

無人飛行載具產製可見光與近紅外光數值地形分析崩塌潛感值 ：以神木村地區為例

蕭宇伸^{[1]*} 莊大賢^{[1][2]} 陳樹群^[1] 張榮傑^{[1][3]}

摘 要 本文利用無人飛行載具建置地形，以研究台灣神木村地區崩塌潛感相關課題。經由搭載可見光與近紅外光相機的無人飛行載具航拍，獲得神木村周邊 10 公分空間解析度的正射鑲嵌影像與 50 公分網格解析度的數值地表模型。本研究利用 GPS 衛星控制點檢核數值地表模型，並利用羅吉斯迴歸分析神木村山崩潛感值，選用包括高度、坡度、坡向、地形起伏度、地形粗造度與總曲率等 6 個崩塌潛感因子。本研究主要相關結果如下：(1) 可見光產製與近紅外光產製的數值地表模型，高程精度分別為 0.953 公尺與 2.236 公尺；(2) 坡度與坡向為本研究區域之最重要崩塌潛感因子；(3) 可見光影像產製之數值地形，比近紅外光更適合應用於山崩潛感值預估。

關鍵詞：無人飛行載具，崩塌潛感，羅吉斯迴歸。

Determination of Landslide Susceptibilities Using UAV-Borne RGB and NIR images: A Case Study of Shenmu Area in Taiwan

Yu-Shen Hsiao^{[1]*} Ta-Hsien Chung^{[1][2]} Su-Chin Chen^[1] Jung-Chieh Chang^{[1][3]}

ABSTRACT This study conducted a landslide susceptibility analysis at Shenmu area in Taiwan by using terrain models constructed using unmanned aerial vehicles (UAVs). High-resolution orthomosaics and digital surface models (DSMs) were both obtained from several UAV practical surveys by using red-green-blue (RGB) and near-infrared (NIR) cameras, respectively. GPS control points were used for evaluating the DSMs. The algorithm for landslide susceptibility prediction is based on logistic regression, in which elevation, terrain slope, terrain aspect, terrain relief, terrain roughness, and curvature, were the primary factors. The results are as follows: (1) the vertical accuracies of RGB- and NIR-derived DSMs are 0.953 and 2.236 m, respectively; (2) terrain slopes and aspects are the most influential factors in landslide susceptibility prediction; (3) the DSM derived from RGB images are more appropriate for landslide susceptibility prediction than that from NIR.

Keyword: UAV, Landslide Susceptibility, Logistic Regression

一、簡 介

台灣地狹人稠、人口密度高，可供利用的土地有限，其中平地面積僅占全台灣的三分之一，在地形變化劇烈、且降雨時空分布極度不均的台灣，崩塌、地滑、土石流等坡地災害發生非常頻繁，嚴重威脅人民的生命財產安全。影響崩塌發生的因素包括氣候、地形、地質、植生、人為開發等。若能從中掌握與了解這些造成崩塌的重要因子，並預測崩塌發生的機率，即能收避災減災之成效。本研究利用無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)，分別搭載可見光 (Red-Green-Blue, RGB) 與近紅外光 (Near-Infrared, NIR) 相機進行航拍，分別取得可見光與近紅外光航空照片，進而產製數值地表模型 (Digital

Surface Model, DSM)。然後萃取地形相關因子，分析神木村地區崩塌之高低潛勢，並探討 UAV 產製之地形模型是否有助於提升崩塌潛勢預測之準確率，以作為災害警戒之參考。

過去數十年，遙測衛星與正規航空攝影測量一直為獲取 DSM 的主要技術。但由於飛行高度的限制，並無法取得超高分辨度 (小於 10 cm) 的數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM) 或數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。除此之外，遙測衛星軌道周期固定，若發生災害無法立即取得影像，機動性小，也容易受到高空雲的影響使得影像品質欠佳。正規航空攝影測量雖然機動性較遙測衛星佳，但飛行成本甚高，且

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

[2] 高雄市政府水利局

Water Resources Bureau, Kaohsiung City Government, Kaohsiung 830, Taiwan, R.O.C.

[3] 經濟部水利署第三河川局

Third River Management Office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taichung 413, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: HYPERLINK "mailto:yshsiao@nchu.edu.tw" yshsiao@nchu.edu.tw

也容易因高空雲而影響航拍影像品質。UAV 由於航拍高度低，影像解析度高，再加上 UAV 低成本、高機動性等特性，可彌補遙測衛星與正規航空攝影之不足，進而製作高精度與高解析度的 DSM。然而 UAV 也有其缺點，包括因成本及時間的限制，航拍面積較衛星影像小等，然而本文之研究區域僅為神木村周邊區域約 731 公頃，因此利用 UAV 能迅速將此地區航拍影像蒐集完成。

崩塌的形式非常複雜，產生崩塌的因素繁多，回顧過去關於崩塌因子之研究，分別提出不同種類之因子組合（洪雨柔，2013），包括靜態的環境因子及動態的外在誘發因子。環境因子包含地形因子、地質因子、區位因子等；外在誘發因子包含地震、降雨事件等。本研究之研究區域僅 731 公頃，故全區多項因子之數量或類型相當一致，例如神木村之地質屬於中新世的和社層及中新世晚期的南莊層，皆由頁岩構成，而由於研究區域小，故全區之雨量可視為相等。本研究鎖定區域變化較大之地形因子作為主要分析對象，例如高程與坡度等，其中又以坡度最常被討論於山崩研究，Dai et al.(2002) 表示坡度對於坡面崩塌具有一定程度的影響，特別是當坡面為一均勻等向性坡面時，坡度與崩塌之相關性將大幅提升；許惠瑛（2007）探討台灣中部地區降雨誘發崩塌之影響時，說明坡度為影響崩塌發生之重要因子，且當坡度大於三十度時，邊坡破壞之機率將大幅增加。參考過去研究選用之因子，本研究挑選出高程、坡度、坡向、總曲率、地形起伏度、地形粗糙度作為崩塌因子。高程、坡度、坡向為表達地形的基本因子，地形起伏度與地形粗糙度可分別用於呈現研究區域地形高程與坡度變化之離散程度，而總曲率為地形高程的二次微分，即代表地形坡度變化的速率。

本研究區域位於山坡地，植生覆蓋區域廣大，為取得更完整的影像波段，UAV 除了搭載 RGB 相機，也另外搭載 NIR 相機取得 NIR 影像，利用植物對於 NIR 之高反射率，輔助植被的判釋並比較 RGB 影像與 NIR 影像對於地形監測、崩塌潛勢預測結果的差異。近年來利用 NIR 影像進行地表監測之相關研究包括：Nagai et al. (2009) 以 UAV 搭載 RGB 及 NIR 相機進行航拍，並結合卡爾曼濾波與光束法平差進行直接地理定位，建立 DSM 並監測邊坡及河流周圍之植生生長情形；Choi et al (2011) 使用 Terra 衛星上 ASTER 感測器取得 NIR 影像以計算常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)；廖振廷 (2011) 利用 NIR 影像之近景攝影測量建立 DSM，以取像方式簡易及低限制條件的近景攝影測量方式，匹配多張 RGB 及 NIR 及紅外彩色影像，分別建立 RGB、NIR 及紅外彩色之 DSM，其目的在於探討加入 NIR 波段後，所產生的利用 NIR 及紅外彩色產製的 DSM，和 RGB 產製之 DSM 的異同，並比較該 DSM 是否更能突顯植被區；區悅生 (2014) 利用遙測衛星取得 NIR 及紅光影像計算兩期影像之 NDVI，並結合高程、坡度、地形起伏度等地形因子，以羅吉斯迴歸分析預測陳有蘭溪集水區之山崩潛勢。

崩塌潛勢分析目的為挑選一組足以判別崩塌或非崩塌的因子組合，如地形、氣候、地質因子等，並計算崩塌潛感值，以供區域規劃與災害評估使用。本研究採用之研究方法為統計分析法中的多變量分析法，此法主要用於分析擁有多個變數的資料，探討資料彼此之間的關聯性或是釐清資料的結構，建

