

# 以無人機技術分析匹亞桑溪集水區二維影像變異及三維土方量變化

蕭宇伸<sup>(1)\*</sup> 張榮傑<sup>(2)</sup> 陳星華<sup>(3)</sup> 卓宥瑄<sup>(2)</sup>

## 摘要

本研究利用研究區域之無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技術獲取研究區域兩期影像點雲,再以自行發展之程式進行二維影像變異偵測及三維土方量變化計算。計算方法採用綠葉指標(Green Leaf Index, GLI)並搭配門檻值之設定。研究區域為台中市和平區匹亞桑溪集水區下游一帶。影像拍攝日期分別為 2021 年 8 月 5 日與 8 月 12 日。本研究結果發現,在二維變異點分析中,先分別計算出前後兩期影像每一個網格的 GLI 值,並將 GLI 門檻值設定最小值 0 與最大值 0.03 時,具有最佳之成果;在三維土方量變化分析中,若將 GLI 配合門檻值設定於最大值 0.02 時,具有最佳之成果。研究顯示在研究區域在 2021 年 8 月 7 日強降雨後,約有 522,955 m<sup>3</sup> 之土砂運移。期望本研究結果能作為環境監測與變遷分析等應用之參考。

(關鍵詞：UAV、GLI、匹亞桑溪。)

## Analysis of 2D Image Change and 3D Earthwork Volume Change in Pi-Ya-Sang Creek Watershed with UAV Technology

Yu-Shen Hsiao<sup>(1)\*</sup> Jung-Chieh Chang<sup>(2)</sup> Xin Hua Chen<sup>(3)</sup> Yu-Hsuan Cho<sup>(2)</sup>

Associate Professor<sup>(1)</sup> PhD Student<sup>(2)</sup> Graduate Student<sup>(3)</sup> Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung-Hsing University, Taiwan

---

(1)國立中興大學水土保持學系副教授(通訊作者 e-mail: yshsiao@nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系博士生

(3)國立中興大學水土保持學系碩士生

## ABSTRACT

We used the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology to obtain the orthomosaics and point clouds from photographs of two periods, and then used a self-developed program to detect 2D image change and calculate 3D earthwork volume change in the study area. The algorithm was the Green Leaf Index (GLI) combined with the setting of the threshold value. The study area was located in the lower reaches of the Pi-Ya-Sang Creek watershed in Heping District, Taichung City. The two UAV photography missions were carried out on August 5 and August 12, 2021 respectively. In the 2D image change detection, we calculate the GLI values for each grid of the two phases separately. The best result was obtained if the GLI threshold value was set to the minimum of 0 and the maximum of 0.03; in the 3D earthwork volume change calculation, the best result was obtained if the GLI threshold value was set to the maximum of 0.02. The study showed that after the heavy rainfall in the study area on August 7, 2021, about 522,955 m<sup>3</sup> of soil and sand migrated. We expected that the results of this research can be used as a reference for applications such as environmental monitoring and change analysis.

**(Keywords :** UAV , GLI, Pi-Ya-Sang Creek)

## 前言

台灣位於板塊交界處，地震次數頻繁，導致台灣山區地形陡峭，河川坡陡流急，又因近年來極端氣候使高強度降雨集中，原本脆弱的土坡地在夏、秋季節易遭受侵襲，造成土砂災害日益嚴重，河川土砂含量也因此大幅上升；除了引發嚴重水患之外，亦造成高山或河流匯集處等地區發生重大山崩與土石流災害，導致多處道路邊坡路基流失以及交通中斷等事故。

每當發生重大的崩塌事件或是河道上大量土砂運移，往往會透過實地勘察或是拍攝航照，以提供即時的資料為災區做變異的判釋與分析，而近年來無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的高度發展，可協助使用者快速獲得航空照片，透過後續軟體的應用建立災區之數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)、正射影像與三維點雲等，這些 UAV 特點讓此技術大量應用於環境規劃治理與河道變遷分析等水土保持防治課題。

