地震比較多，所以熱液面積與之後發生的地震有較大的相關。從相關係數來看各時段的值雖然不是很高，但是熱液前 2 到 4 天、和後 4 天的相關係數小於 0.5 以外，其他都大於 0.5，相關係數最高的是影像前後 1 天，代表熱液面積與前後 1 天的地震有較大關聯，而且與影像拍攝時間之後發生的地震有較大的相關係數，影像拍攝之前的相關係數大多沒有大於 0.6。

除了地震數量之外，地震規模也可能是影響的因素之一，依照不同距離和時間計算地震規模，地震規模的計算用加總來呈現，也就是將各時間範圍的規模相加後再與熱液範圍比較，結果與地震數量的結果差不多(圖 14)，相關係數最高的是前後 1 天

和前後 2 天，最低的是前 4 天，隨著時間範圍的增加相關係數降低，不過比較不同的是影像拍攝之前的相關係數明顯更低，也能代表較多的影響來自影像拍攝時間之後的地震。

本研究假設熱液面積能代表熱液噴發量，雖然沒有實際的資料比對，但還是可以粗略估計熱液的量，利用分類結果中的 α 值，將熱液面積內所有像素的值加總作為當時熱液的量，再依照不同的時間乘上不同的 α 值，結果與熱液面積相似，接著和地震做同樣的分析，結果如圖 15，相關係數最高的值有稍微高些(0.698)，不過整體趨勢和熱液面積差不多，最高的是前後 1 天和前後 2 天，最低的是前 4 天。

