

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

三維雷射掃瞄儀目標物顏色因子對於反射強度及精度  
影響之研究-以 Trimble GS200 為例



研究生：李宗儒

指導教授：陳春盛

中華民國九十六年七月

三維雷射掃瞄儀目標物顏色因子對於反射強度及精度影響之  
研究-以 Trimble GS200 為例

A Study on the Effect of Reflective Intensity and Precision on 3D Laser Scanner  
Target's Color Factor-A Case of Trimble GS200

研究生：李宗儒

Student：Tzung-Ju, Li

指導教授：陳春盛

Advisor：Dr. Chun-Sung Chen

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 of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

July 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

三維雷射掃瞄儀目標物顏色因子對反射強度及精度影響之研究  
-以 Trimble GS200 為例

學生：李宗儒

指導教授：陳春盛 博士

國立交通大學土木工程研究所碩士班

## 中文摘要

經三維雷射掃瞄儀掃瞄作業後所得到之眾多三維空間坐標一般以”點雲”稱之，點雲資料的優劣影響著後續的內業處理與成果分析。以點雲獲取而言，三維雷射掃瞄儀掃瞄的原理是應用接收雷射反射訊號的時間差，來得到各點位的三維空間坐標，但反射強度與精度的關係並非反射強度值越高則精度越好。本研究將探討在掃瞄不同顏色之目標物時，將所得到的點雲分布、反射強度值和色階值(RGB)進行分析，研究這些因子的相關性，瞭解目標物顏色因子對反射強度及精度影響之研究，並提出相關研究成果。



本研究擬以 Trimble Mensi GS200 型三維雷射掃瞄儀掃瞄儀，利用掃瞄自製目標物所得點雲進行分析，先探討目標物在不同色階下，其強度值的差異，再分析強度值對精度的影響，利用上述兩步驟，以找出色階值與強度值對精度的影響。

經實驗後可得各種顏色目標物強度值趨近常態分佈，其中亮色系顏色具有較佳的反射強度，但強度值分佈較離散；反之暗色系強度值較小，強度值分佈較集中。此外點雲資料並非強度值越高其精度越高，將精度朝兩方向探討：精密度與精確度，在強度值 41~140 間點雲資料精密度最佳，而點雲精確度而言則在強度值 141~200 間最佳，但兩種精度指標皆在強反射範圍呈震盪現象，進而影響整體之精度。

A Study on the Effect of Reflective Intensity and Precision on 3D Laser Scanner

Target's Color Factor-A Case of Trimble GS200

Student : Tzung-Ju Li

Advisor : Dr. Chun-Sung Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

The numerous three-dimensional space coordinates received generally call it with " point clouds " after scan the object which use 3D laser scanner. But the quality of point cloud is influencing the follow-up analysis. There are close relations between the precision of point clouds and intensity of reflecting. So in this research, different scanning colors of the object are considered to analyze the point cloud distribution and density, the noise and the reflective intensity. Using the analyzed results, the reflective intensity, and the object's RGB of the foregoing factors are presented.

In this research, Trimble GS200 type 3D laser scanner is selected to scan the object. And using the observations, the influence from the scanning intensity and RGB of the object are analyzed. From the analyzed results, a promoting method is presented for 3D laser scanner scanning and point cloud information analysis.

# 目錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VII
第一章 前言.....	1
1-1 研究之動機與目的.....	1
1-2 研究流程.....	3
1-3 文獻回顧.....	5
1-4 論文架構.....	7
第二章 理論基礎與研究方法.....	8
2-1 顏色的組成和目標物材質的選擇.....	8
2-1-1 目標物顏色的選擇.....	8
2-1-2 目標物材質的選擇.....	10
2-2 最小二乘最適平面.....	13
2-2-1 空間中平面方程式.....	13
2-2-2 最小二乘最適平面.....	14
2-3 三維雷射掃瞄儀系統.....	18
2-3-1 三維雷射掃瞄儀之介紹.....	18
2-3-2 三維雷射掃瞄儀之特性.....	19
2-1-3 三維雷射掃瞄儀量測原理.....	22

2-1-4 座標轉換.....	25
2-1-5 三維雷射掃瞄儀誤差來源.....	26
第三章 目標物顏色因子與反射強度關係之研究.....	28
3-1 實驗掃瞄工作規劃.....	28
3-2 使用儀器、軟體說明.....	30
3-3 實驗資料與實驗設計.....	32
3-3-1 實驗資料.....	32
3-3-1-1 內業資料處理流程.....	33
3-3-2 實驗設計.....	36
3-4 目標物顏色因子與反射強度之關係.....	39
第四章 反射強度值對精度影響分析.....	53
4-1 實驗資料與實驗設計.....	53
4-1-1 實驗資料.....	53
4-1-2 實驗設計.....	53
4-2 單次最適平面計算.....	56
4-3 點雲與 TARGET 平面距離.....	65
4-4 影響因子之關係.....	76
第五章 結論與建議.....	80
參考文獻.....	81



## 圖目錄

圖 1-1、研究流程圖 .....	4
圖 2-1、強反射反應圖 .....	10
圖 2-2、三維雷射掃瞄儀與物體間相對坐標系示意圖 .....	19
圖 2-3、三角法：單相機法（修改自 Boehler,2001） .....	23
圖 2-4、三角法：雙相機法（修改自 Boehler,2001） .....	23
圖 2-5、時間差量測法示意圖（修改自 Boehler,2001） .....	24
圖 2-6、掃瞄儀坐標系與物空間坐標系之關係圖 .....	25
圖 3-1、外業掃瞄流程圖 .....	29
圖 3-2、Trimble GS200 型三維雷射掃瞄儀距離與掃瞄精度關係圖 .....	31
圖 3-3、點雲分類程式 .....	31
圖 3-4、點雲資料匯入 Microsoft Office Access .....	32
圖 3-5、點雲初步分割 .....	33
圖 3-6、控制規標 .....	34
圖 3-7、內業處理點雲流程圖 .....	35
圖 3-8、實驗場目標物與儀器擺放示意圖 .....	36
圖 3-9、實驗場目標物與儀器擺放位置圖 .....	37
圖 3-10、目標物與規標佈設圖 .....	37
圖 3-11、掃瞄之點雲成果圖 .....	38
圖 3-12、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(紅色).....	40
圖 3-12、紅色目標物強度值分布直方圖 .....	41
圖 3-13、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(綠色).....	42
圖 3-14、綠色目標物強度值分布直方圖 .....	43
圖 3-15、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(藍色).....	44
圖 3-16、藍色目標物強度值分布直方圖 .....	45

圖 3-17、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(黃色).....	46
圖 3-18、黃色目標物強度值分布直方圖 .....	47
圖 3-19、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(白色).....	48
圖 3-20、白色目標物強度值分布直方圖 .....	49
圖 3-21、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(黑色).....	50
圖 3-22、黑色目標物強度值分布直方圖 .....	51
圖 4-1、反射強度值對精度影響研究流程圖 .....	55
圖 4-1、紅色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖 .....	57
圖 4-2、綠色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖 .....	59
圖 4-3、藍色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖 .....	60
圖 4-4、黃色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖 .....	61
圖 4-5、白色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖 .....	63
圖 4-6、黑色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖 .....	64
圖 4-7、紅色目標物點雲精密度與精確度分佈圖 .....	66
圖 4-8、綠色目標物點雲精密度與精確度分佈圖 .....	68
圖 4-9、藍色目標物點雲精密度與精確度分佈圖 .....	69
圖 4-10、黃色目標物點雲精密度與精確度分佈圖 .....	71
圖 4-11、白色目標物點雲精密度與精確度分佈圖 .....	72
圖 4-12、黑色目標物點雲精密度與精確度分佈圖 .....	74
圖 4-13、顏色與其平均強度值和點雲精密度之關係圖 .....	77
圖 4-14、顏色與其平均強度值和點雲精確度之關係 .....	79



## 表目錄

表 2-1、不同材質掃瞄測試整理表 .....	11
表 3-1、Trimble GS200 型三維雷射掃瞄儀規格 .....	30
表 3-2、強度值分類表 .....	31
表 3-3、紅色目標物四次掃瞄 RGB 強度值平均表 .....	40
表 3-4、紅色目標物其各強度值區段點雲數統計表 .....	41
表 3-5、綠色目標物五次掃瞄 RGB 強度值平均表 .....	42
表 3-6、綠色目標物其各強度值區段點雲數統計表 .....	43
表 3-7、藍色目標物五次掃瞄 RGB 強度值平均表 .....	44
表 3-8、藍色目標物其各強度值區段點雲數統計表 .....	45
表 3-9、黃色目標物五次掃瞄 RGB 強度值平均表 .....	46
表 3-10、黃色目標物其各強度值區段點雲數統計表 .....	47
表 3-11、白色目標物五次掃瞄 RGB 強度值平均表 .....	48
表 3-12、白色目標物其各強度值區段點雲數統計表 .....	49
表 3-13、黑色目標物五次掃瞄 RGB 強度值平均表 .....	50
表 3-14、黑色目標物其各強度值區段點雲數統計表 .....	51
表 3-15、各顏色平均強度值表 .....	52
表 4-1、紅色目標物各強度值區段精度表 .....	57
表 4-2、綠色目標物各強度值區段精度表 .....	58
表 4-3、藍色目標物各強度值區段精度表 .....	60
表 4-4、黃色目標物各強度值區段精度表 .....	61
表 4-5、白色目標物各強度值區段精度表 .....	62
表 4-6、黑色目標物各強度值區段精度表 .....	64
表 4-7、紅色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表 .....	66

表 4-8、綠色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表 .....	67
表 4-9、藍色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表 .....	69
表 4-10、黃色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表 .....	70
表 4-11、白色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表 .....	72
表 4-12、黑色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表 .....	73
表 4-13、顏色與其平均強度值和最適平面精度表 .....	77
表 4-14、顏色與其平均強度值和點雲至 Target 平面距離表 .....	78



# 第一章 前言

## 1-1 研究之動機與目的

近年來各種工程應用三維雷射掃瞄儀的案例日漸增多，舉凡土木建設工程、防災與災害調查、建築古蹟管理、隧道測量、工廠設施監測、及自然景觀調查等，上述工程的共同點皆為測量範圍小、被測物之空間關係複雜且可能正處於持續變化狀態，應用三維雷射掃瞄儀是因其具有下列優點：只需一個儀器立足點，即能以不接觸被測物的方式快速獲得待測物表面非常高密度且高精度的三維點位，相較於傳統測量儀器是針對待測物體表面單一特徵點進行量測的方法，三維雷射掃瞄儀更適用於需物體表面的測量；三維雷射掃瞄儀除具有快速獲得物體表面資訊以外，更解決了因觀測者所產生的人為觀測誤差；三維雷射掃瞄儀為主動式量測，由儀器自行發射雷射光源，在黑暗中亦可作業，對於像是在隧道的測量有極大幫助；傳統測量儀器常因為對於待測物體取樣不足，在測量工作的可靠度上易令人存疑，將三維雷射掃瞄儀的技術應用於空間資料蒐集、分析，可突破傳統測量受限的方法，能精確、大量、快速且連續地蒐集資料，對於分析結果更具有真正的意義及代表性。

經三維雷射掃瞄儀作業後所得到之眾多三維空間座標一般以”點雲”稱之，點雲資料的優劣影響著後續的內業處理與成果分析，由以往的文獻資料可以知道三維雷射掃描儀於戶外進行掃描作業時會受到許多外在環境因素的影響，如距離、角度、材質、溫度、濕度及壓力等等，而使得三維點雲座標資料之精度變差，例如以本研究所使用之Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀，雖原廠規格為掃瞄距離為200公尺時精度可達6mm但實際檢驗後發現在50m以內精度最佳，超過此距離儀器距離待測物越遠則精度精度大幅降低；此外在角度方面，以70°作為三維雷射掃瞄儀一個臨界指標，當掃瞄角度在70°以內的掃瞄點可作為點雲疊合的共軛點，而掃瞄角度大於70°則無法判定。


以點雲資料獲取而言，三維雷射掃瞄儀的原理是應用接收雷射反射訊號的時間差，來得到各點位的三維空間座標，反射訊號的優劣也影響著點雲資料的精度，而點雲資料中之反射強度值 (Intensity) 即為反射訊號的一種，利用反射強度值進行一些點雲資料的判讀，在空載光達上是利用因不同的材質具有不同的反射強度，故可由反射強度來幫助區分地表上的物體，但在三維雷射掃瞄儀(地面光達)方面，強度值的應用卻幾乎沒有，故本研究中一部分將探討強度值對精度之影響。

此外對待測物之顏色而言，對於不同顏色其反射的能力也有差異，例如亮色系具有較好的反射能力，故本研究亦對欲掃瞄的目標物作多種顏色的搭配並對其作掃描，以瞭解顏色與強度值之關係。綜合上述三維雷射掃瞄儀精度影響之因子，本研究將探討三維雷射掃瞄儀目標物顏色因子對反射強度及精度之影響，探討顏色與強度值的關係，以及分析強度值對精度之影響，實驗是否反射强度高其精度也越好，以及其之間關係。

## 1-2 研究流程

本研究實驗所用儀器為Trimble的子公司Mensi所生產的GS200型三維雷射掃瞄儀，此款雷射掃瞄儀為中距離掃瞄儀器；而實驗中所佈設在目標物上之規標亦為Mensi原廠所率定製造之反射規標(Target)。因本研究為探討目標物顏色因子對反射強度及精度之影響，為了避免因實驗場設置於室外，使陽光造成對雷射光束的影響，進而影響實驗的準確性，故實驗場選擇在交通大學工程二館的224教室內進行對目標物的實驗。目標物顏色共計有六種，實驗分別對六種顏色進行掃描，每種顏色各掃描五次，再將掃描所得點雲資料進行資料格式轉換和分類，進行下列兩種分析：1. 目標物顏色因子與反射強度關係。2. 反射強度對精度之影響分析。研究流程如圖1-1。

### 1. 目標物顏色因子與反射強度關係



本研究使用經 GS200 型三維雷射掃瞄儀掃描各種顏色製作而成之目標物，利用所得之點雲進行目標物顏色因子與反射強度關係的分析，目的在於探討目標物顏色對強度值的影響。方法為利用點雲資料中的強度值，進行整筆資料的分類，首先將點雲資料強度值以昇冪方式排列，再將資料中強度值每間隔 10 為一單位共分為 27 類，並進行統計以瞭解此種顏色的強度值分佈情形，以得到目標物顏色因子與反射強度關係。

### 2. 反射強度對精度影響之分析

由於欲了解強度值對精度之影響，掃描後所得點雲資料亦需進行以強度值差異量 10 的一個分類。反射強度對精度影響之分析，本研究以兩種方法作為分析的指標，分別是(1)各反射強度值區段所組最適平面精度、(2)各反射強度值區段之點雲至規標(target)所組成之最適平面的平均距離。利用此兩種計算成果經統計後以供分析強度值對精度之影響。

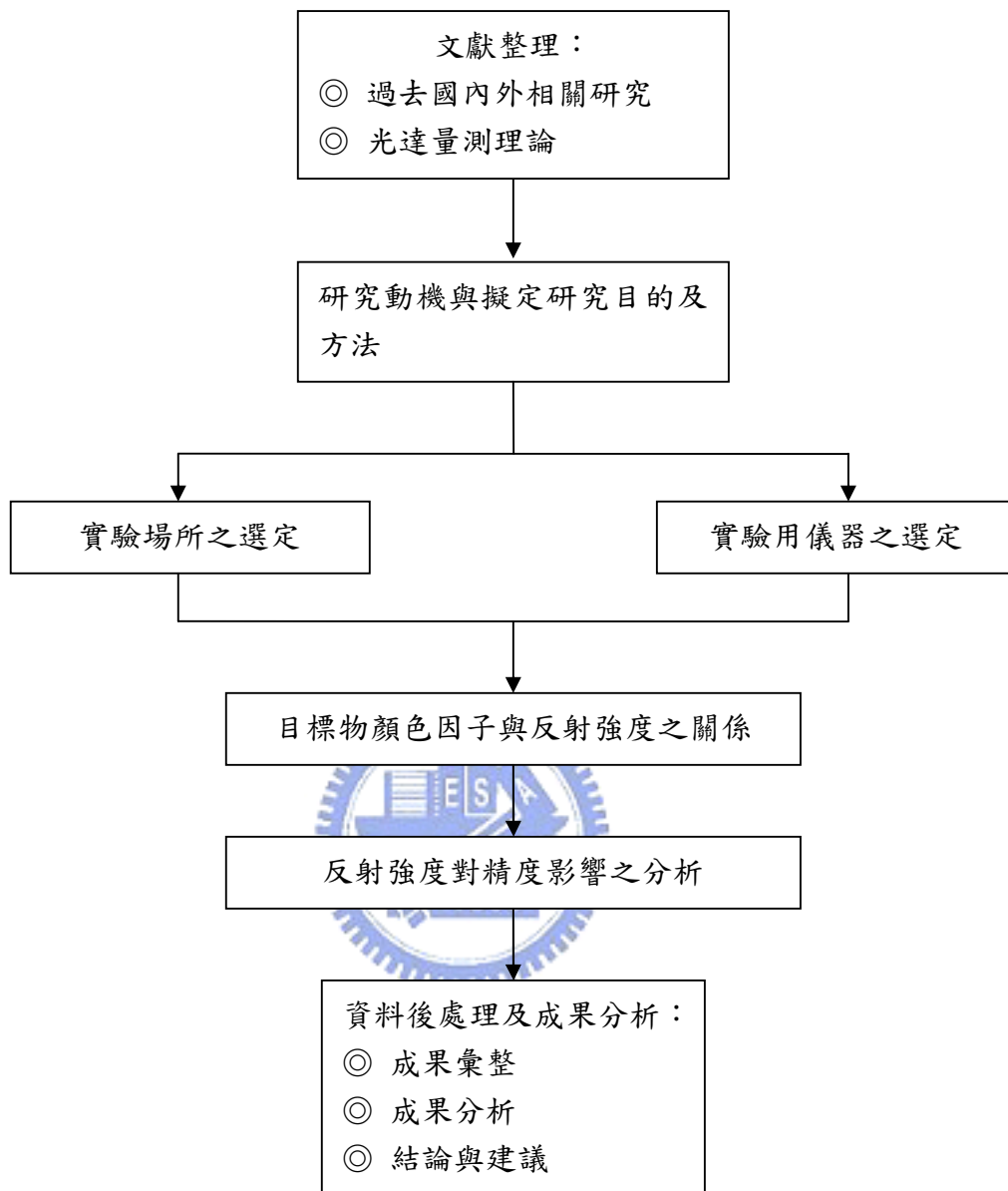


圖 1-1、研究流程圖

### 1-3 文獻回顧

本研究將探討三維雷射掃瞄儀目標物顏色因子對於反射強度及精度影響之研究，在研究中將先論述目標物的選擇與實驗場的設計，最後對目標物各強度值區段精度以點雲最小二乘適平面求取理論作為計算之方法。

在過去的研究中已對反射標的製作材料選取已有研究(賴志凱，2004)，在反射標的製作材料選取，基本要求是需對於雷射光反射能力強，也就是掃瞄點有較高的強度值(Intensity)，主要原因是反射力較強的反射標其有效的掃瞄距離較長，使用時才不會受距離的限制。其次是該物體經掃瞄後其點雲分佈形狀仍能維持原反射標幾何形狀。最後則是使用的反射標選擇容易製作且材質容易取得。但由於本研究旨在探討目標物的顏色對於反射強度以及經度之影響，且本研究實驗為短距離，若仍以高反射強度材質作為本實驗目標物將造成三為雷射掃瞄儀的多路徑效應，其效應發生在近距離掃瞄強反射表面將造成距離誤差[Runne et al, 2001]。故參照過去研究選出適合本研究目標物之材質，其中經簡單測試後，選擇以大型壁報紙較佳，因其具有顏色豐富、取得容易、擺設簡單等特性。

此外對實驗場的設計以室內掃瞄場為佳，在過去室外的檢定研究中(粘基非，2005)發現於戶外檢定場最大的困難是無法控制環境因子，其實驗得知中環境因素可影響三維雷射掃瞄的精度，尤其是陽光對雷射光束的甚至可能達到十多公分的偏差。且陽光影響雷射光束的精度，將造成雷射測距本身精度降低，亦加上太陽直射會使儀器溫度提高，也將影響到三維雷射掃瞄儀本身定位的精度，因此建議在實際作業上，盡量選用陰天或日曬不強烈的時段進行野外掃瞄。

在研究中各種顏色之目標物經掃瞄後，其點雲資料的精度判定將以點雲最適平面求取，而其理論基礎則是利用最小二乘平差理論：方法為分別利用 X、

Y、Z 坐標作為觀測值，透過迭代門檻值的設定，進行點雲最適平面方程求取工作，並選定所有點雲群與最適平面距離平方和為最小當作主要之點雲最適平面。於點雲最小二乘最適平面求取方法中，經實驗(徐元俊，2006)測試結果，以最小二乘理論對於點雲進行最適平面求取工作，透過門檻值進行迭代計算，可以正確地獲得最適平面方程式，利用 X、Y 坐標作為觀測量時，所求取出點雲最適平面之精度較佳，且兩者精度較為一致，並呈現穩定的趨勢，而利用 Z 坐標作為觀測量計算時，由於點雲的剔除率成效不一致，因此在點雲最適平面精度較易呈現出不穩定的趨勢。這樣的情形可在進行單次計算時，就能發現何者最終求解精度較佳，可以利用點雲剔除門檻值的重新設定，讓迭代計算的次數增加，使得以 Z 坐標作為觀測量時，最適平面成果與 X、Y 為觀測量時相近，但此步驟將參雜較多人力介入，因此，仍然較建議採用 X 或 Y 坐標為觀測直進行最適平面計算工作。





## 1-4 論文架構

本論文之基本架構分為五個章節，各章節之研究內容簡要概述如下：

第一章 說明本論文之研究動機與目的、本研究所進行的研究流程與方法，和相關文獻回顧，以及本研究之組織架構。

第二章 理論基礎與研究方法：

2-1 節：顏色的組成和目標物材質的選擇

2-2 節：最小二乘最適平面

2-3 節：對於三維雷射掃瞄儀的掃瞄特性、原理及誤差來源作一說明。

第三章 目標物顏色因子與反射強度關係之研究：

3-1 節：說明三維雷射掃瞄的外業掃瞄工作及內業資料處理部分。

3-2 節：簡述相關使用軟硬體設備及規格。

3-3 節：說明實驗資料與實驗設計。

3-4 節：對於目標物顏色因子與反射強度之關係進行分析。

第四章 反射強度對精度影響分析：

4-1 節：說明實驗資料與實驗設計。

4-2 節：以最適平面精度比較各顏色之精度。

4-3 節：以規標所組最適平面為基準計算各顏色點雲至此之平均距離，並與最適平面精度結合，比較資料的精確度與精密度。

4-4 節：探討顏色、反射強度值與精確度以及顏色、反射強度值與精密度之關係。

第五章 結論與建議：


根據本研究的實驗結果與分析進行總結，以提供未來進行相關研究可供加強的地方，並提出一些建議。

## 第二章 理論基礎與研究方法

本研究旨在探討目標物顏色因子對三維雷射掃瞄儀的影響，故在本章將先說明本研究物體顏色為可見光照射下所判定之顏色，以及研究中目標物材質將以適合近距離掃瞄且取得容易及製作方便之紙張為選定的材質。接著介紹本研究精度計算上將以最小二乘最適平面為計算方法，由於三維雷射掃瞄儀掃瞄得到的點雲資料是屬於面的資訊，空間中的特徵點可由三個平面交會得到，而兩個相交會的平面亦可求出一條特徵線（徐元俊，2006），也由於本研究目標物設計為大平面，故以最小二乘最適平面計算較合適。最後並對所使用之三維雷射掃瞄儀器作一介紹，先簡述三維雷射掃瞄儀之技術、特性，再介紹三維雷射掃瞄儀之掃瞄原理。

### 2-1 顏色的組成和目標物材質的選擇

#### 2-1-1 目標物顏色的選擇



顏色是通過眼、腦和我們的生活經驗所產生的一種對光的視覺效應圖像是自然界中的客觀景物透過某種系統的映射，使人們產生的視覺感受。人們在觀察景物時，視覺的第一印象乃是顏色的感覺。顏色是通過眼、腦和人類的生活經驗所產生的一種對光的視覺效應亦可說顏色是視覺系統對可見光的感知結果。而光如何通過眼、腦使人們產生關於顏色的感受，在於光線在進入眼睛後於視網膜轉換成神經中樞的訊號，再經由視神經到達腦部，而眼睛回憶三種紅、綠、藍原色和頭腦解析顏色，就如同綜合以上三種訊號。解析顏色的變化極大，完全是根據外在的環境而定。當一樣的颜色經由日光或是燭光所看到的顏色會不一樣。然而，人類的勢力可適應於光線的來源，可以讓我們在兩種情況下決定同一種顏色。

1666年英國科學家牛頓第一個揭示了光的性質和顏色的秘密。並以光的散

色實驗說明太陽光是各種顏色的混合光，並發現光的顏色決定於光的波長。光波是一種具有一定頻率範圍的電磁波，電磁波的波長和強度可以有很大的區別，電磁波中只有一小部分能夠引起人類眼睛的興奮而被感覺，在人可以感受的波長範圍內（約 380nm 至 740nm），此段電磁波範圍被稱為可見光，有時也被簡稱為光。假如將一個光源各個波長的強度列在一起，就可以獲得這個光源的光譜。一個物體的光譜決定這個物體的光學特性，包括它的顏色。不同的光譜可以被接收為同一個顏色。雖然可以將一個顏色定義為所有這些光譜的總和，但是不同的動物所看到的顏色是不同的，不同的人所感受到的顏色也是不同的，因此這個定義是相當主觀的。

