

以正規化互相關法匹配光達點雲之研究

Matching Tie Points of LiDAR Point Cloud Data Sets Using Normalized Cross-Correlation

陳英鴻¹

湯凱佩²

曾義星³

Ying-Hong Chen

Kai-Pei Tang

Yi-Hsing Tseng

摘 要

雷射掃瞄技術具有快速獲得大量的物體表面點位三維資訊之特性，隨著具有長距離掃瞄能力之地面光達與空載光達產品問世，近年來雷射掃瞄亦被廣泛的應用於測量工作，如製作數值高程模型（DEM），或建構城市三維場景等，而在許多應用中，藉由部分重疊的觀測來結合兩（或多）群點雲資料則是經常必須處理的問題，如相鄰航帶的接合、360度三維場景建構等即是。

目前點雲資料的結合已經有許多方法被提出，如 ICP 法、共軛面轉換法、磁性規標控制點法、曲面匹配法等，而基本上進行點雲的結合可以視為共軛位置匹配的問題。本研究中由影像的觀點出發並以醫學影像領域中的三維體積影像（volume image）為概念，將點雲資料所屬空間做三維規則網格切割，使每筆點雲資料成為一張三維的體積影像，並將二維影像常用之 NCC（Normalized Cross-Correlation Matching）匹配法延伸至三維，對兩群具有重疊區的點雲資料進行匹配，研究中並對不同位置匹配得到之 NCC 值所形成的分佈進行分析，利用一階原點動差（Original Moments）及二階中心動差（Central Moments）之統計特性，來提高 NCC 匹配之定位成果並評估不同方向上的定位精度。

關鍵詞：正規化互相關法、一階原點動差、二階中心動差

Abstract

Point cloud data collected by using scanners records the surface information of scanned objects. A complete observation is frequently composed of several scans, so that how to merge multi-scanned data sets becomes an important issue. This thesis presents a point cloud matching method to find conjugate points for Lidar data. The proposed matching method works based on a 3D regular grid structure data which can be obtained by interpolating the point cloud data into a 3D grid. Therefore, 3D

¹ 國立成功大學測量暨空間資訊學系碩士

² 國立成功大學測量暨空間資訊學系博士班研究生，內政部土地測量局測量員

³ 國立成功大學測量暨空間資訊學系教授

Normalized Cross-Correlation Matching (NCC) can be applied. The matching position and matching quality can be estimated by analyzing the NCC coefficients. The experimental results show that 3D grid structuring point cloud data could be matched successfully, and matching quality can be estimated by using the second moments of NCC coefficients.

Keywords: Normalized Cross-Correlation、Original Moments、Central Moments

一、前言

雷射掃瞄儀(以下簡稱光達)的問世，開啟了獲得物體表面資訊的另一扇門，對於測量工程應用而言，光達的分類主要可分為地面光達以及空載光達兩大類。無論是地面光達或者是空載光達，其點雲資料密佈於物體表面之豐富的三維空間資訊，以及其快速獲得資料之能力，提供了測量人員嶄新的思考方向。

對於地面光達而言，所要觀測的測區或地物通常並非單一掃瞄站就可完成三維空間資料的取得，必須擺設多個地面掃瞄站以涵蓋整個待測的區域，而後進行點雲結合的內業工作。現階段處理點雲結合的方法眾多，這些點雲結合方式皆屬兩兩測站的點雲結合方法，而非多測站的整體結合，而且其結合結果缺少了供評估精度的指標，使得點雲結合完畢後的成果缺乏資料品質的指標。

在空載光達方面，由於空載光達點雲資料牽涉到許多隨機以及系統性的誤差量，因此有許多學者提出空載光達的航帶平差(Burman, 2000; Crombaghs, 2000; Vosselman and Maas, 2001)，期望藉著航帶平差的方式消除這些隨機及系統性的誤差。因此如何在航帶重疊區中找尋可靠的控制點或連結點，以進行航帶的平差計算，減少系統誤差的影響，是一個重要的也是關鍵的問題所在。目前空載光達重疊區內的共軛位置匹配之研究，主要都是先將不規則分佈的點雲資料進行結構化的工作後再行匹配。而結構化的方式主要可分為兩大類，其中一種為將空載光達點雲資料經由內插的方式，產生 2.5D 的規則化網格結構後再進行匹配(Behan, 2000)，另一種則是以不規則三角網(Triangular Irregular Network, TIN)的方式，將航帶重疊區內的點雲資料組成許多的 TIN 結構後再進行匹配(Maas, 2000; Vosselman and Maas, 2001)。