立一組能區別崩塌與非崩塌之迴歸模式，並利用此模式繪製崩塌潛感圖，且多變量分析在兩因子間具有相依性，例如高度與坡度此類具有高度相關的因子時，也不會造成模式預測結果的偏差。而在多變量分析中，較常運用於崩塌潛勢分析的方法有判別分析法與羅吉斯迴歸分析。但判別分析法的自變數須為有效數值，如坡度、高程等；而羅吉斯迴歸分析的自變數可以為數值或非數值型式的類別變數，如：岩性、坡向等。經過上述比較，本研究採用自變數選擇自由度較高的羅吉斯迴歸為崩塌潛勢研究方法。在過去採用羅吉斯迴歸分析崩塌潛感之相關研究包括：張弼超 (2005) 利用八期 SPOT 衛星影像結合 DEM，採用地形、地震、雨量等因子對南投國姓地區之崩塌潛感進行羅吉斯迴歸分析，研究結果顯示約有 70% 以上之崩塌區位於高潛感區中；李馨慈 (2011) 研究集集地震地表擾動對於後續降雨引發山崩之影響，採用地質、地形、區位、地表覆蓋與地震力，以羅吉斯迴歸分析山崩潛勢，其中桃芝颱風有高達 92.17% 預測準確率；洪雨柔 (2013) 以南橫公路 50 至 110k 之路段沿線上下邊坡 1400 公尺為研究對象，選擇地形、區位及雨量因子，利用不同降雨事件進行羅吉斯迴歸分析，其預測崩塌潛勢之整體正確率均達 70% 以上，為良好的預測結果。詹勳全等 (2015) 研究利用羅吉斯迴歸、不安定指數及支撐向量機來建立繪製景山溪集水區上游的山崩潛感圖。

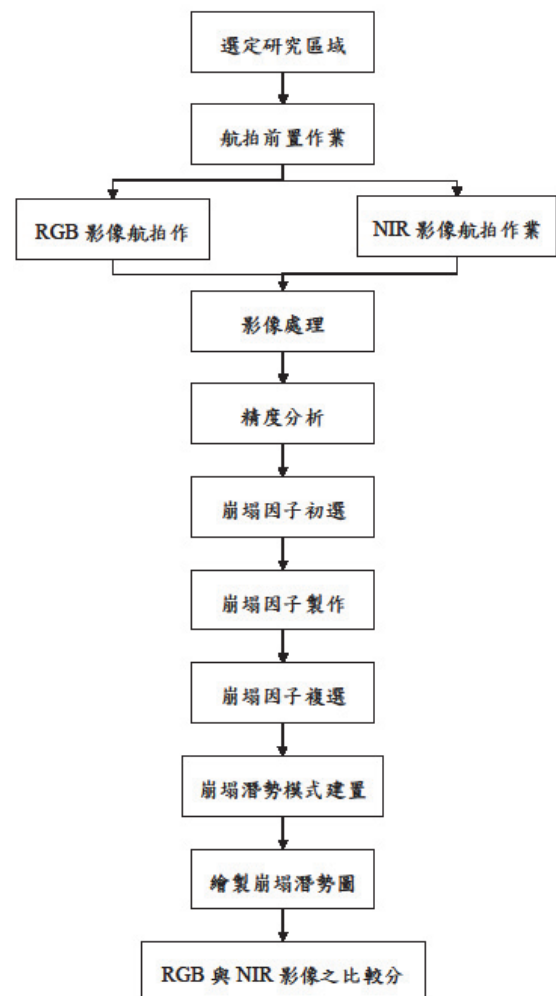


圖 1 研究流程圖

Fig.1 The flowchart of this study

本研究之研究流程步驟如圖 1 所示，步驟包括：

1. 航拍前置作業：航拍作業前須規劃航線並鋪設控制點之航測標。
2. 航拍作業：航拍作業分為獲取 RGB 影像與 NIR 影像兩個架次。
3. 影像處理：利用 Pix4Dmapper 進行正射影像鑲嵌並建立 DSM。
4. 精度分析：利用衛星控制點與地面控制點檢核 DSM 之精度。
5. 崩塌因子初選：挑選前人研究常用之地形因子做為初選崩塌因子。
6. 崩塌因子製作：從 DSM 中萃取各個初選因子並繪製因子圖。
7. 崩塌因子複選：檢驗各項因子對崩塌是否具有判別力，進行篩選。
8. 崩塌模式建置：以羅吉斯迴歸分析崩塌潛勢，並對預測結果加以探討。
9. 影像之比較分析：比較 RGB 與 NIR 影像之判釋能力與預測結果之差異。

二、基本原理

1. 航空攝影測量

航空攝影測量基本原理為共線條件 (Collinearity Condition)，即攝影測量成像系統中，地面上任一地形點 (A)、投影中心及像片上之相應像點 (a)，此三點應位於同一條直線上，如圖 2 所示。

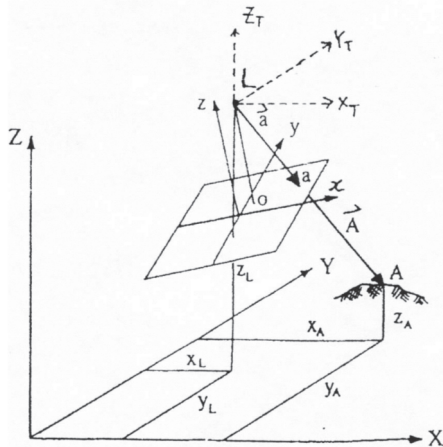


圖 2 航空攝影測量共線條件示意圖 (Wolf and Dewitt, 2000)

Fig.2 A diagram represented collinearity condition in photogrammetry

共線方程式可表示為：

$$\chi_a = \chi_0 - f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (1)$$

$$y_a = y_0 - f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (2)$$

其中 χ_a 、 y_a ：像點 a 之影像座標； f ：相機焦距； X_A 、 Y_A 、 Z_A ：物空間中地物點 A 之座標； X_L 、 Y_L 、 Z_L ：物空間中曝光點 L 之座標； m_{ij} ：旋轉矩陣元素。

2. 羅吉斯迴歸

本研究預估崩塌潛勢之演算法為羅吉斯迴歸。一般而言，羅吉斯迴歸分析式可表示為

$$P(y_i = 1 | \chi_i) = \frac{1}{1 + e^{-\epsilon_i}} \quad (3)$$

其中 ϵ_i 代表各斜坡單元的羅吉斯函數值，其值域為負無窮至正無窮，而當 ϵ_i 趨近於負無窮時，羅吉斯函數為：

$$P(y_i = 1 | \chi_i) = \frac{1}{1 + e^{-(-\infty)}} = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = 0 \quad (4)$$

當 ϵ_i 趨近於正無窮時，羅吉斯函數為：

$$P(y_i = 1 | \chi_i) = \frac{1}{1 + e^{-(\infty)}} = \frac{1}{1 + e^{-\infty}} = 1 \quad (5)$$

無論 ϵ_i 為任何值，羅吉斯函數估計的機率 P 值域範圍均在 0 至 1 之間。而在本研究羅吉斯迴歸分析式之 ϵ_i 採用公式如下：

$$\epsilon_i = \alpha + \sum_{k=1}^K \beta_k x_{ki} \quad (6)$$

其中 ϵ_i 代表各斜坡單元的羅吉斯函數值； x_{ki} 為各像崩塌潛勢因子值， α 與 β_k 為迴歸截距與各因子之迴歸係數。將各斜坡單元的羅吉斯迴歸函數值帶回 (3) 式中即可計算出崩塌潛勢值，一般而言，羅吉斯迴歸中，其指標值預設為 0.5，若崩塌潛勢大於 0.5 可被歸類為崩塌組斜坡單元，反之，則被歸類為非山崩組斜坡單元。

三、研究區域與空拍任務

1. 研究區域

本研究區域位於台灣南投縣信義鄉西南角的神木村 (圖 3)，高度約海拔 1500 公尺至海拔 1600 公尺。研究區域由三條支流為和社溪、郝馬夏斑溪、出水溪匯集而成，地質主要由頁岩構成。由於地質構造發達，溪流下切侵蝕嚴重，岩層破碎，且邊坡坡度陡峭、溪谷落差甚大，表層岩屑土砂堆積不易穩定，故此區域屬於地質敏感區，亦屬於邊坡崩塌與土石流高潛勢區域，每當颱風豪雨或地震侵襲，容易引發大規模崩塌，故本團隊選定此一區域，並分析此區域之崩塌潛勢，藉由計算崩塌潛感值與繪製崩塌潛勢圖，以提供此區域災害評估使用。

