

多測站具 GPS 定位之地面光達資料之網形平差

簡廷宇^{1*} 曾義星²

摘要

地面光達可以快速獲得高精度且大量的三維點雲資訊，由於各掃描站點雲資料均參考於區域坐標系統，而每個掃描站的掃描範圍有限，往往需要結合多站點雲資料才能完整涵蓋掃描場景，某些應用還需要將點雲資料轉換到地面坐標系統(地理定位)，傳統上至少要利用三個地面控制點進行坐標轉換，但使用地面控制點造成測量工作上的不便。本研究利用點特徵加入以 e-GPS 求得之觀測量進行多測站之聯合平差，評估是否可以不需要地面控制點進行地理定位，在我們實驗的兩個案例中，利用 e-GPS 觀測量和連結點觀測量進行多站聯合平差在 E、N、h 方向之精度皆小於 10 公分，透過實驗得知利用 e-GPS 觀測量進行多站聯合平差，可以在不使用地面控制點的情況下，達到地理定位之目的，其精度足夠做為應用。

關鍵詞：地面光達、地理定位、GPS、點雲套疊

1. 簡介

1.1 研究動機及目的

地面光達可以快速獲得大量且高精度的三維空間資訊(點雲資料)，各掃描站的點雲資料參考於掃描儀本身的坐標系統，但每站的掃描範圍有限，通常須將多站的點雲資料套疊，從各站的區域坐標系統轉換到一致的坐標系統下，才能完整的涵蓋掃描場景。一般點雲的套疊方式可分為以點雲為基礎和以特徵為基礎，以點雲為基礎的方式中利用反覆最鄰近點法(Iterative closet point)最為常見，主要為透過尋找兩群點雲資料間的最小距離，透過找出兩群點雲間之距離平方和最小值來求解轉換參數，以特徵為基礎的套疊方式則是利用點雲的共軛特徵，包括點、線、面等求解轉換參數，進行點雲套疊。

各站點雲套疊到同一個坐標系統後，某些應用還必須將點雲轉換到地面坐標系統(地理定位)，透過資料為基礎和儀器為基礎等兩種方式可以達到地理定位的目的，以資料為基礎的方式通常利用已知地面坐標系統的控制點、線、面求解其轉換參數，

目前最常見的方法是利用最少三個地面控制點，進行轉換參數求解，將點雲資料轉換到地面坐標系統，但控制點的布設降低觀測的效率。

以儀器為基礎的方式達到地理定位的目的，在空載和車載系統利用定位定向系統求解掃描儀的位置及姿態，達到直接地理定位的目的(Alamús *et al.*, 2004)。此外，在掃描儀和掃描場景中的反設標上方裝設 GPS 天線，此時掃描儀和反射標皆可量測在地面坐標系統下的位置，其儀器與反射標的空間關係即可建立在在地面坐標系統下(Reshetyuk, 2010)，只是利用這些方式須要額外的儀器，且價格昂貴。

目前大部分地面光達皆可讓使用者在上方裝置 GPS 天線(圖 1)，意味著掃描儀在地面坐標系統下的位置可以透過 GPS 天線量測而得，但是利用單一個 GPS 天線仍然無法求得掃描儀的姿態，因此 Belder *et al.*,(1994) 和 Mohamed and Wilkinson(2009)分別於掃描儀上方架設四個及兩個 GPS 天線，透過天線與掃描儀之間的相對關係來求解掃描儀的姿態及位置，達到地理定位的目的。

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

*通訊作者, E-mail: sam79782003@gmail.com

收到日期：民國 104 年 05 月 25 日

修改日期：民國 105 年 03 月 02 日

接受日期：民國 105 年 05 月 30 日



圖 1 地面掃描儀上方裝置 GPS 天線

目前的 Riegl 發展的商業軟體(RiSCAN)可以讓使用者利用 GPS 觀測量，在不使用地面控制點的情況下進行地理定位，但是其使用方式上有所限制，在進行測站平差時，掃描儀中心主要利用 GPS 天線所測得坐標之 h 方向扣掉其天線底部到掃描儀中心之距離，若掃描儀不是在水平的狀態，則其計算之掃描儀中心存在誤差，因此必須在儀器定平的情況下，才可以求得精度高的解算成果，但是在每次掃描都要將儀器定平會造成作業上的不方便，在某些特殊的場景甚至需要適當的使儀器傾斜，以完成完整的場景掃描，因此透過軟體進行求解並不適用所有情況。

目前達到地理定位的方式必須透過點雲套疊及坐標轉換，但使用此程序容易造成誤差傳播，利用多測站的網形平差透過地物點與掃描站之間的相對關係組成的觀測方程式，傳統上搭配地面控制點，以最小二乘平差求解掃描儀的位置和姿態，讓點雲套疊與坐標轉換在同一個平差系統下完成，可以有效減少誤差。本研究加入 GPS 觀測量，透過 GPS 天線與掃描儀幾何關係所組成的觀測方程式，評估是否可以取代傳統使用控制點的方式，進行地理定位。

