

# 應用非常規攝影量測評估國道 3 號 3.1 公里崩塌事件之土方量

蕭震洋\* 謝寶珊 冀樹勇

**摘要** 非常規攝影「量測」(Unconventional Photogrammetry)無需使用測量專用相機與事前標定(Camera Calibration), 雖計算內外參數(internal & external parameters)較常規傳統攝影「測量」(Traditional Photogrammetry)複雜且精度較低, 但一旦發生災害, 能以便於取得之現場照片重建三維地形, 如與災前地形資料比較, 即可量化災害前後地形高程差異變化。文中以民國 99 年 4 月 25 日下午 2 時 33 分於國道 3 號南下線里程約 3.1K 處之大規模邊坡崩塌事件, 分別於事件發生及後續崩塌土方清運完畢後個別進行非常規攝影量測, 經比對前後量測資料後, 推估崩塌土方量約為 225,078.5m<sup>3</sup>; 此估算數據與交通部(2010<sup>a</sup>)以工程車實際外運統計資料相近, 充分顯示非常規攝影量測確屬可行, 能有效、迅速且量化災害前後地形高程變化量。

**關鍵詞**: 非常規攝影量測、電腦視覺、多視幾何、土方量。

## Preliminary Study Using Unconventional Photogrammetry to Evaluate the Earthwork Volume – a Case Study of the Landslide Occurred on the Cidu Section of Formosan Freeway

Cheng-Yang Hsiao<sup>\*</sup> Pao-Shan Hsieh Shu-Yeong Chi

**ABSTRACT** “Unconventional Photogrammetry” is a measurement methodology not requiring “Camera Calibration” and can use a regular consumer camera. The calculation of its “internal and external parameters” is more complicated and less precise than “Traditional Photogrammetry”. Unconventional Photogrammetry can use readily available photos to reconstruct 3D terrain soon when a disaster occurs. By comparing these terrain data (before and after the disasters), we can quantify the changes in elevation during disasters.

We chose a large-scale slope failure event occurred on the Cidu section of Formosan Freeway on 2010/04/25 at 14:33, used “Unconventional Photogrammetry” to reconstruct terrain data (after the event and when the collapsed earth had been cleared). We estimated the earthwork volume of the landslide was around 225,078.5 m<sup>3</sup>; and it's close to the result published by the Ministry Of Transportation And Communications. It showed this method is indeed feasible and able to rapidly, and quantitatively measure the terrain elevation variations.

**Key Words:** Unconventional Photogrammetry, Computer Vision, Multiple-View Geometry, Earthwork Volume.

## 一、前言

近年來天然災害頻繁，國際間學者及專家遂開始研究能應用於緊急救災時之測量方式及流程 (柯濤等人, 2010)。這種方式目前通稱「非常規」攝影量測，其不同於「常規」傳統攝影測量，精度要求較低且約束條件較少，特色為能應用各式易於取得之影像資料 (如災後無規劃飛行路徑的航拍、UAV (無人載具) 攝像及現地居民或媒體所提供之即時災害現場照片)，且資料處理採半自動方式，便於災後完成初步調查工作，提供量化參考數據，以利於即時災情掌控進而及時救災。隨著數位相機日益普及，居民或救災人員常在發生災害後，即時拍攝多幅災害現況照片，但此類照片拍攝位置屬隨機且未標定，較不適用傳統常規攝影測量，歸納有四大因素：

1. 拍攝地點複雜：常呈現隨機交向攝影方式 (如圖 1 (a))，不易按照傳統平行攝影方式 (如圖 1 (b))，致使影像重疊率變化較大。
2. 基線 (Baseline) 不同：隨機拍攝造成各張照片間基線常短不一。基線太短將影響測量精度，而基線過長不易進行影像匹配。
3. 精度及可靠性浮動：因各張照片之拍攝焦距、基線與畸變為隨機，以致影響量測之精度及可靠性。
4. 影像匹配不易：隨機拍攝造成任意照片組合之上下或左右視差角度過大，照片解析度也因拍攝焦距等原因而有所差異，難以應用常規攝影測量的匹配方法進行處理。

因此，本文採用非常規攝影量測方法中之多視幾何 (Multiple-View Geometry) 技術，其克服上述四大因素，具有能從多幅不同角度且未標定的序列影像進行圖像資訊綜合分析，進而重建三維模型的優勢 (3D-Reconstruction) (Gordon and Lowe, 2004; 孫敏, 2007)，故能進行災後影像深度量測與災區三維地形重建。以民國 99 年 4 月 25 日發生於國道 3 號 3.1K 之大規模邊坡崩塌事件為例，使用消費型數位相機 (Panasonic LX3) 以不同方向角度拍攝土石清運前與清運後之影像，再以非常規攝影量測技術獲取影像中的三維點雲資料；經人工編修後，以高精度 GPS 測量值為地真 (Ground True) 資料檢核其點雲資料誤差，確認其適用範圍；再以三維空間科學繪圖軟體 Surfer 比較土方清運前後數值地形，估算本案例區域於該崩塌事件中所清運之土方量。

## 二、非常規攝影量測簡介

目前數位相機與數位攝影機在解析度與取樣頻率等規格大幅提升，且各種量測理論日趨成熟。數位攝影量測技術已逐漸被應用在各種物理量的量測與識別、地形測繪及災後即時資料處理上，如陳建州等人 (2010) 使用消費型數位攝影機成功取代精密速度計，用以識別斜張鋼纜的各項振態參數；孫敏 (2007) 及趙曉等人 (2004) 也曾使用消費型數位相機，透過電腦視覺領域之多視幾何技術獲取工程測繪等級精度之地形三維重建成果；大陸武漢大學研究團隊於 2010 年台灣成功大學舉行兩岸非常規攝影測量研討會時，分享於 2008 年 5 月 12 日汶川大地震中，以不同於常規攝影測量方式進行資料取得、處理、成果展示等一套完整流程之經驗分享 (柯濤等人, 2010; 張勇等人, 2010; 孫明傳及段艷, 2010)。基於上述，國際間學者及專家將多視幾何等不符合常規傳統攝影測量規範之測量方式及流程，皆歸類為非常規攝影量測，且致力於後續應用發展。

