

第四章 三維雷射掃瞄儀距離檢定

本章節在描述三維雷射掃瞄儀的距離檢定與系統誤差的改正工作，藉由長距離檢定場的建立，以雷射掃瞄成果與傳統的全測儀測量檢定檢定場內的九個反射標。此外，將點雲資料藉由七參數轉換來對儀器的系統誤差進行改正，並將檢定得到的精度與原廠報告進行比對分析。

4-1 國內外檢定場與檢定方法介紹

一般來說，測量上可分為系統誤差與偶然誤差，而我們進行檢定工作的目的即是為了檢驗雷射掃瞄儀是否含有系統誤差，並分析其誤差量；因此，根據不同需求來建立一個適當的檢定場是必要的，在收集國內外相關的雷射掃瞄檢定場之後，我們可將其概略分為室內(Indoor)檢定場以及室外(Outdoor)檢定場兩大類。針對不同目的與需求，室內及室外檢定場有其優缺點，將分述如下：

1. 室內檢定場：

室內檢定場最大的優點在於能方便進行觀測，並較容易控制環境變因，使反射標的定位能夠達到較高的精度，減少環境因素對於定位成果的影響。但是相對地，室內檢定場最大缺點即是受限於檢定場的範圍，無法進行中長距離的檢校作業，因此使得距離對誤差的影響量

難以顯現。

2. 室外檢定場：

相對於室內檢定場來說，室外檢定場可以將反射標與雷射掃瞄儀的距離拉遠，因此可以任意控制掃瞄距離，對於進行一般工程用雷射掃瞄儀的距離檢定是較適當的選擇；但其缺點則是不易控制環境因素對掃瞄的影響，包括天候及溫度、濕度等改變，都有可能對掃瞄的作業過程與成果產生影響。此外，因為中長距離的檢定需要較大型的場地，因此在場地的設置上也較室內檢定場困難。



國內外已有針對不同的目的及方法來對三維雷射掃瞄儀進行檢定，本研究根據目前一些相關研究文獻，收集國內外的各種檢定作業方式，來作為本研究檢定場設置的參考及依據。以下將分為室內檢定及室外檢定來分別簡述國內外各種檢定方法：

一、室內檢定：

Tucker(2002)使用 Cyrax 2500 三維雷射掃瞄儀來檢驗其掃瞄誤差與精度，並檢測使用 Cyrax 的原廠反射標以及使用 Leica 的反射稜鏡兩者掃瞄得到的中心點位座標之常差量。Tucker 的作法分為兩部分，第一部份是在近距離(3.2 公尺~5.8 公尺)下，分別以雷射掃瞄儀和全測儀對十個反射標進行座標的量測，再將兩者得到的座標以六參

數轉換到同一座標系，並比較兩者之間的差值。第二部分則是將距離拉長至 9~43 公尺，同樣以雷射掃瞄儀和全測儀對十個反射標進行掃瞄，但最後並非比較各個反射標的座標值，而是分別對兩個反射標之間的距離比較其誤差量。

Johansson(2002)針對三種不同品牌的三維雷射掃瞄儀進行比較，分別是 Cyrax 2500、Optech ILRIS 3D 及 Rigel LMS-Z210，設定在同樣的環境條件之下，分別以 5、10、30、55、85 公尺來進行檢定作業。其作法是使用上述三部三維雷射掃瞄儀對不同距離的反射標進行掃瞄，再與全測儀觀測得到的各反射標座標值來進行差異量與精度分析。此外，Johansson 也設計了三種不同的物體作為掃瞄對象，並將三個物體放在一起進行掃瞄，比較三台不同的儀器對於這三種物體掃瞄的效果；最後由一種已知四種反射係數的特製反射標來觀察對三種儀器量測時的影響。

Jaakko & Vahur(2003)同樣使用 Cyrax 2500 來進行檢定工作，其檢定的目的是分析在不同的掃瞄角度及距離下，對掃瞄結果的影響。其作法是特製一個可前後傾斜的圓形面板，在面板上黏貼反射標，藉此控制反射標的傾斜角度(垂直擺放 270 度並再加減 30 度)；並同時使用雷射掃瞄儀和全測儀，在 3、10、25、50 公尺等不同距離下對反射標進行量測，探討分析尺度因子以及座標精度的變化。

賴志凱(2004)使用 Optech ILRIS 3D 雷射掃瞄儀，檢定場選定在成功大學的測量系館內，在掃瞄距離約 10 公尺處對自製的 136 個反射標進行重複觀測；再以 Leica TCR1103 全測儀對反射標進行觀測，將得到的兩組不同座標系的反射標中心座標藉由六參數轉換到同一座標系之下，比對其座標差值。在實驗中，分別針對重複掃瞄、不同日期掃瞄以及掃瞄局部區域等三個實驗來進行不同的檢定，探討誤差來源。

二、室外檢定：

Lichti et al.(2000)使用 I-Site 雷射掃瞄儀進行三種檢定作業：第一種是對反射標進行掃瞄，再將點雲資料以三種不同的計算方法來分別求得反射標中心座標；第二種是 EDM 基線測定，測定時利用已知彼此距離的定心柱，在定心柱上安置定心定平的掃瞄儀及反射標，量測掃瞄儀到各反射標的距離；第三種檢定是利用 GPS 求得反射標的三維座標，再利用六參數轉換將雷射掃瞄得到的反射標中心座標與 GPS 得到的座標轉換到同一座標系，並比較轉換後座標的精度與差值。

Gordon et al.(2001)使用 Cyrax 2400 進行檢定，將反射標貼於高牆上，並同樣使用雷射掃瞄儀與全測儀對反射標進行觀測，再利用六參數轉換到同一座標系下，比較個別得到的反射標中心座標值來計