過去針對這方面的研究文獻包括：徐金煌等(2015)利用 UAV 拍攝之影像資訊透過專業後製處理軟體 Pix4Dmapper 產製正射影像與數值地表模型，其成果具備快速、自動化產製與高精度等優點；申承翰(2013)以 UAV 影像建製猴山岳、光復等地區 DSM，並藉由去除雜訊、地表樹木與人造建物後，產製出數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，再與現有實測資料做比對，以評估所建置的數值地形模型之高程精度評估；李國維等(2019)於大規模崩塌潛勢區應用 UAV 調

查潛勢區的地形、地質及災前災後的地表變化，探討如何運用 UAV 輔助危險性較高的大規模崩塌場址調查；周天穎等(2014)透過旋翼型無人載具搭載非量測型相機及全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)獲取高解析度的地面影像，蒐集與分析坡地災害環境資訊，建立 3D 立體模型進行空間量測分析。其研究成果可應用於災後緊急分析，以推估邊坡崩塌範圍、土方量並建置崩塌地的立體模型；田坤國等(2017)應用 UAV 進行砂石堆體積評估之研究，相比於雷射掃描儀，UAV 具備了快速且成本低的優點，透過垂直航拍之航線規畫較容易的特性，能夠進行大面積的砂石堆體積評估；Carter et al., (2007)研究說明高解析度之點雲資料能夠符合毫米等級的量測精度，即使被植被環繞也能夠正確的建立地表地形；Niethammer et al., (2012)利用 UAV 監測大型崩塌地邊坡上的紋理及裂隙，此技術可觀測持續發生位移的區域。

除了上述研究之外，本研究團隊近年來在 UAV 有不少之研究，包括蕭宇伸等(2014)、蘇柏軒和蕭宇伸(2015)、白絜成等(2015)、張崴等(2017)、蕭宇伸等(2018)、蕭宇伸和陳祥茵(2020)、蕭宇伸等(2021)，這些研究大多以 UAV 獲取研究地區正射鑲嵌圖、DSM 與點雲以進行坡地相關地形計算為主，相關成果大致不錯。

由上述研究可得知，UAV 在水土保持相關監測應用上，已經廣泛使用，然而絕大部份 UAV 是搭載可見光相機進行影像拍攝，故在過去文獻中，將 UAV 影像與遙測指標整合在山坡地的研究很少，這是因為常用的遙測指標，例如常態化差值植生指標

( Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，需要有近紅外光波段的值。本研究以 UAV 技術搭配可見光相機，獲取大甲溪支流匹亞桑溪集水區一帶之影像並建置正射鑲嵌、DSM 與三維點雲，再用自行發展的影像判釋程式輔以可見光遙測指標(Motohka et al., (2010)； Lim et al., (2019)； Muraoka et al.,(2013))分析匹亞桑溪集水區二維影像變異及三維土方量變化，這是過去極少的研究。

研究中選用的可見光遙測指標為綠葉指標(Green Leaf Index, GLI)，GLI 是偵測植物葉片葉綠素含量十分有效的指標(Yuliantika et al.,2016)。根據過去研究，可見光指標常應用於植被判別，(Gitelson et al.,2002)基於植被與土壤對可見光反射特性的不同，去建立並估計植被的分布，(Lim et al.,2019)將可見光指標套用在航空攝影照片上，根據其研究成果，證明了 GLI 公式效果良好，不管是都市或是森林地區的植被判別能力都有不錯成果。

## 研究區域概況

本研究區域位於匹亞桑溪集水區下游，接近大甲溪匯流處，位於臺中市和平區大甲溪發電廠青山分廠旁，與中橫公路交接處，如圖 1 表示，研究區域約 1km<sup>2</sup>，高程介於 900m 至 1400m 之間。2004 年敏督利颱風豐沛的雨量，在此地區造成嚴重土石流災害，大量的土石堆積物，阻塞行水河道。鄭錦桐等(2007)研究指出在豪雨頻率年 200 年的情況下，大甲溪崩塌土石量以志樂溪、匹亞桑溪最大。匹亞桑溪地質主要以

