

國立交通大學

土木工程學系  
碩士論文

空載光達點雲穿透率探討

On the Penetration Rate of Point Clouds  
from Airborne LiDAR

研究生：黃清美

指導教授：史天元

中華民國九十六年六月

空載光達點雲穿透率探討

**On the Penetration Rate of Point Clouds  
from Airborne LiDAR**

研究生：黃清美      Student : Ching-Mei Huang

指導教授：史天元      Advisor : Dr. Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文



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 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年六月

# 空載光達點雲穿透率探討

學生：黃清美

指導教授：史天元

國立交通大學土木工程學系

## 中文摘要

空載光達可在短時間內獲取大量且高密度的點雲資料，其中包含了地面點與地物點。在評估數值高程模型資料品質優劣時，地面點點雲密度為重要指標之一。地面點密度高且分布均勻時，較能正確地展示地形面。地面點密度除受原始點雲密度之影響外，穿透率為另一重要因子。而雷射點穿越覆蓋面的比率(穿透率)，主要受地表覆蓋物之性質、雷射入射角與航高等因子影響。

本研究之目的在探討穿透率之表示方法，與其各種影響因子的關係。探討之項目，包括：(1)比較格網方式及 TIN 三角形面積排序的密度指標方法，了解不同地表覆蓋物與穿透率指標之間的關係。(2)分析實測航帶，探討雷射入射角對光達穿透率的影響，(3)討論覆蓋物之遮蔽效應，分析航高、入射角、覆蓋物高等影響因子，並試驗在不同航帶重疊率時，遮蔽陰影區域的補償效果。

經由實驗發現以格網方式評估密度時，當以不同面積為統計單位時，密度指標數值不同，相對上 TIN 三角形面積排序方法較不會有高密度區與低密度區互相補償的情形，可獲得較詳細的點雲密度資訊。當雷射入射角越大時，穿透率越低，反之亦然；航帶重疊可以改善遮蔽問題，但若在兩建物太靠近的情況下，即使有航帶重疊，也可能無法改善遮蔽問題。

# **On the Penetration Rate of Point Clouds from Airborne LiDAR**

**Student : Ching-Mei Huang**

**Advisor : Tian-Yuan Shih**

**Department of Civil Engineering**

**National Chiao Tung University**

## **Abstract**

The point cloud obtained from airborne LiDAR is composed of ground points and non-ground points. The density of ground points is an important index for characterizing the quality of DEM. When ground point density is high and distributed evenly, topography can be presented with high fidelity. There are a number of factors which may influence the ground point density. In addition to the density of the original point cloud, penetration rate is another essential factor. Penetration rate is influenced by land-cover types, incidence angle, flying height, etc.

This study investigates the indices for measuring penetration rate and the relationship among various factors. Three study subjects are included.

- (a) The penetration rate indices based on grid and TIN with different land-cover types are compared.
- (b) The influence of incidence angle on penetration rate is evaluated with real data set.
- (c) The relation between the building height, overlap ratio, and the shadow is derived, and validated with real data set.

The experiments revealed that the area size of statistic unit has high influence on the density computed. The triangle ranking indices based on TIN are less influenced by the compensation between high and low density regions in the unit area. It is also proved from real data analysis that the penetration rate is higher with smaller incidence angles. Overlap between flight lines can reduce the building shadow effectively, but not when the buildings are closely spaced.



## 致謝

研究所這兩年是畢生難忘的一段時光，其間歷經許多挫折與失落，幾度想要放棄，卻又不想半途而廢，終於在這個夏天畫下了句點，也因為經過這一串的磨練讓自己更充實更茁壯。相信所有的人都和我一樣，在撰寫這一段文章時，心中充滿了喜悅與感恩的心情。

首先誠摯的感謝指導教授史天元老師的教導與啟發，讓我在學業方面與處事態度上受益良多。感謝曾義星老師、蔡榮得老師、趙鍵哲老師與李瓊武博士對於論文的指導與改正，使論文能更加完整，並感謝工研院能環所對資料及技術方面的協助。

感謝劉進金、徐偉城與彭森祥學長們不厭其煩的指出我研究中的缺失，且總能在我迷惘時為我解惑，也感謝雅文、俊毅、玉芳、啟訓、胖虎、JACO、熱狗同學們的幫忙，恭喜我們順利走過這兩年。感謝歷韋、俊宜、紫猗、逸晴、富傑等學弟妹們常帶給我生活許多歡笑，你們總是讓我特別開心。特別感謝田福安學長，即使工作繁忙，卻依舊關心我的生活，並給我許多建議。

最後感謝我的家人與彥谷在過去兩年期間的配合與包容，你們的支持更是我前進的動力，願共同一起分享這份喜悅。

# 目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	IV
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
第一章 前言.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 研究方法.....	4
1-4 論文架構.....	5
第二章 光達穿透率.....	6
2-1 空載光達起源與系統組成.....	6
2-2 光達之多重回訊特性.....	7
2-3 空載光達穿透率及計算.....	9
2-3-1 各密度指標介紹.....	9
2-3-2 本研究之密度指標討論.....	11
第三章 實驗與分析成果.....	14
3-1 實驗數據來源.....	14
3-1-1 光達數據.....	14
3-1-2 航照影像.....	14
3-2 穿透率與地表覆蓋物分析.....	14
3-2-1 地表覆蓋物分類.....	15
3-2-2 試驗區.....	16
3-2-3 光達數據處理—點雲過度過濾之修正.....	17
3-2-4 影像數據處理—影像分類.....	20
3-2-5 穿透率成果.....	21
3-2-6 試驗區整理討論.....	27
3-2-7 試驗區穿透率與植被覆蓋率之討論.....	35
3-2-8 不同統計單位面積之穿透率與植被覆蓋率迴歸分析.....	37
3-3 雷射入射角對穿透率之影響.....	44
3-3-1 試驗規劃.....	44
3-3-2 試驗區.....	45
3-3-3 實驗結果.....	46
3-3-4 實驗成果分析.....	47
3-4 航帶重疊率與點雲密度之分析.....	48

3-4-1 單一航帶點雲密度差異.....	48
3-4-2 覆蓋物遮蔽探討.....	49
3-4-3 航帶重疊率探討.....	54
第四章 結論與建議.....	61
參考文獻.....	63
附錄A 雷射入射角對穿透率之影響試驗區之正射影像.....	65
作者簡歷.....	68





## 圖目錄

圖 2-1、空載光達掃描方式示意圖(Renslow, 2001).....	6
圖 2-2、光達footprint示意圖(Baltsavias, 1999).....	7
圖 2-3、雷射穿越樹葉之間細縫之示意圖(Kristian, 2002).....	8
圖 2-4、多重回波示意圖(Hug et al., 2006).....	9
圖 3-1、穿透率與地表覆蓋物分析流程圖.....	15
圖 3-2、光達點雲過度過濾剖面圖(橘色為地面點，綠色為非地面點).....	19
圖 3-3、不同覆蓋面之TIN組成差異。TIN以白色線表示.....	23
圖 3-4、9622_3_011 試驗區(25%~50%之植被覆蓋區).....	25
圖 3-5、不同覆蓋物TIN面積與三角形個數之直方圖.....	27
圖 3-6、穿透率與植被覆蓋率線性迴歸.....	36
圖 3-7、不同統計單位面積之穿透率與植被覆蓋率迴歸分析流程圖.....	37
圖 3-8、9622_3_011 下大壩.....	38
圖 3-9、五種統計單位面積圖示.....	39
圖 3-10、100m x 100m穿透率與植被覆蓋率迴歸結果.....	40
圖 3-11、200m x 200m穿透率與植被覆蓋率迴歸結果.....	40
圖 3-12、300m x 300m穿透率與植被覆蓋率迴歸結果.....	41
圖 3-13、400m x 400m穿透率與植被覆蓋率迴歸結果.....	41
圖 3-14、500m x 500m穿透率與植被覆蓋率迴歸結果.....	42
圖 3-15、單一航帶依平行航向等分五等分.....	45
圖 3-16、新竹六曲窩入射角與穿透率之關係.....	46
圖 3-17、新竹富興頭入射角與穿透率之關係.....	47
圖 3-18、桃園三民入射角與穿透率之關係.....	47
圖 3-19、單一航帶點雲密度之差異.....	49
圖 3-20、新竹富興頭各航帶原始點雲總數直方圖.....	49
圖 3-21、建物遮蔽示意圖.....	50
圖 3-22、新竹二十張犁試驗區之建物.....	52
圖 3-23、覆蓋物遮蔽各參數取得之步驟.....	52
圖 3-24、航帶 27 建物點雲剖面圖.....	53
圖 3-25、航帶 28 建物點雲剖面圖.....	54
圖 3-26、建物之間太靠近時，所造成之遮蔽陰影.....	56
圖 3-27、新竹南勢試驗區之建物.....	57
圖 3-28、新竹南勢試驗區建物之光達剖面圖.....	57
圖 3-29、航帶最右側之點雲分佈情形.....	58
圖 3-30、航帶中心之點雲分佈情形.....	59
圖 3-31、點雲影響範圍示意圖.....	59
圖 3-32、新竹市試驗區.....	60

圖A-1、新竹六曲窩 .....65  
圖A-2、新竹富興頭 .....66  
圖A-3、桃園三民 .....67



## 表目錄

表 2-1、多重回訊增加原始點雲總數的比率(100m x 100m) .....	12
表 3-1、地表覆蓋物類別及定義 .....	16
表 3-2、各試驗區其來源圖號 .....	17
表 3-3、不同覆蓋面之穿透率(使用工研院提供之光達數據成果) .....	18
表 3-4、不同覆蓋面之穿透率(已修正後點雲) .....	22
表 3-5、TIN面積排序成果與穿透率A .....	24
表 3-6、裸露地試驗區整理討論 .....	28
表 3-7、25%~50%之植被覆蓋區試驗區整理討論 .....	29
表 3-8、50%~75%之植被覆蓋區試驗區整理討論 .....	30
表 3-9、>75%之植被覆蓋區試驗區(1)整理討論 .....	31
表 3-10、>75%之植被覆蓋區試驗區(2)整理討論 .....	32
表 3-11、都會區試驗區整理討論 .....	33
表 3-12、試驗區穿透率與植被覆蓋率的關係 .....	36
表 3-13、各統計範圍穿透率與植被覆蓋率迴歸線之斜率 .....	42
表 3-14、新竹六曲窩不同入射角與穿透率值 .....	46
表 3-15、新竹富興頭不同入射角與穿透率值 .....	46
表 3-16、桃園三民不同入射角與穿透率值 .....	47
表 3-17、新竹富興頭各航帶之原始點雲總數 .....	49
表 3-18、各變數與遮蔽陰影長之關係 .....	51
表 3-19、航帶 27 遮蔽陰影長 $c$ 之計算 .....	53
表 3-20、航帶 28 遮蔽陰影長 $c$ 之計算 .....	54
表 3-21、由式(3-7)所得 $h_b$ 與 $l$ 關係 .....	55
表 3-22、試驗區中兩建物造成之遮蔽陰影長 .....	57

# 第一章 前言

## 1-1 研究動機與目的

近年來大範圍高精度高解析度數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)與數值覆蓋模型(Digital Surface Model, DSM)之產製技術中，主動式遙感探測技術已日趨成熟，尤其光達(Light Detection And Ranging，簡稱 LiDAR)以高發生頻率雷射進行掃描，且可在短時間內得到大量的點位資訊，已進入商業運作階段。光達或稱雷射掃描儀(Laser Scanner)，使用雷射光束進行測距，並以掃描方式獲得面涵蓋。空載光達以航空器為載台，結合雷射系統、全球定位系統(Global Position System, GPS)，與慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)。將三部份整合，經解算後，同時獲得地面點位之三維坐標，使地形高程測量作業快速而準確(史天元等，2005)。空載光達可在短時間內獲取大量且高密度的多重回波點雲資料，點雲由眾多具有三維坐標的掃描點組成，提供豐富的空間資訊，包含地物點及地面點，可用以生產 DEM 與 DSM，亦可提供森林結構等分析應用(Lim et al., 2003)。

如同一般地形測量，有效觀測量數目與分佈，對產品之品質有直接關係。故在產生數值高程模型中，表現資料品質優劣時，地面點點雲密度為重要指標之一，地形面點密度高時，能較正確地展示地形面。地面點密度除受原始點雲密度之影響外，穿透率為另一重要因子。而雷射點穿越覆蓋面的比率，主要受地表覆蓋物性質影響，雷射不一定能順利抵達地形面，故在不同地表覆蓋面，相同掃描條件之地面點密度不一定相同。獲取資料情況惡劣時，有可能造成地形面點數不足，無法達到預期對地形面描述要求之現象。

由於資料品質評估為各種測量之重要項目之一，本研究針對光達點雲密度之表示方式與穿透率之影響因子進行分析探討，主要目的如下：

1. 探討各種密度指標特性與適用性。

2. 了解不同地表覆蓋面與穿透率之間的關係。
3. 探討不同雷射掃描入射角對穿透率造成的影響。
4. 討論覆蓋物之遮蔽效應，分析航高、入射角、覆蓋物高等影響因子，並試驗在不同航帶重疊率時，遮蔽陰影區域的補償效果。

## 1-2 文獻回顧

Peng and Shih (2006)以兩個不同掃描條件，相同試驗區之光達數據分析高程精度之影響因子。試驗區為歷經九二一地震災害嚴重之南投九份二山，範圍為  $3km \times 3km$ ，試驗區因地震有大規模的山崩，地勢崎嶇，有 70% 的坡度大於  $20^\circ$ 。所用之兩個光達資料一為航高 1100m，掃描儀器為 Optech ALTM 2033，視角  $30^\circ$ ，點雲間距為 1~2m；另一為航高 1800m，掃描儀器為 Leica Geosystems，視角  $40^\circ$ ，點雲間距為 2~3m。此研究以兩個光達資料評估地形坡度、地形方位及地表覆蓋物型態對高程精度之影響，其中描繪植被資訊方面是以光達資料的樹高、樹冠體積、局部粗糙度和植被角度做分析。另外，由於從地面控制點到最鄰近之光達點的平均距離可決定光達地面反射點間距，計算結果是以較低的飛行高度 ( $H=1100m$ ) 較佳 ( $RMSE=16.3cm$ )，較高的飛行高度 ( $H=1800m$ ) 較差 ( $RMSE=25.8cm$ )。

實驗結果顯示高程精度與五個影響因子非常相關，分別是地勢坡度、植被角度、樹冠體積、點雲局部粗糙度及光達地面反射點間距(最鄰近光達點之平均距離)。此結果顯示光達高程精度與地面反射點間距 $\times \tan(\text{植被角度})$ 有高度線性相關 ( $r^2 > 0.9$ )，故地面反射點間距 $\times \tan(\text{植被角度})$ 可以決定地表覆蓋類型對光達高程精度的影響。另外，光達高程精度與地面反射點間距 $\times \tan(\text{坡度})$ 亦有明顯的線性相關 ( $r^2 \approx 0.9$ )。而在地形方位部分，在航高  $H=1800m$  光達資料及沒有交叉航帶之航高  $H=1100m$  光達資料中，地形方位對高程誤差皆有顯著的影響。但若  $H=1100m$  光達資料中加入交叉航帶資料後，地形方位對高程誤差沒有具體的影響。由結果得知，有加入的交叉航帶資料可降低地形方位對高程精度之影響。

何心瑜(2006)依照內政部高精度及高解析度數值地型模型測製規範(工研院, 2005), 將地表覆蓋分為裸露地、矮植被、疏遮蔽林、密遮蔽林與都會區五類, 統計單位面積為 $100m \times 100m$ , 探討評估空載光達點雲密度指標的方法。何心瑜(2006)採用兩種方式計算空載光達穿透率, 一為以格網方式進行, 計算該面積內之地面點雲總點數與原始點雲總點數之比率, 所得成果以裸露地(44.3%)穿透率最高, 其次依序為都會區(38.6%)、矮植被(37.7%)、疏遮蔽林(21.5%), 密遮蔽林(15.3%)為最低。另一方法為 TIN 三角形個數, 即計算地面點雲組成之 TIN 三角形個數與原始點雲組成之 TIN 三角形個數之比率, 所得成果以裸露地最高(51.5%), 其次依序為疏遮蔽林(14.2%)、都會區(11.7%)、矮植被(8.6%), 密遮蔽林(8.5%)為最低。實驗結果顯示不論是利用格網方式、三角形個數, 甚至視覺判斷, 都可以明顯分辨出密遮蔽林和裸露地, 而疏遮蔽林、都會區、矮植被覆蓋區, 其穿透率受到統計範圍影響, 高密度區與低密度區互相補償, 導致成果無法反應品質。

Barilotti and Turco (2006)與彭炳勳(2006)探討空載光達點雲穿透率(LiDAR Penetration Index, LPI)與葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)的關係。Barilotti and Turco (2006)探討之兩個試驗區在義大利東北的 Friuli Venezia Giulia 山區, 試驗中將光達點雲以 TerraScan(Terrasolid, 2004)進行過濾, 分為地面點及植被點, 其中植被點又分兩類, 一為矮植被(高度 $<1m$ ), 一為高植被(高度 $>1m$ ), LPI 的計算方式如下:

$$LPI_{ij} = g_{ij} / (g_{ij} + V_{ij}) \quad (1-1)$$

式中  $g_{ij}$  代表地面點密度,  $V_{ij}$  代表高植被點密度。LPI 計算時的格網大小為  $1m \times 1m$ , 所得之雷射點雲穿透率與葉面積指數值關係式為  $LAI = -12.863(LPI) + 5.5919$ , 其  $R^2 = 0.89$ 。研究中並探討當光達點雲密度不同時, 若用相同格網大小計算 LPI, 則 LAI 與 LPI 相關性會降低。因此, LPI 的計算半徑應隨著點雲密度不同而更改, 其計算半徑之算式如下:



$$r = (150/\pi\rho)^{1/2} \quad (1-2)$$

其中  $r$  的單位是公尺， $\rho$  是點雲密度( $pts/m^2$ )，表示至少 150 點取樣計算，由此式子可以決定計算 LPI 時之統計半徑。

彭炳勳(2006)使用 LI-COR 公司於 1992 年所開發之 LAI-2000 植物冠叢分析儀測定 LAI 值，再選取與 LAI 施測時相同點位但多種不同統計單位面積的空載光達點雲資料，計算其穿透率。利用不同統計單位面積的雷射點雲穿透率與 LAI 進行分析計算，藉此得知由空載光達推估 LAI 的最適網格大小，並以推估出的最適網格大小為基礎，將雷射點雲穿透率與葉面積指數資料進行迴歸分析，推導出迴歸模型，可作為推算試驗區葉面積指數之用。此研究計算出的最適網格大小為  $15m \times 15m$ ，雷射點雲穿透率指數(LPI)是以(冠層點)/(冠層點+地面點)來計算，所得之雷射點雲穿透率-葉面積指數值關係式為  $LAI = 4.4212(LPI)$ ， $R^2 = 0.701$ 。研究結果顯示利用雷射點雲穿透率及葉面積指數計算所得之相關性高，故可由光達資料推估葉面積指數。