孫敏 (2007) 曾指出多視幾何理論之發展基於使用相機所拍攝的序列照片進而取得相機拍攝影像時的相機所在位置並重建序列照片三維場景，這也就是電腦視覺領域目前研究的重點—「從運動中求得結構」 (Structure from motion, SfM)。SfM 具有不需事先標定的優點，而採用自標定技術 (Self-Calibration) 獲取每張照片拍攝時的相機相對位置 (Maybank and Faugeras, 1992; Faugeras, 1992; Pollefeys, 1999; Lei et al., 2001; 雷成等人, 2001; 張艷珍等人, 2001)，除拍攝所在位置較有彈性外，也可使用不同相機所拍攝的照片，但前提是拍攝對象已不持續變動。舉例來說，可想像一個帶有坐標系統框架的照像機以不變形的剛體方式運動，而 SfM 的「運動」就是

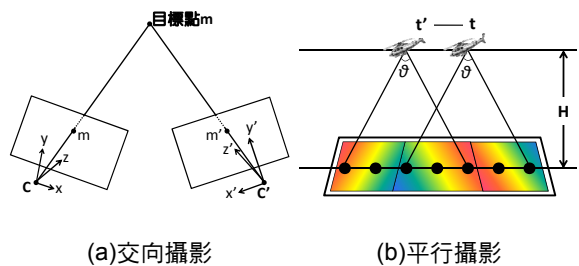


圖 1 交向及平行攝影方式示意圖

Fig.1 Convergent and Parallel Photography

由第二張照片的相機位置相對於第一張照片的相機位置的運動變化，透過旋轉矩陣  $\mathbf{R}$  及平移矩陣  $\mathbf{t}$ ，進而變為另一個坐標系就稱為「從運動中求得」(如圖 2)。

如圖 2，若拍攝照片 A 及 B 之相機內參數分別為  $K_1$  及  $K_2$ ，變換矩陣 (Transformation matrix) 分別為  $\mathbf{P}_1$  及  $\mathbf{P}_2$ ，則  $M_i$  到  $m_i$  及  $m_i'$  的關係如式 1 及式 2，且  $\mathbf{P}_1$  及  $\mathbf{P}_2$  兩矩陣可用式 3 及式 4 表示：

$$m_i = P_1 M_i \quad (1)$$

$$m_i' = P_2 M_i \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_1 = K_1 [\mathbf{I} \mid \mathbf{0}] \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_2 = K_2 [\mathbf{R} \mid \mathbf{t}] \quad (4)$$

由上式而知，我們需先有旋轉矩陣  $\mathbf{R}$  及平移矩陣  $\mathbf{t}$  解出兩照片之變換矩陣，進而得到三維點  $M_i$ ，第一步需先透過核幾何 (Epipolar Geometry) 關係，可知同一坐標系統下且對同一目標物  $M_i$  所拍攝序列照片存在幾何上的核線約束關係。如圖 2 所示，在  $O$  及  $O'$  位置拍攝兩張皆有拍攝到點  $M_i (X_i, Y_i, Z_i)$  之交向照片 (A 及 B)，點  $M_i$  落在照片 A 及 B 的位置分別為  $m_i (x_i, y_i)$  及  $m_i' (x_i', y_i')$ ，則  $m_i'$  必定是在跟  $m_i$  相關聯的核線上，這種核線約束方式就是 SfM 分析中的基本原理。核幾何 (Epipolar Geometry) 關係及定義如下：

1. 基線 (base line)：相機投影中心  $O$  及  $O'$  的連線。
2. 核點 ( $e$  及  $e'$ ; epipole)：基線與照片平面的交點。
3. 核面 (epipolar plane)：相機投影中心  $O$  及  $O'$ 、照片上的匹配點  $m_i$  及  $m_i'$  以及點  $M_i$  共五點所組成的平面。

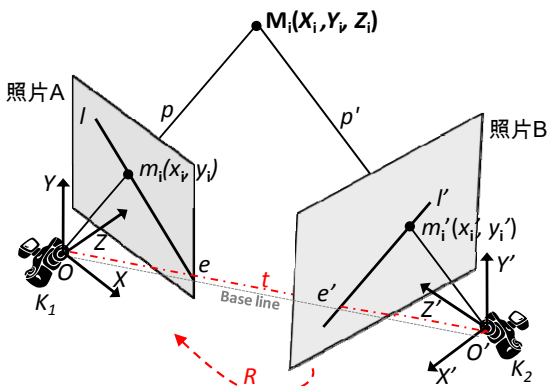


圖 2 兩照片間核線幾何關係圖

Fig.2 Epipolar geometry of a stereo pair

4. 核線 ( $l, l'$ ; epipolar line)：核點 ( $e$  及  $e'$ ) 及匹配點 ( $m_i$  及  $m_i'$ ) 的連線。

如今數位相機所拍攝的影像中皆有可交換圖像文件欄位 (EXIF; EXchangeable Image file Format)，當中包含計算內參數  $K_1$  及  $K_2$  所需的拍攝焦距、解析度 (LW; 如  $1600 \times 1200$ ) 及相機型號 (可上原廠網站查詢感測器尺寸) 等資訊，故使用數位相機所拍攝之照片皆可視內參數  $K_1$  及  $K_2$  為已知。在內參數已知的情況下，首先要推導核線方程式，令  $\hat{m}_i$  及  $\hat{m}_i'$  為  $m_i$  及  $m_i'$  的坐標向量，由核線約束關係可知  $\overrightarrow{Om}$ 、 $\overrightarrow{Om'}$  及  $\overrightarrow{OO'}$  共面，同樣的，三者中任一向量在其他兩向量所在的平面上，如式 5：

$$\overrightarrow{Om} \cdot [\overrightarrow{OO'} \times \overrightarrow{Om'}] = 0 \quad (5)$$

