

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

空載光達作業流程及品質管理之研究

The Production Process and Quality Management Schemes for

DEM Generation from Airborne LiDAR Data

研究生：何心瑜

指導教授：史天元

中華民國九十五年六月

空載光達作業流程及品質管理之研究

**The Production Process and Quality Management Schemes for DEM  
Generation from Airborne LiDAR Data**

研究生：何心瑜

Student : Hsin-Yu Ho

指導教授：史天元

Advisor : Dr. Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系



**Submitted to Department of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment to the Requirements  
for the Degree of Master  
in  
Civil Engineering  
June 2006  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十五年六月

# 空載光達作業流程及品質管理之研究

學生：何心瑜      指導教授：史天元

國立交通大學土木工程學系

## 中文摘要

利用空載光達獲取資料已逐漸成為生產數值高程模型主要作業方法之一，本研究針對其作業過程及產品的品質管理進行探討。

一般檢核空載光達資料的方式為比較平面及高程精度，此時比較的數據已為最終成果。若不符合要求，則需重新產製，不合經濟效益。故本研究以「以流程保證品質」的概念探討查核與品管。整理現有之作業流程為一簡單明瞭之流程，並針對一般應用目的設計所需之查核項目與時機，然而各項目及參考數值可依使用目的不同加以調整。研究中針對幾項影響重大的因素進行進一步探討。包含點雲密度、點雲處理與編修及高程精度檢核。

經由實驗發現原始點雲數量不足，連帶影響地面點數量不足造成自動分類錯誤與 DEM 的不合理，而藉由適當的人工編修可有效改善產品品質，但仍無法保證完全正確，最後進行正高化算所使用之大地起伏模式之精度會影響到正高系統之 DEM，其中以經過水準點修正之模式較為理想。

# **The Production Process and Quality Management Schemes for DEM Generation from Airborne LiDAR Data**

**Student : Hsin-Yu Ho      Advisor : Tian-Yuan Shih**

**Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University**

## **Abstract**

Airborne LiDAR has become one of the primary methods used for DEM generation. This study investigates the production process and quality management scheme for DEM generation from airborne LiDAR data.

The quality of airborne LiDAR produced by DEM is currently evaluated by identifying the planimetric and height position accuracies with ground checkpoints. Because there are only a limited number of checkpoints, and the process is usually conducted during the final stage, a step-by-step quality management scheme during the flow of DEM production would be beneficial. In this study, the production process is investigated first. Subsequently, a quality check scheme is designed. Based on different application requirements, the standard of the threshold values may be different. However, reference values are provided in this study. Several important issues, including point density, filtering, and manual editing, are studied together with the height accuracy validation.

It has been determined that the distribution and density of ground points in the original point cloud greatly influence the DEM production. If the amount of points on the ground is not sufficient, manual editing may improve the overall data quality.

However, the quality of the final product is still in doubt. The last step in the DEM production is the transformation from the ellipsoid height system into an orthometric height system. The performance of several currently available geoid models of Taiwan is also evaluated. It is found that models with differential leveling benchmarks included in the formation process perform better.



## 誌謝

碩士生就快告一段落了，在這期間受到了許許多多人的幫助，才有這本論文的誕生。首先由衷感謝 史天元教授兩年來的耐心指導、包容與鼓勵，使我獲益良多，以及口試委員陳繼藩、曾義星、蔡榮得教授的建議與指正，讓本論文更加完整。

此外感謝工研院能環所劉進金、徐偉城、陳大科、蕭國鑫、廖子毅學長們平時的照顧及對研究進度的關心。還有同事們，因為你們，讓我的研究所生活充滿了歡笑，認識你們真好！還有同研究室的同學承昌和紹禎平日生活上的幫忙和照顧。

並感謝內政部『辦理 LIDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案』提供協助。

需要感謝的還有其他許多的聽我訴苦的好朋友及幫助我成長進步的對象，最後致上最深的謝意給鼓勵我、支持我的家人，因為有你們，我才能無後顧之憂地完成學業，願將此喜悅與你們分享。

# 目錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 DEM和DSM產品定義.....	2
1-3 文獻回顧.....	3
1-4 研究構想與方法.....	6
1-5 論文架構.....	6
第二章 空載光達系統及點雲過濾演算法介紹.....	7
2-1 空載光達系統.....	7
2-2 點雲過濾演算法.....	11
第三章 空載光達產製DEM之品管流程設計.....	17
3-1 空載光達作業流程.....	17
3-2 查核項目.....	29
3-3 產品等級.....	34
第四章 空載光達資料品質檢核.....	36
4-1 使用資料說明.....	36
4-2 點雲密度計算.....	37
4-3 TerraScan地面點過濾及錯誤.....	42
4-4 自動過濾與人工編修發生問題.....	58

4-5 DEM與DSM合理性分析.....	72
4-6 空載光達資料高程精度檢核.....	74
第五章 結論.....	85
參考文獻.....	86
作者簡歷.....	92





## 圖目錄

圖 1-1、影響光達品質之主要項目(Luethy, 2004) .....	4
圖 1-2、定義光達品質六項指標(Luethy, 2004) .....	5
圖 2-1、空載光達掃瞄方式示意圖(Renslow, 2001).....	8
圖 2-2、空載光達內三系統間坐標關係圖(Schenk, 2001).....	9
圖 2-3、多重回波示意圖(RIEGL, 2006).....	11
圖 2-4、各種過濾基本概念(Sithole & Vosselman, 2003).....	12
圖 2-5、TerraScan過濾地面點參數設定對話窗 .....	15
圖 2-6、過濾地面點種子點示意圖(Soininen, 2004) .....	15
圖 2-7、Iteration angle和Iteration distance示意圖 .....	15
圖 2-8、以高程方式展示雲塊之點雲 .....	16
圖 2-9、低點對DEM模型之影響例圖 .....	16
圖 3-1、空載光達作業流程 .....	18
圖 3-2、Leica ALS50 系統裸眼單發SEED曝光量 .....	20
圖 3-3、Leica ALS50 系統 50 mm Optics單發SEED曝光量 .....	20
圖 3-4、平坦地區地面點過濾錯誤示意圖 .....	25
圖 3-5、山區地面點過濾錯誤示意圖 .....	25
圖 3-6、以地面點建立之地表擬色模型 .....	26
圖 3-7、點薄化示意圖(Terrasolid, 2004a).....	28
圖 3-8、Level 1A DEM處理過程.....	34
圖 3-9、Level 1B DEM處理過程.....	34
圖 3-10、Level 2A DEM產品處理過程.....	35
圖 3-11、Level 2B DEM產品處理過程.....	35
圖 3-12、Level 3A DEM產品處理過程.....	35

圖 3-13、Level 3B DEM產品處理過程.....	35
圖 4-1、計畫測區基本資料圖(工研院，2006).....	37
圖 4-2、五類覆蓋面示意圖 .....	38
圖 4-3、將 1/5000 像片基本圖大小分為 100 公尺見方格網示意圖 .....	40
圖 4-4、不同覆蓋面之TIN組成差異.....	41
圖 4-5、以表 4-5 參數過濾地面點成果圖 .....	44
圖 4-6、以表 4-6 參數過濾地面點成果圖 .....	44
圖 4-7、以表 4-7 參數分區過濾地面點成果圖 .....	46
圖 4-8、以表 4-8 參數分區過濾地面點成果圖 .....	46
圖 4-9、以表 4-9 參數過濾地面點成果圖 .....	48
圖 4-10、以表 4-10 參數過濾地面點成果圖 .....	48
圖 4-11、9419_3_038 自動過濾後之成果圖 .....	51
圖 4-12、9419_3_038 人工編修後之成果圖 .....	51
圖 4-13、9419_3_038 人工檢查後之成果圖 .....	52
圖 4-14、9622_1_075 自動過濾後之成果圖 .....	54
圖 4-15、9622_1_075 人工編修後之成果圖 .....	54
圖 4-16、9622_1_075 人工檢查後之成果圖 .....	55
圖 4-17、9419_2_097 自動過濾後地面點建立之模型圖 .....	56
圖 4-18、9419_2_097 人工編修後地面點建立之模型圖 .....	56
圖 4-19、9419_2_097 人工檢查後之成果圖 .....	57
圖 4-20、低點分類錯誤例圖(山區).....	60
圖 4-21、低點分類錯誤例圖(平坦地區).....	60
圖 4-22、低點分類錯誤例圖(植被).....	60
圖 4-23、建物無法濾除例圖(山區).....	61
圖 4-24、建物無法被濾除例圖(山區).....	61
圖 4-25、建物無法被濾除例圖(平坦地區).....	61

圖 4-26、建物無法被濾除例圖(山區).....	62
圖 4-27、植被無法被濾除例圖(平坦地區).....	62
圖 4-28、植被無法被濾除例圖(平坦地區).....	62
圖 4-29、植被無法被濾除例圖(山區).....	63
圖 4-30、山區植被點被誤分為地面點例圖 .....	63
圖 4-31、山區植被點被誤分為地面點例圖 .....	63
圖 4-32、山區植被點被誤分為地面點例圖 .....	63
圖 4-33、山頂缺少地面點例圖 .....	64
圖 4-34、山頂缺少地面點例圖 .....	64
圖 4-35、山頂缺少地面點例圖 .....	64
圖 4-36、地下停車場出入車道實地照片及點雲展示 .....	65
圖 4-37、地下停車場出入車道實地照片及垂直剖面圖 .....	66
圖 4-38、施工中的建築工地 .....	66
圖 4-39、交通大學綜合一館建築特殊處 .....	67
圖 4-40、交通大學環校道路特殊路段圖 .....	68
圖 4-41、缺乏地面點之密遮蔽地區(1).....	70
圖 4-42、缺乏地面點之密遮蔽地區(2).....	71
圖 4-43、地面點點數不足造成無法建立模型 .....	71
圖 4-44、等高線於河川部分錯誤情形(1).....	72
圖 4-45、等高線於河川部分錯誤情形(2).....	72
圖 4-46、9522_1_090 之問題點分布 .....	73
圖 4-47、低點造成DSM高程低於DEM情形示意圖 .....	73
圖 4-48、地面點數量少造成DSM高程低於DEM情形示意圖 .....	73
圖 4-49、點雲密度低造成DSM高程低於DEM情形示意圖(1).....	74
圖 4-50、點雲密度低造成DSM高程低於DEM情形示意圖(2).....	74
圖 4-51、人工編修錯誤造成DSM高程低於DEM情況示意圖 .....	74

圖 4-52、正高、橢球高與大地起伏關係圖(Maune, 2001) .....	75
圖 4-53、台灣地區大地起伏模式(30 秒解析度)彩色圖及等值線圖.....	78
圖 4-54、台灣地區大地起伏模式(3 秒解析度)彩色圖及等值線圖.....	79
圖 4-55、3 秒解析度之大地起伏模式差異彩色圖 .....	81
圖 4-56、Max Triangle 示意圖.....	81
圖 4-57、Max Slope 示意圖 .....	81
圖 4-58、位於橋上不使用之檢核點 .....	82
圖 4-59、與周圍地面點高程內插值相差-0.793 公尺之檢核點.....	82
圖 4-60、與周圍雷射點內插值相差 0.901 公尺之檢核點 .....	83



## 表目錄

表 2-1、空載光達系統規格比較(Leica, 2004; Optech, 2004).....	10
表 2-2、建議參數 .....	15
表 3-1、查核項目 .....	30
表 4-1、計畫測區基本資料統計表(工研院, 2006).....	36
表 4-2、地表覆蓋物類別及定義 .....	38
表 4-3、不同覆蓋面之穿透率 .....	41
表 4-4、每 100 公尺見方內平均三角形個數及穿透率 .....	42
表 4-5、9419_3_038 過濾參數設定(1).....	43
表 4-6、9419_3_038 分區參數設定(2).....	43
表 4-7、9622_1_075 參數設定(1).....	45
表 4-8、9622_1_075 參數設定(2).....	45
表 4-9、9419_2_097 分區參數設定(1).....	47
表 4-10、9419_2_097 參數設定(2).....	47
表 4-11、過濾地面點之型 I 錯誤和型 II 錯誤定義 .....	49
表 4-12、各類錯誤計算方式 .....	49
表 4-13、裸露地過濾成果表 .....	50
表 4-14、裸露地錯誤比例 .....	50
表 4-15、山區過濾成果表 .....	53
表 4-16、山區錯誤比例 .....	53
表 4-17、地形變化複雜區域過濾成果表 .....	53
表 4-18、地形變化複雜區域錯誤比例 .....	53
表 4-19、自動過濾之型 I 錯誤和型 II 錯誤比例 .....	58
表 4-20、人工編修之型 I 錯誤和型 II 錯誤比例 .....	58

表 4-21、自動過濾發生的問題及原因 .....	59
表 4-22、人工編修發生的問題及原因 .....	69
表 4-23、大地起伏模式(30 秒解析度)較差與均方根比較.....	80
表 4-24、大地起伏模式(3 秒解析度)比較(以Hw2005 為比較對象)(單位：公尺)	80
表 4-25、橢球高部分以參數 5-30-0.15 比較成果(單位：公尺).....	83
表 4-26、橢球高部分以參數DEM：5-41-0.3；DSM：25-65-0.5 比較成果(單位： 公尺).....	83
表 4-27、利用不同大地起伏模式進行正高化算成果 .....	83



# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機與目的

空載光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)是近年來新興的一項技術。它結合了全球定位系統(Global Position System, GPS)及慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS),配合雷射測距和光學掃瞄技術,可在短時間內獲取大量且高密度的多重回波點雲(Point Cloud)資料。

點雲資料有豐富的高程資訊,包含地表、建物和植被的高程,由垂直剖面圖中清晰可見。目前點雲主要應用為生產數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)與數值地表模型(Digital Surface Model, DSM),產製出的DEM與DSM可應用於地層下陷、集水區或崩塌地分析、建物、樹林、電纜線萃取和建立三維建物模型等(王及曾,2003),亦可結合其他資料進行海岸變遷評估、森林監測等,用途相當廣泛。從救災方面的崩塌地分析到三維城市模型的建立,無一不需要高精度的DEM,而空載光達高密度和高精度的特性正好符合目前各界的要求。

傳統上DEM由攝影測量方式所製作,攝影測量和雷射掃瞄兩方式差異在於攝影測量是被動式感測,雷射掃瞄則為主動式,直接由空中對地面發射雷射光束,回波資訊配合GPS、INS及掃瞄角解算可定出雷射點的三維坐標;航空影像需透過內外方位的解算組成立體像對,始可進行量測工作,量測方式可透過人工立體量測或是影像匹配,但不論何種方式,地面上的一點要同時出現於組成立體像對的兩張像片,方可利用前方交會求解地面坐標。在資料處理部分,攝影測量是經過人眼判讀再進行量測工作,可在地形重要特徵處取得資訊;但雷射點掃瞄是盲目的獲取雷射點,缺乏該點的地形特徵等屬性資料。遮蔽是兩種方式都會遇到的問題,在樹木遮蔽的山區,攝影測量須滿足前方交會條件往往無法觀測到需要的點位元;而雷射因為以光線法定位,只需一條光束且具有多重反射特性,得



到部分地面點之機率較高，此為空載光達另一項優勢。

由於空載光達產製之 DEM 及 DSM 使用頻率逐漸增加，一套標準化之作業流程是目前迫切需要的，而產品品質的控管也變得重要。因此本研究以一般使用目的為依據，提供了空載光達產製 DEM 流程，並從實務面探討其中須要注意的事項和發生的問題。

## 1-2 DEM 和 DSM 產品定義

依據內政部(2004)，DEM 為不含地表植被及人工構造物時，地球表面自然地貌起伏的數值模型。雖然指自然的地貌起伏，但以土石構築之人工構造物，如堤防、土壩、水壩、大型溝渠或水道及挖填之道路等大型土方結構物，亦屬於此類地表。DSM 則是表示地表最上層覆蓋物的表面模型。

數值高程模型為一種利用數值表達地形的的方法。常見的有數值等高線(digital contour)、不規則三角網(Triangulated Irregular Network, TIN)以及規則方格網(regular grid)等三種。其中數值等高線其等高線間不易建立關係，所以目前僅適合用於資料展示，而較不適合複雜的計算與分析。而不規則三角網是一組用不規則三角形覆蓋全面以表達三度空間連續的資料結構，其解析度可以隨著資料的複雜度改變，能有效地表示地形上的劇烈變化，但資料結構不規則、資料量大，故使用上較規則格網之 DEM 不便。規則格網的資料型態隨著計算機科學的發展廣泛的使用，一組正交的格網上，每一格網點均有其高程資料，這些描述真實地形的格網資料為一規則之矩陣結構。在資料的處理方面，其中的矩形格網由於演算法容易設計且易與遙測影像資料結合，格網大小亦可視實際需要加以調整，故正交格網資料的處理與儲存最為簡便。由於格網點高程值係內插而得，無法完整表達地形，惟格網越細、越能顯現出實際的地表情況。目前台灣地區完整的數值高程模型為利用航測方式生產之格網間距 40 公尺之模型，即於地表面上每隔 40 公尺才有一筆數值高程資料，目前各界則需要解析度更高的資料。



### 1-3 文獻回顧

評估空載光達資料的品質前，先對品質作定義。根據 ISO9000(ISO, 2000)，品質可以定義為「degree to which a set of inherent characteristics fulfils requirements」應即「符合需求與期望的程度」(Luethy, 2004)。

Lohmann(1999)探討空載光達所產製的 DEM 精度，驗證得高程可達 10~30 公分，水準精度為數公尺，水準精度不理想原因可能有系統(GPS、INS 等)造成之誤差、及參考數據不適合光達數據檢驗。另空載光達系統產製之 DEM 品質受到點雲過濾方法影響極大。Lohmann(1999)使用線性推估法(Linear prediction)過濾 DSM，以迭代方式進行，以避免受到植被及建物上雷射點之影響。

Al-Bayari(2001)比較攝影測量生產之 DEM 與利用空載光達生產之 DEM。作業航高 200 公尺，航帶重疊率 50%。使用之航空數位相機是 Hasselblad 相機，解析度為 2K x 3K；LiDAR 系統是 TopEye AB 系統。實驗區地表覆蓋包含植物、建物、作物等。結論得到此實驗中由 LiDAR 所生產的 DEM 最佳精度可達 10 公分足以供工程應用。除比較 DEM 品質外，另外比較利用立體模型與空載光達資料搭配數值影像兩種不同方式製作的正射影像差異，成果得到兩者所生產之正射影像精度皆相當理想(平面精度為 4-8 公分，高程精度為 10-20 公分)。

Ahokas 等人(2003)使用兩組不同資料：Toposys-1 系統於 2000 年在 Kalkkinen 獲取的資料、和 TopEye 系統於 2002 年在芬蘭(Masala, Otaniemi)獲取的資料。其中 Toposys 航高為 400 和 800 公尺；TopEye 系統航高為 100, 200, 400 和 550 公尺。掃瞄區的地表覆蓋包含柏油地、草地、砂礫地和森林。目的為計算不同地表覆蓋和不同航高對精度的影響，以地面上使用 RTK 和測距儀實測之檢核點為準進行精度比較。結論得到以下幾項：同一航帶中，以測試區內(以檢核點為中心，半徑為 2 公尺的範圍)平均高程、最接近檢核點之雷射點高程和利用雷射點內插出的高程三種高程與檢核點高程之差值皆近似，表示最接近檢核點之雷射點可做

品質控制用，而不需要另比較雷射點的平均高程值；而每條航帶的系統性誤差和隨機誤差皆會影響其整體精度，以致每條航帶的精度不一，故要得到高品質之產品，航帶平差為必須；觀測角度亦會造成系統性誤差，但角度大小造成的系統性誤差無明確關係，可以知道的是影響量約 10 公分；不同地表覆蓋物的高程誤差不同；航高愈高，產製的地表模型隨機誤差越大，高程誤差也愈大。

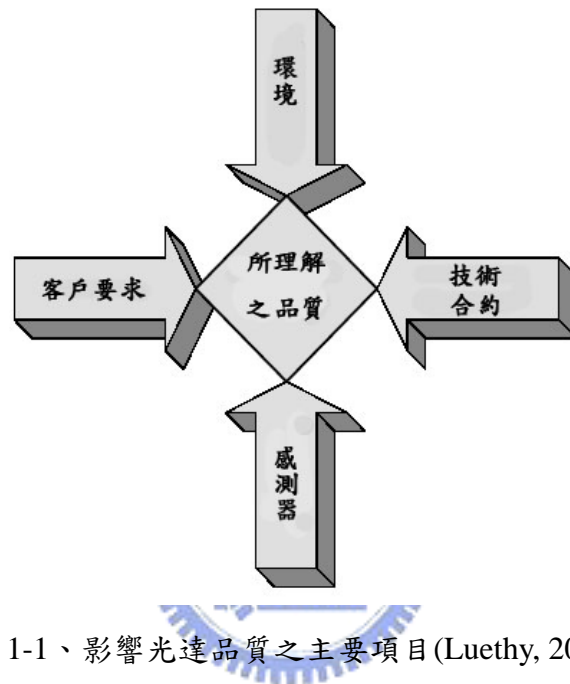


圖 1-1、影響光達品質之主要項目(Luethy, 2004)

Luethy(2004)將影響空載光達品質的因素分為以下四方面：環境、感測器、客戶要求、和技術，如圖 1-1 所示。針對圖 1-1 中四項目加以說明。

- 客戶要求：客戶要求會反應到需要的產品規格精度不同，訂定之合約內容愈明確，承包者愈易決定執行的程序，產品品質也愈易控管。
- 技術(Know How)、合約：指合約上應清楚表示產品要求；執行者則擁有生產過程的技術。
- 感測器：指光達系統中的「黑盒子」(飛航資料記錄器，俗稱黑盒子)。
- 環境：天氣、地形等，人類所無法控制的自然環境影響。

而評估空載光達資料品質，單純以平面及高程精度評斷並不足夠，文中提出六項品質指標以完整評估資料品質(圖 1-2)。

- 密度(Density)：以計算出之密度評估品質。
- 平面、高程精度(H/V accuracy)：分為平面及高程兩方向來評估資料品質。
- Artifacts：因系統誤差、環境或不完整的前處理造成 DEM 資料中某區域出現異常高程或上下起伏或成波浪狀之錯誤現象。
- 資料空隙(Data voids)：指沒有雷射點的區域，造成原因為儀器故障或物質無不反射(如水體)。
- 完整性(Completeness)：因有資料空缺的問題，故其他地區地表地物偵測更需完整。而較小足跡(footprint)可能會造成地物(如樹頂、電纜線)不完整的偵測。
- 航帶不連續(Steps)：相鄰航帶間具有不連續的高程變化。造成原因為率定不佳或導航資料不正確。

其中密度和平面/高程精度可經由統計方法計算，其餘各者要經由影像判釋驗證。所列舉出之品質控制項目必須確保品質能達到要求。



圖 1-2、定義光達品質六項指標(Luethy, 2004)

Ahokas 等人(2005)由分析精度方法、DEM 品質、建物萃取和變遷偵測幾方向探討空載光達品質。內容結合各作者之前所發表的文章，統整出提高 LiDAR 精度可從以下幾方面著手：提升 GPS/INS 技術可減少定位和方位的錯誤；增加掃瞄頻率和降低航高可以增加雷射點密度，這對於山區和三維房屋模型等應用有所幫助。

## 1-4 研究構想與方法

影響空載光達資料品質的因素相當多，本研究首先制定出空載光達生產 DEM 與 DSM 之流程，並於流程步驟中設計檢核點。再針對資料後處理部分，即內業處理部分進行實際測試及比較。包含討論點雲密度計算方式、地形點與地物點自動分類問題、人工編修可能發生問題、DEM 和 DSM 合理性比較及正高化算等，以得知目前空載光達作業內業情況，可供未來制定規範時參考。

## 1-5 論文架構

第一章說明研究動機與目的，並對討論空載光達資料品質評估方法有關之文獻進行回顧，最後介紹研究構想及架構。

第二章主要介紹空載光達系統及作業原理、點雲過濾演算法的概念及 TerraScan 過濾參數。

第三章中針對所擬出之空載光達作業流程及各階段之檢核項目進行說明。

第四章裡，在不考慮系統誤差及航帶平差問題的前提下，先提出幾種點雲密度評估方式，再針對地面點密度的另一表示方式-穿透率，比較以不同方法計算之成果。之後討論利用 TerraScan 設定不同參數自動過濾地面點之差異與人工編修對產品的影響及處理過程中亦發生的問題。

第五章為結論與建議。

## 第二章 空載光達系統及點雲過濾演算法介紹

本章介紹空載光達系統原理、組成及可能出現的誤差等，並介紹各種點雲過濾演算法與所使用之商業軟體 TerraScan 過濾原理和參數。

### 2-1 空載光達系統

#### 2-1-1 雷射測距

雷射測距是一種主動式測距方法，主動發射雷射光束至被測物表面後反射回來接收。其測距方式可分為(1)量測時間差計算距離的方式稱為脈衝式(Plused Ranging)；(2)計算相位差得到距離的方式為連續波式(Continuous Wave, CW)。

脈衝式雷射測距藉由量測雷射光脈衝波速  $c$ (光速)和發射到接收經過的時間  $(t)$  計算出雷射光脈衝所行經的距離  $(R)$ 。其測距公式為：

$$R = \frac{1}{2}ct$$



連續波式雷射測距以連續的雷射光波測距，利用量測發射與接收的連續光波的相位差  $(\phi)$  計算出距離，若使用的雷射光波長  $\lambda$ ，其測距公式為：

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi$$

目前兩種方式的雷射測距精度都可達到 10 公分以內，但由於高功率的連續波雷射半導體製作上較困難，故商業性雷射掃瞄儀多以脈衝式為主(王及曾，2003)。

#### 2-1-2 空載光達坐標系統組成

空載光達是於飛行載體上安置全球定位系統、慣性導航系統和雷射掃瞄儀，藉彼此不同量度技術進行觀測。INS 經由慣性量測元件(Inertial Measurement Unit, IMU)得到載體的位置、速度和姿態；GPS 則是以動態 GPS(Kinetic GPS)方式計

算得到載體之即時位置；GPS 在長時間的穩定性較佳，而 INS 因為有速度和角速度估算量，因此在短時間內的穩定性較好。GPS 所得解之頻率在 1Hz 至 10Hz 間，但 INS 可取得 200Hz 或更高的頻率的資料。故利用 INS 的解整合 GPS 的解，再內插達雷射所需頻率，目前雷射之頻率最高為 50kHz~150kHz。而雷射掃瞄儀藉著反射稜鏡的帶動，會沿著飛行方向，並以與飛行方向垂直的一定角度掃瞄。圖 2-1 為空載光達掃瞄方式示意圖。

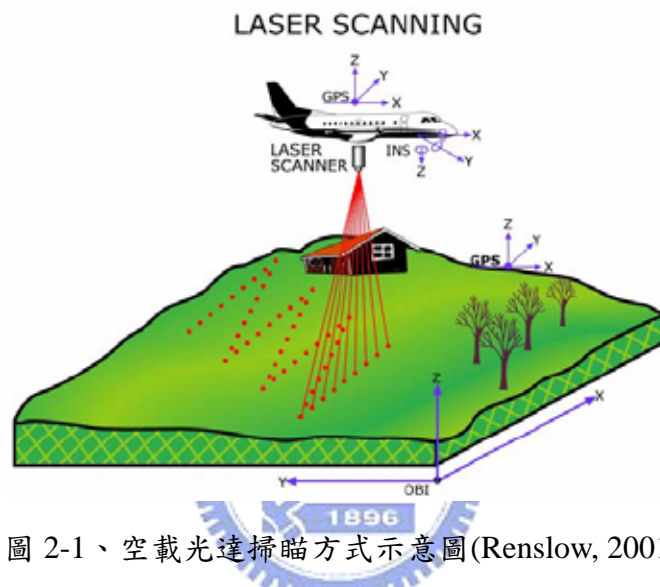


圖 2-1、空載光達掃瞄方式示意圖(Renslow, 2001)

Shenk(2001)所描述之空載光達子系統間坐標關係為雷射掃瞄儀進行掃瞄時，所獲得之雷射點坐標為雷射掃瞄儀的局部坐標，依序將坐標轉換為 INS 之坐標系統和 GPS 的坐標系統，最後再轉換至 WGS84 坐標系統。空載光達內三系統間坐標關係如圖 2-2 表示。



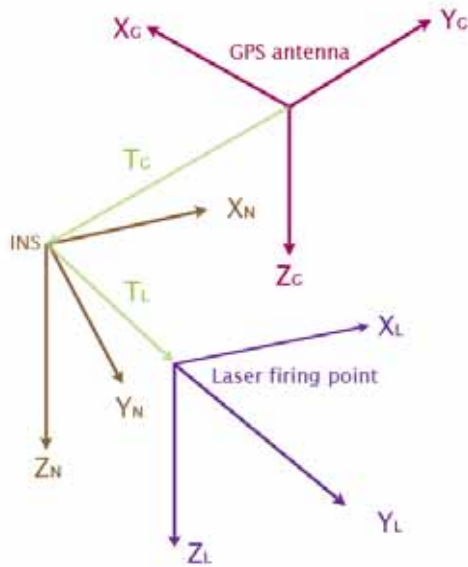


圖 2-2、空載光達內三系統間坐標關係圖(Schenk, 2001)

藉由三者間轉換得到雷射點三維坐標，三子系統間轉換關係如(式 2-1)式(Schenk, 2001)：

$$P_W = R_W R_G R_N (R_M R_L r + t_L + t_G) + t_{GPS} \quad (式 2-1)$$

其中

- $R_W, R_G, t_{GPS}$  為目前載台位置之函數；
- $R_N, R_L, r$  為由量測或測距時間內插而得；
- $R_M, t_L, t_G$  為儀器安置參數(常數)；

由此可知要獲得掃瞄點的三維坐標需經過距離、方位等多種觀測值的轉換，整個過程中任何一個微小的誤差都會影響最終的結果。其中誤差來源包含(Schenk, 2001)：

1. 雷射掃瞄誤差：包括儀器的測距誤差和掃瞄角誤差
2. INS 誤差：INS 起始誤差、對位誤差及飄移誤差(gyro shifts)
3. GPS 誤差：GPS 定位誤差
4. 儀器誤差：掃瞄儀安置誤差、GPS 天線安置誤差及各子系統間整合誤差
5. 大地垂線誤差：INS 設置時的垂線與大地垂線間的誤差

Vosselman and Mass(2001)則將這些誤差大致區分為兩類：

1. 航帶性誤差
2. 區域性誤差

航帶性誤差主要涉及系統性誤差：GPS 的週波脫落、INS 飄移誤差及雷射掃描頭與 GPS/INS 系統間偏移量的誤差，這些誤差會影響整個航帶的資料，使得航帶重疊區發生系統性的偏移；區域性誤差主要為偶然誤差，多是因為雷射測距及 GPS 雜訊所致(Vosselman and Mass, 2001)。

### 2-1-3 空載光達系統比較

目前商業運作之空載光達系統有多種，表 2-1 以台灣目前引進的兩個空載光達系統(Leica ALS50 和 Optech ALTM3070)進行規格比較。

表 2-1、空載光達系統規格比較(Leica, 2004; Optech, 2004)

系統	Leica ALS50	Optech ALTM 3070
掃描形式	Oscillating, Mirror, Z shaped	Oscillating, Mirror, Z shaped
雷射脈衝率(Pulse rates)	83 kHz	33, 50, 70 kHz(選擇式)
雷射波長	1064 nm	1064 nm
最大掃描頻率(Scan rates)	70Hz	70Hz
最大掃描角度(FOV)	75 度	50 度
操作高度(AGL)	200~4000 m	200~3000 m
回波次數>Returns)	4 ranges +3 intensities	4 ranges +4 intensities