因此本研究亦使用規則網格的構想，將光達點雲資料進行結構化，然在結構化的過程中將以原始光達點雲資料為主，與不規則三角網進行結構化不同的是，本研究不將點與點之間作連結，而是將點雲資料的空間做三維網格切割，並加入醫學影像領域中的三維體積影像(Volume Image)概念，將每個三維網格視為一個體積單元(Volume Element)或稱體元(Voxel)，每個體元根據其內部所含的點雲資料賦予其影像灰度值，如此每筆點雲資料將可視為一張三維的體積影像，而有利於將來利用影像匹配的方式進行點雲的匹配工作，且適用的對象可不限於地面光達點雲資料或者是空載光達點雲資料。

二、研究方法與理論

本研究首先將點雲資料空間進行三維網格結構化，並根據體積影像的概念，賦予網格灰度值。接著將廣泛使用的正規化互相關影像匹配做三維延伸，以配合三維體積影像之匹配。最後利用動差的統計特性評估匹配之成果。

2.1 點雲資料三維網格化

光達點雲資料三維網格化的概念是，將每筆點雲資料的集合看成是一張三維的影像，而為了利用影像處理的技術，則必須在點雲所處的坐標系內進行規則的三維網格切割，且網格切割的坐標系三軸與物空間坐標系的三軸一樣同為右旋坐標系統。每個規則網格內的資訊除網格位置資訊外，另外包含屬於該

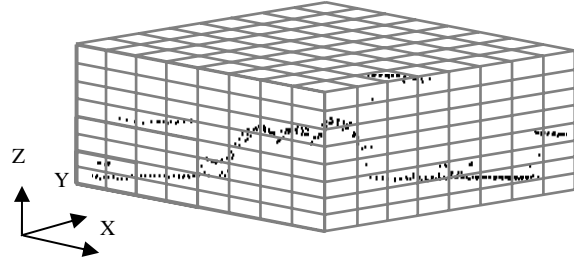


圖1. 三維規則網格切割示意圖

網格內的點數資料及點的坐標與反射值資訊，以這樣的概念進行的三維網格分割所得到的是一種真實的三維網格，且完全不經任何的內插程序可避免因內插所產生的資料錯誤。經過三維規則網格化後，由於點資料除了有座標資訊外尚有反射值資訊，而反射值通常可用灰階的方式表示(0~255)，因此根據網格內的點之反射值賦予網格灰度值，如此規則網格則可視為一幅三維體積影像。

2.2 正規化互相關法匹配

NCC (Normalized Cross Correlation) 匹配法廣泛地應用於電腦視覺領域，是一種以區域為基礎(area-based)的影像匹配方式，而 NCC 匹配法所使用的理論即為統計上的相關係數。而欲利用 NCC 匹配法於三維體積影像匹配，則必須先將傳統用於二維影像匹配的 NCC 匹配法做三維的延伸，因此根據二維的定義式(1)，做三維的延伸後之結果如式(2)至式(6)所示。

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R} \quad (1)$$

其中 σ_{LR} 為影像罩窗 L 與 R 的協變方，
 σ_L 為影像罩窗 L 的標準偏差，
 σ_R 為影像罩窗 R 的標準偏差。

$$g_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l g_L(x_i, y_j, z_k)}{n \cdot m \cdot l} \quad (2)$$

$$\bar{g}_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l g_R(x_i, y_j, z_k)}{n \cdot m \cdot l} \quad (3)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l (g_L(x_i, y_j, z_k) - \bar{g}_L)^2}{n \cdot m \cdot l - 1}} \quad (4)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l (g_R(x_i, y_j, z_k) - \bar{g}_R)^2}{n \cdot m \cdot l - 1}} \quad (5)$$

$$\sigma_{LR} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l ((g_L(x_i, y_j, z_k) - \bar{g}_L) (g_R(x_i, y_j, z_k) - \bar{g}_R))}{n \cdot m \cdot l - 1} \quad (6)$$