構成顏色的實質是可見光。其存在必須的 3 個實體是：光線、被觀察對象和觀察者。其組成為觀察對象的顏色是指該對象在可見光的照射下，所反射的各光譜成分作用於人眼的綜合效果；對於透射對象則是透過該物體的光譜綜合作用的結果。此外光是由光子組成的。不同波長的光由不同能量的光子組成。波長  $\lambda$  和能量  $E$  間的關係為  $E=hc/\lambda$  式中  $h$  為普朗克常數， $c$  為光速。當光子射到物體上時，某波長的光子能量與物質內原子的振動能，或電子發生躍遷時所需能量相同時，就易被物質吸收，其它波長的光就不易被吸收。物質對光的選擇吸收，就造成了各自的顏色。而當各種不同波長的光信號一同進入我們的眼睛的某一點時，視覺器官會將它們混合起來，作為一種顏色接受下來。物體的顏色決定於它對光線的吸收和反射，實質上決定於物質的架構，不同的物質架構對不同波長的光吸收能力不同，例如一個反射所有波長的光的表面是白色的，而一個吸收所有波長的光的表面是黑色的但由於大多數光源的光譜不是單色的，它們的光是由不同強度和波長的光混合組成的。人眼將許多這樣的混合光的顏色與單色光源的光的顏色看成是同樣。比如橙色，實際上就不是單色的波長 600nm 的光，實際上它是由紅色和綠色的光混合組成的（顯示器無法產生單色的橙色）。出於眼睛的生理原理，我們無法區分這兩種光的顏色。也有許多

顏色是不可能單色的，因為沒有這樣的單色的顏色，好比黑色、灰色和白色就是這樣的顏色，粉紅色或紫色也是這樣的顏色。

綜合上面對顏色的簡介，故本實驗中對目標物顯色都是在可見光環境下做探討，與一般外業掃瞄環境相同。而目標物之顏色選擇將以單色系顏色為主，其中目標物顏色將以光的三原色紅、綠、藍以及單色系之黃色、黑色以及白色。

### 2-1-2 目標物材質的選擇

本研究目標物的材質選擇，參考過去對反射標的製作材料選取之研究，依照其設計精神以及材質的測試，經改良後以供本研究目標物使用。

過去對反射標的製作材料選取已有研究(賴志凱，2004)，在反射標的製作材料選取，基本要求是需對於雷射光反射能力強，也就是掃瞄點有較高的強度值(Intensity)，主要原因是反射力較強的反射標其有效的掃瞄距離較長，使用時才不會受距離的限制。其次是該物體經掃瞄後其點雲分佈形狀仍能維持原反射標幾何形狀。最後則是使用的反射標選擇容易製作且材質容易取得。但由於本研究旨在探討目標物的顏色對於反射強度以及經度之影響，且本研究實驗為短距離，若仍以高反射強度材質作為本實驗目標物將造成三為雷射掃瞄儀的多路徑效應，其效應發生在近距離掃瞄強反射表面將造成距離誤差[Runne et al, 2001]，如圖2-1。

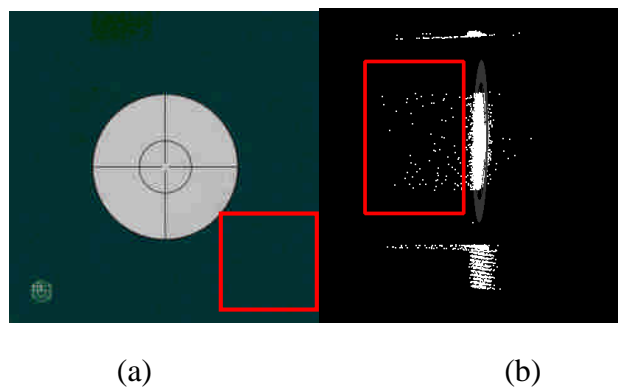


圖2-1、強反射反應圖：(a)強反射物質，(b)定位之距離誤差

在過去研究中已對一些較易取得的材質反射標進行一些簡單的測試掃瞄，並從測試中找到合適的反射標材質。其測試的方式則是先在短距離(約15公尺)下對不同材質的物體進行單純的掃瞄，並藉由此次成果簡單選擇適用的材質，過濾不合適的材質，表2-1為測試使用的材質、掃瞄時的強度值、幾何形狀完整性及是否容易製作的整理。表中某些材質會有兩種不同的反射值，主要是由於不同類型的產品(一般反光標)或物體擺設位置相對儀器不同所造成(鋁片、黑塑膠板)，這也代表此類物體的不穩定性，所以會加以淘汰。稜鏡反射性超強會有過度反射而使得標中心位置無掃瞄點，但遠距離時只要雷射的足跡能涵蓋到稜鏡就會產生觀測點，因而形成相當好的標形，而且仍然具有定位之效果，所以考量於遠距離掃瞄時應用。

表2-1、不同材質掃瞄測試整理表(賴志凱，2004)

材質名稱	強度值	完整性	是否容易製作	採用與否
一般反光標	200~230	不佳	不易	否
	over			
測量用反射貼紙	over	不佳	不易	否
鐵盤	75~85	佳	不易	否
鋁片	55~255	佳	不易	否
黑色塑膠板	55~255	佳	易	否
	over			
包裝紙	50~255	不佳	易	否
厚紙板	190~230	佳	易	是
一般用紙	180~230	佳	易	是
保麗龍	200~230	佳	易	是
稜鏡	240~255	可	使用現有產品	是
	over			

注：over 代表由於反射能量過強產生點雲不符合正常分佈的現象。

經其測試發現可使用的材質為以下四種：厚紙板、一般用紙、保麗龍、稜鏡，並可依其使用場合分為以下兩類：

(1). 短距離作業時使用的反射標：

採用紙類、厚紙板或保麗龍來製作反射標，反射標大小則視使用場合而定，形式則是圓盤標。適用場合為距離較短(小於100 公尺)，如建築古蹟維護、坑道與洞穴測量及工廠設施與管線配置等作業。

(2). 長距離作業時使用的反射標：

以傳統稜鏡為主要測試反射標，大小與形式則為傳統稜鏡形式不做改變。希望能在長距離掃瞄時使用，如防災與災害調查與自然景觀維護等作業，並希望能進一步作為空載雷射掃瞄的地面反射標。

由於本研究實驗採取室內短距離下進行掃瞄，若選取強反射材質作為目標物製作，將造成定位誤差而失去實驗的價值，並又考量目標物須搭配不同顏色但材質仍需一致的情況下，將選取一般用紙，因一般用紙可購買到各種顏色而不須經任何加工，免除經加工後造成目標物表面材質不同使得實驗不精確。綜合上述觀點本研究目標物材質的選擇將以一般用紙作為後續實驗所用。

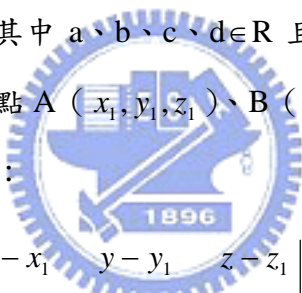
(以方法)

## 2-2 最小二乘最適平面

由於目標物為平坦的紙面所佈設而成，在過去研究中自行設計之反射標形狀上以使用幾何對稱的圖形為佳，利用其對稱的特性尋找其幾何對稱中心作為反射標的特徵點，其中以圓盤狀或球狀較為常見。但由於本次目標物的選取為大面紙張，並欲計算各反射強度值區段，而各強度值區段點雲分佈亦非均勻分布，將造成對稱中心計算上的困難與誤差，故本研究目標物精度之計算將以最小二乘最適平面作為計算方法。

### 2-2-1 空間中平面方程式

空間中任意三點可組成一平面，而空間中的平面方程式一般均可簡化為  $ax+by+cz+d=0$  的形式，其中  $a、b、c、d \in \mathbb{R}$  且  $a^2+b^2+c^2 \neq 0$ 。此外空間中平面 E 為通過不共線的三點 A  $(x_1, y_1, z_1)$ 、B  $(x_2, y_2, z_2)$ 、C  $(x_3, y_3, z_3)$ ，則平面 E 的方程式可以寫成：


$$\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 & z-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{vmatrix} = 0$$

空間中解算平面方程式的方法有相當多種，由於點雲資料是儲存為  $x、y、z$  三維坐標的型式，故採用  $ax+by+cz+d=0$  的形式，其中  $x、y、z$  為三維雷射掃描點雲坐標值； $a、b、c、d$  為平面方程式各項係數。可將上式改寫為：

$$X' = a'Y + b'Z + c'$$

其中  $X', Y, Z$  為點雲三軸之坐標值， $a', b', c'$  為最適平面三個參數值。

## 2-2-2 最小二乘最適平面

若以 X 軸向進行最適平面計算工作，先假設各點雲位於同一平面，並列出下列方程式：

$$X_i + V_x = a_{fit} Y_i + b_{fit} Z_i + c_{fit}$$

則可得出觀測方程式：

$$L + V = AX$$

其中各矩陣表示如下：

$$L_x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad V_x = \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{x2} \\ \vdots \\ v_{xn} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} Y_1 & Z_1 & 1 \\ Y_2 & Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_n & Z_n & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} a_{fit} \\ b_{fit} \\ c_{fit} \end{bmatrix}$$

以最小二乘法計算可得：

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

經由最小二乘計算出點雲在最適平面 X 軸方向上殘差  $v_{xi}$  為：

$$v_{xi} = a_{fit} Y_i + b_{fit} Z_i + c_{fit} - X_i$$

獲得最適平面的各項參數  $a_{fit}$ 、 $b_{fit}$ 、 $c_{fit}$  後，再將所有計算最適平面的點雲相對坐標值帶回最適平面計算得出點雲各點相對於最適平面的距離。

點雲各點與最適平面的距離  $d_{xi}$  為：

$$d_{xi} = \frac{|a_{fit} Y_i + b_{fit} Z_i - X_i + c_{fit}|}{\sqrt{a_{fit}^2 + b_{fit}^2 + 1}}$$

標準誤差 (Standard Deviation) 為  $\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{V_x^T V_x}{n-u}}$ ，n=該次最適平面所用的點雲總

數，u 為未知參數個數 3。

若我們將點雲資料與最適平面的距離視為誤差，並假設誤差為隨機分佈且獨



立，則標準誤差（Standard Deviation）如下：

$$\hat{\sigma}_{dx} = \sqrt{\frac{d_x^T d_x}{n-u}}, \quad n=\text{該次最適平面所用的點雲總數}$$

同理針對 Y 軸向進行最適平面計算工作，假定點雲位於同一平面，可列出下列方程式：

$$Y + V_y = d_{fit} Z + e_{fit} X + f_{fit}$$

其中  $X, Y, Z$  為點雲三軸之坐標值， $d_{fit}, e_{fit}, f_{fit}$  為最適平面三個參數值，以  $Y$  方向坐標為觀測量，其矩陣形式亦可表示為：

$$L + V = AX$$

$$L_y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad V_y = \begin{bmatrix} v_{y1} \\ v_{y2} \\ \vdots \\ v_{ym} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} Z_1 & X_1 & 1 \\ Z_2 & X_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_n & X_n & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} d_{fit} \\ e_{fit} \\ f_{fit} \end{bmatrix}$$

由最小二乘法可得出：

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

經由最小二乘計算出點雲在最適平面 Y 軸方向上殘差  $v_{yi}$  為：

$$v_{yi} = d_{fit} Z_i + e_{fit} X_i + f_{fit} - Y_i$$

獲得最適平面的各項參數  $d_{fit}$ 、 $e_{fit}$ 、 $f_{fit}$  後，再將所有計算最適平面的點雲相對坐標值帶回最適平面計算得出各點雲相對於最適平面的距離。各點雲與最適平面的距離  $d_{yi}$  為：

$$d_{yi} = \frac{|d_{fit} Z_i + e_{fit} X_i - Y_i + f_{fit}|}{\sqrt{d_{fit}^2 + e_{fit}^2 + 1}}$$

標準誤差 (Standard Deviation) 為  $\hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{V_y^T V_y}{n-u}}$ ， $n$  為該次最適平面所用的點雲總數， $u$  為未知參數個數 3。將點雲資料與最適平面的距離視為誤差，並假設誤差為隨機分佈且獨立，則標準誤差 (Standard Deviation) 如下：

$$\hat{\sigma}_{d_y} = \sqrt{\frac{d_y^T d_y}{n-u}}, \quad n = \text{該次最適平面所用的點雲總數}$$

同理針對 Z 軸向進行最適平面計算工作，假定點雲位於同一平面，可列出下列方程式：

$$Z + V_z = g_{fit} X + h_{fit} Y + i_{fit}$$

其中  $X, Y, Z$  為點雲三軸之坐標值， $g_{fit}, h_{fit}, i_{fit}$  為最適平面三個參數值。以  $Y$  方向坐標為觀測量，其矩陣形式亦可表示為：

$$L_z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} \quad V_z = \begin{bmatrix} v_{z1} \\ v_{z2} \\ \vdots \\ v_{zn} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} g_{fit} \\ h_{fit} \\ i_{fit} \end{bmatrix}$$

由最小二乘法可得出：

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

經由最小二乘計算出點雲在最適平面 Z 軸方向上殘差  $v_i$  為：

$$v_{zi} = g_{fit} X_i + h_{fit} Y_i + i_{fit} - Z_i$$

得最適平面的各項參數  $g_{fit}, h_{fit}, i_{fit}$  後，再將所有計算最適平面的點雲相對坐標值帶回最適平面計算得出各點雲相對於最適平面的距離。各點雲與最適平面的距離  $d_{zi}$  為

$$d_{zi} = \frac{|g_{fit}X_i + h_{fit}Y_i - Z_i + i_{fit}|}{\sqrt{g_{fit}^2 + h_{fit}^2 + 1}}$$

標準誤差 (Standard Deviation) 為  $\hat{\sigma}_z = \sqrt{\frac{V_z^T V_z}{n-u}}$ ，n=該次最適平面所用的點雲總

數，u 為未知參數個數 3。將點雲資料與最適平面的距離視為誤差，並假設誤差為隨機分佈且獨立，則標準誤差 (standard deviation) 如下：

$$\hat{\sigma}_{dz} = \sqrt{\frac{d_z^T d_z}{n-u}}$$

，n=該次最適平面所用的點雲總數，u 為未知參數個數 3。

利用上面所述最小二乘最適平面計算原理，在掃瞄作業完成後將位於同一平面上之所有點雲相對坐標匯出成 X, Y, Z 格式，代入最適平面方程式，透過最小二乘平差法，可得此平面之標準偏差。

以上述之計算原理，並利用 Microsoft visual basic 6.0 進程式撰寫，將上述理論基礎轉為程式運算。由於最適平面以 X、Y 作為觀測量進行計算時，其成果較為穩定，且精度較佳，且最適平面精度可由單次計算推測最終何者精度較佳(徐元俊，2006)，故實驗中計算最適平面將以 X 軸為觀測量進行單次計算。

## 2-3 三維雷射掃瞄儀系統

### 2-3-1 三維雷射掃瞄儀之介紹

三維雷射掃瞄儀是一種能在短時間內快速獲取大量高精度三維點位相對坐標的儀器，且只需一個儀器立足點，即能以不接觸被測物的方式快速獲得待測物表面非常高密度且高精度的三維點位，相較於傳統測量儀器是針對待測物體表面單一特徵點進行量測的方法，三維雷射掃瞄儀更適用於需物體表面的測量；三維雷射掃瞄儀除具有快速獲得物體表面資訊以外，更解決了因觀測者所產生的人為觀測誤差；三維雷射掃瞄儀為主動式量測，由儀器自行發射雷射光源，在黑暗中亦可作業，對於像是在隧道的測量有極大幫助；傳統測量儀器常因為對於待測物體取樣不足，在測量工作的可靠度上易令人存疑，將三維雷射掃瞄儀的技術應用於空間資料蒐集、分析，可突破傳統測量受限的方法，能精確、大量、快速且連續地蒐集資料，對於分析結果更具有真正的意義及代表性。

三維雷射掃瞄儀掃瞄方式因掃瞄需求不同，使其設計而有不同，根據應用距離之不同，近距離的有 50 公尺以內的，主要針對小型模型、機械工程或小型古蹟等；長距離的有 200 公尺以上甚至至 500 公尺者，不但可應用於古蹟建模重構，還可針對大型結構體、科技廠房、隧道、小範圍地形監測及橋樑變形等等；精密測量儀器不斷更新，近距離的掃瞄儀器由於受地形限制，對於大範圍的地形變化、地殼變動、邊坡滑動等監測之作業均較難應用，因此更長距離的雷射掃瞄儀就一一誕生，並以遠距光達稱之。也由於三維雷射掃瞄儀可在室內外不宜移動的、危險的、非接觸性的、不規則的、非線性的、高價值的、資產密集性的複雜目標實體或實景進行資料獲取、建模、立體貼圖。諸如：邊坡滑動監測工作、古蹟文物的重新建模、建築物外圍影像敷貼工作都有相當大的助益。

### 2-3-2 三維雷射掃瞄儀之特性

三維雷射掃瞄儀利用雷射測距的原理，由儀器本身發射出雷射光束，接觸到物體表面後反射再接收物體所反射之訊號，經由相位或脈衝時間差的計算，可推求出被測物與三維雷射掃瞄儀之間的斜距（SD），配合掃瞄的水平方向角（HA）與垂直方向角（VA），可推求得出每一掃瞄點雲與測站之水平距（HD）與高差（VD），可得到掃瞄點雲與掃瞄儀的三度空間相對坐標差值，再配合掃瞄角度的不同，可以計算出掃瞄儀中心至測點的三維坐標差，且可同時記錄回訊之強度值。而三維雷射掃瞄之相對坐標定位，是以掃瞄儀的雷射光源為原點，自成一局部坐標系統，根據右手定則，以掃瞄儀的右側為 X 方向，正對目標物的方向為 Y 方向，而垂直軸方向為 Z 方向，再藉由雷射光發射和接收的時間差和相位差，計算出雷射光源與掃瞄點之間的距離和角度，以計算出待測掃瞄物點的相對點位坐標值。（如圖 2-2 所示）

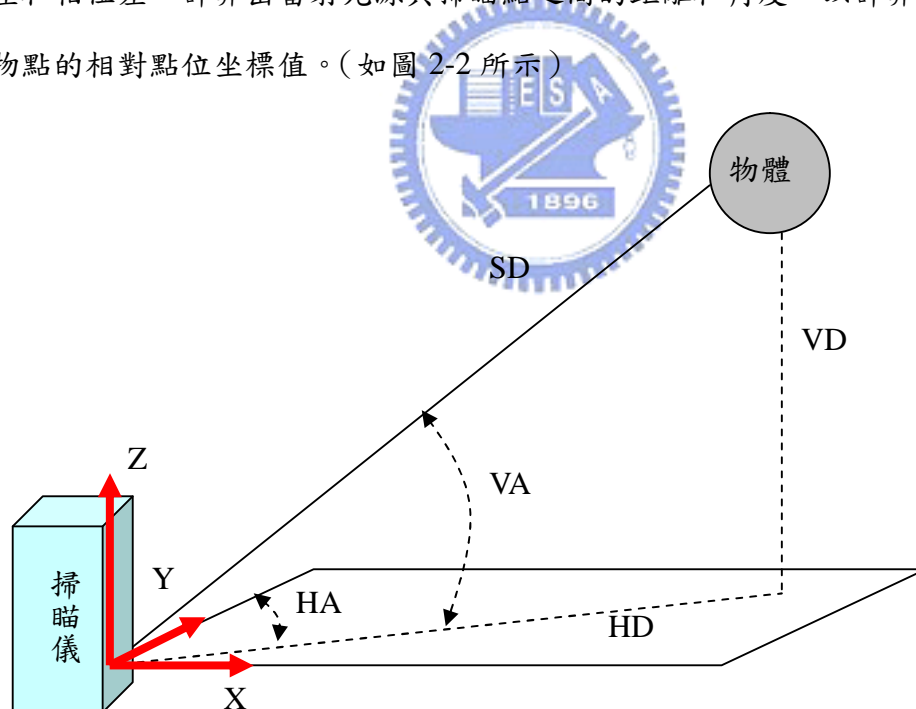


圖 2-2、三維雷射掃瞄儀與物體間相對坐標系示意圖

三維雷射掃瞄儀的優點在於能在最短時間內快速地獲得物體表面大量的空間覆蓋資訊，每秒所能觀測的點位能達萬點之多，瞬間產生大量觀測資料，

因此通常需連接電腦以便即時儲存資料。它提供大量且快速的點位相對坐標值，進而詳實且客觀地描述待測點位之表面特性。三維雷射掃瞄所得到的初步資料是均勻密佈於被測物表面的三維點雲 (Point Cloud)，但外型複雜的地物，例如：儲槽、橋樑等，皆須聯合多測站的觀測點雲資料才能由內業處理結合成一個完整的表面模型。當被測物無法以一次掃瞄涵蓋範圍完整觀測時，則需整合多個測站所產生的點雲來達成任務。然而由於各觀測站的參考坐標系統之不同，因此點雲資料的連結 (Joint) 並非單純的資料合併，必須找尋出參考坐標系統之間的轉換關係，才能解決資料結合的問題。

雷射波長會影響反射的能量，因此所觀測得的反射強度與波長有關，若使用近紅外雷射光會對植物有較強的反射。雷射的觀測有效距離是儀器重要的應用條件，尤其對大型地物或場景的觀測，或是無法接近的地物，皆需要較長的觀測距離。然而，距離越遠的地物觀測精度越差，若要保持儀器所宣稱的測距精度，則觀測距離需在其標準範圍內。三維雷射掃瞄儀的定位精度與測距精度、瞬間視角、水平與垂直角精度皆有關係，所以必須綜合這些所有條件來評估三維雷射掃瞄儀。三維雷射掃瞄儀需要兩種軟體的配合才能發揮功能，一是控制軟體，另一則是資料處理軟體。控制軟體是安裝在與掃瞄儀連接的電腦上，操作員可透過控制軟體的介面指定掃瞄的範圍、密度及一些相關的掃瞄功能，同時監控掃瞄的情形並記錄所有數據。

此外，三維雷射掃瞄儀所得的初步資料是均勻密佈於被測物表面的三維點雲資料尚是隱性 (Implicit) 資料，對於被測物並非顯性 (Explicit) 描述，對大多數的工程測量應用而言，需要將點雲資料進行模型化 (Modeling) 的處理，以便獲得被測物之物件式或圖元式的顯性描述，才能符合需求。單一測站往往無法完整涵蓋複雜或大型的地物，實測時需規劃好觀測網形，使得掃瞄區域能完全涵蓋整個被測物的表面。然而，點雲資料的參考坐標系統是定義於測站位

置、水平面及起始掃瞄方向（或磁北方向），不同測站的點雲資料具有不同的參考坐標系統，因此點雲連結的問題即是求得彼此參考坐標系統的轉換關係，或將所有點雲轉換到一個共同的參考坐標系統。

三維雷射掃瞄儀系統可以用來掃瞄任何物體或實景，進而實現三維立體資訊的採集及資料建模，特別適於不規則構成的大型目標及實景。透過三維的雷射掃瞄，直接將室內外各種大型目標（實體或實景）以三維資料形態的方式量化到電腦中，然後進行目標的綜合測繪、三維建模、立體編輯及分析處理等後處理工作，其主要的技術應用包含：

1. 三維的、徹底的、直接的向量化實體目標。
2. 大量採集之三維資料可對目標進行各種分析處理。
3. 可對目標進行三維資料模型的重建。
4. 提供其他 3D 設計軟體（如：Microstation）及管理軟體所需之模型及資料。
5. 將掃瞄之目標物可數化後轉到其他軟體作景觀設計、照明模擬。
6. 可利用物件重組軟體將掃瞄後之各零組件、殘骸物重新組合，以了解與原設計之差異。
7. 目標物掃瞄數化後可提供點位比對，分析受力前後之全面變化情形。

### 2-1-3 三維雷射掃瞄儀量測原理

本節簡單介紹本研究所使用之三維雷射掃瞄儀的原理。由儀器本身發射出雷射光束，接觸到物體表面後反射再接收所反射之訊號，經由相位或脈衝時間差的計算，可推求出被測物與掃瞄儀之間的斜距，配合掃瞄的水平與垂直方向角，可推求得每一掃瞄點與測站之三度空間相對坐標差，再配合掃瞄角度的不同，可以計算出掃瞄儀中心至測點的三維坐標差（即為相對坐標值），且可同時記錄回訊之強度值。基本原理依三維雷射掃瞄量測原理不同主要可分為三角法和時間差量測兩種：

#### （一）三角法（triangulation）

此方法利用三角形幾何關係求得距離。先由掃瞄儀發射雷射光到待測物體表面，經由入射光與反射光之間的夾角，利用在基線另一端之相機接收物體反射之訊號，且雷射光源與CCD之間的基線長度經率定已知，經由三角形幾何關係推求雷射掃瞄儀與待測物體之間之距離。採用此種方法的三維雷射掃瞄在近距離（小於2公尺）的精度較時間差系統為佳，其最大測距範圍也較短，測距精度與本身基線長度有關。而另外一種三角法是採用兩台各自架設在基線兩端的相機，接收經待測物體反射之訊號，計算雷射掃瞄儀與物體間之距離。

1. 單相機三角量測法（Triangulation principle-single camera solution）：如圖2-3示意圖，利用雷射光撞擊於待測點上時，瞬間由另一側之相機攝影該光點形成三角關係，而雷射頭與相機位置為固定基線長度，藉以計算待測點之坐標位置。



