

# 應用多期環景攝影之影像自動匹配與變異分析技術於公路邊坡安全性評估

## Automatic Coregistration and Change Detection of Multi-Temporal Panoramas for Safety Assessment of Highway Slopes

松尾智也、劉正千

Tomoya Matsuo, Cheng-Chien Liu

破碎的地質構造、頻繁發生的地震，再加上雨季與颱風季充沛的降雨，使台灣公路邊坡的穩定度受到極大威脅。山區公路容易發生邊坡災害，對國家經濟與交通命脈造成危害。一般公路維護作業大多仰賴巡路人員，以步行或乘車的方式，目視檢查道路或邊坡狀況，但這種傳統方式不但耗費大量人力與時間，也無法針對路況即時提供相關的空間資訊。除了缺乏客觀量化的科學數據與舊有資料進行比對，也難以偵測到邊坡災害細微但持續性的前兆。本研究依序分析了 2011 年 4 月 20 日與 2011 年 11 月 22 日於中部橫貫公路拍攝的環景攝影影片，選取出 12 處易發生邊坡災害的地區，再從資料中擷取出每個地區的多期環景影像進行變異分析。由於一般的巡路車輛並未收錄精確的 GPS 和 IMU 資訊，上述兩段環景影片也不是從相同視角拍攝，因此本研究整合了三種幾何配準方法處理多期環景攝影資料。影像先經過自適化增揚處理，再使用影像匹配技術 SIFT 方法萃取特徵點，然後利用交互相關方法 (CC) 與相位相關方法 (PC) 檢驗特徵點並濾除掉有問題的特徵點。留下可用的特徵點再以 PC 產生匹配點，每一點都以 CC 檢驗，精確的匹配點讓多期環景影像能精確的配準以進行變異分析。研究結果顯示多期環景影像在配準後所偵測到的變異處，能針對公路邊坡的細微變化提供可靠的量化資訊，此項自動化的變異分析技術為公路邊坡提供了創新且費用低廉的安全評估方式。

The broken terrain and frequent earthquakes, together with the heavy precipitation during the rainy and typhoon seasons, pose a grave threat to slope stability in Taiwan. As a result, slope disasters are frequently found along the highways in mountainous area and seriously endanger Taiwan's lifeline of transportation and economy. The traditional approach for highway maintenance relies on patrolmen to visually screening the slopes from the ground or the patrol vehicle. Such an approach, however, requires considerable manpower and time, yet provides very limited information on spatial coverage. Lacking of an objective and quantitative comparison between the latest observations to the historical one, there is no way to diagnose the subtle yet progressive signs of slope disasters. This research employs two panorama videos of New Central Cross-Island Highway, taken on 20 April 2011 and 22 November 2011, respectively. A total of 14 sites with high risk of slope disasters are identified and selected. The multi-temporal panoramas of each site are extracted from the videos for change detection. Since the accurate GPS and IMU data were not recorded in an ordinary petrol vehicle, and these two

videos were not taken from the same viewing angles along the same route, we integrate three approaches to coregister the multi-temporal panoramas. First, the adaptive enhancement is applied to the multi-temporal panoramas and scale invariant feature transform (SIFT) approach is used to generate a set of key points. These key points are examined by both the cross-correlation (CC) approach and the phase-correlation (PC) approach, with the intention to fill out those problematic points. Based on these robust key points, the PC approach is used again to generate a large number of tie points and each point is double checked with CC approach. With the large amount of accurate tie points, the multi-temporal panoramas can be accurately coregistered to meet the requirements of change detection. The results demonstrate that the difference between the coregistered multi-temporal panoramas provides reliable and quantitative information of subtle changes on highway slopes. This processing can be carried out in a fully automatic fashion, which is an innovative and low-cost approach to assess the safety of highway slopes.

