

國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 學 系

碩 士 論 文

三 維 雷 射 掃 瞄 儀 反 射 標 定 位 精 度 提 升 之 研 究

- 以 Trimble Mensi GS200 為 例

研 究 生：曾 信 翰

指 導 教 授：陳 春 盛

中 華 民 國 九 十 七 年 七 月

三維雷射掃瞄儀反射標定位精度提升之研究

-以 Trimble Mensi GS200 為例

A Study on the Improving 3D Laser Scanner Target's Positioning Precision and Accuracy

-A Case of Trimble Mensi GS200

研究生：曾信翰

Student：Xin-Han Zeng

指導教授：陳春盛

Advisor：Dr. Chun-Sung Chen

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 of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

中文摘要

使用三維雷射掃瞄儀掃描時，單一測站往往無法完整涵蓋被測物的範圍，常需要整合多個測站的點雲資料來達成目的，點雲連結問題主要為求得各測站坐標系統間的轉換關係，或轉換到相同坐標系統。其中磁性規標控制點法為利用相鄰測站之重疊觀測區域裡擺設磁性反射標當控制點，反射標主要作用是為了提供雷射掃瞄點雲資料一個明顯而且定位精準的特徵，只要有三個以上的控制點，即可求得相連測站之三維座標轉換參數，故反射標的定位精度將會對點雲結合的精度有極大影響。

本研究擬以 Trimble Mensi GS200 型三維雷射掃瞄儀掃描儀選定適當試驗場進行實驗，欲提升反射標定位精度，主要考量因素有二：一為經三維雷射掃瞄儀掃描出來的點雲資料會因為量測環境而產生雜訊，故使用六種雜訊濾除方法，距離濾除法、最小角度濾除法、最適平面法、高斯平滑、中值平滑、平均平滑濾除反射標原始點雲中的量測雜訊點，以求得更好的反射標定位精度；二為反射標選擇上也會影響到反射標定位精度，不同的反射標會有不同的定位精度，除使用原廠所率定之反射標外，另選擇自製反射標進行實驗，並比較自製反射標與原廠反射標定位精度差異。

研究分 30、60、90 公尺三段距離進行實驗，成果發現，使用六種雜訊濾除方法確實能提升反射標定位精度，其中以最適平面法為最佳，無論是內部精度或外部精度。自製反射標與原廠反射標定位精度比較後，內部精度方面，自製反射標優於原廠反射標；外部精度方面，在 30 公尺及 60 公尺原廠反射標優於自製反射標，90 公尺處自製反射標優於原廠反射標。

A Study on the Improving 3D Laser Scanner Target's Positioning Precision and Accuracy

-A Case of Trimble Mensi GS200

Student : Xin-Han Zeng

Advisor : Dr. Chun-Sung Chen

Department of Civil Engineering National Chiao Tung University

Abstract

When using 3D Laser scanner, multiple scans are required for a complete scan project. The point clouds of each scan is defined a local coordinate, data sets of multi-station must be merged into a uniform coordinate system or each coordinate system transforming parameter. One way is put at least three targets in overlapping scan stations to get coordinate system transforming parameter, so target's positioning precision and accuracy is important.

The study use Trimble Mensi GS200 3D laser scanner to experiment. In order to improve target's positioning precision and accuracy, we consider two factors: 1. Point clouds make noises with environment, and therefore use six noise filterings: remove scatter points 、 remove spikes 、 fit plane 、 gaussian smooth 、 median smooth 、 averaging smooth to filter point cloud's noises. 2. Different targets have different precision and accuracy. Besides original targets, we use handmade targets and compare the relationship with both targets.

Experiment divide into three distances 30m 、 60m 、 90m, the result found using six noise filterings improve target's positioning precision and accuracy certainly. Behind comparing the relationship with original targets and handmade targets, handmade targets are better than original targets in precision part. In 30m and 60m distances original targets are better than handmade targets in accuracy part, but in 90m distance handmade targets are better than original targets in accuracy part.

致謝

在交大的兩年眼睛眨一下就過去了，時間真是飛逝如梭，致謝是本論文最後一部份，也將為我的碩士學位畫下一個最完美的句點。首先當然要先感謝我在學兩年的指導教授陳春盛老師這兩年來的悉心教導，對論文的寫作及問題給予最大的鼓勵與批評改正，幫助我渡過重重難關，雖然我已畢業，但老師您永遠是我的指導教授；接下來要感謝的是陳老師旗下大弟子，也就是博士班學長：阿KEN塞、達哥、俊寰學長，特別是阿肯學長在論文上提出的意見及改正，達哥快樂的澎湖之旅，俊寰學長課業上的指導。還有已經畢業的學長：傑扣學長、胖虎學長、熱狗學長，這三位學長在我剛進交大懵懂無知時，教我如何面對種種難關，不論是課業上或者是做人處事上，各位學長們也是運動時的好伙伴。

除了在課業上要感謝的人外，當然也要感謝在研究所中娛樂上的酒肉朋友：小閻、小光、小亨利，我們除了在運動場上廝殺外，在電腦前面廝殺的更厲害，有了他們幾個，使我的生活更多彩多姿，使我有動力繼續向前，也讓我的等級越來越高Orz。當然也要感謝我的同學：富傑、阿嵐、歷韋、逸晴、老吳、紫猗各位同學的幫助，如：富傑都會在咪聽時帶東西給我們吃、阿嵐搞笑的講話方式、歷韋天兵天兵等，雖然我要畢業了，但我不會忘記你們的。另外也要感謝學弟丕毛、建成及我的女友，丕毛幫我搬儀器，建成幫我寫了一個小程式，我的女友也不時的督促我，都使我的論文更加順利快速完成。要感謝的人實在太多太多了，這邊沒提到的先跟您說聲對不起，但我的內心還是由衷的感謝你們的。

這一本論文，看起來是由一堆冰冷的文字構成的，但裡面有著大家的辛苦才完成的，因此我相當珍惜它，最後將此論文獻給我最親愛的父母，以表示對你們的尊敬，沒有你們就沒有這本論文，謝謝你們。

目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	錯誤! 尚未定義書籤。
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VIII
第一章 前言.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 研究方法.....	3
1-3 研究流程.....	4
1-4 論文架構.....	6
第二章 理論基礎.....	7
2-1 三維雷射掃描儀系統.....	7
2-1-1 掃描原理.....	8
2-1-2 坐標轉換.....	11
2-1-3 誤差來源.....	13
2-1-4 點雲結合.....	14
2-2 基於三個控制點的點雲對齊方法.....	16
2-2-1 控制點選擇.....	17
2-2-2 三點對齊坐標變換方法.....	18
2-2-3 三點定位的精度分析.....	20
2-3 點雲雜訊濾除方法.....	21
2-3-1 距離、最小角度率除法.....	21
2-3-2 最適平面法.....	22

2-3-3 點資料平滑化.....	27
第三章 反射標內部精度.....	29
3-1 外業掃描工作規劃.....	29
3-2 使用儀器、軟體說明.....	31
3-3 實驗設計與資料處理.....	33
3-1-1 實驗設計.....	33
3-1-2 實驗資料.....	36
3-1-3 內業資料處理流程.....	37
3-4 反射標內部精度.....	42
第四章 反射標外部精度.....	59
4-1 實驗設計與資料處理.....	59
4-1-1 實驗設計.....	59
4-1-2 實驗資料.....	60
4-1-3 內業資料處理流程.....	61
4-2 反射標外部精度.....	64
第五章 結論與建議.....	80
參考文獻.....	82



表目錄

表 2-1 三維雷射掃描儀基本資料.....	7
表 2-2、三維雷射掃描儀的誤差分類與誤差來源.....	14
表 3-1、Trimble GS200 型三維雷射掃描儀規格.....	31
表 3-2、30 公尺自製反射標(Object)擬合平面 RMS 值.....	44
表 3-3、60 公尺自製反射標(Object)擬合平面 RMS 值.....	44
表 3-4、90 公尺自製反射標(Object)擬合平面 RMS 值.....	44
表 3-5、30 公尺原廠反射標(Target)擬合平面 RMS 值.....	45
表 3-6、60 公尺原廠反射標(Target)擬合平面 RMS 值.....	45
表 3-7、90 公尺原廠反射標(Target)擬合平面 RMS 值.....	45
表 3-8、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)擬合平面之平均 RMS 值.....	46
表 3-9、原始擬合平面 RMS 與六種雜訊濾除方法擬合平面 RMS 較差表.....	47
表 3-10、30 公尺自製反射標(Object)中心點位標準偏差 σ_s	49
表 3-11、60 公尺自製反射標(Object)中心點位標準偏差 σ_s	49
表 3-12、90 公尺自製反射標(Object)中心點位標準偏差 σ_s	50
表 3-13、30 公尺原廠反射標(Target)中心點位標準偏差 σ_s	50
表 3-14、60 公尺原廠反射標(Target)中心點位標準偏差 σ_s	50
表 3-15、90 公尺原廠反射標(Target)中心點位標準偏差 σ_s	51
表 3-16、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)中心點位平均標準偏差 σ_s	52
表 3-17、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)中心點位平均標準偏差 σ_s 較差表...	52
表 3-18、自製反射標(Object)與原廠反射標(Target)擬合平面平均 RMS 值與中心點位 平均標準偏差 σ_s 關係.....	53
表 3-19、自製反射標與原廠反射標中心點位標準偏差 σ_s 比較表.....	57
表 3-20 自製反射標與原廠反射標中心點位標準偏差 σ_s 較差表.....	58
表 4-1 全測儀觀測計算所得之十八個反射標中心點位坐標.....	60

表 4-2、30 公尺自製反射標原始點雲中心點位坐標六參數轉換成果表	62
表 4-3、30 公尺自製反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表	64
表 4-4、60 公尺自製反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表	65
表 4-5、90 公尺自製反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表	65
表 4-6、30 公尺原廠反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表	66
表 4-7、60 公尺原廠反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表	66
表 4-8、90 公尺原廠反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表	67
表 4-9、六種雜訊濾除方法與原始點雲 Δx 、 Δy 、 Δz 正負值差距最大表	68
表 4-10、六參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲外部精度	71
表 4-11、六參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲 RMS-s 值	71
表 4-12、七參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲外部精度	72
表 4-13、七參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲 RMS-s 值	72
表 4-14、六參數轉換原始點雲與六種雜訊濾除後點雲 RMS-s 值較差表	73
表 4-15、七參數轉換原始點雲與六種雜訊濾除後點雲 RMS-s 值較差表	74
表 4-16、自製反射標與原廠反射標六參數與七參數轉換外部精度較差表	76
表 4-17、自製反射標及原廠反射標中心點位坐標外部精度比較表	78
表 4-18、自製反射標及原廠反射標中心點位坐標外部精度較差表	79

圖目錄

圖 1-1. 研究流程圖.....	5
圖 2-1、時間差量測法示意圖.....	8
圖 2-2、三角法：單相機法.....	9
圖 2-3、三角法：雙相機法.....	10
圖 2-4、三維雷射掃瞄儀與物體間相對坐標系示意圖.....	11
圖 2-5、掃瞄儀坐標系與物空間坐標系之關係圖.....	12
圖 2-6、基於三個控制點的點雲對齊方法示意圖.....	16
圖 2-7、Mensi 生產之反射標.....	17
圖 2-8、三點坐標變換示意圖.....	19
圖 2-9、距離濾除法.....	21
圖 2-10、最小角度濾除法.....	22
圖 2-11、平均平滑法(Averaging).....	27
圖 2-12、中值平滑法(Median).....	28
圖 2-13、高斯平滑法(Gaussian).....	28
圖 3-1 外業掃描流程圖.....	30
圖 3-2、Trimble GS200 型三維雷射掃瞄儀距離與掃瞄精度關係圖.....	32
圖 3-3、LiDAR 處理程式.....	32
圖 3-4、左為自製反射標(Object)；右為原廠反射標(Target).....	33
圖 3-5、自製反射標與原廠反射標佈設方式.....	34
圖 3-6、30m 處架設三維雷射掃瞄儀掃描情形.....	34
圖 3-7、外業掃描點雲成果.....	35
圖 3-8、將 ASC 點雲資料以記事本開啟.....	36
圖 3-9、原廠反射標點雲.....	37
圖 3-10、自製反射標點雲.....	37

圖 3-11、30m Target1 圓形部份原始點雲不同視角原始點雲資料	38
圖 3-12、六種雜訊濾除後 30m Target1 之點雲資料.....	38
圖 3-13、六種雜訊濾除後之點雲資料不同視角比較圖.....	39
圖 3-14、RealWorks4.2 Registration Target Analyzer Tool.....	40
圖 3-15、Target Analyzer Tool 解算反射標中心點位坐標及 RMS 值	40
圖 3-16、內業流程圖.....	41
圖 3-17、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)平均擬合平面 RMS 值折線圖.....	46
圖 3-18、高內部精度(精密度高)；低內部精度(精密度低).....	48
圖 3-19、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)中心點位平均標準偏差 σ_s 折線圖..	52
圖 3-20、30 公尺自製反射標(Object)RMS 與 σ_s 關係.....	54
圖 3-21、60 公尺自製反射標(Object)RMS 與 σ_s 關係.....	54
圖 3-22、90 公尺自製反射標(Object)RMS 與 σ_s 關係.....	54
圖 3-23、30 公尺原廠反射標(Target)RMS 與 σ_s 關係.....	55
圖 3-24、60 公尺原廠反射標(Target)RMS 與 σ_s 關係.....	55
圖 3-25、90 公尺原廠反射標(Target)RMS 與 σ_s 關係.....	55
圖 4-1、全測儀觀測反射標示意圖.....	59
圖 4-2、六參數及七參數轉換程式.....	62
圖 4-3、外部精度分析流程圖.....	63
圖 4-4、自製反射標編號 1 三段距離原始點雲變化.....	68
圖 4-5、原廠反射標編號 1 三段距離原始點雲變化.....	68
圖 4-6、六參數轉換 Δ RMS-s 折線圖	73
圖 4-7、七參數轉換 Δ RMS-s 折線圖	74
圖 4-8、自製反射標六參數與七參數轉換外部精度較差圖.....	76
圖 4-9、原廠反射標六參數與七參數轉換外部精度較差圖.....	76
圖 4-10、六參數轉換自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位坐標外部精度....	78
圖 4-11、七參數轉換自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位坐標外部精度....	79

第一章 前言

1-1 研究動機與目的

近年來使用三維雷射掃瞄儀於各種工程應用上越來越受到重視，舉凡土木建設工程、變形監測、數位古蹟典藏、隧道測量、逆向工程、自然景觀維護等，皆須實施現地的測量以獲得被測物的三維空間資訊，是目前應用相當廣泛的技術。應用三維雷射掃瞄儀測量具有以下優點，儀器只需要一個立足點，即能以不接觸到物體的情況下快速獲得被測物體表面高密度以及高精度的三維點位，有別於傳統測量的針對被測物體單一特徵點進行量測，三維雷射掃瞄儀可以說是屬於一種面的測量；三維雷射掃瞄儀除具有快速、高精度、高密度獲得物體表面空間資訊的優點外，更解決了因觀測者所造成的人為觀測誤差；三維雷射掃瞄儀為一主動式量測，在黑暗中亦可由儀器主動發射雷射光源進行量測，對於在黑暗中的作業也有實質上的幫助。三維雷射掃瞄儀的發明突破了以往的傳統測量方法，能精確、大量、快速獲得被測物的表面空間資料，對於從事空間資訊建立及分析的專家而言，無疑將是一項強大而有力的空間資訊取得的工具。

經三維雷射掃瞄儀作業後所得之資料為均勻密佈於被測物體表面的三維點資料，一般皆以點雲 (Point Cloud) 稱之，每一個點資料包含著空間坐標、反射強度值等資訊。然而單一測站往往無法完整涵蓋被測物的範圍，常需要整合多個測站的點雲資料來達成目的，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各測站坐標系統間的轉換關係，或轉換到相同坐標系統，目前所知的點雲連結方法有四：共軛面轉換法、磁性規標控制點法、測站後視稜鏡法、及曲面匹配法(曾義星、史天元，2002)。以上四種點雲連結方法中，磁性規標控制點法為利用相鄰測站之重疊觀測區域裡擺設反射標當控制點，反射標主要作用是為了提供雷射掃瞄點雲資料一個明顯而且定位精準的特徵，只要有三個以上的控制點，即可求得相連測站之三維座標轉換參數，因此反射標的定位精度將會對點雲結合的精度有極大的影響。

一般來說，三維雷射掃瞄儀的廠商會生產原廠磁性反射標以供使用者於點雲結合者當控制點使用，反射標中心坐標計算方法為依反射標反射強度差異篩選出反射標圓形部分點雲，再將圓形部份所有點雲資料取其平均坐標即得，而三維雷射掃瞄儀量測所得到的點雲資料，會因量測的環境，如空氣粒子、測物材質、顏色等而產生一些量測的雜訊，因此反射標中心坐標也易受原始點雲中雜訊而影響其定位精度。因此本研究以提升三維雷射掃瞄儀反射標定位精度為主要研究對象，分 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離，使用六種不同雜訊濾除方法，距離濾除法、最小角度濾除法、最適平面法、點資料平滑化（高斯平滑、中值平滑、平均平滑）濾除反射標原始點雲中的量測雜訊點，以求得更好的反射標定位精度。

除使用雜訊濾除方法來提升反射標定位精度外，反射標的選擇也是一個影響定位精度之重要因素，不同的反射標會有不同的定位精度，故本研究中除使用原廠反射標外，亦使用自製之反射標進行試驗，主要原因為原廠反射標價格昂貴且購買管道僅有生產三維雷射掃瞄儀公司，而自製反射標成本低廉並可自行製作，若自製反射標定位精度與原廠反射標定位精度相比較下差異性不高或甚至更佳時，對於三維雷射掃瞄儀的使用者將是另外一種選擇，因此可利用此次實驗得到原廠反射標與自製反射標定位精度的差異；另一原因為若以單一反射標探討雜訊濾除對反射標定位精度的影響，會顯得太過主觀，故選用兩種反射標來當作此次實驗的對象。

1-2 研究方法

在本研究所選用的三維雷射掃瞄儀是隸屬於法國 Trimble 的子公司 Mensi 所生產的 GS200 型，適用於中長距離的掃瞄作業；反射標為 Mensi 原廠所率定製造的反射標 (Target) 與自製反射標 (Object)。

本論文主要以提升反射標定位精度為研究對象，分 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離進行測試，分別對這三段距離中原廠反射標與自製反射標之原始點雲使用六種濾除方法加以改正其定位精度，並比較在各測試距離中能改善的幅度大小及兩種反射標的定位精度差異。定位精度可分內部精度與外部精度，故本研究主要有兩個主要作業：1. 反射標中心點位坐標內部精度差異比較；2. 反射標中心點位坐標外部精度分析。

1. 反射標內部精度差異

本研究於試驗場牆面上佈設原廠反射標及自製反射標，使用 GS200 型三維雷射掃瞄儀分三段距離分別掃描原廠反射標及自製反射標，對反射標使用距離濾除法、最小角度濾除法、最適平面法、高斯平滑、中值平滑、平均平滑共六種雜訊濾除方法濾除反射標原始點雲的雜訊後，再利用 RealWorks Registration Target Analyzer Tool 計算出反射標中心點位坐標。利用重複觀測，比較三種距離以及六種濾除方法對反射標內部精度的差異，以得到原始點雲與濾除雜訊後點雲後之反射標內部精度變化，並比較原廠反射標與自製反射標內部精度差異。

2. 反射標外部精度分析

欲了解反射標外部精度，因分析反射標內部精度時已經求得三段距離中原廠反射標與自製反射標的中心點位坐標，故先比較三段距離中六個雜訊濾除方法中各反射標中心坐標的差異量後，再使用全測儀對反射標進行觀測，以全測儀觀測所得之坐標當做參考已知坐標，各距離掃描原始點雲定位坐標以及各種濾除方法所得之反射標中心點位坐標當觀測坐標作六參數與七參數轉換來進行外部精度的分析作業。

1-3 研究流程

本研究流程圖如圖 1-1，詳細步驟說明如下：

一、確定研究目標

確定本身想要研究的目標，例如本論文以三維雷射掃瞄儀為主要的研究目標。

二、文獻回顧

以研究目標為主題收集國內外相關文獻，從文獻中找出可行之研究題目及方向，探討可行性，試圖找出合適之題目。

三、建立研究題目

經由國內外文獻回顧後，確定合適作為研究之題目，並撰寫出研究之動機與目的。

四、設計研究方法

研究題目以及研究動機與目的確定後，即可設計一可合乎流程的研究方法，擬定研究的流程及步驟。

五、實施外業計劃

外業計劃在整個研究流程中屬最重要，外業的成果影響了整個研究的結果，因此必須按照設計之外業計劃，按部就班完成所有外業內容。

六、成果探討

屬內業作業部分，經由外業所得之各項數據，選定合適的數學模式進行數值分析之動作。

七、結論與建議

歸納研究成果，提出結論以及後續研究之建議。



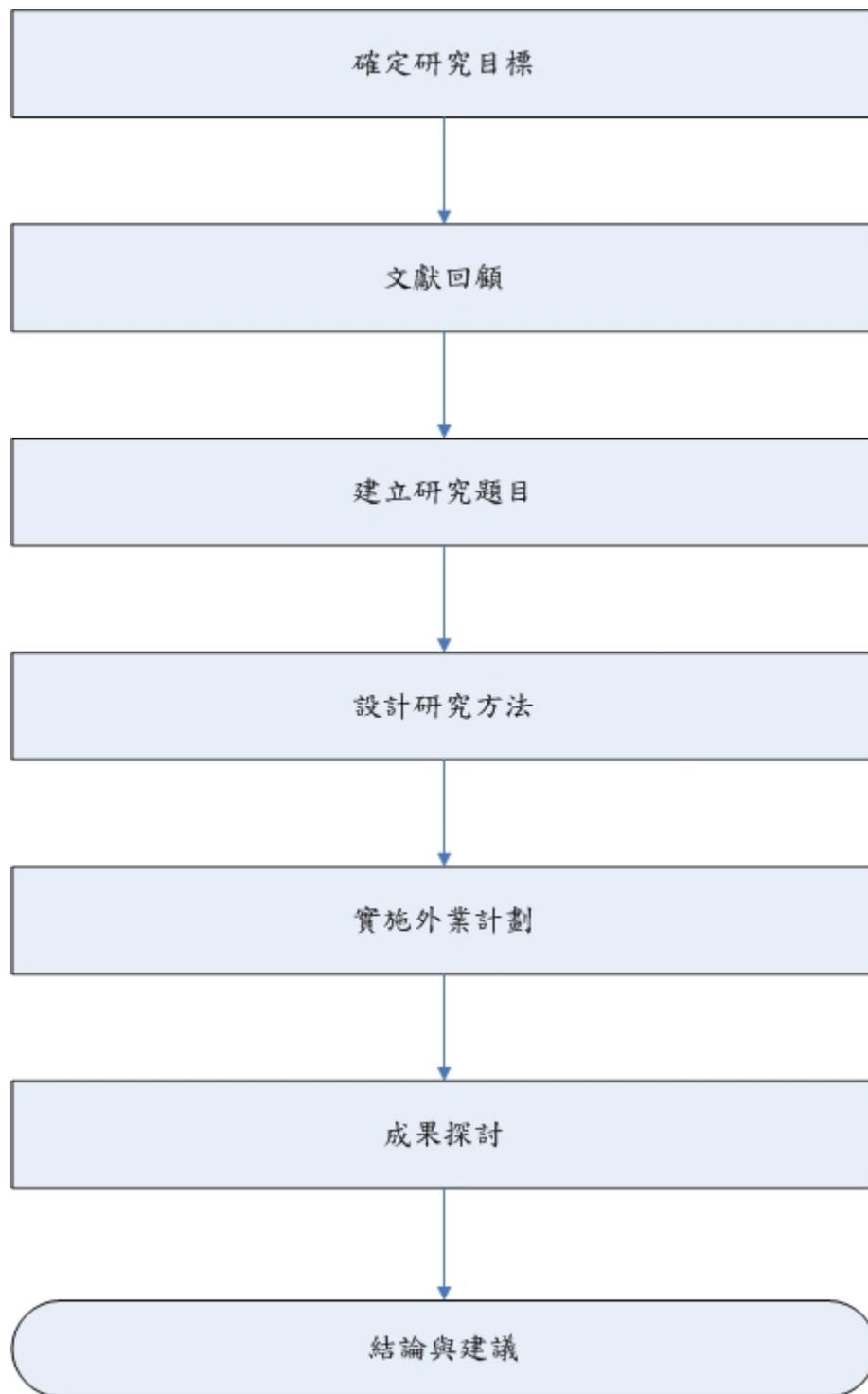


圖 1-1.研究流程圖

1-4 論文架構

本論文之基本架構共分為五個章節，各章節的研究內容依序簡要概述如下：

第一章 前言

簡述本研究之動機與目的、研究方法研究流程以及論文組織架構。

第二章 理論基礎

概述三維雷射掃瞄儀系統，包含掃瞄原理、坐標系統、點雲結合、誤差來源等，並介紹基於三控制點點雲結合方法以及本研究所用之雜訊濾除方法。

第三章 反射標內部精度

包含外業規劃、使用儀器、軟體、實驗設計與資料處理及經由內業所得之數據進行數據分析，此章節為比較三種距離以及六種濾除方法對反射標內部精度的差異，以得到原始點雲與濾除雜訊後點雲後之反射標內部精度變化，並比較原廠反射標與自製反射標內部精度差異。

第四章 反射標外部精度

實驗資料處理，比較第三章所解算之反射標中心定位坐標差異量，再以全測站觀測之反射標中心點位坐標為已知坐標值，三維雷射掃瞄儀所得原始反射標定位坐標及雜訊濾除後之反射標定位坐標當觀測值，進行六參數與七參數坐標轉換，分析其雜訊濾除前後之外部精度差異及觀察七參數轉換是否能提升外部精度，最後比較自製反射標與原廠反射標外部精度。

第五章 結論與分析

根據前述之研究過程與結果分析並進行總結，以提供未來進行相關研究可供加強的地方，歸納出數點結論與建議。

第二章 理論基礎

2-1 三維雷射掃瞄儀系統

三維雷射掃瞄儀 (3D Laser Scanner) 能快速掃描被測物，不須佈設反射稜鏡，儀器只需要一個立足點，即能以不接觸到物體的情況下快速獲得被測物體表面高密度以及高精度的三維坐標，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，且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，是一種精確且經濟的測量工具。三維雷射掃瞄儀主要構造為雷射測距儀，加上反射鏡進行垂直方向的掃描，水平方向則以伺服計步馬達轉動儀來達成，可達到 360 度的掃描。目前雷射掃瞄儀掃描速度可達上千點甚至上萬點，瞬間產生大量觀測資料，因此需要連接電腦即時儲存資料，另外掃描的範圍、密度及一些掃描參數相關設定也需要連接電腦來設定。表 2-1 所顯示為目前市面上各種三維雷射掃描儀相關基本資料。

表2-1 三維雷射掃描儀基本資料(李文漢，2007)

製造商	商品型號	最長掃描距離 (m)	掃描速度(點/秒)	最大掃描角度(d)	測點精度@距離	數貼影像	模型化處理軟體
Z+F	Imager 5003	53	125000	360H 310V	13mm @50m	Photo	LFM MODELLER
Leica	HDS 4500	53	125000	360H 310V	7mm @10m	Photo	Cyclone 5.5
Leica	HDS 3000	300	2150	360H 270V	6mm @50m	Photo	Cyclone 5.5
Trimble	GS200	100	5000	360H 60V	1.5mm @50m	Photo	RealWorks
Riegl	Z420i	1000	8000	360H 80V	6mm @100m	3D Image	3D-RiScan
Optech	ILRIS-3D	2000	2000	360H 180V	8mm @100m	Photo	PoyWorks
I-site	4400-LR	700	4400	360H 80V	70mm @100m	3D Image	I-Site Studio

2-1-1 掃描原理

Boehler (2001) 依據三維雷射掃描儀測量原理之不同，將其分類為時間差量測 (Time-of-flight, TOF) 及三角法 (Triangulation) 兩種，其中三角法又分為單相機法與雙相機法兩種，茲分別詳述如下(徐元俊，2006)：

(一) 時間差量測 (Time-of-flight, TOF)

由雷射掃描儀發射出脈衝雷射光到待測物體的表面，再接收經由待測物體表面反射回來的訊號，計算該期間之時間長度，圖一為其量測之示意圖，由光速 c 、時間 Δt 算出掃描儀與物體之間的距離 ρ ， $\rho = \frac{1}{2}c\Delta t$ 。(如圖 2-1 所示)。

採用此種方法的雷射掃描儀比起三角法 (triangulation) 可以測量較遠的距離，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大。市面上之雷射掃描儀多採用這種系統，如：Trimble GS200(本研究所選用之機型)、Riegl LMS-Z420、Cyrax2500、Optech ILRIS-3D 等。

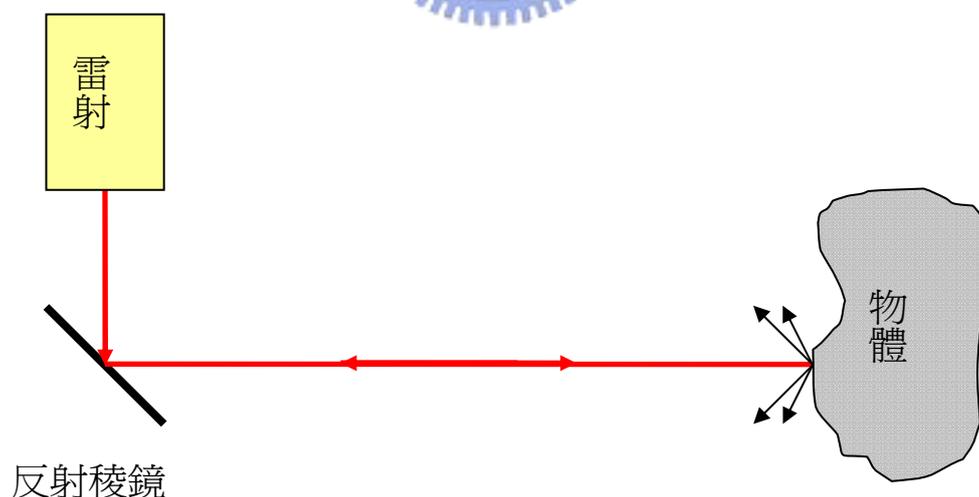


圖 2-1、時間差量測法示意圖 (修改自 Boehler, 2001)

