

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

應用空載雷射掃描系統推估森林結構特性之研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2313-B-004-001-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立政治大學地政學系

計畫主持人：詹進發

計畫參與人員：施瑩瑄、詹凱軒

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 12 月 28 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

計畫名稱：應用空載雷射掃描系統推估森林結構特性之研究(1/2)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC93-2313-B-004-001

執行期間：93年8月1日至94年7月31日

計畫主持人：詹進發

共同主持人：

計畫參與人員：施瑩瑄、詹凱軒

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立政治大學地政學系

中華民國 94 年 12 月 27 日

空載雷射掃描資料於推估樹冠高度之應用

摘要

森林生態系經營有賴於詳實之林分結構資訊，傳統地面調查需耗費大量人力、物力、經費與時間，不易獲得迅速且正確之資訊。空載雷射掃描儀具有高密度測點與穿透樹冠間隙之特性，可迅速獲取林分之三度空間資料，適合用於林分結構相關資料之蒐集。本研究利用以 Leica ALS40 掃描陽明山地區所獲取之空載雷射掃描資料，產生林分數值表面模型，進而以林分數值表面模型與數值高程模型之差推估樹冠高度模型，並與 11 個地面樣區實測樹高比較，以評估其準確度。結果顯示以 LIDAR 資料估測樹冠高度普遍有低估之現象，若能提高數值表面模型與數值地形模型之精度，應可建立較準確之樹冠高度推估模式。

關鍵詞：空載雷射掃描、樹高、數值表面模型、數值高程模型

Abstract

Forest ecosystem management depends on detailed information about forest stand structure. Traditional ground investigation requires vast amount of manpower, resources, costs, and time, hence it is not easy to promptly obtain accurate information by using ground investigation. Airborne laser scanner (LIDAR) is capable of measuring objects at very high density and penetrating gaps among tree crowns, therefore it can rapidly obtain 3D data about forest stands, and can be used for acquiring related data about forest stand structures. This study utilized an airborne laser scanner data set, acquired using Leica ALS40 scanner, of the Yangminshan National Park area to derive digital surface model for the forest canopy. Furthermore, the forest canopy height model was estimated by computing the difference between the digital surface model and a digital elevation model. The canopy height model was compared to the tree heights measured in eleven ground sample plots in order to assess its accuracy. The results indicate that the forest canopy height is generally underestimated by using the LIDAR data. More accurate

forest canopy height model can be achieved, if the accuracy of the digital surface model and digital elevation model can be improved.

Key words: airborne lidar, canopy height, digital surface model, digital elevation model

1. 前言

遙測技術應用於林業已有多多年，其應用範圍如：自然資源調查、病蟲害調查、森林火災調查、野生動物棲息地調查、生物量之推估、植生綠度分析、植群生態變遷、生態環境變遷監測等。近年來遙測技術發展迅速，遙測影像的光譜解像力與空間解像力均提高甚多，例如：HYDICE(Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)、AVIRIS(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)、CASI(Compact Airborne Spectrographic Imager)之影像資料均超過兩百個光譜波段，IKONOS 衛星影像之空間解像力可達一公尺，QuickBird 衛星影像更提昇至約 61 公分的空間解像力，使得遙測技術對不同地物之辨識能力大為增加，更大幅提昇遙測技術之實用性。遙測技術有許多優點，然而地形遮蔽與天候之影響，亦使其應用受到限制。此外，由於多光譜影像對於植生覆蓋之穿透能力不佳，因此無法直接測得林分結構，其他如林分材積、生物量等森林資源重要資訊，也僅能藉由模式間接推估。空載雷射掃描(LIDAR, **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging)與 RADAR (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging)均屬主動式(active)遙測技術，兩者之最主要的差別在於其掃描時所發射出之電磁波的頻率高低，RADAR 利用較長波長之電磁波對地面進行掃描，而 LIDAR 則是利用較短波長之電磁波。由於 LIDAR 遙測技術具有高解像力與穿透能力，因此在國外不同學術研究領域均普遍受到重視，相關研究成果極為豐碩，例如：Kaufman et al.(2003)

利用 LIDAR 和其他主動式空間遙測系統重建粗、細氣溶膠之垂直剖面；Babichenko et al. (2001)以 LIDAR 研究海洋中有機體之三度空間分布；Cracknell (1999)指出遙測技術包括高光譜影像、SAR、LIDAR 均可有效監測河口及濱海區域；Utkin et al. (2002)利用 LIDAR 偵測森林火災；Davenport et al. (2000)以 LIDAR 推估農田中作物之高度，藉以改善預測鳥類族群之模式；St-Onge and Achaichia (2001)結合 LIDAR 與航空攝影以量測林分高度；Smith et al. (2002)提出利用 LIDAR 與 SAR 對森林中每木直徑估計的比較；Lefsky et al.(2001)評估多種遙測系統應用在美西花旗松純林之森林調查、監測及繪圖。有鑒於 LIDAR 之優異測量能力，美國航空及太空總署(NASA, National Aeronautics and Space Administration)積極推動 VCL(Vegetation Canopy Lidar)衛星遙測計畫，其目標為藉由裝置在距地表 400 公里軌道的衛星上之 LIDAR 系統偵測地球之三度空間結構，尤其是植群之垂直與水平結構，以及地表之地形(Blair et al., 1999)。國內有關 LIDAR 之研究尚屬起步階段，2002 年四月間農委會引進 LIDAR 進行九二一地震災區形變測量，採用兩套不同的商業化系統重複作業，一為 Optech ALTM 2033 儀器，另一為 Leica ALS40 儀器。兩次作業測得的雷射測點地面平面解析度大部分區域優於 1m，LIDAR 測高成果與地面 GPS-RTK 測量之檢核點比較，均方根誤差小於 12cm (史天元、彭淼祥，2002)。以往因缺乏資料，而使 LIDAR 之相關研究停滯不前，在引進 LIDAR 技術之後，已有以

LIDAR 資料進行研究之成果陸續發表，如邵怡誠、陳良健(2003)應用 LIDAR 資料於 DTM 生產及房屋偵測；史天元、彭淼祥(2003b)將空載雷射掃描之成果與航空測量數據高程精度進行比較；陳良健等(2003)結合 LIDAR 資料與數位空照影像建立三維建物區塊；王淼等(2003)提出 LIDAR 點雲資料的處理方法，以萃取出隱含於資料中的平面資訊。

樹冠高度為林分結構之重要參數，由雷射點雲資料可分離出地面點與非地面點，常用的方法可粗分為兩類，一為利用統計方式濾波 (statistical filter)，另一為形態學方式濾波 (morphological filter)。大部分的濾波皆假設利用空載雷射掃描系統所得三維點雲中最低點為地表回波，此假設於都市、開闊地或是疏林地大致成立，但於密林地時其反射訊號極有可能來自於下層植被 (understory vegetation)，使得地表高程被高估，因此，於密林區樹高有普遍低估的情形 (Næsset, 1997)。Sithole and Vosselman (2003)比較用於分類空載雷射點雲資料之八種演算法，發現多數演算法在地景較單純時表現良好，對於較複雜之地景則仍有一些困難。本文主要目的乃在於探討 LIDAR 技術之特性，以及如何利用 LIDAR 資料產生數值表面模型 (DSM, Digital Surface Model) 與數值高程模型 (DEM, Digital Elevation Model)，據以推估樹冠高度，並與地面實測樹高比較，以評估其準確度。

2. 研究材料與方法

2.1 研究試區概述

本研究試區位於陽明山國家公園內，海拔高度分布自 200 m 至 1120 m，氣候類型屬亞熱帶氣候區與溫帶氣候區。陽明山國家公園成立於 1985 年，以大屯火山群為主體，總

面積約 11455 公頃，地質構造多屬安山岩，特殊的火山地形與地質為本區獨特之地形景觀資源。由於受緯度、海拔、地質與東北季風之影響，本區之植物景觀極為豐富，大致可分為水生、草原及森林植被三大類，除了亞熱帶雨林、暖溫帶常綠闊葉林與山脊矮草原等不同的植物帶外，亦可見到通常分布於中央山脈海拔二千五百公尺以上的高山植物，維管束植物種類超過 1200 種，種類繁多的植群也孕育了多樣化的動物群落。植物相主要為天然闊葉樹混合林、芒草原、矢竹林與人工造林等，闊葉林以樟科植物為主，如紅楠、大葉楠等，另有多種特有或稀有植物 (陽明山國家公園，2004)。

