

第十五卷第一期
中華民國九十九年三月

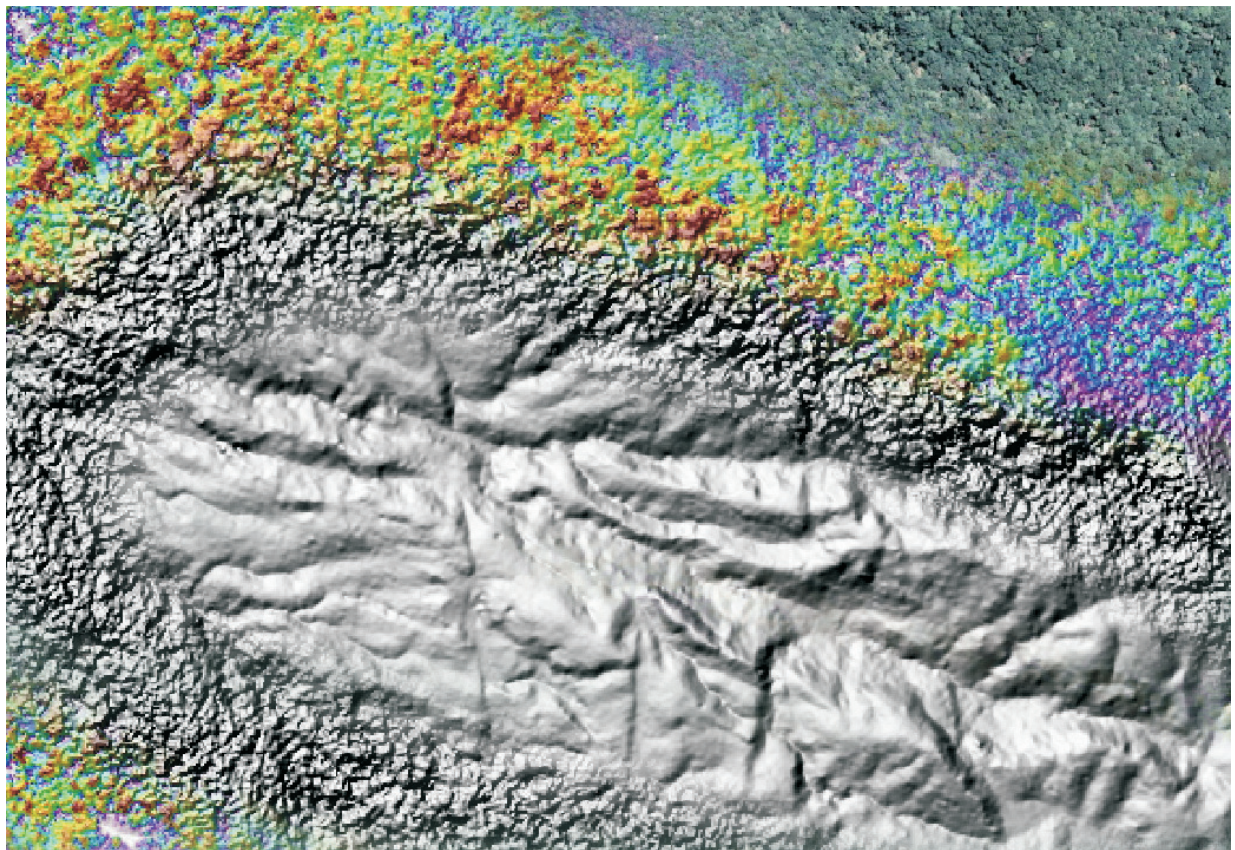
ISSN 1021-8661



航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版

災害防救專刊



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Special Issue on Natural Hazards

Volume 15 No.1

March 2010

Published by Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

航測及遙測學刊

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

發行人：王蜀嘉

出版者：中華民國航空測量及遙感探測學會

地址：台北市文山區羅斯福路五段 113 號三樓

信箱：台北市郵政 93-158 號信箱

電話：886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

傳真：886-2-2931-7225

電子信件：csprsmail@csprs.org.tw

網址：http://www.csprs.org.tw

PUBLISHER: S. C. Wang

PUBLISHED BY: Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Address: 3F, No.113, Sec.5, Roosevelt Road, Taipei, Taiwan

Mail Address: P. O. Box. 93-158, Taipei, Taiwan

Tel: 886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

Fax: 886-2-2931-7225

E-mail: csprsmail@csprs.org.tw

Web Site: http://www.csprs.org.tw

總編輯

曾義星

國立成功大學測量及空間資訊學系

電話：886-6-275-7575 分機 63835

傳真：886-6-237-5764

電子信件：jprssubmit@conf.ncku.edu.tw

EDITOR-IN-CHIEF

Yi-Hsing Tseng

Department of Geomatics, National Cheng Kung University

Tel: 886-6-275-7575 ext. 63835

Fax: 886-6-237-5764

E-Mail: jprssubmit@proj.ncku.edu.tw

編輯委員

◆ 農林

鄭祈全 (文化大學)

申雍 (中興大學)

◆ 海洋與大氣

劉振榮 (中央大學)

何宗儒 (台灣海洋大學)

◆ 防災

劉進金 (工業技術研究院)

徐百輝 (台灣大學)

◆ 土地利用與覆蓋

陳永寬 (台灣大學)

詹進發 (政治大學)

◆ 地理資訊系統

何維信 (政治大學)

蔡榮得 (中興大學)

◆ 遙感探測

陳良健 (中央大學)

陳錕山 (中央大學)

◆ 攝影測量與光達

廖揚清 (成功大學)

史天元 (交通大學)

趙鍵哲 (台灣大學)

EDITORIAL BOARD

◆ Agriculture and Forestry

C. C. Cheng (Chinese Culture University)

Y. Shen (National Chung Hsing University)

◆ Oceanography and Atmospheric Science

G. R. Liu (National Central University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

◆ Disaster Management

J. K. Liu (Industrial Technology Research Institute)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

◆ Land Cover and Land Use

Y. K. Chen (National Taiwan University)

J. F. Jan (National ChengChi University)

◆ Geographical Information System

W. H. Ho (National ChengChi University)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

◆ Remote Sensing

L. C. Chen (National Central University)

K. S. Chen (National Central University)

◆ Photogrammetry and LiDAR

Y. C. Liao (National Cheng Kung University)

T. Y. Shih (National Chiao Tung University)

J. J. Jaw (National Taiwan University)

封面圖片說明 About the Cover

空載光達技術以雷射高密度量測地面且可穿透森林，其反射回波初步分類為樹頂點與地面點，這些實測點經內插處理後，可得高準確度的數值高程模型。本圖以四個層次展示海岸山脈光達資料，展示區寬約 850 公尺，第一層為航照影像(右上角)，顯示本區茂密翠綠的樹木，第二層以色階顯示樹木的高度，由白色至棕色為 0 至 25 公尺，第三層為數值表面模型陰影圖，顯示樹頂表面起伏，第四層為去除樹木後的數值地面模型陰影圖，可清楚呈現隱藏的山谷地形與約南北向的地表破裂帶，由此可知空載光達技術對全面調查森林地區的地表地形與變形作用極為關鍵。

(封面圖片出處：詹瑜璋，中央研究院地球科學所；光達資料來源：中央地質調查所)

防災專刊編輯前言

Guest editor's preface to the special issue on **Natural Hazards**

劉進金

Jin-King Liu

工業技術研究院綠能與環境研究所正研究員

Email: jkliu@itri.org.tw

徐百輝

Pai-Hui Hsu

國立台灣大學土木工程學系助理教授

Email: hsuph@ntu.edu.tw

天然災害(Natural Hazards)的防救工作若是可為而不為，則看似天災，實為人禍。近年來因為全球變遷及暖化問題日漸加劇，造成全球的環境體系變弱，環境風險因而擴大，如何降低天災所造成的損失已成為人類永續發展的核心議題。地球觀測科技(Earth Observation Technology)進展的首要目的就是發揮其在防災、減災、抗災與避災等應用之社會效益。台灣因為地質破碎脆弱、地形陡峭、颱風豪雨與地震頻仍，環境與地形變動極為劇烈，天然災害的發生已是常態，所以必須採取長期可靠的防救措施。重大天然災害具有很強的因果災害鏈，防災與減災之效益遠大於救災，但是一旦災害發生，若不及時有效處理，很容易產生二次災害，以及衍生社會與經濟方面的問題，甚至於衍生政治問題。

臺灣近年來發生的重大天然災害包括賀伯颱風(1996)、集集大地震(1999)、桃芝颱風(2001)、納莉颱風(2001)、敏督利颱風(2004)與七二水災(2004)、卡玫基(2008)、以及八八水災(2009)等，航測及遙測技術已被廣泛應用在這些災害的防救工作以及學術研究上，中國四川大地震(2008)也廣泛應用最新的航測及遙測技術。緣此，航測及遙測學刊乃選擇天然災害防救為本期專刊之主題，彙整相關調查研究成果，以反映天然災害觀測、分析評估、預測、預防、與預警上的進展，作為防救災相關工作之參考。

本期專刊共收錄九篇論文，可以反應航測及遙測技術幾個主要的面向。這些應用有關的事件包括集集及汶川等地震災害，賀伯、桃芝、敏督利、莫拉克等颱風災害、以及七二水災、八八水災等災害事件。從資料面而言，各研究廣泛地應用多時期福衛2號(FS-2)及SPOT系列等衛星影像、航攝數位影像、空載及地面光達資料等，並輔以數值地形資料(Digital Terrain Models, DTM)及其他空間資料等，搭配地理資訊系統(GIS)為分析工具，以進行災害的辨認或災害地圖的製作。就技術面而言，張崑宗等人利用高解析衛星影像與地形資料所衍生之空間特徵，以提升衛星影像自動化暴雨型崩塌地之判釋精度。劉治中等人結合彩色航照與空載光達資料，藉由半自動化方式辨識崩塌地，並利用三維立體展示的人機操作介面，供人工判釋及編輯崩塌地邊界向量資料及屬性資料，提供後續之規劃參考用。黃韋凱等則利用物件導向式(Object Oriented)分析方法進行大範圍坡地與河川災害快速判釋，以改善像元式影像分析方法於分類時常有之雜訊問題。從應用面而言，葉堃生等提到關於緊急應變時，農林航空測量所如何進行數位影像的快速獲取、判釋分析及資訊分享，以提供各防救災相關單位在災害發生後能迅速掌握災害及災情資訊，為救災、減災以及災後重建提供了重要依據；尹孝元

等說明過去農委會水保局如何利用遙測科技進行國土變異監測，包括山坡地變異點分析、崩塌地監測、地變形監測、及歷年海岸線變遷等應用。蕭國鑫等人利用地面三維雷射掃描儀，針對颱風前後河道地區進行三維雷射掃描，除製作高解析的高程地形外，並量化颱風前、後之崩塌土石變化。董家鈞等人則利用衛星影像進行堰塞湖判釋，並結合數值地形模型資料，配合可快速進行空間計算之地理資訊系統系統，提出一套堰塞湖形成初期之快速分析與評估程序，以提供相關單位研擬堰塞湖之防、減災策略。壽克堅等人利用衛星影像快速對大範圍地區進行崩塌地調查，並據以分析 1999 集集地震後之崩塌行為。陳桂嘉等人則結合衛星影像判釋結果及相關環境因子，發展土砂災害集水區的生態環境脆弱程度評估模式，此研究成果將有助於未來進行崩塌地復育整治工程時之考量依據。

在研究對象上，可以發現大部分的研究論文皆跟崩塌與土砂災害判釋有關，顯示在台灣因為地震與颱風、豪雨所誘發的坡地災害是大家最關注的，而評估災害對環境所造成的影響也逐漸受到重視。而在影像自動判釋及分析技巧上，大部分論文使用的是逐像元的分類方法(Pixel-Based Classification)，其中壽克堅、黃韋凱、陳桂嘉、尹孝元、張崑宗、劉治中、葉堃生等皆提出以 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 指標做為崩塌地或土砂之判釋依據，顯見多光譜遙測影像的紅外線資訊於災害判釋中扮演極為重要之角色；此外，數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)、數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)等空間資料亦被廣泛用來提升崩塌地之判釋正確性及萃取災害資訊等。而張崑宗等則進一步比較了最大似然法、倒傳遞類神經網路法，及支持向量機等分類方法之優劣。黃韋凱等則採用物件導向分類方法，搭配各種地形地物特徵，以獲取更完整之崩塌地資訊。

雖然航遙測技術在天然災害的「實用性」，遠超過其「學術性」，但是從災害新案例的探討到分析方法的創新，處處都可以有新的發現，亦有其學術上的意義。展望未來，所謂「預防重於治療」，天然災害常見的種類除本專刊所及之地震堰塞湖與豪雨山崩外，尚有火山、地層下陷、洪水氾濫、生態逆境、活斷層、侵蝕、地滑、與土石流等等，其預防的起點在於清點、找出發生的控制因素、以及分析評估未來復發的潛感性等，有待更多更深入的研究。尤其，在緊急救災上，航遙測技術也應該扮演很重要的角色。

遙測影像與數值地形模型於堰塞湖災害評估之應用

董家鈞^{1*} 劉說安² 張立雨³ 李錫堤⁴ 廖志中⁵ 潘以文⁵

摘要

堰塞湖一旦形成後，衍生災害可概分兩類：第一類為上游迴水淹沒、第二類為潰壩造成下游夾砂水流或洪水災害。遙測技術對於這兩類災害快速評估工作之推動可扮演相當關鍵的角色。本研究整合衛星影像以及數值地形模型，配合可快速進行空間計算之 GIS 系統，提出一套堰塞湖形成初期之快速分析與評估程序。流程包括：(1)及時取得足夠清晰之衛星影像，判釋堰塞湖位置；(2)配合數值地形模型獲得天然壩之幾何資訊(壩頂高程、壩長、壩寬、壩高)以及上游集水面積；(3)根據數值地形資料繪製水位高程-湖水體積圖，並利用多期衛星影像搭配數值地形模型進行堰塞湖水位高程監測；(4)估計淨入流流量、溢流時間以及上游淹沒範圍與時間之關係；(5)利用地形指標或統計模型以評估天然壩之穩定性。本文以汶川地震於北川形成之唐家山堰塞湖為例，說明如何利用福衛二號影像以及 SRTM 數值地形資料於第一時間提供堰塞湖防、救災工作推動所需之重要資訊。本研究重要結論包括：(1)地震或極端降雨後，應於可能的最短時間內，取得影像解析度至少能描繪天然壩堆積邊界之清晰衛星影像；(2)評估所需之 DEM 精度以 5 公尺為佳；(3)堰塞湖水位高程研判應以堰塞湖水陸交界找尋多點進行高程平均，以提高湖水水位高程研判之準確度；(4)堰塞湖後期流量推估對水位高程估計較敏感，因此欲根據遙測影像及 DEM 進行水位高程監測以及淹沒範圍預測，應注意 DEM 水平位置及高程誤差可能造成之影響。

關鍵詞：天然壩、水位監測、溢頂破壞、壩體穩定性

1. 概論

堰塞湖一旦形成後，衍生災害可概分兩類：第一類為上游迴水淹沒、第二類為潰壩造成下游夾砂水流或洪水災害(Korup, 2005)。根據文獻資料(Costa and Schuster, 1988)顯示，約 60%的天然壩會在形成後一個月內潰決。因此，如何在短時間內研擬堰塞湖防、減災策略，是一件艱鉅的任務(經濟部水利署水利規劃試驗所，2002)。

第一類災害必須儘可能在第一時間估計壩頂高，然後即可依地形圖劃設淹沒區。若能概估流量，則亦能推估時間與淹沒範圍之關係，評估技術上並不複雜。然而，堰塞湖形成後人員以及機具設備之

運送均受到極大之限制，因此，如何快速估計流量以及推估時間與淹沒範圍間之關係，仍有其困難性。因迴水上昇速度通常相當快(特別是豪雨誘發山崩形成之堰塞湖)，再加上天然壩潰決超過九成都是溢頂破壞(Schuster, 1995)，所以天然壩形成後湖水水位變化之即時監控，並間接推估入流量，即顯得相當重要。

第二類災害必須儘可能在第一時間研判堰塞湖天然壩之穩定性，以及天然壩若一旦破壞，下游可能之淹沒範圍。因下游通常人口較上游密集，故這類災害受到之關注與重視遠超過第一類。舉例而言，1933 四川地震疊溪堰塞湖天然壩(山崩體積 4650 萬立方公尺)潰決時(形成後 45 天潰決)，曾造成下游約 2500 人死亡(柴賀軍、等，1995)，以當

¹ 國立中央大學應用地質研究所 副教授

² 國立中央大學太空及遙測研究中心 特聘教授兼主任

³ 國立中央大學太空及遙測研究中心 助理研究工程師

⁴ 國立中央大學應用地質研究所 教授

⁵ 國立交通大學土木工程學系暨防災工程研究中心 教授

*通訊作者，電話：886-3-4224114, E-mail: jjdong@geo.ncu.edu.tw

收到日期：民國 99 年 03 月 30 日

修改日期：民國 99 年 05 月 01 日

接受日期：民國 99 年 05 月 06 日

時對照現今之人口以及土地利用密度，不難想像大型天然壩潰決有多可怕。

天然壩之穩定性評估以及一旦潰決後對下游之影響分析，分析工具以及分析技術上問題也不大，因為以人工建造之土石壩，於規劃、設計乃至營運各階段，均需經過嚴謹的穩定性與潰決後影響範圍劃定評估。天然壩穩定性與潰壩後對下游影響之分析，概念上與人工土石壩是類似的。但是，天然壩相關分析的困難在於天然壩通常潰決得很快，再加上天然壩組成材料力學與水力特性不像人工土石壩可以掌握，而且難以於短時間內進行調查或實驗獲得。因此，快速判斷堰塞湖天然壩的穩定性以及萬一潰決下游可能受影響之範圍，成為相當具有挑戰性之工作。

山崩材料堵塞河道形成堰塞湖之控制因素包括：天然壩之壩高、壩體積、集水區面積、山崩速度、被阻塞之河道寬、湖體積、堵塞點至上游頂之高程差等等 (Swanson *et al.*, 1986 ; Costa and Schuster, 1988 ; Casagli and Ermini, 1999 ; Korup, 2004)。其中壩體積直接代表壩的大小，集水區面積則與河道流量及河谷寬有高度相關 (Casagli and Ermini, 1999)。Ermini and Casagli (2003) 以及 Korup (2004) 都曾利用不同的堰塞湖資料庫，經由地形分析取得控制壩體穩定性的重要地形以及水文參數，並提出數個簡單的對數關係式，從地形以及水文參數之雙對數圖上劃分出穩定、不確定及不穩定區域。關於堰塞湖天然壩穩定性快速評估方法，最常被引用的是依據全球 84 個堰塞湖案例分析而得的 DBI 指標 (Ermini and Casagli, 2003)：

$$DBI = \log \frac{A \cdot H}{V} \quad (1)$$

其中 A , H , V 分別為集水面積、壩高與壩體積，DBI 指標大於 3.08 為不穩定之天然壩，小於 2.75 為穩定。也就是說，壩體積愈大天然壩愈穩定，但集水面積與壩高愈大天然壩愈不穩定。Dong *et al.* (2009) 利用 43 個日本案例，採統計方法建立天然壩穩定度之判別函數式：

$$D_s = -2.621 \log(A) - 4.67 \log(H) + 4.571 \log(W) + 2.67 \log(L) + 8.26 \quad (2)$$

其中 A , H , W , L 分別為集水面積、壩高、壩長(沿河方向)與壩寬(跨河方向)，根據判別分析之標準化係數大小，影響天然壩穩定性之重要參數，依序分別為溪流之尖峰流量(與壩穩定呈負相關)、壩高(與壩穩定呈負相關)、壩寬與壩長(均與壩穩定呈正相關)。此一模式交叉驗證之正確率為 86%，相較於 DBI 指標約有 25% 之案例無法正確判斷，判別分析之模型對於研判壩體穩定性之正確性略有提昇。

然而，不論是哪一種天然壩穩定性快速評估方法，通常需要立刻掌握與堰塞湖有關之地形與水文特性，特別是壩體幾何形狀。另外，如前所述，上游迴水監控亦是刻不容緩。因此，如何充分運用遙測影像、地形資料以及 GIS 快速空間計算分析之能力，即成為關鍵課題。

同樣重要的，為能建立快速穩定性分析之統計模型，需要大量堰塞湖資料庫。然而，目前建立統計模型最大的問題，便是堰塞湖案例不足 (Dong *et al.*, 2009)。隨著遙測技術之快速進步與普及，預期堰塞湖案例數將持續且快速增加。因此，如何有效利用遙測技術，協助建立完整之堰塞湖資料庫即益形重要。以汶川地震為例，根據福衛二號影像配合 Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 產製之地形資料，於 GIS 系統架構下分析結果，提供了中國北川唐家山堰塞湖形成與發展過程許多重要資訊 (Liou *et al.*, 2010)。相關研究充分說明遙測技術於堰塞湖災害防治工作的重要性日趨增加。本研究提出利用遙測技術建立取得堰塞湖上游迴水及天然壩穩定性快速評估所需資料的流程，並以 2008 年汶川地震形成之唐家山堰塞湖為例，說明遙測影像、地形資料以及 GIS 系統整合應用，如何能於堰塞湖防、減災扮演積極且重要的角色。

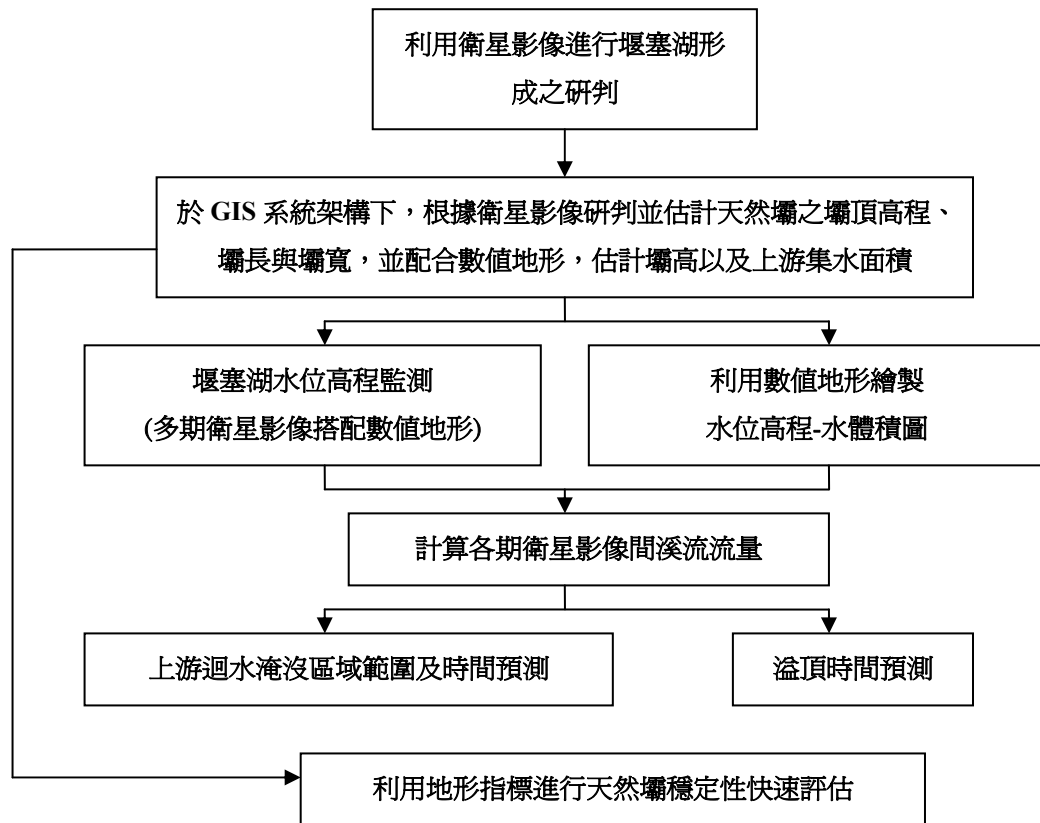


圖 1 堰塞湖形成後與遙測技術有關之快速分析與評估建議程序

2. 堰塞湖防、減災工作與遙測技術

本研究基於整合衛星影像以及數值地形模型 (Digital Elevation Model, DEM), 配合可快速進行空間計算之 GIS 系統, 提出一套堰塞湖形成初期之快速分析與評估程序。與堰塞湖災害相關之防、救災單位, 應於地震或極端降雨後, 利用可及時取得足夠清晰之衛星影像, 判釋堰塞湖位置; 其次應搭配 DEM 獲得天然壩之壩頂高程、壩長與壩寬, 並估計壩高以及上游集水面積; 接著即可根據 DEM 資料繪製水位高程-湖水體積圖, 並利用多期衛星影像搭配 DEM 進行堰塞湖水位高程監測, 以估計淨入流流量, 根據淨入流流量以及水位高程-湖水體積圖, 即可用來估計可能溢流時間以及上游淹沒範圍與時間之關係; 最後, 根據估計自衛星影像與 DEM 之壩體與堰塞湖相關地文及水文參數, 利用地形指標或統計模型以評估天然壩之穩定性。以上關於堰塞湖形成後與遙測技術有關之快速評估程

序, 整理如圖 1。以下各小節將分別說明各項分析評估工作之具體方法。

2.1 堰塞湖形成之快速研判

因大部分堰塞湖形成於人煙罕至的崇山峻嶺間, 因此, 遙測影像對於早期判釋堰塞湖之形成與其位置常扮演重要角色。當規模較大地震或豪雨過後, 可由專業人員利用災區遮蔽較少的衛星影像, 確認堰塞湖天然壩之位置。對於堰塞湖防、減災策略研擬工作推動而言, 此一工作最好能在取得可辨識影像後幾個小時內完成, 因此, 專業人力配置與工作效率相當重要。

2.2 堰塞湖天然壩上游水位監測與分析

此一工作重要性分兩個面向: (a) 上游迴水淹沒區域範圍及時間預測; (b) 溢頂時間預測。概念上這兩件事都很單純, 只要能掌握溪流入流量及堰塞湖容積, 這兩件工作就能得到很精準的預測。但是,

如前所述，天然壩位置通常位處深山，壩體上游通常未設置水文站，若專業人力也無法及時到達，這兩件工作就會面臨困難。

遙測影像搭配地形資料以及 GIS 系統，進行空間資訊計算，可作為流量快速估計的參考。以下提出建議步驟：

- (1) 快速研判壩頂高程：理論上根據衛星影像天然壩範圍圈繪搭配 DEM，應可快速決定壩高。然而，因天然壩之壩頂面通常不是一個平面，故壩頂高程研判仍須有一些技巧。建議根據衛星影像以及最快能取得最高精度的 DEM，分別找到天然壩堆積河道兩岸邊界高程之最大值，然後以兩者中較小者當作壩頂高程。若有任何精度更高的壩頂高程資料獲得時，應即刻以該壩頂高程替換。
- (2) 決定每上昇單位高度所需之水體積：計算方法可以單位高度上下高程所圍面積平均值乘上單位高度，單位高度視 DEM 精度而定，以台灣而言，建議至少 5 公尺進行一筆分析，直至高程超過壩頂高程數個單位高度為止(視壩頂高程不確定性而定)。分析成果應即刻繪製水位高程-水體積圖(圖 2a)，以作為下一步分析之參考。
- (3) 決定堰塞湖水位高程：此一工作應該儘可能地使用多期衛星影像進行分析，為增加水位高程研判之精度，建議可由衛星影像判斷出之湖水與陸地邊界，搭配 DEM 找到多筆水陸邊界高程，然後利用 GIS 進行水陸邊界高程平均，藉此獲得水位高程。同樣的，若有任何時期精度更高的水位高程資料獲得時，應隨時進行比對、檢核以及進行必要之修正。
- (4) 計算各期衛星影像間溪流流量：由步驟(3)可得到兩期衛星影像間不同湖水高程，再根據步驟(2)所繪製之水位高程-水體積圖(圖 2a)，可得到兩期衛星影像間(時間間隔 ΔT)溪流“淨入流體積 ΔV ”(入流體積扣除流出體積；即為流入堰塞湖湖區之水體積)。淨入流體積除以影像時間之間隔，即可獲得影像間隔期間平均淨

入流之流量 $\Delta Q = \Delta V / \Delta T$ 。此一工作應根據最新取得衛星影像持續進行分析。值得注意的是，此一方法不能完全取代水文分析，在可能的情況下，此一分析結果應於水文分析完成後立即進行相互比對。

- (5) 預測水位上昇速度以及淹沒範圍：每幅最新衛星影像產出後，經過分析即可獲得前一時期淨入流之流量，根據此一最新淨入流量，即可由步驟(2)所繪製之水位高程-水體積圖，及時推估未來時間-水位高程預測圖(圖 2b)，以作為溢頂時間研判之依據。同時，透過 GIS 系統，亦可及時評估與呈現預測之某一未來時間可能之淹沒範圍，以作為上游迴水淹沒區防、減災工作推動之參酌。舉例而言，根據此一預測成果，上游淹沒區道路系統遭淹沒而中斷之時間即可準確評估。值得注意的是，因為上游入流量受很多因素控制(如降雨)，出流量(如由壩體滲流出之湖水)亦受湖水水位高度控制，淨入流流量顯然通常並非固定值。因此，隨新的衛星影像取得，應不斷重新進行預測。也就是說，步驟(3)-(5)應自堰塞湖形成後持續進行，建議分析工作應持續至潰壩或評估天然壩屬於穩定後方停止。當有特殊情況(如突然降雨或雨量明顯變化)時，縮短分析時間之間隔有其必要性。

2.3 堰塞湖天然壩幾何形狀以及集水區地文參數取得

如前所述，天然壩穩定性快速評估需要天然壩幾何形狀以及集水區地文、水文參數，因此，針對災害風險性較高的堰塞湖而言，如何快速取得評估所需參數亦相當重要且急迫。除此之外，為建立堰塞湖資料庫，縱使相對災害風險較小的堰塞湖，亦值得透過遙測技術，設法取得堰塞湖天然壩重要特性參數。堰塞湖天然壩形成後應取得相關參數如表 1，天然壩體、堰塞湖以及山崩幾何特性有關之參數定義詳圖 3。

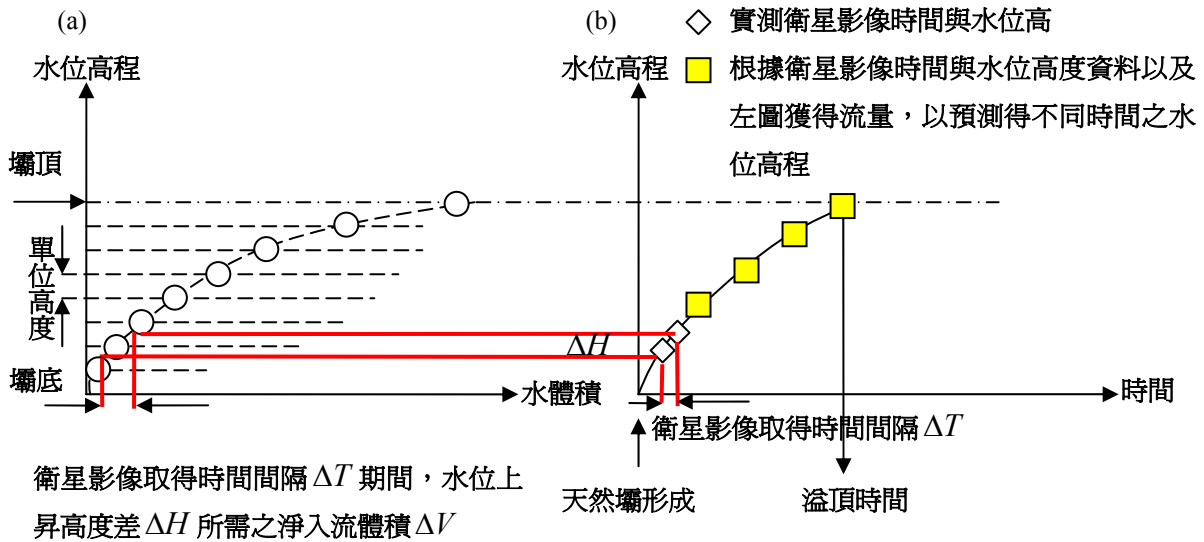


圖 2 堰塞湖水位監測、溢頂時間以及淹沒範圍推估方法示意圖。(a)根據數值地形於 GIS 系統架構下分析獲得之水位-水體積圖；(b)水位高程-時間預測圖

表 1 堰塞湖與天然壩重要參數與定義(經濟部水利署水利規劃試驗所，2002)

欄位名稱	說明
流域面積	堰塞湖堵塞河川上游之集水面積
平均流量	堰塞湖壩體處平均流量
尖峰流量	堰塞湖壩體處尖峰流量
上游坡降	堰塞湖壩體處上游側 500~1000 公尺之平均坡度
下游坡降	堰塞湖壩體處下游側 500~1000 公尺之平均坡度
地質	崩落滑移體所在地層之地質狀況
成因	堰塞湖形成原因
山崩面積	形成堰塞湖之山崩區域之面積
移動土塊量	崩落滑移體積
水平距離	山崩區域中高程最高點至河床之水平距離
比高	山崩區域中高程最高點至河床之垂直距離
壩高	堰塞湖天然壩壩高，由河床底面起算，至壩身溢流最低點之高差
壩寬	堰塞湖天然壩壩寬，垂直河流主軸方向
壩長	堰塞湖天然壩壩長，平行河流主軸方向
壩體體積	堰塞湖天然壩壩體之體積，若無實測資料時以 $(0.5 \times \text{壩長} \times \text{壩寬} \times \text{壩高})$ 概估之
湖水高	堰塞湖水位高度
湖面積	堰塞湖面積
湖容量	堰塞湖容量
壽命	堰塞湖之破壞時間

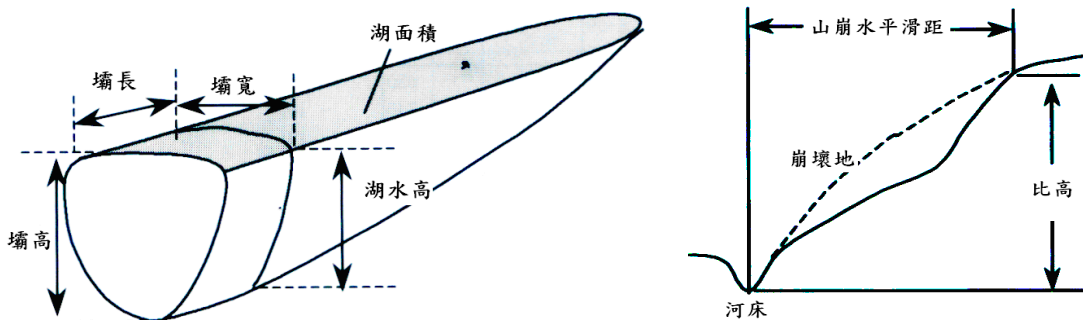


圖 3 天然壩體、堰塞湖以及山崩幾何特性相關參數定義示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2002)

表 1 中，除了流量與山崩體積不易直接根據遙測影像、地形資料以及於 GIS 系統架構下分析獲得以外，其它參數理論上均應能於獲得處理好的遙測影像資料後，於很短的時間(數小時)內完成初步分析。關於流量，若無急迫性，應透過水文分析獲得，然若無任何水文分析資料可資運用之條件下，建議仍可提供根據 2.2 節步驟(4)所獲得之流量分析結果，並註明流量資料取得方法。關於山崩體積，則需要推估山崩平均厚度方能計算，較理想之情況是能取得災前後之高精度 DEM。關於天然壩體積以及幾何形狀參數，藉由衛星影像以及 DEM 可概略估計，對於快速壩體穩定性分析精度或尚稱足夠。然而，對於後續詳細穩定性或潰壩分析而言，精度可能仍有所不足。因此，對於災害風險高之堰塞湖，應設法於天然壩形成後儘快取得高精度之 DEM，空載雷射掃瞄即為一種非常有用且重要的方法。

值得注意的是，根據 Schuster and Costa (1986) 所統計世界各國之 135 個堰塞湖案例中，有 46% 因暴風雨與溶雪造成之山崩所形成，有 38% 則為地震觸發山崩造成，若為暴風雨期間造成之堰塞湖，因雲層遮蔽問題，可資利用之影像較侷限，相對而言，地震期間形成之堰塞湖，遙測影像取得限制則較小。除此之外，因極端降雨誘發山崩而形成之天然壩，若溢流與潰壩時間過短(如莫拉克颱風小林村天然壩由形成到潰決僅約一小時；李錫堤、等，2009)，本研究建議之快速評估方法，就防災工作推動時效性角度而言，仍有其侷限性。

3. 堰塞湖災害快速評估與遙測技術-以唐家山堰塞湖為例

3.1 汶川地震與堰塞湖

2008 年 5 月 12 日，規模 M_s 為 8.0 之汶川地震誘發大量的山崩(Cui *et al.*, 2009)，部份崩落土石阻斷河流形成堰塞湖。根據 Cui *et al.* (2009) 之調查顯示，汶川地震共形成 257 個堰塞湖，其中位於北川縣的唐家山堰塞湖最大。北川縣唐家山堰塞湖，

為岷江上游北川縣城附近四個堰塞湖之一，因河流右岸崩塌堵塞河道而形成，此一地震誘發山崩所形成之天然壩之壩體長 800 公尺、寬 612 公尺、高 80~120 公尺，壩體積約 2037 萬立方公尺，估算最大可蓄水量約 3.0 億立方公尺。根據媒體報導(新華網，2008a)，5 月 18 日下午 4:00，堰塞湖湖水體積估計為 3000 萬立方公尺。5 月 20 日下午北川開始降雨，至 21 日中午雨停為止，堰塞湖湖水體積已達 8000 萬立方公尺(和訊新聞，2008)。另外，根據新浪網(2008)報導，中國水利部專家估計近期(報導日期為 5 月 20 日)唐家山堰塞湖水位每天上漲約 2.9 公尺。而 22 日至 23 日水位則上漲 2.6 公尺，至 5 月 23 日為止，唐家山堰塞湖蓄水量約 1 億立方公尺(新華網，2008b)。

3.2 唐家山堰塞湖-福衛影像判釋

汶川地震過後，國立中央大學遙測中心立即取得多幅清楚的福衛二號影像，清楚紀錄北川唐家山堰塞湖的形成與發展過程。圖 4 左側為 2008 年 5 月 15 日福衛二號影像，圖中清楚標示出北川縣唐家山堰塞湖以及天然壩位置，而北川縣城就在此一堰塞湖之下游(東側)。若天然壩潰決直接受影響地區人口估計總數達 1.4 萬人，下游潛在受影響人口更超過百萬人(Xu *et al.*, 2009)。圖 4 右下方為經三維視覺模擬(觀察方向由北往南)之福衛影像(2008 年 5 月 15 日)，山崩裸露區以及恰位於河道轉彎處之天然壩清晰可辨，由照片判斷堰塞湖尚未發生溢流。

圖 5 為綜合汶川地震兩年前(2006 年 5 月 14 日)、地震發生 2 天(2008 年 5 月 14 日)、6 天(2008 年 5 月 18 日)以及 10 天(2008 年 5 月 22 日)後，位於天然壩上游約 5.6 公里漩坪村附近之福衛影像與其三維視覺模擬結果，由影像分析可獲知漩坪地區(河道轉彎之河階地)河寬從地震前約 100 公尺，於地震 2 天後成為 300 公尺，地震 6 天後成為 520 公尺，到了地震後的 10 天，河面寬已迅速擴增至約 570 公尺。由圖 5 可清楚看見，地震過後短短的兩天，原跨越河流的橋與聯絡道路已遭迴水淹沒，而漩坪村亦已被淹沒了一大半。到了第 6 天，漩坪村已完全被淹沒了(林銘郎、等，2008)。

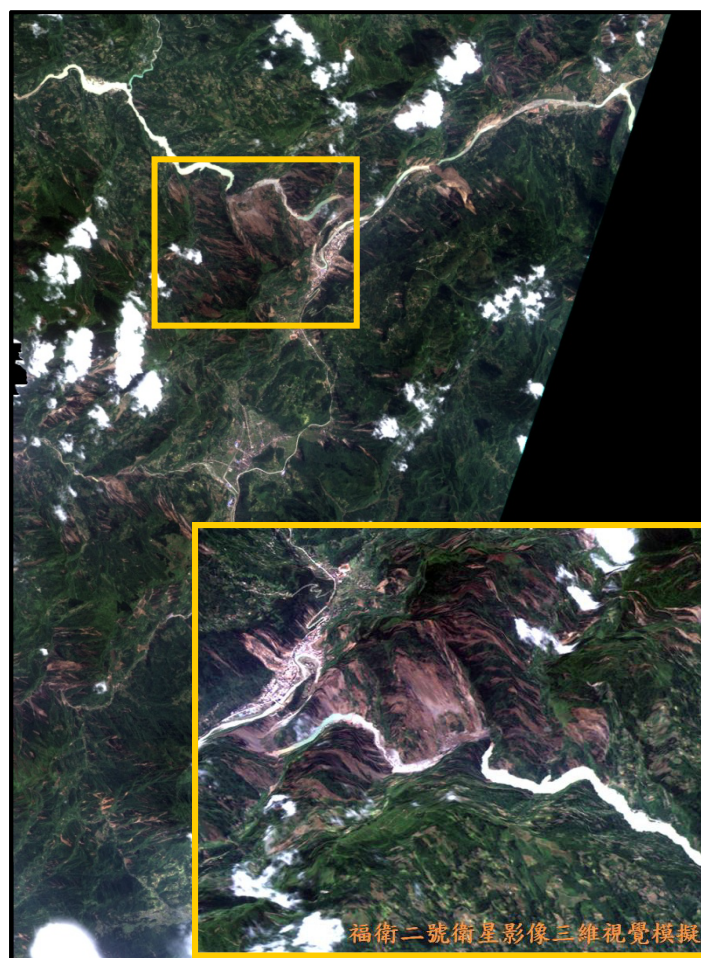


圖 4 由福衛二號影像判釋唐家山堰塞湖天然壩位置，三維視覺模擬方向由北往南

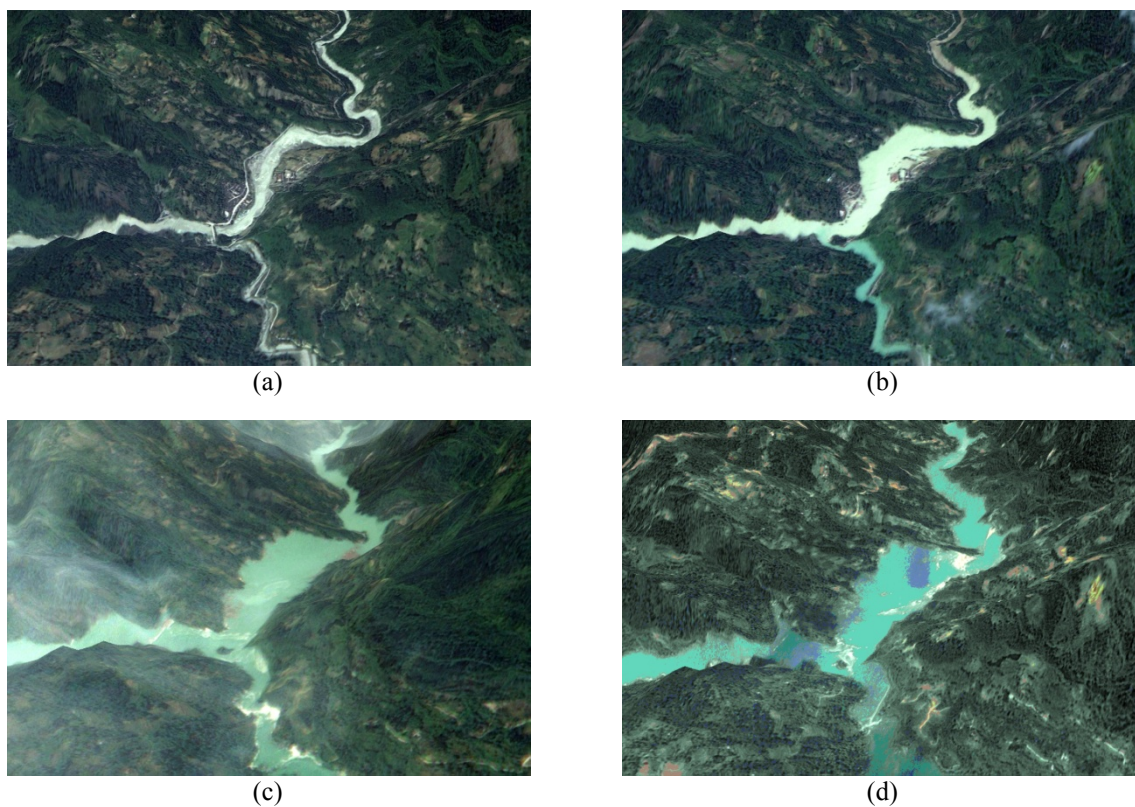


圖 5 福衛二號衛星立體模擬影像唐家山堰塞湖於漩坪村之湖水面上升之發展情形
影像日期(a) 2006/5/14 ; (b) 2008/5/14 ; (c) 2008/5/18 ; (d) 2008/5/22 (Liou *et al.*, 2010)

3.3 水位監控與水位高程變化預測-遙測影像與 DEM 之應用

根據福衛二號影像配合 SRTM 地形資料, Liou *et al.* (2010) 計算出漩坪地區汶川地震前(2006 年 5 月 14 日, 圖 5a)河道原始水位為 677 公尺, 於堰塞湖天然壩形成後兩天內(2008 年 5 月 14 日, 圖 5b), 水位上升至 687 公尺, 接下來的四天(2008 年 5 月 18 日, 圖 5c)水位上升至 702 公尺(上升了約 15 公尺), 平均迴水水位上升速率約 4m/day, 到了第十天, 水位高程已升至 725 公尺(2008 年 5 月 22 日, 圖 5d), 也就是從第六天至第十天水位上升了 22 公尺, 顯示淨入流量略微增加, 其原因應與 5 月 21 日至 22 日的降雨有關。

這個快速計算而獲得之水位上升速率, 與前述中國媒體報導水利部專家估計再接下來的兩天唐家山堰塞湖水位每天上漲約 2.9 公尺相比較, 顯見福衛二號影像配合 SRTM 地形資料對於堰塞湖水位上升快速的估算結果相當合理。因堰塞湖一形成, 上游迴水衍生之災害需要立即評估, 並隨即開始進行搶救災工作, 而迴水淹沒範圍、迴水上升速率以及聯絡道路之通暢程度, 是上游迴水災害防救最重要的資訊。另外, 如前所述溢頂時間研判對防、救災亦相當重要。以下即以唐家山堰塞湖為例, 說明如何利用遙測技術進行上游迴水範圍以及溢頂時間定量評估。

利用 SRTM 地形資料, 根據每固定高度間隔上、下所圍面積平均值乘上高度, 即可累加獲得水位高程-水體積圖, 如圖 6a 所示。唐家山天然壩位置原河道高程為 664.7 公尺、壩頂高程為 752.2 公尺(Xu *et al.*, 2009), 圖 6a 計算所得之唐家山堰塞湖滿水位湖容積為 3 億立方公尺, 與 Xu *et al.* (2009) 報導之湖容積相當接近。

根據前述 5 月 14 日之水位高程計算, 地震後前兩日(5 月 12 日至 5 月 14 日)平均淨入流量約為 81 CMS, 至於 5 月 14 日至 5 月 18 日間流量則為 72 CMS。Yin *et al.* (2009) 報導四川地區 Xiaojiahe 堰塞湖(集水面積 159.8 平方公里)五月份常時流量

為 4 CMS, 若以唐家山堰塞湖集水面積 3550 平方公里推估, 則其常時流量約 88.9 CMS, 顯示利用遙測影像搭配 DEM 判斷湖水位高並推估流量尚稱合理。

由堰塞湖蓄水區地形特性研判, 隨水位上昇, DEM 之誤差, 對流量估計不確定性之影響將增加。也就是說, 堰塞湖後期流量推估對水位高程估計較敏感。因此欲根據遙測影像及 DEM 進行水位高程監測以及淹沒範圍預測, 應注意 DEM 水平位置及高程誤差可能造成之影響。SRTM 原始資料之平面解析度為 90 公尺, SRTM 在歐亞大陸區域之高程絕對誤差約 8.8m(Best of 90%)(Rodríguez *et al.*, 2006), 為減少 DEM 誤差對計算所生之影響, 本研究利用漩坪地區 2008 年 5 月 22 日影像, 挑選水陸邊界 273 筆資料進行統計, 得到之平均湖水面高程為 718.38 公尺。此一結果與 Liou *et al.* (2010) 計算出漩坪地區 2008 年 5 月 22 日水位高程為 725 公尺相差約 7 公尺, 若根據水位高程 725 公尺計算, 5 月 18 日至 5 月 22 日間淨入流量為 243 CMS。若根據平均湖水面高程 718.38 公尺計算, 5 月 18 日至 5 月 22 日間淨入流量則為 145 CMS, 兩者間流量估計差約為 44%。與 5 月 18 日前評估之流量比較, 5 月 18 日至 5 月 22 日間計算所得流量增加, 應與 5 月 21 日至 5 月 22 日間該地區之降雨有關。

因溪流流量將明顯受到降雨影響, 因此欲利用水位高程監測結果預測不同時間點之淹沒區範圍, 或是預測溢頂時間, 持續利用最新影像資料更新入流量進行預測相當重要。舉例而言, 根據 5 月 18 日至 5 月 22 日間推估之流量 145 CMS(平均湖水面高程 718.38 公尺計算), 可估計溢頂時間為 6 月 8 日(圖 6b), 然而, Xu *et al.* (2009) 報導, 6 月 7 日水位高程為 740.4 公尺, 此一結果與水位到達 740 高程之預測時間 6 月 2 日產生有 5 天的誤差量, 此一誤差可能來自 5 月 18 日至 5 月 22 日間推估流量(反應的是降雨期間之流量)無法代表 5 月 22 日後之流量。也就是說, 5 月 22 日之後流量可能不到 145 CMS, 因此, 根據 5 月 18 日至 5 月 22 日間流量以估計溢頂時間, 將得到偏早的結果。

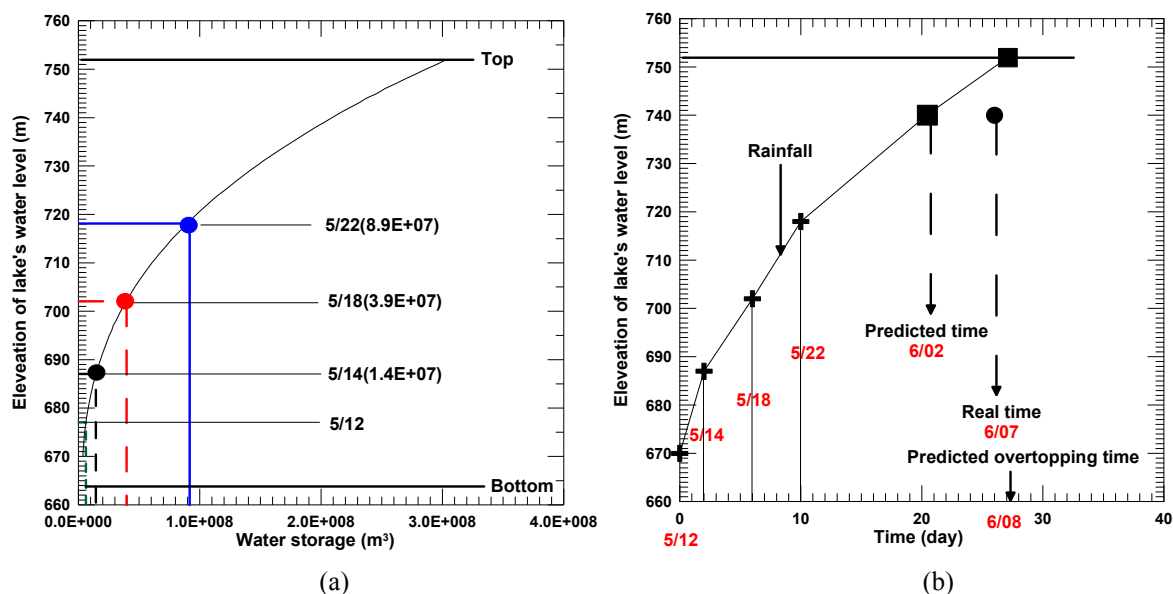


圖 6 (a)唐家山堰塞湖水位高程-水體積圖；(b)溢頂時間以及淹沒區範圍推估

表 2 唐家山堰塞湖壩體穩定性評估(根據遙測影像提供資料與詳細調查資料)使用參數

參數	林銘郎、等(2008)快速評估獲得之參數與評估結果		Cui <i>et al.</i> (2009)詳細調查獲得之參數與評估結果	
	集水面積 (km ²)	3550	3550	
壩高 (m)	50		80 (最低處)	120 (最高處)
壩寬 (m)	100		612	
壩長 (m)	1000		800	
壩體積 (10 ⁶ m ³)	5.00		20.37	
穩定性快速評估	DBI (式(1))	4.55	4.24	
統計模型	D_s (式(2))	-5.64	-5.39	

3.4 堰塞湖天然壩穩定性快速評估

如前所述，1933 年四川迭溪堰塞湖於形成後 45 天潰決，造成 2500 人死亡。因此，除了上游迴水引致之災害外，更受到重視的問題是堰塞湖天然壩是否會潰決、何時會潰決以及潰決可能對下游產生之影響。雖然堰塞湖天然壩之潰決模式有三大類(溢頂破壞、滲流與溯源破壞、邊坡破壞)，然而，絕大多數的破壞與堰塞湖水位超過天然壩之壩頂溢流冲刷所引發。因此，前述以遙測技術快速掌握湖水面高度變化，對潰壩與否之評估亦相當關鍵。然而，本論文僅將著重於討論遙測技術對壩體本身穩定性快速評估之可能貢獻，潰壩以及下游淹沒潛勢快速評估仍有待未來進一步深入研究。

欲快速評估天然壩穩定性，可考慮採用 Ermini and Casagli (2003)提出之無因次阻塞指標 DBI(式(1))進行分析(DBI<2.75 穩定；DBI>3.08 不穩定)。然而，遙測技術是否能快速提供壩體穩定性評估所需資訊呢？

壩體穩定性評估所需資訊中，集水面積可由衛星影像確定天然壩位置，然後利用 DEM 快速且正確的計算而得(唐家山堰塞湖集水面積 3550 平方公里)。另外，壩幾何形狀亦可根據衛星影像及 DEM 推估。根據福衛影像於短時間進行快速計算結果，唐家山堰塞湖天然壩之壩長(沿河道方向)約 1000 公尺、平均壩寬約 100 公尺(林銘郎、等，2008)，至於壩高之估計需要較高精度之 DEM，因本研究無法取得四川唐家山堰塞湖附近較高精度之 DEM，

SRTM 地形資料精度計算壩高誤差將較大。林銘郎、等(2008)根據漩坪村與壩距離(約 5.6 公里),假設河流坡降 0.5%,若漩坪村水位上漲 25 公尺,則壩高至少 53 公尺,若壩高以 50 公尺計算,則壩體積為 500 萬立方公尺,則唐家山堰塞湖天然壩之 DBI 值為 4.55,屬於較不穩定之天然壩(九份二山與草嶺之天然壩 DBI 值分別約為 1.0 與 2.1,屬於較穩定之天然壩;林銘郎、等,2008),此一結果與鄭錦桐、等(2008)估計值相當接近。若根據前述 Cui *et al.* (2009)報導唐家山堰塞湖相關之幾何尺寸計算, DBI 值為 4.24,快速估計與仔細計算壩體幾何形狀結果差異並不明顯,其原因為概略估計所得之壩高雖明顯低估,但壩體積亦將同時被低估,因此壩體幾何形狀估計誤差對 DBI 值計算所可能產生之影響相互抵銷。上述計算是未利用 DEM 資料計算結果,若有災前高精度 DEM,則壩體幾何形狀之估計準確程度將明顯提升,更進一步若能同時快速以遙測技術取得災後地形,則壩體尺寸估將更準確。

另外,根據式(2)以及快速評估堰塞湖壩體尺寸,可計算得到天然壩之判別分數 $D_s = -5.6$,然若根據 Cui *et al.* (2009)報導唐家山堰塞湖相關之幾何尺寸,可計算得到天然壩之判別分數 $D_s = -5.3$,均顯示唐家山堰塞湖天然壩之壩體穩定性相當低。相關計算使用之參數值詳見表 2。總而言之,唐家山堰塞湖案例充分說明了遙測技術所提供的資訊,正隨著其技術持續之發展,已逐漸可與堰塞湖防、救災工作直接接軌。

4. 結論與建議

堰塞湖形成後,於極短時間內,必須針對上游迴水淹沒範圍、可能溢頂時間以及天然壩穩定性,進行快速研判。此一工作對於對堰塞湖形成初期之防減、災工作推動極為重要,遙測技術對於此一工作之推動,可以扮演相當關鍵的角色。本研究基於整合衛星影像以及 DEM,配合可快速進行空間計算之 GIS 系統,提出一套堰塞湖形成初期之快速分析與評估程序。當地震或極端降雨後,(1)首先應利用可及時取得足夠清晰之衛星影像,判釋堰塞

湖位置;(2)其次應搭配 DEM 獲得天然壩之壩頂高程、壩長與壩寬,並配合 DEM 估計壩高以及上游集水面積;(3)接著根據 DEM 資料繪製水位高程-湖水體積圖,並利用多期衛星影像搭配 DEM 進行堰塞湖水位高程監測,以估計淨入流之流量,再根據淨入流之流量以及水位高程-湖水體積圖,來估計可能溢流時間以及上游淹沒範圍與時間之關係;(4)最後,根據估計自衛星影像與 DEM 之壩體與堰塞湖相關地文及水文參數,利用地形指標或統計模型以評估天然壩之穩定性。本研究以汶川地震於北川形成之唐家山堰塞湖為例,說明利用福衛二號影像以及 SRTM DEM 資料,如何能於第一時間提供堰塞湖防、救災工作推動所需之重要資訊。根據本研究之經驗,以下提出關於堰塞湖快速評估之相關建議:

1. 地震或極端降雨後,應於可能的最短時間內,取得清晰之衛星影像,影像解析度至少應以能描繪天然壩堆積邊界為最低限度。一般而言,地震事件形成之堰塞湖較極端降雨事件形成之堰塞湖,更有機會取得品質較佳之影像。
2. DEM 精度以 5 公尺為佳,我國已產製全島足夠精度之 DEM,搭配福衛影像,我國已具備本研究建議之堰塞湖快速評估所需資料,未來空載 Lidar 產製之地形資料,精度更將可充分滿足堰塞湖快速評估所需,對於風險較高之堰塞湖,若能於災後取得空載 Lidar 產製之地形資料,則甚至可提供作為堰塞湖詳細評估所需之資料。
3. 堰塞湖水位上昇監測涉及之湖水位高程研判,建議以堰塞湖水陸交界找尋多點進行高程平均,以提高湖水位高程研判之準確度,特別是當 DEM 精度不足 5 公尺時。當水位高程直接量測開始時,相關分析即應以實測值取代。
4. 隨水位上昇,DEM 之誤差對流量估計不確定性之影響將增加。也就是說,堰塞湖後期流量推估對水位高程估計較敏感。因此欲根據遙測影像及 DEM 進行水位高程監測以及淹沒範圍預測,應注意 DEM 水平位置及高程誤差可能造成之影響。另外,溪流之流量受降雨影響明

顯，因此，關於溢頂時間以及淹沒範圍與時間之關係預測，應以持續更新所得最新資料作為預測基準。本研究建議之方法，主要是為了在極短時間內進行快速研判，此一方法並不能取代水文分析，若有水文分析結果，應立即進行相關分析與預測之檢核。

5. 類似小林村於極端降雨事件其間形成之天然壩，若潰決時間過短，如數小時，以目前科技能力，快速評估方法對防災作為而言時效上仍有其侷限性。
6. 堰塞湖天然壩穩定性快速評估方法屬經驗法，預測模式之準確程度與資料庫之代表性息息相關，遙測影像之快速發展與普及，於可預見的將來，有機會協助快速擴充堰塞湖資料庫，此一工作應是不論堰塞湖有無危害性都應該加以建置。台灣堰塞湖發生頻率相當高，因此，未來應該投注資源，利用遙測技術有效率地進行我國堰塞湖資料庫之建置。

參考文獻

- 李錫堤、董家鈞、林銘郎，2009。小林村災變之地質背景探討，地工技術，第 122 期，89 - 96。
- 林銘郎、董家鈞、胡植慶、劉桓吉、陳江淮、孫思優、劉說安、李錫堤，2008。向大自然學習我們準備好了嗎？～從地工角度看四川汶川地震之相關議題，地工技術，第 116 期，97 - 112。
- 柴賀軍、劉漢超、張倬元，1995。中國滑坡堵江事件目錄，地質災害與環境保護，第六卷，第四期，1 - 9。
- 經濟部水利署水利規劃試驗所，2002。堰塞湖引致災害防治對策之研究，第一年研究成果報告。
- 鄭錦桐、沈哲緯、陳微鈞、謝寶珊、冀樹勇、連榮吉、林柏壽，2008。利用多尺度衛星影像即時評估四川汶川地震引致之土砂災害，第十二屆海峽兩岸水利科技交流研討會，2008年10月，北京。
- 和訊新聞，2008。

- <http://news.hexun.com/2008-05-22/106151649.html>
- 新浪網，2008。
<http://news.sina.com/102-000-101-101/2008-05-21/1439488471.html>
- 新華網，2008a。
http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008-05/19/content_8202748.htm
- 新華網，2008b。
http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008-05/23/content_8239537.htm
- Casagli, N. and Ermini, L., 1999. Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine. Japanese Geomorphological Union, 20: 219 - 249.
- Costa, J. E. and Schuster, R. L., 1988. The formation and failure of natural dam. Geological Society of America Bulletin, 100: 1054 - 1068.
- Cui, P., Zhu, Y., Han, Y., Chen, X. And Zhuang, J., 2009. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation. Landslides, 6: 209 - 223.
- Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., Liao, J. J. and Pan, Y. W., 2009. Discriminant analysis of the geomorphic characteristics and stability of landslide dams. Geomorphology, 110: 162 - 171.
- Ermini, L. and Casagli, N., 2003. Prediction of the behaviour of dams using a geomorphological dimensionless index. Earth Surface Processes and Landforms, 28: 31 - 47.
- Korup, O., 2004. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams. Engineering Geology, 73: 13 - 35.
- Korup, O., 2005. Geomorphic hazard assessment of landslide dams in South Westland, New Zealand: Fundamental problems and approaches. Geomorphology, 66: 167 - 188.
- Liou, Y. A., Kar, S. K. and Chang, L. Y., 2010. Use of high-resolution Formosat-2 satellite images for post-earthquake disaster assessment: A study following 12 May 2008 Wenchuan earthquake. International Journal of Remote Sensing, 31:1-14.
- Rodríguez, E., Morris, C. S. and Belz, J. E., 2006. A global assessment of the SRTM performance.+ Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72: 249 - 260.
- Schuster, R. L., 1995. Landslide dams - a worldwide phenomenon. Journal of the Japanese Landslide Society, 31: 38 - 49.
- Schuster, R. L. and Costa, J. E., 1986. A perspective on Landslide Dams, Landslide Dams: Processes,

- Risk and Mitigation, (Schuster Ed), American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Pub., 3: 1 - 20.
- Swanson, F. J., Oyagi, N. and Tominaga, M., 1986. Landslide dams in Japan, Landslide dams: Processes, Risk and Mitigation. (Schuster Ed) American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Pub., 3: 131 - 145.
- Xu, Q., Fan, X. M., Huang, R. Q. and Van Westen, C., 2009. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, south west China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68: 373 - 386.
- Yin, Y., Wang, F. and Sun, P., 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Landslides, 6: 139 - 152.

Application of Satellite Images and DEM for the Hazard Assessment of Landslide Dams

Jia-Jyun Dong ^{1*} Yuei-An Liou ² L-Y Chang ³ Chyi-Tyi Lee ⁴ Jyh-Jong Liao ⁵
Yii-Wen Pan ⁵

ABSTRACT

After the formation of a landslide dam, the related impacts can be divided into upstream (rising backwater) and down stream (dam breaching with outburst flood and debris flow) components. Since both components may occur soon after the landslide dams the river, rapid assessment of the related hazards is crucial. Remote sensing technology could play a key role for decision-making to prevent or minimize the disaster due to a landslide dam. This research proposed a procedure utilizing the satellite images, DEM, and GIS system to quickly assess the potential hazards associated with the formation of landslide dams. To begin with, the location of the landslide dam should be identified from the satellite images. Secondly, the elevation of the landslide-dam top, dam geometry, and catchment area should be determined based on the satellite images and DEM. It follows a production of the water level–lake storage curve of the natural lake. Different periods of the satellite image could be used for monitoring the buildup of the backwater. Consequently, the inflow could be estimated using the water level–lake storage curve and the monitored water level. Based on the estimated inflow, the time for overtopping and the flooding area of the backwater could be determined. Meanwhile, the stability of landslide dam could be evaluated using the geo-morphological and hydro-geological characteristics estimated from the satellite images and DEM. A large landslide dam formed after the 2008 Wenchuan Earthquake is adopted as an example for demonstrating the hazard assessment procedure. The case history successfully illustrated how the high-resolution FORMOSAT-2 satellite images and the DEM derived from Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) could be efficiently served as the powerful tools to provide important information for decision making on the action of hazard mitigation soon after the formation of a landslide dam.