算其誤差和精度。

上述的研究文獻所使用的檢定方法較少著墨於距離方面的檢定，且使用的距離較短；隨著雷射掃瞄技術的發展，雷射掃瞄儀可達到的掃瞄距離逐漸增加，本研究希望能藉由設計的檢定實驗，提供中長距離的工程用雷射掃瞄儀在實際外業前進行檢校工作，藉由檢定的結果來判定儀器是否有系統誤差。



4-2 距離檢定場實驗

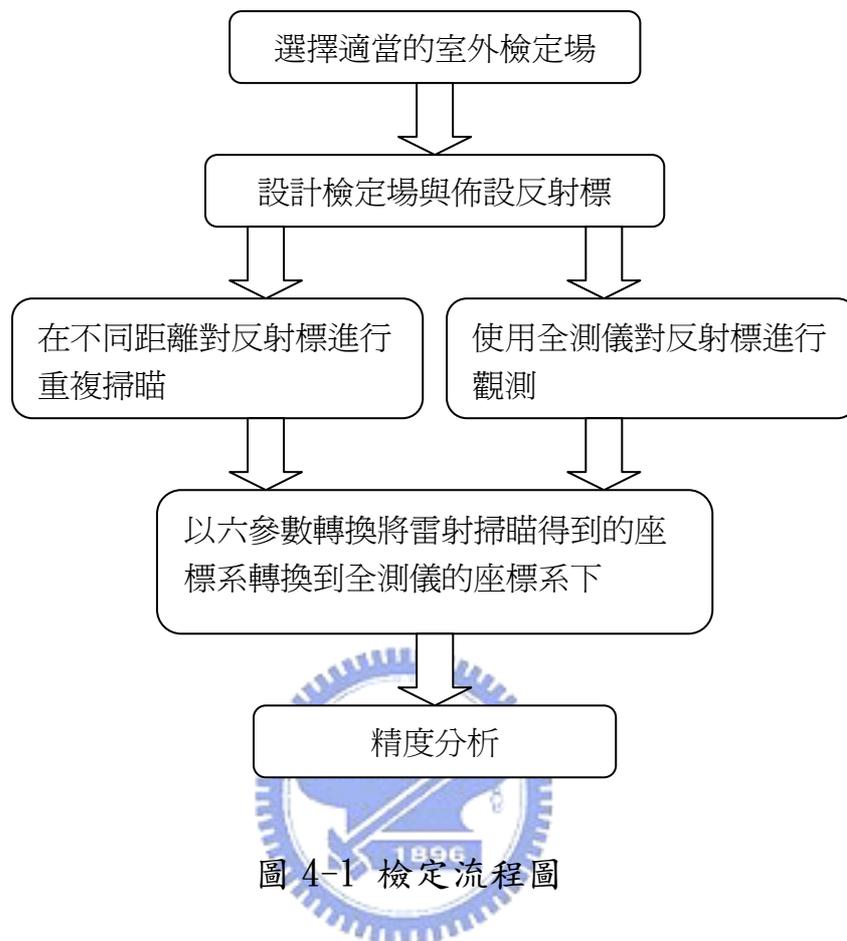
雷射掃瞄可以快速獲取大量精確的點雲資料，在廠商出產儀器的規格表之中，往往敘述儀器擁有公釐級的精度。但規格表上的精度通常只是其雷射測距精度，而非掃瞄的定位精度；此外，如果儀器在出廠時沒有經過嚴密的校正工作，或受到外力等未知因素影響而導致儀器內部發生問題，會使我們掃瞄得到的點位座標發生系統性的誤差，而影響定位的精度。因此，發展一套雷射掃瞄儀的檢校方法有助於確保雷射掃瞄的品質，以利相關測量技術的應用發展。

在影響雷射掃瞄精度的各種因素當中，根據國內外研究文獻資料顯示，掃瞄的距離將會影響雷射掃瞄的定位精度，因此本研究將建立一個中長距離的檢定場，針對不同距離來對掃瞄儀進行檢校工作，並對系統誤差進行系統性的改正。

4-2-1 三維雷射掃瞄儀距離檢定步驟

本研究的檢定方法是在所選擇的檢定場內佈設反射標，再分別於不同的距離以三維雷射掃瞄儀對反射標進行掃瞄；另外再以傳統測量的全測儀對反射標進行量測做為已知值，得到反射標的中心座標，並利用六參數轉換，將掃瞄得到的座標系轉換到全測儀的座標系後，進行比較分析。圖 4-1 是檢定作業的流程圖，以下則為各個步驟的詳細

說明：



1. 選擇適當的室外檢定場：

由於本研究主要在探討距離對於三維雷射掃瞄儀定位精度的影響，因此檢定場需要選擇在一個有足夠距離且允許貼標的場所；本研究選用的 Mensi GS200 雷射掃瞄儀的有效掃瞄距離可達 200 公尺，因此如果要檢定 GS200 掃瞄範圍內所有距離，則很難選擇室內的檢定場，故室外的檢定場是較為恰當的選擇。本實驗檢定場選用在桃園中正理工學院的彈道館前，反射標佈設於彈道館的牆面上，而彈道館正前方的柏油路即為儀器架設處，最遠可在同一直線上選擇約 200~250

公尺的掃瞄距離。

2. 設計檢定場與佈設反射標：

反射標選擇第三章所使用的 Mensi 原廠 target，在牆面上佈設 9 個反射標(3×3)，並以矩陣方式排列，而相鄰兩個反射標的距離約為 15 公分。圖 4-2 即為反射標排列的照片，圖 4-3 為檢定場的照片。

