

108年度建立地面三維雷射掃描儀 校正系統委託研究

成果報告

Report on establishing a calibration system of terrestrial 3D
laser scanner in 2019

內政部國土測繪中心委託研究

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

108年度建立地面三維雷射掃描儀 校正系統委託研究

成果報告

Report on establishing a calibration system of terrestrial 3D
laser scanner in 2019

受委託單位：工業技術研究院 量測技術發展中心

研究主持人：彭淼祥

受委託單位：國立成功大學 測量及空間資訊學系

協同主持人：曾義星

研究期程：中華民國108年3月至108年12月

研究經費：新臺幣146萬元

內政部國土測繪中心委託研究

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

摘要

內政部國土測繪中心(以下簡稱國土測繪中心)，為國內測繪業務主管機關，為提升測繪成果品質、落實測繪法令，辦理「108年度建立地面三維雷射掃描儀校正系統委託研究案」。本案成果包括：以文獻蒐集探討方式，完成評估測繪領域常見之地面三維雷射掃描儀，並分為短、中、長距離等三種類型進行說明。

1. 藉由文獻回顧，蒐集與分析國內外重要學術成果及地面三維雷射掃描儀校正相關資料，將本案規劃發展的校正內容分為兩個項目：
 - (1)距離校正-測距基線校正場執行。
 - (2)角度與坐標校正-以室內布置校正標的方式進行。
2. 完成評估室內校正場適宜性、黎明辦公區莊敬樓 1 樓做為室內校正場的實驗室設計及室內校正場所需校正儀具的裝置。
3. 利用國土測繪中心測量校正實驗室現有電子測距儀校正場，執行雷射掃描儀距離校正，以此測距基線校正場執行距離校正活動。
4. 進行校正計算程式撰寫，重要軟體功能包括(1)分析點雲數據能自動化量測校正標中心點坐標；(2)數據平差及求定儀器系統性參數；(3)測距基線校正場所需平差計算等。
5. 分析不同的校正案例，嘗試校正不同款式的地面三維雷射掃描儀器，實際進行校正流程測試，完成距離、坐標等校正成果器差之統計分析。

關鍵字：校正，地面三維雷射掃描儀，基線場，校正標，不確定度評估

Abstract

National Land Surveying and Mapping Center (NLSC), Ministry of the Interior, is the domestic competent authority for surveying and mapping operations. In order to improve the quality of surveying and mapping results, and implement the surveying and mapping decree, we have handled the “Commissioned research project of establishing a terrestrial three-dimension (3D) laser scanner calibration system in 2019”. The achievement of this study includes:

Based on the reference collection and discussion methods, the terrestrial 3D laser scanner commonly used in the field of surveying and mapping are evaluated, and divided into three types for specification: short, medium, and long distances.

1. By reviewing the related references, collecting and analyzing important domestic and foreign academic achievements and related information on the calibration of the terrestrial 3D laser scanner. The calibration content for planning development of this study is divided into two items:
 - (1) Distance calibration – performed by a ranging baseline calibration field.
 - (2) Angle and coordinate calibration – performed by arranging calibration targets indoors.
2. The assessment of the suitability of the indoor calibration field, the laboratory design on the 1st floor of Zhuang Jing Building in Liming Office District as an indoor calibration field, and the calibration instrument set up that required for the indoor calibration field have

been completed.

3. Use the existing electronic distance measuring device calibration field of the Survey and Calibration Laboratory of NLSC to perform the distance calibration of the laser scanner, and perform the distance calibration activities based on the ranging-baseline calibration field.
4. Write calibration calculation programs. Important software functions include (1) analysis of point cloud data to automatically measure the coordinates of the calibration target center; (2) data adjustment and determination of system parameters of the instrument, and (3) calculation of adjustment needed for baseline ranging calibration field, etc.
5. Analyze different calibration cases, try to calibrate different types of terrestrial 3D laser scanners, actually perform the calibration process test, and complete the statistical analysis of distance, coordinate and other calibration results.

KEYWORDS

calibration; terrestrial three-dimension (3D) laser scanner; baseline field; calibration target; uncertainty evaluation (assessment)

目 錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
圖 目 錄.....	vii
表 目 錄.....	x
第一章 前言.....	1
1-1 緣起.....	1
1-2 目的.....	1
1-3 工作項目及內容.....	1
第二章 地面三維雷射掃描儀系統介紹.....	5
2-1 短距離雷射掃描儀.....	6
2-2 中距離雷射掃描儀.....	8
2-3 長距離.....	10
2-4 適用性說明.....	12
第三章 國內外相關資料蒐集.....	13
3-1 國外相關資料.....	13
3-1-1 球形標基樁法 (Gottwald, 2008; ISO 17123-9, 2018).....	13
3-2 國內相關資料.....	20
3-2-1 地面雷射掃描儀的精度分析與檢定 (賴志凱, 2004).....	20
3-3 理論與方法研究之分析.....	23
第四章 研提合適之校正理論及方法.....	27
4-1 距離查核.....	27
4-2 角度與坐標查核.....	28
第五章 校正場址評估及規劃.....	32
5-1 校正模式研提.....	32
5-2 測距基線校正場.....	32
5-3 室內校正場.....	33

5-4 校正場作業規劃	35
5-4-1 測距基線校正場作業規劃	35
5-4-2 室內校正場作業規劃	35
第六章 校正標製作及布設	36
6-1 校正標設計及製作	36
6-1-1 校正標材質	36
6-1-2 平面校正標與球型校正標	36
6-1-3 立體校正標	37
6-1-4 室內校正標之設計與製作	38
6-1-5 測距基線校正場校正標之設計與製作	40
6-2 校正標布設	41
第七章 校正計算程式撰寫及測試	45
7-1 點雲萃取轉檔	46
7-2 點雲萃取轉檔管理	51
7-3 平差計算	52
7-4 平差計算管理	53
第八章 校正流程先期評估	57
8-1 掃描儀測距校正步驟	59
8-1-3 測距校正數據分析	64
8-2 掃描儀角度與坐標校正步驟	67
8-2-1 自訂坐標系與坐標起算值	68
8-2-2 坐標校正項目之參考值量測	68
8-2-3 坐標校正項目，量測值作業步驟	69
8-2-4 角度與坐標校正數據分析	72
8-3 校正案例精度評估	75
8-3-1 坐標校正項目之參考值分析	75

8-3-2 測距校正項目之校正件量測值分析案例.....	75
8-3-3 坐標校正項目之校正件量測值分析案例.....	77
8-3-4 校正件量測值，人工作業量測值分析案例.....	78
8-3-5 人工量測校正標中心點與自動化分析之比較.....	79
第九章 TAF 校正認證先期評估.....	81
9-1 實驗室認證整體流程.....	81
9-2 不確定度源先期評估.....	81
9-3 能力試驗活動先期規劃.....	84
第十章 結論與建議.....	86
10-1 結論.....	86
10-2 建議.....	87
參考文獻.....	88
附件一 期中報告書委員審查意見及處理.....	92
附件二 期末報告書委員審查意見及處理.....	93
附件三 歷次工作會議結論與追蹤事項辦理情形.....	94
附件四 國內外相關資料分析.....	95
附件五 校正場建置方案及校正標規格圖表.....	96
附件六 相關函文及簽到簿.....	97

圖 目 錄

圖 2-1 Trimble TX6 雷射掃描儀 [Trimble 網頁].....	6
圖 2-2 RIEGL VZ-400i 三維雷射掃描儀 [RIEGL 網頁]	8
圖 2-3 Teledyne Optech 之 Polaris 雷射掃描儀 [Teledyne Optech 網頁]	11
圖 3-1 單一距離簡易查核示意圖 [Gottwald, 2008].....	14
圖 3-2 掃描角誤差示意圖與使用參數 [Schenk, 2001]	22
圖 4-1 雷射掃描儀置於測距基線校正場掃描之示意圖	27
圖 5-1 測距基線校正場示意圖	33
圖 5-2 測距基線校正場現況照片	33
圖 5-3 莊敬樓場址	34
圖 6-1 反射標材質(貼紙).....	36
圖 6-2 平面反射標與球型標	37
圖 6-3 立體之平面標設計	38
圖 6-4 校正標設計樣式	39
圖 6-5 室內校正場校正標設計圖	39
圖 6-6 室內校正場校正標設計成果樣式	40
圖 6-7 測距基線校正場，雷射掃描校正標完成圖表 6-2 室外校正標規格	40
圖 6-8 室內校正場校正標與雷射掃描儀基樁固定位置圖	42
圖 6-9 室內場校正標與儀器基樁布設圖(上圖朝南拍照，下圖朝北拍照).....	43
圖 6-10 測距基線校正場校正標布設圖	44
圖 7-1 檔案處理流程	45
圖 7-2 程式初步處理的點雲展示	46
圖 7-3 程式處理後校正標搜尋結果	47
圖 7-4 校正標點位彩色上色	48

圖 7-5 校正標點位灰階上色	48
圖 7-6 校正標點位直方圖(Ge et al., 2015)	48
圖 7-7 MV 點位展示	49
圖 7-8 MV 霍夫轉換成果	49
圖 7-9 校正標辨識三維成果	49
圖 7-10 點雲轉檔及校正標萃取	50
圖 7-11 初始校正標偵測成果	50
圖 7-12 最終校正標偵測成果	51
圖 7-13 點雲萃取轉檔管理頁面	51
圖 7-14 點雲及校正標查看畫面	52
圖 7-15 資本資訊填寫頁面	52
圖 7-16 掃描專案選取頁面	53
圖 7-17 聯合平差計算頁面	53
圖 7-18 平差成果資料夾	53
圖 7-19 實驗場平差成果 Adjustment_Report	54
圖 7-20 實驗場平差成果 ControlPoint	54
圖 7-21 距離場平差成果 Adjustment_Report	55
圖 7-22 距離場平差成果 ControlDistance	56
圖 8-1 Z+F IMAGER® 5016 儀器外觀	58
圖 8-2 RIEGL VZ-400 儀器外觀	59
圖 8-3 FARO FOCUS X 330 儀器外觀	59
圖 8-4 基線場 9 座基樁，測距組合 14 測線示意圖	60
圖 8-5 基線場 9 座基樁，校正件測距組合 11 測線示意與現況圖	61
圖 8-6 Leica 的全站儀室內參考值量測現況	67
圖 8-7 室內校正場之參考值量測方式示意圖	67

圖 8-8 RIEGL VZ-400 掃描作業案例	70
圖 8-9 Z+F IMAGER 5016 掃描作業案例	70
圖 8-10 校正標點雲之點間距，測距 2.5m 處，間距約 2 mm	71
圖 8-11 校正標點雲之點間距，測距 5m 處，間距約 5 mm	72
圖 9-2 量測稽核追溯原理圖	85

表 目 錄

表 2-1 短距離雷射掃描儀案例規格	7
表 2-2 中距離雷射掃描儀案例儀器規格(I)	9
表 2-3 中距離雷射掃描儀案例儀器規格(II)	10
表 2-4 長距離雷射掃描儀案例規格	11
表 3-1 單一距離量測結果 [Gottwald, 2008]	14
表 3-2 國內外三維雷射掃描儀校正相關論文的比較	24
表 6-1 比較不同標在不同範圍下的測距精度	37
表 8-1 本案使用之地面雷射掃描儀案例儀器規格	58
表 8-2 測距校正件(RIEGL)量測成果	62
表 8-3 校正件經測距基線場校正後的器差與剩餘誤差	66
表 8-4 以 RIEGL 量到的部分校正標為例，列舉各軸向的器差	74
表 8-5 參考值重複觀測精度評估	75
表 8-6 單次掃描，測距校正之器差與剩餘誤差統計結果	76
表 8-7 掃描 3 次取平均值，測距校正之器差與剩餘誤差統計結果	76
表 8-8 RIEGL 之各軸向器差的統計量	77
表 8-9 FARO 之各軸向器差的統計量	77
表 8-10 Z+F 之各軸向器差的統計量	78
表 8-11 RIEGL 之器差值的統計量(人工量測法)	79
表 8-12 FARO 之器差值的統計量(人工量測法)	79
表 8-13 Z+F 之器差值的統計量(人工量測法)	79
表 8-14 RIEGL 之人工量測與自動化分析之差量統計表	80
表 8-15 FARO 之人工量測與自動化分析之差量統計表	80
表 8-16 Z+F 之人工量測與自動化分析之差量統計表	80

第一章 前言

1-1 緣起

內政部國土測繪中心（以下簡稱國土測繪中心）基於確保測繪成果品質及落實測繪法令，將建立三維雷射掃描儀校正系統納入「多元測繪科技整合應用計畫」（政府科技發展中程個案計畫）細部計畫之一，期就國內三維雷射掃描儀校正制度予以探究，建置完整體制，並通過國際相互承認之機構「財團法人全國認證基金會」（Taiwan Accreditation Foundation, TAF）認證，使我國校正標準與國際同步，以提供測繪業辦理全球認證之校正服務，進而提升測繪產業之競爭力。

1-2 目的

「108年度建立地面三維雷射掃描儀校正系統委託研究案」（以下簡稱本案）主要目標為建立國土測繪中心自主地面三維雷射掃描儀校正系統，並完成TAF認證申請前置作業。本案具體最終成效目標為擴充國土測繪中心測量儀器校正實驗室(Survey Instrument Calibration Laboratory, SICL)，增加校正能量項目，擴充認證校正項目「地面三維雷射掃描儀校正系統」。

本案為2年期(108至109年)委外案，108年度辦理校正系統研究及TAF校正領域認證作業先期評估，109年度則依108年度研究及評估成果，接續辦理校正場建置及TAF認證申請前置作業。

1-3 工作項目及內容

本案108年開始規劃，分2年期辦理，以下將說明各工作之項目及內容。

1-3-1 研究計畫書製作

依本案工作項目內容、規格標評選與會人員意見撰擬提送研究計畫書，研擬本研究計畫書前，完成赴國土測繪中心辦理需求訪談，並依據三維雷射掃描儀校正，分為距離與角度等校正方法，進行資料蒐集，完成計畫書製作。

1-3-2 校正場建置方案規劃

1. 國內外相關資料蒐集

已完成4個國外與2個國內的地面三維雷射掃描儀校正相關資料的蒐集。

2. 研提校正理論及方法

經由前述國際上學理文獻蒐集與分析，進行理論與方法研究分析及對於儀器適用性評估，分析出可行的雷射掃描儀校正理論及方法，以利於完成以下校正項目：

- (1) 查核儀器量測的長度量值，查核測距的量測精度。
- (2) 查核儀器量測的角度量值，查核角度的量測精度。
- (3) 查核儀器量測的坐標定位精度。

3. 校正場址評估、協調及規劃

經由前述國內外所蒐集的資料，歸納理論方法，提出適合的校正模式後，以國土測繪中心預選的黎明辦公區附近的基線場與莊敬樓室內場地進行評估及規劃。

4. 校正標製作及布設

- (1) 校正標製作: 依據相關的文獻或佐證資料, 確認設計理念後, 進行校正標形、材質、尺寸等規格之設計及製作。
- (2) 校正標布設: 依據相關的文獻, 設計校正標的個數與尺寸分布, 進行校正場的校正標布設。

1-3-3 校正計算程式撰寫及測試

1. 計算程式撰寫

校正計算程式需依據地面雷射掃描儀(Terrestrial Laser Scanner, TLS) 校正方法來設計其功能, 首先此校正確式必須能讀取不同儀器的資料, 規劃上是要要求測試儀器的軟體輸出通用資料格式, 如點雲 LAS (LASer) 檔或 ASCII 檔, 因此校正確式應設計通用資料格式讀取功能。第二, 校正確式必須能展示並瀏覽點雲, 並同時展現標點辨識成果。第三, 校正確式還須能夠於點雲中自動辨識所設計的標點, 並萃取標點的中心點。第四, 校正確式應具備校正方法的平差模型運算功能, 完成儀器的自我校正運算。第五, 校正確式亦應具備測距基線校正場檢測雷射測距線性改正參數的功能。最後此校正確式必須以規劃設計的格式輸出校正成果資料報表。因此, 本計畫擬針對下列功能撰寫校正計算程式:

- (1) 點雲資料輸入功能。
- (2) 點雲資料展示瀏覽功能。
- (3) 校正標點自動辨識及量測功能。
- (4) 校正平差模型運算功能。
- (5) 測距基線校正場檢測雷射測距線性改正參數功能。
- (6) 校正成果報表輸出功能。

2. 計算程式功能測試

計畫期間將針對國內至少三種較為通用的TLS機型進行測試，各項程式功能在進行撰寫期間或修改期間都會針對不同機型儀器進行測試。校正程式於各階段完成某些功能的整合，也將進行整合功能的測試、效能測試、以及使用者方便性測試。

1-3-4 TAF 校正領域認證項目之先期評估

1. 不確定度誤差源分析先期評估

依TAF「校正領域量測不確定度評估指引」(TAF-CNLA-G16)建議評估方法，將各項誤差來源分為A類及B類不確定度，並予以量化。其中，A類以統計方法評估，B類用其他方法評估，兩者皆以假設性機率分布為基礎，估得各標準不確定度，依特定信賴水準與有效自由度，決定涵蓋因子，計算擴充不確定度。

量測不確定度分析包括有參考值量測不確定度分析、校正件量測不確定度分析。分析全測站儀測距誤差源及角度誤差源、標準件來自校正追溯的誤差等誤差來源。

2. 能力試驗活動規劃

依 TAF「能力試驗活動要求」(TAF-CNLA-R05)協助國土測繪中心辦理三維雷射掃描儀校正系統參與能力試驗活動。依據TAF規定，申請校正系統認證須附能力試驗或量測稽核結果之合格報告以為佐證。本項工作協助國土測繪中心報名量測稽核申請，由工業技術研究院(以下簡稱工研院)量測中心品質工程部執行能力試驗活動/量測稽核報告。以工研院量測中心為參考實驗室，進行數據量測活動，國土測繪中心為參與實驗室，進行量測方法的比較。

第二章 地面三維雷射掃描儀系統介紹

地面三維雷射掃描儀系統屬於長距離量測系統，其掃描距離一般可大於30 m，因其快速且精準獲取物體表面高密度三維坐標（點雲）的能力，近年來廣泛地被應用於工程測量領域，如建物之三維模型建置、古蹟文物保存、森林調查及隧道變形觀測等方面。而依各廠牌雷射掃描儀規格設計上之差異，不同型號有各自的掃描距離、掃描範圍、掃描速度及掃描精密度規格，且根據不同的參數設定可能會瞬間產生大量點雲資料，可達每秒上萬點甚至數十萬點以上，會產生大量的觀測資料，因此需要大量的儲存裝置來存取資料，並透過相關資料處理軟體，進行瀏覽、分析與處理。三維雷射掃描儀依據固定式掃描及動態掃描儀器分為固定式雷射掃描儀，一般稱為地面雷射掃描儀(TLS)，及車載移動式掃描儀，稱為Mobile Mapper。本案界定儀器標的為TLS，目前市面上常見之地面三維雷射掃描儀依其掃描的有效距離而有不同的應用領域，依其儀器測距離範圍可分為短、中、長距離等三種類型；以下將整理目前國內市面上常見地面三維雷射掃描儀規格，並於後續章節說明是否適用於所建議採行的校正方法，以及本案預計採用測試的儀器型號。

經過20多年的發展，三維雷射掃描硬體在穩定性、精度、易操作性等方面取得了長足的進步，尤其是在空載/車載/地面三維雷射掃描方面進展顯著，其中具有代表性的三維雷射掃描硬體研製廠商包括：RIEGL、FARO、Leica、Trimble及Optech等公司。以下用量測之有效距離區分各節，進行舉例與完整性整理，儀器規格等相關資料取自於各廠牌官方網站。

2-1 短距離雷射掃描儀

蒐集短距離(量測範圍 $< 150\text{ m}$)之地面三維雷射掃描儀，例如 Trimble TX6雷射掃描儀，其掃描的有效距離為 80 m ，水平與垂直各有 360° 與 317° 的最大轉角，實體如圖2-1。



圖 2-1 Trimble TX6 雷射掃描儀 [Trimble 網頁]

下表列出短距離用的各廠牌名稱與相關規格，可看到掃描速度可達到 $(360 \sim 2000)\text{ kHz}$ ，測距精密度規格約 4 mm 以內。

表 2-1 短距離雷射掃描儀案例規格

廠牌	FARO	FARO	Trimble	Trimble	Leica	Leica
型號	FOCUS S70	FOCUS M70	TX6	TX8	BLK360	RTC360
平均掃描速度 (meas./sec)	976,000	488,000	500,000	1,000,000	360,000	2,000,000
有效距離 (m)	70 m	70 m	80 m	120 m	60 m	130 m
角度精密度規格(°)	垂直 0.0053° 水平 0.0053°	N/A	垂直 0.0046° 水平 0.0046°	垂直 0.0046° 水平 0.0046°	N/A	垂直 0.005° 水平 0.005°
水平視角範圍(°)	360°	360°	360°	360°	360°	360°
垂直視角範圍(°)	300°	300°	317°	317°	300°	300°
測距精密度規格*	1mm@10m	3mm@10m	2mm@100m	2mm@100m	4mm@10m	1mm+10ppm

*A mm@B m 表示於 B m 處其精密度約為 A mm

2-2 中距離雷射掃描儀

蒐集中距離(量測範圍介於150 m ~ 2000 m)之地面三維雷射掃描儀，例如RIEGL VZ-400i 雷射掃描儀，其掃描的有效距離為800 m，水平與垂直各有360°與100°的最大轉角，實體如圖2-2。



圖 2-2 RIEGL VZ-400i 三維雷射掃描儀 [RIEGL 網頁]