(二) 三角法 (Triangulation)

此方法利用三角形幾何關係求得距離。先由雷射掃描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描儀與待測物體之間之距離。採用此種方法的三維雷射掃描儀在近距離的精度較時間差系統為佳，但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，計算雷射掃描儀與物體間之距離。(如圖 2-2 所示)

(1) 單相機三角量測法 (Triangulation principle-single camera solution):

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。 $\rho = \frac{L}{\cos \lambda}$ ，其中 ρ 為距離， L 代表反射稜鏡到鏡頭的基線長， λ 為鏡頭與基線之間的夾角。

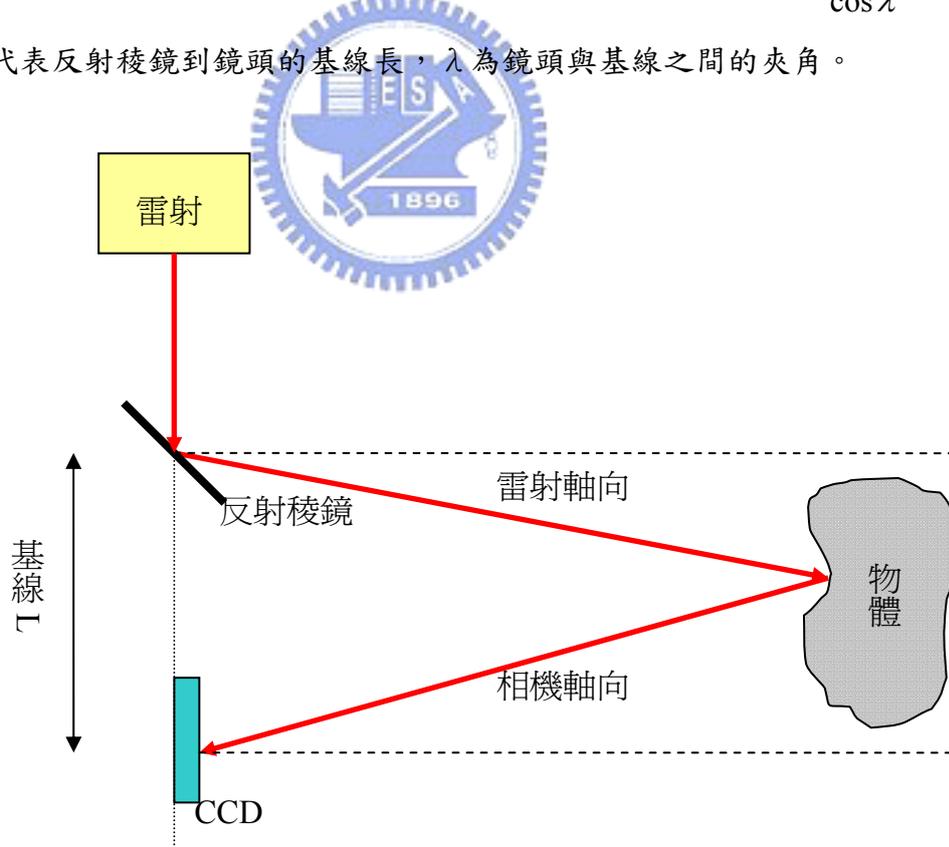


圖 2-2、三角法：單相機法 (修改自 Boehler, 2001)

(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。 $\rho = L_1 \tan \lambda_1 = L_2 \tan \lambda_2$

$L = L_1 + L_2$ ，其中 ρ 為距離，L 代表兩個鏡頭的基線長， λ_1 、 λ_2 為鏡頭與基線之夾角。

(如圖 2-3 所示)

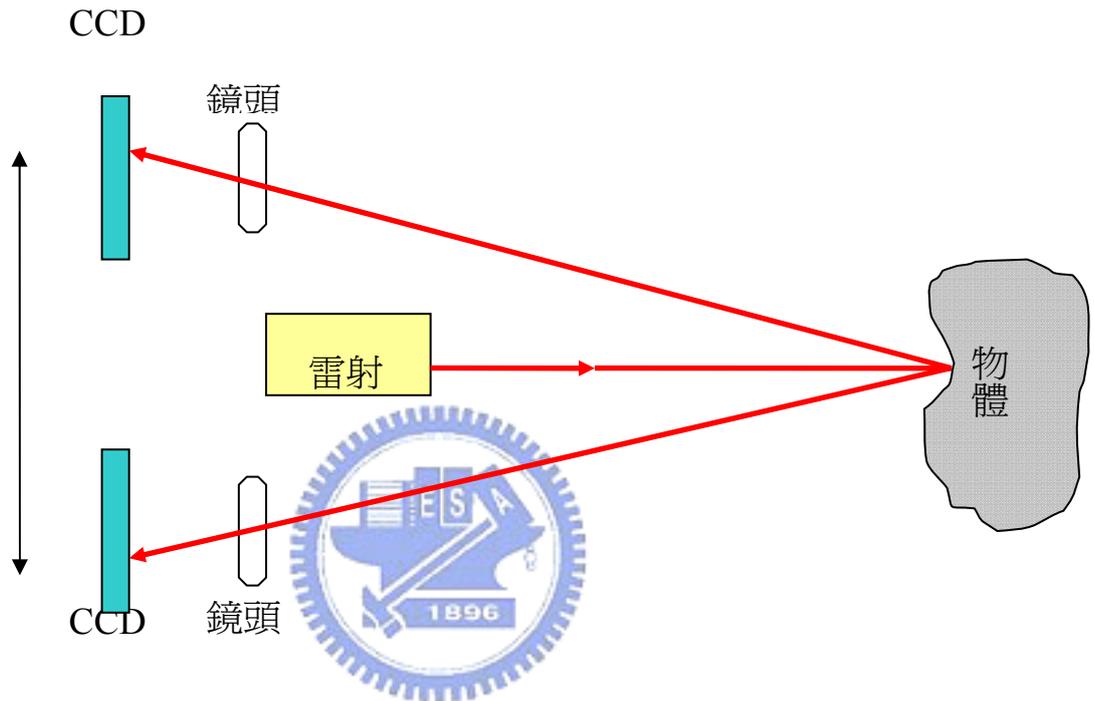


圖 2-3、三角法：雙相機法 (修改自 Boehler, 2001)

雖然三維雷射掃瞄儀可分為時間差量測法與三角法，基本上三維雷射掃瞄儀仍是距離測量的一種，因此，三維雷射掃瞄儀的誤差大小也是隨著掃瞄儀與待測物體間的距離增加而增加。對於較近物體的測量，因為其距離較短，在時間的準確度上便會影響距離的精度，所以在近距離測量時，三角法的精度較時間差量測法為高，反之，對於較遠物體的測量，距離增長，角度的偏差對於距離測量影響較大，故長距離的雷射掃瞄儀多採用時間差量測法進行。

2-1-2 坐標轉換

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 2-4 所示)

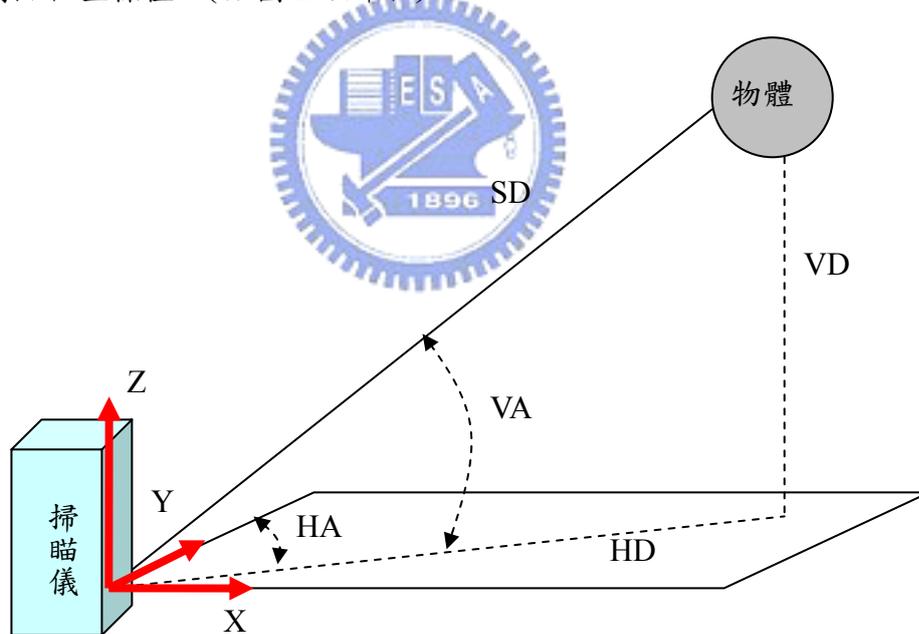


圖 2-4、三維雷射掃瞄儀與物體間相對坐標系示意圖

掃瞄儀坐標系與物空間坐標系之關係可表示如圖 2-5 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。 ρ 為 S 到 P 之間的距離， α 為 S 與 P 點之間的垂直角， θ 為其水平角。

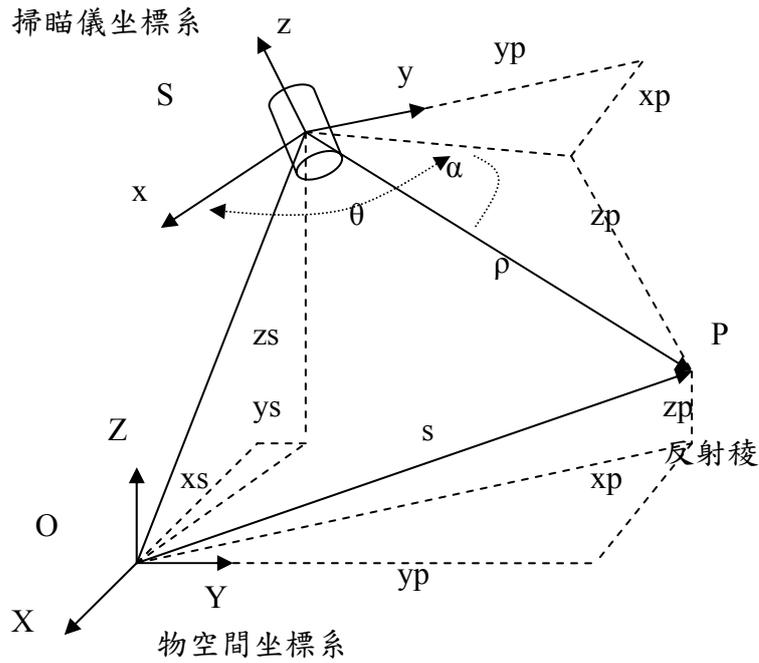


圖 2-5、掃瞄儀坐標系與物空間坐標系之關係圖 (修改自 Lichti et al, 2000)

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 (ω 、 ϕ 、 κ) 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： $\vec{r}_p = M^{-1} \left(\vec{R}_p - \vec{R}_s \right)$

2-1-3 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，便會對於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， ρ 為產生 $\Delta\rho$ 誤差所處的距離， φ 為雷射入射角， δ 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。(賴志凱，2004)

表2-2、三維雷射掃瞄儀的誤差分類與誤差來源

誤差類型	產生原因	改正方式
隨機性誤差	雷射測距及測角的隨機性誤差傳撥	無法直接改正
粗差或錯誤	載台不穩、人為錯誤	重複觀測偵錯
	觀測位置誤差	無法直接改正
系統性誤差	儀器校正不完善，主要有測距、掃描角、參考原點、比例尺及座標軸方向之系統性誤差等因素所導致	儀器檢定 數學模式校正

2-1-4 點雲結合

雷射掃瞄所得的初步資料是均勻密佈於被測物表面的三維點雲(Point Cloud)，在土木工程的應用上，由於目標物（邊坡、樓房等）的覆蓋或體積甚大，且建物結構往往相當複雜，加上掃瞄距離與掃瞄範圍的限制，致使無法從單一測站將整體建築或場景完整掃瞄，而必須結合多測站掃瞄資料以達到場景建置的完整。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座標系統不同，因此點雲資料的連結(Joint)並非單純的資料合併，必須找尋得參考座標系統的轉換關係，才能解決資料結

合的問題。目前所知的點雲連結方法有四：共軛面轉換法、磁性規標控制點法、測站後視稜鏡法、及曲面匹配法(曾義星、史天元，2002)，以下分別描述之。

(1) 共軛面轉換法

在重疊的兩群點雲裡由使用者以人機互動方式將共面（或接近共面）的點形成平面，然後指出三個以上不平行的共軛面，由這些共軛面求出三個平移及三個旋轉的三維座標轉換參數。此方法不需在觀測時進行任何額外的佈標或量測工作，但必須於共同的觀測範圍內找得三個轉換平面，而且內業工作較為繁複。

(2) 磁性規標控制點法

在相連測站之重疊觀測區域裡擺設磁性規標當成控制點，則可利用雷射對磁性規標的特殊反射強度自動尋得控制點，只要有三個以上的控制點，即可求得相連測站之三維座標轉換參數。此方法須於施測時在現場將規標擺置於適當位置，內業的工作則可自動化。



(3) 測站後視稜鏡法

雷射掃瞄器掃視到稜鏡時亦會產生特別強的反射，而能辨識之，因此可建立測站與稜鏡之三維相對關係，可稱為後視基線。此時若能觀測得稜鏡與測站之地面座標（定義於共同參考座標系統），則可將點雲轉換到地面座標系統。一般可利用全測站來進行稜鏡與測站之定位測量，其應用條件是必須於掃描器上方設計有稜鏡基座，以方便架設稜鏡讓全測站觀測。亦可應用全球定位系統(GPS)來進行稜鏡與測站之定位測量，但必須能於稜鏡與測站上架設GPS 天線。此種連結方法之內業工作也相當自動化。

(4) 曲面匹配法

若所觀測的地物具有起伏的曲面，亦可透過曲面匹配的方式結合有重疊觀測區域的點雲資料。以目前的曲面匹配理論尚無法全自動化，必須先以人為操作方式達到近似匹配，才能進行最佳匹配的運算。

2-2 基於三個控制點的點雲對齊方法

上面章節簡單的介紹了三維雷射掃瞄儀系統，也提及了目前所知的四種點雲連結（對齊）方法：共軌面轉換法、磁性規標控制點法、測站後視稜鏡法、及曲面匹配法。其中磁性規標控制點法即為基於三個控制點的點雲對齊方法，而實際上是將點雲結合問題轉換為坐標變換問題，也就是將各測站之三維坐標系轉換到相同的座標系統中，此方法中控制點的選擇以及控制點的定位精度皆會直接影響到整體點雲結合的成果優劣，因此控制點必須能夠精準定位，使用三維雷射儀掃瞄時通常以高反射值之反射標當測量時的控制點。本章節將詳細介紹基於三個控制點的點雲對齊方法，包括了控制點的選擇、三點對齊坐標變換方法、三點定位的精度分析。圖 2-6 為基於三個控制點的點雲對齊方法示意圖。

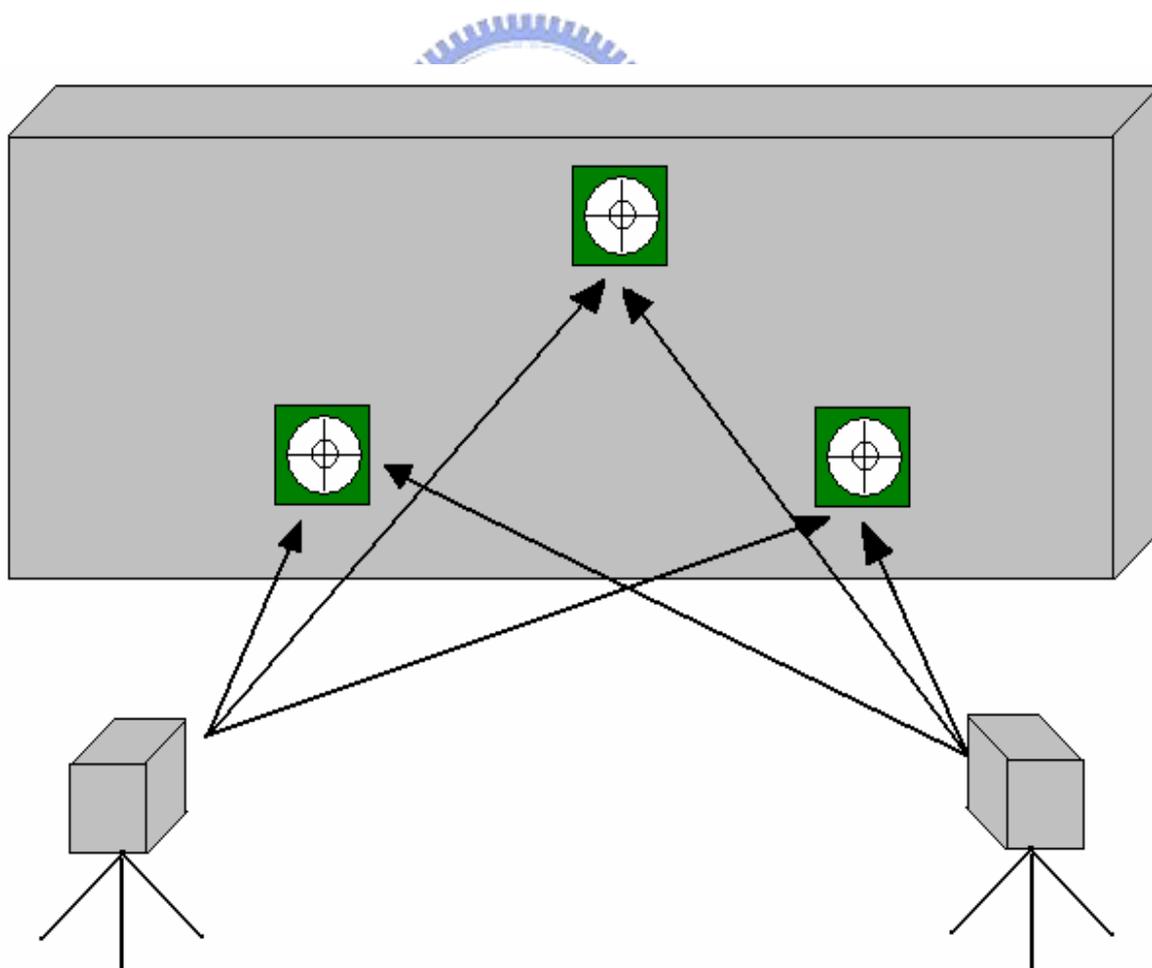


圖 2-6、基於三個控制點的點雲對齊方法示意圖

2-2-1 控制點選擇

三維雷射掃描儀測量時，被測物往往無法於單一測站完整掃描，而必須結合多測站的點雲資料，使用磁性規標控制點法時，須在各測站測量時架設三個或三個以上之控制點，對於三維雷射掃描儀的使用者來說，這些控制點通常以磁性規標佈設，這些磁性規標又可稱反射標，因此在外業工作時，使用者應該於被測物表面上或者單一測站範圍內設置三個或三個以上之反射標。反射標的作用是提供地面雷射掃描資料中一個明確可辨識的特徵點，讓我們能夠利用反射標所提供的特徵點當做不同坐標系間點雲合併的控制點，亦或是局部坐標系與絕對坐標系兩者之間坐標轉換的控制點。如果直接利用屋角、窗緣等建築本身的形貌作為疊合的共軌點，則在不同測站先後兩次對同一特徵物所選取的點位坐標勢必有一個的人為判定的誤差，而無法正確地選擇控制點，但是反射標則可利用固定規格的尺寸和不同反射率的材質，使我們可以直接利用軟體計算功能來定出反射標的中心座標。

反射標設計的主要原則是要能夠明確定位，其定位能力的好壞會直接影響到坐標轉換後的成果，因此所使用之材質需對雷射光波應具有高反射性質，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，而以圓盤狀或球狀較為常見。圖 2-7 即為 Mensi 所生產的反射標，反射標的尺寸為 15 cm × 15 cm；中央的圓形區域為白色的強反射材質所製成，其半徑為 7 cm，以上尺寸均經過 Mensi 原廠率定後求得。

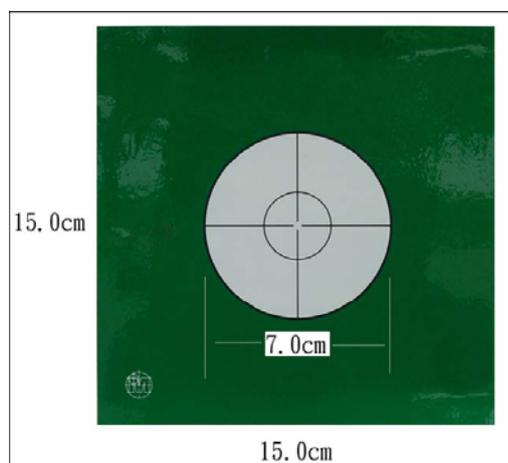


圖 2-7、Mensi 生產之反射標

2-2-2 三點對齊坐標變換方法

三維雷射掃描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，這些資料均是屬於隱性資料 (Implicit)，對於被測物並非顯性描述 (Explicit)，在被測物表面的數據化過程中，由於測站的移動造成測量坐標系統的變化，相同的位置在不同的測量過程中，數據是不同的，但對同一個點來說，相當於從一個坐標系變換到另一個坐標系，因此可以將問題表述為坐標系的變換問題。

三維圖形的坐標變換包括平移、比例、旋轉、錯切等幾何變換，這裡測量數據點的對齊問題僅是平移和旋轉變換。因為三點可以表示一個完整的座標，因此多次測量數據變換只需由三個不同的基準點就能實現。三維幾何坐標變換方法為：測量基準點 p_1 、 p_2 和 p_3 。第二次測量時，基準點坐標變為 q_1 、 q_2 和 q_3 ，剛體變換可通過以下三個步驟實現(金濤、童永光，2005)：

- (1) 變換 p_1 到 q_1 ；
- (2) 變換向量 (p_2-p_1) 到 (q_2-q_1) (只考慮方向)；
- (3) 變換包含三點 p_1 、 p_2 與 p_3 的平面到包含 q_1 、 q_2 與 q_3 的平面。

以下步驟即為坐標轉換算法，圖 2-8 為三點坐標變換示意圖：

Step1 作向量 (p_2-p_1) 、 (p_3-p_1) 、 (q_2-q_1) 與 (q_3-q_1) ；

Step2 令 $V_1 = p_2-p_1$

$$W_1 = q_2-q_1；$$

Step3 作向量 V_3 與 W_3 ；

$$V_3 = V_1 \times (p_3-p_1)$$

$$W_3 = W_1 \times (q_3-q_1)$$

Step4 作向量 V_2 與 W_2 ；

$$V_2 = V_3 * V_1$$

$$W_2 = W_3 * W_1$$

顯然，向量 V_1 、 V_2 與 V_3 構成右手正交系，向量 W_1 、 W_2 與 W_3 同樣也構成右手正交系

Step5 作單位向量

$$v_1=V_1/|V_1|, \quad v_2=V_2/|V_2|, \quad v_3=V_3/|V_3|$$

$$w_1=W_1/|W_1|, \quad w_2=W_2/|W_2|, \quad w_3=W_3/|W_3|$$

Step6 把系統 $[v]$ 的任一點 P_i 變換到系統 $[w]$ ，用變換關係式

$$P_i' = P_i + T;$$

Step7 因為 $[v]$ 和 $[w]$ 是單位向量矩陣，所以 $[w]=[v]R$ ，於是所求的關於 $[W]$ 系統的旋轉矩陣為

$$R = \text{inv}[v][w];$$

Step8 使 $P_i' = q_1$ 和 $P_1 = p_1$ ，把方程式代入，可得平移矩陣 T ：

$$T = q_1 - p_1 \text{inv}[v][w];$$

Step9 將方程式改為

$$P' = P \text{inv}[v][w] - p_1 \text{inv}[v][w] + q_1;$$

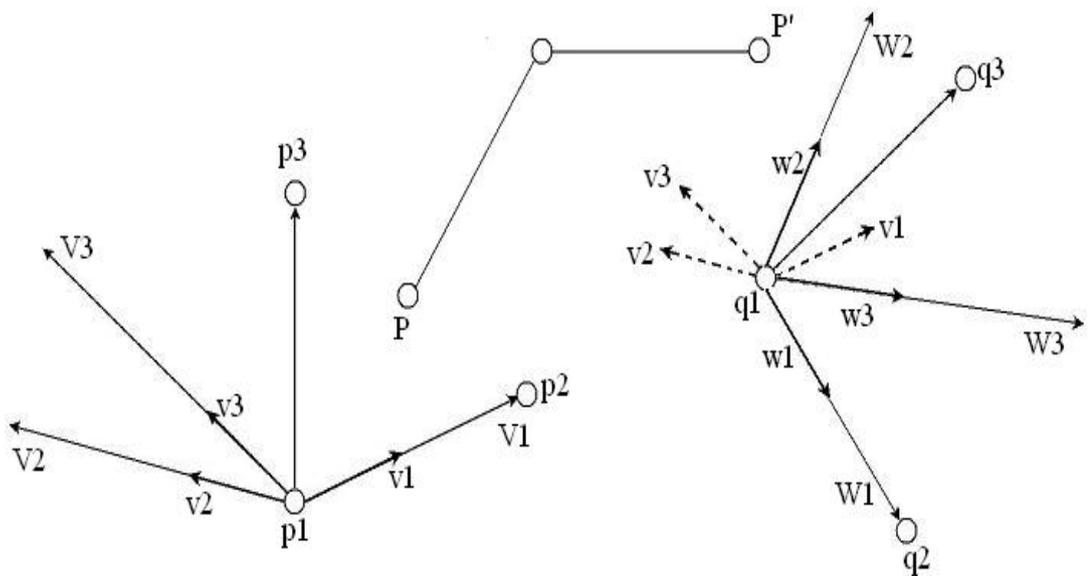


圖 2-8、三點坐標變換示意圖(金濤、童永光，2005)

2-2-3 三點定位的精度分析

由上述不同坐標系轉換方法可以看出，被測物點雲的對齊精度取決於三個控制點的測量精度，另外，在相同的測量誤差的情況下，基準點的位置選取不同，也會影響被測物的點雲結合，但如果誤差控制在一定的範圍內，這樣的坐標變換是能夠滿足點雲結合要求的，對測量設備來說，只有具有尋點及尋邊功能的測量儀器都可用於基於三個控制點的對齊方法。如果採用三維雷射掃瞄儀進行測量時，由於進行被測物以及控制點測量表面掃描時，點雲也會產生誤差，這些誤差的來源可能跟儀器本身量測能力、外在環境因素、儀器率定或人為操作等等原因有關。因此，為保證對齊精度，採用基於三控制點之點雲對齊方法時，控制點的應該盡量遵循下列原則(金濤、童永光，2005)：

- (1)當誤差相同時，三點構成的三角形的面積越大，相對誤差越小，即控制點的選擇距離越遠，測量誤差對點雲數據對齊的影響越小；
- (2)在測量誤差呈正態分布的情況下，三條邊的誤差趨於相同，為使各個點的影響相同，相對誤差應趨於相等，即控制點的選取應盡量接近等邊三角形。
- (3)控制點的位置應盡量選擇在與外界接觸下不會產生變形的地方，反射標（控制點）盡可能牢貼於被測物或控制點選擇位置上。
- (4)同一控制點的測量，應反覆測量幾次，取多次測量的平均值，也可避免錯誤的產生，且多次測量應盡量在相同的環境中完成。

2-3 點雲雜訊濾除方法

經三維雷射掃描儀量測所得到的點雲資料，會因為量測的環境，如空氣粒子所造成的散射以及背景光源等，或者又因被測物的材質而產生一些量測誤差或是量測的雜訊，雜訊點的存在會影響後續的點資料處理工作，包括不同視角點資料的合併、點資料區域分割、曲線與曲面的嵌合等，雜訊點必對於被測物而言是多餘的，雜訊點必須加以濾除或降低影響，本章節將介紹本研究所使用之各種點雲雜訊濾除方法。

2-3-1 距離、最小角度率除法

距離濾除法是以設定距離閾值(Threshold Value)作為判斷標準，假設一個點資料與其前後點資料的距離都過大，則此點視為雜點，此種方法較適用於排序過的點資料。如圖2-9為一筆排序過的點雲資料，使用距離濾除法時將距離閾值設定為39mm，則點雲資料中前後所有距離大於39mm的點資料將會被刪除。

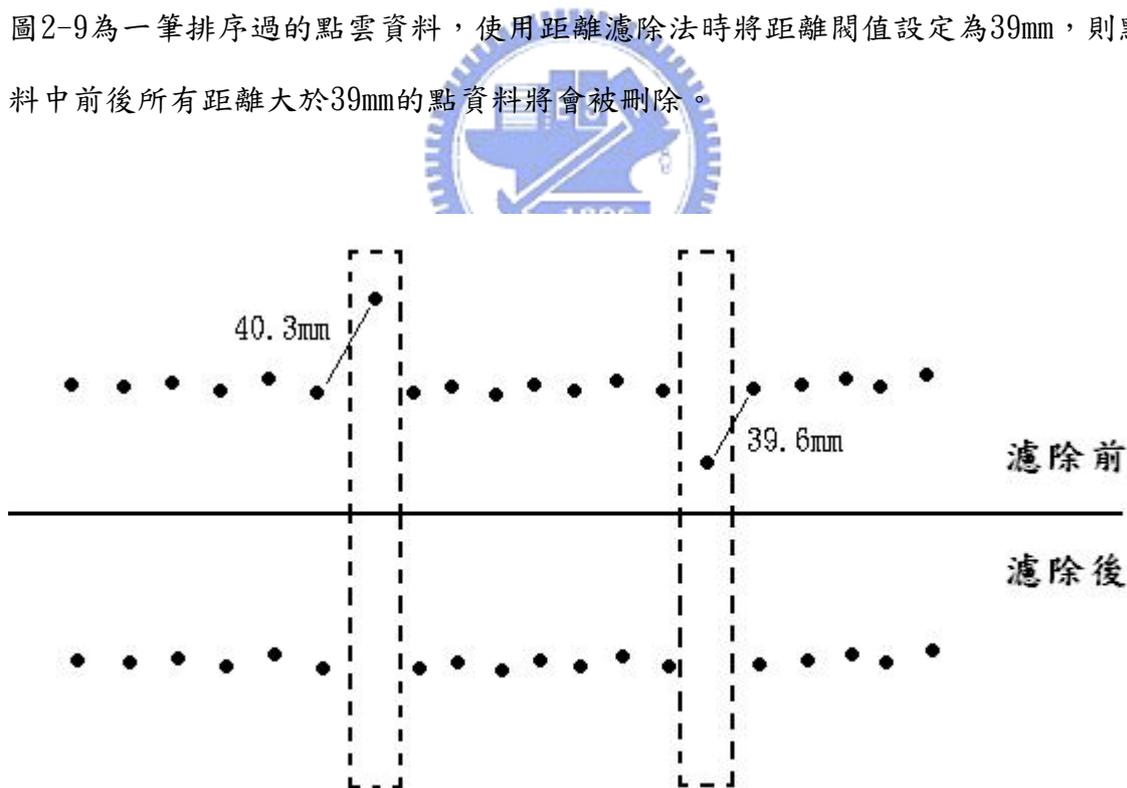


圖 2-9、距離濾除法

最小角度濾除法，此種方法適用於掃瞄線型態的點資料，如雷射掃瞄的點資料。當一個點資料與其前後的點資料以直線相連，會形成一個夾角，如圖2-10所示。此方法利用角度的特徵作為雜訊點的判斷依據，先固定某角度作為閾值，小於此閾值的點一律視為雜訊點，如圖2-9的A、B點，若將閾值設定為150度，A、B兩點將會被剔除，閾值的選擇必須考慮點資料的曲率分佈情形。