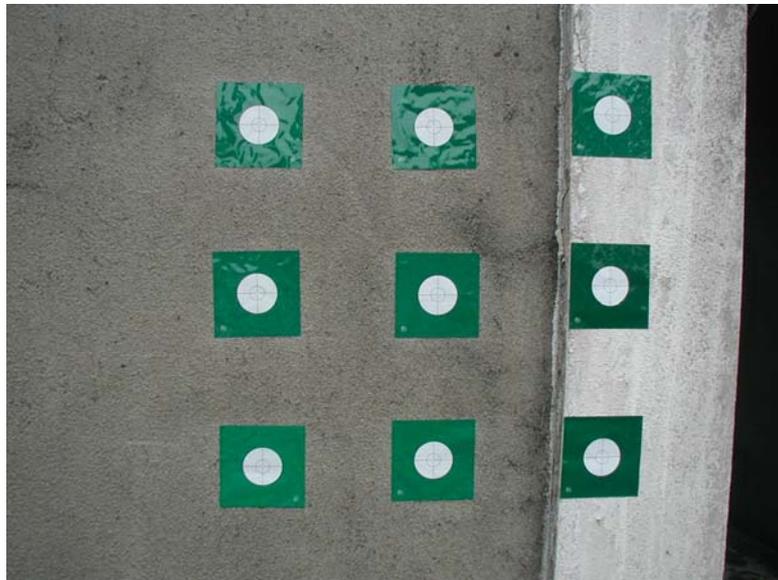


圖 4-2 反射標排列的照片



圖 4-3 檢定場的照片

3. 在不同距離對反射標進行重複掃瞄：

以 Mensi 所生產的 GS200 雷射掃瞄儀分別在距離反射標約 5、25、50、95、100、150、200 公尺處，對 9 個反射標分別進行五次的重複觀測，並以 PointScape 2.1 軟體內的功能定出反射標中心；當距離超過 95 公尺時，軟體無法辨識反射標中心，因此我們利用反射標中間白色圓形區域的反射度較強，訂定掃瞄點雲資料反射值的門檻值，再將反射值高於門檻值的點則將座標值相加取平均，亦可得到反射標

的中心座標值；這些由雷射掃瞄得到的反射標中心座標，我們稱之為觀測座標。

4. 使用全測儀對反射標進行觀測：

本研究使用 Trimble 5000 全測儀來觀測檢定場，觀測目標是九個反射標中心的十字交點位置。我們先將最左上角的反射標中心座標值設為(0, 0, 0)，並根據觀測得到的斜距和角度分別計算出其他八點的座標值，再平差改正每個反射標。由全測儀觀測，再經平差計算後得到的反射標中心座標視為檢定場的已知座標值，代表檢定場內各反射標之間的相對位置。



5. 座標轉換：

將觀測座標與已知座標兩個不同座標系的相同點位，藉由六參數（三平移、三旋轉）進行座標轉換，把觀測座標轉換到與已知座標相同的座標系，使雷射掃瞄得到的反射標中心點座標與全測儀量測得到的座標處於同樣的座標系統之下。六參數轉換的公式如式 4-1 所示：

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} x_L - X \\ y_L - Y \\ z_L - Z \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中 (x_A, y_A, z_A) 為全測儀觀測得到的已知座標

(x_L, y_L, z_L) 為雷射掃瞄得到的觀測座標

(ω, ϕ, κ) 為兩座標系的旋轉角度參數

(X, Y, Z) 為兩座標系原點的平移參數

6. 精度分析：

針對掃瞄成果的好壞，我們可從誤差、精確度與精密度三者來進行分析探討。在檢定場實驗之中，當所有的觀測座標都轉換到已知座標系後，我們將不同距離下對每一個反射標的五次重複掃瞄成果取平均值，再與相對應的已知座標相減，即可得到誤差量，如式 4-2；精確度以 RMS 表示，由轉換後的觀測座標與已知座標依公式 4-3 計算求得；精密度的指標則為 STD，是分別將不同測站的重複掃瞄觀測資料經轉換後減去平均座標所得的誤差來計算求得，如式 4-4 所示。

$$\Delta L = \bar{L} - L_A \quad (4-2)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{Li} - L_A)^2}{n}} \quad (4-3)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{Li} - \bar{L})^2}{n-1}} \quad (4-4)$$

其中 ΔL 為誤差值 $\Delta L = \{ \Delta x, \Delta y, \Delta z \}$

$$\Delta x = \bar{x}_L - x_A, \Delta y = \bar{y}_L - y_A, \Delta z = \bar{z}_L - z_A$$

\bar{L} 為重複掃瞄的觀測座標平均值

L_A 為全測儀觀測得到的已知座標

L_{Li} 為掃瞄第 i 次的觀測座標

在本章中的檢定場實驗使用的工具分為軟體和硬體兩部分：硬體方面包括 Mensi GS200 三維雷射掃瞄儀、Trimble 5000 全測儀，以及使用 Mensi 生產的 target 來作為檢定場的反射標。軟體方面包括 GS200 的控制軟體 PointScope 2.1，軟體並內建反射標的定位功能；點雲資料的疊合與展示則是使用 RealWorks 軟體進行處理；而其餘利用不同反射強度點雲來計算反射標中心座標程式以及座標轉換程式的撰寫則是使用程式語言 Borland C++ Builder6。

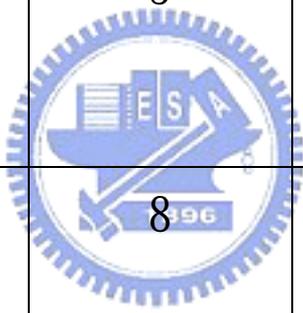
4-2-2 實驗成果與分析

在掃瞄完八個不同距離的測站之後，我們首先將各測站掃瞄九個反射標的觀測座標經由六參數轉換到已知座標的座標系之下，並分別計算其精密度、誤差值與精確度。我們將測站分別在距離反射標大約 10、25、50、95、100、150、200 公尺處，對九個反射標各進行五次

重複觀測，反射標的編號如表 4-1 所示。以上成果將分為兩部分探討：第一部份是針對不同的掃瞄距離，重複觀測得到的反射標中心座標之精密度分析；第二部分則是利用觀測座標與已知座標的比較，來探討掃瞄成果的精確度。

