

應用數值航空攝影測量於坡地災害土砂分布及變異量之推估

林育樞* 何學承 蘇苗彬

摘要 在台灣極端氣候事件出現的頻率有增多的趨勢，而其所造成的災害規模也明顯擴大，因此更不可忽略其所可能帶來的衝擊。本研究針對特定區域進行完整的資料收集，並使用數值航空攝影測量方法。首先取得災害前後之航空像對，應用影像處理技術，定出崩塌發生點位的崩落與堆積的分佈，依此可計算滑動土體的形狀與實際體積。透過地形高程變異分析，將可用於提供做後續機制模擬與研判。崩落材料的堆積現況與可能產生之運移，則為後續防災之重點。本研究透過高雄市甲仙區小林里地區之分析，已可量化各崩塌點位之規模，可供後續做崩塌機制之探討。

關鍵詞：坡地災害、數值航空攝影測量、地形高程變異。

Estimation on Behavior of Slopeland Disaster and Sediment Distribution and Variation using Digital Aerial Photogrammetry

Yu-Shu Lin* Hsueh-Cheng Ho Miao- Bin Su

ABSTRACT In Taiwan, the frequency of extreme weather events are increasing. The scales of the related disasters is getting larger. Therefore, we must not overlook the potential impact. This study is to collect data as complete as possible from selected areas, and it is using digital aerial photogrammetry. First, get the aerial pair in the pre-and post disaster period, Application of image processing technology, and set the collapse and accumulation distribution of the collapse occurred points. It can calculate the shape and actual volume of the sliding soil body. Through the analysis of terrain elevation variation, and provide the simulation and judged of follow-up mechanism. Accumulation situation of collapse material and the possible movement, and it is the emphasis of follow-up disaster prevention. In this study, through analysis of Xiaolin Vil., Jiasian Dist., Kaohsiung City region, and it has been to quantify the scale of the collapse occurred points, and available for follow-up study of the collapse mechanism.

Key Words : Slope land disasters, digital aerial photogrammetry, terrain elevation variation.

一、前言

全球暖化是當前重要的課題，相關的研究相當多，大多指出極端氣候的出現機率提高，以往不曾或不常發生的事件，將來都可能發生，莫拉克風災的超

大累積雨量即為一例。莫拉克颱風所造成很多坡地災害與財產損失，尤以小林里全里被埋在土石之中之事更震驚各界。

要研究坡地災害，最好的方法就是取得實際資料，災害已發生者，需要到災區去收集資料，運用航

空攝影測量的技術, 必要時要做補充的現地量測 (如 3D 掃瞄); 有發生災害的潛在可能的地區, 經由現場調查探測等方式進行資料收集。再對所收集的資料進行統計整理, 可用於進行相關研究及後續處理分析。

選定研究區後, 首先取得災害前後之航空像對, 應用影像處理技術, 定出崩塌發生點位的崩落與堆積的分佈, 依此可計算滑動土體的形狀與實際體積, 提供做後續機制模擬與研判。崩落材料的堆積現況與可能產生之運移, 則為後續防災之重點, 量化各崩塌點位之規模及河道土砂運移之概況, 可供後續做崩塌機制研究與河相演變推估。本研究中分別重製民國 96 年與民國 100 年之正射影像, 使用 ArcGIS 匯入數值地形模型, 並加以分析與人工校正數化, 重新分析莫拉克風災前後期之坡面範圍。以剖面線來探討崩塌地高程的變化, 藉由繪製多條橫、縱剖面, 並使用 3D Analyst 模組計算出高程、土石之變異量以及河道的縱剖面與橫剖面, 並檢討其成因。

二、文獻回顧

數值航空攝影像係指將航空攝影所攝得之航空像片, 利用掃瞄器, 依據掃瞄解析度, 掃瞄為數值格式, 並儲存於電腦中。利用電腦可快速處理大量運算之特點, 可將傳統攝影測量像對、絕對方位判定、空中三角測量、建立數值地形模型、建立正射影像及立體觀察量測等工作在電腦上運算處理。近年來, 數值航空攝影測量亦有採用數位航空攝影照片, 應用航照數位相機拍攝之影像, 不須經過傳統底片沖洗及掃瞄等流程, 航空攝影作業完畢後透過影像後處理軟體的操作即可得到 14bit 及具有 4band(Red、Green、Blue、NIR) 之影像, 另外加上慣性定位定向系統之輔助, 可取得攝影曝光瞬間的位置與姿態參數, 節省後續的空中三角測量平差作業所需的人力及時間。

航照影像內含色調與地面之間的定量關係, 使用掃瞄影像數值化, 由解析度推求影像處理系統自動分類。(歐陽鍾裕, 1986)。航空攝影測量是指利用精密之攝影機置於飛行載具上所拍攝之航照影像, 作為攝影測量研究之對象(何維信, 1995)。根據 ASPRS(american society of photogrammetry and remote sensing) 的定義, 攝影測量為一門透過記錄、量測、判釋像片影像或輻射電磁波之型態或其他現象, 以獲得物體及環境之可靠資訊的藝術、科學及技術 (Wolf, 2000)。由於相

關儀器及技術之進步, 攝影測量已成為編繪地圖及製作地形圖的最正確及最有效率之方法。

利用此種方式拍攝之航照影像, 一般有三種用途, 一為量測攝影測量, 另為判釋攝影測量。量測攝影測量包括像點之精密量測、求取像點之距離、角度、面積、高程...等資訊。判釋攝影測量則是利用影像上提供之資訊, 藉此瞭解土地利用、自然生態等情形。民國四十三年農林航測所就開始販售航照影像, 提供航空攝影, 技術的發展進步由傳統底片影像到數位影像以及多光譜數位影像, 使得航空攝影測量提供更有效的資訊。