Keywords: Landslide dam, Water-level monitoring, Overtopping, Dam stability

¹ Associate professor, Graduate Institute of Applied Geology, National Central University

Received Date: Mar. 30, 2010

² Distinguished Professor and Director, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

Revised Date: May. 01, 2010

³ Assistant research engineer, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

Accepted Date: May. 06, 2010

⁴ Professor, Graduate Institute of Applied Geology, National Central University

⁵ Professor, Department of Civil Engineering and Hazard Mitigation Research Center, National Chiao-Tung University

* Corresponding Author, Phone: 886-3-4224114, E-mail: jjdong@geo.ncu.edu.tw

以 SPOT 衛星影像探討 1999 集集地震後之崩塌行為

壽克堅^{1*} 吳秋靜² 許惠瑛²

摘要

台灣地區受到 1999 年集集地震之衝擊，地質破碎坡地崩塌嚴重；加以近年來受氣候變遷影響造成颱風降雨強度增強，使得原本脆弱的坡地更易遭受侵襲並造成崩塌災害。本研究以多時期 SPOT 衛星影像探討 1999 集集地震後之崩塌行為，為了利用衛星快速對大範圍地區進行崩場地調查，本研究採用常態化差異指標-坡度(NDVI-Slope)雙門檻值法來做崩場地判釋。此一雙門檻值法首先利用 NDVI 值作為分界門檻值找出裸露地，再搭配 DTM 坡度門檻值將崩場地進一步判釋出來。但此一雙門檻值法之判釋可能會受地區性的地形條件、地質條件、植生條件等影響判釋之準確度；因此，不同之流域選用不同之判釋門檻值有其必要。本研究以烏溪為研究區域，考慮賀伯、桃芝、敏督利等三個颱風事件探討各種 NDVI 及坡度門檻值組合對崩場地判釋之影響，並以全區域及地層年代分區探討崩場地之行為。本研究以接受器操作特性曲線(Receiver Operating Characteristic Curve)來分析比較出最佳的門檻值組合，以進行崩場地有效快速判釋。本研究發現 NDVI 門檻值設為 0.1 坡度門檻值設為 40%在烏溪以全區域及以地層年代分區的分析有一致性較佳之判釋結果。多時期崩塌判釋結果發現，2001 年桃芝颱風時西側靠近車籠埔斷層地區有顯著崩場地分布外，因桃芝颱風之降雨落在北港溪一帶，使得該區崩場地比以往更為嚴重。2004 年的敏督利颱風，因強降雨造成烏溪流域西北側有顯著崩塌，強降雨未落於北港溪流域，相較桃芝颱風北港溪流域之崩塌有明顯減緩趨勢。集集地震引起的崩場地在自然癒合但未達邊坡長期穩定狀態下，後續颱風事件仍會因降雨而產生坡地災害，但地震之衝擊效應將隨時間而衰減。

關鍵詞：SPOT、NDVI-Slope 雙門檻值法、ROC 曲線、烏溪、1999 集集地震

1. 前言

受到 1999 年集集地震之衝擊，台灣西部地區地質破碎坡地崩塌嚴重。而近年來受氣候變遷影響造成颱風降雨強度增大，使得原本脆弱的土坡地更易遭受侵襲並造成崩塌災害。傳統的地質災害調查一般以人力調查為主，但對於高山地區之災害，因地形陡峭非人力可及，現地調查非常困難。遙感探測可針對大範圍地區做全面性偵測且具有多時性，因此在災害地質相關調查工作上，特別是範圍及高山地區之調查提供較佳之選擇。

本研究以遙測影像 SPOT 衛星影像及數值高程模型(Digital Terrain Model)作為材料，利用常態

化差異指標-坡度(NDVI-Slope)雙門檻值法來代替過去以人工遙測判釋；並將研究區域以全區域以及依地層年代分區，探討山崩判釋是否因區域範圍的大小影響到崩塌判釋的準確性。此一雙門檻值法過去已為國內外學者採用(如劉守恆, 2002; Barlow *et al.*, 2003;曾聖權, 2005)，但是如何適當選用門檻值以得較準確之判釋論述卻不多。本研究選用不同雙門檻值組合，配合統計方式-接受器操作特性曲線(Receiver Operating Characteristic Curve)來進行崩塌判釋結果準確度的量化分析；求出之最佳雙門檻值組合可供未來研究區災後崩塌判釋之用。

本研究以烏溪流域為研究區，考慮賀伯(1996 年)、桃芝(2001 年)、敏督利(2004 年)等三個颱風

¹ 國立中興大學土木系 教授

² 國立中興大學大地組 研究生

*通訊作者, 電話: 886-4-22850989, E-mail: kjshou@dragon.nchu.edu.tw

收到日期:民國 99 年 03 月 30 日

修改日期:民國 99 年 04 月 23 日

接受日期:民國 99 年 05 月 10 日

事件。除探討各種 NDVI 值及坡度門檻值對崩塌判釋正確性之影響；並以全區域以及地層年代分區來探討 1999 集集地震前後烏溪流域之崩塌行為。

2. 研究區概述

2.1 研究區域基本資料

2.1.1 地形與地質

烏溪流域在地形上可包括河谷、平原、丘陵及山地等四種地形單元，其中清水沿海河系與彰化沿海河系僅東側局部分別有大肚台地及八卦台地，其餘皆為盆地及海岸隆起平原。就整個地形區分而言，烏溪流域在更孟山西麓、紅香、白狗山西麓、眉溪溪谷及關刀山東麓此一線以東，在地形上屬於脊梁山脈之南湖山塊及能高千卓萬山塊，為台灣標準山地地形；西側呈陡坡或斷崖，東側則呈緩傾之山坡。中游草屯、國姓、埔里一帶，主要為西部麓山帶之

丘陵地及中低海拔山地。本研究考慮崩塌地分布，只選取草屯以上之流域進行研究，如圖 1 所示。

烏溪外形則為東西長，南北窄之流域，區域內之構造主要以南-北至北北東-南南西走向為主貫穿烏溪流域主要斷層線自東而西有眉溪斷層、武陵斷層（關刀山斷層或地利斷層）、水里坑斷層、水長流斷層、雙冬斷層（或稱大茅埔-雙冬斷層）、車籠埔斷層與彰化斷層（清水斷層）等，其中大多數與大甲溪相同為由東向西逆衝之逆斷層。本研究區位於台灣島的中部地區，地層之生成年代由東向西逐漸年輕。漸新世以佳陽層、白冷層與水長流層為主，中新世以廬山層、大禹層為主。漸新世晚期至中新世主要有陸相的含化石的淺海相地層，如大坑層炭寮地段、猴洞坑層、福隆園層、桂竹林層等（何春蓀，1986；中央地質調查所，1995，2000，2002）。本研究又將研究區以地層年代區分成更新世、中新世丘陵地(I)、漸新世、中新世高山區(II)等四區進行分析探討，參見圖 2。

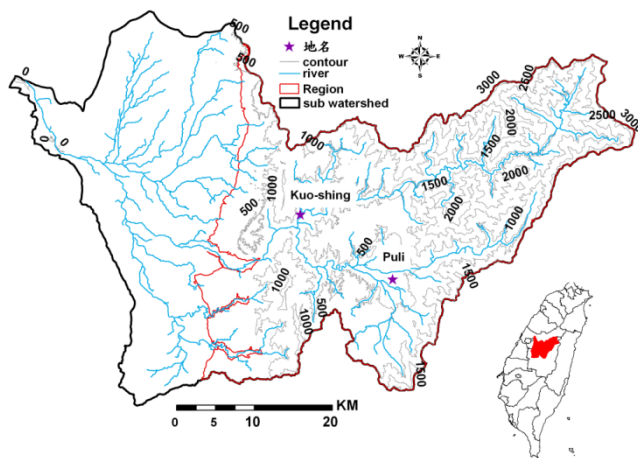


圖 1 烏溪流域地形圖

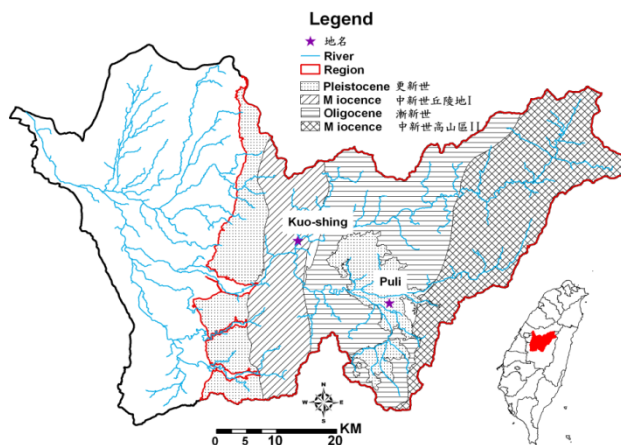


圖 2 烏溪流域本研究地層分區圖(改編自中央地調所五萬分之一區域地質圖)

2.1.2 水文特性

烏溪為台灣第四大河川，發源於中央山脈合歡山西麓，海拔 2,596 公尺。流域範圍東以中央山脈為界，北鄰大甲溪流域，西毗台灣海峽，南至濁水溪流域，東西長約 84 公里，南北寬約 52 公里，略似桐葉狀。地勢為東北向西南走向，幹線全長 119 公里，流域面積 2,025 平方公里，流域平均標高 651 公尺。其主要水系可劃分為北港溪、南港溪、筏子溪、大里溪、貓羅溪及烏溪主流。

烏溪歷年雨量資料顯示流域內各測站年平均降雨量介於 1400 至 2800 公厘之間，降雨量有沿海拔升高而遞增的趨勢，受季風及地形影響甚大。此外，該流域降雨量多集中在 5 至 9 月，大約佔全年雨量的 79%；而 6 月至 8 月降雨量更是佔了整年總平均降雨量 57%。(財團法人中興土木科技發展文教基金會，2009)

2.2 資料庫收集與來源

本研究針對賀伯、桃芝、敏督利及辛樂克颱風事件所誘發的山崩進行分析，採用之崩場地判釋所需之相關資料加以收集整理，來源列於表 1 並分別說明如下：

1. DTM：資料來自中央地質調查所，資料以 5m×5m 為一單位。地形圖：為內政部資料中心所提供之經建版地形圖，比例尺各為二萬五千分之一及五萬分之一兩種。另輔以臺灣地區相片基本圖，比例尺五千分之一（平地）及一萬分之一（山地）兩種，作為地形判釋及現場踏勘比對之用。
2. 地質圖：本研究地質資料係以中央地質調查所二十五萬分之一「區域地質圖」為主，低海拔區則利用中央地質調查所出版的五萬分之一「區域地質圖」。
3. 雨量資料：由中央氣象局所提供之颱風時期的雨量站資料，建立本究區所需要之最大降雨強度及累積雨量資料圖檔。
4. 衛星影像：原始資料來自國立中央大學太空及遙測研究中心，所拍攝之研究區範圍之賀伯、桃芝、敏督利等三大事件前後 SPOT 衛星多光譜態影像(XS)影像圖共六張(參見圖 3)，其影像時間如表 2 所示。
5. 崩場地對照資料：本研究對照驗證資料，採用的崩場地資料是由經濟部中央地質調查所辦理之『易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置』計畫判釋調查成果。

表 1 研究區域基本資料搜集表

種類	使用資料	比例尺(網格)	資料來源	出版年代
地形	DTM 經建版地形圖	5m x 5m 1/25000	中央地質調查所	2003~2004 2000
地質	臺灣地質圖	1/250000 1/50000	中央地質調查所	2003 2004
雨量資料	雨量站	大甲溪：共 38 站 烏溪：共 73 站	中央氣象局	各颱風事件
植生狀況	SPOT 衛星 影像	20m x 20m	中央大學太空 及遙測中心	各颱風事件
崩場地	崩場地成果	向量式圖檔(*.shp)	中央地質調查所	—

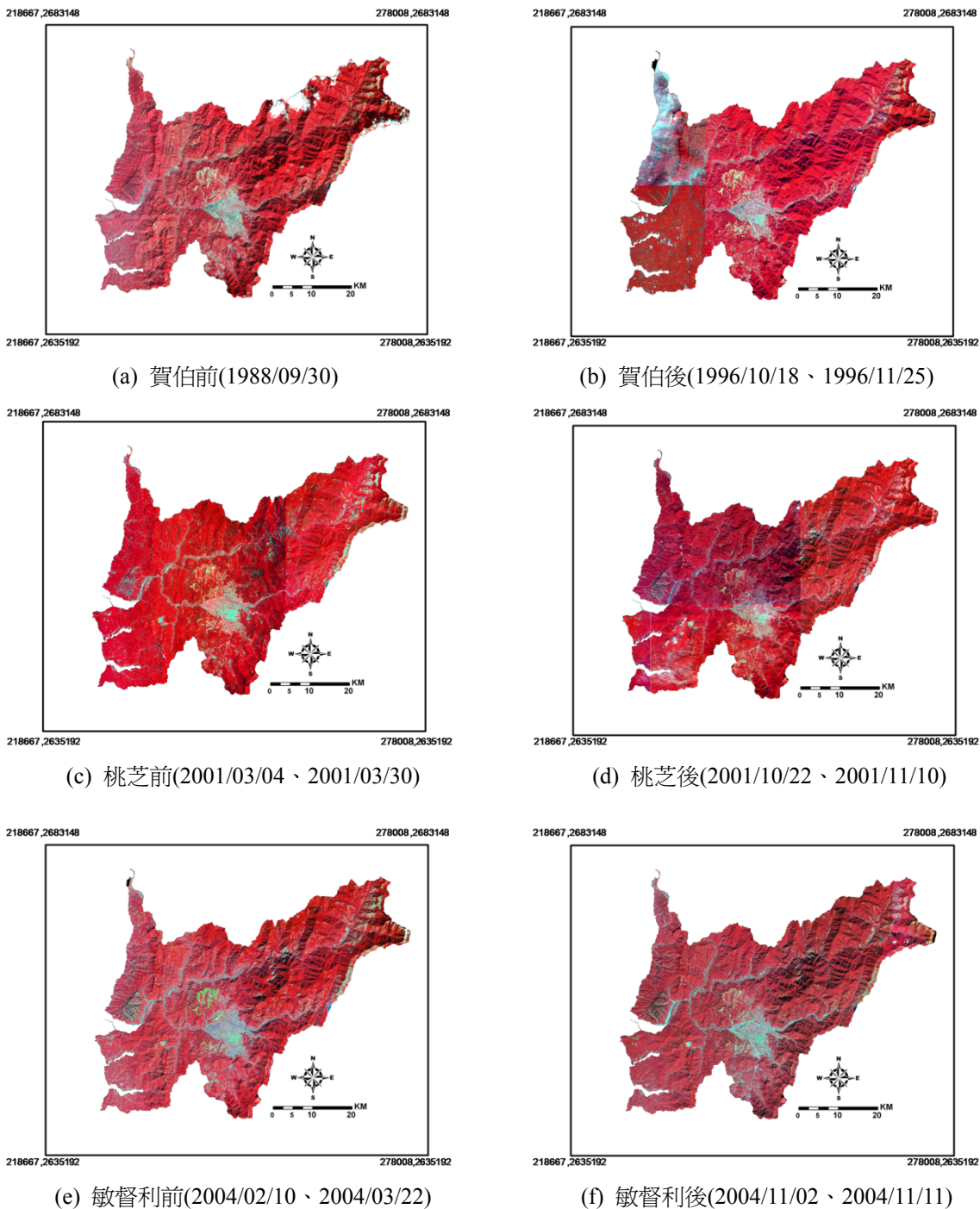


圖 3 烏河流域研究區賀伯、桃芝、敏督利颱風前後 SPOT 衛星多光譜態影像

表 2 研究區域各時期影像資料表

Event	Date	Image Time (Wu River)
Herb	1996/07/29 -1996/08/01	before 1988/09/30
		after 1996/10/18、1996/11/25
Toraji	2001/07/28 -2001/07/31	before 2001/03/04、2001/03/30
		After 2001/10/22、2001/11/10
Mindulle	2004/06/28 -2004/07/03	before 2004/02/10、2004/03/22
		after 2004/11/02、2004/11/11

3. 研究方法

3.1 崩塌地判釋流程

本研究利用 SPOT 衛星影像資料作為崩塌地判釋之基本資料，影像本身具有多光譜態(XS)以及全色態(Pan)兩種影像資料；為了有效的針對地表覆蓋進行分類，選用多光譜態影像。其波段主要是由綠光段(XS1: 0.50 μm ~0.59 μm)、紅光段(XS2: 0.61 μm ~0.68 μm)及近紅外光段(XS3: 0.79 μm ~0.89 μm)所組成，另外還新增短波紅外線波段(SWIR, Short-Wave Infrared)。SWIR 波段(0.8 μm ~1.2 μm)具備的大氣穿透能力較原有的 XS 波段強，可使地物地貌更加清晰，且亮度及對比明顯增強利於地表監測之相關工作。SPOT 之紅外光假色影像是將紅外光波段著上紅色，紅光波段著上綠色，綠光著上藍色，然後疊合起來。紅光在假色影像中，植物將呈現紅色；而水體將呈現黑色；裸露地則呈現藍灰色。然而衛星影像資料在拍攝的過程中，往往會因為系統、大氣環境及地表起伏等因素造成雜訊及扭曲現象，所以需要透過適當之影像前處理動作後才能進行判釋分析，而本研究以 ERDAS IMAGING 軟體進行了雜訊消除及輻射糾正之處理動作。而在選定影像圖時，則主要以低雲量做為原則。此外，由於烏溪流域範圍廣闊，不易全區取得同一時間點品質條件一致之衛星影像，因此採用兩至三個接近時間點的衛星影像圖進行合併判釋，以取得最佳的判釋成果。

3.1.1 植生指數

物體由於其組成和結構差異，而有不同的電磁波波譜特性，因此具有不同的輻射與反射波譜，也呈現不同反射作用。綠色植物因具有強烈吸收藍光、紅光及強烈反射紅外光之特性，故可應用多光譜態對於植物電磁波波譜反射量之多寡，推算出植物的分佈量變化，即所謂的植生指標(Vegetation Index, VI)。在為數眾多的植生指數中，以 1973 年 Rouse 等人所提出的常態化差異指標 NDVI 應用較為廣

泛，其原理為綠色植物會強烈吸收紅光(Red, 波長約 0.67 μm)，強烈反射近紅外光(NIR, 波長約 0.8~1.2 μm)，計算兩種波段吸收與反射的差異性，用來監測植生變化。

常態化差異植生指數是植物生長狀態及植被空間分布密度之最佳指示因子，亦是綠色植物偵測時最常用的指標；植生指數與植物覆蓋分佈密度呈線性相關，值域介於-1~1 之間；小於零的數值通常屬於非植生雲層、水體、道路和建築物等像元，所以指數愈大代表綠色生物量愈多。其來源於用以監測全球性的植被，透過 NDVI 之指標分析，可快速地將全球植生予以分類(Mantovani *et al.*, 1996)。其計算公式(1)如下：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

其中，NIR 表示近紅外光波段，R 則為紅外光波段。

3.1.2 崩塌地判釋處理流程

由於本研究區域面積廣大，為了簡化崩塌地判釋在 SPOT 衛星影像判釋方面，則參考吳柏毅(2006)崩塌地判釋二分法先利用常態化差異植生指標(NDVI)將影像進行分類，其中將露頭、水系、溪床、裸露地、人工墾植區等區域之 NDVI 值在設定門檻值以下歸類於初步崩塌地。然而採用衛星影像以多光譜做為分類基準時，在坡度較緩之地區，河道、人類聚落、道路、以及水體之常態化差異植生指標(NDVI)均為負值，因為這些地區並無綠色植被分佈，故會影響崩塌地之判釋結果。為了避免上述情況發生，所以配合坡度門檻值以坡度做為進一步排除上述可能之誤判。判釋結果之驗證本研究採用 ROC 曲線法，以判釋出來的預測值(Predicted)與配合現地調查人工圈繪出來之觀測值(Observed)比較探討自動判釋之正確率。Arc Map 9.2 內部之空間分析模組(Spatial Analysis)套疊坡度資料與 NDVI 指數資料，以建立成效良好的崩塌地與坡度聯集分佈之資料庫。崩塌地判釋流程如圖 4 所示。

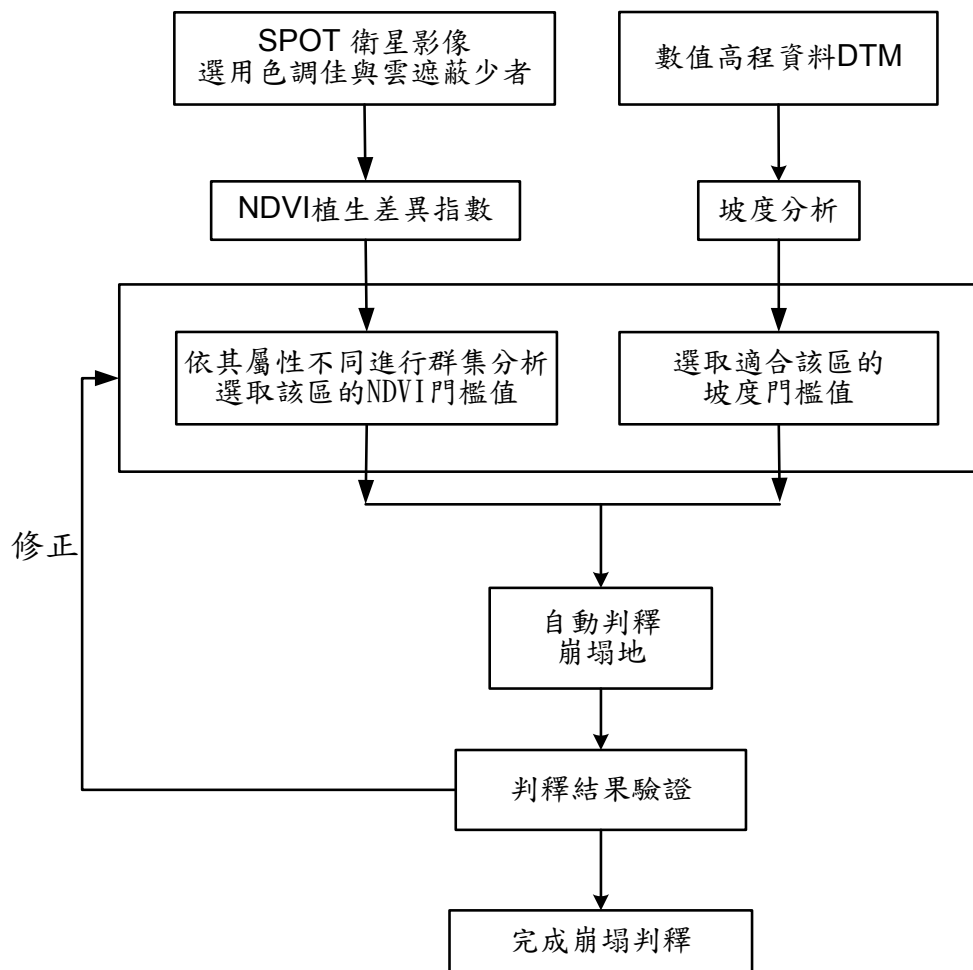


圖 4 崩塌地判釋流程圖

3.2 門檻值的選取

本研究採用不同 NDVI 及坡度門檻值組合進行多時期崩塌地判釋，參考劉守恆(2002)、Barlow *et al.* (2003)、曾聖權(2005)及鄭錦桐(2005)等人研究，NDVI 門檻值主要分為 0.1、0.2、0.3 等三類，坡度門檻值主要分為 30%、35%、40%等三類，如表 3 所示共分七種門檻值組合以圖 4 之流程進行崩塌地判釋及分析。並將研究區以全區域以地層分區進行分析，地層年代區分成更新世、中新世丘陵地(I)、漸新世、中新世高山區(II)等四區(如圖 2)。參考 Goodenough *et al.*(1974)、Egan *et al.* (1975)、Frattini *et al.* (2010)等人之研究利用接受器操作特性曲線(Receiver Operating Characteristic Curve，以下簡稱 ROC 曲線)研究比較研究區崩塌地判釋採用門檻值組合之優劣。

ROC 曲線是一條凸向左上方的曲線，而且愈偏離 45 度對角線愈好。要繪製 ROC 曲線必須要改變門檻值(threshold)獲得所有可能的靈敏度與特異度，並將其收集為兩個變數值(x,y)。關係圖中的垂直軸(x)為靈敏度(sensitivity)，水平軸(y)為 1-特異度(1-specificity)。故一條 ROC 曲線代表兩個特定族群的相對關係，並且是在描述此相對關係下 sensitivity 與 specificity 之互動變化情形。ROC Curve 是以 sensitivity 為垂直軸(x)，以 1-Specificity 為水平軸(y)，將各組操作點畫在 x-y 平面上，將各操作點連接起來，再將最小之點與(0,0)連接，最大之點與(1,1)連接，此 ROC 曲線即完成(如圖 5)。

本研究採用 ROC 曲線的目的，是希望藉預測值(Predicted)及觀測值(Observed)來探討正確和錯誤的個數。由其中預測值(Predicted)為本研究區判釋出來的崩塌地；觀測值(Observed) 則為中央地質

調查所以人工圈繪出來的崩塌地。而本研究採用中央地質調所人工圈繪出來的崩塌地目錄，來探討遙測判釋之準確度(中興工程顧問公司，2009)。

考慮四種預測值與觀測值之關係及其數量，也就是指 tp、tn、fp 與 fn 之數值，其中 tp 與 tn 分別是指將目標樣本判斷正確與錯誤的個數，fp 與 fn 分別是指將非目標樣本判斷錯誤與正確的個數(如表 4 所示)。如此可以定量的找出最佳崩塌地判釋

門檻值組合，ROC 曲線越偏離對角直線(line of no information)越偏向左上角表示門檻值越佳。其 ROC 曲線的垂直軸(x)為靈敏度(sensitivity)，水平軸(y)為 1-特異度(1-specificity)中的計算公式如(2)、(3)，本研究分別以全區及個別地質分區來探討崩塌地判釋門檻值，以 ROC 曲線方法配合觀測數據來比較分析，求取之最佳門檻值可供後續本研究區來崩塌判釋。

$$\text{True positive rate(TP)}=\text{sensitivity}, \frac{tp}{tp+fn} = \frac{tp}{p} \quad (2)$$

$$\text{False positive rate(FP)}=1-\text{specificity}, \frac{fp}{fp+tn} = \frac{fp}{n} \quad (3)$$

表 3 烏溪流域崩塌地判釋門檻值指標

門檻值指標(crit.)	1	2	3	4	5	6	7
NDVI	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1
SLOPE(%)	30	30	35	35	40	40	40

表 4 烏溪流域崩塌地模組評估表

Observed	Predicted	
	Class0(-)stable	Class1(+)unstable
Class0(-)stable	(- -) true negative, tn	(+ -) false positive, fp
Class1(+)unstable	(- +) false negative, fn,	(+ +), true positive, tp

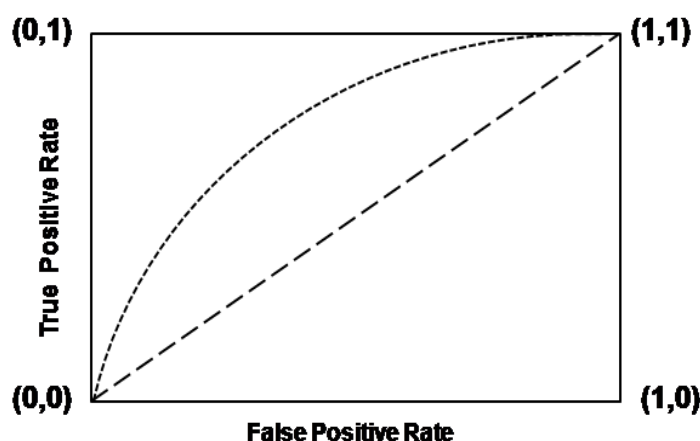


圖 5 ROC 曲線之示意圖

4. 結果與討論

4.1 門檻值的探討

經由上述 ROC 曲線分析結果發現，在本研究區域烏溪流域中門檻值指標 7 (即 NDVI 門檻為 0.1，SLPOE 門檻為 40%)較其它指標更偏離 45 度對角線，反映其崩場地判釋結果較佳。此外，可以發現門檻值指標 7 在全區域以及依地層年代分區的條件下也有一致性的較佳判釋結果(如圖 6、7、8、10

所示)。

依地層年代分區的漸新世區域中，該區為門檻值指標 1 相對較明顯，其可能原因為該區屬於埔里盆地促使該區的坡地因人為開發影響較大，使得該區植生沒有像其他未開發區域多加上該區的坡度平緩。因此，此區的 NDVI 值選取較門檻值指標 7 為小，同時該區的坡度較為平緩，在坡度門檻值選取較指標 7 為小，而使得在 NDVI 門檻為 0.3，SLPOE 門檻為 30%有較佳之判釋結果(如圖 9)。

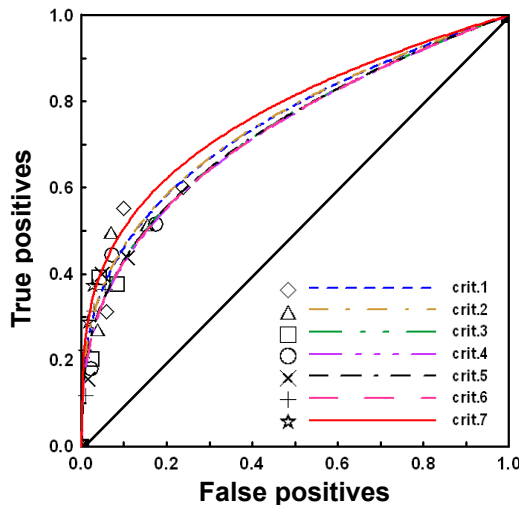


圖 6 全區門檻值 ROC 曲線

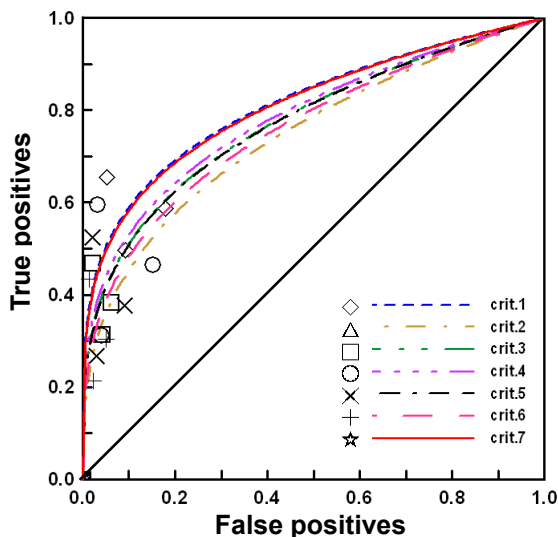


圖 7 更新世門檻值 ROC 曲線

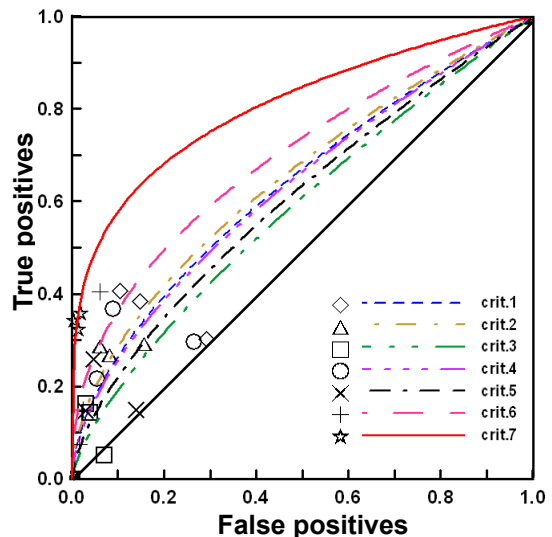


圖 8 中新世丘陵地門檻值 ROC 曲線

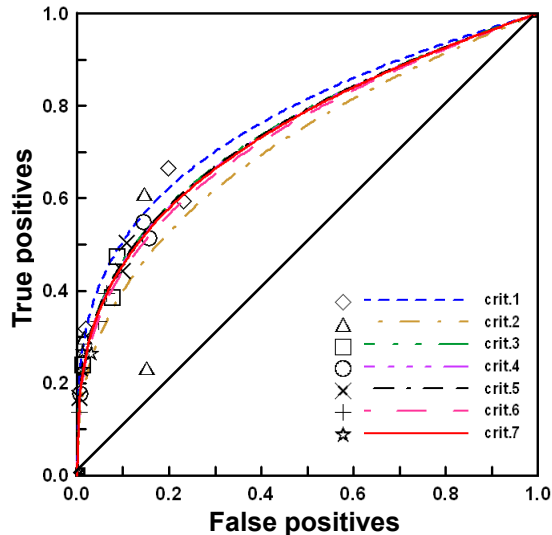


圖 9 漸新世門檻值 ROC 曲線

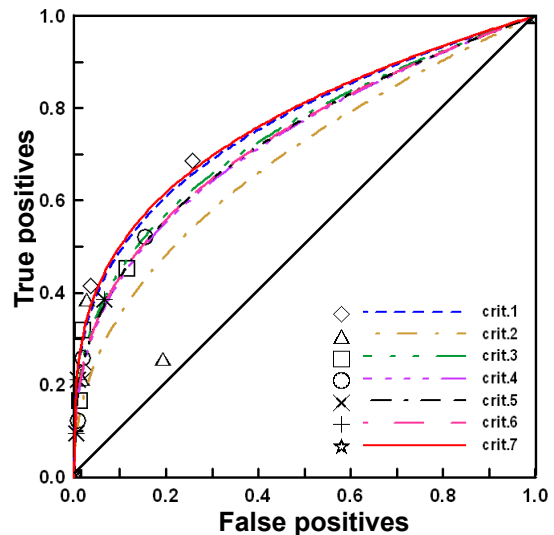


圖 10 中新世高山區門檻值 ROC 曲線

4.2 崩塌行為的探討

本研究以多時期颱風事件崩塌判釋結果，配合該事件降雨分布進行崩塌行為之探討。烏溪流域北港溪在 1999 年集集地震前，1996 年賀伯颱風事件所造成崩塌情況及降雨分佈如圖 11 及圖 12 所示；崩塌地主要分布於丘陵地及高山地區。流域下游(西側)雖有強降雨，但崩塌並不明顯；可能的原因為地形較為平緩及已人為整治等。受到 1999 年集集地震衝擊後，本研究區內地質材料破碎，遇到颱風降雨坡地更易受到沖蝕或造成崩塌。圖 13 所示為該區 2001 年桃芝颱風後之判釋崩塌地分布，除西側靠近集集地震時再活動車籠埔斷層附近地區有顯著崩塌地分布外；因桃芝颱風之降雨分佈落在東北側之北港河流域，使得該區崩塌地比以往更為嚴重(參見圖 14)。崩塌地具備自然之自癒能力，經過長期的坡面及河道搬運可使邊坡逐漸恢復先前之穩定狀態。2004 年的敏督利颱風，因強降雨造成烏溪流域部份區域特別是西北側有顯著崩塌外；因該事件的強降雨分佈範圍未落在北港河流域，相較桃芝颱風災後北港河流域之崩塌在敏督利颱風時有明顯減緩趨勢(參見圖 15 及圖 16)。

由烏溪流域四個地層不同颱風事件產生崩塌地之比較發現，高山區中新世降雨及崩塌之關連趨勢最為明顯，其原因可能為高山區地形陡峭及區域性氣候影響，造成局部強降雨及較高崩塌率。另一

方面高山區之地質材料風化較為嚴重，較易發生淺層崩塌，因此崩塌率最為最大(如圖 11、13、15)。其次為位於丘陵區之中新世地層區，類似之地形因素及效應雖存在但不如高山區強烈。西側更新世地層，因較靠近車籠埔斷層，雖地形因素較不顯著，但地質條件及地震衝擊較為顯著。

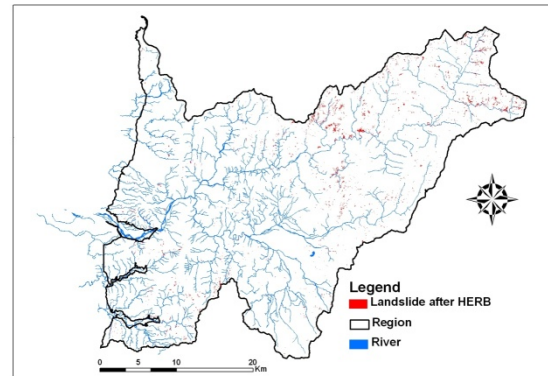


圖 11 賀伯颱風後崩塌地判釋之結果

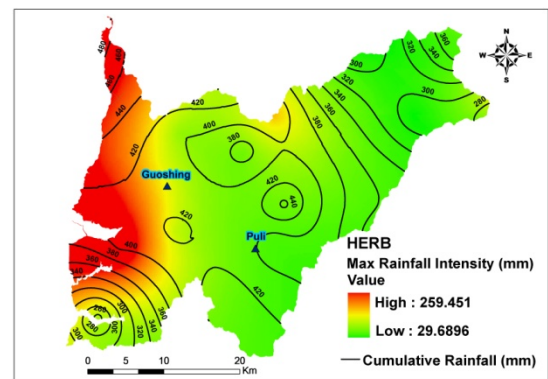


圖 12 賀伯颱風累積雨量及降雨強度分佈 (以中央氣象局雨量站資料繪製)

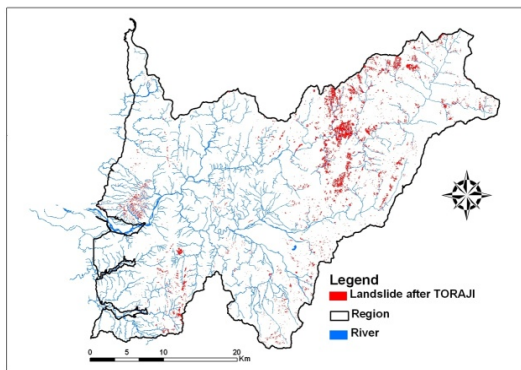


圖 13 桃芝颱風後崩塌地判釋之結果

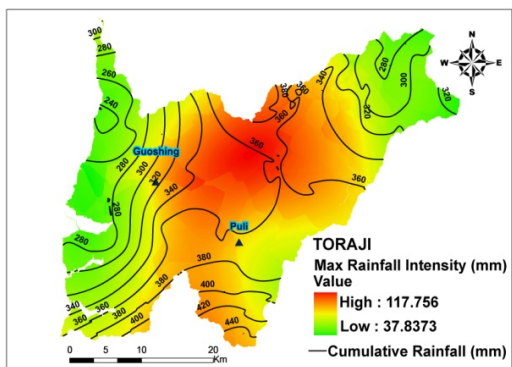


圖 14 桃芝颱風累積雨量及降雨強分佈圖 (以中央氣象局雨量站資料繪製)

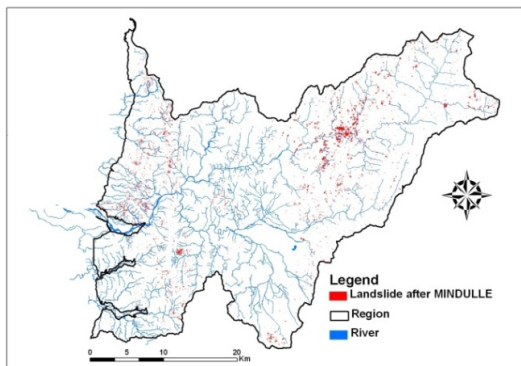


圖 15 敏督利颱風後崩塌地判釋之結果

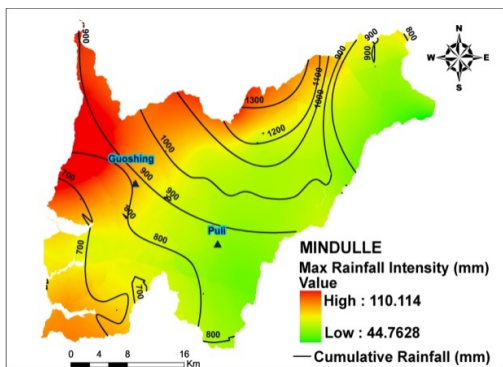


圖 16 敏督利颱風累積雨量及降雨強度分佈圖 (以中央氣象局雨量站資料繪製)

5. 結論與建議

在烏溪流域中崩塌地門檻值指標選取上以全區域的觀點去選取，本研究發現 NDVI 門檻值設為 0.1，SLOPE 門檻設為 40%最適合研究區之崩塌地判釋；但如果在依地質年代分區的條件下，仍需考慮人為開發對坡地之破壞及地形環境改變等因素對門檻值選取的影響。

關於 1999 集集地震後烏溪流域之崩塌行為，2001 年桃芝颱風時西側靠近車籠埔斷層地區有顯著崩塌地分布外，因桃芝颱風之降雨落在北港溪一帶，使得該區崩塌地比以往更為嚴重。2004 年的敏督利颱風，因強降雨造成烏溪流域西北側有顯著崩塌，強降雨未落於北港溪流域，相較桃芝颱風北港溪流域之崩塌有明顯減緩趨勢。針對該研究區在不同颱風事件崩塌地判釋的過程中，也可發現在 921 地震引起的坡地災害後，坡地在自然癒合但未達邊坡長期穩定狀態下，在下一個颱風事件侵襲時仍會因降雨而產生坡地災害，但此一效應將隨時間而衰減。

本研究區域以三個颱風事件點作為 ROC 曲線的分析資料，建議可繼續利用此方法分析更多颱風事件，以建立更為良好之 ROC 曲線獲得更完善的 NDVI-坡度雙門檻值，以更準確的用來做崩塌地判釋。此外，其它流域也可採用類似方法，建立適用該流域之判釋雙門檻值。

參考文獻

中央地質調查所，1995，台灣地區五萬分之一地質圖「國姓圖幅」，經濟部中央地質調查所。
 中央地質調查所，2000，台灣地區五萬分之一地質圖「埔里圖幅」，經濟部中央地質調查所。
 中央地質調查所，2002，台灣地區五萬分之一地質圖「霧社圖幅」，經濟部中央地質調查所。
 中興工程顧問公司，2009。集水地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估。經濟部中央地質調查所。

- 何春蓀, 1986, 台灣地質概論—台灣地質圖說明書。增訂二版, 經濟部中央地質調查所。
- 吳柏毅, 2006。臺灣中部地區崩場地影響因子之分析研究。碩士論文, 國立中興大學土木工程學系。
- 財團法人中興土木科技發展文教基金會, 2009, 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置-烏溪流域成果彙編, 經濟部中央地質調查所。
- 曾聖權, 2005。SPOT衛星影像應用於陳有蘭溪流域崩塌調查之研究。碩士論文, 朝陽科技大學營建工程系。
- 劉守恆, 2002。衛星影像於崩場地自動分類組合之研究。碩士論文, 國立成功大學地球科學研究所。
- 鄭錦桐、林彥享、張玉麟、顧承宇、許世孟、陳錦清、余勝雄、楊勳得、焦中輝、黃連通, 2005。崩場地之衛星影像自動判釋與變遷研究-大甲溪集水區於集集地震與曆次風災後崩塌災害為例, 中國地質會 94 年會暨學術研討會論文集。
- Barlow, J., Martin, Y. and Franklin, S.E., 2003. Detecting translational landslide scars using segmentation of LANDSAT ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. *Can. J. Remote Sensing*, 29(4): 510-517.
- Egan, J.P., 1975. *Signal Detection Theory and ROC Analysis*. Series in Cognition and Perception, Academic Press, New York.
- Fratini, P., Crosta, G. and Carrara, A., 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111: 62-72.
- Goodenough, D.J., Rossmann, K. and Lusted, L.B., 1974. Radiographic applications of receiver operating characteristic (ROC) analysis. *Radiology*, 110: 89-95.
- Mantovani, F., Soeters, R. and Westen, C.J.V., 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15: 213-225.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. in 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, 1: 309-317.

Analysis of Landslide Behavior after 1999 Chi-Chi Earthquake by SPOT Satellite Images

K.J. Shou^{1*} C.C. Wu² H.Y. Hsu²

ABSTRACT

Due to the impact of 1999 Chi-Chi Earthquake (MW=7.6), the geology in Taiwan area was more fractured and a tremendous amount of landslides were induced. After 1999, the unusual typhoon events cause the primary and secondary landslide hazard more severe. This study aims to study the landslide hazard by the SPOT satellite images, focusing on the behavior of the primary and secondary landslide hazards after 1999. In order to obtain the landslide distributions efficiently, this study adopted an NDVI-Slope criterion in the GIS image interpretation. Since this criterion could be affected by local topography or geology, it could be necessary to adopt different criterion for different catchment or sub-catchment. In this study, the Wu His catchment in Central Taiwan was adopted as study area, the landslides induced by three typhoon events, i.e., Herb (1996), Toraji (2001) and Mindulle (2004), were analyzed. In order to obtain an optimal criterion, the analysis of Receiver Operating Characteristic Curve was used. The results showed good interpretation by using the criterion 0.1 of NDVI and 40% of slope in Wu His catchment, for the whole catchment and for its sub-catchments.

The landslides distributions showed that significantly more landslides were induced near the Chelungpu Fault by the 2001 Toraji Typhoon. In addition, more landslides were found in the upstream Peikang River sub-catchment, due to the distribution of heavy rainfall. However, less landslides were induced by 2004 Mindulle Typhoon in the Peikang River area, since the heavy rainfall is distributed in the northwestern side of the catchment. The results reveal that the self-healing effect is undergoing, but subsequent typhoon events could still cause above-normal landslides. However, the impact of landslide will decay away gradually.

Keywords: SPOT, NDVI-Slope Criterion, ROC Curve, Wu Hsi, 1999 Chi-Chi earthquake.

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University

² Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University

* Corresponding Author, Phone: 886-4-22850989, E-mail: kjshou@dragon.nchu.edu.tw

Received Date: Mar. 30, 2010

Revised Date: Apr. 23, 2010

Accepted Date: May. 10, 2010

物件導向分析方法應用於遙測影像之分區及崩塌地 與人工設施分類

黃韋凱¹ 林銘郎² 陳良健³ 林彥享⁴ 蕭震洋⁴

摘要

本研究利用物件導向式遙測影像分析方法進行大範圍坡地與河川災害快速判釋，以改善像元式影像分析方法於分類時常有之雜訊問題。研究使用福爾摩沙二號衛星在莫拉克颱風事件前後遙測影像，利用災害前後影像同時進行均質化分割技術，於兩張影像上產生出相同區塊，以解決不同時期影像之地貌分類邊界問題；以區塊為分析單元，依照人工判釋經驗與階層式的邏輯，加入合適之空間特徵資訊（包括光譜值、坡度等），訂定分類規則流程，由單純至複雜的地貌進行十四種分類，建立出有系統之分類程序，以作為未來災前後影像快速判釋之參考。

應用於研究區之分類結果，進一步與航照判釋及現地踏勘比對，訓練成果由誤差矩陣評估得整體精度達 81.6%；崩塌比由災前的 1.5% 增加為 10.5%、河道變遷河段達 307 處，災後河道面積相對於災前增加 32%、受影響之開發地達 26%、受影響之房舍達 26%（1179 處）、受影響之道路達幾 18%（2281 處）。

關鍵詞：莫拉克颱風、物件導向、分區、分類、最鄰近法、影像變異、崩塌、人工設施

1. 前言

台灣位處歐亞板塊及菲律賓板塊交界地帶，地質狀況偏屬破碎。加上近年來氣候變遷影響，極端降雨引發之劇烈自然環境變化造成台灣頻繁的天然災害，如民國 98 年 8 月 7 日至 11 日之莫拉克颱風事件在台灣南部地區帶來累計降雨量超過 2,000 毫米，造成南台灣坡地嚴重崩塌、道路中斷及河道變遷致災的情形（李維峰、等，2009）。

利用遙測影像可以在短期內獲得大區域災情資料，但藉由傳統人工判釋與數化方法對於廣域影像判釋分類頗為耗時，可能無法滿足救災與復建決策所需之即時性與快速性，因此如何利用自動判釋方法快速進行影像之地貌分類（尤其是受影響之道路、房舍、開發地等）是相當重要的課題。過去常用之自動判釋方法大多採用像元式（pixel-based）的分析方法，藉由特定統計方法的分析與分類，逐

一賦予影像中每個像元一種類別。然而既有像元式分類法大多僅藉由光譜分布的差異進行分類，不易呈現地貌間之空間關聯性，且分類結果易常有雜訊（salt & pepper）產生，影響分類的精度和結果。

作者等有幸參與行政院公共工程委員會「莫拉克颱風高雄縣甲仙鄉小林村及那瑪夏鄉、桃源鄉致災原因調查計畫」（陳清泉、等，2010），取得由中央大學太空遙測中心提供的福爾摩沙衛星二號所拍攝多光譜影像進行分析。

綜觀前人使用物件導向分析方法之相關研究整理如表 1。了解前人研究多以影響生活環境之災害（崩塌、河道變遷...等）作分析，鮮少進一步對人工設施做分類及討論，但其人工設施與災害的相互關係通常是防災設計所依據之重要資訊。

有鑑於此，本文將利用物件導向式之遙測分析方法，以遙測影像人工判釋的成果為基礎，以區塊（segment）為分析單元依照人為判釋經驗與邏輯，結合既有地貌判釋知識，訂定電腦判釋的規則（rule

¹ 國立台灣大學土木工程學系研究生

² 國立台灣大學土木工程學系 教授

³ 國立中央大學土木工程學系 教授

⁴ 財團法人中興工程顧問社 研究員

*通訊作者，電話：886-2-33664348, E-mail: mlin@ntu.edu.tw

收到日期：民國 99 年 03 月 31 日

修改日期：民國 99 年 04 月 29 日

接受日期：民國 99 年 06 月 11 日

set)，加入合適空間特徵資訊進行分類，其中包括形狀、光譜值、坡度等資訊，最後利用階層式的邏輯，由單純至複雜共十四種地貌進行分類，以了解災前後地貌狀況及變遷情形，最後建立出一系統化「災害與人工設施判釋系統」。期未來在災後利用此技術於有限的時間內，以本研究分析流程和方式進行之大範圍遙測影像判釋，迅速瞭解災害發生規模、範圍，以及受災害影響之重要人工設施位置等重要資訊，以利決策者瞭解災害的情況，做為決策的參考依據，幫助救災及重建工作之推行。

2. 分析資料簡介

2.1 研究區域概述

研究區域以莫拉克颱風造成災害最為嚴重之六村進行分析（圖 1），本研究區位處高雄縣那瑪夏鄉之南沙魯村（民族村）、瑪雅村（民權村）及達卡努瓦村（民生村）、甲仙鄉之小林村、桃源鄉之桃源村及勤和村等六村，屬於旗山溪流域上游及荖濃溪流域中游部分地區。面積各分別為：南沙魯村 4,849 公頃、瑪雅村 5,701 公頃、達卡努瓦村 6,734

公頃、桃源村 4,448 公頃、小林村 3,833 公頃、勤和村 1,834 公頃，總面積約 27,400 公頃。以下對研究區域之流域至局部區域概述說明。

2.1.1 旗山溪流域-小林村及那瑪夏鄉

旗山溪主要為東北-西南流向，河岸兩側與山稜線平行，研究區在旗山溪流域之平均坡度以地理資訊系統軟體-ArcGIS 從 40m × 40m 高程數值模型計算，主流沿線從北-達卡努瓦村村界至南-小林村五里埔其平均溪床坡度為 1：60，另因上游河段坡度大之地形條件，使河流下切嚴重形成兩岸陡峭地形。旗山溪溪床在上游那瑪夏鄉地區河道狹窄，流至小林村區域河道則逐漸變寬且溪床坡度漸緩，略成沖積地形。地質條件方面，於旗山溪流域為第三紀沉積岩區，屬砂岩及頁岩之岩性分佈，有數條斷層構造線通過（甲仙、平溪、小林斷層等）（圖 1），地質構造發達，沿岸邊坡破碎程度高，經過此次颱風事件造成小林村至那瑪夏鄉沿岸產生多處崩塌。土地利用在沿岸開發主要以稻作、畜禽、農業用地；靠山稜線處則為林務局的林業事業用地；交通狀況以台 21 線公路為重要聯外道路。

表 1 物件導向分類相關研究整理

研究學者	文章發表時間	分類探討對象	分類選用之特徵值、資料圖層
洪凱政	2009	崩塌	光譜、形狀、紋理、植生指數
Martha 等人	2009	崩塌（破壞形式）	數值地表模型（DSM）、數值高程模型（DEM）、坡度、流向、邊坡曲率、河川流網、集水區資料圖層
Moine 等人	2009	崩塌	形狀、光譜、紋理
Asselenand & Seijmonsbergen	2006	山區型態（崩塌、河流階地...等）	數值地形模型（DTM）、坡度圖、河流中心線向量圖層
黃帥豪	2008	河道變遷	光譜、河流中心線向量圖層
Arroyo 等人	2010	河岸土地覆蓋地貌（河道、裸露地...等）	數值地形模型（DTM）、植生樹冠模型（TCM）
鄧佩欣	2009	土地利用（人工設施）	光譜、植生指數

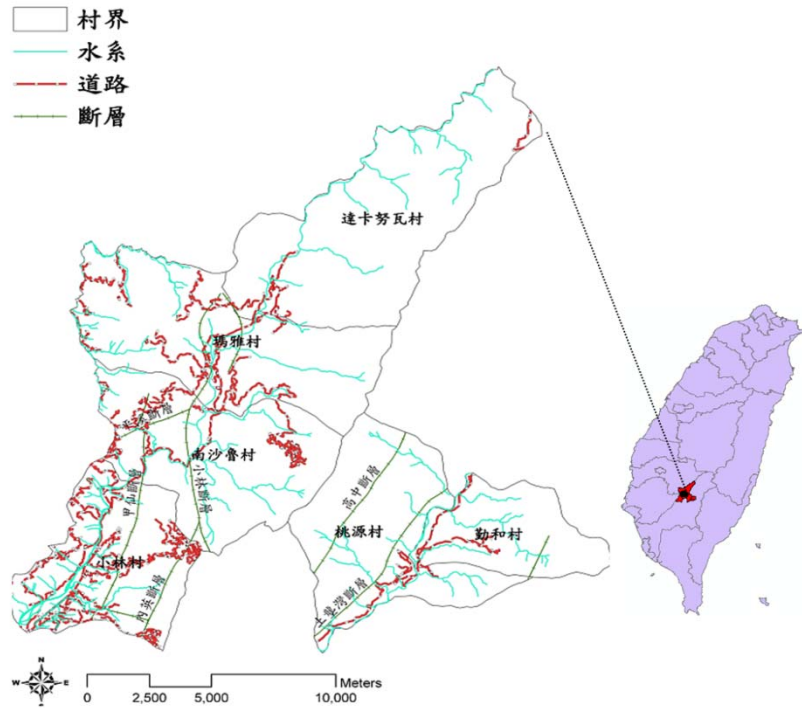


圖 1 研究區域

表 2 影像資料

衛星影像編號/資料敘述	拍攝日期 (GMT)	分析光譜波段	空間解像力/解析度 (公尺)
I0019367	2009/5/9	R、G、B、NIR	8
I20090817	2009/8/17	R、G、B、NIR	8
高程數值模型(災前)			40
坡度圖(災前)			40

2.1.2 荖濃溪流域-桃源村及勤和村

荖濃溪主要為東北-西南流向，研究區之荖濃溪流域其溪床平均坡度為 1：50，地形及河流演育受到地質構造控制。地質狀況於土壟灣斷層東側區域，屬堅硬之第三紀輕度變質岩區，造成高山峻嶺及 V 型河谷之地形；斷層以西則為沉積岩地質與旗山溪流域相似。土地利用多於沿岸之河階地進行開發，桃源村及勤和村聚落即分布於其中；交通狀

況以台 20 線公路為桃源村及勤和村之對外聯絡之重要道路。

2.2 影像資料

本研究使用影像為中央大學太空遙測中心所提供，係福爾摩沙衛星二號於 2009 年 5 月 9 日及 2009 年 8 月 17 日所拍攝之多光譜影像(表 2)。此兩期影像為莫拉克颱風災前後所拍攝，其分析之空

間解像力為 8 公尺，各包含 R、G、B、NIR 4 種波段，總計 8 個前後期多光譜波段由本研究進行分析。每張影像分析像素為 10,062,176 Pixels (3064×3284)，另外分析中加入以 40m×40m 高程數值模型 (digital terrain model, DTM) 產製之坡度圖層。

2.3 軟硬體設備

本研究所使用的系統平台為安裝 Microsoft Windows XP Professional SP2 之個人電腦；CPU 為 Intel Core2 Quad，記憶體為 3.48GB。分析軟體為德國公司 Definiens Image 所開發之 Definiens Developer 7.0 (Definiens, 2003)，其前身名稱為 ECoginition，是為一套專用於影像物件導向式分類之軟體。

3. 研究方法

本研究以物件導向為基礎，利用 Definiens Developer 7.0 軟體 (以下簡稱 Definiens) 進行地貌判釋分類，依照人工判釋經驗與邏輯，結合既有的地貌知識，訂定電腦判釋的規則流程，最後與人工判釋分類作比對，決定出適合本分析影像的分類流程，以做分類結果之應用。本研究之研究流程圖，如圖 2 所示。

3.1 物件導向介紹及分析流程

物件導向式分類是利用光譜、坡度圖層等資訊進行區塊影像分類，根據像元的光譜將影像分割成多個同質的區塊，此時最小的分類單元為影像物件 (image object) 即區塊，將能降低傳統像元式分類法雜訊問題。

3.1.1 影像分割

影像分割是物件導向分類方法的第一個步驟，本研究利用 Definiens 軟體以多重解析分割法 (multiresolution segmentation of image objects) 的概念將原始影像 (圖 3 a、b) 分割成一個個小多邊

形物件使之成為多個同質區域 (圖 3 c)。此方法為一由下而上 (bottom-up) 之區塊合併 (region-merging) 的技術，影像中的最小組成單位為像元，我們可以假想它為許多的種子 (seed)。每一種子經由電腦程式運算此種子周遭之異質性，其異質性指標在系統中分為三種 (ECognition user's guide, 2003)：(1) 屬性值 (attribute) 異質性指標；(2) 形狀 (shape) 異質性指標；(3) 整體異質性指標，當整體異質性指標 (為屬性值與形狀異質性指標加總) 低於系統程式判定標準以下，它將會四面八方的找尋最佳鄰近種子作合併，直到系統計算之整體異質性指標大於系統設置的「門檻值」才停止合併動作，形成一個多邊形的區塊此門檻值大小是由分割尺度來決定 (詳 3.2.1 節)。

以上所論述之形狀異質性指標是以平滑度 (smooth) 與緊密度 (compactness) 之含量做為分割的指標，這兩個數值會影響到分割區塊的邊界形狀，作者使用 Definiens 軟體內所提供的內定值來設定。

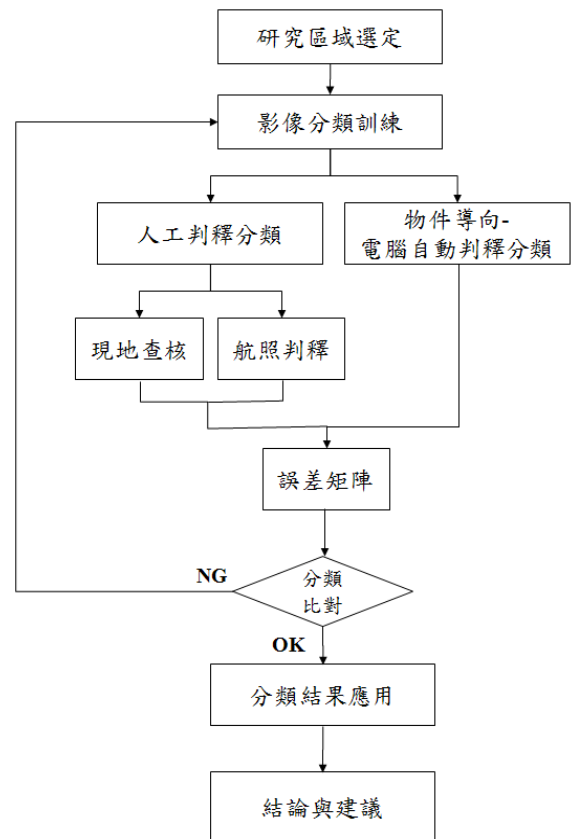
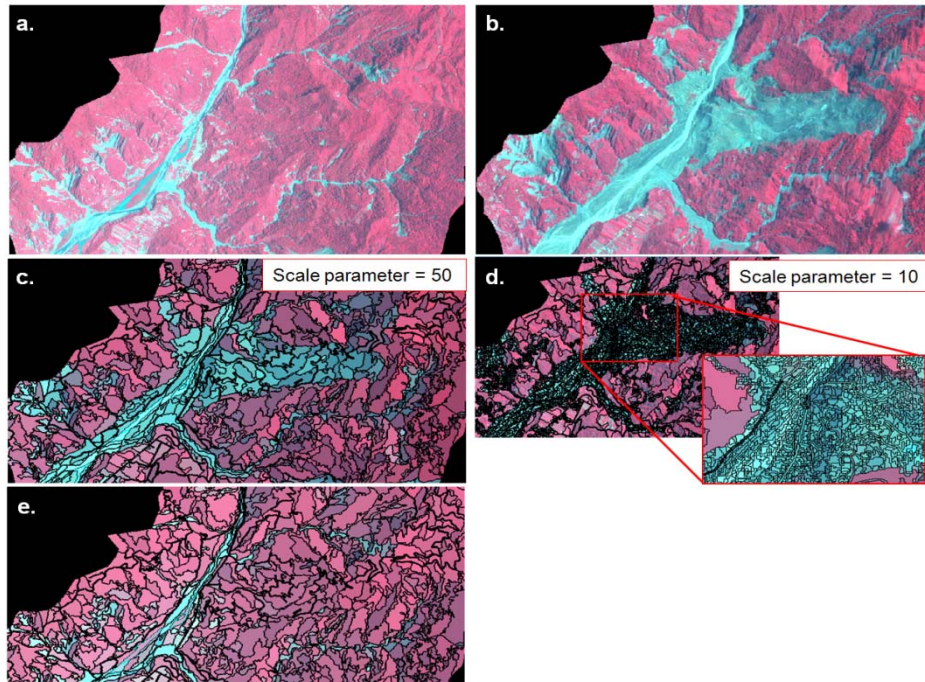


圖 2 研究流程圖



- (a) 小林村-災前，原始影像。
- (b) 小林村-災後，原始影像。
- (c) 小林村-災後，分割尺度選擇 50，兩期影像同時進行分割區塊均質化處理後之區塊分割情形。
- (d) 小林村-災後，分割尺度選擇 10，兩期影像同時進行分割區塊均質化處理後之區塊分割情形。
- (e) 小林村-災前，分割尺度選擇 50，兩期影像同時進行分割區塊均質化處理後之區塊分割情形。

圖 3 物件導向區塊均質化分割與不同分割尺度分割成果示意圖

3.1.2 分類特徵

本研究中將分類出 14 種的地貌分類，其中道路及房舍屬於人工設施（表 3），由於此二幅經仔細挑選影像幾乎無雲，故本研究對於雲尚未進行分類處理。為了建立研究區分割與分類成果的驗證資料，選擇小林村附近區域左上及右下 TW67 座標（210548, 2563827）、（215572, 2560603）以內的區域做為訓練區。針對衛星拍攝之假色影像疊合分割成果，進行人工判釋各分割區塊內之地貌屬性；接著以航照為輔，檢核地貌是否判讀錯誤；最後再利用 3D 立體飛行模擬作第二次校正，主要檢核跟坡度有相關之地貌（圖 4）。圖中因圖層顯示疊合之關係，編號分類 11~14 等四類未標示於圖上。

各地貌分類人工判釋特徵之描述如下：

分類(1)道路（未受損）：顏色多亮白居多，形狀多為細長線形。

分類(2)植生：暗紅色之不規則多邊形。

分類(3)稀疏植生：與植生比較為稍亮之紅色，屬竹林、果樹、人工林等林相，且位置多位於崩塌、房舍及開發地附近，表示可能和崩塌有關或是經過人為低密度開發或墾植，其坡度與開發地相比，通常坡度較陡。

分類(4)陰影：顏色多為灰黑色，位置多位於山稜線下，形狀多呈不規則之形狀與周遭地貌不協調。

分類(5)舊河道：亮藍色，其位置多位於河谷，在主河道部分形狀屬寬長條形；支流溪溝部分形狀屬直且細長，坡度較河岸崩場地緩。

分類(6)房舍：亮白色或淡紅色，位置多位於坡度較緩之河道旁階地以及道路旁，面積形狀為矩形、方形之細小之區塊。

分類(7)開發地：其判釋條件與房舍雷同；不同的是其面積大小較房舍大且色調較房舍稍暗，且坡度與房舍相比有些稍陡。

分類(8)新增崩塌地：亮藍色，經由兩期影像作判釋後，增加在山稜線、及河道周遭之色調較亮之部分，形狀多數為非細長的不規則多邊形，包括新生及舊崩塌地擴大，坡度較舊河道及河道變遷陡。

分類(9)河道變遷：亮藍色，經由多期影像判釋出舊河道擴大之河道，坡度較緩。

分類(10)舊崩塌地：亮藍色，多位於河道旁及接近山稜線，形狀為非細長的不規則多邊形、坡度較陡。

分類(11)道路中斷-河道變遷：在災後因河道變遷而消失之道路。

分類(12)道路中斷-崩塌變遷：在災後因崩塌而消失之道路。

分類(13)受影響房舍：在災後因崩塌及河道變遷消失之房舍。

分類(14)受影響開發地：在災後因崩塌及河道變遷消失之開發地。

表 3 分類特徵規則

分類階層	人工判釋地物特徵	分割尺度	電腦分類篩選特徵
道路	亮白、細長線型	指定分割	指定分類
植生	暗紅、位置	Scale50	災後NDVI \geq 0.26
稀疏植生	亮紅、位置	Scale50	植生分類中，災前NDVI \leq 0.46
陰影	灰黑、位置、不規則形狀	Scale50	最鄰近法及模糊隸屬函數-災後NIR、災後NDVI樣本選取訓練
舊河道	亮藍、位置、較寬之線型、坡度緩	Scale50	最鄰近法及模糊隸屬函數-災前NIR、坡度圖、DTM樣本選取訓練
房舍	亮白、位置、細小區塊、坡度緩	Scale10	最鄰近法及模糊隸屬函數-災前面積(Area)、災前NIR、坡度圖樣本選取訓練
開發地	亮白及淡紅、位置、小區塊、坡度緩	Scale10	最鄰近法及模糊隸屬函數-災前面積(Area)、災前NIR、坡度圖樣本選取訓練
新增崩塌地	亮藍、位置比對、不規則形狀、坡度陡	Scale10	災前後NDVI變異值 $>$ 0.04、坡度圖 $>$ 12.2°
河道變遷	亮藍、位置比對、較寬之線型、坡度緩	Scale10	災前後NDVI變異值 $>$ 0.04、最鄰近法及模糊隸屬函數-坡度圖樣本選取訓練
舊崩塌地	亮藍、位置、不規則形狀、坡度陡	Scale10	最鄰近法及模糊隸屬函數-坡度圖樣本選取訓練
道路中斷-河道變遷		指定分割	在河道變遷物件作指定分類
道路中斷-崩塌變遷		指定分割	在新增崩塌變遷物件作指定分類
受影響房舍		Scale10	在河道變遷、新增崩塌物件作指定分類
受影響開發地		Scale10	在河道變遷、新增崩塌物件作指定分類

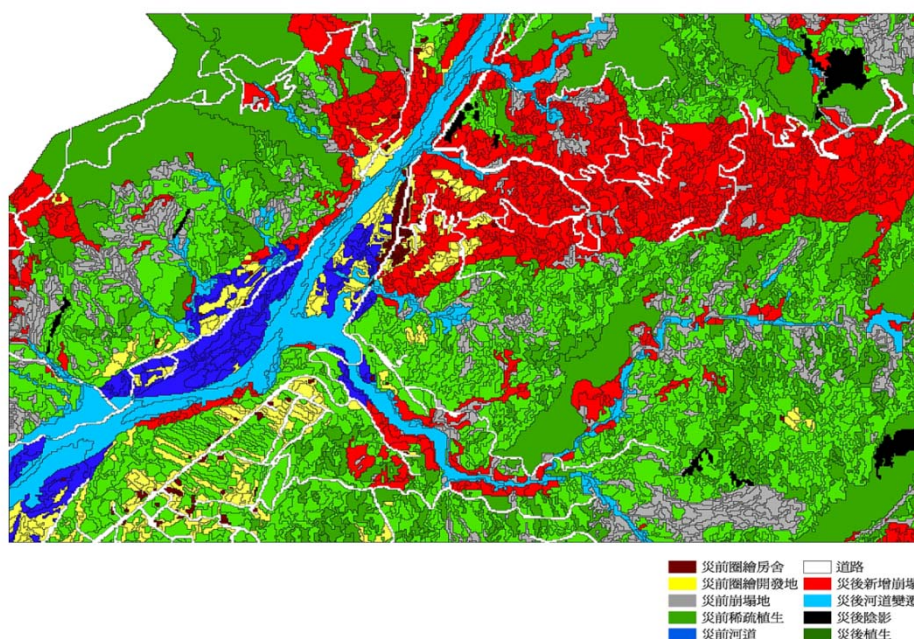


圖 4 小林村人工判釋（災前後原始影像參照圖 3 a、b）

3.2 物件導向分析流程

將影像作分割區塊均質化後，接著經由人工經驗判釋所得經驗，萃取出地貌分類特徵，設置門檻值。其中直接用光譜、NDVI、坡度等單一特徵就能做出分類者為單純地貌，進行分類中之植生、稀疏植生分類。若無法利用單一特徵作出分類，則是複雜地貌，為分類中之陰影、舊河道、房舍、開發地、新增崩場地、河道變遷、舊崩場地、道路中斷-河道變遷、道路中斷-崩塌變遷、受影響房舍、受影響開發地；必須再藉由程式中開發的最鄰近法與模糊隸屬函數（詳 3.3 節），經由選取樣本訓練的方式，進一步將目標地貌鑑別出來。本研究中物件導向分析流程如圖 5 所示。