2.2 研究材料

2.2.1 空載雷射掃描資料

行政院農業委員會於 2002 年引進空載雷射掃描技術，委由交通大學執行空載雷射掃描儀資料獲取計畫，利用 Optech ALTM 2033 與 Leica ALS40 雷射掃描系統獲取包括九二一地震災區、新竹地區、陽明山等地之資料 (史天元、彭淼祥，2002、2003a)。本研究所使用之資料為 2002 年 4 月 14 日利用 Leica ALS40 掃描陽明山地區所獲得之資料，涵蓋範圍如圖 1 所示，覆蓋面積約 57 km² (5.4 km x 10.5 km)。圖中顯示掃描範圍裡有許多地方並未獲得資料，此乃由於掃描作業進行時陽明山地區有濃厚雲層覆蓋所致。

Leica ALS40 系統主要包括雷射掃描儀 (laser scanner) 與載具方位記錄系統 (aircraft position and orientation system, POS)，藉由全球定位系統 (GPS) 量測載具之空間位置 (latitude, longitude, altitude)，慣性量測系統 (inertial measurement unit, IMU) 記錄載具姿態 (roll, pitch, heading)，以及量測掃描儀與地面的距離與掃描角度，便可解算反射雷射脈衝之地面點的三維空間座標 (Leica Geosystems, 2002)，Leica ALS40 之主要規格

如表 1 所示(Leica Geosystems, 2002；史天元、彭淼祥，2002)。
 空載雷射掃描資料包括測點之 E、N、H 座標及反射強度值 I，其座標系統為 TWD97，其高程值為橢球高，全部掃描點資料共計 22,734,756 點，去除無資料之部分後，掃描資料點密度約為 0.62 pts/m²，資料檔案約 812 MB。此外，本研究另取得以商業軟體 TerraScan 將原始資料分類後所獲得之地面(ground)與覆蓋面(surface)資料，雷射掃描作業之飛航參數與資料檔詳如表 2。

2.2.2 圖籍資料與地面樣區調查資料

為檢核雷射掃描資料之估測成果，本研究另取得多項圖籍資料包括：數值高程模型、衛星影像(QuickBird, SPOT)、正射影像(1:5000)、地形圖(1:1000)、行政區界圖、控

制點圖與地面樣區調查資料等，為陳永寬等(2003)執行台北市加速保安林檢訂管理計畫之研究成果，主要供判釋土地覆蓋類型、座標校正與比較 LIDAR 之測量成果。數值高程模型由台北市政府提供，網格大小為 4 m × 4 m，由於資料量十分龐大，僅切取與 LIDAR 資料涵蓋範圍重疊之數值高程模型供分析使用。地面樣區面積大小為 0.01 公頃，樣區之中心位置以 GPS 衛星定位儀配合全測站測量其座標，每一樣區均詳細調查胸高直徑(DBH, diameter at breast height)大於 5 cm 之林木株數、樹種、胸高直徑、樹高，由調查人員填寫於調查記錄表中。

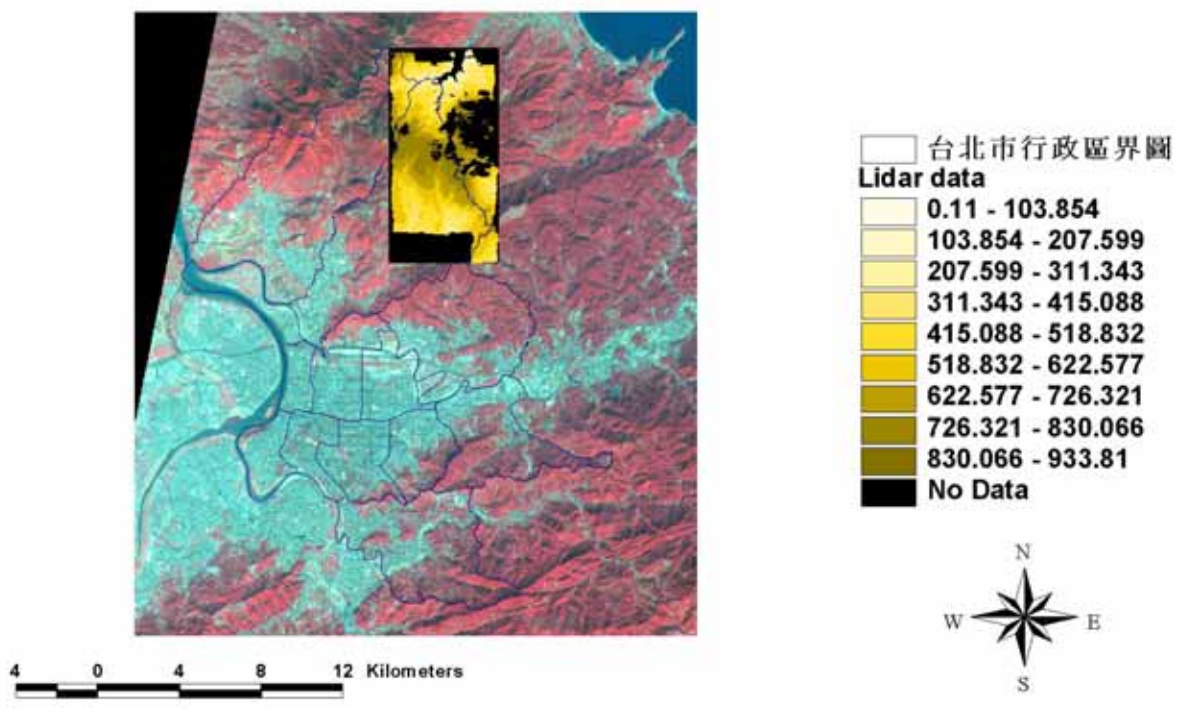


圖 1. 陽明山地區空載雷射掃描資料涵蓋範圍圖

表 1. Leica ALS40 主要系統規格(Leica Geosystems, 2002；史天元、彭森祥，2002)

最大雷射脈衝頻率	45 KHz
雷射波長	1.064 μ m
最大雷射掃描頻率	70 Hz
掃描角度	10-75°
作業航高	500-3000 m (AGL)
水平精度	15-75 cm
高程精度	15-50 cm
多重目標	每一脈衝最多可記錄五個反射訊號
工作溫度	0-35°
環境溼度	10-90%

表 2. 雷射掃描作業之飛航參數與資料檔

飛航航高	1200-2200 m (AGL)
掃描角度	35°
掃描頻率	29.4 Hz
脈衝頻率	38 KHz
全部掃描點	22,734,756 (812 MB)
地面點	1,686,303 (60 MB)
覆蓋面點	15,892,054 (580 MB)
點密度	0.62 pts/m ²

2.2.3 軟硬體設備

本研究所使用的系統平台為安裝 Microsoft Windows 2000/XP 之一般個人電腦，軟體系統包括：ESRI (Environmental Systems Research Institute)所研發之地理資訊系統 ArcGIS、PCI Geomatics 所研發之遙測影像處理軟體 Geomatica、SAS 統計分析軟體。圖形資料之格式轉換、處理、分析與展示均使用 ARC/INFO 提供之 AML (Arc Macro Language)，及以 C 程式語言自行開發之軟體工具。

2.3 研究方法

2.3.1 圖籍資料處理

本研究所取得之圖籍資料原為 TWD67 座標，為便於與 LIDAR 資料比較與套疊分析，需將所有圖籍資料轉換成 TWD97 座標。台北市政府所提供之 4 m 解析度 DEM 高程為正高，除座標轉換之外，尚需將正高轉換為橢球高。第一步先將圖形資料之點位座標轉換成文字檔，並保留其屬性資料。其次利用內政部提供之「台灣地區大地基準及座標系統轉換計算程式(MTWDCON, Modified TaiWan Datum CONversion

program)」，將點位資料轉換成 TWD97 座標，然後將點位資料與屬性資料匯入 ArcGIS 空間資料庫以產生具有 TWD97 座標之圖檔，並建立位相(topology)關係。圖籍資料之格式轉換與座標轉換，均利用 AML 與 C 語言撰寫軟體，將其處理過程自動化。

衛星影像主要供判釋研究區域土地覆蓋類型，QuickBird 影像原為 UTM 座標系統，本研究以 PCI Geomatica OrthoEngine 模組將影像做正射糾正(Orthorectification)，並轉換為 TWD97 座標系統，影像空間解析度為黑白 0.7 m，彩色 2.8 m。

