

以精密分度盤校正經緯儀測角精度之研究

Study on accuracy of theodolite by the precision disc calibration system

康寧凱¹ 邱明全² 陳鶴欽³ 李旭志⁴
Ning-Kai Kang¹ Ming-Chyu Chiou² He-Chin Chen³ Hsu-Chih Lee⁴

摘要

經緯儀為執行測量業務之主要設備之一，若儀器本身存在有誤差，該項誤差便會傳播至觀測數據，對測量成果影響甚鉅。因此測量儀器必需定期校正，以確保測量成果品質。內政部國土測繪中心於2007年成立測量儀器校正實驗室，建置電子測距儀、經緯儀及衛星定位儀三項校正系統，並建立符合ISO/IEC 17025之品質管理系統，於2010年通過全國認證基金會（Taiwan Accreditation Foundation, TAF）認證，其中經緯儀校正系統，係以定線瞄準儀及多目標瞄準儀組成之多管軸校正系統進行經緯儀角度校正，經參考國家標準實驗室，該項校正亦可使用精密分度盤辦理校正。

本研究目的即在建立精密分度盤校正系統相關校正程序，同時對校正系統進行評估，參考TAF實驗室間比對方式與多管軸校正系統進行比對，以驗證分度盤校正系統量測不確定度之正確性及可靠度。本研究同時評估多測回數對校正成果之影響，據研究成果顯示分度盤與多管軸校正系統之校正成果具一致性且確實可行，且其一測回水平角準確度之擴充不確定度優於多管軸校正系統。

關鍵詞：校正、精密分度盤、量測不確定度

Keyword：Calibration system, Precision Disc, Uncertainty of accuracy

¹內政部國土測繪中心 技士，23113@mail.nlsc.gov.tw

²內政部國土測繪中心 專員

³內政部國土測繪中心 技正

⁴內政部國土測繪中心 課長

一、 前言

經緯儀校正作業在臺灣及各國的發展都已相當成熟，目前國內經 TAF 認證之校正實驗室，除國家一級實驗室外，尚有 2 家民間測量公司及 1 個公務機關在辦理此項業務，各實驗室校正方法、最高工作標準件如表 1 所列（財團法人全國認證基金會網址 <http://service.taftw.org.tw/tafweb/indexC.aspx>）。本中心為執行此項工作之唯一公務部門，為因應國土測繪法於 2007 年公布施行，積極建置測量儀器校正實驗室，推動儀器校正理念，於 2007 年建置多管軸校正系統，對自有儀器實施定期校正，並為落實 ISO/IEC 17025 對於量測追溯的要求，更於 2011 年完成分度盤校正系統建置，希望藉此擴充校正能量及能力。

一般經緯儀校正方法分為多目標法及比較法(楊俊志, 2004)，多目標法是國際標準 ISO17123-3 和德國工業標準 DIN18723-3 所採用的方法；比較法則是將待校經緯儀與精密分度盤進行比較。本研究目的即在建立精密分度盤校正系統相關校正程序，同時對校正系統進行評估。研究過程透過比較多管軸與分度盤校正系統間之差異性，從 ISO/IEC 17025 對校正的定義進行探討，同時從量測系統追溯的角度分析系統的異同。本研究也使用 TAF 對各不同實驗室間對相同校正項目之實驗室間比對方式，對新建置之精密分度盤校正系統進行校正能力之可靠性評估。而校正作業中，觀測測回數亦為影響校正結果之因素之一，由於各家實驗室校正測回數不同，本研究亦探討測回數對校正結果之影響，作為日後規畫校正方法參考。

表 1 國內校正實驗室一覽表

實驗室名稱	校正方法/最高工作標準件	校正範圍
國家度量衡標準實驗室	自訂07-3-85-0085 /360齒分度盤/ AA GAGE / 2921487	0° to 360°
內政部國土測繪中心測量儀器校正實驗室	自訂SICL-3-02-0 /Leica/TC2003/441820	0° to 360°
名家長度校正實驗室	自訂CS-87-ICT-T-03/Vexcel DFT-720	0° to 360°
森泰長度校正實驗室	自訂CG-2-16-2/中國船舶分度盤	0° to 360°

二、 校正方法及計算

經緯儀校正項目一般有視準軸誤差、橫軸誤差、垂直度盤指標差、一測回水平角準確度及望遠鏡視軸直度誤差，本研究僅針對一測回水平角準確度部份作說明，以下分別針對多管軸校正系統及分度盤校正系統之校正方法及計算說明，其系統架構示意圖如圖 1 及圖 2。