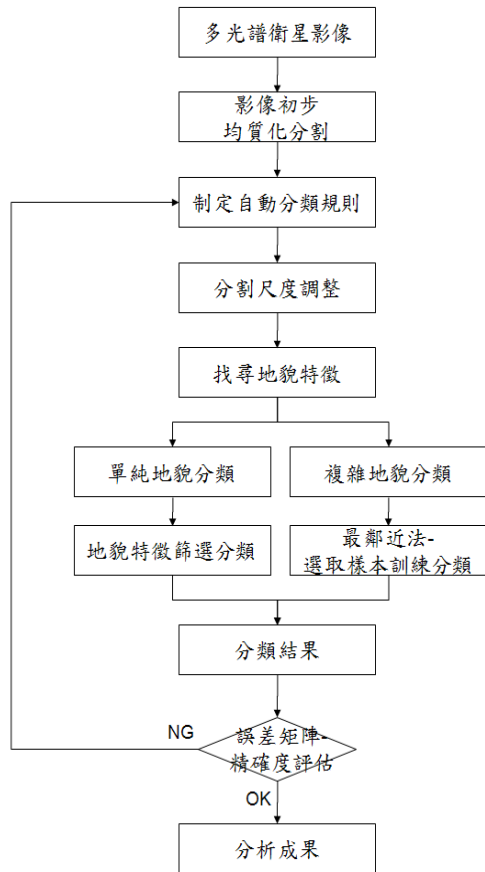


圖 5 物件導向-判釋分類流程圖

分類誤差往往來自於地貌光譜組成之複雜度，若能縮小分析範圍使目標單純化，盡可能以單一資訊分析，就可將兩種地貌作出區別，如以植生指數（normalized difference vegetation index, NDVI）即

可分辨崩場地與植被分類（Goward *et al.*, 1991）；而縮小分析範圍最佳方式就是以階層式篩選以分類（1）開始逐次向分類（14）進行。因此，一套以專家判釋知識所建立於邏輯系統的分類流程規則，將可利用邏輯推論的方式，變成一套符合邏輯程序，將複雜的工作做有效率的簡化完成複雜之分類工作。以下將對於各分類之分割尺度及特徵範圍的選取做說明，統整成有程序的系統化分類規則流程。

3.2.1 分類分割尺度之選擇

3.1.1 節所論述之「門檻值」在系統作分割時，是依據影像性質及使用需求（user-defined）加以定義，此門檻值稱之為分割尺度（scale parameter）。分割尺度在多重解析分割法是一非常重要的參數，此參數可用於決定異質性門檻之上限，改變整體細分過程；也可決定影像中分割物件的平均大小。換言之，此數值設定較高表示允許物件合併之異質性較高，因此物件將會有更多的合併，組合成更大的物件；反之亦然（Rejaur and Saha, 2007）（圖 3 c、d 分別用分割尺度 10、50 的分割成果）。

不同的分割尺度就會產生不同大小之區塊，不是全部地貌特徵都可對應使用同一種分割尺度。至於決定一個合適的分割尺度，就是在於分割出來的區塊邊界能否對上影像中的地貌邊界（如：崩場地邊界）（鄭詠心，2009）。因此可以使用多重解析分割法，針對不同的地貌設定不同之參數，將影像中感興趣的地貌，決定出屬於它們的分割尺度（Baatz and Schape, 2000）。

本研究中依據分類地貌之「面積大小」、「空間位置關係」、「內容豐富度」、「分割效率」做出分割尺度的選擇。面積大小為分析對象於影像中之相對大小，地貌相對較大則使用相對較大之尺度，反之亦然；空間位置關係為兩個或兩個以上之地貌間之空間關係，可以距離與方向描述，亦可以其相鄰、相離、包含等關係來描述，若一個空間關係多為相鄰之地貌則使用相對較大之尺度，相離則用較小之尺度。若是 A 地貌包含於 B 地貌，A 地貌之邊界不符合人工判釋標準為前提，則對於 B 地貌選擇

相對較小之尺度做分割；內容豐富度與分割尺度呈反比；分割效率與分割尺度呈反比。

此外，影像均質化分割部分，也可利用加入圖層的方式，針對圖層的邊界特徵進行指定分割，如：加入 DTM、道路中心線環域分析圖層對於舊河道與道路邊界使用指定分割。以下將對於各分類所設定的分割尺度參數做簡單闡述：

分類(1)道路：多位於山林間，其樹種茂密常遮蔽住道路特徵，常無法辨認。以交通部之道路中心線向量圖層，於 ArcGIS 中進行道路平均寬度 5 m 環域分析產生向量圖層後，加入 Definiens 進行多尺度分割出線型。

分類(2)植生：面積大且空間關係多屬相鄰，使用相對較大之分割尺度。

分類(3)稀疏植生：使用相對較大之分割尺度，理由與植生相同。

分類(4)陰影：面積不一定，空間關係多屬相離，但內容豐富度低，使用相對較大之分割尺度。

分類(5)舊河道：面積大且空間位置相鄰；河道與河道旁側崩塌、開發地之光譜色調相似，因此加入 DTM 圖層使用相對較大之分割尺度對舊河道邊界做出分割。

分類(6)房舍：面積小且空間關係多屬相離，使用相對較小之分割尺度。

分類(7)開發地：使用相對較小之分割尺度，理由與房舍相同。

分類(8)新增崩場地：面積不一定，空間關係不一定，但內容豐富度高，使用相對較小之分割尺度。

分類(9)河道變遷：使用相對較小之分割尺度，理由與新增崩場地相同。

分類(10)舊崩場地：使用相對較小之分割尺度，理由與新增崩場地相同。

分類(11)道路中斷-河道變遷：理由闡述及尺度選擇同道路。

分類(12)道路中斷-崩塌變遷：理由闡述及尺度選擇同道路。

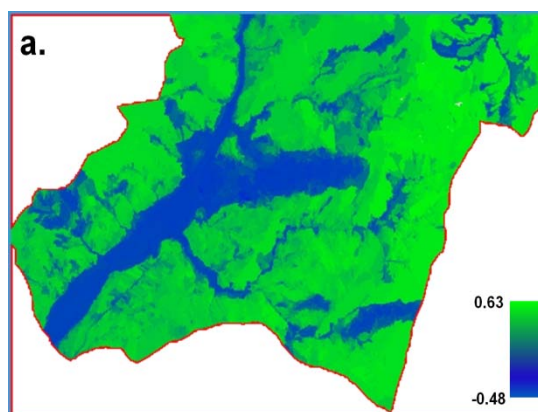
分類(13)受影響房舍：使用相對較小之分割尺度，理由與房舍相同。

分類(14)受影響開發地：使用相對較小之分割尺度，

理由與開發地相同。

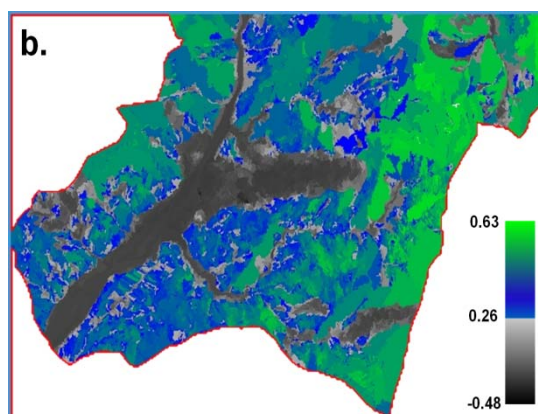
3. 2. 2 分類特徵值之選擇

經分割區塊，構成影像的最小單位為區塊物件，每一區塊將有各自的地貌值（如：光譜值、坡度...等）。接著配合人工思考邏輯以及遙測知識找到凸顯各地貌之分類特徵值。分類植生為例，全幅圖層的災後 NDVI 範圍值介於 $-0.48\sim 0.63$ （圖 6 a）。以災後 NDVI 作出調整篩選後與人工判釋比對，調整後災後影像 NDVI 值介於 $0.26\sim 0.63$ 即為植生區域（圖 6 b）。顯示藍及綠之漸層表示在設定範圍內，相對值低顯示為藍色，高則為綠色；顯示黑及灰則為未在選取範圍內之區域，相對值低顯示黑色，高則為灰色。



災後NDVI為 $-0.48\sim 0.63$

(a) 災後全幅 NDVI 值範圍於 $-0.48\sim 0.63$



災後NDVI為 $0.26\sim 0.63$

(b) 災後植生 NDVI 值範圍於 $0.26\sim 0.63$

圖 6 (a)~(b)植生之分類特徵(災後 NDVI)及其適用範圍

應用以上的方法於各地貌之判釋，即可依序找到非植生部分之各地貌分類特徵及其特徵值範圍，做出合理參數選擇(表 3)。各分類使用鑑別特徵及理由說明如下：

分類(1)道路：多位於山林間，當林相茂密遮蔽住道路特徵，常無法辨認。因此使用道路中心線做 5 m 環域分析之圖層做指定分類。

分類(2)植生：災後之非植生區域為本研究分析重點，因此使用災後 NDVI 值 ≤ 0.63 者分類為植生。

分類(3)稀疏植生：其位置於開發地、房舍及崩場地周邊的植生範圍為稀疏植生，就已屬植生部分，進一步以災前 NDVI 值 ≤ 0.46 區分出。由災前影像才可取得災後房舍及開發地資訊，因災害變遷使之消失或被土石覆蓋無法得其位置，而房舍及開發地除落於災害變遷中，尚有落於稀疏植生中之物件。

分類(4)陰影：對於 NIR 及 NDVI 反應明顯，使用災後 NIR、NDVI 值選取樣本後，做模糊隸屬函數及最鄰近法訓練分類；縮小災後非植生區域，簡化分類複雜度。

分類(5)舊河道：對於 NIR 反應明顯，且坡度較緩，使用災前 NIR、坡度圖選取樣本後，做模糊隸屬函數及最鄰近法訓練分類。

分類(6)房舍：對於災前 NIR 反應明顯，面積小，多位於坡度較緩，使用災後 NIR、NDVI 值選取樣本後，做模糊隸屬函數及最鄰近法訓練分類。

分類(7)開發地：對於災前 NIR 反應明顯，面積小，多位於坡度較緩，但與房舍相比其面積稍大且坡度較陡，使用災後 NIR、NDVI 值選取樣本後，做模糊隸屬函數及最鄰近法訓練分類。

分類(8)新增崩場地：為 NDVI 值災前與災後有產生變化且坡度較陡，因此使用 NDVI 變異值及坡度篩選分類。

分類(9)河道變遷：為 NDVI 值災前與災後有產生變化且坡度較緩，使用變異值及坡度選取樣本後，做模糊隸屬函數及最鄰近法訓練分類。

分類(10)舊崩場地：對於坡度反應明顯，使用坡度選取樣本後，做模糊隸屬函數及最鄰近法訓練分類。

分類(11)道路中斷-河道變遷：落於河道變遷之道路

分類。

分類(12)道路中斷-崩塌變遷：落於新增崩塌之道路分類。

分類(13)受影響房舍：落於河道變遷與新增崩塌之房舍分類。

分類(14)受影響開發地：落於河道變遷與新增崩塌之開發地分類。

3.2.3 分類規則流程敘述

本研究將人工判釋經驗邏輯轉換成電腦輔助之分類規則流程，災後影像分析總共九個步驟，簡述說明如下：

- 步驟(一)-分割 1：以災前及災後 R、G、B、NIR 共 4 個波段 8 張影像加入道路經環域分析圖層進行多重解析分割法做分割；分割尺度選擇 50。
- 步驟(二)-分類 1-道路、植生、稀疏植生、陰影：
 1. 對整幅影像物件進行道路指定分類。
 2. 對剩餘未分類物件在災後 NDVI ≥ 0.26 分類為植生。
 3. 對植生分類物件在災前 NDVI ≤ 0.46 為稀疏植生。
 4. 對剩餘未分類物件作最鄰近法-災後 NIR、災後 NDVI 樣本選取訓練，分類為陰影。
- 步驟(三)-分割 2 (分割出舊河道)：
 1. 對剩餘未分類物件作合併。
 2. 對剩餘未分類物件以災前後 R、G、B、NIR 共 8 個波段加入 DTM 圖層進行多重解析分割法做分割；分割尺度選擇 50 對整幅影像作分割。
- 步驟(四)-分類 2-舊河道：對剩餘未分類物件作最鄰近法-災前 NIR、坡度圖、DTM 樣本選取訓練，分類為舊河道。
- 步驟(五)-分割 3 (分割出房舍、開發地)：
 1. 對剩餘未分類物件作合併。
 2. 對剩餘未分類物件以災前 R、G、B、NIR 共 4 個波段分割尺度選擇 10。
 3. 對稀疏植生分類物件以災前 R、G、B、NIR 共 4 個波段分割尺度選擇 10。
- 步驟(六)-分類 3-人工結構 (房舍、開發地)：

1. 對剩餘未分類及稀疏植生分類物件作最鄰近法-災前面積、災前 NIR、坡度圖樣本選取訓練，分類為房舍。
 2. 對剩餘未分類及稀疏植生分類物件作最鄰近法-災前面積、災前 NIR、坡度圖樣本選取訓練，分類為開發地。
- 步驟(七)-分類 4-變異點 (河道變遷、新增崩塌地)：
 1. 對剩餘未分類、房舍、開發地、道路分類物件在 NDVI 災前後變異值 >0.04 ，分類為變異點。
 2. 對變異點分類物件作最鄰近法-坡度圖樣本選取訓練，分類為河道變遷。
 3. 對變異點分類物件在坡度圖 $>12.2^\circ$ ，分類為新增崩塌地。
 - 步驟(八)-分類 5-舊崩塌：對剩餘未分類物件以最鄰近法-坡度圖樣本選取訓練，分類為舊崩塌地。
 - 步驟(九)-分類 6-災害影響之人工設施 (受影響房舍、開發地、道路)：
 1. 對河道變遷分類物件進一步作道路分類物件指定分類，分類為道路中斷-河道變遷。
 2. 對新增崩塌地分類物件進一步作道路分類物件指定分類，分類為道路中斷-崩塌變遷。
 3. 對河道變遷、新增崩塌地分類物件進一步作房舍分類物件指定分類，分類為受影響房舍。
 4. 對河道變遷、新增崩塌地分類物件進一步作開發地分類物件指定分類，分類為受影響開發地。

3.3 最鄰近法與模糊隸屬函數

承接 3.2 節所提到最理想的分類狀態，不外乎為利用單一影像資訊，就可將欲分類地貌萃取出來，但實際上自然界地貌之影像資訊複雜，電腦輔助判釋通常難以單純利用光譜分析就可將地貌鑑別出來，因此本研究利用「最鄰近法」配合「模糊隸屬函數」對影像資訊複雜的地貌進行分類。

3.3.1 最鄰近法

最鄰近法(nearest neighbor) (Clark and Evans, 1954) 的分類過程，首先從欲分類之地貌中選取數個具有代表性之取樣物件，然後對每個影像物件搜尋其最接近距離之取樣物件，以此物件為中心；特徵空間標準距離 (d) 為半徑，將此最鄰近法的特徵空間內的物件都攫取為欲分類之物件，而其空間標準距離的計算式如下：

$$d = \sqrt{\sum_f \left(\frac{v_f^{(s)} - v_f^{(o)}}{\sigma_f} \right)^2} \quad (1)$$

式 (1) 中， d 為取樣物件 s 和影像物件 o 間的距離， $v_f^{(s)}$ 為取樣物件對特徵 f 的特徵值 (如光譜中的 DN 值)， $v_f^{(o)}$ 為影像物件對特徵 f 的特徵值， σ_f 為特徵 f 之特徵值的標準差，所以 d 之物理意義為所有特徵值的標準差，將取樣物件和影像物件在特徵空間的距離標準化。

3.3.2 模糊隸屬函數

模糊集合理論 (fuzzy set theory) 於 1965 年由美國加州大學柏克萊分校 Zadeh 教授首先提出 (Zadeh, 1965)，其採用模糊集合的概念，以模糊邏輯 (fuzzy logic) 來描述現實的事物，有別於傳統的二值關係，例如「是」為「1」及「否」為「0」，在現實世界中，有許多事物並非只有是與否的關係，而是具有位於是與否中間過渡的差異，故模糊理論更能用來表現真實世界所呈現的事與物，例如影像中定義二值影像黑與白的範圍，其假設灰階小於等於 0.26 定義為黑，大於等於 0.28 則定義為白，而在 0.26~0.28 間就是黑與白之間的過渡地帶，在 Zadeh 教授則使用「隸屬度函數值」(membership functions) 來描述其間的關係，因此可以使用模糊理論來表示人類思考時常會發生的「不確定」或「含糊」的概念。

本研究使用之隸屬度函數是利用樣本訓練後產生，以河道變遷為例說明 (圖 7)；各物件之坡度值對應到包絡線將決定出隸屬度函數值，其函數

值大於 0 則明確定義為「是」；函數值等於 0 則定義為「否」。定義「是」之物件將會被鑑別出為河道變遷物件。

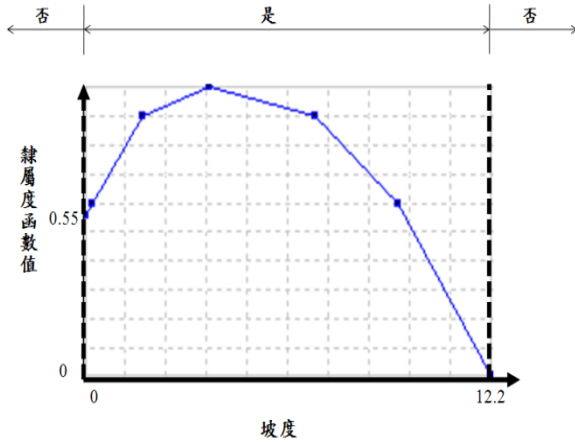


圖 7 河道變遷-樣本訓練之隸屬函數，當坡度介於 0°~12.2°之區塊定義為河道變遷分類，反之當坡度大於 12.2 者被定義為新增崩塌(表 2)。

3.4 影像變異法

在影像前處理階段若可達到幾何零誤差、輻射值標準化，並且處理影響分析之物件（如：雲霧、陰影）；在解決大多數影響兩幅事件前後期影像的

資料後，只要簡單的將前後期影像相減（每一個在空間上對應像元的輻射值相減），就可得到所謂的差值影像，此差值影像即代表該事件前後期的環境變化圖（change map），差異值越高的區域表示變化越大。Coppin 等人（Coppin *et al.*, 2004）回顧了幾種變化偵測的方法（change detection algorithm）（表 4），其中也包括本研究中所使用的直接相減法（univariate image differencing）。

一般而言在大規模災害發生時，影響人類生活環境（道路、房舍、開發地）最嚴重的因素，莫過於自然變遷中的崩塌及河道變遷。在對單一影像作崩塌等分類時，通常因為崩塌塊體滑落覆蓋植生，因此可由 NDVI 將崩塌物件等萃取出來，接著配合直接相減法（Eastman and Mcendry, 1995），偵測影像之變遷。本研究以此單一事件中的災前、後 NDVI 值，相減後之結果平方（式 2）得到自然環境之變異值作為篩選分類變異點的指標，平方為了將此差值放大，使的有變異的物件更能凸顯出來。

$$\text{變異值} = (\text{災前 NDVI} - \text{災後 NDVI})^2 \quad (2)$$

表 4 變異偵測演算法適用情況之比較(Coppin *et al.*, 2004)

變異偵測演算法	資料類型轉換	變異類型	適用變遷條件	典型範例
Post-classification comparison	是	突發變異	事件別	森林樹種之更替
Composite analysis	否	程序漸變	事件別	落葉偵測
Univariate image differencing	不限	不限	不限	平原變遷監測
Image ratioing	是	突發變異	事件別	地表覆蓋變化
Bi-temporal linear data transformation	不限	不限	不限	林段監測
Change vector analysis	不限	不限	不限	地表覆蓋變化
Image regression	是	突發變異	事件別	熱帶雨林之衰減
Multi-temporal spectral mixture analysis	否	程序漸變	事件別	熱帶雨林監測
Multidimensional temporal feature space analysis	否	程序漸變	事件別	林地開發

4. 影像分類之改進與成果

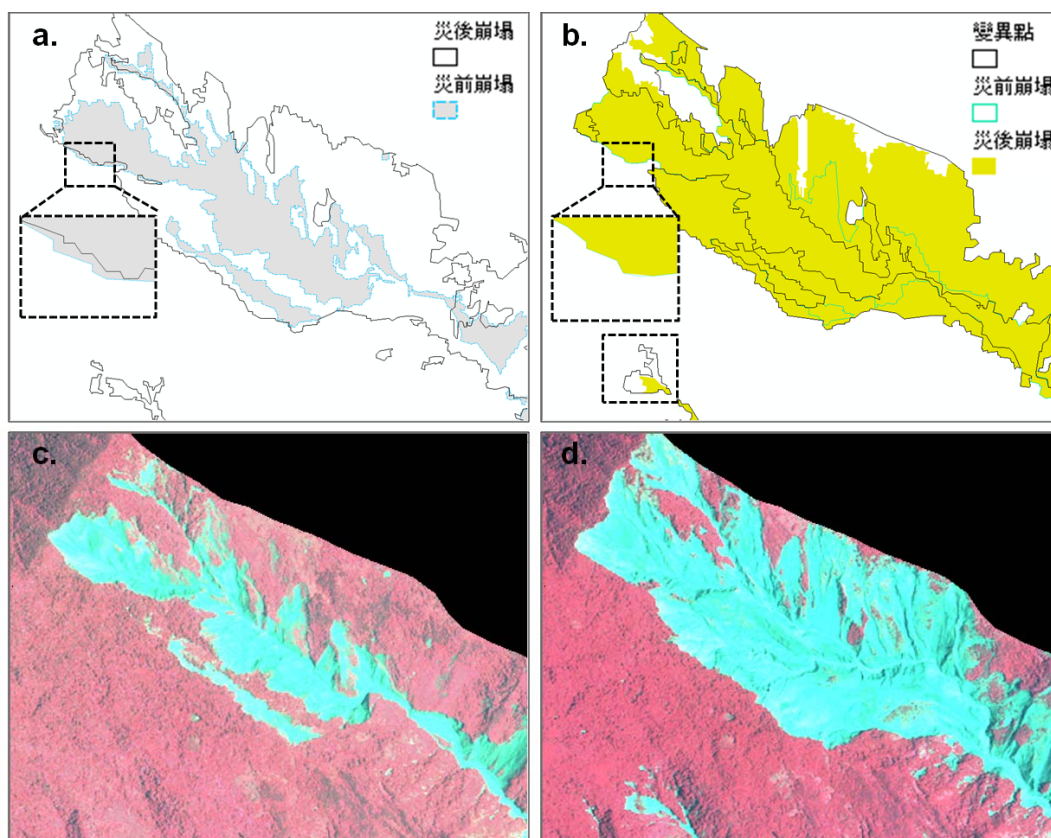
利用上述之研究方法進行影像之分割及分類會遭遇一些問題，以下將針對在分類時產生的問題及改進後的成果加以論述。

4.1 以事件前後兩期影像同時均質化區塊分割處理

以物件導向式電腦輔助分析進行影像分類，與像素式分析相比，固然有許多優點。但是在瞭解災前、後變遷情形的面積增加估算時，不管是物件、像素式分析都會有災前、後變遷作相減，其分類結果邊界不符合邏輯之狀況，如：以物件導向式分析，

對單一期影像作均質化區塊分割分類後，災前崩塌邊界會超出災後崩塌邊界的情形（圖 8 a）。問題產生原因可能為災前、後衛星影像拍攝之時間、氣候、拍攝方位條件不同，使災前、後變遷在分類後進行相減對面積估算時產生問題，這種狀況即使在經過精準的影像前處理校正後，仍會些微偏差的問題發生。

本研究將以 3.1.1 節所敘述的影像分割方法應用於兩期影像各自 4 個波段（R、G、B、NIR）總共 8 幅影像；同時做均質化的區塊分割處理，其區塊分割結果（圖 3 c、e），可看到災前、後影像之分割區塊大小一致，經由前後期影像的光譜填色後，仍能將未區塊均質化處理的原始影像重要資訊展示出來，因此克服以上所述之邊界問題。



- (a) 布唐布納斯溪上游崩塌-以單期災前、後作分割，災前後邊界不一致情況。
- (b) 布唐布納斯溪上游崩塌-以兩期災前、後同時作分割，災前後邊界已趨於一致，且左下角方框中可見崩塌漏估減少情況。
- (c) 布唐布納斯溪上游崩塌-災前原始影像。
- (d) 布唐布納斯溪上游崩塌-災後原始影像。

圖 8 影像分割後邊界展示圖

4.2 物件導向之變異點監測

變異情形在許多的前人研究中，多半利用影像光譜及紋理資訊，找到在單期影像中欲分類的地貌後再做比對得取。但通常因為變異判釋單在比對前的分類就會產生判釋誤差之問題；而兩幅影像各自分類後再作比對時又會因為邊界之不同再一次產生 4.1 節所論述之問題。因此，在本研究中除使用兩幅影像均質化區塊分割處理解決邊界問題後，以 3.4 節之影像變異法作以變異點的監測將可使判釋誤差降低。

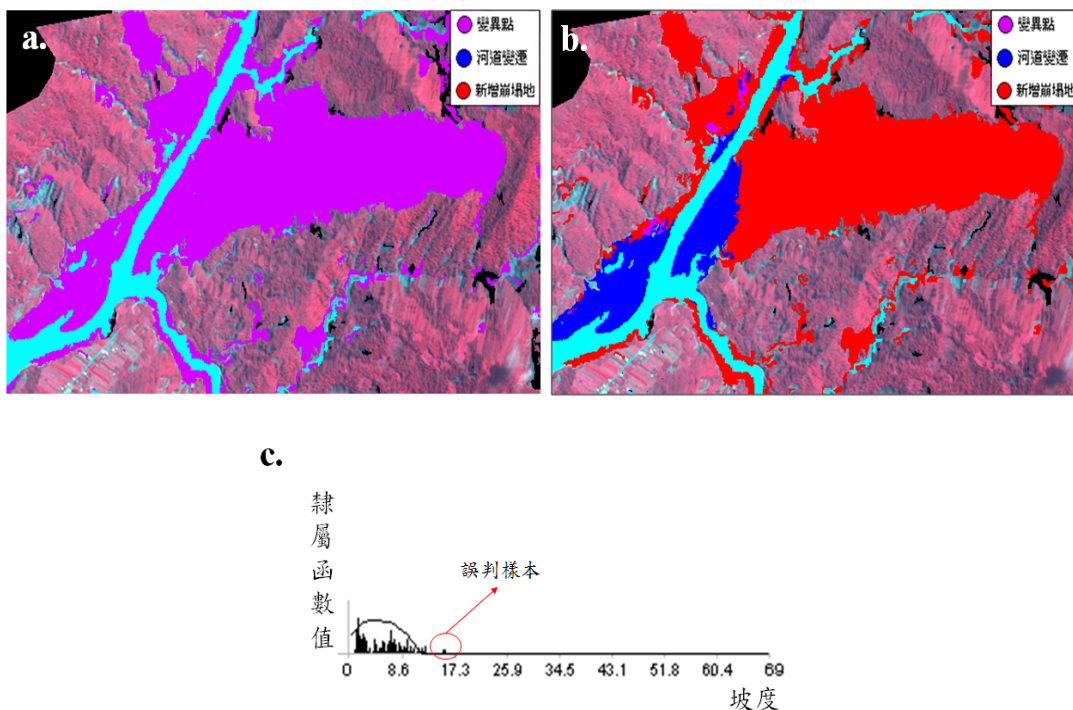
以位於荖濃溪支流布唐布納斯溪上游大規模崩塌作一說明(圖 8 b)，黑色實線部分為以變異法做出之 NDVI 變異值其變異點情形；綠色實線及黃色圖框為單以災前、後 NDVI 值作出之崩塌塊體圈繪的情形，由此可發現以影像變異法分析後使得崩

塌漏估狀況降低。

4.3 變異點區別-河道變遷與新增崩場地

河道變遷與新增崩場地分類在單期影像分析中，不論是以光譜或是坡度作分析常會有難以區分之窘境發生。

因此，本研究利用 3.3 節所論述之最鄰近法與模糊隸屬函數，從中選取樣本進行分類訓練。先經由影像變異法作出變異點分類(圖 9 a)，接著從變異點分類物件中，配合坡度為特徵，選取河道變遷分類的樣本作以訓練，直線條為在影像中選取的物件樣本的坡度分佈(圖 9 c)；訓練運算處理後產生一包絡線，接著系統將以此包絡線判定河道變遷之地貌分類(圖 9 b)。



- (a) 以影像變異法作出變異點分類情形。
- (b) 以最鄰近法及模糊隸屬函數以坡度圖為特徵，選取樣本訓練分類後之新增崩場地及河道變遷分佈情形。
- (c) 以最鄰近法與模糊隸屬函數選取河道變遷分類樣本訓練之隸屬函數值與坡度關係圖，落於隸屬函數外的資料為產生誤判的樣本。

圖 9 變異點區別-河道變遷與新增崩場地

4. 4 誤差矩陣

災後影像對以上 14 種地貌分類進行物件導向影像自動判釋後，使用誤差矩陣 (error matrix) 進行精確度計算，在此需注意的是道路分類，如 3.2.2 節所述為指定分類，因此有關於道路分類之 3 種分

類都不納入計算(表 5)，最後得到整體精度(overall accuracy) 為 81.6%，Kappa 值為 0.798。災前影像分類成果利用誤差矩陣對 7 種未受災害影響之地貌分類進行精確度計算，最後得到整體精度 (overall accuracy) 為 87.4%，Kappa 值為 0.853(表 6)。

表 5 災後分類成果之誤差矩陣

		樣本											
		陰影	植生	舊河道	河道變遷	新增崩塌地	房舍	受影響房舍	稀疏植生	開發地	舊崩塌	受影響開發地	Sum
分類階層	陰影	44	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	44
	植生	2	48	0	0	0	0	0	3	0	0	0	53
	舊河道	0	0	38	3	1	5	1	0	1	0	2	51
	河道變遷	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	7	54
	新增崩塌地	0	0	2	0	43	0	0	0	0	0	5	50
	房舍	0	0	0	0	0	33	3	0	0	0	1	37
	受影響房舍	0	0	0	0	4	1	37	0	0	0	0	42
	稀疏植生	3	2	0	0	0	1	0	47	9	4	0	66
	開發地	0	0	1	0	0	7	0	0	36	0	0	44
	舊崩塌	1	0	8	0	0	0	0	0	0	45	0	54
	受影響開發地	0	0	0	0	0	0	9	0	2	0	31	42
	unclassified	0	0	2	2	0	0	1	0	3	1	1	13
	Sum	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
	Accuracy												
生產者精度	0.88	0.96	0.76	0.94	0.86	0.66	0.74	0.94	0.72	0.9	0.62		
使用者精度	1	0.96	0.74	0.87	0.86	0.89	0.88	0.71	0.81	0.83	0.73		
整體精度	0.816												
Kappa	0.798												

表 6 災前分類成果之誤差矩陣

		樣本							Sum
		陰影	植生	舊河道	房舍	稀疏植生	開發地	舊崩塌	
分類階層	陰影	49	1	1	0	0	0	2	53
	植生	0	48	0	0	1	0	0	49
	舊河道	0	0	38	3	0	2	2	45
	房舍	0	0	0	45	0	0	0	45
	稀疏植生	1	1	0	0	47	9	2	60
	開發地	0	0	2	2	0	35	0	39
	舊崩塌	0	0	7	0	0	2	44	53
	unclassified	0	0	2	0	2	2	0	6
	Sum	50	50	50	50	50	50	50	
Accuracy									
生產者精度	0.98	0.96	0.76	0.9	0.94	0.7	0.88		
使用者精度	0.924	0.979	0.844	1	0.783	0.897	0.830		
整體精度	0.874								
Kappa	0.853								

5. 成果展示應用

5.1 各分類成果

應用先前建立之分類規則流程，對福爾摩沙衛星二號衛星在莫拉克颱風事件災害前後期，作拍攝之影像進行研究區域-高雄縣那瑪夏鄉、小林村、桃源村及勤和村分析，災後影像分類成果如圖 10；災前影像分類成果如圖 11。

災後之成果以小林村區域(圖 12 a)配合現地照片及航照圖由西至東做一細部分類成果說明(圖 12 b~e)：

1. 小林村西側崩塌細部展示中(圖 12 b)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其災後冠部崩塌向稜線延伸毀及道路之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示其災前舊崩塌判釋情形。

2. 五里埔耕地細部展示中(圖 12 c)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示落於五里埔耕地之房舍；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示開發地及稀疏植生判釋情形。

3. 小林村南側台 21 線 224k+600 第八號橋細部展示中(圖 12 d)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示台 21 線因河道變遷使之道路下邊坡掏刷造成毀損之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示第八號橋受河道變遷影響毀損之判釋情形。

4. 小林村原址細部展示中(圖 12 e)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示上方小林村大規模崩塌以及河道變遷使之房舍及開發地受影響之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示小林村上方崩塌影響房舍、開發地以及道路之判釋情形。

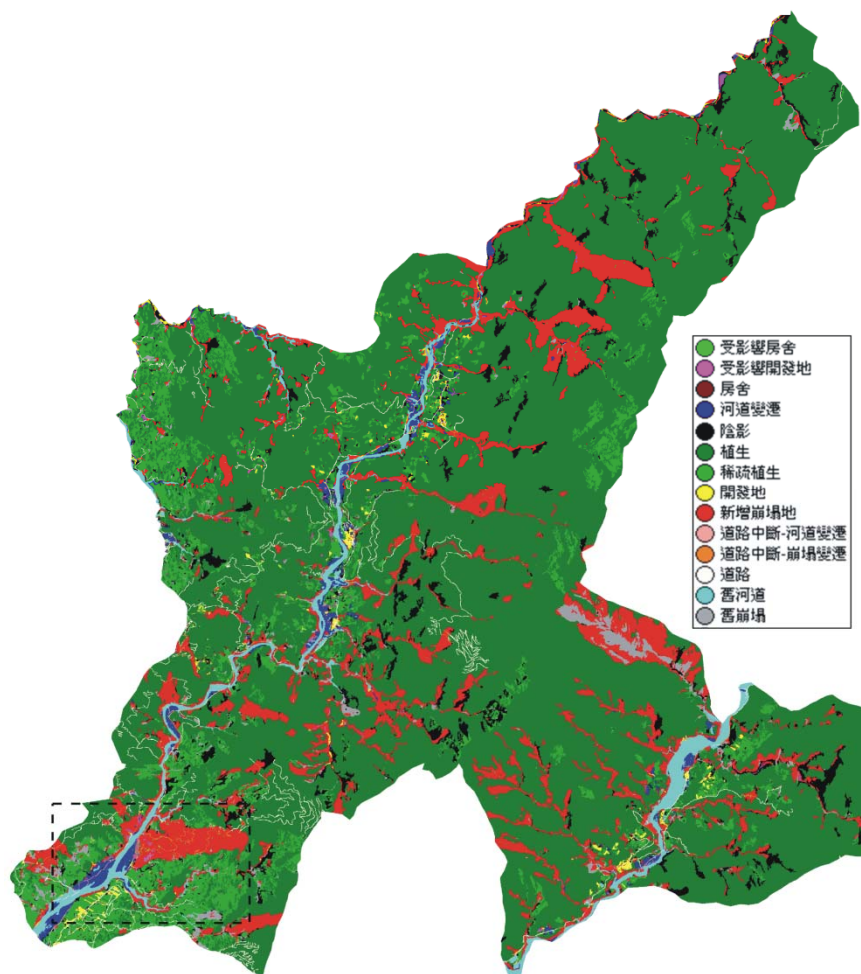


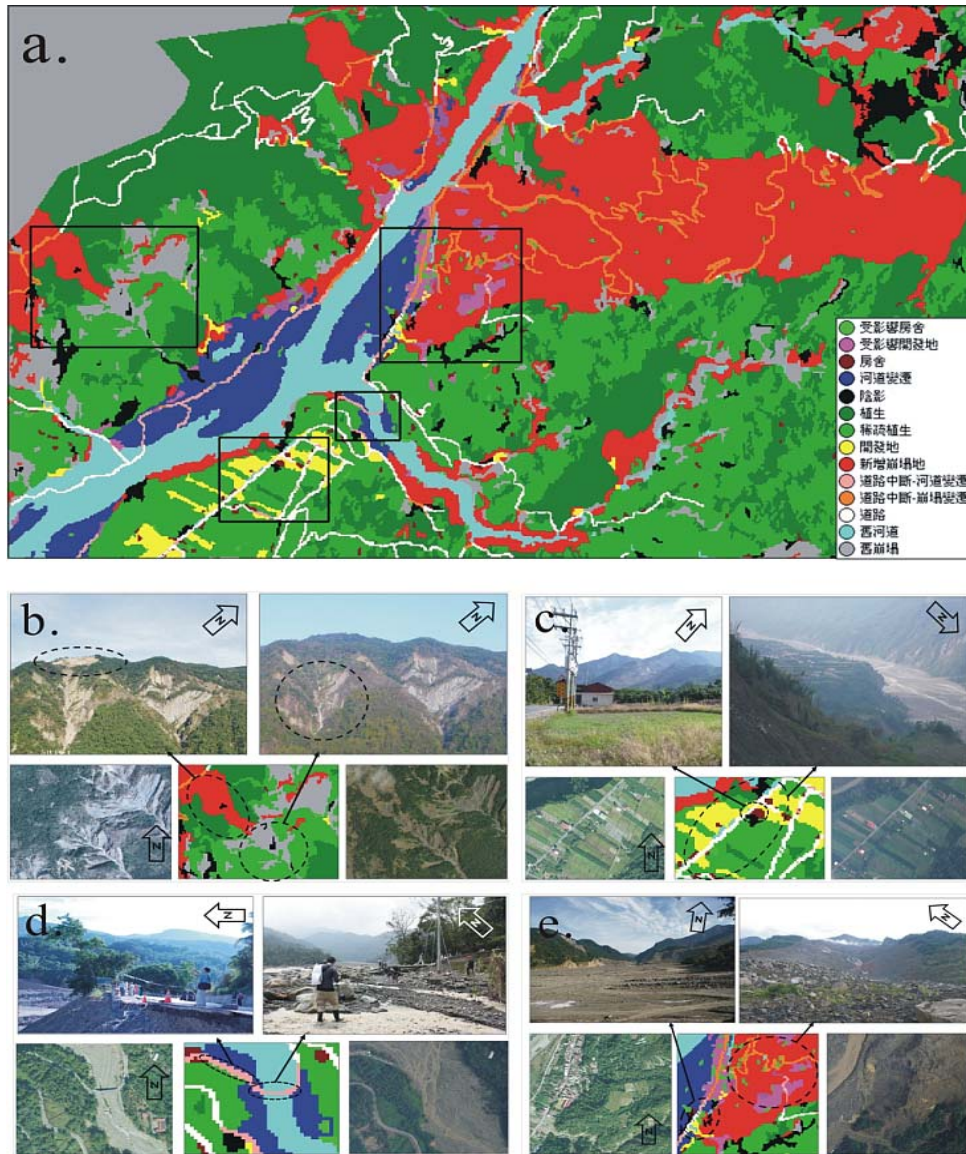
圖 10 災後影像十四種地貌分類成果，黑色虛線圖框為圖 4 人工判釋訓練區範圍及局部區域分類成果



圖 11 災前影像七種地貌分類成果

災後之成果以小林村區域(圖 12 a)配合現地照片及航照圖由西至東做一細部分類成果說明(圖 12 b~e)：

1. 小林村西側崩塌細部展示中(圖 12 b)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其災後冠部崩塌向稜線延伸毀及道路之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示其災前舊崩塌判釋情形。
2. 五里埔耕地細部展示中(圖 12 c)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示落於五里埔耕地之房舍；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示開發地及稀疏植生判釋情形。
3. 小林村南側台 21 線 224k+600 第八號橋細部展示中(圖 12 d)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示台 21 線因河道變遷使之道路下邊坡掏刷造成毀損之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示第八號橋受河道變遷影響毀損之判釋情形。
4. 小林村原址細部展示中(圖 12 e)，左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示上方小林村大規模崩塌以及河道變遷使之房舍及開發地受影響之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示小林村上方崩塌影響房舍、開發地以及道路之判釋情形。



- (a) 小林村區域成果。
- (b) 小林村西側崩場細部成果與現地照片、災前後航照比對。左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其災後冠部崩塌向稜線延伸毀及道路之判釋情形；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其災前舊崩場判釋情形。
- (c) 五里埔耕地細部成果與現地照片、災前後航照比對。左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其落於五里埔耕地之房舍；右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示其開發地及稀疏植生判釋情形。
- (d) 小林村南側台 21 線 224k+600 第八號橋細部成果與現地照片、災前後航照比對。左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其台 21 線因河道變遷使之道路下邊坡淘刷造成毀損之判釋情形；以及右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示其第八號橋受河道變遷影響毀損之判釋情形。
- (e) 小林村原址細部成果與現地照片、災前後航照比對。左上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示，其上方小林村大規模崩塌以及河道變遷使之房舍及開發地受影響之判釋情形；以及右上之現地照片配合成果相對位置以虛線圈繪表示其小林村上方崩塌影響房舍、開發地以及道路之判釋情形。

圖 12 小林村區域成果展示

各影響人民生活環境經 ArcGIS 分析各分類統計，其統計運算如表 7。研究區內之崩壞比由災前的 1.5% 災後增加為 10.5%、河道變遷河段達 307 處，災後河道面積相對於災前增加 32%、受影響之開發地達 26%、受影響之房舍達 26% (1179 處)、受影響之道路達幾 18% (2281 處)。

5.2 崩塌地成果

本研究結果與經濟部中央地質調查所於此次莫拉克颱風事件後，對崩塌地圈繪圖層作比較 (圖 13)，經由比對後了解地調所圈繪之圖層只對單幅災後影像作崩塌地之圈繪；本研究對於災前後影像之舊崩塌與新增崩塌各別作出圈繪，且另外在崩塌圈繪包含主流及支流河道側蝕、下切之側崩塌。於

本研究中對於陰影及河道變遷尚有做出分類，因此部分於比對圖層中 (圖 13) 如藍色方框內之地貌，會有判釋差異。

5.3 崩塌災害與河流關聯探討

河流 (包括主流與支流) 距離 5m 以內之崩塌成果經 ArcGIS 分析計算後，佔新增崩塌比例高達 58% (表 7)。其崩塌位置多位於河道轉彎之攻擊岸與河道之兩側，於現勘調查旗山溪及荖濃溪沿岸，由水痕高度、沿岸樹皮刮落痕跡及邊坡土石流動之擦痕，推論為莫拉克颱風帶來之豪大雨引致河水暴漲、溪水快速洩降及夾帶土石刮蝕，使之護岸及邊坡趾部受損引致沿岸崩塌。

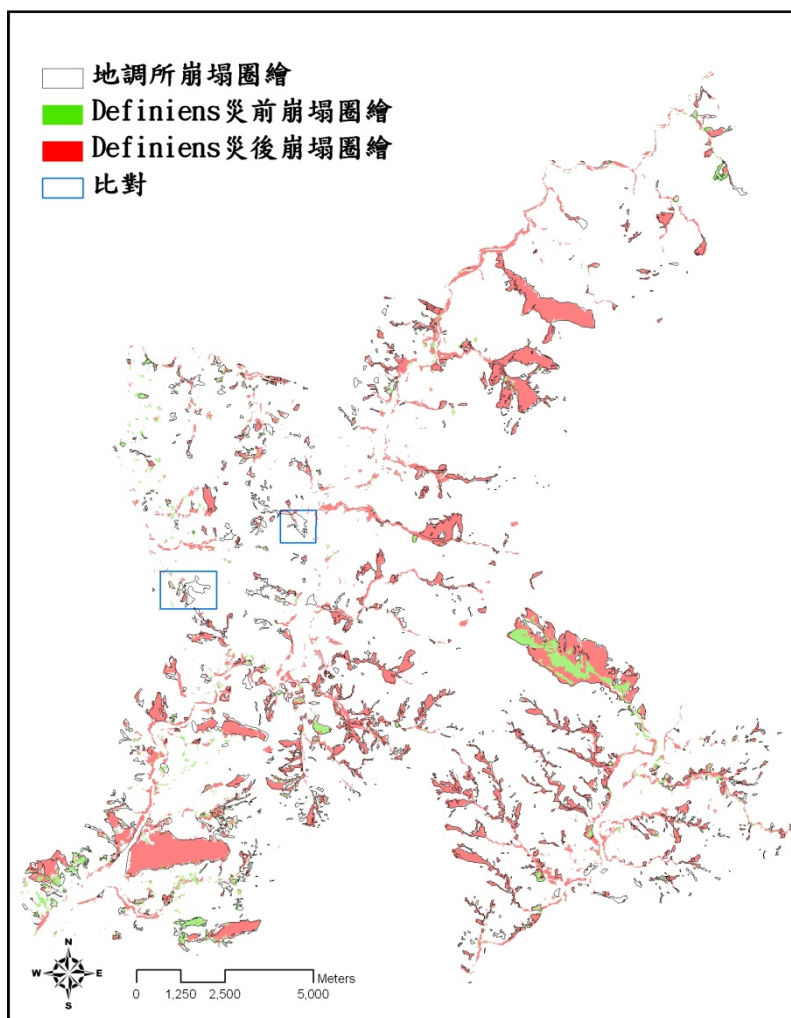


圖 13 地調所與 Definiens 崩塌圈繪比對

表 7 影響人民生活環境之分類統計運算

比例	算式	結果
災前崩塌比	崩塌比 = $\frac{\text{崩塌面積}}{\text{研究區域面積}}$	1.5%
災後崩塌比		10.5%
災後河道增加比例	災後河道增加比例 = $\frac{\text{河道變遷面積}}{\text{河道變遷面積} + \text{舊河道面積}}$	32%
河道相關之新增崩塌比例	河道相關之新增崩塌比例 = $\frac{\text{河道相關之新增崩塌面積}}{\text{新增崩塌面積}}$	58%
受影響開發地比例	受影響比例 = $\frac{\text{受影響面積}}{\text{總面積}}$	26%
受影響房舍比例		26%
受影響道路比例		18%

6. 結論與建議

6.1 結論

本研究利用物件導向的遙測分析方法來對地貌作以分類，所獲心得與結論說明如下：

1. 使用物件導向之方法針對災前、後兩幅影像內的影像光譜與地形資訊。同時進行多尺度分割分析，將可解決在對影像比對時邊界產生不符合邏輯之現象，可使的災前、後分割均質化後之區塊大小一致。
2. 由影像判釋邏輯中，只針對災前、後之重要資訊做分類（如：災前房舍、開發地；災後新增崩塌、河道變遷），將可忽略不感興趣之類別間之數量及節省前、後期影像判釋及比對時間。
3. 分類規則流程的建立，其順序若能以簡易的地貌至複雜為原則，則可將複雜的工作做有效率的簡化，可參考本研究分析整理規則（表 3）。
4. 最鄰近法與模糊隸屬函數，對複雜的地貌分類，作有效的樣本選取後，配合相關的特徵資訊作以訓練，將能把複雜的分類萃取出。
5. 經由判釋分類與現地調查，了解研究區域之崩塌災害多與河流切割坡腳有關連性。

6.2 建議

好的影像邏輯判斷，須對判釋分類地貌之地質構造及地貌知識有一定了解，才能依人為判釋語意和物件導向之遙測分析作連結。

本研究中以電腦判釋約 27,400 公頃之面積，花費總計約為 5 個小時的工作時間；人工判釋小林村局部區域約 3,000 公頃花費約 15 個小時。由此可知其電腦自動判釋之快速性，而電腦判釋花費較長時間為樣本選取之部分，一個好的分類結果可能由 1~5 個樣本選取就可決定；而所謂好的樣本，就是可決定出分類地貌其特徵範圍的上下限。未來若能以各地貌分類特徵之反應建立資料庫，更能縮短時間以便遇到不同之分析區域時不用再重新訓練模型。

而經由以上論述的結論將可將 80% 以上的分類完整的標示出來，但尚有少部分物件因特徵設定限制與訓練後的結果鑑別效果較差，因此造成誤差及未分類之情形，例如表 4 中之房舍及受影響開發地（生產者精度為 66%、62%）。若未來能成熟運用及發展此技術，除可得到更多人工結構物和其自然災害的關係，若應用於災害潛勢分析，相信能更加準確的預測災害可能發生位置，對於土木工程的發展建設規劃，將能有更佳之參考依據。

參考文獻

- 李維峰、冀樹勇、王昭雯、黃佳駿、廖洪鈞、陳正興，2009，莫拉克風災地工災情統計分析，地工技術，第 122 期：第 5-12 頁。
- 陳清泉、李咸亨、王乾盈、陳堯中、謝玉山、林銘郎、陳國華、林國峰、陳賜賢、李光敦、鄭克聲、陳明杰、郭一羽、陳良健，2010，莫拉克颱風高雄縣甲仙鄉小林村及那瑪夏鄉、桃源鄉致災原因調查，中國土木水利工程學會，台灣。
- 洪凱政，2009，應用多光譜影像多種特徵偵測崩塌地之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系，碩士論文。
- 黃帥豪，2008，運用影像處理於航照影像之自動河道變遷分析，私立中原大學資訊工程學系，碩士論文。
- 鄧佩欣，2009，物件導向式分類應用在土地利用類別判釋之研究，私立逢甲大學土地管理學系，碩士論文。
- 鄭詠心，2009，利用 LiDAR 對第一生產力資源參數與林相自動判識差異分析，國立成功大學資源工程學系，碩士論文。
- Arroyo, L. A., Johansen, K., Armston, J., Phinn, S., 2010, Integration of LiDAR and QuickBird imagery for mapping riparian biophysical parameters and land cover types in Australian tropical savannas, *Forest Ecology and Management*, Vol. 259, Issue 3, pp. 598-606.
- Asselenand, S. van, Seijmonsbergen A.C., 2006, Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM, *Geomorphology*, Vol. 78, Issues 3-4, pp. 309-320.
- Baatz, M., Schape, A., 2000, Multiresolution segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation, *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Beitrage zum AGIT-symposium salzburg 2000*: pp. 12-23.
- Clark, P. J., Evans, F. C., 1954, Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations, *Journal of Ecology*, Vol. 35, Issue 4: pp. 445-453.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E., 2004, Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25: pp. 1565-1596.
- Definiens AG, 2003, *ECognition user's guide*, Definiens Image, Germany.
- Eastman, J. R., McKendry, J. E., 1995, *Change and time series analysis: Explorations in Geographic Information Systems*, United Nations Institute for Training and Research, Vol. 1: pp. 6-34.
- Goward, S. N., Markham B., Dye, D. G., Dulaney, W., Yang, J., 1991, Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 35, no. 2-3: pp. 257-277.
- Martha, T. R., Kerle, N., Jetten Victor, Westen, C. J. van., Kumar, K. V., 2009, Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods, *Geomorphology*, Vol. 116, Issues 1-2, pp. 24-36.
- Moine, M.; Puissant, A., Malet, J.-P., 2009, Detection of landslides from aerial and satellite images with a semi automatic method. Application to the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Landslide Processes: from geomorphological mapping to dynamic modellin*, pp. 63-68
- Rejaur Rahman, Md., Saha, S.K., 2007, Multi-resolution segmentation for object-based classification and accuracy assessment of land use/land cover classification using remotely sensed data, *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 36: pp. 189-201.
- Zadeh L. A., 1965, Fuzzy sets, *Volume 8, Information and Control*, Issue 3: pp. 338-353.

Applying Object-Oriented Analysis to Segmentation and Classification of Landslide and Artificial Facilities with Remote Sensing Images

Wei-Kai Huang¹ Ming-Lang Lin^{2*} Liang-Chien Chen³ Yen-Hsiang Lin⁴ Cheng-Yang Hsiao⁴

ABSTRACT

In this study, object-oriented analysis method was applied to interpret landslide and flood disasters before and after Typhoon Morakot with remote sensing images. It is shown that remote sensing images in wide area can be recognized quickly using this method. Two images before and after the disaster were homogeneously segmented to generate the same blocks in order to solve the boundary problem in feature classification. Based on the rules of artificial interpretation, proper information (ex. spectral values, slopes...etc.) was added to construct hierarchical logic, classifying 14 different kinds of features. The classification results are double checked with aerial photographs and field investigation. The overall accuracy of final training outcome based on the error matrix assessment is about 83.3%. The results show that the landslide ratio increased from 1.5% to 10.5%, blocks features of river channel increased 307 sites, area ratio increasing to 32% compared with the original river channel area, 26% of the developed lands were affected, 26% (1179 sites) of the houses were affected, 18% (2281 sites) of the roads were affected .

Keywords: Typhoon Morakot, object-oriented, segmentation, classification, nearest neighbor method, image difference, landslide, artificial facilities.

¹ Department of Taiwan University Civil Engineering Graduate Student

² Department of Taiwan University Civil Engineering Professor

³ Department of National Central University Civil Engineering Professor

⁴ Sinotech Engineering Consultants, INC. Research Engineer

* Corresponding Author, Phone: 886-2-33664348, E-mail: mlin@ntu.edu.tw

Received Date: Mar. 31, 2010

Revised Date: Apr. 29, 2010

Accepted Date: Jun. 11, 2010

台東地區土砂災害之生態環境脆弱度評估

陳桂嘉¹ 吳守從² 陳朝圳^{3*}

摘要

知本溪與太麻里溪為台東縣較嚴重的莫拉克颱風土砂災害集水區，崩塌是該集水區內最嚴重的土砂災害類型。本研究目的在於發展土砂災害集水區的生態環境脆弱程度評估模式。研究方法係整合 GIS 與 RS 技術，利用因素分析求解崩場地影響因子權重，並以環境脆弱度指標，評估集水區生態脆弱區域，同時建構以自然環境潛在因子，以及保全對象危害度因子為基礎的崩場地復育需求模式，並利用莫拉克颱風造成的崩場地作為脆弱度區域之驗證。研究結果顯示，除了環境區位因子的干擾外，人為開發亦為崩場地發生的重要影響因子；在脆弱度分析方面，兩個集水區均顯現崩場地確實是處於高危險且高脆弱之地區，其中又以太麻里溪集水區最為嚴重，整個區域內被歸類於極脆弱等級之崩場地高達 41.35%。依據本研究建立的崩場地復育需求評估模式，顯示太麻里溪集水區崩場地有較高的復育處理需求，因此研究結果有助未來集水區進行治理及崩場地植生復育之參考。

關鍵詞：生態環境脆弱度、土砂災害、植生復育評估、集水區、莫拉克颱風

1. 前言

台灣位處菲律賓海洋板塊及歐亞大陸板塊交接處，在地震頻繁，地質組成複雜，颱風、豪雨等潛在因子影響，與山坡地過度開發，人為建設增加，921 地震後的外在劇烈干擾之下，導致山坡地容易引發山崩、洪水及土石流等土砂災害。吳杰穎、等(2008)曾指出，颱風是台灣最頻繁的天然災害，以東部及北部最受衝擊，其中東部更成為全台最易受災地區；此外，在全球氣候變遷影響下，劇烈天氣所導致的山區大量降雨，更使山崩發生機率逐年升高(鄭皆達、等，2003；呂明翔，2007)，因此環境對於崩場地的抗衡能力亦成為各界所關注之議題。全球氣候變遷(Global Climate Change) 第二次評估報告(IPCC Second Assessment Report, 1997)曾提及，「脆弱度組成構面的具體定義，包含系統暴露在某一環境下的特徵強度(或速率)、易敏感而受影響之對象，以及對抗外界干擾的調適能力等三大構面」

(IPCC, 1997)；而系統的不安定度，以及對外界干擾的敏感性，可表示為對干擾活動的反應速度、程度，以及強度大小(王介勇、等，2005；田亞平、等，2005)。

RS 與 GIS 具有能透過高度的空間、時間與光譜解析力整合，以及取得地表資訊進行空間套疊分析的特性，實為近年來進行崩場地研究之重要工具。Di *et al.*(2008)曾利用 GIS 建立土石流危險評估模型，其方法乃根據 DEM、地質圖與 24 小時降雨資料，結合社會經濟條件，以迴歸分析進行土石流之風險評估，並依所推估之潛在危害區域與脆弱性，把四川省之嚴重等級分為四類；同時透過風險測繪與建模，區分土石流危險保全之程度，以提供當地居民與政府作為有效治理與預防的參考資料。此外，另有研究針對區域內各影響因子，以空間主成份分析法(Spatial Principle Component Analysis, SPCA)篩選對區域內生態環境脆弱度最具影響的組成因子，並進一步利用生態環境脆弱度評估模式，探討脆弱度長期變遷的情形，結果均顯示生態環境脆弱

¹ 國立屏東科技大學森林系 碩士

² 實踐大學觀光管理學系 副教授

³ 國立屏東科技大學森林系 教授

*通訊作者，電話：886-8-7703202ext.7147, E-mail: cct@gisfore.npust.edu.tw

收到日期：民國 99 年 04 月 08 日

修改日期：民國 99 年 05 月 14 日

接受日期：民國 99 年 06 月 04 日

度評估模式 (Eco-environmental vulnerability evaluation, EVE) 為具有地區性特徵的整合指數，利用環境脆弱度指標 (Environmental vulnerability index, EVI) 明確顯示其整體區域的真實情況與變化情形，能有效地劃分出脆弱度的區域範圍，並建立生態環境脆弱體系 (Li *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2008)。

台東縣雖然相對在東部是土地開發程度較低的地區，但 2009 年之莫拉克颱風卻帶給知本溪及太麻里溪集水區相當嚴重的土砂災害。極端氣候的影響雖是無可避免之因素，但超限利用的行為亦可能是導致山區土砂嚴重流失以及水文系統改變的原因，更因而加劇了天然災害的嚴重性。然自 2000 年以來，水土保持局即開始進行土石流疏散避難路線之規劃，其目的乃希望有效降低災後的人員傷亡 (水土保持局，2008)，因此對於崩塌地脆弱區域，若能針對具有保全對象者給予適當評估，則在其災害復發之時，將有助於減少危及生命安全情事的發生。

爰此，針對擁有保全對象之崩塌地，應優先提出對應辦法，並進行崩塌地監測與復育治理之作業。而就治理作業而言，蔡真珍(2000)曾以集水區出口口的泥沙產量，推算崩塌區位沖蝕的深度，以作為治理順序的指標；而水土保持局(2003)則以保護對象、地表起伏比、地質、植生覆蓋率、土壤沖蝕、崩塌率，以及土石流潛勢溪等因子，作為評估集水區優先治理之順序，因此可知復育治理的順序管理是有其必要性的。而為瞭解森林集水區之環境特性，以及人為開發對區域崩塌之影響，本研究應用 GIS 與 RS 技術，透過地文、水文、氣候、人文等四大類影響因子之分析，評估森林集水區的生態環境脆弱度，以作為集水區規劃與經營、管理參考。

本研究期望透過脆弱度的概念，探討研究區潛在崩塌脆弱區域，因此於 IPCC 的基礎架構下，針對研究目的將脆弱度重新定義為「受人文因子所干擾，導致較敏感、脆弱之地區；當遭受環境及氣候等外界因素危害，其容易受災的程度」。並應用脆弱度評估分析方法，建立公正、客觀且標準的評估指標體系；同時探討影響脆弱度因子與脆弱程度間

之關係，以期能配合適當的管理規劃，瞭解並加強面臨威脅時的適應需求能力，以及降低系統脆弱度的策略性思考。本研究之目的分述如下：

- (一) 以地文、水文、氣候、人文等四類影響因子，推估知本溪及太麻里溪集水區容易發生崩塌之潛在脆弱區域，以利相關部門作為經營管理之參考。
- (二) 因受莫拉克颱風侵襲之影響，各地崩塌災情不斷，有鑑於此，本研究將藉此驗證極端氣候對於潛在環境脆弱之地區影響。
- (三) 透過崩塌地脆弱區域圖，整合區內保全對象資料，繪製崩塌地優先復育等級，以避免高危險崩塌地再次引發災害。

2. 材料與方法

2.1 研究區域概述

台東縣東邊銜接海岸山脈且濱臨太平洋、西倚中央山脈。因位居北迴歸線以南，其氣候屬於熱帶氣候型態。由於地理位置之關係，經常成為颱風來襲首當其衝之地，進而成為土砂災害好發地區。境內較為重要的土砂災害集水區，分別為知本溪集水區與太麻里溪集水區，其範圍如圖 1 所示。氣候方面，台東地區 1~4 月屬於相對乾旱期，5~9 月則轉變為雨季。統計 2001~2008 年之資料，其年均溫約為 24.8°C，年平均降雨量則為 1,373.6 mm；而與 2000 年以前之歷年資料相比，近年溫度偏高但降雨量減少，平均溫度上升約 0.46°C，而降雨量則下降 482.5 mm。莫拉克颱風來襲時，本區在極端氣候影響下，短時間之內即累積降下高達 1,400~1,600 mm 之雨量，其值相當於一年的降雨總量，故造成土砂災害之發生。

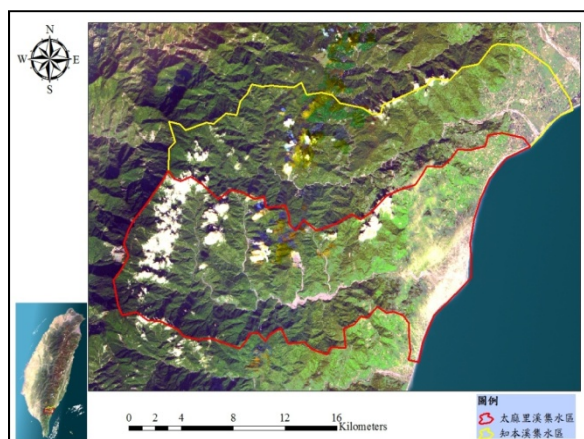


圖 1 研究區域位置

2.2 研究材料

本研究採用 2007 年 4 月 1 日 SPOT4 之 20 m 多光譜態影像，以及空間解析力由 10 m 多光譜態 (HI) 與 2.5 m 超解像模式 (THR) 所融合之 2.5 m 自然色影像 (影像日期為 2009 年 8 月 20 日之 SPOT5) 為材料，前者主要為推估分析使用，後者則為後續分析驗證之用。另為瞭解兩期影像崩場地分布狀況，除 2007 年崩場地圖層係由 96 年度國科會研究成果 (NSC 96-2625-Z-020-003-) 所取得外，2009 年崩場地圖層，則以 2.5 m 之融合影像為主，2007 年崩場地圖層為輔，透過人工判釋以螢幕數化方式獲取。環境是生態體系遭外在干擾衝擊時，極為重要的抗衡因素，因此參考前人所使用的環境因子 (林鼎鈞，等，2008；蕭芝昫，等，2008；白林奇，2008；陳俞瑾，2006；黃漢淨，2006；蔡靜怡，2005；Metternicht and Gonzalez, 2005；張政亮，等，2005；劉文賢，2005；黃崇賢，2004；簡世宏，2004；林家榮，2004；Perotto-Baldivieso, 2004；張雲翔，2004；連香如，2003；許輔仁，2002；王慶豐，2001；陳誌焜，2000；廖軒吾，2000；游中榮，1996；林中興，1994；Phien-Wei, 1993；鄭元振，1992；Gao and Lo, 1991)，挑選坡度、坡向、海拔、地質、平均年降雨量、地表裸露度、距水系距離、距道路距離，以及人口密度等 9 項具代表脆弱度意義之因子，建立網格式資料圖層 (40 m×40 m)，並給予適當分級，以作為隸屬分析及模式推估之用。而因子圖層

製作方面，除使用林務局農林航空測量所製作之 40 m×40 m 數值地形模型 (Digital Elevation Model, DEM) 資料計算坡度、坡向等相關地文資料，並利用 2007 年之衛星影像進行植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (式 1) 計算，且進行反轉將其值分為 0~1，再以常態分配之原則進行分級。反轉後之 NDVI 數值越高，代表地表裸露程度越高。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

ρ_{NIR} ：近紅外光波段 ρ_R ：紅光波段

降雨是促成崩塌發生的主要因素之一，當累積降雨超過 600 mm 時，生成崩塌趨勢則明顯提高 (陳天建，等，2004)。然而，某區域的長年降雨量，通常能代表該區的降雨程度—年降雨量較高者，對於水分供給應較為豐富。本研究為瞭解年降雨量對於崩場地生成是否造成影響，利用水利署架設之水文水資源資料管理供應系統，推估研究區平均年雨量資料。

地質資料取得係為中央地質調查所製作之全台 1/250,000 地質圖層。由於研究區域範圍廣大，實際調查困難，且地質由許多不同岩石所組成，故利用各種岩石密度資料 (史天元，等，1998) 與地質年代資料 (黃敦友，1990)，取其岩石密度之平均值，以獲得各地層之密度；再對照地質圖層之地質年代、地質組成等資訊，估算各岩層之地質強度高低後予以分級。

人口密集處通常是開發較嚴重區域，也極可能是構成環境脆弱的重要影響因子，因此人口密度圖層係根據內政部戶政司 2007 年底之戶籍統計資料進行製作 (內政部戶政司，2008)；而道路圖及水系圖則依據內政部所提供之全台道路、水系圖層予以萃取；保全對象為復育優先順序之重要考慮因子，故本研究則以土石流危險溪流之危險區域範圍，以及土地利用現況之建地、交通建設區域等作為保全對象圖層，以供後續復育需求分析使用。

2.3 研究方法

本研究目的期望透過生態環境脆弱度的評估顯示發生崩塌的潛在脆弱地區，並透過脆弱度區域圖加以整合區內的保全對象資料，以瞭解亟需優先復育的崩場地，進而提供相關經營管理參考與避免二次災害之發生。

2.3.1 生態環境脆弱度分析

Lehmann *et al.* (2002)及朱容君(2008)等研究指出，為達推估之理想狀況、提高脆弱度推估模式的準確性，於建立推估模式前，應隨機將資料分為建立模式組，以及模式準確性評估之驗證檢核組，因此本研究以逢機方式，將 80%的原始崩場地資料作為資料建模組，另以 20%作為後續脆弱度評估之驗證檢核組。此外，透過 9 項因子模糊集合資料計算 EVI(Li *et al.*, 2006)，以探索性因素分析(圖 2)評比各項因子之權重；以累積解釋率達一定百分比以上的前 n 項因素軸，作為轉軸後之顯著因素因子，並將因素軸之因子特徵比例，視為脆弱度因子權重的加權係數，以獲得知本溪集水區與太麻里溪集水區各 EVI 數值(式 2)，藉以求取知本溪與太麻里溪集水區境內的生態環境脆弱程度以及脆弱度較高之區域。

