

影像感測技術於邊坡運動監測之適用性初探

胡舒閔 陳明源 羅佳明*

摘要 本文主要探討影像感測技術於邊坡運動監測之適用性，藉由低成本、高解析度攝影機即時記錄邊坡滑動、傾倒及流動等過程，並以絕對差值分析法搭配門檻值評估邊坡地表運動過程。物理模型感測結果顯示，採用影像感測技術可即時偵測邊坡張裂隙發展、岩體變形與地表瞬間崩壞之區位，有效提升災前及災中預警之成效。實際山崩案例分析發現，順向坡滑動之感測特徵由初始傾斜長條型紅色區塊逐漸增加範圍，最終塊體於地面擴散後將造成紅色區塊瞬間擴大。而影像感測技術對於土石流速度及流動狀況之監測，亦可作為下游保全對象防災疏散之參考。此外，本研究亦初步歸納影像感測技術之應用限制，期能作為未來邊坡地表變動監測與相關研究之參考。

關鍵詞：影像感測技術、絕對差值分析法、物理模型、邊坡地表變動監測。

Applicability Study of A Slope Motion Monitor Using Video Motion Detection Technology

Shu-Min Hu Ming-Yuan Chen Chia-Ming Lo*

ABSTRACT This study primarily investigates the applicability of video motion detection (VMD) technology for detecting side-slope movement. This technology involves using an economical high-resolution camera to instantly record activities, such as side-slope sliding, toppling, and movement. Concurrently, sum of absolute differences (SAD) analysis was combined with the threshold value to assess the side-slope surface movement. The physical modeling detection results showed that the VMD technology instantly detects side-slope tension crack development, rock deformation, and the location of collapsing surfaces, thereby effectively improving the effectiveness of alarms before and during disasters. Actual landslide case analysis shows that dip-slope movement is detected through gradual expansion of initial slanted rectangular red blocks and instant magnification following the block expansion on the ground level. The monitoring mechanism of VMD technology for detecting the speed and movement of debris flow can be used as a reference in disaster prevention and evacuations of people living in downstream areas. Furthermore, this study generalizes the limitations of VMD technology. These generalizations can be used as a reference for future slope surface movement monitoring and related studies.

Key Words : Video motion detection technology, sum of absolute differences, physical modeling, slope surface movement monitoring.

一、前言

近年由於極端氣候影響，高強度豪雨甚至暴雨造成臺灣山區道路山崩災害頻傳，其災害往往造成人員傷亡、公共設施損失甚至交通阻斷等，如 2013 年 8 月 31 日豪雨造成之南迴列車撞擊土石流與基隆、瑞芳地區巨石崩落等多處山崩事件，均反應出目前國內邊坡監測範圍與即時預警技術不足之問題。

邊坡監測為邊坡滑動觀察以及預警的關鍵指標，其可掌握豪雨及地震期間構成之邊坡破壞狀況，以提前預警方式降低保全對象與公共設施之受災風險。一般常見之邊坡監測系統，常包含以下項目：(1) 降雨量、(2) 地下水壓、(3) 地表滑動量、

(4) 滑動面深度及變位量等。其中，滑動面之監測直接反應規模之大小，對於危險潛勢之評估甚為重要，為邊坡監測中不可或缺之觀察指標 (顏呈仰, 2010)。傳統的監測方法或儀器多以機械式地表傾斜儀、傾斜變動感應裝置、傾斜管、孔內傾斜計、地中伸縮計、GPS 量測法等。目前國內傳統邊坡監測多採用人工測量或半自動監測方式，其優點為安裝容易，儀器設備費用相較於自動化監測儀器為低，但其具有難即時獲取資料，缺乏自動化及預警功能，且人力需求量較大等缺點。

近年來邊坡監測則多以時域反射法 (time domain reflectometry, TDR)、光纖感測法等為主，其優點為可長期監測，耐久性較佳、維護容易，但仍有量測設備費用高、靈敏度較低

等缺點。而自動化監測已逐漸應用於地滑區，其中，時域反射法為採用電磁波進行監測及探查之方法，基本原理與雷達 (Radar) 相似，但 TDR 之電磁波侷限在一維之傳輸線系統中發送與接收。當 TDR 製波器發出之脈衝訊號在遇到斷面材質不同或幾何形狀不同時會產生反射訊號，因此可利用此原理來監測土體變動 (顏呈仰, 2010)。其優點為具連續性且可多點量測的感應器，加上不受設置方向的限制，不易受地下物質侵害、不因溼度、溫度、或地下水狀態的改變而有所影響，以及儀器設置簡便快速等，近年來在現地地滑狀況調查的應用上已頗有取代傳統系統的趨勢 (蘇苗彬, 廖建鑫, 2006)。

上述傳統監測方法，部分仍需採用人工方式在現場記錄讀數，如此一來不但費時，在豪雨發生或邊坡發生滑動時，將甚難即時取得現場監測記錄資料，其危險性亦大幅增加。而採用自動化監測方法，雖然可快速獲取邊坡監測資訊，但其設置成本較高，對於大範圍與大量之邊坡監測較不適用。近年來由於通訊普及、數位攝影功能提升與網際網路的日益發達，影像監測已逐漸應用到各種領域，尤其影像監測與分析可即時獲得邊坡變動訊息，以低成本進行遠端監控，並即時瞭解邊坡表面變化狀況，達到地表監測之目的。童士恒等人即曾以數位影像相關係數法 (digital-image correlation technique) 監測擋土牆變形，其基本原理為比對變形前後次級影像內之灰階值關係，於變形後影像中尋找變形前一次級影像的相對位置。其優勢在於利用低成本之攝影設備得到高精度量測結果，同時亦可將擋土牆變形之過程視覺化，增加土木相關設施變形研判之效果 (童士恒等人, 2008 & 2011)。然而，該方法仍需將錄製影像檔後處理為多張灰階影像，再逐一分析其擋土牆之變位置，甚難達到即時監測之目的。因此，本研究將採用另一種簡易影像感測方法，直接將影像錄製檔進行邊坡崩壞驅動與山崩運動感測分

析，藉由室內物理模型試驗與實際山崩案例影片測試結果，初步探討影像感測技術於邊坡監測之適用性。

二、研究方法

本文主要採用絕對值分析法 (sum of absolute differences, SAD) 進行邊坡感測分析，首先以室內物理模型進行測試，再應用於現地實際案例，藉此初步探討其可行性。其相關方法與室內物理模型試驗配置說明如下。

1. 影像絕對差值分析法

目前常用之影像感測分析與物件追蹤大致可區分為兩類：

- (1) 利用影像辨識技術針對即時攝影中之物體進行追蹤 (Shah, 2007; Kim, 1999; Haritaoglu, 2000)。
- (2) 利用 GPS 座標為基礎並結合攝影之視覺追蹤方法 (Tsai, 1987)。