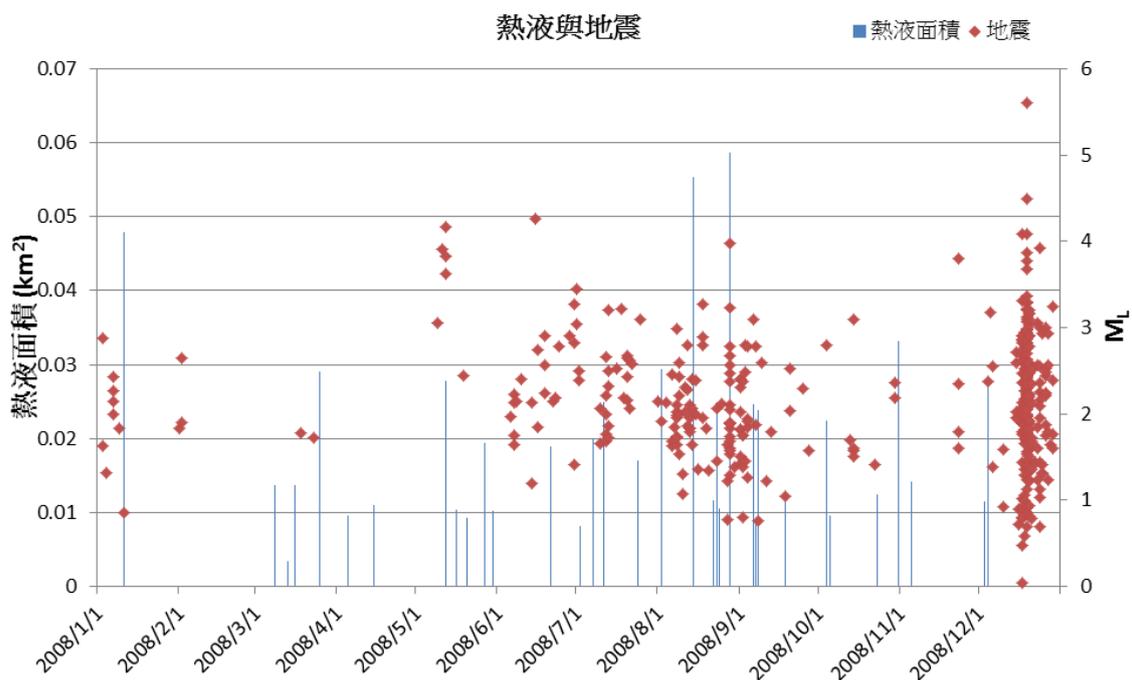


圖 11 熱液面積與地震規模。藍色線條是熱液面積，紅色方塊是地震規模。整體來看熱液面積較大的時候多發生在群震的周圍

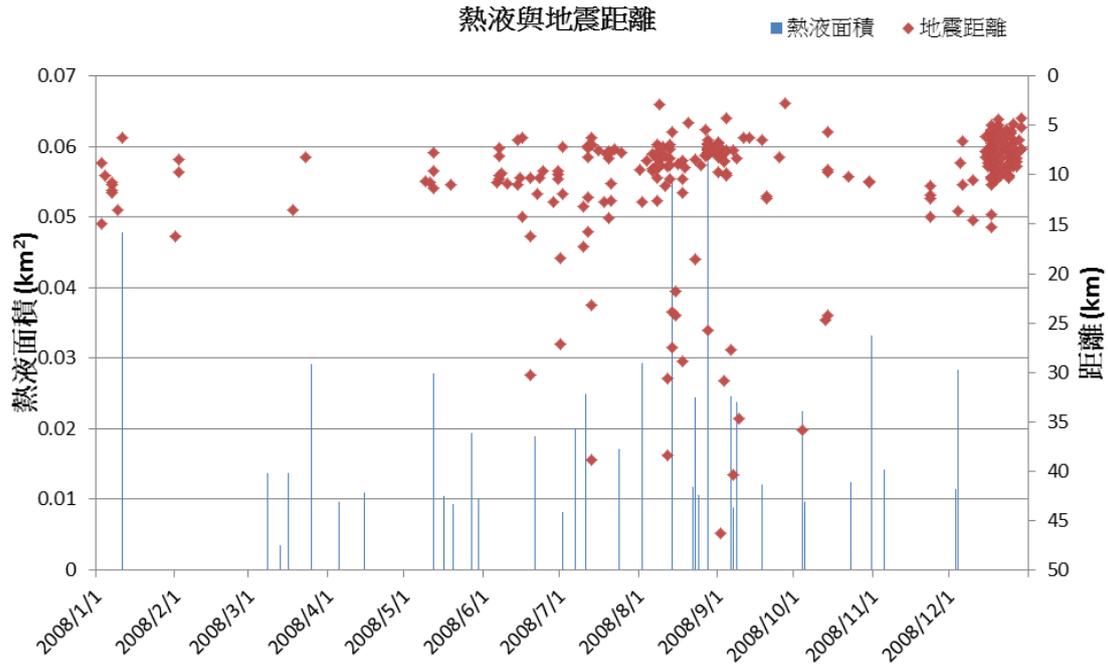


圖 12 熱液面積與地震距離。地震大多分佈在 15 到 5 公里間，八月有較近的地震發生

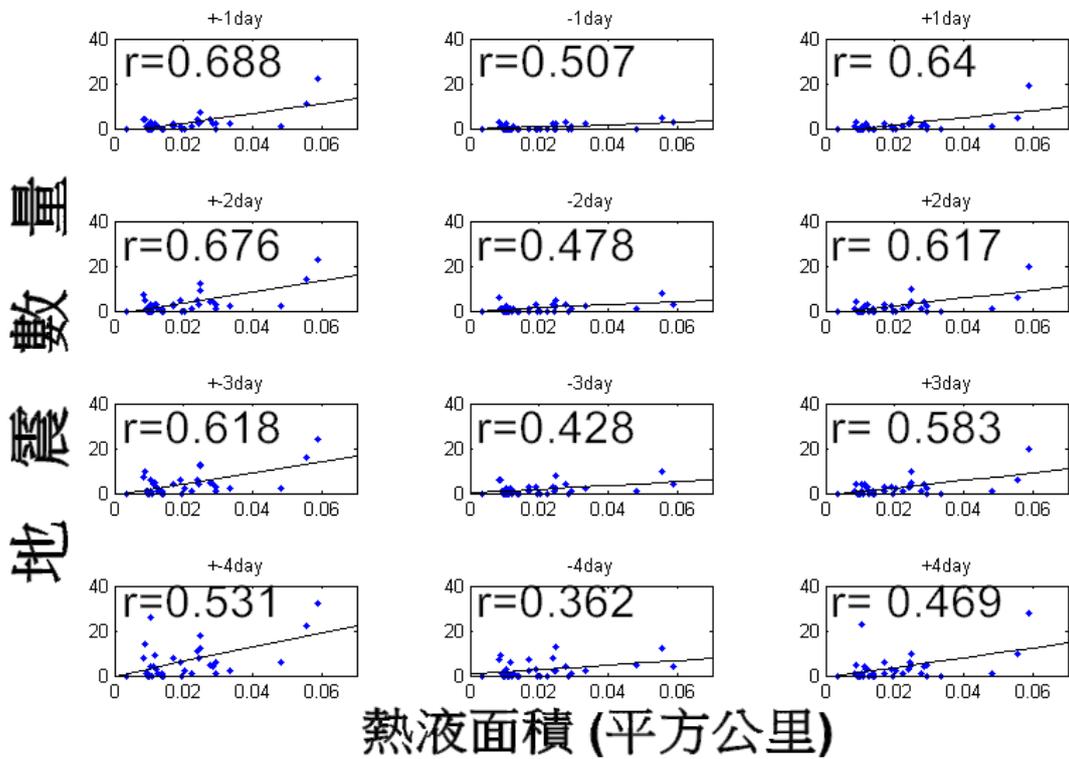