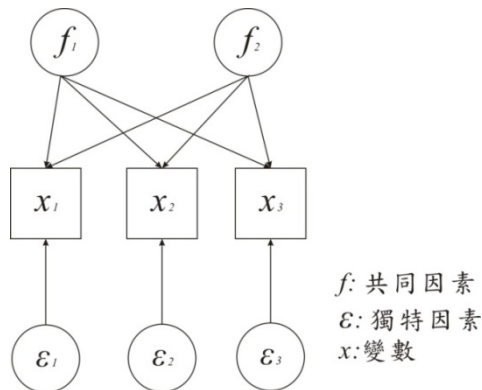


圖 2 探索性因素分析路徑圖(陳順宇, 2004)

$$EVI = \sum \alpha_i Y_i \quad (2)$$

式中，EVI 表示生態環境脆弱度指數， α_i 為第 i 個因子負荷量，而 Y_i 則表示第 i 個因素軸。

2.3.2 極端氣候之驗證

受全球氣候變遷之影響，極端氣候發生機率屢屢上升，未來全台的平均極端降雨事件頻率也趨於升高的現象(盧孟明、等, 2005)，而莫拉克颱風即為極端氣候事件的明顯案例。由於該颱風造成台東地區極大的災害，故本研究於完成生態環境脆弱度評估後，另使用 2009 年莫拉克風災後之崩場地層與其相互套疊，將崩場地與環境脆弱度評估圖進行比較，瞭解崩場地分布與脆弱度等級之關係，並藉此評估結果是否與現況相符，以驗證脆弱度評估圖的可靠性。

2.3.3 崩塌優先復育評估

經生態環境脆弱度評估後，即可求得每塊崩場地的脆弱程度，因此本研究進一步進行治理評估。以水土保持局(2008)建立之土石流潛勢溪流優先處理順序等級評估模式(式 3)為例，其評分對象分自然潛在因子與保全對象危害度因子兩大類後再細分各類別，其中自然潛在因子方面，包含崩塌規模、地形因子、材料破碎情形、地質因子以及植生因子；保全對象危害度因子方面，則主以建築物、交通設施、現地整治成效共三大考量項目。

$$\text{優先處理順序評分} = (\text{自然環境潛在因子} \times 50\%) + (\text{保全對象危害度因子} \times 50\%) \quad (3)$$

由於評估復育優先等級所需考慮因子眾多，為能有效避免高危險地區引起二次災害，本研究擬應用具解釋區域性脆弱程度優勢之脆弱度評估圖，取代繁雜之自然因子計算，建立崩塌優先復育評估模式。而有關保全對象選取方面，根據水土保持局對土石流潛勢溪流之定義：「該溪流除有發生土石流之可能，且發生土石流後會對當地住宅及道路、橋梁等造成災害時，才會將該區域劃設為土石流潛勢溪流」；依行政院農業委員會水土保持局(2009)公布資料顯示，台東縣總計共有 163 條危險溪流，而大部份均具有保全住戶且屬於中、高潛勢之溪流。基於危險溪流之潛在受害區域即為需保護之對象，且目前各縣市之土石流影響範圍之圖層資料完整，

因此以崩塌地與建地(Build)、道路(Road)，以及土石流影響範圍(Areas of Debris Flow Affects, ADF)納入保全對象為考慮因子，利用歐基理德距離進行兩兩目標源之計算，並換算每塊崩塌地與各項保全對象的平均距離。然而，因各項評估因子的單位數值與其定義皆有不同，故於計算評分前需將各評估因子予以標準化如式 4。透過上述模式的建立結果，將可提供相關單位瞭解廣大範圍內之崩塌地急迫處理的等級。

$$X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

式中， X'_i 係指轉換後的評估因子標準值， X_i 為轉換前的評估因子數值， X_{\max} 、 X_{\min} 則分別代表評估因子的最大值、最小值。

3. 結果與討論

3.1 脆弱度評估分析

為探討兩個集水區對於崩塌災害的容忍度，以標準化後的 9 項環境因子進行因素分析，藉由因子負荷量表示因子間之權重值。各集水區主要因素軸的高相關因子整理如表 1，依據因素分析轉軸過後之因素軸解釋率(Contribution)作為脆弱度的成分權重，並且計算 EVI 的成分組合，如式 5 及式 6 所示。

$$EVI_{chi} = 0.30526 \times P1 + 0.16577 \times P2 + 0.12805 \times P3 + 0.12356 \times P4 \quad (5)$$

$$EVI_{tai} = 0.39114 \times P1 + 0.15514 \times P2 + 0.11593 \times P3 \quad (6)$$

知本溪及太麻里溪集水區之 P1 整體脆弱度，其成分比依次約為 42.24%與 59.07%，其中除知本溪的水系距離因子之外，其餘所包含的高相關變數因子皆以海拔及會破壞坡腳穩定性的道路距離為主。道路邊坡防護設施設計不良、排水功能不佳或是地質狀態脆弱，容易於開發後造成挖空地區之坡

腳穩定度降低，誘使下方土石無法承受上方的壓力而向下崩落(黃漢淨，2006)，顯示近道路地區對崩塌地確實有所影響。在經濟發展與人口增加等人文因素下，平地的空間使用已呈現飽和狀態；考量生存空間之需求，人類的基礎建設不斷朝向高海拔地區拓展，使得受干擾的開發型坡地可能已產生了潛在的脆弱，因此海拔因素係屬崩塌生成之影響因子(陳俞瑾，2006)，此結果亦與簡世宏(2004)之研究發現—「崩塌位置主要分布約為 500 m 以上的山坡地」相符。此外，年平均降雨量亦屬於 P1 影響的代表因子，花東地區因常為颱風與季風鋒面之首當地區，對於排水不佳、地質脆弱的地區於雨季來臨時，會因降雨量增多而使地下水位出現明顯變動；而地下水位上升會降低土壤的抗剪強度，同時增加土體的下滑力(王大維，2004)。年降雨量較豐富的地區即表示該地區的相對降雨機率較高，因此地下水位升高的頻率也相對提高。鍾國平(2009)於南庄鄉進行地滑穩定性與災害因子調查，也曾提出雨量豐沛是造成崩塌的主因，且累積的降雨量可能會造成不同程度的崩塌深度(Dai and Lee, 2001)，故年平均降雨量產生之影響乃是構成脆弱度的重要因子。由上述說明可知，崩塌地的潛在地區多位於高海拔、距離道路或是水系較近，且年降雨量較豐沛的地區，故將此軸命名為「環境區位因子」。

由知本溪集水區之 P2 因素軸顯示，人口密度因子為影響崩塌發生的原因之一。由於台東地區人文環境為靠河岸兩旁開發居多，人們所有活動主要都圍繞在道路周邊(李瑞陽、等，2005)，土地的開發會破壞原始地質之結構，故當人口密度過高，則可能屬於較脆弱之地區；再加上河床、河道兩側的水流沖蝕、搬運能力增強(黃漢淨，2006)，蜿蜒河道也會因凹岸的水流速度較急，產生侵蝕河岸之現象，致使附近邊坡嚴重的沖刷導致坡腳受到破壞，上方土壤與沿岸的土石承受力降低而因此向下滑落產生崩塌(李瑞陽、等，2005)。P2 軸與整體脆弱度成分比，雖然依序僅佔 16.58%，仍可說明人口開發程度確實為影響崩塌地的成因之一，故可將此軸命名為「人為開發因子」。

表 1 各集水區主要因素軸因子與因子負荷量

	知本溪集水區	太麻里溪集水區
P1	距道路距離(0.96870)、年平均降雨量(0.94608)、海拔(0.83998)	海拔(0.95142)、距道路距離(0.89160)、年平均降雨量(0.85219)、距水系距離(0.70327)
P2	距水系距離(0.83656)、人口密度(-0.71397)	地質(0.78534)
P3	地質(0.75761)	地表裸露度(0.91844)
P4	地表裸露度(0.84477)	

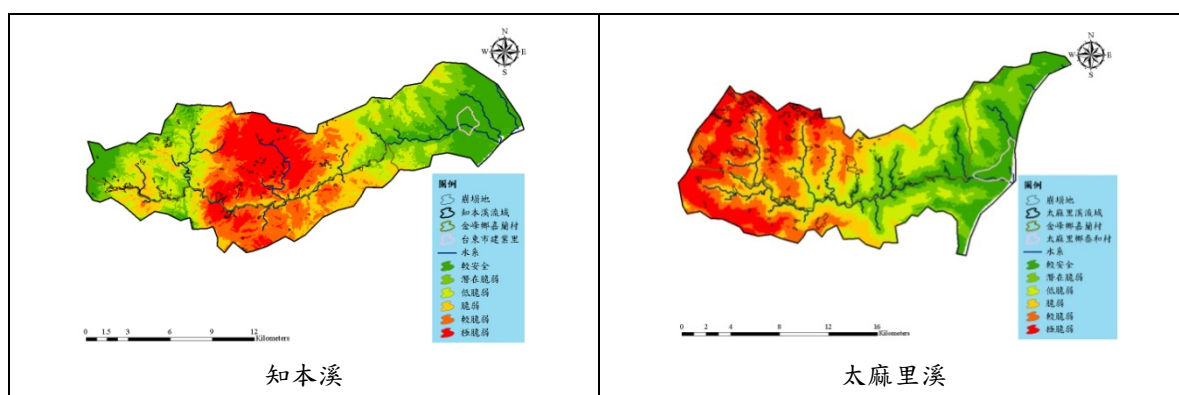


圖 3 集水區脆弱度評估圖

而知本溪之 P3 軸與太麻里溪之 P2 軸，則是受到地質的影響。岩石種類影響風化的時間與風化後土壤的性質，若不易風化，植物進入土壤的時間相對也會變慢，而預防地表土壤沖蝕的能力則相對降低。不同地質成分特性與其透水性差異也易產生崩塌之滑動面(蔡靜怡，2005)。另坡度越陡之處，通常較不利植物的生長紮根；而道路建設與河川沖蝕會改變坡腳的地形，影響邊坡的穩定性(簡碧梧，1995)。因此地質較脆弱，則容易誘發崩塌產生，故將此軸命名為「地質狀況因子」。

地表裸露度亦為影響脆弱度的重要因子。當大雨來襲時，若地表裸露且土石鬆軟、地表無植生覆蓋或是覆蓋稀疏，將無法有效阻止雨水衝擊地面造成表土層土壤流失或入滲率下降而產生逕流(陳信雄、李錦育，1986)，進而引起崩塌災害的發生。林鼎鈞等(2008)於紅葉溪集水區之研究，曾顯示崩塌與礦區開採有密切之關係，又道路在影像上所顯

示的地表裸露值趨近於 1，且道路建設對於邊坡穩定亦為決定其崩塌生成與環境脆弱的成因，因此可將知本溪集水區之 P4 軸命名為「地表裸露度狀況因子」。

綜合以上因子，可推測除海拔、距水系距離、地質，以及年平均降雨量等天然條件外，尚須考慮人為開發程度對環境脆弱度的影響。再者，若受到其他環境因子之累加作用影響，通常發生崩塌或土石流的機率也會相對較高(高橋保，1997)。

高權重的因子成分經重組後，因自然界係以常態之分布且 EVI 數據資料屬於線性分布，故以各類別需包含同等數量之原則，進行脆弱度評等標準，並將集水區之脆弱度評估圖分級為較安全、潛在脆弱、低脆弱、脆弱、較脆弱以及極脆弱等六項等級(圖 3)，並使用崩塌地 20%之原始資料進行脆弱度的準確性檢核評估(表 2)。

表 2 顯示，知本溪與太麻里溪集水區境內 75% 以上的崩塌地位置，分別被歸屬於脆弱、較脆弱及極脆弱，代表崩塌地所在位置確實屬於高危險、高脆弱之地區。其中太麻里溪集水區約 89.71% 落在脆弱區，而被歸類於極脆弱等級者，則達 41.35%，顯示該集水區內崩塌地係處於一個極不穩定且脆弱之情況。由各崩塌地平均 EVI 之值可知，知本溪集水區第 29 號崩塌地，以及太麻里溪集水區第 71 號崩塌地，是屬於最脆弱之崩塌地。

3.2 脆弱度評估於極端氣候之驗證

利用 2007 年崩塌地圖層與 2009 年災後崩塌地圖層(圖 4)，以及透過影像圖層與環境因子分析(圖 5)可知，多數新生崩塌地分布於高海拔、近河道兩

旁約 500 m 處，且 61.36% 生成於坡度 25°~40° 位置，其中又以坡度 30°~35° 者分布為最多。另外，46.11% 的崩塌地則位處年平均降雨量 1,200 mm~1,300 mm 之地區，顯示當極端天氣發生時，常年雨量豐沛地區容易造成土砂災害發生。

由 2007 年與 2009 年崩塌地的變遷趨勢發現，部份的崩塌量在低脆弱至極脆弱等級有下降趨勢，尤其極脆弱區域的崩塌量更減少了 19.98%，推測在莫拉克風災發生之前，部份崩塌地應有植生回復的狀況(圖 6)。另以災後崩塌地與脆弱度評估圖進行相互套疊(圖 7)則顯示，崩塌地發生地區多屬脆弱與較脆弱等級。因此經由風災所新增之諸多崩塌地區位與環境套疊的驗證結果可以了解，環境脆弱度的評估確實能夠掌握在極端氣候發生時，不同地區的耐災程度，以及容易受災的區域，此一資訊可供防災工作參考。

表 2 EVI 分級標準值與檢核結果

		知本溪集水區		太麻里溪集水區	
EVI Mean		0.48		0.52	
EVI St. D		0.20		0.14	
Evaluation level	分級	分級門檻	檢核百分比	分級門檻	檢核百分比
較安全	1	<0.480	1.35	<0.444	1.27
潛在脆弱	2	0.480~0.572	4.05	0.444~0.619	4.96
低脆弱	3	0.572~0.651	18.02	0.619~0.838	7.07
脆弱	4	0.651~0.742	22.97	0.838~1.026	21.31
較脆弱	5	0.742~0.825	13.51	1.026~1.226	24.05
極脆弱	6	>0.825	40.09	>1.226	41.35

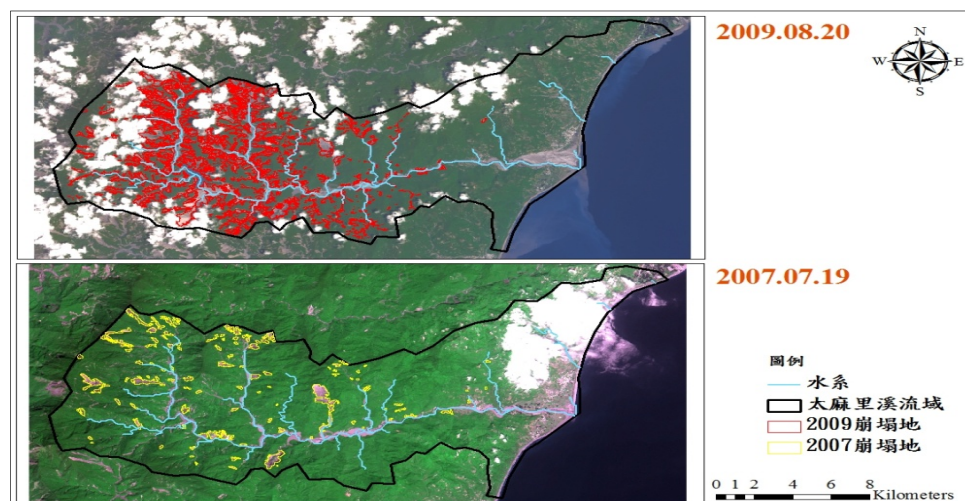


圖 4 太麻里溪集水區於莫拉克颱風前後之崩塌地分布狀況

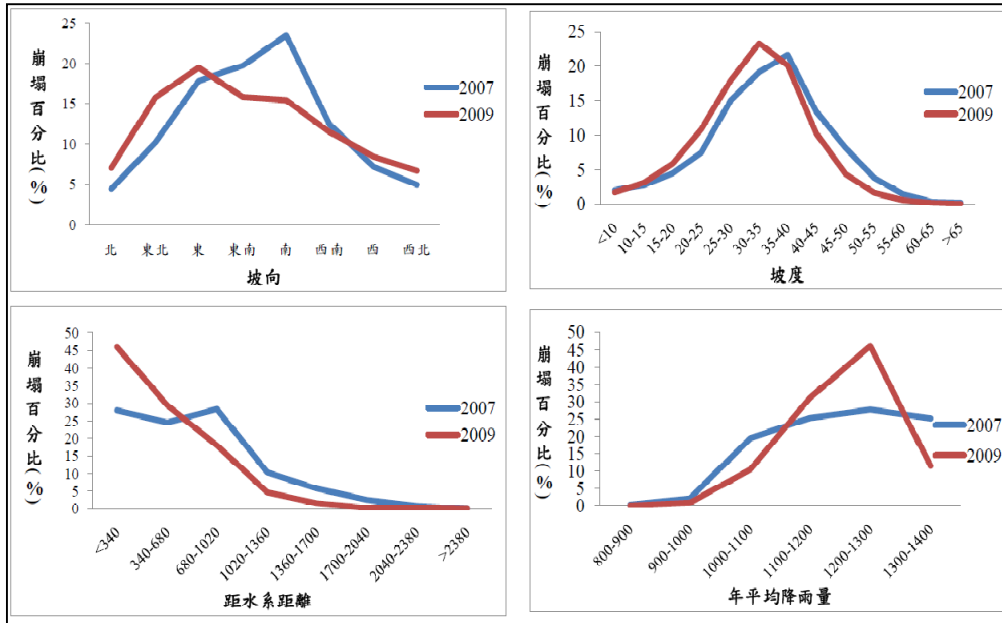


圖 5 太麻里溪集水區於莫拉克颱風前後之崩場地環境因子變化

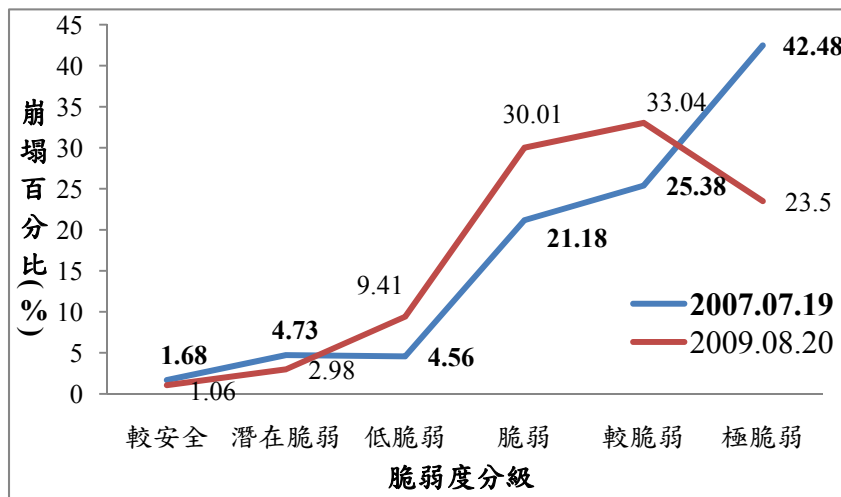


圖 6 莫拉克颱風災後崩場地分布與脆弱度等級之關係

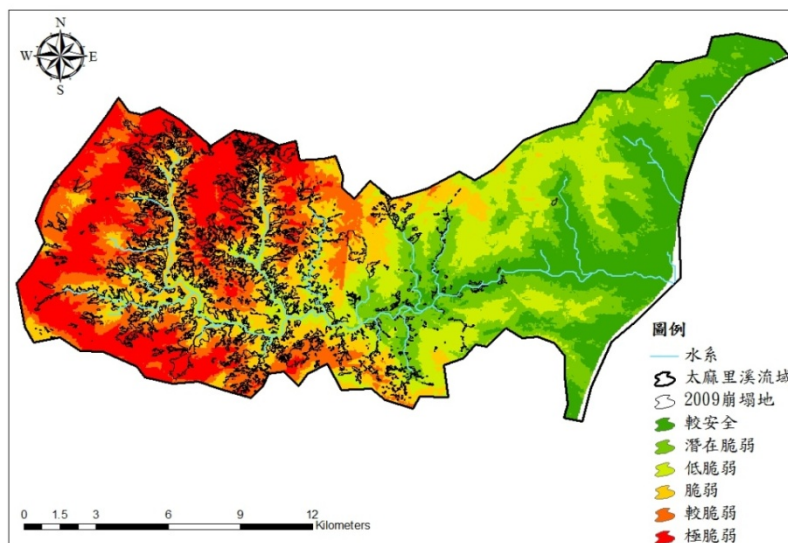


圖 7 莫拉克颱風災後崩場地於脆弱度評估圖之分布狀況

3.3 崩塌優先復育等級評估

優先復育等級之評估，係以土石流潛勢溪流優先處理評估模式為範本加以修改，並依此建立知本溪集水區與太麻里集水區各崩場地區位之復育順序。考慮土石流發生的衝擊，調整各因子之係數權重，進而建立各集水區崩場地優先復育等級評估模式之方程式如式 7，此方程式可針對各崩場地治理順序，進行優先處理得分之計算，同時訂定處理等級為暫緩處理、加強處理、優先處理及立即處理等四個類別(圖 8)。

$$FS_n = EVI \times 0.5 + \text{Build} \times 0.25 + \text{ADFA} \times 0.15 + \text{Road} \times 0.1 \quad (7)$$

將各集水區內的崩場地評估結果加以平均顯示，知本溪集水區之崩場地平均等級為加強處理(FS=0.46)，太麻里溪集水區之崩場地平均等級則為須優先處理的狀況(FS=0.52)。其次以各崩場地處理等級觀之，知本溪集水區係以暫緩處理與立即處理所佔比率最多(表 4)，而太麻里溪集水區之各崩場地的處理等級有 33.9%是需要注意加強處理(如表 5)，其中必須立即處理的崩場地亦佔有相當高的比率。雖然知本溪集水區較太麻里溪集水區的優先處理百分比略高，但是以平均顯示結果與暫緩處理比

率兩方面而論，太麻里溪集水區仍是屬於需要相關單位多加優先注意的地區。

研究結果亦發現，知本溪集水區內的卑南鄉溫泉村第 35 號崩場地，以及太麻里溪集水區的金峰鄉嘉蘭村第 9 號崩場地是本次評估當中最具有立即處理需求的崩場地(圖 9)。由此可知，崩場地優先復育分析將可提供與瞭解各集水區境內最急需復育的崩場地以及其所在位置。

本研究比較水土保持局(2008)公布之土石流年報中使用的土石流潛勢溪流優先處理順序等級評估方法發現，自然評估因子中所參考的材料破碎狀況為脆弱度評估因子所欠缺之項目，因此建議未來評估項目中，除可沿用脆弱度評估因子外，建議亦可將材料破碎狀況等納入後續評估模式。

綜上所述，考量集水區範圍廣闊與人力有限的狀況之下，若無法將具有急迫性復育的崩場地進行適當之處理，當大雨來襲之際可能造成更多崩場地，甚至更大的傷害(如圖 10)。因此建議有關當局可先針對各集水區中具高優先處理權者，著手進行相關復育的規劃與工程。而本研究也發現，由於使用的建築物與道路資料尺度過於粗糙，因此未來如可獲得更精細的圖層資料，將有助於對每個崩場地進行更準確的評估。

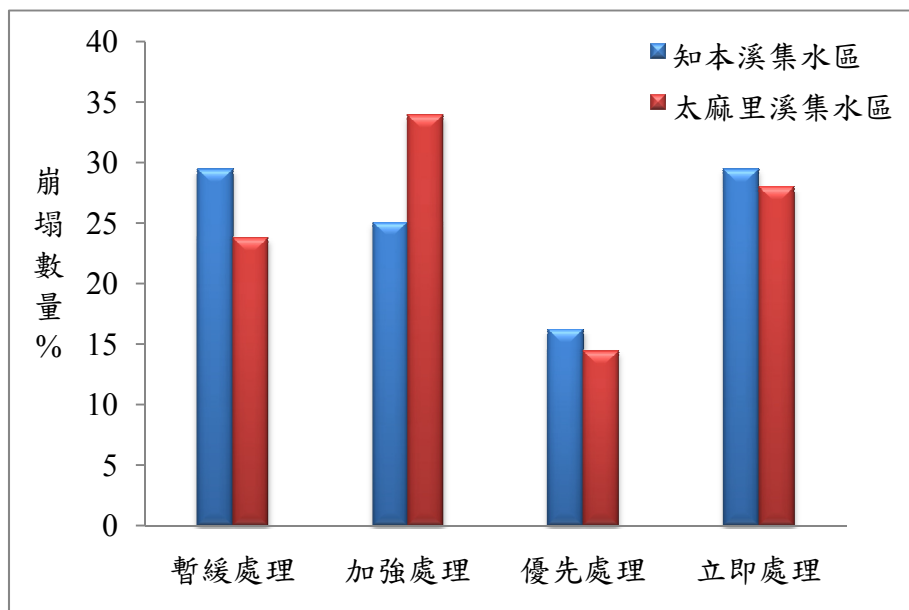


圖 8 集水區復育評估等級

表 4 知本溪集水區崩塌地復育評估分級

處理等級	門檻值	崩塌地數量	%
暫緩處理	0.249 > X	20	29.41
加強處理	0.249~0.576	17	25.00
優先處理	0.576~0.633	11	16.18
立即處理	0.633 < X	20	29.41

表 5 太麻里溪集水區崩塌地復育評估分級

處理等級	門檻值	崩塌地數量	%
暫緩處理	0.456 > X	28	23.73
加強處理	0.456~0.519	40	33.90
優先處理	0.519~0.558	17	14.41
立即處理	0.558 < X	33	27.97

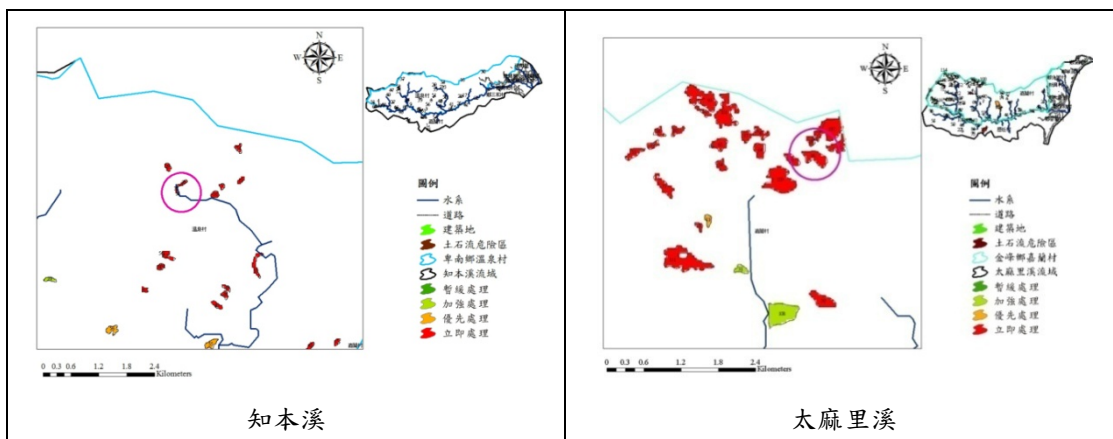


圖 9 集水區之崩塌地復育評估結果

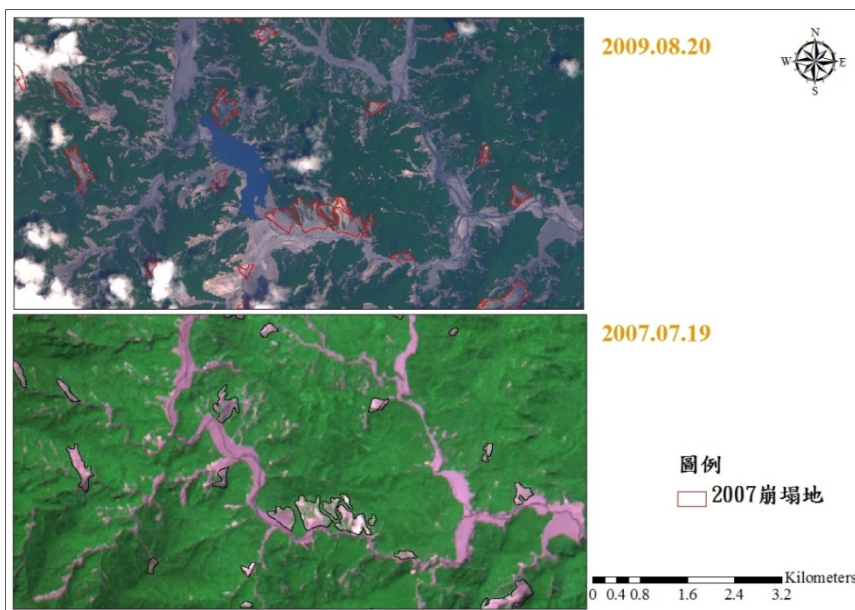


圖 10 莫拉克颱風引發崩塌地災害擴大示意圖

4. 討論

全球氣候變遷所引發的暖化現象正持續發生且日益嚴重，而氣候劇烈變化對物種及生態系統產生嚴重影響，並進而導致天然災害的頻繁發生(IPCC, 2007)。本研究以 IPCC 所提出之脆弱度觀念，應用脆弱度分析評估森林集水區的土砂災害管理，探討極端氣候下的集水區耐災程度，以及容易產生弱化的影響因子，並且分析衝擊形成的原因。

脆弱度評估模式中最重要的工作，為選擇具影響力之環境因子與數據分析工具，其目的為提升評估的有效性與可靠性，並且給予適當的脆弱度權重係數。本研究以因素分析得知，台東縣境內兩個重要的土砂災害集水區，其崩塌產生最主要是受到海拔與影響坡腳安定性的道路開發或河川侵蝕所致。透過評估模式結果顯示，崩場地確實為集水區內危險且脆弱的地區，其中太麻里溪集水區高達 41.35% 的崩場地是歸屬於極脆弱等級，顯示崩場地處於一個極不穩定且需相關單位關切與進行復育之地區。經由本研究將每筆崩場地予以復育需求評分，並配合 E 化的崩場地環境屬性資料庫，實能迅速且完整的掌握崩場地復育需求之程度與其環境資訊，故此方法將有助於未來進行崩場地復育整治工程時的考量依據。

致謝

本研究承行政院國家科學委員會專題研究計畫 NSC 97-2625-M-020-002- 經費補助，得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

內政部戶政司，2008。內政部戶政司全球資訊網，網址：<http://www.ris.gov.tw/>。
王大維，2004。降雨造成崩塌邊坡地下水變動特性之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
王介勇、趙庚星、杜春先，2005。基於景觀空間結構信息的區域生態脆弱性分析-以黃河三角洲

墾利縣為例，干旱區研究，22(3)：317-321。
王慶豐，2001。遙測在草嶺崩塌區監測評估之應用研究，朝陽大學營建工程系碩士在職專班碩士論文。
史天元、邱元宏，1998。台灣地區數值密度模型之建立，測量工程，40(3)：3-22。
田亞平、劉沛林、鄭文武，2005。南方丘陵區的生態脆弱度評估-以衡陽盆地為例，地理研究，24(6)：843-852。
白林奇，2008。花東土砂害集水區崩場地潛感分布及地景變遷之研究，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
朱容君，2008。應用廣義加法模式建立墾丁國家公園稀有植物潛在分布，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
行政院農委會水土保持局，2003。水土保持技術規範，農委會水保局。
行政院農委會水土保持局，2008。96 年土石流年報，農委會水保局。
行政院農業委員會水土保持局，2009。土石流防災資訊網，網址：
<http://246.swcb.gov.tw/default-1.asp>。
吳杰穎、江宜錦，2008。台灣天然災害統計指標體系建構與分析，地理學報，51：65-84。
呂名翔，2007。新武呂河流域的山崩與輸砂量在地震與颱風事件中的相對應關係，國立台灣大學理學院地質科學研究所碩士論文。
李瑞陽、陳蕙華，2005。遙測衛星影像於崩場地潛感分析之應用-以竹東至松本段為例，2005 年台灣地理資訊學會年會暨學術研討會論文集，台中市，1-10。
林中興，1994。山坡穩定度評估之因子分析及地理資訊系統之應用，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
林家榮，2004。潛在危險指標應用於屏東縣集水區分級分區之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
林鼎鈞、陳紫娥、游麗方，2008。應用地理資訊系統技術於紅葉溪集水區崩場地特性之分析。第

- 六屆資源與環境學術研討會論文集，台南市，151-160。
- 高橋保，1997。橫跨土石流潛勢區域之橋梁工程問題，土木工程防災系列講習會系列四，國立中央大學土木工程學系橋梁工程研究中心。
- 張政亮、張瑞津、紀宗吉，2005。遙測與地理資訊系統應用於大甲溪流流域之崩塌災害的調查與分析，地理研究，43：101-122。
- 張雲翔，2004。大坑地區地滑之研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 許輔仁，2002。鯉魚潭水庫集水區之崩塌地潛感分布研究，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 連香如，2003。南台灣國道三號高速公路(九如-梅山段)邊坡災害潛感分析模式之建立研究，國立屏東科技大學土木工程系碩士論文。
- 陳天健、詹錢登，2004。七二水災降雨量與坡地崩塌特性分析，2004 坡地防災創新研發成果研討會論文集，台北，109-118。
- 陳俞瑾，2006。應用地理資訊系統分析台東地區潛在崩塌地特性之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
- 陳信雄、李錦育，1986。森林集水區水土保育功能綜合模式之研究，中華林學季刊，19(3)：59-74。
- 陳誌焜，2000。曾文水庫集水區山地農村環敏感區位劃定之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 游中榮，1996。應用地理資訊系統於北橫地區山崩潛感之研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 黃崇賢，2004。山坡地山崩災害管理之研究-以台南縣為例，長榮大學土地管理開發研究所碩士論文。
- 黃敦友，1990。地質年代的區分，地質，2(10)：179-182。
- 黃漢淨，2006。德基水庫集水區崩塌地潛感分布與林地使用衝突之研究，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 廖軒吾，2000。集集地震誘發之山崩，國立中央大學地球物理學系碩士論文。
- 劉文賢，2005。大高雄地區崩場地因子量化之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
- 蔡真珍，2000。大甲溪 921 震災崩場地植生復育之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 蔡靜怡，2005。模糊理論應用於六龜鄉崩場地危險度之研究，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 鄭元振，1992。地理資訊系統在區域邊坡穩定分析之應用-中橫公路天祥至太魯閣段，第五屆大地工程學術研究討論會，台北縣，697-703。
- 鄭皆達、林俐玲、盧惠生，2003。森林對台灣河川溪流上游集水區水文之影響，台灣林業，29(4)：41-57。
- 盧孟明、陳佳正，2005。豪大雨之頻率分析方法，氣象學報，46(1)：45-60。
- 蕭芝昀、陳紫娥、游麗方，2008。壽豐溪集水區崩塌地與植生恢復地特性之研究，第六屆資源與環境學術研討會論文集，台南市，73-88 頁。
- 鍾國平，2009。苗栗縣南庄鄉石門及鹿竹地滑地穩定性與災害因子之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 簡世宏，2004。SPOT 衛星遙測影像與 DEM 應用於崩塌地潛勢分析之研究-以清水溪及水區為例，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 簡碧梧，1995。台灣的崩塌地災害，工程環境會刊，6：23-47。
- Dai, F. C., and C. F. Lee, 2001. Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology*. 64: 65-87.
- Di, B. F., N. S. Chen, P. Cui, Z. L. Li, Y. P. He, and Y. C. Gao, 2008. GIS-based risk analysis of debris flow: An application in Sichuan, southwest China. *International Journal of Sediment Research*. 23(2): 138-148.
- Gao, J., and C. P. Lo, 1991. GIS modeling of influence of topography and morphology on landslide occurrence in Nelson County, Virginia, U. S. A., *Earth Surface Process and Landforms*. 18:579-591.
- Intergovernmental Panel on Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability Climate Change, 2007. Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, UK.

- Intergovernmental Panel on Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability Climate Change, 1997. Second Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, UK.
- Lehmann, A., J. McC. Qverton, and M. P. Austin, 2002. Regression models for spatial prediction: Their role for biodiversity and conservation. *Biodiversity and Conservation*. 11(12): 2085-2092.
- Li, A., A. Wang, S. Liang, and W. Zhou, 2006. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS-A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling*. 192: 175-187.
- Metternicht, G., and S. Gonzalez, 2005. FUERO: Foundations of fuzzy exploratory model for soil landslide hazard prediction. *Environment Modeling & Softwar*. 20: 715-728.
- Perotto-Baldiviezo, H. L., T.L. Thurow, C. T. Smith, R. F. Fisher, and X. B. Wu, 2004. GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, southern Honduras. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 103: 165-176.
- Phien-wei, N., T. Pientong, and A. S. Balasubramaniam, 1993. Catastrophic landslides and debris flows in Thailand. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 48: 93-100.
- Wang, X.D., Zhong, X.H., Liu,S.Z., Liu, J.G., Wang, Z.Y., and Li, M.H., 2008. Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method. *Journal of Arid Environments*. 72: 1929-1939.

Assess Eco-environmental Vulnerability of Debris Disaster Areas in Taitung County

Kuei-Chia Chen¹ Shou-Tsung Wu² Chaur-Tzuhn Chen^{3*}

ABSTRACT

Among the watersheds in Taitung County, the river watersheds of Zhiben and Taimali are more serious natural disaster areas on typhoon Morakot, in which landslide is the most serious type of sediment disasters in those watersheds. The purpose of this study was to develop a model of eco-environmental vulnerability for the landslide disaster watershed. First, we used the factor analysis to get the weights of landslide causing impact factors. After this, we used environmental vulnerability index (EVI) to assess the eco-environmental vulnerable area of watershed. We also created the assessment model of vegetation recovery that was based on the natural potential environmental factors and the protected object factors. Finally, we used the disasters areas which Morakot created to confirm the frailty region the accuracy. The results indicated that not only landslide occurred was base on the watershed environment at factors, the impact of human activity was also an important factor in these two watersheds. In vulnerability of this study indicated that the landslides were located in high-risk and high-vulnerability areas. Especially, Taimali river watershed was the gravest, and there was 41.35% of landslide belonging extreme level. According to the landslide vegetation recovery assessment model, the First Score (FS) was know that landslide of Taimali river watershed is necessary to give the precedence action. This research can give the guideline of vegetation recovery in future.

Keywords: Eco-environmental vulnerability, Debris Disaster, Vegetation recovery assessment, Watershed, Typhoon Morakot

¹ M.Sc., Department of Forestry National Pingtung University of Science and Technology

² Professor, Department of Tourism Management, Shih Chien University

³ Professor, Department of Forestry National Pingtung University of Science and Technology

* Corresponding Author, Phone: 886-8-7703202ext.7147, E-mail: cct@gisfore.npust.edu.tw

Received Date: Apr. 08, 2010

Revised Date: May. 14, 2010

Accepted Date: Jun. 04, 2010

衛星影像於國土變異監測之應用

尹孝元¹ 梁隆鑫^{2*} 陳錕山³ 黃珮琦⁴

摘要

國土變遷可分為自然與人為兩方面：自然方面，如海岸線變動、崩塌、土石流及淹水等情形；人為方面，如山坡地違規、違建、濫墾、傾倒廢棄物等。對於地表變動監測，衛星遙測的優勢，不受地表高度限制，且可快速與準確地進行資料處理，對於國土變遷普查，是一個非常有效的工具。其中崩塌與違規濫墾是臺灣地區較常見的山區變動，崩塌是災害，幾乎每年都會伴隨颱風或豪雨發生，違規濫墾造成土石外露是崩塌與土石流素材的來源之一。農委會水土保持局自 1995 年起，即利用遙測科技進行山坡地管理與監測，結合遙測影像與 GIS 判釋系統，進行山坡地變異監測及地形變動分析，除了每年皆查獲違法點位之外，間接對想取巧之徒也有嚇阻效果，並減少現場查報人員的人情麻煩。地形變動分析可以對崩場地判釋、統計分析、與圖資建置，提供最新資訊，做為治災防災之參考。

關鍵詞：衛星影像、國土變遷、崩場地

1. 前言

台灣地區由於人口稠密。土地開發利用早已經往山坡地發展，如新社區與別墅群的開發、農業用地的拓墾、休閒遊憩區的設立、新道路的延伸等。而這些綠地的開發改變了大自然原有較穩定的地貌；甚且，1999 年 921 集集大地震，造成有些山區的表土因地震的搖晃而鬆軟，加上山坡地地區土地利用及開發，若水土保持措施不良，則於豪大雨或熱帶氣旋夾帶大量降雨時，就容易發生崩塌或土石流災害；如 2009 年的莫拉克風災即造成 699 人死亡與失蹤，195 億的重大損失。因此，平時利用衛星影像進行國土監測，可瞭解國土變動或違規濫墾的行為，並於氣候劇變下計算整體綠資源與碳吸存變動量，對於災後的及時國土變動分析，可提供救災與防災措施之參考；所以結合可重複攝像的光學與雷達衛星遙測工具是個最快速準確的方法。

國土變異的種類很多，如海岸線位置變遷、綠地面積增減、地形地貌的改變、地表高程變化等，

當然，這些變動現象可能是災害也可能是人為造成；因此進行國土監測前，需要先訂定偵測的現象或種類，並瞭解及定義這些地物類別所能偵測的空間精度與時間頻率，以滿足不同任務的土地利用分類及其變異需求。故在有限的成本考量下，如何透過妥善的監測機制，以快速、有效地掌握土地資源利用現況及變異的相關資訊，提供做為國土管理之參考，遂成為重要的課題。而衛星遙測具有資料獲取週期短、影像資料涵蓋範圍廣、可迅速掌握地表改變狀況、以及成本低等特性，非常適合做為全面性與即時性的國土利用監測工具。

國內使用衛星監測國土變動的例子，如利用雷達影像干涉對 1999 年 921 集集地震後地變形的研究 (Wang *et al.* 2003; Chang *et al.* 2004; Liang *et al.* 2006; Wang *et al.* 2010)，除了結合雷達影像干涉技術觀測臺灣全島地層下陷的地變形外，並和地面水準測量、GPS 資料比較分析，以評估其結果。海岸變遷方面，利用 ERS 系列雷達衛星資料進行台灣西部海岸水線萃取與變遷分析(王秀雯、等，林景

¹ 農業委員會水土保持局坡地監測科 科長

² 國立中央大學太空及遙測研究中心 技士

³ 國立中央大學太空及遙測研究中心 教授

⁴ 農業委員會水土保持局坡地監測科 雇員

*通訊作者，電話：886-3-4227151ext.57625, E-mail: lsliang@csr.sr.ncu.edu.tw

收到日期：民國 99 年 04 月 27 日

修改日期：民國 99 年 06 月 18 日

接受日期：民國 99 年 07 月 26 日

騰、等, 2007)。而對於大規模災害後崩場地判釋, Liang *et al.*(2005)利用 SPOT 資料研究敏督利颱風後之中臺灣地區崩場地, 發現總數量 89% 的崩場地發生在林班地, 其崩場地面積多介於 2-10 公頃, 坡度則大多分佈在 30-45 度之間。

2. 衛星遙測於國土變遷之應用

衛星遙測具有瞬時、大範圍、全面性及快速取樣之非接觸性探測特性, 可不受地形、地物之阻隔及交通限制獲取資料, 所以遙測技術提供極佳的國土現況調查能力; 而獲取多期之影像, 經過處理後就可提供變動比對, 尤其是針對大規模災害後所造成的地形地貌改變, 更能提供即時性的變化資料; 配合定點式的地面調查, 將能增進遙測資料判釋的可靠度, 並進一步做為遙測資料之率定及影像判釋成果驗證之用。

目前台灣地區衛星遙測資料來源, 依照感測器種類可分成光學影像與雷達影像; 光學影像是接收地表物太陽的反射光譜, 屬於被動式探測, 所使用的波長約介於 400-14,400 nm 之間, 此波段的光線無法穿透雲層, 所以受天氣影響甚劇。雷達影像為主動式探測, 由衛星載體發射波長介於 1-1,000 mm 之間的電磁波, 並接收由地面物反射之電磁波回波訊號。與光學影像不同的是此波段的電磁波能夠穿

越雲層, 所以地面成像不受影響。目前臺灣地區主要使用的觀測衛星, 包括(1)SPOT 系列衛星 (2)福衛二號 (3)MODIS (4)ERS2 (5)RADARSAT2 (6)ALOS (7)ENVISAT 等, 前三者為光學影像, 後四者為雷達資料。這七種衛星影像的特性如表 1 所示。

2.1 山坡地變異點分析

變遷偵測是經由分析比較不同時期的影像, 辨識兩者差異量的一種過程, 基本上是利用多時資料 (multi-temporal data) 進行前後期資料的比對。其中光學影像變異分析的基本條件是地表物的變遷必須造成影響輻射值的變化, 而且此變化必須大於其他因素對輻射值的影響, 包括(a)不同的大氣狀態 (b)不同的太陽角度 (c)不同的土壤含水量。而選擇適當的資料可以有效地減低上述因素對變遷偵測的影響, 故在進行變遷偵測之前, 必須對這些多時性影像資料進行輻射糾正, 不同年份但同一季節的影像, 就可以降低太陽角度的不同以及植物型態的不同所造成的影響。鑒於多時遙測影像具有上述的特性。所以水土保持局乃自 1995 年起, 即開始利用衛星資料進行山坡地監測, 以查報取締違法濫墾, 提昇監測效率。因此, 本文較著重於這一部分的說明。

表 1 臺灣地區主要使用的觀測衛星

衛星別	空間解析力	像幅寬度	波段	周期	天候影響
SPOT5	10m	60 公里	G,R,IR,SWIR	2.5 天	雲雨影響
福衛 2 號	8m	24 公里	B,G,R,IR	1 天	雲雨影響
MODIS	250-1,000m	2330 公里	36 波段	1 天	雲雨影響
ERS2	30m	100 公里	C	35 天	無影響
RADARSAT2	3-100m	20-500 公里	C	3 天	無影響
ENVISAT	30m	56-400 公里	C	35 天	無影響
ALOS	7-100m	20-350 公里	L	2 天	無影響

2.2 崩塌地監測

衛星遙測除運用於山坡地違法濫墾的常態監測外，亦應用於發生風災或水災的緊急救災的即時監測上，如利用衛星影像快速判釋風災或水災影響範圍、坡地崩塌或土石流面積、新崩塌區域、堰塞湖的演變及分析後續可能的災害潛勢。一般光學衛星影像在幾何校正後，以光譜分類，配合顏色、形狀及三維模擬地形區位的方式進行崩塌地萃取；而雷達影像則是因不同極化(VV、HH、HV、VH)對不同地物形態產生不同的強度影像及其組合，再配合顏色、形狀與地形區位做為判釋方式。以民國

98 年的莫拉克颱風為例，四天的累積雨量在南台灣創了記錄(如圖 1)，也造成嚴重的災情。在風災期間隨時委託獲取判釋後之光學與雷達影像，供救災防災使用，並以 98 年 3 月至 6 月的衛星影像做為災前的參考影像；而於水災後考慮到爭取時效，因此採用 8 月 10 日至 8 月 31 日衛星影像，將判釋成果提供救災使用(災前與災後衛星影像如圖 2)。另亦監測新增堰塞湖之位置與面積變化評估，災前災後崩塌地之變動，監測重點區域包括曾文河流域、八掌河流域、台東沿海河系、林邊河流域、濁水河流域、高屏河流域等六大流域，其崩塌變動列於表 2。

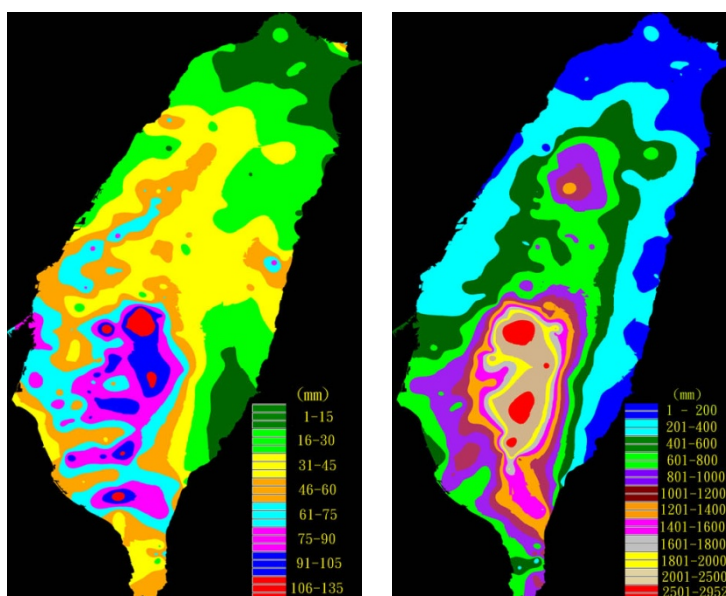


圖 1 (左) 2009 年八八水災最大時雨量分布，(右)8 月 7 - 10 日之累積雨量分布

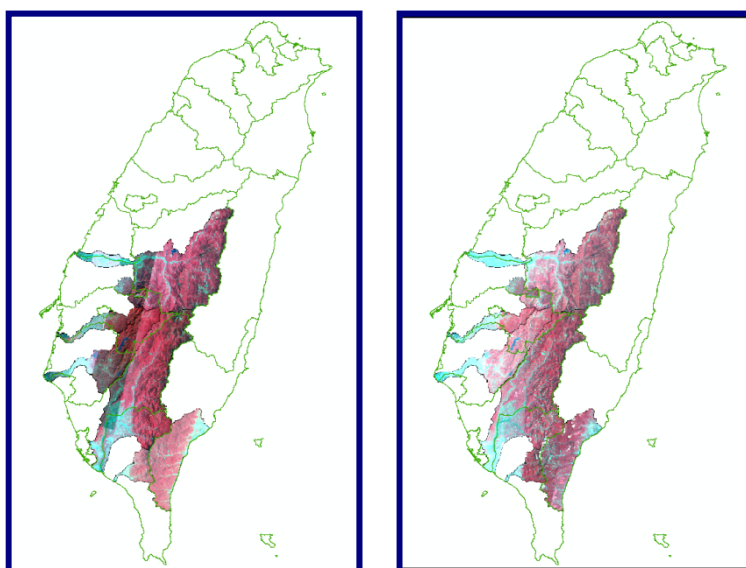


圖 2 崩塌地判釋重點區衛星影像；左為災前影像，右為災後影像

表 2 八八水災前後崩塌地判釋成果統計表

項目 區域	災前		災後	
	崩塌地數量 (處)	崩塌地面積 (公頃)	崩塌地數量 (處)	崩塌地面積 (公頃)
曾文溪流域	2,579	673.67	8,470	2,596.79
八掌溪流域	241	122.20	782	354.60
台東沿海河系	6,526	1,611.14	12,453	5,023.99
林邊溪流域	1,067	179.45	5,698	1,517.99
濁水溪流域	18,176	5,196.55	26,393	7,013.23
高屏溪流域	17,739	4,439.79	40,789	16,786.78

2.3 地變形監測

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交接處，屬於環太平洋地震帶中的一部分，因此容易發生地震；而在地震發生之後地表可能產生形變，所以近年來對於大範圍的地變形分析監測亦相當的重視。衛星影像應用於地表高度變動，一般可用合成孔徑雷達干涉量測(SAR Interferometry, 簡稱 InSAR)技術，利用雷達回波相位資訊，以獲取地表三維資訊與變化資訊。其中干涉雷達可通過兩天線同時觀測或兩次近乎平行的觀測，獲取地面同一地區影像；由於目標區與兩天線位置的幾何關係，在雷達影像上產生相位差，形成干涉條紋(包含了斜距上的點與兩天線位置之精確資訊)。因此，利用感測器高度、雷達波長、入射角及天線的基線之間的幾何關係，可以精確的計算出影像上每一點的三維位置和變化資訊。

衛星干涉量測主要以重複軌道(Repeat Pass)的方式實施，於不同時間獲取同一地區的 SAR 影像經干涉處理而得；如圖 3 為屏東地區 ERS 影像干涉圖(梁隆鑫、等，2001)。處理過程包含兩張複數影像的精確套合、及套合影像中相對應像元的共軛複數相乘得到相位差值。相同的相位差值會形成干涉圖像中的干涉條紋。若在兩影像獲取的時間段內發生地表的移動，而干涉圖像中的干涉條紋主要由地形效應(Topographic Effects)和地表移動所組成；

因此，為了從原干涉圖像中獲得地表移動資訊，可以移除地形效應產生的差分干涉圖像。

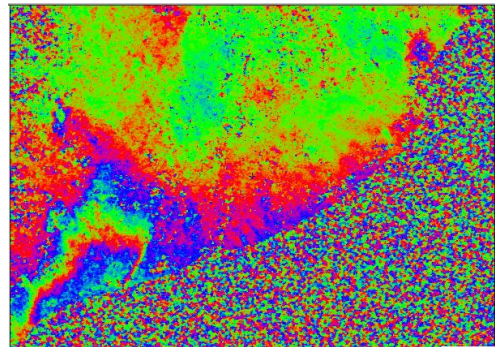


圖 3 1996 年 4 月 11 日與 1 月 31 日高屏地區 ERS 雷達影像干涉圖(左右相反)

2.4 歷年海岸線變遷

近年來因氣候變遷影響海水面變化的議題受到重視，尤其是台灣地區大部分的人口居住在離海岸 50 公里的區域之中，而且在沿岸有許多的高經濟農漁業及工業區。由於氣候變遷對於海岸線的影響日益嚴重，所以加強對海岸線變化的監測更顯重要。

中央大學太空遙測中心利用雷達與光學衛星影像，針對近十年來台灣的海岸線的變化進行研究(王秀雯、等，2007)，以影像邊緣特徵萃取技術標示各幅影像的海岸線位置，並將結果輸入資料庫，在資料庫中進行海岸線位置的時序分析。結果顯示

西部海岸大多呈現侵蝕狀態，其中外傘頂洲西南端南移約為 700 公尺，在潮位約 0.8 公尺下發現 2005 年面積由 60 公頃縮為 26 公頃。海豐島洲箔子寮漁港附近之離岸沙洲由 1996 年漁港離沙洲約為 800 公尺縮為 400 公尺，顯示沙洲向內陸靠近；海豐島沙洲群有南移約為 1.5 公里現象發生，如圖 4 與圖 5。而東部海岸則呈現侵淤互現的狀態，靠近河川出海口附近海岸多有向海增長的趨勢，而峭壁海岸則持續被侵蝕(林景騰、等；王秀雯、等，2007)。

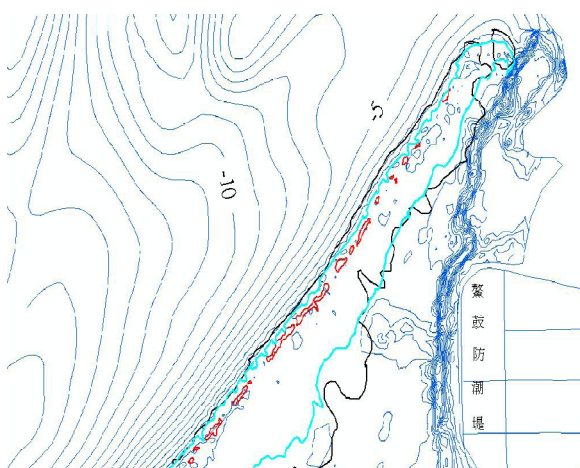


圖 4 2005 年外傘頂洲最高潮位與最低潮位水線套疊圖，潮位驗證站：塹港站，亮藍色線：2003 外傘頂洲水深 0 公尺等高線，紅色線：2005/6/23 ERS-2 水線（潮位：0.89 公尺），黑色線：2005/11/10 ERS-2 水線（潮位：-0.96 公尺），高程數據以基隆平均海水面為基準面

3. 農委會水土保持局山坡地變異點分析

農委會水土保持局自 1995 年起，即利用衛星資料進行全國山坡地監測業務，自 2002 年起更將衛星影像之山坡地監測併入例行性的業務；包括結合多時序的光學影像(SPOT 與福衛系列)，比對前後期影像的變異情形，其中影像變異即為利用前後期之正規化差異植生指標值之變化分析進行評估。

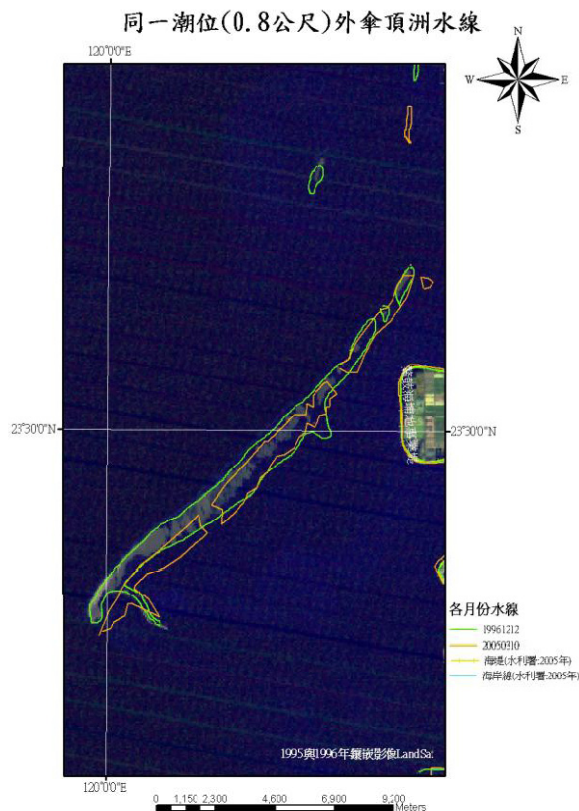


圖 5 外傘頂洲同一潮位水線變化情形：綠色線為 1996/12/12 外傘頂洲水線；橘色線為 2005/3/10 外傘頂洲水線

3.1 正規化差異植生指標 (NDVI) 比較法

衛星影像光譜值可利用波段與波段間操作分析，或是用多種波段組合進行分析。植生指標 (Vegetation Index) 是一種影像比例方法，可以消除感測器任何外來且多重程度相當之影響。以最原始之影像比例而言： $R_{i,j} \frac{X_i}{X_j}$ ， X_i 為波段 i 之灰度值， X_j 為波段 j 之灰度值。這種比例的影像有三種主要的特性：(a) 變遷區域會被增揚 (b) 減抑幾何校正不精確的影響 (c) 利用多時影像時，可將灰度值常態化。同時也具兩種缺點 (1) 增揚隨機誤差 (2) 會將兩種不相關的波段產生相關。以 SPOT 衛星而言，第三波段為 IR 近紅外光波段輻射值，第二波段為 R 紅光波段輻射值，由於植物之特性，可用這兩個波段來組成所謂的植生指標。目前國際上有許多植生指標之定義，例如：(a) 植

生指標： $VI \frac{IR}{R}$ (b) 正規化差異植生指標：

$NDVI \frac{IR-R}{IR+R}$ (c) 轉換後植生指標： $VI \sqrt{\frac{IR-R}{IR+R} + 0.5}$ 。

山坡地變異監測即使用 NDVI；因為綠色植物有吸收藍光、紅光及強烈反射近紅外光之特性，可應用於多光譜態資訊於植物資源之探測，以判別植生反射量之多寡；因此可用這兩個波段之比值或差值做為植生好壞之判定、分析植生變化情況。通常 NDVI 之值介於-1 至+1 之間，小於零的像元值屬於非植生之雲層、水域、裸露地、開挖地、道路及建築物等像元；故指標值愈大時，代表綠色生物量之增加，植物生長愈旺盛，其吸收之藍光、紅光愈多，近紅外光反射愈強，期間之差距也愈大。在做法上先求取前後期影像的植生指標後，再加以比較，以辨識變遷的區域，如此便可針對植物為重點進行變遷偵測。

3.2 變異點判釋整合系統

山坡地範圍廣闊，為因應龐大之資料分析量與配合五仟分之一圖幅之輔助圖資，以 ArcView GIS 地理資訊系統為主體，發展「山坡地變異點比對應用系統」；系統中同時具有基本套疊、查詢、展示及繪圖功能，加上系統管理、圖資檢視、影像管理、變遷分析、影像處理及圖資輸出等六項功能。本系統可依據不同監測間距與監測區域進行調整，依據實際業務需求訂定判釋週期。應用系統架構如圖 6 所示。

利用衛星影像做為山坡地管理工具，主要是要找出由植生變成非植生的區域；因此，系統的條件設定考慮的因素為 (a)後期之 NDVI 值必然為接近 0 或小於 0 之值 (b)前後期差異設定閾值(Cut-off value)。由於單張衛星影像 NDVI 值之區間為±1，前後期影像相減，差異值應為單張影像的兩倍，故 NDVI 差異值範圍為±2，閾值預設為範圍的十分之一，即±0.2，再依據 NDVI 實際差異值之不同，以人工進行調整與判釋。即先蒐集可用衛星影像相關資訊，確認為最佳且可使用的影像並購買後，進行影像幾何校正之檢驗，檢驗無誤，將影像匯入變異

點判釋整合系統，以 NDVI 分析，並配合 GIS 相關輔助圖資，如彩色航照圖、像片基本圖、土地利用圖、建物、道路與農路及坡度陰影等，藉由自動化到人工判釋，流程如圖 7 所示；而判釋的等級處理區分，如圖 8 所示，共分成三級；先以系統自動化初步比對變異點，數化出變異區域，再由具有專業知識及判釋經驗的人員，根據衛星影像資訊、輔助圖資、判釋經驗、歷史變異點、現場調查成果資料等，以人工方式逐一剔除非必要變異點（非必要變異點包含：1.海岸線或河道因豐水、枯水期變異、2.學校、機場或軍事用地、3.特定都市重劃區、4.旱田及水田等週期性翻耕、5.雲霧或山脊陰影、6.天然災害），最後由經驗豐富的判釋人員進行二次判釋及檢核，經由系統整合，匯出疑似違規變異點成果，如圖 9 所示。

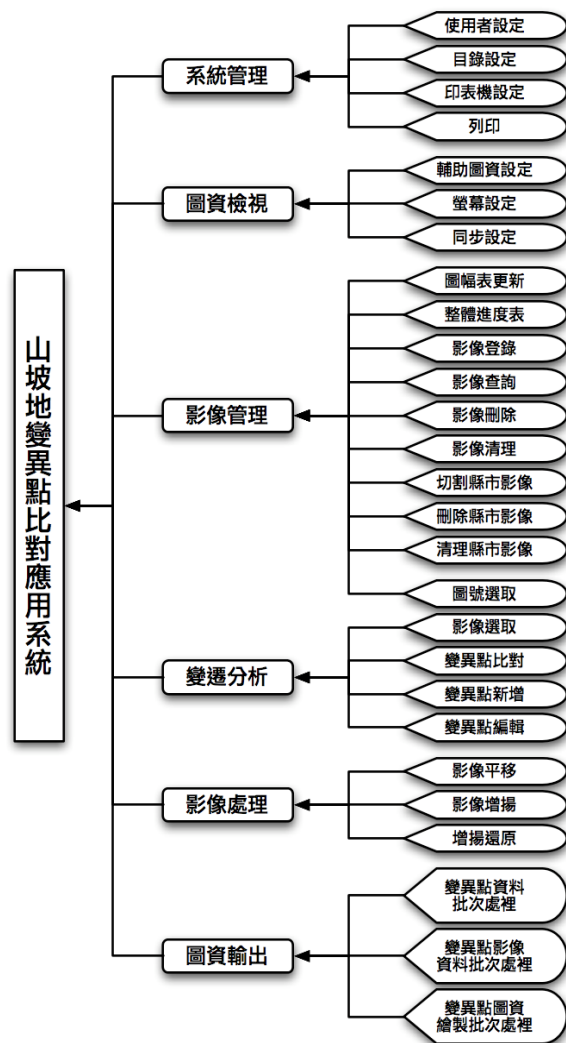


圖 6 山坡地變異點比對應用系統架構

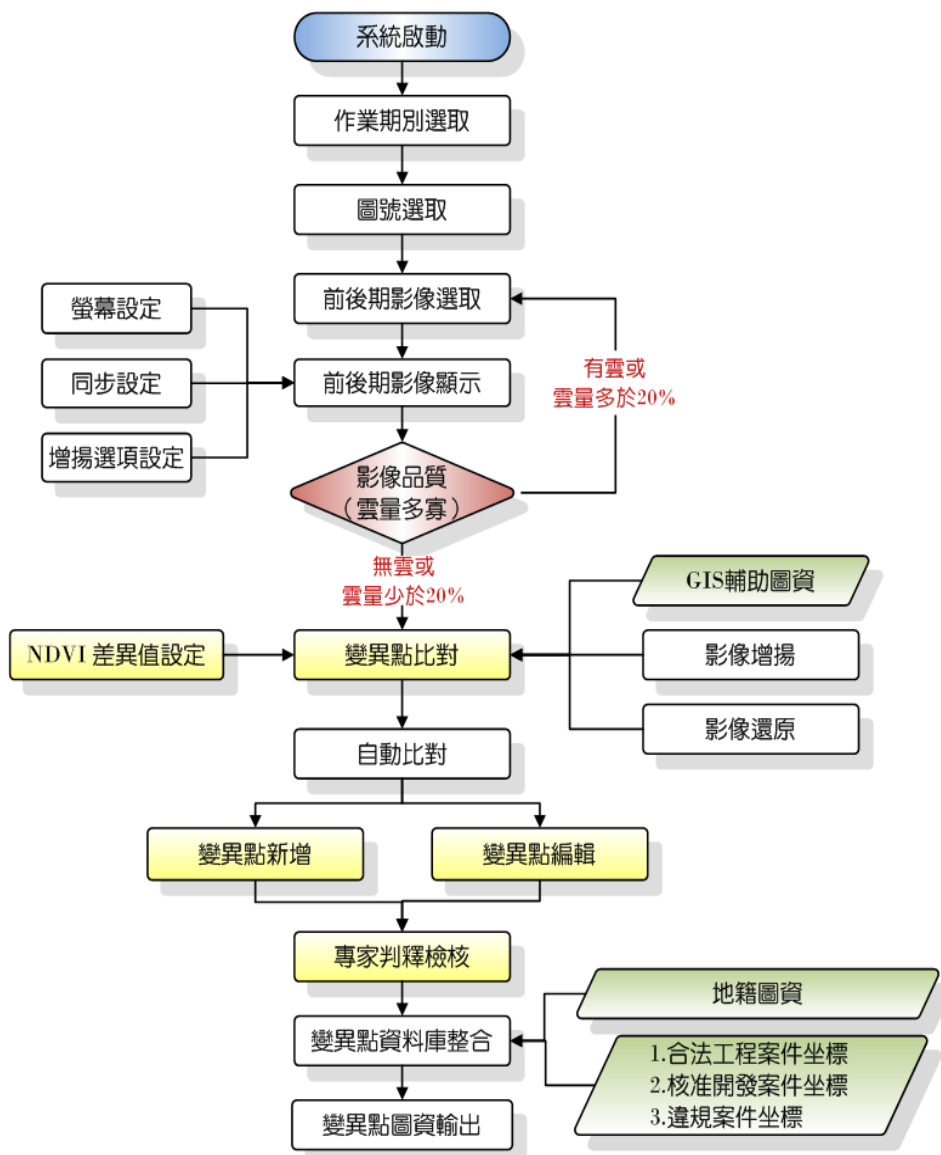


圖 7 運用遙測技術輔助山坡地變異點判釋流程

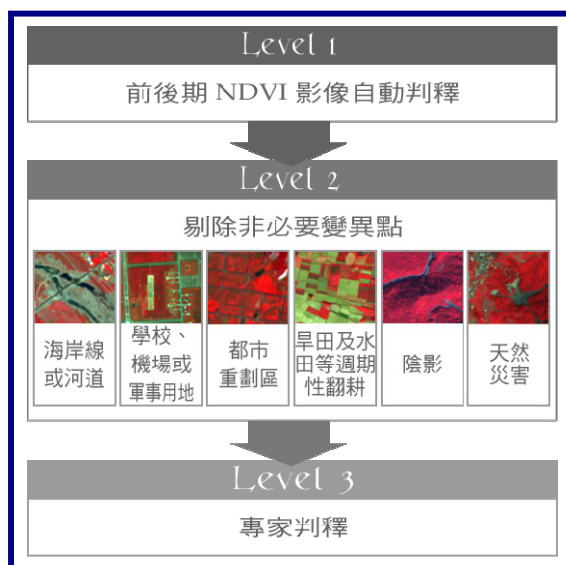


圖 8 變異點判釋等級區分示意圖

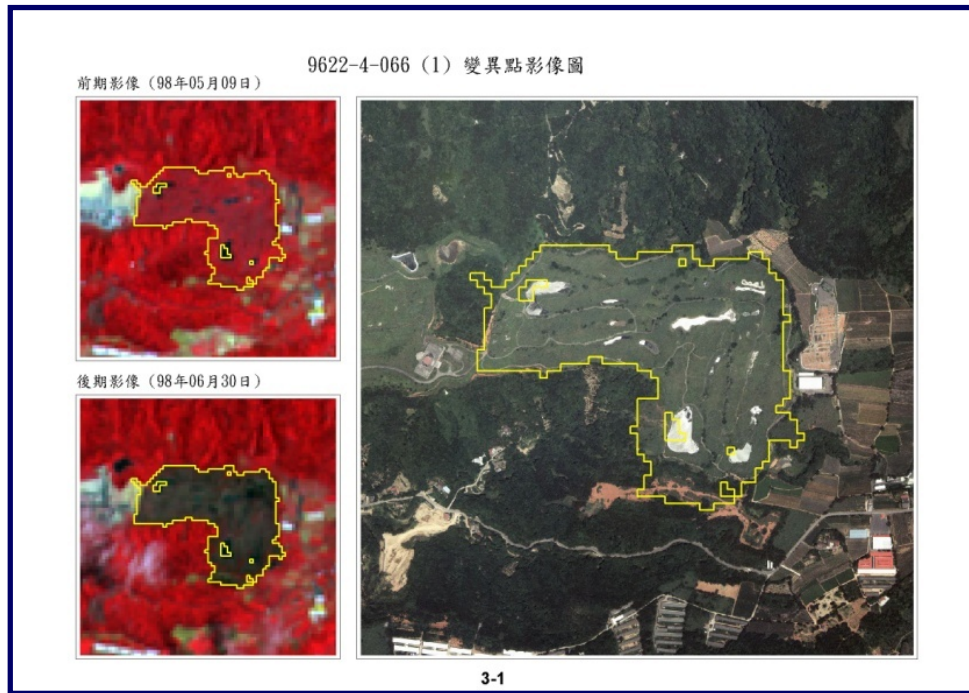


圖 9 疑似違規變異點

3.3 相對參考資料

山坡地變異監測對於植生與非植生的門檻值認定，可以利用長期監測的標準樣區值域分析，或航帶中確定的裸露區做為參考，標準裸露樣區位於新竹縣寶山鄉寶山第二水庫(如圖 10)，自 2004 年起於水庫開挖期間監測，面積約為 11.9 公頃，區域內主要為裸露地，周圍地表為植物覆蓋，水庫工程已於 2006 年初完成。NDVI 統計值如表 3 所示。整體低 NDVI 值反應地表裸露，對於 NDVI 裸露地的率定相當可靠。

