

地面雷射掃描儀系統校正：結合室外標準基線場與室內 校正場

林烜生^{1*} 曾義星² 彭森祥³ 劉子安⁴ 蔡季欣⁵ 鄒慶敏⁶

論文收件日期：109.4.30

論文修改日期：109.5.27

論文接受日期：109.6.01

摘要

地面雷射掃描儀(Terrestrial Laser Scanner),又稱為地面光達(Terrestrial LiDAR),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,可用於建築物、隧道工程、森林調查、土木工程等測量工作。地面雷射掃描儀會在瞬間產生大量點雲資料,每秒可達上萬點甚至數十萬點以上,但在龐大的點雲資料中可能含有許多不同種類誤差,誤差的來源可能與儀器本身量測能力、儀器品質不良(未校正)、環境因素影響、人為操作不當等等原因有關。近年來,許多先進發表了有關地面雷射掃描儀使用不同方法進行校正的一系列論文,討論了地面雷射掃描儀可能的誤差來源和相關改正參數,本研究提出了將自率定法結合個別組件校正的混合模式能更準確地模擬地面雷射掃描儀系統性誤差的理論,並以自率定法為基準提出了結合室外標準基線場和室內校正場的校正方法來進行測試,該方法克服自率定法受室內空間大小限制的缺陷,將地面雷射掃描儀的測距方面在全長 266 m 的標準基線場獨立校正,再將校正成果乘常數-103 ppm 與加常數 1.4 mm 帶入自率定法中作為測距方面改正參數使用,將器差絕對值平均縮小為 3.9 mm。混合模式初步測試結果,器差的絕對值平均與均方根值都呈現變小趨勢,可以初步判定應用本研究提出之混合模式方法來對地面雷射掃描儀進行校正與系統性誤差分析,的確可以為地面雷射掃描儀校正帶來正面的影響,通過計算結果可協助使用者更謹慎地了解儀器目前量測品質,使用者可依計算結果評估是否該儀器需回原廠檢校。

關鍵詞：地面雷射掃描儀、地面光達、系統性誤差、率定

^{1*} 碩士生兼任助理,國立成功大學測量及空間資訊學系,E-mail: hsuansheng0110@gmail.com。

² 教授,國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 研究員,工業技術研究院。

⁴ 資深研究員,工業技術研究院。

⁵ 課長,內政部國土測繪中心。

⁶ 技正,內政部國土測繪中心。

System Calibration of Terrestrial Laser Scanners by Using Range and Indoor Calibration Fields

Hsuan-Sheng Lin^{1*}, Yi-Hsing Tseng², Miao-Hsiang Peng³, Tze-An Liu⁴,
Ji-Shin Tsai⁵, Ching-Min Chou⁶

Abstract

Due to its outstanding 3D modeling capabilities, Terrestrial Laser Scanner (TLS) has been widely used in engineering surveying fields in recent years. However, different types of errors exist in huge point cloud data, and they would affect the accuracy of point cloud data through error propagation. The sources of these errors may come from instrumental factors (if it is not be calibrated), environmental factors, human factors, etc. In order to ensure the quality of the TLS data, systematic errors should be properly calibrated and corrected before using it. In this study, the theory that the self-calibration combined with the individual components calibration can more accurately simulate the systematic error of TLS was proposed. And a calibration method combining standard baseline field and indoor correction field is proposed for testing. This method overcomes the limitation of indoor space size, and independently calibrate the TLS rangefinder in the standard baseline field with a total length of 266 m. Then the calibration result multiplication constant -103 ppm and the addition constant 1.4 mm are brought into the self-calibration method as additional parameters, and the absolute average value of the difference is reduced to 3.9 mm. According to the preliminary test results, using the theory proposed in this study to perform TLS calibration and analyze systematic errors can help users to more carefully understand the current measurement quality of the instrument. Users can evaluate whether it is necessary to return to the factory for inspection according to the calibration results.

Keywords: Calibration, Ground-based LiDAR, Systematic Error, Terrestrial Laser Scanner

^{1*} Graduate Research Assistant, Department of Geomatics, National Cheng-Kung University,
E-mail: hsuansheng0110@gmail.com.

² Professor, Department of Geomatics, National Cheng-Kung University.

³ Researcher, Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute.

⁴ Senior Researcher, Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute.

⁵ Section Chief, Planning & Technology Section, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior (NLSC).

⁶ Specialist, Planning & Technology Section, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior (NLSC).

一、前言

經過 20 多年的發展，三維雷射掃描技術在穩定性、精度、易操作性等方面已有長足的進步，尤其是在空載/車載/地面三維雷射掃描方面進展顯著。其中地面雷射掃描儀為主動式量測，由儀器自行發射雷射光源，在黑暗中亦可作業，是一種精密且實用的測量工具，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，可用於建築物、隧道工程、森林調查、土木工程等大型物體之測量工作，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。

地面雷射掃描儀主要由雷射測距儀、反射稜鏡、伺服馬達轉動儀與電腦構成，基本掃描原理由一個測距與兩個測角（水平方向、垂直方向）量測系統組成，如圖 1 所示：以雷射光進行距離測量；以伺服馬達依掃描間距驅動掃描儀作水平與垂直方向旋轉，通常水平方向可達全方向掃描；以電腦或儀器介面設定掃描範圍及掃描參數；以電腦紀錄每發雷射之觀測量，其基本觀測量是距離、兩個正交的角度及記錄回訊之強度值，並可由距離和兩個角度推算每筆資料在儀器自訂的坐標系下的三維坐標，如圖 2 所示。另由於構造與操作模式類似，亦可將地面雷射掃描儀視為一部能全自動、快速與精準地進行全方位測角、測距、記錄之全測站式電子經緯儀。(賴志凱, 2004; 陳永寬等, 2005; 蔡漢龍, 2007; 曾義星等, 2008; Cuartero et al., 2010; D. D. Lichti, 2010a, 2010b; J. C. K. Chow et al., 2013; 吳建廷, 2013; Muralikrishnan et al., 2015)

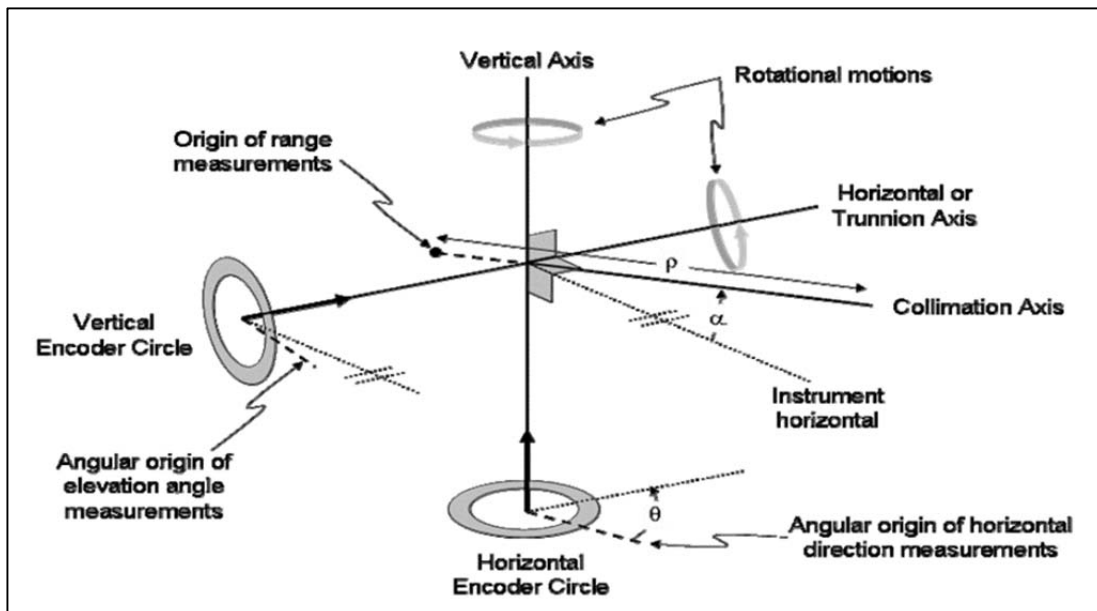


圖 1 地面雷射掃描儀掃描原理示意圖(D. D. Lichti, 2010a)