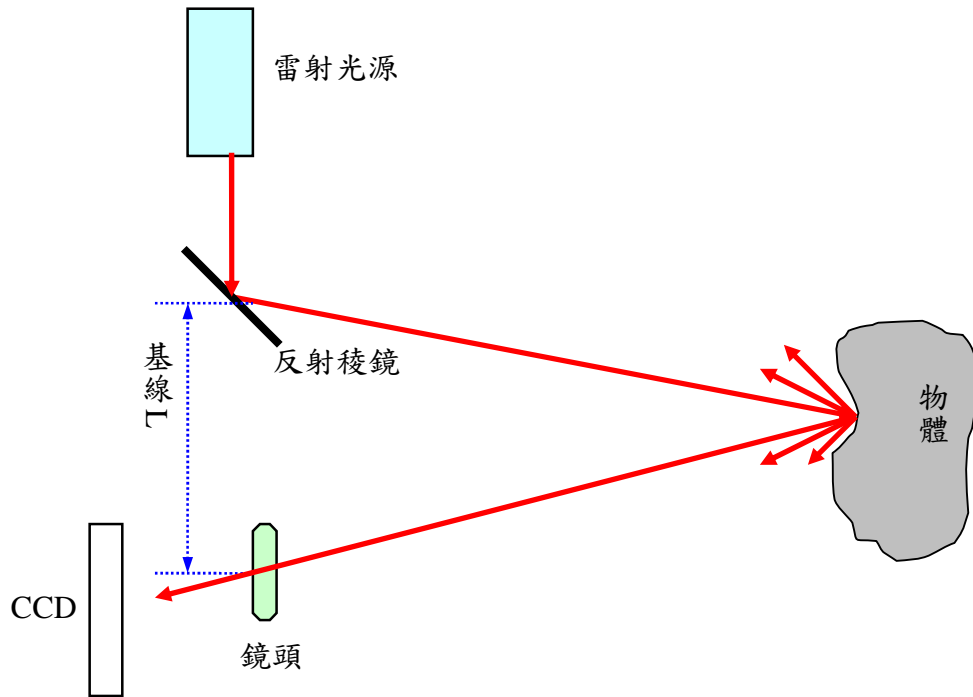


圖 2-3、三角法：單相機法（修改自 Boehler,2001）

2. 雙相機三角量測法 (Triangulation principle-double camera solution)：利用雷射光撞擊於待測點上時，瞬間由兩側之相機攝影該光點形成三角關係，而兩相機位置為固定基線長度，藉以計算待測點之坐標位置。

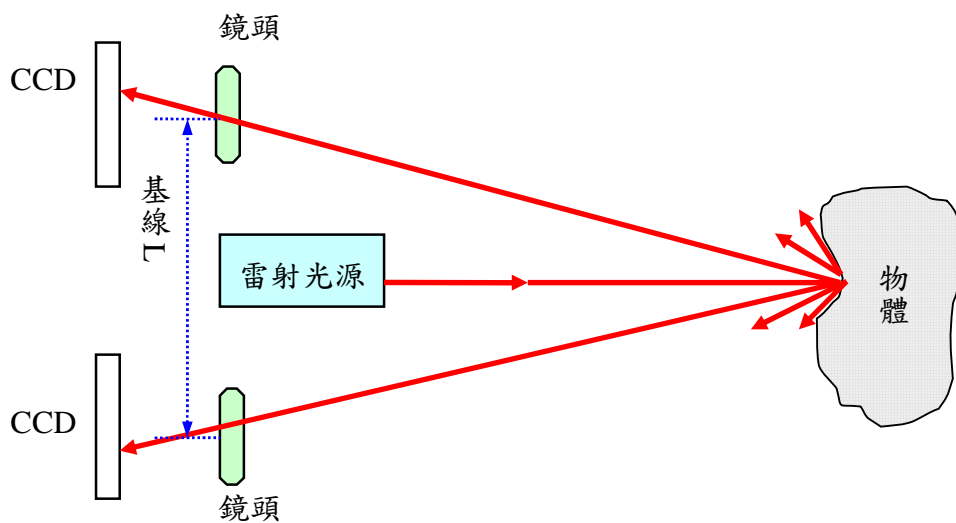


圖 2-4、三角法：雙相機法（修改自 Boehler,2001）

## (二) 時間差量測 (Time-of-Flight)

由雷射掃瞄儀發射出脈衝雷射光到物體表面，再接收經由物體表面反射回來的訊號，計算往返時間長度，求得雷射掃瞄儀與待測點之間的距離。採用此種方法的掃瞄儀比起三角法 (triangulation) 可測量較遠的距離，但在近距離時，精度卻顯得較差。一般而言，誤差仍隨著距離增加而增。

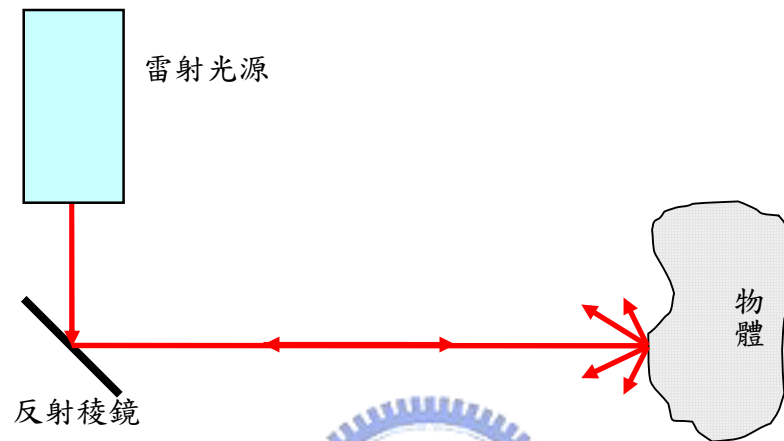


圖 2-5、時間差量測法示意圖 (修改自 Boehler,2001)

### 2-1-4 座標轉換

掃瞄儀坐標系與物空間坐標系之關係可表示如圖 2-6 所示，其中 S 為掃瞄儀的位置，P 點為待測點的位置（三維雷射掃瞄儀坐標系原點），O 點為物空間坐標系的原點。 $\rho$  為 S 到 P 之間的距離， $\alpha$  為 S 與 P 點之間的垂直角， $\theta$  為其水平角。

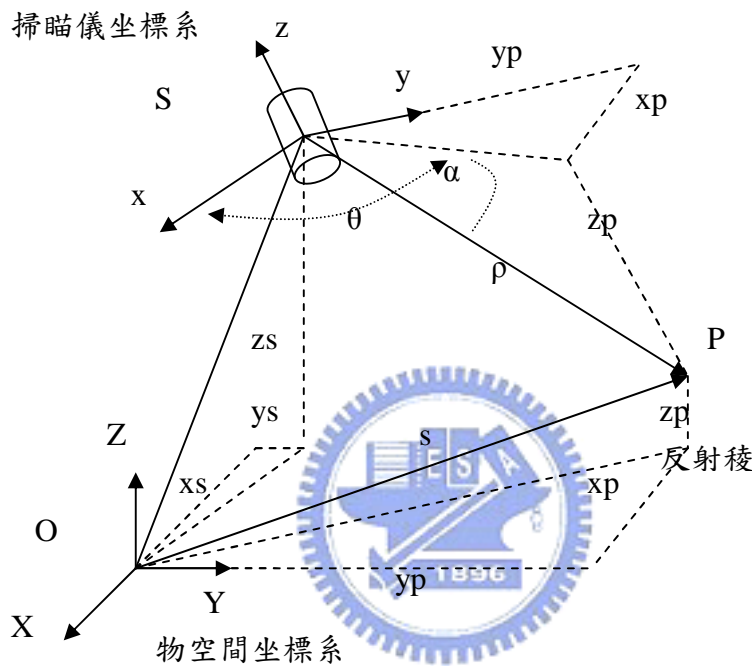


圖 2-6、掃瞄儀坐標系與物空間坐標系之關係圖（修改自 Lichti et al，2000）

由掃瞄坐標系轉換到物空間坐標系的數學式可寫成如下面公式所示，利用三個或以上的物空間之已知控制點坐標進行轉換（Lichti et al.，2002）。

$$\vec{R}_p = M \vec{r}_p + \vec{R}_s$$

$\vec{r}_p = [x_p \quad y_p \quad z_p]^T$ ：P 點在掃瞄坐標系中的坐標向量。

$\vec{R}_p = [X_p \quad Y_p \quad Z_p]^T$ ：P 點在物空間坐標系中的坐標向量。

$\vec{R}_s = [X_s \quad Y_s \quad Z_s]^T$ ：掃瞄坐標系原點 S 在物空間坐標系的坐標向量。

M 為一分別繞 X、Y、Z 軸旋轉 ( $\omega$ 、 $\phi$ 、 $\kappa$ ) 角度之旋轉矩陣。

$$M = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix}$$

而公式  $\vec{R}_p = M \vec{r}_p + \vec{R}_s$  亦可改寫成：
$$\vec{r}_p = M^{-1} \left( \vec{R}_p - \vec{R}_s \right)$$

### 2-1-5 三維雷射掃瞄儀誤差來源

以三維雷射掃瞄儀掃瞄後可快速得到大量密佈於被測物的點雲，但此些大量密佈之點雲中可能含有許多種誤差，這些誤差的來源可能跟儀器自身之掃瞄震動或環境因素以及人為操作等等原因有關。就針對可能影響點雲坐標值的誤差類型進行分類，並對這類誤差的可能來源加以說明。依傳統測量對觀測誤差的基本概念，將這些誤差分成以下三類：

#### A. 錯誤(mistakes)：

以人為誤差為例大多是因為儀器操作不當或數據處理步驟錯誤所造成，只要小心謹慎便能減少此類誤差的產生。此外由於三維雷射掃瞄儀測距是由物體反射回來的訊號的時間，透過計算得出掃瞄儀與待測物之間的距離，但是雷射遇到強反射物（如：反射規標）時，會在物體前端產生許多的散射點，使得三維雷射掃瞄儀獲得的回訊可能不只一個，此稱為多路徑效應，而多路徑效應普遍發生在掃瞄強反射的物體表面、近距離對於待測物進行掃瞄工作以及在掃瞄物體角落時發生（Runne et al, 2001），亦可能會產生較大的距離誤差，此亦為一般測量作業中所見之錯誤，通常這種較大的距離誤差可以透過人眼判斷或是點雲濾除門檻值的設定而消除掉，但是對於產生在角落凹面較小的誤差，便會對點雲產生不確定的距離誤差。故為避免此些誤差通常須事後重測或重複的觀測將有利於錯誤的偵除。

## B. 系統性誤差(systematic errors):

系統性誤差則是具有系統性或規律的誤差，產生原因主要是儀器的率定不夠完善，例如當製造廠商儀器率定工作不嚴謹或儀器長久使用未送回原廠檢修，便容易使得儀器掃瞄得資料有系統性誤差存在。而系統性誤差又主要有測距誤差、掃瞄角誤差、參考原點誤差、比例尺誤差以及坐標軸方向誤差等等因素。有時環境的因素也可能會造成系統性誤差的行為。此種誤差是可以被發現的，例如雷射光束的寬度可能提高雷射測距儀在測距準確度上的偏移量，特別是在雷射光束在特定的入射角度，其回訊無法準確被掃瞄儀判別時所產生。這樣的誤差  $\Delta\rho = \frac{\rho\delta}{2 \tan \varphi}$ ，其中  $\Delta\rho$  為測距的誤差， $\rho$  為產生  $\Delta\rho$  誤差所處的距離， $\varphi$  為雷射入射角， $\delta$  為雷射光束在待測物上產生的雷射點直徑 (Lichti, 2005)。以上述為例只要在掃瞄作業前，能透過適合檢定方法來確定儀器之系統性誤並加以校正，將可避免因誤差造成掃瞄點雲資料精度過差，而提高資料的正確性。



## C. 偶然誤差(accidental errors) :

偶然誤差是無法以系統性參數描述的誤差，其大小及符號呈現”偶然性”且不可預期，隨機誤差量的統計性質通常偏向正常分佈。雷射掃瞄的隨機誤差的中誤差可由雷射測距儀的測距精度及反射稜鏡的測角精度來推估，此中誤差直接反應儀器本身的定位能力。

## 第三章 目標物顏色因子與反射強度關係之研究

### 3-1 實驗掃瞄工作規劃

此章節旨在研究目標物顏色因子與反射強度之關係，由前面可知物體的顏色與照射光線有關，而絕大多數掃瞄外業工作都處於可見光之照射下，故本實驗執行環境模擬成一般外業環境，即在一般可見光環境中進行，但未免於室外掃瞄時受日光直接照射而影響掃瞄成果(粘基非，2005)，故實驗場地的選擇於交通大學土木工程系214教室內進行。

本研究所使用之Trimble GS200三維雷射掃瞄儀架設方法與傳統儀器相同，但三維雷射掃瞄儀之優點在於無須定心定平，但在一般掃瞄外業上卻必須另設置至少三個共軛點位，作為測站與測站之間的點雲的相互連結之用，而在共軛球點位上增加靜態GPS測量或是結合多主站RTK系統可將掃瞄得到之點位相對坐標值，換算為WGS84或TWD97等常用之坐標系統，再利用空間後方交會法(Space resection)，可計算出三維雷射掃瞄儀中心之坐標。由於本次實驗於室內環境下執行，儀器不進行移動，故不需設置共軛點。此外一般測量外業於待測物表面佈設控制規標點位，目的在於透過控制規標測量出精確的點位，以供後續需高精度內業處理上應用。而本研究亦於目標物上佈設規標除作為查驗最適平面精度之用外，亦可作為檢查儀器是否有因掃瞄時的震動而有所改變。

本次外業掃瞄皆採用高精度高密度掃瞄，目的為了求出最適平面方程式並探討目標物顏色因子與反射強度之關係，外業規劃掃瞄流程如圖3-1所示。

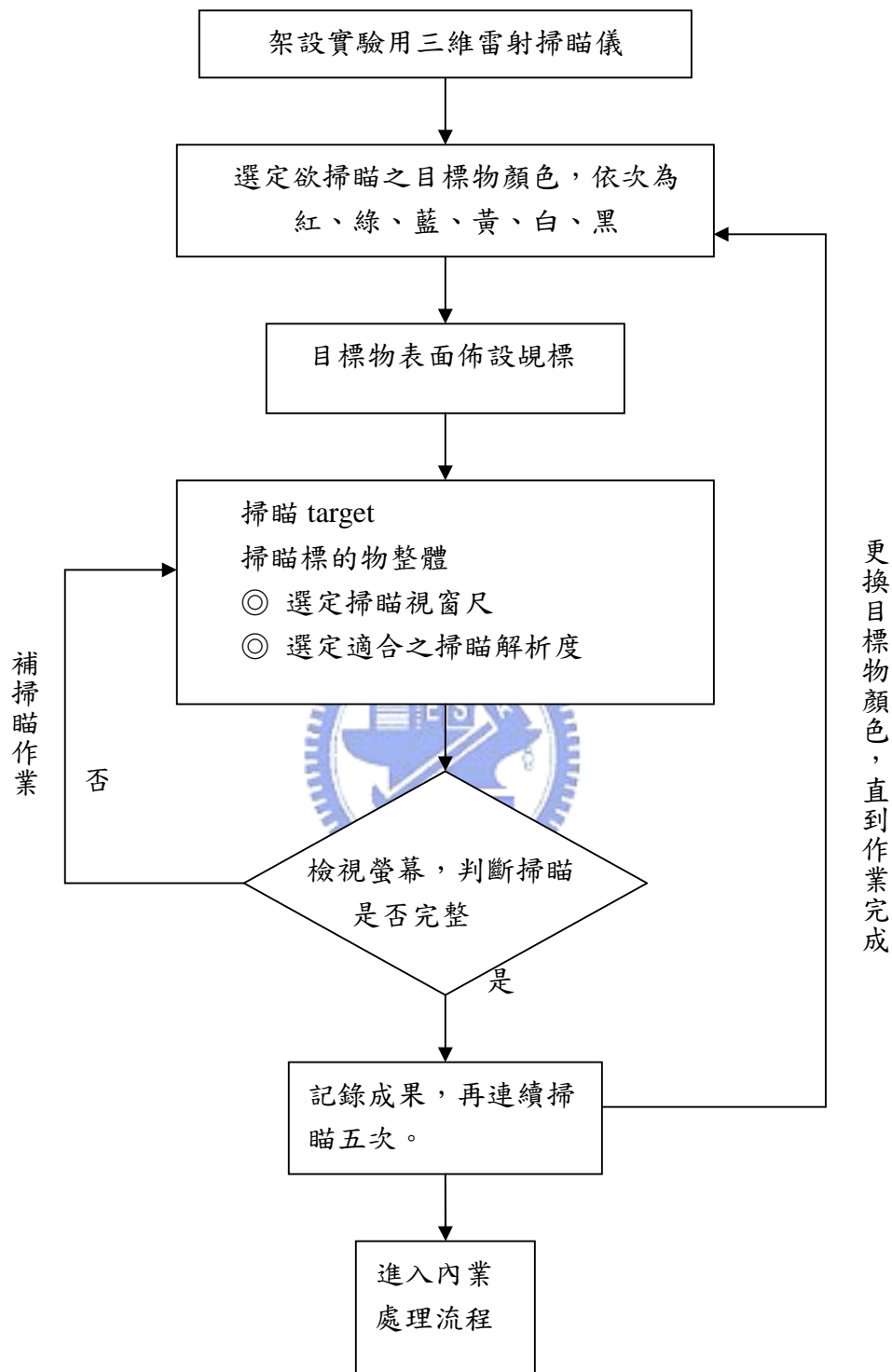


圖 3-1、外業掃瞄流程圖

### 3-2 使用儀器、軟體說明

本實驗所採用三維雷射掃瞄儀為Trimble公司生產的 GS200型，其規格如表3-1所示，Trimble GS200型操作軟體為Trimble Point Scape 2.1。掃瞄後所得之三維點雲資料處理以Real Works Survey 4.1進行處理，例如：原始掃瞄點雲雜訊濾除、點雲切割、資料格式的輸出等工作。三維點雲資料分類程式以Microsoft Visual Basic 6.0撰寫。

本實驗所採用之三維雷射掃瞄儀由於是利用測角、測距來推算物體的相對坐標值，因此儀器掃瞄點雲的精度亦與儀器有效掃瞄距離有關。下圖3-2則為Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀在各不同距離時儀器之標準誤差。

表3-1、Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀規格 (Trimble, 2005)

使用介面	Windows XP/NT/2000
動態放射	8bits
資料介面	筆記型電腦/PDA (TCP/IP或無線網路Wifi)
掃瞄視角	水平：360度 (400g) 垂直：上、下各30度
電源	交流：AC 110-240V-50/60Hz 直流：DC 24V nominal
掃瞄速度	每秒5000點
覘標規格	20 MENSII scan targets
光點尺寸、顏色	3 mm/50 m、綠光
最小解析度	3 mm at 100 m



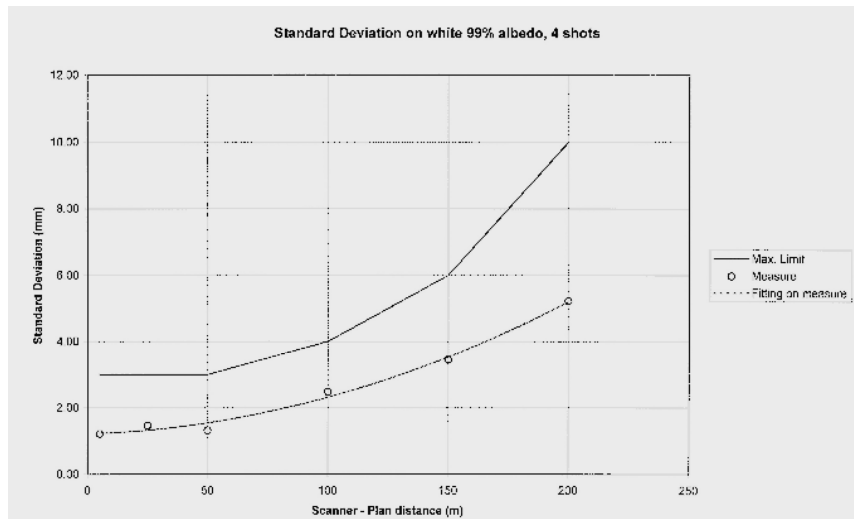


圖3-2、Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀距離與掃瞄精度關係圖 (Mensi, 2005)

本實驗點雲資料可以坐標值：X、Y、Z；強度值：intensity；色階值：R、G、B格式輸出，其中由於點雲強度值最小為0，最大為255，因此針對強度值(intensity)的大小，以Microsoft Visual Basic 6.0撰寫一個分類強度值大小的程式，將點雲依照強度值不同分成28組區段(Degree)(第一組強度為0，第二組強度為1~10，第三組強度為11~20...以此類推，第28組強度為255)，圖3-3為點雲分類程式，而表3-2為經程式分類後各組強度值的表示方法。

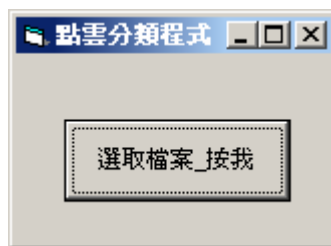


圖 3-3、點雲分類程式

表3-2、強度值分類表

Intensity	0	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255

### 3-3 實驗資料與實驗設計

#### 3-3-1 實驗資料

本實驗所使用之點雲資料為Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀掃瞄觀測所得，得到的資料除了有各個點雲相對於三維雷射掃瞄儀的三維相對坐標X、Y、Z，Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀尚可輸出各點雲之強度值(intensity)與色階值(R、G、B)。點雲資料利用Real Works Survey 4.1將包含上述格式之資料輸出，並匯入Microsoft Office Access中，如圖3-4所示。

實驗的主要目的在於將觀測所得到的點雲資料，以上述格式輸出，以探討目標物在不同顏色時其強度質與色階值的關係。

識別碼	X	Y	Z	intensity	R	G	B
3292	-972.16	4918.15	-128.02	50	210	177	101
8509	-804.7	4955.27	236.76	54	192	166	88
6471	-871.24	4940.8	4.28	56	208	175	99
7728	-830.36	4941.69	-95.9	56	205	178	87
4285	-941.27	4922.8	-156.04	57	208	180	98
8122	-818.25	4941.24	-184.23	58	206	181	96
3374	-970.03	4924.35	36.11	58	204	177	102
7053	-852.04	4946.41	140.31	59	199	170	86
2956	-983.35	4925.38	229.05	59	176	168	102
7804	-827.74	4949.57	96.17	61	199	171	89
9679	-768.1	4955.46	8.3	62	200	172	88
5954	-886.94	4938.55	92.3	63	206	178	96
9659	-768.06	4957.76	88.25	63	200	175	92
4668	-928.24	4923.73	-212.45	64	209	176	100
10163	-752.39	4956.67	48.16	64	204	180	90
3079	-978.84	4926.34	228.79	64	170	161	95
5573	-899.68	4937.91	128.2	64	200	175	92
4426	-936.49	4923.4	-232.5	64	210	181	97
6078	-883.42	4939.44	92.13	65	205	177	93
6297	-876.43	4943.56	204.61	65	200	171	94
6860	-858.79	4937.59	-76.03	65	205	176	99
10244	-749.44	4964.44	220.7	65	197	169	87
4006	-949.42	4925.88	-27.89	65	204	180	99
6140	-882.34	4932.26	-156.34	66	209	177	92
10199	-751.84	4957.27	-95.96	66	207	180	89
2871	-985.44	4922.21	72.07	66	201	181	96
10095	-755.13	4952.04	-176.19	67	208	176	91
3961	-950.81	4930.39	152.57	67	197	177	88
7711	-830.75	4944.52	-27.79	67	204	179	94
4841	-922.68	4933.13	88.11	67	198	173	86
9036	-788.12	4954.11	107.97	68	198	175	91
6826	-859.17	4942.63	60.03	68	199	171	89
7403	-841.07	4949.85	220.88	68	195	170	87
9637	-768.38	4960.2	180.6	68	198	172	94
4726	-926.58	4930.35	52.23	68	203	179	89
7769	-828.42	4951.78	236.78	68	197	174	90
8227	-814.41	4944.77	-115.97	68	204	177	86
4156	-945.21	4924.8	-132.27	69	205	175	103
8686	-799.89	4950.41	24.25	69	208	176	93
8129	-817.74	4942.22	-212.31	69	212	184	102

圖 3-4、點雲資料匯入 Microsoft Office Access

### 3-3-1-1 內業資料處理流程

經三維掃瞄儀掃瞄後之資料為原始點雲資料，由於在掃瞄時是以掃瞄整體目標物進行，故必須將欲分析部份的部份切割出來，除確保資料的正確性外，亦可作為初步雜訊之濾除。如圖3-5所示，紅色空選範圍為本實驗所需點雲資料。又三維雷射掃瞄儀的點雲資料易受到空氣中粒子的影響而產生額外的雜訊，而這些雜訊所呈現之顏色並不是本實驗欲探討之顏色，故所得之原始點雲資料需先經過濾除動作，已確保資料的正確。除此之外原佈設於目標物上以作為控制點為之規標，因屬於強反射物質，使掃瞄後規標外框點雲會呈現白色雜訊，並非實驗中所佈置的顏色，為後續資料處理上的正確性，需將其剔除，以保資料的正確。圖3-6所示。分割出的點雲資料以Real Works Survey 4.1內建之點雲格式轉換程式，將點雲以包含X、Y、Z坐標值；Intensity強度值；R、G、B色階值的資料格式輸出。利用包含坐標直、強度值、色階值的資料，經自行撰寫之點雲分類程式將點雲資料依照強度值大小不同，分類成28個區段，以供後續分析目標物顏色因子與反射強度之關係。內業資料處理流程如圖3-7所示。