2.3.2 樹冠高度模型(canopy height model, CHM)推估

欲從空載雷射掃描獲取之龐大的離散三維點雲資料中獲取樹冠高度模型，必須先於其中分離出地面點及非地面點如：植被、建物等，並進一步內插使成為常用等間距之網格(Grid)形式或是不規則三角網(TIN, Triangulated Irregular Network)，進而建立有效之 DEM 與 DSM，兩者之差距即可供推估樹冠高度模型。

由表 2 可知陽明山地區之雷射掃描資料分類所獲得之地面資料點數量遠小於覆蓋面資料點數，此乃由於研究試區之植被茂密，雷射光束難以直接到達地面所致。將雷射點雲資料與衛星影像套疊(圖 2、圖 3)，亦可證實地面點多發生於建物、裸露地或植被稀疏之處。由於推估樹高需有地面高程資料，既

有之地面點顯然不足以涵蓋所有研究範圍，因此需先設法推估全面之地面高程。為利於與 4m 解析度之 DEM 套疊運算與比較，所有由雷射掃描資料所產生之網格式資料均轉換成與 DEM 具有相同網格大小與座標原點。本研究採用兩種方法推估全面地面高程，其一為先以 LIDAR 地面點建立不規則三角網(LIDAR_TIN)，然後計算每一 4 m × 4 m 網格中心點座標，將此座標值與 LIDAR_TIN 以線性內差法推算與該點相對應之地面高程值。另一種方法為從所有點雲資料中找出落於 4 m × 4 m 網格之點，以高程最低者為其地面高程，此方法所得到之地面高程在密林區可以預期會有較大偏差。由於 LIDAR 地面點涵蓋不足，若據以產生數值高程模型，恐難獲得精確之成果，因此本文另以既有之 4m × 4m 數值地形模型代表地面高程，並據以建立不規則三角網(DEM4M_TIN)。為求得樹高，由離散覆蓋面點之平面座標與 DEM4M_TIN 及 LIDAR_TIN 以線性內差法推算與該點相對應之地面高程值，覆蓋面點之高程減去相對應之地面高程，即可得到樹高。此外，並求出落於 4m × 4m 網格之所有雷射掃描點的最大高程值，將其減去地面高程，即可得到規則網格之樹冠高度模型。由於原始雷射掃描資料極為龐大，需耗費大量之硬碟儲存空間與電腦運算時間，本文僅從原始資料擷取涵蓋 1 km × 1 km 之測試資料，進行演算分析試驗，並將其結果與地面樣區調查資料比較，以檢核其推估之精確度。

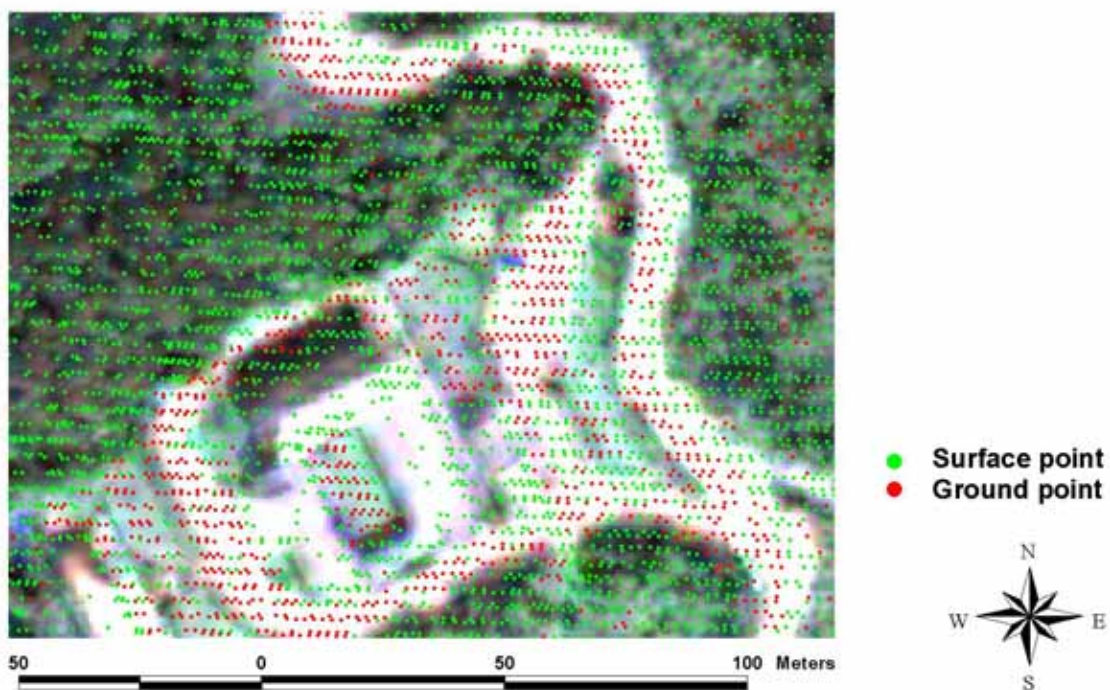


圖 2. QuickBird 衛星影像與 LIDAR 覆蓋面點(surface point)及地面點(ground point)套疊圖

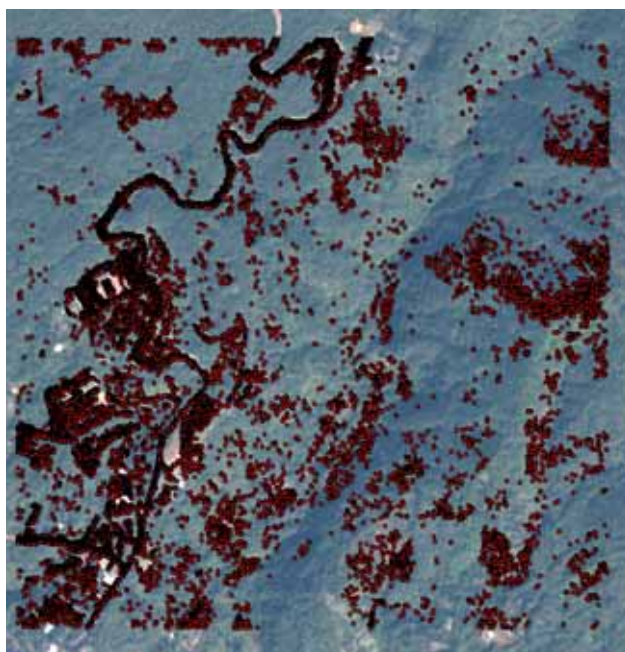


圖 3. QuickBird 衛星影像與 LIDAR 地面點(ground point)套疊圖

3. 結果與討論

圖 4、圖 5 分別為由以 LIDAR 地面點建立之 LIDAR_TIN 經內插推估之數值高程模型 (DEM_GROUND)，以及由 4 m × 4 m 網格之最低高程值所產生之數值高程模型 (DEM_MIN)，圖 6 為 4 m 解析度數值高程模型 (DEM_4M)，圖 7 為擷取落於 4 m × 4 m 網格中之所有 LIDAR 觀測值的最大高程值所產生之 DSM。

從圖 4 可以明顯看出因地面點涵蓋不足而造成許多具有平滑面的三角網，無法表現地形的細微變化。DEM_MIN 相較於 DEM_4M 則有較多的起伏變化，此乃因為 DEM_MIN 記錄的是 4 m × 4 m 網格中之最低高程值，在密林中往往並非真正地面點。圖 7 的 DSM 顯示植群濃密區域影像表面較為平滑，植群較稀疏處則高低起伏較大而有較為複雜的紋理，試驗區左上方的道路在圖 5 和圖 7 中均清晰可見。

圖 8 為 DSM 與 DEM_GROUND 相減所得到之 CHM (CHM_GROUND)，圖 9 為 DSM 與 DEM_MIN 相減所得到之 CHM (CHM_MIN)，圖 10 為 DSM 與 DEM_4M 相減所得到之 CHM (CHM_DEM4M)。

CHM_MIN 為 4 m × 4 m 網格中最大高程減去最小高程，所得到之樹高值最高為 29.680 m，最小為 0 m，亦即沒有植生覆蓋的地面點。CHM_GROUND 所得到之樹高值介於