接著可使用投影中心  $O$  的相機關聯坐標系將式 5 改為式 6：

$$\hat{m}_i \cdot [\mathbf{t} \times (\mathbf{R} \hat{m}_i')] = 0 \quad (6)$$

其中可視  $\mathbf{t}$  為兩個坐標系的平移向量 ( $\overrightarrow{OO'}$ )， $\mathbf{R}$  為旋轉矩陣。以本質矩陣  $\mathbf{E}$  (Essential Matrix) 代表兩相機之核幾何關係，故  $\mathbf{E} = [\mathbf{t}]_x \mathbf{R}$ ，代入式 6 可得核線方程式 (式 7)，但未標定的相機，需要繼續推導匹配點的關係， $\hat{m}_i$  及  $\hat{m}_i'$  和  $m_i$  及  $m_i'$  的關係如式 8 及式 9：

$$\hat{m}_i^T \mathbf{E} \hat{m}_i' = 0 \quad (7)$$

$$m_i = K_1 \hat{m}_i \quad (8)$$

$$m_i' = K_2 \hat{m}_i' \quad (9)$$

將式 8 及式 9 代入式 7 後可得式 10，

$$m_i^T K_1^{-T} \mathbf{E} K_2^{-1} m_i' = 0 \quad (10)$$

令  $\mathbf{F} = K_1^{-T} \mathbf{E} K_2^{-1}$ ，則式 10 可轉換為式 11，

$$m_i^T \mathbf{F} m_i' = 0 \quad (11)$$

其中  $\mathbf{F}$  稱為基本矩陣 (Fundamental Matrix)，前人研究中提出許多方法求解基本矩陣，本文使用的方法為最常見的八點法 (Long-Higgins, 1981)，也就是在兩張照片中找到八個匹配點就可以解出基本矩陣  $\mathbf{F}$ ，再求得本質矩陣  $\mathbf{E}$ ，即解出  $\mathbf{R}$  及  $\mathbf{t}$ ，進而得到轉換矩陣  $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$  後，就可求得三維點  $M_i$ 。

依前述說明 SfM 原理可知欲估算三維點坐標、旋轉矩陣及平移矩陣皆可是任意值，故在三維重建所使用的影像上，不需嚴格要求其拍攝位置及方向，具有

較多照片選用的彈性，也因此不適合以常規攝影測量誤差評估方式進行評估，且因本文提出的非常規攝影量測之估計方法較常規不嚴謹，故侷限應用於可視化之環境（如重建三維點無法明確看到控制點，就無法進行坐標轉換）。綜上所述，非常規攝影量測對於照片拍攝條件要求較低且彈性較大是其優點，但對於測量誤差及精度評估尚無法以常規攝影測量之標準進行討論，故對於後續研究及應用人員來說仍有相當大的發展及應用空間可持續努力。

### 三、非常規攝影量測流程

本文主要介紹崩塌土方量估算之方法，首先概述國道 3 號 3.1 公里崩塌事件，其次說明地形三維重建步驟，接著進行重建資料之精度檢核，最後計算兩期重建地形之高程差量。依序說明如后。

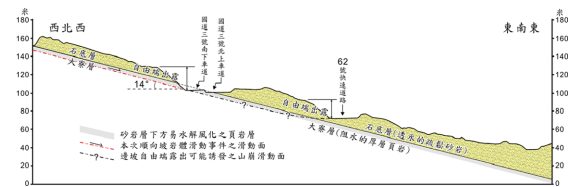
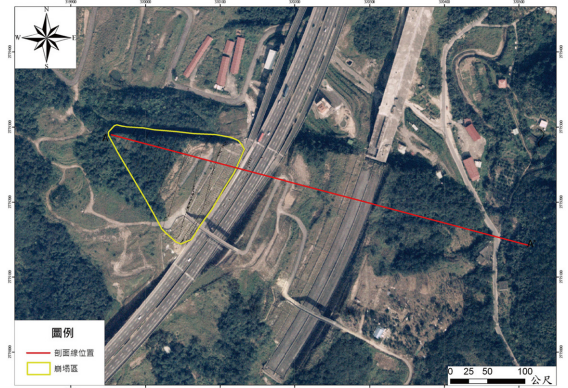
#### 1. 國道 3 號 3.1 公里崩塌事件概述

民國 99 年 4 月 25 日下午 2 時 33 分於國道 3 號基隆汐止段南向里程約 3.1K 處右側上邊坡發生大規模崩塌事件（交通部，2010<sup>b</sup>）。根據陳勉銘等人（2010）研判本次事件為石底層底部砂岩段楔形塊體下滑造成，屬於順向坡岩體滑動的山坡類型（如圖 3）。災害發生當時天氣晴朗且無風無雨，大量崩塌土石除壓垮國道 3 號主線上方的大埔橋外，也掩埋南北雙向共六車道（如圖 4），使得汐止系統—基金雙向車道於救災搶修期間全面封閉，故基隆或其他地區的部分通勤族改繞替代道路，其中國道 1 號（中山高）南下 13.1~16.1 公里路段開放路局供小客車行駛，但尖峰時段於基隆至台北南北雙向路段仍出現車多壅塞以致回堵現象，約多耗一小時以上，而預估通車時間從原 99 年 5 月 25 日，延後至 99 年 6 月 1 日有條件性通車；最後，99 年 6 月 19 日恢復全線雙向 6 車道通車且取消通車限制條件。

