農業工程學報　第 57 卷第 4 期
中華民國 100 年 12 月出版

Journal of Taiwan Agricultural Engineering
Vol. 57, No. 4, December 2011

專　論

應用攝影測量量測山坡地崩塌量之研究
—苗栗火炎山爲例

Measurement of Landslide Using Close-Range Photogrammetry: Case-Study at Huoyen Shan, Miao-Li

國立聯合大學土木與防災工程學系(所)
碩士
黃 偉 哲
Wei-Cher Huang

國立聯合大學土木與防災工程學系
教授兼系主任
柳 文 成*
Wen-Cheng Liu

摘　要

攝影測量常用的方法有非線性方程式的共線式與線性方程式的直接線性轉換(Direct Linear Transformation, DLT)法，DLT 法由共線式改寫而成，是爲了讓內方位參數未知或不穩定的非量度性攝影機也可應用於攝影測量上。然隨著相機功能越來越精密的情況下，DLT 法已較少被使用。然而共線式需提供可靠的內、外方位參數的初始值，才能順利的完成解算，且需要花費較多的計算時間。因此在無法取得可靠的內、外方位參數的初始值的情況下，則必須使用 DLT 法來進行解算。

本研究以攝影測量使用 DLT 法於苗栗火炎山先量測山坡地的地形，並與 e-GPS 的量測結果進行比較，探討攝影測量使用 DLT 法的實用性。再於崩塌區域，同樣使用 DLT 法量測崩塌前與崩塌後的地形，建立數值地形模型，透過數值地形模型計算土石崩塌量之體積。研究結果顯示，攝影測量使用 DLT 法的量測結果與 e-GPS 量測結果的數值地形模型，兩者表面積相差 1.7%。崩塌區域在崩塌前與崩塌後的土石崩塌量體積爲 994.16 m^3。

關鍵詞：DLT 法，攝影測量，崩塌地，影像匹配，火炎山，苗栗。

ABSTRACT

Most studies used the non-linear equation collinearity and linear equation Direct Linear Transformation (DLT) method in photogrammetry. Traditionally, the DLT method

*通訊作者，國立聯合大學土木與防災工程學系教授兼系主任，36003 苗栗市恭敬里聯大 1 號，wcliu@nuu.edu.tw

applied in photogrammetry was developed through collinearity for non-metric camera that interior orientation parameters were unknown or unstable. The DLT method seems not to be adopted because the function of camera is better than before. However, it is necessary to provide the precise initial value of interior and exterior orientation parameters to approach and to spend more computational cost when collinearity method is applied. As the initial value of interior and exterior orientation parameters can not be obtained, DLT method should be used.

The present study adopted the DLT method in photogrammetry to measure terrain of landslide at the Huoyen Shan, Miao-Li and to compare measured results with e-GPS. The availability of photogrammetry with DLT method was also discussed. We applied the same methodology to measure the terrain before landslide and after landslide in the study area. The digital terrain model (DTM) was established and then was used to calculate the volume of the terrain before landslide and after landslide. The results revealed that the difference in surface area was approximately 1.7% as comparing the photogrammetry with DLT method and e-GPS measurement. The volume before and after landslides was 994.16 m^3.

Keywords: Direct Linear Transformation (DLT) method, photogrammetry, landslide, image matching, Huoyen Shan, Miao-Li.

一、前　言

攝影測量(Photogrammetry)是指利用拍攝物體之影像，來重建物體空間位置與三維形狀的技術。攝影測量的特點之一是在像片上進行量測與判釋，無需接觸被測目標物體的本身，因此很少受到自然環境條件的限制。而且像片與其他各種類型影像均是客觀的眞實反映目標物體，影像訊息豐富、逼眞，人們可以從中獲得目標物體的大量幾何訊息與物理訊息。因此攝影測量目的可以分爲兩大類(何維信，1995)：一、量度的攝影測量(Metrical Photogrammetry)，主要是對所獲取之影像進行量的量測，藉以獲得地面點位與高程、距離、面積、或體積，再進而繪出平面圖或地形圖；二、像片判讀(Photograph Interpretation)，主要是對影像進行質的分析與評估。因爲這一類的工作運用了像片及非像片之系統，故給予一個更一般化之名詞，稱之爲遙感探測(Remote Sensing)。

攝影測量常用的數學模式有共線式(Collinearity)與直接線性轉換法(Direction Linear Transform, DLT)，由於共線式在空間後方交會時需提供可靠的內、外方位參數，在早期非量度性攝影機的內方未參數未知或不穩定，因此無法使用共線式進行解算。因此 Abdel-Aziz 與 Karara (1971)將非線性方程式的共線式改寫成線性的 DLT 法。由於共線式與 DLT 法兩者在使用上大不相同，因此也有不少人就兩者之間進行討論。Chen 等人(1994)試驗不同控制點數量與分佈情況對 DLT 法的影響，發現當控制點數量超過 20 個以上，且分布在試驗場的四周時，DLT 法解算結果趨於穩定且與共線式結果相近。鄭傑文(2007)將共線式與 DLT 法做比較，當地面控制點稀少或分布不均時，DLT 法的解算精度不及共線式，且當地面控制點接近共平面時，易造成奇異解。

1.1 研究目的

本文選擇苗栗縣三義鄉內火炎山西邊崩塌地爲研究區域，分別使用 Conon EOS400D 相機

拍攝山坡地之地形樣貌，以攝影測量中的 DLT 法與影像匹配中的相關系數法求得影像上各點在物件空間的三維座標，再以 Surfer8 軟體建立數值地形模型，與使用高精度之電子化全球衛星即時動態定位系統(e-GPS)所量測之數值地形模型進行比較，探討 DLT 法的實用性。在易於崩塌之區域，拍攝崩塌前與崩塌後之影像，使用攝影測量中的 DLT 法與相關系數法求得崩塌前、後的點雲，由 Surfer8 軟體將點雲建立成數值地型模型。透過崩塌前、後的數值地型模型計算兩者之體積與兩者體積之差異，亦為該量測區域的土石崩塌量。