下表列出中距離用的各廠牌名稱與相關規格，可看到掃描速度可達到(266 ~ 1000) kHz，中距離用途的儀器測距精密度規格約5 mm以內。

表 2-2 中距離雷射掃描儀案例儀器規格(I)

廠牌	Z+F	RIEGL	RIEGL	Teledyne Optech	Trimble
型號	IMAGER® 5016	VZ-400	VZ-400i	CMS V500	SX10
平均掃描 速度 (meas./sec)	1,000,000	122,000	500,000	N/A	266,000
有效距離 (m)	365 m	600 m	800 m	500 m	600 m
角度精密 度規格(°)	垂直 0.004° 水平 0.004°	N/A	N/A	垂直 0.1° 水平 0.1°	垂直 0.0014° 水平 0.0014°
水平視角 範圍(°)	360°	360°	360°	360°	360°
垂直視角 範圍(°)	320°	100°	100°	320°	300°
測距精密 度規格*	1mm+10ppm	5mm@100m	5mm@100m	20mm	2.5mm@100m

*A mm@B m 表示於 B m 處其精密度約為 A mm

表 2-3 中距離雷射掃描儀案例儀器規格(II)

廠牌	Leica	Leica	FARO	FARO	FARO
型號	ScanStation P30/P40	ScanStation P50	FOCUS S150	FOCUS S350	FOCUS X 330
平均掃描 速度 (meas./sec)	1,000,000	1,000,000	976,000	976,000	976,000
有效距離 (m)	270m	>1000m	150m	350m	330m
角度精密 度規格(°)	垂直 0.0022° 水平 0.0022°	垂直 0.0022° 水平 0.0022°	垂直 0.0053° 水平 0.0053°	垂直 0.0053° 水平 0.0053°	N/A
水平視角 範圍(°)	360°	360°	360°	360°	360°
垂直視角 範圍(°)	290°	290°	300°(+150°/-150°)	300°(+150°/-150°)	300°(+150°/-150°)
測距精密 度規格*	1.2mm+10ppm	1.2mm+10ppm (120m / 270m mode) 3mm+10ppm (570m / >1km mode)	1mm@10m	1mm@10m	2mm@25m

*A mm@B m 表示於 B m 處其精密度約為 A mm

2-3 長距離

蒐集長距離(量測範圍>2000 m)之地面三維雷射掃描儀，例如 Teledyne Optech 之 Polaris (-LR)雷射掃描儀，其掃描的有效距離為 2000m，水平與垂直各有360°與120°的最大轉角，實體如圖2-3。



圖 2-3 Teledyne Optech 之 Polaris 雷射掃描儀 [Teledyne Optech 網頁]

表2-4列出長距離用的各廠牌名稱與相關規格，可看到掃描速度可達到(222 ~ 500) kHz，測距精密度規格約5 mm ~ 15 mm以內。

表 2-4 長距離雷射掃描儀案例規格

廠牌	RIEGL	RIEGL	RIEGL	Teledyne Optech
型號	VZ-2000i	VZ-4000	VZ-6000	Polaris
平均掃描速度 (meas./sec)	500,000	222,000	222,000	500,000
有效距離(m)	2500m	4000m	6000m	2000m
角度精密度 規格(°)	N/A	N/A	N/A	垂直 0.0046° 水平 0.0046°
水平視角範圍 (°)	360°	360°	360°	360°
垂直視角範圍 (°)	100°(+60°/-40°)	60°(+30°/-30°)	60°(+30°/-30°)	120°(+70°/-50°)
測距精密度 規格*	5mm@100m	15mm@150m	15mm@150m	5mm@100m

*A mm@B m 表示於 B m 處其精密度約為 A mm

2-4 適用性說明

本案發展地面三維雷射掃描儀校正系統，將前述各種距離的地面三維雷射掃描儀，納入待校儀器需求。因三維雷射掃描儀的基本觀測量是距離及兩個正交的角度，因此針對雷射測距與稜鏡及儀器轉角為檢驗目標，發展因應的校正項目。所發展的校正系統應可適用於不同的雷射測距形式(脈衝式或相位式)、不同的儀器掃描方式(縱掃式或橫掃式)及上述短、中、長距離之三維雷射掃描儀，本校正系統擬採用的測距基線校正場之最長距離為266公尺。

本案校正系統建立後，將以國內測繪廠商所擁有的三維雷射掃描儀進行測試評估，至少將選擇三種不同廠牌的儀器，納入本案發展的校正系統之測試案例。校正系統之測試案例擬藉由與測繪廠商合作的方式，在本案人員協助下，由廠商派員攜帶儀器於校正場進行掃描並提供量測結果，使其先期參與本校正系統之建置。本案校正方法與校正分析建置過程，一併考量各款三維雷射掃描儀校正的可行性。

第三章 國內外相關資料蒐集

本案之國內外地面三維雷射掃描儀校正相關資料之蒐集工作，計完成4個國外與2個國內的地面三維雷射掃描儀校正相關資料的蒐集，詳細情形請參閱附件。

茲就所蒐集國家之研究現況，並配合所蒐集的文章，進行理論與方法研究之分析說明如下。

3-1 國外相關資料

本案蒐集4個不同形式的地面三維雷射掃描儀校正研究成果或校正場建置報告。

3-1-1 球形標基樁法 (Gottwald, 2008; ISO 17123-9, 2018)

球形標基樁法(Gottwald, 2008)描述兼具簡易與完整之標準化雷射掃描球型標之量測法，是針對ISO 17123-9的標準化方法，屬於比對式校正，利用各種不同距離的球型標，進行比對式的校正，描述了ISO 17123-9 針對TLS的標準校正方法。

查核方式分為簡易型測試與完整型測試，茲以簡易型測試中的單一距離查核說明量測方法，首先須製作球型掃描標，球型掃描標經掃描獲取點雲數據後，由立體球點雲數據可定義球型重心點，雷射掃描儀架設在Station 1，如圖3-1 Target 1的中心點與Target 2的中心點可建構得到第一組距離 D_{12_i} ，同理，雷射掃描儀架設在Station 2獲取第2組 D_{12_ii} ， D_{12_ref} 距離的參考值需進一步設計量測方法，比如Target 1與Target 2是安裝在強制定心的基樁上，則基樁卸下球型掃描標，重新裝置反射稜鏡可以用電子測距儀離量測參考值 D_{12} 距離。藉由比較兩個站所量到的長度(差值)，來判斷這個儀器的量測偏差是否通過允收需求。

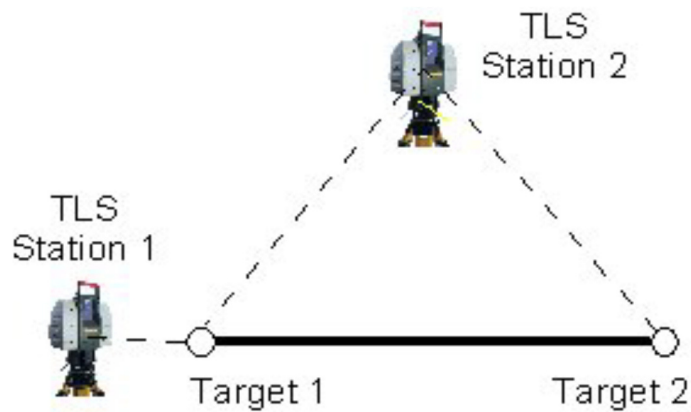


圖 3-1 單一距離簡易查核示意圖 [Gottwald, 2008]

表3-1是量測結果，使用的TLS有Leica Scan Station 2 (SS2) 與 Leica HDS6000 (6000)。SDP1是2個目標在幾乎同一水平，SDP2是兩個目標有明顯的高度差。允許量是以掃描標的點準確度4.0 mm (在99%有效位準)的情形下估計而得，量測參考值是以Leica TCRP1201進行量測的結果。

表 3-1 單一距離量測結果 [Gottwald, 2008]

Single Distance Procedure (SDP)

Procedure	TLS	Line	TLS Station 1 [m]	TLS Station 2 [m]	$\Delta=S1-S2$ [mm]	Tolerance S=99% [mm]	Reference TCRP1201 [mm]
SDP1	SS2	1-2	44.198	44.199	-1	14	44.203
	6000	1-2	-	-	-	-	-
	SS2nc	1-2	-	-	-	-	-
SDP2	SS2	1-2	44.900	44..899	1	14	44.905
	6000	1-2					
	SS2nc	1-2					
Total time	< 60 min						

3-1-2 自我校正法 (Lichti et al., 2007; Chow, 2010)

自我校正法 (Lichti et al., 2007; Chow, 2010)是以室內布設平面式校正標達到雷射掃描儀自我校正的方式，儀器在兩個不同的房間中獨立校準兩次，以評估系統誤差參數的穩定性和一致性。該研究的結果

在選定的掃描儀與非標準目標組合中，顯示顯著的測距偏移。待校件顯示出垂直方向隨著水平方向變化的系統性失真，並可被適當地以經驗參數建立模型。通過觀測範圍的模型建立，待校件的水平和垂直讀值精度均得到改善。屬於簡單型誤差量測與修正。

量測方法為雷射掃描儀經由多次變換掃描角度，利用坐標轉換，藉由高精度儀器(比如全測站)測得反射標參考坐標值以及重疊掃描的數據，分析雷射掃描儀的系統誤差參數。是為多角度(random)、直接校正法。

TLS的幾何校正有賴於校正場的固定觀測標點所建立的參考框架，校正場內大量的觀測標點定義一個穩定的「物空間坐標系」，經TLS 掃描觀測標點所得的儀器坐標，可參考於檢測過的物空間坐標，而建立儀器坐標系與物空間坐標系之幾何轉換關係，此轉換關係可用剛體轉換 (Rigid-body Transformation) 來描述，其轉換參數有3個平移量及3個旋轉量，即6個外方位參數，其幾何轉換數學關係式如下：

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R(\kappa_j)R(\varphi_j)R(\omega_j) \begin{bmatrix} X_i - X_{0j} \\ Y_i - Y_{0j} \\ Z_i - Z_{0j} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

其中

(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 為觀測點 i 於第 j 個掃描站之三維坐標；

(X_i, Y_i, Z_i) 為觀測點 i 之物空間坐標；

(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}) 為第 j 個掃描站之物空間坐標；

$(\kappa_j, \varphi_j, \omega_j)$ 為第 j 個掃描站之3個旋轉角。

TLS藉由雷射測距配合稜鏡轉動及儀器本體旋轉，獲得瞬間掃描點位的距離 (ρ)、平轉角 (θ) 及縱轉角 (α) 之原始觀測量，進而換算成以儀器中心為原點的三維直角坐標系，既點位之儀器坐標系(x, y, z)。TLS系統的運作相當於具有掃描功能的全測站儀(Total Station)，因

此TLS系統校正方法可依循全測站儀的校正概念，亦即依據其3個原始觀測量分別校正其系統性誤差。可針對各個觀測點 i 被第 j 個掃描站觀測之3個原始觀測量，與其三維直角坐標之幾何改正關係而建立其誤差模型數學關係式，亦即平差模型觀測方程式如下：

$$\rho_{ij} + v_{\rho_{ij}} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho \quad (3-2)$$

$$\theta_{ij} + v_{\theta_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta \quad (3-3)$$

$$\alpha_{ij} + v_{\alpha_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha \quad (3-4)$$

其中

$(\rho_{ij}, \theta_{ij}, \alpha_{ij})$ 為觀測點 i 於第 j 個掃描站之3個原始觀測量；

$(v_{\rho_{ij}}, v_{\theta_{ij}}, v_{\alpha_{ij}})$ 為三個原始觀測量之殘差；

(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 為觀測點 i 於第 j 個掃描站之三維坐標，需將(3-1)式代入形成完整的觀測方程式；

$(\Delta\rho, \Delta\theta, \Delta\alpha)$ 為系統誤差改正參數。

由於TLS有人工定平。因此在平差模型內，加入兩個約制條件如下：

$$\varphi_{ij} + v_{\varphi_{ij}} = 0 \quad (3-5)$$

$$\omega_{ij} + v_{\omega_{ij}} = 0 \quad (3-6)$$

其中 φ_{ij} 與 ω_{ij} 分別是主要的與次要的旋轉角，描述掃描儀在物體空間中的方向。這些約制條件都是基於儀器有定平裝置或某種設定裝置，因這些裝置都不是完全無誤差，所以採用彈性約制，亦即以儀器的設定當成可以加權的觀測量，即可納入平差系統。而這些角度的查核方式，可用兩坐標間距與距離，換算出角度，並進行與參考值相減的比較式查核。

Chow, 2010實驗成果，補充於附件，系統誤差經過參數補償計算後，觀測值誤差數值有明顯減小，達到儀器自我校正的目的。

3-1-3 雷射追蹤儀法 (ASME, 2006)

雷射追蹤儀法 (ASME, 2006) 是美國機械工程師學會 (The American Society of Mechanical Engineers, ASME) 針對高精度雷射追蹤儀 (laser tracker) 之測試規範標準與評估方法。雷射追蹤儀內含雷射干涉儀 (IFM) 或絕對測距儀 (ADM) 或二者皆有。此標準規範了雷射追蹤儀的兩種性能評估方式，系統 (一系列點對點長度) 與測距 (位移或距離) 測試，屬於比對式校正，並參考美國國家標準暨技術研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 以此方法所真正量測得分析 (Muralikrishnan, 2008)，分為系統測試 (包括長度、水平與垂直、左右對角線等之量測系統測試)、雙面系統測試、測距測試 (包括干涉儀、絕對距離儀等測距測試) 等。基本上都是藉由量測待測距離，並與已知的參考長度相減比較，查核是否落於儀器允收誤差範圍內。

例如 NIST 針對 ASME 標準進行實驗量測上，在距離量測方面，用 60 m 長的長尺校正系統 (另一端有雷射干涉儀為標準，此系統長度的擴充不確定度 $U(L) = 5 \mu\text{m} + 0.3 \times 10^{-6}L$, $k = 2$ 。根據 B89.4.19 標準法，進行多點測試。而在長度與雙面量測方面，利用雷射干涉儀當標準，進行 2 個端點距離的量測，可以根據 B89.4.19 標準法進行各種方向的轉動，左上方臺車上有兩個反向反射鏡，此系統長度 L 的擴充不確定度 $U(L) = 3.4 \mu\text{m} + 0.5 \times 10^{-6}L$, $k = 2$ 。根據 B89.4.19 標準法，進行 35 個位置的長度測試與 36 個位置的雙面測試，也可看到儀器符合容許誤差 (MPE) 範圍。

NIST 針對這個部分有進行誤差分析並補償，然而由於不同的雷射掃描儀有不同的機械架構，因此一個雷射掃描儀的距離、縱角、水平角等誤差模型，並不一定適用於每個掃描儀，其誤差修正法說明如下節所示。

3-1-4 絕對式誤差量測與修正法 (Muralikrishnan, 2015)

絕對式誤差量測與修正法(Muralikrishnan, 2015)由美國國家標準暨技術研究院發表，說明大型雷射掃描儀的幾何誤差模型，詳細描述掃描儀具有雷射源和安裝在平臺上的旋轉稜鏡，可以繞垂直軸旋轉等原理。並描述了此類雷射掃描儀誤差項目，解決了它們對測量範圍和角度的影響，討論了不同的雙面和體積長度測試對模型中每個項目的敏感性。使用市售之平面對比標進行的實驗，以評估所提出的模型的有效性。幾何誤差模型不僅對提高雷射掃描儀的精度很重要，而且對於便於識別這些儀器的性能評估的測試程序以及標準的制定也很重要。屬於絕對式誤差量測與修正，基本上是分析出誤差源的關係，用平面校正標進行以下的量測並擬合出誤差源的值：

1. 雙面的距離量測:將校正標置於掃描頭的高度，距離約2 m，進行正面與背面的距離量測，得到誤差量，因為 $V_m=90^\circ$ ，由上述公式可知，其一半即為過渡偏移 x_2 ，其值為0.005 mm。
2. 線上距離量測:將2個校正標置於掃描頭的高度，並置於兩個校正標中間(線上)。兩個校正標間距約4 m(先以雷射追蹤儀校正)，進行兩個校正標正面的量測，如上述可測得零偏移 x_{10} 為0.1 mm。
3. 雙面橫向測試:將8個校正放在垂直長桿軌道上，1個放在地上，掃描儀放在離軌道約2 m處，掃描四次，決定前面與後面所量到的平均坐標值。雙面量測的水平角 dH_m 與縱角差 dV_m 值分別表示如下，水平角的部分是用總水平角修正(校正)量：

$$\Delta H_m = k \left[\frac{x_{1z}}{R_m \tan V_m} + \frac{x_3}{R_m \sin V_m} + \frac{x_{5z}}{\tan V_m} + \frac{2x_6}{\sin V_m} - \frac{x_7}{\tan V_m} - x_{8x} \sin H_m + x_{8y} \cos H_m \right] +$$

$$\left[\frac{x_{1n}}{Rm} + x_{5n} + x_{11a} \cos 2Hm + x_{11b} \sin 2Hm \right]$$

去推算，由於正面與反面的k值分別為+1與-1，因此理論上量到的雙面量測誤差在水平角方面為下式的2倍

$$\left[\frac{x_{1z}}{Rm \tan Vm} + \frac{x_3}{Rm \sin Vm} + \frac{x_{5z}}{\tan Vm} + \frac{2x_6}{\sin Vm} - \frac{x_7}{\tan Vm} - x_{8x} \sin Hm + x_{8y} \cos Hm \right]$$

同樣的縱角的部分是用總縱角修正(校正)量:

$$\Delta Vm = k \left[\frac{x_{1n} \cos Vm}{Rm} + \frac{x_2 \cos Vm}{Rm} + x_4 + x_{5n} \cos Vm + x_{9n} \cos Vm \right] +$$

$$\left[-\frac{x_{1z} \sin Vm}{Rm} - x_{5z} \sin Vm - x_{9z} \sin Vm + x_{12a} \cos 2Vm + x_{12b} \sin 2Vm \right]$$

去推算，同樣正面與反面的k值分別為+1與-1，因此理論上量到的雙面量測誤差在縱角方面為下式的2倍

$$\left[\frac{x_{1n} \cos Vm}{Rm} + \frac{x_2 \cos Vm}{Rm} + x_4 + x_{5n} \cos Vm + x_{9n} \cos Vm \right]$$

接著將掃描儀轉45度，再掃四次，接著繼續每45度轉一次一直轉到360度(亦即回到原點)，共9次，有8個校正標，因此可量到72個坐標值，並在距標約4 m與8 m處各量一組。這些量測值經與上述理論上的量測值經最小平方法去擬合後可以得到一些誤差源參數值: x_{1n} 、 x_4 、 x_{5n} 、 x_{1z} 、 x_3 、 x_6 、 x_{8x} 、 x_{8y} 、 x_{5z} 、 x_7 。而由於 x_{9n} 與 x_{9z} 無法從 x_{5n} 與 x_{5z} 中分辨出來，因此這 x_{9n} 與 x_{9z} 皆假設為0。從擬合結果可看到擬合後的殘餘誤差只有約20 μ rad，表示，經過儀器經過理論誤差的修正後，可以將4 m距離的量測誤差0.4 mm降到 0.04 mm。而經過長期(數個月)的量測結果仍然穩定，表示實驗具有足夠的穩定性。

3-2 國內相關資料

本章亦蒐集參考兩篇國內有關地面三維雷射掃描儀校正研究論文。

3-2-1 地面雷射掃描儀的精度分析與檢定 (賴志凱, 2004)

賴志凱 (2004) 建立完整之儀器誤差分析建模、精度量測、誤差修正(校正)後的量測，屬於經驗式誤差量測與修正，進行地面三維雷射掃描儀對於圓形平面反射標之誤差模型與實驗比較，並測試各種校正標對實驗的影響，以室內場進行比較式檢定(校正)得到實驗誤差與精度。

為了進行儀器的校正，利用室內布設高密度標的方式，與全測站的量測結果進行比較式的量測，以六參數轉換將觀測坐標轉換到已知的坐標系下，以進行相減計算誤差，以理論誤差公式去比較，分析誤差來源，並進行儀器的校正。

為了更精確求得誤差值，分為以下三種方式來改正誤差：

1 在坐標轉換上引入七參數，如下所示：

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \lambda \times R(\omega, \phi, \kappa) \times \begin{bmatrix} x_L - X \\ y_L - Y \\ z_L - Z \end{bmatrix}$$

(x_A, y_A, z_A) 為全測站儀觀測得之已知坐標組

(x_L, y_L, z_L) 為雷射掃描儀觀測得之觀測坐標組

(ω, ϕ, κ) 為兩坐標系的旋轉角度參數

(X, Y, Z) 為兩坐標系的坐標原點平移參數

λ 為兩坐標系尺度參數

2 六參數加附加參數：

$$\begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \\ \Delta z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^* - x_k \\ y_k^* - y_k \\ z_k^* - z_k \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} S_k(1+q) \times \sin(\alpha_k + \varepsilon_\alpha + \frac{\Delta\tau_\alpha}{2} - i \times \frac{\Delta\tau_\alpha}{n-1}) \\ S_k(1+q) \times \cos(\alpha_k + \varepsilon_\alpha + \frac{\Delta\tau_\alpha}{2} - i \times \frac{\Delta\tau_\alpha}{n-1}) \times \cos(\beta_k + \varepsilon_\beta + \frac{\Delta\tau_\beta}{2} - j \times \frac{\Delta\tau_\beta}{m-1}) \\ S_k(1+q) \times \cos(\alpha_k + \varepsilon_\alpha + \frac{\Delta\tau_\alpha}{2} - i \times \frac{\Delta\tau_\alpha}{n-1}) \times \sin(\beta_k + \varepsilon_\beta + \frac{\Delta\tau_\beta}{2} - j \times \frac{\Delta\tau_\beta}{m-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix}$$