Miller 和 Laflamme(1985) 定義數值地形模型為: 以有系統之 X、Y、Z 坐標值, 對應於連續地表面起伏, 亦即以縱橫斷面數值來定義地形表面。此後, 許多近似的概念也相繼出現, 如德國使用的 DHM(digital height model) 與美國使用的 DEM(digital elevation model) 等; 而 DSM(digital surface model) 指的是匹配時包含建物、植被高度的數值地表模型。廣義而言, DTM 則是指任何以數值或數位方式來表示地表特性的資料模式 (Mark, 1984; 吳奇勳, 2004)。陳俊仰 (2007) 運用數值航空攝影測量配合數值地形模型, 求得廬山地區得高程資料與計算土石變異量; 吳仲民 (2008) 以南投縣仁愛鄉萬豐村曲冰部落為例, 瞭解不同時期的河道高程變異、土石變異量及分布情況。

堰塞湖是在一定的地質、地理環境下形成的, 通常需要具備以下幾個基本條件: 1、堰塞湖形成區域內有河流通過, 且河床寬度不是很大, 尤其是山區的“V”型河谷更有利於堰塞湖的形成; 2、在地震、降雨、融雪以及人類活動等因素的作用下, 河岸坡面的山體有發生大型地滑、崩塌、泥石流等山地災害的可能; 3、河道上游必須有充分的水源條件或極強降雨的匯流條件。

陳樹群及吳俊銓 (2009) 針對高雄縣甲仙鄉小林村於 2009 年莫拉克颱風所引發之崩塌災害進行探討, 主要分析內容為崩塌前後之地形變遷量及地形特徵分析; 地形變遷量以崩塌前及崩塌後之 5m×5m 數值高程模型進行估算, 以此估算總崩塌量及總堆積量, 並擷取縱及橫剖面方式分析崩塌前後之高程變化量, 且經由崩塌後崖面高程分佈判斷崩塌類型。蕭國鑫 (2010) 等利用 2005 年及 2010 年的空載光達資料計算小林村附近的地形變化量, 其中崩塌區的最大崩塌深度達 84.75 公尺, 崩塌量 2,883 萬立方公尺; 堆積

區的最大堆積深度 85.08 公尺，堆積量 1,753 萬立方公尺；而旗山溪右岸的堆積區堆積量亦達 210 萬立方公尺；另研究區範圍內的旗山溪河床高度亦淤積了近 20~22 公尺之多。馮正一 (2011) 利用台灣寬頻地震站甲仙站(SGSB)測得之震動訊號、衫林大橋水位站水位資料，分析旗山溪河道上所形成之堰塞湖及其潰壩時間點，較準確推估潰壩時間點；經研究結果顯示，於 2009 年 8 月 9 日，小林村堰塞壩約在 07:40a.m.時完全潰壩，洪水爆發約 08:03 到達甲仙，約 08:40a.m.到達衫林大橋，小林村堰塞壩短暫存在時間為 1 小時 24 分鐘。

三、研究區域

本研究區域為高雄市甲仙區小林里 (圖 1)，民國 98 年 8 月 6 日~10 日中度莫拉克颱風來襲，其所引進的西南氣流形成高強度及長延時的降雨型態，造成台灣南部災情嚴重，連日的豪雨使得高雄市甲仙區小林里發生獻肚山崩塌及堰塞湖潰堤事件，進而造成該村嚴重的損失與傷亡。

四、研究方法

1. 相關資料蒐集與製作

本研究數值航空攝影測量的應用，主要在重建高雄市甲仙區小林地區的地形資料，以方便後續的室內資料處理及分析。對過去的研究來說，要能得到現地的地形資料，就必須對於邊坡或河道進行測量的工作。小林地區研究範圍地區廣闊，要進行實地測量工作已有困難，還要回溯已經消逝的過去歷史資料。不過以上問題，皆可利用航空影像來解決，利用航空影像進行正射影像以及數值地形模型地重建工作，可快速進行大範圍的量測，解決耗時且難以進入量測區域的問題。在操作上，數值航空攝影測量分為飛行航空攝影及室內操作及二大部分。在航空攝影上，由於技術及器械的問題，取而代之的是使用林務局農林航空測量所，照片來源為歷年來在小林地區所拍攝的航空影像。農林航空測量所將拍攝影像品質分為 a、b 兩類，a 為佳、b 為有碎雲或霾氣，而所購買的原始航照應盡量挑選品質為 a 的影像，本研究挑選了同年度不同飛行任務的原始航空照片進行正射影像與 DTM 的製作，以達到影像的完整性。

工作站影像處理 (內業) 部分，則是運用軟體程式將原始航空影像進行正射處理，以產製正射影像與數值地形模型資料。目前數值地形模型製作的技術已趨於成熟，市面上與業界有許多的軟體或工作站皆能進行處理。本研究所使用的軟體為 ERDAS IMAGINE 的 LPS 模組，進行正射處理及數值地形模型產製，其製作流程如圖 1。

2. 數值航空攝影測量

航空攝影測量有即時、拍照範圍遼闊、可進行多光譜調查、影像直接可視等優點，並且使用 ERDAS IMAGINE 的 leica photogrammetry suites (LPS) 模組，產出具有大地坐標之正射化影像與數值地形模型 (digital terrain model, DTM)。在災害發生後，考慮災後速報的時間急迫性，在取得圖資後，正射影像與 DTM 的製作可在 3-5 天內完成，在精度許可下可取代許多需

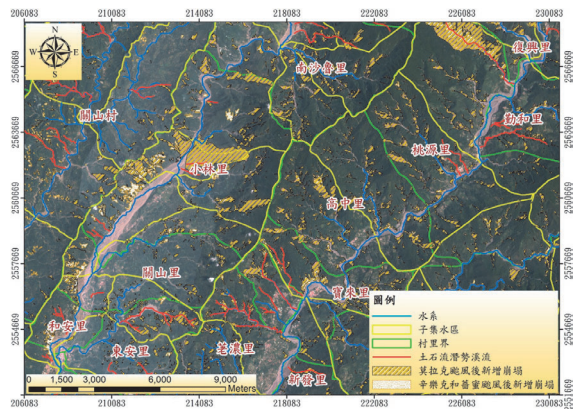


圖 1 小林里與其鄰近地區土石流潛勢溪流及歷年崩塌場分布圖

Fig.1 Debris-flow-prone stream and landslide distribution map of Xiaolin village and its neighbors.