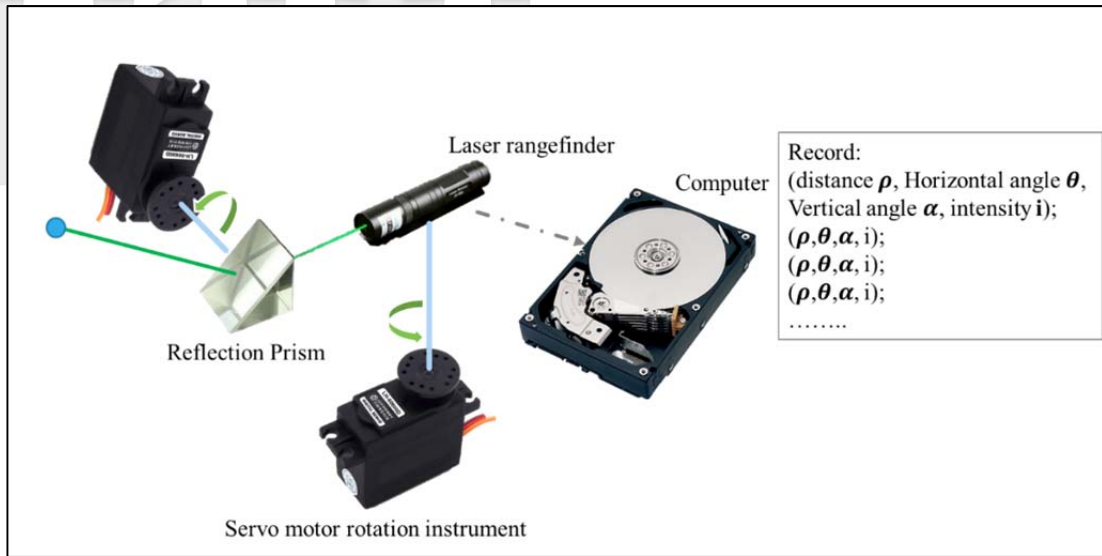


圖 2 地面雷射掃描儀組成示意圖

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、掃描速度及掃描精度，目前市面上常見之地面雷射掃描儀依其掃描有效距離而有不同的應用領域，吾人可以儀器掃描有效距離可分為短、中、長距離等三種類型。同時地面雷射掃描儀亦為自動量測系統，除掃描參數設定之外量測過程無須人工介入，儀器會自動根據掃描參數快速、精確、大量地產生物體表面點雲資料，可達每秒上萬點甚至百萬點以上，避免了因觀測者所造成的人為誤差。三維雷射掃描技術突破了傳統測繪技術的限制，對現今空間資訊領域產生革命性的影響，是一種創新、強大而有力的量測工具(吳建廷, 2013)。

由於地面雷射掃描儀的軟、硬體日益成熟，能產製更可靠和準確的點雲資料，因此儘管遠非現實，但許多針對地面雷射掃描儀的應用都假定點雲資料中沒有錯誤，然而，實際上會影響地面雷射掃描儀精度的因子十分眾多，例如儀器本身量測能力；儀器品質不良（未校正）；量測物體表面的顏色、材質；環境因素影響（環境溫度、濕度及壓力等）；人為操作不當，皆為有可能的精度影響因子，而各精度影響因子會透過誤差傳播而影響點雲坐標精度。若在儀器出廠前未經過嚴謹率定、儀器出廠後長時間未送回原廠檢修或儀器受外力碰撞等等其他因素下，日積月累造成儀器內部產生問題，將導致儀器掃描結果含有系統性誤差存在，進而影響儀器精度。因此，從事空間測繪領域的專家學者需有一套嚴謹有效的地面雷射掃描儀校正方法來檢定儀器的系統性誤差，並能透過分析擬合出最貼近誤差值變化的數學模型來加以改正，藉此提高儀器觀測精度。(賴志凱, 2004; 蔡漢龍, 2007; D. D. Lichti, 2010a)

本研究考量地面雷射掃描測量理論與地面雷射掃描儀之掃描物理機制，以自率定法為基準，提出了結合室外標準基線場和室內校正場的校正方法，並利用系統性誤差改正參數組成數學模型來分析和校正地面雷射掃描儀系統性誤差，觀察數學模型中造成系統性誤差的因子對精度的影響，冀望能找出通用於目前常見的地面光達之誤差模式，改善目前無法得知地面光達誤差來源的窘境。

二、地面雷射掃描儀誤差模式分析

(一) 地面雷射掃描儀掃描方式

地面雷射掃描儀是透過在儀器自訂的坐標系下觀測並記錄物空間某特徵點之距離和兩個角度來給予該特徵點儀器坐標系的三維坐標，如圖 3 所示。

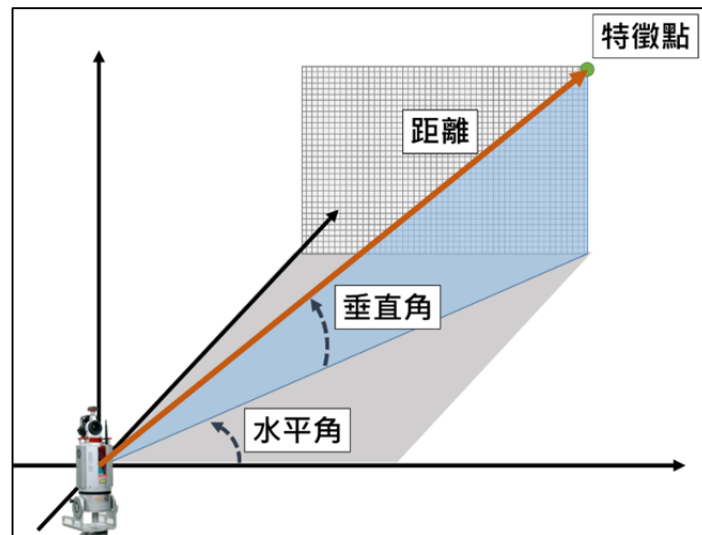


圖 3 地面雷射掃描儀定位

又因為儀器設計上的差異，導致儀器可能會有不同的掃描角定義，因此不同廠牌的儀器坐標值計算公式亦有可能不同，通常依兩個測角（水平方向、垂直方向）掃描順序區分為橫掃式（如 Optech ILRIS-3D 掃描儀）、縱掃式（如 RIEGL VZ400 掃描儀）兩種。

1. 橫掃式

橫掃式地面雷射掃描儀作業時其位置及方向固定，儀器內部具有以伺服馬達轉動儀驅動的水平方向、垂直方向反射稜鏡，掃描範圍為一矩形範圍，每一測站可視為獨立的儀器坐標系統，如圖 4 所示。

2. 縱掃式

縱掃式地面雷射掃描儀作業時其位置及方向固定，儀器內部僅有以伺服馬達轉動儀驅動的垂直方向反射稜鏡，而儀器本身可做全角度的水平方向旋轉，因此通常縱掃式地面雷射掃描儀的水平視角範圍（HFOV）通常可達 360° ，垂直視角範圍（VFOV）則通常可達 80° 以上，每一測站可視為獨立的儀器坐標系統，如圖 5 所示。