## 一、研究區域

中部橫貫公路西起於台中市東勢區，沿著大甲溪河谷途經谷關與青山往中央山脈一路爬升。沿途地勢崎嶇不平且地質活動頻繁，颱風季帶來的降雨經常使土石滑落導致某些路段交通中斷。1999 年的九二一大地震造成中部橫貫公路多處嚴重損毀，尤其是東勢到梨山段。投入大量經費與人力修復

後，2004 年的敏督利颱風依舊重創了中部橫貫公路，谷關以東的路段更是因此長期封閉。儘管如此，中部橫貫公路依然是谷關與梨山一帶居民的主要對外道路，對於這條公路的維護與修復仍有許多爭議與討論。目前谷關與德基之間的路段僅在固定時間開放通行，也需要更嚴謹的安全評估。圖 1(b) 為本文的研究區域，挑選出中部橫貫公路沿線需嚴密監控的 12 個熱點。

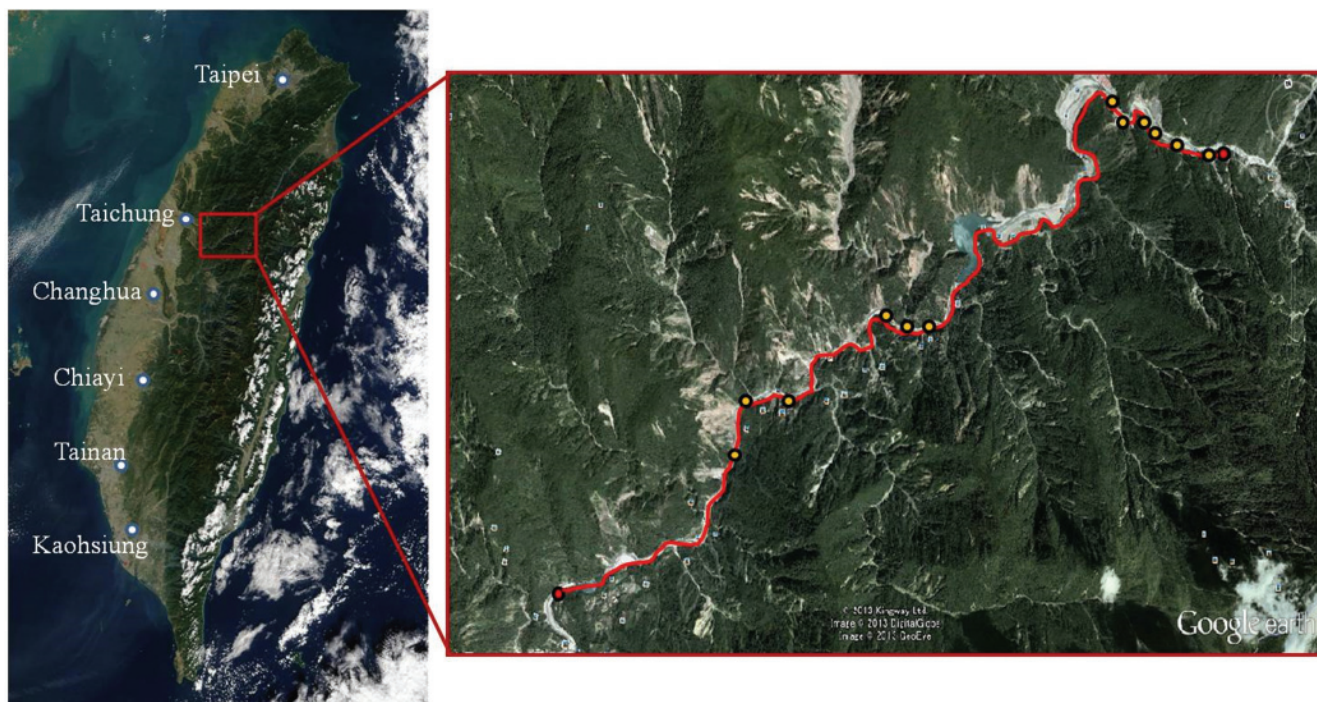


圖 1. 研究區域與 12 處監測地點。

表 1. 監測公路邊坡災害的各種方法比較。

	範圍	速度	應用彈性	坡面	解析度	機動性	天候影響	分析	成本
人工巡查	×	×	○	○	○	○	○	△	○
數位相機	×	×	○	○	○	○	○	×	○
空中遙測平台	○	△	×	×	△	×	×	△	△
光達	×	△	×	○	○	×	×	○	×