2. 空拍任務

在航拍任務方面，採用碳基科技公司 (Carbon-Based Technology, Inc) 研發 Avian-P 型無人飛行載具 (圖 4(b))，飛行高度海拔約 2600 公尺，飛機時速約 63~81 km/hr，相片前後重疊率為 74%，相片左右重疊率為 25%，可獲取之照片可達 10 公分之空間解析度。圖 4(a) 為航線圖，航拍路線採 S 型航道設計，航線總長度約 50 km，範圍涵蓋神木村全區，起飛地點為塔塔加 (緯度：23.489732；經度：120.884219)，降落地點為同富社區 (緯度：23.571274；經度：120.876215)。兩架次施測日期分別為 103 年 8 月 5 日 (RGB 像片) 與 103 年 8 月 12 日 (NIR 像片)，天氣晴朗、光照及能見度皆理想，故航拍影像相當良好。RGB 與 NIR 照片之拍攝相機型號均為 Samsung NX1000，有效畫素 2030 萬，然而在拍攝 NIR 影像時，於相機加裝一可以過濾 800 nm 以下波段之濾鏡。兩次航拍作業分別取得 801 張 RGB 像片與 867 張 NIR 像片。本研究

亦在神木村內選取 5 個地面控制點與 4 個地面檢核點，其點位分布如圖 4(a) 所示。控制點選點原則為四周空曠無遮蔽，且利於鋪設航測標及架設 GPS 接收儀，其中控制點於航拍時，覆蓋本團隊自製之航測標，航測標為帆布材質 (2 公尺 x 2 公尺)，外觀如圖 4(c) 所示，航測標上面印有黑色井字圖樣，白色格子長寬皆為 50 公分，並在帆布中央開一個直徑 2 公分的小孔，以利於鋪設時對準控制點位。此自製航測標在單張相片

中可清晰呈現，可有效降低後續對點作業所產生之誤差。每個控制點均於航拍前以 Trimble 4000 型 GPS 接收儀 (圖 4(d)) 接收約 3 小時 GPS 訊號，並以國土測繪中心 e-GPS 站解算座標，各點水平與垂直方向精度均可達公分等級 (內政部國土測繪中心, 2006)。此外 4 個地面檢核點皆為內政部四等衛星控制點，用以檢核本研究產製 DSM 之高程精度。

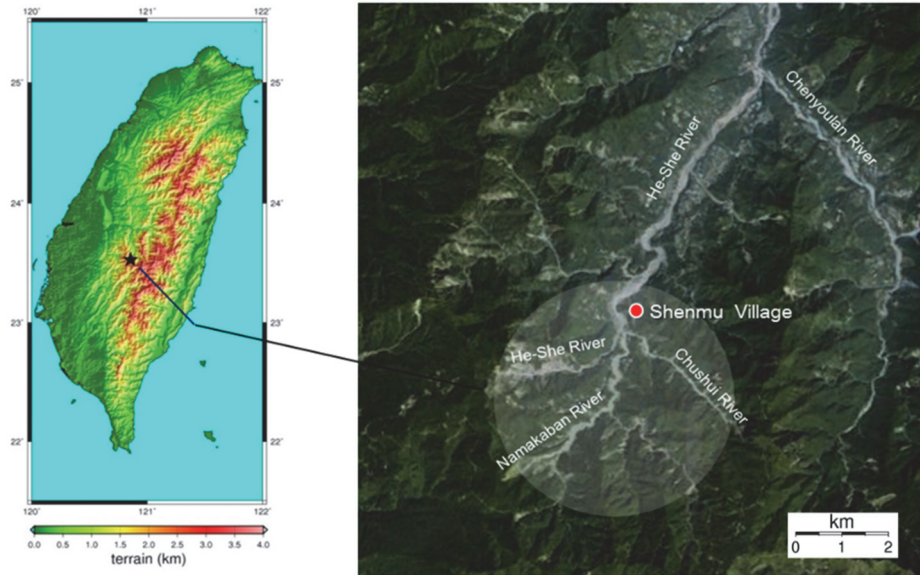


圖 3 左圖為台灣地形圖，其中星號位置即為神木村所在地；右圖為神木村區域衛星影像圖(來源：google earth)

Fig.3 Left: the terrain of Taiwan. The black star points out the location of Shenmu area. Right: a zoomed-in view of Shenmu area from the google earth

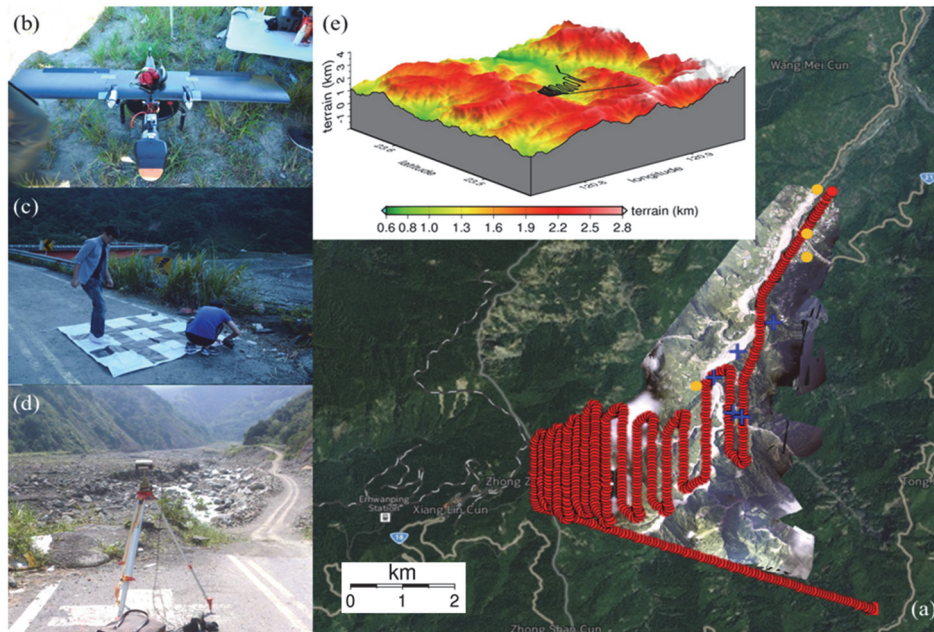


圖 4 (a) UAV 航拍路線圖，其中紅色點位為每張航拍相片中心位置，黃色圓形點位為地面檢核點，藍色十字點位為地面控制點；(b) Avian-P 型無人飛行載具；(c) 自製航測標；(d) 用於測量地面檢核點與地面控制點座標之 Trimble 4000 GPS 接收儀

Fig.4 (a) The UAV flight lines. The red dots mean the locations of the aerial photos. The crossed blue and circle yellow dots represent the ground control and check points, respectively. (b) The Avian-P UAV. (c) The artificial target installation on the ground control point. (d) The GPS field surveys (Trimble 4000 GPS receiver) on the ground control and check points

本研究利用 Pix4Dmapper (Strecha et al., 2012) 軟體建構研究區域之正射鑲嵌影像、三維點雲以及 DSM。圖 5(a) 為 RGB 航拍所任務獲得之神木村周圍正射影像鑲嵌圖，雖然航拍面積相當廣大，但由於航拍重疊率較高的區域位於神木村下方區域，又因進行可見光影像之航拍作業時，神木村之西方區域有雲層覆蓋，為求可見光影像與近紅外光影像之研究範圍一致，最後保留 731 公頃之方型區域 (如圖 5(a) 之黑框區域)，作為本文章之研究區域，並計算區域內之崩塌潛感值。圖 5(b) 與 (c) 分別為研究區域 RGB 與 NIR 之正射鑲嵌圖。在 NIR 影像方面 (圖 5(c))，由於本研究僅保留波長 800 nm 以上之波段成像，故僅能以單一紅色明暗表達地貌，無法如正統遙測衛星影像以假色呈現地貌。整體而言，原始 RGB 影像對各種地物的判讀性較 NIR 影像為佳。圖 5(b) 中，河道、建築物、植被、崩塌地均清楚呈現於 RGB 影像中，然而對於植被而言，NIR 影像具有非常強的優勢，圖 5(c) 中，植被分布區域均呈現強烈的亮白色，這與河道、建築物、崩塌地等呈現強烈對比，有助於判釋植被類別。除此之外，由圖 4 發現，神木村的崩塌情況非常嚴重。本研究利用 Arcgis 10.0 軟體將圖中崩塌地區以人工數化方式萃取其邊界，其結果如圖 5(b) 與 (c) 中紅色與黑色區塊所示。此真實崩塌區域將用於驗證本研究崩塌潛感值結果之正確性。