本研究主要目的為利用 GPS 觀測量進行多測站網形平差，透過測試場的檢核點進行精度驗證，並評估是否可以利用 GPS 觀測量取代傳統的地面控制點，在經由網形平差後解算掃描儀的位置及姿態，達到地理定位的目的。

1.2 研究方法

本研究可分為三個部分，分別為外業工作、多站網形平差以及成果評估，在外業工作的部分，我們利用 Riegl VZ-400 進行掃描，同時在掃描儀上方裝置 GPS 天線，利用 e-GPS 系統進行坐標觀測，在我們的實驗中選擇兩個測試場，分別為國立成功大學自強校區以及億載金城，於國立成功大學自強校區，利用靜態 GPS 的方式求得地面控制點坐標並利用水準儀及全站儀觀測地面控制點與牆面檢核點之間的角度、距離觀測量，最後利用聯合平差求得牆面檢核點之坐標，其 E、N 方向精度小於 1 公分左右，在億載金城中，利用 e-GPS 量測檢核點的坐標以做為驗證。

在多站網形平差前，必須先將點雲資料進行初略對位，可以利用 GPS 所測得的坐標觀測量提供位置的初始值，再利用測站間的相對關係提供姿態的初始值，此外，利用 RiSCAN 可以將點雲進行初略對位，得到測站姿態及位置的初始值，以利後續解算。

本研究中分別利用 RiSCAN 軟體與 GPS 觀測量加入網形平差的方式處理點雲資料，並同時利用檢核點比較兩者之精度，此外，在本研究所使用的網形平差模型中，分別測試了只有控制點觀測量、只有 GPS 觀測量及同時具有控制點及 GPS 觀測量等三種情況，圖 2 為本研究之流程圖。

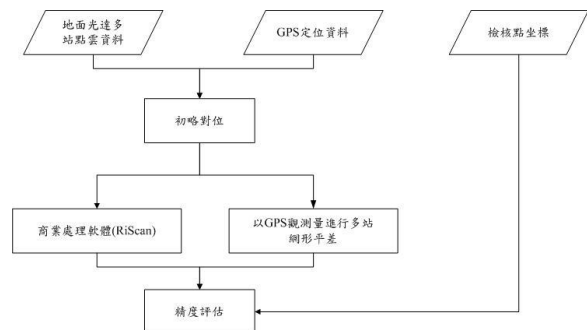


圖 2 本研究之流程圖

2. 點雲套疊

2.1 坐標系統

在地面光達中所使用到的坐標系統可分為三種，一種為建立在掃描儀本身的坐標系統(Scanner coordinate system, S-Frame)，此坐標系統為卡式坐標系統，原點為掃描儀中心，三軸成正交特性。第二種為專案坐標系統(Project coordinate system, P-Frame)，此坐標系統主要是透過使用者自己定義，透過多站點雲資料，將其坐標系統轉換到一致的坐標系統下，即可視為專案坐標系統。最後為地面坐標系統(Mapping coordinate system, M-Frame)，此坐標系統參考於絕對的坐標系統，在某些實際應用上，通常需要在地面坐標系統下進行應用。

由於這三種坐標系統皆屬於卡式坐標系統，其中並沒有尺度上的差異，因此其坐標轉換主要包含平移及旋轉，如圖 3 所示，平移代表坐標系統原點的移動(r_S^P)，旋轉則代表三軸姿態角的旋轉(R_S^P)，以達到坐標系統之間的轉換。

2.2 點雲套疊

點雲套疊可分為以點雲為基礎和以特徵為基礎等兩種方式，其主要概念如下：

2.2.1 點雲為基礎

以點雲為基礎的方式可以視為對兩群點雲進行表面的套合對位，反覆最鄰近點法(ICP)為常見的方式，最早是由 Besl and Mckay(1992)針對 3D 資料的結合所提出，利用反覆疊代的方式，透過計算出兩群點雲間鄰近點之距離平方和最小值作為判斷之依據，一但求出距離平方和之最小值，代表兩群點雲套合之最佳解，藉此求出轉換參數，完成點雲套合(圖 4)。

此方法適用於各種形式之點雲，但是其初始值要求較高，且容易受到粗差的影響，一但點雲出現錯誤的離群值，套合成果容易受到影響，此外其疊代的過程中相當費時，Godin *et al.*,(1995)提出了在進行反覆最鄰近點法時，加入屬性(如：顏色)作為約制(Iterative Closest Compatible Point algorithm, ICCP)，有效的縮減其運算時間並增加效率。此外 Sharp *et al.*, (2000)提出加入特徵的作為約制的方式，相較於傳統的 ICP 有效的減少疊代次數。