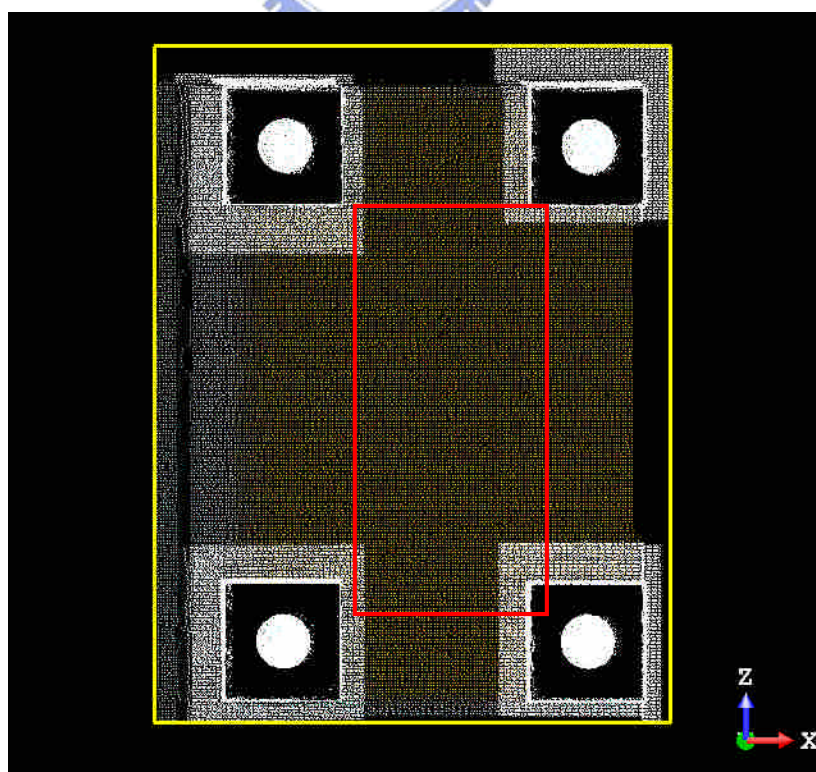


圖3-5、點雲初步分割，紅色匡選處為選取部分

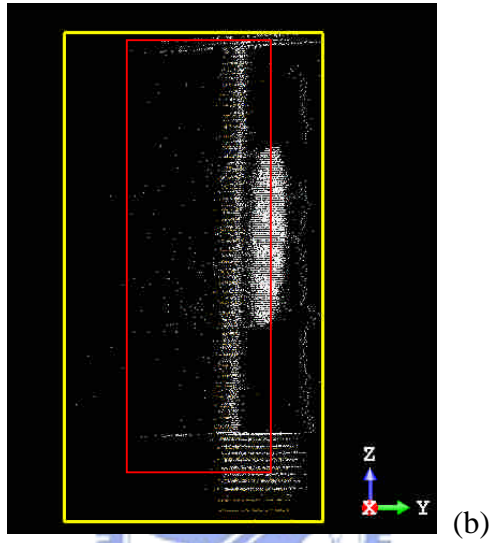
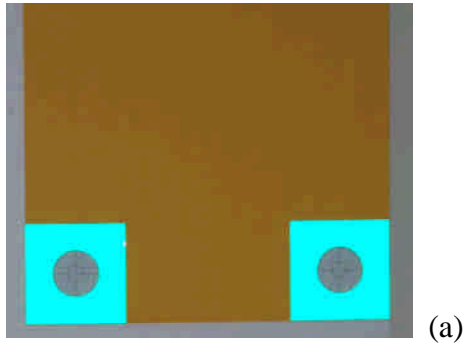
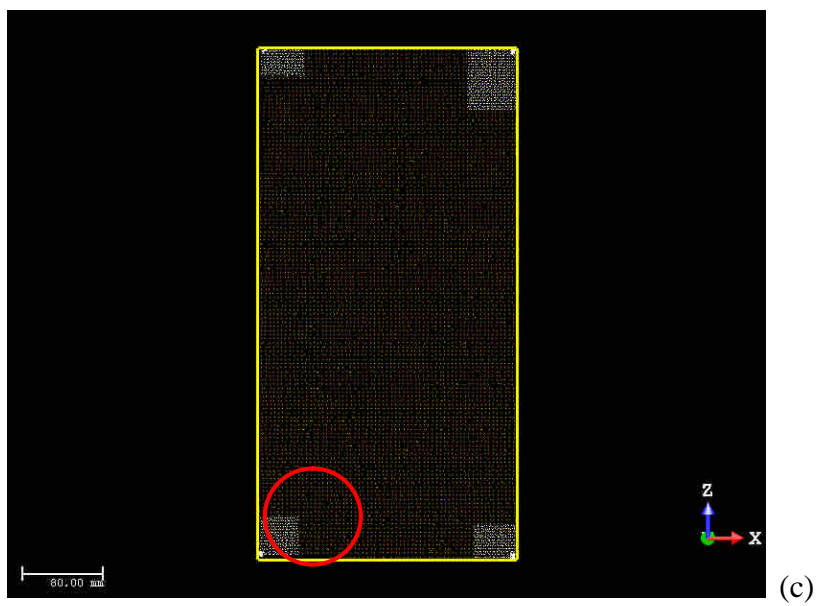


圖 3-6、控制規標

(a)規標於掃瞄時強反射反應圖(b)強反射部分易造成雜訊(紅色框)

(c)切割後然有殘餘雜訊呈現白色(紅色框)



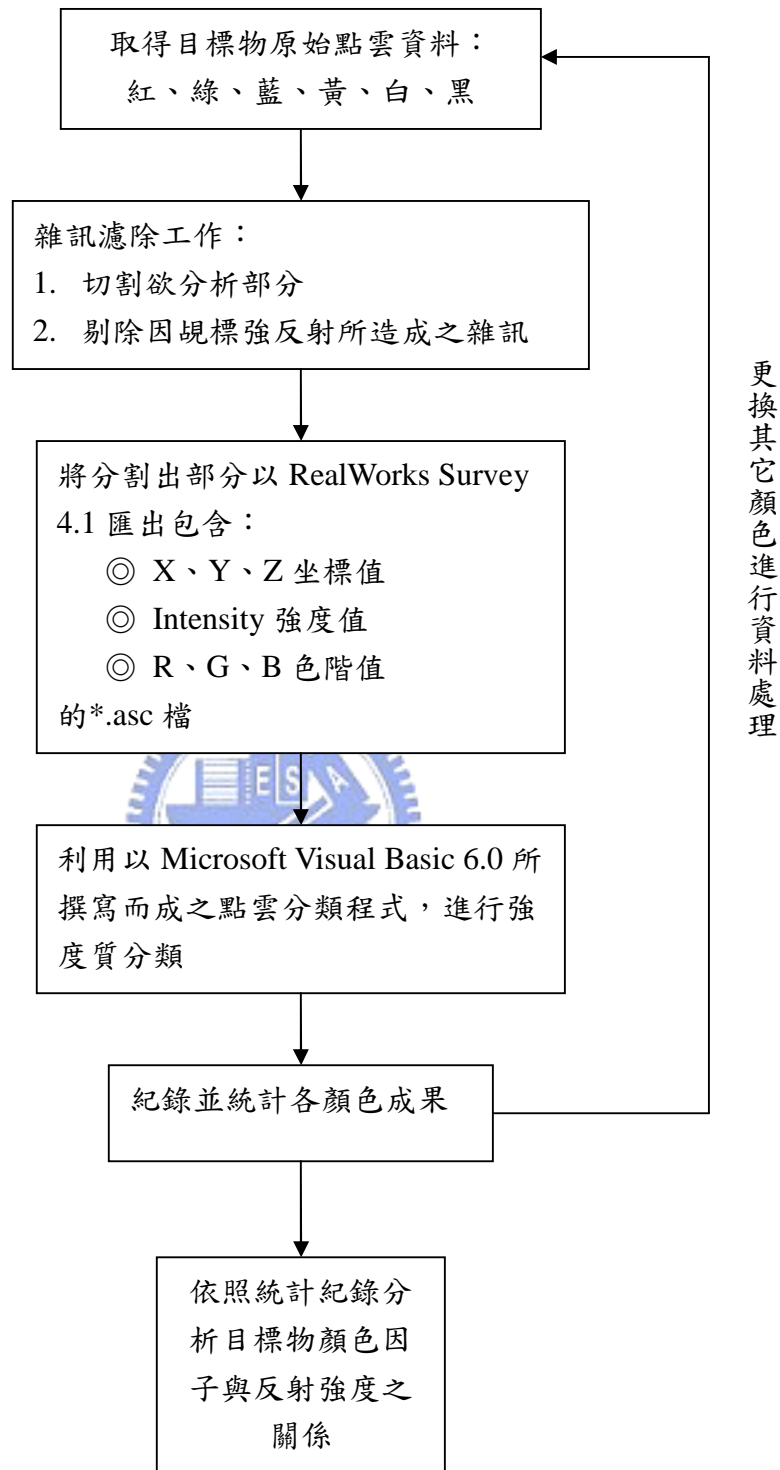


圖 3-7、內業處理點雲流程圖

### 3-3-2 實驗設計

本研究實驗區選在交通大學工程二館 214 教室內進行，是由於一般掃瞄觀測下，待測物顏色為經可見光反射後所呈現的顏色，故實驗場需選擇相同條件下進行觀測，但為避免因陽光直射目標物而易造成雜訊的狀況產生，選擇室內環境較佳。目標物的架設，本實驗將壓克力版佈設在牆面上，再將欲掃瞄之各式顏色色紙黏貼於壓克力版上，並在色紙上貼控制用規標。實驗中先掃瞄目標物上所佈設的四控制規標(Target)，再對於整個目標物進行高密度的掃瞄工作，掃瞄時採垂直正向掃瞄目標物並依照實驗之掃瞄順序，先掃瞄四個控制規標，再掃瞄整體目標物之五次掃瞄作業，且在五次掃瞄中不搬移或關機，也不旋轉儀器掃瞄角度，以盡量減少可能影響精度的外在因素。如圖 3-8 為實驗場目標物與儀器擺放示意圖，圖 3-9 實驗場目標物與儀器擺放位置圖，圖 3-10 為各種顏色目標物設計與規標佈設圖。

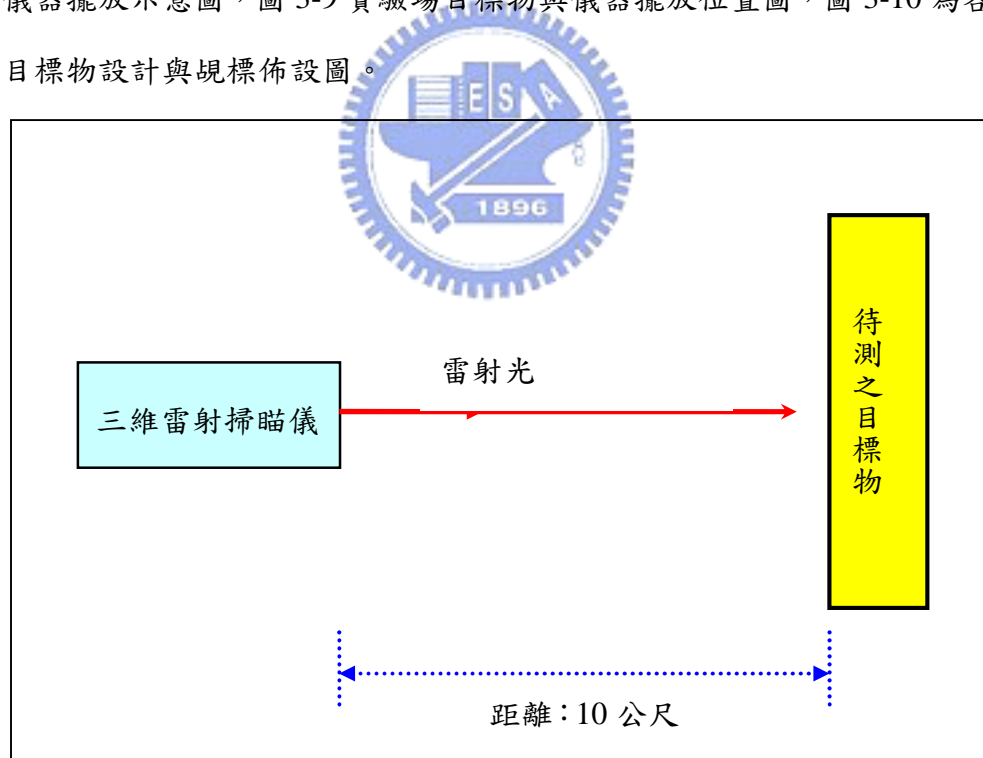


圖 3-8、實驗場目標物與儀器擺放示意圖



圖 3-9、實驗場目標物與儀器擺放位置圖

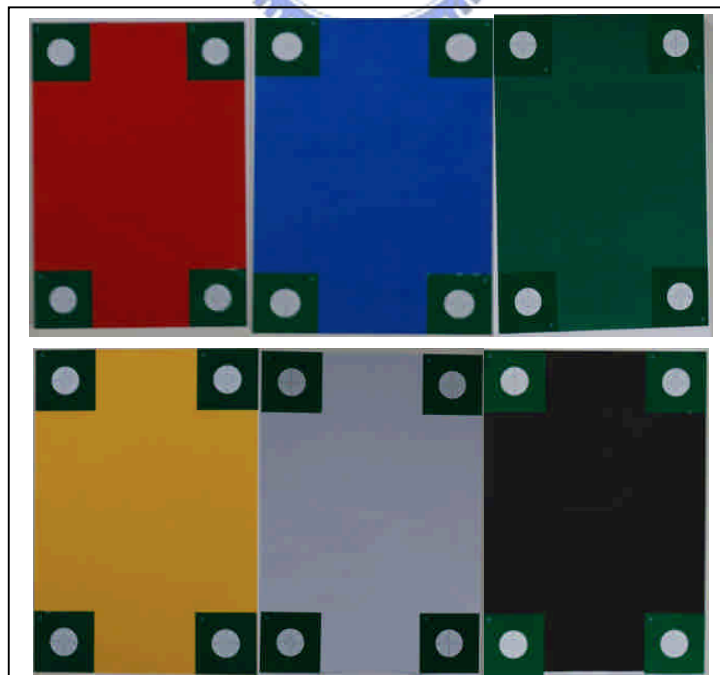


圖3-10、目標物與規標佈設圖：紅、綠、藍、黃、白、黑六種顏色目標物

再將五次掃瞄所得控制規標以 XYZ 坐標直輸出，並檢視五次規標坐標是否有偏移。由於本次掃瞄由於地面屬較為穩固的材質，因此五次掃瞄規標所得之相對坐標值差距甚小（最大變化量約在 0.1 mm），確認目標物的設置無偏移後，將四個控制規標五次掃瞄所得的相對坐標值進行平均的工作，作為本次控制規標點相對坐標值。掃瞄所得原始資料，以 3-3-1 節所述內業資料處理流程，分割後之點雲資料中的強度值，由小至大以強度值 10 為一個區段，分成 28 個強度值區段，以供後續分析目標物顏色因子與反射強度之關係。圖 3-10 為掃瞄之點雲成果。

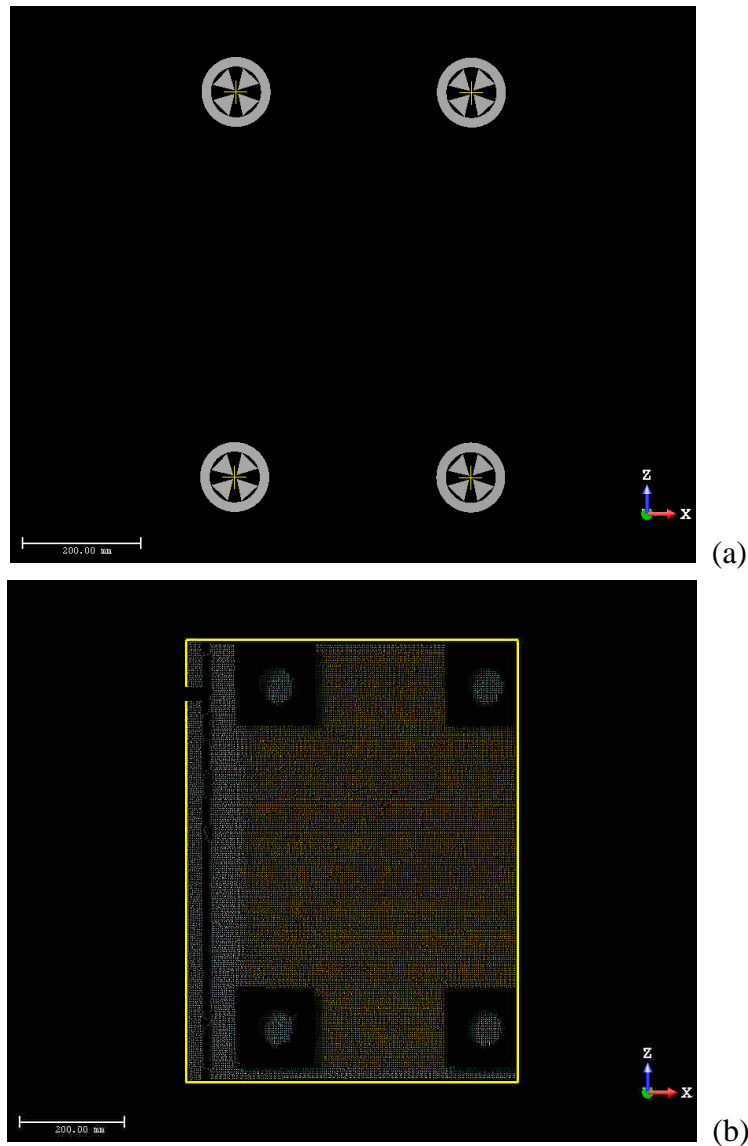



圖 3-11、掃瞄之點雲成果圖

(a)規標(Target)掃瞄成果，(b)目標物經高解析掃瞄之點雲成果



### 3-4 目標物顏色因子與反射強度之關係

本章節為研究目標物顏色因子與反射強度之關係實驗，以三維雷射掃瞄儀高解析掃瞄後所得到之點雲資料進行分析，利用點雲資料中的強度值以及色階值，進行資料統計與分析，驗證是否亮色系目標物具有較佳反射強度，以及各種顏色的目標物的反射強度值分布情形。經由 3-3 節中所述實驗方法，將六種目標物顏色，先以五次作業後之點雲成果資料分割出欲分析部分，再將分割後之點雲依強度值大小不同進行分類，統計每次作業所得點雲之強度值區段的點雲數量，並將五次成果紀錄和平均。成果如表 3-4、表 3-6、表 3-8、表 3-10、表 3-12 和表 3-14 所示。上述 6 個表中 Intensity 為強度值，以每強度值相差 10 為一個區段(Degree)共分為 28 個區段如表 3-2 所示；數量(五次掃瞄之平均)為每次掃瞄後各強度值 Degree 的平均值。



此外為證明目標物經三維雷射掃瞄儀掃描後其顏色仍為當初以肉眼選定之顏色，以紅色目標物為例，當目標物以紅色為掃瞄目標時，先利用Real works 4.1 轉檔功能以\*.asc格式檔輸出RGB值，再將RGB平均值輸入Photoshop的檢色器功能，觀察經掃瞄後的顏色是否會受到雷射光影響使得掃瞄前後顏色具有差異。圖、左為紅色目標物RGB值輸入檢色器並與右邊數位相機影像顏色比較，表、為紅色目標物四次掃瞄R、G、B各自的平均值以及將四次平均值再做一總平均值，由於Photoshop 檢色器僅可輸入整數，故將其中總平均值以四捨五入方式顯示。

#### (一) 紅色目標物強度值統計與分布情形：

由於紅色目標物之第三次掃瞄檔案毀損，故在後續資料呈現時，紅色目標物僅以其中正確的四次資料為計算資料，由表、可看出四次掃瞄中紅色目標物R的強度值範圍為：R值平均為143、最高143.53、最低142.64，最高與最低強度值相差0.89；G值平均為58、最高58.38、最低58.03，最高與最低強度值相差0.35；

B值平均為59、最高59.52、最低59.22，最高與最低強度值相差0.30。四次掃瞄RGB差異性甚小，依此RGB值輸入Photoshop 檢色器並與數位相機之影像顏色進行比較，由圖3-11可看出三維雷射掃描儀之影像較相機影像亮，原因該是因室內攝影下無閃光燈拍攝，故相機影像看起來較暗，且三維雷射掃描儀相機CCD顏色呈現也不同，但仍為紅色的顏色呈現。

表3-3、紅色目標物四次掃瞄RGB強度值平均表

紅色	第 1 次掃瞄	第 2 次掃瞄	第 4 次掃瞄	第 5 次掃瞄	平均
R	142.64	142.66	142.91	143.53	143
G	58.17	58.03	58.32	58.38	58
B	59.22	59.30	59.52	59.42	59

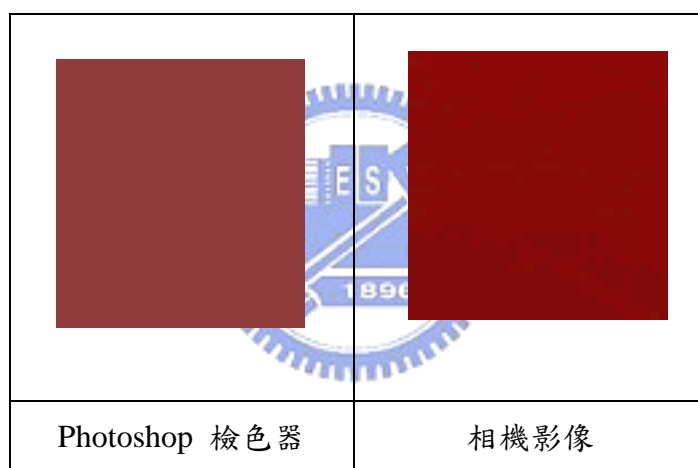


圖 3-12、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(紅色)

將原始資料依照強度值大小區段，統計其強度值分布情形並紀錄成表，並以四次掃瞄之平均數量作依統計，紅色目標物點雲數量總數平均為 7708 個，並由表 3-4 可知紅色目標物於高反射值如強度值 181~225 部份幾乎完全沒有，僅強度值於 225 時出現一點佔整體數量 0.0032%；中反射強度如強度值範圍：91~180 點雲數量佔整體 0.0487%；而低反射強度範圍：低反射強度值 0~90 佔整體 99.9481%，又細分其分布可發現近 95% 數量集中在強度值 11~20(49.9481%)、強度值 21~30(27.114%)和 31~10(9.9734%)，初步可瞭解紅色目標物屬於低強度值顏色，再將表 3-4 以直方圖顯示，由圖 3-12 可看出紅色目

標物顏色分佈趨近於常態分布且分布集中，資料大都集中在強度值 1~40 之間。

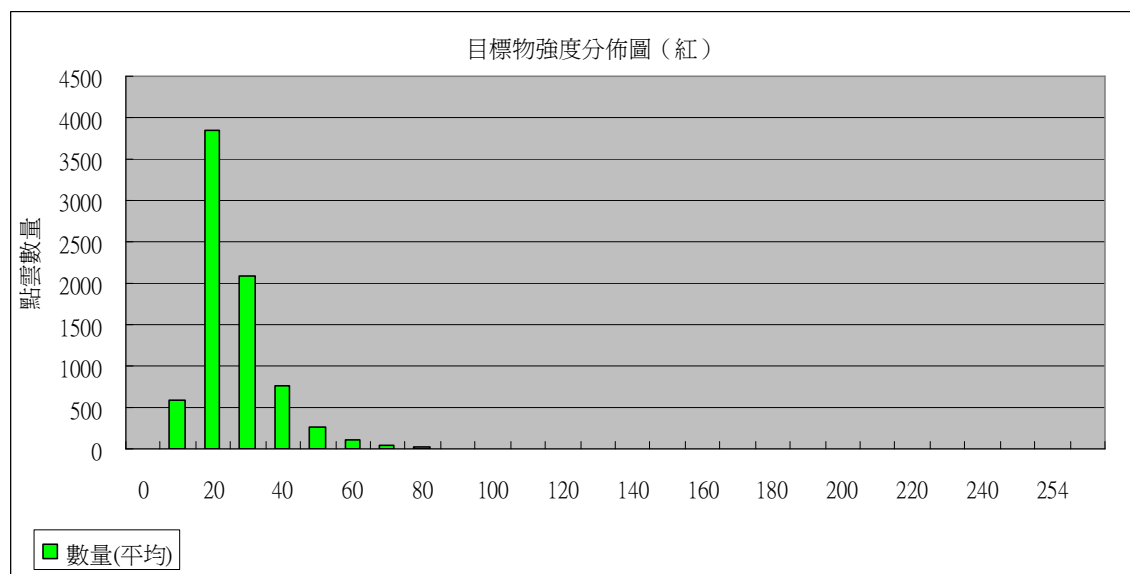


圖 3-12、紅色目標物強度值分布直方圖

表3-4、紅色目標物其各強度值區段點雲數統計表

Intensity	0	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
數量(平均)	0.00	581.50	3850.00	2089.75	768.75	265.00	99.75
所佔比例(%)	0.0000	7.5441	49.9481	27.1114	9.9734	3.4380	1.2941
Intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
數量(平均)	32.75	13.00	3.50	2.75	0.50	0.00	0.50
所佔比例(%)	0.4249	0.1687	0.0454	0.0357	0.0065	0.0000	0.0065
Intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
數量(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255
數量(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032