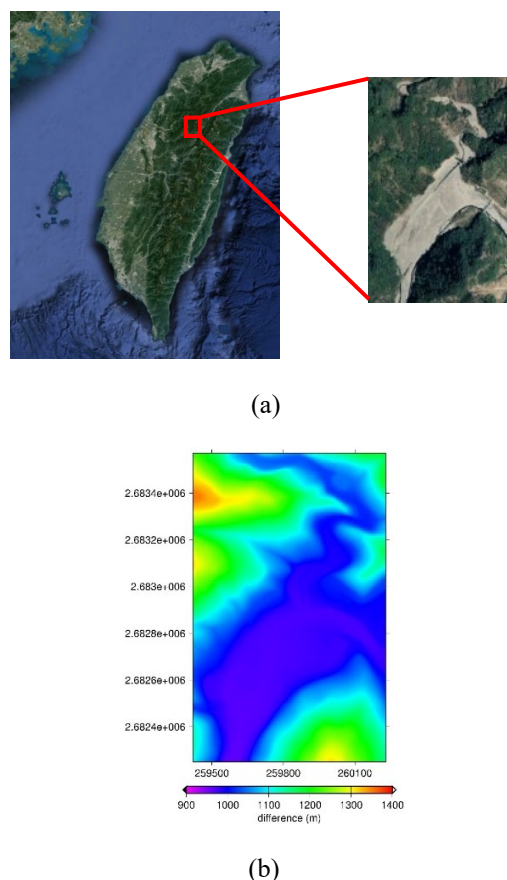


圖 1 (a)匹亞桑溪集水區位置圖(資料來源為 Google Earth)與(b)地形圖，圖中使用之坐標系統為 TWD97 NE

Fig.1 The Location (a) (Source: Google Earth) and terrain (b) of Pi-Ya-Sang Creek watershed. The coordinate system shown in (b) is TWD97 NE (unit: meter).

四稜砂岩組成，其特性為岩體易碎裂，含水量高及具有發達之剪裂帶構造(陳銘風，2005)，在全球極端氣候的影響下，高強度的降雨發生機率增加，加上經歷多次地震影響，大部份的土砂構造鬆散並造成上游地區發生大規模的崩塌地，坡腳的位置大量堆積碎裂鬆散的崩塌地材料，這些崩塌地材料成為了下游地區堆積段的土砂來源之一(陳文

福等，2011)。

由上述研究資料顯示，此集水區易受降雨事件影響發生崩塌事件，且大甲溪流域之於灌溉、給水、發電、水庫堰壩及防洪等面向的相關設施對於下游民眾的整體水利資源運用影響甚巨，故針對上游部份各集水區的調查就顯得相當重要。而 2021 年 8 月 7 日在該地區發生豪雨事件，根據中央氣象局逐日降水年表查詢，在最靠近此研究區域之德基測站在 24 小時累積了 188mm 之降雨量，造成下游段土石運移，本研究利用 2021 年 8 月 5 日與 2021 年 8 月 12 日之無人機空拍資料進行分析，比較此豪雨事件前後對該區域地表面造成的變異與河道上的土方變化。

## 研究方法

研究流程圖如圖 2 所示：

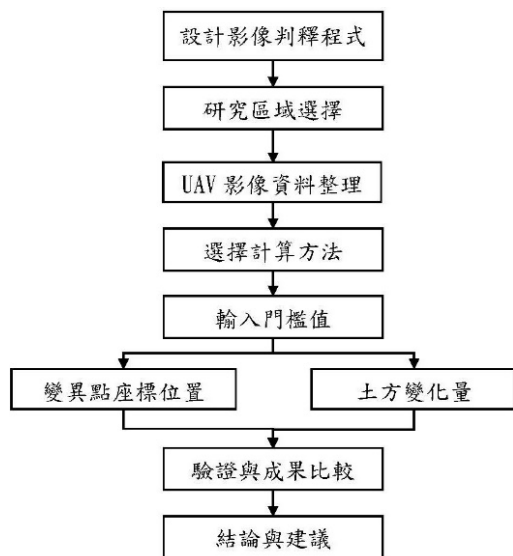


圖 2 研究流程圖

Fig.2 Research process

無人機航拍前必須先確認拍攝範圍再進行飛航任務規劃，規劃原則為航線左右重疊度須大於 50%，前後照片重疊度須大於 70%，飛行高度則依地面解析度及相機類型來設定，航線區域須較拍攝區域大以確保模型的完整。拍攝方式以相機鏡頭垂直之航拍，本研究無人機航線示意圖如圖 3 所示。



(a)



(b)

圖 3 匹亞桑溪集水區航線圖，(a) 拍攝日期為 2021 年 8 月 5 日、

(b) 拍攝日期為 2021 年 8 月 12 日

Fig.3 The flight tracks of Pi-Ya-Sang Creek watershed in (a)2021/08/05, and (b)2021/08/12.