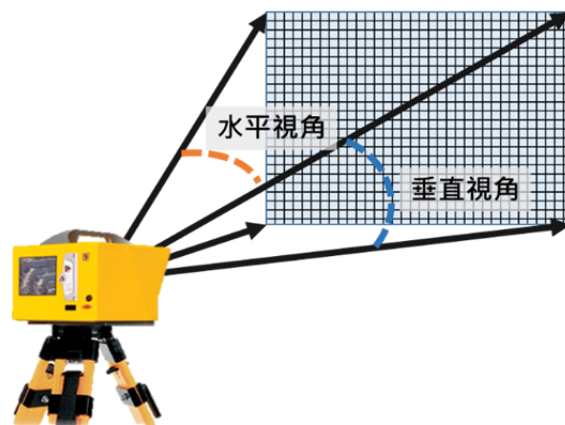


圖 4 橫掃式地面雷射掃描儀 (Optech ILRIS-3D 掃描儀)



圖 5 縱掃式地面雷射掃描儀 (RIEGL VZ400 掃描儀)

當掃描儀對掃描角的定義不同，計算同一掃描點坐標的公式也會不同，雖然利用幾何公式可以推導角度彼此間的轉換關係，但不同的掃描方式是否會對後續誤差模式的建立及計算結果造成影響亦是後續研究所需注意的。(賴志凱, 2004; 蔡漢龍, 2007; 曾義星等, 2008)

(二) 地面雷射掃描儀數學模型

地面雷射掃描儀利用前述掃描原理及掃描方式可以得到掃描儀中心至掃描點的三維坐標差、回訊之強度值及色彩資訊。掃描儀坐標系與物空間坐標系之關係可表示如圖 6，其中 S 為掃描儀的雷射發射中心， P 點為待測點的位置， O 點為物空間坐標系的原點。 ρ 為 S 到 P 的距離， α 為儀器坐標系中 S 與 P 點之間的垂直角， θ 為其水平角， (ω, ϕ, κ) 為儀器坐標系與物空間坐標系的旋轉角度參數。由物空間坐標系轉換到儀器坐標系的數學式可寫為如式(1)，利用三個或以上的物空間已知控制點坐標計算轉換參數(賴志凱, 2004; Derek D Lichti & Licht, 2006; D. D. Lichti,

2007, 2010a, 2010b; 蔡漢龍, 2007; 曾義星等, 2008; Habib et al., 2010; D. D. Lichti et al. 2011; 吳建廷, 2013; J. C. K. Chow et al., 2013; Lerma & García-San-Miguel, 2014; Ge, 2016)。

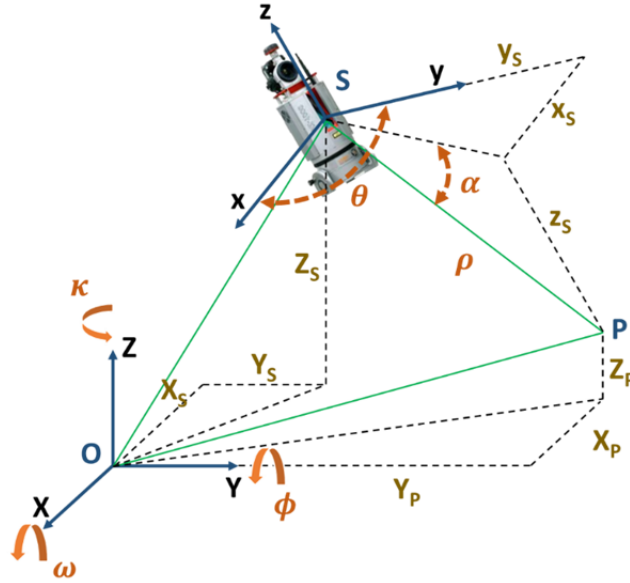


圖 6 掃描儀坐標系與物空間坐標系關係圖

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R_3(\kappa_j)R_2(\phi_j)R_1(\omega_j) \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} = M(\omega_j, \phi_j, \kappa_j) \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \phi_j \cos \kappa_j & \cos \omega_j \sin \kappa_j + \sin \omega_j \sin \phi_j \cos \kappa_j & \sin \omega_j \sin \kappa_j - \cos \omega_j \sin \phi_j \cos \kappa_j \\ -\cos \phi_j \sin \kappa_j & \cos \omega_j \cos \kappa_j - \sin \omega_j \sin \phi_j \sin \kappa_j & \sin \omega_j \cos \kappa_j + \cos \omega_j \sin \phi_j \sin \kappa_j \\ \sin \phi_j & -\sin \omega_j \cos \phi_j & \cos \omega_j \cos \phi_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 為待測點在儀器坐標系位置， (X_i, Y_i, Z_i) 為待測點在物空間坐標系位置， (X_{sj}, Y_{sj}, Z_{sj}) 為掃描儀雷射發射中心在物空間坐標系位置， $(\omega_j, \phi_j, \kappa_j)$ 為儀器坐標系與物空間坐標系的旋轉角度參數， $M(\omega_j, \phi_j, \kappa_j)$ 為一分別繞 X、Y、Z 軸旋轉 $(\omega_j, \phi_j, \kappa_j)$ 角度之旋轉矩陣。

又一般地面雷射掃描儀量測值可理解為測距觀測量 (ρ_{ij}) 與角度觀測量 $(\theta_{ij}, \alpha_{ij})$ 的組成，故可將式(1)改寫為下式，形成地面雷射掃描儀觀測方程式。

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

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

$$\alpha_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} \right) \quad (5)$$

(三) 地面雷射掃描儀誤差模式

地面雷射掃描儀量測誤差的來源可能與儀器本身量測能力、儀器品質不良（未校正）、環境因素影響、人為操作不當等等原因有關。本節針對常見的地面雷射掃描儀量測誤差進行分類，並對各種類誤差可能來源加以分析（表 1）。

1. 雜訊（Noise）

雜訊是明顯與真實狀況不符的誤差，例如，本應空無一物的地方出現點雲、平直的物體邊界點雲卻劇烈起伏。雜訊可能的來源是人為誤差，如掃描時人車經過、儀器受外力撞擊或載台不穩震動影響等；另一常見來源為多路徑效應，通常於掃描強反射物（如反射規標、鏡面）、近距離掃描物體或掃描物體邊緣時發生，使儀器接收到一個以上的回訊，導致可能產生錯誤的點雲。較大或明顯的雜訊通常可利用人眼判斷或是設定點雲濾除門檻值消除，亦可透過多測站掃描法對物體進行重複觀測，以利偵錯及消除錯誤。（Runne et al., 2001; 蔡漢龍, 2007; 吳建廷, 2013）

2. 隨機性誤差（Random Errors）

隨機性誤差是無法以系統性參數描述的誤差，其誤差大小與方向通常呈現偶然性及不可預測性，誤差值無法被量測及校正，透過誤差傳播原理可以知道測距與測角之隨機誤差會影響掃描點的儀器坐標系坐標。雖然地面雷射掃描儀無法針對單點進行精密觀測，但可以利用廠商提供之測距、測角中誤差推估地面雷射掃描儀隨機誤差的中誤差，此中誤差即反映儀器本身的定位能力。（賴志凱, 2004; 蔡漢龍, 2007; 曾義星等, 2008; 吳建廷, 2013）

3. 系統性誤差（Systematic Errors）

具有系統性變化或規律變化的誤差稱為系統性誤差，例如，掃描牆面時發現牆面點雲整體向後平移 5mm 或理應平直的牆面點雲卻凹陷為圓弧狀，類似情形可以判斷掃描結果含有系統性誤差。系統性誤差的最大來源為儀器誤差，多為儀器出廠前未經過嚴謹率定、儀器出廠後長時間未送回原廠檢修或儀器受外力碰撞和其他因素造成的儀器內部問題，導致儀器掃描結果含有系統性誤差存在，影響儀器定位精度。

儀器的系統性誤差能利用合適的率定方法來確定，並能透過分析擬合出最貼近誤差值變化的數學模型來加以改正，藉此提高觀測精度，設計合適的率定方法來推算儀器的系統性誤差數學模型是本研究的重點。