-10.404 m 與 43.921 m 之間，CHM_DEM4M 所得到之樹高值介於 -8.280 m 與 31.680 m 之間，兩者皆有樹高為負值之不合理現象，顯示在部分區域覆蓋面點的高程值低於 DEM_GROUND 與 DEM_4M 的地面高程，此應為 LIDAR 測得之高程過於低估所致。經檢視樹高之空間分布狀況，發現樹高值為負者大多數發生於建物、道路、裸露地與疏林區域。這些區域以 LIDAR 量測理應較少受到植生覆蓋的干擾，其量測值偏低，應可推論 LIDAR 量測值存在系統性的誤差。雷射掃描資料至今仍多由系統研發廠商負責資料蒐集與處理，然後將成果交付使用者，其資料分析演算法為何，廠商常基於商業利益不願說明。而諸如系統之率定 (calibration)、航線平差、控制點之數量與分布等，對於資料之品質很重要，卻無標準之實施程序，因此使用者往往無法確知資料之精度與可靠性 (Baltsavias, 1999)。本研究取得之 LIDAR 資料由系統研發廠商之工程師處理原始數據，並分類為地面點與覆蓋面點，其演算法為何，以及處理程序是否完整，吾人僅由最終之數據實在難以得知。為驗證 LIDAR 量測數據之精度與 DEM_4M 之品質，本研究以 GPS 量測 27 個控制點，並以控制點之平面座標經線性內插解算 DEM4M_TIN 與 LIDAR_TIN 相對應點位之高程，以供相互比較，表 3 為其比較之結果。

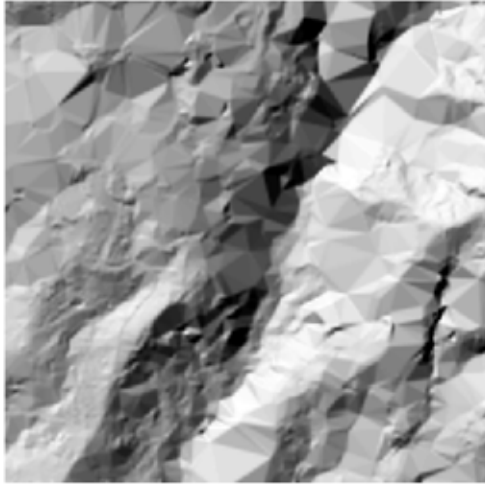


圖 4. 由 LIDAR_TIN 經內插推估之數值
高程模型(DEM_GROUND)

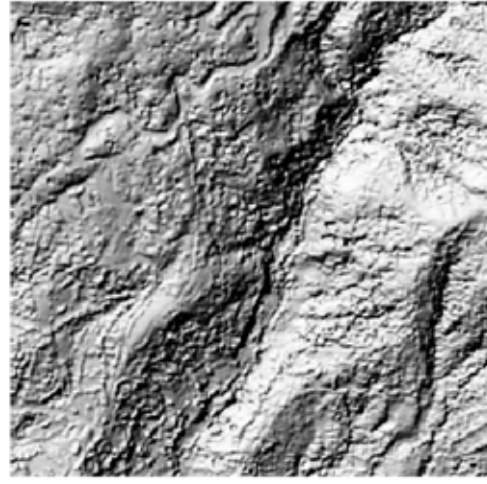


圖 5. 由 4 m × 4 m 網格之最低高程值所
產生之數值高程模型(DEM_MIN)

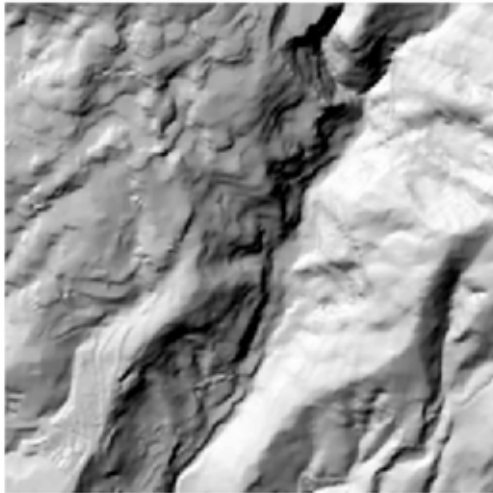


圖 6. 4 m 解析度數值高程模型(DEM_4M)

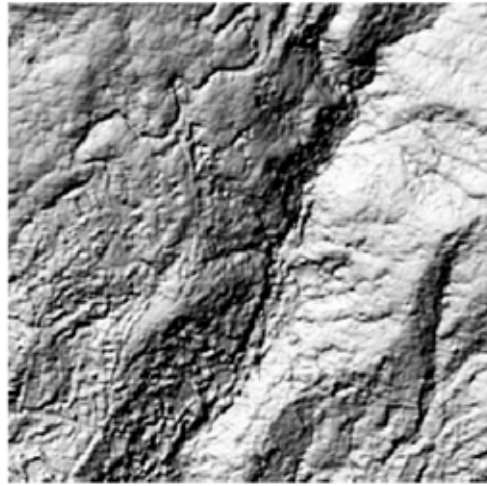


圖 7. 由 4 m × 4 m 網格中之最大高程值
所產生之 DSM

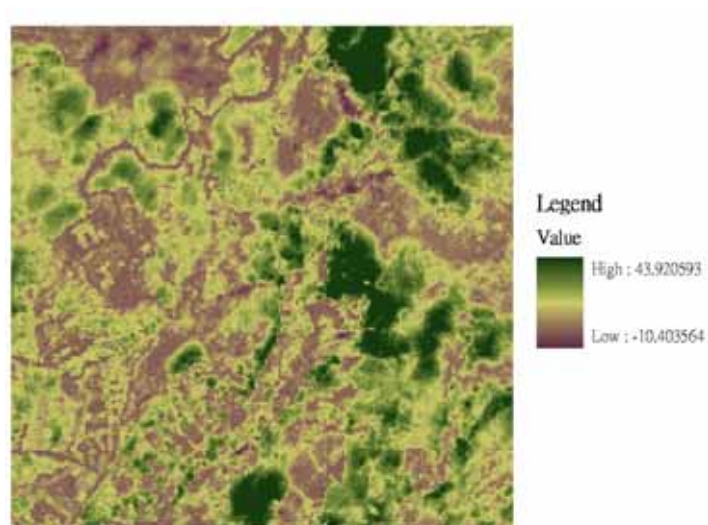


圖 8. DSM 與 DEM_GROUND 相減所得到之樹冠高度模型(CHM_GROUND)

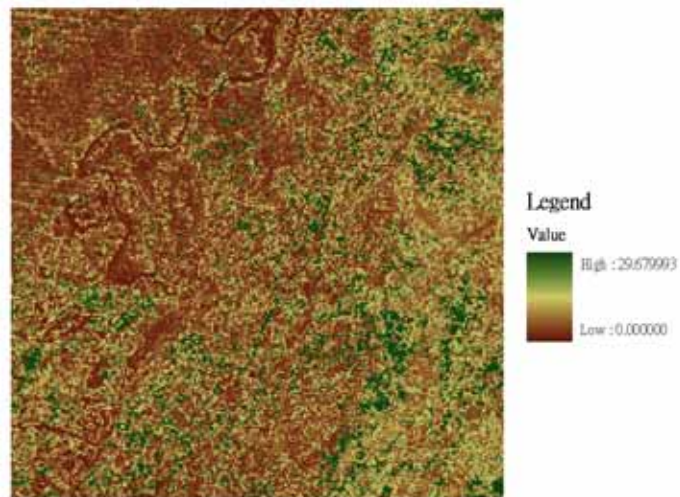


圖 9. DSM 與 DEM_MIN 相減所得到之樹冠高度模型(CHM_MIN)

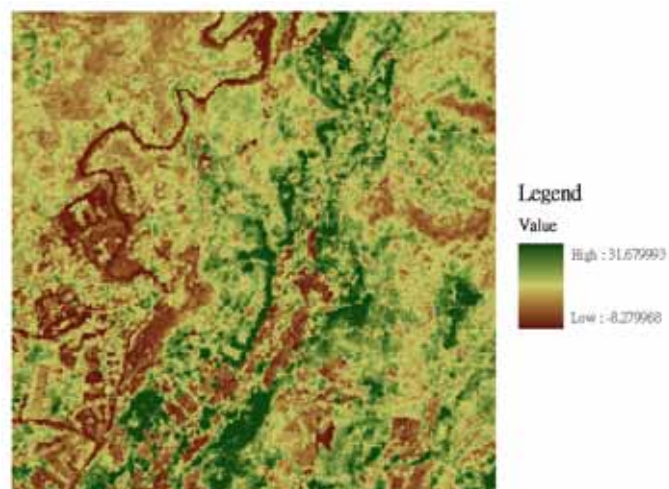


圖 10 為 DSM 與 DEM_4M 相減所得到之樹冠高度模型(CHM_4M)