3.4 現場查證

查證業務中會提供前一年度現場查報人員未查復變異點數與案件編號，由委託單位自第一期起，每一期分別前往不同縣市調查地方政府未查復之變異點和當年度變異點現況，並配合工作人員進行變異點現場調查，將現場調查成果彙整後，上傳至山坡地管理資訊系統，並將調查成果進行統計和分析。其現場調查流程如圖 11 所示。

現場調查主要目的為瞭解變異點現況為何，將

查證結果提供做為監測與管理參考，並以現場調查結果做為加強變異模糊地帶判釋依據，藉由查證工作佐證比對判釋準確性。以下為 2009 年度現場調查案例。

現場調查資料有時會有文字內容描述上的差異，如計畫被委託人員於 2009 年 6 月 23 日至新竹縣寶山鄉，調查 2009 年度第二期變異點，案號 AJ1109802005 之現況；該地土地利用現況為：邊坡開挖整地及邊坡設置擋土設施，有聯外道路，部分區域有雜草覆蓋；而新竹縣寶山鄉查報人員回報單對此處狀況描述為『5 月 15 日查證：疑似違規案件：11 未依核定計畫施工。山坡地開挖整地；本案經縣府 97 年 12 月府農保字第 0970009333 核准在案，惟疑似超挖，經本所 2009 年 3 月 12 日寶農字第 098300047 號函請縣府施工檢查』。現場調查相關圖表如圖 12 為案號 AJ1109802005 現場調查表，圖 13 為案號 AJ1109802005 變異點影像圖，圖 14 為工作團隊現場調查人員拍攝之現場照片，圖 15 為水土保持局山坡地管理資訊系統鄉鎮人員回報之查證資料。



圖 10 2004 年 1 月份寶山第二水庫新建工程現場照片

表 3 標準樣區 — 裸露地 NDVI 值域統計表

年度	2004											
月份	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
最小值	-0.19	-0.17	-0.13	-0.11	-0.11	-0.11	-0.19	-0.15	-0.11	-0.13	-0.18	-0.18
最大值	0.12	0.00	0.05	0.21	0.41	0.58	0.65	0.54	0.23	0.54	0.26	0.20
平均值	-0.04	-0.09	-0.04	0.05	0.15	0.23	0.23	0.20	0.06	0.20	0.04	-0.07
標準差	0.09	0.05	0.05	0.09	0.15	0.20	0.24	0.20	0.10	0.19	0.13	0.08
年度	2005											
月份	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
最小值	--	--	-0.14	-0.14	-0.11	-0.20	-0.18	-0.17	-0.09	-0.15	-0.15	-0.14
最大值	--	--	0.28	0.48	0.36	0.48	0.59	0.52	0.48	0.53	0.40	0.35
平均值	--	--	-0.05	-0.03	0.00	-0.09	-0.04	-0.04	0.02	0.03	-0.04	-0.04
標準差	--	--	0.09	0.13	0.12	0.14	0.20	0.18	0.15	0.15	0.14	0.08

註：2005 年 01 及 02 月未進行樣區監測，故無統計資料。

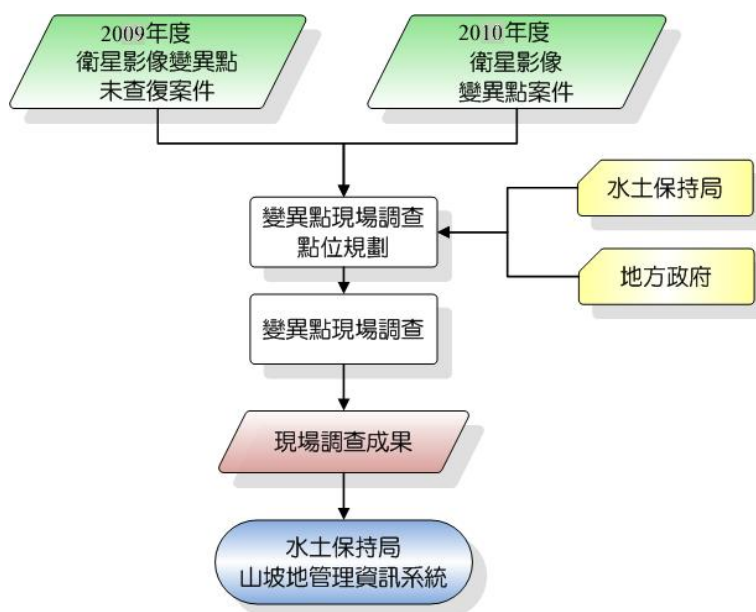


圖 11 變異點現場調查流程圖

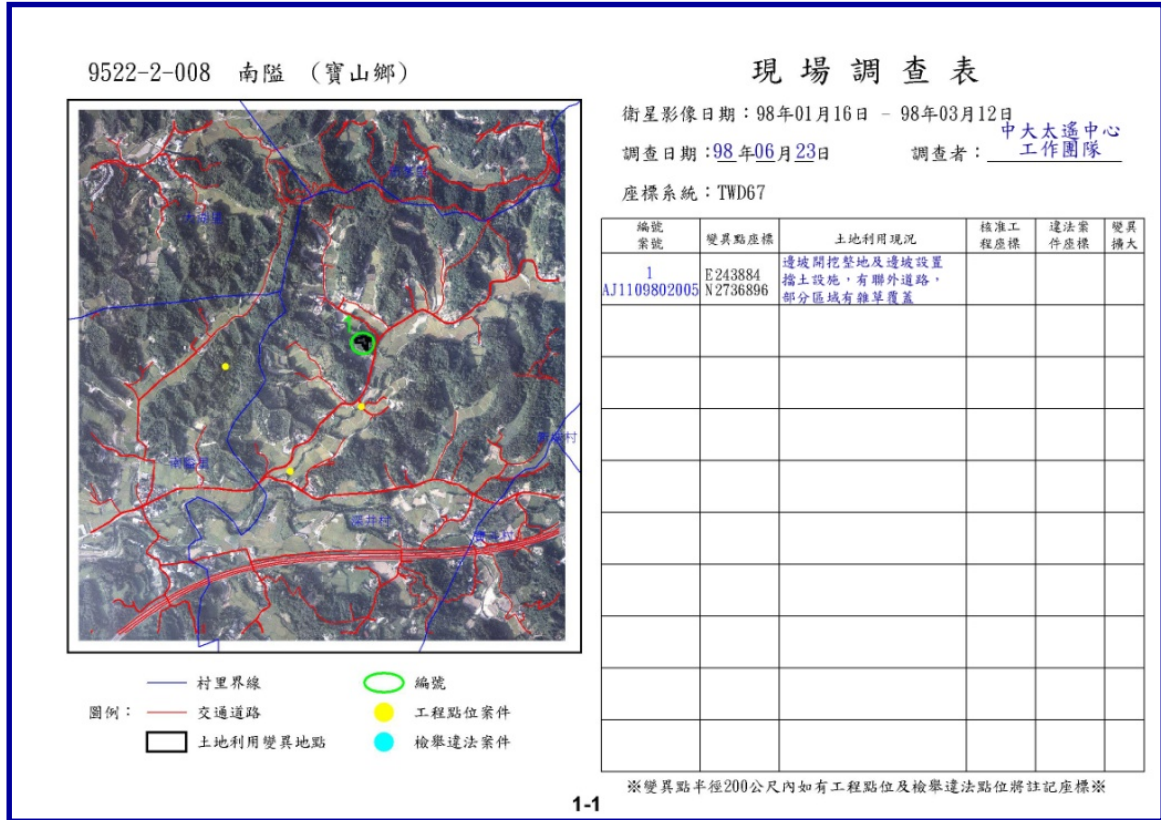


圖 12 案號 AJ1109802005 現場調查表

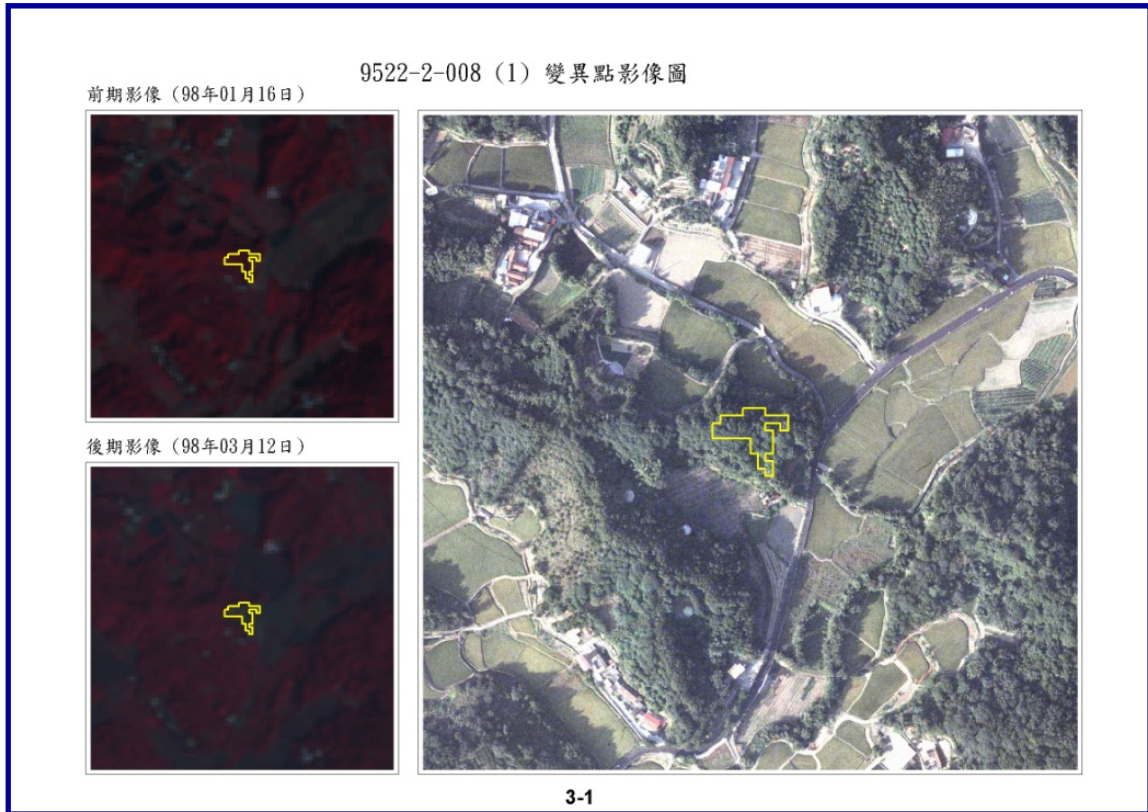


圖 13 案號 AJ1109802005 變異點影像圖



圖 14 案號 AJ1109802005 現場照片

基本資料		查證資料	
案件編號：	AJ1109802005	查證人員：	邱一弘
縣市：	新竹縣	查證日期：	98/5/15
鄉鎮：	寶山鄉	查證結果：	疑似違規案件
年度：	98	疑似違規類型：	11未依核定計畫施工
次別：	2	使用狀況：	山坡地開挖整地
圖名：	南隘	備註：	本案經縣府97年12月府農保字第0970009333核准在案，惟疑似超挖，經本所98年3月12日寶農字第098300047號函請縣府施工檢查。
圖號：	9522-2-008	現場照片：	
前期影像：	98/01/16		
後期影像：	98/03/12		
X坐標：	243884		
Y坐標：	2736896		
通告日期：	98/05/06		
面積(㎡)：	2432		
變異點地籍清冊			

圖 15 山坡地管理資訊系統案號 AJ1109802005 查證資料

3.5 山坡地判釋成效分析

山坡地變異管理成效可分為三項進行探討：判釋率、查報率及違規率，三者關係如圖 16 所示；最外層由衛星影像及 NDVI 進行變異點判釋，並剔除非必要變異點，即為判釋率，判釋準確率高才能進行後續之分析。山坡地地貌變異判釋準確率，為變異點案件數中的實際變異案件數，藉由統計

2005 年至 2009 年現場調查點共 1,061 處變異，約 99% 為實際有變異點位。中間層為查報率，是反映相關人員完成查證案件之數目，對變異點總案件數之比值，表 4 統計山坡地管理資訊系統 2004 年起至 2008 年止，其平均查證率為 99.1%。最內層為違規率，為違規案件數對已完成查證案件數之比值，2004 年至 2008 年，變異點案件年度平均違規率約為 20%，如圖 17。

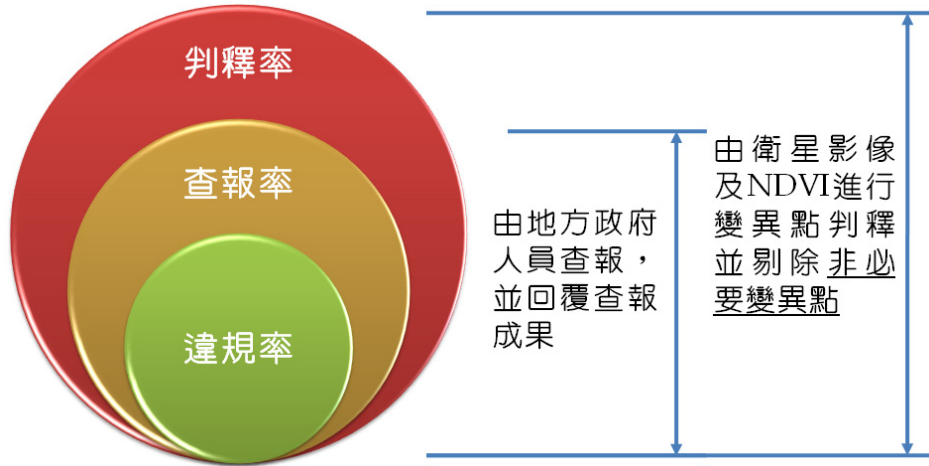


圖 16 變異點判釋率、查報率與違規率的關係

表 4 各年度山坡地變異點查證率

年度別	變異點案件數(處)	查證件數(處)	查證率(%)
2004	2,002	2,002	100.0
2005	2,417	2,379	98.4
2006	2,253	2,239	99.4
2007	2,669	2,621	98.2
2008	2,398	2,395	99.9
總計	11,739	11,636	99.1

資料來源：水土保持局山坡地管理資訊系統。

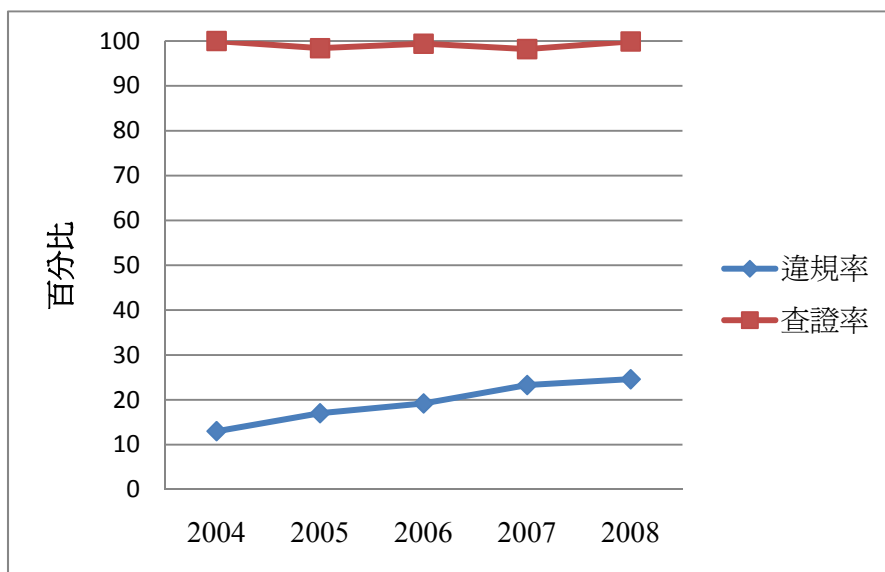


圖 17 各年度之查證率與違規率

4. 結論

不同的衛星之間雖然成像機制不同，但可以利用其特性，進行不同面向的國土監測，或取其個別優勢相輔相成，如光學與雷達衛星對山坡地變異與崩場地變動，光學與雷達影像對於海岸水線變動監測；利用衛星遙測的優勢，可以進行大範圍的監測，不受地形限制，快速與準確的資料處理，對於國土變遷普查與監測，提供一個有效的監測工具，可作為國土防災、規劃、與管理的重要決策參考。尤其在莫拉克颱風期間，衛星影像發揮了強大的災害監測功能，每天近中午時分，福衛與 SPOT 影像接收後，影像接收單位及一些福衛資料分散中心即進行資料處理與分析，即時提供新崩塌區域、淹水區域、漂流木區域、並回報堰塞湖演變，資料得以提供給決策人員參考。由此可知，衛星遙測資料對於災害期間、及災前災後分析都扮演非常重要的工具。

參考文獻

- 王秀雯，王志添，陳錕山，林延郎，2007，”利用衛星雷達影像分析臺灣西部水線變遷”，*航測及遙測學刊*，vol 12，no. 2，pp 107-119。
- 林景騰，陳錕山，王志添，李鴻瑋，吳春燕，周莉真，2007，“應用衛星雷達於台灣西海岸變遷研究”，TGA 台灣地球科學聯合學術研討會。
- 梁隆鑫，王志添，陳錕山，侯進雄，2001，“雷達差分干涉法應用於地層下陷研究”，*第四屆地下水資源及水質保護研討會*，PP. 191 - 196。
- Chang, C. P., Wang, C.T., Chang, T.Y., Chen, K.S., Liang, L.S., Pathier, E. and Angelier, J., 2004, “Application of SAR interferometry to a large thrusting deformation: The 1999 Mw=7.6 Chichi earthquake (Central Taiwan),” *Geophysical Journal International*, vol. 159, pp 9-16.
- Liang, L. S., Chen, K. S., Wang, C. L., Chen, A.J., Boerner, W. M., 2005, “Landslide monitoring and assessment in taiwan using SPOT series satellites”, *Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 2, PP 1397-1400.
- Liang, L. S., Wang, C. T., Chen, K. S., Tsai, Y. B., Chen, A. J., 2006, “Deformation of 921 Earthquake by Satellite Radar Interferometry : Co-seismic and Post-seismic Estimation” , *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 11, no.3, pp. 327-336.
- Wang, C. T., and Chen, K. S., 2003, “A study of multi-temporal processing of SAR imagery,” *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol.8, no.1, pp.47-56.
- Wang, C. T., Chen, K. S., Yin, H. Y., Hu, J. C., Chen, W. Y., Boerner, W. M., 2010, “Mapping Land Uplift and Subsidence in the Industrial Parks in Northern Taiwan by Radar Interferometry,” accepted to *International J. Remote Sensing*.

Monitoring in Land Surface Changes by Satellite Images

Hsiao-Yuan Yin¹ Long-Shin Liang^{2*} Kun-Shan Chen³ Peggy Huang⁴

ABSTRACT

Land surface changes are generally due to natural or human forces. For example, coastal changes, landslide, mudslide, and floods are all triggered by natural forces. While over-developed and illegally waste dumping in slopeland are owing to man-made impacts. Remote sensing as a powerful tool for change detection of wide area land surface can supply fast and accurate processing and analysis. This paper gives an overview about applications of satellite image, including change monitoring of slopeland, landslide analysis, acquiring of surface deformation, and change detection of waterline in west Taiwan. Application of remote science and technology in management and monitoring, including slopeland monitoring and landslide analysis, has been proceeding since 1995 by Water and Soil Conservation Bureau of the Council of Agriculture. These works are all the resources of government's administration in precaution against natural calamities.

Keywords: Satellite image, land surface changes, landslide, surface deformation

¹ Sectional chief, Soil and Water Conservation Bureau (SWCB), Council of Agriculture

² Engineer, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

³ Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

⁴ Engineer, Soil and Water Conservation Bureau (SWCB), Council of Agriculture

* Corresponding Author, Phone: 886-3-4227151 ext 57625, E-mail: lsliang@csrsr.ncu.edu.tw

Received Date: Apr. 27, 2010

Revised Date: Jun. 18, 2010

Accepted Date: Jul. 26, 2010

暴雨型崩塌地自動判釋及特徵分析之研究

張崑宗^{1*} 高啟軒² 王主一² 劉進金³

摘要

台灣位在西北太平洋颱風移行的主要路徑上，依據統計平均每年約有 3 至 4 個颱風可能侵襲台灣地區，伴隨颱風而來的強風豪雨所引發的洪水與坡地土砂崩塌災害，不僅嚴重威脅人民的生命安全，更時常造成社會經濟的重大損失。過去崩塌災情分析方式，常由經驗豐富地質專家進行人工研判，不僅耗時、費力，無法在短時間內做出有效的災害評估與災後復原計畫；且易因高山阻隔或災後道路中斷等因素，使得大範圍災情調查工作無法順利進行。因此，如何提升自動化判別災區崩塌地區域之效能，是一個值得探討的研究課題。

本研究使用高解析衛星影像與地形資料，以提升衛星影像自動化暴雨型崩塌地判釋之精度為目標，除了使用在許多影像分類技術常被採用的最大似然法及倒傳遞類神經網路法外，亦建立以支持向量機法為基礎之崩塌地判釋機制；文中除了對三種方法進行分類精度評估，亦探討影像色調及地形特徵作為暴雨型崩塌地判釋特徵之顯著性，以強化崩塌地分析的自動化及效能。

從分離度分析結果可顯示訓練樣本之選取適當，坡度特徵的加入有助於增加崩塌地與其他三種類別分離度。此外，由分類精度評估結果可知 BPNN 法與 SVM 法分類精度均優於 ML 法；至於判釋特徵，如坡度、OHM 等之使用上，對於山崩判釋正確率提升上有不同程度之影響，其中以坡度特徵影響最為顯著。然而，因混合像元效應(本次實驗資料解析度 20m)、取樣率不一之影響，對於本研究使用特徵及分類方法，值得進一步探討與分析。

關鍵詞：暴雨型崩塌地、衛星影像、空載光達、類神經網路、支持向量機

1. 前言

1.1 研究動機與目的

世界銀行在 2005 年發行的《Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis》報告中指出，台灣約有 73% 的面積及人口暴露在三種以上的天然災害危險當中 (Dilley *et al.*, 2005)。台灣位在西北太平洋颱風移行的主要路徑上，依據經濟部水利署民國 92 年統計資料，106 年來台灣地區遭遇 393 次颱風，平均每年約有 3 至 4 個颱風可能侵襲台灣地區，伴隨颱風而來的強風豪雨所引發的洪水與坡地土砂崩塌災害，不僅嚴重威脅人民的生命安全，

更時常造成社會經濟的重大損失，成為台灣地區嚴重災害之一。每年因颱風導致的經濟損失估計約 200 億元，其中農業損失以民國 85 年賀伯颱風之 180 億元居冠，94 年海棠颱風 77 億元居次，96 年柯羅莎颱風 (76 億元)、87 年瑞伯颱風 (67 億元) 與 89 年碧利斯颱風 (61 億元) 等個案的農業損失也都在 60 億元以上 (依據行政院農業委員會 1988~2007 年統計)。去年 8 月 8 日莫拉克颱風 (88 水災)，於短短二~三天之間挾帶龐大雨量 (累積降雨量達 1000~2000 多毫米)，南臺灣各地災情慘重。據統計近 760 人死亡及 24950 人撤離家園，重創台灣農林漁牧業、交通、水利、維生管線等公共設施，為臺灣 50 年來繼八七水災之後最大的颱風

¹ 明新科技大學土木工程與環境資源管理系(所) 助理教授

² 明新科技大學土木工程與環境資源管理系(所) 研究生

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所 正研究員

* 通訊作者, 電話: 886-3-5593142 ext3297, E-mail: ktchang@must.edu.tw

收到日期: 民國 99 年 05 月 03 日

修改日期: 民國 99 年 06 月 18 日

接受日期: 民國 99 年 07 月 12 日

災害。

崩塌地是地球表面為求得動態平衡所引發的自然現象，其潛在因子(即內在因子)為地質與地形條件，其誘發因子(即外在因子)為地震、氣候、水文條件與人為擾動。當內在因子條件不良(如地質破碎且地形陡峭)，加上外在因子條件惡劣(如地震、豪雨或土石大量開挖)時，若外力大過內力，地球表面平衡遭受破壞，將開始動態調整，以達到另一階段的平衡。這種動態調整實際上就會造成塊體移動或地表物質移動(mass movement)，如山崩、地滑、土石流、及侵蝕等現象均屬之。台灣地小人稠，山多平原少，許多地理環境敏感帶，如洪水沖積平原以及河川上游山坡地都因人為過度開發，導致地理環境嚴重破壞，其對災害的承受力因而降低。且地處地震帶、颱風路徑上，尤其是近年來，越來越嚴重的全球氣候變遷異常現象更加遽了這些天災的威脅，造成台灣多處易於崩塌。大規模災害的發生及其災情的形成具有空間性、時間性、連鎖性、累積性、複雜與複合性等特性；災害防救攸關人民生命、財產安全，為當今國際社會所重視，雖世界各國國情與地理環境有異，執行手段與方法不同，然其目標卻趨於一致即為減少損失。達成此目標首要關鍵，在於災後如何迅速取得災害發生處。過去崩塌災情分析方式，常由經驗豐富地質專家進行人工研判，不僅耗時、費力，無法在短時間內做出有效的災害評估與災後復原計畫；且易因高山阻隔或災後道路中斷等因素，使得大範圍災情調查工作無法順利進行。因此，如何提升自動化判別災區崩塌地區域之效能，是一個值得探討的研究課題。

隨著高解析度航、遙測影像資料及數值地形資料取得上較為方便，分析方法與軟體功能亦日益提升，因此，本研究將以提升衛星影像自動化暴雨型崩塌地判釋之精度為目標，除了使用在許多影像分類技術常被採用的最大似然法及倒傳遞類神經網路法外，亦建立以支持向量機法為基礎之崩塌地判釋機制；對三種方法進行分類精度比較，且探討影像色調及地形特徵作為暴雨型崩塌地判釋特徵之顯著性，以強化崩塌地分析的自動化及效能。

1.2 文獻回顧

依據 Varnes 及中央地質調查所做的土石運動類型整理如表 1 所示(Varnes, 1978)。本研究探究對象在於影像上可辨別之崩塌地類型，由於深層山崩或地滑因為滑動體未受太大之破壞，航照或影像上地表無特別反差，因此極不易研判。通常判釋上是依據一般深層滑動在發生後常出現的特殊地形，包括滑落崖、滑動體、側翼及趾部等地貌特徵。深層山崩通常需要野外現地調查以確認其存在。一般降雨促成的山崩為淺層山崩或落石，崩痕(scars)通常很清晰，因為在原始邊坡有植被時，崩痕上之植被常被剝除。當豪雨加強且有足夠材料時，土石可能液化以流體狀態運動，直到坡度變緩或其他阻力防止為止。土石流、淺層山崩或落石參照前述準則可以作正確分類。因此本研究主要針對暴雨可能引發之崩塌類型，即為淺層山崩或落石進行後續分析。

表 1 土石運動類型

運動類型		元素類型		
		基礎	工程土壤	
			大部分粗顆粒	大部分細顆粒
墜落		岩石墜落	岩屑崩落	泥土崩落
倒塌		岩石倒塌	岩屑倒塌	泥土倒塌
滑動	翻滾型	岩石滑動	岩屑滑動	泥土滑動
	平移型			
測邊擴散		岩石擴散	岩屑擴散	泥土擴散
流動		岩石流動(深層緩慢)	岩屑流動	泥土流動
綜合型		結合兩種以上主要運動型態		

一般崩塌地調查方法可分為三種，包括現地人工調查、航照或衛星影像判釋、及混合二者。其中，現地調查僅為單點式調查，於災害發生後，常因交通中斷導致現地調查困難，無法達成全面與近即時性調查目標。運用航照或衛星影像判釋法，可依操作方式分為人為研判、自動或半自動判釋三種。人為研判為將航照、衛星影像作一有效顯像，至於判釋工作則交由地質專家，以立體視覺方式觀測影像，將崩塌地或其他地質現象圈繪出來。此方法優點是判釋成果的範圍與面積明確，可作為治理規劃的基礎。然而，其結果因人而異，且調查效率是項考驗。數值影像自動分類是將數值影像讀入電腦，讓電腦利用辨認法則，自動判釋崩塌地。這種方法優點為辨認法則客觀，唯實際應用上，受到影像解像力、判釋因子重要性及判釋演算法之影響。台灣因為地質破碎、地形陡峭，且氣候溫暖、潮濕、風化作用激烈、地表植物茂盛，所以長軸小於五十公尺的小型崩塌地偏多。小型崩塌在解像力大於十公尺的衛星影像上，常常不易研判。此外，自動分類方法一般是以像元為判釋最小單元，所以結果中會產生許多獨立像元之崩塌地。此外，許多非崩塌地像元，因複雜的地形效應而被分類為崩塌地，導致誤判。再者，可先以影像自動判釋後，再至現場確認的調查方式，乃結合前述二種方式的優點；若能提高影像判釋結果效能及一致性，則可減輕之後至現場調查的負擔(張崑宗、等，2006)。

以往使用航照可進行立體觀察及高空間解析度特性，因此常被用來作為崩塌地判釋及土地分類的工具，並可繪製成圖(劉進金，1987)。然而傳統的航照判釋方法，其航照拍攝與人力判釋都很費時，並需要較高經費(劉進金、等，2001)。

除了航照外，衛星影像亦可蒐集土壤、地質、坡度、形態、土地利用、水文、降雨、斷層等相關資料易於取得。該影像判釋工作過去因影像解像力較粗糙，只能將土地利用與覆蓋作一級分類(即大分類)，例如分成城鎮、農地、牧場、林地、水體、濕地、裸地、草原等八類；隨著衛星影像解像力提高(地面解像力可達1公尺)，及影像處理技術之提升，其判釋精確度及效率均提高許多(潘國樑，

1999)。運用多光譜衛星影像可進行岩石、植被、土地使用等分類或以立體視覺進行中、小比例尺地形圖製作(Liu, 1987；吳久雄等，1989；梁隆鑫，1997；Liu, 1999；許立達等，2002)。

遙測影像中有關植物的訊息，植物葉綠素利用光合作用吸收大約70%至90%的紅光和藍光，但在可見光範圍內，大多數的綠光均被反射。將葉片所反射出來的訊息，經由遙測影像的擷取與分析運算，即可瞭解植物行光合作用後所反應的資訊，如植物生長情形及植物生長量的多寡，進而可利用這種特性來進行作物及保育區的監測。此外，將原本用於評估綠色生物量的指標變成土壤環境監測中有意義的訊號，可藉由植生分析和植被探測為評估及監測天然資源之關鍵技術，且作為環境資源管理及決策之參考(張崑宗、等，2004)，尤其在乾旱環境及地表侵蝕風險評估上。

崩塌地測繪成果圖與崩塌地大小、遙測影像資料地面解析度有關。以一般崩塌地40000 m^2 大小為例，在SPOT全色態影像上為20x20像元；在SPOT多光譜影像上為10x10像元。此足以用來判釋高反差崩塌地及其相關環境，諸如植被的裸露險坡；但無法提供充分資訊以建立崩塌地特徵及類別。較高空間解析度的影像及立體顯示能力，諸如SPOT或IRS，雖可用來產生過去普通崩塌地形圖，但其大部分不足以勾勒所有崩塌地的細節(蕭國鑫、等，2003)。未來將著眼於非常高解析度(Very High Resolution, 簡稱VHR)影像，如IKONOS-2，可能有效輔助崩塌地資源調查(Westen, 2000)。國內許多學者著重於崩塌地潛勢分析及其與潛在因子、誘發因子的權重關係之探討(李錫堤、等，2003)。隨著判釋準則的確定，值得進一步將判釋準則轉化成人工智慧或其他自動化的程序，以增加效率與精確度(Kojima et al., 2000；劉進金、等，2001)。

分類理論的創新與精進將有助於遙測影像分類時之精度提升，遙測影像所採的分類理論最初是以統計分析方法為主，如高斯最大似然分類法及判別分析方法等。而隨電腦科技的進步及類神經網路(Artificial Neural Networks, 簡稱ANNs)理論的復甦，使得類神經網路已廣泛用在不同應用領域，例

如圖型識別、最佳化、預測、自動控制及水稻田分類等領域，為一強大且多用途之計算系統(Robert, 1990; Zurada, 1992; 邵泰彰、等, 2001)。此外，近年來支持向量機 (support Vector Machine, 簡稱 SVM) 是一種新穎的模式識別方法，由於其自適應的學習，以及處理高維度特徵資料的優勢，使其在遙感應用領域受到廣泛關注 (Zhu & Blumberg, 2002; Melgani & Bruzzone, 2004; Camps-Valls & Bruzzone, 2005)。過去許多研究將支持向量機運用於土地覆蓋分類或水稻田辨識，其成果顯示支持向量機所獲得的成果為最佳 (黃明哲、等, 2005; 陳承昌, 2006)。綜觀使用高解析影像及光達資料，自動分類方法，如類神經網路、最大似然法應用於崩塌地自動判釋之相關文獻成果均可作為本研究之發展基礎 (張崑宗、等, 2006; 楊孟學, 2007)。

2. 研究方法

目前在影像分類方法上主要分成監督式及非監督式分類法兩種類型，本研究依據前人研究經驗及判釋精度考量，因此選用監督式分類法進行本研究；並採用學習生物神經網路法發展快速且成熟的類神經網路法，近年來統計學習理論中備受矚目的支持向量機法，及傳統常被使用的最大似然法進行崩塌地自動化判釋之比較。以下為所用分類法原理之介紹 (陳承昌, 2006; 沈煥鋒, 2009)。

2.1 高斯最大似然法

高斯最大似然分類法 (Gaussian Maximum Likelihood Classification, 簡稱 ML) 須先指定各類別之訓練樣本區，待訓練完成後，即以訓練樣本區的光譜分佈性質，當作自動判讀之準則，對整幅影像進行分類作業。訓練樣本區資料之分離程度對成果有極大影響，故須謹慎選取。高斯最大似然法對未知像元進行分類時，將同時考慮判釋特徵，如光譜特徵的變異量與協變方；考量類別機率值之計算，該法假設各類別特徵資料的機率分配具有高斯常態分配之性質。在該前提下，資料的分配可由中值向量 (mean vector) 與協變方矩陣 (covariance matrix)

表示，經由這兩項參數可計算各像元被分類為某一種土地覆蓋類別之條件機率並以最大機率作為判斷像元所屬類別之依據。高斯最大似然分類法處理程序參見圖 1 所示，大致可分為兩個階段如下所述 (Lillesand *et al.*, 2004)：

1. 訓練階段：由使用者界定影像中類別數 m 並選取各類別之訓練樣本區，且由各訓練樣本資料計算各類別在各波段之中值向量與協變方矩陣。
2. 分類階段：將訓練階段所得的各類別中值向量及協變方矩陣代入常態分配之機率密度函數 (Probability Density Function)，以求得整幅影像上各像元對各類別之機率，並依據此機率值對各像元進行分類作業。

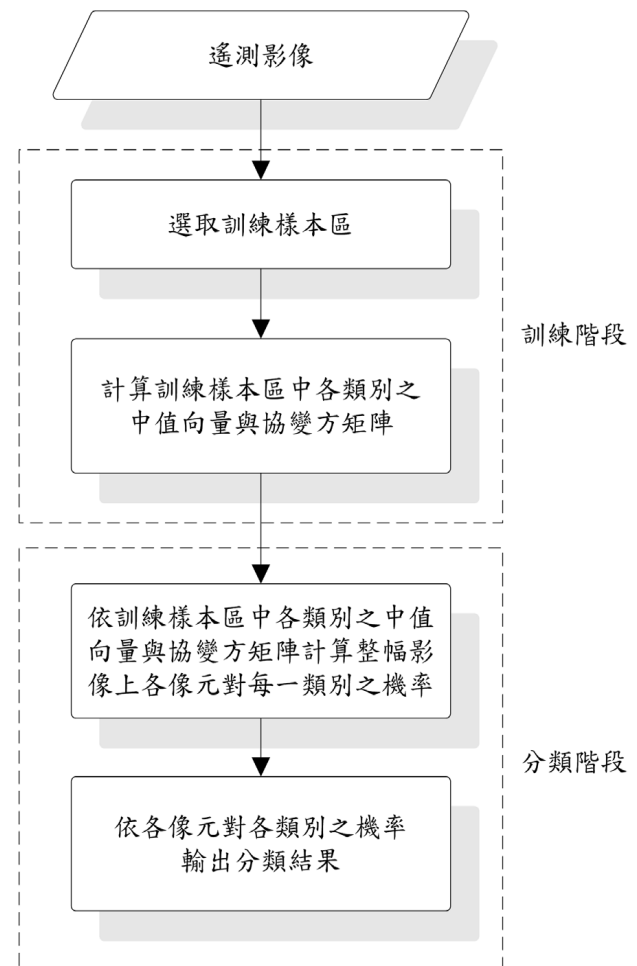


圖 1 高斯最大似然分類法處理流程

2.2 倒傳遞類神經網路法

類神經網路(ANNs)是一種使用大量相連結的人工神經元(Artificial Neurons)來模擬生物神經網路能力的計算系統。一個生物神經元組織結構主要包含細胞體、軸突(Axon)、樹突(Dendrite)、突觸(Synapse)四個部分；當生物神經元接收到輸入脈波訊號後，經細胞核處理產生新的脈波訊號輸出，若脈波訊號夠強，將會突破突觸關卡而將訊號送出。人類學習時，外界的刺激會使神經細胞產生的電流改變突觸上的知識，突觸隨電流在神經元間傳輸而不停改變，當知識趨於穩定時，學習也宣告完成。而人工神經元構造模擬上述學習過程，當人工神經元受到一組量化的輸入訊號刺激產生回應，透過網路連結將訊號傳遞到其他神經元，只要適當地調整網路連結係數(以權值表示；有些文獻以強度表示)，產生近似輸出值，以記錄所要學習的知識訊號，達到生物神經網路的學習效果(葉怡成, 1998; Robert, 1990)。ANN 特性之一為可提供某些人類解決難以運用邏輯、解析技術模擬問題的能力；此外，使用 ANN 毋須事先定義知識基礎，經由學習可讓網路找到輸入及輸出之間的作用關係。

多層次認知機(Multi-Layered Perceptron, 簡稱 MLP)，意即俗稱倒傳遞類神經網路(Back-propagation Neural Network, 簡稱 BPNN)，為 ANN 中廣泛被運用學習模式之一。其學習過程由正向傳播過程和反亦傳播過程組成。在正向傳播過程中，輸入資訊從輸入層經隱藏層單元，逐層處理並傳向輸出層。如果在輸出層得不到期望的輸出，則取輸出值的誤差平方和作為目標函數，轉入反向傳播，將誤差信號沿反向計算，由梯度下降法來調整權值和閾值(Zurada, 1992)。

BPNN 網路結構以每一個神經元用一個節點來表示，網路由輸入層、隱藏層、輸出層節點組成，隱藏層可以是一層，也可以是多層。BPNN 用於遙測分類的詳細學習過程如下：

1. 設定權係數初始值，賦予網路相鄰兩層節點之間的連接權值和隱藏層、輸出層節點的閾值，其值為 $(-1, 1)$ 之間的隨機小量。

2. 從網路的輸入節點輸入樣本資料，計算樣本資料在正向傳播過程中，傳到隱藏層節點和輸出層節點的輸出：

$$h_j = f(\sum_{i=1}^M W_{ji} X_i - \theta_j) \quad (1)$$

$$y_k = f(\sum_{i=1}^M W_{kj} h_j - \theta_k) \quad (2)$$

前二式中， θ_j 和 θ_k 分別為隱藏層節點和輸出層節點的閾值， W_{ji} 為輸入層 i 節點與隱藏層 j 節點之間的連接數值， W_{kj} 為隱藏層 j 節點與輸出層 k 節點之間的連接數值， X_i 為輸入層第 i 節點輸入的樣本訊號。

3. 根據 δ 規則計算樣本經網路輸出 $Y_k(l)$ 的輸出 $T_k(l)$ 與其期望輸出的誤差。如輸出層節點誤差為

$$\delta_k(l) = (T_k(l) - Y_k(l)) \cdot Y_k(l) \cdot (1 - Y_k(l)) \quad (3)$$

隱藏層中節點誤差為

$$\delta_j = h_j(1 - h_j) \cdot \sum_k (\delta_k(l) \cdot W_{kj}) \quad (4)$$

4. 對誤差 δ_k 和 δ_j 按照減少方向調整連接數值，其調整增量為

$$\Delta W_k = \eta \cdot \delta_k \cdot h_j \quad (5)$$

5. 輸入 P 個樣本，經上述步驟反覆訓練，每訓練完一次，計算其均方差 E 為

$$E = \frac{1}{2P} \sum_{i=1}^P (y_k(l) - T_k(l))^2 \quad (6)$$

當 E 小於指定精度 λ 時，停止訓練，並輸出此時調整後的數值和閾值；否則，更新學習次數，重新對訓練樣本集進行再訓練，直到滿足 $E < \lambda$ 為止。輸入影像數值，對各像元進行類別判斷，其目標函數為：

$$y_i = f(\sum_j W_{ji} \cdot f(\sum_k W_{2kj} \cdot X_k - \theta_{2j}) - \theta_{1j}) \quad (7)$$

2.3 支持向量機法

支持向量機(Support Vector Machine, 簡稱 SVM)為依統計學習理論為基礎，所建構出的機

器學習系統，其主要原理是在特徵空間中尋求具最大邊界的超平面以區分不同的二元類別。支持向量機可分為線性及非線性，倘若訓練樣本在空間中的分佈呈非線性，則採非線性支持向量機，反之則採線性支持向量機；而線性支持向量機又可分為線性可分或線性不可分的情況。

這是一種相對於其他統計分類方法較新的模式識別方法，由於其自我適應的學習方式，以及處理高維度特徵資料的優勢，使其在遙測應用領域受到廣泛關注。其實現了學習過程的一致性和結構風險最小化原理，透過綜合考慮經驗風險和可信區間，根據結構風險化最小原則取其折中，從而得到風險最小的決策函數。其核心思想是把輸入空間的樣本以非線性變化映射到高維度核空間，在高維度核空間求取具有低 VC 維(複雜度)的最優線性決策面。SVM 的基本原理是：假設訓練樣本為 $\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_3, Y_3)\}$ ，其中 $X_i \in \{\pm 1\}$ ，表示目標輸出。設最優決策方程為 $w^T x_i + b = 0$ ，則權值向量 w 和 b 偏置需滿足約束：

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \varepsilon_i \quad (8)$$

其中 ε_i 為線性不可分條件下的鬆弛變量，它表示模式對理想線性情況下的偏離程度。SVM 的目標是找到一個決策面，使其在訓練資料上的平均錯誤分類誤差最小，可推導出以下優化函數：

$$\varphi(w, \varepsilon) = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \quad (9)$$

C 是使用者指定的正參數，他表示 SVM 對錯分樣本的懲罰程度，是錯分樣本比例和演算法複雜度之間的平衡參數。用 Lagrange 乘子法，最優決策面的求解可轉化為以下的約制優化問題：

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (10)$$

其中 $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$ 為 Lagrange 乘子，且式 (10) 滿足約束條件：

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C, \quad i = 1, 2, 3 \dots N \quad (11)$$

$K(x_i, x_j)$ 為核函數，滿足 Mercer 定理，常用的核函數有以下兩種：

(1) 線性 (Linear) 核函數：

$$K(x_i, x_j) = x_i^T x_j \quad (12)$$

(2) 多項式 (Polynomial) 核函數：

$$K(x_i, x_j) = (y x_i^T x_j + r)^d, \quad y > 0 \quad (13)$$

(3) 徑向基 (RBF) 核函數：

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \quad \gamma > 0 \quad (14)$$

(4) S 型 (Sigmoid) 核函數：

$$K(x_i, x_j) = \tanh(y x_i^T x_j + r), \quad r > 0 \quad (15)$$

其中 γ 是核函數的 gamma 值 (除了線性核函數); d 表示多項式核函數中的多項式次數; γ 表示多項式和 S 型核函數的偏差量。本研究 SVM 實驗中將採用 RBF 核函數進行衛星影像分類測試。

3. 案例研究

3.1 研究範圍

研究區位於嘉義縣阿里山地區之阿里山溪上游地區，面積約 57 平方公里，屬於阿里山溪上游部份約 36 平方公里。之所以選擇此研究區是由於 2006 年 6 月 9 日開始在短短 48 小時內，累積雨量超過 1200 毫米，導致因豪大雨促使山洪暴發，山崩處處；而獲取此地區遙測資料之前一年以上，此地區無重大豪雨事件。因此，可以認定數位影像上之山崩即為此豪雨事件引發之山崩，符合本研究探討目標。研究中所採用之空載光達與航照影像同步於 2006 年 6 月 18 日、6 月 20 日及 6 月 22 日三天之上午三個航次完成掃描拍攝。有關空載光達、航照之取得方法及資料處理過程參見行政院農業委員會科技計畫研究報告(劉治中、等，2006)，研究中所用資料均由工業技術研究院-能源與環境研究所提供。研究區範圍及地理位置如圖 2、圖 3 所示。

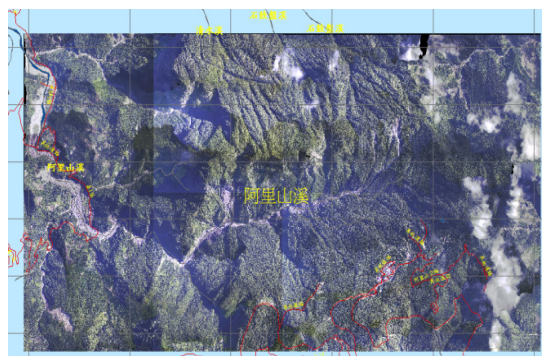


圖 2 研究區範圍



圖 3 研究區地理位置圖

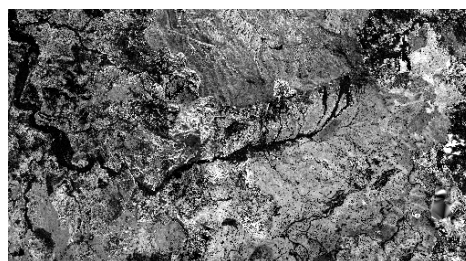


圖 5 OHM 影像

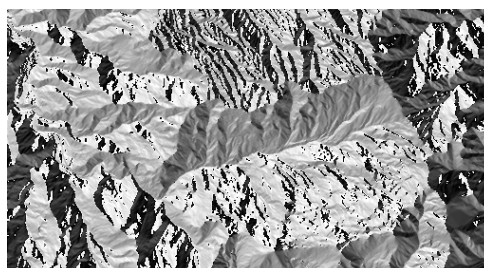


圖 6 坡向影像

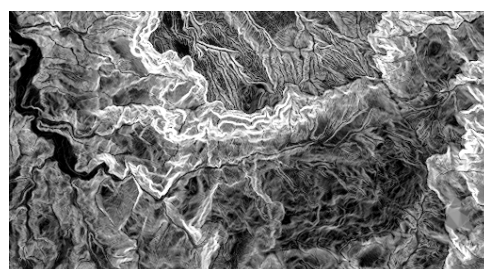


圖 7 坡度影像

3.2 研究材料

研究中採用二十公尺解析度之 SPOT-5 三多光譜波段，即為綠光(G)、紅光(R)、近紅外光(IR)，以及空載光達 DEM、DSM 資料，以上述衛星影像及光達資料進而產生各項判釋特徵資料，如正規化植生指標 (Normalized Vegetation Index, 簡稱 NDVI)、坡向、坡度及物件高度模型(Object Height Model, 簡稱 OHM) 等，在此分別以圖 4 至圖 8 表示衛星多光譜假色影像及各衍生特徵影像。

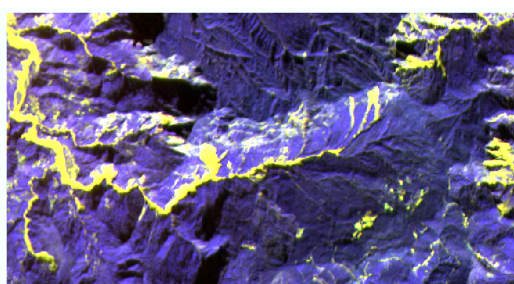


圖 4 SPOT 衛星假色影像

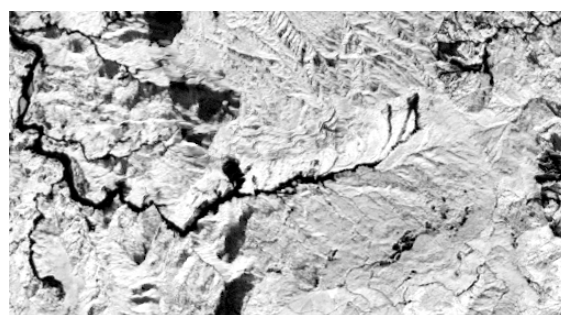


圖 8 植生指標影像

3.3 實驗流程

實驗流程主要分為六個步驟，首先第一個步驟為針對研究區域的崩塌情形做初步的認識及釐清造成災害之原因；其次步驟為資料收集與整理，如正射航照、衛星影像、光達資料及道路、水系等資料，並於衛星影像產生植生指標及彩色正射影像之輔助比對下，依據專家判釋經驗法則人工圈畫出地

真資訊，以利後續作業。第三個步驟則是將收集到各種資料，進行地理對位、各類資料值域正規化等前處理，避免因資料基準、質性定義不同而造成分類上的錯誤。第四個步驟於 ENVI 軟體中使用 ROI 功能製作訓練樣區(ENVI, 2009)，研究中結合 SPOT 衛星影像產生光譜特徵及空載光達資料所產生地形特徵作為判釋依據，故在此步驟中也將安排光譜、地形衍生特徵之可能組合；由於植生指標與 R 及 IR 波段資料具有相依性，故後續分類測試所用光譜特徵僅使用 G 波段及 NDVI。為考慮判釋特徵對結果之影響程度，故先僅以光譜特徵進行分類，接著陸續加入各項衍生地形特徵資料，經由多次實驗擬定判釋所用特徵之組合如表 2，提供後續三法分類測試之用。

第五個步驟為使用相同訓練樣區、及設計好的特

徵組合，實驗中利用 ENVI 4.6 版軟體工具中提供之 ML、BPNN 及 SVM 影像分類功能進行崩塌地自動化判釋(ENVI, 2009)。依上述表 2 組合之安排進行分類測試。

最後第六個步驟對上述分類作業成果與地真資料進行精度評估，除了比較各種所用判釋特徵組合對於崩塌地與其他類別判別區分上的重要程度，並藉由分類精度評估報告了解三種分類法於崩塌地判釋上的特性、優劣。崩塌地判釋的精度除了考量位置正確性，意即研究區的山崩是否都找到外，有無遺漏(omission)，即第一類誤差(Type I error)，或者有無誤判(commission)，即第二類誤差(Type II error)情形，均須列入分類結果好壞判定標準中。完整崩塌地自動化判釋精度評估方式說明如表 3。完整實驗流程如圖 9 所示。

表 2 判釋所用特徵之組合


判釋特徵		判釋特徵
光譜+OHM		G+NDVI
光譜+NDVI		G+NDVI+OHM
光譜+坡向		G+NDVI+坡向
光譜+坡度		G+NDVI+坡度
光譜+ NDVI+OHM+ 坡向+坡度		G+NDVI+OHM+坡向+ 坡度

表 3 崩塌地自動化判釋精度評估表

		地真 (Ground Truth)		
		崩塌	非崩塌	
分類結果	崩塌	正確辨認	誤認	崩塌誤認率
	非崩塌	漏認	正確辨認	
		崩塌正確辨認率		
註：山崩正確辨認率 = (正確辨認山崩面積/實際總山崩面積) × 100% 山崩誤認率 = (誤認為山崩的面積/分類總山崩面積) × 100%				

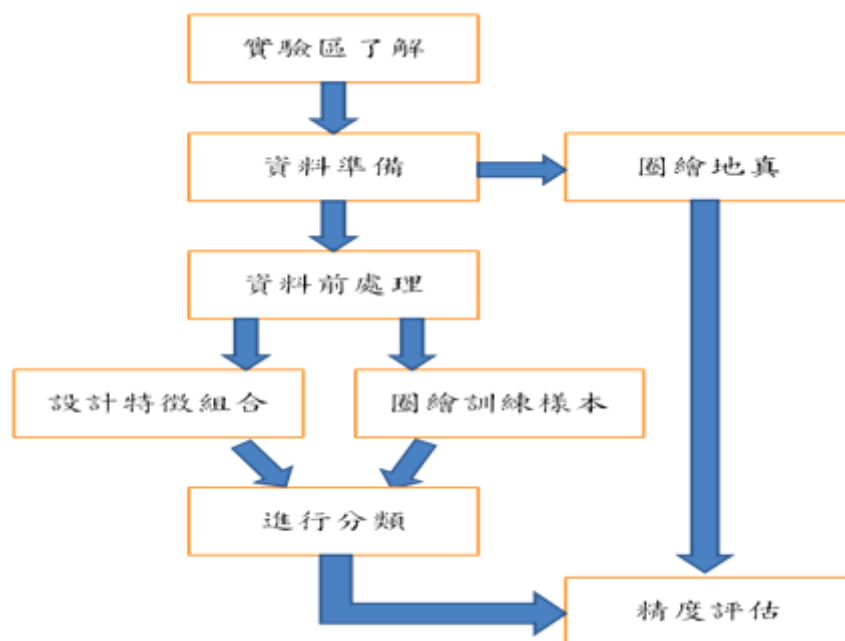


圖 9 實驗流程圖

4. 成果分析與討論

4.1 地真及訓練樣區製作結果

航照正射照片漸漸地普及，很多人為求方便不再以立體對作立體觀察判釋，都在二維影像上作人工判釋。為避免或降低分類錯誤，劉進金等(2001)提出一個 SPOT 假色影像的增揚處理方法以及一個「五項研判準則」，藉著對山崩體及其所處環境之物理特性的指導，改善山崩分類正確性，包括：色調準則、區位準則、形狀準則、方向準則、與陰影準則。其後，因為研究區有數值地形可用，所以增加邊坡角度準則 (Chang and Liu, 2004)。

本研究人工圈繪地真之方法是參酌上述專家經驗法則，利用 Arc GIS 軟體套疊航照影像及植生指標影像，進而圈繪出崩塌地及該研究區內其他三種代表性類別：意即河流、建物及樹林；地真圈繪過程如圖 10、圖 11 分別以線條、面域表示其範圍。同時為了更深入探討不同分類方法之特性，從全區地真資料中挑選出各類別代表性地真，利於比較細部分類結果。全區、代表性各類別地真如圖 12、圖 13 所示。全區各類別地真像元數統計及其代碼詳如表 3。

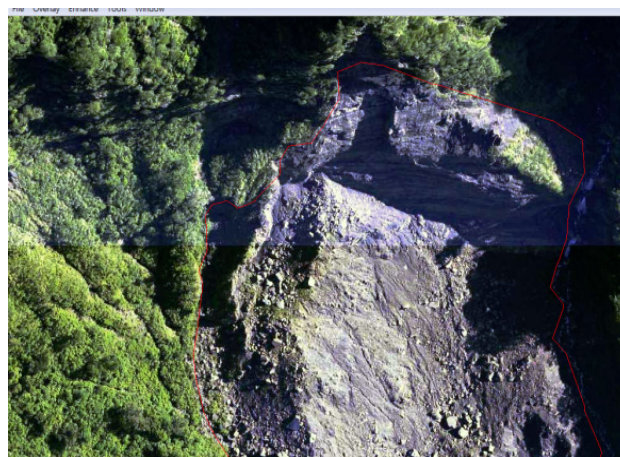


圖 10 崩塌地真圈繪示意(紅色線段)



圖 11 崩塌地真圈繪示意 2(面域)

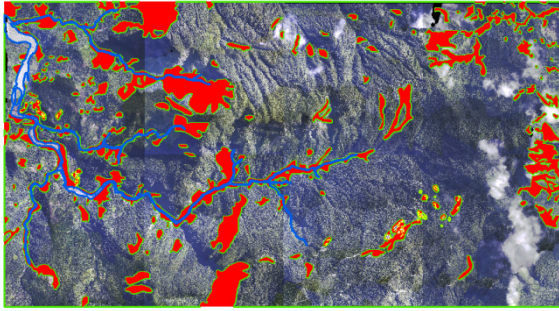


圖 12 全區崩塌及其他三類別地真圖

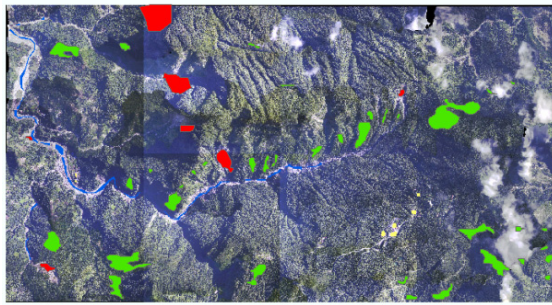


圖 13 細部研究區地真圖

表 4 研究區各類別地真像元數統計

類別	代碼	顏色	像元數
崩塌	R1	紅色	7,130
河流	R2	藍色	3,102
建物	R3	黃色	278
樹林	R4	綠色	132,059

針對訓練樣區的製作，參考上述全區地真圈繪成果，從中選取各類別具代表性且明確可辨認區塊作為訓練樣區如圖 14 所示；各類別訓練樣區統計如表 5。

表 5 訓練樣區統計

類別	代碼	顏色	像元數
崩塌	R1	紅色	260
河流	R2	藍色	256
建物	R3	黃色	52
樹林	R4	綠色	258

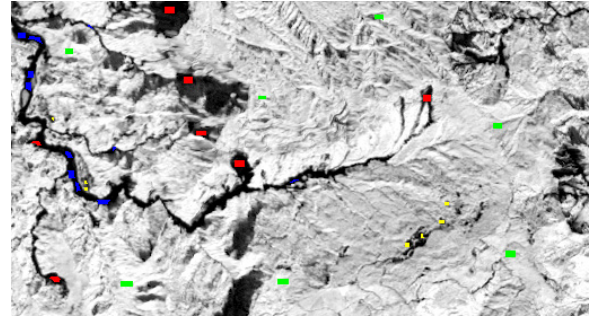


圖 14 訓練樣區分佈

4.2 判釋特徵分離度分析

為了解訓練樣區圈選情形是否滿足後續分類上之需要，同時比較各種所用判釋特徵組合對於崩塌地與其他類別判別區分上的重要程度，所以在此將使用 ENVI 提供之 Compute ROI Separability 功能計算各訓練 ROIs 之特徵分離度，該功能可計算 Jeffries-Matusita (簡稱 JM) 及 Transformed Divergence (簡稱 TD) 二種距離指標，其指標值範圍介於 0 到 2.0 之間，代表取用各訓練樣區於該特徵組合資料下統計分離程度，大於 1.9 的指標值表示各類別訓練樣區分離度良好，反之當指標值小於 1，表示分離度低，意即訓練樣區之選取上須進行調整(ENVI, 2009)。針對上述表 2 中提到之特徵組合加上僅用多光譜三波段(為便於比較，將判釋特徵組合及其代號表示如表 6)之分離度計算結果如表 7 所示，表中顯示從 TD 距離指標無法看出崩塌地與其他三類別分離度差異，惟從 JM 距離指標可知本研究訓練樣區之選取情形尚稱良好(指標值均大於 1.0)。進一步討論不同特徵組合對各類別分離之程度，由組合 A、B 中崩塌地與樹林 ROIs 之 JM 距離值從 1.6 提高至 1.92，表示植生指標比原來多光譜特徵更能區分崩塌地與樹林，再者加入坡度，亦可有效提升崩塌地與河流、建物之分離度(JM 距離分別從 1.2、1.5 提高到 1.7、1.9)。其餘特徵，如坡向及 OHM，對於分離度之影響較不顯著。

4.3 分類成果與比較

此節將針對不同判釋特徵組合資料，使用三種分類方法，進行分類成果精度評估之結果整理如下列各小節，以下分類成果之比較為免篇幅過於冗長，均以上述表 6 中判釋特徵組合代號表示。

4.3.1 分類測試成果一(使用組合代號 A 特徵)

此分類實驗結果如表 8；在崩場地辨認正確率上，以 BPNN 法精度最高(其 PA%為 81%)，同時 UA%亦從 27%提高至 62%，意即誤判率降低；然而，BPNN 法對於影像中所佔樣本數較少的類別，如河流、建物，無法辨認。此外，ML、SVM 法同

屬於統計學習理論，對於四個類別均有一定分類正確率，但於河流、建物誤判率高。最後，就 BPNN、SVM 法樹林分類精度均比 ML 法高(三法 PA%分別是 95%、90%、76%)。

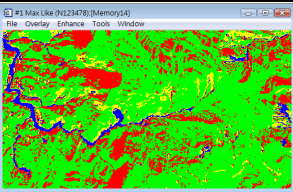
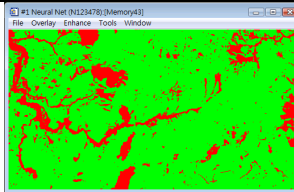
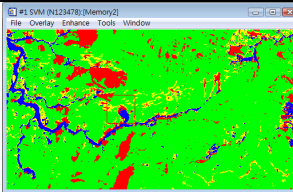
表 6 判釋特徵組合及其代號

判釋特徵組合代號	組合內含特徵
A	G+R+IR
B	G+NDVI
C	G+NDVI+OHM
D	G+NDVI+坡向
E	G+NDVI+坡度
F	G+NDVI+OHM+坡向+坡度

表 7 崩場地與其他三類別分離度統計與判釋特徵

類別	像元數	A		B		C		D		E		F	
		JM	TD	JM	TD	JM	TD	JM	TD	JM	TD	JM	TD
河流	256	1.43	1.99	1.22	1.99	1.45	1.99	1.28	1.99	1.74	1.99	1.81	1.99
建物	52	1.55	2.00	1.51	1.99	1.61	1.99	1.65	1.99	1.90	1.99	1.94	1.99
樹林	258	1.60	1.86	1.92	2.00	1.94	2.00	1.93	2.00	1.93	2.00	1.96	2.00

表 8 全區與細部精度評估一

	ML		BPNN		SVM	
						
全區/細部	PA%	UA%	PA%	UA%	PA%	UA%
山崩	56.56/73.73	27.61/97.85	80.59/100.00	61.69/63.78	57.84/ 80.89	71.49/95.80
河流	81.01/93.85	28.19/68.46	0.00/ 0.00	0.00/0.00	84.95/94.77	22.18/69.45
建物	58.28/62.22	1.14/42.11	0.00/0.00	0.00/0.00	44.79/45.56	0.75/74.55
樹林	76.06/100.00	98.79/99.01	95.02/100.00	97.34/99.92	89.63/100.00	98.97/100.00
OA%	73.88/92.64		92.04/86.87		85.89/94.13	
Kappa	0.3259/0.8610		0.6693/0.7421		0.5301/0.8891	
PA% (Producer's Accuracy)：生產者精度（以百分比為單位）						
UA% (User's Accuracy)：使用者精度（以百分比為單位）						
OA% (Overall Accuracy)：整體精度（以百分比為單位）						

4.3.2 分類測試成果二(使用組合代號 B 特徵)

此小節成果如表 9 所示,此測試主要探討光譜衍生指標 NDVI 是否可取代原有衛星影像波段;所以由表 8、9 均使用光譜的成果顯示,去除了 R、IR 波段而加入 NDVI,卻使得山崩判釋正確率降低,可能是因資訊量減少以致於分類精度降低,顯見 NDVI 特徵無法完全取代 IR 及 R 波段資訊。但 BPNN 對於影像所佔比率較小的類別,如建物,已可判釋 (PA 值為 66%),不過其誤認率仍高。最後在三種分類法上山崩的誤認大幅降低(三法 UA 值為 28%、62%、71%提升至 95%、84%、90%),因此 NDVI 在減少山崩誤判上有相當的幫助。

4.3.3 分類測試成果三(使用組合代號 C 特徵)

此實驗結果如表 10 所示;與 4.3.2 節成果比較得知,加入 OHM 地形衍生指標後,無法有效提升崩塌地的判釋精度,其中以 SVM 山崩判釋正確率為最高。此外,BPNN 在所有類別上均能判釋 (PA 值為河流 31%、建物 64%),且其它二法的建物正確判釋率都提高了(如 SVM 法中 PA 值由 51%至 61%),其餘類別不升反降。

4.3.4 分類測試成果四(使用組合代號 D 特徵)