本研究主要採用影像感測邊坡崩壞與滑動過程，故採用第一個方法，即於邊坡通視良好之處設置攝影機，搭配影像辨識技術進行邊坡滑動之追蹤。而 SAD 係以區塊比對 (block matching) 之方式進行影像區塊移動估測 (block motion estimation, BME)，藉此紀錄影像內容物之運動狀態，其相關運算公式如下：

$$SAD = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} |f^t(i, j) - f^{t-1}(i+x, j+y)| \tag{1}$$

其中， $f^t(i, j)$ 為目前畫面區塊中的像數值， $f^{t-1}(i+x, j+y)$ 為參考畫面中經由重建後區塊之像素值， x 、 y 為區塊移動之相對應位置。其 SAD 值越大，代表前後兩張影像差異越大，故可藉由 SAD 值評估影像內容物移動與否。

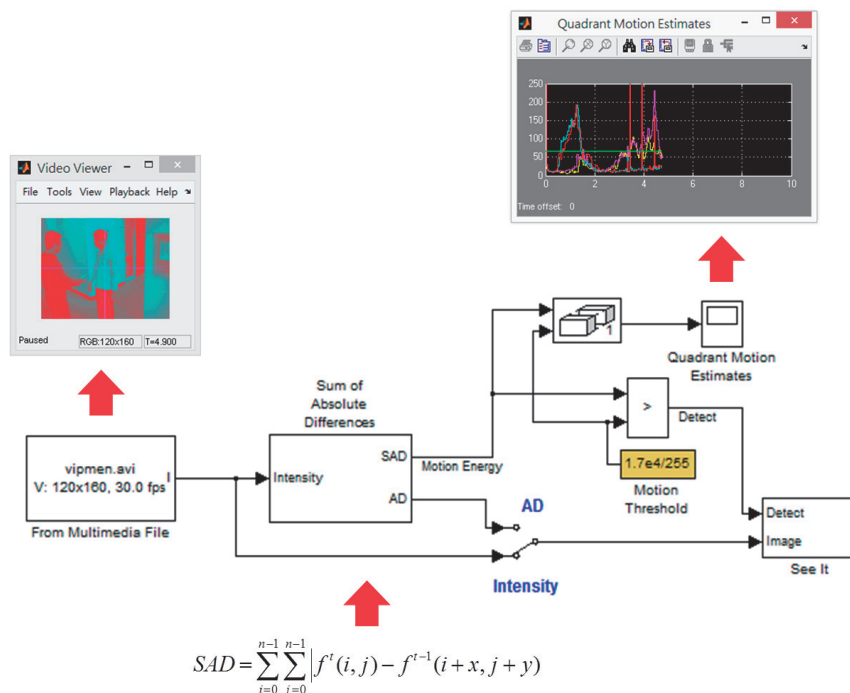


圖 1 影像感測程式之運算架構圖

Fig.1 The architecture diagram of the video motion detection program (Mathworks, 2010)

Mathworks Image Acquisition Toolbox 提供 MATLAB 與影像裝置溝通之管道, 透過指令可簡單作硬體溝通及 Video 擷取。其程式中已有一套採用 SAD 演算法進行物件追蹤之試用程式 (motion detect), 其可將擷取進來的攝影資料快速分析前後兩張影像之三個月可見光像素值, 計算相減後絕對值之總和, 並透過設定之門檻值決定影像內容物移動與否, 藉此透過視訊方式呈現整個感測監測過程 (圖 1)。圖 1 顯示, 該程式可直接將影片 (avi 檔案格式) 載入, 接著設定感測視窗 (step size) 並進行 SAD 運算分析。當程式運作時, 其 SAD 值將即時呈現於象限運動評估 (quadrant motion estimates) 視窗上, 並根據運動門檻值 (motion threshold) 設定評估 SAD 值是否高過門檻值, 超過門檻值者所偵測到之感測視窗將呈現紅色狀態。

2. 室內物理模擬試驗 I-順向坡與逆向坡崩壞模型

為瞭解影像感測方法之初步可行性, 本研究採用自行設計之山崩物理模型試驗儀 (圖 2) 進行測試, 其物理模型主要根據溪谷地形設計, 整個模型包含源頭、運移、堆積等三大區。模擬材料可放置於源頭區溪谷兩岸, 模擬順、逆向坡崩壞或板岩變形, 藉由上方降雨模擬器降下之雨水, 促使溪谷兩岸邊坡逐漸發生崩滑, 並利用 500 萬以上動態畫素攝影機進行崩滑過程監測, 即時將錄製影像傳輸至電腦進行感測, 藉此初步測試影像感測技術監測表面邊坡運動之適用性。

順、逆向坡模擬材料主要採用 3cm×3cm×2.5cm 之菱形研磨石 (圖 3), 其研磨石將排列至源頭之左右兩岸 (坡度統一調整為 35 度), 再以樹脂材料進行黏合。樹脂材料乾燥時整體研磨石接合處強度極高, 但仍具有相當程度之遇水弱化特性, 故相當適合模擬砂頁岩互層之弱化特性。以順向坡定義而言, 其係指一自然邊坡, 其坡面傾斜方向與層面一致或大致相同稱之, 一般長而緩, 沿地層落面方向產生平面滑動破壞; 而逆向坡則為坡面傾斜方向與層面相反者, 亦即層面以逆傾方向插入坡面之岩盤邊坡, 其主要破壞型式為受重力作用產生之傾倒崩壞 (柯昱岑, 2005)。圖 4 為本研究依其順向坡滑動特性進行之樹脂黏合方式, 其模型為長 12cm、寬 12cm、高 10cm 之試體, 主要將研磨石周緣進行大量樹脂黏合, 而平行坡面之上下端層面則以少量樹脂黏合, 藉此讓地表水容易滲入層面中促使膠結材料加速弱化。而逆向坡模型為長 9cm、寬 9cm、高 7.5cm 之試體, 其黏合方式與順向坡模型相反 (圖 5), 係將研磨石上下端進行大量樹脂黏合, 再於周緣層面黏合少量樹脂, 藉此讓地表水滲入與坡面近似垂直之層面中, 促使逆向坡模型因膠結材料弱化產生翻倒崩壞。

3. 室內物理模擬試驗 II-板岩邊坡變形模型

除了沉積岩區順向坡滑動、逆向坡傾倒為常見山崩災害外, 臺灣高山地區常可發現板岩變形之問題, 其變形範圍往往容易引致更大規模的崩塌災害 (Broili, 1967), 故本研究亦將列為另一個模型試驗與影像感測重點。板岩變形試驗材料係以球形研磨石 (直徑為 1cm) 並加入樹脂膠結成長 19cm、寬 11cm、高 11cm 之邊坡塊體 (圖 6), 其各層 (葉理) 間以紅色與灰色進行各葉理面之區隔, 以協助觀測及分析板岩變形之過程。當降雨模擬器啟動時, 地表水將滲入空隙中弱化膠結材料, 促成整體邊坡逐漸變形。