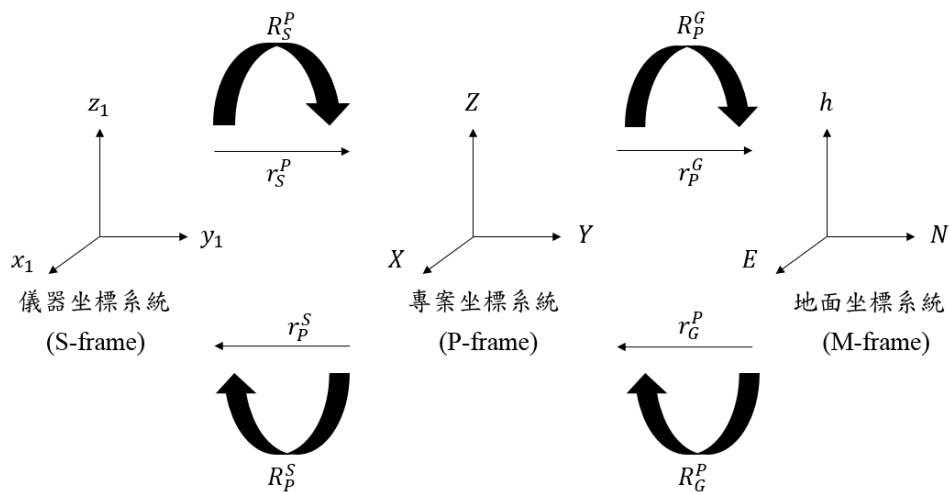


圖 3 坐標系統間之轉換

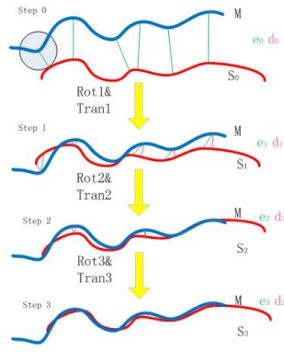


圖 4 ICP 示意圖(Wang, 2014)

2.2.2 特徵為基礎

相較於以點雲為基礎的套疊方法，以特徵為基礎主要是利用點雲間共軛特徵(包括點、線、面等)，以相同的共軛特徵，在進行套疊後必須位於同一位置，藉此求出點雲間的轉換參數，使用點特徵為常見的方式，其點特徵包括自然點或是人造標點，劉燈烈(2004)提出利用點特徵進行多站網形平差的演算法。

線特徵也常用來做為點雲套疊，其容易出現在建物的邊界，透過平面交會擬合的方式可以萃取出現特徵，莊子毅(2006)利用三種不同的方式萃取出線特徵，並分別利用兩種模型來達到高精度的點雲套疊。

面特徵亦可透過平面擬合的方式萃取，湯凱佩

(2005)利用平面特徵進行點雲的資料套疊，Acka(2007)則是提出利用曲面特徵進行點雲套疊的演算法。

實際上，點雲套疊可以同時結合多種特徵，黃建銘(2009)同時利用點、線、面特徵進行多站點雲套疊，莊子毅(2012)則是提出較為自動化且有效率的方式，並利用模擬資料及真實資料進行驗證，同時評估不同平差模型、基準的選擇所影響的套疊成果。

由於以點雲為基礎的方式容易受到粗差的影響，且其初始值的要求較高，而點特徵為一般點雲中最常見的特徵，因此在本研究中使用點特徵為基礎進行點雲套疊。

3. 以 GPS 觀測量進行多測站網形平差

在本研究中，平差模型所使用的觀測方程式，均建立在 GPS、地物點以及掃瞄儀之間的幾何關係上，如圖 5 所示，為 GPS 觀測量、地物點於掃瞄儀坐標系統之觀測量以及控制點之觀測量，其中 i 表示掃瞄站之編號、 j 表示地物點之編號，傳統方式為利用連結點及控制點進行網形平差，在此情況下控制點為觀測量並同時為未知數，本研究加入 GPS 觀測量之觀測方程式，進行網形平差。