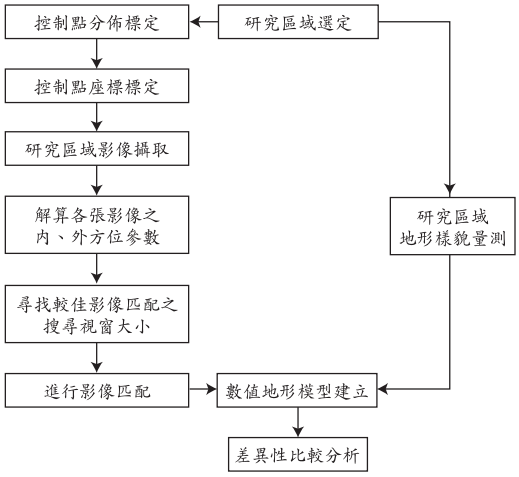

圖 1　流程圖

1.2 文獻回顧

攝影測量除了早期的地形量測之外，近年也被應用於河川流速量測、古蹟維護與記錄、物體三維重建等方面。Wanek 與 Wu (2006)使用三台攝影機一體的自動化攝影量測系統，來量測波浪的獨特性，由於攝影測量非接觸性的特性，因此不會改變波浪的整體結構或干擾波浪的變化。Hauet *et al*. (2009)使用攝影測量技術來提供大量有關河道附近乾燥地區的資訊，以及影像處理來演算描繪水流的特性。透過攝影測量可以獲得一些所需要的地表特徵包含河邊控制點，河道邊緣，河邊沉澱之泥砂，植被以及被侵蝕的圖案。河川流速可以透過一連串的影像經由 LSPIV 來獲得；最後可以在 GIS 呈現出地圖上的元素以及表面流速。Jodeau *et al*. (2008)使用 LSPIV 於水庫洩洪時，量測山區河流高流量的河川表面流速，並與平面二維數值模式計算比較。兩者比較的結果顯示，LSPIV 對量測高流量表面流速，進而計算其流量是一個很好的工具。

Yilmaz 等人(2007; 2008)指出由於歷史古蹟與現代建築相比是相對比較脆弱的，因此近景攝影測量非接觸性量測的特性，非常適合被應用在古蹟的研究上，與傳統量測方式相比，近景攝影測量提供了直觀性的影像。Arias *et al*. (2005)認為使用近景攝影測量來記錄古蹟是一個非常好的工具，可以記錄古蹟表面、大小、形狀、維護情況、局部較為明顯的區域。量測的結果可作為以後古蹟重建的用途。梁福榮(2006)將攝影測量應用於古蹟記錄和邊坡表面變化量量測，攝影測量除了可完整將古蹟的整體結構以數值模型建構之外，還可以提供古蹟外觀的影像資訊，且量測過程對古蹟的影響也較其他方式還要來得低。

二、研究方法

2.1 研究流程

本研究實驗地點選定為苗栗火炎山，不論是在研究區域 A 比較攝影測量與 e-GPS 的量測結果，或於研究區域 B 量測崩塌前、後的土石崩塌量，都必須控制研究區域範圍。然後選擇控制點位置，並量測控制點座標，由於地形較為複雜，每個研究區域都必須透過兩組以上的影像，才能進行地形重建，因此控制點平均分散於研究區域內，並於研究區域 A 內使用 e-GPS 逐點量測座標。完成控制點的選定與量測後，拍攝研究區域的影像，並以 DLT 法求得內、外方位參數，再進行影像匹配之前，必須先行尋找較佳的影像匹配視窗大小，最後再進行影像匹配。將攝影測量在研究區域 A 所量測的點雲與 e-GPS 所量測的點雲，使用 Suffer8 製作成數值地型模型，並計算其表面積與體積，進行比較。同時也將研究區域 B 崩塌前與崩塌後，使用攝影測量量測的點雲，也製成數值地型模型，並計算崩塌前與崩塌後土石崩塌量。實驗流程圖如圖 1 所示。

圖 2　e-GPS

圖 3　Canon EOS400D

圖 4　Nikon DTM-332

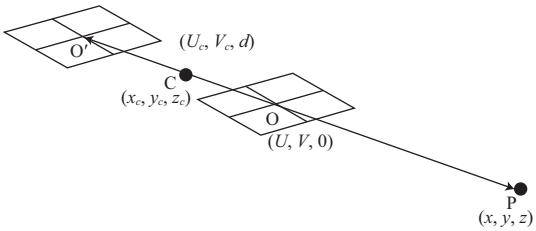

圖 5　透視中心、影像空間系統與物件空間系統之關係圖

2.2 儀器介紹

本研究使用之儀器分別有高精度之電子化全球衛星即時動態定位系統(e-GPS)、數位相機與全站儀。e-GPS 是使用 Leica ATX1230GG 雙重頻率天線，精度可達到 2 公分，以及一台控制器與一台擁有藍芽傳輸功能之手機，如圖 2 所示。其量測模式使用 RTK 模式。數位相機是 Canon EOS400D，如圖 3 所示，最高有效畫素爲 1020 萬像素。全站儀爲 Nikon DTM-332，如圖 4 所示，其精度爲五秒讀。

2.3 攝影測量原理與 DLT 法

在攝影測量中，主要是透過二維影像空間系統之座標，去獲得三維物件空間系統目標物點之座標。攝影測量常見之數學模式爲共線式與直接線性轉換法，其中共線式是依據中心透視原理建構成像共線條件，其共線特性爲物點 P、攝影機的透鏡中心 C 與影像上的對應像點 O 所組成，也就是這三點應落在同一條直線上。有時爲幾何解析方便，會將前述之負片成像方式表達成爲正片型態，但其共線性質依然維持不變，因此攝影測量中共線式其物理意義如下圖 5 所示。

透視中心 C 在影像空間座標系統之座標爲 (U_c, V_c, d)，在物件空間座標系統之座標爲(x_c, y_c, z_c)。當圖 5 中的關係成立時，則透視中心 C 與影像空間一點 O (U, V, 0)與相對應在物件空間一點 P (x, y, z)，會成立一個關係式：

$$B = cMA \qquad \text{.....} (1)$$

其中

A：透視中心 C 到物點 P 的方向向量；

B：透視中心 C 到像點 O 的方向向量；

c： A 與 B 兩者的比例刻度；

M：旋轉矩陣。

向量 A、向量 B 與旋轉矩陣 M 分別如式(2)、式(3)、式(4)所示

$$A = \begin{bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{bmatrix} \qquad \text{.....} (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} U - U_c \\ V - V_c \\ 0 - d \end{bmatrix} \qquad \text{.....} (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \qquad \text{.....} (4)$$