本研究透過 Pix4Dmapper 軟體，分別將 2021 年 8 月 5 日空拍照片(217 張，對地航高約 120 m)與 2021 年 8 月 12 日空拍照片(193 張，對地航高約 120 m)輸入軟體，經由軟體計算後得到兩期影像的正射鑲嵌圖與三維點雲，兩個時期的正射鑲嵌圖如圖 4 所示。

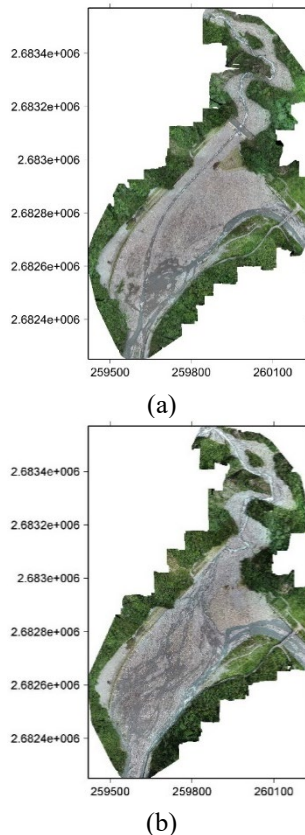


圖 4 匹亞桑溪集水區之兩期正射鑲嵌影像，(a) 拍攝日期為 2021 年 8 月 5 日、(b) 拍攝日期為 2021 年 8 月 12 日。圖中坐標系統為 TWD97 NE，單位為公尺。

Fig.4 The orthomosaic images of Pi-Ya-Sang Creek watershed in (a)2021/08/05, and (b)2021/08/12. The coordinate system shown in the figures are TWD97 NE (unit: meter).

在三維點雲等資料方面，由於 Pix4Dmapper 解算得的三維點雲資料並非規則網格格

式，本研究利用通用製圖工具軟體(Generic Mapping Tools, GMT)( Wessel et al., 2019)，將三維點雲資料進行內差與外差計算，以獲得 1m×1m 規則網格式。在影像判釋部分，本研究利用 GLI 遙測指標作為植被篩選的準則，GLI 計算式為(Yuliantika et al.,2016)

$$GLI = \frac{2g-r-b}{2g+r+b} \dots \dots (1)$$

其中 g 為綠光反射值，r 為紅光反射值，b 為藍光反射值。當 GLI 計算值小於 0 的區域可視為無植被生長的裸露地，當 GLI 計算值大於 0 的區域則可視為有綠色植物覆蓋 (Louhaichi et al.,2001)，從(1)式中可發現，綠光反射值對 GLI 計算值影響較大。本研究以自行發展的 Fortran 計算程式，將兩期空拍點雲逐一帶入，並透過 GLI 最小以及最大門檻值設定，來計算研究區位每一個網格點(1m 空間解析度)的二維影像變異及三維土方量變化。

在二維影像變異計算中，當某一網格點在兩期影像中的 GLI 計算值差距到一定程度時，則視為發生影像變異，程式將輸出該位置的坐標，例如某網格點在前期影像中之 GLI 計算值小於門檻值最小值則被視為裸露地，而該網格在後期影像中 GLI 計算值若大於門檻值最大值，視為植被覆蓋。若為相反狀況(某網格前期 GLI 計算值大於門檻值最大值，而後期 GLI 計算值小於門檻值最小值)，代表該網格從原本植生良好轉變為地表裸露，程式也會輸出該位置的坐標。門檻值最小值與最大值的差距必須適當，若兩門檻值差距太大，代表搜尋影像變異網格將趨於嚴格，將造成搜尋到的變異點過少；反之，若兩門檻值差距太小，代表搜尋影像變異網格將趨於寬鬆，將造成搜尋到的變異點過