### 1-3 研究方法

本研究除探討各種密度指標特性與適用性外，並以三個試驗例了解穿透率與各種影響因子的關係。試驗內容包括：(1) 穿透率與地表覆蓋物分析，將地表覆蓋物以植被覆蓋率測定結果分為四類，外加都會區共五類，植被覆蓋率計算以航測影像做判斷。點雲密度指標以格網方式及 TIN 面積排序兩種方法，對不同地表覆蓋物地形的試驗區分別計算穿透率，並將穿透率與各覆蓋物之植被覆蓋率進行比對，做迴歸分析，了解地表覆蓋物與穿透率之間的相關性。以格網方式計算穿透率時，以不同面積為統計單位所得到的成果也會有所差異，故於本研究中也探討不同統計單位面積對穿透率與覆蓋物關係之影響。(2) 雷射入射角對穿透率的影響。本研究使用實測航帶，在同一航帶中依雷射入射角分成數帶各別計算其穿透率，了解不同雷射入射角對點雲穿透率的影響。(3) 航帶重疊率與點雲密度

之分析。本試驗先討論同一航帶中，原始點雲密度變化情況。再探討覆蓋物之遮蔽效應，分析航高、入射角、覆蓋物高等影響因子，並試驗在不同航帶重疊率時，遮蔽陰影區域的補償效果。

## 1-4 論文架構

論文架構共分為四章，說明如下：

第一章「前言」：說明研究動機與目的，並回顧相關研究及敘述本論文之研究方法。

第二章「光達穿透率」：介紹光達起源與組成，說明其多重回訊的特性。並對各密度指標特性做探討，說明本研究之穿透率計算方式。

第三章「實驗與分析成果」：包括穿透率與地表覆蓋物分析試驗、雷射入射角對穿透率影響試驗及航帶重疊率對點雲密度分析試驗，說明此三試驗之實驗方法、實驗流程與實驗成果探討。

第四章「結論與建議」：研究成果總結與建議。



## 第二章 光達穿透率

### 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)及慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)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年期間將雷射掃描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描儀系統(Ackermann, 1999)。

空載光達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GPS 地面參考站，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，最後求定地面掃描點的三維座標(陳威誠，2004)。圖2-1為空載光達掃描方式示意圖。

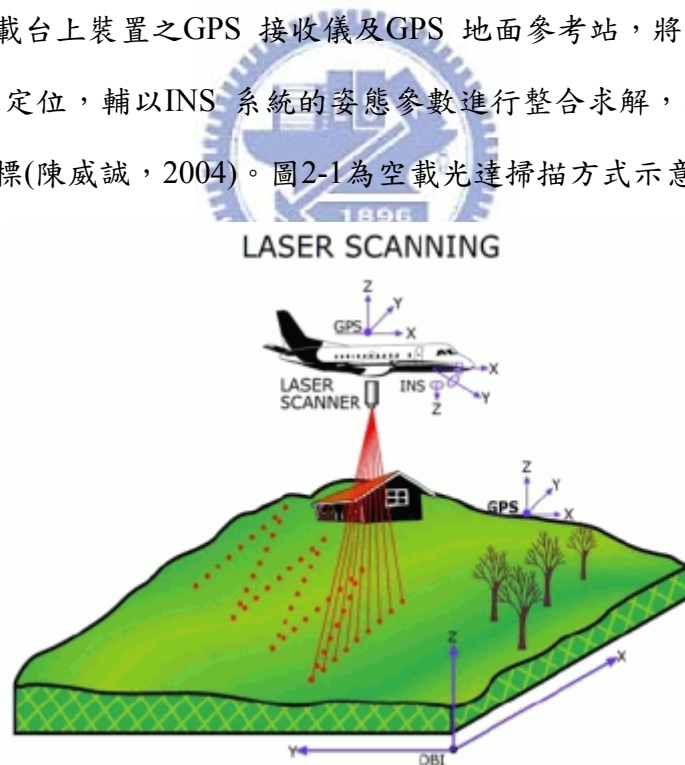


圖 2-1、空載光達掃描方式示意圖(Renslow, 2001)

目前，空載雷射掃描儀使用之脈衝雷射波段大多在近紅外光範圍。亦有某些系統採用綠光波段的光達系統，如用於近岸水深測量之SHOALS系統，因為綠色波段可穿透水體，進而量測水底的地形起伏。(史天元等，2005)

## 2-2 光達之多重回訊特性

空載光達由空中向地面發射雷射光束獲取點雲資料時，雷射光束因為發散而形成圓錐狀，抵達地表時會形成直徑約數十公分到數公尺的圓形光照區域，此區域稱為足跡(footprint)。足跡直徑大小與飛行航高、瞬間視角 (IFOV)、地形坡度等有關，圖2-2為光達雷射光束投影至地表的示意圖，其中D為光學發射孔徑，h為載具的飛航高度， $\gamma$ 為瞬間視角，A為雷射地面投影直徑。

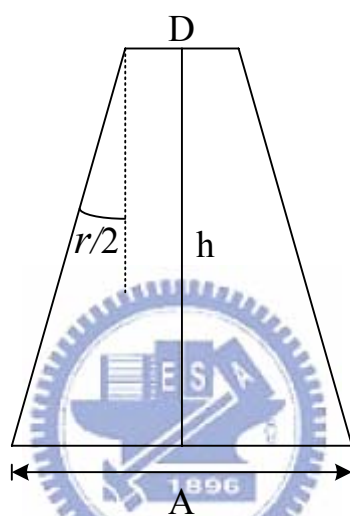


圖 2-2、光達 footprint 示意圖(Baltsavias, 1999)

光達的足跡面積範圍有時比接觸到的物體還大，物體無法完全遮蔽雷射光，例如樹葉之間的縫隙，如圖2-3。未被遮蔽的雷射光會繼續往下傳送直到抵達另一被測物表面，故雷射光接觸第一個被測物時，能反射回光達接受器，成為第一個回訊，未被遮蔽的雷射光則繼續往下傳送。同樣地，若抵達第二個被測物時，仍無法完全阻擋剩餘的雷射光，則剩餘的雷射光仍會繼續往下傳送直到雷射光完全被擋住。因此一道雷射光可能產生一次或多次的反射回波 (Echo)，每一個回波點雲都有三維資訊。

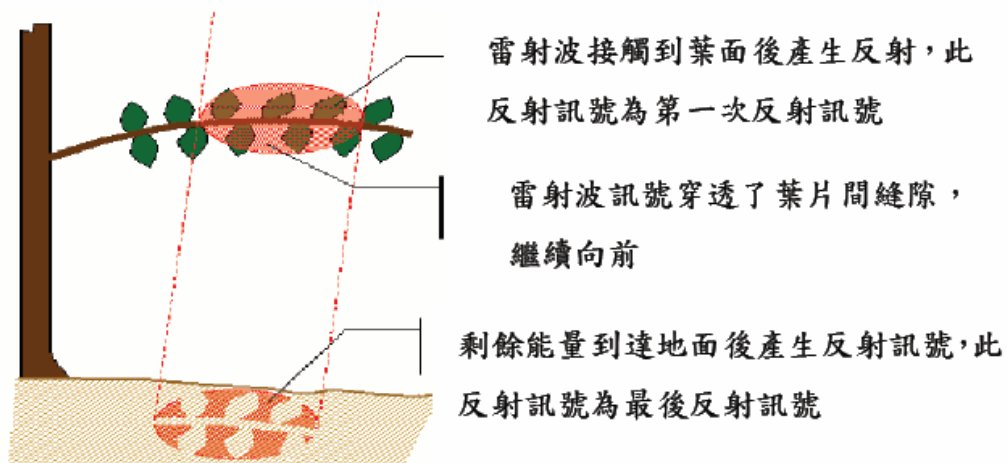


圖 2-3、雷射穿越樹葉之間細縫之示意圖(Kristian, 2002)

光達因為在植被覆蓋區域有多重回波(Multiple Echoes)，且雷射光束能穿越樹葉之間的細縫而抵達地形面，故稱光達具有穿透力。運用此能力可獲取林木中垂直方向不同的冠層高度及樹冠密度變化情形，由冠層表面的反射點高度差，可用於單株立木的樹冠輪廓研究，或者藉由地面點與冠層點的高度差產生樹冠高度模型(Canopy Height Model, CHM)(Leckie et al., 2003)，圖2-4為光達多重回波示意圖。

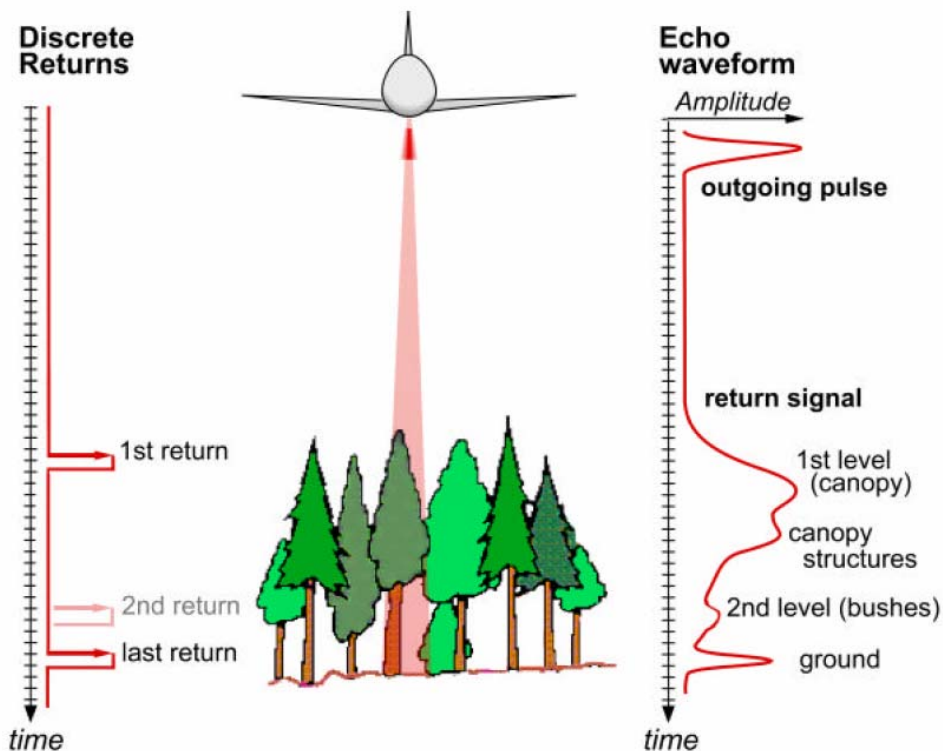


圖 2-4、多重回波示意圖(Hug et al., 2006)

## 2-3 空載光達穿透率及計算

雷射具有多重回訊之能力，不同的地表覆蓋地形，有不同之多重回訊，如房舍通常應只有一次單一回訊，在植被覆蓋的區域則通常有多次回訊。穿透率的定義為雷射點穿越覆蓋面的比率，意即所得地面點數所佔全部點數之比率。定義穿透率的方式有很多，良好的穿透率計算方式是以能詳細且正確地表現點雲密度分佈情況為目標。如以全區之平均值計算，則可能有高密度區與低密度區，彼此互相補償，使得指標無法反應品質。若採用較小區域之平均，則多小的區域範圍為合理之大小，值得探討。

### 2-3-1 各密度指標介紹

目前根據空載光達點雲性質及作業方式考量，何心瑜(2006)提出的點雲密度表示方法，有以下五種：

1. 格網方式

以一固定面積為單元，計算該面積內之雷射點數。當此一面積值為整個測區之面積時，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。而使用何面積為統計單元與點雲本身密度有關，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。此指標會因所選擇範圍大小、區域不同而有所差異，具體性質尚有待進一步討論。

## 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。而徐昇多邊形以最鄰近法內插，即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。

### 2-3-2 本研究之密度指標討論

上節所述的五種方法中，TIN三角形個數與格網方式原理大致相同，都是以地面點數佔總點雲點數的比率來呈現，與統計單位面積有極大關係，故本研究擇一探討，選擇格網方式。TIN三角形面積排序與徐昇多邊形兩種方法原理也大致相同，但TIN三角形面積所代表的是地面點雲空隙，在探討點雲密度時以地面點雲空缺面積來計算有較好的代表性，故選擇TIN三角形面積排序方法。而使用人工繪製多邊形的方法因為人工介入太多，故不採用。因此，本研究所使用的密度指標為格網方式與TIN三角形面積排序兩種，以下分別詳述這兩種密度指標。

#### 1. 格網方式

以格網方式做密度指標最重要的因子就是統計單位面積，也就是格網大小。當格網取的太大，高密度區與低密度區容易平均而無法顯現出細節資訊。當格網取的太小時，會沒有足夠的樣本數，容易出現特例，難以評估其密度值。以格網方式計算穿透率，方便快捷且直接，在密度分佈均勻的區域，可以立即得到一個良好的指標，但於密度分佈不均的區域，則容易因為格網大小的不同而影響指標，且無法提供較細節的資訊。

何心瑜(2006)以 $100m \times 100m$ 為網格大小做穿透率的試驗，其對穿透率定義如下，在此稱為穿透率(A)：

$$\text{穿透率}(A) = \frac{\text{地面點數}}{\text{點雲總點數}} \times 100\% \quad (2-1)$$

但在植被覆蓋物地區，多重回訊會影響到點雲密度，一次雷射發出只會有一個地面點，但可能有一次到多次不等的回訊，每一次回訊都會視為一個點，原始點雲總數會因為回訊的多寡而不同，影響穿透率，如表 2-1 中，以統計單位面積 $100m \times 100m$ ，統計原始點雲總數因為多重回訊而增加的比率。only+last 點雲數

代表唯一回波與最後回波，正常狀況下，only+last 點雲數與雷射發射總數應該相同，由此統計可以看出在植被覆蓋密集的地區，因為多重回訊的關係，原始點雲總數比雷射發射總數多了 20%~30%。因此本研究除了採用式(2-1)的穿透率定義計算外，並以雷射發出總數為基準的方式計算穿透率，在此稱為穿透率(B)，定義如下：

$$\text{穿透率(B)} = \frac{\text{地面點雲數}}{\text{雷射發射總數}} \times 100\% \quad (2-2)$$

本研究除了用穿透率(A)及穿透率(B)分別計算光達點雲的穿透率外，並選用 100m×100m、200m×200m、300m×300m、400m×400m 與 500m×500m 五種格網大小做試驗，以了解各格網大小之適用性。

表2-1、多重回訊增加原始點雲總數的比率(100m x 100m)

覆蓋類	總點雲數	only+last點雲數	非only+last回訊率(%)
裸露地	13136	13136	0.0
	16183	16183	0.0
	17575	17568	0.0
25%~50% 之植被覆蓋	7600	7437	2.1
	15866	15832	0.2
	6313	6166	2.3
50%~75% 之植被覆蓋	8279	8115	2.0
	18017	17453	3.1
	15761	12754	19.1
>75% 之植被覆蓋區	16625	14273	14.1
	17894	16043	10.3
	23687	21076	11.0
	13618	9922	27.1
	13106	8785	33.0
都會區	13524	10639	21.3
	13144	12695	3.4
	8969	8575	4.4
	17384	16690	4.0

## 2. TIN 三角形面積排序

以TIN的方式做密度指標有兩種，一種為TIN三角形面積排序，另一種為TIN三角形個數計算。何心瑜(2006)以TIN三角形個數計算穿透率，計算的面積單位

為 $100m \times 100m$ ，但不論使用格網方式或TIN三角形個數計算穿透率，都與試驗區域大小有極大的關係，因為這兩種方法都是以試驗區中地面點數與總點雲數之間比值為基礎的方式來做指標，因此統計單位面積會影響密度指標。

而TIN三角形面積排序方法主要詮釋數據之項目為最大三角形面積、95%排序面積及面積標準差等，統計單位面積對這些指標造成的影響並沒有那麼大，相對上也比較不會有高密度區與低密度區互相補償的情況發生。

TIN三角形面積排序方法中，計算95%排序面積時必須先設一門檻值，針對面積大於此門檻值的三角形才做排序，而門檻值的大小影響著排序面積指標。本研究使用之光達原始點雲，平均密度為每平方公尺1.4~1.5點，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，因此本研究將門檻值設為面積1平方公尺，代表當地面點所組成的TIN面積小於或等於1平方公尺時，可將之視為無覆蓋物的情況，意即穿透率百分之百的狀態。將之先濾除，目的是防止影響密度指標，避免因為無覆蓋物區域的三角形個數之多寡而對95%三角形排序面積及面積標準差造成影響。

以地面點組成的 TIN 做三角形面積排序的密度指標計算時，三角形面積最大值越大者，表示地面點點雲中有越大空隙，此乃可能有較大的覆蓋物遮蔽，使雷射無法抵達地形面，或無反射區域，如水體等。1 平方公尺過濾後 95% 排序面積可作為試驗區的整體密度指標，1 平方公尺過濾後的面積標準差代表著地面點的集中度與一致性，當面積標準差高時，表示地面點一致性低，地面點分佈不均，反之當面積標準差低時，表示地面點一致性高，地面點分佈均勻。



## 第三章 實驗與分析成果

### 3-1 實驗數據來源

#### 3-1-1 光達數據

本研究所使用之空載光達資料皆為內政部「辦理 LiDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪」計畫成果，由工業技術研究院能源與環境研究所於 94 年所蒐集五千分之一基本圖，本研究所選用地區為桃園與新竹。使用的空載光達設備為 Leica ALS50 系統，平均每幅圖原始點雲一千多萬點，平均密度每平方公尺 1.4 點~1.5 點(工研院，2005)。

#### 3-1-2 航照影像

本研究所使用搭配光達試驗區之正射影像其原始影像是於 91 年 11 月、92 年 3 月與 5 月所拍攝，拍攝相機為蔡司 RMK TOP，航高為 3000~4000 公尺，正射影像地面解析度為 50 公分。