表 1 地面雷射掃描儀的誤差分類與誤差來源

誤差類型	產生原因	改正方式
雜訊	人為操作不當、外力因素、多路徑效應影響	利用人眼判斷或是設定點雲濾除門檻值消除；利用重複觀測偵錯及消除
隨機性誤差	雷射測距及測角的隨機性誤差傳播	無法直接改正，可利用測距、測角中誤差及公式推估大小
系統性誤差	儀器校正不完善或長時間未校正影響、儀器受外力碰撞或其他因素造成的儀器內部問題	儀器定期送原廠率定；利用數學模型校正

三、地面雷射掃描儀校正方法及程序

(一) 校正方法回顧

近年來，許多先進發表了有關地面雷射掃描儀校正的一系列論文，討論了地面雷射掃描儀可能的誤差來源和相關改正參數(賴志凱, 2004; Institute, 2006; Gottwald, 2008; 曾義星等, 2008; J. C. K. Chow et al., 2013; J. C. K. Chow et al., 2013; Muralikrishnan et al., 2015)，當然，還有許多其他針對評估地面雷射掃描儀系統性誤差的研究未在此處被提及。通過蒐集、分析國內外文獻，吾人可以將常見的地面雷射掃描儀校正方法歸納如圖 7，校正方法主要可分為兩大類，分別是通過個別系統組件校正或整體考量系統校正來估計地面雷射掃描儀的量測偏差及減輕其對掃描成果的影響。

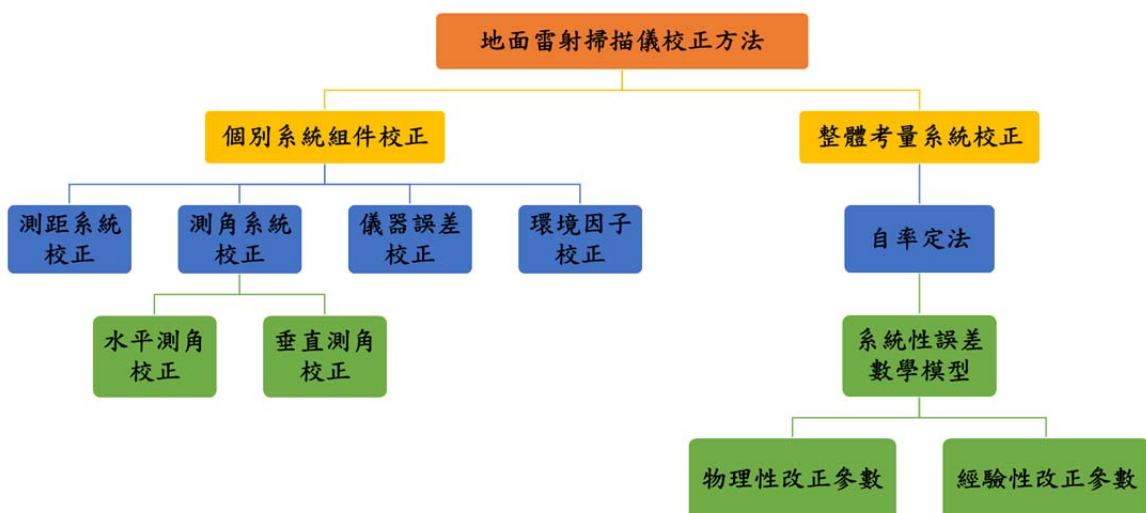


圖 7 地面雷射掃描儀校正方法

在個別系統組件校正中，我們需分別檢測距離和角度量測系統中的誤差，除此之外，還應檢測掃描儀是否具有其他由於機械缺陷或設計不良而引起的儀器誤差，

在這種情況下，還需考量其他外部因素，例如：將氣溫、氣壓等環境因子視為可能的誤差來源，進行獨立檢測。在整體考量系統校正中，自率定法利用改正參數組成數學模型來對地面雷射掃描儀的誤差建模，可分為具有幾何意義，在物理上可解釋的改正參數；利用統計方法得到，在經驗上可解釋的改正參數，上述兩種參數被用於建立掃描儀誤差的數學模型和校正掃描儀的量測成果，而所有改正參數都會在自率定法計算過程中一次確定(D. D. Lichti, 2007; Ge, 2016)。

在個別系統組件校正中，檢測者需準確地了解各個系統組件及其各自對於地面雷射掃描儀誤差的貢獻(Ge, 2016)。然而，各廠牌為了保護各自掃描儀的設計專利，針對組件的設計與運作原理，能提供的資訊通常十分有限。此外，個別系統組件校正通常需使用特殊的專用設備，例如辦理經緯儀角度校正，需專用的多管軸校正系統或精密分度盤校正系統，而這對於大多數用戶而言並不容易獲得，更多有關利用個別系統組件校正進行地面雷射掃描儀校正的信息，請參見(Schulz, 2008)。

而在整體考量系統校正中，用於建立系統性誤差模型和減輕地面雷射掃描儀量測偏差的所有改正參數是在同一個校正過程中一起確定的，利用大量觀測量進行最小二乘平差計算得到改正參數值，因此，與個別系統組件校正相反，了解掃描儀的各個系統組件運作機制並分析其對於整體誤差的貢獻，在整體考量系統校正中並不是那麼必要。當然，在進行整體考量系統校正前，吾人可以利用對掃描儀系統組件運作機制的了解來設計具有物理幾何意義的改正參數來組成系統性誤差模型，並且可以在校正期間通過分析最小二乘平差計算結果，進一步增加或移除改正參數來調整系統性誤差模型。

因此，詳盡地探討地面雷射掃描儀可能具有的系統性誤差，除了可以避免個別系統組件校正遺漏其他可能的誤差來源，更可以幫助完善整體考量系統校正的系統性誤差模型，達到同時確定掃描儀的所有系統性誤差以及其他與系統性誤差相關參數的效果。

(二) 本研究校正方法

本研究經由前述國際上學理文獻蒐集與分析，提出可行的地面雷射掃描儀校正方法理論及方法草案，詳細如圖 8 所示，關於校正項目可歸納包括：

1. 利用室外標準基線場評估待校正儀器於測距方面是否有長距離 (>30 m) 或長週期性誤差變化，如常數項誤差 (常數誤差)、線性項誤差 (尺度誤差)。
2. 利用室內校正場評估待校正儀器於測距、測角方面的系統性誤差，並利用系統性誤差改正參數建立誤差數學模型。
3. 在自率定法平差計算中加入利用室外標準基線場測定的加常數 C 和乘常數 S 作為測距方面的系統性誤差改正參數，作為約制使用，避免平差計算過度修正，藉此增加自率定法使用之系統性誤差數學模型的合理性與準確性。

地面雷射掃描儀混合模式校正方法

本研究假設測距與兩個測角間誤差獨立不相關，所以分別給予其獨立的系統性誤差改正參數來描述地面雷射掃描儀的系統性誤差模式。

個別系統組件校正(測距)

測距校正(室外標準基線場)

-由於室內場地測距距離較短，為了更準確地確定TLS於測距上的長距離 (>30公尺) 或長週期性誤差變化，基於ISO 17123-4:2012，提出了一種使用電子距離測量 (EDM) 標準基線場進行距離校準的方法。

整體考量系統校正(測距、測角)

自率定法(室內校正場)

-自率定法 (Self-calibration) 是一種有效且被廣泛使用的TLS校正方法，其將儀器的所有組件作為一整體考慮，本研究並將測距校正計算得到的加常數C與乘常數S加入自率定法計算，達到更合理地分析和校正TLS系統性誤差的效果。

圖 8 地面雷射掃描儀校正方法

因此，完整校正流程依序為：室外標準基線場標準值量測→室外標準基線場地
面雷射掃描儀量測→室內校正場標準值量測→室內校正場地
面雷射掃描儀量測→校正式計算→成果報表，如圖 9 所示。