2.3 動差介紹

動差，或稱矩(Moment)，主要可分為兩大類，其一定義為與零(原點)的離差稱之為原點動差(Original Moments)，另一則定義為與期望值的離差稱之為中心動差(Central Moments)。而一般常用平均值(mean)及標準誤差(standard deviation)，分別就是一階原點動差以及二階中心動差，在測量上更是以二階中心動差來表示解算成果或是定位效果的好壞。然而一階原點動差所代表的雖然是一群隨機變數的期望值，但廣義而言也代表著一群隨機變數的重心，故一階原點動差其實是隱含著定位意義的。而離散型一階原點動差與二階中心動差如式(7)所示。

$$\begin{cases} E[x^k] = \sum_{i=1}^n x_i^k \cdot f(x_i) \\ E[(x - E(x))^k] = \sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^k \cdot f(x_i) \end{cases} \quad (7)$$

三、三維網格化點雲資料匹配理論

3.1 NCC 值與動差關係

假設圖 2 為一理想一維 NCC 匹配值的分佈圖形，在相同的計算單窗大小之下，根據動差定義計算其一階原點動差以及二階中心動差，其中機率的部分以 NCC 值直接代入，並與以機率(1/n)的方式作比較，則發現直接將 NCC 值帶入動差計算之成果，並無法表現出統計的特性。因此將計算單窗內的 NCC 值做標準化，如式(8)：

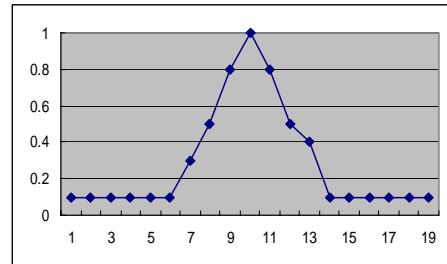


圖 2. NCC 值分佈圖

$$f(X) = \frac{ncc(X)}{\sum ncc(X)} \quad (8)$$

將 NCC 值做標準化的其理由有二：

1. 由於 NCC 值各自並無相同的標準，因此利用標準化 NCC 值使得計算範圍內之 NCC 值可具有共同的標準。
2. 標準化 NCC 值與原始位置上的 NCC 值的表示有直接的關係，也就是當該位置的 NCC 值越大，則經過標準化之後其值也會越大，如此一來不僅保持了原本匹配的意義，也具有加權的效果。

3.2 二階中心動差與誤差橢圓

一維 k 階中心動差定義為 $E[(x - E[x])^k]$ ，而當隨機變數的維度延伸至二維時，此時稱之為 $k+l$ 階“混和中心動差”，其定義為 $E[(x - E[x])^k \cdot (y - E[y])^l]$ ，因此當 $k+l=2$ 時則將會有三種排列組合，分別為

$$\begin{cases} E[(x - E[x])^2] \\ E[(x - E[x])^1 \cdot (y - E[y])^1] \\ E[(y - E[y])^2] \end{cases} \quad (9)$$

如此則可組成協變方矩陣(Covariance Matrix)，接著把協變方矩陣經過主軸轉換，則可以求出特徵向量矩陣(Eigen Vector Matrix)與特徵值(Eigen Value Matrix)，其中特徵向量矩陣所代表的為誤差橢圓長短軸的方向，而特徵值所代表的為誤差橢圓長短軸的長度。在測量上常以誤差橢圓的長軸評估誤差的主要方向，或代表定位較差的方向，同樣地在此也採用誤差橢圓的概念，利用二階中心動差所組成的協變方矩陣，求出誤差橢球之參數並評估誤差的主要方向。

圖3為將匹配之結果計算將其二階中心動差組成協變方矩陣後，經主軸轉換求得誤差橢球相關參數，並將誤差橢球與影像套合之結果。由於匹配的特徵為影像中黑與白變化所構成的直線，因此直線延伸的方向為定位較不確定的方向，而經由計算其NCC值之二階中心動差，與誤差橢球參數則可表現出這樣的趨勢。

