

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

雷射掃描點雲資料結構化作業分析、幾何品質評估及應用領域之研究(1)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-002-054-

執行期間：93年08月01日至94年10月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：趙鍵哲

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 2 月 27 日

摘要

本計畫在第一年針對雷射掃描過程中的結構化處理(特徵萃取)與精度分析、不同測站雷射掃描資料接合等兩工作項目進行研討。計畫執行中分項工作一是透過(a).掃描點屬性表之建立與比對萃取平面特徵物，並從而推演交線與角點等特徵物及其精度指標；(b).透過區域成長法以及迭代式霍夫轉換(Iterated Hough Transform) 萃取雷射掃描點雲資料中平面特徵物並推演角點及交線之特徵物以及精度分析。分項工作二是利用三維直線特徵(3D Line Features)匹配以及三維直線為基礎的空間相似轉換(Spatial Similarity Transformation)接合不同測站掃描成果。

關鍵字：結構化、區域成長法、迭代式霍夫轉換、三維直線特徵、空間相似轉換。

Abstract

The authors investigated in this study by exploiting the concepts of structuralization on LIDAR point cloud and registering laser scanning data sets from different stations. The former task conducted by two streams includes extracting planes as well as line features and point features derivation. One of the two methods is to table the LIDAR point cloud attributed with geometric and topologic relationship of the points within near neighborhood and thus be able to classify the point cloud into planar features. Line features and point features are then derived seeking neighboring planes. The other method is to employ 3D grid structure well addressing point cloud into 3-D topology and followed by (a). region growing for hypothesizing planes and (b). iterated Hough Transform for refining the plane-features. Line features and point features can then be derived based on the previous solution on plane extraction. The latter task is mainly focused on developing the algorithms in which 3D line feature correspondences for registering multiple data sets with overlapping scene can be established by using geometric constraints in an automatic fashion. The spatial similarity transformation can then be performed by matched 3D line feature correspondence.

Keywords: Structuralization; Region Growing; Iterated Hough Transform; 3D Line Features; Spatial Similarity Transformation

一、前言

儘管至目前為止在雷射掃描系統及其應用上如此熱絡及豐富的研究，雷射掃描系統的精密率定、雷射掃描資料的處理、雷射掃描點雲(Point Cloud)描述物空間幾何的品質、及雷射掃描資料的應用仍是研究者追索的重點課題。本計畫於第一年中擬針對雷射掃描從特徵萃取與精度分析及不同測站點雲資料接合等二方向進行探討。

本研究中採用兩種方式進行特徵物之萃取，(a).是建立掃描點之屬性表，透過屬性值的比對與計算集結共面點為區塊並進一步集結為面特徵物，再透過兩相鄰面特徵物之交會得到交線或三相鄰面特徵物之交會得到角點，演算過程中透過誤差傳播可獲得角點或交線特徵物之精度矩陣(Lin and Jaw, 2004; 林信宏、趙鍵哲，2005)；(b).是使用三維網格框架置入點雲資料，藉網格編號界定點雲間位相關係，並以區域成長法搜尋近似平面參數，其後經

由迭代式霍夫轉換萃取較精確之平面特徵，可進而透過平面特徵衍生交線、交點特徵(黃國彥，2005; 黃國彥、趙鍵哲，2005)及其精度資訊。

本研究另一方向乃利用三維直線特徵匹配完成空間相似轉換之自動化作業，直線特徵匹配乃利用角度與距離的約制條件以及相似轉換的近似模式演算法併同嚴密演算法之聯合模式(Hybrid Model)進行共軛特徵篩選、確認及嚴密求解轉換參數之功效(莊子毅、趙鍵哲，2005)。

二、研究目的

本計畫第一年針對雷射掃瞄程序中，單一測站掃瞄成果之特徵物之萃取方式與精度探討、相鄰測站掃瞄資料之接合等兩分項工作進行研究，試圖對於雷射掃瞄點雲之特徵物萃取與套合之精度進行分析與研究。

在分項工作一的特徵物萃取中，本研究採用建立點屬性表後進行比對計算，再將點集結為面並進行交會之方式將點雲資料結構化以獲得交線與角點及其精度。本研究同時採用區域成長法併同迭代式霍夫轉換萃取雷射掃瞄點雲資料中面特徵，並從相鄰的面特徵依據相鄰性推演交線、角點特徵以及其精度資訊。兩種不同方式獲得之成果可進行比對與驗證。

分項工作二的任務為套合不同測站點雲資料，可謂延伸分項工作一之成果於實際應用上。利用點雲資料結構化或以影像處理技術從網格化後的點雲資料中獲得三維直線，並實施三維直線特徵匹配以及完成空間相似轉換接合不同測站掃瞄成果為本階段之目的。

三、文獻探討

三維離散點資料結構化相關研究之精闢彙整可參(Boyer and Sarkar, 1999)。物空間場景多樣化，在空間域中實施雷射掃描點雲資料結構化處理常需引入過多判斷程序，增加演算法之複雜性且不易獲致滿意的特徵萃取成果。Hough(1962)提出在參數域實施結構化處理的轉換方法辨識影像中能以特定數學模式描述的圖形稱之為霍夫轉換 (Hough Transform)。Morgan and Habib(2002)以雷射掃描點雲產生不規則三角網資訊，再配合區域成長法與霍夫轉換萃取建物邊線。攝影測量領域利用直線特徵進行匹配如 Habib *et al.*(2003)利用線特徵並結合 MIHT(Modified Iterated Hough Transform)方法進行物、像線特徵匹配並進而求解像片外方位參數; Shaker(2004)採用直線特徵並搭配 LBTM(Line Based Transformation Model)方法進行空間相似轉換; Habib *et al.*(2005)提出利用直線特徵作為相片控制求解外方位參數以及利用像片前交之三維直線特徵與雷射掃描直線特徵相套合。

四、研究方法

本段針對兩個分項工作(甲、乙)的三種研究方法(一、二、三)進行說明。

甲、特徵物萃取

- (1). 研究一：透過每一掃瞄點鄰近數個掃瞄點之共面關係及其精度建立之屬性表進行屬性值之比對與計算獲得共平面之區塊，再將共面之區塊進行集結以獲得平面，最後透過相鄰兩平面之交會獲得交線或相鄰三平面之交會獲得角點。實驗中透過誤差傳播可獲得特徵物之精度矩陣供評估特徵物之內在精度。流程圖如下圖 1 所示。

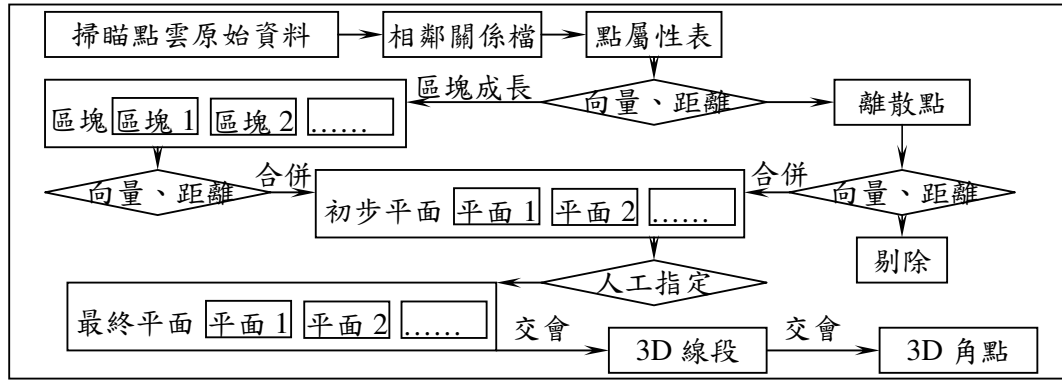


圖 1、透過點屬性表比對獲得特徵物之流程(林信宏、趙鍵哲，2005)