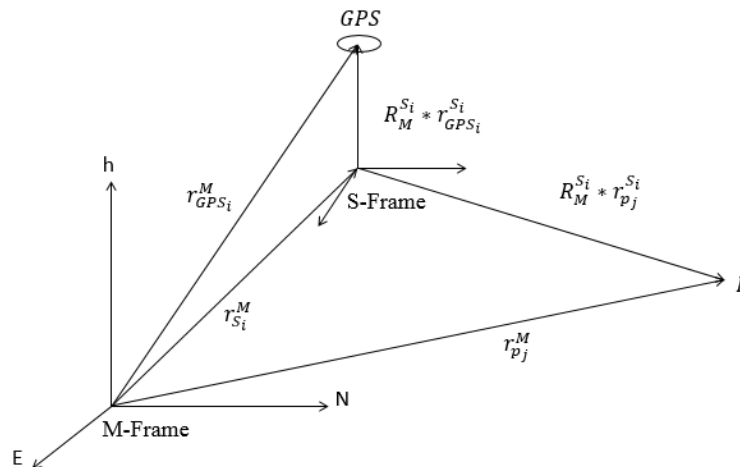


圖 5 GPS 天線、掃瞄儀及地物點間之幾何關係

其中觀測方程式依據其幾何關係可以分別列為：

透過最小二乘平差可以計算未知參數及其後驗中誤差，其公式如下：

GPS 觀測量：

$$r_{GPS_i}^M + V_{r_{GPS_i}^M} = r_{S_i}^M + R_{S_i}^M * r_{GPS_i}^{S_i} \sim W_{GPS} \dots\dots\dots(1)$$

$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W L = N^{-1} A^T W L \dots\dots\dots(5)$$

連結點：

$$r_{p_j}^{S_i} + V_{r_{p_j}^{S_i}} = R_M^{S_i} (r_{p_j}^M - r_{S_i}^M) \sim W_{tp} \dots\dots\dots(2)$$

$$\hat{V} = A \hat{X} - L \dots\dots\dots(6)$$

控制點：

$$r_{p_j}^M + V_{r_{p_j}^M} = r_{p_j}^M \sim W_{cp} \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{\frac{\hat{v}^T W \hat{v}}{u}} \dots\dots\dots(7)$$

其中不同的觀測量分別帶有適當的權，其平差模型可表示為：

$$\hat{\Sigma}_{\hat{x}} = \sigma_0^2 N^{-1} \dots\dots\dots(8)$$

$$\begin{bmatrix} L_{GPS} \\ L_{tp} \\ L_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{GPS} \\ V_{tp} \\ V_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ A_2 & A_3 \\ 0 & A_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{eo} \\ X_{gp} \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} W_{GPS} & 0 & 0 \\ 0 & W_{tp} & 0 \\ 0 & 0 & W_{cp} \end{bmatrix} \dots\dots(4)$$

如圖 6 所示，透過各站點雲所觀測的連結點，加入各站之 GPS 觀測量，可以利用多站網形平差求解所有未知數。

式(4)中， W_{GPS} 為 GPS 觀測量之權； W_{tp} 為連結點觀測量之權； W_{cp} 為控制點觀測量之權

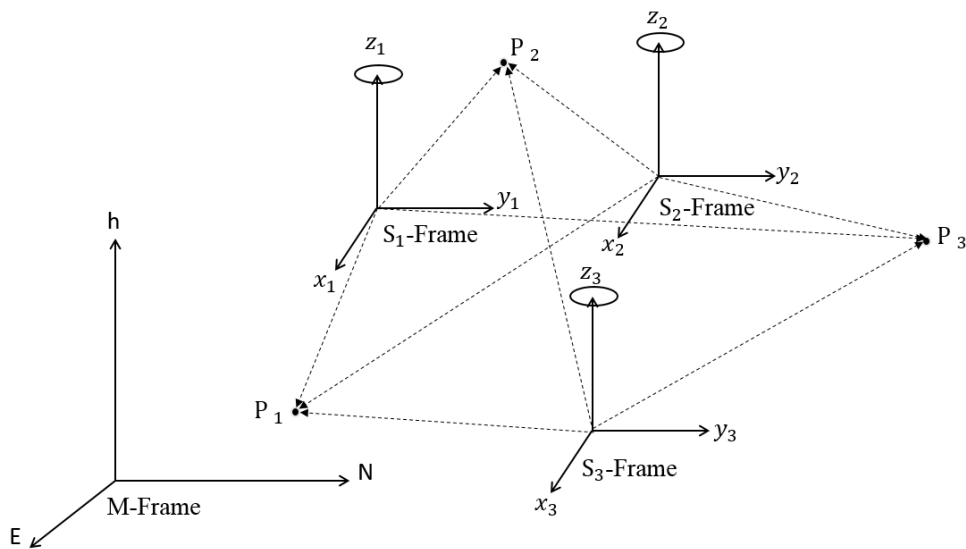


圖 6 多站平差示意圖

4. 實驗及成果

本實驗中選擇兩個測試場進行驗證，分別為成功大學自強校區以及億載金城，在自強校區測試場中，所有布設之檢核點皆透過地面測量求得精確之三維坐標，其精度足夠用於地面光達之檢核，在億載金城中，場景較為複雜，遮蔽情形較多，其檢核點利用 e-GPS 量測三維坐標，作為驗證。在兩個測試場中，分別利用 RiSCAN 以及本研究所提出的方法處理點雲資料，並進行成果分析比較。