3.3 三維規則網格之定位與定位評估之概念

當影像為三維網格影像時，NCC 的匹配值則呈現三維的分佈，因此在 NCC 的定位問題就必須考慮三個方向的定位效能。三個方向都具有定位效果的如圖 4(a)所示，具有兩個定位方向的如圖 4(b)所示，圖 4(c)則僅具有一個定位方向的效果。在三維空間中角點不再僅由線的交會所產生，三個相異的平面亦可以決定出共同的交點，在這樣的情況下角點的匹配位置將會是在三個方向上皆具有明確定位，且各方向的匹配精度也應較為平均，如圖 4 (a)箭頭所示。三維空間的線特徵除空間中的直線外，尚有由兩相異的平面所交會出來線，因此匹配的影像顯現的是線特徵，則匹配的位置在沿著線特徵的延伸方向將會是不容易確定的(精度將

會較差)，圖 4 (b) 箭頭所示。而若匹配的影像呈現的是平面特徵時，則匹配的位置在平面的法向量的方向上將會是較為確定的(精度較佳)，而在平面上的延伸方向上的定位精度將會較差，如圖 4(c) 箭頭所示。

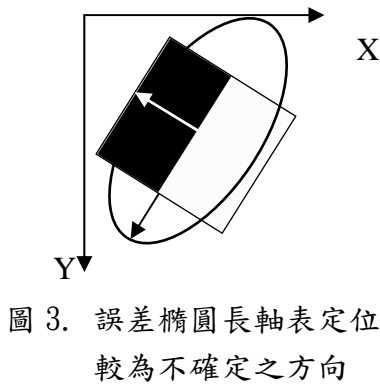


圖 3. 誤差橢圓長軸表定位較為不確定之方向

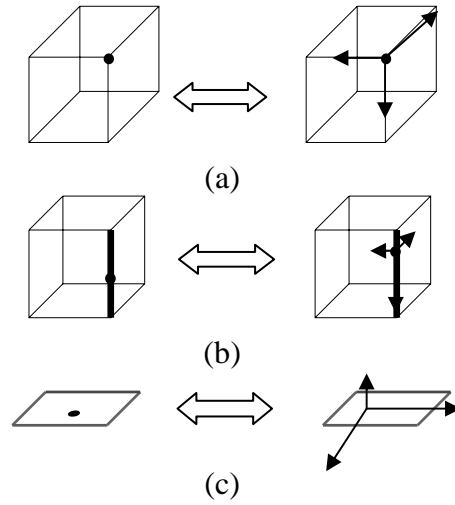


圖 4. (a) 角點特徵匹配；(b) 線特徵匹配；(c) 平面特徵匹配

四、實驗與分析

本研究的實驗所使用的地面光達點雲資料是由Optech公司所出產的地面光達儀 ILRIS-3D所測得，該儀器所得的每一筆點資料記錄了點位之三維空間座標，以及當時雷射反射強度值。空載光達點雲資料則由行政院農委會所提供，掃瞄地區為新竹地區，掃瞄之點雲資料與地面光達一樣，每筆點資料皆記錄了三維空間座標以及雷射反射值，座標系統為TWD97二度分帶投影座標系。

圖5(a)為佈設於成大測量系館牆面上的人工標，而每個標的大小皆為15公分乘15公分，而標中心的圓形部分則為半徑為5公分的圓，點雲掃瞄間距大約為1.5公分。匹配照窗設定為15x15x15而搜尋照窗設定為27x27x27，網格灰度值則為灰階影像，網格大小為1公分，而匹配過程中也分別對不使用與使用移動平均法做測試，匹配的結果影像如圖5(b)與(c)所示，圖中藍色表匹配近似位置紅色為最後匹配位置，匹配位置則置於表1。其中理論匹配位置則是利用PolyWorks所計算而得到的圓形標中心，並換算成三維網格之坐標以作為比較。當使用NCC進行三維網格匹配時，當網格小於掃瞄間距將會產生許多的空洞網格，若不對於這些空洞網格進行處理，則匹配後的最大NCC值將無法達到0.5的NCC匹配門檻，且空洞網格造成匹配罩窗內的網格幾何分佈不佳，也會使得匹配結果產生錯誤。而經過移動平均法處理空洞網格過後，很明顯的可大幅提昇最大的NCC值，且使得匹配的最後結果也比較正確。