表 4-1 反射標編號示意表

1	2	3
4	5	6
7	8	9



第一部份：

將所有的反射標重複掃瞄五次，可分別計算其 XYZ 方向與距離的 STD，分別以 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_s 表示。表 4-2 到 4-8 為不同距離掃瞄得到的 STD，其中每格代表相對應位置反射標資料；表 4-9 為各測站反射標平均的 STD，以下的單位均為 mm，編號如上表 4-1 所示。

表 4-2 掃瞄距離 10m 時的 STD

$\sigma x=0.91$	$\sigma x=0.72$	$\sigma x=0.75$
$\sigma y=0.66$	$\sigma y=0.39$	$\sigma y=0.36$
$\sigma z=0.15$	$\sigma z=0.13$	$\sigma z=0.20$
$\sigma s=1.14$	$\sigma s=0.83$	$\sigma s=0.85$
$\sigma x=0.49$	$\sigma x=0.56$	$\sigma x=0.53$
$\sigma y=0.22$	$\sigma y=0.15$	$\sigma y=0.15$
$\sigma z=0.21$	$\sigma z=0.21$	$\sigma z=0.12$
$\sigma s=0.57$	$\sigma s=0.62$	$\sigma s=0.57$
$\sigma x=0.54$	$\sigma x=0.39$	$\sigma x=0.34$
$\sigma y=0.08$	$\sigma y=0.22$	$\sigma y=0.20$
$\sigma z=0.10$	$\sigma z=0.17$	$\sigma z=0.10$
$\sigma s=0.56$	$\sigma s=0.48$	$\sigma s=0.41$

表 4-3 掃瞄距離 25m 時的 STD

$\sigma x=6.31$	$\sigma x=5.52$	$\sigma x=5.38$
$\sigma y=0.38$	$\sigma y=1.22$	$\sigma y=0.83$
$\sigma z=2.82$	$\sigma z=2.38$	$\sigma z=2.31$
$\sigma s=6.92$	$\sigma s=6.13$	$\sigma s=5.91$
$\sigma x=4.64$	$\sigma x=4.70$	$\sigma x=4.24$
$\sigma y=1.34$	$\sigma y=0.48$	$\sigma y=0.94$
$\sigma z=2.13$	$\sigma z=2.10$	$\sigma z=1.81$
$\sigma s=5.28$	$\sigma s=5.17$	$\sigma s=4.70$
$\sigma x=4.18$	$\sigma x=3.91$	$\sigma x=3.63$
$\sigma y=0.85$	$\sigma y=0.72$	$\sigma y=0.65$
$\sigma z=1.87$	$\sigma z=1.72$	$\sigma z=1.56$
$\sigma s=4.65$	$\sigma s=4.33$	$\sigma s=4.00$

表 4-4 掃瞄距離 50m 時的 STD

$\sigma x=5.90$	$\sigma x=4.69$	$\sigma x=3.75$
$\sigma y=0.56$	$\sigma y=0.56$	$\sigma y=0.60$
$\sigma z=4.52$	$\sigma z=3.74$	$\sigma z=3.17$
$\sigma s=7.47$	$\sigma s=6.02$	$\sigma s=4.95$
$\sigma x=3.69$	$\sigma x=3.08$	$\sigma x=2.82$
$\sigma y=0.59$	$\sigma y=0.57$	$\sigma y=0.42$
$\sigma z=2.83$	$\sigma z=2.41$	$\sigma z=2.22$
$\sigma s=4.69$	$\sigma s=3.95$	$\sigma s=3.61$
$\sigma x=2.71$	$\sigma x=2.36$	$\sigma x=2.07$
$\sigma y=0.66$	$\sigma y=0.53$	$\sigma y=0.59$
$\sigma z=2.27$	$\sigma z=2.09$	$\sigma z=1.74$
$\sigma s=3.60$	$\sigma s=3.19$	$\sigma s=2.77$

表 4-5 掃瞄距離 95m 時的 STD

$\sigma x=37.52$	$\sigma x=22.42$	$\sigma x=24.81$
$\sigma y=16.42$	$\sigma y=13.90$	$\sigma y=11.47$
$\sigma z=23.73$	$\sigma z=10.25$	$\sigma z=14.93$
$\sigma s=47.33$	$\sigma s=28.30$	$\sigma s=31.15$
$\sigma x=32.94$	$\sigma x=23.36$	$\sigma x=3.64$
$\sigma y=13.85$	$\sigma y=8.41$	$\sigma y=3.46$
$\sigma z=15.39$	$\sigma z=8.26$	$\sigma z=11.39$
$\sigma s=38.91$	$\sigma s=26.17$	$\sigma s=12.45$
$\sigma x=30.22$	$\sigma x=30.46$	$\sigma x=10.73$
$\sigma y=15.54$	$\sigma y=10.78$	$\sigma y=6.50$
$\sigma z=14.92$	$\sigma z=13.19$	$\sigma z=17.82$
$\sigma s=37.11$	$\sigma s=34.90$	$\sigma s=21.79$

表 4-6 掃瞄距離 100m 時的 STD

$\sigma_x=38.17$	$\sigma_x=22.69$	$\sigma_x=23.50$
$\sigma_y=16.49$	$\sigma_y=13.85$	$\sigma_y=12.99$
$\sigma_z=23.65$	$\sigma_z=13.17$	$\sigma_z=16.92$
$\sigma_s=47.83$	$\sigma_s=29.66$	$\sigma_s=31.74$
$\sigma_x=28.92$	$\sigma_x=23.12$	$\sigma_x=5.24$
$\sigma_y=15.32$	$\sigma_y=10.15$	$\sigma_y=3.17$
$\sigma_z=17.95$	$\sigma_z=9.27$	$\sigma_z=14.65$
$\sigma_s=37.33$	$\sigma_s=26.90$	$\sigma_s=15.88$
$\sigma_x=29.50$	$\sigma_x=30.90$	$\sigma_x=12.03$
$\sigma_y=17.49$	$\sigma_y=11.07$	$\sigma_y=7.62$
$\sigma_z=17.12$	$\sigma_z=13.65$	$\sigma_z=17.32$
$\sigma_s=38.33$	$\sigma_s=35.54$	$\sigma_s=22.42$