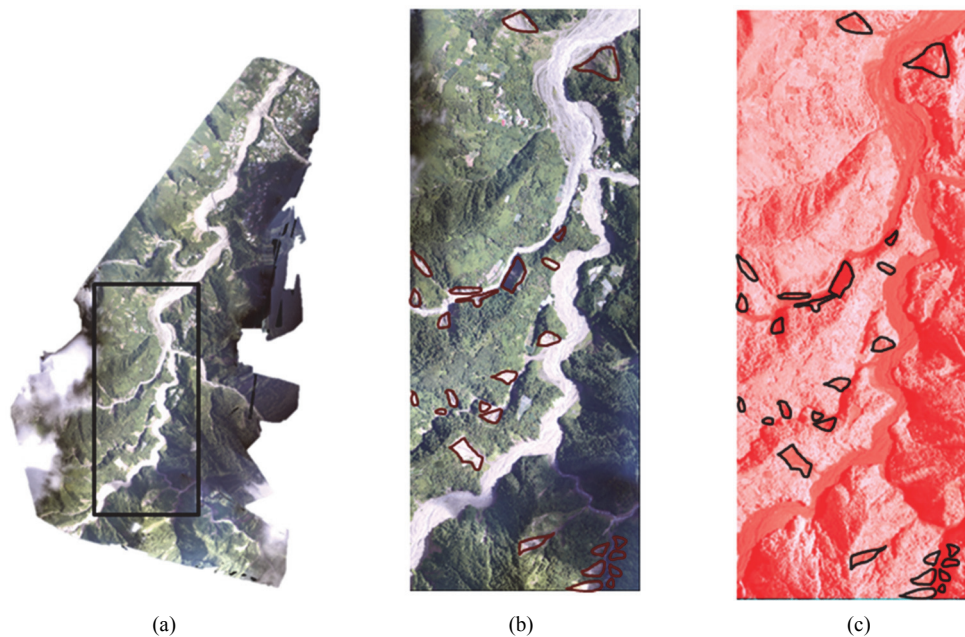


圖 5 (a) 神木村 UAV 正射鑲嵌圖，其中黑色框區域代表本研究之主要實驗區域；(b) 主要實驗區域可見光之正射鑲嵌圖；(c) 主要實驗區域近紅外光之正射鑲嵌圖。圖 (b) 與 (c) 之紅線與黑線區域為崩塌地所在地

Fig.5 (a) The UAV ortho-mosaic image in Shenmu area. The black rectangle represents the study area, (b) RGB ortho-mosaic image, and (c) NIR ortho-mosaic image in study area

3. RGB 與 NIR 產製之地形精度分析

本研究所設置之五個控制點，經由 Trimble 4000 型 GPS 接收儀接收約 3 小時之 GPS 訊號，並經過國土測繪中心 e-GPS 站解算座標，得到之控制點橢球高後，再以最新台灣大地起伏模型 (Hwang et al., 2013) 改正而得到正高。為檢核控制點校正後高程之準確度，本研究將 RGB 與 NIR 影像所產製之 DSM 內插至控制點及檢核點之點位，並分別求得兩者座標在 DSM 中之高程，最後與兩者之原高程比較。除了比較 UAV 產製之 DSM 之外，上述所有高程精度結果如表 1 與圖 6 所示。圖 6(a) 與 (b) 之底圖分別為 RGB 與 NIR 光影像產製之 DSM，各圖中藍色十字為控制點；黃色圓點為檢核點；灰色長柱表示各 DSM 與控制點及檢核點之間的高程誤差量，長柱越長表示誤差越大。在檢核點位置部分，無論 RGB 與 NIR 光影像產製之 DSM，在較靠近控制點密集處 (方框內) 之檢核點，其誤差均在 2 公尺以內，RGB 影像 DSM 又較 NIR 影像 DSM 誤差值更小，而在遠離控制點之檢核點位置，誤差量約在 2~8 公尺間；

星影像以假色呈現地貌。整體而言，原始 RGB 影像對各種地物的判讀性較 NIR 影像為佳。圖 5(b) 中，河道、建築物、植被、崩塌地均清楚呈現於 RGB 影像中，然而對於植被而言，NIR 影像具有非常強的優勢，圖 5(c) 中，植被分布區域均呈現強烈的亮白色，這與河道、建築物、崩塌地等呈現強烈對比，有助於判釋植被類別。除此之外，由圖 4 發現，神木村的崩塌情況非常嚴重。本研究利用 Arcgis 10.0 軟體將圖中崩塌地區以人工數化方式萃取其邊界，其結果如圖 5(b) 與 (c) 中紅色與黑色區塊所示。此真實崩塌區域將用於驗證本研究崩塌潛感值結果之正確性。

在控制點位置部分，RGB 影像 DSM 之誤差平均值與標準偏差分別為 1.783 公尺與 0.953 公尺，其成果明顯優於 NIR 影像 DSM (誤差平均值與標準偏差分別為 4.322 公尺與 2.236 公尺)。此精度結果顯示 UAV RGB 影像產製之 DSM 精度相當較佳且穩定，相比之下 UAV NIR 影像產製之 DSM 誤差偏大，這可能會影響利用 NIR 影像 DSM 來預測崩塌潛勢結果的準確性。

表 1 利用 GPS 檢核點與 GPS 控制點分別檢核 UAV 產製高程模型之精度分析結果統計表 (單位：公尺)

Table 1 Statistics regarding the differences (m) between the GPS-observed and UAV-modeled heights at GPS control and check points

照片種類	GPS點位	最大值	最小值	平均值	標準偏差
RGB	控制點	0.567	0.147	0.281	0.166
	檢核點	2.606	0.409	1.783	0.953
NIR	控制點	0.539	0.089	0.312	0.165
	檢核點	7.013	1.761	4.322	2.236

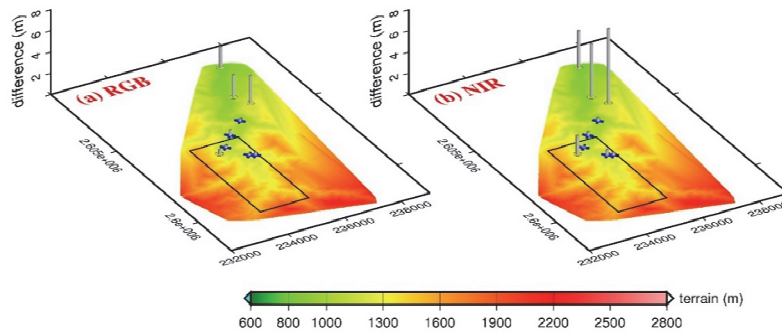


圖 6 利用 GPS 檢核點與 GPS 控制點分別檢核 (a) UAV 產製 RGB 影像高程模型與 (b) UAV 產製 NIR 影像高程模型。其中黃色圓形點位為地面檢核點，藍色十字點位為地面控制點，淺灰色的長柱代表高程誤差值大小

Fig.6 The differences (m) between the heights from the GPS-observed and (a) from the UAV-based RGB imaging, and (b) from the UAV-based NIR imaging at GPS control and check points

四、崩塌潛勢因子

本研究共選取研究區域之高程、坡度、總曲率、坡向、地形起伏度、地形粗糙度六項地形因子，作為分析崩塌潛感值之用。圖 7(a) 為研究區域內之 RGB 影像產製之空間解析度 0.5 公尺 DSM 高程值，由圖中可發現本研究區域介於 1000~2000 公尺之間。圖 7(b) 為 RGB 與 NIR 影像之 DSM 差值圖，由圖可發現 RGB 與 NIR 影像之 DSM 差值範圍約介於±10m。

在坡度方面，本研究利用 GMT 軟體 (Wessel et al., 2013) 提供的坡度計算程式“grdgradient”計算此區域 25 m x 25 m 之坡度模型，圖 7(c) 為利用 RGB 影像產製之 DSM 所計算得到之坡度模型結果，圖中坡度單位為百分比，圖中坡度分類共分七級 (水土保持局，2014)，1~7 級坡定義分別為區域坡度值 $S \leq 5\%$ 、 $5\% < S \leq 15\%$ 、 $15\% < S \leq 30\%$ 、 $30\% < S \leq 40\%$ 、 $40\% < S \leq 55\%$ 、 $55\% < S \leq 100\%$ 與 $S > 100\%$ 等。由圖 7(c) 中可明顯看出，研究區域中以六級坡 (55~100%) 最多，屬於山嶺地，部分屬於陡峭山地，而大部分河道地區坡度均在二級坡以下。