其中

(x_k^*, y_k^*, z_k^*) 為雷射掃瞄儀觀測得之第 k 個控制點坐標

(x_k, y_k, z_k) 為全測站儀觀測得之第 k 個轉換後控制點坐標

$$S_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \quad \alpha_k = \sin^{-1}\left(\frac{x_k}{S_k}\right) \quad \beta_k = \tan^{-1}\left(\frac{z_k}{y_k}\right)$$

$(q, \varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \Delta\tau_\alpha, \Delta\tau_\beta)$ 為待求之附加參數

3 七參數加上附加參數

以尺度參數與附加參數改正所有誤差，計算方式與上式大致相同，只是在最後把所有檢核點改正後，觀測坐標改以七參數反轉換到全測站坐標下，附加參數無法改正的誤差再由尺度參數吸收，再對改正後成果分析比較。

3-2-2 地面光達系統誤差分析及校正 (曾義星等人, 2008)

曾義星等人 (2008) 提出一個合適的誤差模式來對掃描誤差與精度進行評估，有完整之儀器誤差分析建模、誤差修正(校正)後的量測，並能在此模式下檢核出儀器的系統誤差來源，最後針對儀器存在的系統誤差加以改正。並再配合室外檢定方式對地面光達進行檢定工作，選定一合適校正場布設反射標，以傳統測量方式與地面光達量測得的資料加以處理，計算地面雷光達誤差與精度，最後以六參數加測

角、測距參數模式改正儀器掃描時的系統性誤差，而結果亦顯示此種方法能有效改正儀器誤差，屬於經驗式誤差量測與修正。在誤差模式分析方面，圖3-2為掃描角誤差示意圖與其使用參數。

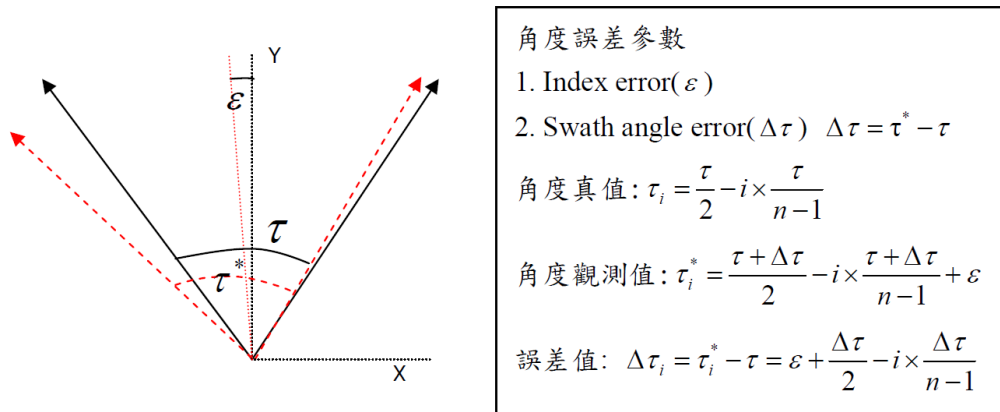


圖 3-2 掃描角誤差示意圖與使用參數 [Schenk, 2001]

本研究中共使用 6 個誤差因子，(c, q, ε_α , ε_β , $\Delta\tau_\alpha$, $\Delta\tau_\beta$)再搭配三維剛體 6 參數(3 旋轉角、3 平移量)坐標轉換， α 與 β 分別為水平角與縱角，依各種誤差因子組合成不同的數學誤差模型對資料進行校正並分析成果，找出最能有效消除該地面光達系統性誤差之數學模型。

而在校正方法及程序方面，先設計反射標且設置於校正場，再以地面光達與傳統測量方式觀測校正場，再由三維剛體六參數轉換加上附加參數同時平差計算，並由顯著性測試檢驗校正參數之顯著性，求解各校正參數。最後選用六參數附加測角測距誤差模式作最終成果解算。校正後再比較剩餘差(儀器經校正後坐標與已知坐標在相同坐標系下之坐標差值)，量測數據(詳見於附錄3-44的表3-3)顯示在此研究中所使用之Optech ILRIS-3D 儀器其明顯含有測距之誤差因子。由實驗結果可看出該儀器未改正前軸向誤差分布非呈現常態分布狀態，而經由加入誤差因子對其成果有明顯之改善。

3-3 理論與方法研究之分析

從前述國內外相關資料蒐集中，可了解到：

1. Gottwald (2008)利用各種不同距離的球型標，進行比對式的校正，描述了ISO 17123-9 針對TLS的標準校正方法。
2. 美國機械工程師學會(The American Society of Mechanical Engineers, ASME)公開的ASME (2006)針對高精度雷射追蹤儀(laser tracker)之測試規範標準與評估方法，此標準規範了雷射追蹤儀的兩種性能評估方式，系統(一系列點對點長度)與測距(位移或距離)測試，亦屬於比對式校正。說明利用查核距離、標準件長度與雙面之坐標，來量測雷射追蹤儀的誤差。此校正方法為針對雷射追蹤儀的誤差量測方法，需要較準的球型標(較貴)，參考長度需要校正過(通常會需要一個雷射干涉儀在旁邊進行量測長度)。但沒有對誤差源進行分析，以及利用誤差模型來補償這些誤差，對儀器量測結果進行校正。
3. 美國國家標準暨技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)發表的Muralikrishnan (2015)詳細的討論大型雷射掃描儀的幾何誤差模型，掃描儀具有雷射源和安裝在平臺上的旋轉稜鏡，可以繞垂直軸旋轉。描述了誤差項目，解決了它們對測量範圍和角度的影響，並討論了不同的雙面和體積長度測試對模型中每個項目的敏感性。使用市售之平面對比標固定於長型桿中進行的實驗，以評估所提出的模型的有效性。幾何誤差模型不僅對提高雷射掃描儀的精度很重要，而且對於便於識別這些儀器的性能評估的測試程序以及標準的制定也很重要，屬於絕對式誤差量測與修正。
4. Lichti et al., (2007)及 Chow (2010)以室內布設平面式校正標達到雷射掃描儀自我校正的方式，儀器在兩個不同的房間中獨立校準兩次，以評估系統誤差參數的穩定性和一致性。該研究的結果在選定的掃描儀與非標準目標組合中，顯示顯著的測

距偏移。待校件顯示出垂直方向隨著水平方向變化的系統性失真，並可被適當地以經驗參數建立模型。通過觀測範圍的模型建立，待校件的水平和垂直讀值精度均得到改善，屬於簡單型誤差量測與修正。

5. 賴(2004) 建立完整之儀器誤差分析建模、精度量測、誤差修正(校正)後的量測，屬於經驗式誤差量測與修正。
6. 曾等人 (2008) 提出一個合適的誤差模式來對掃描誤差與精度進行評估，有完整之儀器誤差分析建模、誤差修正(校正)後的量測，並能在此模式下檢核出儀器的系統誤差來源，最後針對儀器存在的系統誤差加以改正。並再配合室外檢定方式對地面光達進行檢定工作，選定一合適校正場布設反射標，以傳統測量方式與地面光達量測得的資料加以處理，計算地面雷射光達誤差與精度，最後以六參數加測角測距參數模式改正儀器掃描時的系統性誤差，而結果亦顯示此種方法能有效改正儀器誤差，屬於經驗式誤差量測與修正。

綜觀以上國內、外論文(含屬性)的分析，將其目的、量測方法、誤差分析等因素，歸納成表3-2:

表 3-2 國內外三維雷射掃描儀校正相關論文的比較

論文	ASME (2006)	Gottwald, (2008)	Muralikrishnan (2015)	Chow (2010)	曾 (2008)	賴 (2004)
目的	儀器性能 量測	儀器性能 量測	分析儀器誤差 並修正	分析儀 器誤差 並修正	分析儀 器誤差 並修正	分析儀 器誤差 並修正
Target	Laser tracker	TLS	TLS	TLS	TLS	TLS
量測 方法	藉由量測 距離及長 度，得到	藉由量測 長度與位 置，得到	以公式擬合實 驗，修正儀器 誤差	以公式 擬合實 驗，修	以公式 擬合實 驗，修	以公式 擬合實 驗，修

論文	ASME (2006)	Gottwald, (2008)	Muralikrishnan (2015)	Chow (2010)	曾 (2008)	賴 (2004)
	儀器性能	儀器性能		正儀器 誤差	正儀器 誤差	正儀器 誤差
校正 標	2 個或多 個反射體	多個球型 標	平面標(垂直 8 個,水平 2 個)	平面標 (~200 個)	平面標 (~27 個)	一個牆 面布平 面標或 室外特 徵點
距離 量測	> 20 m(>6 點)	間接式	間接式	間接式	間接式	間接式
角度 或坐 標量 測	長度 (35 點) 雙面 (36 點)	~50 m (不 同長度)	長度量測；雙 面量測縱角與 水平角偏差	室內校 正標	室外校 正標 (50 m~ 200 m)	室內校 正標
儀器 誤差 分析	無	無	以公式擬合實 驗	以公式 擬合實 驗	以公式 擬合實 驗	以公式 擬合實 驗

由表3-2可知，在量測屬性上，ASME(2006)與Gottwald (2008)等標準方法中，並無描述對於待校件進行誤差分析與修正，因此只需要對於儀器進行量測即可。這兩篇中，以ASME描述較為完整，有利用距離與量測長度的方法來查核距離與角度，並與標準件進行比對得到差值，即可對儀器出具校正報告。

其他四篇也有相當重要的價值，他們是對於儀器的誤差進行分析的方法，當然越複雜的誤差公式越能精確的修正儀器，使得殘餘誤差得到最佳化，例如Muralikrishnan (2015) 的複雜量測方式與公式，且無須利用其他標準件進行比對，不過其缺點就是只針對論文上描述的那種掃描儀有效。另外三篇就需要將利用TLS量出來的坐標轉換到與全測站或物空間的坐標系下進行相減，並進行誤差公式的擬合。而三篇皆是利用室內標的方式來進行，Chow(2010)利用儀器定平(人工)的方式，以程式擬合得到圓形校正標(直徑~15 cm)中心位置，在距離以

及角度上以簡單公式進行修正，並與全測站比較修正前後的距離與角度誤差。而曾(2008)與賴(2004)同樣用室內圓形標(直徑 <9 cm)，直接在坐標上以經驗公式修正，並與全測站比較修正前後各方向的坐標誤差，不過他們的公式與NIST發表的Muralikrishnan (2015)論文類似，並非每個掃描儀皆可適用。因此Chow(2010)的方式較適合全部的雷射掃描儀進行誤差的分析與修正。

綜上，對於校正方法的選擇方面，我們將以ASME (2006) 的校正方式，兼具長距離與角度的查核，並與標準件進行比對式校正。而為了可以了解誤差來源，可用Chow (2010) 的簡易誤差修正公式進行。最終校正法將利用室外測距基線校正場進行長距離的校正，在角度方面，參考ASME (2006)或Muralikrishnan (2015) 的方式，利用橫桿上有校正標的方式，輔以Chow (2010) 的方式均勻布設於室內，來進行比對式校正。且由於布設於室內，同時可以進行如Chow (2010) 的誤差分析，對儀器進行誤差的修正。而由文獻可知，Muralikrishnan (2015) 或賴(2004)所提誤差修正方式複雜，而非一體適用於各種儀器，因此選擇Chow (2010)的誤差簡單型修正方式，將可涵蓋大部分的TLS儀器。另外，在室內、室外率定場之搭配上，校正程序都先不引用任何修正參數，經網形平差後從殘差分析可能的系統性修正參數，這些修正參數都會先經過統計分析來確定其顯著性，在測試修正參數時會考慮先引用室外距離校正場獲得的距離修正參數。

而對於這些改正參數與誤差分析的結果，在整個校正作業中，並不會出現於的校正報告不確定度分析裡面，而是會在附錄的裡提供客戶一個誤差修正參數的參考，以利於其方便進行日後所需的應用。

第四章 研提合適之校正理論及方法

經由前述國際上學理文獻蒐集與分析，本案初步分析出可行的雷射掃描儀校正理論及方法草案，本案地面三維雷射掃描儀校正方法，將以ASME (2006) 與Gottwald (2008)等標準為參考，關於校正項目可歸納包括：查核儀器量測的距離(或長度)量值(與其量測精度)；查核儀器量測的角度量值(與其量測精度)；查核儀器量測的坐標定位精度。距離查核可用室外校正場滿足，角度或坐標的查核則需要室內場才可進行。

4-1 距離查核

在距離的查核方面，國土測繪中心辦公大樓前安全島(現為電子測距儀校正場)，設置 9 支穩固之鋼筋混凝土基樁，各基樁上設有可直接架設儀器之強制定心基座，為校正系統之工作標準件，而各樁位間之標準距離係定期以國家度量衡標準實驗室校正合格之精密電子測距儀查核。

因此本案利用國土測繪中心的測距基線校正場來檢測雷射測距是否有顯著的線性改正參數或其它參數。規劃分別於測距基線校正場 0 m 基樁與 5 m 基樁架設掃描儀掃描立於其他基樁上的觀測標，如圖 4-1，其校正方式如同電子測距儀的校正方法。

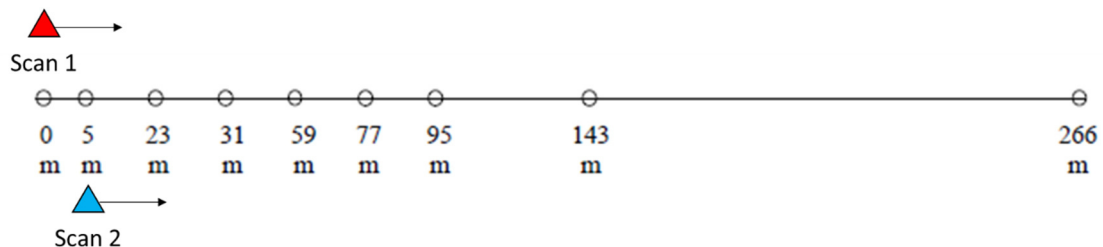


圖 4-1 雷射掃描儀置於測距基線校正場掃描之示意圖

4-2 角度與坐標查核

在角度與坐標的查核方面，地面三維雷射掃描儀 (Terrestrial Laser Scanner, TLS) 運作時會成立以儀器中心為原點的三維直角坐標系，稱為「儀器坐標系」，其觀測成果是分布於被掃描地物表面的觀測點群，通稱為點雲 (Point Cloud)。每個掃描站各自建立自己的區域型儀器坐標系，點雲的結合與應用有賴於物空間與儀器坐標系轉換關係建立。透過控制點位的觀測標點建立坐標系轉換關係是一種有效且精準的點雲結合方法，因此本案擬建立具有大量固定觀測標點的 TLS 校正場來達到此目的。

茲將本章文獻Chow, 2010所使用公式，重新展示於下，公式中變數的定義如前述所示。

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R(\kappa_j)R(\varphi_j)R(\omega_j) \begin{bmatrix} X_i - X_{0j} \\ Y_i - Y_{0j} \\ Z_i - Z_{0j} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$$\rho_{ij} + v_{\rho_{ij}} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho \quad (4-2)$$

$$\theta_{ij} + v_{\theta_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta \quad (4-3)$$

$$\alpha_{ij} + v_{\alpha_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha \quad (4-4)$$

$$\varphi_{ij} + v_{\varphi_{ij}} = 0 \quad (4-5)$$

$$\omega_{ij} + v_{\omega_{ij}} = 0 \quad (4-6)$$

參考一般坐標轉換原理，平差模型同時解算物空間與儀器坐標系轉換參數及系統誤差改正參數，若需要進行誤差分析，這兩種參數通常會具有某種程度的相依性，尤其是縱轉角系統誤差改正參數 ($\Delta\alpha$) 與坐標旋轉參數 (φ_j, ω_j) 具有高度相關性。要能減少平差模型內未知參數的相關性，則校正場的固定觀測標點數量與分布必須有足夠的網

形幾何強度，尤其要降低 $(\Delta\alpha)$ 與 (φ_j, ω_j) 的相依性則立面的標點須足夠，且具備不同距離的標點，可惜多數TLS校正場很難滿足此條件。另一種較可行的替代方案是於校正場設立多測站掃描，並且掃描時將儀器定平，現在有些TLS具備有雙軸補償裝置 (Dual-axis Compensator) 可方便定平。因此在平差模型內，我們可加入本章式(4-5)與(4-6)的兩個約制條件。

關於約制條件，定平約制條件在現階段並無作用，因為尚未引入觀測角度常差參數時並無作用，但在未來工作項目，建議納入成評估工作。當我們將角度常差參數當成未知數求解時，會與儀器的方位參數高相關，這時定平約制條件就有降低參數相關性的作用。在分析系統誤差參數時，可以一併分析定平約制條件作用的顯著性。無定平裝置的儀器是否就無法進行校正的案例，本階段工作成果也尚未能確定此工作案例，需要設計實驗分析校正案例。本工作案因為有增加觀測站數也應該有降低參數相關性的效果，相關可行性分析建議未來工作納入成工作項目。

上述系統誤差改正參數分別針對三個原始觀測量都是單一參數，亦即都只有常差量，雖然單一常差量已經能夠提供多數TLS足夠的校正精準度，但是有些TLS之系統誤差模式可能無法以單一參數描述，而需要較複雜的系統誤差改正參數組合。例如加上線性改正參數的系統誤差改正模型如下：

$$\Delta\rho_{ij} = a_0 + a_1\rho_{ij} \quad (4-7)$$

$$\Delta\theta_{ij} = b_0 + b_1\theta_{ij} \quad (4-8)$$

$$\Delta\alpha_{ij} = c_0 + c_1\alpha_{ij} \quad (4-9)$$

參數的選擇亦可以是更複雜的物理參數加上經驗參數，這種參數的選擇需經過誤差模式分析來檢定各個參數的顯著性來決定，亦即先不要加入系統誤差參數進行平差，平差後分別分析三個原始觀測量之殘差分布統計性質，以決定參數之顯著性。基本上，參數的顯著性都

需經過統計檢定方式來確定，目前統計檢定的方法還未釐清，等釐清後會補上統計檢定的方法。

本案先以國內幾種較普遍使用的機型，先進行未加入系統誤差參數的殘差分析，再測試單一參數及加入線性改正參數的校正成效。若有必要再進行更複雜的參數選項測試。

參考Chow(2010)在室內建置校正場，於全區牆面布設雷射掃描反射校正標，校正場需設立多測站掃描，針對本案規劃的校正場，於校正場內設立4個掃描站。每個掃描站設立儀器時需定平並設立起始掃描方向，若機器無法自動定平，則可利用人工法，以圓盒氣泡進行粗略定平。4個掃描站之起始掃描方向分別差異90度。

應用反射校正標的物空間坐標的量測程序，達成儀器之間的比對活動，是本案校正程序重要步驟，簡略敘述如下。校正原理是使用校正實驗室工作標準件(如全測站儀)量測物空間坐標，待校正件為雷射掃描儀，亦量測同樣的反射校正標，比對二者坐標差值，據以評估雷射掃描儀的儀器精度。

1. 反射標的校正參考值

採用全測站儀測量，全測站儀量測各反射標，得物空間坐標(X_{ri} , Y_{ri} , Z_{ri})，(X_{ri} , Y_{ri} , Z_{ri})稱為校正參考值；

2. 反射標的待校正件量測值

以待校正件雷射掃描儀掃描各反射標，可得觀測儀器坐標，應用(4-1)式，藉由旋轉矩陣將雷射掃描儀儀器坐標系轉換至物空間坐標(X_i , Y_i , Z_i)，(X_i , Y_i , Z_i)稱為待校正件量測值。

3. 參考值與待校正件坐標量測值關係原理

前述，反射校正標的物空間坐標可採用工作標準件(全測站儀)量測得校正參考值 (X_{ri} , Y_{ri} , Z_{ri} ，統整以 Ref_i 表示)，雷射掃描儀觀測反射校正標可測得(X_i , Y_i , Z_i ，統整以 Mea_i 表示)。

經由比對儀器之間的坐標差異，建立量測方程式，待校正件坐標量測值(Mea_i)與工作標準件的校正參考值(Ref_i)，及待校正件的器差($Diff_i$)，三者關係可表示為：

$$Diff_i = Mea_i - Ref_i$$

其中

$Diff_i$ ：為二者量測器差值，

Mea_i ：為雷射掃描儀量測反射校正標的坐標量測值

Ref_i ：為工作標準件全測站儀的坐標校正參考值

得到校正件與參考件的器差值 $Diff_i$ ，即可出具報告，完成校正工作。因此校正報告將包含：(1)距離量測值及其不確定度；(2)x, y, z 等三軸坐標數值及其量測不確定度；(3)誤差修正參數與參數統計檢定等資料，也提供作參考資訊。亦即所發展的地面光達校正系統，關於校正效益，可以列入服務選項，分析待校正件是否有顯著的測距及測角系統誤差，進一步效益是可以提供校正報告使用者，應用所推估得到的系統誤差參數，補償修正觀測數據。

校正流程為：(1) 測距基線校正場，儀器分別放置於0 m、5m處掃描，將校正標分別輪動於5 m到266 m間各個位置掃描，並換算出距離，與全測站參考值相比對，並得到距離的量測不確定度。(2) 室內校正場，分別設置於4個站，分別掃描範圍內的校正標，並與全測站量到的坐標位置相比對，分析x, y, z等三軸的量測不確定度。最後即可出具報告。目前成果是以坐標值與其不確定度作為查核角度的依據。

另外，室外基線場的校正是針對測距的加、乘常數，在系統誤差分析程序上，會先進行測距的加常數、乘常數的分析，具顯著性的測距的加常數、乘常數將會套用於室內校正作業分析。