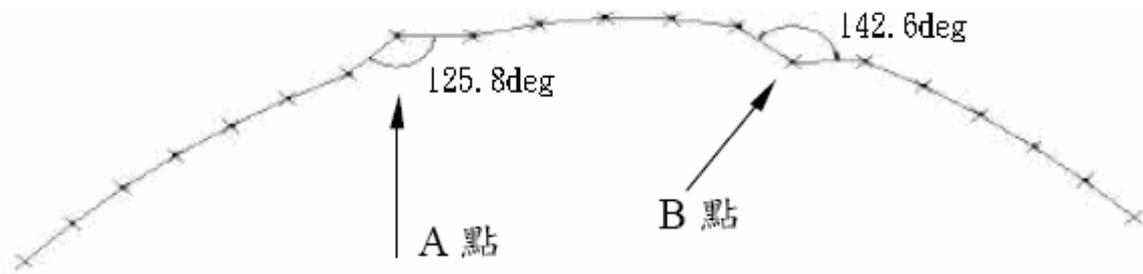


圖 2-10、最小角度濾除法

2-3-2 最適平面法

本研究選用之反射標為平坦的紙面所佈設而成，而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，故本研究的其中一種方法將採用最適平面法(徐元俊，2006)來濾除反射標原始點雲的雜訊。

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，故採用第一種方法：

$ax + by + cz + d = 0$ ，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。

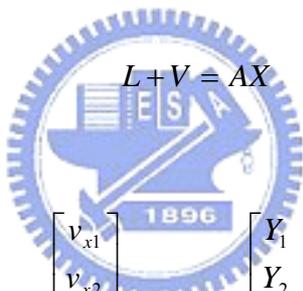
若以 X 軸向進行最適平面計算工作，先假設各點雲位於同一平面，並列出下列方程式：

$$X' + V_x = a_{fit}Y + b_{fit}Z + c_{fit}$$

則可得出觀測方程式：

$$L + V = AX$$

其中各矩陣表示如下：



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

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：

$$L + V = AX$$

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

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 =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：

$$\hat{\sigma}_{dy} = \sqrt{\frac{d_y^T d_y}{n-u}}$$



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：

$$L + V = AX$$

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

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 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：

$$\hat{\sigma}_{dz} = \sqrt{\frac{d_z^T d_z}{n-u}}$$
， n 為該次最適平面所用的點雲總數， u 為未知參數個數 3。

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 軸與 Y 軸為觀測量進行單次計算。

2-3-3 點資料平滑化

點資料平滑化的主要目的是消除測量雜訊，以得到更精確的點雲資料和好的特徵提取效果，採用點資料平滑方法處理點雲數據時，應力求保持點雲數據特徵不變。所謂平滑化，直觀上就是新數據的”波動”不超過原始數據的”波動”，實際應用實不單單要求處理後的數據要比原始數據平滑，同使要求前後兩組數據的偏離也不能過大。目前一般常用之點資料平滑化方法有平均平滑法(Averaging)、中值平滑法(Median)、高斯平滑法(Gaussian)三種(陳文賢，2006)。

平均平滑法(Averaging)，以空間中連續三個點資料所形成三角形的重心位置取代中間點的座標。(如圖 2-11)

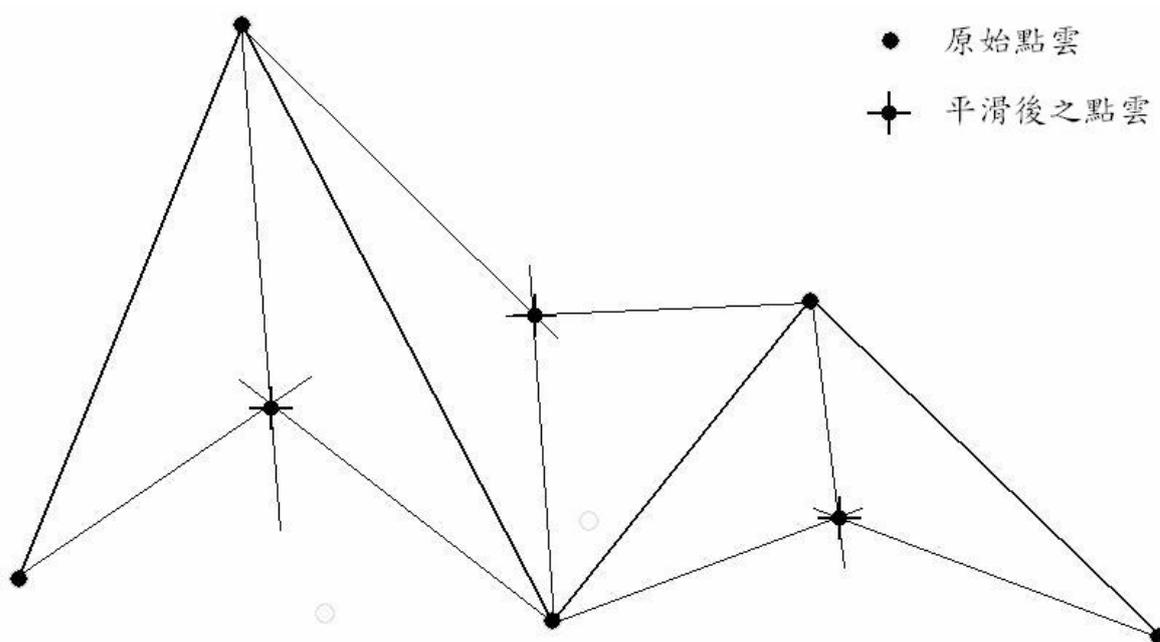


圖 2-11、平均平滑法(Averaging)

中值平滑法(Median)，應用統計中位數方式來取樣，可有效的解決不屬於本體的資料，方法為取三維點資料 X 、 Y 、 Z 方向的中間點 X 、 Y 、 Z 值取代中間點的位置。中值過濾法或平均值過濾法固然可以使資料點分佈的上下振幅平坦化而達到平滑化的效果，但過度的平滑化卻可能會破壞原資料點之間的凹凸關係。(如圖 2-12)

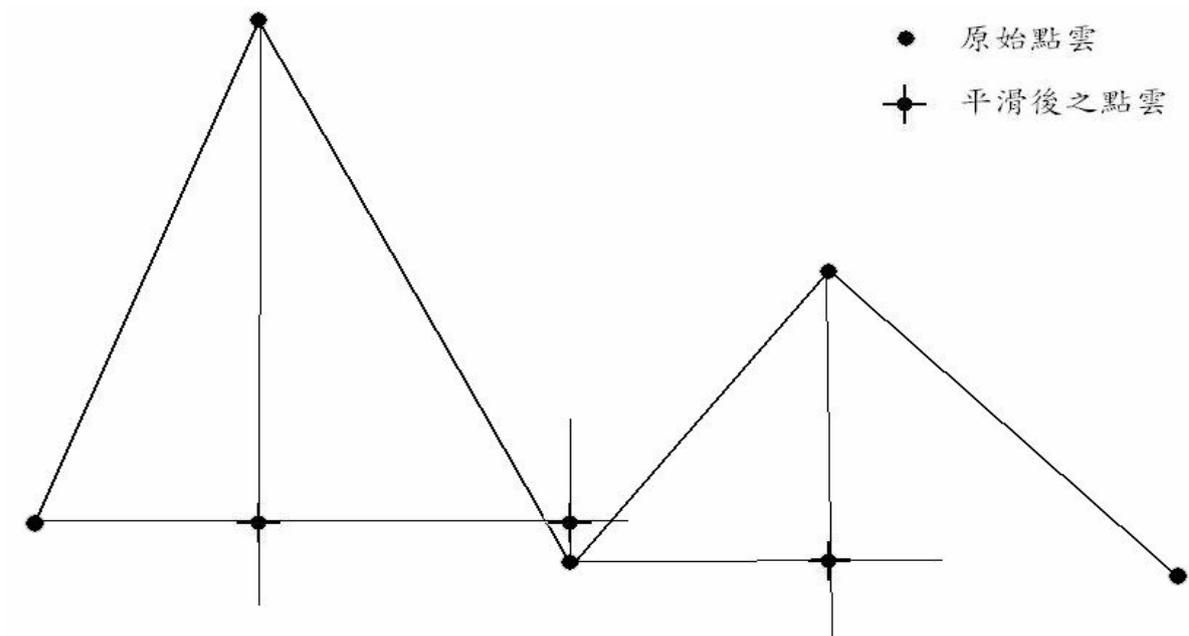


圖 2-12、中值平滑法(Median)

高斯平滑法(Gaussian)，以連續三個點所形成三角形的重心位置及中間點的位置兩者平均值取代中間點的位置，這方法適合用於雜訊多的點雲資料，利用高斯法較不會破壞原先資料點的空間凹凸關係特徵關係，而且不會有像平均法那樣造成平均效應。(如圖 2-13)

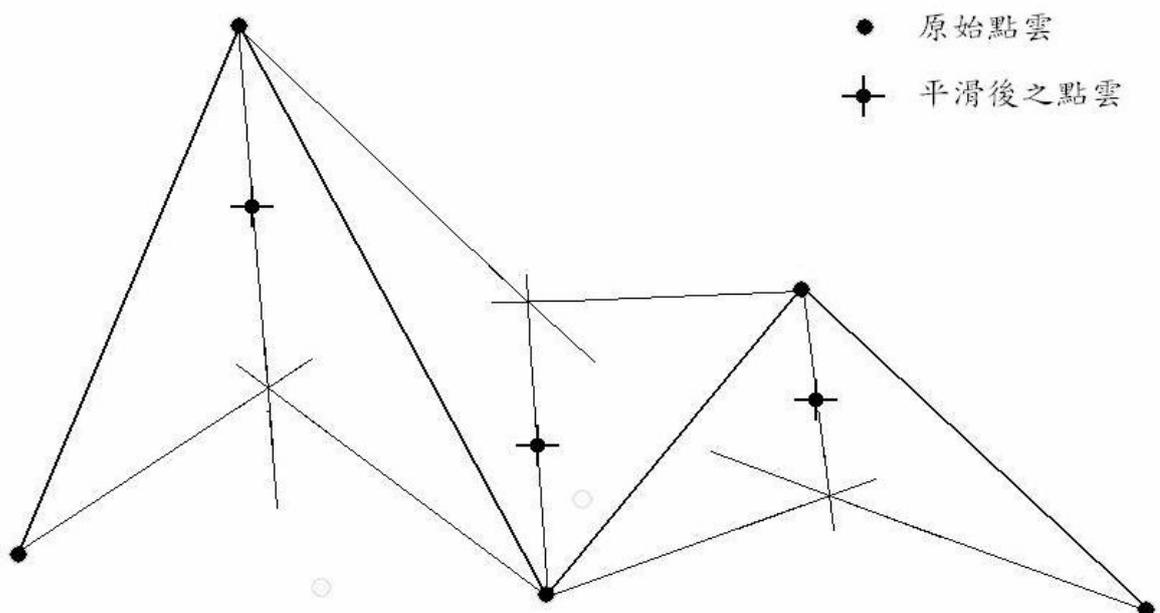


圖 2-13、高斯平滑法(Gaussian)

第三章 反射標內部精度

3-1 外業掃描工作規劃

本研究主要目的為提升三維雷射掃描儀反射標定位精度提升之研究，使用六種雜訊濾除方法過濾反射標原始點雲雜訊，此外在反射標的選擇上除了使用 Mensi 原廠率定後所生產的反射標外，亦有自製反射標。選擇兩種反射標原因有二：一為比較原廠反射標與自製反射標之定位精度差異性；另一原因為使用兩種反射標能得知雜訊濾除方法在這兩種反射標上是否有相同的效應存在。

本研究所使用之三維雷射掃描儀為 Trimble GS200，屬中長型雷射掃描儀，儀器架設方法與傳統測量儀器相同。場地的選擇上，因本外業三維雷射掃描儀工作時程較長，且同一反射標需多次掃描，為避免於室外作業時，工作時程過長時外部環境的變換，如日照等因素影響到掃描所得點雲資料穩定性，故場地選擇於國立交通大學綜合一館地下二樓室內停車場內進行實驗。此室內停車場為一日光照射不到之區域，場地總長約為 90 公尺，是本實驗所用之 Trimble GS200 所可掃描之掃描距離內，實驗將分三段距離掃描，分別為 30、60、90 公尺。

反射標與適當試驗場確定後，即可於現地探勘、拍照、預估作業時程，規劃出整個外業掃描流程。掃描流程大致上為，首先於標的物表面上佈設反射標，擺設完反射標後於試驗場上架設三維雷射掃描儀，一切準備工作完成後對目標物進行掃描；並於不同距離下對反射標進行多次掃描作業以進行分析作業，掃描完畢即可檢視成果是否符合預期或有錯誤，若成果不符合預期或有錯誤，針對不符合部分或錯誤重新再掃描；若成果符合，便可進入內業處理作業。圖 3-1 為外業掃描流程圖。

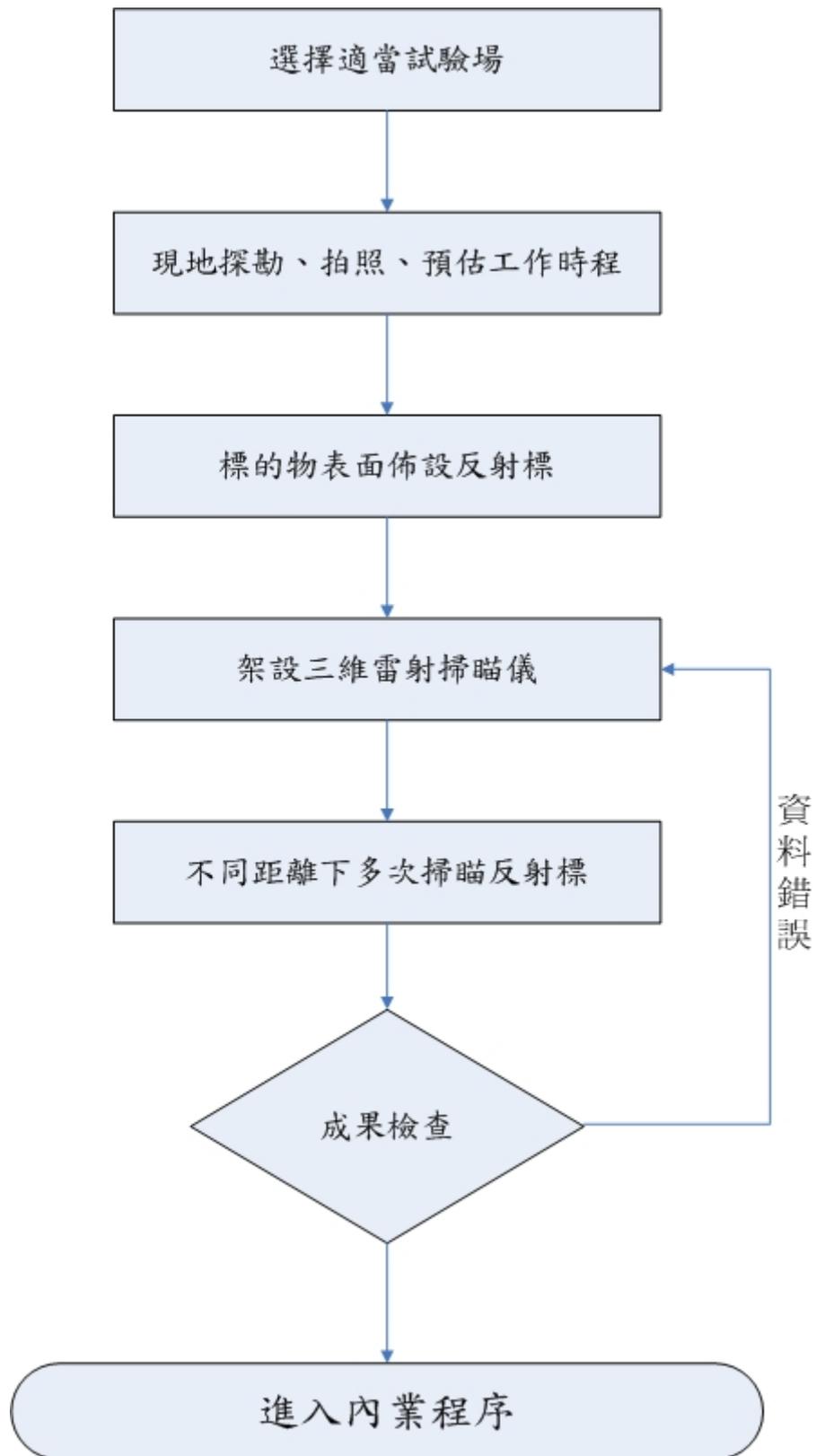


圖 3-1 外業掃描流程圖

3-2 使用儀器、軟體說明

本論文所採用儀器為Trimble公司生產的GS200型三維雷射掃瞄儀，其儀器規格如表3-1所示，Trimble GS200型外業操作軟體為Trimble PointScape 3.2。外業掃瞄後所得之三維點雲資料處理以Real Works Survey 4.2進行內業處理作業，例如：掃瞄點雲讀取、點雲切割、ascII資料格式的輸出等工作。

由於三維雷射掃瞄儀是以雷射測角、測距利用數學公式來推算物體的相對坐標值，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。雷射本身亦有強度等級之分，因此儀器掃瞄點雲的精度與三維雷射掃瞄儀器雷射有效掃瞄距離有關。圖3-2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
規標規格	20 MENSIS scan targets
光點尺寸、顏色	3 mm/50 m、綠光
最小解析度	3 mm at 100 m

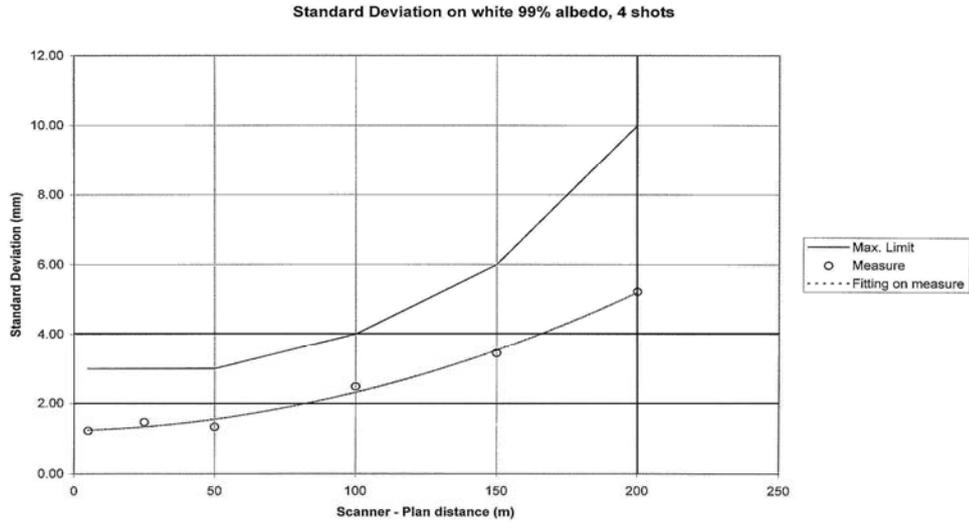


圖 3-2、Trimble GS200 型三維雷射掃瞄儀距離與掃瞄精度關係圖 (Mensi, 2005)

點雲雜訊濾除方面所使用軟體為USGS Imageware12及Microsoft Visual Basic 6.0所撰寫LiDAR點雲處理程式。Imageware12主要使用於逆向工程之應用，功能有基本點雲操作、點資料處理、曲線生成、曲面生成、物體建模等，為一完整之逆向工程軟體，主要使用者大多為機械類專業人士。隨著三維雷射掃瞄儀的出現，土木測量近年來也逐漸從單純的點資料逐漸往”面”資料及3D模型發展，都有賴於三維雷射掃瞄儀大量的三維點資料，故以往機械逆向工程方面的軟體未來皆有可能應用於土木測量中。本研究中所使用到Imageware12的功能為點資料處理，利用軟體中點資料處理功能之平滑化、距離濾除法、角度濾除法來處理實驗掃描所得之三維雷射點資料，而Microsoft Visual Basic 6.0所撰寫LiDAR點雲處理程式為最適平面法處理軟體(如圖3-3)。

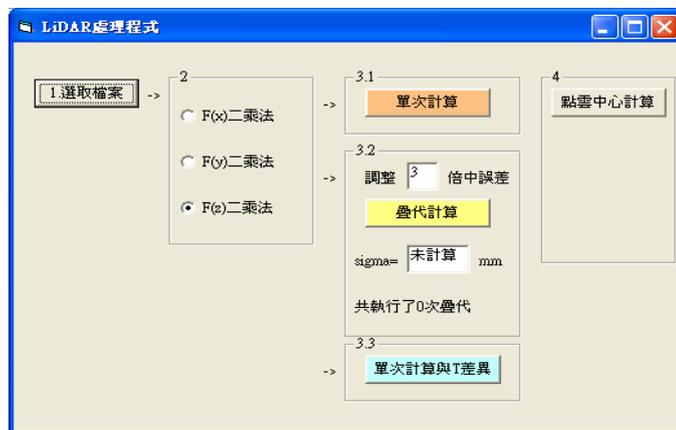


圖 3-3、LiDAR 處理程式

3-3 實驗設計與資料處理

3-1-1 實驗設計

本實驗選擇兩種反射標進行實驗，其一為原廠反射標，另一為自製反射標。原廠反射標成本昂貴且須向原廠購買，故自製反射標考慮到便利性以及價格兩種因素，選擇以一般紙為材質，上面印有黑白兩色圖案可利用強度值分辨紙上黑白部份，且若反射標不足或毀壞時影印即可使用。原廠反射標可直接於外業操作時利用 PointScape3.2 軟體直接計算出其反射標中心點位坐標，自製反射標則須經由一些內業處理方可得到中心點位坐標，但若自製反射標定位精度比原廠反射標更好時，往後作業時便可使用自製反射標進行掃描作業，不僅可確保定位精度，也可節省成本。圖 3-4 所示，左邊為自製反射標，簡稱為 Object；右邊為原廠反射標，簡稱為 Target

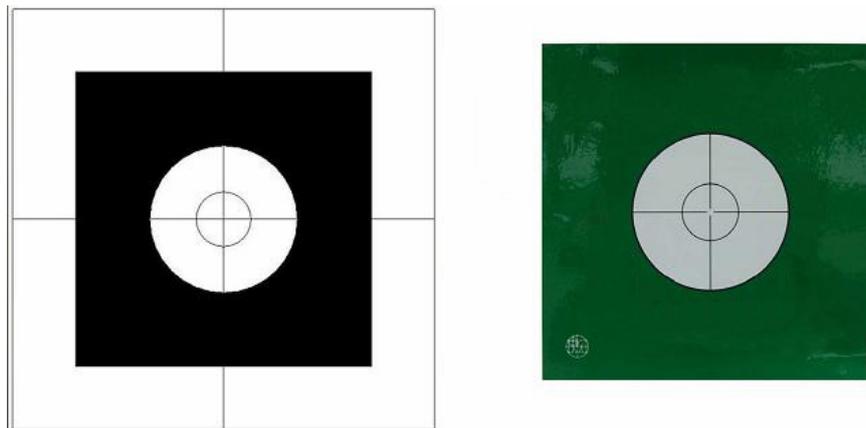


圖 3-4、左為自製反射標(Object)；右為原廠反射標(Target)

實驗地點選擇於國立交通大學綜合一館地下二樓室內停車場，本實驗選擇使用九個自製反射標及九個原廠反射標共十八個反射標平貼於標的物牆面上，如圖 3-5 所示。實驗所選擇之三維雷射掃描儀為 Trimble GS200，屬中長距離之掃描儀，停車場總長為 90 公尺，為此三維雷射掃描儀掃描範圍內。實驗將分三段掃描，分別為 30 公尺、60 公尺、90 公尺，對共十八個反射標進行各十次的掃描。掃描距離選擇 30 公尺、60 公尺、90 公尺主要因為探討不同距離下六種雜訊濾除方法對反射標中心點位定位精度的影響，故距離的選擇並沒有一定的標準存在，有差異性即可。

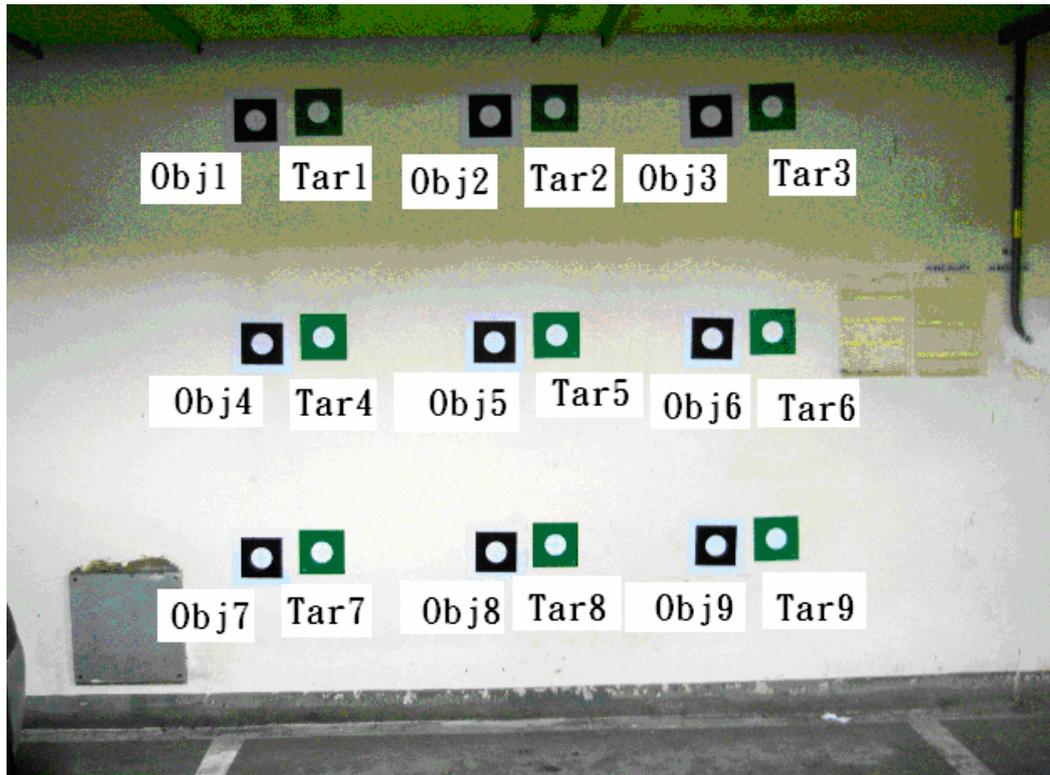


圖 3-5、自製反射標與原廠反射標佈設方式



圖 3-6、30m 處架設三維雷射掃瞄儀掃描情形

使用三維掃瞄儀在三段距離下掃描此十八個反射標，其中一個自製反射標與一個原廠反射標為一組掃描各十次，故有九組反射標三段距離掃描十次，共 270 筆資料，資料量龐大且複雜，故每掃描一個反射標後需檢查其數據或者掃描成果是否有錯誤；若有錯誤可立即重新掃描，若其成果符合預期，即可繼續掃描作業。