目標點固定範圍內相鄰點中，最遠距離之兩點及距此兩點連線之垂距為最遠之點共三點解算近似起始平面之向量參數 (a_0, b_0, c_0) 。理論上共面各點坐標向量與平面向量內積應為-1，如式(1)，惟受掃描誤差影響往往無法符合，若以帶有未知參數之條件平差求解平面法向量參數未知數 (a_E, b_E, c_E) ，觀測量為點坐標，方程式如式(2)。迭代運算收斂參數解為式(3)；後驗單位權方差為式(4)；平面參數之後驗方差協方差矩陣為式(5)。

$$a_E x_i + b_E y_i + c_E z_i + 1 = 0 \quad (1)$$

式中 (x_i, y_i, z_i) ：i 點座標

(a_E, b_E, c_E) ：平面 E 之法向量

$$Be + A\xi - W = 0 \quad e \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (2)$$

式中 e ：誤差向量。

ξ ：參數 (da_E, db_E, dc_E) 增量向量

W ：初始值代入面方程之向量。

Σ ：觀測值方差-協方差矩陣

A ：觀測方程式對未知參數偏微分之係數矩陣。

B ：觀測方程式對觀測量偏微分之係數矩陣。

σ_0 ：雷射掃描點雲資料先驗單位權中誤差

P ：依點雲資料於 X 、 Y 、 Z 軸向先驗精度而定之權矩陣

參數解：

$$\hat{\xi} = [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A]^T [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} W] \quad (3)$$

後驗單位權方差：

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\tilde{e}^T P \tilde{e}}{n-3} \quad (4)$$

式中 \tilde{e} ：改正數向量

n ：觀測量個數

參數後驗方差-協方差矩陣：

$$\hat{\Sigma}_{\xi} = \hat{\sigma}_0^2 [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A]^{-1} \quad (5)$$

以目標點與相鄰點構成之平面間的相互關係建立屬性表，供判斷點群間之幾何關係，兩目標點法向量平行且兩法向量與兩點連線方向近乎垂直代表兩點可能共面，可由兩目標點間距離確認鄰近之程度。以共面各點屬性值應相近之概念出發，以類似區域成長法之方式擴展平面區塊，可將離散之雷射掃描點雲透過屬性比對之方式成長獲致可供組織平面之區塊並對區塊之平面屬性以相同方式集結成初步平面。程序設計於此階段允許人工介入指

定初步平面進行合併以獲得最終平面，最終平面之法向量外積為交線向量 (a_L, b_L, c_L) ，交線端點選取交集部分，如圖 2，式(6)包含交線向量的解算與精度。本研究另以四參數法表示三維空間直線，如式(7)，Z 為任意值， $(A,B,1)$ 為方向向量， $(P,Q,0)$ 表示空間中直線穿刺於XY 平面之點 (Habib,2000)。式(8)為四參數精度計算式。

$$\begin{cases} (a_L, b_L, c_L) = (b_1c_2 - b_2c_1, a_2c_1 - a_1c_2, a_1b_2 - b_1a_2,) \\ \Sigma_{(a_L, b_L, c_L)} = D_L \begin{bmatrix} \Sigma_{a_1b_1c_1} & 0 \\ 0 & \Sigma_{a_2b_2c_2} \end{bmatrix} D_L^T \end{cases} \quad (6)$$

式中 (a_i, b_i, c_i) ：第 i 平面向量 (i=1,2)

D_L ：直線參數對平面向量偏微分之係數矩陣；

$\Sigma_{a_i b_i c_i}$ ：第 i 平面參數後驗方差-協方差矩陣；

$$\begin{cases} X = \frac{(b_1 - b_2)}{(a_1b_2 - a_2b_1)} + \frac{(b_1c_2 - b_2c_1)}{(a_1b_2 - a_2b_1)} Z = P + AZ \\ Y = \frac{(a_1 - a_2)}{(a_2b_1 - a_1b_2)} + \frac{(a_1c_2 - a_2c_1)}{(a_2b_1 - a_1b_2)} Z = Q + BZ \end{cases} \quad (7)$$

$$\Sigma_{(A,B,P,Q)} = D_{Pl} \begin{bmatrix} \Sigma_{a_1b_1c_1} & 0 \\ 0 & \Sigma_{a_2b_2c_2} \end{bmatrix} D_{Pl}^T \quad (8)$$

式中 D_{Pl} ：A、B、P、Q 分別對平面向量 $(a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2)$ 偏微分之係數矩陣。

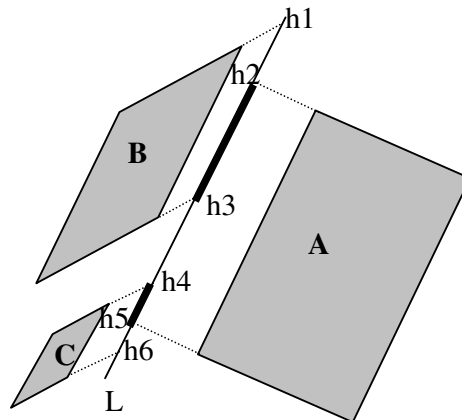


圖 2、面交線萃取

兩平面交會可得交線，三相鄰平面交會可獲得唯一交點。如圖 3 所示。式(9)所示三平面 E_1 、 E_2 、 E_3 組成之方程式可解得唯一交點 T，若由多於三面交於一點，則可組成觀測方程式並代入近似值解算交點座標及其精度。

$$\begin{cases} E_1 : a_1x + b_1y + c_1z + 1 = 0 \\ E_2 : a_2x + b_2y + c_2z + 1 = 0 \\ E_3 : a_3x + b_3y + c_3z + 1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

以最小二乘法求解函式模式與隨機模式同於式(2)，因此相應之解可以式(3)~(5)表之，惟此時參數為交點坐標。

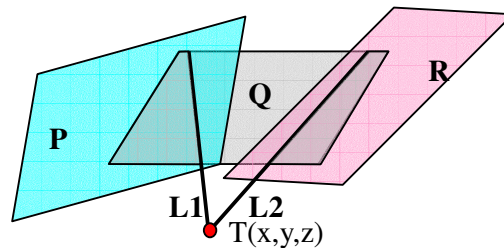


圖 3、面交會得交點示意圖

(2). 研究二：本研究於點雲資料結構化處理時將自空間域與參數域著手，先透過三維網格結構賦予每一個點雲資料網格編號，再以區域成長法的概念，漸次自種子點所在的網格往外成長，取得初步的平面參數。並逐一將平面參數近似值套入迭代式霍夫轉換萃取平面特徵後，解出之參數可反應出共面點雲資料群聚的現象，再以此選定最適合之平面參數。由平面與平面以及平面與交線之位相關係剔除誤判之雷射掃描點雲，並將重覆之雷射掃描點雲再次分類，如此即可得到一完整之共面點雲資料，其後依有交線關係之多組平面參數解算線參數與端點，完成雷射掃描點雲資料特徵萃取工作。研究流程如圖 4 所示。