多。

在三維土方量變化計算中，同樣透過 GLI 門檻值最大值的設定來移除河道上或兩側的植被範圍，與二維方法的原理相似，都要先計算出每個網格的 GLI 值，但在三維土方量變化計算中，某計算網格在前後期影像中其中一期的 GLI 計算值大於所設定的門檻值，程式就會將該網格視為植被範圍而去除，避免這些位置被計算於土方量變化。

## 結果與討論

2021 年 8 月 7 日在匹亞桑溪集水區一帶發生豪雨事件，本研究兩期影像拍攝日期分別為 8 月 5 日與 8 月 13 日，前後間隔一個星期，由於兩期影像時間相隔接近，沒有落葉林受季節影響造成樹葉顏色差距過大問題，故若有發生影像變異，應為此豪雨事件造成的影響。以下針對二維影像變異分析及三維土方量變化分析成果分別探討。

### 二維影像變異分析

分析成果如圖 5 所示，計算過程中，GLI 門檻值最小值/最大值設定從較寬鬆的 0/0.01 到較嚴格的 0/0.04。計算過程中當某一期網格 GLI 計算值小於門檻值最小值，而另外一期網格 GLI 大於門檻值最大值時，即代表該網格為變異點(圖 5 紅色點位)。若將圖 5 與圖 4(a)、圖 4(b) 等正射鑲嵌原圖相比，可發現圖 4 中兩期影像變化明顯處，與圖 5(c)紅點處位置較吻合，這代表 GLI 門檻值 0/0.03 擁有最佳成果，也顯示本研究自行發展的程式有成功計算出發生變異的位置。由圖 4 中亦可發現主要發生變異的位置在主河道出

現的草地，以及受土砂堆積造成河流改道的部分。在圖 5 中，有部份紅點位於河道側邊道路的點位，並不合理，推測原因為道路右側植生高於路面許多，樹頂容易受到風干擾而晃動，在拍攝時遮蔽路面位置，讓程式判定路面變成植被覆蓋而輸出其點位。

### 三維土方量變化分析

在三維土方量變化分析中，雖然同樣透過門檻值設定將植被範圍去除僅保留河道地形，但門檻值設定原理與二維變異點計算不同，在土方量變化分析中，只要某計算網格在前後期影像中其中一期的 GLI 計算值大於所設定的門檻值，程式就會將該網格視為

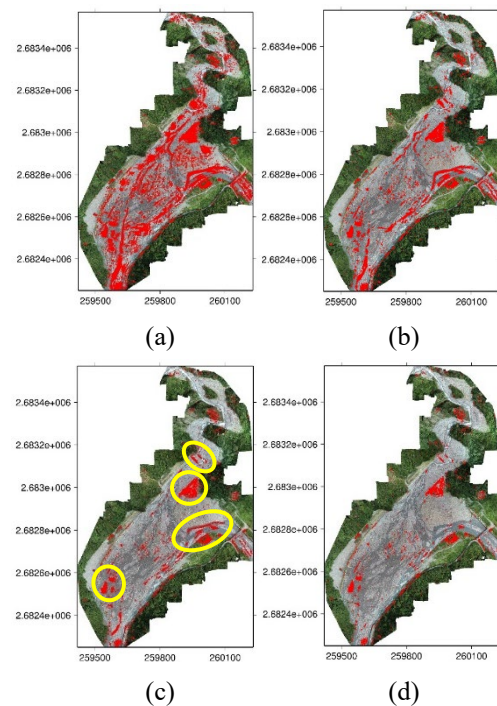


圖 5 二維變異分析成果，其中 (a) 門檻值為(0/0.01)、(b) 門檻值為(0/0.02)、(c) 門檻值為(0/0.03)、(d) 門檻值為(0/0.04)，紅色點位為變異點位置，黃圈處為變化明顯之

處，圖中使用之坐標系統為 TWD97 NE，單位為公尺。

Fig.5 The results of 2D image change detection. The min/max threshold values in (a), (b), (c), and (d) are 0/0.01, 0/0.02, 0/0.03, and 0/0.04, respectively. The red dots are the positions with variation. The yellow circles are the locations with obvious change. The coordinate system shown in the figures are TWD97 NE (unit: meter).