空載光達可獲得多重回波(multiple echoes)資料，如圖 2-3 所示。藉由多重回波的觀測值，可同時觀測到樹頂、樹幹和地面的雷射點。目前儀器可接收多次回波，紀錄回波數可達 4 次，一般最常使用的為第一回波(first return)和最後回波(last



return)。第一回波通常反射自地表地物最頂端的點位為 DSM 之機率高；最後回波則來自地面點或離地面最近的點位為地面點之機率高。

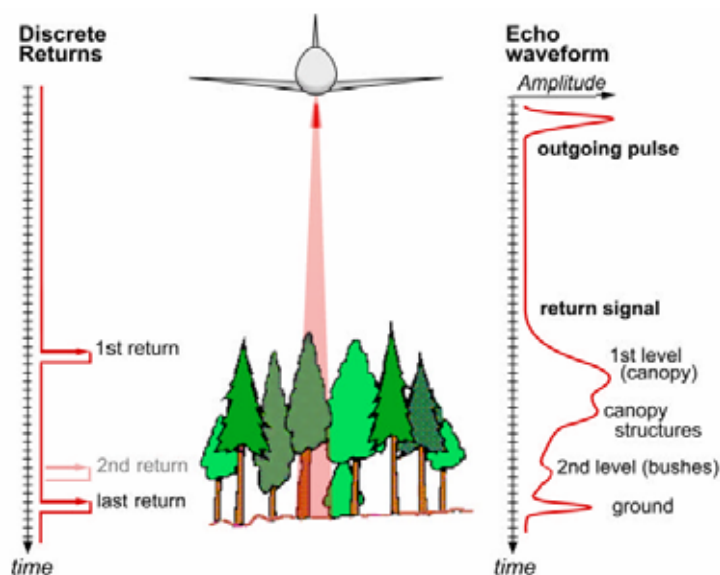


圖 2-3、多重回波示意圖(RIEGL, 2006)

#### 2-1-4 資料格式

原始 LIDAR 數據(All points)為 WGS84 坐標系統之不規則離散點，稱為點雲(point-cloud)，以 ASPRS(2005)公佈之標準格式(.las)儲存，包含雷射點三維坐標及反射值(intensity)等。大多數的過濾演算法是在原始的不規則點雲格式下運作，但有些因受限於影像處理套件，在編修處理之前便已將格式轉換為規則格網。而本研究所述之過程亦是以不規則點雲格式下運作，只在最後產出格網化 DEM 及 DSM 時，方才進行格網化。

## 2-2 點雲過濾演算法

### 2-2-1 點雲過濾基本概念

點雲過濾主要是從點雲資料中濾除非地面點，利用過濾後的地面點生產 DEM。大多數過濾演算法利用地形不連續性的特徵進行，例如坡度、高程差異、至 TIN 三角平面的最短距離及至參考面的最短距離等。Sithole & Vosselman(2003)將各種非地面點濾除基本概念分為四種，如圖 2-4 表示。

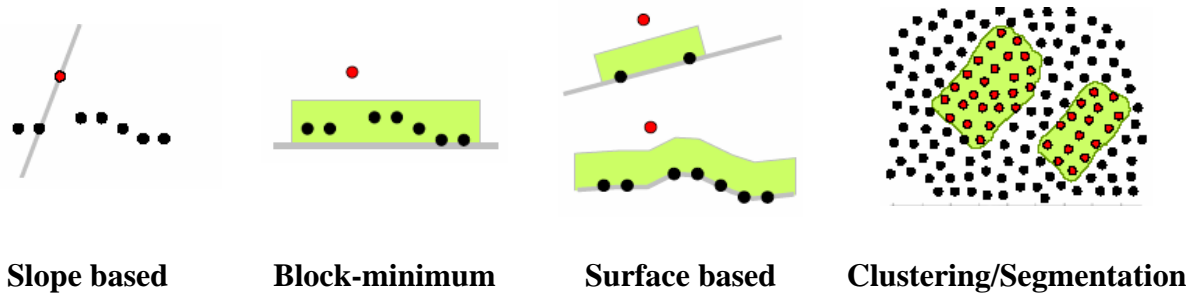


圖 2-4、各種過濾基本概念(Sithole & Vosselman, 2003)

- A. 以斜率為基礎(Slope based)：以地表上斜率最大者歸類為地物為概念。此類演算法主要是量測兩點之間的坡度或高程差異。若坡度超過設定的門檻值時，最高點則視為地物點。
- B. 區塊最小(Block-minimum)：此採用的分離方式主要是以一個參考環域範圍(垂直方向)為基準，若點雲不在此參考環域內則分類為地物點。此環域的定義為一個三維空間範圍，並且在該範圍中的點視為地面點。
- C. 以面為基礎(Surface based)：與上述區塊最小(Block-minimum)方法類似，其參考面為一個數學參數表面，若點位坐落於該參數表面環域範圍內則視同為地面點，反之則被分類為地物點。
- D. 群集/分割(Clustering/Segmentation)：倘若群集點高於參考的鄰近地區，則該群集點被分類為地物點。需注意的是在使用此群集概念分離點資料時，必須詳細描述地物特徵如明確的建物或植被且不能以某單一方面來判斷該點是否為地物點，需加入多種參考因素方可成功分離非地面點。

### 2-2-2 現有點雲過濾演算法回顧

過濾空載光達資料方法依使用的數學模式大致可分類為四種：一、形態學過濾法(Morphological Filters)，二、曲線近似法(Spline-Approximation)，三、線性推估(Linear Prediction)，及四、一般影像處理法(General Digital Image Processing) (Lohmann et al., 2000)。

形態學過濾法最早由 Lindenberger(1993)提出，而後經 Vosselman(2000)改

良。此方法主要是根據對物體形狀的描述，利用侵蝕(Erosion)或膨脹(Dilation)的概念進行過濾。應用在點雲的處理上是根據地點的描述，利用點位間距、高差、斜率或曲率等資訊定義符合地面點的條件，依據所設定之參數或門檻值過濾，考量局部範圍的點雲資料，逐步將非地面點濾除(周富晨，2004)。

曲線近似法是以漸進方式搜尋地面點後，使用不規則三角網(Triangulated Irregular Networks, TIN)將地面點組成地表面。此法初在使用者自訂的格網大小內取最低點做為最初的種子點，然後搜尋可能為地面點的點雲資料加入後重新組成 TIN，直至沒有新的點加入為止。判斷是否為地面點的方法是依據點到 TIN 三角平面的距離及點到該平面的夾角當做門檻值。

線性推估法是一種統計內插法(statistical interpolation method)。Lohmann and Koch(1999)以此法進行過濾，先以擬合平面(fitting plane)的方式利用平面斜截式計算趨勢面，並考慮兩點距離的協變方函數(covariance function)進行過濾。Kraus and Pfeifer(1998)則針對森林區的點雲資料以線性推估方式過濾，根據平均高程計算點位殘差，並利用選權迭代方式，讓殘差最大的點的權值最後趨近於零，則迭代過程中非地面點會自動被濾除，而迭代終止時所餘留下來的點即為地面點(周富晨，2004)。

另外，應用影像處理法濾除非地面點(Cobby et al., 2001; Priestnall et al., 2000)，須先將不規則的點雲資料內插為規則格網。內插格網通常會造成空間資料的損失，尤其在建物邊緣與具有多重回訊的樹林地區，經由內插後會使得地物點高程與地面點高程混合計算在同一格網內，造成高程的失真(王及曾，2003)。國內學者亦自行發展過濾演算法如爬昇及滑行演算法(Climbing-And-Sliding, CAS)(邵怡誠，2005)、自適性過濾演算法(彭森祥，2005)、階層式地形復原演算法(Coarse to Fine Terrain Recovery Algorithm, CFTRA；林承毅，2005)。雖然點雲過濾演算法眾多，但目前沒有演算法能完全正確過濾出地面點，因此需要人工編修以提高產品的正確度。

### 2-2-3 TerraScan 使用之演算法

本研究使用之自動過濾程式為根據 Axelsson(1999, 2000, 2001)之演算法開發之軟體 TerraScan (Terrasolid, 2004a)。其演算法主要原理為曲線近似法，先於自訂的格網大小內取最低點做為初始的種子點組成少數的 TIN，再逐次加入符合門檻值的迭代點組成更多的 TIN。門檻值為限制雷射點到 TIN 平面的角度和距離。

每次迭代完成後，程式會重新計算 TIN 和資料(包含新分類為地面點者)得到的新門檻值。重複計算直到沒有低於門檻值的點後，此漸近過程終止。

Sithole & Vosselman(2003)指出，此演算法主要優點在於能夠處理不連續面。但過濾大量低點及地形坡度大地區表現則較不理想。

### 2-2-4 TerraScan 地面點過濾參數設定

TerraScan過濾地面點時的參數設定對成果影響相當大。過濾地面點可調整的參數有以下幾個，如圖 2-5 中紅框所示。自動過濾地面點時，針對不同地形設定不同參數，若一圖幅中包含不同地形建議分區過濾以達到較佳的效果。

以下說明Terrascan過濾地面點參數：Max building size指最大建物的尺寸，程式在運作時會將一圖幅分為該尺寸大小的格網，在每一個格網中尋找最低點作為地面點的種子點(Initial point)，如圖 2-6 中，各色框線表示格網，桃紅色點表示種子點(該圖為俯視圖)；Terrain angle為過濾地面點所接受的TIN三角形平面最陡角度；Iteration angle是可能點(可能為地面點的雷射點)到TIN三角形平面間的最大角度，一般設 4~10 度間； Iteration distance為該點到TIN三角形平面的距離，可以牽制Iteration angle，避免將平面面積大的一層建物分為地面點，一般值在 0.5~1.5 m間。Iteration angle與Iteration distance關係如圖 2-7；Reduce iteration angle是當TIN三角形三邊長小於所設定的距離時，避免小的TIN三角形中繼續增加地面點，Iteration angle會趨近於 0，防止產生過多之地面點並減少記憶體佔用。此選項建議在地面點密集的地區使用。

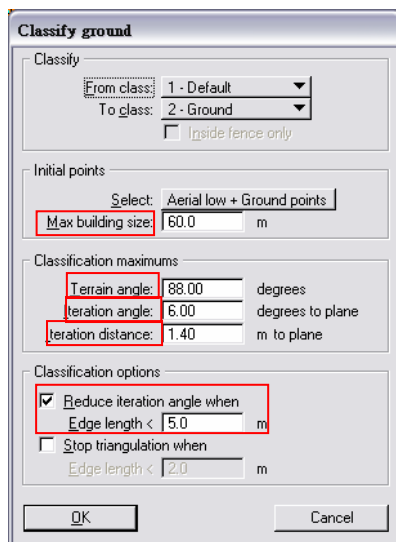


圖 2-5、TerraScan 過濾地面點參數設定對話窗

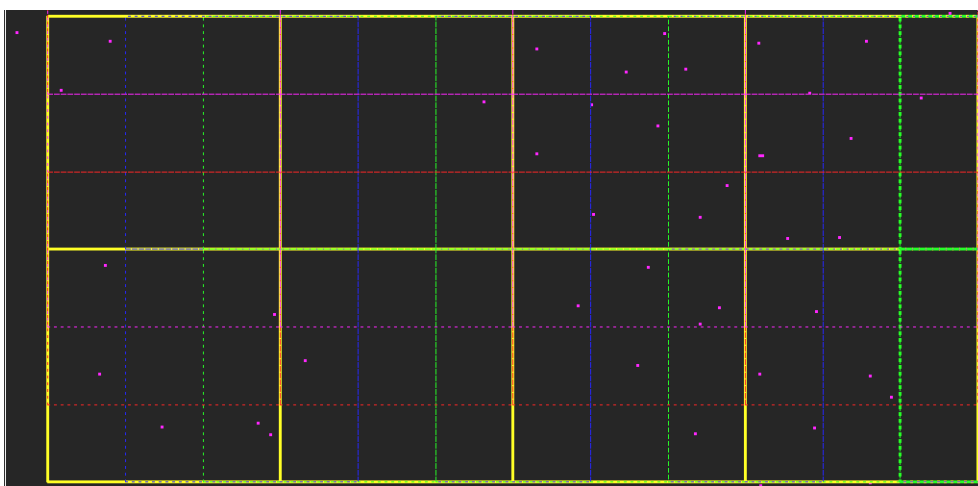


圖 2-6、過濾地面點種子點示意圖(Soininen, 2004)

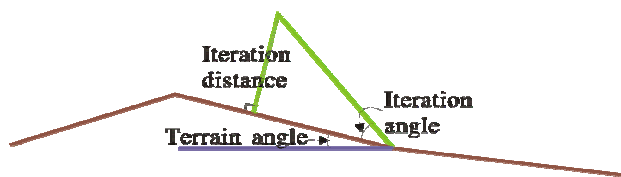


圖 2-7、Iteration angle 和 Iteration distance 示意圖

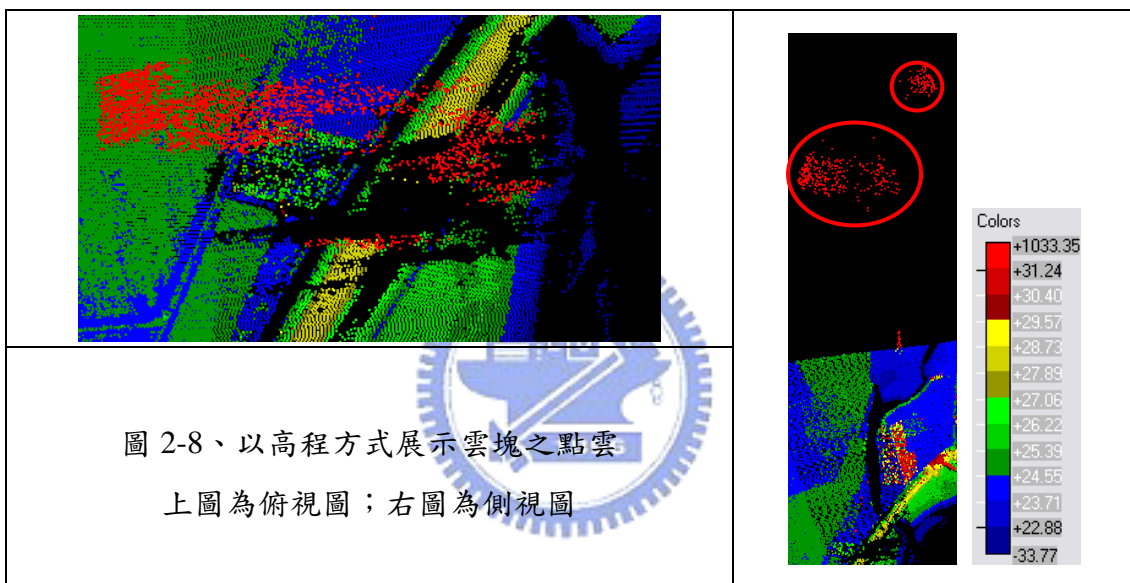
表 2-2、建議參數

參數名稱	平地	山區
Max building size(m)	80	30~60
Terrain angle(degrees)	50~60	70~75
Iteration angle(degrees to plane)	4	8~10
Iteration distance(m to plane)	1.4	1.2

根據實作經驗建議各地形適合的過濾參數，如表 2-2，這些參數值不代表過濾成果會良好，而是雖沒辦法完全正確但也不會需要長時間的人工編修。實際使用時，可依狀況予以調整。

### 2-2-5 TerraScan 過濾地面點流程

過濾地面點之前，可先濾除系統錯誤點或高程異常點，如雲塊(圖 2-8 中紅圈處)。出現於空中飛行器、鳥等的離散點(air point)對 DEM 影響不大，生產 DEM 時，可省略濾除的步驟，但在生產 DSM 時則需要分類。



低點(low point)分類是尋找高程比鄰近的點都低的點，通常用於尋找錯誤點，如因多路徑產生的錯誤點。程式是比較每一個點(以其為中心點)和位於給定範圍內其他點的高程。如果中心點比其他點高程低超過門檻值，該點就會被分類為低點。低點對 DEM 影響從圖 2-9 可見，左圖為俯視圖；右圖為垂直剖面圖，圖中紅圈處為低點所在處。

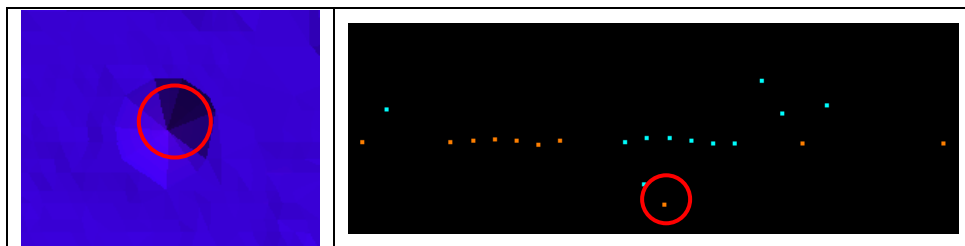


圖 2-9、低點對 DEM 模型之影響例圖



## 第三章 空載光達產製 DEM 之品管流程設計

空載光達獲取資料後，原始資料須經過解算、過濾和編修等過程才能提供使用者正高系統 DEM 或 DSM 等產品使用。目前作業流程規範尚在研擬中，本研究根據現有之作業流程，設計一套品管流程，以進行品質控制。每進行下一步驟前須先進行查核，合格者得繼續處理，不合格者則重新處理，達到以流程保證品質的目標。

### 3-1 空載光達作業流程

空載光達作業流程可分為三部分：任務規劃、資料獲取和資料處理。資料獲取屬於外業工作，任務規劃、資料處理屬於內業工作，其中資料處理又分為點雲解算和點雲分類與編修，圖 3-1 為作業流程圖。



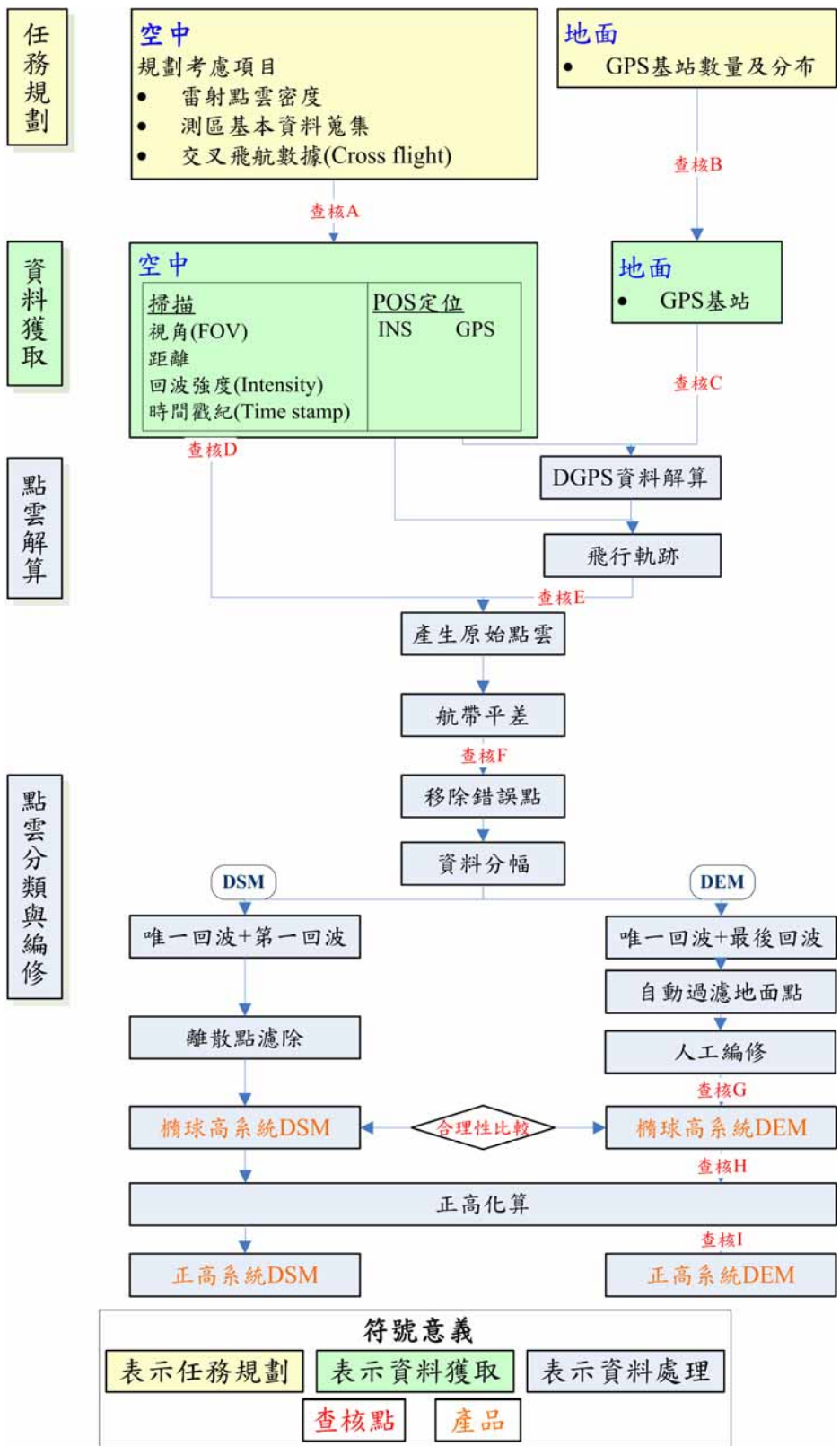


圖 3-1、空載光達作業流程

### 3-1-1 任務規劃

任務規劃分為空中與地面兩部分。空中部分指飛航規劃，地面部分指地面



GPS 基地的選擇。飛航規劃可利用輔助工具計算飛航參數作為參考，如 Leica 提供該公司 ALS 系列作業規劃試算表，可依需求自行調整。然而不論是那一公司儀器，考量因素皆包含下述項目：

1. 測區地形分析：分析測區地形最高、最低、平均高度、坡度及地形特徵。此步驟對航線數目、方向有決定性之影響。若高差過大，考量分段以不同之飛行高度施測，以維持相近之對地航高。
2. 植被覆蓋種類：根據測區的衛星影像或航照圖，判釋測區地表覆蓋特徵，以決定視角(Field of View, FOV)角度大小、雷射發射頻率、掃瞄頻率和是否需要降低航高。較大之視角可有較大之帶寬，有減少航線數目之功效，但是較小之視角有較佳之穿透率適合地表覆蓋為密遮蔽之地區，而於密遮蔽地區施測時，可同時提高掃瞄頻率以增加雷射點密度。
3. 決定航帶重疊區比率：有關航帶左右重疊區比率，有多種考量。基本上，若保持良好對地航高，5%之重疊率即可，因其目的僅在確定兩航帶間無空隙。但是國際間亦有使用 50%航帶重疊率者，其原因為提升原始點雲密度、增加對同一地表左右方向之測線以減少遮蔽、補償因輕霧及小型雲塊等因素造成之遮蔽等。藉由高重疊率，亦可考慮加航速及適度增大視角。較大之重疊率亦有助於提升全區平差之幾何條件，故於高精度業務，較大之重疊率應有相當意義。依據現有規範，NGS (2003)針對海岸線區光達作業要求兩航帶間至少要重疊 25%。NGS (2005)針對航空站區光達作業要求兩航帶間至少要重疊 50%。
4. 飛航速度：目前國內航空測量飛機中，Britten Norman BN2 Islander 之航速約為 65 至 140 節(knot，一節為每小時一海哩，合 1.852km/h)，根據 Wikipedia(2005a)，BN2 最大航速為 147 節，合 273km/h。Beechcraft KingAir 之航速約為 110 至 240 節，根據 Wikipedia(2005b)，最大航速為 270 節，合

499km/h。一般航測作業多採用低飛航速度，史天元等(2005)應用 Beechcraft KingAir 時之航速為 150 節，工研院應用 BN2 Islander 時之航速為 110 至 120 節。

5. 航線規劃：由航高、地形變化、FOV 角計算帶寬及考慮重疊區比率，規劃出航線間距、數目、起終點。空載光達為求全飛航時段 GPS 不脫鎖，迴轉半徑要求較大，以避免機翼之遮蔽效應。故理想之航線規劃，亦應考量飛機飛航時之迴轉半徑及其作業安全。
6. 安全航高：依地形變化及安全性設定航高。由於空載光達使用的雷射系統雷射強度等級為 Class 4，屬於高能量系統(high-power)，直接的雷射光束會對人體眼睛及皮膚造成為危害，擴散的反射亦有可能造成傷害。因此需要至少跟地面保持一定的距離。根據 ANSI Z136.1-2000(ANSI, 2000)中的規範配合各家廠商儀器計算出安全距離，圖 3-1、圖 3-2 為 Leica ALS50 系統 SEED(安全目視距離 Safe Eye Exposure Distance)估算值(Leica, 2004)。

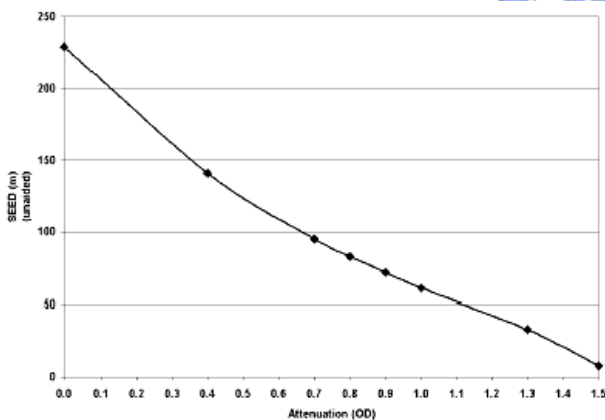


圖 3-2、Leica ALS50 系統裸眼單發 SEED 曝光量

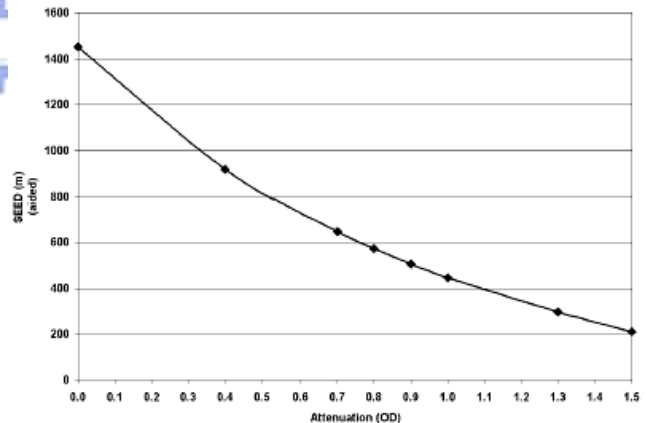


圖 3-3、Leica ALS50 系統 50 mm Optics 單發 SEED 曝光量

7. 回波紀錄數：目前各系統最多可紀錄四次回波。可依產製產品不同使用不同回波數之設定。
8. 交叉飛航數據：航線起終點應進行垂直各航線之交叉飛航掃瞄。此一要求係

針對提升精度時之考量，目的在增強全區平差時之幾何強度，並非所有飛航任務所必須。

地面部分的規劃，在測區附近或測區內尋找現有之固定連續觀測站，如內政部 GPS 追蹤站，可設置為基站。若無適當固定連續觀測站，則可由追蹤站和測區附近既有的 GPS 控制點聯測，選取適合的控制點規劃使用，於該處設置基站。基站之對空通視十分重要，其訊號品質直接影響解算成果，新設之基站宜先行觀測一段時間以確定其訊號品質。每條航線於飛行時至少要有兩個 GPS 基站同步接收 GPS 資料以提升操作之可靠度，基站與航線之直線距離應小於 30 公里。若航線過長時，則需適當增加基站。

### 3-1-2 資料獲取

於任務規劃完成並合乎所需後，擇日進行掃瞄資料之工作。資料獲取亦分為空中與地面兩部分。空中部分指載體所裝置之儀器進行資料獲取，地面部分指掃瞄資料時，地面 GPS 基站同時接收 GPS 資料。

### 3-1-3 資料處理

在獲取原始資料後即進行資料處理，包含點雲解算和點雲分類與編修兩部分。以下就各部分進行說明。

#### I. 點雲解算

解算點雲之前，須先求出載體的飛行軌跡。解算飛行軌跡所需資料有地面 GPS 基站資料、載體 POS(動態 GPS 及 INS)資料。依現有經驗，解算 GPS 所需之星曆並非一定要使用精密星曆(洪偉嘉等，2005)。解算步驟如下：

- (1) 利用 DGPS 之原理，結合地面 GPS 資料與載體的動態 GPS 資料聯合求出飛行軌跡之三維坐標。
- (2) 將載體 INS 資料整合到 GPS 三維軌跡上，求解出具有掃瞄儀之瞬間位置與姿態資訊的飛行軌跡。

求得載體飛行軌跡後，結合掃瞄所得資料，加入各系統誤差率定參數、坐標

投影參數，依航帶求出具有 WGS84 坐標系統三維坐標之點雲。

而掃瞄點受到 INS、GPS 和掃瞄系統坐標轉換及其他不確定的系統誤差和偶然誤差影響，會產生航帶性的系統誤差及區域性誤差。在航帶重疊區點雲資料間可能會有高程及水準方向之差異。處理上可利用航帶重疊區內連結點的高程與強度值(Intensity)進行連結點的量測，以評估重疊航帶的內部精度不符值，並進一步改正系統誤差，Vosselman & Mass(2001)提出航帶平差的數學模式：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{strip\_to\_ref} \cdot (R_e + xR_{et}) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{strip\_centre} \\ Y_{strip\_centre} \\ Z_{strip\_centre} \end{bmatrix} \quad (式 3-1)$$

其中

$$R_e = \begin{bmatrix} 1 & -\kappa & \varphi \\ \kappa & 1 & -\omega \\ -\varphi & \omega & 1 \end{bmatrix} \quad R_{et} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta \\ \alpha & 1 & -\gamma \\ -\beta & \gamma & 1 \end{bmatrix}$$

式(3.1)中  $R_{strip\_to\_ref}$ ,  $X_{strip\_centre}$ ,  $Y_{strip\_centre}$ ,  $Z_{strip\_centre}$  定義航帶坐標系統與區域坐標系統間的六參數轉換關係、 $e_x, e_y, e_z$  是三個平移參數、 $\kappa, \varphi, \omega$  是三個旋轉參數、 $\alpha, \beta, \gamma$  為旋轉的線性飄移量共九個參數，以消除由航帶線性變形所導致之系統誤差。

Burman(2002)提出相關之航帶平差模式，其程式並已商業化為套裝程式 TerraMatch (TerraSolid, 2004b)。Burman(2002)提出之觀測方程式如式 3-2。

$$\begin{aligned} \lambda_{Zl} = & Z'_X \cdot dX_0 + Z'_Y \cdot dY_0 - dZ_0 + \left( Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial r} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial r} - \frac{\partial R_Z}{\partial r} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dr + \\ & + \left( Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial p} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial p} - \frac{\partial R_Z}{\partial p} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dp + \left( Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial h} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial h} - \frac{\partial R_Z}{\partial h} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dh \end{aligned} \quad (式 3-2)$$

其中

$\lambda_{zi}$  為量測點和檢核點高程之差異；

$(dX_0, dY_0, dZ_0)^T$  為偏移量之初始值，會隨迭代計算更新；

$(r, p, h)$  為三姿態參數 roll, pitch, heading；

$(dr, dp, dh)$  為姿態角偏差量，會隨迭代計算更新；

利用航帶重疊數據進行航帶平差及平差成果評估，可提升航帶間內部一致性，並進行系統性誤差的改正。參考陳大科等(2005)處理流程如下：

- (1) 資料蒐集與前處理：測區航帶光達資料、航跡(trajjectory)檔、地面檢核點與控制點蒐集。
- (2) 逐航帶點雲分類：每一條航帶分別將地面點、建物及非地面點分類。
- (3) 航帶重疊區內部精度檢核：利用重疊區內地面點資料比對不同航帶間相同地面點之平均絕對誤差(magnitude)及高程差(dZ)。
- (4) 樣本點篩選：針對已分類之點雲資料，人工篩選出具代表性(變動性低者)之地面點與建物點雲，作為航帶平差之觀測資料。
- (5) 未知數解算：TerraMatch 軟體迭代解算各航線之參數修正量。解算方式分為無地面控制點與含地面控制點兩種，並只針對 dz, dr, dp, dh 計算，其他飄移量在短航線測量可忽略。
- (6) 逐航帶點雲修正：根據所解算出之參數修正量，逐航線修正點雲資料高程值。
- (7) 成果分析：目前分為兩部分，一為平差後內部精度重新計算，另一為利用地面檢核點與航帶地面點進行外部精度檢核。