4. 現場試驗與實際山崩案例測試

由於室內物理模型試驗尺度上與現地有所差異, 且實際邊坡滑動時表面運動現象亦較複雜, 於野外實際感測時勢必會出現諸多問題, 故本研究亦於荖濃溪林道板岩邊坡進行現場試驗, 藉此瞭解其感測技術於現場邊坡滑動監測之限制。此外, 於 YouTube 上蒐集順向坡滑動案例與土石流現場模型試驗, 進行感測分析, 初步探討其適用性。

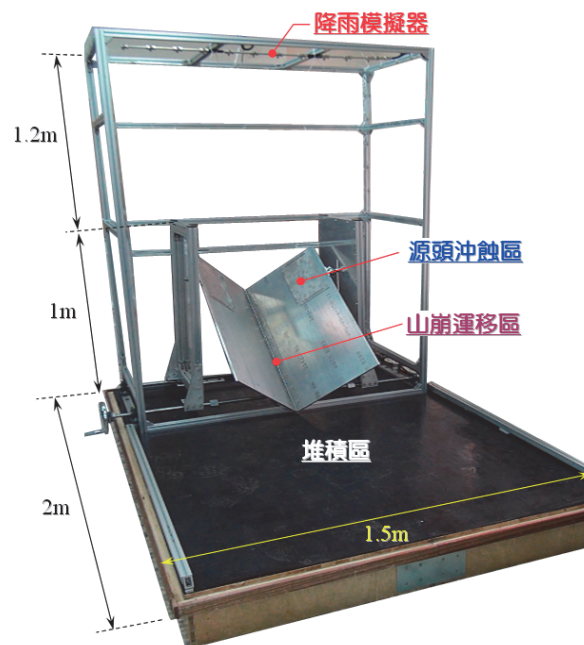


圖 2 山崩物理模型試驗儀

Fig.2 The landslide physical modeling

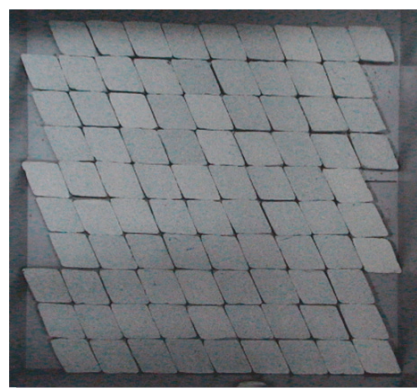
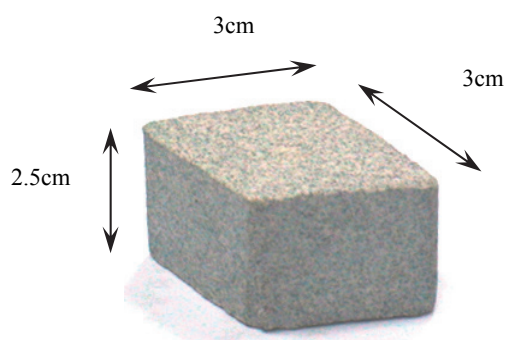


圖 3 模擬材料尺寸與排列示意圖 (Lo, C.M, 2009)

Fig.3 An illustration of the material size and installation

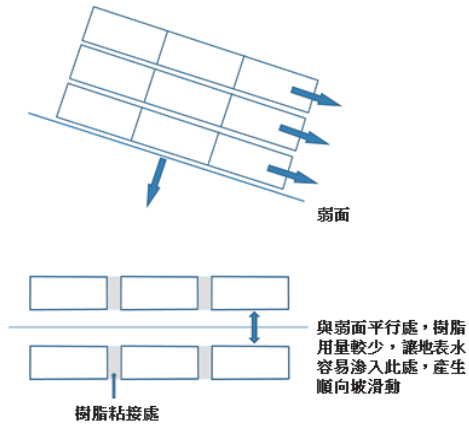


圖 4 順向坡物理模型黏合示意圖

Fig.4 An illustration of the coherence method for the physical modeling of the cataclinal slope

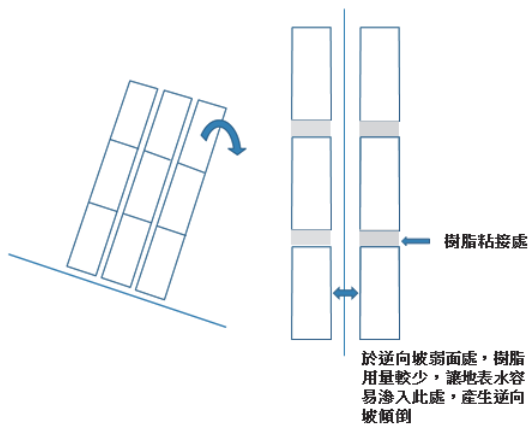


圖 5 逆向坡物理模型黏合示意圖

Fig.5 An illustration of the coherence method for the physical modeling of the anaclinal slope

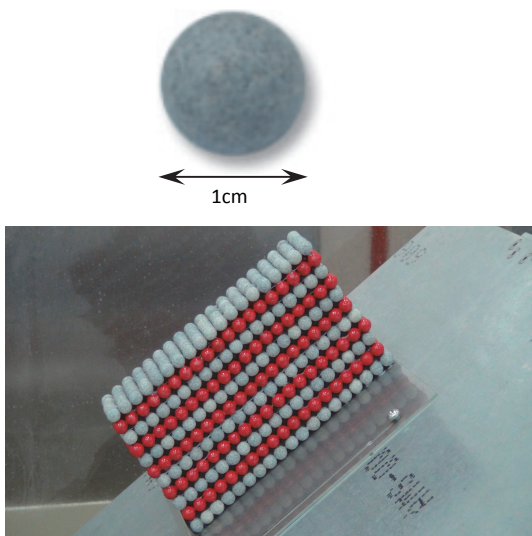


圖 6 板岩邊坡模型材料 (左) 與坡面裝置情形 (右)

Fig.6 The material of slate slope modeling (left) and installation (right)

三、研究結果

1. 室內物理模擬實驗 I 順向坡與逆向坡崩壞試驗

(1) 順向坡模型試驗

圖 7 為實驗 I—順向坡模型試驗過程與影像感測結果，整個試驗時間花費 3 分 34 秒，初始將模型放置於山崩物理模型試驗儀之源頭區，接著開啟降雨模擬器讓地表水逐漸滲入順向坡模型之空隙中，之後將攝影機架設於可清楚拍攝順向坡崩滑之位置，即時進行影像感測分析。經由多次測試後，其畫面中感測視窗設定為 300 格，SAD 運動偵測門檻值設定為 66.67 時，可合理感測出塊體滑動之徵兆，以下為順向坡模型試驗之過程：