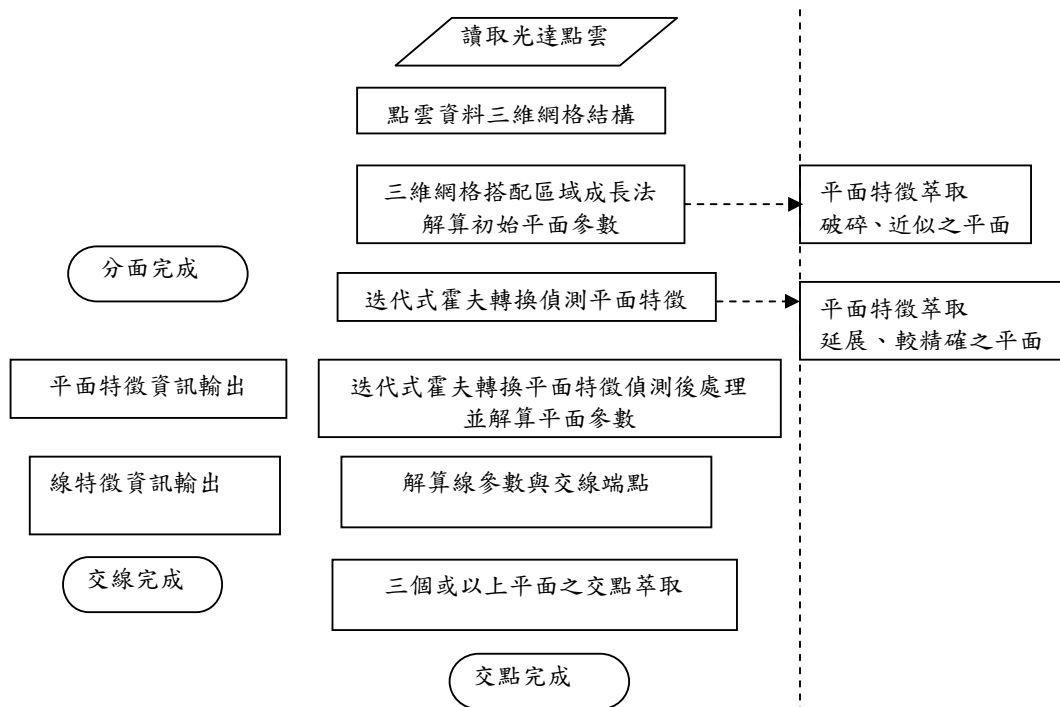


圖 4、選用區域成長法以及迭代式霍夫轉換做為萃取平面特徵之流程圖(黃國彥、趙鍵哲，2005)

先將點雲資料視為一個巨大的網格，經由切割而形成許多大小相同的子網格，再針對存有雷射掃描點雲資料之三維網格編號與該網格中雷射掃描點位其座標值予以記錄。任選一子網格做為起始的目標網格 (Target Grid)，漸次自目標網格臨近的各網格找尋搜尋網格 (Search Grid)，依雷射掃描點雲資料水平與垂直方向之先驗精度定義雷射掃描點位至擬合平面之距離門檻值，以此做為判斷是否共面之依據，由於搜尋範圍呈規律的走向在成長，搜尋範圍內若有非共面點即停止成長，一塊廣大的平面很有可能在雜訊與非共面之小區域的干擾下被分成數塊小平面，而平面參數之可靠度及精度並不理想，因此此階段萃取之平面參數僅被視為近似值，提供給下階段迭代式霍夫轉換萃取較精確之平面特徵。

依空間域與參數域變換原理，每個三維平面物空間中每一點位在參數域中軌跡仍為一平面，對應之三軸各為原平面參數 a 、 b 及 c 分量。若一平面方程式如式(10)，霍夫轉換至參數域後對應平面參數組 A_i 之座標組 C_i 為空間域之每個共面點所組成，可形成各自之平面方程式如式(11)，式中每一個方程式仍為平面方程式，其變量為原空間域中平面參數，因此空間中共面之點位經式(11)變換在參數域理論上應落於相同位置故可解算交點，其交點位置 (x', y', z') 應為原平面參數，然而在雜訊、近似值、點位精度等原因之下，這些雷射掃描點

雲將會逐漸群聚在一個區域，但不會完全交於一點。

$$C_{n \times 3} A_{3 \times 1} + 1 = 0 \quad (10)$$

其中：n為此平面之點數

$$C_{n \times 3} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}$$

$$A_{3 \times 1} = [a_{app} \quad b_{app} \quad c_{app}]^T$$

a_{app} 、 b_{app} 、 c_{app} ：近似平面參數

x_i 、 y_i 、 z_i ：平面上之點位座標

$$\begin{cases} A_1' C_1' + 1 = 0 \\ A_2' C_2' + 1 = 0 \\ \vdots \\ A_n' C_n' + 1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中 A_i' ：霍夫轉換後對應空間域點位座標之平面參數組，且 $A_i' = C_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]$

C_i' ：霍夫轉換後對應平面參數組 A_i' 之座標組，且 $C_i' = [x_i' \quad y_i' \quad z_i']^T$

本研究利用迭代式霍夫轉換(Iterated Hough Transform)縮小霍夫轉換參數維度及達到平面延展之功效。先固定平面參數中之兩參數，另一參數(本研究稱為目標參數)產生群聚的雷射掃描點位即視為共面點，依此求得修正後之平面參數，並進行下一次迭代運算。取出滿足條件之雷射掃描點位，將其視為共面點並求得最適當平面參數，計算共面點中各雷射掃描點位距擬合面之距離 d_i 。若低於門檻值時繼續迭代，並更新此次平面參數，將每近似平面參數代入迭代式霍夫轉換可得到近似平面參數之共面點雲資料，並依嚴密平面參數求解模式(1)~式(5)解得平面參數及其精度。取得平面特徵後，可進一步萃取交線特徵，並藉其表示式推導交線上任意點之座標與直線參數精度，也可進一步獲取多面交會之角點特徵如前述，以利後續之用。

乙、相鄰測站掃瞄資料之接合

(3)研究三：以三維直線特徵進行匹配研究乃利用直線之幾何特性搭配空間幾何的角度及最短距離約制條件並利用平差解算尋找可能的共軛直線對作為後續三維空間相似轉換之觀測量。三維空間的相似轉換包含非線性模式之嚴密模式(Rigorous Model)及非線性模式之近似模式(Approximated Model)以及聯合模式(Hybrid Mode)。在本研究中將近似模式之解作為嚴密模式之近似解以進行迭代計算三維空間相似轉換之參數解，流程如圖 5 所示。