若加入坡向特徵,其測試成果如表 11 所示;與 4.3.2 節成果比較得知,SVM 在山崩正確判釋率較高,在此實驗中 SVM 法在山崩判釋 OA%或 PA%均為三法中最高者 (PA%為 55%、OA%為 85%),其他類別判釋精度上差異並不顯著。

4.3.5 分類測試成果五(使用組合代號 E 特徵)

本次實驗精度評估結果如表 12 所示;與 4.3.2 節成果比較得知,加入坡度特徵後,對於三法之崩塌地判釋精度均有顯著提升,如三法 PA%分別從 22%、54%、42%,增加為 36%、72%、64%,足

見坡度特徵有助於提升崩塌地判釋精度。再者,BPNN 法與 SVM 法之結果精度均優於 ML 法。

4.3.6 分類測試成果六(使用組合代號 F 特徵)

最後嘗試加入所有特徵資料後得到結果如表 13 所示;若與 4.3.2 節結果相比,三法崩塌地判釋精度均有提高,PA 值從 22%、54%、42%提昇至 36%、63%、66%,顯然加入地形特徵可有效提升分類精度。但在山崩誤認率上卻降低,如 SVM 之 UA 值由 90%降至 81%。此外三法對於建物及樹林判釋正確率均大幅提昇,如 BPNN 之建物 PA 值由 65%提升至 88%;至於,河流判釋正確率卻不升反降。

4.3.7 分類成果之比較

綜合上述六組分類測試成果可歸納出下列幾點:就使用判釋特徵而言,加入坡度特徵資料對於提升山崩判釋正確率最為顯著,如 BPNN (PA%為 54%提升至 72%),在總體精度上也顯示加入坡度特徵資料組合之分類結果為最佳(三法 OA 值從 84%、82%、83%提升至 89%、91%、91%)。就使用分類方法而言,BPNN 法與 SVM 法均優於 ML 法;再者,BPNN 法與 SVM 法在判釋正確率上各有千秋,如使用組合代號 E 特徵得到的崩塌地判釋正確率顯示 BPNN 法優於 SVM 法 (PA 值分別為 72%、64%);但在誤判率上,SVM 法卻優於 BPNN 法(UA 值分別為 84%、73%)。

表 9 全區與細部精度評估二

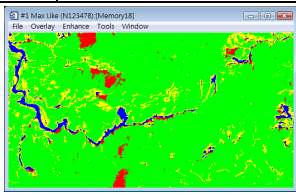
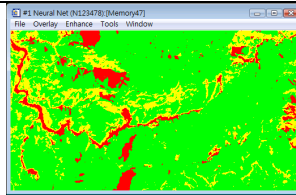
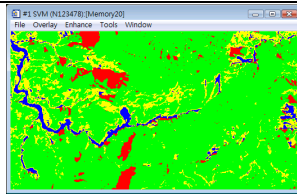
	ML		BPNN		SVM	
						
全區/細部	PA%	UA%	PA%	UA%	PA%	UA%
山崩	22.44/64.48	95.40/93.73	54.35/99.69	83.76/64.60	42.17/75.58	90.25/96.46
河流	69.96/93.38	31.02/63.83	0.00/0.00	0.00/0.00	76.00/96.15	27.13/62.88
建物	61.96/32.22	0.74/96.6	65.64/33.33	0.51/85.71	50.92/28.89	0.48/100.00
樹林	92.43/100.00	94.95/95.64	86.91/99.94	97.16/99.94	88.66/100.00	98.01/99.97
OA%	84.14/89.98		82.05/87.30		83.16/92.80	
Kappa	0.3807/0.8064		0.4232/0.7512		0.4486/0.8642	

表 10 全區與細部精度評估三

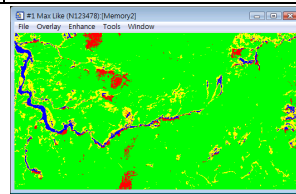
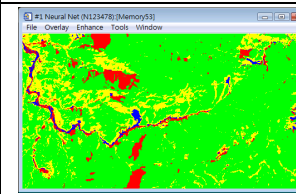
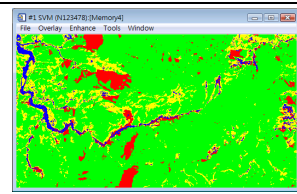
	ML		BPNN		SVM	
						
全區/細部	PA%	UA%	PA%	UA%	PA%	UA%
山崩	20.98/59.71	94.54/92.26	41.06/78.43	86.83/73.18	48.81/95.15	87.52/86.30
河流	69.09/86.00	35.54/80.32	30.58/48.92	27.33/54.27	69.85/75.54	28.99/88.15
建物	71.17/58.89	0.89/21.99	63.80/36.67	0.49/55.00	61.35/36.67	0.55/64.71
樹林	93.20/100.00	94.64/93.24	86.94/99.67	96.73/99.64	87.61/99.97	98.08/100.00
OA%	84.64/88.45		80.96/87.92		82.93/95.03	
Kappa	0.3802/0.7751		0.3858/0.7691		0.4545/0.9049	

表 11 全區與細部精度評估四

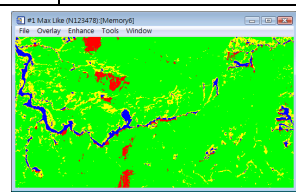
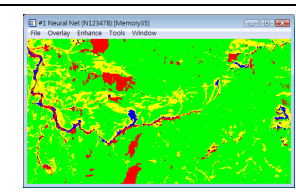
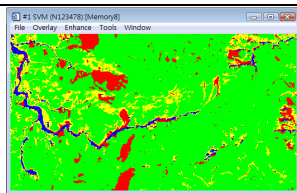
	ML		BPNN		SVM	
						
全區/細部	PA%	UA%	PA%	UA%	PA%	UA%
山崩	21.97/65.18	95.38/94.10	41.06/78.43	86.83/73.18	54.66/95.45	87.87/91.37
河流	71.79/93.08	28.89/63.75	30.58/48.92	27.33/54.27	66.13/83.85	34.46/83.21
建物	65.03/32.22	0.80/74.36	63.80/36.67	0.49/55.00	48.47/28.89	0.51/100.00
樹林	92.42/100.00	94.90/95.97	86.94/99.67	96.73/99.64	89.46/100.00	98.09/99.97
OA%	84.10/90.10		80.96/87.92		85.15/95.96	
Kappa	0.3787/0.8093		0.3858/0.7691		0.5015/0.9227	

表 12 全區與細部精度評估五

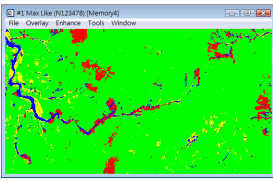
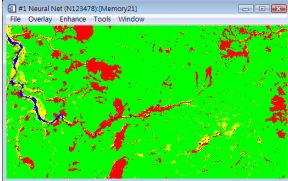
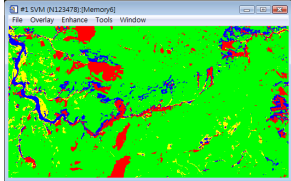
	ML		BPNN		SVM	
						
全區/細部	PA%	UA%	PA%	UA%	PA%	UA%
山崩	36.31/82.05	91.99/88.75	71.90/97.92	73.80/85.70	64.49/96.92	84.53/87.06
河流	64.51/80.46	30.22/81.97	38.13/57.85	66.07/93.53	66.34/72.77	15.20/84.92
建物	68.10/38.89	2.20/89.74	84.05/61.11	2.21/37.41	55.83/30.00	1.48/75.00
樹林	96.67/100.00	94.50/95.72	94.17/100.00	97.98/99.83	91.82/100.00	98.43/100.00
OA%	89.35/92.64		90.90/94.04		90.90/94.04	
Kappa	0.5083/0.8562		0.6448/0.8859		0.6448/0.8859	

表 13 全區與細部精度評估六

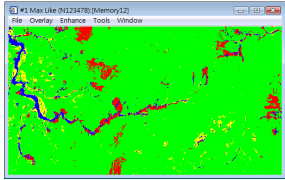
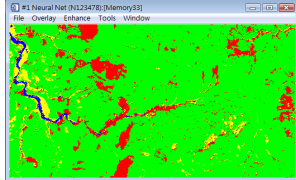
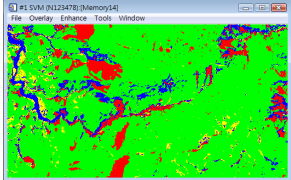
	ML		BPNN		SVM	
						
全區/細部	PA%	UA%	PA%	UA%	PA%	UA%
山崩	35.60/79.28	91.57/88.48	63.93/98.00	76.19/85.31	66.12/97.15	81.41/87.27
河流	68.23/77.69	33.37/85.74	45.74/61.69	60.10/94.13	72.65/73.54	12.69/88.19
建物	77.91/61.11	2.72/69.62	87.73/64.44	2.27/50.88	65.03/47.78	1.80/86.00
樹林	96.93/100.00	94.29/94.56	94.65/99.92	97.05/99.72	89.34/100.00	98.36/99.97
OA%	89.55/92.04		90.51/94.50		86.45/95.46	
Kappa	0.5091/0.8436		0.6162/0.8946		0.5450/0.9130	

表 14 山崩判釋精度綜合評估表

	ML		BPNN		SVM	
組合	PA%/ UA%	OA%	PA%/UA%	OA%	PA%/UA%	OA%
A 組	56.56/27.61	73.8806	80.59/61.69	92.0391	57.84/71.49	85.8948
B 組	22.44/95.40	84.1384	54.35/83.76	82.0544	42.17/90.25	83.1555
C 組	20.98/94.54	84.6403	41.06/86.83	80.9616	48.81/87.52	82.9287
D 組	21.97/95.38	84.0978	41.06/86.83	80.9616	54.66/87.87	85.1464
E 組	36.31/91.99	89.3530	71.90/73.80	90.8952	64.49/84.53	90.8952
F 組	35.60/91.57	89.5532	63.93/76.19	90.5074	66.12/81.41	86.4534

5. 結論與建議

5.1 結論

1. 由分離度分析成果中可知加入 NDVI 指標讓崩場地與樹林 ROIs 之 JM 距離值從 1.6 提高至 1.92，表示植生指標比原來多光譜特徵更能區分崩場地與樹林。再者加入坡度，亦可有效提升崩場地與河流、建物之分離度(JM 距離分別從 1.2、1.5 提高到 1.7、1.9)。
2. 由分類精度評估成果顯示在加入坡度地形衍生指標資料後，對於崩場地自動判釋精度之提升上最為顯著（如 BPNN 法 PA%由 54%提升至 72%），不論是位置正確率或使用者精度上，因此得知坡度在崩場地自動化判釋上是不可獲缺的重要資訊。
3. 就使用分類方法而言，BPNN 法與 SVM 法均優於 ML 法；再者，BPNN 法與 SVM 法在判釋正確率上各有千秋，如使用組合代號 E 特徵得到的崩場地判釋正確率顯示 BPNN 法優於 SVM 法(PA 值分別為 72%、64%)；但在誤判率上，SVM 法卻優於 BPNN 法(UA 值分別為 84%、73%)。
4. 在研究過程中將三種分類法需要特別注意及遇到的問題，歸納出下列幾項：
 - (1).ML 法在圖資特徵及色彩訓練樣本數不夠明確或數量不足以參考時，容易造成錯誤及誤判。
 - (2).BPNN 法則是給予不同參數，其分類結果會有較大差異，如迴圈次數給予不同次數變化相當大，且此迴圈數是否足以收斂等。
 - (3).SVM 法雖與 ML 法同為統計學習理論，但不會像 ML 法因為樣本數不夠，進而造成誤判及漏判，以致於影響總體精度。
 - (4).在 BPNN 法與 SVM 法中，參數設定必須依照不同的需求及目標而改變；所以在這兩種分類方法中需要實驗出一組可以運用在崩場地清查較佳的參數設定。

5.2 建議

1. 地真的圈繪結果對於後續分類精度評估上影響很大，因此必須審慎檢查及圈繪，另可針對全區或局部考慮是否需要圈繪。
2. 針對本研究造成的錯誤及誤判給予的建議是，訓練樣本的劃定必須盡可能給予明確及足夠的數量，且應以地真類別佔總像元數比例下圈選等比例之訓練樣本。
3. 依據本研究分類精度及誤判率成果得知所用資料的解析度不足時，形成混合像元效應（mixed pixel effect），導致研究區面積所佔比率較低類別，如建物、河川分類精度較差。此外，訓練樣本的選取上必須盡可能給予明確及足夠的數量，未來將考慮依據地真資料各類別所佔像元總數等比率圈選訓練樣本，及選用特徵資料之解析度要能與判釋物體尺度相當，以克服這些問題。

參考文獻

- 沈煥鋒，2009。ENVI 遙感影像處理方法，武漢大學。
- 李錫堤、潘國樑、林銘郎，2003。山崩潛感分析之研究-九十二年度報告，經濟部中央地質調查所，227 頁。
- 邵泰彰，2001。類神經網路於多光譜分類之研究。國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 吳久雄、蔡銖華、胡錦地，1989。臺灣省山坡地崩坍調查報告，行政院農業委員會，臺灣省山地農牧局。
- 陳承昌，2006。支持向量機及 Plausible Neural Network 於水稻田辨識之研究，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 許立達、鄭祈全、趙振平、陳修，2002。多年期 SPOT 衛星影像在大型崩場地變遷監測之應用，中華地理資訊學會年會暨學術研討會論文集，逢甲大學，台中。
- 梁隆鑫，1997。衛星影像應用於崩場地及溫泉區調

- 查。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 張崑宗、劉進金，2004。以高光譜植生指標協助土地覆蓋分類之比較，第二十三屆測量學術暨應用研討會，國立中興大學，台中，第 185-192 頁。
- 張崑宗、劉進金，2006。利用類神經網路方法於高解析衛星影像及地形資料之崩場地辨識_以九份二山為例，航測及遙測學刊，11(2)：161-174。
- 黃明哲、李良輝，2005。支持向量機應用於空載雷射掃描資料地物分類之研究，電子計算機於土木水利應用研討會。
- 葉怡成，1998。類神經網路模式應用與實作，五版，儒林書局有限公司。
- 楊孟學，2007。結合空載光達與多波段衛星影像於山崩自動分類，高雄師範大學碩士論文。
- 劉進金，1987。山崩之遙測影像自動分析，遙感探測，第八期，第 60-90 頁。農委會遙測小組出版。
- 劉進金、翁勳政、黃金鴻、楊明宗，2001。豪雨型崩場地之遙測影像分析，21 世紀土木工程技術與管理研討會論文集，新竹，第 C-21~C-31 頁。
- 劉治中、蕭國鑫、陳朝圳、鍾玉龍、林金樹、邱祈榮、史天元、劉進金、陳大科、廖子毅、石佳惠、翁勳政、羅時凡、潘麗慧，2006。先進航遙測應用技術開發(第一年/全程三年)，行政院農業委員會九十五年度科技計畫研究報告，訊庫編號：950023。計畫編號：95 農科-12.1.1-科-a1，執行機構(計畫)識別碼：120101a100。
- 潘國樑，1999。山坡地永續利用，詹氏書局，共 471 頁。
- 蕭國鑫、尹承遠、劉進金、游明芳、王晉倫，2003。SPOT 影像與航照資料應用於崩場地判釋之探討，航測及遙測學刊，8(4)：29-42。
- Camps-Valls G., and L. Bruzzone, 2005. Kernel-Based Methods for Hyperspectral Image Classification, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(6): 1351-1362.
- Chang K. T. and J. K. Liu, 2004. LANDSLIDE FEATURES INTERPRETED BY NEURAL NETWORK METHOD USING A HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGE AND DIGITAL TOPOGRAPHIC DATA, Proceedings of ISPRS XX Congress, Commission VII TS WG VII/5, Istanbul, Turkey, pp.574-579. July.
- Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B., and Yteman, G., 2005. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis, Disaster Risk Management Series No.5, The World Bank, Washington, D. C.
- Kojima, H., C. F. Chung, and C. V. Westen, 2000. Strategy on the Landslide Type Analysis Based on The Expert Knowledge and the Quantitive Prediction Model, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B7, pp. 701-708, Amsterdam.
- Lillesand, T. M., R. W. Kiefer, and J. W. Chipman, 2004. Remote Sensing and Image Interpretation, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Liu, J. K., 1987. Automation for landslide analysis using digital images, Remote Sensing, Vol. 8, pp. 60-90. (in chinese)
- Liu, J. K., 1999. *A practical approach to the installation of a national landslide database on basis of a SPOT mosaic*. Proceedings of the 18th symposium on survey and mapping. Ilan, p.561-570.
- Melgani, F., and L. Bruzzone, 2004. Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images with Support Vector Machines, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 42 (8): 1778-1790.
- Robert, H. N., 1990. Neurocomputing, Addison-Wesley Pub. Co., pp. 21-42.
- Varnes, D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes, In Landslides Control, eds. Schuster and Krizek, National Academy of Sciences, Washington, D.C. pp.11-33.
- Westen, C. V., 2000. Remote Sensing for Natural Disaster Management, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B7, pp. 1609-1617, Amsterdam.
- Zhu, G., and D. G. Blumberg, 2002. Classification ASTER Using Data and SVM Algorithms ; The Case Study of beer Sheva, Israel, Remote Sensing of Environment, 80 (2): 233-240.
- Zurada, J. M., 1992. Introduction to Artificial Neural Systems, West Pub. Co., pp.163-248.

Automatic Rainfall-induced Landslide Interpretation and Features Analysis

K. T. Chang^{1*} C. S. Kao² Z. Y. Wang² J.K.Liu³

ABSTRACT

Taiwan is located in the northwest Pacific, in a major migration path of typhoons. There are about 3-4 typhoons likely to hit the Taiwan area in average annually. Strong winds and heavy rains are accompanied with typhoons, thus, usually leading to a result of floods and landslide hazards. Not only human lives are seriously threatened, but also social and economic losses might be imposed. It is estimated that the economic loss is about six billion US dollars in every year due to typhoon. Landslide inventory used to be done by manual judgement of experienced geologists. It is a time consuming and labour-intensive job, to lead making effective disaster assessment and recovery plans impossible. And let large-scale disaster investigation can not proceed smoothly due to blocked by mountains or post-disaster factors such as road disruption. Therefore, how to enhance the automation and its performance of landslide inventory is an important research topic.

Multi-source high-resolution data, e.g. a SPOT satellite image, 5m x 5m DTM reduced from a LIDAR data and aerial orthophotos, are fused to construct the feature space for landslides analysis in this paper. Then, those spectral and geomorphometric features are used to recognize landslides by a Maximum Likelihood (ML) method, an Artificial Neural Network (ANN) method and a Supported

Vector Machine (SVM) method. The classification results are evaluated in comparison with those of manual-interpretation. Moreover, the separability analysis for the used features on rainfall-induced landslide interpretation is also provided.

The separability analysis result indicates that slope is an important factor to distinguish the landslide and other classes. In this case study, the recognition accuracy for landslides and non-landslides for the BPNN and SVM method are better than the ones for the ML method. Moreover, slope is a significant interpretation key for landslides recognition. Due to mixed pixel effect (resolution of this experimental data is 20m) and the effect of different sampling rates, the characteristics and assessment for the conducted methods is worth further study and analysis.

Keywords: Rainfall-induced Landslides, satellite image, airborne LIDAR, Artificial Neural Networks, support vector machine.

¹ Assistant Prof., Dept. of Civil Eng. And Environmental Informatics, Ming-Hsin University of Science and Technology (MhUST)

² Graduate Student, Dept. of Civil Eng. And Environmental Informatics, Ming-Hsin University of Science and Technology (MhUST)

³ Senior Researcher, Industrial Technology Research Institute (ITRI)

*Corresponding Author, Phone: 886-3-5593142 ext 3297, E-mail: ktchang@must.edu.tw

Received Date: May. 03, 2010

Revised Date: Jul. 10, 2010

Accepted Date: Jul. 21, 2010

三維雷射掃描應用於崩塌土石量化之研究

蕭國鑫^{1*} 劉進金² 曾義星³ 王晉倫⁴

摘要

本研究利用地面三維雷射掃描儀，針對 2004 年 7 月敏督利颱風前後，位於南投縣境內之濁水溪支流陳有蘭溪的支流，竹仔腳坑溪與三廊坑溪上游河道地區進行三維雷射掃描，除製作高解析的高程地形外，並量化颱風前、後之崩塌土石變化。過程為先利用 GPS 量測基準點坐標，並結合地面規標控制點的佈設與全測站經緯儀之外業測量，以獲取規標點的坐標；其次為施行三維雷射掃描後，藉由規標控制點將多測站掃描資料連結，再利用規標點的坐標進行坐標轉換，且模型化目標區的三維地形為 20 公分網格資訊；最後疊合颱風前、後的掃描觀測資料，評估此兩條河道上游崩塌區的土石侵蝕與淤積變化。結果顯示竹仔腳坑溪上游河道於敏督利颱風過後，河道地形侵蝕深度最多達 5~10 公尺，而三廊坑溪上游土石流潛在地區則淤積了 5~10 公尺；顯現以地面三維雷射掃描資料監測局部重點地區的地形變化，具有應用潛力。

關鍵詞：崩塌地、數值高程模型、三維雷射掃描儀

1. 前言

台灣本島在夏、秋季節，常隨著颱風或暴雨帶來集中性的豪雨；加以山區地形陡峻及地質條件較為特殊，所以在地質不穩定區的順向坡地帶或表土鬆軟區，就容易受到暴雨影響而產生山崩或土石流現象；特別是 1999 年集集大地震後，部分地區的表土因地震搖晃而鬆弛，此狀況在暴雨來襲時更容易引發山崩。如發生於 2004 年 7 月的敏督利颱風 (Typhoon Mindulle)，短短三天內就在中南部地區降下累積超過 1,000 公釐的降雨量，使得表土無法負荷的地區產生崩塌，並導致土石流的發生。另外於 2009 年 8 月的莫拉克颱風 (Typhoon Morakot) 過境時，在中南部與東部多處地區降下刷新歷史紀錄的雨量；除引發嚴重水患外，亦造成台灣南部及臺東縣等地區發生重大的山崩與土石流災害，並導致多處路基流失與交通中斷現象。

每當有重大的崩塌或土石流發生時，往往會進行實地勘查或拍攝航照，以提供災區的研判與分析。

但野外踏勘對於救災資訊往往是緩不濟急，而拍攝航照立體對並製作高程資訊，對於產生高解析的數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，通常需要投入較多的人力與時間。且在有植生覆蓋地區，特別是陡峻且密植生的山區，高程精度會有降低情形。而利用可攜式的地面三維雷射掃描 (ground-based 3D laser scanner) 系統，除了可依任務需求測取重點地區的高密度點雲 (point clouds) 資料外；配合資料的模型化 (modeling)，則可形成三維的空間資訊 (蕭國鑫等，2003a、2003b)；另亦可結合地面點佈標與坐標測量，將點雲資料換算為絕對的大地坐標，再疊合多時期的地形資料進行比對與分析 (蕭國鑫等，2005)。

目前農航所與內政部建置的 DEM 網格間距分別為 40 公尺與 5 公尺，對於陡坡區或植生密林區所提供的高程資料精度相對不足。而地面三維雷射掃描除了可測取高解析且為公分級的地形高程精度外，並具有可攜式及機動性測取資料之特性，非常利於小面積之較細微的地形變化監測。所以本研

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

² 工業技術研究院綠能與環境研究所 正研究員

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

⁴ 農委會水土保持局保育治理組 組長

* 通訊作者，電話：886-3-5918587, E-mail: hks@itri.org.tw

收到日期：民國 99 年 05 月 10 日

修改日期：民國 99 年 06 月 18 日

接受日期：民國 99 年 07 月 12 日

究乃嘗試利用 Optech ILRIS-3D 地面雷射掃描系統(硬體規格如表 1)，藉由可獲取高精度與高解析地形資料的特色，在 2004 年 7 月敏督利颱風前後，機動測取陳有蘭溪支流竹仔腳坑溪與三廊坑溪上游河道地形。除網格化為 20 公分的 DEM 資料，以比對上游河道於颱風前後的侵蝕與淤積情形，並藉以評估地形高程變化。

2. 地面三維雷射掃描

2.1 掃描原理

三維雷射掃描是利用雷射測距儀主動發射雷射光(綠光或近紅外光)，並同時接收目標物所反射的訊號來進行測距。而利用有效距離及掃描範圍內之測站至掃描點的斜距，結合掃描的水平與垂直方向角，就可推求掃描點與測站的三度空間相對坐標差(如圖 1)。另施行三維雷射掃描時，掃描儀通常

亦會接收目標物的反射強度(intensity)資料，以提供點雲資料編輯與對照用；另亦可結合高程資訊製作目標物的三維影像。

2.2 資料獲取

通常容易產生地形變化的地區，大部分發生在溪谷、道路開發區或向斜坡等地區的附近或週圍；這些地區可能因交通不便、規模太大或其他因素的影響，而難以進行實地的野外勘查。所以在產生地形變化的局部重點地區，可選擇較長距離的地面三維雷射掃描儀獲取地形資訊(蕭國鑫等，2003a)。另進行雷射掃描時亦需評估目標區的植生遮蔽與置放平臺的安全性，並瞭解掃描儀的特性，如垂直或水平掃描、可掃描角度、掃描密度等，且需要考慮通視良好的多測站掃描資料能否全部涵蓋目標區。

表 1 Optech ILRIS-3D 地面雷射掃描系統硬體規格

	項 目	說 明
1	測距範圍	距離 3~ 350m (目標物 4%反射量) ; 3~ 800m (目標物 20%反射量); up to 1500m (目標物 80%反射量)
2	測距精度	3mm
3	測量速度	2000 點 / 秒
4	雷射點尺寸	0.00974 °
5	最小測量點距	0.00115 °
6	掃描範圍	-20 ° ~90 ° (V) x 360 ° (H) , -90 ° ~20 ° (V) x 360 ° (H)
7	數位相機	Color 6 mega Pixels
8	控制介面	Palm PDA
9	傳輸介面	IR & RS232
10	電源	24VDC or AC Converter
11	電池	24V rechargeable
12	耗電功率	75W
13	尺寸	312x312x 205mm
14	重量	13kg (Scanner) 8kg (Rotating base)
15	操作溫度	0 °C to + 40 °C
16	儲存溫度	-20 °C to + 50 °C
17	操作環境	NEMA 4X water and dust-proof, IP65
18	雷射安全度	Class I Laser at all mode (IEC 60825-1, US FDA 21 CFR1040)

施行三維雷射掃描時，需在對應目標物的有效距離內設定掃描範圍(圖 2)；另亦需考慮植生覆蓋或地物遮蔽、多測站掃描資料是否可以連結等問題(如圖 3 之第 5 個基站即是因地物遮蔽而補充規劃掃描點)。通常掃描系統會設計選用一個或數個回波訊號，其中第一次回波(first return)可得到地表物高程模型，最後回波(last return)可能得到地表高程模型，但房屋與其他固體結構物等，雷射波無法穿透，所以得到的是地表建物高程模型(Digital Building Model, DBM)；而在獲取地面三維雷射掃描點雲資料時，為了避免植生干擾，一般會選用最後的回波反射作為代表地物的三維資訊(蕭國鑫等，2003b)。

2.3 點雲資料前處理

當施行三維雷射掃描時逢遮蔽區就沒有觀測資訊；所以對於多遮蔽、複雜外型、無法以一次掃描涵蓋全部範圍的目標物，通常需要藉助於多測站的掃描資料予以連結(圖 4)，以完全涵蓋整個被測物。本研究使用的 IRIS-3D 地面雷射掃描系統，每一個不同測站的掃描資料均為對應於測站位置、水平面及起始掃描方向(或磁北方向)的相對參考坐標，不同測站即具有不同的參考基準點，所以點雲資料需要再進行連結，即求得各參考坐標的轉換關係，或將所有點雲資料轉換到共同的參考坐標系統。一般之點雲連結方法有 (1)共軛面轉換法 (2)磁性規標控制點法 (3)測站後視稜鏡法 (4)曲面匹配法等四種(蕭國鑫等，2003a)。本研究採用曲面匹配法進行資料連結，即將所觀測具有起伏曲面的地形或地物，透過曲面匹配方式結合重疊觀測區域的點雲資料，以構成完整的曲面資料。目前較新型的掃描系統已可利用重疊觀測區的掃描共軛點，經由程式自動搜尋並接合多測站的掃描資料，以省卻資料接合時搜尋共軛點的時間，並可減少因為共軛點的誤判，導致坐標差受誤差傳遞累加之困擾。

多測站點雲資料連結後，再依需求進行資料模型化，或配合控制點施行坐標轉換；其中模型化資料可為向量式(vector)或圖形(raster)資訊，如向量資

料投影至平面可形成二維平面圖或地圖；圖形資料則可利用透視方式形成三維空間資訊。另模型化的多測站連結點雲資料，已具備對應於測站的共同參考坐標，此時即可藉助於控制點的坐標，將對應於測站的參考坐標轉換為實際的大地坐標(如圖 5)，以利於多時期高程資料之疊合比對與分析。其中三維雷射掃描工作流程圖如圖 6 所示。

3. 三維雷射掃描與地形差異量化

研究中的實際案例，為先利用 SPOT 衛星影像研判南投地區的崩塌地分佈後；利用三維雷射掃描儀測取陳有蘭溪支流竹仔腳坑溪與三廊坑溪上游地區，於敏督利颱風前、後的河道地形，並進行疊合比對與分析地形變化，再評估崩塌區土石區經過侵、淤後的高程差異量。

3.1 研究區範圍

研究區位於竹仔腳坑溪與三廊坑溪上游(如圖 7 與圖 8 所示)；由於處於易發生土石流區，水保局於民國 93 年起已在河道沿岸設置人工結構物，以有效導引崩塌土石進入主河道，並減少災害發生。

3.2 雷射掃描資料獲取

三維雷射掃描前，先於掃描區內佈設控制點規標，並結合 GPS 控制點架設全測站(total station)經緯儀，以測量控制點規標的坐標資訊，並提供後續之點雲資料坐標轉換用。而實際測取掃描點雲資料於 2004/06/17~18 日敏督利颱風前、2004/08/05~06 日之颱風後，進行上游防沙壩土石料源區之多測站三維雷射掃描(圖 9)，並同時獲取數位掃描影像(圖 10)，以利於掃描資料比對及資料連結時之共軛點搜尋。

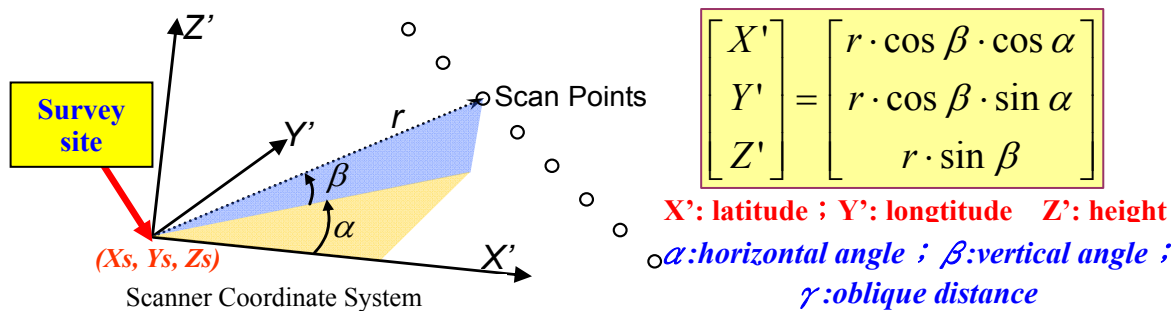


圖1 雷射掃描計算的相對坐標示意圖

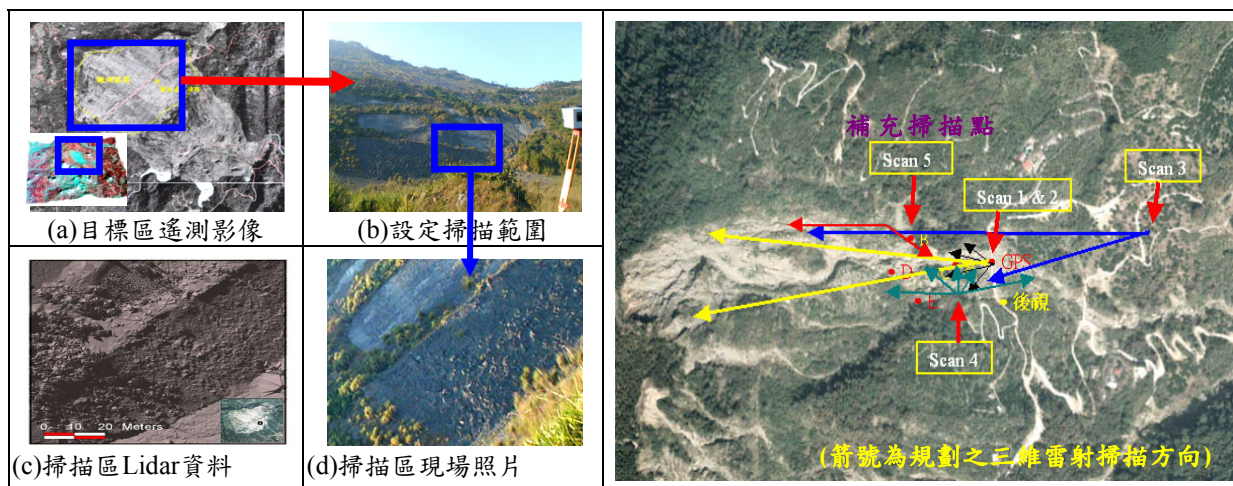


圖 2 地面三維雷射掃描設定範圍示意圖

圖 3 多測站三維雷射掃描規劃示意圖

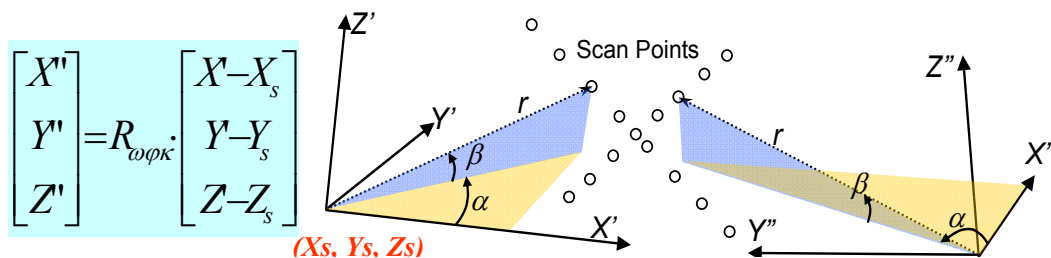


圖 4 多測站掃描資料連結示意圖

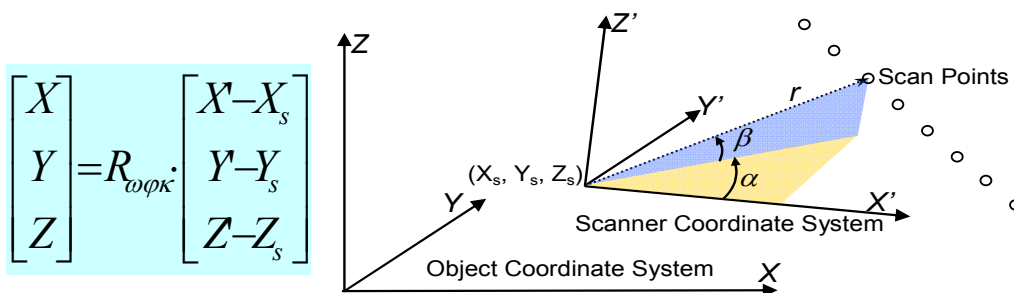


圖 5 掃描點雲資料坐標轉換示意圖

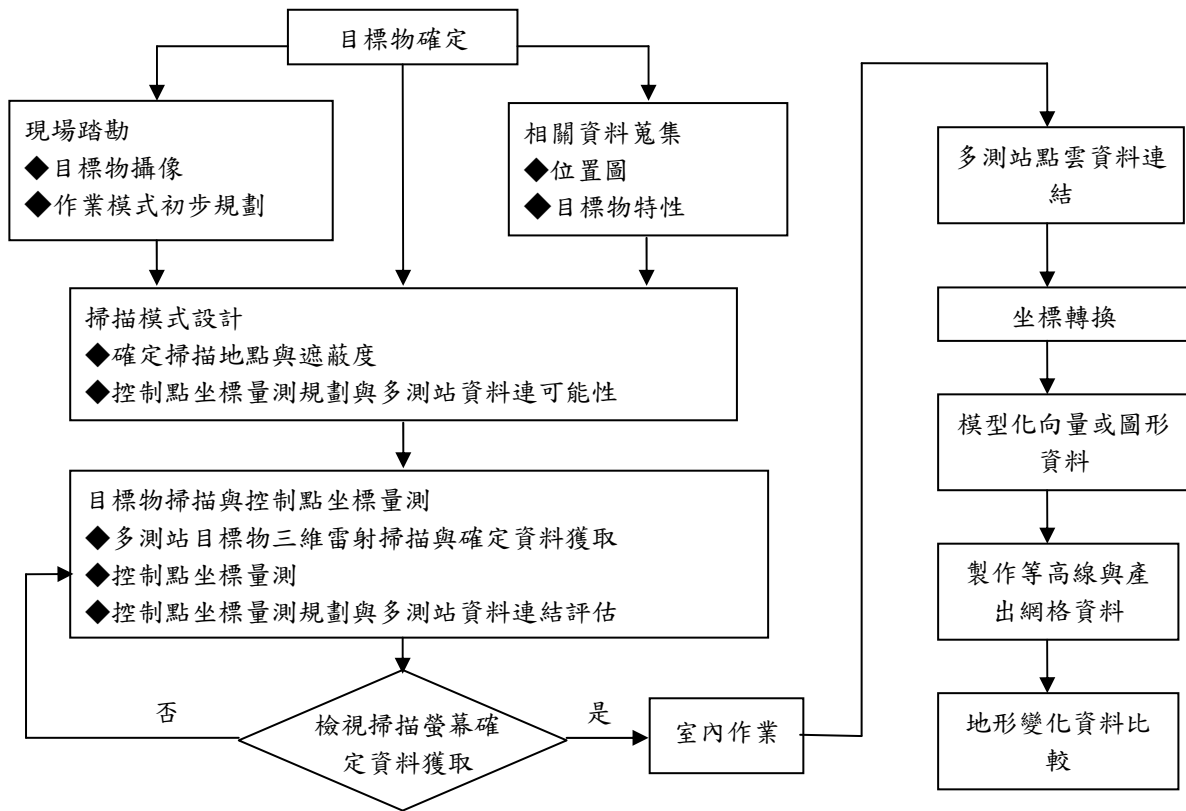


圖 6 三維雷射掃描工作流程圖

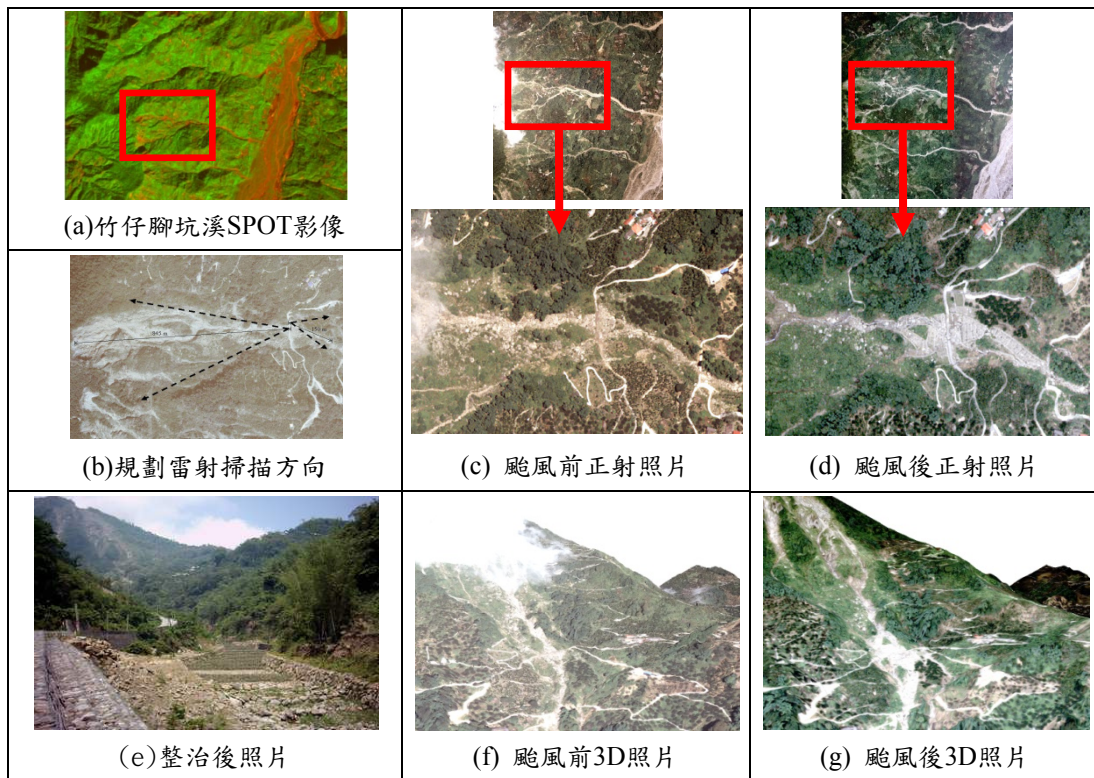


圖 7 竹仔腳坑溪上游於敏督利颱風前、後的影像與整治後照片

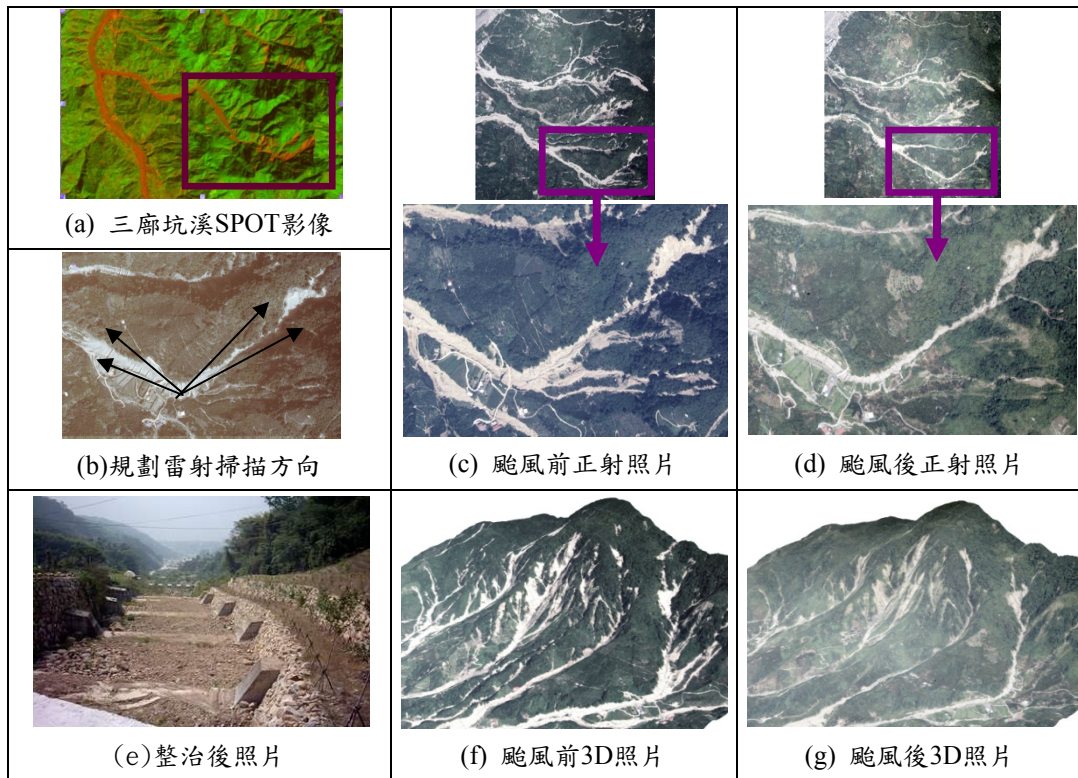


圖 8 三廊坑溪上游於敏督利颱風前、後的影像與整治後照片

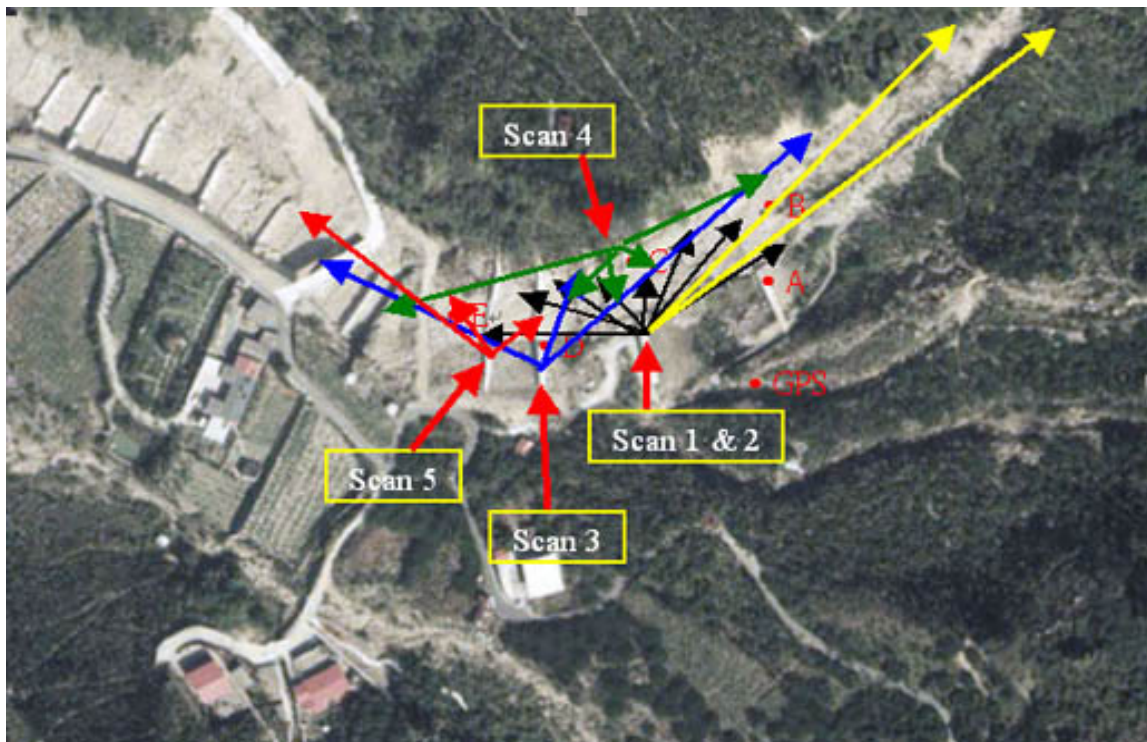


圖 9 三廊坑溪之三維雷射掃描地點與掃描方向示意圖

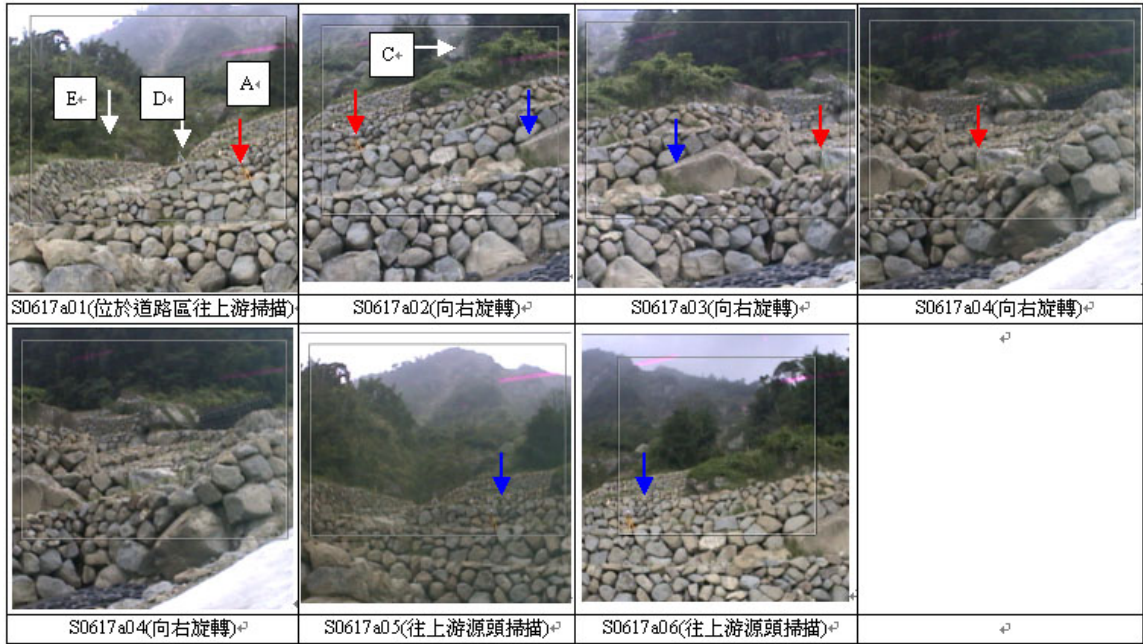


圖 10 不同方向之三維雷射掃描數位影像

3.3 多測站掃描資料連結與資料模型化

當獲取河道地區的多測站掃描點雲資料後，利用曲面匹配法進行多測站、多方向的資料連結(圖 11)，以將所有的點雲資料轉換到一致性的參考坐標系統；再利用控制點坐標進行大地坐標轉換。其中坐標轉換為配合控制點及規標點的坐標施測，在掃描資料中找到對應的點雲坐標後，將相對於測站的參考坐標轉換為實際的絕對大地坐標。而經過連結與坐標轉換後的點雲資料，即以模型化後的向量或圖形，在一致性的坐標下製作所需間距的等高線或高密度數值網格高程資料；如本研究獲取的點雲間距在 3~10 公分之間(平均間距為 5 公分)，所以可以製作成相當高解析的網格化高程資料，提供地形差異比對或量化分析等。如圖 12 與圖 13 即為竹子腳坑溪與三廊坑溪上游於敏督利颱風前、後製作 20 公分網格與 2 公尺間距等高線示意圖。

3.4 地形差異量化

上述之三維雷射掃描資料，經過網格化為 20 公分的 DEM 資料後(如圖 12 與圖 13)，再利用

Arc-GIS 軟體進行疊合，並進行高程差異比對；如圖 14 為竹子腳坑溪與三廊坑溪源頭於敏督利颱風前、後的高程變化情形。

由於三維雷射掃描竹子腳坑溪範圍屬於上游源頭的崩塌區與侵蝕地區，掃描時的土地覆蓋分類以崩塌裸露地為主，地表崩塌或侵蝕狀況仍持續中，所以此區的地形變化以侵蝕為主；如敏督利颱風前、後的向源侵蝕崩塌區的高程差異，多者可達 5~10 公尺，沿崩塌面較外圍地區亦有 1~5 公尺的高程變化。另隨著降雨所攜帶的土石堆積到稍為下游的河道緩坡區，如原來道路地區的其堆積高度最多達 3~5 公尺(圖 14(a))。

三廊坑溪最上游崩塌區雖然有掃描點雲資料，但是有效距離已經超過儀器可測距範圍(參表 1 所示，本研究評估使用的點雲資料在 1000 公尺以內)，所以未評估最上游地區的高程變化。當上游源頭的大量崩塌土石隨降雨移動到山腳緩坡區，故三維雷射掃描此河段的地形以堆積型態為主，平均堆積高程在 3~5 公尺之間，部分地區的最大堆積高程多達 5~10 公尺。另在圖 14(b)所示之颱風前原來水為工結構物之河階地區，因為土石於此處堆積，所以河階之水工結構物下方的高程差異，多者堆積高度可達 10~20 公尺。

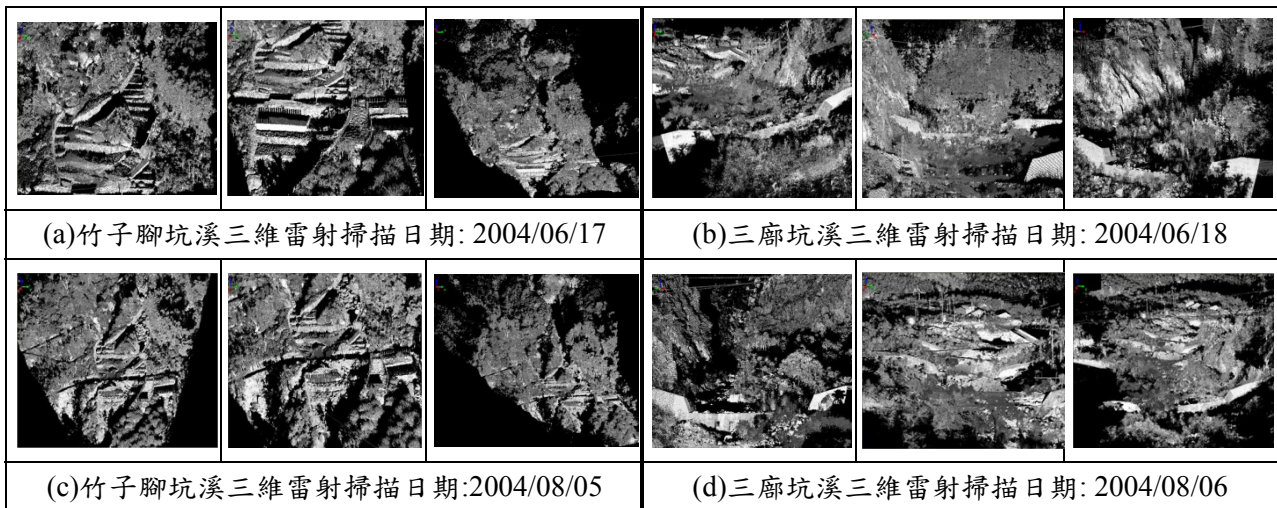


圖 11 竹子腳坑溪與三廊坑溪上游於敏督利颱風前、後整合之點雲分佈

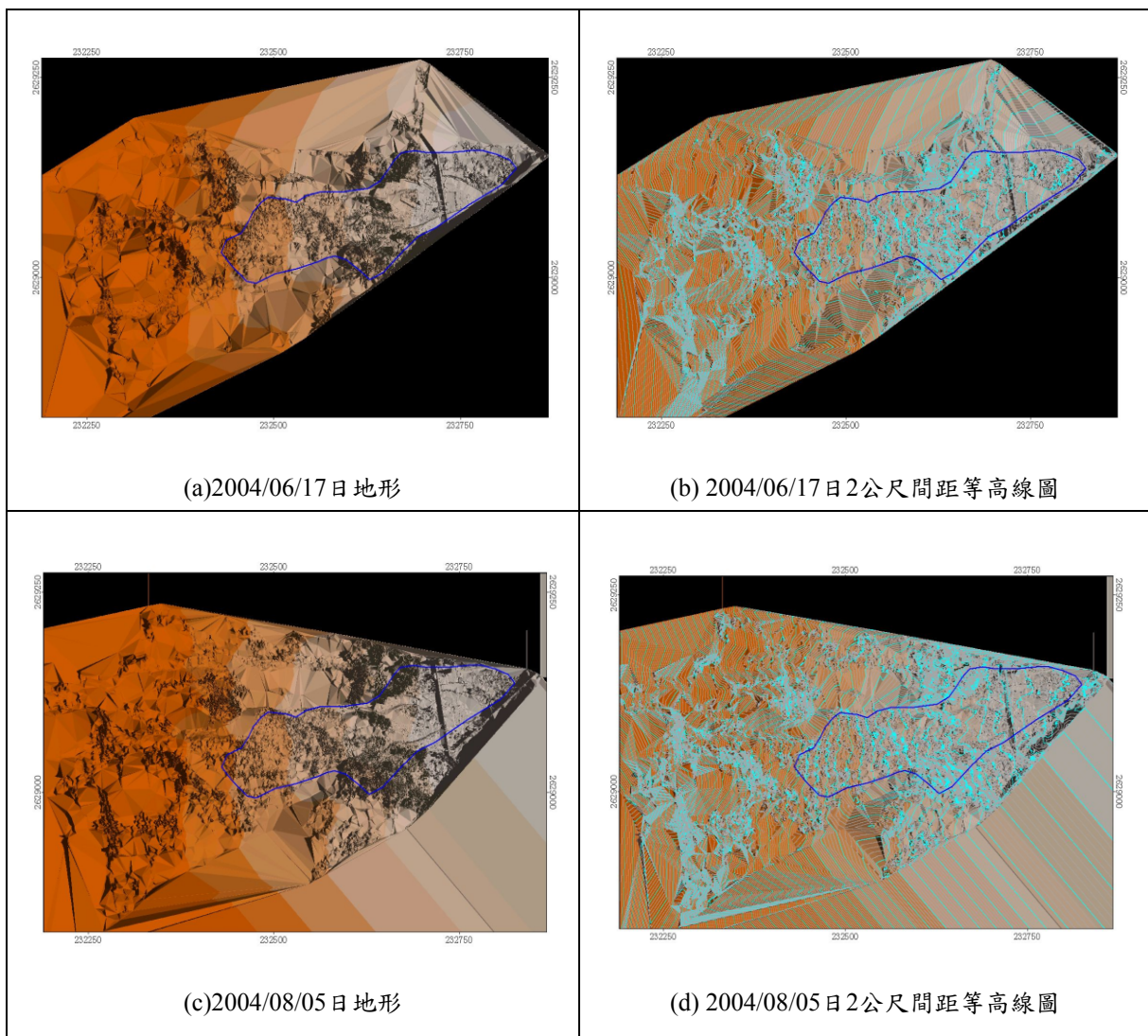


圖 12 竹子腳坑溪上游於敏督利颱風前、後製作之 20 公分網格與 2 公尺間距等高線圖

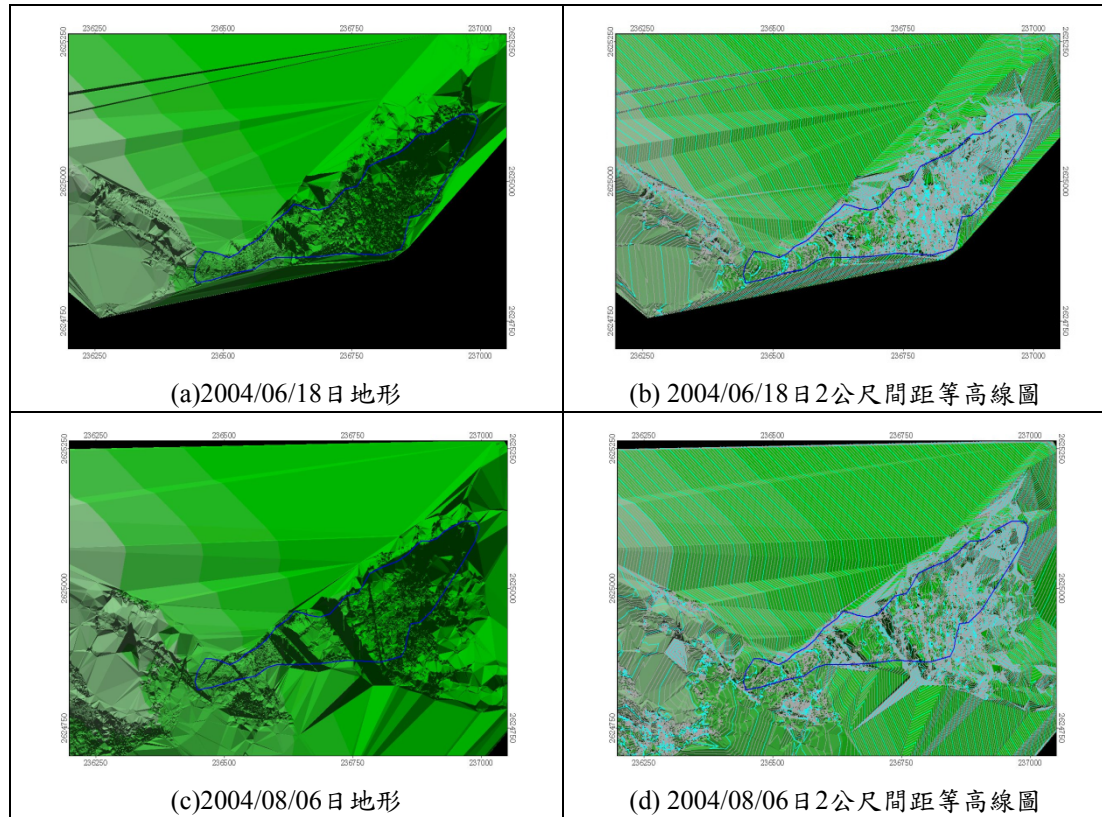


圖 13 三廊坑溪上游於敏督利颱風前、後製作之 20 公分網格與 2 公尺間距等高線圖

3.5 討論

三維雷射掃描是在短時間內，獲取地表之高精度與高解析的點雲資訊，並藉由不同時期資料的比對來評估地形變化；其中推廣應用於河溪泥砂量監測，亦以地形變化為監測目標，目前尚無法對泥砂材質種類及流道下的地形進行偵測(主動發射近紅外光的雷射掃描儀無法獲取水下地形資訊)，所以對於河溪之泥沙粒徑、種類等物理性質並非三維雷射掃描資料可以解析。另因地面三維雷射掃描施測範圍有限，對於颱風暴雨後的河道地形，仍無法監測泥砂運移的中間過程(水保局，2005)；但是比對局部重點地區的崩塌地、河道侵蝕或堆積變化情形，則具有機動性與快速分析優點。

結合多時期資料評估地表高程變化，前提需要精確的地形資料，且高程差異需大於精度兩倍以上，評估地形變化才有意義。目前地面三維雷射掃描的高程精度若有制高點提供施測，或有明顯且無覆蓋的立面目標，則評估之掃描精度約在 0.5~5 公分之間；若沒有地形制高點提供遠距離的雷射掃描，

則精度相對會降低，但仍可控制在 5~10 公分之內，本研究評估之高程精度即是此種情況(如表 2 與圖 15 所示)。所以如暴雨過後的崩塌區地形差異，在地形變化不大或是仍有部分植生分布的地區，藉由航測推導之高程資訊，仍不容易精確地估算出小變化區的高程差異量；而地面三維雷射掃描的精度為公分級，往後若累積多時期的掃描資料，則評估小範圍且為裸露區的高程變化量，在未來的應用中頗具潛力。

若要評估整個集水區或河道地形的變化總量，則以具有大面積掃描特性的空載光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)較為合適；因為空載光達可在短時間內獲取較大範圍的點雲資料，且亦具有公分~公尺級的高程精度與高密度掃描的優點(內政部，2006)，唯評估的高程誤差稍大於地面雷射掃描資料。但只要地表變化量在掃描精度的兩倍以上，則空載光達非常適合用來評估大範圍的地形變化，特別是屬於大面積的崩塌區或人員不易到達的地方。

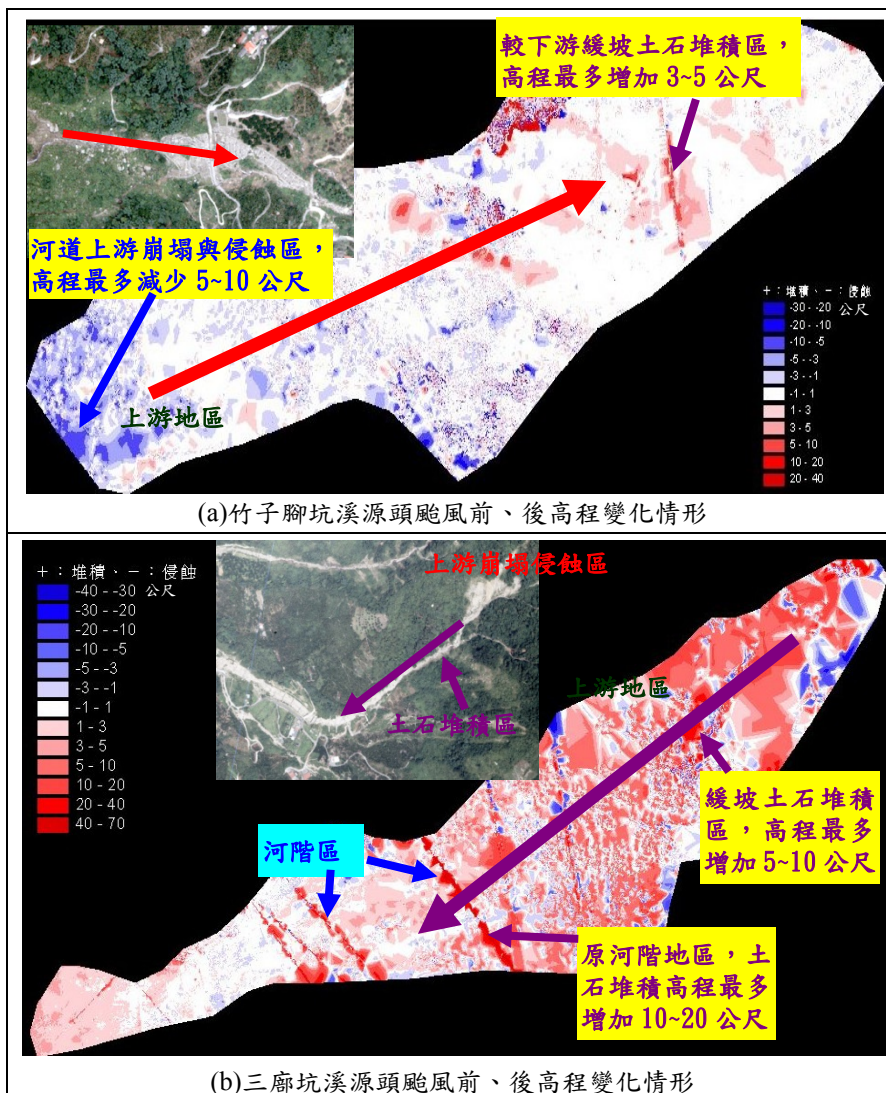


圖 14 竹子腳坑溪與三廊坑溪源頭於敏督利颱風前、後的高程變化

表 2 竹子腳坑溪與三廊坑控制點與三維雷射掃描資料之 TWD97 坐標

竹子腳坑溪						
點位	實測坐標			三維雷射掃描坐標		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	233,541.634	2,628,906.118	783.498	233,541.618	2,628,906.136	783.489
2	233,571.480	2,628,900.304	772.298	233,571.505	2,628,900.304	772.303
3	233,586.251	2,628,926.988	773.243	233,586.241	2,628,926.983	773.230
4	233,549.400	2,628,943.516	781.772	233,549.401	2,628,943.502	781.783
三廊坑溪						
點位	實測坐標			三維雷射掃描坐標		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	237,437.018	2,624,660.760	853.705	237,437.109	2,624,660.832	853.623
2	237,451.886	2,624,688.781	858.954	237,451.828	2,624,688.759	859.003
3	237,344.846	2,624,629.666	826.888	237,344.753	2,624,629.722	826.963
4	237,311.428	2,624,643.830	815.843	237,311.338	2,624,643.823	815.890

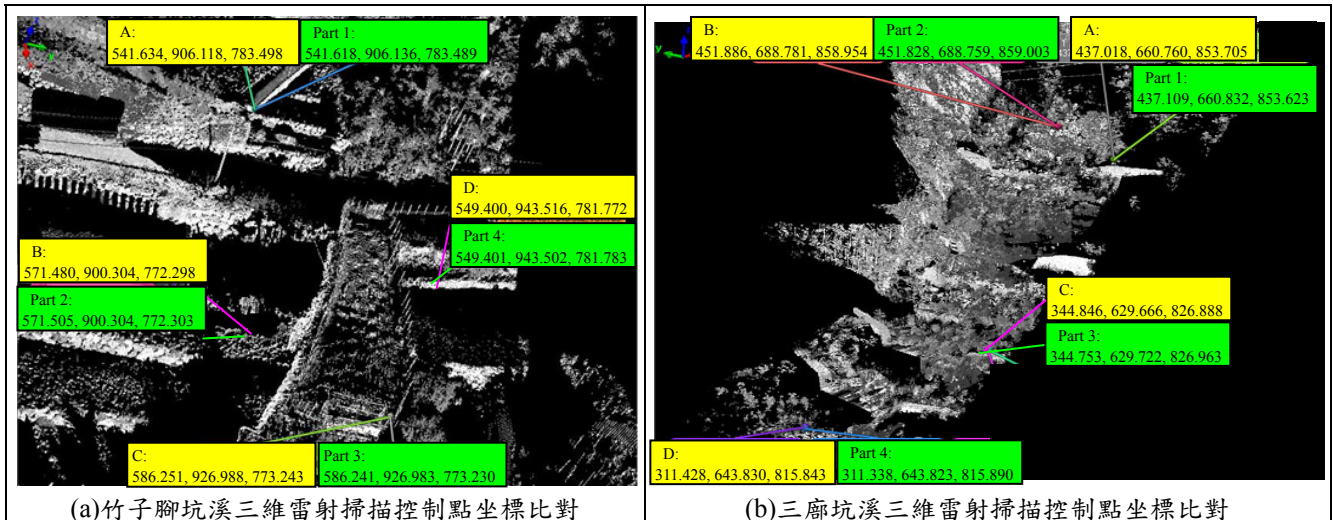


圖 15 竹子腳坑溪與三維雷射掃描資料與控制點坐標比對結果

(A、B、C、D 為 GPS 實測坐標、part1~4 為三維雷射掃描坐標；TWD97 坐標)

4. 結論與建議

多測站連結的三維雷射掃描資料，配合少數的地面控制點施測與坐標轉換，可以快速獲取目標區的地形與坐標資訊；再疊合與比對多時期的地形資料，則可監測地形變化，並提供高程差異量化分析、崩塌土石量估算等用途。本研究以遠距離地面雷射掃描儀，施測兩處崩塌地源頭於敏督利颱風前、後的河道地形變化，評估高程精度在 5~10 公分間，此精度遠小於颱風過後河道的沖、淤變化量，故非常適合小地區的地形監測分析。結果顯示 2004 年敏督利颱風過後之竹子腳坑溪上游源頭的崩塌區及陡坡處，局部地區侵蝕深度達 5~10 公尺；三廊坑溪則因源頭的崩塌土石堆積於掃描範圍內的緩坡地區，故河川以堆積為主，部分地區堆積高程差可達 5~10 公尺之多。

目前不同比例尺地形圖的平均高程製圖精度在等高線間距的一半以內；但一般的地形侵蝕速度非常緩慢，故以地形圖資訊監測地形變化並不可行。相較於崩塌地、土石流區、礦區開採、砂石開挖或土地開發整治等地區，其高程變動量往往為公尺級；利用高程精度在公分級的三維雷射掃描資料，則可清楚地比較地形變動前、後的高程差異，並分析其變化或統計土石侵蝕或淤積的差異量。

地面三維雷射掃描適合測取小範圍、且需要較

高精度資料的監測，如重點地區的微地形變化監測者；但對於集水區地形或全河段河道的大面積地形資訊，則以空載光達掃描資料較為合適；因為評估大範圍或狹長河道地形變化，需要完整的流域地形資訊；但比對前後期的空載光達資料，若探討地形變化差異仍在掃描精度兩倍以內，則光達資料評估微地形變化只能提供參考；因此，選擇合適的地面或空載雷射掃描資料，可有效提昇對局部地區或大面積地形監測的應用潛力。

誌謝

本研究承農委會水保局計畫支援，成大測量及空間資訊學系協助地面三維雷射掃描資料獲取，研究得以完成，深致謝忱。

參考文獻

- 水保局，2005。土石流防災資訊整合與應用~LiDAR 於土石流防災遇災後調查分析之應用期末報告，共 48 頁，工研院能資所執行。
- 內政部，2006。辦理 LiDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案總報告，共 318 頁，工研院能資所執行。
- 蕭國鑫、游明芳、劉進金、曾義星，2003a。地面 LiDAR 資料應用於崩塌地形變化初步研究，中

華地理資訊學會 2003 年會、學術研討會暨高雄市政府 GIS 成果展，光碟。

蕭國鑫、廖子毅、徐偉城、游明芳，2003b。高解析影像與光達資料應用於崩塌土石判釋及崩塌量推估研究(1/2)，農委會 92-農科 2.5.2-林-F1(4)計畫報告，共 60 頁。

蕭國鑫、劉進金、曾義星、游明芳，2005。三維雷射掃描應用於河道地形變化偵測，第二十四屆測量學術及應用研討會，第 167~176 頁。

A Study on the Topographic Changes Using Ground-based 3D Laser Data

Kuo-Hsin Hsiao^{1*} Jin-King Liu² Yi-Hsing Tseng³ Chin-Lun Wang⁴

ABSTRACT

Ground-based 3D laser data are used in this study for the estimation of riverbed topographic change. A point-cloud of high precision and high density can be obtained in a few minutes for the sensitive riverbed areas. With a limited control survey of precise targets using GPS and total stations, multiple scans of ground-based LiDAR can be registered together to form one cohesive 3D model. And, thus, different periods of topographic data are overlaid for estimating the changes of the target areas. Two cases are practiced in this study. In the first case, the scoured riverbed on Zu-Zi-Jiao-Keng stream, a branch of Cho-Shui river in Nan-Tou County was scanned before and after typhoon Mindulle on 2 June 2004, with a total of 15 scans in 5 stations by using ILRIS-3D laser scanner. Subsequently, they were registered and joined and re-sampled to a 20 cm grid. The second case is located in San-Boo-Keng upstream. It is found that in the first case that maximum erosion height of riverbed changes was between 5~10 m. In the second case, the average height of silted-up is about 5~10 m. The effectiveness of applying 3D laser scanning is proved in this study.

