

# 近景攝影技術之應用開發

## — 以道路邊坡穩定監測為例

邱永芳／交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

李良輝／國立高雄應用科技大學土木工程系副教授

胡啟文／交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

張庭榮／國立高雄應用科技大學土木工程系研究生

### 開發背景

臺灣位於歐亞板塊和菲律賓海板塊的聚合邊界，為造山運動活躍的活動構造區，地處多山且地質年輕破碎，加上東北季風與西南氣流及夏季颱風影響，行經山區之公路，常因瞬間豪大雨過後引發邊坡崩塌，造成道路坍方或路基流失，交通因此阻斷甚至造成人車傷損。隨著地球氣候急遽變化，集中降雨愈趨明顯，造成山坡地發生滑動及土石流破壞之道路通行安全更重要的威脅。

為因應 98 年莫拉克風災，交通部於 101 年頒佈「公路養護規範」，供各級公路養護管理機關依據該規範考量其特殊需求去訂定養護制度與養護手冊，並依手冊規範進行定期檢測及特別檢測作業，檢測並記錄邊坡滑動之跡象，研判擋土結構物是否結構功能降低或尚失，以利及早發現問題並進行養護維修整建去防止災害產生。而經由現場工程師目視之檢測紀錄來判定邊坡現況，常因目視檢測紀錄數據之量化受限於人為主觀因素及本職學能而無法完全真實記錄邊坡各種破壞表徵，且常造成不同檢測人員因量化標準不一，而有不同結果之判定，無法完整描述邊坡目前之狀態。

實務上常運用於邊坡監測上之量測設備為地表地滑計、位移計、水壓計、土中水位計、土中傾斜儀、地錨荷重計、土中沈陷計、伸縮儀、土壓計…等，藉由量測邊坡地表及土壤移動變化之紀錄來得知邊坡穩定狀況。近年來，隨著科技發展，開始將衛星定位系統技術（Global Positioning System, GPS）、合成孔徑

雷達干涉技術（Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR）、時間域反射技術（Time Domain Reflectometry, TDR）、布裏淵散射光時域反射技術（Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR）及三維雷射掃描技術（Light Detection And Ranging, LiDAR）運用於邊坡滑動監測上，實可得不錯的監測成果，惟各監測方法皆有其限制及適用條件，公路養護管理機關必須依於有限的預算及被監測區域範圍之條件下去選擇使用之。相較於前述幾種監測技術，本研究發展之近景攝影測量技術應用在邊坡穩定之監測上具有成本較低、機動性高及精度高之特點，可被廣泛地使用在災害潛勢區域之經常性調查及災後即時影像之蒐集，作為風險評估、災害預防及災後重建參考依據之用。本研究利用近景攝影測量技術之特性，開發一般非量測型之普通數位相機（圖元 1000 萬畫素以上），採用多視點攝影的方式對被監測區域進行攝影，使用攝影測量軟體獲取被監測區域的三維表面點雲（為大量空間點資料的集合，其每點均含有三維座標點資料，可精準保存目標物不規則表面變化的實際尺寸與影像空間資訊）模型，透過自動匹配兩期影像控制點，將監測區域後期的相對三維數值模型轉換到前期的絕對三維數值模型中，然後分別生成數值高程模型（Digital Elevation Mode, DEM），並對兩期 DEM 模型進行疊加比對，計算坡體滑動的絕對位移量和局部變化區域的位置以及面積大小，從而實現後期監測過程中無需量測控制點就可以完成坡體監測，瞭解坡體滑動完整之歷史變遷資訊。

## 多視立體視覺近景測量技術

近年來，多視立體視覺中三維重建技術，以從運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 演算法重建場景，起初 SfM 是以攝影測量衍生出來之方法，透過記錄相機行進路線，並求得相機姿態參數，接著運用三角測量進一步重建三維場景。隨著時代改變，SfM 演算法場景重建流程，以重建相機的位置與場景為三維重建之關鍵。以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) [1] 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) [2,3] 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。

### 多視立體視覺演算法理論之簡述

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， $C$  和  $C'$  是拍攝兩張影像分別的攝影機曝光中心 (Principal Point)，形成的左、右影像平面分別為  $R$  和  $R'$ 。點  $M$  為場景空間的任一點，稱之為共軛點 (Conjugate Point)，點  $M$  在左、右影像平面上分別為  $m$  與  $m'$ ，亦為場景空間點  $M$  在影像中的投影，點  $M$  與相機的像主點  $C, C'$  三點所確定的平面為  $\pi$ ，平面  $\pi$  與影像平面  $R, R'$  的交線分別為  $L$  及  $L'$ ， $m$  與  $m'$  必定是在相關聯的核線上，此為核線幾何之約束條件，亦是 SfM 演算法的基本原理，以下為核線幾何之相關元素：

- (1) 基線 (Base Line)：為連接  $C$  和  $C'$  兩相機之像主點之間的直線。
- (2) 核點 (Epipolar Point)： $e$  和  $e'$  為基線在影像平面上的交點。

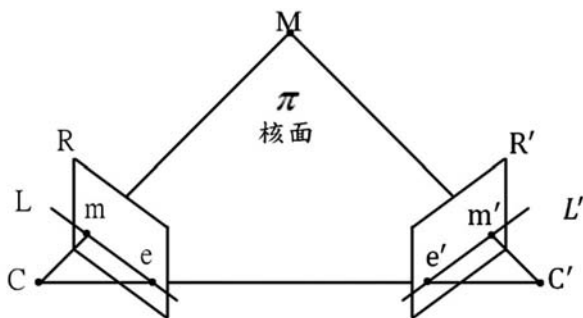


圖 1 場景空間與影像之核線幾何關係圖

(3) 核面 (Epipolar Plane)：為場景空間點  $M$  與兩曝光中心所組成。

(4) 核線 (Epipolar Line)：為核面與影像平面的交線。

假設拍攝影像  $R$  及  $R'$  之相機內方位參數分別為  $k_1$  及  $K_2$ ， $M$  到像點  $m$  及  $m'$  的變換矩陣 (投影矩陣) 為  $P_1$  及  $P_2$ ，則場景空間點  $M$  與像點  $m$  及  $m'$  之關係式為

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

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

投影矩陣與相機內外方位參數之關係式為

$$P_1 = k_1 [I | 0] \quad (3)$$

$$P_2 = k_2 [R | t] \quad (4)$$

其中  $R, t$  為相機外方位參數分別為旋轉矩陣及平移向量。

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，基礎矩陣表示了兩影像間之轉換關係。而假設兩影像所對應的內部參數矩陣分別為  $K$  和  $K'$ ，則它們之間的本質矩陣  $E$  (Essential Matrix) 可定義為：

$$E = K'^T F K \quad (6)$$

目前拍攝影像以數位相機為主流，可由影像之可交換圖檔格式 Exif (Exchangeable image file format) 資訊內容取得圖像解析度、焦距、感測器尺寸等參數資訊，進而求得相機之內方位參數  $K_1$  及  $K_2$ ，因此相機之內方位參數可視為已知之條件。