表 4-7 掃瞄距離 150m 時的 STD

$\sigma_x=42.43$	$\sigma_x=41.86$	$\sigma_x=43.16$
$\sigma_y=34.13$	$\sigma_y=34.20$	$\sigma_y=31.50$
$\sigma_z=41.45$	$\sigma_z=34.87$	$\sigma_z=35.16$
$\sigma_s=68.44$	$\sigma_s=64.33$	$\sigma_s=63.96$
$\sigma_x=44.95$	$\sigma_x=31.01$	$\sigma_x=22.54$
$\sigma_y=34.26$	$\sigma_y=29.12$	$\sigma_y=17.65$
$\sigma_z=36.48$	$\sigma_z=30.70$	$\sigma_z=31.26$
$\sigma_s=67.27$	$\sigma_s=52.46$	$\sigma_s=42.39$
$\sigma_x=45.41$	$\sigma_x=37.16$	$\sigma_x=27.50$
$\sigma_y=34.14$	$\sigma_y=27.14$	$\sigma_y=23.14$
$\sigma_z=35.43$	$\sigma_z=25.85$	$\sigma_z=30.43$
$\sigma_s=66.96$	$\sigma_s=52.78$	$\sigma_s=47.09$

表 4-8 掃瞄距離 200m 時的 STD

$\sigma_x=59.86$	$\sigma_x=59.14$	$\sigma_x=61.12$
$\sigma_y=49.14$	$\sigma_y=52.42$	$\sigma_y=57.49$
$\sigma_z=61.16$	$\sigma_z=56.62$	$\sigma_z=51.72$
$\sigma_s=98.68$	$\sigma_s=97.21$	$\sigma_s=98.57$
$\sigma_x=58.19$	$\sigma_x=58.80$	$\sigma_x=49.20$
$\sigma_y=56.49$	$\sigma_y=55.85$	$\sigma_y=40.92$
$\sigma_z=57.20$	$\sigma_z=54.50$	$\sigma_z=45.62$
$\sigma_s=99.24$	$\sigma_s=97.70$	$\sigma_s=78.59$
$\sigma_x=48.00$	$\sigma_x=51.45$	$\sigma_x=46.42$
$\sigma_y=39.85$	$\sigma_y=47.29$	$\sigma_y=48.49$
$\sigma_z=47.19$	$\sigma_z=46.76$	$\sigma_z=54.50$
$\sigma_s=78.22$	$\sigma_s=84.09$	$\sigma_s=86.47$

表 4-9 各測站平均的 STD 整理

測站	STD (mm)
10 m	0.69
25 m	5.23
50 m	4.47
95 m	30.90
100 m	31.74
150 m	58.41
200 m	90.98

由以上得到的成果可以很明顯看出掃瞄距離與精密度之間的關係，在 50 公尺之內，基本上精度還相當穩定維持在 6 公釐以內，這段範圍內的精度與掃瞄距離的關係並不明顯；但在掃瞄距離超過 50 公尺之後，掃瞄的標準偏差很明顯提高，而且與掃瞄距離呈現正相關。在 95 公尺測站處精度大幅降低至約 4 公分，此掃瞄距離同時也約為 PointScape 軟體能自動判識反射標中心的極限距離；而在 95 公尺到有效掃瞄距離 200 公尺這段距離，其中誤差也慢慢提高，甚至在 200 公尺時 STD 接近 10 公分；超過 200 公尺之後，則因點雲資料太過稀疏，而完全無法判識反射標。由整理而得的表 4-9 可以繪出掃瞄距離與精密度的關係圖，如圖 4-4，並可從關係圖中明顯看出上昇的趨勢。

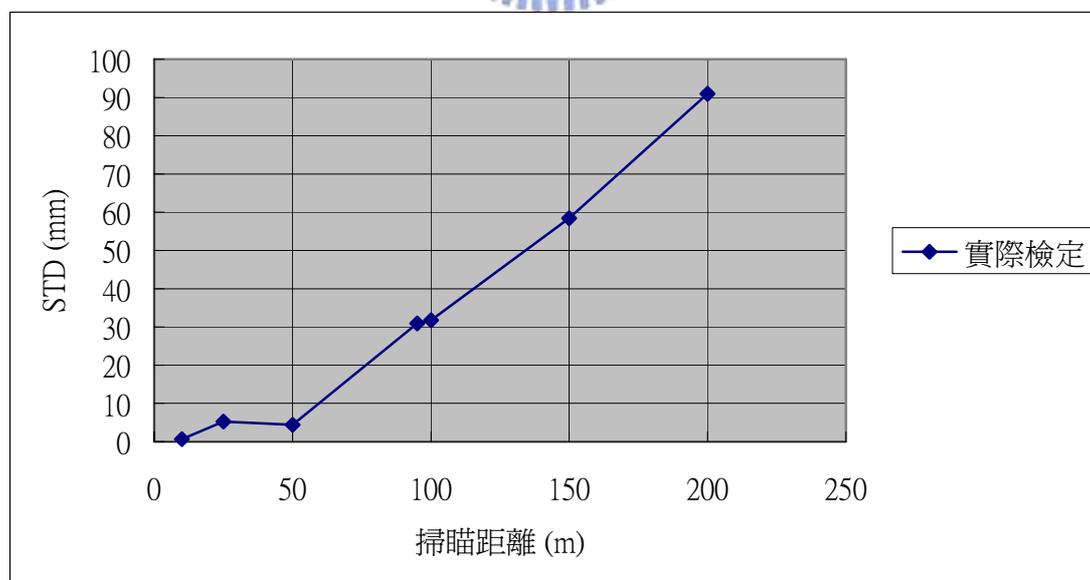


圖 4-4 實際檢定掃瞄距離與 STD 關係圖

從圖 4-4 中可以看出掃瞄距離對儀器的定位精度影響甚大，在中短距離時，掃瞄精度高而穩定，但在長距離時，掃瞄距離與標準偏差有高度相關，距離的增加將很明顯使定位精度大大降低。我們可以原廠的雷射測距檢定報告與實際檢定結果來做一比對，圖 4-5 即為原廠檢定成果，圖 4-6 為將原廠檢定與實際檢定套合比較。