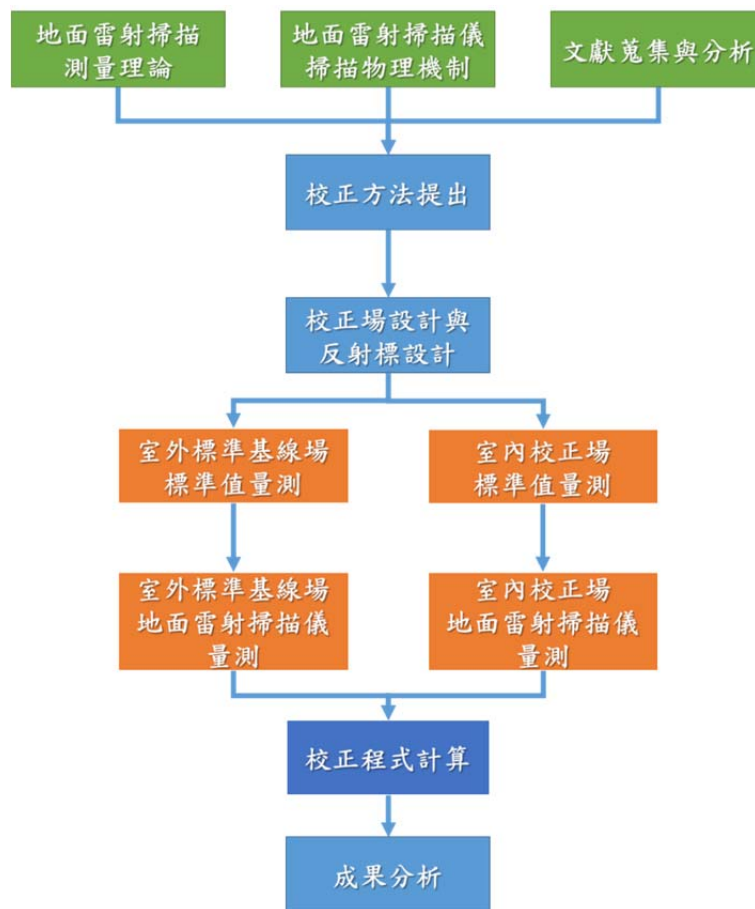


圖 9 校正程序示意圖

(三) 數學模型

1. 測距校正數學模型

參照 ISO 17123-4:2012 (ISO, 2012)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校正標計算求得水平距離（待校地面雷射掃描儀量測距離 D_m ），並利用比較法的方式，透過待校地面雷射掃描儀量測距離（ D_m ）與室外標準基線場標準距離（ D_s ）計算儀器誤差（器差 ΔD ），再以器差（ ΔD ）為縱軸，基線場標準距離（ D_s ）為橫軸，並使用一元回歸方程式計算儀器的常數項（加常數 C ）和線性項（乘常數 S ）系統性誤差改正參數，利用 t 分佈確定加常數 C 和乘常數 S 在 95%信心區間內是否有效。

$$C = \frac{\sum D_s^2 \times \sum -\Delta D - \sum D_s \times \sum (D_s \times -\Delta D)}{n \times \sum D_s^2 - (\sum D_s)^2} \quad (6)$$

$$S = \frac{n \times \sum (D_s \times -\Delta D) - \sum D_s \times \sum -\Delta D}{n \times \sum D_s^2 - (\sum D_s)^2} \quad (7)$$

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

加常數 C 和乘常數 S 代表該待校地面雷射掃描儀於測距方面的常數項與線性項系統性誤差是否顯著，亦可利用式(9)及式(10)計算待校地面雷射掃描儀量測距離校正值（ D_C ）及校正後的剩餘誤差（ V_d ）。

$$D_C = D_m + (S \times D_m) + C \quad (9)$$

$$V_d = D_C - D_s \quad (10)$$

2. 自率定法數學模型

本研究參考國外文獻提出之方法(D.D.Lichti,2007; J.C.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）量測校正標在物空間坐標系位置真值（ 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校正標在物空間坐標系位置量測值（ 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 $_i$)，詳細計算敘述如下式。

$$Diff_i = Mea_i - Ref_i \quad (11)$$

以待校件地面雷射掃描儀掃描校正標，可得到校正標在儀器坐標系位置 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ，而一般地面雷射掃描儀量測值可理解為測距觀測量 (ρ_{ij}) 與角度觀測量 $(\theta_{ij}, \alpha_{ij})$ 組成，故可將觀測式表示為(12)、(13)及(14)，形成地面雷射掃描儀觀測方程式。

$$\rho_{ij} + v_{\rho_{ij}} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho_{ij} \quad (12)$$

$$\theta_{ij} + v_{\theta_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta_{ij} \quad (13)$$

$$\alpha_{ij} + v_{\alpha_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha_{ij} \quad (14)$$

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

本研究假設測距與兩個測角間誤差獨立不相關，所以分別給予其獨立的系統性誤差改正參數來描述地面雷射掃描儀的系統性誤差數學模型，且部分的系統性誤差數學模型無法以單一參數描述，故需以較複雜的改正參數組合來處理，例如以常數項加上線性項改正參數的系統性誤差改正模型如下：

$$\Delta\rho_{ij} = a_0 + a_1 \times \rho_{ij} \quad (15)$$

$$\Delta\theta_{ij} = b_0 + b_1 \times \theta_{ij} \quad (16)$$

$$\Delta\alpha_{ij} = c_0 + c_1 \times \alpha_{ij} \quad (17)$$

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性誤差改正參數進行平差，平差後分別分析三個原始觀測量之殘差分佈性質，再測試單一參數及加入線性改正參數的校正成效。

3. 混合模式數學模型

十多年來，Lichti 和其他先進已發表了許多有關地面雷射掃描儀使用自率定法

進行校正的一系列論文(Derek D Lichti & Licht, 2006; D. D. Lichti, 2007, 2010a, 2010b; D. D. Lichti et al. 2011; J. C. K. Chow et al., 2013; Ge, 2016)，驗證以自率定法進行測距、角度校正的可行性以及討論地面雷射掃描儀可能的誤差來源，但前述文獻多只針對某部特定儀器在特定條件下測試，且校正場地普遍設置於小於 30 m 之室內環境，測距距離較短，並無法評估地面雷射掃描儀於測距上的長距離 (>30 m) 或長週期性誤差變化，因此本研究利用室外標準基線場（如圖 10 所示，其總長為 266 m）進行測距校正，分析儀器於 266 m 內的測距誤差是否具有系統性變化，並計算常數項和線性項系統性誤差改正參數並將其加入自率定法計算，結合自率定法與測距校正，藉此嘗試讓校正成果能更合理且正確，詳細如下式。

$$\rho_{ij} + v_{\rho_{ij}} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \rho_0(C) + \lambda_{\rho}(S)\rho \quad (18)$$

$$\theta_{ij} + v_{\theta_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \theta_0 \quad (19)$$

$$\alpha_{ij} + v_{\alpha_{ij}} = \tan^{-1}\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \alpha_0 \quad (20)$$

其中， $\rho_0(C)$ 為測距常數項誤差改正參數（加常數）， $\lambda_{\rho}(S)$ 為測距線性項誤差改正參數（乘常數）， θ_0 為水平角常數項誤差改正參數， α_0 為垂直角常數項誤差改正參數。

四、實驗結果與分析

本研究選定內政部國土測繪中心辦公大樓前安全島黎明基線場（現為電子測距儀校正場）作為室外標準基線場（圖 10），用來檢測地面雷射掃描儀於測距方面是否有顯著的常數項、線性項改正參數或其它參數，該基線場之管理及維護係依內政部國土測繪中心「內政部國土測繪中心電子測距基線場管理要點」規定辦理，每年使用經國家度量衡標準實驗室校正合格之電子測距經緯儀檢測固定基座基線場，並利用整體嚴密平差方程式，採用間接平差法進行最小二乘平差計算標準距離，詳細過程可參閱（邱明全等, 2007）。