Keywords: Landslides, Digital Elevation Model (DEM), Ground-based 3D Laser Scanner.

¹ Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

² Senior Researcher, GEL, ITRI

³ Professor, Department of Geomatics, National Chung Kung University

⁴ Director, Division of Slope Land Conservation and Utilization, Soil and Water Conservation Bureau, COA

* Corresponding Author, Phone: 886-3-5918587, E-mail: hks@itri.org.tw

Received Date: May. 03, 2010

Revised Date: Jun. 18, 2010

Accepted Date: Jul. 12, 2010

結合空載 LiDAR 與彩色航照應用於崩場地研判

劉治中^{1*} 蕭國鑫¹ 饒見有² 劉進金³ 吳哲榮¹ 黃群修⁴

摘要

本研究結合彩色航照與空載光達資料，藉由半自動化方式辨識崩場地，並利用三維立體展示的人機操作介面，供人工判釋及編輯崩場地邊界向量資料。其中彩色航照利用綠度指數，空載光達資料則利用數值高程模型(DEM)與數值地表模型(DSM)，除計算地物高度模型(OHM)與坡度資料外，亦結合地表粗糙度(Roughness)來確定崩場地範圍。初步成果顯示利用上述參數，依訓練樣區統計資料選定適當之門檻值後，可有效地偵測出局部範圍的崩場區位置；對於誤判的地區，藉由開發的三維立體編修系統，可以透過人工進行必要之修正。另配合崩場地完整屬性需求，亦設計了及時研判功能，並依崩場地發生之位置、形狀、滑動面型態及崩塌方式等，建置崩場地的地質屬性，提供後續之規劃參考用。

關鍵詞：崩場地、數值高程資料、空載光達

1. 前言

台灣地區有 27.31%的山坡地(海拔 100~1,000 公尺)與 46.01%的山區地形(海拔 1,000 公尺以上)，且山區地形陡峻、溪流湍急、岩性脆弱、地質構造複雜、土壤鬆軟，而平均年降雨量亦達 2,500 毫米之多；加上 921 地震後，部分地區的表土因劇烈搖晃而鬆弛，所以逢颱風或豪雨時極易觸發土石崩塌。其中崩塌土石對集水區直接的影響是土壤沿著山溝與河流冲刷到下游地區，並堆積於水庫底層，造成水庫蓄水量下降，同時也造成水質污濁而影響供水，導致民生困境與經濟損失。而山崩若未能儘早復原，雨水將逐漸冲刷表層土石，進一步降低水庫蓄水功能，而減少水庫壽命。

傳統的崩場地研判為利用外業調查，或是藉由航、遙測影像進行辨識；但野外調查受限於交通問題與地形因素，所以有其困難性。另取得目標區完整的航照資料，雖然辨識的精度較高，且航照立體對亦可以產製高程資訊，但對於地表覆蓋型態的辨識須透過人為的方式，亦很少利用高程資訊輔助研

判崩場地分布。遙測衛星影像利用大面積涵蓋的優勢，短時間內可獲取大範圍的影像，但因空間解像力(Spatial resolution)限制，對於較細微崩場區的研判仍然有盲點存在(蕭國鑫等，2003)。地面三維雷射掃描(Ground-based 3D laser scanning)具有高的機動性、高精度與高解析獲取地形資料的優點，但受限於儀器的架設地點與掃描有效距離等因素，所以可掃描的有效範圍亦有相當高的限制，特別是有高密度植生覆蓋的地區(蕭國鑫等，2005)。

目前的空載光達(Light Detecting And Ranging, LiDAR)掃描在天候許可下，已可同步獲取好品質的彩色數值航照；除了具有大範圍與低死角觀測的能力外，平時或災害發生後，亦可針對大範圍地區進行全面性的調查工作。其中獲取的空載光達點雲(Point clouds)資料，配合 DGPS 差分定位及慣性導航系統(Inertial Navigation System ; INS)，可直接換算得到點雲的三維坐標，且高程精度達公寸級(內政部，2005)。而後續航照正射化之空三平差及地物分類等處理，也已經可以達到相當高的自動化程度。

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

² 國立成功大學測量與空間資訊學系 助理教授

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所 正研究員

⁴ 農委會林務局企劃組 科長

*通訊作者，電話：886-3-5915468, E-mail: cclau@itri.org.tw

收到日期：民國 99 年 05 月 13 日

修改日期：民國 99 年 06 月 21 日

接受日期：民國 99 年 07 月 28 日

空載光達資料提供高密度的三維點雲資訊，而航空照片則可提供土地利用/覆蓋物分析，也可以進行三維空間資訊萃取。在自動化資料處理過程中，運用航照正射影像主要目的在於地表覆蓋物分析，以及能明確地定義不同地物的邊界。而空載光達的角色主要在提供地物第三軸的空間資訊，也就是高程變化，除了可以提供地表面粗糙度分析、地形面坡度計算與地上物高度計算，以進行崩塌範圍之自動化偵測。兩個以上不同時期的掃描資料，則可以提供相當精確的地表物高程變化分析，若是崩塌區則可以估算崩塌土石之體積量。因此，本研究即利用經過地物分類處理之空載光達資料，配合彩色航照正射影像，建立自動化崩塌偵測技術，以提昇崩

塌調查工作的效率。由於自動化偵測難免有漏授 (Omission) 或誤判 (Commission) 的現象，所以亦設計人機操作介面來模擬三維景觀方式，提供人為判釋及編修自動化產生之崩塌向量資料。

圖 1 為台灣地區常見的典型崩塌型態，顯示山崩區通常具有土壤裸露、附近林木茂密且地形陡峭的現象。所以依據圖 1 的崩塌特徵，光達資料研判僅考慮山崩、土石流及河岸侵蝕等三種類型的崩塌災害，而不考慮地滑形式的地形變異。且由於多數的崩塌區經過長時間後，可能會有植物生長的情形，因此亦不考慮已經植生復育的歷史崩塌。其中崩塌地判釋範疇如表 1 所示。

表 1 崩塌地判釋範疇

項目	說明	研究方法
遙測資料	經地物分類後之空載光達及數化彩色航照正射影像	空載光達內插為網格式 DSM 與 DEM 資料
狀況	崩塌表面土壤裸露	利用 DSM 與 DEM 偵測地物高度，並利用數化航照計算綠度指標過濾植被。
類型	山崩、土石流及河岸侵蝕	地滑式崩塌表面可能仍有林木或植被，因此會被視為沒有發生崩塌現象。
地形	地形平緩或陡峭	利用 DEM 計算坡度，假設崩塌坡度在一定程度以上，可包含上述三種類型之山崩。
調查項目	崩塌邊界	結合綠度、地表粗糙度、地形坡度與地表物高程等四種參數，研判崩塌地及將崩塌邊界向量化。
人機介面	提供三維導覽環境，供人為判釋及數化編修。	航照及崩塌區向量資料，套疊於地形幾何模型上。



圖 1 台灣地區典型的崩塌型態照片

2. 測試區資料

本研究選定石門集水區內，基本圖圖號為 9622-1-094 與 9622-1-095 的區域進行相關崩塌地研判測試，此區地物覆蓋包含林地、竹林、河流、崩塌地及少數農作(林務局，2007)。其中使用之資料來源包括空載光達與數化彩色航空照片，空載光達資料掃描日期為 2005 年 12 月 16 日，點雲密度每平方公尺約為 1.6 點，經以半自動化方式進行地物分類後得到 DSM 與 DEM 資料(內政部，2005)。如圖 2(a)~圖 2(c)為圖號 9622-1-094 空載光達 DSM 資料、DEM 成果、利用 DSM 減去 DEM 後得到 OHM 資料的結果。數化彩色航空照片是由林務局農林航空測量所因應艾利颱風後災害調查需求所拍攝，拍攝日期約在 2004 年 9-11 月間，像比例尺約 1:14,000，經掃描數化與空三求解後配合 20 公尺網格數值地形模型製作成正射影像，其地面空間取樣間距(Ground Sampling Distance, GSD)為 50 公分，如圖 2(d)所示。

3. 崩塌地研判方法

3.1 自動化崩塌地偵測

McKean and Roering (2004)曾以空載光達產生的數值地形模型，利用一維到三維的統計分析及 Laplacian 與 Power Spectra 等分析獲取地表粗糙度，

進而得以探討山崩的表面型態 (Surface Morphology)；再透過此種地形學分析，來了解崩塌特徵、崩塌行為機制及評估活動中的山崩，並探討山崩在空間與時間尺度上的變化機制。Glenn *et al.* (2006) 則利用高解析度數值地形模型，分析地表粗糙度、坡度、坡向、半變異數與碎型尺度等，並用來分析山崩之表面型態、成分與活動等現象。其中地表粗糙度為利用式(1)之 DSM 與 DEM 差值得到之地上物的高度，即地物高程模型(Object Height Model, OHM)加以計算，當 OHM 值為零時，表示該處無地物。本研究乃假設山崩表面無植被生長，所以崩塌區的地物高度會極接近零，利用此假設偵測 OHM 中高差甚小的區域，可作為山崩候選區。其次為統計局部視窗內之標準偏差，將之視為粗糙度(Roughness)或均調性(Homogeneity)指標，供後續崩塌地偵測用。

$$\text{OHM} = \text{DSM} - \text{DEM} \quad (1)$$

結合空載光達與航照影像進行崩塌地自動偵測時，利用地表粗糙度指標、地形坡度、綠度指數以及 OHM 等資料，研判在一定坡度以上之裸露地，以得到崩塌地初始位置及範圍(Hsiao *et al.*, 2009)。再將偵測結果從 Raster 格式轉換為 Vector 格式，並以 Shapefile 檔案格式儲存，得到崩塌地區塊多邊形向量資料，供後續編輯用。

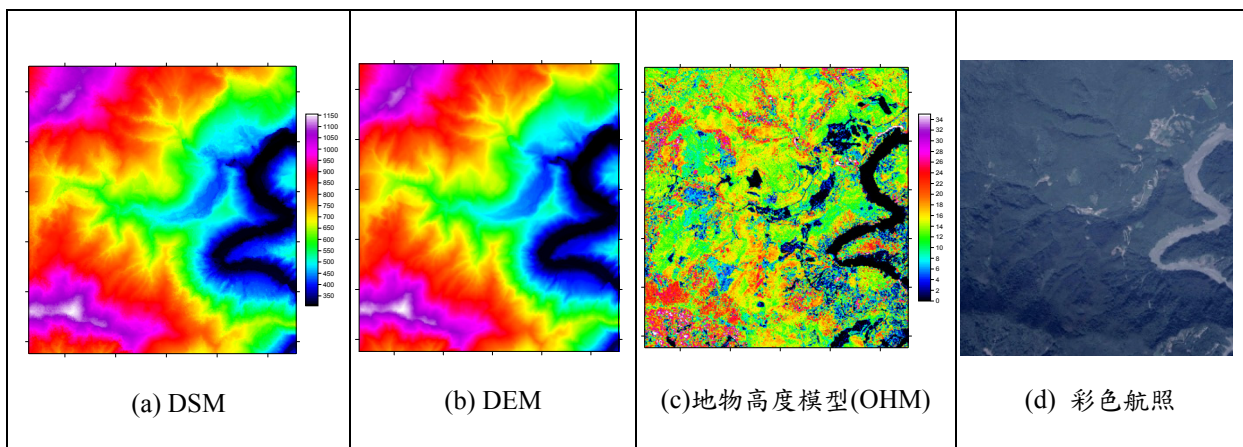


圖 2 測試區 DSM、DEM、地物高度模型及彩色航照

3.1.1 地表粗糙度

本研究將局部視窗地物高度變化之標準偏差 (Standard Deviation) 視為地表粗糙度；為了避免地形效應，利用 DSM 減去 DEM 所得到的 OHM 進行地表粗糙度之計算。

3.1.2 地形坡度

地形坡度愈大的地區，通常發生土石滑動或崩塌情形的機率相對較高 (例如坡度大於 20 度，但仍需視地質、土壤、水文與氣象等因素而定)。所以研究中藉由空載光達 DEM 資料所計算的地形坡度，是為偵測崩塌區的一個重要指標。假設地形曲面為：

$$Z=f(X, Y) \quad (2)$$

其中坡度定義：單位為弧度，可再化算為度或%

$$\text{slope} = \tan^{-1} \left(\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \right) \quad (3)$$

$$\text{其中： } f_x = \frac{\partial Z}{\partial X}, \quad f_y = \frac{\partial Z}{\partial Y}$$

一般使用格網式的 DEM 計算地形坡度的方法，是取用計算點為中心的 3 x 3 網格的 9 個高程點來計算，如圖 3 所示。

Z ₇	Z ₈	Z ₉
Z ₄	Z ₅	Z ₆
Z ₁	Z ₂	Z ₃

圖 3 3 x 3 網格高程計算坡度示意圖

考量在山區若僅使用 3 x 3 網格的高程點，當地形高低起伏過大時容易干擾坡度的計算，並出現較多雜訊，造成坡度的不連續性；因此利用影像處理中 Canny 邊緣偵測元的觀念，即使用一階微分的高斯函數與 DEM 進行迴旋(Convolution)計算，得到兩個方向的差值(Gradient)；而二維(x, y)的迴旋計算等同於合併二個一維(x)及(y)迴旋處理的結果，這種簡化可以提高計算效率(Parker, 1997)。例

如一維的高斯函數如式(4)，一階微分如式(5)，而將 DEM 高程分別對 x 方向及 y 方向的一階微分之操作元作迴旋計算，再依式(3)計算即可獲得其坡度斜率。其中式(4)所計算之標準差會決定高斯函數曲線中反曲點的位置，數值越小，對稱的兩個反曲點間距越小，而高斯曲線越陡峭，則平滑的效果較不明顯；反之此標準差越大，數值地形中若有雜訊，則其平滑過濾的效果會較明顯。而就不同解析度與製作方式的數值地形而言，實際上難以用一明確地數學公式表示其間之關係，但可考慮使用不同的標準差與單窗大小，並以經驗方式測試其效果。

$$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

$$f_x = f'(x) = \left(-\frac{x}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

實際坡度的計算，為利用不同尺寸的操作元換算高斯函數的標準偏差；例如取 5 x 5 網格計算斜率，則使用標準差 0.8 來決定操作元內之值，X 方向操作元如圖 4 之矩陣所示，而 Y 方向操作元恰為 X 操作元之轉置矩陣 (林務局，2005)。

0.137	0.715	0.000	-0.715	-0.137
0.137	0.715	0.000	-0.715	-0.137
0.137	0.715	0.000	-0.715	-0.137
0.137	0.715	0.000	-0.715	-0.137
0.137	0.715	0.000	-0.715	-0.137

圖 4 5 x 5 網格計算斜率時 X 方向之操作元

3.1.3 波譜分析

本研究假設山崩表面無植被生長，所以可以利用數化航照影像的光譜資訊，初期偵測無植被或稀少植被的地區做為山崩之候選區。如果遙測影像含有近紅外光波段，則進行 NDVI 植被指數計算(式 6)。理論上在計算 NDVI 指數時，使用的資料為各波段的地物反射率(Reflectance)，因此須先進行感測器的輻射校正工作，以求得灰度值與反射率之轉

換係數。一般而言，反射率等於灰度值除以一個增益值(Gain)，如此即可避免因感測器輻射反應的偏差而造成錯誤的結果。然而此項率定工作需要相當專業的處理，一般空載數位相機大都沒有進行此項工作。所以 NDVI 計算結果僅能當作相對的植被指數，並不適合做為植被含量的絕對量評估(林務局，2005)。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (6)$$

其中，R: 紅光波段影像灰值；NIR: 近紅外光波段影像灰值。

傳統的航空像片有些僅具有可見光之 RGB 彩色影像，並無近紅外光(Near-IR, NIR)波段可利用，因此無法用來計算 NDVI 植被指數，故可利用其可見光波段的綠光與紅光來計算其綠度指數(式 7)。同樣的此綠度指標並未經過輻射改正，因此僅能計算相對植被指數。

$$Greenness = \frac{G - R}{G + R} \quad (7)$$

其中，R: 紅光波段影像灰值；G: 綠光波段影像灰值。

根據公式(6)及(7)，NDVI 與綠度指數其值必定介於-1 到+1 之間，但受限於攝像時的各項自然環

境及硬體設備因素，其值域未必能完全佈滿這個區間。如前所述之綠度指數為一相對量，較低者即表示植被較少，也就是可能為裸露地。其中如圖 5(a) 為利用數位彩色航照影像求得的綠度指數影像，圖 5(b)為使用 OHM 資料求得地表之粗糙度(標準偏差)，由於 OHM 資料已經去除地形效應，所以能呼應地物高度之幾何變化，圖 5(c)則為利用 DEM 資料計算之地形坡度成果。

3.2 半自動化崩塌地偵測

鑒於自動化山崩偵測無法達到百分之百的正確率，故再利用合適的人機介面，以提供人為的局部山崩偵測用。而本研究的重點在利用光達點雲及彩色航照進行崩塌區辨識，因此在進行局部山崩偵測時，所引用的資料仍以地物高度模型、綠度指標、粗糙度指標及地形坡度等四項為主。為了協助人工判釋山崩，所設計之操作介面仍是基於前述之三維動態瀏覽平台，而進行局部山崩偵測時，所使用之概念為類似仙女棒的區塊成長法(Region Growing)，由操作員點選一山崩種子點，接著在局部區域偵測具有相似特性的山崩，並進行編輯確認。操作程序如圖 6 所示。

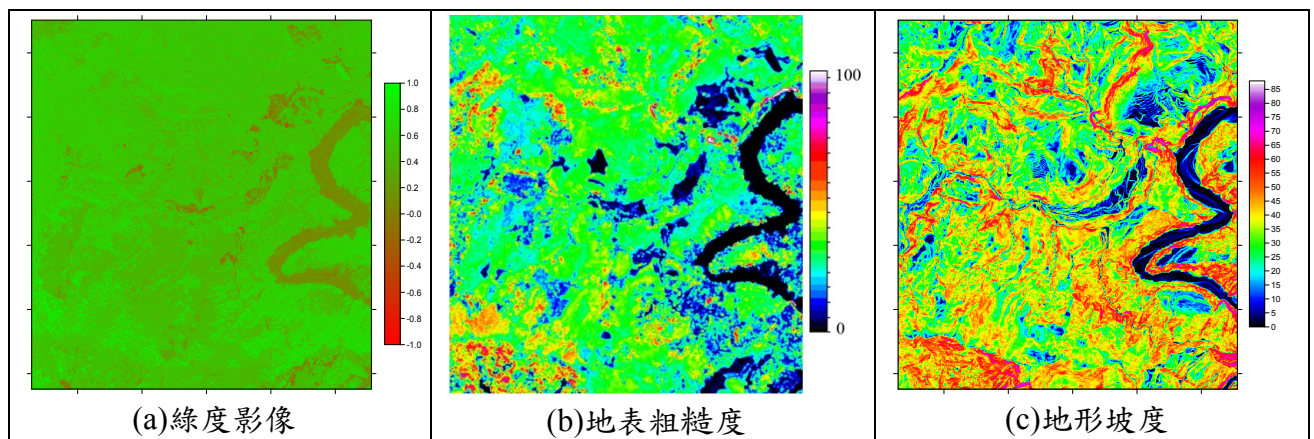


圖 5 基本圖 9622-1-094 圖幅之綠度、地表粗糙度及地形坡度影像

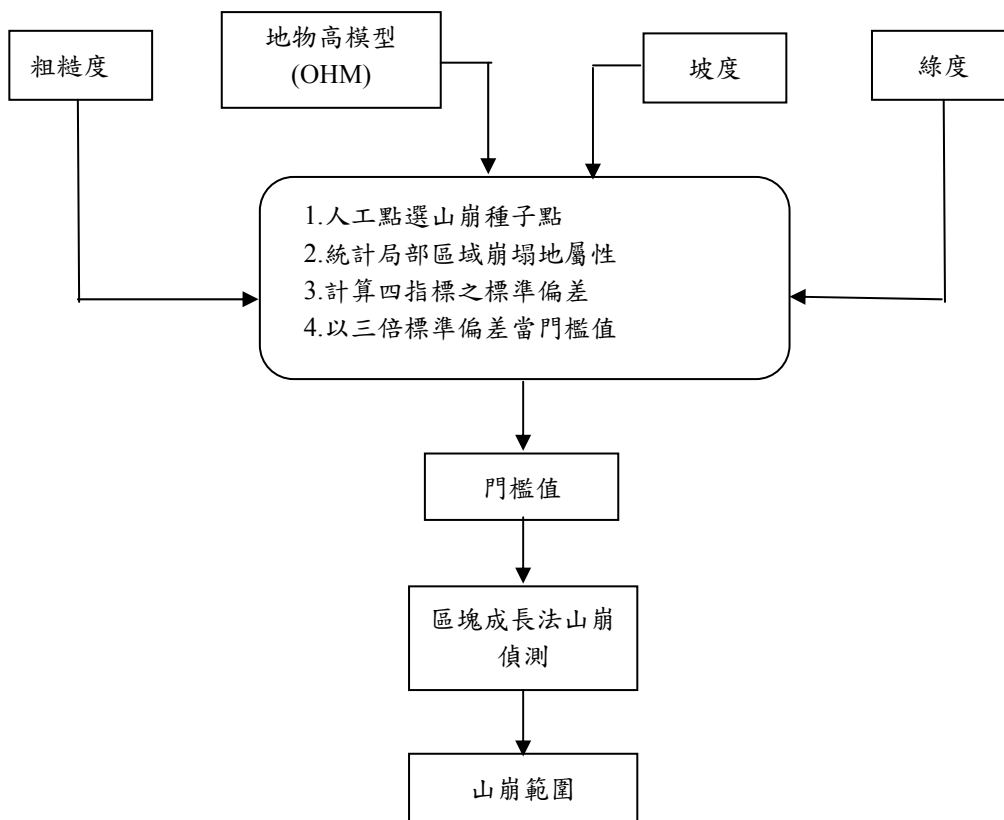


圖 6 結合空載光達與航照影像偵測山崩流程圖

4. 崩塌地研判成果

4.1 崩塌地波譜與幾何特性分析

比較圖 2(c)與圖 2(d)之 OHM 與航照資料，顯示黑色部份為無地上物的區域，包括河流、開墾地、裸露地與道路等；而崩塌地也部份坐落在這些區域中，故須進一步過濾與偵測，方可得到較可靠的成果。為了進一步了解崩塌地之波譜與幾何特性關係，測試工作乃根據土地利用圖中之崩塌地區塊，分析其綠度、地形坡度、地物高度以及地表粗糙度等指標之分布情形，並據此設定合理的自動化崩塌地偵測相關參數。為了使偵測結果有足夠可靠度，以 95%信心區間做為門檻值的初步探討(林務局，2005)。

圖 7(a)為崩塌區之綠度折線圖與累積分布(Cumulative Probability Distribution, CPD)圖，由圖中可得知崩塌地之綠度分佈約在-0.1~0.8 之間，平均值約為 0.3；由於綠度指標之計算過程未經輻射

改正，故僅能當作相對量加以探討，另由累積分布曲線可得知 95%的崩塌地綠度約在 0.55 以下。圖 7(b)為崩塌地之坡度分布折線圖與累積分布圖，顯示崩塌地的坡度分布範圍相當大，但 95%的崩塌地坡度約在 8 度以上。圖 7(c)為崩塌地之地表粗糙度分布折線圖與累積分布圖，顯示 95%的崩塌地的粗糙度在 11 公尺以下。圖 7(d)為崩塌地之地物高度分布折線圖與累積分布圖，由此圖中可知 95%的崩塌地之地物高度在 11 公尺以下，由於此值相當高，表示在崩塌地圖層中涵蓋了相當多的林木。

4.2 誤差分析

研判崩塌地的波譜與幾何特性分析，可以得到四個指標 95%信心區間的門檻值；再藉由一公尺解析度的正射影像、DEM 與 DSM，進行自動化崩塌地偵測之測試。其中四個指標的門檻值(綠度<0.55，坡度>8 度，OHM<11 公尺，粗糙度<11 公尺)利用地真資料進行誤差分析，結果正確率為 91.86%，漏授率為 8.14%，誤判率為 96.80%。

由此結果可發現誤判率相當高，而正確率也未達 95%；因此，進一步改變上述門檻值的設定，並進行 12 項的測試，結果如表 2 所示。其中案例 1~3 為改變綠度，案例 4~6 為忽略地表粗糙度，案例 7~9 為忽略綠度指標改以粗糙度為主，案例 10~12 則為綜合上述各測試，並以合理之門檻值進行測試之成果。如圖 8 為案例 12 之偵測成果(紅色區塊)與地真資料(黃色區塊)套疊於正射影像之結果，由此圖中可發現誤判現象大多發生聚落或開墾地，以及少部分由於崩塌地週遭樹木的陰影所致。

測試方法雖然可以得到合理的結果，但仍無法避免裸岩區或農作翻耕造成土壤裸露區被判釋為崩塌地的結果。此為預期中可能發生的現象，況且無法期望全自動崩塌地偵測可以達到百分之百的正確率，以及完全沒有誤判與漏授結果。而自動化崩塌地偵測目的，乃是希望有高可靠度的成果，以

降低後續人工編修的工作量，更提昇效率及正確率。故另一研究即在提出崩塌地三維互動式編修系統，除具有地表波譜與高度幾何資訊的人機操作介面外，並可在三維視覺化之下進行資料編輯或修正。

由於測試研究是以像元為基礎來進行逐點的計算與山崩偵測，因此，偵測成果可能會產生小面積的山崩區塊；所以乃利用數學型態學 (Morphology) 中之開放與封閉操作元，移除小面積或狹長的偵測結果，並以適當的面積門檻移除小面積之區塊。

當崩塌範圍確定後即進行後續的誤差分析，即首先設定可以匯入地真(Ground Truth)圖層資料，接著利用誤差矩陣進行山崩偵測誤差分析，如圖 9 的畫面中同時顯示正確、漏授與誤授之誤差統計等資訊，並且以紅色顯示漏授位置，以藍色顯示正確偵測結果，接著是以綠色顯示誤授之山崩位置。

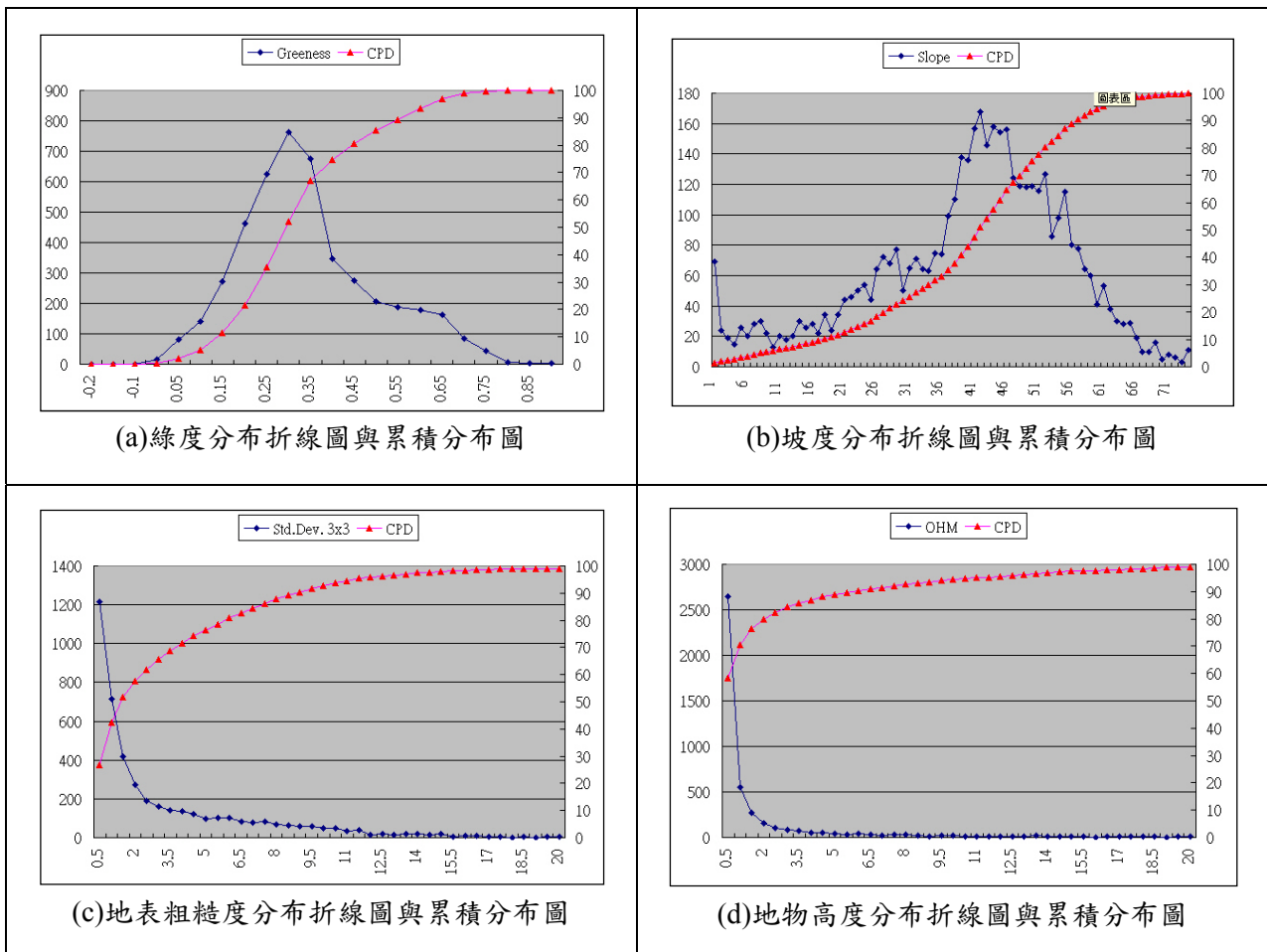


圖 7 崩塌地之綠度、坡度、地表粗糙度與地物高度分布折線圖與累積分布圖

表 2 設定各種門檻值進行崩塌地偵測之誤差分析

案 例	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
綠度 <	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	1	1	1	0.2	0.2	0.2
坡度(度) >	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	12	8
OHM (公尺) <	11	11	11	11	11	11	11	11	11	2	2	5
地表粗糙度(公尺) <	11	11	11	800	800	800	11	5	2	2	2	5
PA 生產者精度(%)	93.0%	89.7%	80.5%	95.2%	91.8%	81.9%	93.1%	80.3%	63.2%	57.9%	56.1%	71.8%
OE 漏授誤差(%)	7.0%	10.3%	19.5%	4.8%	8.2%	18.1%	6.9%	19.7%	36.8%	42.1%	43.9%	28.2%
CE 誤授誤差(%)	3.6%	5.8%	16.8%	2.2%	3.9%	15.3%	3.3%	10.4%	19.2%	30.5%	38.5%	23.5%
UA 使用者精度(%)	96.4%	94.2%	83.2%	97.8%	96.1%	84.7%	96.7%	89.6%	80.8%	69.5%	61.5%	76.5%
OA 整體精度(%)	77.9%	87.2%	96.3%	63.0%	80.0%	95.9%	75.9%	93.8%	97.3%	98.5%	98.8%	97.7%
AA 平均精度(%)	85.4%	88.4%	88.5%	78.9%	85.9%	88.9%	84.4%	87.1%	80.4%	78.3%	77.7%	84.5%

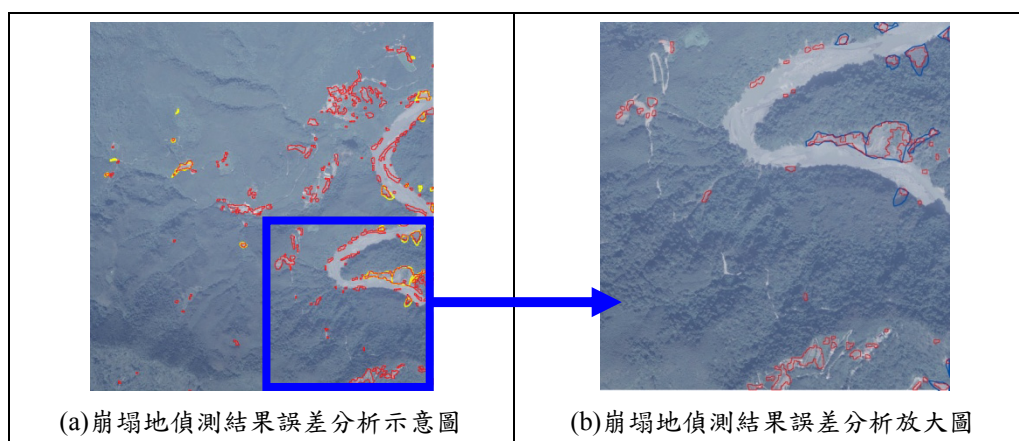


圖 8 崩塌地偵測結果誤差分析示意圖與放大圖

4.3 山崩三維立體編修系統

圖 10 為設計之山崩編修系統介面，具有為可匯入山崩自動化偵測結果之 Shapefile 檔案功能，接著利用 DEM 內插其高度資料，得到三維山崩邊界的多邊形圖層。最後將此山崩 Shapefile 套繪於航照正射影像上，即可以三維立體方式進行人機互動之操作與編修工作，包括新增、刪除及修改等功能，如圖 10 為山崩三維立體編修系統畫面之一，圖 11 與圖 12 分別為刪除誤判與修正崩塌地邊界之畫面。

4.4 崩塌地特性設定

對於崩塌地研判成果通常會建置為向量資料，並將之納入地理資訊系統中；但若要有完整的崩塌地資訊，則可依判釋人員對山崩辨識之經驗，再鍵入山崩特性資訊，以提供往後的工程規劃或山崩監測參考用。如圖 13 為以人工選取一山崩後，依據系統設計可出現一選單，再依需求設定崩塌方式、山崩位置、山崩型態及山崩形狀之屬性資料，圖 13 為設定四種山崩特性之範例示意圖。

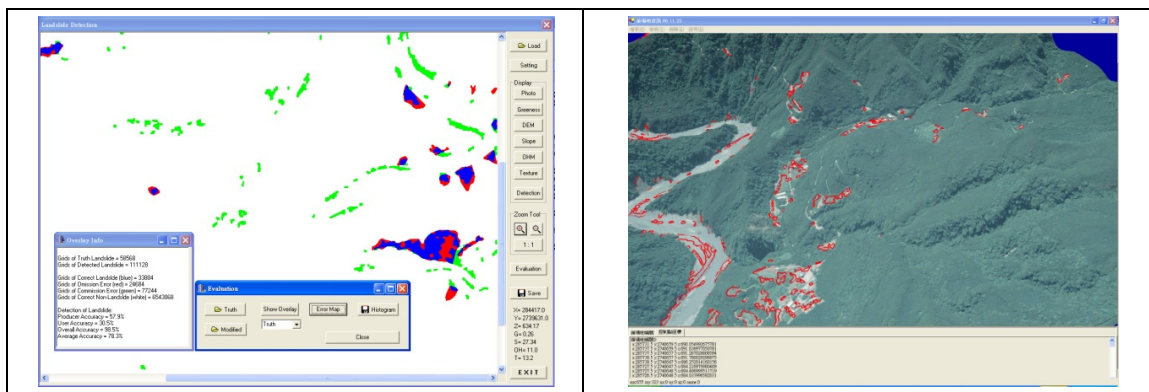


圖 9 山崩偵測誤差分析畫面

圖 10 山崩三維立體編修系統畫面之一

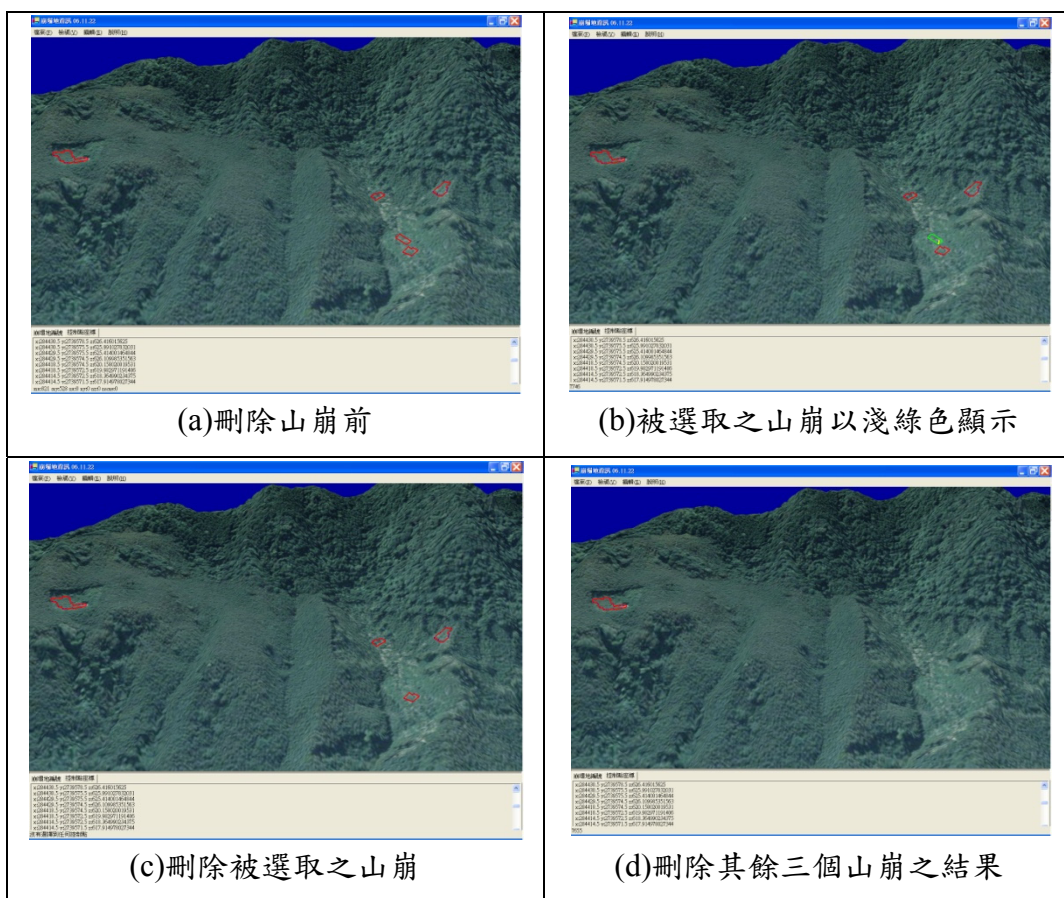


圖 11 系統刪除誤判崩場地圖示

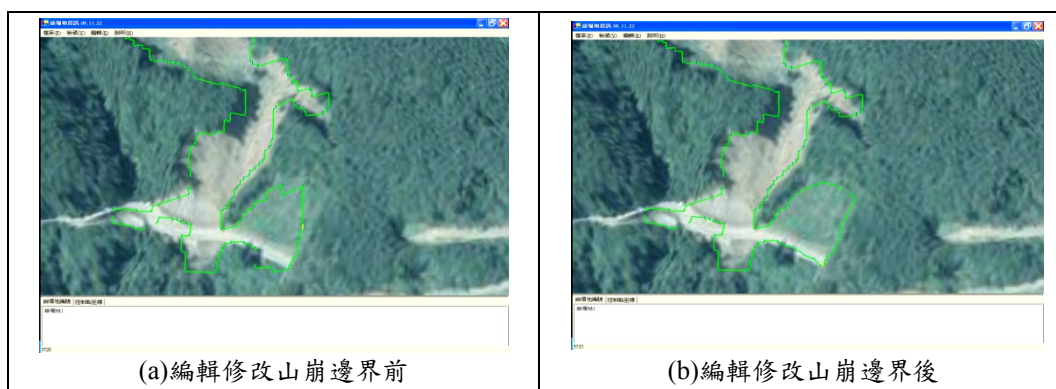


圖 12 系統刪除誤判崩場地圖示

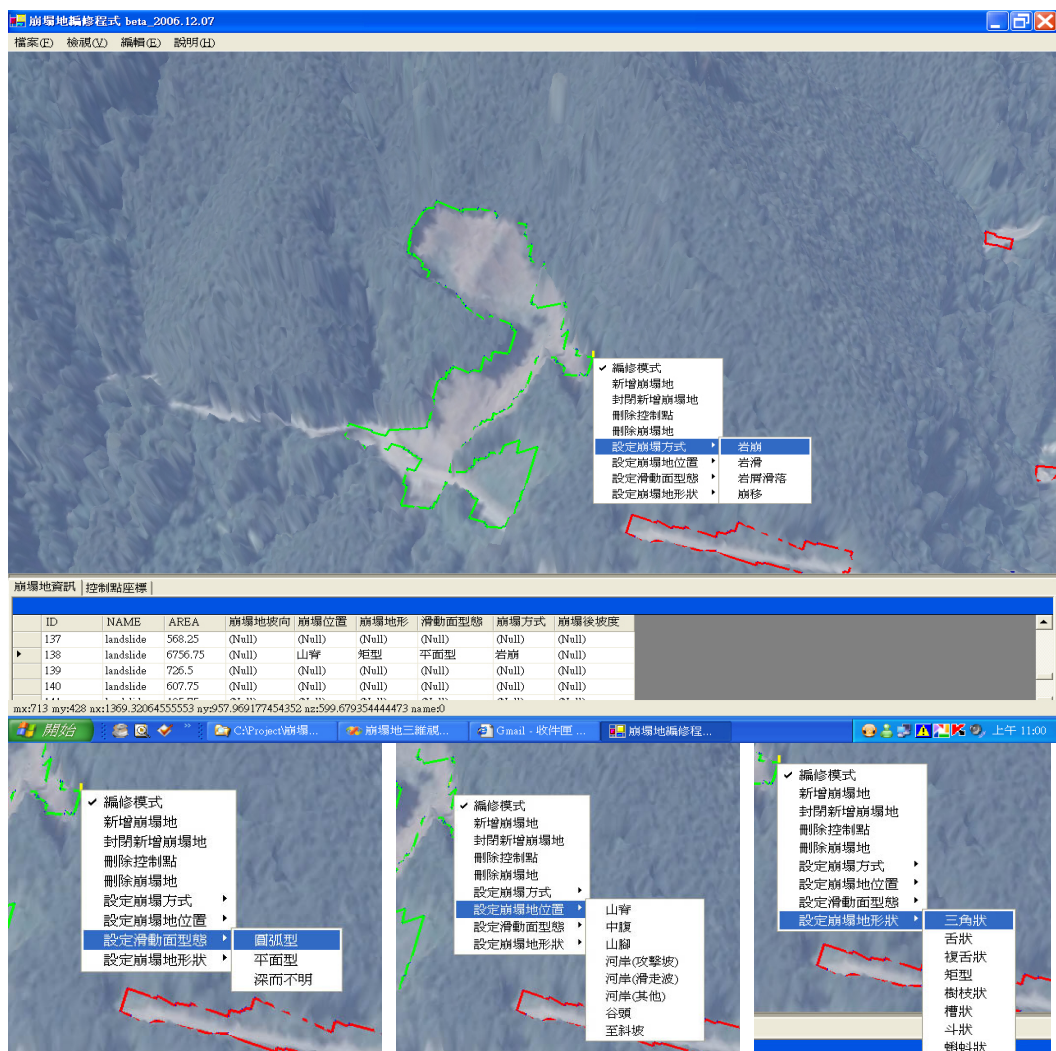


圖 13 設定四種山崩特性之範例示意圖

5. 結論與建議

本研究從半自動化的角度出發，嘗試結合彩色航照與空載光達資料辨識崩塌地範圍；並且藉由三維立體展示的人機操作介面，供後續人工判釋及編輯崩塌地邊界向量資料，以獲取最高品質的成果。初步結論為：

1. 結合正射航照與空載光達資料，利用彩色航照的綠度指數及空載光達資料推演的地形坡度、地物高度模型與地表粗糙度等地形地物指標，透過人工圈選訓練區自動計算相關指標之門檻；此種作法隨資料的不同選擇門檻值，可避免不同地區因不同時間拍攝資料的差異，造成門檻值決定上的困擾。
2. 自動化及半自動化山崩偵測皆無法達到百分之

百正確率，因此開發了三維立體編修系統，以對崩塌地邊界向量之端點進行編修，另配合山崩地質之研究，亦設計了人工判釋及設定山崩特性之功能，可在判釋所有山崩後，依據山崩發生之位置、形狀、及崩塌方式等建置崩塌地的屬性，提供後續之規劃參考用。

3. 測試結果顯示使用自動化偵測崩塌地之成果可靠度高，且誤判之部分可以透過人工立體編修，快速判釋是否為崩塌地並刪除之。而評估自動化辨識崩塌地之困難處，在於崩塌地偵測之邏輯運算過程雖然簡單，但不同參數門檻值的設定有許多變因存在；如綠度指數的計算是利用航照影像之灰度值，會受到太陽光位置、地形坡度、地物反射特性、大氣狀況、陰影，以及該地點與攝影機之相對位置等因素影響，所以

無法明確定義出絕對的植被指數。未來在實際運作時，使用的大量航照影像也可能不是同一天拍攝，所以綠度指數門檻值的設定亦將會有所不同。

4. 空載光達 DEM 資料的空間解析度相當高，太細微的地形變化對崩場地偵測不見得合適，例如可能偵測到許多單一像元的崩場地；而此種成果在應用上反而會造成研判上的困擾，甚至導致需介入大量的人工編修，增加時間與成本。因此，如何選取適當的 DEM 空間解析度，也是往後對於崩場地自動判釋中重要的一部分。
5. 航照影像拍攝日期與光達掃描日期不一定是同一天，若日期差距太大，可能因地表覆蓋物的變化，尤其發生植被復育時，會影響偵測成果之準確度。另研究中假設崩場地為地形坡度大之裸露地，自動偵測結果可能會將翻耕中之山區農作地視為崩場地，因此誤判結果仍需結合部份的 GIS 資料，以降低人工編修及誤判與漏授之誤差。

蕭國鑫、尹承遠、劉進金、遊明芳、王晉倫，2003。

SPOT 影像與航照資料應用於崩場地辨識之探討，航測及遙測學刊，8(4)：29-42。

蕭國鑫、劉進金、游明芳、曾義星，2005。航測與三維雷射掃描資料應用於九份二山地形變化分析，航測及遙測學刊，10(2)：191-202。

Glenn, N. F., D. R. Streutker, D. J. Chadwick, G. D. Thackray, and S. J. Dorsch, 2006. "Analysis of LiDAR-Derived Topographic Information for Characterizing and Differentiating Landslide", *Geomorphology*, Vol.73, pp.131-148.

Hsiao, K. H., J. K. Liu, C. C. Lau, and J. Y. RAU, 2009, Automation of Landslide Detection Using Optical Images and LiDAR Data, *Proceeding of Asian Conference on Remote Sensing*, Oct. 18-23, Beijing, China, CD-ROM.

McKean, J., and J. Roering, 2004, "Objective Landslide Detection and Surface Morphology Mapping Using High-Resolution Airborne Laser Altimetry", *Geomorphology*, Vol. 57, pp.331-351.

Parker, J. R., 1997, *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, Wiley Computer, New York.

誌謝

本研究感謝農委會 97 農科-7.4.1-務-e1 計畫支持，內政部提供 2005 年空載光達點雲資料，國立中央大學太遙中心提供衛星影像，研究得以完成，深致謝忱。

參考文獻

- 內政部，2005。辦理 LIDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案期中報告-2，共 141 頁，工研院能資所執行。
- 林務局，2005。先進航遙測應用技術開發(1/3)，行政院農委會九十五年度科技專案計畫研究報告，共十章，工研院能資所執行。
- 林務局，2007。先進航遙測應用技術開發(3/3)，行政院農委會九十七年度科技專案計畫研究報告，共八章，工研院能資所執行。

Integrating Airborne LiDAR and Color Aerial Photography for Landslide Interpretation

Chi-Chung Lau ^{1*} Kuo-Hsin Hsiao ¹ Jiann-Yeou Rau ² Jin-King Liu ³

Jer-Rong Wu ¹ Qun-Xiu Huang ⁴

ABSTRACT

In this study, a semi-automatic landslide classification method is proposed and implemented using both airborne LiDAR data and color aerial photographs. A man-machine interface is implemented with three-dimensional perspective display capability, thus to ease the manual interpretation and editing after a preliminary result of landslide polygons are generated by an automatic algorithm proposed in this study. Four parameters are used in the automatic algorithm, namely Greenness, Slope, OHM and Roughness. Greenness is derived from color aerial photograph and employed to define non-vegetated land of fresh scars of shallow-seated landslides. All the other three parameters are derived from LiDAR DSM and DEM to portray the geomorphometric characteristics of landslides. Thresholds are derived automatically from training areas and then are applied in real time to show the distribution of possible landslides. With the 3D interactive interface, the possible landslides are draped on 3D perspective landscape on the screen. This is convenient to assist the human expert to further modify the results by deleting erroneous ones or modify the boundaries of landslides visually. In addition, the interface system can go without the semi-automatic approach and just be used for visual interpretation solely on basis of the expert knowledge of feature locations, shapes, and types of landslides. Attribute table linked with the landslide spatial feature can also be established in this system. It is proved in this study that this is a practical and efficient system.

Keywords: Landslides, Digital Terrain Model (DTM), LiDAR

¹ Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

² Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

³ Senior Researcher, GEL, ITRI

⁴ Chief of Planning Section, Forest Planning Division, Forestry Bureau, COA

* Corresponding Author, Phone: 886-3-5915468, E-mail: cclau@itri.org.tw

Received Date: May. 13, 2010

Revised Date: Jun. 21, 2010

Accepted Date: Jul. 27, 2010

航攝數位影像於防救災工作之應用

葉堃生¹ 李茂園^{2*} 王韻皓³

摘要

本文簡述農林航空測量所應用新式航攝數位相機配合 GPS/IMU 進行防救災工作之製圖流程，從航空攝影、軌跡解算、正射影像製作、判釋數化乃至資料提供，並針對近年來發生的重大災害如「阿里山火災」、「八八水災」及「甲仙大地震」，鉅細靡遺地呈現本所從影像取得、高解析度多光譜正射影像製作及後端加值應用等作業方法，展現應用航攝數位影像於防救災工作之具體成果。航攝影像成果可應用在森林火災之 NDVI 影像判釋、數值地形模型產製、地形變遷偵測等災害之防救上。

關鍵詞：航攝數位相機、高解析度多光譜正射影像

1. 前言

台灣地區位處歐亞板塊之交界處，地質脆弱，易受颱風、水災、火災、土石流及地震等各類災害侵襲，且民國 88 年九二一地震災害後，使得部份地區的表土因地震的撼動而鬆散，提高了山坡地潛在之崩塌危機，因此每每發生颱風、豪雨等災害時，即造成山區嚴重的崩塌及大量的土石流。從民國 90 年桃芝颱風到 93 年敏督利及艾利颱風，天地無情的攻擊，也撕裂了美麗寶島的面貌。

爲了迅速掌握災情，爭取時效，通盤瞭解災區狀況，本所於災害發生後，把握適合空照天候，立即執行航攝作業，進行災區航攝影像蒐集，並建立緊急災害影像提供機制，爲簡化工作流程及提升傳統相機輻射解析力，更於民國 95 及 96 年各添購一台數位製圖相機 Z/I DMC (Digital Mapping Camera) 及空載多光譜掃描儀 Leica ADS 40 (Airborne Digital Scanner 40)，有效縮短了後製圖資之流程，並增廣了影像後端加值應用的效益，一貫且有效工作流程也具體展現在災情嚴重的八八水災後圖資成果即時提供上。

2. 設備介紹

林務局農林航空測量所爲全國性航遙測製圖之公務機關，主要任務爲使用航遙測飛機、航空攝影機、數化製圖儀器、資源調查儀器與經驗豐富之專業技術人員執行航測製圖及農林資源航遙測調查業務，提供鐵路、機場、港口、水庫、礦場等國家各項經濟建設規劃之基本資料，並作爲農業生產、森林經營、國土規劃、區域計畫、資源開發、土地利用等調查規劃之用。自民國 65 年至今已航攝並建置 80 萬張以上航遙測影像資料庫，除航攝原始影像外，尚有台灣地區各版次像片基本圖、林區像片基本圖及彩色正射影像圖等圖資，因此於災害發生時，可提供災區相關歷史影像資料，以供上級單位即時救災規劃使用，並於取得災後影像同時，迅速進行災前災後影像比對，獲取災害災情資訊，爲救災減災以及災後重建提供了重要依據。茲簡介本所現有防救災相關軟硬體設備如下：

2.1 航遙測飛機

目前航攝業務使用的航遙測飛機爲內政部空中勤務總隊所有之 Beech-200 及 Beech-350，其中

¹ 農林航空測量所製課 技士

² 農林航空測量所計畫管制課 技士

³ 農林航空測量所計畫管制課 課長

*通訊作者，電話：886-2-33437628, E-mail: ikonos168@gmail.com

收到日期：民國 99 年 04 月 06 日

修改日期：民國 99 年 05 月 06 日

接受日期：民國 99 年 05 月 21 日

Beech-350 自 98 年 6 月起，即因進廠預備進行五年大檢，無法使用，故「莫拉克風災」及「甲仙大地震」均使用 Beech-200 飛機進行航攝任務。因飛機需配合國家搜救指揮中心統一調度，原則上駐紮於台中清泉崗機場，便於馳援全國各地，平時航攝任務亦於該機場起降。

2.2 航攝數位相機

2.2.1 Z/I DMC (圖 1)

成像原理與傳統相機類似，採用框幅式(Frame)攝影，相機配有 4 個高解析度全色態(Panchromatic)電荷耦合裝置(Charge Coupled Device, CCD)鏡頭及 4 個原解析度 R、G、B、NIR 多光譜(Multi-Spectrum) CCD 鏡頭。其中全色態鏡頭之像元大小為 $12\ \mu\text{m}$ ，焦距(影像融合後)為 120mm，輻射解析度為 12 bit。

Z/I DMC 影像在正射處理時，於航帶內及航帶與航帶之間，皆需再經過鑲嵌處理。框幅式影像在資料管理上較為方便，但在影像融合及鑲嵌作業上需花費較多時間。



圖 1 數位製圖相機 DMC

2.2.2 Leica ADS 40 (圖 2)

採用推掃式(Push Broom)攝影記錄地面訊息，原理與傳統狹縫相機相似，所得影像呈帶狀型式，

同一航線所得之影像，可不需經過鑲嵌處理，即可不間斷瀏覽，色調也較一致。多光譜影像(R、G、B、NIR)部分，同時備有 2 組置於不同視角之線狀 CCD 感測器(後視及底視)，全色態部分則有 3 組不同視角之線狀 CCD 感測器(後視、底視及前視)，經組合後，可獲得連續之立體像對，供立體觀察與數值航測地形圖測繪等應用。各波段之線狀 CCD 感測器像元大小均為 $6.5\ \mu\text{m}$ ，焦距為 62.77 mm，輻射解析度為 12 bit，因 R、G、B、NIR 波段與全色態波段同樣為高解析度，故不需再進行影像融合，即可直接獲取的高解析度的彩色影像，且鑲嵌作業僅需針對航帶與航帶之間，較符合緊急災害製圖所需，但其帶狀影像的儲存方式，與本所現有依圖幅或片幅之資料管理方式較不相容。



圖 2 空載多光譜掃描儀 ADS 40

2.3 GPS/IMU

本所航攝數位相機皆配有高精度 GPS (Global Positioning System)/IMU(Inertial Measurement Unit)定位裝置，GPS 可提供高精度的位置、速度和時間，而 IMU 除可提供位置及速度外，還可提供高精度之姿態參數，但 IMU 於長時間穩定飛行後，會產生方位漂移誤差，此時可根據 GPS 的位置資料予以修正，如圖 3，兩者組合有極高的互補性，適於直接獲取完整之外方位參數 (Leica Geosystems,2007)。

為提升 GPS/IMU 之解算精度及解算成功率，本所執行航攝任務時皆依以下 2 種原廠建議之初始化方式進行 (Leica Geosystems,2007)：

1. 地面初始化 (Ground Start)：飛機起飛前停止於地面接收 5 分鐘之 GPS 資料，以求解週波未定值及使 IMU 定向歸零，飛機降落後亦靜止接收 5 分鐘之 GPS 資料，以便做正反算求解。此方式前提為基站與飛機起降場、待拍攝目標區域之基線距離小於 50 公里，俾順利消去大氣中電離層及對流層等誤差。
2. 空中初始化 (Air-Start)：當基站與待拍攝目標區基線距離太長時，應使用空中初始化方式。即於待拍攝目標區前，先穩定飛行 5 分鐘以上，以求解週波未定值，之後做 S 轉彎或 8 字繞行，激活 IMU 避免直飛時產生之漂移誤差，再開始攝影，航攝結束後依相反步驟再初始化 1 次，以做正反算求解，此步驟也稱做空中校準 (In-flight alignment)。空中初始化之前提同樣

為基站與待拍攝目標區域之基線距離為小於 50 公里，如圖 4，俾順利消去大氣中電離層及對流層等誤差。如於空中發生 GPS 斷訊或其他不可抗力使週波未定值須重新求解時，也應重新執行空中校準，提高 GPS/IMU 之求解精度。

GPS/IMU 求得之外方位參數再加上已知的相機內方位參數，便可於立體像對中直接計算出影像上任一點的坐標，稱為直接地理對位 (Direct Georeferencing)。與傳統利用大量地面已知控制點來反演外方位參數方式比較，直接地理定位可大幅節省作業時間，對災後資料快速解算有極大之助益。

本所 Z/I DMC 相機配備的 IMU 是 Applanix 公司之 POS AV 510，Leica ADS 40 相機配備的是 Leica IPAS 10 CUS6，理論上兩者後處理之 GPS/IMU 定位精度皆可達 5-30 公分 (Mostafa *et al.*,2001)。

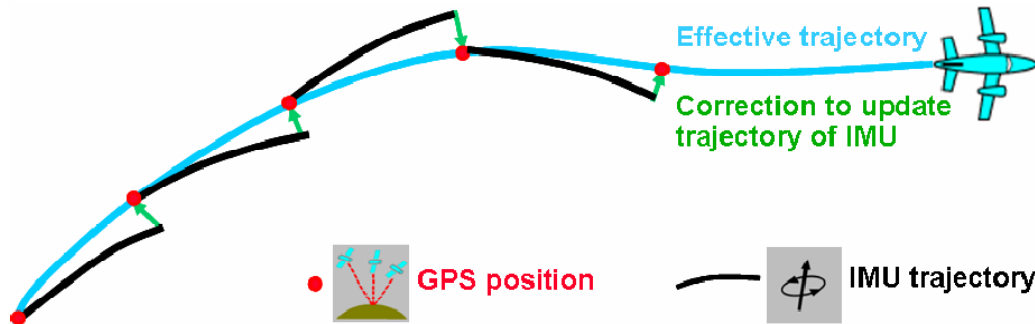


圖 3 GPS 修正 IMU 之方位漂移誤差 (Leica Geosystems,2007)

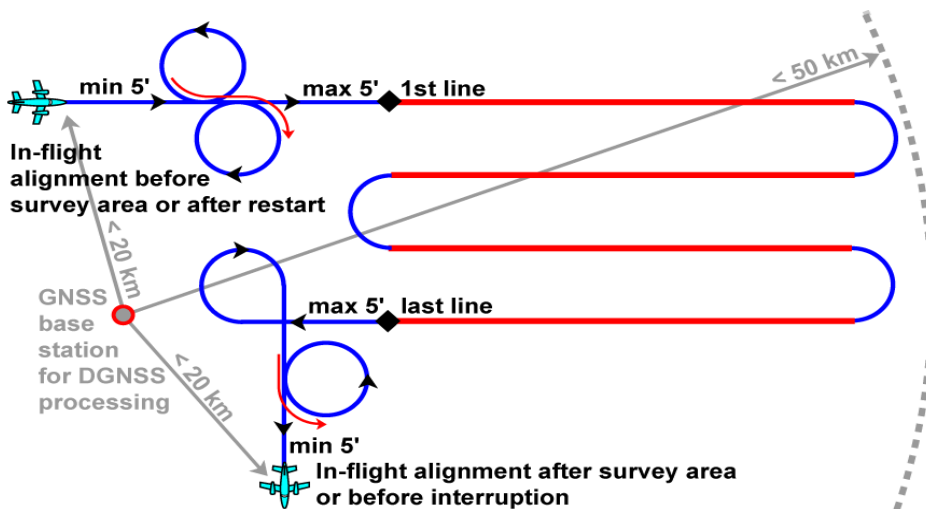


圖 4 空中校準示意圖 (Leica Geosystems,2007)

2.4 影像後處理軟體暨影像產品類別

航攝數位相機拍攝所得之原始資料 (Raw Data)，尚非一般影像處理軟體所能讀取之格式，也未達應用階段之正射影像標準，因此針對不同相機，需再分別使用原廠搭配之影像後處理軟體進行解壓縮乃至正射糾正，始能產生可視之影像產品。

2.4.1 Z/I DMC 影像產品類別

Z/I DMC 影像之解壓縮及影像融合 (Image Fusion)，係使用原廠提供之 PPS (Post-Processing Software)、DIA (Digital Image Analysis) 等軟體，後續空三、正射糾正、影像色調調整與鑲嵌等作業，則使用 ISAT (ImageStation Automatic Triangulation)、OrthoPro、OrthoVista 等軟體分別處理。GPS/IMU 之解算則使用 Applanix POSPac (Position & Orientation System) 軟體。

Z/I DMC 之影像產品，可視應用目的，於後處理各階段，選擇以下之輸出結果 (Intergraph Corp.,2010)：

1. 中繼 (Intermediate) 影像 (未融合之 R、G、B、NIR 及 Panchromatic 共 8 個)。
2. 高解析度全色態 (Panchromatic) 或多光譜 (R、G、B、NIR) 原始影像 (單像或立體像對)。
3. 高解析度全色態 (Panchromatic) 或多光譜 (R、G、B、NIR) 正射影像。