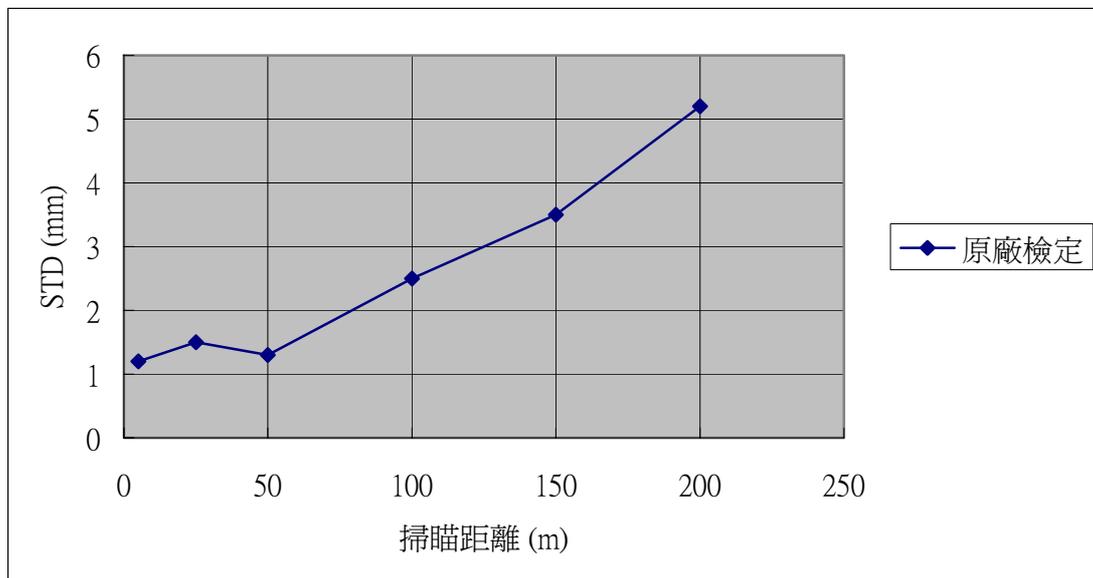


圖 4-5 原廠檢定掃瞄距離與 STD 關係圖

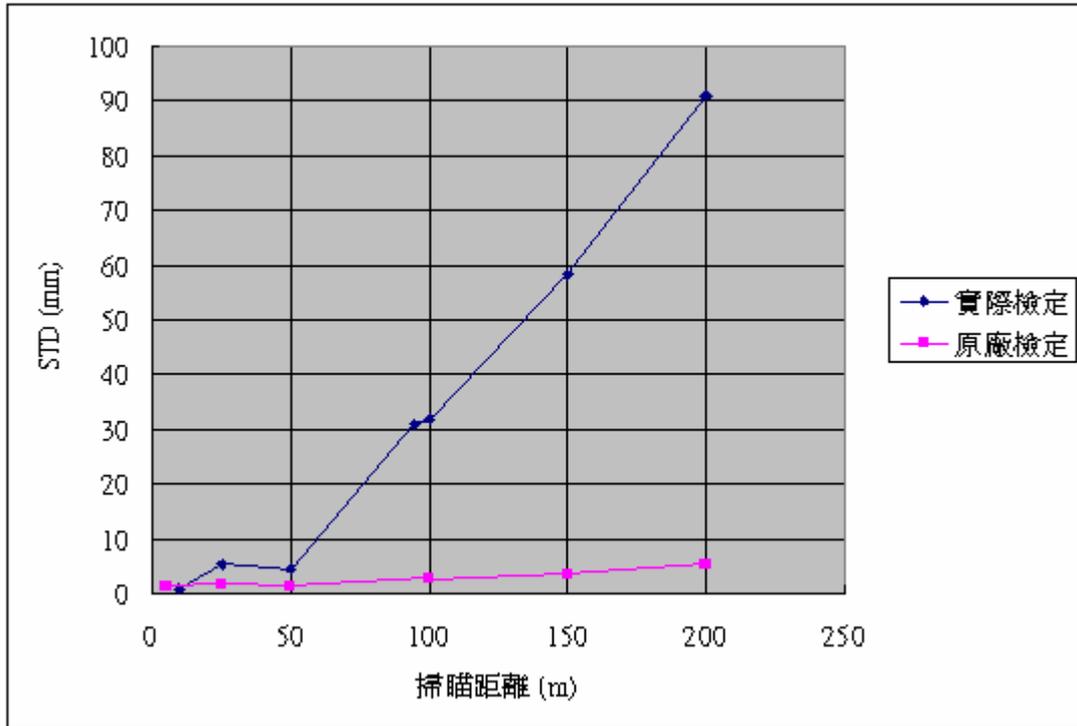


圖 4-6 實際檢定與原廠檢定成果比較

從圖 4-5 可以看出，原廠檢定得到掃描距離與精密度之間的關係，其線型與實驗得到的趨勢大致相同，但精度較實際檢定高出甚多，由圖 4-6 可以明顯比較出兩者之間的差異；因此我們可以由上述的檢定成果資料中推論出檢定時必然有其他外在因素或系統本身的因素影響檢定成果精度，例如環境影響的溫度、濕度、光度明暗等等因素，以及儀器影響的儀器溫度與內部系統誤差，甚至還包括人為影響誤差等等，都可能導致上述檢定成果精度的降低。