接著將正確匹配成果計算其一階原點動差以及二階中心動差，結果如表2所

示。由表2可發現到在一階原點動差方面，其數值與匹配位置相當接近，而X與Z方向的二階中心動差相較於Y方向也大許多。而二階中心動差方面，很明顯地實驗中的人工標是一種平面的特徵，因此在某一方向上的NCC值分佈會產生明顯的高峰，而其餘兩個方向的峰將比較不明顯，而實驗結果也顯示出這樣的特性，在Y方向的二階中心動差數值明顯的小於X與Z方向的二階中心動差，這表示在Y方向上NCC分佈的峰是最明顯的，且在Y方向上的定位效果應比其餘兩方向的定位效果佳。而接著求其誤差橢球的相關參數，代表橢球三個主軸方向的特徵向量，以及代表橢球三個主軸長度的特徵值，如表3所示。由特徵向量與特徵值矩陣可得知，該匹配位置上的誤差橢球是一個在Y方向上有最短軸，而在X與Z方向有較長軸的扁橢球。

圖6分別代表兩航帶重疊區內建物屋角點特徵，而點雲資料已經化算至台灣二度TM投影座標系統，點雲掃瞄間距大約是1.5公尺。實驗切割網格為1公尺，匹配單窗為 $9 \times 9 \times 9$ 搜尋單窗為 $19 \times 19 \times 19$ 。匹配過程中也分別對不使用與使用移動平均法做測試，匹配結果影像如圖7所示，圖中藍色表匹配近似位置紅色為最後匹配位置，匹配位置則置於表4。

如表4所示，若對於單窗中的空洞網格進行填補，則由於匹配單窗內的網格幾何分佈不佳，無法凸顯出特徵來，使得匹配的NCC值無法超過相關係數0.5的門檻值，且匹配的位置也不夠正確。反之若對於空洞網格進行填補過後，則匹配單窗內的網格分佈可較為連續，使得該屋角特徵的面以及邊緣變的較為明顯，如此匹配的最大NCC值可以大幅改善，且匹配的結果也更為準確。

接著將正確匹配成果計算其一階原點動差以及二階中心動差，結果如表5所示。一階原點動差沒有意外的與最後匹配位置的數值相當，最多大約有0.7公尺左右的定位誤差，而在二階中心動差方面則出現與地面光達點雲資料面特徵匹配相似的結果，也就是說其二階中心動差都會呈現出一小(Z方向)兩大(X與Y方向)的現象。而這樣的現象其實是可預期的，因為空載光達進行掃瞄時都在數百公尺以上的高空，因此整個地表相對於飛行高度而言幾乎可視為在同一個平面上，如此一來就如同地面光達的面特徵一樣，其二階中心動差會出現一小兩大的現象，但對於空載光達匹配結果而言，高程方向(Z方向)都將會是二階中心動差最小的方向。接著求其誤差橢球的相關參數，代表橢球三個主軸方向的特徵向量，以及代表橢球三個主軸長度的特徵值，如表6所示。

