

104-019-7799

MOTC-IOT-103-H1DB008

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

中華民國 104 年 3 月

104-019-7799

MOTC-IOT-103-H1DB008

道路邊坡滑動自動攝影監測系統 之研究

著 者：邱永芳、胡啟文、李良輝

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究 / 邱永芳, 胡
啟文, 李良輝著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研
所, 民 104.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-04-4323-3(平裝)

1.道路工程

442.1

104002200

道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究

著 者：邱永芳、胡啟文、李良輝

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 104 年 3 月

印 刷 者：九易數碼科技印刷有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010400204

ISBN：978-986-04-4323-3 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部
運輸研究所書面授權。

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

GPN: 1010400204
定價 200 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究			
國際標準書號 ISBN978-986-04-4323-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1010400204	運輸研究所出版品編號 104-019-7799	計畫編號 103-H1DB008
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳主任 計畫主持人：邱永芳主任 研究人員：胡啟文 聯絡電話：04-26587119 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立高雄應用科技大學 計畫主持人：李良輝副教授 研究人員：張庭榮 地址：807 高雄市三民區建工路 415 號 聯絡電話：07-3814526 轉 5222		研究期間 自 103 年 09 月 至 103 年 11 月
關鍵詞：道路邊坡監測、近景攝影測量			
摘要： 公路邊坡表面位移增量是分析邊坡穩定性的重要依據。傳統的邊坡測量只能測量假設邊坡下滑點的位移增量，不能表徵整體的位移變化，因而影響邊坡穩定性分析。將近景攝影測量技術應用於公路邊坡監測，預期將可獲得較好的效果。 結合近景攝影測量技術，利用非量測型相機，採用多視點攝影的方式對被監測區域進行攝影，使用攝影測量軟體系統獲取被監測區域的三維表面點雲模型，透過自動匹配兩期影像控制點，將監測區域二期的相對三維模型轉換到一期的絕對三維模型中，然後分別生成DEM模型，並對兩期DEM模型進行疊加，計算滑坡體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山體的滑坡監測。 研究結果使用不同規格的非量測型相機對目標進行攝影，由序列的實驗分析結果顯示利用多視立體影像進行三維重建之「監測點的位移分析」，其定位精度可達0.4~0.5個像元以內，而對於對整體點雲的重建精度，平均可達0.5~0.6個像元。因此，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，且成果較地面Lidar直接掃描量測之精度更佳。 研究成果效益： 藉由規劃適當之自動攝影系統與影像監控網路傳輸及控制系統，並由本研究所確立之多視點攝影的方式，比對被監測區域攝影所重建之不同時間序列DEM模型，可計算滑坡體的絕對位移量和局部變化區域的位置以及面積大小，而得到邊坡滑動及變形之量化資料，再結合本所港研中心所研發之「災害預警資料交換機」進行預警發布及資料交換之作業，而達自動化監測及通報之功效。 提供應用情形： 1.相較於其他自動監測方法，成本較為低廉。 2.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。			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
104 年 3 月	198	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。
機密等級： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 (解密條件：☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密， ☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密) ☒普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Automatic photographic monitoring system for the deformation of road slope			
ISBN 978-986-04-4323-3 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010400204	IOT SERIAL NUMBER 104-019-7799	PROJECT NUMBER 103-H1DB008
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yuang-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yuang-fang PROJECT STAFF: Chi-Wen Hu PHONE: +886-4-26587119 FAX: +886-4-26564418			PROJECT PERIOD FROM September 2014 TO November 2014
RESEARCH AGENCY: National Kaohsiung University of Applied Sciences PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Liang-hwei PROJECT STAFF: Chang Ting-lung ADDRESS: #415 Chien Kung Road, Kaohsiung 807, Taiwan (R.O.C.) PHONE: +886-7-3814526 ext5222			
KEY WORDS: road slope measurement, close range photogrammetry			
ABSTRACT The surface shifting of road slope is a significant reference on the stability analysis. A traditional slope measurement can only compute some shifting point based on assumption but cannot stand for the total variation in the displacement, then, it leads to a negative effect on the stability analysis. When the close range photogrammetry is applied, a better result will be generated. Integrated with close range photogrammetry, a nonmetric camera is used and the multi-view photography is applied in the interest area, and then, 3D point clouds are able to be derived through the photogrammetry software. With the automatic imagery GCP matching, the relative 3D model from the 2nd stage is converted to an absolute 3D spatial model same as the model from 1st stage, and two DEMs will be generated, respectively. The difference from those two DEMs can compute the absolute slope shifting, and the displacement and the area in partial region. A slope monitoring measurement without GCP control surveying, is able to be achieved. As a result, the analysis of a sequential experiments represents that a 3D reconstruction with multi-view image processing for monitoring deformation is able to get the positioning accuracy within 0.4-0.5px, and the construction of total point clouds even gets 0.4-0.5 px, just by using generic cameras with different specification. Hence, the spatial information reconstruction can meet a requirement of monitoring, with image processing technique. And, the accuracy derived is even better than which from land surveying 3D Laser Scanner. Benefit from study With adequate automatic imagery capture system, imaging transmission& control monitoring networking system, the multi-view imaging technique from this study, and then, the matching process among reconstructed DEMs from different nodes in a sequential time series, a computation includes the absolute displacement and the location& area of regional variation would derived, and the deformation& reforming magnitude will be calculated. After this study integrated with the Hazard Warning Data Switch developed by IHMT, the automatic monitoring& announcement capabilities will be achieved. The application 1. Compared with other automated monitoring technique, the costs in this study is significantly lowered. 2. The technique in this study may broadly be applied to the management of road slope monitoring by TANFB, DGH, TRA, etc., On the other hand, the manual investigation in field operation would be efficiently reduced.			
DATE OF PUBLICATION March 2015	NUMBER OF PAGES 198	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	IX
表目錄	IX
第一章 前言	1-1
1.1 研究背景	1-1
1.2 研究目的	1-7
1.3 研究方法與程序	1-8
1.4 工作內容與項目	1-10
1.5 預期成果及其效益	1-10
1.6 工作時程與進度	1-11
第二章 多視立體視覺近景量測系統	2-1
2.1 核線幾何(Epipolar Geometry)	2-1
2.2 立體視覺	2-3
2.3 基礎矩陣(Fundamental Matrix)	2-3
2.3.1 基礎矩陣之定義	2-3
2.3.2 基礎矩陣推算法	2-6
2.4 相機率定	2-7
2.4.1 傳統相機率定方法	2-7
2.5 SfM 演算法	2-15
2.5.1 三角定位	2-17

2.5.2 迭代過程	2-19
2.5.3 集束調整 (Bundler Adjustment)	2-20
2.6 模型誤差傳播及計算精度分析	2-21
2.6.1 基礎矩陣的誤差	2-21
2.6.2 三維點的誤差	2-22
2.7 統計檢驗	2-31
2.7.1 兩個母體變異數比值之假設測試	2-31
2.7.2 單點位移顯著性檢驗(t 檢驗)	2-31
2.8 編碼標誌設計方案	2-33
2.8.1 編碼標誌的設計原理	2-33
2.8.2 編碼標基礎方案選擇	2-35
2.9 小結	2-37
第三章 道路邊坡滑動預警模式	3-1
3.1 道路邊坡崩塌現象與監測徵兆物理量	3-1
3.1.1 道路邊坡崩塌型態分類	3-1
3.1.2 道路邊坡崩塌徵兆物理量	3-3
3.1.3 監測頻率	3-7
3.1.4 災害預警	3-9
3.2 自動傳輸計算及預警	3-9
第四章 研究方法與進行步驟	4-1
4.1 概述	4-1
4.2 多視立體影像三維重建	4-3
4.2.1 拍攝距離與量測精度	4-3
4.2.2 多視立體影像拍攝方式	4-4
4.3 控制點及檢核點(監測點)	4-5

4.4 數位相機之率定	4-6
4.4.1 率定參數	4-8
4.4.2 率定參數解算	4-8
4.5 道路邊坡重建	4-9
4.6 道路邊坡自動攝影監測系統規劃	4-10
第五章 實驗結果與分析	5-1
5.1 實驗前置規劃	5-1
5.1.1 實驗場地	5-1
5.1.2 控制測量	5-3
5.1.3 實驗相機	5-5
5.1.4 拍攝方式	5-6
5.1.5 相機率定	5-8
5.1.6 編碼標	5-10
5.2 實驗 1	5-15
5.2.1 實驗組 1(10/1)_Canon	5-16
5.2.2 實驗組 2(10/1)_Nikon	5-17
5.2.3 實驗組 3(10/1)_Sony	5-19
5.2.4 實驗組 4(10/9)_Canon	5-21
5.2.5 實驗組 5(10/9)_Sony	5-23
5.2.6 實驗組 6(10/9)_Sony	5-25
5.2.7 實驗分析	5-27
5.3 實驗 2	5-28
5.3.1 實驗組 1(11/6)	5-29
5.3.2 實驗組 2(11/6)	5-32
5.3.3 實驗分析	5-34

5.4 實驗 3.....	5-34
5.4.1 實驗組 1.....	5-35
5.4.2 實驗組 2.....	5-39
5.4.3 地面 Lidar 比較	5-42
5.4.4 實驗分析	5-47
第六章 建議標準作業流程.....	6-1
6.1 拍攝方法.....	6-1
6.1.1 垂直邊坡平行移動攝影	6-1
6.1.2 多站旋轉交會攝影	6-1
6.2 拍攝距離.....	6-2
6.3 編碼標設置.....	6-4
6.4 相機率定.....	6-4
第七章 交通事故現場重建.....	7-1
7.1 交通事故於近景攝影測量使用	7-1
7.2 交通事故重建.....	7-3
7.2.1 實驗組 1.....	7-4
7.2.2 實驗組 2.....	7-5
7.2.3 實驗組 3.....	7-7
7.2.4 實驗分析	7-8
第八章 結論與建議.....	8-1
8.1 結論.....	8-1
8.2 建議.....	8-2
8.3 成果效益與應用情形.....	8-3
8.3.1 研究成果效益	8-3
8.3.2 提供應用情形	8-3

參考文獻.....	參-1
附錄一 期末審查意見回覆表.....	附錄 1-1
附錄二 期末報告簡報資料.....	附錄 2-1

圖目錄

圖 2.1 核線幾何關係	2-2
圖 2.2 基礎矩陣用來表示和幾何的轉換關係	2-4
圖 2.3 考慮徑向畸變的照相機模型	2-9
圖 2.4 共線式表示物空間與相片之關係	2-12
圖 2.5 附加參數光束法平差之物空間與相空間之關係	2-13
圖 2.6 兩幅影像的三角定位	2-17
圖 2.7 設計標誌容許縮放、仿射變形	2-33
圖 2.8 編碼標誌的旋轉不變性	2-34
圖 2.9 Hattori 編碼方式	2-35
圖 2.10 可能的坐標系組合	2-36
圖 2.11 14 位元編碼標誌	2-37
圖 3.1 邊坡監測預警系統流程	3-10
圖 4.1 實驗相機參數取得流程圖	4-1
圖 4.2 邊坡穩定度監測及交通事故重建流程圖	4-2
圖 4.3 相機感光元件與地面解析度之幾何關係	4-4
圖 4.4 拍攝方式示意圖(影像序列拍攝方式)	4-5
圖 4.5 拍攝方式示意圖(多機旋轉拍攝)	4-5
圖 4.6 因透鏡畸變所產生之影像變形示意圖	4-7
圖 4.7 PI-3000 率定標示意圖	4-7
圖 4.8 邊坡穩定監測	4-10
圖 4.9 山坡地三維重建示意圖	4-10
圖 4.10 道路邊坡自動攝影監測系統規劃	4-11
圖 5.1 道路邊坡監測實驗區示意圖	5-2

圖 5.2 實驗區現場	5-2
圖 5.3 控制測量現場	5-3
圖 5.4 實測控制點分布	5-4
圖 5.5 多視立體視覺建議拍攝方式	5-7
圖 5.6 實驗拍攝方式	5-8
圖 5.7 利用固定焦距大量重疊方式進行相機率定	5-9
圖 5.8 旋轉攝影示意圖	5-9
圖 5.9 iWitness 自動率定標	5-11
圖 5.10 iWitness 自動量測標應用	5-12
圖 5.11 V-STAR 精密工業近景量測標	5-13
圖 5.12 V-STAR 精密工業近景量測系統圓形標	5-13
圖 5.13 Schneider 編碼標(節錄)	5-14
圖 5.14 編碼標大小與自動量測編碼標比例實驗	5-14
圖 5.15 實驗 1 控制點及檢核點分布圖	5-15
圖 5.16 實驗組 1(10/1)Canon 拍攝成果圖	5-16
圖 5.17 實驗組 2(10/1)Nokon 拍攝成果圖	5-18
圖 5.18 實驗組 3(10/1)Sony 拍攝成果圖	5-19
圖 5.19 實驗組 4(10/9)Canon 拍攝成果圖	5-22
圖 5.20 實驗組 5(10/9)Sony 拍攝成果圖	5-24
圖 5.21 實驗組 6(10/9)Sony 拍攝成果圖	5-26
圖 5.22 相關實驗合併拍攝距離	5-28
圖 5.23 實驗 1 控制點及檢核點分布	5-29
圖 5.24 實驗組 1 兩實驗組量測示意圖	5-30
圖 5.25 實驗組 1 兩實驗組量測示意圖	5-32
圖 5.26 點雲量測距離方法	5-35

圖 5.27 實驗組 1 三維重建密集點雲	5-36
圖 5.28 實驗組 1 兩組影像套疊差異分析	5-36
圖 5.29 實驗組 1 距離差異分析	5-38
圖 5.30 實驗組 2 三維重建密集點雲	5-39
圖 5.31 實驗組 2 兩組影像套疊差異分析	5-40
圖 5.32 實驗組 2 距離差異分析	5-42
圖 5.33 Lidar 掃瞄作業情形	5-43
圖 5.34 Lidar 掃描成果	5-44
圖 5.35 Lidar 掃描成果與近景三維重建成果比較	5-44
圖 5.36 Lidar 掃描與三維重建距離差異分析	5-46
圖 6.1 沿道路(邊坡)方向攝影	6-1
圖 6.2 模擬固定監視器多方向與多站之交會攝影	6-2
圖 6.3 拍攝距離與地面解析度關係圖	6-4
圖 6.1 利用固定焦距大量重疊方式進行相機率定	6-5
圖 6.2 旋轉攝影示意圖	6-5
圖 7.1 交通事故拍攝示意圖(iWitness 範例)	7-1
圖 7.2 交通事故量測示意圖(iWitness 範例)	7-2
圖 7.3 交通事故使用 SfM 方式重建	7-2
圖 7.4 車損近景量測	7-3
圖 7.5 車損三維重建(iWitness 範例)	7-3
圖 7.6 實驗組 1 交通事故重建以 GoPro 為例	7-5
圖 7.7 實驗組 2 交通事故重建	7-6
圖 7.8 無人飛行載具場景重建	7-8

表目錄

表 1-1 預定進度甘特圖(Gantt Chart).....	1-11
表 2-1 F 檢驗	2-31
表 3-1 法恩氏斜坡塊體運動分類表	3-1
表 3-2 山崩形態之移動速度表	3-4
表 3-3 邊坡崩滑速度分級表	3-5
表 3-4 邊坡維護階段管理基準	3-8
表 3-5 山坡地工程監測參考管理值(內政部營建署).....	3-8
表 3-6 邊坡穩定判斷建議之管理值(廖瑞堂，2001).....	3-9
表 5-1 控制點實測資料.....	5-4
表 5-2 相機率定參數.....	5-10
表 5-3 編碼標自動識別比較表	5-15
表 5-4 實驗組 1(10/1)Canon 控制點	5-16
表 5-5 實驗組 1(10/1)Canon 檢核點	5-17
表 5-6 實驗組 1(10/1)Canon 控制點及檢核點 RMSE	5-17
表 5-7 實驗組 2(10/1)Nikon 控制點.....	5-18
表 5-8 實驗組 2(10/1)Nikon 檢核點.....	5-19
表 5-9 實驗組 2(10/1)Nikon 控制點及檢核點 RMSE.....	5-19
表 5-10 實驗組 3(10/1)Sony 控制點	5-20
表 5-11 實驗組 3(10/1)Sony 檢核點.....	5-21
表 5-12 實驗組 3(10/1)Sony 控制點及檢核點 RMSE	5-21
表 5-13 實驗組 4(10/9)Canon 控制點	5-22
表 5-14 實驗組 4(10/9)Canon 檢核點	5-23
表 5-15 實驗組 4(10/9)Canon 控制點及檢核點 RMSE	5-23

表 5-16 實驗組 5(10/9)Sony 控制點	5-24
表 5-17 實驗組 5(10/9)Sony 檢核點	5-25
表 5-18 實驗組 5(10/9)Sony 控制點及檢核點 RMSE	5-25
表 5-19 實驗組 6(10/9)Sony 模擬多站旋轉 控制點	5-26
表 5-20 實驗組 6(10/9)Sony 模擬多站旋轉 檢核點	5-27
表 5-21 實驗組 6(10/9)Sony 模擬多站旋轉 控制點及檢核	5-27
表 5-22 Pixel Size 與量測精度比較表	5-28
表 5-23 實驗組 1 控制點成果	5-30
表 5-24 實驗組 1 兩次拍攝監測點成果	5-31
表 5-25 實驗組 1 控制點及監測點精度	5-31
表 5-26 實驗組 2 控制點成果	5-33
表 5-27 實驗組 2 兩次拍攝監測點成果	5-33
表 5-28 實驗組 2 控制點及監測點精度	5-34
表 6-1 拍攝距離與地面解析度計算表	6-3
表 6-1 相機率定參數.....	6-6

第一章 前言

1.1 研究背景

20 世紀 90 年代以來，受人類活動和全球化的影響，地質災害越發嚴重，地質災害發生的規模、數量和分佈範圍呈上升趨勢，給人民群眾帶來的損失也越來越大。地質災害已成為嚴重制約我國經濟發展的重要因素之一，而滑坡是我國最常見和最多發生的地質災害之一。滑坡對工程建設的危害很大，輕則影響施工進度，重則破壞了建築結構。滑坡可以中斷交通，影響鐵路的正常運輸；大規模的滑坡，更可以掩埋村莊阻塞河道、摧毀公路。因此，對滑坡建立有效的監測系統，既有利於我們採取一定的措施避免滑坡的發生，又能夠減少滑坡發生後的人身財產損失。

滑坡監測是一門整合性很強的應用技術，它以土木工程理論、岩石力學、土壤力學、鋼筋混凝土、工程地質學等學科為理論基礎，以資訊科學、測繪技術、感測器技術及儀器儀錶等學科為技術支援，同時還結合了土木工程施工技術和有關工程施工經驗，以及岩土體及工程結構的穩定性動態評估為主要目的的綜合應用技術。滑坡監測技術在很大程度上可以減輕甚至消除滑坡給人民群眾生命安全和財產方面所帶來的損失。許多大型滑坡在經過一定的處理後雖然暫時處於穩定階段，但不能保證其以後不再次發生，因此對滑坡進行長時間的監測是十分必要的。

目前常用的滑坡監測方法主要有宏觀地質監測法、簡易監測法、設站觀測法、大地精密測量法、儀錶監測法和自動遙測法等。

1. 宏觀地質監測法

這種方法是用常規地質調查方法，針對滑坡發育過程中的各種變形跡象及其他相關的各種異常現象，例如地裂隙、房屋、泉水等動態變化進行定期監測和記錄，掌握滑坡的發展趨勢，達到科學的預測預報目的。其中最常用的方法是對建築物變形、地表裂隙的監

測。在裂隙處設置簡易監測標誌，定期記錄裂隙長度、寬度、深度的變化及裂隙的形態、裂紋延伸方向等。由於滑坡體在滑動過程中各部位受力性質和大小不同，滑速也不同，因而不同部位產生不同力學性質的裂隙，有滑坡後部的拉張裂隙、滑坡體中前部兩側的剪切裂隙、滑體前緣的鼓張裂隙和滑坡舌部的扇形裂隙等。該方法的特點是具有直觀性、動態性、適應性及較強的實用性，不僅適用於各種類型滑體不同變形階段的監測，而且監測內容比較豐富、全面，獲取的前兆資訊直觀可靠，可信度高。其方法簡易經濟，便於掌握和普及推廣應用。宏觀地質監測法可提供滑坡預報的可靠資訊，即使是採用先進的儀錶觀測及自動遙測方法監測滑體的變形，該方法仍然是不可缺少的。但該方法存在內容單一、精度低和工作量大等缺點。

2. 簡易監測法

簡易監測法是透過人工直接觀測邊坡中地表裂縫、建築物變形和地下水變化等現象。該方法除了人力外還輔助使用一些簡易的儀器，這樣更有利於群防群測。如在建築物開裂處貼條、埋釘和上漆等，測量工具則以卷尺、游標卡尺和鋼直尺為主。此法比較適用於觀測正在發生病害的邊坡，再結合儀器監測加以綜合分析，更可用來初步判定滑坡所處的變形階段以及中短期滑動趨勢。該方法的缺點是工作量大，作業相當複雜，實現無人值守的監測比較困難。若考慮它的直觀性和易操作性，在滑坡威脅程度較小的情況下可選擇該方法。

3. 設站觀測法

此方法是指在充分瞭解了現場工程地質背景的基礎上，在邊坡上設立變形觀測點(線狀、網路狀)。在變形區範圍之外穩定地點設置固定觀測站，使用經緯儀、全站儀、水準儀、測距儀及攝影儀等儀器定期測量變形區內的網點三維(X, Y, Z)位移變化。其優點是選點方便且遠離變形區，相比簡易監測法更加精密和客觀，觀測與比較範圍也更大；但該法觀測工作量大，需有人值守，且連續觀測能力差。

4. 大地精密測量法

該方法是從測繪技術衍生而來的，採用高精度光學光電測量儀器，透過測角和測距來完成監測任務。監測邊坡的水平單向位移用小角法、測距法和視準線法；監測二維(X, Y 方向)水平位移選擇距離交會法和三角交會法；監測滑坡的垂直(Z 方向)位移常用精密三角高程測量法和幾何水準法。如利用全站儀來進行平面坐標位移監測和三角高程法垂直位移監測。以坐標、距離及角度為基礎，新的坐標與初始坐標之差來表徵觀測目標的變化。首先建立變形監控站，形成地表的變形監控網，便於定期記錄監控站網點的位移與沉降，確保監測結果的準確性。其次滑坡體上觀測點網的佈設，原則上必須與監控站通視。最後在監控站架設儀器對觀測點進行定期觀測。因其技術成熟，精確度較高而得到廣泛應用。它還具有以下優點：監控範圍大使其可更有效地確定滑坡變形範圍，量測未受限制，保證滑坡監測的連續性，能觀測到滑坡的絕對位移量，即時性強等。這種方法的缺點是易受到氣象和地形條件的影響，週期長，工作量大，連續監測困難。

5. 儀錶監測法

儀錶監測是採用精密儀錶對滑坡進行地表及深層的位移、應力、地聲、水位、水壓、含水量等相關環境因素進行監測，它是對滑坡進行全面監測的有效方法，透過綜合分析能夠得到較為準確的預測預報。它的優點是內容豐富，測量精度較高，受地表影響因素小，省時省力。缺點是儀器價格較高，且對儀器的精度和安裝要求高。按照實施方式，儀錶監測可分為兩大類型：直接監測法和間接監測法。直接監測法包括地表裂縫法、雨量監測法和泉流量監測法三大類。而間接監測法則由測斜法、測縫法、地下水測量法、孔隙水壓測量法及地聲、地應力、應變及地溫測量法組成。

6. 自動遙測法

自動遙測法利用有線和無線傳輸技術，遠距離遙控監測系統或空間技術衛星遙測，對儀錶監測的滑坡變形資料進行自動採集、存

儲、列印和輸出，並繪製出各種變化曲線和圖表。該方法適用於滑坡變形處在瞬變及臨滑狀態時的中、短期監測及防治施工期安全監測。該方法的優點是：監測內容豐富，自動化程度高，可實現全天候不間斷觀測，並且能實現遠距離傳輸，省時省力。缺點是容易受到外界因素的干擾，所以穩定性較差，再加上感測儀器易發生故障，因此現場較少使用該監測方法。

7. 基於 GPS 的滑坡監測

該法將衛星定位系統(GPS)技術運用於滑坡監測中，主要分析兩次監測所得監測點坐標之間的差異，儘管兩次監測中所得到的誤差會分別影響兩次的坐標值，但透過分析可以求得變形量。它利用 GPS 方法，創建高精度的大地控制網，監測滑坡變形與位移。GPS 滑坡監測的方法分為週期性監測模式和連續性監測模式兩種，前者適用於滑坡變形速率很慢甚至接近於穩定不動；而後者又可分為即時動態監測與固定連續運行參考站。

GPS 作為現代大地測量中一種重要的技術手段，可以同時測量出三維位移量 X 、 Y 和 Z ，作業方便簡單且精度高、投入快、易監測，可以進行全天候連續監測，同時不受氣候條件的限制。監測自動化減小了作業人員的工作強度，且監測點之間無需通視。該方法對運動中的監測點的變化速率監測精度高，適合災害體不同變形階段的水平和垂直位移監測。儘管一些滑坡體會出現因為樹林、衛星高度角因素等造成 GPS 信號不穩定的情形及成本過高。不過，這並不影響 GPS 技術在滑坡監測中得到大力推廣，具有較好的發展前景。

8. 合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)

在基於遙測的監測技術中，雷達遙測較適合滑坡方面的監測，其中以 InSAR 技術效果較佳。利用合成孔徑雷達的相位資訊提取地表的 X 、 Y 、 Z 坐標變化資訊，根據其干涉圖像可反演地表地形點變化量，可進行地表的微變位移監測，其監測精度甚至已達到 mm 級，特別擅長提取高程資訊。它的優勢是獲取資訊的精度和可靠性較高，全天候即時高速監測，且不受天氣等外界因素的影響，成本相對較

低。但 InSAR 技術通常作為暫態觀測，可能產生不相干問題，且監測受控於衛星的過境時間，因此難以提供足夠的時間解析度。

9. 時間域反射技術(TDR)

時間域反射技術產生於 20 世紀 30 年代，在國外從 20 世紀 80 年代開始應用於監測露天煤礦塌陷層的變形位移等，90 年代開始應用於滑坡、崩塌等地質災害監測工作。與傳統監測手段相比，基於 TDR 技術的滑坡監測系統具有較高的資料獲取精度。

一個 TDR 滑坡監測系統主要由同軸電纜、電纜測試儀、資料記錄儀和遠端通訊設備四部分組成。TDR 的基本工作原理為：同軸電纜發生變形時，它的特性阻抗也會發生變化。透過測量當測試脈衝發生阻抗變化所產生的反射波所需要的傳播時間，確定其傳播速度與時間，即可分析得出同軸電纜特性阻抗發生變化的位置及程度。故同軸電纜的 TDR 技術又稱為“閉路雷達”。在用於滑坡監測時，將同軸測試電纜垂直埋設在滑坡體內，當埋置於其中的同軸電纜由於受滑坡變形的影響而產生拉伸、剪切等變形，從而導致其局部特性阻抗也發生變化，最後通過測試同軸電纜的變形位置及程度，可掌握滑坡變形的大小及其位移情況。與傳統的測斜儀相比，TDR 技術具有以下優點：測試時間短、信號可信度高、能夠快速完成任務，且一套設備可同時檢查上百個點；成本低、性能比較高，與 GIS 的結合，可利用通訊網絡遠距離的無線傳輸功能提高資料的採集分析效率；避免了作業人員頻繁現場採集資料的情況，同樣能實現在極端天氣情況下對各個監測點進行遠端監控，大幅提高監測的安全性。同樣，TDR 技術也存在著不足之處，單獨使用時很難確定滑坡移動的方向以及無法量化測試位移量等。因此，以 TDR 作為主要監測儀器，輔助測斜儀等傳統監測設備，能夠取得更好的滑坡監測成果。

10. 布裏淵散射光時域反射技術(BOTDR)

BOTDR 技術是利用光纖中的自然布裏淵散射光的頻移變化量與光纖所受的軸向應變之間的線性關係所得到的光纖的軸向應變。依靠 OTDR 定位技術和布裏淵分光技術，即可得到光纖在某一點的應

變資訊。把該技術應用地質災害滑坡監測中時，首先將光纖與待測岩體固定，岩體發生變形，從而引起光纖的變形，然後透過測量光纖的變形分析得出岩土의變形情況。BOTDR 技術同時適用於岩體的表層和深層監測。

該技術最早運用於航太技術，隨後西方國家將其應用於電力、通訊領域的監控方面。日本是較早將 BOTDR 技術運用於滑坡監測的國家。BOTDR 技術具有分散式、長距離、靈敏度高、抗電磁干擾等特點，通過合理的佈設，可以方便地對測坡體各個部位進行監測。雖然還存在著如鋪設方式、系統維護及成本高等一系列技術難點，但隨著技術發展加上其本身良好的應用前景，已成為一些西方國家，如美國、加拿大、瑞士等國家爭相研發的課題。

11.三維雷射掃描技術(LiDAR)

雷射掃描技術是對待測物進行快速網格式掃描從而獲取三維空間坐標資訊的點雲資料，它可以完整地展現出待測物的表面型態，因此其獲取地表資訊的能力優於現階段其他任何監測方法。目前在滑坡監測中已開始使用該技術，LiDAR 掃描到的點雲資料可作為該滑坡監測的基礎資料。該監測方法具有不需要合作目標(稜鏡)、高精度、高密度、高效率、全數位特徵等優點。但其仍存在著成本過高、過程複雜、點雲資料量大、特徵值提取困難等缺點。國外較早將該技術運用於變形監測中。

12.近景攝影測量技術

近景攝影測量系統是在不同時間對目標體進行數次攝影，並將影像導入測量軟體分析系統，利用系統與 GIS 坐標對比計算，得出目標體位移增量。主要分為兩個部分：數位相機和數位影像處理軟體。

近景攝影測量系統的主要技術特點如下：(1)可使用非量測相機(普通數位相機，圖元 1000 萬畫素以上)進行近景攝影測量；(2)提供三種非量測相機檢校方式(控制場檢校、液晶顯示幕檢校和自檢校)；(3)國際領先的多視點近景影像立體匹配演算法，每秒可匹配

500~1,000 個像點，匹配正確率高於 98 %；(4)全自動空中三角測量(利用基於嚴密數學模型的自檢校光束法平差進行參數解算)；(5)測量相對精度可達 1/5,000~1/10,000；(6)自動三維場景重建、正射影像和三維景觀；提供三維視覺化分析工具。

1.2 研究目的

本研究主要針對公路邊坡的穩定度及可能導致的滑坡災害進行監測。

公路邊坡監測的意義有：

1. 邊坡監測能為邊坡的穩定性分析提供可靠資料。
2. 邊坡監測能為判斷邊坡破裂面的位置提供可靠依據。
3. 邊坡監測能為邊坡工程岩上體力學參數的反演分析提供資料，提高邊坡工程岩上力學參數的準確程度。
4. 邊坡監測結果是評價邊坡理論分析結果和經驗判斷成果的依據，是修改設計和指導施工的客觀標準。
5. 邊坡監測的結果能為預測邊坡變形破壞趨勢、評價邊坡的長期穩定性提供條件。
6. 邊坡監測能為分析岩體結構與邊坡變形破壞的關係，掌握邊坡變形特徵和規律，研究邊坡穩定性的影響因素，指導在邊坡發生嚴重變形條件下的應急處理提供依據。
7. 邊坡監測能為邊坡加固效果的評價提供依據。

公路邊坡在自然的雨水侵蝕以及載車行走震動疊加效應下，易導致滑坡災害，做好災害的事前預測有助於及時採取防範措施，為此必須對邊坡的位移進行有效的監測。傳統的大地觀測法、儀錶觀測法、GPS 觀測只能進行點監測，在利用監測點監測變形體時，由於測點數量有限，難以反映邊坡體變形的細節和全貌。特徵資訊不夠全面，無法獲取其他部位或整個地質體的空間位移模式。隨著數位相機在畫素與解析度的技術進步，加上影像處理定位技術高精度與即時化的發展，

近景攝影測量因不需要登臨邊坡現場佈點，作業簡易且成本低廉，該技術在公路邊坡監測或滑坡監測方面具有相當的應用與發展的潛力。

公路邊坡表面位移增量是分析邊坡穩定性的重要依據。傳統的邊坡測量只能測量假設邊坡下滑點的位移增量，不能表徵整體的位移變化，因而影響邊坡穩定性分析。將近景攝影測量技術應用於公路邊坡監測，預期將可獲得較好的效果。

結合近景攝影測量技術，利用非量測相機，採用多視點攝影的方式對被監測區域進行攝影，使用攝影測量軟體系統獲取被監測區域的三維表面點雲模型，透過自動匹配兩期影像控制點，將監測區域二期的相對三維模型轉換到一期的絕對三維模型中，然後分別生成 DEM 模型，並對兩期 DEM 模型進行疊加，計算滑坡體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山體的滑坡監測。

本文中另外探討交通事故現場重建之方法，透過 SfM 方法，探討如何拍攝交通事故現場，以最佳最快速方法完成現場重建，以提供事故肇事判定之使用。

1.3 研究方法與程序

本研究為建立在「基於三維重建的自動攝影測量監測技術」為工作之主軸，結合近景攝影測量技術，利用非量測相機，採用多視點攝影的方式對被監測區域進行攝影，使用攝影測量方法獲取被監測區域內人工佈設監測點的三維座標計算及整體三維表面點雲模型之重建兩種方案進行監測及數據的分析。

方案一、監測點處理

1. 對監測區域進行多重視點攝影。
2. 為自動化的資料處理，對欲監測之邊坡，以人工佈設特定的標誌，利用特徵點偵測與匹配方法自動於影像中提取各監測點位置資料(座標量測)。

3. 建立控制點參考座標系統。
4. 利用影像三維重建技術獲取個監測點之空間座標。
5. 比對各期監測點空間座標位移量之統計分析。

方案二、監測面、體處理

使用攝影測量方法獲取監測區域的三維表面點雲模型，透過自動匹配兩期影像控制點，將監測區域二期的相對三維模型轉換到一期的絕對三維模型中，然後分別生成 DEM 模型，並對兩期 DEM 模型進行疊加，計算滑坡體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山體的滑坡監測。

對被監測的滑坡區域第一次拍攝的影像稱為一期影像，第二次拍攝的影像稱為二期影像，依次類推。以一、二期為例，基於近景攝影測量原理的滑坡監測具體的實施方案如下：

1. 第一次進行滑坡監測時，使用免稜鏡全站儀測量 4 個或 4 個以上(根據監測區域大小而定)分佈均勻的控制點。首先對相機進行檢校，將一期影像、相機檢校參數和控制點輸入到近景攝影測量軟體系統中，得到被監測區域絕對定向後的三維點雲模型。
2. 後期滑坡現場監測時，需要保證攝影的攝站分佈位置與第一次的攝站分佈位置大致相同，從而確保後而的一、二期影像之間的匹配能夠順利進行。
3. 考慮到隨著監測時間的推移，第一次監測時佈置的控制點有可能產生了位移變動，因此第一次佈置的控制點不能用到二期的滑坡監測中，利用一、二期影像自動匹配得到的物間共軛點解算一、二期的模型轉換參數。
4. 透過對一、二期影像自動提取影像特徵點，進行一、二期影像之間對應影像的匹配，然後在一期影像與二期影像的內部分別進行點的傳遞匹配，從而得到一、二期滑坡三維模型下的共軛物方點。根據這些共軛物方點解算一、二期三維點雲模型之間的旋轉、平移、縮

放等 7 個參數，從而將二期三維表面點模型轉換到一期的控制點坐標系中。

5. 對轉換到同一個控制點坐標系下的兩期三維點雲模型，按照一定的間距進行取樣，產生同一監測區域的兩期 DEM 模型，為了更完整地觀察整個測區兩期前後的變化情況，分別對每期的影像進行拼接。可以很直觀地看出兩期 DEM 的變化與影像的變化區域是相符的。然後對其進行疊加分析，計算滑坡絕對位移量以及滑坡區域的局部變化量，實現滑坡監測的目的和任務。

1.4 工作內容與項目

以近景攝影測量為基礎之道路邊坡坍塌監測及自動化預警系統

1. 選定已經設置道路邊坡坍塌防治工程路段，設置適當之自動攝像系統，並設定影像監控網路傳輸及控制系統。
2. 研發多角度拍攝影像影像處理與分析演算法，反演道路邊坡防護工程網地錨位置。
3. 由時間序列地錨位置，建立即時計算道路邊坡地形及防護工程網位移模式。
4. 提供多視立體視覺之交通事故現場重建方式，以達快速三維重建及肇事判定之使用。

依據本所港研中心過去相關研究成果，建立道路邊坡坍塌預警判定機制模式。

1.5 預期成果及其效益

1.5.1 預期成果：

1. 於已設置道路邊坡坍塌防治工程路段，規劃適當之自動攝像系統與影像監控網路傳輸及控制系統之設置程序。
2. 由監測影像即時計算道路邊坡防護工程網位移模式。

3. 依據本所港研中心過去相關研究成果，建立道路邊坡坍塌預警判定機制模式。

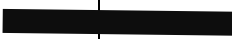
1.5.2 效益及其應用：

1. 相較於其他自動監測方法，成本較為低廉。
2. 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。

1.6 工作時程與進度

本研究工作時程與進度如表1-1所示。

表1-1預定進度甘特圖(Gantt Chart)

工作項目	第 1 月	第 2 月	第 3 月	備註
相關資料之蒐集與整理				
邊坡近景攝影測量規劃與實驗				
交通事故重建規劃與實驗				
資料整理與分析報告撰寫				
技術與資料移轉				
工作進度估計百分比(累積數)				
預定查核點	103 年 11 月 28 日以前提送期末報告初稿			
說明:(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。 (2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定:①工作天數②經費之分配③工作量之比重④擬達成目標之具體數字。 (3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。				

第二章 多視立體視覺近景量測系統

近年來，多視立體視覺中三維重建技術，以從運動到結構(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，其重點逐漸轉為從無序或有序之影像進行三維重建，主要是重建場景之深度及相機拍攝位置。

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)[16]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)[17,18]之關係，以及基礎矩陣之解算方法。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，基礎矩陣則是用來表示兩張影像之間的轉換關係。

本章節首先針對多視立體視覺近景量測相關理論架構進行介紹，而多視立體視覺幾何概念則由核線幾何開始，利用核線幾何推求兩影像間之幾何關係，並由此幾何關係回推攝像中心位置，最後透過立體視覺演算法進行三維重建，本實驗中將針對多視立體視覺演算法進行精度探討，以證明該方式於進行攝影量測上可扮演邊坡滑動監測之方法。

另外本研究主要針對道路邊坡自動監測方法進行相關研究，因此自動化量測功能在本研究中，也扮演了相當重要之角色之一，利用特定編碼標，進行監測點位量測之方法為本研究中完成自動化量測之關鍵技術。

2.1 核線幾何(Epipolar Geometry)

核線之定義為針對同一場景所拍攝之影像，不管是兩張、三張甚至更多張的影像，影像中所對應之特徵有一定的約束關係，而此約束

關係與相機率定、場景重建有密切的關連。核線幾何為兩張影像之間的攝影幾何，依賴於相機的內方位參數及相機位置與姿態(外方位參數)。

核線基礎為通過兩拍攝站基線之平面，與影像共軛點之交線為核線。不同影像點形成不同共軛面及核線。左右影像之核線分別與基線交於一點，該點稱為核點。基於核線之概念，場景空間任一點 M 一定位於通過此核面之核線上，如圖 2.1，接著配合影像匹配演算法，可將影像由二維搜尋簡化至一維搜尋。

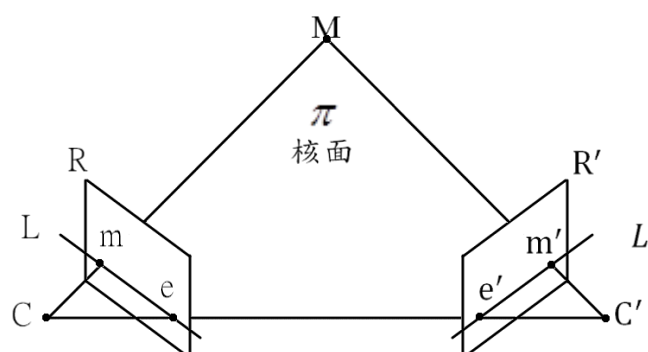


圖 2.1 核線幾何關係

如圖 2.1 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' ，像主點 C 和 C' 連線稱為基線，基線與平面 R, R' 的交點 e, e' 為極點。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 π ，平面 π 與影像平面 R, R' 的交線分別為 LL' ，顯然，點 m 在 L 上，點 m' 在 L' 上，此為核線幾何之約束條件。平面 π 為核平面， LL' 為核線。左影像面上的核線必定經過核點 e ，右影像面上的核線必定經過核點 e' 。用基礎矩陣 F 表示核線約束關係，該矩陣將一幅影像上的點映射到另一幅影像上對應的核線上，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。
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。

2.2 立體視覺

所謂立體視覺是指兩張影像具有一定重疊度，利用兩張影像之幾何關係進行分析及應用，為立體視覺中重要應用之一。立體視覺無法透過單張影像獲取場景空間資訊，而是需要透過多張影像獲得更多之場景資訊，因此回歸到最自然且最基本之情況，以模仿人的雙眼，設立兩個觀察點，可以解釋成如果有兩張影像就可以完成場景的三維重建。

透過立體攝影上的影像點位推測出物體點位空間坐標，並且以較少之控制點來完成影像重疊範圍中的像點位置，可由共線方程式來進行運算，為了達成此項要求，必須恢復相機鏡頭系統的內方位參數及像片的外方位參數，否則就不能進行求解空間交會取得三維空間坐標。

2.3 基礎矩陣(Fundamental Matrix)

基礎矩陣為兩張影像間投影幾何關係之轉換，並可使用核線約制之特性來簡化自動化匹配過程中複雜的搜尋方法，可增加匹配點位之可靠與精確程度，在攝影幾何學中，基礎矩陣已經是不可或缺的關鍵要素之一。

2.3.1 基礎矩陣之定義

基礎矩陣是描述影像中的任一點與其相對應之核線關係，如圖 2.2，在立體視覺中是相當重要的數學矩陣，已知 m 為位於左影像上之任何一點，l' 為對應在右影像上的核線，在右影像上對應的 m' 必定位出現於 l' 上，因此 l' 與 m 之關係：

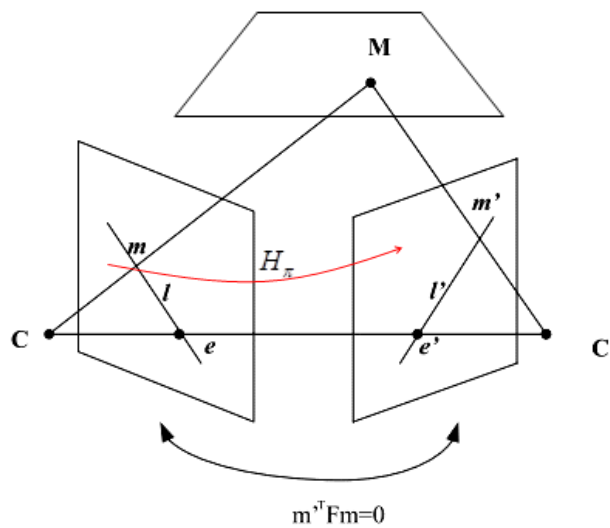
$$l' = Fm \dots\dots\dots (2-1)$$

其中 F 為基礎矩陣，大小為 3×3 大小之旋轉矩陣。因為 m 在右影像上的對應點 m' 一定位於核線 l' 上，所以 m' 的坐標和 l' 向量之內積為零：

$$m'^T l' = m'^T F m = 0 \dots\dots\dots (2-2)$$

兩張影像與基礎矩陣之關係屬於等同，因此可將兩張影像之關係互換，亦即改用右圖求解與左圖之關係時，可將式(2-2)轉換成：

$$m^T F^T m' = 0 \dots\dots\dots (2-3)$$



$$\begin{aligned} m' &= H_\pi m \\ l' &= e' \times m' = [e']_m m' = [e']_m H_\pi m \\ F &= [e']_m H_\pi \\ l' &= F m \end{aligned}$$

圖 2.2 基礎矩陣用來表示和幾何的轉換關係

π 為三維影像點 M 所在之核面上。

H_π 為第一影像經由平面 π 到第二張影像之間轉換矩陣。

l' 為第二張影像上得核線。

$[e']_m$ 為第二張影像上核線之外積表示矩陣

$$e' = \begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \end{bmatrix}, \quad [e']_m = \begin{bmatrix} 0 & -e3 & e2 \\ e3 & 0 & -e1 \\ -e2 & e1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-4)$$

F 為基礎矩陣。

以下為基礎矩陣 F 之特性與核幾何之轉換關係整理：

F 為 3×3 矩陣，有 7 個自由度變數(Degrees of Freedom)

F 為投影矩陣(P,P')之基礎矩陣，則 F^T 亦為投影矩陣(P,P')之基礎矩陣。

F 為奇異矩陣(Singular Matrix)， $\det(F) = 0$

基礎矩陣對應關係如下：

假設 m 與 m' 分別為兩張影像上之共軛點，則：

$$m'^T F m = 0 \dots\dots\dots (2-5)$$

其中矩陣 F 被稱為基礎矩陣，也就是說基礎矩陣是對核幾何的代數表示。若兩幅影像間的基礎矩陣為 F，且這兩幅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(Essential Matrix)可定義為：

$$E = K'^T F K \dots\dots\dots (2-6)$$

核線(Epipolar Lines)：令 l, l' 分別為 m, m' 相關連的核線，則

$$\begin{aligned} l' &= Fx \\ l &= Fx' \dots\dots\dots (2-7) \end{aligned}$$

核點(Epipole)：令 e, e' 分別為第一張與第二張影像上的核點，則

$$\begin{aligned} Fe &= 0 \\ F^T e' &= 0 \dots\dots\dots (2-8) \end{aligned}$$

投影矩陣 (Projection Matrix)：令 P, P' 分別為第一張與第二張影像上的投影矩陣，則

$$P = [I \mid 0]$$

$$P' = \left[\begin{bmatrix} e' \end{bmatrix}_m F e' \right] \dots\dots\dots (2-9)$$

欲推估兩張影像間的基礎矩陣可由式(2-9)求得，在兩張影像上任意的對應點 m 與 m' 必然需要滿足 $m'^T F m = 0$ 。若兩張影像中的特徵點集合 m_i 與 m'_i 已知，則每一組對影點可以產生一個線性方程式，由於基礎矩陣 F 扣除一個尺度常數之後，還有八個未知數，因此最少要有八組對應點，才可以解算基礎矩陣。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、LMeds 等方法。較為簡單且最廣為使用的為八點演算法。

基礎矩陣最主要的用途：

1. 簡化影像匹配：因為需滿足 $m'^T F m = 0$ ，所以匹配時可以使用此約束條件，讓匹配視窗可以使用線性式的搜尋，亦即可將搜尋方式由二維方式降為一維搜尋方式，以節省運算的時間並提升匹配結果之可靠度。
2. 匹配點位除錯：將匹配後之點位帶入公式，藉此運算判斷該點對是否為正確匹配之點位，並踢除錯誤之匹配點位。

2.3.2 基礎矩陣推算法

基礎矩陣的推估方法有多種，基本上只需要 8 組共軛點位就可以計算出基礎矩陣，再根據基礎矩陣秩(Rank)為 2 的矩陣性質，只需要 7 點就可以計算出基礎矩陣。基於幾何的非線性估計，由於基礎矩陣具有明顯的幾何內涵，因此許多學者又提出基於疊代方法的非線性估計方法。主要有以下兩個準則：

1. 點到對應核線的距離平方和

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n (d(m_i, F^T m'_i)^2 + d(m'_i, F m_i)^2) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{(m_i^T F m'_i)^2}{(F m_i)_1^2 + (F m_i)_2^2} + \frac{(m'_i{}^T F m_i)^2}{(F m'_i)_1^2 + (F m'_i)_2^2} \right) \dots\dots\dots (2-10) \end{aligned}$$

2. 反投影距離

$$\sum_{i=1}^n (d(m_i, F^T \hat{m}_i)^2 + d(m_i, F \hat{m}'_i)^2) \dots\dots\dots (2-11)$$

其中 $\hat{m}_i$ 、 $\hat{m}'_i$ 是透過線性計算求出基礎矩陣和影像特徵點 $\hat{m}_i$ 、 $\hat{m}'_i$ 進行投影重建所得到的空間點的反投影影像點。

當影像匹配出現錯誤匹配的時候，前述方法已經不適用，因此學者針對誤匹配的問題提出解決方法，如 RANSAC、LMeds 等方法，其基本的想法是透過疊代隨機取樣最小點集合(Minima Data Set)來找出能夠使正確匹配所占比例最高的最小點集合，而影響基礎矩陣精度的主要因素為影像中的雜訊與錯誤匹配點的因素。

2.4 相機率定

傳統相機率定標準方式，利用率定標設置於立體或是平面上，以已知的物空間幾何之情況下進行拍攝，經此率定場反推相機的率定參數將參數率定出來，得以定義相機內部幾何。

首先對傳統相機率定方法做相關介紹，接著對 Kruppa 方程自率定方法做詳細之介紹。

2.4.1 傳統相機率定方法

照相機的傳統率定方法採用攝影測量學中的技術，獲取率定參照物的影像後，經過複雜的計算得到照相機的內、外方位參數。本節主要介紹比較經典的直接線性變換方法(Direct Linear Transformation, DLT)^[17,19]，Tsai 的兩步法(Two-Stage)和張正友(Zhang)^[20~27]平面率定法。

2.4.1.1 直接線性變換方法

1971 年，Abdel-Aziz 和 Karara 建立攝相機成像幾何的線性模型，研究環境物體和影像之間的關係，提出了直接線性變換(Direct Linear Transformation, DLT)的率定方法，這種率定方法，參數的估計可以通過

求解線性方程來完成。

直接線性變換法不考慮畸變因素時，影像點和實物點之間的成像關係如式(2-12)所示：

$$\begin{aligned} u &= \frac{X_w l_{00} + Y_w l_{01} + Z_w l_{02} + l_{03}}{X_w l_{20} + Y_w l_{21} + Z_w l_{22} + l_{23}} \\ v &= \frac{X_w l_{10} + Y_w l_{11} + Z_w l_{12} + l_{13}}{X_w l_{20} + Y_w l_{21} + Z_w l_{22} + l_{23}} \dots\dots\dots (2-12) \end{aligned}$$

其中， (u, v) 是率定參照物上特徵點在影像坐標系中的坐標， (X_w, Y_w, Z_w) 是參照物上特徵點的三維坐標， l_{ij} 是DLT方法的待定參數。計算時，不失一般性，可以令 $l_{23}=1$ 。如果已知率定參照物上 $n(n \geq 6)$ 個特徵點的坐標 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 及特徵點對應的影像點坐標 (u_i, v_i) ，則待定參數幾就可以通過線性最小二乘法計算出來。

為了提高精度，應當加入非線性優化演算法。考慮非線性畸變時，直接線性變換法表示影像點與三維率定物上特徵點之間的關係如式(2-13)所示：

$$\begin{aligned} u_i + \delta_x(u_i, v_i) &= u_i = \frac{X_w l_{00} + Y_w l_{01} + Z_w l_{02} + l_{03}}{X_w l_{20} + Y_w l_{21} + Z_w l_{22} + l_{23}} \\ v_i + \delta_y(u_i, v_i) &= v_i = \frac{X_w l_{10} + Y_w l_{11} + Z_w l_{12} + l_{13}}{X_w l_{20} + Y_w l_{21} + Z_w l_{22} + l_{23}} \dots\dots\dots (2-13) \end{aligned}$$

式(2-13)中， (u_i, v_i) 是率定參照物上第 i 個特徵點對應的實際影像坐標。 $\delta_x(x_d, y_d), \delta_y(x_d, y_d)$ 是影像點 (u_i, v_i) 處的鏡頭畸變校正。 (u'_i, v'_i) 是校正後的影像點坐標。 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 是參照物上第 i 個特徵點的坐標。非線性畸變因素加入到DLT演算法中還是比較方便的。

2.4.1.2 Tsai 的兩步率定法

1986年，Tsai提出基於徑向約束的兩步率定法來求解照相機參數。

第一步利用最小二乘法解超定線性方程，給出外部參數；第二步求解內部參數，若無鏡頭畸變，可由一個超定線性方程解出；若存在徑向畸變，可結合非線性優化法計算全部參數。

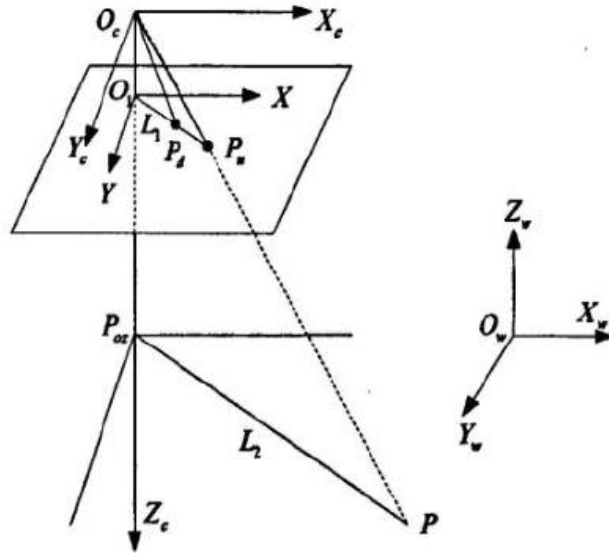


圖 2.3 考慮徑向畸變的照相機模型

圖 2.3 中，世界坐標系中物體點 P 的三維坐標為 (X_w, Y_w, Z_w) ，該點在照相機坐標系中的坐標為 (X_c, Y_c, Z_c) 。 (x, y) 是影像平面的坐標系， P_u (即 $P(x_u, y_u)$) 是該坐標系上理想的影像點， P_d (即 $P(x_d, y_d)$) 是畸變後實際的影像點，假設只考慮徑向畸變，則點 O_1, P_u 和 P_d 始終在一條直線上。影像中心點 O_1 到點 $P(x_u, y_u)$ 之間的向量 L_1 平行於點 P_{oz} 與點 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 之間的向量 L_2 即使焦距 f 發生變化，也只能影響 L_1 的長度卻不會影響它的方向。這就是兩步法中重要的徑向排序約束 (Radio Alignment Constraint, RAC)。約束與畸變係數和有效焦距無關。

$$\text{設旋轉矩陣 } R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \text{ 平移向量 } T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \text{ Tsai 兩步率定}$$

法過程如下：

第一步：求解旋轉矩陣 R ，平移向量 T 的 t_x, t_y 分量以及影像尺度因

數 s_x (也稱為縱橫比)：

1. 利用 n 個不共面的點，令 $i=1,2,\dots,n$ ，設 (u_0, v_0) 為電腦螢幕的中心點坐標， (u_i, v_i) 為第 i 個點的影像坐標，對應的三維坐標為 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 。不妨設 $S_x = 1$ ，由影像坐標 (u_i, v_i) 計算得出實際影像坐標 (x_{di}, y_{di}) 。
2. 由 RAC 約束條件可得

$$\frac{r_1 X_{wi} + r_2 Y_{wi} + r_3 Z_{wi} + t_x}{r_4 X_{wi} + r_5 Y_{wi} + r_6 Z_{wi} + t_y} = \frac{X_{di}}{s_x Y_{di}} \dots\dots\dots (2-14)$$

整理式(2-14)得到 $A_i b = x_{di}$ 。其中，行向量：

$A = [X_{wi} Y_{di} \quad Y_{wi} Y_{di} \quad Z_{wi} Y_{di} \quad Y_{di} \quad -X_{wi} Y_{di} \quad -Y_{wi} Y_{di} \quad -Z_{wi} Y_{di}]$ 是已知的。待求列向量如式(2-15)所示：

$$b = \begin{bmatrix} \frac{r_1 s_x}{t_y} & \frac{r_2 s_x}{t_y} & \frac{r_3 s_x}{t_y} & \frac{r_4 s_x}{t_y} & \frac{r_4}{t_y} & \frac{r_5}{t_y} & \frac{r_6}{t_y} \end{bmatrix}^T \dots\dots\dots (2-15)$$

當不共面點的數目大於 7 的時候，列向量 b 可由最小二乘法解這個超定方程組求得

3. 利用正交矩陣 R 的性質計算出 t_x, t_y, s_x, R 。

第二步：求解有效焦距 f ，平移向量 T 的 t_z 分量和透鏡畸變係數 k_1 。

1. 對每個特徵點，不考慮畸變就有 $\frac{y_{di}}{f} = \frac{y_{ci}}{Z_{ci}}$ ，設 $k_1 = 0$ ， (u_0, v_0) 為電腦螢幕的中心點坐標，可得式(2-16)所示的關係：

$$[Y_d - d_y(v_i - v_0)] \begin{bmatrix} f \\ t_z \end{bmatrix} = w_i d_y(v_i - v_0) \dots\dots\dots (2-16)$$

其中， $Y_d = r_4 X_{wi} + r_5 Y_{wi} + r_6 Z_{wi} + t_y$ ， $w_i = r_7 X_{wi} + r_8 Y_{wi} + r_9 Z_{wi}$ 。求解式(2-16)組成的超定方程組即可求得有效焦距 f 和平移向量 T 的 t_z 分量。