若經過良好率定及良好飛航規劃控制精度可減少上述誤差，但無法全部消除，仍需利用航帶平差來提高資料品質。根據陳大科等(2005)建議相鄰航帶間高程差在 5 公分內者不要進行航帶平差，以免發生提升內部精度卻降低外部精度之情形。目前航帶平差對於整體精度的提升程度未完全確定，但是確實可有效消除視覺上高程模型之不一致性。航帶平差如何進行為最佳，仍有待進一步探討。



## II、點雲分類與編修

點雲分類與編修部分，分為產製 DEM 和 DSM 兩類，首先說明產製 DEM 流程：

### (1) 消除錯誤點

系統誤差或環境因素可能造成不合理點的產生。另外資料中可能包含雲霧、鳥或其他離散點，這些雷射點對於 DEM 或 DSM 的生產皆無用途，甚至影響點雲分類，必須先行消除。

### (2) 資料分幅

錯誤點處理完畢，將點雲資料分成小範圍以便後續處理，以內政部『辦理 LiDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案』（以下簡稱內政部 2004 測試案）為例，根據內政部(2004)，其合約規範以 1/5000 像片基本圖圖幅為分幅依據。分幅大小除參考合約規定，另需考慮處理點雲資料之電腦效能，避免因記憶體造成地面點過濾錯誤。以 TerraScan 為例，記憶體(RAM)大小會影響處理點數。地面點分類時，每多分類一個點需要佔用 4 bytes，最終分類為地面點類別時，每個點佔 80 bytes。而展示地面點類別的高程時，256 MB 可處理二~五百萬點；512 MB 可處理四百萬~一千萬點；1024 MB 可處理八百萬~二千萬點，此數量是依展示的點高程值而定。Leica(2003)建議處理點雲用之電腦配備有 2GB 的 RAM、雙螢幕、雙處理器、作業系統為 Windows 2000 或 XP Professional、PCMCIA 讀卡機及可交換資料之硬碟，MicroStation 版本為 SE 或 8.x。分幅後資料仍以不規則點雲(.las 檔)儲存。

### (3) 回波分類

雷射光束具有多重回波性質。雷射光束發射後，會因距離及反射物質不同，使接收到回波的時間亦不同。唯一回波(only return)通常是雷射光束自堅硬表面反射，如建物、岩石等無覆蓋物之裸露面；多重回波則是雷射點發射到植生等可能穿透的覆蓋物時的反射。產製 DEM 利用唯一回波(only return)和多重回波的最後

回波(last return)作為起始面。

#### (4) 不合理點

實務作業時，可能發現少數異常的不合理點，如一片平坦地中有高程明顯不同(通常低於其他點)的雷射點，會造成 DEM 及模型錯誤，如圖 2-9。此不合理點出現原因為雷射光束受地形影響產生多次反射，因此雷射掃瞄儀接收到回波時間較遲。由於系統以時間差推算直線距離求得雷射點三維坐標，使得該點距離雷射掃瞄儀距離較遠，故高程比其他周圍點位低。此類雷射點通常稱為低點。

#### (5) 地面點過濾

選擇適合之軟體或程式進行地面點過濾，針對不同地形設定不同參數，以求較佳效果。以 TerraScan 軟體自動過濾為例，在地形平坦地區(覆蓋為農地或建物)，Terrain angle 必須設小(最大不要超過 60 度)，避免 TerraScan 將矮植被一併視為地表造成錯誤，如圖 3-4。當發生此類型錯誤時，可重設參數重新分類或是以人工加以編修；山區因為地形坡度較大，Terrain angle 須調整為較大，才能使山區過濾出地面點。但山區往往因為植被過於茂密造成雷射點無法穿透或穿透點數極少，使山區地形無法完整表示，如圖 3-5。



圖 3-4、平坦地區地面點過濾錯誤示意圖

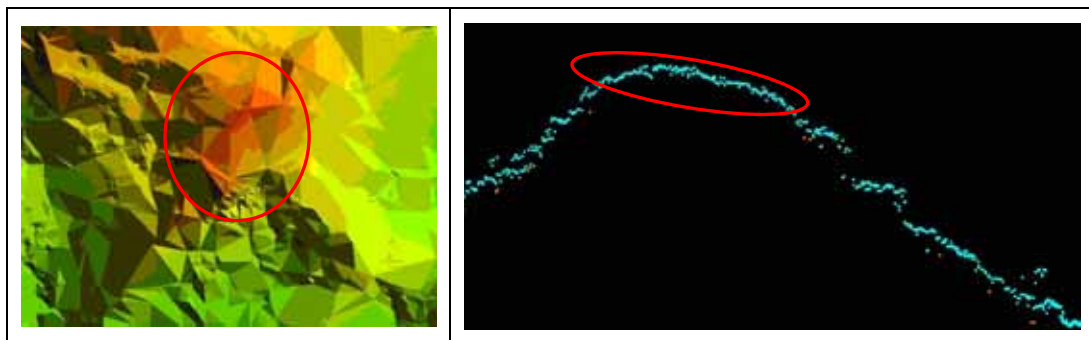


圖 3-5、山區地面點過濾錯誤示意圖

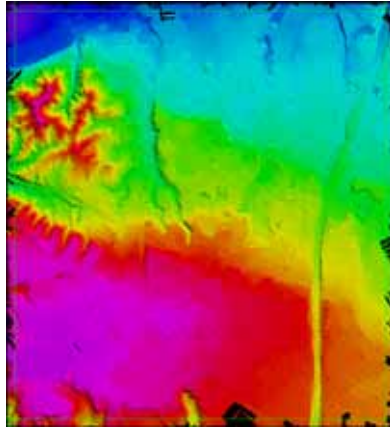


圖 3-6、以地面點建立之地表擬色模型

#### (6) 建立模型(TIN 格式)

地面點自動過濾完成後，利用過濾出的地面點(不規則點雲格式)建立地表擬色模型(圖 3-6)，可幫助製圖人員編修時對地形的判斷，同時可利用人眼判釋自動過濾成果正確性。其中需注意 TerraScan 軟體在建立模型時會稍微平滑化點雲，因此所見者並非最真實的地表模型，但可作為輔助判釋之用。

#### (7) 人工編修

在點雲資料處理過程中，此步驟需要最多人工。因程式或軟體自動過濾的成果無法達到完全正確，需要人工判斷修正。編修的主要目的是將自動過濾錯誤的雷射點分回正確的屬性、消除錯誤點及使地表模型盡量正確。

人工編修點雲的方式分為兩類：一為點雲過濾後，將每個雷射點賦予對應的屬性。此種編修方式的優點在於地形重要特徵處的點被濾除時，可經由人眼的判斷在地形重要特徵處改變點的屬性增加地面點；一為直接修改內插後格網式 DEM 的高程，此種方式較為直接，利用垂直剖面圖的方式將 DEM 的高程點與原始雷射點資料比對，修改 DEM 點位高程使其與人眼判斷的地面點高程相符(周富晨，2004)。

本研究的人工編修對象為不規則點雲。編修點雲的方式可分為兩大類：種點和不種點。種點是指在缺乏雷射點的地區，利用人眼判斷高程，加入新的雷射點(總點數增加)，但此須由具有豐富經驗的製圖人員進行，避免增加錯誤降低品



質；不種點的方式為使用現有點雲，改變其屬性來增加地面點點數量(總點數不變)，其中分為加地面點(簡稱加點)和消除地面點(簡稱消點)，加點是將自動過濾誤分為地物點的地面點更改屬性回地面點；消除地面點則反之。過程中建議盡量使用原始點雲(不改變點雲數)處理，避免種點時發生人為判斷錯誤。本研究中編修處理皆使用原始點雲，無新增雷射點。另因為人工編修會造成地面點點數量及位置的改變，若有需要，可更新編修後地表模型。在人工編修結束後有人工檢查的步驟，內容和人工編修相同，但製圖人員不同，目的是修正人工編修之遺漏或錯誤。

#### (8) 點薄化(Thin points)

點薄化的目的是在點群(group of points)中，移除非必要的點，以降低點密度。原則為限定之水準距離和高程距離內若有多點存在，僅保留一點代表該點群，如圖 3-7 中將點分群，依不同條件取不同的點代表該點群。TerraScan 使用者手冊(Terrasolid, 2004a)建議在建立 TIN 格式的地表模型前進行點薄化動作以減少資料量。

以內政部 2004 測試案而言，掃瞄所得原始點雲資料約 1.3~1.4 點/平方公尺，在航帶重疊區則更為密集，經過分類後的地面點密度約為 0.4~0.7 點/平方公尺。為減少資料檔案大小於產出 DEM 時進行地面點薄化的動作。

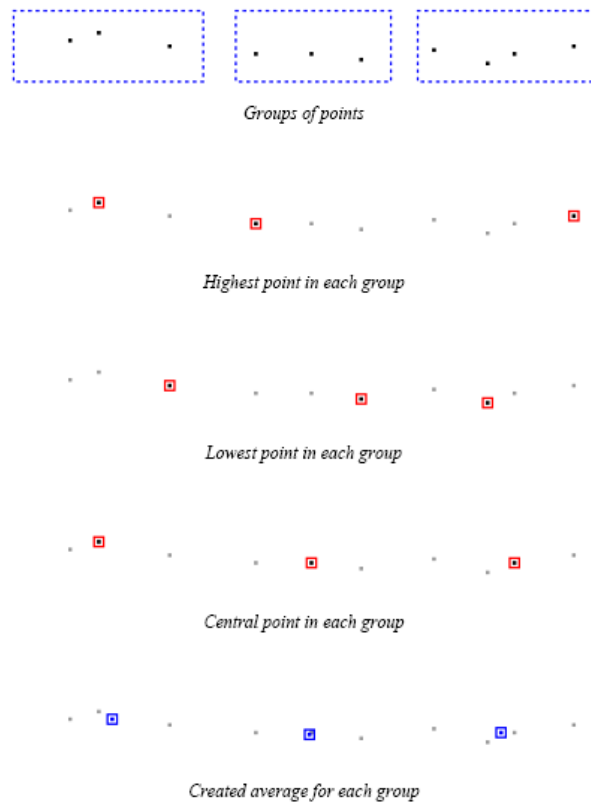


圖 3-7、點薄化示意圖(Terrasolid, 2004a)

(9) 點平滑化(Smoothen points)

此指令是調整雷射點高程使產生之模型更加平滑，一般使用在地面點類別，目的是移除一些隨機變化的雷射點高程以產生更精確的模型或繪出較平滑表面，則等高線和垂直剖面圖較美觀。

平滑化是將點雲分群，以群為單位，利用每個雷射點與其周圍雷射點重覆比較高程的迭代過程，求出最佳擬合平面，而以此點群之中心點最接近求得之擬合平面。此指令最終會依地形判斷是否平滑化(平坦地區平滑，高程明顯變化處則不改變)。但矮植被覆蓋地區或需要萃取特徵線時，不適合進行平滑化動作。

(10) 格網化

在此之前，資料皆以不規則分布的點雲格式儲存，而所需之 DEM 格式為規則格網，可依需要的解析度設定不同格網大小將不規則點雲進行格網化動作。

### (11) 正高化算

將橢球高轉為正高之過程稱為正高化算。目前台灣地區有數個大地起伏模式描述橢球高與正高間的大地起伏值。可選擇最新的或內政部公告之大地起伏模式進行化算。

以上為由原始資料產製 DEM 的步驟。產製 DSM 之步驟則簡述如下：

#### (1) 回波分類

利用原始點雲(All points)中唯一回波和多重回波中的第一回波(only return 和 first return，即 Any first return)，即表示 DSM 所需的地表覆蓋點。

(2) 濾除錯誤點和離散點。

(3) 格網化輸出。

(4) 正高化算。

#### 3-1-4 DEM & DSM 合理性比較

實務作業時發現，可能發生 DSM 高程小於 DEM 高程的不合理情形。故根據定義 DSM 不論在任何地點理應均大於或等於 DEM，以此為標準進行比對，發生不合理情形則討論造成原因。

### 3-2 查核項目

本研究所設計之查核點，是為作業單位自我檢查用。為達以流程控制品質之目標，各階段查核項目具有回饋機制，即前一階段之查核合格，始可進行下一階段工作。若查核單位欲進行查核，可利用各項目之書面報告進行。查核項目說明如表 3-1，各項目詳細敘述如後。

表 3-1、查核項目

	查核項目	查核標準	查核方法	不合格處理方法
查核 A	1. 規劃之點雲密度 2. 航帶覆蓋完整性 3. 航帶重疊比率	登錄數值並判定是否合格	對照合約計畫： 1. 飛航計畫書 2. 密度計算 3. 交叉飛航數據 4. 其他事項：時間、軍事	重新規劃
查核 B	1. GPS 基站選址 2. 基線計算 3. 接收訊號品質	1. 透空度(仰角 5 度以上無遮蔽) 2. 基線計算成果與已知基站之坐標反算值成果差值 95% 信心區間小於 3 公分+6ppm* 3. 和載具直線距離 <30 公里*，並同時有兩個以上 GPS 基站	1. 基線解算成果和坐標反算成果比較 2. 檢核 GPS 接收時段的衛星顆數和幾何分布	1. 重新解算基線及檢核坐標值 2. 另尋更佳點位
查核 C	1. 接收資料頻率 2. 儀器高 3 接收資料品質	1.和 2.皆須在接收之前確定調整完畢	此部分需乙方作業時自行檢核	使用他站資料或該區重新進行飛航作業
查核 D	1. 點雲密度 2. 資料完整性	1.密度以合約計畫要求為標準 2.資料覆蓋是否完整	利用軟體解算後的資訊檢視	1. 密度不足處利用相鄰航帶重疊部分提高密度或再次進行掃瞄 2. 覆蓋不完整則再次進行掃瞄

\*表示參考值，可依實際需要做調整

	查核項目	查核標準	查核方法	不合格處理方法
查核 E	1. GPS 軌跡 正反算精度 2. GPS 接收 資料品質	1. 正反算差值<20 公分* 2. DOP 值在 3*以內	利用 POSpac 查核	不合格則該次資 料作廢
查核 F	航帶誤差	相鄰航帶的重疊部 分高程差異<5 公分 *，則不需進行平差	航帶重疊區以剖線 檢核	1. 於重疊區內新 增點位進行平差 2. 加入地面控制 點進行平差 3. 重新掃描資料
查核 G	成果產出紀 錄表	地形重要特徵表達 完整，如山脊線	抽驗繳交成果圖幅 數之 10%*。資料產 出者實際操作，觀察 成果是否相同	抽驗幅數中 10%* 有誤則退回繳交 成果
查核 H	雷射點高程 精度(分為內 部精度及外 部精度)	內部精度：只評估 資料品質 外部精度：與實際 地面檢核點之橢球 高差值<20 公分*	內部精度：應用交叉 比對計算 外部精度：地面檢核 點的實測橢球高和 利用該點周圍雷射 點內插出的高程值 比較	內部精度：重新進 行航帶平差 外部精度：若差值 >20 公分*則全面 檢討
查核 I	大地起伏模 式精度	雷射點內插出之正 高值與地面檢核點 之差值<3 倍中誤差 *	以實際地面檢核點 的正高值檢核	加測地面點位以 局部修正大地起 伏模式

\*表示參考值，可依實際需要做調整

備註：

1. 查核標準應依實際合約規範或使用而定，本表所列之查核標準為參考性質，乃參考內政部 2004 測試案擬訂。
2. 查核方法可依查核對象不同而分為書面審查、內業查核(上機查核)和外業查核。書面查核包括檢核 A、檢核 B；電腦操作部分包含檢核 D、檢核 E、檢核 F 和檢核 G；外業檢核部分包含檢核 C、檢核 H 和檢核 I。

#### ● 查核 A

確認所規劃之各項目可以達到所要求的點雲密度、點雲是否覆蓋整個測區及航帶的重疊率。

- 查核 B

GPS 基站品質對空載光達的點雲品質的影響相當大。因此在選取 GPS 基站時需注意幾點原則：

1. 透空度需極佳，並避免周圍有基地台或易造成多路徑效應之物體。不需為已知坐標點，透空度為優先考慮。
2. 點位分布在航線與 GPS 基站之直線距離小於 30 公里範圍內，並同時有二個以上的 GPS 基站。
3. 盡量保留 GPS 基站與水準點聯測之可能性(以地面上的點位為優先)。

GPS 基站的品質對於解算出來之雷射點三維坐標影響很大。因此若欲使用內政部公告的坐標值，需事先接收資料解算該點坐標值的正確性。

- 查核 C

進行飛航掃瞄時，地面上需同時有兩個以上 GPS 基站接收資料。接收資料前須調整接收頻率、設定儀器高及天線盤高，接收時段內需注意是否有斷訊、衛星顆數或遮蔽情況。

- 查核 D

每日任務結束，利用 navigation 檔(Leica ALS 系統)與掃瞄資料檔聯合求解出點雲，初步查核點雲密度及是否覆蓋完整。

- 查核 E

要維持良好的 POS 品質，要在起飛前和降落後靜止觀測 15 分鐘。相同單一基站使用廣播星曆對應精密星曆求解之空載光達點雲高程差異在 0.16~0.46 公分之間；對於雙基站求解之高程則無差異(洪偉嘉等，2005)，因此使用廣播星曆或精密星曆解算在實際作業上並無差別。

單基線利用正反算檢核差異量。若差值過大應重新檢核 GPS 及 INS 資料並



重算 POS。多基線時，各條單基線解算完後再平差。通常以距離較近之基站求得成果較為可信。另外，利用 POSGPS 檢核基線 DOP 值、Combine Separation，檢核條件如下所列：

1. PDOP 和 VDOP $<3$ 。
2. Roll 和 Pitch 小於 15 度避免 GPS 斷訊(NGS, 2003)。
3. 衛星數量大於 6 顆。

● 查核 F

解算出每一航帶之原始點雲後，因各航帶間隱藏由高程差和滾動(roll)方向不同造成的系統誤差，造成資料重疊處不吻合、不連續現象，且對產生的 DEM 和 DSM 精度造成影響，因此需要求解各航帶重疊區的平均絕對高程誤差，以降低平均的高程差異量。原始點雲除了不同航帶間的差異，在單一航帶點雲資料中存在由系統錯誤或自然環境造成的錯誤點，可以航帶為單位進行錯誤點的濾除。

● 查核 G

目前是以不同人員進行編修及檢核。利用人工檢核經過人工編修的資料是否漏缺或仍有錯誤，將錯分類別之雷射點分回正確類別，或以人工估計方式增加一些地面點地面點過於稀疏地區。

● 查核 H

空載光達測點的高程檢核分為內部精度和外部精度兩部分。內部精度在比對地面檢核點前，可應用交叉比對(Cross Validation)計算，幫助內部精度的預測及診斷，分析交叉比對的統計量提供點雲資料是否能表達地形特徵、品質診斷的參考(史天元等，2003)。

交叉比對的原理為在某雷射點之高程由周邊鄰近的數據推估，該雷射點的高程值不參與推估計算，推估值再與該點觀測高程比較(史天元等，2003)。

外部精度則利用地面檢核點之橢球高和距離該點最近且在設定距離內之雷



射點或該點周圍雷射點內插出之高程值比較。

- 查核 I


不同大地起伏模式提供之大地起伏值不同，利用大地起伏模式將雷射點高程由橢球高化算為正高，再與測區內的地面檢核點實際正高值比較差異，得到最接近真實情況的大地起伏模式。

### 3-3 產品等級

從原始資料到產出數值高程模型，處理過程的不同會產出多種不同規格之產品，過程之嚴謹性會影響到產品等級。對於生產者而言，產品等級關係到技術和成本；對使用者而言，關係到應用範圍及經費。目前有關產品分級之探討，包含 Flood(2002)、工研院(2005)。

#### 3-3-1 等級一(Level 1)DEM

此等級產品指僅以自動化過濾點雲後即產出之 DEM。自動過濾點雲容易發生過濾不完全或過當的情形，尤以地形複雜區域更為嚴重。此等級 DEM 產品沒有經過人工檢視，品質較不可靠。另外，點雲資料未經航帶平差嚴謹的系統誤差驗證與改善，則可能包含系統性誤差。因此等級一 DEM 產品又可分為兩類：Level 1A、1B。圖 3-8 及圖 3-9 分別表示 Level 1A 及 1B 產品之處理過程。



點雲解算→自動過濾地面點→格網化DEM

圖 3-8、Level 1A DEM 處理過程

點雲解算→航帶平差→自動過濾地面點→格網化DEM

圖 3-9、Level 1B DEM 處理過程

#### 3-3-2 等級二(Level 2)DEM

自動化過濾點雲無法完全將點雲分類正確時，利用人工編修自動分類後的點雲以提高品質是必要的。此種經過人工編修品質較嚴格的 DEM 產品，資料品質

較可靠，稱之為等級二 DEM 產品。另外，如同等級一 DEM 產品，等級二 DEM 視是否經過航帶平差，分成兩類：Level 2A 和 Level 2B。圖 3-10 及圖 3-11 為 Level 2A 及 2B 產品之處理過程圖。

點雲解算→自動過濾地面點→人工編修地面點→格網化DEM

圖 3-10、Level 2A DEM 產品處理過程

點雲解算→航帶平差→自動過濾地面點→人工編修地面點→格網化DEM

圖 3-11、Level 2B DEM 產品處理過程

### 3-3-3 等級三(Level 3)DEM

生產之 DEM 經過等級二之處理後，在進行格網化之前增加斷線等資訊，產出附加約制之不規則三角網，或整合斷線資訊再進行格網化，且格網化成果亦經編修審視，稱之為等級三 DEM 產品。同前等級一與等級二產品，將產品分為 Level 3A 和 Level 3B。圖 3-12 和圖 3-13 為 Level 3A 和 Level 3B 產品處理過程圖。

點雲解算→自動過濾地面點→人工編修地面點→增加斷線資訊  
→格網化DEM→人工檢核→格網化DEM\*

圖 3-12、Level 3A DEM 產品處理過程

點雲解算→航帶平差→自動過濾地面點→人工編修地面點  
→增加斷線資訊→格網化DEM→人工檢核→格網化DEM\*

圖 3-13、Level 3B DEM 產品處理過程

備註：格網化 DEM\*表示增加斷線資訊及經過人工審核之格網化 DEM。

## 第四章 空載光達資料品質檢核

不論原始資料品質良劣，可經由內業處理提升一定品質。本章主要探討幾項影響產品品質的重要項目，包含點雲密度、自動過濾、人工編修及以地面實測檢核點比較等項目，就其中現象進行討論。

### 4-1 使用資料說明

本研究所使用之空載光達資料為工研院於 93 和 94 年所蒐集。使用的空載光達設備為 Leica ALS50 系統，實際進行掃瞄時，裝設在大鵬航空公司之 Britten-Norman BN-2B-26 單引擎飛機上。飛航作業時間因地區不同而有所不同，工作範圍包含高屏地區、桃竹地區、台南高雄地區、外傘頂洲和九二一災區，共約 880 幅 1/5,000 基本圖圖幅範圍，各測區的基本資料如表 4-1 和圖 4-1 所示。平均每幅原始點雲一千多萬點，平均密度每平方公尺 1.4 點~1.5 點。本研究所使用資料包含高屏地區、桃竹地區、台南高雄地區。

表 4-1、計畫測區基本資料統計表(工研院，2006)

測區名稱	圖幅數	高程範圍(m)	坡度(度)	涵蓋海岸區
高屏地區	266 幅	0~1400m	0~60	否
台南高雄地區	333 幅	0~1,620m	0~60	是
桃竹地區	197 幅	0~1,750m	0~75	是
九二一災區	48 幅	90~1,860m	0~70	否
外傘頂洲地區	18 幅*2	0~10m	0~3	是

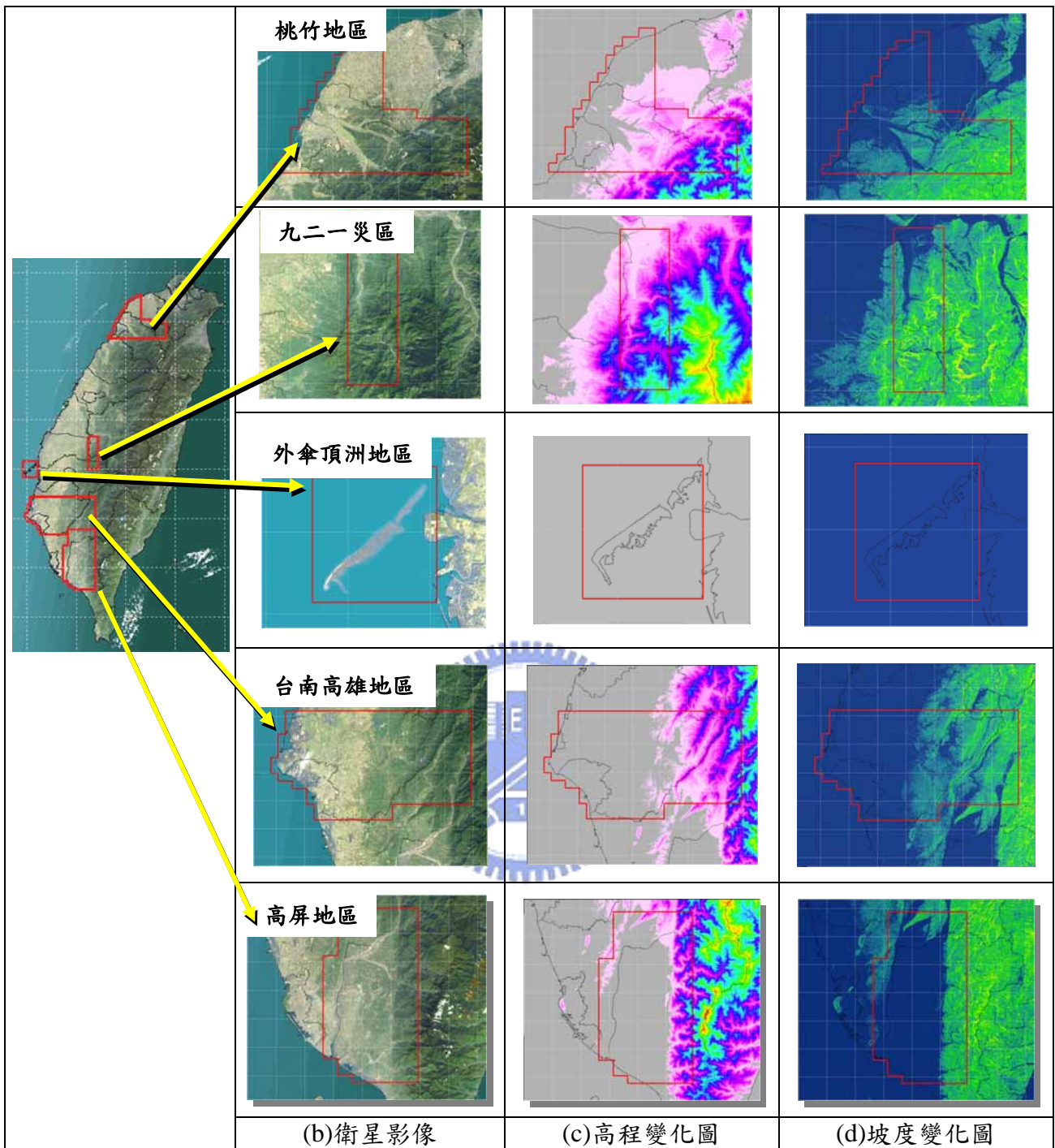


圖 4-1、計畫測區基本資料圖(工研院，2006)

## 4-2 點雲密度計算

點雲密度為原始掃描資料品質的重要指標之一；穿透率則是產出成果之品質指標之一。



#### 4-2-1 地表覆蓋物分類

地表覆蓋物分為五類，根據王與曾(2003)，定義其中四類地表覆蓋物，由於並未提及都會區之定義，故都會區定義根據 EPA(2003)而訂，各類覆蓋物定義如表 4-2。不同地表覆蓋現場樣例見圖 4-2。



圖 4-2、五類覆蓋面示意圖

表 4-2、地表覆蓋物類別及定義

類別	定義
裸露地	半徑在 50 公尺內受植被覆蓋小於 25%
矮植被	半徑在 50 公尺內受植被覆蓋面積介於 25%~50%
疏遮蔽林	半徑在 50 公尺內，樹木覆蓋面積介於 50%~75%
密遮蔽林	半徑在 50 公尺內，樹木覆蓋面積須大於 75%
都會區	特徵物需佔全部面積 30% 以上

#### 4-2-2 點雲密度指標

根據空載光達點雲性質及作業方式考量，點雲密度表示方法，可有以下六種：

##### 1. 格網方式

以一固定面積為單位，計算該面積內之雷射點數。當此一固定面積為整個測區時，可得一指標。但此一整體指標對細節之描述，可能不足。以單位圖幅面積為單位，亦為一項指標。此兩指標適合於詮釋數據中記載。若考量使用者區域性研判，應使用較小面積單位。目前內政部以空載光達生產之數值高程模型，其原始數據大多以每平方公尺最少一點為規劃原則。

## 2. TIN 三角形個數

統計一固定面積內點雲組成之 TIN 三角形個數，其三角形個數與點數及其分布均有關聯，三角形個數為 $(2n - h - 2)$ ，其中  $n$  為點數， $h$  為外包凸多邊形之組成節點數目(黃中偉, 2005)。此指標會因所選擇範圍大小、區域不同而有所差異，有待進一步討論。

## 3. TIN 三角形面積排序

以點雲組成不規則三角網後，依面積查核，面積大於某一標準者，將其輸出到一圖層(Polygon)。若進行排序，亦可算出 95% 指標或繪製直方圖，顯示密度分布機率。作為詮釋數據之項目，可以選用最大三角形面積，或以 95% 排序面積為指標。至於此一面積篩選標準，有待進一步研究，方能釐清。

## 4. 徐昇多邊形(Thiessen's Polygon)面積

徐昇多邊形為 Delaunay 不規則三角網之互偶(Dual)。Delaunay 不規則三角網所表示者為該面積內無實測點，故其面積值代表內插之最大區域。亦即為資料空缺之面積。而徐昇多邊形為單一點位於內插時影響之區域，多邊形面積愈大，表示該區域之內插涵蓋面積大，隱含內插值不確定性可能較高。如同三角網面積排序，可依多邊形之面積選擇一標準，大於此一標準值，即將該多邊形輸出至一密度圖層(polygon)。此時，因為多邊形之性質，其成果應為向量圖層。其他指標之計算與 TIN 三角網面積同。

## 5. 使用人工繪製多邊形

以人工判釋方式，畫出稀疏區域，與格網方式相較，此一作業方式受”平均”效應影響較小，與 TIN 三角形、徐昇多邊形相較，圖形數目可能較少、易配合製圖需求，但缺點為人工介入多。

由於內插值之品質，點位分布並非唯一影響因素，地形之平坦與否、變化是

否劇烈、以及點位所在位置，均與內插值之品質相關。故空載光達點雲密度分布僅為一項基礎資訊。

#### 4-2-3 穿透率計算

雷射具有多重回波之能力，不同之地表覆蓋，多重回波次數不同，如建物通常只有單一回波。多重回波會影響到點雲密度，但是地形面上點雲密度之主要影響因素為穿透率，即穿透率愈高，地面點密度愈高。穿透率定義如下：

$$\text{穿透率} = \frac{\text{地面點點數}}{\text{總點雲數}} \times 100\%$$

本研究以格網方式及 TIN 三角形個數兩種方式進行穿透率計算，分別敘述如下。

- 格網方式

使用高屏地區掃瞄資料，自不同圖幅中挑選符合表 4-2 所列各種覆蓋面定義之格網，每種覆蓋面各選 10 個格網進行穿透率計算，成果如表 4-3。

將以 1/5000 像片基本圖圖幅外擴 50 公尺為參考圖框分幅之點雲資料利用 TerraScan 將其分為 100 公尺\* 100 公尺的格網如圖 4-3 所示。

