

國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文

由光達覆蓋模型萃取數值高程模型之研究

Extracting Digital Elevation Model from LiDAR DSM



研究生：陳威誠

指導教授：史天元 博士

中華民國九十三年六月

# 由光達覆蓋模型萃取數值高程模型之研究

Extracting Digital Elevation Model from LiDAR DSM

研究生：陳威誠

Student: Wei-Cheng Chen

指導教授：史天元 博士

Advisor: Dr. Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系



A Thesis

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 2004  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

# 由光達覆蓋模型萃取數值高程模型之研究

學生：陳威誠

指導老師：史天元 博士

國立交通大學土木工程學系

## 中文摘要

空載光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)量測技術應用快速取樣的空載光達系統進行三維空間量測，該系統結合衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS)、慣性量測系統(Inertial Measurement Unit, IMU)以及雷射掃描儀 (Laser Scanning System) 等三個子系統，向地面進行紅外光雷射點取樣；再經由電腦計算處理後獲得地面掃描點之 X, Y, Z 座標。光達系統接收之反射點的資料並未區分是否為地面點或非地面點，因此，欲建置數值高程模型，需先將非地面點資料濾除，再由濾除後的資料進行數值高程模型的建置。

本研究主要目的是在於利用光達兩次回訊數據，以雲線內插演算法濾除非地面點資料，並以其後獲取之地面點資料建置數值高程模型。其演算法濾除成果與檢核資料比照後，計算地面點分類精度達到 82%~99%間，但未成功率由 1%~44%不等；為瞭解濾除成果之正確性與可用性，分別採用數理統計與視覺觀察評估其成果並歸納其錯誤點與未分類成功地面點分布與特徵，結果發現大多錯誤點分布於高程差異不明顯之矮小植被或具有複雜構造的建物，可提供後續人工濾除作業參考，本研究最後乃據而研擬一個光達濾除之作業流程。

# **Extracting Digital Elevation Model from LiDAR DSM**

**Student: Wei-Cheng Chen**

**Advisor : Dr. Tian-Yuan Shih**

**Department of Civil Engineering**

**National Chiao Tung University**

## **Abstract**

Airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) is a rapidly emerging technology for capturing 3-D data on physical ground surfaces. The computation of 3-D coordinates of surface points from a measured range, GPS and inertial measurements, is remarkably simple. However, the point clouds portray a digital surface model (DSM) other than a digital elevation model (DEM). The non-ground points including vegetation points and other object points have to be identified and filtered out prior to the generation of a DEM.

In this study, after reviewing various algorithms for filtering non-ground points, an algorithm applying spline interpolation is adopted for processing a LiDAR dataset with first and last returns. Subsequently, the ground points after filtering are used for creating a DEM. Processing accuracy is checked with standard dataset provided by ISPRS. The errors are also assessed with both visual and statistical approaches. An attempt is performed to find out what types of land surfaces suffer more mis-classification of non-ground points and, thus, to improve the process of DEM production.

## 致謝

本論文承蒙吾師 史天元教授兩年來在學術研究上的悉心指導以及生活上的照顧與關心，讓學生我能夠順利研修學業以及完成本論文，在此向老師致上最誠摯的感謝。同時，感謝系上陳春盛教授、黃金維教授與李振燾教授在學業上的啟發與指導；以及口試委員 陳繼藩教授、趙鍵哲教授與徐百輝博士提供寶貴建議讓本論文能更加完善。

論文研究期間內，感謝劉進金學長、劉榮寬學長、王弘基學長、彭淼祥學長及洪偉嘉學長等先進在論文方面的指導與幫忙，使得本論文順利完成。

轉眼間這幾年研究生的生活就這麼地結束了，回想當初剛到新竹的我對於這裡有著陌生且生澀的感覺，如今轉眼間變得如此熟悉與不捨，不勝唏噓；在此感謝學長敬軒、榮傑、俊宏、宇伸、宗儒、宗展、鴻謙、敏峰以及學姊佩珊、美麗、惠菁、莉雪等學長姐以及易達、佑廷、貓哥、展鵬、基非、印淞、世青等碩一學弟這兩年來的幫助與鼓勵。尤其，我想特別感謝一起度過這段充滿歡笑與艱苦日子的同學們介嵐、子銘、朗哲、誌強、亘昶、進福、福利、秉榮、宜珊、淑珍等人，非常高興在大家互相扶持與照應下都能順利畢業與完成學業。

除了感謝在新竹彼此照應的同學外，也要謝謝遠在台北的彭念與志鵬、台南的正憲跟錦松、朋友宛如與淑君…等人，這些日子以來的鼓勵與幫助。

這幾年當中，我曾經無數次徬徨與失落，曾想過『測量』這兩個字對我的意義何在?!如今，終於了解『測量』的意義，它不再只是象徵著工作與能力，而是代表著測量人對於測量界的一份用心與執著。最後，僅以本論文獻給我最親愛的家人以及我女朋友盈旭，感謝他們陪我走過這兩年艱辛的日子。期許所有人在未來的日子裡『努力地快樂，快樂地努力』。

# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第一章 前言.....	1
§1-1 研究動機與目的.....	1
§1-2 研究方法.....	3
§1-3 論文架構.....	4
第二章 點雲濾除演算法回顧.....	6
§2-1 空載光達起源與系統組成.....	6
§2-2 非地面點濾除原理.....	7
§2-2-1 地物與地表之關係.....	7
§2-2-2 點雲濾除基本原理.....	8
§2-3 現有點雲濾除演算法回顧.....	10
§2-4 成果品質檢核.....	16
§2-5 精度評估.....	16
§2-5-1 內部精度.....	16
§2-5-2 分類精度.....	17
§2-5-3 高程比對評估.....	18
第三章 由光達覆蓋模型萃取數值高程模型.....	19
§3-1 雲線內插過濾演算法.....	19
§3-2 資料預處理（粗差濾除）.....	20
§3-3 邊界偵測.....	21
§3-4 區域成長.....	25

§3-5 分類校正 .....	26
§3-6 系統介紹與參數設定 .....	26
第四章 實驗成果及分析 .....	30
§4-1 實驗數據介紹 .....	30
§4-2 檢核數據 .....	32
§4-3 成果精度評估 .....	33
§4-3-1 內部精度評估 .....	33
§4-3-2 分類精度評估 .....	35
§4-3-3 高程資料比對 .....	37
§4-4 視覺化分析 .....	39
§4-5 錯誤點與未成功點分析 .....	49
第五章 結論與建議 .....	60
參考文獻 .....	64
附錄一 實驗參數表 .....	68
附錄二 ISPRS 八大地區之原始點雲座標分佈及 DSM 示意圖 .....	69
附錄三 ISPRS 八大測試區之濾除成果展示 .....	77
附錄四 GRASS 作業程序說明 .....	87
作者簡介 .....	90

# 圖目錄

圖 1-1-1	LiDAR 示意圖.....	1
圖 1-1-2	光達多重回訊示意圖.....	2
圖 1-2-1	論文研究流程圖.....	4
圖 2-1	光達系統組成及掃描示意圖.....	7
圖 2-2-1	地表與地物之關係.....	8
圖 2-2-2	各種點雲濾除原理.....	9
圖 3-1	雷射多重反射訊號示意圖.....	19
圖 3-2	觀測量與內插值差異分布直方圖.....	21
圖 3-3-1	理論邊界值之邊界偵測.....	22
圖 3-3-2	地表真實邊界值之邊界偵測.....	23
圖 3-3-3	內插表面與真實地面關係圖.....	23
圖 3-3-4	高程觀測量之垂直剖面與內插曲線圖.....	24
圖 3-3-5	邊界偵測(梯度門檻值).....	24
圖 3-3-6	邊界偵測後分類情形.....	24
圖 3-4-1	點集合所組成的凸多邊形.....	25
圖 4-1-1	德國行政區域圖.....	30
圖 4-1-2	Vaihingen/Env 測試區以及 Stuttgart 城市中心地理位置.....	30
圖 4-3-1	Sample11 濾除成果與檢核資料高差統計圖.....	38
圖 4-4-1	test11 濾除成果與檢核資料之視覺比較.....	40
圖 4-4-2	等高線圖比較.....	41
圖 4-4-3	Sample11 濾除成果與檢核資料之點雲分布圖.....	41
圖 4-4-4	建物高程剖面圖.....	42
圖 4-4-5	植被高程剖面圖.....	43
圖 4-4-6	郊區 Sample61 濾除成果與檢核資料視覺比較.....	44

圖 4-4-7	等高線圖比較.....	45
圖 4-4-8	樣本 Sample61 之高程剖面圖.....	45
圖 4-4-9	Sample11 樣本檢核資料與濾除成果高程分布直方圖.....	46
圖 4-4-10	Sample11 濾除成果分類錯誤地面點分布圖.....	47
圖 4-4-11	Sample61 樣本檢核資料與濾除成果高程分布直方圖.....	47
圖 4-4-12	Sample61 樣本濾除成果之錯誤地面點分布圖.....	48
圖 4-5-1	test11 地面錯誤點分布情形.....	49
圖 4-5-2	test11 錯誤點地面覆蓋厚度統計圖表.....	50
圖 4-5-3	test11 地面錯誤點分布情形.....	51
圖 4-5-4	test54 錯誤點地面覆蓋厚度統計圖表.....	51
圖 4-5-5	錯誤點分類錯誤示意圖.....	52
圖 4-5-6	原始 DSM 與濾除成果點雲分布圖.....	53
圖 4-5-7	地表起伏與錯誤點之空間分布.....	53
圖 4-5-8	FSite5 航空影像與點雲分布對照圖.....	54
圖 4-5-9	test11 錯誤點之坡度分布圖（檢核資料）.....	55
圖 4-5-10	test11 錯誤點之坡度分布圖（濾除成果）.....	55
圖 4-5-11	test23 濾除成果之地面點散佈圖.....	57
圖 4-5-12	test23 初始分類地面點散佈圖.....	58
圖 4-5-13	地表起伏與其未成功分類點雲分布圖.....	59

# 表目錄

表 2-3-1	濾除演算法歸納表.....	11
表 2-5-1	濾除成果之交叉矩陣.....	17
表 3-6-1	程式模組概述.....	26
表 3-6-2	s.edgedetection 參數表.....	28
表 3-6-3	s.growing 參數表.....	28
表 3-6-4	s.correction 參數表.....	29
表 3-6-5	s.bspline.reg 參數表.....	29
表 4-1-1	測試數據概要.....	31
表 4-1-2	測試地區主要地形特徵.....	31
表 4-2-1	檢核樣本地面特徵.....	32
表 4-2-2	檢核資料統計表.....	33
表 4-3-1	濾除成果之交叉驗證指標.....	34
表 4-3-2	test11 樣本交叉驗證之高差統計表.....	35
表 4-3-3	15 組地面點分類精度統計表.....	36
表 4-3-4	15 組地物點分類精度統計表.....	37
表 4-3-5	Sample11 高差統計表.....	38
表 4-3-6	錯誤率大於 10% 樣本之高差統計.....	39
表 4-4-1	Sample11 點雲比較統計表.....	46
表 4-4-2	Sample61 點雲比較統計表.....	48
表 4-5-1	十五組樣本之錯誤點坡度統計表.....	56
表 4-5-2	test23 初始地面點成果與最終成果之統計表.....	57
表 4-5-3	test24 初始地面點成果與最終成果之統計表.....	58

# 第一章 前言

## §1-1 研究動機與目的

除航空攝影測量、傳統地面測量、地形圖數化...傳統地形資料獲取方式外，近來有許多新興的測量技術已被廣泛地研究與實施，如：QuickBird, IKONOS...等高解析度衛星影像、雷達差分技術、光達系統...等。就大範圍地形測繪以及快速地蒐集高程資料來說，以光達系統最具有代表性。為了 921 南投集集大地震災區持續重建工作，行政院農業委員會引進光達系統進行災區形變測量，冀望藉此建立快速精確的災害調查技術與災情製圖機制（史與彭，2002）。採用光達技術進行地形測繪的優點在於光達可快速且直接獲取地面高程，較傳統測量取得高程方式方便且具有效率。

光達(Light Detection And Ranging, 簡稱 LiDAR)量測技術的主要特性是利用掃描方式，大量且快速地向地面發射雷射光波，再由感測器(Sensor)接收雷射反射訊號，經電腦處理後得到地面掃描點座標，進而達到地面點取樣的目的。光達系統整合衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)，慣性量測儀(Inertial Measurement Unit, IMU)以及雷射掃描儀(Laser Scanning System)此三大系統的功能，由載台上的雷射掃描儀向地面發射紅外光雷射掃描取樣，再經電腦處理後獲得地面掃描點座標(圖 1-1-1)。

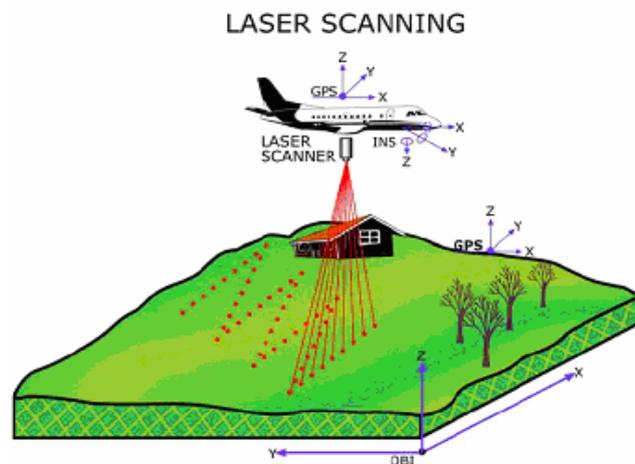


圖 1-1-1 LiDAR 示意圖(Renslow M., 2001)

光達反射訊號具有多重反射(multiple echoes)的特性，可接收量測到地表及樹頂甚至樹幹的訊號，如圖 1-1-2 所示。由多重回訊示意圖(圖 1-1-2)可知，LiDAR 所獲取的資料有部分點雲落在樹頂，有些為地面反射點，而有些則介於兩者之間的樹幹位置。根據雷射反射的情況，也可藉此了解地物對於雷射光的不同穿透性質。

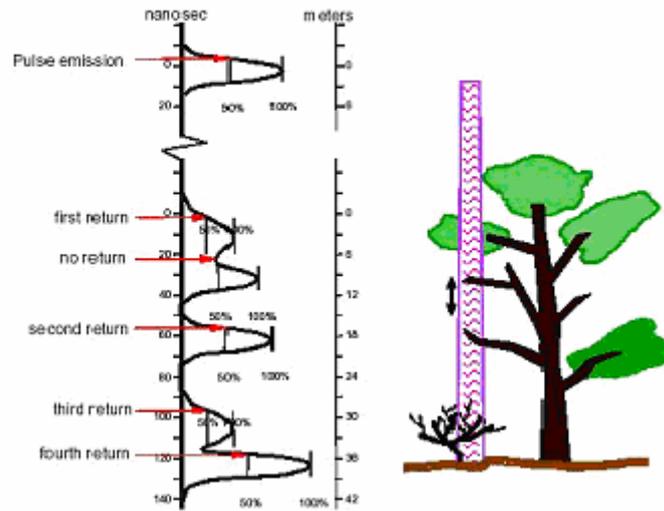


圖 1-1-2 光達多重回訊示意圖 (王與曾, 2003)

根據上述特性，可使用第一次雷射反射訊號所獲得的高程值產生數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)。若要產生數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)可採用最後回訊反射值進行處理，但是單純使用光達最後反射值產生 DEM 並不能產生正確的 DEM；因為光達最後反射值不一定是由地面點反射而得，有可能是屋頂或樹幹等地物反射所獲取的點雲資料，因此要得到最終地面 DEM 成果必須將這些非地面點資料濾除。由於光達資料是由三維點雲座標所組成，其資料量相當龐大，如何從中萃取出正確的地面點資料組成正確的數值高程模型是目前的熱門研究方向。

因此，本研究的目的包括如下：

- (1) 探討點雲濾除之各種方法，並比較其數學模式及濾除流程。
- (2) 針對雲線內插過濾演算法進行深入探討與分析。
- (3) 以 ISPRS 測試資料進行實例驗證並評估其分類精度與濾除成果之好壞。

(4) 針對濾除錯誤及濾除失敗之地面點，以視覺觀察與數理分析模式嘗試歸納出其特性，藉此提供後續人工濾除工作時可採用的參考與建議。

## §1-2 研究方法

本研究濾除演算法考量光達多重回訊的特性，將兩次回訊資料經由 GRASS 系統之雲線內插程式 s.spline.reg 形成規則網格後，根據原始點雲之梯度與高差將其判釋分類為地面點或邊界點，再經由區域成長法將邊界點組成凸多邊形後，依據多邊形內部點雲高程值大小判釋其分類型態（地面點或地物點）。最後，經由校正分類步驟將原始點雲與初始 DEM 進行比較，當高差小於門檻值或大於門檻值時進行重新分類，迭代處理後可得最終地面點成果(Brovelli, et al., 2004)。在濾除過程中，人造物或植被的點雲如橋樑，高架橋或是樹木等，在濾除過程中分類成地物點並且移除。

以上各步驟之流程圖，如圖 1-2-1 所示；



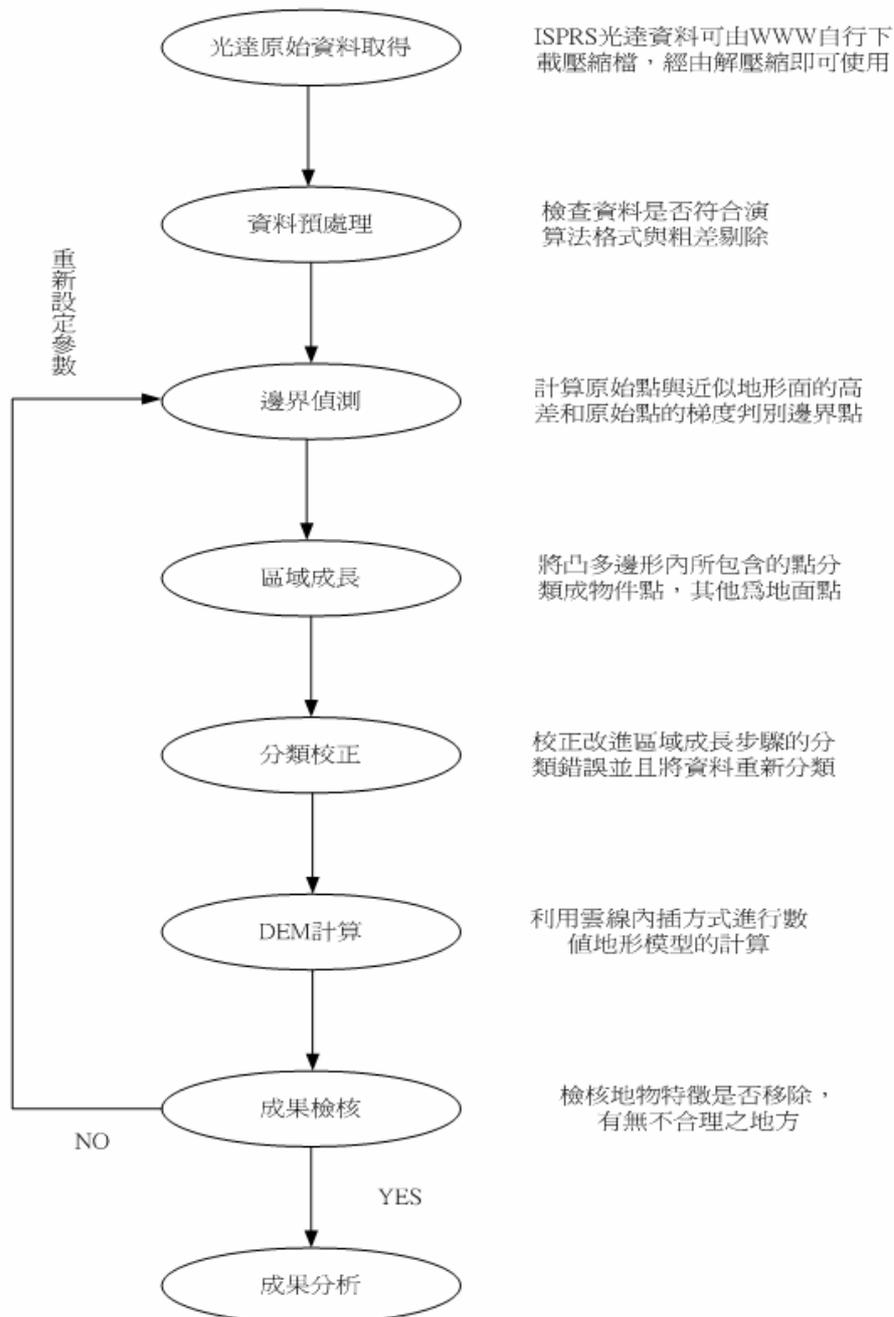


圖 1-2-1 論文研究流程圖

### §1-3 論文架構

本論文共分成五個章節，各章節之主題分別敘述如下；

第一章 前言---針對本論文的研究動機、目的與研究流程進行敘述且根據現有文獻之蒐集成果，了解現今光達濾除點雲研究近況。

第二章 點雲濾除演算法回顧---針對光達點雲濾除演算法之相關文獻進行了解

與分析，並分別敘述各演算法之特性。

第三章 由光達覆蓋模型萃取數值高程模型---此章節詳細描述本研究所使用的點雲濾除演算法，並依照其特性和流程進行研究。

第四章 實驗成果及分析---說明本研究所使用的光達數據及檢核數據；將其兩者進行分析後，探討本研究之演算法成果精度與可靠度並將其分類失敗與錯誤之處進行探討，嘗試為後續人工濾除提供參考與建議。

第五章 結論與建議---討論本研究之成果，並對進一步的研究提出多項建議與方向，提供後續研究參考。



## 第二章 點雲濾除演算法回顧

本章擬先回顧光達技術的起源和光達系統的基本原理，接著回顧各種不同數學模式的濾除演算法，最後探討數值高程模型之品質檢核與精度評估方法。

### §2-1 空載光達起源與系統組成

空載光達技術的發展，源自1970及1980年代美國太空總署(NASA)的研發。之後，因應全球定位系統(Global Positioning System, GPS)及慣性量測儀(Inertial Measurement Unit, IMU)的發展，使得精確的即時定位定姿態方法得以實現。經由德國Stuttgart 大學於1988至1993年期間將雷射掃瞄技術與即時定位定姿態系統加以結合產生初始的空載雷射掃瞄儀系統(Ackermann, 1999)，或稱空載光達。爾後，空載光達隨即快速地發展，目前已有十多家製造廠商,其可選用之系統更超過30多種(Baltsavias, 1999)。

空載光達藉由雷射光多重反射(multiple echoes)的觀測值，量測地表覆蓋面之高程，從而建置數值高程模型(DEM)。由於光達自動化處理及精確的觀測成果，許多測量機構已嘗試應用空載光達為主要的DEM產製方式，如荷蘭的測量部門於1997-1998 實施雷射掃瞄產製DEM的區域已超過全國土地面積的一半(Huising and Pereira, 1998)。目前光達系統也應用於集水區或崩塌地的分析(Cobby et al., 2001)，其他應用如建物、樹林、及電纜線的萃取及三維城市模型的建置亦快速發展中(Maas and Vosselman, 1999; Priestnall et al., 2000; Vosselman and Dijkman, 2001)。

空載光達是一個結合雷射掃瞄系統(Laser Scanning System)、全球定位系統(GPS)以及慣性導航系統(INS)等三部分的整合性技術。將雷射掃描儀固定於飛行載台上，由空中向地面以高頻率發射雷射光束，並由感測器接收反射訊號後，記錄發射脈衝到接收反射訊號之間的時間差，再配合在載台上裝置之 GPS 接收儀及待測區的 GPS 地面站，將兩者以動態差分方式實施 GPS 定位，輔以 INS 系統的姿態參數進行整合求解，最後求定地面掃瞄點的三維座標（圖 2-1）。

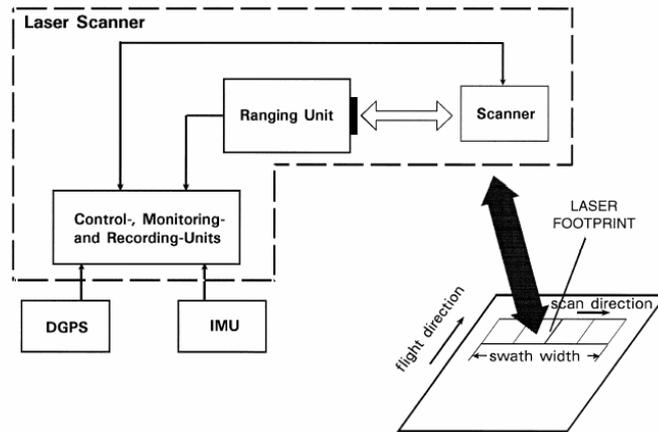


圖 2-1 光達系統組成及掃描示意圖 (Wehr and Lohr, 1999)

目前，空載光達使用之脈衝雷射波段大多在近紅外光範圍，亦有某些系統採用可穿透水體的綠光波段量測水底的地形起伏，如用於近岸水深測量之 SHOALS 系統。

## §2-2 非地面點濾除原理

為獲取 DEM，光達資料須經過點雲分類，將非地面點資料濾除後，再進行產製 DEM。由於光達系統接收訊號包括地面反射及地物反射兩種，因此產製 DEM 前必先將非地面點加以濾除。本節中將舉例數種演算法的數學模式說明其濾除原理與步驟。

### §2-2-1 地物與地表之關係

依照不同的地物特性，可將地表上常見的景物以圖 2-2-1 表示。濾除非地面點的最終目的在於將地表上的建物與植被等地物點雲加以濾除而保留正確的裸露地表面的點雲。

項目	圖樣描述
景物	
裸露地表	
地物	
可分離之地物	
附屬地面之地物	
濾除概念	

圖 2-2-1 地表與地物之關係 (Sithole and Vosselman, 2003)

## §2-2-2 點雲濾除基本原理

濾除非地面點的基本原理是根據點雲局部範圍內，偵測點雲間的不連續性特徵後加以濾除，例如高程差異、坡度、以及點雲至不規則三角網或數學參考面所表示之地形面的最短距離等。可藉由計算點雲之地形指標，偵測找出點雲的不連續性。除了以點雲之不連續性進行濾除外，也可利用群集分類方式進行非地面點濾除(Sithole and Vosselman, 2003)。以下說明各種濾除方法的基本原理(圖 2-2-2)。

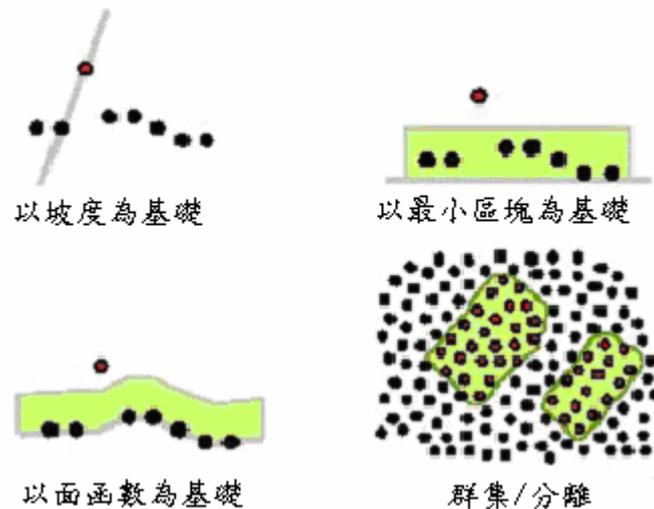


圖 2-2-2 各種點雲濾除原理 (Sithole and Vosselman, 2003)

(A) **以坡度為基礎(Slope based)**：在此類演算法中，計算兩點雲之間的坡度或高差用以判釋是否為地物點。假使坡度超過設定的門檻值時，較高的點則分類為地物點。此原理之假設是基於景物中具有陡峻坡度的點雲必屬於地物一部分。

(B) **以最小區塊為基礎(Block-minimum)**：以最低點雲構成之水平面為基準，在其上方設定一三維空間範圍，如圖 2-2-2 之右上所示。若點雲不在此空間範圍內則分類為地物點；反之則分類為地面點。

(C) **以面函數為基礎(Surface base)**：與 **Block-minimum** 方法類似；以較低點雲組成一數學參數面，並在其上方設定一距離範圍為判釋門檻，若點雲座落於該範圍內則視為地面點；反之則分類為地物點。

(D) **群集/分離(Clustering/Segmentation)**：本類演算法之基礎是，若有一群具有聚集特性之點雲時，且該群聚點雲之高程大於鄰近點雲高程，該群集點雲視為地物點。因此，若有新加入之點雲座落於群集範圍內則判定為地物點，反之則為地面點。如圖 2-2-2 中右下所示，綠(灰)色矩形區可能為人造物。

另外，光達系統具有多重回訊的特性，此特性可讓森林學者藉由多重回訊資料觀察森林內部情形。通常第一個回訊紀錄著最上層植被的表面，而接下來的回訊紀錄著從地表起算的植被材積等資訊。除紀錄多重回訊以外，光達系統同時紀

錄該取樣位置的反射強度值(Intensity)。依照反射物的相異光譜特性，不同景物的表面會造成反射回訊值的差異，也可利用此差異性質進行點雲分類(Tran and Blundell, 2003)。

### §2-3 現有點雲濾除演算法回顧

濾除非地面點的方法依照所使用的數學模式大致可分類為四種：型態學過濾法、線性推估、曲面近似法及一般影像處理法 (Lohmann et al., 2000)。

- 型態學過濾法是假設在某特定範圍內，地面點雲間的最大高差為  $\Delta h_{\max}(d)$ ；若該範圍內某點 P 與其它任意點 Q 之高差大於  $\Delta h_{\max}(d)$ ，此點 P 視為地物點，應濾除之。
- 線性推估法是將點雲資料進行資料金字塔處理(data pyramid)並利用階層等級之差異粗略計算一近似地面模型後，以近似地面模型為基礎採用線性評估方式重新判識所有點雲是否屬於地面點並重新內插組成新的 DEM 網格，直到所有點雲判識完畢為止。
- 曲面近似法是以漸進方式搜尋地面點進而構成一地表面，Axelsson(1999)引用不規則三角網(Triangular Irregular Networks, TIN)表示地表面後，在特定範圍內萃取較明確的地面點組成初始TIN，然後在此三角網內搜尋可能為地面點的點雲將其加入初始TIN後再次組成新的TIN，反覆進行直到範圍內無明確地面點為止，此方法稱為Adaptive TIN Surfaces。
- 一般影像處理法是以規則網格進行，因此必先將不規則點雲資料內插成規則網格後，再以小波濾除或其他影像處理方式進行 DEM 萃取。