植被範圍而去除，故在土方量計算中門檻值之設定只有最大值，透過此方法保留真正發生垂直方向變化的河道範圍。經過測試後發現當門檻值最大值設定在 0.02 與 0.03 時能夠得到較為合理的成果，如圖 6 與圖 7 所示，圖 6 中紅點處為本程式計算得到的非植生覆蓋之河道範圍，即位用於計算土方變化的網格點位，每一個網格均為 1m×1m 空間解析度，若與圖 4 正射鑲嵌原圖相比，成果大致吻合。若比較圖 6(a)與圖 6(b)，兩個成果均能將植被與流路之網格點位排除，但圖 6(b)有搜尋到較多不需計算之點位(例如路面網格點)，故門檻值最大值 0.02 所計算之成果(圖 6(a))，應為河道土方量變化計算之最佳成果。

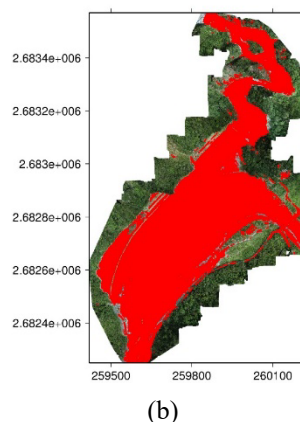
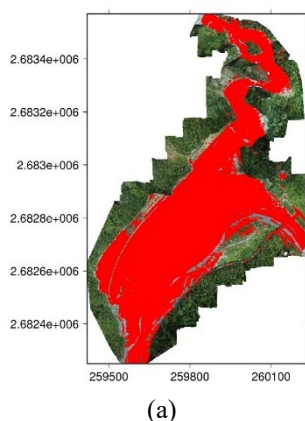


圖 6 三維土方量變化分析成果，其中(a)門檻值最大值 0.02、(b)門檻值最大值 0.03。紅色點位為有計算土方量變化的位置。圖中使用之坐標系統為 TWD97 NE，單位為公尺

Fig.6 The results of 3D earthwork volume change. The maximum threshold values in (a), and (b) are 0.02, and 0.03, respectively. The red dots are the positions where the earthwork volume change is calculated. The coordinate system shown in the figures are TWD97 NE (unit: meter).

另外由圖 7 可發現，高程增加的地方(紅圈處)有防砂壩蓄水處以及河道下半部的大面積土砂，與圖 4 正射鑲嵌圖吻合，高程減少的部分(藍圈處)為與大甲溪的匯流處，推測其原因為受大甲溪冲刷導致高程下降，並將冲刷的土砂往下游堆積，而綠色圓圈處為計算誤差處，此地區為橋樑兩側處，高程差距過大，故當空拍影像平面坐標精度不足時，容易造成高程計算誤差，此計算誤差在圖 7(a)與圖 7(b)都有出現，未來將針對此部份進行改善。計算土方增減量成果如表 1 所示，推估這次降雨事件造成的土砂變化量在 GLI 門檻值最大值為 0.02 時，增加 522,956 m<sup>3</sup>，在 GLI 門檻值最大值為 0.03 時，增加 597,247

蕭宇伸、張榮傑、陳星華、卓宥瑄：  
以無人機技術分析匹亞桑溪集水區二維影像變異及三維土方量變化

m<sup>3</sup>。

表 1 三維土方量變化量計算成果

Table 1 The results of 3D earthwork volume change

| 門檻值  | 土方增加量(m <sup>3</sup> ) | 土方減少量(m <sup>3</sup> ) | 網格大小(m) | 土砂變化量(m <sup>3</sup> ) |
|------|------------------------|------------------------|---------|------------------------|
| 0.02 | 526,921                | 3965                   | 1x1     | 522,956                |
| 0.03 | 602,982                | 5735                   | 1x1     | 597,247                |

明顯堆積處，藍圈為高程降低處，綠圈則代表計算誤差處，圖中使用之坐標系統為 TWD97 NE，單位為公尺。

Fig.7 The differences of earthwork volume changes. The maximum threshold values in (a), and (b) are 0.02, and 0.03, respectively. The red circles are the places where accumulated soil and sand; the blue circles are the places where the elevations are reduced; the green circles represent the places with errors. The coordinate system shown in the figures are TWD97 NE (unit: meter).

