

公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統 開發應用研究

邱六芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

胡啓文 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

李良輝 國立高雄應用科技大學土木工程系副教授

張廣榮 國立高雄應用科技大學土木工程系研究生

摘要

臺灣本島多丘陵與山地地形，鐵路系統也伴隨此地形建設。氣候位處季風影響範圍內，春夏兩季容易受滯留鋒面及颱風影響，容易產生瞬間豪大雨及長期降雨以致引發鐵路邊坡崩塌，造成道路坍方或路基流失，危及交通甚至造成人車傷損。因此尋找一個好的道路邊坡監測及預警方法，將可有效提供防災的參考依據。而道路邊坡監測方法甚多，主要可依區域、監測類型、坍塌潛勢區域等類型，來選擇各種道路邊坡坍塌防治工法，防止道路邊坡坍塌。然而，為了確保邊坡防治效果，必須以經常性人工巡檢，或投入昂貴之自動化監測設備，來達到邊坡監測之目的。

攝影測量是一種基於影像式三維重建的技術，目前廣泛應用於測量製圖及三維重建領域。近年來，多視立體視覺三維重建技術的發展已提供了高精度量

測及表面三維重建的成果，因此逐漸被應用於三維監測的應用。它的優點在於精度高及成本低廉，但方法上並未以三維監測進行設計，因此無法完成全自動攝影及計算。

本研究提出基於多視立體視覺三維重建(Structure from Motion & Multi-view Stereo, SfM-MVS)攝影測量的全自動三維監測架構，來解決全自動攝影、監測數據計算及誤差分析的方法。其中自動攝影系統由物聯網(Internet of Things, IoT)架構結合數位相機組成，提供自動攝影及資料回傳，計算架構建立於 PhotoScan 內建 Python 環境進行開發，提供 SfM-MVS 監測數據計算及誤差分析。實驗成果顯示該架構可有效應用於三維監測並提供全自動計算分析及三維表面差異的展示。

一、前言

臺近年來因大範圍監測為需求，獲取表面三維資料的技術陸續被提出及應用，其中包含 GPS 衛星定位監測系統、地面雷射掃描技術及攝影測量三維重建等技術，這些技術可由分析監測點位移或三維表面差異作為監測預警發佈的參考依據。上述監測技術如：(1)GPS 衛星定位監測系統，可由監測點上設置的接收天線盤獲取全天候的連續觀測資料，但監測範圍僅限天線盤設置區域；(2)雷射掃描技術，可快速獲取大量三維表面資料來提供三維表面差異計算，但目前自動化較不完善，因此常用於多時期三維資料差異分析使用；(3)攝影測量技術，可同時提供監測點及三維表面差異分析，因 SfM-MVS^[1]的發展，目前廣泛被應用於獲取三維表面資訊及三維建模，且因精度的需求於演算法中也考慮

了控制點約制及數據平差計算，因此陸續被應用測量製圖於監測使用，惟此技術仍受限於自動攝影、資料回傳、自動化解算及資料分析等問題，目前僅作為手動巡檢及三維資料差異分析使用。

因此，本研究提出一個基於視覺攝影測量的自動監測系統，提供自動攝影、資料回傳、視覺定位計算、三維資料差異分析及預警機制。此架構以物聯網(IoT)結合攝影系統，建立全自動攝影及影像自動回傳功能，並援引 SfM-MVS 攝影測量技術建立全自動計算分析功能，提供監測點的位移計算及監測面的三維表面差異分析，藉由多時期三維重建差異分析資料，做為記錄道路整體邊坡變遷，判斷崩塌潛勢之依循，以利維護管理單位災害預防及災後管理之決策參考。

二、多視立體視覺攝影測量及監測相關理論

本研究關鍵核心技術包含多視立體視覺攝影測量理論及相機率定技術，以下先就視覺攝影測量理論技術進行闡述，後續包含相機率定及自動識別標誌進行說明。道路邊坡近景攝影自動監測方案採用監測點的自動監測，藉由自動識別標誌及自動量測，完成監測點位移判別依據，而道路邊坡整體滑動或破壞情事，可經由多時期點雲差異判別該區域是否產生變化。

2.1 多視立體視覺演算法理論之簡述

由運動恢復結構(SfM)技術的發展，以多視立體(Multi-view Stereo, MVS)計算理論^[2]描述由序列影像中恢復物體位置的三維幾何關係，建立了計算機視覺領域中的三維重建技術理論。多視立體視覺由一般相機所獲取的影像序列來重構三維場景的三維空間結構及獲取相機外方位參數，藉由多視角所拍攝的多張序列影像，進行影像匹配，再經由匹配後所得之影像特徵點，以核線幾何

(Epipolar Geometry)關係進行場景重建，求取相機相對應位置，並探討其與基礎矩陣(Fundamental Matrix)之關係，以及基礎矩陣之解算方法，進而求得場景空間之具體座標進行三維重建。

多視立體視覺理論是基於核線幾何所衍伸的方法，所謂核線幾何是指三維空間中的物體，與二維平面影像間相互轉換之空間幾何對應關係，如圖 1 所示， O_1 和 O_2 分別是兩個相機的投影中心，獲取的影像分別為影像 A 和 B， O_1 和 O_2 連線(基線)與 A、B 影像的交點 e_1 和 e_2 為核點。假設空間點 M 至相機投影中心位置由 O_1 到 O_2 的平移向量為 t ，旋轉矩陣為 R ，而在兩位置時對應的相機內方位參數分別為 K_1 及 K_2 ，空間點 M 在 A 及 B 影像上的特徵點集合分別為(左影像)及(右影像)。