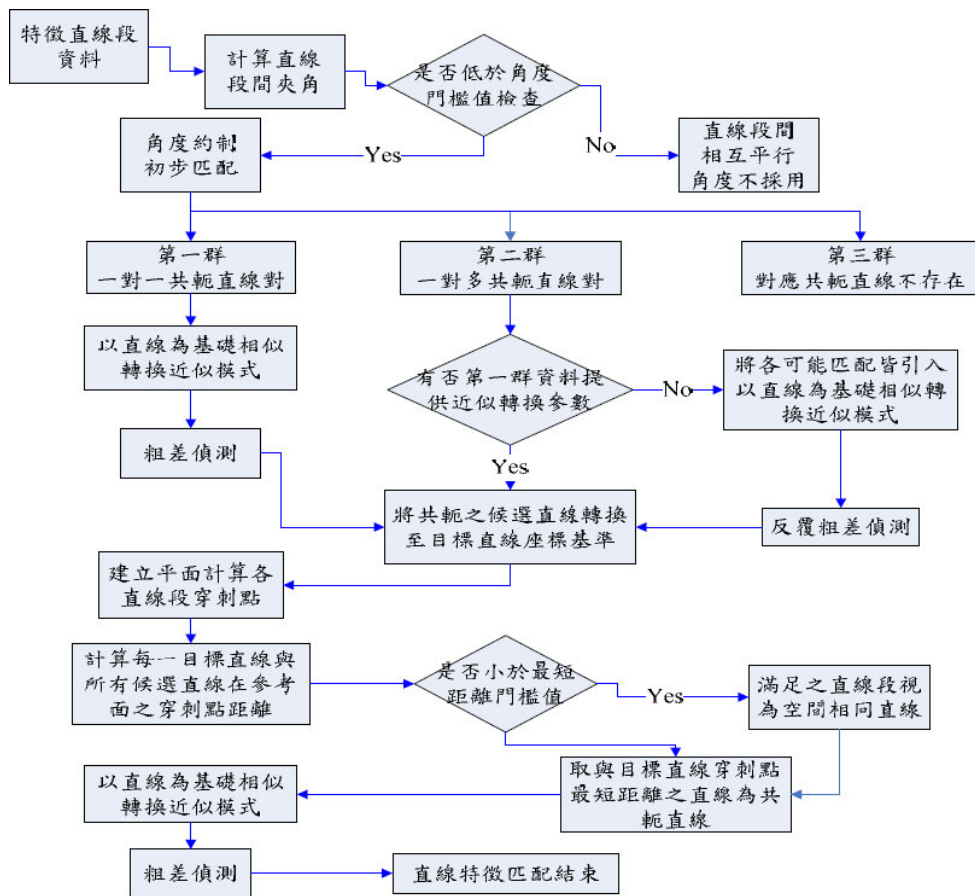


圖 5、三維特徵直線匹配程序圖(莊子毅、趙鍵哲, 2005)

三維直線特徵匹配策略分兩個主要階段，第一個階段利用角度檢查獲得可能共軛直線配對後進行近似轉換參數計算。第二階段是利用第一階段轉換參數，將全部資料轉換至共同座標系計算空間直線間的距離作最小距離檢查，進而判斷共軛直線配對。由圖 6，三維共軛直線利用線段對應線段之模式經坐標轉換後應具有共線 (Collinearity) 特性，即 (X_c, Y_c, Z_c) 經轉換至第二坐標系後應落於其共軛線段之軌跡上，如式(12)所示。利用第一坐標系的直線段端點 $(X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}), (X_{di}, Y_{di}, Z_{di})$ 轉換至第二坐標系後可以分別建立如式 (13) 之關係式，以下採用 (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) 點作說明：

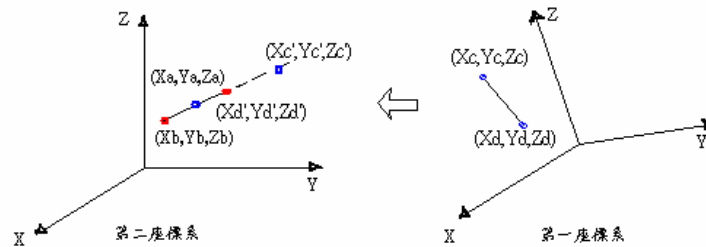


圖 6、不同坐標下的三維共軛直線段 $((X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i}), (X_{d_i}, Y_{d_i}, Z_{d_i}))$ 分別為

$(X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i})$ 及 $(X_{d_i}, Y_{d_i}, Z_{d_i})$ 轉換至第二坐標系之坐標

$$t = \frac{X_{c_i} - X_{a_i}}{l_i} = \frac{Y_{c_i} - Y_{a_i}}{m_i} = \frac{Z_{c_i} - Z_{a_i}}{n_i} \quad (\text{其中 } i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

$(X_{a_i}, Y_{a_i}, Z_{a_i}), (X_{b_i}, Y_{b_i}, Z_{b_i})$ 為第二坐標系的第 i 線段端點坐標。

$$\begin{bmatrix} X_{ci} \\ Y_{ci} \\ Z_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ci} \\ Y_{ci} \\ Z_{ci} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中旋轉矩陣 $M = M_\kappa \cdot M_\phi \cdot M_\omega$

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos(\kappa) \cos(\phi) & m_{12} &= \sin(\kappa) \cos(\omega) + \cos(\kappa) \sin(\phi) \sin(\omega) \\ m_{21} &= -\sin(\kappa) \cos(\phi) & m_{13} &= \sin(\kappa) \sin(\omega) - \cos(\kappa) \sin(\phi) \cos(\omega) \\ m_{32} &= -\cos(\phi) \sin(\omega) & m_{22} &= \cos(\kappa) \cos(\omega) - \sin(\kappa) \sin(\phi) \sin(\omega) \\ m_{33} &= \cos(\phi) \cos(\omega) & m_{23} &= \cos(\kappa) \sin(\omega) + \sin(\kappa) \sin(\phi) \cos(\omega) \\ m_{31} &= \sin(\phi) \end{aligned}$$

嚴密模式解法中，由式(12)三維空間直線段兩端點可建立四個觀測方程式，為求解七個轉換參數，至少需要空間中兩對非共面直線段，採附有未知數之條件平差方程式，數學模式如式(14)型態為非線性方程式，平差計算前必須針對未知參數進行偏微分之線性化處理。依最小二乘法解得參數及其精度，如式(15)。令 $\bar{y} = w - By$ ， $\bar{e} = Be$ 則將式(15)變換為間接平差一般式，如式(16)。

$$w_{4n \times 1} = A_{4n \times 7} \xi_{7 \times 1} + B_{4n \times 12n} (y_{12n \times 1} + e) \quad , \quad e \sim (0, \sum_e = \sigma^2 \cdot P^{-1}) \quad (14)$$

$$w - By = A\xi + Be$$

其中 n : 共軛直線配對數; w : 為不符值向量;
 ξ : 空間相似轉換七參數增量; y : 直線端點坐標觀測值向量;
 e : 直線端點坐標觀測值誤差向量;
 A : 式(12)方程式對參數偏微分之係數矩陣
 B : 式(12)方程式對觀測值偏微分之係數矩陣

$$\bar{y} = A\xi + \bar{e} \quad , \quad \bar{e} \sim (0, \sum_{\bar{e}} = B \cdot \sum_e \cdot B^T = \sigma_0^2 \bar{P}^{-1}) \quad (15)$$

$$\text{參數解: } \hat{\xi} = [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A]^{-1} [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} \bar{y}]$$

$$\text{後驗單位權方差: } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\bar{e}^T \bar{P} \bar{e}}{4n - 7} \quad (16)$$

$$\text{後驗參數方差協方差矩陣: } \hat{\Sigma}_{\hat{\xi}} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A]^{-1}$$