相較於精確但費用昂貴的地理定位影像或繪製地形模型，本研究應用環景攝影低成本且高機動性的特性拍攝研究區域。一般公路邊坡災害的監測仰賴人工目視巡查，不但耗費大量時間與人力亦難以與歷年監測所建置的資料進行客觀量化比對，所以不易掌握細微但持續誘發邊坡災害的前兆，相比之下數位相機於短時間內拍攝的高解析度照片較易於傳送與保存資料。因此，Corominas 等人建議欲進行深入調查時再採行人工巡查方式<sup>(1)</sup>。再配合空中遙測的各種平台，由單張照片的人工逐點檢視可迅速擴大觀測範圍，實際應用如林業管理的變異監測<sup>(2)</sup>。但將上述方式應用於公路邊坡災害的評估，航空照片或衛星影像的解析度仍嫌不足，而且較為陡峭的邊坡坡面難以完整拍攝，容易成為遙測資料的死角。此外還有利用一般車輛搭載行動測繪系統 (mobile mapping system, MMS)，通常包含高精度全球定位系統 (global position system, GPS)、慣性導航裝置 (inertial navigation system, INS) 以及地面光達，不過皆屬高成本儀器<sup>(3)</sup>，即使這種方式能夠獲取公路邊坡坡面的地形變化達到公分等級，仍要配合不同時期的資料才能取得變異監測的資訊<sup>(4, 5)</sup>，代價高昂的 MMS 還是無法頻繁應用於公路邊坡的監測工作。表 1 比較了各種公路監測方式的優缺點。

## 二、Ladybug-3<sup>®</sup> 環景攝影機

本研究採用 Point Grey Research 公司所研發的 Ladybug-3<sup>®</sup> 環景攝影機，配備 6 個鏡頭 (1600 × 1200 像素 Sony CCD sensors)，每秒可拍攝 15 張環景照片，同時以 GPS 記錄座標<sup>(6, 7)</sup>。Nichimura 曾利用 Ladybug-3<sup>®</sup> 監測建築物的變異與倒塌狀況做為管理和維修的依據<sup>(8)</sup>。和其他單眼反光相機及魚眼相機相比，他歸納出在解析度 7 公尺內

時 Ladybug-3<sup>®</sup> 環景攝影機可以清楚看出牆壁的裂隙。而在本研究中，用 Ladybug-3<sup>®</sup> 監測坡面的解析度也是高於 7 公尺。雖然 Ladybug-3<sup>®</sup> 很適用於公路邊坡的變異監測，但前後兩次拍攝時搭載車輛行駛於公路的車行軌跡很難維持一致，拍攝視角及取像時距離邊坡的遠近也會有所不同。從圖 2 於不同日期拍攝的兩張環景影像可以看出缺乏正確的 GPS 和 INS 資訊，即使 Ladybug-3<sup>®</sup> 經過定位也無法修正照片的幾何變形。要從這些幾何變形的影像中找出變異點就必須先運用影像匹配技術進行幾何修正。

## 三、影像匹配

影像匹配技術是將不同的影像轉換成相同座標系統，也是電腦視覺研究的基礎。影像配準的技術可區分為基於特徵點匹配和基於領域匹配兩種方法。

基於領域匹配技術是算出兩張影像間的差異性，例如演算影像亮度差異平方總和 SSD (sum of squared differences) 及影像亮度差異絕對值總和 SAD (sum of absolute differences)<sup>(9)</sup> 與正規化相關演算法 NCC (normalized cross correlation)。匹配點會落在差異值最小而相關性最高的地方。雖然 NCC 是匹配特徵點的較佳指數，但演算時會耗費大量資源，特別是影像範圍較大的情況。Lewis 因此提出新的演算法，快速正規化相關演算法 FNCC (fast normalized cross correlation) 加速影像配準的過程<sup>(10)</sup>。

$$R(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_u, v][t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_u, v]^2 \sum_{x,y} [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2}} \quad (1)$$