2.1 多管軸校正系統

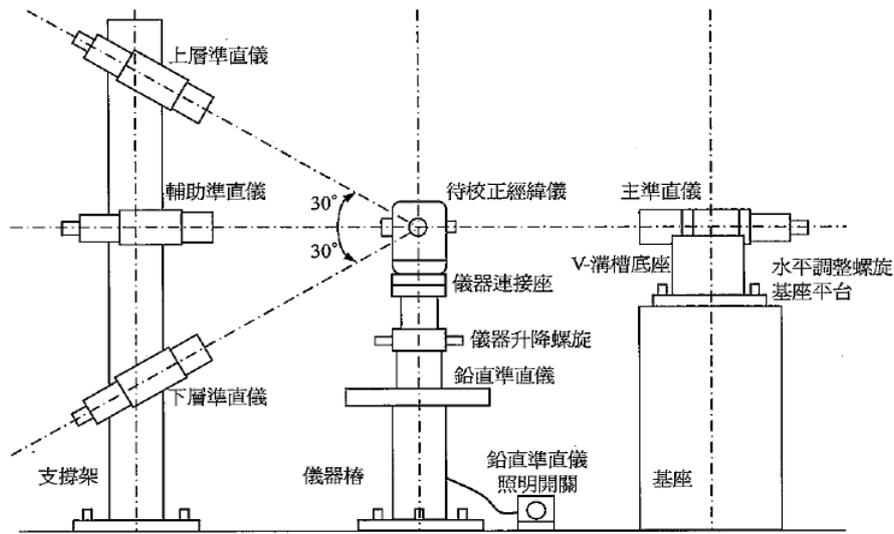


圖 1 多管軸校正系統架構示意圖

校正件將水平角分別對準 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° ，正鏡照準主準直儀 ∞ 目標，記錄水平角觀測讀數值 $P_1 \sim P_6$ 。旋轉校正件照準輔助準直儀，記錄水平角觀測讀數值 $Q_1 \sim Q_6$ 。倒鏡重複前述步驟，記錄主準直儀倒鏡水平角觀測讀數值 $P'_1 \sim P'_6$ （照準 ∞ 目標）、輔助準直儀倒鏡水平角觀測讀數值 $Q'_1 \sim Q'_6$ ，校正步驟詳見經緯儀校正作業程序（內政部國土測繪中心，2011（a））。再以觀測資料計算一測回水平角準確度 μ ，其計算式為：

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中 $n=6$ ， v_i ：第 i 測回水平角度差

2.2 分度盤校正系統

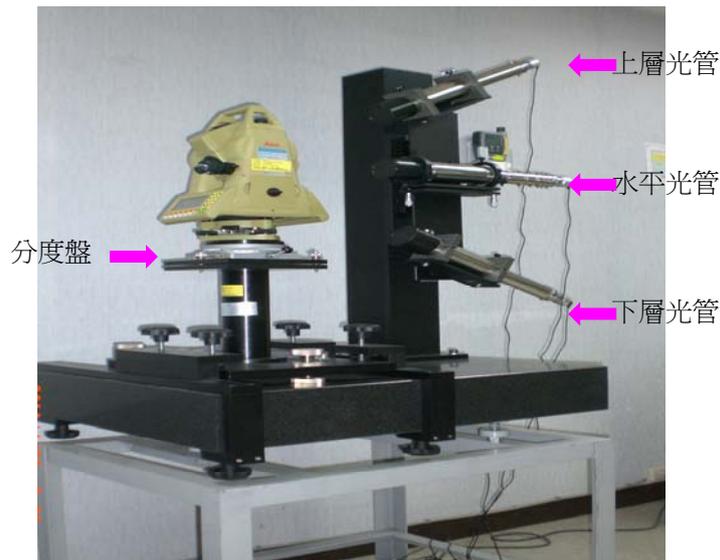


圖 2 本中心分度盤校正系統近照

在分度盤接合座上，整置待校經緯儀，調整待校經緯儀及 360 齒分度盤兩者皆水平，須同軸旋轉，將 360 齒分度盤置於 0° ，每次以逆時針方向旋轉分度盤 60° ，並轉動待校經緯儀照準光管∞目標，分別記錄水平角觀測讀數 $P_1 \sim P_7$ ；再倒鏡重複前述步驟，每次以順時針方向旋轉分度盤 60° ，分別記錄水平角觀測讀數 $P'_1 \sim P'_7$ ，再以式 (1) 計算一測回水平角準確度 μ （財團法人工業技術研究院，2009）。

三、 量測不確定度誤差來源分析及評估

本研究分析流程係參考國際標準組織（International Organization for Standardization, ISO）出版的「Uncertainty of measurement—Part3：Guide to the expression of uncertainty in Measurement」（簡稱 GUM：1995）所建議的方法，評估各校正項目之不確定度，將各項不確定度來源予以分類並量化為 A 類及 B 類的標準不確定度，其中 A 類標準不確定度的評估方法為利用統計分析，B 類標準不確定度的評估方法為 A 類評估方法以外的其他方法。再依量測不確定度傳遞原理計算組合標準不確定度、依 Welch-Satterthwaite 公式計算有效自由度，作為校正報告敘述校正結果擴充不確定度之依據（評估流程如圖 3）。