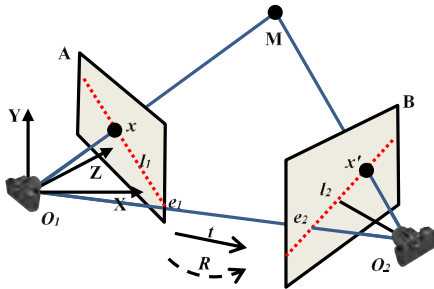


圖 1 場景空間與影像之核線幾何關係圖

假設空間點 M 到像點 m 的轉換矩陣(即投影矩陣)為 P_1 ，到像點 m' 的投影矩陣為 P_2 ，則：

$$m = P_1 M \quad (1)$$

$$m' = P_2 M \quad (2)$$

假設 O_1 為三維空間坐標系的參考

原點，且過 O_1 的相機主光軸為 Z 軸，則投影矩陣 P_1 和 P_2 可分別表達為：

$$P_1 = K_1 [I | 0] \quad (3)$$

$$P_2 = K_2 [R | t] \quad (4)$$

其中 K_1 、 K_2 為相機內方位參數，為單位矩陣、旋轉矩陣及 t 為平移矩陣。

利用場景空間與影像之核線幾何關係，可導出像點 m 和 m' 之關係為

$$m'^T F m = 0 \quad (5)$$

其中矩陣 F 被稱為基礎矩陣(Fundamental Matrix)，基礎矩陣為兩張影像間投影核線幾何關係之轉換(即影像 A 上的 m 轉換到影像 B 上的 m')，當這兩張影像所對應的內部參數矩陣分別為 K_1 和 K_2 ，則它們之間的本質矩陣 E (Essential Matrix)可定義為：

$$E = K_2^T F K_1 \quad (6)$$

欲推估兩張影像間的基礎矩陣可由式(5)求得，其兩張影像中的特徵點集合與必滿足式(5)之關係，則每一組特徵點可以產生一個線性方程式，由於基礎矩陣扣除一個尺度常數之後，還有八個未知數。而推求基礎矩陣的方法有很多種，最常被使用的有八點法、七點法、RANSAC (RANDOM Sample Consensus)、LMeds(Least Median squares)等方法。較為簡單且最廣為使用的為八點法^[3]，即就是在兩張影像間找到 8 組特徵點方能解算出基礎矩陣 F ，再求得本質矩陣 E ，藉由分解本質矩陣 E 可得到旋轉矩陣 R 及平移向量 t ，再得到投影矩陣 P_1 及 P_2 ，最

後可計算出每一個特徵點所相對應之場景空間點 M 之具體坐標，藉由上述原理可知欲推算三維空間坐標，旋轉矩陣及平移矩陣皆可為任意值，即說明不用要求影像拍攝之位置及方向，以透過多視立體影像中稠密點雲之匹配方式來獲取大量 DEM 資料。

2.2 拍攝距離與測量精度

如圖 2 所示，由於每一像素之寬度 (Pixel Size) 與焦距長 (Focal Length)，相對於地面解析度 (Ground Sample Distance, GSD) 與拍攝距離為相似三角形，其幾何關係可表示為式(7)，可按每次工作所需之精度需求，並配合拍攝相機焦距、感光元件規格及解析度，代入式(7)關係式，可決定每次工作所需最大拍攝距離。

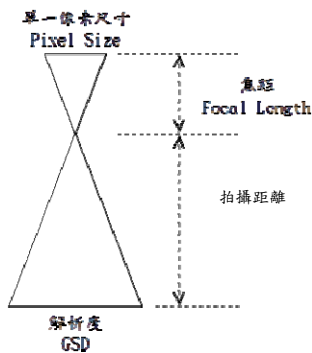


圖 2 相機感光元件與地面解析度之幾何關係

$$\frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} = \frac{\text{GSD}}{\text{拍攝距離}} \quad (7)$$

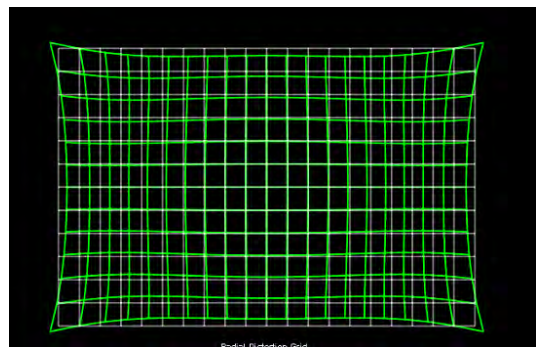
2.3 相機率定

相機率定在攝影測量中用以修正像點畸變扮演著關鍵的角色，尤其是對非量測性相機。多年來發展了眾多的相機率定方法，原則上可以分為使

用率定標 (Target) 及攝影場景 (Target Free) 二種的率定方式。前者需於攝影測量程序前，配合率定進行拍攝以共線條件式解算，稱之為預率定方法^[4]。後者直接使用攝像後的場景影像，在進行共軛點匹配量測後進行相機率定參數的求解，稱之為自率定方法^[5]，並常於 SfM-MVS (Structure from Motion & Multi-view Stereo) 中使用。如圖 3(a) 為本研究之綜合相機率定場，圖 3(b) 表示鏡頭畸變差，灰色為未修正前影像位置，綠色為修正鏡頭畸變差後所產生的位移量。



(a) 多功能率定場



(b) 相機率定成果表示

圖 3 率定場及鏡頭畸變差

2.4 率定標樣式

率定標主要使用於預率定方法，需先於室內場景進行率定標拍攝，取得參

數後再進行後續處理，過去在做相機率定時處理程序較為複雜，且需使用立體標進行率定，隨著演算法的進步，標的樣式也從立體標轉變為平面標，而現在所使用率定標通常會選擇變形後還是能夠判別出標的形心位置的樣式，一般分為十字形角點或是含有圓心點標示的圓形標及 Hattori 所設計得編碼標，如圖 4(a)(b) (c)，前者的標定樣式是透過 Harris 的角點偵測取得特徵點；後者則是利用圓點中心檢測的算法獲取圓心點的位置。

傳統率定方法通常使用率定板 (Calibration Target) 作為參照物來進行標定。率定板就是帶有固定間距圖案陣列的平板，通常將其放在若干合適的角度和位置，從每一個角度、位置拍攝一張圖像。在此過程中要求相機不能移動位置，以確保其參數的不變性。圖 4(a)展示了一個西洋跳棋盤樣式的標定板，其作法為針對率定板連續拍攝十組以上在某種確定模式下的立體像對，隨後進行參數確定。