### 3-2 穿透率與地表覆蓋物分析

本實驗主要欲了解空載光達在地表覆蓋物與穿透率的關係，並以兩種密度指標試驗，了解其特性。圖 3-1 為本實驗的流程圖。

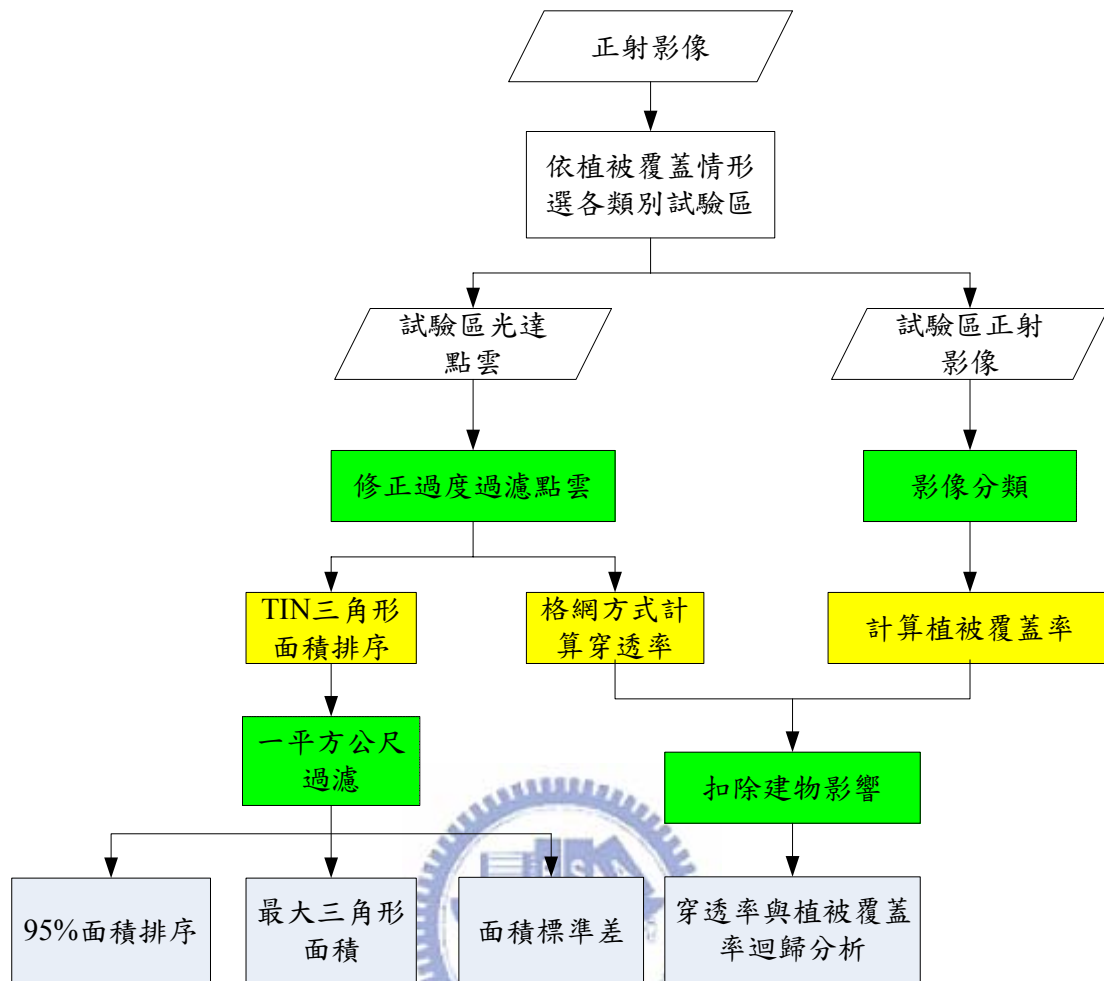


圖 3-1、穿透率與地表覆蓋物分析流程圖

### 3-2-1 地表覆蓋物分類

不同的地表覆蓋物對穿透率有不同的影響，本研究將地表覆蓋物分為五類，其中植被覆蓋區域依據覆蓋比例分為四類，另一類為都會區。五類的定義如表 3-1。

表3-1、地表覆蓋物類別及定義

類別	定義
裸露地	以任一點為中心，半徑在 50 公尺內受植被覆蓋之面積小於 25%
25%~50%之植被覆蓋區	以任一點為中心，半徑在 50 公尺內受植被覆蓋之面積介於 25%~50%
50%~75%之植被覆蓋區	以任一點為中心，半徑在 50 公尺內受植被覆蓋之面積介於 50%~75%
>75%之植被覆蓋區	以任一點為中心，半徑在 50 公尺內受植被覆蓋之面積大於 75%
都會區	特徵物佔全部面積 30%以上

### 3-2-2 試驗區

本試驗是由 14 幅五千分之一之桃竹地區基本圖切取五種不同地表覆蓋物的試驗區，試驗區之統計範圍皆為 $100m \times 100m$ ，其中除了>75%之植被覆蓋區有 6 個試驗區，其他四種地表覆蓋物區域皆選擇 3 個試驗區，共 18 個 $100m \times 100m$ 的試驗區，試驗區之植被面積皆由人工方式與影像分類而得，各試驗區其五千分之一圖號分別如表 3-2。

表3-2、各試驗區其來源圖號

裸露地	25%~50%之植 被覆蓋區	50%~75%之植 被覆蓋區	>75%之植被覆 蓋區	都會區
9522_1_078	9622_4_052	9622_3_001	9522_1_100 9522_1_099	9522_1_079
9622_4_052	9522_1_099	9622_3_011	9522_2_020	9522_1_080
9622_4_071	9622_3_001	9622_3_015	9622_3_015 9622_1_063 9622_4_100	9622_4_051

### 3-2-3 光達數據處理一點雲過度過濾之修正

光達原始點雲過濾後，除兩種正確情況外，其地形點之錯誤分兩類：

第一類錯誤(Type I error)：該點為地形面之雷射點，但過濾後歸類於非地形面之雷射點(由地形面中剔除)。

第二類錯誤(Type II error)：將非地形面之雷射點歸類為地形面之雷射點

此兩類錯誤對 DEM 品質影響之量級不同，第一類錯誤造成地形面上之點數較應有為少，但若在某一合理範圍內，對成果之影響不大，但是在地形變化大，如稜線、谷線之處，有可能造成大誤差。第二類錯誤則影響十分顯著，少數覆蓋點之加入地形面，往往造成 DEM 變形。故以 DEM 品質而言，對第一類錯誤之容忍度較大，而對第二類錯誤之容忍度較小。而且第一類錯誤，以 TerraScan 所使用之過濾法，大多發生於地形大趨勢較平坦之處。因為這種狀況，一般均為減少第二類誤差，而承受較多之第一類誤差。換言之，編修時寧可多除去點雲點位，而減少誤加入覆蓋點之機會。

工研院提供之光達點雲資料，是由 TerraScan 軟體自動過濾，本試驗先以工研院提供之光達成果，分別用式(2-1)及式(2-2)計算其穿透率，得表 3-3 之成果。

表3-3、不同覆蓋面之穿透率(使用工研院提供之光達數據成果)

覆蓋類	圖號	總雲點數	雷射發射總數	地面點雲點數	穿透率A(%)	穿透率B(%)
裸露地	9522_1_078	13136	13136	4171	31.8	31.8
	9622_4_052	16183	16183	6584	40.7	40.7
	9622_4_071	17575	17568	4234	24.1	24.1
25%~50%之植被覆蓋區	9622_4_052	7600	7437	3166	41.7	42.6
	9522_1_099	15866	15832	7571	47.7	47.8
	9622_3_001	6313	6166	3429	54.3	55.6
50%~75%之植被覆蓋區	9622_3_001	8279	8115	2812	34.0	34.7
	9622_3_011	18017	17453	3798	21.1	21.8
	9622_3_015	15761	12754	3671	23.3	28.8
>75%之植被覆蓋區	9522_1_100	16625	14273	639	4.2	4.9
	9522_1_099	17894	16043	1831	10.2	11.4
	9522_2_020	23687	21076	1790	7.6	8.4
	9622_3_015	13618	9922	1516	11.1	15.3
	9622_1_063	13106	8785	961	7.3	10.9
	9622_4_100	13524	10639	623	4.6	5.9
都會區	9522_1_079	13144	12695	1936	14.7	15.3
	9522_1_080	8969	8575	2506	27.9	29.2
	9622_4_051	17384	16690	2491	14.3	14.9

由表 3-3 所得穿透率成果中得知，裸露地的穿透率明顯比預期低許多。如裸露地中 9522\_1\_078 圖幅所選的區域為新竹南勢附近的空地，地勢平坦且無樹冠或大型覆蓋物，只有些許小短草與青苔，穿透率應達到 90% 以上，但實際卻只有 31.8%，另外裸露地之 9622\_4\_052 圖幅，是新竹燒炭窩陸軍戰車砲射擊陣地營區操場，操場上只有少數乾枯之韓國草，穿透率理論上應可達到 90% 以上，但卻只有 40% 左右。原因是工研院作業時使用 TerraScan 軟體自動過濾時，在地勢平坦、地形覆蓋物少地區，TerraScan 軟體本身容易發生大量的第一類錯誤，成果有大量過度過濾的現象，使得工研院成果的地面點比預期要少許多。試驗區中裸露地部分因為地勢平緩，人工編修時，修正第二類錯誤比第一類錯誤快且容易，且過濾後的地面點主要是產製 DEM，地面點過多對於提高 DEM 精度沒有顯著幫助，故人工編修時也沒有修正。但在計算穿透率或點雲密度時，應將所有第一類錯誤修正完全，才能顯示真正的穿透率。圖 3-2(a) 為工研院繳交成果點雲剖面圖，在地勢平緩處仍有許多屬於地形面的點雲並未歸類於地面點(第一類錯誤)，圖 3-1(b) 為修正後的點雲剖面圖，是以人工的方式加以修正完全。

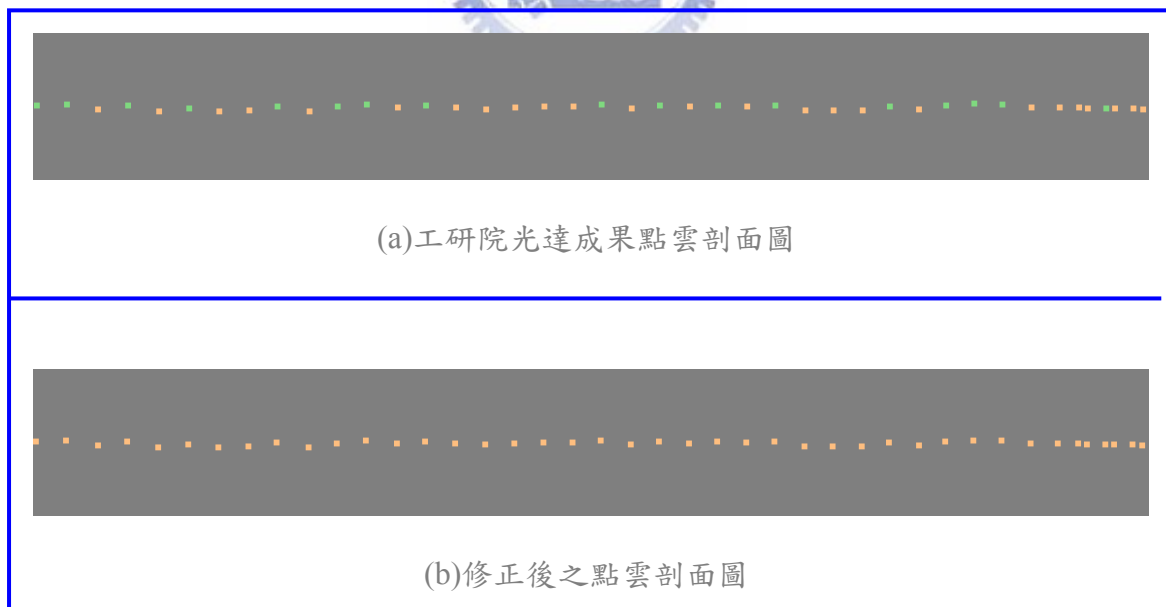


圖 3-2、光達點雲過度過濾剖面圖(橘色為地面點，綠色為非地面點)

以人工的方式修正過度過濾之點雲有很多方式，本研究中將第一類錯誤的點修正之方式依地形分為兩種情況：

### 1. 地勢平坦之裸露地

在地勢平坦的裸露地或無太多地面覆蓋時，因為第一類錯誤的雷射點很多，故將其重新設參數自動分類，參數設定上將過濾門檻設為較低值，可避免過度過濾，最後再以人工編修的方式，仔細檢驗是否有過濾錯誤之雷射點。

### 2. 地勢起伏較劇烈或有覆蓋物之地形

在地勢起伏較劇烈或是有覆蓋物的地形下，很容易在自動過濾時發生第二類錯誤，故在此情況下，要修正過度過濾的雷射點(第一類錯誤)最好以人工的方式檢驗與編修，但缺點是費時且容易有遺漏的錯誤點。

由此可知，當欲正確計算光達的穿透率時，要先將點雲有過度過濾的情形完全修正，此步驟需耗費大量時間與人力，但若無此步驟，所計算出的成果則與事實不符。

### 3-2-4 影像數據處理—影像分類

本研究之影像分類使用最大似然分類方法(Maximum Likelihood Classifier)做監督式分類，分類成果分為植被與非植被兩類，可得試驗區之植被覆蓋率，作為與光達穿透率的比對數據。

在一些特殊的覆蓋面地形中，如很短的小草、青苔，由於光達的高程精度在10~30公分，光達在距離地表低於10公分的短植被區域無法分辨是否有植被遮蔽，故在分析植被覆蓋與穿透率的關係時，只將有影響光達穿透率的區域算入，故可將低於10公分的植被區域視為裸露地。在監督式分類上，本研究以航照做分類，可見光波段對小草及青苔處分類為裸露地成果不佳，故當自動分類成果不佳時，本研究採用人工圈選的方式分類，以人工圈選的方式劃分出植被區與非植被區。



### 3-2-5 穿透率成果

#### 1. 格網方式

將試驗區的光達資料經過修正及檢查第一類或第二類錯誤後，以式(2-1)與式(2-2)的計算，求得每個 $100m \times 100m$ 統計單位面積中，穿透率 A 與穿透率 B 的值，並將航照所得之植被覆蓋率分類成果一起整理出表格，所得成果如表 3-4 所示。

由表 3-4 得知，在植被覆蓋較小的地區，穿透率較大，反之，在植被覆蓋較大的地區，穿透率較小。而都會區有建物，故覆蓋物除了考慮植被外，仍需考慮建物遮蔽的問題。

穿透率 A 與穿透率 B 在裸露地並沒有明顯差異，因為裸露地大多只有一次回訊，故總點雲數與雷射發射總數幾乎沒有差異。但在有植被覆蓋的區域，雷射會穿越樹冠而抵達地形面，期間可能會有多次回波，雷射回波次數的不同，便會影響兩種穿透率的差異。正常狀況下，總點雲數會大於雷射發射總數，故以總點雲數為基準的方式計算(穿透率 A)會比以雷射發射總數為基準方式的計算方式(穿透率 B)所得值為小。



表3-4、不同覆蓋面之穿透率(已修正後點雲)

覆蓋類	圖號	總雲 點數	雷射發 射總數	地面點 雲點數	穿透率 A(%)	穿透率 B(%)	植被 覆蓋 率(%)
裸露地	9522_1_078	13136	13136	12970	98.7	98.7	0
	9622_4_052	16183	16183	15480	95.7	95.7	0
	9622_4_071	17575	17568	15566	88.6	88.6	3.7
25%~50%之 植被覆蓋區	9622_4_052	7600	7437	4849	63.8	65.2	33.7
	9522_1_099	15866	15832	11412	71.9	72.1	21.5
	9622_3_001	6313	6166	4252	67.4	69.0	28.0
50%~75%之 植被覆蓋區	9622_3_001	8279	8115	3004	36.3	37.0	56.6
	9622_3_011	18017	17453	4653	25.8	26.7	68.2
	9622_3_015	15761	12754	6527	41.4	51.2	71.2
>75%之植 被覆蓋區	9522_1_100	16625	14273	1931	11.6	13.5	99.5
	9522_1_099	17894	16043	2595	14.5	16.2	88.1
	9522_2_020	23687	21076	3082	13.0	14.6	97.2
	9622_3_015	13618	9922	2490	18.3	25.1	98.2
	9622_1_063	13106	8785	1443	11.0	16.4	99.4
	9622_4_100	13524	10639	1193	8.8	11.2	97.4
都會區	9522_1_079	13144	12695	3248	24.7	25.6	—
	9522_1_080	8969	8575	4094	45.6	47.7	—
	9622_4_051	17384	16690	6592	37.9	39.5	—

## 2. TIN 三角形面積排序

不同覆蓋面之地面點點數及分布方式不盡相同，使得 TIN 的組成紋理和三角形面積大小也有所差異。圖 3-3 中五張圖的面積範圍皆為  $100\text{ m}^2$ ，但為不同地表覆蓋區。

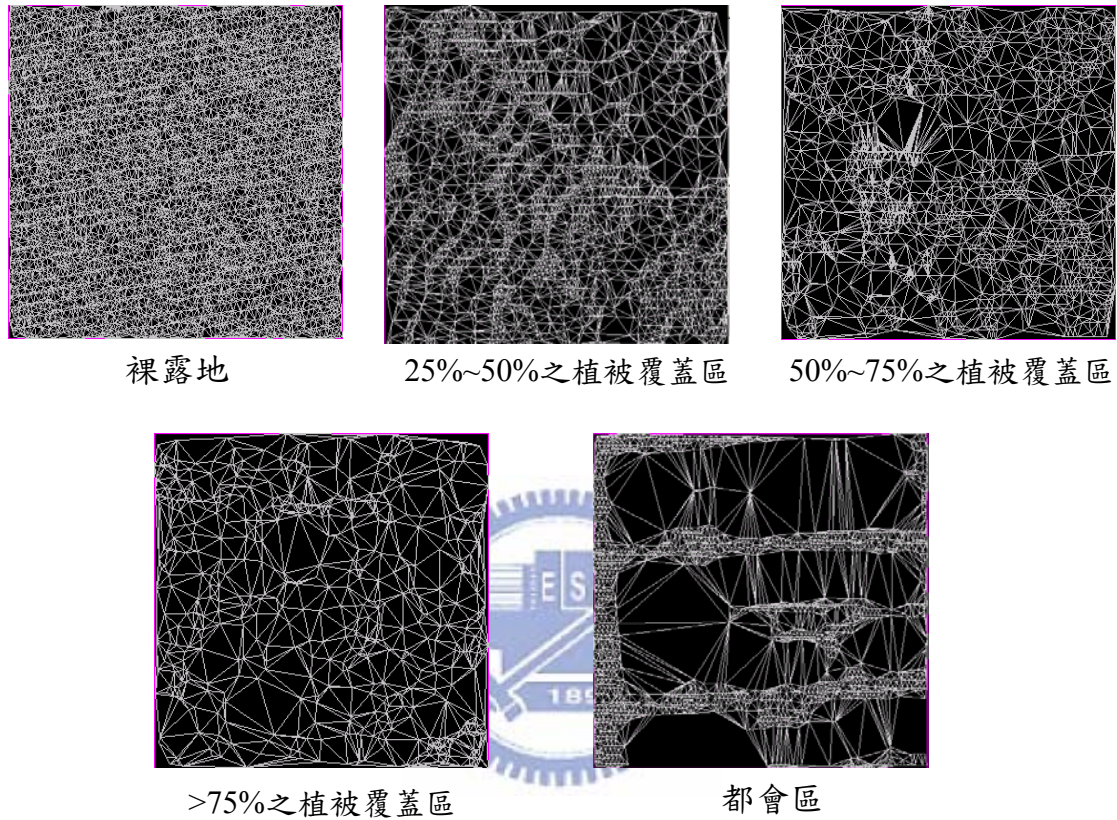


圖 3-3、不同覆蓋面之 TIN 組成差異。TIN 以白色線表示

本研究以 1 平方公尺作門檻值，求得之 TIN 面積排序成果與表 3-4 所得到的穿透率 A 比較，所得成果如表 3-5。

表3-5、TIN面積排序成果與穿透率A

覆蓋類	圖號	三角形個數	面積最大值 ( $m^2$ )	$1m^2$ 過濾後95%排序面積 ( $m^2$ )	$1m^2$ 過濾後面積標準差	穿透率A(%)
裸露地	9522_1_078	25713	1.57	1.27	0.08	98.7
	9622_4_052	30787	2.14	1.94	0.30	95.7
	9622_4_071	30855	4.38	1.64	0.25	88.6
25%~50%之 植被覆蓋區	9622_4_052	9595	24.45	5.30	1.83	63.8
	9522_1_099	22602	19.85	5.99	2.14	71.9
	9622_3_001	8362	28.84	10.09	3.19	67.4
50%~75%之 植被覆蓋區	9622_3_001	5888	29.88	7.67	2.68	36.3
	9622_3_011	9196	22.60	6.91	2.15	25.8
	9622_3_015	12889	37.03	6.13	2.42	41.4
>75%之植被 覆蓋區	9522_1_100	3775	77.91	12.75	4.99	11.6
	9522_1_099	5096	30.61	10.96	3.62	14.5
	9522_2_020	6080	50.37	9.13	3.34	13.0
	9622_3_015	4897	22.73	6.92	2.16	18.3
	9622_1_063	2810	39.87	13.46	4.59	11.0
	9622_4_100	2331	53.93	15.80	5.39	8.8
都會區	9522_1_079	6280	266.34	20.67	15.05	24.7
	9522_1_080	7977	119.47	18.50	8.84	45.6
	9622_4_051	13024	67.62	6.71	4.63	37.9