第五章 校正場址評估及規劃

本項是延續前述研究成果進行規劃，歸納理論方法，提出適合的校正模式後，分析國土測繪中心預選的校正場地，進行細部規劃工作。完成以國土測繪中心辦公大樓前安全島(現為電子測距儀校正場)做為室外校正場，以及黎明辦公區莊敬樓1樓做為室內校正場的評估及規劃。

5-1 校正模式研提

本案經由前述工作項分析及文獻探討分析後，國內外雷射掃描儀校正，(1)依場地區別：有室內與室外場地；(2)依校正項目區別：校正模式分別為坐標比對、長距離比對以及短距離比對。坐標比對，如ISO建議方法的坐標比對程序及ASME (2006)方法。Chow (2010)與Muralikrishnan (2015) 以室內校正標得到較多的校正數據，進而可進行修正誤差源的效益。

由本參考文獻分析後，建議校正模式包含一個長距離的測距基線校正場以及可量測各種角度的室內的校正場進行校正。茲就本報告主文分析成果，將校正場的需求條件評估說明如后。

5-2 測距基線校正場

測距校正場需要進一步設計，合適於雷射校正標裝置，例如NIST於文獻 Muralikrishnan (2008) 所提到的就有60 m，場地需要能合適於雷射掃描儀進行測距的比對校正工作。

以國土測繪中心既有電子測距儀校正場進行評估說明案例，國土測繪中心辦公大樓前安全島(現為電子測距儀校正場)，設置 9支穩固之鋼筋混凝土基樁，各基樁上設有可直接架設儀器之強制定心基座，為校正系統之工作標準件，而各樁位間之標準距離係定期以國家度量

衡標準實驗室校正合格之精密電子測距儀查核。基樁配置如圖5-1，環境現況如圖5-2。

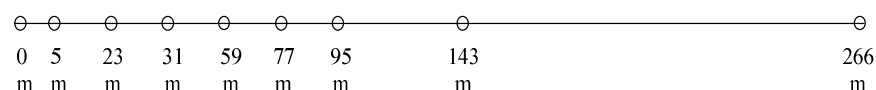


圖 5-1 測距基線校正場示意圖



圖 5-2 測距基線校正場現況照片

因此，國土測繪中心現有的電子測距儀校正場，非常適合使用雷射掃描儀專用校正標，校正雷射測距的線性改正參數。

5-3 室內校正場

本案工作團隊，工研院量測中心是建置實驗室專業機構，執行國家度量衡標準實驗室計畫，建置超過百套校正實驗室，由專業實務團隊經驗與國內外文獻，例如Chow(2010)與賴(2004)探討分析後，本案建議室內場地環境條件近似於一般辦公室環境條件即可滿足，場址選址條件包括：(1)室內場址空間尺寸：量測距離尺寸建議大於3公尺；(2)牆面材質的穩定性，若牆面材質穩定性不足，建議另行設計桁架結

構，滿足穩定性需求；(3)牆面可否允許設置反射標；(4)校正場環境控制：溫度需求 $(25\pm 8)^{\circ}\text{C}$ ，濕度需求 $(65\pm 30)\%$ 。

國土測繪中心預選室內校正場地黎明辦公區莊敬樓1樓之三維雷射掃描儀室內校正場，室內長約8.76 m、寬約4.78 m、高約2.60 m，如圖5-3。

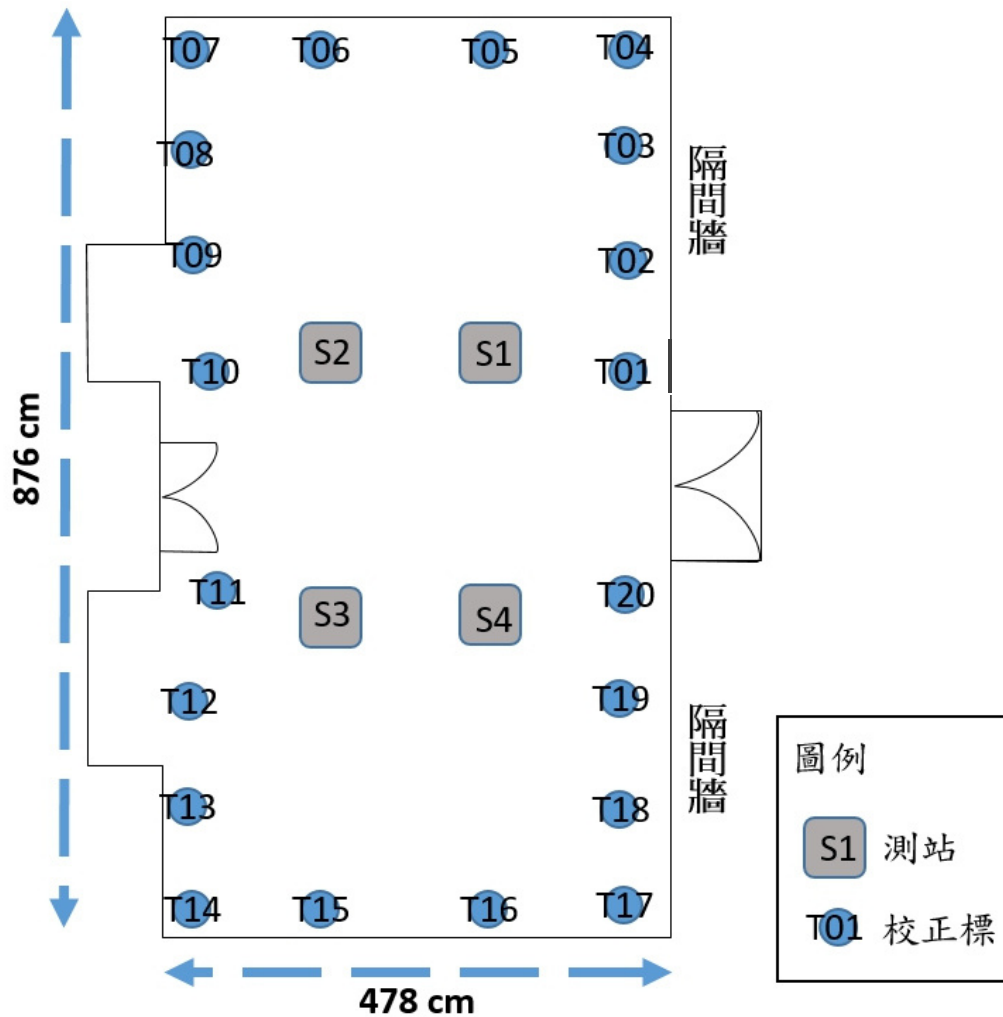


圖 5-3 莊敬樓場址

將室內校正場址進行評估：

1. 室內空間尺寸：關於雷射掃描儀校正，長距離的校正需求是透過測距基線校正場執行，關於角度與坐標校正需求，此處空間尺寸皆適

合雷射掃描儀布標校正。

2. 牆面穩定性：攸關於是否可以布設掃描儀校正標，此處為水泥結構建物，透過適當的布標規劃，可適用校正標布設需求。
3. 室內實驗室環境溫控條件：實驗室執行校正期間，宜進行一般辦公室環境溫控條件，溫度需求 $(25\pm 8)^{\circ}\text{C}$ ，濕度需求 $(65 \pm 30)\%$ ，此處空間適當，溫控條件佳。

評估結果，適用於設置雷射掃描儀室內校正實驗室。

5-4 校正場作業規劃

5-4-1 測距基線校正場作業規劃

本案室內校正場掃描距離約在5公尺範圍內，應不足以校正雷射掃描儀關於測距的線性改正參數，甚至更複雜的非線性改正參數。經前述勘查作業與評估，本案規劃經由國土測繪中心的測距基線校正場來檢測雷射測距是否有顯著的線性改正參數或其它參數。

本案建議測距基線校正場一端掃描立於基樁上的觀測標，如圖4-1，其校正方式如同電子測距儀的校正方法。

5-4-2 室內校正場作業規劃

於本室內校正場進行4面牆壁進行布標，並測試布標情形與試作多站雷射掃描成果評估。最終規劃布設80個校正標，最後經分析，再篩選出關鍵性校正標的數目。校正標數目仍須考量校正作業的執行經費因素，有足夠數量校正標即可量到該有的準確度，在準確度與校正執行費用上取得平衡考量。

第六章 校正標製作及布設

本案針對校正標設計的理念基礎，包括材質、形狀、大小等功能性，及採用的理由，說明如後。

6-1 校正標設計及製作

依據相關的文獻或佐證資料，確認設計理念後，進行校正標形、材質、尺寸等規格之設計及製作。

6-1-1 校正標材質

在校正標材質方面，需要同時適合雷射掃描儀反射訊號，並且適用於全測站儀測距反射訊號，示意圖如圖6-1；市場上有現成產品，適用於專業實驗室用的雷射掃描儀附件產品。本案選定校正標材質後，預先選用專業級的校正標，能同時適用於全測站反射訊號與雷射掃描儀訊號，並事前在成大進行校正分析，與校正標自動化認標的測試分析，確認了此專業級反射標材質(貼紙)合適。本工作案校正標選用條件首先必需適用於全測站反射訊號的專業貼紙，一般性的貼紙材質，如亮面、霧面等多款式貼紙，暫不考慮納入分析。



圖 6-1 反射標材質(貼紙)

6-1-2 平面校正標與球型校正標

在校正標型式方面，常用反射標形式是平面的反射標，亦有球型

的雷射掃描標，如圖6-2。其中，球型的雷射掃描標需配合掃描距離變換不同直徑的球型，以免球體過大導致球心求定的誤差變大，或球體過小掃描點數太少。以本案室內校正場及測距校正場需求初步分析，以平面的反射標較具彈性。

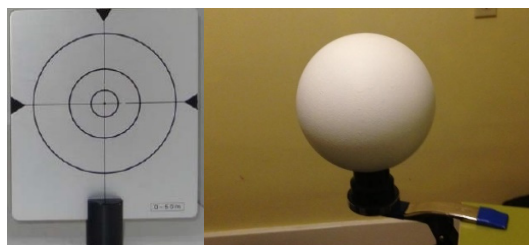


圖 6-2 平面反射標與球型標

另外由於參考NIST在文獻中Muralikrishnan (2015)，比較三種校正標(1個平面標與2個球型標)在測量不同距離時的重複性精度(10次觀測)，如表6-1:

表 6-1 比較不同標在不同範圍下的測距精度

Range	Contrast target			Scan sphere			Titanium sphere		
	σ_R	$R\sigma_H$	$R\sigma_V$	σ_R	$R\sigma_H$	$R\sigma_V$	σ_R	$R\sigma_H$	$R\sigma_V$
2 m	0.005	0.012	0.022	0.010	0.026	0.025	0.009	0.025	0.023
4 m	0.005	0.019	0.033	0.017	0.024	0.042	0.020	0.024	0.042
6 m	0.004	0.036	0.048	0.020	0.034	0.057	0.043	0.039	0.056
8 m	0.012	0.045	0.086	0.058	0.089	0.112	0.047	0.108	0.114

由表6-1可看到在不同距離時，平面標都比球型標來得好，因此本案建議以平面標為主。

6-1-3 立體校正標

在自動化量測的彈性方面，雷射掃描點雲落在反射標上，最佳設計是反射標與背景平面不在同一平面，如圖6-3。藉由反射標型式設計能以程式自動化判斷並分離出標內點雲與背景牆面的點雲，達到自動

化量測的彈性。



圖 6-3 立體之平面標設計

6-1-4 室內校正標之設計與製作

由於距離背景有一定的距離才可利於程式判別，因此在室內校正場規劃設計以螺桿將其凸出於牆面一段距離。關於校正標尺寸大小，如附件之校正標規格圖，在室內場將其剪裁成直徑為10 cm，如圖6-4，由國立成功大學曾義星教授經驗數據得知，30 m 距離以內，此尺寸對於校正精度已足夠自動化辨識出圓形標能力。另外，對於特別掃描密度的儀器，可藉由校正標設計機構，圓型校正標可以置換標型版面，藉此尺寸可以有彈性可換標型。

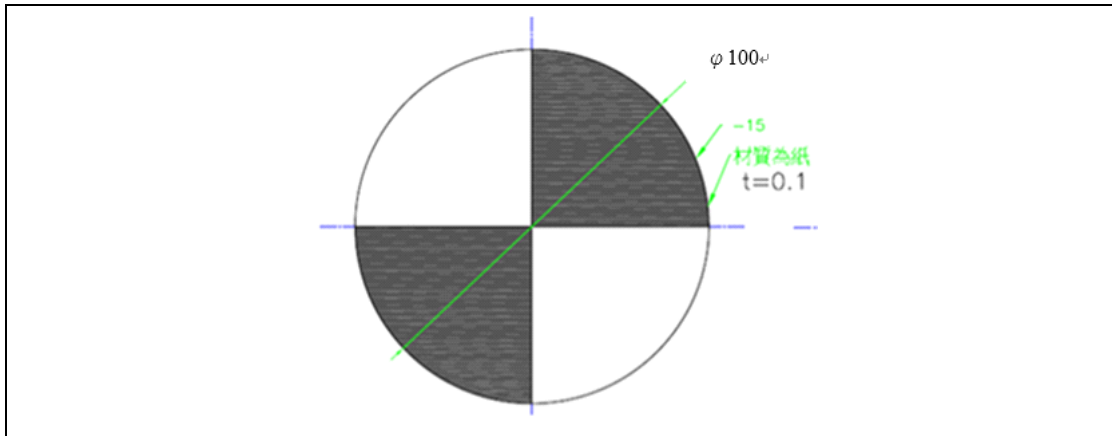


圖 6-4 校正標設計樣式

校正標的固定座設計上，依據前述校正標分析，設計原則是反射面材質、平面標型、立體式的校正標，並有考量到製作價格合適性，易加工製作等特性，將最終的校正標與固定座之製作規格設計如圖6-5。製作好的10 cm直徑校正標與固定座之實體圖如圖6-6。可固定於鋁擠型上並整個固定於靠牆之地板與天花板上，進行測試。

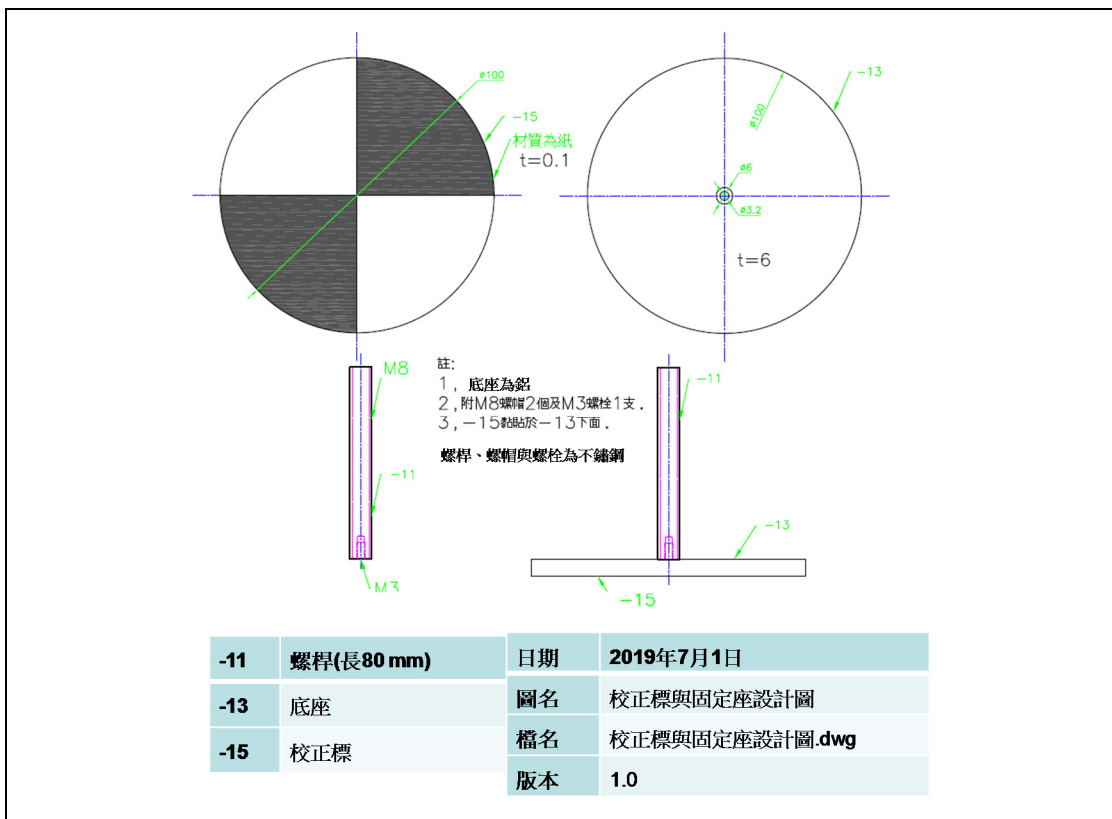


圖 6-5 室內校正場校正標設計圖

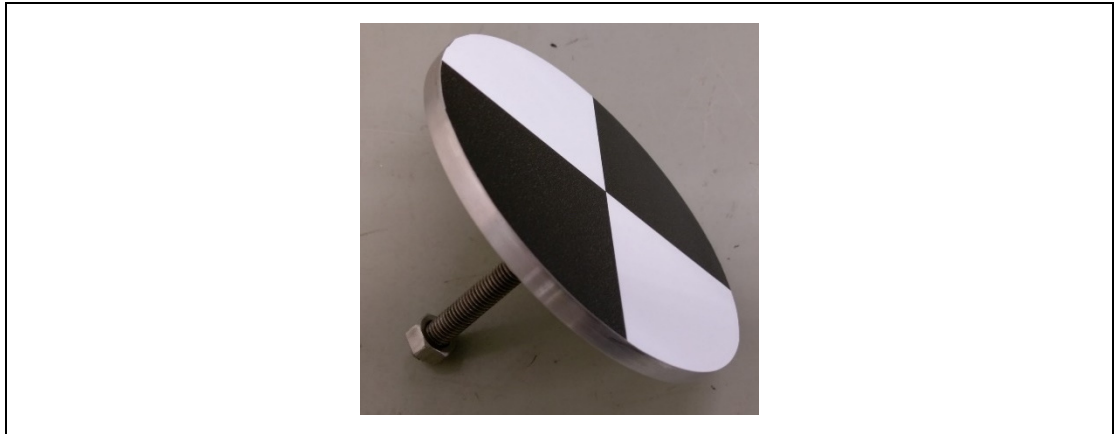


圖 6-6 室內校正場校正標設計成果樣式

6-1-5 測距基線校正場校正標之設計與製作

關於在室外測距基線校正場，所需要使用的雷射掃描專用校正標，經本案調查搜尋實驗室測量儀器配件，市售有合適於測距基線校正場可利用的校正標固定座，考量價格合理與校正工作適用性，建議以圖6-7的校正標固定座，結合雷射掃描校正標，雷射掃描校正標貼於此固定座上完成圖如圖6-7，形狀為四方型，詳細規格如表6-2，校正標大小為45 cm × 42 cm。



圖 6-7 測距基線校正場，雷射掃描校正標完成圖

表 6-2 室外校正標規格

材質	陽極處理鋁板上有黑色/白色反光膜
尺寸	450 mm × 420 mm
下方連接	12 mm 外徑圓柱(5/8"內牙)，可安裝於基線場基樁
黑白標型尺寸	410 mm × 410 mm

6-2 校正標布設

在室內場方面，考量校正標需要堅固的支撐柱進行固定，以及位置的移動方便性，以鋁擠型做為其固定柱，將校正標固定於鋁擠型上，並平均分配於靠近四個牆面上。此外，為了進行掃描，於室內布設4個較粗的鋁擠型做為掃描儀的基站。在室外場方面，由於已有現成合適的固定基樁，因此只需要固定於基樁上即可。

6-2-1 室內校正場校正標布設

規劃布設20個鋁擠型柱，柱上固定4個校正標，因此共有80個校正標。將放校正標用的鋁擠型置放位置標示為T01到T20，如圖6-8圓形處；將放雷射掃描儀用的鋁擠型置放位置標示為S1到S4，如圖6-8方形處。校正標編號為由低點到高點進行1到4的編號，例如第1個放校正標用鋁擠型位置T01的校正標由下方到上方分別為T011、T012、T013與T014，其他依此類推。