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演算法，基本上只需要 8 組共軛點位就可以計算出基礎矩陣  $F$ ，由已知之內方位參數  $K$ ，再求得本質矩陣  $E$ ，再藉由分解本質矩陣  $E$  即可得到旋轉矩陣  $R$  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匹配點所相對應之場景空間點  $M$  之具體坐標。

依據上述多視立體視覺演算法得知，利用多視立體視覺之優點在於利用大量多餘觀測之概念，利用線性求解核線幾何，再推攝像站外方位參數，而相機率定步驟為攝影測量中最高關鍵之問題之一，現今演算法可透過自率定方式，利用現地影像進行相機率定，該方式將可大大提高拍攝焦距選擇之便利性，並可降低相機率定之門檻，讓相機率定變成一件輕鬆容易的事情。利用多視立體影像中稠密點雲之匹配方式，可大量獲取 DEM 資料，因此多視立體視覺近景測量方式可針對單點進行監控，亦可進行面的前後期資料比對監測，本研究將針對多視立體視覺演算法運用於邊坡滑動監測上之計算精度與使用可行性做進一步探討。

### 拍攝距離與測量精度

本研究首先採用單一相機進行拍攝，利用相機對邊坡進行多張影像序列拍攝，而監測精度取決於像素大小 (Pixel Size)，以目前相關實驗報告均證明，利用多視立體影像測量精度可到達次像素 (Sub-Pixel) 等級，意旨如果測量精度須滿足 1cm，那拍攝之像素大小將不可大於 1cm，以此將可以滿足測量之精度。

如圖 2 所示，由於每一像素之寬度與焦距長，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)，可按每次巡檢或監測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，帶入式 (7) 關係式，可決定每次工作所需最大拍攝距離。

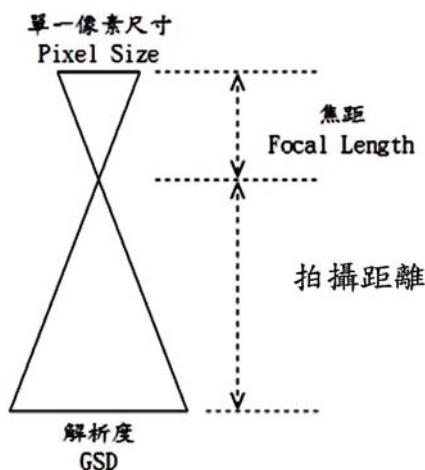


圖 2 相機感光元件與地面解析度之幾何關係

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

### 編碼標設計方案

編碼標可使近景攝影測量中進行自動量測，於控制點部分將可自動量測並進行約制，檢核部分將可透過自動化量測功能，與前期資料進行比對以完成全自動量測之用途，因此如何選用適合用於邊坡量測之編碼標須考慮的因素如下：

#### ● 相似性

編碼標主要為攝影測量中自動識別的唯一手段，因此編碼標設計的成功於否決定了自動識別及量測成果之關鍵，相機的攝像原理為仿射投影之成像幾何，且攝影測量是以立體視覺原理為基礎之量測方式，如圖 3 所示，這樣的圖形是無法用來表示不同的編碼，因為經過轉換後相似性太高，因此編碼標必須需要滿足平移、縮放、旋轉、仿射之特性，方能適用於邊坡發生滑動後，檢測之編碼標產生位移、旋轉或因道路阻斷致使需從另一方向進行拍攝... 等攝像幾何情況改變時，均可在任何方向均輕易辨識標碼標位置。

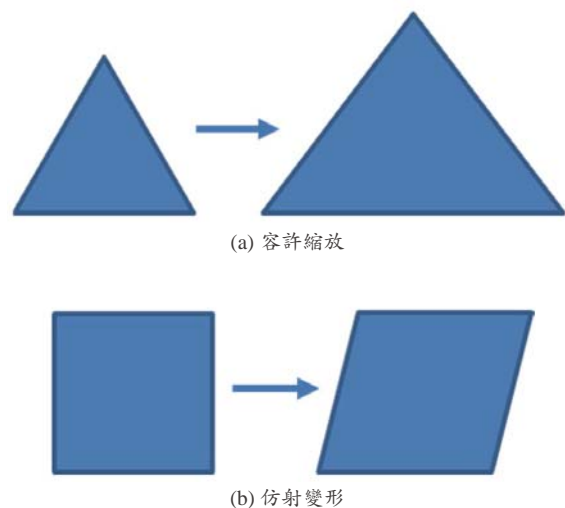


圖 3 編碼標需滿足之特性

#### ● 編碼總數量足夠

物體於三維場景重建過程中會產生平移、縮放及旋轉之問題，而三維的座標轉換包含了 1 個尺度參數、3 個平移參數及 3 個旋轉參數共 7 個轉換參數，如式 (8) 及圖 4 所示，必須透過座標系統的轉換才可使兩期 DEM 資料精確的比對。而為解得此 7 個轉換參數，至

少需要 3 個已知控制點，若設置多於 3 個已知控制點時，即可利用最小二乘法求得 7 個轉換參數的最或是值，因此在編碼標數量之選用上，必須設置至少 3 個以上做為已知控制點，才可確保使兩期 DEM 於一致的座標系統上進行比對，另於公路邊坡之敏感位置（如：坡頂、坡角、路面、錨碇座 … 等）可以增設編碼標做為監控使用，而數量上則可依實際需求進行設置。

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = (1+m) \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

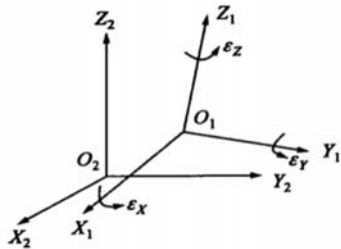


圖 4 兩期不同三維座標系統間之轉換模型（布爾莎 — 沃爾夫 (Bursa-wolf) 模型）

● 特徵簡單，易於識別

為了減少圖形處理的複雜度，提高辨識準確率和降低處理時間，編碼圖案應盡量做到特徵簡單，最好是由適合用圖像處理進行識別的基本幾何元素構成，因此圓形為最簡單的幾何圖形。