(二) 綠色目標物強度值統計與分布情形：

以綠色目標物進行掃瞄，由表3-5可看出五次掃瞄中綠色目標物R、G、B的色階值範圍為：R強度值平均為52、最高52.64、最低50.88，最高與最低強度值

相差1.76；G強度值平均為107、最高107.87、最低106.61，最高與最低強度值相差1.26；G強度值平均為80、最高81.24、最低79.18，最高與最低強度值相差2.06。RGB三者差異性甚小，亦以此R、G、B色階整數平均值輸入Photoshop 檢色器，並由圖3-13可看出左邊以三維雷射掃瞄儀得到之綠色影像與數位相機綠色影像，除亮度較暗外，顏色呈現仍相同。

表3-5、綠色目標物五次掃瞄RGB強度值平均表

綠色	第 1 次掃瞄	第 2 次掃瞄	第 3 次掃瞄	第 4 次掃瞄	第 5 次掃瞄	平均
R 強度值	52.13	52.64	51.08	50.88	51.44	52
G 強度值	107.87	106.61	107.01	107.01	106.69	107
B 強度值	81.24	80.07	79.98	79.69	79.18	80

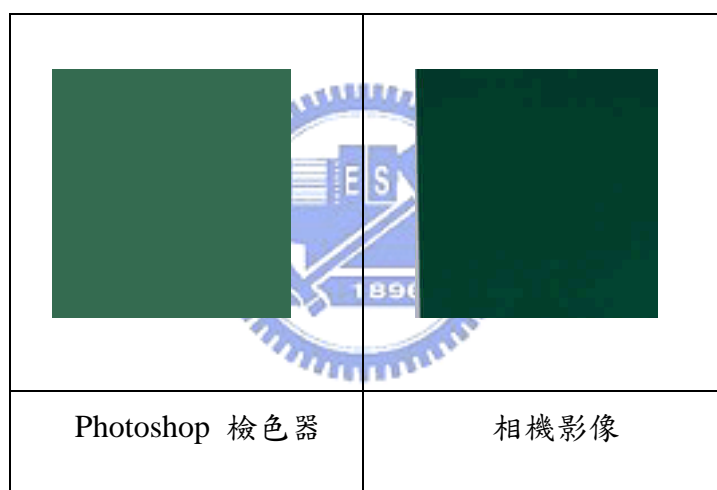


圖 3-13、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(綠色)

綠色目標物資料以五次掃瞄成果進行統計，經統計後其點雲總數平均為7675.80個，將成果紀錄成表3-6，由表3-6可看出綠色目標物在低反射強度範圍：強度值0~90佔整體數量之65.0720%；於中反射強度範圍：強度值91~180佔整體34.1489%；而高反射強度範圍：181~255則只佔整體之0.7791%，再深入瞭解可發現強度值的佔整體數量之95%分布在強度值30~140之間，其中強度值51~100就佔整體數量之68.6573%，由此了解綠色目標物屬於中強度值反應顏色。再將表3-6之資料以直方圖顯示，由圖3-14看出綠色目標物顏色分佈亦趨近於常態分布但資料分布較紅色離散，資料大都集中在強度值30~140之

間。

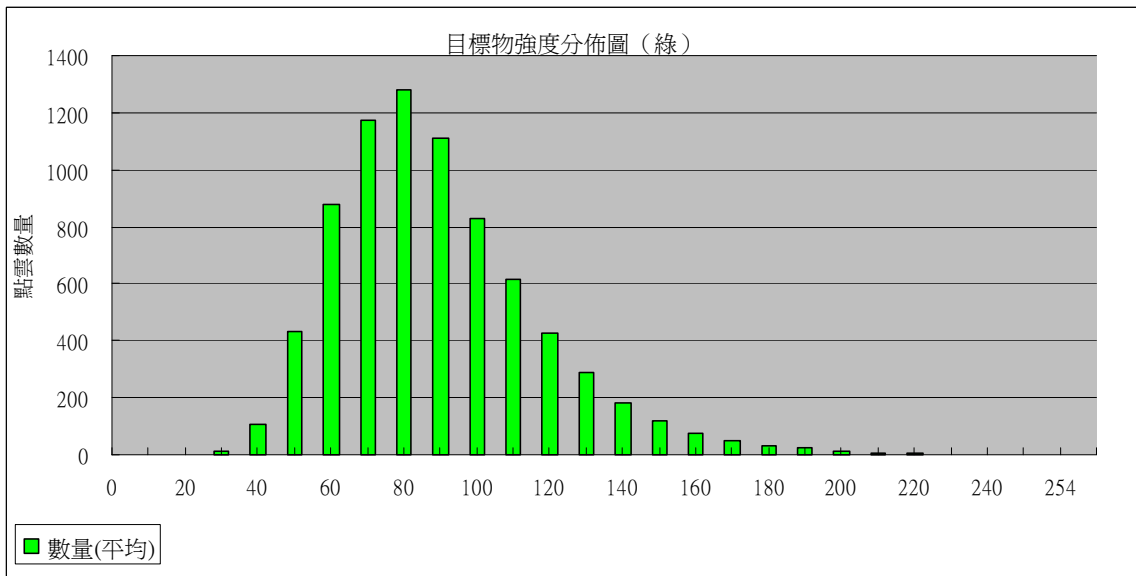


圖 3-14、綠色目標物強度值分布直方圖

表3-6、綠色目標物其各強度值區段點雲數統計表

Intensity	0	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
數量(平均)	0.0	0.0	0.0	10.8	108.2	434.6	879.6
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.1407	1.4096	5.6620	11.4594
Intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
數量(平均)	1174.6	1278.4	1108.6	828.8	615.6	427.0	286.8
所佔比例(%)	15.3026	16.6549	14.4428	10.7976	8.0200	5.5629	3.7364
Intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
數量(平均)	180.2	121.4	77.0	51.8	32.6	24.2	13.2
所佔比例(%)	2.3476	1.5816	1.0032	0.6748	0.4247	0.3153	0.1720
Intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255
數量(平均)	8.2	5.4	2.8	1.4	2.2	2.0	0.4
所佔比例(%)	0.1068	0.0704	0.0365	0.0182	0.0287	0.0261	0.0052

(三) 藍色目標物強度值統計與分布情形：

以藍色目標物掃描，經資料整理後，由表3-7可看出五次掃描中藍色目標物 R、G、B的色階值範圍為：R強度值平均為77、最高77.07、最低74.11，最高與

最低強度值相差2.96；G強度值平均為118、最高120.41、最低113.72，最高與最低強度值相差6.69；G強度值平均為176、最高179.25、最低170.60，最高與最低強度值相差8.65。R值差異性甚小但G和B值差異性較大，再將R、G、B色階整數平均值輸入Photoshop 檢色器，並進行後續分析。

表3-7、藍色目標物五次掃瞄RGB強度值平均表

藍色	第 1 次掃瞄	第 2 次掃瞄	第 3 次掃瞄	第 4 次掃瞄	第 5 次掃瞄	平均
R	76.38	77.42	77.82	77.07	74.11	77
G	119.03	120.04	120.41	119.29	113.72	118
B	176.51	177.22	179.25	178.29	170.60	176



圖 3-15、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(藍色)

藍色目標物資料亦以五次掃瞄成果進行統計，經統計後其點雲總數平均為7675.80個，將成果紀錄成表3-8，由表3-8可看出藍色目標物在低反射強度範圍：強度值0~90佔整體數量之79.6477%；而中反射強度範圍：強度值91~180佔整體19.9302%；高反射強度範圍：181~255則只佔整體之0.4221%，藍色目標物中佔整體95%的點雲都分布於強度值21~130，較綠色目標物點雲所佔多數的強度值稍低，且其中整體數量68%分布於強度值31~90之間，亦較綠色目標物所佔相同比例的分佈範圍為低。亦將表、之資料以直方圖顯示，由圖3-16看出綠色目標物顏色分佈亦趨近於常態分布但資料分布較低強度反射顏色離散外，與反射強度相近之綠色目標物相比，其直方圖分佈亦較為偏向低反射反應。

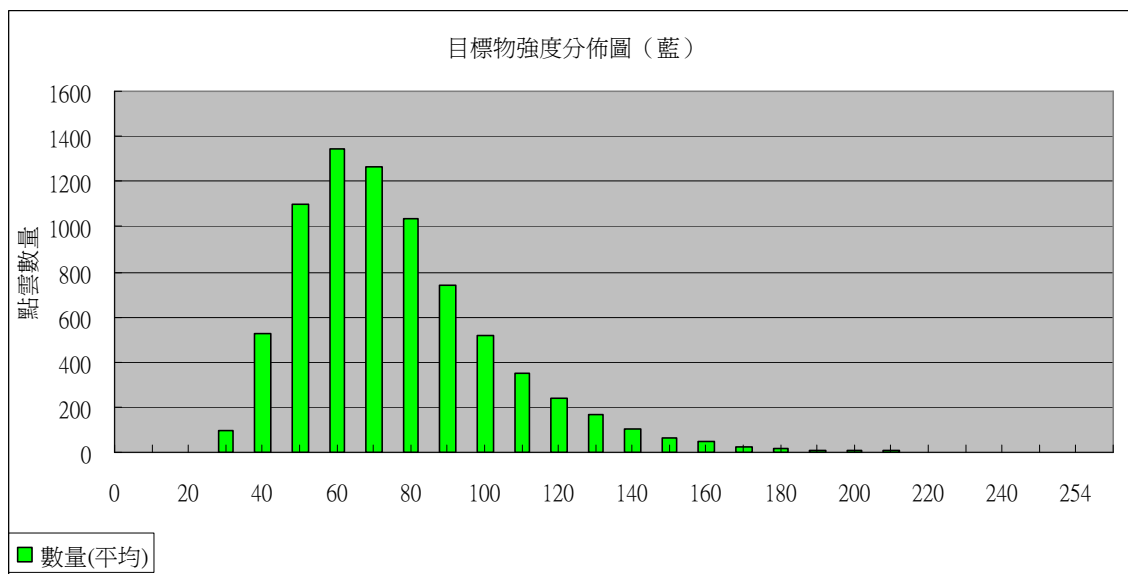


圖 3-16、藍色目標物強度值分布直方圖

表3-8、藍色目標物其各強度值區段點雲數統計表

<b>Intensity</b>	<b>0</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
數量(平均)	0.0	0.0	2.4	96.6	529.2	1098.6	1343.2
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0313	1.2585	6.8944	14.3125	17.4992
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
數量(平均)	1268.0	1037.8	737.8	514.8	352.8	241.6	168.2
所佔比例(%)	16.5195	13.5204	9.6120	6.7068	4.5963	3.1476	2.1913
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
數量(平均)	101.6	64.2	44.2	26.8	15.6	10.2	6.4
所佔比例(%)	1.3236	0.8364	0.5758	0.3491	0.2032	0.1329	0.0834
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255</b>
數量(平均)	6.4	3.0	1.5	1.4	1.5	1.0	1.0
所佔比例(%)	0.0834	0.0391	0.0195	0.0182	0.0195	0.0130	0.0130

(四) 黃色目標物強度值統計與分布情形：

進行黃色目標物掃瞄，經資料整理後，由表3-9可看出五次掃瞄中藍色目標物R、G、B的色階值範圍為：R強度值平均為203、最高204.25、最低201.59，最高與最低強度值相差2.66；G強度值平均為177、最高178.09、最低176.53，最高

與最低強度值相差1.56；B強度值平均為94、最高94.79、最低93.98，最高與最低強度值相差0.81。RGB三者差異性甚小，亦以此R、G、B色階整數平均值輸入Photoshop 檢色器，並進行後續分析。

表3-9、黃色目標物五次掃瞄RGB強度值平均表

黃色	第 1 次掃瞄	第 2 次掃瞄	第 3 次掃瞄	第 4 次掃瞄	第 5 次掃瞄	平均
R	203.03	202.83	203.17	204.25	201.59	203
G	177.07	177.04	177.58	178.09	176.35	177
B	94.08	93.98	94.33	94.79	94.51	94

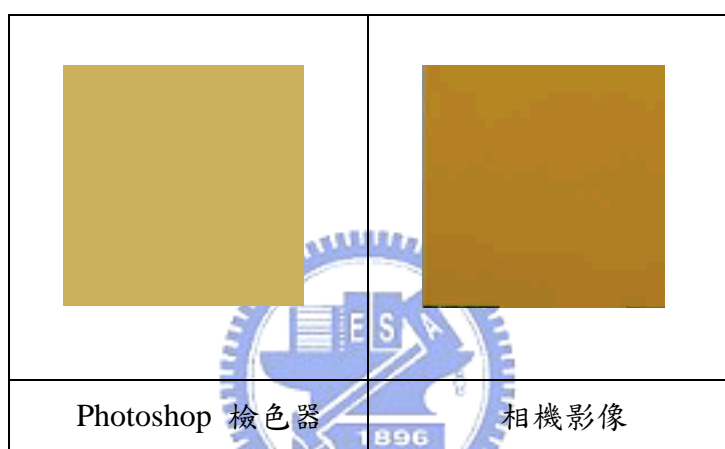


圖 3-17、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(黃色)

黃色目標物資料亦以五次掃瞄成果進行統計，經統計後其點雲總數平均為7760.80個，將成果紀錄成表3-10，由表3-10可看出黃色目標物在低反射強度範圍：強度值0~90佔整體數量之6.1669%；而中反射強度範圍：強度值91~180佔整體67.0653%；高反射強度範圍：181~255則佔整體之26.7679%。由表、即可發現黃色目標物顏色其點雲強度值分布與前面三種顏色相比，其分布較前面三者較均勻，除強度值0~50幾乎沒有外，以及強度值51~80所佔整體點雲比例低(2.5642%)外，點雲強度值分布自強度值81~225分布所佔比例皆相差不多，但其中於強度值91~180的範圍所佔比例又更高，此段範圍更佔整體的68%。亦將表、之資料以直方圖顯示，由圖3-18看出黃色目標物顏色分佈仍趨近於常態分布，但資料分布有往高反射強度範圍分布的趨勢。



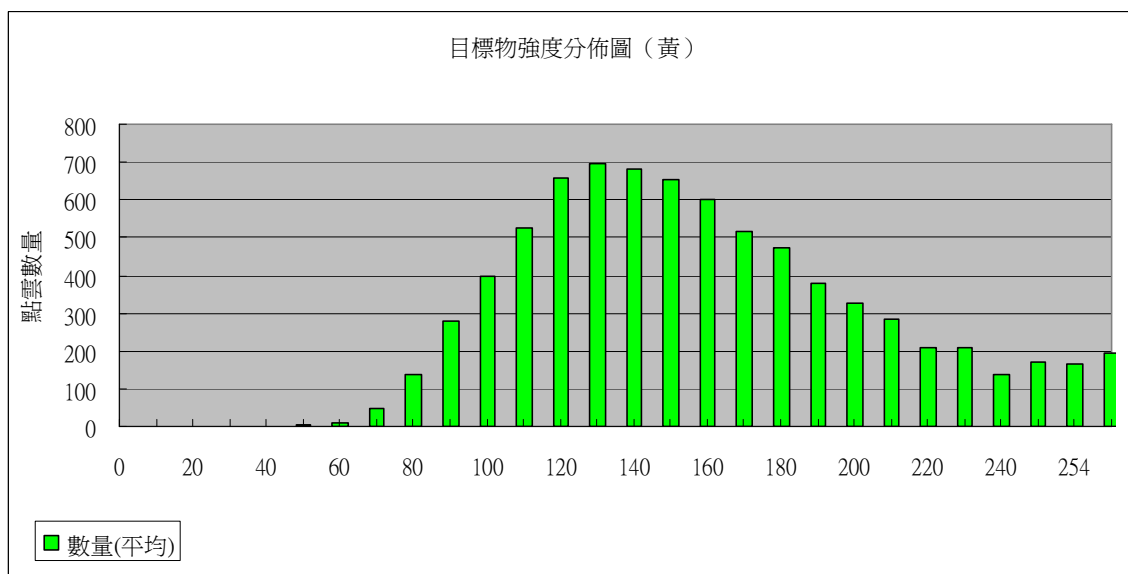


圖 3-18、黃色目標物強度值分布直方圖

表3-10、黃色目標物其各強度值區段點雲數統計表

<b>Intensity</b>	<b>0</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
數量(平均)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	11.2
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0309	0.1443
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
數量(平均)	47.6	137.8	279.6	396.2	525.8	656.2	696.4
所佔比例(%)	0.6133	1.7756	3.6027	5.1051	6.7751	8.4553	8.9733
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
數量(平均)	680.6	655.4	601.0	518.2	475.0	381.0	327.4
所佔比例(%)	8.7697	8.4450	7.7440	6.6771	6.1205	4.9093	4.2186
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255</b>
數量(平均)	283.0	209.4	208.4	138.8	169.0	167.0	193.4
所佔比例(%)	3.6465	2.6982	2.6853	1.7885	2.1776	2.1518	2.4920

(五) 白色目標物強度值統計與分布情形：

白色目標物掃瞄後，資料經整理先將五次RGB值平均值列成表3-11，由表3-11可看出五次掃瞄中白色目標物R、G、B的色階值範圍為：R強度值平均為200、最高200.73、最低199.84，最高與最低強度值相差0.89；G強度值平均為214、最

高215.01、最低213.58，最高與最低強度值相差1.43；B強度值平均為234、最高234.73、最低233.65，最高與最低強度值相差1.08。但RGB帶入檢色器後呈藍色，應為日光燈影響下之反應。

表3-11、白色目標物五次掃瞄RGB強度值平均表

白色	第 1 次掃瞄	第 2 次掃瞄	第 3 次掃瞄	第 4 次掃瞄	第 5 次掃瞄	平均
R	199.84	200.57	200.33	200.73	200.68	200
G	213.58	214.31	214.36	214.56	215.01	214
B	233.65	234.46	234.38	234.73	234.52	234

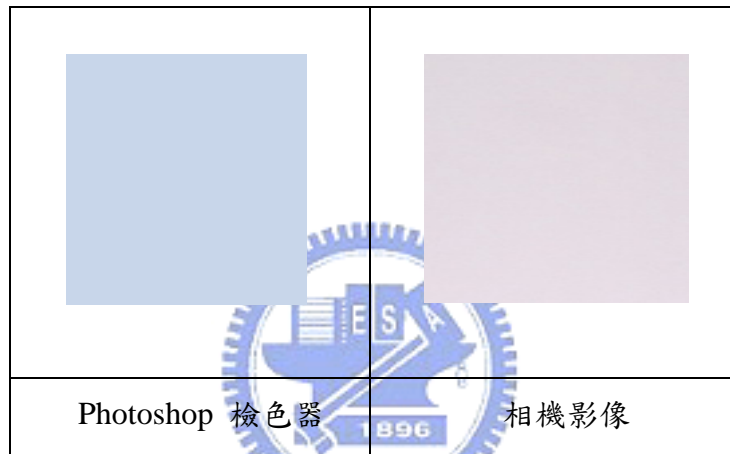


圖 3-19、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(白色)

白色目標物資料亦以五次掃瞄成果進行統計，經統計後其點雲總數平均為7852.60個，將成果紀錄成表3-12，由表3-12可看出白色目標物在低反射強度範圍：強度值0~90佔整體數量之0.003%；而中反射強度範圍：強度值91~180佔整體28.984%；高反射強度範圍：181~255則只佔整體之71.013%。由表3-12可知白色目標物點雲在強度值0~80完全沒有點雲資料，大部分點雲都分佈於中高強度值範圍，其中95%點雲數量分佈於強度值141~255之間，而其中佔總數68%點雲數量之強度值範圍為高強度反應181~255，雖大都分佈於高強度反射，但白色目標物在強度值161~254之間其所佔比例大致相同，比較其它顏色，與平均強度值差不多之黃色目標物，白色目標物分佈更加均勻。

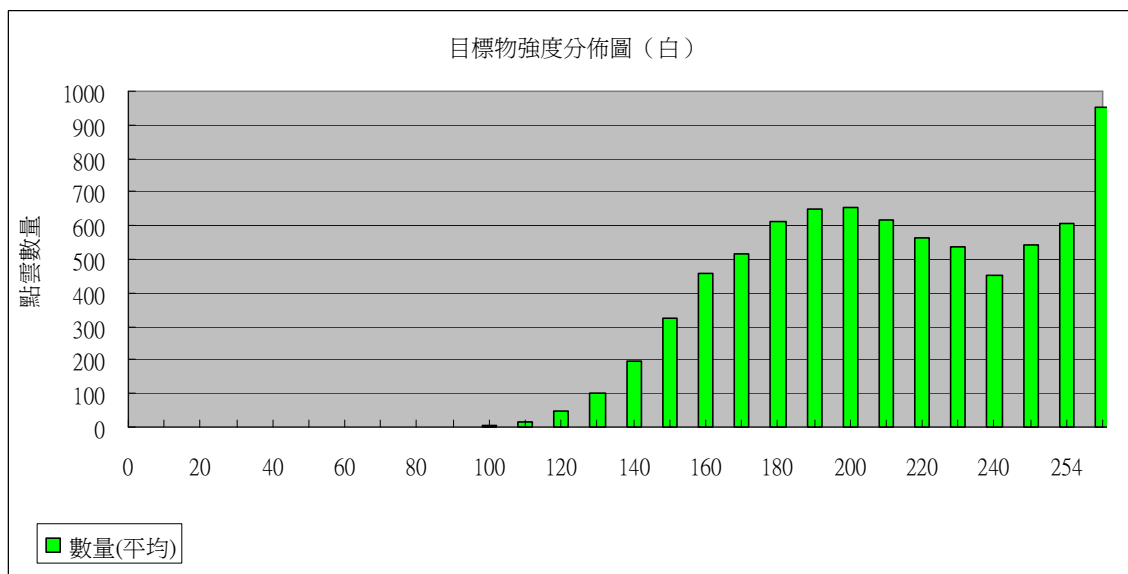


圖 3-20、白色目標物強度值分布直方圖

表3-12、白色目標物其各強度值區段點雲數統計表

<b>Intensity</b>	<b>0</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
數量(平均)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
數量(平均)	0.0	0.0	0.2	3.4	15.0	48.0	103.2
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0025	0.0433	0.1910	0.6113	1.3142
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
數量(平均)	198.4	325.0	455.0	517.0	611.0	651.0	652.4
所佔比例(%)	2.5266	4.1388	5.7943	6.5838	7.7809	8.2902	8.3081
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255</b>
數量(平均)	618.6	563.6	539.2	450.4	545.2	604.0	952.0
所佔比例(%)	7.8776	7.1772	6.8665	5.7357	6.9429	7.6917	12.1234

(六) 黑色目標物強度值統計與分布情形：

黑色目標物掃瞄完成經資料整理後，其 RGB 平均值列成表 3-13，五次掃瞄中黑色目標物 R、G、B 的色階值範圍為：R 強度值平均為 58、最高 58.21、最低 57.69，最高與最低強度值相差 0.52；G 強度值平均為 57、最高 57.49、最

低 57.36，最高與最低強度值相差 0.13；B 強度值平均為 65、最高 65.16、最低 64.42，最高與最低強度值相差 0.70。RGB 三者差異甚小，亦以此 R、G、B 色階整數平均值輸入 Photoshop 檢色器。

表3-13、黑色目標物五次掃瞄RGB強度值平均表

黑色	第 1 次掃瞄	第 2 次掃瞄	第 3 次掃瞄	第 4 次掃瞄	第 5 次掃瞄	平均
R	57.69	58.13	58.17	58.21	58.13	58
G	57.37	57.36	57.39	57.49	57.38	57
B	64.75	64.51	64.42	65.16	64.54	65

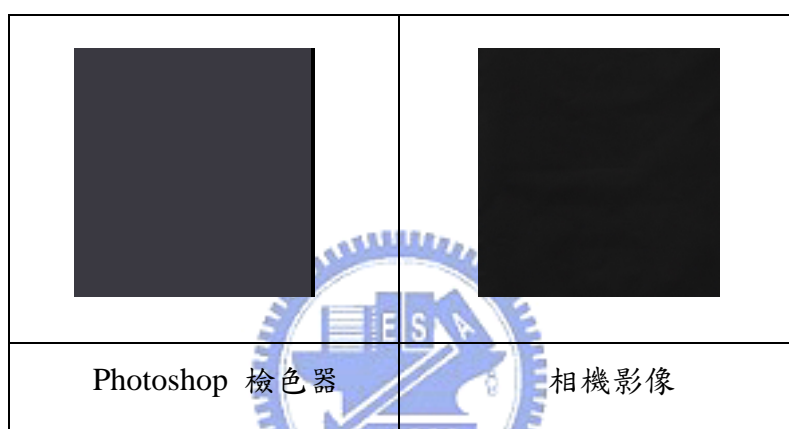


圖 3-21、Photoshop 檢色器與相機顏色比較(黑色)

黑色目標物經五次掃瞄其點雲總數平均為 7792.6 個，各強度值數量成果紀錄成表 3-14，由此表知黑色目標物在低反射強度範圍：強度值 0~90 佔整體數量之 99.5817%；而中反射強度範圍：強度值 91~180 佔整體 0.3958 %；高反射強度範圍：181~255 則只佔整體之 0.02319%。由表 3-14 即可發現黑色目標物顏色其點雲強度值分布在高反射強度值部分幾乎佔整體比例 0%，細看表格發現點數僅有 9 個點，應為離 Target 平面甚遠之雜訊點，此證明於下章論述。將表、之資料以直方圖顯示，由圖 3-22、看出黑色目標物顏色分佈仍趨近於常態分布，但資料分布集中在低反射強度範圍。