表 3. 地面控制點(GCP)、LIDAR 地面點與 DEM 三者高程之比較

高程差	觀測點數	平均誤差 (m)	平均絕對誤差 (m)	最大絕對誤差 (m)	最小絕對誤差 (m)	標準差 (m)
$G_h - D_h$	27	0.4121	0.7811	1.8735	0.0167	0.9214
$G_h - L_t$	27	1.5000	1.6891	2.5522	0.1294	0.9357
$L_h - D_h$	23157	-0.4446	1.7409	15.9124	0.0001	2.3765

註: G_h 表 GCP 之高程, D_h 表由 DEM4M_TIN 內插推估之高程, L_t 表由 LIDAR_TIN 內插推估之高程, L_h 表 LIDAR 測得地面點之高程。

表 3 顯示 GPS 控制點之高程平均高於 DEM_4M 約 0.4121 m, 其中誤差為 0.9214 m。LIDAR 地面點高程相較於 GPS 控制點有低估之現象, 其平均誤差 1.5000 m, 中誤差為 0.9357 m。若將 LIDAR 地面點高程與 DEM_4M 比較, 其絕對誤差介於 0.0001 m 與 15.9124 m 之間, 平均比 DEM_4M 低 0.4446 m, 中誤差為 2.3765 m。由此可知 LIDAR 量測數值確實存在系統性誤差, 若僅與 GPS 控制點比較, 其值偏低約 1.5 m, 若比較 LIDAR 地面點、DEM_4M 及 GPS 控制點之相對數據, 則其值偏低約 0.857 m。史天元與彭森祥在九份二山以同一掃描儀所得數據驗證其高程, 其誤差期望值為 -0.960 m, 與本研究所得結果頗為相近, 其誤差來源主要為系統率定未完全所致 (史天元、彭森祥, 2002)。

為驗證由 LIDAR 資料推估之樹冠高度模型的精度, 本研究以 11 個地面樣區實際測量的樹高與 CHM_4M 做比較, 樣區調查日期為 2003 年 3 月 25 日, 其結果如表 4 所示,

GPS 控制點與樣區位置如圖 11 所示。表中顯示除樣區 7 與 8 之外, 以 LIDAR 估測之樹冠高度普遍有低估之現象。以離散覆蓋面點估測樹冠高度平均誤差為 -5.67m 至 1.95m, 以規則網格最大高程估測樹冠高度表現較佳, 其誤差介於 -5.46m 至 1.31m 之間。Næsset(1997)利用僅紀錄最後回波值之雷射掃描系統依胸高斷面積(basal area)加權計算平均樹高。樣區平均樹高自 8 m 至 24 m, 利用所有雷射掃描系統偵測點位計算得之樹高資料較地真資料約低估 4.1 m 至 5.5 m, 若以網格式方式處理雷射掃描系統所得資料並取網格內回波值之最大高程值為網格值時, 所得平均樹高較地真資料之偏差值為 -0.4 m 至 1.6 m。本研究結果與 Næsset 之研究結果類似, 兩者之差異可能因離散覆蓋面點所對應之地面高程為由 TIN 內插所得, 規則網格點則直接對應到該網格之 DEM 高程, 相較之下前者之地面高程誤差可能偏高。

表 4. LIDAR 資料推估之樹高與地面樣區實測樹高之比較

樣區編號	樣木株數	地面實測樹高平均值 (m)	離散覆蓋面點估測樹高平均值 (m)	規則網格最大高程估測樹高平均值 (m)
1	36	8.40	2.90	3.94

2	27	8.60	2.70	4.19
3	28	7.28	3.96	4.22
4	43	8.16	5.34	5.50
5	31	6.84	2.59	3.45
6	31	7.27	5.13	3.93
7	44	6.72	7.06	6.84
8	33	6.15	8.10	7.46
9	18	6.51	4.74	5.05
10	29	7.01	2.69	3.72
11	26	8.64	2.97	3.18

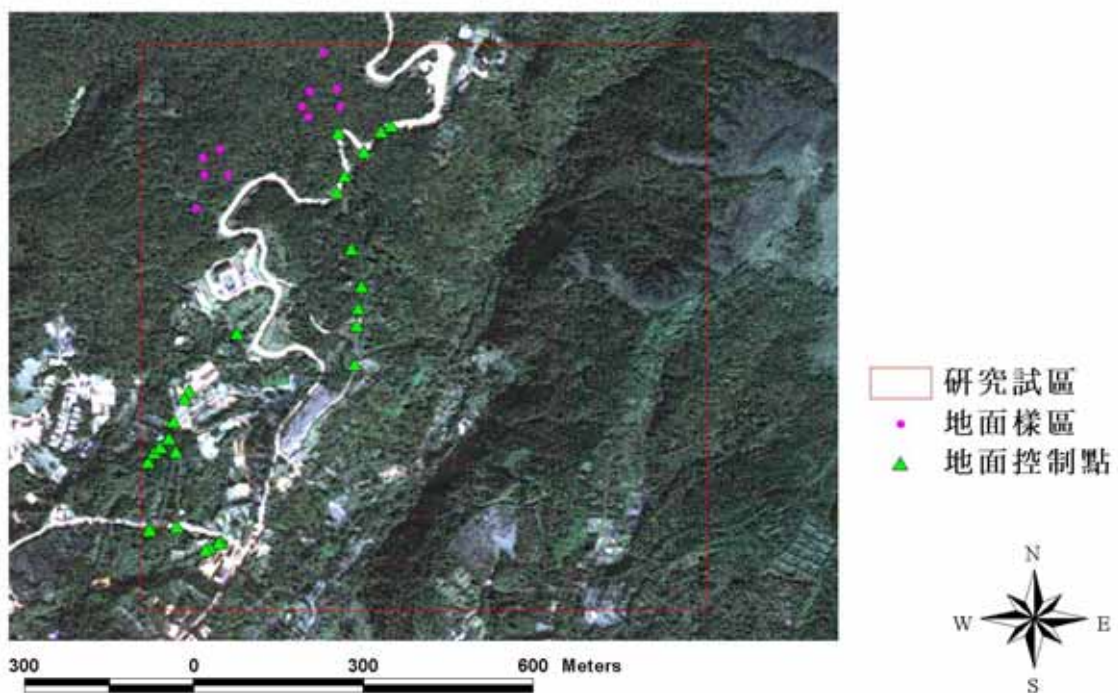


圖 11. 地面控制點與地面樣區位置圖

以 LIDAR 資料估測樹冠高度與地面實測樹高不符之原因，大略可歸納如下：

1. 地面樣區測量時間較 LIDAR 資料獲取之時間晚了將近一年，林木之自然增生導致測量數據之不同。
2. 地面測量林木以樹底至樹梢之距離為樹高，LIDAR 測得之點位則可能為低於樹梢之樹幹、枝條、葉部等，因此有普遍低估樹高之趨勢。
3. 樹高之推估係以 DEM 之高程為參考值，且 DEM 係由正高經內插推算橢球高，DEM 之精度為何仍待蒐集更多資料，以便進一步的檢驗。
4. LIDAR 系統之量測精度因施測之方式與地表覆蓋、地形等因子之影響而有所不同，亦可能為產生誤差之來源。
5. 雷射掃描系統本身之率定若未完全，亦可能影響其量測精度。以本研究所取得之資料為例，其系統誤差即可能影響樹高估測之精度。

4. 結論

本研究之目的為利用空載雷射掃描資料獲取樹冠高度資料，綜合研究成果可獲得以下結論：

1. 本研究所取得之空載雷射掃描資料點雲密度為 0.6 pt/m^2 ，用於推估數值高程模型難以獲得精確結果，未來應嘗試以其他輔助資料提高數值高程模型估測之精度。
2. LIDAR 技術有助於直接獲取樹冠高度資料，以 LIDAR 資料估測樹冠高度普遍有低估之情形，若有較精確之數值高程模型，樹高之估測精度應可提升。
3. 本研究以 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 試區實驗樹冠高度模型推估方法，雖已獲致初步成果，惟 LIDAR 系統之量測精度因施測之方式與地表覆蓋、地形等因子之影響而有所不同，因此不同區域獲得的樹冠高度模型精度也將不同，為提昇樹冠高度模型之估測精度，宜再蒐集更多樣區資料以供比較。