● 尺度適當

編碼標的尺寸過小，成像面積小，不利於資訊的識別；尺寸過大則無法貼附於量測平面上，會產生扭曲等問題。

本研究模擬拍攝距離可被辨識如下圖 5 所示，對編碼標進行不同距離拍攝，再推估編碼標形狀大小佔多少像素可被辨識出來，實驗結果如表 1 所示，證明編碼標直徑至少需大於 34 像素，在影像中才能被自動量測出來。

根據拍攝距離與量測精度關係式（式(7)），可計算出拍攝距離之地面解析度大小，再由地面解析度與編碼標不得小於 34 pixel 之原則計算出編碼標最小需要之尺寸，例如拍攝距離 10 公尺，GSD 為 0.319cm，則編碼標直徑最少要大於 10.8cm (0.319cm × 34 = 10.8cm)，依此類推計算所設置之編碼標大小。

● 易於從背景中分離

邊坡之顏色多為植被、土壤及岩石所組成，以綠、紅及灰色系為主，因此利用黑白色系相間之標誌進行目標物識別，方能順利與背景影像中進行分離，並偵測編碼標黑色與白色各佔百分比作為判識依據。

綜上所述，Schneider 編碼標（如圖 6）具有適合邊坡量測及上述各點之特性，本研究將採此編碼標進行道路邊坡穩定監測可行性及相關精度之探討。

表 1 編碼標自動識別比較表

辨識標大小 (像素)	93	78	55	34	26	18
是否被辨識	是	是	是	是	否	否



圖 5 編碼標大小與自動量測編碼標比例實驗

## 實驗規劃與成果分析

本研究實驗場地選擇高雄市鼓山區壽山，該區域為壽山動物園、忠烈祠等高雄市重要地標必經之路，道路旁山坡均有施作地錨護坡，本實驗道路邊坡實驗均在此執行實驗及相關控制檢核點實測作業。實驗區長度約為100公尺，邊坡高度約7公尺，實驗區如圖7所示，實驗區現場如圖8所示，使用一般消費型數位相機 Sony A55 及搭配單眼鏡頭 Sony DT16-50mm F2.8。

本研究針對多視立體影像三維重建後之精度、自動量測可行性及兩期 DEM (面狀) 比較分析，規劃 (1) 以移動及固定拍攝方式探討多視立體視覺近景測量技術之精度，控制點部分採用全站儀進行三次元三角測量，以驗證精度及穩定度，(2) 為探討自動量測之方法，利用佈設編碼標，使得在近景測量過程中，需要人工點選控制點或檢核點之步驟可以自動執行，以探討全自動監測之可行性，(3) 利用編碼標進行監測點相關模擬實驗進行兩期 DEM 比較，以分析整體邊坡活動，共 3 組實驗進行分析探討。

### 多視立體影像拍攝方式

本研究提出兩種拍攝方式：

方式 1：為採用單一相機，進行影像序列式拍攝，該方式透過移動相機位置進行拍攝來模擬公路管養單位於一般邊坡 (非高潛勢滑動邊坡) 巡查之工作模式，手持相機或架設於移動車輛邊移動

邊拍攝，如圖 9 所示。

方式 2：透過多台固定相機同時對監測區進行拍攝，來模擬公路管養單位對於高潛勢滑動邊坡連續監測之工作模式，配合後端影像處理及資料傳輸、比對及分析，達到連續監測之目的，如圖 10 所示。

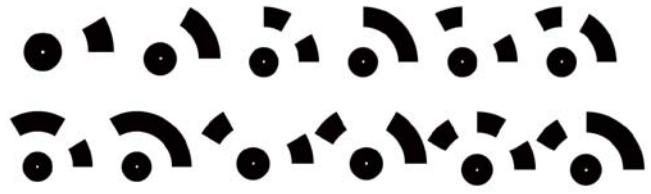


圖 6 Schneider 編碼標 (節錄)



圖 7 實驗區鳥瞰圖

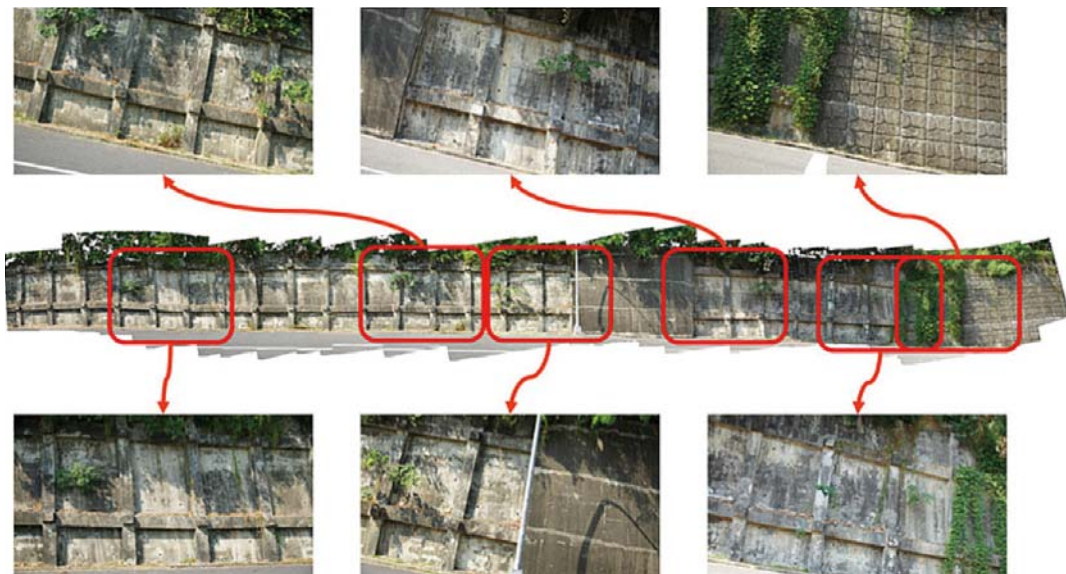


圖 8 實驗區現場照片

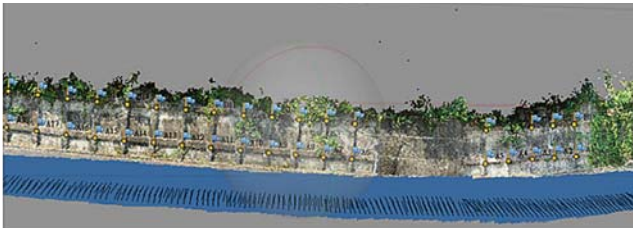


圖 9 拍攝方式示意圖 (影像序列拍攝方式)