空間直線端點透過式(12)推得之觀測方程式中，將 $(X_q, Y_q, Z_q), (X_h, Y_h, Z_h), (X_c, Y_c, Z_c)$ 視為係數並以式(17)取代原參數，獲得新線性觀測方程式。相同透過式(15)以最小二乘法間接平差模式進行計算得式(18)，惟 A 矩陣是新觀測方程式對十二個未知參數偏微分之係數矩陣。一對共軛空間直線段之對應可以組成四個觀測方程式，針對十二個未知參數 $(P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{31}, P_{32}, P_{33}, T_X, T_Y, T_Z)$ 至少需要使用三對共軛直線段方可求解。此十二參數已包含平移向量 (T_X, T_Y, T_Z) ，而三個旋轉角度以及一個尺度因子可利用轉換式(19)~(22)推求:

$$\begin{aligned} P_{11} &= S [\cos(\kappa) \cos(\phi)] & P_{21} &= S [-\sin(\kappa) \cos(\phi)] & P_{31} &= S \sin(\phi) \\ P_{12} &= S [\sin(\kappa) \cos(\omega) + \cos(\kappa) \sin(\phi) \sin(\omega)] & P_{22} &= S [\cos(\kappa) \cos(\omega) - \sin(\kappa) \sin(\phi) \sin(\omega)] & P_{32} &= S [-\cos(\phi) \sin(\omega)] \\ P_{13} &= S [\sin(\kappa) \sin(\omega) - \cos(\kappa) \sin(\phi) \cos(\omega)] & P_{23} &= S [\cos(\kappa) \sin(\omega) + \sin(\kappa) \sin(\phi) \cos(\omega)] & P_{33} &= S [\cos(\phi) \cos(\omega)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{參數解: } \hat{\xi} = [A^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A]^{-1} \bar{y} \quad (18)$$

$$S = \sqrt{P_{11}^2 + P_{21}^2 + P_{31}^2} \quad (19)$$

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{P_{31}}{S} \right) \quad (20)$$

$$\kappa = \tan^{-1} \left(-\frac{P_{21}}{P_{11}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\kappa) \cos(\phi)}{\cos(\kappa) \cos(\phi)} \right) \quad (21)$$

$$\omega = \tan^{-1}\left(\frac{-P_{32}}{P_{33}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\omega)\cos(\phi)}{\cos(\omega)\sin(\phi)}\right) \quad (22)$$

聯合模式即是將嚴密模式以及近似模式做一個結合。利用近似模式的參數解作為嚴密模式的參數起始值，免除供予近似值之程序，也維持較好的參數求解精度。藉此理念可推廣至多測站之同時求解，而將式(14)行延伸得式(23)。令 $\bar{y} = w - By$ ， $\bar{e} = Be$ 則將式(23)變換為間接平差一般式，同式(15)

$$w_{\left[\sum_{i=1}^n (4 \cdot (l_i - 1)) \times 1\right]} = A_{\left[\sum_{i=1}^n (4 \cdot (l_i - 1)) \times [7 \cdot (m - 1)]\right]} \xi_{[7 \cdot (m - 1)] \times 1} + B_{\left[\sum_{i=1}^n (4 \cdot (l_i - 1)) \times [6 \sum_{i=1}^n l_i]\right]} (y_{\left[6 \sum_{i=1}^n l_i\right] \times 1} + e) e \sim (0, \sum_e \sigma^2 \cdot P^{-1}) \quad (23)$$

其中 m : 重疊資料個數;
 l_i : 共軛配對個數, $i = 1 \sim n$;
 (其餘符號定義同式(14))

則將上述三維直線特徵匹配策略與以直線特徵為基礎的三維相似轉換做結合，即可完成由輸入三維直線特徵至輸出轉換七參數以進行點雲資料套合之自動化程序。

五、結果與討論 (含結論與建議)

(1) 研究一

本研究自台南成功大學圖書館地面雷射掃描掃描資料內單一掃描站選取局部區域為測試區輻射影像如圖 7 紅框，以 3 號紅框為例，掃描點如圖 8 包含兩交會平面，X 範圍約 2 公尺，Y 範圍約 1 公尺，Z 範圍約 1 公尺，共 587 個掃描點。以加拿大 Optech 公司生產的地面雷射掃描 ILRIS-3D 所取雷射掃描點先驗定位精度 $\sigma_0 = \pm 8 \sim 12mm$ 。如圖 9 共獲得 34 個區塊。本實驗獲得 5 個初步平面，如圖 10 所標示。在此階段允許人工介入指定交會之平面並自動計算交線，如圖 11 之平面 1 與 2 及以粗紅線表示交會線，以共面各點至最終平面距離為改正數計算之二個最終平面中誤差、平面向量與其變方-協變方矩陣及夾角如下表 1。圖 12 將交線置入原始掃描資料，可肉眼辨識交線座落位置與原始掃描資料之交線極為相近。其餘各紅框測試區之成果因篇幅有限不贅述。

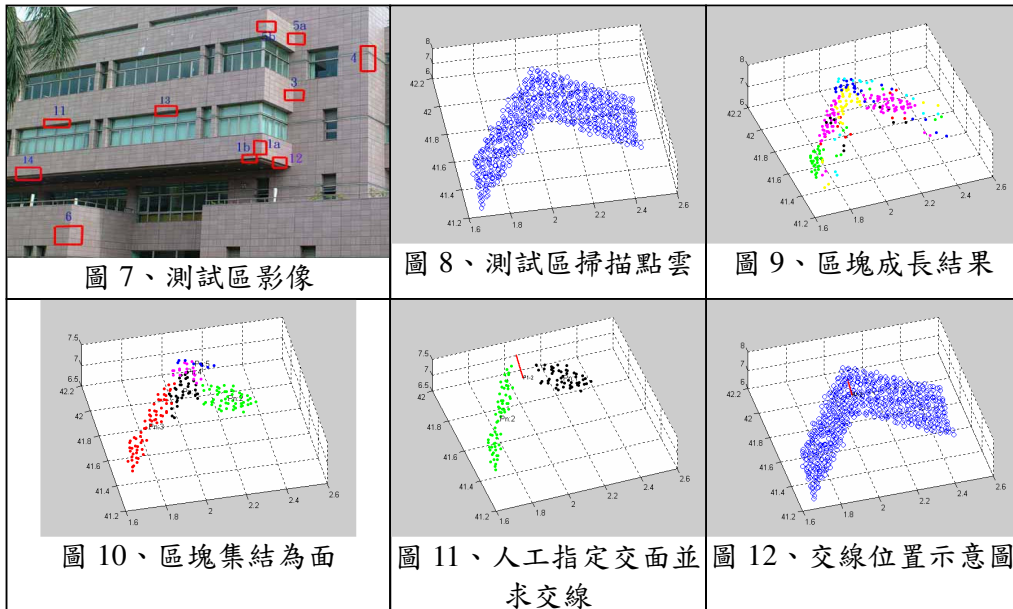


表 1、最終平面資訊

	平面 1				平面 2			
$\hat{\sigma}_0^2$	0.00080(m ²)				0.00082(m ²)			
法向量	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2
	-0.01659	-0.02419	0.00708	1.0	0.04074	-0.02707	0.00746	1.0
法向量協變矩陣	1.8684e-4	-1.4729e-5	3.5788e-5		1.2364e-4	-8.7347e-6	1.1843e-5	
	-1.4729e-5	3.7413e-6	-1.8270e-5		-8.7347e-6	1.6140e-6	-6.7620e-6	
	3.5788e-5	-1.8270e-5	9.9401e-5		1.1843e-5	-6.7620e-6	3.6384e-5	
兩面夾角	88.78°							
交線參數	A		B		P(m)		Q(m)	
	0.0078		0.2875		2.0073		39.9590	
交線 (A,B,P,Q) 參數精度	0.000014811		0.000018216		-0.00051498		-0.00026484	
	0.000018216		0.000030199		-0.00026486		-0.00074839	
	-0.00051498		-0.00026484		0.0036013		0.0017731	
	-0.00026486		-0.00074839		0.0017731		0.005169	