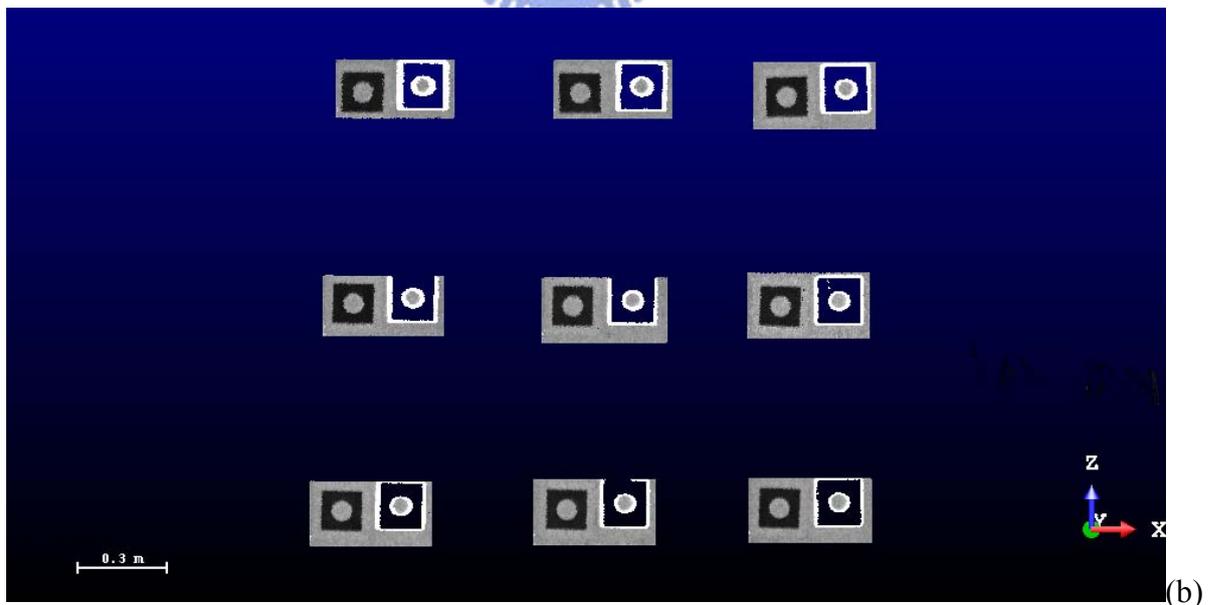
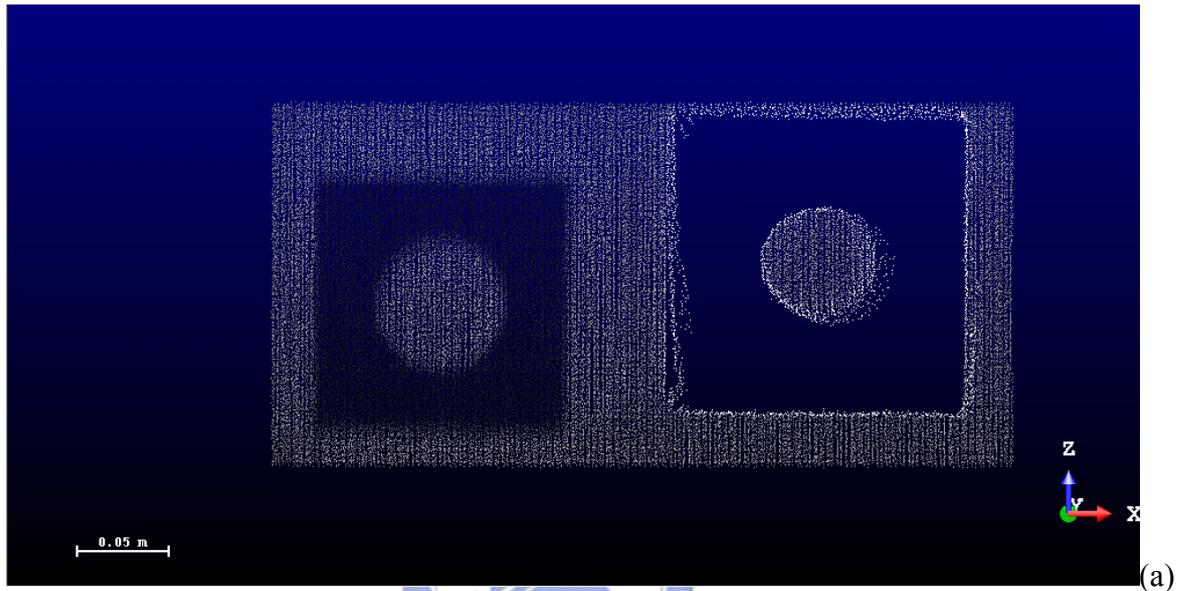


圖 3-7、外業掃描點雲成果

(a)30m Obj1+Tar1 掃描一次成果 (b)30m 所有反射標掃描成果

3-1-2 實驗資料

經由Trimble GS200三維雷射掃瞄儀掃描所得之點雲資料，除了有各個點雲相對於三維雷射掃瞄儀的三維相對坐標值X、Y、Z外，Trimble GS200型三維雷射掃瞄儀尚可輸出各點雲之強度值(intensity)，點雲強度值最小為0，最大為255；與利用儀器上之照相機所得之色階值 R、G、B。點雲資料利用Real Works Survey 4.2將包含上述格式之資料輸出成ASC檔案，檔案可用記事本打開，如圖3-8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，其中X、Y、Z、intensity為內業處理所需要的數據，X、Y、Z解算反射標中心點位坐標；強度值用來分辨自製反射標圓形部份點雲資料用途。

X	Y	Z	intensity	R	G	B
-4664.7690	29492.1094	1376.1658	129	70	74	79
-4664.5410	29490.6758	1375.0533	134	71	73	79
-4664.5688	29490.8594	1373.4934	142	71	73	79
-4664.9722	29493.4180	1372.5667	126	71	73	79
-4664.5327	29490.6406	1371.9147	121	71	73	79
-4664.9023	29492.9805	1371.5006	124	71	73	79
-4664.9507	29493.2969	1370.4697	126	71	73	79
-4664.6206	29491.2148	1368.8043	120	70	68	82
-4664.6650	29491.5078	1367.7723	126	70	68	82
-4665.0278	29493.8027	1366.8331	128	70	68	82
-4664.5962	29491.0898	1365.1389	123	70	68	82
-4665.0161	29493.7461	1364.7389	134	70	68	82
-4664.9321	29493.2227	1363.6691	133	66	72	77
-4665.3574	29495.9199	1362.7478	141	66	72	77
-4664.4917	29490.4492	1361.4497	138	66	72	77
-4664.5034	29490.5273	1360.9304	141	66	72	77
-4664.6621	29491.5371	1359.9313	149	66	72	77
-4665.0518	29494.0117	1358.4769	153	66	72	77
-4664.8311	29492.6230	1357.8899	142	77	78	87
-4664.5879	29491.0918	1356.2512	143	77	78	87
-4664.6680	29491.6055	1355.7518	139	77	78	87
-4665.2085	29495.0313	1354.3408	133	77	78	87
-4665.0498	29494.0293	1353.7720	142	77	78	87
-4664.8809	29492.9707	1352.6777	154	77	78	87
-4664.8774	29492.9531	1352.1541	151	67	75	77
-4664.6680	29491.6426	1350.0028	161	67	75	77
-4664.8369	29492.7129	1349.5289	150	67	75	77
-4664.4653	29490.3730	1348.3762	148	67	75	77
-4664.2002	29491.2115	1348.6659	140	77	76	83
-4664.7383	29491.0816	1347.7097	140	77	76	83
-4664.5166	29490.7168	1344.7325	140	77	76	83

圖 3-8、將 ASC 點雲資料以記事本開啟

3-1-3 內業資料處理流程

三維掃瞄儀掃瞄後之資料為原始點雲資料，由於外業掃瞄時是以整個反射標進行掃瞄，故必須將欲分析部份的部份切割出來，使用工具為 RealWorks 4.2 Segmentation Tool。原廠反射標原始點雲如圖 3-9(a)，經處理過原始反射標圓形部份點雲如圖 3-9(b)。自製反射標原始點雲如圖 3-10(a)所示，因自製反射標未經過特殊處理過，故原始點雲資料不像原廠反射標可直接萃取出圓形部份，根據先前研究，目標物顏色與強度值有絕對的關係，黑色對於三維雷射掃瞄儀所掃描出的點雲強度值均偏低(0~80)，白色掃瞄點雲強度值均偏高(80~255) (李宗儒，2007)；故尚須利用強度值(intensity)差異剔除自製反射標上黑色顏色部分點雲後，如圖 3-10(b)，才能得到自製反射標圓形部份點雲，如圖 3-10(c)。

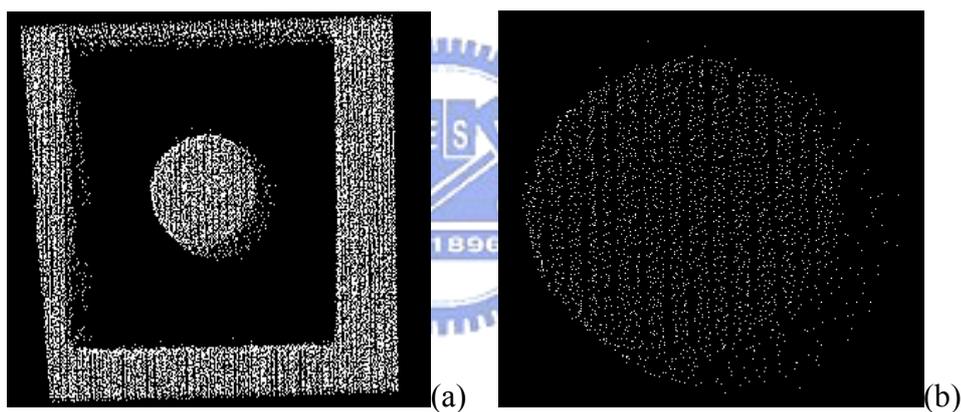


圖 3-9、原廠反射標點雲

(a)Target 原始點雲 (b)Target 圓形部份點雲

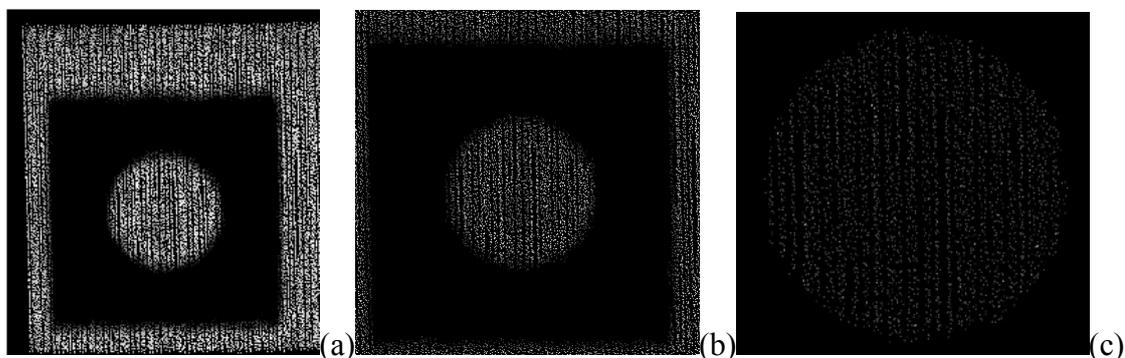


圖 3-10、自製反射標點雲

(a)Object 原始點雲 (b) Object 剔除黑色顏色部分點雲 (c) Object 圓形部份點雲

取得原廠反射標與自製反射標圓形部份點雲後，即可利用 USGS Imageware12 及使用 Microsoft Visual Basic 6.0 所撰寫 LiDAR 點雲處理程式對點雲進行點資料平滑化（平均平滑、中值平滑、高斯平滑）、距離濾除法、最小角度濾除法、最適平面法共六種雜訊濾除方法濾除反射標點雲的雜訊，圖 3-11~圖 3-13 為 30 公尺原廠反射標編號 1 雜訊濾除前後點雲圖。

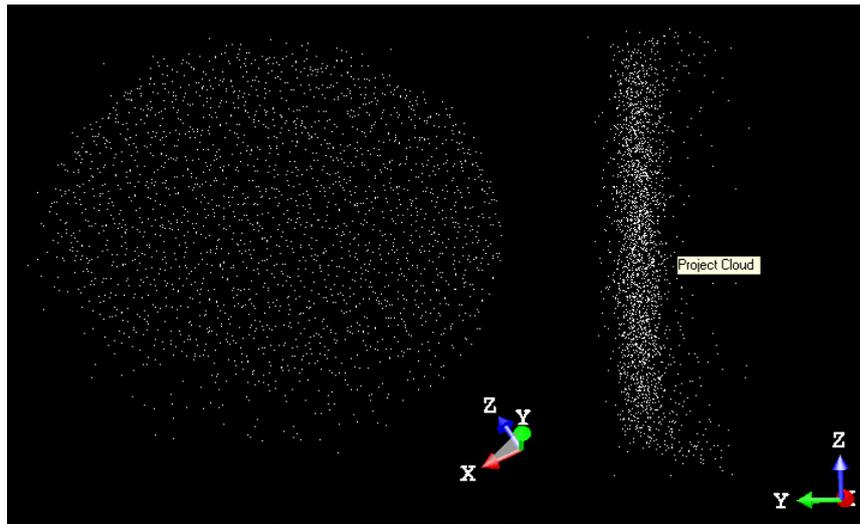


圖 3-11、30m Target1 圓形部份原始點雲不同視角原始點雲資料

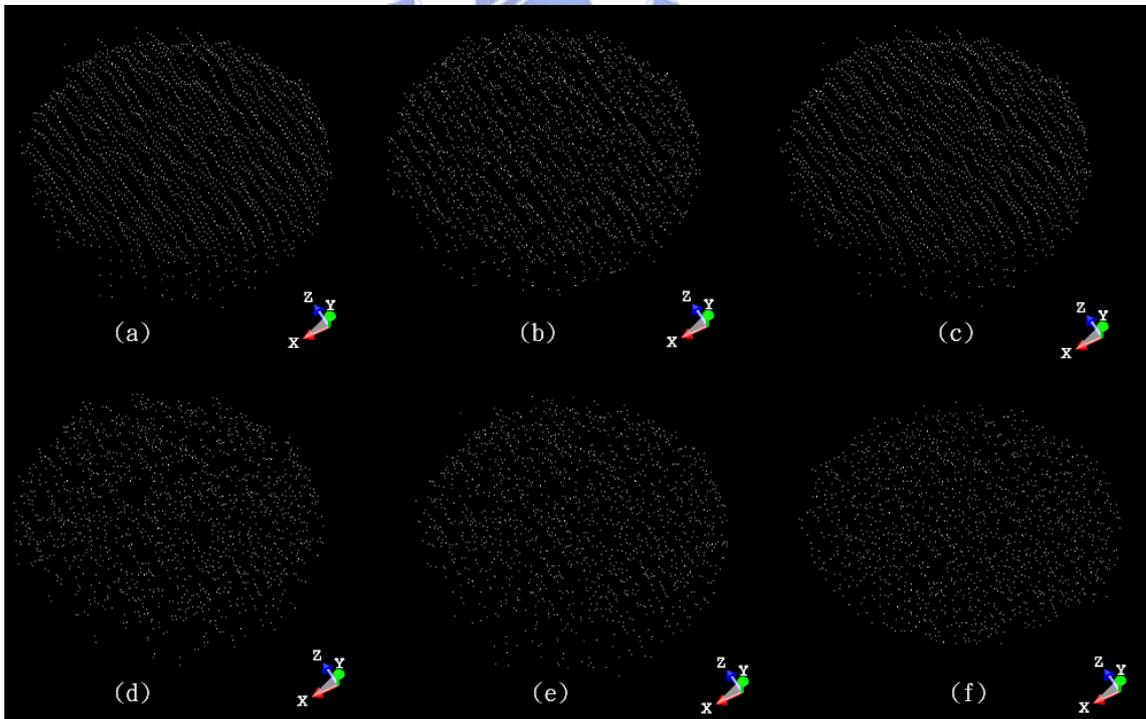


圖 3-12、六種雜訊濾除後 30m Target1 之點雲資料

(a)平均平滑(b)中值平滑(c)高斯平滑(d)距離濾除法(e)角度濾除法(f)最適平面法

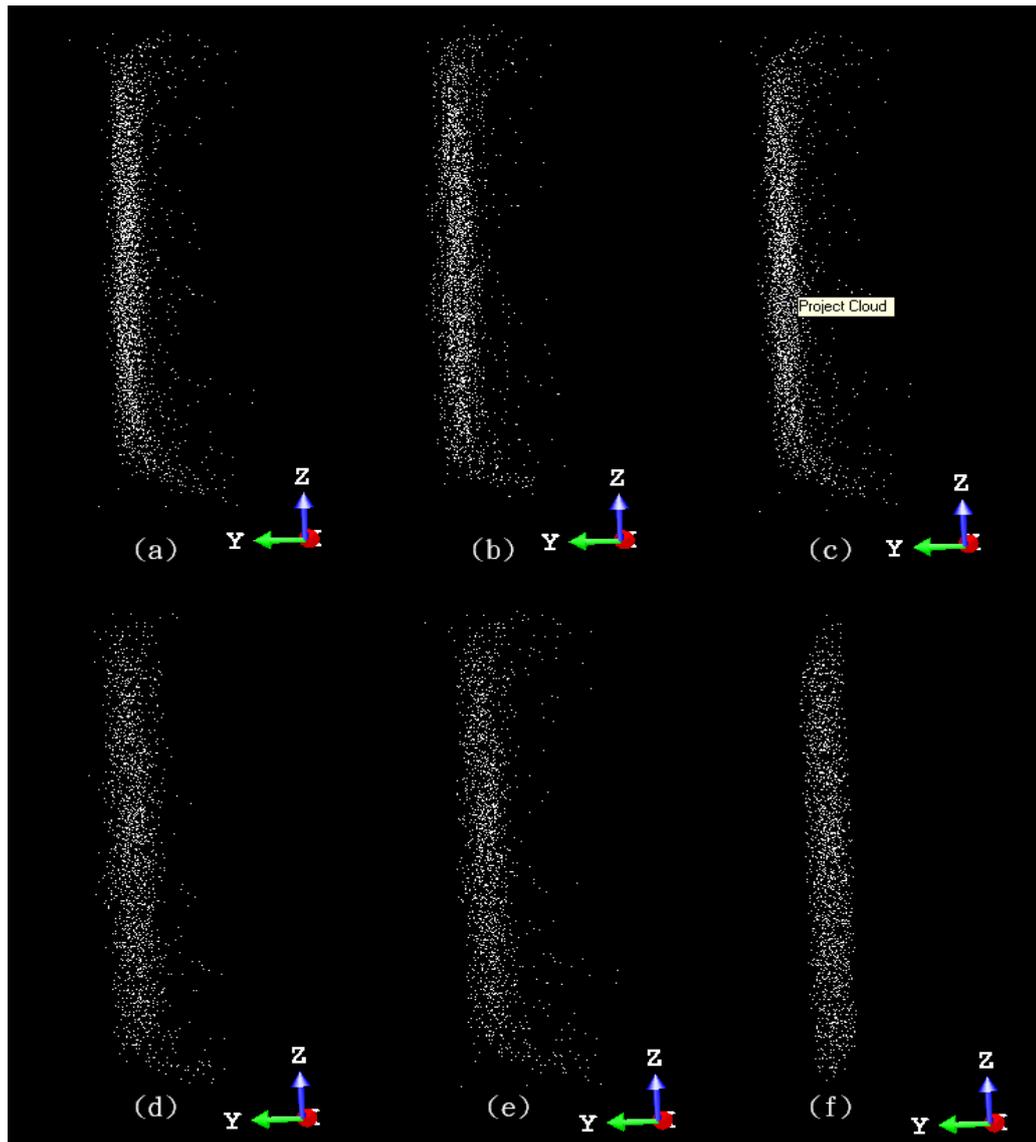


圖 3-13、六種雜訊濾除後之點雲資料不同視角比較圖

(a)平均平滑(b)中值平滑(c)高斯平滑(d)距離濾除法(e)角度濾除法(f)最適平面法

六種雜訊濾除方法處理點雲資料完畢後，便可開始解算九個自製反射標與九個原廠反射標之定位坐標，所使用到的工具為 RealWorks4.2 Registration Target Analyzer Tool。此功能為 RealWorks4.2 內建工具，主要目的為解算反射標點雲之中心點位坐標，解算方式為將反射標圓形部份全部點雲坐標相加取平均，此功能除了解算反射標中心點位坐標外，亦有擬合 Target 平面的 RMS 值，此值越小，表示 Target 的精度越高。因此會解算出共有三段距離十八個反射標，每個反射標有十次的中心點位坐標及 RMS 值。圖 3-14 及圖 3-15 為 RealWorks4.2 Registration Target Analyzer Tool 操作圖。

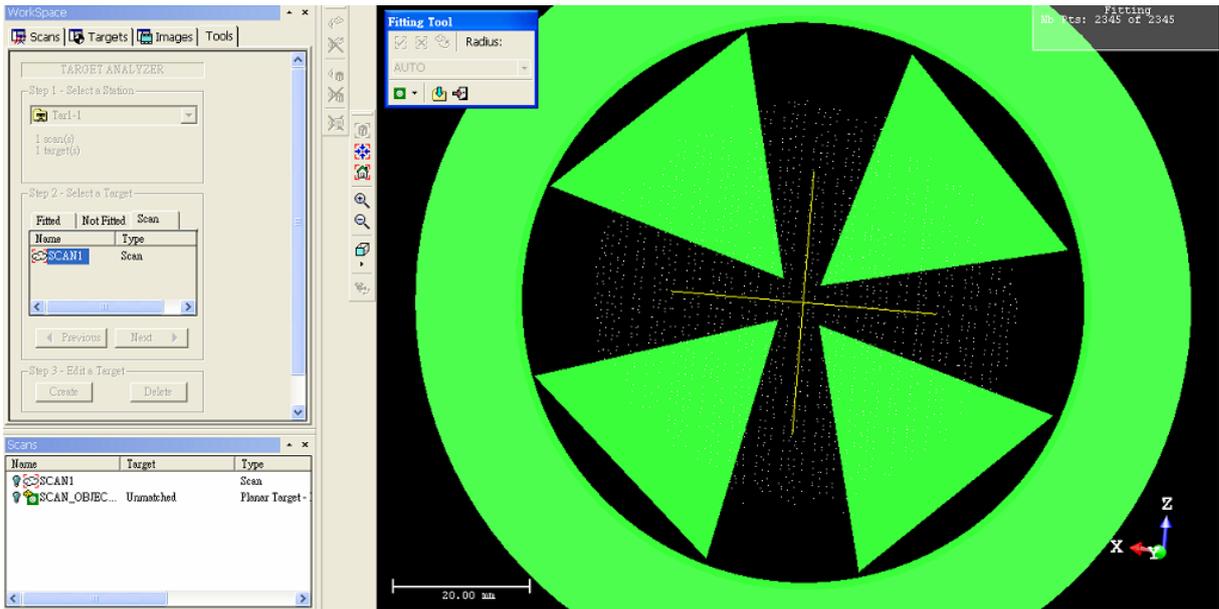


圖 3-14、RealWorks4.2 Registration Target Analyzer Tool

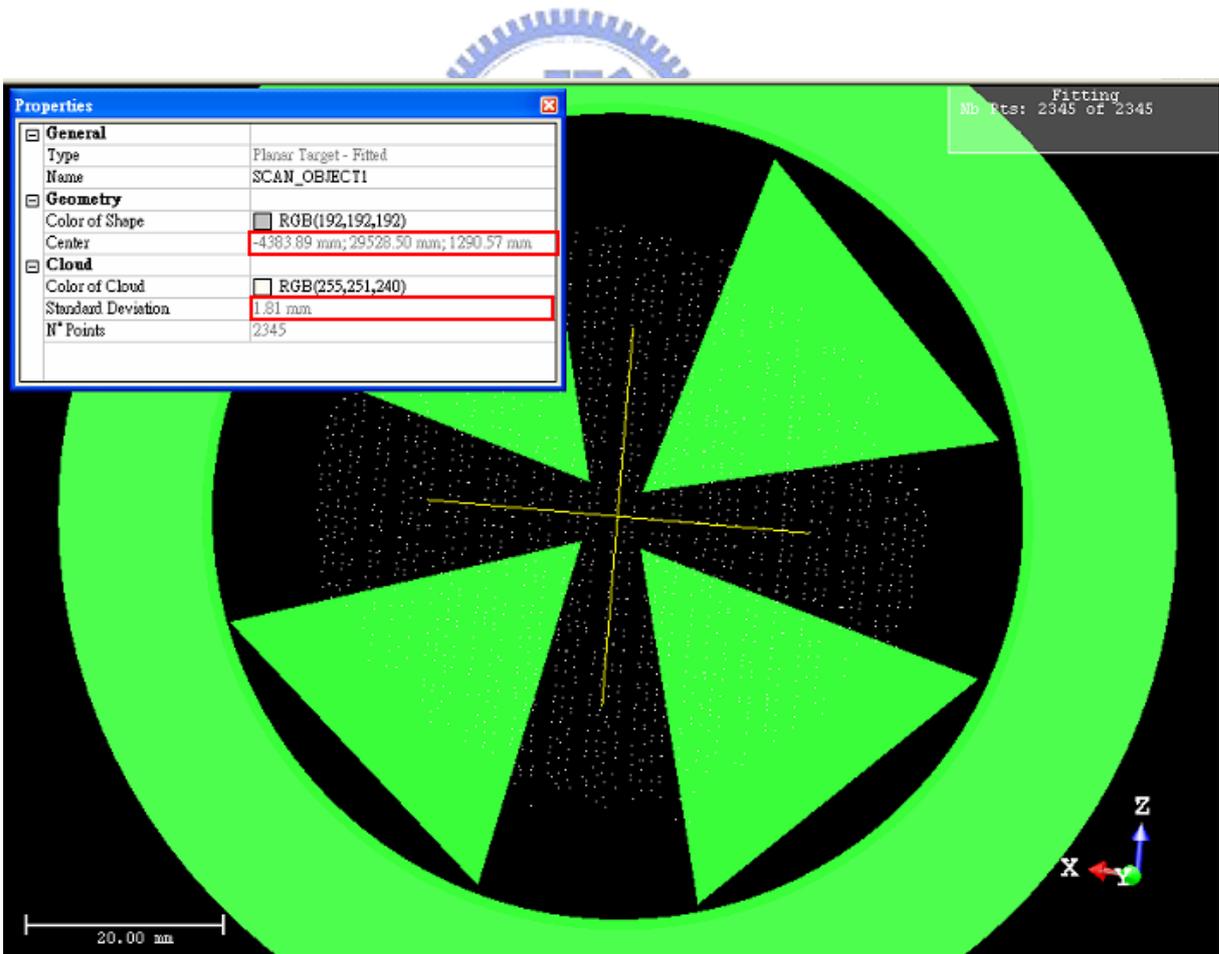


圖 3-15、Target Analyzer Tool 解算反射標中心點位坐標及 RMS 值

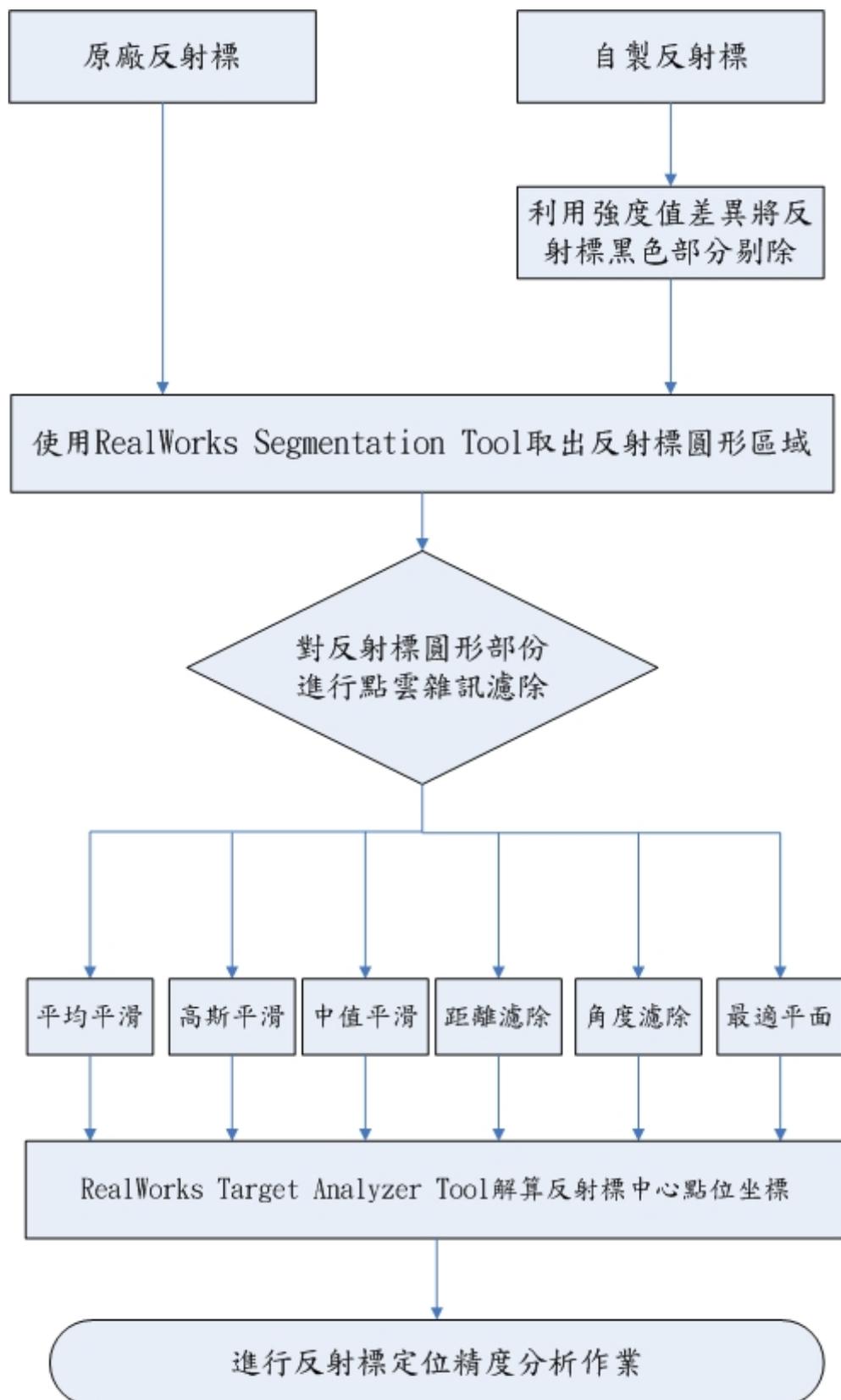


圖 3-16、內業流程圖

3-4 反射標內部精度

此章節主要為探討自製反射標與原廠反射標原始點雲經過六種雜訊濾除方法後中心點位定位坐標內部精度差異及兩種反射標之間的內部精度比較。故本章節將在試驗場實驗及內業處理過後得到之 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離對每一個反射標重複觀測十次的反射標中心點位坐標，利用重複觀測，進行資料統計與分析。

本章節主要統計分析共有以下四項：一、自製反射標與原廠反射標使用 Target Analyzer Tool 解算之擬合平面的 RMS 值，每一個反射標有十次原始擬合平面 RMS 值與經六種點雲雜訊濾除後各十次之擬合平面 RMS 值，將其取平均當成反射標的原始擬合平面 RMS 值及六種點雲雜訊濾除後擬合平面 RMS 值。二、因每一個反射標均有重複觀測，利用重複觀測可計算每個反射標中心點位坐標標準偏差 σ_s ， σ_s 計算方式如以下公式 3-1、3-2、3-3 所示， σ_s 即為反射標內部精度，亦稱為精密度(Precision)；每一個反射標均會有原始點雲中心點位內部精度及六種雜訊濾除後之中心點位內部精度。三、比較擬合平面 RMS 值與中心點位坐標標準偏差 σ_s 關係，理論上應該會有正相關的關係存在。四、比較使用自製反射標內部精度與使用原廠反射標內部精度差異，並比較此兩種反射標優劣。

假設有一組數據 X_1, \dots, X_n (皆為實數)，其平均值為：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3-1)$$