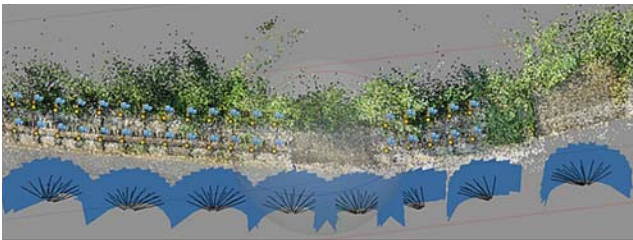


圖 10 拍攝方式示意圖 (多機旋轉拍攝)

### 控制測量

控制點實測部分採用全測站經緯儀實測，使用假定坐標系統，對地錨區進行現地實測，本次實驗規劃地錨特徵點及自動量測標兩個部分。

地錨特徵點，主要針對地錨明顯之區域（如：錨碇塊之角隅點）進行測量，於本實驗中，可用於驗證攝影測量精度及自動量測精度使用。自動量測標部分則假設

佈設自動量測位置為邊坡不易滑動區域，用來將模型座標進行控制使用，再透過佈設在邊坡上自動量測標檢核點進行比較，用此進行邊坡自動量測用途使用。實測分佈如圖 11 所示，地錨特徵點位於每個地錨之右下角，自動量測標則位於邊坡最下方，接近地表之處。

特徵點實測共計 36 點，控制點為黃色點位，紅色點位為檢核點，使用控制點及檢核點編號為 A 開頭及 B 開頭點位編號，控制點及檢核點採用地錨右下角特徵（自然點位）做為量測點位。自動控制標控制實測共計 10 點以 T 開頭，如表 2 所示。

### 相機率定

相機率定方式，以移動相機之拍攝方式為採用現場自率定，可於拍攝影像序列時一併進行相機率定，於固定焦距下，對一距離目標進行至少 80% 以上覆蓋率進行拍攝，利用大量重疊的方式進行相機率定參數求解。由於以多台固定相機同時拍攝之方式在攝影幾何上非常弱，因此若旋轉攝影的方式順便執行相機率定功能，會使得求解參數有所偏差，因此必須先利用移動相機之拍攝方式，事先對單一目標先進行相機率定，再將此相機率定參數重新帶回計算。

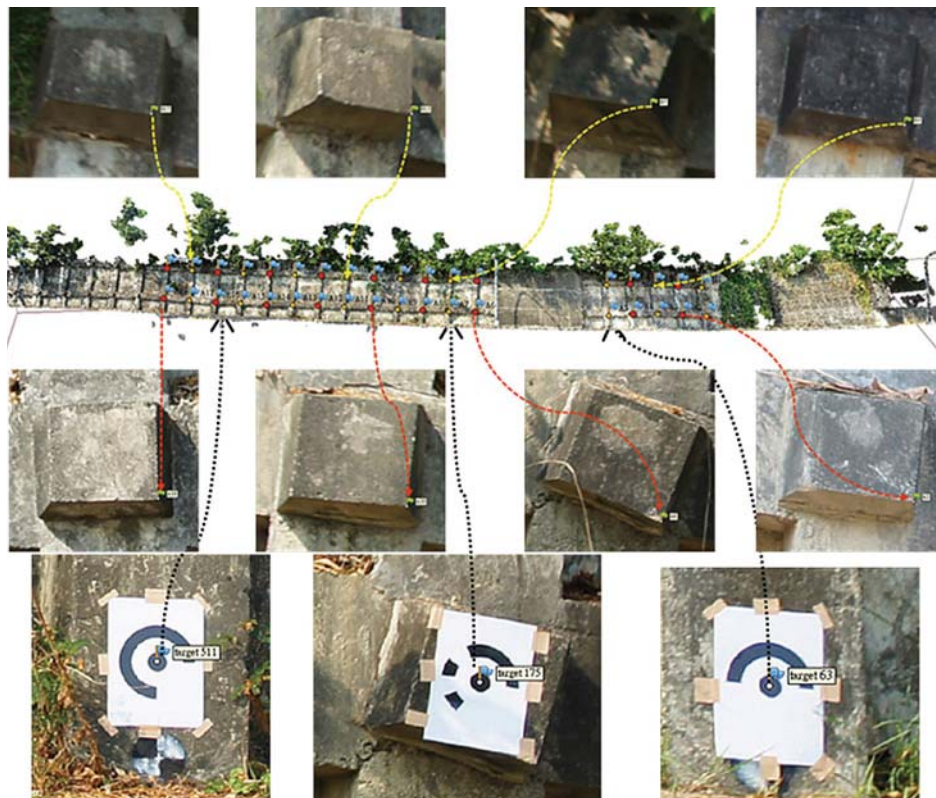


圖 11 實測控制點分佈 (放大點位節錄)