其中， $\bar{t}$  是平均值，而  $f_{u,v}$  是  $f_{u,v}$  位於特徵點區域中

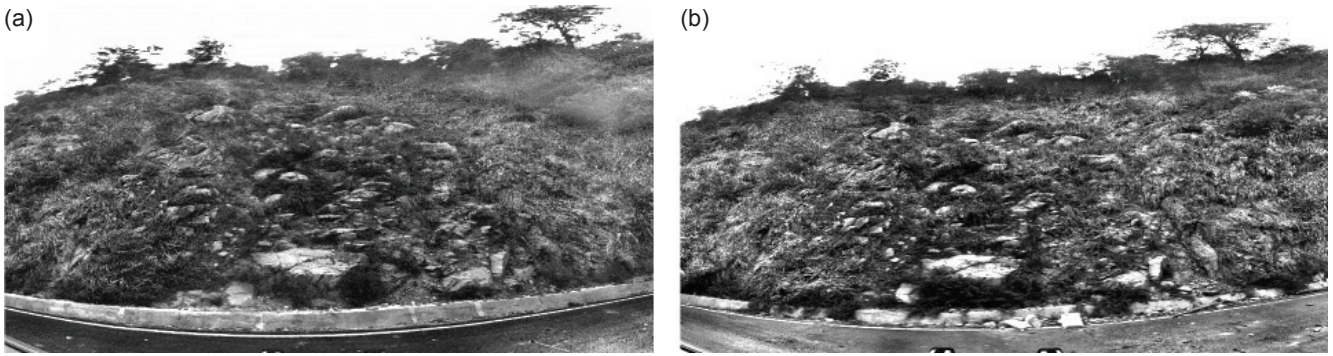


圖 2. Ladybug-3<sup>®</sup> 在 (a) 2011 年 4 月 20 日和 (b) 2011 年 11 月 22 日拍攝的環景影像呈現出影像的幾何變形。

的平均值。這個方法已經成功應用於配準福衛二號衛星影像的全色態與多頻譜波段，自動萃取出地面控制點並完成遙測影像的正射<sup>(11)</sup>。

另一個加速基於領域匹配技術的方法是利用傅立葉轉換將影像從空間域轉換至頻域，也就是相位相關法 (PC)。兩張影像的相關轉換偏移可根據交互功率頻譜正確計算<sup>(12)</sup>。

$$R(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2)\overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2)G(k_1, k_2)|} \quad (2)$$

其中， $F$  和  $G$  是經過傅立葉轉換的影像， $\overline{G}$  是  $G$  的共軛複數。相位相關法不受影像的噪聲干擾，而且可以決定兩張影像間旋轉與縮放的差異<sup>(13)</sup>。其中最值得注意的是可以從影像中偵測出邊角<sup>(14)</sup>。而同樣的概念也能用於沒有顯著邊角的影像，找出空間中不同尺度的特徵點<sup>(15, 16)</sup>。Lowe 等人所提出的尺度不變特徵轉換 (SIFT) 可以在影像變形、尺度與亮度不一的狀況下對兩張影像的特徵點進行配準<sup>(17, 18)</sup>。

圖 2 的兩張環景影像是在不同日期拍攝，可以明顯看出除了影像變形，影像的尺度與亮度也不一樣。如果只修正影像亮度，仍不足以進行變異點的比對，SIFT 會是較適當的方法。又基於兩張影像於不同季節拍攝，公路邊坡所覆蓋的植被有極大的差異，SIFT 可能會在兩張影像上萃取出不同的特徵點，配準後留下錯誤配準的特徵點。在 SIFT 過程中僅微調門檻植或是參數還是難以濾除有問題的特徵點，也可能濾除正確的點。本研究同時運用 NCC 與 PC 兩種方法，檢驗每個由 SIFT 選取的配

準點，於 SIFT、NCC 與 PC 不同濾除標準的三重檢驗中，最後只留下正確的點。此外，因為只檢驗 SIFT 篩出的配準點與其週邊的點，所以使用 PC 和 NCC 方法時所耗費的電腦運算資源大幅降低，不僅結果準確而且運算快速。圖 3 便是結合 SIFT、NCC 與 PC 三種方式的影像匹配示意圖，於圖 2 所使用的兩張影像中一共找出了 39 個匹配點，每個點都經過人為確認。

#### 四、變異分析

一旦在兩期影像上找出匹配點便能進行配準以線性拉伸修正影像變形的部份，過程中假定匹配點的數量夠多而且是均勻分布的，所以每個像元的偏移都能根據鄰近匹配點的偏移做線性修正。圖 4 是兩期影像於圖 2 和圖 3 的步驟後進行變異偵測的結果 (紅線所圈繪處)。為了清楚辨識變異處，紅線圈繪出的變異區塊分別被套疊在前期和後期影像上，變異的程度以不同顏色顯示。

#### 五、結果

在中部橫貫公路 12 處 (如圖 1 所示) 拍攝的前後期影像皆進行了配準與線性拉伸以偵測變異點，如圖 5 所示。中部橫貫公路位在地質脆弱的險峻山區，經常發生山崩、落石與土石流等災害破壞路面與邊坡。於上述 12 處所辨識出的變異可被分類為崩塌 (圖 5(a)–5(d))、地表變化 (圖 5(e)–5(g))、落石 (圖 5(h)–5(k)) 與施工工程 (圖 5(l)) 等類型。受到天氣因素影響，陡峭的坡面容易在岩石接合處