2. 求解式(2-14)即可求得 f, k_1, t_z 的精確值。

$$\begin{aligned} X_{di}(1+k_1^2) &= f(r_1X_{wi}+r_2Y_{wi}+r_3Z_{wi}+t_x)/(r_7X_{wi}+r_8Y_{wi}+r_9Z_{wi}+t_y) \\ Y_{di}(1+k_1^2) &= f(r_4X_{wi}+r_5Y_{wi}+r_6Z_{wi}+t_x)/(r_7X_{wi}+r_8Y_{wi}+r_9Z_{wi}+t_y) \dots (2-17) \end{aligned}$$

基於 RAC 法的優勢在於它所使用的方程大部分是線性的，求解參數比較簡單便捷，因此率定過程較為快捷。

2.4.1.3 自率光束法空中三角平差

光束法空三平差是航空攝影測量時透過已知的地面控制點及其在影像之對應像點與影像間連結點(tie point)之量測，依據共線式的原理以最小二乘法同時解算航拍時影像於物空間的成像位置與姿態(即外方位參數)以及連結點之地面坐標，其共線式表示物空間與相片之關係如圖 2.4 所示。若將相機參數視為未知數，並於空三平差過程中一併解出，則稱為自率光束法空三平差。

以共線條件式來建立物空間與像平面空間之對應關係，稱之為光束法平差模式(Bundle Adjustment)，共線式表示如式(2-18)。

$$\begin{aligned} x_i &= -f \frac{m_{11}(X_i - X_0) + m_{12}(Y_i - Y_0) + m_{13}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \\ y_i &= -f \frac{m_{21}(X_i - X_0) + m_{22}(Y_i - Y_0) + m_{23}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \dots (2-1) \end{aligned}$$

式中： x_i, y_i ：相片坐標

f ：攝影機焦距

X_0, Y_0 ：攝影站之空間坐標

X_i, Y_i, Z_i ：點位之地面坐標

$m_{11} \sim m_{33}$ ：旋轉矩陣係數

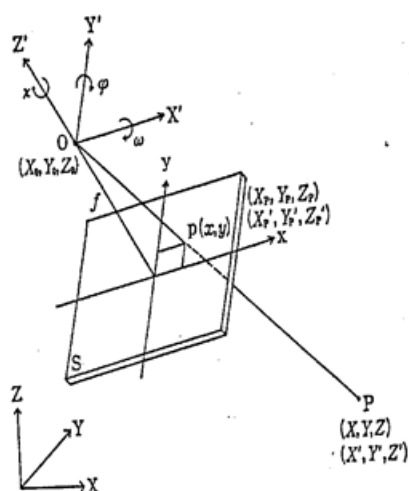


圖 2.4 共線式表示物空間與相片之關係

附加參數自率光束法平差模式(自率光束法平差)，將附加參數(相機內方位參數含鏡頭畸變差)加入共線式移並進行解算，透鏡畸變及底片之非平面畸變，在共線模式中附加參數型式加以修正：輻射畸變差參數： $k_1 \sim k_3$ 。

附加參數修正值表示如式(2-19)所示。將附加參數與帶入共線式得自率光束法公式，如式(2-20)所示。

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= x_0 - x_i \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) - \left(p_1 x_i + p_2 y_i + p_3 x_i y_i + p_4 y_i^2 \right) \\ \Delta y_i &= y_0 - y_i \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) - \left(p_5 x_i^2 + p_6 x_i y_i \right) \\ r^2 &= x_i^2 + y_i^2\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\begin{aligned}x_i + \Delta x_i &= -f \frac{m_{11}(X_i - X_0) + m_{12}(Y_i - Y_0) + m_{13}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \\ y_i + \Delta y_i &= -f \frac{m_{21}(X_i - X_0) + m_{22}(Y_i - Y_0) + m_{23}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)}\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (2-3)$$

空中三角-光束法平差(Bundle Adjustment)可直接完成外方位參數求解 (包括相對與絕對方位)，因此透過 SfM 求解之參數可用來當作自率光束法之初始值，再透過自率光束法將可取得序列影像內方位參數，其附加參數光束法平差之物空間與相空間之關係，如圖 2.5 所示。

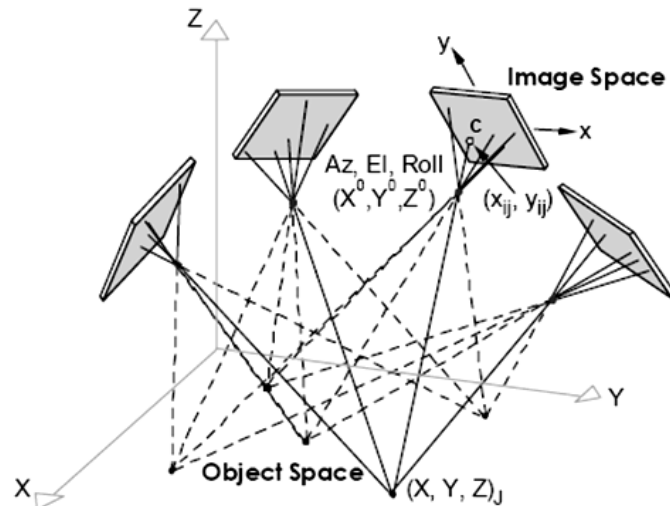


圖 2.5 附加參數光束法平差之物空間與相空間之關係

2.4.1.4 基於 Kruppa 方程的照相機自率定方法

傳統的照相機率定方法需要率定參照物，並且率定參照物上點的三維坐標和對應的影像坐標都得已知。在一些場合中，照相機的焦距需要經常調節，位置也需要經常移動，如果採用傳統的率定方法就必須每次調整之後重新率定。這樣非常不方便。照相機自率定不需要率定參照物，該率定方法直接從照相機拍攝的多幅影像中確定照相機內方位參數。照相機自率定避免了使用率定參照物的問題。

常用的自率定方法有：基於 Kruppa 方程的自率定[29]；基於絕對二次曲面的自率定；分層逐步重建等等。本文根據具體應用所需，採用了基於 Kruppa 方程的自率定方法。

照相機自率定的前提條件是影像點之間的對應關係已經確定下來。一般情況下，照相機拍攝影像時，可以認為其內參矩陣是不變化的。所謂的自率定，就是計算照相機內參矩陣的各個變數，如式(2-21)所示：

$$k = \begin{pmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2-21)$$

Kruppa 方程式之相機自率定方法，其中有些方法需要對照相機內方位參數作一些假設，例如：有些方法中令相機的畸變因數近似為 0，

有些方法設相機的主點坐標在影像中心等。本文採用基於 Kruppa 方程式的相機自率定方法。Kruppa 方程式是利用絕對二次曲線建立的關於相機內參矩陣 K 的約束方程。自率定的基本構想為：利用絕對二次曲線建立 Kruppa 方程式；求解 Kruppa 方程式確定矩陣 C ；再通過 Cholesky 分解得到內參矩陣 K 。

Kruppa 方程的自率定方法是由 Faugeras, Luong 和 Maybank 等人提出的。該方法結合了絕對二次曲線和核線變換的理論，在此基礎上推導出了 Kruppa 方程式。在 Kruppa 方程式的推導過程中，假設：相機的模型是針孔模型，相機的內部參數始終保持恒定不變，輸入的二維序列影像是由單個相機拍攝而成的，序列影像上的對應匹配點已經被確定。

基於 Kruppa 約束方程式的方法是在兩幅影像之間建立方程。點 x 在照相機投影矩陣 $P=K[R \ t]$ 的作用下成像為 $m=KRx$ (符號 $=$ 表示相差常數因數下的相等)，則得到 $x=R^T K^{-1}m$ ，代入絕對二次曲線的方程 $x^T x=0$ ，可得：

$$m^T K^{-T} R R^T K^{-1} m = m^T K^{-T} K^{-1} m = 0 \quad \text{..... (2-22)}$$

式(2-22)代表絕對二次曲線在二維平面上的像點與相機內方位參數的關係。通常用 ω 記為矩陣 $K^{-T} K^{-1}$ 所代表的絕對二次曲線的像。這就表明絕對二次曲線的像僅僅與相機的內參矩陣 K 有關，與相機的運動參數無關。式(2-22)還說明，在內參矩陣不變的前提下，絕對二次曲線可以看成一個虛擬的率定板，無論相機怎樣運動均能被偵測出來，且所成的像 ω 保持不變。絕對二次曲線的這種不變性幾乎是所有自率定方法的基礎。相機自率定的目的就是為了尋找出 ω 並計算出 $K^{-T} K^{-1}$ ；再對 $K^{-T} K^{-1}$ 取逆就可以得到 $K^T K$ 對 $K^T K$ 做 Cholesky 分解，即可求出內方位參數矩陣 K 。

基於 Kruppa 方程的自率定方法不需要對原始影像做攝影重建，而是通過對二維序列影像建立方程，求出相機的內方位參數。但是在某些場合下很難將所有的二維序列影像統一到一個一致的攝影框架內，

這意味著無法確保無窮遠處的平面在所有二維影像確定的攝影空間裡一致。從而也說明了對於某些序列之二維影像，基於 Kruppa 方程的自率定方法存在不穩定的因素。

2.5 SfM 演算法

從影像的二維資訊中重建出三維點雲結構資訊是整個三維重建的關鍵步驟，前幾節所述的特徵提取與匹配也是為這一步驟做的準備。本文採用從運動中恢復結構(Structure from Motion, SfM)的方法從影像中恢復三維模型。SfM 在不知道相機參數和場景中的三維資訊的情況，通過迭代來求解出三維點雲和相機矩陣。由於它是基於特徵點匹配的，所以重建出來的點雲是重建物件的稀疏表示。但是，它在這個過程中能夠恢復出相機參數，這個對於後續工作有極大的幫助。SfM 的思想來源於人的三維視覺感知，即當物體旋轉造成陰影的時候，人們才能感覺到它是三維的，這種現象稱為由運動引起的深度效應(Kinetic Depth Effect)。其基本原理是，從不同角度觀察三維世界中的同一個點，就可以得到它的三維資訊。SfM 使用不同影像中的匹配點，在求得投影矩陣的同時，恢復出這些匹配點的三維資訊。

1981 年，學者 Longuet-Higgins 提出該研究方法之後，SfM 就已經成為該領域發展重點之一。早期的 SfM 技術來源於攝影測量學，在進行重建時，必須對相機進行相機率定，得到相機的內方位參數，並求取相機之為方位參數(位置及姿態)，在相機內外方位參數均已知的情況下，將可還原出場景的三維結構。

近年來，SfM 的解算方式已由之前須對相機進行預率定，改為直接於序列影像中自率定之方式，由序列影像求取相機內外方位參數，在重建三圍場景為目前三維重建領域中發展重點之一[30~34]。

1992 年 Tomasi 和 Kanade 等人[35]是第一個利用影像進行三維重建系統，以假定相機為正交投影之情況下，運用仿射分解(Affine Factorization)方法同時解算出三維結構與相機行進過程；此系統是運用光流法(Optical Flow)之追蹤技術解決特徵匹配之問題，但此方法只能

運用於場景物體深度大於場景物體之尺寸才適用，模型品質並不高。

1992 年學者 Faugeras[36]採用不同的幾何約束條件，將射影重建變換為歐氏空間的度量重建，但此方法僅適用於各種幾何條件約束下的物件。對於一般的重建物件，如果不知道相機的內方位參數，將無法進行三維重建。為了克服此難題學者 Hartley 於 1997 年提出，在影像採集過程中採用 Kurppa 與 SVD 分解，使用同時進行相機內方位參數求解，實現相機自率定。

2004 年 Pollefeys[37]提出，在相機焦距長度變化情況下，使用參數範圍內自動縮放方法來實現度量重建。當構建出的三維幾何模型後，常用光束法平差(Bundle Adjustment 演算法[38-40]進行優化和調整，以提高重建精度。在多視圖圖像三維重建中，當得到了初始的射影重建結果之後，為了使誤差均勻的分佈於各幅圖像之間，同時也為了獲得更精確的結果，通常需要對初始的重建結果進行光束法平差優化，光束法平差已成為了 SFM 和三維重建的一個重要組成部分。Pollefeys 概括性的總結了自率定的多視圖三維重建程序，其程序包含以下幾個步驟：1.特徵提取和匹配 2.多視圖幾何約束關係計算(內方位參數求取)3.從相機運動恢復場景結構(外方位參數計算)4.稠密的表面估計(稠密匹配)5.場景的表面重建。

特徵提取和匹配是多視立體影像三維重建的重要技術之一，在同一場景的幾個視圖中，提取特徵點，然後對檢測到的特徵點根據是否表示物件的同一空間位置進行配對，是計算物體三維結構模型的前提。多視影像幾何約束關係計算，是指當獲得影像間匹配點後，利用多視影像幾何關係，即多視圖圖像三維重建之間的幾何約束關係，對相同場景下圖像之間的匹配特徵點進行約束。通過對匹配特徵的幾何約束關係的計算，得到相機內方位參數。核線幾何為處理多視影像幾何約束的基本工具，通過核線幾何，影像的匹配問題轉化為基礎矩陣的魯棒性參數估計問題。因此後續將對影像匹配及核線幾何求取進行介紹。

2.5.1 三角定位

三角定位(Triangulation)的目標是從影像匹配中通過投影關係恢復出這些匹配點對應的三維場景中的點，以及重建影像的相機參數，如圖 2.6 所示。

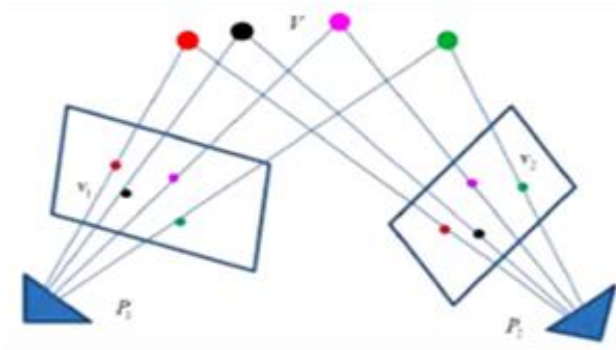


圖 2.6 兩幅影像的三角定位

由這兩幅影像的特徵點匹配可以取得基礎矩陣 F ，在已知攝相機內方位參數的情況下，很容易由基礎矩陣 F 得到本質矩陣 E 。對 E 進行奇異值分解，得到：

$$E = UDV^T \dots\dots\dots (2-23)$$

透過前述由兩張影像的特徵點匹配可求得之基礎矩陣 F ，在已知相機內方位參數為已知的情況下，可由基礎矩陣 F 得到本質矩陣 E ，接著求得兩相機之間的外方位參數 R 與 t ，由此可得到兩張影像之投影矩陣：

$$\begin{cases} P_1 = K \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \\ P_2 = K \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \end{cases} \dots\dots\dots (2-24)$$

相機內方位參數為 K ，並假設兩相機之內方位參數為相同， R 和 t 為兩相機之間的外方位參數， I 為 3×3 之矩陣。在得到相機內外方位參數 K 、 R 、 t 以及匹配點影像坐標 m 和 m' 之後，接著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。

投影矩陣 P_1 部分，令 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{13} 為 P_1 之相對應行向量，對應 P_1 影像的

第 i 個匹配點的齊次坐標為 $(u_i, v_i, 1)^T$ ，對應匹配點之場景齊次坐標為 X_i ，一般常數項為 S ，則數學模式為：

$$S \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \end{bmatrix} X_i \Rightarrow \begin{cases} su_i = P_{11}X_i \\ sv_i = P_{12}X_i \\ s = P_{13}X_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{13}X_i u_i = P_{11}X_i \\ P_{13}X_i v_i = P_{12}X_i \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_{13}X_i u_i = P_{11}X_i = 0 \\ P_{13}X_i v_i = P_{12}X_i = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} P_{13}u_i & -P_{11} \\ P_{13}v_i & -P_{12} \end{bmatrix} X_i = 0 \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

同理，對於投影矩陣 P_2 ，令與點 $(u_i, v_i, 1)^T$ 對應的影像點的像素坐標為 $(u'_i, v'_i, 1)^T$ ，也可得到類似的等式：

$$\begin{bmatrix} P_{23}u'_i & -P_{21} \\ P_{23}v'_i & -P_{22} \end{bmatrix} X_i \dots\dots\dots (2-26)$$

將式(2-25)與(2-26)聯立，可得：

$$\begin{bmatrix} P_{13}u_i & -P_{11} \\ P_{13}v_i & -P_{12} \\ P_{23}u'_i & -P_{21} \\ P_{23}v'_i & -P_{22} \end{bmatrix} X_i = 0 \quad \dots\dots\dots (2-27)$$

此時是通過四個方程式來求解三個未知數，在這種情況下，可以通過最小二乘法原理求解出 X_i 的值，具體實現步驟如下：

$$\text{令：} A = \begin{bmatrix} P_{13}u_i & -P_{11} \\ P_{13}v_i & -P_{12} \\ P_{23}u'_i & -P_{21} \\ P_{23}v'_i & -P_{22} \end{bmatrix}, \text{然後對 4 階矩陣 } A \text{ 的每一行進行正歸化處理，}$$

即行中的每一個元素都除以該行的模，我們就可以得到新的 4 階矩陣 A_{norm} ，這樣(2-28)式的求解問題可以變為求解對應 $(A_{norm})^T A_{norm}$ 的最小特徵值的特徵向量對 A_{norm} 進行奇異值分解：

$$A_{norm} = USV^T \dots\dots\dots (2-28)$$

後可推導出 等於最後一個由矩陣 V 的最後一列。

2.5.2 迭代過程

SfM 是一個迭代計算的過程。初始的結構矩陣資訊通過第一和第二幅影像 I_1, I_2 計算得到。根據 I_1, I_2 之間的匹配點對可計算出本質矩陣 E ，並可通過分解本質矩陣 E 可以得到相對位置資訊(旋轉矩陣 R 和平移矩陣 T)。第一個相機的位置資訊被設定為 $R_1 = I$ ， $T_1 = I$ ，第二個相機的位置設定為 $R_1 = I$ ， $T_1 = I$ 。接著，三維點雲中的初始點 X_j 可以通過 I_1, I_2 之間二維對應配對點的三角化過程得到，具體過程如上一節所述。最後相對位置以及三維結構資訊通過最優化下面這個幾何投影誤差目標函數得到：

$$\min_{R_i, T_i, X_j} \sum_{i=1}^2 \sum_j \|m_{ij} - K[R_i | T_i]X_j\|^2 \dots\dots\dots (2-29)$$

其中 m_{1j}, m_{2j} 是生成三維點 X_j 的兩幅影像 I_1, I_2 中的二維特徵匹配對。當從第一個影像對中計算出初始的方位和結構後，在其餘的配對中延續 SfM 計算過程。從第三幅影像開始，每次加入一副影像，進行以下的迭代過程：

1. 計算 I_{i-1} 與 I_i 之間的公共對應點 $C_{(i-1)i}$ 以及基礎矩陣 $F_{(i-1)i}$ 。
2. 以 I_{i-1} 為基準，由 $C_{(i-2)(i-1)}$ 與 $C_{(i-1)i}$ 得到第 $i-2, i-1$ 與第 i 幅影像共有的對應點 $C_{(i-2)(i-1)}$ 。
3. 由當前已有的結構 S_{i-1} 與 $C_{(i-2)(i-1)}$ 可以得到 I_i 與 S_{i-1} 的對應關係，可以將 I_i 劃分為三部分： I_{i1}, I_{i2} 與 I_{i3} ，其中 I_{i1} 是那些其結構已經存在於 S_{i-1} 中的特徵點集合， I_{i2} 與 I_{i3} 的結構都尚未恢復，但 I_{i2} 為在 I_{i-1} 中有對應點存在的那些特徵點，而 I_{i3} 即為在前面的影像中不可見的那部分特徵點。對 I_{i1} 與其對應的結構並採用 RANSAC 策略可得到 P_i 。
4. 由 P_{i-1}, P_i 以及 I_{i2} 可以由多項式三角測量方法得到 I_{i2} 所對應的結構，而

I_{i1} 由於已經有其對應的結構，需要用其對現有的結構進行更新，因為多項式三角測量方法只能適用於兩幅影像，因此可以用線性三角測量方法對 I_{i1} 所對應的結構進行更新。

2.5.3 集束調整 (Bundler Adjustment)

集束調整[41-43]與攝影測量領域常用之光束法平差(Bundle Adjustment)不同，一樣都是平差之概念，但集束調整則是以局部區塊進行平差調整，最後將所有局部區塊計算成果在一起進行平差近算。

經過前文所述的步驟我們已經得到了一系列特徵點的三維資訊結構以及每一個相機的姿態資訊，這裏進一步採用集束調整的方法來進行最後的參數優化操作。所謂集束調整，就是優化重建結果以提供“整體最優”的三維結構和相機參數。這裏“最優”指最終的參數估計可以使某一代價函數取得最小值；“整體”則意味著無論對三維結構還是相機參數而言，它的解都是最優的；“集束”是說所有離開三維特徵點的光線束會彙集到每個相機的中心。這種方法實際上是調整所有的光束與攝相機的位置，使得總誤差最小。

集束調整的主要思想是：一次選定兩幅或多幅影像由三角定位技術恢復出在這些影像中匹配上的特徵點的三維資訊與這幾幅影像對應的相機參數，然後再做下一組影像的重建，最後把各組重建結果合併。一般是影像兩兩進行重建，因為超過要在 3 幅或更多幅影像中保持比較多的匹配非常困難，而影像間的匹配數目越多，越能保證重建結果的準確性。

對於 m 幅影像和 n 個特徵點，集束調整的目標函數為：

$$\min_{\hat{P}_k, \hat{M}_i} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n D(m_{ki}, \hat{P}_k \hat{M}_i)^2 \quad \dots\dots\dots (2-30)$$

其中 $\hat{P}_k$ 是投影矩陣， $\hat{M}_i$ 是第 i 個特徵點的三維空間資訊， M_{ki} 是第 i 個特徵點在第 k 幅影像上的二維坐標資訊。

2.6 模型誤差傳播及計算精度分析

對基於影像序列的全自動三維重建過程，就攝影測量的角度考慮而言，影像特徵點可以看成是起算的原始資料，另外由於校正矩陣的精度討論本身是一個複雜問題，限於現有研究水準，假設其估值已知，因此校正矩陣也可以看成是起算原始資料。由此，三維重建過程的已知數據為影像點 x 和校正矩陣 K ，而未知數有計算過程中的中間變數 F, E, t, R 和最終結果變量 X 。

2.6.1 基礎矩陣的誤差

三維重建以計算第一個像對的基礎矩陣開始，基礎矩陣 F 可由式 $x^T F x = 0$ 計算得到。此式按 F 元素展開即得到線性求解方程式，考慮一個比例自由因數， F 的展開式可寫成矩陣運算式為： $Af + L = 0$ ，其中 A 是由像點平面坐標構成的係數矩陣， L 是由數值為 1 的元素組成的向量矩陣， $f = [F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33}]^T$ 。此式又可寫為： $f = -A^{-1}L$ ，對其兩邊進行微分得：

$$\frac{df}{dx} = A^{-1} \frac{dA}{dx} A^{-1} L \dots\dots\dots (2-31)$$

這是因為 $dA^{-1} = -dA A^{-1}$ ，便於書寫，在下文中對矩陣的微分矩陣用下標 d 表示。故上式可寫為：

$$F_d = A^{-1} A_d A^{-1} L \dots\dots\dots (2-32)$$

式中 F_d 為 F 矩陣的微分矩陣， A_d 為 A 矩陣的微分矩陣，因此，此式揭示了像點誤差到 F 矩陣元素誤差的傳播規律(由於微分等式與協方差等式表達誤差傳播關係在本質上是一致的，為使問題的描述簡明化，本文僅使用微分等式)。式中左邊含兩個 A 的逆陣，因而可以得到這樣一個結論：對於給定的像點誤差，像點坐標的數值越大， F 矩陣元素的誤差會越小。

因此 F 矩陣的計算應盡可能多地選取影像邊緣部分的像點，靠近光軸局部的點過多，將會造成 F 矩陣較大的誤差。這是由於 A 陣中含

有像點坐標的二次項，而 A_d 中僅含有其一次項，因而像點坐標值對 F 矩陣元素誤差的影響將非常敏感。依照這樣一個結論，採用廣角鏡頭獲取資料要比普通鏡頭獲取資料進行計算的結果更加穩健。

2.6.2 三維點的誤差

目前，三維重建中對三維點坐標的計算方法有很多，主要是用線性三角形法進行計算，下面就線性三角形法進行簡要介紹並對本文提出的用矩陣分析法對三維點的誤差進行評定的方法進行詳細說明。

2.6.2.1 線性三角形法計算三維點的坐標及誤差

可以由點形成線，由線構成三角網再形成面進行紋理貼圖，再由各種面構建形成三維立體結構。多視立體視覺中的三維重建，無論是空間圖形的重建，還是全像元稠密的重建，空間點的重建是其最基本也是最重要的內容。因此三維重建的精度歸根到底可以說就是空間點的點位精度。下面就三維重建點的一種最常用的方法——線性三角形法及過程進行詳細介紹，並就結果的誤差進行討論。當我們獲得相機矩陣後，即已知同一參考系中的相機矩陣 P_m (m 為相機個數)。設空間點 $X(X,Y,Z,1)$ 在第 i 幅影像上的影像點是 $x(x,y,1)$ ，則有：

$$[x]_x (P_i X) = 0 \dots\dots\dots (2-33)$$

將公式(2-33)展開，其中兩個是線性獨立的，故可得：

$$\begin{aligned} x(P_i^{3T} X) - (P_i^{1T} X) &= 0 \\ y(P_i^{3T} X) - (P_i^{2T} X) &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2-34)$$

P_i^{jT} 是 P_i 的第 j 行，這些方程式關於 $\bar{X}$ 的分量是線性的。將 m 個相機矩陣代入可得：

$$A\bar{X} = L \dots\dots\dots (2-35)$$

其中 A 為 $2m \times 3$ 矩陣，其係數與 $x, y, P_i (i=1,2,\dots,m)$ 有關； $\bar{X}$ 為要求解的未知數 (X,Y,Z) ； L 為 $2m \times 1$ 的矩陣，其係數僅與 $P_i (i=1,2,\dots,m)$ 的

第四列有關。

公式(2-35)表示了一個具有三個齊次未知量的 $2m$ 個方程式組，並且由於數據總是含有雜訊，用基於均方誤差的最小二乘法解，空間點 X 的坐標在相差一個尺度因數的意義下被確定，詳細的推導過程將在下面給出。方程式組(2-36)可以展開寫成如下形式：

$$\begin{bmatrix} yP_{i31} - P_{i21} & yP_{i32} - P_{i22} & yP_{i33} - P_{i23} \\ P_{i11} - xP_{i31} & P_{i12} - xP_{i32} & P_{i13} - xP_{i33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{i24} - yP_{i34} \\ xP_{i34} - P_{i14} \end{bmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-36)$$

在線性方程式組(2-36)中，因為該方程式組是過約束的，即其中方程式的個數大於未知數的數目且該方程式組的秩最大等於最小(方程式組的個數，未知數的個數)，由線性代數理論可知線性方程式組(2-36)無解，在這種情況下，只能找到使誤差最小的 $\bar{X} = (X, Y, Z)^T$ ，定義誤差為：

$$E_r \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^{2m} (a_{i1}X + a_{i2}Y + a_{i3}Z - l_i)^2 = \|A\bar{X} - L\|^2 \quad \dots\dots\dots (2-37)$$

由於 E_r 正比於方程式的均方誤差，因此最小二乘法的意思就是使均方誤差最小化。令 $E_r = e^T e$ ， $e = A\bar{X} - L$ (定義式)。為了找到使 E_r 最小的 $\bar{X}$ ， E_r 對 $\bar{X}$ 的每一個分量 $\bar{X}_i$ ($i=1,2,3$) 的偏導數必須為 0，即：

$$\frac{\partial E_r}{\partial X_i} = 2 \frac{\partial e}{\partial X_i} \cdot e = 0 \quad i=1,2,3 \quad \dots\dots\dots (2-38)$$

令 A 的各列為 $C_j (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j})^T$ ， $j=1,2,3$ (取 $m=2$ ，為一對影像的情況)。則有：

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial X_i} &= \frac{\partial}{\partial X_i} \left[(C_1, C_2, C_3) \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} - L \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial X_i} (C_1 X_1, C_2 X_2, C_3 X_3 - L) = C_i \quad \dots\dots\dots (2-39) \end{aligned}$$

由 $\frac{\partial E_r}{\partial X_i} = 0$ 可導出： $C_i^T (A\bar{X} - L) = 0$ ，把這些約束方程式從上到下排

列起來就變成了下面的型式：

$$\begin{pmatrix} C_1^T \\ C_2^T \\ C_3^T \end{pmatrix} (A\bar{X} - L) = 0 \Leftrightarrow A^T (A\bar{X} - L) = 0 \Leftrightarrow A^T A\bar{X} = A^T L \dots\dots\dots (2-40)$$

即方程式(2-40)使均方誤差最小的最小二乘解為 $\bar{X} = ((A^T A)^{-1} A^T) L$ 。此時可以根據誤差定義式解求三維坐標點的計算誤差 $E_r = |A\bar{X} - L|^2$ 。

2.6.2.2 捆集調整方法介紹

如果影像測量有雜訊則方程式 $x_j^i = P_i X_j$ 將不能完全滿足。在這種情形下，我們將尋求最大似然(ML)解並假設測量雜訊滿足 Gauss 分佈。同時我們希望可以估計出投影矩陣 $\hat{P}^i$ 和真正投影到影像點 $\hat{x}_j^i$ 的 3D 點 $\hat{X}_j$ ，即 $\hat{x}_j^i = \hat{P}^i \hat{X}_j$ ，並且在這些 3D 點出現的每幅視圖中都使重投影點和被檢測(測量)的影像點 x_j^i 之間的影像距離最小，用公式表示為：

$$\min_{ij} \sum d(\hat{P}^i \hat{X}_j, x_j^i)^2 \dots\dots\dots (2-41)$$

其中 $d(x, y)$ 是齊次點 x 和 y 之間的幾何影像距離。這種涉及到最小化重投影誤差的估計稱為捆集調整。

捆集調整方法一般可以應用在任何重建演算法的最後一步。這個方法的好處之一是在有資料丟失的情況下提供真正的 ML 估計；同時它也允許對每一個測量值賦予單位協方差，其應用可以擴展到先驗估計且無須相機參數或點的位置的約束。總體來說，捆集調整演算法稱得上是一個理想的演算法，但也存在以下缺失：一是它需要有一個好的初始值，即和真值相差不能太大的初值，這是在實際應用中需要考慮的首要問題；二是這個方法涉及到大量參數，它可能成為一個非常大的最小化問題，這對實際應用是一個挑戰。

由以上說明可以看出，捆集調整是從影像集合估計攝影或仿射重建的最一般演算法，它以最小化重投影誤差為代價函數進行迭代計算，最終得出滿足條件的解。

2.6.2.3 求解三維點誤差的探索方法

三維點坐標計算之前需要計算投影矩陣，由於投影矩陣在計算過程中，本質上只是一個中間量，單純討論投影矩陣誤差意義不大，因此將其與三維點的計算一起討論。為簡化問題，我們已經假定校正矩陣 K 的估值已知，由此 F 可由本質矩陣 E 替代。而 E 可以通過 SVD 分解得到旋轉矩陣 R 和平移向量 t 。 E 的 SVD 分解可以表達為： $E = USV^T$ 。令 T 為由向量 t 構成的斜對稱矩陣，則有：

$$E = TR ;$$

$$T = UWSU^T, R = UWV^T \dots\dots\dots (2-42)$$

而 W 為一斜對稱矩陣，且具有兩種情形的取值，其與 S 均為常數矩陣，具體參見文獻。顯然由於 W, S 兩矩陣的存在， T 實為一個主角元素為零的斜對稱矩陣，為表達方便，下面仍用向量 t 表達由 T 中三個非零元素組成的向量，即：

$$t = [-T_{23} \quad T_{13} \quad -T_{12}]^T \dots\dots\dots (2-43)$$

結合投影矩陣運算式，則投影矩陣 P 可表達為：

$$P = K[UWV^T \mid t] \dots\dots\dots (2-44)$$

結合 $x = P[X \ 1]^T$ ，可推得： $X = VW^T U^T (K^{-1}x - t)$ ，對該式兩邊求微分並加以簡化得：

$$dX = V_d V^T X + VW^T U_d (K^{-1}x - t) - VW^T U^T K^{-1} K_d K^{-1} x + VW^T U^T (K^{-1} dx - dt) \dots\dots (2-45)$$

此式可再化簡為：

$$dX = V_d V^T X + R^T U U_d R X - R^T K^{-1} K_d (RX + t) + R (K^{-1} dx - dt) \dots\dots\dots (2-46)$$

式中 U, V 及 t 的微分對於已知數據而言為間接量，為求得其直接運算式，由 $E = USV^T, E = TR$ 且 $S = \text{diag}[1 \ 1 \ 0]$ 推導可得：

$$\begin{aligned}
U_d S &= E_d V \\
V_d S &= E_d^T U^T \\
T_d &= [dt]_x = E_d R^T \dots\dots\dots (2-47)
\end{aligned}$$

運算式中 S 矩陣的存在表明， U 和 V 矩陣的第三列微分均為零向量，因此 U_d 與 V_d 的完整運算式應寫為：

$$\begin{aligned}
U_d &= E_d V + [0 \ 0 \ U_{d3}] \\
V_d &= E_d^T U^T + [0 \ 0 \ V_{d3}] \dots\dots\dots (2-48)
\end{aligned}$$

其中 U_d 與 V_d 恰為影像 A 與 B 核點的微分量，因此可由 K_l 求微分得到。由於 $E = K^T F K$ ，故有：

$$E_d = K_d^T F K + K^T F_d K + K^T F K_d \dots\dots\dots (2-49)$$

此式表明了由像點 x 和校正矩陣 K 的已知誤差到最終三維點的計算結果誤差之間的傳播規律，由於計算式比較複雜，在此作者僅就單獨因數對三維點的誤差影響稍加分析。

1. 僅考慮像點誤差時的情形：

在 $K_d = 0$ 時有：

$$\begin{aligned}
E_d &= K^T F_d K \\
dX &= V_d V^T X + R^T U U_d R X + R(K^{-1} d x - dt) \dots\dots\dots (2-50)
\end{aligned}$$

由此兩式可以得到結論：首先，三維點誤差與其空間位置有關，離投影中心越遠，其誤差越大，這一點與一般常識相符。其次，校正矩陣中的相機內方位參數對三維點誤差的影響非常敏感，這是由式 $E_d = K^T F_d K$ 中校正矩陣 K 的二次項決定的。一個重要的結論是：相機的焦距越長，重建結果誤差越大。一般常識認為，焦距越長，攝影解析度越高，因此精度應更高，但以上推論恰好否定了這一點。事實上，關於 F 矩陣誤差的結論是一致的。因此，為了獲得高精度三維重建結果，資料獲取過程應盡可能做到：近距離且短焦距攝影。

2. 僅考慮校正矩陣誤差時的情形：

此時 $F_d = 0$, $dx = 0$, $dt = 0$ ，即有：

$$dX = -RK^{-1}K_dK^{-1}X \dots\dots\dots (2-51)$$

在此式中，由於含有 K 逆陣的二次項，因此校正矩陣的誤差對三維重建的結果影響並不明顯，這一結論與三維重建實際計算過程所得到的結果是一致的，這是由於此式中隱含了一個比例自由度，即 X 的結果值僅是模型值，與真實地理空間中的數值之間應關聯一個比例因數。按此式粗略估算，相機參數誤差對結果的影響在千分之一以下，假設比例因數為 $1/100$ 時，這種影響會擴大 100 倍，因此在傳統攝影測量中，當攝影比例尺較小時，相機參數誤差對測繪結果的影響會非常敏感，從而相機的檢校精度應結合實際攝影比例尺加以考慮，比例尺越小，相機檢校精度應越高。

2.6.2.4 矩陣分析法計算三維點的誤差

上節所介紹求解三維點坐標誤差的方法是一種探索方法，由推導過程我們可以看出，計算過程複雜且所需計算量很大。由於在計算過程中對一些元素進行了省略簡化處理，對結果也會有一定的影響，在此探索研究基礎上，本文又提出了一種相對簡單的對三維點精度進行估計的方法，下面進行介紹。給定基礎矩陣 F 可以求規範攝相機對，並且在相差一個 3D 攝影轉換下， F 可以唯一確定攝相機對。我們可以得出三個很有用的小結：

1. 一個非零矩陣 F 是對應於一對攝相機矩陣 P 和 P' 的基礎矩陣的充要條件是 $P'^T F P$ 是反對稱矩陣。
2. 令 F 是基礎矩陣， S 是任意反對稱矩陣，則可以定義攝相機矩陣對為 $P = [I | 0]$ 和 $P' = [SF | e']$ 。其中 e' 是滿足 $e'^T F = 0$ 的對極點，並假定所定義的 P 是有效的攝相機矩陣(其秩為 3)，則 F 是對應於 (P, P') 的基礎矩陣。
3. 基礎矩陣 F 的攝相機矩陣可以選擇為 $P = [I | 0]$ 和 $P' = [[e']_\times F | e']$ 。

相機矩陣 P 左邊的 3×3 子矩陣 $([e']_{\times} F)$ 的秩為 2，對應於中心在 π_{∞} 上的相機，這也屬於我們無須回避的情形，可以將其運用到實際情況中。選取基礎矩陣 F 的攝相機矩陣為 $P_1 = [I | 0]$ ， $P_2 = [[e']_{\times} F | e']$ 其中 e' 是滿足 $e'^T F = 0$ 的核點，是 F 矩陣的左零向量。

P_1 為常數矩陣，假設其無誤差，下面所寫的微分方程式都是關於 P_2 的，像點坐標也選的是第二幅影像上的點 x' 。先討論一對點的情形，假設選取第二幅影像上的一個點的非齊次坐標為 $u(u'_1, v'_1)^T$ ，用 u_i 表示 u 矩陣的第 i 個元素，於是可得 P 矩陣關於每個元素的微分矩陣為：

$$P_{di} = \frac{dP}{du_i} = \left[\frac{d([e']_{\times} F)}{du_i} \mid \frac{de'}{du_i} \right] \dots\dots\dots (2-52)$$

而 P 矩陣關於 u 矩陣的微分矩陣為：

$$dP = [P_{d1} \ P_{d2}] \dots\dots\dots (2-53)$$

又由 $x = PX$ (式中 x, X 均為齊次坐標表示)，可以得到：

$$X = P^+ x \Rightarrow \frac{dX}{du_i} = \frac{dP^+}{du_i} x + P^+ \frac{dx}{du_i} \dots\dots\dots (2-54)$$

從而三維點坐標關於像點坐標矩陣的微分矩陣為：

$$\frac{dX}{du} = \begin{bmatrix} \frac{dX}{du_1} & \frac{dX}{du_2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-55)$$

其中 $P^+ = P^T (PP^T)^{-1}$ 為 P 矩陣的右為逆矩陣，其微分方程式為：

$dP^+ = -P^+ dP \cdot P^+$ ，推導過程如下：

$$\begin{aligned} dP^+ &= dP^T (PP^T)^{-1} + P^T d(PP^T)^{-1} \\ &= dP^T (PP^T)^{-1} - P^T (PP^T)^{-1} d(PP^T) (PP^T)^{-1} \\ &= dP^T (PP^T)^{-1} - P^T (PP^T)^{-1} [dP \cdot P^T + P \cdot dP^T] (PP^T)^{-1} \\ &= dP^T (PP^T)^{-1} - P^+ [dP \cdot P^T + P \cdot dP^T] (PP^T)^{-1} \\ &= [dP^T - P^+ dP \cdot P^T - P^+ P \cdot dP^T] (PP^T)^{-1} \dots\dots\dots (2-56) \\ &= -P^+ dP \cdot P^T (PP^T)^{-1} = -P^+ dP \cdot P^+ \end{aligned}$$

2.6.2.5 計算精度分析

以上誤差分析建立在三維重建模型基礎之上，但該分析只能提供理論上粗略的定性結果，欲得到定量的精度評定結果，需要具體計算未知數的協因數陣。對於一個像對，快速地評估其精度的方法是沿用上面的分析結果，在假定像點誤差與校正矩陣誤差已知，且像點誤差對應單位權值的情況下，可按以下推導公式計算得到未知數矩陣 X 的協因數矩陣。

以下所做推導均是以協方差傳播率為基礎的，是屬於非線性函數的情況。下面就協方差傳播率在非線性函數情況下的表示進行說明。

設有觀測值 X 的非線性函數

$$Z = f(X) \dots\dots\dots (2-57)$$

或寫成： $Z = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，已知 X 的協方差矩陣 Σ_{XX} ，欲求 Z 的方差 Σ_{ZZ} 。我們可以通過對函數 Z 求全微分，從而可以應用協方差傳播律求解 Σ_{ZZ} 。假定觀測值 X 有近似值 X^0 。

$$X^0 = [X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0]^T \dots\dots\dots (2-58)$$

則函數 Z 的全微分式子可以寫成：

$$dZ = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \right)_0 dX_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \right)_0 dX_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \right)_0 dX_n = K dX \dots\dots\dots (2-59)$$

根據協方差傳播律可以得到：

$$\Sigma_{ZZ} = K \Sigma_{XX} K^T$$

$$K = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \right)_0 \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \right)_0 \dots \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \right)_0 \right] \dots\dots\dots (2-60)$$

以上是對 X 的一個非線性函數的推導過程，可以推廣到 n 個非線性函數的情況，在此不做詳細介紹。

2.6.2.6 基礎矩陣的協方差矩陣計算

由 $F_d = A^{-1}A_dA^{-1}L$ 得 F 相對於像點坐標誤差的協方差矩陣。設所選

8 對像點坐標的協方差矩陣為：

$$\Sigma_{xx} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{31}^2 \\ & & & & \sigma_{32}^2 \end{bmatrix}_{32 \times 32} \dots \dots \dots (2-61)$$

根據協方差傳播律，可以得到 f 矩陣的協方差矩陣為：

$$\Sigma_{ff} = \left(\frac{df}{du} \right)_{8 \times 32} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{31}^2 \\ & & & & \sigma_{32}^2 \end{bmatrix}_{32 \times 32} \left(\frac{df}{du} \right)_{32 \times 8}^T = \begin{bmatrix} \sigma_{f_1}^2 & \sigma_{f_1 f_2} & \dots & \sigma_{f_1 f_8} \\ \vdots & & & \vdots \\ \sigma_{f_8 f_1} & \sigma_{f_8 f_2} & \dots & \sigma_{f_8}^2 \end{bmatrix}_{8 \times 8} \dots \dots (2-62)$$

此式即為 F 矩陣八個元素的協方差矩陣

2.6.2.7 三維點坐標矩陣 x 的協方差矩陣

同理，由 $dX = dP^+ x + P^+ dx$ 和 $dP^+ = -P^+ dP P^+$ 可得三維重建結果 X 相對於像點誤差 dx 的協方差矩陣。假設選取的像點坐標為 $u(u'_1, v'_1)^T$ ，則由此點的點位坐標方差矩陣可以推導出三維點坐標矩陣 X 的協方差矩陣為：

$$\Sigma_{xx} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & & & \\ & \sigma_{y1}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{xn}^2 \\ & & & & \sigma_{yn}^2 \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \dots \dots \dots (2-63)$$

則由 n 個像點的坐標方差可以推導出 n 個三維點坐標 $X_{4 \times n}$ 的方差矩陣為；

$$\Sigma_{xx} = \left(\frac{dX}{du} \right)_{4n \times 2n} \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & & & \\ & \sigma_{y1}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{xn}^2 \\ & & & & \sigma_{yn}^2 \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \left(\frac{dX}{du} \right)_{2n \times 4n}^T \dots \dots \dots (2-64)$$

由上式可以看出 Σ_{xx} 為 $4n \times 4n$ 的分塊矩陣，其對角線上的 n 個 4×4 矩陣分別代表每個三維點的點位坐標方差，其第四行第四列也均為 0。

2.7 統計檢驗

兩次坐標的較差不一定反應坐標位移，有可能是偶然誤差所引起，因此要對坐標位移進行顯著性檢驗(t 檢驗)。不過，在進行 t 檢驗前要先確定兩期測量精度是否相同，即母體的變異數是一致的。所以在進行 t 檢驗前，要先做兩期母體變異數是否相同的檢驗(F 檢驗)，如表 2-1 所示。

2.7.1 兩個母體變異數比值之假設測試

令 S_1^2 與 S_2^2 分別是取自平均 μ_1 與 μ_2 且變異數 σ_1^2 與 σ_2^2 的常態分佈、樣本數 n_1 與 n_2 的獨立隨機樣本之樣本變異數。若 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ，則統計量 S_1^2 / S_2^2 服從有著自由度 $n_1 - 1$ 與 $n_2 - 1$ 的 F 分佈。

μ_1 ：第一期平均數 μ_2 ：第二期平均數
 σ_1 ：第一期標準差 σ_2 ：第二期標準差
 S_1 ：第一期變異數 S_2 ：第二期變異數
 n_1 ：第一期自由度 n_2 ：第二期自由度

表 2-1 F 檢驗

單尾測試	雙尾測試
虛無假設 $H_0: S_1^2/S_2^2=1$ 對立假設 $H_a: S_1^2/S_2^2>1$	虛無假設 $H_0: S_1^2/S_2^2=1$ 對立假設 $H_a: S_1^2/S_2^2 \neq 1$
顯著水準 α	顯著水準 α
檢定統計量 $F = S_1^2/S_2^2$	檢定統計量 $F = S^2(\text{larger})/S^2(\text{smaller})$
拒絕 $H_0: F > F_\alpha$	拒絕 $H_0: F > F_{\alpha/2}$

2.7.2 單點位移顯著性檢驗(t檢驗)

此項檢驗通常用於變形觀測網，對不同時間的重複測量數據，按自由網平差的成果進行變形分析。設監測網兩期平差得到的某個單獨

坐標值為 x_1 和 x_2 相應的變異數為 $\sigma_0^2 Q_1$ 和 $\sigma_0^2 Q_2$ ，單位權變異數估值為 $\hat{\sigma}_{01}^2$ 和 $\hat{\sigma}_{02}^2$ 。坐標位移量為：

$$dx = x_2 - x_1 \dots\dots\dots (2-65)$$

因為 x_1 為 $N(\xi_1, \sigma_0^2 Q_1)$ 變量， x_2 為 $N(\xi_2, \sigma_0^2 Q_2)$ 變量，故 dx 也為 $N(\xi_1 - \xi_2, \sigma_0^2 (Q_1 + Q_2))$ 變量。

作 dx 的標準化變量，它為標準化常態變量：

$$\frac{dx - (\xi_2 - \xi_1)}{\sigma_0 \sqrt{Q_1 + Q_2}} \sim N(0,1) \dots\dots\dots (2-66)$$

根據兩期平差所得殘差平方和可做如下的 χ^2 變量：

$$\frac{(V^T PV)_1 + (V^T PV)_2}{\sigma_0^2} = \frac{f_1 \hat{\sigma}_{01}^2 + f_2 \hat{\sigma}_{02}^2}{\sigma_0^2} = \chi_{(f)}^2 \dots\dots\dots (2-67)$$

自由度 $f = f_1 + f_2 = (n-r)_1 + (n-r)_2$ 。

上述 $N(0,1)$ 變量與 $\chi_{(f)}^2$ 變量互相獨立，這是平差坐標與殘差不相關，按 t (t 分配) 變量定義為：

$$t = \frac{N(0,1)}{\sqrt{\frac{\chi_{(f)}^2}{f}}} = \frac{dx - (\xi_2 - \xi_1)}{\sigma_0 \sqrt{Q_1 + Q_2}} / \sqrt{\frac{f_1 \hat{\sigma}_{01}^2 + f_2 \hat{\sigma}_{02}^2}{\sigma_0^2 (f_1 + f_2)}} = \frac{dx - (\xi_2 - \xi_1)}{\sigma_0 \sqrt{Q_1 + Q_2}} \dots\dots\dots (2-68)$$

式中

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{f_1 \hat{\sigma}_{01}^2 + f_2 \hat{\sigma}_{02}^2}{f_1 + f_2} \dots\dots\dots (2-69)$$

t 變量的自由度為 $f = f_1 + f_2$ ，它與 χ^2 變量的自由度 f 同。有了這個 t 變量就可對座標位移 dx 進行位移顯著性檢驗，其步驟如下：

1. $H_0: \xi_2 - \xi_1 = 0$ ， $H_1: \xi_2 - \xi_1 \neq 0$

其意思是，檢驗的原假設 H_0 是 $\xi_2 = \xi_1$ ，即該點坐標理論值兩期相同，自然無位移存在，如果拒絕原假設 H_0 則接受假設 H_1 ，認為位移存在。

2. 作統計量 t ，當原假設 H_0 成立，式(2-70)應為：

$$t = \frac{dx}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_1 + Q_2}} = \frac{dx}{\hat{\sigma}_{dx}} \dots\dots\dots (2-70)$$

3. 選定顯著水平 α ，查 t 分配表得 $t_{\alpha/2}$ ，如果 $|t| > t_{\alpha/2}$ 則拒絕 H_0 ，位移顯著可信，否則接受 H_0 ，認為有位移不可信。

2.8 編碼標誌設計方案

自動監測只要目的在於拍攝影像中之特定點位，如控制點或監控點最好可以透過自動量測方式進行量測，可省去人工進行控制點及監測點量測之時間，對於自動監測而言，才能完成全自動化量測，計算分析功能，因此本研究中也針對編碼標誌進行探討，已完成全自動量測之目的。

2.8.1 編碼標誌的設計原理

編碼標誌設計須考慮的因素有：編碼標誌在測量所起的作用、圖案以尺寸、圖像處理與標誌的方法、材料等。

1. 相似性

編碼標誌主要為攝影測量中自動識別的唯一手段，因此編碼標誌設計的成功與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，為滿足任何方向均可進行量測，因此編碼標必須滿足平移、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，如下圖 2.7 所示，設計之標型必須滿足。

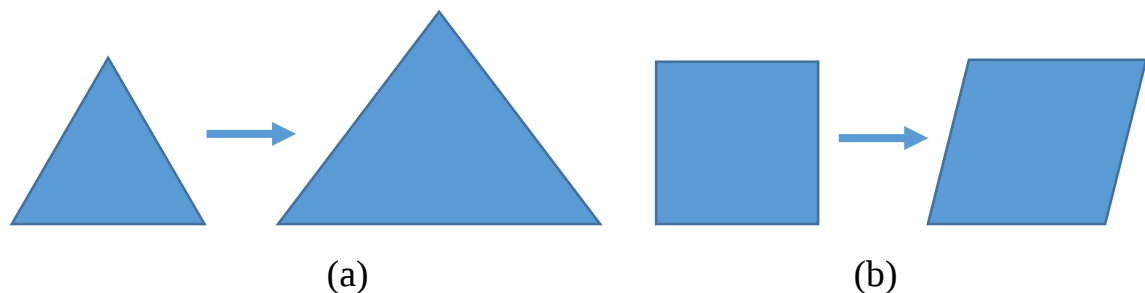


圖 2.7 設計標誌容許縮放、仿射變形

圖中，(a)為尺度改變(b)為仿射變形。這樣的圖形是無法用來表示不同的編碼，因為他們經過這些轉換後，相似性太高。

因此這裡需要特別指出的編碼必須具有”旋轉不變性”。旋轉不變性是指一個編碼圖案經過任一角度的旋轉，不能與其他編碼圖案發生重複。

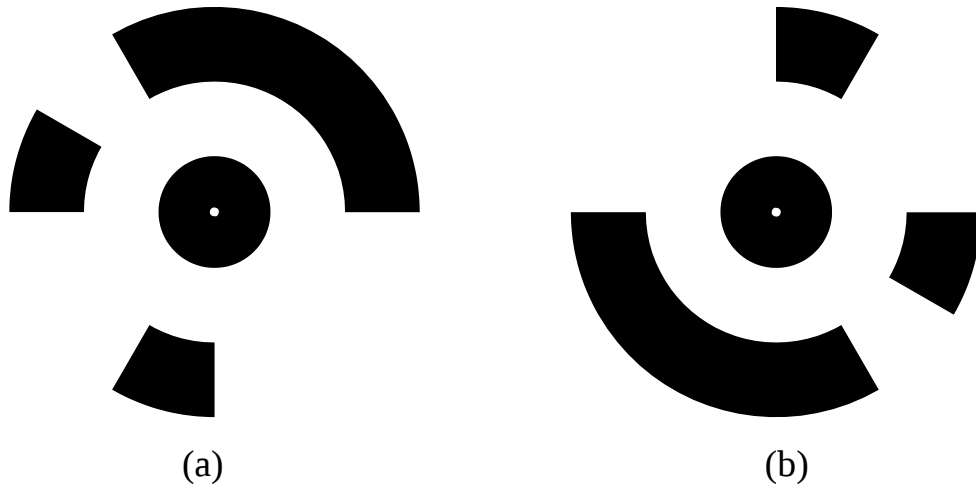


圖 2.8 編碼標誌的旋轉不變性

如上圖 2.8 所示，其中一個圖案經過旋轉與另一個完全一致，因此只能代表該標誌相同，無法表示兩個編碼。

2. 編碼總數量足夠

近景量測物體越大，結構複雜度越高，因此必須要有足夠數量之編碼標誌，才能滿足編碼標誌應用之數量。

3. 特徵簡單，易於識別

為了減少圖形處裡的複雜度，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。

4. 尺度適當

編碼標誌的尺寸過小，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。

5. 易於從背景中分離

影像處理方式對於編碼標誌須能與背景進行分離，因此利用黑白色進行目標物識別，偵測編碼標誌黑色與白色各佔百分比，以作為判識依據，利用此方式可以順利與背景影像中進行分離。

2.8.2 編碼標基礎方案選擇

以現今編碼標大多採用圓形為主要特徵，這是由於圓形是一種簡單且完美的圖形，且具有下列特點：

1. 無方向性。其形狀不隨線性轉換、仿射轉換產生改變。
2. 特徵簡單。描述一個圓只需要圓心(x,y)和半徑 R 三個參數，這樣是其他圖型所無法取代的簡單。

這些特徵點使得圓型特徵的影像識別較為簡單，處理時可以獲得很高的處理效率。以下介紹目前較常用的編碼標誌方案 Hattori 及 Schneider 特徵矩形方案。

1. Hattori 編碼標

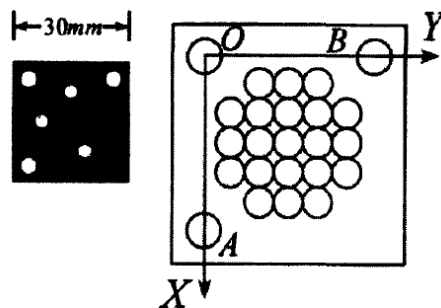


圖 2.9 Hattori 編碼方式

(1) 編碼方式

Hattori 編碼方式以每個標誌都有 6 個點組成，如圖 2.9 所示，其中較大的三個點 A、B、O 用於標示坐標系 XOY，其餘三個點用於編碼-稱作編碼點(code Dot)。編碼點的位置從(b)中的 21 個圓形區域中選擇，而且互相之間至少需間隔一行一列。編碼為三個編碼點在其坐標系 XOY 中的座標。

(2)解碼算法

影像二值化後進行形態學處理膨脹(Dilation)，如果 6 個區域融合成一個區域，則他們屬於一個標誌，稱為一個”點組”。

- 搜尋 A、B、O 點。按照顯露模式(Emerging Pattern)對標誌影像排列，然後將所有可能的座標軸組合與模型比較。比較是通過計算”點組”的形心得到點的距離最為計算依據。
- 確定坐標系。利用第 2 步找到的三個點，確定坐標系時有多種可能，如圖 2.10 所示。通過檢測剩餘的 3 個點是否能落入坐標系形成的平行四邊形來決定到底為何種正確的組合。
- 坐標系確定後，計算出 3 個編碼點的坐標，則編碼就可以進行提取。

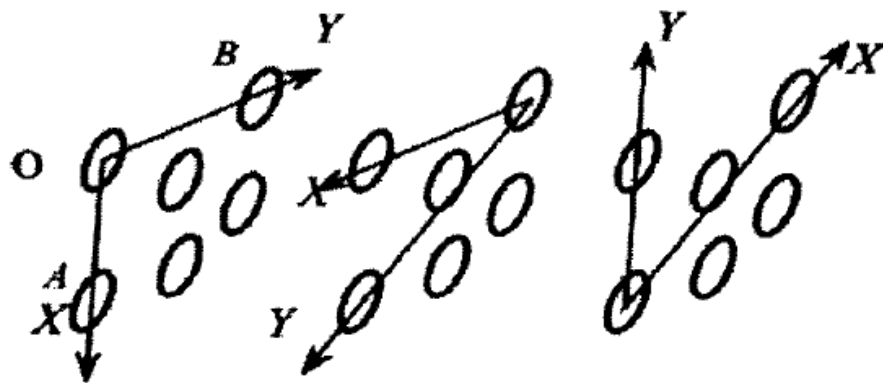


圖 2.10 可能的坐標系組合

(3)識別方法類型

解碼算法首先尋找設計方案中的坐標系 XOY，進行計算編碼點的坐標。所以此編碼的解碼方法屬於”語法結構模式識別法”。

2. Schneider 特徵矩形解碼方式

特徵矩形的方案是針對擴展為 14 等分後的 Schneider 標誌，如圖 2.11 所示。

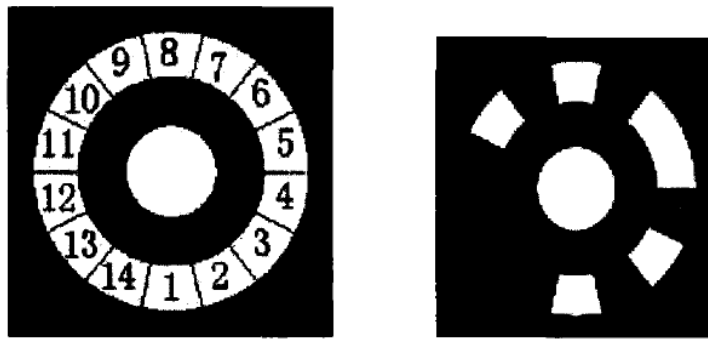


圖 2.11 14 位元編碼標誌

(1) 編碼方式

編碼標誌事先隨機編列的序號及為編碼。

(2) 解碼算法

首先，對大量實驗圖像計算仿射變形的七個特徵不變值，與標準編碼模板相應的特徵進行比較，最終選定其中分辨率最高的四個特徵不變所組成特徵向量。識別時，計算實際編碼標誌影像的特徵向量與模板的特徵向量之間的歐氏距離，距離最小且在誤差範圍內者及為該編碼識別方式類型。