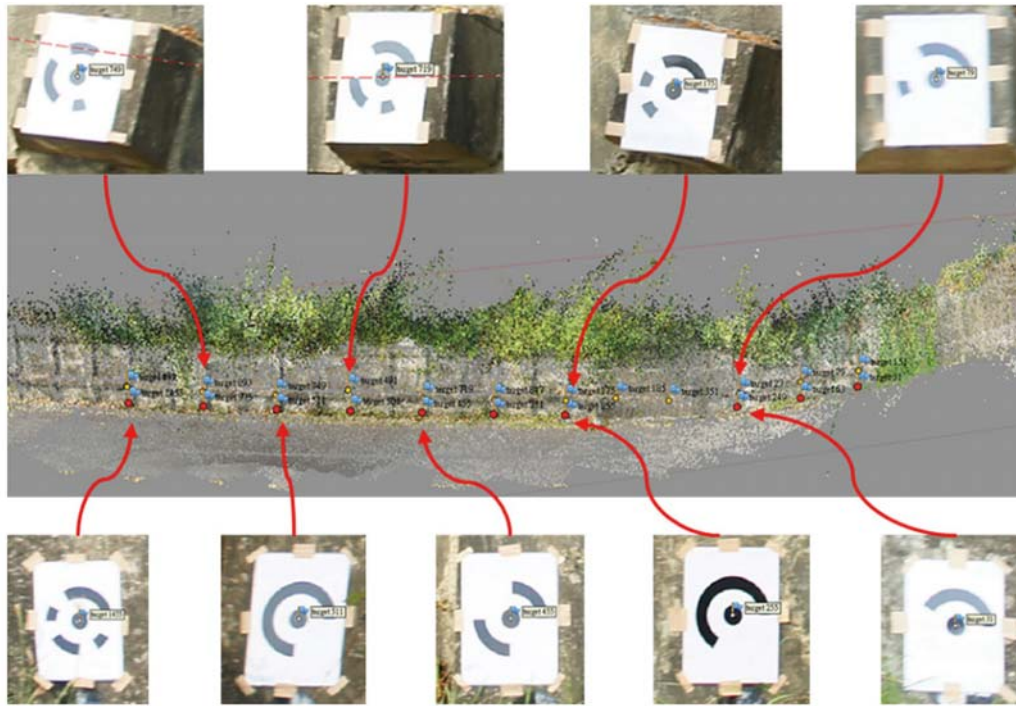


圖 12 實驗 2 控制點及檢核點佈設編碼標之分布示意圖

表 9 兩次移動拍攝之控制點成果

Label	X	Y	Z	Error	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料(m)			誤差分析(m)				近景量測(m)		
第1次拍攝										
T1455	0.993	0.714	3.116	0.0046	-0.0041	-0.002	0.0009	0.9889	0.712	3.1169
T975	2.727	5.381	2.5	0.0015	0.0011	-0.001	0	2.7281	5.38	2.5
T511	4.487	10.009	1.933	0.004	0.003	-0.0024	0.0011	4.49	10.0066	1.9341
T501	6.185	14.769	1.492	0.0024	0.002	0.0003	-0.0012	6.187	14.7693	1.4908
T455	7.746	19.358	0.916	0.0024	0.0009	0.0008	-0.0021	7.7469	19.3588	0.9139
T231	9.251	24.08	0.364	0.0051	-0.0027	0.0042	0.0001	9.2483	24.0842	0.3641
T255	10.797	28.81	-0.175	0.0046	0.0014	0.0043	0.0001	10.7984	28.8143	-0.1749
T249	13.554	40.928	-1.263	0.0027	-0.0018	0	0.0019	13.5522	40.928	-1.2611
T31	13.749	50.948	-2.077	0.0068	0.0059	-0.0035	0	13.7549	50.9445	-2.077
T63	13.895	45.954	-1.7	0.0058	-0.0056	-0.0008	-0.0009	13.8894	45.9532	-1.7009
第2次拍攝										
T1455	0.993	0.714	3.116	0.0067	-0.0048	0.0043	-0.002	0.9882	0.7183	3.114
T975	2.727	5.381	2.5	0.0016	0.0014	0.0007	0.0004	2.7284	5.3817	2.5004
T511	4.487	10.009	1.933	0.0042	0.0002	-0.0038	0.0019	4.4872	10.0052	1.9349
T501	6.185	14.769	1.492	0.0043	-0.0041	0.0013	-0.0003	6.1809	14.7703	1.4917
T455	7.746	19.358	0.916	0.0015	0.0007	0.0009	-0.001	7.7467	19.3589	0.915
T231	9.251	24.08	0.364	0.0079	0.0068	-0.0019	0.0035	9.2578	24.0781	0.3675
T255	10.797	28.81	-0.175	0.0051	0.0038	-0.0033	-0.0005	10.8008	28.8067	-0.1755
T249	13.554	40.928	-1.263	0.0063	0.0053	-0.0016	-0.0029	13.5593	40.9264	-1.2659
T31	13.749	50.948	-2.077	0.0099	-0.0089	0.003	0.0032	13.7401	50.951	-2.0738
T63	13.895	45.954	-1.7	0.0023	-0.0005	0.0004	-0.0022	13.8945	45.9544	-1.7022

表 10 兩次移動拍攝之監測點成果

Label	X	Y	Z	Error	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	第1次拍攝(m)			誤差分析(m)				第2次拍攝(m)		
T151	13.612	50.9907	-0.8771	0.0122	0.0019	-0.0052	-0.0108	13.6101	50.996	-0.8663
T175	10.844	28.8776	1.0352	0.0153	-0.0124	0.0087	-0.0021	10.8565	28.869	1.0373
T185	11.9	32.2209	0.8966	0.0147	-0.0126	0.0076	-0.0002	11.9121	32.213	0.8968
T23	13.577	40.9818	-0.1169	0.0174	-0.0172	0.0023	0.0015	13.5938	40.98	-0.1184
T351	13.052	35.7708	0.3486	0.0147	-0.0125	0.0059	0.0049	13.0646	35.765	0.3437
T491	5.8384	14.859	2.9401	0.0135	-0.0093	0.0029	-0.0094	5.8477	14.856	2.9496
T719	7.7403	19.5483	2.0379	0.0095	-0.0078	0.0011	-0.0053	7.748	19.547	2.0431
T749	4.4651	10.1185	3.0527	0.0096	-0.0078	0.0036	-0.0042	4.4729	10.115	3.0569
T79	13.772	45.9665	-0.3835	0.0156	-0.015	-0.0004	-0.0044	13.7869	45.967	-0.3791
T831	0.9306	0.7758	4.3501	0.014	-0.0139	-0.0013	-0.0008	0.9445	0.7771	4.3509
T847	9.2259	24.2009	1.4978	0.02	-0.0179	0.007	-0.0055	9.2438	24.194	1.5034
T893	2.6999	5.4943	3.5983	0.0094	-0.0089	-0.0001	-0.0031	2.7088	5.4945	3.6014

表 11 兩次移動拍攝之控制點及監測點精度成果

Table with 12 columns: 1st and 2nd photo control points (Max DX, Max DY, Max DZ, Max Total, Min DX, Min DY, Min DZ, Min Total, EVxVx, EVyVy, EVzVz, EVV), and Monitoring Point Accuracy (Max DX, Max DY, Max DZ, Max Total, Min DX, Min DY, Min DZ, Min Total, RMSE X, Y, Z, Total RMSE).

表 12 兩次固定拍攝之控制點成果

Table with columns: Label, X, Y, Z, Error, Xerror, Yerror, Zerror, Xest, Yest, Zest. Includes sub-sections for 1st and 2nd photos with multiple rows of data points.

表 13 兩次固定拍攝之監測點成果

Table with columns: Label, X, Y, Z, Error, Xerror, Yerror, Zerror, Xest, Yest, Zest. Similar structure to Table 12, listing monitoring point results for two photos.

表 14 兩次固定拍攝之控制點及監測點精度成果

Table with columns: 1st and 2nd photo control points (Max DX, Max DY, Max DZ, Max Total, Min DX, Min DY, Min DZ, Min Total, EVxVx, EVyVy, EVzVz, EVV), and Monitoring Point Accuracy (Max DX, Max DY, Max DZ, Max Total, Min DX, Min DY, Min DZ, Min Total, RMSE X, Y, Z, Total RMSE).