4.1 RiSCAN處理流程

在 RiSCAN 處理流程中，首先必須要使用者輸入 GPS 量測而得的資料，軟體在假設儀器定平的情況下，將所輸入坐標之 h 方向減掉掃瞄儀中心到 GPS 天線之距離，視為掃瞄儀的掃瞄中心，確定掃描中心後，必須將欲套疊之點雲資料進行約略對位，即可透過 ICP 的方式，將點雲套疊並建立在地面坐標系統上。

然而，RiSCAN 決定掃瞄儀中心的方式，並不適用於所有情況，在儀器沒有定平時，直接將 GPS 坐標之 h 方向扣掉掃瞄儀中心到 GPS 天線之距離，所得到的並非正確的掃瞄儀中心，我們也做了簡單的測試，在儀器有定平及傾斜的兩種情況下，利用相同軟體求解所得到的精度差異相當大(表 1)，證實了使用 RiSCAN 沒有辦法在儀器傾斜的情況下得到良好的成果。

表 1 儀器姿態不同之案例的檢核點精度

	RMSE(定平)	RMSE(傾斜)
dE(m)	± 0.035	± 0.344
dN(m)	± 0.035	± 0.052
dh(m)	± 0.058	± 0.269

4.2 自強測試場

在此測試場中，我們總共布設 27 個檢核點，

並架設了六站(圖 7)，使用 Riegl VZ-400 雷射掃瞄儀及 Trimble R4 GPS 天線，每一站同時進行光達掃瞄及 e-GPS 觀測，其掃瞄之角度解析度在水平及垂直方向分別為 0.03 度，掃瞄儀在水平方向旋轉 360 度以獲取完整之場景，每一站的掃瞄時間大約 5 分鐘。

在本測試場中，分別利用 RiSCAN 以及本研究所提出之方法進行資料處理，此外在本研究所提出之方法中，測試了三種不同情況，分別為只利用控制點進行網形平差、只利用 GPS 觀測量進行網形平差以及同時利用 GPS 觀測量及控制點進行網形平差。

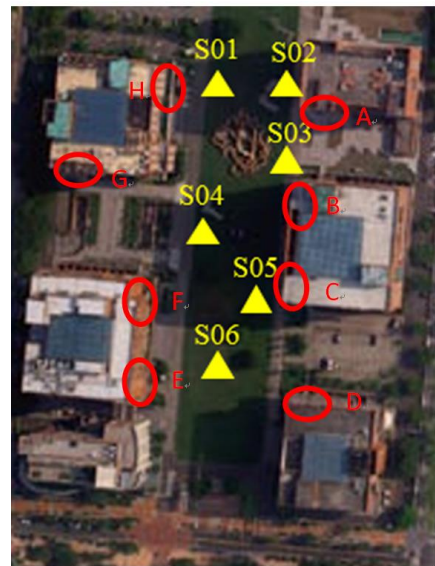


圖 7 自強校區測試場測站及檢核點分布圖

4.2.1 只利用地面控制點進行網形平差

利用連結點及控制點之觀測量進行多測站光達點雲之網形平差為傳統方式，表 2 為此情形所使用的觀測量個數，利用所布設的檢核點作為連結點，並選擇其中三個做為控制點，表 3 為利用地面控制點進行網形平差之 27 個檢核點差值的平均值及均方根誤差(Root Mean Square Error)。

表 2 只利用地面控制點進行網形平差之觀測量個數

觀測量	數量
控制點	3*3
連結點	84*3
GPS	0

表 3 只利用地面控制點進行網形平差之檢核點差值精度

	dE(m)	dN(m)	dh(m)
差值平均值	0.004	0.006	0.005
RMSE	±0.017	±0.027	±0.049
最大誤差	-0.048	0.098	0.133
最小誤差	0	0	0

4.2.2 只利用GPS觀測量進行網形平差

此情況下只利用 GPS 觀測量進行多測站光達點雲之網形平差，不使用任何控制點，表 4 為此情形所使用的觀測量個數，量取所布設之檢核點作為連結點，由於 S04 站之 GPS 資料出現明顯錯誤，因此將其剔除只使用 5 個測站的 GPS 觀測量，表 5 為利用 GPS 觀測量進行網形平差之 27 個檢核點差值的平均值及均方根誤差(RMSE)。

表 4 只利用 GPS 觀測量進行網形平差之觀測量個數

觀測量	數量
控制點	0
連結點	84*3
GPS	5*3

表 5 只利用 GPS 觀測量進行網形平差之檢核點差值精度

	dE(m)	dN(m)	dh(m)
差值平均值	0.007	0.001	-0.01
RMSE	±0.021	±0.029	0.078
最大誤差	-0.043	0.106	0.136
最小誤差	0.002	0.001	0.009