此組數據的標準偏差為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3-2)$$

利用以上公式即可求得 σ_x 、 σ_y 、 σ_z

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (3-3)$$

(一) 擬合平面 RMS 值：

由於反射標與使用時須平貼於標的物表面上，故經由三維雷射掃瞄儀掃描反射標之點雲理論上應呈現出一平面點雲，但由於量測上的誤差，會造成點雲呈現凹凸不平而非完全平面的現象產生。RealWorks4.2 Registration Target Analyzer Tool 除了計算出反射標中心點位坐標外，也會根據反射標點雲擬合出 Target 平面出來，而擬合出來的平面會因為量測的雜訊會造成擬合平面精度上的不同，因此 Target Analyzer Tool 也會計算出擬合平面的 RMS 值供使用者參考，RMS 值越低代表著此擬合平面的精度越高，也代表著點雲資料越接近一平面。本研究分 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離掃描九個自製反射標及九個原廠反射標共十八個反射標十次，且每個反射標原始點雲資料均經過六種雜訊濾除方法處理過，表 3-2~表 3-7 為三段距離自製反射標與原廠反射標十次擬合平面精度 RMS 值平均的比較。



從表 3-2~表 3-7 可以看出，自製反射標部分，30 公尺處以最適平面法改正之擬合平面 RMS 值為最佳，九個自製反射標平均 RMS 值為 0.9576mm；60 公尺和 90 公尺處均以中值平滑法改正之擬合平面之 RMS 值為最佳，九個自製反射標平均 RMS 值分別為 1.4521mm 與 2.2376mm。原廠反射標部份，在 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離中均以最適平面法所得之擬合平面 RMS 值最佳，九個原廠反射標利用最適平面法後所計算平均 RMS 值分別為 0.9470mm、1.5596mm、2.0132mm。表 3-8 為 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離將九個反射標之擬合平面 RMS 值平均所得之表格，並將之以折線圖表示，如圖 3-17 所示。從圖表中可以看到，不論是自製反射標或者是原始反射標，所選用之六種點雲雜訊濾除方法都可降低擬合平面的 RMS 值，也代表著這六種雜訊濾除方法確實能提升擬合平面的精度；而其中以中值平滑法及最適平面法為最佳，最差者為角度濾除法。

表3-2、30公尺自製反射標(Object)擬合平面RMS值

單位：mm

30m	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	平均
原始	1.4850	1.4710	1.4920	1.4640	1.4480	1.4830	1.4900	1.4910	1.4860	1.4789
平均	1.1940	1.2000	1.2010	1.1890	1.1720	1.2030	1.2010	1.2160	1.1940	1.1967
距離	1.1840	1.1820	1.1970	1.1800	1.1680	1.1960	1.1990	1.2030	1.1850	1.1882
高斯	1.2050	1.2090	1.2110	1.1990	1.1810	1.2120	1.2120	1.2270	1.2050	1.2068
中值	1.1700	1.1440	1.1710	1.1570	1.1500	1.1790	1.1440	1.1800	1.1690	1.1627
平面	0.9700	0.9560	0.9660	0.9580	0.9260	0.9620	0.9680	0.9450	0.9670	0.9576
角度	1.4250	1.3710	1.4060	1.3760	1.3500	1.3900	1.3960	1.4020	1.3910	1.3897

表3-3、60公尺自製反射標(Object)擬合平面RMS值

單位：mm

60m	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	平均
原始	2.2010	2.2730	2.2588	2.2170	2.1970	2.2330	2.2740	2.2440	2.2440	2.2380
平均	1.7910	1.8240	1.8200	1.7710	1.7560	1.7730	1.8210	1.8160	1.7230	1.7883
距離	1.7770	1.7990	1.7913	1.7610	1.7470	1.7870	1.7990	1.7790	1.7900	1.7811
高斯	1.8070	1.8400	1.8363	1.7890	1.7710	1.7920	1.8400	1.8320	1.7450	1.8058
中值	1.4990	1.4690	1.4500	1.4340	1.4070	1.4440	1.4660	1.4500	1.4500	1.4521
平面	1.5500	1.6500	1.6200	1.5690	1.5720	1.5840	1.6390	1.6000	1.5720	1.5951
角度	2.0730	2.1480	2.1375	2.0630	2.0490	2.0970	2.1100	2.1230	2.1200	2.1023

表3-4、90公尺自製反射標(Object)擬合平面RMS值

單位：mm

90m	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	平均
原始	3.4820	3.4870	3.4680	3.4740	3.4560	3.4150	3.4940	3.5320	3.5450	3.4837
平均	2.6950	2.7310	2.6710	2.8010	2.7790	2.7540	2.7690	2.8010	2.8470	2.7609
距離	2.7100	2.7790	2.7710	2.7400	2.7070	2.6900	2.7600	2.7930	2.7770	2.7474
高斯	2.7180	2.7540	2.6990	2.8280	2.8030	2.7760	2.8040	2.8260	2.8720	2.7867
中值	2.2330	2.2670	2.2620	2.2510	2.1990	2.1760	2.2320	2.2580	2.2600	2.2376
平面	2.5030	2.4540	2.5710	2.5010	2.4520	2.3390	2.4900	2.6010	2.6170	2.5031
角度	3.3100	3.2060	3.2570	3.2280	3.2130	3.2090	3.2960	3.3180	3.3090	3.2607

表3-5、30公尺原廠反射標(Target)擬合平面RMS值

單位：mm

30m	Tar1	Tar2	Tar3	Tar4	Tar5	Tar6	Tar7	Tar8	Tar9	平均
原始	1.7960	1.7110	1.6520	1.5800	1.5010	1.6410	1.5940	1.5440	1.5600	1.6199
平均	1.3240	1.2340	1.1170	1.0770	0.9750	1.1200	1.0600	0.9830	1.0110	1.1001
距離	1.3930	1.3430	1.3170	1.2700	1.2210	1.3190	1.2810	1.2450	1.2790	1.2964
高斯	1.3460	1.2570	1.1450	1.1060	1.0030	1.1470	1.0910	1.0170	1.0420	1.1282
中值	1.3570	1.2680	1.1900	1.1490	1.0510	1.1880	1.1380	1.0850	1.1140	1.1711
平面	0.9450	0.9570	0.9630	0.9210	0.9040	0.9730	0.9480	0.9640	0.9480	0.9470
角度	1.5690	1.4660	1.3950	1.3050	1.2150	1.3630	1.2970	1.2410	1.2690	1.3467

表3-6、60公尺原廠反射標(Target)擬合平面RMS值

單位：mm

60m	Tar1	Tar2	Tar3	Tar4	Tar5	Tar6	Tar7	Tar8	Tar9	平均
原始	2.7760	2.7050	2.6763	2.4670	2.2810	2.3370	2.3870	2.1020	2.1290	2.4289
平均	2.3410	2.2000	2.2475	1.9030	1.7190	1.8000	1.8430	1.4850	1.4830	1.8913
距離	2.3840	2.4430	2.3775	2.1860	2.0420	2.1120	2.1290	1.8610	1.8690	2.1559
高斯	2.3600	2.2270	2.2663	1.9350	1.7530	1.8340	1.8720	1.5260	1.5250	1.9220
中值	2.4070	2.2990	2.3038	2.0360	1.8480	1.9410	1.9580	1.6490	1.6650	2.0119
平面	1.5250	1.5350	1.5825	1.5070	1.5450	1.5770	1.6230	1.5440	1.5980	1.5596
角度	2.6870	2.5570	2.5588	2.2600	2.0520	2.1290	2.1590	1.8370	1.8630	2.2336

表3-7、90公尺原廠反射標(Target)擬合平面RMS值

單位：mm

90m	Tar1	Tar2	Tar3	Tar4	Tar5	Tar6	Tar7	Tar8	Tar9	平均
原始	4.7580	5.6200	5.1260	4.6020	5.0330	5.0150	5.2310	4.8700	5.1560	5.0457
平均	4.5060	5.3460	4.8590	4.2740	4.6840	4.6260	4.9200	4.5690	4.8330	4.7352
距離	4.0480	4.8970	4.4960	4.0930	4.4360	4.5360	4.6710	4.2670	4.6780	4.4580
高斯	4.5180	5.3560	4.8690	4.2880	4.7060	4.6540	4.9400	4.5850	4.8560	4.7524
中值	4.5060	5.3460	4.8590	4.2740	4.6840	4.6260	4.9200	4.5720	4.8330	4.7356
平面	1.9470	1.9950	2.0970	2.0730	2.2390	1.9550	1.7550	1.7310	2.3270	2.0132
角度	4.7290	5.6300	5.0950	4.5850	4.9320	4.9490	5.1600	4.7290	5.0170	4.9807

表3-8、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)擬合平面之平均RMS值

單位：mm

RMS	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
原始	1.4789	2.2380	3.4837	1.6199	2.4289	5.0457
平均	1.1967	1.7883	2.7609	1.1001	1.8913	4.7352
距離	1.1882	1.7811	2.7474	1.2964	2.1559	4.4580
高斯	1.2068	1.8058	2.7867	1.1282	1.9220	4.7524
中值	1.1627	1.4521	2.2376	1.1711	2.0119	4.7356
平面	0.9576	1.5951	2.5031	0.9470	1.5596	2.0132
角度	1.3897	2.1023	3.2607	1.3467	2.2336	4.9807

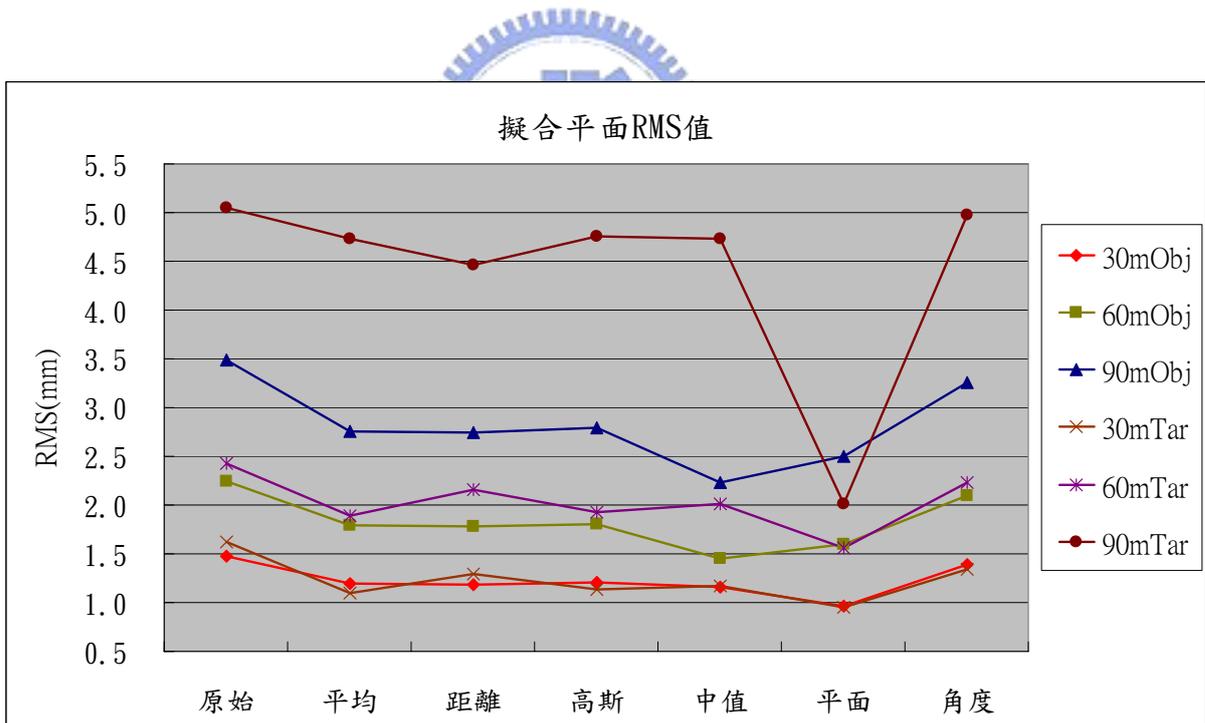


圖 3-17、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)平均擬合平面 RMS 值折線圖

表 3-9 為六種雜訊濾除方法之擬合平面 RMS 值與原始擬合平面 RMS 值較差表， Δ RMS=原始擬合平面 RMS 值-點雲雜訊濾除之擬合平面 RMS 值，從表 3-9 可以得到自製反射標部分，30 公尺處擬合平面精度改善最佳者為最適平面法，提升了 0.5213mm；改善幅度最小為角度濾除法，僅提升了 0.0892mm；60 公尺處擬合平面精度改善最佳者為中值平化法，提升 0.7858mm 的擬合平面精度；改善幅度最小為角度濾除法，僅提升了 0.1357mm；90 公尺處擬合平面精度改善最佳者為中值平化法，提升 1.2461mm 的擬合平面精度；改善幅度最小為角度濾除法，僅提升了 0.2230mm。原廠反射標部份，30 公尺處擬合平面精度改善最佳者為最適平面法，提升了 0.6729mm；改善幅度最小為角度濾除法，僅提升了 0.2732mm；60 公尺處擬合平面精度改善最佳者為最適平面法，提升了 0.8693mm；改善幅度最小為角度濾除法，僅提升了 0.1953mm；90 公尺處擬合平面精度改善最佳者為最適平面法，提升 3.0324mm 的擬合平面精度；改善幅度最小為角度濾除法，僅提升了 0.0650mm。

表3-9、原始擬合平面RMS與六種雜訊濾除方法擬合平面RMS較差表

(Δ RMS=原始擬合平面 RMS 值-點雲雜訊濾除之擬合平面 RMS 值)

單位：mm

Δ RMS	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
平均	0.2822	0.4496	0.7228	0.5198	0.5376	0.3104
距離	0.2907	0.4568	0.7362	0.3234	0.2730	0.5877
高斯	0.2721	0.4322	0.6970	0.4917	0.5069	0.2932
中值	0.3162	0.7859	1.2461	0.4488	0.4171	0.3101
平面	0.5213	0.6429	0.9806	0.6729	0.8693	3.0324
角度	0.0892	0.1357	0.2230	0.2732	0.1953	0.0650

(二) 反射標中心點位標準偏差 σ_s ：

每一個反射標均經過三維雷射掃描儀掃描十次，經由重複觀測可計算出反射標中心點位標準偏差 σ_s ， σ_s 可以當成經由掃描儀掃描所得反射標中心點位坐標的內部精度指標； σ_s 越小代表內部精度越高，也就是當掃描儀掃描反射標時，每一次掃描所定位出之反射標中心點位坐標越接近；反之 σ_s 越大，表示每一次掃描所定位出反射標中心點位坐標越離散，如圖 3-18 所示。表 3-10~表 3-15 所呈現為自製反射標與原廠反射標經由 Trimble GS200 掃描所得三段距離十八個反射標及各種雜訊濾除方法之中心點位標準偏差 σ_s ，從表中可得知，六種雜訊濾除方法在各段距離及各個不同反射標間所計算得出之中心點位標準偏差 σ_s 皆會有所不同。

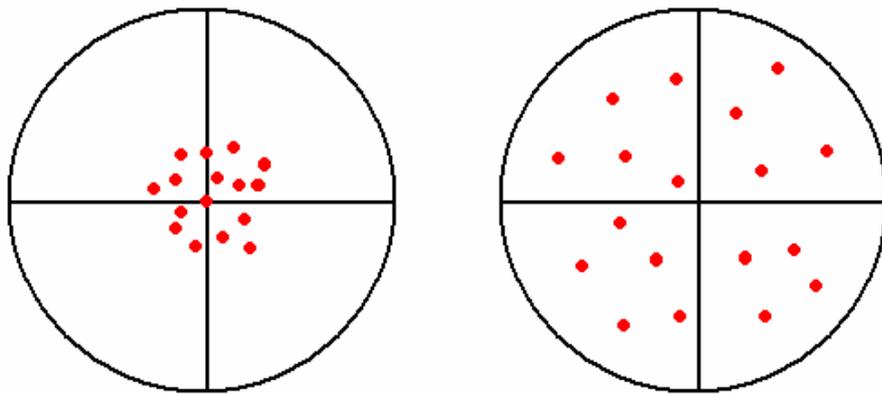


圖 3-18、高內部精度(精密度高)；低內部精度(精密度低)

以自製反射標部分來看：三段距離中 Obj1~Obj9 六種雜訊濾除方法所能改善最佳者與最差者皆略有差異，如 30 公尺處 Obj1 改善最多者為最適平面法，改善最少者為中值平滑法，Obj2 改善最多者為最適平面法，改善最少者為平均平滑法，故在三段距離中六種雜訊濾除方法對每個反射標所能改善最好與最壞者有所差異。但以整體來說，自製反射標於 30 公尺處時的最佳改善方法為最適平面法，而最差改善方法為角度濾除法；60 公尺處最佳改善方法為中值平滑法，而最差改善方法為角度濾除法；90 公尺處，最佳改善方法為中值平滑法，而最差改善方法為角度濾除法。原廠反射標部份，與自製反

射標雷同，每一個反射標再不同距離下六種雜訊濾除方法改善最佳與最差者亦有差異，但以整體來說，原廠反射標 30 公尺處內部精度改善最佳者為最適平面法，最差者為距離濾除法；60m 處最佳者為最適平面法，最差者為角度濾除法；最佳者為最適平面法，最差者為角度濾除法。

表3-10、30公尺自製反射標(Object)中心點位標準偏差 σ_s

單位：mm

30m	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	平均
原始	1.9855	4.4701	3.2402	2.6220	2.6848	1.7779	1.5240	1.2453	0.8495	2.2666
平均	1.7663	4.1307	3.1257	2.4664	2.3759	1.5307	1.2610	0.8812	0.5938	2.0146
距離	1.7070	4.0628	3.1828	2.4547	2.3459	1.4299	1.2479	0.9932	0.7343	2.0176
高斯	1.7666	4.1289	3.1268	2.4637	2.3763	1.5309	1.2593	0.8812	0.5853	2.0132
中值	1.7701	4.0978	3.1414	2.3426	2.2081	1.5736	1.3197	1.1109	0.5775	2.0157
平面	1.6960	4.0294	3.0482	2.3336	2.3428	1.4884	1.3214	0.9180	0.5800	1.9731
角度	1.7451	4.0977	3.1802	2.6397	2.4440	1.6417	1.1661	0.9917	0.7407	2.0719

表3-11、60公尺自製反射標(Object)中心點位標準偏差 σ_s

單位：mm

60m	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	平均
原始	1.4655	1.9951	3.9349	2.1226	1.2396	0.6335	0.9669	0.7920	1.3973	1.6164
平均	1.0043	1.4821	3.5793	1.7294	0.9457	0.3935	0.7391	0.5496	1.1490	1.2858
距離	1.2140	1.5098	3.6083	1.6911	1.0870	0.4201	0.7501	0.6043	1.2107	1.3439
高斯	1.0030	1.5155	3.5841	1.7364	0.9409	0.3887	0.7220	0.5442	1.1482	1.2870
中值	0.9575	1.5048	3.5534	1.6603	0.9115	0.3596	0.6490	0.4799	1.0358	1.2346
平面	0.9642	1.5729	3.4597	1.6979	0.9618	0.3913	0.7168	0.4882	1.0569	1.2566
角度	1.4708	1.6183	3.8261	1.7168	0.8927	0.6022	0.8372	0.7379	1.2137	1.4351

表3-12、90公尺自製反射標(Object)中心點位標準偏差 σ_s

單位：mm

90m	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	平均
原始	1.7013	1.6082	2.0798	1.4329	1.2326	1.1887	2.3134	2.1130	1.2643	1.6593
平均	1.3999	1.3429	1.8416	1.2552	0.7526	0.8388	2.1040	2.0073	0.9272	1.3855
距離	1.5229	1.4028	1.8835	1.1717	1.0006	0.9110	2.1747	1.9902	1.0321	1.4544
高斯	1.3943	1.3448	1.8407	1.2544	0.7524	0.8401	2.0929	2.0307	0.9277	1.3864
中值	1.4348	1.1894	1.5002	0.8918	0.8615	0.6781	1.8899	1.7187	0.8674	1.2258
平面	1.4560	1.3229	1.8469	0.9402	0.8758	0.6769	1.8515	1.9043	0.8805	1.3061
角度	1.6069	1.3389	1.9594	1.3446	1.3931	1.0257	2.3040	2.0583	1.1267	1.5731

表3-13、30公尺原廠反射標(Target)中心點位標準偏差 σ_s

單位：mm

30m	Tar1	Tar2	Tar3	Tar4	Tar5	Tar6	Tar7	Tar8	Tar9	平均
原始	4.3838	3.3666	2.8206	2.5045	2.4079	1.6462	1.4526	1.1813	0.8191	2.2870
平均	4.1851	3.2449	2.5464	2.4347	2.3420	1.5082	1.3133	0.9067	0.6147	2.1218
距離	4.3341	3.2783	2.5429	2.3298	2.3829	1.6777	1.2886	0.9369	0.7774	2.1721
高斯	4.1868	3.2450	2.5462	2.4340	2.3425	1.5098	1.3133	0.9073	0.6140	2.1221
中值	4.1861	3.2452	2.5442	2.4352	2.3455	1.5071	1.3140	0.9068	0.6159	2.1222
平面	4.1426	3.0824	2.5083	2.2408	2.1326	1.4504	1.1214	0.8609	0.5224	2.0069
角度	4.2504	3.2887	2.6074	2.4212	2.3499	1.6295	1.2075	0.9438	0.6666	2.1517

表3-14、60公尺原廠反射標(Target)中心點位標準偏差 σ_s

單位：mm

60m	Tar1	Tar2	Tar3	Tar4	Tar5	Tar6	Tar7	Tar8	Tar9	平均
原始	1.5051	2.6098	4.2286	1.8522	1.3984	0.9488	1.2414	1.0363	1.3501	1.7967
平均	1.3085	2.2055	4.1963	1.6282	1.0645	0.6057	0.8424	0.9096	0.9923	1.5281
距離	1.2986	2.4799	4.2037	1.6319	1.0555	0.6361	1.0031	1.2570	1.1207	1.6318
高斯	1.3069	2.2045	4.1960	1.5818	1.0649	0.6053	0.8413	0.9100	0.9925	1.5226
中值	1.3056	2.2012	4.1997	1.5806	1.0666	0.6103	0.8425	0.9119	0.9973	1.5240
平面	1.1591	1.7909	4.1928	1.4794	0.8474	0.5284	0.7999	0.9283	0.9559	1.4091
角度	1.4119	2.3429	4.1459	1.7970	1.0578	0.6910	1.0348	1.3578	1.2001	1.6710

表3-15、90公尺原廠反射標(Target)中心點位標準偏差 σ_s

單位：mm

90m	Tar1	Tar2	Tar3	Tar4	Tar5	Tar6	Tar7	Tar8	Tar9	平均
原始	1.2987	1.4209	2.0849	1.9512	1.3863	1.7833	2.4448	2.1973	1.3655	1.7703
平均	0.9173	1.0816	1.8392	1.6482	1.3302	1.4705	2.3132	1.8310	1.1305	1.5069
距離	0.9337	1.1390	1.9533	1.4760	1.3890	1.3610	2.2301	1.8273	1.1266	1.4929
高斯	0.9362	1.0817	1.8397	1.6433	1.3687	1.4443	2.3130	1.8285	1.1268	1.5091
中值	0.9500	1.0816	1.8392	1.6482	1.3404	1.4705	2.3132	1.8287	1.1305	1.5114
平面	0.7580	0.7187	1.1193	1.2725	0.8680	1.1950	2.0129	1.4725	0.8446	1.1402
角度	1.0986	1.2657	2.0295	1.6451	1.3344	1.4977	2.3175	1.8677	1.2267	1.5870

為了能更明顯比較出六種雜訊濾除方法在 30 公尺、60 公尺、90 公尺處自製反射標與原廠反射標所改善的程度，故把自製反射標與原廠反射標平均標準偏差 σ_s 整理出如表 3-16，並將之畫成折線圖(圖 3-19)。除了將兩種反射標原始中心點位平均標準偏差 σ_s 與六種雜訊濾除方法中心點位平均標準偏差 σ_s 整理成表外，亦將六種雜訊濾除方法中心點位平均標準偏差與原始反射標中心點位平均標準偏差進行較差比較，比較表如表 3-17 所示， $\Delta\sigma_s$ =原始反射標點雲中心點位標準誤差 σ_s -六種濾除方法點雲中心點位標準誤差 σ_s 。由較差表可知，自製反射標部分：30 公尺處以最適平面法提升了 0.2935 mm 的精度為最佳，最小角度法提升了 0.1947 mm 為最差；60 公尺處以中值平滑法提升了 0.3817 mm 的精度為最佳，最小角度法提升了 0.1813 mm 為最差；90 公尺處以中值平滑法提升了 0.4336 mm 的精度為最佳，最小角度法提升了 0.0863 mm 為最差。原廠反射標部份：30 公尺處以最適平面法提升了 0.2801 mm 的精度為最佳，距離濾除法提升了 0.1149 mm 為最差；60 公尺處以最適平面法提升了 0.3876 mm 的精度為最佳，最小角度法提升了 0.1257 mm 為最差；90 公尺處以最適平面法提升了 0.6302 mm 的精度為最佳，最小角度法提升了 0.1833 mm 為最差。從以上統計資料可得出一個結果，不論是自製反射標與原廠反射標，經由六種雜訊濾除方法濾除過後的中心點位標準偏差 σ_s ，雖然在 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離中自製反射標與原廠反射標改善內部精度最佳者的方法有所不同，但所能改善的幅度均隨著距離變大而提升越多。

表3-16、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)中心點位平均標準偏差 σ_s

單位：mm

σ_s	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
原始	2.2666	1.6164	1.6593	2.2870	1.7967	1.7703
平均	2.0146	1.2858	1.3855	2.1218	1.5281	1.5069
距離	2.0176	1.3439	1.4544	2.1721	1.6318	1.4929
高斯	2.0132	1.2870	1.3864	2.1221	1.5226	1.5091
中值	2.0157	1.2346	1.2258	2.1222	1.5240	1.5114
平面	1.9731	1.2566	1.3061	2.0069	1.4091	1.1402
角度	2.0719	1.4351	1.5731	2.1517	1.6710	1.5870

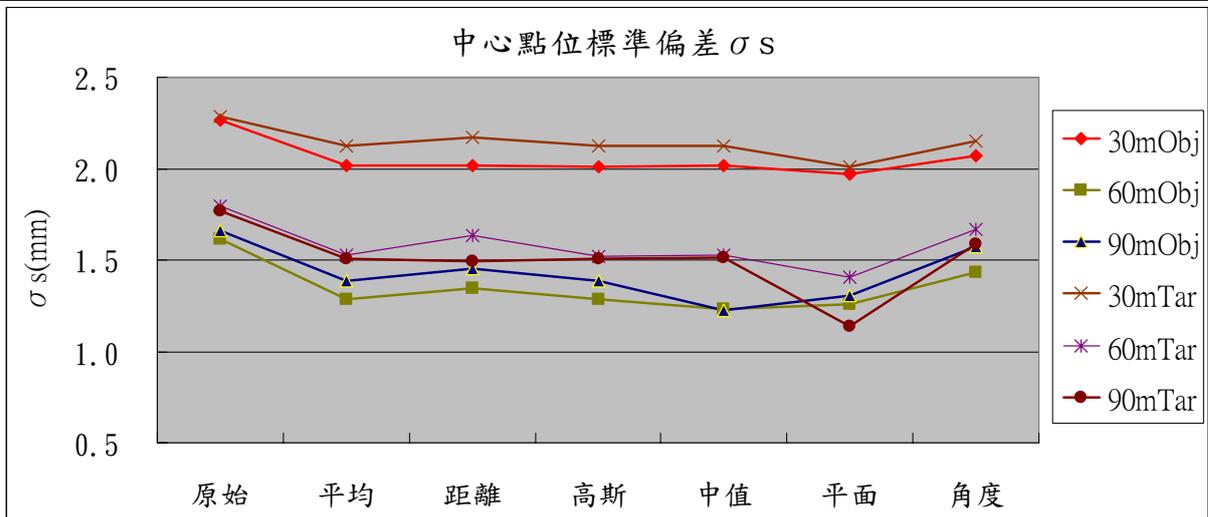


圖 3-19、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)中心點位平均標準偏差 σ_s 折線圖

表3-17、自製反射標(Obj)與原廠反射標(Tar)中心點位平均標準偏差 σ_s 較差表

單位：mm

$\Delta\sigma_s$	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
平均	0.2520	0.3306	0.2738	0.1652	0.2686	0.2635
距離	0.2490	0.2724	0.2049	0.1149	0.1649	0.2775
高斯	0.2534	0.3294	0.2729	0.1649	0.2742	0.2612
中值	0.2508	0.3817	0.4336	0.1647	0.2728	0.2590
平面	0.2935	0.3597	0.3532	0.2801	0.3876	0.6302
角度	0.1947	0.1813	0.0863	0.1353	0.1257	0.1833

(三)擬合平面 RMS 值與中心點位標準偏差 σ_s 關係：

理論上，反射標擬合平面 RMS 值與中心點位標準偏差 σ_s 應呈現正相關的關係存在。因擬合平面 RMS 值關係著擬合出來的平面精度，而反射標點雲為主要影響擬合平面的因素，RMS 值越小代表點雲越接近平面，可想而知解算之反射標中心點位坐標必定較為準確。藉由此次實驗，比較 30 公尺、60 公尺、90 公尺自製反射標與原廠反射標擬合平面平均 RMS 值與中心點位平均標準偏差 σ_s 關係如表 3-18，使用線性迴歸法，線性迴歸法會得出 R^2 值，此值越接近 1 表示此組數據越接近線性。從圖 3-20~圖 3-25 可看到自製反射標線性迴歸之 R^2 值在 30 公尺、60 公尺、90 公尺分別為 0.7196、0.8497、0.9688；原始反射標線性迴歸 R^2 值在 30 公尺、60 公尺、90 公尺分別為 0.9778、0.9438、0.8348，從實驗結果數據看來，除了自製反射標在 30 公尺的 R^2 值低於 0.8 外，其餘數值均高於 0.8，透過實驗，使用線性迴歸法也證明了反射標擬合平面 RMS 值與中心點位標準偏差 σ_s 之間的确是存在有明顯正關係。