● 移動及固定拍攝方式之精度成果分析

以移動拍攝方式之實驗結果（表 5 及表 11）比較有無使用編碼標之量測精度，可以說明使用編碼標之量測結果更為精準，且該方法為全自動量測，若於自動監測上使用，能減少人工介入之問題。另外於模擬固定站旋轉攝影實驗中，監測點精度微幅下降，由實驗數據研判，可能是因為固定站旋轉攝影導致編碼標自動識別時，無法順利進行量測，因此導致量測數量有所減少，但可說明了使用自動量測標之方式有其可行性。

以密集點雲之面狀三維重建資料進行邊坡監測之探討

● 多視立體視覺近景測量之三維重建

主要驗證利用面狀區域進行分析，實驗佈設編碼標位置假設為邊坡不易滑動區域，且利用佈設編碼標方式進行自動量測，最後產生密集點雲的方式進行分析。

本實驗以點雲進行面狀量測，因此建議使用相同地面解析度進行密集點雲生成，否則距離計算將會因地面解析度不同而有所影響，點雲距離計算方法如下圖 13 所示，因點雲間距有所不同將導致量測精度有所偏差。

本實驗共拍攝兩組實驗分別產製密點雲，一組實驗採用沿邊坡水平移動拍攝方式（圖 9），另一組採用模擬固定站旋轉拍攝方式進行（圖 10）。使用拍攝焦距為 35 公厘定焦鏡，拍攝距離約 14.5 公尺。相關精度驗證已於前述實驗中證明，本實驗中成果與上述成果相當，不

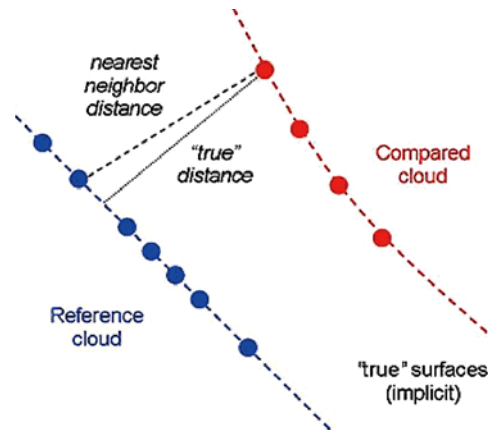


圖 13 點雲量測距離方法

1.05 公厘，監測點最大誤差為 5.9 公厘，其實驗成果較移動拍攝方式精度略差，主要是因為固定站旋轉攝影間接影響編碼標識別之數量。

再詳述。圖 14 為兩期 DEM 套疊差異分析圖、圖 15 為兩期 DEM 套疊差異分析距離計算圖。

兩期 DEM 差異距離計算如下圖 15 所示，圖 15(a) 為 XYZ 方向計算兩期差異距離圖，使用顏色方式進行顯示，主要誤差均於 5 公分左右，而大部分則小於 1 公分，顏色變化劇烈區域為植被物區，因此產生較大的誤差，圖 15(b)~(d) 為使用 X、Y、Z 三個分量所計算之結果，其中以 X 方向誤差較其他兩個方向較大。

● 多視立體視覺近景測量與地面 Lidar 比較

本實驗規劃與地面 Lidar 進行比較，使用地面 Lidar 為 Leica Scan Station 2，對本實驗區進行掃描動作，掃描密度以 1 公分點雲間距進行掃描，其掃描成果如圖 16 所示。

為了驗證近景攝影測量與 Lidar 掃描三維重建精度之成果比較，於實驗區架設兩站 Lidar 進行掃描，以能進行套疊比對，再透過佈設控制點進行連結，最後再透過這些控制點與本次近景攝影坐標系統進行轉換。圖 17 為兩組套疊差異分析距離計算圖，兩組差異距離計算如下圖 18 所示，圖 18(a) 為 XYZ 方向計算兩期差異距離圖，使用顏色方式進行顯示，實驗成果顯示越接近 Lidar 擺設位置，兩組差異值甚小（如圖 18，藍色色塊）；反之，越遠離 Lidar 擺設位置，則兩組差異值越大（如圖 18，黃紅色塊），平面誤差可達 10cm 左右，可以說明運用近景攝影測量所重建之三維模型精度可達 Lidar 掃描精度之水準，而本研究因沿道路邊坡進行移動拍攝，在拍攝距離不變之條件下，而使近景攝影測量所重建之三維模型能保持精度一致，相較之下 Lidar 是以固定位置進行掃描，其造成兩組有差異值之原因，應為隨 Lidar 掃描距離加長之原因，而使精度有所損失。

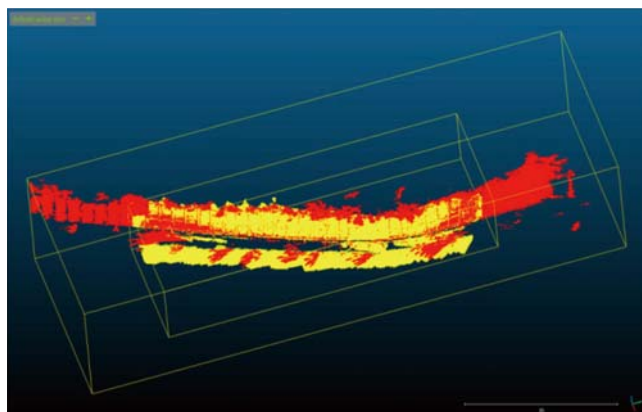
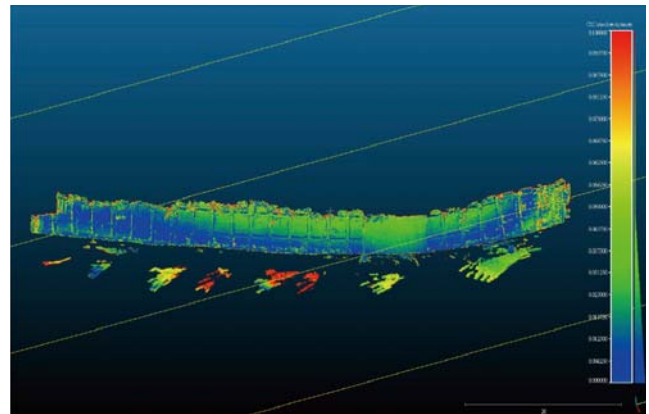
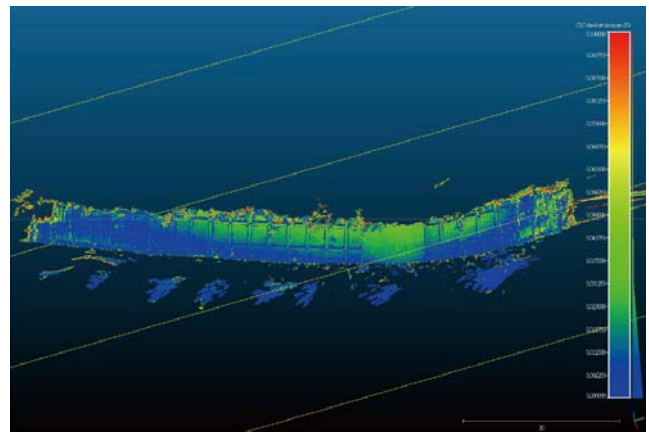