2.9 小結

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為關鍵之問題之一，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。而多視立體影像中稠密點雲匹配方式，可大量獲取監測地表之 DSM 資料，利用多視立體視覺近景量測方式可針對單點進行監控，亦可透過 DSM 資料進行面狀兩期資料比較之依據，而立體匹配演算法可獲取更高密度點雲資料，對於面狀監測，可大大提升該方式之應用。

另外本研究中自動量測為自動監測中，主要被探討之問題之一，本研究中將依據兩組編碼標之方案進行相關實驗，給本案提供最適當之解決方案。

第三章 道路邊坡滑動預警模式

針對預警模式而言，在以往邊坡滑動監測上，可分為表面及邊坡內部結構監測兩方面，而近景攝影測量方式僅對表面破化及滑動進行判識，因此本研究將不針對邊坡內部應力之預警模式進行探討。

為進行道路邊坡崩塌監測系統之評估，首先以道路邊坡崩塌種類與其造成之災害，其次詳述邊坡崩塌現象監測徵兆物理量以及完整之監測規劃所涉及之各項原則，並針對表面滑動或是破壞行為進行探討。

3.1 道路邊坡崩塌現象與監測徵兆物理量

道路邊坡崩塌之監測，可視為道路邊坡管理非常重要之一環，一般而言，邊坡監測之應用時機可分為四大類：

1. 邊坡特性調查
2. 邊坡施工中安全監控
3. 邊坡長期維護與防災管理
4. 回饋設計及防災研究

四大類均為利用邊坡崩塌徵兆物理量之量測與分析，將所得成果做為不同目的使用時之參考。其中邊坡長期維護與防災管理對於道路管理單位而言顯得特別重要。為了瞭解道路邊坡崩塌徵兆物理量，首先必須進行道路邊坡崩塌之分類。

3.1.1 道路邊坡崩塌型態分類

影響道路邊坡崩塌的因素有很多，其中包含含水量、地球重力、岩石風化等因素，都間接或直接影響著道路邊坡的穩定，而表面特徵則是滑動破壞中最容易判識的一個主要依據，以表 3-1 為道路邊坡以及坡體運動分類表。

表3-1法恩氏斜坡塊體運動分類表

移動型態 Type of Movement		塊體種類 Type of Material		
		岩盤 Bedrock	工程土壤 Engineering Soils	
			粗粒為主	細粒為主
墜落 Falls		岩石墜落 Rock fall	岩屑墜落 Debris Fall	土墜落 Earth Fall
傾覆 Topples		岩石傾覆 Rock Topple	岩屑傾覆 Debris Topple	土傾覆 Earth Topple
滑動 Slides	轉動 Rotational	岩石崩移 Rock Slump	岩屑崩移 Debris Slump	土崩移 Earth Slump
	移動 Translational	岩塊滑動 Rock Block Slide 岩石滑動 Rock Slide	岩屑塊滑動 Debris Block Slide 岩屑滑動 Debris Slide	土塊滑動 Earth Block Slide 土滑動 Earth Slide
側落 Lateral Spreads		岩石側落 Rock Spread	岩屑側落 Debris Spread	土側落 Earth Spread
流動 Flows		岩石流動 Rock Flow (深蠕動 Deep Creep)	岩屑流動 Debris Flow	土流動 Earth Flow
複合運動 Complex		複合兩種或兩種以上之運動方式		

運動體的組成物質可分為岩盤和工程土壤，其中工程土壤又可細分為顆粒較粗的土石和顆粒較細的土泥。斜坡運動形式可分為五大基本類型：墜落、傾覆、滑動、側落與流動。由兩種以上基本類型組合而成的運動則稱為複合運動（Complex Slope Movement）。以下概述塊體之運動型態（工研院能資所，1989）。

1. 墜落(Falls)

墜落是體積大小不一的岩塊或土石以自由落體的運動方式向下掉落，多發生於陡峭邊坡或懸崖，速度極快。發生於公路邊坡時可能傷及人車。砂頁岩互層構成的陡坡會因差異侵蝕的影響，導致上覆的砂岩失去支撐而墜落。

2. 傾覆(Topples)

傾覆是岩塊向下坡方向傾斜而發生滾落的一種方式；岩層被兩

組垂直節理切割成柱狀的岩塊最容易在自由面上發生傾覆或崩移。因山區闢建的公路，常有非常高聳的邊坡，甚至半隧道的型式，在這種邊坡傾翻破壞時有發生。傾翻發生的場合通常有一組高傾角不連續面（層面或節理面）向邊坡的內側傾斜。

3. 滑動(Slides)

滑動是最常見的斜坡運動。滑動可分兩種，一種為平面式滑動，另外一種為旋轉式滑動。平滑的滑動面形狀近乎平面，如層面、節理面、斷層面或崩積土與岩盤界面等；旋滑的滑動面形成則是開口向上的曲面。平滑常沿著岩盤、層面、節理面或斷層面滑動，常因地層排水不良而觸動，但是也常因坡腳被切除而引發，因此以發生在路邊、山溝或河流的坡面最多；旋滑常發生於邊坡、河岸、公路旁及填土的地方，尤其是土層很厚或岩層破碎的地方，在滑動體內及冠部附近經常可見到張力裂縫。事實上，自然界的滑動很少有單一型式者，很多滑動均是在頭部為旋滑，在趾部則轉變為平滑或流動。

4. 側落(Spreads)

側落幾乎是水平方向的滑動，滑動面底下通常是一種軟弱的岩層，因軟弱岩層發生塑性流動而影響上覆堅硬岩層。

5. 流動(Flows)

流動像塑性流體一樣的移動，其速度可以從每秒數 cm 至每秒數百公尺。流動不一定要含水，有的邊坡在重力的作用下也會慢慢地向下坡方向流動，稱為潛移（Creep），其移動速度很慢，每年可能只有數公釐至數 cm，但已足以威脅基礎的安全。潛移可分為淺、深兩類。前者只有表土部分發生滑動，後者會導致岩層彎曲。

3.1.2 道路邊坡崩塌徵兆物理量

根據上述道路邊坡崩塌分類結果，基於邊坡外在與內在因素或誘因觸發邊坡崩塌，可進一步將邊坡崩塌徵兆物理量可分為兩類，一為直接徵兆物理量，另一為間接徵兆物理量。

1. 直接徵兆物理量

邊坡崩塌即為斜坡塊體運動，因此位移即為此現象之直接徵兆物理量。邊坡移動可從地表面觀察（地表面物體傾斜、移動、地表開裂、隆起與下陷等）或地表面傾斜與位移量測得知，邊坡移動亦可由地下位移或變形量測得知。此直接物理量隨著不同邊坡崩塌種類而有不同之現象徵兆，包括位移量、位移速度、位移範圍及位移深度等。邊坡崩塌過程除產生位移以外，可能伴隨產生之現象尚包括地聲、水質變化與受剪破壞激發之超額孔隙水壓變化，亦屬於直接徵兆物理量。

邊坡崩塌直接徵兆物理量中以位移最為重要，而位移速度為此徵兆物理量重要之特徵。不同之斜坡塊體移動型態，將有不同之運動方式與速度，如潛移每年數 cm；土崩每小時數百公里（潘國樑，1994）。根據日本高速道路調查會（1988）之研究，不同山崩型態之運動速度統計於表 3-2。

邊坡崩塌移動速度對於災害規模影響甚鉅。崩塌速度為邊坡破壞現象的特質，因此需要獨立定義。Turner and Schuster (1996)整理邊坡崩塌位移速度並分為七級(表 3-3)。

表3-2 山崩形態之移動速度表

移動速度	快					
------	---	--	--	--	--	--

移動速度	快		中		慢	
慢速土砂流						
岩屑地滑						
層狀岩塊滑動						
岩盤猛落						
層狀土質滑動						

資料來源：日本高速道路調查會，1988)

表3-3 邊坡崩滑速度分級表

速度 等級	描述	速度 (mm/sec)	代表性速度
7	非常快	5×10^3	5 m/sec
6	很快	5×10^1	3 m/min
5	快	5×10^{-1}	1.8 m/hr
4	中等	5×10^{-3}	13 m/month
3	慢	5×10^{-5}	1.6 m/year
2	很慢	5×10^{-7}	16 mm/year
1	非常慢		

資料來源：Turner and Schuster, 1996)

崩滑速度很快與非常快之界限非常重要(等級 6 與等級 7 間)，此速度之界限約為人跑步的速度(5m/sec)。另一個速度界限介於慢與很慢等級之間(1.6m/year)，在此移動速度之下，建築物在崩滑過程中有可能不被損壞。。

2. 間接徵兆物理量

邊坡崩塌塊體移動之發生，與許多因素有關，其中較相關之環境因素包括：邊坡地形條件、邊坡地質材料與構造條件、邊坡之地表與地下水文條件及氣候條件等等。另一方面，邊坡塊體移動與人為因素亦息息相關。根據工研院能資所(1989)之研究，影響斜坡運動

的因素可分為內在或外在兩種：內在因素主要包括：(A)礦物組成的性質(B)地質構造(C)地下水的存在(D)地形(E)植生。外在因素主要包括：(A)岩層的風化(B)孔隙水壓增加；(C)加重負載(D)移去坡趾支撐；(E)下伏地層垮塌(F)地震(G)其他因素，如地下採礦或石灰岩溶洞造成地盤下陷等。

一般而言，地震、豪雨及因豪雨或其他因素而造成之地下水位變化是邊坡塊體移動之重要誘因，由理論與過往經驗均得知邊坡崩塌常伴隨上述物理量之變化。故震動、水壓或水位及降雨特性等外在因素均屬邊坡崩塌之間接徵兆物理量。至於內在影響因素與邊坡崩塌極為相關，此部份因素主要為邊坡之先天不變因素(除地下水之存在)，做為道路邊坡危險程度評估之重要參考，較不適合為崩塌監測之徵兆物理量。基於上述之徵兆物理量，邊坡監測之目的通常包括：

- (1)在邊坡滑動已發生的情況下決定滑動體之深度與形狀，然後使用這些參數來計算滑動面上材料之剪力強度參數，做為改進邊坡穩定工法設計之依據。
- (2)決定滑動體之絕對垂直與橫向移動量及滑動之速度。
- (3)監測與邊坡滑動息息相關之地下水位或孔隙水壓，提供有效應力分析之用。
- (4)觀察介於安全邊緣之天然或開挖邊坡之穩定性，並確認施工或降雨對邊坡移動之影響。
- (5)監測及評估各種控制或穩定工法之有效性。
- (6)在偏遠地區將量測數據透過通訊系統傳出，為可能發生邊坡崩塌提出預警。

本研究僅針對表面破壞及滑動進行探討，並針對有邊坡滑動警示區域進行定期或固定長時間監測為依據進行監測。然而利用近景攝影測量之技術，主要監測邊坡表面相關位移，對於邊坡內部應力及地下水變化則無法得知，攝影測量可提供監測區域高精度地表模型，利用

兩期地表模型進行分析，將可有效計算出邊坡位移，並依據上表滑動速度做出相關邊坡滑動警示。

3.1.3 監測頻率

針對不同致災規模、保全對象以及天然事件提出各項監測項目之頻度，其說明如下：

1.第一類監測：

此類監測主要針對已經發生坡地災害的處所，為避免二次災害的發生，監測主要針對預報降雨前開始針對現地影像、降雨量、地下水位以及坡面上下滑動位移量為主要監測項目，且因為保全對象明確，且致災規模可能較大，此時應伴隨疏散避難為主。

2.第二類監測：

此類監測主要針對未發生坡地災害，但有明顯坡面滑動或是河道有明顯土砂堆積的處所，為避免災害的發生，監測主要透過巡察的回報以及即時的監測資料的回傳，設定警戒值作為通報。

3.第三類監測：

此類主要針對具有潛在坡地災害的區位進行監測，並同樣透過降雨資料、地下水位監測、影像變遷變化等進行判識，並可針對變化較大之區域，提出工程治理的建議。

中華水土保持學會(1999)整理日本預警基準值相關資料與國內相關案例，建議各類監測儀器於地滑狀況之基準值可發現預警基準值之範圍相當廣泛，原因是此預警基準值是累積不論汛期或平時之實測資料所建立的，故僅適用於與統計資料條件相同之邊坡，表 3-4 所示。至於內政部營建署所建議之山坡地工程監測參考管理值，與廖瑞堂(2001)有關山坡地工程穩定判斷之建議管理值，其制定方式同樣是以綜合相關案例資料及參考國外相關文獻所建立而成，如表 3-5 所示。

表3-4 邊坡維護階段管理基準

監測方法	管理區分		
	注意	警戒	疏散
地表伸縮計 地表變位速度	0.5~25mm/day	5~100mm/日	50~500mm/日
地盤傾斜計 地表面傾斜速度	5~10 sec/day	-	10~50sec/day
管內傾斜計管 內變位速度	0.5~1mm/day	2~5mm/day	> 10mm/day
地中伸縮計 地盤變位速度	1~10mm/day	10~100mm/day	> 100mm/day
降雨量 (累積降雨量)		10~20mm/hr 10~50mm	20mm/hr 100mm

資料來源：中華水土保持學會，1999

表3-5 山坡地工程監測參考管理值(內政部營建署)

觀測項目	需考量之因素	預警值	警戒值	行動值
地層移動	1.位移量 2.位移速度	2.0mm/月 (有一定位移傾向)	2.0~10.0mm/月 (有一定位移傾向)	> 10.0mm/月 (有一定位移傾向)
地下水位	設計地下水位	設計水位		
地下水壓	設計地下水壓	設計水壓		
建物傾斜量	容許傾斜量	1/500	1/360	1/250
裂縫增量	容許裂縫寬度	1mm		
地面沉陷	容許沉陷量	沉陷量不影響 結構之使用性		
建物(鄰房) 沉陷	1.容許沉陷量 2.差異沉陷量	沉陷量不影響 結構之使用性 1/500	1/360	1/250
擋土牆及抗 滑樁變位	位移量			
地錨荷重	1.設計拉力 2.鋼腱容許拉力	設計拉力×1	±設計拉力×1.2	鋼腱容許拉力
擋土牆鋼筋 應力	1.鋼筋降伏應力 2.鋼筋容許應力	設計應力	容許應力(考慮 臨時結構短期 應力可提昇 1.2 或 1.5 倍)	降伏應力

表3-6 邊坡穩定判斷建議之管理值

觀測項目	考量之因素	預警值	警戒值	行動值
地層移動	1.位移傾向 2.位移速率	略有位移傾向 0.5mm/月	有一定位移傾向 2.0mm/月	有一定位移傾向 >10.0mm/月
地下水位及水壓	設計地下水位 及水壓	設計水壓		
地面沉陷	容許沉陷量	不影響使用性		

資料來源：廖瑞堂，2001

3.1.4 災害預警

依據上表，攝影測量僅針對表面移動為主要考量因素，以表 3-6 預警值而言，測量誤差必須要小於 0.5 公厘，當移傾量每個月大於 2 公厘則進入警戒值，大於每個月位移超過 10 公厘則須考慮該區域會有較高的邊坡滑動的風險性存在。

因此須對預警區進行高潛勢區及低潛勢區進行區別，高潛勢區依據每日多次方式，以固定攝影站對目標區進行攝影，低潛勢區則使用固定時間，使用單一相機對監測區進行拍攝，進而推演邊坡區域是否產生關鍵性位移分析。

3.2 自動傳輸計算及預警

利用固定式攝影站方式進行拍攝，並由現地伺服器於固定時間啟動攝影機進行拍攝，最後彙整所拍攝之照片回傳行控中心進行計算，其主要架構如圖 3.1 所示。

依據設定監測頻率再由影像伺服器進行監測區自動計算，並自動比對監測區資料，以達到自動監測之目的，再由本所港研中心所研發之「災害預警資料交換機」進行預警發布及資料交換之作業。災害預交換機能即時收集災情資訊與現地儀器監測資訊進行資料彙整工作，一旦災情資訊與儀器監測資訊到達設定的安全警戒值，災害預警交換機將啟動自動通報機制立即通報相關負責工程人員進行道路管制或封閉的措施。

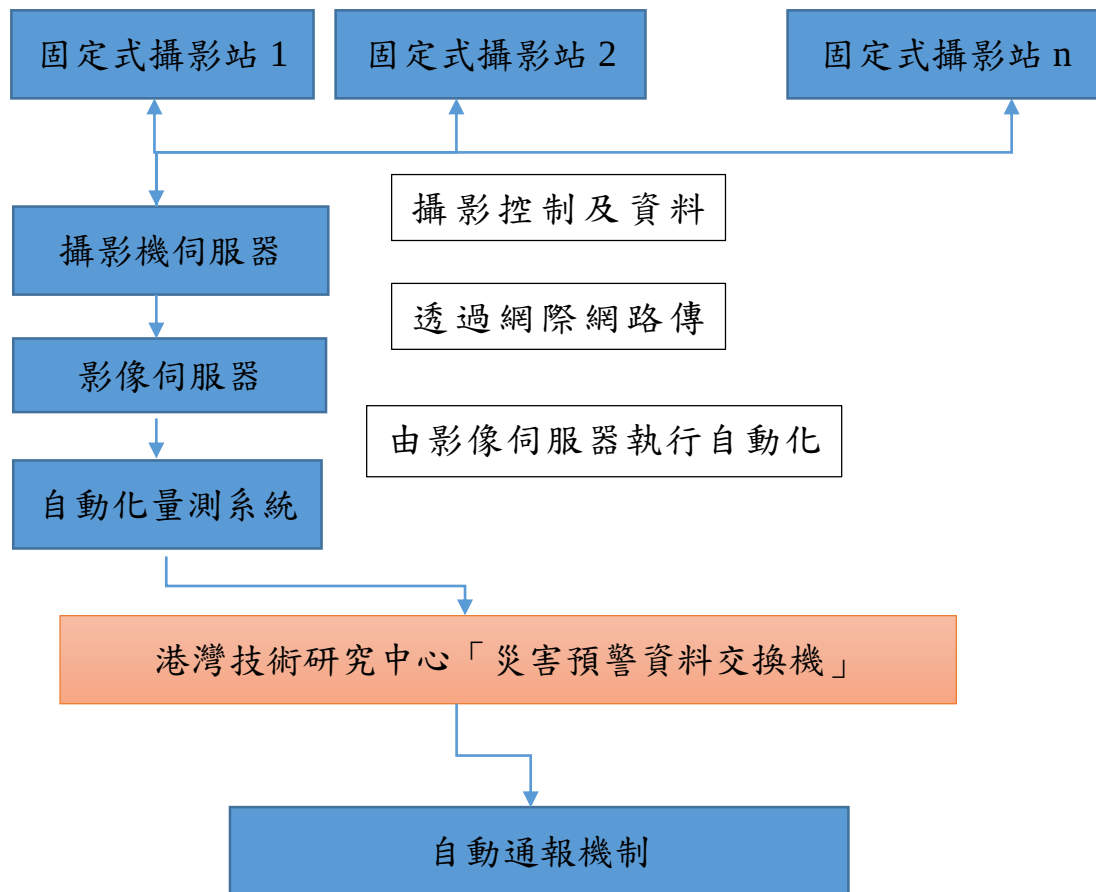


圖 3.1 邊坡監測預警系統流程

第四章 研究方法與進行步驟

4.1 概述

本研究將援引近景攝影測量技術應用於公路邊坡穩定度監測的可行性。而近景攝影測量技術採用多視立體視覺(Multi Viewer Stereo)，該方法利用多張序列影像方式進行場景重建，從中依據上一章節所提之方式，包含相機自率定，以及本研究團隊對該方式進行相關精度驗證，均證明該方法之精度，將優於傳統近景攝影測量方式。以下將針對相關方式進行說明。

實驗規劃公路邊坡穩定監測，並包含使用單相機進行多張相片拍攝，固定多台相機進行交會拍攝兩種，以及利用近景攝影測量於事故現場重建之研究，其相機參數求取流程圖如圖 4.1 所示。

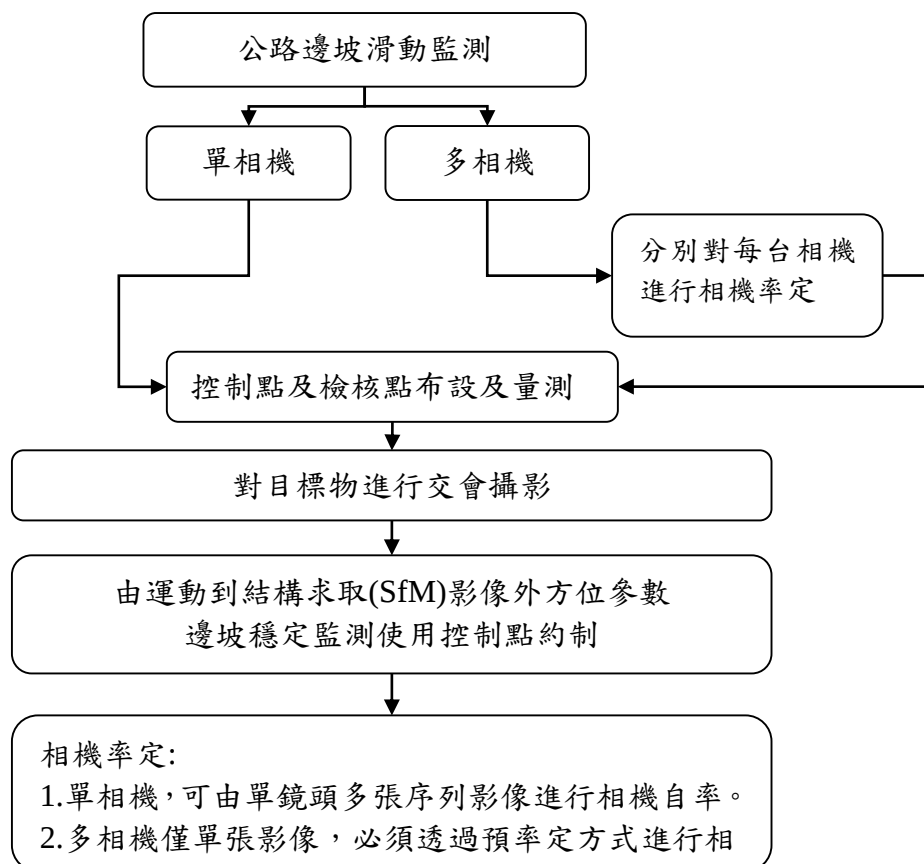


圖 4.1 實驗相機參數取得流程圖

利用多張立體視覺影像進行相機參數求取相機內外方位參數完成之後，將可進行近景量測工作，其相關流程圖如圖 4.2 所示。

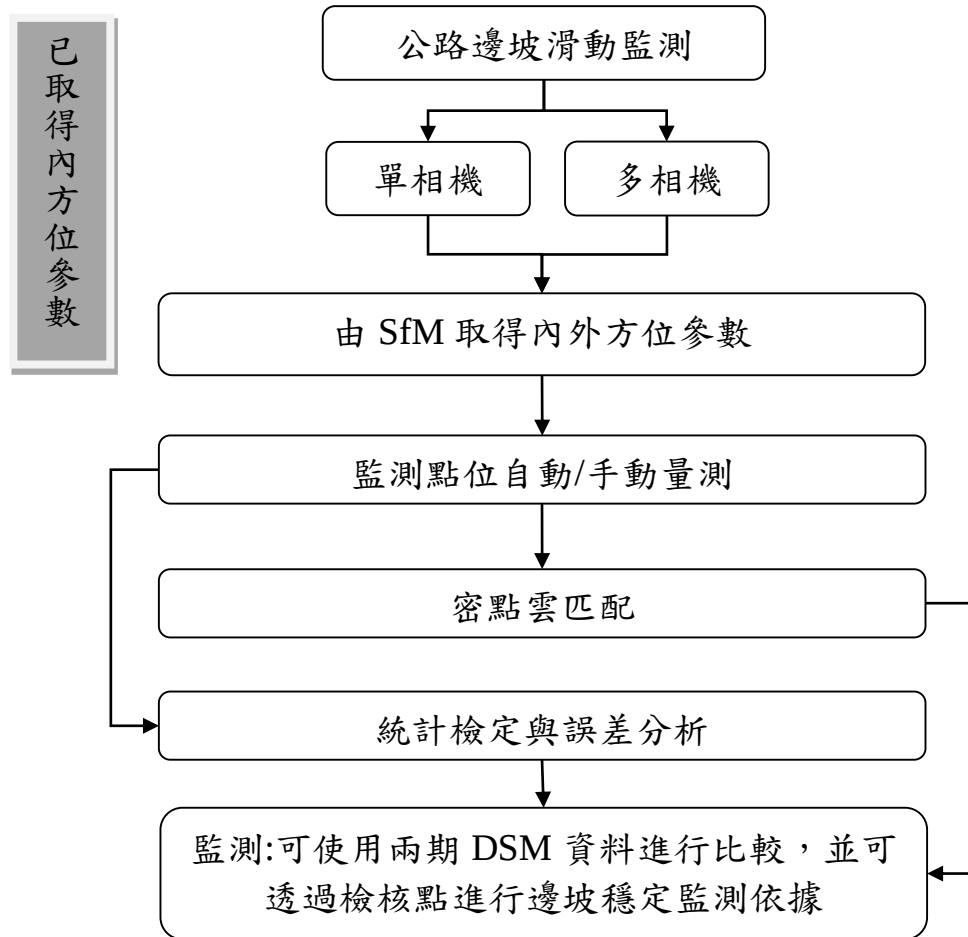


圖 4.2 邊坡穩定度監測流程圖

利用上述流程圖，主要透過多視立體影像進行攝影，並透過全站儀進行控制點及檢核點位布設，而經由 SfM 方式求取拍攝影像外方位參數之後，可透過自動/手動方式取得檢核點位置，並透過這些檢核點之三維坐標進行監測，方可達到監測之目的，另外可透過密點雲匹配方式，將整面山坡地進行重建，再透過 DSM 資料進行比對，亦可計算出該監測區是否有位移或變位等影響邊坡安全之疑慮。

另外於交通事故重建部分也可透過多視立體影像方式進行三維重建，依據上述流程圖，於交通事故進行多張序列影像拍攝，並透過 SfM

求取影像內外方位參數，並對興趣點位進行量測，而重建時必須有一距離參考，該尺度參考可透過地面實際距離，或是尺度棒之方式進行參考，當作本模型解算之尺度約制，最後亦可透過密集點雲匹配方式，將交通事故進行重建。

4.2 多視立體影像三維重建

傳統立體攝影測量方式依據共線方程式進行外方位參數解算，而利用多視立體影像則透過多重共面條件式進行解算，該算法在於計算容易，並可免去初始值就可進行解算，而精度部分則透過多餘觀測的概念，透過多張同時進行解算以達到恢復相機位置之目的，本研究援引多視立體影像三維重建技術，透過對目標區進行三維重建之過程，計算取得監測點位之三維坐標，並透過對這些監測位置進行統計、分析以達到監測之目的。

4.2.1 拍攝距離與量測精度

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元大小(Pixel Size)，以目前相關實驗報告均證明，利用多視立體影像量測精度可到達次像元(Sub-Pixel)等級，意旨如果量測精度須滿足 1cm，那拍攝之像元大小將不可大於 1cm，以此將可以滿足量測之精度。

假設以 UAV 航拍為例，所使用數位相機為 Canon EOS 600D，相機感光元件解析度為 5184 x 3456 像元，相機感光元件尺寸為 3.6 × 2.4cm，換算後可得到感光元件上每一像素之實際尺寸為 6.4 微米(μm) (0.0006cm)。由於每一像素之寬度與焦距長，相對於地面解析度(GSD)與航高(AGL)為相似三角形，如圖 4.3 所示。

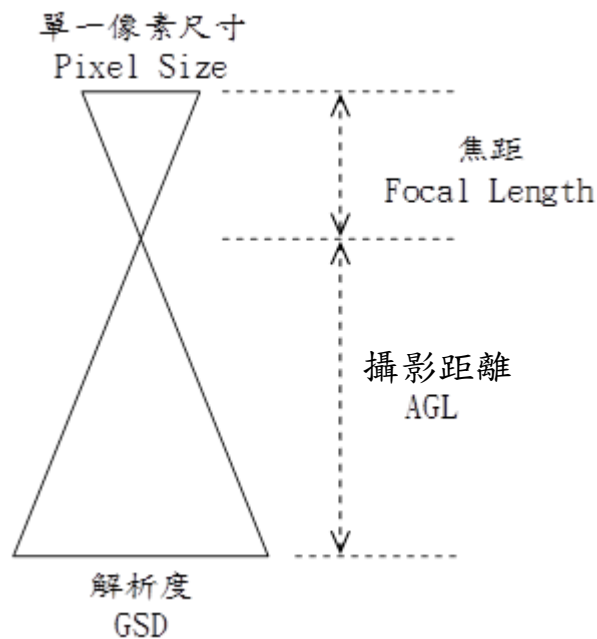


圖 4.3 相機感光元件與地面解析度之幾何關係

因此可得下式：

$$\frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} = \frac{\text{GSD}}{\text{AGL}} \dots\dots\dots (4-1)$$

根據上式，帶入拍攝相機鏡頭焦距、相機感光元件規格，及監測區域地面解析度的需求。配合鏡頭焦距規格，帶入計算後，即可計算出對應的拍攝距離。

4.2.2 多視立體影像拍攝方式

本研究中提出兩種拍攝方式，實驗初期採用單一相機，進行影像序列式拍攝，該方法可免去相機率定之步驟，於 SfM 預估影像參數時可一併進行相機率定動作，該方式則需要透過移動相機位置進行拍攝，因此於長期監控下必然要提出自動位移拍攝機制，才能完成此方式，或可用於邊坡巡查員，利用移動的方式進行拍攝，用於非高潛勢邊坡監測使用，拍攝方式如下圖 4.4 所示，拍攝方式可有人手持拍攝，也可架於移動車輛上進行移動拍攝。

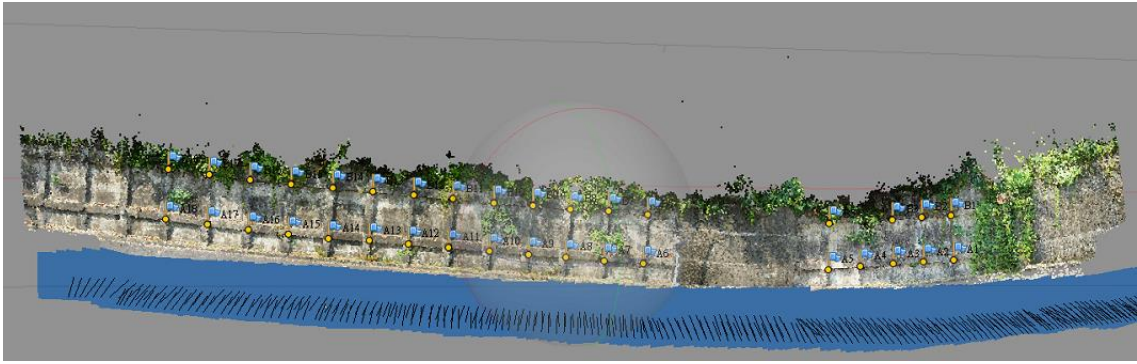


圖 4.4 拍攝方式示意圖(影像序列拍攝方式)

另外如果透過多台相機，利用固定的方式架設於監測區域，在透過固定相機同時對監測區進行拍攝，該方式則需要透過事先相機率定之步驟，因為每台相機都只有拍攝單張，無法透過 SfM 等方式同時求取每一台相機之相機參數，而該方式的優點在於僅需要架設固定攝影鏡頭，亦可達到監測之目的，如圖 4.5 所示。

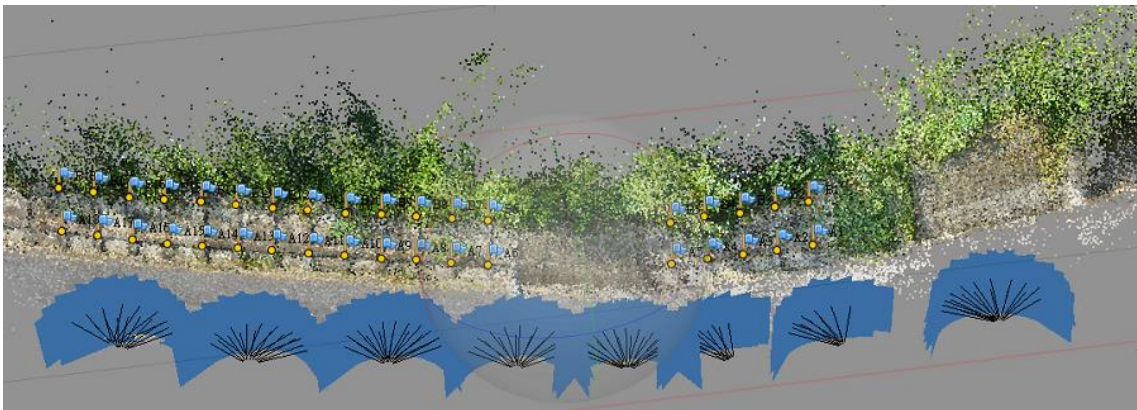


圖 4.5 拍攝方式示意圖(多機旋轉拍攝)

4.3 控制點及檢核點(監測點)

本研究於探討邊坡穩定之問題，因此利用全站儀透過三維量測方式進行控制點及檢核點量測；控制點及檢核點(監測點)選取可透過事先佈標(自動量測標)，或是自然點位進行選取。另要考慮整體邊坡滑動之問題，可由外部控制系統，將控制系統引入測區使用。

4.4 數位相機之率定

攝影測量領域中，相機率定(Camera Calibration)一直是個關鍵議題，不論是使用傳統量測性相機或是現今高解析度之數位相機。如今，隨著相關演算法及影像處理技術的成熟，相機率定已不再是一項繁雜的程序，甚至可透過自率定的方式完成相機率定的工作，自率定將可省去事先相機率定之步驟，以下將針對傳統相機率定方式進行介紹。

攝影測量之技術為由二維影像中獲取三維之空間資訊，而為了從影像中獲取精確且可靠之三維資訊，首要前提即是對於所使用相機之內部特性需有著充份的了解，該些特性即為相機內方位參數(Interior Orientation Parameter, IOP)，包含了相機之拍攝焦距(Focal Length)、像主點位置(Principal Point)及各項透鏡畸變差參數，其中以自率定(Self-Calibration)光束法平差求得相機之各項參數是最常見的方法。相機率定通常都是在率定檢驗場所進行，在率定場裡，會使用各式特定之率定標協助率定程序。起初，攝影測量所採用之相機皆屬於類比式量測性相機(Metric Camera)，該類型相機，是專為攝影測量用途所製造的，其透鏡系統及成像面皆有著較為強健之結構，因此提供了較為穩定之內方位參數值；另一方面，近年來由於電子科技的進步而快速發展之數位相機，皆屬於數位式的非量測性相機(Non-Metric Camera)，由於該些相機並非專為攝影測量用途所生產的，其內方位參數值會較為不穩定，故應用於攝影測量之數位相機必須以合適之率定程序求得相機內方位參數，以利後續近景攝影數位三維建模之應用。

當相機按下快門的那一瞬間，物間景色將經由透視中心投影至CCD 成像面，形成數位影像，而相機鏡頭本身為一非平面結構之凸鏡，因此會使得投影光線產生折射現象而無法將光線正確投射至成像面，除了使影像產生變形，也造成了影像坐標之偏移(Shift)，如圖 4.6 所示。在這樣的情形之下，相機投影中心、影像點位及相應地面點位將無法達到三點共線之條件，因此需以相機率定程序求得相機之內方位參數，恢復攝影光束於相機內部之行進方向，進而獲取正確之影像點位坐標。除了內方位參數外，尚需對於造成影像變形之各項鏡頭畸變因素進行

率定，主要包含了輻射畸變差(Radial Lens Distortion)、離心畸變差(De-centric Lens Distortion)、大氣折射差(Atmospheric Refraction)及仿射畸變差(Affinity Deformation)等。



(a)正確影像

(b)變形影像

圖 4.6 因透鏡畸變所產生之影像變形示意圖

傳統率定檢驗場中，率定標均以三維型式進行布設，且率定過程較為繁雜，直至近幾年來，相機率定方式有了突破性之進展，且由於相關演算法之成熟，市面上亦出現各式商用軟體可供使用，因此相機率定不再是一項繁雜之程序，僅需針對以二維型式布設之率定標進行不同角度之拍攝，在完成點位量測及自動影像匹配後，以附加參數自率光束法平差進行參數求解後即完成相機率定程序，圖 4.7 為近景軟體 PI-3000 之率定標型範例。

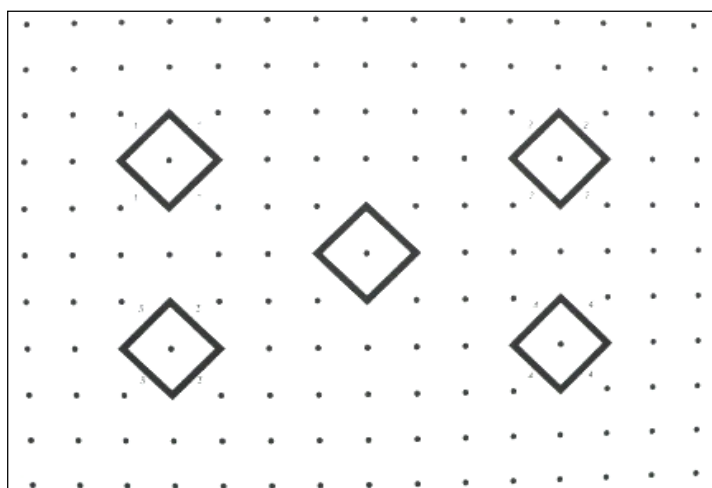


圖 4.7 PI-3000 率定標示意圖

4.4.1 率定參數

除了內方位參數之外，近景軟體 PI-3000 主要使用了四個附加參數來描述鏡頭畸變所產生的影像變形行為，所率定之參數分別如下所示：

- 內方位參數(Interior Orientation)： c, x_p, y_p
- 輻射畸變差參數(Radial Lens Distortion)： K_1, K_2
- 離心畸變差參數(Decentric Lens Distortion)： P_1, P_2

下式即為所使用之數學模式：

$$\begin{aligned} x &= x_{meas} - x_p \\ y &= y_{meas} - y_p \end{aligned} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 \\ dr &= K_1 \times r^3 + K_2 \times r^5 \end{aligned} \dots\dots\dots (4-3)$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= x + x \cdot dr/r + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 \times x \times y \\ \Delta y &= y + y \cdot dr/r + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 \times x \times y \end{aligned} \dots\dots\dots (4-4)$$

式中 r ：像點之輻射距離

x, y ：以像主點為中心之影像坐標

x_{meas}, y_{meas} ：於影像上量測之原始影像坐標

x_p, y_p ：像主點位置

$\Delta x, \Delta y$ ：經改正後之影像坐標

4.4.2 率定參數解算

以上所提到的各項畸變差參數元素之選擇主要依當時之攝影條件及所使用之攝影配備有關，當選用合適之改正參數後，即可由共線式之附加參數自率定光束法平差進行各項參數之求解，在完成內方位參數求解後，即可恢復相機之光線投射狀態，並完成變形之影像坐標糾正作業。

$$\begin{aligned}x - x_0 + \Delta x &= -f \frac{a_{11}(X - X^0) + a_{12}(Y - Y^0) + a_{13}(Z - Z^0)}{a_{31}(X - X^0) + a_{32}(Y - Y^0) + a_{33}(Z - Z^0)} \\y - y_0 + \Delta y &= -f \frac{a_{21}(X - X^0) + a_{22}(Y - Y^0) + a_{23}(Z - Z^0)}{a_{31}(X - X^0) + a_{32}(Y - Y^0) + a_{33}(Z - Z^0)} \dots\dots\dots (4-5)\end{aligned}$$

式中 x, y : 影像坐標

$\Delta x, \Delta y$: 透鏡畸變差改正量

f, x_0, y_0 : 內方位參數

X, Y, Z : 點位之地面坐標

X^0, Y^0, Z^0 : 攝影站之空間坐標

$a_{11} \sim a_{33}$: 旋轉矩陣之係數

4.5 道路邊坡重建

道路邊坡監測主要依據所需之精度決定拍攝距離，並透過多張交會拍攝的方式達到三維量測及三維重建之目的，本研究預計於高雄壽山施作地錨區域進行實驗，並透過全站儀進行控制點及檢核點位量測，再透過拍攝交會影像之方式進行三維重建。首先於道路邊坡進行交會多張影像序列或是模擬固定站旋轉攝影方式進行拍攝，再由多視立體視覺等 SfM 方式求取拍相機內外方位參數，再透過立體匹配演算法如 PMVS/CMVS/SGM 等方式進行三維重建，密集點雲如圖 4.8 所示。

依據地錨明顯之處進行三維重建，並取其中幾點作為控制點已檢核點，利用不同時間拍攝之三維重建結果進行比較，以分析邊坡是否有滑動等破壞現象產生，三維重建示意圖如圖 4.9 所示。



圖 4.8 邊坡穩定監測密集點雲圖

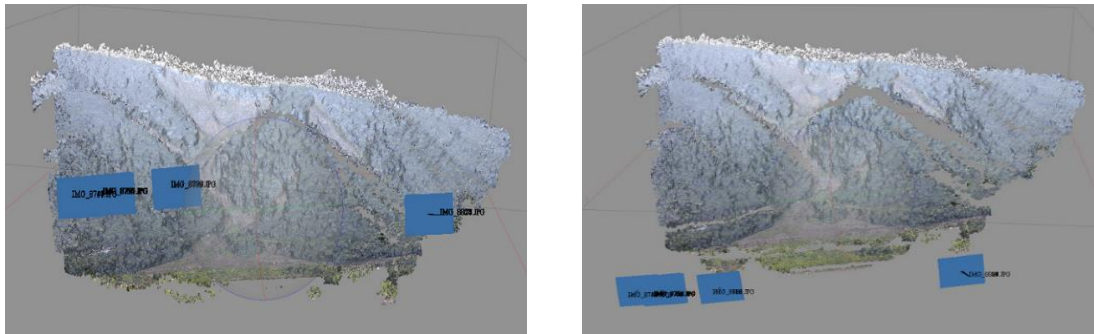


圖 4.9 山坡地三維重建示意圖

4.6 道路邊坡自動攝影監測系統規劃

道路邊坡自動攝影監測系統規劃可由本研究中提出，利用固定攝影站旋轉方式進行攝影。本實驗僅模擬示意相關方法，未對真實實驗地點進行硬體相關建置及實作。以下提供相關系統規劃。首先以架構而言分為現地拍攝系統及處理中心兩部分，現地由固定攝影站及旋轉攝影系統架構自動攝影系統，由影像伺服器對攝影系統固定時間進行

拍攝動作，並由影像伺服器對處理中心影像工作站進行計算任務需求，拍攝影像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，並由編碼標誌進行自動識別，並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，由災害預警資料交換機進行預警通報及資料交換。其架構圖如圖 4.10 所示。若監測現場無網際網路服務，則改由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。

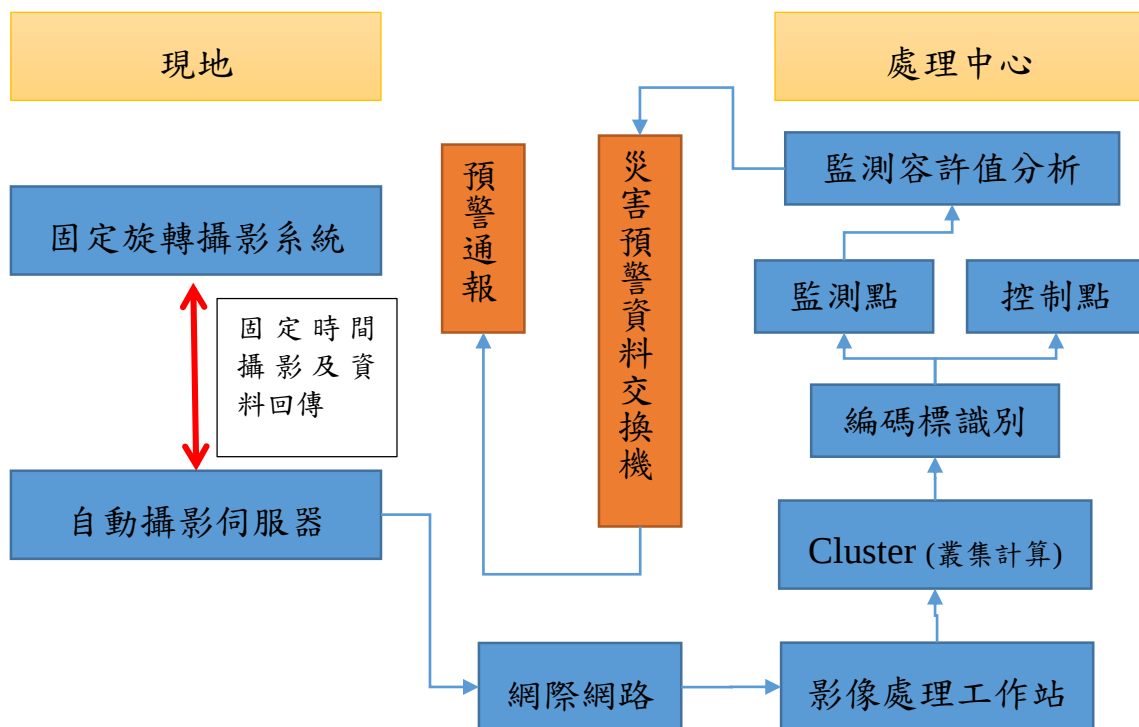


圖 4.10 道路邊坡自動攝影監測系統規劃

第五章 實驗結果與分析

本實驗首先探討多視立體視覺近景量測技術之精度，利用相同實驗區多次拍攝，並採用不同相機不同焦距進行拍攝，控制點部分採用全站儀進行三次元三角測量，該實驗主要驗證利用攝影測量方式之精度及穩定度。

接續探討自動量測之方法，利用編碼標誌設計讓近景量測過程中，需要人工點選控制點，或是檢核點之步驟可以省去，利用這樣的方式完成全自動監測之目的，因此需對編碼標誌之識別大小及精度進行相關探討。

最後利用編碼標誌進行監測點相關模擬實驗，及利用兩期 DEM 進行比較，以分析整體邊坡活動。另外本實驗中另外探討利用多視立體影像於交通事故重建之應用，利用照相機，或是錄影機(GoPro)進行攝影，在利用多張序列影像之方式進行三維環境重建，讓交通事故量測達到更快速、更精準、更科學化之分析，提供車禍鑑識之重要現場分析數據使用。

5.1 實驗前置規劃

實驗前規劃包含實驗場地、控制測量、選用相機、拍攝方式及相機率定等步驟，以下將針對此依序進行介紹。

5.1.1 實驗場地

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，實驗區如下圖 5.1 所示。實驗區現場如圖 5.2 所示。



圖 5.1 道路邊坡監測實驗區示意圖

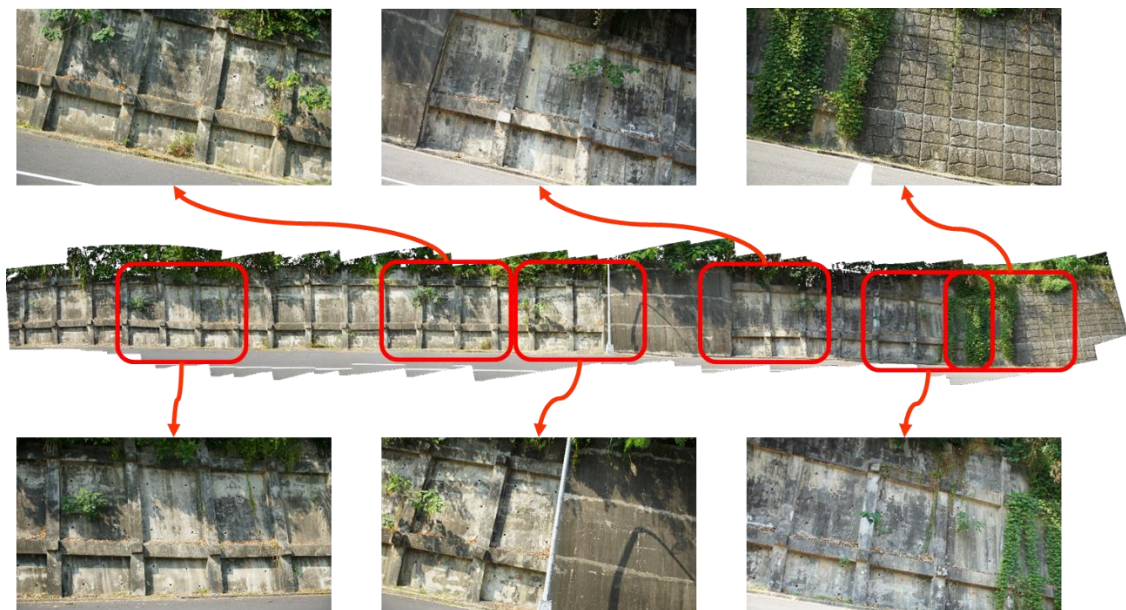


圖 5.2 實驗區現場

5.1.2 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，現地實測如下圖 5.3。



圖 5.3 控制測量現場

地錨特徵點，主要針對地錨明顯之區域進行測量，於本實驗中，可用於驗證攝影測量精度及手動量測精度使用。自動量測標部分則假設布設自動量測位置為邊坡不易滑動區域，用來將模型坐標進行控制使用，再透過布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。實測資料如圖 5.4 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，此圖為節錄部分點位放大，詳細引用控制點將在每個實驗中詳細介紹。

特徵點實測共計測得 36 點，A、B 編號單數為控制點，雙數為檢核點使用。自動控制標控制實測 10 點，以 target 開頭，自動控制點另外再布設未經實測點位 12 點，控制點資料如表 5-1 所示。

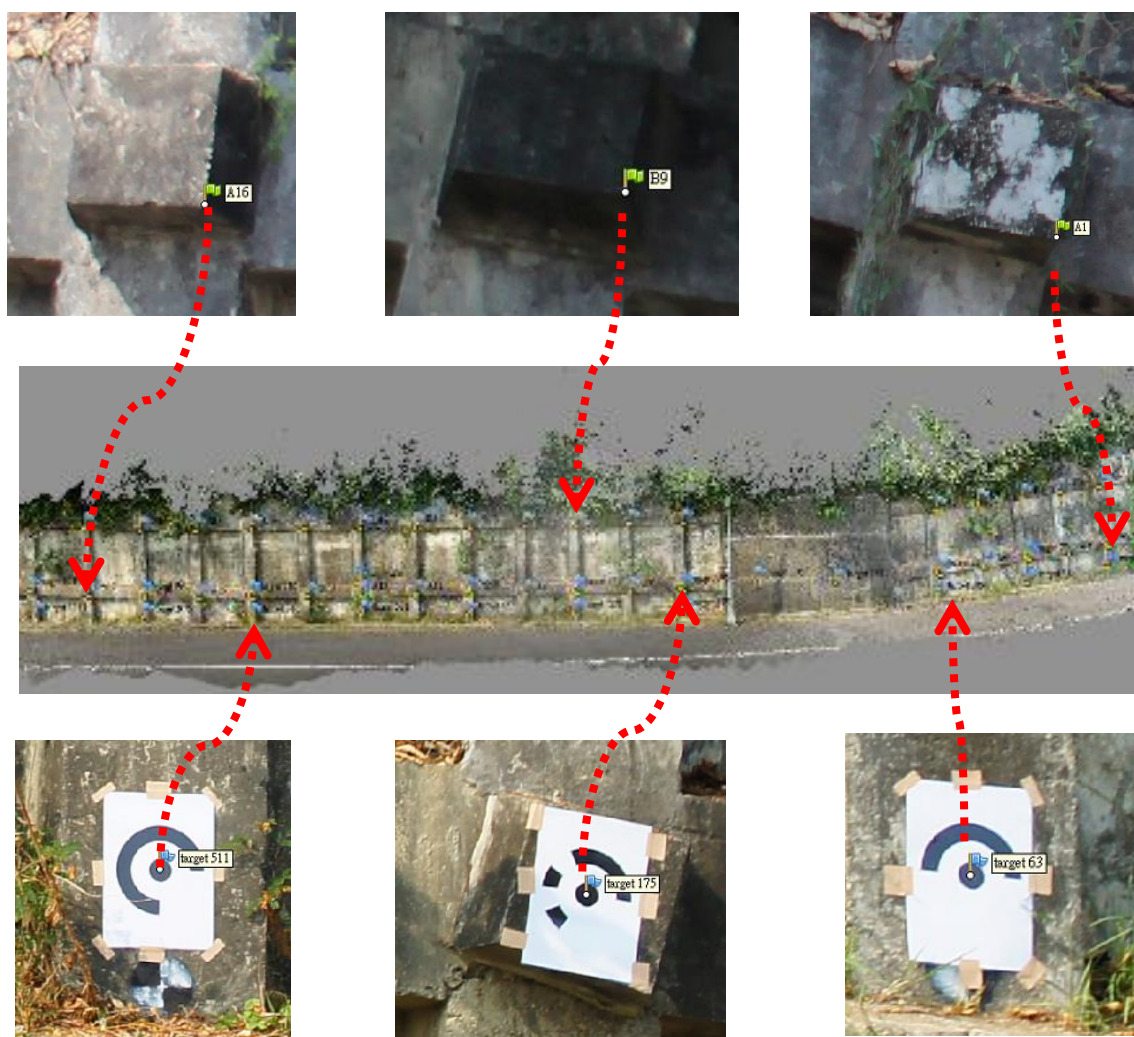


圖 5.4 實測控制點分布

(放大點位節錄)

表5-1控制點實測資料

點號	N 坐標	E 坐標	H 高程	備註
A1	51.166	13.639	-1.043	控制點
A10	19.688	7.825	1.868	
A11	17.286	7.047	2.186	
A12	14.902	6.218	2.454	
A13	12.626	5.386	2.678	
A14	10.243	4.551	2.875	
A15	7.944	3.687	3.133	
A16	5.625	2.788	3.429	
A17	3.279	1.880	3.798	

點號	N 坐標	E 坐標	H 高程	備註
A18	0.907	1.014	4.165	控制點
A2	48.550	13.795	-0.778	
A3	46.126	13.812	-0.549	
A4	43.587	13.765	-0.370	
A5	41.149	13.622	-0.307	
A6	28.978	10.913	0.837	
A7	26.621	10.126	1.064	
A8	24.328	9.305	1.336	
A9	22.041	8.561	1.573	
B1	51.263	12.712	1.851	檢核點
B10	20.269	7.126	4.810	
B11	17.836	6.308	5.100	
B12	15.502	5.573	5.384	
B13	13.115	4.732	5.670	
B14	10.816	3.853	5.921	
B15	8.415	2.992	6.149	
B16	6.062	2.145	6.435	
B17	3.725	1.249	6.820	
B18	1.406	0.333	7.148	
B2	48.738	12.883	2.126	
B3	46.293	13.064	2.310	
B4	43.737	13.120	2.610	
B5	41.354	13.098	2.700	
B6	29.529	10.234	3.886	
B7	27.177	9.385	4.096	
B8	24.882	8.606	4.293	
B9	22.625	7.851	4.557	
target 31	50.948	13.749	-2.077	自動編碼 標
target 63	45.954	13.895	-1.700	
target 249	40.928	13.554	-1.263	
target 255	28.810	10.797	-0.175	
target 231	24.080	9.251	0.364	
target 455	19.358	7.746	0.916	
target 501	14.769	6.185	1.492	
target 511	10.009	4.487	1.933	
target 975	5.381	2.727	2.500	
target 1455	0.714	0.993	3.116	

5.1.3 實驗相機

本次實驗使用多台相機，不同焦距進行相關實驗驗證，主要驗證此方式利用任何一種相機均能達到量測精度之需求，使用相機如下：

1. Canon EOS 600D + Sigma 30mm F1.4
2. Nikno D2xs + 17mm 量測型定焦鏡(固定焦距無法進行手動對焦)
3. Sony A55 + Sony DT16-50mm F2.8
4. GoPro Hero 3 Plus Black Edition