圖 2 數值航空攝影測量製作流程

Fig.2 Production process of digital aerial photogrammetry

在交通不便區域所進行的測量工具。隨著科技進步，軟體日新月異，針對如此大的區域進行全盤性且快速的瞭解，使用數值航空攝影測量是個很好的方式。航空攝影具有即測量工作。這些特點剛好能夠彌補前人研究中，無法進行精確評估的缺點。

數值航空攝影測量係指以飛行載具在空中向地面垂直攝影，所得原始相片經由掃描成為原始數位影像，藉由電腦軟硬體設備，進行控制點量測，經由數學解算的方式，建立像空間與物空間之間坐標系統的對應關聯。再經由正射處理，最後可由正射影像中直接得到現地的絕對坐標資料。

本研究中，結合 GPS (global positioning system) 與 INS (inertial navigation system) 的儀器裝設於航空攝影載具上，稱為「定位定向系統」(position and orientation system, POS)，可直接使用感測器的定位與率定參數來決定外方位參數，這種方式稱為「直接地理定位」(direct georeferencing)。此法提供了一種直接獲取外方位參數的方式，亦即由 GPS 取得位置參數，由 INS 取得姿態參數；若從 GPS 與 INS 系統中取得的外方位參數準確度夠高，而且 GPS、INS 及攝影機均經過精密的率定時，將可以在空中三角測量作業時，不再需要任何的地面控制點，免除航標點和控制點的佈設和測量工作，更甚至也有可能免除整個空中三角的量測及計算等流程。

本研究利用航空攝影測量重製民國 96 年以及 100 年之數值地形模型。經由 ERDAS LPS 模組點選外方位的控制點與連接點，進行空中三角測量，由空中三角測量結果的均方根誤差 RMSE (room mean square error) 可以得知是否精確，每條航帶測量結果均控制在 2 公尺之內，數值地形模型的建置也經過精度檢覈的計算。數值地形模型精度檢核計算公式如下。民國 96 年與 100 年研究區域各個航帶之數值地形模型精度審核結果，如表 1 所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}} \quad (1)$$

其中， e_i = 數值地形模型之高程值 - 地面控制點或連結點之高程值

本研究運用數值航空攝影測量重建過去之數值地形模型，以高雄市旗山溪地區民國 96 年與 100 年之原始航空照片，完成製作跨越民國 98 年之莫拉克風災前後期 5m×5m 之數值地形模型及正射影像圖，產製過後的正射影像 2 個年代達 10 多張，為了使各年代之正射

影像更有整體性，分析上有絕佳的辨識度，所使用 Erdas Imagine 的 MosaicPro 功能將各張的正射影像鑲嵌成一張正射影像，如圖 3、圖 4。

五、結果與討論

1. 小林里上方坡面評估

依民國 96 年及 100 年之正射影像 (TWD97 坐標系統)，並使用 ArcGIS 分析與人工校正數化，重新分析莫拉克風災前後期之坡面範圍。運用前後期影像作

表 1 旗山溪小林區域數值地形模型精度檢核之成果

Table 1 The result of accuracy assessment for the digital terrain model at Chisan River

民國96年	96年航帶1	96年航帶2
RMSE	0.2386	0.6536
民國100年	100年航帶1	100年航帶2
RMSE	0.5315	0.163

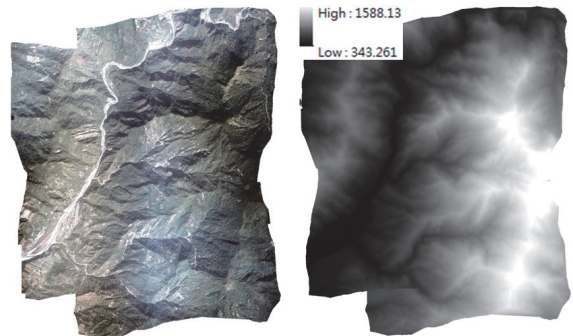


圖 3 民國 96 年高雄市旗山溪正射影像與數值地形模型 (莫拉克前)

Fig.3 The digital orthophoto and digital terrain model in Xiaolin Vil., Kaohsiung City in 2007. (Before Typhoon Morakot)

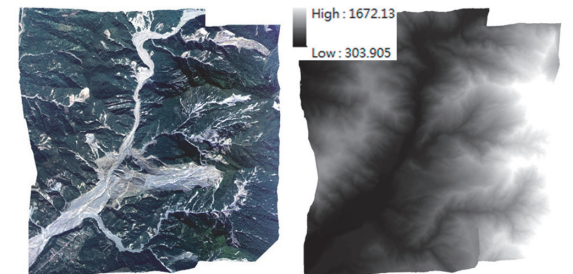


圖 4 民國 100 年高雄市旗山溪正射影像與數值地形模型 (莫拉克後)

Fig.4 The digital orthophoto and digital terrain model in Xiaolin Vil., Kaohsiung City in 2011. (After Typhoon Morakot)

DTM 相互疊減，假設差異部份即為土砂變異量。(莫拉克後期 DTM-莫拉克前期 DTM=坡面高程變異值)，圖 5 為小林里上方坡面高程變異圖，圖中負值表示為沖刷、正值為淤積。