由表 3-5 可看出面積最大值以都會區為最大，再來是以植被覆蓋較多的為大，以植被覆蓋較少的為小。面積最大值越大，表示地面點點雲中有越大空隙。裸露地覆蓋物範圍小，地面點點雲資料空隙小，所以面積最大值最小。都會區空隙最大的原因是有建物遮蔽，雷射對建物只有一次回訊，在有建物的地區，雷射無法穿透傳送至地表，所以會造成在有建物的區域大範圍缺少地面點，故都會區的 TIN 三角形面積最大值為所有覆蓋物地形中最大。

1 平方公尺過濾後 95% 排序面積最大值為植被覆蓋率最大者，依植被覆蓋率大小順序排列，以植被覆蓋率最小者為最低。在 25%~50% 之植被覆蓋區中之 9622\_3\_011 試驗區中，1 平方公尺過濾後 95% 排序面積  $10.09 m^2$ ，明顯比同類別的試驗區大，原因就是 9622\_3\_011 試驗區地面點點雲密度分佈較不均，如圖 3-4 所示。故探討此試驗區可發現，當點雲密度分佈不均時，以格網方式計算穿透率得到的成果無法發現其點雲有大的空缺，但以 TIN 三角形面積排序時，即可明顯的表現出其密度狀況。而都會區 95% 排序面積會依試驗區的不同而有很大差異，因為都會區建物大小不同，當建物範圍越大時，TIN 面積會越大，95% 排序面積受建物大小影響，故不列入比較中。

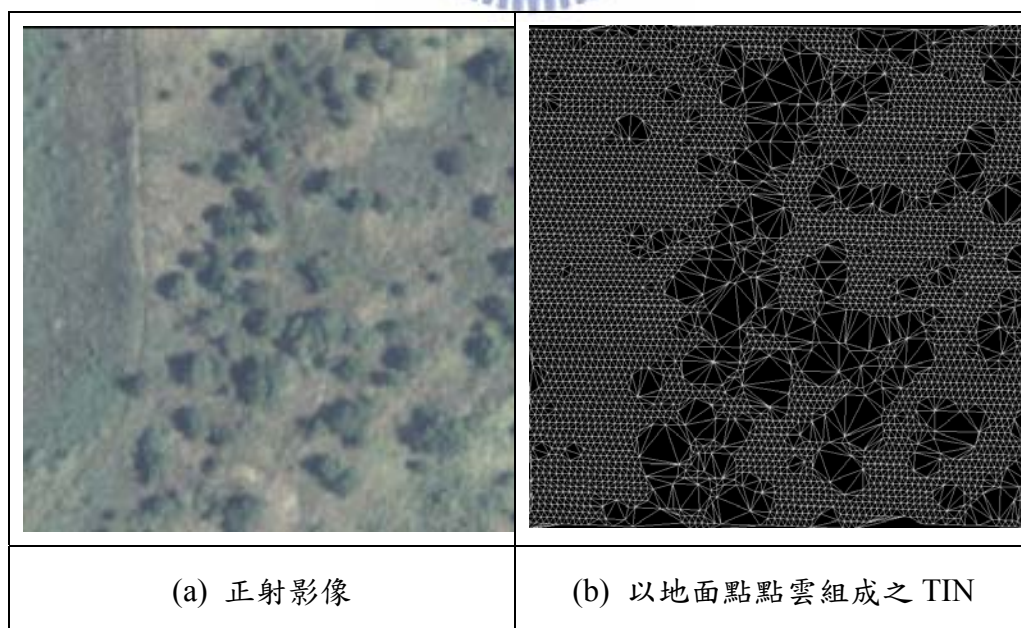


圖 3-4、9622\_3\_011 試驗區(25%~50%之植被覆蓋區)

一平方公尺過濾後的面積標準差代表著地面點的集中度與一致性。由表 3-5



可以發現裸露地的標準差最小，集中度最高，以都會區、植被覆蓋率高者的標準差最大，顯示都會區與植被覆蓋率高者的 TIN 面積相差懸殊，一致性低，代表地面點分佈不均。在 9622\_3\_011 試驗區(25%~50%之植被覆蓋區)中，也可由標準差得知此試驗區比起其他同一類別的試驗區，地面點密度分佈較不均。

以穿透率和 TIN 三角形個數、面積最大值與 95%排序面積比較。當穿透率越高時，三角形個數越多，面積最大值與 95%排序面積會越小。反之，當穿透率越小時，三角形個數越少，面積最大值與 95%排序面積會越大。但都會區因為 TIN 面積大小直接與建物大小相關，穿透率與 TIN 面積大小無法與其他植物覆蓋區物相比較。

由以上實驗得出以 TIN 三角形面積排序為密度指標時，各指標大約如下：

#### 1. 三角形面積最大值

- 裸露地：< 5 平方公尺
- 25%~50%植被覆蓋區：< 30 平方公尺
- 50%~75%植被覆蓋區：< 40 平方公尺
- >75%植被覆蓋區：< 80 平方公尺



#### 2. 1 平方公尺過濾後 95%排序面積

- 裸露地：< 2 平方公尺
- 25%~50%植被覆蓋區：< 10 平方公尺
- 50%~75%植被覆蓋區：< 10 平方公尺
- >75%植被覆蓋區：< 20 平方公尺

圖 3-5 為 1 平方公尺過濾後，各覆蓋物中三角形面積與三角形個數之直方圖，顯示各覆蓋物地形 TIN 面積分布狀況。在穿透率越高的地形，如裸露地，其三角形面積大小越集中，在穿透率較低的地形，即植被覆蓋率較高的區域，TIN 面積大小分佈範圍較大，表示有些地區缺乏地面點。除了裸露地與 25%~50%之植被覆蓋區以外，其他地區在最右邊(面積大於  $20 m^2$  者)皆有若干數量，尤其是>75%之植被覆蓋區與都會區，此表示這些覆蓋物地形中有許多區域地面點點

雲空隙大於  $20m^2$ ，此與表 3-5 三角形面積最大値之說明相符合。

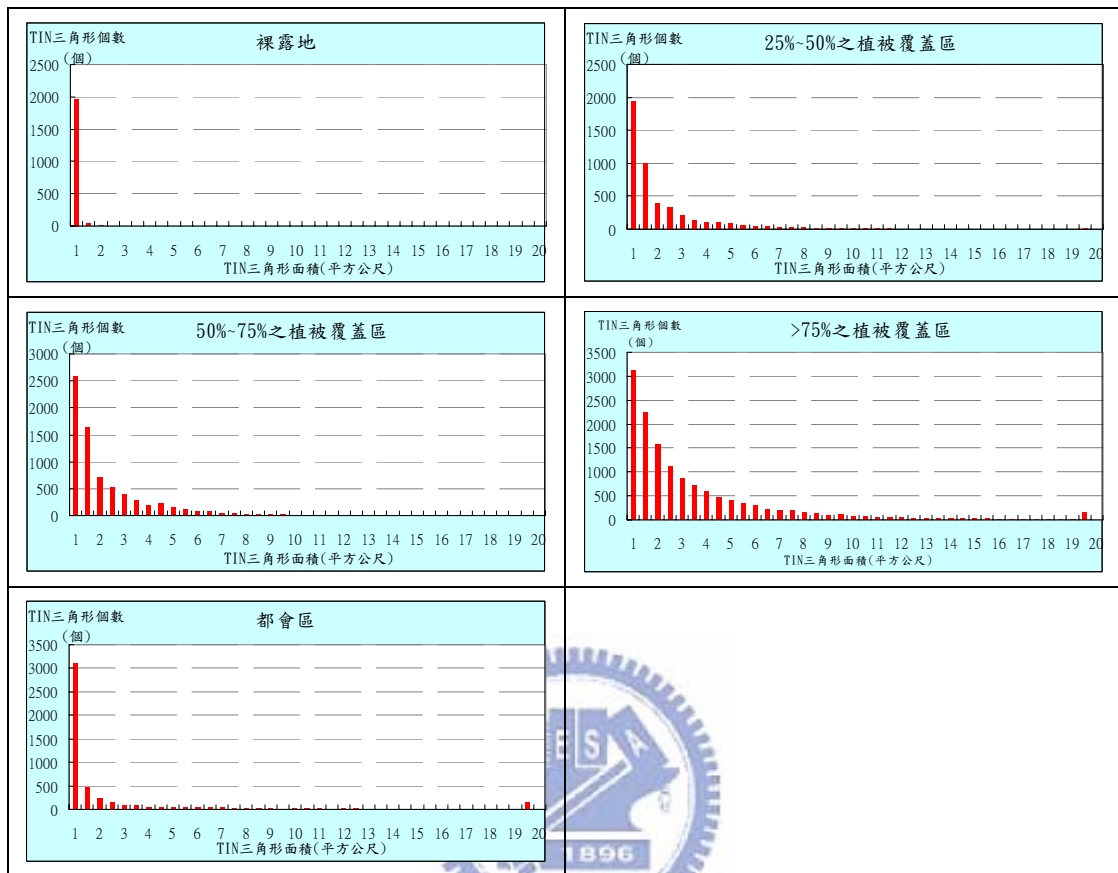


圖 3-5、不同覆蓋物 TIN 面積與三角形個數之直方圖

### 3-2-6 試驗區整理討論

每一類的試驗區情況並不一定相同，表 3-6~表 3-11 分別對於本研究中的十八個試驗區個別討論其光達資料、航照影像資料及試驗結果討論。

表3-6、裸露地試驗區整理討論

圖號	95221078 新竹南勢	96224052 新竹燒炭窩	96224071 竹北六家
航照影像			
過濾後地面點 點雲			
分類主題圖 綠：植被 紅：建物 灰：其他			
光達點雲剖面 圖例			
試驗區說明	機場附近空地，無樹冠或大型覆蓋物，只有小短草與青苔。光達點雲高程在24.65m~26.24m之間，地勢平坦。	陸軍戰車砲射擊陣地營區操場，有稀疏的韓國草與青苔，光達點雲高程在173.35m~175.00m之間，地勢平坦。	農作物區，航照影像下方有覆蓋物，但光達資料在下方並無植被覆蓋。航照影像及光達資料上皆可見農田的田埂旁及田埂上有植被覆蓋。光達點雲高程在54.53m~56.45m之間。
穿透率(%)	A：98.7 B：98.7	A：95.7 B：95.7	A：88.6 B：88.6
植被覆蓋率	0% (人工分類)	0% (人工分類)	3.7% (人工分類)
附註	此二試驗區皆有小短草與青苔，由點雲剖面圖得知小短草與青苔高度值在光達的高程精度誤差內，所以無法辨別出地形面與地表覆蓋物的點雲，故在光達點雲上，全區幾乎可視成全為地面點，而此試驗區中，植被對光達穿透率並沒有影響，故在此試驗區中植被覆蓋率為0。		此試驗區下半部影像有一區(約10%)為農作物覆蓋區，但光達點雲上此區幾乎無覆蓋物，原因可能是航照拍攝時間與光達點雲獲取資料時間不同，農作物休耕與否的差異，或是該區域的作物為較矮的作物，故光達點雲上無法分辨出有覆蓋。

表3-7、25%~50%之植被覆蓋區試驗區整理討論

圖號	96224052 新竹燒炭窩	95221099 新竹靈閣寺	96223001 新竹寶山
航照影像			
過濾後地面點 點雲			
分類主題圖 綠：植被 紅：建物 灰：其他			
光達點雲剖面 圖例			
試驗區說明	新竹縣燒炭窩古道，有幾處疏林，中間有道路，疏林中有多處雜草，光達點雲高程在 171.80m~184.43m 之間。	新竹靈閣寺，地勢平坦，有若干矮灌木與雜草，光達點雲高程在 116.82m~128.08m 之間。	新竹寶山，試驗區左邊為斜坡，整區有若干株樹冠與雜草覆蓋，光達點雲高程在 125.03m~152.34m 之間。
穿透率(%)	A：63.8 B：65.2	A：71.9 B：72.1	A：67.4 B：69.0
植被覆蓋率	33.7% (最大似然分類法)	21.5% (最大似然分類法)	28.0% (最大似然分類法)
附註	在 25%~50%之植被覆蓋區這部份的實驗中，航照監督式分類成果與光達資料幾乎符合，只有在某些部分會有不同，例如短草部份，因為高度低於光達誤差精度，故在光達資料上是視為地面點，但影像監督式分類上要將這些短草歸為非覆蓋物較不易，另外在有坡度的部份，可能會因為航照的拍攝角度而使在斜坡上比一般平地較暗或較亮，影響監督式分類成果。		



表3-8、50%~75%之植被覆蓋區試驗區整理討論

圖號	96223001 新竹寶山	96223011 新竹下大壩	96223015 新竹橫山
航照影像			
過濾後地面點雲			
分類主題圖 綠：植被 紅：建物 灰：其他			
光達點雲剖面圖例			
試驗區說明	試驗區有多處樹冠與雜草覆蓋，有一建物在左下角(分類主題地圖中紅色部分)，光達點雲高程在137.03m~186.54m之間。	試驗區為山坡地，斜坡上種植矮果樹，光達點雲高程在131.83m~190.57m之間。	約40%處有茂密的樹冠覆蓋，另有多處矮植被與雜草，試驗區中有道路橫越，並有若干建物，約佔5%。光達點雲高程在194.21m~229.42m之間。
穿透率(%)	A：36.3 B：37.0	A：25.8 B：26.7	A：41.4 B：51.2
分類成果	植被：56.6% 建物：0.8% (最大似然分類法)	植被：68.2% 建物：0% (最大似然分類法)	植被：71.2% 建物：6.6% (最大似然分類法)
附註	此試驗區左下角有一建物，使穿透率降低。在此航照影像中，沒有樹冠的區域也多有雜草叢生，在分類上較不精確。	此試驗區光達資料與航照資料大致符合，在試驗區右下角處有雜草及矮植被覆蓋，分類上將其視為有植被覆蓋，而光達資料在此處無法辨別有覆蓋物。	試驗區有建物會使穿透率降低，且建物屋頂、馬路或裸露地可見光波段相近，故分類成果不佳。此區草坪覆蓋很多，草坪區光達無法辨識有覆蓋物。

表3-9、>75%之植被覆蓋區試驗區(1)整理討論




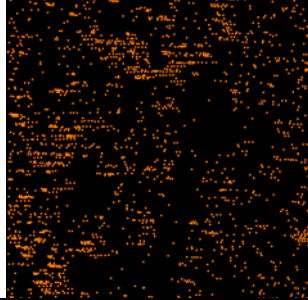
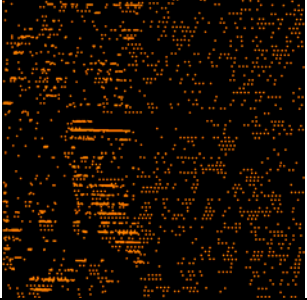
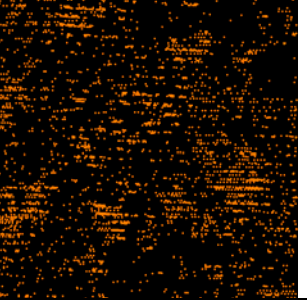
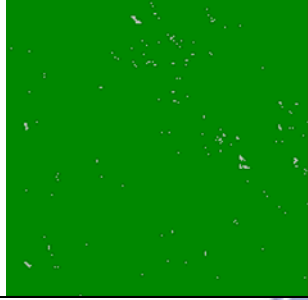
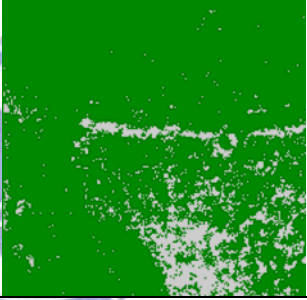
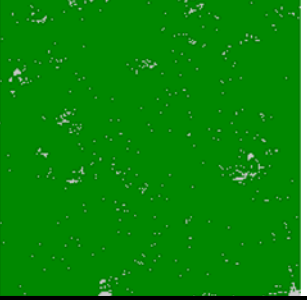

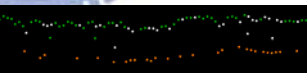
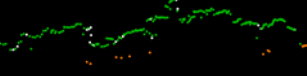
圖號	95221100 新竹雙溪	95221099 新竹靈閣寺	95222020 新竹富興頭
航照影像			
過濾後地面點 點雲			
分類主題圖 綠：植被 紅：建物 灰：其他			
光達點雲剖面 圖例			
試驗區說明	航照影像上整個區域皆被樹冠覆蓋，光達點雲資料上可看出樹冠與樹冠之間有孔隙。點雲高程在 73.06m~104.27m 之間。	航照影像上約 65%是茂密的樹冠覆蓋，右下半部為雜草及矮作物，光達在此處可以辨別雜草與地面。試驗區光達點雲高程在 107.90m~144.84m 之間。	航照影像上整個區域幾乎被樹冠覆蓋，光達點雲資料上可看出樹冠之間有孔隙。試驗區光達點雲高程在 142.21m~212.94m 之間。
穿透率(%)	A : 11.6 B : 13.5	A : 14.5 B : 16.2	A : 13.0 B : 14.6
植被覆蓋率	99.5% (最大似然分類法)	88.1% (最大似然分類法)	97.2% (最大似然分類法)
附註	在此類試驗區中，由於航照影像解析力不足，再加上樹木蔭影掩蓋林分中小空隙地，使林分看似稠密，因此高估植被覆蓋率。在圖號 95221099 試驗區中，光達資料可以將雜草與地表辨識出來，其雜草區域，光達資料上看來相當濃密，使穿透率不佳，但以航照來看，雜草卻沒有整個覆蓋地表，使分類上稍微錯估了植被覆蓋率。原因可能是航照與光達資料收集時間點不一致的關係。		

表3-10、>75%之植被覆蓋區試驗區(2)整理討論

圖號	96223015 新竹橫山	96221063 桃園三民	96224100 新竹六曲窩
航照影像			
過濾後地面點 點雲			
分類主題圖 綠：植被 紅：建物 灰：其他			
光達點雲剖面 圖例			
試驗區說明	此類試驗區航照影像上整個區域幾乎被樹冠覆蓋，但樹冠之間可見空隙，光達可穿透至地面，試驗區光達點雲高程在圖號 962230152 試驗區為 18.70m~270.52m 之間，圖號 96221063 試驗區為 360.43m~443.90m 之間，圖號 96224100 試驗區為 708.84m~806.43m 之間。		
穿透率(%)	A：18.3 B：25.1	A：11.0 B：16.4	A：8.8 B：11.2
植被覆蓋率	98.2% (最大似然分類法)	99.4% (最大似然分類法)	97.4% (最大似然分類法)
附註	由於航照影像解析力不足，再加上樹木蔭影掩蓋林分中小空隙地，使林分看似稠密，高估植被覆蓋率。此區有很明顯的空隙受到蔭影關係而無法以影像正確分類出植被覆蓋率，但這些空隙會有大量的雷射點穿越至地面，此會直接影響植被覆蓋率與穿透率的相關性。		