將式(2)、式(3)、式(4)代回式(1)可得式(5)：

$$\begin{bmatrix} U - U_c \\ V - V_c \\ 0 - d \end{bmatrix} = c \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{bmatrix} \qquad \text{.....} (5)$$

或者

$$U-U_c=c\left[r_{11}\left(x-x_c\right)+r_{12}\left(y-y_c\right)+r_{13}\left(z-z_c\right)\right] \quad \text{.....(6)}$$

$$V-V_c=c\left[r_{21}\left(x-x_c\right)+r_{22}\left(y-y_c\right)+r_{23}\left(z-z_c\right)\right] \quad \text{.....(7)}$$

$$-d=c\left[r_{31}\left(x-x_c\right)+r_{32}\left(y-y_c\right)+r_{33}\left(z-z_c\right)\right] \quad \text{.....(8)}$$

從式(8)可改寫成式(9)：

$$c=\frac{-d}{\left[r_{31}\left(x-x_c\right)+r_{32}\left(y-y_c\right)+r_{33}\left(z-z_c\right)\right]} \quad \text{.....(9)}$$

將式(9)代入方程式(6)、(7)可得到方程式(10)、(11)：

$$U-U_c=-d\frac{\left[r_{11}\left(x-x_c\right)+r_{12}\left(y-y_c\right)+r_{13}\left(z-z_c\right)\right]}{\left[r_{31}\left(x-x_c\right)+r_{32}\left(y-y_c\right)+r_{33}\left(z-z_c\right)\right]} \quad \text{.....(10)}$$

$$V-V_c=-d\frac{\left[r_{21}\left(x-x_c\right)+r_{22}\left(y-y_c\right)+r_{23}\left(z-z_c\right)\right]}{\left[r_{31}\left(x-x_c\right)+r_{32}\left(y-y_c\right)+r_{33}\left(z-z_c\right)\right]} \quad \text{.....(11)}$$

在式(10)、式(11)中，在影像空間座標系統的長度單位是像素，物件空間座標系統的長度單位是公尺，因此需要將長度單位統一，在此是將影像空間座標系統的單位轉換爲物件空間座標系統的單位，如式(12)、式(13)所示：

$$U-U_c=\lambda_u\left(u-u_c\right) \quad \text{.....(12)}$$

$$V-V_c=\lambda_v\left(v-v_c\right) \quad \text{.....(13)}$$

再將式(12)、式(13)分別代入式(10)、式(11)中，重新整理可得式(14)、式(15)：

$$u-u_c=\frac{-d}{\lambda_u}\frac{\left[r_{11}\left(x-x_c\right)+r_{12}\left(y-y_c\right)+r_{13}\left(z-z_c\right)\right]}{\left[r_{31}\left(x-x_c\right)+r_{32}\left(y-y_c\right)+r_{33}\left(z-z_c\right)\right]} \quad \text{.....(14)}$$

$$v-v_c=\frac{-d}{\lambda_v}\frac{\left[r_{21}\left(x-x_c\right)+r_{22}\left(y-y_c\right)+r_{23}\left(z-z_c\right)\right]}{\left[r_{31}\left(x-x_c\right)+r_{32}\left(y-y_c\right)+r_{33}\left(z-z_c\right)\right]} \quad \text{.....(15)}$$

最後將共線式，式(14)、式(15)重新整理可改寫成 DLT 法，如式(16)、式(17) (Mikhail *et al*., 2001)：

$$u=\frac{L_1\cdot X+L_2\cdot Y+L_3\cdot Z+L_4}{L_9\cdot X+L_{10}\cdot Y+L_{11}\cdot Z+1} \quad \text{..... (16)}$$

$$v=\frac{L_5\cdot X+L_6\cdot Y+L_7\cdot Z+L_8}{L_9\cdot X+L_{10}\cdot Y+L_{11}\cdot Z+1} \quad \text{..... (17)}$$

其中

$$L_1=\frac{u_c r_{31}-f_u r_{11}}{D},$$

$$L_2=\frac{u_c r_{32}-f_u r_{12}}{D}$$

$$L_3=\frac{u_c r_{33}-f_u r_{13}}{D}$$

$$L_4=\frac{\left(f_u r_{11}-u_c r_{31}\right)x_c}{D}+\frac{\left(f_u r_{12}-u_c r_{32}\right)y_c}{D}+\frac{\left(f_u r_{13}-u_c r_{33}\right)z_c}{D}$$

$$L_5=\frac{v_c r_{31}-f_v r_{21}}{D}$$

$$L_6=\frac{v_c r_{32}-f_v r_{22}}{D}$$

$$L_7=\frac{v_c r_{33}-f_v r_{23}}{D}$$

$$L_8=\frac{\left(f_v r_{21}-v_c r_{31}\right)x_c}{D}+\frac{\left(f_v r_{22}-v_c r_{32}\right)y_c}{D}+\frac{\left(f_v r_{23}-v_c r_{33}\right)z_c}{D}$$

$$L_9=\frac{r_{31}}{D}$$

$$L_{10}=\frac{r_{32}}{D}$$

$$L_{11}=\frac{r_{33}}{D}$$

2.4 影像匹配原理

影像匹配是將兩張影像轉換爲數位影像，透過數學關係式，尋找兩張影像中相同物點的點。所謂的數位影像爲將影像切割成無數個小區塊，並透過一定的規則，賦予每個小區塊一個數值，目前常見數位影像是使用灰度值與 RGB (Red, Green, Blue)值。影像匹配較爲常見方法共有三種(王樹根，2009)：相關係數法、協方差法、最小二乘匹配法。本文所採用的是相關係數法，係透過兩張影像的目標像點與周遭數位影像，去計算兩者之相關係數 c (Wolf and DeWitt, 2001)如式(18)所示：

$$c=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\left(A_{ij}-\bar{A}\right)\left(B_{ij}-\bar{B}\right)\right]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(A_{ij}-\bar{A}\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(B_{ij}-\bar{B}\right)^2\right]}} \quad ....(18)$$