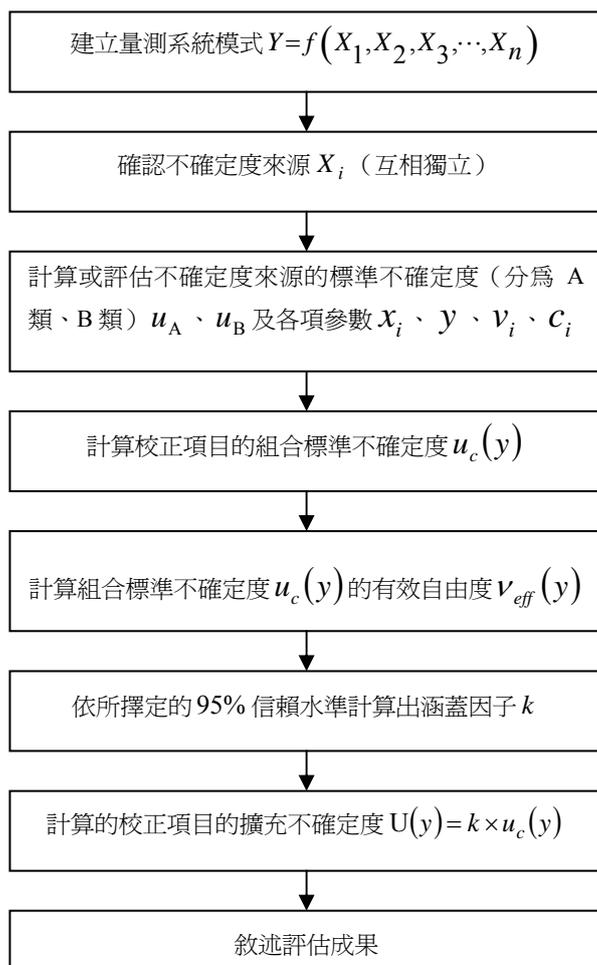


圖 3 量測不確定度評估流程

校正系統各項誤差來源及其標準不確定度彙整如表 2，詳細分析請參閱經緯儀校正系統評估（內政部國土測繪中心，2011（b））。

表 2 誤差來源及標準不確定度彙整表

誤差來源及誤差量	誤差種類	誤差分布型態	除數	標準不確定度	靈敏係數	標準不確定度分量	自由度
望遠鏡照準誤差 $\sigma_1 = 0.33''$	B	矩形	$\sqrt{3}$	$u_1 = 0.19''$	1	$0.19''$	$\nu_1 = 8$
光學測微最小讀值誤差 $\sigma_2 = d''/10$	B	矩形	$\sqrt{3}$	$u_2 = \frac{d''}{10 \times \sqrt{3}}$	1	$\frac{d''}{10 \times \sqrt{3}}$	$\nu_2 = 8$
光學經緯儀讀數指標對齊誤差 $\sigma_3 = 0.87''$	B	矩形	$\sqrt{3}$	$u_3 = 0.50''$	1	$0.50''$	$\nu_3 = 12.5$
電子經緯儀最小顯示讀值能力誤差 $\sigma_4 = \Delta''$	B	矩形	$\sqrt{3}$	$u_4 = \frac{\Delta''}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{\Delta''}{\sqrt{3}}$	$\nu_4 = 50$
經緯儀定平誤差 $\sigma_5 = 0.00048''$	B	常態	3	$u_5 = 0''$	1	$0''$	$\nu_5 = \infty$
準直儀 ∞ 目標變化誤差 $\sigma_6 = 0''$	B	常態	3	$u_6 = 0''$	1	$0''$	$\nu_6 = \infty$
環境變化誤差 $\sigma_7 = 1.5''$	B	矩形	$\sqrt{3}$	$u_7 = 0.87''$	1	$0.87''$	$\nu_7 = 12.5$
一測回水平角準確度等精度觀測平均值 μ_8	A	常態	1	u_8	1	u_8	$\nu_8 = 5$
查核件測角追溯誤差 σ_9	B	常態	2	$u_9 = 0.30''$	1	$0.30''$	$\nu_9 = 77$
分度盤追溯誤差 $\sigma_{10} = 0.39''$	B	矩形	$\sqrt{3}$	$u_{10} = 0.23''$	1	$0.23''$	$\nu_{10} = 50$

3.1 多管軸校正系統

一測回水平角準確度 μ 的誤差來源有 $\sigma_1 \sim \sigma_7$ 、 μ_8 及 σ_9 ，誤差來源相關分析及說明參表 2：

3.1.1 組合標準不確定度 $u_c(\mu)$

$$v_i = \bar{Q}_i - \bar{P}_i - \bar{\mu}_0 \quad (2)$$

式（2）中， v_i ：第 i 測回水平角度誤差； \bar{P}_i ：第 i 測回，正倒鏡照準主準直儀 ∞ 目標水平角觀測讀數平均值； \bar{Q}_i ：第 i 測回，正倒鏡照準輔助準直儀水平角觀測讀數平均值； $\bar{\mu}_0$ ：主準直儀與輔助準直儀計算水平角度之最或是值。

透過式（1）計算組合標準不確定度 $u_c(\mu)$ ，得

$$u_c^2(\mu) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{1}{2}\right)^2 u_{Q_i}^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 u_{P_i}^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 u_{P_i}^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 u_{P_i}^2 \right]}{n-1} + u_8^2 \quad (3)$$

式 (3) 中 $n=6$ ：表示觀測 6 測回； u_{Q_i} ：正鏡照準輔助準直儀 ∞ 目標的水平角觀測讀數值之標準不確定度； $u_{Q'_i}$ ：倒鏡照準輔助準直儀 ∞ 目標的水平角觀測讀數值之標準不確定度； u_{P_i} ：正鏡照準主準直儀 ∞ 目標的水平角觀測讀數值之標準不確定度； $u_{P'_i}$ ：倒鏡照準主準直儀 ∞ 目標的水平角觀測讀數值之標準不確定度； u_8 ：一測回水平角準確度等精度觀測計算值之標準不確定度。

因為表 2 中的誤差來源彼此互相獨立，且靈敏係數均為 1，可得 $u_{Q_i}^2 = u_{Q'_i}^2 = u_{P_i}^2 = u_{P'_i}^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2 + u_8^2$ ， $n=7$ ，組合標準不確定度 $u_c(\mu)$ 的計算可分為光學經緯儀

$u_{c_1}(\mu)$ 及電子經緯儀 $u_{c_2}(\mu)$ 兩類，以下僅針對電子經緯儀敘述如下：

以電子經緯儀為例， $u_2 = 0$ 、 $u_3 = 0$ ，在多管軸校正系統中，以精密電子經緯儀 Leica TC2003 進行模擬校正，其最小顯示讀值能力 $\Delta = 0.10''$ ，再由模擬校正所得數據計算出 $u_8 = 0.17''$ ，利用表 2 中的相關數值，透過式 (3) 將求得 $u_{c_2}(\mu) = 1.05''$ 。