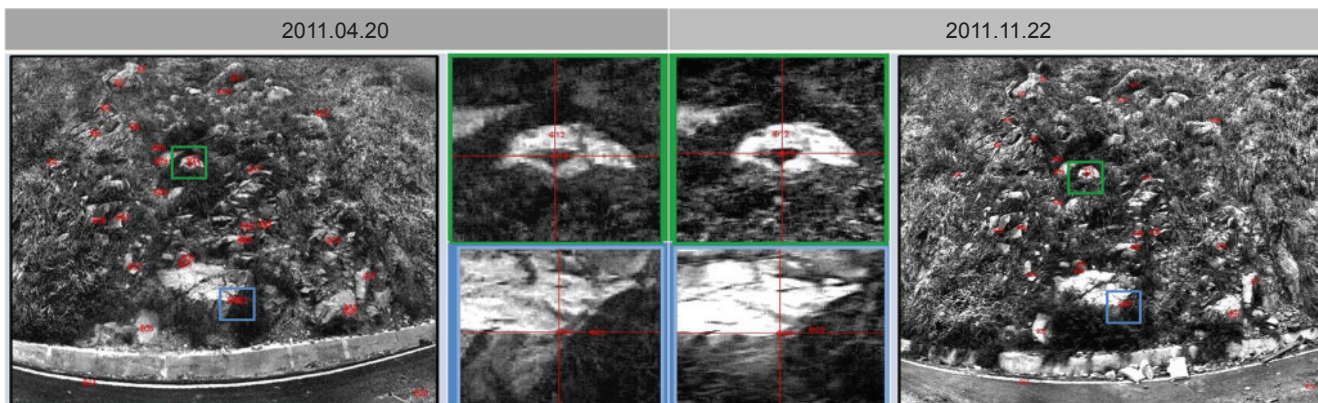


圖 3. 結合 SIFT、PC 與 NCC 三種方法進行影像幾何配準。前後期影像中總共找出 39 個對應點(圖 2)。

斷裂造成落石災害，而坡面沒有植被覆蓋的區塊通常是崩塌或落石發生的前兆，附近的石塊也容易滑動。這些地點容易發生邊坡災害，應該被視為公路災害防治的重點區，優先進行整治。如果路面出現掉落的小石塊便是落石災害的重要徵兆，沿著石塊掉落的軌跡就能找到脆弱邊坡的坡趾部。

SIFT 所篩出的每個匹配點，結果不但可靠而且運算快速。從 12 個地點所找出的變異處可被歸類為崩塌、地表變化、落石與施工工程。從影像匹配後的多期環景影像進行比對可提供公路邊坡細微變化的客觀量化資訊。影像匹配的全自動處理過程對於公路邊坡的安全性評估不僅創新且是花費低廉的方式。

## 六、結論

本研究成功應用了低成本且高機動性的 Ladybug-3<sup>®</sup> 環景攝影機針對研究區域取像，萃取出足夠的匹配點，多期環景影像便能精確匹配以達到偵測變異的要求。再結合 NCC 與 PC 法檢驗

## 誌謝

感謝行政院國家科學委員會的支持，使得本計劃得以順利進行，特此致上感謝之意。計劃編號 NSC 102-2628-M-006-002、NSC 102-2627-B-006-009。