近年所使用的自動編碼標誌圖 4(b)(c)主要為攝影測量中自動識別的唯一率定物，因此編碼標誌設計的完善度成為自動識別及量測成果之關鍵，相機的攝像原理為仿射投影成像幾何，且攝影測量是以多視立體視覺原理為基礎量測方式，為了滿足任何方向均可進行量測，因此編碼標必須能夠平移、縮放、旋轉、仿射等攝像幾何改變時，仍可以輕易辨識量測位置，處理時可以獲得很高的處理效率。

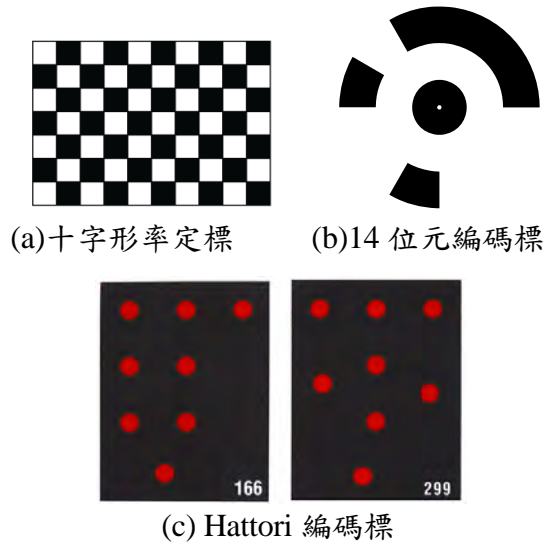


圖 4 率定標樣式

2.5 點雲差異分析

點雲距離計算為評判兩點雲間差異之依據，早期 DTM 資料要進行差異分析時，通常會將點雲進行網格化(Grid)處理，但在進行網格化過程中，必須由內插程序完成網格補點，而兩期差異將因內插程序導致誤差產生。目前既有的點雲差異分析方法包含 C2C (Cloud-to-Cloud)、C2M(Cloud-to-Mesh)及 M3C2 (Multiscale-Model-to-Model-Cloud)^[6] 等方法。

C2C 是一個最簡單最快速的點雲距離計算方法，因為它不需要將點雲網格化，也不需要計算表面法線，但容易受到周圍點雲影響，以致匹配錯誤率較高，如圖 5 所示。

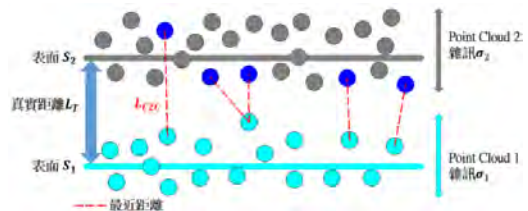


圖 5 直接最近距離示意圖

三、IoT 視覺攝影監測系統

本研究結合上述視覺攝影方式，以 IoT 結合自動攝影系統，並使用視覺攝影方式獲取監測點三維空間資料來推估監測區是否產生變位，其相關系統設計如下依序闡述。

3.1 系統架構

IoT 視覺監測自動監測系統由 IoT 自動攝影模組 (IoT Automatic Photography Module, IoT_APM)、視覺攝影監測模組 (SfM-MVS

Photogrammetry Monitoring, SfM-MVS_PM) 及誤差分析模組 (Error Analysis Module, EAM) 所組成。

IoT_APM 是架設於現地的自動攝影及回傳設備，由 IoT 架構結合攝影裝置組合而成；SfM-MVS_PM 是基於 SfM-MVS 攝影測量技術的全自動量測及計算架構；EAM 是由資料庫結合誤差分析的資料展示及預警發布系統，如圖 8 為本系統架構。

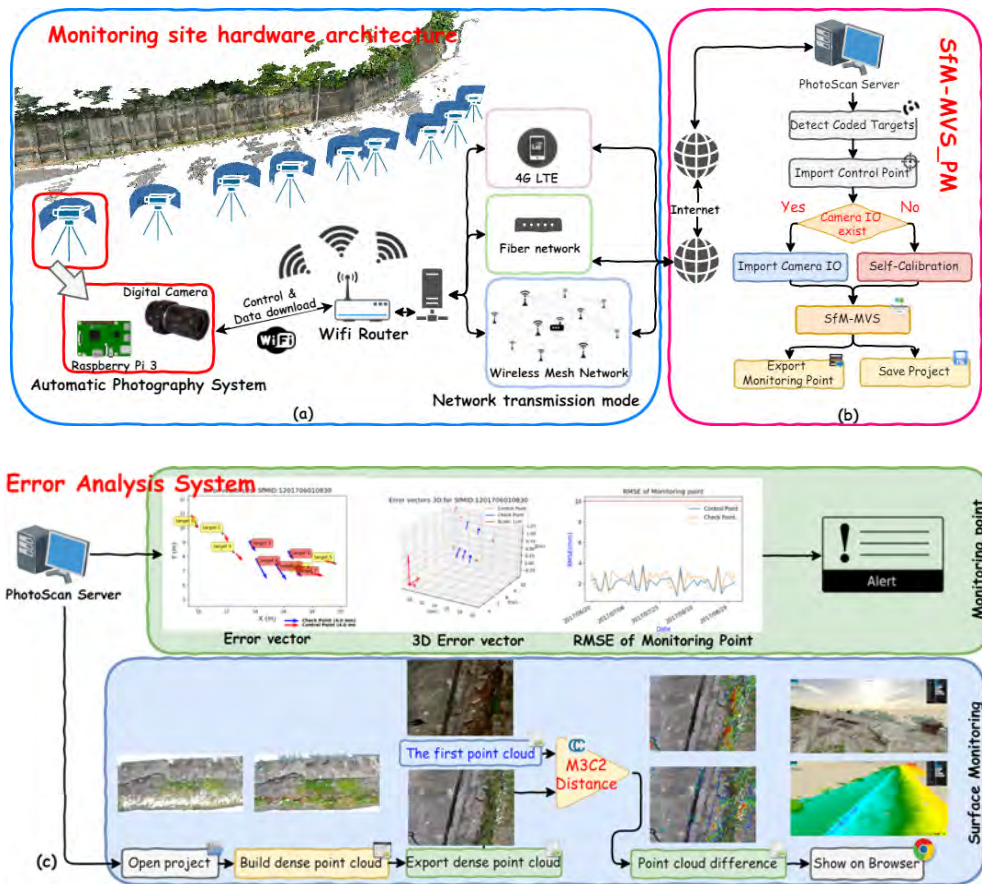


圖 8 IoT 視覺監測自動監測系統架構

IoT_APM 架設於監測現地並由多部自動攝影組成，其中各 IoT 通訊及資料傳輸由 Wifi 提供連結，網際網路通訊及資料傳輸可由 4G LTE、Fiber network 或 Wireless Mesh network 提供(圖 8(a))。