由於崩塌土方量不易於災後立即估算，且後續相關安全評估複雜繁瑣，易延誤通車時間。有鑒於此，若能在災害發生後，即時量測評估崩塌土方量，對於清運計畫經費及時程安排皆有所助益；另災害發生區域廣泛，常呈現零星分布，且交通動線易受災害阻斷，致使人力到達困難度提高，加上能快速測量之儀器（如光達）與專業操作人員較少，不易即時進行所有受災區域地形測量，以致無時效性量化資訊，供以評估後續土方清運處理對策。

#### 2. 三維重建步驟

圖 5 為三維重建步驟流程圖。首先，對目標物進行多角度拍攝，其次，再以 SIFT 進行特徵點提取及影像匹配；接著，重複以 SfM 獲得相機參數，最後，藉



上圖為災前航照影像，清晰可見朝東南向傾斜的楔形岩體，尖端凸向西北，黃色線大致圈繪出本次山崩事件滑動岩體的範圍，紅色線為剖面線的位置。

下圖為本次發生順向坡岩體滑動事件之順向坡的剖面示意圖。

圖 3 事件地點災前航照及地質剖面示意圖(陳勉銘等人，2010)

Fig.3 Aerial Photo before the Disaster and Geological Cross-section



圖 4 崩塌現場空拍照片(交通部，2010<sup>b</sup>)

Fig.4 Aerial Photo of the Failure



由參考點將三維點雲資料由相對區域坐標轉換世界坐標 (國際通用世界坐標為 WGS84, 但各國家地區常有個別定義坐標系統 (如台灣為 TWD97)。各步驟詳述如下：

- (1) 目標物多視角拍攝: 立體視覺之三維重建如同左右眼視差所造成立體感, 故應以不同角度拍攝目標物兩張以上的照片才能進行三維重建。拍攝目標物焦距越長, 在同距離及角度拍攝的照片張數就越多 (如圖 6), 但解析度也就越高, 有助於提高三維重建點雲資料密度及精度, 但重建電腦運算時間也就越長。三維重建點雲資料最後需使用參考控制點進行坐標轉換, 故參考控制點要能在重建三維點雲中被人眼辨識, 此與每次拍攝照片解析度及參考控制點之標示尺寸有關, 經作者測試, 建議參考控制點應至少涵蓋  $7 \times 7$  個像素較容易獲得人眼可辨識參考控制點之點雲資訊。
- (2) 影像匹配: 影像匹配應先偵測特徵, 後進行特徵匹配。特徵必須是穩健性 (Robust) 且可被描述的, 所謂穩健性是表示該特徵能對於旋轉、尺度、視角及亮度等影像變化因素保持不變性, 而將特徵點進行統計且透過轉換或組合, 則可使其成為易辨識及匹配的描述形式, 如此即可穩定匹配兩幅差異較大的影像。因此, 本文使用 SIFT 演算法 (Lowe, 1999、2004、2006), 主要包括「產生特徵鋒及趙輝, 2004」, 其可獲得尺度及旋轉不變性的特徵點及其描述算子 (description operator), 進而達成良好的影像匹配成果。
- (3) 相機位置及參數獲取: 以特徵點匹配數最多的兩張圖片作為起始位置, 並以光束調整法程式庫 (Sparse Bundle Adjustment Library) (Lourakis and Argyros, 2004) 有效減少每次循環計算的目標函數, 故可依序加入具備足夠特徵點匹配成果之鄰近圖片, 重複進行 SfM 循環計算目標物場景中每張圖片的相機位置及其參數, 直至無可進行三維重建的照片為止 (Noah et al., 2010)。
- (4) 三維重建: 三維重建即為計算三維點雲資料。本文使用多視幾何方法為 Multi-View Stereopsis (MVS) (Yasutaka and Jean, 2010), 其可對已有相機參數之影像, 進行三維點雲資料計算: MVS 特色為準確、效率高且計算三維點雲資料密集並帶有原照片中之 RGB 色碼。

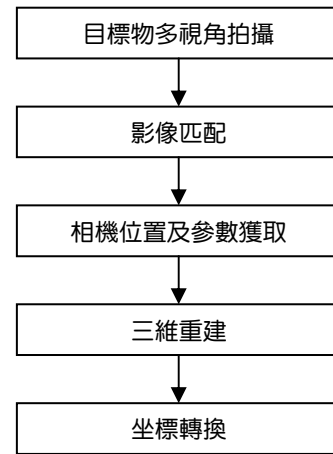


圖 5 三維重建處理步驟流程圖

Fig.5 3-dimensional Recreation Flow Chart



(a) 焦距短 (36mm)



(b) 焦距長 (70mm)

圖 6 在同位置使用不同焦距拍攝成果示意圖 (焦距短相對長之可視範圍較大, 但解析度較低)

Fig.6 Using different focal lengths in the same location for shooting

(5) 坐標轉換:透過參考控制點將目標物三維點雲資料由相對區域坐標轉換真實世界坐標。使用非測量相機進行三維重建時,控制參考點的分布需要滿足解算條件,且盡量確保能控制整個測區,但過多的參考控制點並未對提升精度有所幫助,建議提供 6 個以上參考控制點進行坐標轉換 (汪磊, 2002)。

### 3. 量測誤差比對

使用照片做為量測資料基礎,其誤差主要來源來自照相機及三維重建演算法。Seitz et al. (2006) 指出目前多數三維重建演算法在 30 萬畫素 (640\*480) 照片中 20 公分寬的物件精度可達 0.1 公分;近年許多使用非測量相機的攝影測量精度已可滿足 1:100 至 1:200 比例尺的地形圖測繪 (汪磊, 2002)。量測資料精度對於地形差量估算甚為重要,若掌握其製作地形資料精度,方能釐清是否為真實差異量,或是量測誤差範圍。蕭震洋等人 (2009) 曾以精度達 50 公分之空載光達為實例說明,欲觀測地形高程前後期差異相減高程量若小於 50 公分,不建議直接採用於推估分析上。鑑此,文中案例使用德國儀器大廠 Leica 所製造高精度 GPS (如圖 7) 測量成果與三維重建點雲資料進行測量誤差比較。