GoPro Hero3 為魚眼鏡頭，本次利用此鏡頭進行交通事故重建，用於重建現場使用。

5.1.4 拍攝方式

對監測區的攝影，以三種多視點立體拍攝方式為原則：

1. 沿道路(邊坡)方向攝影(常規方法)
2. 模擬固定監視器多方向與多站之交會攝影
3. 邊坡若高度太高可考慮增加 UAV 攝影

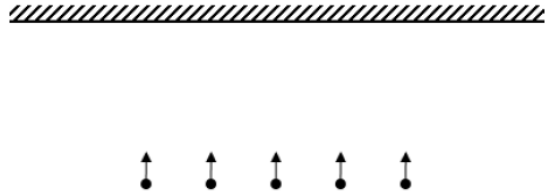
多視立體視覺拍攝方式希望可以對於重建物體進行垂直拍攝，盡量不要站在同一點上進行旋轉攝影，但這樣的思考方式剛好跟本實驗中多機單鏡頭的方式背道而行，依攝影幾何而言，旋轉攝影的確是幾何條件最差的方式，但如果使用多個旋轉攝影，可以把它想像成以寬基線交會攝影的方式，因此本研究中依據此概念，設計多台單機旋轉攝影方式，圖 5.5 為多視立體視覺重建建議拍攝方式。

Facade (Incorrect)



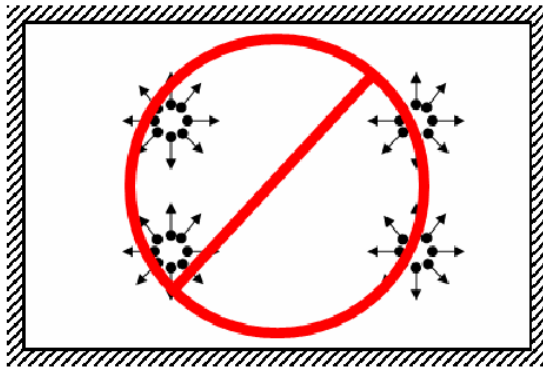
(a)不建議單張旋轉

Facade (Correct)



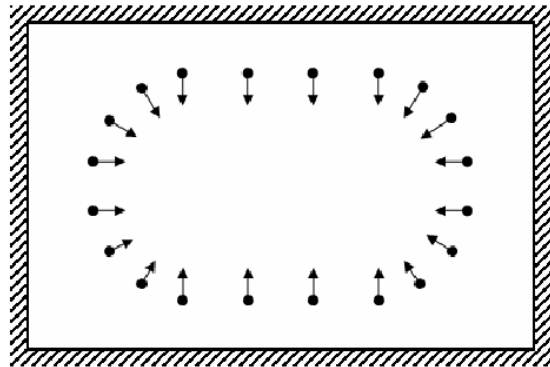
(b)最佳拍攝平型攝影

Interior (Incorrect)



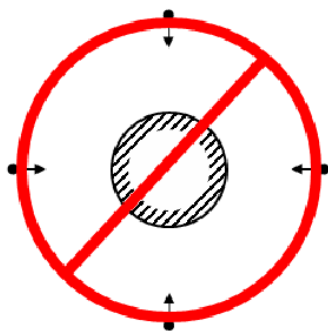
(c)環繞場景不建議旋轉攝影

Interior (Correct)



(d)環繞旋轉攝影

Isolated Object (Incorrect)



(e)單一物體建模覆蓋率要大

Isolated Object (Correct)

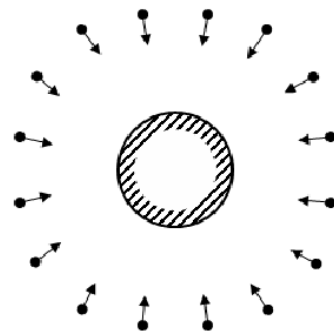
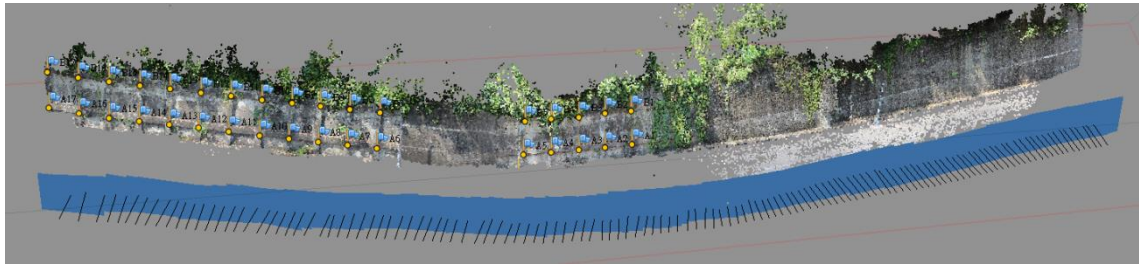
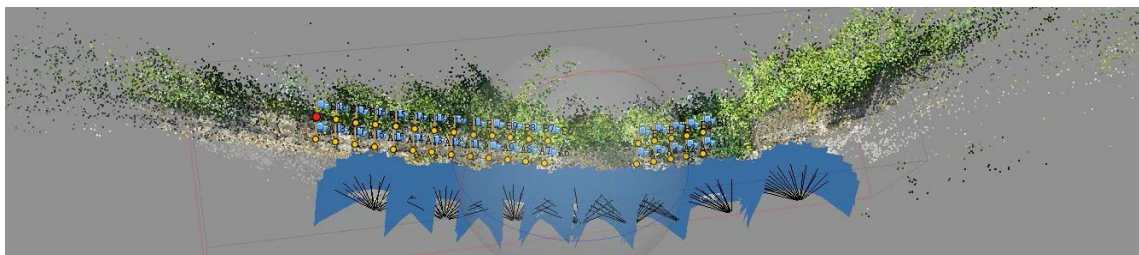


圖 5.5 多視立體視覺建議拍攝方式

上述為標準拍攝方式，平行攝影方式為多視立體視覺重建中，最佳之拍攝方式，本研究將針對以上所述，首先利用平行攝影方式進行，另外透過上述所提出多站旋轉攝影方式，達到固定站監測目的，實驗拍攝如下圖 5.6 所示。



(a)沿道路(邊坡)方向攝影



(b)模擬固定監視器多方向與多站之交會攝影

圖 5.6 實驗拍攝方式

5.1.5 相機率定

相機率定方式，本研究中採用現場自率定方式，首先針對拍攝距離開啟自動對焦，並讓相機進行對焦動作，之後關閉對焦功能，使本次拍攝焦距固定，利用這樣的方式達到單次拍攝定焦之目的。自率定可於拍攝影像序列時一並進行相機率定，如下圖 5.7 所示，於固定焦距之後，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。

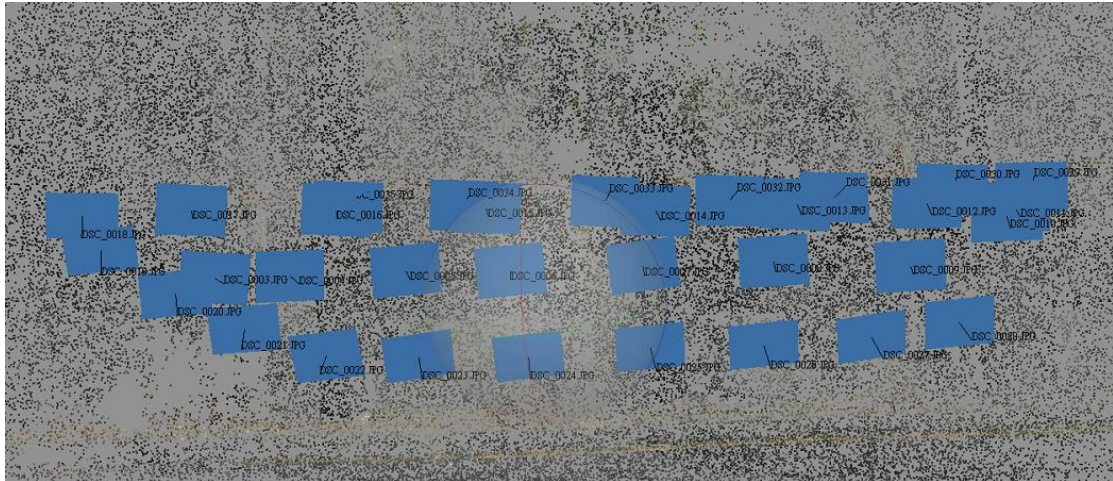


圖 5.7 利用固定焦距大量重疊方式進行相機率定

另外關於攝影幾何問題，本研究中另外提出利用固定站，旋轉攝影方式進行拍攝（圖 5.8），該方式於攝影幾何上非常弱，因此如果利用此方式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，因此建議如果利用旋轉攝影時，必須先利用上述方式，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。

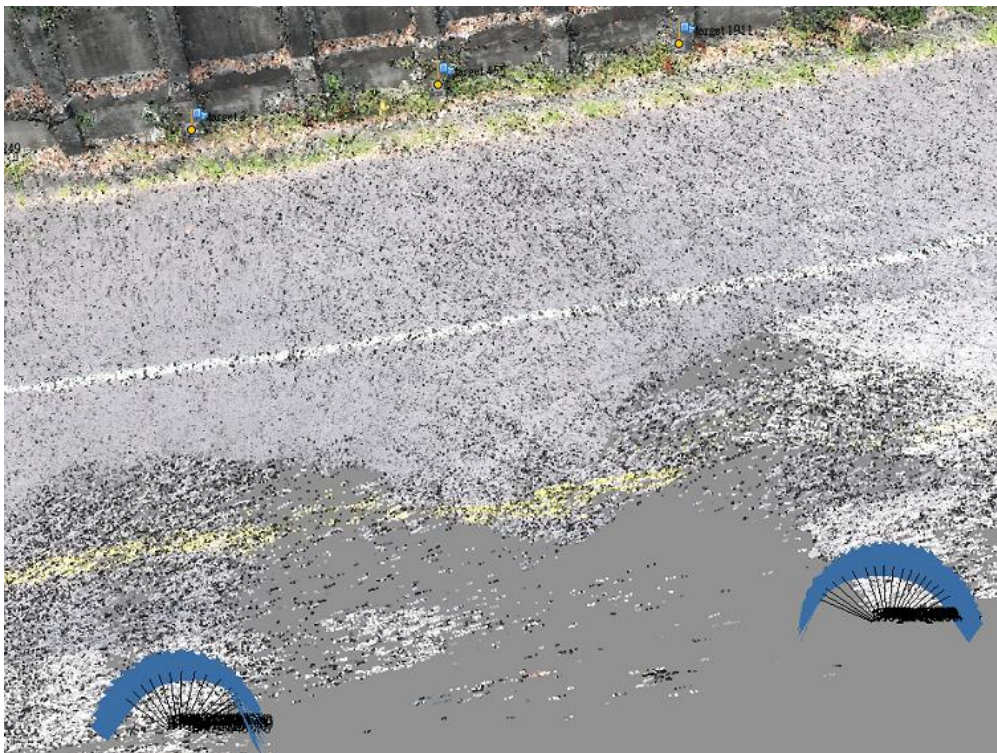


圖 5.8 旋轉攝影示意圖

相關率定參數如下表 5-2 所示，本實驗中使用之相機與焦距每次都會進行自率定動作，因此每次相機率定參數均不同，以下為其中一台相機所率定之報告。

表5-2 相機率定參數

Australis Bundle Adjustment Results: Camera Parameters					
12 November, 2014 15:50:27					
Project: C:\Australis\Project 1. aus					
Adjustment: Free-Network					
Number of Points: 1000					
Number of Images: 10					
RMS of Image coords: 1.00 (um)					
Results for Camera 1 NIKON_D2Xs Lens					
Sensor Size		Pixel Size (mm)			
H	4288	0.00840516			
V	2848	0.00840516			
Camera Variable	Initial Value	Total Adjustment	Final Value	Initial Std. Error	Final Std. Error
C	27.2487	0.00000	27.2487	1.0e+003	1.000e-003 (mm)
XP	0.2305	0.00000	0.2305	1.0e+003	1.000e-003 (mm)
YP	0.0990	0.00000	0.0990	1.0e+003	1.000e-003 (mm)
K1	1.39086e-004	0.000e-000	1.39086e-004	1.0e+003	1.000e-003
K2	-1.10181e-007	0.000e-000	-1.10181e-007	1.0e+003	1.000e-003
K3	1.25145e-011	0.000e-000	1.25145e-011	1.0e+003	1.000e-003
P1	-1.90047e-005	0.000e-000	-1.90047e-005	1.0e+003	1.000e-003
P2	-4.59663e-006	0.000e-000	-4.59663e-006	1.0e+003	1.000e-003
B1	-5.08288e-003	0.000e-000	-5.08288e-003	1.0e+003	1.000e-003
B2	-3.49100e-004	0.000e-000	-3.49100e-004	1.0e+003	1.000e-003
Maximum Observational Radial Distance Encountered:				1.000 mm	

5.1.6 編碼標

編碼標在本實驗中，扮演非常重要角色，編碼標可讓近景量測中可以自動進行量測，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(監測)之用途，因此選用適當的編碼標為本實驗中自動化量測之重要依據。

自動量測標的選用大致上可以分為 Hattori 及 Schneider 兩大類，也廣泛應用在現今近景攝影軟體中，如圖 5.9 為 iWitness 使用自動律定標，軟體可透過不同顏色之色標進行對位，透過大量量測共軛相點以求取相機率定參數。

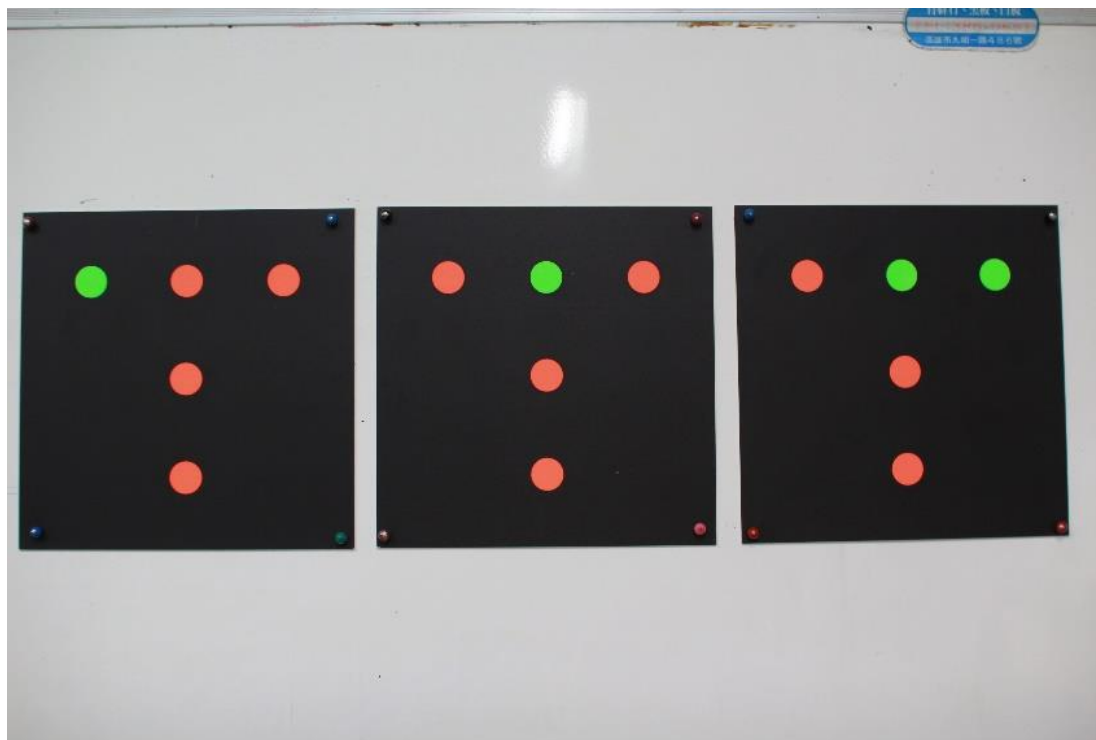
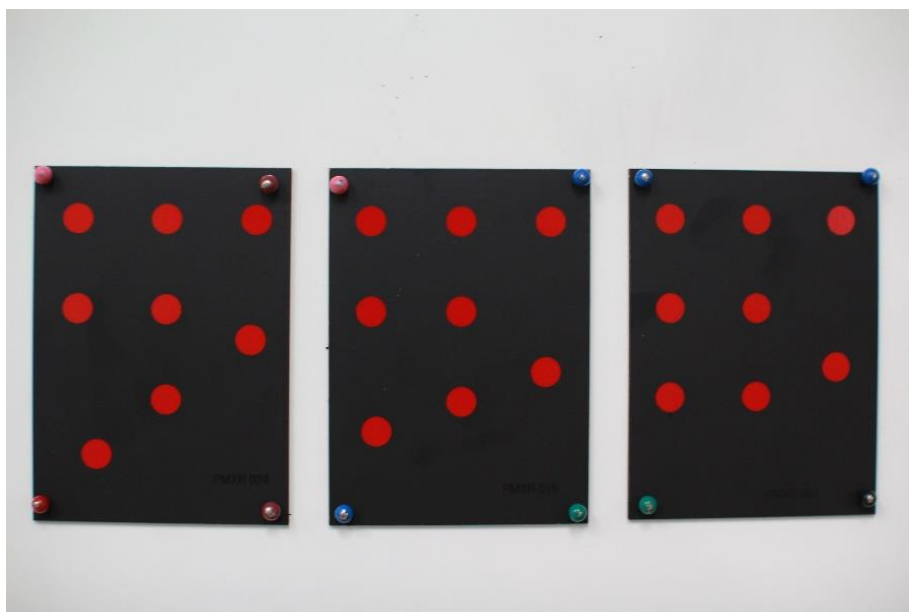
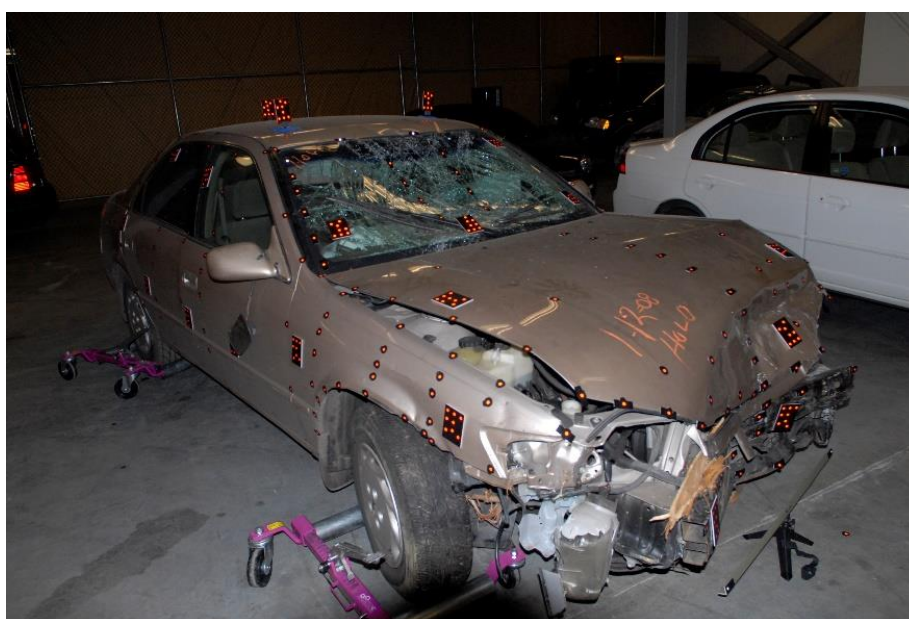


圖 5.9 iWitness 自動率定標

iWitness 軟體中解決自動化量測手段還有編碼標的功能，透過圓形標記及編碼標的方式，偵測並抓取圓形標記中心，再透過編碼標進行對位，已完成自動近景量測。如下圖 5.10(a)所示。iWitness 利用 Hattori 編碼標可自動識別拍攝區域及對位，圖 5.10(b)為應用範例，用於車禍車損量測上應用。



(a)iWitness 自動量測標



(b)iWitness 自動量測標應用

圖 5.10 iWitness 自動量測標應用

工業精密量測近景攝影測量軟體 V-STAR 系統一樣採用 Hattori 編碼標進行自動量測自動量測標如圖 5.11 所示。

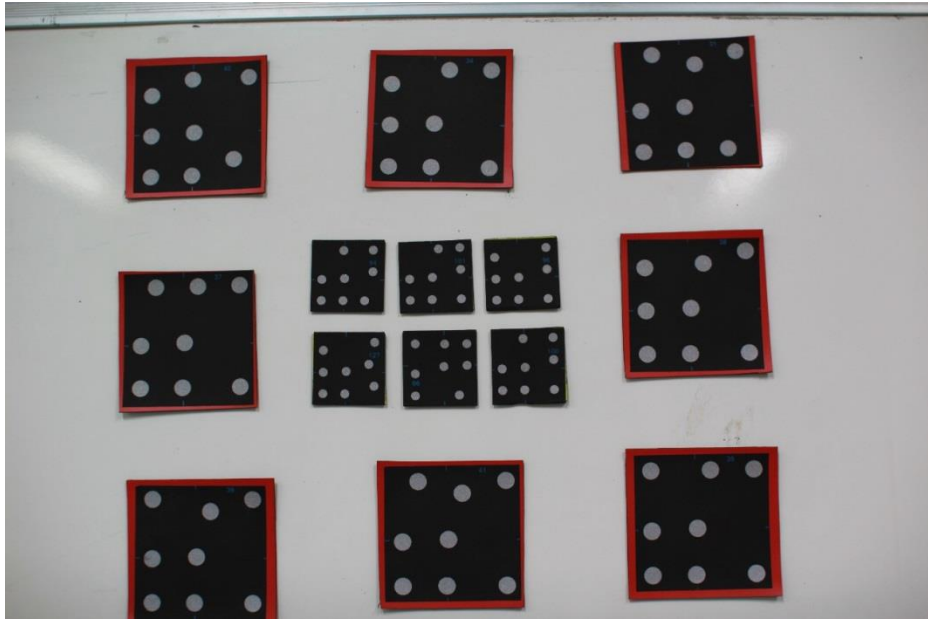


圖 5.11 V-STAR 精密工業近景量測標

這些編碼標誌通常用來標註識別整個場景，主要量測還是透過貼附在量測區域之圓形標，如圖 5.12 所示。因此該方式比較適用於小範圍，且自動辨識標為 V-STAR 中消耗性耗材，無法自行列印，因此用於山坡地監測上，因拍攝距離關係，需要可以自行列印，放大編碼標，因此此類編碼標較不適宜用於山坡地監測上使用。



圖 5.12 V-STAR 精密工業近景量測系統圓形標

因此利用 Schneider 編碼標的方式為本研究中採用方式，Schneider 編碼標可自行列印，因此針對拍攝距離遠近，可自行產製配合本次自動量測使用之大小。本研究採用 12bit 方式編碼，編碼標如圖 5.13 所示。為配合拍攝距離，本研究首先嘗試拍攝標型大小於自動偵測中可被順利辨識。

模擬拍攝距離可被辨識如下圖 5.14 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。以實驗角度而言，像素大小越大，可被辨識的角度越小，如表 5-3 所示。表中各辨識標大小對應圖 5.14 中之依序圖示。因此拍攝距離越遠，可辨識的角度越大，角度約 60 度左右。

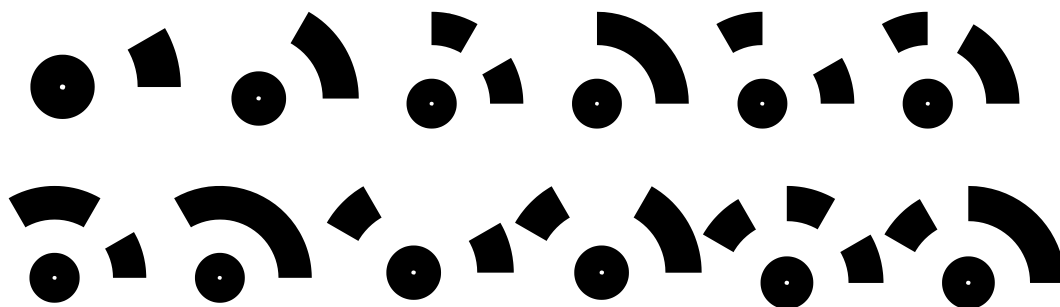


圖 5.13 Schneider 編碼標(節錄)



圖 5.14 編碼標大小與自動量測編碼標比例實驗

表5-3 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
拍攝角度(概略) (無法辨識角度)	45	50	55	60	否	否

依據上述實驗結果，因本實驗預計採用不同相機，不同焦距進行實驗，因此使用之編碼標圓心直徑為 5cm，含編碼區直徑為 17.4cm，印製於 A4 大小紙張中進行後續相關實驗。

5.2 實驗 1

實驗 1 規劃利用不同相機，及上述兩種拍攝方式進行拍攝，採用控制點及檢核點如下圖 5.15 所示。實驗主要驗證近景量測精度及穩定度，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。

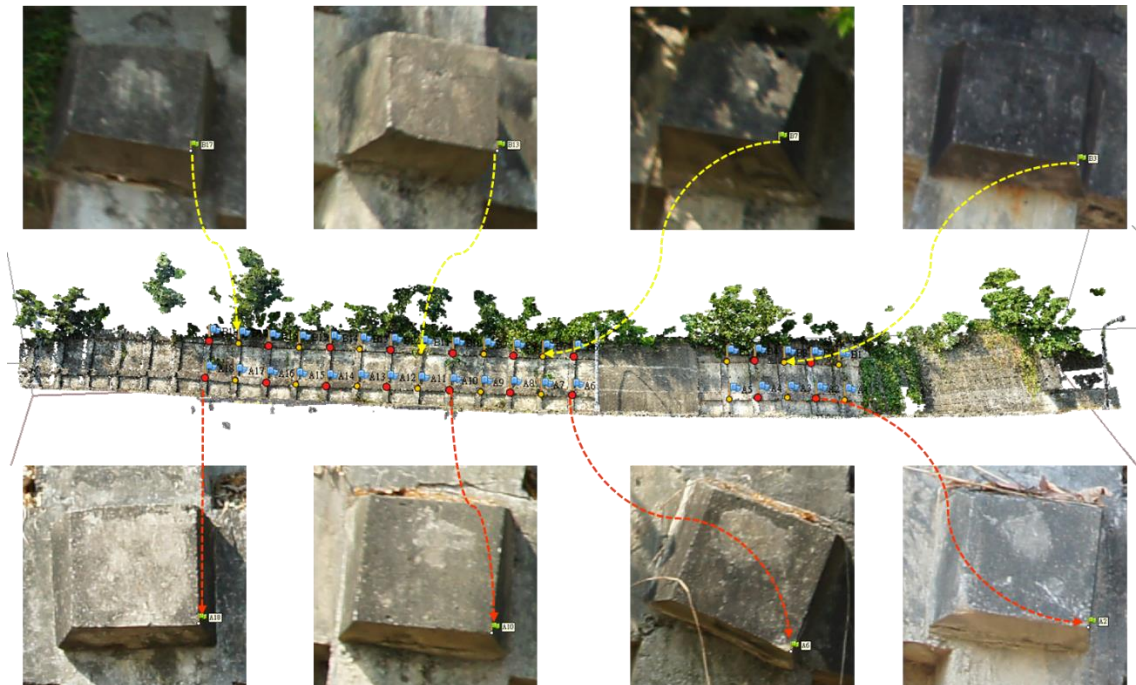


圖 5.15 實驗 1 控制點及檢核點分布圖

5.2.1 實驗組1(10/1)_Canon

實驗組 1 拍攝日期為 103.10.01，使用相機為 Canon。以垂直道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.16 所示。使用拍攝焦距為 30mm 定焦鏡頭，拍攝距離約 14.5 公尺，相關實驗數據如下。

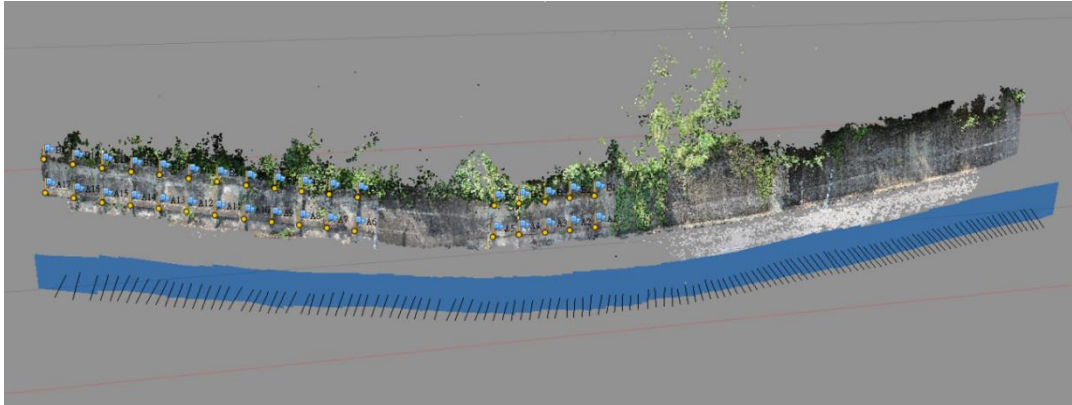


圖 5.16 實驗組 1(10/1)Canon 拍攝成果圖

控制點部分實驗結果如表 5-4 所示，檢核點實驗結果如表 5-5 所示。控制點及檢核點均方根誤差(RMSE)如表 5-6 所示，本實驗組平均像元大小為 2.05cm，計算以像素之 RMS 為 0.42 像素。

表5-4 實驗組1(10/1)Canon控制點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A1	13.639	51.166	-1.043	0.029635	0.024505	0.007303	0.014980	13.614495	51.173303	-1.057980
A3	13.812	46.126	-0.549					13.812000	46.126000	-0.549000
A5	13.622	41.149	-0.307	0.028055	0.018441	0.018061	0.010991	13.640441	41.130939	-0.317991
A7	10.126	26.621	1.064	0.014911	0.013979	0.004508	0.002568	10.112021	26.616492	1.066568
A9	8.561	22.041	1.573	0.019304	0.008306	0.016903	0.004235	8.569306	22.024097	1.577235
A11	7.047	17.286	2.186	0.005661	0.002380	0.001149	0.005006	7.044620	17.284851	2.191006
A13	5.386	12.626	2.678	0.008112	0.005502	0.005939	0.000507	5.380498	12.631939	2.677493
A15	3.687	7.944	3.133	0.012425	0.009403	0.007802	0.002257	3.696403	7.951802	3.130743
A17	1.88	3.279	3.798	0.015708	0.007401	0.002332	0.013658	1.872599	3.281332	3.784342
B1	12.712	51.263	1.851	0.020522	0.007101	0.018300	0.005988	12.704899	51.281300	1.856988
B3	13.064	46.293	2.31	0.007302	0.004672	0.004711	0.003049	13.068672	46.288289	2.313049
B5	13.098	41.354	2.7	0.013147	0.012667	0.003044	0.001769	13.110667	41.350956	2.701769
B7	9.385	27.177	4.096	0.015190	0.011848	0.001639	0.009363	9.396848	27.175361	4.105363
B9	7.851	22.625	4.557	0.010122	0.001498	0.004623	0.008879	7.852498	22.620377	4.565879
B11	6.308	17.836	5.1	0.010933	0.006113	0.004091	0.008089	6.301887	17.840091	5.108089
B13	4.732	13.115	5.67	0.008983	0.006475	0.003616	0.005069	4.725525	13.118616	5.675069
B15	2.992	8.415	6.149	0.014685	0.010768	0.007086	0.007034	3.002768	8.422086	6.141966
B17	1.249	3.725	6.82	0.009640	0.008503	0.002194	0.003977	1.240497	3.722806	6.816023

表5-5 實驗組1(10/1)Canon檢核點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A2	13.795	48.55	-0.778	0.018260	0.011919	0.000350	0.013829	13.783081	48.549650	-0.791829
A4	13.765	43.587	-0.37	0.013218	0.000332	0.009941	0.008706	13.765332	43.577059	-0.378706
A6	10.913	28.978	0.837	0.012330	0.012188	0.001819	0.000414	10.900812	28.976181	0.837414
A8	9.305	24.328	1.336	0.016529	0.012359	0.010719	0.002360	9.292641	24.317281	1.338360
A10	7.825	19.688	1.868	0.012650	0.000135	0.011357	0.005570	7.824865	19.676643	1.873570
A12	6.218	14.902	2.454	0.009009	0.008422	0.003187	0.000271	6.209578	14.905187	2.454271
A14	4.551	10.243	2.875	0.013901	0.012844	0.005317	0.000013	4.563844	10.248317	2.875013
A16	2.788	5.625	3.429	0.017192	0.011999	0.008761	0.008650	2.799999	5.633761	3.420350
A18	1.014	0.907	4.165							
B2	12.883	48.738	2.126	0.020137	0.018264	0.005949	0.006043	12.901264	48.732051	2.132043
B4	13.12	43.737	2.61	0.007471	0.006889	0.002890	0.000111	13.113111	43.739890	2.609889
B6	10.234	29.529	3.886	0.016310	0.015268	0.003440	0.004589	10.249268	29.525560	3.890589
B8	8.606	24.882	4.293	0.012215	0.000357	0.001641	0.012099	8.605643	24.880359	4.305099
B10	7.126	20.269	4.81	0.009116	0.003413	0.005771	0.006177	7.129413	20.263229	4.816177
B12	5.573	15.502	5.384	0.009255	0.006284	0.004241	0.005309	5.566716	15.506241	5.389309
B14	3.853	10.816	5.921	0.024710	0.024305	0.004365	0.000901	3.877305	10.820365	5.920099
B16	2.145	6.062	6.435	0.016646	0.014379	0.006095	0.005762	2.159379	6.068095	6.429238
B18	0.333	1.406	7.148							

表5-6 實驗組1(10/1)Canon 控制點及檢核點RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.02450	0.018	0.015	0.03	0.013	0.011	0.014	0.025
Min Dx	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00150	0.001	5E-04	0.006	1E-04	4E-04	1E-05	0.007
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV
0.00203	0.001	1E-03	0.004	0.002	6E-04	7E-04	0.004
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.1092	0.009	0.008	0.009	0.012	0.006	0.007	0.009
平均 Pixel Size(cm) :				2.05			
RMS(Pixel)				0.42			

5.2.2 實驗組2(10/1)_Nikon

實驗組 2 拍攝日期為 103.10.01，使用相機為 Nikon。以垂直道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.17 所示。使用拍攝焦距為 17mm 定焦鏡，拍攝距離約 4.7 公尺，相關實驗數據如下。

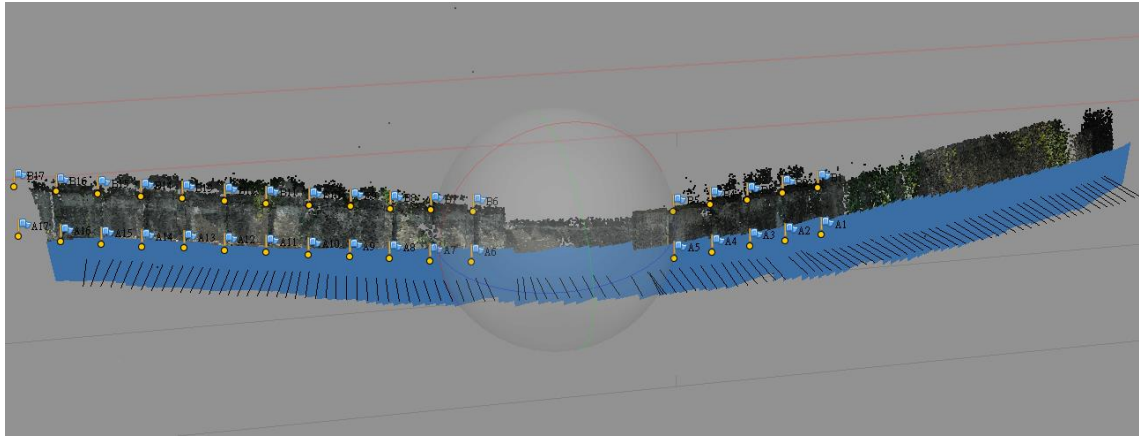


圖 5.17 實驗組 2(10/1)Nokon 拍攝成果圖

控制點部分實驗結果如表 5-7 所示，檢核點實驗結果如表 5-8 所示。控制點及檢核點均方根誤差(RMSE)如表 5-9 所示，本實驗組平均像素大小為 1.52cm，計算以像素之 RMS 為 0.47 像素。

表5-7 實驗組2(10/1)Nikon控制點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A1	13.639	51.166	-1.043	0.011327	0.002595	0.002143	0.010815	13.641595	51.168143	-1.053815
A3	13.812	46.126	-0.549							
A5	13.622	41.149	-0.307	0.007608	0.003381	0.005321	0.004259	13.625381	41.143679	-0.311259
A7	10.126	26.621	1.064	0.010569	0.000465	0.008833	0.005785	10.125535	26.629833	1.069785
A9	8.561	22.041	1.573	0.005858	0.005256	0.001281	0.002248	8.566256	22.042281	1.575248
A11	7.047	17.286	2.186	0.007763	0.000546	0.005128	0.005802	7.047546	17.291128	2.191802
A13	5.386	12.626	2.678	0.010149	0.005922	0.006638	0.004886	5.380078	12.632638	2.673114
A15	3.687	7.944	3.133	0.017263	0.015018	0.001218	0.008426	3.671982	7.945218	3.124574
A17	1.88	3.279	3.798							
B1	12.712	51.263	1.851	0.015234	0.015041	0.001202	0.002098	12.696959	51.264202	1.853098
B3	13.064	46.293	2.31	0.007823	0.003859	0.005870	0.003442	13.067859	46.287130	2.306558
B5	13.098	41.354	2.7	0.006049	0.000714	0.005162	0.003072	13.097286	41.348838	2.703072
B7	9.385	27.177	4.096	0.014016	0.013288	0.000666	0.004409	9.398288	27.176334	4.100409
B9	7.851	22.625	4.557	0.012981	0.004472	0.006752	0.010145	7.846528	22.631752	4.567145
B11	6.308	17.836	5.1	0.007920	0.006162	0.000597	0.004939	6.314162	17.836597	5.104939
B13	4.732	13.115	5.67	0.006907	0.001754	0.004534	0.004906	4.733754	13.110466	5.674906
B15	2.992	8.415	6.149	0.012000	0.005058	0.008034	0.007339	2.997058	8.406966	6.141661
B17	1.249	3.725	6.82	0.006832	0.003059	0.005311	0.003019	1.245941	3.719689	6.816981

表5-8 實驗組2(10/1)Nikon檢核點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A2	13.795	48.55	-0.778	0.010061	0.004307	0.000773	0.009060	13.790693	48.549227	-0.787060
A4	13.765	43.587	-0.37	0.007373	0.003754	0.002255	0.005932	13.768754	43.584745	-0.375932
A6	10.913	28.978	0.837	0.010411	0.009023	0.004410	0.002744	10.922023	28.982410	0.839744
A8	9.305	24.328	1.336	0.005127	0.000022	0.003963	0.003253	9.305022	24.331963	1.339253
A10	7.825	19.688	1.868	0.003472	0.000038	0.002911	0.001892	7.825038	19.690911	1.869892
A12	6.218	14.902	2.454	0.011186	0.006481	0.008324	0.003719	6.211519	14.910324	2.450281
A14	4.551	10.243	2.875	0.011093	0.006474	0.004227	0.007954	4.544526	10.247227	2.867046
A16	2.788	5.625	3.429	0.024705	0.018920	0.004268	0.015302	2.806920	5.629268	3.413698
A18	1.014	0.907	4.165							
B2	12.883	48.738	2.126	0.016037	0.003611	0.012619	0.009214	12.886611	48.725381	2.135214
B4	13.12	43.737	2.61	0.005699	0.005424	0.001202	0.001269	13.114576	43.735798	2.608731
B6	10.234	29.529	3.886	0.015450	0.014947	0.001327	0.003680	10.248947	29.530327	3.889680
B8	8.606	24.882	4.293	0.008534	0.003486	0.002573	0.007352	8.609486	24.884573	4.300352
B10	7.126	20.269	4.81	0.006548	0.005707	0.001094	0.003018	7.131707	20.270094	4.813018
B12	5.573	15.502	5.384	0.011194	0.009098	0.000996	0.006445	5.563902	15.502996	5.390445
B14	3.853	10.816	5.921	0.018173	0.017016	0.005458	0.003303	3.870016	10.810542	5.917697
B16	2.145	6.062	6.435	0.015233	0.009717	0.009507	0.006874	2.154717	6.052493	6.428126
B18	0.333	1.406	7.148							

表5-9 實驗組2(10/1)Nikon 控制點及檢核點RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.015	0.009	0.011	0.017	0.013	0.013	0.015	0.025
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
5E-04	6E-04	0.002	0.006	2E-05	8E-04	0.001	0.003
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$
8E-04	4E-04	6E-04	0.002	0.001	5E-04	7E-04	0.002
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.007	0.005	0.006	0.006	0.009	0.005	0.007	0.007
平均像素大小(cm)：				1.52			
RMS(Pixel)				0.47			

5.2.3 實驗組3(10/1)_Sony

實驗組 3 拍攝日期為 103.10.01，使用相機為 Sony。以垂直道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.18 所示。使用拍攝焦距為 30mm 可變焦距鏡頭，拍攝距離約 9.6 公尺，相關實驗數據如下。

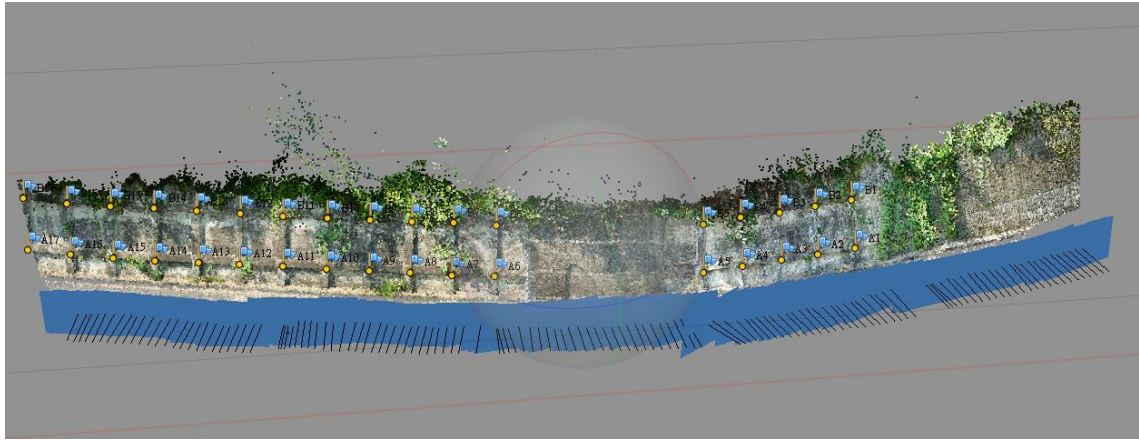


圖 5.18 實驗組 3(10/1)Sony 拍攝成果圖

控制點部分實驗結果如表 5-10 所示，檢核點實驗結果如表 5-11 所示。控制點及檢核點均方根誤差(RMSE)如表 5-12 所示，本實驗組平均像素大小為 2.36 公分，計算以像素之 RMS 為 0.37 像素。

表5-10 實驗組3(10/1)Sony控制點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A1	13.639	51.166	-1.043	0.022032	0.019714	0.007205	0.006699	13.619286	51.158795	-1.049699
A3	13.812	46.126	-0.549	0.010368	0.009496	0.004140	0.000433	13.802504	46.12186	-0.548567
A5	13.622	41.149	-0.307	0.014646	0.012739	0.005985	0.004049	13.634739	41.143015	-0.311049
A7	10.126	26.621	1.064	0.013487	0.010729	0.008092	0.001140	10.136729	26.629092	1.06514
A9	8.561	22.041	1.573	0.008007	0.007775	0.001883	0.000350	8.568775	22.042883	1.57265
A11	7.047	17.286	2.186	0.004533	0.002710	0.001759	0.003180	7.04971	17.287759	2.18918
A13	5.386	12.626	2.678	0.003873	0.000817	0.002228	0.003061	5.385183	12.623772	2.674939
A15	3.687	7.944	3.133	0.021466	0.019680	0.005654	0.006445	3.66732	7.938346	3.126555
A17	1.88	3.279	3.798							
B1	12.712	51.263	1.851	0.017189	0.017100	0.000555	0.001660	12.6949	51.262445	1.85266
B3	13.064	46.293	2.31	0.003136	0.002149	0.001568	0.001660	13.061851	46.291432	2.31166
B5	13.098	41.354	2.7	0.010243	0.009723	0.000976	0.003072	13.107723	41.354976	2.703072
B7	9.385	27.177	4.096	0.028043	0.026909	0.007568	0.002244	9.411909	27.184568	4.098244
B9	7.851	22.625	4.557	0.021406	0.018688	0.009551	0.004215	7.869688	22.634551	4.561215
B11	6.308	17.836	5.1	0.013093	0.012324	0.002873	0.003359	6.320324	17.838873	5.103359
B13	4.732	13.115	5.67	0.004544	0.002923	0.000069	0.003478	4.729077	13.115069	5.673478
B15	2.992	8.415	6.149	0.019764	0.019125	0.002251	0.004449	2.972875	8.412749	6.153449
B17	1.249	3.725	6.82	0.048630	0.047875	0.008000	0.002980	1.201125	3.717	6.82298

表5-11 實驗組3(10/1)Sony檢核點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A2	13.795	48.55	-0.778	0.007378	0.000994	0.004741	0.005565	13.794006	48.545259	-0.783565
A4	13.765	43.587	-0.37	0.015830	0.015118	0.003833	0.002710	13.780118	43.583167	-0.372710
A6	10.913	28.978	0.837	0.018369	0.017966	0.003728	0.000854	10.930966	28.981728	0.837854
A8	9.305	24.328	1.336	0.014449	0.013247	0.005765	0.000248	9.318247	24.333765	1.335752
A10	7.825	19.688	1.868	0.001479	0.000774	0.001222	0.000310	7.825774	19.689222	1.868310
A12	6.218	14.902	2.454	0.002766	0.000703	0.001285	0.002346	6.217297	14.900715	2.451654
A14	4.551	10.243	2.875	0.007762	0.005527	0.002704	0.004731	4.545473	10.240296	2.870269
A16	2.788	5.625	3.429	0.010017	0.001678	0.004983	0.008526	2.786322	5.620017	3.420474
A18	1.014	0.907	4.165							
B2	12.883	48.738	2.126	0.009217	0.005616	0.004593	0.005685	12.888616	48.733407	2.131685
B4	13.12	43.737	2.61	0.006497	0.006142	0.001833	0.001060	13.113858	43.735167	2.608940
B6	10.234	29.529	3.886	0.040965	0.040409	0.000166	0.006724	10.274409	29.528834	3.879276
B8	8.606	24.882	4.293	0.025356	0.023340	0.008788	0.004576	8.629340	24.890788	4.297576
B10	7.126	20.269	4.81	0.013176	0.009679	0.007617	0.004679	7.135679	20.276617	4.814679
B12	5.573	15.502	5.384	0.006923	0.002397	0.002572	0.005964	5.570603	15.504572	5.389964
B14	3.853	10.816	5.921	0.003861	0.003142	0.001966	0.001081	3.849858	10.817966	5.922081
B16	2.145	6.062	6.435	0.006755	0.002578	0.005444	0.003057	2.147578	6.056556	6.431943
B18	0.333	1.406	7.148							

表5-12 實驗組3(10/1)Sony 控制點及檢核點RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.048	0.01	0.007	0.049	0.048	0.009	0.009	0.041
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
8E-04	7E-05	4E-04	0.003	7E-04	2E-04	3E-04	0.001
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV
0.006	4E-04	2E-04	0.006	0.003	3E-04	3E-04	0.004
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.018	0.005	0.004	0.011	0.014	0.004	0.004	0.009
平均 Pixel Size(cm) :				2.36			
RMS(Pixel)				0.37			

5.2.4 實驗組4(10/9)_Canon

實驗組 4 拍攝日期為 103.10.09，使用相機為 Canon。以垂直道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.19 所示。使用拍攝焦距為 30mm 定焦距鏡頭，拍攝距離約 14.5 公尺，相關實驗數據如下。

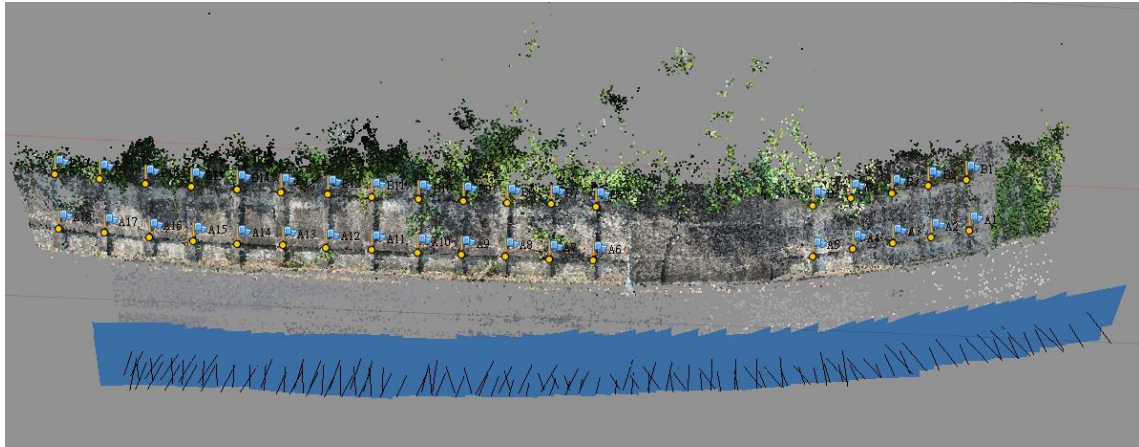


圖 5.19 實驗組 4(10/9)Canon 拍攝成果圖

控制點部分實驗結果如表 5-13 所示，檢核點實驗結果如表 5-14 所示。控制點及檢核點均方根誤差(RMSE)如表 5-15 所示，本實驗組平均像素大小為 2.407 公分，計算以像素之 RMS 為 0.50 像素。

表 5-13 實驗組4(10/9)Canon控制點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A1	13.639	51.166	-1.043	0.017796	0.003574	0.017373	0.001447	13.642574	51.183373	-1.044447
A3	13.812	46.126	-0.549	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.812	46.126	-0.549
A5	13.622	41.149	-0.307	0.007322	0.005263	0.001996	0.004683	13.627263	41.150996	-0.311683
A7	10.126	26.621	1.064	0.011117	0.008381	0.007278	0.000606	10.117619	26.613722	1.064606
A9	8.561	22.041	1.573	0.018465	0.000275	0.018421	0.001247	8.560725	22.022579	1.571753
A11	7.047	17.286	2.186	0.013289	0.002404	0.011141	0.006834	7.044596	17.274859	2.192834
A13	5.386	12.626	2.678	0.007401	0.002146	0.005805	0.004059	5.388146	12.620195	2.682059
A15	3.687	7.944	3.133	0.013195	0.002888	0.011226	0.006305	3.684112	7.955226	3.139305
A17	1.88	3.279	3.798	0.034011	0.011083	0.032093	0.001984	1.891083	3.311093	3.799984
B1	12.712	51.263	1.851	0.017446	0.001096	0.017236	0.002469	12.713096	51.280236	1.853469
B3	13.064	46.293	2.31	0.024988	0.024277	0.004824	0.003431	13.039723	46.297824	2.313431
B5	13.098	41.354	2.7	0.007674	0.005756	0.005070	0.000242	13.103756	41.34893	2.699758
B7	9.385	27.177	4.096	0.017011	0.007605	0.014906	0.003060	9.392605	27.162094	4.09294
B9	7.851	22.625	4.557	0.019389	0.005622	0.018279	0.003196	7.856622	22.606721	4.553804
B11	6.308	17.836	5.1	0.019089	0.007339	0.017615	0.000481	6.315339	17.818385	5.099519
B13	4.732	13.115	5.67	0.012000	0.006188	0.009804	0.003096	4.738188	13.105196	5.666904
B15	2.992	8.415	6.149	0.007818	0.002699	0.004230	0.005995	2.994699	8.41923	6.143005
B17	1.249	3.725	6.82	0.028229	0.020441	0.019354	0.002110	1.228559	3.744354	6.81789

表5-14 實驗組4(10/9)Canon檢核點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A2	13.795	48.55	-0.778	0.022627	0.005273	0.021702	0.003632	13.789727	48.571702	-0.781632
A4	13.765	43.587	-0.37	0.014824	0.012219	0.007115	0.004452	13.752781	43.594115	-0.374452
A6	10.913	28.978	0.837	0.011300	0.001523	0.010602	0.003600	10.914523	28.967398	0.833400
A8	9.305	24.328	1.336	0.013576	0.002002	0.013171	0.002613	9.302998	24.314829	1.333387
A10	7.825	19.688	1.868	0.017159	0.004978	0.016405	0.000724	7.820022	19.671595	1.868724
A12	6.218	14.902	2.454	0.010940	0.002869	0.009609	0.004373	6.215131	14.892391	2.458373
A14	4.551	10.243	2.875	0.006592	0.001686	0.004092	0.004886	4.549314	10.247092	2.879886
A16	2.788	5.625	3.429	0.020769	0.001144	0.020440	0.003500	2.789144	5.645440	3.432500
A18	1.014	0.907	4.165	0.048857	0.011989	0.047363	0.000076	1.025989	0.954363	4.164924
B2	12.883	48.738	2.126	0.013717	0.008784	0.004827	0.009365	12.874216	48.742827	2.135365
B4	13.12	43.737	2.61	0.010165	0.001391	0.003688	0.009370	13.118609	43.733312	2.600630
B6	10.234	29.529	3.886	0.027406	0.018601	0.019074	0.006425	10.252601	29.509926	3.879575
B8	8.606	24.882	4.293	0.019771	0.008432	0.017704	0.002523	8.614432	24.864296	4.290477
B10	7.126	20.269	4.81	0.017640	0.003671	0.016872	0.003609	7.129671	20.252128	4.806391
B12	5.573	15.502	5.384	0.016904	0.008933	0.014201	0.002066	5.564067	15.487799	5.381934
B14	3.853	10.816	5.921	0.010329	0.008325	0.000918	0.006045	3.861325	10.815082	5.914955
B16	2.145	6.062	6.435	0.014394	0.003138	0.013593	0.003544	2.141862	6.075593	6.431456
B18	0.333	1.406	7.148	0.038906	0.017555	0.032905	0.011078	0.350555	1.438905	7.136922

表5-15 實驗組4(10/9)Canon 控制點及檢核點RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.024	0.032	0.007	0.034	0.02	0.047	0.011	0.049
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0	0	0	0	0.001	9E-04	8E-05	0.007
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$
0.001	0.004	2E-04	0.005	0.001	0.006	5E-04	0.008
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.009	0.014	0.004	0.01	0.009	0.019	0.005	0.012
平均 Pixel Size(cm) :				2.407932011			
RMS(Pixel)				0.5			

5.2.5 實驗組5(10/9)_Sony

實驗組 5 拍攝日期為 103.10.09，使用相機為 Sony。以垂直道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.20 所示。使用拍攝焦距為 35mm 定焦鏡，拍攝距離約 14.5 公尺，相關實驗數據如下。

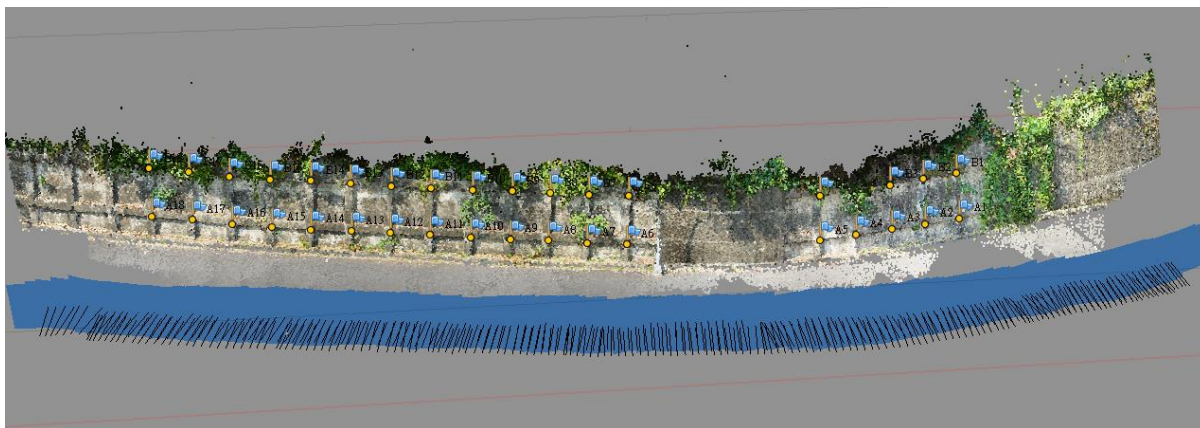


圖 5.20 實驗組 5(10/9)Sony 拍攝成果圖

控制點部分實驗結果如表 5-16 所示，檢核點實驗結果如表 5-17 所示。控制點及檢核點均方根誤差(RMSE)如表 5-18 所示，本實驗組平均像素大小為 3.88 公分，計算以像素之 RMS 為 0.40 像素。