在坡向方面，本研究同樣利用 GMT 之“grdgradient”程式計算每 25 公尺網格坡向，圖 7(d) 為 RGB 影像產製 DSM 之每個網格之坡向圖，其中 N、NE、E、SE、S、SW、W、WN 分別代表坡向方位角為 $337.5^\circ - 22.5^\circ$ 、 $22.5^\circ - 67.5^\circ$ 、 $67.5^\circ - 112.5^\circ$ 、 $112.5^\circ - 157.5^\circ$ 、 $157.5^\circ - 202.5^\circ$ 、 $202.5^\circ - 247.5^\circ$ 、 $247.5^\circ - 292.5^\circ$ ，和 $292.5^\circ - 337.5^\circ$ 。

地形起伏度是除了高度及坡度外，另一可呈現地貌特色之離散程度的表示法。本研究計算地形起伏度之公式如下 (Wilson and Gallant, 2000)：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (Z_i - \bar{Z})^2}{n_c - 1}} \quad (7)$$

其中 S 代表計算點周邊高程之標準偏差 (即地形起伏度值)； n_c 為視窗範圍內之點， Z_i 為各點之高度值， $\bar{Z}$ 為視窗範圍各點高度之平均值。圖 7(e) 為 RGB 影像產製 DSM 之地形起伏度，由圖中可發現研究區域之地形起伏度約介於 0-3 公尺之間。

在地形粗糙度計算方面，本研究亦採用參考 Wilson and Gallant (2000) 之計算方式，與地形起伏度計算相比，差異僅只於將地形起伏度計算公式中之高程轉換為坡度值。其被採用

的目的為可判別在坡度急遽變化之區位是否容易產生崩塌。圖 7(f) 為 RGB 影像產製 DSM 之地形粗糙度，由圖中可發現研究區域之地形粗糙度約介於 0-3% 之間。

總曲率 (curvature) 為地形的二次微分，表示一次微分結果 (如坡度、坡向) 的改變率，本研究計算總曲率之公式如下：

$$Z_{xx} = \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \approx \frac{Z_4 - 2Z_5 + Z_6}{L^2} \quad (8)$$

$$Z_{yy} = \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \approx \frac{Z_2 - 2Z_5 + Z_8}{L^2} \quad (9)$$

$$Z_{xy} = \frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} \approx \frac{-Z_1 - 2Z_3 + Z_7 - Z_9}{4L^2} \quad (10)$$

$$K = Z_{xx}^2 + 2Z_{xy}^2 + Z_{yy}^2 \quad (11)$$

其中， $Z_1 \sim Z_9$ 為計算點與周邊各網格之高程， K 為總曲率。由於總曲率計算結果 K 值呈現對數曲線分佈，本研究將總曲率取對數值，做為後續研究使用之總曲率。圖 7(g) 為研究區域之總曲率計算結果。由於 RGB 與 NIR 影像產製之坡度差值、坡向差值、地形起伏度差值、地形粗糙度差值與總曲率差值極小，故本研究不畫出 NIR 影像產製之坡度圖、坡向圖、地形起伏度圖、地形粗糙度圖與總曲率圖。

一般而言，上述地形因子應以數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 計算較佳，而本研究採用 UAV 空拍建置研究區域地形，只能獲取 DSM，即未考量樹木高度之影響，然而本文研究區域高程起伏落差極大 (海拔介於 1000~2000 公尺之間)，且坡度變化亦相當大 (一至七級坡皆有，且大部分在六級坡以上)，故在如此陡峭的地形中，樹木高度影響各因子之計算結果應較低。

針對上述初選選定之六項地形因子，本研究以成功率曲線做為複選方法。成功率曲線法為將各因子的數值分為數個區間，並且統計該區間面積佔總面積與崩塌面積佔該區間面積之比例，從大到小採累加的方式計算，繪製一弧形曲線。曲線下面積 (Area Under Curve, AUC) 越大，表示該因子對於崩塌與非崩塌的判別力越佳，通常當曲線下面積等於或小於 0.5，則表示此因子對於崩塌與非崩塌幾乎沒有判別力。圖 8 為經由成功率曲線檢定之成果，由圖中可發現高程、總曲率之 AUC 皆在 0.5 以下，而地形粗糙度之 AUC 也僅稍高於 0.5，表示此三項因子對於崩塌的判別力不佳，而其餘三項因子之 AUC 顯示具有可接受的判別力，其中又以坡度之 AUC 高於 0.7，最具代表性。為驗證上述坡度、坡向與地形起伏度為本研究區域之重

要崩塌潛勢因子，本研究將各地形因子交叉組成共 5 個測試例（表 2）。測試例 1 包含本研究最具代表性之坡度、坡向、地形起伏度等因子；測試例 2 則僅包含坡度、坡向兩因子；測試例 3 則僅包含坡度因子；測試例 4 則考慮全部 6 個因子；測試例 5 僅包含高程、地形粗糙度、總曲率等判別力較差的因子，已作為對照組。將以上各測試例之地形資訊匯入 SPSS 統計軟體進行羅吉斯迴歸分析。分析結果將於後面說明。

表 2 測試例分類表
Table 2 Five cases for considering different factors

測試例	地形因子	高程	坡度	坡向	地形起伏度	地形粗糙度	總曲率
測試例 1			V	V	V		
測試例 2			V	V			
測試例 3			V				
測試例 4		V	V	V	V	V	V
測試例 5		V				V	V

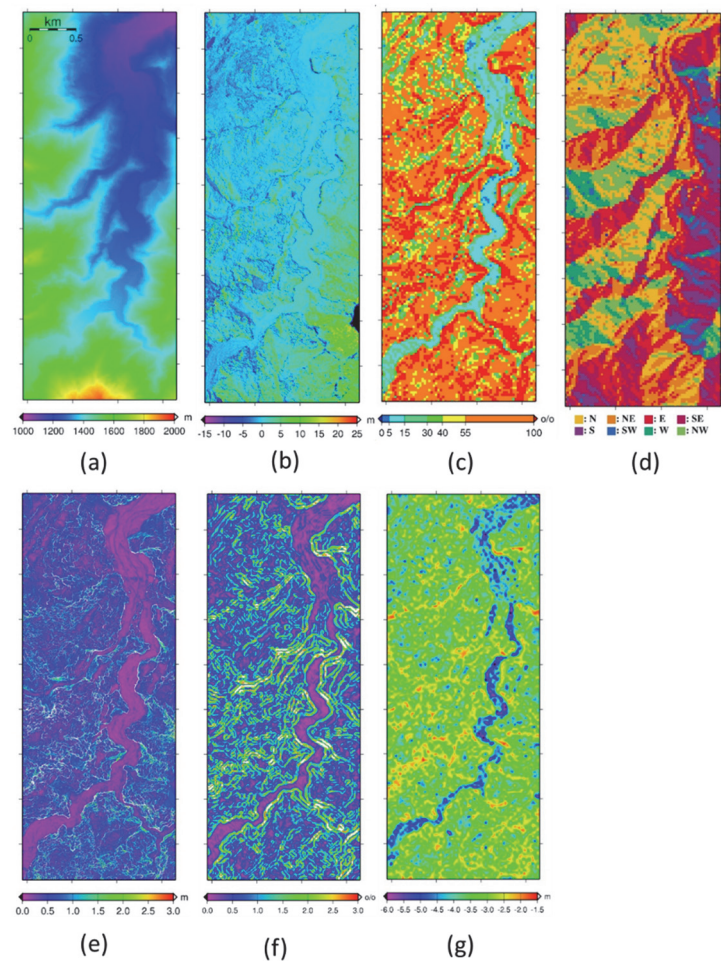
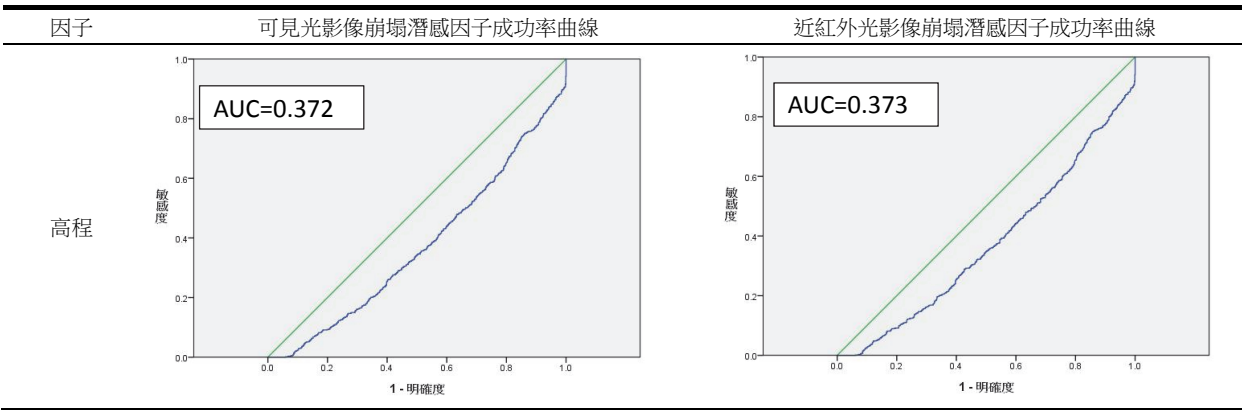