### 4. 崩塌土方量估算

三維點雲資料多包括植被與其他物體(如挖土機及電線桿等),故應先進行點雲移除或降低高度等人為編修,再使用三維空間科學繪圖軟體 Surfer 比較土方清運前後數值地形,估算崩塌土方量。圖 8 為前後期地形變化之體積計算模擬示意圖。經後期高精度數值地形減去前期高精度數值地形,所得網格內數值若為負值代表土方移出、正值為土方移入,再乘上高精度數值地形網格面積大小,即為單一網格之地形變化量,故崩塌清運土方量為地形變化量之體積總和。

## 四、實例探討

本文以國道 3 號 3.1 公里崩塌事件之清運土方量估算做為實例進行探討。依序說明三維重建、量測誤差比對及崩塌土方量估算成果依序說明如后。

### 1. 三維重建成果

國道 3 號 3.1 公里崩塌事件發生後,首先,筆者分別於 99 年 4 月 25 日下午 3 點 (拍攝 9 張) 及 99

年 9 月 16 日下午 1 點 (拍攝 52 張),前往位在事件發生地點對面之自強產業道路上空地 (如圖 9) 進行受災地點照片拍攝 (如圖 10);接著,將拍攝照片經影像匹配及 SfM 運算後,清運前及清運後分別有 5 張及 26

表 1 高精度 GPS 坐標測量成果

Table 1 Result of Measurement by High-precision GPS Coordinates

編號	TWD97_X	TWD97_Y	橢球高(M)	用途
1	320,092.16	2,779,282.87	111.25	坐標轉換
2	320,024.04	2,779,289.75	128.08	
3	319,998.46	2,779,288.23	134.63	
4	319,978.13	2,779,292.41	140.52	
5	319,958.26	2,779,299.91	146.63	
6	319,949.26	2,779,291.17	146.40	
7	319,962.33	2,779,276.91	142.65	
8	320,064.65	2,779,253.63	114.62	誤差比對
9	320,063.61	2,779,252.56	114.89	
10	320,027.11	2,779,266.49	125.31	
11	320,026.10	2,779,265.24	125.47	



圖 7 高精度 GPS (型號: Leica ATX1230 GG)

Fig.7 High-precision GPS

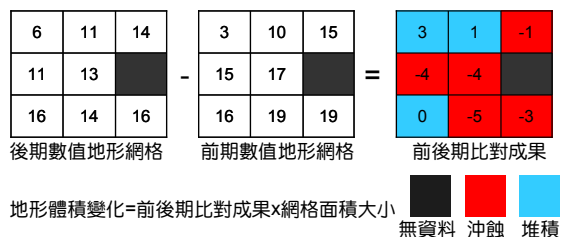


圖 8 前後期地形變化之體積計算示意圖 (蕭震洋等人, 2009)

Fig.8 Calculation of Terrain Change



張照片可供進行三維重建，並個別產生 965,021 個及 1,590,206 個三維點雲資料；最後，以 7 個高精度 GPS 坐標測量之特徵點，做為真實世界坐標轉換及後續誤差比對之參考控制點 (如表 1)。圖 11 為三維重建點雲成果圖，圖 (a) 及 11 (b) 分別明顯可見植被、電線桿及挖土機之具有三維坐標及 RGB 色碼點雲資料，故有助於後續人為編修。

## 2. 量測誤差比對成果

因清運前之檢核點不易布設，而無法進行評估，故本文僅比較清運後三維重建特徵點坐標與高精度 GPS 現地測量成果，其高程誤差從 11 公分到 16 公分 (如表 2)，滿足營建署城鄉發展分署所訂定地行測量驗收標準 (吳宗江等人，2007)。經評析後，若欲提昇精度，可藉不同演算法交互比對或強化攝影設備規格提昇照片解析度，再透過室內標準模型對照，將可減低估算誤差。

表 2 誤差比對成果

**Table2 Error Comparison**

GPS 測量	TWD97_X	320,064.65	320,063.61	320,027.11	320,026.10
	TWD97_Y	2,779,253.63	2,779,252.56	2,779,266.49	2,779,265.24
	橢球高(m)	114.62	114.89	125.31	125.47
三維重建成果	TWD97_X	320,064.26	320,063.80	320,026.35	320,026.19
	TWD97_Y	2,779,250.99	2,779,250.83	2,779,267.72	2,779,267.73
	橢球高(m)	114.78	114.76	125.42	125.31
高程差絕對值(m)*		0.16	0.13	0.11	0.16