本研究後續利用面交會搜尋角點資訊。從圖 7 判斷可用於解算交點之平面為 Ea、Eb、Ec、Ed 與 Ee。角點所在示意圖如圖 13 所示。圖 14 紅點區域為應用於求取角點所萃取之平面，黑線為交線。經由萃取之離散平面可解算兩交會角點 T1 與 T2，如黑點所示，精度如表 2 所示。

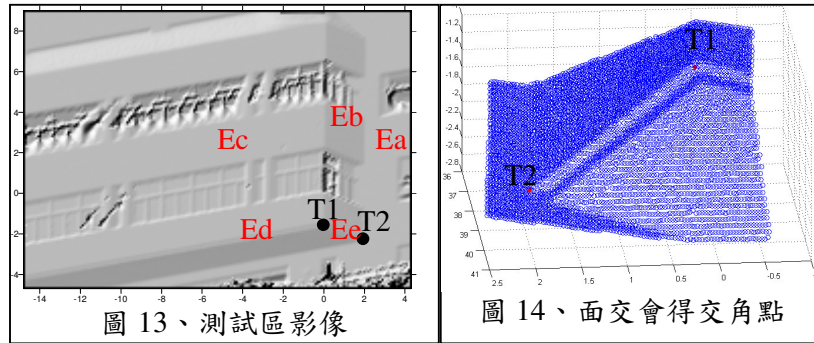


表 2、交點坐標及精度

交點	坐標(m)			$\hat{\Sigma}_T (m^2)$			$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{e^T P e}{n-u} (m^2)$
	X	Y	Z				
T1	1.9629	39.258	-2.296	1.61e-4	1.16e-4	-3.14e-5	5.9911e-6
				1.16e-4	2.35e-4	-4.68e-5	
				-3.14e-5	-4.68e-5	1.04e-4	
T2	-0.0087	36.509	-1.557	6.04e-4	2.85e-4	-8.23e-5	3.5686e-5
				2.85e-4	7.64e-4	-1.75e-4	
				-8.23e-5	-1.75e-4	2.53e-4	

交線與角點之計算直接以掃描點視為觀測量組成之平面方程式交會解算，面特徵後驗單位中誤差略大於先驗精度，角點採用之共面點散布較廣而精度較佳，由角點坐標之變方協變矩陣分析角點坐標精度約 2 公分，主因應為掃瞄品質對於面特徵物之萃取有所影響所致，解算角點所採用之平面若與角點相距較遠，對於角點之影響也隨之加強。本研究採點屬性比對及區域成長法之方式進行雷射掃描資料之結構化，在效率上有待加強，萃取所

得線特徵物或點特徵物可進一步將雷射掃描資料進行完整之物件切割以獲得有意義之物件資訊。

(2)研究二

本研究採用之資料除同研究一選用台南成功大學圖書館地面雷射掃描掃描資料之外，亦選用由空載雷射掃描 ALS40 所取得，平面精度為 0.4m、高程精度為 0.15m 之資料。地面雷射掃描實驗中，人工選擇了 1~5 號五塊大小、地型不均等之實驗區，如圖 15 所示與表 3 所說明。1 號實驗區為僅存有共線之兩平面的區域，最終切割次數為 8 次，共找出十七個近似平面參數，分別將其代入迭代式霍夫轉換偵測平面特徵後並以人工挑選最適當之平面，其結果如圖 16a 與 16b 所示，黑色為原始資料中之雷射掃描點雲；藍色則為迭代式霍夫轉換後萃取之共面點。圖 17 為重覆或誤判點之部份，黑色為原始資料中之雷射掃描點雲；藍色則為重覆或誤判之雷射掃描點雲。迭代式霍夫轉換平面特徵偵測後處理完畢之後，總共剔除 97 點為重覆或誤判之雷射掃描點雲，圖 18 為線特徵萃取成功之結果；表 4 為平面及線特徵精度與參數之資訊。其餘各框測試區之成果因篇幅有限不贅述。

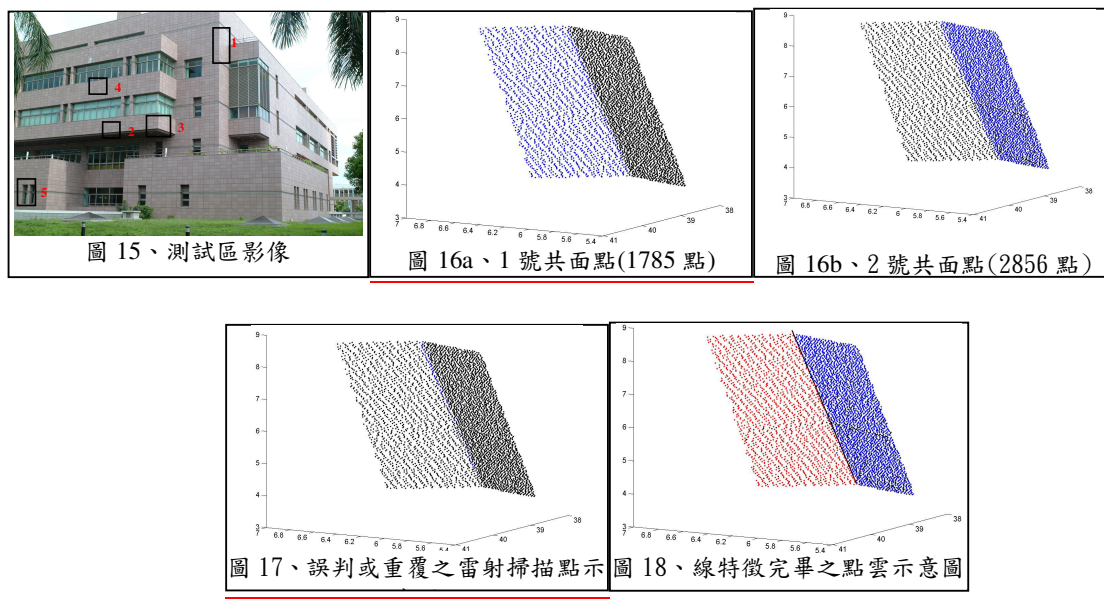


表 3、小範圍實驗區資訊

編號	1	2	3	4	5
點數	4912	544	3306	2160	3257
點密度 (點/m ²)	863.115	682.741	1055.599	765.756	596.208
地形狀況	點數多之兩相交平面	點數少之兩相交平面	屋角	階梯狀之平面	含玻璃之區域

表 4、參數與精度資訊

點數	平面 1(藍色平面)			平面 2(紅色平面)		
		2817			1727	
$\hat{\sigma}_0$	0.838870			0.767066		
平面參數	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
	-0.017255	-0.024201	0.007300	0.054069	-0.035860	0.009825

平面參數 方差-協方差 矩陣	0.3765×10^{-9}	-0.0583×10^{-9}	0.0143×10^{-9}	0.7502×10^{-8}	-0.1272×10^{-8}	0.0324×10^{-8}		
	-0.0583×10^{-9}	0.0093×10^{-9}	-0.0035×10^{-9}	-0.1272×10^{-8}	0.0217×10^{-8}	-0.0063×10^{-8}		
	0.0143×10^{-9}	-0.0035×10^{-9}	0.0087×10^{-9}	0.0324×10^{-8}	-0.0063×10^{-8}	0.0064×10^{-8}		
交線參數	a		b		p(m)		q(m)	
	0.012452		0.292749		6.049405		37.007235	
交線參數 方差-協方 差矩陣	0.009714×10^{-6}		-0.001262×10^{-6}		-0.060188×10^{-6}		0.007829×10^{-6}	
	-0.001262×10^{-6}		0.009446×10^{-6}		0.008081×10^{-6}		-0.058101×10^{-6}	
	-0.060188×10^{-6}		0.008081×10^{-6}		0.448311×10^{-6}		-0.060542×10^{-6}	
	0.007829×10^{-6}		-0.058101×10^{-6}		-0.060542×10^{-6}		0.433824×10^{-6}	