表5-16 實驗組5(10/9)Sony控制點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A1	13.639	51.166	-1.043	0.037214	0.027659	0.024839	0.001693	13.611341	51.141161	-1.044693
A3	13.812	46.126	-0.549	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.812	46.126	-0.549
A5	13.622	41.149	-0.307	0.005456	0.004693	0.000114	0.002780	13.626693	41.149114	-0.30422
A7	10.126	26.621	1.064	0.031646	0.006558	0.028480	0.012139	10.132558	26.64948	1.076139
A9	8.561	22.041	1.573	0.023522	0.005952	0.021283	0.008056	8.566952	22.062283	1.581056
A11	7.047	17.286	2.186	0.015466	0.003312	0.012944	0.007790	7.050312	17.298944	2.19379
A13	5.386	12.626	2.678	0.004521	0.002307	0.003887	0.000094	5.383693	12.629887	2.677906
A15	3.687	7.944	3.133	0.016846	0.012959	0.008667	0.006382	3.674041	7.935333	3.126618
A17	1.88	3.279	3.798	0.038319	0.026967	0.019314	0.019185	1.853033	3.259686	3.778815
B1	12.712	51.263	1.851	0.029918	0.010464	0.024400	0.013792	12.701536	51.2386	1.837208
B3	13.064	46.293	2.31	0.013598	0.002182	0.005576	0.012209	13.061818	46.287424	2.297791
B5	13.098	41.354	2.7	0.015844	0.014729	0.004290	0.003960	13.112729	41.35829	2.69604
B7	9.385	27.177	4.096	0.036012	0.021491	0.025263	0.014029	9.406491	27.202263	4.110029
B9	7.851	22.625	4.557	0.030523	0.017993	0.020483	0.013724	7.868993	22.645483	4.570724
B11	6.308	17.836	5.1	0.021329	0.018958	0.005853	0.007828	6.326958	17.841853	5.107828
B13	4.732	13.115	5.67	0.012995	0.010828	0.004743	0.005396	4.742828	13.110257	5.675396
B15	2.992	8.415	6.149	0.017171	0.015682	0.006260	0.003119	2.976318	8.40874	6.145881
B17	1.249	3.725	6.82	0.031575	0.006319	0.028790	0.011321	1.242681	3.69621	6.808679

表5-17 實驗組5(10/9)Sony檢核點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A2	13.795	48.55	-0.778	0.026625	0.024292	0.010633	0.002393	13.770708	48.539367	-0.780393
A4	13.765	43.587	-0.37	0.013607	0.013262	0.003033	0.000246	13.751738	43.583967	-0.369754
A6	10.913	28.978	0.837	0.028602	0.009587	0.025566	0.008517	10.922587	29.003566	0.845517
A8	9.305	24.328	1.336	0.026508	0.005524	0.024965	0.006994	9.310524	24.352965	1.342994
A10	7.825	19.688	1.868	0.016528	0.004899	0.014732	0.005670	7.829899	19.702732	1.873670
A12	6.218	14.902	2.454	0.008621	0.007352	0.003332	0.003027	6.225352	14.905332	2.457027
A14	4.551	10.243	2.875	0.009622	0.007093	0.001930	0.006208	4.543907	10.241070	2.868792
A16	2.788	5.625	3.429	0.028326	0.021011	0.011172	0.015366	2.766989	5.613828	3.413634
A18	1.014	0.907	4.165	0.048727	0.034067	0.020693	0.028028	0.979933	0.886307	4.136972
B2	12.883	48.738	2.126	0.025520	0.009036	0.023419	0.004602	12.892036	48.714581	2.130602
B4	13.12	43.737	2.61	0.000000						
B6	10.234	29.529	3.886	0.037481	0.031252	0.019651	0.006477	10.265252	29.548651	3.892477
B8	8.606	24.882	4.293	0.031828	0.015836	0.024273	0.013156	8.621836	24.906273	4.306156
B10	7.126	20.269	4.81	0.022905	0.009485	0.018568	0.009482	7.135485	20.287568	4.819482
B12	5.573	15.502	5.384	0.009441	0.001609	0.007602	0.005363	5.571391	15.509602	5.389363
B14	3.853	10.816	5.921	0.005487	0.000840	0.004807	0.002509	3.853840	10.811193	5.923509
B16	2.145	6.062	6.435	0.028499	0.024287	0.014704	0.002478	2.120713	6.047296	6.432522
B18	0.333	1.406	7.148	0.044254	0.025910	0.033857	0.011864	0.307090	1.372143	7.136136

表5-18 驗組5(10/9)Sony 控制點及檢核點RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.028	0.029	0.019	0.038	0.021	0.034	0.028	0.049
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0	0	0	0	8E-04	0.002	3E-04	0
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$
0.004	0.005	0.002	0.01	0.005	0.006	0.002	0.013
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.014	0.017	0.01	0.014	0.018	0.018	0.01	0.016
平均 Pixel Size(cm) :				3.883495146			
RMS(Pixel)				0.4			

5.2.6 實驗組6(10/9)_Sony

實驗組 6 拍攝日期為 103.10.09，使用相機為 Sony。本實驗模擬於長期監測邊坡情況之下所架設固定攝影站，利用固定攝影站旋轉攝影方式進行邊坡監測，拍攝成果如下圖 5.21 所示。本方法須透過拍攝焦

距自率定方式，因為攝影幾何關係，需事先率定，再將此參數放回 SfM 中計算。使用拍攝焦距為 35 公厘定焦鏡，拍攝距離約 14.5 公尺，相關實驗數據如下。

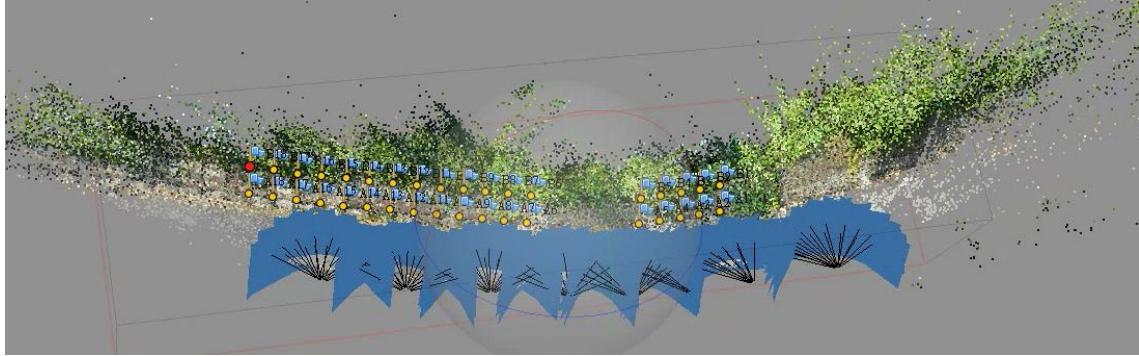


圖 5.21 實驗組 6(10/9)Sony 拍攝成果圖

控制點部分實驗結果如表 5-19 所示，檢核點實驗結果如表 5-20 所示。控制點及檢核點均方根誤差(RMSE)如表 5-21 所示，本實驗組平均像素大小為 1.00 公分，計算以像素之 RMS 為 0.39 像素。

表5-19 實驗組6(10/9)Sony模擬多站旋轉 控制點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A1	13.639	51.166	-1.043	0.011587	0.011305	0.002506	0.000414	13.627695	51.163494	-1.043414
A3	13.812	46.126	-0.549	0.018754	0.014526	0.008527	0.008247	13.797474	46.117473	-0.540753
A5	13.622	41.149	-0.307	0.005575	0.004805	0.002784	0.000493	13.626805	41.146216	-0.306507
A7	10.126	26.621	1.064	0.007891	0.002636	0.004324	0.006051	10.123364	26.616676	1.070051
A9	8.561	22.041	1.573	0.010944	0.008974	0.000861	0.006205	8.569974	22.040139	1.579205
A11	7.047	17.286	2.186	0.010322	0.004184	0.001802	0.009262	7.051184	17.287802	2.195262
A13	5.386	12.626	2.678	0.004583	0.004292	0.001231	0.001034	5.381708	12.624769	2.676966
A15	3.687	7.944	3.133	0.006577	0.002614	0.005980	0.000816	3.684386	7.93802	3.132184
A17	1.88	3.279	3.798	0.015903	0.012954	0.005153	0.007651	1.867046	3.273847	3.790349
B1	12.712	51.263	1.851	0.008905	0.000346	0.006229	0.006355	12.712346	51.269229	1.844645
B3	13.064	46.293	2.31	0.007557	0.004146	0.000742	0.006274	13.068146	46.293742	2.303726
B5	13.098	41.354	2.7	0.004693	0.002490	0.003138	0.002445	13.10049	41.357138	2.697555
B7	9.385	27.177	4.096	0.011337	0.011091	0.002342	0.000193	9.396091	27.179342	4.096193
B9	7.851	22.625	4.557	0.011657	0.009842	0.006241	0.000265	7.860842	22.631241	4.557265
B11	6.308	17.836	5.1	0.012493	0.010842	0.006178	0.000594	6.318842	17.842178	5.100594
B13	4.732	13.115	5.67	0.003856	0.002532	0.001779	0.002300	4.729468	13.116779	5.6723
B15	2.992	8.415	6.149	0.005008	0.003797	0.002233	0.002383	2.988203	8.417233	6.146617
B17	1.249	3.725	6.82	0.006613	0.002088	0.000674	0.006238	1.246912	3.725674	6.813762

表5-20 實驗組6(10/9)Sony模擬多站旋轉 檢核點

Label	X/East	Y/North	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
A2	13.795	48.55	-0.778	0.003311	0.002931	0.001156	0.001018	13.792069	48.551156	-0.776982
A4	13.765	43.587	-0.37	0.007053	0.002829	0.006362	0.001128	13.762171	43.580638	-0.368872
A6	10.913	28.978	0.837	0.007750	0.001656	0.006625	0.003664	10.914656	28.971375	0.840664
A8	9.305	24.328	1.336	0.008357	0.005037	0.003154	0.005875	9.310037	24.324846	1.341875
A10	7.825	19.688	1.868	0.004284	0.002073	0.000221	0.003743	7.827073	19.687779	1.871743
A12	6.218	14.902	2.454	0.004488	0.000247	0.001392	0.004259	6.218247	14.900608	2.458259
A14	4.551	10.243	2.875	0.005139	0.001722	0.004815	0.000514	4.549278	10.238185	2.875514
A16	2.788	5.625	3.429	0.013667	0.011331	0.006210	0.004452	2.776669	5.618790	3.424548
A18	1.014	0.907	4.165	0.013829	0.008436	0.000867	0.010924	1.005564	0.906133	4.154076
B2	12.883	48.738	2.126	0.007413	0.001593	0.004443	0.005716	12.884593	48.742443	2.131716
B4	13.12	43.737	2.61	0.016161	0.014216	0.005793	0.005053	13.105784	43.742793	2.604947
B6	10.234	29.529	3.886	0.022258	0.018554	0.006525	0.010421	10.252554	29.522475	3.875579
B8	8.606	24.882	4.293	0.013887	0.013780	0.000861	0.001490	8.619780	24.882861	4.291510
B10	7.126	20.269	4.81	0.009708	0.005154	0.008188	0.000804	7.131154	20.277188	4.810804
B12	5.573	15.502	5.384	0.006466	0.001151	0.006245	0.001219	5.574151	15.508245	5.385219
B14	3.853	10.816	5.921	0.003902	0.001548	0.003334	0.001310	3.851452	10.819334	5.919690
B16	2.145	6.062	6.435	0.004217	0.003303	0.001451	0.002184	2.141697	6.060549	6.432816
B18	0.333	1.406	7.148	0.017396	0.017161	0.000306	0.002833	0.315839	1.406306	7.145167

表5-21 實驗組6(10/9)Sony模擬多站旋轉 控制點及檢核(RMSE)

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.015	0.009	0.009	0.019	0.011	0.008	0.011	0.022
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
4E-04	7E-04	2E-04	0.004	3E-04	2E-04	5E-04	0.003
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$
0.001	3E-04	4E-04	0.002	0.001	4E-04	4E-04	0.002
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.008	0.004	0.005	0.006	0.009	0.005	0.005	0.004
平均 Pixel Size(cm) :				1.00896861			
RMS(Pixel)				0.39			

5.2.7 實驗分析

以上實驗一共計拍攝 6 組實驗，包含垂直拍攝 5 組，模擬旋轉拍攝 1 組，相關實驗數據證明，多視立體視覺用於近景攝影測量，精度驗證部分，控制點及檢核點精度均可小於 0.5 像素，且實驗多次成果證明多視立體視覺近景量測技術之穩定度非常好，量測精度穩定，對於

監測使用上絕對能夠扮演此任務。而相關數據證明此方法之量測精度以像素而言可達到 0.5 像素以內，因此只要確定拍攝之平均像素大小，將可以決定量測精度，比如拍攝之像素大小為 1 公分，這樣量測精度將可小於 0.5 公厘；拍攝之像素大小為 2 公分，量測精度將可小於 1 公分，依此類推。

圖 5.22 為本次實驗前五次垂直拍攝之拍攝位置，表 5-22 為本次拍攝以像素 為單位之均方根誤差(RMSE)比較表。

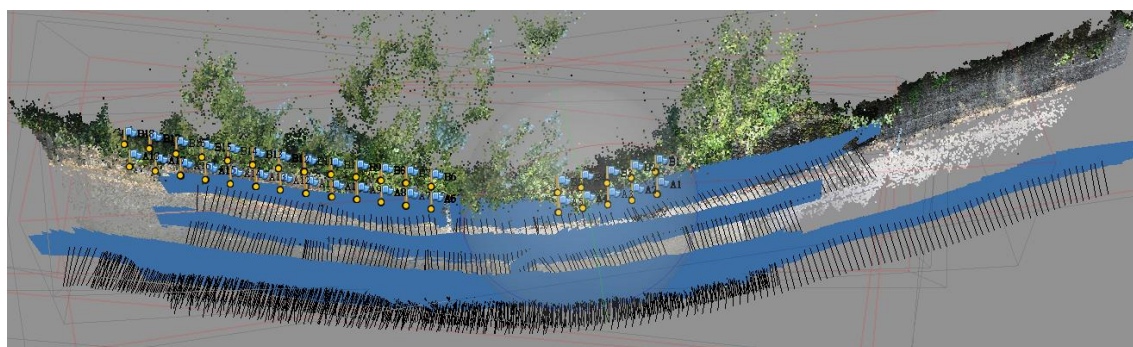


圖 5.22 相關實驗合併拍攝距離

表5-22 Pixel Size與量測精度比較表

編號	相機	拍攝距離 (m)	焦距 (mm)	RMSE (cm)	RMSE (Pixel)	拍攝方式
實驗 1	Canon	14.5	30	2.05	0.42	垂直邊坡水平 拍攝
實驗 2	Nikon	4.7	17	1.52	0.47	
實驗 3	Sony	9.6	30	2.36	0.37	
實驗 4	Canon	14.5	30	2.40	0.50	
實驗 5	Sony	14.5	35	3.88	0.40	
實驗 6	Sony	14.5	35	1.0	0.39	模擬單站旋轉 攝影

5.3 實驗 2

探討道路邊坡滑動自動監測系統而言，實驗 1 透過人工方式進行控制點及檢核點量測工作，其控制點及檢核點精度均可達到監測之用途，實驗 2 主要驗證自動化量測方法，利用自動辨識編碼標，並自動量測控制點及檢核點動作，並進行相關精度驗證。本實驗主要假設設置控制點區域為不易變動區域，再透過控制點(未經真實量測坐標)進行兩期資料比對，作為自動監測之依據使用。

如圖 5.23 所示，控制點資料如表 5-1 所示。紅色為控制點分布位置，黃色為檢核點位置。於控制點及檢核點佈設編碼標誌，編碼標如圖 5.23 所示。

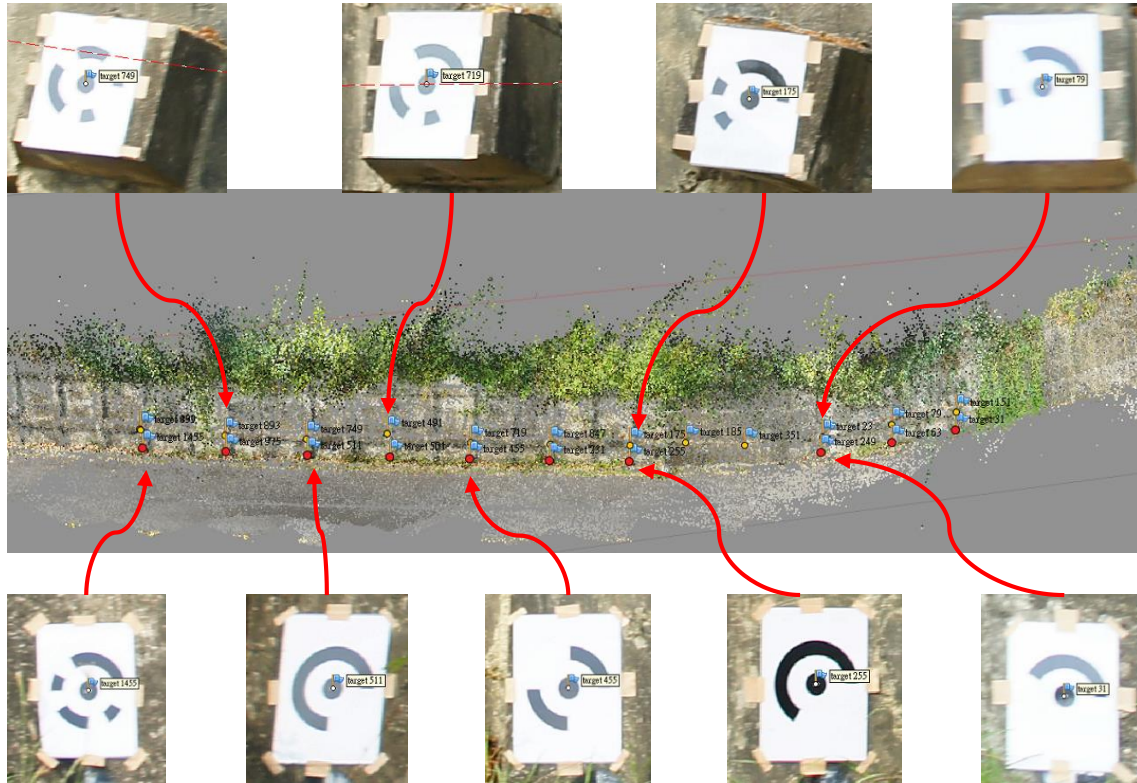
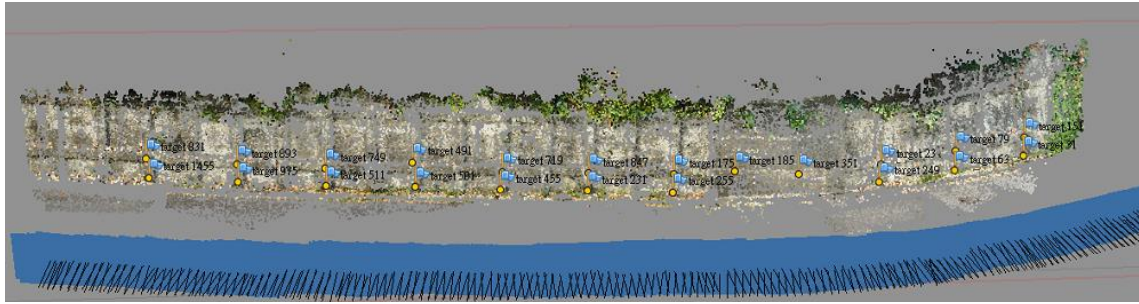


圖 5.23 實驗 2 控制點及檢核點分布

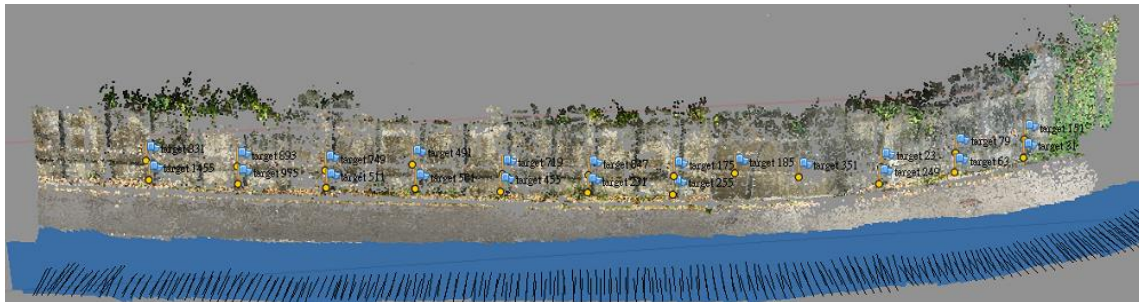
5.3.1 實驗組1(11/6)

實驗組 1 拍攝日期為 103.11.06，使用相機為 Sony。以垂直道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.24 所示，本實驗模擬連續拍攝兩次，主要驗證兩次自動量測於檢核點之精度分析。使用拍攝焦距為 50 公厘定焦鏡頭，拍攝距離約 14.5 公尺，相關實驗數據如下。

實驗組 1 第 1 次拍攝及第 2 次拍攝實驗成果如表 5-23 所示，實驗組 1 兩次拍攝監測點成果如表 5-24 所示。控制點及監測點均方根誤差 (RMSE) 如表 5-25 所示，第 1 次拍攝控制點總均方根誤差為 0.2 公厘，第 2 次拍攝總均方根誤差為 0.3 公厘，兩次監測點均方根誤差為 0.8 公厘，監測點最大誤差為 1.7 公厘。因兩次拍攝時間相近，其成果證明該方式可用於監測點使用，依本實驗組成果可達 0.2 公厘，對於自動監測應用上，具有充分條件扮演監測方式使用。



(a)實驗組 1 平行拍攝第 1 次拍攝



(b)實驗組 1 平行拍攝第 2 次拍攝

圖 5.24 實驗組 1 兩實驗組量測示意圖

表5-23 實驗組1 控制點成果

Label	X	Y	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
實驗組 1 第 1 次拍攝										
target 1455	0.993	0.714	3.116	0.0046	-0.0041	-0.0020	0.0009	0.9889	0.7120	3.1169
target 975	2.727	5.381	2.5	0.0015	0.0011	-0.0010	0.0000	2.7281	5.3800	2.5000
target 511	4.487	10.009	1.933	0.0040	0.0030	-0.0024	0.0011	4.4900	10.0066	1.9341
target 501	6.185	14.769	1.492	0.0024	0.0020	0.0003	-0.0012	6.1870	14.7693	1.4908
target 455	7.746	19.358	0.916	0.0024	0.0009	0.0008	-0.0021	7.7469	19.3588	0.9139
target 231	9.251	24.08	0.364	0.0051	-0.0027	0.0042	0.0001	9.2483	24.0842	0.3641
target 255	10.797	28.81	-0.175	0.0046	0.0014	0.0043	0.0001	10.7984	28.8143	-0.1749
target 249	13.554	40.928	-1.263	0.0027	-0.0018	0.0000	0.0019	13.5522	40.9280	-1.2611
target 31	13.749	50.948	-2.077	0.0068	0.0059	-0.0035	0.0000	13.7549	50.9445	-2.0770
target 63	13.895	45.954	-1.7	0.0058	-0.0056	-0.0008	-0.0009	13.8894	45.9532	-1.7009
實驗組 1 第 1 次拍攝										
target 1455	0.993	0.714	3.116	0.0067	-0.0048	0.0043	-0.0020	0.9882	0.7183	3.1140
target 975	2.727	5.381	2.5	0.0016	0.0014	0.0007	0.0004	2.7284	5.3817	2.5004
target 511	4.487	10.009	1.933	0.0042	0.0002	-0.0038	0.0019	4.4872	10.0052	1.9349
target 501	6.185	14.769	1.492	0.0043	-0.0041	0.0013	-0.0003	6.1809	14.7703	1.4917
target 455	7.746	19.358	0.916	0.0015	0.0007	0.0009	-0.0010	7.7467	19.3589	0.9150
target 231	9.251	24.08	0.364	0.0079	0.0068	-0.0019	0.0035	9.2578	24.0781	0.3675
target 255	10.797	28.81	-0.175	0.0051	0.0038	-0.0033	-0.0005	10.8008	28.8067	-0.1755
target 249	13.554	40.928	-1.263	0.0063	0.0053	-0.0016	-0.0029	13.5593	40.9264	-1.2659
target 31	13.749	50.948	-2.077	0.0099	-0.0089	0.0030	0.0032	13.7401	50.9510	-2.0738
target 63	13.895	45.954	-1.7	0.0023	-0.0005	0.0004	-0.0022	13.8945	45.9544	-1.7022

表5-24 實驗組1 兩次拍攝監測點成果

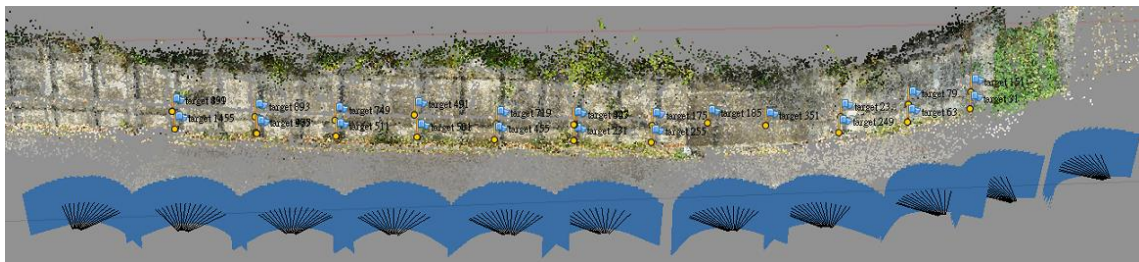
Label	X	Y	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	第 1 次拍攝			誤差分析				第 2 次拍攝		
target 151	13.6120	50.9907	-0.8771	0.0122	0.0019	-0.0052	-0.0108	13.6101	50.9959	-0.8663
target 175	10.8441	28.8776	1.0352	0.0153	-0.0124	0.0087	-0.0021	10.8565	28.8689	1.0373
target 185	11.8995	32.2209	0.8966	0.0147	-0.0126	0.0076	-0.0002	11.9121	32.2133	0.8968
target 23	13.5767	40.9818	-0.1169	0.0174	-0.0172	0.0023	0.0015	13.5938	40.9795	-0.1184
target 351	13.0521	35.7708	0.3486	0.0147	-0.0125	0.0059	0.0049	13.0646	35.7649	0.3437
target 491	5.8384	14.8590	2.9401	0.0135	-0.0093	0.0029	-0.0094	5.8477	14.8561	2.9496
target 719	7.7403	19.5483	2.0379	0.0095	-0.0078	0.0011	-0.0053	7.7480	19.5472	2.0431
target 749	4.4651	10.1185	3.0527	0.0096	-0.0078	0.0036	-0.0042	4.4729	10.1149	3.0569
target 79	13.7719	45.9665	-0.3835	0.0156	-0.0150	-0.0004	-0.0044	13.7869	45.9669	-0.3791
target 831	0.9306	0.7758	4.3501	0.0140	-0.0139	-0.0013	-0.0008	0.9445	0.7771	4.3509
target 847	9.2259	24.2009	1.4978	0.0200	-0.0179	0.0070	-0.0055	9.2438	24.1939	1.5034
target 893	2.6999	5.4943	3.5983	0.0094	-0.0089	-0.0001	-0.0031	2.7088	5.4945	3.6014

表5-25 實驗組1 控制點及監測點精度

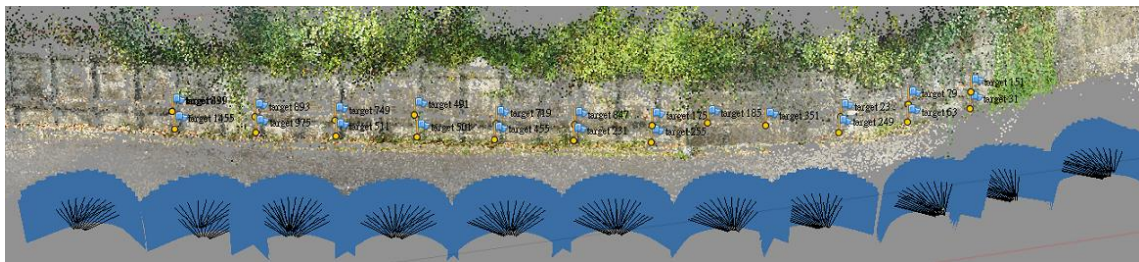
第 1 次拍攝控制點(m)				第 2 次拍攝控制點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.00586	0.00433	0.00193	0.00685	0.00681	0.00426	0.00351	0.00990
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00563	0.00354	0.00206	0.00151	0.00886	0.00378	0.00295	0.00150
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$
0.00011	0.00006	0.00001	0.00018	0.00021	0.00006	0.00005	0.00032
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.00333	0.00247	0.00111	0.00248	0.00458	0.00248	0.00213	0.00325
監測點精度(m)							
Max DX		Max DY	Max DZ	Max Total			
0.00195		0.00867	0.00489	0.02001			
Min DX		Min DY	Min DZ	Min Total			
0.01791		0.00517	0.01084	0.00943			
$\Sigma V_x V_x$		$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	$\Sigma V V$			
0.00180		0.00027	0.00034	0.00241			
RMSE X		RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE			
0.01223		0.00477	0.00534	0.00818			

5.3.2 實驗組2(11/6)

實驗組 2 拍攝日期為 103.11.06，使用相機為 Sony。本實驗延續實驗 1 中探討利用架設固定攝影機旋轉攝影方式，對道路邊坡護坡地錨進行拍攝，拍攝成果如下圖 5.25 所示，本實驗模擬連續拍攝兩次，主要驗證兩次自動量測於檢核點之精度分析。使用拍攝焦距為 50 公厘定焦鏡頭，拍攝距離約 14.5 公尺，相關實驗數據如下。



(a)實驗組 2 模擬固定站旋轉第 1 次拍攝



(b)實驗組 2 模擬固定站旋轉第 2 次拍攝

圖 5.25 實驗組 2 兩實驗組量測示意圖

實驗組 2 第 1 次拍攝及第 2 次拍攝實驗成果如表 5-26 所示，實驗組 2 兩次拍攝監測點成果如表 5-27 所示。控制點及監測點均方根誤差 (RMSE) 如表 5-28 所示，第 1 次拍攝控制點總均方根誤差為 0.18 公厘，第二次拍攝總均方根誤差為 0.42 公厘，兩次監測點均方根誤差為 1.05 公厘，監測點最大誤差為 5.9 公厘。其實驗成果較實驗組 1 垂直攝影垂直移動方式精度略差，主要因為旋轉攝影間接影響編碼標識別之數量。

表5-26 實驗組2 控制點成果

Label	X	Y	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	實測資料			誤差分析				近景量測		
實驗組 2 第 1 次拍攝										
target 1455	0.993	0.714	3.116	0.0050	0.0038	0.0031	0.0005	0.9968	0.7171	3.1165
target 975	2.727	5.381	2.5	0.0029	0.0026	0.0012	0.0001	2.7296	5.3822	2.5001
target 511	4.487	10.009	1.933	0.0036	-0.0023	-0.0026	0.0008	4.4847	10.0064	1.9338
target 501	6.185	14.769	1.492	0.0048	-0.0046	-0.0003	-0.0013	6.1804	14.7687	1.4907
target 455	7.746	19.358	0.916	0.0035	-0.0023	-0.0017	-0.0021	7.7437	19.3563	0.9139
target 231	9.251	24.08	0.364	0.0024	0.0002	-0.0021	0.0012	9.2512	24.0779	0.3652
target 255	10.797	28.81	-0.175	0.0016	0.0011	-0.0012	0.0001	10.7981	28.8088	-0.1749
target 249	13.554	40.928	-1.263	0.0028	0.0003	0.0022	0.0017	13.5543	40.9302	-1.2613
target 31	13.749	50.948	-2.077	0.0019	0.0017	-0.0002	-0.0009	13.7507	50.9478	-2.0779
target 63	13.895	45.954	-1.7	0.0016	-0.0004	0.0016	-0.0001	13.8946	45.9556	-1.7001
實驗組 2 第 2 次拍攝										
target 1455	0.993	0.714	3.116	0.0197	0.0193	-0.0037	0.0021	1.0123	0.7103	3.1181
target 975	2.727	5.381	2.5	0.0040	-0.0026	0.0029	-0.0009	2.7244	5.3839	2.4991
target 511	4.487	10.009	1.933	0.0054	-0.0052	-0.0011	-0.0001	4.4818	10.0079	1.9329
target 501	6.185	14.769	1.492	0.0069	-0.0067	0.0008	-0.0012	6.1783	14.7698	1.4908
target 455	7.746	19.358	0.916	0.0045	-0.0038	-0.0012	-0.0019	7.7422	19.3568	0.9141
target 231	9.251	24.08	0.364	0.0028	-0.0011	-0.0017	0.0020	9.2499	24.0783	0.3660
target 255	10.797	28.81	-0.175	0.0043	0.0028	-0.0030	0.0013	10.7998	28.8070	-0.1737
target 249	13.554	40.928	-1.263	0.0020	0.0018	0.0004	0.0009	13.5558	40.9284	-1.2621
target 31	13.749	50.948	-2.077	0.0032	-0.0005	0.0030	-0.0008	13.7485	50.9510	-2.0778
target 63	13.895	45.954	-1.7	0.0027	0.0027	-0.0004	-0.0004	13.8977	45.9536	-1.7004

表5-27 實驗組2 兩次拍攝監測點成果

Label	X	Y	Z	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
	第 1 次拍攝			誤差分析				第 2 次拍攝		
target 151	13.6085	50.9963	-0.8790	0.0127	0.0119	-0.0018	-0.0040	13.5966	50.9981	-0.8750
target 175	10.8439	28.8760	1.0330	0.0050	-0.0015	0.0022	-0.0042	10.8454	28.8738	1.0372
target 185	11.9001	32.2209	0.8944	0.0049	0.0001	0.0029	-0.0040	11.8999	32.2180	0.8984
target 23	13.5786	40.9864	-0.1189	0.0041	-0.0016	0.0025	-0.0029	13.5803	40.9839	-0.1160
target 351	13.0522	35.7716	0.3466	0.0043	-0.0003	0.0034	-0.0026	13.0525	35.7683	0.3492
target 491	5.8322	14.8624	2.9372	0.0047	0.0000	-0.0007	-0.0046	5.8321	14.8630	2.9418
target 499	0.9125	0.7777	4.3469	0.0629	-0.0591	-0.0213	0.0018	0.9716	0.7990	4.3450
target 719	7.7352	19.5503	2.0354	0.0037	0.0000	0.0003	-0.0037	7.7352	19.5500	2.0391
target 749	4.4602	10.1221	3.0498	0.0038	0.0022	-0.0015	-0.0027	4.4580	10.1235	3.0525
target 79	13.7768	45.9706	-0.3855	0.0044	-0.0018	0.0012	-0.0038	13.7786	45.9694	-0.3817
target 831	0.9370	0.7840	4.3454	0.0060	0.0025	-0.0050	-0.0022	0.9345	0.7890	4.3476
target 847	9.2271	24.1992	1.4958	0.0041	-0.0001	0.0004	-0.0041	9.2272	24.1988	1.4999
target 893	2.6992	5.5008	3.5949	0.0042	0.0027	-0.0019	-0.0026	2.6965	5.5027	3.5975

表5-28 實驗組2 控制點及監測點精度

第 1 次拍攝控制點(m)				第 2 次拍攝控制點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.00382	0.00312	0.00169	0.00495	0.01927	0.00302	0.00212	0.01973
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00464	0.00262	0.00207	0.00161	0.00673	0.00368	0.00193	0.00203
$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV	$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV
0.00006	0.00003	0.00001	0.00010	0.00049	0.00005	0.00002	0.00055
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.00240	0.00185	0.00110	0.00186	0.00697	0.00216	0.00133	0.00428
				監測點精度(m)			
				Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
				0.01188	0.00338	0.00185	0.06285
				Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
				0.05909	0.02133	0.00462	0.00370
				$\Sigma V_x V_x$	$\Sigma V_y V_y$	$\Sigma V_z V_z$	ΣVV
				0.00366	0.00052	0.00015	0.00434
				RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
				0.01678	0.00634	0.00343	0.010540

5.3.3 實驗分析

實驗 2 主要探討自動辨識編碼標於自動監測中之精度，實驗結果證明量測精度將比手動量測更為精準，且該方法為全自動量測，於自動監測上使用，能解決需人工介入之問題。另外於模擬固定站旋轉攝影實驗中，監測點精度下降，由實驗數據研判，可能是因為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，但其量測精度亦大於手動量測，因此使用自動量測標之方式，為本研究中最為自動量測之方法。

5.4 實驗 3

實驗 3 主要驗證利用面狀區域進行分析，實驗設計佈設編碼標位置假設為邊坡不易滑動區域，且利用實驗 2 方式進行自動量測，最後產生密集點雲的方式進行分析。本實驗主要用於分析使用，可用於非護坡行道路邊坡進行面狀分析，因本實驗區缺乏尚未建置護坡區域之實驗區，因此本實驗一樣於施作邊坡地錨區域進行相關實驗。

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 5.26 所示，因點雲間距有所不同將導致量測精度有所偏差。

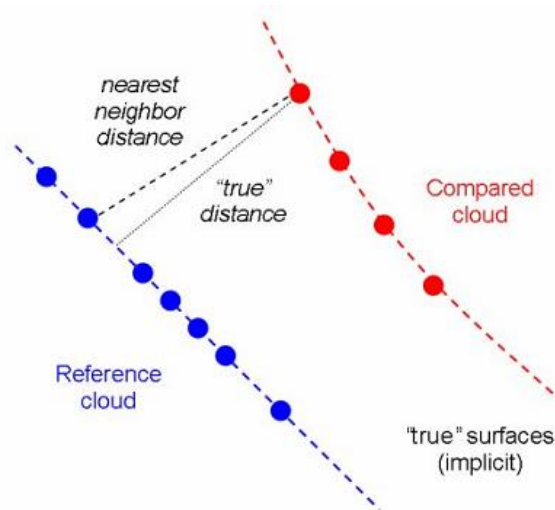
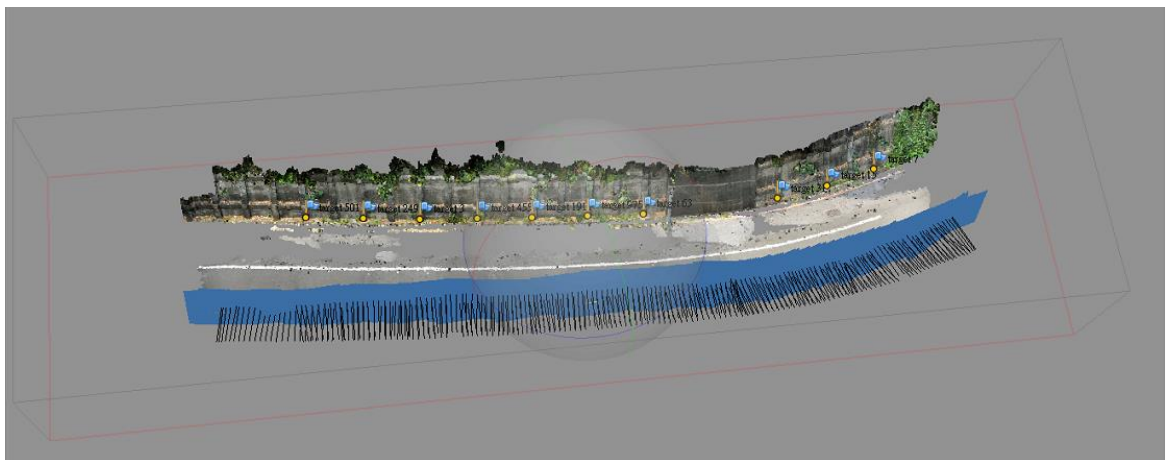


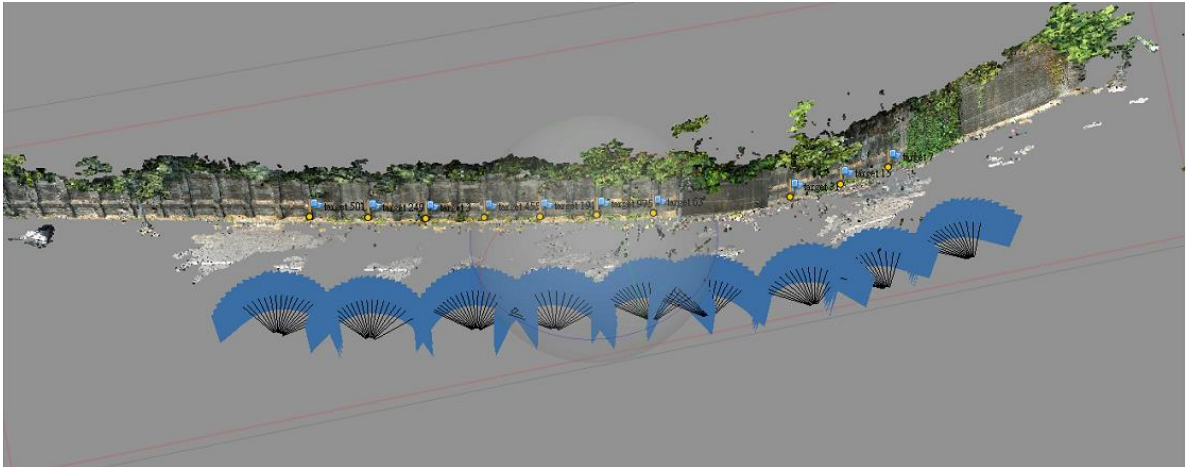
圖 5.26 點雲量測距離方法

5.4.1 實驗組1

本實驗組同時使用 Sony 相機，拍攝日期為 10 月 27 日，共計拍攝兩組實驗分別產製密點雲，一組實驗採用垂直邊坡水平攝影方式，另一組採用模擬固定站旋轉攝影方式進行。使用拍攝焦距為 35 公厘定焦鏡，拍攝距離約 14.5 公尺，兩組實驗三維重建密集點雲成果如下圖 5.27 所示：



(a)實驗組 1 第 1 次拍攝



(b)實驗組 1 第 2 次拍攝

圖 5.27 實驗組一 三維重建密集點雲

相關精度驗證於上述實驗中均已證明，本實驗中成果與上述成果相當，因此相關數據不再此進行詳述。圖 5.28 為兩組套疊差異分析圖、圖 5.29 為兩組套疊差異分析距離計算圖。

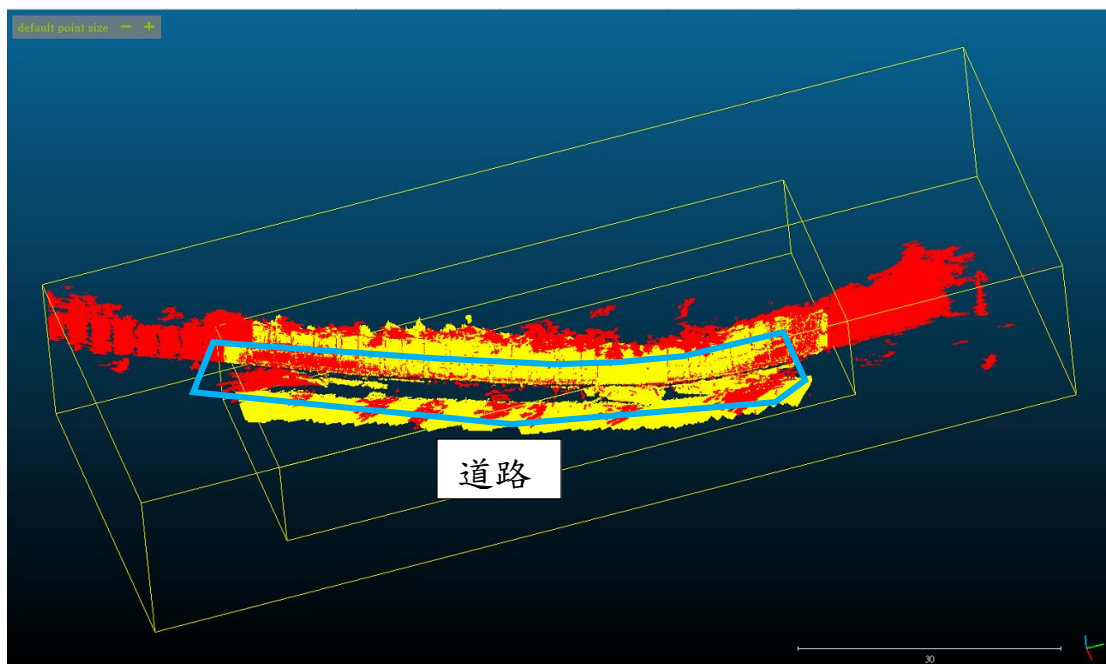
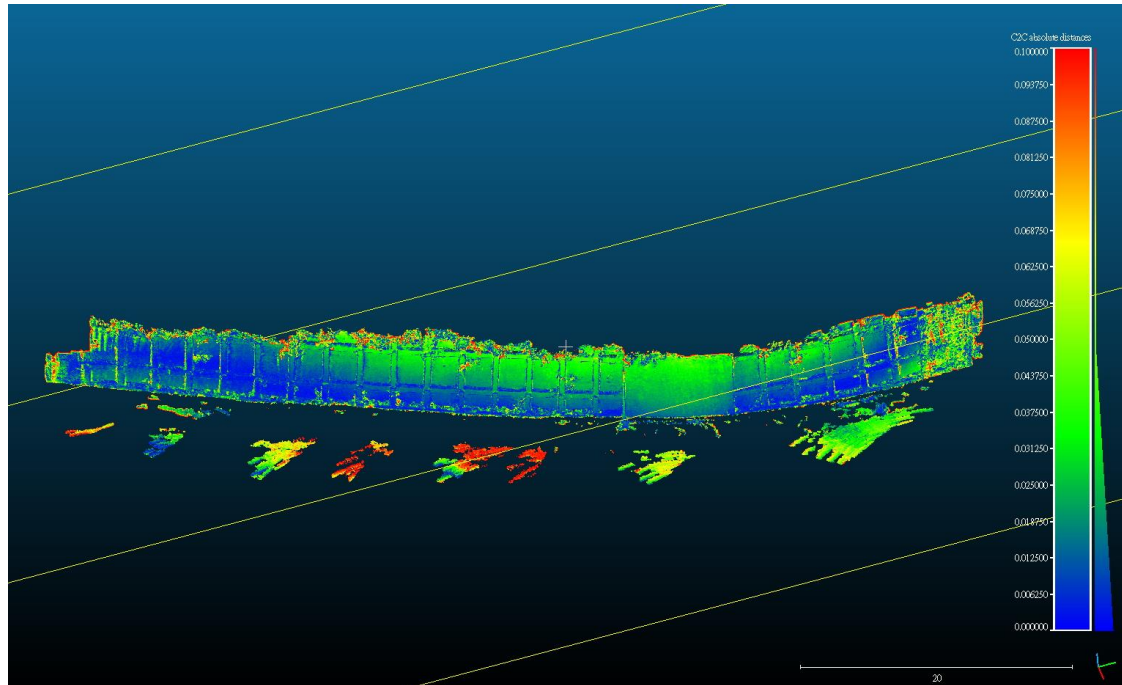


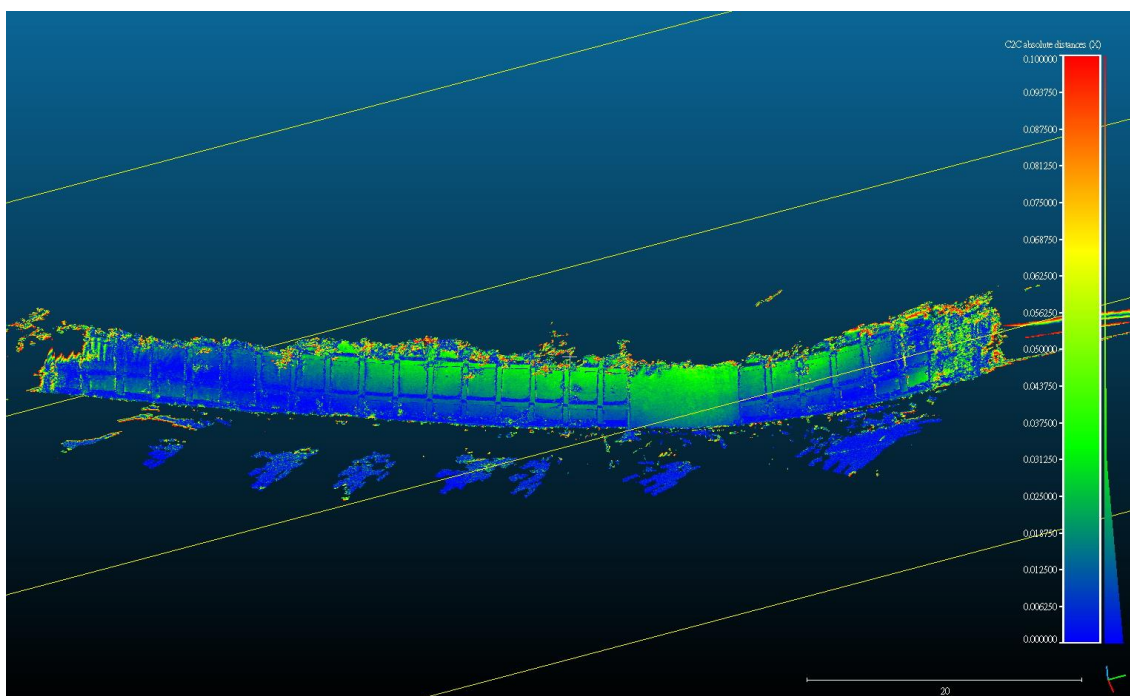
圖 5.28 實驗組 1 兩組影像套疊差異分析

兩組差異距離計算如下圖 5.29 所示，圖 5.29(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，

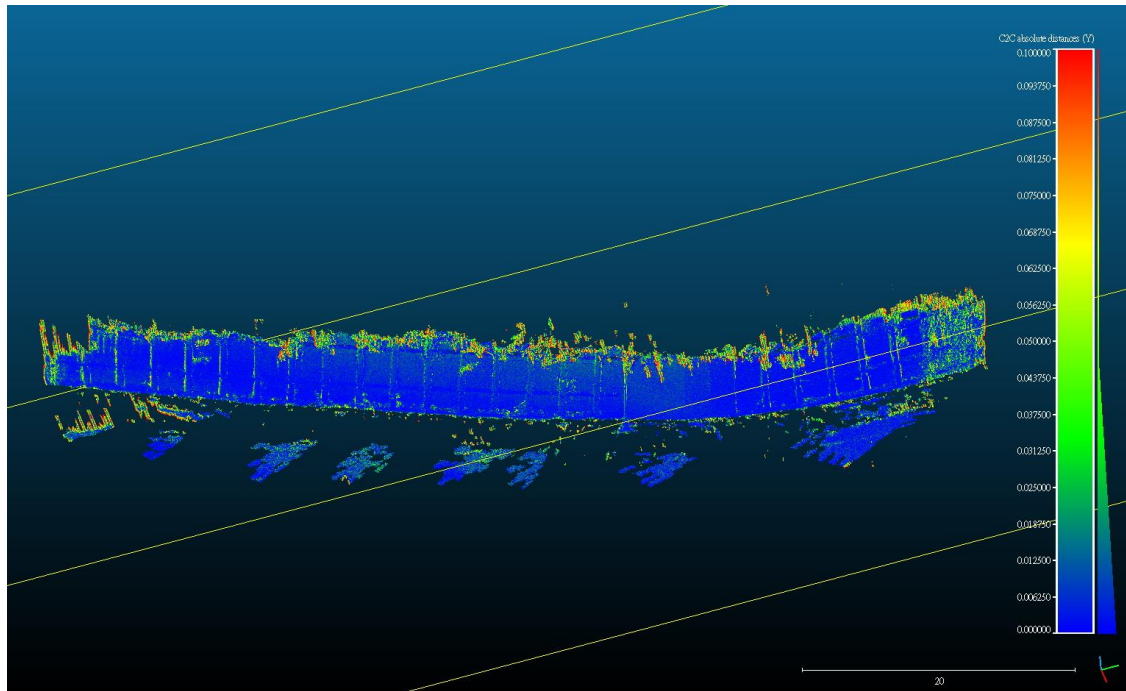
而大部分則小於 1 公分，顏色變化劇烈區域為植被物區，因此產生較大的誤差，圖 5.29(b)~(d)為使用 X 、 Y 、 Z 三個分量所計算之結果，其中以 X 方向誤差較其他兩個方向較大。



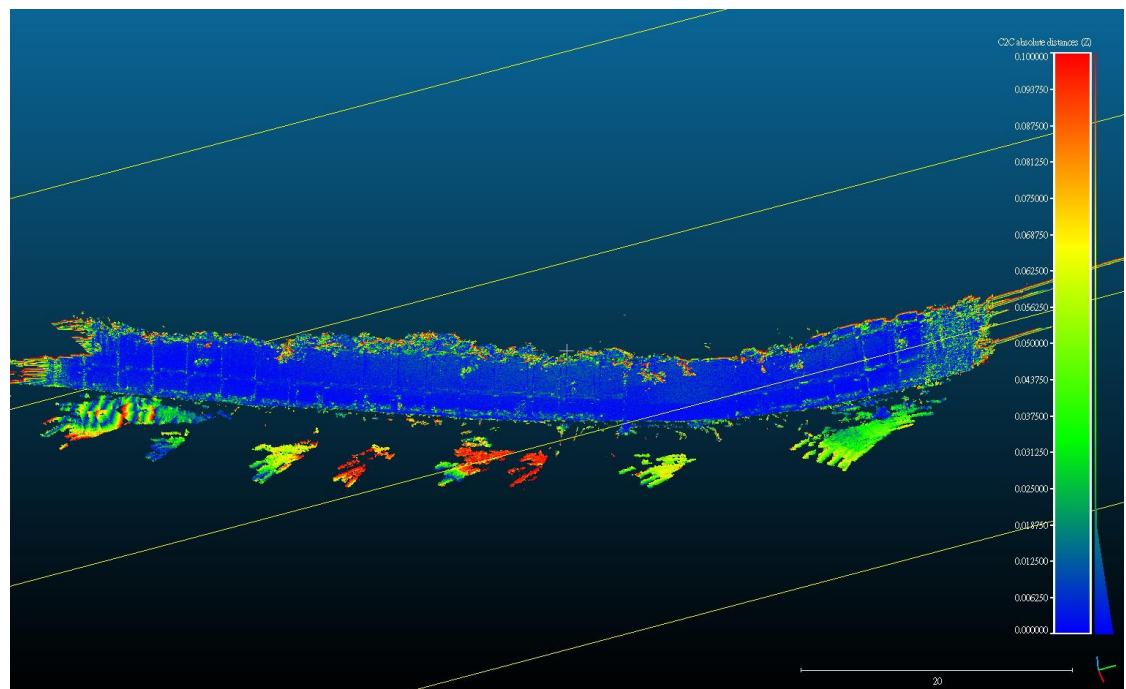
(a)實驗組 1 距離差異分析(XYZ)0~10 公分範圍



(b)實驗組 1 距離差異分析(X 方向) 0~10 公分範圍



(c)實驗組 1 距離差異分析(Y 方向) 0~10 公分範圍

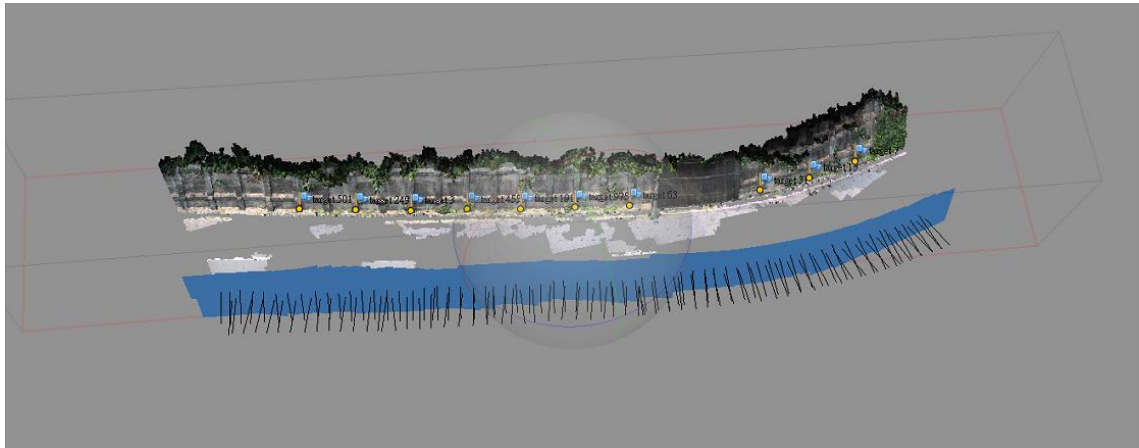


(d)實驗組 1 距離差異分析(Z 方向) 0~10 公分範圍

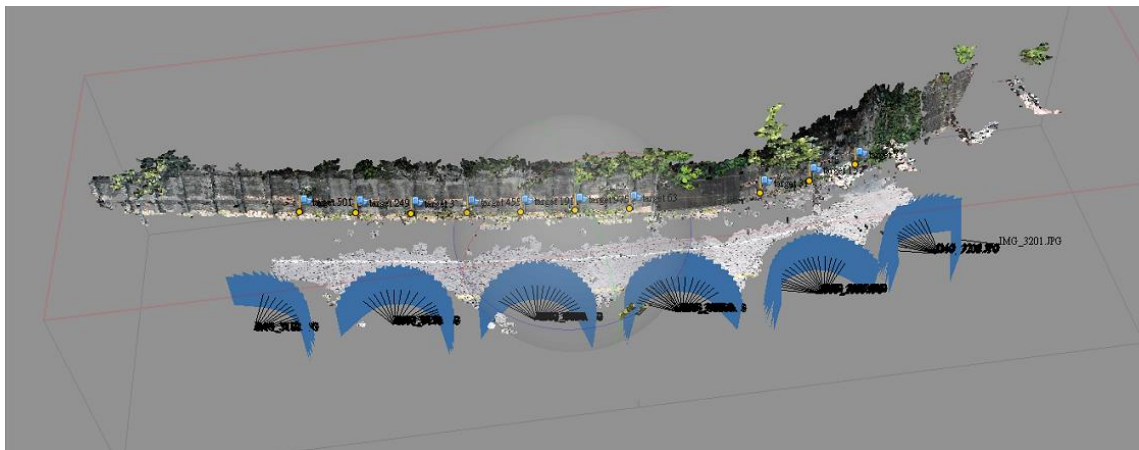
圖 5.29 實驗組 1 距離差異分析

5.4.2 實驗組2

本實驗組同時使用 Canon 相機，拍攝日期為 10 月 27 日，共計拍攝兩組實驗分別產製密點雲，一組實驗採用垂直邊坡水平攝影方式，另一組採用模擬固定站旋轉攝影方式進行。使用拍攝焦距為 30 公厘定焦鏡，拍攝距離約 14.5 公尺，兩組實驗三維重建密集點雲成果如下圖 5.30 所示：