整理歸納目前濾除非地面點的演算法，如表 2-3-1 所示。

表 2-3-1 濾除演算法歸納表

研究學者	濾除法概要	研究學者	濾除法概要
M.Elmqvist	活動式形狀模型(Active Shape Model)	P.Axelsson	漸進式不規則三角形加密法(Progressive TIN densification)
G.Sohn	規則化方法 (Regularization Method)	G. Sithole, G. Vosselman	以坡度為基礎之改良式濾除法(Modified Slope based filter)
M.Roggero	以坡度為基礎之改良式濾除法(Modified Slope based filter)	N.Pfeifer, C.Briese	階層式強鈍內插法 (Hierarchical robust interpolation)
M.Brovelli	雲線內插法 (Spline interpolation)	T. Thuy	小波濾除非地面點法 (Filtering Non-terrain Point By Wavelet)
R.Wack	階層式最小區塊改良法 (Hierarchical Modified Block-Minimum)	David M. Cobby	距離影像分割法 (Range Image Segmentation Method)

以下簡要說明各演算法之濾除步驟：

#### (A) 活動式形狀模型(Active Shape Model)

Elmqvist (2001)提出一個在二維影像上使用主動式等高線雲線進行濾除，此二維影像由光達數據經網格化後所獲取。此主動式等高線雲線法乃是採用一種活動形狀模型(Active Shape Model)方法評估地表面。

該方法考量內部與外部因素以加權方式計算該模型能量，使其模型能量為最小。該內部因素取決於等高線形狀而外部因素則取決於點雲資料組成之二維影像或是其他外部約束條件。

#### (B) 規則化方法(Regularization Method)

Sohn and Dowman(2002)採用一規則化方法處理光達原始點雲，採用兩大步驟處理：

- 向下加密(Down Densification)：此步驟主要目的在於獲得一個地表初始的基準面，然後在此點雲資料中定義一個矩形範圍。在此矩形的四角落各自尋找

最接近的點並且定義它為地表點。此四個點利用 Delaunay Triangulation 方式組成三角形。接下來，搜尋此點雲資料中高程最低的點，將其加入計算新的 TIN。重複執行此最後步驟，直到所有剩餘點高程皆高於所計算的 TIN。此最後成果被當作是該區域地表的初始狀態。

- 向上加密(Upward Densification)：此步驟目的在於萃取提昇由 Down Densification 步驟中所獲得的初始 TIN 的成果。首先，定義由每個初始三角形的面往上的環域(buffer)，此環域的深度給定為  $\delta h$ 。對於每個三角形，倘若其餘雷射點超過此環域範圍則被認定為非地面點。反之，則該點認定為地面點。

#### (C) 以坡度為基礎之改良式濾除法(Modified Slope based filter)

Roggero(2001)將點雲資料進行粗差濾除後將其點雲資料進行網格化並且採用線性回歸計算使每個點雲皆對點雲資料中最低點雲進行比對。所比對的點雲與最低點雲的距離和高差皆予以加權，並在線性回歸計算中當作觀測量。此目的在於使距離越遠的點，越難以影響線性回歸式的型態。因此，經由計算獲得在回歸線上特定範圍內所形成的曲線代表著初始的地表面。在此初始地表面以下的點被判定為地面點，反之則被判定為地物點。

此特定範圍的門檻值通常是用以決定點雲分類的重要因素。該門檻值大小取決於初始地形的坡度。上述步驟可進行反覆測試直到獲得較為正確的成果為止。

#### (D) 雲線內插法(Spline interpolation)

Brovelli et al. (2002, 2004)利用雲線(Spline)內插方式將原始數據內插成網格式數據後，藉由設定門檻值(Threshold)參數分離粗差(Outlier)以及非地面點(Non-terrain point)的數據，將其濾除後可得到純為地面點(Terrain point)數據的成果，此成果後續可用來產生數值地形模型；

此演算法主要有五個步驟：

- I. 數據預處理(Data Preprocessing)
- II. 邊緣偵測(Edge Detection)

### III. 區域成長(Region Growing)

### IV. 分類校正(Correction)

### V. 數值地形模型計算(DEM computation)

#### (E) 階層式最小區塊改良法(Hierarchical Modified Block-Minimum)

Wack and Wimmer(2002)提出之演算法主要是採用一種階層方法(Hierarchical Approach)偵測非地面網格資料。此方法基於 Block-Minimum 方式為演算基礎進行濾除非地面點資料，執行步驟如下。

- 將原始點雲網格化組成 9m 的 DEM。為了避免粗差造成 DEM 錯誤，原始點雲中高程異常的點雲不加入計算，其目的在於將異常過大的點雲去除以獲取較正確初始 DEM。此舉結果使大部分建物以及密集植被皆可移除。
- 假設資料中具有地物的網格位置會以急劇高程變化為特徵現象，以此現象來進行偵測非地面網格。利用高斯拉普拉斯操作元(Operator of Laplacian of Gaussian)計算初始 DEM。
- 接著以原始點雲內插組成 3m 的 DEM，若此 3m 網格資料經由高斯拉普拉斯操作元計算後其較差超過所設定之門檻值時，以第一步驟之正確初始 DEM 的高程值來取代。
- 重複上述步驟獲取所需之 DEM 資料。

#### (F) 漸進式不規則三角形加密法(Progressive TIN Densification)

Axelsson(1999)將原始點雲形成初始的不規則三角網後，以漸進方式加入點雲資料來加密整個三角網型結構，其步驟如下。

- 一開始由點雲資料中，各鄰近區塊內的最小值獲取初始鬆散的 TIN，再逐漸加入點資料加初始組成的 TIN。在每一次加密點的過程中，都必須判斷所加入的點到初始 TIN 之距離是否小於門檻值。該門檻值是由原始點雲資料計算而得。
- 在上述反覆迭代計算 TIN 時，皆重新計算新的門檻值；新的門檻值由該次迭代計算中藉由統計加入到 TIN 中點雲高程之中值，將中值視為新的門檻

值。

- 當點雲資料內沒有任一點在該門檻值之下時，停止迭代計算。

#### (G) 以坡度為基礎之改良式濾除法(Modified Slope based filter)

Sithole(2001)以在非陡峻地形下，兩個鄰近點雲具有明顯的高程差為條件進行點雲判識；大部分，較高的點並非地面點。也就是說，倘若如果高差大的兩點間距離越近，則較高的點是地面點的可能性越低；於是可給定一個可接受的高差門檻值  $\Delta h_{\max}(d)$ ， $d$  為兩點距離， $pi, pj$  為相異的點資料， $A$  為所有點集合， $DEM$  為所有地面點的集合，得到下列公式。

$$DEM = \{ pi \in A | \forall pi \in A: h_{pi} - h_{pj} \leq \Delta h_{\max}(d(pi, pj)) \} \dots(2.1)$$

#### (H) 階層式強鈍內插法(Hierarchical Robust Interpolation)

Pfeifer et al. (1999)、Pfeifer et al. (2001)、Briese and Pfeifer (2001)及 Briese et al. (2002) 等人以線性預估 (Linear Prediction) 方式為主，加入強鈍估值法 (Robust Estimation) 評估方法為輔，採分區型式進行近似地面模型之漸近計算。其步驟如下；

- 首先將點雲資料進行資料金字塔處理(data pyramid)後，利用個別階層等級之差異粗略計算獲得一個近似地面模型。
- 再經由計算所有點與初始近似地表面的垂直距離後，給定權值於各點，若是點在初始面之上方則給予較小的權值，反之，則越大。再以不等權之點雲高程，採用線性內插法計算出新的地表面。因此，計算而得的地表模式主要是受到高程較低的點所影響；反覆迭代計算直到設定的迭代次數或計算後地表模型不再有明顯的變化。
- 若點資料與該計算之地表面之垂直高差在所預先設定的門檻值以內，則判定此點為地面點；反之，則判定為非地面點。另外，此演算法也允許預先定義斷線位置後來進行濾除處理。

#### (I) 小波濾除非地面點(Filtering Non-terrain Point By Wavelet)

Vu and Tokunaga (2001)將原始點雲數據內插形成距離影像後進行影像小波分析，經過小波分析過後可得到邊界影像(Edge Image)；另一方面將原始點雲資料套用群集(Clustering)概念進行點雲分類，最後結合上述兩中間過程之成果進行點雲分割將點雲分類為地面點與地物點兩種。

#### **(J) 距離影像分割法(Range Image Segmentation Method)**

Cobby et al.(2001)將光達點雲資料網格化形成距離影像(Range Image)後，根據其距離影像的紋理特徵分割不同種類之地物型態並進行範圍識別(Region Identification)分離成各種不同地物區塊。根據其高程計算成果對植被部分進行細部分離，最後得到植被與地形之高程數據。

根據前述，可歸納出許多濾除演算法皆考量到光達資料中具有錯誤資訊的可能性。因此，在資料預處理(Data Pre-process)步驟中可根據統計點雲高程分佈情形進行點雲粗差濾除。目的在於避免粗差資料在後續處理過程中造成計算成果的錯誤。另外，若以演算法輸入資料格式區分，可分為兩種：網格資料(grid)或點雲資料(X,Y,Z)。Elmqvist (2001), Roggero (2001), Wack and Wimmer (2002) 皆以影像處理方法為基礎進行非地面點濾除；首先將原始點雲內插成規則網格後，萃取該範圍之初始近似地面模型且計算特定參考門檻指標(如：等高線、坡度...等)進行非地面點過濾或地面點萃取。相對，使用原始點雲資料進行濾除非地面點除了可以保留原始觀測量外，亦不會因進行內插而產生資訊失真現象。

總結上述各種演算法進行濾除或是萃取的整個流程中大致經過下列三個執行步驟：

- 粗差濾除
- 初始地形模型的萃取
- 給予所使用的參數（如：坡度，垂距，坡向，高差...等）一個明確門檻值進行資料濾除或萃取

另外，產製 DEM 必須注意填補缺口(Gaps Filled)的問題。資料缺口即表示該空缺範圍內無點雲資料可用以表示地面高程。一般由鄰近點雲資料內插產生高程

時，該位置之高程與鄰近點雲高程具有連續性，但若缺口範圍過大，其內插成果亦得斟酌考量真實性。

最後，關於何種濾除法能得到最好的成果，尚未有定論。其原因在於不同演算法對於不同的地物的濾除效果不同。目前各種演算法，無任一種可以達到百分之百的濾除效果；其最大因素除了演算法特性不同外，光達資料本身之複雜也是重要因素。過於複雜的建物或是幾何形狀，也是造成無法成功濾除的因素。因此產製 DEM 成果時，結合人工方式或其他附加資料進行修補或改正 DEM 成果依然是不可或缺的步驟。

## §2-4 成果品質檢核

DEM 資料的使用目的之一是以精確的高程資料表達地形起伏的資訊。就地表起伏的特性而言，DEM 應具有連續平滑性，除了自然斷面，如：山崖、斷層之外，DEM 資料不應該出現其他不連續或過於平滑的不自然問題。

因此，在品質檢核偵測除了以抽樣方式找出資料品質問題外，常用的地形計測方法也常用來檢查資料品質問題（賴進貴，2003）。本研究將品質分析分為兩個部分探討：一為視覺化分析，另一為數理統計分析。茲分別說明如下；

在缺乏檢核資料情形下，通常藉由視覺化方式對於成果進行全面性的觀察與評估。因此，DEM 資料品質檢測的初步方法是以一般 GIS 常用的視覺化工具觀察濾除成果，透過合適的視覺展示呈現全面性資料品質狀況。此外，常採用點雲數量統計方式檢核其高程分布情形是否有不合理之現象。

若實驗數據具有檢核資料時，可利用內插方式組成檢核 DEM 與濾除成果進行高差計算或採取點雲比對方式評估其分類成果，藉此了解兩者差異為何。

## §2-5 精度評估

### §2-5-1 內部精度

光達所得高程測點，在沒有比對檢核點數據之前，可應用交叉比對評估資料本身內部精度之好壞；交叉比對是採用分類後的地面點成果進行。

所謂交叉比對計算原理是在某個觀測點位置，其高程由週邊鄰近的數據推估，該觀測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，如此程序再計算下一個點位，重複的一次計算一個交叉比對誤差數值（觀測值與推估值的較差）（史與彭，2003）。

為評估濾除成果的內部精度，以不偏性及一致性作為評估標準；

- 不偏性：計算其交叉比對誤差數值之平均值，該平均值越接近零時，表示其不偏效果越佳，以 KAE 表示；

$$KAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i^* - Z_i) \cong 0 \quad \dots\dots (2.2)$$

- 一致性：推估誤差平方與何種模式之變異數比值之期望值越接近於 1，則模式越佳，以 KRMSE 表示；

$$KRMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(Z_i^* - Z_i)^2}{\sigma^2} \right] \cong 1 \quad \dots\dots(2.3)$$

### §2-5-2 分類精度

將濾除結果與檢核資料進行比對後，採用交叉矩陣方式說明四種分類型態，其濾除成果之交叉矩陣如表 2-5-1 所示；

表 2-5-1 濾除成果之交叉矩陣

樣本		濾除成果	
		地面點	地物點
檢核資料	地面點	(正確點)	(未成功點)
	地物點	(錯誤點)	(正確地物點)

本研究目的在於探討地面點分類精度，因此採用正確點、錯誤點、未成功點等三種點雲分類數量來評估計算地面點分類精度；其計算方式為將濾除成果點數視為母數，計算正確率與錯誤率，而將檢核地面點數視為母數計算未成功率。

### §2-5-3 高程比對評估

高程資料比對是使用以點為基礎的搜索，考量檢核資料點雲密度大小而設定搜尋範圍，亦即若搜尋點在參考點的範圍內，視兩者為相同點進行高差計算，然後輸出平面座標與高差值，藉由統計高差值指標及分布圖了解誤差分布狀況。



### 第三章 由光達覆蓋模型萃取數值高程模型

光達具有多重回訊之特性，藉由記錄同一發射波之各回訊時間差計算出各回訊點的距離差異，進而可推算出各回訊反射點的空間位置。雷射光可穿透植被而產生兩次以上的回訊，第一次回訊由植被最上層的表面所反射的訊號，而其餘各次回訊則是由植被的莖幹或地表面反射而得，如圖 3-1 所示。

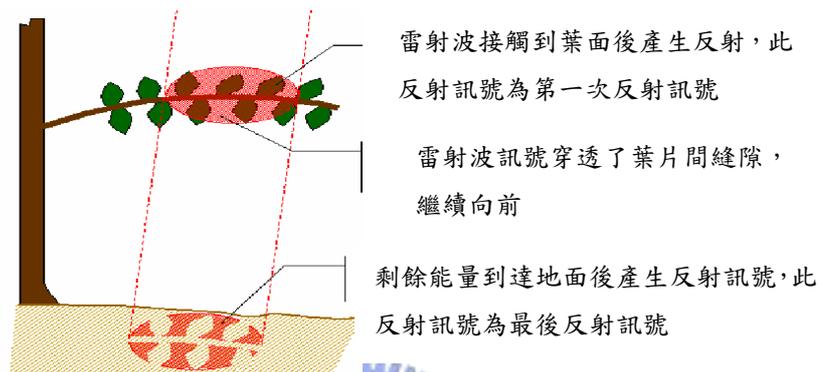


圖 3-1 雷射多重反射訊號示意圖(Kristian, 2002)

#### §3-1 雲線內插過濾演算法

本研究探討之演算法將多重回訊特性加入考量(Brovelli et al., 2004)，利用雲線內插過濾演算法將光達最後回訊點資料分類為地面點與地物點(或稱為非地面點)兩種。地面點乃是由地球表面之裸露地表(無地上物或植被等物體)經雷射波所反射的點資料，反之由建物或植被等地表物體所反射的點資料則認定為地物點。該演算法考量光達多重回訊的特性，將回訊資料經由 GRASS 系統之雲線內插程式 s.bspline.reg 組成規則網格後，根據原始點雲之梯度與高差值判釋分類為地面點或邊界點。接著由區域成長法將邊界點組成凸多邊形後，依據多邊形內部點雲高程值大小判釋其分類型態(地面點或地物點)。最後，經由校正分類步驟，將高差小於門檻值或大於門檻值的點雲進行重新分類，迭代處理後可得最後成果。

以下，§3-2 至§3-6 小節詳細說明各步驟之內容。

## §3-2 資料預處理（粗差濾除）

依照光達取樣結果，可以發現在原始資料中，有少量點雲資料的空間位置不屬於取樣的空間範圍內（如；地面，建物，植被...等），而這些點雲資料稱為錯誤資料或粗差資料。所謂粗差乃是空載光達系統掃描後經由電腦計算得到該反射取樣點的空間座標與整體數據或參考地面高程相較下，其空間位置明顯不合理。

因此，在進行點雲分類前，可以先將原始點雲數據中可能含有粗差的點雲資料（錯誤點）進行剔除，避免造成後續演算法在計算上產生矛盾或是錯誤的情況。因此，本研究使用最小二乘法(least square approach)，將原始點雲資料經由 Bicubic interpolation by Tikhonov regularization 進行內插，以下整個內插步驟簡稱  $S_0$ 。此步驟  $S_0$  之參數是依據原始點雲資料的點密度大小決定。在構成地形面時為了避免局部與整體的突兀情形，所以此 Tikhonov regularization 參數（簡稱  $\lambda_0$ ）之設定原則是為了使資料缺口處的內插值可以保持與鄰近表面的一致性，以及使通過此缺口的內插雲線曲率為最小。假設使用了一個較大的  $\lambda_0$  值，則會造成內插表面的高程值與原始點雲資料具有顯著的差異。反之，使用一個較小的  $\lambda_0$  值則會使得內插表面的起伏太過於平滑而無法正確表達地表的真實狀態。所以在設定此參數時必先經過數次測試方能得到較好之參數值，而選定參數大小之後即進行資料內插處理。點雲經內插處理後的高程值與原始點雲高程進行高差計算並將其繪製高程差異之直方圖如圖 3-2，經觀察發現此高差分布圖呈現著兩種統計型態。依照經驗法選定粗差濾除所使用的門檻值( $T_0$ )；若是點雲資料其殘差超過  $T_0$  時，該筆資料就認定為是粗差並將其移除。

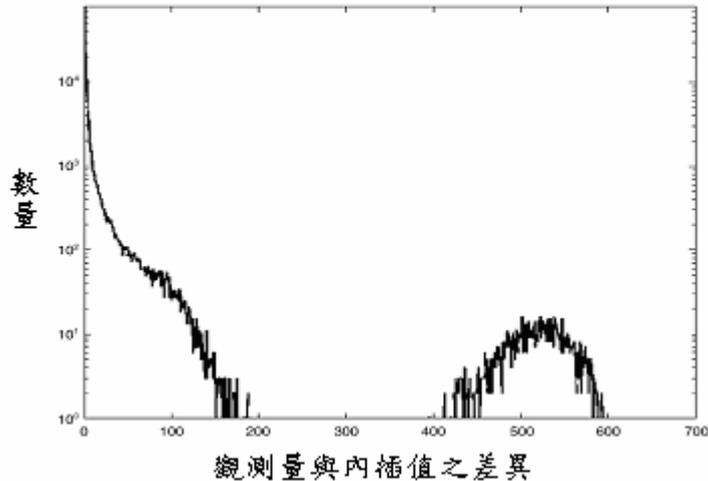


圖 3-2 觀測量與內插值差異分布直方圖(Brovelli et al., 2004)

### §3-3 邊界偵測

第二步驟則是將點雲資料進行地表地物的邊緣偵測(Edge Detection)。所謂邊界指的是兩個相異區域的界限；換言之，若以建物為例，在極短距離的範圍內，其邊界高程值有著顯著的變化。本研究依據此假設條件對點雲資料進行邊界點偵測。

首先，輸入使用之點雲數據，然後經由 GRASS 模組中 Bilinear Spine Interpolation( $S_g$ ) 和 Bicubic Spline Interpolation( $S_r$ ) with Tikhonov regularization 內插計算後獲得兩個近似數值地表模型，其  $S_g$  的方程式如式 3.1。

$$z(x,y) = \hat{a}x + \hat{b}y + \hat{c}xy + \hat{d} \dots (3.1)$$

其中， $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$ ,  $\hat{c}$ ,  $\hat{d}$  皆為最小二乘法係數，其梯度量計算方式如式 3.2。

$$G_m = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} = \sqrt{(\hat{a} + \hat{c}y)^2 + (\hat{b} + \hat{c}x)^2} \dots (3.2)$$

$G_m$ : 梯度(gradient magnitude)

在參數設定上若選擇了較小的梯度門檻值，則可能會造成無法明確地判釋何者為正確的邊界；反之，若是給予一個較大的值則可能只偵測出陡峻的高程變化。所以若是給予單一特定門檻值來進行處理並不適用。因此，Brovelli et al.(2002,

2004)所用之演算法的基本假設是一般雜訊值並不會在規則的形狀中出現。也就是說，邊界型態通常以一個規則鏈狀表示，因此在此步驟中， $\lambda_0$  參數值採用一個較小值進行內插處理。然而為了提升邊界偵測的效果，於是將邊界向量方向條件加入邊界點分類判斷的過程中，使其邊界分類更為嚴謹。其邊界向量方向計算如式 3.3。

$$g_p = \tan^{-1} \left[ \frac{G_y}{G_x} \right] + \frac{\pi}{2} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{b} + \hat{c}x}{\hat{a} + \hat{c}y} \right) + \frac{\pi}{2} \dots (3.3)$$

之後，設定兩個的梯度門檻值  $T_g, t_g$  以及一個邊界向量方向門檻值  $\theta_g$ 。計算所有點雲 p 之梯度，將梯度值超過  $T_g$  的點雲分類為「可能邊界點」；反之，若是梯度值小於  $T_g$  且大於  $t_g$  時，沿著該點雲之最大邊界向量方向找出其相鄰且對立的兩點  $p_1, p_2$ ，若此兩點其邊界向量方向小於門檻值  $\theta_g$  ( $|\theta_{p_1} - \theta_p| < \theta_g, |\theta_{p_2} - \theta_p| < \theta_g$ ) 且在點雲 p 的八個最鄰近點中至少有兩個點其梯度值超過  $T_g$ ，則該 p 點被分類為「可能邊界點」；若否，則分類為不確定點。而梯度值低於  $t_g$  的點則被分類為地面點。

上述邊界偵測方法的輸出結果，在地物邊緣處的厚度通常會超過一個以上的邊界網格。理論上，在進行梯度計算時會產生兩個梯度值較大的網格(圖 3-3-1)，一為邊界點，另一為在邊界點之前的鄰近點。

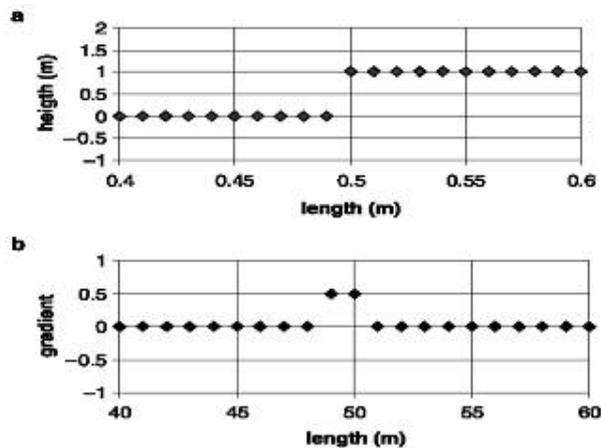


圖 3-3-1 理論邊界值之邊界偵測 (Brovelli et al., 2004)

在考量真實地表的情況下，其實際的地勢變化較為錯綜曲折如圖 3-3-2 所示。

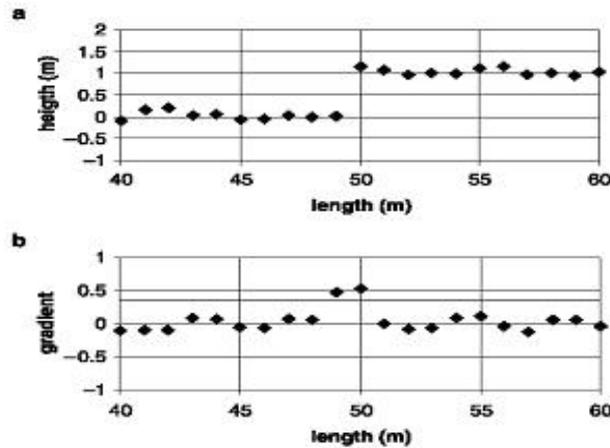


圖 3-3-2 地表真實邊界值之邊界偵測 (Brovelli et al., 2004)

由於此兩點計算之梯度值皆大於門檻值，因此無法只參考梯度值區分正確的邊界點。在這種情形下，加入一個新的分類條件來解決這個問題。首先，計算原始點雲高程與 Bicubic Spline 內插後高程之間的高差，由圖 3-3-3 可以了解此內插表面與原始點雲之間具有明顯的區分，若是高差為正值，則該點雲屬於邊界處；反之，若高差為負，則該點雲屬於地表面。

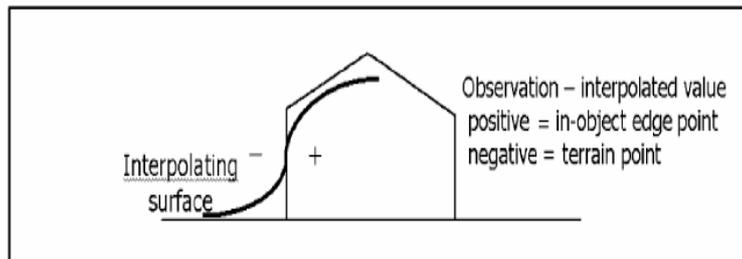


圖 3-3-3 內插表面與真實地面關係圖(Brovelli et al., 2004)

因此，可由上述兩分類條件進行點雲分類，如圖 3-3-4；若有兩點其梯度值超過門檻值，則將此兩點應用圖 3-3-3 之理論，找出真正的邊界點。可由圖 3-3-5 說明此方法的優點是可以更精確地判釋出邊界點並且使邊緣鏈結的寬度變小，增顯邊界點的特性。

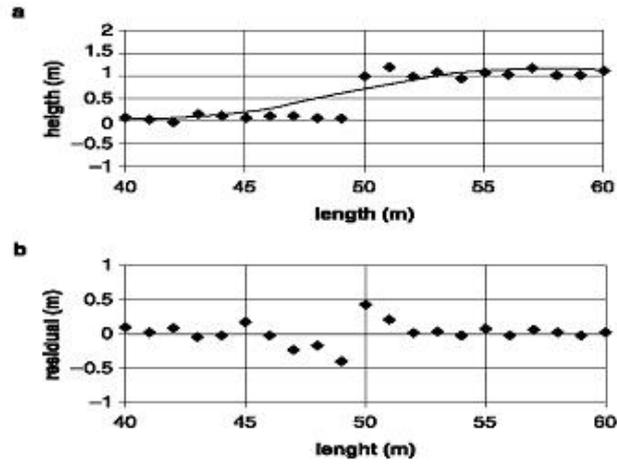


圖 3-3-4 (A)高程觀測量之垂直剖面與內插曲線圖觀測量  
(B)內插表面之殘差分布圖(Brovelli et al., 2004)

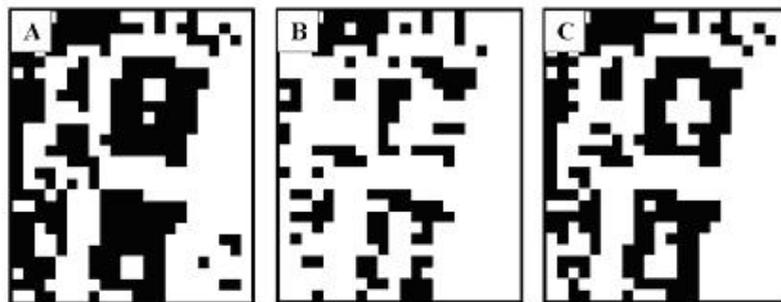


圖 3-3-5 邊界偵測(梯度門檻值) (A) Low Threshold, (B) High Threshold, (C) The New Method output (Brovelli et al., 2004)

將原始點資料進行實際測試後所得到的初步分類結果，如圖 3-3-6 所示；其中深橘色點為邊界點，黃色點為不確定點，而淺橘色則為地面點。



圖 3-3-6 邊界偵測後分類情形 (Brovelli et al., 2004)

### §3-4 區域成長

經邊界偵測步驟後，點雲分類為邊界點(Edge Point)、地面點(Ground Point)及不確定點(Uncertain point)三種；觀察邊界點位置所在之內插網格是否與同性質之網格具有鏈結（相鄰）特性；若有，則將該網格利用 Convex Hull 演算法組成鏈節環狀後，對座標位置座落於環圈內的點雲進行分類。本步驟基於房屋中央的點雲高程通常大於或等於房屋邊界高程條件下進行房屋結構點雲偵測。

進行此步驟時，首先將光達最後回訊資料的點雲密度視為網格解析度進行網格化處理。然後擷取相同網格內的點雲資料，計算第一次回訊高程值與最後回訊高程值之高差且設定其高差門檻值  $T_d$ 。若兩者高差超過  $T_d$ ，則判別該平面位置具有兩次回訊特性。反之，則為單一回訊。將分類為單一回訊的邊界點經 Convex Hull 演算法處理後，將邊界點鏈結形成凸多邊形如圖 3-4-1 所示，並同時計算鏈結邊界之平均高程  $H_m$ 。

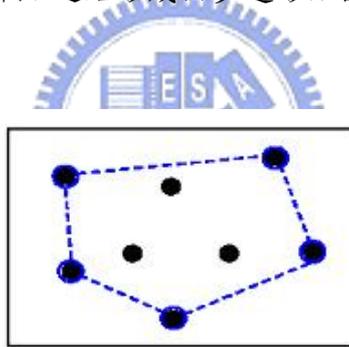


圖 3-4-1 點集合所組成的凸多邊形 (Brovelli et al., 2004)