謝誌

本研究承蒙行政院國家科學委員會計畫補助(NSC 92-2313-B-004-001)，台北市政府建設局、行政院農業委員會林務局農林航空測量所、台灣大學陳永寬教授、交通大學史天元教授等提供資料，始得以完成，謹此致謝。

參考文獻

王焱、賴志恆、曾義星，2003。LIDAR 資料之八分樹分割與合併，第二十二屆測

- 量學術及應用研討會論文集，中正理工學院，台灣桃園，77-85。
- 史天元、彭森祥，2002。九二一地震災區空載雷射掃描作業成果初步報告，第二十一屆測量學術及應用研討會論文集，交通大學，台灣新竹，449-456。
- 史天元、彭森祥，2003a。空載雷射掃描數據精度評估程序之研究，第二十二屆測量學術及應用研討會論文集，中正理工學院，台灣桃園，247-256。
- 史天元、彭森祥，2003b。以空載雷射掃描與航空攝影測量製作數值高程模型之比較，農委會 92 年度試驗研究計畫研究報告，共 54 頁。
- 邵怡誠、陳良健，2003。利用光達資料於 DTM 生產及房屋偵測，第二十二屆測量學術及應用研討會論文集，中正理工學院，台灣桃園，87-94。
- 陳永寬、詹進發、成晨光、葉堃生、郭家隆，2003。台北市保安林檢訂管理，「台北市九十一年度加速保安林檢訂管」研究成果報告，台北市政府建設局，共 330 頁。
- 陳良健、賴彥中、饒見有，2003。結合光達資料與數位空照影像建立三維建物區塊，第二十二屆測量學術及應用研討會論文集，中正理工學院，台灣桃園，273-280。
- 陽明山國家公園，2004。陽明山國家公園網站 — 草山風采：
<http://www.ymsnp.gov.tw/HTML/CHI/INTRO/INTRO-INDEX.HTM>
(2004/6/24)。
- Babichenko, S.M., L. Poryvkina, A.E. Dudelzak, and P. Wassmann, 2001. Spectroscopic lidar sensing in three-dimensional profiling of marine organics, *International Journal of Remote Sensing*, 22:385-402.
- Baltsavias, E.P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:83-94.
- Blair, J.B, D.L. Rabine, and M.A. Hofton, 1999. The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitization-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:115-122.
- Cracknell, A.P., 1999. Remote sensing techniques in estuaries and coastal

- zones—an update, *International Journal of Remote Sensing*, 19:485-496.
- Davenport, I.J., R.B. Bradbury, G.Q. Anderson, G.R. Hayman, J.R. Krebs, D.C. Mason, J.D. Wilson, and N.J. Veck, 2000. Improving bird population models using airborne remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 21:2705-2717.
- Kaufman, Y. J., D. Tanre, J.F. Leon, and J. Pelon, 2003. Retrievals of Profiles of Fine and Coarse Aerosols Using Lidar and Radiometric Space Measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(8):1743-1754.
- Lefsky, M.A., W.B. Cohen, T. A. Spies, 2001. An Evaluation of Alternate Remote Sensing Products for Forest Inventory, Monitoring, and Mapping of Douglas-Fir Forests in Western Oregon, *Can . J. For. Res.*, 31:78-87.
- Leica Geosystems, 2002. ALS40 Airborne Laser Scanner Product Description, Atlanta, Georgia: Leica Geosystems, 1-10.
- Næsset, E., 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52:49-56.
- Sithole, G, and G. Vosselman, 2003. Comparison of Filtering Algorithms, Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop, 3-D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data, Dresden, Germany, 8-10 October 2003.
- Smith, G, A. Persson, J. Hohmgren, B. Hallberg, J.E.S. Fransson, and L.M.H. Ulander, 2002. Forest Stem Volume Estimation Using High-Resolution Lidar and SAR Data, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'02, 2002 IEEE International*, 4:24-28.
- St-Onge, B. A. and N. Achaichia. 2001. Measuring forest canopy height using a combination of LIDAR and aerial photography data, *Workshop on Land Surface Mapping and Characterization Using Laser Altimetry*, Annapolis, Maryland, USA, October 22-24, 2001.
- Utkin, A.B., A.V. Lavrov, L. Costa, F. Simoes, and R. Vilar, 2002. Detection of small

forest fires by lidar, Applied Physics B,
74:77-83.

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席國際學術會議報告

94 年 12 月 27 日

附件三

報告人姓名	詹進發	服務機構 及職稱	國立政治大學地政學系 副教授
時間 會議 地點	22-26 November 2004 泰國清邁	本會核定 補助文號	
會議 名稱	(中文)第 25 屆亞洲遙測研討會 (英文) the 25 th Asian Conference on Remote Sensing		
發表 論文 題目	(中文)以雷射掃描資料產生數值高程模型之研究 (英文) Generation of Digital Terrain Model Using Laser Scanner Data, the 25 th Asian Conference on Remote Sensing		

一、參加會議經過

此次亞洲遙測研討會在泰國清邁舉行，會議為期五天，總共與會發表論文人數約八百人，主要參加國家為亞洲地區的國家，亦有少數歐美國家的專家學者與會，台灣參加人數約 40 人，參加人數僅次於日本。會議主題涵蓋空間資訊領域的各種研究，包括：衛星遙測、航空測量、GPS 測量、雷射掃描、雷達、地理資訊系統，以及各種不同領域的應用，為一相當高水準的研討會。

二、與會心得

1. 本次參與研討會，對於主辦單位籌劃大型國際會議之能力印象深刻，舉凡討論議題之擬定、徵稿與註冊程序、議程安排、會議地點佈置與軟硬體設施、會議資訊網站之架設、大會服務與資訊提供，均井然有序，對於未來我國舉辦類似研討會，有許多值得學習之處。本系在 2005 年九月主辦國內之第二十四屆量學術及應用研討會，即從中得到不少啟發，而使得大會相當成功。
2. 此次會議主題涵蓋範圍甚廣，包括各種航遙測技術與空間資訊領域的研究與應用。與會學者專家來自世界各國，雖有不同的文化背景、使用不同語言，以及不同的專長領域，惟對於科學探索的熱忱則為共通的特質。參與研討會，看到許多學者熱心的貢獻研究心得，其對於科學研究的執著，以及樂於與他人分享研究心得的無私精神，著實令人感佩。從研討會的論文發表與討論中，也可以知悉學術研究的發展趨勢，對於未來的研究也有啟發作用。
3. 本次研討會的文化交流之夜，台灣的與會者表演合唱，以及年輕學生表演熱舞，展現無

間的團隊合作默契，以及活潑熱情，贏得無數的掌聲，最後得到大會表演第一名的榮譽，使所有參與的團員都感到很光榮。個人覺得類似的研討會應鼓勵年輕學子參與，讓他們早日接受研究的刺激，有助於長期在學術研究上的發展。

三、攜回資料名稱及內容

研討會論文集二冊與光碟。

四、報告內容如附件。

GENERATION OF DIGITAL TERRAIN MODEL USING LASER SCANNER DATA

Jihn-Fa Jan (Taiwan)

Assistant Professor, Department of Land Economics

National Chengchi University

64, Sec. 2, Chih-Nan Road, Taipei 116, Taiwan

Telephone: +886-2-29393091 ext. 51647 Facsimile: +886-2-29390251

E-mail: jfjan@nccu.edu.tw

Chi-Chuan Cheng (Taiwan)

Department of Forest Management

Taiwan Forestry Research Institute

53, Nan-Hai Road, Taipei 100, Taiwan

Telephone: +886-2-23110061 Facsimile: +886-2-23754216

E-mail: cccheng@serv.tfri.gov.tw

Ying-Hsuan Shih (Taiwan)

School of Forestry and Resource Conservation

National Taiwan University

1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan

Telephone: +886-2-23630231 ext. 2777 Facsimile: +886-2-23638044

E-mail: r92625020@ntu.edu.tw

Kuen-Sheng Yeh (Taiwan)

School of Forestry and Resource Conservation

National Taiwan University

1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan

Telephone: +886-2-23630231 ext. 2777 Facsimile: +886-2-23638044

E-mail: d92625003@ntu.edu.tw

Kai-Hsuan Chan (Taiwan)

Department of Land Economics

National Chengchi University

64, Sec. 2, Chih-Nan Road, Taipei 116, Taiwan

Telephone: +886-2-29393091 ext. 51647 Facsimile: +886-2-29390251

E-mail: u0207415@nccu.edu.tw

KEY WORDS: laser scanner, digital terrain model

ABSTRACT

The objective of this study was to generate digital terrain model by using laser scanner data. This study utilized an airborne laser scanner (Leica ALS40) and a terrestrial laser scanner (Leica HDS3000) to obtain data of a sample plot selected from the Yangminshan National Park located in northern Taiwan. For both data sets, estimation of tree height model was derived from the difference between local maximum and local minimum within each grid cell, and digital terrain model was generated by subtracting tree height model from the digital surface model created from the surface points. To assess the accuracy of the resultant DTMs, the DTMs were compared to a DTM generated from photogrammetric procedure.