表3-18、自製反射標(Object)與原廠反射標(Target)擬合平面平均RMS值
與中心點位平均標準偏差 σ_s 關係

單位：mm

	30m Object		60m Object		90m Object		30m Target		60m Target		90m Target	
	RMS	σ_s										
原始	1.48	2.27	2.24	1.62	3.48	1.66	1.62	2.29	2.43	1.80	5.05	1.77
平均	1.20	2.01	1.79	1.29	2.76	1.39	1.10	2.12	1.89	1.53	4.74	1.51
距離	1.19	2.02	1.78	1.34	2.75	1.45	1.30	2.17	2.16	1.63	4.46	1.49
高斯	1.21	2.01	1.81	1.29	2.79	1.39	1.13	2.12	1.92	1.52	4.75	1.51
中值	1.16	2.02	1.45	1.23	2.24	1.23	1.17	2.12	2.01	1.52	4.74	1.51
平面	0.96	1.97	1.60	1.26	2.50	1.31	0.95	2.01	1.56	1.41	2.01	1.14
角度	1.39	2.07	2.10	1.44	3.26	1.57	1.35	2.15	2.23	1.67	4.98	1.59

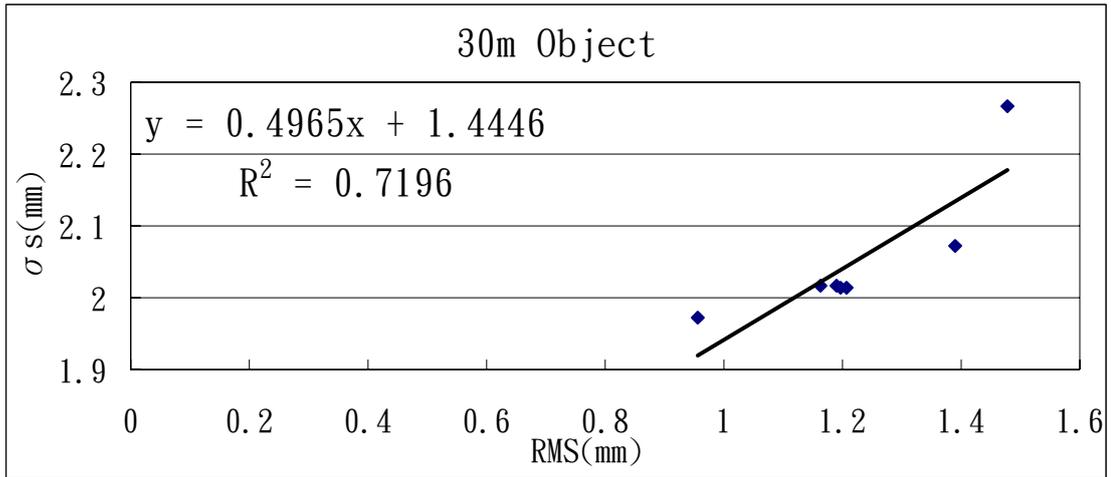


圖 3-20、30 公尺自製反射標(Object)RMS 與 σ_s 關係

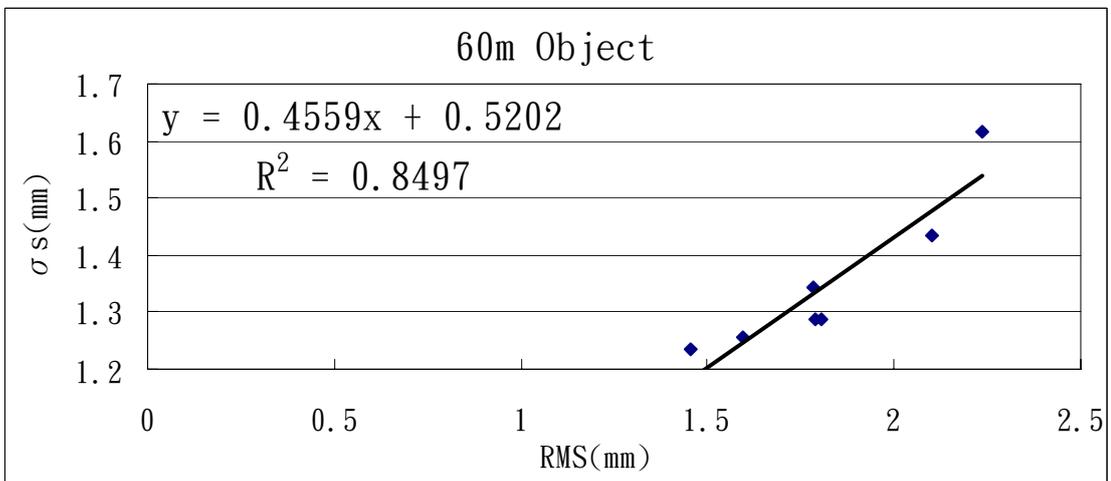


圖 3-21、60 公尺自製反射標(Object)RMS 與 σ_s 關係

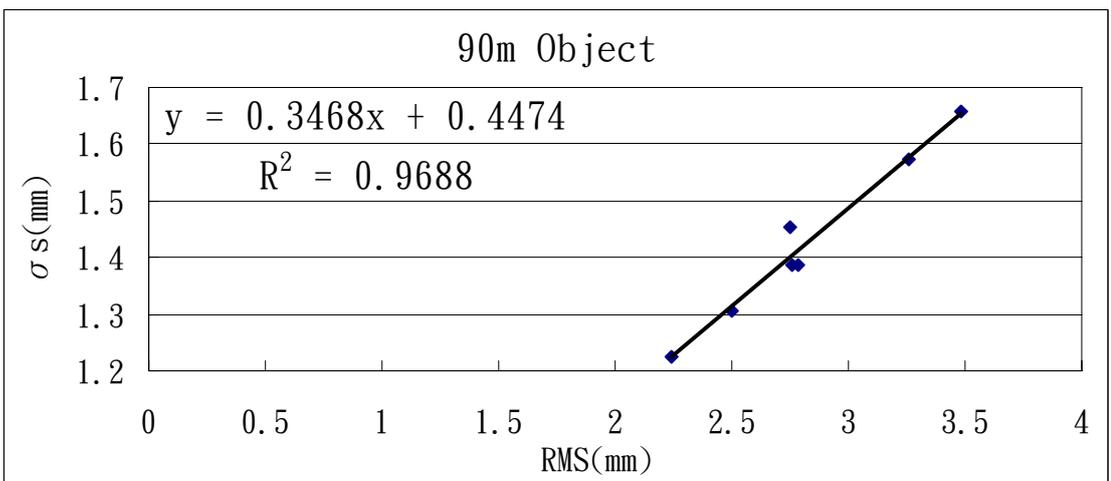


圖 3-22、90 公尺自製反射標(Object)RMS 與 σ_s 關係

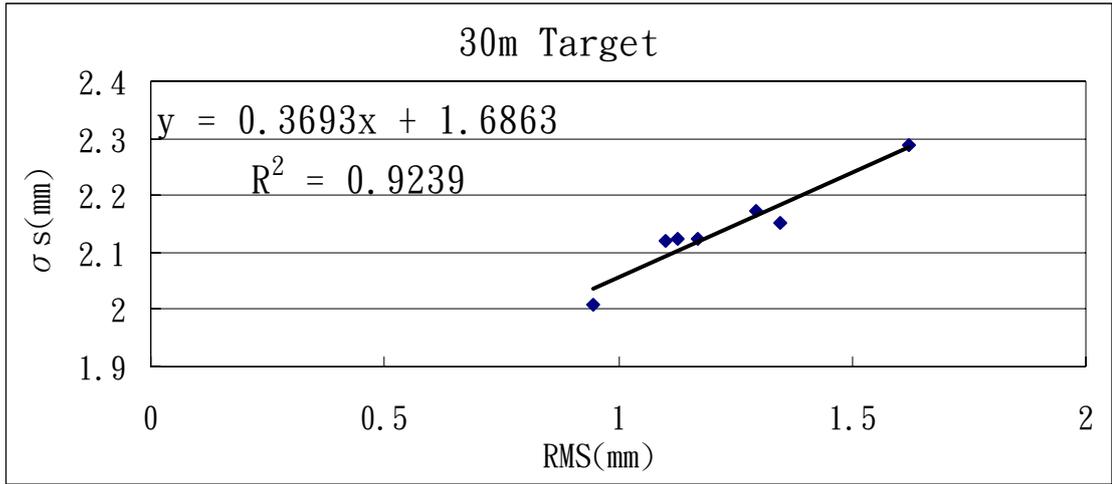


圖 3-23、30 公尺原廠反射標(Target)RMS 與 σ_s 關係

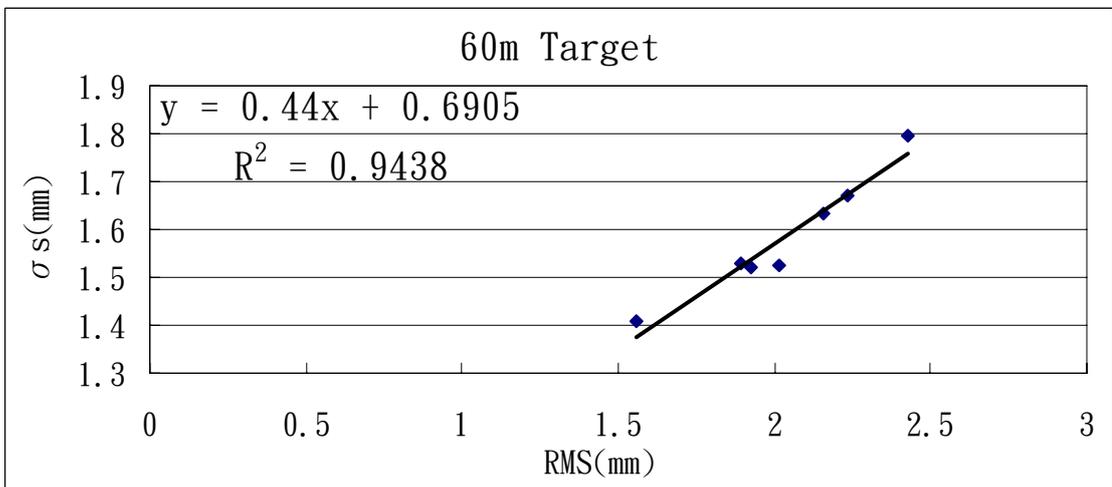


圖 3-24、60 公尺原廠反射標(Target)RMS 與 σ_s 關係

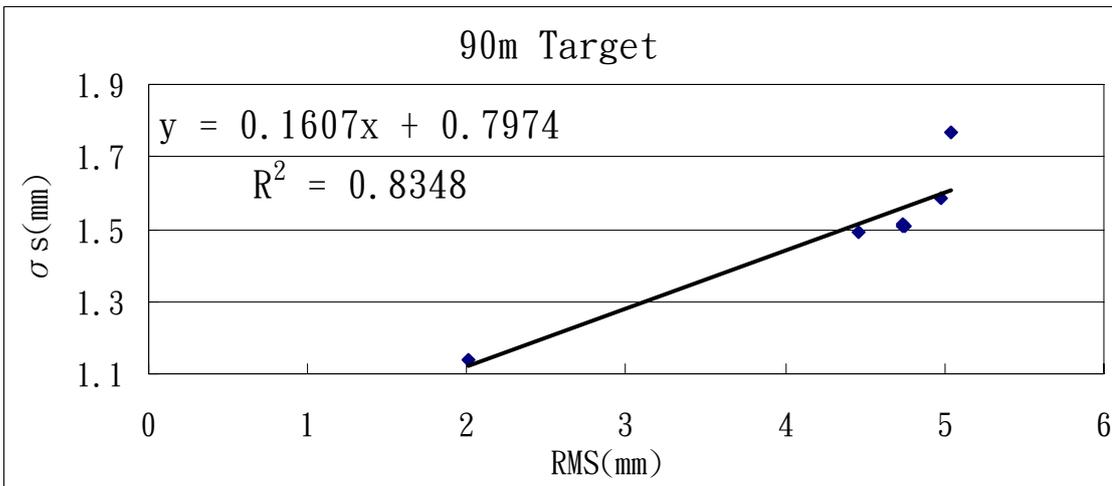


圖 3-25、90 公尺原廠反射標(Target)RMS 與 σ_s 關係

四、自製反射標與原廠反射標內部精度比較：

欲提升反射標定位精度，除了使用六種點雲雜訊濾除方法對原始反射標點雲進行雜訊濾除外，反射標的選擇上也是影響反射標定位精度條件之一，本研究選擇兩種不同反射標進行實驗：原廠反射標(Target)與自製反射標(Object)。本章節為反射標內部精度差異比較，故將自製反射標原始中心點位標準偏差 σ_s 與原廠反射標原始中心點位標準偏差 σ_s ，及經過六種點雲雜訊濾除後原廠反射標與自製反射標中心點位標準偏差 σ_s 進行比較。表 3-19 即為自製反射標與原廠反射標中心點位標準偏差 σ_s 比較表，圖 3-26~圖 3-32 為原始及六種點雲雜訊濾除方法原廠反射標與自製反射標中心點位標準偏差 σ_s 所繪之折線圖。

由實驗所得原始點雲及六種點雲濾除方法自製反射標與原廠反射標中心點位標準偏差 σ_s 比較結果，自製反射標內部精度指標 σ_s 除了在 90 公尺使用最適平面法明顯高於原廠反射標，自製反射標在原始及另外五種雜訊濾除方法中自製反射標中心點位標準偏差 σ_s 值皆低原廠反射標。表 3-20 為原廠反射標在 30 公尺、60 公尺、90 公尺之中心點位標準偏差 σ_s 減去自製反射標在 30 公尺、60 公尺、90 公尺之中心點位標準偏差 σ_s 之較差表， $\Delta\sigma_s = \text{原廠反射標中心點位標準偏差 } \sigma_s - \text{自製反射標中心點位標準偏差 } \sigma_s$ ，若 $\Delta\sigma_s$ 為正值表示自製反射標內部精度比原廠反射標內部精度高，負值則表示自製反射標內部精度比原廠反射標內部精度低。

表 3-20 較差表得知，30 公尺處自製反射標內部精度均大於原廠反射標，差距最大為距離濾除法，自製反射標比原廠反射標多提升了 0.1572mm 的精度，差距最小為原始點雲，自製反射標比原廠反射標多提升了 0.0223mm 的精度；60 公尺處，自製反射標內部精度亦皆大於原廠反射標，差距最大為中值平滑法，自製反射標比原廠反射標多提升了 0.2893mm 的精度，差距最小為最適平面法，自製反射標內部精度比原廠反射標多提升了 0.1525mm；90 公尺處，除了最適平面法中，原廠反射標內部精度優於自製反射標外，其餘皆為自製反射標優於原廠反射標，中值平滑法中，自製反射標比原廠反射標多

提升了 0.2893mm 的精度為最佳，最適平面法中，自製反射標比原廠反射標比較下降低了-0.1660mm 的精度為最差。

本章節為討論反射標選擇與內部精度的關係，以上統計數據可得，自製反射標除了在 90 公尺處最適平面法內部精度劣於原廠反射標外，在其他距離及其他雜訊濾除方法皆優於原廠反射標。原廠反射標為經由原廠率定之反射標，於外業作業時，可經由軟體得到原廠反射標定位坐標，不需要經過複雜的內業處理，但購買成本昂貴，且購買管道僅有生產三維雷射掃瞄儀公司；自製反射標雖然於外業作業時無法立即得到反射標定位坐標，需經由較繁雜的內業處理，較為耗時，但經由實驗結果得知，整體來說自製反射標內部精度並不比原廠反射標低，且自製反射標製作方便，成本低廉，若外部精度亦優於原廠反射標或相差無幾時，將是未來三維雷射掃瞄儀使用者可考慮的反射標使用對象，而非單一選擇原廠所提供之反射標。

表3-19、自製反射標與原廠反射標中心點位標準偏差 σ_s 比較表

單位：mm

	反射標	30m	60m	90m
原始	Object	2.2666	1.6164	1.6593
	Target	2.2889	1.7967	1.7703
平均	Object	2.0146	1.2858	1.3855
	Target	2.1218	1.5281	1.5069
距離	Object	2.0176	1.3439	1.4544
	Target	2.1748	1.6318	1.4929
高斯	Object	2.0132	1.2870	1.3864
	Target	2.1183	1.5226	1.5091
中值	Object	2.0157	1.2346	1.2258
	Target	2.1222	1.5240	1.5114
平面	Object	1.9731	1.2566	1.3061
	Target	2.0204	1.4091	1.1402
角度	Object	2.0719	1.4351	1.5731
	Target	2.1611	1.6710	1.5870

表3-20自製反射標與原廠反射標中心點位標準偏差 σ_s 較差表

($\Delta\sigma_s$ =原廠反射標中心點位標準誤差 σ_s -自製反射標中心點位標準誤差 σ_s)

單位：mm

$\Delta\sigma_s$	30m	60m	90m
原始	0.0223	0.1804	0.1110
平均	0.1072	0.2423	0.1214
距離	0.1572	0.2879	0.0385
高斯	0.1051	0.2356	0.1227
中值	0.1064	0.2893	0.2856
平面	0.0474	0.1525	-0.1660
角度	0.0892	0.2359	0.0139



第四章 反射標外部精度

4-1 實驗設計與資料處理

4-1-1 實驗設計

反射標定位精度可分為內部精度以及外部精度，欲分析反射標外部精度，一般方法使用全測儀觀測所得之反射標中心點位當作已知坐標，三維雷射掃瞄儀掃描反射標中心點位坐標為觀測坐標，進行六參數及七參數轉換作業比較坐標差值。上章節已對反射標作內部精度分析作業，並有掃描觀測坐標，故本章將延續使用上章實驗資料，新增全測儀觀測之反射標中心參考已知坐標，進行外部精度分析。

本實驗所選用之全測儀為 Leica TCR307(如圖 4-1)，可使用無反射稜鏡模式，使用雷射光線測距之全測儀，在無反射稜鏡下測距精度為 $3\text{mm}+2\text{ppm}$ ，測角精度為 $7''$ 。實驗於試驗場離反射標約 10 公尺處架設全測儀，對上章已佈設好之九個自製反射標與九個原廠反射標進行重覆觀測，紀錄水平角、垂直角、水平距三個觀測量，經由三角函數計算，即可得知十八個反射標參考已知坐標值。

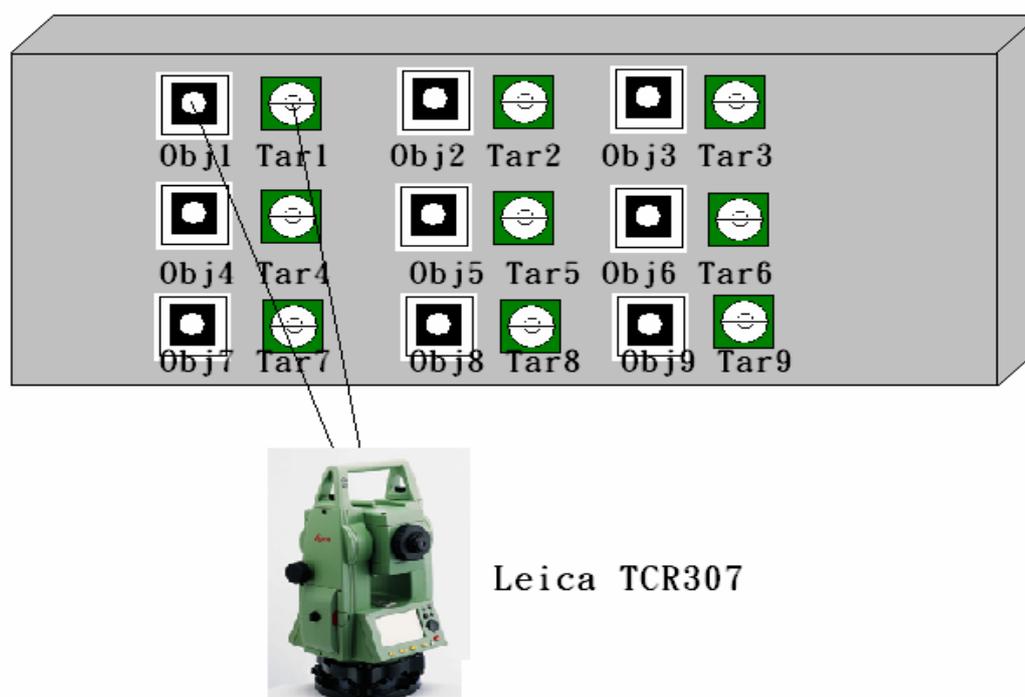


圖 4-1、全測儀觀測反射標示意圖

4-1-2 實驗資料

實驗資料除上章經 Trimble GS200 型三維雷射掃瞄儀掃瞄掃描所得點雲資料經由內業處理後之自製反射標與原始反射標原始點雲及六種點雲雜訊濾除方法中心點位定位坐標外，亦有利用 Leica TCR307 全測儀觀測十八個反射標的水平角、垂直角、水平距計算所得之參考已知坐標，表 4-1 利用全測儀即為計算所得之反射標中心點位坐標。

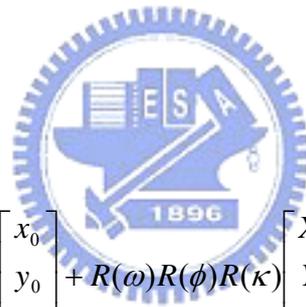
表4-1全測儀觀測計算所得之十八個反射標中心點位坐標

單位：mm

	Obj1	Tar1	Obj2	Tar2	Obj3	Tar3
X	0.0000	204.6084	752.6205	964.9363	1467.4822	1670.3808
Y	10567.0000	10539.0140	10491.0384	10459.5848	10413.1048	10381.4764
Z	410.7660	437.8057	416.6752	443.6660	412.0514	443.1093
	Obj4	Tar4	Obj5	Tar5	Obj6	Tar6
X	-19.5644	182.5524	740.9370	945.0564	1460.3508	1661.9595
Y	10563.9819	10540.4193	10484.8526	10461.3997	10411.0780	10387.8915
Z	-303.8954	-281.8314	-304.8698	-281.0193	-296.3581	-273.6896
	Obj7	Tar7	Obj8	Tar8	Obj9	Tar9
X	-45.9491	154.6437	734.8878	932.0331	1471.5276	1675.8484
Y	10565.9001	10550.8668	10485.2783	10469.5958	10407.4842	10390.7246
Z	-1006.2239	-985.7940	-992.3995	-968.2406	-978.8795	-956.2037

4-1-3 內業資料處理流程

三維雷射掃瞄儀坐標系統與全測儀坐標系統為不同坐標系統，本研究為比較 Trimble GS200 掃瞄所得反射標中心點位坐標與全測儀所得之反射標中心點位坐標差異量，以分析其外部精度，故必須透過坐標參數轉換才能達成。參數轉換方法將使用六參數坐標轉換及七參數坐標轉換兩種進行轉換，六參數轉換主要轉換參數有三個旋轉角及三個平移量(式 4-1)，而七參數轉換多一個尺度因子(式 4-2)。使用七參數主要原因為一般三維雷射掃瞄儀的系統誤差以尺度上的誤差為主，在參數求定時，坐標系的旋轉參數和平移參數並不會吸收系統誤差，所有的系統誤差主要以尺度參數來改正(粘碁非，2005)。因此本研究除了使用六參數坐標轉換比較外部精度差異外，亦使用七參數法來處理掃瞄的點雲資料，利用改正其尺度上的誤差來消除掃瞄資料的系統誤差，以提升反射標定位精度。



六參數轉換

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + R(\omega)R(\phi)R(\kappa) \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4-1)$$

七參數轉換

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \lambda \times R(\omega)R(\phi)R(\kappa) \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

(X_A, Y_A, Z_A) 為全測儀觀測得到之已知坐標

(X_B, Y_B, Z_B) 為三維雷射掃瞄儀觀測得到之觀測坐標

(ω, ϕ, κ) 為兩坐標系的旋轉角度參數

(x_0, y_0, z_0) 為兩坐標系原點的平移參數

λ 為兩座標系的尺度參數

六參數及七參數轉換內業處理程式為Microsoft Visual Basic 6.0所撰寫LiDAR點雲資料坐標轉換程式V1.0(如圖4-2)，經由轉換程式轉換完結果會如表4-2，表4-2為30公尺自製反射標原始點雲中心點位坐標六參數轉換成果，轉換結果包含轉換參數、原始座標、實際坐標、轉換後坐標、坐標差值。欲分析掃瞄儀觀測坐標與全測儀已知坐標外部精度關係，故使用RMS-x、RMS-y、RMS-z、RMS-s當作外部精度評估指標，計算方式如下：

$$RMS-x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n}} \quad \dots\dots\dots(4-3)$$

$$RMS-y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2}{n}} \quad \dots\dots\dots(4-4)$$

$$RMS-z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2}{n}} \quad \dots\dots\dots(4-5)$$

$$RMS-s = \sqrt{RMS-x^2 + RMS-y^2 + RMS-z^2} \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

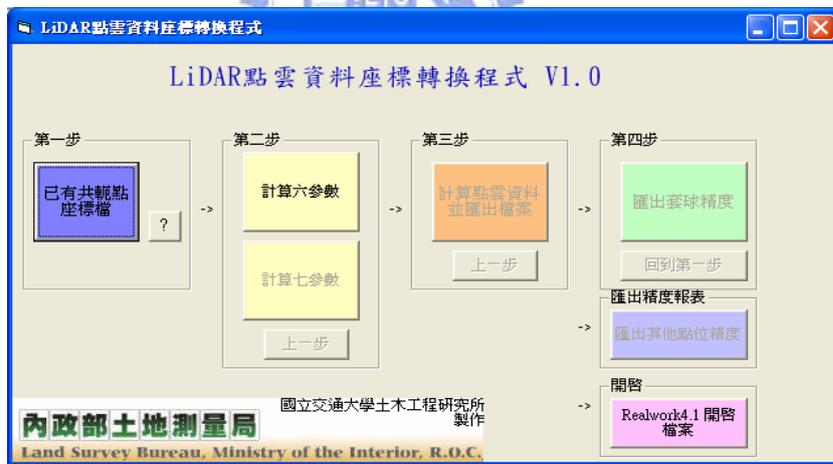


圖 4-2、六參數及七參數轉換程式

表4-2、30公尺自製反射標原始點雲中心點位坐標六參數轉換成果表

單位：mm

原始 X	原始 Y	原始 Z	實際 X	實際 Y	實際 Z	轉換後 X	轉換後 Y	轉換後 Z	ΔXi	ΔYi	ΔZi
-4580.1	29502.9	1268.1	0.0	10567.0	410.8	-1.7	10567.3	410.9	1.7	-0.3	-0.1
-3849.3	29602.3	1265.5	752.6	10491.0	416.7	752.9	10490.8	416.8	-0.3	0.2	-0.1
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

因自製反射標與原廠反射標除了原始點雲所得中心點位坐標外，另有六種雜訊濾除方法處理後之反射標中心點位坐標，故經由六參數與七參數轉換後，除了比較六參數及七參數轉後後六種雜訊濾除方法反射標中心點位坐標外部精度是否比原始點雲反射標中心點位坐標較佳外，亦比較七參數轉換是否能將三維雷射掃瞄儀系統誤差消除，最後，比較自製反射標與原廠反射標中心點位坐標外部精度的差異，圖 4-3 為外部精度分析流程圖。

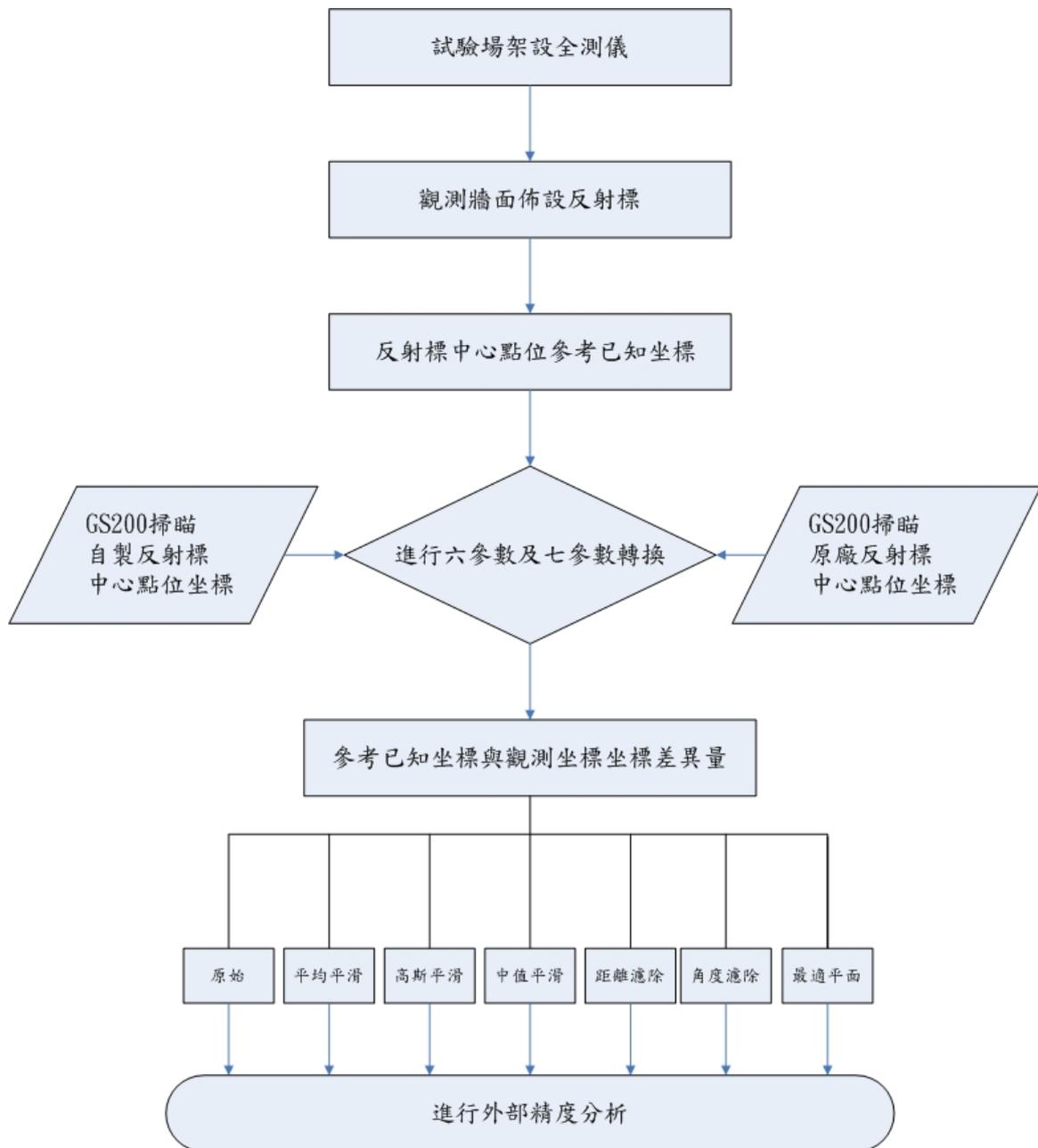


圖 4-3、外部精度分析流程圖

4-2 反射標外部精度

一、反射標原始與經六種雜訊濾除後中心點位坐標差異量：

反射標原始點雲中心點位定位坐標與經六種點雲雜訊濾除方法處理過後之中心點位坐標必有差異，此差異量會造成反射標外部精度的變化，為了解經由雜訊濾除過後之反射標中心點位坐標與原始點雲之反射標中心點位坐標變化大小，將原始點雲經過六種雜訊濾除後之反射標中心點位坐標 X、Y、Z 減去原始點雲反射標中心點位坐標 X、Y、Z 後，可得到雜訊濾除後之坐標三維較差量 Δx 、 Δy 、 Δz 。表 4-3~表 4-8 為 30 公尺、60 公尺、90 公尺三段距離中自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位坐標與六種雜訊濾除後中心點位坐標三維較差表。表 4-3~表 4-8 可以看出， Δx 、 Δy 、 Δz 出現最大或最小值發生以中值平滑法及最適平面法最多，正也呼應了中值平滑法及最適平面法改善反射標內部精度為最多。