表3-11、都會區試驗區整理討論

圖號	95221079 新竹市區	95221080 新竹二十張犁	96224051 新竹竹高屋
航照影像			
過濾後地面點 點雲			
分類主題圖 綠：植被 紅：建物 灰：其他			
光達點雲剖面 圖例			
試驗區說明	整個試驗區只有建物與地表，無植被覆蓋，光達資料上亦是只有建物覆蓋。試驗區光達點雲高程在 32.54m~63.41m 之間。	試驗區中有建物也有樹冠覆蓋，其餘為馬路或是草地，但短草高度低，光達資料上無法分辨草與地表面，試驗區光達點雲高程在 51.20m~69.30m 之間。	試驗區中有建物、馬路、草及少許的植被覆蓋。草地部分光達點雲無法辨別植被與地形面。光達點雲右半部較稀疏，左半部點較密是因為左半部為航帶重疊區。試驗區光達點雲高程在 106.38m~140.37m 之間。
穿透率(%)	A : 24.7 B : 25.6	A : 45.6 B : 47.7	A : 37.9 B : 39.5
分類成果	植被: 0% 建物:73.4% (最大似然分類法)	植被:39.8% 建物:18.4% (最大似然分類法)	植被: 5.8% 建物:54.7% (最大似然分類法)
附註	在都會區中用可見光波段做監督式分類成果並不佳，因為建物與道路容易混淆，甚至建物與植被也可能分類錯誤。此類別試驗中，圖號 96224051 試驗區建物與植被就有多處分類錯誤。		

由上述各試驗區之分析，得知以下結論：

1. 光達對於低於 10 公分的矮植被，如青苔或短草，光達無法精確的辨認出地形面與矮植被的點雲，因此在低於 10 公分的雷射點，幾乎都會被歸類為地面點，但在航照影像上，難以認定此矮植被是否低於 10 公分，在計算植被覆蓋率時，有植被覆蓋的區域都會被算入，但這類的矮植被對光達穿透率並無影響，若將此計算入，會影響穿透率與植被覆蓋率的關係，故可以用光達剖面圖輔助判斷試驗區的矮植被是否會影響穿透率，若不影響穿透率再將此區域歸類為非植被區。
2. 光達獲取資料的時間與航照拍攝時間不同，兩者出來的結果會有差異。如在農作物區會有休耕與否的情況，或是明顯的自然環境改變，都會使光達與航照資料不一致。
3. 當植被群聚覆蓋時，由於航照影像解析力不足，再加上樹木蔭影掩蓋林分中小空隙地，使林分看似稠密，會高估植被覆蓋率。故在 >75% 之植被覆蓋區中，幾乎每一個試驗區的植被覆蓋率都達到 90% 以上，都有高估植被覆蓋率的情形。若要精確得知植被覆蓋率，可以使用航照立體像對判釋，將樹冠之間的孔隙畫出，可得較精確的植被覆蓋率。
4. 建物與水體的區域光達點雲沒有地面點的資料，若要計算植被覆蓋率與光達穿透率的關係必須將建物與水域扣除。
5. 本研究是以航照影像用可見光波段作最大似然法分類，在建物與植被的分類上有時可能會混淆，可能較加入近紅外光波段分類成果為差。

### 3-2-7 試驗區穿透率與植被覆蓋率之討論

本小節將探討光達穿透率與植被覆蓋率的關係，由表 3-4 可以得知穿透率 A、穿透率 B 與植被覆蓋率的值，但是在都會區和一些試驗區中有建物的影響，在做穿透率與植被覆蓋率分析前，應先將房屋的影響扣除。

本研究將試驗區的光達點雲中屬於建物的點雲刪除，只留下非建物的點雲，再重新計算穿透率，此時的光達穿透率並沒有受到建物影響稱為穿透率(A')與穿透率(B')，亦即：

$$\text{穿透率}(A') = \frac{\text{地面點總點數}}{\text{扣除建物點之原始點雲總點數}} \quad (3-1)$$

$$\text{穿透率}(B') = \frac{\text{地面點總點數}}{\text{扣除建物點之雷射發射總數}} \quad (3-2)$$

計算植被覆蓋率方面，在航照影像上，將分類成果中，屬於建物的部份扣除，再重新計算植被佔非建物的百分比，亦即：

$$\text{扣除建物後的植被覆蓋率} = \frac{\text{植被百分比}}{1 - \text{建物百分比}} \quad (3-3)$$

迴歸分析是以數學和統計方法來確認一組變數中的系統性部分，並依此解釋過去的現象和預測未來。判定係數(coefficient of determination,  $R^2$ )是線性迴歸中最常用的配適度指標，它衡量迴歸模型所能捕捉的變動量佔 $Y_i$ 總變動量中的比例， $R^2$ 愈高代表迴歸模型所能捕捉到應變數的變動量佔總變動量的比例愈高，故配適度較佳，如當 $R^2 = 1$ ，迴歸平方和等於總平方和，此時迴歸模型沒有任何殘差，稱作完全配適(perfect fit)。若當 $R^2 = 0$ ，殘差平方和等於總平方和，此時迴歸模型對應變數並無任何解釋能力(管中閔，2004)。

將有建物的試驗區重新計算後，結果如表 3-12。以此數據做線性迴歸分析，得到圖 3-6，穿透率 A' 與植被覆蓋率的 $R^2 = 0.9653$ ，穿透率 B' 與植被覆蓋率的 $R^2 = 0.9437$ ，可得知光達穿透率與植被覆蓋率之間有高相關。

表3-12、試驗區穿透率與植被覆蓋率的關係

圖號	穿透率(A')(%)	穿透率(B')(%)	植被覆蓋率(%)
9522_1_078	98.7	98.7	0.0
9622_4_052	95.7	95.7	0.0
9622_4_071	88.6	88.6	3.7
9622_4_052	63.8	65.2	33.7
9522_1_099	71.9	72.1	21.5
9622_3_001	67.4	69.0	28.0
9622_3_001	36.5	37.6	57.1
9622_3_011	25.8	26.7	68.2
9622_3_015	41.8	51.8	76.2
9522_1_100	11.6	13.5	99.5
9522_1_099	14.5	16.2	88.1
9522_2_020	13.0	14.6	97.2
9622_3_015	18.3	25.1	98.2
9622_1_063	11.0	16.4	99.4
9622_4_100	8.8	11.2	97.4
9522_1_079	98.4	98.4	0.0
9522_1_080	53.2	56.5	48.8
9622_4_051	62.3	65.6	23.0

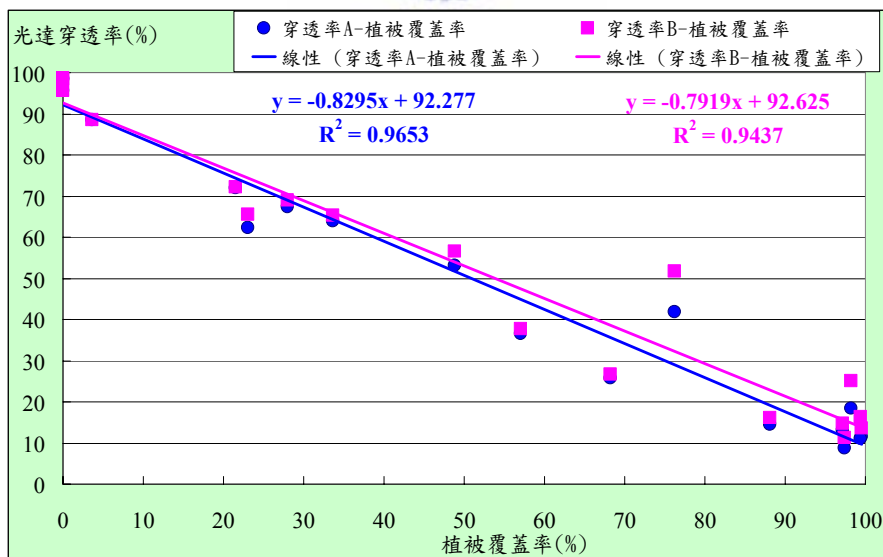


圖 3-6、穿透率與植被覆蓋率線性迴歸



### 3-2-8 不同統計單位面積之穿透率與植被覆蓋率迴歸分析

在前述的格網方式做穿透率試驗中，18 個試驗區都是 $100m \times 100m$ ，而當用不同統計單位面積時，穿透率與植被覆蓋率的關係也會不同。本節將討論以同一試驗區，在五種不同統計單位面積做穿透率與植被覆蓋率關係比較，並以迴歸分析方式了解穿透率與植被覆蓋率之間的關係，圖 3-7 為此實驗之流程圖。

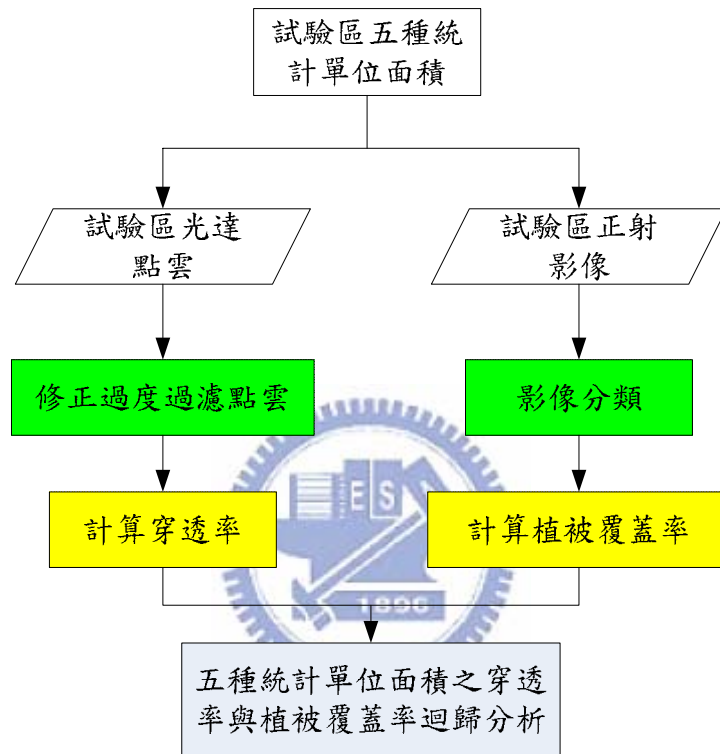


圖 3-7、不同統計單位面積之穿透率與植被覆蓋率迴歸分析流程圖

#### 1. 試驗區

本研究主要探討穿透率與植被覆蓋率之間的關係，故選整個測區中大多是植被覆蓋的地區為試驗區，盡量選擇較少建物或水域的地區，避免影響分析精度。本試驗區為圖號 9622\_3\_011 五千分之一圖幅，地點為新竹縣下大壠，下大壠是坡地柑橘園集中的地方，此試驗區中有山谷與坡地，植被覆蓋多，正射影像如圖 3-8(a)。光達總點雲數為 11,951,034 點，平均約  $1.5 \text{ 點}/m^2$ ，本研究已將光達點雲經過再次的人工編修檢查，將過度過濾的點雲修正，其結果如圖 3-8(b)，圖中橘色點代表地面點。此試驗區中光達總點雲高程值在 91.81m 到 246.19m 之間，地

面點點雲高程值在 90.00m 到 209.02 公尺之間。

將此試驗區的航照影像以最大似然分類法分類後，將整幅圖分為兩類，得到結果如圖 3-8(c)主題圖，綠色代表植被覆蓋，淡灰色表示非植被區，其中植被覆蓋佔 83%，非植被區佔 13%。

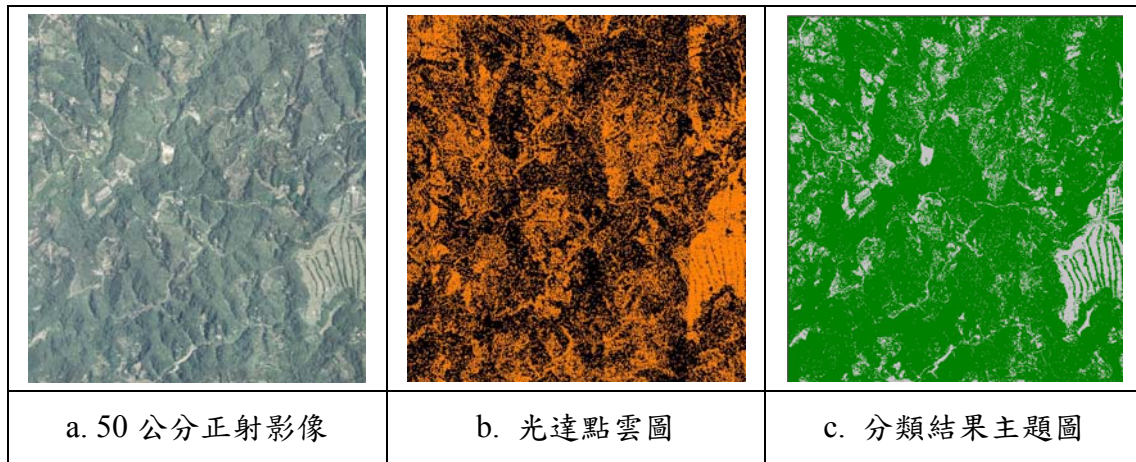


圖 3-8、9622\_3\_011 下大壩

## 2. 統計單位面積

本研究統計單位面積共有五種，分別是  $100m \times 100m$  (484 個)、 $200m \times 200m$  (121 個)、 $300m \times 300m$  (56 個)、 $400m \times 400m$  (30 個) 與  $500m \times 500m$  (20 個)，如圖 3-9 所示，每一種統計單位面積都落在 9622\_3\_011 的範圍內。