圖 13 所有距離內的地震數量與熱液面積，r：相關係數

熱液面積與地震

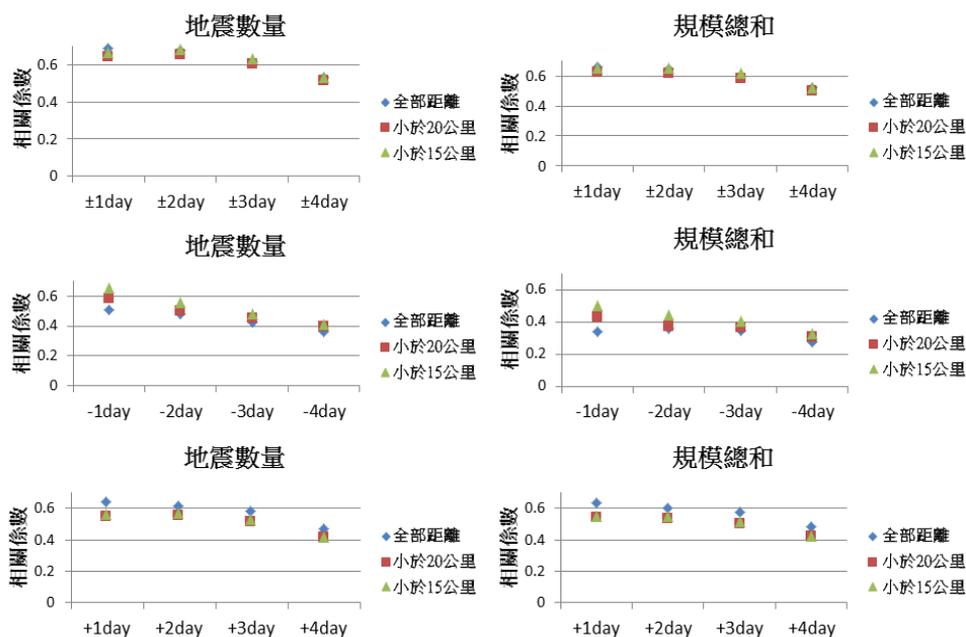


圖 14 地震與熱液面積的相關係數。X 軸為時間範圍，Y 軸為相關係數，菱形為所有距離內的地震，方形為 20 公里以內，三角形為 15 公里以內。左邊是熱液面積與地震數量的相關係數，右邊是熱液面積與地震規模總和的相關係數