而自率定法無需借助特殊設備即可執行，僅需一個具有適當大小的房間，本研究選定內政部國土測繪中心黎明辦公區莊敬樓 1 樓辦公室作為室內校正場（圖 11），量測員需在室內校正場中從數個不同的測站位置和起始方向獲取校正標的重複觀測點雲資料，該室內校正場校正標坐標值，是以 Leica 的全站儀（Leica TS09 PLUS 1”）作為校正場的標準件來量測，全站儀量測方式以正倒鏡觀測取平均值，其中校正標量測以無稜鏡模式進行，首先將全站儀架設於金屬樁 S1 位置，利用求心基座定心定平後，於金屬樁 S4 架設反射稜鏡並利用求心基座定心定平，作為後視使

用，藉此建立室內校正場的區域坐標系統，接著從 T01 鋁擠型柱開始，由下而上量測校正標（編號 T011~編號 T014），再以逆時鐘方向順序量測至 T20 鋁擠型柱，依序完成所有校正標與金屬樁的量測，完成金屬樁 S1 掃描作業後，再重複此順序，依序進行金屬樁 S2、S3 及 S4，量測全部的校正標與金屬樁坐標，校正標之標準值計算，採用最小約制自由網平差，以金屬樁 S1 作為約制，將此 4 站(金屬樁 S1~S4) 的角度與距離觀測量進行整體平差，計算各校正標之三維坐標。

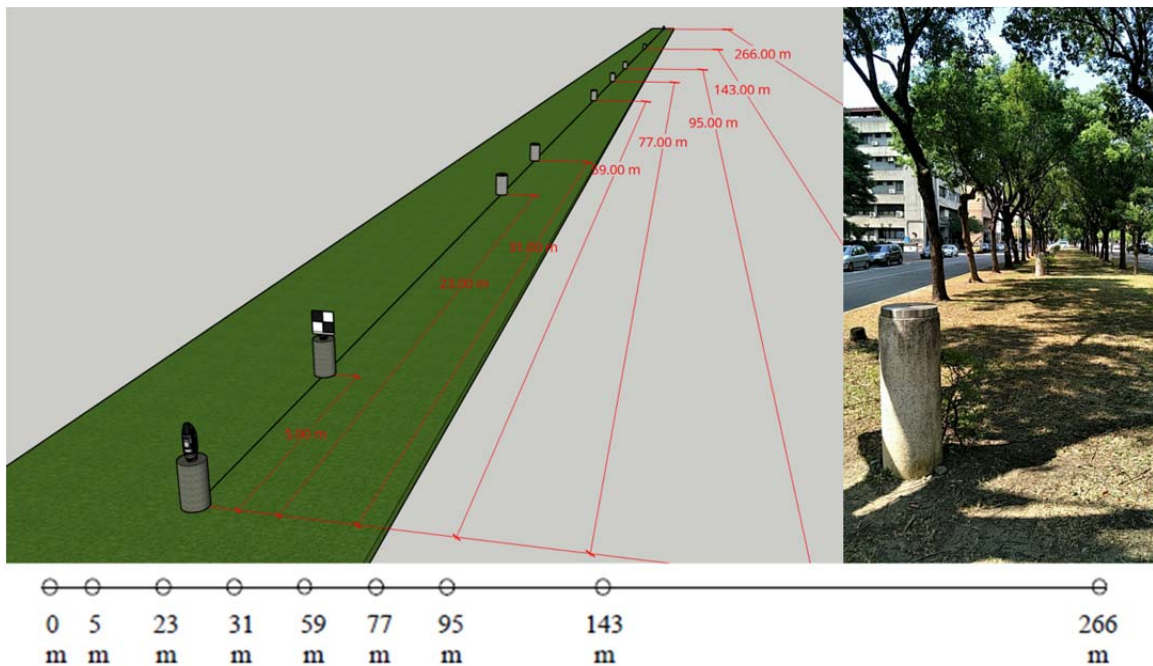


圖 10 室外標準基線場示意圖

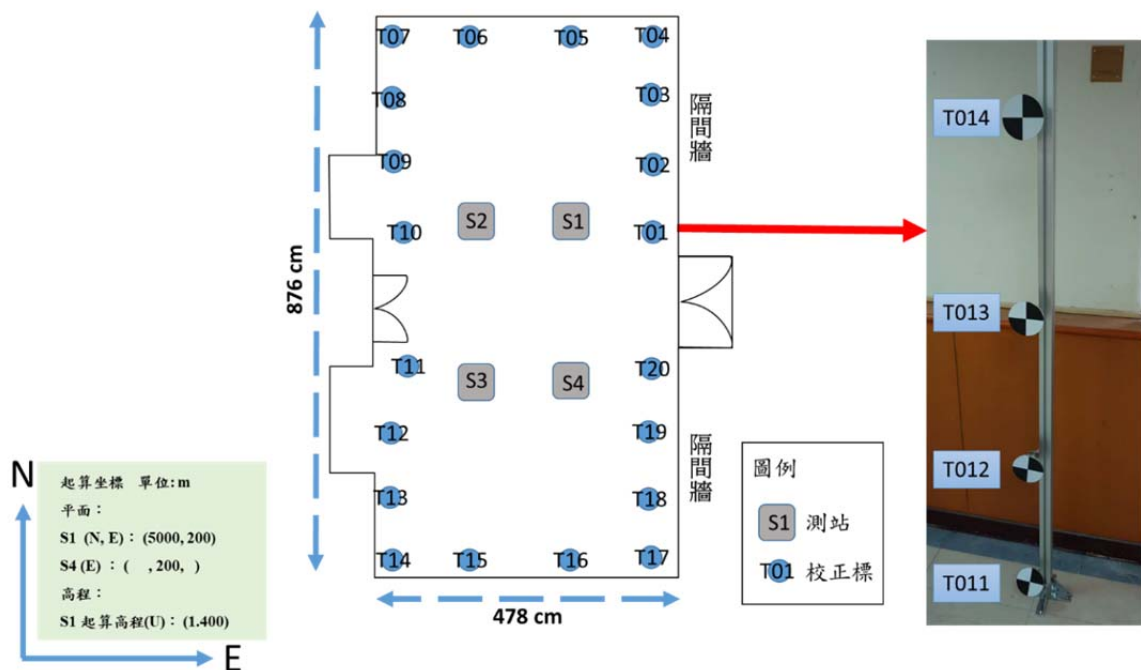


圖 11 室內校正場校正標分佈示意圖

表 2 標準件量測校正標之坐標重複觀測精度評估

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

表 3 RIEGL VZ-400 規格

	儀器	RIEGL VZ-400
	平均掃描速度(meas./sec)	
有效距離(m)		600 m
水平視角範圍(°)		360°
垂直視角範圍(°)		100°(+60°/-40°)
測距準確度*		5 mm @ 100 m

* A mm @ B m 代表儀器位於 B m 的精度為 A mm

以 Leica TS09 PLUS 1”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，水平角度觀測量 306 筆，距離觀測量 306 筆，平差自由度 452，平均多餘觀測量為 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 2 所示。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。

由圖 10、圖 11 得知，本研究使用之地面雷射掃描儀其有效距離需大於 266 m、水平視角範圍需 360°、垂直視角範圍需於最短距離時可以涵蓋牆面（約 100°），由表 3 可知，RIEGL VZ-400 的最大有效距離為 600 m，垂直與水平視角範圍亦符合本研究實驗設計，本研究以 RIEGL VZ-400 地面雷射掃描儀於內政部國土測繪中心進行實地量測作業，詳細操作流程如後所述。

(一) 測距校正量測

本研究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校正標計算求得水平距離，並利用比較法的方式，將求得水平距離與室外標準基線場標準