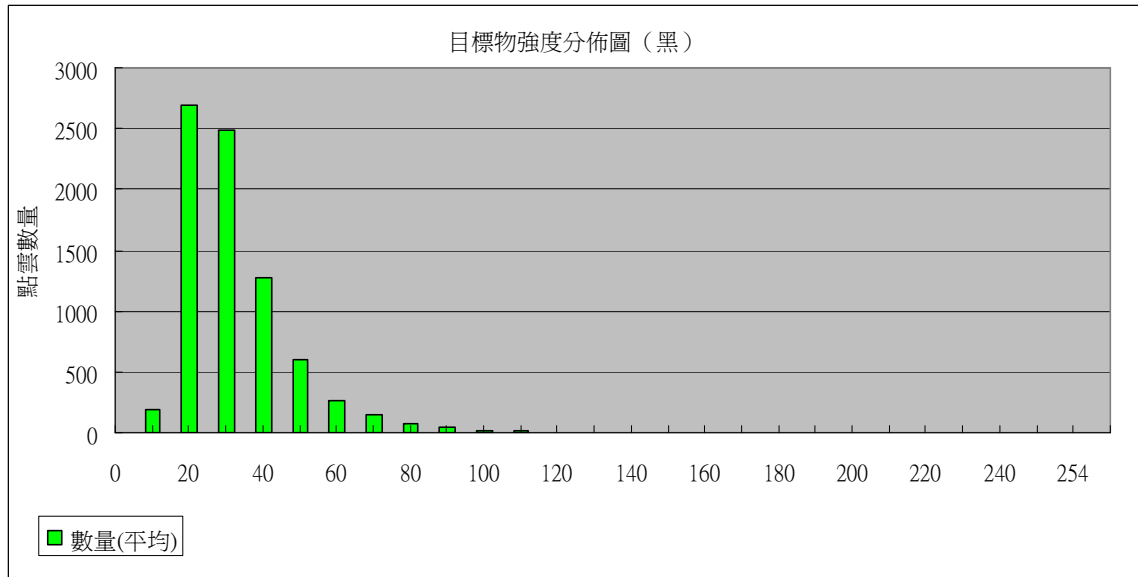


圖 3-22、黑色目標物強度值分布直方圖

表3-14、黑色目標物其各強度值區段點雲數統計表

<b>Intensity</b>	<b>0</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
數量(平均)	0	195.8	2694.2	2492.6	1272.8	592.8	266.2
所佔比例(%)	0.0000	2.5126	34.5738	31.9868	16.3334	7.6072	3.4161
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
數量(平均)	142	67	36.6	14	10.2	3.8	1
所佔比例(%)	1.8222	0.8598	0.4697	0.1797	0.1309	0.0488	0.0128
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
數量(平均)	0.6	0.4	0.4	0.4	0	0.2	0.2
所佔比例(%)	0.0077	0.0051	0.0051	0.0051	0.0000	0.0026	0.0026
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255</b>
數量(平均)	0	0	0	0	0	0	1.4
所佔比例(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0180

以平均強度值作為分類依據，將本實驗進行的六種目標物顏色作一強度值強、中、弱的分類，由表 3-15 中，將平均強度值較弱的黑色與紅色目標物歸為一類為弱反射強度；綠色與藍色目標物歸為一類為中反射強度；黃色與白色目標物歸為一類為強反射強度。

表3-15、各顏色平均強度值表

顏色	Red	Black	Green	Blue	Yellow	White
強度值平均	21.25	27.45	88.79	71.60	154.61	205.37

各顏色強度值趨近常態分佈，而亮色系顏色具有較佳的反射強度，但強度值分佈較離散；反之暗色系強度值較小，強度值分佈較集中。反射強度值相似地其強度值分佈曲線大致相同，例如以弱反射強度的紅色與黑色目標物而言，紅色目標物平均強度值為 21.25 而強度值分佈轉折點為強度值 31.7 與 10.8，黑色目標物平均強度為 27.45 其強度值分佈轉折點為強度值 42.19 與 12.71，相較之下分佈差異不大；再以中反射強度的藍色與綠色目標物而言，其強度值分佈曲線相似，但由於綠色目標物較藍色目標物平均反射強度高且差異較紅色與黑色的為大，故其分佈曲線綠色目標物平均強度值為 88.79 而強度值分佈轉折點為強度值 116.09 與 61.16；藍色目標物平均強度值為 71.60 而強度值分佈轉折點為強度值 99.01 與 44.19，相較之下藍色目標物分佈更朝低反射強度分佈；而高強度反射如黃色與白色目標物，因兩者強度值差異頗大，黃色目標物平均強度值為 154.60 強度值分佈轉折點為強度值 201.67 與 107.55；白色目標物平均強度值為 205.37 強度值分佈轉折點為強度值 243.58 與 167.16；經比較後更可明顯看出越強反射強度資料越離散，且更朝高反射強度分佈。


## 第四章 反射強度值對精度影響分析

### 4-1 實驗資料與實驗設計

#### 4-1-1 實驗資料

本實驗所使用之點雲資料亦由 Trimble GS200 型三維雷射掃瞄儀掃瞄所得，資料來源為上一章的採取方式與實驗場環境，實驗場為交通大學工程二館 214 教室，使用的分析資料延續上一章點雲資料之原因在於，因掃瞄後之原始資料亦包含本章欲探討的強度值(Intensity)部分，使用同一數據可免除因重新掃瞄造成資料因設站位置不同造成資料不延續的因素，而可在後續將顏色值、強度值以及精度三者作一整合分析。

#### 4-1-2 實驗設計



三維雷射掃瞄儀可在短時間內獲得大量的點位相對坐標值，接踵而來的便是點雲資料的精度考量。以三維雷射掃瞄儀而言其原理是應用接收雷射反射訊號的時間差，來得到各點位的三維空間座標，而原始點雲資料中之反射強度值(Intensity) 即為反射訊號的一種，反射強度的強弱與點位的精度是否有關，又或者強度值在一範圍內其精度可達最理想狀態，皆為本實驗分析計算上的重點。本實驗設計上仍沿用上章實驗資料，除讓資料與上一實驗有延續性外，在後續分析可以將色階值、強度值與精度做一結合。

在本次實驗中以兩種方法來分析強度值與精度的關係:點雲的單次最適平面計算和點雲至 Target 平面的平均距離兩種方法。點雲的單次最適平面計算為利用最適平面計算程式，計算各強度值區段的精度。而點雲至 Target 平面的平均距離則為先以四個控制規標(Target)組成的最適平面為基準，依此基準計算各強度值區段中的點雲到此平面的距離，以瞭解各強度值區段的點雲與控制規標所組最適平面的離散程度及所組最適平面精度。

此外目標物表面佈設控制規標點位之目的在於透過控制規標可擷取出精確的點位三維坐標，利用此精確的規標坐標組成平面，除供查驗各點雲至此平面的距離，又因三維雷射掃瞄儀在施測過程可能因旋轉、俯仰造成儀器產生微小的震動，故在掃瞄整體目標物工作前先對於各個控制規標進行一次掃瞄，待目標物整體掃瞄作業完成後，再對於控制規標進行一次掃瞄，以確定控制規標之坐標值並未因儀器震動而有所改變，如此重複觀測五次後，若坐標值差異不大，則以直接取平均值做為該控制規標的相對坐標值。

本次外業掃瞄皆採用高精度高密度掃瞄，目的為了求出強度值對精度的影響，並依此結果結合色階值作一分析。圖 4-1 為本次實驗計算流程圖。





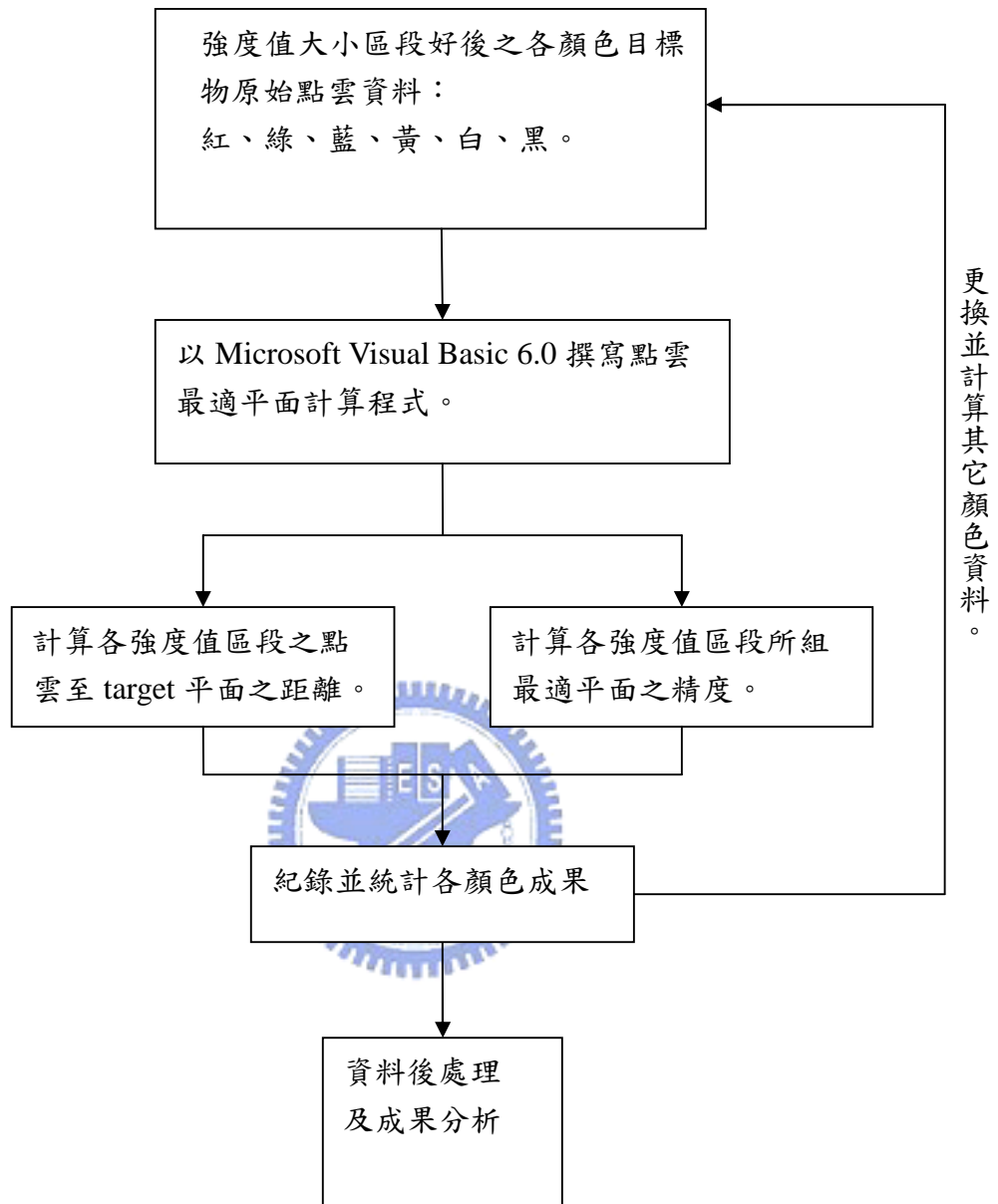


圖 4-1、反射強度值對精度影響研究流程圖

## 4-2 單次最適平面計算

本章節對單次最適平面的實驗，將利用點雲最適平面理論進行各種顏色之強度值區段最適平面計算。由於目標物以紙張所組成並在平坦的牆面上佈設，為瞭解各強度值區段的精度，將採用以最小二乘原理所撰寫而成的最適平面計算程式，利用高掃瞄密度的點雲相對坐標值，檢驗各強度值區段所組成最適平面之精度，並分析強度值對精度之影響。本實驗延續上一章實驗，使用資料亦為上一章實驗所收集之資料，首先針對已知平整之牆面上佈設目標物，並在目標物上佈設四個控制規標，由於最適平面以 X、Y 作為觀測量進行計算時，其成果較為穩定，且精度較佳，且最適平面精度可由單次計算推測最終何者精度較佳(徐元俊，2006)，故實驗中計算最適平面將以 X 軸為觀測量進行單次計算，其成果如表 4-1、表 4-2、表 4-3、表 4-4、表 4-5 和表 4-6 所示。此外由於空間中需三個點才可構成一個平面，對於某些強度值區段因點數不到 3 點，故該最適平面精度值將以 0 紀錄。



### (一) 紅色目標物各強度值區段精度：

由於紅色目標物在強度值範圍 111~120 和 131~254 之間並無點雲，故無法進行最適平面計算其精度資料以 0 記錄之，又因空間中需三點方可組成一平面，而強度值範圍 101~110 以及 121~130 點雲數量不足，故兩者最適平面計算精度亦為 0。針對紅色目標物整體所組成之最適平面進行計算，其四次計算成果平均精度為 2.52mm，接著將強度值粗分為三種等級：低強度值範圍強度值 0~90 所組最適平面精度平均為 1.79mm，而中強度值範圍強度值 91~180 其最適平面精度平均 0.15mm，而高強度值範圍由於點數不足或無點雲資料，無法進行最適平面計算，雖強度值 0~90 所組最適平面精度較整體為佳，但需考量數量的關係，例如強度值 91~100 和 101~110 精度遠優於其他各強度值區段，是因為這兩強度值數量都恰為 3 個點雲，故所組點雲精度甚佳，接著考量佔整體

數量達 95%之強度值範圍 11~40 而言，其最適平面所組精度平均為 2.65mm 就與整體所組最適平面精度相當。

表4-1、紅色目標物各強度值區段精度表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
單次最適平面精度	0.00	2.35	2.69	2.44	2.25	1.55	1.60
數量(平均)	0.00	581.50	3850.00	2089.75	768.75	265.00	99.75
<b>intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
單次最適平面精度	1.55	1.10	0.58	0.15	0.00	0.00	0.00
數量(平均)	32.75	13.00	3.50	2.75	0.50	0.00	0.50
<b>intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
單次最適平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
數量(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
單次最適平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
數量(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25

單次最適平面精度單位：mm

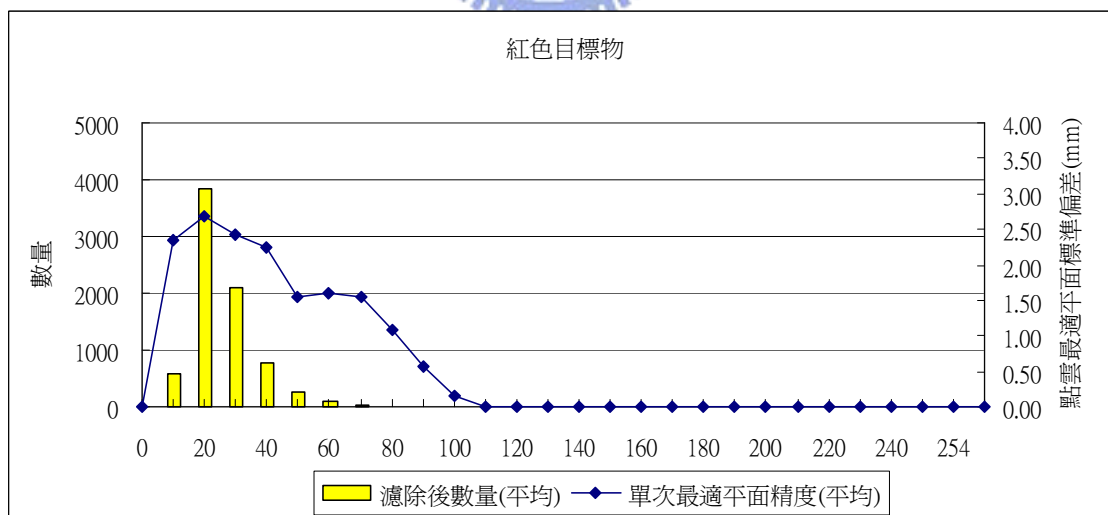


圖 4-1、紅色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖

(二) 綠色目標物各強度值區段精度：

由於綠色目標物在強度值 0~20 並無點雲，故資料以 0 記錄之。針對綠色目標物整體所組成之最適平面進行計算，經五次計算後將成果平均，平均最適平面精度為 1.79mm。而綠色目標物在低強度值範圍強度值 0~90 所組最適平面精度平均為 0.95mm，而中強度值範圍強度值 91~180 其最適平面精度平均 1.79mm，高強度值範圍強度值 181~255 其最適平面精度平均為 0.37mm，其中佔綠色目標物數量 68%之強度值範圍 51~100 所組成之最適平面其平均精度為 1.57mm，而以佔整體 95%數量之強度值 30~140 其最適平面平均精度為 1.59mm，雖然由表 4-2 可看出強度值 141 以上之點雲最適平面都較強度值 140 以下的精度較好，但數量卻相對少很多，僅佔整體不到 5%故並無法影響整體精度太多。

表4-2、綠色目標物各強度值區段精度表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.00	0.75	1.15	1.50	1.28
<b>數量(平均)</b>	0.00	0.00	0.00	10.80	108.20	434.60	879.60
<b>intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
單次擬合平面精度(平均)	1.42	1.64	1.76	1.82	2.40	2.07	1.81
<b>數量(平均)</b>	1174.60	1278.40	1108.60	828.80	615.60	427.00	286.80
<b>intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
單次擬合平面精度(平均)	1.44	2.02	1.81	1.52	1.23	1.20	0.68
<b>數量(平均)</b>	180.20	121.40	77.00	51.80	32.60	24.20	13.20
<b>intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
單次擬合平面精度(平均)	0.61	0.21	0.29	0.02	0.14	0.14	0.00
<b>數量(平均)</b>	8.20	5.40	2.80	1.40	2.20	2.00	0.40

單次最適平面精度單位：mm

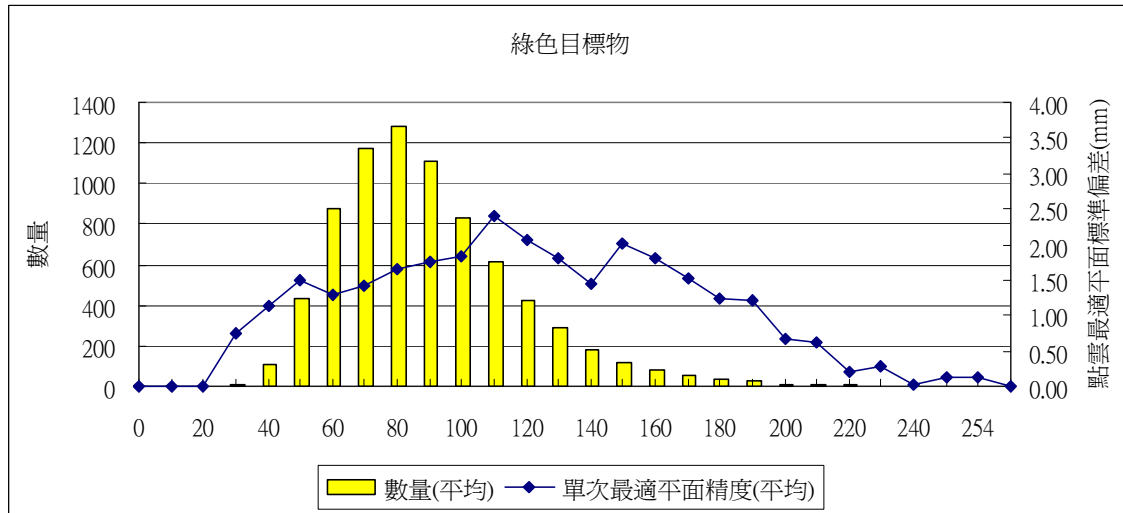


圖 4-2、綠色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖

(三) 藍色目標物單次最適平面精度：

藍色目標物在強度值 0~10 無點雲，無法進行最適平面計算故以 0 記錄。此外對藍色目標物整體所組成之最適平面進行計算，經五次計算後將成果平均，平均最適平面精度為 2.11mm。而藍色目標物在低強度值範圍強度值 0~90 所組最適平面精度平均為 1.42mm，而中強度值範圍強度值 91~180 其最適平面精度平均 1.68mm，高強度值範圍強度值 181~255 其最適平面精度平均為 0.26mm，其中佔藍色目標物數量 68%之強度值範圍 31~90 所組成之最適平面其平均精度為 1.99mm，而以佔整體 95%數量之強度值 21~130 其最適平面平均精度為 2.04mm，與整體點雲所組最適平面平均精度相當。與強度值相近之綠色目標物相較下藍色目標物在數量分佈上較朝低強度值分佈，其精度也較差。

表4-3、藍色目標物各強度值區段精度表

Intensity	0.00	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.28	1.92	1.84	2.09	1.77
數量(平均)	0.00	0.00	2.40	96.60	529.20	1098.60	1343.20
intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
單次擬合平面精度(平均)	2.00	2.16	2.11	2.11	2.44	1.98	2.03
數量(平均)	1268.00	1037.80	737.80	514.80	352.80	241.60	168.20
intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
單次擬合平面精度(平均)	0.99	1.60	1.55	1.55	0.83	0.68	0.40
數量(平均)	101.60	64.20	44.20	26.80	15.60	10.20	6.40
intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255.00
單次擬合平面精度(平均)	1.02	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
數量(平均)	6.40	3.00	1.50	1.40	1.50	1.00	1.00

單次最適平面精度單位：mm

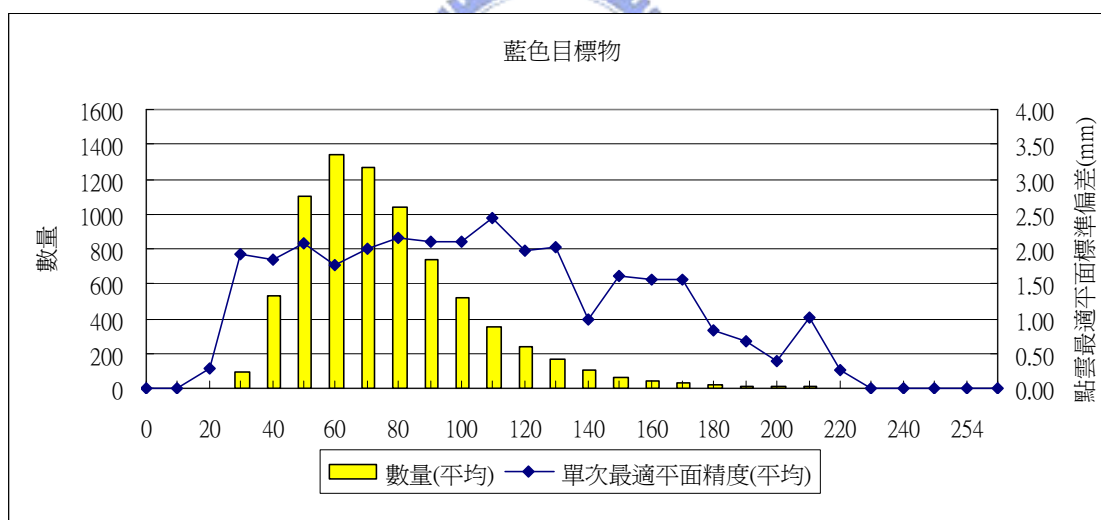


圖 4-3、藍色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖

(四) 黃色目標物單次最適平面精度：

黃色目標物在強度值 0~40 之間無任何點雲存在固其最適平面計算以 0 記錄。此外以黃色目標物整體所組成之最適平面進行計算，將五次計算成果平均，而其平均最適平面精度為 3.04mm。亦將目標物強度值先粗分為三種範圍：在

低強度值範圍強度值 0~90 所組最適平面精度平均為 0.60mm，而中強度值範圍強度值 91~180 其最適平面精度平均 2.67mm，高強度值範圍強度值 181~255 其最適平面精度平均為 2.75mm，其中黃綠色目標物佔總數量 68%之強度值範圍恰為中等強度值 91~180，而以佔整體 95%數量之強度值 81~225 其最適平面平均精度為 2.66mm。

表4-4、黃色目標物各強度值區段精度表

Intensity	0	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	1.09
數量(平均)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	11.2
intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
單次擬合平面精度(平均)	1.03	1.77	1.77	1.40	1.78	2.23	2.95
數量(平均)	47.6	137.8	279.6	396.2	525.8	656.2	696.4
intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
單次擬合平面精度(平均)	1.42	3.78	3.16	3.89	3.40	4.37	1.77
數量(平均)	680.6	655.4	601.0	518.2	475.0	381.0	327.4
intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255
單次擬合平面精度(平均)	5.40	1.10	4.10	0.99	2.11	3.13	1.80
數量(平均)	283.0	209.4	208.4	138.8	169.0	167.0	193.4

單次最適平面精度單位：mm

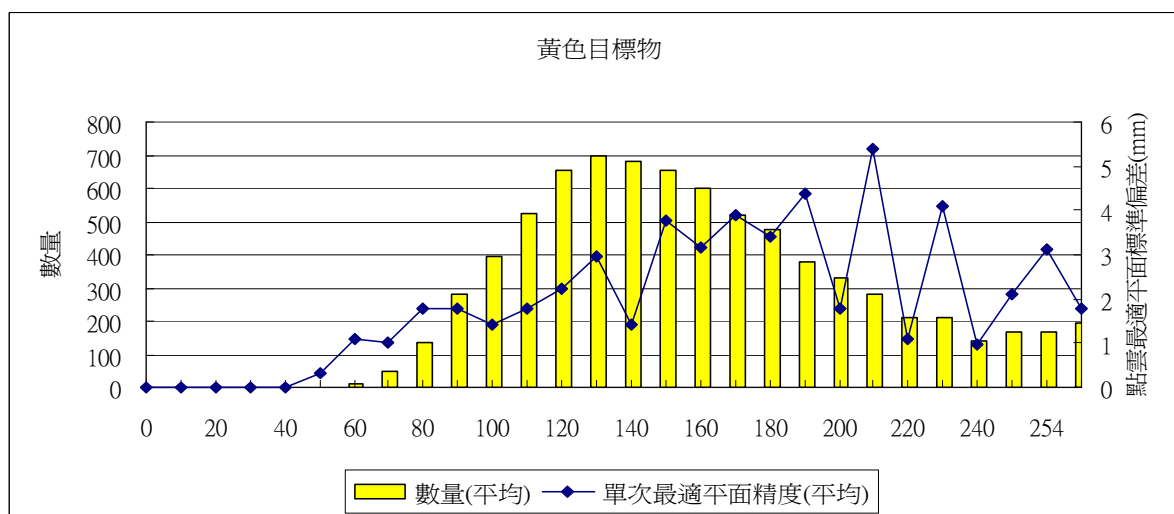


圖 4-4、黃色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖

(五) 白色目標物單次最適平面精度：

白色目標物在強度值 0~80 無點雲資料，故其最適平面計算以 0 記錄。而以白色目標物整體所組成之最適平面進行計算，將五次計算成果平均，其最適平面平均精度為 2.17mm。白色目標物亦將強度值粗分為三個等級：低強度值範圍強度值 0~90 所組最適平面精度因無任何點雲故以 0 記之，而中強度值範圍強度值 91~180 其最適平面精度平均 1.14mm，高強度值範圍強度值 181~255 其最適平面精度平均為 2.06mm。由於白色目標物在強度值 161 以上除強度值 255 外，所佔比例和數量大致相同約在總數 6%~7%，此段最適平面平均精度為 1.91mm 與整體平均相近，並佔了整體數量之 71%。