其中

c ：相關係數；

A_{ij} ：目標視窗中在第 i 行與第 j 列位置上像素的數值；

B_{ij} ：搜尋視窗中在第 i 行與第 j 列位置上像素的數值；

$\bar{A}$ ：目標視窗中所有像素的數值之平均值；

$\bar{B}$ ：搜尋視窗中所有像素的數值之平均值。

相關係數 c 數值介於 1~0 之間，當相關係數 c 爲 1 時，表示兩張影像分別選取的像點與周遭數位影像完全一致，相關係數 c 越接近 0，表示兩張影像分別選取的像點與周遭影像差異越大。

在目標影像上選定一個目標像點，以目標像點爲中心建立一個目標視窗，然後在搜尋影像上以每個像點爲中心，分別建立一個搜尋視窗，目標影像上的目標視窗與搜尋影像上的每個搜尋視窗計算兩者之相關係數 c。如此可得到目標視窗與每個搜尋視窗的相關係數 c，將相關係數 c 最大者的一組的搜尋像點，視爲共軛像點。

然而並不是相關係數 c 最大值的那一組的目標像點與搜尋像點，就一定爲共軛像點，因爲相關係數 c 最大值的一組，但其數值不接近 1，這意謂著這一組目標像點與搜尋像點與其它組相比雖然最爲相近，但是目標像點與搜尋像點不是共軛像點。因此可以設置一個相關係數 c 門檻值，意即目標像點與搜尋影像中的每一個搜尋像點相關係數 c 中的最大值，沒有大於相關係數 c 門檻值，則表示在搜尋影像中沒有目標像點的共軛像點。

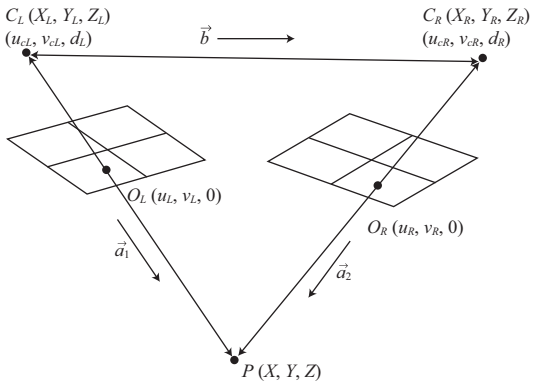

圖 6　五點共平面示意圖

在第二張影像上尋找與第一張影像目標點，相同物點的像點，不論使用何種影像匹配方法，都需要花費大量的時間，因此有了核線約制。核線約制即爲共面條件，是指目標影像的透視中心 C_L、搜尋影像的透視中心 C_R、物空間的目標點 P、目標點在目標影像上的像點 O_L 及目標點在搜尋影像上的像點 O_R，此五點共平面，五者的關係如圖 6 所示。

其中

$$\vec{b}=\begin{bmatrix}b_x\\b_y\\b_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_L-X_R\\Y_L-Y_R\\Z_L-Z_R\end{bmatrix} \quad ..... (19)$$

$$\vec{a}_1=\begin{bmatrix}x_L\\y_L\\z_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_L-X\\Y_L-Y\\Z_L-Z\end{bmatrix}=M_L^T\begin{bmatrix}u_L-u_{cL}\\v_L-v_{cL}\\0-d_L\end{bmatrix} \quad ..... (20)$$

$$\vec{a}_2=\begin{bmatrix}x_R\\y_R\\z_R\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_R-X\\Y_R-Y\\Z_R-Z\end{bmatrix}=M_R^T\begin{bmatrix}u_R-u_{cR}\\v_R-v_{cR}\\0-d_R\end{bmatrix} \quad ..... (21)$$

M_L^T ：左邊影像的旋轉矩陣；

M_R^T ：右邊影像的旋轉矩陣。

圖 7　研究區域之地理位置

圖 9　研究區域 B 崩塌前

圖 8　研究區域 A 從下方攝影

圖 10　研究區域 B 崩塌後

當五點共平面時，則會滿足式(22)條件：

$$F=\begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ x_L & y_L & z_L \\ x_R & y_R & z_R \end{vmatrix}=0 \quad \text{.....(22)}$$

由 $\vec{b}$ 、$\vec{a}_1$ 、$\vec{a}_2$ 三者所組成的平面 F ，分別會與右邊影像與左邊影像相交在一條線上，將左邊影像與平面 F 相交的線上的任一點 u_L 、v_L 代入式(20)，與右邊影像與平面 F 相交的線上的任一點 u_R 、v_R 代入式(21)，都可讓式(22)中的 F 爲 0。如此只需在平面 F 與影像相交的線上的像點進行影像匹配即可。

2.5 研究區域概述

火炎山自然保留區爲台灣現有的十九個自然保留區之一，火炎山位於臺灣苗栗縣三義鄉境內，靠近苗栗縣三義與台中縣后里交界處大安溪的北方，如圖 7 所示。其特色是岩層中含有大量礫石以及少量細粒物質所組成的礫石層，由於礫石的膠結物是鬆散的沙與泥，因此容易於地表的發生侵蝕作用，其特徵爲蝕溝發達、地表沖刷作用強烈。在火炎山共形成五個子集水區，子集水區最上游區域爲大面積崩塌地，產生許多礫石沈積物；河道因劇烈侵蝕作用而下切，將上方與兩側崩塌所形成的礫石向下搬運；下方則有五個巨大的聯合沖積扇，主要是由河道搬運而來的礫石與沈積物堆積而成。裸露的邊坡、陡直的乾河道與巨大的聯合沖積扇成爲火炎山最主要的地形特徵(鄭遠昌，2004)。