SfM-MVS_PM 為全自動視覺攝影測量計算架構，計算流程由 IoT_APS 拍攝影像並建立專案開啟自動計算程序，監測點自動量測可由分析影像編碼標(Coded Targets, CTs)位置來完成自動量測，最後由取監測區控制點及各相機內方位參數以 SfM-MVS 方式計算監測點三維資料，如圖 8(b)。

EAM 可提供監測點三維資料來提供預警資料，更進一步可以不同時期表面差異來判識三維表面差異，計算程序由兩期稠密點雲以 M3C2 方式計算點雲差異，並轉換為 WebGL 格式進行展示，如圖 8(c)。

3.2 IoT 硬體架構

IoT_APM 由多部小型單板電腦(Small Single-Board Computers)以 IoT 架構結合數位相機所組成，每部自動攝影設備以 Raspberry Pi3 Model B 搭配一組伺服馬達雲台及數位相機組成，並從中選擇一台作為主站，其功能為拍攝控制及專案建立。拍攝控制可使用排程及單次拍攝，其中單次拍攝可做為系統測試及重複確認計算資料使用，排程則以固定時間啟動進行拍攝。

當自動攝影完成後，每台攝影站將以 FTP 傳遞拍攝照片至自動計算伺服器中，主站將於各站資料傳遞完成

後自動產製 JSON 專案檔，供伺服器建立自動計算專案。此外，影響攝影測量精度包含相機解析度(Pixel Size)、相機焦距(Camera focal length)及地面解析度(GSD)等因素，因此本研究選擇微型單眼系統，並由監測精度需求來調整攝影距離或鏡頭焦距。

3.3 IoT 通訊架構

本架構裡 IoT 攝影系統通常會建置於區域網路內，若使用 Socket 或 WebSocket 等通訊協定需以 IP 轉址才能經由網際網路控制及存取相關資訊。而 MQTT 通訊協定可跨網域進行訊息傳遞及指令下達，網路安全可以使用者登入及 SSL/TLS 加密保全，因此本研究 IoT_APM 採用 MQTT 通訊協定。

IoT_APM 依其內建設定檔(圖 10(a))決定其中一台為主站其餘則為子站，主站用來發布拍攝指令及產製專案檔，子站則依拍攝指令執行拍攝任務，所有相機均向 PhotoScan Server 請求通訊設定參數，如 FTP 連線 IP、帳號、密碼及目前計算主機狀態。完成上述動作後 IoT_APS 將進入等待任務狀態，如圖 9(a)所示。任務發布可由主站或 PhotoScan Server 依任務需求(要求重新拍照時)進行發布，並由各相機開始拍攝任務，當拍攝任務完成後各相機會向主站發布完成任務訊息，並由主站等待所有子站均完成任務後製作任務專案檔(圖 10(b))，並上傳至 PhotoScan Server；然而如果主機等待超時，此次任務拍攝取消並重新開始拍攝，如圖 9(b)所示。

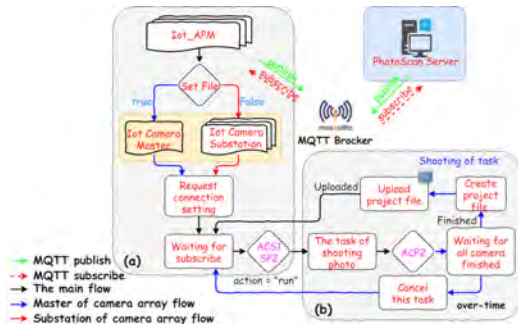
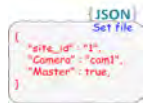
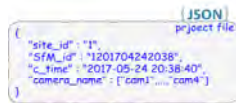


圖 9 IoT 相機控制模式

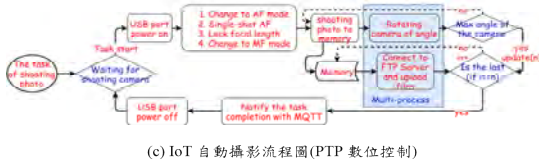
本架構 MQTT 發布訂閱主題如圖 10(e)所示。如主站需要知道目前 IoT 相機陣列中有多少主機，則可由訂閱 ACP1 及 ACP3 取得；開始自動拍攝任務可由各相機訂閱之 ACS1 及 SP1 解析回傳訊息為 'run' 時，開始自動拍攝任務；拍攝任務完成後各相機將以 ACP2 發布該任務名稱來代表自己以拍攝完畢，而主站則依據訂閱 ACP2 來判斷是否所有相機均已完成任务。



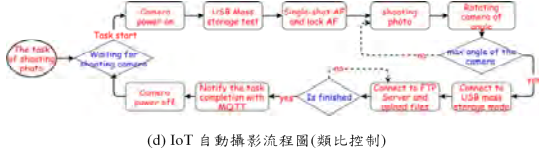
(a) 設定檔 JSON 格式



(b) 專案檔 JSON 格式



(c) IoT 自動攝影流程圖(PTP 數位控制)



(d) IoT 自動攝影流程圖(類比控制)



(e) MQTT 通訊架構；

"{Site_id}"及"{Camera}"為變數，#代表訂閱 MQTT 所有階層

圖 10 IoT 相機控制流程

3.4 誤差分析

控制點為三維重建過程中，將相對模型座標轉換至絕對模型座標之參考依據。以往通常假設選擇的控制點於監測區域外不變動位置，而這樣所量測出來的監控點(Check point)即為絕對位移量，如表 1(a)顯示為使用 SfM-MVS 將控制點加入約制，計算出控制點及監控點誤差量原始數據。表 1(b)紅色數字為模擬監控點開始產生 20mm 位移量，其成果直接顯示於誤差量及 RMSE 上，代表絕對位移量。但如此假設於真實環境中將難以找到真正不動的控制點，如表 1(b)(c)顯示如果控制點也開始發生 20mm 位移現象，紅色數字顯示並非以絕對位移量增加，而是一個相對的位移量，這個位移量將使 RMSE 由原始 1.980mm 增加至 8.686mm，該數字可提供判定該監測區域是否開始產生不穩定之參考依據。