## 結論

本研究之結論與後續建議如下：

1. 本研究以 Fortran 程式語言發展一影像判釋計算程式，程式以 GLI 遙測指標搭配門檻值設定，可計算兩期影像之二維影像變異和三維土方量變化。
2. 研究區域位於匹亞桑溪集水區下游，2021 年 8 月 7 日在該地區發生豪雨事件，UAV 空拍影像日期分別為 2021 年 8 月 5 日與 2021 年 8 月 12 日，剛好位於豪雨事件前後日期。透過 Pix4Dmapper 軟體，分別將兩期空拍照片計算得正射鑲嵌圖與三維點雲。
3. GLI 門檻值最小值/最大值設定值為 0/0.03 時，二維影像變異有最佳之判釋成果，而 GLI 門檻值最大值設定值為 0.02 時，三維土方量變化有最佳之計算成果。推估這次降雨事件造成的土砂變化量在門檻值最大值為 0.02 時，增加 522,955 m<sup>3</sup>，在門檻值最大值為 0.03 時，增加 59,7247 m<sup>3</sup>。
4. 本研究以 Pix4Dmapper 產製的正射鑲嵌圖

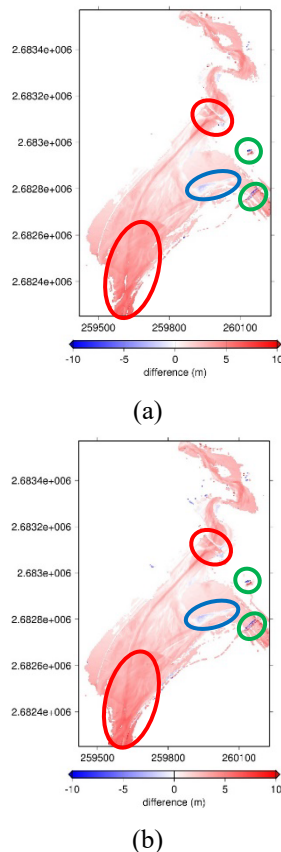


圖 7 三維土方量變化圖，其中(a)門檻值最大值 0.02、(b)門檻值最大值 0.03。紅圈為

與三維點雲，在橋樑附近因高低落差大產生模型誤差，造成此位置二維影像變異判釋和三維土方量變化計算產生誤差，後續 UAV 航拍重疊率應再提升，避免此現象發生。

5. 本研究計算得之土方變化量，後續將嘗試以地面測量技術(斷面測量或光達測量)相互驗證，以分析正確性。

6. 本研究發展的程式，目前僅選用 GLI 指標做為測試，未來將測試不同可見光遙測指標，例如常態化差異綠紅差值指標(Normalized Green/Red Difference Index, NGRDI)或可見光大氣抵抗指標 (Visible Atmospherically Resistant Index, VARI)進行分析。

7. 本研究發展之程式最大的特點在於能夠處理多個時期的影像資料，並能同時計算影像的二維變異點與三維地形變化量，期望此技術除了河道變遷外，也能做為後續山坡地開發、查報違規取締等應用。