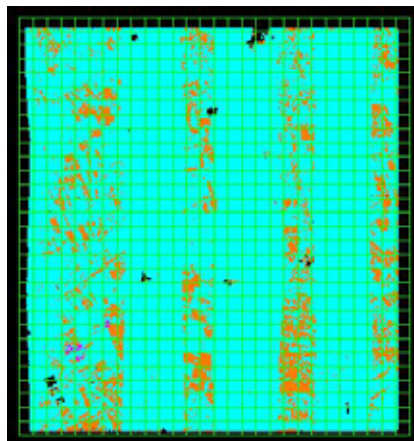


圖 4-3、將 1/5000 像片基本圖大小分為 100 公尺見方格網示意圖



表 4-3、不同覆蓋面之穿透率

覆蓋面	地面點密度(pts/m <sup>2</sup> )	原始點雲密度(pts/m <sup>2</sup> )	穿透率(%)
裸露地	0.557	1.383	44.3
矮植被	0.586	1.678	37.7
疏遮蔽林	0.337	1.970	21.5
密遮蔽林	0.144	1.130	15.3
都會區	0.527	1.491	38.6

● TIN 三角形個數

不同覆蓋面之地面點數量及分布方式不相同，使 TIN 的組成方式和面積大小有所差異，如圖 4-4 所示，圖 4-4 中展示五種不同覆蓋面地面點之 TIN 組成，其中每幅圖面積範圍皆為 100 公尺\* 100 公尺。

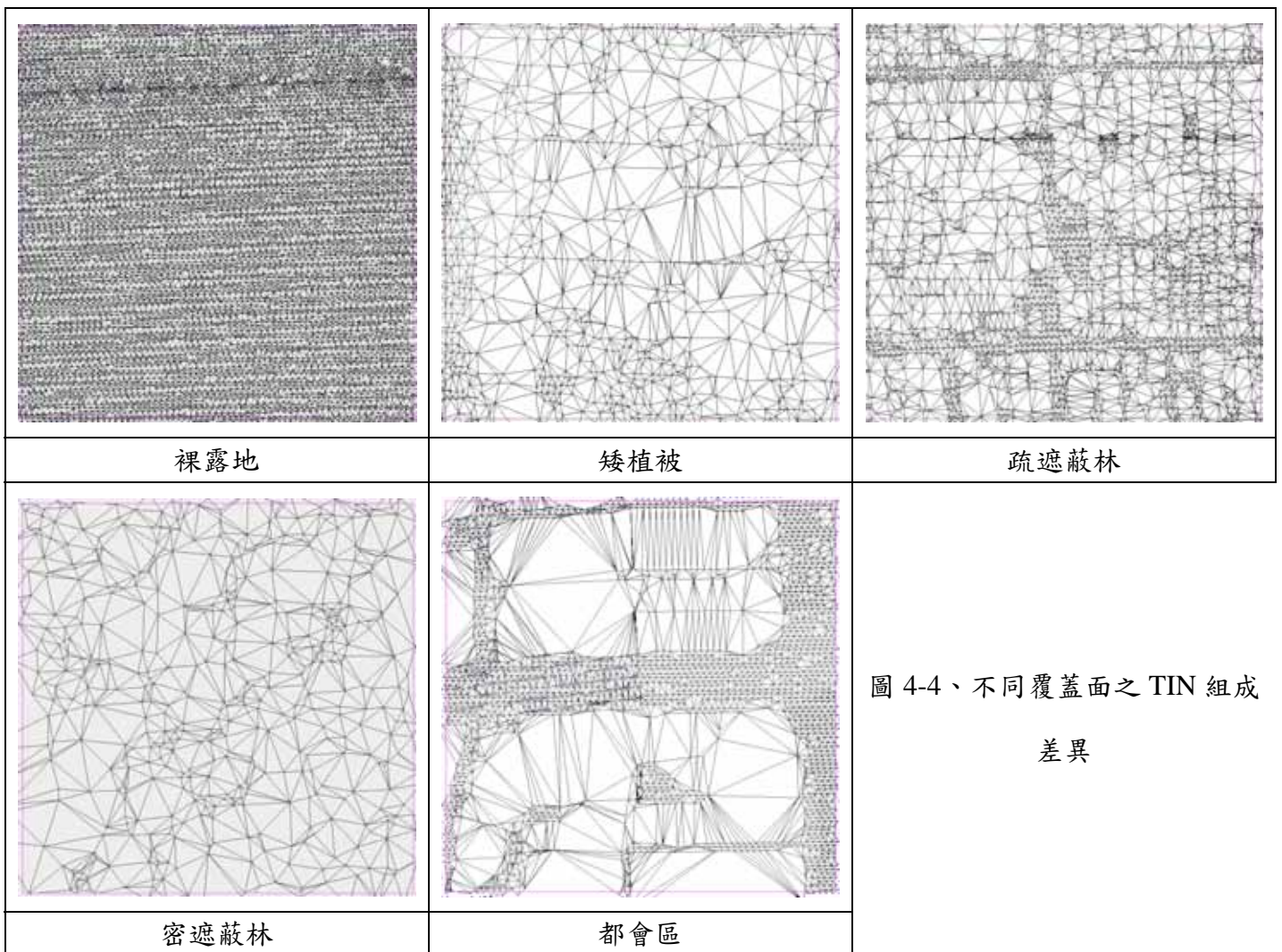


圖 4-4、不同覆蓋面之 TIN 組成  
差異

為方便計算穿透率，利用 Delaunay 三角網組成 TIN，計算一面積單位(一面

積單位為 100 公尺見方)中之三角形數目。選取和以格網方式計算時相同之 10 個面積單位，平均每單位內三角形之個數及穿透率如表 4-4。

表 4-4、每 100 公尺見方內平均三角形個數及穿透率

覆蓋面	地面點三角形個數(個)	原始點三角形個數(個)	穿透率(%)
裸露地	16033.1	31115.4	51.5
矮植被	3882.7	45105.1	8.6
疏遮蔽林	4650.3	32586.9	14.2
密遮蔽林	2385.2	28026.1	8.5
都會區	3675.3	31281.3	11.7

#### 4-2-4 小結

以格網方式計算得裸露地穿透率為最高，其次依序為都會區、矮植被、疏遮蔽林，密遮蔽林為最低。

以 TIN 三角形個數比較，同樣範圍的不同覆蓋區，地面點組成之三角形數量以裸露地最多，其次為疏遮蔽林、矮植被、都會區，以密遮蔽林數量最少。其中矮植被和都會區三角形數目接近。以地面點組成的三角形數和原始點組成的三角形數比值計算穿透率：裸露地>疏遮蔽林>都會區>矮植被>密遮蔽林。

兩方式計算之穿透率得到大致趨勢，發現皆以裸露地最高，密林區最低，其他三種覆蓋面可能是因計算的樣本數不夠多，造成辨別效果不理想。而兩種方式計算得到的穿透率值有差異，尤以矮植被和都會區差別甚大，原因可能與所選擇的區域有關。

### 4-3 TerraScan 地面點過濾及錯誤

#### 4-3-1 不同參數自動過濾地面點比較

利用 TerraScan 過濾地面點，過濾參數對於成果影響相當大，依不同地形調整適合的參數會得到較佳的成果。選擇三幅不同地形覆蓋面的圖幅分別使用兩組不同參數進行地面點過濾比較不同參數設定造成的差異。圖 4-5~圖 4-10 中紅圈

處表示錯誤處(本節只為比較不同參數造成之差異，故不修改錯誤)。

A. 平坦地區(裸露地)

圖號：9419\_3\_038(台南地區)

主要地形覆蓋面：平坦地、植被

全部雷射點高程：-136.32 公尺~1132.64 公尺

使用兩組不同參數過濾地面點。參數設定如下表 4-5、表 4-6：

表 4-5、9419\_3\_038 過濾參數設定(1)

表 4-6、9419\_3\_038 分區參數設定(2)

參數名稱	平地
Max building size(m)	60
Terrain angle(degrees)	55
Iteration angle (degrees to plane)	4
Iteration distance(m to plane)	1.4
地面點點數	3,298,859

參數名稱	平地
Max building size(m)	80
Terrain angle(degrees)	55
Iteration angle (degrees to plane)	4
Iteration distance(m to plane)	1.4
地面點點數	3,296,945

圖 4-5 和圖 4-6 中紅圈處表示明顯或大範圍錯誤，主要為植被所佔面積超過最大建物尺寸(max building size)設定而無法被濾除和最大建物尺寸(max building size)設定對於田埂而言過大，造成田埂被削平。而表 4-5 所列的最大建物尺寸設定較表 4-6 為小，故圖 4-5 中建物無法濾除(第 1 號和第 2 號錯誤)。由於田埂被削平是最大建物尺寸過大造成，若求田埂部分能正確自動過濾，則最大建物尺寸需設定為極小，且確定周圍無其他地物點，避免造成其他錯誤。因濾除建物和田埂使用的最大建物尺寸的參數可說是差異甚大，故取折衷的參數分類是較佳的選擇。



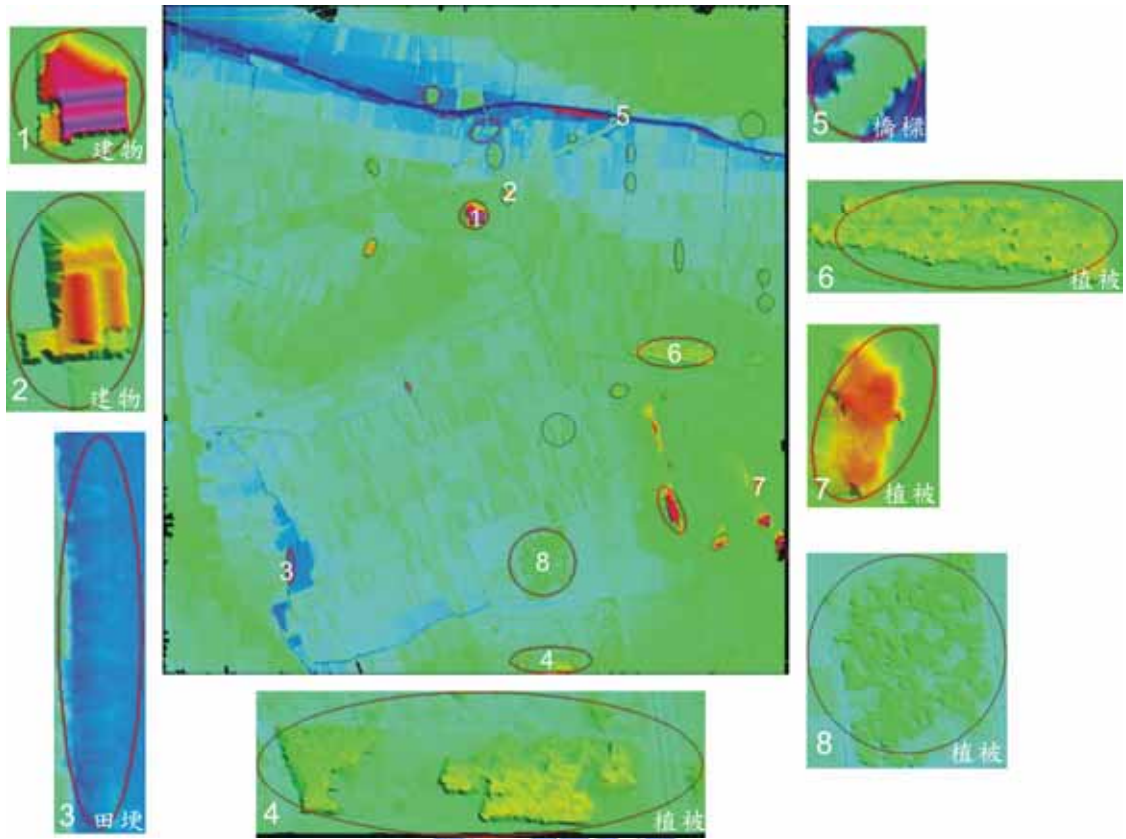


圖 4-5、以表 4-5 參數過濾地面點成果圖

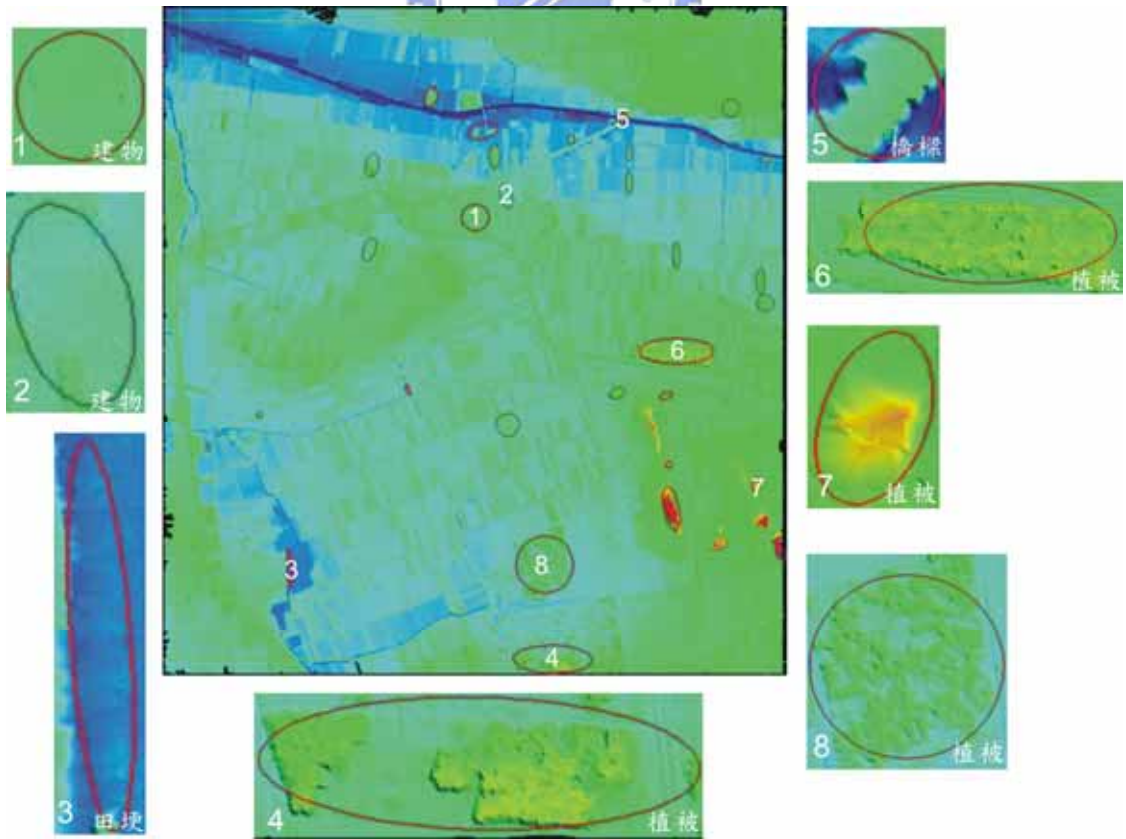


圖 4-6、以表 4-6 參數過濾地面點成果圖

B. 山區(密遮蔽林)

圖號：9622\_1\_075(桃竹地區)

主要地形：山區(含河谷)

全部雷射點高程：261.31 公尺~1075.92 公尺

使用兩組不同參數過濾地面點。參數設定如下表 4-7、表 4-8：

表 4-7、9622\_1\_075 參數設定(1)

參數名稱	山區
Max building size(m)	20
Terrain angle(degrees)	70
Iteration angle (degrees to plane)	8
Iteration distance(m to plane)	1.2
地面點點數	1,512,880

表 4-8、9622\_1\_075 參數設定(2)

參數名稱	山區
Max building size(m)	35
Terrain angle(degrees)	70
Iteration angle (degrees to plane)	8.5
Iteration distance(m to plane)	1.2
地面點點數	1,523,467

圖 4-7 和圖 4-8 都有植被點被分為地面點和山脊被削平兩種錯誤，其中以表 4-7 參數分類所發生之錯誤主要為非地面點被分為地面點，圖 4-7 與圖 4-8 中僅展示部分錯誤；對照兩圖可發現以表 4-8 參數分類發生之錯誤種類以山脊被削平為多。山脊被削平表示過濾出之地面點數量少，需要人工加點，另一面之涵義為過濾出的地面點至少為正確，而不是需要再次花費大量時間檢查自動過濾出之地面點是否有誤，因此對人工編修而言，山脊被削平的錯誤較易處理，故以表 4-8 參數較為理想。



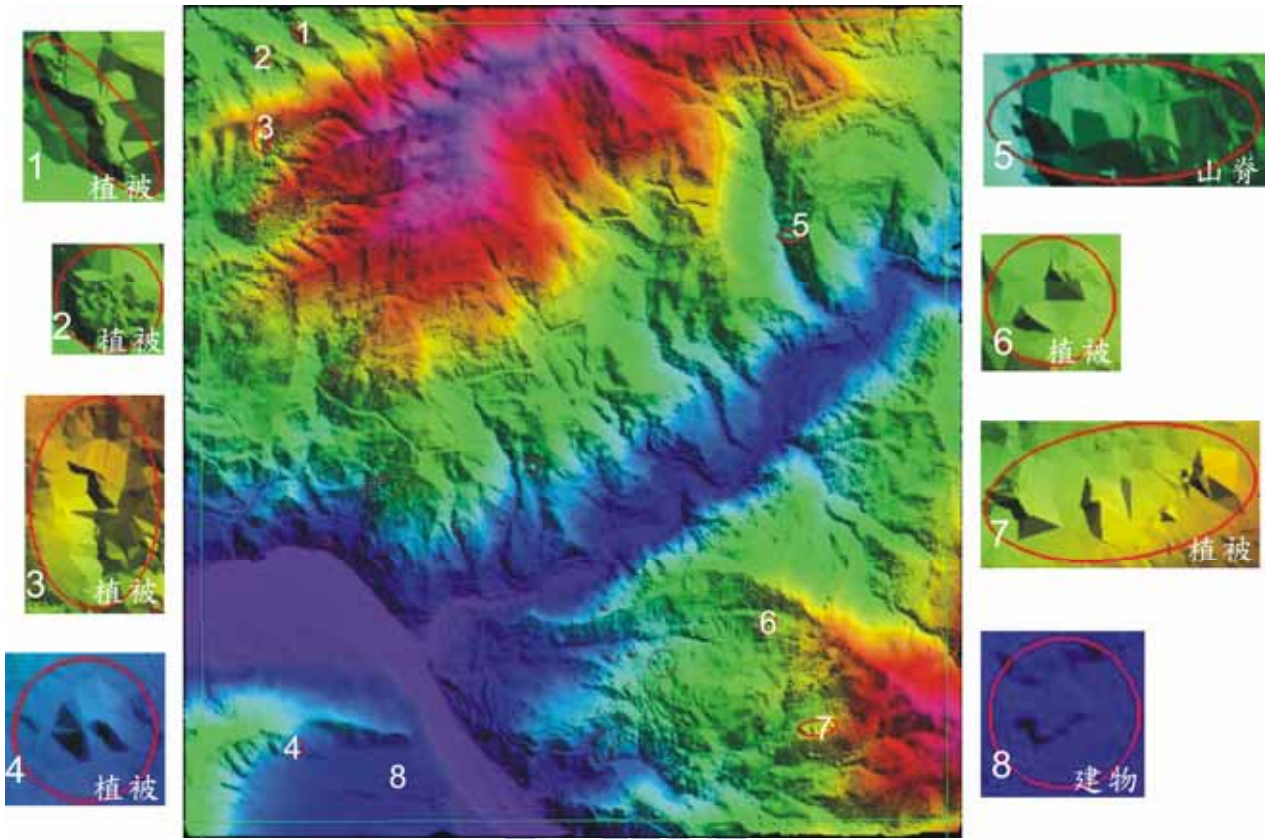


圖 4-7、以表 4-7 參數分區過濾地面點成果圖

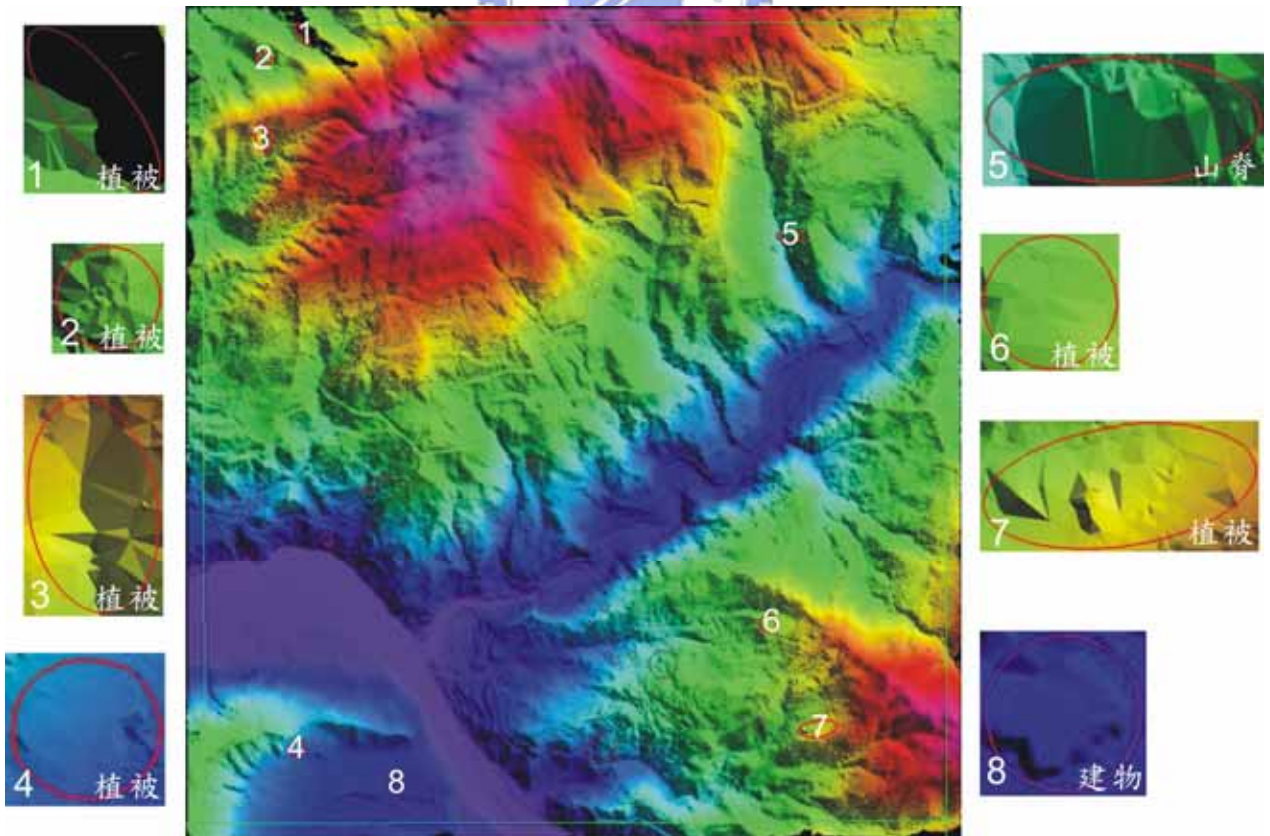


圖 4-8、以表 4-8 參數分區過濾地面點成果圖

### C. 地形變化複雜的區域

圖號：9419\_2\_097(台南地區)

主要地形：山區、平坦地、河谷、丘陵

全部雷射點高程：50.92 公尺~1197.61 公尺

使用兩組不同參數過濾地面點。參數設定如下表 4-9、表 4-10：

表 4-9、9419\_2\_097 分區參數設定(1)

參數名稱	全區
Max building size(m)	20
Terrain angle(degrees)	70
Iteration angle(degrees to plane)	7
Iteration distance(m to plane)	1.2
地面點點數	2,344,359

表 4-10、9419\_2\_097 參數設定(2)

參數名稱	全區
Max building size(m)	30
Terrain angle(degrees)	72
Iteration angle(degrees to plane)	10
Iteration distance(m to plane)	1.1
地面點點數	3,617,294

圖 4-9 中的錯誤類型包含建物未被濾除或植被點被分為地面點，如第 3、4、6 號錯誤，亦有山脊被削平或山頂無法分類出地面點之情況，如第 1、2、5、7、8 號錯誤；圖 4-10 中錯誤主要為山脊處無法過濾出地面點和山脊被削平，而沒有植被點被誤分為地面點的情況，故以表 4-10 的參數較為理想。



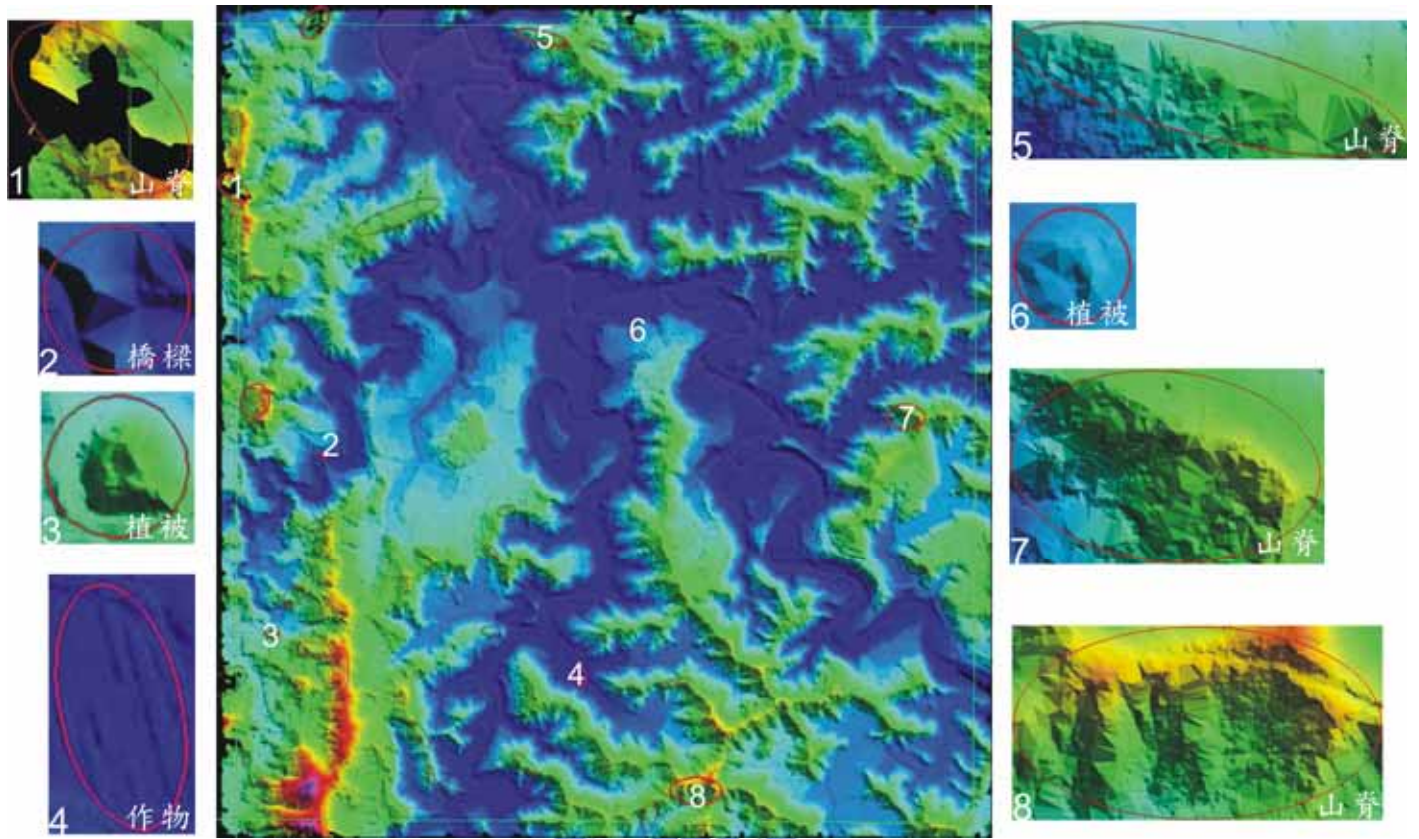


圖 4-9、以表 4-9 參數過濾地面點成果圖

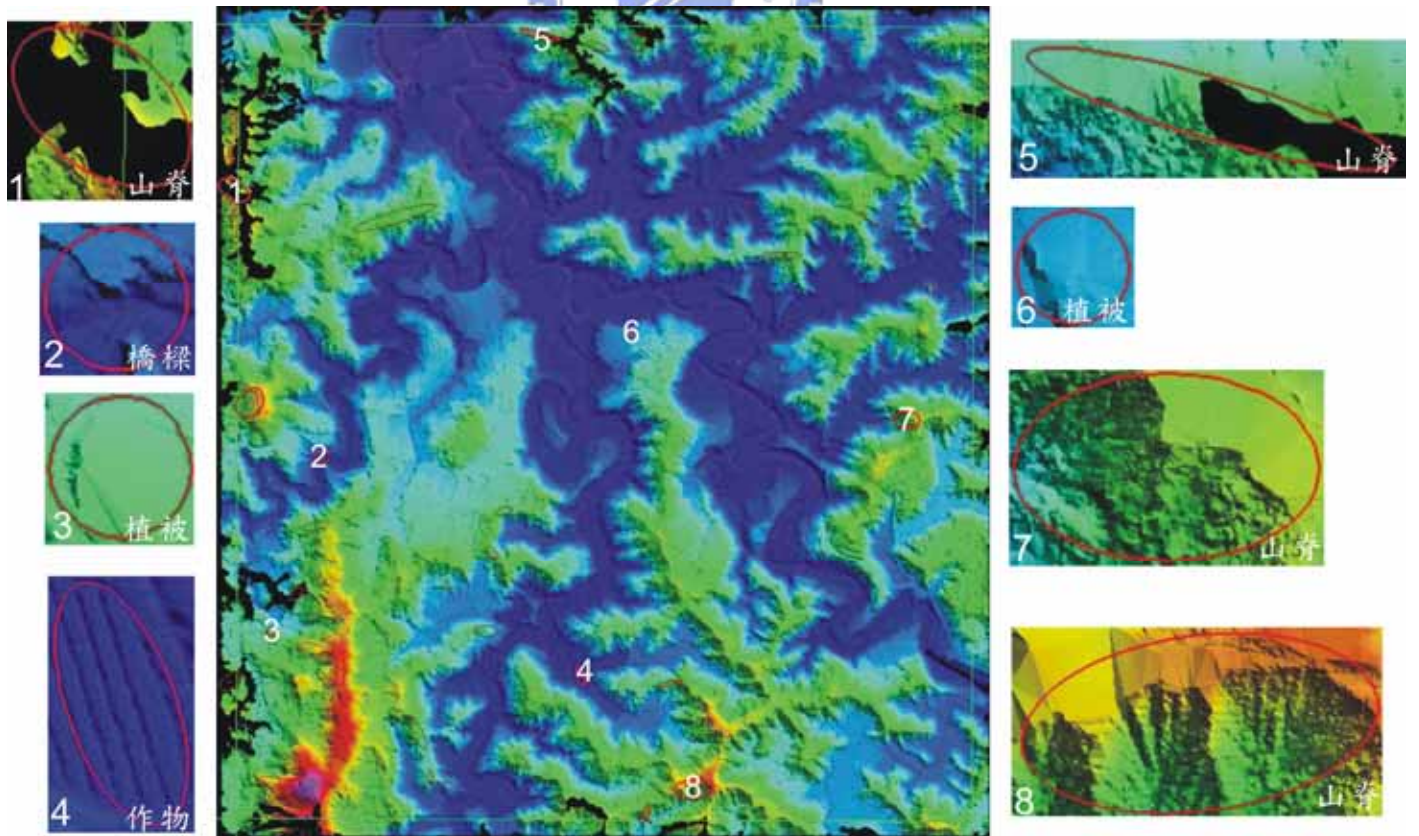


圖 4-10、以表 4-10 參數過濾地面點成果圖

### 4-3-2 型 錯誤及型 錯誤分析

雷射點資料在生產數值高程模型過程中只需要使用地面點，其餘雷射點都視為非地面點並不會使用。因為自動過濾無法完全正確，將所產生之錯誤分為型 I 錯誤和型 II 錯誤，定義如下(表 4-11)：