- ① 將樹脂黏合而成之順向坡模型放置於源頭處，於初始狀態下，由於尚未降雨，其地表水尚未滲入模型空隙中，且岩塊間膠結之樹脂亦無弱化情形之發生，故整個順向坡模型於地形坡度 35 度之條件下，暫時呈現穩定之狀態 (圖 7(a))。
- ② 持續降雨約 2 分鐘後，樹脂開始軟化，順向坡模型前端崖頂開始出現裂縫現象，其影像感測亦偵測到其裂縫張開與岩體些微變形之現象 (紅色區塊部分) (圖 7(b))，其滑動前兆均屬於肉眼不易察覺之地表邊坡變動範圍。
- ③ 約 3 分 26 秒，最頂端之兩層岩塊，開始有局部岩塊因持續地表水入滲與弱化而產生滑落現象，影像感測亦可偵測到其運動情形 (紅色區塊部分) (圖 7(c))。
- ④ 接著 2 秒後，頂端之兩層岩塊因漸漸承受不住地表水入滲與弱化而在瞬間整體滑動，影像感測亦可成功偵測到順向坡模型上兩層岩塊之變動情形 (圖 7(d))。

(2) 逆向坡模型試驗

圖 8 為實驗 I—逆向坡物理模型實驗過程與影像感測結果，整個試驗時間花費 6 分 29 秒，經由多次測試後，當畫面中感測視窗設定為 204 格，且 SAD 運動偵測門檻值亦設定為 66.67 之條件下，可合理感測出塊體翻落之徵兆。以下為逆向坡模型試驗之過程：

- ① 於初始狀態下，由於尚未降雨，其地表水尚未滲入模型空隙中造成樹脂弱化，其模型暫時呈現穩定之狀態 (圖 8(a))。
- ② 持續降雨約 2 分鐘後，前端模擬岩塊呈現出傾翻之情況，影像感測技術可偵測到前端岩塊翻倒與後端向前擠壓變形之現象 (紅色區塊部分) (圖 8(b))，其亦為肉眼不易觀察到之地表變動。
- ③ 5 分 33 秒時，前端另一側岩塊偵測出翻倒現象，此時後端岩塊與坡面連結位置亦開始有移動之情形產生 (紅色區塊部分) (圖 8(c))。
- ④ 於 6 分 24 秒時，整體岩塊出現傾倒情形，導致感測到整體均呈現紅色區塊 (圖 8(d))。

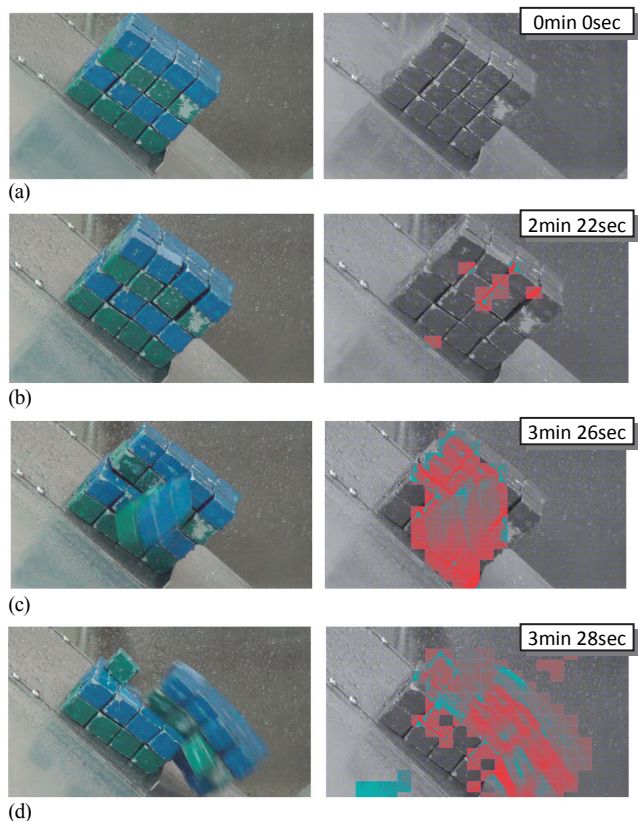


圖7 順山坡物理模型試驗(左)與影像感測(右)過程
Fig.7 The physical modeling of the cataclinal slope test (left) and the process of video motion detection (right)

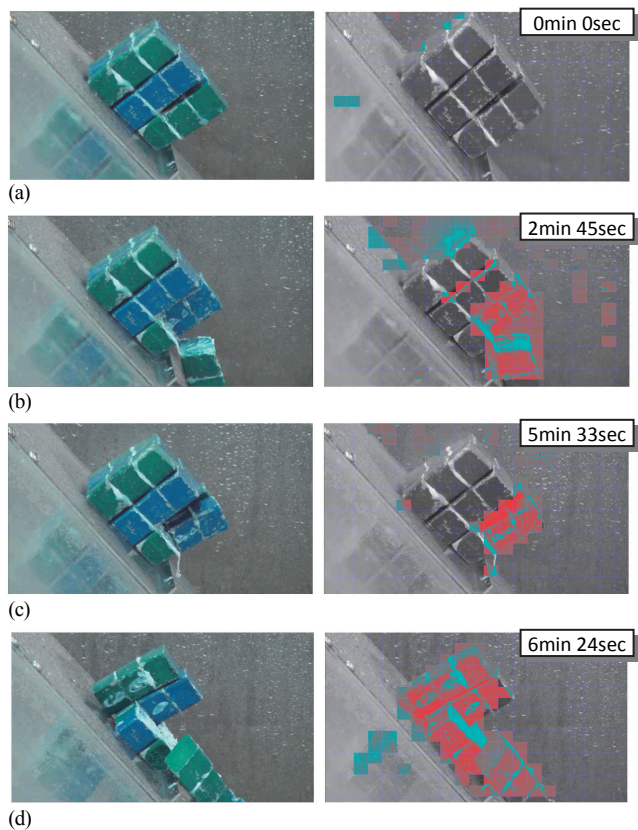


圖8 逆山坡物理模型試驗(左)與影像感測(右)過程
Fig.8 The physical modeling of the anaclinal slope test (left) and the process of video motion detection (right)

2. 室內物理模擬實驗 II 板岩邊坡變形試驗

圖9為板岩變形物理模型實驗過程與影像感測結果，整個試驗過程為179分36秒，當畫面中感測視窗設定為352格，且SAD運動偵測門檻值設定為137.26之條件下，可合理感測出塊體變形之徵兆。以下為板岩變形模型試驗之過程：

- (1) 圖9(a)為板岩變形模型之初始變形狀態，經降雨2分多鐘後，模型已開始產生一些肉眼看不出來的變動，其影像感測技術仍可偵測到近表面2排岩塊移動之跡象(紅色區塊部分)，造成表面些微隆起，而其他區位尚未偵測到有明顯變動之現象。
- (2) 於76分27秒時，坡趾與坡腹已呈現相當明顯的隆起現象，影像感測技術偵測到從表面算起至深度約為6公分