第二部分：

本實驗使用的全測儀 Trimble 5000 可達到 3 mm 的精度，將其觀

測九個反射標得到的座標值視為已知座標，而使用 GS200 掃瞄得到的座標為觀測座標。由於一組已知座標可列出三條觀測方程式，因此進行六參數轉換時最少需要兩組對應座標來當作控制點；但為了使平差計算中具有多餘觀測量，我們使用反射標 1 號、3 號和 5 號三點作為控制點來計算旋轉角 ω 、 φ 、 κ 以及平移量 X 、 Y 、 Z 等六個轉換參數值。

在不同測站掃瞄得到的反射標中心座標，我們都同樣固定 1 號、3 號和 5 號三個反射標作為控制點，再利用這三點相對應的已知座標，分別計算出不同測站的六個轉換參數值，使每個測站的觀測座標都轉換到與已知座標同一座標系之下，再計算其餘六個觀測座標與已知座標的誤差值與 RMS 來作為判斷掃瞄精確度的指標。下表 4-10 為不同掃瞄距離測站控制點之外的六個反射標經六參數轉換後與已知座標計算得到的誤差值 Δ ，單位為 mm，表 4-11 為各測站成果經六參數轉換後的精確度，以 RMS 表示；另外我們亦可由表 4-10 繪出每個反射標在不同掃瞄距離與誤差值的關係圖，如圖 4-7 所示。

表 4-10 各測站轉換後的六個觀測座標與已知座標的誤差值

(單位:mm)

		10 m	25 m	50 m	95 m	100 m	150 m	200 m
Target_2	Δx	0.34	0.61	-0.2	-11.4	-54.87	61.77	40.42
	Δy	-0.12	0.74	-0.32	2.72	-12.36	-24.39	87.81
	Δz	-0.43	-0.61	0.05	1.78	-59.06	19.53	76.48

	Δs	0.56116	1.136574	0.380657	11.8544	81.55716	69.22302	123.2622
Target_4	Δx	-0.4	-1.21	-1.47	13.28	35	56.91	-22.3
	Δy	1.66	1	1.57	0.73	-3.62	30.96	133.4
	Δz	0.05	0.15	0.16	16.71	-92.85	15.12	-54.83
	Δs	1.708245	1.576896	2.15671	21.35686	99.29364	66.52732	145.9424
Target_6	Δx	0.31	2.58	1.99	-60.52	-87.62	-83.63	-115.12
	Δy	1.38	2.5	1.81	15.75	20.48	24.82	281.75
	Δz	0.1	-1.02	-1.25	-50.31	88.39	-9.03	-17.6
	Δs	1.417921	3.734541	2.96626	80.26101	126.1328	87.70148	304.8695
Target_7	Δx	0.33	1.69	0.66	-46.08	33.82	22.33	-109.39
	Δy	0.41	-0.34	-0.28	-29.32	46.1	41.68	254.91
	Δz	-0.11	-1.02	-0.44	37.71	-17.41	119.45	136.32
	Δs	0.53768	2.003023	0.84119	66.37072	59.76714	128.4685	309.0767
Target_8	Δx	0.33	3.36	2.25	21.99	-7.34	54.76	-93.72
	Δy	0.19	0.13	0.47	-17.38	-7.48	16.7	299.25
	Δz	0.49	-1.19	-0.83	23.38	68.66	78.53	73.26
	Δs	0.620564	3.566875	2.443829	36.49998	69.45518	97.18286	322.0264
Target_9	Δx	-0.02	4.09	2.1	-30.7	-80.43	-87.38	-248.51
	Δy	0.1	-0.87	0.48	-4.41	-18.02	42.68	345.92
	Δz	0.09	-1.77	-1.5	4.61	161.39	69.03	33.45
	Δs	0.136015	4.540694	2.624957	31.35586	181.2193	119.256	427.2432

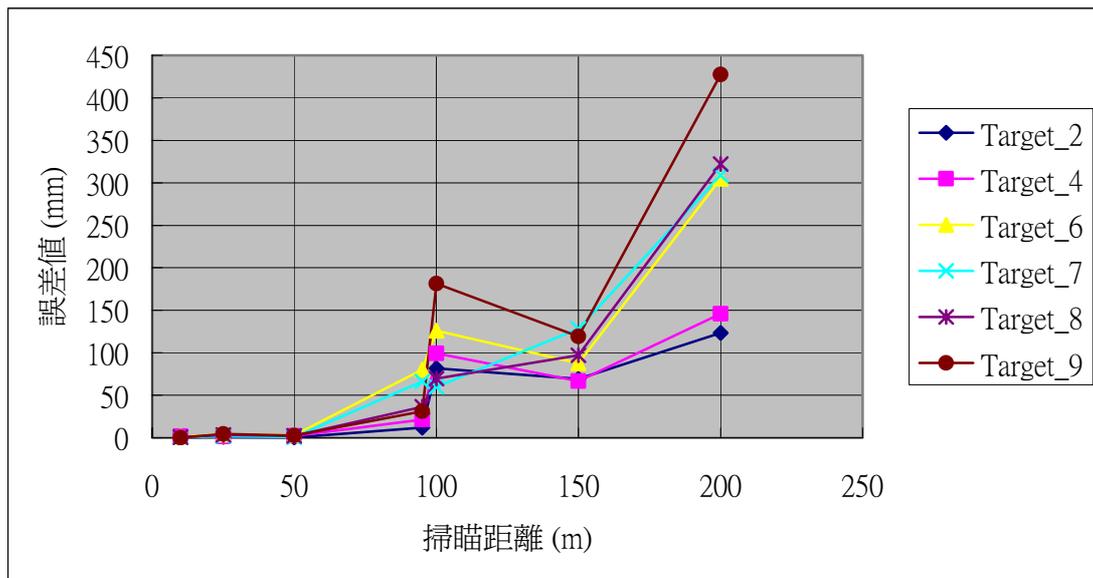


圖 4-7 不同測站得到的反射標座標誤差值

表 4-11 各測站成果經六參數轉換後的 RMS 值(單位：mm)