3.1.2 有效自由度 $\nu_{\text{eff}}(\mu)$

將表 2 所列一測回水平角準確度 μ 誤差來源的標準不確定度及其自由度，以及 3.1.1 計算出來的組合標準不確定度代入 Welch-Satterthwaite 公式計算有效自由度，計算式如 (4)：

$$\nu_{\text{eff}}(\mu) = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4(y)}{\nu_1} + \frac{u_2^4(y)}{\nu_2} + \frac{u_3^4(y)}{\nu_3} + \dots + \frac{u_n^4(y)}{\nu_n}} \quad (4)$$

由上式計算所得有效自由度 $\nu_{\text{eff}}(\mu) = 17$ 。

3.1.3 涵蓋因子 k_μ

以選擇的 95% 信賴水準，並依 3.1.2 計算出的有效自由度 $\nu_{\text{eff}}(\mu) = 17$ ，利用 t 分布表查得涵蓋因子 $k_\mu = t_{95\%}(17) = 2.11$ 。

3.1.4 擴充不確定度 $U(\mu)$

擴充不確定度 $U(\mu)$ 由涵蓋因子乘上組合標準不確定度，因此可由 3.1.1 及 3.1.3 的結果得到 $U(\mu) = 2.3''$ ，此為多管軸校正系統之最小量測不確定度。「最小量測不確定度」是一個實驗室於認可範圍內，可達到的最小擴充不確定度。在研究中係以實驗室最高標準件進行模擬校正所獲得。

3.2 分度盤校正系統

一測回水平角準確度 μ 的誤差來源有 $\sigma_1 \sim \sigma_7$ 及 σ_{10} ，誤差來源相關分析及說明參表 2。

3.2.1 組合標準不確定度 $u_c(\mu)$

$$\nu_i = \alpha_i - \alpha_0 - \alpha_i^s \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^s) / n, n=7 \quad (6)$$

式中 α_i ：正倒鏡照準水平光管∞目標水平角觀測讀數平均值； α_0 ：平行定向參數； α_i^s ：第*i*位置360齒分度盤角度方向讀數； v_i ：第*i*位置計算之剩餘誤差。

$$u^2(\alpha_i) = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times (u^2(\alpha_{iF}) + u^2(\alpha_{iR})) \quad (7)$$

式中 α_i ：經緯儀正(F)及倒(R)鏡照準水平光管∞目標之水平方向讀數平均值； α_{iF} ：為正鏡水平方向讀數； α_{iR} ：為倒鏡水平方向讀數。

因為表 2 中的誤差來源彼此互相獨立，且靈敏係數均為 1，可得

$$u_{(\alpha_{iF})}^2 = u_{(\alpha_{iR})}^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2, n=7, \text{標準不確定度 } u(\alpha_i) \text{ 的計算可分為光學經緯儀 } u_{c_1}(\alpha_i) \text{ 及電子經緯}$$

儀 $u_{c_2}(\alpha_i)$ 兩類，以下僅針對電子經緯儀敘述如下：

以電子經緯儀為例， $u_2 = 0$ 及 $u_3 = 0$ ，在分度盤校正系統中，以精密電子經緯儀 Leica TC2003 進行模擬校正，其最小顯示讀值能力 $\Delta = 0.10''$ ，利用表 2 中的相關數值透過式 (7) 可得標準不確定度 $u(\alpha_i) = 0.63''$ 。

由式 (1)、(5) 及 (6)，各誤差源相互獨立，透過誤差傳遞，分別導出其標準不確定度 $u(v_i)$ 、 $u(\alpha_0)$ 及 $u^*(\mu)$ 如下：

$$u^2(v_i) = u^2(\alpha_i) + u^2(\alpha_0) + u^2(\alpha_i^s) \quad (8)$$

$$u^2(\alpha_0) = \left(\frac{1}{7}\right)^2 \sum_{i=1}^7 [u^2(\alpha_i) + u^2(\alpha_i^s)] \quad (9)$$

$$u^{*2}(\mu) = \left(\frac{1}{2\mu}\right)^2 \sum_{i=1}^7 \left(\frac{2v_i u(v_i)}{6}\right)^2 \quad (10)$$

由前面求得標準不確定度值 $u(\alpha_i) = 0.63''$ 及表 2 $u_{10} = u(\alpha_i^s) = 0.23''$ ，並由模擬校正所得一測回水平角準確度 $\mu = 0.34''$ ，透過 (8)、(9) 及 (10) 式可得標準不確定度 $u^*(\mu) = 0.29''$ 。組合標準不確定度 $u_c(\mu)$ 以式 (11) 計算

$$u_c(\mu) = [u^{*2}(\mu) + u^2(\alpha_i^s)]^{1/2} \quad (11)$$

利用前面求得一測回水平角準確度 μ 誤差源之 A 類標準不確定度分量 $u^*(\mu) = 0.29''$ ，自由度 $v_1 = 6$ ；另 360 齒分度盤之標準不確定度分量 $u(\alpha_i^s) = 0.23''$ ，自由度 $v_2 = 50$ 。則一測回水平角準確度 μ 誤差源之組合標準不確定度 $u_c(\mu)$ 可由式 (11) 求得 $u_c(\mu) = 0.37''$ 。

3.2.2 計算有效自由度 $\nu_{eff}(\mu)$ 、涵蓋因子 κ_{μ} 及擴充不確定度 $U(\mu)$

由上述計算結果，參考 3.1.2、3.1.3 及 3.1.4 的計算方式可得有效自由度 $\nu_{eff}(\mu) = 15$ 、涵蓋因子 $\kappa_{\mu} = t_{95\%}(15) = 2.13$ 及擴充不確定度 $U(\mu) = 0.8''$ ，此即為分度盤校正系統之最小量測不確定度。