表 1 模擬監測點變動對 SfM-MVS 方法之影響

Raw data(a)				Simulation changes							
				2 point of check point(b)		1 point of control point(c)		All point of control point(d)			
Control Point		Check Point		Control	Check	Control	Check	Control	Check		
# Label	Error	# Label	Error	Error	Error	Error	Error	Error	Error		
target 1	4.607	target 3	4.043	4.568	22.231	7.416	3.246	1.464	5.502		
target 2	2.428	target 4	3.181	2.381	3.165	5.832	1.340	11.818	5.954		
target 5	3.704	target 7	3.649	3.547	3.527	1.758	3.276	13.144	12.572		
target 6	2.783	target 8	6.906	2.594	6.656	3.506	5.674	20.271	13.067		
target 9	3.272	target 10	5.816	3.314	22.969	4.408	4.702	20.156	12.451		
RMSE	1.980	2.843		1.946	8.518	2.873	2.271	8.686	6.053		

Red text is simulation changes points

3.5 預警通報

監測系統預警通報可結合管理員資訊，以 SMS 簡訊、智慧型手機推播、Mail 信件及通訊軟體通知等方式。管理員將視監測數據結果分析判斷是否有立即性危害，並派遣人員前往查察。本系統也可以結合相關通報系統，如 Taiwan Road Early Nature Disaster Prevention Systems(TRENDS)^[7] 使用 XML 資料結構發布相關預警訊息，再由該系統進行合併通報(圖 11)。



圖 11 預警系統發布架構

3.6 系統介面介紹

本系統以 Python 語言進行封裝，系統啟動可直接由 PhotoScan 開啟後使用”Run Script”方式啟動本系統，系統載入時會先確認所有伺服器架構是

否正常運作，若相關測試均通過，將會於選單中新增”道路邊坡自動監測”選單，選單功能中有”道路邊坡自動監測系統”及”排程及差異分析計算”兩大功能，選單載入如圖 12 所示。系統載入後於 Console 中會進行相關環境連線測試及相關版權宣告等歡迎畫面，其中包含目前 PhotoScan Pro 軟體版本、PostgreSQL 版本、PhotoScan Server 連線測試、SQL 連線測試、Flask Server 啟動測試及 Http Server 啟動測試等功能，若相關測試都通過，系統將正常運作，相關歡迎測試訊息如圖 13 所示。

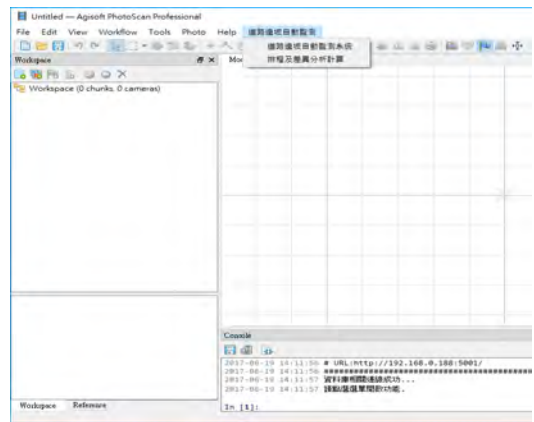


圖 12 道路自動邊坡監測系統選單自動載入

可直接有移動平台(Android、iso)登入控制，以下為初步開發介面，系統登入可依據資料庫管理員資料欄位進行登入，登入畫面如圖 21 所示。

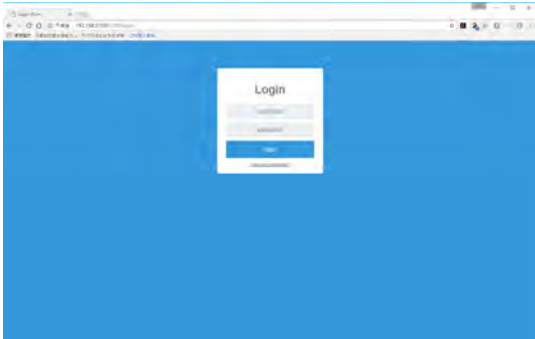


圖 21 道路邊坡自動監測系統網頁登入介面

登入後將自動轉換至控制介面，介面中提供相關道路邊坡自動監測功能啟動與停止，該功能與 Windows UI 功能連動，若於網頁介面進行停止，Windows UI 介面也會跟著停止，啟動亦相同。於網頁 UI 上提供目前計算相關訊息，其中包含監測任務及叢集計算主機狀態，Web UI 如圖 22 所示，叢集計算主機狀態如圖 23 所示。網頁控制介面中也可以直接對遠端 IoT 進行控

制，控制介面如圖 24。完成相關設置後可由此進行 IoT 任務下達，並由上述程序完成自動計算。

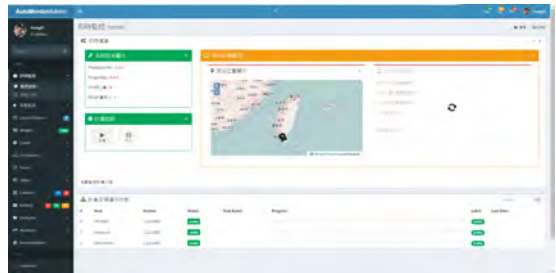


圖 22 道路邊坡自動監測系統網頁任務介面



圖 23 叢集計算主機狀態

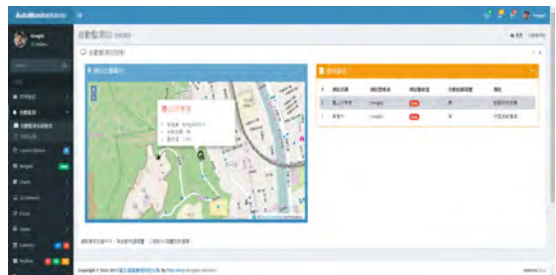


圖 24 IoT 自動監測模組管理

四、實驗例探討

4.1 實驗區設置

實驗場地以臺灣高雄市鼓山區鼓山二路往壽山動物園道路邊坡取其中 50m 為例(圖 25(a))。IoT 自動攝影系統以間隔 8m 設置一部，共計使用 4 部(圖 25 (b))。實驗設計使用相機解析度為