\*高程差絕對值=|GPS 測量橢球高 - 三維重建成果橢球高|



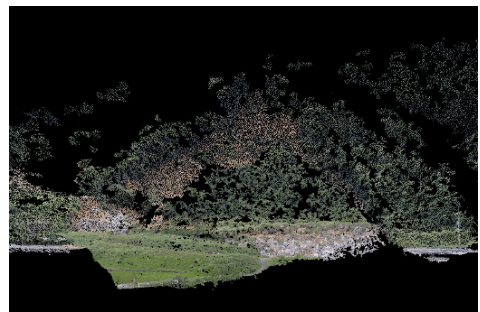
(a) 99 年 4 月 25 日



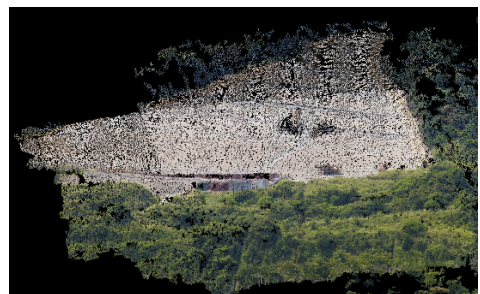
(b) 99 年 9 月 16 日

圖 10 事件地點清運前後照片

**Fig.10 Before and After the Removal**



(a) 99 年 4 月 25 日



(b) 99 年 9 月 16 日

圖 11 三維重建點雲成果圖

**Fig.11 3-dimensional Cloud Point Recreation**

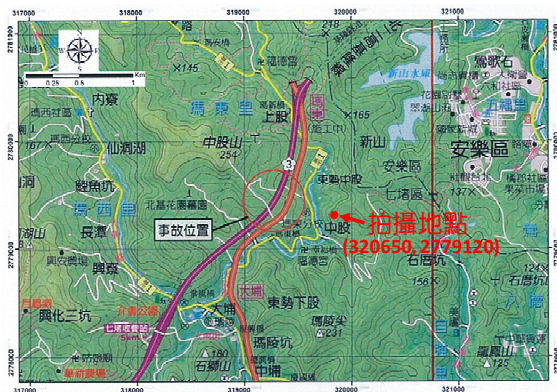


圖 9 拍攝地點 (修改自 交通部，2010<sup>b</sup>)

**Fig.9 Photographed Location**

### 3. 崩塌土方量評估成果

完成人工編修之點雲資料, 使用 Surfer 及 Kriging 法建立土方清運前後之 5m×5m 數值高程模型 (DEM); 清運前 (如圖 12) 明顯可見坡面上有明顯崩塌土方殘留, 但清運後坡面光滑無殘土, 如圖 13。圖 14 為崩塌土方清運前後地形高程變化量分布圖, 推估崩塌清運之土方量約為 225,078.5m<sup>3</sup>, 此估算數據與交通部 (2010a) 以工程車實際外運統計資料之 219,527m<sup>3</sup> 土方量結果相近, 約差 2.5%。

## 五、結論與建議

本文提出非常規攝影量測方法使用自標定, 不需要專業測量用相機, 且操作簡單、約束條件少, 並適用歷史照片或災害發生後任何人所拍攝的照片, 可增加使用彈性。由案例分析可知量測誤差量足以評估本次事件之崩塌土砂產量, 與最後清運結果相近, 顯示此項技術確屬可行。建議未來除地面拍攝外, 尚可搭配 UAV 突破地面上之拍攝角度限制。但自標定結果不夠穩定, 精度有時較差, 相機標定甚至可能因錯誤率高而導致三維重建失敗, 但可藉由蒐集或拍攝較多目標物照片補足缺陷, 提昇三維重建成功率; 若拍攝前能先進行相機標定, 且拍攝環境較不複雜, 建議可嘗試以 Tasi 兩步標定法 (1986)、Weng 標定法 (1992)、Zhang 棋盤法 (1999; 2000)、Bouquet (1999) 之基於對偶原理的標定法、Heikkil (2000) 之圓形標誌做為控制點標定法以及 Ahn (2001) 之圓環編碼圖標自標定法等其他精度較高相機標定方式來代替本文提出之自標定, 減少相機標定錯誤率。

## 六、後續應用

非常規攝影量測能有效、經濟、迅速進行地形量測, 建議後續可嘗試應用如下:

1. 辨識天然災害於地表受災範圍及規模: 可建立崩塌、堆積等災情初步評估量化資料, 以即時且有效反應地形變動概況, 作為災害應變決策參考, 將致災風險減至最低。
2. 地質調查: 對於調查人員無法接近的地點(如峽谷對岸), 可依據本方法調查地層之走向與傾角。
3. 土壤沖蝕調查: 一般使用沖蝕針進行土壤沖蝕調查, 其資料為點狀, 但若搭配本方法即可建立調查區域完整土壤沖蝕面狀資料。

4. 量化土石流與崩塌歷程變化: 長期監控相同土石流或崩塌區域, 即可重建其歷程變化。
5. 驗證三維邊坡數值模擬: 三維邊坡數值模擬為當前相當熱門之議題, 尤以岩坡上弱面之發展與災



圖 12 清運前地形量測圖

Fig.12 Topographic Shading Map before Removal

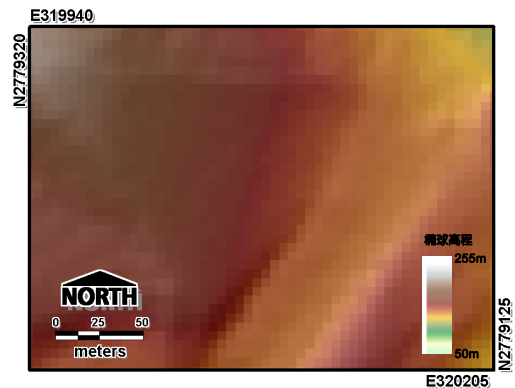


圖 13 清運後地形量測圖

Fig.13 Topographic Shading Map after Removal

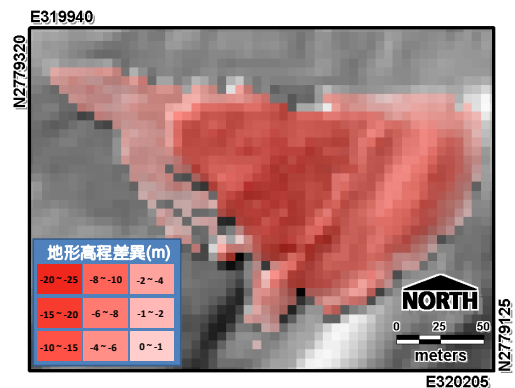


圖 14 土方清運前後地形高程變化量分布圖

Fig.14 Distribution of Terrain Elevation Changes before and after the Removal



前後地形的快速量測，對於山崩機制推估、模型邊界設定與模擬參數之修正極為重要。有鑑於國內目前岩坡三維數值模擬多以落石型山崩為主(顧承宇等人，1996；2006；葛德治與陳詳凱，2006；羅佳明，2010)，其參數上往往缺乏完整岩坡之弱面發展與災前後之數值高程模型，而本研究將可快速提供相關數值模擬資訊(包含張裂縫、節理、劈理、片理等弱面分布)，大幅提升模型邊界與輸入參數之正確性，並可提供相關山崩領域專家快速研判山崩機制之重要依據。