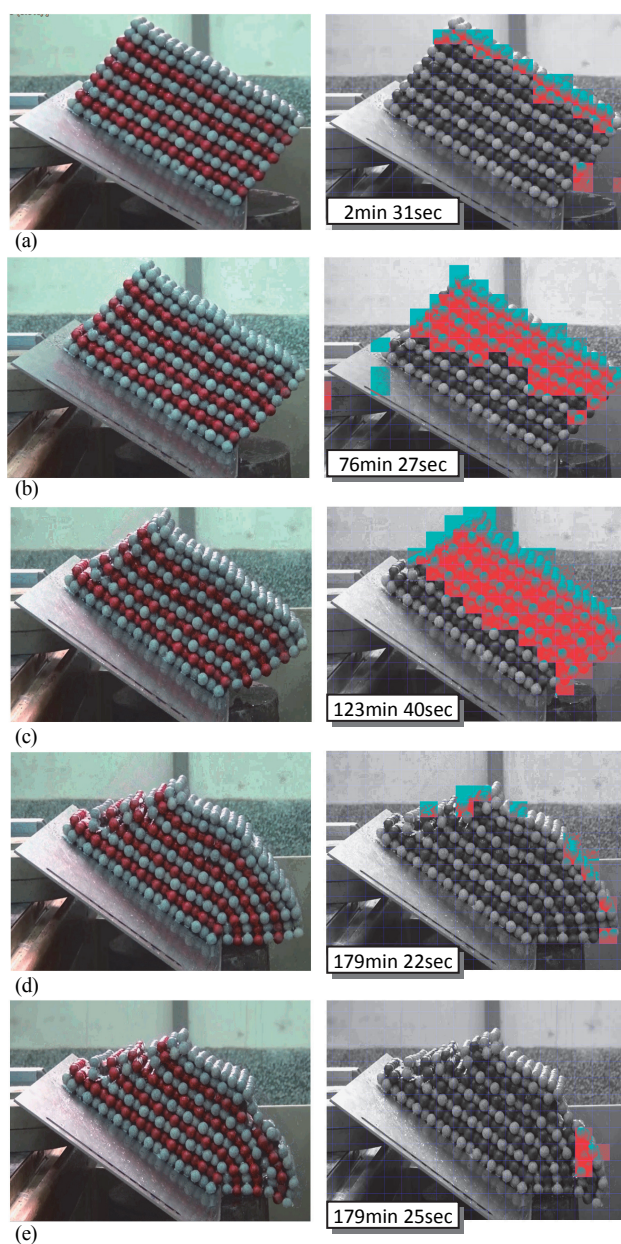


圖9 板岩邊坡變形物理模型試驗(左)與影像感測(右)過程

Fig.9 The physical modeling of the slate slope deformation test (left) and the process of video motion detection (right)

的位置具有明顯的移動 (圖 9(b) 紅色偵測到之部分)，造成此現象主因為地表水滲入模型弱化樹脂黏合區位，導致整體呈現大幅重力變形。坡趾與坡腹因重力擠壓促成壓應變而隆起，而坡頂因為受拉力之影響呈現出內凹開口向上之情形，其影像感測技術亦可明顯偵測出坡頂變形深度相較於坡趾與坡腹處來的更深，整體位移更大。

- (3) 接著再經過 40 多分鐘，樹脂遇水軟化特性更為明顯，其坡頂因持續的受拉力而產生張力裂隙，而坡趾因受到擠壓開始慢慢變形向下運動，其影像感測技術偵測到之整體變形深度較為平均，從表面算起至深度約為 8 公分均屬於變形範圍 (圖 9(c))。
- (4) 因持續的重力變形，於 179 分 22 秒可以很清楚的從影像看到坡頂多道張力裂隙產生，坡頂與坡腹表面亦因承受不住受坡趾變形之拉扯而導致裂隙逐漸加大，其影像感測亦可擷取其細微的裂隙張開與坡趾逐漸下滑之區位 (圖 9(d))。

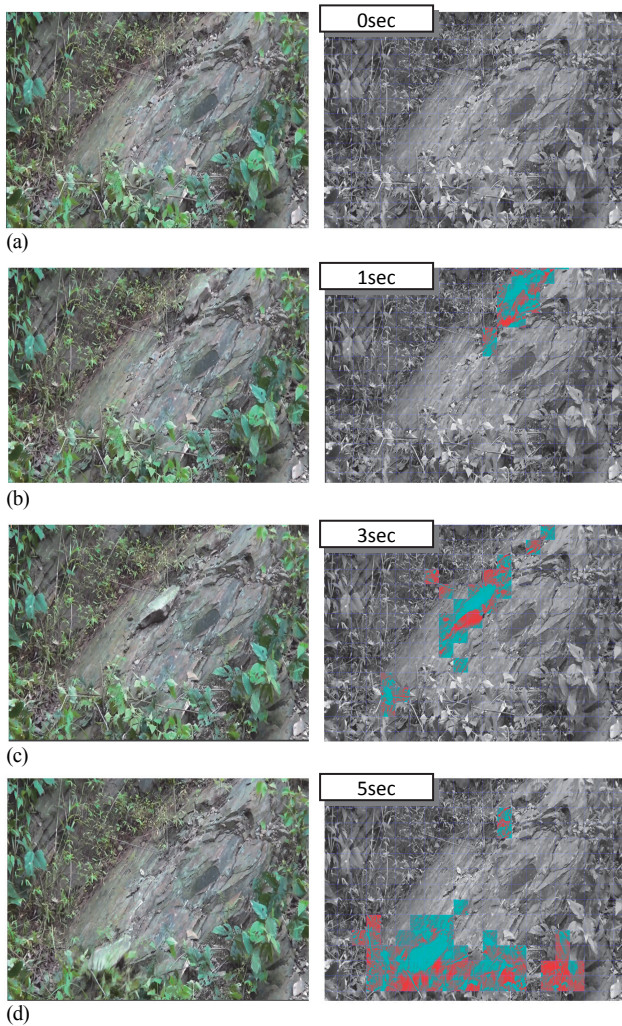


圖 10 高雄市寶山區老濃溪林道附近現場模型試驗(左)與影像感測(右)過程

Fig.10 The physical modeling test near Laonunghsi forest road of Baoshan District of Kaohsiung City (left) and the process of video motion detection (right)

- (5) 緊接著 3 秒後，坡腹表面裂縫因承受不住坡趾持續重力變形，造成前端坡趾崩壞，其影像感測亦可偵測到其滑落之區位 (圖 9(e))。

3. 現場模型試驗

圖 10 為現場模型試驗過程與影像感測研究結果，整個試驗過程為 5 秒，本試驗區位於高雄市寶山區老濃林道，於寶山巷近寶山聚落之板岩順向坡。其坡面寬約 5m、高約 3m 之地形，角度約為 32 度~35 度，另選擇長約 40cm、寬約 35cm、高約 12cm 之板岩塊由坡頂使其滑落，並於適當位置架設攝影機，即時感測其岩塊滑落情形。當畫面中感測視窗設定為 336 格，且 SAD 運動偵測門檻值設定為 70.58 之條件下，可合理感測出塊體滑落之運動過程。