型 I 錯誤：原本為地面點之雷射點過濾後被歸為非地面點。

型 II 錯誤：原本為非地面點之雷射點過濾後被歸為地面點。

表 4-11、過濾地面點之型 I 錯誤和型 II 錯誤定義

		過濾後	
		地面點	非地面點
參考 (正確)	地面點	正確(a)	型 I 錯誤(b)
	非地面點	型 II 錯誤(c)	正確(d)

a：地面點被正確分為地面點的點數

b：地面點被誤分為非地面點的點數

c：非地面點被誤分為地面點的點數

d：非地面點被正確分為非地面點的點數

e：所有使用點數總和(e = a + b + c + d)

表 4-12、各類錯誤計算方式

	型 I 錯誤(%)	型 II 錯誤(%)	錯誤總和(%)
計算方式	$\frac{b}{a+b}$	$\frac{c}{c+d}$	$\frac{b+c}{e}$

表 4-12 中所列之計算方式皆以點數計算，但點數計算出的成果和 DEM 的正確率不完全為正比關係，也就是地面點數量多並不能表示 DEM 精度高；反之亦然。在平坦、覆蓋少(疏遮蔽或無遮蔽)的地區，地面點數量對於提高 DEM 精度無顯著幫助，甚至無影響，但對於山區(密遮蔽地區)或斷線處，地面點的數量及位置則影響 DEM 精度相當大。因此人工編修時，平坦地區模型若無錯誤，不進行人工加點；地形變化大或密遮蔽區域則以達到模型完整為目標進行加點。



為了單純比較自動過濾和人工編修的差異，在自動過濾前先將明顯的異常點濾除。另外選取三種不同地形覆蓋面(裸露地、山區及地形變化複雜區)進行比較。選用的圖幅大小是以 1/5000 像片基本圖外擴 50 公尺範圍為大小。裸露地部分因無圖幅內地表全為裸露地，因此選擇地表覆蓋為裸露地混合耕地等覆蓋物之圖幅計算。計算時，以人工檢查後的點數視為正確值，人工檢查是指在人工編修完畢後，由另一經驗較豐富之製圖人員檢查人工編修是否有遺漏或錯誤之處加以修正，因無法確定正確點數，故目前暫且視人工檢查後之點數為正確。此實驗以 TerraScan 設定參數自動過濾和人工編修後(先經自動過濾再由人工編修)的點數分別與最終人工檢查後的點數比較。以下表格中使用參數 80-60-6-1.4-5 依序表示 Max building size : 80 m ; Terrain angle : 60 度 ; Iteration angle : 6 度 ; Iteration distance : 1.4 m ; Reduce iteration angle when Edge length < 5.0 m。圖 4-11~圖 4-18 展示一些自動過濾明顯錯誤及其在人工編修後之變化，而人工檢查改變之點數造成之改變在模型上不易發現，且其人工檢查範圍幾乎遍佈整圖幅，故不另外展示人工檢查後之細部圖。



A. 裸露地(耕地)

表 4-13、裸露地過濾成果表

圖號：9419_3_038			
使用參數：80-55-4-1.4-5		總點數：10,990,720	
類別	自動過濾後點數	人工編修後點數	人工檢查後點數
地面點	3,296,945	3,278,701	3,281,203
非地面點	7,550,008	7,568,252	7,565,746
低點	166	166	170
未使用(包含雲)	143601	143601	143601

表 4-14、裸露地錯誤比例

	型 I 錯誤(%)	型 II 錯誤(%)	總和錯誤(%)
自動過濾	0.48	0.21	0.29
人工編修	0.08	0.03	0.05

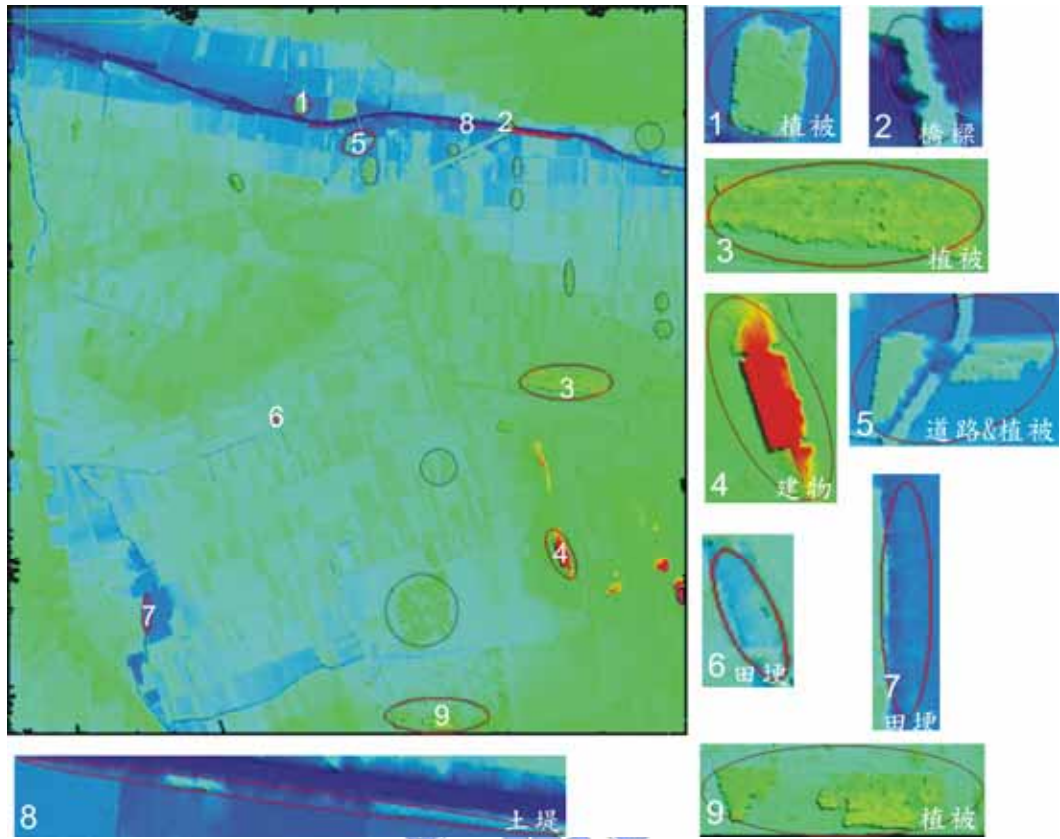


圖 4-11、9419\_3\_038 自動過濾後之成果圖

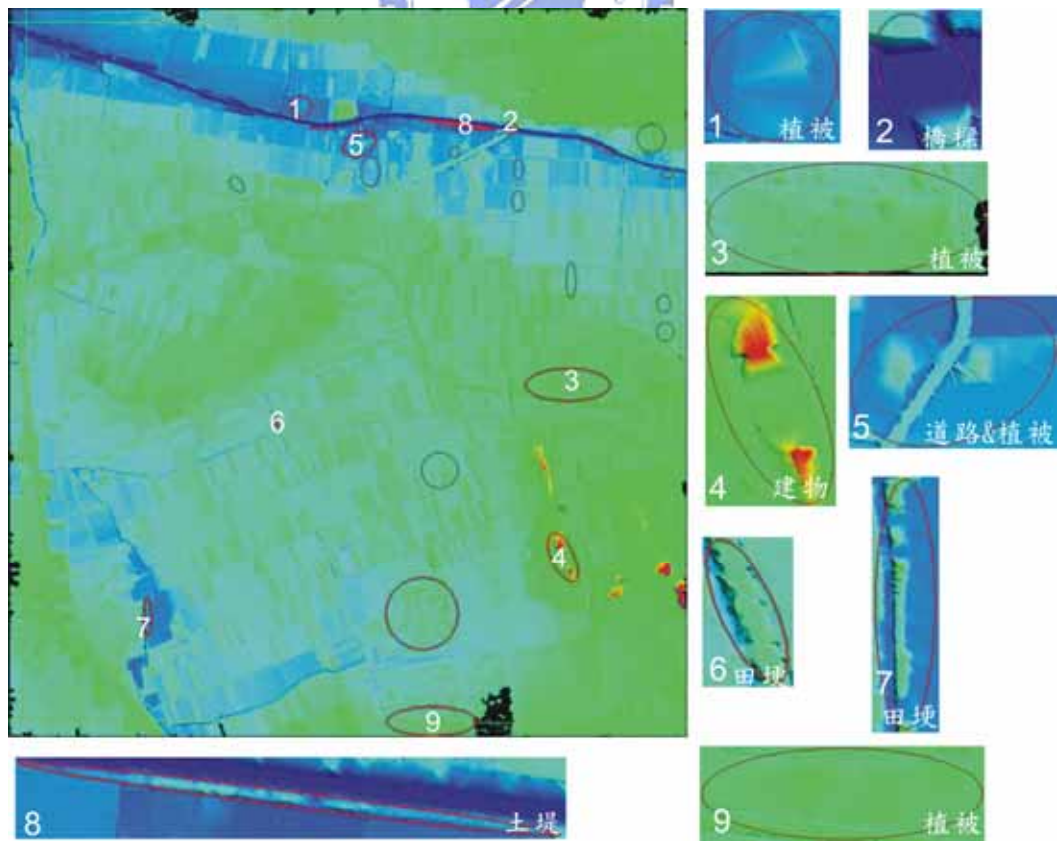


圖 4-12、9419\_3\_038 人工編修後之成果圖

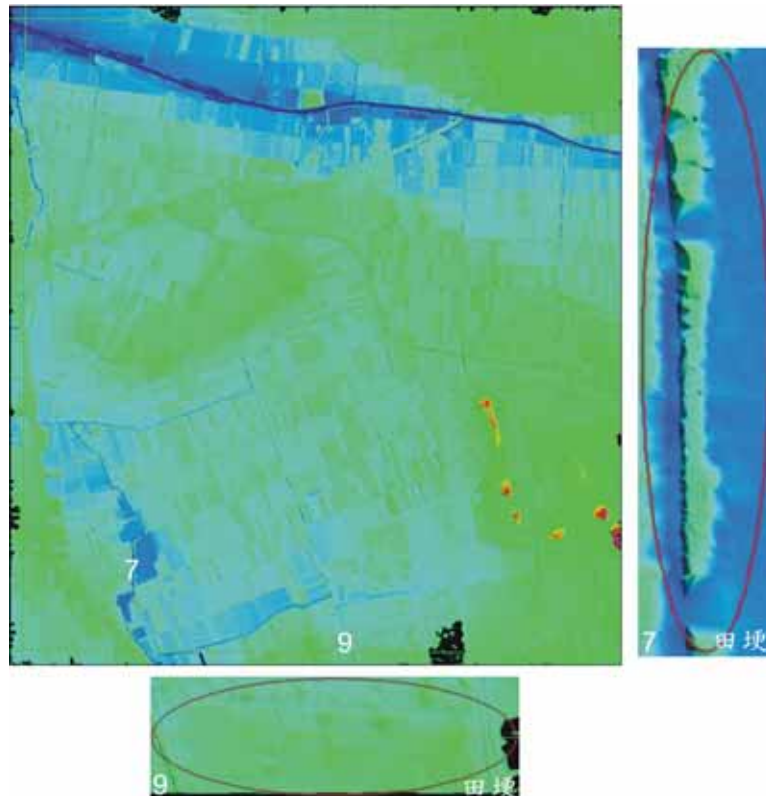


圖 4-13、9419\_3\_038 人工檢查後之成果圖

圖 4-11 為自動過濾後全圖的地表模型及自錯誤中選出 9 個錯誤(不同類型或較特別者)的放大圖。9 個自動過濾產生的錯誤經過人工編修的成果展示於圖 4-12 中，可看出人工編修有助提升產品品質。而表 4-13 中，地面點點數的變化：由自動過濾至人工編修，再至人工檢查後的點數是先減少再增加的趨勢，主要原因為人工編修時以消去被誤分為地面點的植被點為主，故地面點點數減少，而人工檢查除檢查是否仍有分類錯誤的植被點，另外亦將被削平的田埂處增加地面點，以求田埂處的完整，如圖 4-12 和圖 4-13 中第 9 號錯誤的左側田埂及第 7 號錯誤的田埂，故地面點點數會比人工檢查時多，而圖 4-13 中第 7 號田埂處仍有少數地點模型不完整，是由於該處缺少雷射點所致。圖 4-12 和圖 4-13 的邊緣有些區域模型呈現空缺(無建立模型)，原因為圖幅邊緣地區地面點點數量少造成所謂的「邊緣效應」，即單純因位於圖幅邊緣造成模型無法建立，而非無地面點。

B. 山區

表 4-15、山區過濾成果表

圖號：9622_1_075			
使用參數：35-70-8.5-1.2-5		總點數：12,139,818	
類別	自動過濾後點數	人工編修後點數	人工檢查後點數
地面點	1,523,467	1,546,415	1,548,365
非地面點	10,616,345	10,593,397	10,591,444
低點	1	1	4
未使用(包含雲)	5	5	5

表 4-16、山區錯誤比例

	型 I 錯誤(%)	型 II 錯誤(%)	總和錯誤(%)
自動過濾	1.61	0.03	0.41
人工編修	0.13	0.02	0.03

C. 地形變化複雜地區

表 4-17、地形變化複雜區域過濾成果表

圖號：9419_2_097			
使用參數：30-72-10-1.1-5		總點數：13,400,920	
類別	自動過濾後點數	人工編修後點數	人工檢查後點數
Ground	3,617,294	3,686,315	3,703,225
Non-ground	9,783,616	9,714,595	9,697,680
Low point	3	3	8
Unused(含 cloud)	7	7	7

表 4-18、地形變化複雜區域錯誤比例

	型 I 錯誤(%)	型 II 錯誤(%)	總和錯誤(%)
自動過濾	2.32	0.89	1.28
人工編修	0.46	0.17	0.25



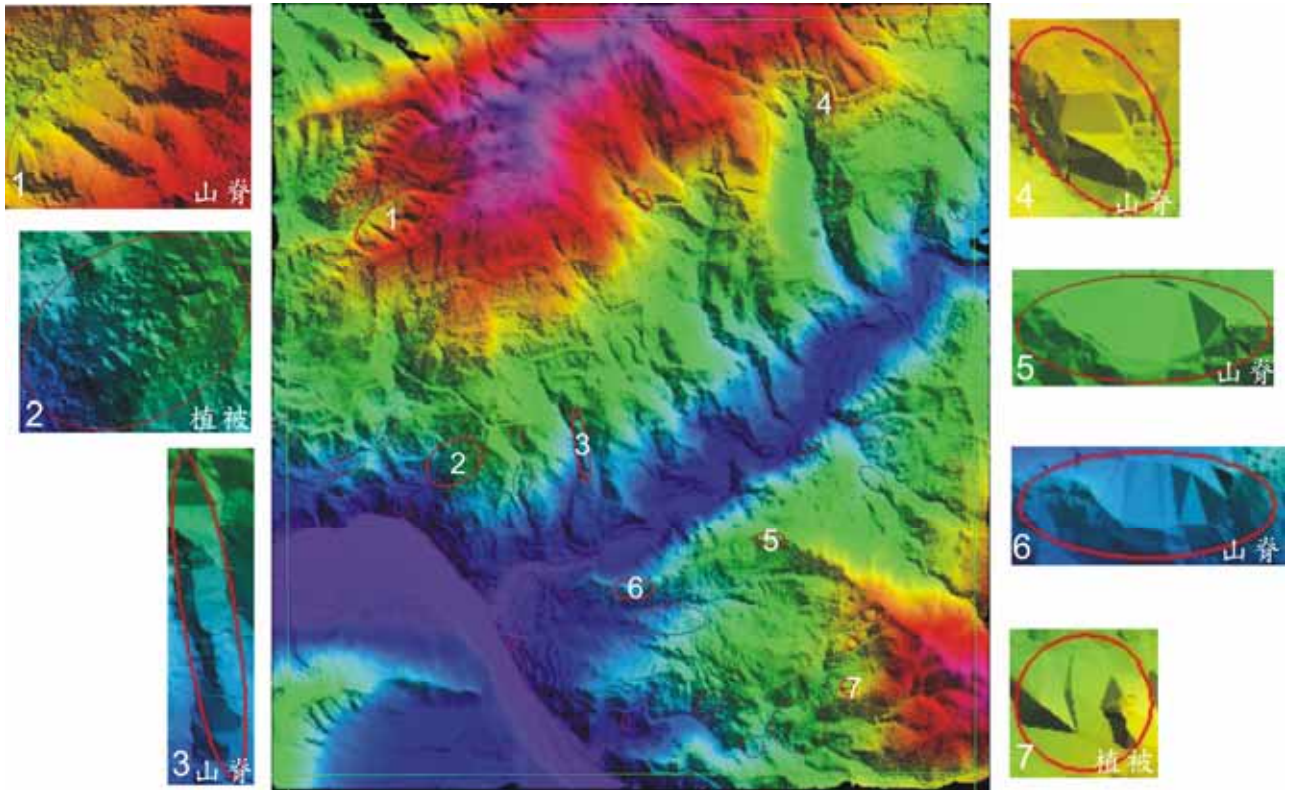


圖 4-14、9622\_1\_075 自動過濾後之成果圖

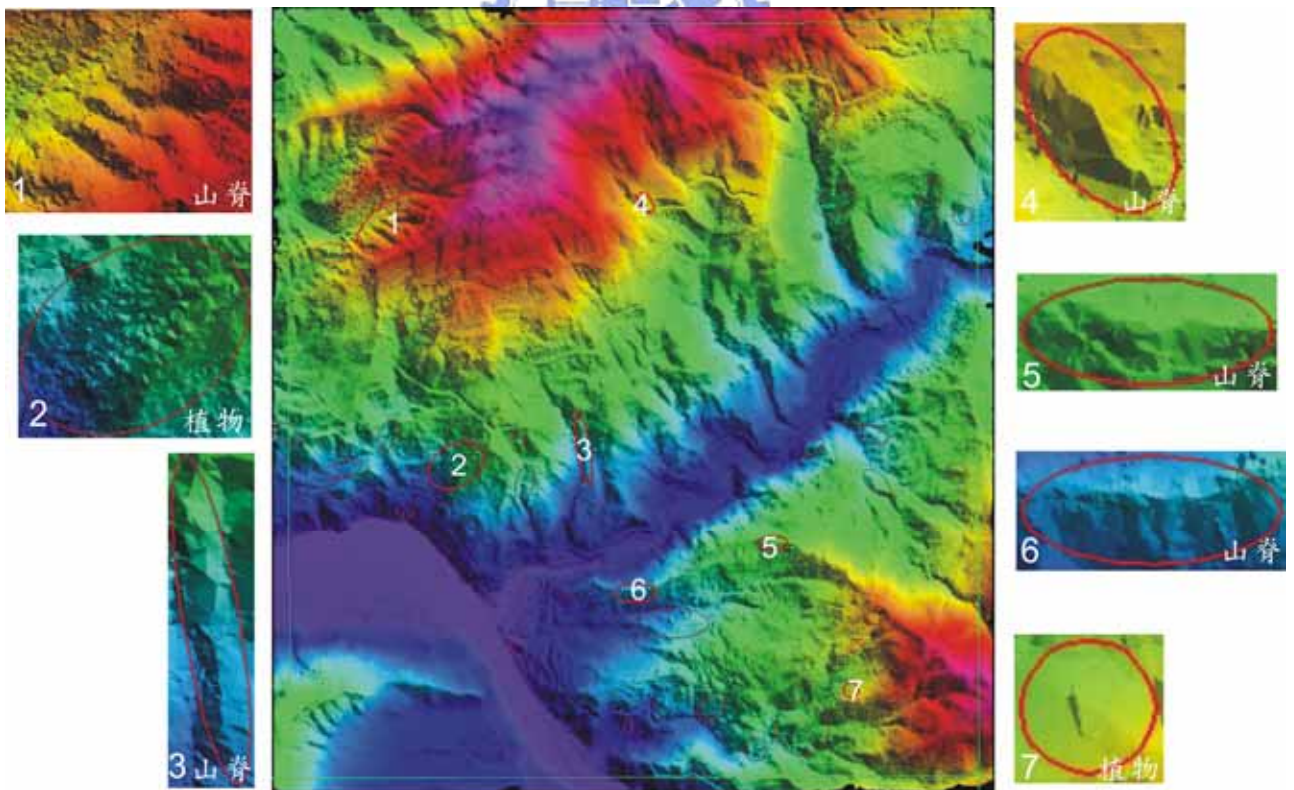


圖 4-15、9622\_1\_075 人工編修後之成果圖



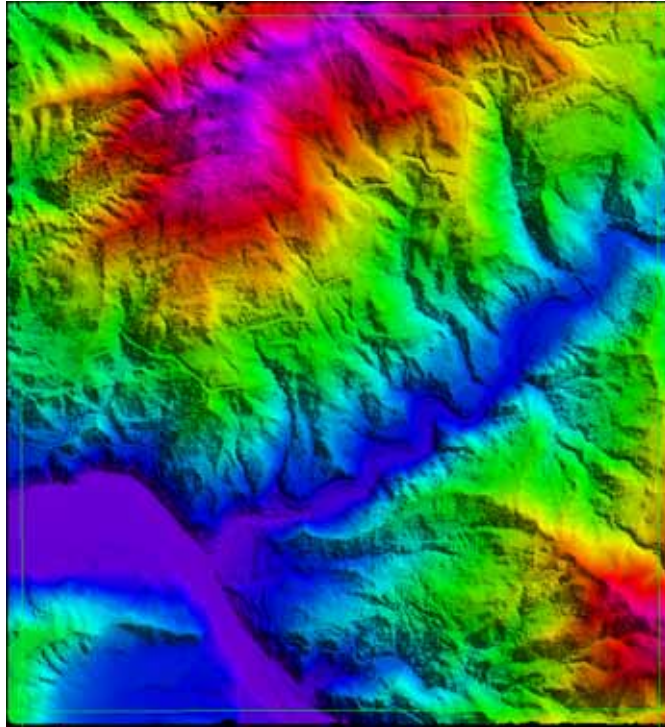


圖 4-16、9622\_1\_075 人工檢查後之成果圖

在山區地形部分，自動過濾參數選擇之原則為盡量不將植被點誤分為地面點，即被過濾為地面點者皆正確，再經由人工編修增加無過濾出之地面點，故此參數設定易造成山脊被削平的狀況，因此人工編修主要工作是增加地面點，由表 4-15 可發現地面點點數漸增，表示增加的地面點點數多於消除的地面點點數。此圖幅自動過濾發生之錯誤中為植被點被誤分為地面點山脊被削平兩類，自其中選出 7 個較明顯之錯誤加以放大並和整圖幅的成果展示於圖 4-14 中；人工編修後的成果展示於圖 4-15。而對照圖 4-14 及圖 4-15 中第 2 號錯誤，發現兩張放大圖幾乎一樣，是因該處為密遮蔽林，地面點數量相當少，可以修改的部分並不多。

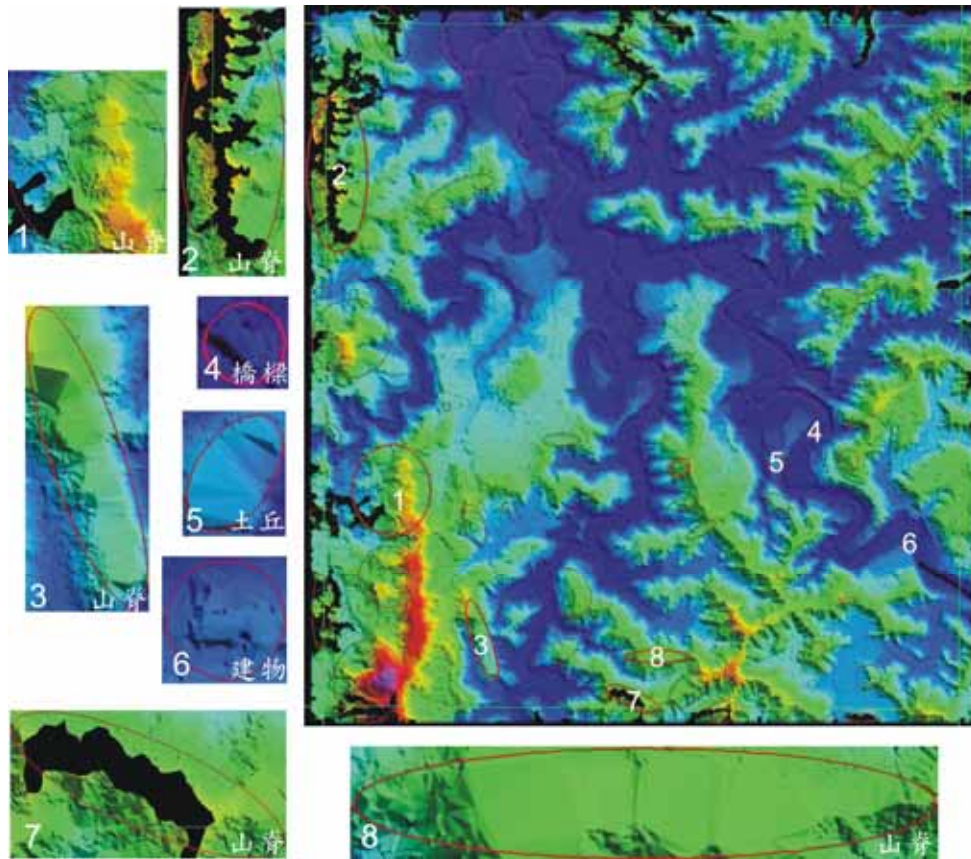


圖 4-17、9419\_2\_097 自動過濾後地面點建立之模型圖

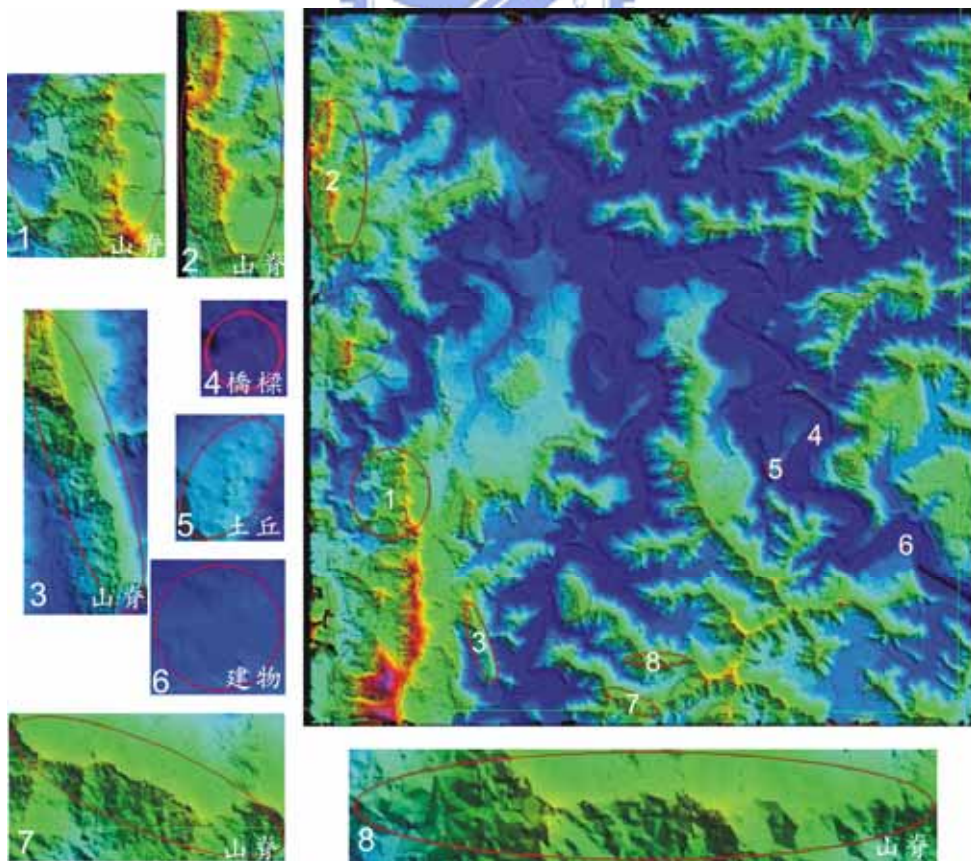


圖 4-18、9419\_2\_097 人工編修後地面點建立之模型圖



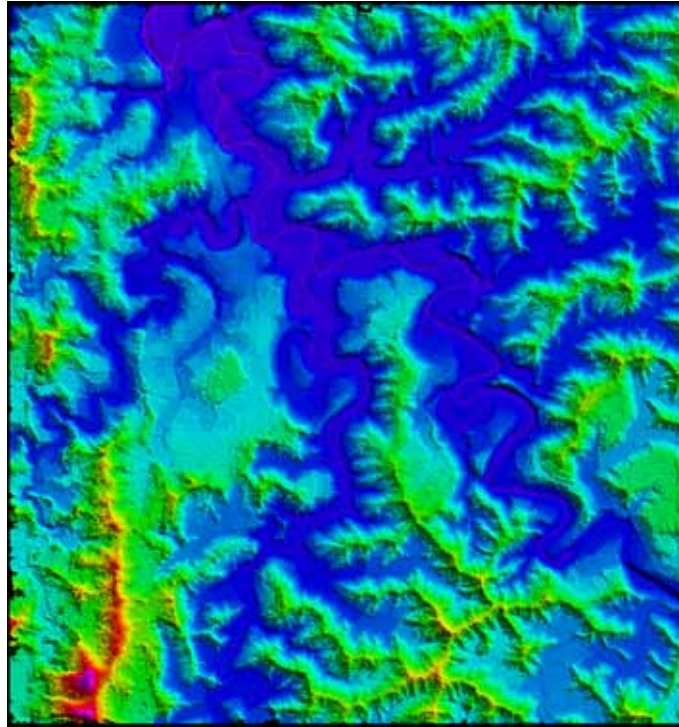


圖 4-19、9419\_2\_097 人工檢查後之成果圖

地形變化複雜區域會發生山脊被削平和建物或植被點被分為地面點等錯誤，故人工編修時會進行加點和消點，地面點數量增減要視其地形覆蓋及自動過濾參數而定。圖 4-17 展示自動過濾後產生的錯誤，包含前述的山脊被削平(第 1、3、5、8 號錯誤)和建物被誤分為地面點(第 6 號錯誤)及山頂無法過濾出地面點(第 2、7 號錯誤)、橋樑無法濾除(第 4 號錯誤)等錯誤。然而這些錯誤的出現與自動過濾參數設定關係密切，如針對不同地形覆蓋以不同參數進行分區過濾，成果會較理想。經過人工編修後成果展示於圖 4-18 中，但由於地面點點數不足，造成模型不平滑。

表 4-19 和表 4-20 為以圖表比較自動過濾和人工編修發生的型 I 錯誤和型 II 錯誤，其中不論是自動過濾或人工編修都以地形變化複雜地區的錯誤較大，原因是地形變化複雜地區自動過濾效果較不理想，需要大量的人工編修，故錯誤量較多。人工編修部分的山區總和錯誤最小，原因可能是人工檢查時，僅進行加點，而非如平坦地區在人工編修時以移除植被點為主要目的，人工檢查時則在許多田埂處進行加點，故山區的人工編修總和錯誤量為最小。