(a)實驗組 2 第 1 次拍攝



(b)實驗組 2 第 2 次拍攝

圖 5.30 實驗組 2 三維重建密集點雲

圖 5.31 為兩組套疊差異分析圖、圖 5.32 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 5.32 所示，圖 5.32(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 10 公分

以下，而大部分則小於 5 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 5.32(b)~(d)為使用 X、Y、Z 三個分量所計算之結果。

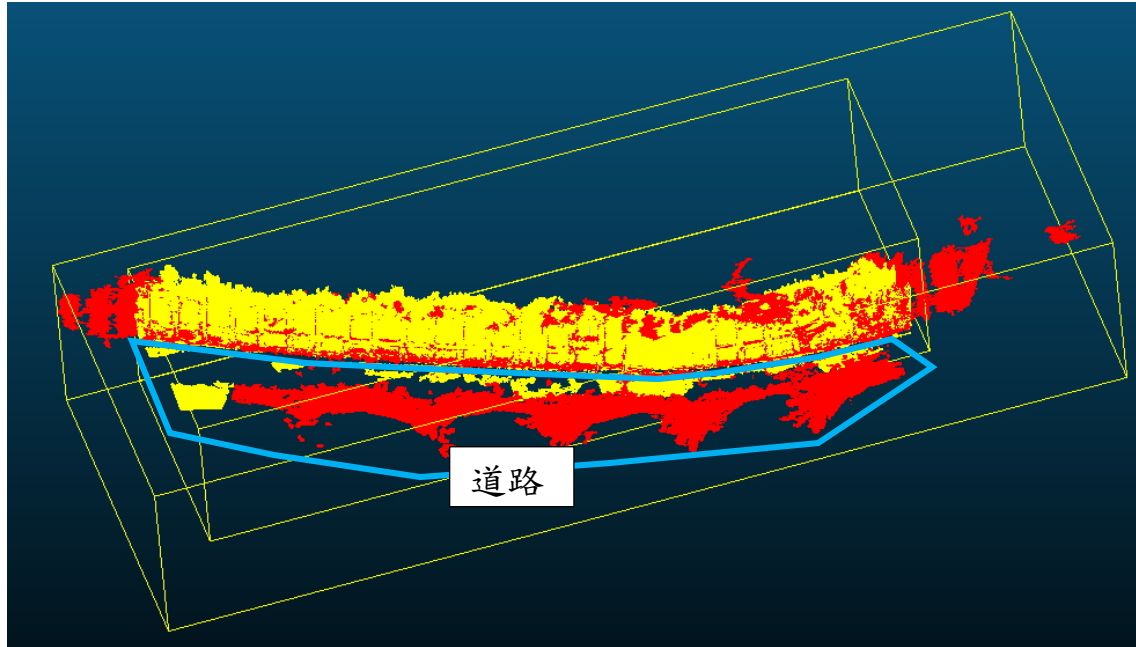
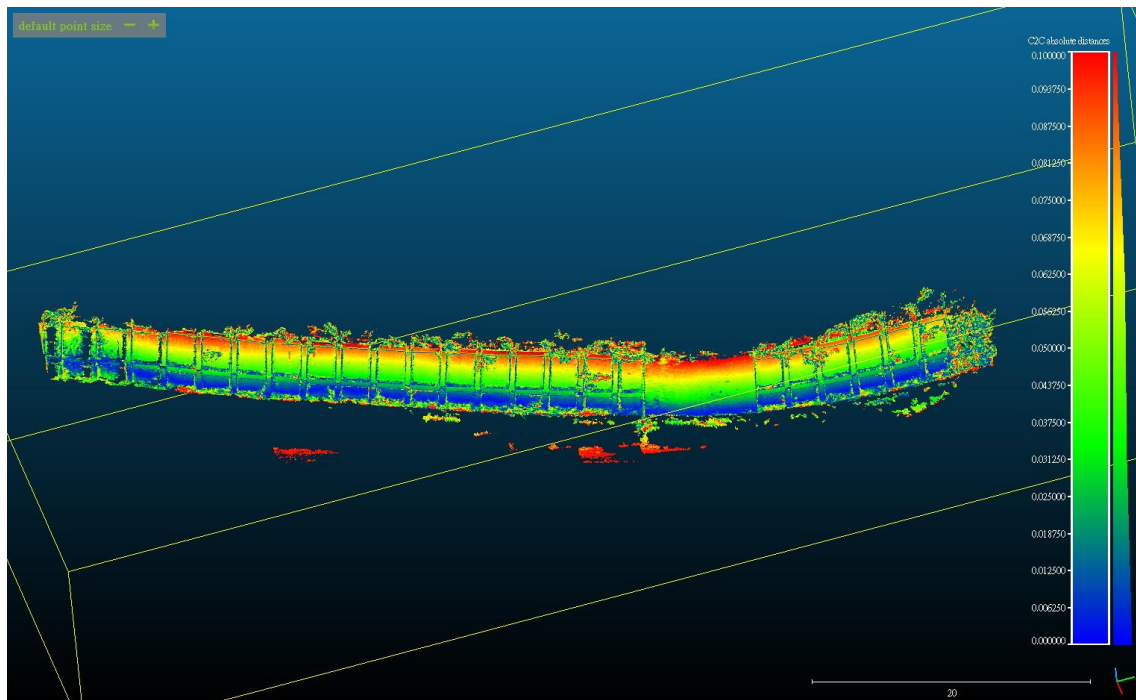
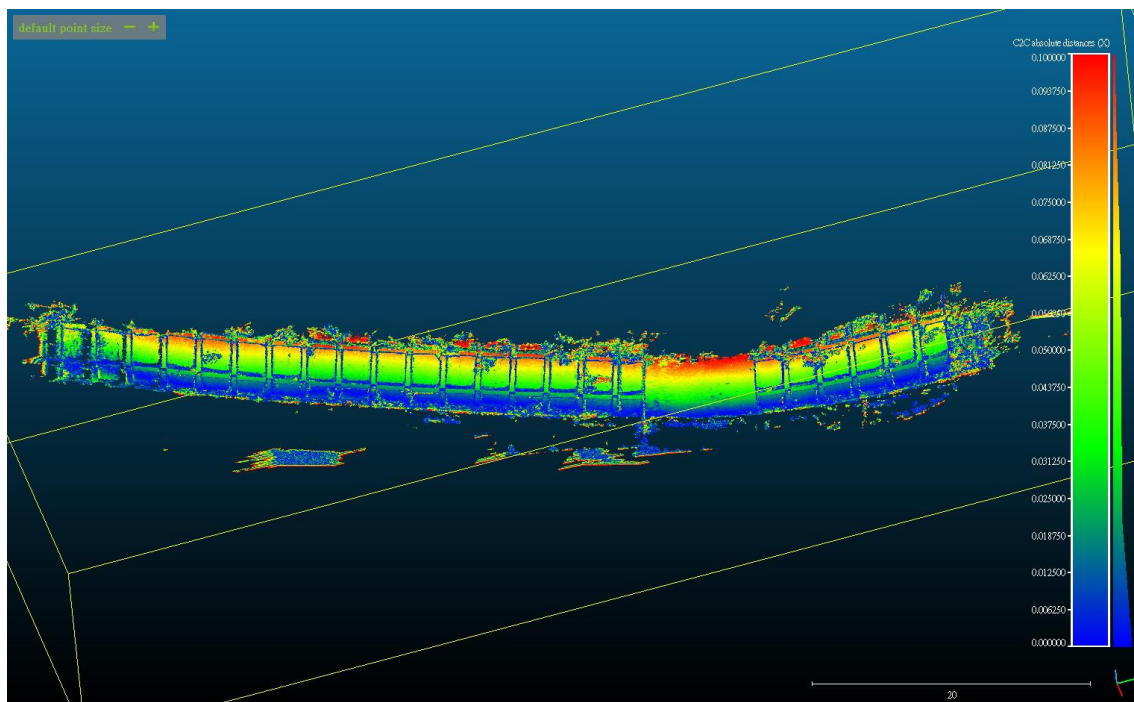


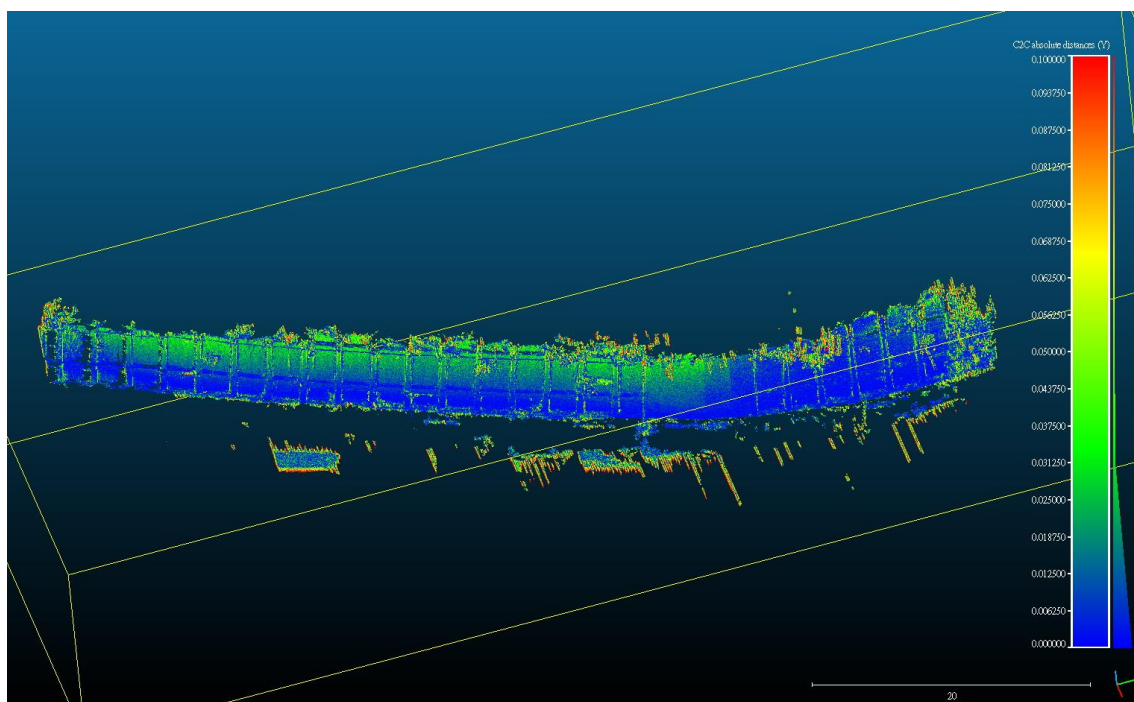
圖 5.31 實驗組 2 兩組影像套疊差異分析



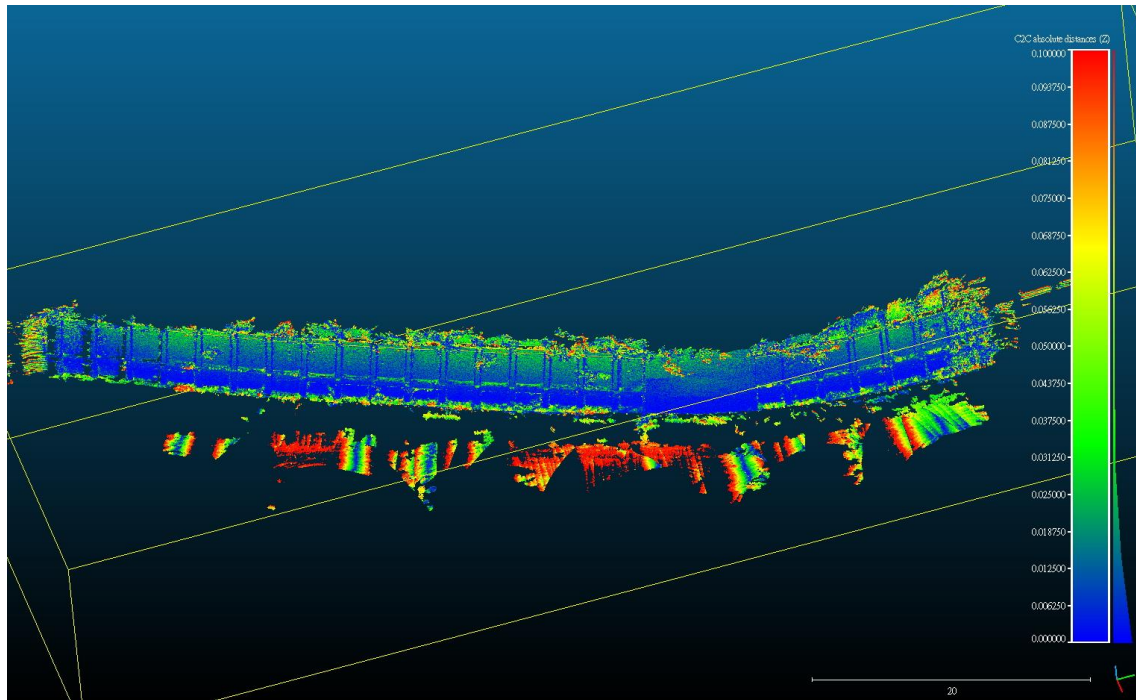
(a)實驗組 2 距離差異分析(XYZ) 0~10 公分範圍



(b)實驗組 2 距離差異分析(X 方向) 0~10 公分範圍



(c)實驗組 2 距離差異分析(Y 方向) 0~10 公分範圍



(d)實驗組 2 距離差異分析(Z 方向) 0~10 公分範圍

圖 5.32 實驗組 2 距離差異分析

5.4.3 地面Lidar比較

本實驗中特地與地面 Lidar 進行比較，使用地面 Lidar 為 Leica ScanStation 2，對本實驗區進行掃描動作，實驗時間為 11/13 日，掃描密度以 1 公分點點雲間距進行掃描，掃描作業情況如圖 5.33 所示。其掃描成果如圖 5.34 所示。本實驗為了與上述坐標系統進行套疊，特地於實驗區控制點上佈測 Lidar 專用轉換標進行本專案轉換使用，並與本實驗第一組 Sony 相機拍攝三維重建資料進行比較，圖 5.35 為 Lidar 與近景攝影測量三維重建比較圖，與 Lidar 掃描擺設位置。



圖 5.33 Lidar 掃瞄作業情形

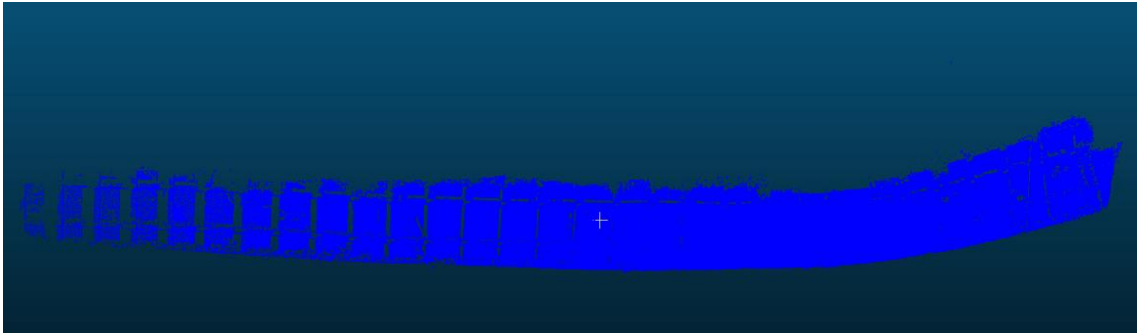


圖 5.34 Lidar 掃描成果

本次作業為了驗證近景攝影測量三維重建精度與 Lidar 掃描之成果比較，於實驗區架設兩站進行掃描，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 5.35 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 5.36 所示，圖 5.36(a)為 XYZ 方向計算兩期差異距離圖，使用顏色方式進行顯示，實驗成過再度驗證 Lidar 掃描精度會因為掃描距離關係，而有所損失，平面誤差可達 10cm 左右。圖 5.36(b)~(d)為使用 X、Y、Z 三個分量所計算之結果，在在證明 Lidar 平面精度會因掃描距離而有所影響。

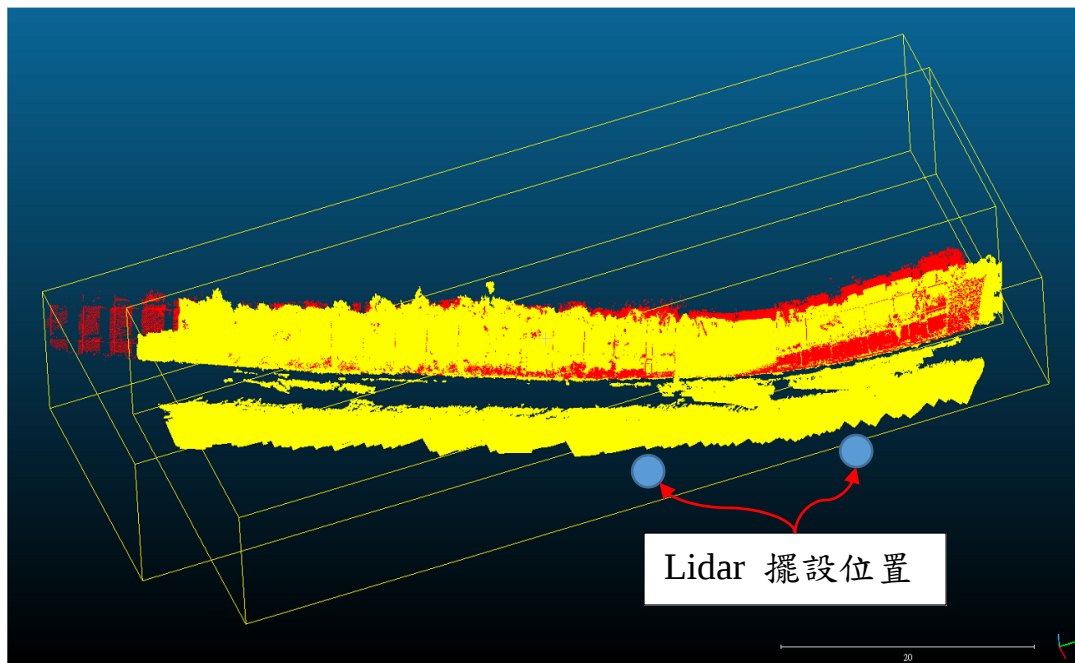
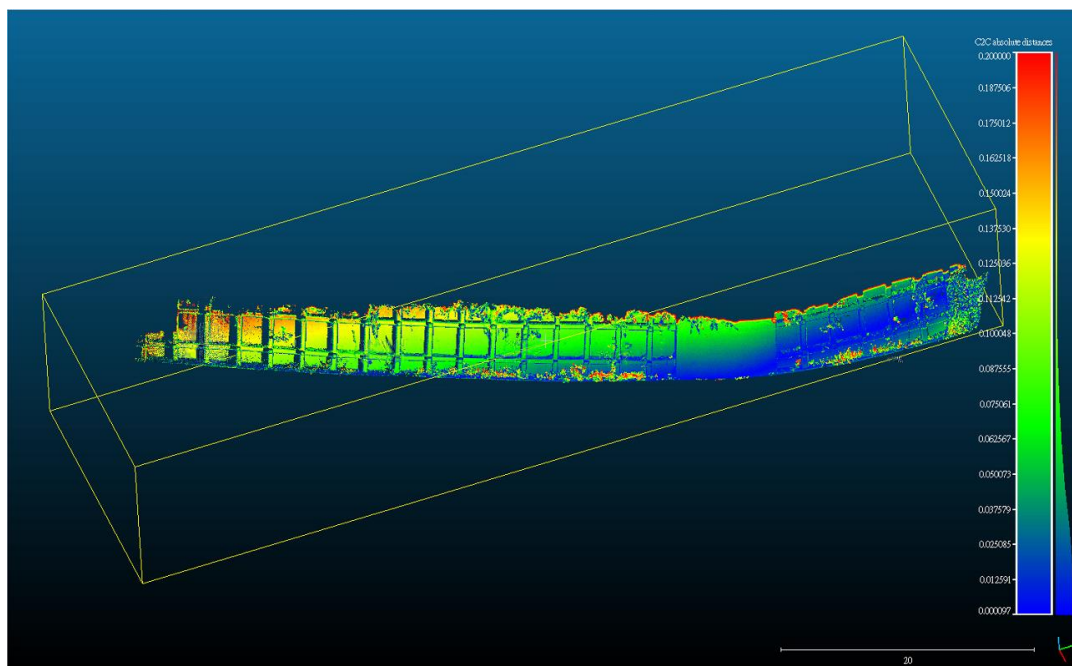
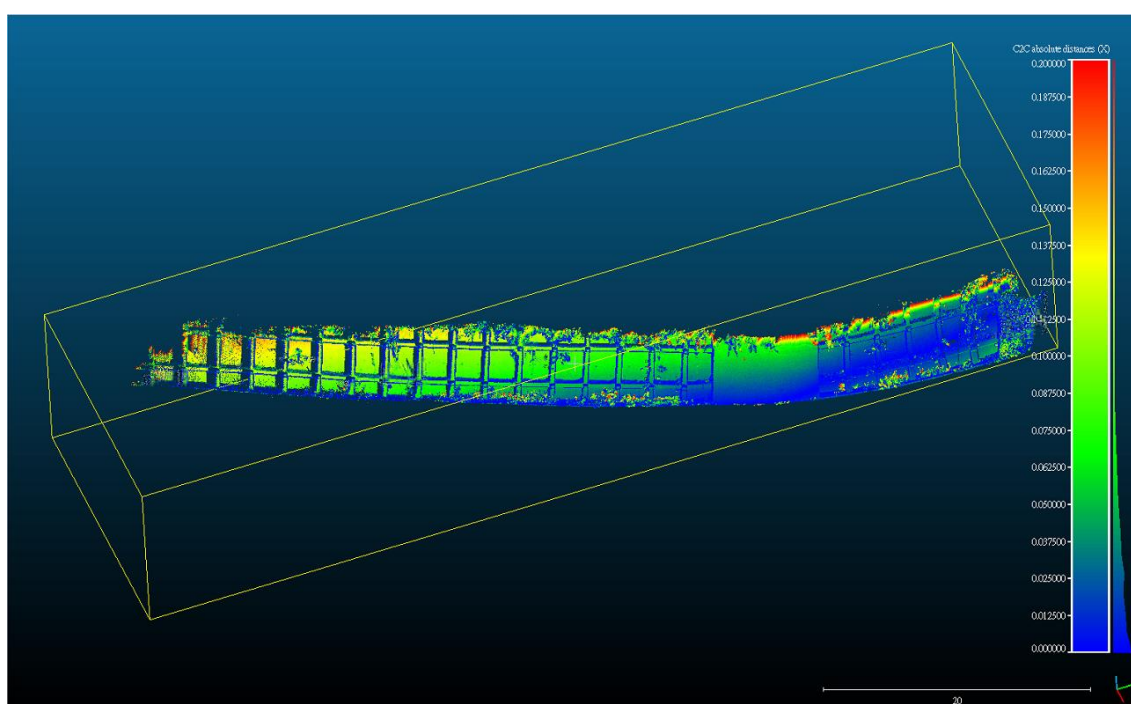


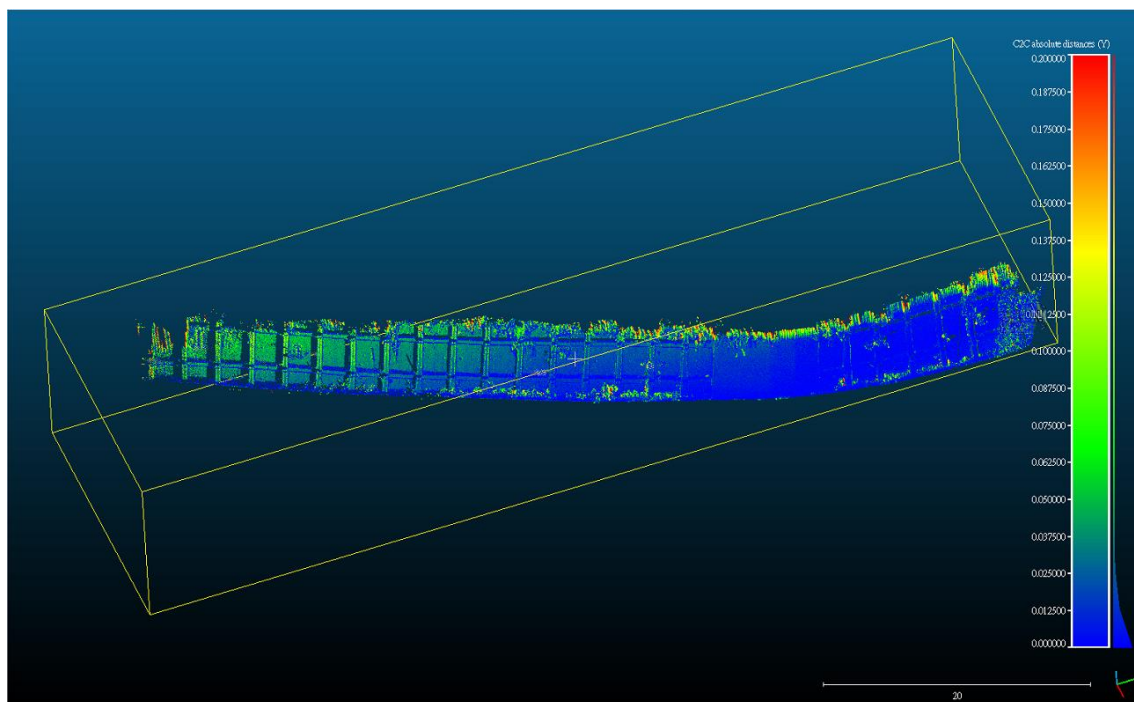
圖 5.35 Lidar 掃描成果與近景三維重建成果比較



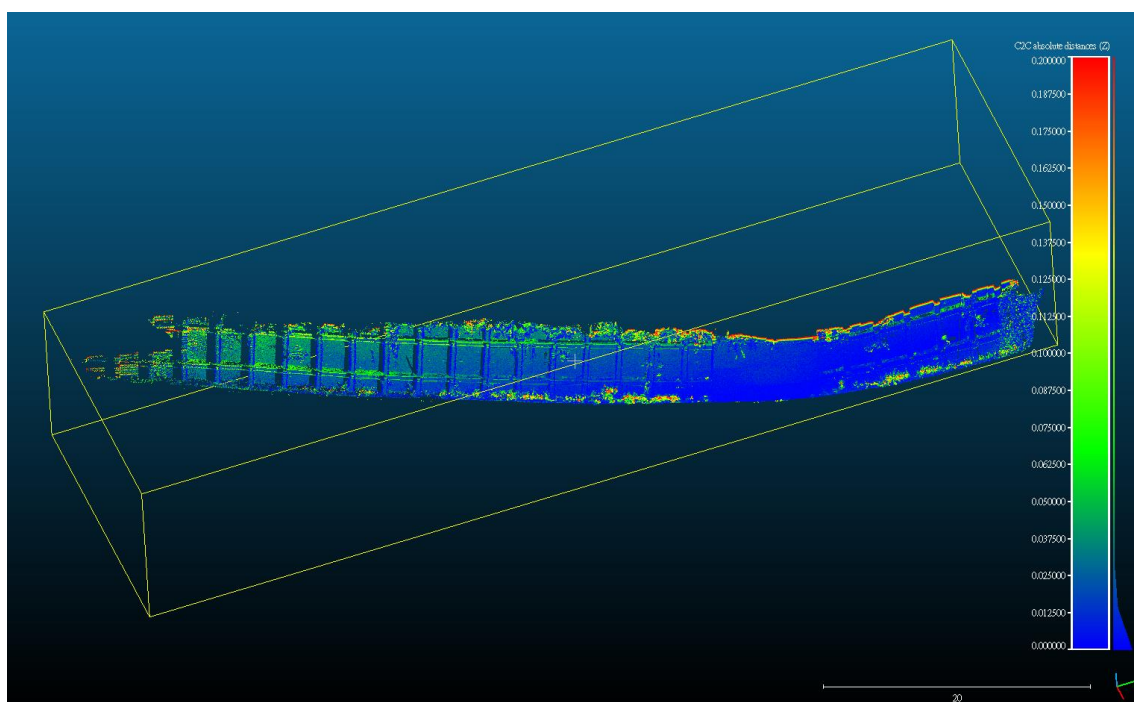
(a) Lidar 掃描與三維重建距離差異分析(XYZ) 0~20 公分範圍



(b) Lidar 掃描與三維重建距離差異分析(X 方向) 0~20 公分範圍



(c) Lidar 掃描與三維重建距離差異分析(Y 方向) 0~20 公分範圍



(d) Lidar 掃描與三維重建距離差異分析(Z 方向) 0~20 公分範圍

圖 5.36 Lidar 掃描與三維重建距離差異分析

5.4.4 實驗分析

本實驗組主要驗證利用三維重建，密集點雲之面狀進行邊坡監測使用，實驗成果會受三維重建密集點雲密度有關，依本實驗第 1 組而言，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，實驗第 2 組平均地面解析度為 3.88 公分，密集點雲一樣採用格點取樣方式進行三維重建，重建結果比較精度均於 10 公分左右，但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，因本實驗中無實質變化，因無法看出實質效果，後續將可用於無實質護坡邊坡滑動偵測上使用。另外本實驗組中加入 Lidar 比較，Lidar 會因為掃描距離，間接影響掃描密度，因此對平面精度上會有所損失。

第六章 建議標準作業流程

因拍攝地面解析度直接影響近景攝影測量精度，因此決定拍攝地面解析將決定道路邊坡監測之精度及等級，本研究中另外提供上述實驗之標準作業流程，提供未來實務應用上之建議。

6.1 拍攝方法

拍攝方法本文提供兩種拍攝方式供作業單位進行選擇。

6.1.1 垂直邊坡平行移動攝影

首先由對邊坡進行垂直拍攝平行位移，主要用於低潛勢邊坡滑動使用，透過機載或手持方式對邊坡進行攝影，如圖 6.1 所示。

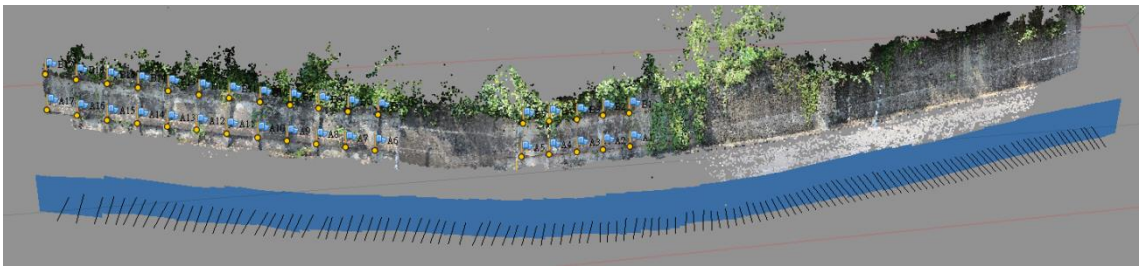


圖 6.1 沿道路(邊坡)方向攝影

該方法主要探討利用機載、手持方式，對邊坡進行攝影，以建立邊坡滑動資料庫，針對低潛勢之邊坡進行資料管理，以做出道路邊坡滑動之參考數據。拍攝覆蓋率本實驗規劃拍攝每片以 90% 為覆蓋率進行拍攝，如邊坡高度較高之情況之下，可透過載台或是提高拍攝高度進行兩條航帶式拍攝，兩條覆蓋率以 70% 覆蓋率進行拍攝即可。

多視立體視覺三維重建技術在於拍攝越多數量，其精度越高，但拍攝越多數量其計算效率越差，因此拍攝之張數應適當，不宜過多。

6.1.2 多站旋轉交會攝影

另於長期監測方案，利用建立多站旋轉攝影之方式進行交會拍攝，亦為本案主題主要方法，依此方法將可以透過固定時間進行攝影，達到自動監控之目的，如圖 6.2 所示。

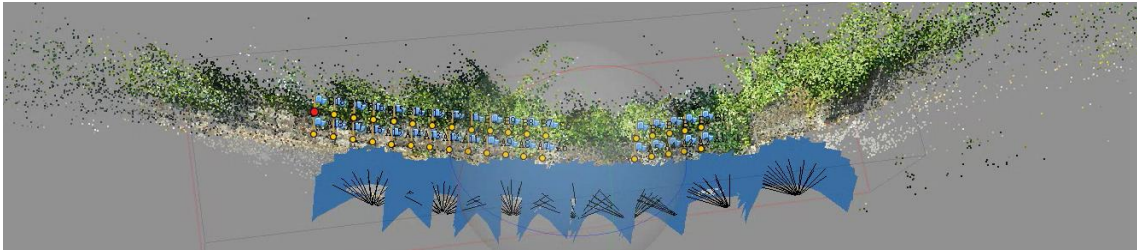


圖 6.2 模擬固定監視器多方向與多站之交會攝影

該方法主要透過架設固定攝影站，以旋轉攝影方式進行交會攝影，用於長期須自動監測之邊坡使用，透過拍攝伺服器進行任務分配，以固定時間進行交會拍攝，再由拍攝伺服器回傳至監控系統影像工作站進行計算，並透過自動量測標誌進行監控點量測，以辨識道路邊坡是否已開始產生滑動。

6.2 拍攝距離

首先要決定拍攝精度，再決定拍攝之地面解析度，最後則是選擇適合之照相機，依據上述實驗證明，量測精度可以達 0.5 像素，因此預計量測 5 公厘精度，則地面解析度需為 1 公分。以下提供計算地面解析度之方式，首先必須先計算像素大小，計算公式如式(6.1)，並以計算範例講解，實際計算 Sony A55 相機 GSD 大小。

$$\frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} = \frac{\text{GSD}}{\text{Distance}} \dots\dots\dots (6-1)$$

計算範例：以 Sony A55 +30mm 鏡頭為例

相片大小:4912*2760 Pixel、CCD 大小:2.35*1.32cm、焦距:3cm、拍攝距離 1000cm。計算步驟如下：

$$\begin{aligned} \text{Pixel Size} &= 2.35\text{cm} / 4912 = 4.78 \times 10^{-4} \text{cm} = 4.78 \mu\text{m} \\ \text{GSD} &= \frac{\text{Pixel Size} \times \text{Distance}}{\text{Focal Length}} = \frac{4.78 \times 10^{-4} \times 1000}{3} = 0.159\text{cm} \dots\dots\dots (6-2) \end{aligned}$$

範例中計算拍攝距離 10 公尺，拍攝焦距 3 公分，對應垂直點 GSD 為 0.159 公分，需考慮並非所有成像面都與攝影站距離相同，因此需要

進行放大以當作平均 GSD 使用，本範例放大 2 倍做為安全係數，拍攝距離與地面解析度計算表如表 6-1，拍攝距離與地面解析度分析圖如圖 6.3。

表 6-1 拍攝距離與地面解析度計算表

Sony A55+ 30mm					
像素		像素大小(cm)		解析度(cm)	焦距 (cm)
col	row	col	row	Pixel	
4912	2760	2.35	1.32	4.78E-04	3
拍攝距離 (m)	地面解析度 SD(cm)	預估平均 GSD(cm)	拍攝距離 (m)	地面解析度 GSD(cm)	預估平均 GSD(cm)
10	0.159	0.319	125	1.993	3.987
15	0.239	0.478	130	2.073	4.146
20	0.319	0.638	135	2.153	4.306
25	0.399	0.797	140	2.233	4.465
30	0.478	0.957	145	2.312	4.625
35	0.558	1.116	150	2.392	4.784
40	0.638	1.276	155	2.472	4.944
45	0.718	1.435	160	2.552	5.103
50	0.797	1.595	165	2.631	5.263
55	0.877	1.754	170	2.711	5.422
60	0.957	1.914	175	2.791	5.582
65	1.037	2.073	180	2.871	5.741
70	1.116	2.233	185	2.950	5.901
75	1.196	2.392	190	3.030	6.060
80	1.276	2.552	195	3.110	6.219
85	1.356	2.711	200	3.189	6.379
90	1.435	2.871	205	3.269	6.538
95	1.515	3.030	210	3.349	6.698
100	1.595	3.189	215	3.429	6.857
105	1.674	3.349	220	3.508	7.017
110	1.754	3.508	225	3.588	7.176
115	1.834	3.668	230	3.668	7.336
120	1.914	3.827	235	3.748	7.495

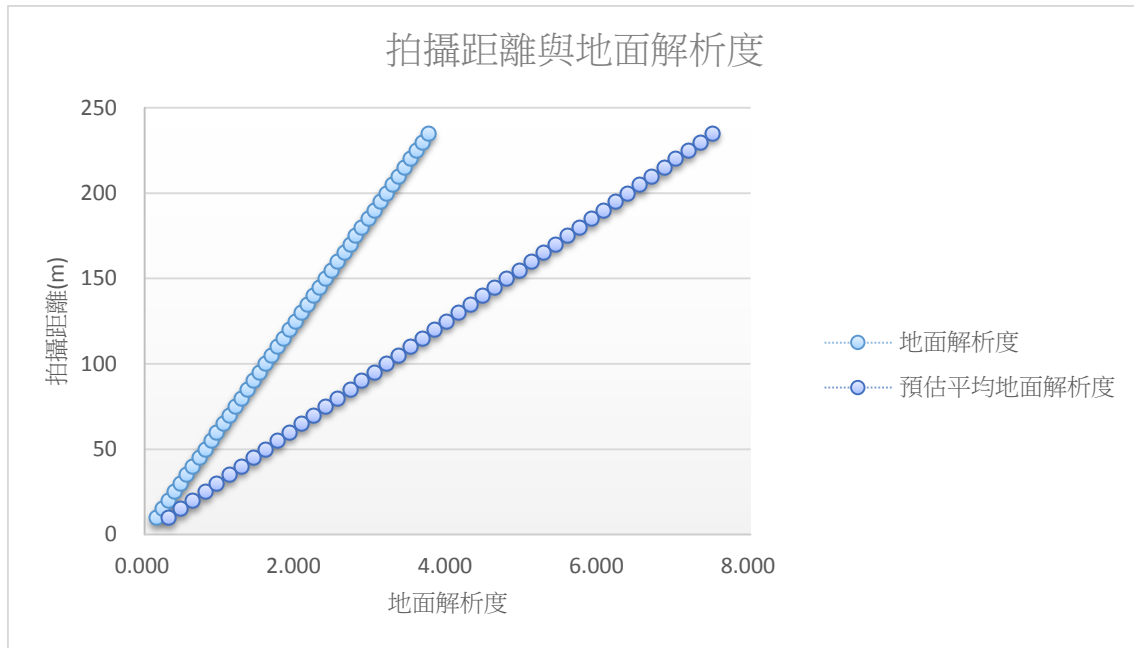


圖 6.3 拍攝距離與地面解析度關係圖

6.3 編碼標設置

Schneider 編碼標誌於本實驗中進行標誌大小可被順利辨識之測試，實驗結果編碼標不得小於 34 pixel，因此根據上數計算拍攝距離之地面解析度大小後，再用計算出來之地面解析度計算最小需要多大之編碼標，如拍攝距離 10 公尺預估平均地面解析度為 0.319cm 編碼標直徑最少要大於 10.8cm($0.319\text{cm} \times 34 = 10.8\text{cm}$)，依此類推計算所設置之編碼標大小。

6.4 相機率定

相機率定方式，可採用現場自率定方式進行，首先針對拍攝距離開啟自動對焦，並讓相機進行對焦動作，之後關閉對焦功能，使本次拍攝焦距固定，利用這樣的方式達到單次拍攝定焦之目的。自率定可於拍攝影像序列時一並進行相機率定，如下圖 6.4 所示，於固定焦距之後，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，相機率定可透過 Photoscan 等 SfM 三維重建軟體進行解算，拍攝成果如圖 6.4 所示。

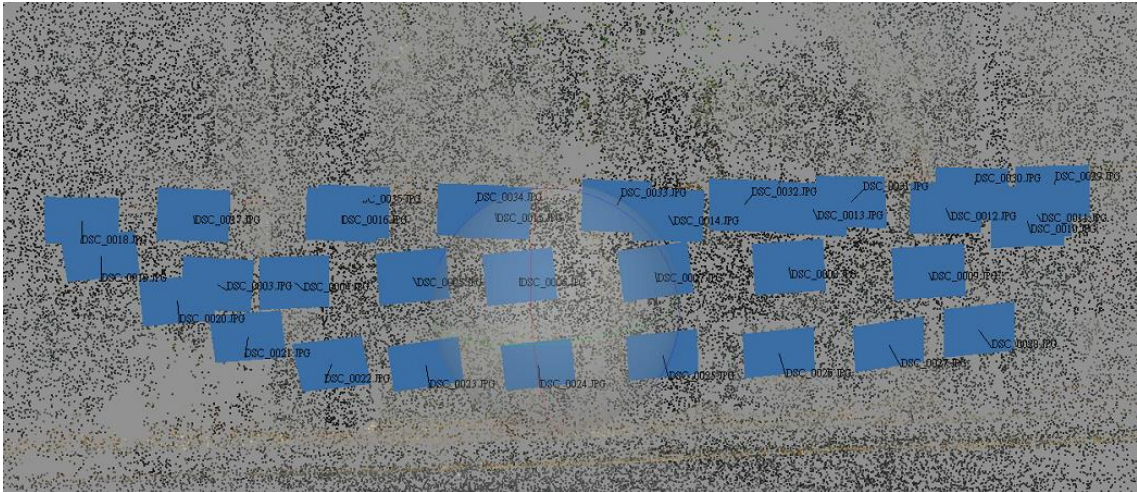


圖 6.4 利用固定焦距大量重疊方式進行相機率定

關於透過固定攝影站旋轉攝影方式進行拍攝(圖 6.5)，因此方式於攝影幾何上略顯不足，因此如果利用此方式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，因此建議如果利用旋轉攝影時，必須先利用上述方式，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 6.5 旋轉攝影示意圖

相關率定參數如下表 6-2 所示，固定攝影站有幾台就要執行幾次相機率定動作，因為每次相機率定參數均不同，以下為其中一台相機所率定之報告。

表6-2 相機率定參數

Australis Bundle Adjustment Results: Camera Parameters					
12 November, 2014 15:50:27					
Project: C:\Australis\Project 1. aus					
Adjustment: Free-Network					
Number of Points: 1000					
Number of Images: 10					
RMS of Image coords: 1.00 (um)					
Results for Camera 1 NIKON_D2Xs Lens					
Sensor Size		Pixel Size (mm)			
H	4288	0.00840516			
V	2848	0.00840516			
Camera Variable	Initial Value	Total Adjustment	Final Value	Initial Std. Error	Final Std. Error
C	27.2487	0.00000	27.2487	1.0e+003	1.000e-003 (mm)
XP	0.2305	0.00000	0.2305	1.0e+003	1.000e-003 (mm)
YP	0.0990	0.00000	0.0990	1.0e+003	1.000e-003 (mm)
K1	1.39086e-004	0.000e-000	1.39086e-004	1.0e+003	1.000e-003
K2	-1.10181e-007	0.000e-000	-1.10181e-007	1.0e+003	1.000e-003
K3	1.25145e-011	0.000e-000	1.25145e-011	1.0e+003	1.000e-003
P1	-1.90047e-005	0.000e-000	-1.90047e-005	1.0e+003	1.000e-003
P2	-4.59663e-006	0.000e-000	-4.59663e-006	1.0e+003	1.000e-003
B1	-5.08288e-003	0.000e-000	-5.08288e-003	1.0e+003	1.000e-003
B2	-3.49100e-004	0.000e-000	-3.49100e-004	1.0e+003	1.000e-003
Maximum Observational Radial Distance Encountered:				1.000 mm	

第七章 交通事故現場重建

交通事故重建利用近景攝影方式進行量測工作，在國外行之有年，但傳統近景攝影測量方式，必須透過手動或半自動的方式完成相片對位，再針對有交通事故進行繪製，利用此方式除了需要先行將相機進行相機率定，也需要訓練一專業人員進行該項工作。本研究中採用多視立體視覺方式進行近景攝影，透過大量重疊的拍攝，透過 SfM 方式進行相片校齊，在對有興趣之位置進行量測或三維重建，方可達到量測之目的。

7.1 交通事故於近景攝影測量使用

交通事故拍攝示意圖如圖 7.1 及圖 7.2 所示。多視立體視覺影像，以多張影像進行現場還原，因此拍攝張數越多越好。



圖 7.1 交通事故拍攝示意圖(iwitness 範例)

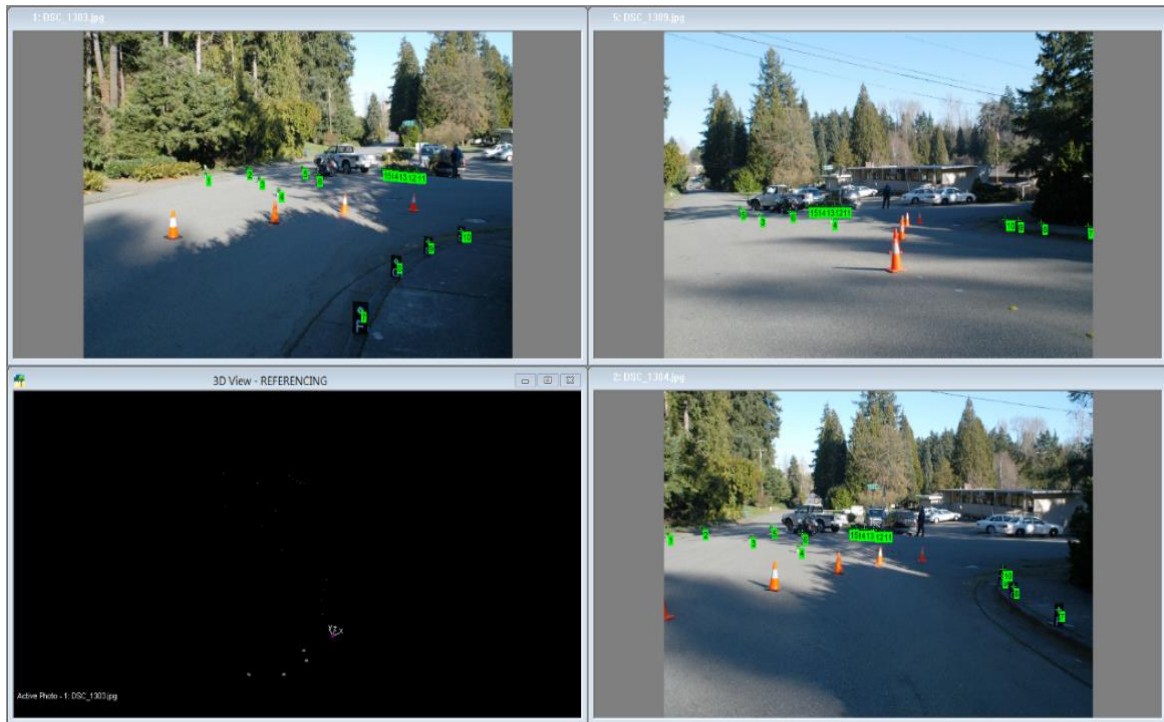


圖 7.2 交通事故量測示意圖(iwitness 範例)

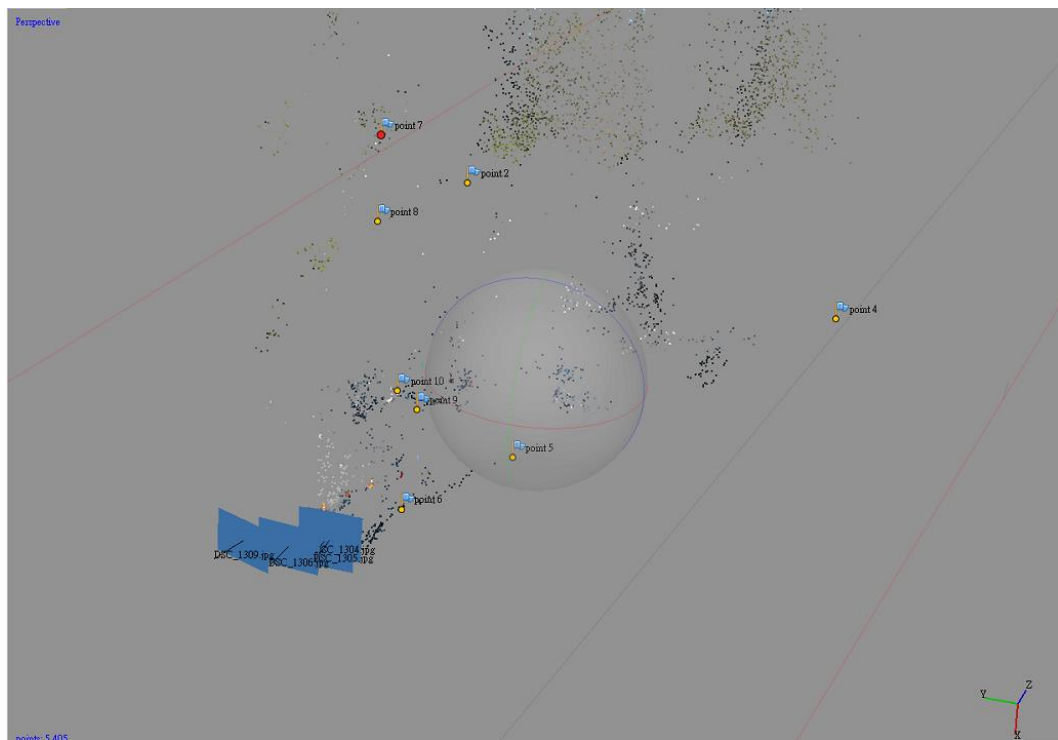


圖 7.3 交通事故使用 SfM 方式重建

依據交通事故三維重建資料，可配合判識重要車禍還原依據，其中並包含受損車體三維重建，利用多視立體視覺影像將有效完成三維重建之目的，如圖 7.3、圖 7.4 及圖 7.5 所示。

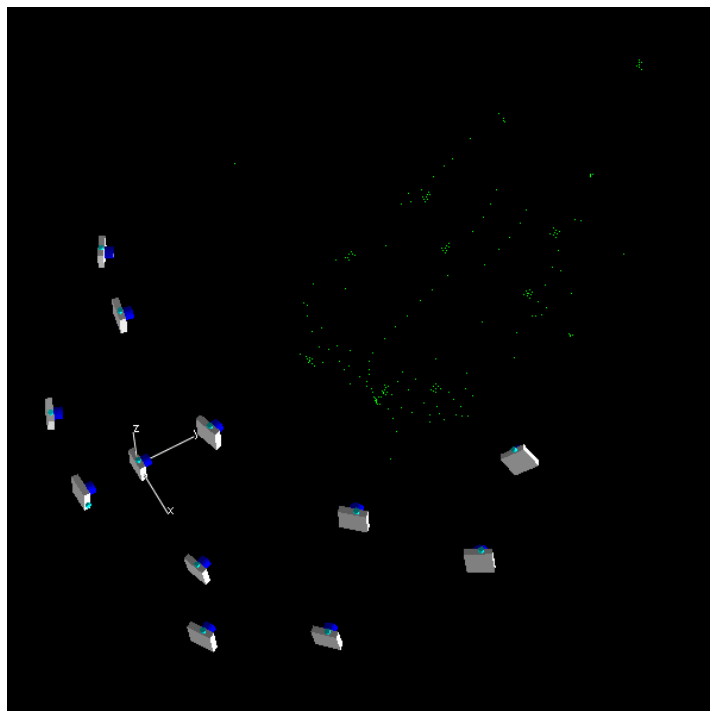


圖 7.4 車損近景量測

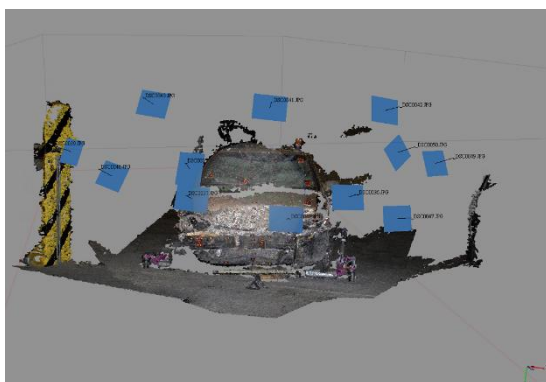


圖 7.5 車損三維重建(iwitness 範例)

上述交通事故重建主要探討車禍場景三維重建方式，利用多視立體視覺拍攝方式進行三維重建中，其中拍攝方式為車禍場景重建主要問題之一，本研究將針對拍攝場景進行實驗分析。

7.2 交通事故重建

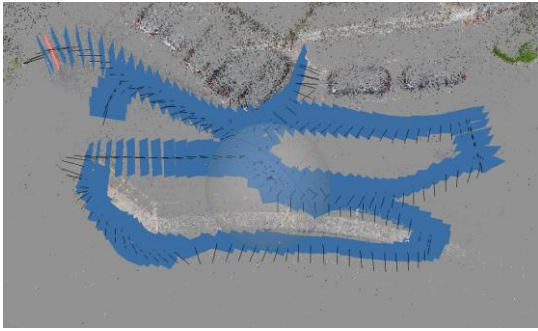
交通事故重建屬於三維場景重建之應用之一，在早期近景攝影測量中，用於交通事故量測功能為相關應用之一，本研究中另外探討透過多視立體視覺三維重建技術，用於交通事故重建使用，多視立體視覺三維重建技術可透過影像序列進行場景三維重建，而相關量測精度以在上述實驗中證明。

本研究主要針對假設交通事故進行場景還原，分別探討魚眼鏡頭以錄影方式(GoPro)三維重建，單眼相機場景重建方式進行探討，最後如果場景過大，則透過無人飛行載具進行場景重建，以下依據進行上述相關實驗。

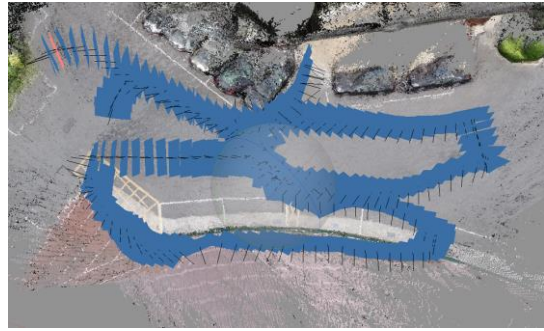
7.2.1 實驗組1

本實驗首先利用目前極限運動最熱門之錄影機(GoPro Hero 3+)進行測試，該攝影機可以錄製 4K 畫質，於應用上已經可以達到三維重建之使用，但目前 GoPro Hero 3+於 4K 錄影僅可拍攝 15fps，在動態上有所不足，本實驗降低解析度，利用 Full HD 1080P 解析度進行場景拍攝，並採用 60fps 進行錄影，高分辨率錄影可有效降低移動時模糊的問題。

實驗場地選擇本校操場旁之停車場，利用手持進行移動式拍攝，場景重建方式主要還是依據覆蓋為原則，交通事故重建需要進行量度功能，因此需要在現地實測部分距離，或事先放置比例尺，使拍攝時一同拍攝進去，進行尺度約制，拍攝後相機位置如下圖 7.6 所示。



(a)三維重建稀疏點雲重建



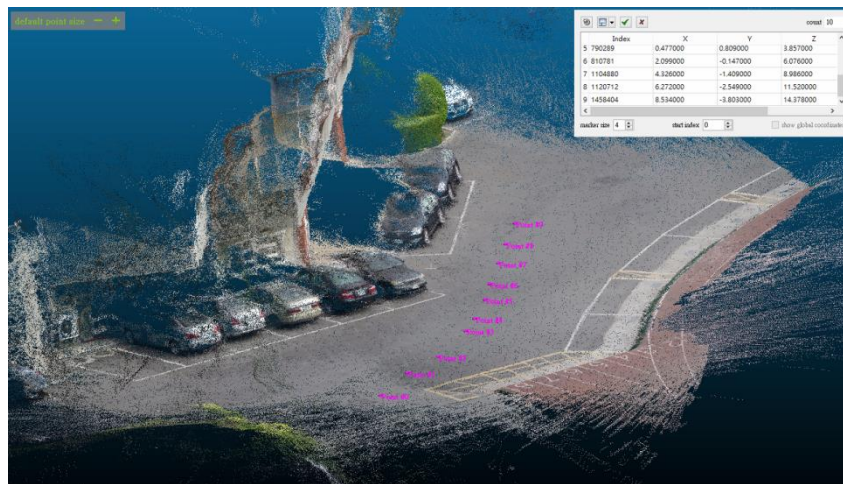
(b)密點雲重建



(c)點雲顯示



(d)點雲量度功能



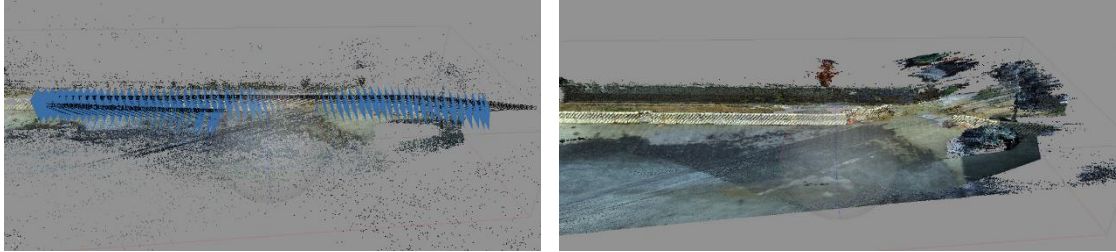
(e)模擬交通事故相關煞車痕跡量測

圖 7.6 實驗組 1 交通事故重建以 GoPro 為例

7.2.2 實驗組2

本實驗探討大規模現場重建方法，實驗組 1 利用 GoPro 錄影機，以錄影方式進行場景重建。本實驗利用高角度方式對地進行拍攝，模擬航拍方式對地進行拍攝，主要使用廣角單眼數位相機，本實驗以