現場模型試驗配置上，於初始狀態先將板岩塊固定於坡頂上 (圖 10(a))，當攝影機啟動時，隨即將板岩塊放開，使其順著坡面向下滑動。於第 1 秒時，板岩塊由左上角開始逐漸向下滑動，但由於色調接近造成肉眼甚難看出滑落岩塊位置 (圖 10(b) 右圖)，仍可藉由影像感測技術偵測到其岩塊運動區位 (圖 10(b) 左圖)。第 3 秒時，板岩塊周圍伴隨著一些小碎塊同時滑落，影像感測亦偵測到小碎塊掉落畫面 (圖 10(c))。接著板岩塊於第 5 秒掉落至雜草中，因其板岩塊掉落時觸動到坡趾周圍之雜草，使得影像感測同時偵測到雜草擺動之情形，造成此時偵測到之紅色畫面範圍較板岩塊本身尺寸為大。

4. 實際山崩案例測試

(1) 實際順向坡滑動案例

此山崩案例影片拍攝地點為美國波爾克縣的 6 號公路，其主要發生順向坡滑動並造成該公路交通阻斷，整個過程約 21 秒。當畫面中感測視窗設定為 70 格，且 SAD 運動偵測門檻值設定為 66.67 之條件下，可合理感測出現場順向坡崩滑之運動過程。其影像感測分析過程如下：

- ① 影片一開始呈現 64 號公路旁的順向坡，由於尚未發生滑動現象，因此影像感測上無法監測出任何結果 (整個畫面均呈現灰階影像) (圖 11(a))。然而，該順向坡案例可發現明顯的坡趾切除透空之跡象，其可能造成整個順向坡逐漸趨於不穩定甚至大規模滑動之潛在危險。
- ② 於第 6 秒時，影像上可看到位於坡趾處有一岩塊掉落，此時影像感測即可偵測到岩塊掉落瞬間，其影像位於畫面中間偏左處呈現出紅色方塊 (圖 11(b))，顯見此處順向坡已呈現局部不穩定之狀態。
- ③ 第 9 秒時，影像中順向坡開始發生大規模滑動現象，其滑動之塊體還未覆蓋至道路，此時影像感測技術即可偵測到位於影像中間偏左處整個滑動範圍，約佔畫面 30% 的紅色區塊 (圖 11(c))。
- ④ 第 11 秒時，大量滑動塊體衝擊至地面後開始擴散，造成雙向道路上大規模塊體覆蓋，而影像感測技術亦能明顯偵測到整個運動範圍，其畫面中紅色區塊部分

相較於第 9 秒有明顯擴大之跡象 (約佔畫面 45%) (圖 11(d))。此外, 從偵測到之紅色區塊部分來看, 除了塊體崩落至地面擴散外, 亦可發現由崖頂的樹幹掉落, 造成整個紅色區塊顯著擴大。

- ⑤ 最後掉落之塊體其覆蓋範圍已擴散至旁邊人行道上, 煙霧覆蓋住整個道路, 其影像感測技術亦可偵測到崩滑塊體雜夾著樹幹與煙霧擴散之畫面, 其偵測到之紅色區塊佔整個畫面約佔 70% (圖 11(e))。
- ⑥ 由監測結果可以得知, 於此拍攝距離與觀測角度條件下, 可看到偵測影像由原本的順向坡塊體初始滑動形成之傾斜長條型紅色區塊, 直至塊體衝擊至地面擴散與崖頂樹幹滑落導致傾斜長條型紅色區塊逐漸擴大, 最後整個道路周緣被塊體、煙霧所覆蓋, 促使紅色區塊瞬間大幅增加, 其為影像感測順向坡滑動之關鍵特徵。

(2) 全尺度土石流模型試驗案例

全尺度崩塌及土石流模型試驗案例地點為 2012 年韓國山區, 試驗與影片拍攝者為 Joongcheol 等人, 影片長約為 27 秒, 坡道長約為 800m, 上游端約為 38 度。當畫面中感測視窗設定為 224 格, 且 SAD 運動偵測門檻值設定為 58.43 之條件下, 即可感測出崩塌及土石流之運動過程。其影像感測分析過程如下:

- ① 其試驗初始於山頂處放置一個貨櫃, 貨櫃內裝入土石、砂及 10 m³/sec 的水, 於第 1 秒貨櫃開啟時, 崩塌物已緩緩流至貨櫃口, 影像感測技術已可即時偵測到崩塌物於貨櫃出口之初始流動區位 (圖 12(a))。
- ② 第 4 秒時, 土石迅速流出, 短短幾秒鐘時間土石流已迅速淹沒上游約 2/3 河道, 影像感測技術亦偵測到其流動情形 (圖 12(b)), 另藉由第 1 秒與第 4 秒紅色區塊最底端位置之計算, 可以發現此時土石已流至約 29m 之處, 其流速約為 104.4 km/hr。
- ③ 於第 17 秒時, 土石流仍然持續於河道上流動, 影像感測技術仍可監測到其流動畫面, 然而因土石流動造成周遭樹木晃動, 導致位於畫面右下方產生影像感測上監測的誤差 (紅色區塊明顯較大) (圖 12(c)), 其應列為後續相關研究對於誤差消除之探討對象。此外, 對於源頭土石流之流速及持續發生時間之監測, 將可作為後續下游保全對象防災疏散之參考。

(3) 土石流衝擊構造物案例

此案例為全尺度土石流模型試驗之中游, 其河道上放置一結構物使其受土石流衝擊, 整個拍攝過程約為 16 秒。其感測視窗亦設定為 224 格, SAD 運動偵測門檻值則設定為 66.67, 可感測出土石流衝擊構造物之過程。其影像感測分析過程如下:

- ① 其畫面中前方布設一個構造物, 其構造物內有水流動, 土石流從後方快速流下, 於第 4 秒時可明顯看到其構造物後方開始有土石流出, 其影像感測亦可偵測到流動範圍 (圖 13(a))。

- ② 接著後方土石流亦夾雜著大型樹幹與大量土石一塊流下, 於第 7 秒時已快接近構造物, 並在感測畫面中間部分呈現出紅色影像 (圖 13(b))。
- ③ 於 10 秒時, 土石流已衝擊並淹沒整個構造物, 其高強度衝擊導致土石造成塵土飛揚, 導致整個感測畫面約 95% 呈現出紅色區塊 (圖 13(c))。約 15 秒後, 該構造物因無法承受土石流高速衝擊因而衝潰至下游。由此案例感測過程得知, 影像感測技術除可即時