若是凸多邊形內部的點雲其高程高於或相同於所計算的  $H_m$  時，則分類為地物點。Brovelli et al.(2004) 指出此方法並不適用於點雲密度小於  $0.18 \text{ Points}/\text{M}^2$ ，也就是點間隔約 2.0-3.5m 之情況。其原因是因為在較低的點雲密度下，此演算法無法正確地組成建物邊界多邊形而造成分類上的錯誤，因此較適用於點雲密度較高的資料。另外，此演算法並無法完全正確地分類地物內部點，在少數情況下（例如具有高程不一的特殊屋頂結構）會產生分類錯誤。此錯誤情況會使得建物點雲中某些分類為地物，而某些分類為地面；同理也會造成地面點錯誤判釋。針對此類問題，在下一個步驟中提出因應對策。

### §3-5 分類校正

為了解決上述步驟之少數特殊情況，在此步驟中提供一個重新分類的方法，此方法是根據原始點雲高程與初始 DEM 兩者之高程差異大小進行重新分類。首先將上步驟分類為地面點的點雲進行雲線(Bilinear Spilne(  $S_c$  )by Tikhonov regularization(  $\lambda_c$  ))內插，接著計算原始點雲高程與內插高程之高差( $\Delta$ )；將此高差與兩個設定門檻值  $T_c, t_c$  進行比較，比較後可列出下面四種重新分類的情形：

- 若點 P 被分類為地面點且  $\Delta > T_c$  時，將其重新分類為地物點。
- 若點 P 先前被分類為雙重回訊地面點(其第一次回訊高程與最後回訊高程之殘差大於  $T_d$  且在先前步驟中被分類為地面點)且  $\Delta > T_c$  時，將其重新分類為雙重回訊地物點。
- 若點 P 先前被分類為地物點且  $|\Delta| < t_c$  時，將其重新分類為地面點。
- 若點 P 先前被分類為雙重回訊地物(其第一次回訊高程與最後回訊高程之殘差大於  $T_d$  且在先前步驟中被分類為地物點)點且  $|\Delta| < t_c$  時，將其重新分類為雙重回訊地面點。



此步驟可反覆進行迭代處理，直到以視覺分析觀察其成果能夠顯著地解決問題或減少此類不確定成果的數量後停止迭代。最後，迭代成果中被分類為地面點與雙重回訊地面點的點雲資料即為萃取地面點成果。

### §3-6 系統介紹與參數設定

本研究使用之程式是在 GRASS 系統下開發的操作模組(Brovelli et al., 2004)，其模組內容由表 3-6-1 說明。以下簡略介紹 GRASS 系統。

表 3-6-1 程式模組概述

作業系統	Linux	
操作環境	GRASS(Open Source GIS 其中一種系統)	
程式模組	s.edgedetection	邊界偵測
	s.growing	區域成長
	s.correction	分類校正
	s.bspline.reg	DEM 計算

地理資源分析支援系統(Geographical Resources Analysis Support System, GRASS)是在 1982 到 1995 年由美國聯邦機構、大學及私人公司合力發展的地理資訊系統，其中，以美國工兵署營建工程研究實驗室 (Construction Engineering Research Laboratory, USA - CERL) 為此系統開發主導團隊。在 1997 年後，此發展機構由美國工兵署營建工程研究實驗室轉由 Baylor University 之 Markus Neteler 主導；而在 1999 年 GRASS 接受了 GNU GPL 的版權管理政策，採取 Linux 為發展平台(黃誌川，2003)。此系統具有下列特色：

- 在 UNIX 環境下開發 GIS 系統。
- GRASS 是一個公用軟體，相關資料均為公開，任何人都可以經由 INTERNET 網路系統，免費取得 GRASS 的程式原始碼、執行碼、文件和相關資訊。
- GRASS 是使用者參與式 GIS，自發展初期，就由美國 14 個聯邦機構組成 GIASC 委員會來確立 GRASS 技術發展方向；而使用者團體組成的 Open GRASS Foundation，強調使用者共享觀念與經驗，並提倡開放式 GIS 的做法。

目前由 ITC-irst 主導 GRASS 發展，該組織已在 2005 年 3 月正式推出最新 GRASS 6.0.0 版，其最新訊息可在 GRASS 網站(GRASS, 2005)中獲取。

安裝完成 GRASS 以及此模組程式後，先將粗差濾除後的光達原始數據轉換成 GRASS 可相容之格式，經由下列四個步驟進行非地面點濾除。

- **s.edgedetection**：用以偵測地物的邊界，其輸出數據包含了初步分類完成的三種點數據：地面點、邊界點以及不確定點；需要設定的參數： $S_g$ 、 $S_r$ 、 $\lambda_g$ 、 $\lambda_r$ 、 $t_g$ 、 $T_g$ 、 $\vartheta_g$ ，其涵義如表 3-6-2 所示。

表 3-6-2 s.edgedetection 參數表

參數名稱	參數內涵
Sg	Bilinear Spline 內插平面解析度大小(m)
Sr	Bicubic Spline 內插平面解析度大小(m)
$\lambda_g$	Tikhonov regularizing 參數
$\lambda_r$	Tikhonov regularizing 參數
tg	邊界偵測時，小梯度門檻值
Tg	邊界偵測時，大梯度門檻值
$\theta_g$	邊界偵測時，角度門檻值(rad)

- **s.growing**：進行區域成長過程，輸入檔包括經由邊界偵測後的最後回訊資料輸出檔與第一次回訊資料檔；輸出檔包括四種不同分類的點雲數據（屬性值種類：0 為地面點、1 為兩次回訊地面點、2 為兩次回訊的地物點、3 為地物點）；使用參數有：被認定為兩次回訊之最小距離門檻值 Td，同一平面位置上，判斷是否為地物之頻率門檻值 Tj，是否執行區域成長過程 Appl，如表 3-6-3 所示。

表 3-6-3 s.growing 參數表

參數名稱	參數內涵
Appl	是否使用 Convex Hul 演算法(yes/not)
Td	同一平面位置上，判斷是否兩次回訊之 高程門檻值 (m)
Tj	網格位置上，判斷是否為地物之機率門 檻值

- **s.correction**：進行校正分類，此重新分類結果包含：地面點，兩次回訊地面點，地物點，兩次回訊地物點）；使用參數有：Sc、 $\lambda_c$ 、Tc、tc；此外，為了求得最佳參數，此過程需進行若干次，N 表示其迭代處理的次數，其涵義如表 3-6-4 所示。

表 3-6-4 s.correction 參數表

參數名稱	參數內涵
Sc	Bilinear Spline 內插平面解析度大小 (m)
$\lambda_c$	Tikhonov regularizing 參數
Tc	校正分類時，大高程門檻值
tc	校正分類時，小高程門檻值
N	迭代次數 (約 1~2 次)

- **s.bspline.reg**：可將光達點數據進行 bilinear/bicubic interpolation spline 內插；使用參數： $S_i$ 、 $\lambda_i$ 、 $r_i$  (表 3-6-5)。輸出檔可自由選擇為點數據檔或是網格數據檔。

表 3-6-5 s.bspline.reg 參數表

參數名稱	參數內涵
$S_i$	Bilinear Spline 內插平面解析度大小(m)
$\lambda_i$	Tikhonov regularizing 參數
$R_i$	網格解析度大小(m)

整個流程中，最常使用到的參數是  $S_i$  也就是雲線內插表面的平面解析度設定值；此參數之設定必須考量使用的光達點雲資料平均點密度，而本研究使用之參數值於本文最後附錄一，提供參考。

## 第四章 實驗成果及分析

### §4-1 實驗數據介紹

本研究所使用的光達數據是由 2000 年歐洲攝影測量實驗研究組織(OEEPE)之雷射掃描計畫(OEEPE, 2000)所建置的光達數據；此光達數據之取樣範圍是在德國南部 Vaihingen/Env 地區以及 Stuttgart 城市中心（圖 4-1-1,4-1-2）。

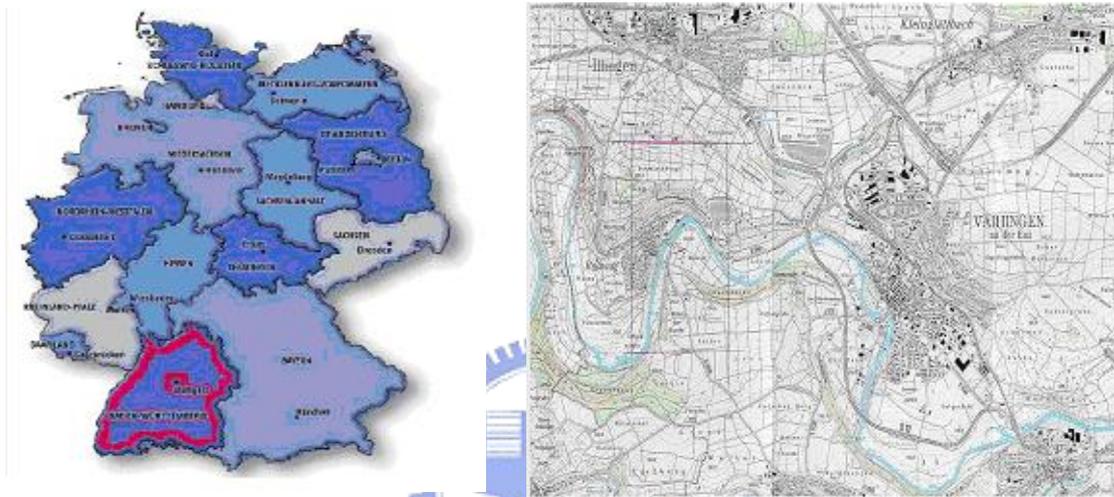


圖 4-1-1 德國行政區域圖，測試區域為紅色範圍(OEEPE, 2000) 圖 4-1-2 Vaihingen/Env 測試區以及 Stuttgart 城市中心地理位置(OEEPE, 2000)

該計畫之光達數據是委託 FOTONOR AS 公司採用 Optech ALTM1210 (Optech, 2004)型號之光達系統進行地面掃描，分別紀錄第一次(First Return)與最後一次(Last Return)的回訊數據，並且同時紀錄反射雷射光的回訊強度值(Intensity)；最後，依照其掃描區域內不同的地理位置將成果數據分成都市與郊區兩種，並分割成四個區域，各區域之地理位置及點雲密度與地形特徵如表 4-1-1、表 4-1-2 所示。

表 4-1-1 測試數據概要

種類	區域	涵蓋範圍				點密度 (points/m <sup>2</sup> )
		Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	
都市	Site1	512050	513150	5403440	5404100	0.67
						0.18
						0.04
	Site2	513450	513870	5402650	5403280	0.67
Site3	512023	512549	5403120	5403500	0.67	
Site4	513120	513630	5403190	5403760	0.67	
郊區	Site5	493650	495250	5419770	5421000	0.18
	Site6	496350	497950	5420750	5421817	0.18
	Site7	495950	497200	5421350	5422380	0.18
	Site8	499450	500550	5408330	5419430	0.18
0.05						
						0.01

表 4-1-2 測試地區主要地形特徵

區域	種類	點雲間距	地形特徵
Site1	都市	1-1.5m 2-3.5m 4-6m	陡坡、山坡植物與建物混合區
Site 2	都市	1-1.5m	大型建物、不規則形狀建物、路上隧道與橋樑
Site 3	都市	1-1.5m	密集建物與植被、特異屋頂的建物
Site 4	都市	1-1.5m	火車站、火車
Site 5	郊區	2-3.5m	含有植被的陡坡、露天礦場、河岸植被
Site 6	郊區	2-3.5m	大型建物、堤岸
Site 7	郊區	2-3.5m	橋樑、地下通道
Site 8	郊區	2-3.5m 4-5.5m 7-10m	高架橋、斷線、河岸植被

為了解各測試區之地形變化，將各測試區之原始點雲數據進行初步統計歸納並且根據光達多重回訊特性採用第一次回訊資料進行網格化處理繪製成圖；如附錄二，藉此了解該區域內之地形特徵與地物分布情形。

## §4-2 檢核數據

本研究採用 ISPRS 對於上述八大地區進行人工分類後擷取其中十五塊小區域之分類點雲為檢核資料 (ISPRS, 2004) 提供各界使用。此檢核資料獲取的作業流程中, 作業人員必須對當地景物有相當程度的瞭解, 並且同時在進行分類的時候, 一併參考航空影像進行人工分類, 以確保人工分類的正確性; 而分類後的檢核資料分為地面點及地物點兩種。十五組樣本之地形與分類點數概要如表 4-2-1、表 4-2-2 所示。

表 4-2-1 檢核樣本地面特徵

測試區域	樣本	地面特徵 (選取原因)
Site 1	Sample 11	陡坡上之植被與建物
	Sample 12	小型物體 (車子)
Site 2	Sample 21	窄橋
	Sample 22	橋墩(西南處)與通道(東北處)
	Sample 23	結構複雜建物, 大型建物以及不連續地面
	Sample 24	斜坡
Site 3	Sample 31	不連續地面, 低粗差點以及低粗差影響點
Site 4	Sample 41	低粗差點雲叢集
	Sample 42	窄長地物
Site 5	Sample 51	坡面上植被
	Sample 52	矮小植被, 斷線(山脊)
	Sample 53	斷線
	Sample 54	低解析度建物
Site 6	Sample 61	斷線(陡峻山脊和渠道)
Site 7	Sample 71	橋樑, 斷線

表 4-2-2 檢核資料統計表

樣本	地面點	地物點	總點數
Sample11	21786	16224	38010
Sample12	26691	25428	52119
Sample21	10085	2875	12960
Sample22	22504	10202	32706
Sample23	13223	11872	25095
Sample24	5434	2058	7492
Sample31	15556	13306	28862
Sample41	5602	5629	11231
Sample42	12443	30027	42470
Sample51	13950	3895	17845
Sample52	20112	2362	22474
Sample53	32989	1389	34378
Sample54	3983	4625	8608
Sample61	33854	1206	35060
Sample71	13875	1770	15645

此十五組範圍樣本的資料格式為三維點雲座標 X,Y,Z 加上一個屬性值 (X,Y,Z,0 or X,Y,Z,1)，當屬性值為零的時候，該點雲為地面點；若屬性值為 1 的時候，則該點雲為地物點。

### §4-3 成果精度評估

為了解濾除成果與檢核資料在產製 DEM 品質上的差異與分類正確率，採用交叉驗證指標與交叉矩陣評估其內部精度與分類精度。同時由濾除成果與檢核資料高程比對計算濾除成果與檢核資料兩者間的高差，藉此了解濾除成果與檢核資料之差異。

#### §4-3-1 內部精度評估

以樣本 test11 為例，使用三種不同內插方式進行交叉比對計算：不規則三角網線性內插法 (Triangulation with Linear Interpolation method, TIN)、克利金內插法(Kriging Method, Kriging)、距離反比權重法(Inverse Distance Weighted Method, IDW)；本研究隨機從各樣本中取樣 1000 點資料進行指標計算。

交叉比對後，藉由計算 KAE 與 KRMSE 評估濾除成果之不偏性與一致性；  
以表 4-3-1 說明不同內插法對於濾除成果的不偏性與一致性。

表 4-3-1 濾除成果之交叉驗證指標

濾除成 果	交叉驗證 指標	不規則三 角網	克利金內 插法	距離反比 權重法	濾除成 果	交叉驗證 指標	不規則三 角網	克利金內 插法	距離反比 權重法
test11	KAE	-0.03238*	-0.03136*	-0.03357*	test41	KAE	0.04378*	-0.00823	0.00697
	KRMSE	1.00249	0.96165*	1.00252*		KRMSE	0.99506*	1.00002	1.00003
test12	KAE	-0.01397	0.00350	-0.01749*	test42	KAE	0.00972	0.00514	-0.00609
	KRMSE	1.00063	1.00009	1.00162		KRMSE	1.00090	1.00033	1.00028
test21	KAE	-0.00723	0.00570	-0.00092	test51	KAE	0.02383	-0.00530	-0.01030
	KRMSE	1.00028	1.00218	1.00003		KRMSE	1.00258*	1.00015	1.00041
test22	KAE	-0.00540	0.00100	-0.00005	test52	KAE	0.00258	-0.00208	0.00146
	KRMSE	1.00080	1.00003	1.00000		KRMSE	1.00104	1.00003	1.00001
test23	KAE	-0.00638	0.00601	-0.00401	test53	KAE	0.03390*	0.02463*	-0.04597*
	KRMSE	0.99834	1.00042	1.00015		KRMSE	1.00387*	1.00398*	1.00671*
test24	KAE	0.01452	-0.01446	-0.01440	test54	KAE	-0.02545	0.00470	-0.01161
	KRMSE	1.00117	1.00516*	1.00132		KRMSE	1.00155	1.00006	1.00037
test31	KAE	-0.01230	0.01542*	0.00177	test61	KAE	-0.00434	0.00835	-0.00206
	KRMSE	1.00028	1.00184	1.00002		KRMSE	1.00051	1.00158	1.00007
test71	KAE	0.00202	-0.00798	-0.01427					
	KRMSE	1.00006	1.00107	1.00173*					

以指標品質來說，KAE 值越接近零表示其高程分佈較為集中，而 KRMSE 值越接近一，則表示該組內各點雲高程與內插高程之差異程度較小。由表 4-3-1 之十五組評估成果可觀察出此三種內插方式的 KAE 值分佈於 0.00258 至 0.04378 間，而 KRMSE 值則介於 1.00387 與 0.99834 間也可觀察出此十五組資料點雲高程與內插高程間的差異性大小。

挑選各組指標值最大三組數據以符號\*為記號表示，經觀察後可發現在 KAE 最大值之前三組數據中至少有兩組也為 KRMSE 值之最大值而另一組的 KRMSE 值也相當接近於 KRMSE 最大值之第三名，由此觀察出兩者伴隨發生機率相當大

也可當作是該組資料品質較差於其他組資料的指標意義。

另外，可藉由觀察計算交叉比對時所產生的高差值評估整體地面點之內插 DEM 品質，由於高差大表示該點雲高程與內插表面高程有較大的差異，可藉由此差異來進行後續粗差濾除動作；使用克利金推估法將 test11 之濾除成果進行交叉驗證後，得 test11 樣本交叉驗證之高差統計表如表 4-3-2。

表 4-3-2 test11 樣本交叉驗證之高差統計表

test11 交叉驗證高差統計表			
高差(m)	觀測量	累積數量	百分比
<= -8.00000	1	1	0.00489
-6	0	1	0
-4	5	6	0.02445
-2	256	262	1.25159
0	9587	9849	46.87103
2	10449	20298	51.08536
4	149	20447	0.72846
6	6	20453	0.02933
8	0	20453	0
10	0	20453	0
12	1	20454	0.00489

觀察表 4-3-2，可歸納出此濾除成果內包含少數高差過大的粗差點，其高差具有明顯異常現象，可藉由此統計成果進行後續的粗差濾除，以增進濾除成果的精度。

#### §4-3-2 分類精度評估

將濾除結果(地面點)與檢核資料進行比對後，採用交叉矩陣方式計算分類精度。本研究採用正確地面點、錯誤地面點、未成功地面點等三種點雲分類數量評估計算地面點分類精度；其計算方式為將濾除成果點數視為母數，計算正確率與錯誤率；而將檢核地面點數視為母數計算未成功率。

由於採用之檢核資料與濾除成果之點集合有些許差異，原因是因為在濾除過程中本研究將可能為粗差的點雲資料完全移除，使得兩者成果之點雲數目有些許

不同；經由計算各區域之粗差濾除率，除 Site6 為 1.1%外，皆小於 1%以下。依照點雲比對方式，計算 15 組樣本之分類統計表與該樣本之分類機率，將其 15 組統計成果以表 4-3-3 表示。

表 4-3-3 15 組地面點分類精度統計表

樣本	正確點	錯誤點	未成功點	正確率	錯誤率	未成功率
test11_grd	16885	3608	4887	0.82	0.18*	0.22*
test12_grd	26432	3852	231	0.87	0.13*	0.01
test21_grd	9900	306	88	0.97	0.03	0.01
test22_grd	17147	778	5202	0.96	0.04	0.23*
test23_grd	7721	619	5486	0.93	0.07	0.41*
test24_grd	2996	219	2413	0.93	0.07	0.44*
test31_grd	15528	3113	14	0.83	0.17*	0.01
test41_grd	4803	294	733	0.94	0.06	0.13*
test42_grd	11315	1547	1117	0.88	0.12*	0.09
test51_grd	13434	1165	511	0.92	0.08	0.04
test52_grd	18330	633	1747	0.97	0.03	0.09
test53_grd	26242	454	6576	0.98	0.02	0.20*
test54_grd	3926	769	51	0.84	0.16*	0.01
test61_grd	31934	184	1892	0.99	0.01	0.06
test71_grd	11417	238	2452	0.98	0.02	0.18*

由分類成果表可看出本研究中所使用的濾除演算法在分類正確地面點方面最低成功機率為 82%。而依照其區域分類(點雲密度大小)，都市地區之平均成功機率為 90%，而郊區之平均成功機率更高達 95%。\*符號之數據為比例較大之樣本的錯誤率與未成功率。在如此高效率的分類成果中，此濾除演算法依然有其不足之處，藉由觀察地面點未分類成功機率可發現在都市地區的平均未成功率約為兩成以上，尤其在樣本 test23 與 test24 之處更高達四成以上；相較於都市地區之成果，郊區濾除成果的最大未成功率為 20%而其平均未成功率為 9%，也就是說本濾除演算法在郊區部分較都市地區成果有明顯較佳的分類成效而其未成功分類的機率也較小。

由分類地面點成果，可觀察出本演算法的濾除成果可達到相當良好的分類精

度，但某些樣本中發現較多的地面點分類錯誤及大量的未成功分類地面點，依然對描述真實地表情形具有相當大的影響。原因是由於未成功分類的地面點或分類錯誤的地面點，易造成地形資訊的流失或是造成錯誤的地形資訊而導致後續產製 DEM 時無法詳細正確地描述地形真實起伏。針對上述可能發生的問題，本研究分為錯誤點與未成功點兩部分分別進行分析與探討，並嘗試找出其分類錯誤的原因，以提供後續進行人工濾除時可採用的準則及參考。

另外，同時計算地物分類精度統計表提供參考，如表 4-3-4 所示。

表 4-3-4 15 組地物點分類精度統計表

樣本	正確點	錯誤點	未成功點	分類正確率	錯誤率	未成功率
test11_obj	12608	4895	3616	0.72	0.28	0.22
test12_obj	21581	245	3847	0.99	0.01	0.15
test21_obj	2531	88	344	0.97	0.03	0.12
test22_obj	9397	5212	805	0.64	0.36	0.08
test23_obj	11246	5496	626	0.67	0.33	0.05
test24_obj	1833	2417	225	0.43	0.57	0.11
test31_obj	10188	26	3118	0.997	0.003	0.23
test41_obj	5301	747	328	0.88	0.12	0.06
test42_obj	28463	1135	1564	0.96	0.04	0.05
test51_obj	2729	511	1166	0.84	0.16	0.30
test52_obj	1726	1747	636	0.50	0.50	0.27
test53_obj	930	6576	459	0.12	0.88	0.33
test54_obj	3855	51	770	0.99	0.01	0.17
test61_obj	1020	1892	186	0.35	0.65	0.15
test71_obj	1532	2452	238	0.38	0.62	0.13

依據上述二表，此兩表具有相對關係；也就是當樣本地面點分類未成功率較大時，其地物點分類錯誤率也隨即較大。

### §4-3-3 高程資料比對

以樣本 Sample11 之濾除成果為例，將其與檢核資料進行高程資料比對。其比對結果如圖 4-3-1 所示；統計指標如表 4-3-5 所示。

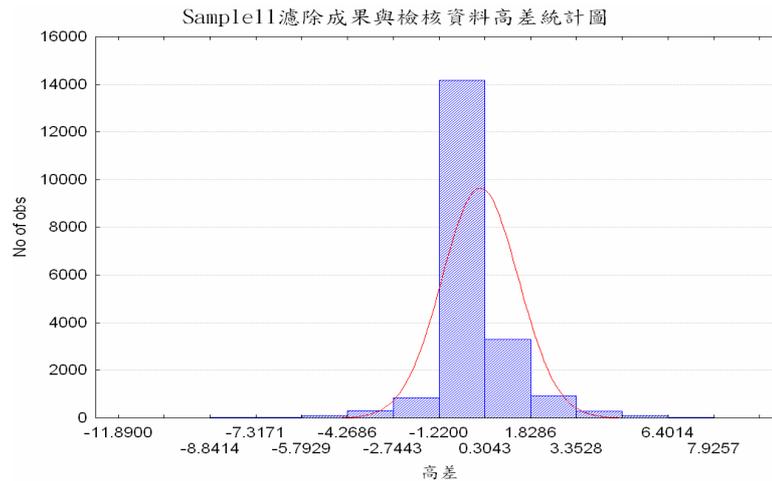


圖 4-3-1 Sample11 濾除成果與檢核資料高差統計圖

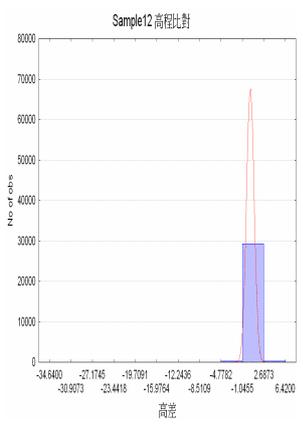
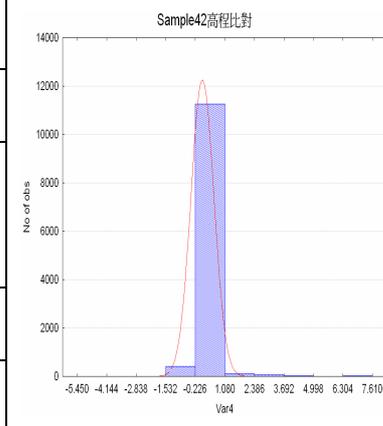
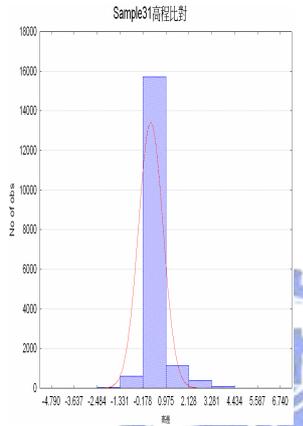
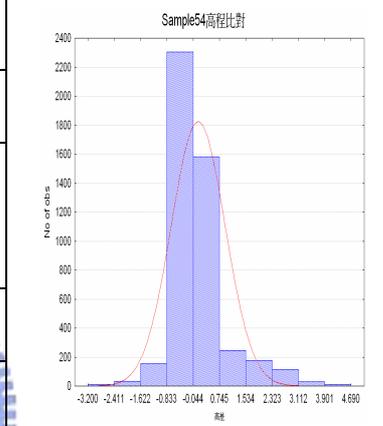
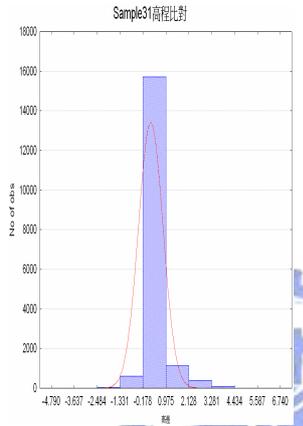
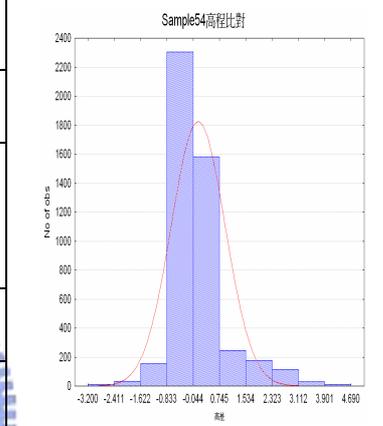
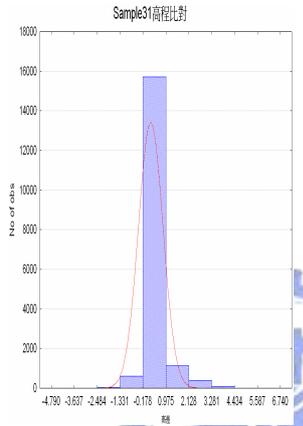
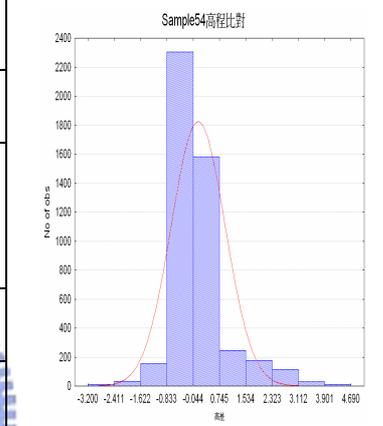
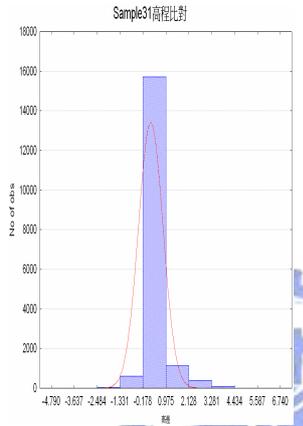
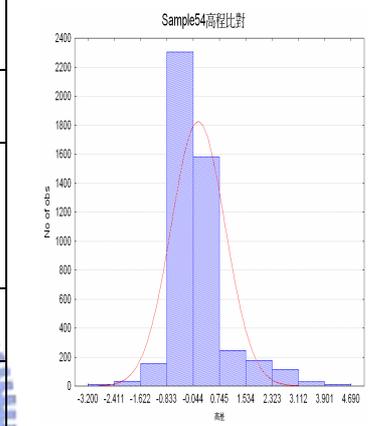
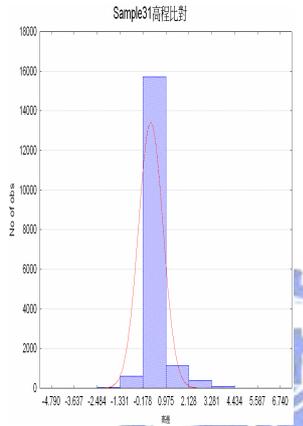
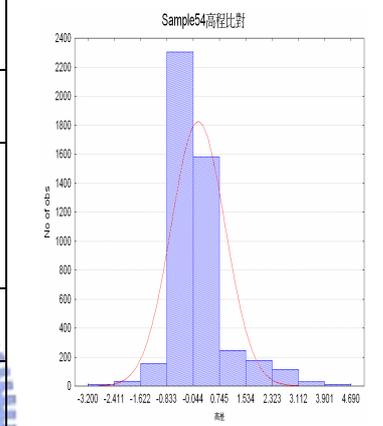
表 4-3-5 Sample11 高差統計表