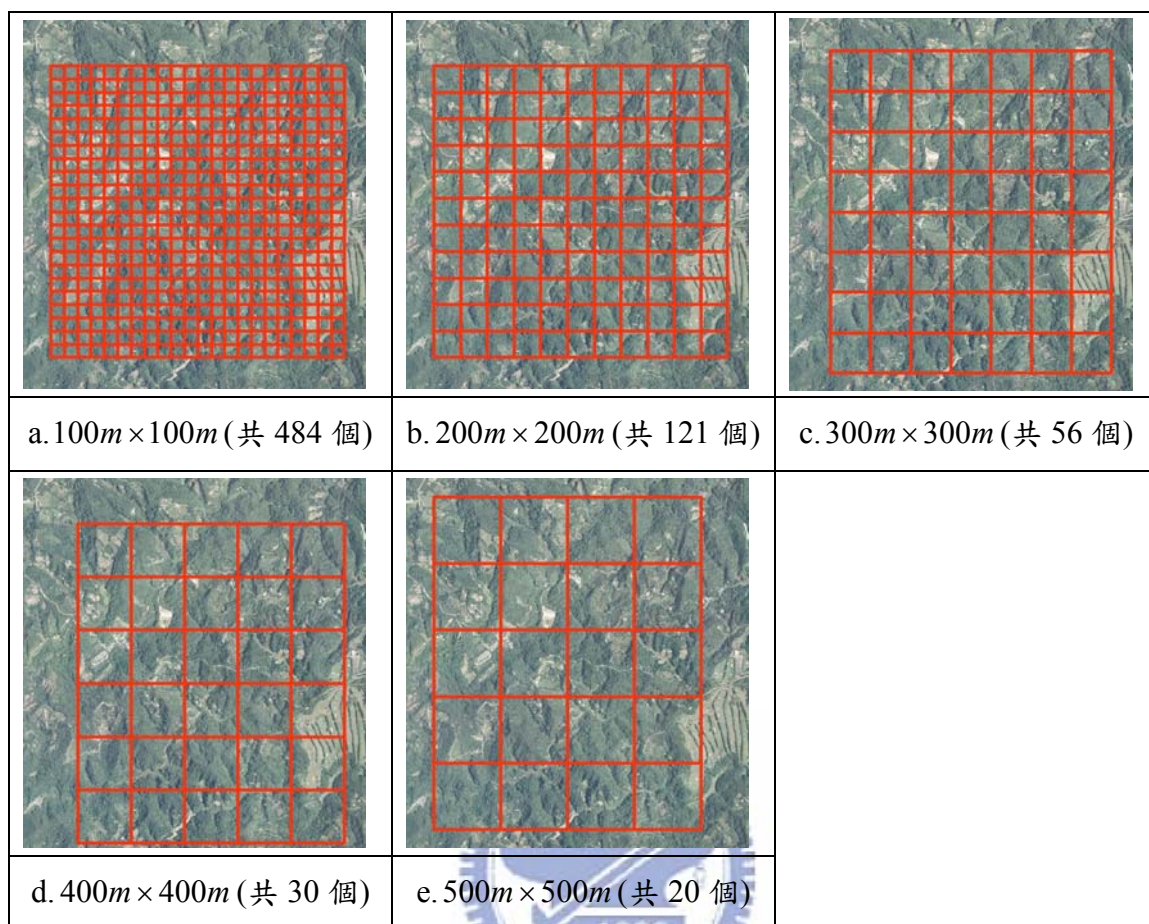


圖 3-9、五種統計單位面積圖示

### 3. 迴歸分析結果

將統計單位面積中所得之光達穿透率與航照分類後之植被覆蓋率數據整理，做迴歸分析，所得結果如圖 3-10~3-14 所示。

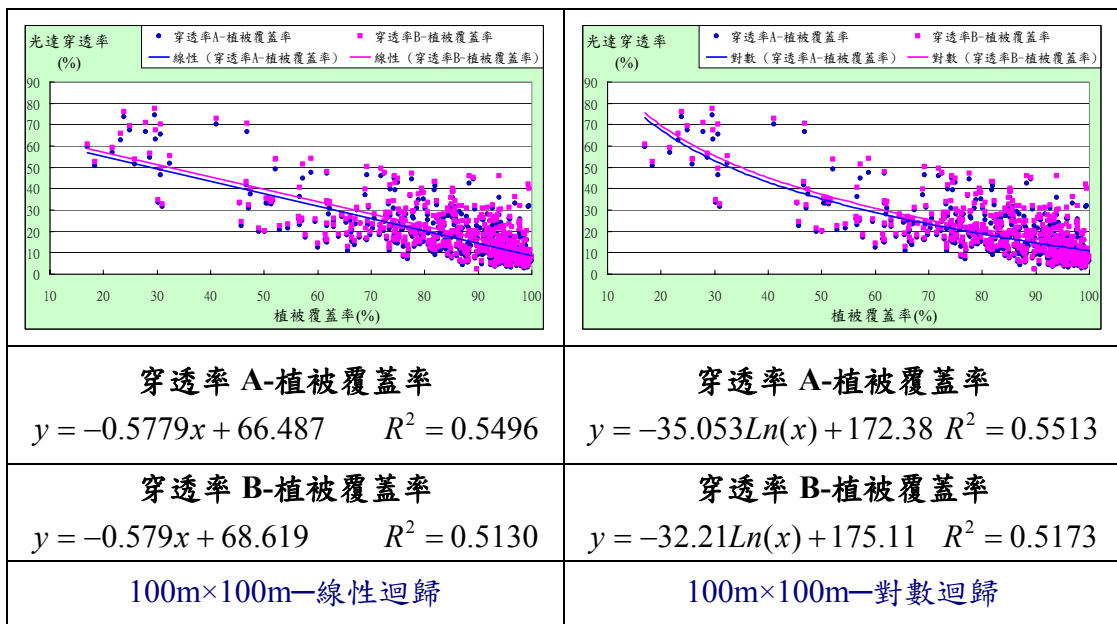


圖 3-10、100m x 100m 穿透率與植被覆蓋率迴歸結果

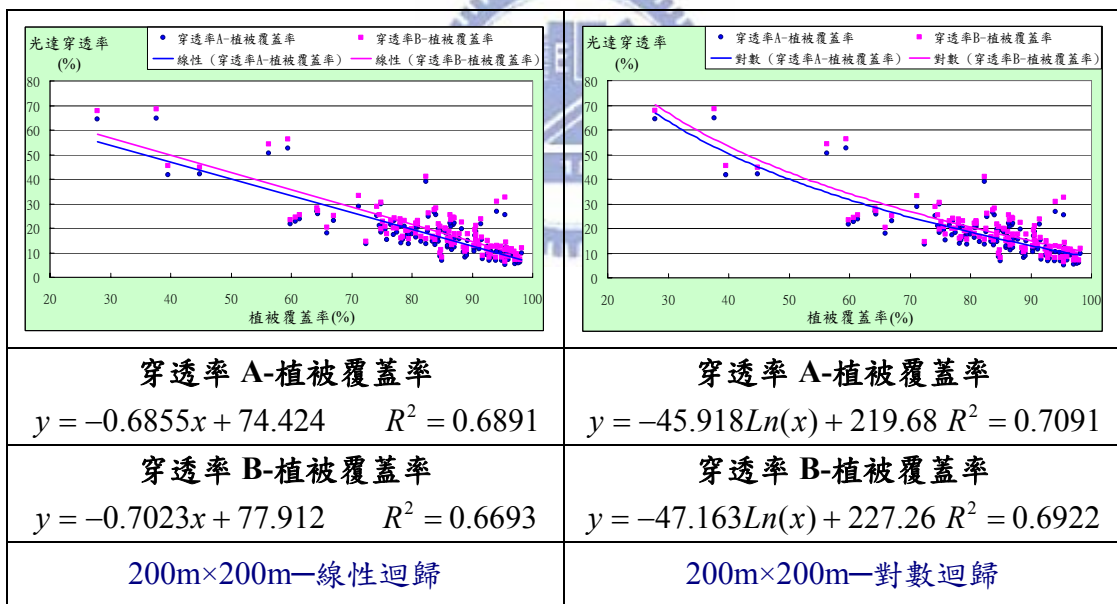


圖 3-11、200m x 200m 穿透率與植被覆蓋率迴歸結果

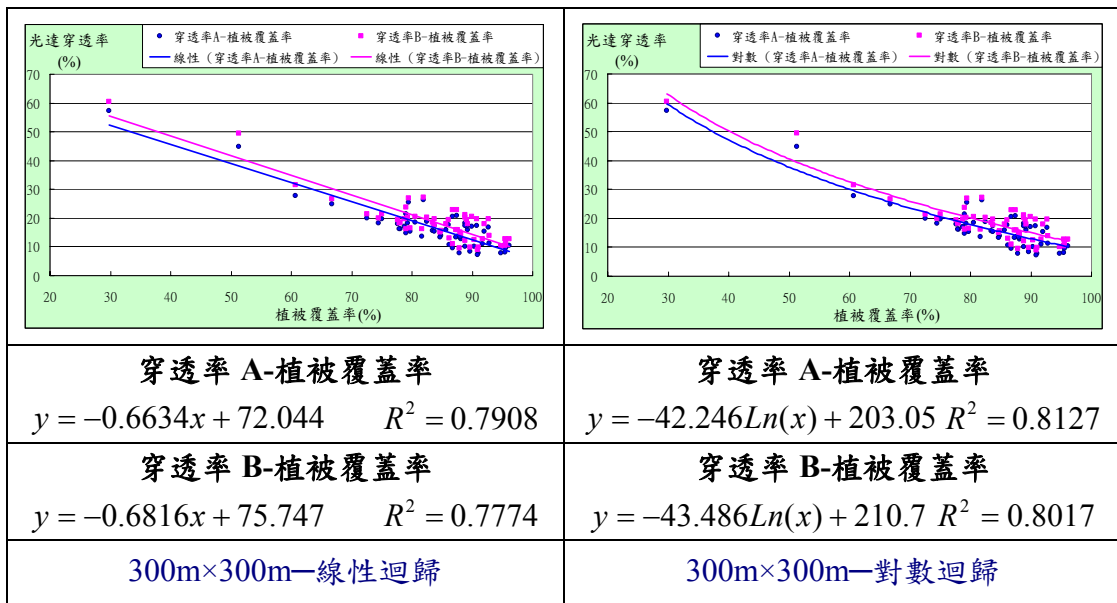


圖 3-12、300m x 300m 穿透率與植被覆蓋率迴歸結果

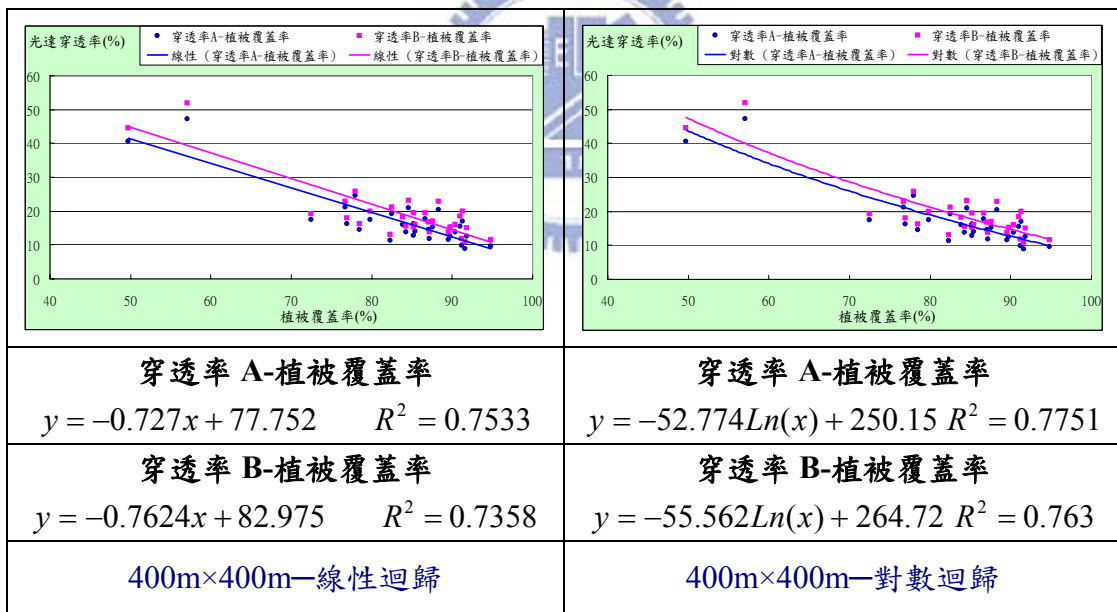


圖 3-13、400m x 400m 穿透率與植被覆蓋率迴歸結果



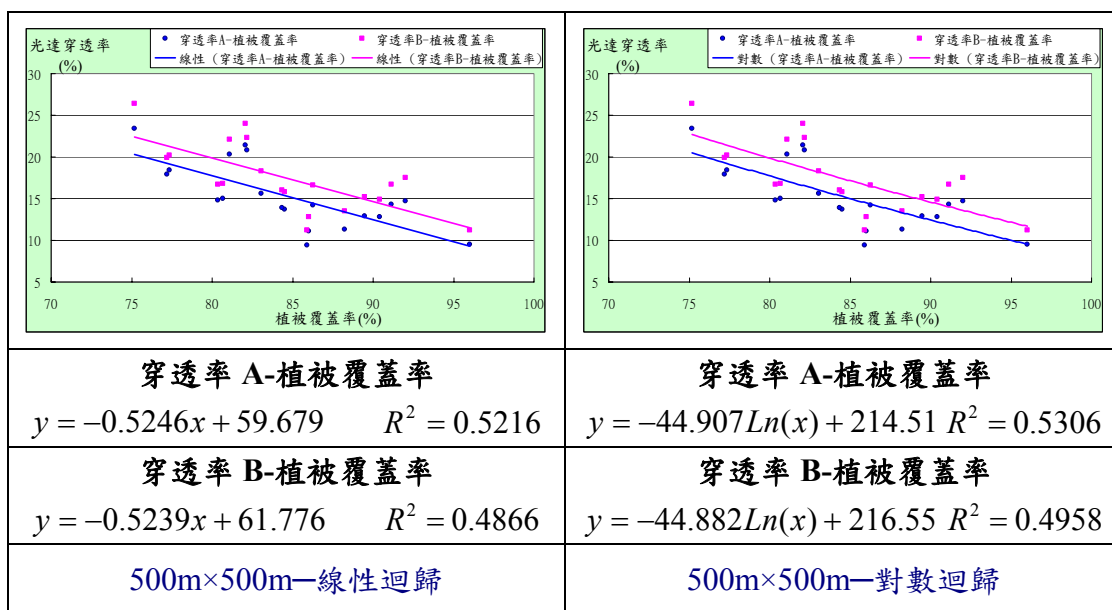


圖 3-14、500m x 500m 穿透率與植被覆蓋率迴歸結果

#### 4. 實驗結果分析

由實驗結果顯示，穿透率與植被覆蓋率迴歸成果中，穿透率 A 比穿透率 B 好，且對數迴歸成果比線性迴歸成果好。 $R^2$  的值最高的統計單位面積是為  $300m \times 300m$ ，再來為  $400m \times 400m$ 、 $200m \times 200m$ 、 $100m \times 100m$ ，最低的統計單位面積為  $500m \times 500m$ 。本研究亦曾選用指數迴歸，但較對數迴歸成果差，故不探討。

表 3-13 為五種統計單位面積之線性迴歸斜率，由表得知，斜率大約落在  $-0.5 \sim -0.8$  之間，五種統計單位面積之迴歸線斜率並不相近，無法準確評估穿透率與植被覆蓋率之線性迴歸線之斜率值。

表3-13、各統計範圍穿透率與植被覆蓋率迴歸線之斜率

	穿透率A-植被覆蓋率	穿透率B-植被覆蓋率
100mx100m	-0.5779	-0.579
200mx200m	-0.6855	-0.7023
300mx300m	-0.6634	-0.6816
400mx400m	-0.727	-0.7624
500mx500m	-0.5246	-0.5239

因為此試驗是以整幅五千分之一圖幅做試驗區，所以當計單位面積過大時，如  $500m \times 500m$ ，能分成的試驗區只有 20 個，數量較少，迴歸成果可能因此而不如其他統計單位面積。且以格網方式計算穿透率，容易有高密度區與低密度區互相補償的情況。

而統計單位面積較小時，迴歸成果不好的原因可能和建物、水域等其他因子有關，為何以  $300m \times 300m$  單位面積為最佳，需再做進一步探討。





### 3-3 雷射入射角對穿透率之影響

因為雷射可以穿越葉縫抵達地面，故空載光達在森林測計之應用價值高。當植被覆蓋率較大時，為了能得到更多的地面點以確保可以更準確的描述地形面，作業時必須要求更高的穿透力。而在都會區，建物之遮蔽亦為一重要點雲品質影響因子，因此本研究探討當雷射入射角不同時，穿透率之變化，藉此可以幫助了解在需要高穿透率的區域，如>75%植被覆蓋區，是否應該控制入射角的大小，調整作業之視角(FOV)，以增加穿透率。

#### 3-3-1 試驗規劃

本研究使用實測航帶，依平行航向等分五等分，作為五種不同雷射入射角之統計單元，如圖 3-15 所示，分別求各等分之穿透率，即可得入射角與穿透率之關係。雖然地表覆蓋物對穿透率有直接的影響，但若樣本足夠，預期覆蓋物之影響會有彼此補償而達均衡化之結果，除非試驗區多為某一類地表覆蓋型態，此時地表覆蓋物會直接影響穿透率。故本研究先以航照挑選試驗區，盡量排除試驗區皆為某一類地表覆蓋型態，以各類地表覆蓋物皆均勻分佈之試驗區佳。

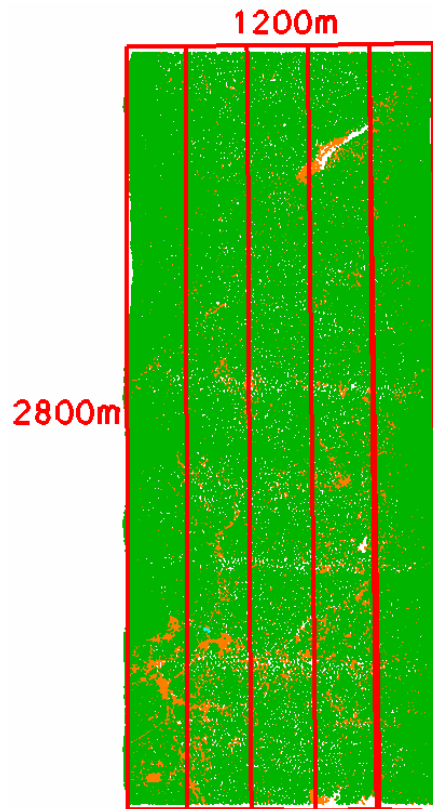


圖 3-15、單一航帶依平行航向等分五等分

### 3-3-2 試驗區

本試驗於桃竹地區選擇三處，每一處取 2~3 條航帶作測試，所選試驗區必須盡量為均質的區域，降低地表覆蓋物對穿透率的影響。所選航帶如下：

1. 新竹六曲窩：航帶 67、航帶 68
2. 新竹富興頭：航帶 26、航帶 27、航帶 28
3. 桃園三民：航帶 80、航帶 81、航帶 82

### 3-3-3 實驗結果

本研究將每條航帶等分的五個統計單位面積由左至右依次稱為 left2、left1、middle、right1、right2，分別計算其穿透率值，成果如表 3-14~表 3-16，圖 3-16~圖 3-18 為穿透率統計直方圖。

表3-14、新竹六曲窩不同入射角與穿透率值

航帶	穿透率	left2(%)	left1(%)	Middle(%)	right1(%)	right2(%)
67	A	11.7	15.1	18.9	18.9	11.6
	B	14.9	19.8	24.7	25.2	15.0
68	A	9.8	10.3	14.1	11.3	10.5
	B	12.9	13.6	18.1	14.6	13.7

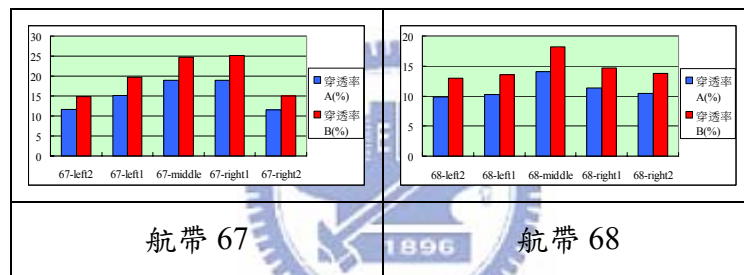


圖 3-16、新竹六曲窩入射角與穿透率之關係

表3-15、新竹富興頭不同入射角與穿透率值

航帶	穿透率	left2(%)	left1(%)	Middle(%)	right1(%)	right2(%)
26	A	22.3	26.7	30.8	22.1	22.0
	B	24.8	30.0	34.4	24.9	24.5
27	A	15.5	20.6	36.4	32.1	22.4
	B	17.4	23.1	39.8	35.7	24.9
28	A	27.2	30.5	37.4	32.0	22.0
	B	30.3	33.9	41.2	35.2	24.6

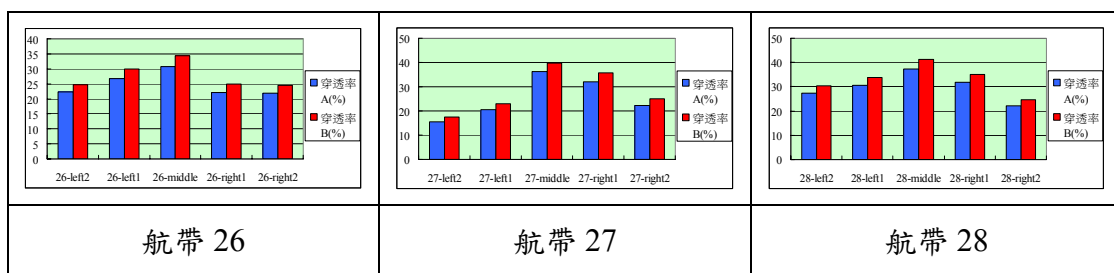


圖 3-17、新竹富興頭入射角與穿透率之關係

表3-16、桃園三民不同入射角與穿透率值

航帶	穿透率	left2(%)	left1(%)	Middle(%)	right1(%)	right2(%)
80	A	10.2	12.8	10.3	15.7	11.7
	B	13.7	17.3	14.2	20.6	14.9
81	A	8.6	18.1	17.9	18.7	12.3
	B	11.8	23.2	22.7	23.6	15.4
82	A	12.6	18.4	22.8	24.5	18.0
	B	16.0	23.5	28.8	30.2	22.0

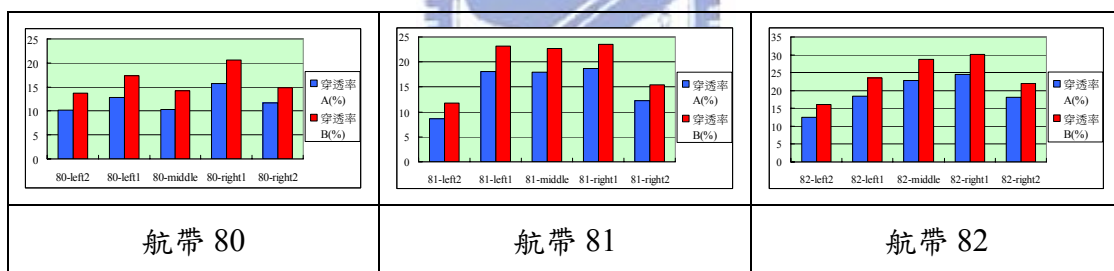


圖 3-18、桃園三民入射角與穿透率之關係

### 3-3-4 實驗成果分析

將相同試驗區中，不同航帶但同入射角分類之穿透率平均後，得到每一試驗區之不同入射角之穿透率，比較其值，排序如下：

- 新竹六曲窩：

middle(19%)>right1(17%)>left1(15%)>right2(13%)>left2(12%)

- 新竹富興頭：

middle(37%)>right1(30%)>left1(27%)>right2(23%)>left2(23%)

- 桃園三民：

right1(22%)>middle(19%)>left1(19%)>right2(16%)>left2(12%)

由成果得知，除了桃園三民試驗區以外，新竹六曲窩與新竹富興頭試驗區航帶在入射角較小時穿透率都較高，入射角越大時，穿透率越低。

桃園三民試驗區，middle 部分(入射角最小)穿透率並非最高，可能與地表覆蓋或點雲資料本身有關，因為此資料是工研院編修成果，可能在某些統計面積下分佈大量的第一類錯誤。若要避免地表覆蓋物影響或點雲資料之誤差，統計數量應增加，統計單位面積也應增大，即可排除誤差。

### 3-4 航帶重疊率與點雲密度之分析

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，因其目的僅在確保相鄰航帶間無空隙。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，亦可考慮提高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%(何心瑜，2006)。

#### 3-4-1 單一航帶點雲密度差異

在同一航帶上，點雲的密度分佈並非皆同。因為雷射發射至航帶兩側時，反射稜鏡轉動方向欲改變，此時稜鏡會停留較長的時間，導致同一航帶在兩側原始點雲密度較高，如圖3-19所示。

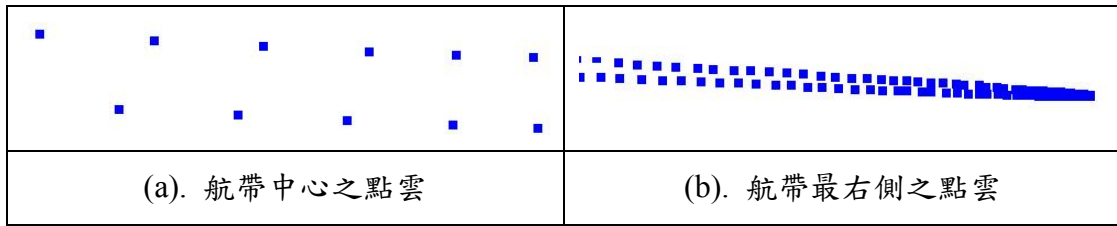


圖 3-19、單一航帶點雲密度之差異

以本文3-3-3節的實驗成果為例，新竹富興頭的航帶26、航帶27、航帶28，其原始點雲數如表3-17，其直方圖如圖3-20所示。可得知在單一航帶上，兩側的原始點雲比中間的點雲數高許多。