從分析結果中得知，最大崩塌深度為 84 公尺，崩塌的區域主要集中於滑動土體的上半部，由 DTM 相互疊減的結果計算出，崩塌的總體積約為 3500 萬立方公尺；最大堆積深度為 92 公尺，堆積的區域主要集中在獻肚山下半部、旗山溪右岸和原小林里所在位置，由 DTM 相互疊減的結果計算出，堆積的總體積約為 2700 萬立方公尺；從 DTM 相互疊減的結果可推測，於旗山溪堰塞湖潰堤後，遭帶走之外移土砂量體積約為 800 萬立方公尺，詳細如圖 5 所示。

2. 獻肚山崩塌剖面高程變異 (縱剖面)

沿獻肚山崩塌坡面上共繪製 6 條縱剖面線 (圖 6)，分析前後期坡面地形的變化，了解邊坡上崩塌或堆積的情況。以下分析為應用 ArcGIS 匯入數值地形模型，自行繪製數條縱剖面，並使用 3D Analyst 模組計算出高程，將 96 年與 100 年的縱剖面進行比較，分析位置與結果如下圖 (圖 7) 所示。

由獻肚山崩塌地的縱剖面高程變異分析中，可藉由 DTM 前後時期的變化，清楚的劃分出崩塌區、堆積區和 590 高地的位置 (圖 7-3)，由此次崩塌範圍高差最大達 900m，且平均坡度達到 40 度，可推測崩落土石到達小林里時速度已相當快，在大規模山崩量體作用下形成巨大破壞能量。圖中綠色的線條為莫拉克颱風前的縱剖面高程，藍色的線條為莫拉克颱風後的縱剖面高程。

3. 獻肚山崩塌剖面高程變異 (橫剖面)

沿獻肚山崩塌坡面上共繪製 16 條橫剖面線 (圖 8)，分析前後期坡面地形的變化，了解邊坡上崩塌或堆積的情況。以下分析為應用 ArcGIS 匯入數值地形模型，垂直崩塌方向繪製橫剖面線，並使用 3D Analyst 模組計算出高程，將 96 年與 100 年的橫剖面進行比較，分析位置與結果如下圖所示 (圖 9)。

由獻肚山崩塌地的橫剖面高程變異分析中 (圖中綠色的線條為莫拉克颱風前的橫剖面高程，藍色的線條為莫拉克颱風後的橫剖面高程)，於垂直深槽每隔 200 公尺繪製一條橫剖面線，可看出在獻肚山坡面上地形和 590 高地在莫拉克颱風前後期的變化，從剖面 3 以上可以看到兩條明顯的坑溝 A 和坑溝 B (如圖中紅色

圈選部分)；剖面 13 以上的區域為為獻肚山上主要的崩塌區，從前後時期的坡面高程變化可看出崩塌地的邊界和深度；剖面 8 的位置由橫剖面圖可看出為一堆積的平台，其為 590 高地；從橫剖面分析中將有助於判釋獻肚山崩塌土石主要的移動方向，並可很明顯地觀測坑溝 A 和坑溝 B 的位置和大小變化，藉由 DTM 前後期的變化，觀察到獻肚山上部 (崩塌區)、中部 (590 高地)、下部 (堆積區) 土石分布和變化量的情形。

4. 旗山溪剖面高程變異

為了能了解河道兩側邊坡的沖刷或堆積情形，沿旗山溪共繪製 13 條橫剖面線 (圖 11)，分析旗山溪前後期的高程變化 (圖 10)。以下分析為應用 ArcGIS 匯入數值地形模型，並使用 3D Analyst 模組計算出高程，將 96 年與 100 年的剖面進行比較，分析位置與結果如下圖所示 (圖 12)：

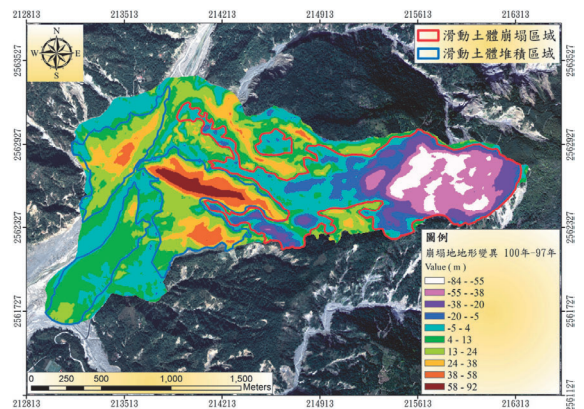


圖 5 小林里上方坡面高程變異圖

Fig.5 Slope elevation variation above Xiaolin village

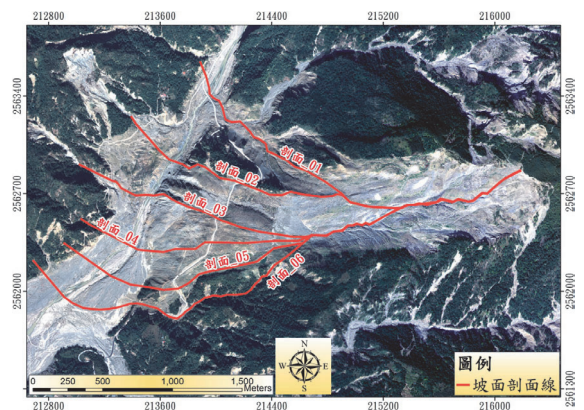


圖 6 獻肚山崩塌坡面之縱剖面線

Fig.6 Longitudinal profile lines of Hsien-Du-Shan landslide

由河道的橫剖面分析可了解旗山溪河道在莫拉克颱風前後時期的變化 (圖中綠色的線條為莫拉克颱風前的河道橫剖面高程, 藍色的線條為莫拉克颱風後的河道橫剖面高程), 旗山溪在莫拉克颱風時期所形成的 小林里堰塞湖潰決極有可能為小林里災害的主要原因, 藉由旗山溪在崩塌前後的河道深槽 (圖中粗線部分) 與寬度來推測災害發生的位置, 根據相關的研究報告, 河道寬度不大的 V 型河谷有利於造成堰塞湖的