圖 7 研究區域之 (a)UAV 產製 RGB 影像高程模型、(b) UAV 產製 RGB 影像高程模型與 NIR 影像高程模型的差值、(c) 坡度模型、(d) 坡向模型、(e) 地形起伏度 (f) 地形粗糙度、與 (g) 總曲率

Fig.7 (a) the heights from the UAV-based RGB imaging. (b) The differences between the heights from the UAV-based RGB and NIR imaging, respectively. (c) The terrain slopes, (d) the slope aspects, (e) the terrain reliefs, (f) the terrain roughness, and (g) the surface curvatures derived from UAV-based RGB imaging



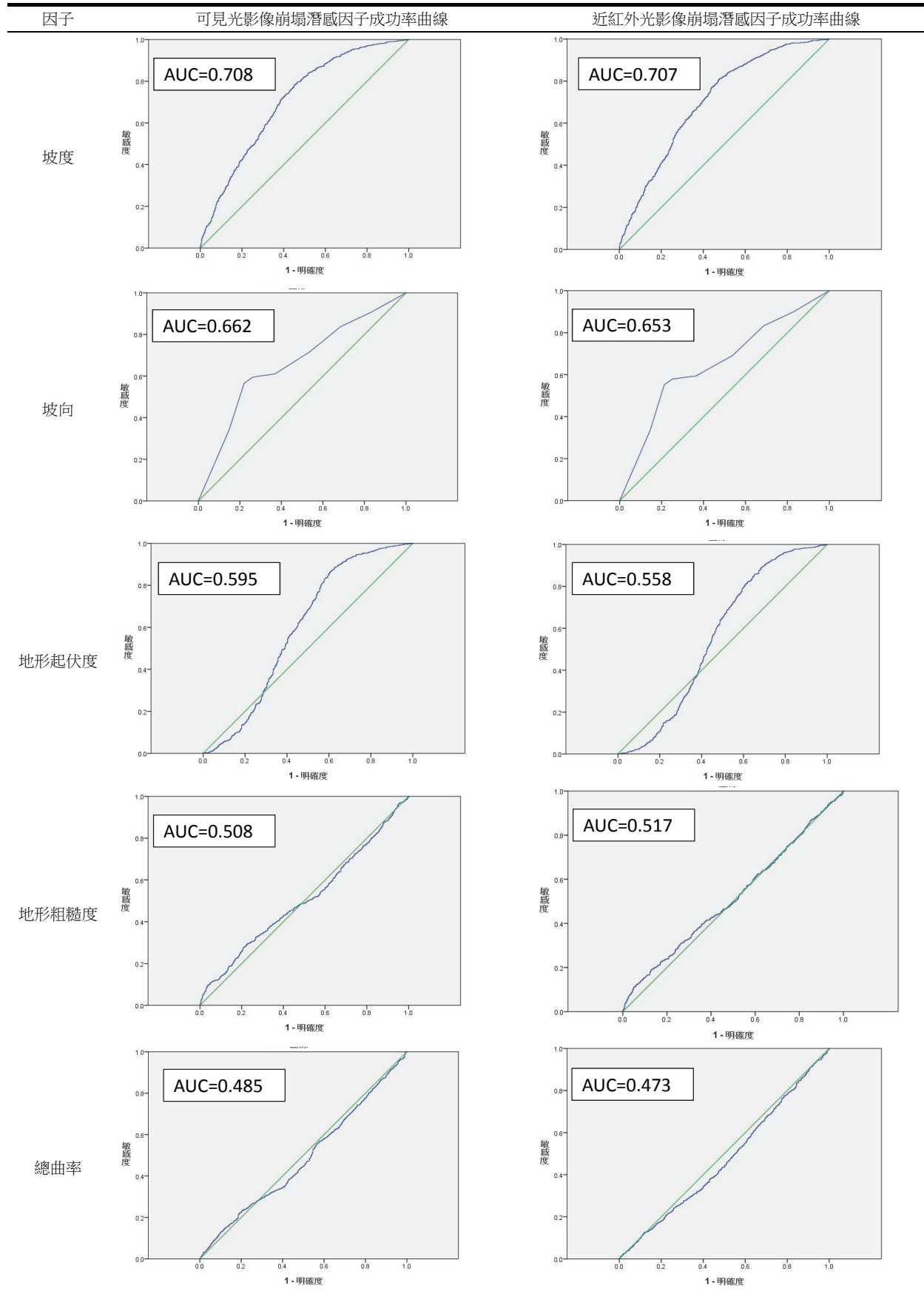


圖 8 各崩塌因子之成功率曲線圖

Fig.8 The success rate curve of each landslide factor

五、結果與討論

本研究以高程、坡度、坡向、地形起伏度、地形開闊度與總曲率等因子進行羅吉斯迴歸分析，比較不同的因子組合分析結果之差異，並分析各測試例之 RGB 與 NIR 影像進行崩塌潛勢分析。將羅吉斯迴歸分析結果得到之迴歸模型係數代入 GMT 軟體中，產製崩塌潛感圖，圖 9 即為本研究 5 個測試例之 RGB 影像高程模型計算得之崩塌潛感值，圖中黑線框起的區域即為本次航拍影像中實際崩塌地。羅吉斯迴歸判別崩塌機率的方式為 0.5 (機率 50%) 以上為發生崩塌，0.5 以下為不崩塌，故本研究以 0.5 為界，區分為高潛感區及低潛感區。綜合觀看 5 組測試例之崩塌潛勢圖，並對照表 2 之崩塌潛感因子圖，可發現高潛勢區位皆明顯位於大坡度之區域，與坡度因子

之高權重相符。比較測試例 1 與測試例 2，兩者之崩塌潛勢趨勢相近，山坡地皆位於 0.5 以上之高潛勢，而測試例 1 由於增加了地形起伏度一項，在影像呈現上較為銳利。測試例 3 為單獨以坡度做羅吉斯迴歸分析之崩塌潛勢圖，其平均崩塌潛勢相當程度低於測試例 1 與 2。測試例 4 為考量所有崩塌潛感因子結果，然其崩塌潛勢結果與測試例 3 相近，但測試例 4 在河床所估計得到之崩塌潛感值較高。測試例 5 之崩塌潛勢結果則明顯與其他測試例顯著不同，在接近河床地區潛感值明顯較高。另外，測試例 1 與 2 實際崩塌地均位於崩塌潛勢值 0.8 以上的高潛勢區域，而測試例 3 與 4 之實際崩塌地則落在潛勢 0.5~0.7 的中潛勢區位。圖 10 為各測試例 RGB 高程模型與 NIR 高程模型計算得之崩塌潛感之差值，由圖 10 可發現，採用 RGB 與 NIR 影像產製高程模型，其所得到的崩塌潛感值差距可達 ± 0.3 。