表3-17、新竹富興頭各航帶之原始點雲總數

	Left2	Left1	Middle	Right1	Right2
航帶26	786923	429898	396761	424894	801625
航帶27	799650	424174	388710	423279	815088
航帶28	795386	417381	383423	402695	828266

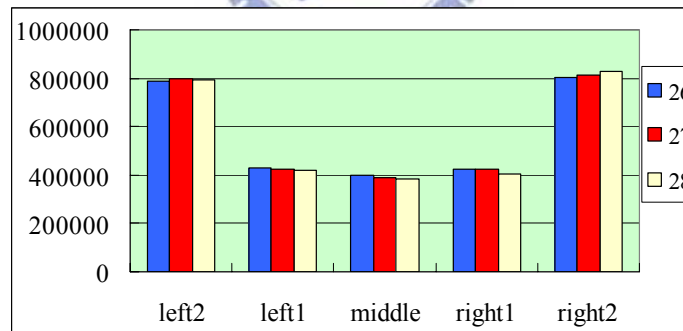


圖 3-20、新竹富興頭各航帶原始點雲總數直方圖

### 3-4-2 覆蓋物遮蔽探討

#### 1. 影響因子討論

當地表上的覆蓋物無法穿越時，如建物遮蔽，不僅無法測得該覆蓋處之地表高度，更會因為不同的入射角與建物高度而造成不同範圍大小的陰影遮蔽。如圖

3-21所示，當有建物遮蔽時，以單一方向之測線，會有一範圍被遮蔽而無法施測，如圖中紅色區塊。

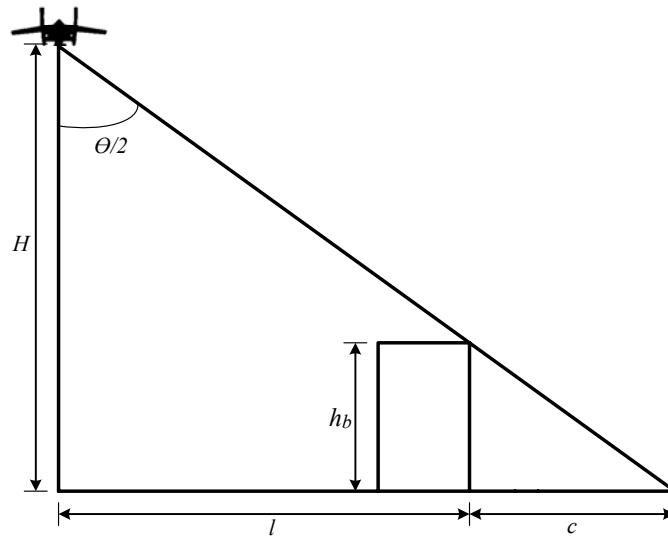


圖 3-21、建物遮蔽示意圖

而遮蔽陰影的大小與建物高度、建物位置與航高相關，由圖3-21可以推之得：

$$c = \frac{h_b l}{H - h_b} \quad (3-4)$$

其中各參數代表：

$H$ ：航高

$h_b$ ：建物高

$c$ ：遮蔽陰影長

$l$ ：建物與航帶中心的距離

由式(3-4)，可以由  $H$ 、 $h_b$  及  $l$  推算出  $c$ ，表 3-18 為各變數與遮蔽陰影長之關係。



表3-18、各變數與遮蔽陰影長之關係

(a) 設 $H = 1500$ , $h_b = 20$ 時, $l$ 與 $c$ 之關係									
$H$	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
$h_b$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$l$	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$c$	0.00	0.41	0.81	1.22	1.62	2.03	2.43	2.84	3.24
(b) 設 $H = 1500$ , $l = 100$ 時, $h_b$ 與 $c$ 之關係									
$H$	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
$h_b$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$l$	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$c$	0.00	0.33	0.67	1.01	1.35	1.69	2.04	2.39	2.74
(c) 設 $h_b = 20$ , $l = 100$ 時, $H$ 與 $c$ 之關係									
$H$	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
$h_b$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$l$	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$c$	3.45	2.56	2.04	1.69	1.45	1.27	1.12	1.01	0.92

由表3-18得知，當建物與航帶中心的距離越長、建物高度越高、航高越低時，遮蔽陰影長就越大。反之，當建物與航帶中心的距離越短、建物高度越低、航高越高時，遮蔽陰影長就越小。

## 2. 實例試驗

本研究以新竹二十張犁其中一棟建物做測試，其正射影像圖如圖 3-22 中紅色圈選處之建物，本試驗以涵蓋此建物的兩航帶(航帶 27 與航帶 28)，觀察此建物造成的遮蔽陰影。圖 3-23 為覆蓋物遮蔽實例試驗之各參數取得之步驟。



圖 3-22、新竹二十張犁試驗區之建物

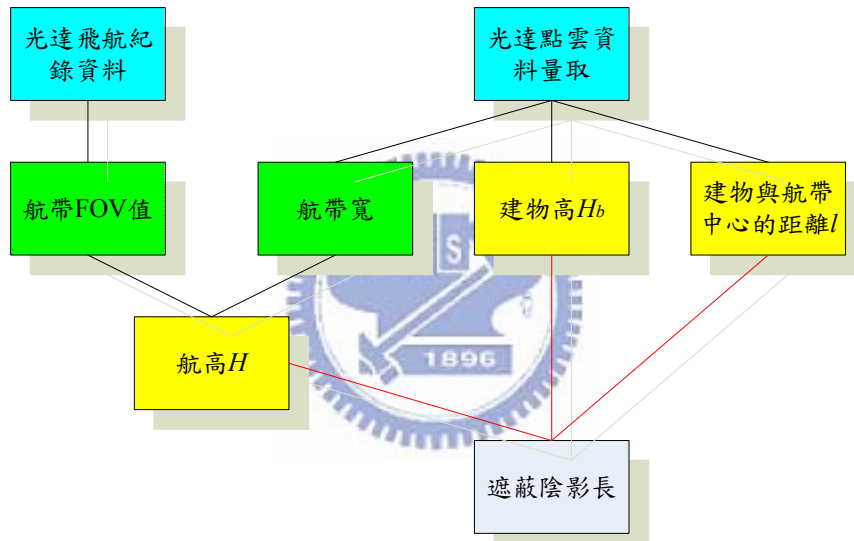


圖 3-23、覆蓋物遮蔽各參數取得之步驟

令視角FOV為 $\theta$ ，航帶寬度為 $B$ ，計算航高 $H$ 式子如下：

$$H = \frac{B}{2} \cot \frac{\theta}{2} \quad (3-5)$$

(a) 航帶 27

其建物之點雲剖面圖如圖 3-24 所示，由式(3-5)：

視角 FOV= 42 度

航帶寬  $B$  約=1110m

故得知航高 $H$ 約 = 1500m

又量取光達點雲得知：

$$\text{建物高 } h_b = 26.21\text{m}$$

$$\text{建物與航帶中心的距離 } l = 196\text{m}$$

由式(3-4)計算得遮蔽陰影長  $c = 3.49\text{m}$ ，如表 3-19。

表3-19、航帶27遮蔽陰影長 $c$ 之計算

	H	$h_b$	$l$	$c = \frac{h_b l}{H - h_b}$
航帶 27	1500m	26.21m	196m	<b>3.49m</b>

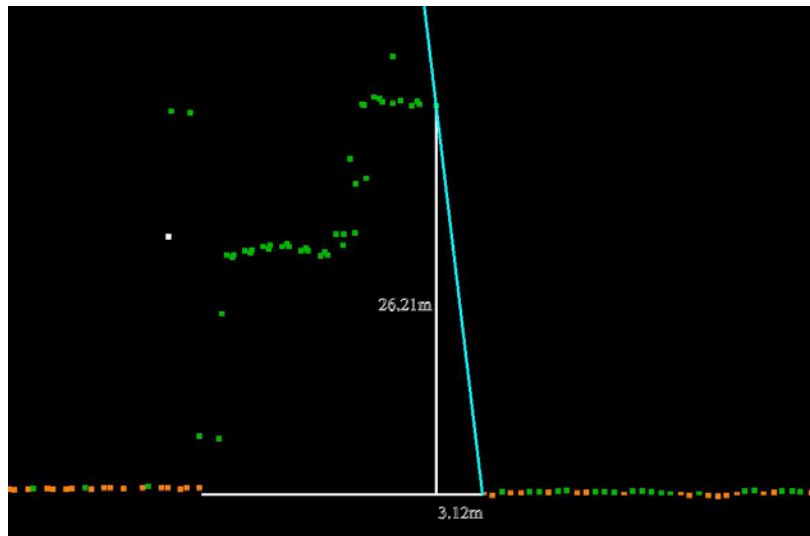


圖 3-24、航帶 27 建物點雲剖面圖

但實際由光達點雲所量得被遮蔽區長3.12m，與計算出來的值相差0.37m。

(b) 航帶28

其建物之點雲剖面圖如圖 3-25 所示，由式(3-5)：

$$\text{視角 FOV} = 42 \text{ 度}$$

$$\text{航帶寬 } B \text{ 約} = 1110\text{m}$$

$$\text{故得知航高 } H \text{ 約} = 1500\text{m}$$

又量取光達點雲得知：

$$\text{建物高 } h_b = 15.5\text{m}$$

建物與航帶中心的距離  $l = 462.3\text{m}$

由式(3-4)計算得遮蔽陰影長  $c = 4.83\text{m}$ ，如表 3-20。

表3-20、航帶28遮蔽陰影長 $c$ 之計算

	H	$h_b$	$l$	$c = \frac{h_b l}{H - h_b}$
航帶 28	1500m	15.5m	462.3m	<b>4.83m</b>

但實際由光達點雲所量得被遮蔽區長4.81m，與計算出來的值相差0.02m。

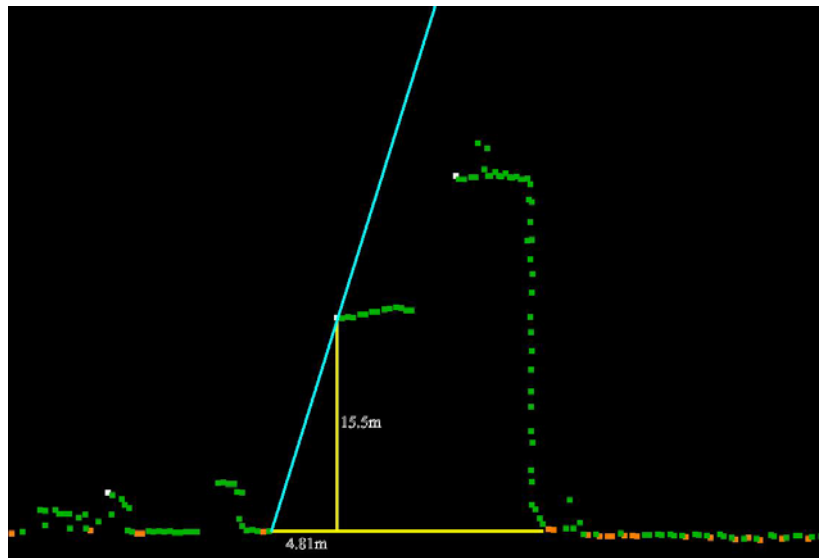


圖 3-25、航帶 28 建物點雲剖面圖

故由上面兩個試驗得知，式(3-4)之效應確實存在於真實數據。以式(3-4)計算出來的遮蔽陰影長與實際以光達剖面量得遮蔽陰影長，兩者之間的差距來源可能是因為足跡剛好落在建物的邊緣附近所導致，以及航高推算的誤差與以光達剖面量取資料時的誤差等，造成推算值與實際值之間有些微差距。

### 3-4-3 航帶重疊率探討

#### (a) 單一建物

航帶重疊除了可以避免兩航帶之間有空隙外，更可以改善遮蔽陰影的問題。如圖3-21，紅色部分的遮蔽陰影雖然在此測線無法施測，但若此航帶右邊有另一航帶與之重疊，重疊部分包括紅色區域，則遮蔽陰影的問題即可解決。

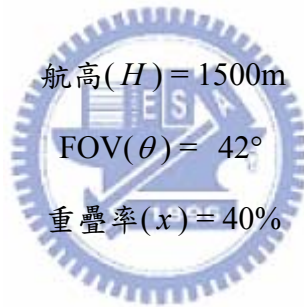
為了避免雷射被遮蔽，造成某些區域無法獲取資料，若將航帶重疊率提高至50%以上，單一建物產生的遮蔽陰影，可完全改善。而目前內政部生產之空載光達成果中，航帶重疊率大多為40%，在此情況下，單一建物造成的遮蔽陰影問題可能有些無法改善，以下將討論這些情況。

設左右兩航帶重疊率為 $x$ 時，航帶中心距離無重疊區的長 $b_n$ 為：

$$b_n = \left(\frac{1}{2} - x\right)B \quad (3-6)$$

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1點為規劃原則，故當遮蔽陰影小於1公尺時，可視為不影響點雲密度的狀況。故當 $l+1 < b_n$ 且 $c > 1$ 時，此時遮蔽陰影問題會影響點雲密度。

以目前內政部生產之空載光達數據為例，目前內政部產製DEM之光達數據其飛航資料大多如下：



故

$$\text{航帶寬}(B) = 1151.6\text{m}$$

$$\text{航帶中心距離無重疊區}(b_n) = 115.16\text{m}$$

因此當 $0\text{m} < l < 114.16\text{m}$ 且 $c > 1$ 時，此時遮蔽陰影問題會影響點雲密度。

即

$$c = \frac{h_b l}{H - h_b} = \frac{h_b l}{1500 - h_b} > 1$$

$$h_b > \frac{1500}{l+1} \quad (3-7)$$

表3-21、由式(3-7)所得 $h_b$ 與 $l$ 關係

$l(\text{m})$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	114
$h_b(\text{m})$	71.43	48.39	36.59	29.41	24.59	21.13	18.52	16.48	14.85	13.04

由表3-21可得知式(3-7)中， $h_b$ 與 $l$ 的關係。此在說明航高1500m、FOV為42度、重疊率40%時，表內參數造成之遮蔽陰影大於1公尺。若規劃每1平方公尺最

少為1點時，在表內參數的狀況下會無法達成。在此例子中，若測區的建物高程皆小於13公尺，則40%的航帶重疊率即可解決所有單一遮蔽陰影問題，而重疊率無需達到50%。

(b) 相鄰建物遮蔽

在有航帶重疊處，並非絕不會發生遮蔽陰影的問題，當兩建物太靠近時，即使航帶重疊，以不同方向測線也無法改善遮蔽問題，如圖3-26所示，在紅色區塊與黃色區塊重疊處，即使航帶重疊，兩方向之測線也無法測得此區域之資料。

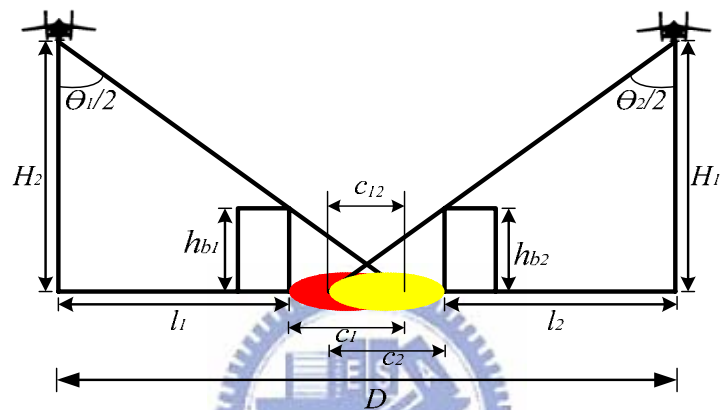


圖 3-26、建物之間太靠近時，所造成之遮蔽陰影

設兩條重疊航帶其航帶中心相距  $D$ ：

$$D = \frac{1}{2}(B_1 + B_2) - X \quad (3-8)$$

$B_1$  與  $B_2$ ：各航帶之航帶寬

$X$ ：重疊寬度

由圖3-26得知

$$c_{12} = l_1 + l_2 + c_1 + c_2 - D \quad (3-9)$$

當  $l_1 + l_2 + c_1 + c_2 - D > 0$  時，左右兩測線有無法測得的遮蔽區，故在此情況下即使航帶重疊率達50%也無法改善遮蔽問題。

以新竹南勢某兩棟建物作測試，兩棟建物之正射影像圖如圖3-27中紅色圈選處，本試驗以涵蓋此建物的兩航帶(航帶18與航帶19，重疊率43%) 觀察此建物造成的遮蔽陰影。





圖 3-27、新竹南勢試驗區之建物

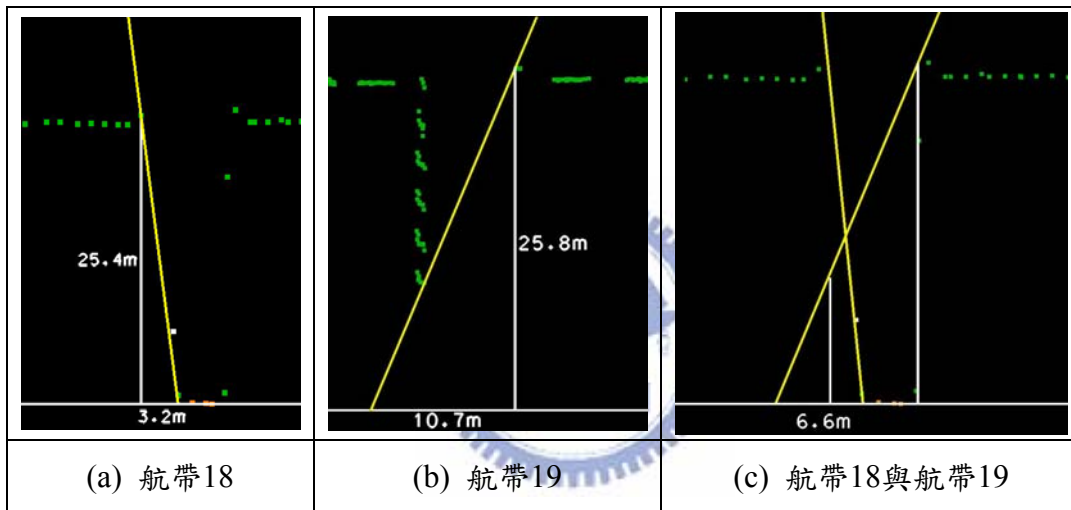


圖 3-28、新竹南勢試驗區建物之光達剖面圖

圖3-28為新竹南勢試驗區之光達剖面圖，由光達所測得之數據，計算此兩棟建物所造成之遮蔽陰影，所得數據如表3-22。

表3-22、試驗區中兩建物造成之遮蔽陰影長

$l_1$	$l_2$	$c_1$	$c_2$	$D$	$c_{12} = l_1 + l_2 + c_1 + c_2 - D$
96.5m	543.7m	3.2m	10.7m	647.1	7.0

由式(3-9)計算所得之 $c_{12}$ 遮蔽陰影長為7.0m，但由光達剖面圖所量得之遮蔽陰影長為6.6m，相差0.4m，雖然兩者之間有些微差距，原因可能為光達剖面量取資料時的誤差，但仍可了解式(3-9)亦存在於真實數據中。