形成, 根據災前地形的判斷, 堰塞湖的地點可能位於圖 12-5 至 12-7 間, 又此處上方為獻肚山崩塌剖面分析中坑溝 B 的位置, 在獻肚山崩塌的過程中所產生的大量土石堆積在隘口, 故推測此處應該為堰塞湖發生的地點; 從圖 12-5 至 12-11 的河道剖面中, 堰塞湖潰壩後, 旗山溪河道更接近小林里。以上河道變化的跡證, 都可能為小林里災害的重要原因。

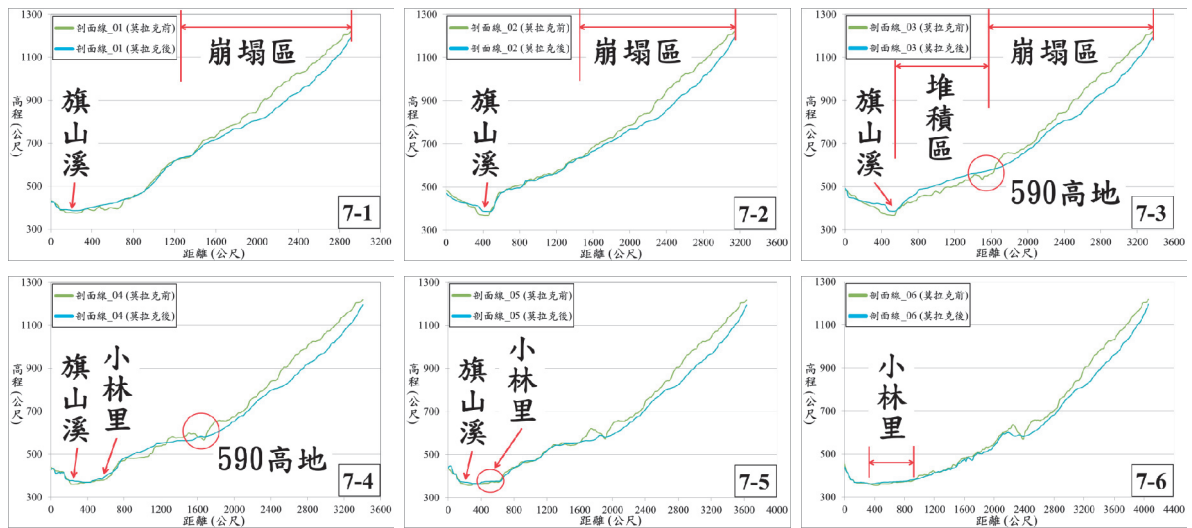


圖 7 獻肚山崩塌地區於莫拉克前後期之縱剖面高程 1~6
Fig.7 Longitudinal profile 1-6 of Hsien-Du-Shan landslide in Pre- and Post- Typhoon Morakot