表4-3、30公尺自製反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表

30m	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$
	平均			距離			高斯		
Obj1	-0.055	-0.054	0.001	-0.236	-0.183	0.213	-0.058	-0.057	-0.001
Obj2	-0.109	-0.031	0.052	0.028	-0.120	0.136	-0.108	-0.031	0.055
Obj3	0.175	-0.039	0.012	0.104	-0.156	-0.107	0.173	-0.038	0.002
Obj4	0.079	0.015	0.066	0.161	-0.072	-0.015	0.080	0.015	0.061
Obj5	0.046	-0.067	0.093	0.175	-0.166	0.312	0.042	-0.067	0.097
Obj6	0.057	-0.074	0.014	0.209	-0.164	-0.130	0.056	-0.074	0.009
Obj7	-0.089	-0.015	-0.001	0.015	-0.080	-0.018	-0.086	-0.013	-0.006
Obj8	0.073	-0.061	0.060	0.269	-0.152	0.301	0.068	-0.063	0.060
Obj9	0.037	-0.038	0.039	0.088	-0.132	0.145	0.041	-0.037	0.042
	中值			平面			角度		
Obj1	-0.194	-0.099	-0.194	0.381	-0.205	0.226	-0.023	-0.053	0.091
Obj2	-0.287	-0.043	-0.032	0.130	-0.129	0.380	-0.087	-0.001	-0.031
Obj3	0.169	-0.048	-0.212	0.300	-0.220	0.090	0.190	-0.038	-0.052
Obj4	-0.126	0.013	-0.102	0.319	-0.135	0.301	0.143	0.029	0.074
Obj5	-0.116	-0.053	-0.043	0.133	-0.272	0.536	0.227	-0.062	-0.030
Obj6	-0.055	-0.073	-0.146	0.270	-0.233	0.243	0.068	0.061	-0.011
Obj7	-0.209	-0.020	-0.162	0.141	-0.183	0.171	-0.138	-0.031	0.002
Obj8	0.023	-0.064	0.015	0.149	-0.283	0.420	0.132	-0.067	0.034
Obj9	0.072	-0.032	-0.211	0.154	-0.154	0.255	0.160	-0.048	0.073

表4-4、60公尺自製反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表

60m	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$
	平均			距離			高斯		
Obj1	-0.239	0.067	-0.068	-0.076	-0.009	-0.232	-0.231	0.064	-0.075
Obj2	0.002	-0.110	0.160	0.267	-0.206	0.062	0.005	-0.112	0.125
Obj3	0.050	0.094	-0.063	-0.135	0.008	-0.194	0.045	0.093	-0.069
Obj4	0.077	0.108	0.072	0.033	-0.005	-0.319	0.062	0.106	0.066
Obj5	0.056	0.037	-0.011	0.075	-0.060	-0.228	0.056	0.035	-0.012
Obj6	-0.019	-0.067	-0.004	0.025	-0.181	-0.224	-0.015	-0.070	-0.009
Obj7	-0.046	-0.042	0.005	-0.110	-0.164	-0.202	-0.041	-0.045	-0.003
Obj8	-0.023	-0.004	0.029	-0.077	-0.118	-0.326	-0.025	-0.005	0.017
Obj9	0.081	0.024	-0.134	-0.021	-0.080	-0.326	0.082	0.020	-0.131
	中值			平面			角度		
Obj1	-0.087	0.019	-0.270	-0.016	-0.085	0.021	-0.058	0.044	-0.021
Obj2	0.256	-0.183	-0.307	0.058	-0.248	0.352	0.090	-0.155	0.136
Obj3	-0.142	0.028	-0.257	0.050	-0.044	-0.274	0.120	0.074	0.093
Obj4	-0.182	0.062	-0.040	0.206	-0.080	-0.267	0.129	0.122	-0.099
Obj5	0.114	0.006	-0.188	0.101	-0.147	-0.054	-0.013	0.018	0.077
Obj6	0.089	-0.100	-0.192	0.006	-0.255	-0.156	0.078	-0.023	0.033
Obj7	-0.146	-0.124	-0.487	0.059	-0.262	-0.352	0.062	-0.007	-0.071
Obj8	0.090	-0.045	-0.143	-0.103	-0.143	-0.136	0.040	0.009	-0.180
Obj9	0.099	-0.044	-0.119	0.051	-0.129	-0.223	-0.001	-0.012	-0.106

表4-5、90公尺自製反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表

90m	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$
	平均			距離			高斯		
Obj1	-0.097	0.050	0.100	-0.220	-0.153	0.155	-0.089	0.041	0.080
Obj2	-0.105	0.044	0.082	-0.025	-0.195	0.219	-0.103	0.030	0.082
Obj3	-0.025	0.018	-0.108	0.200	-0.242	0.127	-0.019	0.009	-0.122
Obj4	-0.059	0.008	0.116	-0.034	-0.177	0.044	-0.057	0.006	0.103
Obj5	-0.025	-0.005	-0.012	0.201	-0.307	0.127	-0.026	-0.011	-0.027
Obj6	-0.051	-0.008	0.037	0.132	-0.226	0.142	-0.053	-0.014	0.019
Obj7	-0.038	-0.002	-0.015	0.276	-0.221	0.445	-0.022	-0.005	-0.024
Obj8	-0.102	0.063	-0.060	0.243	-0.274	0.363	0.000	0.053	-0.076
Obj9	0.042	0.100	0.021	0.147	-0.115	0.233	0.046	0.093	0.006
	中值			平面			角度		
Obj1	-0.028	-0.099	-0.211	-0.172	-0.217	-0.029	-0.068	-0.001	-0.140
Obj2	-0.068	-0.080	-0.008	-0.246	-0.381	-0.048	0.015	0.018	-0.027
Obj3	0.051	-0.118	-0.697	0.287	-0.365	-0.211	0.124	-0.057	-0.236
Obj4	-0.188	-0.160	-0.476	-0.138	-0.333	0.124	-0.025	-0.044	0.366
Obj5	0.295	-0.139	-0.344	0.166	-0.303	0.325	0.088	-0.121	0.068
Obj6	-0.030	-0.191	-0.530	0.342	-0.291	0.128	0.114	-0.109	0.038
Obj7	-0.130	-0.093	-0.292	0.193	-0.226	0.026	0.016	-0.024	-0.176
Obj8	0.002	-0.090	-0.710	-0.031	-0.388	-0.363	0.102	-0.002	0.025
Obj9	0.240	0.011	-0.570	0.373	-0.201	-0.305	-0.056	0.039	0.218

表4-6、30公尺原廠反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表

30m	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$
	平均			距離			高斯		
Tar1	0.068	-0.035	-0.005	-0.156	0.144	0.217	0.066	-0.023	-0.004
Tar2	-0.026	-0.053	-0.033	-0.167	0.101	-0.096	-0.027	-0.042	-0.033
Tar3	-0.025	0.017	-0.003	-0.094	0.110	0.083	-0.027	0.025	-0.002
Tar4	0.015	-0.025	0.000	-0.243	0.049	0.175	0.014	-0.020	0.000
Tar5	0.012	-0.023	-0.031	-0.297	-0.032	0.011	0.011	-0.017	-0.031
Tar6	-0.067	-0.033	-0.002	-0.224	0.012	-0.121	-0.069	-0.025	-0.001
Tar7	0.034	-0.028	-0.052	-0.222	0.015	0.058	0.034	-0.018	-0.050
Tar8	0.003	0.134	-0.002	-0.219	0.175	0.001	0.003	0.140	-0.002
Tar9	-0.007	-0.005	0.028	-0.213	0.034	-0.127	-0.007	0.001	0.028
	中值			平面			角度		
Tar1	0.060	0.001	0.002	-0.967	0.339	1.136	-0.107	-0.120	0.126
Tar2	-0.030	-0.028	-0.025	-1.006	0.244	0.637	0.016	-0.103	-0.023
Tar3	-0.027	0.033	0.005	-0.864	0.187	0.362	-0.047	-0.064	0.068
Tar4	0.012	-0.012	0.008	-1.053	0.130	0.661	-0.215	-0.084	0.108
Tar5	0.011	0.024	-0.026	-1.192	-0.003	-0.022	-0.159	-0.098	0.052
Tar6	-0.068	-0.026	0.003	-1.038	0.122	0.646	-0.175	-0.090	-0.044
Tar7	0.031	-0.017	-0.049	-0.999	0.125	0.674	-0.184	-0.106	-0.033
Tar8	0.003	0.132	0.003	-0.785	0.211	0.384	-0.168	0.063	0.023
Tar9	-0.008	0.005	0.033	-1.023	0.059	0.368	-0.128	-0.047	-0.119

表4-7、60公尺原廠反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表

60m	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$	$\Delta x(mm)$	$\Delta y(mm)$	$\Delta z(mm)$
	平均			距離			高斯		
Tar1	0.021	-0.079	-0.056	0.026	0.159	-0.425	0.021	-0.067	-0.055
Tar2	-0.240	0.007	0.108	0.179	-0.025	-0.214	-0.240	0.014	0.109
Tar3	-0.049	0.030	0.002	0.099	0.085	-0.454	-0.049	0.043	0.001
Tar4	-0.010	0.021	-0.043	0.214	0.192	-0.285	-0.010	0.070	-0.043
Tar5	-0.040	-0.027	-0.023	0.177	-0.033	-0.262	-0.040	-0.020	-0.023
Tar6	0.000	-0.084	-0.064	0.178	-0.088	-0.199	0.000	-0.076	-0.063
Tar7	0.104	-0.019	-0.035	0.182	-0.013	-0.336	0.104	-0.012	-0.034
Tar8	-0.009	-0.024	-0.010	0.076	-0.020	-0.221	-0.009	-0.017	-0.009
Tar9	-0.170	0.002	-0.111	0.157	0.003	-0.316	-0.170	0.010	-0.108
	中值			平面			角度		
Tar1	0.020	-0.044	-0.043	-0.603	1.103	-0.098	0.172	-0.416	-0.264
Tar2	-0.240	0.005	0.118	0.118	0.900	0.100	0.255	-0.401	-0.024
Tar3	-0.049	0.047	0.005	0.314	1.007	-0.789	0.111	-0.329	-0.265
Tar4	-0.010	0.072	-0.034	0.167	0.811	-0.392	0.210	-0.222	-0.155
Tar5	-0.040	-0.023	-0.010	-0.057	0.538	-0.641	-0.097	-0.285	-0.482
Tar6	0.000	-0.084	-0.050	0.353	0.387	-1.134	0.292	-0.377	-0.473
Tar7	0.104	-0.023	-0.019	-0.047	0.487	-1.256	0.138	-0.258	-0.274
Tar8	-0.009	-0.023	0.015	-0.577	0.238	-1.354	-0.016	-0.260	-0.340
Tar9	-0.170	0.010	-0.086	-0.454	0.196	-1.255	0.088	-0.249	-0.573

表4-8、90公尺原廠反射標六種雜訊濾除方法與原始點雲中心點位坐標較差表

90m	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$
	平均			距離			高斯		
Tar1	-0.260	-0.125	0.025	-0.062	0.899	0.309	-0.260	-0.094	0.026
Tar2	0.031	-0.118	-0.144	0.183	0.990	0.207	0.030	-0.095	-0.141
Tar3	-0.133	-0.031	-0.111	-0.114	0.908	-0.078	-0.133	-0.002	-0.108
Tar4	0.022	-0.089	-0.035	0.372	0.870	0.835	0.021	-0.066	-0.028
Tar5	-0.071	-0.067	-0.009	0.147	0.925	0.936	-0.131	-0.051	-0.009
Tar6	-0.014	-0.139	-0.002	0.264	0.817	0.606	-0.013	-0.085	0.001
Tar7	0.003	-0.076	0.041	-0.159	0.762	0.410	0.003	-0.059	0.040
Tar8	0.028	-0.121	-0.035	0.243	0.827	0.349	0.029	-0.097	-0.037
Tar9	-0.033	-0.083	0.034	-0.017	0.719	0.851	-0.033	-0.068	0.035
	中值			平面			角度		
Tar1	-0.260	-0.125	0.015	0.071	2.030	-3.164	-0.315	-0.199	0.166
Tar2	0.031	-0.118	-0.144	-0.013	2.980	-3.624	-0.301	-0.252	0.063
Tar3	-0.133	-0.031	-0.111	0.799	2.426	-2.745	-0.174	-0.141	-0.072
Tar4	0.022	-0.089	-0.035	0.405	2.249	-2.200	0.023	-0.287	0.077
Tar5	-0.041	-0.067	-0.009	-0.152	2.241	-3.049	0.014	-0.078	0.444
Tar6	-0.014	-0.139	-0.002	-0.492	2.163	-4.145	-0.010	0.018	0.165
Tar7	0.003	-0.076	0.041	3.802	2.748	-5.014	-0.175	-0.149	0.206
Tar8	0.028	-0.119	-0.034	0.132	1.983	-4.055	-0.091	-0.262	0.090
Tar9	-0.033	-0.083	0.034	-0.256	1.981	-4.465	-0.049	-0.138	0.527

為了更明確知道中心點位坐標三維變化量，將經六種雜訊濾除方法與原始點雲 Δx 、 Δy 、 Δz 正負值相差最大者整理出來如表 4-9 所示，表 4-9 得知自製反射標在三段距離中心點位坐標差距最大為 90 公尺 $\Delta z=1.155\text{mm}$ ，最小為 30 公尺處 $\Delta y=0.344\text{mm}$ ；原廠反射標三段距離中心點位差距最大為 90 公尺 $\Delta z=5.95\text{mm}$ ，最小為 30 公尺處 $\Delta y=0.344\text{mm}$ 。從以上統計可知，本次實驗中六種雜訊濾除方法對反射標中心點位坐標影響最大可達 5.95mm，最小 0.344mm，表 4-9 中也可看到距離越大中心點位坐標變化量越大，且雜訊濾除方法對中心點位定位坐標影響，原廠反射標遠大於自製反射標。探討原廠反射標雜訊濾除方法對中心點位坐標影響遠大於自製反射標原因，主要原因歸咎於反射標原始點雲穩定程度，圖 4-4 與圖 4-5 為自製反射標與原廠反射標編號 1 三段距離原始點雲，從圖中明顯可看出自製反射標點雲隨距離變大並沒有太大變化，而原廠反射標卻隨距離變大而出現離散點，且呈現碗狀非平面，為可能造成原廠反射標中心點位坐標經雜訊濾除後坐標差異量較大主因。

表4-9、六種雜訊濾除方法與原始點雲 Δx 、 Δy 、 Δz 正負值差距最大表

	30mObj			60mObj			90mObj		
	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$
正值最大	0.381	0.061	0.536	0.267	0.122	0.352	0.373	0.100	0.445
負值最小	-0.287	-0.283	-0.212	-0.239	-0.262	-0.487	-0.246	-0.388	-0.710
正值-負值	0.668	0.344	0.748	0.506	0.384	0.839	0.619	0.488	1.155
	30mTar			60mTar			90mTar		
	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$
正值最大	0.068	0.339	1.136	0.353	1.103	0.118	3.802	2.980	0.936
負值最小	-1.192	-0.120	-0.127	-0.603	-0.416	-1.354	-0.492	-0.287	-5.014
正值-負值	1.260	0.459	1.263	0.956	1.519	1.472	4.294	3.267	5.950

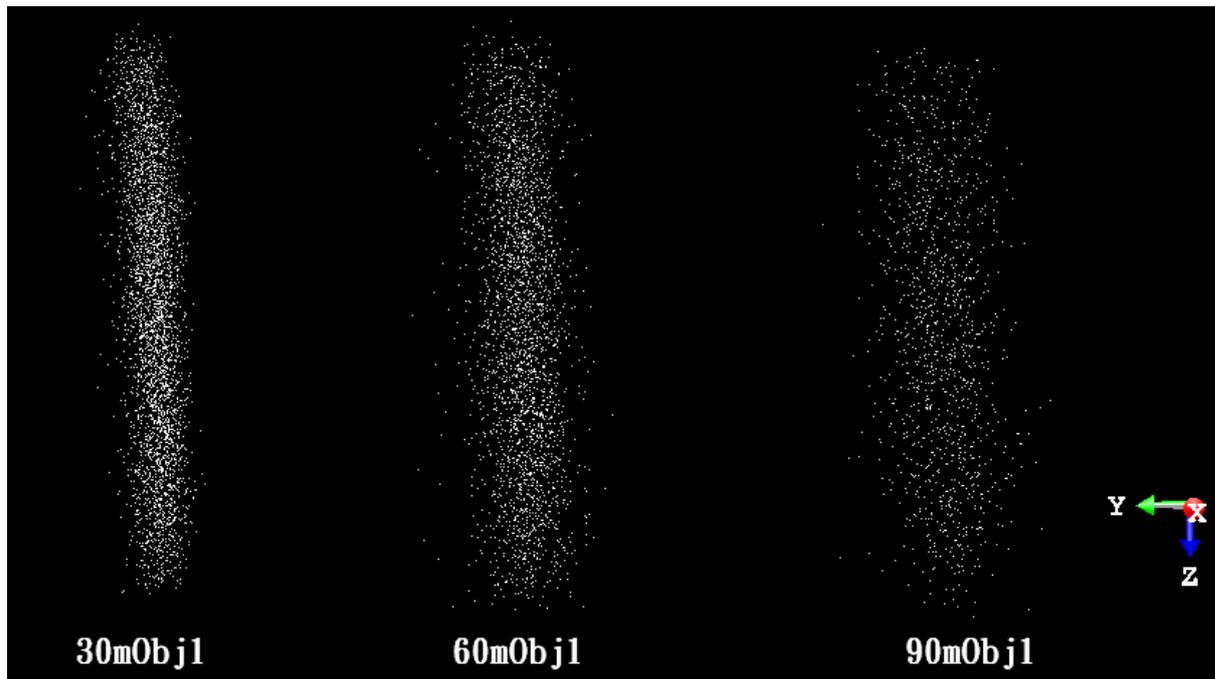


圖 4-4、自製反射標編號 1 三段距離原始點雲變化

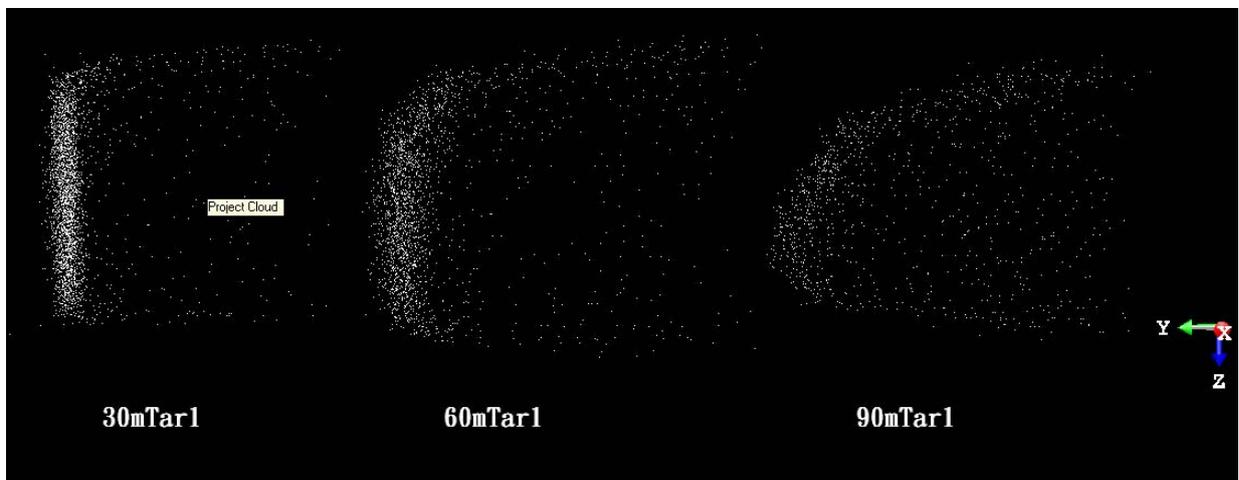


圖 4-5、原廠反射標編號 1 三段距離原始點雲變化

二、反射標原始與經六種雜訊濾除後外部精度差異：

本章節主要探討自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位定位坐標與經六種雜訊濾除後點雲中心點位定位坐標外部精度差異。將全測儀觀測所得反射標中心點位坐標當成參考已知坐標，掃瞄儀觀測之反射標原始點雲與雜訊濾除後點雲中心點位坐標當成觀測坐標，進行六參數與七參數轉換，轉換後可得到坐標差值，利用坐標差值即可計算出 RMS-x、RMS-y、RMS-z、RMS-s 四個外部精度參考指標。表 4-10 和表 4-12 分別為經六參數轉換及七參數轉換後自製反射標與原廠反射標原始點雲及經六種雜訊濾除後之點雲中心點位坐標 RMS-x、RMS-y、RMS-z、RMS-s 值；表 4-11 和表 4-13 為六參數及七參數轉換後自製反射標與原廠反射標原始點雲與經六種雜訊濾除後之反射標中心坐標 RMS-s 值，此章所指反射標外部精度值差異均指 RMS-s 值差異，因 RMS-s 值是一外部精度綜合指標，故以 RMS-s 值當為評估外部精度主要指標。

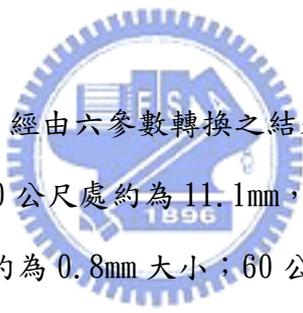


表 4-11 及表 4-13 得知，經由六參數轉換之結果，自製反射標部分在 30 公尺處外部精度大約為 0.9mm 大小；60 公尺處約為 11.1mm，90 公尺處約為 16.3mm。原廠反射標部份，30 公尺處外部精度大約為 0.8mm 大小；60 公尺處約為 11.6mm，90 公尺處約為 18.1mm。經由七參數轉換之結果，自製反射標部分在 30 公尺處外部精度大約為 0.9mm 大小；60 公尺處約為 9.6mm，90 公尺處約為 14.2mm。原廠反射標部份，30 公尺處外部精度大約為 0.7mm 大小；60 公尺處約為 9.5mm，90 公尺處約為 15.5mm。而本章節主要為探討雜訊濾除對反射標外部精度的影響，故將反射標原始點雲中心點位坐標 RMS-s 減去反射標經六種雜訊濾除後點雲中心點對坐標 RMS-s， $\Delta \text{RMS-s} = \text{原始點雲 RMS-s} - \text{六種雜訊濾除方法點雲 RMS-s}$ ，如表 4-14、表 4-15 所示；若 $\Delta \text{RMS-s}$ 呈現正值表示反射標點雲經雜訊濾除後之反射標中心點位坐標外部精度提升，負值則外部精度降低，圖 4-6、圖 4-7 為六參數及七參數轉換 $\Delta \text{RMS-s}$ 折線圖。

從 Δ RMS-s 表可看出，本研究所使用之六種雜訊濾除方法對外部精度的影響並無特定之規則性可循，無論在自製反射標與原廠反射標，經六種雜訊濾除後之反射標外部精度有提升也有降低。六種雜訊濾除對外部精度的影響，六參數轉換部分，最大為 60 公尺處自製反射標使用中值平滑化可提升 0.0718mm 的外部精度，最小為 60 公尺處自製反射標使用最適平面降低了 0.0383mm 的外部精度；七參數轉換部份，最大為 90 公尺處原廠反射標使用距離濾除法提昇 0.1115mm，最小為 60 公尺處自製反射標使用最適平面降低 0.0823mm 的外部精度，以上數據可以得知六參數轉換最大及最小相差 0.1101mm，七參數轉換最大及最小相差 0.1937mm，故不管是六參數轉換或者七參數轉換，六種點雲雜訊濾除方法對原始點雲中心點位坐標外部精度影響非常小。

由實驗數據統計分析可知六種雜訊濾除方法對反射標外部精度的影響並無特定之規則性可循，僅能做綜合性的評估，從表 4-14、表 4-15、圖 4-6、圖 4-7 四個圖表進行比較，評判出最適平面法為提升反射標外部精度最佳方法，主要原因為，無論使用六參數及七參數轉換，除了自製反射標在 60 公尺處使用最適平面法對反射標原始點雲進行雜訊濾除後外部精度 RMS-S 降低外，自製反射標與原廠反射標使用最適平面法反射標外部精度 RMS-S 在其它距離下均有提升現象發生，且提升的幅度在其它濾除方法中並非為最低，故評估最適平面法為提升反射標外部精度最佳方法。

表4-10、六參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲外部精度

單位：mm

30mObj	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s	30mTar	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s
原始	0.6134	0.5970	0.2351	0.8877	原始	0.5665	0.4234	0.3694	0.7979
平均	0.6356	0.5550	0.2399	0.8773	平均	0.5855	0.3998	0.3671	0.7984
距離	0.6373	0.5626	0.3078	0.9041	距離	0.5557	0.3855	0.3954	0.7834
高斯	0.6355	0.5549	0.2416	0.8776	高斯	0.5860	0.3978	0.3671	0.7977
中值	0.6457	0.5433	0.2666	0.8850	中值	0.5876	0.4040	0.3671	0.8020
平面	0.5683	0.5616	0.2721	0.8441	平面	0.5749	0.3803	0.2657	0.7388
角度	0.6440	0.5611	0.2380	0.8866	角度	0.5277	0.4036	0.3789	0.7648
60mObj	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s	60mTar	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s
原始	10.1891	0.7429	4.4019	11.1242	原始	10.4975	0.3336	4.8308	11.5605
平均	10.1999	0.7420	4.4361	11.1475	平均	10.5075	0.3262	4.8159	11.5632
距離	10.1878	0.7574	4.3964	11.1217	距離	10.4751	0.2900	4.8087	11.5297
高斯	10.1967	0.7460	4.4342	11.1441	高斯	10.5082	0.3260	4.8158	11.5638
中值	10.1203	0.7486	4.3789	11.0524	中值	10.5080	0.3273	4.8159	11.5637
平面	10.2259	0.7499	4.4125	11.1625	平面	10.5068	0.3172	4.7659	11.5415
角度	10.1982	0.7470	4.3976	11.1310	角度	10.4684	0.3115	4.8147	11.5268
90mObj	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s	90mTar	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s
原始	15.3989	0.3816	5.4079	16.3254	原始	17.0993	0.3736	6.0071	18.1277
平均	15.3901	0.4048	5.4268	16.3239	平均	17.1032	0.3945	6.0067	18.1316
距離	15.3694	0.4187	5.4167	16.3013	距離	17.1016	0.3998	5.8886	18.0914
高斯	15.3904	0.4027	5.4338	16.3264	高斯	17.1026	0.3836	6.0069	18.1309
中值	15.3292	0.4134	5.4976	16.2904	中值	17.1031	0.3935	6.0058	18.1312
平面	15.3092	0.4005	5.5020	16.2728	平面	16.9081	0.4582	6.4500	18.1024
角度	15.3720	0.4273	5.3708	16.2888	角度	17.0869	0.3502	5.9476	18.0958

表4-11、六參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲RMS-s值

單位：mm

RMS-s	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
原始	0.8877	11.1242	16.3254	0.7979	11.5605	18.1277
平均	0.8773	11.1475	16.3239	0.7984	11.5632	18.1316
距離	0.9041	11.1217	16.3013	0.7834	11.5297	18.0914
高斯	0.8776	11.1441	16.3264	0.7977	11.5638	18.1309
中值	0.8850	11.0524	16.2904	0.8020	11.5637	18.1312
平面	0.8441	11.1625	16.2728	0.7388	11.5415	18.1024
角度	0.8866	11.1310	16.2888	0.7648	11.5268	18.0958

表4-12、七參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲外部精度

單位：mm

30mObj	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s	30mTar	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s
原始	0.5967	0.5529	0.2930	0.8646	原始	0.4920	0.4214	0.3579	0.7400
平均	0.6059	0.5543	0.2658	0.8631	平均	0.5037	0.3968	0.3522	0.7316
距離	0.6355	0.4880	0.3696	0.8824	距離	0.4900	0.3838	0.3936	0.7365
高斯	0.6066	0.5541	0.2664	0.8637	高斯	0.5065	0.3956	0.3481	0.7309
中值	0.5975	0.5422	0.3095	0.8641	中值	0.5072	0.4024	0.3499	0.7359
平面	0.5457	0.5607	0.2991	0.8377	平面	0.5114	0.3782	0.2962	0.7016
角度	0.6114	0.5601	0.2677	0.8713	角度	0.4652	0.4019	0.3799	0.7227
60mObj	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s	60mTar	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s
原始	7.4051	0.7303	6.0412	9.5846	原始	7.3148	0.3938	6.0673	9.5118
平均	7.5691	0.7343	5.9200	9.6373	平均	7.3526	0.2949	6.0298	9.5135
距離	7.4156	0.7447	6.0681	9.6108	距離	7.3178	0.2516	5.9975	9.4648
高斯	7.5106	0.7362	5.9827	9.6304	高斯	7.3349	0.2919	6.0512	9.5133
中值	7.3431	0.7351	6.0196	9.5235	中值	7.3165	0.2911	6.0693	9.5106
平面	7.5819	0.7422	5.9508	9.6669	平面	7.3121	0.2748	6.0766	9.5114
角度	7.4604	0.7352	6.0380	9.6257	角度	7.3500	0.2781	6.0393	9.5170
90mObj	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s	90mTar	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-s
原始	10.5224	0.5373	9.5440	14.2161	原始	11.1789	0.3714	10.7707	15.5278
平均	10.2667	0.4183	9.8222	14.2147	平均	11.3397	0.3891	10.5909	15.5211
距離	10.2950	0.4309	9.7220	14.1665	距離	11.2968	0.3945	10.4829	15.4164
高斯	10.2439	0.4164	9.8505	14.2177	高斯	11.2277	0.3798	10.7079	15.5198
中值	10.4040	0.4247	9.6942	14.2268	中值	11.3517	0.3878	10.5769	15.5204
平面	10.4441	0.4105	9.6350	14.2155	平面	11.1158	0.4197	10.7657	15.4802
角度	10.5597	0.4359	9.4046	14.1472	角度	11.2344	0.3462	10.6255	15.4671