6000×4000 pixel、焦距為 16mm 及攝影距離約 11.5m，換算地面解析度約 3mm/pix，監測點使用中心半徑為 25mm 的 12bit 編碼標，共計設置 16 個(圖 25(c, d))。編碼標整體直徑為 175mm 約為 58pixel，遠大於可辨識 9-10pixel，

並使用本地座標系統以 TST 測得各監測點座標。假設此實驗為臨時性實驗，因此 IoT 自動攝影設備使用測量用三角架架設，每台 IoT 自動攝影設備由獨立行動電源供應電源，單次拍攝範圍由 0° 至 180° 以每 10° 拍攝一張照片，四部相

機共計拍攝 76 張，網際網路連線使用 4G Let 傳輸。若未來要進行現地連續性觀測，可將此系統架設於路燈，並以市電及固網進行架接，以解決電力及網路問題。



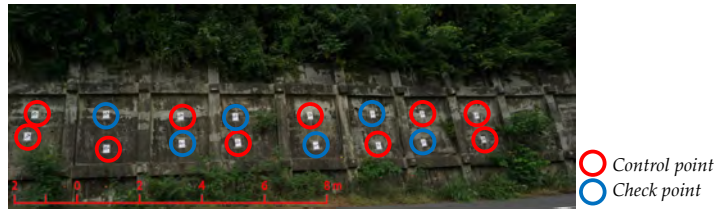
(a) 實驗區域



(b) IoT 自動攝影系統



(c) 使用編碼標



(d) 控制點及檢核點設置位置

圖 25 實驗區設置

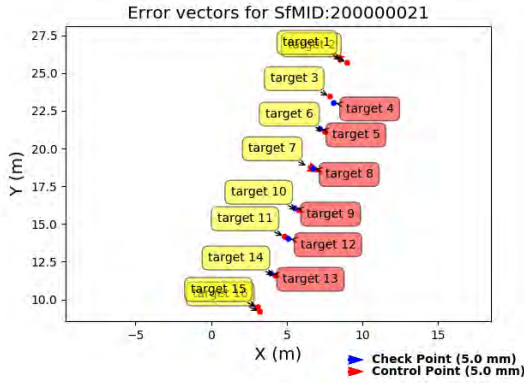
4.2 誤差分析

為了驗證 SfM-MVS 方法精度及可靠度可適用於監測使用，於 2014 年 6 月至 2014 年 12 月開始以定期手動巡檢對本實驗場地，以不同相機、焦距、攝影方式及自動編碼標抓取等條件進行測試，監測點均以 TST 觀測成果進行比較，成果顯示精度均小於 0.5pixel^[8]。控制點以均勻分布於監測區上，誤

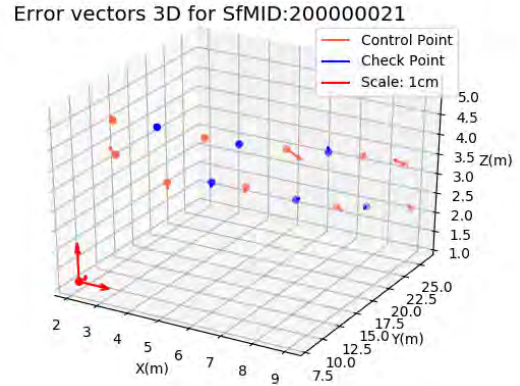
差分析計算以本研究提出兩方法進行比較，以本系統自動計算成果 SfMID:2000000021 為例，監測點(控制點與檢核點)最大誤差為 5.087mm，最小為 0.011mm，Total RMSE 為 1.39mm，控制點 RMSE 為 2.934mm，檢核點 RMSE 為 1.651mm。以本實驗拍攝 GSD 為 3mm/pix，以 Pixel 表示 Total RMSE 為 0.463pixel。各點位以誤

差向量表示如圖 26(a,b)，本實驗統計 40 次計算數據的 RMSE 來驗證其方法之穩定度，控制點最大 RMSE 為 3.81mm，最小為 0.776mm，檢核點最

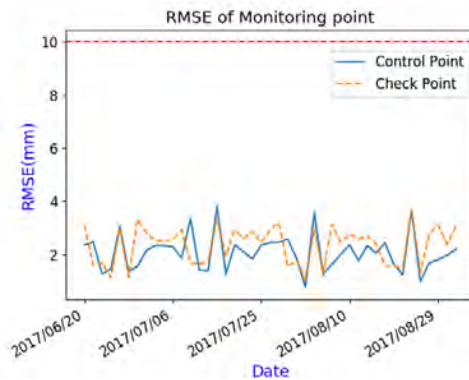
大 RMSE 為 3.695mm，最小為 1.065mm，如圖 26(c)。上述成果說明利用此方式具有高精度及穩定度，可適用於結構體監測使用。



(a) 2D 誤差向量



(b) 3D 誤差向量



(c) 監測點 RMSE

圖 26 監測點誤差分析圖

此方法用於道路邊坡監測需長時間才能發現其變化，為了驗證此方式可適用於道路邊坡監測使用，以下以移動監測點位置來模擬邊坡發生變動。首先將各控制點依序於影像量測位置位移 25mm，如圖 27 所示。圖中'Raw'顯示各監測點原始誤差，'1 point'至'10 points'顯示各控制點依序移動後所顯示

的誤差值。'Total RMSE'顯示各控制點位移後所計算的 Total RMSE。數據顯示當移動一個控制點時誤差值由 4.28mm 上升至 18.405mm，Total RMSE 也由 2.574mm 上升至 7.159mm；依序移動各控制點可發現被移動的控制點誤差值會提升，Total RMSE 也開始由 2.574mm 逐漸增加至 20.172mm。