由於本研究是使用近景攝影測量，因此只選擇其中一個河道下方的沖積扇作爲研究區域，研究區域分爲兩個區域：一、在研究區域 A，由上往下攝影如圖 8 中，地面由大顆粒的礫石所組成，在研究區域 A 可看到中間有一個約兩公尺的落差的區域，但相對於研究區域 B 的地形，研究區域 A 的地形則較爲平坦，其平面面積約爲 $20 \times 80\ m^2$；二、研究區域 B 分爲崩塌前與崩塌後，在崩塌前已存在一條較小的沖蝕溝如圖 9 所示，在崩塌過後，形成較大的沖蝕溝，形成一個類似 U 字型的形狀如圖 10 所示，其平面面積約

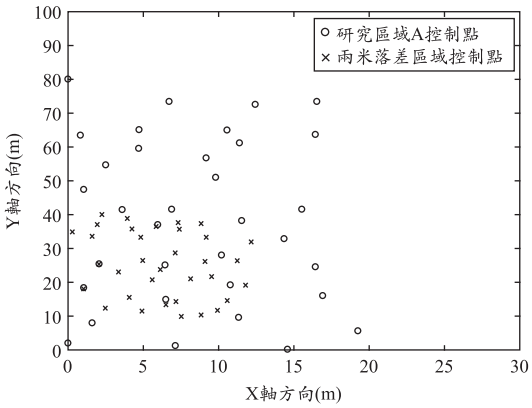

圖 11　研究區域 A 地面控制點分佈圖

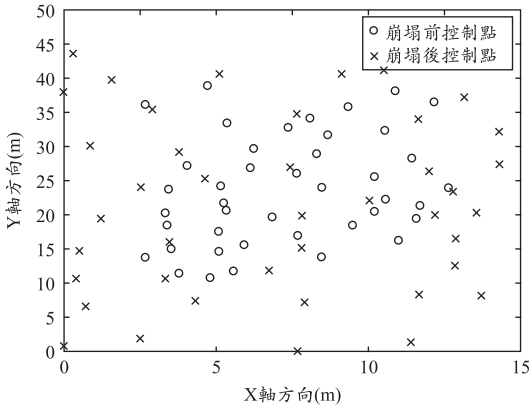

圖 12　研究區域 B 地面控制點分佈圖

爲 20× 30 m^2。

三、實驗數據討論與分析

3.1 控制點量測與檢核

由於本研究使用 DLT 方法，須先透過六個以上之參考點解算出十一個變數，再利用此十一個變數可將影像上任一點的二維座標，轉換成物件空間的三維座標。因此參考點對於成果有直接性的影響。

研究區域 A 初始設置 34 個地面控制點，由於研究區域 A 中有一個兩公尺落差的區域，必須新增一組影像，因此增補 34 個地面控制點，由於研究區域 A 與兩米落差區域所使用的座標系統相同，因此兩者地面控制點可直接套疊在一起，則研究區域 A 內共有 68 個地面控制點。爲了計算與操作上的方便，將原始量測的座標進行座標轉換與平移，結果如圖 11 所示，可看出研究區域 A 地面控制點分佈區域約爲 20 × 80 m^2。

由於崩塌面積之大小無法預測，因此爲了方便作業，崩塌前、後之控制點座標量測皆採用自訂座標系統，崩塌前共設置 42 個控制點，崩塌後共設置 41 個控制點。由於本文是要量測崩塌前、後之土石崩塌量，因此崩塌前、後控制點須使用相同的座標系統，如此才能確立崩塌前、後控制點的相對位置關係。因此於崩塌前、後兩組控制點中，各自選取兩個控制點，使用 e-GPS 量測這四點控制點在 TWD97 座標系統中之座標值，透過這四點控制點將崩塌前、後兩組控制點統一轉換至 TWD97 座標系統上，再一起進行座標旋轉與平移後，崩塌前、後控制點分佈圖如圖 12 所示。

於研究區域完成攝影，並挑選要進行攝影測量的影像之後，對選取的各張影像上，尋找影像上所有地面控制點在影像上的座標，也就是像點觀測量。透過已量測的地面控制點座標與各張影像之像點觀測量，使用 DLT 法與空間後方交會模式，可以求得各張影像在攝影瞬間時，DLT 法的十一個參數。各張影像之像點觀測量與各張影像的 DLT 法十一個參數，使用 DLT 法與空間前方交會模式，可以重新解算地面控制點座標值，將全站儀所量測的地面控制點座標與攝影測量所解算的地面控制點座標相減，即爲重新解算的地面控制點誤差量。

研究區域 A 影像重新解算的地面控制點各方向誤差量如圖 13 所示，兩米落差區域影像重新解算的地面控制點各方向誤差量如圖 14 所示。由於研究區域 A 與兩米落差區域的影像，其攝影方向大略沿著 Y 軸方向攝影，因此可以看到地面控制點在 Y 軸方向產生的誤差較 X 軸及 Z 軸產生的誤差爲大，此現象與模擬資料試驗結果相同。