因此當兩建物太靠近時，即使航帶重疊也無法改善遮蔽問題，應縮小FOV，減小遮蔽陰影，增加穿透率，即應造成  $c_{12} \leq 0$ 。

### (c) 實際數據統計

本研究比較新竹市單一航帶的建物遮蔽陰影率與航帶左右重疊率各42%(重疊部份佔84%)後之建物遮蔽陰影率，探討航帶重疊前後之遮蔽陰影改善情形。本研究試驗區之FOV值為42度，航高約為1500m，試驗區中最高建物約為80m，圖3-32(a)為試驗區之正射影像，試驗區之範圍為  $2.86\text{km} \times 1.12\text{km}$ 。

本試驗區之單一航帶點雲平均密度約為  $0.84 \frac{\text{pt}}{\text{m}^2}$ ，而單一航帶點雲密度分佈並不均勻，航帶最兩側與航帶中心之點雲密度不相同，光達點雲的間隔大約在1m~3m不等，甚至有點雲間隔超過3m者。雷射發射至航帶兩側時，掃描方向改變，鄰近兩次來回掃描線的點雲間隔大，如圖3-29所示，點雲間隔達4.5m。航帶中心之點雲分佈的間隔大致相等，約1.5m，如圖3-30所示。

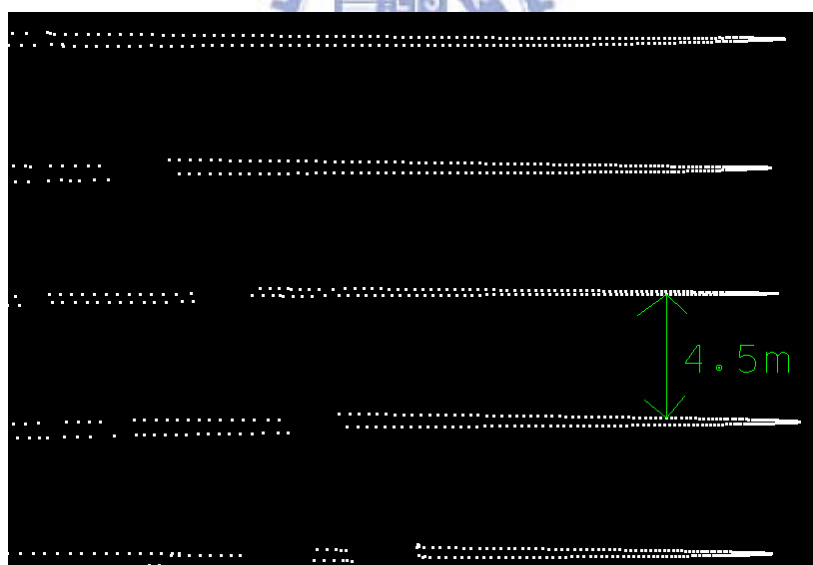


圖 3-29、航帶最右側之點雲分佈情形

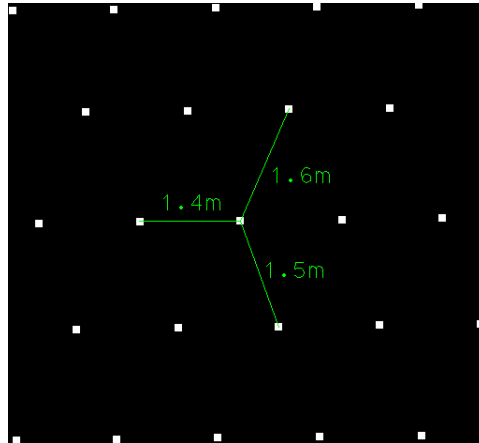


圖 3-30、航帶中心之點雲分佈情形

本研究以格網的方式統計，將試驗區分為 $1m \times 1m$ 的大小。當點雲落在格網內時，以此格網為中心，向外擴展影響範圍，影響範圍大小為 $3m \times 3m$ ，亦即在這 $3m \times 3m$ 的範圍內，皆表示有點雲分佈。此乃因為原始點雲分佈不均，點雲間距大多在 $4m$ 以下，為了避免計算遮蔽陰影率時受到原始點雲分佈不均的影響，故將每個點雲以 $3m \times 3m$ 的影響範圍統計。圖3-31為格網統計示意圖，其中綠色點為光達點雲，白色範圍為每個點雲之影響區域，黑色部分即為空缺點雲區域。

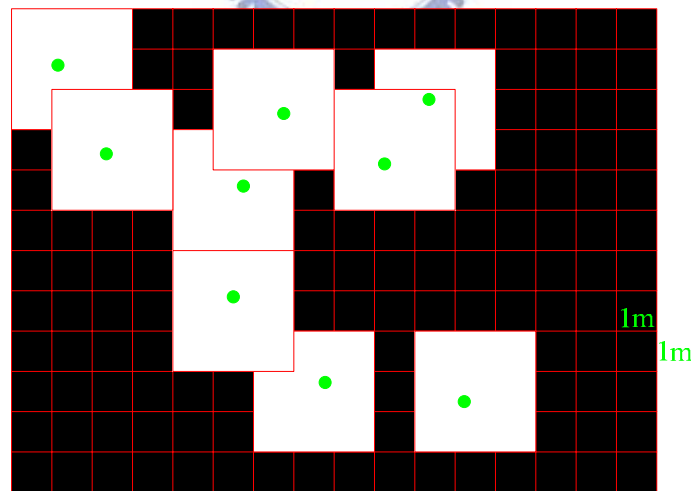


圖 3-31、點雲影響範圍示意圖

由上述之方式將點雲資料做格網統計後，試驗區單一航帶之點雲分佈情形如圖3-32(b)所示，黑色為點雲空缺部分，造成點雲空缺的原因大多為建物遮蔽陰影，以及少部分水體或雷射掃描不當所造成的空隙。在單一航帶中，點雲空缺部

份佔6.2%，大多分佈在航帶兩側。

航帶左右重疊率為42%之點雲分佈情形如圖3-32(c)所示，點雲空缺部份佔1.1%，航帶兩側之點雲空缺情況大多改善，點雲空缺改善率達82.3%，可知在42%重疊率時，多數的(82.3%)遮蔽陰影可獲得改善。

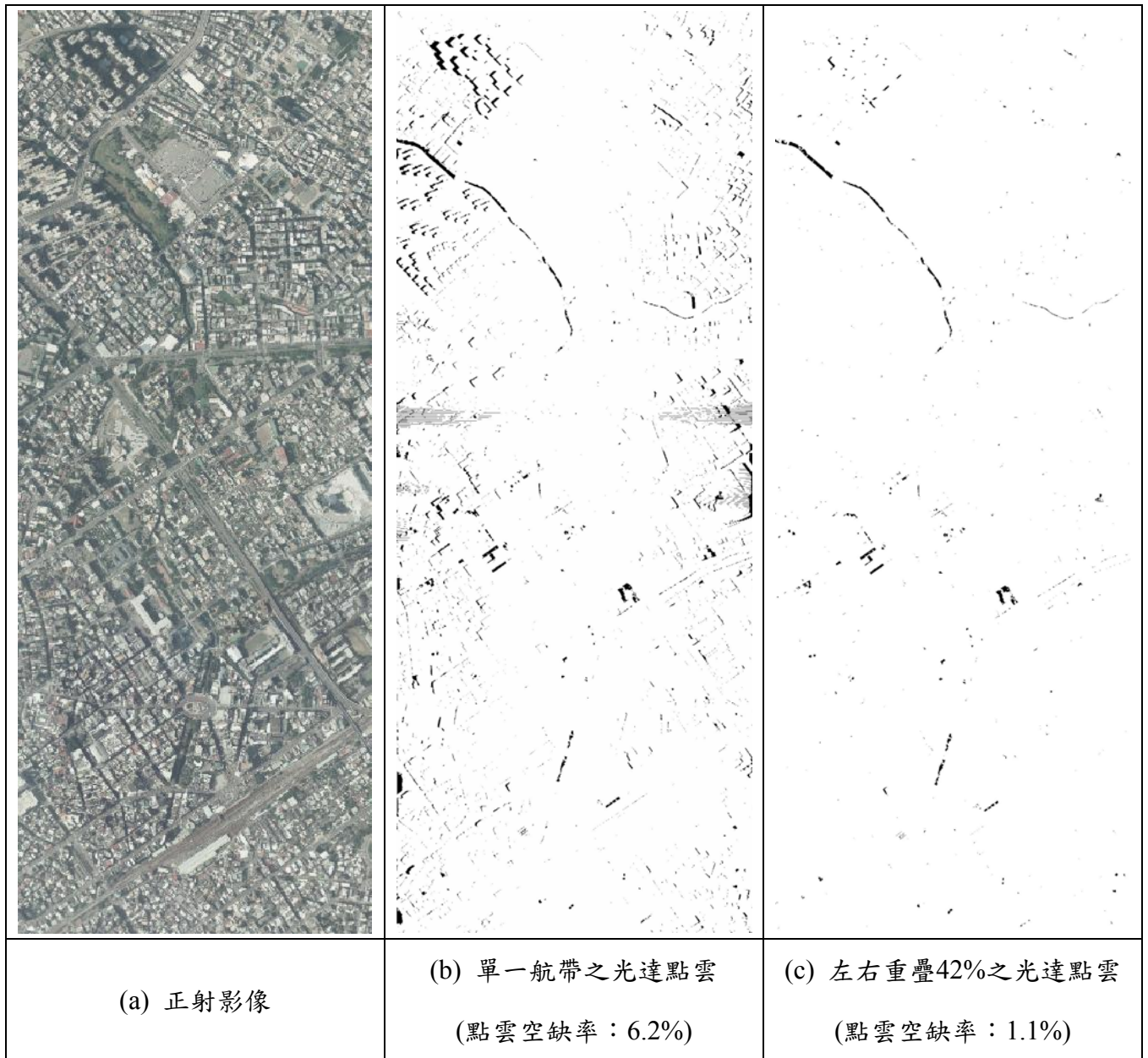


圖 3-32、新竹市試驗區

## 第四章 結論與建議

本研究主要探討穿透率與各項影響因子之關係，包括地表覆蓋物、雷射入射角及遮蔽陰影等，做分析討論，得到以下結論與建議：

1. 計算穿透率前要將過度過濾的點修正，人工編修大部分是針對特殊地形變化處做檢查與編修，但若要完全修正第一類錯誤並不容易，需要花費許多人力及時間，且效果也無法達到百分之百，若有更好的過濾方式或更有效率的人工編修方式將可提高穿透率與植被覆蓋率分析的效率及精度。
2. 以格網方式計算穿透率，不同統計單位面積與植被覆蓋率迴歸成果不同。本研究穿透率與植被覆蓋率迴歸成果以 $300m \times 300m$ 最佳，但其迴歸成果可能受許多因素影響，仍需進一步探討。
3. 計算 TIN 三角形面積排序指標時，面積篩選之門檻值應以原始點雲密度為考量，以無地形覆蓋物狀況下之點雲所組成 TIN 之三角形面積為門檻值，可避免影響其計算出來的密度指標，本研究以 1 平方公尺作為篩選門檻值，未來仍可嘗試以其他面積值作為篩選值。
4. TIN 三角形面積排序不會因為統計單位面積太大而密度互相補償。本研究中 1 平方公尺過濾後 95% 排序面積，雖然 25%~50% 植被覆蓋區(< 10 平方公尺)與 50%~75% 植被覆蓋區(< 10 平方公尺)相同，但標準差可得知試驗區有密度分佈不均的情況，顯示 TIN 三角形面積排序指標比格網式可提供更多密度資訊。
5. 本研究植被覆蓋率是由航照正射影像分類所得，航照正射影像是以可見光波段做分類，若增加近紅外波段成果精度應該可以再提升。在植被群聚覆蓋處有陰影遮蔽，使植被覆蓋率高估，可改用航照立體像對判釋或增加近紅外波段，提升植被的分類精度，亦可嘗試以 DSM 扣除 DEM 的方式，將所得之



數值樹冠模型(Digital Crown Model, DCM)作為輔助影像分類。而水域、建物等其他地表覆蓋物亦會影響穿透率，故在比較穿透率與植被覆蓋率的關係時，其他影響因子應該予以扣除對成果正確性也可大幅提升。

6. 雷射入射角越小時，穿透率越高，本研究中除了桃園三民試驗區，可能受地表覆蓋物及光達過濾誤差之影響，成果並非以 middle 穿透率最高。其他試驗區不同入射角之穿透率排序順序為 middle>right1>left1>right2>left2。middle 穿透率約是 right1 及 left1 的 1.3 倍，是 right2 及 left2 的 1.6 倍。
7. 遮蔽陰影的大小與建物高度、建物位置與航高相關，單一建物之遮蔽陰影為  $c = \frac{h_b l}{H - h_b}$ ，相鄰建物之遮蔽陰影為  $c_{12} = l_1 + l_2 + c_1 + c_2 - D$ ，此二算式之效應皆存在於真實數據。
8. 目前內政部生產之空載光達數據中，要求每平方公尺 1 點為規劃原則，目前其所獲取之數據大多為航高約 1500m，FOV 為 42 度，重疊率 40%，在此情況下，若建物皆低於 13m 以下時，單一建物遮蔽不會影響所要求之點雲密度，但若有兩建物太過靠近的狀況，即使重疊率達 50%，也無法改善遮蔽陰影的問題。



## 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，內政部主辦，工業技術研究院能源與環境研究所執行。

史天元、彭森祥、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，第十卷，第一期，第 103-128 頁。

何心瑜，2006。空載光達作業流程及品質管理之研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文。

管中閔，2004。統計學觀念與方法，華泰文化事業有限公司。

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。

彭炳勳，2006。空載光達點雲穿透率與葉面積指數之關係探討，國立屏東科技大學森林系碩士班專題討論報告。URL：

<http://140.127.11.121/system/study/upload02/resave.asp?id=1000>

(last date accessed : 22 March 2007)

Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54.

Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3): 199-214.

Barilotti, A., Turco, S., 2006. LAI determination in forestry ecosystem by LiDAR data analysis, University of Udine. URL：

<http://geomatica.uniud.it/progetti/laserscan/lpi/>

(last date accessed : 23 March 2007)

Hug, C., Ullrich, A., Grimm, A., 2006. A waveform-digitizing LIDAR terrain and vegetation mapping System, RIEGL. URL：

[http://www.riegl.com/airborne\\_scanners/airborne\\_scanners\\_literature\\_/download](http://www.riegl.com/airborne_scanners/airborne_scanners_literature_/download)

[ds/natscan\\_litemapper\\_.pdf](#) (last date accessed : 22 March 2007)

- Kristian, W.M., 2002. Calibration of airborne laser scanners, Master thesis,  
Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta.
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., and Shreenan, R. 2003.  
Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown  
analysis, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 5, pp. 633–649.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. And Flood, M., 2003. LIDAR remote  
sensing of forest structure, *Physical Geography*, 27(1):88-106.
- Peng, M.H., Shih, T.Y., 2006. Error assessment in two lidar-derived TIN datasets,  
*Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 72, No. 8, pp. 933–947.
- 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.
- Renslow, M. 2001. Development of a bare ground DEM and canopy layer in NW  
forestlands using high performance LIDAR, ESRI International User  
Conference.
- Terrasolid, 2004. TerraScan user guide(18.11.2004), Terrasolid.

附錄 A 雷射入射角對穿透率之影響試驗區之正射影像



圖 A-1、新竹六曲窩



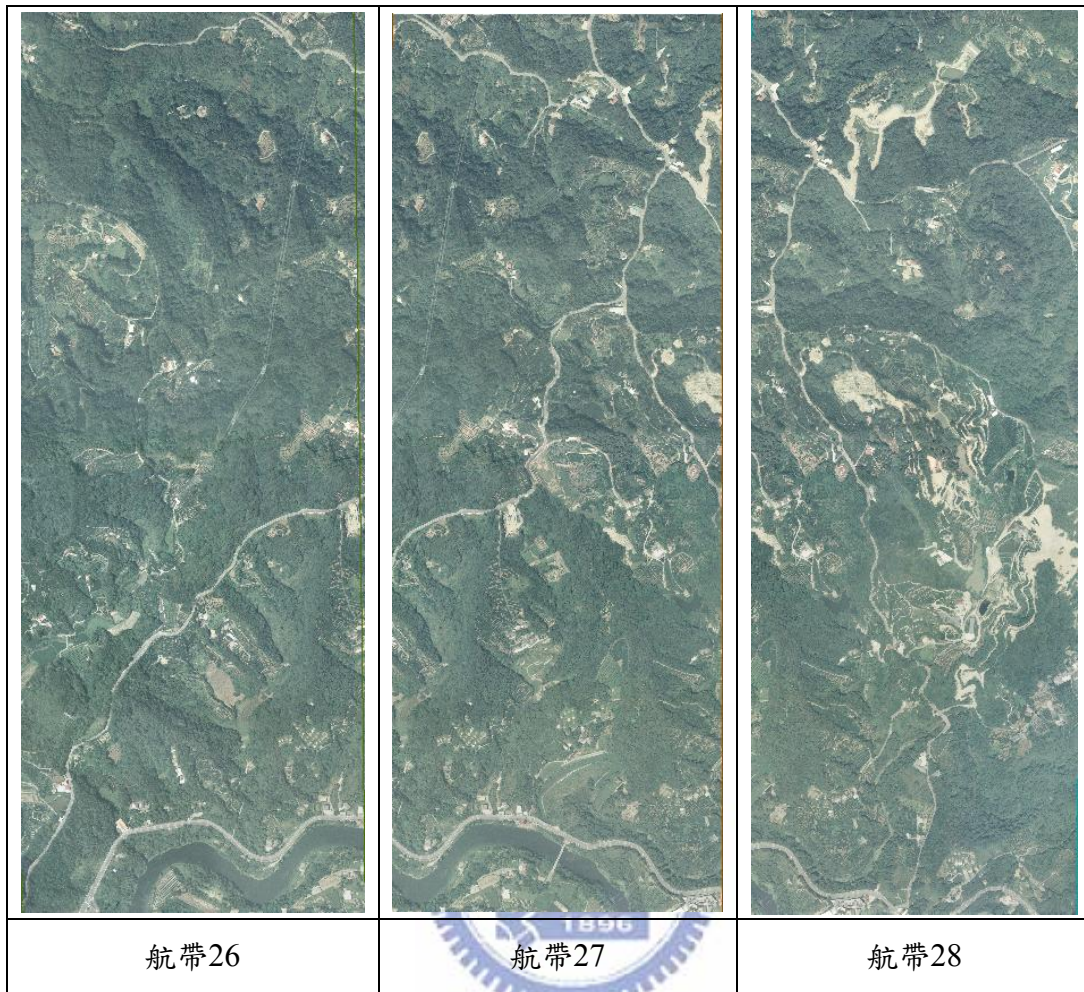


圖 A-2、新竹富興頭



圖 A-3、桃園三民

## 作者簡歷

姓名：黃清美

籍貫：台灣省彰化縣

出生日期：民國 70 年 11 月 29 日

電子郵件：[momola.cv94g@nctu.edu.tw](mailto:momola.cv94g@nctu.edu.tw)

學歷：國立彰化女中畢業

國立中央大學土木工程學系畢業

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

- 相關著作：
1. 黃清美、何心瑜、史天元，2006。空載光達點雲密度指標探討，內政部『高精度及高解析度數值地形模型建置計畫』成果發表及相關應用研討會，137-145。
  2. 黃清美、徐偉城、吳俊毅、史天元，2006。KML 資料庫之建置及探討—以交通大學光復校區校園為例，台灣地理資訊學會年會學術研討會暨國土資訊系統博覽會，118。