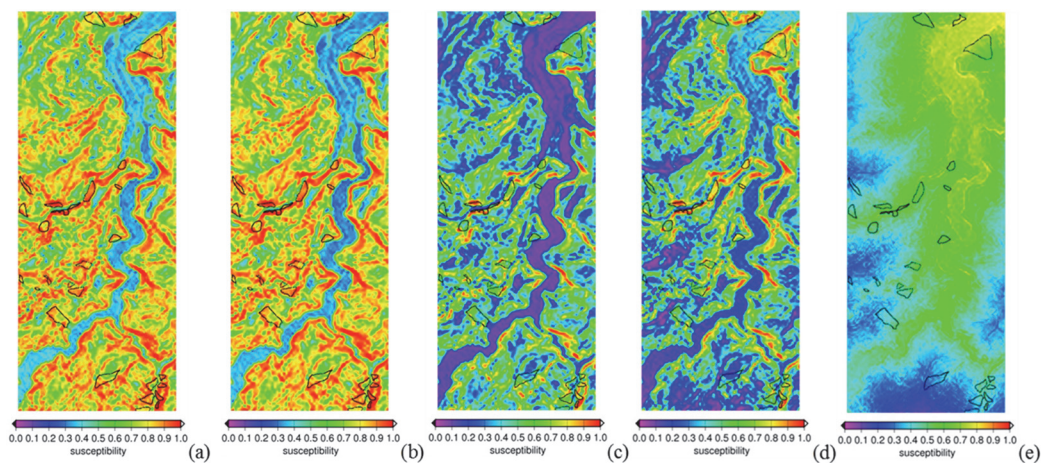


圖 9 測試例 1(a)、測試例 2(b)、測試例 3(c)、測試例 4(d)、與測試例 5(e)之崩塌潛感。圖中黑線框起的區域為實際崩塌地
Fig.9 The landslide susceptibilities of case 1(a), case 2(b), case 3(c), case 4(d), and case 5(e). The areas within the black lines denote the actual landslide areas

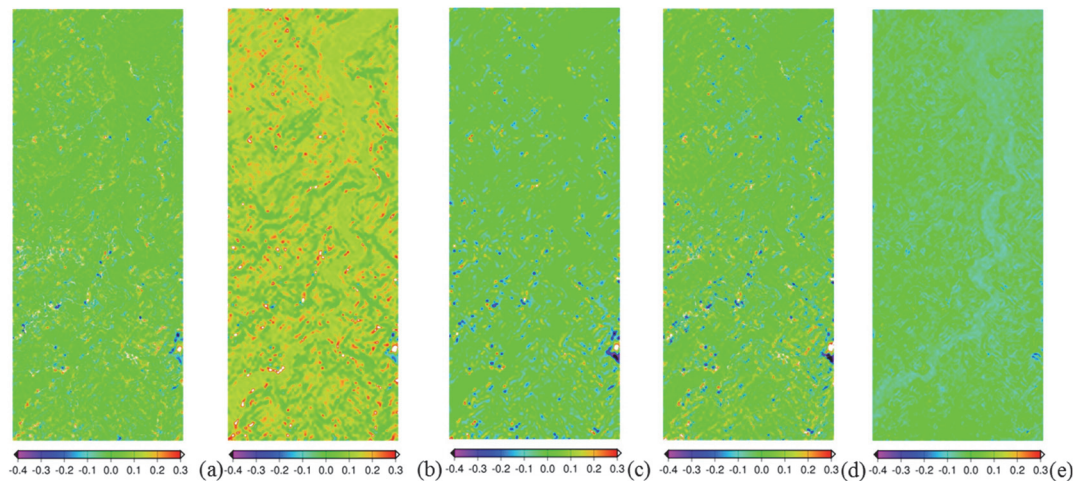


圖 10 由可見光高程模型與近紅外光高程模型計算得之崩塌潛感之差值，其中 (a)~(e) 分別為測試例 1~5 的結果

Fig.10 The differences between the landslide susceptibilities from the UAV-based RGB and NIR imaging in cases 1(a), 2(b), 3(c), 4(d), 5(e)

為進一步了解本研究所計算的崩塌潛感值與實際崩塌地之關聯性，本研究計算實際崩塌地與崩塌潛勢值的符合率 (表 3)，並將實際崩塌地範圍中各網格之崩塌潛感值繪製成圖 11 之立體柱狀圖，圖 11 中長柱即為各網格之潛感值，長柱之高度越高、高潛勢值之密度越密則表示預測結果之準確度越高。

比較 5 組測試例中，可發現測試例 1 與測試例 2 之 RGB 影像之崩塌地網格潛勢值在 $P=0.75$ 的門檻均高於 NIR 影像之崩塌地網格潛勢值，而測試例 3 在 $P=0.75$ 的門檻，NIR 影像之崩塌地網格潛勢值則略高於可見光影像之崩塌地網格潛勢值。比較前三組測試例之預測能力，可以發現測試例 1 之符合率高於

測試例 2 且遠高於測試例 3。進行因子複選作業時，坡度之成功率曲線下面積為眾因子中最大，分析測試例 3 的結果，其在潛勢值 $P = 0.5$ 已達到 62%，顯示具有不錯的預測成果，但在 $P=0.75$ 的階段，則僅有 13%，表示若單獨使用坡度做為崩塌潛勢因子顯然不足。而由測試例 2 中可發現加入坡向因子能夠大幅提高結果的準確度，表示坡向因子對於本研究地區之崩塌預測是不可或缺的。另外，測試例 1 中顯示地形起伏度對符合率僅小幅度提升，表示此因子在本區域對崩塌的發生影響不大。若比較測試例 4 與 5，可發現崩塌潛勢 $P=0.75$ 以上之符合率，測試例 4 之 RGB 與 NIR 影像均為 28% 左右，而測試例 5 之

RGB 影像為 1.4%，NIR 影像為 6.3%。測試例 4 與 5 之崩塌潛勢與實際崩塌地之符合率皆遠低於測試例 1~3 之成果。此外，觀察測試例 5 之崩塌潛勢圖（圖 11(e) 之底圖），發現若僅以剔除因子進行崩塌潛勢分析，其全區之潛勢分界相當模糊且過於相近，與實際崩塌情形相去甚遠。

整體趨勢顯示 RGB 影像產製之高程模形，對崩塌地的預測能力較 NIR 影像產製之高程模形為佳，判斷可能的因素為 RGB 影像之地景特徵較 NIR 影像細緻，因此其產製之 DSM 較為精準，可以獲得較佳的崩塌潛勢預測結果。

表 3 實際崩塌地位於崩塌潛感值大於 0.25, 0.5 和 0.75(25%, 50% 和 75%) 之機率統計

Table 3 The percentages (%) of the real landslide areas where the landslide susceptibilities are over 0.25, 0.5 and 0.75

Results derived from	Used factors	percentages (%)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
RGB images		>25%	99.8	100	94.7	95.3	99.7
		>50%	97.5	97.3	61.0	69.4	55.7
		>75%	81.4	79.9	12.6	28.7	1.4
NIR images		>25%	99.4	98.9	94.8	93.0	99.7
		>50%	95.8	92.1	62.6	67.0	60.8
		>75%	75.5	60.4	12.7	28.0	6.3