由於研究區域 B 地形較爲複雜，因此崩塌前、後並非各只使用一組影像進行攝影測量，而是將崩塌前、後各自分爲左、右兩側，所以崩塌

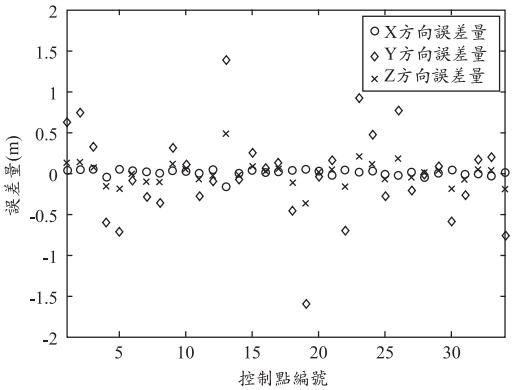

圖 13　研究區域 A 控制點檢核結果

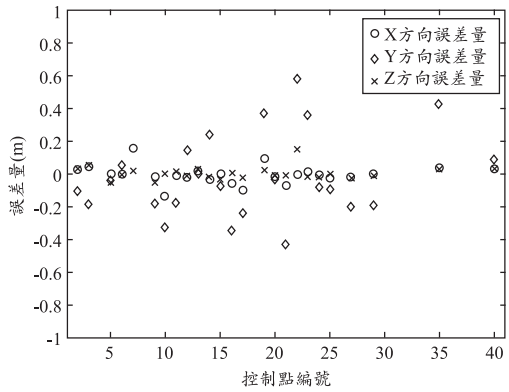

圖 14　兩米落差區域控制點檢核結果

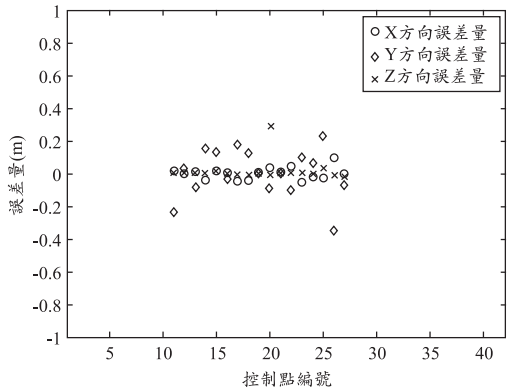

圖 15　崩塌前左側控制點檢核結果

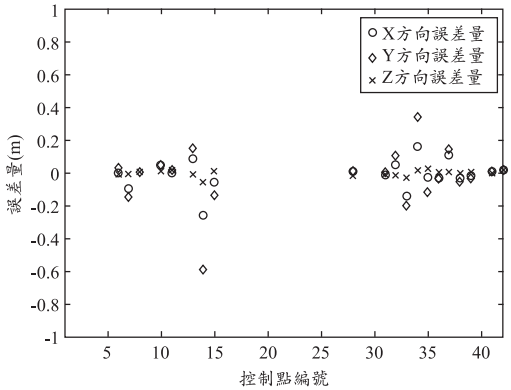

圖 16　崩塌前右側控制點檢核結果

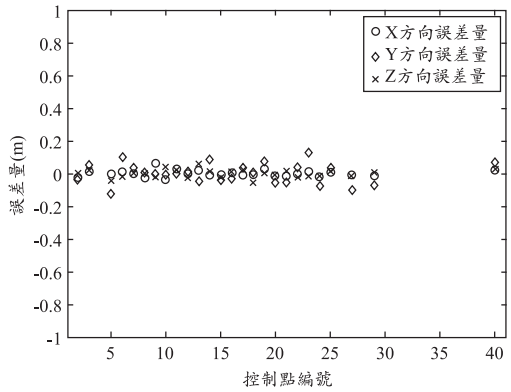

圖 17　崩塌後左側控制點檢核結果

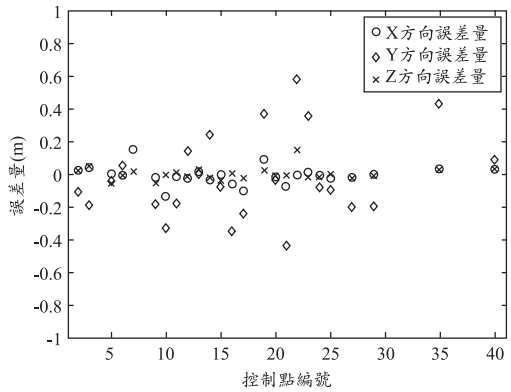

圖 18　崩塌後右側控制點檢核結果

前與崩塌後各有兩組影像進行攝影測量。崩塌前左側與右側地形地面控制點檢核結果如圖 15 及圖 16 所示；崩塌後左測與右側地形地面控制點檢核結果如圖 17 及圖 18 所示。圖 15 至圖 18 中，有些地面控制點檢核結果的誤差量沒有展示，那是由於各組影像無法在影像中看到地面控制點，因此無法獲得該點的像點觀測量，所以無法解算這些地面控制點的座標。

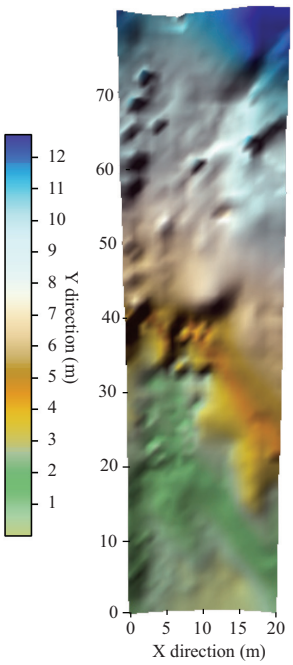

圖 19　攝影測量量測結果

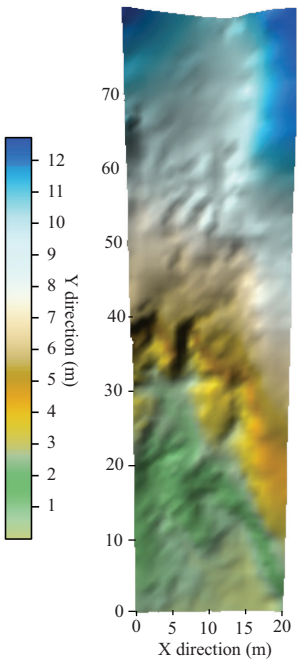

圖 20　e-GPS 量測結果

3.2 攝影測量

攝影測量可分爲二大部分：一、進行影像匹配，本研究使用的相關係數法；二、於空間前方交會模式計算地面未知點座標，本研究使用 DLT 法進行解算。在運作過程透過一些判斷或限制條件，將在運算過程中電腦判斷錯誤的點給於刪除。

影像匹配：透過影像匹配，可尋找地面未知點在左邊影像與右邊影像的像點觀測量。首先在左邊影像所拍攝的研究區域中設置點雲；然後使用共平面法找出在右邊影像中與左邊影像像點觀測量共平面的線；再沿著這條線進行影像匹配，找出相關係數最大的點，作爲與左邊影像像點觀測量的共軛像點觀測量。在影像匹配中，受到解算方法、搜尋視窗大小、影像彼此的差異性、影像內容色彩的豐富度等影響，每一次影像匹配的最大值不見得都是接近 1 的數值，因此只選取相關係數大於 0.7 (Wanek and Wu, 2006)的地面點座標，低於 0.7 表示右邊影像搜尋範圍中，沒有與左邊影像的像點觀測量具有高度相關性。