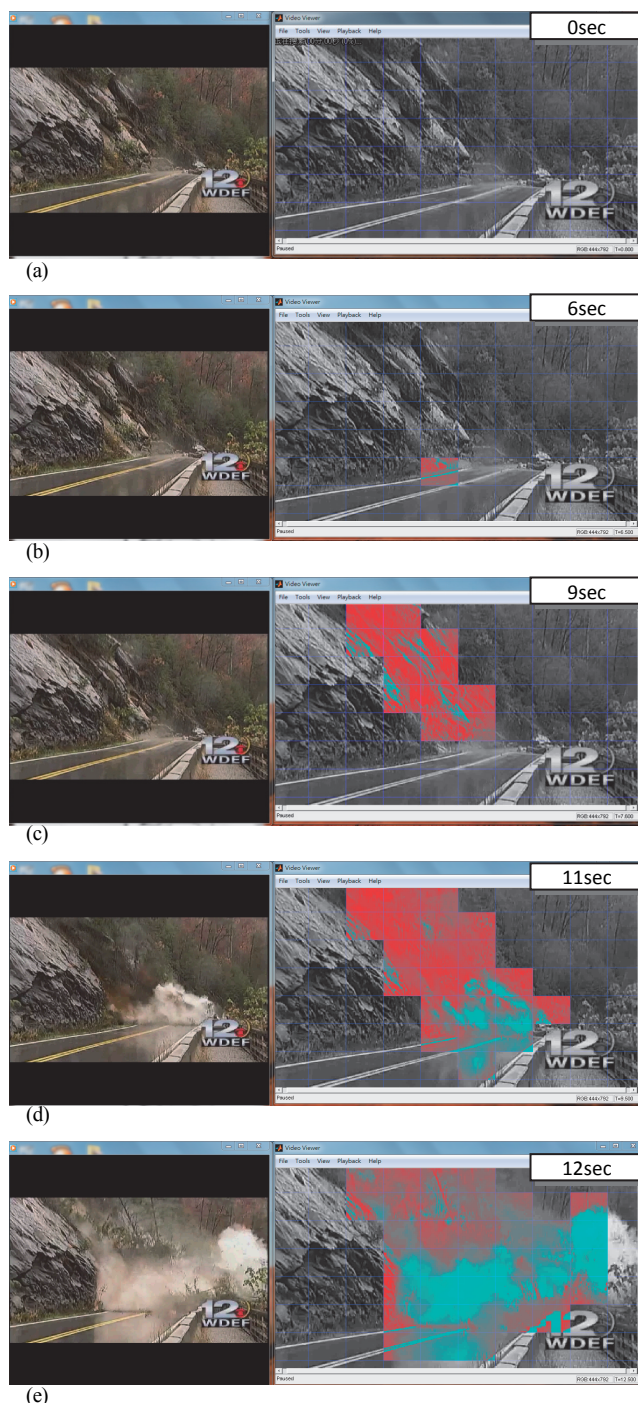


圖 11 實際山崩案例-美國波爾克縣 6 號公路順向坡滑動 (左) 與影像感測 (右) 過程

Fig. 11 Actual landslide case- the cataclinal slope slide in U.S. Polk County No.6 road (left) and the process of video motion detection (right)

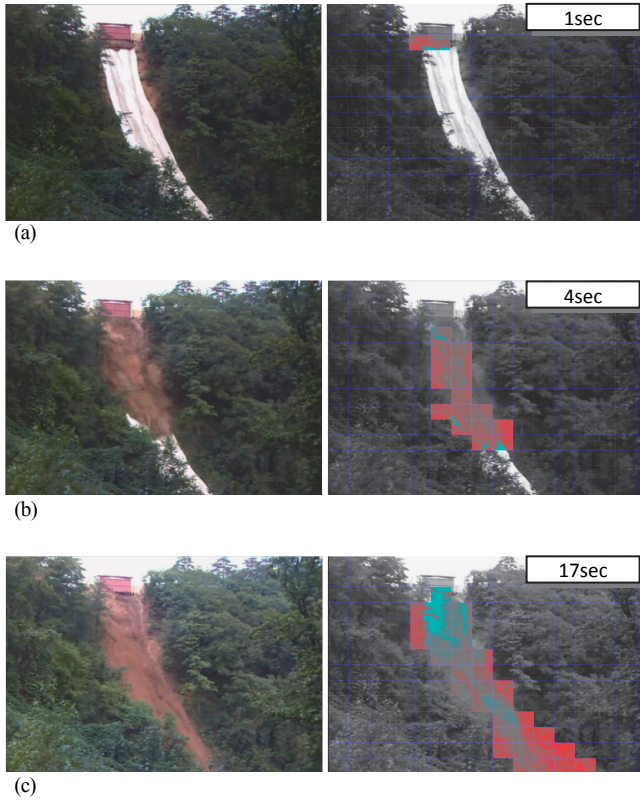


圖 12 現場崩塌模型試驗案例 (左) 與影像感測 (右) 過程
Fig.12 The field physical modeling of landslide test (left) and the process of video motion detection (right)

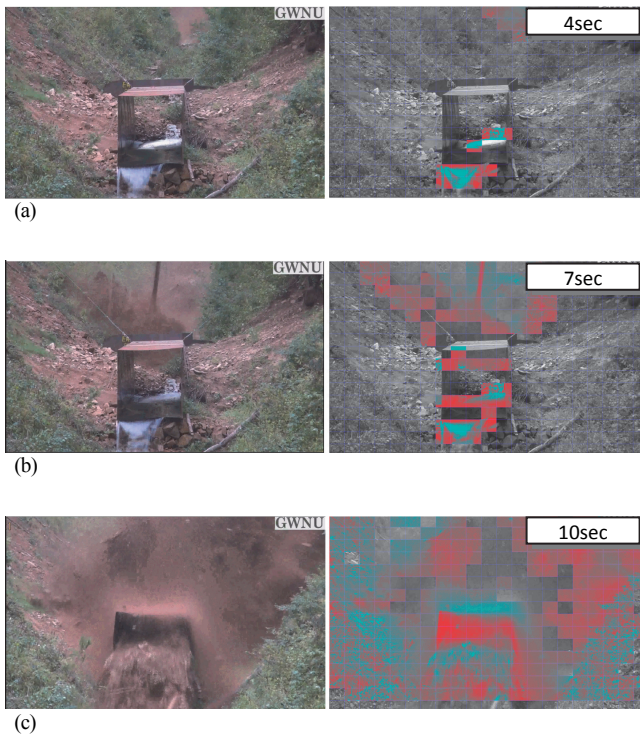


圖 13 現場模型試驗案例土石流衝擊構造物 (左) 與影像感測 (右) 過程
Fig.13 The field physical modeling of debris flow attack the structure test (left) and the process of video motion detection (right)