表4-5、白色目標物各強度值區段精度表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>數量(平均)</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.00	0.50	0.95	0.91	1.14
<b>數量(平均)</b>	0.00	0.00	0.20	3.40	15.00	48.00	103.20
<b>intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
單次擬合平面精度(平均)	1.02	1.49	1.59	1.04	1.62	1.47	1.24
<b>數量(平均)</b>	198.40	325.00	455.00	517.00	611.00	651.00	652.40
<b>intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
單次擬合平面精度(平均)	3.00	1.09	3.28	1.04	1.62	3.71	2.09
<b>數量(平均)</b>	618.60	563.60	539.20	450.40	545.20	604.00	952.00

單次最適平面精度單位：mm



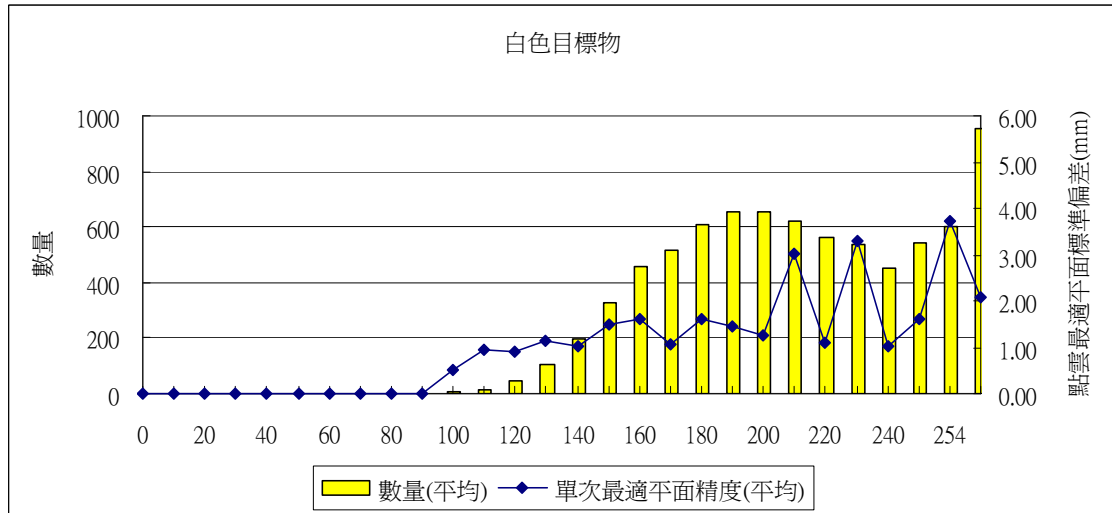


圖 4-5、白色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖

(六) 黑色目標物單次最適平面精度：

黑色目標物在強度值範圍 211~254 之間並無點雲，故無法進行最適平面計算其精度資料以 0 記錄之，又因空間中需三點方可組成一平面，而強度值範圍 121~200 之間點雲數量不足，故兩者最適平面計算精度亦為 0。黑色目標物整體所組成之最適平面進行計算，經五次計算後將最適平面精度平均為 2.74mm。將黑色目標物強度值粗分為三種等級：低強度值範圍強度值 0~90 所組最適平面精度平均為 1.78mm，而中強度值範圍強度值 91~180 其最適平面精度平均 0.40mm，而高強度值範圍由於點數不足或無點雲資料，無法進行最適平面計算以 0 紀錄。強度值 0~90 所組最適平面精度較整體為佳，但亦考量數量的因素，針對黑色目標物總數 68% 所佔強度值範圍 11~30 而言其所組成的最適平面精度為 2.86mm，若以佔總數 95% 之強度值範圍 1~60 所組成的最適平面精度為 2.41mm。

表4-6、黑色目標物各強度值區段精度表

Intensity	0.00	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
單次擬合平面精度(平均)	0.00	2.32	2.88	2.84	2.89	2.18	1.37
數量(平均)	0.00	195.80	2694.20	2492.60	1272.80	592.80	266.20
intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
單次擬合平面精度(平均)	1.49	1.20	1.20	1.03	0.99	0.33	0.00
數量(平均)	142.00	67.00	36.60	14.00	10.20	3.80	1.00
intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
數量(平均)	0.60	0.40	0.40	0.40	0.00	0.20	0.20
intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255.00
單次擬合平面精度(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
數量(平均)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40

單位：mm

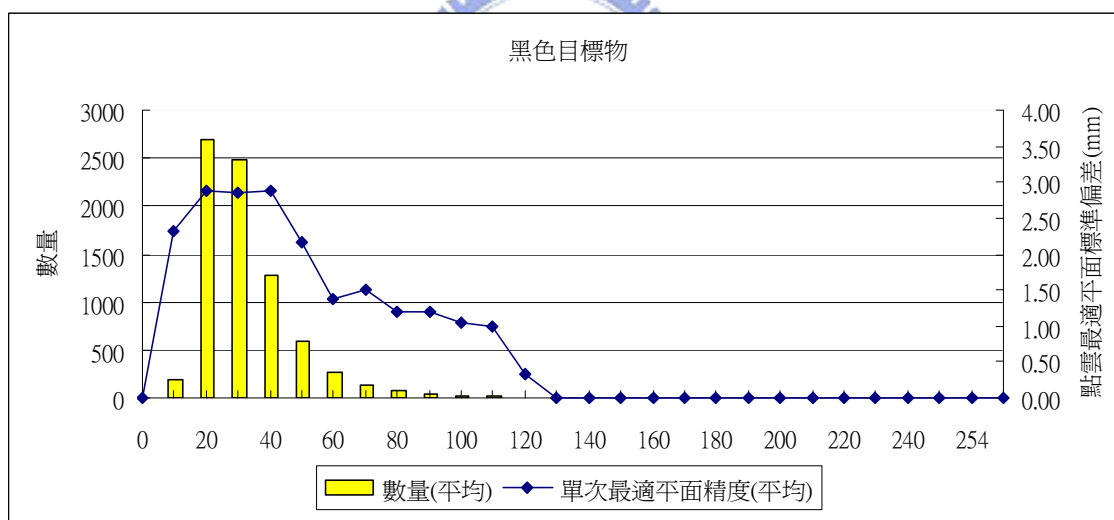


圖 4-6、黑色目標物最適平面曲線與強度值分佈圖

### 4-3 點雲與Target平面距離

此外由於最適平面的精度僅代表該強度值區段所組平面的精度，及該資料之精密度，並無法得知與真值的準確度，故本實驗將利用佈設於目標物上之規標，以佈設於目標物上的四個規標作為控制點，將經三維雷射掃瞄後所得之高精度點位帶入最適平面計算，即利用此規標所組成之平面方程式為主，計算各強度值區段中各點雲至此平面的距離，已瞭解各強度值區段所組平面的資料正確性，其成果如表 4-7、表 4-8、表 4-9、表 4-10、表 4-11 和表 4-12 所示，該些表格中點雲至 T 平面平均距離代表各強度值區段的點雲至 Target 平面，並將五次掃瞄成果之距離平均並記錄。並將最適平面精度與點雲與 Target 平面平均距離結合，其成果如圖 4-2、圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6 和圖 4-7。

#### (一) 紅色目標物與 Target 平面之差異：

欲瞭解紅色目標物點雲資料的正確性，將以控制規標所組成之 Target 為基準，計算各點雲至此平面的平均距離，以作為驗證點雲資料正確性的一個指標。將四次掃瞄之點雲資料分別計算當次之整體點雲至 Target 平面之平均距離，以求得紅色目標物整體點雲的資料正確度，經四次整體點雲至 Target 平面的距離計算後，並將四次成果平均得到紅色目標物整體點雲至 Target 平面之平均距離為 2.83mm，再將強度值分為三類進行點雲至 Target 平面之平均距離計算：低強度值 0~90 其點雲至 Target 平面的平均距離為 2.16mm；中強度值 91~180 點雲至 Target 平面的平均距離為 1.54mm；高強度值範圍 181~254 無點雲資料以 0 記錄，但強度值 255 之點雲至 Target 平面的平均距離卻高達 28.43mm 時。考量紅色目標物強度值與數量時其點雲 95% 集中在強度值 11~40 間其點雲至 Target 平面的平均距離 2.78mm。由圖 4-2 可知強度值在 11~40 時點雲至 Target 平面的平均距離明顯甚高，代表與 Target 平面差異甚大，而在強度值 41~100，最適平面精度明顯變佳，但點雲至 Target 平面的

平均距離雖有稍微下降但仍有 2.14mm 的差距。

表4-7、紅色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	2.42	3.03	2.75	2.55	2.49	2.43
單次最適平面精度	0.00	2.35	2.69	2.44	2.25	1.55	1.60
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
點雲至規標平面平均距離	2.17	2.09	1.61	2.06	2.66	0.00	1.43
單次最適平面精度	1.55	1.10	0.58	0.15	0.00	0.00	0.00
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
單次最適平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.43
單次最適平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

單位：mm

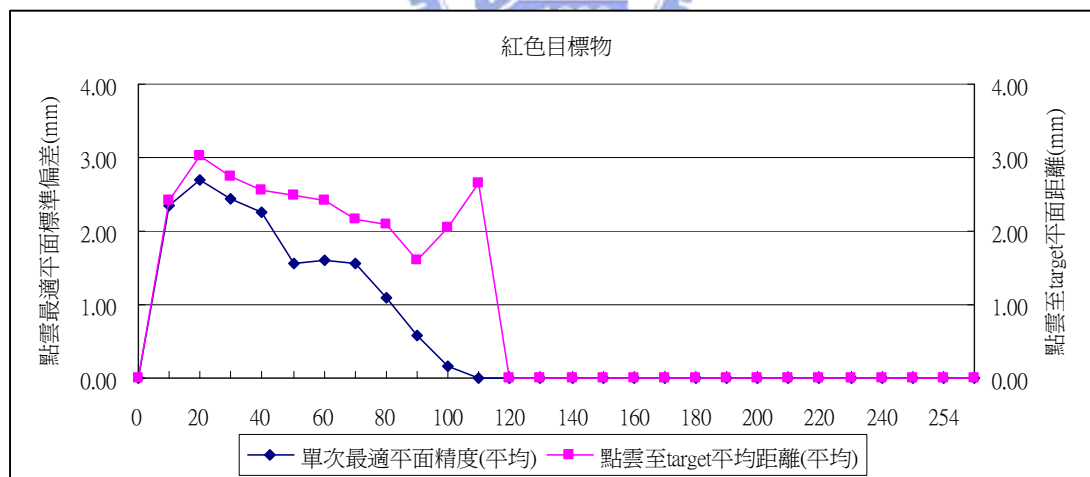


圖 4-7、紅色目標物點雲精密度與精確度分佈圖

(二) 綠色目標物與 Target 平面之差異：

綠色目標物之點雲至 Target 平面之平均距離計算實驗亦以控制規標所組成之 Target 為基準，計算各點雲至此平面的平均距離，以作為評估點雲正

確性的一個指標。經五次整體點雲至 Target 平面之平均距離計算，得到綠色目標物整體之點雲至 Target 平面之平均距離為 3.54mm。亦將強度值分為三類進行點雲至 Target 平面之平均距離計算：低強度值 0~90 其點雲至 Target 平面的平均距離為 2.49mm；中強度值 91~180 點雲至 Target 平面的平均距離為 2.75mm；高強度值範圍 181~255 其點雲至 Target 平面的平均距離為 1.84mm，但若高強度範圍剔除強度值 255 之點雲至 Target 平面的平均距離 8.71mm 時，可降低至 0.98mm。又考量綠色目標物強度值與數量時於在其佔整體數量 68% 時強度值範圍 51~100 其最適平面精度最佳(1.57mm)，但卻與假設之真值(Target 平面)差異最大，點雲距離 Target 平面平均距離可達 3.61mm，而以佔整體數量 95% 數量之強度值 31~140 間其點雲距離 Target 平均平面為 3.49mm。而由圖 4-3 可知看出強度值在 31~140 時最適平面精度優於強度值 141~254，但與 Target 平面平均距離卻明顯高出甚多。

表4-8、綠色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	0.00	3.22	3.33	3.50	3.52
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.00	0.75	1.15	1.50	1.28
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
點雲至規標平面平均距離	3.67	3.80	3.79	3.64	3.68	3.60	3.26
單次擬合平面精度	1.42	1.64	1.76	1.82	2.40	2.07	1.81
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
點雲至規標平面平均距離	2.53	2.65	2.09	1.88	1.41	1.34	1.03
單次擬合平面精度	1.44	2.02	1.81	1.52	1.23	1.20	0.68
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
點雲至規標平面平均距離	1.04	1.08	0.80	0.84	0.61	1.07	8.71
單次擬合平面精度	0.61	0.21	0.29	0.02	0.14	0.14	0.00

單位：mm

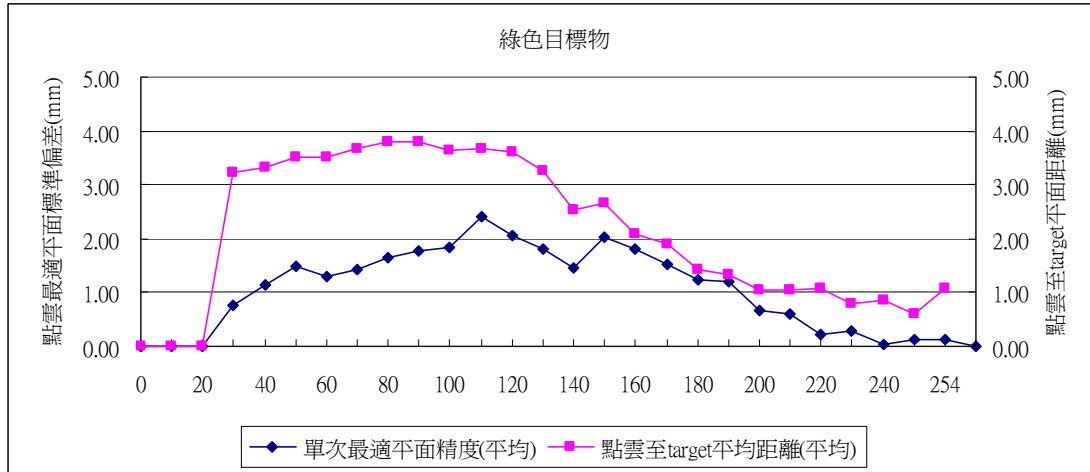


圖 4-8、綠色目標物點雲精密度與精確度分佈圖

(三) 藍色目標物與 Target 平面之差異：

亦以控制規標所組成之 Target 為基準，計算藍色目標物點雲至 Target 平面的平均距離，以作為評估點雲資料正確性的一個指標。經五次整體點雲至 Target 平面之平均距離計算，得到藍色目標物整體之點雲至 Target 平面之平均距離為 3.34mm。亦將強度值分為三類進行點雲至 Target 平面之平均距離計算：低強度值 0~90 其點雲至 Target 平面的平均距離為 3.55mm；中強度值 91~180 點雲至 Target 平面的平均距離為 2.28mm；高強度值範圍 181~255 其點雲至 Target 平面的平均距離為 4.02mm，但若高強度範圍剔除強度值 255 之點雲至 Target 平面的平均距離 27.35mm 時，可降低至 1.10mm。此外考量藍色目標物在佔整體數量 68% 時強度值範圍 31~90 其最適平面精度最佳 (1.99mm)，但卻與假設之真值(Target 平面)差異最大，點雲距離 Target 平面平均距離可達 3.49mm，而以佔整體數量 95% 數量之強度值 21~130 間最適平面精度為 2.04mm，但其點雲距離 Target 平均平面為 3.28mm。由圖 4-4 可看出強度值在 31~90 間雖最適平面精度最佳但與 Target 平面平均距離卻明顯高於其它強度值甚多。

表4-9、藍色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	4.42	3.32	3.19	3.47	3.40
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.28	1.92	1.84	2.09	1.77
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
點雲至規標平面平均距離	3.54	3.60	3.46	3.34	3.12	2.91	2.74
單次擬合平面精度	2.00	2.16	2.11	2.11	2.44	1.98	2.03
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
點雲至規標平面平均距離	2.05	2.25	1.74	1.39	0.99	0.82	0.60
單次擬合平面精度	0.99	1.60	1.55	1.55	0.83	0.68	0.40
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
點雲至規標平面平均距離	1.10	0.69	1.55	0.89	0.96	2.24	27.35
單次擬合平面精度	1.02	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

單位：mm

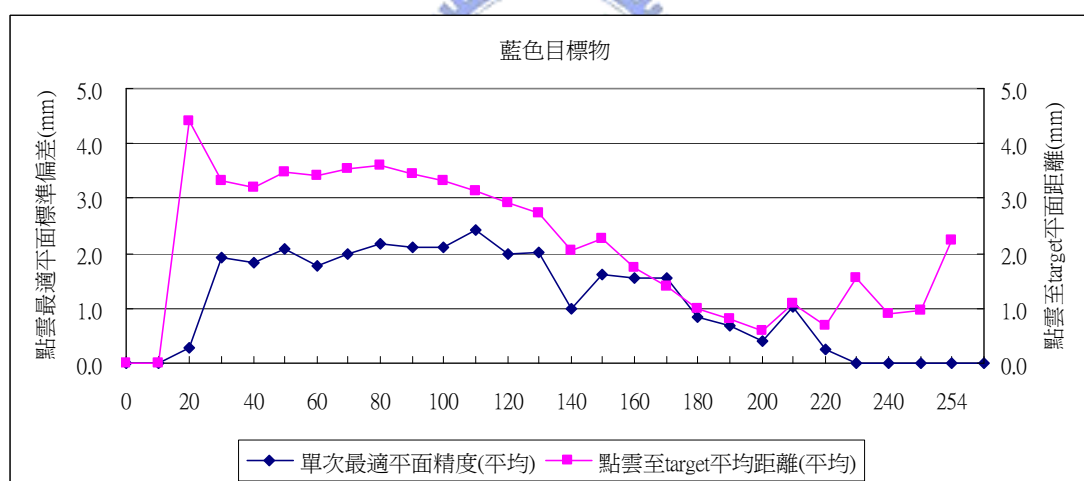


圖 4-9、藍色目標物點雲精密度與精確度分佈圖

(四) 黃色目標物與 Target 平面之差異：

黃色目標物以控制規標所組成之 Target 為基準，計算各點雲至此平面的平均距離，以為評估點雲資料正確性的一個指標。經五次整體點雲至 Target 平面之平均距離計算，得到黃色目標物整體之點雲至 Target 平面之平均距離為 2.31mm。再將計算成果依強度值分為三類進行點雲至 Target 平面之平均距離計

算：低強度值 0~90 其點雲至 Target 平面的平均距離為 2.53mm；中強度值 91~180 點雲至 Target 平面的平均距離為 2.55mm；高強度值範圍 181~255 其點雲至 Target 平面的平均距離為 1.54mm，但黃色目標物於強度值 255 時點雲至 Target 平面的平均距離 1.08mm 時，相較其它顏色於強度值 255 時點雲至 Target 平面的平均距離值都相當大如紅色 28.43mm；綠色 8.71mm；藍色 27.35mm，但黃色目標物差異卻相對較小。此外黃色目標物在佔整體數量 68% 時強度值範圍 91~180 時其最適平面精度最差(2.67mm)，但卻與假設之真值(Target 平面)差異最小，點雲至 Target 平面平均距離為 2.55mm，可以看出整體數量之 95% 數量位於強度值 91~255 間，雖最適平面精度震盪幅度頗大，但大致上點雲至 Target 平面平均距離呈下降狀況，由圖 4-5 可得知於強度值在 201~254 間不論是最適平面精度或點雲距離 Target 平面平均距離都呈震盪走勢。

表4-10、黃色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.84	2.32
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	1.09
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
點雲至規標平面平均距離	2.31	2.61	2.57	2.55	2.58	2.64	2.80
單次擬合平面精度	1.03	1.77	1.77	1.40	1.78	2.23	2.95
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
點雲至規標平面平均距離	2.25	2.79	2.56	2.37	2.37	2.27	1.60
單次擬合平面精度	1.42	3.78	3.16	3.89	3.40	4.37	1.77
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
點雲至規標平面平均距離	2.62	1.01	1.98	0.84	1.11	1.34	1.08
單次擬合平面精度	5.40	1.10	4.10	0.99	2.11	3.13	1.80

單位：mm



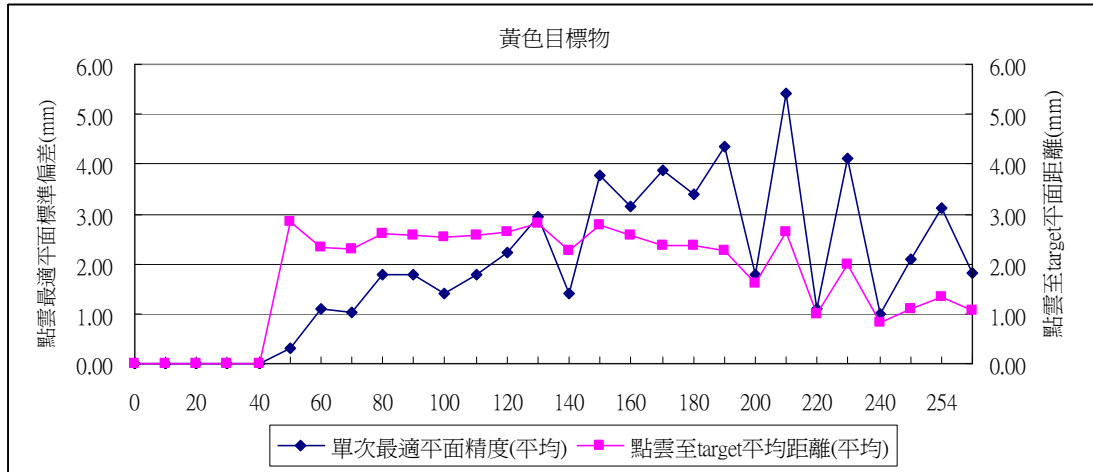


圖 4-10、黃色目標物點雲精密度與精確度分佈圖

(五) 白色目標物與 Target 平面之差異：

白色目標物亦以控制規標所組成之 Target 為基準，計算各點雲至此平面的平均距離，作為評估點雲資料正確性的一個指標。經五次整體點雲至 Target 平面之平均距離計算，得到白色目標物整體之點雲至 Target 平面之平均距離為 1.68mm。將強度值分為三類進行點雲至 Target 平面之平均距離計算：低強度值 0~90 之間僅有強度值 81~90 間有點雲，經計算其點雲至 Target 平面的平均距離為 3.12mm；中強度值 91~180 點雲至 Target 平面的平均距離為 2.38mm；高強度值範圍 181~255 其點雲至 Target 平面的平均距離為 1.56mm，但白色目標物於強度值 255 時之點雲至 Target 平面的平均距離為 1.28mm 時，與其它顏色該強度值之數據相較精確度較高。此外考量白色目標物之數量時，由於白色目標物於強度值 161 以上數量幾乎成平均分佈且此段強度值範圍佔總數之 71%，並且在此段強度值範圍其最適平面精度最佳(1.91mm)，與假設之真值(Target 平面)差異最小，點雲距離 Target 平面平均距離為 1.64mm。

表4-11、白色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表

Intensity	0.00	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Intensity	61~70	71~80	81~90	91~100	101~110	111~120	121~130
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	3.12	3.24	2.93	2.79	2.42
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.00	0.50	0.95	0.91	1.14
Intensity	131~140	141~150	151~160	161~170	171~180	181~190	191~200
點雲至規標平面平均距離	2.26	2.10	2.01	1.79	1.84	1.69	1.59
單次擬合平面精度	1.02	1.49	1.59	1.04	1.62	1.47	1.24
Intensity	201~210	211~220	221~230	231~240	241~250	251~254	255.00
點雲至規標平面平均距離	1.84	1.36	2.10	1.16	1.29	1.79	1.28
單次擬合平面精度	3.00	1.09	3.28	1.04	1.62	3.71	2.09