表4-13、七參數轉換反射標原始點雲及六種雜訊濾除後點雲RMS-s值

單位：mm

RMS-s	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
原始	0.8646	9.5846	14.2161	0.7400	9.5118	15.5278
平均	0.8631	9.6373	14.2147	0.7316	9.5135	15.5211
距離	0.8824	9.6108	14.1665	0.7365	9.4648	15.4164
高斯	0.8637	9.6304	14.2177	0.7309	9.5133	15.5198
中值	0.8641	9.5235	14.2268	0.7359	9.5106	15.5204
平面	0.8377	9.6669	14.2155	0.7016	9.5114	15.4802
角度	0.8713	9.6257	14.1472	0.7227	9.5170	15.4671

表4-14、六參數轉換原始點雲與六種雜訊濾除後點雲RMS-s值較差表

($\Delta\text{RMS-s}$ =原始點雲 RMS-s-六種雜訊濾除方法點雲 RMS-s)

單位：mm

$\Delta\text{RMS-s}$	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
平均	0.0104	-0.0233	0.0015	-0.0005	-0.0027	-0.0039
距離	-0.0164	0.0025	0.0240	0.0145	0.0308	0.0363
高斯	0.0101	-0.0200	-0.0011	0.0002	-0.0033	-0.0032
中值	0.0027	0.0718	0.0350	-0.0041	-0.0032	-0.0036
平面	0.0436	-0.0383	0.0526	0.0592	0.0190	0.0253
角度	0.0010	-0.0069	0.0365	0.0331	0.0337	0.0319

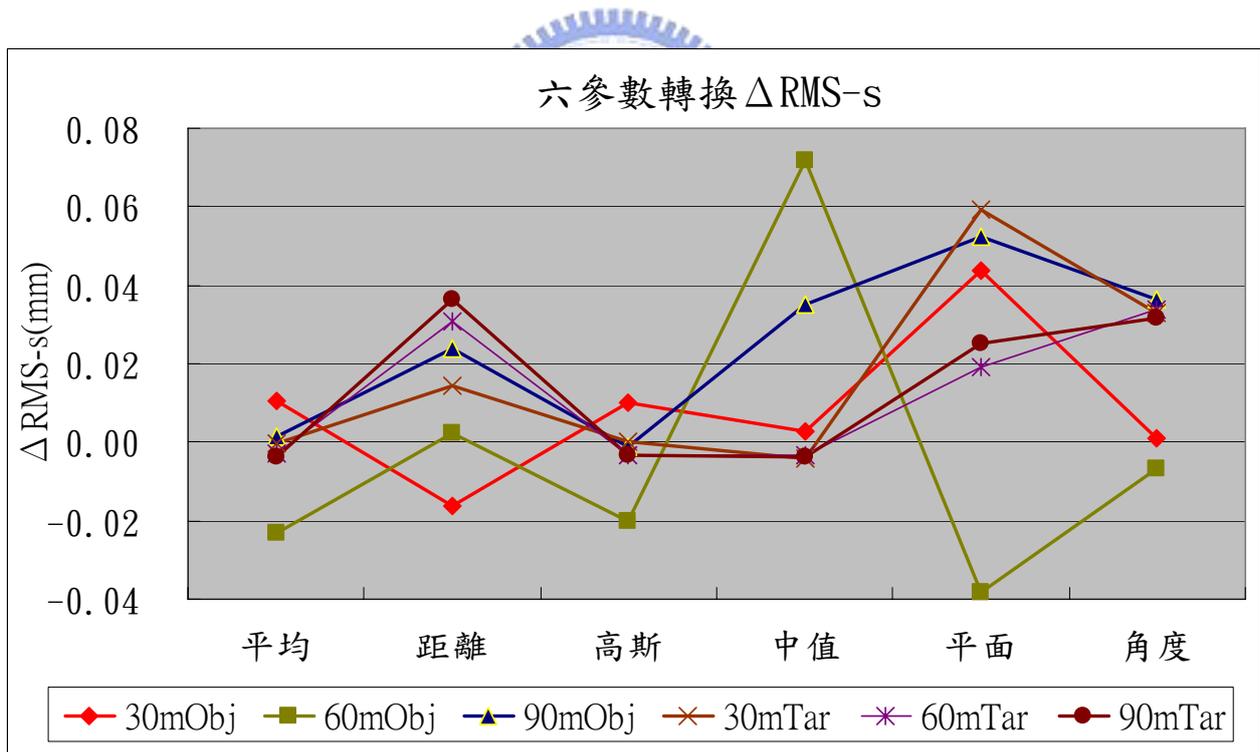


圖 4-6、六參數轉換 $\Delta\text{RMS-s}$ 折線圖

表4-15、七參數轉換原始點雲與六種雜訊濾除後點雲RMS-s值較差表

($\Delta\text{RMS-s}$ =原始點雲 RMS-s－六種雜訊濾除方法點雲 RMS-s)

單位：mm

$\Delta\text{RMS-s}$	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
平均	0.0014	-0.0527	0.0014	0.0085	-0.0017	0.0067
距離	-0.0178	-0.0262	0.0495	0.0036	0.0469	0.1115
高斯	0.0009	-0.0458	-0.0016	0.0092	-0.0015	0.0080
中值	0.0005	0.0611	-0.0107	0.0041	0.0012	0.0075
平面	0.0269	-0.0823	0.0006	0.0384	0.0004	0.0476
角度	-0.0067	-0.0411	0.0688	0.0174	-0.0052	0.0607

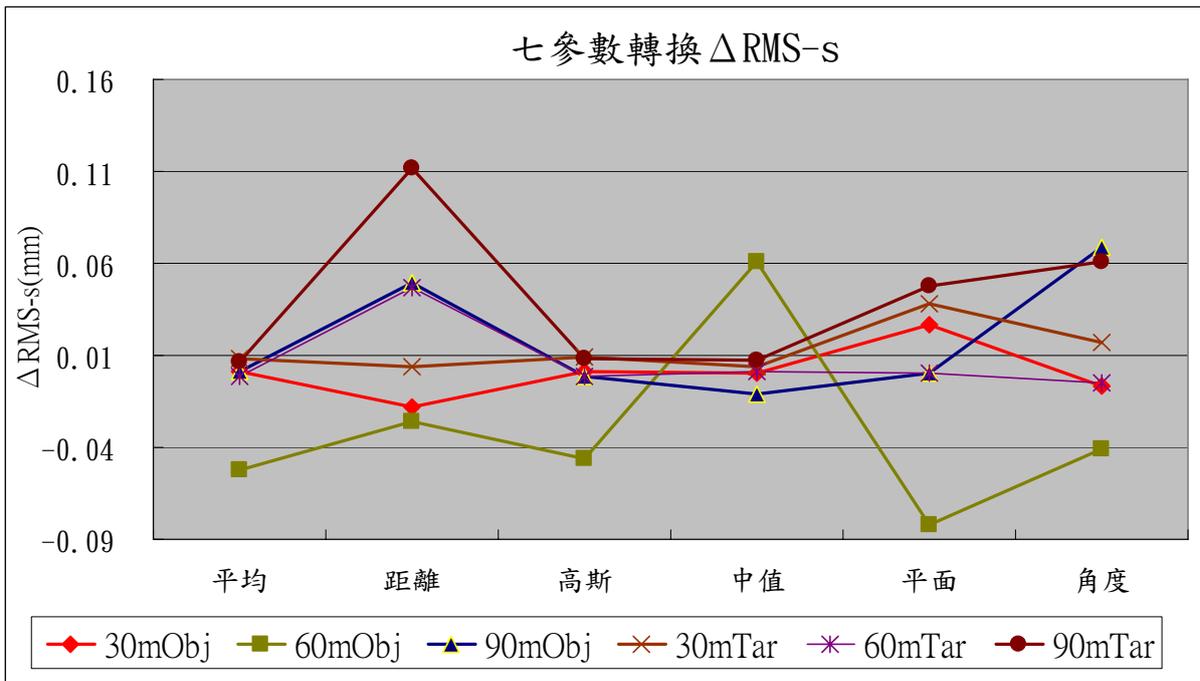


圖 4-7、七參數轉換 $\Delta\text{RMS-s}$ 折線圖

三、反射標六參數轉換與七參數轉換外部精度差異：

三維雷射掃瞄儀儀器內部可能含有系統誤差，針對三維雷射掃瞄儀來說，在參考與收集國內外文獻後，三維雷射掃瞄儀系統誤差以尺度上的誤差為主，故本研究亦使用七參數轉換法來處理掃瞄的點雲資料，利用改正其尺度上的誤差來消除掃瞄資料的系統誤差，並與六參數轉換法比較，分析七參數轉換法是否能有效提升反射標外部精度。表 4-16 為六參數轉換與七參數轉換反射標外部精度較差表， $\Delta \text{RMS-s}$ = 六參數轉換反射標外部精度 RMS-s 值 - 七參數轉換反射標外部精度 RMS-s 值，當 $\Delta \text{RMS-s}$ 值為正時表示使用七參數轉換時，反射標外部精度較六參數轉換時高，圖 4-8、圖 4-9 為自製反射標與原廠反射標六參數轉換與七參數轉換反射標外部精度較差折線圖。

經由實驗數據分析後，發現七參數轉換的確能有效提升自製反射標與原廠反射標中心點位坐標外部精度 RMS-s 值，也就是說，反射標中心點位坐標外部精度經過系統誤差改正後有所提升，藉由尺度因子參數加入改正，使尺度因子吸收掉三維雷射儀系統誤差，可使反射標中心點位坐標外部精度提高。以三維雷射掃瞄儀來說，當掃描距離越遠時，外部精度 RMS-s 值越大，因此使用七參數轉換後進行坐標轉換，反射標外部精度提升的幅度也隨著距離越遠而變大。自製反射標部分，使用七參數轉換比六參數轉換原始點雲及六種雜訊濾除後所提升的反射標平均外部精度，在 30 公尺處，原始及六種點雲雜訊濾除方法平均提升了 0.0165mm 的精度，60 公尺處平均提升了 1.5396mm 的精度，90 公尺處平均提升了 2.1035mm 的精度；原廠反射標部份，30 公尺處平均提升了 0.0548mm 的精度，60 公尺處平均提升了 2.0438mm 的精度，90 公尺處平均提升了 2.6226mm 的精度。

表4-16、自製反射標與原廠反射標六參數與七參數轉換外部精度較差表

($\Delta\text{RMS-s}$ =六參數轉換反射標外部精度RMS-s值－七參數轉換反射標外部精度RMS-s值)

單位：mm

$\Delta\text{RMS-s}$	30mObj	60mObj	90mObj	30mTar	60mTar	90mTar
原始	0.0231	1.5396	2.1093	0.0579	2.0487	2.5998
平均	0.0141	1.5102	2.1093	0.0668	2.0497	2.6105
距離	0.0218	1.5109	2.1348	0.0469	2.0649	2.6750
高斯	0.0139	1.5137	2.1088	0.0668	2.0505	2.6110
中值	0.0209	1.5289	2.0636	0.0661	2.0531	2.6108
平面	0.0064	1.4956	2.0573	0.0372	2.0301	2.6221
角度	0.0153	1.5053	2.1416	0.0422	2.0098	2.6287
Average	0.0165	1.5149	2.1035	0.0548	2.0438	2.6226

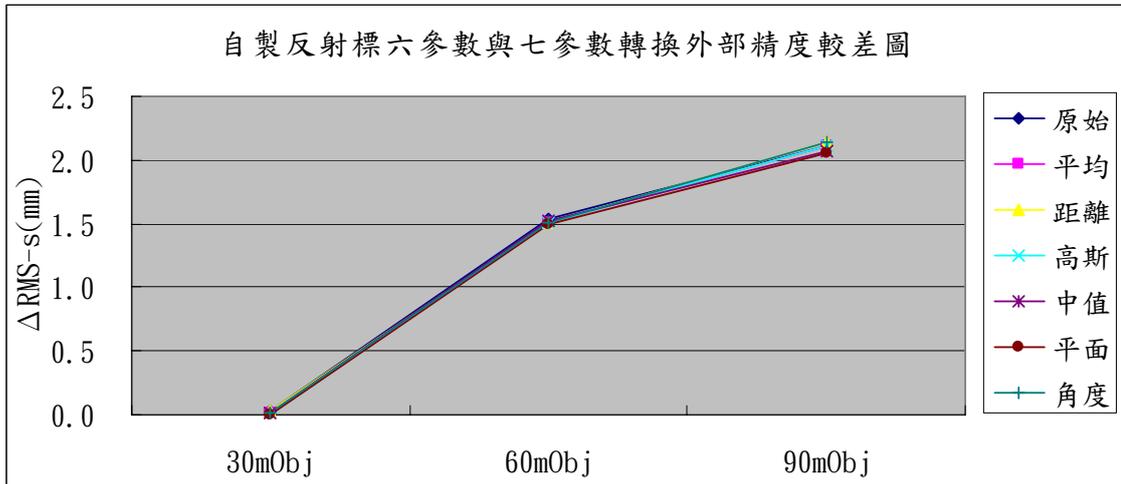


圖 4-8、自製反射標六參數與七參數轉換外部精度較差圖

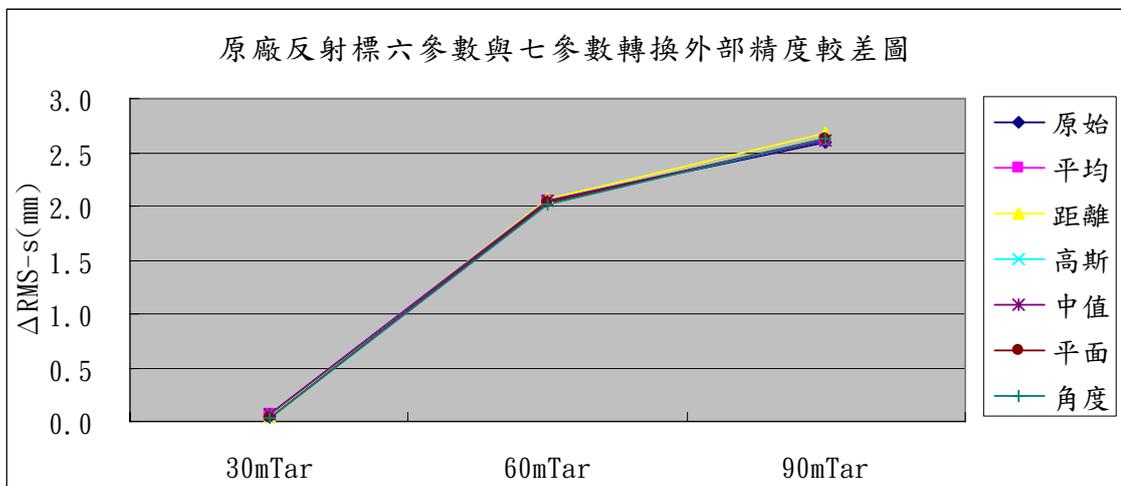


圖 4-9、原廠反射標六參數與七參數轉換外部精度較差圖

四、自製反射標與原廠反射標外部精度比較：

提升反射標定位精度，反射標的選擇也是一重要的因素，上一章節已比較自製反射標與原廠反射標內部精度差異，證實反射標的不同確實會影響內部精度，且自製反射標內部精度高於原廠反射標，故本章節將比較自製反射標與原廠反射標外部精度差異，比較自製反射標外部精度是否高於原廠反射標外部精度。表 4-17 為六參數與七參數轉換後自製反射標及原廠反射標原始點雲與六種雜訊濾除後點雲中心點位坐標外部精度比較表，前面章節已比較過六種點雲雜訊濾除方法對反射標外部精度影響 RMS-s 值相當小且並不明顯，故圖 4-10、圖 4-11 僅將六參數與七參數轉換後自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位坐標外部精度進行比較；表 4-18 為六參數與七參數轉換後自製反射標及原廠反射標原始點雲與六種雜訊濾除後點雲中心點位坐標外部精度較差表， Δ RMS-s=原廠反射標外部精度 RMS-s 值 - 自製反射標外部精度 RMS-s 值，故若 Δ RMS-s 值為正時表示自製反射標外部精度高於原廠反射標。



從實驗數據統計分析圖表中可得到，使用六參數轉換時，30 公尺處，原始點雲及經六種雜訊濾除方法後原廠反射標平均外部精度較自製反射標高 0.097mm 的平均外部精度，60 公尺處自製反射標精度比原廠反射標平均高 0.4237mm 的外部精度，90 公尺處自製反射標精度比原廠反射標平均高 1.8117mm 的外部精度；七參數轉換時，30 公尺處，原始點雲及經六種雜訊濾除方法後原廠反射標平均外部精度較自製反射標高 0.1468mm 的平均外部精度，60 公尺處原廠反射標精度比自製反射標平均高 0.1555mm 的外部精度，90 公尺處自製反射標精度比原廠反射標平均高 1.2449mm 的外部精度。使用六參數轉換時，30 公尺處原廠反射標外部精度優於自製反射標，60 公尺及 90 公尺自製反射標優於原廠反射標；七參數轉換時，30 公尺及 60 公尺原廠反射標外部精度優於自製反射標，90 公尺處自製反射標優於原廠反射標。綜合以上分析，當掃描距離大於 90 公尺時，使用自製反射標之外部精度成果並不劣於原廠反射標，主要因為自製反射標點雲於 90 公尺時仍能維持平面，但原廠反射標點雲會隨距離越長而呈現碗狀而非平面。

表4-17、自製反射標及原廠反射標中心點位坐標外部精度比較表

單位：mm

	六參數轉換				七參數轉換			
	反射標	30m	60m	90m	反射標	30m	60m	90m
原始	Object	0.8877	11.1242	16.3254	Object	0.8646	9.5846	14.2161
	Target	0.7979	11.5605	18.1277	Target	0.7400	9.5118	15.5278
平均	Object	0.8773	11.1475	16.3239	Object	0.8631	9.6373	14.2147
	Target	0.7984	11.5632	18.1316	Target	0.7316	9.5135	15.5211
距離	Object	0.9041	11.1217	16.3013	Object	0.8824	9.6108	14.1665
	Target	0.7834	11.5297	18.0914	Target	0.7365	9.4648	15.4164
高斯	Object	0.8776	11.1441	16.3264	Object	0.8637	9.6304	14.2177
	Target	0.7977	11.5638	18.1309	Target	0.7309	9.5133	15.5198
中值	Object	0.8850	11.0524	16.2904	Object	0.8641	9.5235	14.2268
	Target	0.8020	11.5637	18.1312	Target	0.7359	9.5106	15.5204
平面	Object	0.8441	11.1625	16.2728	Object	0.8377	9.6669	14.2155
	Target	0.7388	11.5415	18.1024	Target	0.7016	9.5114	15.4802
角度	Object	0.8866	11.1310	16.2888	Object	0.8713	9.6257	14.1472
	Target	0.7648	11.5268	18.0958	Target	0.7227	9.5170	15.4671

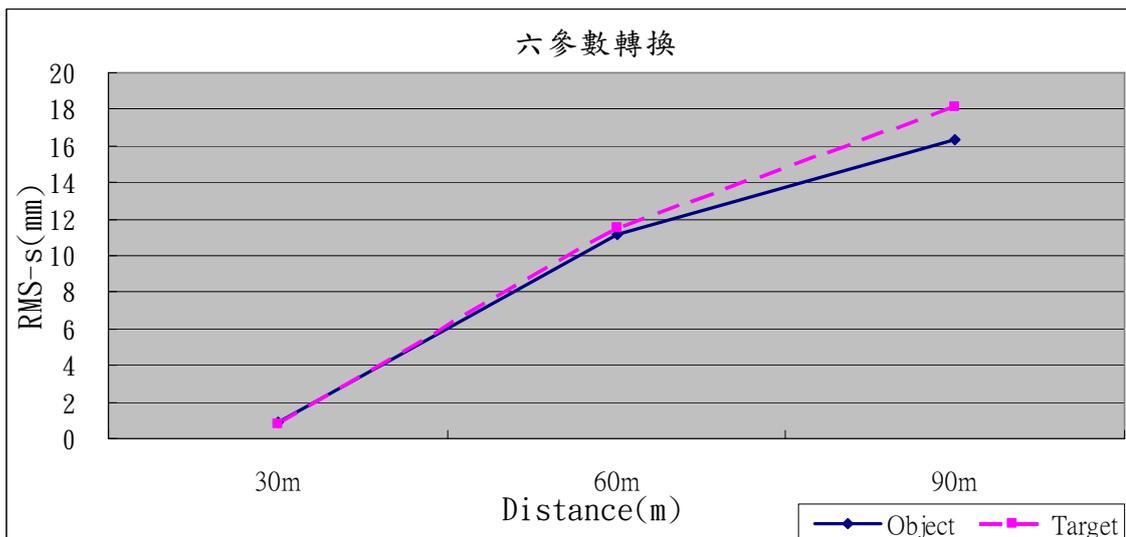


圖 4-10、六參數轉換自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位坐標外部精度

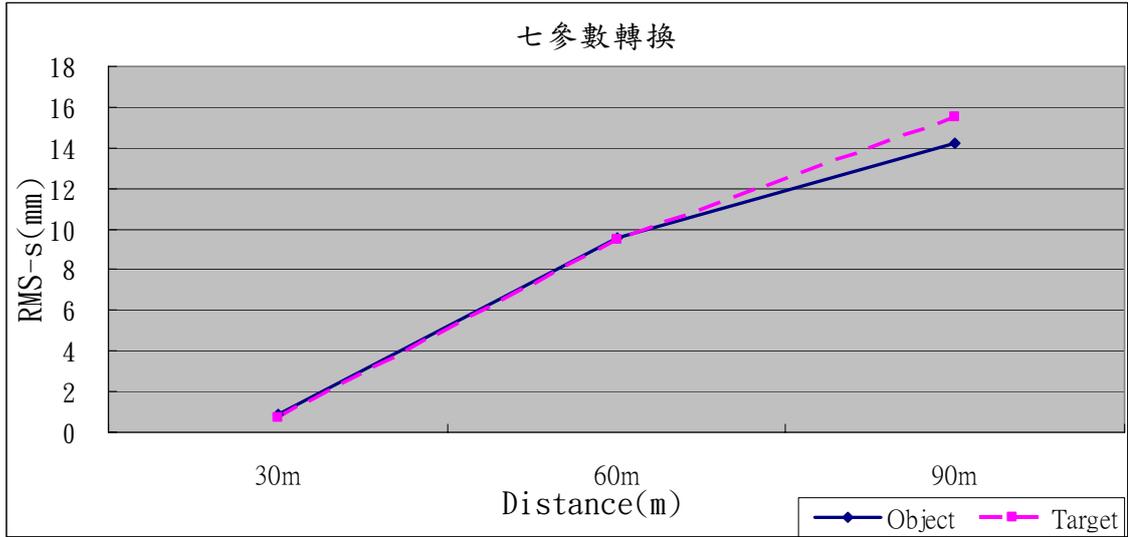


圖 4-11、七參數轉換自製反射標與原廠反射標原始點雲中心點位坐標外部精度

表4-18、自製反射標及原廠反射標中心點位坐標外部精度較差表

(Δ RMS-s=原廠反射標外部精度RMS-s值-自製反射標外部精度RMS-s值)

單位：mm

Δ RMS-s	六參數轉換			七參數轉換		
	30m	60m	90m	30m	60m	90m
原始	-0.0897	0.4363	1.8023	-0.1245	-0.0728	1.3118
平均	-0.0789	0.4156	1.8077	-0.1315	-0.1238	1.3065
距離	-0.1207	0.4080	1.7901	-0.1459	-0.1459	1.2499
高斯	-0.0799	0.4197	1.8044	-0.1328	-0.1171	1.3021
中值	-0.0830	0.5113	1.8408	-0.1282	-0.0129	1.2936
平面	-0.1053	0.3790	1.8296	-0.1360	-0.1555	1.2647
角度	-0.1218	0.3957	1.8070	-0.1486	-0.1087	1.3199
Average	-0.0970	0.4237	1.8117	-0.1354	-0.1053	1.2926

第五章 結論與建議

本研究目的為提升反射標定位精度，主要考量因素有二：一為經三維雷射掃瞄儀掃瞄出來的點雲資料會因為量測的環境而產生雜訊，反射標中心坐標也易受原始點雲中雜訊而影響其定位精度，故使用六種雜訊濾除方法，距離濾除法、最小角度濾除法、最適平面法、高斯平滑、中值平滑、平均平滑濾除反射標原始點雲中的量測雜訊點，以求得更好的反射標定位精度；二為反射標選擇上也會影響到反射標定位精度，不同的反射標會有不同的定位精度，除使用原廠所率定之反射標外，亦選擇自製反射標進行實驗，並比較自製反射標與原廠反射標定位精度差異。定位精度可分內部精度與外部精度，本研究針對反射標內部精度與外部精度進行分析，探討使用六種點雲雜訊濾除方法是否能提升反射標定位精度及使用自製反射標與原廠反射標定位精度的差異，此章將對研究成果進行結論並提供建議供後續參考。



反射標內部精度部分，經由實驗及內業處理後，發現經由六種點雲雜訊濾除方法處理原始點雲過後的反射標內部精度，不管是自製反射標與原廠反射標，均比反射標原始點雲內部精度高，自製反射標部分，30 公尺最佳方法為最適平面法，60、90 公尺最佳方法為中值平滑法；原廠反射標部份，三段距離均以最適平面法為最佳。實驗結果證明濾除點雲雜訊確實能有效提升反射標內部精度，且改善幅度隨距離變長而提升越多。反射標的選擇上也是影響反射標定位精度條件之一，以內部精度而言，本研究所使用之兩種反射標，自製反射標與原廠反射標，自製反射標除了在 90 公尺處使用最適平面法內部精度劣於原廠反射標外，在其它距離及其它雜訊濾除方法皆優於原廠反射標。

反射標外部精度部分，以全測儀所量測反射標中心點位之參考已知坐標與掃瞄儀掃瞄所得之反射標中心點位坐標進行六參數及七參數轉換，進行七參數轉換的原因為多一度因子吸收掉三維雷射掃瞄儀的系統誤差。從實驗結果看出，使用六種點雲雜訊濾除方法對反射標外部精度的影響並無明顯之規律性可循，評判以最適平面法為提升反射標

外部精度最佳方法，主要原因為無論六參數及七參數轉換，除了自製反射標在 60 公尺處使用最適平面法反射標外部精度降低外，自製反射標與原廠反射標使用最適平面法反射標在其它距離下外部精度均有提升現象發生，且提升的幅度在其它濾除方法中並非為最低。此外，七參數轉換的確能有效提升自製反射標與原廠反射標中心點位坐標外部精度，也就是說，經由七參數轉換吸收掉掃描儀系統誤差後，反射標中心點位坐標外部精度能有所提升。最後，比較自製反射標與原廠反射標外部精度差異發現，30 公尺與 60 公尺處原廠反射標外部精度高於自製反射標，90 公尺處自製反射標外部精度高於原廠反射標。

經由實驗結果得知，本研究所使用之自製反射標定位精度在內部精度部分優於原廠反射標，而外部精度方面，在 30 公尺及 60 公尺原廠反射標優於自製反射標約 0.1mm，90 公尺處自製反射標外部精度優於原廠反射標外部精度約 1.3mm，可見自製反射標定位精度成果並不劣於原廠反射標。原廠反射標優點為於外業時經由軟體即可立即求得定位坐標，缺點為成本高、取得不易；自製反射標優點為成本低、製作方便，但缺點為無法於外業時立即得到定位坐標，需利用強度值差異剔除自製反射標上部分點雲。原廠反射標與自製反射標各有其優缺點，三維雷射掃描儀使用者可依自己需求選擇適用之反射標。如：90 公尺以下可選擇原廠反射標加點雲雜訊濾除來定位反射標中心點位坐標，90 公尺以上可選擇自製反射標加點雲雜訊濾除來定位反射標中心點位坐標，若有成本考量或精度要求度不高時，自製反射標將是一個不錯的選擇。

本研究使用六種雜訊濾除方法及兩種反射標進行實驗，雜訊濾除方法除了本研究所使用之距離濾除法、最小角度濾除法、最適平面法、高斯平滑、中值平滑、平均平滑外另有其它雜訊濾除方法；而本實驗所用之自製反射標材質部份為最常見之紙張，顏色取黑白為底色，材質及顏色部分另有多種可選擇，故建議後續進行相關之研究時可以使用其它點雲雜訊濾除方法進行原始點雲雜訊濾除，而自製反射標也可選擇其它材質及顏色進行反射標製作。

參考文獻

- [1] 陳文賢，「逆向工程軟體 Imageware 使用手冊」，全華，台北，2006。
- [2] 金濤、童永光，「逆向工程技術 Reverse Engineering」，新文京，台北，2005。
- [3] 李文漢，「3D Laser Scanning 與 3D CADD 整合之應用」，中鼎月刊 334:11-14，2007。
- [4] 曾義星、史天元，「三維雷射掃描儀—新一代測量利器」，科學發展 356:16-21，2003。
- [5] 曾義星、史天元，「三維雷射掃描技術及其在工程測量上的應用」，中國土木水利工程學刊，2002。
- [6] 李宗儒，「三維雷射掃描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」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2007。
- [7] 徐元俊，「三維雷射掃描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。
- [8] 粘基非，「反射標與距離檢定對三維雷射掃描儀精度影響評估—以 Mensi GS200 為例」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2005。
- [9] 賴志凱，「地面雷射掃描儀的分析與檢定」，國立成功大學測量工程研究所碩士論文，2004。
- [10] Trimble Engineering & Construction Group, "Trimble GS Series 3D Scanner Datasheet",2005.
- [11] 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.
- [12] 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.