1. INTRODUCTION

Similar to radar (RADIO Detection And Ranging), lidar (LIGHT Detection And Ranging) is a very advanced active remote sensing technique with laser light as the energy source. Lidar obtains measurements at very high density, therefore it provides excellent horizontal resolution. Additionally, lidar has the capability of recording multiple return pulses of the initial laser energy. An airborne lidar system is capable of acquiring range image for a large area very efficiently. Classification of the return pulses yields both the ground elevation and non-ground elevation, which allows direct measurements of the heights of buildings and vegetation (Baltsavias, 1999b; Wehr and Lohr, 1999). Recent development of lidar technologies has led to applications of lidar in various disciplines, which include: mapping of electrical transmission lines and towers (Wehr and Lohr, 1999), generation of DTM (digital terrain model) in forested areas (Kraus and Pfeife, 1998), forest canopy structure investigation (Drake et al., 2002), biomass estimation (Lim and Treitz, 2002), and forest fire detection (Utkin et al. 2002).

Airborne lidar technique has certain advantages over photogrammetric procedures, particularly the capability of lidar to obtain ground measurements in forested area provide accurate estimation of DTM (Baltsavias, 1999a; Kraus and Pfeife, 1998). This research utilized an airborne lidar system for obtaining data about the Yangmingshan National Park area in northern Taiwan, and the techniques for deriving digital surface model (DSM) and DTM using lidar data was investigated. In addition, the same procedures were applied to data acquired using a terrestrial lidar system. To assess the capability of lidar in estimation of DTM, the height measurements derived from lidar data were compared to the results generated from photogrammetric procedures.

2. materials and method

2.1 Study area

The study area for this research is located within the Yangmingshan National Park, a very popular recreation area in the vicinity of the Taipei City. The elevation of the park ranges from 200 to 1,120 meters with a total area of 11,455 hectares. Established in 1985, the park features unique volcanic landscape and numerous fauna and flora species. Vegetation of the park can roughly be grouped into three categories, i.e., water plants, grasslands, and forest canopy. Growing in water and land environments, there are more than 1,200 plant species, of which several are endemic species. Silvergrass (*Miscanthus floridules*) and arrow bamboo (*Sinobambusa kunishii*) often grow in grasslands, and the forest canopy is primarily composed of broad-leaved tree species, among them the Lauraceae family are dominant species, such as the red nanmu (*Machilus thunbergii*) and the

large-leaved nanmu (*Machilus kusanoi*). Consisting of a cluster of more than 20 volcanoes, the park is famous for its outstanding natural beauty, geological features, and abundant hot spring resources (Yangmingshan National Park 2004).

2.2 Data

2.2.1 Lidar data: A Leica ALS40 airborne laser scanner mounted on an airplane was used to acquire data for the study area on April 14, 2002. The sensor was equipped with an aircraft position and orientation system (POS), which recorded the aircraft position and attitude information using a GPS receiver and IMU (inertial measurement unit). The POS data were processed using a proprietary software to generate WGS84 ground coordinates of all the reflected laser pulses (Leica Geosystems, 2002). Furthermore, the data were transformed from WGS84 to local coordinate system and subsequently a filtering process was performed to separate ground points from non-ground points. The flight parameters and the number of points in the airborne lidar datasets provided by the vendor are shown in Table 1. Moreover, a terrestrial lidar system, Leica HDS3000, was used to scan a sample plot selected from the study site. In order to register the data with local coordinate system, GPS-RTK was used to measure control points in the sample plot. The raw data was processed using Cyclone software to align point clouds captured from different scanning positions, and to transform data into text file containing (X, Y, Z) coordinates for further processing. The parameters of the terrestrial lidar dataset are shown in Table 2.

Flying height	1,200-2,200 m above ground level
FOV	35°
Scan rates	29.4 Hz
Pulse rates	38 KHz
All points	22,734,756 (812 MB)
Surface points	15,892,054 (580 MB)
Ground points	1,686,303 (60 MB)

Table 1. Flight parameters and number of points in the airborne lidar dataset

Resolution	2 cm at distance of 30 m
FOV	Horizontal: 360° Vertical: 270°
Pulse rates	Up to 1800 points/second
Data points	22,653,213 (777 MB)

Table 2. Parameters and number of points in the terrestrial lidar dataset

2.2.2 Digital terrain model: A DTM, generated from aerial photos, with ground resolution of 4

meter was used in this study. Fig. 1 depicts shaded relief of the study area computed from the digital elevation model assuming 315° (azimuth) and 45° (altitude) as the position of the illumination source.

2.2.3 Ancillary data: In addition to aerial photographs and satellite images, this study used topographic maps (1:1000), orthoimages (1:5000), land cover maps, ground control points (GCP) measured using real-time kinematic (RTK) GPS, and field data to evaluate the quality of the lidar dataset. For photogrammetric processes, ground control points were measured using high-precision surveying instruments such as GPS and total stations.

2.3 Method

The lidar datasets contain irregularly spaced point clouds with four measurement readings, i.e., easting, northing, elevation, and intensity of the returned pulse. As shown in Table 1, the airborne lidar data has three datasets including all points, surface points, and ground points. The data were text files, and the (X,Y,Z) values were in TWD97 (Taiwan geodetic datum based on the Geodetic Reference System 1980, GRS80) coordinate system with elevation representing geodetic height. In order to compare with the DEM, the datasets were converted to ARC/INFO raster grids with common origin and cell size as the DEM. From the dataset containing all points data, the minimum elevation, maximum elevation, average elevation, and number of points within each grid cell were computed and corresponding GRID maps were created. Moreover, the lidar datasets were converted into vector maps, i.e., ARC/INFO point coverages. All the data conversions were done using software programs written in C and AML (Arc Macro Language).

The lidar DSM (LIDAR_DSM) was represented by the grid map containing local maximum, and the grid map of local minimum provided estimation of the DTM (LIDAR_DTM). The lidar canopy height model (LIDAR_CHM) was obtained by subtracting the LIDAR_DTM from the LIDAR_DSM. Processing of the lidar data required large amount of computer disk space and memory because the size of the original data was quite large. To reduce processing time, a subset of the lidar dataset, 1 km x 1 km, was selected to experiment with the analytical methods developed for this study. Within the experimental site, a sample plot was selected to capture data using the terrestrial lidar system. The same algorithms were applied to the terrestrial lidar dataset in order to produce LIDAR_DTM and LIDAR_DSM. To assess the accuracy of the LIDAR_DTM, the LIDAR_DTM for both airborne and terrestrial lidar dataset were compared to the 4-meter DTM (AP_DTM).