最大值	最小值	平均值	中值	標準差
-11.89	9.45	0.09	0.01	1.27

由高差統計圖表可看出誤差分布集中於中央，從中觀察出大部分的濾除成果點雲與檢核資料差異介於-1.2m 到 1.8m 間，但依然保留了少許誤差較大的點雲，造成誤差範圍達到-11.89m 到 9.45m 間。若扣除這些少量誤差過大的點雲後，其誤差範圍則可明顯縮小，使誤差呈現較密集分布現象。

依上述步驟，將錯誤率大於 10% 之其餘樣本進行高程比對，藉此觀察其誤差分布情形，其成果如表 4-3-6。

表 4-3-6 錯誤率大於 10% 樣本之高差統計

Max	6.42		7.61	
Min	-34.64		-5.45	
Mean	0.14		0.06	
Error	0		0	
Median	0		0.51	
SD	0.65		0.09	
Max	6.74		4.69	
Min	-4.79		-3.2	
Mean	0.18		0.09	
Error	0		0	
Median	0.01		-0.07	
SD	0.62		0.80	

從上表可觀察濾除成果之高差大部分密集分布於零附近，由此可知，絕大多數的濾除成果與檢核資料高程相符。而由誤差分布情形也可得知該濾除成果誤差分布範圍，此結果可提供後續人工濾除時對於錯誤點濾除的參考。

#### §4-4 視覺化分析

進行視覺化分析前，濾除成果的點雲資料為離散的點資料，需經過內插網格化後產製數值地形模型資料進行視覺分析。但不同內插方法的選擇會造成 DEM 品質的影響，故須先對 DEM 品質精度進行評估。所謂內插，是利用資料中已知點的屬性值推估未知點的屬性值；透過此過程所產生的 DEM 品質會受到內插方法特性、地形特性等因素的影響，故必須對內插方法之原理及性質有所瞭解，方能依點雲資料之特性選擇較佳之空間內插方法。根據光達點雲離散分布的特性，本小節採用克利金內插方式產生 DEM 藉此觀察濾除成果與檢核資料之差異；全區八組測試資料之濾除成果以視覺化方式展示於附錄三。

使用克利金法產生樣本 Sample11 之數值地表模型，再以數值暈渲圖方式進行視覺觀察，其成果如圖 4-4-1 所示；

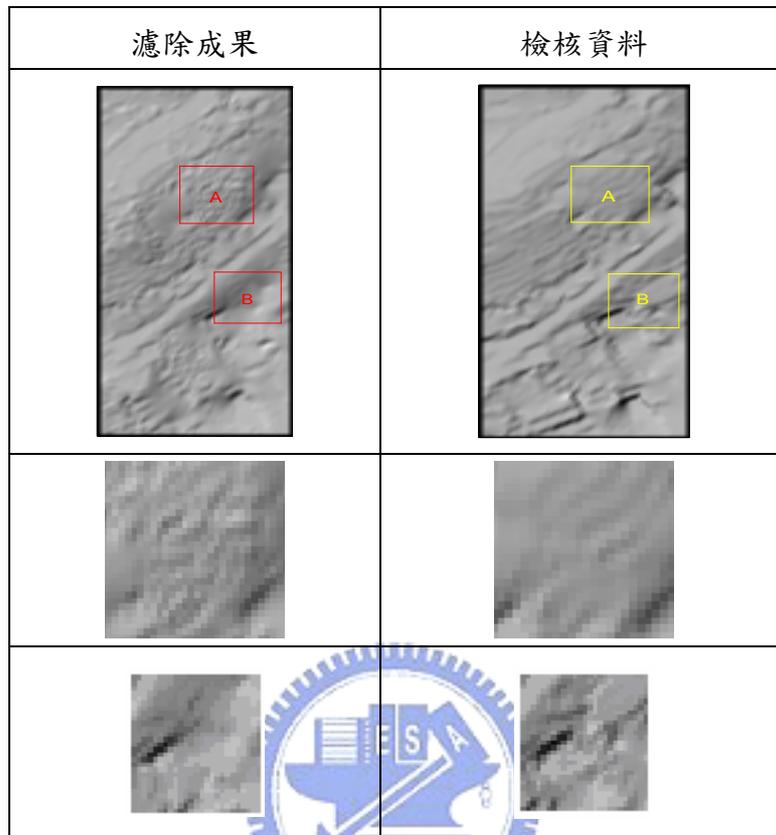


圖 4-4-1 test11 濾除成果與檢核資料之視覺比較

觀察整個區域，可發現濾除成果在上半部山坡地上較多零星起伏，而在下半部建物部分則較為平滑。其原因可能是濾除成果中，在山坡地保留了較多點雲資料，因此產生粗糙現象，而建物區域則因為資料缺口而產生較多內插平滑化現象。

A 區域是位於山坡上，從圖中可以看出有較多零碎的高程起伏，由原始 DSM 資料可觀察得知此區域為山坡的植被部分，約略可推斷出該山坡之植被濾除失敗率較高。以 B 區域來說，該區域位於山腳平坦處，有較多的房屋建物。此區域之濾除成果由於資料空缺導致內插時產生過度平滑化現象，所以此處 DEM 成果之平滑現象並非反映真實地表。

以肉眼觀察由數值暈渲圖成果可知除了資料空缺處外，該濾除成果與檢核資料無明顯差異，接下來藉由繪製五米等高線圖進行 DEM 高程比較，如圖 4-4-2 所示。

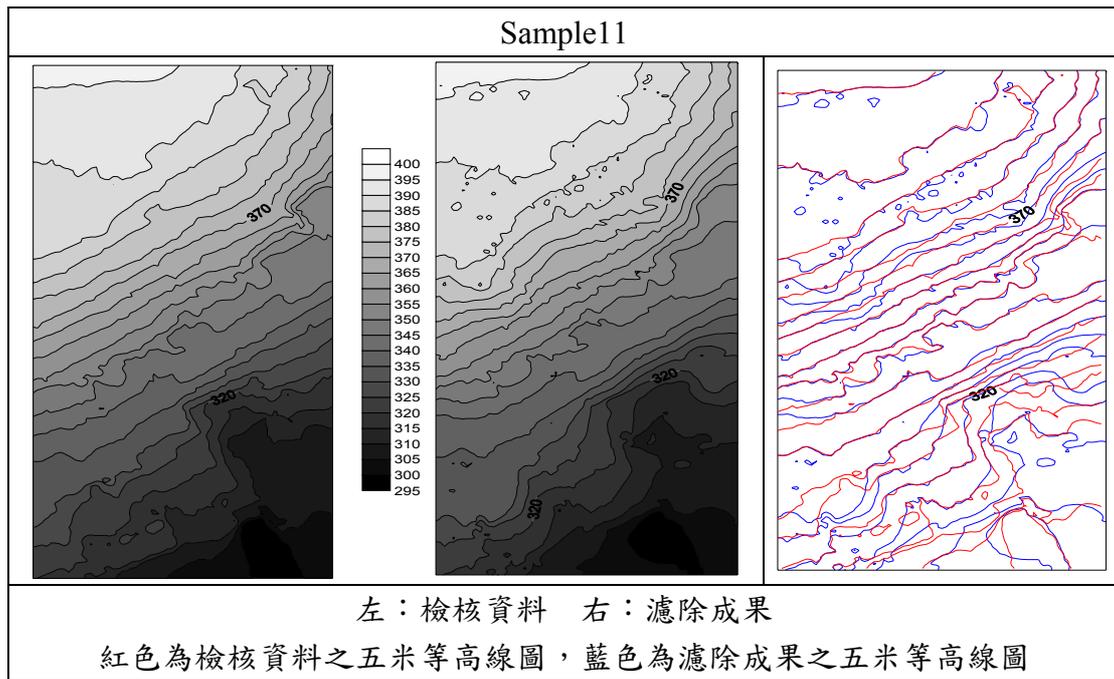


圖 4-4-2 等高線圖比較

經觀察後發現兩者在山坡部分（上半部）大致相同，除了零星的起伏與少許等高線不重合外，大致可看出此處之起伏大致相同；相較之下，在下半部建物部分的差異較大；利用兩成果之點雲分布來說明山坡地與建物濾除效果之好壞，如圖 4-4-3 所示。

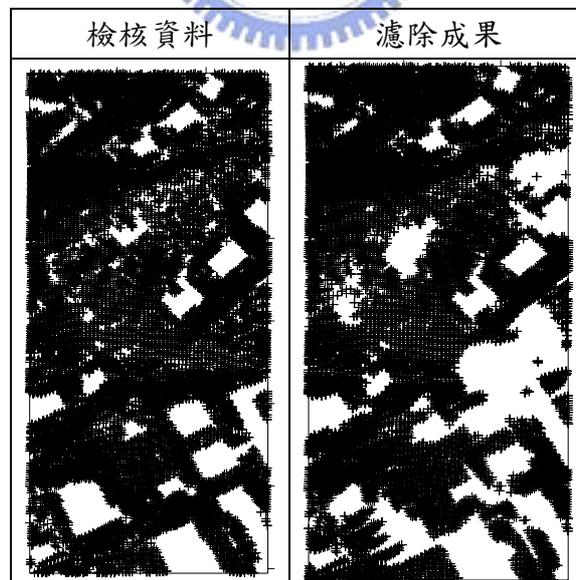


圖 4-4-3 Sample11 濾除成果與檢核資料之點雲分布圖

由點雲分布圖可看出在上述暈渲圖比較所圈選的建物部分，在濾除成果中幾乎將點雲完全過濾，而檢核資料卻保留了大部分的點雲；所以該濾除成果在進行

內插時產生較平滑的現象，其成果也較不可靠；由此圖可看出上半部的點雲分布兩者較為相似，而在下半部較多建物的地區產生了較大的差異。

為了更詳細分辨兩者 DEM 之高程差異，對原始 DSM、濾除成果、與檢核資料三者繪製高程剖面圖，並分別針對建物與植被部分進行分析。

針對山腳下的兩棟建物進行高程剖面評估，圖 4-4-4 中藍色線段即代表所繪製的高程剖面線包含原始 DSM，檢核資料與濾除成果之高程剖面線成果。

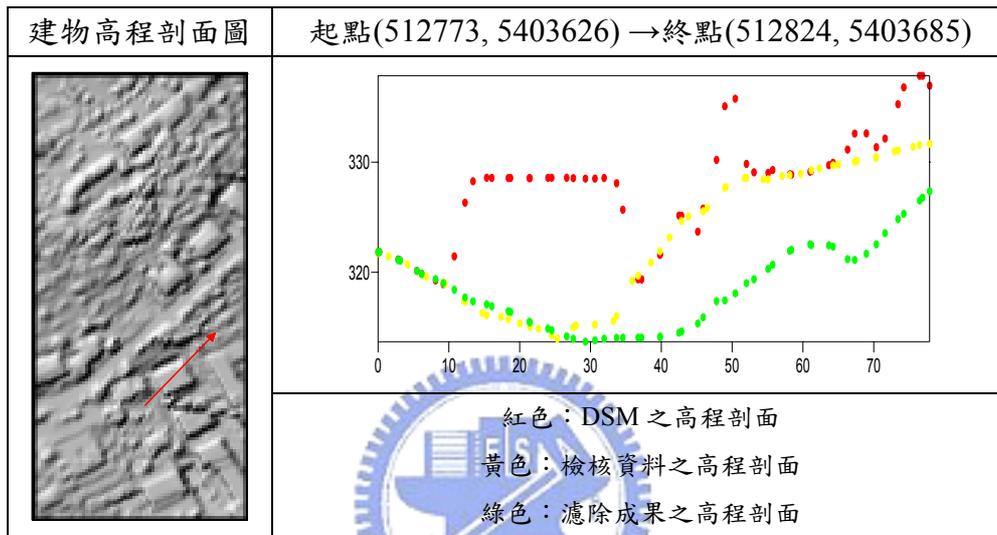


圖 4-4-4 建物高程剖面圖

觀察點雲分布圖（圖 4-4-3）與此剖面圖，可發現濾除成果與檢核資料同樣過濾了房屋的特徵，而該濾除成果與檢核資料之右半部高程剖面卻不一致。原因是因為濾除過程將右半部的點雲濾除，使得該部分的 DEM 高程是經由內插所產生，因此可明顯地看出檢核資料與濾除成果在此處的差異。由此推斷出濾除成果在進行內插時需要考量資料空缺處之範圍大小與性質，避免內插產生錯誤的 DEM 成果。

接下來，針對植被濾除成果進行高程剖面圖之處理；觀察數值暈渲圖，在山坡地部分找出植被分布地區進而繪製高程剖面圖來評估植被濾除效果，紅色線段為所繪製之高程剖面線，如圖 4-4-5。

從圖 4-4-5 可觀察出此斜坡的濾除成果與檢核資料成果十分相近，同樣可濾除植被資料而保留地面資料。

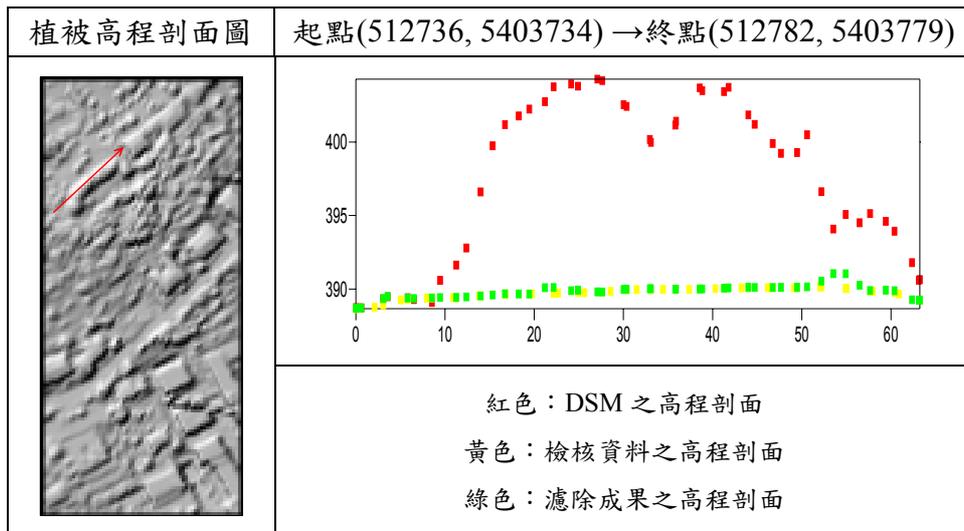


圖 4-4-5 植被高程剖面圖

以上成果大致可推斷出此演算法對於建物與植被的濾除效果大致良好，但須注意到的一點是資料缺口處的內插部分，由於缺口處無高程資料可進行內插處理，而採用距離較遠的高程數據內插取得高程。因此，此局部內插的高程較容易產生錯誤的 DEM 成果。

分析完都市樣本(Sample11)之後，以郊區樣本(Sample61)為觀察對象進行視覺分析；將樣本 Sample61 之第一次回訊資料內插成網格資料後進行觀察，藉此了解該樣本之地形起伏情形；由於樣本 Sample61 之點雲密度為每平方公尺 0.157 點（35056 點/223862 平方公尺），換算成平面解析度約為 0.395m，利用克利金法將其內插成 4 米網格後以數值暈渲圖（圖 4-4-6）進行視覺觀察，可初步找出兩者差異之處。

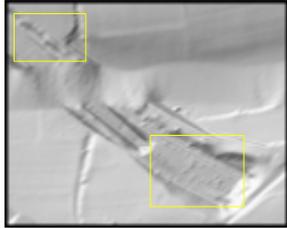
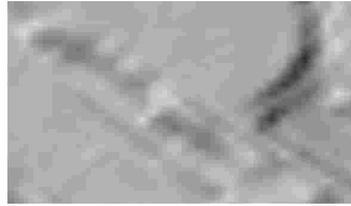
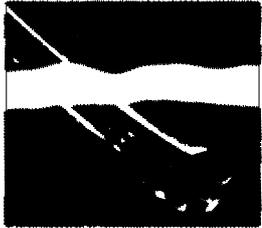
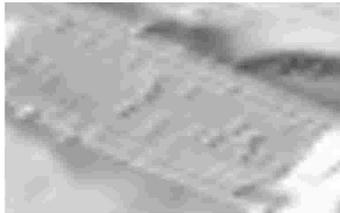
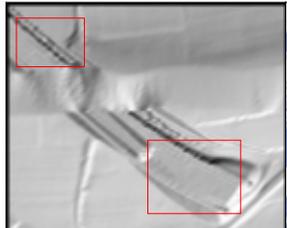
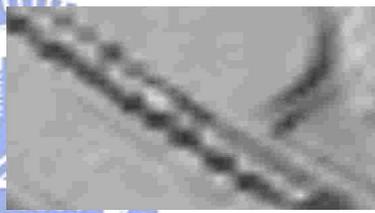
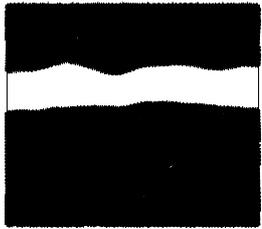
Sample61	
濾除成果	
	
內插 DEM	放大後左上黃色區塊地形
	
點雲散佈圖	放大後右下黃色區塊地形
檢核資料	
	
內插 DEM	放大後左上紅色區塊地形
	
點雲散佈圖	放大後右下紅色區塊地形

圖 4-4-6 郊區 Sample61 濾除成果與檢核資料視覺比較

圖 4-4-6 為 Sample61 濾除成果及檢核資料所組成之內插 DEM 及點雲分佈圖；濾除成果 DEM 之左上黃色區塊中，濾除成果較檢核資料 DEM 平滑的原因是由於濾除成果中該位置資料空缺，故地形高程是經鄰近點雲內插高程而獲得，與檢核成果有明顯差異。而濾除成果 DEM 之右下黃色區塊中，濾除成果 DEM 含有較多零星起伏現象是由於濾除成果殘留了地形起伏較小的零星地物點造

成，其 DEM 成果不如檢核資料 DEM 平滑。另外，可明顯看出中間區域有一橫條狀明顯不連續的內插成果，此乃由於資料缺口所造成的錯誤現象，也說明若是缺口過大時，內插處理也會產生不連續現象而無法獲得良好的 DEM。接下來，繪製等高線圖進行自動濾除與人工濾除之比較觀察。以圖 4-4-7 所示。

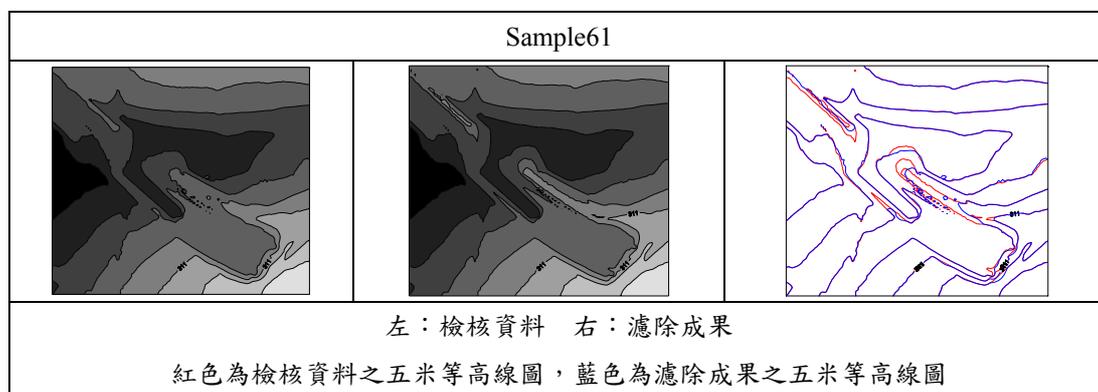


圖 4-4-7 等高線圖比較

由視覺觀察後，可發現兩者等高線大部分重疊，唯有中間少許等高線不重合。接下來，繪製高程剖面圖來說明兩者在產製 DEM 後的高程差異及評估其 DEM 成果好壞，如圖 4-4-8。

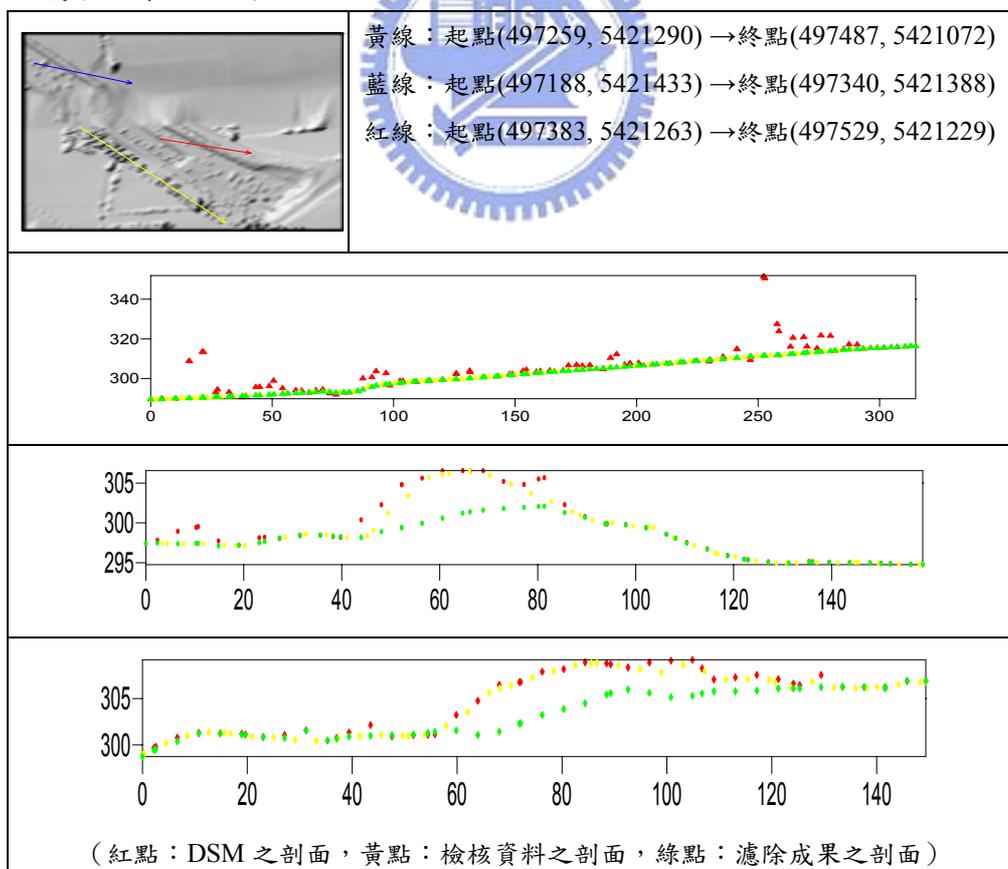


圖 4-4-8 樣本 Sample61 之高程剖面圖

由黃線的高程剖面圖可看出濾除成果與檢核資料皆可把凹槽旁邊的植被濾除，兩者所保留的地形特徵相當一致，而藍線與紅線部份，在濾除成果中隆起的土丘被移除而產生較平滑的地形面，而檢核成果保留了該地形隆起的部分；可了解濾除演算法對於突然隆起的地形無法進行準確的判斷，而在點雲濾除之後造成地形資訊的損失。此點也說明了 Brovelli et al.(2002, 2004)演算法對於此種類的地形在處理上可能會造成的缺失；根據藍線與紅線高程剖面圖，可歸納出此演算法在對於類似於房屋形狀之小土丘時會產生濾除錯誤的現象，除此之外在此樣本中其餘成果皆可達到良好的濾除效果。

除了以視覺方式觀察成果外，藉由統計濾除成果與檢核資料之高程值和兩點雲資料空間分布圖分析兩者之異同處。以樣本 Sample11 為例，由高程統計直方圖(圖 4-4-9)可觀察出兩成果高程之最大最小值幾乎相等，初步判別此區域之高程範圍大致相同，同時也可判斷出濾除成果內無大粗差存在。將濾除成果與檢核資料進行點雲比對得統計表 4-4-1。

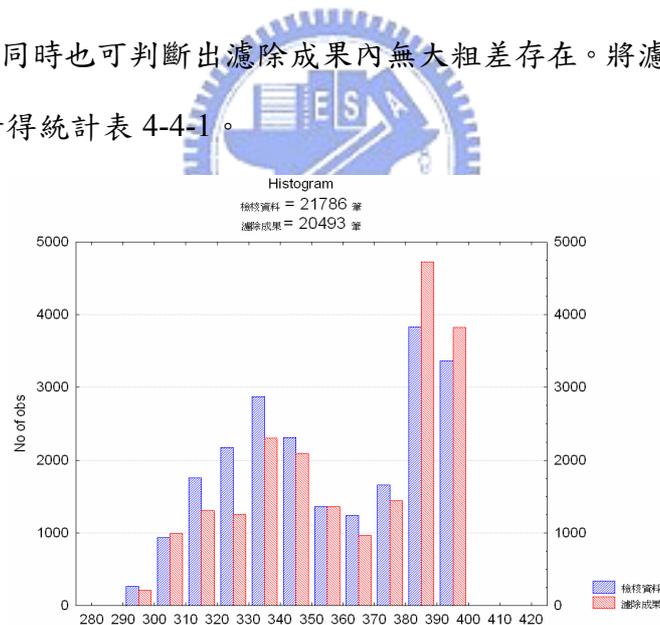


圖 4-4-9 Sample11 樣本檢核資料與濾除成果高程分布直方圖

表 4-4-1 Sample11 點雲比較統計表

Sample11 點雲比較統計表				
濾除成果	檢核資料	正確點	錯誤點	未成功分類點
20493	21786	16885	3608	4887

根據等高線圖與數值暈渲圖，劃分為山坡地（高程大於 350 米）與平地（高程小於 350 米）兩部份；初步統計可知山坡地之錯誤點約有 2244 個點，而平地

錯誤點有 1364 個點，其錯誤點高程分布圖如圖 4-4-10 所示。

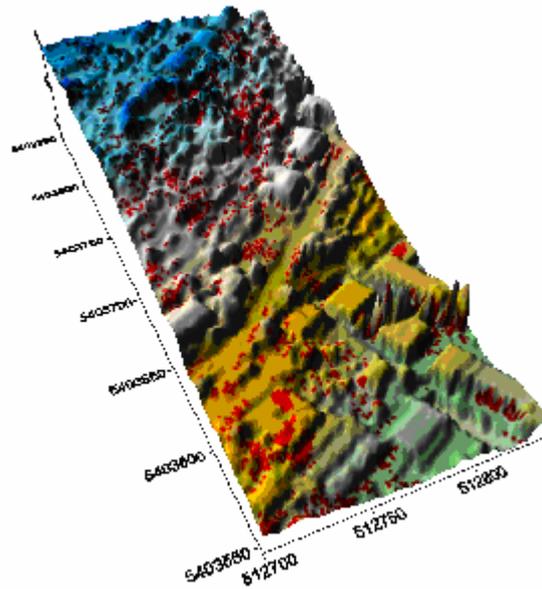


圖 4-4-10 Sample11 濾除成果分類錯誤地面點分布圖

上圖中紅色圓點為濾除成果中分類錯誤點，在上半部山坡處明顯聚集了許多錯誤分類的地面點。由此圖也可以清楚判別出在平地上錯誤點雲的分布大致是伴隨著建物而出現。

針對郊區樣本，Sample61 之濾除成果高程直方圖，如圖 4-4-11 所示。

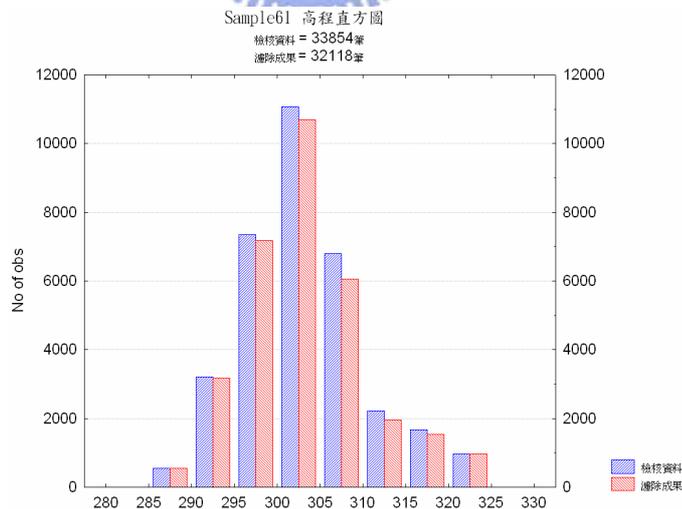


圖 4-4-11 Sample61 樣本檢核資料與濾除成果高程分布直方圖

將濾除成果與檢核資料成果進行點雲比對，從中萃取出濾除成果中分類錯誤的地面點資料。使用 GIS 軟體 Arcview 8.3 版(ESRI, 2004)之 3D 分析模組將其繪製成錯誤點雲分布圖，如圖 4-4-12 所示。

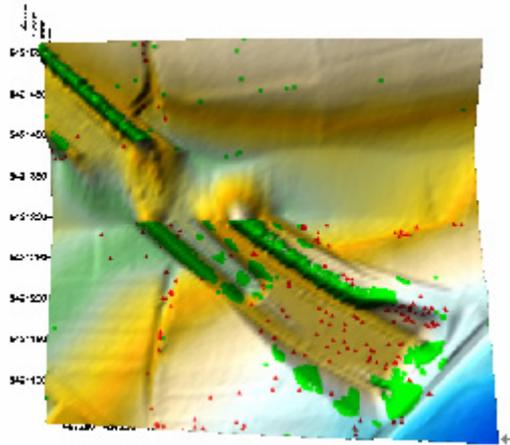


圖 4-4-12 Sample61 樣本濾除成果之錯誤地面點分布圖

觀察數值暈渲圖（圖 4-4-8）與錯誤地面點分布圖進行分析，發現分類錯誤的地面點並未在生產 DEM 時造成較大的誤差，推斷可能是這些點資料高程與鄰近正確地面點高程相近無大殘差存在，且錯誤點雲數量少（與檢核點數相比）所以在內插時並未造成太大的差異，而造成較大差異的是在綠色點部分，由於此部分地面點未在濾除過程中成功地分類出來，而造成在此部分的地形資訊流失，可從高程剖面圖中看出濾除成果較檢核資料平滑，至於未能成功分類的原因是因為該部分點雲高程局部起伏較大，而使得演算法將其分類為地物點所導致產製 DEM 時的錯誤。將濾除成果與檢核資料進行點雲比對得統計表 4-4-2。