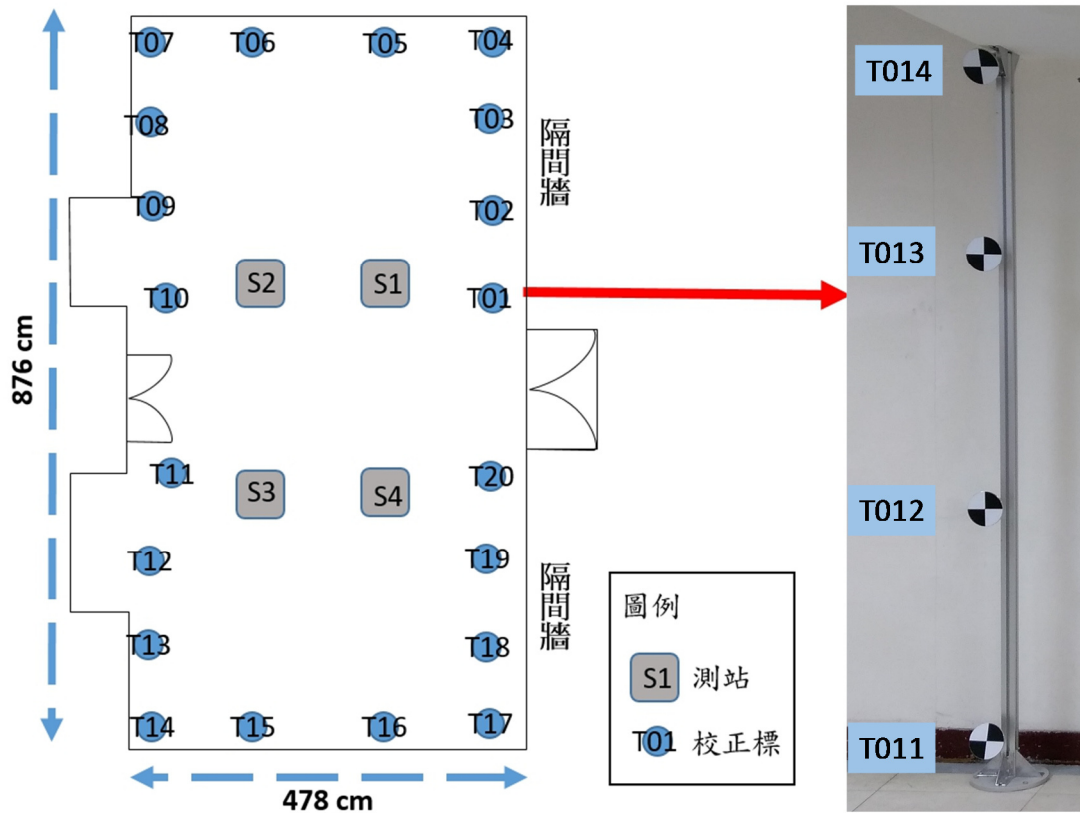


圖 6-8 室內校正場校正標與雷射掃描儀基樁固定位置圖

將鋁擠型柱上以連結片固定4個校正標，並將固定校正標與雷射掃描儀用的鋁擠型，以連結片及圓盤等固定於地板與天花板後，完成80個校正標的布設如圖6-9，放校正標用的鋁擠型上的校正標間距約70 cm，柱間距離約100 cm，放儀器用的鋁擠型高度約140 cm。



圖 6-9 室內場校正標與儀器基樁布設圖(上圖朝南拍照，下圖朝北拍照)

6-2-2 測距基線校正場校正標布設

國土測繪中心辦公大樓前安全島(現為電子測距儀校正場)有現成合適的固定基樁，因此將校正標固定於基樁上如圖6-10，藉由搬站過程將校正標移到下個基樁上，室外量測範圍可達266 m。



圖 6-10 測距基線校正場校正標布設圖

第七章 校正計算程式撰寫及測試

本案已完成的點雲擷取、校正標自動判別及初步平差等軟體平臺撰寫，後續將修改平差模式，加入系統性誤差參數計算。

使用者於室內校正場及室外距離校正場取得掃描成果(點雲)後，可透過此平臺進行點雲轉檔及平差計算的操作，經點雲轉檔後，使用者可於網頁中視覺化查看該點雲之樣態，並且在過程中，系統同時進行校正標的自動辨識作業，待辨識完成後，將校正標所在位置標註於點雲展示頁面上，供使用者查看；在平差計算中，使用前一步驟辨識所得的校正標位置資訊做為觀測量進行解算，求得校正標坐標與真值的位置差異量及距離差異量，出具計算成果文件供使用者查看，藉此評估光達掃描儀器。

率定平臺共主要分為四大功能項，並以網頁方式作為使用者介面，功能面分別為：點雲萃取轉檔、點雲萃取轉檔管理、平差計算及平差計算管理，檔案處理流程如圖7-1所示，細節內容分述如後：

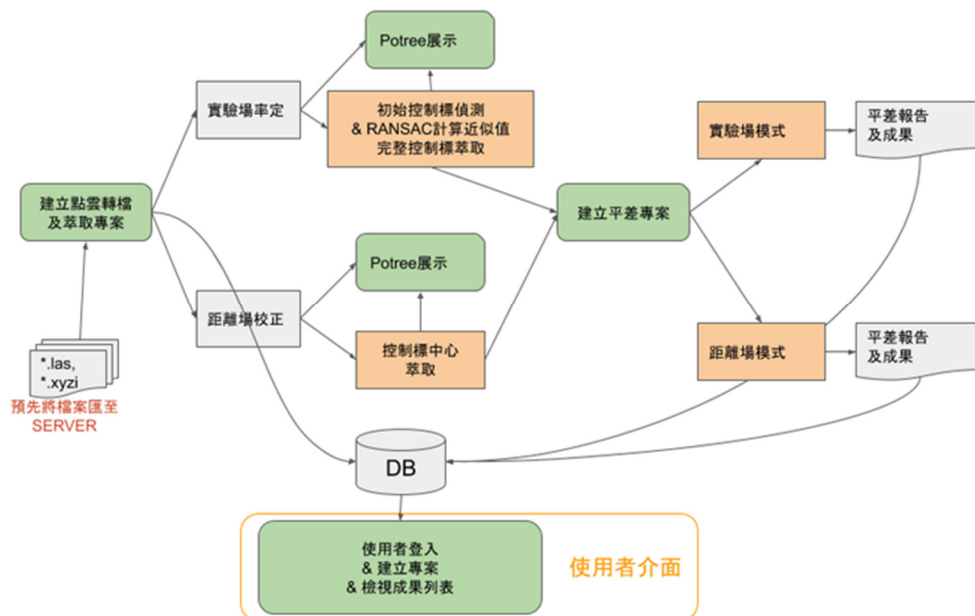


圖 7-1 檔案處理流程

7-1 點雲萃取轉檔

於已建立的專案中，載入標準格式之點雲檔案(LAS 或 xyz)，系統會同時進行兩個動作，第一個動作為多尺度轉檔(所謂多尺度轉檔，是將原始點雲檔案依據八元樹的概念進行資料分割轉檔，後續於網頁上查看點雲時，會自動依據查看視角及距離，選擇不同尺度的檔案來進行展示，藉此優化點雲瀏覽效果)，將點雲檔案進行轉換，使點雲成果可於展示圖臺上進行展示，如圖7-2。

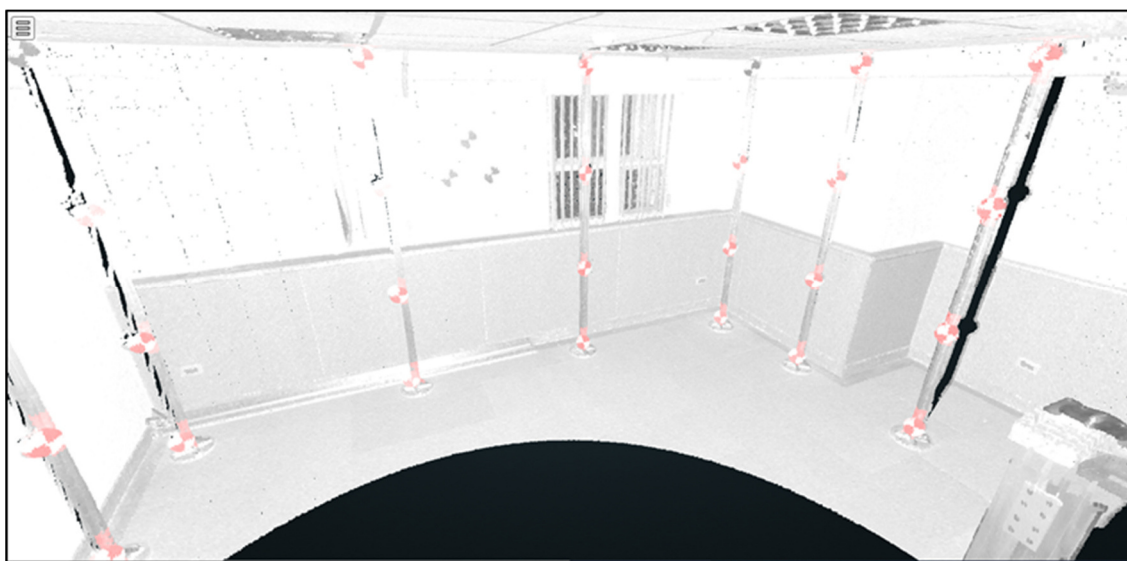


圖 7-2 程式初步處理的點雲展示

第二個動作是對點雲原始檔案進行資料萃取，自動辨識出校正標的位置，取得各校正標中心的位置後，萃取之校正標中心坐標即可供後續平差計算所用。其中，校正標位置取得後，會將校正標的位置資訊輸入點雲展示圖臺中，讓使用者可於圖臺上檢視校正標搜尋的成果，如圖7-3紅色區域。

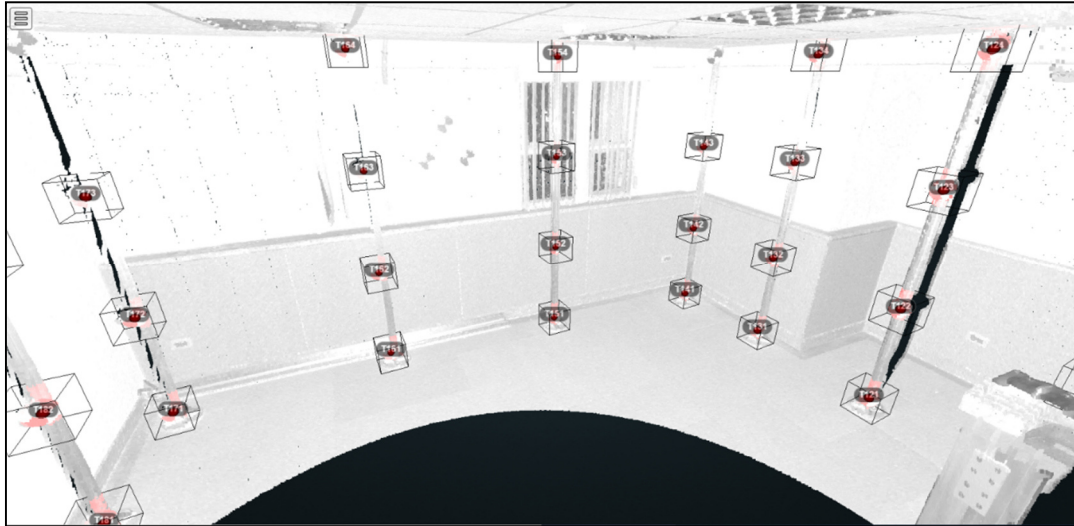


圖 7-3 程式處理後校正標搜尋結果

校正標辨識的流程主要分為三個步驟，辨識校正標所在的平面、取得該平面黑白交界處的點位、擬合相交的線段並決定中心點位置。

首先使用區域成長法(Region Growing)找到整體點雲中的數個候選平面，計算各平面之法向量，設定適當的法向量差異閾值，並且將校正標的大小設為篩選條件，如此便可分離出包含各個校正標的點位位置，篩選出的單一校正標點位，依反射強度之不同進行上色如圖7-4所示，依反射強度進行灰階上色如圖7-5所示，由圖7-4可看出，辨識出的點雲型態與校正標的特徵相符合，得知此方法可有效辨識出校正標所在位置，藉由圖7-5則可看出，校正標上的反射強度有明顯的差異，可以此差異特性進行中心點之定位。

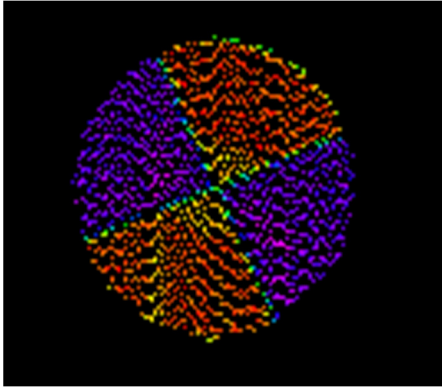


圖 7-4 校正標點位彩色上色

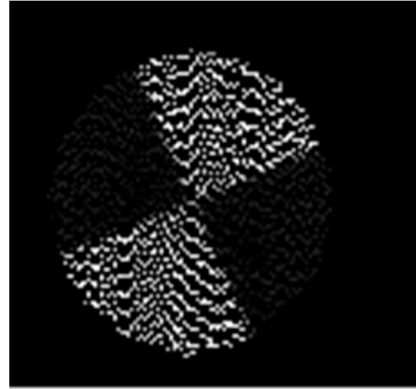


圖 7-5 校正標點位灰階上色

由圖7-5可看出校正標上有明顯的灰階差異，若將圖7-5中各點位的反射強度進行直方圖繪圖(圖7-6)，則可發現有兩個明顯的峰值，圖中右側反射強度較高的是校正標上的白色區域點位，圖中左側反射強度較低的峰值，則是校正標上的黑色區域點位，而在兩峰值中間的區域(Middle Value, MV)的點位，多數是存在於黑色與白色交界處及校正標邊緣的點位，分離出這些點位有助於校正標中心位置的尋找。

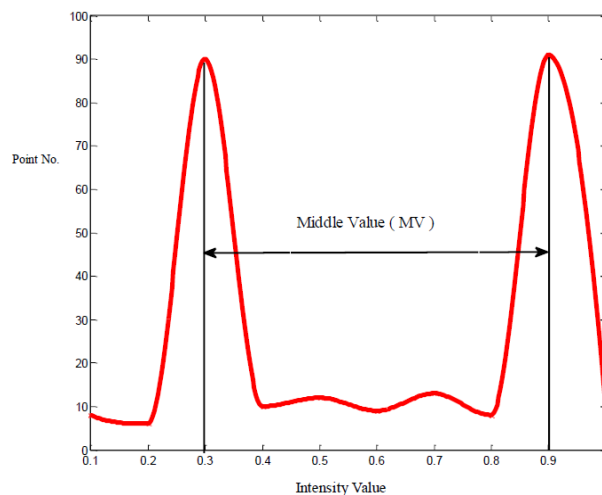


圖 7-6 校正標點位直方圖(Ge et al., 2015)

MV區域點位展示成果如圖7-7所示，由圖中可明顯得知兩個線段的交會處，即為校正標中心所在之位置，於此使用霍夫轉換進行線段擬合查找，擬合成果如圖7-8所示，圖中藍色與橘色線段即為擬合成果，而兩線段相交的位置，則視為校正標的中心位置，其中，霍夫轉換

的過程將三維的點雲轉到二維平面上做線段擬合，故所求得之中心位置亦為二維的成果，需再根據投影關係，將二維中心點位投影至三維空間中，投影成果如圖7-9所示，圖中的紅點位置，即為辨識出的校正標中心位置。

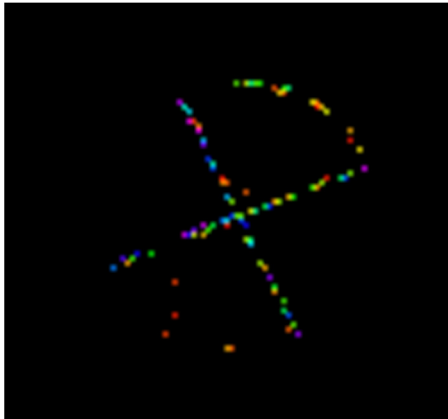


圖 7-7 MV 點位展示

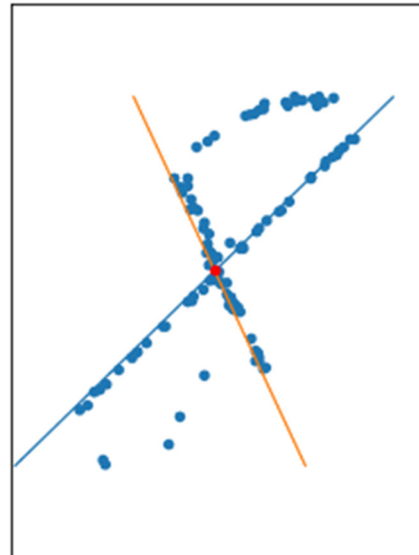


圖 7-8 MV 霍夫轉換成果

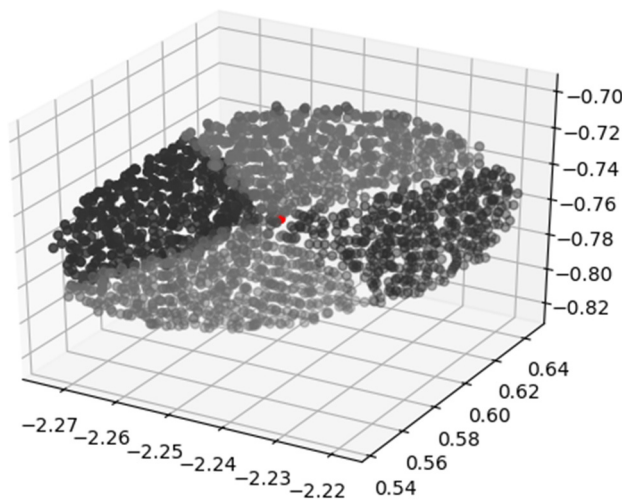


圖 7-9 校正標辨識三維成果

然而，依此作法在複雜且眾多校正標之環境中，並無法成功獲取大多數校正標，因此針對實驗場中校正標的萃取，可將初始偵測之成果對應由全測站量測之的校正標中心成果，以RANSAC方法解算六參

數相似轉換，但由於實驗場內的校正標布設過於規律，因此需約制轉換參數(高程或XY旋轉角)，以避免錯誤的配對仍有良好之轉換參數。在取得轉換關係後，可將已知全測站量測之校正標中心轉換至測站坐標系中做為校正標中心萃取之近似值，如此萃取之成果可避免錯誤且同時取得對應(如圖7-11及圖7-12)，萃取之校正標中心坐標即可供後續平差計算所用。

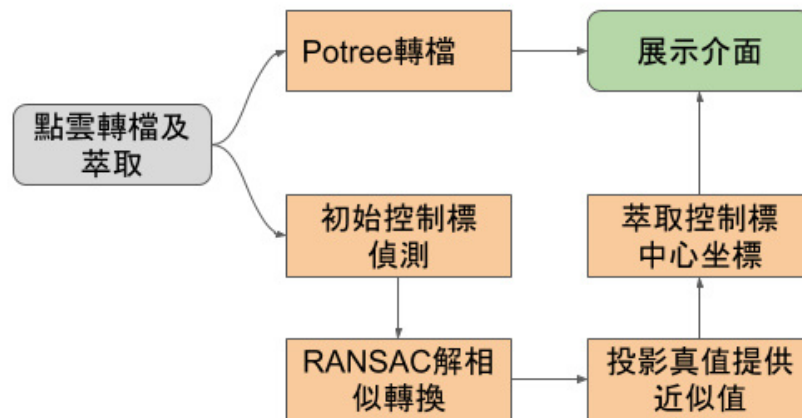


圖 7-10 點雲轉檔及校正標萃取



圖 7-11 初始校正標偵測成果



圖 7-12 最終校正標偵測成果

7-2 點雲萃取轉檔管理

點雲萃取轉檔管理介面，供使用者快速查看各轉檔專案的相關資訊、處理狀態及點雲查看連結(點選連結可開啟點雲進行查看)，在狀態欄位中可得知點雲轉檔狀態，處理中即為點雲尚在轉檔中，無法提供查看；已完成即為轉檔完成，可正常查看(如圖7-13及圖7-14)；轉檔錯誤即為發生不知明原因無法轉檔，需請工程師協助釐清問題。

專案名稱	所屬單位	用途	轉換類型	備註	轉檔狀態	標萃取狀態	點雲展示連結	掃描日期	建立時間	重試RANSAC	使用手動成果偵測
S03_Z+F	國立成功大學	儀器校正	實驗場	Z+F實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-11	2019-11-11 16:44		
S02_Z+F	國立成功大學	儀器校正	實驗場	Z+F實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-11	2019-11-11 16:43		
S01_Z+F	國立成功大學	儀器校正	實驗場	Z+F實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-11	2019-11-11 16:43		
RIEGL-RANGE-3	國立成功大學	儀器校正	距離場	RIEGL距離場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-09	2019-11-09 13:16		
RIEGL-RANGE-2	國立成功大學	儀器校正	距離場	RIEGL距離場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-09	2019-11-09 13:13		
RIEGL-RANGE-1	國立成功大學	儀器校正	距離場	RIEGL距離場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-09	2019-11-09 13:07		
S04-4	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:14		
S04-3	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:14		
S04-2	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:14		
S04-1	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:14		
S03-4	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:14		
S03-3	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		
S03-2	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		
S03-1	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		
S02-4	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		
S02-3	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		
S02-2	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		
S02-1	國立成功大學	儀器校正	實驗場	RIEGL實驗場	已完成	完成偵測	連結	2019-11-08	2019-11-08 11:13		

圖 7-13 點雲萃取轉檔管理頁面

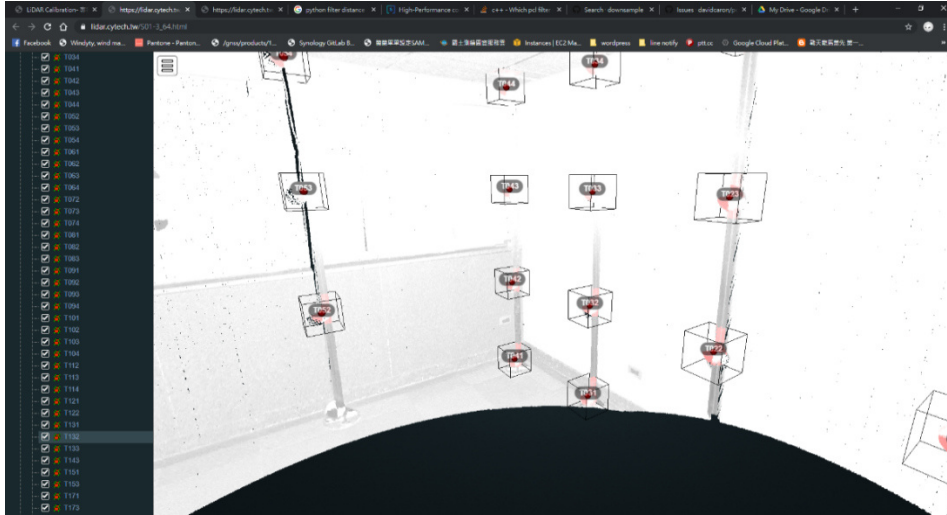


圖 7-14 點雲及校正標查看畫面

7-3 平差計算

點雲完成轉檔，校正標自動辨識完成，取得校正標之坐標資訊後，可使用此介面進行平差計算之設定，此功能分為三步驟，填寫資本資訊、選取掃描專案及聯合平差計算。

資本資訊填寫需填寫內容包括有：平差成果名稱、計算日期及備註(圖7-15)。選取掃描專案功能，頁面(圖7-16)上會呈現所有已轉檔完成之專案名稱，使用者可查看相關資料並進行勾選，此處支援複數選擇專案進行計算，故需特別注意所選的多個專案應為同一儀器，且實驗場及距離場分別採不同平差模式計算，平差之數據方可供該儀器評估校正成果。