空載雷射掃描實驗自圖 19 挑選選取建物做為實驗區如表 5 說明。經過三維網格搭配區域成長法後可得到 59 組近似平面參數。由人工方式可挑選出六組最適合且無誤的平面特徵經過迭代式霍夫轉換平面特徵萃取後處理之成果為圖 20。六組平面特徵及其精度資訊如表 6。

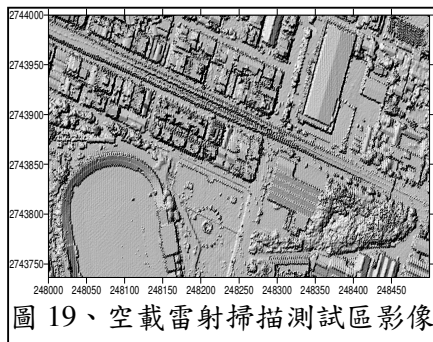


表 5、空載雷射掃描實驗區資訊

	掃描點數：1282
	點密度：0.487 點/m ²
	X 座標分佈 (m)： (248055.75, 248102.57)
	Y 座標分佈 (m)： (2743902.1, 2743958.33)
	Z 座標分佈 (m)： (41.87, 87.22)

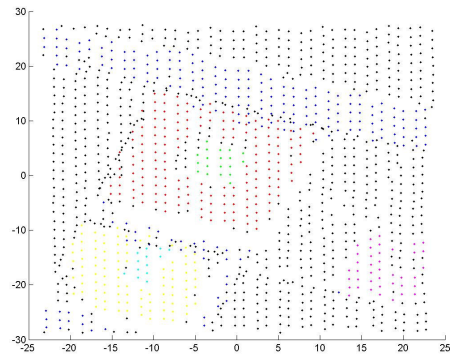
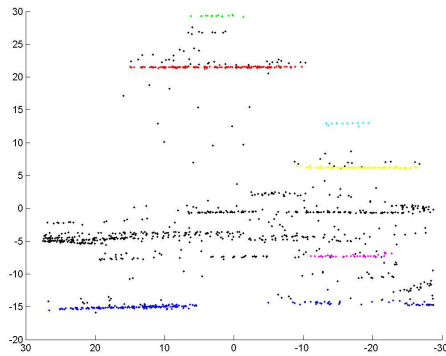


圖 20、特徵萃取完畢之點雲示意圖

表 6、平面參數與精度資訊

	平面 1(藍色平面)			平面 2(紅色平面)		
點數	209			167		
$\hat{\sigma}_0$	1.085326			0.471968		
平面參數	a	b	c	a	b	c
	-0.000257	0.001248	0.067637	0.000077	-0.000060	-0.046475
平面參數 方差-協方 差矩陣	0.3651×10^{-8}	-0.0387×10^{-8}	-0.0315×10^{-8}	0.1575×10^{-8}	0.0077×10^{-8}	0.0240×10^{-8}
	-0.0387×10^{-8}	0.2866×10^{-8}	0.1627×10^{-8}	0.0077×10^{-8}	0.1607×10^{-8}	-0.0175×10^{-8}
	-0.0315×10^{-8}	0.1627×10^{-8}	0.3534×10^{-8}	0.0240×10^{-8}	-0.0175×10^{-8}	0.0199×10^{-8}
	平面 3(紫色平面)			平面 4(天青色平面)		
點數	40			13		
$\hat{\sigma}_0$	0.191326			0.114854		

平面參數	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
	-0.002307	0.003451	0.124240	0.002103	-0.000553	-0.076490
平面參數 方差-協 方差矩陣	0.0399×10^{-6}	0.0009×10^{-6}	0.0942×10^{-6}	0.9976×10^{-7}	-0.3763×10^{-7}	0.3780×10^{-7}
	0.0009×10^{-6}	0.0262×10^{-6}	-0.0600×10^{-6}	-0.3763×10^{-7}	0.4692×10^{-7}	0.2619×10^{-7}
	0.0942×10^{-6}	-0.0600×10^{-6}	0.3755×10^{-6}	0.3780×10^{-7}	0.2619×10^{-7}	0.6512×10^{-7}
平面 5(黃色平面)			平面 6(綠色平面)			
點數	94			19		
$\hat{\sigma}_0$	0.152231			0.074807		
平面參數	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
	-0.000068	0.000625	-0.159542	-0.000347	-0.000245	-0.034107
平面參數 方差-協 方差矩陣	0.0074×10^{-6}	0.0022×10^{-6}	0.0217×10^{-6}	0.2659×10^{-8}	0.0169×10^{-8}	0.0188×10^{-8}
	0.0022×10^{-6}	0.0071×10^{-6}	0.0255×10^{-6}	0.0169×10^{-8}	0.2105×10^{-8}	-0.0166×10^{-8}
	0.0217×10^{-6}	0.0255×10^{-6}	0.1233×10^{-6}	0.0188×10^{-8}	-0.0166×10^{-8}	0.0037×10^{-8}

由地面與空載掃瞄實驗成果得知，在取得近似平面參數時會因平面本身之形狀及是否有鄰近平面而限制。雖無法一次取得所有之平面與線資訊，但若將資料以已處理與未處理之方式標註，並僅針對未處理之雷射掃描點雲進行二次迭代式霍夫轉換特徵萃取，則應可萃取出先前未處理到之平面特徵。故對於受到干擾的實驗區來說，只要重要平面上未影響的雷射掃描點雲佔大多數，同時干擾較嚴重之點雲未擴散至全部平面範圍上，其成功率仍可令人信賴。分析實驗成果並於整理後提出以下建議：

由誤差傳播定律可知解算出之平面參數與線參數其理論精度應遠優於實際精度，且極為貼近真值，經由線參數而得之交線端點亦應與真值相近。然而實驗結果顯示解算出之交線端點與真值的差距仍有可能在兩倍至三倍先驗精度之間，在線參數與真值有所偏差的情況下，即使交線僅只是略為歪斜也會造成端點位置偏離真值而影響端點座標之求解，且各雷射掃描點位其本身亦含有誤差，而導致交線端點實際精度比不上理論精度的情況發生，此為後續研究應再探討之處。三維網格結合霍夫轉換萃取平面特徵受限於起始值的優劣，若無較佳的平面參數近似值或部份的平面特徵未被偵測到時將會影響成果。此情況最容易出現在某些破碎、不平整、細長或干擾嚴重的平面之上，如由穩健度估價值法(Robust Estimation)分析之觀念針對改正數較大之雷射掃描點位進行調權的動作，令此類雷射掃描點雲的影響程度下降，應可使近似平面參數更為貼近實際狀況，其後進行霍夫轉換萃取特徵時將能更為提升特徵萃取之完整度以及精度。

