
**桃園市-復興區-T002(光華)大規模崩塌
潛勢區無人機光達拍攝及圖層產製**

**Geographic Data Layer Production for
Potential Large-scale Landslide Area Using
Unmanned Laser Scanning in Fuxing Dist.,
Taoyuan City**

成果報告書

執行 單位：自強工程顧問有限公司

執行 期間：民國 110 年 2 月 26 日至民國 110 年 10 月 29 日

計畫主持人：李明軒 測量技師

協同主持人：楊豐毓 測量技師

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 10 月

(本報告內容及建議純屬執行單位意見，僅供水保局施政參考)

桃園市-復興區-T002(光華)大規模崩塌潛勢區

無人機光達拍攝及圖層產製

摘要

本計畫辦理之目的，係針對位於桃園市復興區之一處大規模崩塌潛勢區，運用無人機航拍及光達技術來進行地理資訊圖資之產製；無人機之機動性與任務彈性已成為現代化地形測繪之利器，而採用無人機光達之優勢為利用雷射脈衝可穿過植被孔隙之特性，可進行高精度及高細緻度之數值高程模型建置，同時配合無人機航空攝影測量則可產製正射影像，輔助地表特徵之辨識，進一步來量化大規模崩塌潛勢區之地形變位數據。

關鍵字:無人機光達、數值高程模型、正射影像、大規模崩塌潛勢區

Geographic Data Layer Production for Potential Large-scale Landslide Area Using Unmanned Laser Scanning in Fuxing Dist., Taoyuan City

ABSTRACT

The purpose of this project is to use drone aerial photogrammetry and LiDAR technology to produce geographic data layer for a potential large-scale landslide area located in Fuxing District of Taoyuan City. The mobility and flexibility of aerial mapping using drones have become an efficient method for modern topographic surveying and mapping. The advantage of using ULS (Unmanned Laser Scanning, A.K.A UAV LiDAR) to build high-accuracy and high-detailed digital elevation models (DEM) is based on the use of laser pulses to pass through vegetation pores. The orthophoto produced by aerial photogrammetry could help with the identification of topographic surface features. Hence, the displacement and deformation data of the potential large-scale landslide can be determined.

Keywords: Unmanned Laser Scanning, Digital Elevation Model, Orthophoto, Potential Large-scale Landslide Area

目次

摘要	I
ABSTRACT	II
目次	III
表次	V
圖次	VI
第一章 計畫概述.....	1-1
第一節 計畫範圍	1-1
第二節 工作項目與內容	1-1
第三節 工作成果要求	1-2
第四節 工作進度及期限	1-3
第五節 各次飛行計畫	1-3
第二章 任務規劃	2-1
第一節 無人機系統規格	2-1
第二節 無人機光達作業流程	2-2
第三節 控制測量作業	2-5
第四節 GNSS 監測點架設	2-6
第五節 成果資料分析範例	2-7
第三章 專案管制	3-1
第一節 人力編制	3-1
第二節 工作進度管制	3-2
第三節 品質管制計畫	3-3

第四章 執行成果.....4-1

第一節 e-GNSS 測量成果4-1

第二節 無人機航拍資料處理.....4-2

第三節 航拍正射影像成果.....4-5

第四節 無人機光達點雲成果.....4-8

第五節 前兩期工作成果比對分析.....4-11

第六節 第三期工作成果比對分析.....4-19

第五章 結論與建議.....5-1

第一節 結論5-1

第二節 建議.....5-2

附錄

附錄 1.各次拍攝任務通知飛行計畫報備..... 附錄 1

附錄 2.e-GNSS 作業-點之記 附錄 2

附錄 3.軌跡及點雲平差融合報告..... 附錄 3

附錄 4.定位定向系統後處理報表..... 附錄 4

附錄 5.各期審查意見及回覆表..... 附錄 5

表次

表 2-1	無人機光達系統規格	2-1
表 2-2	衛星定位儀(基站/控制點/檢核點測量)	2-5
表 3-1	專業人力編組.....	3-1
表 4-1	e-GNSS 測量成果.....	4-1

圖次

圖 1-1	計畫範圍.....	1-1
圖 2-1	無人機光達資料處理流程	2-2
圖 2-2	Applanix POSPac 定位定向系統軌跡處理	2-3
圖 2-3	RIEGL RiProcess 點雲融合.....	2-4
圖 2-4	TerraSolid 點雲編修	2-4
圖 2-5	Quick Terrain Modeler DEM 分析	2-4
圖 2-6	GNSS 監測點現場架設範例.....	2-6
圖 2-7	成果分析範例(水保局技研組提供).....	2-7
圖 3-1	工作進度規劃.....	3-2
圖 3-2	品質管制流程圖.....	3-3
圖 4-1	e-GNSS 測量工作照.....	4-1
圖 4-2	無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(3/1 成果)	4-2
圖 4-3	無人機航拍影像 PPK 後處理報表(3/1 成果)	4-2
圖 4-4	無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(8/17 成果)	4-3
圖 4-5	無人機航拍影像 PPK 後處理報表(8/17 成果)	4-3
圖 4-6	無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(10/19 成果)	4-4
圖 4-7	無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(10/19 成果)	4-4
圖 4-8	航拍影像空三計算與密匹配(3/1 成果).....	4-5
圖 4-9	航拍正射影像成果(3/1 成果).....	4-5
圖 4-10	航拍影像空三計算與密匹配(8/17 成果)	4-6
圖 4-11	航拍正射影像成果(8/17 成果).....	4-6
圖 4-12	航拍影像空三計算與密匹配(10/19 成果)	4-7
圖 4-13	航拍正射影像成果(10/19 成果).....	4-7