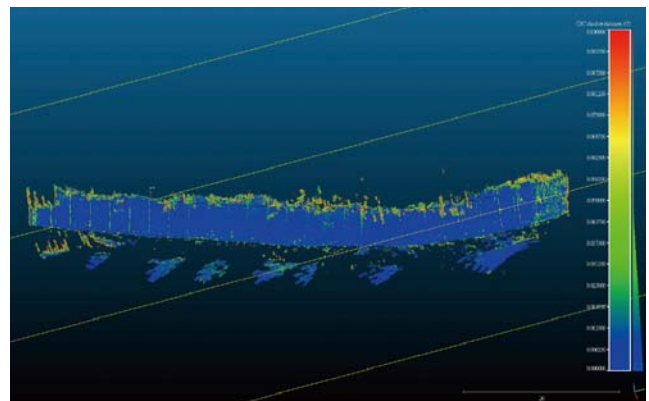
圖 14 兩期 DEM 套疊差異分析



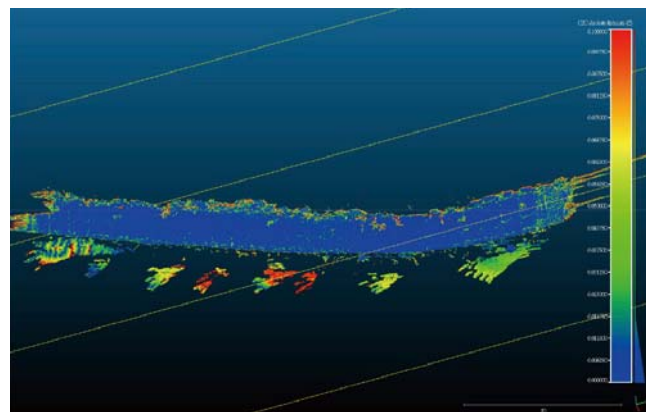
(a) 距離差異分析 (XYZ) 0~10 公分範圍



(b) 距離差異分析 (X 方向) 0~10 公分範圍



(c) 距離差異分析 (Y 方向) 0~10 公分範圍



(d) 距離差異分析 (Z 方向) 0~10 公分範圍

圖 15 距離差異分析



圖 16 Lidar 掃描成果

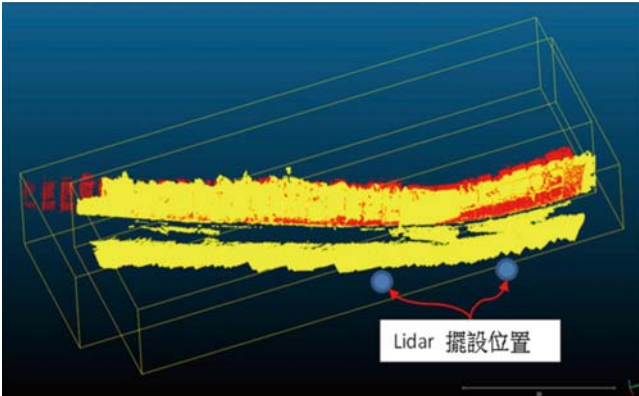


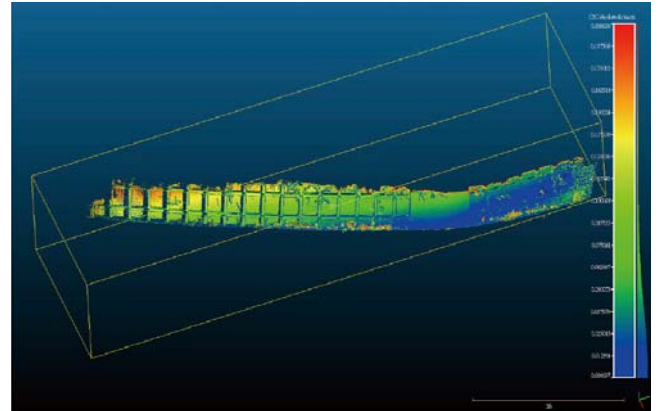
圖 17 Lidar 掃描成果與近景測量三維重建成果比較

### ● 實驗成果分析

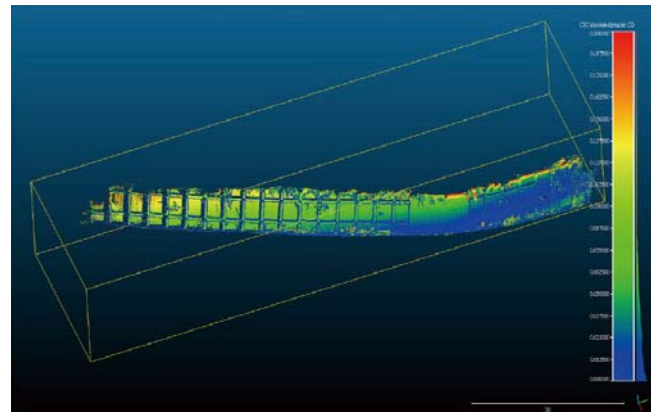
本實驗主要驗證利用密集點雲之面狀三維重建之兩期 DEM 資料比較進行邊坡監測，實驗成果會受三維重建密集點雲密度有關，平均地面解析度為 2.4 公分，密集點雲採用格點取樣方式進行三維重建，重建結果比較精度均於 5 公分左右，應為邊坡表面植被影響，因而產生較大的誤差，上述成果均在平面方向 (X) 比較差，其餘方向均小於 2.5 公分。另外本實驗組中加入 Lidar 比較，Lidar 會因為掃描距離之關係，間接影響掃描密度，因此對平面精度上會有所損失。

### 結論

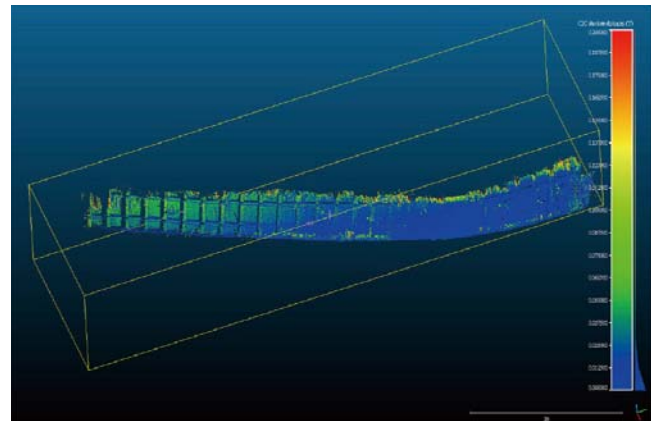
本研究對整體點雲的重建精度，平均可達 0.5~0.6 個像素，故利用影像技術對「點、線、面」的重建精度已可滿足監測工作之需求，相較於 Lidar 掃描測量技術，因 Lidar 會隨掃描距離，間接影響掃描密度，而使平面精度有所損失，以相同之拍攝距離比較，近景攝影測量所得精度已可達 Lidar 掃描技術之水準，且具成本低、拍攝快速方便之機動性及精度高之優點，開發成果將可推廣至公路養護管理機關運用於經常性巡查作業及連續性自動監測作業上，將可降低設備投資與維護檢測人力等成本，具有實地運用之可行性。