(3)研究三

本研究採用之資料同研究一為相鄰兩測站之點雲影像及近景影像，在點雲資料網格化後之距離影像(Range Image)以 Canny 邊緣線偵測所得之直線中，設定其中標號藍線 A~L 為候選直線資料，紅線 1~9 為目標直線資料。如圖 21 所示。針對兩測站之直線特徵以角度約制匹配後以共軛直線對進行三維相似轉換之近似模式，檢核並剔除錯誤的共軛比對再應用獲得之近似轉換參數將共軛直線對轉換至相同基準，計算穿刺點進行穿刺點間最小距離約制以挑選最適匹配，最後引入三維直線為基礎的空間相似轉換聯合模式計算轉換參數。各階段之成果如表 7(A)~(D)，兩測站掃瞄點雲套合結果如圖 21。

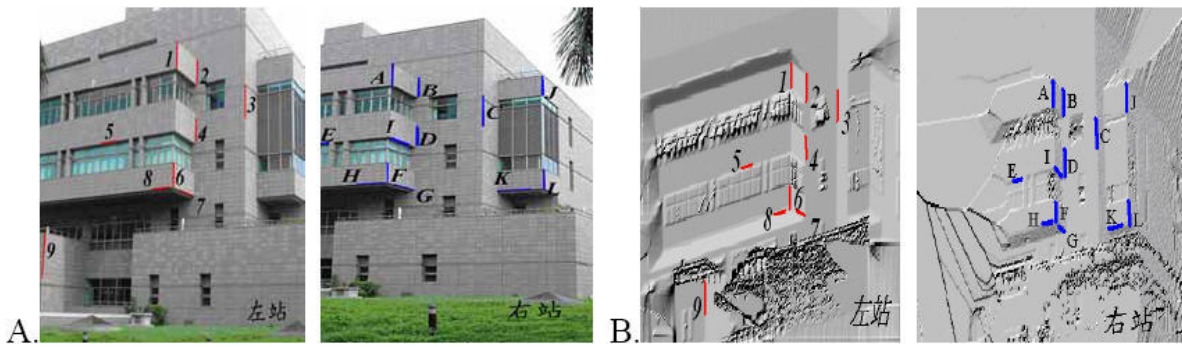


圖 21、地面雷射掃描相鄰兩測站之近景影像 A 及雷射掃描點雲距離影像 B

表 7(A)、角度約制初步匹配結果

目標直線	1	2	3	4	5	6	7	8	9
候選直線	ABCD	BCDJ	BCJL	BCD	EHK	ADFL	GI	H	BCDF

表 7(B)、初步匹配以近似模式檢核之轉換參數近似值結果

Scale	Omega	Phi	kappa	Trans X	Trans Y	Trans Z
0.9989	0.2953rad	0.1148rad	1.1349rad	1.3072m	-1.3061m	0.0841m

表 7(C)、穿刺點最短距離約制匹配結果

目標直線	1	2	3	4	5	6	7	8
候選直線	AF	BD	C	BD	E	AF	G	H
距離差異	0.3361	0.1107	0.2192	0.2384	0.1990	0.1530	1.080	2.1071

表 7(D)、共軛直線對進行聯合模式相似轉換之參數結果

Scale	Omega	Phi	kappa	Trans X	Trans Y	Trans Z
1.0001	0.2617rad	0.1221rad	1.1289rad	1.3988m	-1.2981m	0.04866m
後驗單位權中誤差	0.81793					

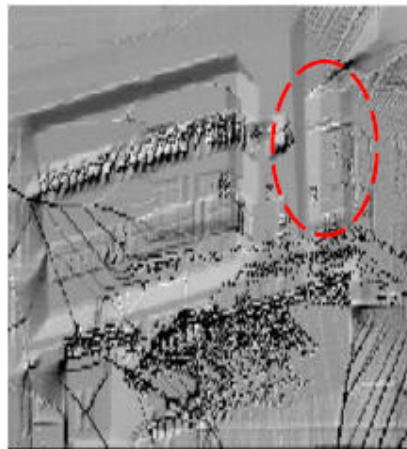


圖 21、相鄰測站套合成果

雖匹配成果無誤，由圖 21 仍可看出兩測站資料經過套合後仍有差異，此乃與點雲內差處理及直線特徵萃取方式有關。由圖 21 紅色圈選部分可看出非直線共軛範圍內之套合結果因為誤差外差而導致較大之差異。在本實驗模擬階段已獲知，倘增加直線數量及分佈，可使演算參數結果精度提升且更可靠。本研究驗證三維直線特徵匹配至空間直線之相似轉換的聯合模式為一具體可行之方法。

六、綜合分析

本研究進行了地面雷射掃描與空載雷射掃描資料的特徵萃取及精度分析及不同測站資料套合多組實驗，對於雷射掃描資料之處理已有較完整具體之測試，惟測試成果之比對及測試項目之類別，尚有值得擴充之空間，如不同的特徵萃取模式之效益比較可進行更周密之分析、特徵物萃取之成果可實際應用於測站接合進行實驗。因此將目前各方向之研究成果交互應用與印證獲取更完整之雷射掃描技術之分析、延伸研究至擴大應用領域至融合不同資料來源如傳統航測之空間特徵物資訊應為眼下可進行之方向。

參考文獻

- Boyer, K.L. and S. Sarkar, 1999. *Perceptual organization in computer vision: status, challenges, and potential*, Computer Vision and Image Understanding 76(1):1-5.
- Habib, A., A. Asmamaw, D. Kelly, and M. May, 2000. *Linear Features in Photogrammetry*, Report No. 450, Department of Civil & Environmental Engineering & Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, OH, pp.22-25.
- Habib, A., Y. Lee, and M. Morgan, 2003. *Automatic Matching and Three-Dimensional Reconstruction of Free-Form Linear Features from Stereo Images*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(2):189-197.
- Habib, A., G. Mwafag, M. Michel, and R. Al-Ruzouq, 2005. *Photogrammetric and LIDAR Data Registration Using Linear Features*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 71, No. 6, pp. 699-707.
- Hough, P.V.C., 1962. *Methods and Means for Recognizing Complex Patterns*, U.S. patent No.3069654.
- Lin, S. H. and J. J. Jaw, 2004. *Structuralization of Lidar Point Cloud*, 25th ACRS, Volume I, Chiang Mai, Thailand, pp. 102-107.
- Morgan, M. and A. Habib, 2002. *Interpolation of LIDAR Data and Automatic Building Extraction*, ACSM-ASPRS 2002 Annual Conference Proceedings, pp. 19-26.
- Shaker, A., 2004. *The line-based transformation model (LBTM): A new approach to the rectification of High-resolution satellite imagery*, ISPRS Congress, pp. 850-855.
- 林信宏、趙鍵哲，2005。光達資料結構化之研究，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，pp. 51-58。
- 莊子毅、趙鍵哲，2005。以三維直線特徵匹配並進行三維空間相似轉換之自動化程序探討，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，pp. 261-268。
- 黃國彥、趙鍵哲，2005。結合三維網格及迭代式霍夫轉換進行光達點雲資料結構化處理，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，pp. 43-50。
- 黃國彥，2005。結合三維網格及迭代式霍夫轉換進行光達點雲資料結構化處理，國立台灣大學土木研究所碩士論文，101p。

計畫成果自評

本計畫執行之項目除了包括空載以及地面雷射點雲資料結構化處理外，還利用雷射點雲萃取之三維直線進行地面不同測站雷射點雲資料的套合作業試驗，這些項目之初步成果業已發表於國內、外相關之研討會上，俟匯整具體成果，併同刻在進行的後續計畫新的研究成果撰寫文章投至國際期刊。