熱液量與地震

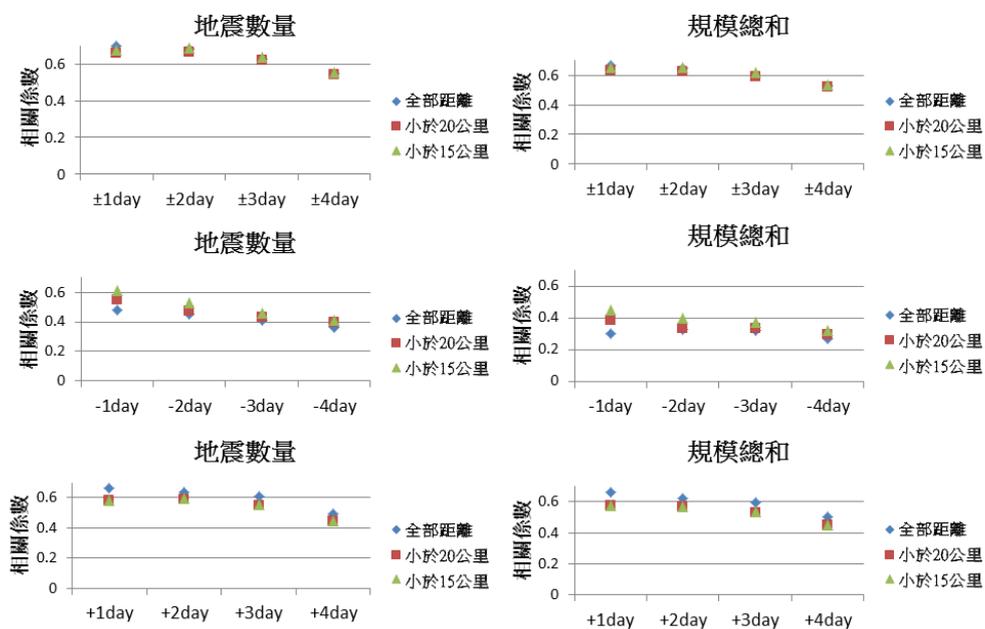


圖 15 地震與熱液量的相關係數。X 軸為時間範圍，Y 軸為相關係數，菱形為所有距離內的地震，方形為 20 公里以內，三角形為 15 公里以內。左邊是熱液量與地震數量的相關係數，右邊是熱液量與地震規模總和的相關係數

6. 結論與建議

- (1) 潮汐與颱風引起的海水活動在本研究中並沒有發現對熱液面積造成的影響，因為前者在面積大或面積小的時候都包含漲潮和退潮；後者侵台的前後，熱液也沒有比較高或比較低。沒有影響的原因也可能跟影像數量有關，沒辦法看到較短時間的變化，不確定有無影響。
- (2) 2008 年的地震大致上分為三群，1 月、8 月和 12 月，整體來看熱液範圍較大的時間大約發生在群震的周圍，細部來看 1 月 11 日的面積較大，也剛好發生在 1 月的群震後；8 月 14 日和 8 月 28 日的面積也較大，剛好發生在 8 月的群震之中；12 月 3 日和 12 月 4 日面積有比較大，但是沒有太明顯的反應出 12 月的群震，可惜的是 12 月只有 12 月 3 日和 12 月 4 日有可用的影像，2009 年最接近而且能用的也只有 1 月 21 日，間隔太久無法反映出 12 月的地震。
- (3) 此研究主要想找到熱液與地震的關聯，在地震發生前後熱液面積可能會有所改變，所以針對熱液前後的時間分析，地震數量的結果顯示熱液面積與前後 1 天和 2 天有最大的相關，最高的相關係數是 0.688，照相關係數來看比起前幾天的地震，後幾天發生的地震與熱液面積的關聯比較大。
- (4) 粗略計算熱液含量，結果顯示和熱液面積差不多，因為沒有實際資料，所以無法確定計算的值和實際值之間的關係，如果未來要繼續研究，可以分成直接和間接兩部分，直接就是直接至噴口處測量，最好維持一年，可能會記錄到季節性變化，也可以直接觀測熱液與海水活動的關係；間接就是用遙測的方式。利用直接和間接的值，找到兩者間的關係，提升遙測的準確性，使遙測成為節省人力和物力的最佳監測方式。
- (5) 地震數量與影像數量的落差很大，2008 年的地