### 誌謝

本研究無人機航拍照片由禹安工程顧問有限公司提供。

### 參考文獻

1. 田坤國、蔡佳勳、林冠甫 (2017),「應用 UAV 及雷射掃描儀進行砂石堆體積評估之研究」,航測及遙測學刊 22(2), 127-136。
2. 申承翰 (2013),「無人飛行載具影像數值地形模型建置及精度評估」,國立台北科技大學碩士論文。
3. 李國維、黎俊逸、潘以文、廖志中 (2019),「無人飛行載具於大規模崩塌潛勢區之輔助調查—以高雄市六龜區 D015 大規模崩塌潛勢區為例」,中國土木水利工程學刊 31(7), 659-670。
4. 周天穎、陳彥宏、蕭淵展 (2014),「應用無人載具(UAV)影像於坡地災害環境資訊蒐集與分析」,國土資訊系統通訊, 92, 2-17。
5. 徐金煌、張國楨 (2015),「以 Pix4Dmapper 進行 UAV 影像之空間資料產製」,中國土木水利工程學刊 27(3), 241-246。
6. 陳銘風 (2005),「三孔隧道於不同節理傾角開挖交互影響之探討」,國立台灣科技大學營建工程系碩士論文。
7. 陳文福、吳士杰、蔡明波 (2011),「匹亞桑溪集水區土石流事件之規模探討」,中華水土保持學報 43(3), 311-320。
8. 鄭錦桐、顧承宇、邱顯晉、林彥享、許世孟、張玉堉 (2007),「大甲溪上游土石災害潛勢評估方法之研究」,中興工程 95, 31-39。
9. 蕭宇伸、蘇柏軒、莊大賢、陳樹群 (2014),「2018 臺中花博舉辦地環境形先期調查：利用無人飛行載具與空載光達技術」,農林學報 63(1), 81-94。
10. 蘇柏軒、蕭宇伸 (2015),「以無人飛行載具系統(UAS)獲取國立中興大學校區三維地形之精度分析」,水土保持學報 47 (2), 1349-1366。
11. 蕭宇伸、田仲傑、彭思顯 (2015),「易

12. 淹水區危險等級評估-以彰化縣山坡地為例」, 水土保持學報 47(3), 1395-1406。
13. 白絜成、劉益誠、蕭宇伸、連惠邦、林秉賢 (2015), 「無人飛行載具掛載消費型攝影機應用於防災可行性研究」, 中華水土保持學報 46(3), 142-149。
14. 張崴、蕭宇伸\*、張榮傑(2017), 「UAV 航拍技術應用於河道變遷土砂監測和山區地形製圖之可行性分析」, 中華水土保持學報 48(1), 1-13。
15. 蕭宇伸、莊大賢、陳樹群、張榮傑(2018), 「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」, 中華水土保持學報 49(3), 142-153。
16. 蕭宇伸、陳祥茵(2020), 「以無人機 PPK 與 RTK 技術建置地形圖之可行性評估」, 水土保持學報 50 (3), 2485 - 2496。
17. 蕭宇伸、廖子寧、沈鈺旻、卓宥瑄(2021), 「手機定位 APP 與 UAV 技術應用於山坡地農路調查工作」, 水土保持學報 51 (2), 2789-2804。
18. Carter, W.E., Shrestha, R.L., Slatton, K.C., 2007. "Geodetic laser scanning " P hys. Today,, 60(12), 41 - 47
19. Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., and Rundquist, D., 2002. "Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. " Remote Sensing of Environment, 80(1), 76 - 87
20. Louhaichi, M., Borman, M.M., and Johnson, D.E., 2001. "Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. " Geocarto International, 16(1), 65 - 70
21. Lim, S.E., Ismail, R., Hashim, W., and Baharu, A., 2019. "The Use of VARI, GLI, and VIGREEN Formulas in De-tecting Vegetation in Aerial Images " International Journal of Technology, 10(7), 1385-1394
22. Motohka, T., Nasahara, K.N., Oguma, H., and Tsuchida, S., 2010. "Applicability of Green-red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. " Remote Sensing, 2(10), 2369 - 2387
23. Muraoka, H., Noda, H.M., Nagai, S., Motohka, T., Saitoh, T.M., Nasahara, K.N., and Saigusa, N., 2013. "Spectral Vegetation Indices as the Indicator of Canopy Photosynthetic Productivity in a Deciduous Broadleaf Forest. " Journal of Plant Ecology, 6(5), 393 - 407
24. Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J., and Joswig, M., 2012. "UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results " Engineering Geology, 128, 2 - 11
25. Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Sc

harroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H.  
F., and Tian, D., 2019. “The Generi  
c Mapping Tools version 6 “ Geoche  
mistry, Geophysics, Geosystems, 20,  
5556 – 5564.

26. Yuliantika, G., Suprayogi, A., and Su  
kmono, A., 2016. “Analisis Penguna  
an Saluran Visible untuk Estimasi Ka  
n-dungan Klorofil Daun Pade dengan  
Citra Hymap.” . Jurnal Geodesi Undi  
p, 5(2), 200 – 207

111 年 3 月 15 日收稿

111 年 4 月 1 日修改

111 年 4 月 6 日接受