表 4-4-2 Sample61 點雲比較統計表

Sample61 點雲比較統計表				
濾除成果	檢核資料	正確點	錯誤點	未成功分類點
32118	33854	31934	184	1920

從統計表可看出，此區域之濾除成果正確機率高達 94.3%，錯誤點佔濾除成果的 0.0057%，須注意到的是對於未成功分類的地面點在產製 DEM 的成果後會有明顯的差異，雖然產生了較平滑的地形面，但未必是正確的地形。

以視覺化觀察和高程統計圖來說，該演算法濾除成果與檢核資料成果分別產製 DEM（網格化）後，經由觀察歸納發現除了在複雜建物處產生非地面點濾除失敗，及樣本中對於隆起土丘地形處濾除失敗外，其餘部分無太大錯誤情形。

## §4-5 錯誤點與未成功點分析

首先，選取十五組樣本中分類錯誤率較高的幾組數據進行探討；經由分類精度表（表 4-3-3）中分別對都市與郊區兩地區各自挑選出錯誤率大於 10% 的一組樣本 test11 和 test54 進行分類錯誤的探討分析。

以樣本 test11 為例，為了解地面錯誤點空間位置的分布情形以視覺化方式觀察原始地表情形，因此使用 Arcview 8.3 之 3D 分析模組將第一次回訊資料組成不規則三角網後，依照該樣本之分類錯誤的地面點座標繪製其地面錯誤點分布圖，如圖 4-5-1 所示。

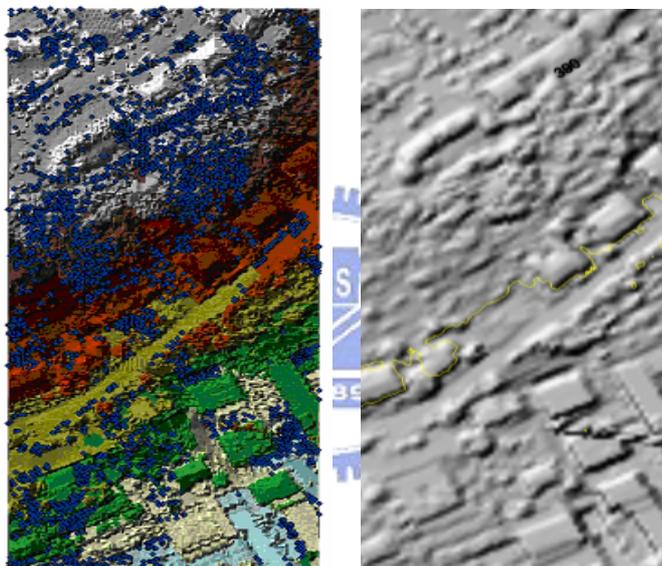


圖 4-5-1 test11 地面錯誤點分布情形

比對上圖，可約略看出位於山坡上的錯誤點發生較為集中，而該位置皆有地表覆蓋情形；另外也可以觀察出該地面點濾除成果中屬於建物部分的地物點移除效果相當良好，僅僅於左下角處有些許殘留之建物點。原因是觀察圖 4-5-1 右圖可發現該建物中央位置有一凹陷之情形，可能是因為該建物構造特殊，使得該凹陷部分高程較低導致演算法在判釋時造成錯誤判斷而被分類為地面點，由圖 4-5-1 右圖之黃線位置(350m)將錯誤點依照其高程大小區分為山坡地錯誤點與平地錯誤點兩種。

為明確得知山坡上的錯誤點位置是否具有地表覆蓋情形，因此藉由紅外光雷射掃描之穿透特性，將第一次回訊與最後回訊資料分別進行網格化後相減，則可

得到該地理位置之地面覆蓋物厚度，並結合山坡地之錯誤地面點空間位置計算該錯誤點所在位置之地面覆蓋厚度，其成果如圖 4-5-2 所示。另外，為了計算山坡地錯誤點之地面覆蓋厚度，先將錯誤點依照其地理位置與高程大小分類為平地與山坡地兩類型，錯誤點高程在 350 公尺以上為山坡地錯誤點共 2245 點，而平地錯誤點有 1363 點。

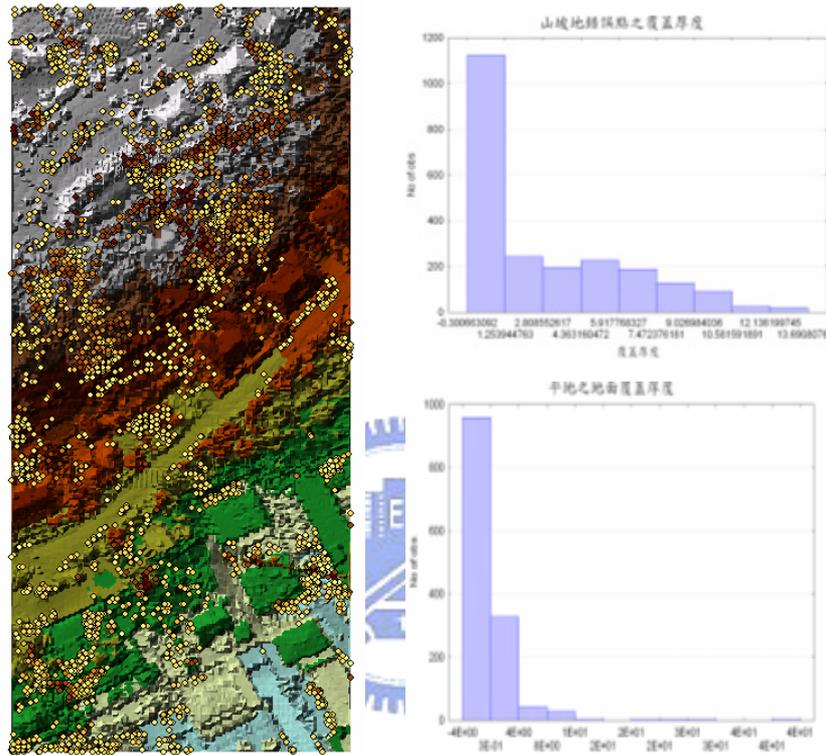


圖 4-5-2 test11 錯誤點地面覆蓋厚度統計圖表

由上述成果可明顯觀察出錯誤點發生情形與覆蓋厚度有相關，兩地區（山坡地與平地）超過 50% 的錯誤點資料其地面覆蓋厚度小於 1 公尺；以一般情形來說，坡地地面覆蓋小於 1 公尺的地物且其外形呈現不規則高程零星起伏，此類型大多數是屬於植被。在這種情況下，可推斷出本濾除過程對於較低矮的植物分類情形較為不良，容易產生分類錯誤的現象。為了驗證上述假設，採用樣本 test54 之數據進行分析。

同樣將 test54 之第一次回訊資料組成不規則三角網與配合黑白數值暈渲圖藉此了解該範圍內之地形起伏與地物分布情形，如圖 4-5-3 所示。

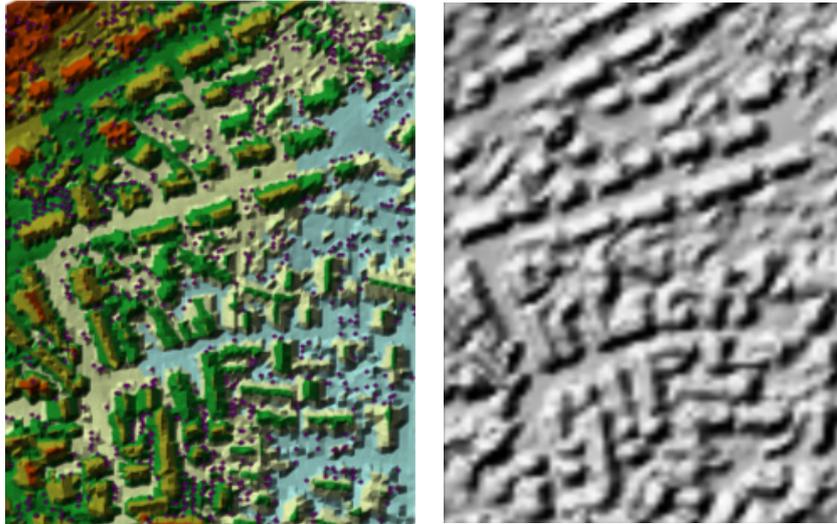


圖 4-5-3 test11 地面錯誤點分布情形

由圖 4-5-3 可明顯觀察出該樣本內具有許多密集規則的建物與明顯的街道，大致可推斷出該區域之地表起伏多半是由建物所造成，而整個樣本之地形起伏從右下方往左上方遞增，其高程範圍由 250m 至 300m，相較於 test11 之高程範圍（295m~406m）可知該地區之地形起伏較為平緩。另外，從圖 4-5-3 也可觀察出該範圍內無植被密集之山坡地，錯誤點呈現較離散分布；同樣也可以觀察出該樣本內房屋位置大多無殘留錯誤點，也表示建物點分類情形良好。

為了驗證這些錯誤點的產生，同樣計算 test54 樣本之地面覆蓋厚度進行分析，並統計錯誤點所在地面厚度，如圖 4-5-4。

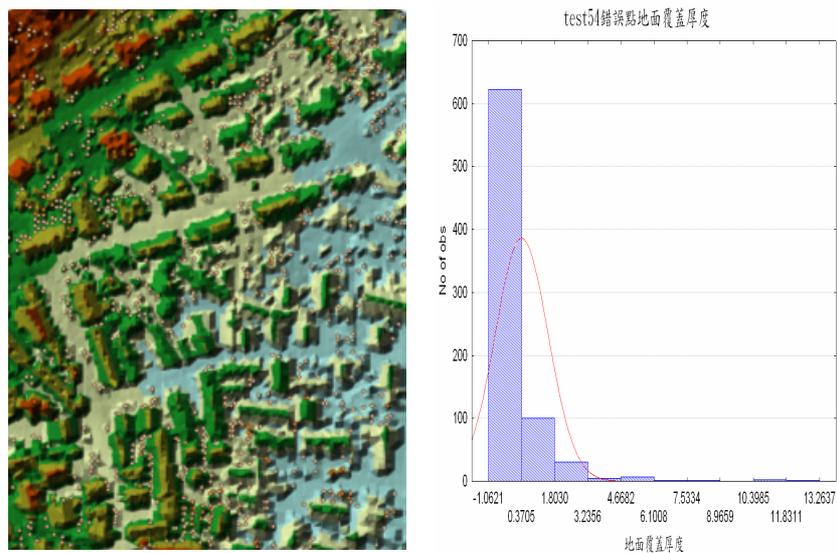


圖 4-5-4 test54 錯誤點地面覆蓋厚度統計圖表

根據圖 4-5-4，可發現錯誤點依然分布在地面覆蓋較淺的空間位置；結合黑白數值暈渲圖與錯誤點分布圖，可看出錯誤點可分為兩類：第一類分布於零星的不規則高程起伏位置，其散佈位置如圖 4-5-4 左上邊與右半邊部分而第二類則密集出現於建物的周圍，如左半邊建物密集區部分；初步可以推斷出第一類型的錯誤點可能是高程較低的地物點如植被或小型物體，因為高程上無明顯區分導致演算法分類錯誤，尤其是在圖 4-5-4 左上方與右上方以及中間下方位置更可以清楚觀察出地表面有植被分布；而第二類型的錯誤點密集分布於建物的周遭，原因是本演算法在進行點雲分類判斷時是依據其雲線內插表面高程與點雲高程的差異量進行分類，雖然錯誤點高程較高於鄰近正確地面點高程，但是由於周遭建物高程更高於錯誤點高程，造成雲線內插表面與鄰近建物週遭的錯誤點高程無太大差異，使得其分類時產生錯誤，此類型錯誤可由圖 4-5-5 說明。

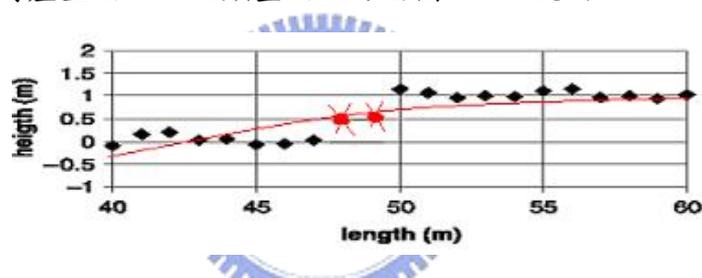


圖 4-5-5 錯誤點分類錯誤示意圖

上圖中紅色交叉點為錯誤點，紅線為雲線內插表面，可明顯看出錯誤點位於建物旁且較高於周遭正確之地面點，但其錯誤點高程卻小於內插表面之高程，導致在邊界偵測時被判定為地面點，加上其高程與周圍正確地面點明顯差異，使得校正分類步驟也無法被正確地分類。此類錯誤常分佈於建物周圍植被或矮小地物。

另外，可以結合點雲空間分布與原始 DSM 觀察推斷出哪些點可能是錯誤點。以 test54 濾除成果為例，利用視覺化觀察判斷可能的錯誤點，如圖 4-5-6 所示。



圖 4-5-6 原始 DSM 與濾除成果點雲分布圖

圖 4-5-6 中，黃色點為 test54 濾除成果，由於該地區分布以建物為主，可觀察出建物部分無殘留錯誤的地面點；最後，以視覺化觀察方式分析其他錯誤率較大的樣本情形，如圖 4-5-7。

地表起伏與錯誤點之空間分布	
	<p>左圖可看出錯誤點分布於類似植被或矮小地物位置。</p>
	<p>左圖中，建物明顯分離，而分類錯誤點則分布在建物周圍及植被。</p>
	<p>左圖中，建物明顯地區分，其錯誤點主要分布建物下方。</p>

圖 4-5-7 地表起伏與錯誤點之空間分布

除此之外，也可以結合當地航空影像來進行錯誤點判釋；圖 4-5-8 為 FSite5 之航空影像與點雲分布對照圖。



圖 4-5-8 FSite5 航空影像與點雲分布對照圖

從結合航空影像與數值地表模型點雲分布，可清楚地看出錯誤點的地表真實情形，也證實這些錯誤點大多發生在植被以及建物周圍附近。

除錯誤點與地面覆蓋具有相關性之外，可藉由錯誤點之坡度分布圖了解坡度與錯誤點之關係。將檢核資料經由克利金內插形成網格資料後計算其坡度值，再以錯誤點之平面座標為搜尋位置找出其對應的坡度值，統計其坡度分布情形；以 test11 濾除成果之錯誤點為例，如圖 4-5-9。

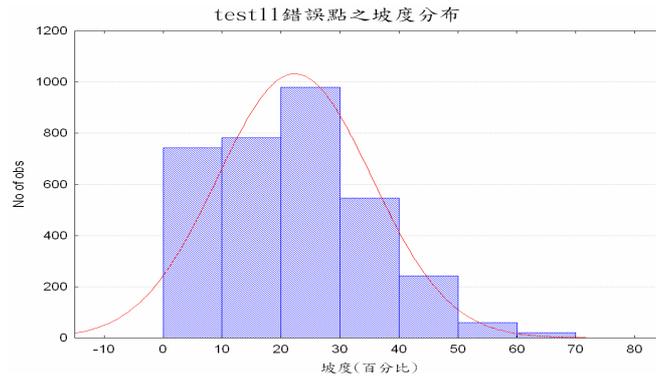


圖 4-5-9 test11 錯誤點之坡度分布圖（檢核資料）

由圖 4-5-9 可觀察出大部分錯誤點的坡度值介於 0%~40%之間，換算成角度則為 0 度到 21.5 度之間；由此可知，大部分錯誤點發生在坡度小於 21.5 度的位置。將坡度值換算成水平方向上垂距變化後可知錯誤點大多發生在單位距離（公尺）內其高程變化小於 0.4 公尺處，由此可知這些錯誤點其垂直變化量並不明顯導致演算法的分類錯誤。為了驗證其檢核資料與濾除成果之相似度，同樣將濾除成果進行網格化後，計算錯誤點之坡度值，如圖 4-5-10。

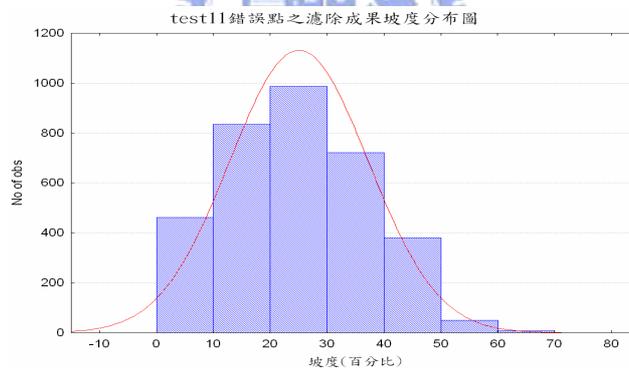


圖4-5-10 test11錯誤點之坡度分布圖（濾除成果）

比照圖 4-5-9 與圖 4-5-10 可發現錯誤點皆集中分布於坡度 0 度至 21.5 度處；由此可歸納出當錯誤點在兩成果之坡度分布上大致相同，在坡度較小的時候，演算法未能分辨細微的地物與地表關係，因此造成誤判情形。

因此，藉由計算 15 組樣本錯誤點於濾除成果之坡度值觀察其相關性，如表 4-5-1 所示。

表 4-5-1 十五組樣本之錯誤點坡度統計表

錯誤點樣本	坡度最小值	坡度最大值	坡度平均值	坡度中值
test11	0.86	66.02	24.85	24.62
test12	1.23	51.53	14.80	12.86
test21	1.65	33.62	12.71	12.03
test22	0.35	42.92	11.94	10.49
test23	0.39	48.29	10.48	7.67
test24	1.03	59.52	27.14	26.50
test31	0.99	78.95	17.31	14.54
test41	0.38	82.09	33.19	30.99
test42	0.65	62.36	14.71	10.45
test51	0.50	46.06	18.40	18.01
test52	0.79	46.24	12.59	9.71
test53	0.59	65.96	14.27	8.98
test54	1.17	39.30	13.61	12.17
test61	0.33	35.84	11.60	10.32
test71	0.77	34.01	12.85	11.25

坡度值：百分比（%）

由坡度統計表可觀察出此十五組錯誤點之坡度密集分布於 10%~33%之間，由此可知此 15 組樣本之錯誤點大多發生在坡度起伏不大的位置，其原因是因為本演算法對於坡度起伏較小的地物點容易產生誤判情形。

接下來，對於未成功分類的地面點進行視覺化觀察；選取十五組樣本中未成功率最高的兩組樣本：test23 與 test24 進行分析。首先觀察 test23 樣本中濾除成果之地面點散佈情形，如圖 4-5-11。

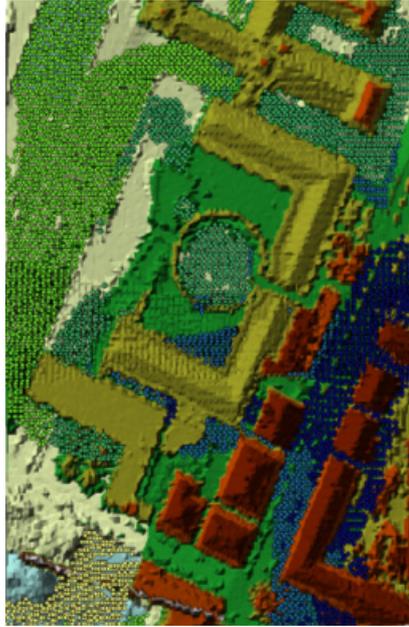


圖 4-5-11 test23 濾除成果之地面點散佈圖

觀察地面點散佈可發現建物部分無殘留之錯誤地面點，但許多正確的地面點卻分類失敗。為了探究問題所在，檢查未經過重新分類（校正分類步驟）之數據藉此了解初始分類的成果。表 4-5-2 為區域成長步驟後初始地面點成果與最終成果之統計表。

表 4-5-2 test23 初始地面點成果與最終成果之統計表

初始地面點數	最終地面點數	差異點數
15032	8340	6692

由表 4-5-2 可觀察出校正分類後的地面點比區域成長步驟後地面點大幅減少 45%。原本採用校正分類步驟是針對少數特殊房屋構造的建物或特殊高程起伏情形以改正分類成果，其原理是將區域成長步驟後的地面點利用雲線內插程式 s.bspline.reg 組成網格資料後，將所有點雲資料比對網格高程進行高程差計算；當其高差在門檻值內，則依照其點雲種類重新分類為地面點或雙重回訊地面點。反之，則重新分類為地物點或雙重回訊地物點。為了解該步驟(校正分類)前後差異，針對分類前後之地面點進行觀察，如圖 4-5-12。

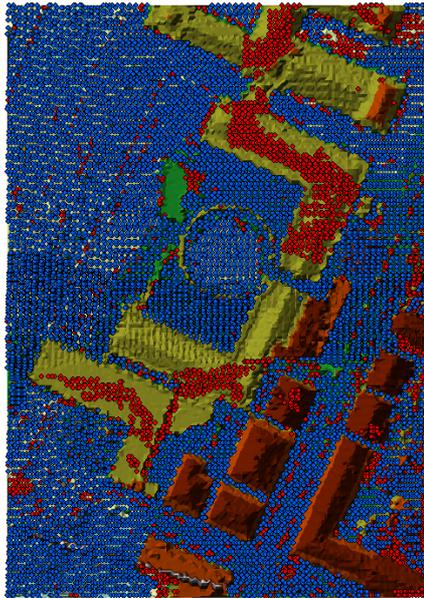


圖 4-5-12 test23 初始分類地面點散佈圖

從初始分類地面點散佈圖可觀察出除了紅色點為分類錯誤點外，藍色點部分與檢核資料之地面點分布一致，由此可看出此重新分類步驟雖然濾除了紅色錯誤點，也同樣大量地移除了正確的藍色地面點。由此可知，在進行重新分類步驟時應考量初始地面點之分類情況，並檢查重新分類後之成果是否異常，如地面點急遽減或遽增等現象。

由上述成果可了解重新分類步驟固然對於構造特殊的建物分類錯誤情形具有改善的效果，但是由於其操作範圍是針對整體點雲來進行重新分類，對於原本分類正確的点雲來說，是否會造成重新分類後的錯誤，是使用者進行此步驟時需考量之問題。

同樣，此類型的錯誤也發生在樣本 test24 上，成果統計表如表 4-5-3 所示。

表 4-5-3 test24 初始地面點成果與最終成果之統計表

初始地面點數	最終地面點數	差異點數
5884	2996	2888

經過點雲比對後發現初始地面點與檢核資料有 4939 共同地面點，未分類成功點由 2413 點減少為 470 點；試圖藉由觀察未成功率較高樣本之地表起伏與其未成功分類點雲分布來歸納出未成功點分布特性，如圖 4-5-13。

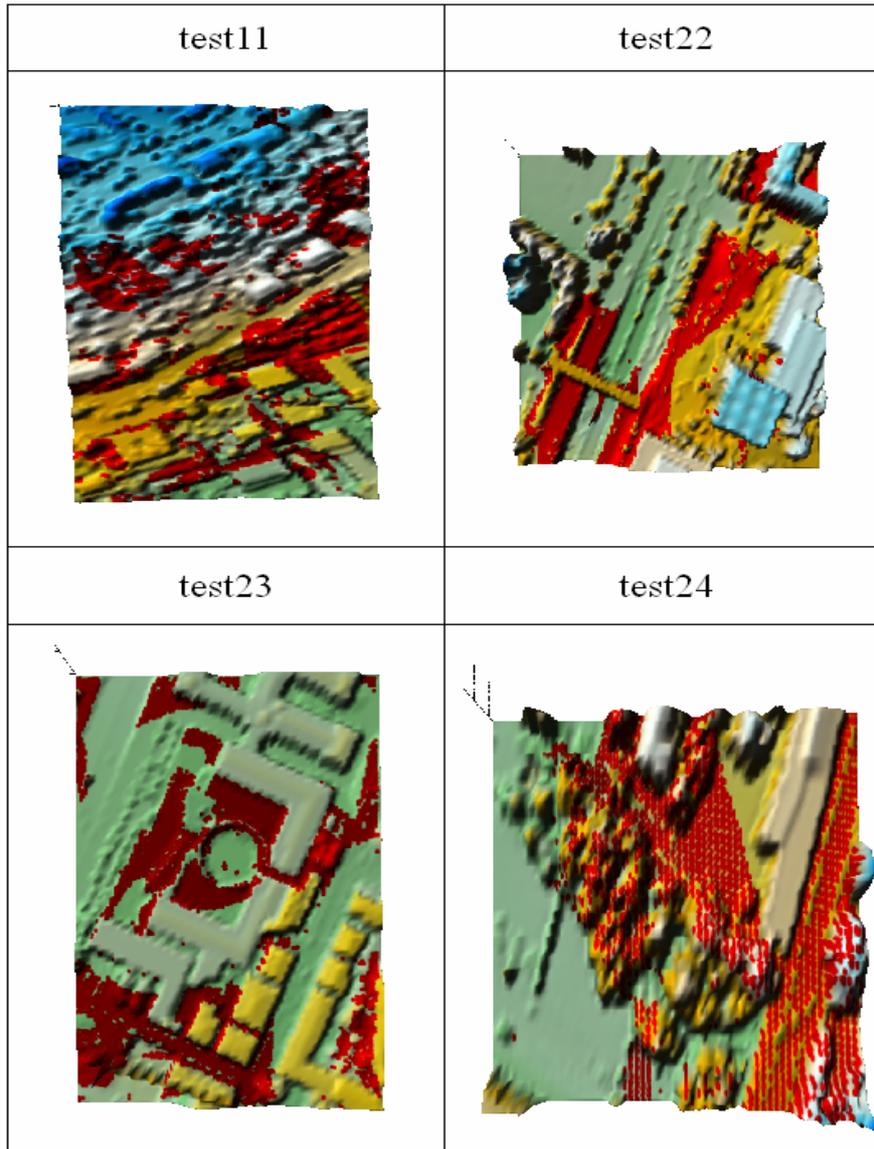


圖 4-5-13 地表起伏與其未成功分類點雲分布圖

觀察未成功分類地面點分布圖可歸納出兩種可能會造成未成功分類地面點發生的地方：隆起台地與土丘處。隆起台地之所以無法成功分類原因是因為台地邊緣起伏狀況類似於房屋邊緣具有高程不連續性。在本演算法大多針對高程不連續性偵測邊界點進而達到濾除效果，而土丘處造成原因亦然。上述兩者皆可經由後續人工濾除時參考原始 DSM 與航空影像進行校正分類，使濾除地面點成果更加完整。

## 第五章 結論與建議

雲線內插濾除非地面點演算法考量到光達多重回訊的特性，利用結合第一次回訊與最後回訊資料加入計算過程，藉此兩相異回訊資料組成近似趨勢面，判斷同一平面位置上是否具有兩次的光達回訊資料。由此判斷此平面位置是否具有雙重回訊特性，再由最後回訊資料經邊界偵測過程後將點雲分類為邊界點或地面點，接著以 Convex Hull 演算法將具有邊界點特徵之網格組成凸多邊形後，重新分類位於該凸多邊形內部的點雲；最後，經由校正分類步驟完成濾除過程；最終成果分類為四種類別的點雲資料：地面點，兩次回訊地面點，地物點和兩次回訊地物點。

由第四章實驗成果可知雲線內插濾除演算法最大的優點是可利用邊界點構成建物輪廓後進行濾除，使得大多數建物能夠完整地從原始點雲資料中移除；藉由使用 ISPRS 光達公開測試資料進行演算法濾除處理，經由檢核資料比對驗證後，可知該雲線內插濾除演算法之濾除成果地面點分類正確率達八成以上，在某些樣本(test61)之實驗成果甚至可達 99% 正確率。由此可知此演算法濾除成果之可靠度，但值得研究的是某些樣本內雖然濾除成果的正确率高達九成以上，但是其未成功分類之地面點數量卻超過該檢核地面點數量的 40%。如此龐大流失的地形資訊，會造成產製 DEM 時的錯誤與失真，而喪失真實地形描述能力。有鑑於此，本研究最後藉由視覺觀察與統計分析方式歸納錯誤點與未成功點之特性，藉此提供後續人工濾除時可採用的參考資訊。

從分析錯誤點分布與地表起伏之關係到計算地面覆蓋厚度與錯誤點分布之相關性，可發現錯誤點大多發生在矮小植被和建物週遭附近。其原因是由於植被高程與地面點間無明顯高差而使得在濾除過程中無法從點雲資料中將其濾除。另外，在建物週遭附近的錯誤點產生原因是由於其高程雖然高於鄰近之地面點，但是由於雲線內插表面與該錯誤點無明顯之高差（大於門檻值）或錯誤點在內插表

面之下方導致分類過程中將其分類為地面點。根據上述分析，將濾除成果結合原始地表起伏 (DSM) 或外部資訊 (航空相片) 進行後續人工濾除，可藉由視覺判斷或經驗法則濾除該錯誤點。

至於未成功地面點部分，藉由觀察其分布情形，發現未成功點呈現密集分布情形，此點可能是因為演算法最後進行校正分類步驟時，乃是藉由初始 DEM 與所有點雲之高差大小進行重新分類。倘若初始 DEM 有明顯不合理或錯誤時，該初始 DEM 與正確分類的地面點高差可能超過設定之門檻值，此時該正確地面點會被重新分類為地物點而造成未成功分類結果。為了解決此問題，可由觀察組成初始 DEM 的地面點與原始 DSM 之空間關係發現初始地面點不合理或錯誤處，再將其錯誤現象移除後重新組成初始 DEM 以確保正確點能完整地保留下來。