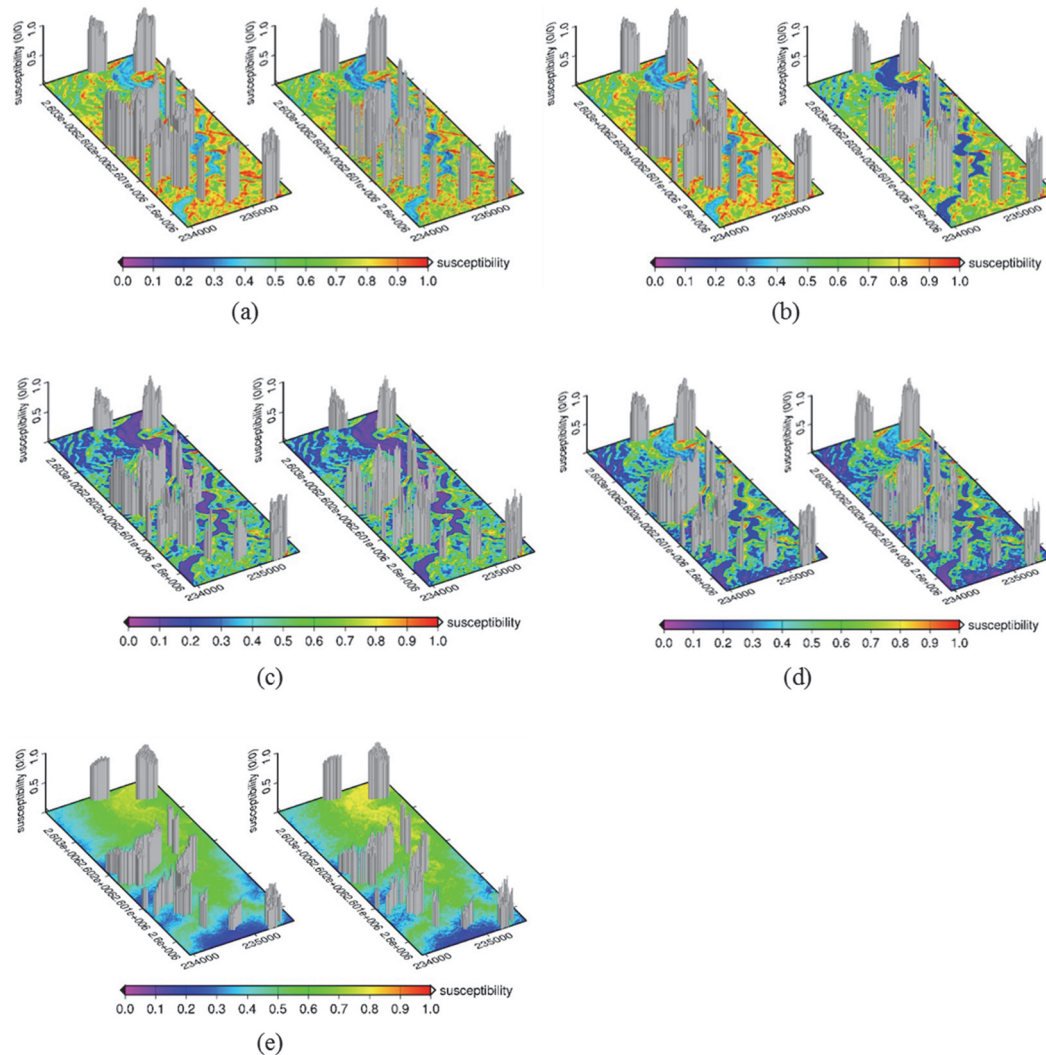


圖 11 實際崩塌地在可見光高程模型與近紅外光高程模型之崩塌潛感值，其中 (a)~(e) 分別為測試例 1~5 的結果。各圖中左邊為可見光崩塌潛感值，右邊為近紅外光高程模型崩塌潛感值

Fig.11 The landslide susceptibilities (vertical bars) at the landslide areas from the UAV-based RGB(left) and NIR(right) imaging in cases 1(a), 2(b), 3(c), 4(d), 5(e)

六、結論與建議

本研究區域為南投縣信義鄉神木村，以 UAV 搭載 RGB 與 NIR 相機取得航拍影像，並針對地形因子做崩塌潛勢分析，經複選作業選定高程、坡度、總曲率、坡向、地形起伏度、地形粗糙度等六項因子，組合 5 組測試例進行羅吉斯迴歸，並進一步建立各測試例之崩塌潛感值。本研究整理崩塌潛勢、影像處理、精度分析、影像判釋等相關研究結果得到下列幾點結論與建議。

- (一) 以內政部之四等衛星控制點驗證本研究之 DSM 高程，在控制點位置部分，RGB 影像產製 DSM 之誤差平均值與標準偏差分別為 1.783 公尺與 0.953 公尺，其成果明顯優於 NIR 影像產製之 DSM (誤差平均值與標準偏差分別為 4.322 公尺與 2.236 公尺)。
- (二) 以羅吉斯迴歸分析結果得到 RGB 與 NIR 影像之迴歸模型做係數比較，發現三項因子中以坡度與坡向為崩塌發生之重要因子。
- (三) 將崩塌潛感圖與實際崩塌區位做對照，顯示 RGB 影像產製之地形預測結果與實際崩塌情形較 NIR 影像產製之地形預測結果更為相近。
- (四) 5 組崩塌潛感值測試例中，以測試例 1 成果最佳、測試例 2 次之，測試例 4 與 5 均不甚理想。
- (五) 本研究之崩塌潛感預測水準雖然在可接受範圍，但中高潛勢的面積略顯過大，為使其更加準確，未來可考慮加入其他崩塌相關因子進行分析 (包括地質因子、區位因子等環境因子，或地震、降雨事件等誘發因子)，使得中高潛勢之面積縮小至與實際崩塌情形更為接近，令此預測崩塌潛感之方式更加完善。

誌 謝

本文為科技部研究計畫「固定翼無人飛行載具近紅外光影像輔助山區土砂變化量之研究」(計畫編號：MOST 102-2622-B-005-005-CC2) 部分成果，謹此致謝。

參考文獻

- [1] 內政部國土測繪中心 (2006)，「e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統 VBS-RTK 定位測試成果報告」，行政院內政部國土測繪中心編印，台中。(NLSC (2006). *The test results of VBS-RTK positioning of E-GPS, Final report*, National Land Surveying and Mapping Center of the Ministry of Internal Affairs, Taiwan. (in Chinese))
- [2] 水土保持局 (2014)，「水土保持相關法規」，行政院農委會水土保持局編印，南投。(SWC (2014). *Regulations of soil and water conservation*, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Taiwan. (in Chinese))
- [3] 李馨慈 (2011)，「重大地震地表擾動衰減特性於震後高強度降雨之山崩潛勢分析」，國立成功大學資源工程學系博士論文。(Li, S.T. (2011). *The analysis of potential in heavy rainfall-induced landslides affected by the attenuation pattern of ground disturbing after a major seismic event*, Phd Thesis, National Cheng Kung University. (in Chinese))
- [4] 洪雨柔 (2013)，「降雨對山崩潛勢分析之影響-以南橫公路 50 至 110 k 沿線為例」，中興大學水土保持研究所碩士論文。(Hong, Y.J. (2013). *Rainfall on landslide susceptibility analysis-A case study along 50 to 110k section of the southern cross island highway, Taiwan*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese))
- [5] 張弼超 (2005)，「運用羅吉斯迴歸法進行山崩潛感分析-以台灣中部國姓地區為例」，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。(Chang, P.C. (2005). *Using Logistic Regression to assess landslide susceptibility-A case study in Kouhsing area, central Taiwan*, Master Thesis, National Central University, Taiwan. (in Chinese))
- [6] 許惠瑛 (2007)，「臺灣中部地區降雨誘發崩塌之影響因子研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。(Hsu, H.Y. (2007). *Study on the control factors of rainfall induced landslides in central Taiwan*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese))
- [7] 區悅生 (2014)，「以羅吉斯迴歸法建立陳有蘭溪集水區山崩潛感圖之研究」，中興大學水土保持學研究所碩士論文。(Ou, Y.S. (2014). *Application of the Logistic Regression method in landslide susceptibility mapping-using Chenyulan stream watershed as an example*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese))
- [8] 廖振廷 (2011)，「利用近紅外光影像之近景攝影測量建立數值地表模型之研究」，國立政治大學地政研究所碩士論文。(Liao, C.T. (2011). *Construction of digital surface model using Near-IR close range photogrammetry*, Master Thesis, National ChengChi University, Taiwan. (in Chinese))
- [9] 詹勳全、陳柏安、溫祐霆 (2015)，「以地理資訊系統搭配羅吉斯回歸、不安定指數及支撐向量機 建立山崩潛感之比較分析」，中華水土保持學報，46(4)，213-222。(Chan, H.C., Chen, P.A., and Wen, Y.T. (2015). "A GIS-based comparative study of the use of a Logistic Regression, the instability index method and a support vector machine for landslide susceptibility analysis." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 46 (4), 213-222. (in Chinese))
- [10] Choi, J., Oh, H.J., Lee, H.J., Lee, C., and Lee, S. (2011). "Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS." *Engineering Geology*, 124, 12-23.
- [11] Dai, F.C., and Lee, C.F. (2002) "Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong." *Geomorphology*, 42, 213-228.
- [12] Hwang, C., Hsu, H.J., and Huang, C. (2013). "A new geoid model of Taiwan: Applications to hazard mitigation, environmental monitoring and height modernization." *Taiwan Journal of Geoinformatics*, 1(1), 57-81. (in Chinese)
- [13] Nagai, M., Chen, T., Shibasaki, R., Kumagai, H., and Ahmed, A. (2009). "UAV-Borne 3-D Mapping System by Multisensor

- Integration.” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(3), 701-708.
- [14] Strecha, C., Küng, O., and Fua, P. (2012). Automatic mapping from ultra-light UAV imagery, EuroCOW 2012, Barceloa, Spain, February 8-10.
- [15] Wilson, J.P., and Gallant, J.C. (2000). Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley and Sons: New York, USA.
- [16] Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J.F., and Wobbe, F. (2013). “Generic mapping tools: Improved version released”. EOS Trans. San Francisco, USA: AGU.
- [17] Wolf, P., and DeWitt, B. (2000). Elements of Photogrammetry with Applications in GIS 3rd Edition. Imprint: Boston : McGraw-Hill.

2017 年 08 月 28 日 收稿

2018 年 03 月 19 日 修正

2018 年 04 月 25 日 接受

(本文開放討論至 2018 年 12 月 31 日)