表 4-19、自動過濾之型 I 錯誤和型 II 錯誤比例

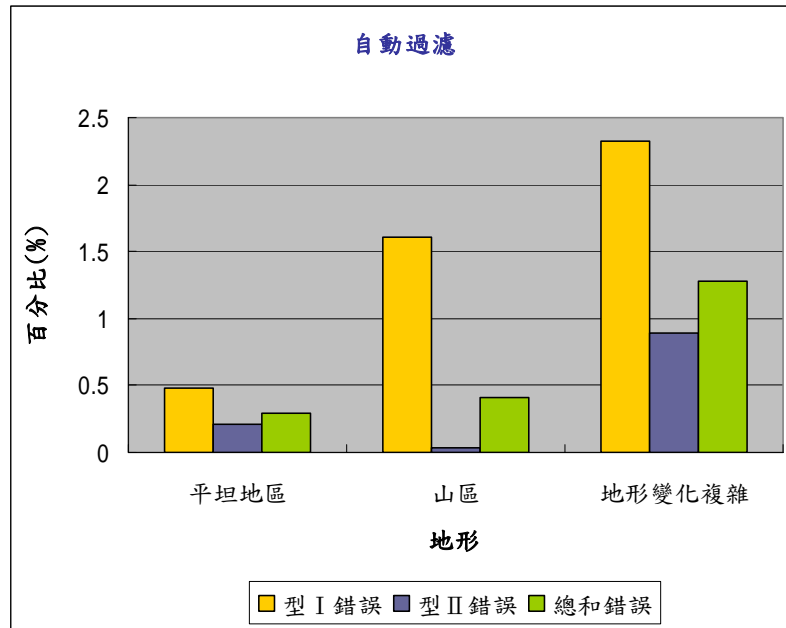
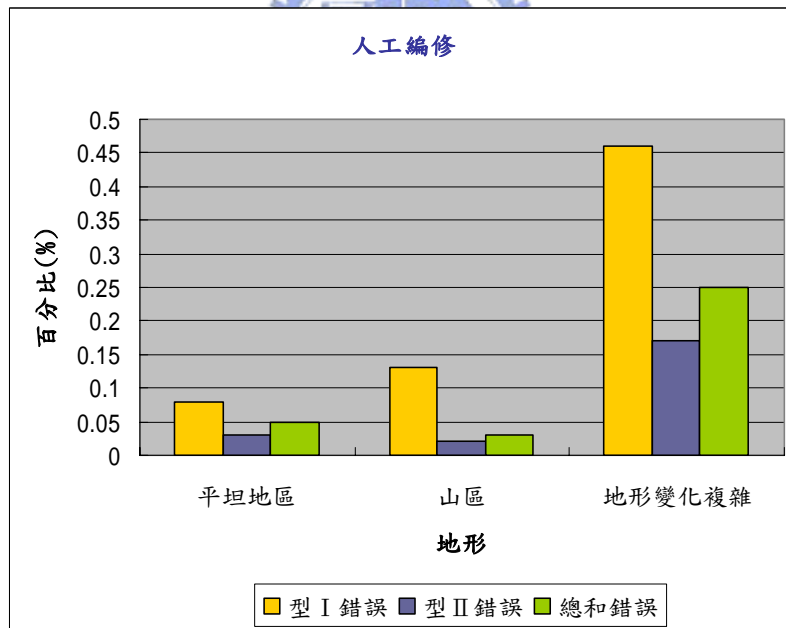


表 4-20、人工編修之型 I 錯誤和型 II 錯誤比例



#### 4-4 自動過濾與人工編修發生問題

在作業流程中資料處理部分，目前作業方式為先利用軟體自動過濾，再行人工編修。其中地形或其他因素皆可能造成雷射點分類錯誤，以下分自動過濾、人工編修兩部分討論。

#### 4-4-1 自動過濾發生的問題及原因

本研究謹以 TerraScan 為例，整理歸納出軟體過濾地面點時常發生的問題、造成原因及結果列於下表 4-21。而大部分之自動過濾錯誤可經由人工編修改正，提高產品品質。

表 4-21、自動過濾發生的問題及原因

		發生之問題	原因	結果
自動過濾	平坦地區	1. 低點(Low point)分類錯誤	1. 過濾不完全 2. 不同地形和地表覆蓋適合不同的參數	低點誤分為地面點 (非地面點誤分為地面點)
		2. 過大建物無法濾除		非地面點誤分為地面點
		3. 矮植被無法濾除		地面點誤分為非地面點
	山區	4. 低點(Low point)分類錯誤		低點誤分為地面點 (非地面點誤分為地面點)
		5. 建物無法濾除		非地面點誤分為地面點
		6. 山頂無法過濾出地面點		地面點誤分為非地面點
		7. 山區植被點無法濾除		非地面點誤分為地面點
	特殊地形	非地面點誤分為地面點		

表 4-21 以地形作區分，分別列出發生山區與平地發生之問題。錯誤出現的原因固然與地形有關，但與穿透率關係更大，故不同地形可能出現同樣的錯誤現象。之中 1.和 4.結果類似；而 2.和 5.是因為參數中最大建物尺寸(max building size)設定所造成。一般而言，平坦地區面積較大建物(約大於 80\* 80 平方公尺)，山區大於 30\* 30 平方公尺以上者較易發生無法完全濾除情形，但主要仍是與每次過濾所設定的參數值相關。3.和 7.指植被點誤分為地面點，但造成的原因不同。以下針對造成不同錯誤的環境作介紹，並展示該處的模型與垂直剖面圖。圖中每一

顏色代表一種類別的雷射點，說明如下：

- ：地面點
- ：非地面點
- ：低點

#### 4-4-2 自動過濾錯誤易發生的情形

##### ● 低點(Low point)分類錯誤

此步驟可在地面點過濾前進行。在裸露地或地表覆蓋少的區域，低點可以正確被分類。但在遮蔽較密的區域則會發生誤分的錯誤，如真正的地面點被分為低點，連帶造成非地面點被分為地面點會造成 DEM 錯誤。圖 4-20 是山區遮蔽較嚴重造成零星的地面點被誤分為低點；圖 4-21 是平地植被因遮蔽嚴重使地面點被誤分為低點；圖 4-22 中右圖可見到低點被分到植被點上。

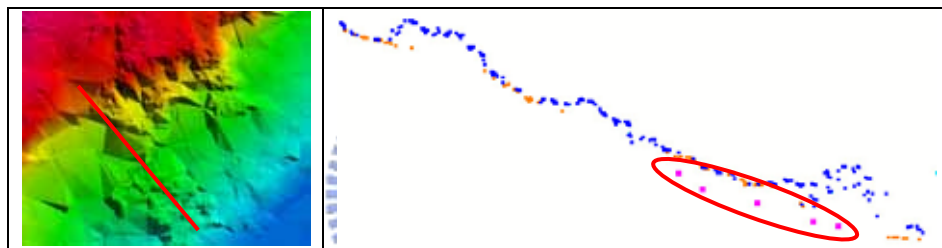


圖 4-20、低點分類錯誤例圖(山區)

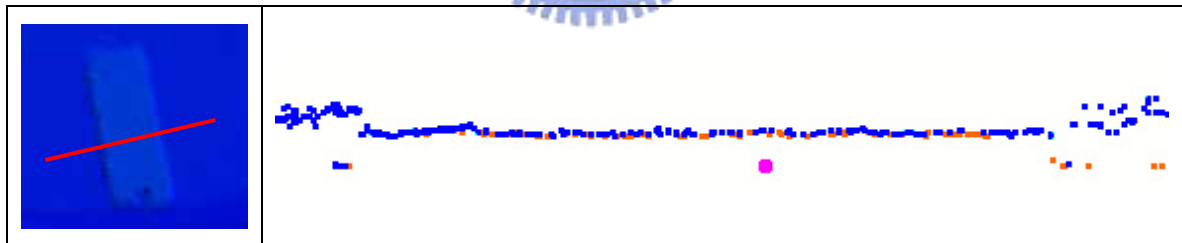


圖 4-21、低點分類錯誤例圖(平坦地區)

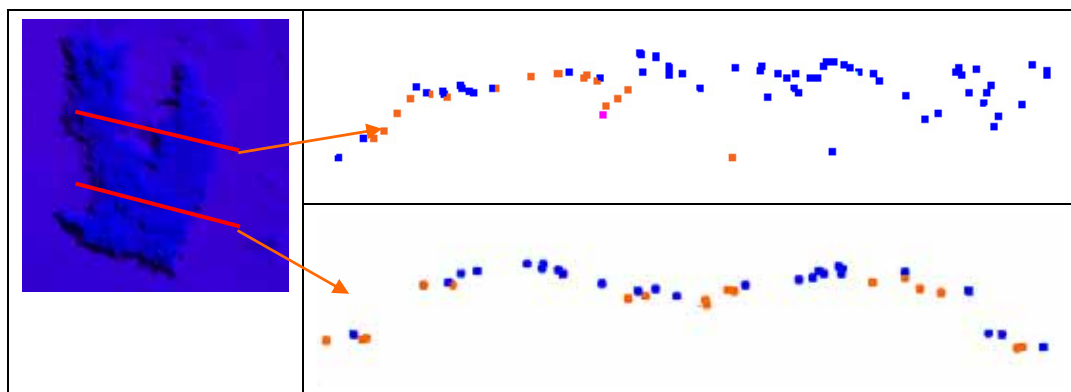


圖 4-22、低點分類錯誤例圖(植被)

- 建物無法濾除

平坦地區或山區皆可能發生此情況。建物濾除與否主要和設定之參數有關。平坦地區的最大建物尺寸往往設定較大，佔地面積小於設定之最大建物尺寸的建物可被濾除，但一些佔地面積較廣的建物則否；在山區，為避免濾除山脊等地形特徵，最大建物尺寸會設定小一些，然而山坡上偶爾有建物存在，可能大於所設定的最大建物尺寸造成錯誤。圖 4-23 中垂直剖面圖可看出部分建物和山坡連接，使建物點無法濾除；圖 4-24 可能是由於地面點數量太少造成建物點被分為地面點；圖 4-25 及圖 4-26 是由於建物面積過大及參數設定造成建物無法完全濾除。

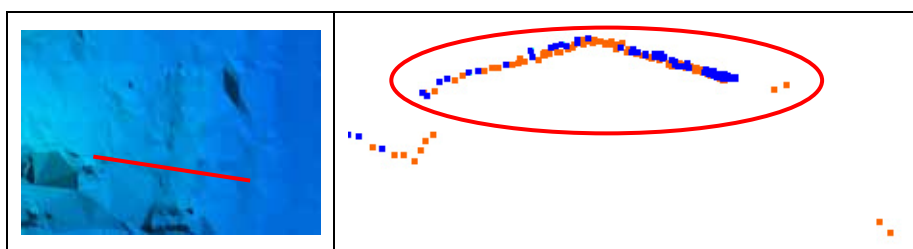
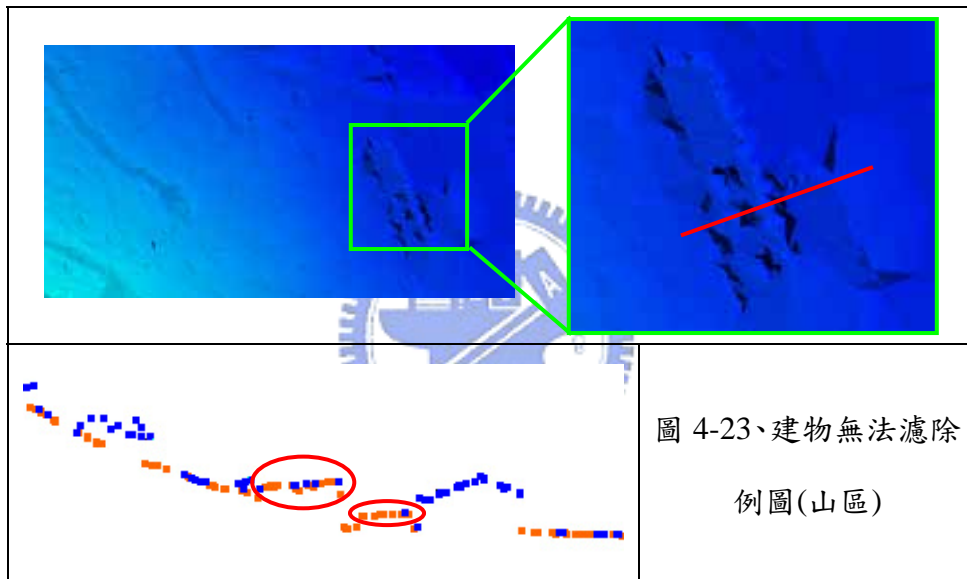


圖 4-24、建物無法被濾除例圖(山區)

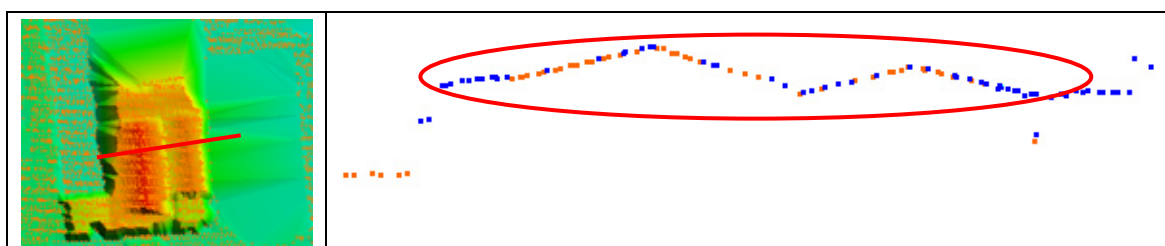


圖 4-25、建物無法被濾除例圖(平坦地區)



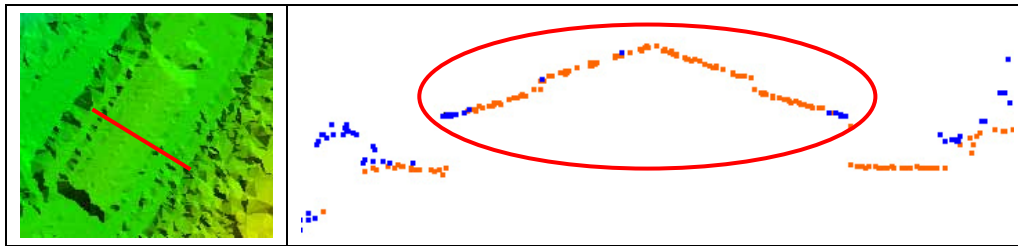


圖 4-26、建物無法被濾除例圖(山區)

- 植被無法濾除

此情形若發生在平坦地區，通常是大面積耕地且種植高度在 0.5 公尺~3 公尺間的植物，可能受設定參數影響，無法濾除植被點。圖 4-27 和圖 4-28 中的植物高度約 1.8 公尺至 2.7 公尺，皆發生部分植被點被分為地面點；圖 4-29~圖 4-31 為山區密遮蔽處，因地面點點數不足易發生地面點分類到植被點上之錯誤。而山區較高處之植被點是因參數設定和地面點不足兩者同時成立，導致植被點被誤分為地面點如圖 4-32。

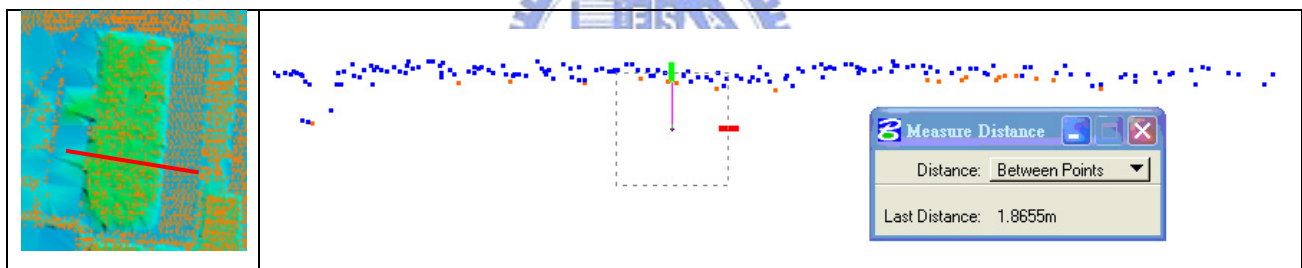


圖 4-27、植被無法被濾除例圖(平坦地區)

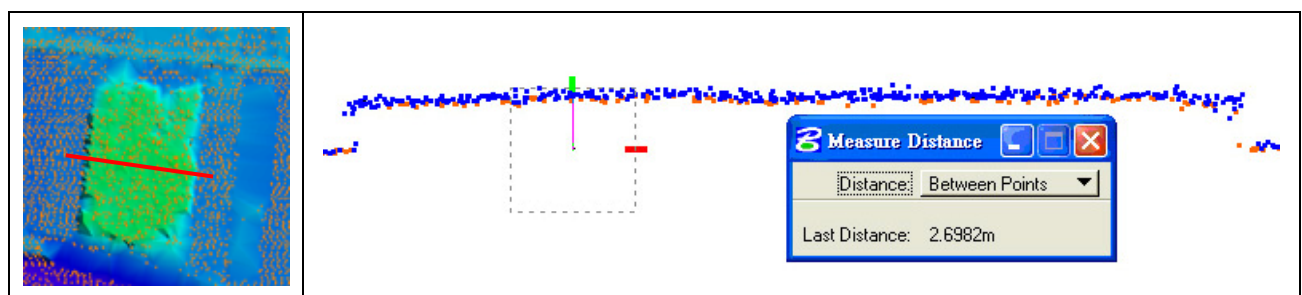


圖 4-28、植被無法被濾除例圖(平坦地區)

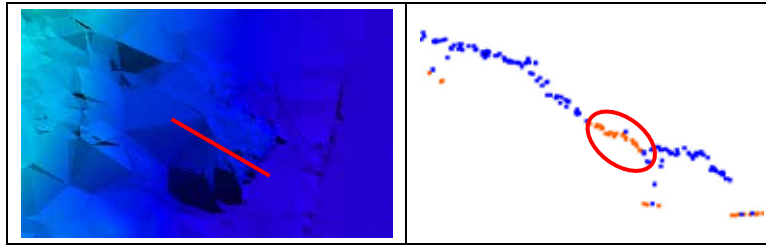


圖 4-29、植被無法被濾除例圖(山區)

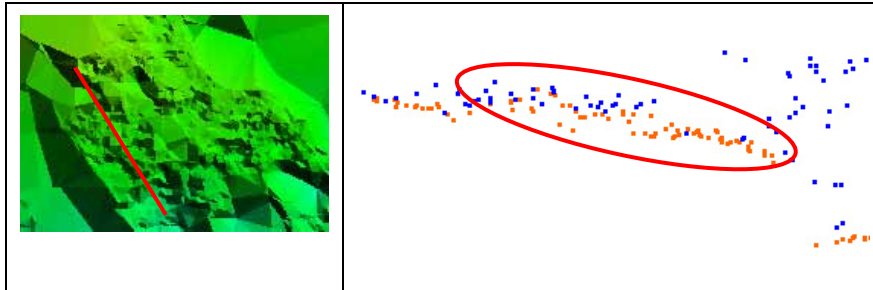


圖 4-30、山區植被點被誤分為地面點例圖

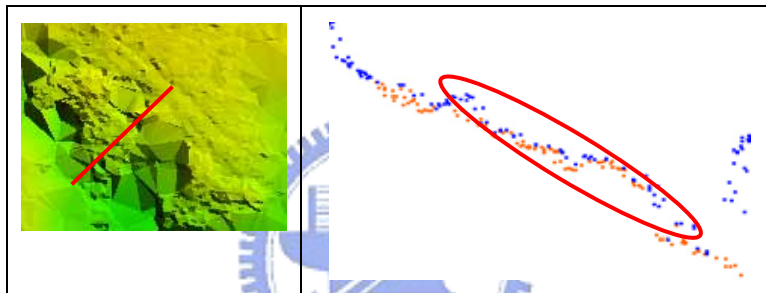


圖 4-31、山區植被點被誤分為地面點例圖

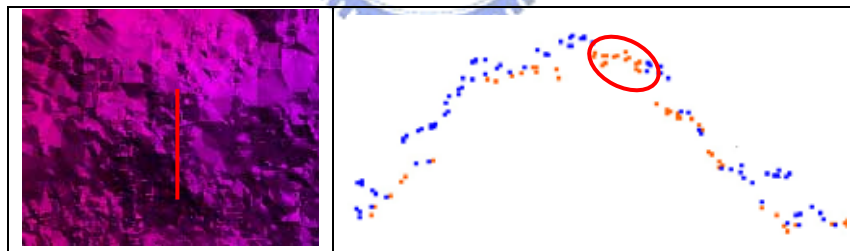


圖 4-32、山區植被點被誤分為地面點例圖

- 山頂無法過濾出地面點

在坡度較陡的斜面(約 75 度~90 度)，特別是接近垂直角度的崖，或是地面點過少易造成無法分類出地面點。圖 4-33~圖 4-35 展示山脊被削平之現象，即因山頂部分無地面點造成。山頂部分之雷射點會受到參數設定影響，使無法分出地面點或是植被點被誤分為地面點。

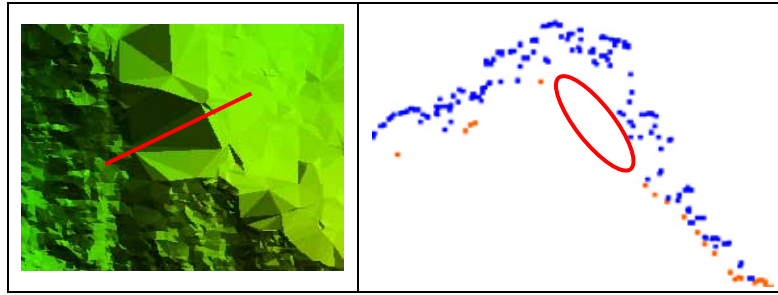


圖 4-33、山頂缺少地面點例圖

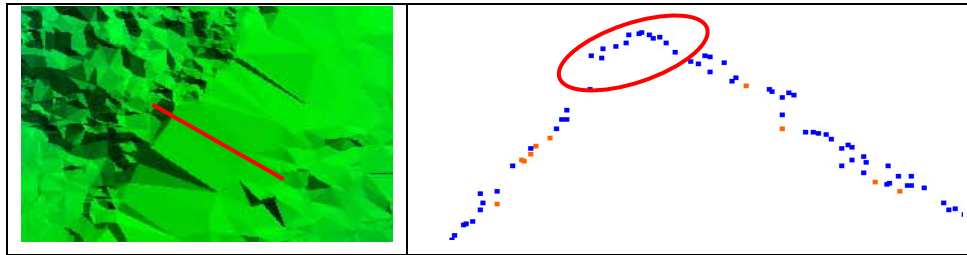


圖 4-34、山頂缺少地面點例圖

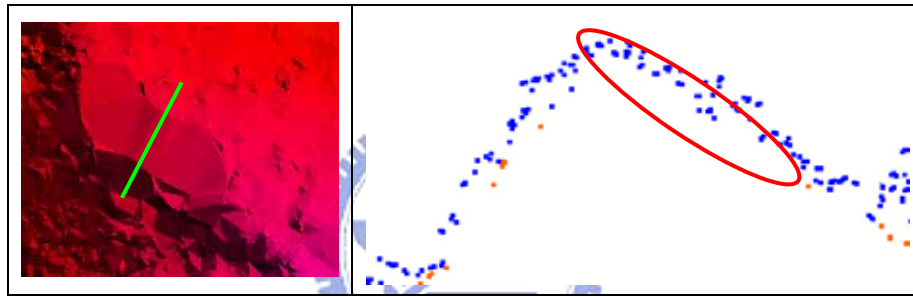


圖 4-35、山頂缺少地面點例圖

- 特殊地形

在都會及平坦地區發生自動過濾錯誤情形，常是由於較特殊之地形造成，如地下停車場出入口等，因車道之坡度較和緩，露天部分之車道的雷射點會被視為地面點，圖 4-36(A)是新竹愛買量販店地下停車場入口車道實地照片，該地區對應到圖 4-36(B)(C)(D)中之紅圈處，而圖 4-36(B)(C)(D)分別為模型圖、垂直剖面圖及點雲展示圖，發現車道露天部分之雷射點會被視為地面點。

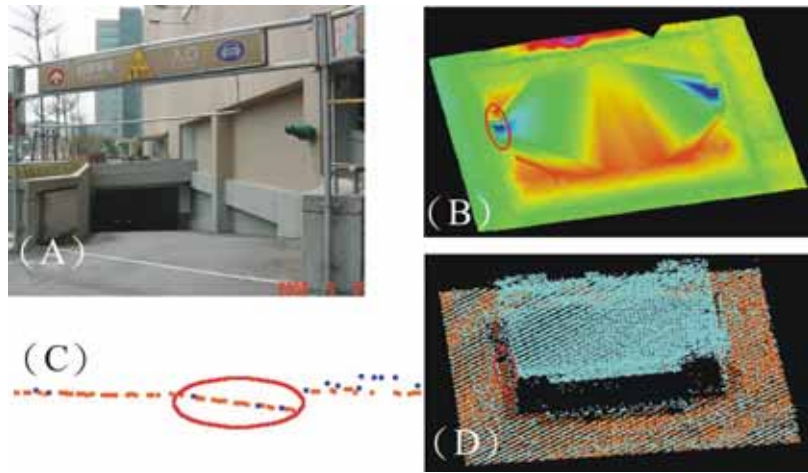


圖 4-36、地下停車場出入車道實地照片及點雲展示

圖 4-37 是新竹科學園區內某公司的地下停車場入口之弧狀車道如圖 4-37(A)(B)、而模型上可見一弧形凹陷，如圖 4-40(C)，此自動過濾錯誤可以經由人工編修，但形狀較特殊，若無實地照片，會增加人工編修上判釋難度。地下停車場出入口之車道等此類地形是否屬於 DEM 目前尚未明確，故暫視其為建物一部分加以移除。

另外建物的造景或暫時性之建築工地亦有可能在自動過濾時被視為地面點，如圖 4-38(A)可看到有一區地面點明顯低於周圍其他地面點，而該處的地面點高程相近，上方又有些格子狀的物體，故判斷為建築工地；圖 4-38(B)是暫時建築工地被誤分為地面一部分組成的模型；圖 4-38(C)則是該處與一般地面的高程差。

圖 4-39 是交通大學綜合一館之地下停車場車道及建築較特殊部分；其中圖 4-39(A)表示地表模型上異常處(以紅藍綠三色圈選)；圖 4-39(B)(C)(D)分別代表圖 4-39(A)中紅藍綠三圈處實地狀況及點雲剖面圖，三者坡度不大，在自動過濾時，會被視為地面點造成錯誤，而圖 4-39(C)(D)是否屬於建物一部分仍需進一步定義。



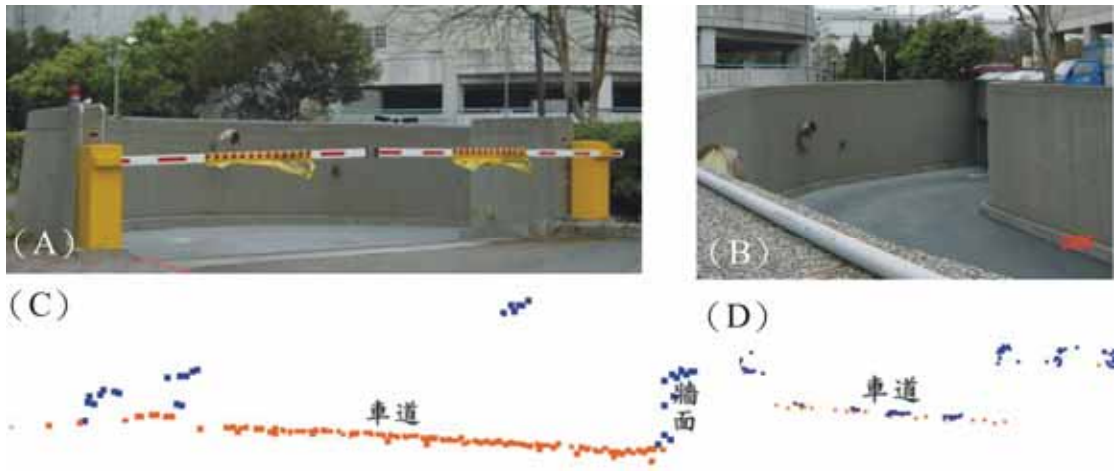


圖 4-37、地下停車場出入車道實地照片及垂直剖面圖

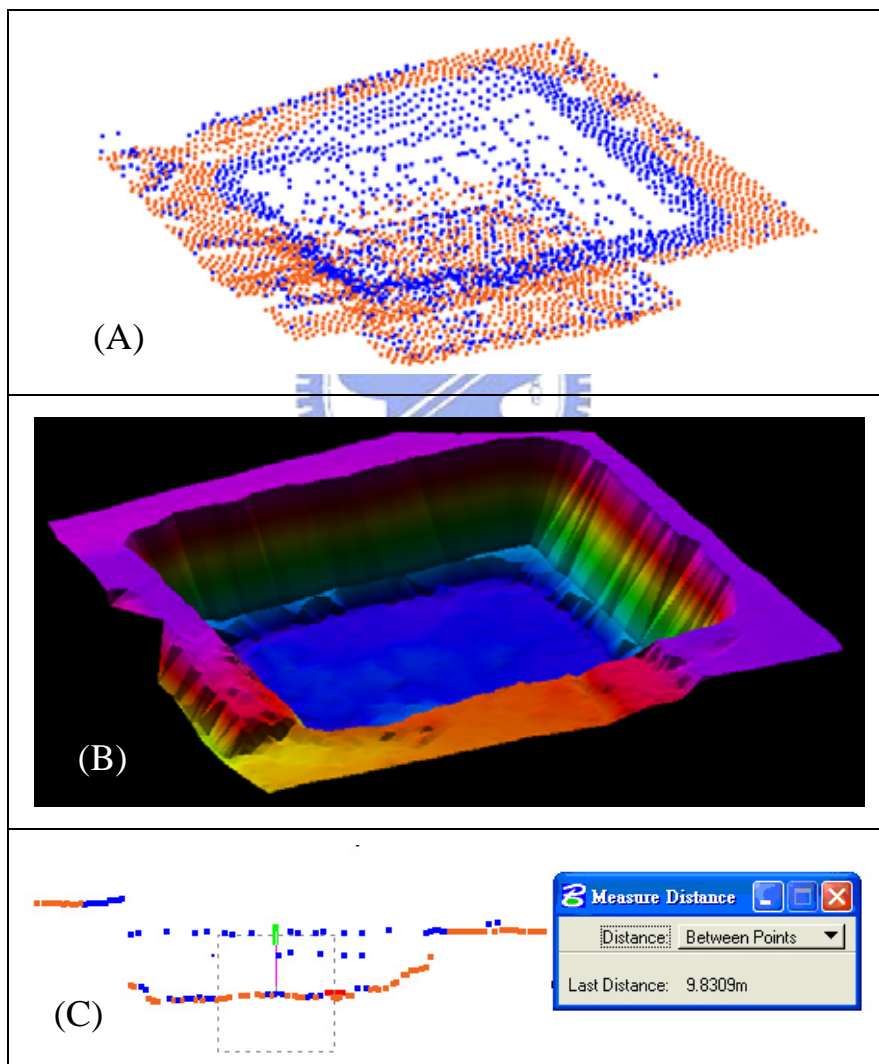


圖 4-38、施工中的建築工地

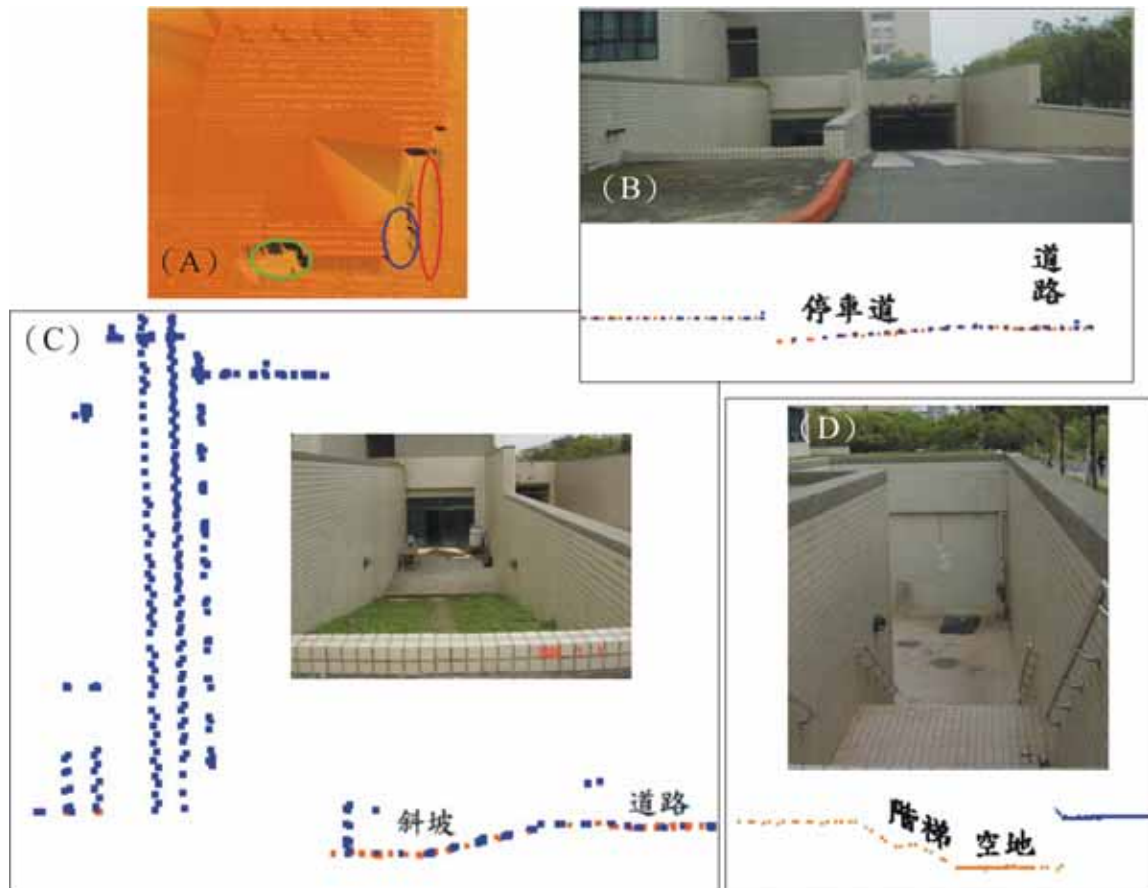


圖 4-39、交通大學綜合一館建築特殊處

圖 4-40 為交通大學校園內，環校道路在奈米中心後方的路段，該段道路大部分為露天，少部分上有遮蔽，實際照片如圖 4-40(A)所示，拍攝方向為圖 4-40(B)中箭頭方向。點雲之垂直剖面圖(與道路方向垂直的剖面)如圖 4-40(D)所示，若以單一路段來看，很容易將車道上的雷射點分類為低點，造成圖 4-40(C)看似正確但實際錯誤的模型，正確的模型如圖 4-40(B)，模型中藍圈處呈現一個由圖面上道路左方延續至道路之斜面，實際上不是該區無建物，而是無雷射點打到建物邊緣，圖 4-40(D)可見；因本路段有彎曲，故將本段路分為兩部分展示，如圖 4-40(E)(F)，由兩圖看出在路段與路段之間存在一段高度較高之遮蔽物，故該段無地面點。