根據本文內容以及相關文獻所述，可簡短地將原始點雲數據萃取數值地面模型的作業流程以下幾個步驟說明；

### 1. 原始點雲數據格式轉換

由於原始數據其資料格式通常不一致，部分數據是採用混合紀錄方式將所有回訊資料紀錄於同一陣列，而有些數據依照回訊不同分別紀錄於相異的行列中，如 ISPRS 公開測試資料之格式為兩次回訊資料並排儲存如 (X1, Y1, Z1, I1, X2, Y2, Z2, I2)，通常第一組數據為第一次回訊資料，第二組數據為最後回訊資料(假設此數據具有兩次回訊特性)；因此在進行資料處理時需將數據轉換為使用者所需格式後，方能使用。以本研究所使用之程式而言，需將兩回訊資料各自分別儲存並將數據中的強度值回訊資料進行移除後，方能使用。

### 2. 粗差濾除

如何判定粗差點可由空間座標之邏輯不合理進行判斷，如高程過大或呈現負值時；為了避免萃取地面點或濾除地物點過程中造成錯誤判釋或計算誤差，必先將粗差點進行移除後，方可進行萃取地面點或濾除非地面點的過程。

### 3. 採用特定濾除演算法萃取地面點或濾除非地面點

本研究在此階段時採用雲線內插過濾演算法濾除非地面點，其主要過程是利

用量測點雲之不連續性，如高差、梯度...等進行邊界點的判釋。經由點雲判釋後，將邊界點所組成的凸多邊形視同為建物邊緣進行內部點雲判釋。若內部點雲其高程大於其多邊形之邊界點平均高程時，該內部點雲分類為地物點；若否，則分類為地面點。最後經由校正分類步驟，將地物點高程接近初始 DEM 的點雲重新分類地面點，或地面點高程與初始 DEM 之間的高差大於門檻值的點雲重新分類為地物點。最後，經由迭代數次後可獲得地面點最終成果。

#### 4. DEM 品質偵測

從本研究之成果可發現濾除演算法未能達到百分之百的濾除效果，最終會殘留錯誤點於濾除成果中，同時屬於真實地面的點雲資料也未能全部萃取而得；若無地面檢核資料時應進行成果資料品質的偵測以評估濾除成果的適用性；若具有地面檢核資料時，可將濾除成果與檢核資料利用點雲比對或比較產製 DEM 差異方式進行指標計算，如錯誤率、未成功率、誤差範圍及 DEM 差異等指標，藉此了解兩者之異同程度。

#### 5. 後續人工濾除參考

通常，人工濾除步驟中會參考外部資料如航照影像，參考 DEM 等資訊；以本研究中 FSite5 測試區為例，從航照影像中可明顯觀察出建物與植被等地物的分布情形，藉由套合點雲於航照影像上可從濾除成果之地面點分布位置初步判釋該點是否可能為地物點。如點雲座落在建物影像時；亦可觀察濾除成果中資料空缺處是否可能存在著地面點資料；若有此可能，可擷取地物點資料中資料空缺範圍內之點雲。藉由高程剖面判斷或對應航照影像位置進行人工分類，用以增加正確地面點數量；若無外部參考資料時，可將原始點雲之第一次回訊資料處理成原始 DSM 網格，藉由數值暈渲圖或彩色立體圖了解該範圍內之地物分布情形；藉此也可以當作濾除成果後續人工分類上的參考依據。

#### 6. 產製數值地形模型

經由上述五項步驟後，可利用不規則三角網或規則網格方式展示 DEM。而使用何種方式能夠將地形資訊作詳盡的描述，則須考量地面點雲分布與資料完整



性。

後續研究上，可望從結合他種演算法或外部資料來增強濾除效果。除此之外，在沒有檢核資料的情形下，如何訂定光達資料產製 DEM 的標準與精度也是值得研究的一環。就目前為止，無可避免的是沒有任何一種濾除演算法可以達到百分之百的濾除效果或精度；由此可知人工濾除的必要性。因此，訂定出一套標準的人工濾除方法也是值得重視的一項研究。如何藉由採取半自動化的人工濾除方式降低人工濾除所耗費的時間與精力也是未來研究的方向之一。



## 參考文獻

- 王蜀嘉、曾義星，2003。高精度及高解析度數值地形模型測製規範研究報告，內政部地政司衛星測量中心。
- 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，pp449-456。
- 史天元、彭森祥，2003。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，行政院農委會九十二年度試驗研究計畫研究報告。
- 黃誌川，2003。中央研究院計算中心通訊，第 19 卷 15 期，GIS 專題-地理資源分析支援系統 (GRASS) 簡介。民國 92 年 07 月 14 日出版。
- 賴進貴，2003。遙測技術在崩塌地、土石流及坡地管理應用計畫 (第三年)-DTM 品質檢核與提升之研究成果報告，行政院農業委員會水土保持局，SWCB-92-026-06。
- Ackermann, F., 1999. Airborne Laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54 (1999).
- Axelsson, P., 1999. Processing of Laser scanner data - algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54 (1999).
- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2/3), 199-214.
- Brovelli, M.A., M. Cannata, and U.M. Longoni, 2002. Managing and Processing LIDAR data within GRASS. *Proceedings of the GRASS Users Conference 2002, Trento, 11-13 September 2002.*
- Brovelli, M.A., M. Cannata, and U.M. Longoni, 2004. LIDAR Data Filtering and DTM Interpolation Within GRASS. *Transactions in GIS Vol. 8 Issue 2 Page 155 April 2004.*

- Briese, C. and N. Pfeifer, 2001. Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. Optical 3-D Measurement Techniques V, 2001, pp. 80 – 87.
- Briese, C., N. Pfeifer, and P.Dorning, 2002. Applications of the Robust Interpolation for DTM determination. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV / 3A, pp. 55 – 61.
- Cobby, D.M., D.C. Mason, and I.J. Davenport, 2001. Image Processing of Airborne Scanning Laser Altimetry Data for Improved River Flood Modeling, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 56 (2001). pp. 121– 138.
- Elmqvist, M., 2001. Ground Surface Estimation from Airborne Laser Scanner data Using Active Shape Models. ISPRS Commission III, 2002. September 9 - 13, 2002.
- ESRI, 2004. User Guide. Environmental Systems Research Institute.
- GRASS, 2005. User Guide. Geographic Resources Analysis Support System.  
 Url:<http://grass.itc.it/>
- Huising, E.J. and L.M.G. Pereira, 1998. Errors and Accuracy Estimates of Laser Data Acquired by Various Laser Scanning System for Topographic Application, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 53: pp. 254-261.
- ISPRS, 2004. ISPRS Commission III WG3. <http://www.commission3.isprs.org/wg3/>
- Kristian, W.M., 2002. Calibration of Airborne Laser Scanners. Master thesis, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, November, 2002.
- Lohmann P., A. Koch, and M. Schaeffer, 2000. Approaches to the filtering of laser scanner data. Proceedings of XIXth Congress of the international society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS), Amsterdam The Netherlands 16 - 23 July 2000, On CD-ROM. Amsterdam, The Netherlands. pp. 534 - 547.
- Maas, H.G., and G. Vosselman, 1999. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999 153–163.

- OEEPE, 2000. Working Group on laser data acquisition. ISPRS Congress 2000.  
[http://www.geomatics.kth.se/~fotogram/OEEPE/ISPRS\\_Amsterdam\\_OEEPE\\_presentation.pdf](http://www.geomatics.kth.se/~fotogram/OEEPE/ISPRS_Amsterdam_OEEPE_presentation.pdf)
- Optech, 2004. ALTM Product Line. Optech Inc. Url: <http://www.optech.on.ca/>
- Priestnall, G., J. Jaafar, and A. Duncan, 2000. Extracting Urban Feature from LiDAR Digital Surface Models, Computers, Environment and Urban Systems, 24: pp. 65-78.
- Pfeifer, N., T. Reiter, C. Briese, and W. Rieger, 1999. Interpolation of High quality ground models from laserscanner data in forested areas. IAPRS WGIII/5 and WG III/2. 9-11. 1999, Vol. 32, Part 3W14. La Jolla, CA, USA. pp. 31-36.
- Pfeifer, N., P. Stadler, and C. Briese, 2001. Derivation of Digital terrain models in the SCOP++ environment. Proceedings of OEEPE workshop on airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models 1-3 March 2001; Editor Kennert Torlegard; Royal Institute of Technology Department of Geodesy and Photogrammetry 100 Stockholm, Stockholm.
- Renslow, M., 2001. Development of a Bare Ground DEM and Canopy Layer in NW Forestlands Using High Performance LIDAR. ESRI international user conference.
- Roggero, M., 2001. Airborne Laser Scanning: Clustering in raw data. IAPRS, Vol XXXIV –3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct, 2001. pp. 227-232.
- Sithole, G., 2001. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. IAPRS, Vol. XXXIV – 3/W4 Annapolis, MD, 22-24 October 2001. pp. 203-210.
- Sithole, G., and G. Vosselman, 2003. Comparison of Filter Algorithms. ISPRS Commission III, WG3. 2003.  
Url: <http://www.geo.tudelft.nl/frs/isprs/filtertest/MainDoc.htm>
- Sohn, G., and I. Dowman, 2002. Terrain Surface Reconstruction by the Use Of

- Tetrahedron Model With the MDL Criterion. IAPRS, Vol XXXIV Part 3A. ISPRS Commission III, Symposium. September 9 - 13, 2002, Graz, Austria. pp. 336-344.
- Vu, T. T., and M. Tokunaga., 2001. Wavelet and Scale-Space Theory in Segmentation of Airborne Laser Scanner Data. Proc. ACRS 2001 - 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 1:176-180, 2001.
- Tran, T.C., and B. Blundell, 2003. Rapid Feature Extraction and modeling using elevation and intensity information from high-resolution LiDAR data. ASPRS 2003.
- Vosselman, G., and S. Dijkman, 2001. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Annapolis, Maryland, pp. 37-43.
- Wack, R., and A. Wimmer, 2002. Digital Terrain Models From Airborne Laser Scanner Data – A Grid Based Approach. IAPRS, Vol XXXIV Part 3B. ISPRS Commission III, Symposium. September 9 - 13, 2002, Graz, Austria.
- Wehr, A., and U. Lohr, 1999. Airborne laser scanning — an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing Vol.54, 1999, 68–82.

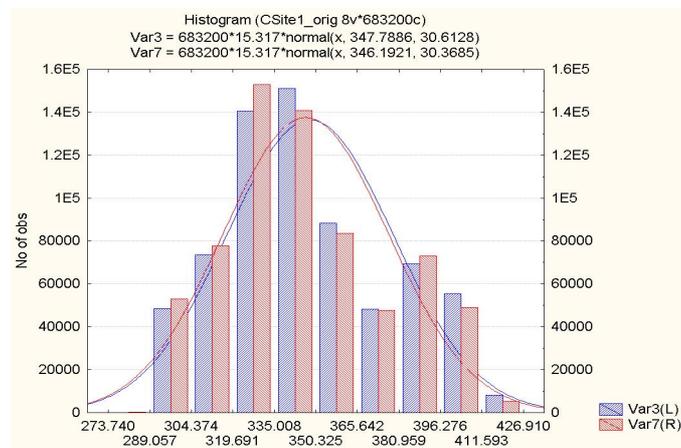
# 附錄一 實驗參數表

Site	Data resolution	Outlier			s.edgedetection						s.growing			s.correction			s.bspline.reg					
		$S_0$	$\lambda_0$	$T_0$	$S_g$	$\lambda_g$	$\theta_g$	$T_g$	$t_g$	$S_r$	$\lambda_r$	$r_d$	$T_d$	Apply	$S_c$	$\lambda_c$	$T_c$	$t_c$	$N$	$S_i$	$\lambda_i$	$r_i$
City	Site 1	4×4	2	50	4×4	0.01	0.26	6	3	4×4	2	2	0.6	Yes	25×25	0.1	2	1	3	4×4	1	2
		8×8	2	50	8×8	0.01	0.26	6	3	8×8	2	4	0.6	No	25×25	0.1	2	1	3	8×8	1	4
		12×12	2	50	12×12	0.01	0.26	6	3	12×12	2	6	0.6	No	25×25	0.1	2	1	2	12×12	1	6
	Site 2	4×4	2	50	4×4	0.01	0.26	6	3	4×4	2	2	0.6	Yes	50×50	20	1	0.5	2	4×4	1	2
Forest	Site 3	4×4	2	50	4×4	0.01	0.26	6	3	4×4	2	2	0.6	Yes	40×40	1	2	1	2	4×4	1	2
	Site 4	4×4	2	50	4×4	0.01	0.26	6	3	4×4	2	2	0.6	Yes	50×50	5	1	0.5	2	4×4	0.1	2
Forest	Site 5	8×8	2	50	8×8	0.01	0.26	6	3	8×8	2	4	0.6	No	25×25	0.1	2	1	1	8×8	0.1	4
	Site 6	8×8	2	50	8×8	0.01	0.26	6	3	8×8	2	4	0.6	Yes	25×25	0.1	2	1	2	8×8	0.1	4
	Site 7	8×8	2	50	8×8	0.01	0.26	6	3	8×8	2	4	0.6	Yes	50×50	0.1	2	1	1	8×8	0.1	4
	Site 8	8×8	2	50	8×8	0.01	0.26	6	3	8×8	2	4	0.6	Yes	25×25	0.1	2	1	3	8×8	0.1	4
		12×12	2	50	12×12	0.01	0.26	6	3	12×12	2	6	0.6	No	25×25	0.1	2	1	1	12×12	0.1	6
		20×20	2	50	20×20	0.01	0.26	6	3	20×20	2	10	0.6	No	25×25	0.1	2	1	1	20×20	0.1	10

## 附錄二 ISPRS 八大地區之原始點雲座標分佈 及 DSM 示意圖

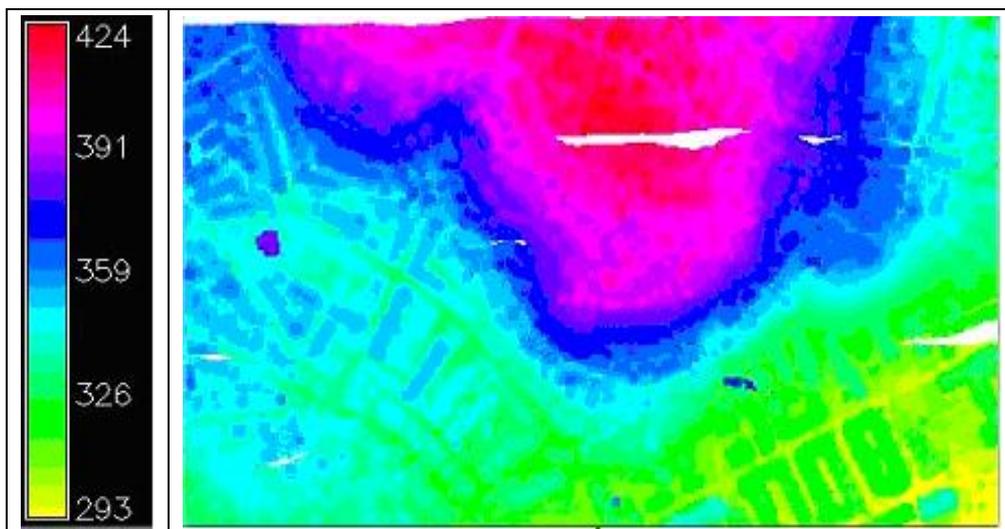
CSite1 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 小值	Y 座標最 小值	Y 座標最 小值	Z 座標最 小值	Z 座標最 小值	Z 平均值
512050	513150	5403440	5404100	274.05	426.91	347.7886



CSite1 之高程分佈圖

將其原始點雲資料之第一次回訊數據網格化後得一 DSM，用以瞭解該區域地表起伏。

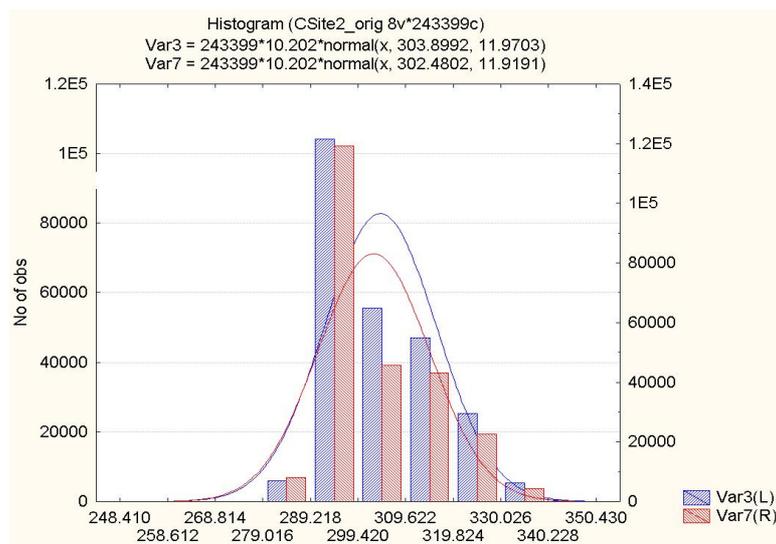


CSite1 數值表面模型

### CSite2 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
513450	513870	5402650	5403280	300.36	357.03	317.9633

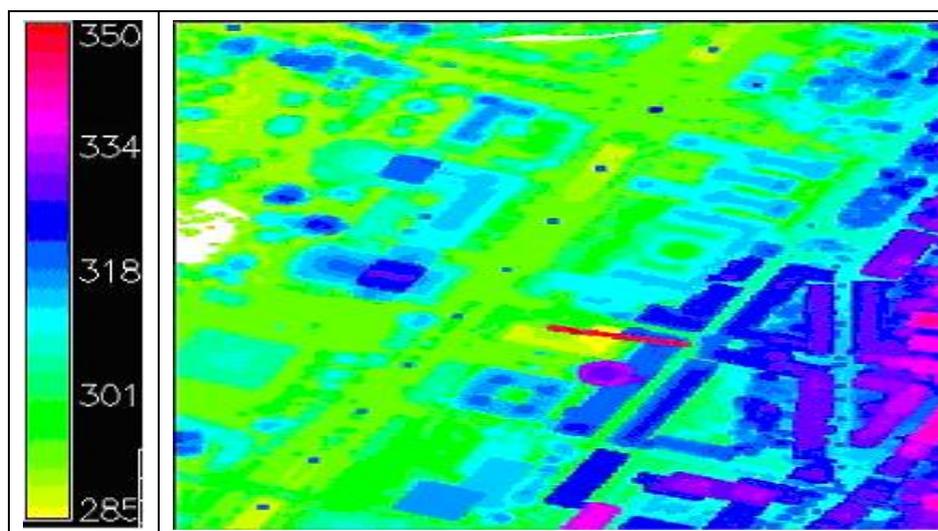
(單位：m)



CSite2 高程分佈圖

Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

將其原始點雲資料之第一次回訊數據網格化得一 DSM，用以瞭解該區域地表起伏。

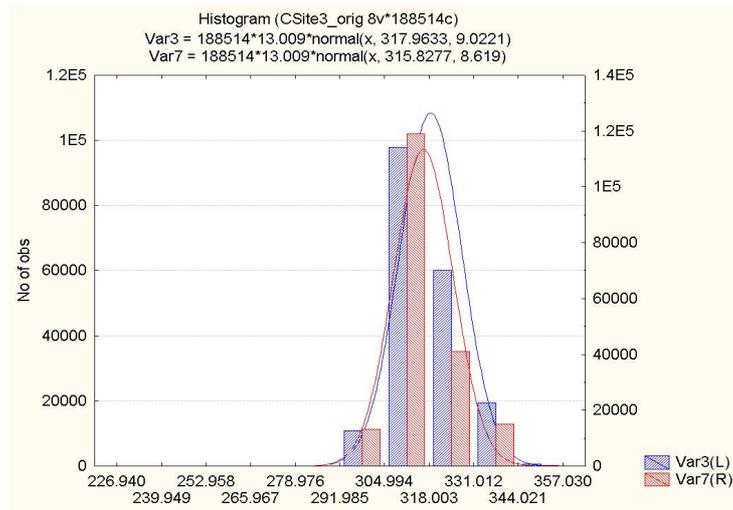


CSite2 數值表面模型

### CSite3 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
512023	512549	5403120	5403500	300.36	357.03	317.9633

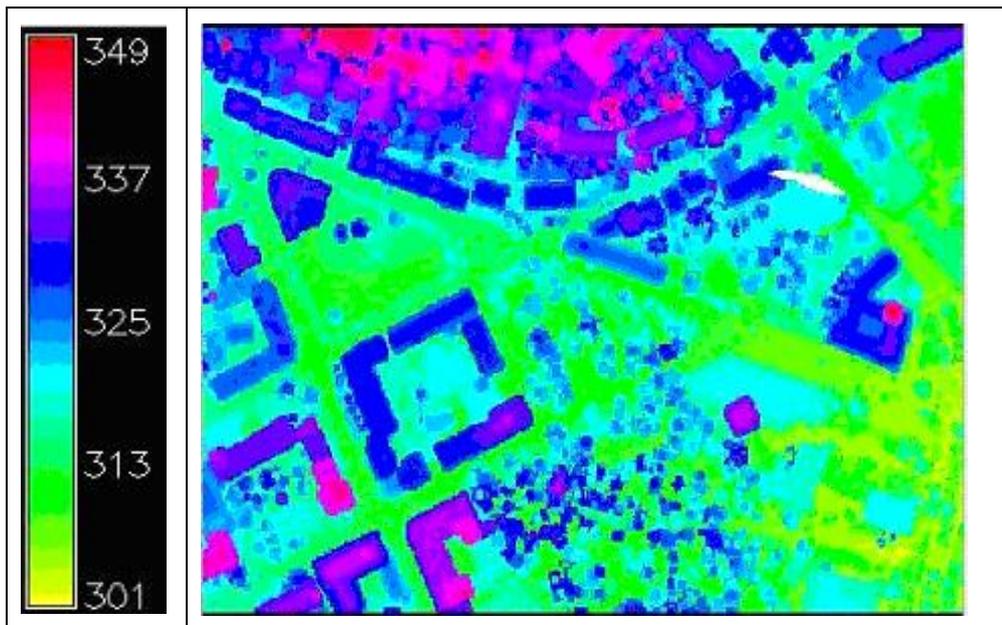
(單位：m)



CSite3 之高程分佈圖

Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

原始點雲第一次回訊數據之數值表面模型。

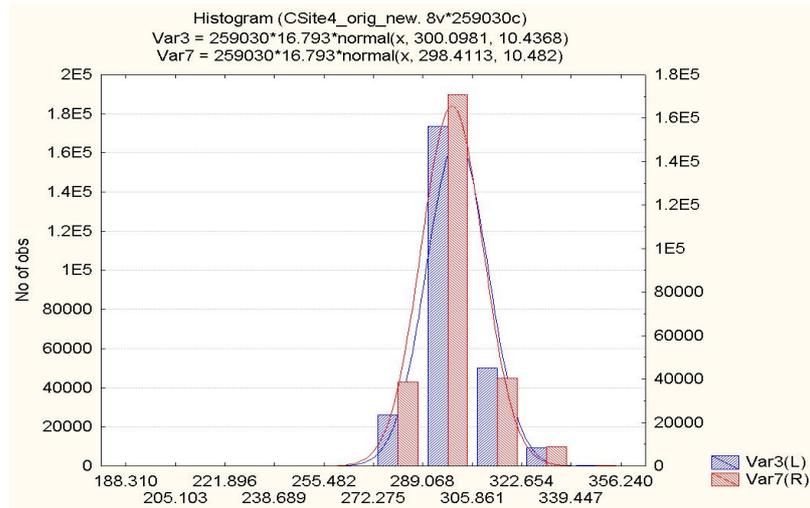


CSite3 數值表面模型

### CSite4 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
513120	513630	5403190	5403760	269.7	356.24	300.0981

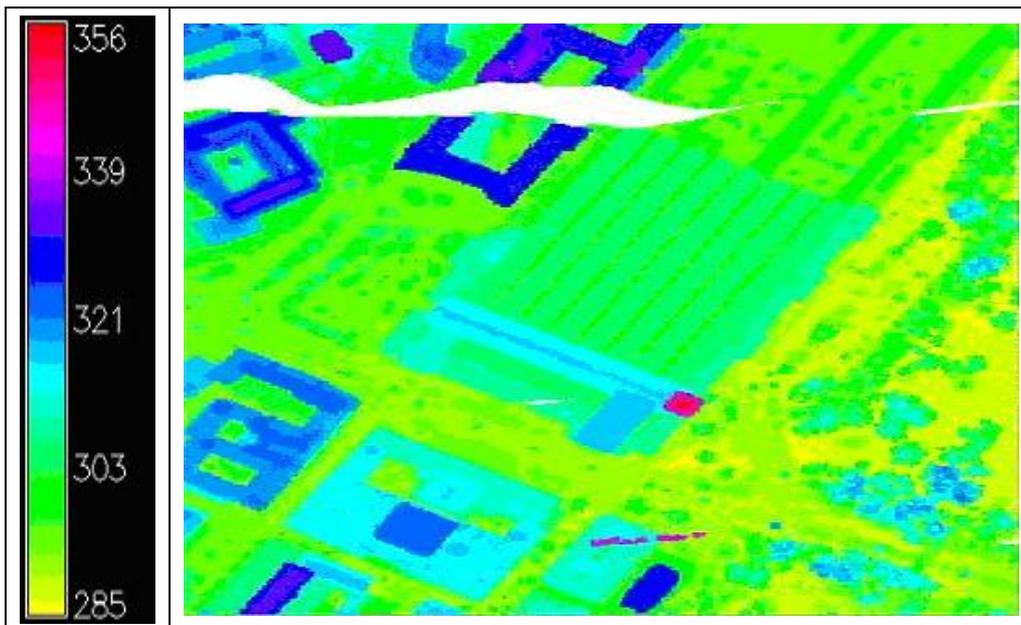
(單位：m)



### CSite4 高程分佈圖

Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

未處理前原始點第一次回訊數據之數值表面模型。

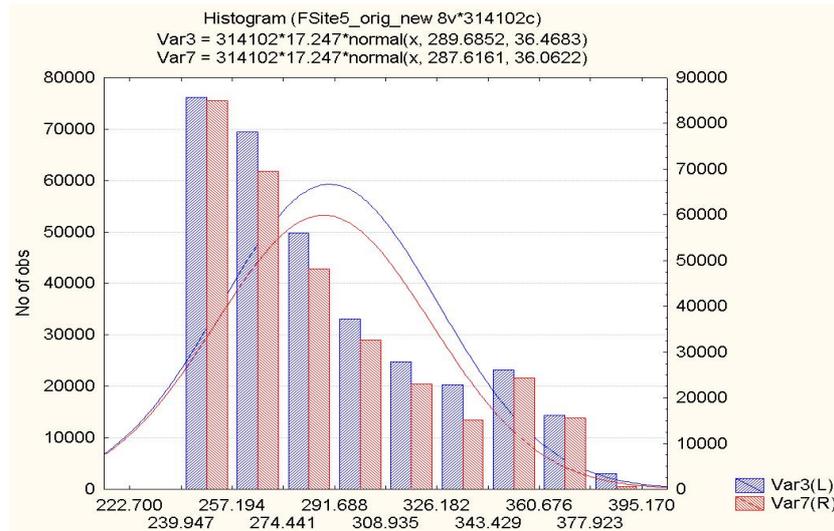


### CSite4 數值表面模型

### FSites5 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
493650	495250	5419770	5421000	249.78	395.17	289.6852

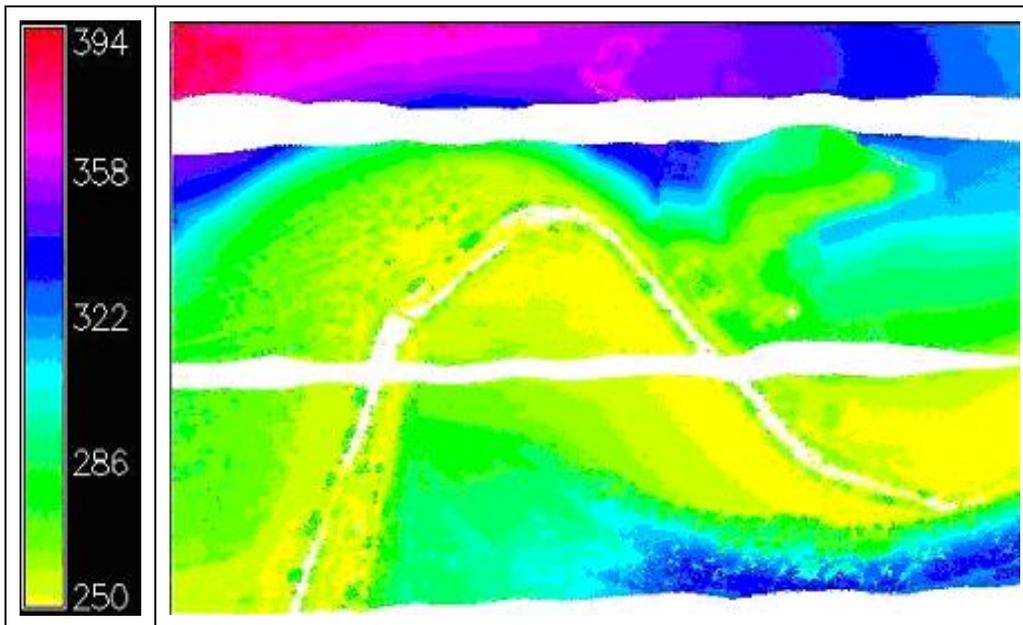
(單位：m)