距離進行比較分析，以一元回歸方程式計算儀器的常數項（加常數 C ）和線性項（乘常數 S ）系統性誤差改正參數，並進行統計測試。

室外標準基線場共設置 0 m、5 m、23 m、31 m、59 m、77 m、95 m、143 m 及 266 m 等 9 支樁，掃描儀首先置於 0 m 站並定心定平，分別於 5 m、23 m、31 m、59 m、77 m、95 m、143 m 及 266 m 等站架設校正標並觀測；然後將儀器移設於 5 m 站並定心定平，再向 23 m、31 m、59 m、77 m、95 m、143 m 及 266 m 等站架設校正標並觀測，共有 15 測站，如圖 12 所示。

表 4、表 5 為測距校正的結果，上述 15 測站內共有 4 測站校正標偵測失敗，亦即有效數據為 11 組，表 5 顯示了加常數 C 、乘常數 S 以及基線標準距離（ D_s ）和校正前後距離（ D_m 、 D_c ）之間的差異統計信息，藉此評估加常數 C 和乘常數 S 的貢獻，詳細計算方式可參考三-(三)-1 章節。

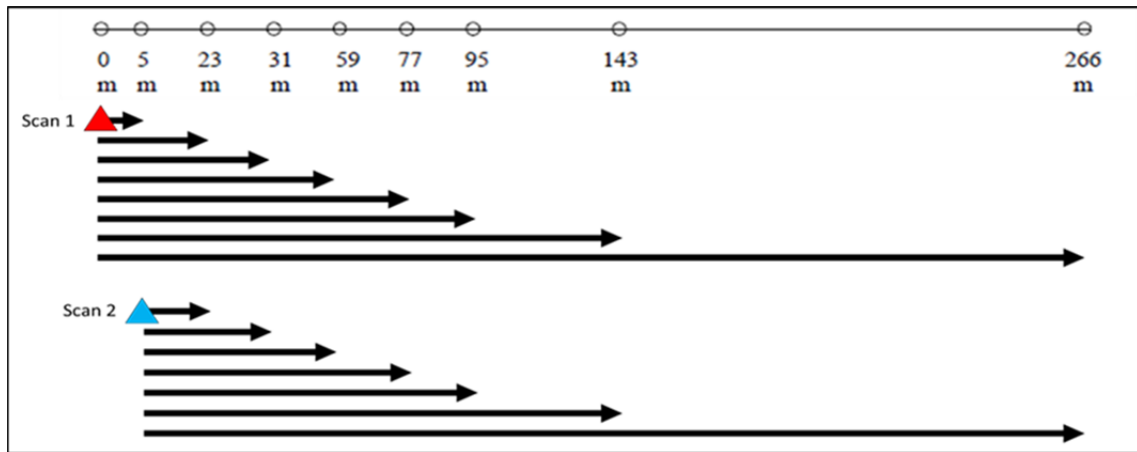


圖 12 室外標準基線場 15 測站示意圖

表 4 測距校正成果

測站	$D_m - D_s$	$D_c - D_s$
0 m_5 m	0.0064	0.0073
0 m_31 m	0.0071	0.0053
0 m_59 m	0.0034	-0.0013
0 m_77 m	0.0091	0.0026
0 m_95 m	0.0049	-0.0035
0 m_143 m	0.0139	0.0006
5 m_23 m	-0.0251	-0.0255
5 m_31 m	0.014	0.0127
5 m_59 m	0.0073	0.0031
5 m_77 m	0.0057	-0.0004
5 m_95 m	0.0069	-0.001

表 5 測距校正統計信息

改正參數	值	
加常數 C (mm)	1.4	
乘常數 S (ppm)	-103	
校正前後之差異統計	平均值	標準差
$D_m - D_S$ (mm)	4.8	10.0
$D_C - D_S$ (mm)	-0.009	9.1

(二) 室內校正場量測

本研究以地面雷射掃描儀掃描設置於室內校正場的校正標計算求得三維坐標，並利用比較法的方式，將求得的校正標坐標量測值與室內校正場校正標坐標標準值進行比較分析。

室內校正場設置 S1、S2、S3 及 S4 等 4 支金屬樁，並沿牆面均勻布設 20 個鋁擠型柱，柱上固定 4 個校正標，共有 80 個校正標，將地面雷射掃描儀依序架設於室內校正場內金屬樁（S1~S4）上，利用求心基座定心定平後，分別面向東、南、西、北方進行全景（最大掃描範圍）掃描作業，完成 S1 金屬樁掃描作業後，依序進行 S2，S3，及 S4，每樁位觀測 4 次，共 16 測站，如圖 13 所示。

將 16 測站掃描成果，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 XYZ 坐標，進一步分別與校正標坐標真值相比對，得到儀器量測的器差數值，表 6 乃以報表中 T013~T021 為例，列舉各軸向的器差部分數據

表 7 展示結合室外標準基線場與室內校正場混合模式校正的成果，意即將表 5 的加常數和乘常數作為改正參數加入自率定法計算，經軟體計算求得 80 個校正標的坐標量測值，再與其校正標坐標真值相比對，得到每個校正標 XYZ 坐標值的器差，並進行均方根值計算，表 7 列出加入改正參數前後器差變化的相關數據，詳細計算請參考三-(三)-2、三-(三)-3 章節。

從數據可以看出，通過應用該方法的確可以為地面雷射掃描儀校正帶來正面的影響，採用混合模式後，首先可以發現整體的器差是呈現變小趨勢，以整體器差計算的均方根值也略為變小，再進一步將各軸向（XYZ）的器差分開計算，可以發現除了高程（Z）方面外，平面（XY）的器差均方根值也是變小的。