因原始幅射解析度可達 12 bit，故影像輸出時皆可選擇 16 bit 或 8 bit 檔案格式。

2.4.2 Leica ADS 40 影像產品類別

Leica ADS 40 影像從資料下載、解壓縮至 L0 等級、糾正至 L1 立體像對乃至 L2 正射影像產製，皆可透過原廠 GPro 或 XPro 的支援，其中空三、正射鑲嵌使用 LPS (Leica Photogrammetry Suite)、Orima、OrthoVista 軟體處理，GPS/IMU 之解算則使用 Leica IPAS (Inertial Position & Attitude System) 及 Waypoint GrafNav/GrafNet 軟體。

Leica ADS 40 之影像產品，可視應用目的，於後處理各階段，選擇以下之輸出結果 (Leica Geosystems,2007)：

1. L0 等級—獨立波段 (Single band) 帶狀影像。
2. L1 等級—多光譜 (R、G、B、NIR) 帶狀影像 (單視角或立體像對)。
3. L2 等級—多光譜 (R、G、B、NIR) 帶狀正射影像。

因原始幅射解析度可達 12 bit，故影像輸出時除(1)固定為 16 bit 之外，其他皆可選擇 16 bit 或 8 bit 檔案格式。

2.5 數值航測工作站與立體觀測數化儀

本所早期以底片或沖洗照片，作為地類判釋或於類比及解析製圖儀進行立體測圖作業。航攝作業數位化後，先使用陰極射線管 (Cathode Ray Tube, CRT) 螢幕搭配立體觀測設備，作為數值航測工作站立體測圖之觀測配備，近年因液晶立體觀測設備面市，已全面使用反光式液晶立體螢幕，作為立體測圖主要觀測配備。

2.5.1 數值航測工作站與數值地形圖測製

數值航測工作站為本所航測立體製圖之主力設備，作業項目包括航測專案建置、空中三角測量平差、航攝數位影像正射糾正處理、影像色調調整、鑲嵌、正射影像圖產製、地形圖立體測製、數值地形模型產製等。過往本所採全人工方式測繪等高線地形圖，並產製數值地形模型，其精度高但速度較慢。98 年八八水災發生後，本所為救災即時性需要，已具備以 Inpho Match-T 軟體自動化採集地形資料之作業能力。

2.5.2 立體觀測數化儀與判釋作業

另本所亦於地理資訊系統 (Geographic information system, GIS) 軟體外掛立體觀測模組，

搭配反光式液晶立體螢幕，使單純之 GIS 軟體，亦具備簡易立體數化作業之能力。傳統判釋作業必須於比對照片與正射影像圖後，於簡易立體鏡或反光立體鏡下，以人工方式轉繪目標於正射影像或像片基本圖，再進行人工數化作業。利用立體判釋數化儀，能取代本所原本之傳統照片判釋與轉繪作業，無需轉繪，只需備妥立體像對專案後，即可進行立體判釋及數化，所得成果為具備地理座標之 3D 或 2D-shapefile，作業之一貫性與整體性高，不可不謂作業型態與效率之重大轉變。在歷次天災中，本作業模式便發揮極大功效，能協助迅速提供空間資料。

3. 工作方法與流程

測繪科技日新月異，本所製圖流程在引進航攝數位相機後，正式由解析攝影測量邁入數值攝影測量的時代，不僅大幅簡化作業流程，亦能符合災後即時製圖所需。以下簡要說明本所以數位化航攝技術支援防救災之方法：

3.1 航線規劃

重大天然災害總是無法預期的，為避免天災發生後，需費時規劃航線，本所於平時便已建立一套涵蓋全國之航線規劃圖，航線設計沿五千分之一基本圖圖幅中心線南北向飛行，像幅寬度大於圖幅寬度，航帶間重疊度大於 25%，航帶內前後重疊度大於 65%，再參考全國數值地形模型 DTM (Digital Terrain Model) 規劃不同航高，使符合設計平均地面解析度約 27 公分。規劃後之航線平時可用於國土資訊系統之航遙測影像資料庫蒐集，救災時可視災區範圍直接套用，爭取時效。如局部性災害嚴重有特殊需求之影像，亦可快速規劃小範圍之航線，以達需求。

3.2 航空攝影

航空攝影的目的在於拍攝清晰無雲，適合製圖及應用之影像，據本所歷年經驗，台灣本島全年適

合航攝之日數不超過 100 日。遇有緊急重大災害時，本所為了迅速掌握災情，通盤瞭解災區狀況，主動蒐集災區相關資訊一如各林管處現場人員通報、國家災害防救科技中心需求及媒體報導等，再劃定待拍攝區域，不論雲量多寡，立即執行航攝作業，進行災區航攝影像蒐集。

3.3 影像下載及 GPS/IMU 解算

航攝數位影像資料量大，每日攝得之原始資料經後處理後可達 1TB 以上，後處理之作業量繁重，且航遙測飛機駐紮於台中清泉崗機場，為有效縮短影像處理時間，本所平日之航攝原始資料，原則上皆先於台中空照室下載 GPS/IMU 觀測資料與影像解壓縮，並進行方位解算。

GPS/IMU 解算分兩階段，先將飛機上移動站之 GPS 觀測資料與地面基站觀測資料進行動態差分解算，計算出正確之 GPS 軌跡後，再與 IMU 觀測資料進行勻化 (Smoothing) 處理，經曝光時間記錄內插計算，可得 Z/I DMC 相機曝光點之外方位參數，或輸出 Leica ADS 40 相機軌跡檔。

在影像下載部分，Z/I DMC 相機之原始資料解壓縮後，共可解得 8 張單波段中繼影像，其中 4 張全色態影像，經 PPS 軟體依重疊區域自動匹配，可鑲嵌成 1 幅高解析度之全色態影像；若再將 4 張多光譜影像進行影像融合處理，則可得到一高解析度之多光譜影像。影像於台中空照室處理至以上階段後，定期由專人持送回台北辦公室，進行後續作業。

ADS 相機因不需進行影像融合，故僅需先進行原始資料下載及 GPS/IMU 軌跡檔解算工作，再定期將原始資料及軌跡檔由專人持送回台北辦公室即可。

3.4 DTM 之產製

航測法數值地形資料產製，皆為共線方程式 (Collinearity Equations) 之應用，須具備已有地理座標系統之光學立體模型，DMC 航攝數位影像可經賦予外方位後，組合出正確之光學立體模型；而

Leica ADS 40 影像，則透過組合原始單波段 L0 影像，經附加軌跡檔(即連續之外方位參數)，糾正因飛機運動及姿態改變所造成影像扭曲，經重新取樣糾正並旋轉影像到核線上，即為 L1 影像。組合不同視角之 L1 影像即可形成立體影像對專案，供測圖使用。

本所產製數值地形資料方式，分為自動化與專業人工數化兩種方式。自動化產製地形資料採用影像自動匹配原理獲得地形高程值；人工數化則須在立體觀測設備下，進行數值地形圖測繪工作。兩種方法各有優劣，可依需求資料之品質精粗程度與時間緊迫性決定。一般來說，緊急災害製圖所需之數值地形資料以自動化產製較符合需求。

3.5 航攝數位影像的正射產製

將透視投影之航攝數位影像糾正為正射投影，並賦予正確地理座標與比例，此程序稱為正射糾正 (Ortho-Rectification)，糾正所得之影像即為正射影像 (Ortho-Image)。

DMC 影像正射糾正原理與傳統底片式相機類似，因每張影像涵蓋範圍較小，須先將連續數張影像進行正射糾正，經鑲嵌後依圖幅定義之範圍裁切存檔，才能產製一幅完整之數值正射影像。

Leica ADS 40 影像成像方式為狹縫推掃式感測，所成影像為數萬條掃描線組成之帶狀影像，故正射糾正須逐線糾正透視投影產生之位移。外方位元素以軌跡檔形式存在，配合 DTM 資料可將 L0 影像糾正為帶狀正射影像，稱為 L2 影像。由於 Leica ADS 40 影像每一航帶內連續不間斷之特性，所得 L2 影像僅需進行色調調整後，便可依五分之一基本圖幅範圍依序裁切存檔，完成正射影像圖之產製作業。

本所規劃生產之多光譜正射影像，採用 16bit TIFF 格式儲存，包含 R、G、B、NIR 等 4 個波段，較傳統 8 bit 影像具更細之灰階變化(即更高之輻射解析度)，且保有近紅外光波段，可供遙測分析使用，並可依需求組合或轉換成其他產品，因而保有應用與格式轉換之最大彈性。

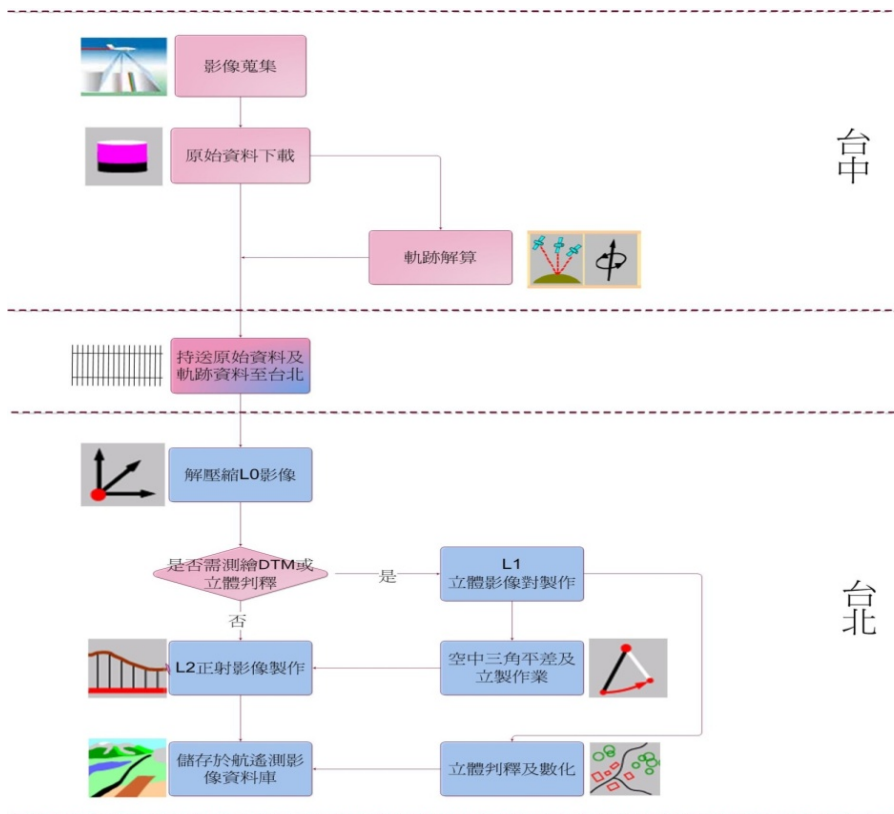


圖 5 一般防救災工作流程

3.6 影像判釋及數化

災害後之地面調查往往需花費許多人力與時間，尤其是大面積之受創，利用航遙測多光譜影像資料，先進行影像分類及影像變遷偵測等技術可自動迅速判釋災區範圍，對於災害受損情形較有初步通盤之瞭解，其後再針對災害局部區域，於立體觀測數化儀或電腦螢幕直接進行影像細部判釋，並透過數值化的作業，將災害成果轉化為具有地理座標的數值圖檔，獲得更精準之災區資訊。圖 5 以 Leica ADS 40 相機為例說明本所一般防救災工作流程。

4. 工作實績

4.1 阿里山火災

4.1.1 影像蒐集

98 年 2 月 19 日猛烈的祝融之火，燃燒著大埔事業區第 110 林班地轄區內的林木，在林管處、消防隊、空勤總隊及在社區民眾不眠不休全力投入滅火工作，於 20 日下午 2 時許撲滅。為能迅速提供上級機關災害資訊，本所立即於 98 年 2 月 21 日起數日，利用航攝數位相機進行影像蒐集作業，由於當地天候長期雲霧繚繞，不易獲得完整之航攝成果，計出動 5 架次前往當地拍攝，至 3 月 4 日始獲得完

整清晰之影像。

4.1.2 正射影像製作

因本次任務以 Z/I DMC 相機執行，原始之高解析度彩色影像由台中移送至台北辦公室後，隨即進行正射糾正作業，並製成災前、災後之多光譜正射影像及假色（CIR）影像。

4.1.3 判釋與分析

森林火災面積廣，人工數化判釋費時，故本所以自動化遙測分類方式進行，其方法如下：由 Z/I DMC 影像產製之多光譜正射影像中，利用各波段之光譜值，包括 R、G、B 與近紅外光(NIR)波段等，可據以計算出災前與災後之植生指標(NDVI)影像。由於植物生理與結構對紅外光的物理特性明顯，經 NDVI 計算後，可與非植生地區產生明顯差異。經計算前、後期 NDVI 之差異值，可明顯區分出植生變化區域，對於火災跡地之自動判釋與萃取及面積計算，幫助相當大。以下為多光譜影像分析獲得之相關成果。圖 6 為火災跡地北區之前、後期自然色影像，可肉眼約略判釋，圖 7 為前後期多光譜影像之紅外光假色影像，已可以肉眼明顯區分。圖 8 則計算其植生指標值，最後計算前、後期植生指標之差值，則如圖 9，可更明顯凸顯火災跡地。

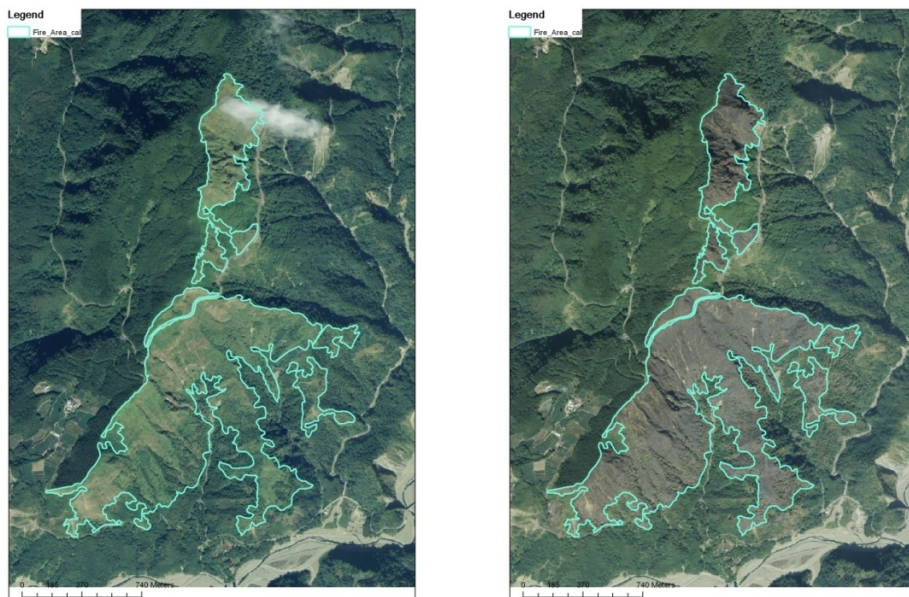


圖 6 火災跡地北區前、後期自然色影像

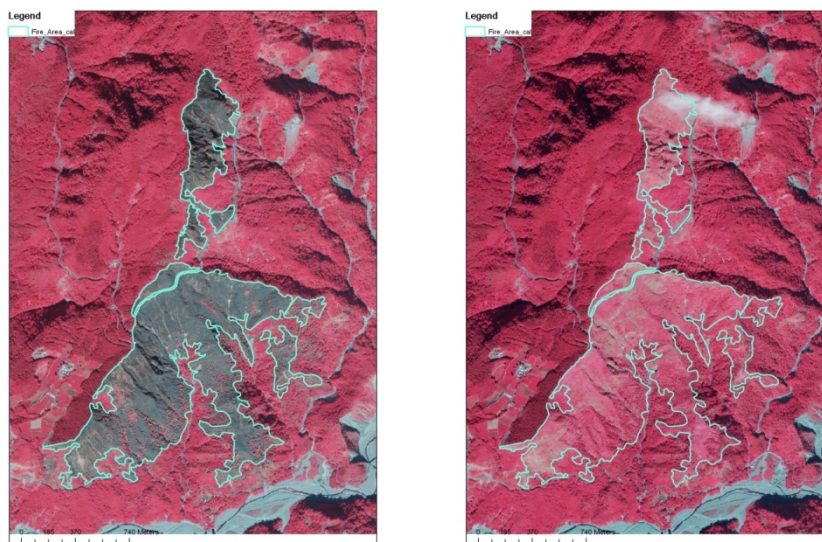


圖 7 火災跡地北區前、後期多光譜影像之紅外光假色影像

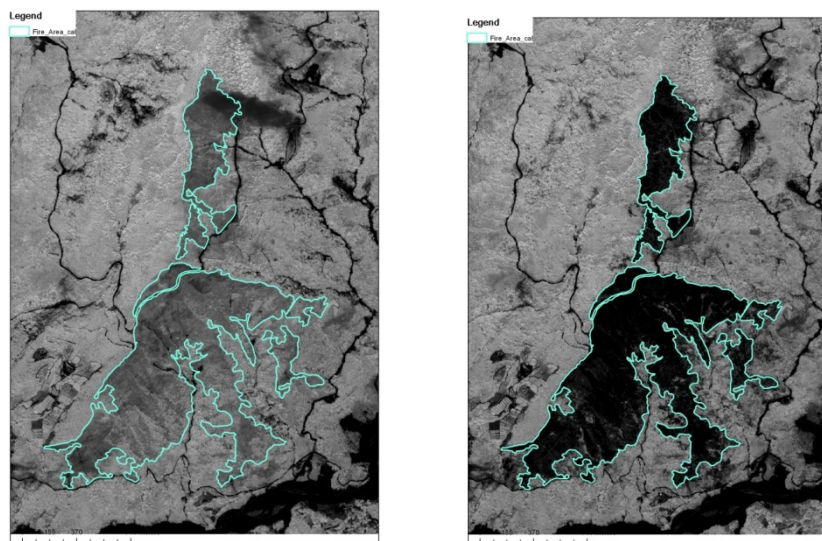


圖 8 火災跡地北區前、後期之 NDVI 影像

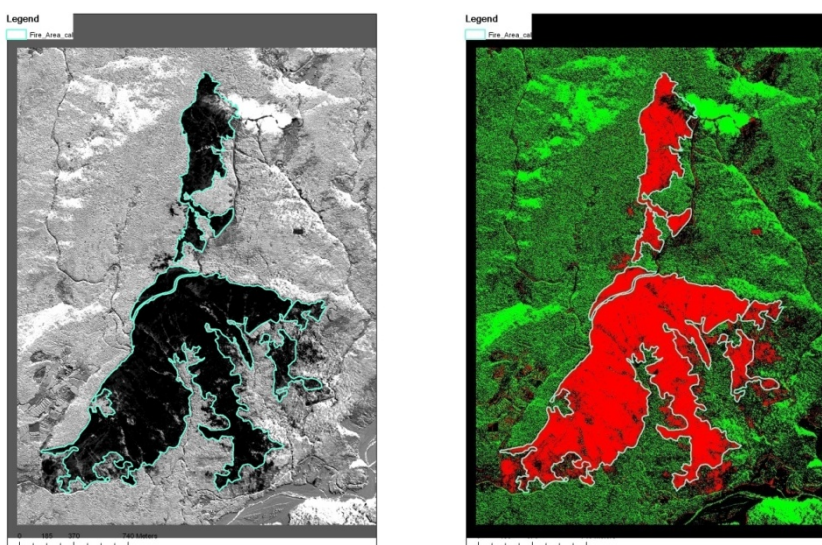


圖 9 火災跡地北區前、後期之 NDVI 差異值影像

4.2 八八水災

4.2.1 影像蒐集

98年8月7日中度颱風莫拉克來襲，兩天兩夜的豪大雨，導致台灣南部與東部平原惡水高漲，山區土石滾滾而下，造成人民生命財產極大損失。

「八八水災」發生之後，數個地區陸續傳出災情，如小林村、那瑪夏鄉之民族、民權、民生等村，本所隨即積極地蒐集災區影像資料並規劃航線如圖10。但是，天公不作美連日多雨，待雨勢稍歇，本所同仁協同空中勤務總隊飛行員刻不容緩地出動任務，前往災區蒐集影像資料，當時颱風外圍環流仍影響台灣，為克服雲層過多之困擾，儘管任務區域位於山區且當地救難直升機起降頻繁，空域受限，航攝任務仍改採降低航高之雲下作業方式進行，在天候、地形及空域的多重困難下，執行航攝任務比平時困難許多。

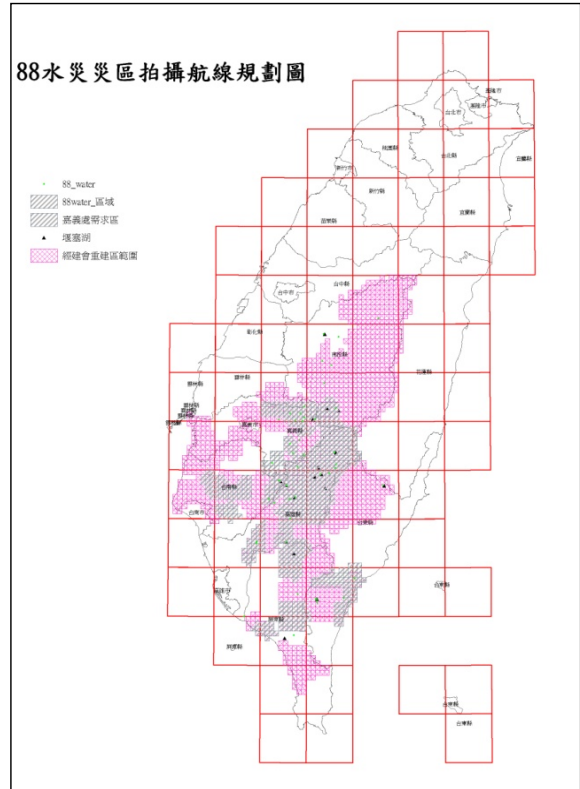


圖 10 八八水災航線規劃圖

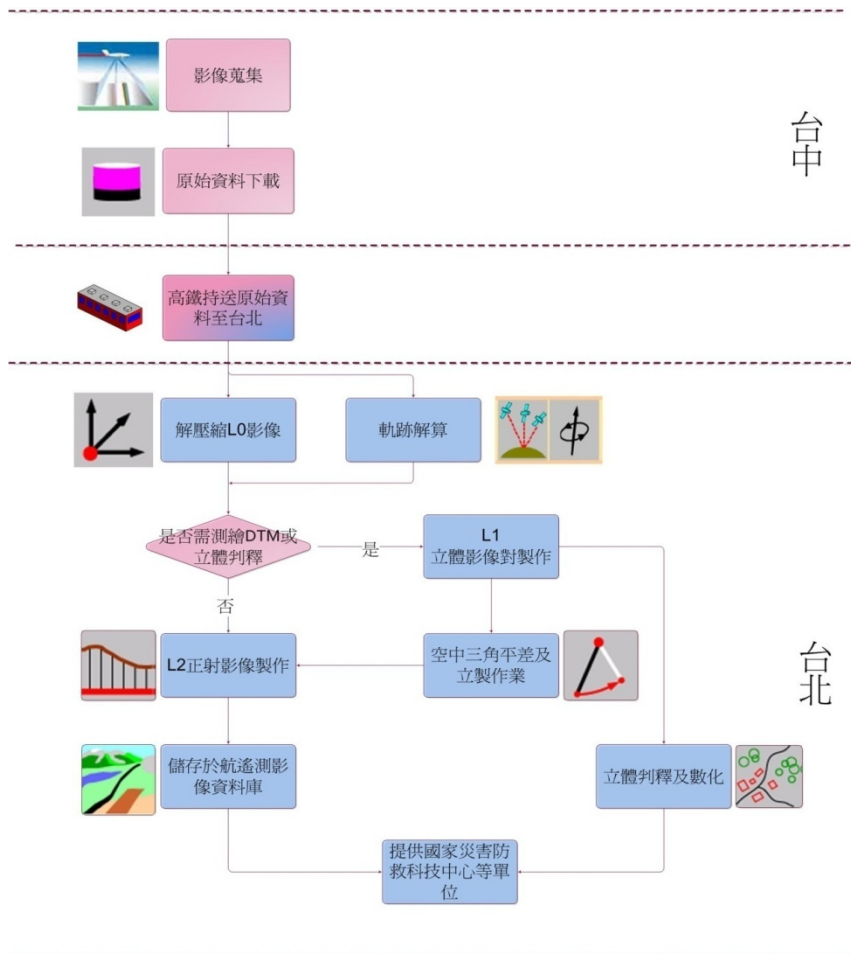


圖 11 八八水災緊急應變工作流程

因災情慘重且受創面積廣，通訊及山區公路也無法倖免於難，在災區資訊無法得知情況下，以航遙測圖資正確研判災情更顯重要。為此，本所改變以往工作流程，務使每日拍攝之影像，翌日即可提供國家災害防救科技中心及相關單位使用。八八水災之災害緊急應變工作流程如圖 11。

航攝任務採用不需進行影像融合及鑲嵌處理之 Leica ADS 40 相機，以節省後處理時間。因機場與辦公室分處北中兩地，且影像原始資料量大，無法以現有之網路通訊方式傳回台北。故救災期間本所於每日航攝任務結束後，由台中同仁立即下載原始資料，派員搭乘最近班次之高鐵，以可攜硬碟將資料火速送回台北，進行後續處理。

4. 2. 2 正射影像製作

拜同仁不計辛勞及高鐵便利之賜，當日拍攝之原始資料於晚上可送達台北辦公室中，加班之同仁利用解出 GPS/IMU 等定位、姿態與曝光時間等原始資料，並進行航攝精確軌跡檔計算。解算軌跡檔作業之同時，亦開始進行影像解壓縮作業，以節省等待時間。配合災害即時製圖，影像後處理流程亦稍作調整，緊急災害時僅解壓縮並處理底視之多光譜影像，立體像對與測圖工作則視需求再行製作。八八水災產製之 L2 正射影像解析度為 0.25 公尺，為提升正射影像產製速度，節省影像檔傳遞時間，本所決定產製 8 bit 之多光譜正射影像，並由塔像中萃取 1 公尺解析度影像作為略圖，供災情報告與大圖輸出等目的使用。於此階段所產製之正射影像，皆以最快速度供應國家災害防救科技中心及相關單位救災應用。

4. 2. 3 數值地形模型產製

八八水災所帶來的災害中，最引起關注的便是小林村事件，為釐清引發災情之原因，本所接獲指示提供小林村災前及災後之地形資料。經討論訂定作業流程包括災前地形資料蒐集、災後地形資料測繪、水災前後之數值地形模型、水災前後地形資料驗證(初步計算與分析)等。

4. 2. 3. 1 災前地形資料蒐集

由本所林區像片基本圖測製計畫中，轉換所測繪之 3D 等高線地形圖而成。測繪所用之影像為民國 90 年 12 月拍攝。

4. 2. 3. 2 災後地形資料產製

4. 2. 3. 2. 1 航攝數位立體模型準備

為獲得較佳之地形測繪精度，並與災前地形資料基準一致，本專案採用多航帶航攝數位影像，配合 24 個地面控制點，進行空中三角測量與平差計算，以修正相關偏差，獲得比單獨使用 GPS/IMU 更精確軌跡參數，據此製作 L1 影像立體模型。使用之航攝數位影像為 98 年 8 月 21 日與 8 月 22 日所拍攝。

4. 2. 3. 2. 2 災後地形圖測繪

災後地形圖之測繪作業，以災前地形圖為基準，於地形變化處，即本次水災造成之崩落與河道土石堆積處，進行人工 3D 等高線修測。人工測繪等高線雖較為費時，但作業方式卻可輕易避免災後地形變化處資料與災前地形接合問題，減少資料後續處理的複雜度。

4. 2. 3. 3 產生水災前後之數值地形模型

將蒐集之災前數值等高線檔與災後修測之 3D 數值等高線檔，依序進行不規則三角網計算(即 TIN)、規整網格資料取樣、資料型態轉換等步驟後，轉換為數值地形模型，以方便後續應用(圖 12、13)。

4. 2. 4 水災前後地形資料計算與分析

本次災害相關分析與計算，皆藉助 GIS 相關分析工具達成。主要分析方式為空間疊合、網格運算(raster)與土方計算等工具，土方分析則以柱體法為計算方式。

水災前後地形變化計算方式為：將數值地形模型轉換為網格形式後，以減法運算，將後期地形減去前期地形，即可獲得地形變化差值模型。利用等值線計算與暈渲圖分級著色等方式，可協助將分析成果視覺化，以利判讀。

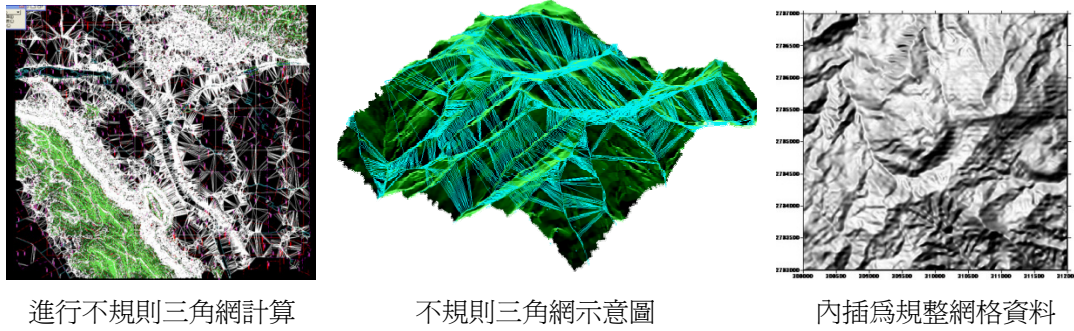


圖 12 等高線轉換為不規則三角網、與規整網格資料轉換流程示意圖

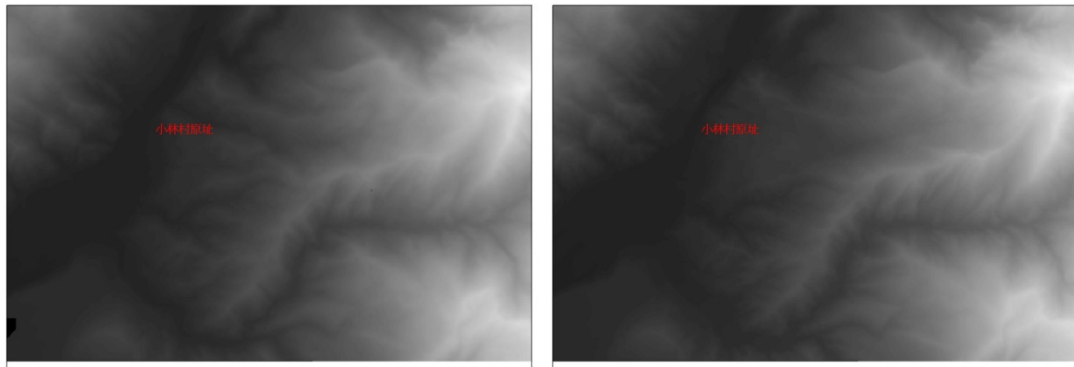


圖 13 小林村災前(左圖)、災後(右圖)DTM 量渲圖

4. 2. 4. 1 水災前後地形變化等差值圖

將地形變化差值模型進行等值線計算，設定每 10 公尺計算一條等值線，得成果如圖 14，小林村上方之最大崩落高差達 80 公尺。

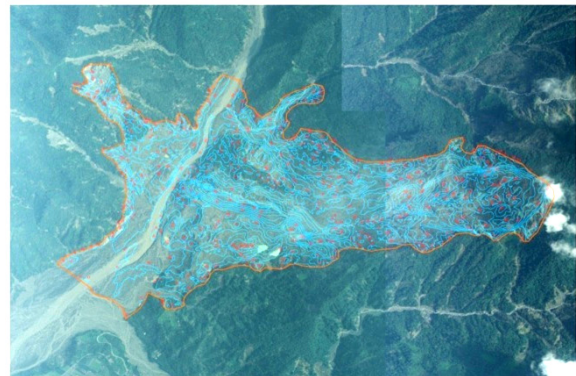


圖 14 小林村地形變化等差值圖

4. 2. 4. 2 水災前後地形變化等差值量渲圖

以連續色調表示地形變化，負值為崩落，正值為堆積。(如圖 15)

4. 2. 4. 3 水災前後地形變化挖填方圖

以地形無變化點為分界，可將崩落與堆積處區分開來。(如圖 16)

4. 2. 4. 4 水災前後土方計算

經計算得小林村區域內，土方總流失面積約 888,100 平方公尺，流失土方約 25,673,847 立方公尺，土方總堆積面積約 1,888,575 平方公尺，流失土方約 25,212,521 立方公尺。

除了小林村區域外，尚針對旗山溪上游及太麻里溪區域進行災前後河道變化圖及河道挖填方圖分析，成果如下圖 17 至 20。

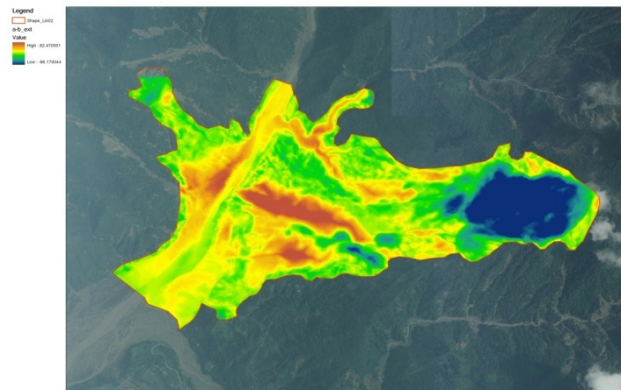


圖 15 小林村地形變化等差值量渲圖

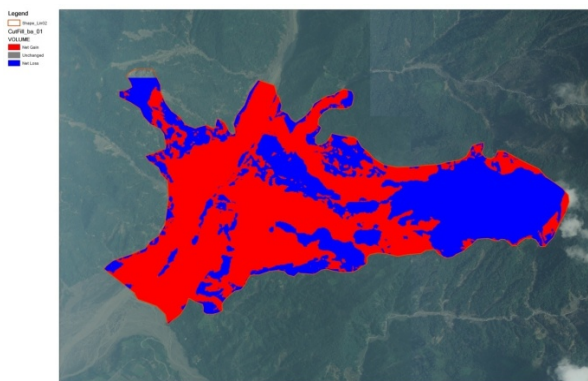


圖 16 地形變化挖填方圖

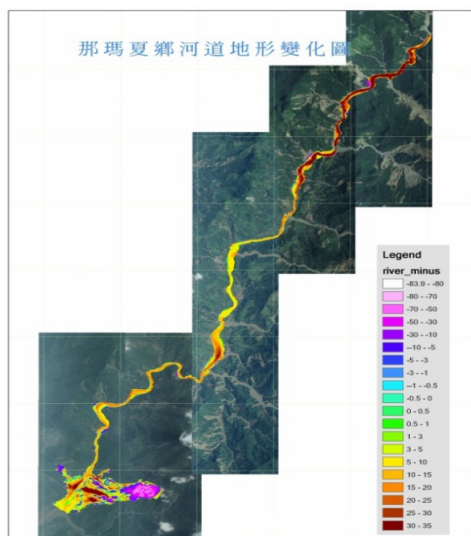


圖 17 旗山溪上游至小林村太麻里溪水災前後河道地形變化圖

4. 2. 5 立體判釋及數化

莫拉克颱風帶來相當於一整年的降雨量，部分山坡因泥石含水飽和引發地滑，崩落之土石阻斷水流形成堰塞湖。堰塞湖之壩口並非不含水之泥塊，在含水量及水壓不斷增大的情形下引發潰堤，大量激流引發另一次土石流，更造成中、下游沿岸居民身家財產嚴重的威脅。為能掌握堰塞湖可能造成之影響，本所接獲指示調查南部各流域之堰塞湖，並針對較大型之堰塞湖進行計算災前災後之水位變化。作業程序包括堰塞湖判釋與定位、堰塞湖立體數化與水體積估算。(如圖 21)

4. 2. 5. 1 堰塞湖判釋與定位

於正射影像產製完成後，利用假色影像，進行半自動判釋與數化，並於本所結合 GIS 與立體觀測功能之立體觀測數化儀，進行水面 3D 數化、堰塞口高程測量、溢流口寬度量測等作業。

4. 2. 5. 2 堰塞湖水體積估算

水體積之計算方式為以水面積乘上高程值所得之立方體體積，扣除相同面積災前地形模型所包圍之土方而得。然堰塞湖所填滿範圍內並非全數為水，實際尚包含沉積於水面下之泥、石等，故所得之水體資訊僅能作為參考。(如圖 22)



圖 18 太麻里溪水災前後河道地形變化圖



圖 19 太麻里溪風災前後河道挖填方圖

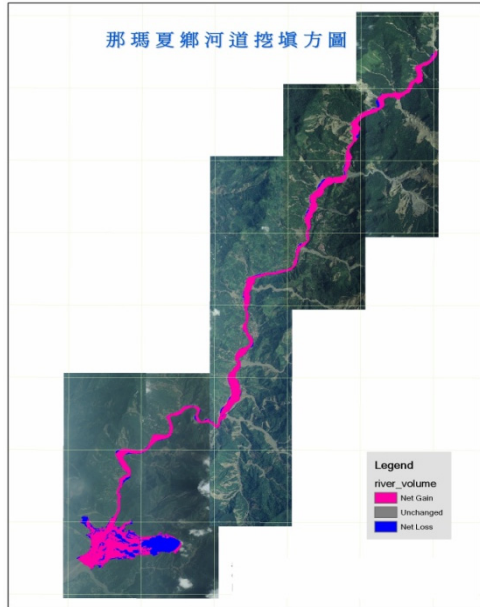


圖 20 旗山溪上游至小林村太麻里溪風災前後河道挖填方圖

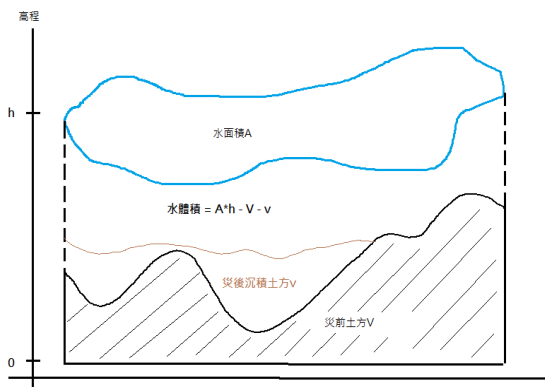


圖 21 水體積計算示意圖

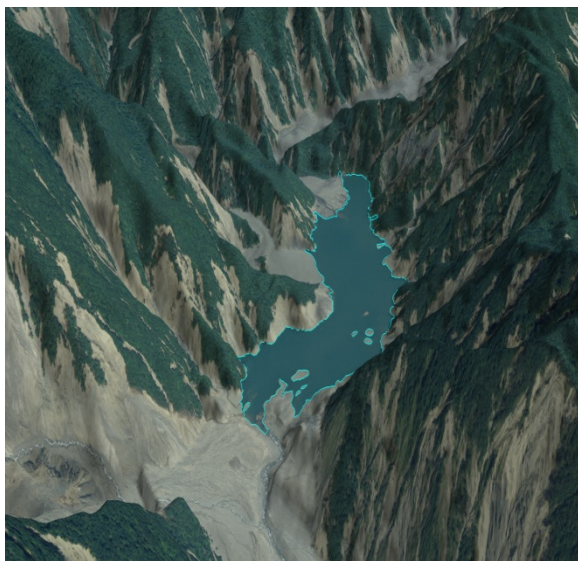


圖 22 太麻里溪上游堰塞後 3D 視覺模擬圖

除堰塞湖外，為精確研判其餘災情，本所於正射影像完成後，緊接著進行各災區災前災後影像比對。有經驗之操作人員利用電腦螢幕將正射影像局部放大，進行地毯式比對，找出變異大之區域，判釋說明災前災後變異情形，並分析計算災害受損面積。因篇幅關係，本文僅展示 1 區災前災後比對影像資料。(如圖 23)

針對本次重災區小林村、新發村及民族村大型機具開挖村落，本所比對災前災後正射影像，並判釋數化房屋毀損處向量圖檔，套疊彩色正射影像圖，提供為現場開挖之參考依據。(如圖 24)

由於八八水災造成台灣大範圍的土石流及崩塌地，而僅以航攝能量尚無法立即取得災區全區影像進行崩場地判釋分析，因此為迅速了解災區崩塌情形，本所委託國立中央大學太空及遙測研究中心，運用衛星影像提供大範圍及光譜影像分類之特性，先迅速產製災區崩場地的位置與面積，如圖 25、圖 26 (行政院農業委員會林務局農林航空測量所，2010)。在對大範圍的災區崩場地有初步的瞭解後，接著利用災區正射影像高解析度之特性，進行局部精度較高之判釋數化及計算面積，並結合林地及集水區資料進行分析比對，以做救災防災的根據與參考。

4.3 甲仙大地震

4.3.1 影像蒐集

相較於八八水災後天氣狀況不佳飛機無法出勤，99 年 3 月 4 日發生之甲仙大地震，本所同仁不待災情傳出，當日即已前往災區上空執行航攝任務。同八八水災建立之流程及經驗，航攝任務結束後，立即下載原始資料，並存放於可交換之硬碟中，派員搭乘最近班次之高速鐵路，火速送回台北，進行後續處理。由於當日災區雲幕較低，於接近雲下拍攝三條航帶之影像後，即因相機窗口霧氣影響，中止航攝作業，但已有品質相當之航攝成果，可供初步判釋與數化建檔等作業。本所另於 3 月 6 日進行另一架次之航攝作業，獲得更多且完整之航攝原始資料。



圖 23 台東南迴公路（金崙溪段）一八八水災災前災後航攝影像比對圖



圖 24 高雄縣那瑪夏鄉民族村災前災後房屋毀損點位影像比對圖

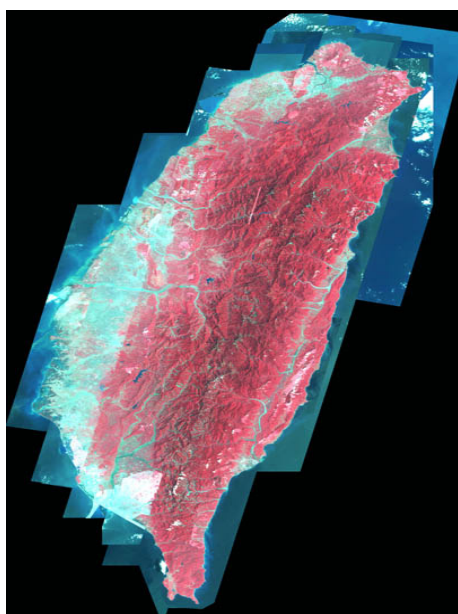


圖 25 98 年災後福衛二號全島鑲嵌影像 (有雲之部份地區以 SPOT5 或 SPOT4 取代)

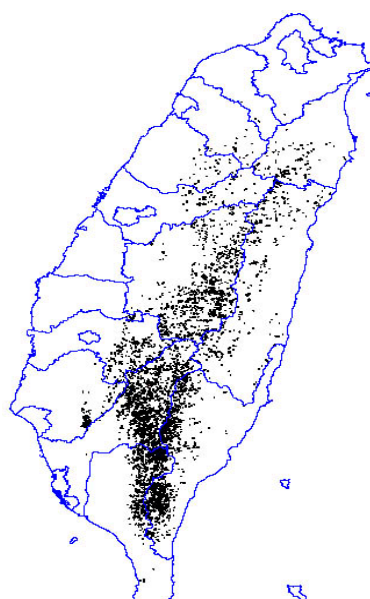


圖 26 災後崩塌地分布位置

4.3.2 正射影像製作

3月4日所拍攝範圍涵蓋約230平方公里，包含3條航帶共28幅圖幅，由於範圍相對較小，加上DTM等相關資料準備充足，於當日晚間9點即已完成正射影像產製作業。分布圖如圖27。

3月6日所拍攝範圍約1300平方公里，包含8條航帶共174幅圖幅，分布圖如圖28。由於範圍相當大，故於事先估計含人員作業時間，需耗時約24小時，為節省等待時間，提前達到初步判圖需求，再次就作業方式進行調整。於原始資料解壓縮後，立即進行1公尺解析度之L2正射影像輸出，接著進行色調調整與圖幅裁切輸出，供判釋與出圖使用。隨即再由解壓縮後之原始資料再次進行0.25公尺L2正射影像製作，依前述之格式與產品形式

輸出。修正後之甲仙大地震緊急應變工作流程如圖29。

4.3.3 立體判釋及數化

由於此次地震災區範圍較八八水災小，且天候狀況較佳，本所出動2架次即已蒐集足資應用之影像，進行後續判釋作業。由於八八水災時造成之崩場地尚未復育完全，為判釋地震是否造成新崩場地危害下游民眾生命財產安全，本所立即將八八水災後判釋之崩場地資料與最新正射影像進行比對，研判有無新增之崩場地。經有經驗之同仁於立體觀測數化儀再三檢視，地震後並無明顯新增之崩場地出現。

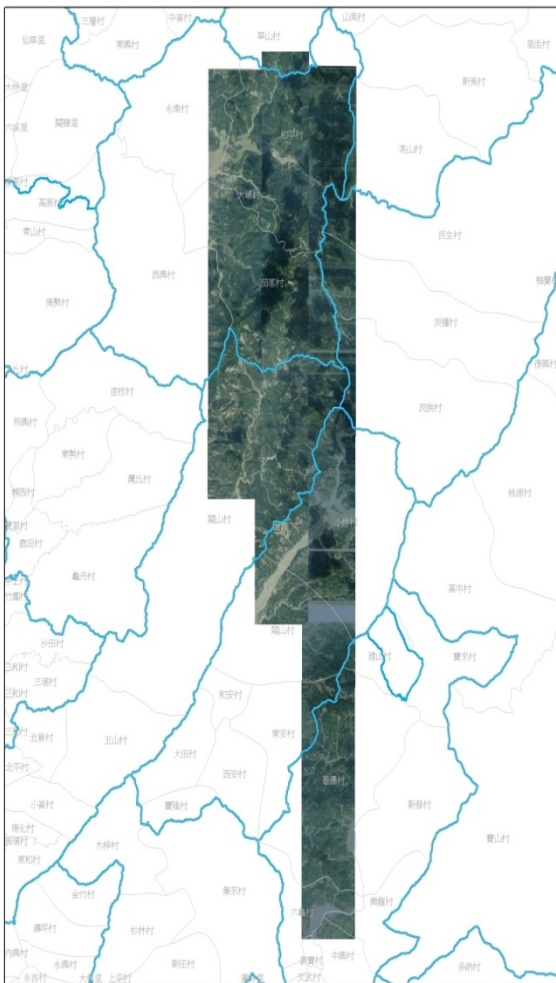


圖 27 99年3月4日正射影像產製成果分布圖

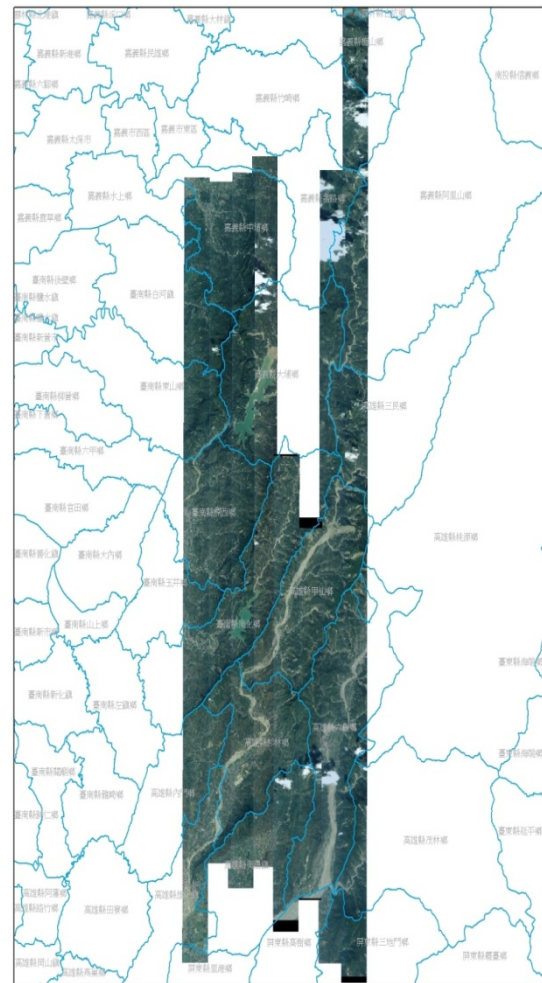


圖 28 99年3月6日正射影像產製成果分布圖

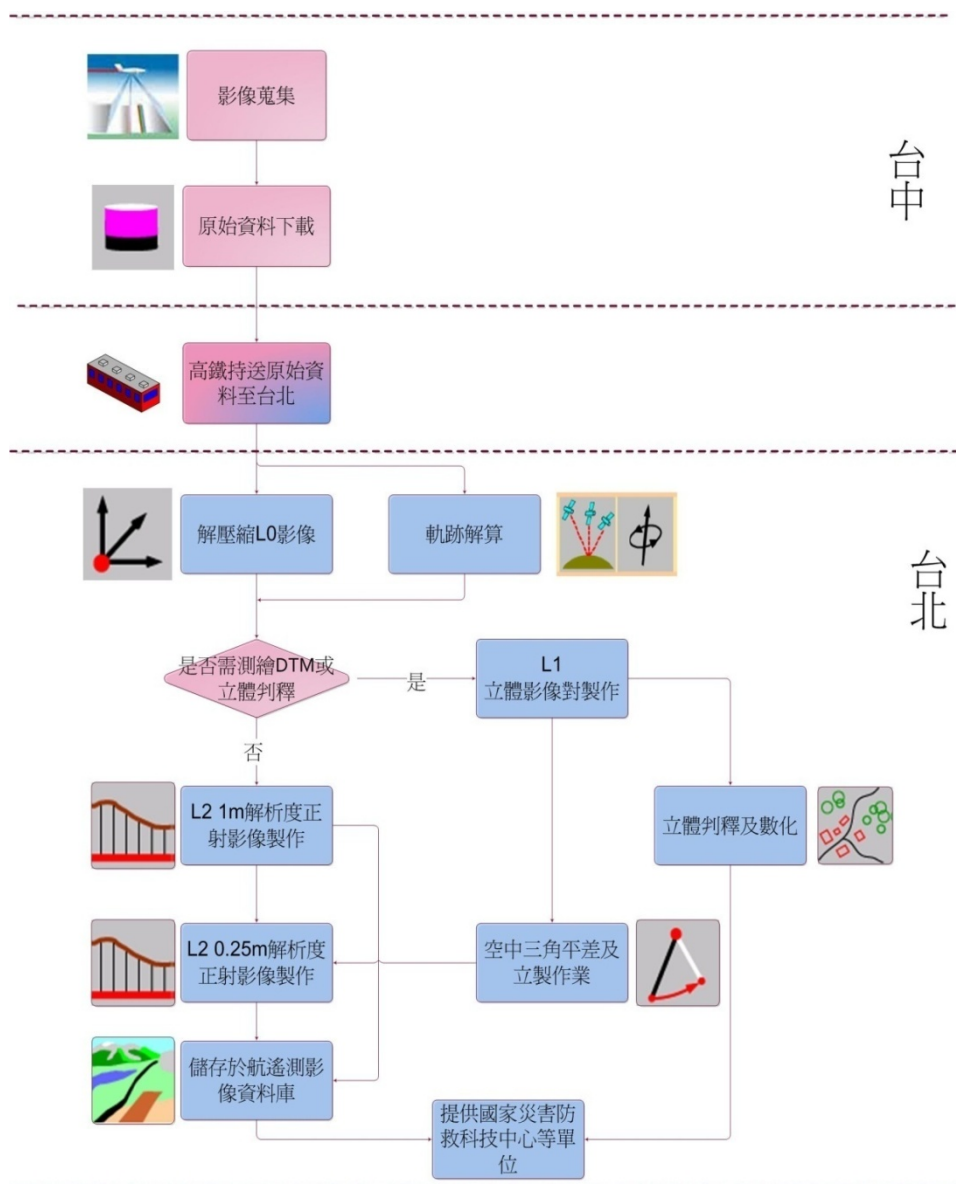


圖 29 甲仙大地震緊急應變工作流程

5. 結論與建議

經歷辛樂克颱風、阿里山森林火災、八八水災及甲仙大地震等大型天災，本所已累積相當之航攝數位快速製圖經驗，並隨之調整作業環境與設備及相關配套程式，架構出一套災害緊急應變工作流程。只要天候狀況許可，出動航遙測飛機進行航攝，即可於隔日取得可用之影像產品。對緊急救災之工作流程，匯整出以下之結論與建議：

1. 近年來國內各機關對國土資訊資料日益增加，但因本所原有 2 架航遙測飛機於民國 93 年起歸

至內政部空中勤務總隊，因勤務需求，常無法專機專用，而航遙測飛機不能妥善利用，也影響本所現有之 2 台數位相機無法充份發揮預期之功效。

2. 相較於傳統相機拍攝後動輒數天至十數天才能提供外界災區正射影像，航攝數位相機搭配 GPS/IMU 配備，有效將災區拍攝後正射影像產製及提供時程縮短為一至二天，對於即時性影像提供而言，實屬重大之突破。

3. GPS/IMU 之理論精度可達 5-30 公分，前提為基線長度合於地面初始化及空中初始化建議之範

圍內，如基線距離如過長，將使外方位精度降低而失去 GPS/IMU 直接定位之優勢，為避免上述困擾，本所期望未來可獲取其他公部門建置之固定式 GPS 接收站資料，如內政部國土測繪中心建置之 eGPS 接收站，以確保 GPS/IMU 之解算精度。

4. 利用本所之立體判釋數化儀，於 GIS 軟體外掛立體觀測模組，使單純之 GIS 軟體，亦具備簡易立體數化作業之能力，能取代本所原本之傳統照片判釋與轉繪作業，無需轉繪，只需備妥立體像對專案後，即可進行立體判釋及數化，所得之成果可為 3D-shapefile 或轉為 2D 形式，並以地理座標存放點位資訊，作業之一貫性與整體性高，不可不謂作業型態與效率之重大轉變。在歷次天災中，本作業模式便發揮極大功效，迅速提供空間資料，為 GIS 結合航測之理想應用實例。
5. 現階段本所對森林火災調查、崩場地判釋及病蟲害調查等天然災害之判釋工作多以人工方式於螢幕數化，未來可應用航攝數位影像多光譜、高空間解析度及高輻射解析度之優勢，結合先進之航遙測技術，如以前後期多光譜正射影像配合現有崩場地資料自動判釋新增崩場地等，提高航攝數位影像之應用價值。
6. 本所目前內部網路及倉儲空間已建置完成，於內部製圖流程效率已有明顯之提升，唯對外網路傳輸之頻寬仍有不足，故目前救災時提供國家災害防救科技中心等單位影像之方式仍以外接式硬碟複製移送，在資料提供效率仍有極大之改善空間。本所未來期望將巨量影像資料儲存於專業之倉儲環境，並結合高速網路設備，以 WMS 發布最新災區正射影像，供各單位防災應用需求。
7. 八八水災後初期因受颱風外圍環流影響，本所無法順利取得清晰且完整之航攝影像，如可配合主動性之感測器系統，如機載合成孔徑雷達 SAR (Synthetic Aperture Radar, SAR)，可立即於風災後之第一時間，以 SAR 先行蒐集災區地形變化影像，俟天候良好時，再以航攝數位相

機取得光學影像，可有效整合傳統光學及主動式雷達感測系統，達相輔相成之效。

參考文獻

- 行政院農業委員會林務局農林航空測量所, 2010。
莫拉克風災(八八風災)前、後衛星影像崩場地調查資料計畫, 林務局農林航空測量所叢刊第116號, 台北。
- Intergraph Corp., 2010.
URL: <http://www.intergraph.com>
- Leica Geosystems, 2007. URL:
<http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>
- Mostafa, M., Hutton, J., B. Reid, 2001. GPS/IMU products – the Applanix approach. In: Fritsch/Spiller(eds.): Photogrammetric Week 2001, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, p. 72.

Applying Digital Aerial Images in Natural Hazards Mitigation in Taiwan

Kuen-Sheng Yeh ¹ Mao-Yuan Li ^{2*} Uen-Hao Wang ³

ABSTRACT

This paper introduces the mapping workflow of using new digital photogrammetric cameras with GPS/IMU in mitigating natural hazards for the Aerial Survey Office. In the text, we have included detailed descriptions on the procedures of image acquisitions, high resolution and multi-spectrum ortho-image productions, interpretations, digitizations, and data provisions. We also illustrate how these procedures were applied to mitigate catastrophes occurred in recent years, such as "Alisan Fire", "88 Flood", and "Chiahsien Earthquake". The results indicate that high-resolution digital aerial images can be applied to the interpretation of forest fires with NDVI images, production of digital terrain model, change detection, and mitigation of natural hazards.

Keywords: digital photogrammetric camera, high-resolution multi-spectral ortho images, disaster mitigation.

¹ Associate Technical Specialist, Aerial Survey Office

² Associate Technical Specialist, Aerial Survey Office

³ Section Chief, Aerial Survey Office

Received Date: Apr. 06, 2010

Revised Date: May. 06, 2010

Accepted Date: May. 21, 2010

投稿注意事項

本學刊出版有關航空測量、遙感探測、及相關應用科學之學術論著、技術短文及學術與應用性報導。所收稿件將送兩位以上相關之專家學者審查，審查時將依照文章之水準、長度及特性向編輯委員會作適當之推薦。學術論著及技術短文均需依本注意事項之規定，技術短文之形式與學術論著相似，惟技術短文內容較技術性，作者需自行申明文稿之類別。投稿件請盡量以電子郵件方式寄送（WORD 檔及 PDF 檔各一份）予總編輯，投稿信箱地址如本刊封面內頁所示。為便利編審及出版作業，請於稿件 WORD 檔中提供聯絡作者之電話號碼及電子郵件信箱，而稿件 PDF 檔則請移除作者相關資料，如姓名、任職單位、電話、電子郵件信箱等。凡投寄之稿件不得同時投寄至其他期刊或曾於其他期刊刊登；於研討會發表過之論文，需經增補內容改寫後，方可向本刊投稿。稿件如經接受，校對工作由作者負責。本刊無稿酬，出版後將寄送作者抽印本 PDF 檔一份。

稿件撰寫格式要點：

一、文字：內容以中文或英文撰寫。應附中文及英文摘要，字數各不得超過 250 字為限。

二、單位：所有含因次之量須採用 SI 單位公制。

三、打字：(1)中、英文稿件均須用白紙以正楷橫式打字。(2)用紙大小 21 公分 x30 公分(A4 規格)為準。(3)使用電腦文書處理軟體打字（word 檔），請隨文稿附送檔案。

四、題目：論文題目宜簡明，英文題目每字第一位字母以大寫字體打印。

五、作者：作者姓名列於論文題目之下方，其服務機關及職稱以^{1,2,...}上標編號註記首頁末。

六、關鍵詞：在題目中須選出中文及英文三至五個關鍵詞，並置於摘要下方空二行之靠左緣位置。

七、首頁及末頁排列格式：

(1)中文稿件之首頁排列依次為「題目、作者姓名、摘要、關鍵詞、論文主題、作者服務機關及職稱」。中文稿件之末頁為英文之題目、作者姓名、摘要、關鍵詞及服務機關(論文內容免列)

(2)英文稿件之首末頁格式與中文稿件相似，但中文、英文互換。

八、章節及標題：1.章節標題須列於稿紙之中央對稱位置，且加編號。編號一律為阿拉伯數字，如 1,2,.....。2.小節標題亦加編號，但必須從文稿之左緣開始。編號一律為 1.1,1.2,1.1.1,1.1.2.....。

九、數學式：(1)所有公式及方程式均須打字以黑墨書寫清楚，其後標式號於圓括弧內。(2)為清晰起見，每一式之上下須空二列。

十、長度：稿件之長度(含圖)，英文不得超過 10,000 字，中文不得超過 30,000 字，或相當於 25 頁(A4 規格)之長度為標準。

十一、圖表：(1)稿件經通知採用後，如有插圖、照片，作者應迅速提供白紙或描圖紙上墨繪製之圖表、幻燈片(或光面照片)等原件，本刊接受彩色圖表，但以學刊二頁為限，超出之費用由作者支付。(2)所有圖表、照片必須附有編號、標題或簡短說明，並以鉛筆註明作者姓名。中文稿圖表標題須為中文，英文稿圖表標題須為英文。

十二、符號：文內所有符號須於符號第一次出現時加以定義。

十三、參考文獻

參考文獻應列於文末，未直接引用者不得列入。參考文獻先排列中文部分，英文參考文獻列於中文參考文獻之後。其他文字參考文獻列於英文參考文獻之後。中文參考文獻以第一作者姓名筆劃順序排列。英文參考文獻以第一作者之姓依英文字母順序排列。當作者相同時，依發表年代排列。第一作者姓名相同時，先排列單一作者之參考文獻，其次為多作者文獻。

在文中，中文參考文獻以作者全名及發表年代，如李良輝(1991)，或(李良輝，1991)，英文以作者姓及發表年代，如 Jones(1979)或(Jones,1979)。作者為兩人時，英文文獻引用兩作者之姓及年代，如 Jones and Smith(1979)。作者為多人時，則引用第一作者之姓，另加 et al. 字樣，如 Jones et al.(1979)或(Jones et al.,1979)。中文文獻兩作者或多作者均以第一作者全名，之後加「、等」及年代引用，如(郭寶章、等，1976)或郭寶章、等(1976)。作者及年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c,引用，如 Jones and Smith(1979b)。文末之參考文獻項目，排列之秩序為：

1.期刊文獻：作者姓名，發表日期。文章標題，期刊名稱，卷數(期數)：起始頁數—終結頁數。

2.書籍：作者姓名，年代。書名，出版者，出版地。

3.論文籍：作者姓名，年代。篇名，論文集名稱，論文發表地點，卷(期)：起始頁數—結束頁數。

Instructions For Authors

It is the policy of Journal of Photogrammetry and Remote Sensing to consider theoretical, applied papers and reports addressing topics in photogrammetry and remote sensing. Manuscripts are peer-reviewed by at least two experts. Decision is made on the disposition of a manuscript, and the authors are notified of the decision.

Manuscripts need to conform to the requirements described below. Technical papers are operation oriented. Authors are requested to indicate categories of their papers.

Manuscript submission should be sent via e-mail to Editor in Chief, both in WORD and PDF formats. It is the policy of the Journal that submitted papers have never been published before. Papers published in conference proceedings are accepted with revision. Authors are responsible for proofreading during the publication process.

Subject to no payment to accepted papers, an electronic version of off-prints in PDF will be sent to authors.

1. Language: Chinese or English text with abstract less than 250 words.
2. Metric System: SI units
3. Typing: Double-spaced on one side of A4 international white paper. A Microsoft WORD document is requested with a PC formatted floppy disk.
4. Title: Titles should be short. Capitalize initial letter for English.
5. Authors: Authors names are listed below title, affiliations are listed at the end of the first page marked with ^{1,2...}
6. Keywords: 3 to 5 keywords are selected from the paper and placed 2 lines below text of abstract to the left margin.
7. Cover page: In cover page, gives, subsequently, manuscript title, authors' names and affiliations, abstract, and key words.
8. Sections and Sub-sections: Centred and numbered in 1, 2... etc. for section headings. Sub-sections are justified to the left in 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2...etc.
9. Equations: Type formulae and equations clearly in black and numbered in curved brackets. Leave 2 lines blank above and below equations.
10. Paper length: Published papers are limited to 25 pages of A4 size that is less than 30,000 words in Chinese or 10,000 words in English.
11. Figures and Tables: Figures and tables are numbered and described in short. When papers are accepted, original figures, tables, and photographs are expected for reproduction. Color reproduction is limited to 2 pages.
12. Arguments: Define symbols at first appearance.
13. References: Only works cited in the text will be included. Arrange Chinese literatures first then English in references. Chinese references all located in stroke number of the first author while English references in alphabetical order. Cited references to published literature in the text by first author and date for example, Jones (1979) or (Jones, 1979), depending on sentence construction.

Volume 15 No. 1
March 2010

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

CONTENTS

Regular Issue Papers

- Application of Satellite Images and DEM for the Hazard Assessment of Landslide Dams
(Jia-Jyun Dong, Yuei-An Liou, L-Y Chang, Chyi-Tyi Lee, Jyh-Jong Liao,
Yii-Wen Pan).....**3**
- Analysis of Landslide Behavior after 1999 Chi-Chi Earthquake by SPOT Satellite
Images
(K.J. Shou, C.C. Wu, H.Y. Hsu).....**17**
- Applying Object-Oriented Analysis to Segmentation and Classification of Landslide and
Artificial Facilities with Remote Sensing Images
(Wei-Kai Huang, Ming-Lang Lin, Liang-Chien Chen, Yen-Hsiang Lin,
Cheng-Yang Hsiao).....**29**
- Assess Eco-environmental Vulnerability of Debris Disaster Areas in Taitung County
(Kuei-Chia Chen, Shou-Tsung Wu, Chaur-Tzuhn Chen).....**51**
- Monitoring in Land Surface Changes by Satellite Images
(Hsiao-Yuan Yin, Long-Shin Liang, Kun-Shan Chen, Peggy Huang).....**65**
- Automatic Rainfall-induced Landslide Interpretation and Features Analysis
(K. T. Chang, C. S. Kao, Z. Y. Wang, J.K.Liu).....**79**
- A Study on the Topographic Changes Using Ground-based 3D Laser Data
(Kuo-Hsin Hsiao, Jin-King Liu, Yi-Hsing Tseng, Chin-Lun Wang).....**97**
- Integrating Airborne LiDAR and Color Aerial Photography for Landslide Interpretation
(Chi-Chung Lau, Kuo-Hsin Hsiao, Jiann-You Rau, Jin-King Liu, Jer-Rong Wu,
Qun-Xiu Huang).....**111**
- Applying Digital Aerial Images in Natural Hazards Mitigation in Taiwan
(Kuen-Sheng Yeh, Mao-Yuan Li, Uen-Hao Wang).....**123**

第十五卷第一期
中華民國九十九年三月

航測及遙測學刊

目錄

學術論著

- 遙測影像與數值地形模型於堰塞湖災害評估之應用
(董家鈞、劉說安、張立雨、李錫堤、廖志中、潘以文).....3
- 以 SPOT 衛星影像探討 1999 集集地震後之崩塌行為
(壽克堅、吳秋靜、許惠瑛).....17
- 物件導向分析方法應用於遙測影像之分區及崩塌地與人工設施分類
(黃韋凱、林銘郎、陳良健、林彥享、蕭震洋).....29
- 台東地區土砂災害之生態環境脆弱度評估
(陳桂嘉、吳守從、陳朝圳).....51
- 衛星影像於國土變異監測之應用
(尹孝元、梁隆鑫、陳錕山、黃珮琦).....65
- 暴雨型崩塌地自動判釋及特徵分析之研究
(張崑宗、高啟軒、王主一、劉進金).....79
- 三維雷射掃描應用於崩塌土石量化之研究
(蕭國鑫、劉進金、曾義星、王晉倫).....97
- 結合空載 LiDAR 與彩色航照應用於崩塌地研判
(劉治中、蕭國鑫、饒見有、劉進金、吳哲榮、黃群修).....111
- 航攝數位影像於防救災工作之應用
(葉堃生、李茂園、王韻皓).....123