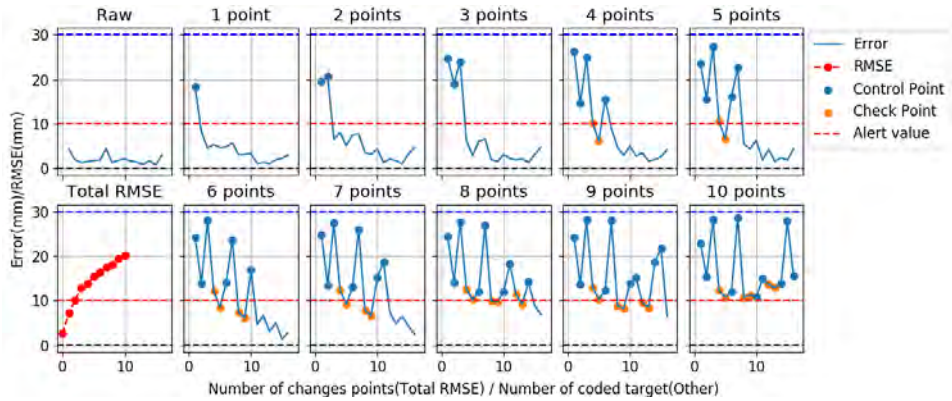


圖 27 模擬監測點變動對 RMSE 影響圖

上述方法於 SfM-MVS(PhotoScan) 計算程序將位移(帶有誤差)的控制點加入約制, 成果顯示並非絕對位移量, 而是整體最小值。為了驗證帶有誤差的控制點不會干擾 SfM-MVS 求解成果, 首先假設將各控制點位移約 55mm, 於 SfM-MVS(PhotoScan) 計算過程相機參數已知且不使用任何控制點進行約制, 再將計算所得控制點經 TLS 與實測控制點計算 3D Affine 參數, 並轉換其餘檢核點如表 2 所示。表 2(a)顯示 Affine 3D 轉換後座標差; (b)將位移控

制點帶入 PhotoScan 約制的座標差; (c)座標差的三維距離。成果顯示(1)TLS 與 PhotoScan 所計算出來的座標差距非常接近(表 2(c)), TLS 所計算的轉換參數須符合各點誤差為最小並與 PhotoScan 計算結果相符; (2)檢核點於實驗例中並未變動, 因此誤差並未在這些點上產生, 而是直接將這些誤差顯示於帶有誤差的控制點上; (3)控制點於 SfM-MVS 計算程序中扮演座標轉換及尺度約制功能, 經驗證帶有誤差的控制點並不會對計算過程產生更大的誤差。

表 2 PhotoScan 以 TLS 三維座標轉換比較表

Label	Diff. Of TLS (a)			Diff. Of PhotoScan (b)			Distance (c)		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	<i>Simulate d moving</i>	<i>TLS</i>	<i>PhotoSc</i>
target 1*	-16.59	-62.83	4.76	-16.67	-62.94	4.76	59.18	65.16	65
target 2*	14.98	50.2	0.62	14.89	50.12	0.65	58.22	52.39	52
target 3*	15.21	52.23	-1.29	15.23	52.21	-1.31	55.55	54.41	54
target 4	1.06	-0.57	5.23	1.05	-0.55	5.24			
target 5	0.14	3.15	0.56	0.2	3.19	0.53			
target 6*	-17.6	-51.22	6.46	-17.55	-51.14	6.46	57.02	54.54	54
target 7*	14.85	63.55	0.37	14.94	63.65	0.35	57.5	65.26	65
target 8	2.16	6.24	3.45	2.24	6.36	3.43			
target 9	2.57	13.41	0.96	2.65	13.52	0.95			
target 10*	-14.77	-41.46	5.93	-14.68	-41.32	5.9	56.82	44.41	44
target 11*	-15.8	-40.85	0.54	-15.74	-40.7	0.54	60.17	43.80	43
target 12	4.23	15.48	4.7	4.29	15.59	4.67			
target 13	7.19	20.12	0.15	7.19	20.12	0.17			
target 14*	8.84	-16.52	-40.58	8.84	-16.48	-40.61	57.17	44.70	44
target 15*	19.89	77.35	20.89	19.82	77.24	20.93	57.96	82.55	82
target 16*	-8.99	-30.45	2.28	-9.06	-30.55	2.29	57.58	31.83	31
RMSE			25.791			25.785	57.73	55.59	55

* Control point; Unit:

4.3 點雲差異分析

稠密點雲匹配誤差可因選擇匹配密度、拍攝 GSD 及覆蓋率等因素影響將介於 GSD 的 2-3 倍。假設以 M3C2 對兩期無實質變動的點雲計算雲差異

如圖 28(a)，取其中較不受植物干擾的紅色區域計算平均值為 0.07mm 及標準差為 9.2mm。依序刪除距離介於 1 至 3 倍標準差的點雲($\pm 9.2\text{mm} \sim \pm 27.6\text{mm}$)如圖 28(b)~(d)。

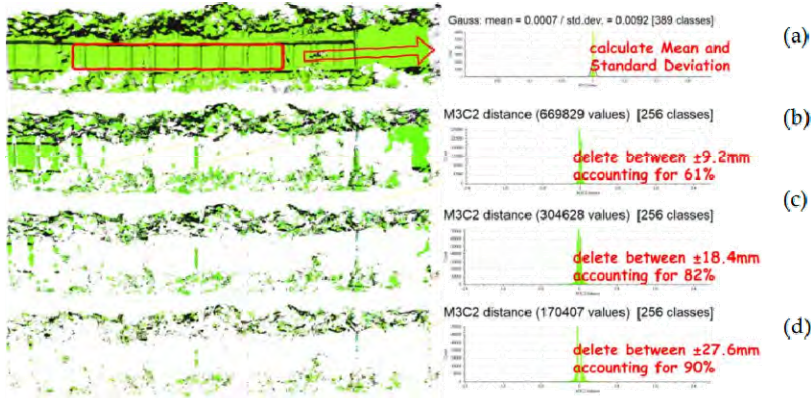


圖 28 點雲差異分析以 M3C2 為例

由實驗成果顯示 1 倍標準差佔整體 61%、2 倍佔整體 82% 及 3 倍佔整體 90%，如圖 29(d)顯示保留下來的點雲數據均位於植物干擾區域。因此以本實驗例 GSD 為 3mm 為例，點雲匹配標準差約為 GSD 的 3 倍，大於 3 倍標準差可視為兩期差異區域。