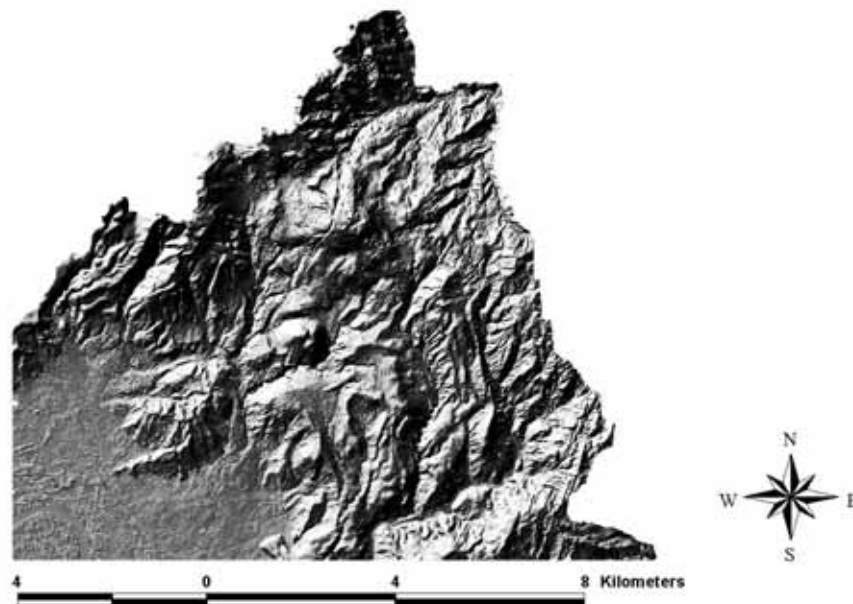


Fig. 1. Shaded relief of the study area produced from DEM

3. Results

The airborne lidar data points were grouped into 4 m x 4 m grid cells, within each cell statistical analysis was performed. Because of the high point density, only very few grid cells were voids, i.e., without any observation of lidar pulses. For the 1 km x 1 km experimental site, only 15 out of 62,500 cells were voids, which amounted to 0.024% of the experimental area.

Analyzed on a per cell basis, the LIDAR_DSM, LIDAR_DTM, and LIDAR_CHM are shown in Fig. 2, Fig. 3, and Fig. 4, respectively. As compared to the 4-meter AP_DTM (Fig. 5), more roughness and details are observed in the LIDAR_DSM and LIDAR_DTM. This was because the AP_DTM was produced by interpolating the stereo image model during the automatic matching process, in contrast, the LIDAR_DSM and LIDAR_DTM were generated using local functions. For comparison between the AP_DTM and LIDAR_DTM, a TIN (triangulated irregular network) was constructed from the AP_DTM, then the (X, Y) coordinates of the grid points of the LIDAR_DTM were used to compute the elevation values by interpolating from the TIN model. Table 3 depicts the comparisons of the elevations between the AP_DTM and LIDAR_DTM. The mean difference between the terrestrial LIDAR_DTM and the AP_DTM was less than mean difference between the airborne LIDAR_DTM and the AP_DTM. This was because the airborne lidar could not see through densely vegetated areas, which caused larger bias for estimation of the ground elevations.

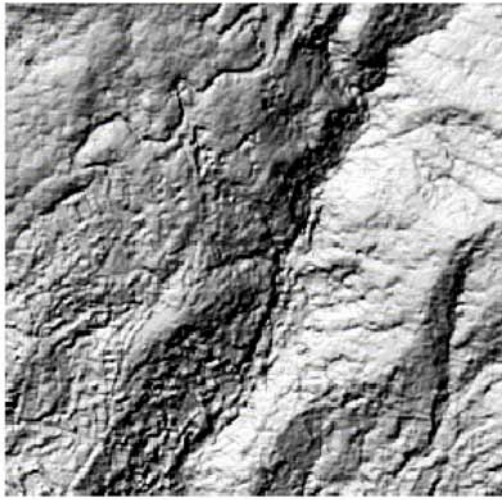


Fig. 2. DSM created from airborne lidar data

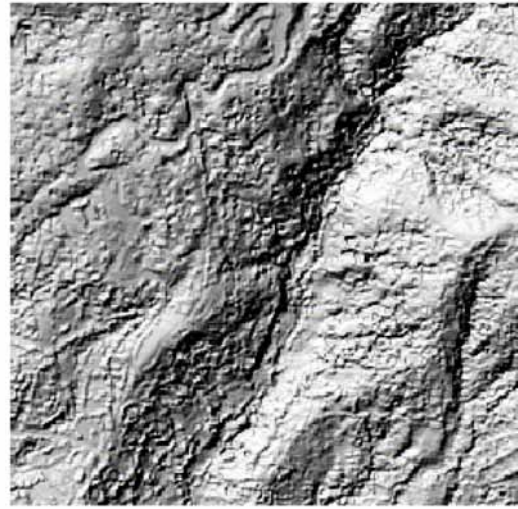


Fig.3. DTM created from airborne lidar data

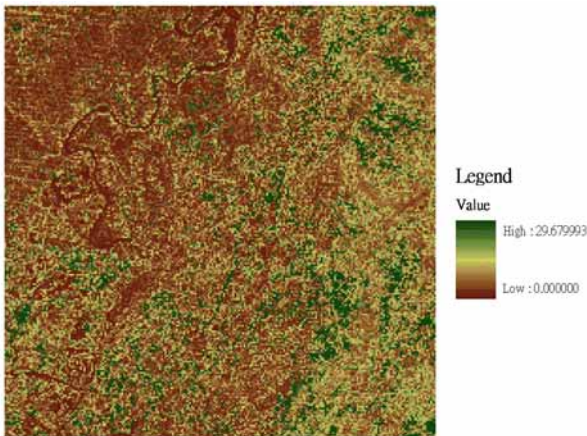


Fig. 4. CHM created from airborne lidar data

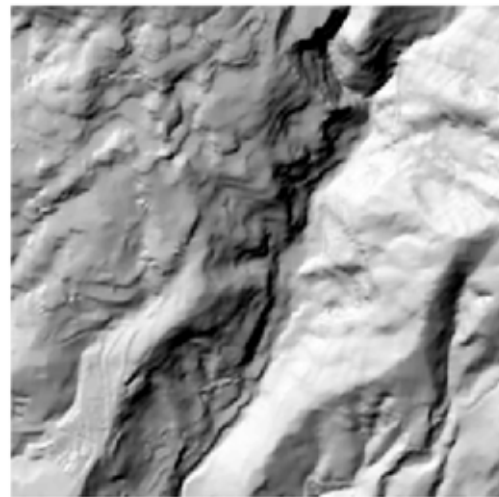


Fig. 5. DTM produced from aerial photos

Variable	Number of Obaservations	Mean (m)	Maximum (m)	Minimum (m)	Standard Deviation (m)
$Z_t - Z$	13779	1.7206	14.5864	-6.0098	2.9051
$Z_a - Z$	62485	2.9743	27.7083	-17.9023	4.3245

Table 3. Comparison between the DTM generated from LIDAR and aerial photos, where Z_t is the elevation measured by terrestrial lidar system, Z_a is the elevation measured by airborne lidar system, and Z is the elevation interpolated from DTM produced using aerial photos.

4. conclusions

While a more complete analysis is needed to evaluate the accuracy of estimation of forest canopy height, the results indicate that the lidar data have great potential for measuring forest canopy structure directly. Further study will be focused on validation of the predicted lidar canopy height with field survey data, and methodology for integrating remote sensing data with lidar data to improve the accuracy of classification results as well as canopy height estimation.

5. acknowledgement

The authors would like to thank the Agricultural and Forestry Aerial Survey Institute, and the Control Signal Corporation for providing data, and the National Science Council for providing support for this study. Our gratitude also goes to the Council of Agriculture and Prof. Shih of the National Chiao Tung University for sponsoring and supervising the lidar pilot project, which resulted in data for this study.

6. references

- Baltsavias, E.P., 1999a. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 83–94.
- Baltsavias, E.P., 1999b. Airborne laser scanning : Existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 164–198.
- Drake, J.B., R.O. Dubayah, D.B. Clark, R.G. Knox, J.B. Blair, M.A. Hofton, R.L. Chazdon, J.F. Weishampel, and S.D. Prince, 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprinting LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 79:305–19.
- Kraus, K., and N. Pfeifer, 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53:193-203.
- Leica Geosystems, 2002. ALS40 Airborne Laser Scanner Product Description. Atlanta, Georgia: 表 Y04

Leica Geosystems. pp. 1-10.

Lim, K, and P. Treitz, 2002. Estimating Aboveground Biomass Using Lidar Remote Sensing. In: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology IV Conference. Proceeding of SPIE's International Symposium on Remote Sensing, 2002 Sep 23-27, Agia Pelagia, Crete, Greece.

Utkin, A.B., A.V. Lavrov, L. Costa, F. Simoes, and R. Vilar, 2002. Detection of Small Forest Fires by Lidar. Applied Physics B: Lasers & Optics, 74:77-83.

Wehr, A., and U. Lohr, 1999. Airborne Laser Scanning—an Introduction and Overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54:68-82.

Yangmingshan National Park, 2004. Looking to the Future.
<http://www.ymsnp.gov.tw/HTML/ENGNEW/info/information.htm> (accessed 28 April 2004).