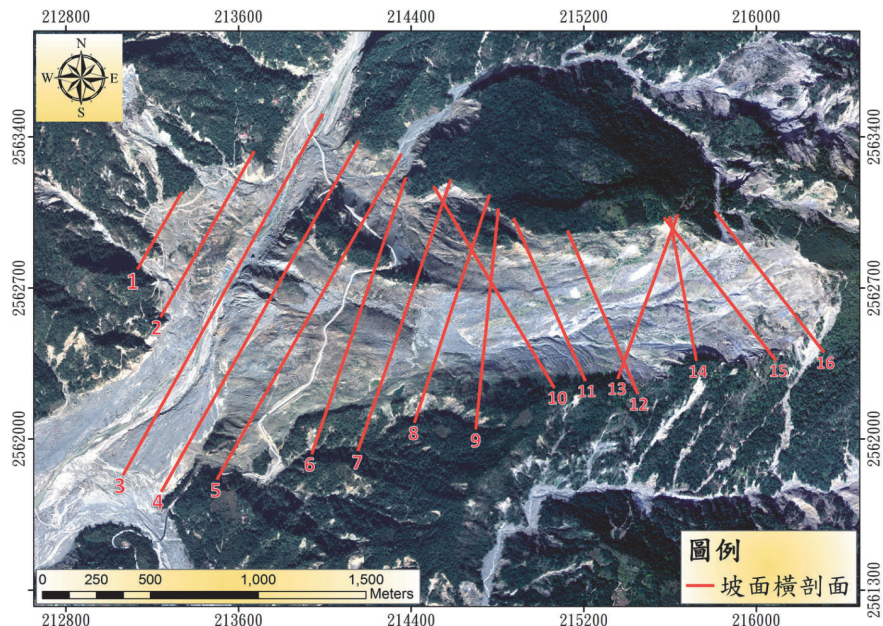


圖 8 獻肚山崩塌地區之橫剖面線
Fig.8 Cross profile lines of Hsien-Du-Shan landslide

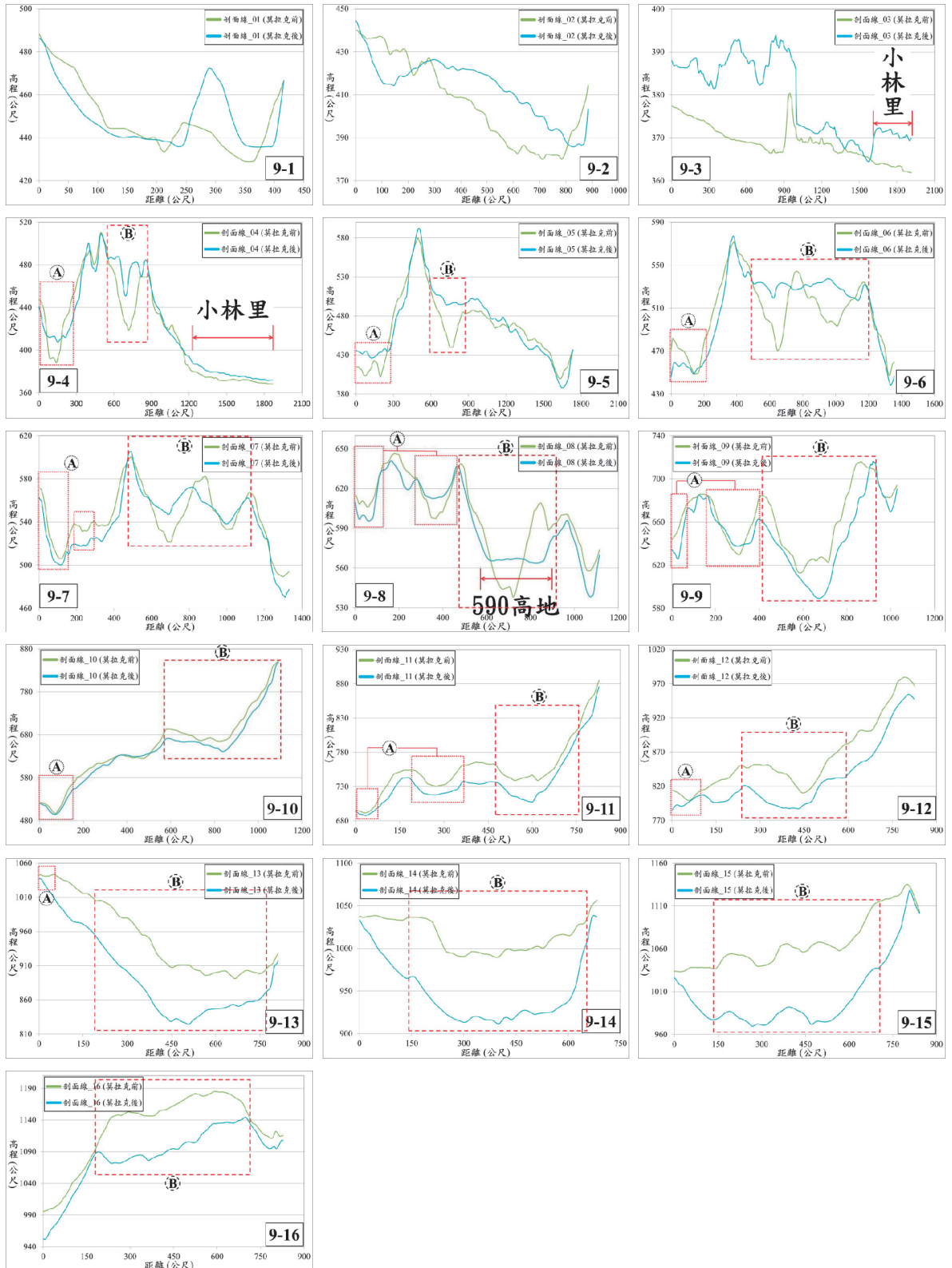


圖 9 獻肚山崩塌坡面於莫拉克前後期之橫剖面高程 1-16

Fig.9 Cross profile 1-16 of Hsien-Du-Shan landslide in Pre- and Post- Typhoon Morakot