3.3 分度盤校正系統測回數不同數據分析

目前通過 TAF 認證之實驗室且使用分度盤校正一測回水平角準確度之校正方法有 25 測回、13 測回及 7 測回，即每次變換度盤分別為 15° 、 30° 及 60° ，本中心分度盤校正系統依財團法人工業技術研究院建議可使用 7 測回，即每次變換度盤 60° 辦理校正。為驗證 3 種校正方法之校正結果是否一致，本研究運用 7 部儀器，分別使用 7 測回、13 測回及 25 測回辦理一測回水平角準確度校正，校正結果如表 3 所列，各測回之結果值分佈曲線如圖 4。

表 3 測回數校正結果

項次	儀器型號	精度/最小讀數	儀器序號	7 測回	13 測回	25 測回	備註
1	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159400	0.29"	0.43"	0.54"	
2	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165395	0.39"	0.52"	0.46"	
3	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165380	0.57"	0.69"	0.46"	
4	Leica/TS02	3"/1"	1313457	0.67"	1.13"	0.44"	
5	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165387	0.38"	0.80"	0.65"	
6	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159393	0.84"	0.90"	0.75"	
7	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159425	0.57"	0.62"	0.69"	

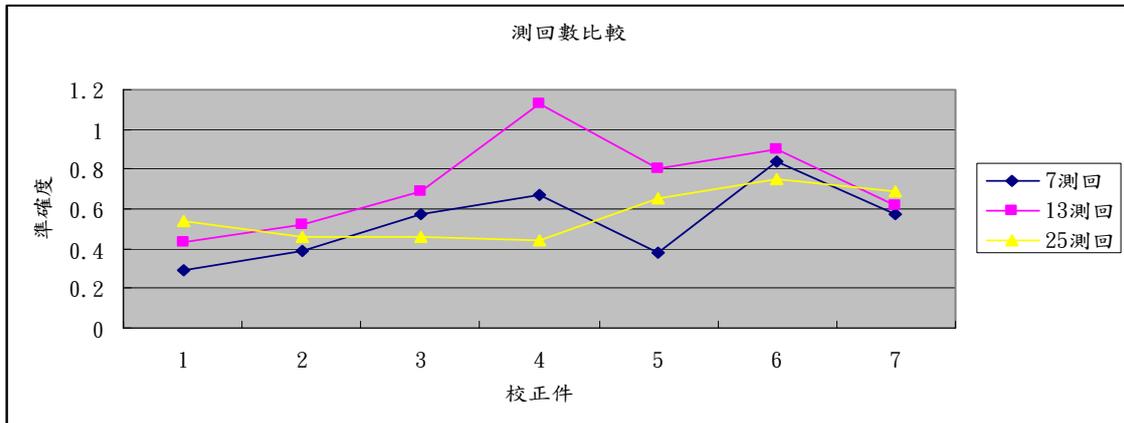


圖 4 測回數分析圖

為檢驗 3 種校正方法之校正結果是否一致，本研究使用統計學中常使用之變異量分析 (The Analysis of Variance, 簡稱 ANOVA) 進行假測檢定。ANOVA 是一種在多樣本的情形下，檢定各樣本平均數是否相等 (陳森勝、李德治, 2010)。假設同一校正件使用 3 種校正方法，校正結果應是一致的，則樣本平均值應無差異性，設定假說如下：

虛無假說 $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ 。

對立假說 H_1 : 至少有兩組 μ 不等。

ANOVA 使用之相關計算式如式 (12)，若 F 檢定值 $< F_{(\alpha, df_b, df_w)}$ 則無法拒絕虛無假說 H_0 ，即表示各組平均值具無差異性，計算結果如表 4 所示。

$$F \text{ 檢定值} = \frac{MS_b}{MS_w} = \frac{SS_b/df_b}{SS_w/df_w} \quad (12)$$

式中總自由度 $df_{total} (df_t)$ = 總樣本數(N) - 1；組間自由度 $df_{between} (df_b)$ = 組數 - 1；組內自由度 $df_{within} (df_w)$ = 總樣本數 - 組數；總變異數量 $SS = \sum \sum X^2 - \frac{G^2}{N}$ ，
 $G = \sum \sum X$ ；組間變異量 $SS_b = \sum_{j=1}^n n_j (M_j - M_t)^2$ ；其中 n: 組數； M_j : 各組平均值； M_t : M_j 平均值；組內變異量 $SS_w = SS_t - SS_b$ 。

表 4 不同校正方法 ANOVA 檢定計算表

變異來源	SS	df	MS	F
組間變異 (b)	0.15204	2	0.07602	2.08789
組內變異 (w)	0.65534	18	0.03641	
總變異	0.80738	20		

經查表 $F(0.05, 2, 18) = 3.55$

經比較 F 檢定值 2.09 小於 $F(0.05, 2, 18)$ 值 3.55，因此，無法拒絕虛無假說 H_0 ，顯示各 7 測回、13 測回及 25 測回之樣本平均是相同的，即校正結果應是一致的。因此，基於成本考量或作業人力考量，會使用不同的測回數來校正一測回水平角準確度，但其結果應是一致的。

四、 兩系統分析比較

本中心校正實驗室同時具備 2 套不同校正系統，其中多管軸校正系統係購置 NIKON 原廠設備，並依其設計規格尺寸安裝；另分度盤校正系統乃參考國家度量衡國家標準實驗室現有校正系統建置，架構及設備乃係自行組裝而成。本節將針對系統架構、校正方法及量測追溯等方向分析兩校正系統之異同。並參考 TAF 實驗室間比對方式，以 En 值評估實驗室能力，為進一步驗證兩校正系統對相同儀器之校正結果是否具一致性，將利用 F 檢定及 t 測試進行假說測試。