震有 425 個，影像只有 36 個，台灣雲量很多使得能用的影像很少，這個是無法解決的問題，所以最好的方式還是直接測量，但是在直接的長期監測出現之前，遙測是最好的長期監測方式。本研究中遙測仍能看出地震與熱液面積呈正相關且大於 0.5。

參考資料

- 王天楷，徐春田，2007。大台北地區特殊地質災害調查與監測地熱流與海域火山活動調查與監測(4/4)，經濟部中央地質調查所。
- 江協堂，2010。台灣東北部宜蘭平原及龜山島之地熱研究，台灣大學海洋研究所博士論文。
- 宋聖榮，2013。台灣的活火山島—龜山島，台灣博物季刊，32 (1)：74-83。
- 宋聖榮，楊燦堯，2011。大台北地區特殊地質災害調查與監測第二期火山地質與火山活動調查與監測(4/4)，經濟部中央地質調查所。
- 林靜怡，2006。沖繩海槽最南段的微震研究，University of Brest, France 博士論文。
- 郭富雯，2001。龜山島海底熱液活動初步調查，國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文。
- 張振乾，劉玉祥，張基泰，2000。龜山島附近海象調查研究，第22屆海洋工程研討會論文集，國立中山大學，97-104。
- 莊文星，張郁生，陳汝勤，2013。由火山活動後期噴流氣現象之盛衰談大台北地區火山再噴發的可能性評估，台灣礦業，65 (1)：1-18。
- 董倫道，2012。台灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測(1/2)，經濟部中央地質調查所。
- 魏子軒，2005。高頻譜影像物質含量估計運用加權最小平方法，國立中央大學資訊工程研究所碩士論文。
- Chen, C.H., Lee, T., Shieh, Y.N., Chen, C.H., and Hsu, W.Y., 1995. Magmatism at the onset of back-arc basin spreading in the Okinawa Trough. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69:313-322.

- Chen, C.T., Zeng, Z., Kuo, F.W., Yang, T.F., Wang, B.J., and Tu, Y.Y., 2005. Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan. *Chemical Geology*, 224:69-81.
- Chen, Y.G., Wu, W.S., Liu, T.K., Chen, C.H., 2001. A date for volcanic eruption inferred from siltstone xenolith. *Quaternary Science Reviews*, 20:869-873.
- Chiang, H.T., Shyu, C.T., Chang, H.I, Tsao, S., and Chen, C.X., 2010. Geothermal Monitoring of Kueishantao Island Offshore of Northeastern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean.*, 21(3):563-573.
- Chiu, C.L., Song, S.R., Hsieh, Y.C., and Chen, C.X., 2010. Volcanic characteristics of kueishantao in northeast Taiwan and their implications. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 21(3):575-585.
- Chung, S.L., Wang, S.L., Shinjo, R., Lee, C.S. and Chen, C.H., 2000. Initiation of arc magmatism in an embryonic continental rifting zone of the southernmost part of Okinawa Trough. *Terra Nova*, 12:225-230.
- Haskell, K.H. and Hanson, R.J., 1981. An algorithm for linear least squares problems with equality and nonnegativity constraints generalized. *Mathematical Programming*, 21:98-118.
- Heinz, D.C., and Chang, C.I., 2001. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 39(3):529-545.
- Konstantinou, K.I., Pan, C.Y., and Lin, C.H., 2013. Microearthquake activity around Kueishantao island, offshore northeastern Taiwan: Insights into the volcano-tectonic interactions at the tip of the southern Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 593:20-32.
- Letouzey, J., and Kimura, M., 1985. Okinawa Trough genesis: structure and evolution of a backarc basin developed in a continent. *Marine and Petroleum Geology*, 2:111-130.
- Mantas, V.M., Pereira, A.J.S.C., and Morais, P.V. 2011. Plumes of discolored water of volcanic origin and possible implications for algal communities. The case of the Home Reef eruption of 2006 (Tonga, Southwest Pacific Ocean). *Remote Sensing of Environment* 115:1341-1352.
- Otsu, N., 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*:9(1):62-66.
- Sibuet, J.C., Deffontaines, B., Hsu, S.K., Thareau, N., Le Formal, J.P., Liu, C.S., and ACT party, 1998. Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution. *Journal of Geophysical Research*, 103:30245-30267.