Station	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-單位權
10 m	0.31	0.90	0.28	0.99
25 m	2.56	1.20	1.08	3.03
50 m	1.64	1.03	0.89	2.13
95 m	35.40	15.48	28.29	47.89
100 m	57.13	22.70	92.18	110.80
150 m	64.78	31.64	65.69	97.54
200 m	127.73	251.36	75.54	291.89

將以上資料整理之後，我們大致可將掃瞄距離分為三段來探討：

在掃瞄距離 50 公尺以內時，雷射掃瞄儀定位的精密度和精確度都可以達到非常高的精度，甚至誤差量可以小於 3 公釐，因此在進行需要極高精度的掃瞄作業時，儀器架設的位置以距離目標物不超過 50 公尺為原則；當掃瞄距離在 50~150 公尺之間時，其標準偏差約在 3~6 公分，而誤差值則約略在 6~15 公分左右，而且在這段掃瞄距離範圍內，距離遠近對定位精確度和精密度的影響量呈現高度相關，在實際掃瞄作業中需特別注意；而在掃瞄距離大於 150 公尺時，掃瞄成果的標準偏差以及誤差值都非常大，而掃瞄距離大於 200 公尺時更因掃瞄點過於稀疏而無法確保點雲資料的可靠性，因此不適用於需要較高精度的監測工程，如果在實際作業上遇到掃瞄距離需大於 150 公尺的工程時，建議將使用的雷射掃瞄儀改變為掃瞄距離更長的儀器以確保成果的精度。

4-3 系統誤差改正

當三維雷射掃瞄儀經檢定之後，發現儀器內部可能含有系統誤差，將三個反射標中心作為控制點，藉由控制點的已知座標和觀測座標可列出足夠的觀測方程式，經平差計算之後求出誤差因子的大小。誤差因子求定之後，我們就可利用求得的值將原始點雲資料經數學模式計算改正其誤差值。

4-3-1 系統誤差改正方法

在傳統測量中有許多對於不同系統誤差因子將量測資料進行系統誤差改正的方法，針對三維雷射掃瞄儀來說，在參考與收集國內外文獻後，一般三維雷射掃瞄儀的系統誤差以尺度上的誤差為主，因此本研究將使用七參數法來處理掃瞄的點雲資料，利用改正其尺度上的誤差來消除掃瞄資料的系統誤差。

七參數法主要是假定造成儀器的系統誤差來源為尺度上的誤差，在參數求定時，座標系的旋轉參數和平移參數並不會吸收系統誤差，所有的系統誤差主要以尺度參數來改正。改正的方法是藉由三個以上的控制點求得兩座標系之間的七個轉換參數，並使用求得的七參數值，將原始的點雲資料進行轉換即可；七參數法的公式與六參數轉換相似，但加上了尺度參數，如式 4-5 所示。

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \lambda \times R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} x_L - X \\ y_L - Y \\ z_L - Z \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

其中 (x_A, y_A, z_A) 為全測儀觀測得到的已知座標

(x_L, y_L, z_L) 為雷射掃瞄得到的觀測座標

(ω, ϕ, κ) 為兩座標系的旋轉角度參數

(X, Y, Z) 為兩座標系原點的平移參數

λ 為兩座標系的尺度參數

4-3-2 使用掃瞄資料進行系統誤差改正

對上一節掃瞄得到的資料進行系統誤差改正，同樣以反射標 1 號、3 號和 5 號的中心作為控制點，並利用其餘六個反射標作為檢核點；分別對檢定場實驗的七個測站資料進行系統誤差改正，求得不同距離下的尺度參數，並利用檢核點來分析系統誤差改正後的成果，計算不同測站改正後資料的精確度。

將七個測站的掃瞄資料以七參數法系統誤差改正方式來計算，並將檢核點的觀測座標轉換到全測儀的已知座標系下，並由檢核點轉換後的成果來進行檢核工作，以 RMS 作為衡量系統誤差改正成果精確度

的指標，表 4-12 為各測站轉換的尺度參數，4-13 為各測站系統誤差改正的計算成果。

表 4-12 各測站轉換的尺度參數

Station	10 m	25 m	50 m	95 m	100 m	150 m	200 m
尺度參數 λ	1.00097	0.99734	0.99602	1.03571	1.15793	1.03511	0.85727

表 4-13 各測站系統誤差改正的計算成果(單位：mm)

Station	RMS-x	RMS-y	RMS-z	RMS-單位權
10 m	0.34	0.87	0.30	0.98
25 m	2.30	1.20	0.60	2.66
50 m	1.27	1.09	0.86	1.88
95 m	32.46	14.28	26.61	44.34
100 m	39.25	34.18	68.00	85.63
150 m	60.36	32.40	57.55	89.47
200 m	127.29	216.38	85.98	265.36

由上表可以看出，在經過系統誤差改正之後，檢核其精確度發現較未經過系統誤差改正之前大為提升，在 50 公尺以內因為已經有非常高的精確度，RMS 小於 4 公釐，因此比較看不出系統誤差改正前後的差異；但在距離約 100 公尺之後，可以明顯看出系統誤差改正對精確度的影響，在 100 公尺處 RMS 降低了 25 公釐，150 公尺處 RMS 降低了 8 公釐，200 公尺處 RMS 降低了 26 公釐。總結來說，掃瞄距離的增加會大幅影響定位的精度，但藉由尺度參數加入改正，使尺度因子吸收掉系統誤差，可以使掃瞄成果的精確度提高。