4.2.3 同時利用GPS觀測量及地面控制點進行網形平差

此情況為同時利用 GPS 觀測量及地面控制點進行網形平差，表 6 為為此情形所使用的觀測量個數，表 7 則是此情形之 27 個檢核點差值的平均值及均方根誤差(RMSE)。

表 6 同時利用 GPS 觀測量及地面控制點進行網形平差之觀測量個數

觀測量	數量
控制點	3*3
連結點	84*3
GPS	5*3

表 7 同時利用 GPS 觀測量及地面控制點進行網形平差之檢核點差值精度

	dE(m)	dN(m)	dh(m)
差值平均值	0.003	0.001	0.002
RMSE	±0.018	±0.027	±0.059
最大誤差	-0.052	-0.038	0.128
最小誤差	0	0	0.018

4.2.4 RiSCAN 成果

表 8 為利用 RiSCAN 在不使用地面控制點的情況下進行網形平差，量取檢核點並計算其差值的平均值和均方根誤差(RMSE)，與表 5 只利用 GPS 觀測量進行網形平差的成果比較，可以發現在 E、

N 方向上，本研究使用的方式精度較好，在 h 方向則差距不大。

表 8 利用 RiSCAN 進行網形平差之檢核點差值精度

	dE(m)	dN(m)	dh(m)
差值平均值	-0.019	0.015	-0.026
RMSE	±0.041	±0.044	±0.072
最大誤差	-0.074	0.112	0.191
最小誤差	0.003	0	-0.003

4.3 億載金城測試場

本研究進行實驗的另一個測試場為台南安平
的億載金城，選擇此地的原因為其場景較為複雜，

整體遮蔽情形較多，共軛特徵較少，總共架設了 30 站才完成整個場景之掃瞄(圖 8)，使用 Riegl VZ-400 雷射掃瞄儀及 Trimble R4 GPS 天線，每一站同時進行光達掃瞄及 e-GPS 觀測，其掃瞄之角度解析度在水平及垂直方向分別為 0.03 度，掃瞄儀在水平方向旋轉 360 度以獲取完整之場景，每一站的掃瞄時間大約 5 分鐘。我們同時利用 e-GPS 觀測了 37 個檢核點作為成果之驗證。

4.3.1 RiSCAN 成果

表 9 為利用 RiSCAN 以 GPS 觀測量進行多站網形平差之檢核點差值的平均值及均方根誤差 (RMSE)，會發現在此情形下 E、N 方向的誤差較自強驗證場來的大，且發現在圖 8 之右上角及左下角有拼接錯誤的情形發生(圖 9)。

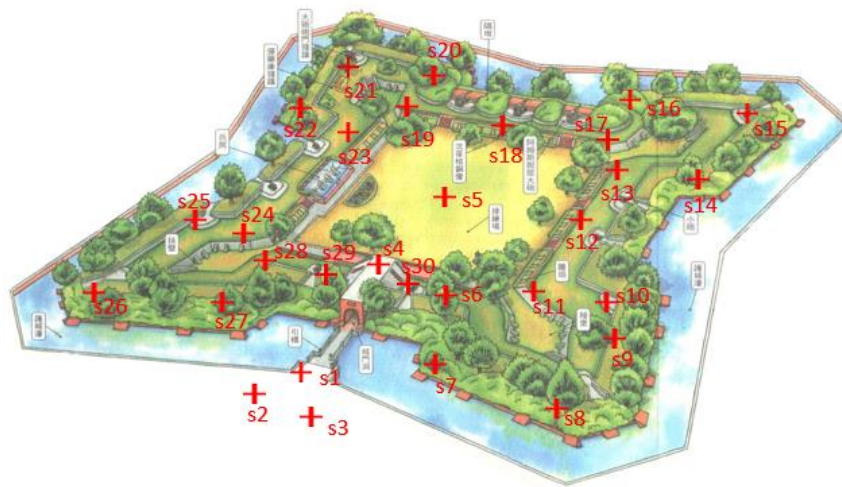


圖 8 億載金城測試場測站分布圖

表 9 億載金城案例中利用 RiSCAN 以 GPS 觀測量進行多站網形平差之檢核點差值的平均值及均方根誤差 (RMSE)

	dE(m)	dN(m)	dh(m)
差值平均值	0.033	-0.033	-0.023
RMSE	±0.124	±0.223	±0.072
最大誤差	0.272	-1.078	-0.191
最小誤差	0.004	0	0.003