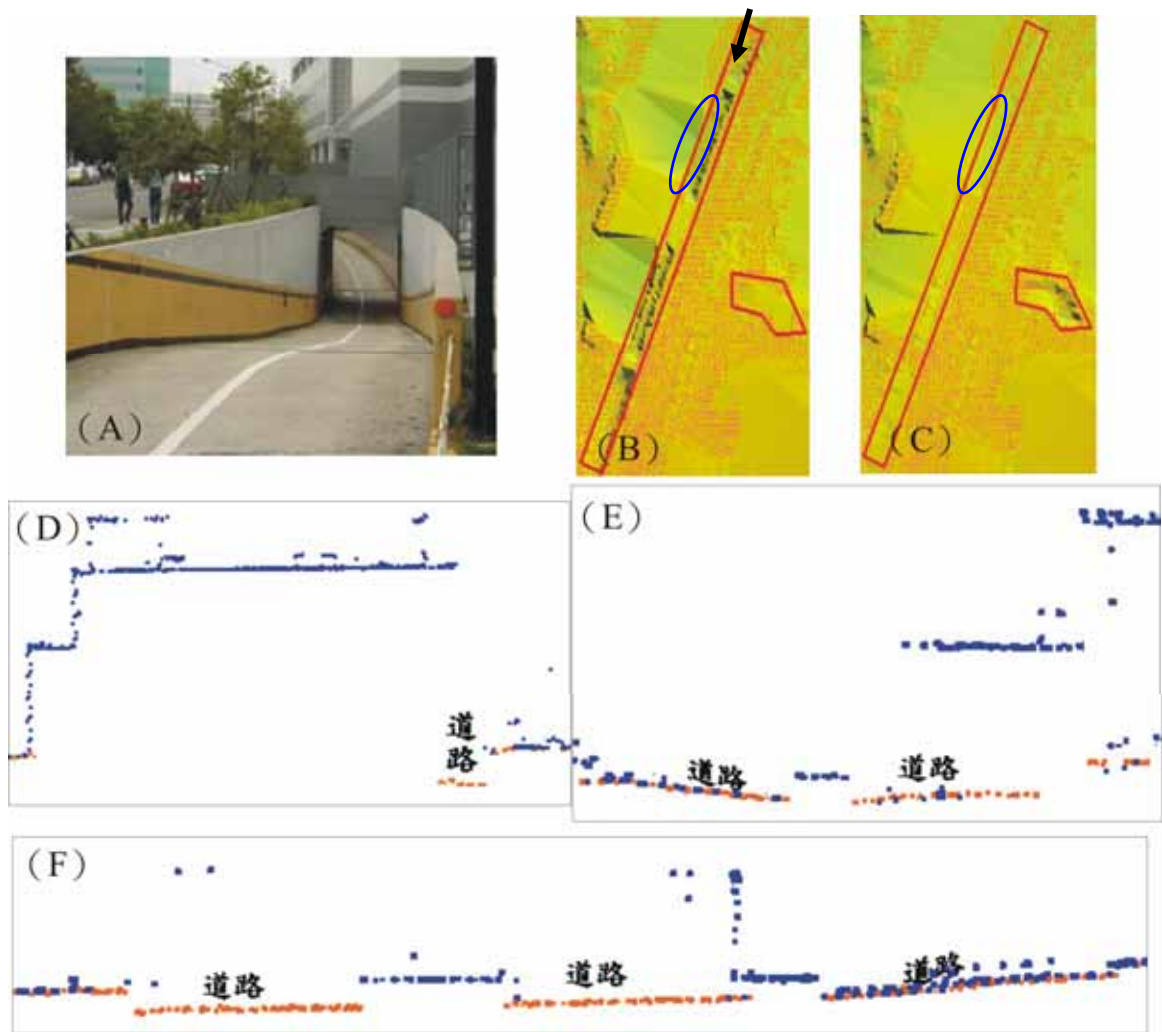


圖 4-40、交通大學環校道路特殊路段圖

圖 4-39 和圖 4-40 展示之地形類似，但因其他條件不同以致於兩環境中雷射點屬性不同。由此可知後續人工編修時，對於同樣的特殊地形並不能直接做相同的處理而要配合周圍環境才能決定屬性。若沒有適當的輔助判釋工具可能發生判斷有誤的狀況，有時需要進行地真調查以確定雷射點的屬性。但為避免及減少過濾錯誤發生，可事先將特殊之雷射點(如錯誤點)分類後再行地面點過濾或之後再以人工編修。

#### 4-4-3 人工編修發生的問題

人工編修的原則：以視覺上模型完整及平滑為目標。

在人工編修部分，因每位製圖人員的判斷可能有所差異，因此產出的結果變

數相當大。但地形平緩或地表無覆蓋(或覆蓋少)時，自動過濾的正確率相當高，人工編修影響甚微；地形起伏變化大或地表覆蓋為密遮蔽時，自動過濾的結果會產生錯誤，相對的此時產出的產品受人工編修影響大，即為人工編修錯誤易發生的地區。

雖然成果可能因人而異，但其中某些問題共同存在，如在地面點過少的山區，在不種點的情形下，無論如何編修都會因地面點過少無法建立出平滑的模型。而目前程式或軟體過濾地面點皆無法達到 100% 正確，仍需仰賴人工編修。

由實務經驗歸納出人工編修錯誤皆是發生在位置特殊之雷射點，其造成原因可分為兩項，如下表 4-22，其中資訊不足是指因地面點少，數量不足以建立完整模型或人工不易判斷該點屬性，此情形通常發生在密遮蔽地區；而訓練不足則指製圖人員經驗尚不足，無法判斷雷射點屬性，此原因受人員經驗影響，故不加以討論，以下僅對資訊不足之情況加以討論。

表 4-22、人工編修發生的問題及原因

	發生的問題	原因	結果
人工編修	1.特殊點分類	1. 資訊不足 2. 訓練不足	非地面點誤分為地面點 地面點誤分為非地面點

以交通大學校園為例，展示易發生人工編修錯誤之地區。下圖 4-41 中(A)是 Google Earth 提供之 QuickBird 衛星影像圖，顯示該區植物遮蔽嚴重，圖 4-41(B)(C)可知該處地形為道路及旁有斜坡。圖 4-41(D)中紅圈處的雷射點無法明確判斷是否為地面點，由其垂直剖面圖(圖 4-41(F))來看，判斷兩雷射點為地面點的原因為其高程與左邊地面點相近，判斷為非地面點原因為該處地形為斜坡，對斜坡而言，該兩點高程相對過高，又由圖 4-41(D)中發現，若其為地面點，會造成模型錯誤，故二雷射點難以判斷屬性。圖 4-41(E)(G)是該區域的垂直剖面圖可見密遮蔽處無任何地面點如圖中紅圈處。

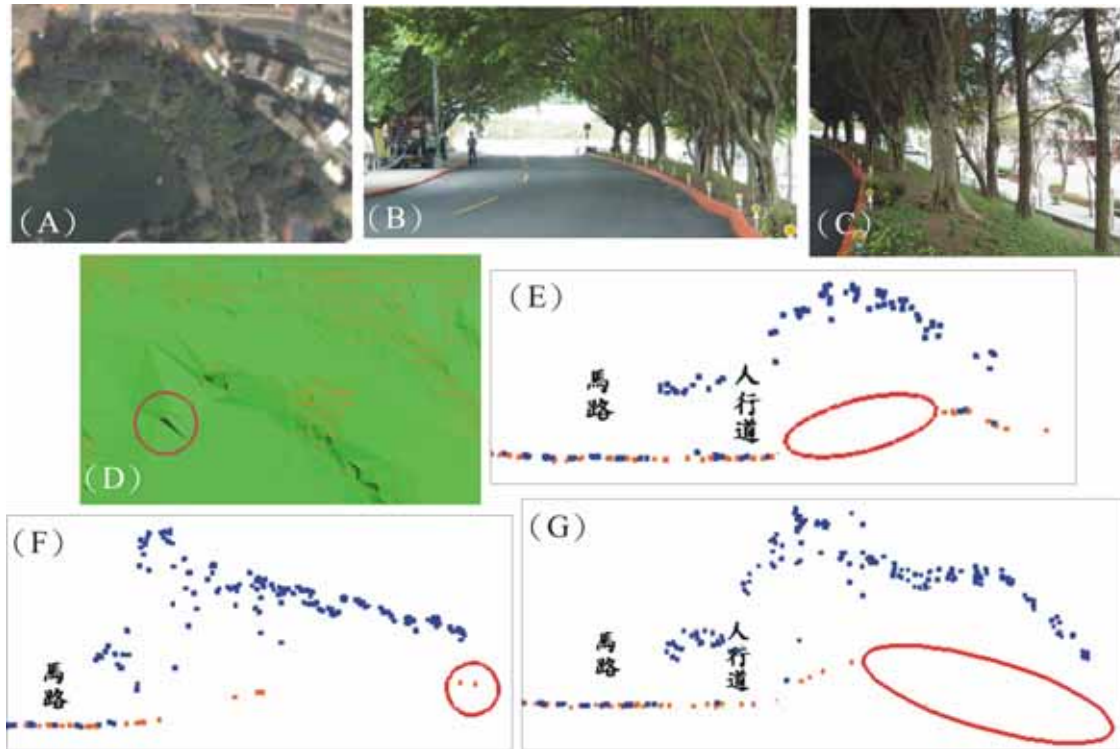


圖 4-41、缺乏地面點之密遮蔽地區(1)

在遮蔽嚴重的區域，地面點往往非常少，圖 4-42 為一例子。該區為長滿高雜草及樹木的山坡，見圖 4-42(A)(B)，其中有約 3 米寬的道路可達山坡上方平臺。根據經驗，在此類型密遮蔽地區，雷射光束很難到達真正的地表，大部分光束到達樹木或雜草後即發生反射。圖 4-42(C)模型紅圈處可見地表模型不平滑，圖 4-42(D)(E)(F)三垂直剖面圖可看出造成模型不平滑原因。圖 4-42(D)中斜坡上只有幾點地面點，而該雷射點雖分類為地面點，但不能確定是自真正地表反射之回波，而非來自雜草反射。圖 4-42(E)(F)展示山坡上的地面點皆是雷射光束到達道路上反射者(圖中顯示該段雷射點近乎平坦)，此可能為造成模型並不平滑之原因之一。

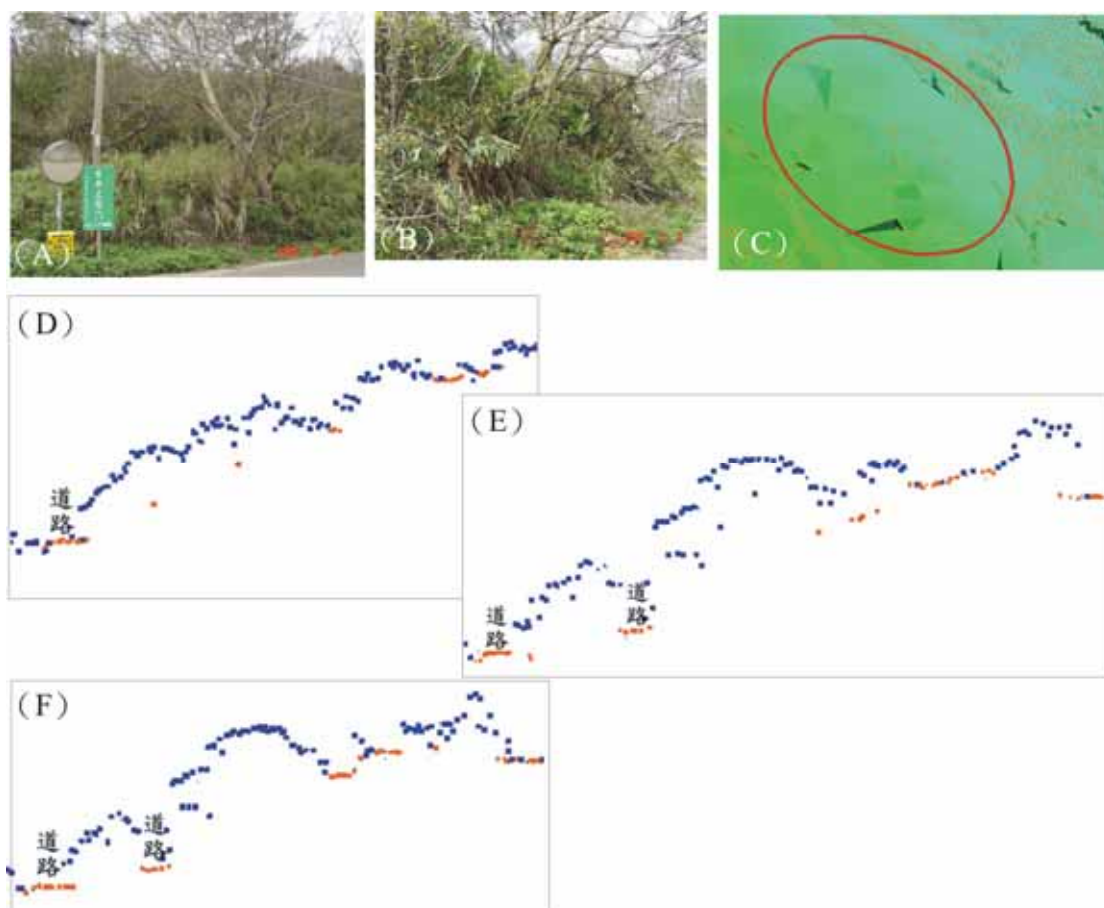


圖 4-42、缺乏地面點之密遮蔽地區(2)

圖 4-43 展示的是山區因地面點不足而造成模型不完整，圖中模型圖的右側邊緣都有空缺的現象，主要是因地面點點數不足，又位於模型邊緣，受到「邊緣效應」影響，亦有可能是造成此現象的部分原因。

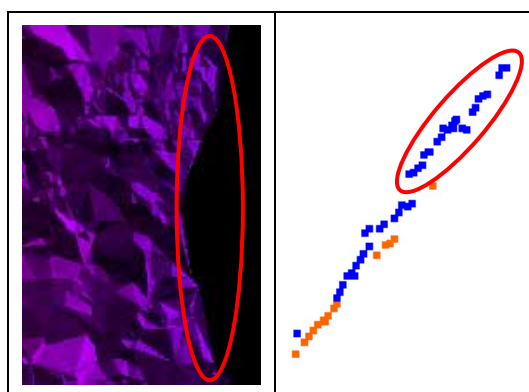


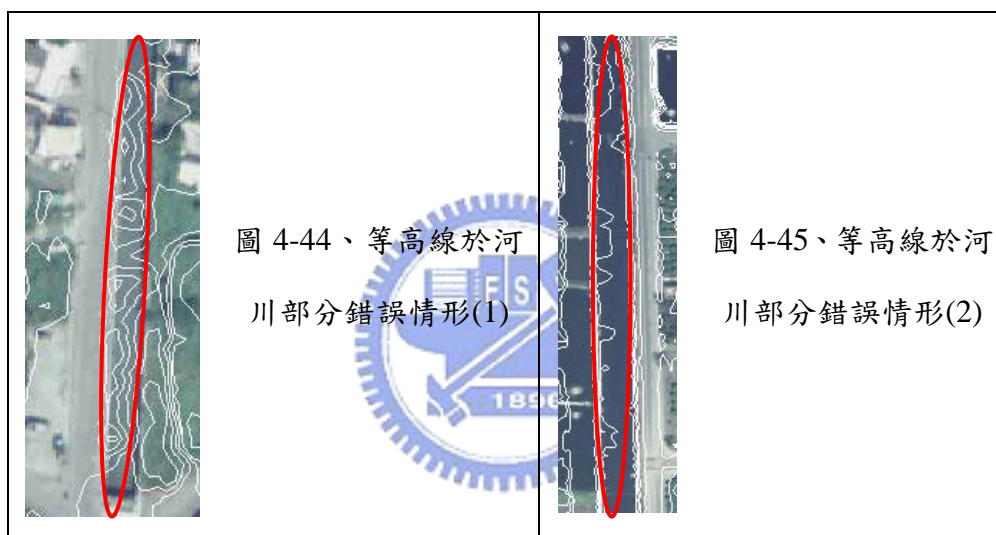
圖 4-43、地面點點數不足造成無法建立模型

#### 4-4-4 格網式 DEM 繪製等高線問題討論

以上所列舉及修正的錯誤都是以點雲的正確性為目標，而後進行格網式



DEM 的產製。產製格網式 DEM 之步驟亦會發生作業問題，由於目前生產格網式 DEM 之方式為組成 TIN 後，以線性內插方式得到每個格點坐標對應之高程值。利用 TIN 方式可獲得較貼近地表變化之高程，但若無斷線等地形特徵線的編輯，格網化之 DEM 受到內插影響會在高程急遽變化處(原本斷線所在位置)會出現密集的等高線，如圖 4-44 及圖 4-45 所示。圖 4-44 中河川中間出現封閉曲線的錯誤，是因河川與其兩旁道路間高程差以內插的方式變化造成。圖 4-45 的情形則好些，河面上無封閉曲線，只有兩側高程急遽變化，出現密集的等高線。本研究不另討論此現象及其解決方法，僅求點雲分類正確。



#### 4-5 DEM 與 DSM 合理性分析

檢核 DEM 與 DSM 的方式有許多，其中以實地勘查最為準確。但受限時間人力和經費問題，只能挑選少數地區進行實地外業抽驗。而內業進行檢核，可檢核較多圖幅，且節省人力，是為一重要方式。內業檢核時，判斷其合理性可引用最基本的概念進行：同一點位 DSM 高程會大於或等於 DEM 高程作為判斷標準。

以交通大學所在圖號為 9522\_1\_090 之圖幅為例進行比較。以空載光達精度 15 公分為門檻值，DSM 低於 DEM 超過 15 公分者列為問題點，整幅圖問題點分布如圖 4-46 所示。以下將討論問題點分布地形或情況。

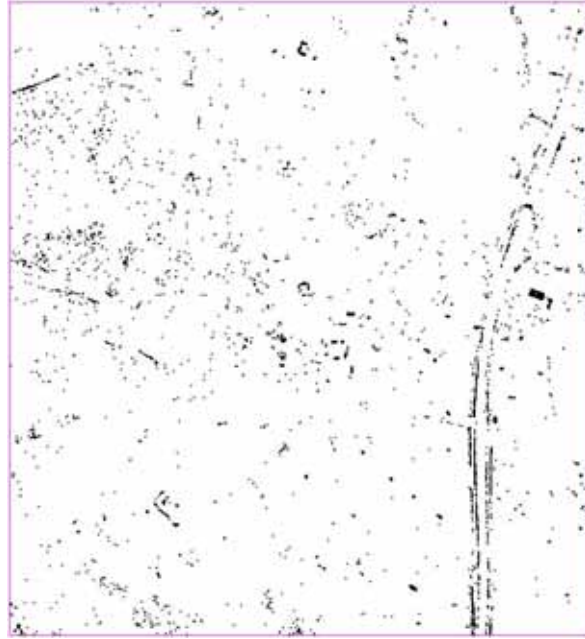


圖 4-46、9522\_1\_090 之問題點分布

1. 過濾地面點時，分類為低點之地區，如地下停車場出入口：在編修地面點時分類為低點的雷射點，在產製 DSM 時會歸為地表的一部分，造成 DSM 比 DEM 低的情形，高程差異量則依不同地點而不同，如圖 4-47。圖 4-47~圖 4-51 內綠色點為 DSM 點(格網點)；黑色點為 DEM 點(格網點)。

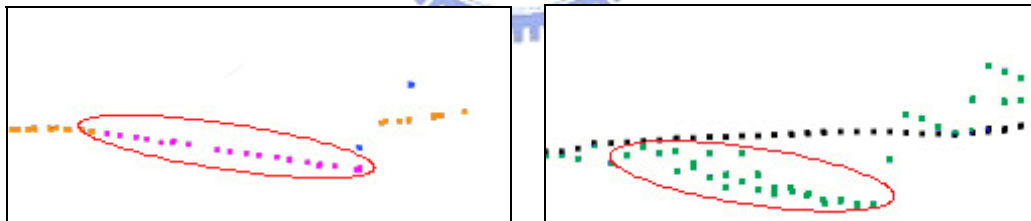


圖 4-47、低點造成 DSM 高程低於 DEM 情形示意圖

2. 地面點數量少之地區：在地表覆蓋為密遮蔽的地區，由於穿透率相當低造成地面點數量少，或植物頂端與地面高程相近，自動過濾或人工不易分辨，影響地面點過濾而產生錯誤，如圖 4-48。

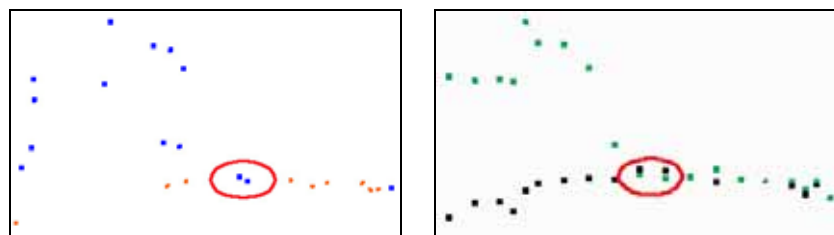


圖 4-48、地面點數量少造成 DSM 高程低於 DEM 情形示意圖



3. 點雲密度低之地區：樹蔭下或水溝等點雲稀疏的地區，由於雷射點數量少，製作格網化 DEM 進行內插時可能會造成與實際情況有出入之錯誤，圖例如圖 4-49 和圖 4-50。

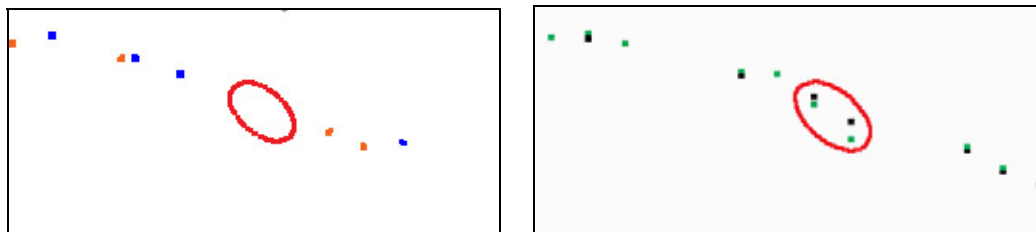


圖 4-49、點雲密度低造成 DSM 高程低於 DEM 情形示意圖(1)

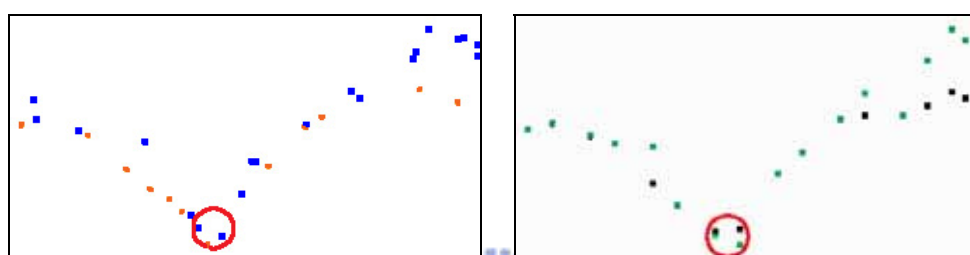


圖 4-50、點雲密度低造成 DSM 高程低於 DEM 情形示意圖(2)

4. 人工編修錯誤之地區：屬性編修錯誤(地面點分類為非地面點及非地面點分類為地面點)有可能造成 DEM 及 DSM 有誤，使 DSM 高程小於 DEM，圖例如圖 4-51。

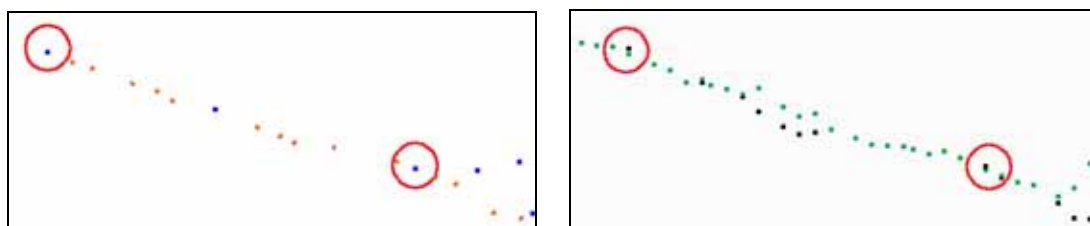


圖 4-51、人工編修錯誤造成 DSM 高程低於 DEM 情況示意圖

#### 4-6 空載光達資料高程精度檢核

空載光達獲得之點雲資料，高程分為兩系統：橢球高與正高，故檢核亦分為兩部分。橢球高部分直接以檢核資料檢核；正高部分利用現有大地起伏模式進行化算後，再行比較。檢核資料為工研院在高屏地區以 RTK 施測的檢核路線共 241 個檢核點，每一檢核點有橢球高及正高資料。橢球高是以 RTK 施測得之；正高

部分依點位類別分為兩種方式得到，已知水準點已有正高值，一般點位則是經由 Hw2001 大地起伏模式化算得到正高值。

#### 4-6-1 大地起伏介紹

正高(H)是地面上一點沿著與等位面垂直的重力方向到大地水準面的距離。橢球高(h)是地面上一點沿著法線方向到橢球面的距離。同一地面點的橢球高和正高間的差值即為大地起伏(N)，如圖 4-52 所示。將橢球高轉換為正高的過程稱為正高化算。全球定位系統所提供之三維坐標，其高程基本上係以橢球面起算的橢球高。如進行差分解算，其高程起算點可能受參考站之高程值性質影響，但是所得高差仍為幾何高。因一般民生應用所需的高程資料是以大地水準面起算的正高，故需進行正高化算。

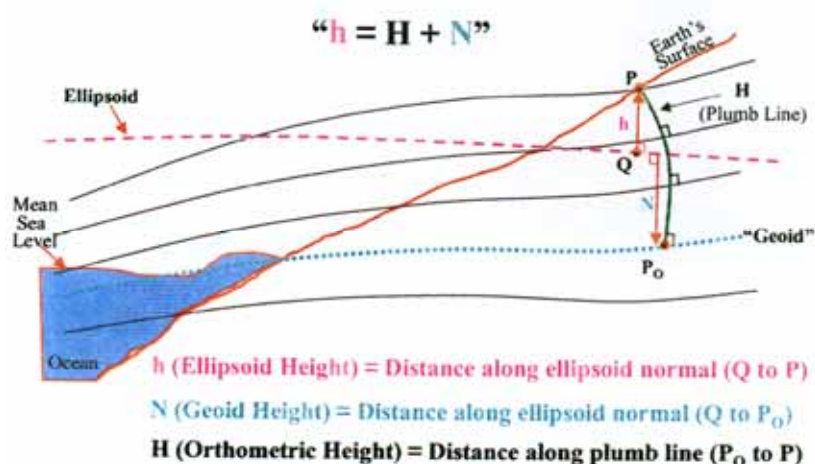


圖 4-52、正高、橢球高與大地起伏關係圖(Maune, 2001)

#### 4-6-2 現有大地起伏模式

目前台灣地區大地起伏模式有黃金維(2001、2003、2005)、陳國華(2004)和呂誌強(2004)所提供之五種不同數值大地起伏模式；其中黃金維(2001)和陳國華(2004)模式解析度為 30 秒，黃金維(2003)、呂誌強(2004)有 3 秒和 30 秒兩種不同解析度，黃金維(2005)則提供 3 秒解析度。以上各模式之坐標系統均為 TWD97 坐標系統，並提供大地起伏內插程式，將格點坐標代入，即可獲得該點之大地起伏值。五者間因方法、使用之 DEM 解析度和資料不同，計算出的大地起伏值亦

不相同。

五種模式簡述如下：

- 黃金維(2001, 2003)

使用去除-回復技術(Remove-Restore Technique)配合最小二乘配置 (Least Square Collocation, LSC) 法，並結合全球大地位模式 EGM96，利用美國國防製圖局編修之全球數值圖圖庫，由其中取數化等高線資料所製成台灣地區 30 秒格網數值地形資料與台灣地區六組重力觀測資料，考慮剩餘地形模型(Residual Terrain Model, RTM)理論計算台灣地區 3"x 3"解析度之大地起伏模式，其精度較 30"x 30"大地起伏模式為優(黃金維，2003)。以 Hw2003 代表此模式。

另黃金維(2001)中之 DEM 採用 30 秒解析度的格網資料，且重力資料未包含一等一級重力資料，故精度理應比 Hw2003 為差。

- 呂誌強(2004)