空間前方交會模式：由影像匹配所產生的左邊影像與右邊影像的像點觀測量，與先前求得的兩張影像的內、外方位參數，透過 DLT 法可算得地面未知點的座標值。將所有計算出來的地面點座標，由邊界條件與高程變化制衡條件等限制，將一些錯誤的地面點給於刪除。邊界條件分爲影像邊界條件與研究區域邊界條件，影像邊界條件即爲影像匹配完成後，除了地面點座標之外，也可知道另一張影像上的共軛像點觀測量，共軛像點觀測量不可超出影像匹配範圍，研究區域邊界條件即爲算得之地面點座標不可超出研究區域，超出邊界條件的點都視爲影像匹配失敗，予以刪除；高程變化制衡條件即爲連續地面點中的一點，高程較周圍其它地面點高程明顯的較高或較低時，予以刪除。

本研究使用 Suffer 8.0 將計算出來的地面點點雲建立數值地形模型，並計算表面積與體積。研究區域 A 使用攝影測量之點雲共有 4995 點，表面積爲 1608.5 m^2，數值地形模型如圖 19 所示，而與之比較的 e-GPS 所量測點雲共有 3268 點，表面積爲 1580.9 m^2，數值地形模型如圖 20 所示。兩者誤差約爲 1.7%。

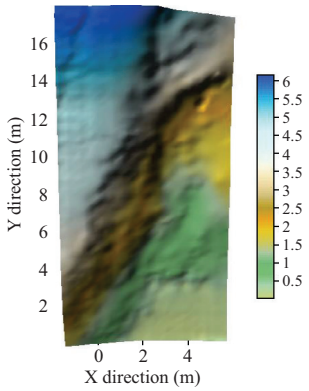

圖 21　崩塌前左側數值地形模型圖

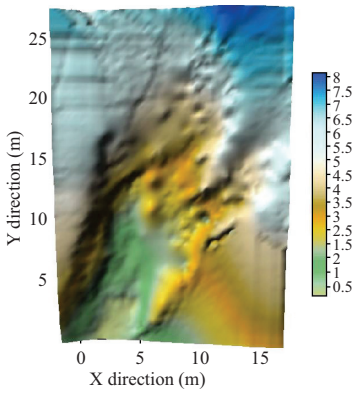

圖 23　崩塌前之數值地形模型圖

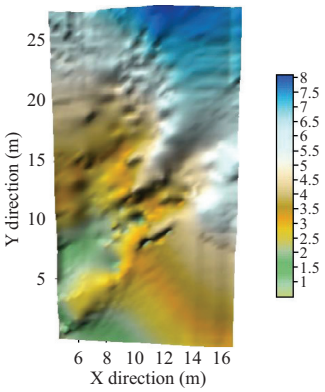

圖 22　崩塌前右側數值地形模型圖

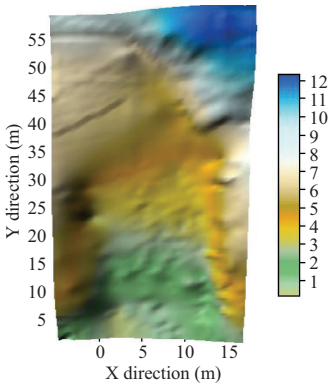

圖 24　崩塌後之數值地形模型圖

研究區域 B 分爲崩塌前與崩塌後，崩塌前左側地形的左、右兩張影像變形量不大，且影像內容色彩豐富，攝影測量之數值地形模型如圖 21 所示。右側地形由於左、右兩張影像內容差異性較大，因此容易造成影像匹配通過相關係數門檻值比例較低，又由於地形較爲複雜，即便經過邊界條件與高程變化制衡條件自動過濾，效果也不佳。因此將右側地形切割成四塊區域分別進行影像匹配，可以獲得較佳的結果。再由人工刪除方式，將一些明顯爲錯誤的量測點刪除，即可完成影像匹配工作。

由於是使用同樣座標系統的地面控制點，因此四塊區域各自完成影像匹配後，可直接將所有影像匹配的結果組合在一起，如圖 22 所示。崩塌前的數值地形模型圖，則是將左側與右側的數值地形模型圖組合在一起，如圖 23 所示。崩塌前進行影像匹配之目標視窗與搜尋視窗大小皆爲 41 × 41，影像匹配相關係數門檻值爲 0.7。左側地形初始點雲爲 2516 點，經過相關係數門檻值條件、邊界條件與高程變化制衡條件後，剩餘 1502 點。右側地形初始點雲爲 3724 點，經過一樣的約制條件，尚有 1658 點，再透過手動刪除一些明顯錯誤的點，最後剩餘 1605 點。

崩塌後地形同樣使用兩組影像建立數值模型地圖，由於崩塌後所拍攝之影像，影像內容色彩較爲單調，因此在影像匹配中，也是採取分區塊進行影像匹配。左側影像分爲左側山壁與中間平坦地兩部分；右側影像分爲右側山壁與後方山壁兩部分。崩塌後進行影像匹配之目標視窗與搜尋視窗大小皆爲 41 × 41，影像匹配相關係數門檻值爲 0.7。崩塌後左側初始點雲共 827 點，將影像匹配失敗點剔除後，尚有 459 點；崩塌後右側