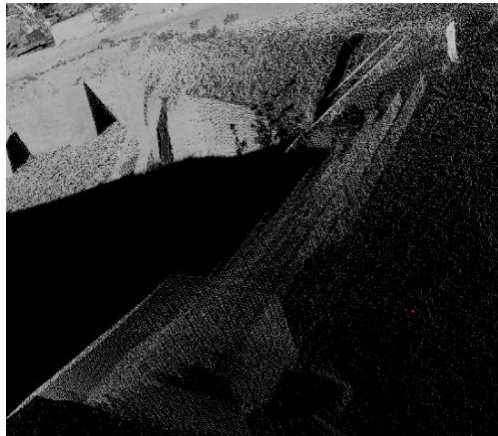
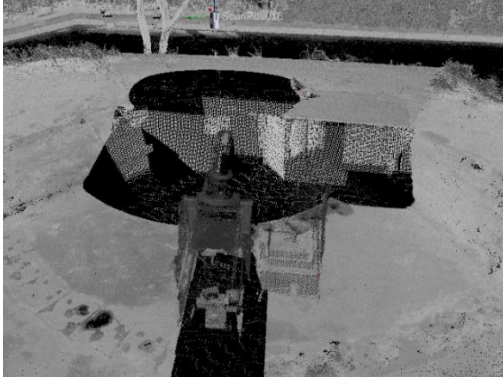


圖 9 利用 RiSCAN 產生之拼接錯誤

4.3.2 以 GPS 觀測量進行多站網形平差

表 10 為只利用 GPS 觀測量進行多測站光達點雲之網形平差的觀測量個數，由於部分測站透空情

形不佳，因此總共 22 個測站順利測得 GPS 觀測量，表 11 為利用本研究所提出之方法，以 GPS 觀測量進行網形平差所計算出來的檢核點平均值和均方根誤差(RMSE)，與表 9 比較可以發現在 E、N 方向上的精度較 RiSCAN 來的好，圖 10 為本研究所求得之套疊成果與 RiSCAN 產生拼接錯誤之處比較，可以發現利用本研究所求得之轉換參數精度較高，沒有明顯的套疊錯誤產生。

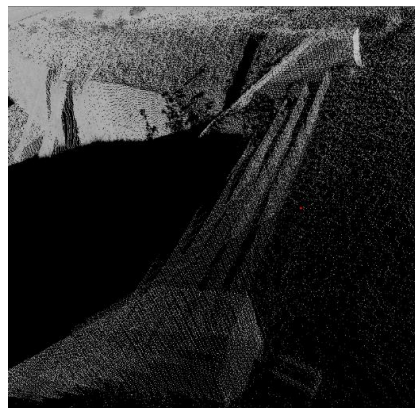
表 10 億載金城案例中利用 GPS 進行多站網形平差之觀測量個數

觀測量	數量
控制點	0
連結點	228*3
GPS	22*3

表 11 億載金城案例中以 GPS 觀測量進行多站網形平差之檢核點差值的平均值及均方根誤差 (RMSE)

	dE(m)	dN(m)	dh(m)
差值平均值	-0.006	0.016	-0.006
RMSE	±0.042	±0.047	±0.069
最大誤差	0.113	0.155	-0.183
最小誤差	-0.004	0.006	0

本研究之拼接成果



利用 RiScan 之拼接成果

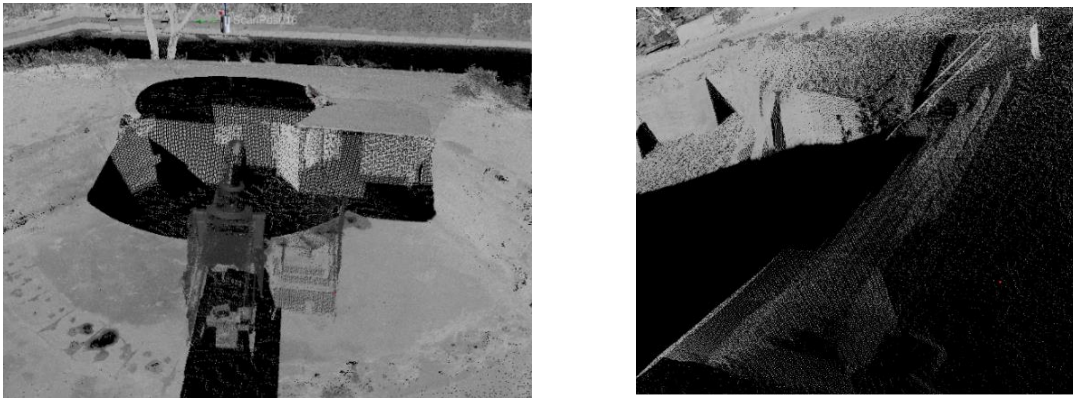


圖 10 以本研究提出之方法與 RiSCAN 產生拼接錯誤之處比較

5. 結論

在本研究中，我們利用兩個測試場進行驗證，在不使用地面控制點，只利用 GPS 觀測量與連結點進行多測站網形平差之成果，於自強測試場中，檢核點差值之精度在 E、N、h 方向分別為 2 公分、2 公分、7 公分；於億載金城測試場中，檢核點差值之精度在 E、N、h 方向分別為 4 公分、4 公分、7 公分，本研究所提出的方法其精度足夠做為應用。此外，相較於以往若要使用雷射掃描儀進行地理定位必須先測得控制點的情況下，本研究所使用之方法可以直接以 GPS 之觀測量與連結點觀測量進行平差，達到地理定位之目的。