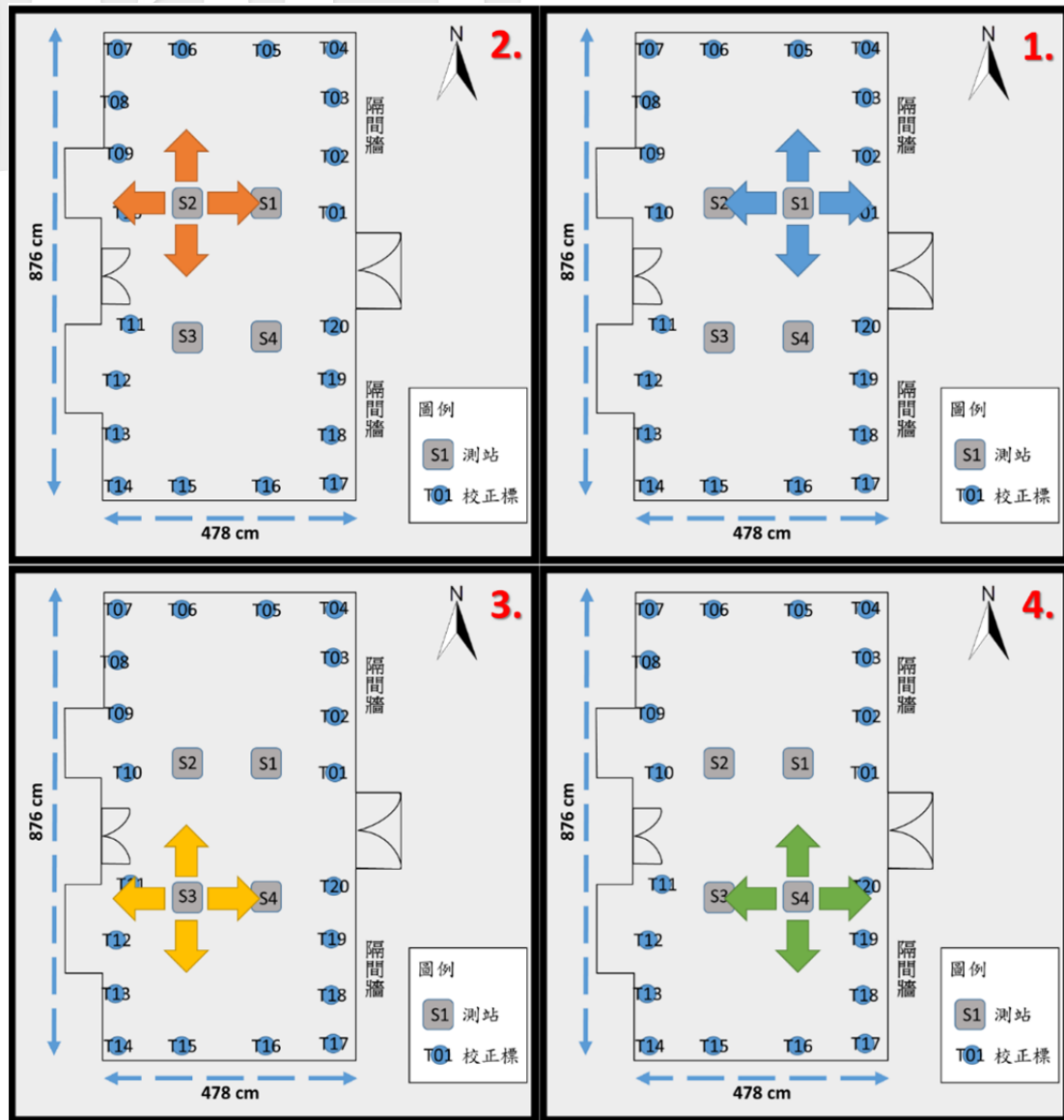


圖 13 室內校正場量測示意圖

表 6 T013~T021 各軸向的器差部分數據

校正標點名	坐標真值(m)	坐標量測值(m)	器差(m)
T013_X	201.38600	201.39237	-0.00637
T013_Y	4999.68200	4999.69230	-0.01030
T013_Z	1.56500	1.56312	0.00188
T014_X	201.39200	201.39769	-0.00569
T014_Y	4999.68400	4999.69141	-0.00741
T014_Z	2.08270	2.08282	-0.00012
T021_X	201.39600	201.39928	-0.00328
T021_Y	5000.53900	5000.54225	-0.00325
T021_Z	0.18840	0.19223	-0.00383

表 7 混合模式校正成果

	未加入改正參數	混合模式
器差絕對值平均(m)	0.004054625	0.003997958
RMS 整體	±0.00509	±0.00506
RMS X (m)	±0.00401	±0.00392
RMS Y (m)	±0.00536	±0.00505
RMS Z (m)	±0.00574	±0.00600

五、結 論

本研究為未來建立校正實驗室之先期研究，主要目標為驗證將自率定法結合個別組件校正的混合模式可行性，校正場地已選定於內政部國土測繪中心，並以適當的方式量測其標準值。

根據成果顯示，本研究參照 ISO 17123-4:2012 (ISO, 2012) 電子測距儀校正方式提出的地面雷射掃描儀測距校正，能有效估計加常數 C 與乘常數 S ，經過改正後的觀測距離與標準距離 (D_s) 的差異平均值縮小為 -0.009 mm。

混合模式初步測試結果，器差的絕對值平均與均方根值都呈現變小趨勢，可以初步判定應用本研究提出之混合模式方法來對地面雷射掃描儀進行校正與系統性誤差分析，的確可以為地面雷射掃描儀校正帶來正面的影響，通過計算結果可協助使用者更謹慎地了解儀器目前量測品質，使用者可依計算結果評估是否該儀器需回原廠檢校。

如前述，本研究為未來建立校正實驗室之先期研究，主要目標為驗證混合模式的可行性，因此仍有許多待改進之處，例如：目前假設地面雷射掃描儀僅具有常數項與線性項誤差，未來應依實際數據調整使用之數學模型，達到更精準分析系統性誤差的效果；校正標中心目前採用軟體自動偵測，精度尚有待提高，避免不良觀測量影響計算成果。

未來的研究方向，將以提升校正標中心自動偵測精度、測試更多不同廠牌地面雷射掃描儀以及找到普遍性通用的系統性誤差改正參數組合為主，以達到未來實驗室以本研究方法做為地面雷射掃描儀校正通解 (general solution) 的目標。

致謝

感謝內政部國土測繪中心「108 年度建立地面三維雷射掃描儀校正系統委託研究案」(NLSC-108-18) 提供研究經費，並同意本團隊就研究成果內容製作視頻上傳至 YouTube 網站與各界分享 (連結網址 <https://youtu.be/rFT1NUepBJU>) 及投稿中華民國地籍測量學會「國土測繪與空間資訊」期刊。

參考文獻

- 吳建廷 (2013)。地面三維雷射掃描儀影響精度因子之研究。交通大學土木工程系所學位論文，頁 1-161。
- 陳永寬, 詹進發, 葉堃生, 鄭祈全, & 施瑩瑄 (2005)。應用地面雷射掃描儀測算樹高之研究。 *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 10, 頁 327-336。
- 曾義星, 林見福, 蔡漢龍, 陳鶴欽, & 曾耀賢 (2008)。地面光達系統誤差分析及校正。 *地籍測量: 中華民國地籍測量學會會刊*, 27 (1), 頁 39-50。
- 蔡漢龍 (2007)。地面光達幾何校正系統設計與實施。成功大學測量及空間資訊學系學位論文，頁 1-90。
- 賴志凱 (2004)。地面雷射掃描儀的精度分析與檢定。成功大學測量及空間資訊學系學位論文，頁 1-101。
- Chow, J. C., Lichti, D. D., & Teskey, W. F. (2010). Self-calibration of the Trimble (Mensi) GS 200 terrestrial laser scanner. *Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 161-166.
- Chow, J. C. K., Lichti, D. D., Glennie, C., & Hartzell, P. (2013). Improvements to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. *Sensors*, 13(6), 7224-7249. doi: 10.3390/s130607224
- Cuartero, A., Armesto, J., Rodriguez, P. G., & Arias, P. (2010). Error Analysis of Terrestrial Laser Scanning Data by Means of Spherical Statistics and 3D Graphs. *Sensors*, 10(11), 10128-10145. doi: 10.3390/s101110128
- Ge, X. (2016). *Terrestrial Laser Scanning Technology from Calibration to Registration with Respect to Deformation Monitoring*. Technische Universität München.
- Gottwald, R. (2008). Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) A Contribution to a Future ISO Standard.
- Habib, A., Bang, K. I., Kersting, A. P., & Chow, J. (2010). Alternative Methodologies for LiDAR System Calibration. *Remote Sensing*, 2(3), 874-907. doi: 10.3390/rs2030874
- Institute, A. N. S. (2006). *Performance Evaluation of Laser-based Spherical Coordinate Measurement Systems*: American Society of Mechanical Engineers.
- ISO. (2012). ISO 17123-4:2012 *Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors)*.
- Lerma, J., & García-San-Miguel, D. (2014). SELF-CALIBRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNERS: SELECTION OF THE BEST GEOMETRIC ADDITIONAL PARAMETERS. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(5).
- Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(5),

- 307-324. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004
- Lichti, D. D. (2010a). A REVIEW OF GEOMETRIC MODELS AND SELF-CALIBRATION METHODS FOR TERRESTRIAL LASER SCANNERS. *Boletim De Ciencias Geodesicas*, 16(1), 3-19.
- Lichti, D. D. (2010b). Terrestrial laser scanner self-calibration: Correlation sources and their mitigation. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 93-102. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.09.002
- Lichti, D. D., Chow, J., & Lahamy, H. (2011). Parameter de-correlation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 317-326. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2010.12.001
- Lichti, D. D., & Licht, M. G. (2006). Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 36(5), 155-160.
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., . . . Palmateer, J. (2015). Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 40, 139-150. doi: 10.1016/j.precisioneng.2014.11.002
- Runne, H., Niemeier, W., & Kern, F. (2001). Application of laser scanners to determine the geometry of buildings. *Optical*, 41-48.
- Schulz, T. (2008). *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy* (Vol. 96): ETH Zurich.