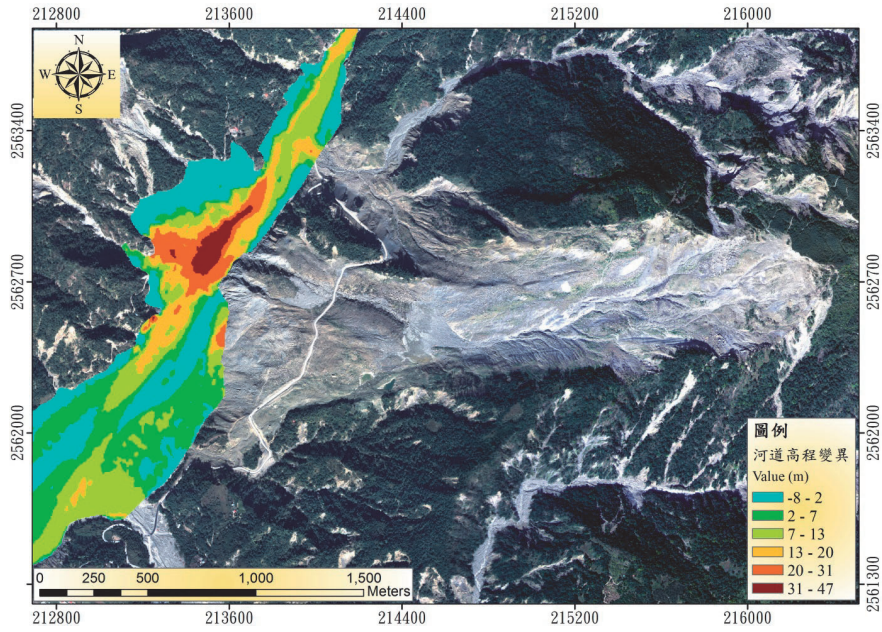


圖 10 旗山溪河道高程變異圖

Fig.10 Chisan River course elevation variation

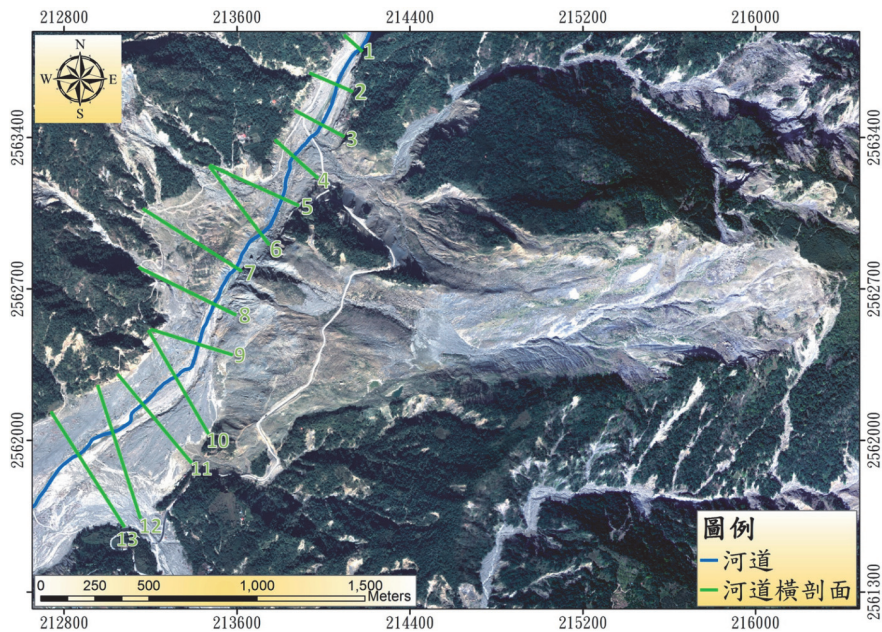


圖 11 旗山溪於莫拉克颱風後河道位置與河道橫剖面線

Fig.11 River course locations and river course cross profile lines of Chisan River after Typhoon Morakot

六、結 論

研究區域現今以及過去所發生的災害，較無完善的全面性人工現地測量，山區以及高程落差較大之處人員無法進行量測，所以利用航空攝影對研究區進行全區航測作業，可快速重建並全面性得到量測區內地

形地貌資訊。對於大範圍地表保持原貌之地滑判釋分析，可快速劃界堆積區域與推估堆積量，人員無法抵達量測地區將可得到分析結果，可節省時間、人力，並可結合航照圖及數值地形模型製作三維地形模擬。綜合研究之結果，可得到以下幾點結論：

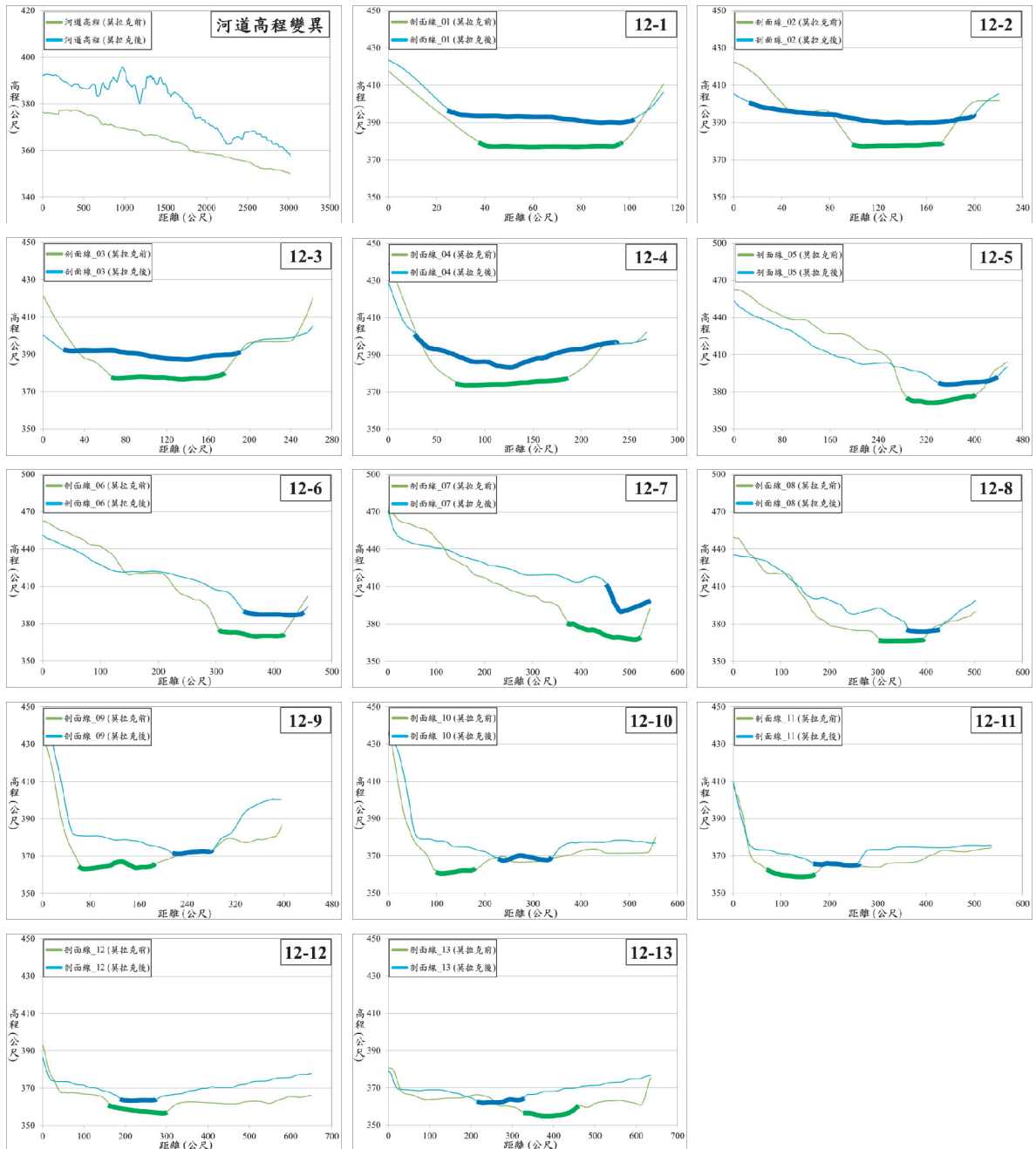


圖 12 旗山溪於莫拉克前後期之河道高程變異與橫剖面高程 1-13

Fig.12 Elevation variation and cross profile 1-13 of Chisan River in Pre- and Post- Typhoon Morakot