此外，在處理大量資料(億載金城案例)，使用 RiSCAN 在不定平的情況下會有錯誤的情形產生，利用本研究提出之方法之成果較好。另外在 RiSCAN 估計掃描儀位置時，直接以 GPS 測得之坐標扣掉一段距離，但在本研究所提出之方法中，求解掃描中心位置是利用一段向量從 GPS 天線位置到掃描儀中心表示，其向量隨著掃描儀姿態不同而有所改變，因此本研究所提出之方法，在掃描儀在傾斜的狀態下，仍可求得高精度的解。

參考文獻

- 莊子毅，2006。以三維直線特徵進行地面光達點雲套合，國立台灣大學土木工程學系研究所碩士論文。
- 莊子毅，2012。以幾何特徵為基礎之光達點雲套合，國立台灣大學土木工程學系博士論文。
- 湯凱佩，2005。以共軛平面特徵進行光達點雲資料結合之平差模式，內政部辦理 LiDAR 之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案成果發表暨應用研討會，pp. 15-24。
- 黃建銘，2009。應用點雲點線面特徵進行地面光達多測站資料結合之聯合平差，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 劉燈烈，2004。地面光達點雲資料的平差結合與影像數貼，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- Akca, D., 2003. Fully Automatic Registration of Laser Scanner Point Clouds, In: Optical 3-D Measurement Techniques VI, volume 1, Zurich, Switzerland, pp.330-337.
- Alamús, R., Baron, A., Bosch, E., Casacuerta, J., Miranda, J., Pla, M., Sánchez, S., Serra, A., and Talaya, J., 2004. On the Accuracy and Performance of the Geomobil System, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey.

- Baeder, B., Osborn, C., and Rhea, J., 1994. Low Cost Navigation Technology Investigation for the Unmanned Ground Vehicle Program, In Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, NV, USA, pp. 574-580.
- Besl, P.J., and McKay, N.D., 1992. A Method for Registration of 3-D Shape, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2):239-256.
- Godin, G., Laurendeau, D., and Bergevin, R., 2001. A Method for the Registration of Attributed Range Images, Third International Conference on 3D Imaging and Modeling, Quebec, Canada, May 28-June 1, 2001, pp. 179-186.
- Mohamed A., and Wilkinson B., 2009. Direct Georeferencing of Stationary LiDAR, Remote Sens. 1(4): 1321-1337; doi:10.3390/rs1041321.
- Reshetyuk, Y., 2010. Direct Georeferencing with GPS in Terrestrial Laser Scanning, ZFV - Zeitschrift für Geodasie, Geoinformation and Landmanagement, 135(3):151-159.
- Sharp, G.C., Lee, S.W., and Ehe, D.K., 2002. ICP Registration Using Invariant Features, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24(1):90-102.
- Wang, T., (accessed on 17 June 2014). Iterative Closest Point algorithm-point cloud/mesh registration, <http://taylorwang.wordpress.com/2012/04/06/iterative-closest-point-algorithm-point-cloudmesh-registration/>.

Multi-station Network Adjustment of Terrestrial LiDAR Data with GPS positioning

Ting-Yu Chien¹ Yi-Hsing Tseng²

ABSTRACT

Terrestrial LiDAR can be used to acquire high accuracy 3D spatial data in rapid way. However, point clouds delivered by a terrestrial LiDAR are referenced to a local coordinate system defined by the laser scanner. With the limitation of viewing coverage of a single scanning station, combining point clouds acquired from multiple scanning stations is usually needed to completely cover the target landscape. For most applications, raw point clouds should be transformed into a global coordinate system (geo-referencing). The geo-referencing of terrestrial LiDAR data is currently relied on known control points. But using control points for geo-referencing is often troublesome and laborious. In this research, we perform network adjustment with GPS observations, and we focus on the problem that whether the role of control points in network adjustment can be substituted by GPS observation of scanning station or not. There are two cases in our experiments. The accuracy of the results are under 10 centimeters in E, N and h directions. By the validation of our experiments, we can know that it can perform network adjustment with GPS observations without control points. The accuracy are good enough for application.

Key word: terrestrial LiDAR, geo-referencing, GPS, point cloud registration.

¹Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

²Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

* Corresponding Author, E- Mail: sam79782003@gmail.com

Received Date: May 25, 2015

Revised Date: Mar. 02, 2016

Accepted Date: May 30, 2016