單位：mm

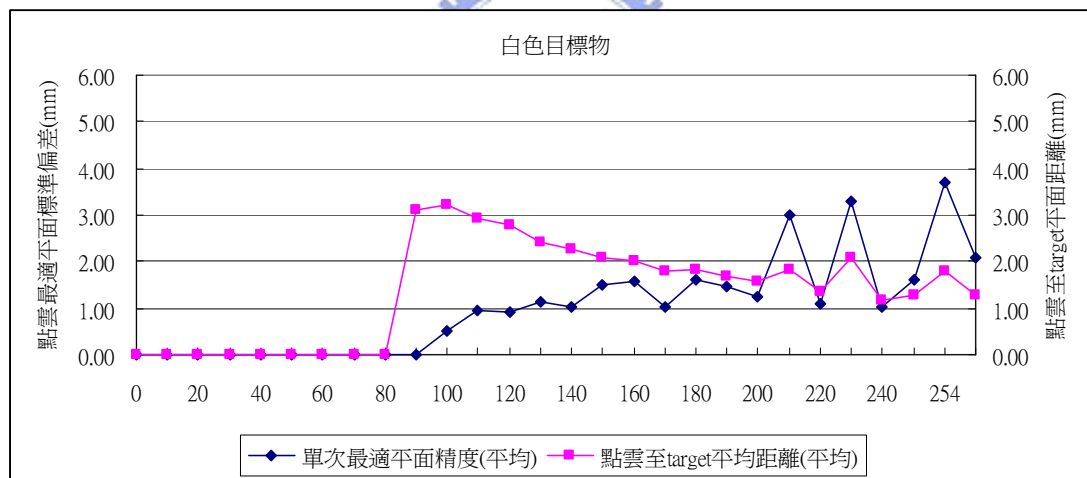


圖 4-11、白色目標物點雲精密度與精確度分佈圖

(六) 黑色目標物與 Target 平面之差異：

黑色目標物以控制規標所組成之 Target 為基準，計算各點雲至此平面的平均距離，以作為驗證點雲資料正確性的一個指標。經五次整體點雲至 Target 平面之平均距離計算，得到白色目標物整體之點雲至 Target 平面之平均距離為 2.39mm。將強度值分為三類進行點雲至 Target 平面之平均距離計算：低

強度值 0~90 其點雲至 Target 平面的平均距離為 2.10mm；中強度值 91~180 點雲至 Target 平面的平均距離為 1.10mm；高強度值範圍僅有 181~200 間和強度值 255 有點雲資料，其點雲至 Target 平面的平均距離為 3.82mm，但因強度值 255 之點雲至 Target 平面的平均距離高達 9.85mm 時。考量黑色目標物強度值與數量時其點雲 95% 集中在強度值 1~60 間其最適平面精度平均為 2.41mm，而此範圍中各點雲至 Target 平面的平均距離 2.26mm。由圖、可知強度值在 1~60 間點雲至 Target 平面的平均距離較其它顏色誤差來的低，且其它範圍點雲至 Target 平面的平均距離亦明顯較其它五種顏色差異來的低。

表4-12、黑色目標物各強度值點雲至規標平面平均距離表

<b>Intensity</b>	<b>0.00</b>	<b>1~10</b>	<b>11~20</b>	<b>21~30</b>	<b>31~40</b>	<b>41~50</b>	<b>51~60</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	2.10	2.49	2.44	2.42	2.18	1.93
單次擬合平面精度	0.00	2.32	2.88	2.84	2.89	2.18	1.37
<b>Intensity</b>	<b>61~70</b>	<b>71~80</b>	<b>81~90</b>	<b>91~100</b>	<b>101~110</b>	<b>111~120</b>	<b>121~130</b>
點雲至規標平面平均距離	1.95	1.72	1.67	1.54	1.38	1.35	1.03
單次擬合平面精度	1.49	1.20	1.20	1.03	0.99	0.33	0.00
<b>Intensity</b>	<b>131~140</b>	<b>141~150</b>	<b>151~160</b>	<b>161~170</b>	<b>171~180</b>	<b>181~190</b>	<b>191~200</b>
點雲至規標平面平均距離	0.73	1.18	0.87	1.02	0.00	1.15	0.45
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Intensity</b>	<b>201~210</b>	<b>211~220</b>	<b>221~230</b>	<b>231~240</b>	<b>241~250</b>	<b>251~254</b>	<b>255.00</b>
點雲至規標平面平均距離	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.85
單次擬合平面精度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

單位：mm

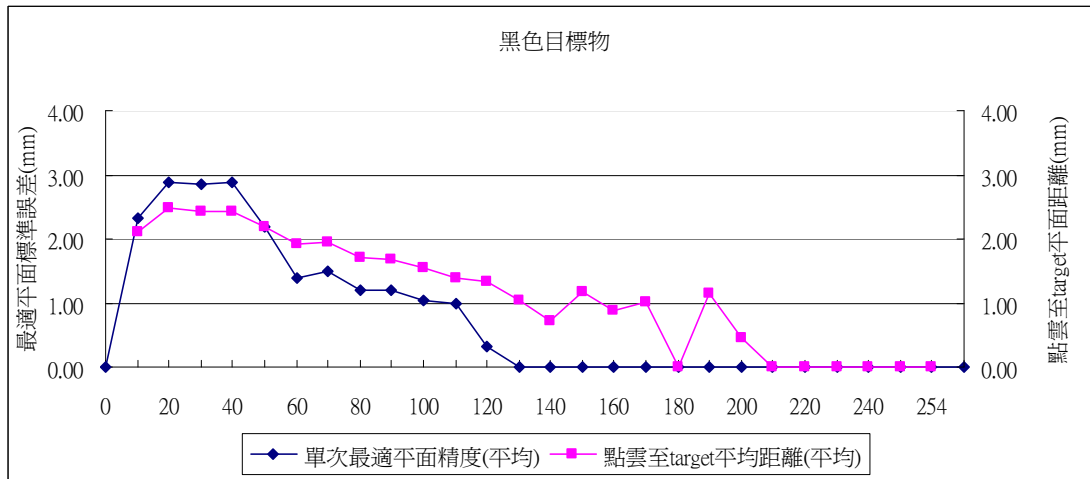


圖 4-12、黑色目標物點雲精密度與精確度分佈圖

在強度值對精度的影響實驗中，利用點雲最適平面計算方法可以得到各種顏色之目標物所組最適平面精度，其中以本實驗六種顏色而言，在整體點雲之最適平面精度比較中綠色最佳(1.79mm)、藍色(2.11mm)次之接著依序為白(2.17mm)、紅(2.52mm)、黑(2.74mm)最後為黃色目標物(3.04mm)。並配合強度值平均觀察，可知強度值於 41~140 範圍時精度最佳各顏色目標物於此段範圍所組最適平面精度都最佳都在 2mm 以下其中在此段範圍中所組最適平面精度最好的為白色目標物：0.91mm，而最差為藍色 1.97mm，但由於藍色與綠色目標物點雲大都集中於此段範圍，故此段範圍精度幾乎與整體精度相同；值得注意的是在此段範圍中黑色與紅色目標物與整體點雲所組最適平面精度比較下，此範圍精度頗佳，但這兩種顏色卻在此段範圍點雲數量極少，各佔整體比例分別為 14.35%及 5.41%對整體精度影響極小，故黑色與紅色目標物之最適平面精度仍然在六種顏色中為較差之顏色；以各顏色目標物而言，由於此段範圍仍較白色目標物平均強度值(205.37)為低，故此段強度值點雲僅佔總數量之 8.83%，亦對白色目標物整體精度影響有限；又以黃色目標物而言，由於黃色目標物平均強度值為 154.61 故此段範圍約佔整體之 44.25%，但在對黃色目標物各強度值區段進行計算後發現，黃色目標物在強度值越高區段其最適平面震

盪幅度越大，進而造成整體精度之下降，而此現象在白色目標物亦可發現，兩者震盪發生的區段都相同，都在強度值 201~210、221~230 和 251~254，在這三個區段中最適平面都較相鄰的強度值區段所組最適平面精度差，尤其以黃色差異最大，研判應是因此原因造成整體最適平面精度之下降。

此外經點雲至 Target 平面距離之計算後發現，利用此計算方法可以得到各種顏色之目標物點雲資料與真值(Target 平面)的正確度，對本實驗六種顏色之資料正確度而言，在整體點雲與 Target 平面之平均距離計算上以白色最佳(1.62mm)、黃色(2.31mm)次之接著依序為黑色(2.39mm)、紅色(2.83mm)、藍色(3.34mm)最後為綠色目標物(3.54mm)。配合強度值觀察，發現在強度值 141 以上時目標物點雲至 Target 平面平均距離皆在 2mm 以下，其中紅色目標物因無點雲資料故計算上為 0，而黑色目標物則僅有少數幾點，雖計算後距離僅 0.39mm 但此強度值區段數量平均總數不到 2 點，除此之外以藍色目標物的資料正確度最佳，其在強度值 141~254 之間各強度值區段點雲至 Target 平面平均距離為 1.26mm，綠色目標物則為次之其平均距離為 1.32mm，接著依次為白色目標物其強度值 141~254 之間各強度值區段點雲至 Target 平面平均距離為 1.71mm，最後為黃色目標物其強度值 141~254 之間各強度值區段點雲至 Target 平面平均距離為 1.90mm。在此亦可看出在同樣強度值下，綠色與藍色資料正確性仍優於白色與黃色。而在此範圍之外以強度值 1~140 為例，由於紅色與黑色目標物點雲皆集中於此段範圍，經計算點雲至 Target 平面距離後得到在此段強度值範圍中，黑色目標物點雲至 Target 平面距離最短為 1.78mm 其資料正確度最佳，而紅色目標物次之經計算為 2.39mm，但在此段範圍中最適平面精度最佳之綠色與藍色資料正確度卻最差，點雲至 Target 平面距離分別為 3.46mm 與 3.65mm，也較此兩種顏色在強度值 141 以上時為差，而白色與黃色目標物點雲至 Target 平面距離則分別為 2.55mm 與 2.79mm。

## 4-4 影響因子之關係

顏色與強度值之關係經實驗後，在選擇之六種目標物顏色中反射強度之強弱依次為：白、黃、綠、藍、黑、紅，且將資料統計可瞭解各顏色強度值趨近常態分佈，而亮色系顏色具有較佳的反射強度，但強度值分佈較離散；反之暗色系強度值較小，強度值分佈較集中，且反射強度值相似地其強度值分佈曲線大致相同，再經六種顏色資料整理後更可明顯看出越強反射強度資料越離散，且更朝高反射強度分佈。此外將各種顏色整體點雲資料進行分析，首先分別計算出各顏色整體點雲之平均反射強度、以及代表點雲資料精密度之點雲最適平面精度、代表點雲資料精確度之點雲至 Target 平面平均距離。再將此三參數及所代表之顏色輸入 Matlab 7.0 程式編寫軟體，以 Matlab 7.0 中可繪製三軸向之功能，分別繪製出顏色與其平均強度值和點雲精密度、顏色與其平均強度值和點雲精確度之關係，已瞭解其相互間之關係。

在目標物顏色與其平均強度值和點雲精密度之關係中，經計算各目標物整體點雲之最適平面精度與平均強度值後製成表 4-13，由表 4-13 中可以知道綠色目標物精度最佳(1.79mm)、藍色目標物(2.11mm)次之接著依序為白(2.17mm)、紅(2.52mm)、黑(2.74mm) 最後為黃色目標物(3.04mm)。依照表 4-13 中各顏色整體點雲之點雲最適平面精度與平均強度後，以 Matlab 7.0 繪製成三軸向之立體關係圖，如圖 4-13。由圖 4-13 與表 4-13 可知屬於高反射強度之白色與黃色整體點雲精度較差，但略優於反射強度最低之紅色與黑色，而中反射強度之綠色與藍色精度最佳，由前面第四章實驗之分析可以知道，強度值於 41~140 範圍時精度最佳各顏色目標物於此段範圍所組最適平面精度都最佳都在 2mm 以下，其精度依次為：白色目標物(0.91mm)、黃色目標物(1.58mm)、綠色目標物(1.69mm)、藍色目標物(2.05mm)。但因綠色與藍色目標物點雲大都位於此段強度值區間，使綠色與藍色目標物為精度最佳之顏色。而白色與黃色目標物雖在

此區段精度較高但所佔資料量較少，且超過此段強度值範圍時最適平面精度有越來越差跡象，並有精度曲線呈震盪現象之發生，如強度值 201~210、221~230 和 251~254 區段，也因此原因造成高強度值範圍之白色與黃色目標物整體最適平面精度最差。此外黑色與紅色目標物，雖在強度值 11~40 之間仍具有少量點雲資料，但此區段之最適平面精度仍較其餘四種顏色為差分別為 2.41mm 和 2.65mm。

表4-13、顏色與其平均強度值和最適平面精度表

顏色種類	強度值平均	擬合平面精度(mm)
White	205.37	2.17
Yellow	154.61	3.04
Green	88.79	1.79
Blue	71.6	2.11
Black	27.45	2.79
Red	21.25	2.52

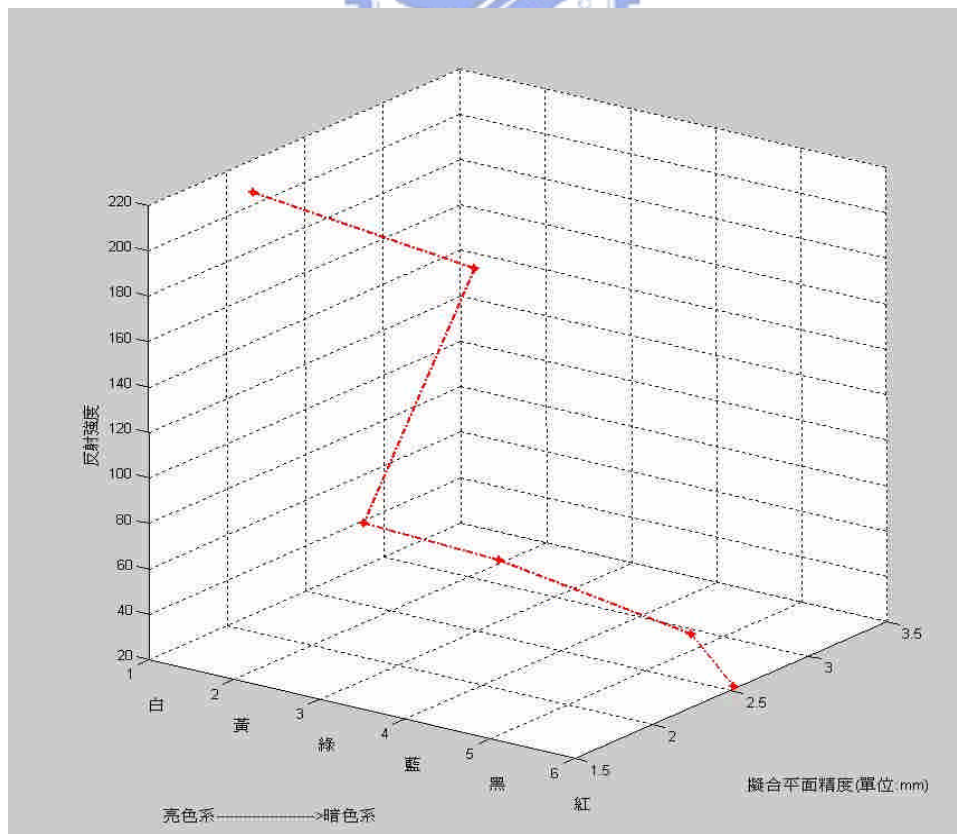


圖 4-13、顏色與其平均強度值和點雲精密度之關係圖

在整體點雲資料精確度計算中，以各目標物整體點雲計算至 Target 之平均距離，並與各目標物平均強度值記錄成表 4-14，再利用 Matlab 7.0 繪製成以顏色、平均強度值和點雲至 Target 之平均距離之三軸向關係圖，如圖 4-14。由表 4-14 與圖 4-14 可知在整體點雲與 Target 平面之平均距離計算上以白色最佳(1.62mm)、黃色(2.31mm)次之接著依序為黑色(2.39mm)、紅色(2.83mm)、藍色(3.34mm)而綠色目標物(3.54mm)最差。與上面最適平面精度結合發現在強度值 41~140 範圍時各顏色之點雲精密度都在 2mm 以下，但在此區段強度值範圍中點雲精確度計算較差，其精確度比較依次由高至低依次為：紅色(1.24mm)最佳，黑色(1.63mm)次之，依序為黃色(2.55mm)、白色(2.90mm)、藍色(3.16mm)而綠色目標物(3.50mm)最差，恰與點雲資料之精密度相反。而在強度值 141 以上卻發現點雲至 Target 平面之平均距離除在強度值 255 外皆有明顯下降趨勢，以資料精確度而言在強度值 141~254 範圍間精確度最高，各顏色點雲至 Target 平面之平均距離皆在 1.82mm 以下，而強度值 255 在大部分的顏色中點雲至 Target 平面之平均距離都很高，研判應為高強度反射值造成之三維雷射掃瞄儀之多路徑效應。綜合點雲最適平面精度計算與點雲至 Target 平面距離此兩種方法，可瞭解點雲在強度值 41~140 時點雲資料彼此間的資料精密度最佳，但資料與真值的精確度卻較差，而在強度值 141~254 間時，資料間的精密度較差，但資料與真值之精確度卻較佳。

表4-14、顏色與其平均強度值和點雲至Target平面距離表

顏色種類	強度值平均	點雲至 Target 平面距離(mm)
White	205.37	1.68
Yellow	154.61	2.31
Green	88.79	3.54
Blue	71.6	3.34
Black	27.45	2.39
Red	21.25	2.83



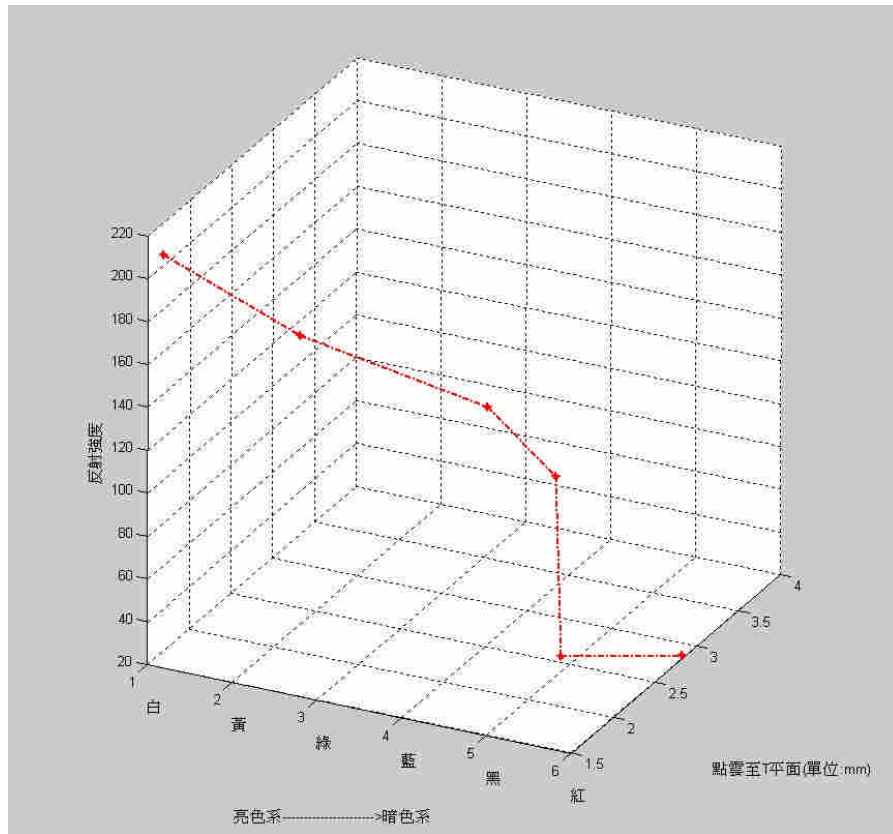



圖 4-14、顏色與其平均強度值和點雲精確度之關係



## 第五章 結論與建議

本研究旨在探討三維雷射掃瞄儀目標物顏色因子對於反射強度及精度影響之研究，在研究中先掃瞄所選擇的六種單色光造成之目標物顏色，並將掃瞄所得之整體點雲資料先進行強度值之分類，將整體點雲依照強度值不同共分為 27 個強度值區段，以供後續實驗探討顏色與強度值之關係，以及強度值對精度之影響。顏色與強度值之關係經實驗後，在選擇之六種目標物顏色中反射強度之強弱依次為：白、黃、綠、藍、黑、紅，且將資料統計可瞭解各顏色強度值趨近常態分佈，而亮色系顏色具有較佳的反射強度，但強度值分佈較離散；反之暗色系強度值較小，強度值分佈較集中，且反射強度值相似地其強度值分佈曲線大致相同，再經六種顏色資料整理後更可明顯看出越強反射強度資料越離散，且更朝高反射強度分佈。



本研究在於提供一種探討顏色與強度值和精度三者之間關係的方法，實驗中以紙張為掃描之範例，故所得成果將是此實驗所選特定材質紙張之成果，而非通用之結果。本研究成果雖不是通用之結果，但方法卻可提供日後欲進行相關類似之研究，依此研究方法進行顏色與強度值和精度三者相關之分析。此外由於目標物顏色的種類繁多，但大部分顏色都屬各波段之可見光結合而成，雖實驗中對於目標物顏色的選擇仍以單色光顏色為主，但仍有多種單色光未做實驗，故仍未可以此研究中之六種顏色，而判定出目標物顏色因子對三維雷射掃瞄儀造成在強度值與精度之影響，故建議在後續相關研究目標物顏色因子對於反射強度及精度之影響時，可考慮更多單色光造成之顏色目標物進行分析。此外由於本研究在探討目標物顏色因子對於反射強度及精度之影響時，目標物選擇以適合近距離掃瞄之紙張為掃描材質，但由過去相關研究中可知材質對於定位精度之影響亦非常大，故建議後續進行相關研究時可以將顏色因子結合各種材質進行研究。

## 參考文獻

- [1]. 徐元俊,「三維雷射掃瞄儀點雲資料密度對最適平面求解精度影響」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, 2006。
- [2]. 粘基非,「反射標與距離檢定對三維雷射掃瞄儀精度影響評估—以 Mensi GS200 為例」, 國立交通大學土木工程學系碩士論文, 2005。
- [3]. 劉嘉銘,「光達點雲資料特徵萃取之研究」, 國立成功大學測量工程研究所碩士論文, 2005。
- [4]. 郭朗哲,「三維雷射掃瞄儀於崩塌地地形製圖之應用」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, 2004。
- [5]. 陳國永,「3D 雷射掃瞄技術應用於隧道變形量測之研究」, 國立中興大學土木工程學系碩士論文, 2004。
- [6]. 黃文杰,「利用 3D 雷射掃瞄儀進行油槽形變監測之研究」, 國立中興大學土木工程學系碩士論文, 2004。
- [7]. 黃偉城,「利用地面三維雷射掃瞄儀研究斷層變形之可行性-2003 年 Mw6.5 台東成功地震池上斷層之同震及震後變形」, 國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 2004。
- [8]. 劉燈烈,「三維雷射掃瞄儀點雲資料的平差結合與影像敷貼」, 國立成功大學測量工程研究所碩士論文, 2004。
- [9]. 賴志凱,「地面雷射掃瞄儀的分析與檢定」, 國立成功大學測量工程研究所碩士論文, 2004。
- [10]. 何維信, 航空攝影測量學, 國立編譯館, 大中國圖書公司, 2000。
- [11]. Devrim Akca. "Matching of 3D surfaces and their intensities", Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006.
- [12]. Derek D. Lichti, Stuart J. Gordon, and Taravudh Tipdecho. "Error Models and Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Networks",

Journal of Surveying Engineering, 2005.

- [13]. Jeong-Heon Song , Soo-Hee Han , Kiyun Yu ,Yong-II Kim. "ASSESSING THE POSSIBILITY OF LAND-COVER CLASSIFICATION USING LIDAR INTENSITY DATA", Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2002.
- [14]. Gordon, S., Lichti, D., and Stewart, M. "Application of a High-resolution, Ground-based Laser Scanner for Deformation Measurements", The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurement. 19-21 March, 2001.
- [15]. Boehler, W., G.Heinz, A. Marbs. "The Potential of Non-contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording", Proceedings of CIPA International Symposium, Potsdam, Germany, 2001.
- [16]. Paul R. Wolf and Bon A. Dewwit, 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3rd edition.
- [17]. Runne, H., Niemeier, W., and Kern, F. Application of Laser Scanners to Determine the Geometry of Buildings. Proc., Optical 3-D Measurement Techniques V, Wichmann, Karlsruhe, Germany, 41-48,2001.
- [18]. Johansson M., 2002. Explorations into the Behaviour of Three Different High-Resolution Ground-Based Laser Scanners in the Built Environment, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing Commission V, Symposium 2002 September, Corfu, Greece.
- [19]. Lichti, D. D., M. P. Stewart, M. Tsakiri and A. J. Snow. Benchmark Testing on a Three-Dimensional Laser Scanning System, Geomatics Research Australasia, 72:1-23, 2000.
- [20]. Nagihara,S.,Hargis,J.,Goss,R.,Wright,J.,Hill,G..Sub-Centimeter-Resolution Digital Topography and Surface Lithology Models Obtained from 3-D Laser Scanner Survey in the South prong Canyon, Texas Panhandle, CSM-ASPRS Conference and Technology Exhibition,XXII.FIG,Washington,2002.

- [21].Ono,N.,Tonoko,N.,Sato,K.,2000.A Case Study on the Landslide by the 3D Laser Mirroe Scanner, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam ,2000, pp. 593-598.
- [22].Stafne, M. A., Mitchell, L. D. and West, R. L.. Positional Calibration of Galvanometric Scanner Used in Laser Doppler Vibrometers,18.Measurement, vol. 28 pp.47-59, 2000.
- [23].Tucker C., 2002. Testing and Verification of the Accuracy of 3D Laser Scanning Data, Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002.