Step1. 填寫基本資訊	
平差成果名稱	計算日期
ex: 平差成果名稱	2019/11/07
備註	
<input type="text"/>	

圖 7-15 資本資訊填寫頁面

Step2. 選取掃描專案(可複選)

專案名稱	掃描日期	所屬單位	轉換類型
<input checked="" type="checkbox"/> 144test3	2019-11-05	144test2	實驗場
<input checked="" type="checkbox"/> 144test	2019-11-05	144test	實驗場
<input checked="" type="checkbox"/> test	2019-11-05	test	實驗場
<input type="checkbox"/> ...	2019-11-05		實驗場

圖 7-16 掃描專案選取頁面

專案選擇完成後，於聯合平差計算的步驟，會顯示已選取的專案名稱供使用者確認，若確認無誤，按下平差計算按鈕，即會進行計算(圖7-17)。



圖 7-17 聯合平差計算頁面

7-4 平差計算管理

平差管理提供一介面，供使用者快速查看各平差解算專案的相關資訊、處理狀態及報告查看連結(點選連結可開啟報告進行查看)，在狀態欄位中可得知平差計算狀態，報告點選後為一資料夾形式(圖7-18)，除包含平差報告分亦可供後續放置其相關資料所用。

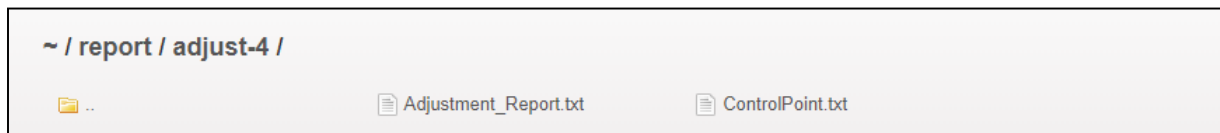


圖 7-18 平差成果資料夾

平差報告分為兩類型，一為實驗場模式，包含 Adjustment_Report.txt(圖7-19)及 ControlPoint.txt(圖7-20)兩個檔案。Adjustment_Report包含平差過程中解算之未知參數(校正標中心於物

空間坐標、測站外方位、校正參數)及其精度，與觀測量之殘差。

T171	201.3642	4994.6045	0.1788			
T172	201.3645	4994.6083	0.8586			
T173	201.3621	4994.6157	1.5710			
T174	201.3718	4994.6139	2.2681			
T181	201.4395	4995.4011	0.1804			
T182	201.4362	4995.4106	0.8493			
T183	201.4279	4995.4194	1.5612			
T184	201.4322	4995.4231	2.2667			
T191	201.4376	4996.3153	0.1789			
T192	201.4344	4996.3175	0.8404			
T193	201.4360	4996.3197	1.5616			
T194	201.4640	4996.3200	2.2628			
T201	201.3882	4997.1792	0.1754			
T202	201.3840	4997.1810	0.8378			
T203	201.3850	4997.1803	1.5606			
T204	201.3900	4997.1820	2.0880			
exterior orientation (EO) elements of scan location						
STA_FileName	X(m)	Y(m)	Z(m)	omega(rad)	phi(rad)	kappa(rad)
S01-1	200.0001	5000.0011	1.7970	0.00000000	0.00000000	-1.61465480
S01-2	200.0014	5000.0001	1.7969	0.00000000	0.00000000	0.03515629
S01-3	200.0022	5000.0013	1.7968	0.00000000	0.00000000	1.55224812
S01-4	198.6372	4996.7973	1.8002	0.00000000	0.00000001	-0.01758903
Calibration Parameter						
Range	a0	0.0037				
Horizontal direction	a0	0.00014181				
Elevation angle	a0	0.00027940				
Number of observation:						
858						
Number of unknown parameter:						
267						
Posteriori variance of unit weight:						
0.00274						
Residuals of observation:						
Point	Range(m)	Horizontal direction(rad)	Elevation angle(rad)			
T012_S01-1	0.0015	-0.00087022	0.00035251			
T013_S01-1	-0.0002	0.00025775	-0.00002242			
T022_S01-1	0.0001	0.00020987	0.00000021			
T023_S01-1	-0.0026	-0.00300599	-0.00114055			
T024_S01-1	-0.0006	0.00080666	0.00022659			
T031_S01-1	-0.0002	0.00044644	0.00012199			
T032_S01-1	-0.0001	0.00065996	-0.00020939			

圖 7-19 實驗場平差成果 Adjustment_Report

ControlPoint則為校正標中心點坐標真值、平差解算值及兩者差異之簡表。

Name_Axis	Truth_Value	Est_Value	Difference
T011_X	-23.80685	-23.80685	0.00000
T011_Y	16.68275	16.68275	0.00000
T011_Z	23.08438	23.08438	0.00000
T012_X	-22.96767	-22.96767	0.00000
T012_Y	16.55043	16.55043	0.00000
T012_Z	-1.74036	-1.74036	0.00000
T013_X	-27.46027	-27.44958	-0.01069
T013_Y	-0.53844	-0.60213	0.06370
T013_Z	-7.32285	-7.35360	0.03074
T014_X	-19.29535	-19.28713	-0.00822
T014_Y	-18.37966	-18.38699	0.00734
T014_Z	14.64872	14.65030	-0.00158
T021_X	-19.41295	-19.43295	0.02000
T021_Y	-22.82903	-22.81990	-0.00913
T021_Z	10.92372	10.91675	0.00697
T022_X	13.42307	13.41875	0.00432
T022_Y	-14.67178	-14.66526	-0.00652
T022_Z	25.46432	25.47005	-0.00573
T023_X	17.11176	17.11663	-0.00487

圖 7-20 實驗場平差成果 ControlPoint

另一類型則為距離場之平差報告，包含Adjustment_Report.txt(圖

7-21)及ControlDistance.txt(圖 7-22)兩個檔案。Adjustment_Report內含平差計算中所用之觀測量、解算之未知參數(距離校正S乘常數、C加乘數)以及觀測量殘差。

```

5m_77m      72.0221  5m_77m-1.las
5m_77m      72.0284  5m_77m-2.las
5m_77m      72.0229  5m_77m-3.las
5m_95m      90.0227  5m_95m-1.las
5m_95m      90.0223  5m_95m-2.las
5m_95m      90.0213  5m_95m-3.las

Adjustment Observation
Target      OBS Value      Truth Value
0m_143m     142.9938        142.9872
0m_23m      23.0359         23.0285
0m_31m      30.9926         30.9890
0m_59m      59.0183         59.0147
0m_5m       5.0012          4.9980
0m_77m      77.0232         77.0187
0m_95m      95.0232         95.0187
5m_23m      18.0333         18.0304
5m_31m      25.9962         25.9900
5m_59m      54.0173         54.0166
5m_77m      72.0244         72.0204
5m_95m      90.0221         90.0205

Correct Parameter
S(ppm)      -5
C(m)        -0.0038
## Dc = Dm + ( S x Dm ) + C
## Dc: Corrected distance measurement
## Dm: Distance measurement
## S: Multiplication constant
## C: Addition constant

Residuals
Target      Residuals
0m_143m     0.0021
0m_23m      0.0035
0m_31m      -0.0004
0m_59m      -0.0004
0m_5m       -0.0006
0m_77m      0.0003
0m_95m      0.0002
5m_23m      -0.0009
5m_31m      0.0023
5m_59m      -0.0033
5m_77m      -0.0001
5m_95m      -0.0026

```

圖 7-21 距離場平差成果 Adjustment_Report

ControlPoint則為校正標中心點距離真值、平差解算值及兩者差異之簡表。

Control Distance			
Target	Truth_Value(m)	Est_Value(m)	Difference(m)
0m_5m	4.9980	4.9974	0.0006
0m_23m	23.0285	23.0320	-0.0035
0m_31m	30.9890	30.9886	0.0004
0m_59m	59.0147	59.0143	0.0004
0m_77m	77.0187	77.0190	-0.0003
0m_95m	95.0187	95.0189	-0.0002
0m_143m	142.9872	142.9893	-0.0021
0m_266m	265.9997	No OBS	No OBS
5m_23m	18.0304	18.0295	0.0009
5m_31m	25.9900	25.9923	-0.0023
5m_59m	54.0166	54.0133	0.0033
5m_77m	72.0204	72.0203	0.0001
5m_95m	90.0205	90.0179	0.0026
5m_143m	137.9891	No OBS	No OBS
5m_266m	261.0015	No OBS	No OBS

圖 7-22 距離場平差成果 ControlDistance

第八章 校正流程先期評估

本案第4章說明地面雷射掃描儀校正項目可歸納包括：(1)查核儀器量測的長度量值(與其量測不確定度)；(2)查核儀器量測的角度量值(與其量測不確定度)；其中，坐標是長度與角度導出量，本案規劃藉由查核儀器量測的坐標定位精度作為地面雷射掃描儀整體的校正項目。距離查核可用測距基線校正場執行校正，角度或坐標的查核則需要室內校正場進行校正實踐。本案發展的校正項目分為2項：

(1)掃描儀測距校正

(2)掃描儀角度與坐標校正

簡述測距校正的原理與流程，測距校正以測距基線校正場執行，基線場可達266m，以9支穩固的基樁，校正方法仿照電子測距儀的校正方法。待校正儀器分別放置於0 m、5m處掃描，將校正標分別輪動於5 m到266 m間各個位置掃描，並換算出距離，校正原理是比對於全測站所測得的距離參考值相減，得到距離的器差，進行統計分析及量測不確定度分析。

角度與坐標的校正方面，採用室內校正場執行，以Chow (2010)的方法進行校正程序。待校正雷射掃描儀分別設置於4個基樁，以強制定心基座裝置安裝儀器，部分的雷射掃描儀可進行定平調整。掃描儀分別在4個基樁進行對校正場範圍內的校正標掃描作業。校正原理是比對於全測站量測的坐標參考值相減，分析南北、東西、高程等三軸向的器差，並進行統計分析及量測不確定度分析。

在校正件方面，以RIEGL、Z+F與FARO等三種廠牌的儀器進行測試，其儀器規格如表8-1，儀器外觀如圖8-1、8-2及8-3。

表 8-1 本案使用之地面雷射掃描儀案例儀器規格

廠牌	Z+F	RIEGL	FARO
型號	IMAGER® 5016	VZ-400	FOCUS X 330
平均掃描速度 (meas./sec)	1,000,000	122,000	976,000
有效距離(m)	365 m	600 m	330 m
角度精密度規格 (°)	垂直 0.004° 水平 0.004°	N/A	N/A
水平視角範圍(°)	360°	360°	360°
垂直視角範圍(°)	320°	100°(+60°/-40°)	300°(+150°/-150°)
測距精密度規格	1mm+10ppm	5mm@100m	2mm@25m



圖 8-1 Z+F IMAGER® 5016 儀器外觀



圖 8-2 RIEGL VZ-400 儀器外觀



圖 8-3 FARO FOCUS X 330 儀器外觀

本案室內校正場坐標參考值是則由全站儀(Leica TS09PLUS 1”)量得，測距基線場的長度參考值則由國土測繪中心實驗室的各基樁距離決定。

8-1 掃描儀測距校正步驟

測距校正步驟內容分3個部份，說明如下：

8-1-1 測距校正參考值量測

測距基線場之參考值，乃以國土測繪中心測量實驗室提供之基線距離為參考值，在基線場依國土測繪中心之儀器標準件正確操作方法，完成儀器設定及準備，量測各基樁頂面強制定心基座間之距離，測距組合14測線如圖8-4。14種組合的測線距離可利用多組測距數據平差，精確定義距離參考值。

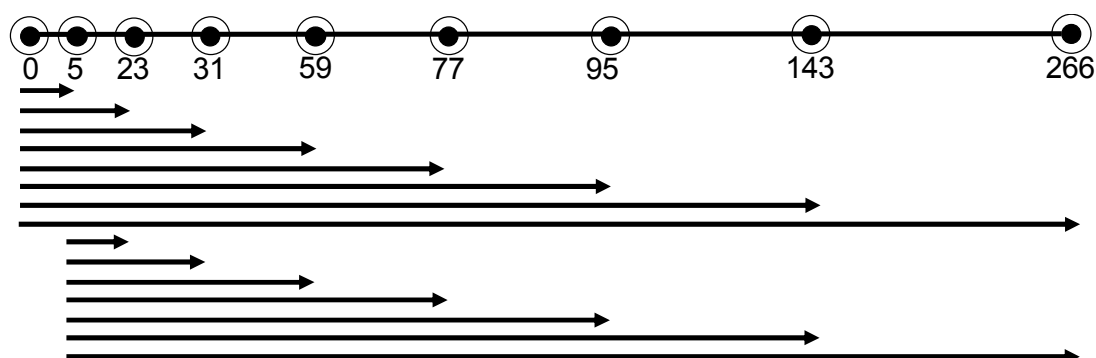


圖 8-4 基線場 9 座基樁，測距組合 14 測線示意圖

8-1-2 測距校正件量測

實作上，於0 m及5 m基樁架設地面雷射掃描儀，並利用求心基座定心定平後，將校正標依序架設於其餘基線樁進行掃描，如圖8-5，經計算求得水平距離，為後續人力成本分析，本案分別測試掃描三次求水平距離平均值與掃描一次所花費時間差異。

掃描密度參數設定為 0.008° 。單一測站掃描時間約需3分鐘，每測站掃描1次包含換站掃描，共需要40分鐘。若每測站掃描3次包含換站掃描，作業需要120分鐘。惟本案實作經驗，若參數設定為 0.008° 此掃描密度不易自動化辨識出基樁143 m與266 m之校正標中心，因此長距離校正標需要更高密度的掃描設定。

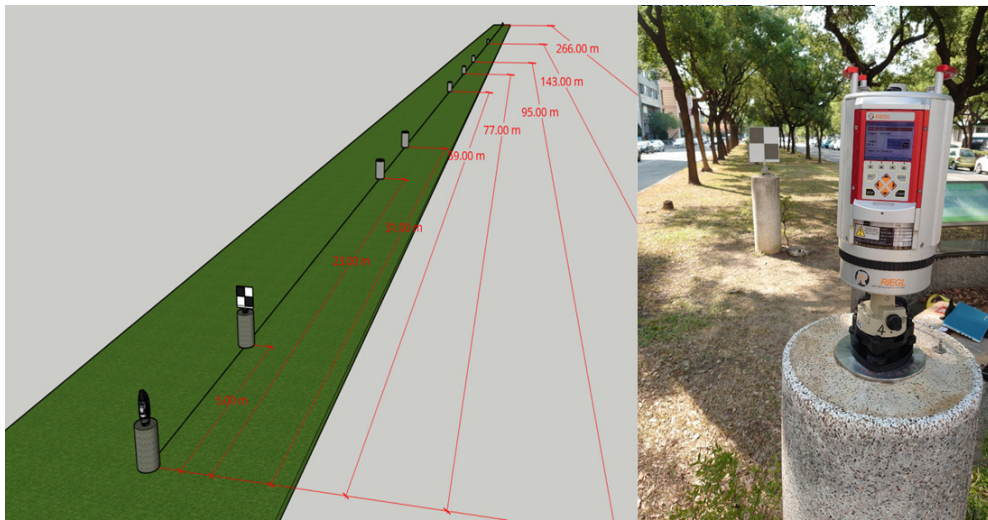
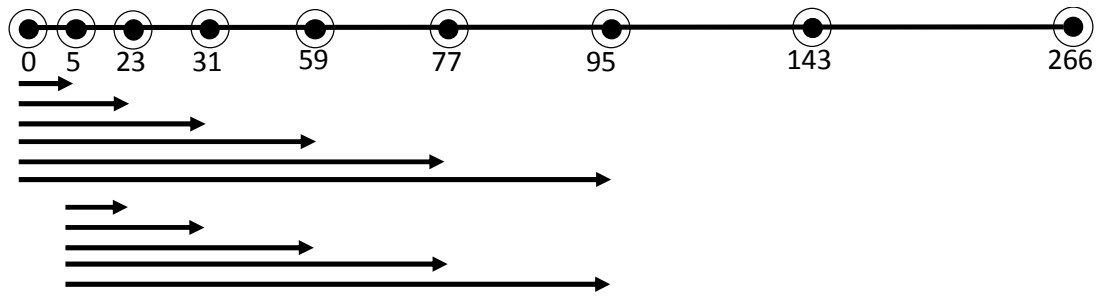
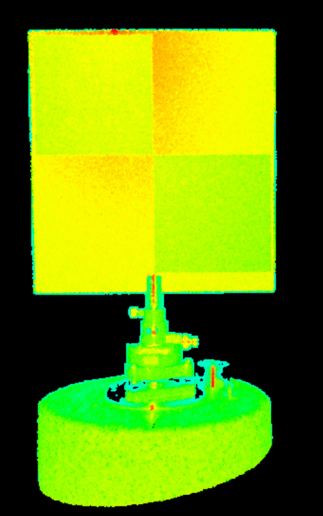
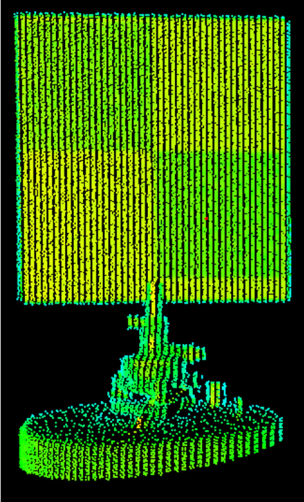
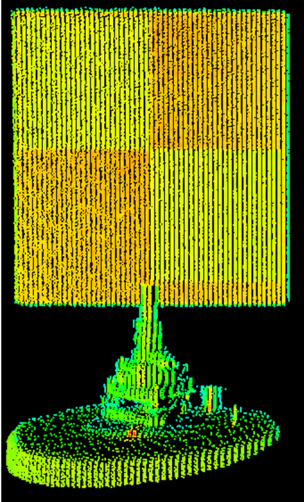
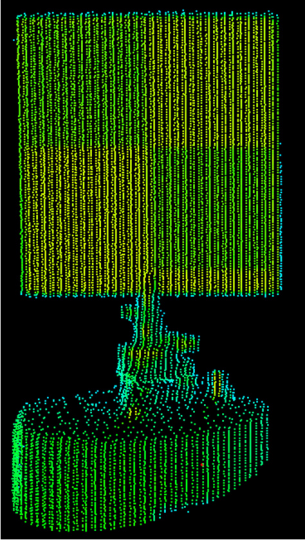
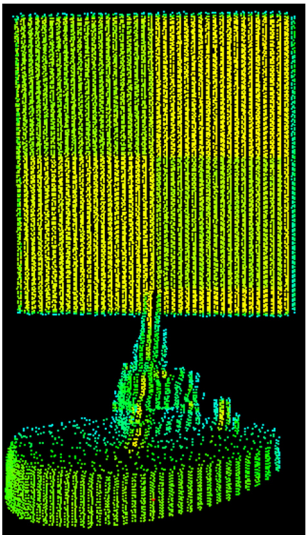
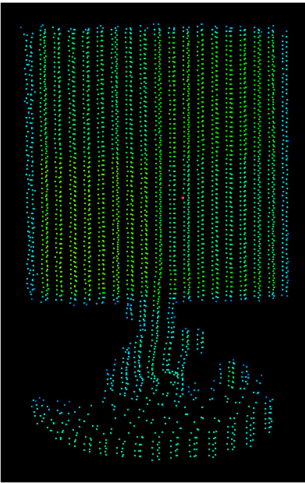
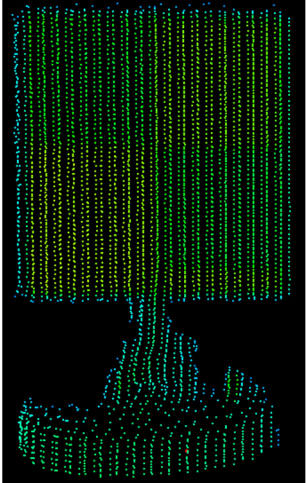
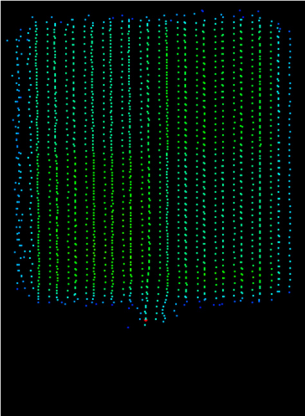
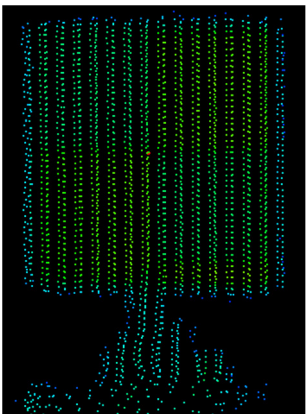
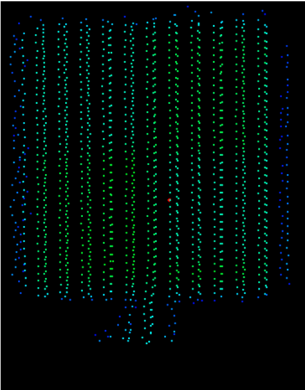
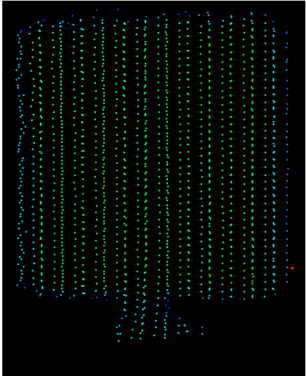
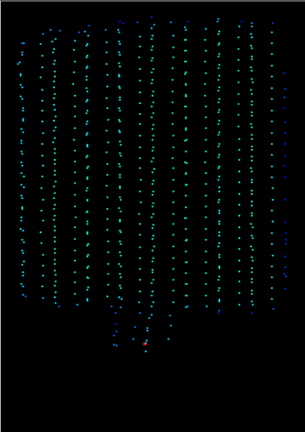
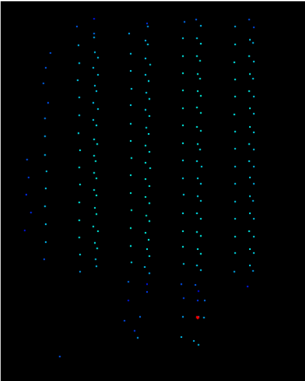