Nikon D2xs 相機配合 17 公厘定焦鏡頭進行下列實驗。實驗成果如下，圖 7.7(a)為利用高角度拍攝三維重建現場，圖 7.7(b)為利用點雲進行量度功能範例。



(a)三維重建



(b)點雲量測

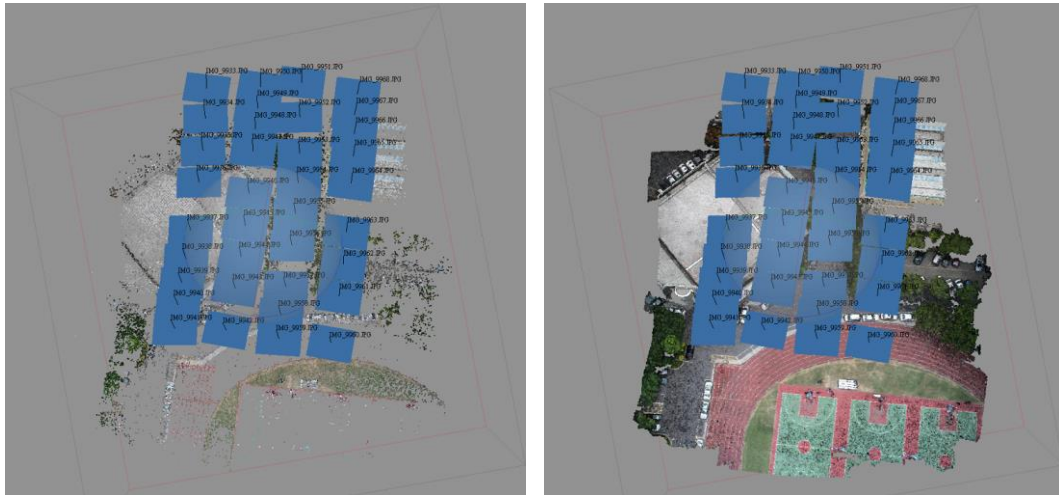


(c)點雲量測

圖 7.7 實驗組 2 交通事故重建

7.2.3 實驗組3

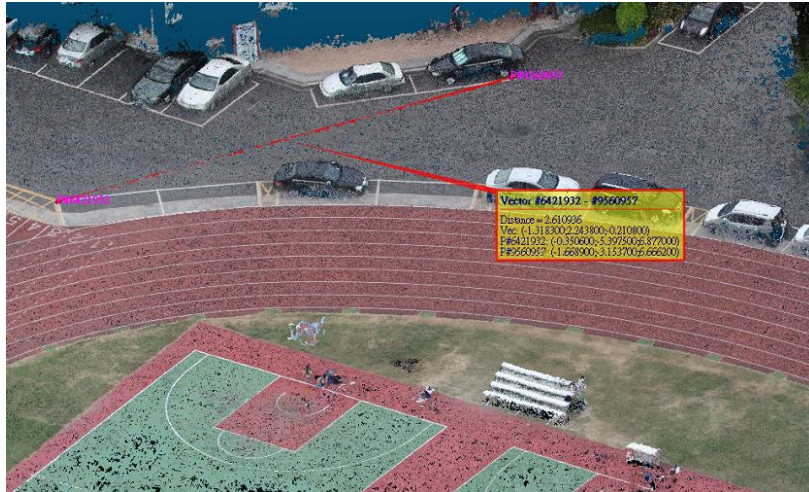
實驗組 3 主要探討大範圍交通事故重建方法，如國道追撞等，此時可透過無人飛行載具進行攝影，依下列實驗範例，為利用無人飛行載具於場景現場重建，圖 7.8 為無人飛行載具場景重建範例，圖 5.39(a) 為利用無人飛行載具三維重建及拍攝方式，圖 7.8(b)、(c) 為利用場景重建密集點雲及點雲量測功能。



(a)無人飛行載具三維重建



(b)場景重建及點雲量測



(c)場景重建及點雲量測

圖 7.8 無人飛行載具場景重建

7.2.4 實驗分析

本實驗主要探討交通事故重建之方式，以目前多視立體視覺三維重建技術而言，拍攝大量序列影像及拍攝方式為場景重建之主要課題之一，如本實驗組 1，利用 GoPro 錄影機進行錄影重建，此方式要求大規模覆蓋，利用攝影機進行場景掃描，再透過多視立體視覺重建場景。

實驗組 2 探討如何大規模進行場景拍攝，近景拍攝整個場景最大的問題就是很難垂直地表進行拍攝，因此可以透過角架，或是提高拍攝位置，盡量對場景進行由高處往地表拍攝，另外車體三維重建也是接續要探討之議題，車體表面為金屬，反光材質，於攝影拍照時容易受到拍攝角度的關係，對周圍的影像進行映射，導致每張照片中所反射的景象都不同，該問題將會導致影像匹配時，無法順利對位之問題，因此車體為後續實驗要去探討之事項。

實驗 3 探討大規模場景重建之建議方式，無人飛行載具維目前最熱門三維重建拍攝載台之一，利用一定高度對地進行拍攝再進行三維重建，依此三維重建技術用於交通事故而言，以本研究中三個範例，拍攝張數最少，處理成果最佳，但唯獨需要此載具進行攝影，但用於大範圍場景重建卻是最方便方法之一。

第八章 結論與建議

本研究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，其主要透過非接觸性表面三維表面量測方式，對道路邊坡進行監測上之使用。實驗中首先探討多視立體視覺三維重建技術之精度，並於實驗中規劃兩種方案，以解決道路邊坡位移監測之使用；第一種方式可透過單向機進行移動拍攝，此方案可用於定點巡檢使用。第二種方式可透過多攝影機旋轉拍攝，可用於固定站即時監測使用。另於三維重建監測技術上本研究提出「監測點的位移分析」及「整體點雲的差異分析」兩種方案進行道路邊坡的位移及變形監測的監測，監測點位移分析可用於即時道路邊坡使用，配合自動識別標誌，可於固定時間對監測點進行量測。整體點雲差異分析則可用於邊坡整體滑動之探討，透過兩時期之 DSM 資料進行差異分析，將可有效識別邊坡差異區域。

本研究所獲致之結論與建議詳列如後。

8.1 結論

1. 本研究為建立在「基於三維重建的自動攝影測量監測技術」作為工作之主軸，結合近景攝影測量技術，利用非量測相機，採用多視點攝影的方式對被監測區域進行攝影，採用「監測點的位移分析」及「整體點雲的差異分析」兩種方案進行道路邊坡的位移及變形監測的監測。
2. 使用不同規格的非量測性相機對目標進行攝影，由序列的實驗分析結果顯示，其結果為：
 - 1) Canon RMS : 0.42 像元
 - 2) Nikon RMS : 0.47 像元
 - 3) Sony RMS : 0.37 像元
 - 4) Canon RMS : 0.50 像元
 - 5) Sony RMS : 0.40 像元

顯示利用多視立體影像進行監測點之三維重建，其定位精度可達 0.4~0.5 個像元以內，因此，在監測工作之規劃中，對「監測點的位移分析」方法，應先決定監測點之量測精度 σ ，並據以決定攝像的解析度 2σ ，配合相機的內方位選擇適當的攝影距離。

3. 對整體點雲的重建精度，平均可達 0.5~0.6 個像元，因此，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，且成果較地面 Lidar 直接掃描量測之精度更佳。
4. 對道路事故現場的重建，由於車身亮面烤漆會對不同攝影位置的標準鏡頭產生明顯的光照反射差異，不利於三維模型的重建。改用全景相機(魚眼鏡頭)可有效改善此缺點。雖然點雲的重建精度略差，但精度可滿足事故現場量測精度的需求。

8.2 建議

1. 基於即時自動攝影測量監測技術主要還是要考慮到單次分析之時間效益，本研究中透過影像工作站對實驗區域進行計算，單一專案計算完畢，以拍攝 100 張照片為例，最少需要 10-15 分鐘可量測出監測點位置，若要加速計算效率，可透過多主機之叢集(Cluster)計算，一加速單一監測之時間，期能透過此架構計算，提升監測之時間間距，已完成即時監測之目的。
2. 本攝影測量監測方式透過非接觸方式進行三維重建，該方式仍有受限之處，比如道路邊坡上覆蓋植被，植被的生長將直接影響監測之精度，因該方式僅能針對表面進行較分析，將無法使用於表面容易受影響之監測面使用。
3. 本實驗針對監測之精度進行分析，其主要量測精度為 0.5 像元間，因此拍攝距離對於監測有相當大之影響，若作為固定巡查監測使用，面對邊坡高度較高之情況之下，可透過無人飛行載具代替人工攝影，將攝影站延伸至空中，已取得更佳之地面解析度。

8.3 成果效益與應用情形

藉由規劃適當之自動攝影系統與影像監控網路傳輸及控制系統，並由本研究所確立之多視點攝影的方式，比對被監測區域攝影所重建之不同時間序列 DEM 模型，可計算滑坡體的絕對位移量和局部變化區域的位置以及面積大小，而得到邊坡滑動及變形之量化資料，再結合本所港研中心所研發之「災害預警資料交換機」進行預警發布及資料交換之作業，而達自動化監測及通報之功效。

8.3.1 研究成果效益

1. 經由本研究提出之近景攝影測量方式，提供道路邊坡監測之解決方案，依本案提出之單相機移動拍攝方式，可提供巡檢員固定時間進行道路邊坡巡檢使用。
2. 依據本實驗模擬多相機架設於固定站上，對道路邊坡進行旋轉攝影之三維重建監測方式，可提供長期固定邊坡監測使用，該方法須配合自動量測標誌進行佈設，以自動量測標誌之表面位移量作為判斷道路邊坡之穩定性之依據，可用於高潛勢區道路邊坡使用。

8.3.2 提供應用情形

1. 相較於其他自動監測方法，成本較為低廉。
2. 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. Szeliski, R., Computer Vision: Algorithm and Applications, USA. Springer Co., 2011.
2. Hartley R., Zisserman A., Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press. London, 2000.
3. Longuet-Higgins H. C., A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections, Nature, 1981, 293(9), pp.133-135.
4. Hartley R., Zisserman A., Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2004.
5. James, M. R., Robson, S., Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with A Camera: Accuracy and Geoscience Application, Journal of Geophysical Research, Vol. 117, F03017, 2012, pp.1-23.
6. Furukawa Yasutaka, Ponce J., Accurate, Dense, and Robust Multi- View Stereopsis, IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8), pp.1362-1376.
7. 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.
8. Hirschmuller H., Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30, 2008, pp.328-341.
9. 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。
10. 竇豔豔，基於圖像序列三維重建的相關技術研究，南京資訊工程大，2013。
11. 梁偉濤，基於雙目立體視覺三維重建方法的研究，哈爾濱理工大學，2014。
12. 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年7月。

- 13.吳笛豪，應用近景攝影與地面雷射掃瞄於地物量測精度及三維建模之研究，國立高雄應用科技大學碩士論文，2008.
- 14.曾匹佑，使用地面攝影測量技術對遠距離崩塌地三維建模與應用之研究，國立高雄應用科技大學碩士論文，2011.
- 15.陳俊山，近景攝影測量於橋樑監測應用之研究，國立高雄應用科技大學碩士論文，2011.
- 16.Charles Loop, Zhengyou Zhang,.Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision, Microsoft Research,1999.
17. Olivier D, Faugeras. Proceedings of European Conference on Computer Vision, 1992.
- 18.Olivier D. Faugeras; Quang-Tuan Luong and Steven Maybank, Proceedings of European Conference on Computer Vision,1992.
- 19.Richard Hartley and Andrew Zisserman. Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-54051-3.,2003.
- 20 P. Debevec, Reconstructing and Augmenting Architecture with Image-Based Modelling, Rendering and Lighthing.Proceedings of the International Symposium on Virtual Architecture (VAA'01), pp. 1-10, Dublin 21-22 June 2001.
- 21.O.Faugeras,Three-Dimensional Computer Vision.MIT Press, 1993.[Fitzgibbon98]A.W. Fitzgibbon, A. Zisserman,Automatic 3D Model Acquisition and Generation of New Images from Video Sequences.In Proceedings of European Signal Processing conference (EUSIPCO '98), Rhodes, Greece, pages 1261-1269, 1998.
- 22.J. Heikkila, O. Silven, A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. In Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1106-1112, 1997.[Kumar94]R. Kumar and A. Hanson. Robust Methods for Estimating Pose and a Sensitivity Analysis.

- CVGIP-Image Understanding, Vol. 60, No. 3, pp. 313-342, 1994.
- 23.R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Vol. I, pp. 99-106, January 2002.
 - 24.M. Pollefeys, 3D Modelling from Images, Tutorial notes, in conjunction with ECCV 2000, Dublin, Ireland, June 2000.
 - 25.R.Y. Tsai, An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, pp. 364-374, 1986.
 - 26.R.Y. Tsai, Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, No. 4, pp. 323-344, August 1987.
 - 27.Reg G. Willson Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses Ph.D. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, January 1994.
 - 28.Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactionson Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000
 - 29.Hartley R. I., Kruppa's equations derived from the fundamental matrix, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(2), pp.133-135.
 - 30.Martinec D., Pajdla T., Robust Rotation and Translation Estimation in Multiview Reconstruction, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, USA, 2007, pp.1-8.
 - 31.Brown M., Lowe D. G., Unsupervised 3D Object Recognition and Reconstruction in Unordered Datasets, Proceedings of the International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Canada,

2005, pp.56-63.

- 32.Schaffalitzky F., Zisserman A., Multi-View Matching for Unordered Image Sets, or How do I Organize my Holiday Snaps?, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision, Copenhagen, Denmark, 2002, pp.414-431.
- 33.Vergauwen M., Van Gool L., Web-Based 3D Reconstruction Service, Machine Vision and Applications, 2006, 17(6), pp.411-426.
- 34.Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R., Modeling the World from Internet Photo Collections, International Journal of Computer Vision, 2008, 80(2), pp.189-210.
- 35.Tomasi C., Kanade T., Shape and Motion from Image Streams Under Orthography: a Factorization Method, International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2), pp. 137-154.

附錄一
期末報告審查意見處理表

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-103-H1DB008

計畫名稱：道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究

執行單位：國立高雄應用科技大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
陳景文 委員： 1. 研究目的為對公路邊坡的穩定度及可能導致的滑動災害進行監測。唯邊坡穩定度乃全面性之數值，而利用攝影及數個固定點和面之組合，其精度確性，請說明。而邊坡之穩定或不穩定可能為長期或瞬間發生，利用攝影技術是否能掌握瞬間發生之不穩定性，請說明。 2. 能否將攝影技術與常用之傾度管傳統儀器之成果作比較？	近景攝影測量方式之邊坡穩定度監測實驗中，假設用於固定監測區域使用，無法全面針對目前所有邊坡均是用，因此對於長期監測而言，攝影測量監測技術可用於長時間邊坡滑動使用，若瞬間發生之不穩定，則較無法進行即時預警。 傾度管物理監測方式，而攝影測量屬於幾何監測方式，兩方法之監測出發點不同，但在未來應用成面上可考慮進行相關比較實驗。	同意辦理。 同意辦理。
劉啟清 委員： 1. 本計畫在短短三個月內，能依據道路邊坡滑動的監測提出利用自動攝影系統的監測方法，作了很深入的理論探討，在技術上也有相當的突破，非常不容易。 2. 在研究背景方面，對於宏觀地質監測法方面有用衛星或航測影像的地形學方法，可以看出區域的石滑動。也有從順向坡	感謝委員肯定。 攝影測量監測技術廣泛，泛指高空宏觀之衛星監測，或本實驗中使用之近景攝影測量方式，這些方式僅能得知邊坡目前之表	同意辦理。 同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
或逆向坡來探討道路邊坡地的穩定性。	象，提供相關主管機關提前擬定應變作為，若要探討邊坡滑動之機制，必須輔以其他監測方式及地質特性進行力學探討。	
3. 時間域反射技術 TDR，請註明全名，而且他對於坡地變動位置是利用反射波的回傳時間來判斷，而變動量是用反射波的震幅(能量)來判斷而非只是反射波所需的傳波時間。	遵照委員意見修正，於期末報告補正。	同意辦理。
4.P.5-2 請標示尺寸及方向。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。	同意辦理。
5.下階段應該找一實際變動之坡地，利用另一獨立較精準的方法互相比較來驗證。	因短期研究計畫時間問題，後續之相關應用一定還需要與真實滑動區域進行比較，得以驗證相關方法之適用性。	同意辦理。
6.坡地拍攝往往相機角度不易掌握，植物生長干擾都可能造成問題。	攝影測量不可否認僅能對表面進行監測，因此若監測區有植物生長，或是相關干擾時，於成果上一定會受到影響。	同意辦理。
崔國強 委員：		
1. 部分文字及排版問題，請予以修正， P1-4 8.8=>8； P1-7 13~19;P1-8;P1-9;P2-34;P5-19 請修正。	遵照委員意見修正，於期末報告補正。	同意辦理。
2. 本文短時間內完成研究報告，頗值得肯定。	感謝委員肯定。	同意辦理。
3.建議在結論中，加強以低成本設備完成高效益之成果研究，在那些特定環境下，能達到0.4~0.5個像元精度。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。	同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
陳清河 委員： 1.研究報告第七章交通事故現場重建並未在原訂工作項目中，可於第一章前言中提及。 2.本計畫目的之一，在”建立道路邊坡坍塌預警判定機制模式”(P1-10)，為達此目標，請問本計畫達成程度如何。 3.本研究強調此方法”相較於其他自動監測方法，成本較為低廉”可否出略評估此方法所需經費，時間精度與其他方法之差別。 4.報告中有部分文自己圖表編號有誤，請再修正。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。 本研究計畫中因時間期程較短，研究過程中先行探討方法之可行性，在確定可行性之後，可透過現地自動拍攝及影像工作站計算之方式，對監測點進行序列資料分析，再給予門檻值進行預警判定。 以表面非破壞性監測比較項目為 Lidar 三維點雲重建方式為比較對象，該設備動則好幾百萬，與相機僅需幾萬元相比，成本就已經相差近 250 倍，而作業時間則依據拍攝張數及後處理時間進行探討。 遵照委員意見修正，於期末報告進行補正。	同意辦理。 同意辦理。 同意辦理。 同意辦理。
蔡榮得 委員： 1.P2.2：圖 2.1 後之文字說明，C 和 C'應為相片拍攝時之曝光中心，而非像主點。LL'為核線，說明錯誤，L(me)及 L'(m'e')為核線。 2.基礎矩陣、基本矩陣；外方位參數中角方位元數之旋轉矩陣、本質矩陣，說明不足或定義矛盾。	遵照委員意見修正，於期末報告進行補正。 遵照委員意見修正，於期末報告進行補正。	同意辦理。 同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
3.P2-5, F 為奇異矩陣(singular matix).dot(F)=0,與基礎矩陣(旋轉矩陣)之特性不符。	基礎矩陣求解方式於電腦視覺領域行之有年,可透過 Ransac、LMeds 等方式進行推估求解。	同意辦理。
4.數學理論,公式,符號系統及說明,易引起疑慮,宜重新修正,便個符號之使用維持一致,尤其用矩陣符號推倒之過程,宜更審慎。例如矩陣 K^{-T} 為何運算?為一般教科書及文獻所不常見,另外 $\frac{d}{dx}A^{-1} \rightarrow (-1)A^{-1}\frac{dA}{dx}$ (公式 2-31) $Af + L = 0 \Rightarrow f = -A^{-1}L$ A 是否為方陣?可求解 A^{-1} 嗎?對矩陣而言,該微分要成立,A 應為方陣才可。	遵照委員意見修正,於期末報告進行補正,另外關於演算式推導過程,本文採用電腦視覺領域慣用寫法,該寫法並非創新或是本研究中推導,可參閱 Computer Vision based Method for 3D Reconstruction of the Standing Trees 相關書籍。	同意辦理。
5.P2-13,公式(2-21)中個符號之說明。	在不考慮相機畸變差的情況之下,相機之內參數矩陣為公式(2-21),式中 a_x 、 a_y 分別是 x 和 y 方向的放大倍數, (u_0, v_0) 是相主點的像素坐標系統。	同意辦理。
6.Bundle Adjustment 中文用語不一致。	SfM 方法中所使用之方式為集束調整(Bundle Adjustment),與航測慣用之 Bundle Adjustment 不同,主要描述並非整體平差,而是透過區域方式平差,推估最佳值之後再進行整體平差之方式。 遵照委員意見修正,於期末報告進行補正。	同意辦理。
7.第四章、P4-8、P4-9:公式(4-21)~(4-5)中個符號之使用其意義應一致。	遵照委員意見修正,於期末報告進行補正。	同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
8.第五章、各使用之相機經率定後，在拍攝過程中會否應攝影站(曝光中心)過多，在移動裝置作成中，內方位參數受到擾動而改變？	SfM 方法成功之處在於透過自率定方式進行相機率定，該方式進行相機率定可依據不同拍攝條件，選擇不同拍攝焦距進行拍攝，而解決定焦之問題，可於對焦完畢後將焦距進行鎖定，至於拍攝是否會受到拍攝移動問題而有所影響，此問題於現代照相機而言，以快速快門進行拍攝就可以解決此問題，另外如果用錄影方式，則可透過高 FPS 進行錄影，亦可解決拍攝模糊之問題。	同意辦理。
9.第六章、P6-1 6.1.1 最後一段不完整。P6-3:表 6-1 僅提供拍攝距離與解析度之關係未提出最佳拍攝距離之建議。	遵照委員意見修正，於期末報告進行補正。拍攝距離可依據監測精度，再換算拍地面解析度進行求取，表 6-1 為本實驗其中之一相機之計算成果，計算公式可參考式(6-1)與式(6-2)。	同意辦理。
10.參考文獻及其於本文中之引用有待改善。	遵照委員意見修正，於期末報告進行補正。	同意辦理。
11.人力及時間、經費等成本分析。	人力及時間、經費分析於後續再提供貴單位使用。	同意辦理。
林雅雯 委員：		
1.摘要中心研究人員及電話傳真皆填寫錯誤，摘要請將本計畫成果及效益納入。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。	同意辦理。
2.當邊坡高度很高、遠超過 7 公尺，上下排的地錨被拍物斜距不同，如何考量。	當拍攝高度影響時，可透過無人飛行載具等設備，將攝影站延伸至空中，以平行方式進行拍攝，以解決相關拍攝問題。	同意辦理。
3. 報 告 P.5-28 表 5-22 之	該表格詳列均方根誤差並以真	同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
RMSE(cm)應為 Pixel Size(cm)。	實距離公分進行詳述，因此並非 Pixel Size 實際距離。	
4.建議以一邊坡案例為例完整敘述拍攝作業流程、步驟、方法、考量因素及分析軟體、分析流程及步驟並增列於第六章。	因繳交時程問題，將於爾後再補充相關標準作業流程供貴中心參考。	同意辦理。
5.報告 p.5-30 結果數據敘述公厘應為公分，第四行兩次監測點均方根誤差為 0.8 公分，監測點最大誤差為 1.79 公分，P.5-32 公厘亦請改為公分。	確認單位為公厘。	同意辦理。
6.結論請將實驗之結果、解析及結論敘述。點雲可達 0.5~0.6 個像元前面並無提及。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。	同意辦理。
7.結論請改為結論與建議，並增加建議一節。	遵照委員意見修正，於期末報告補充說明。	同意辦理。
胡啟文 委員：		
1.P1-9，藉由兩期共軛點匹配來比對邊坡之變化，若監測區產生大規模邊坡滑動後，致使無共軛點可供比對時，應如何處置。	本實驗假設控制點為不易變動之區域進行相關實驗探討，但若該區域已經開始產生滑動導致所謂的共軛點消失情況之下，必定代表已經開始產生破壞性滑動現象，因此可參考本實驗中，透過面比對方式，面比對方式可透過部分仍為不動之共軛點，將兩期資料進行轉換，再透過交叉比對，以達到監測之目的。	同意辦理。
2.P2-36，文末敘述本結中兩方案進行相關實驗，而該結中並無兩方案可查閱，請修正。	此兩方法針對自動辨識，自動量測標進行相關實驗，並針對本文中提出之 Hattori 及 Schneider 編碼標進行相關實驗。於期末報告	同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
3.P3-9, 邊坡表面監測預警值之測量誤差需達小於 0.5mm 之要求, 惟以近景攝影測量是否可達該誤差之要求? 請說明。	補充說明。 邊坡滑動預警值相關管理值參考廖瑞堂 2001 年著作之文獻, 該文獻採用物理模式進行監測, 意旨應力計、傾度管等, 因此這些值為內應力所產生之位移量, 並非表面滑動之依據, 相關透過表面滑動之判定依據還有待相關實驗數據驗證。另外本實驗中對於表面滑動之精度值約為 0.5pixel, 因此若要達到精度, 可拍攝 GSD 為 1 公分以內, 即可達到此精度需求。	同意辦理。
4.圖 3.1, 邊坡監測預警系統流程, 建議可將本所建立之「災害預警資料交換機」機制(收集、整合、自動通報)納入。	遵照委員意見修正, 於期末報告補充說明。	同意辦理。
5.P4-2, 交通事故重建需有一距離參考, 所謂距離參考為何? 請於文中舉例說明。	所謂的參考距離指的是尺度約制, 因 SfM 利用假設坐標系統進行三維重建, 若要讓此系統擁有量度功能, 則必須透過尺度約制的方法, 讓模型空間回到真實比例, 而這個距離參考, 可透過現地量測部分真實距離, 或是透過尺度棒的方式進行約制。	同意辦理。
6.P4-11, 拍攝影像藉由網路傳回影像工作站進行叢集運算, 惟影像檔案多且容量頗大, 尤其與山區藉由無線網路傳輸上相當耗時, 而有無法達成即時監測之效果, 應如何改善? 再請說明。	此問題於山區的確會造成非常大的問題, 因此監測區域是否架設固定線路網路, 或是透過 Lte 4G 進行傳遞, 將是未來此方法用於山區最大之問題, 若此區域真的無法進行網路傳遞, 則影像工作站將架設於監測區使用。	同意辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
7.以將焦距固定之方式進行相機率定取得內外方位參數，惟率定完成後之攝影階段，其焦距之設定為何？有無須注意之處。	本實驗中提出透過預率定方式是為了解決單點旋轉攝影於攝影幾何較弱的情況之下，預先進行率定可以提高量測精度，但如果是平行攝影，只需要注意利用固定焦距進行拍攝，拍攝之成果再透過直接自率定方式進行相機參數求解即可。	同意辦理。
黃俊豪 委員： 1.建議製表呈現各方案(單機、多機、旋轉、光達、uav...)之成果精度、作業效率(請將內、外業分列)及設備費用等供參，並進一步估算單位長度(或面積)所需產製成本。	因本案中無進行相關不同方式之成本計算，因此較難進行相關比較，於後續將針對此進行比較，再提供相關資訊供貴單位使用。	同意辦理。

附錄二

期末報告簡報資料



道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究 期末報告 簡報



計畫主持人：李良輝

國立高雄應用科技大學 土木系

Geospatial Information Lab.

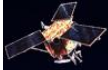


內容 (Contents)

1. 研究背景與目的
2. 多視立體視覺近景量測系統
3. 研究方法與進行步驟
4. 目前工作進度與部分成果
5. 結論

Geospatial Information Lab.



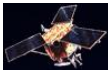


一、研究背景與目的

20世紀90年代以來，受人類活動和全球化的影響，地質災害越發嚴重，地質災害發生的規模、數量和分佈範圍呈上升趨勢，給人民群眾帶來的損失也越來越大。地質災害已成為嚴重制約我國經濟發展的重要因素之一，而滑坡是我國最常見和最多發的地質災害之一。

滑坡對工程建設的危害很大，輕則影響施工進度，重則破壞了建築結構。滑坡可以中斷交通，影響鐵路的正常運輸；大規模的滑坡，更可以掩埋村莊，阻塞河道，摧毀公路。因此，對滑坡建立有效的監測系統，既有利於我們採取一定的措施避免滑坡的發生，又能夠減少滑坡發生後的重大損失。

Geospatial Information Lab.

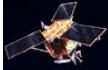


公路邊坡監測的意義

- ① 邊坡監測能為邊坡的穩定性分析提供可靠資料。
- ② 邊坡監測能為判斷邊坡破裂面的位置提供可靠依據。
- ③ 邊坡監測能為邊坡工程岩上體力學參數的反演分析提供資料，提高邊坡工程岩上力學參數的準確程度。
- ④ 邊坡監測結果是評價邊坡理論分析結果和經驗判斷成果的依據，是修改設計和指導施工的客觀標準。
- ⑤ 邊坡監測的結果能為預測邊坡變形破壞趨勢、評價邊坡的長期穩定性提供條件。
- ⑥ 邊坡監測能為分析岩體結構與邊坡變形破壞的關係，掌握邊坡變形特徵和規律，研究邊坡穩定性的影響因素，指導在邊坡發生嚴重變形條件下的應急處理提供依據。
- ⑦ 邊坡監測能為邊坡加固效果的評估提供依據。

Geospatial Information Lab.





目前常用的滑坡監測方法

1. 宏觀地質調查監測法
2. 大地精密測量法
3. 儀錶監測法
4. GPS衛星定位滑坡監測
5. 合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)
6. 時間域反射技術(TDR)
7. 布裏淵散射光時域反射技術(BOTDR)
8. 三維雷射掃描技術(3D LiDAR)
9. 近景攝影測量技術

Geospatial Information Lab.

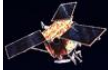


常用的滑坡監測方法之特點

- (1) GPS很容易實現在大區域的連續測量，測量精度在釐米級，具有點與點之間不要求通視、不受天氣影響可全天候觀測等優點。缺點是測量精度不夠高、易受地形的影響、成本較高；
- (2) 自動伸縮計地表位移監測法具有精度高、價格低廉、安裝簡單等優點。缺點是測量的資料只是局部變形，需要多台自動伸縮計串聯來消除這種缺點；
- (3) 合成孔徑雷達干涉測量法適於解決大面積的滑坡、崩塌、土石流以及地面沉陷等地質災害的監測預報，是一項快速、經濟的空間探測高新技術，但雷達資料獲取的品質依賴於季節和天氣條件，潮濕的天氣和高植被覆蓋率會明顯影響相關性；

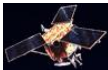
Geospatial Information Lab.





- (4) TDR是一種遠端電子測量技術，TDR系統採用廉價的同軸電纜作為感測器來確定滑坡的剪切面或形變區域，可快速採集到數值量測結果，但不能用於需要監測傾斜情況及不存在無剪切作用的區域，另外，它無法確定滑坡移動量和滑坡移動的方向。
- (5) 3D雷射掃描(LiDAR)是利用雷射技術直接獲取表面點雲資料，作業簡易，精度高。但資料後處理繁雜且儀器昂貴，成本高，不易普及。

Geospatial Information Lab.



研究目的

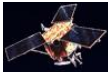
本研究主要針對公路邊坡的穩定度及可能導致的滑坡災害提出：

「基於三維重建的自動攝影測量監測技術」

- 1.公路邊坡在自然的雨水侵蝕以及載車行走震動疊加效應下，易導致滑坡災害。
- 2.傳統的大地觀測法、儀錶觀測法、GPS觀測只能進行點監測，在利用監測點監測變形體時，由於測點數量有限，難以反映邊坡體變形的細節和全貌。特徵資訊不夠全面，無法獲取其他部位或整個地質體的空間位移模式。

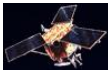
Geospatial Information Lab.





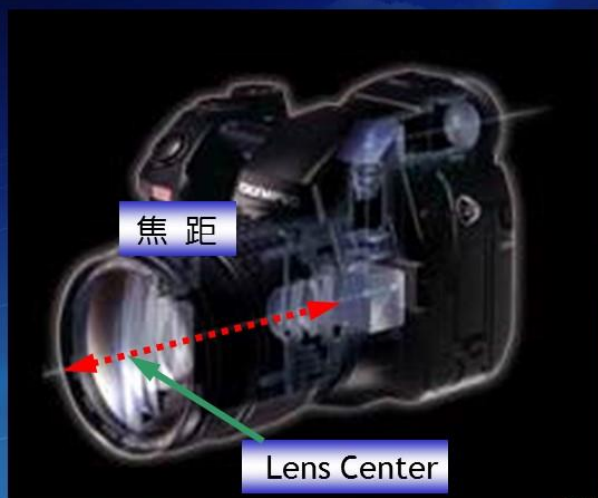
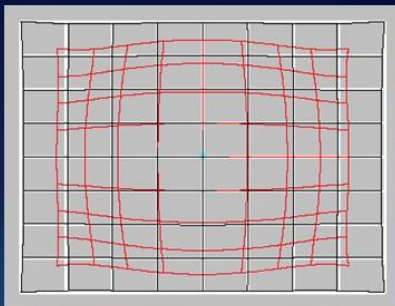
3. 隨著數位相機在畫素與解析度的技術進步，加上影像處理定位技術高精度與即時化的發展，近景攝影測量因不需要登臨邊坡現場佈點，作業簡易且成本低廉，該技術在公路邊坡監測或滑坡監測方面具有相當的應用與發展的潛力。
4. 公路邊坡表面位移增量是分析邊坡穩定性的重要依據。傳統的邊坡測量只能測量假設邊坡下滑點的位移增量，不能表徵整體的位移變化，因而影響邊坡穩定性分析。將近景攝影測量技術應用於公路邊坡監測，預期將可獲得較好的效果。

Geospatial Information Lab.



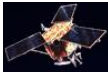
像機率定 (Camera Calibration)

Lens Distortion)



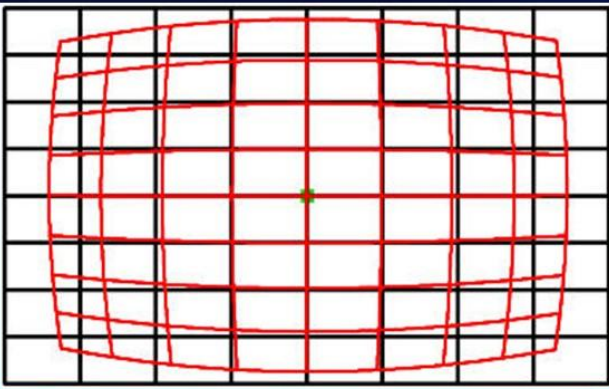
Geospatial Information Lab.





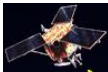
相機率定結果

Panasonic Lumix LX2

	Inner Orientation	
	f (mm)	6.163694
	x_0 (mm)	3.458365
	y_0 (mm)	2.143671
	Radial Distortion	
	K_1	3.654513e-003
	K_2	-5.564247e-005
	Tangential Distortion	
	P_1	-1.054308e-004
	P_2	-9.677860e-005

Max of Before Correction : 71.123 Pixel

Geospatial Information Lab.



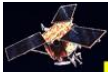
相機的自率定(室外率定新方法)

1. 至少24張圖片，並分布於一個四方型範圍中，並使用四條航帶進行拍攝。
2. 所有的圖像應該對地拍攝。
3. 航片重疊率約80%，航向重疊率約60%為最合適。
4. 所有影像中，必須剔除運動模糊所造成的相片。
5. 率定區域必須選擇一平地，無植被之影響。



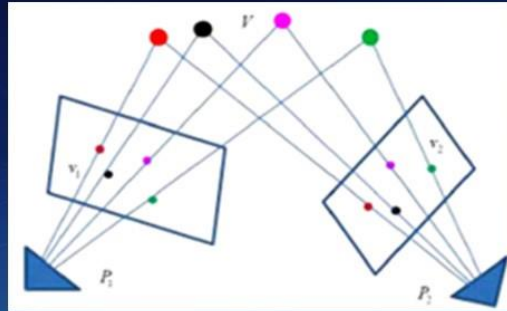
Geospatial Information Lab.





Kruppa方程式的相機自率定

只要利用多張影像的特徵點多餘觀測進行求解。
利用多視立體視覺的方式取代雙目立體視覺。

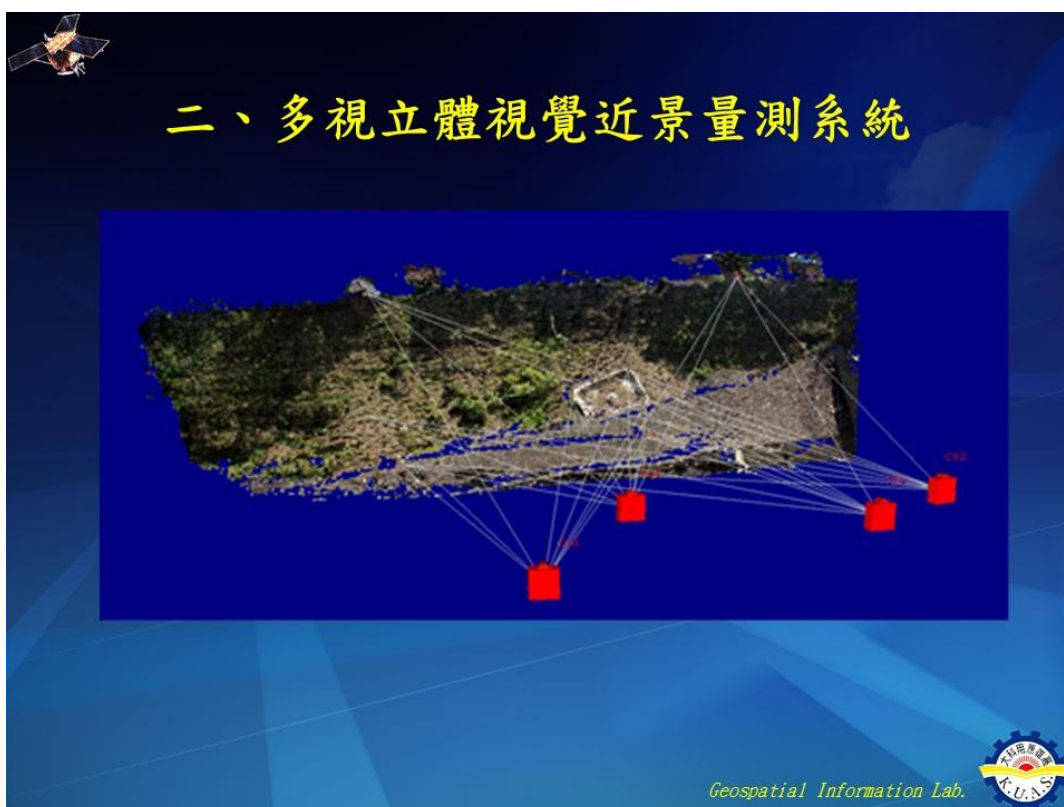


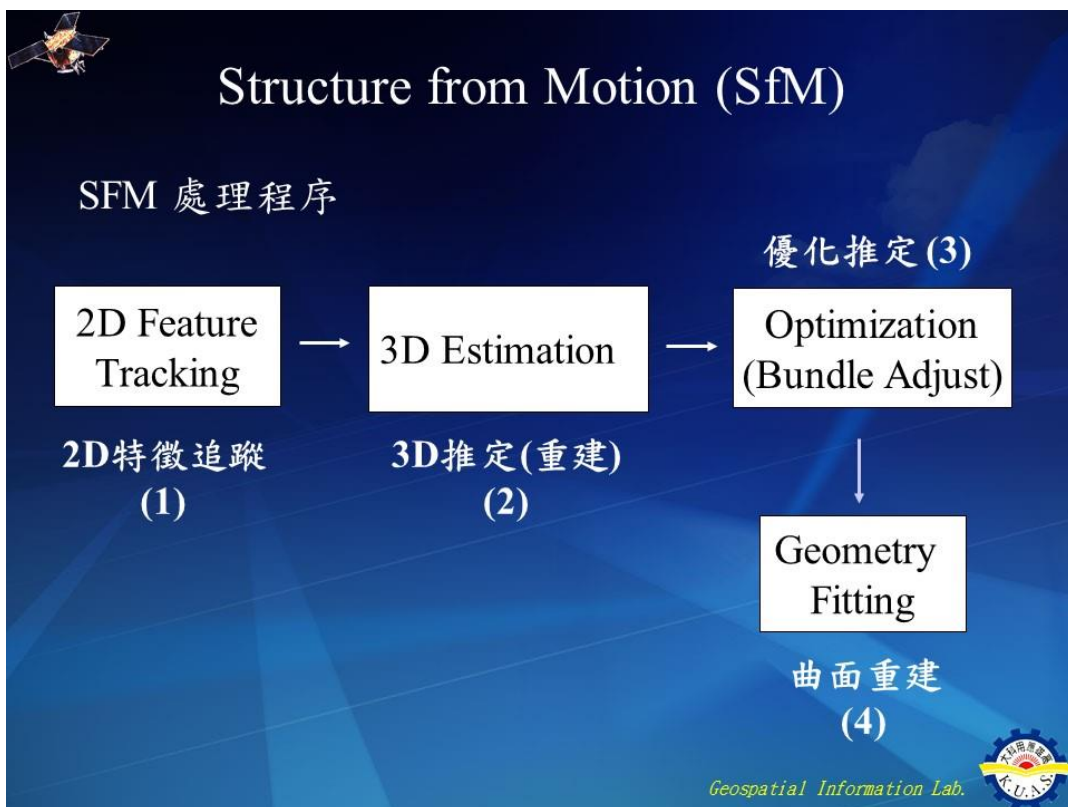
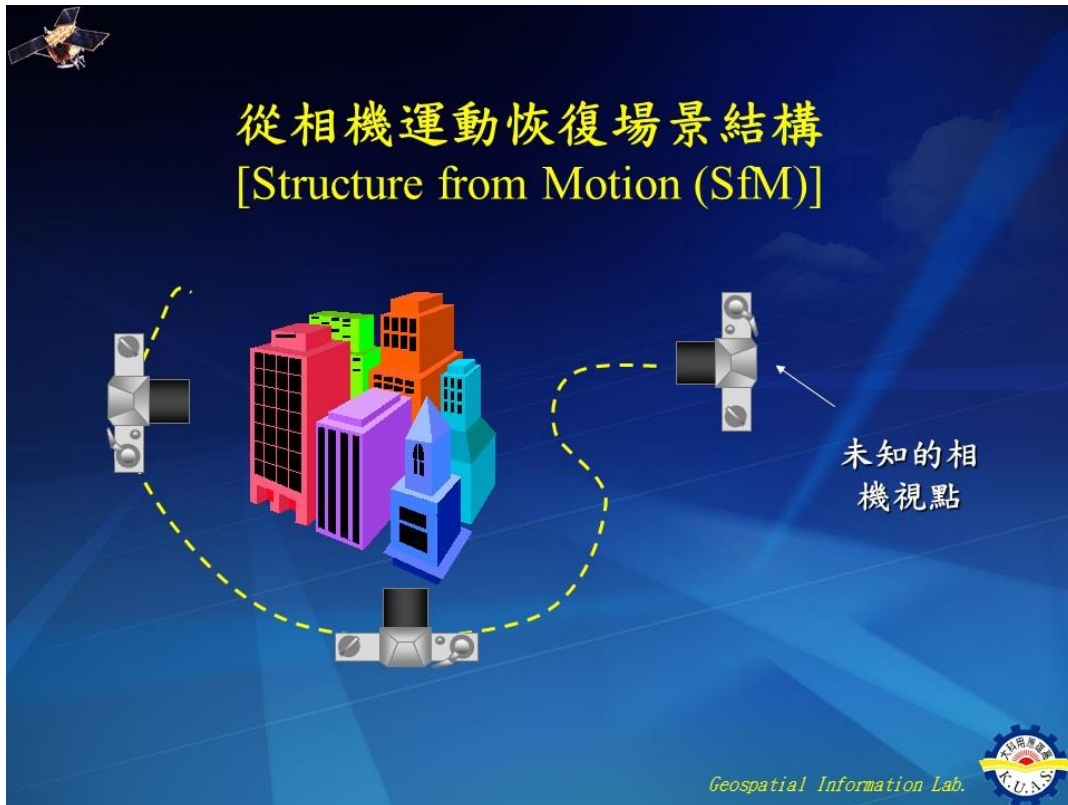
絕對二次曲線: $x^2 + y^2 + z^2 = 0, t = 0$

Kruppa方程式: $m^T K^{-T} R R^T K^{-1} m = m^T K^{-T} K^{-1} m = 0$

Geospatial Information Lab.







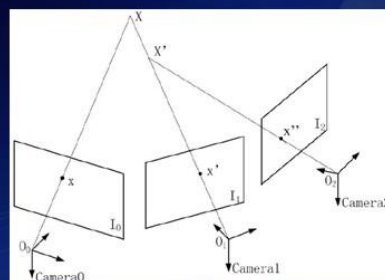


Structure from Motion (SfM)

(1)



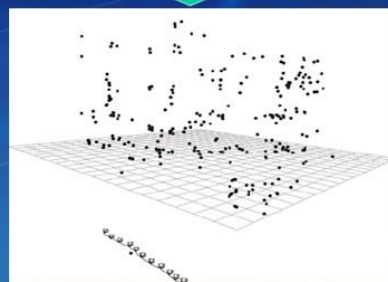
(2)



(4)



(3)



Geospatial Information Lab.



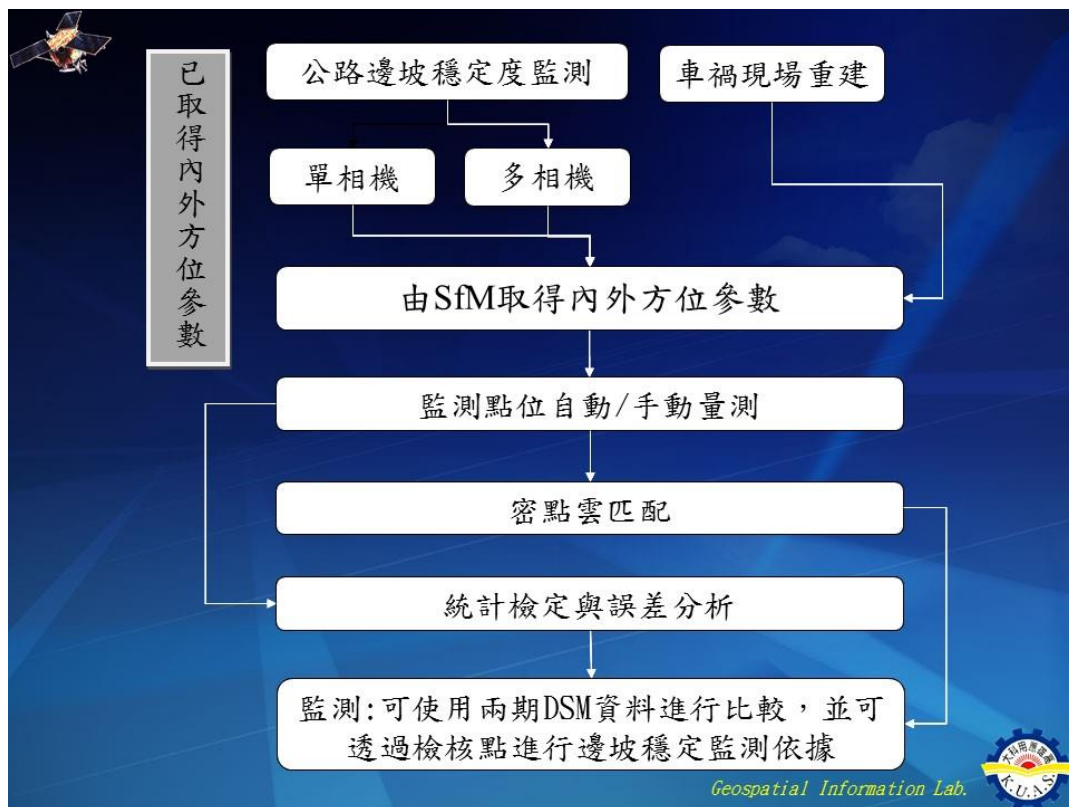
三、研究方法與步驟

「基於三維重建的自動攝影測量監測技術」

結合近景攝影測量技術，利用非量測相機，採用多視點攝影的方式對被監測區域進行攝影，使用攝影測量軟體系統獲取被監測區域的三維表面點雲模型，透過自動匹配兩期影像控制點，將監測區域二期的相對三維模型轉換到一期的絕對三維模型中，然後分別生成DEM模型，並對兩期DEM模型進行疊加，計算滑坡體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山體的滑坡監測。

Geospatial Information Lab.

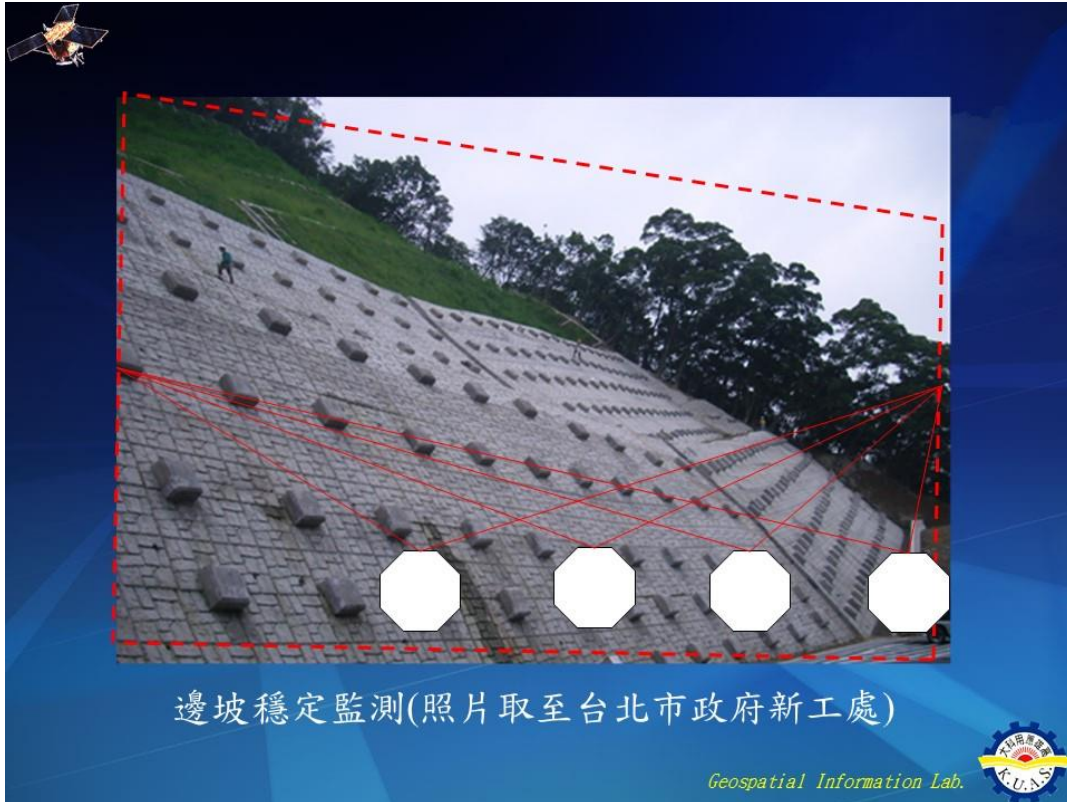




近景攝影測量道路邊坡監測系統實施方案

方案一、監測點處理

1. 對監測區域進行多重視點攝影。
2. 對具有明確地物點的道路邊坡，如地錨凸面角點作為監測點，利用Harris角點偵測演算法於影像中提取其位置資料。
3. 建立控制點參考座標系統。
4. 利用影像三維重建技術獲取個監測點之空間座標。
5. 比對各期監測點空間座標位移量之統計分析。

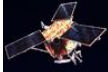


近景攝影測量三維滑坡監測系統實施方案

方案二、監測面、體處理

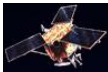
1. 第一次進行滑坡監測時，使用免棱鏡全站儀測量4個或4個以上(根據監測區域大小而定)分佈均勻的控制點。首先對相機進行檢校，將一期影像、相機檢校參數和控制點輸入到近景攝影測量軟體系統中，得到被監測區域絕對定向後的三維點雲模型。
2. 後期滑坡現場監測時，需要保證攝影的攝站分佈位置與第一次的攝站分佈位置大致相同，從而確保後而的一、二期影像之間的匹配能夠順利進行。

Geospatial Information Lab.



3. 考慮到隨著監測時間的推移，第一次監測時佈置的控制點有可能產生了位移變動，因此第一次佈置的控制點不能用到二期的滑坡監測中，利用一、二期影像自動匹配得到的物間共軛點解算一、二期的模型轉換參數。
4. 透過對一、二期影像自動提取影像特徵點，進行一、二期影像之間對應影像的匹配，然後在一期影像與二期影像的內部分別進行點的傳遞匹配，從而得到一、二期滑坡三維模型下的共軛物方點。根據這些共軛物方點解算一、二期三維點雲模型之間的旋轉、平移、縮放等7個參數，從而將二期三維表面點模型轉換到一期的控制點坐標系中。

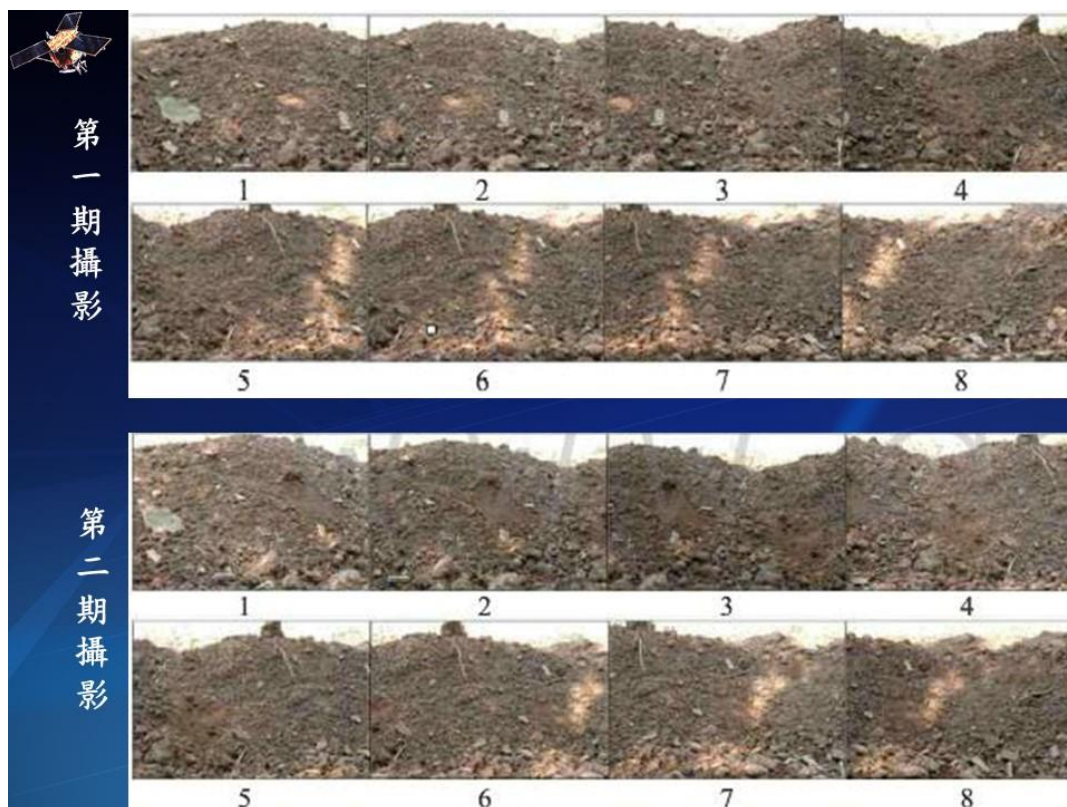
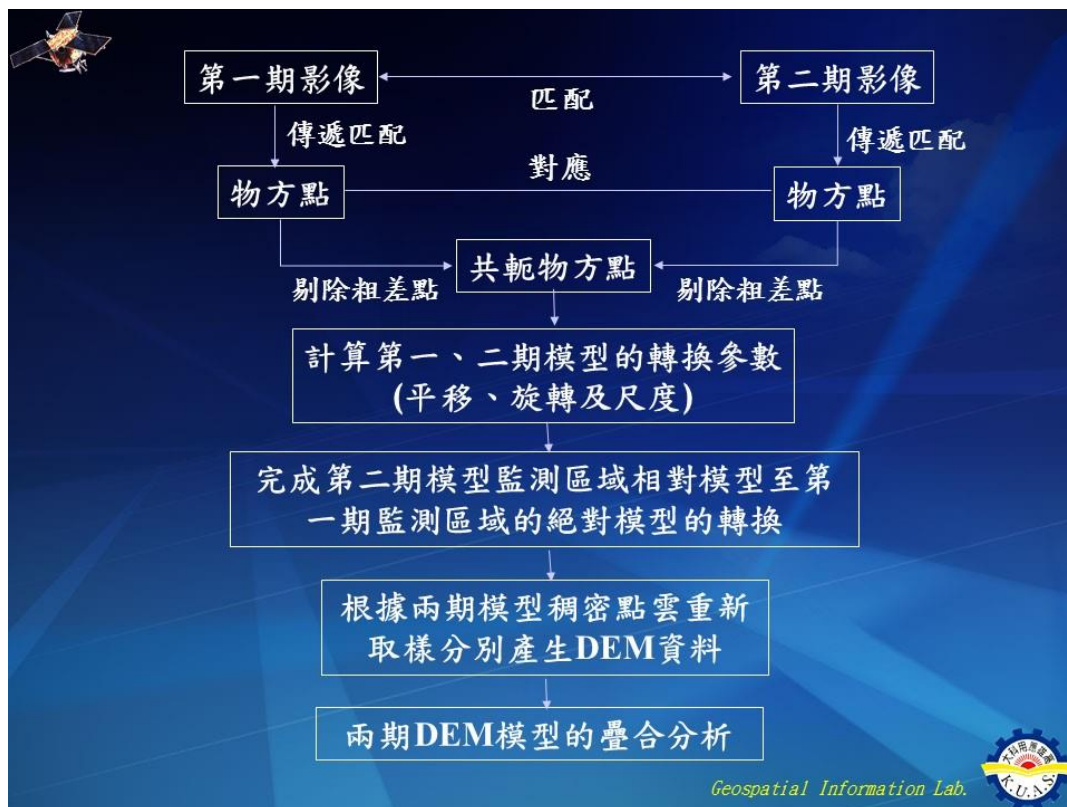
Geospatial Information Lab.