1. 於極端氣候狀態下，連續強降雨形成之地表水及地下水對邊坡之穩定性造成莫大影響。本研究選定高雄市甲仙區小林里，應用erdas imagine的leica photogrammetry suites (LPS) 軟體重建數值地形模型與正射影像，並針對區域內之大型崩塌地重建邊坡型態，推測獻肚山崩塌的過程。
2. 從DTM相互疊減的分析結果可看出獻肚山崩塌與堆積的分布情形，最大崩塌區域集中在滑動土體的上半部，崩塌深度最大為84公尺，崩塌的總體積約為3500萬立方公尺；最大堆積區域主要集中在獻肚山下半部、旗山溪右岸和原小林里所在位置，堆積深度最大為92公尺，堆積的總體積約為2700萬立方公尺；於旗山溪堰塞湖潰堤後，遭帶走之外移土砂量體積約為800萬立方公尺。
3. 由莫拉克颱風前後期的獻肚山縱剖面高程變異分析可清楚的劃分出崩塌區、流通區和堆積區，崩塌範圍高差最大達900m，且平均坡度達到40度，可推測崩落土石到達小林里時速度已相當快，在大規模山崩量體作用下形成巨大破壞能量。
4. 在莫拉克颱風前後期的獻肚山橫剖面高程變異分析中，藉由各橫剖面的地型高程變化，可了解到獻肚山崩塌時土石主要的移動方向，大量的土石沿獻肚山兩條主要的坑溝崩落，並淤積在旗山溪河道，推測坑溝A底部於旗山溪的位置為堰塞湖形成的地點。
5. 由莫拉克颱風前後期旗山溪剖面高程變異分析中，觀察河道深槽與小林里之相對位置，探討旗山溪與小林里災害之間的關係，旗山溪於莫拉克颱風後高程變高，河道呈現淤積的狀態，且河道位置更接近小林里原本的所在位置，河道的變化跡證，亦為小林里災害的原因之一。
6. 本研究中主要以航空照片搭配erdas imagine的LPS模組軟體製作的DTM與正射影像來進行探討，藉由災害前後時期的影像來進行分析。災後並無絕對適當的工具及精度要求，應以時間為主要考量，故以最易取得資料進行評估切提供災後速報為原則，本研究亦提供一分析方法供讀者選擇。

誌 謝

本研究承蒙國科會 NSC-99-2625-M-005-007-MY3 計劃補助，僅致謝忱。

參考文獻

- [1] 行政院農業委員會林務局農林航空測量所，網址：<http://www.afasi.gov.tw/>。(Aerial Survey Office, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. Website: <http://www.afasi.gov.tw/>. (in Chinese))
- [2] 何維信 (1995)，「航空攝影測量學」，大中國圖書股份有限公司，台灣。(He, W.X. (1995). *Aerophotogrammetry*, Da Zhong Guo Book Co. Ltd., Taiwan. (in Chinese))
- [3] 陳俊仰 (2007)，「應用數值航空攝影測量於土石變異量空間分布之評估」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。(Chen, J.Y. (2007). *Assessment of Applying Digital Photogrammetry to Spatial Distribution of Debris Variation*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 陳樹群、吳俊鉉 (2009)，「高雄縣小林村獻肚山巨型深層崩塌引致之地形變遷特性」，中華水土保持學報，40(4)，359-376。(Chen, S.C., and Wu, C.H. (2009). "The Geomorphological Variation Triggered by Catastrophic Deep Landslide in Siaolin Village." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 40(4), 359-376. (in Chinese))
- [5] 馮正一 (2011)，「小林村堰塞壩潰壩時間點與潰壩洪峰歷程之震動訊號分析」，第14屆大地工程學術研討會。(Feng, Z.Y. (2011). "The dam-break time of Xiaolin landslide dam and the seismic signal analyze of dam-break flooding progress." *The 14th. Conference on Current Researches in Geotechnical Engineering in Taiwan*. (in Chinese))
- [6] 歐陽鍾裕 (1986)，「航空攝影測量學」，國立中興大學。(Ouyang, Z.Y. (1986). *Aerophotogrammetry*, National Chung Hsing University, Taiwan, (in Chinese))
- [7] 蕭國鑫、陳大科、劉進金、嚴科偉 (2010)，「空載光達於崩塌測計模式之應用」，國家災害防救科技中心，2010年成果資料：1-7-(1)。(Hsiao, K.H., Chen, D.K., Liu, J.K., and Yan, K.W. (2010). "Airborne LiDAR Data for Installing a Landslide Geomorphometric Model." *National Science and Technology Center for Disaster Reduction, Main effort in 2010*, 1-7-(1). (in Chinese))
- [8] Mark, D.M. (1984), "Automated detection of drainage networks from digital elevation models." *Carto-*

graphica Auto-Carto Six Selected Papers, 21(2-3), 168-178.

- [9] Miller, C.L. and Laflamme, R.A. (1985), "The digital terrain model-theory and application." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 24(3), 433-443.
- [10] Wolf, P.R. and Dewitt, B.A. (2000), *Elements of Photogrammetry (With Application GIS)*, 3rd edition.
-

2013年03月21日 收稿

2013年04月19日 修正

2013年08月12日 接受

(本文開放討論至2014年6月30日)