4.1 系統架構

系統架構上的差異，大致上可由設備所需空間及操作便利性來探討，空間上，多管軸校正系統設備屬線型設計，所有組件建置於一直線上，所佔空間較大，而分度盤校正系統之架構設計，系將所有組件設置於花崗石平台上，並不需很大的空間；操作上，以多管軸校正系

統校正期間，可以坐姿辦理校正，對操作人員可提供較舒適之作業環境，不過仍有一小缺點，在施作一測回水平角準確度項目時，由於觀測目標不同，必需重複一直變換位置。相對的，分度盤校正系統雖然有設備組件集中之優勢，觀測過程不需變換位置，但必須以站姿施作，如僅由同一人員長時間操作，在體力上勢必是一大考驗，另如考量作業時間長短，2 套系統應無明顯差異。

4.2 校正方法

2 套系統對於視準軸誤差、橫軸誤差、垂直度盤指標差及望遠鏡視軸直度誤差這些項目的校正，均是使用上層、水平及下層三根光管完成，在方法上較無差異，所運用的數學運算亦相同，主要都是利用物理原理，藉由觀測固定的目標來計算其誤差量。至於一測回水平角準確度是指經緯儀正、倒鏡觀測同一目標所求得的方向值的準確度。直接反映了經緯儀則角準確度的好壞，是經緯儀校正項目中最重要項目之一，其檢定方法有多目標法及比較法。該兩套系統在校正此一項目上差異性就較大，分述如下：

4.2.1 多管軸校正系統

如圖 1，該系統在架構設計上即假設輔助準直儀與主準直儀之無窮遠目標在校正時是穩定的，兩目標間的夾角在短時間內沒有變化，一測回水平角準確度係透過經緯儀重複觀測此一穩定夾角後計算剩餘差所得，因此在意義上較類似多目標法。

4.2.2 分度盤校正系統

以分度盤校正一測回水平角準確度係利用所謂的比較法，將待校經緯儀與角度標準器進行比較，而所謂的角度標準器一般指的是分度盤，分度盤是一種高準確度的圓分度標準器，一般由 2 個齒盤、齒數和模數不同的端面齒盤組成。使用時，一個齒盤固定，另一個齒盤可與之脫開，旋轉至所需角度後契合，進而達到定位和分度的目的。對於每一個齒盤而言，齒與齒之間的分度準確度不一定很高，但當 2 個齒盤契合後，卻可獲得高於單個齒盤的分度準確度。契合的齒數愈多，分度準確度也愈高。理論上，在任意位置上 2 個齒盤的齒全部契合時，其分度誤差應為零，事實上，由於機械加工等原因，仍然存在分度誤差，誤差的大小除取決於加工技術及齒數外，還與安裝情況有關。目前常見的分度盤有 360 齒、391 齒、720 齒、1440 齒等幾種（楊俊志，2004）。

本系統對於一測回水平角準確度的校正，係利用變換度盤的方式，觀測固定光管之無窮遠目標，每次變換 60°，共變換 7 次，以求得殘差，進而計算其一測回水平角準確度。

依 ISO/IEC 17025 對校正之定義為「在特定條件下為確立量測儀器或量測系統的器示值，與相對應被量測的已知值之間關係的一組操作」，多管軸校正系統，在校正方法上係使用重複觀測兩個穩定的目標，並未提供一標準與量測值比較。分度盤校正系統，經過多次變換度盤，藉由比較經緯儀讀數與度盤變值比較，似較符合依 ISO/IEC 17025 對校正之定義。

4.3 量測追溯

依 ISO/IEC17025：2005 條文 5.6 與 ISO15189 條文 5.6 規定實驗室必需符合追溯要求。

追溯是指待測量於量測儀器或物質量測的顯示值，經由一個或多個階段校正作業後，能與待測量於國家標準之值做比較的程序。校正實驗室之量測設備應有校正方案，以確保實驗室所執行之校正與量測可追溯至國際單位制(SI)（財團法人全國認證基金會，2005），有關國際間計量標準傳遞如圖 5。