圖 8-5 基線場 9 座基樁，校正件測距組合 11 測線示意與現況圖

表 8-2 測距校正件(RIEGL)量測成果

	架設於 0 m 基樁	架設於 5 m 基樁
5 m 基樁		N/A
23 m 基樁		

	架設於 0 m 基樁	架設於 5 m 基樁
31 m 基樁		
59 m 基樁		
77 m 基樁		

	架設於 0 m 基樁	架設於 5 m 基樁
95 m 基樁		
143 m 基樁		N/A
266 m 基樁		N/A

8-1-3 測距校正數據分析

1. 基線標準距離 D_s

基線場測距單元14條測線，利用最小平方法進行整體平差計

算或是也可參考ISO 17123-4:2012建議計算方法，求得各基樁間以0基樁為參考基面（假設高程為0 m）之基線標準距離 D_s ，做為比較檢核之依據。

2.待校儀器量測距離 D_m

參照電子測距儀校正方式，以地面雷射掃描儀掃描立於基樁上的觀測標計算求得水平距離，並利用比較法的方式，將求得水平距離與基線校正場標準距離進行比較分析，以一元回歸方程式計算儀器的測距常數誤差（加常數）、線性誤差（乘常數）改正參數，並進行統計測試。

$$D_c = D_m + (S \times D_m) + C \quad (8-1)$$

D_c : 測距校正值 D_m : 測距平均(觀測)值 C : 加常數 S : 乘常數

$$C = \frac{\sum D_s^2 \times \sum -\Delta D - \sum D_s \times \sum (D_s \times -\Delta D)}{n \times \sum D_s^2 - (\sum D_s)^2} \quad (8-2)$$

$$S = \frac{n \times \sum (D_s \times -\Delta D) - \sum D_s \times \sum -\Delta D}{n \times \sum D_s^2 - (\sum D_s)^2} \quad (8-3)$$

n : 觀測數量

$$\Delta D = D_m - D_s$$

D_s : 基線標準距離

D_m : 測距平均(觀測)值

3.校正實例說明

以RIEGL為例，匯入掃描後的點雲數據，以本案軟體求得校正標中心後，並以軟體平差得到其坐標值後，得到12個可用的測距值，其中校正件在基線場觀測各基樁間距離得到量測距離 D_m ，與利用平差

計算所得基線標準距離 D_s 相減後，得到校正器差 ΔD ，其量測方程式如下：

$$\Delta D = D_m - D_s \quad (8-4)$$

式 (8-4) 中的 D_s 係使用參考標準件所測得的標準距離，其各誤差源與待校儀器量測距離 D_m ，彼此獨立不相關。將儀器本身的器差如表 8-3。校正成果線性誤差（乘常數）改正量為 -1.089×10^{-5} 與測距常數誤差（加常數）改正量為 -0.0032 mm 。

表 8-3 校正件經測距基線場校正後的器差與剩餘誤差

儀器站(代號)	校正標站 (m)	$D_m - D_s$ 器差(mm)	$D_c - D_s$ 剩餘誤差(mm)
0	5	2.20	-1
0	23	7.39	3.5
0	31	2.57	-1
0	59	3.87	0.3
0	77	4.45	0.3
0	95	4.64	0.3
0	143	6.81	1.8
5	23	2.65	-0.4
5	31	5.33	2
5	59	0.41	-3.6
5	77	1.66	-2.4
5	95	2.23	-1.5

8-2 掃描儀角度與坐標校正步驟

本案以Leica的全測站儀(Leica TS09PLUS 1'')模擬為參考值量測標準件，進行室內場的量測，實際量測現況如圖8-6，測量順序方式如圖8-7所示。



圖 8-6 Leica 的全站儀室內參考值量測現況

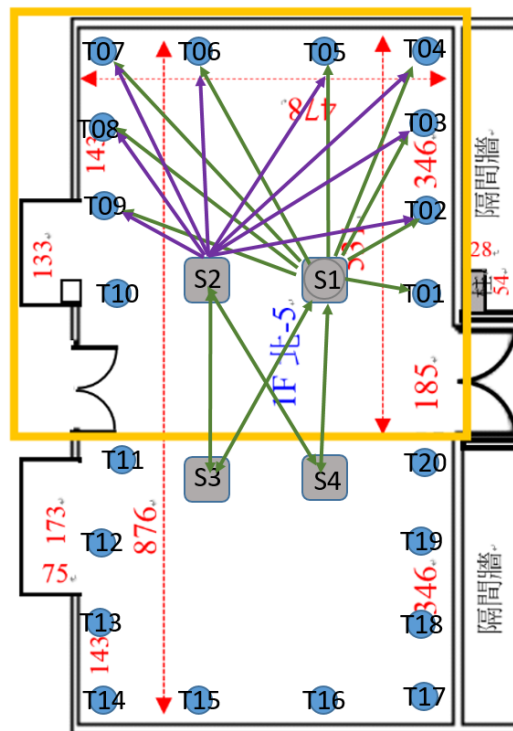


圖 8-7 室內校正場之參考值量測方式示意圖

8-2-1 自訂坐標系與坐標起算值

以自訂坐標系統為坐標系統的定義。首先將儀器置於校正基樁S1位置，坐標起算數據分為平面與高程方向。平面方向最少的起算條件需要一個平面坐標及一個起算方向；高程方向最少的起算條件需要一個起算高程值。

平面方面：(1)一個平面坐標起算點。坐標之起算點設定為 S1 測站，平面坐標起算自訂為坐標 S1(Y, X)為(5000, 200)，單位：公尺。分別代表(南北向,東西向)，亦即一般的(N,E,H)標示法。(2) 一個起算方向，平面起算方向（後視）為坐標 S4 (Y, X, Z)為(NA, 200, NA)，單位：公尺。

高程方面：一個高程起算值，S1 起算高程(Z)為(1.400)，單位：公尺。

8-2-2 坐標校正項目之參考值量測

(1)測量順序

測量順序依照圖8-4的方式，首先觀測站架設在S1，從鋁擠型位置T01開始，測量校正標(編號T011~編號T014)，逆時鐘方向順序，分別量測到位置T20，測量全部的校正標與校正基樁(S3, S4)的坐標。重複此順序，測站換置在S2，測量全部的校正標與校正基樁(S3, S4)的坐標；換站觀測站於S3，測量全部的校正標與校正基樁(S2, S1)的坐標；最後換站觀測站於S4，測量全部的校正標與校正基樁(S2, S1)的坐標。

(2)距離與角度測量

觀測量包括距離、水平角、縱角，其中角度測量需進行正倒鏡觀測取平均值。距離測量需要以無稜鏡方式進行。

(3) 測量作業時間

4個校正基樁架設儀器，重複觀測校正標，包含角度正倒鏡觀測及距離量測，作業時間約需要6小時完成測量。室內標準值以全測站進行坐標點的量測(查核)。一般而言，因為室內校正場環境屬安全很不容易受人為破壞，校正標原理上屬穩定可靠，建議一年量測參考值一次即可，並可應用管制圖數據證明校正標的穩定特性。

(5) 平差計算

校正標之參考值計算，採用最小約制自由網平差方式，平面約制在S1坐標與起算方向值，高程平差則以S1高程為約制起算數據。將此4站的全數角度與距離觀測量，整體平差計算各校正標之(Y, X, Z)3維坐標。

8-2-3 坐標校正項目，量測值作業步驟

(1) 掃描作業

本案將地面雷射掃描儀依序架設於室內校正場內校正基樁(S1~S4)上，利用求心基座定心定平後，進行全角度全區域掃描作業，完成架設S1校正基樁掃描作業後，依序進行S2, S3, 及S4，重複作業，並計算成果。

(2) 掃描作業案例

室內校正場利用RIEGL VZ-400地面雷射掃描儀掃描成果如圖8-8，單一測站掃描時間約3分鐘，4測站(S1~S4)所花費時間(含搬站)為16分鐘，與16測站(S1~S4每測站變換初始水平角度掃描4次)。本案今年規劃掃描4個測站，每個測站最多掃4個不同起始角度的測回，總共是16個測回。學理上是愈多測回所推估的校正參數愈可靠，但實務上是否需要這麼多測回，還需要評估，這評估會納入未來工作

，最後會提出未來校正作業的建議案。

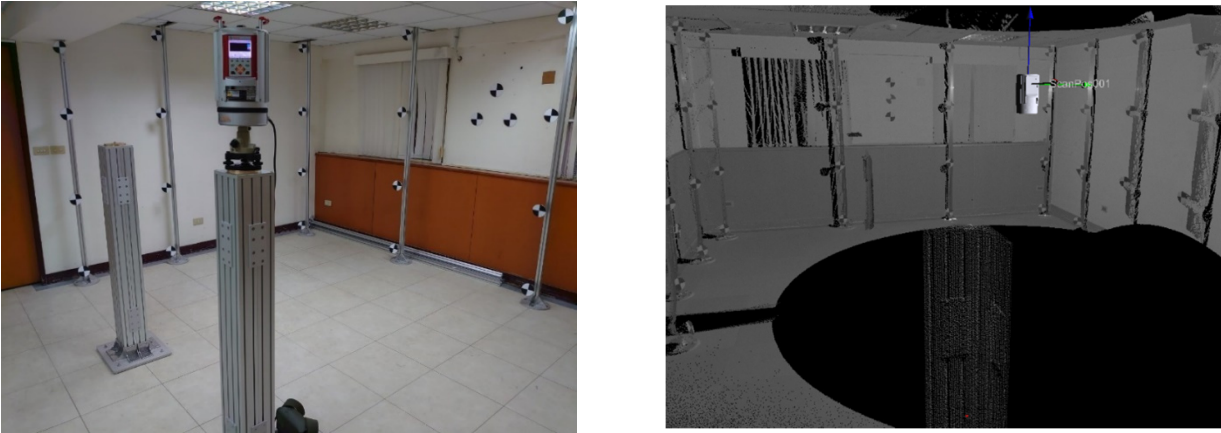


圖 8-8 RIEGL VZ-400 掃描作業案例

本案室內校正場亦利用Z+F IMAGER 5016地面雷射掃描儀掃描儀進行量測。圖8-9為Z+F IMAGER 5016三維雷射掃描儀在室內校正場的作業情形。

由於Z+F IMAGER 5016其縱向為360度全域式(Dome)掃描，在雲點點距為6.3 mm (@10 m)的情形下，水平方向掃描180度即可完成整個室內的掃描，本案建議全域式(Dome)掃描儀器，在4個校正樁分別進行360度水平方向的掃描，此案例每站掃描時間約6分鐘。

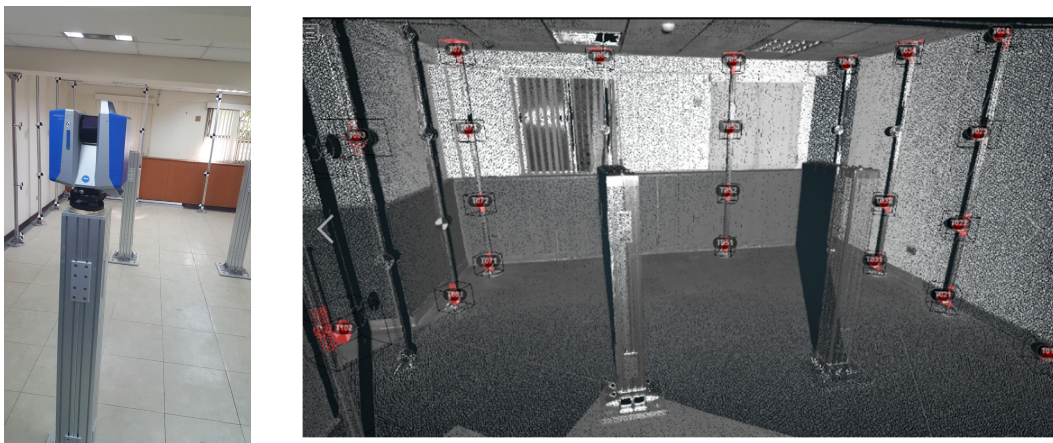


圖 8-9 Z+F IMAGER 5016 掃描作業案例

(3) 掃描密度參數

掃描作業參數當中，點雲密度是重要設定，為後續能夠自動化辨識校正標的中心，校正標點雲之間的點間距需小於15 mm。以實際作業例將掃描密度設定為 0.05° ，計算點間距計算例：距離10 m處，其點雲的點間距約為8 mm。RIEGL VZ-400掃描作業案例，於距離2.5 m處之校正標，點雲間距實際量測值為2 mm（圖8-10）；距離5.5m處之校正標，點雲間距實際量測值為5 mm（圖8-11），圖8-10顯示，點雲間距小者，點雲密度高(左圖)，圖8-11顯示，點雲間距大者，點雲密度低(左圖)，經本案開發軟體測試，全數的校正標，皆可順利自動辨識校正標中心坐標。

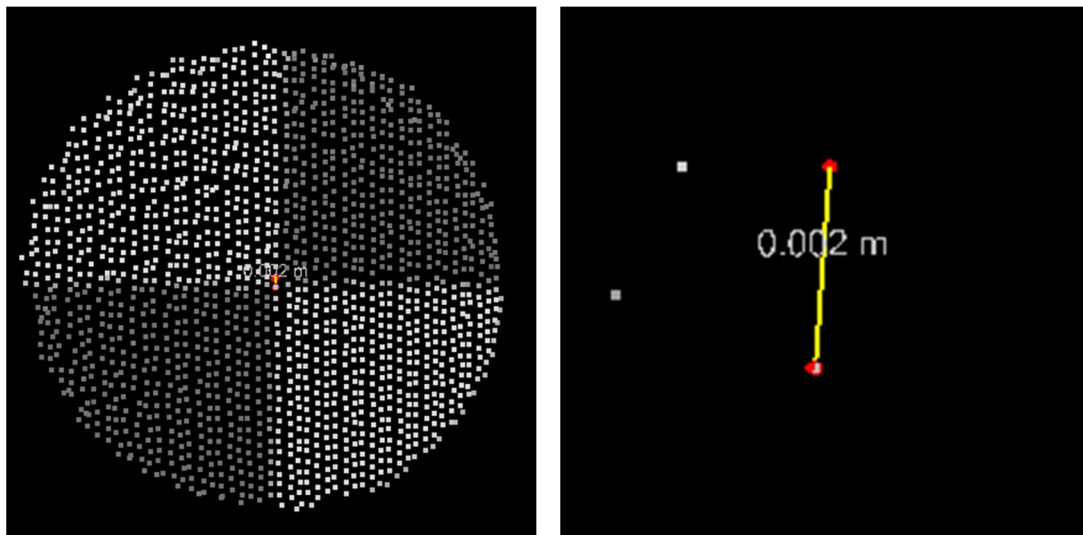


圖 8-10 校正標點雲之點間距，測距 2.5m 處，間距約 2 mm

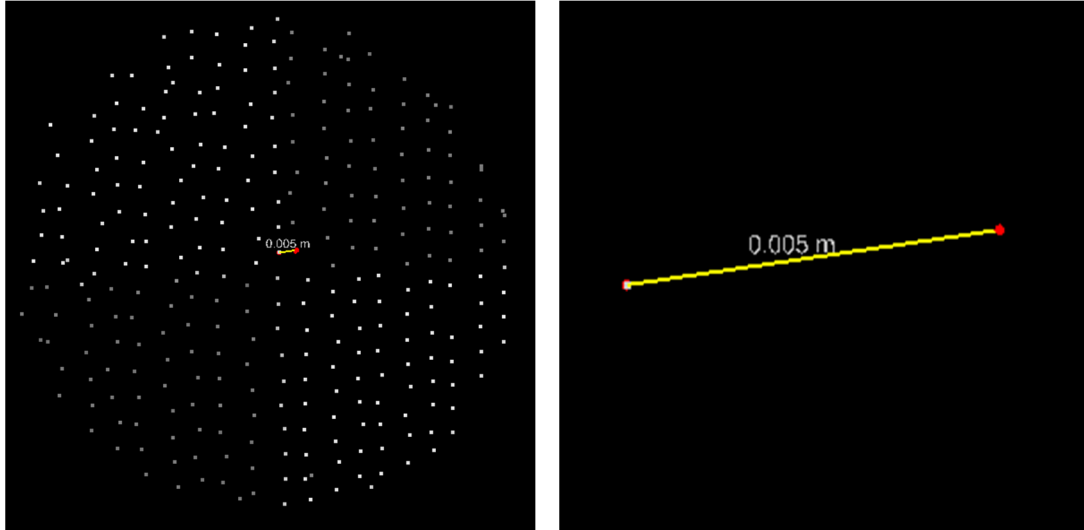


圖 8-11 校正標點雲之點間距，測距 5m 處，間距約 5 mm

8-2-4 角度與坐標校正數據分析

(1) 校正方法原理

本案參考Chow et al., (2010)建置室內校正場以評估地面雷射掃描儀器差以及測距、角度方面的改正參數。於室內校正場全區布設雷射掃描反射校正標，再利用校正實驗室工作標準件（如全測站儀器）量測校正標物空間坐標 (X_{ri}, Y_{ri}, Z_{ri}) ，統整以 Ref_i 表示），再以待校件（地面雷射掃描儀）掃描校正標計算得到物空間量測值 (X_i, Y_i, Z_i) ，統整以 Mea_i 表示），經由比對同一校正標兩者差值計算器差 $(Diff_i)$ ，詳細計算敘述如(8-5)式。

$$Diff_i = Mea_i - Ref_i \quad (8-5)$$

以待校件地面雷射掃描儀掃描校正標，可得到校正標儀器坐標系坐標 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 之點雲坐標，儀器坐標系與物空間坐標系 (X_i, Y_i, Z_i) 之關係為(8-6)式。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} &= R_3(\kappa_j)R_2(\phi_j)R_1(\omega_j) \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} \\ &= M(\omega_j, \phi_j, \kappa_j) \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (8-6) \end{aligned}$$

(X_{sj}, Y_{sj}, Z_{sj}) : 測站位置

$(\omega_j, \phi_j, \kappa_j)$: 測站姿態角

(X_i, Y_i, Z_i) : 校正標物空間坐標

(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) : 校正標儀器坐標系坐標

一般地面雷射掃描儀量測值可分解為測距觀測量(ρ_{ij})與角度觀測量(θ_{ij} 、 α_{ij})組成，故將(8-6)式帶入(8-7)、(8-8)及(8-9)式，形成地面雷射掃描儀觀測方程式。

$$\rho_{ij} + \varepsilon_{\rho_{ij}} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho_{ij} \quad (8-7)$$

$$\theta_{ij} + \varepsilon_{\theta_{ij}} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}} \right) + \Delta\theta_{ij} \quad (8-8)$$

$$\alpha_{ij} + \varepsilon_{\alpha_{ij}} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} \right) + \Delta\alpha_{ij} \quad (8-9)$$

$\Delta\rho_{ij}$ 、 $\Delta\theta_{ij}$ 、 $\Delta\alpha_{ij}$: 系統誤差改正參數

另由於大部分地面雷射掃描儀具有雙軸補償裝置可方便定平，因此在此平差模型中，可再加入兩約制條件如(8-10)、(8-11)式。

$$0 + \varepsilon_{\omega_j} = \omega_j \quad (8-10)$$

$$0 + \varepsilon_{\phi_j} = \phi_j \quad (8-11)$$

最終利用大量校正標量測值組成平差模型，同時解算坐標系統之轉換參數與系統誤差改正參數，計算得到器差及其他參數即可出具校正報告。

(2)校正實例說明

以RIEGL作業案例說明，將4站掃描成果，進行坐標轉換與整體平差，可獲得80個校正標的物空間坐標系坐標，進一步分別與參考值相比對，得到儀器量測的器差數值，表8-4乃以報表中部分數據展示，其中舉例以T021~T044的部分校正成果為例，列舉各軸向的器差如表8-4。關於校正參數初步分析的成果為：距離系統誤差值 $\Delta\rho$ ：0.4 mm；水平角 $\Delta\theta$ ：5''；縱角 $\Delta\alpha$ ：1.25''。