## 誌 謝

本研究進行期間特別感謝清雲科技大學 e-GPS 研究中心吳建廷講師與維興科技有限公司洪于正專員所提供之相關協助與建議。

## 參考文獻

1. Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010) "Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8):1362-1376.
2. Lowe, D. G. (1999) "Object Recognition from Local Scale-Invariant Features," *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, pp.1150-1157.
3. Lowe, D. G. (2004) "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key Points," *International Journal of Computer Vision*, 60:91-110.
4. Lowe, D. G. (2006) "Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features," *International Journal of Computer Vision*, 74(1):59-73.
5. Heikkilä, J. (2000) "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10):1066-1077.
6. Hartley, R. (1992a) "Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras," *Proceedings of European Conference on Computer Vision*.
7. Harley, R., Gupta, R. and Chang, T. (1992b) "Stereo from Uncalibrated cameras," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.761-764.
8. Gordon, I. and Lowe, D. G. (2004) "Scene Modeling, Recognition and Tracking with Invariant Image Features," *In Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR*, pp.110-119.
9. Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M. (1992) "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," *In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI*, 14(10):965-980.
10. Bouguet, J. Y. (1999) "Camera Calibration from Points and Lines in Dual-Space Geometry," *1999 Technical Note*, < <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/> >.
11. Lei, C., Wu, F. C. and Hu, Z. Y. (2001) "Kruppa Equations and Camera Self-calibration," *Acta Automatica Sinica*, 27(5): 621-630.
12. Pollefeys, M. (1999) *Self-calibration and Metric 3D Reconstruction from Uncalibrated Image Sequences*, Ph. D Thesis, Katholieke University Leuven.
13. Longuet-Higgins H. C. (1981) A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections, *Nature*, 293:133-135.
14. Snavely, N., Simon, I., Goesele, M., Szeliski, R. and Seitz, S. M. (2010) "Scene Reconstruction and Visualization from Community Photo Collections," *Proceedings of the IEEE*, pp.1370-1390.
15. Faugeras, O. (1992) "What Can Be Seen in the Three Dimensions with an Uncalibrated Stereo Rig?," *In Proceedings of the 2th European Conference on Computer Vision*, pp.563-578.
16. Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. and Szeliski, R. (2006) "A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms," *Proceedings of the IEEE*, 98(8).
17. Tsai, R. Y. (1986) "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.364-374.

18. Ahn, S. J., Rauh, W. and Kim, S. I. (2001) "Circular Coded Target for Automation of Optical and 3D- measurement Camera Calibration," *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 15: 905-919.
19. Maybank, S., Faugeras, O. (1992) "A Theory of Self-calibration of a Moving Camera," *International Journal of Computer Vision*, 8(2):123-151.
20. Zhang, Z. (2000) "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No.22(11):1330-1334.
21. Zhang, Z. (1999) "Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations," *International Conference on Computer Vision*, pp.666-673.
22. Lourakis, M. and Argyros, A. (2004) "The Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt algorithm," *Tech. Rep. 340*, Institute of Computer Science--FORTH, Heraklion, Crete, Greece, 2004. Available with source code from: <<http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba>>
23. 交通部 (2010a) 「國道 3 號 3K+100 邊坡坍方事件-邊坡初步檢測評估報告」. (Ministry of Transportation and Communications (2010a) National Highway No. 3 3K +100 slope landslide events -the preliminary test assessment of slope. (in Chinese))
24. 交通部 (2010b) 「高速公路風險管理 - 國道 3 號 3.1 公里崩塌事件案例簡報檔案」. (Ministry of Transportation and Communications (2010b) Risk Management of National Highway-the powerpoint file of landslide event at National Highway No. 3 3.1K. (in Chinese))
25. 吳宗江、馮正一、陳文福 (2007), 「崩塌地地形量測精度對土方估算影響之研究」, *水土保持學報*, 39(1):63-72. (Wu, T. C., Feng, Z. Y. and Chen, W. F. (2007) "A study on precision of topography measurement for landslides and its influence on volume estimation," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 39(1):63-72. (in Chinese))
26. 汪磊 (2002) 「數字近景攝影測量技術的理論研究與實踐」, 碩士論文, 中國人民解放軍信息工程大學, 河南省鄭州市 (Wang, L. (2002) *Military Digital Topographic Map Editing and Output System Based on MicroStation*, Master thesis, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou, China. (in Chinese))
27. 柯濤、張祖勛、郭大海、王建超 (2010) 「應急響應下的航空攝影測量」, 2010 兩岸非常規攝影測量研討會, 台南 (Ko, T., Zhang, Z. X., Guo, T. H. and Wang, C. C. (2010) "Aerial Photogrammetry in the Fast Response," *2010 Workshop on Unconventional Photogrammetry*, Tainan. (in Chinese))
28. 胡小鋒、趙輝 (2004) 「Visual C++/MATLAB 圖像處理與識別實用案例精選」, 人民郵電出版社. (Hu, X. F., Zhao, H. (2004) *The practical case selection of image processing and recognition by using Visual C++ / MATLAB*, Posts and Telecom Press. (in Chinese))
29. 孫明傳、段艷 (2010) 「基於最小二乘平差的區域網均色方法研究」, 2010 兩岸非常規攝影測量研討會, 台南. (Sun, M. C. and Duan, Y. (2010) "Research Of Tone Balance Method With Least Squares Block Adjustment," *2010 Workshop on Unconventional Photogrammetry*, Tainan. (in Chinese))
30. 孫敏 (2007) 「多視幾何與傳統攝影測量理論」, *北京大學學報(自然科學版)*, 43 (4 ):453-459. (Sun, M. (2007) "Multiple View Geometry and Traditional Photogrammetry Theory," *ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(4):453-459. (in Chinese))
31. 張勇、柯濤 (2010) 「基於已有正射影像和 DEM 的航空攝影空中三角測量」, 2010 兩岸非常規攝影測量研討會, 台南. (Zhang, Y. and Ko, T. (2010) "Ortho Updating by Aerial Triangulation based on the Existing Ortho-photos and DEM," *2010 Workshop on Unconventional Photogrammetry*, Tainan. (in Chinese))
32. 張豔珍、歐宗瑛 (2001) 「一種新的攝像機線性標定方法」, *中國圖像圖形學報*, 6(8):727-731.