### FSite5 高程分佈圖

Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

未處理前原始點第一次回訊數據之數值表面模型。

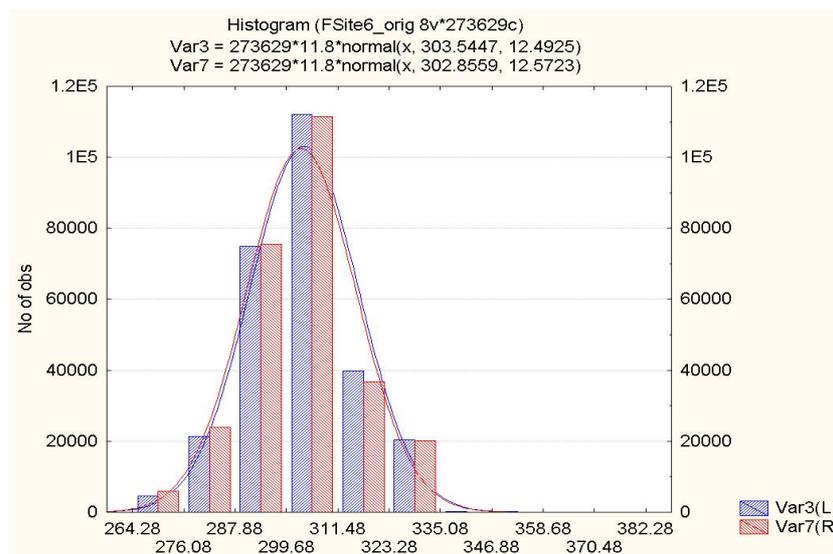


數值表面模型

### F Site6 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
496350	497950	5420750	5421817	264.36	382.28	303.5447

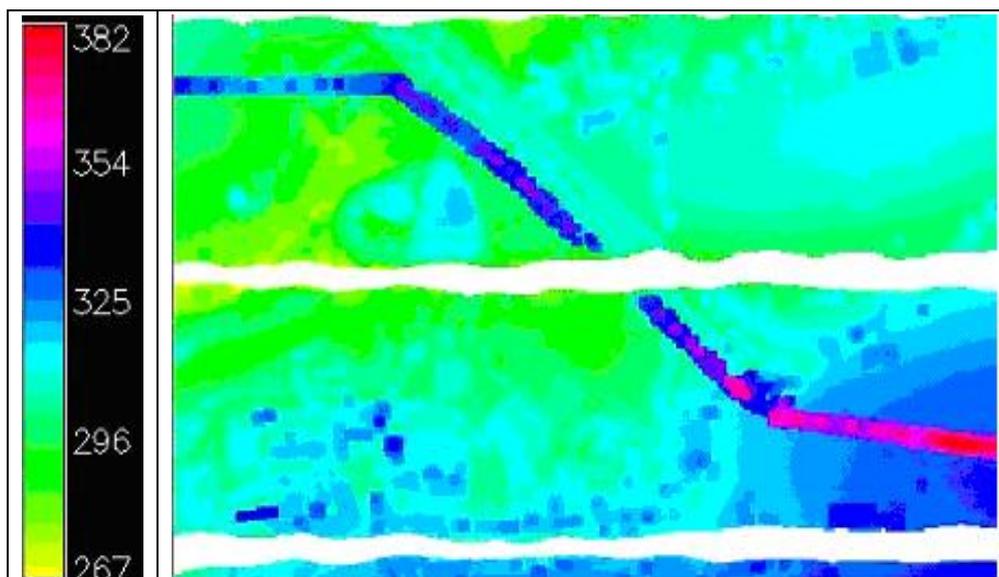
(單位：m)



F Site6 高程分佈圖

Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

未處理前原始點第一次回訊數據之數值表面模型。

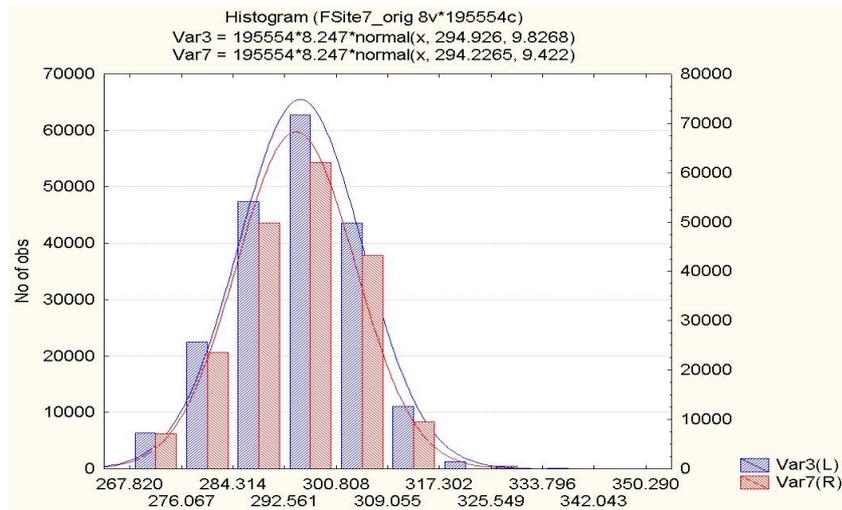


F Site6 數值表面模型

### FSite7 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
495950	497200	5421350	5422380	267.86	350.29	294.926

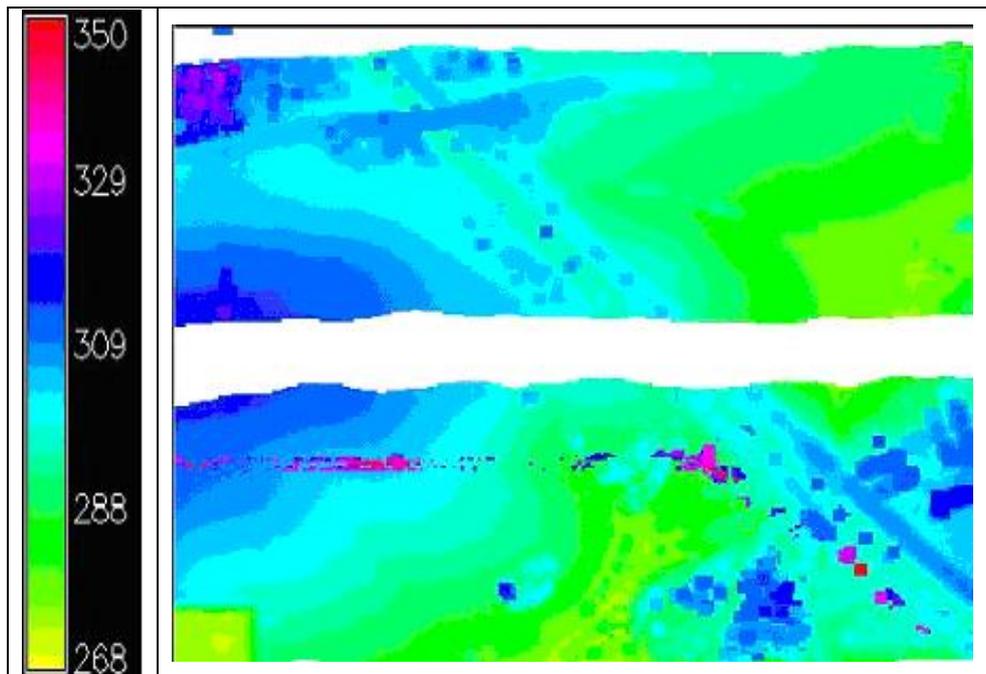
(單位：m)



FSite7 高程分佈圖

Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

未處理前原始點第一次回訊數據之數值表面模型。

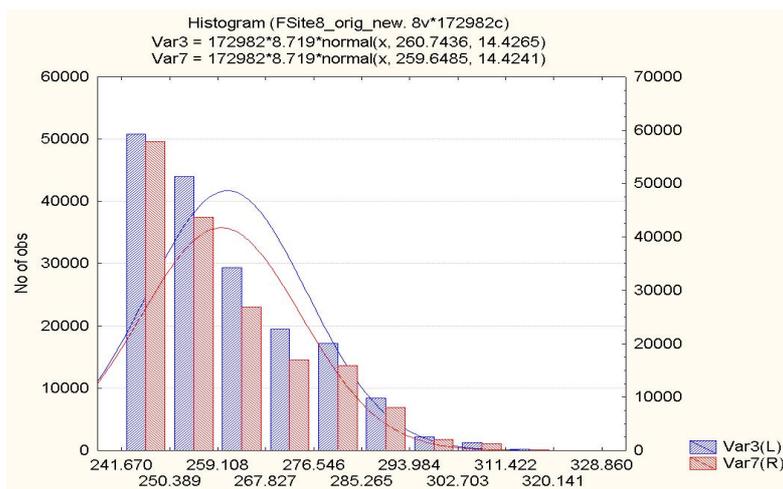


FSite7 數值表面模型

### FSites8 基本數據

X 座標最 小值	X 座標最 大值	Y 座標最 小值	Y 座標最 大值	Z 座標最 小值	Z 座標最 大值	Z 平均值
499450	500550	5418330	5419430	241.73	328.86	260.7436

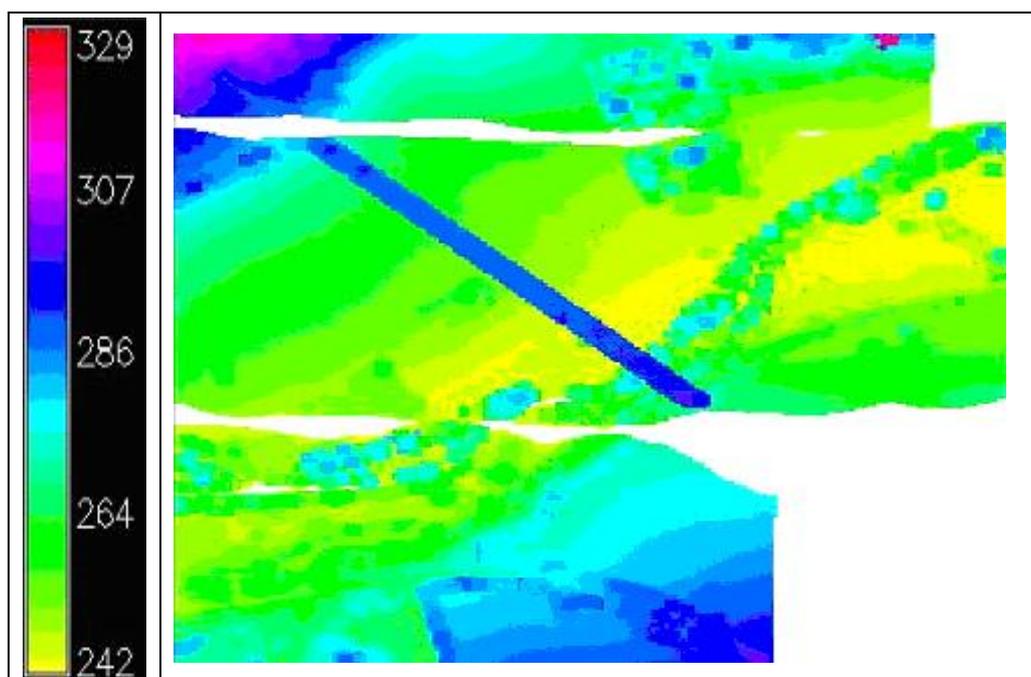
(單位：m)