獲知土石流衝擊結構物之狀況外，其亦可藉由影像感測之衝擊狀況與概估速度，搭配構造物強度及破壞情形進行後續相關工程設計，藉此降低未來構造物受土石流衝擊破壞之風險。

四、應用限制

綜合上述一系列之影像感測分析結果，本文所提之影像感測方法，於應用層面上相關限制歸納說明如下：

1. 攝影機於現地設置上，需於觀測邊坡通視良好之位置，並需依據觀測物體範圍、運移距離與攝影解析度設定適當數量之感測視窗。
2. 攝影設備應設置於固定位置，拍攝時鏡頭不可晃動，一但晃動將使得偵測畫面皆呈現紅色區塊，造成嚴重之偵測誤差。因此，於人為或地震導致攝影機移動之狀況下，其感測結果不可列入評估範圍。
3. 攝影方向與拍攝範圍不應選在人車往返密集處，其由於影像內容變動太大，亦將造成影像感測之偵測誤差。
4. 當雨天監測或感測之邊坡位置植被茂密時，運動監測門檻值應適度進行調整（門檻值需提高），若未經調整，其過大之雨滴與植被晃動亦可能會影響整體監測結果，導致監測畫面出現大量紅色區塊之誤差，進而影響邊坡滑動監測之判斷。

五、結 論

本研究初步探討影像感測技術之適用性，藉由室內外物理模型試驗與實際山崩案例進行影像感測分析，其主要以高解析度、低成本之攝影設備紀錄整個模型滑動、傾倒及流動等山崩過程，運用 SAD 演算法及運動門檻值設定判斷影像內容物移動與否，再以視訊方式呈現其邊坡地表運動及影像感測過程。室內物理模擬試驗搭配影像感測結果顯示，採用影像感測技術可即時偵測順、逆向坡張裂隙發展、岩體變形與地表瞬間崩壞之區位，提升災前整備與預警之功效。對於板岩邊坡而言，其感測技術可偵測地表板岩變形之區位，並可即時掌握板岩地表變形、裂隙發展、崩壞之完整過程，然其影像感測紀錄需耗時甚久，對於運動門檻之設定必須因應現地邊坡狀況與攝影位置進行適度調整。

現場試驗與實際山崩案例搭配影像感測結果顯示，於特定攝影角度下，順向坡塊體初始滑動影像感測上將形成之傾斜長條型紅色區塊，崩滑體接近坡趾時傾斜長條型紅色區塊將逐漸擴大，當崩滑體運動至道路擴散後，將促使紅色區塊瞬間大幅增加，其為順向坡滑動關鍵之影像感測特徵。針對土石流源頭進行影像感測應用上，其影像感測技術可粗估源頭區土石流速度，並持續觀察土石流運動特性，即時傳輸至下游保全對象作為防災疏散避難之參考。此外，於天候狀況不佳時，攝影品質效果不佳，可能無法取代傳統或近期發展方法，故相關技術仍需進一步改進（如門檻值的自動調整）。尤其，現今高速攝影機價格已更普及化，利用高速攝影機應能更有效分析邊坡瞬間

移動問題，大幅提升監測之即時性與精確性。最後，本研究藉由案例測試初步歸納出四點影像感測技術之應用限制，期能作為未來邊坡地表變動監測與相關研究之參考。

參考文獻

- [1] Broili, L. (1967). "New knowledge on the geomorphology of the Vajont Slide slip surface", *Rock Mechanics & Eng. Geol.*, 5 (1), 38-88.
- [2] Haritaoglu, I., Harwood, D., and Davis, L.S. (2000). "Real-time surveillance of people and their activities." *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(8), 809-830.
- [3] Joongcheol, P., Shinhye S., Taeyong, K., and Seungeun, K. (2012). "A real-scale field experiment of debris flow for investigating its deposition and entrainment." *American Geophysical Union, San-Francisco*, 3-7.
- [4] Kim, C., and Hwang, J.N. (1999). "A fast and robust moving object segmentation in video sequences." in *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing*, 2, 131-134.
- [5] Lenz, R.K., and Tsai, R.Y. (1987) "Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 68-75.
- [6] Mathworks. (2010). "Video and image processing blockset." *Matlab User's Guide*, The MathWorks, Inc.
- [7] Shah, M., Javed, O., and Shafique, K. (2007). "Automated visual surveillance in realistic scenarios." *IEEE Multimedia*, 14(1), 30-39.
- [8] Tsai, R.Y. (1987). "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses." *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3 (4), 323-344.
- [9] 交通部運輸研究所 (2006), 「坡地災害緊急搶修與復健整合技術研研究 (1/2)」, 第 5-7 頁。(Institute of transportation ministry of transportation and communications. (2006). *Integrated Short-term Repairing and Long-Term Rehabilitation Measures for Road Slopes*, (1/2), 5-7. (in Chinese))
- [10] 柯昱岑 (2005), 「用 LiDAR 高精度 DTM 判釋順、逆向坡與斜交坡—以陳有蘭溪為例」, 國立成功大學地球科學研究所碩士論文。(Koye, Y.C. (2005). "Identification of cataclinal slopes, anacinal slopes, and orthoclinal slopes with high resolution LiDAR DTM—Chenyoulun stream for example." Master Thesis, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
- [11] 童士恒、施明祥、郭瑞昭、翁孟嘉 (2008), 「數位影像相關係數法於土木工程監檢測之應用」, *土工技術*, 第 117 期, 第 81-90 頁。(Tung, S.H., Shi, M.X., Guo, R.Z., and Weng, M.C. (2008). *Application of the digital-image-correlation technique in the monitoring for civil engineering*, *Journal of Sino-Geotechnics* 117, 81-90. (in Chinese))
- [12] 童士恒、朱晃葵、翁孟嘉、施明祥、陳浩秋 (2011), 「數位影像相關係數法於擋土牆監測之應用」, 第 14 屆大地工程研討會論文集, 第 1-6 頁。(Tung, S.H., Zhu, H.K., Weng, M.C., Shi, M.X., and Cheng, H.C. (2011). "Application of the digital-image-correlation technique in the monitoring for retaining wall." *Proceedings of the 14th Conference on Current Researches in Geotechnical Engineering in Taiwan*, 1-6. (in Chinese))
- [13] 顏呈仰 (2010), 「TDR 監測系統與傳統監測方式應用於邊坡坡體滑動之比較」, *三聯技術雜誌*, 第 2-6 頁。(Yan, C.Y. (2010). *TDR monitoring systems applied in comparison with the traditional method of monitoring the slope sliding*, *San Lian Technology Magazine*, 2-6. (in Chinese))
- [14] 蘇苗彬、廖建鑫 (2006), 「使用 TDR 量測梨山地層滑動面之成果分析」, 2006 年岩盤工程研討會論文集, 台南, 第 357-366 頁。(Su, M.B., and Liao, C.H. (2006). "Monitoring System and Judgment applied to Lisan Landslide Using Time Domain Reflectometry." *Proceedings of the 2006 Taiwan Rock Engineering Symposium*, Tainan, 357-366. (in Chinese))
- [15] 羅佳明 (2009), 「落石區崖線崩退與崖錐堆積形態之研究」, 臺灣大學土木工程研究所博士論文, 第 3 章, 第 9-40 頁。(Lo, C.M. (2010). "Cliff Recession and Talus Deposition Pattern in Rockfall Area, Doctoral Dissertation." Department of Civil Engineering College of Engineering, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))

2013 年 09 月 08 日 收稿

2013 年 11 月 23 日 修正

2013 年 12 月 10 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 9 月 30 日)