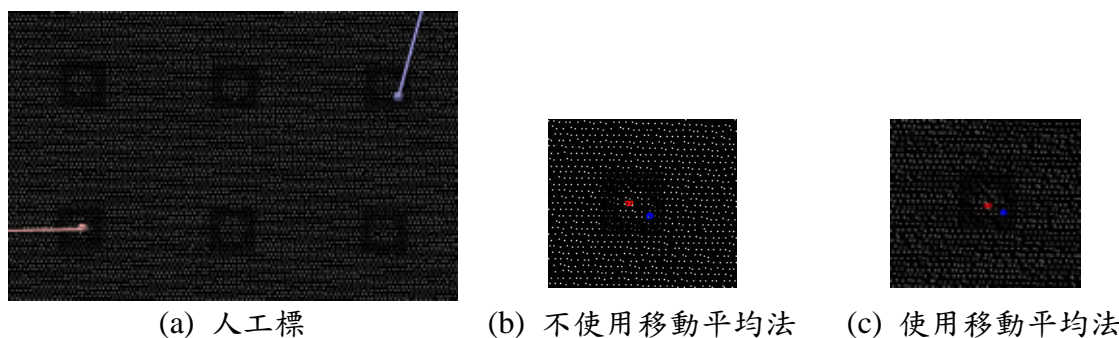


圖5. 人工標與匹配之結果

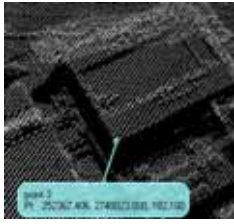


圖6. 空載光達點雲資料示意圖

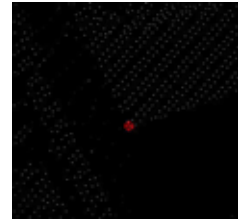
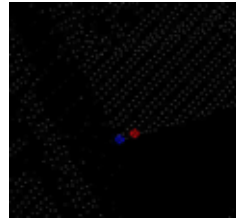


圖7. 匹配結果
(a)未使用移動平均 (b)使用移動平均

表 1. NCC 匹配結果

方向	近似匹配位置	理論匹配位置	匹配位置 (不使用移動平均法)	匹配位置 (使用移動平均法)
X	416	412	411	412
Y	317	317	317	317
Z	726	729	730	729

註 1：最大 NCC 值(不使用移動平均法)：0.384
註 2：最大 NCC 值(使用移動平均法)：0.833

表 2. 各項動差計算結果

方向	匹配位置	一階原點動差	二階中心動差
X	412	412.0	9.7
Y	317	316.8	1.7
Z	729	729.0	9.7

表 3. 特徵向量矩陣與特徵值矩陣

特徵向量	0.0	-0.8	0.6
	1.0	0.0	0.0
	0.0	-0.6	-0.8
特徵值	1.7	0.0	0.0
	0.0	9.7	0.0
	0.0	0.0	9.7

表 4. NCC 匹配結果

方向	近似匹配位置	匹配位置 (不使用移動平均法)	匹配位置 (使用移動平均法)
X	295	294	295
Y	227	224	227
Z	96	96	96

註 1：最大 NCC(不用移動平均)：0.468
註 2：最大 NCC(用移動平均)：0.773

表 5. 各項動差計算結果

方向	匹配位置	一階原點動差	二階中心動差
X	295	294.9	8.5
Y	227	226.5	7.4
Z	96	96.3	1.9

表 6. 特徵向量矩陣與特徵值矩陣

特徵向量	0.1	0.3	-1.0
	-0.2	1.0	0.2
	1.0	0.2	0.1
特徵值	1.6	0.0	0.0
	0.0	7.5	0.0
	0.0	0.0	8.6

五、結論與建議

本研究提出以三維網格的方式，將地面光達以及空載光達點雲資料網格結構化，進行三維網格點雲資料的匹配工作。實驗中發現，匹配的成果與三維罩窗內網格的分佈有絕對的關係，實用上而言必須將散亂分佈點先加以排除後，再進行匹配工作以確保匹配的正確性。而空洞網格的問題，在本研究中則提出使用移動平均法來進行罩窗內空洞網格的填補動作，實驗結果顯示填補空洞是必須的，且可明顯改善最大 NCC 值。然而內插的方式有許多，可能尚有其他比移動平均法更適合的內插方式，來更合理且有效的進行填補空洞網格的工作。

本研究中提出利用一階原點動差評估定位，以及二階中心動差評估定位之方向性皆有得到證實，而二階中心動差將來則可組成協變方矩陣，可用於點雲平差系統中連結點之權矩陣。

六、參考文獻

- 曾義星與史天元，2002，『三維雷射掃瞄技術及其在工程測量上之應用』，第二十一屆測量學術及應用研討會。
- Behan, A., 2000, "On the Matching Accuracy of Rasterised Scanning Laser Altimeter Data", IAPRS, Vol. 33, Part2.
- Schenk, T., 1999, "Digital Photogrammetry", vol. I, TerraScience. pp.231-266
- Vosselman, G. and Maas, H.G., 2001, "Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data", *OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning*.