面差異的一種方法。實驗例以 M3C2 計算 2014/10/01 與 2017/08/31 點雲差異(圖 29(a))，接續刪除 3 倍標準差內的點雲，並以 RGB 紀錄色階渲染顏色(圖 29(b))，最後以 Potree 分別將上述點雲經轉換並以 WebGL 展示(圖 29(c))。整體流程如圖 29 所示。

點雲差異分析是以視覺化展示表

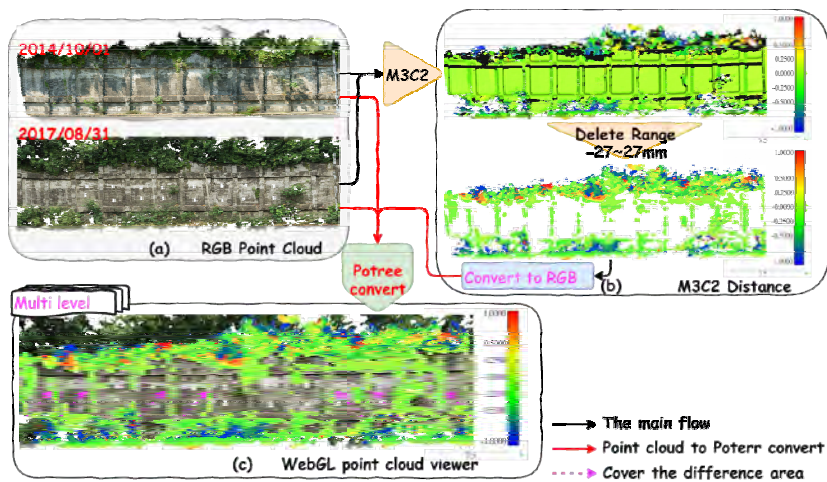


圖 29 M3C2 點雲差異及點雲展示

本實驗例經 TST 現地驗證及上述成果顯示地錨護坡區主體結構無實質變動，僅多處植物生長所產生的差異。但由於拍攝方式為旋轉攝影，多處因攝影

遮蔽所產生差異(圖 29(c)洋紅色箭頭)，若使用固定攝影機旋轉拍攝將可避免此雜訊發生。

五、結論

本研究延續「道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究」計畫^[9]，探討如何建置全自動道路邊坡近景監測方法，其中包含硬體及全自動計算架構，提出基於 SfM-MVS 攝影測量的全自動道路邊坡監測架構，提供全自動攝影、回傳、監測點量測、監測點計算、誤差分析及表面差異分析為目的監測方法。

SfM-MVS 攝影測量監測設備相較於現行 GPS 或地面雷射掃描來得便宜，且同時可提供監測點及三維表面監測。誤差分析於攝影測量監測通常會將控制點設置於不動區域以分析監測點是否位移，而本研究提出將控制點一樣設置於監測區內(控制點可帶誤差)，並以 TLS 三維座標轉換驗證有帶誤差的控制點能可進行約制，且可反映控制點是否開始產生位移。

表面差異分析以 M3C2 計算並刪除大於 3 倍標準差的數據，並以視覺化展示彩色點雲及點雲差異套疊成果。本系統經連續觀測及上述分析方式驗證具有應用於道路邊坡監測之可行性，其結論整理如下：

1. 本研究以 SfM-MVS 攝影測量技術用於邊坡表面位移監測上，其成果證明該方法可有效獲取監測點絕對或相

對的位移量。

2. 以 IoT 自動攝影架構結合全自動近景計算程序可免去人工的介入，使第一線養護單位更能廣泛地接受並實際應用。
3. 本研究以 TLS 三維座標轉換方式來驗證帶有誤差的控制點對解算精度的影響，實驗成果證明，SfM-MVS 方法解算成果與 TLS 三維座標轉換的成果接近，且受變動的控制點也直接反應於該點計算誤差上。此外，該方法解算出來的誤差量為相對位移量，雖然不能直接表示該點的絕對位移量，但可知道該點位已經開始產生位移，可提供後續追蹤使用。

後續使用效益與應用如下：

1. 建立近景攝影測量技術，應用於道路邊坡監測使用，並制定此方案使用範圍及標準建置程序。
2. 提供多時序三維重建資料差異分析之解決方案，可用於分析道路邊坡變遷及崩塌潛勢分析使用。
3. 藉由本研究計畫之實作，驗證本系統架構及後續可行性案例推廣使用。
4. 本近景攝影監測架構可使用於自動攝影、手動、車載及 UAV 定期巡檢功能，於短期間內可直接協助公務機

關應用於巡檢使用。

5. 可提供公路主管機關，如：國道高速公路局、公路總局、台鐵局等，做為

邊坡自動監測管理使用，以減少人工現場勘查所需頻次。

參考文獻

1. Skarlatos, D., and Kiparissi, S. (2012) Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces, ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences 3, 299-304.
2. Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., and Szeliski, R. (2006) A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms, In Computer vision and pattern recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on, pp 519-528, IEEE.
3. Charles Loop, Zhengyou Zhang(1999), Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision, Microsoft Research.
4. Skarlatos, D., and Kiparissi, S. (2012) Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces, ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences 3, 299-304.
5. Duane, C. B. (1966) Decentering distortion of lenses, Photogrammetric Engineering 32(3), 444-462.
6. Maybank, S. J., and Faugeras, O. D. (1992) A theory of self-calibration of a moving camera, International Journal of Computer Vision 8, 123-151.
7. Lague, D., Brodu, N., and Leroux, J. (2013) Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, 10-26.
8. 邱建國(2016)，「臺灣公路早期防救災決策支援系統維護更新及橋梁耐震耐洪資料管理系統建置」，交通部運輸研究所。
9. Chiu, Y. F., Lee, L. H., and Chang, T. R. (2014) Automatic photographic monitoring system for the deformation of road slop, Harbor & Marine Technology Center, Taiwan.
10. 邱永芳、呂良輝、胡啟文(2015)，道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究，交通部運輸研究所報告。