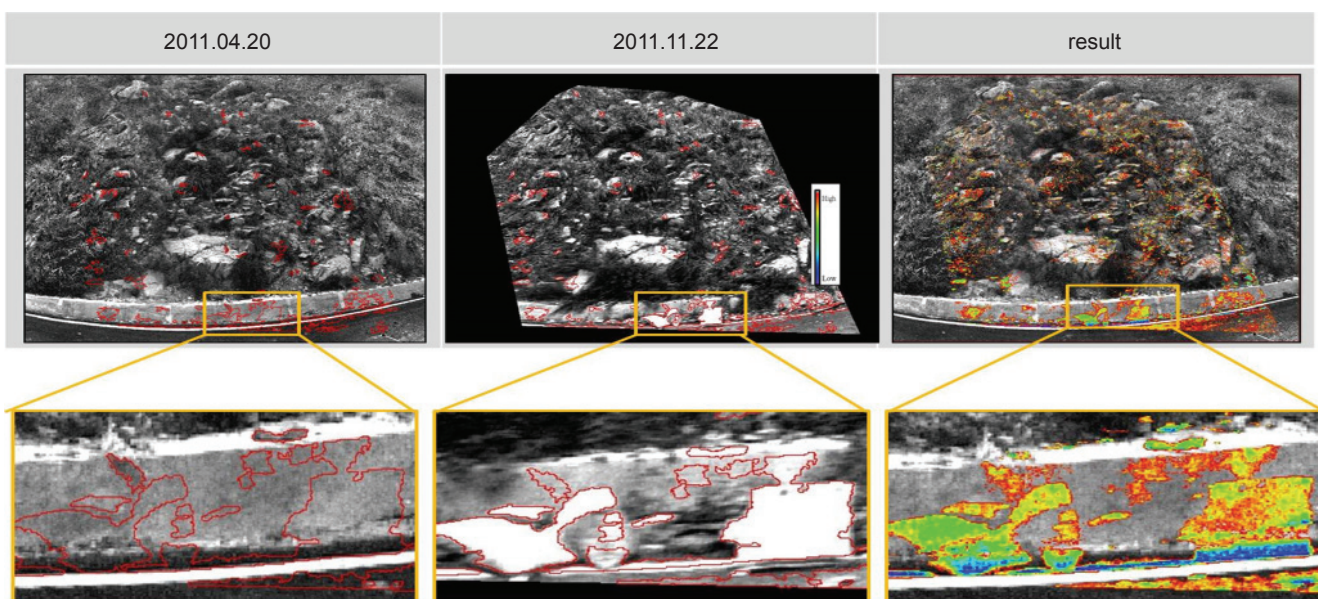


圖 4. 經過圖 2 與圖 3 的步驟後找出變異點(紅線圈繪出的區塊)。

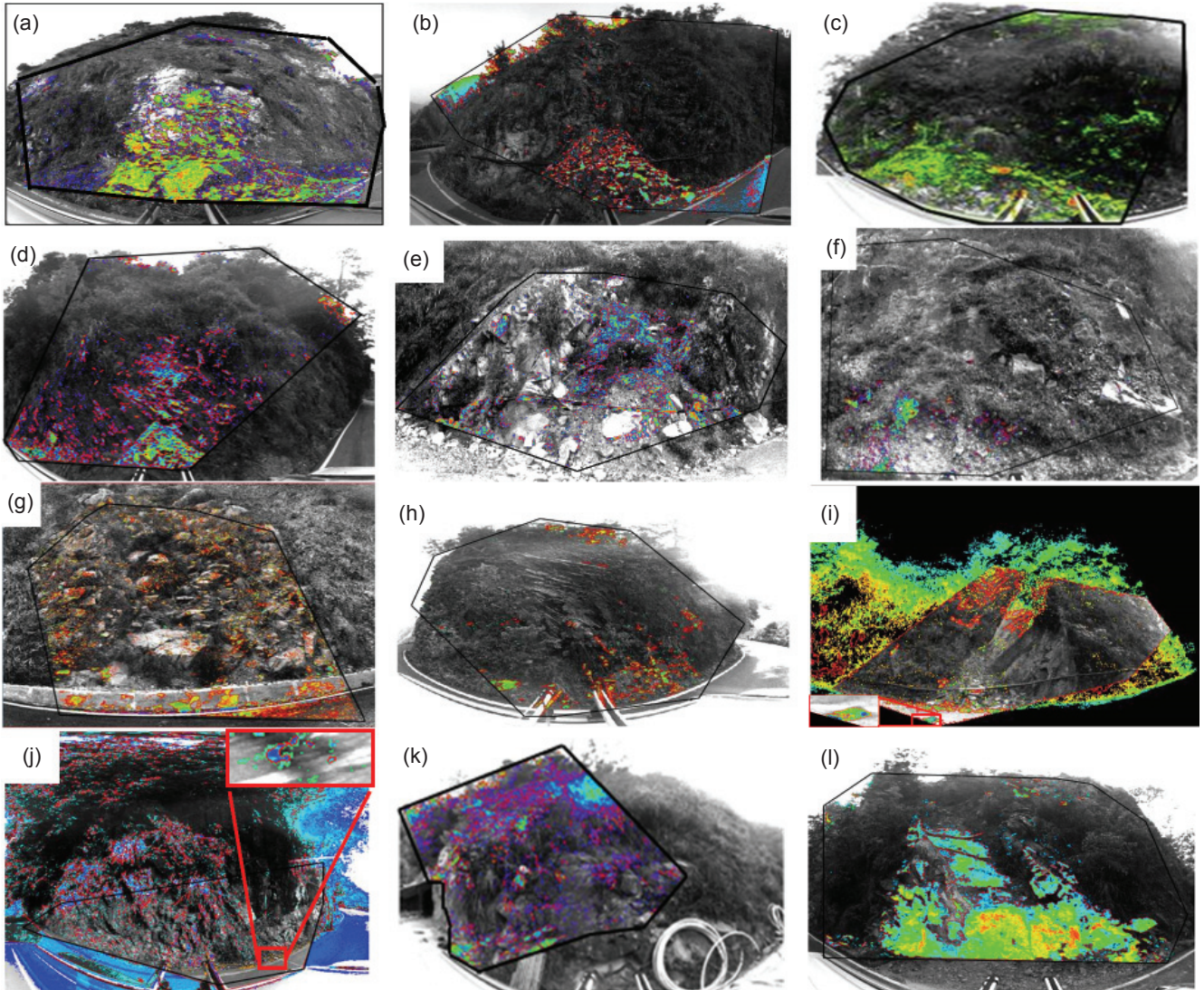


圖 5. 在中部橫貫公路 12 個地點利用前後期環景影像進行變異偵測。

本文英文原文曾獲 The International Symposium on Mobile Mapping Technology 2013 (MMT'2013) 會議學生組最佳論文獎。

### 參考文獻

1. J. Corominas, R. Copons, J. M. Vilaplana, J. Altimir, and J. Amigó, *Natural Hazards*, **30** (3), 421 (2003).
2. G. Castilla, R. H. Guthrie, and G. J. Hay, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, **75** (8), 941 (2009).
3. C. V. Tao, *Journal of Geospatial Engineering*, **2** (2), 1 (2000).
4. M. J. Lato, J. Hutchinson, M. Diederichs, D. Ball, and R. Harrap, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9** (3), 935 (2009).
5. M. J. Lato, M. S. Diederichs, D. J. Hutchinson, and R. Harrap, *Natural Hazards*, **60** (3), 831 (2012).
6. Point Grey Research Ladybug3 Getting Started Manual.
7. Point Grey Research, "Overview of the Ladybug image stitching process" Technical Application Note TAN2008010 (2008).
8. S. Nishimura, "The Measurement and Monitoring at Gunkanjima-Island by Using 3D laser scanner and Sphere Camera" (in Japanese), *Proceedings of JSEM Annual Conference on Experimental Mechanics* (163-168) (2011).
9. M. Shimizu and M. Okutomi, *International Journal of Computer Vision*, **63** (3), 207 (2005).