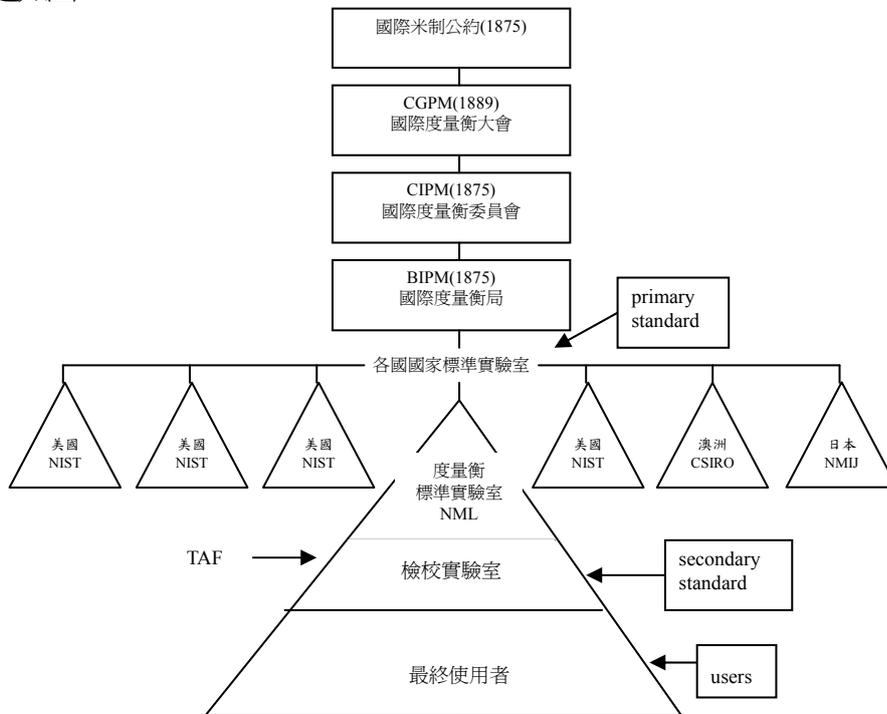


圖 5 計量標準傳遞圖

多管軸校正系統所使用之定線瞄準儀及多目標瞄準儀為固定設備，無法拆卸後將設備送追溯，因此系統本身並未能追溯至國家度量衡標準實驗室（NML），乃需透過參考標準件，經由標準件追溯後來驗證校正系統的穩定性，間接完成追溯性，量測追溯圖如圖 6。

分度盤校正系統使用之校正設備為 360 齒精密分度盤，在架購設計上分度盤是可拆卸的，即分度盤本身是可送追溯的，分度盤即為該校正系統的標準件，其追溯性便可透過定期校正來完成，目前該系統訂定週期為 3 年，有關追溯之階級關係如圖 7。

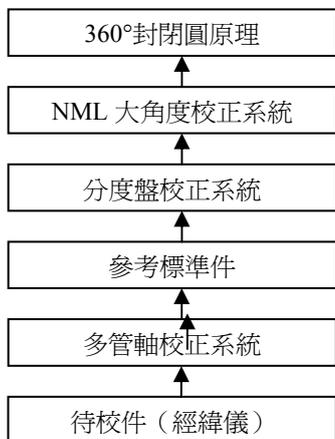


圖 6 多管軸校正系統追溯圖

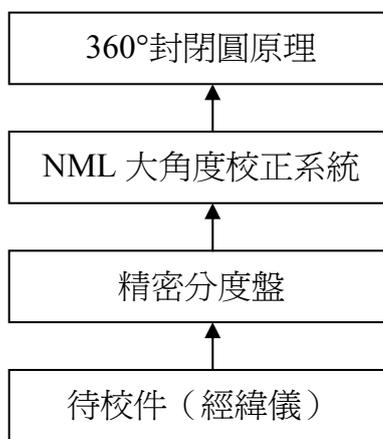


圖 7 分度盤校正系統追溯圖

4.4 實驗室間比對分析

所謂實驗室間比對 (Interlaboratory Comparison, 簡稱: ILC), 係指兩家或以上的實驗室依照既定條件, 規劃、執行與評估相同或類似項目的量測或測試 (財團法人全國認證基金會, 2012)。一般校正實驗室以式 (13) En 值評估實驗室之能力:

$$En = \frac{V_{lab} - V_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad \text{合格基準 } |En| \leq 1 \quad (13)$$

V_{lab} : 參與實驗室的量測結果; V_{ref} : 參考實驗室的量測結果; U_{lab} : 參與實驗室對量測結果所標示之量測不確定度; U_{ref} : 參考實驗室對量測結果所標示之量測不確定度。

本研究係採用 TAF 實驗室間比對方式, 來評估分度盤校正系統校正結果的合理性, 因為多管軸校正系統已通過 TAF 認證, 因此以多管軸校正系統之校正結果為 V_{ref} , 該系統之擴充不確定度為 U_{ref} ; 而精密度分度盤校正系統之校正結果為 V_{lab} , 該系統之擴充不確定度為 U_{lab} 。利用式 (13) 計算一測回水平角準確度之 En 值, 觀測資料計算如表 5:

表 5 能力試驗結果彙整表

項次	儀器型號	精度/最小讀數	儀器序號	多管軸校正系統		分度盤校正系統		En 值
				μ	$U(\mu)$	μ	$U(\mu)$	
1	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165389	0.5"	2.5"	0.7"	0.9"	0.08
2	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165388	0.6"	2.6"	0.9"	0.9"	0.11
3	Leica/TS02	3"/1"	1313562	0.6"	2.6"	0.8"	0.9"	0.07
4	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159400	0.8"	2.6"	0.3"	0.9"	0.18
5	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165395	0.7"	2.6"	0.4"	0.9"	0.11
6	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165380	0.2"	2.5"	0.6"	0.9"	0.15
7	SOKKIA/SET330RK3	3"/1"	165387	0.4"	2.5"	0.4"	0.9"	0.00
8	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159363	0.6"	2.6"	0.6"	0.9"	0.00
9	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159467	0.3"	2.5"	0.7"	0.9"	0.15
10	SOKKIA/SET330R3	3"/1"	159393	0.5"	2.5"	0.8"	0.9"	0.11

由 En 值之分析結果發現, 2 套校正結果計算一測回水平角準確度 En 值均小於 1, 符合 TAF 對不同實驗室間比對的要求, 顯示精密度分度盤校正系統之校正程序及系統評估可行, 校正結果合理。

4.5 統計測試分析

本研究除運用 TAF 所使用之 En 值判定分度盤校正系統之系統評估合理性外, 為進一步驗證兩校正系統對相同儀器之校正結果是否具一致性, 將利用 F 檢定及 t 檢定進行假說測試。

4.5.1 F 檢定

所謂 F 檢定是用來檢定兩個樣本的變異數 (Variance) 是否相同, 首先使用 F 檢定來檢定同一部儀器同樣校正項目在不同之校正系統結果之變異數是否相同。本研究使用 Microsoft Excel 中資料分析工具進行此項分析, 由表 5 之校正結果, 檢定目的是「 $\sigma_{\text{多管軸}}^2$ (以下以 σ_1^2 表示) = $\sigma_{\text{分度盤}}^2$ (以下以 σ_2^2 表示)」, 因此採雙尾檢定,