The Relationship between the Volcanic Activity and the Plume in Guishan Island with Satellite Image

Yu-Wen Li¹ Chung-Pai Chang^{2*} Hsuan Ren²

ABSTRACT

Guishan Island is located at north eastern Taiwan belongs to Yilan County. According to geophysical and geochemical studies, it is an active volcano, and the latest eruption occurred in the Holocene (7 ka). The active hydrothermal vents and earthquake can be considered as manifestations of volcanic activity. There are some hydrothermal vents at eastern offshore, and the fluids from the vents are mostly made up of sulfur, which cause the discoloration of the ocean around Guishan Island. The discolored area is called plume which can be easily detected by satellite image. The shape and size of plume are disturbed by ocean currents or winds. In this study, we detect the plume area by three steps: (1) remove land area; (2) remove cloud area; (3) classification. First, ENVI is used to build a mask and remove land area. Followed by a fully constrained least squares approach, it is a mixed pixel classification method for concentration estimation in each pixel. Finally, the area of plume is calculated from the result of least square approach, and then compare with the number of earthquake events to find the relationship between them. In our experiment, 36 SPOT images in 2008 are adopted, and the result shows that the larger area of plume was occurred around the large cluster of events. The area of plume is related to earthquake but there isn't clear. After the correlation coefficient is calculated, the highest is in ± 1 day. It means maybe the earthquakes can cause the area of plume become larger.

Keywords: Guishan Island, hydrothermal vent, earthquake, satellite image, image classification

¹Master student, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

²Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

*Corresponding Author, Phone: 03-4227151 ext.57627, E-mail: cpchang@csr.r.ncu.edu.tw

Received Date: Jul. 29, 2015

Revised Date: Jan. 20, 2016

Accepted Date: Mar. 15, 2016

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 jprsubmit@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 20 No. 4
June 2016

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

CONTENTS

Regular Issue Papers

- Application of LiDAR System for Monitoring and Management of Artificial Forest
(Chun-Hung Wei, Chaur-Tzuhn Chen)**231**
- Assessment of the Relationship between Satellite-Derived Vegetation Index and Lidar-Based Laser Penetration Index in Evergreen Broadleaf Forest
(Chung-Cheng Lee, Chi-Kuei Wang, Tzu-Min Hong, Kun-Jen Wu).....**251**
- Potential Catastrophic Landslides Mapping by Using Geomorphometric analysis
(Yu-Chung Hsieh, Chin-Shyong Hou, Jyr-Ching Hu, Li-Yuan Fei, Hung-Jen Chen, Cheng-Lung Chiu, Yu-Chang Chan).....**263**
- Automatic Building Boundary Extraction from Airborne LiDAR Data
(Hsiao-Chu Hung, Yi-Hsing Tseng, Hone-Jay Chu).....**279**
- The Relationship between the Volcanic Activity and the Plume in Guishan Island with Satellite Image
(Yu-Wen Li, Chung-Pai Chang, Hsuan Ren).....**301**

第 二 十 卷 第 四 期
中 華 民 國 一 零 五 年 六 月

航測及遙測學刊

目錄

學術論著

- 應用光達技術於人工林之經營與監測
(魏浚紘、陳朝圳).....231
- 評估台灣常綠闊葉森林之衛星影像植生指標與空載光達穿透率之相關性
(李崇誠、王驥魁、洪子敏、吳坤真).....251
- 地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋
(謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋).....263
- 應用空載光達資料自動化萃取建物邊界線
(洪曉竹、曾義星、朱宏杰).....279
- 利用衛星影像探討龜山島周圍海域熱液與地震的關係
(李聿文、張中白、任玄).....301