10. J. Lewis, *Fast Template Matching*, paper presented at Vision Interface (1995).
11. C. C. Liu, J. G. Liu, C. W. Lin, A. M. Wu, S. H. Liu, and C. L. Shieh, *International Journal of Remote Sensing*, **28** (13-14), 3093 (2007).

12. C. Kuglin, "The Phase Correlation Image Alignment Method", paper presented at *Proc. Int. Conference Cybernetics Society* (1975).
13. K. Takita, M. A. Muquit, and T. Higuchi, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, **87** (8), 1913 (2004).
14. C. Harris and M. Stephens, A combined corner and edge detector, Manchester, UK (1988).
15. T. Lindeberg, *Journal of Applied Statistics*, **21** (1-2), 225 (1994).
16. C. Schmid and R. Mohr, *IEEE Transactions on*, **19** (5), 530 (1997).
17. D. G. Lowe, Object Recognition from Local Scale-Invariant Features, IEEE (1999).
18. D. G. Lowe, *International Journal of Computer Vision*, **60** (2), 91 (2004).



松尾智也先生為國立成功大學地球科學系碩士。

Tomoya Matsuo received his M.S. degree from the Department of Earth Science at National Cheng-Kung

University.



劉正千先生為英國倫敦大學帝國理工學院環境、地球科學與工程博士，現為國立成功大學地球科學系特聘教授。

Cheng-Chien Liu received his Ph.D.

in environment, earth sciences and engineering from Imperial College, University of London, UK. He is currently a Distinguished Professor in the Department of Earth Science at National Cheng-Kung University.