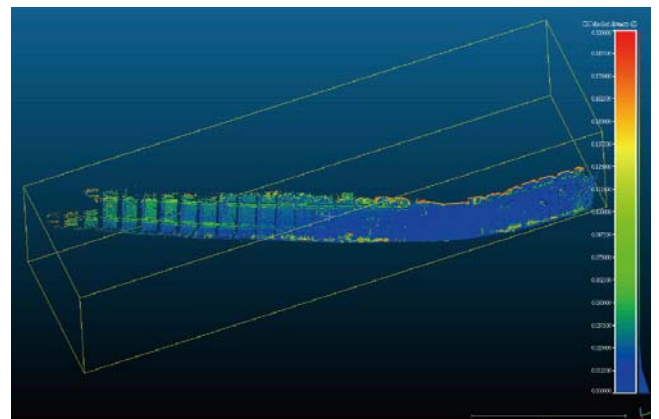
(a) 距離差異分析 (XYZ) 0~20 公分範圍



(b) 距離差異分析 (X 方向) 0~20 公分範圍



(c) 距離差異分析 (Y 方向) 0~20 公分範圍



(d) 距離差異分析 (Z 方向) 0~20 公分範圍

圖 18 Lidar 掃描與三維近景重建距離差異分析

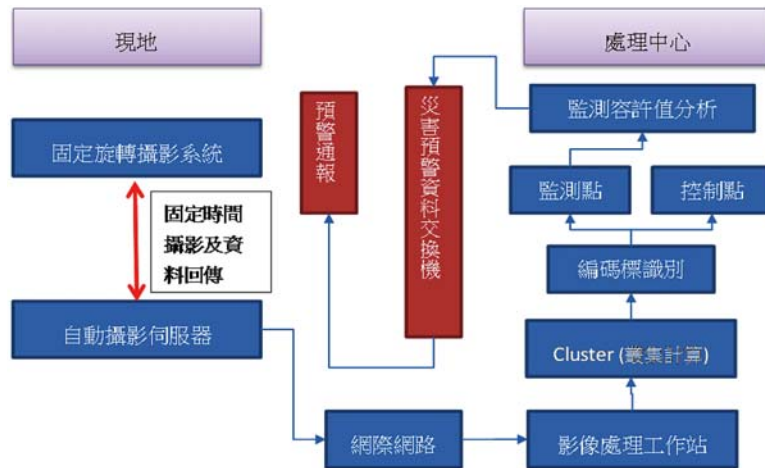


圖 19 道路邊坡自動攝影監測系統規劃架構圖

本研究雖以近景攝影測量技術為基礎，探討用於道路邊坡監測上之可行性，更可大量應用於其它工程領域上，將影像資訊量化為工程可使用之三維數值模型，若再掛載於無人飛行機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 載具上，可以更即時、安全且近距離地取得過去不易到達之影像資料，其相較於一般傳統測量，具有成本較低、迅速且成果精度高等特性，無論是運用在平時維護管養或是災後調查及重建階段上，可做為平時監控記錄及追蹤與災後調查比對使用，皆可輔助工程人員快速地量化並記錄工址現況。惟光線充足與否及通視程度為構成影像之主要因素，於氣候因素不佳條件下，如：夜晚、雨天、霧霾、植被遮蔽...等，皆無法進行有效之攝影，必須搭配輔助光源或其它監測儀器來改善，亦為後續需進行克服之方向，但整體來說近景攝影技術相較於傳統測量具有相當的優勢及其多樣性的開發應用潛能，遂以漸被各界接受並廣泛地使用。

## 後續應用方向

本研究於實驗中規劃單相機進行移動拍攝及固定站旋轉拍攝兩種方案，主要為模擬並提供公路管養單位於不同潛勢類型邊坡之監測方式，其中針對固定站旋轉拍攝，後續運用上則可配合現地伺服器及網路傳輸設備之建置，進而規劃為自動化監測預警系統，架構圖如圖 19 所示，分為現地拍攝系統及處理中心兩部分，藉由現地架設固定旋轉攝影機組，由影像伺服器對攝影系統固定時間進行拍攝動作，透過影像伺服器對處理中心影像工作站進行計算任務需求，再由網際網路進行傳遞，

影像工作站可透過叢集計算，達到快速運算目的，並由編碼標進行自動識別，將控制點資料進行載入，最後透過監控點位進行比對，與前期監測點位進行位移分析，若超出警戒值，由本所港研中心研發之災害預警資料交換機進行資料交換及預警通報。若監測現場無寬頻網際網路服務，則可改為將影像處理中心設置於現地架設影像處理工作站，由現地進行相關解算及預警分析，最後再透過簡訊服務 (Short Message Service, SMS) 發佈相關災害預警訊息，達自動化監測之目的。

## 參考文獻

1. Charles Loop, Zhengyou Zhang., Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision, Microsoft Research, 1999.
2. Olivier D, Faugeras. Proceedings of European Conference on Computer Vision, 1992.
3. Olivier D. Faugeras; Quang-Tuan Luong and Steven Maybank, Proceedings of European Conference on Computer Vision, 1992.
4. Pollefeys M., Gool L. V., Vergauwen M. et. al., Visual Modeling with A Hand-Held Camera, International Journal of Computer vision, 2004, 59(3), pp. 207-232.
5. Szeliski, R., Computer Vision: Algorithm and Applications, USA. Springer Co., 2011.
6. 孫敏「多視幾何與傳統攝影測量理論」, 北京大學學報 (自然科學版), 43 (4): 453-459. (Sun, M. (2007) "Multiple View Geometry and Traditional Photogrammetry Theory," ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 43(4): 453-459, 2007. (in Chinese))
7. 張庭榮, SIFT 演算法於立體對影像匹配與影像檢索應用之研究, 國立高雄應用科技大學碩士論文 (2008)。
8. 陳俊君, 立體視覺三維重建影像匹配方法的研究, 國立高雄應用科技大學碩士論文 (2014)。
9. 邱永芳、呂良輝、胡啟文, 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 (2015)。