假說如下：

$$\text{虛無假說 } H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$\text{對立假說 } H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

假設 S_1 為多管軸系統之變異數， S_2 為分度盤系統之變異數，兩系統之樣本數 n 均為 10，自由度 df 均為 9，F 檢定值計算式 (14) 如下：

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} ; \text{ 其中 } S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n-1}} ; X \text{ 為取值，} \bar{X} \text{ 為平均值} \quad (14)$$

若檢定值 F 落於拒絕域 $F > F_{(\alpha/2, df1, df2)}$ 及 $F < F_{(1-\alpha/2, df2, df1)}$ 則拒絕虛無假說 H_0 ，即多管軸系統與分度盤系統之變異數是有差異性的，否則無法拒絕虛無假說 H_0 ，即 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ，兩系統之變異數是相同的，其中 $F_{(1-\alpha/2, df2, df1)} = 1 / F_{(\alpha/2, df1, df2)}$ ，可查表而得。取顯著水準 $\alpha = 0.05$ ，各校正項目之自由度、變異數 S 、F 檢定值、臨界值及檢定結果如表 6 所示。

表 6 一測回水平角準確度之 F 檢定結果

校正項目	自由度	變異數 S	F 檢定值	$F_{(\alpha/2, df1, df2)}$	$F_{(1-\alpha/2, df2, df1)}$	檢定結果
一測回水平角準確度	df1=9	0.1720	0.8315	4.026	0.2484	接受 H_0
	df2=9	0.1887				

由檢定結果可歸納，多管軸校正系統與分度盤校正系統之變異數無明顯差異，亦即兩校正結果之散佈是相同的。

4.5.2 t 檢定

所謂 t 檢定是用來檢定兩個樣本平均數的差異性檢定，由上述 F 檢定結果得知，多管軸校正系統與分度盤校正系統之變異數無異，即 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ，由於樣本取樣數均為 10，屬於小樣本（樣本數 < 30 ），因此將使用假設變異數相等，兩個母體平均數差的 t 檢定，檢定目的是「 $\mu_{\text{多管軸}}$ （以 μ_1 表示）= $\mu_{\text{分度盤}}$ （以 μ_2 表示）」，因此採雙尾檢定，假說如下：

$$\text{虛無假說 } H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$\text{對立假說 } H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

代號 1 為多管軸系統，代號 2 為分度盤系統，t 檢定值計算式 (15) 如下：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} + \frac{S_p^2}{n_2}}} \quad (15)$$

$$\text{其中 } S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}, \quad df = n_1 + n_2 - 2$$

若檢定值 t 落於 $t_{(\alpha/2, df)}$ 及 $-t_{(\alpha/2, df)}$ 則無法拒絕零假設 H_0 ，表示多管軸系統與分度盤系統之平均數無差異性，否則應拒絕零假設 H_0 ，其中 $t_{(\alpha/2, df)}$ 可查表而得。取顯著水準 $\alpha = 0.05$ ，各校正項目之自由度、變異數 S 、 t 檢定值、臨界值及檢定結果如表 7 所示。

表 7 一測回水平角準確度之 t 檢定結果

校正項目	平均數	變異數 S^2	t 檢定值	雙尾 $t_{(\alpha/2, df)}$	檢定結果
一測回水平角準確度	0.52	0.0329	-1.1749	2.1009	接受 H_0
	0.62	0.0396			

由檢定結果可歸納，多管軸校正系統與分度盤校正系統兩校正系統各校正項目之平均值無明顯差異，亦即兩校正結果具一致性。

五、 結語及建議

本研究中藉由精密電子經緯儀 Leica TC2003 進行模擬校正，參考「量測不確定度表示方式指引」之評估程序，對校正過程各項誤差進行評估，初步顯示多管軸校正系統及分度盤校正系統之擴充不確定度分別為 2.3" 及 0.8"，意謂著以分度盤校正經緯儀一測回水平角準確度時可大幅提升實驗室之校正能力。

再者，參考 TAF 實驗室間比對的概念檢視分度盤校正系統之能力，利用已通過認證之多管軸校正系統作為參考依據，其 En 值皆小於 1，顯示其校正結果與原系統接近，由此可知，本中心以目前建置之分度盤校正系統進行一測回水平角準確度校正應有足夠的可靠性。

目前已通過認證之實驗室，於一測回水平角準確度之校正方法有使用 7、13 及 25 測回，經研究結果顯示，不同測回數之校正結果具一致性。考量校正成本及經濟效益，未來規劃時建議以 7 測回方式進行即可。

參考文獻

1. 內政部國土測繪中心，2011 (a)，經緯儀校正作業程序，SICL-3-02-0。
2. 內政部國土測繪中心，2011 (b)，經緯儀校正系統評估，SICL-3-02-1。
3. 財團法人全國認證基金會網址 <http://service.taftw.org.tw/tafweb/indexC.aspx>。
4. 財團法人工業技術研究院，2009，測量儀器校正實驗室委託輔導認證 (NLSC-98-19)。
5. 財團法人全國認證基金會，2005，ISO/IEC 17025：2005 測試與校正實驗室能力一般要求 (TAF-CNLA-R01 (2))。
6. 財團法人全國認證基金會，2012，能力試驗活動要求 (TAF-CNLA-R05(4))。
7. 陳焱勝、李得治，2010，統計學概論，前程文化。
8. 楊俊志，2004，全站儀的原理及其檢定，中國，測繪出版社。
9. International Organization for Standardization，2008，Uncertainty of measurement —Part3：Guide to the expression of uncertainty in Measurement，First Edition。