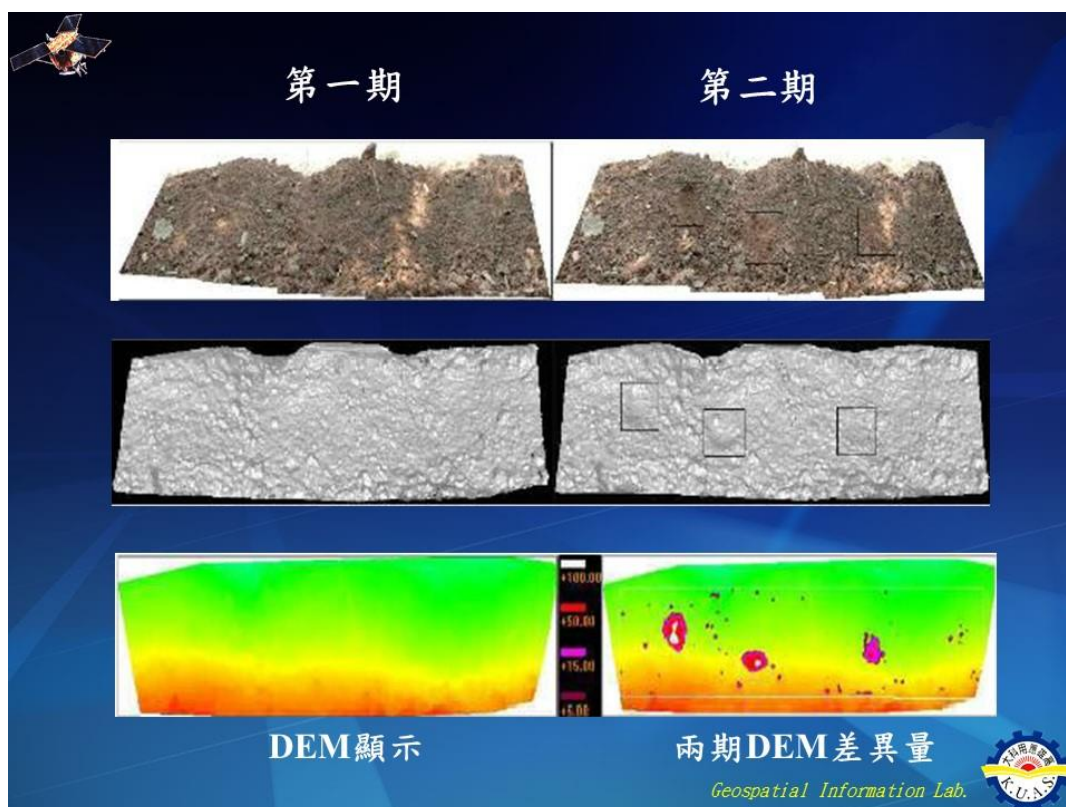
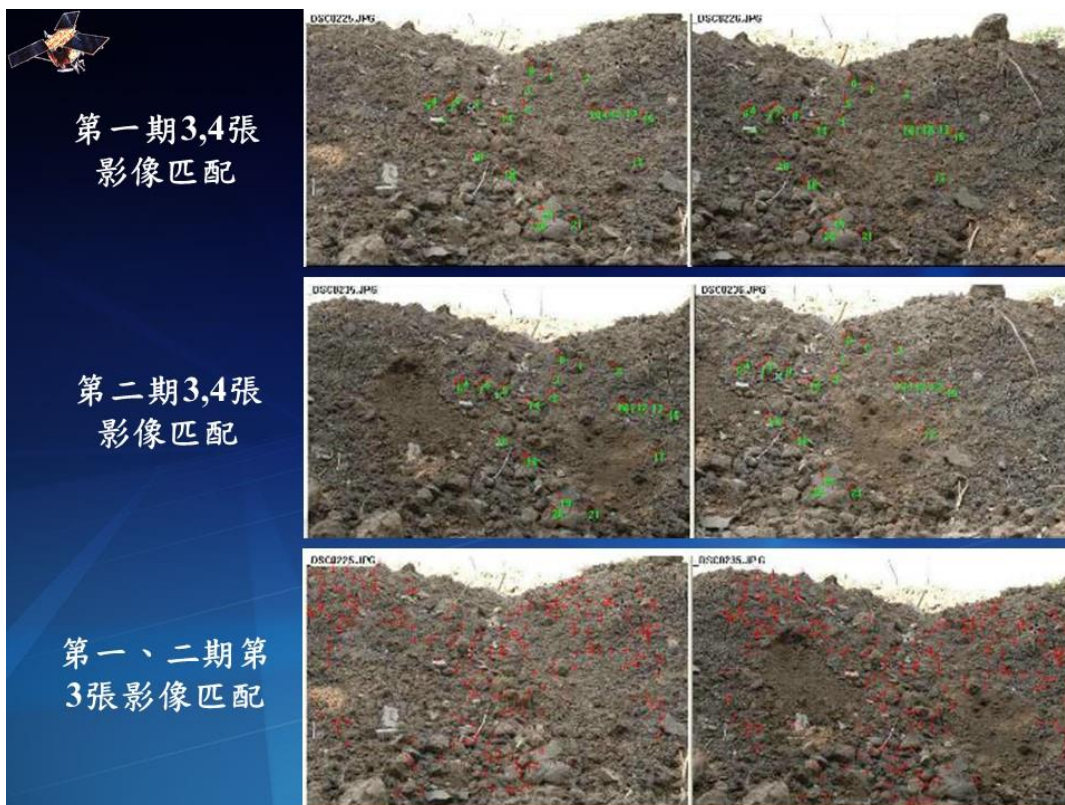


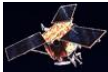
5. 對轉換到同一個控制點坐標系下的兩期三維點雲模型，按照一定的間距進行取樣，產生同一監測區域的兩期DEM模型，為了更完整地觀察整個測區兩期前後的變化情況，分別對每期的影像進行拼接。可以很直觀地看出兩期DEM的變化與影像的變化區域是相符的。然後對其進行疊加分析，計算滑坡絕對位移量以及滑坡區域的局部變化量，實現滑坡監測的目的和任務。

Geospatial Information Lab.





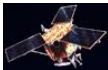




工作項目與內容

1. 實驗區的選擇：於高雄壽山選擇具有邊坡路段之適當地點作為實驗區。
2. 監測攝影模式的規劃：包括多視點攝影位置(3~5個)、相機型式、攝像解析度、可行的影像自動傳輸模式。
3. 影像定位及三維重建模式的建立、程式設計及相關的精度分析。
4. 監測位移量統計模式(顯著性)的建立與分析。

Geospatial Information Lab.

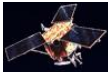


預期效益及其應用

1. 於已設置道路邊坡坍塌防治工程路段，規劃適當之自動攝像系統與影像監控網路傳輸及控制系統之設置程序。
2. 由監測影像即時計算道路邊坡防護工程網位移模式。
3. 依據本所港研中心過去相關研究成果，建立道路邊坡坍塌預警判定機制模式。
4. 相較於其他自動監測方法，成本較為低廉。
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。

Geospatial Information Lab.

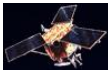




工作時程與進度(預定)

月次 工作項目	第一個月	第二個月	第三個月	第四個月	第五個月	第六個月
相關資料之蒐集與整理	■					
邊坡近景攝影測量規劃實驗	■	■				
資料整理與分析、報告撰寫		■	■			
技術與資料移轉			■			

Geospatial Information Lab.



四、目前工作進度與部分成果

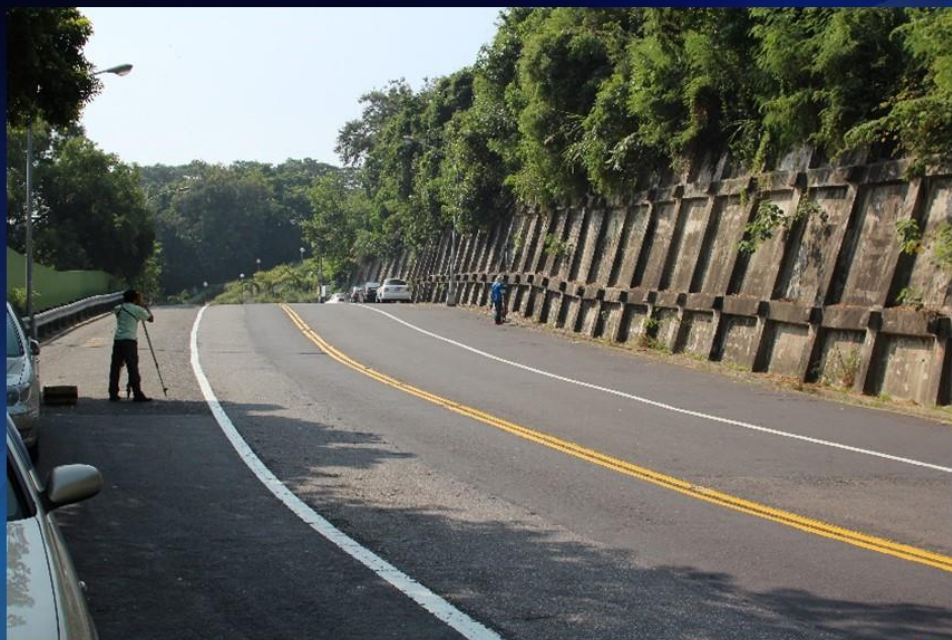
1. 實驗區的選定：高雄市壽山道路邊坡
2. 工作內容：
 - 1) 現場勘查
 - 2) 控制系統的佈設與測量
 - 3) 現場攝影的規劃與攝影 (二次, 10/1, 10/9)
 - 4) 影像的三維重建
 - 5) 監測點的定位精度分析
3. 部分成果的分析

Geospatial Information Lab.





實驗區現場



Geospatial Information Lab.

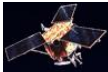


實驗區現場



Geospatial Information Lab.





相機規格與攝影方式設計

目的：瞭解並確認攝像解析度與定位精度之關係

相機規格

1. Canon EOS600D +Sigma 30mm F1.4
2. Nikon D2xs + 17mm 定焦鏡
3. Sony A55 + Sony DT16-50mm F2.8

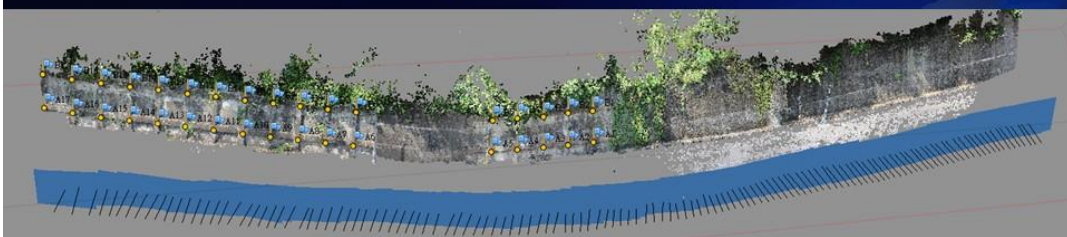
攝影方式設計

1. 沿道路(邊坡)方向攝影(常規方法)
2. 模擬固定監視器多方向與多站之交會攝影
3. 邊坡若高度太高可考慮增加UAV攝影

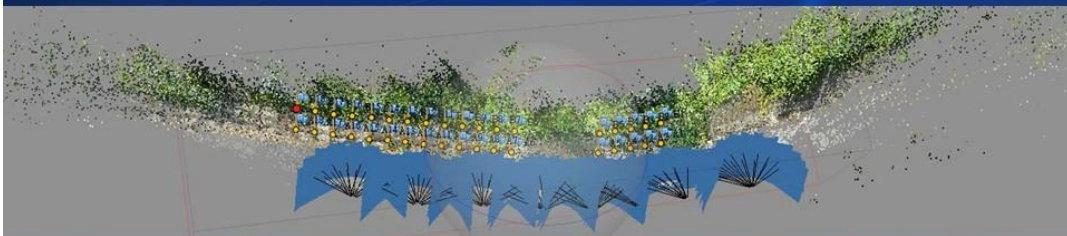
Geospatial Information Lab.



沿道路(邊坡)方向攝影

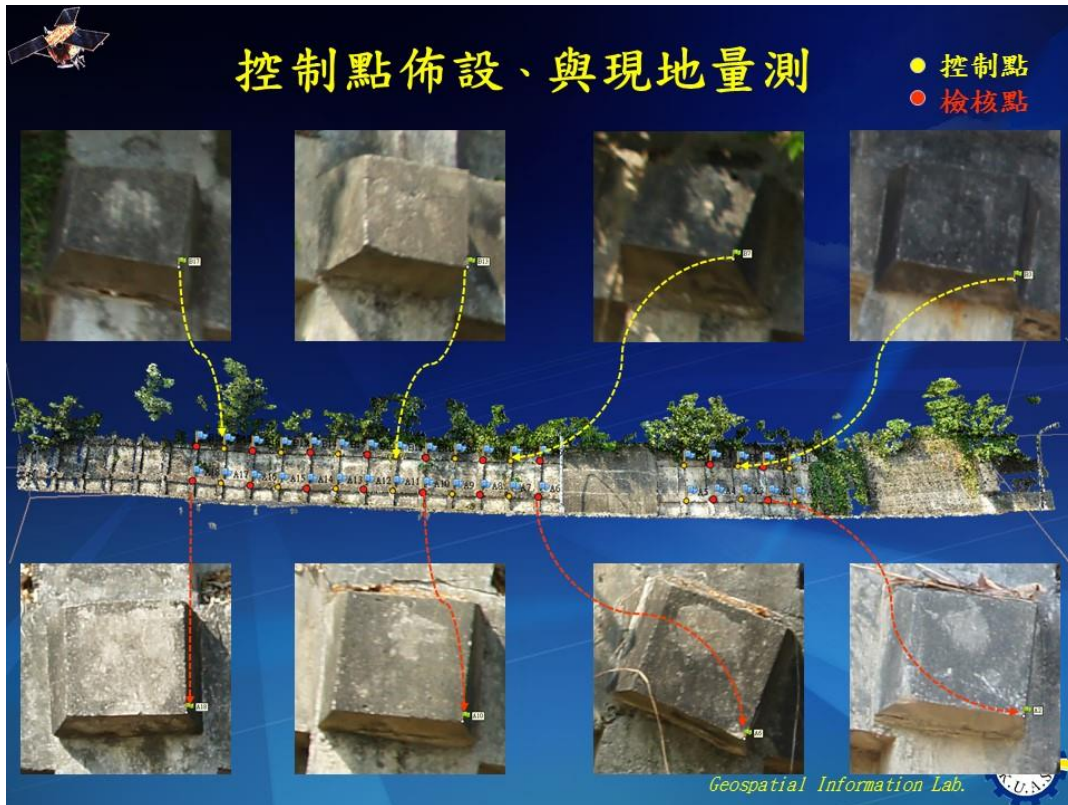


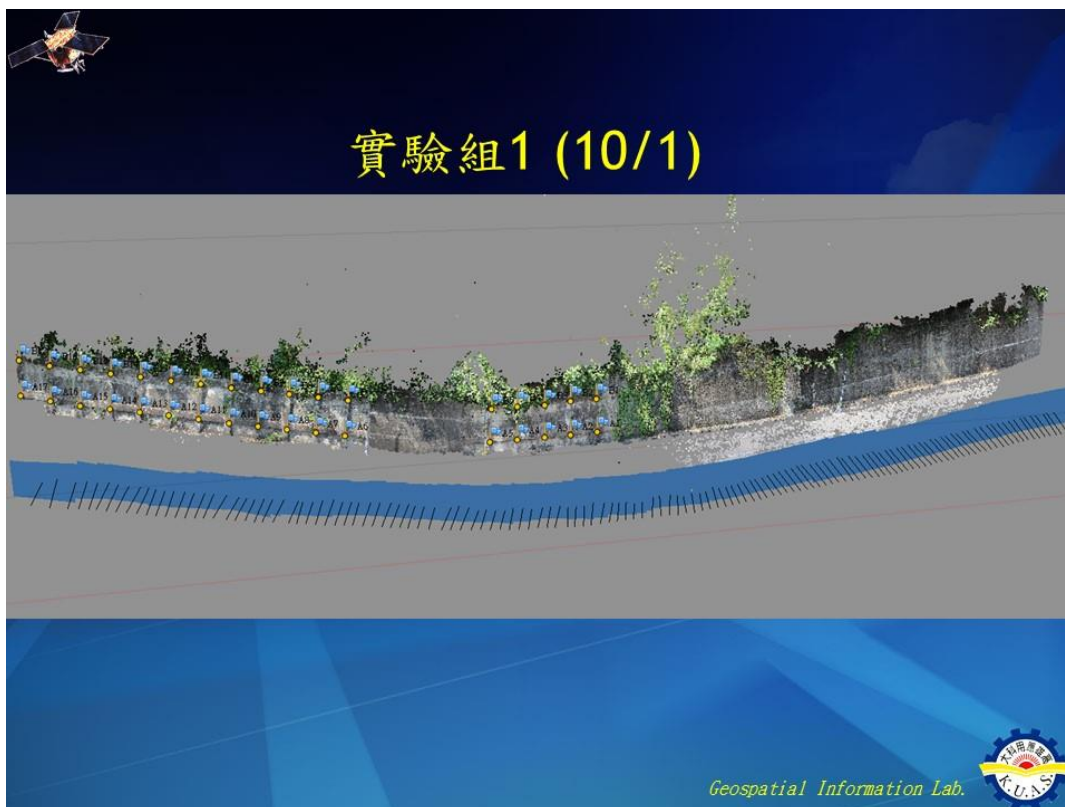
模擬固定監視器多方向與多站之交會攝影



Geospatial Information Lab.








10/01 Canon (控制點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A1	13.639	51.166	-1.043	0.029635	0.024505	0.007303	0.014980	13.614495	51.173303	-1.057980
A3	13.812	46.126	-0.549					13.812000	46.126000	-0.549000
A5	13.622	41.149	-0.307	0.028055	0.018441	0.018061	0.010991	13.640441	41.130939	-0.317991
A7	10.126	26.621	1.064	0.014911	0.013979	0.004508	0.002568	10.112021	26.616492	1.066568
A9	8.561	22.041	1.573	0.019304	0.008306	0.016903	0.004235	8.569306	22.024097	1.577235
A11	7.047	17.286	2.186	0.005661	0.002380	0.001149	0.005006	7.044620	17.284851	2.191006
A13	5.386	12.626	2.678	0.008112	0.005502	0.005939	0.000507	5.380498	12.631939	2.677493
A15	3.687	7.944	3.133	0.012425	0.009403	0.007802	0.002257	3.696403	7.951802	3.130743
A17	1.88	3.279	3.798	0.015708	0.007401	0.002332	0.013658	1.872599	3.281332	3.784342
B1	12.712	51.263	1.851	0.020522	0.007101	0.018300	0.005988	12.704899	51.281300	1.856988
B3	13.064	46.293	2.31	0.007302	0.004672	0.004711	0.003049	13.068672	46.288289	2.313049
B5	13.098	41.354	2.7	0.013147	0.012667	0.003044	0.001769	13.110667	41.350956	2.701769
B7	9.385	27.177	4.096	0.015190	0.011848	0.001639	0.009363	9.396848	27.175361	4.105363
B9	7.851	22.625	4.557	0.010122	0.001498	0.004623	0.008879	7.852498	22.620377	4.565879
B11	6.308	17.836	5.1	0.010933	0.006113	0.004091	0.008089	6.301887	17.840091	5.108089
B13	4.732	13.115	5.67	0.008983	0.006475	0.003616	0.005069	4.725525	13.118616	5.675069
B15	2.992	8.415	6.149	0.014685	0.010768	0.007086	0.007034	3.002768	8.422086	6.141966
B17	1.249	3.725	6.82	0.009640	0.008503	0.002194	0.003977	1.240497	3.722806	6.816023

Geospatial Information Lab.





10/01 Canon (檢核點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A2	13.795	48.55	-0.778	0.018260	0.011919	0.000350	0.013829	13.783081	48.549650	-0.791829
A4	13.765	43.587	-0.37	0.013218	0.000332	0.009941	0.008706	13.765332	43.577059	-0.378706
A6	10.913	28.978	0.837	0.012330	0.012188	0.001819	0.000414	10.900812	28.976181	0.837414
A8	9.305	24.328	1.336	0.016529	0.012359	0.010719	0.002360	9.292641	24.317281	1.338360
A10	7.825	19.688	1.868	0.012650	0.000135	0.011357	0.005570	7.824865	19.676643	1.873570
A12	6.218	14.902	2.454	0.009009	0.008422	0.003187	0.000271	6.209578	14.905187	2.454271
A14	4.551	10.243	2.875	0.013901	0.012844	0.005317	0.000013	4.563844	10.248317	2.875013
A16	2.788	5.625	3.429	0.017192	0.011999	0.008761	0.008650	2.799999	5.633761	3.420350
A18	1.014	0.907	4.165							
B2	12.883	48.738	2.126	0.020137	0.018264	0.005949	0.006043	12.901264	48.732051	2.132043
B4	13.12	43.737	2.61	0.007471	0.006889	0.002890	0.000111	13.113111	43.739890	2.609889
B6	10.234	29.529	3.886	0.016310	0.015268	0.003440	0.004589	10.249268	29.525560	3.890589
B8	8.606	24.882	4.293	0.012215	0.000357	0.001641	0.012099	8.605643	24.880359	4.305099
B10	7.126	20.269	4.81	0.009116	0.003413	0.005771	0.006177	7.129413	20.263229	4.816177
B12	5.573	15.502	5.384	0.009255	0.006284	0.004241	0.005309	5.566716	15.506241	5.389309
B14	3.853	10.816	5.921	0.024710	0.024305	0.004365	0.000901	3.877305	10.820365	5.920099
B16	2.145	6.062	6.435	0.016646	0.014379	0.006095	0.005762	2.159379	6.068095	6.429238
B18	0.333	1.406	7.148							

Geospatial Information Lab.



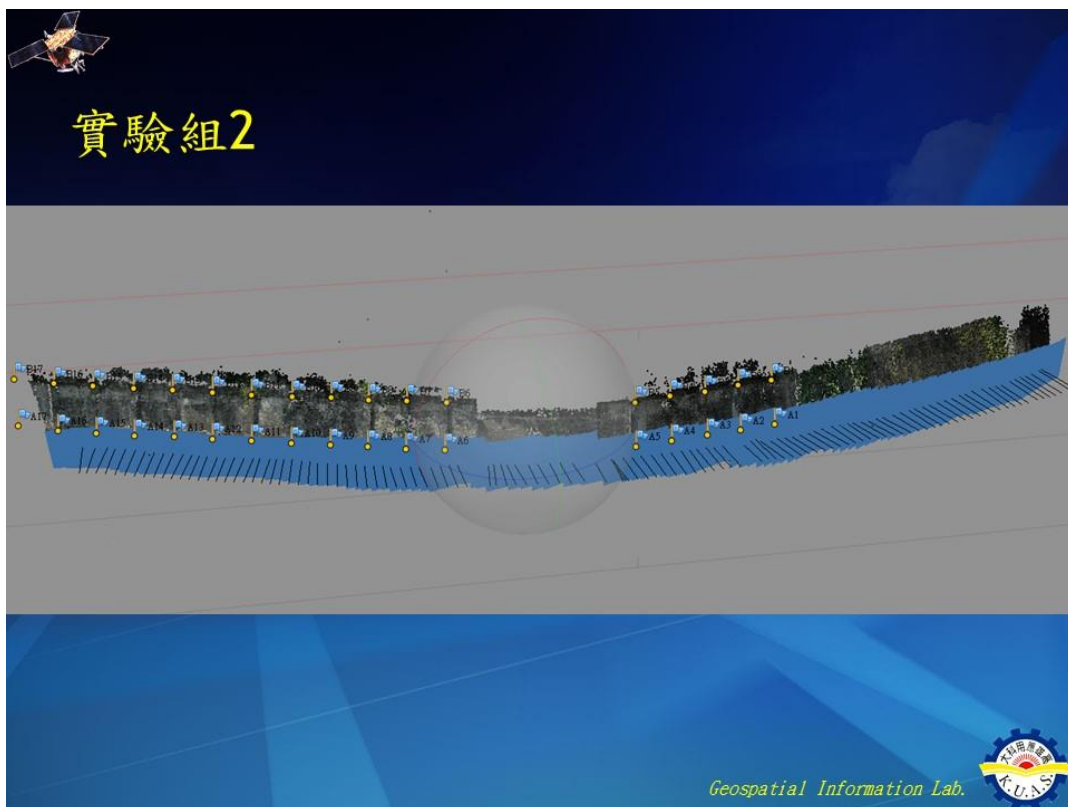
10/01 Canon 控制點及檢核檢RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.02450	0.01830	0.01498	0.02963	0.01267	0.01136	0.01383	0.02471
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00150	0.00115	0.00051	0.00566	0.00014	0.00035	0.00001	0.00747
$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV	$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.00203	0.00126	0.00096	0.00425	0.00229	0.00063	0.00068	0.00360
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.01092	0.00862	0.00751	0.00913	0.01195	0.00626	0.00653	0.00866
平均 Pixel Size :							2.05 (cm)

RMS : 0.42 Pixel

Geospatial Information Lab.






10/01 Nikon (控制點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A1	13.639	51.166	-1.043	0.011327	0.002595	0.002143	0.010815	13.641595	51.168143	-1.053815
A3	13.812	46.126	-0.549							
A5	13.622	41.149	-0.307	0.007608	0.003381	0.005321	0.004259	13.625381	41.143679	-0.311259
A7	10.126	26.621	1.064	0.010569	0.000465	0.008833	0.005785	10.125535	26.629833	1.069785
A9	8.561	22.041	1.573	0.005858	0.005256	0.001281	0.002248	8.566256	22.042281	1.575248
A11	7.047	17.286	2.186	0.007763	0.000546	0.005128	0.005802	7.047546	17.291128	2.191802
A13	5.386	12.626	2.678	0.010149	0.005922	0.006638	0.004886	5.380078	12.632638	2.673114
A15	3.687	7.944	3.133	0.017263	0.015018	0.001218	0.008426	3.671982	7.945218	3.124574
A17	1.88	3.279	3.798							
B1	12.712	51.263	1.851	0.015234	0.015041	0.001202	0.002098	12.696959	51.264202	1.853098
B3	13.064	46.293	2.31	0.007823	0.003859	0.005870	0.003442	13.067859	46.287130	2.306558
B5	13.098	41.354	2.7	0.006049	0.000714	0.005162	0.003072	13.097286	41.348838	2.703072
B7	9.385	27.177	4.096	0.014016	0.013288	0.000666	0.004409	9.398288	27.176334	4.100409
B9	7.851	22.625	4.557	0.012981	0.004472	0.006752	0.010145	7.846528	22.631752	4.567145
B11	6.308	17.836	5.1	0.007920	0.006162	0.000597	0.004939	6.314162	17.836597	5.104939
B13	4.732	13.115	5.67	0.006907	0.001754	0.004534	0.004906	4.733754	13.110466	5.674906
B15	2.992	8.415	6.149	0.012000	0.005058	0.008034	0.007339	2.997058	8.406966	6.141661
B17	1.249	3.725	6.82	0.006832	0.003059	0.005311	0.003019	1.245941	3.719689	6.816981

Geospatial Information Lab.





10/01 Nikon (檢核點)

# Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A2	13.795	48.55	-0.778	0.010061	0.004307	0.000773	0.009060	13.790693	48.549227	-0.787060
A4	13.765	43.587	-0.37	0.007373	0.003754	0.002255	0.005932	13.768754	43.584745	-0.375932
A6	10.913	28.978	0.837	0.010411	0.009023	0.004410	0.002744	10.922023	28.982410	0.839744
A8	9.305	24.328	1.336	0.005127	0.000022	0.003963	0.003253	9.305022	24.331963	1.339253
A10	7.825	19.688	1.868	0.003472	0.000038	0.002911	0.001892	7.825038	19.690911	1.869892
A12	6.218	14.902	2.454	0.011186	0.006481	0.008324	0.003719	6.211519	14.910324	2.450281
A14	4.551	10.243	2.875	0.011093	0.006474	0.004227	0.007954	4.544526	10.247227	2.867046
A16	2.788	5.625	3.429	0.024705	0.018920	0.004268	0.015302	2.806920	5.629268	3.413698
A18	1.014	0.907	4.165							
B2	12.883	48.738	2.126	0.016037	0.003611	0.012619	0.009214	12.886611	48.725381	2.135214
B4	13.12	43.737	2.61	0.005699	0.005424	0.001202	0.001269	13.114576	43.735798	2.608731
B6	10.234	29.529	3.886	0.015450	0.014947	0.001327	0.003680	10.248947	29.530327	3.889680
B8	8.606	24.882	4.293	0.008534	0.003486	0.002573	0.007352	8.609486	24.884573	4.300352
B10	7.126	20.269	4.81	0.006548	0.005707	0.001094	0.003018	7.131707	20.270094	4.813018
B12	5.573	15.502	5.384	0.011194	0.009098	0.000996	0.006445	5.563902	15.502996	5.390445
B14	3.853	10.816	5.921	0.018173	0.017016	0.005458	0.003303	3.870016	10.810542	5.917697
B16	2.145	6.062	6.435	0.015233	0.009717	0.009507	0.006874	2.154717	6.052493	6.428126
B18	0.333	1.406	7.148							

Geospatial Information Lab. 



10/01 Nikon 控制點及檢核檢RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.01504	0.00883	0.01082	0.01726	0.01329	0.01262	0.01530	0.02470
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00047	0.00060	0.00210	0.00586	0.00002	0.00077	0.00127	0.00347
$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV	$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.00082	0.00041	0.00056	0.00179	0.00133	0.00045	0.00071	0.00249
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.00716	0.00504	0.00592	0.00611	0.00913	0.00528	0.00668	0.00721
平均Pixel Size							1.51 (cm)

RMS : 0.47 Pixel

Geospatial Information Lab. 



10/01 Sony (控制點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A1	13.639	51.166	-1.043	0.022032	0.019714	0.007205	0.006699	13.619286	51.158795	-1.049699
A3	13.812	46.126	-0.549	0.010368	0.009496	0.004140	0.000433	13.802504	46.12186	-0.548567
A5	13.622	41.149	-0.307	0.014646	0.012739	0.005985	0.004049	13.634739	41.143015	-0.311049
A7	10.126	26.621	1.064	0.013487	0.010729	0.008092	0.001140	10.136729	26.629092	1.06514
A9	8.561	22.041	1.573	0.008007	0.007775	0.001883	0.000350	8.568775	22.042883	1.57265
A11	7.047	17.286	2.186	0.004533	0.002710	0.001759	0.003180	7.04971	17.287759	2.18918
A13	5.386	12.626	2.678	0.003873	0.000817	0.002228	0.003061	5.385183	12.623772	2.674939
A15	3.687	7.944	3.133	0.021466	0.019680	0.005654	0.006445	3.66732	7.938346	3.126555
A17	1.88	3.279	3.798							
B1	12.712	51.263	1.851	0.017189	0.017100	0.000555	0.001660	12.6949	51.262445	1.85266
B3	13.064	46.293	2.31	0.003136	0.002149	0.001568	0.001660	13.061851	46.291432	2.31166
B5	13.098	41.354	2.7	0.010243	0.009723	0.000976	0.003072	13.107723	41.354976	2.703072
B7	9.385	27.177	4.096	0.028043	0.026909	0.007568	0.002244	9.411909	27.184568	4.098244
B9	7.851	22.625	4.557	0.021406	0.018688	0.009551	0.004215	7.869688	22.634551	4.561215
B11	6.308	17.836	5.1	0.013093	0.012324	0.002873	0.003359	6.320324	17.838873	5.103359
B13	4.732	13.115	5.67	0.004544	0.002923	0.000069	0.003478	4.729077	13.115069	5.673478
B15	2.992	8.415	6.149	0.019764	0.019125	0.002251	0.004449	2.972875	8.412749	6.153449
B17	1.249	3.725	6.82	0.048630	0.047875	0.008000	0.002980	1.201125	3.717	6.82298



10/01 Sony (檢核點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A2	13.795	48.55	-0.778	0.007378	0.000994	0.004741	0.005565	13.794006	48.545259	-0.783565
A4	13.765	43.587	-0.37	0.015830	0.015118	0.003833	0.002710	13.780118	43.583167	-0.372710
A6	10.913	28.978	0.837	0.018369	0.017966	0.003728	0.000854	10.930966	28.981728	0.837854
A8	9.305	24.328	1.336	0.014449	0.013247	0.005765	0.000248	9.318247	24.333765	1.335752
A10	7.825	19.688	1.868	0.001479	0.000774	0.001222	0.000310	7.825774	19.689222	1.868310
A12	6.218	14.902	2.454	0.002766	0.000703	0.001285	0.002346	6.217297	14.900715	2.451654
A14	4.551	10.243	2.875	0.007762	0.005527	0.002704	0.004731	4.545473	10.240296	2.870269
A16	2.788	5.625	3.429	0.010017	0.001678	0.004983	0.008526	2.786322	5.620017	3.420474
A18	1.014	0.907	4.165							
B2	12.883	48.738	2.126	0.009217	0.005616	0.004593	0.005685	12.888616	48.733407	2.131685
B4	13.12	43.737	2.61	0.006497	0.006142	0.001833	0.001060	13.113858	43.735167	2.608940
B6	10.234	29.529	3.886	0.040965	0.040409	0.000166	0.006724	10.274409	29.528834	3.879276
B8	8.606	24.882	4.293	0.025356	0.023340	0.008788	0.004576	8.629340	24.890788	4.297576
B10	7.126	20.269	4.81	0.013176	0.009679	0.007617	0.004679	7.135679	20.276617	4.814679
B12	5.573	15.502	5.384	0.006923	0.002397	0.002572	0.005964	5.570603	15.504572	5.389964
B14	3.853	10.816	5.921	0.003861	0.003142	0.001966	0.001081	3.849858	10.817966	5.922081
B16	2.145	6.062	6.435	0.006755	0.002578	0.005444	0.003057	2.147578	6.056556	6.431943
B18	0.333	1.406	7.148							

Geospatial Information Lab.



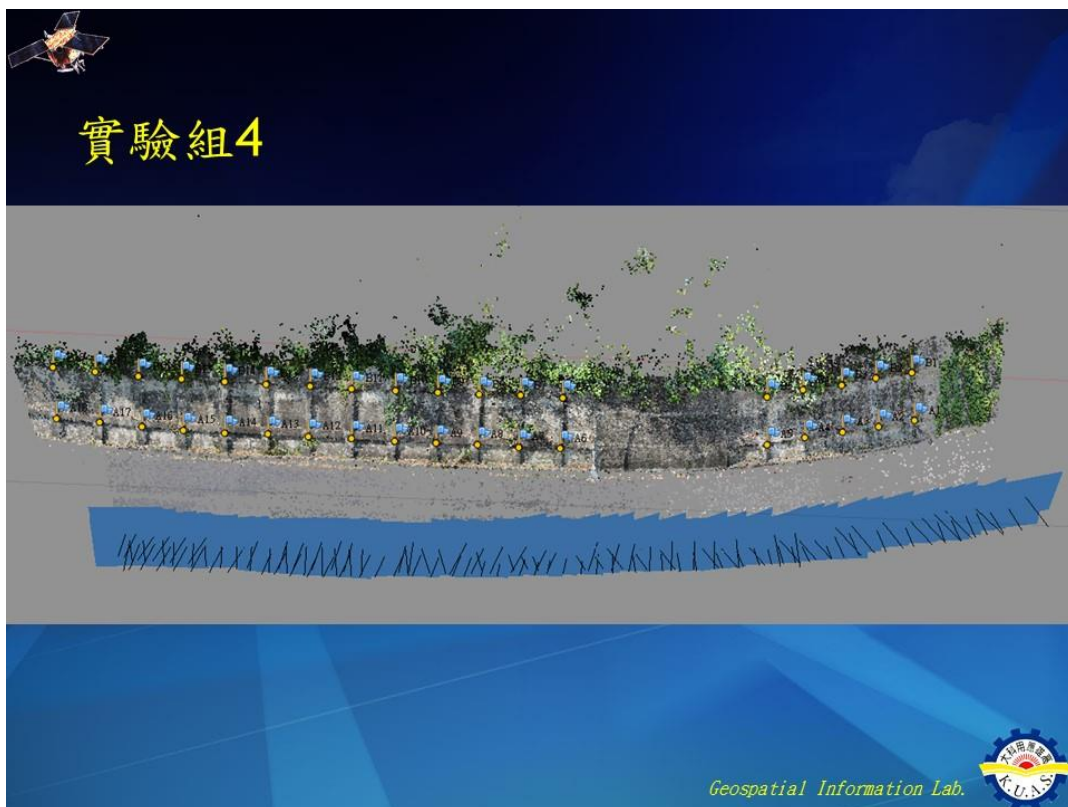
10/01 Sony 控制點及檢核檢RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.04788	0.00955	0.00670	0.04863	0.04788	0.00879	0.00853	0.04096
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00082	0.00007	0.00035	0.00314	0.00070	0.00017	0.00025	0.00148
$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV	$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.00550	0.00044	0.00021	0.00615	0.00313	0.00032	0.00031	0.00375
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.01798	0.00511	0.00355	0.01098	0.01398	0.00447	0.00438	0.00884
平均Pixel Size							2.37 (cm)

RMS : 0.37 Pixel

Geospatial Information Lab.





10/09 Canon (控制點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A1	13.639	51.166	-1.043	0.017796	0.003574	0.017373	0.001447	13.642574	51.183373	-1.044447
A3	13.812	46.126	-0.549	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.812	46.126	-0.549
A5	13.622	41.149	-0.307	0.007322	0.005263	0.001996	0.004683	13.627263	41.150996	-0.311683
A7	10.126	26.621	1.064	0.011117	0.008381	0.007278	0.000606	10.117619	26.613722	1.064606
A9	8.561	22.041	1.573	0.018465	0.000275	0.018421	0.001247	8.560725	22.022579	1.571753
A11	7.047	17.286	2.186	0.013289	0.002404	0.011141	0.006834	7.044596	17.274859	2.192834
A13	5.386	12.626	2.678	0.007401	0.002146	0.005805	0.004059	5.388146	12.620195	2.682059
A15	3.687	7.944	3.133	0.013195	0.002888	0.011226	0.006305	3.684112	7.955226	3.139305
A17	1.88	3.279	3.798	0.034011	0.011083	0.032093	0.001984	1.891083	3.311093	3.799984
B1	12.712	51.263	1.851	0.017446	0.001096	0.017236	0.002469	12.713096	51.280236	1.853469
B3	13.064	46.293	2.31	0.024988	0.024277	0.004824	0.003431	13.039723	46.297824	2.313431
B5	13.098	41.354	2.7	0.007674	0.005756	0.005070	0.000242	13.103756	41.34893	2.699758
B7	9.385	27.177	4.096	0.017011	0.007605	0.014906	0.003060	9.392605	27.162094	4.09294
B9	7.851	22.625	4.557	0.019389	0.005622	0.018279	0.003196	7.856622	22.606721	4.553804
B11	6.308	17.836	5.1	0.019089	0.007339	0.017615	0.000481	6.315339	17.818385	5.099519
B13	4.732	13.115	5.67	0.012000	0.006188	0.009804	0.003096	4.738188	13.105196	5.666904
B15	2.992	8.415	6.149	0.007818	0.002699	0.004230	0.005995	2.994699	8.41923	6.143005
B17	1.249	3.725	6.82	0.028229	0.020441	0.019354	0.002110	1.228559	3.744354	6.81789



10/09 Canon (檢核點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A2	13.795	48.55	-0.778	0.022627	0.005273	0.021702	0.003632	13.789727	48.571702	-0.781632
A4	13.765	43.587	-0.37	0.014824	0.012219	0.007115	0.004452	13.752781	43.594115	-0.374452
A6	10.913	28.978	0.837	0.011300	0.001523	0.010602	0.003600	10.914523	28.967398	0.833400
A8	9.305	24.328	1.336	0.013576	0.002002	0.013171	0.002613	9.302998	24.314829	1.333387
A10	7.825	19.688	1.868	0.017159	0.004978	0.016405	0.000724	7.820022	19.671595	1.868724
A12	6.218	14.902	2.454	0.010940	0.002869	0.009609	0.004373	6.215131	14.892391	2.458373
A14	4.551	10.243	2.875	0.006592	0.001686	0.004092	0.004886	4.549314	10.247092	2.879886
A16	2.788	5.625	3.429	0.020769	0.001144	0.020440	0.003500	2.789144	5.645440	3.432500
A18	1.014	0.907	4.165	0.048857	0.011989	0.047363	0.000076	1.025989	0.954363	4.164924
B2	12.883	48.738	2.126	0.013717	0.008784	0.004827	0.009365	12.874216	48.742827	2.135365
B4	13.12	43.737	2.61	0.010165	0.001391	0.003688	0.009370	13.118609	43.733312	2.600630
B6	10.234	29.529	3.886	0.027406	0.018601	0.019074	0.006425	10.252601	29.509926	3.879575
B8	8.606	24.882	4.293	0.019771	0.008432	0.017704	0.002523	8.614432	24.864296	4.290477
B10	7.126	20.269	4.81	0.017640	0.003671	0.016872	0.003609	7.129671	20.252128	4.806391
B12	5.573	15.502	5.384	0.016904	0.008933	0.014201	0.002066	5.564067	15.487799	5.381934
B14	3.853	10.816	5.921	0.010329	0.008325	0.000918	0.006045	3.861325	10.815082	5.914955
B16	2.145	6.062	6.435	0.014394	0.003138	0.013593	0.003544	2.141862	6.075593	6.431456
B18	0.333	1.406	7.148	0.038906	0.017555	0.032905	0.011078	0.350555	1.438905	7.136922

Geospatial Information Lab.



10/09 Canon 控制點及檢核檢RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.02428	0.03209	0.00683	0.03401	0.02044	0.04736	0.01108	0.04886
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00114	0.00092	0.00008	0.00659
$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV	$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.00148	0.00371	0.00022	0.00542	0.00134	0.00632	0.00052	0.00818
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.00908	0.01436	0.00350	0.01002	0.00863	0.01873	0.00538	0.01231
							2.41 (cm)

RMS : 0.50 Pixel

Geospatial Information Lab.





10/09 Sony (控制點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A1	13.639	51.166	-1.043	0.037214	0.027659	0.024839	0.001693	13.611341	51.141161	-1.044693
A3	13.812	46.126	-0.549	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.812	46.126	-0.549
A5	13.622	41.149	-0.307	0.005456	0.004693	0.000114	0.002780	13.626693	41.149114	-0.30422
A7	10.126	26.621	1.064	0.031646	0.006558	0.028480	0.012139	10.132558	26.64948	1.076139
A9	8.561	22.041	1.573	0.023522	0.005952	0.021283	0.008056	8.566952	22.062283	1.581056
A11	7.047	17.286	2.186	0.015466	0.003312	0.012944	0.007790	7.050312	17.298944	2.19379
A13	5.386	12.626	2.678	0.004521	0.002307	0.003887	0.000094	5.383693	12.629887	2.677906
A15	3.687	7.944	3.133	0.016846	0.012959	0.008667	0.006382	3.674041	7.935333	3.126618
A17	1.88	3.279	3.798	0.038319	0.026967	0.019314	0.019185	1.853033	3.259686	3.778815
B1	12.712	51.263	1.851	0.029918	0.010464	0.024400	0.013792	12.701536	51.2386	1.837208
B3	13.064	46.293	2.31	0.013598	0.002182	0.005576	0.012209	13.061818	46.287424	2.297791
B5	13.098	41.354	2.7	0.015844	0.014729	0.004290	0.003960	13.112729	41.35829	2.69604
B7	9.385	27.177	4.096	0.036012	0.021491	0.025263	0.014029	9.406491	27.202263	4.110029
B9	7.851	22.625	4.557	0.030523	0.017993	0.020483	0.013724	7.868993	22.645483	4.570724
B11	6.308	17.836	5.1	0.021329	0.018958	0.005853	0.007828	6.326958	17.841853	5.107828
B13	4.732	13.115	5.67	0.012995	0.010828	0.004743	0.005396	4.742828	13.110257	5.675396
B15	2.992	8.415	6.149	0.017171	0.015682	0.006260	0.003119	2.976318	8.40874	6.145881
B17	1.249	3.725	6.82	0.031575	0.006319	0.028790	0.011321	1.242681	3.69621	6.808679



10/09 Sony (檢核點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A2	13.795	48.55	-0.778	0.026625	0.024292	0.010633	0.002393	13.770708	48.539367	-0.780393
A4	13.765	43.587	-0.37	0.013607	0.013262	0.003033	0.000246	13.751738	43.583967	-0.369754
A6	10.913	28.978	0.837	0.028602	0.009587	0.025566	0.008517	10.922587	29.003566	0.845517
A8	9.305	24.328	1.336	0.026508	0.005524	0.024965	0.006994	9.310524	24.352965	1.342994
A10	7.825	19.688	1.868	0.016528	0.004899	0.014732	0.005670	7.829899	19.702732	1.873670
A12	6.218	14.902	2.454	0.008621	0.007352	0.003332	0.003027	6.225352	14.905332	2.457027
A14	4.551	10.243	2.875	0.009622	0.007093	0.001930	0.006208	4.543907	10.241070	2.868792
A16	2.788	5.625	3.429	0.028326	0.021011	0.011172	0.015366	2.766989	5.613828	3.413634
A18	1.014	0.907	4.165	0.048727	0.034067	0.020693	0.028028	0.979933	0.886307	4.136972
B2	12.883	48.738	2.126	0.025520	0.009036	0.023419	0.004602	12.892036	48.714581	2.130602
B4	13.12	43.737	2.61	0.000000						
B6	10.234	29.529	3.886	0.037481	0.031252	0.019651	0.006477	10.265252	29.548651	3.892477
B8	8.606	24.882	4.293	0.031828	0.015836	0.024273	0.013156	8.621836	24.906273	4.306156
B10	7.126	20.269	4.81	0.022905	0.009485	0.018568	0.009482	7.135485	20.287568	4.819482
B12	5.573	15.502	5.384	0.009441	0.001609	0.007602	0.005363	5.571391	15.509602	5.389363
B14	3.853	10.816	5.921	0.005487	0.000840	0.004807	0.002509	3.853840	10.811193	5.923509
B16	2.145	6.062	6.435	0.028499	0.024287	0.014704	0.002478	2.120713	6.047296	6.432522
B18	0.333	1.406	7.148	0.044254	0.025910	0.033857	0.011864	0.307090	1.372143	7.136136

Geospatial Information Lab. 



10/09 Sony 控制點及檢核檢RMSE

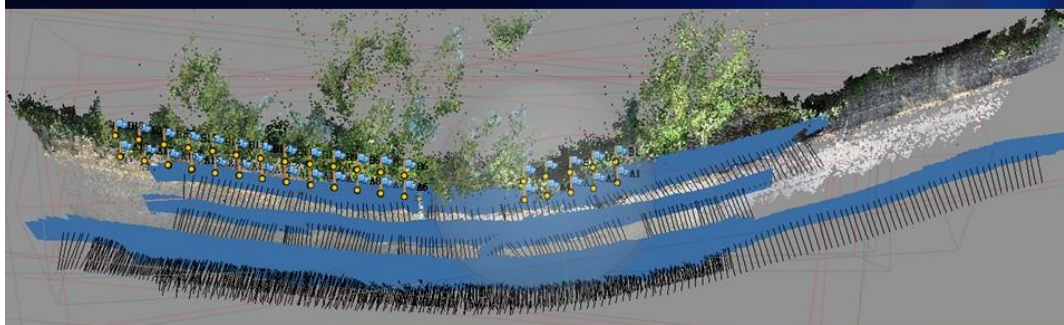
控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.02766	0.02879	0.01919	0.03832	0.02149	0.03386	0.02803	0.04873
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00084	0.00193	0.00025	0.00000
$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV	$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.00366	0.00514	0.00166	0.01046	0.00528	0.00550	0.00174	0.01252
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.01425	0.01690	0.00961	0.01392	0.01763	0.01798	0.01011	0.01567
				平均Pixel Size(cm) 3.88 (cm)			

RMS : 0.40 Pixel

Geospatial Information Lab. 



5 次實驗拍攝位置與定位精度

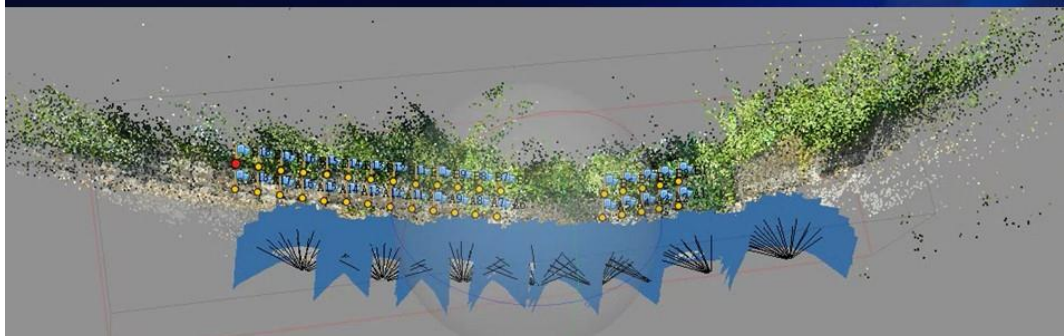


1. Canon RMS : 0.42 Pixel
2. Nikon RMS : 0.47 Pixel
3. Sony RMS : 0.37 Pixel
4. Canon RMS : 0.50 Pixel
5. Sony RMS : 0.40 Pixel

Geospatial Information Lab.



實驗組6



Geospatial Information Lab.





10/09 Sony 模擬固定點旋轉攝影(控制點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A1	13.639	51.166	-1.043	0.011587	0.011305	0.002506	0.000414	13.627695	51.163494	-1.043414
A3	13.812	46.126	-0.549	0.018754	0.014526	0.008527	0.008247	13.797474	46.117473	-0.540753
A5	13.622	41.149	-0.307	0.005575	0.004805	0.002784	0.000493	13.626805	41.146216	-0.306507
A7	10.126	26.621	1.064	0.007891	0.002636	0.004324	0.006051	10.123364	26.616676	1.070051
A9	8.561	22.041	1.573	0.010944	0.008974	0.000861	0.006205	8.569974	22.040139	1.579205
A11	7.047	17.286	2.186	0.010322	0.004184	0.001802	0.009262	7.051184	17.287802	2.195262
A13	5.386	12.626	2.678	0.004583	0.004292	0.001231	0.001034	5.381708	12.624769	2.676966
A15	3.687	7.944	3.133	0.006577	0.002614	0.005980	0.000816	3.684386	7.93802	3.132184
A17	1.88	3.279	3.798	0.015903	0.012954	0.005153	0.007651	1.867046	3.273847	3.790349
B1	12.712	51.263	1.851	0.008905	0.000346	0.006229	0.006355	12.712346	51.269229	1.844645
B3	13.064	46.293	2.31	0.007557	0.004146	0.000742	0.006274	13.068146	46.293742	2.303726
B5	13.098	41.354	2.7	0.004693	0.002490	0.003138	0.002445	13.10049	41.357138	2.697555
B7	9.385	27.177	4.096	0.011337	0.011091	0.002342	0.000193	9.396091	27.179342	4.096193
B9	7.851	22.625	4.557	0.011657	0.009842	0.006241	0.000265	7.860842	22.631241	4.557265
B11	6.308	17.836	5.1	0.012493	0.010842	0.006178	0.000594	6.318842	17.842178	5.100594
B13	4.732	13.115	5.67	0.003856	0.002532	0.001779	0.002300	4.729468	13.116779	5.6723
B15	2.992	8.415	6.149	0.005008	0.003797	0.002233	0.002383	2.988203	8.417233	6.146617
B17	1.249	3.725	6.82	0.006613	0.002088	0.000674	0.006238	1.246912	3.725674	6.813762

Geospatial Information Lab.

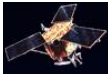


10/09 Sony 模擬固定點旋轉攝影(檢核點)

Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error (m)	X error	Y error	Z error	X est	Y est	Z est
A2	13.795	48.55	-0.778	0.003311	0.002931	0.001156	0.001018	13.792069	48.551156	-0.776982
A4	13.765	43.587	-0.37	0.007053	0.002829	0.006362	0.001128	13.762171	43.580638	-0.368872
A6	10.913	28.978	0.837	0.007750	0.001656	0.006625	0.003664	10.914656	28.971375	0.840664
A8	9.305	24.328	1.336	0.008357	0.005037	0.003154	0.005875	9.310037	24.324846	1.341875
A10	7.825	19.688	1.868	0.004284	0.002073	0.000221	0.003743	7.827073	19.687779	1.871743
A12	6.218	14.902	2.454	0.004488	0.000247	0.001392	0.004259	6.218247	14.900608	2.458259
A14	4.551	10.243	2.875	0.005139	0.001722	0.004815	0.000514	4.549278	10.238185	2.875514
A16	2.788	5.625	3.429	0.013667	0.011331	0.006210	0.004452	2.776669	5.618790	3.424548
A18	1.014	0.907	4.165	0.013829	0.008436	0.000867	0.010924	1.005564	0.906133	4.154076
B2	12.883	48.738	2.126	0.007413	0.001593	0.004443	0.005716	12.884593	48.742443	2.131716
B4	13.12	43.737	2.61	0.016161	0.014216	0.005793	0.005053	13.105784	43.742793	2.604947
B6	10.234	29.529	3.886	0.022258	0.018554	0.006525	0.010421	10.252554	29.522475	3.875579
B8	8.606	24.882	4.293	0.013887	0.013780	0.000861	0.001490	8.619780	24.882861	4.291510
B10	7.126	20.269	4.81	0.009708	0.005154	0.008188	0.000804	7.131154	20.277188	4.810804
B12	5.573	15.502	5.384	0.006466	0.001151	0.006245	0.001219	5.574151	15.508245	5.385219
B14	3.853	10.816	5.921	0.003902	0.001548	0.003334	0.001310	3.851452	10.819334	5.919690
B16	2.145	6.062	6.435	0.004217	0.003303	0.001451	0.002184	2.141697	6.060549	6.432816
B18	0.333	1.406	7.148	0.017396	0.017161	0.000306	0.002833	0.315839	1.406306	7.145167

Geospatial Information Lab.





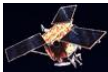
10/09 Sony模擬固定點旋轉攝影 控制點及檢核檢RMSE

控制點(m)				檢核點(m)			
Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total	Max DX	Max DY	Max DZ	Max Total
0.01453	0.00853	0.00926	0.01875	0.01109	0.00819	0.01092	0.02226
Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total	Min DX	Min DY	Min DZ	Min Total
0.00035	0.00067	0.00019	0.00386	0.00025	0.00022	0.00051	0.00331
$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV	$\Sigma VxVx$	$\Sigma VyVy$	$\Sigma VzVz$	ΣVV
0.00105	0.00031	0.00043	0.00179	0.00133	0.00038	0.00041	0.00211
RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
0.00762	0.00417	0.00486	0.00575	0.00858	0.00457	0.00476	0.00394
平均Pixel Size(cm)							1.01 (cm)

RMS : 0.39 Pixel

※ 實驗數據顯示，多重視覺攝影之定位或三維重建之精度可達0.4個像元。(如1cm攝像解析度，定位精度為4mm)

Geospatial Information Lab.

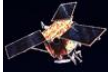


後續工作

1. 進行第三及第四次的攝影(將選擇 Sony相機)
2. 不同時期基於監測點的差異分析
3. 不同時期基於面與體的差異分析
4. 監測點位移量顯著性之統計檢定分析
5. 整體作業設備、方法與程序之擬定與建議

Geospatial Information Lab.





五、結論

1. 目前進度與預期進度相符
2. 後續工作將依時程完成

Geospatial Information Lab.