該研究使用方法和 Hw2003 相同，使用之 DEM 資料為農委會生產之台灣地區數值地形資料、交通大學所處理之衛星測高資料、與台灣地區六組重力觀測資料。除了計算出大地起伏模式，另外用水準點觀測值修正大地起伏面。該研究結論：較高解析度之 DEM 格網對大地起伏模式之精度有提升效果，在平坦地區改善程度有限，在地形起伏劇烈的山區則有較顯著的改善(呂誌強，2004)。以 Lu2004 代表此模式：Lu2004-3sec 表示未經水準點修正值；Lu2004-3sec-v2 表示經過水準點修正值。

- 陳國華(2004)

利用 TWVD2001 水準與 GPS 網的平差結果，以 LSC 技術結合 1920 個一等水準點的橢球高、正高與重力法大地起伏等資料進行高程控制網整體平差計算，使用兩種不同的平差模式：一是帶有附加參數的「高程值」平差模式；一是為帶有附加參數的「高程差」平差模式。結果顯示前者較重力法大地起伏改善 74%；

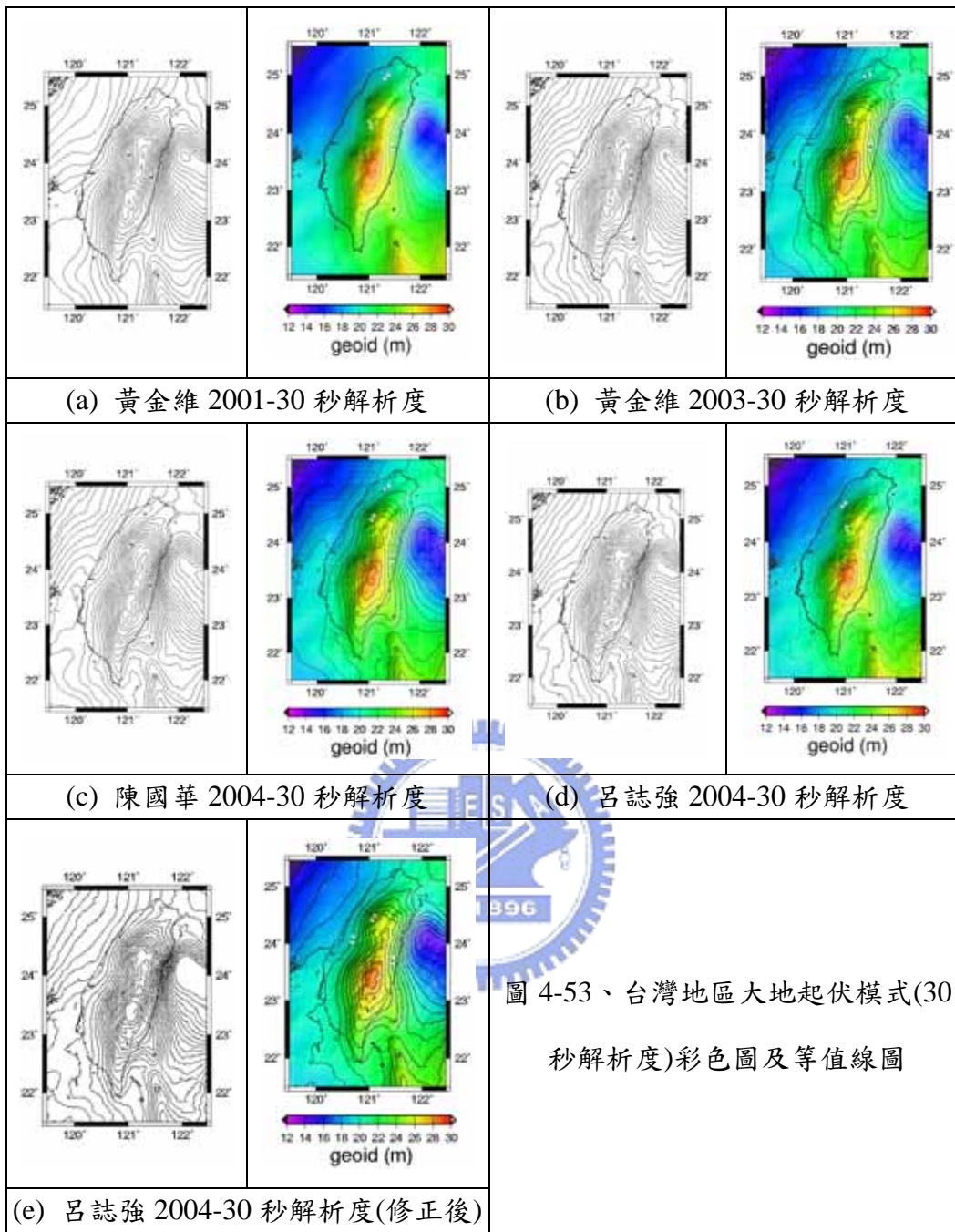
後者則改善 69%(陳國華，2004)。以 KH2004 代表此模式。

- 黃金維(2005)

使用最小二乘配置法以內政部原有重力資料及內政部委託國立交通大學執行之「空載重力測量工作」測算成果整合後之空載重力、船測重力及衛星測高資料，利用最佳化的大地位模式如 EGM96 或由 GRACE 衛星運動所求得之大地位模式 GGM01S 計算求得計算大地起伏與垂線偏差，並利用一等一級水準點修正大地起伏值。提供台灣地區 3"x 3"解析度之大地起伏模式。本研究所使用之版本為已修正者，以 Hw2005 代表此模式。

30 秒大地起伏模式彩色圖及等值圖展示如圖 4-53；圖 4-54 則展示 3 秒大地起伏模式彩色圖及等值圖。







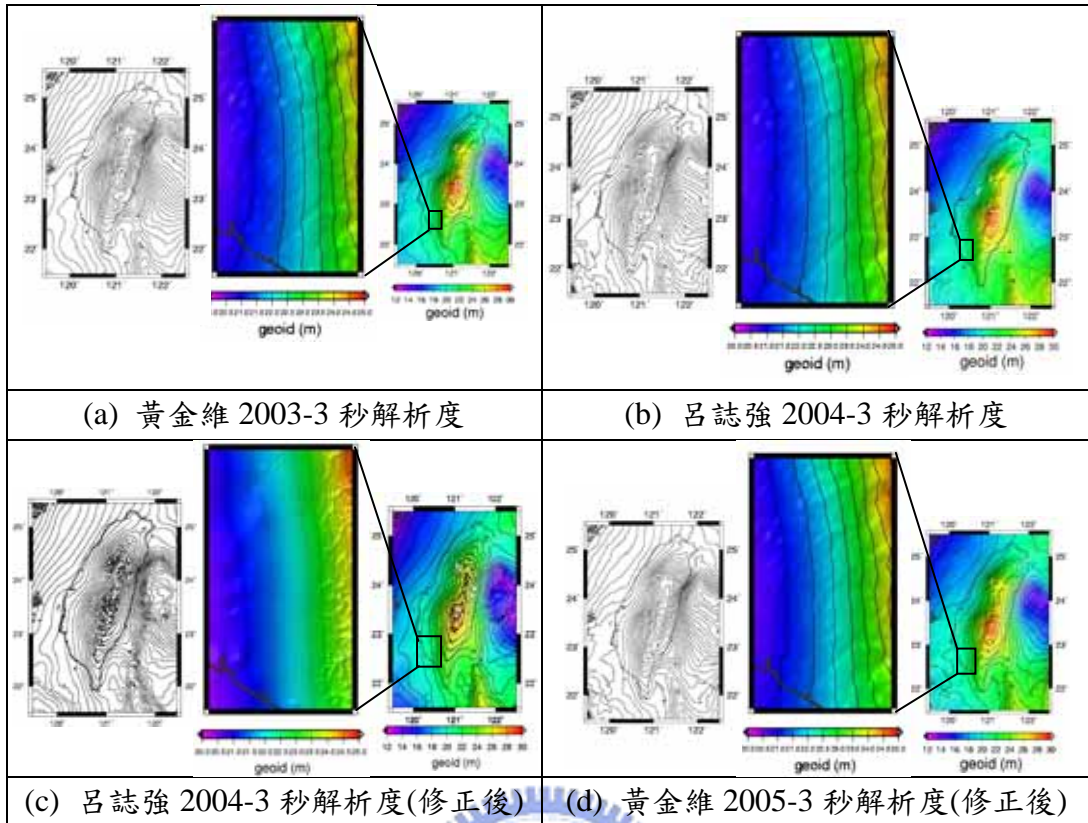


圖 4-54、台灣地區大地起伏模式(3 秒解析度)彩色圖及等值線圖

#### 4-6-3 大地起伏模式比較

30 秒解析度大地起伏模式在高屏地區有 3010 點；3 秒解析度模式則為 290490 點。下列圖表為各模式在高屏地區的差異量並將兩種不同解析度分別比較，表 4-23 和表 4-24 分別是 30 秒解析度及 3 秒解析度之比較。表 4-24 是以 Hw2005 為基準，其他三者對應之差值。其中可發現 Lu2004-3sec-v2 與 Hw2005 因都經過水準路線修正兩者最為接近。另外以彩色圖表示 3 秒模式之差異，如圖 4-55，可發現不論是那一個模式都與 Hw2005 模式在山區有明顯細微的差異。

表 4-23、大地起伏模式(30 秒解析度)較差與均方根比較

標準偏差比較表(單位：公尺)

	Hw2001-30sec	Hw2003-30sec	KH2004-30sec	Lu2004-30sec	Lu2004-30sec-v2
Hw2001-30sec	0	0.0630	0.126	0.101	0.135
Hw2003-30sec	0.063	0	0.147	0.129	0.173
KH2004-30sec	0.126	0.147	0	0.130	0.099
Lu2004-30sec	0.101	0.129	0.13	0	0.099
Lu2004-30sec -v2	0.135	0.173	0.099	0.099	0

均方根比較表(單位：公尺)

	Hw2001-30sec	Hw2003-30sec	KH2004-30sec	Lu2004-30sec	Lu2004-30sec -v2
Hw2001-30sec	0	0.156	0.421	0.456	0.427
Hw2003-30sec	0.156	0	0.298	0.329	0.314
KH2004-30sec	0.421	0.298	0	0.137	0.099
Lu2004-30sec	0.456	0.329	0.137	0	0.107
Lu2004-30sec -v2	0.427	0.314	0.099	0.107	0

表 4-24、大地起伏模式(3 秒解析度)比較(以 Hw2005 為比較對象)(單位：公尺)

	Hw2003-3sec	Lu2004-3sec	Lu2004-3sec-v2
最大值	0.4575	0.4627	0.3889
最小值	-0.4735	-0.4112	-0.3126
平均值	-0.06778	-0.0056	0.0316
標準差	0.1396	0.1379	0.0968
均方根	0.2087	0.1952	0.1405

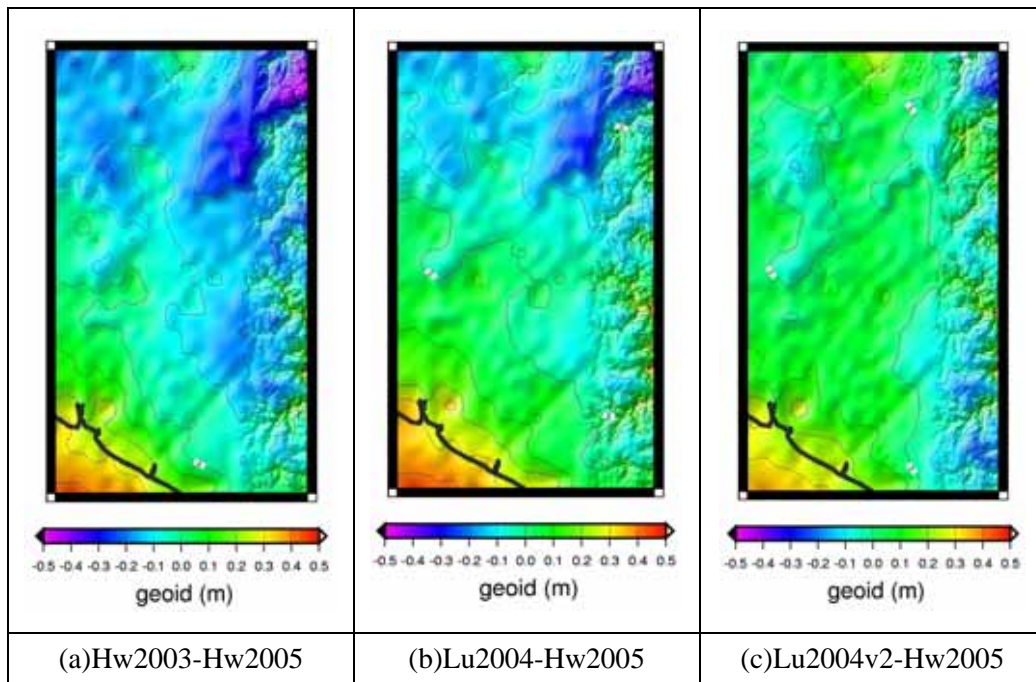


圖 4-55、3 秒解析度之大地起伏模式差異彩色圖

#### 4-6-4 空載光達資料高程精度分析

以經人工編修後之地面點(組成 TIN 格式 DEM)及所有地表點(組成 TIN 格式 DSM)分別比較其橢球高及正高系統高程之精度。DEM 部分可能會受到施測點位不理想造成錯誤，如點位在橋樑上或建物上施測，故比較前將位於橋樑上或建物上之檢核點剔除不採用；DSM 部分則不受影響。比較方法：以檢核路線為中心線向外取約 100 公尺的範圍，分別讀取範圍內地面點和所有表面點資料，以該檢核點周圍雷射點內插出和檢核點(E, N)相同坐標之高程值，輸出比較結果。

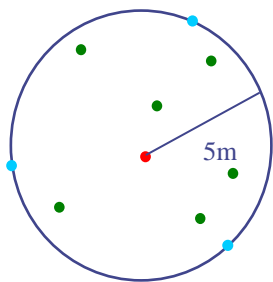


圖 4-56、Max Triangle 示意圖

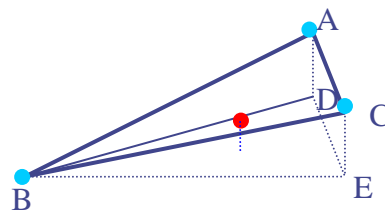


圖 4-57、Max Slope 示意圖

本研究利用 TerraScan 軟體進行比較，比較時可依要求設定參數，本實驗採用之參數為 Max triangle：5 m；Max slope：30 degrees；Z tolerance：0.15 m，之後以 5-30-0.15 表示此組參數。Max triangle 為以檢核點為中心的搜尋半徑，示意

圖見圖 4-56，圖中紅點為檢核點、綠點為在搜尋範圍內的點、藍色為剛好位於搜尋範圍內組成的最大 TIN 三角形；Max slope 為檢核點至包含三角形頂點間之最大坡度值，凡大於此值，檢核點與模型內插點間高程差值不予計算，示意圖如圖 4-57，上述參數值設定是因要求檢核點周圍 5 公尺內需保持平坦；Z tolerance 為正常雷射點高程值之精度，此值使用於前項坡度之計算，以避免小面積三角形造成大坡度，而超越 Max slope。

檢核路線共有點位 241 點，位於橋上而不使用的檢核點有 45 點，如圖 4-58 所示。表 4-25 為橢球高部分參數為 5-30-0.15 之比較成果。根據比較結果發現差值過大的點通常位於被遮蔽處，圖 4-59 為 DEM 部分差值最大(-0.793 公尺)的點，除此點外，其他檢核點與周圍地面點差值，值域在-0.438~0.350 公尺間。其中少數點位差值較大，原因可能為檢核點位置靠近道路邊緣等不理想之地點造成。DSM 部分差值過大者如圖 4-60 所示，位於被遮蔽處，亦有可能在道路邊緣造成差值過大，其他檢核點與周圍雷射點差值皆在-0.277~0.427 公尺內。表 4-25 中，DEM 部分有 2 點條件不合(坡度原因)，將參數改為 5-41-0.3，則無此情況發生；DSM 部分，改變參數為 25-65-0.5 後，條件不合點數(坡度原因)亦由 36 點降為 21 點。但條件不合點數(範圍原因)，兩者參數改變前後皆為 1 點，但由於角度(Max Slope)已相當大，故不再調整參數。改變參數後之比較結果見表 4-26。

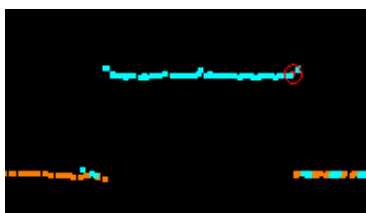


圖 4-58、位於橋上不使用之檢核點

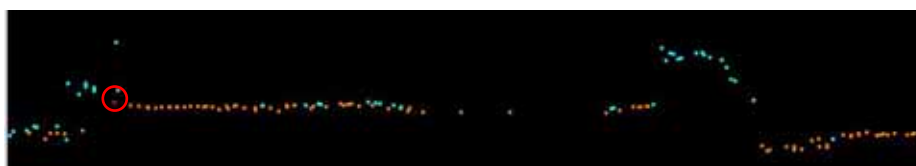


圖 4-59、與周圍地面點高程內插值相差-0.793 公尺之檢核點

表 4-25、橢球高部分以參數 5-30-0.15 比較成果(單位：公尺)

	DEM	DSM
最大值	0.335	0.901
最小值	-0.793	-12.797
平均值	-0.042	0.070
標準差	0.172	1.000
均方根	0.177	1.000
使用點數	196	241
條件不合點數	slope : 2	slope : 36

表 4-26、橢球高部分以參數 DEM : 5-41-0.3 ; DSM : 25-65-0.5 比較成果(單位：公尺)

	DEM	DSM
最大值	0.335	1.514
最小值	-0.793	-12.797
平均值	-0.042	-0.045
標準差	0.173	0.981
均方根	0.177	0.980
使用點數	196	241
條件不合點數	0	slope : 21

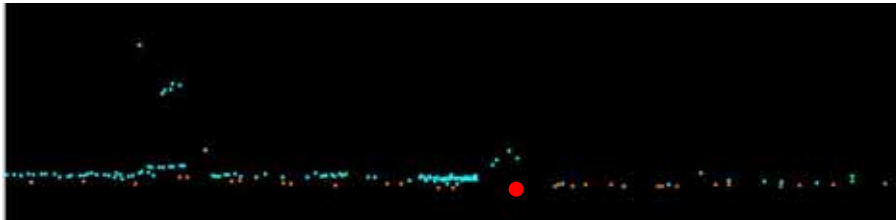


圖 4-60、與周圍雷射點內插值相差 0.901 公尺之檢核點

正高部分之比較，利用不同大地起伏模式進行正高化算後之正高值和檢核點之正高值比較見表 4-27。

表 4-27、利用不同大地起伏模式進行正高化算成果

單位： 公尺	DEM				DSM			
	Hw2003- 3sec	Lu2004- 3sec	Lu2004- 3sec-v2	Hw2005- 3sec	Hw2003- 3sec	Lu2004-3 sec	Lu2004-3 sec-v2	Hw2005- 3sec
最大值	0.435	0.365	0.338	0.378	0.916	0.856	0.906	0.936
最小值	-0.773	-0.823	-0.783	-0.753	-0.457	-0.507	-0.477	-0.437
平均值	0.079	0.009	-0.027	0.014	0.144	0.074	0.037	0.079
標準差	0.199	0.194	0.175	0.174	0.206	0.200	0.179	0.177
均方根	0.214	0.193	0.176	0.174	0.251	0.213	0.182	0.194
條件不合 點數	slope : 2	slope : 2	slope : 2	slope:2	slope : 14	slope : 14	slope : 14	slope : 14



#### 4-6-5 小結

檢核點橢球高為實測，正高則為以區域大地起伏模式內插所得，故以橢球高進行比較較有意義。橢球高 DEM 部分，表 4-25 顯示標準差約 17 公分。此與一般認為之空載光達精度相符。

正高部分的 DEM 部分見表 4-27，四個模式值域略有差異。以均方根而言，除 Hw2003 約為 21 公分，其餘皆小於 20 公分，尤以 Hw2005 值最小。因 DEM 限制為平坦地面點，而 DSM 部分可能因距離最近的雷射點與檢核點間的角度過大，不符合所要求之角度(Max slope)條件，故 DEM 比 DSM 不符合條件的點數少。

表 4-25 與表 4-27 中 DEM 部分，就標準差和均方根而言，以經過水準點修正之模式表現較佳，尤以 Hw2005 與化算前之值無顯著差異，但與 Lu2004-3sec-v2 差異不大，可能因為使用之檢核路線無經過山區。



## 第五章 結論

本研究整理現有空載光達產製 DEM 流程，設計出一般作業所需之查核時機及項目，其中包含參考數值，可供實務作業參考。而查核方式與項目，可隨應用目的適當調整。作業流程中規範不同或內業處理的嚴謹性不同皆會影響產品等級，故使用者可視使用目的選擇不同規格產品。

影響產品品質的因素有許多，研究中針對幾項重要的影響因素進行探討，成果可分為以下幾部分說明：

1. 點雲密度是為原始資料獲取之品質指標；穿透率則為產品產出之品質指標。點雲密度過低會造成地面點過濾錯誤，甚至影響 DEM 合理性。本研究嘗試以格網方式及 TIN 三角形個數計算穿透率，對於地表覆蓋之趨勢相近。其中前者計算較易，但無法表示雷射點分布；而後者計算較複雜，但較能呈現雷射點分布不均之現象。此一部分未來可進一步探討。
2. 目前點雲分類仍無法完全自動化，需仰賴適當之人工編修改善品質，但人工編修改善效果有限，故未來可發展程式用以自動偵測人工編修誤漏地點，之後再由人工介入修正，應可提高產品正確率及處理效率。
3. 以地面檢核點檢核空載光達資料，就目前數據顯示點雲資料處理過程中應更加嚴謹以提高分類之正確性。而施測欲使用之地面檢核點時，需注意引測時精度和 GPS 解算成果，減少因地面檢核點錯誤影響檢核成果的可能性。
4. 理論上經過正高化算之 DEM 精度應低於橢球高之 DEM，但實驗結果顯示無明顯差異，可能是實驗區位於平坦地區，無經過大地起伏變化大之山區，在實務作業時，仍須留意此項化算對品質之影響。正高化算使用之大地起伏模式建議使用最新者，若化算成果不理想，必要時可能需要局部加測地面點位之正高值及橢球高值以修正大地起伏模式。

## 參考文獻

- 工研院，2005。應用空載光達生產數值地形模型之製作規範及標準作業程序(草案)，內政部主辦，工業技術研究院能源與環境研究所執行。
- 工研院，2006。辦理 LiDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案總報告初稿，內政部主辦，工業技術研究院能源與環境研究所執行。
- 工研院，2006。辦理 LiDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案~航線掃瞄 GPS 數據與 PDOP 圖形，內政部主辦，工業技術研究院能源與環境研究所執行。
- 內政部，2004。高精度及高解析度數值地形模型測製規範草案，內政部。
- 內政部，2004。內政部訂購(製)辦理「LiDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作」案合約書副本，內政部。
- 呂誌強，2004。DEM 解析度對大地起伏模式之影響，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 史天元、彭淼祥，2003。空載雷射掃瞄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，247-256。
- 史天元、彭淼祥、吳水吉、吳麗娟，2005。農委會空載光達台灣地區測試，航測及遙測學刊，10(1):103-128。
- 史天元、何心瑜、陳大科，2005。空載光達正高化算探討：以高屏地區為例，第二十四屆測量學術及應用研討會，465-472。
- 史天元、何心瑜，2005。數值高程模型及數值地表模型生產品質研究，內政部『辦理 LiDAR 高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案成果發表暨應用研討會』，129-142。
- 何心瑜、史天元、徐偉城、陳大科，2005。空載光達點雲密度探討，內政部『辦

- 理 LiDAR 高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案  
成果發表暨應用研討會』，151-158。
- 林承毅，2005。空載雷射掃瞄資料產生數值高程模型之研究，國立高雄應用科技  
大學土木與防災科技研究所碩士論文。
- 周富晨，2004。適應性點雲過濾演算法於空載光達資料產生數值高程模型之研  
究，國立成功大學測量與空間資訊研究所論文。
- 洪偉嘉、蕭國鑫、陳大科、劉進金、王成機、陳思仁，2005。精密星曆與地面多  
基站 GPS 資料於空載光達定軌計算之影響，第二十四屆測量學術及應用研  
討會，177-184。
- 陳大科、蕭國鑫、石佳惠、王成機，2005。空載光達資料航帶平差之精度探討，  
第二十四屆測量學術及應用研討會，123-131。
- 陳國華，2004。整合 TWVD2001 水準及 GPS 資料改進台灣區域性大地水準面模  
式以應用於 GPS 高程測量，國立成功大學測量與空間資訊學系博士論文。
- 陳威誠，2004。由光達覆蓋模型萃取數值高程模型之研究，國立交通大學土木工  
程學系碩士論文。
- 彭森祥，2005。空載光達生產數值高程模型及其精度評估，國立交通大學土木工  
程學系博士論文初稿。
- 黃中偉，2005。個人聯絡。
- 黃金維，2003。台灣地區大地起伏模式精度評估期末報告書，內政部。
- 黃金維、陳春盛、楊名，2004。空載重力測量工作服務建議書，內政部。
- ANSI, 2000. American National Standard for Safe Use of Lasers, ANSI Z136.1-2000,  
American National Standard Institutes.
- Ahokas, E., H. Kaartinen, J. Hyypä, 2003. A Quality Assessment of Airborne Laser  
Scanner Data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote  
Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany, XXXIV-3/W13.
- Ahokas, E., X. Yu, H. Kaartinen, J. Hyypä, S. Kaasalainen, L. Matikainen, E.

Honkavaara, H. Hyypä, P. Rönholm, A. Soininen, 2005. Quality of Laser Scanning. Proceedings 2005 of EARSeL workshop 2005. URL :

<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/aktivitaeten/EARSeL-workshop2005.htm>

(last date accessed : 09 May 2006)

Al-Bayari, O. A., N. N. Al-Hanbali, M. Barbarella, A. Nashwan. Quality Assessment of DEM and Orthophoto Generation by Airborne Laser Scanning System Using Automated Digital Photogrammetry. Commission III, PCV Symposium 2002.

ASPRS, 2005. Common Lidar Data Exchange Format - .LAS Industry Initiative.

URL : [http://www.asprs.org/resources/standards/lidar\\_format.html](http://www.asprs.org/resources/standards/lidar_format.html)

(last date accessed : 23 May 2006)

Axelsson, P., 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications.

ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(1999), 138-147.

Axelsson, P., 2000. DEM Generation from laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. IAPRS, Vol. 33 part B4/1, 110-117.

Axelsson, P., 2001. Ground estimation of laser data using adaptive TIN-Models.

Proceedings of OEEPE workshop in airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models 1-3 March 2001. Official Publication No. 40. CD-ROM. 185-208.

Burman, H., 2002. Laser Strip Adjustment for Data Calibration and Verification. The

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Commission III, Symposium 2002, Graz, Austria, A67-72.

EPA, 2003. NCLD 2001 Land Cover Class Definitions, 2003 Draft (Environmental Protection Agency), URL :

<http://www.epa.gov/mrlc/definitions.html> (last date accessed : 08 Nov 2005)

Flood, M., 2002. Product Definitions and Guidelines for Use in Specifying Lidar



- Deliverables. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(12):1-7.
- Flood, M., 2004. *ASPRS Guidelines : Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data*. 1, ASPRS Lidar Committee (PAD).
- ISO (International Organization for Standardization), 2000, *ISO9000:2000 Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*. Committee: ISO-TC176, Genva.
- Kraus, K., N. Pfeifer, 1998. Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53(1998), 193-203.
- Leica, 2003. *ALS50 Mission Planning and Operation powerpoint*, Leica Geosystems.
- Leica, 2004. *ALS50 Airborne Laser Scanner user guide*, Leica Geosystems.
- Lindenberger, J., 1993. *Laser-Profilmessungen zur topographischen Gelandaufnahme*. PhD dissertation, Institute for Photogrammetry, Stuttgart University. Deutsche Geodatische Kommission, Reihe C, No. 400, Munich.
- Lohmann, Peter, Andreas Koch, 1999. Quality Assessment of Laser Scanner Data. *Sensors and Mapping from Space*. ISPRS working Groups, I/1, I/3 and IV/4, 1999.
- Luethy, J., H. Ingensand, 2004. How to Evaluate the Quality of Airborne Laser Scanning Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI-8/W2, 313-317.
- Manandhar, D., Kiyoshi Honda, Shunji Murai, 1999. Accuracy Assessment and Improvement for Level Survey using Real Time Kinematic (RTK) GPS. *Proc., 1999 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp., Vol. 2*, IEEE, Piscataway, N. J., 882-884.
- Maune, David F., 2001. *Digital Elevation Model Technologies and Application The DEM Users Manual*. ASPRS.

NGS, 2003. Light Detection And Ranging (LIDAR) Requirements, Scope of Work for Shoreline Mapping under the NOAA Aeronautical Survey Program, National Geodetic Survey, U.S.A.

NGS, 2005. Light Detection And Ranging (LIDAR) Requirements, Scope of Work for Airport Surveying under the NOAA Aeronautical Survey Program, National Geodetic Survey, U.S.A.

Optech, 2004. ALTM 3070 Brochure.URL :

<http://www.optech.on.ca>(last date accessed : 03 Oct 2005)

Renslow, M. 2001. Development of a Bare Ground DEM and Canopy Layer in NW Forestlands Using High Performance LIDAR. ESRI International User Conference.

RIEGL, 2006. Litemapper 5600 – A waveform – Digitizing LIDAR Terrain and Vegetation mapping System. URL :

[http://www.riegl.com/airborne\\_scanners/airborne\\_scanners\\_literature\\_/airborne\\_literature\\_all\\_.htm](http://www.riegl.com/airborne_scanners/airborne_scanners_literature_/airborne_literature_all_.htm)(last date accessed : 09 May 2006)

Sithole, G., George Vosselman, 2003. Report : ISPRS Comparison of Filters, Commission III, Working Group 3.

Soininen, 2004.TerraScan training powerpoint, Terrasolid.

Soininen, 2004.Ground classification powerpoint, Terrasolid.

Terrasolid, 2004a. TerraScan User Guide (18.11.2004), Terrasolid.

Terrasolid, 2004b. TerraMatch User Guide, Terrasolid.

Vosselman, G., 2000. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data. IAPRS, Vol. XXXIII, part B3, Amsterdam, The Netherland, 935-942.

Wessel, P. And W. H. F. Smith, 1999. The Generic Mapping Tools(GMT) Technical Reference and Cookbook, Univ. of Hawaii, U.S.A.

Wikipedia, 2005a. Britten-Norman Islander,

url: [http://en.wikipedia.org/wiki/Britten-Norman\\_Islander](http://en.wikipedia.org/wiki/Britten-Norman_Islander)

Wikipedia, 2005b. Beechcraft King Air,

url: [http://en.wikipedia.org/wiki/King\\_Air](http://en.wikipedia.org/wiki/King_Air)



## 作者簡歷

姓名：何心瑜

籍貫：台灣省台南市

生日：民國 71 年 7 月 5 日

學歷：國立台南女中畢業

國立成功大學測量與空間資訊學系畢業

國立交通大學土木工程學系測量與空間資訊組碩士班肄業

著作：

史天元、何心瑜，2005。二維空間一維編碼法之評估，地籍測量，第廿四卷第 3 期，46-59。

史天元、何心瑜、陳大科，2005。空載光達正高化算探討：以高屏地區為例，第二十四屆測量學術及應用研討會，465-472。

魏世青、許峻嘉、何心瑜、史天元，2005。GIS 應用於頭前溪砂石盜採之監測與分析，台灣地理資訊學會年會暨學術研討會論文摘要集，136。

史天元、何心瑜，2005。數值高程模型及數值地表模型生產品質研究，內政部『辦理 LiDAR 高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案成果發表暨應用研討會』，129-142。

何心瑜、史天元、徐偉城、陳大科，2005。空載光達點雲密度探討，內政部『辦理 LiDAR 高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案成果發表暨應用研討會』，151-158。