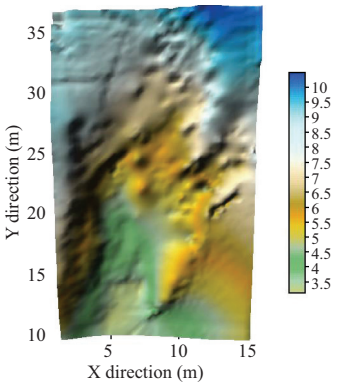

圖 25　土石崩塌區崩塌前之數值地形模型圖

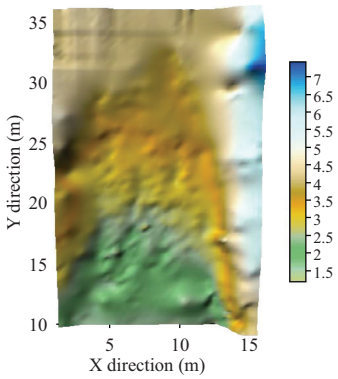

圖 26　土石崩塌區崩塌後之數值地形模型圖

初始點雲共 1567 點，去除影像匹配失敗點後，剩餘 697 點。崩塌後數值地形模型圖如圖 24 所示。

將崩塌前的數值地形模型的三維座標系統投射到崩塌後的三維座標系統，崩塌前在崩塌後的座標系統中，控制點分佈範圍在 X 軸方向約從 1.5 m 到 15 m，Y 軸方向約從 10 m 到 35 m。因此設定邊界 X 軸方向爲 1.5 m 至 15 m，Y 軸方向從 10 m 至 35 m。重新設置邊界後，崩塌前的數值地形模型圖如圖 25 所示，崩塌後的數值地形模型圖如圖 26 所示。崩塌前的數值地形模型圖由 2959 個點所組成，表面積爲 413.48 m^2，體積爲 2169.22 m^3。崩塌後的數值地形模型圖由 1237 個點所組成，表面積爲 383.19 m^2，體積爲 1175.06 m^3。兩者體積相差 994.16 m^3，表示在這個區域中，崩塌前、後的土石崩塌量體積爲 994.16 m^3。

3.3 攝影測量與 e-GPS 之優缺點

由上述之實驗結果，將攝影測量與 e-GPS 之優缺點歸納如下：

攝影測量優點：外部作業時間較短，只需進行地面控制點量測與拍照。而除了地面控制點佈置量測外，不必接觸量測之地形範圍內，減少人員暴露在危險地形之下。且單眼相機費用約三萬元，其重量只有 500 g，故儀器較爲輕便、便於攜帶及設備費用較低。

攝影測量缺點：使用者需掌控多個會影響量測結果之因素，包含控制點佈置與量測、影像拍攝距離與角度、進行影像匹配之視窗大小等，才能獲得較佳的量測結果。

e-GPS 優點：量測點各自獨立，各點間之誤差不相互影響，且可控制各點座標誤差不超過 2 公分。

e-GPS 缺點：需花費大量的量測時間，本文量測 3268 點，至少需要 40 小時以上。使用 e-GPS 於險惡地形進行地形量測，危險性較大，且無法在坡度較大的山坡地進行量測作業。儀器設備費用約 100 萬，其重量約 2.5 kg，較攝影測量費用高以及重量重，且作業環境需可接收手機訊號。

四、結　論

由本研究結果可獲致以下的結論與建議，說明如下：

一、透過相關係數門檻值、邊界條件與高程變化制衡條件，可以有效刪除大量影像匹配失敗的點。而當拍攝物體較爲複雜，可將影像區分成數個區塊，分別獨自進行影像匹配，可有效避免各區塊之間的互相干擾，而使邊界條件與高程變化制衡條件能有效的過濾影像匹配失敗的點。

二、在研究區域 A 中，使用 DLT 法以近景攝影測量方式量測之結果與 e-GPS 量測結果之數值地形模型圖比較中，近景攝影測量於一些小細節上不如 e-GPS 來得精細，但在整體表面積上，兩者只相差 1.7%。然而使用近景

攝影測量卻可節省大量的量測時間。

三、透過研究區域 B 量測崩塌前與崩塌後的數值地形模型圖，確實可以計算崩塌前與崩塌後的土石崩塌量。在本研究範圍內，以近景攝影量測崩塌前與崩塌後的土崩塌量爲 994.16 m^3。證實使用 DLT 法以近景攝影測量方式，可以量測山坡地形樣貌，並透過崩塌前、後的數值地形模型圖，可以計算土石崩塌量。

致　謝

感謝內政部國土測繪中心協助下申請使用 e-GPS 即時定位服務。並感謝行政院農業委員會林務局新竹林區管理處的協助，得以申請進入火炎山進行相關研究。

參考文獻

1. Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M., 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp. 1-18.
2. Arias, P., Herráez, J., Lorenzo, H., Ordóñez, C., 2005. Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods. Computers and Structures 83(21-22), 1754-1766.
3. Chen, L., Armstrong, C. W., Raftopoulos, D. D., 1994. An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. Journal of Biomechanics 27(4), 493-500.
4. Hauet, A., Muste, M., Ho, H. C., 2009. Digital mapping of riverine waterway hydrodynamic and geomorphic features. Earth Surface Processes and Landforms 34(2), 242-252.
5. Jodeau, M., Hauetb, A., Paquier, A., Coz, J. L., Dramais, G., 2008. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. Flow Measurement and Instrumentation 19(2), 117-127.
6. Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C., 2001. Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley and Sons, Inc., Chapter 3, Chapter 4, Chapter 9, pp. 40-43, pp. 90-99, pp. 252-256. ISBN: 0-471-30924-9.
7. Wanek, J. M., Wu, C. H., 2006. Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements. Ocean Engineering 33(5-6), 723-747.
8. Wolf, P. R., DeWitt, B. A., 2001. Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS. McGraw-Hill Higher Education, Chapter 15-6. pp. 334-341. ISBN: 0-07-292454-3.
9. Yilmaz, H. M., Yakar, M., Gulec, S. A., Dulgerler, O. N., 2007. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. Journal of Cultural Heritage 8(4), 428-433.
10. Yilmaz, H. M., Yakar, M., Yildiz, F., 2008. Documentation of historical caravansaries by digital close range photogrammetry. Automation in Construction 17(4), 489-498.
11. 王樹根，2009，攝影測量原理與應用，武漢大學出版社，pp. 49-51。
12. 何維信，1995，航空攝影測量，大中國圖書公司印行，pp. 1-3。
14. 梁福榮，2006，攝影測量應用於古蹟記錄和邊坡表面變化量量測之研究，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文。
15. 鄭傑文，2007，攝影幾何於攝影測量之應用，國立臺灣大學土木工程研究所，碩士論文。
16. 鄭遠昌，2004，地形變遷之研究~以苗栗火炎山地區爲例，國立臺灣大學地理環境資源學研究所，碩士論文。

收稿日期：民國 100 年 1 月 28 日
修正日期：民國 100 年 3 月 28 日
接受日期：民國 100 年 4 月 1 日