表 8-4 以 RIEGL 量到的部分校正標為例，列舉各軸向的器差

點名	Y 器差(mm)	X 器差(mm)	Z 器差(mm)
T021	2.21	0.46	-1.06
T022	0.02	0.61	-0.43
T023	4.65	0.69	-0.59
T024	-0.18	-0.32	-0.61
T031	-0.17	-0.26	0.51
T032	0.07	-0.38	-0.24
T033	-1.38	-0.87	-0.52
T034	0.18	-0.55	-0.79
T041	-0.95	-0.93	1.08
T042	-0.84	-0.46	0.35
T043	-1.38	-1.51	0.43
T044	-1.91	-1.51	0.07

8-3 校正案例精度評估

8-3-1 坐標校正項目之參考值分析

以全測站儀器為標準件量測校正標之坐標，在4個校正基樁重複進行測量，在平面方向的分析，由全數觀測進行整體平差，水平角度觀測個數306，距離觀測個數306，平差自由度452，平均多於觀測數為0.74，平差單位權0.928。關於高程方向，觀測自由度為221。

為了進行重複觀測的精度評估，分析單站觀測彼此間的再現性量測精度。在4個校正基樁重複測量，單個測站觀測的網型非常近似，可以單站平差獲得80個校正標的空間坐標成果，將4站全數觀測整體平差的坐標成果與4次單站測量成果相比對，可計算320組(Y, X, Z)的較差量，由較差量進行統計分析，統計量如表8-5所示。觀察表8-5，就理論而言，整體平差的計算，實際上成果接近於4次單站掃描計算並平均4次成果的結果，因此表8-5較差量平均值欄位內容，會接近於零。其中，較差量的標準差數值，其統計意義是校正標重複4次測量的再現性量測精度，為平面0.6 mm，高程0.2 mm。

表 8-5 參考值重複觀測精度評估

較差量	較差量 平均值	較差量 標準差	較差量 絕對值平均 (MAE)	較差量 最小值	較差量 最大值
dY (mm)	-9.0×10^{-12}	0.6	0.5	-1.8	1.8
dX (mm)	-4.7×10^{-13}	0.6	0.5	-1.8	1.8
dZ (mm)	-2.0×10^{-15}	0.2	0.1	-0.8	0.6

8-3-2 測距校正項目之校正件量測值分析案例

本節分析測距校正項目之器差值，進行統計分析，並比較單次掃描作業成果與重複3次掃描成果之差異。

由本案開發軟體自動化量測校正標中心位置後，計算出各測段距離之量測值，進一步與參考值比對，得到儀器校正的器差，單次掃描校正器差的統計量如表8-6。經加常數改正量 C ，及尺度比例改正量 S ，改正後量測值與參考值比對列於表8-6第3列。

表8-7是掃描3次的作業成果，取量測值的平均值與參考值比對。比較表8-6與表8-7，單次掃描與3次的掃描結果，以標準差統計量為例，並沒有明顯差異，若考量作業時效，未來規劃將建議掃描單1次即可。

表 8-6 單次掃描，測距校正之器差與剩餘誤差統計結果

差量	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
$D_m - D_s$ 器差(mm) ΔD (mm)	3.7	2.1	3.7	0.4	7.4
$D_c - D_s$ 剩餘誤差(mm) $\Delta D'$ (mm)(改正後)	-0.1	2.0	1.5	-3.6	3.5

表 8-7 掃描 3 次取平均值，測距校正之器差與剩餘誤差統計結果

差量	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
$D_m - D_s$ 器差(mm) ΔD (mm)	4.0	1.9	4.0	0.7	7.4
$D_c - D_s$ 剩餘誤差(mm) $\Delta D'$ (mm)(改正後)	-0.2	1.9	1.4	-3.6	3.5

8-3-3 坐標校正項目之校正件量測值分析案例

本節分析坐標校正項目之器差值，進行統計分析，於室內校正場內校正基樁（S1~S4）上掃描，將所有點雲資料匯入本案軟體進行計算，平差後得到80個校正標的量測值，進一步與參考值相比對，得到儀器校正的器差。將器差進行統計量分析如表8-8，顯示RIEGL儀器校正成果，觀察RIEGL器差結果，進行標準差統計量，平面達2.3 mm，高程達1.2 mm。表8-9顯示FARO儀器校正案例，器差的標準差統計量，平面達0.5 mm，高程達1.5 mm。表8-10顯示Z+F 儀器校正案例，器差的標準差統計量，平面達0.6 mm，高程達0.3 mm。

表 8-8 RIEGL 之各軸向器差的統計量

器差	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	0.05	2.3	1.4	-5.2	11.4
dX (mm)	-0.01	2.3	1.4	-4.5	11.0
dZ (mm)	0.002	1.2	0.8	-3.0	3.8

表 8-9 FARO 之各軸向器差的統計量

器差	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	0.37	0.5	0.4	-0.4	1.6
dX (mm)	-0.13	0.5	0.3	-1.7	1.7
dZ (mm)	0.0004	1.5	0.4	-5.6	5.3

表 8-10 Z+F 之各軸向器差的統計量

器差	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	0.01	0.6	0.4	-1.9	2.5
dX (mm)	-0.01	0.5	0.3	-1.4	1.6
dZ (mm)	-0.01	0.3	0.4	-0.9	1.2

8-3-4 校正件量測值，人工作業量測值分析案例

雷射掃描儀以人工作業量測方式，量測校正標中心點坐標，需要先進行坐標轉換，將儀器坐標系，藉由參考值坐標，轉換成空間直角坐標系。考量各基站皆可掃描到的最佳校正標位置，選用T041、T044、T071、T074、T141、T144、T171、T174等8個校正標中心點的參考值做為轉換用坐標。

人工量測校正標中心點所採用軟體為Z+F產品，LaserControl Scout 軟體，版次V9.1.0。作業方式為手工以滑鼠點選近似的校正標中心點位置，軟體輔助定位校正標中心，由交談式確認輔助量測中心點的成果。人工量測單個校正標所需時間在1分鐘內完成，80個校正標可在1小時內完成量測。

原始掃描數據，是架站在校正基樁(S1~S4)重複4次掃描作業，為了後續能進一步精度評估，人工量測案例也採取分次量測此4個站掃描數據，將4個站量測到的校正標坐標值(空間直角坐標系)平均後，進一步與與參考值相比對，得到儀器校正的器差值。

人工量測案例有RIEGL儀器、FARO儀器及Z+F儀器，以器差值進行統計分析後，將每個方向器差量的統計量列於表8-11、8-12及8-13。觀察器差值的標準差統計量，RIEGL掃描量測標準差平面約2.7 mm，高程為1.6 mm。FARO掃描量測標準差平面約1.1 mm，高程為0.8 mm。Z+F儀器量測標準差平面約0.5 mm，高程為0.1 mm

。

表 8-11 RIEGL 之器差值的統計量(人工量測法)

器差	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	-0.06	2.9	2.6	-5.4	5.3
dX (mm)	-0.05	2.5	2.2	-4.7	5.8
dZ (mm)	-0.77	1.6	1.5	-4.9	2.9

表 8-12 FARO 之器差值的統計量(人工量測法)

器差	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	0.06	1.2	0.9	-3.7	4.2
dX (mm)	0.18	0.8	0.7	-1.5	1.8
dZ (mm)	0.45	0.8	0.8	-1.4	2.2

表 8-13 Z+F 之器差值的統計量(人工量測法)

器差	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	-0.05	0.6	0.5	-1.7	1.1
dX (mm)	-0.02	0.4	0.3	-1.1	0.9
dZ (mm)	0.11	0.1	0.1	-0.2	0.4

8-3-5 人工量測校正標中心點與自動化分析之比較

為了確認本案發展軟體，自動化分析認標結果與人工量測校正標中心點成果相近，將此兩種量測方式得到的坐標中心位置進行相減，進行統計分析後，將每個方向較差值的統計量列於表8-14~表8-16，以Z+F為例，由其平均值可看出與自動化分析之偏差量皆

< 0.09 mm，而精度 < 0.7 mm，亦即在去除參考值所造成的影響後，結果相近。

表 8-14 RIEGL 之人工量測與自動化分析之差量統計表

較差量	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	-0.08	3.3	2.6	-11.4	8.2
dX (mm)	0.06	3.8	2.9	-13.2	8.2
dZ (mm)	0.76	1.9	1.7	-3.3	6.5

表 8-15 FARO 之人工量測與自動化分析之差量統計表

較差量	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	0.33	1.33	0.8	-4.2	4.4
dX (mm)	-0.37	1.0	1.1	-2.8	1.2
dZ (mm)	0.82	0.7	0.8	-5.7	4.6

表 8-16 Z+F 之人工量測與自動化分析之差量統計表

較差量	平均值	標準差	絕對值平均 (MAE)	最小值	最大值
dY (mm)	0.05	0.7	0.5	-2.2	1.9
dX (mm)	-0.03	0.5	0.4	-1.2	1.8
dZ (mm)	-0.09	0.3	0.3	-1.1	0.8

第九章 TAF 校正認證先期評估

9-1 實驗室認證整體流程

由於實驗室認證整體流程可分為先期評估與持續辦理事項，將其內容列之如圖9-1，首要工作是建立量測系統技術，包括量測方法、量測技術確認所需之相關實驗設計、量測所需工作標準件確認、標準件校正追溯管道確認、建立校正程序、量測誤差源分析、量測不確定度評估、量測品保設計、最後進行實作校正及評鑑前模擬活動，認證活動所需期程如圖9-1所示。

試驗室認證工作	先期評估	持續辦理事項
1. 量測系統建立技術		
2. 不確定度分析		
3. 建立校正程序		
4. 校正技術追溯性確認		
5. 量測品保設計		
6. 量測稽核評估		
7. 實作校正		
8. 實驗室品質系統調整		
9. 內稽與模擬評鑑		

圖 9-1 實驗室認證整體流程

9-2 不確定度源先期評估

本案回顧文獻關於國內外探討雷射掃描儀之儀器誤差源的分析方式，依TAF「校正領域量測不確定度評估指引」(TAF-CNLA-

G16) 建議評估方法，茲將來源分為A類與B類描述如後，評估誤差源的不確定度分量。以下就量測不確定度源分為探討參考值與量測值不確定度源分量分別說明。

1. 測距基線校正場參考值不確定度源評估

測距參考值係由國土測繪中心，測量校正實驗室電子測距儀校正系統執行維持其參考值量測活動，參考值不確定度源同理於測量校正實驗室電子測距儀校正系統的量測能量。

國土測繪中心使用Leica TM30 為標準件進行測距基線標準距離測量，並以溫度計及壓力計施測環境之溫度及壓力以進行觀測值之大氣影響修正，分析基線場不確定度來源包括(1)參考值重複觀測誤差(A類別)；(2)校正追溯傳遞誤差(B類別)；(3)大氣折射率影響測距誤差(B類別)；(4)儀器定平誤差(B類別)；(5) 照準偏心回復訊號誤差(B類別)；儀器讀數的解析度(B類別)。

- (1)基線場距離重複觀測：屬 A 類評估，以多次基線場全組合觀測嚴密平差求得，為常態分布。
- (2)來自一級追溯值：屬 B 類評估，基線場標準件係追溯自國家標準基線場，故該基線場之不確定度會傳播至測距基線場。
- (3)大氣折射率影響測距誤差（溫、溼度、氣壓）：標準距離測定時均已將環境條件輸入儀器自動修正，此項估計係環境量測時之誤差造成標準距離量測之不確定性，屬 B 類評估。
- (4)儀器定平誤差：屬 B 類評估，基線場各基樁上之固定基座於安置時，均使用水準器定平，按一般對心基座之定平精度進行評估。
- (5)照準偏心回復訊號：屬 B 類評估，即儀器測量時未對準稜鏡中心時的不確定性，正常情況下，觀測時均會瞄準稜鏡中心，進行評估。
- (6)儀器讀數的解析度：屬 B 類評估，為儀器讀數的解析度。

2. 測距基線校正場校正件量測值不確定度源評估

測距量測值係由待校之三維雷射掃描儀，依照多測線法進行基樁距離的多次量測，分析三維雷射掃描儀量測基線場基樁距離之不確定度來源包括(1) 校正件之距離重複觀測誤差(A類別)；(2) 大氣折射率影響測距誤差(B類別)；(3)儀器定平誤差(B類別)；(4) 認標心誤差(B類別)；(5)儀器測距規格(B類別)。

- (1)校正件之距離重複觀測：屬 A 類評估，以多次基線場全組合觀測嚴密平差求得，為常態分布。
- (2)大氣折射率影響測距誤差（溫、溼度、氣壓）：距離測定時均已將環境條件輸入儀器自動修正，此項估計係環境量測時之誤差造成標準距離量測之不確定性，屬 B 類評估。
- (3)儀器定平誤差：屬 B 類評估，基線場各基樁上之固定基座於安置時，均使用水準器定平，按一般對心基座之定平精度進行評估。
- (4)認標心誤差：屬 B 類評估，須評估儀器認校正標中心時的不確定性。
- (5)儀器測距規格：屬 B 類評估，由待校儀器測距精密度規格 $a + b \times L$ 進行評估。

3. 室內校正場參考值不確定度源評估

角度參考值係由國土測繪中心，測量校正實驗室全測站儀執行維持其參考值量測活動，參考值不確定度源包括：(1)重複觀測：屬 A 類評估，以多次觀測數據求得，為常態分布。全測站儀量測完成後，計算4次量測坐標之平均值，將每次測量的坐標值與平均

值與相減可得到殘差量(residues)，最後計算4測站得到80個坐標殘餘量的總平均值與標準差，得到A類的不確定度。(2) 來自一級追溯值：屬B類評估，標準件係追溯自國家標準實驗室，故該不確定度分量會傳播至參考值。(3) 儀器水平角精密度規格，屬B類評估；(4) 儀器縱角精密度規格，屬B類評估；(5) 儀器角度讀數解析度，屬B類評估。

4. 室內校正場量測值不確定度源評估

坐標量測值係由待校之三維雷射掃描儀，依照4個測站進行多次掃描量測，分析三維雷射掃描儀量測之不確定度來源包括(1) 重複4站掃描觀測：屬A類評估，以多次觀測數據求得，為常態分布；(2) 儀器水平角精密度規格，屬B類評估；(3) 儀器縱角精密度規格，屬B類評估；(4) 認標心誤差：屬B類評估，須評估儀器認校正標中心時的不確定性。(5) 儀器量測精密度規格，屬B類評估。

9-3 能力試驗活動先期規劃

在能力試驗活動規劃方面，參考TAF-CNLA-R05關於能力試驗活動的要求，以量測稽核為主，將以工研院量測中心為參考實驗室，國土測繪中心為參與實驗室，量測數據比對方式的規劃如后。

援用校正追溯圖原理說明量測數據比對能達成校正追溯的要求，如圖9-2所示。校正標地面雷射掃描儀量測結果(L_m)經校正活動，追溯至國土測繪中心校正實驗室參考值，國土測繪中心校正實驗室(參與實驗室)量測基樁距離量測值結果(L_r)，經量測稽核活動，追溯參考實驗室標準件，赴校正場以遊校量測，量測基樁之標準件量測結果(L_x)，最終追溯到國家度量衡標準實驗室國際標準。

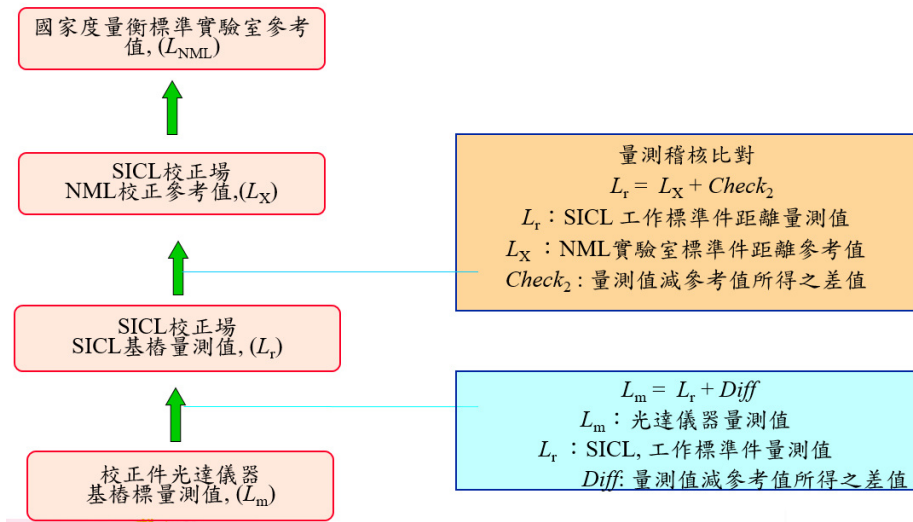


圖 9-2 量測稽核追溯原理圖

第十章 結論與建議

10-1 結論

1. 關於三維雷射掃描校正方法分析，本案建議的校正方法近似 ASME (2006) 的校正方式，兼具長距離與角度(或坐標)的查核，並與標準件進行比對式校正。為了能分析儀器系統性誤差源，本案援用 Chow (2010) 的演算法，平差數據並求定儀器系統性誤差參數，求定出的誤差參數，可進一步提供儀器誤差補償的效益。
2. 關於距離校正，本案以現有電子測距儀校正基線場，完成可校正長距離的雷射掃描儀之距離校正，經校正實作案例評估後，此既有電子測距儀校正場適用於雷射掃描儀之距離校正。
3. 關於坐標校正比對，本案於國土測繪中心黎明辦公區莊敬樓(1樓)，完成一座室內校正場，室內校正場裝置有固定式儀器基樁，可提供全測站儀器及雷射掃描儀架設觀測，本案設計完成雷射掃描儀專用校正標，室內校正場設置 80 個校正標，經校正實作案例評估後，此校正場與校正裝置能執行校正活動。
4. 關於雷射掃描儀點雲數據分析量測，本年度軟體已完成自動化分析點雲數據、自動化量測校正標中心點坐標、整體數據平差及求定常數項系統性誤差改正參數，並可經由計算得到器差及其他參數，預計次年度於平差模型內加入線性、非線性系統性誤差改正參數解算，以達評估該地面雷射掃描儀儀器系統性誤差源之效。
5. 校正實例分析，於室內校正場執行校正，以軟體自動化量測，雷射掃描儀量測值經比對於參考值，器差值的標準差統計量，不同儀器案例，平面器差與高程器差約在 1~2 mm。

10-2 建議

1. 實驗室能量建置步驟，後續辦理工作首要確認實驗室建置能量所需資源，包括人員資格確認與訓練、標準件規格與校正追溯確認、實驗室環境等有關資源準備事項，首要完成評估，以利能量建立時效之掌握。
2. 關於後續工作項目建議，包括：(1)校正計算分析程式持續維護、(2)進行實驗室數據量測及校正實作演練、(3)建立校正程序、(4)評估校正系統量測不確定度、(5)校正領域認證前作業準備等實作工作。

參考文獻

- ASME 2006. B89.4.19-2006 Standard – Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems
- Bae, K.H.; Lichti, D., 2007. On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. In Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Espoo, Finland, September 12–14, [CD-ROM].
- Chow, J., Lichti, D., and Teskey, W., 2010. Self-calibration of the Trimble (Mensi) GS200 terrestrial laser scanner. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (Part 5), [On CD-ROM]
- Filin, S. 2003. Recovery of systematic biases in laser altimetry data using natural surfaces. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 69, 1235-1242.
- Glennie, C. and Lichti, D., 2010. Static Calibration and Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for High Accuracy Mobile Scanning. *Remote Sensing*, 2, 1610-1624.
- Gottwald, R., 2008. Field procedures for testing terrestrial laser scanners: A contribution to a future ISO standard. in Proc. FIG Working Week, Stockholm, Sweden, p. 14.
- ISO Guide 99:1993 - International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM).
- ISO/TS 19159-2: – Part 2: Lidar.
- ISO 17123-9 Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 9: Terrestrial laser scanners, 2018
- Lichti, D. et al., 2000. Calibration and testing of a terrestrial scanner. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B5, pp. 485 - 492
- Lichti, D. et al., 2007, Self Calibration and Analysis of the Surphaser 25HS 3D Scanner. FIG Working Week, Hong Kong SAR, TS 8C
- Lichti, D., 2007. Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*, 61, 307-324.
- Lichti, D., Lampard, J. 2008. Reflectorless total station self-calibration. *Survey Review*, 40, 244- 259.
- Muralikrishnan B., et al., 2008. Performance Evaluation of Laser Trackers Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS '08) pp. 149-155.
- Muralikrishnan B., et al., 2015 “Volumetric Performance Evaluation of a Laser Scanner Based on Geometric Error Model”, *Precision Engineering* 40:139–150.
- Pareja, T. et al., 2013. Terrestrial Laser Scanner (TLS) Equipment Calibration. The

Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC.

RIEGL網頁 <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/48/>

Schenk, T., 2001. Modeling and Recovering Systematic Errors in Airborne Laser Scanners. In: K. Torlegard (Editor), OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, pp. 40-48.

Skaloud, J., Lichti, D., 2006. Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing, 61, 47-59.

South Survey 網頁 <https://www.surveyorsequipment.co.uk/rs1-x90m.html>

Teledyne Optech 網頁 <http://www.teledyneoptech.com/en/products/static-3d-survey/polaris/>

Trimble 網頁 <https://buildings.trimble.com/field-technologies/scanning/trimble-tx-series>

賴志凱, “地面雷射掃描儀的精度分析與檢定” 碩士論文, 國立成功大學測量與空間資訊所, 2004.

曾義星、林見福、蔡漢龍、陳鶴欽、曾耀賢” 地面光達系統誤差分析及校正” , 地籍測量, 第廿七卷第 1 期, 第 39-50 頁, 民國 97 年 3 月