### FSite8 之高程分佈圖

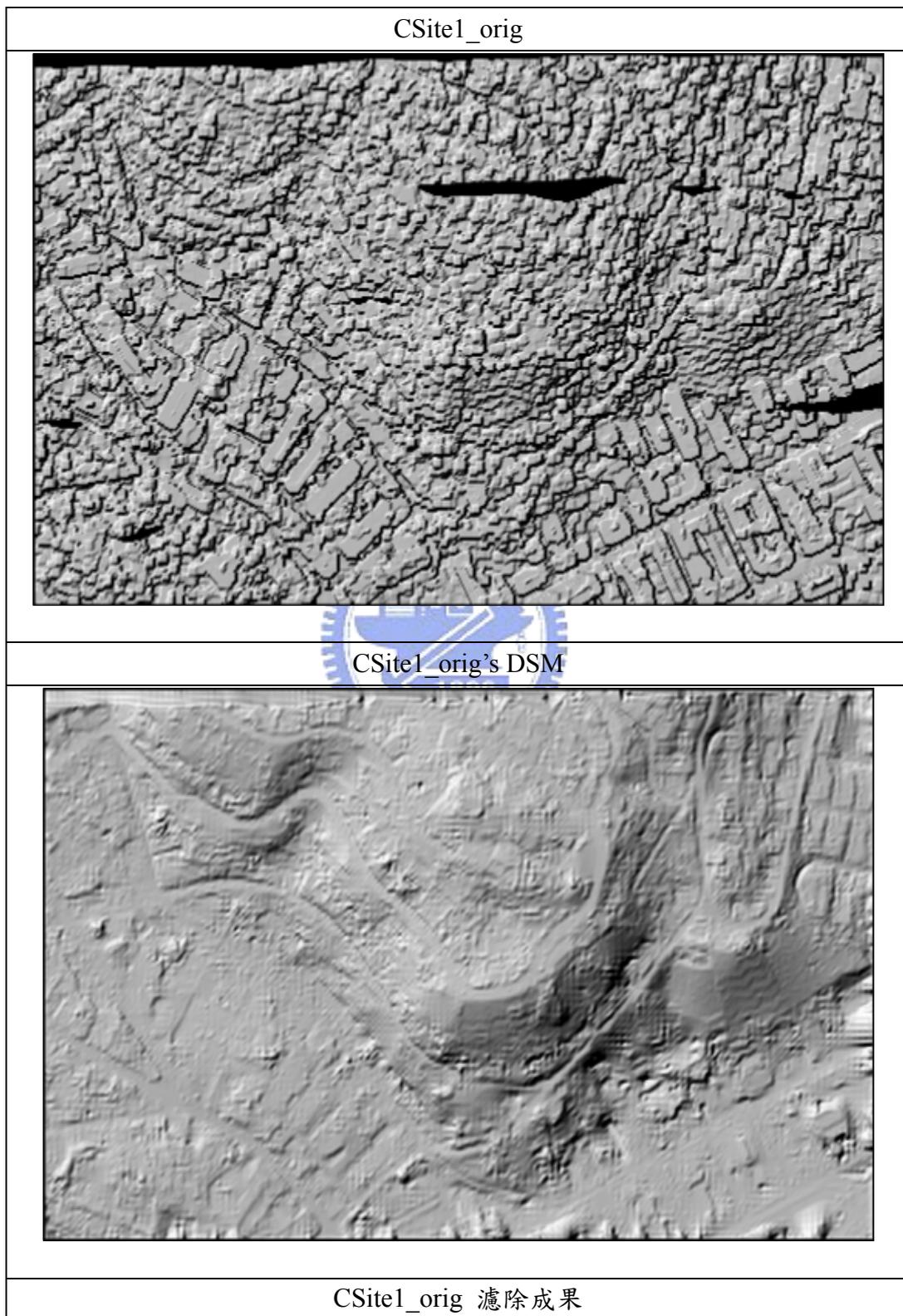
Var3：第一次回訊高程值，Var7：最後回訊之高程值

未處理前原始點第一次回訊數據之數值表面模型。

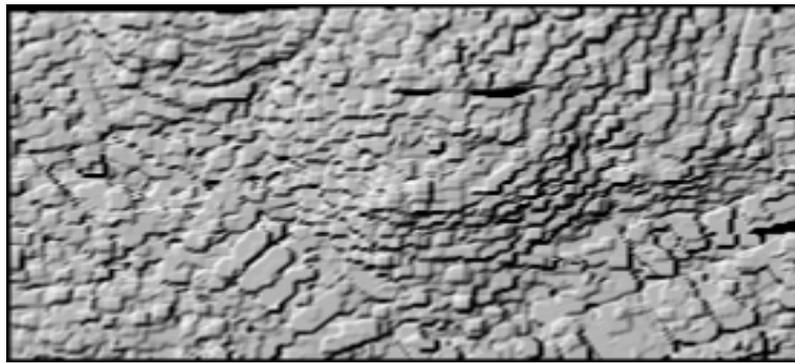


FSite8 數值表面模型

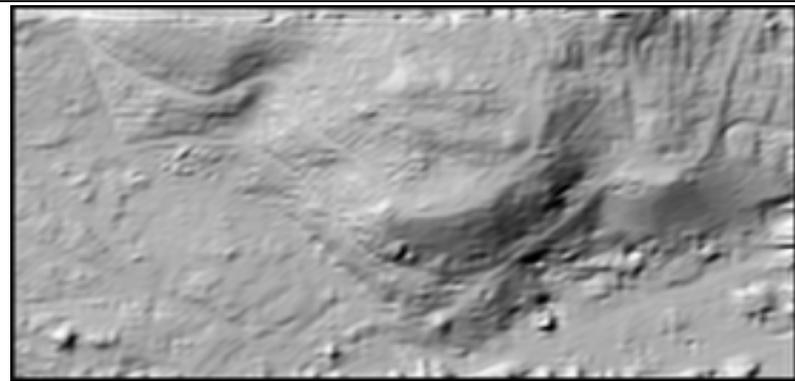
### 附錄三 ISPRS 八大測試區之濾除成果展示



CSite1\_red1

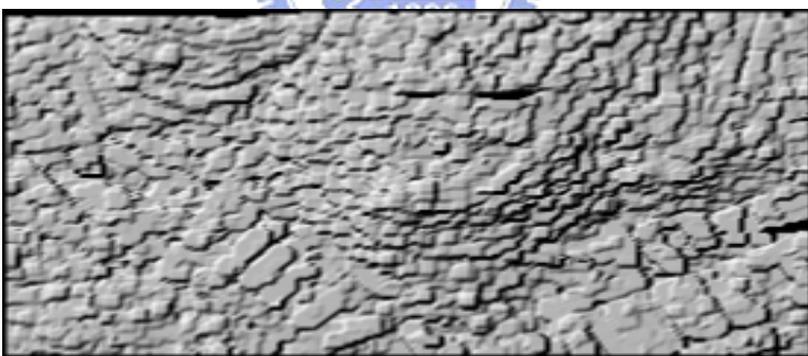


CSite1\_red1's DSM

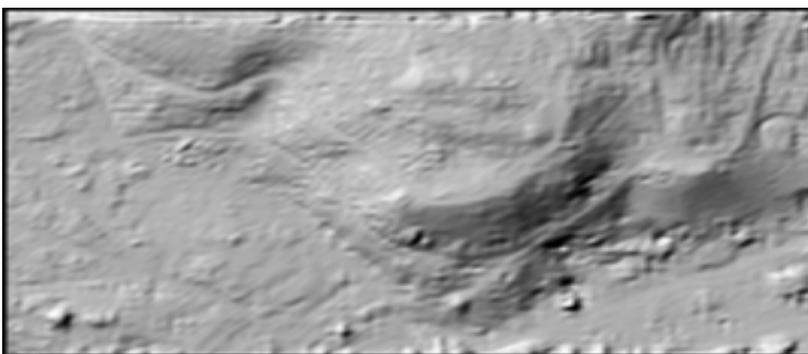


CSite1\_red1 濾除成果

CSite1\_red1

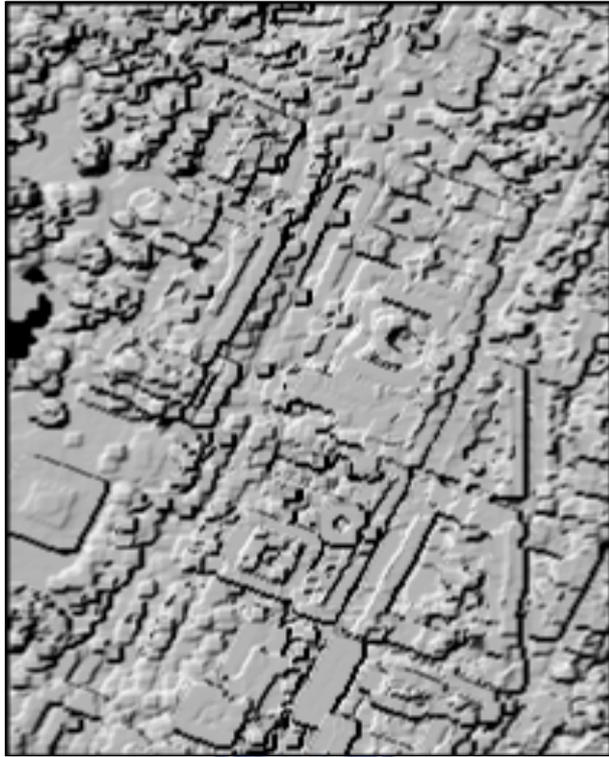


CSite1\_red1's DSM

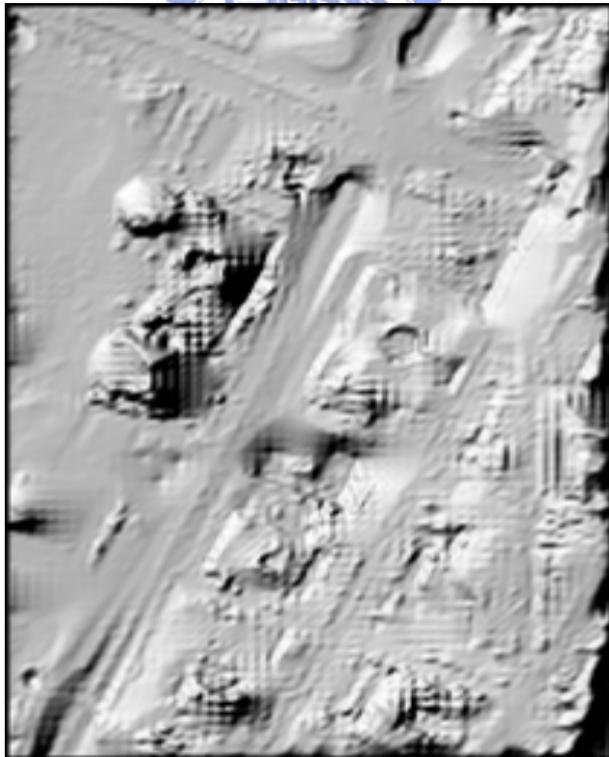


CSite1\_red1 濾除成果

Csite2\_orig

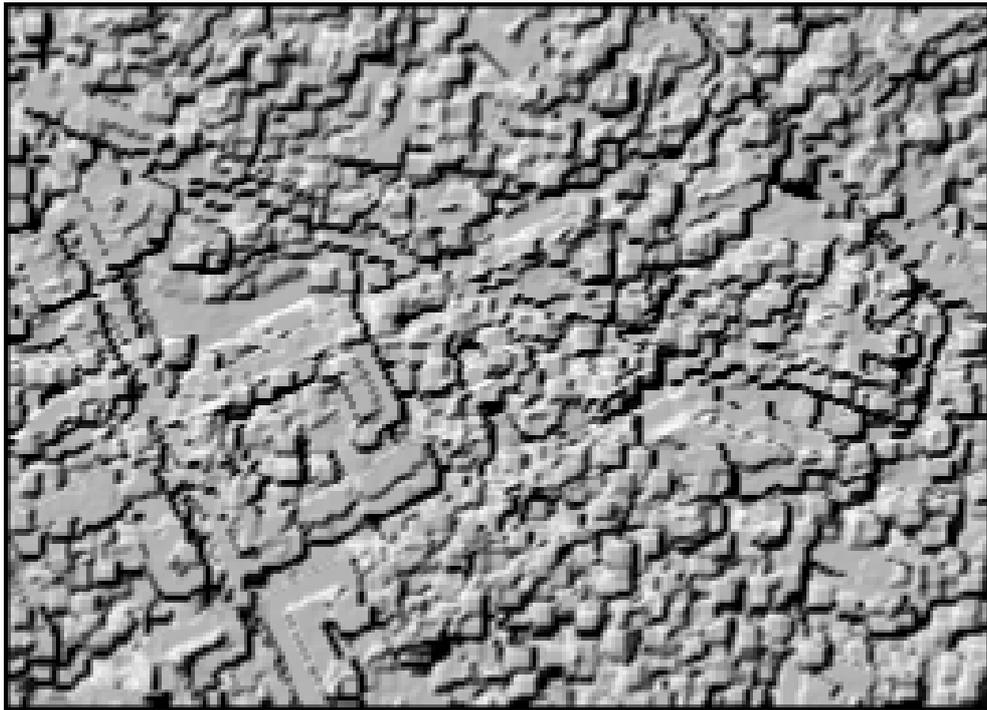


Csite2\_orig's DSM

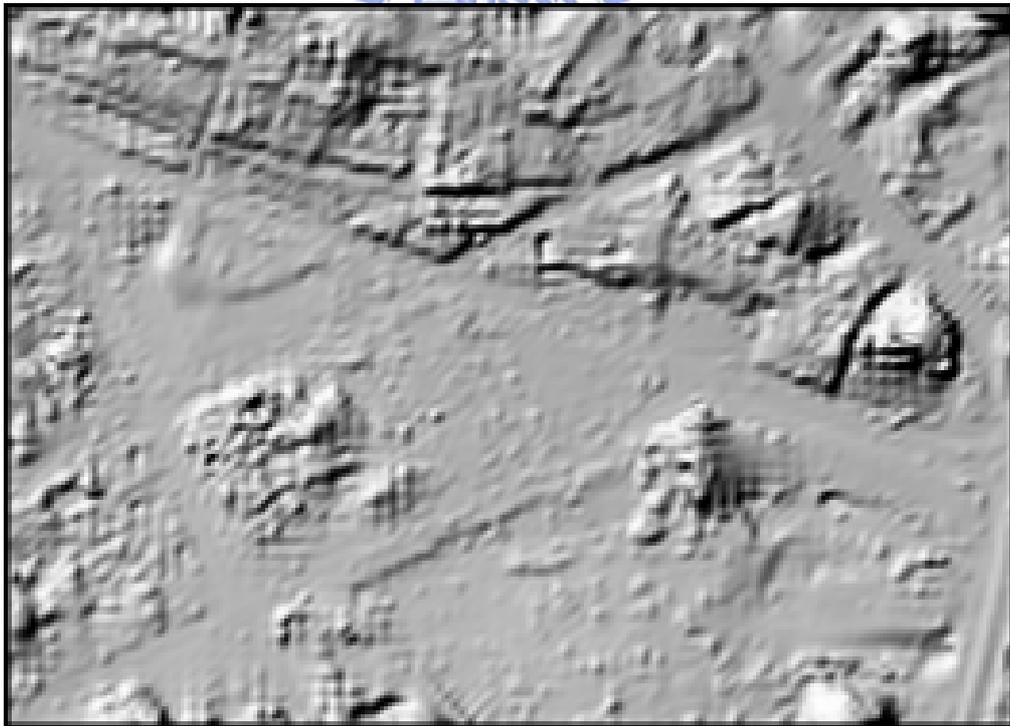


Csite2\_orig 濾除成果

Csite3\_orig

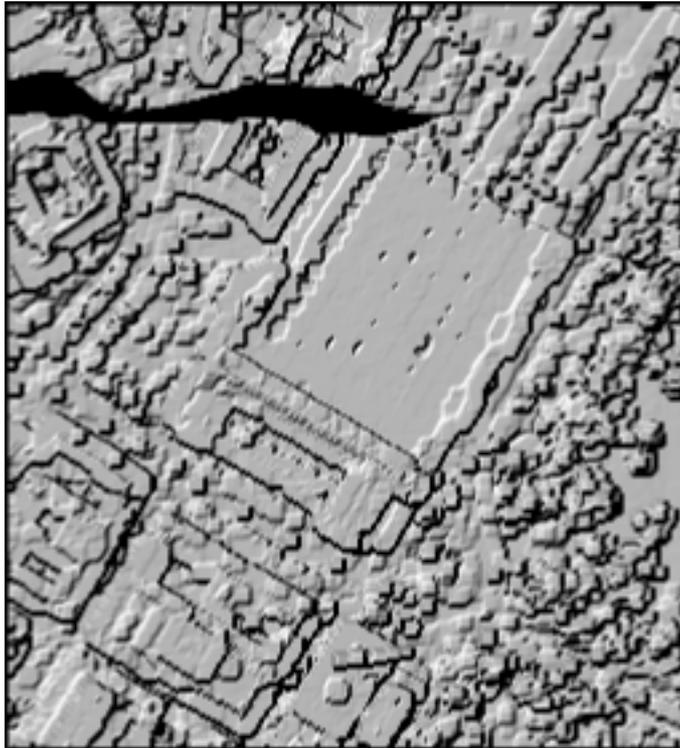


Csite3\_orig's DSM

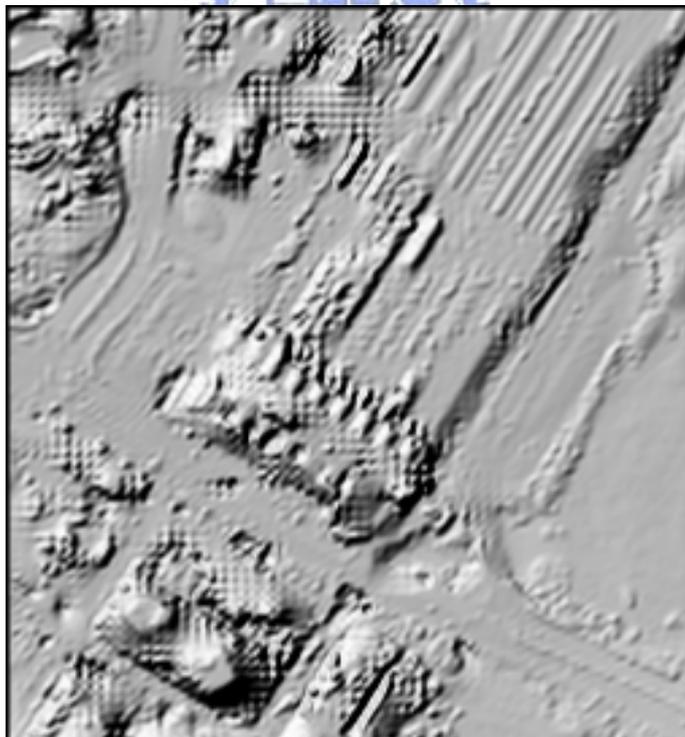


Csite3\_orig 濾除成果

Csite4\_orig

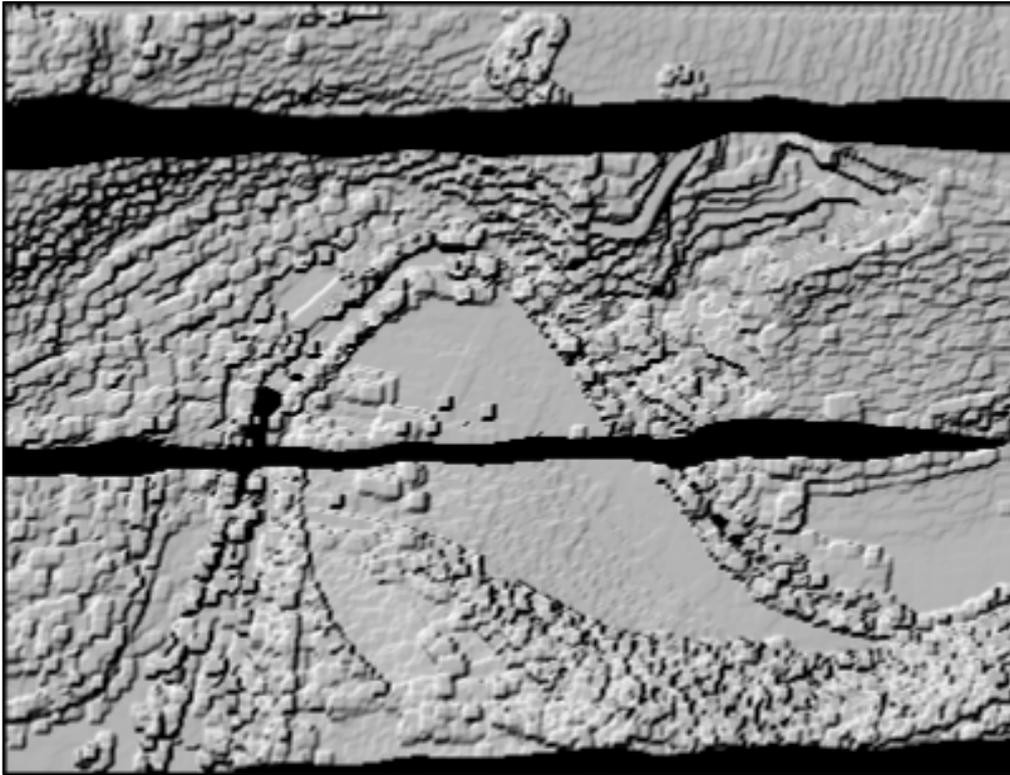


Csite4\_orig's DSM

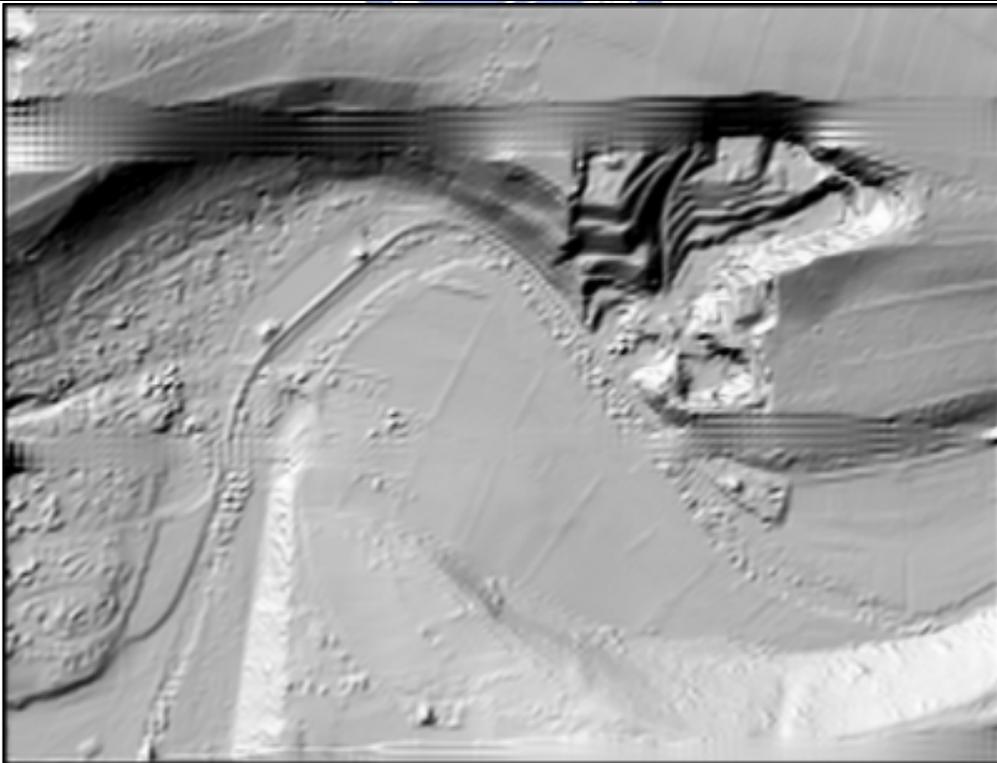


Csite4\_orig 濾除成果

FSite5\_orig

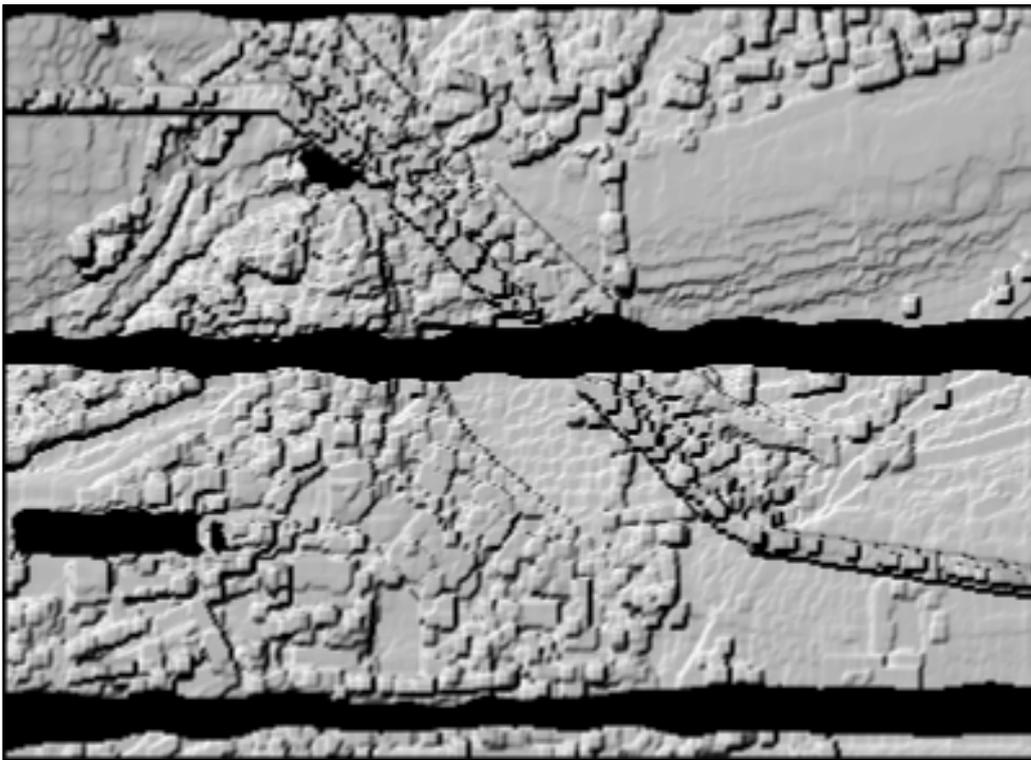


FSite5\_orig's DSM

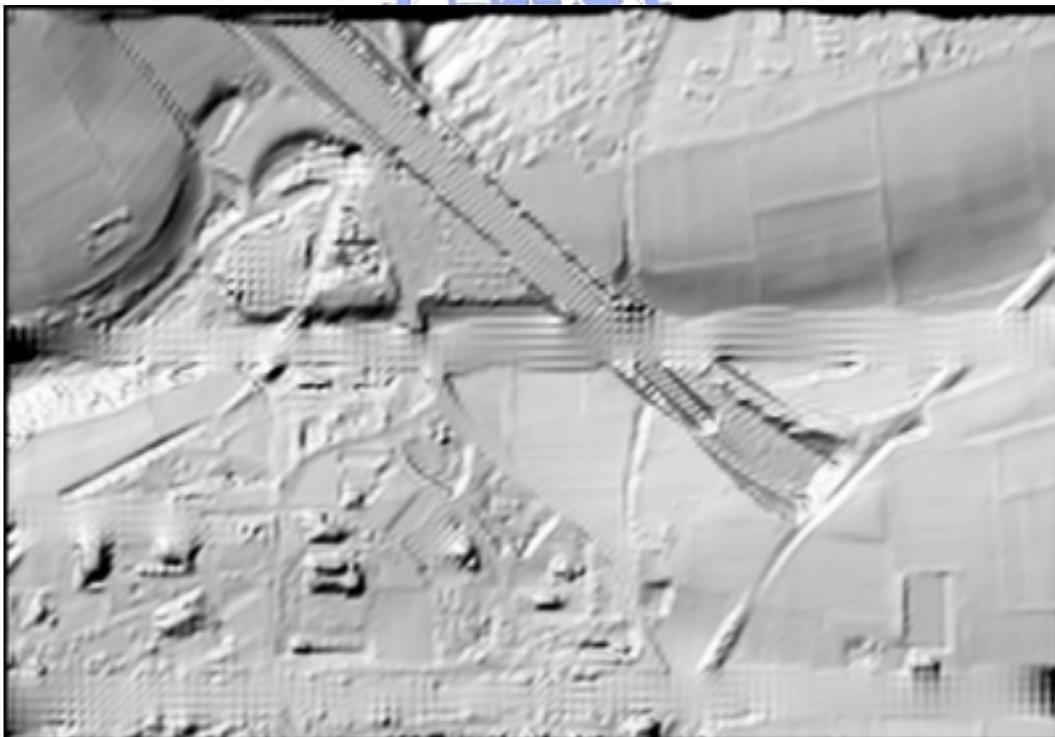


FSite5\_orig 濾除成果

FSite6\_orig

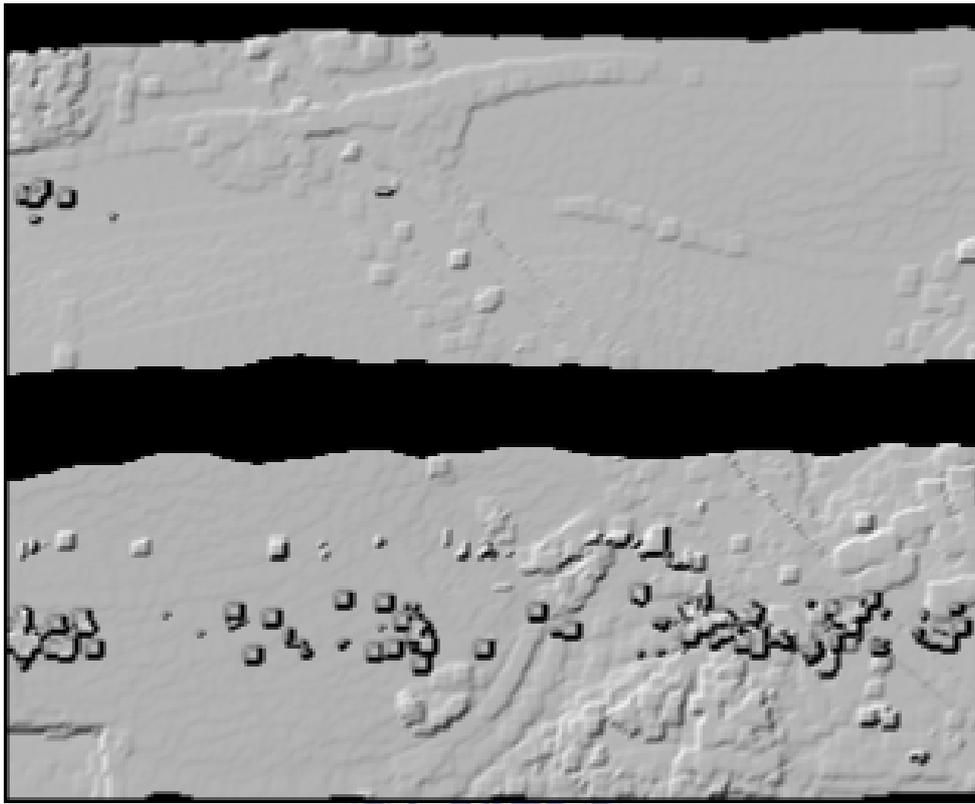


FSite6\_orig's DSM

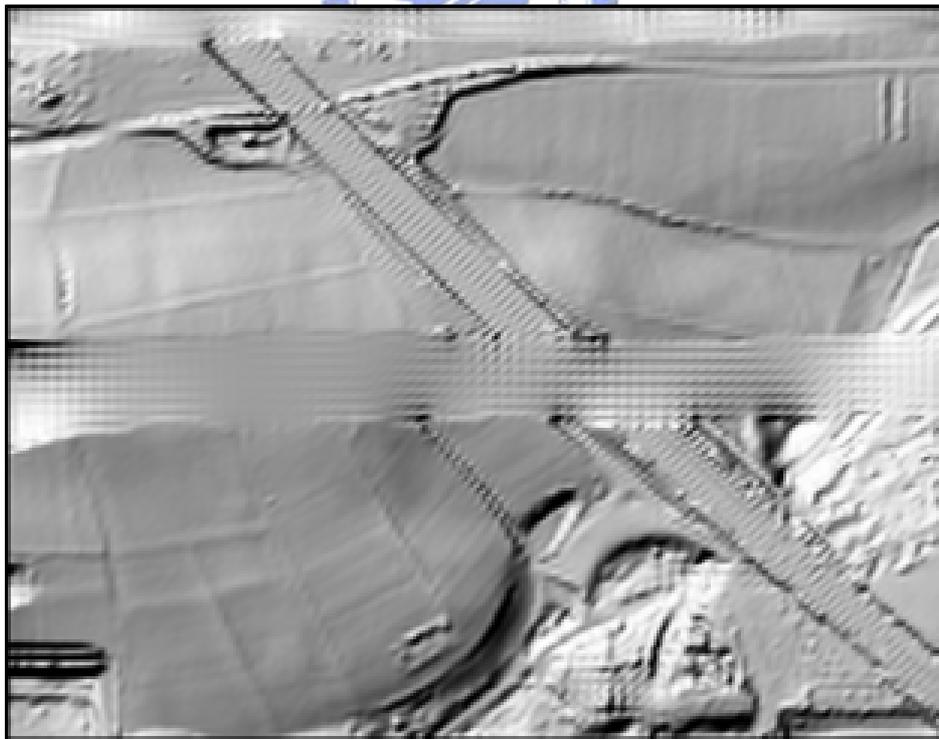


FSite6\_orig 濾除成果

FSite7\_orig

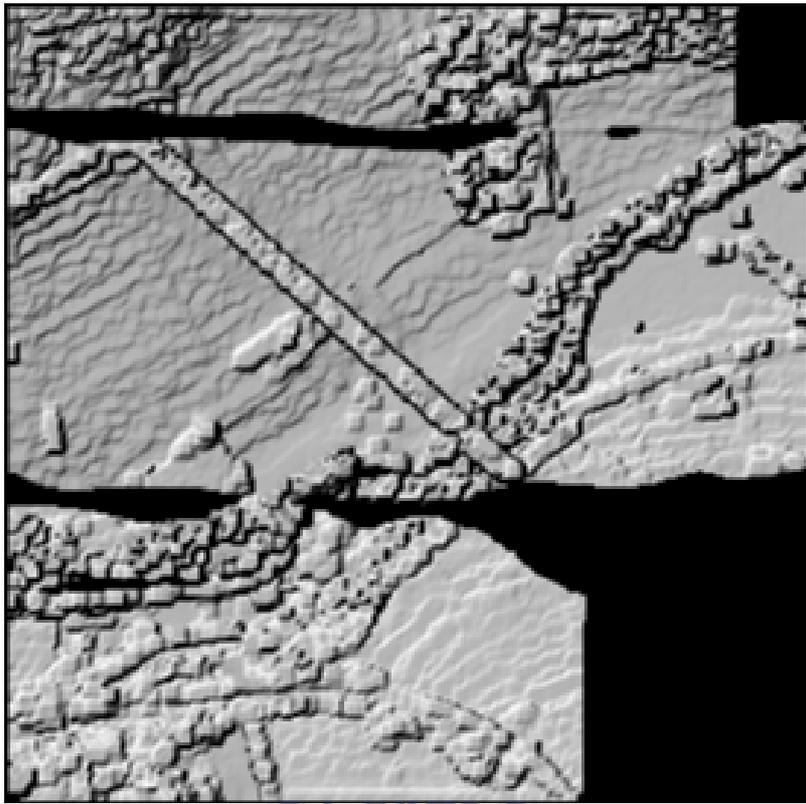


FSite7\_orig's DSM

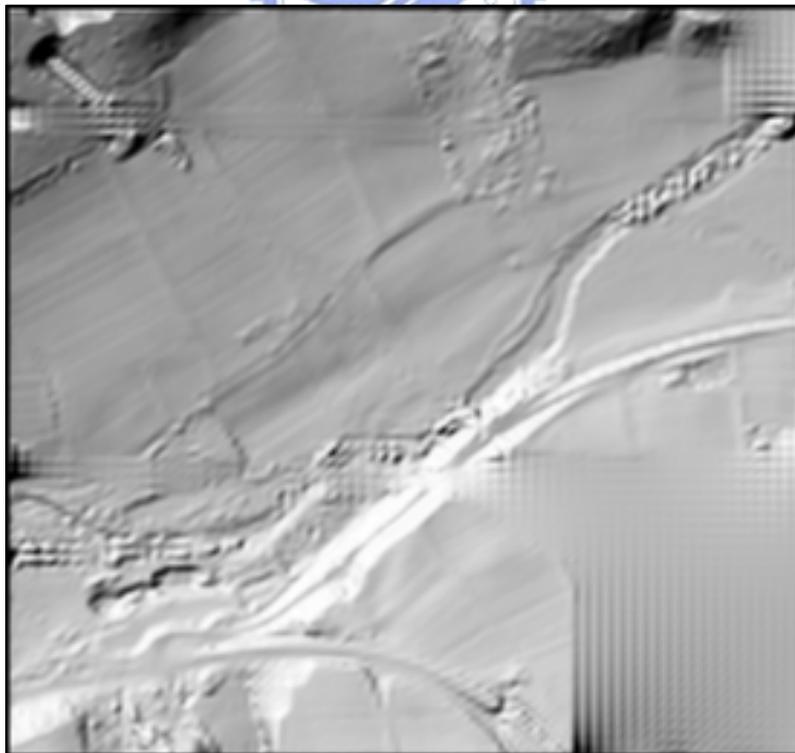


FSite7\_orig 濾除成果

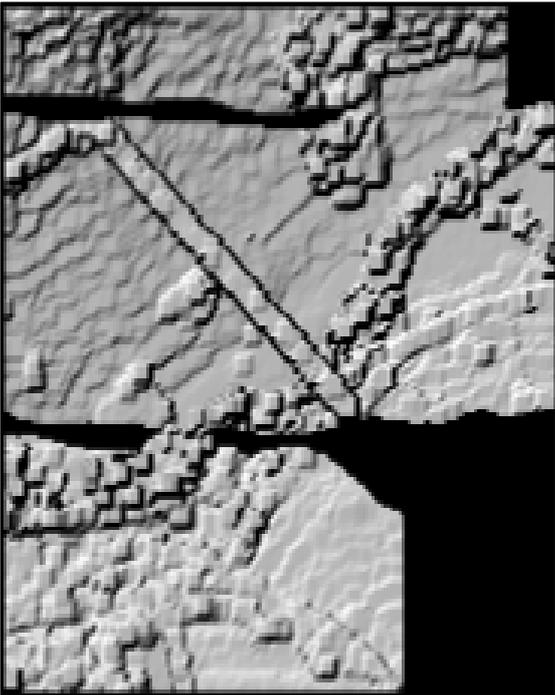
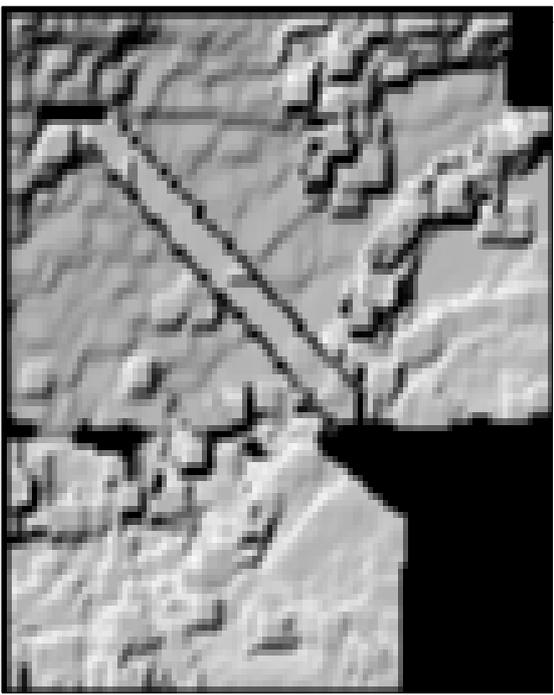
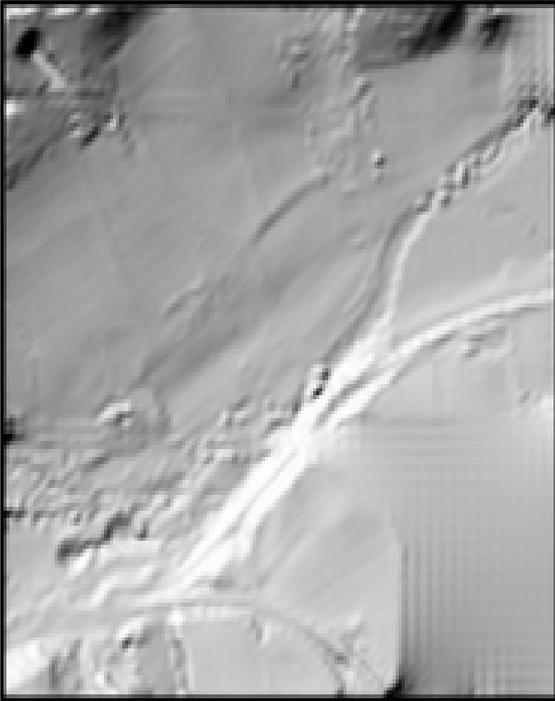
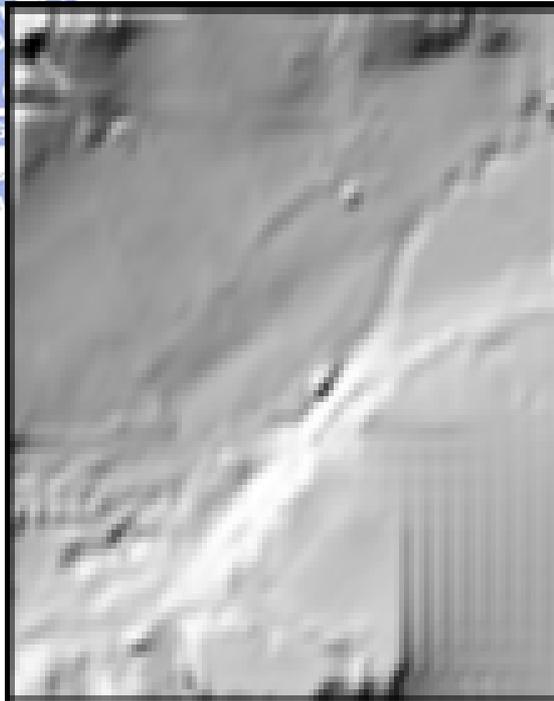
FSite8\_orig



FSite8\_orig's DSM



FSite8\_orig 濾除成果

FSite8_red1	FSite8_red2
	
FSite8_red1's DSM	FSite8_red2's DSM
	
FSite8_red1 濾除成果	FSite8_red2 濾除成果

## 附錄四 GRASS 作業程序說明

安裝完 GRASS 軟體及光達濾除模組後，進入 Linux 指令模式。在指令模式下，輸入 grassxx (xx：為使用之 GRASS 版本；本研究採用 GRASS5.3 版，即輸入 grass53) 後開始執行 GRASS 系統，其開始畫面如下所示；

```
GRASS 5.3.0

LOCATION: This is the name of an available geographic location. -spearfish-
         is the sample data base for which all tutorials are written.

MAPSET:  Every GRASS session runs under the name of a MAPSET. Associated
         with each MAPSET is a rectangular COORDINATE REGION and a list
         of any new maps created.

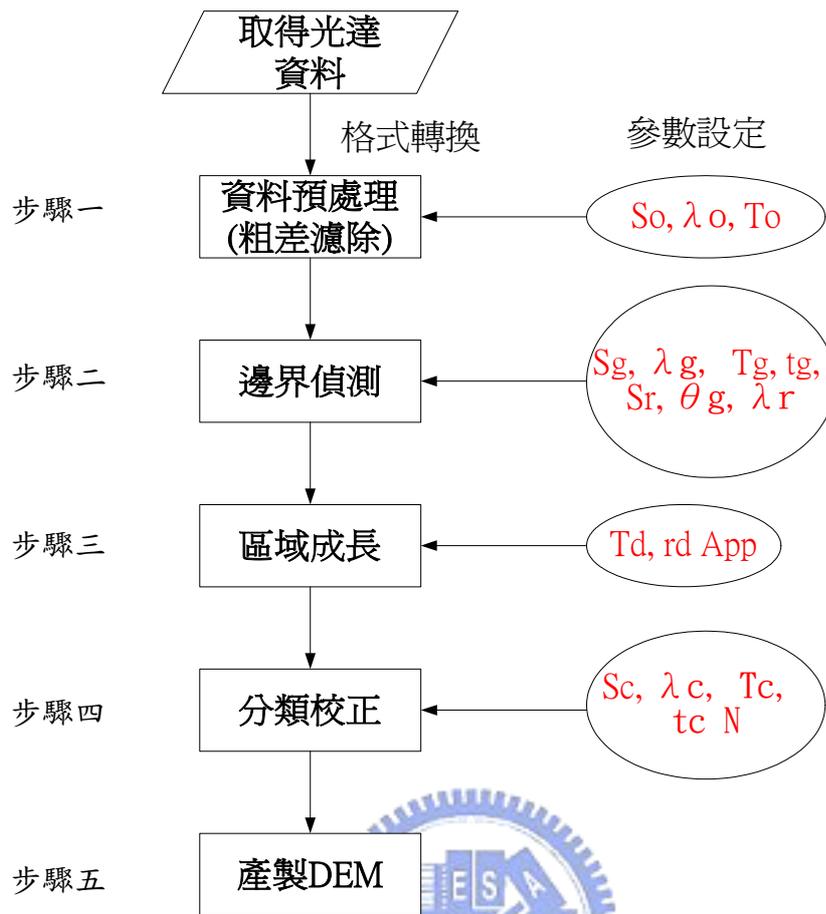
DATABASE: This is the unix directory containing the geographic databases

         The REGION defaults to the entire area of the chosen LOCATION.
         You may change it later with the command: g.region
-----
LOCATION:  global_____ (enter list for a list of locations)
MAPSET:  PERMANENT_____ (or mapsets within a location)
DATABASE: /home/grass_____

AFTER COMPLETING ALL ANSWERS, HIT <ESC><ENTER> TO CONTINUE
(OPTIONAL) HIT <Ctrl-C> TO CANCEL
```

此處 LOCATION 輸入使用之母目錄，MAPSET 則輸入該母目錄下使用者專屬子目錄，DATABASE 則輸入母目錄放置之絕對路徑 (如:/home/grass)，接著同時按下 ESC+ENTER 即可開始進行光達非地面點濾除作業程序(表 3-6-1)。

該作業程序共五大步驟，如下程序圖所示；



以下逐一說明各步驟之程序；操作之參數名稱及意義請參照本文 3-6 節。

### 步驟一 資料預處理

進入 GRASS 系統後，輸入 `s.bspline.reg` 於指令列中；執行後，電腦以詢問方式輸入採用的最後回訊資料檔名、參數  $S_o$ 、 $\lambda_o$  及選取使用 Bicubic interpolation 內插模式。最後，成果以 ASCII 文字格式輸出；該文字成果檔中包含點雲經內插後同位置之內插高程與該點雲之原始高程。經比較後，若兩者高差超過設定之門檻值  $T_o$ ，則將其移除；否之，則保留點雲資料進行下一步驟。

### 步驟二 邊界偵測

於 GRASS 指令列中輸入 `s.edgedetection`，執行後電腦螢幕上出現詢問式輸入介面後，依序輸入上一步驟之成果檔名及參數  $S_g$ 、 $S_r$ 、 $\lambda_g$ 、 $\lambda_r$ 、 $t_g$ 、 $T_g$ 、 $\theta_g$  (表 3-6-2)。此步驟輸出數據包含三種分類點雲：地面點、邊界點以及不確定點。

### 步驟三 區域成長

於 GRASS 指令列中輸入 s.growing，執行後螢幕出現詢問式輸入介面，依序輸入邊界偵測後的成果輸出檔、第一次回訊資料檔及參數 Appl、Td、Tj（表 3-6-3），經程式處理後輸出成果輸出檔。本步驟將邊界偵測後的點雲成果檔之重新分類為四種，其屬性分類：0 為地面點、1 為兩次回訊地面點、2 為兩次回訊地物點、3 為地物點。

#### 步驟四 校正分類

於 GRASS 指令列中輸入 s.correction 指令，執行後螢幕出現詢問式輸入介面，依序輸入區域成長後之成果檔及參數 Sc、 $\lambda_c$ 、Tc、tc（表 3-6-4），最後，其輸出成果同樣分類為四種點雲類型。本步驟可重複迭代處理（N），建議迭代約 2-3 次即可。

#### 步驟五 產製 DEM

將經過校正分類迭代計算後分類屬性為地面點(0)及兩次回訊地面(1)的點雲以雲線內插程式 s.bspline.reg 產製 DEM 網格資料。其內插參數為 Si、 $\lambda_i$ 、ri（表 3-6-5）。



## 作者簡介

姓名：陳威誠

籍貫：彰化縣田中鎮

出生日期：民國 69 年 8 月 26 日

學歷：國立交通大學土木工程學系碩士班肄業（93 級）

國立交通大學科技管理研究所輔所

國立成功大學測量工程學系畢業（91 級）

經歷：工研院能資所定時契約人員（93.4~93.12）

成大衛星資訊研究中心定時契約人員（88.7~90.6）

交通大學土木所地理資訊系統助教（93.9~94.1）

交通大學土木系測量學助教（91.9~92.6）

資格：九十三年專門職業及技術人員高等考試測量技師及格