- (Zhang, Y. Z. and Ou, Z. Y., (2001) "A new linear method of camera calibration," *Genamics JournalSeek*, 6(8):727-731. (in Chinese))
33. 陳勉銘、魏正岳、費立沅 (2010) 「國道 3 號順向坡滑動的地質解析」, *地質*, 29 (2 ):12-15. (Chen, M. M., Wei, C. Y. and Fei, L. Y. (2010) "The dip slope along geological analysis at National Highway No. 3.," *Geology*, 29(2): 12-15. (in Chinese))
34. 陳建州、曾宏正、吳文華、賴國龍、謝昱德 (2010) 「數位攝影量測技術應用於斜張鋼纜各向振態參數識別之研究」, 2010 非常規攝影測量研討會論文集, 台南. (Chen, C. C., Cheng, H. Z, Wu, W. H., Lai, G. L., Xie, Y. D (2010) "The research of Digital photography technology for measuring the vibration of the stayed cable parameter identification," *2010 Workshop on Unconventional Photogrammetry*, Tainan. (in Chinese))
35. 葛德治、陳詳凱 (2006) 「三維單粒落石運動軌跡之量測及計算模式」, 岩盤工程研討會論文集, 台南, pp.159-168. (Ge, D. Z., Chen, X. K. (2006) "The measured and calculation mode of single rock movement tracking in Three-dimensional," *2006 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Tainan, pp.159-168. (in Chinese))
36. 雷成、吳福朝、胡占義 (2001) 「Kruppa 方程與攝像機自標定」, *自動化學報*, 27 (5):621-630. (Lei, C., WU, F. C. and HU, Z. Y. (2001) "Kruppa equations and camera self-calibration," *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 27(5):621-630. (in Chinese))
37. 趙曉、黃潤秋、韋穗 (2004) 「基於計算機視覺的地形 3D 重建」, *地質災害與環境保護*, 15 (2):74-77. (Zhao, X., Huang, R.I. and Wei, S. (2004) "Reconstruction on 3D topography based on computer vision," *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 15(2):74-77. (in Chinese))
38. 蕭震洋、林伯勳、鄭錦桐、辜炳寰、徐偉城、冀樹勇 (2009) 「應用光達技術進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估」, *中興工程季刊*, 105 :17-25. (Hsiao, C. Y., Lin, B. S., Cheng C. T., Ku, B. H., Xu, W. C., Chi, S. Y. (2009) "Application LiDAR technology monitoring sediment transport and evaluate Sediment Delivery Ratio in watershed," *Sinotech Engineering Journal*, 105:17-25. (in Chinese))
39. 賴文能、陳韋志 (2010) 「淺談 2D 至 3D 視訊轉換技術」, 第 23 屆電腦視覺、圖學暨影像處理研討會, 高雄. (Lai, W. N. and Chen, W. Z. (2010) "The introduction of conversion 2D to 3D from video," *The 23rd IPPR Conference on Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Kaohsiung. (in Chinese))
40. 羅佳明 (2009) 「落石區崖線崩退與崖錐堆積形態之研究」, 國立臺灣大學土木工程研究所博士論文, 台北. (Lo, C. M. (2009) *Cliff Recession and Talus Deposition Pattern in Rockfall Area*, Ph. D. Thesis, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
41. 蘇泰維、謝有忠、劉榮斌 (2010) 「國道 3 號災前災後的地形演變」, *地質*, 29(2 ):16-19. (Su, T. W., Hsieh, Y. C., Liu, J. P. (2010) "Topographic change during disaster of landslide at National Highway No. 3.," *Geology*, 29(2):16-19. (in Chinese))
42. 顧承宇、翁孟嘉、高憲彰、陳建忠、李怡先 (2006) 「三維雷射掃描技術於岩坡落石分析之應用」, 岩盤工程研討會論文集, 台南, pp.387-396. (Gu, C. Y., Weng, M. J., Kao, X. Z., Chen, J. Z., Li, Y. X. (2006) "Application Three-dimensional laser scanning technology to analysis of rockfall," *2006 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Tainan, pp.387-396. (in Chinese))
43. 顧承宇、陳錦清、王銘德 (1996) 「落石問題之數值模擬」, 岩盤工程研討會論文集, 台北, pp.243-252. (Ku, C.Y., Chen, J.C. and Wang, M.T. (1996) "The simulation of rockfall," *1996 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Taipei, pp.243-252. (in Chinese))

2011 年 01 月 12 日 收稿

2011 年 03 月 16 日 修正

2011 年 05 月 02 日 接受

(本文開放討論至 2011 年 12 月 31 日)