圖 4-14	點雲融合軌跡及平差成果	4-8
圖 4-15	無人機光達點雲處理成果(彩色與高程色階).....	4-9
圖 4-16	點雲編修處理-DEM 產製.....	4-10
圖 4-17	DEM 產生等高線成果	4-10
圖 4-18	DEM 產生 SVF 成果.....	4-10
圖 4-19	數值高程模型兩期差異(第二期減第一期).....	4-11
圖 4-20	數值高程模型兩期差異(第二期減第一期)-崩塌重點區 ..	4-11
圖 4-21	數值高程模型(3/1 成果)-參考線套疊	4-12
圖 4-22	數值高程模型(8/17 成果)-參考線套疊	4-12
圖 4-23	航拍正射影像(3/1 成果)-參考線套疊	4-13
圖 4-24	航拍正射影像(8/17 成果)-參考線套疊	4-13
圖 4-25	崩塌土方堆積區等高線套疊(3/1 成果)	4-14
圖 4-26	崩塌土方堆積區等高線套疊(8/17 成果)	4-14
圖 4-27	等高線一至二期變化(左:ELEV=980、右:ELEV=981) ..	4-15
圖 4-28	等高線一至二期變化(左:ELEV=982、右:ELEV=983) ..	4-15
圖 4-29	等高線一至二期變化(左:ELEV=984、右:ELEV=985) ..	4-15
圖 4-30	等高線一至二期變化(左:ELEV=986、右:ELEV=987) ..	4-16
圖 4-31	等高線一至二期變化(左:ELEV=988、右:ELEV=989) ..	4-16
圖 4-32	等高線一至二期變化(左:ELEV=990、右:ELEV=991) ..	4-16
圖 4-33	等高線一至二期變化(左:ELEV=992、右:ELEV=993) ..	4-17
圖 4-34	等高線一至二期變化(左:ELEV=994、右:ELEV=995) ..	4-17
圖 4-35	等高線一至二期變化(左:ELEV=996、右:ELEV=997) ..	4-17
圖 4-36	等高線一至二期變化(左:ELEV=998、右:ELEV=999) ..	4-18
圖 4-37	等高線一至二期變化(ELEV=1,000)	4-18
圖 4-38	數值高程模型-兩期成果差異(第三期減第二期).....	4-19

圖 4-39 數值高程模型(10/19 成果)-參考線套疊4-20

圖 4-40 航拍正射影像(10/19 成果)-參考線套疊4-20

第一章 計畫概述

第一節 計畫範圍

計畫範圍包括桃園市-復興區-T002(光華)大規模崩塌潛勢區(約 12.3 公頃)及部分可能影響區域(約 2.7 公頃)，共計約 15 公頃；實際執行得依甲方實際需要調整拍攝範圍(面積)。



圖 1-1 計畫範圍

第二節 工作項目與內容

一、無人機光達拍攝及圖層產製：

(一)無人機拍攝作業包含空載光達掃描及正射影像拍攝。

(二)無人機空載光達(LiDAR)測量，原始點雲平均密度需達 100 點/m² 以上，產製 20 公分 DEM 及數值等高線。

(三)無人機空拍地面解析度(Ground Sampling Distance, GSD)優於 10 公分、平面精度優於 0.5 公尺，提交成果包括原始影像與快速幾何糾正鑲嵌影像及正射影像。

(四)本計畫共需進行預計 3 次拍攝及圖層產製，拍攝時間由甲方通知。若因甲方需求改變，得減少遙控無人機測繪次數，並依實際執行數量(面積)結算。

(五)無人機測繪前，需至現地辦理地面控制測量。

二、成果資料分析：

各期崩塌地形分析，包括崩塌量等。

三、GNSS 監測點架設：

雙頻 GNSS 衛星定位監測 1 處：即時監測現地崩塌變位歷程。

第三節 工作成果要求

一、本計畫所完成之程式、相關資料，著作版權歸水土保持局所有，其原始程式碼，亦需同時提供。

二、提送本計畫成果如后：

(一)工作成果報告：3 份(成果報告內容需包含作業執行計畫、拍攝歷程及檢核方式等)。

(二)成果圖資及相關資料以儲存媒體(可儲存容量至少 1TB 以上)儲存：1 份。

(三)成果報告書電子檔應儲存至「電子圖書管理中心」。

第四節 工作進度及期限

本委託計畫工作期限自決標次日起至完成 3 次拍攝及相關作業或 110 年 10 月 29 日止，受託廠商應確實執行依限完成。

第五節 各次飛行計畫

甲方於 110 年 2 月 26 日、8 月 13 日及 10 月 6 日通知第一次、第二次及第三次飛行任務時間規劃，本計畫團隊以 e-mail 報備進駐日期、無人機飛行團隊人員、聯絡方式、動員設備及飛行規劃(預計採自動及手動航線模式併行)，內容詳附錄 1.各次拍攝任務通知及飛行計畫報備記錄。

第二章 任務規劃

第一節 無人機系統規格

一、UAS Lidar 無人機光達又稱為無人空載掃描系統(Unmanned Aerial Laser Scanning, ULS)，其採用的設備需至少可達下列性能規格及成果要求：

- (一)無人機飛行平台之最大可承受風速須達8m/s。
- (二)定位定向系統之取樣頻率200 Hz，資料後處理軌跡之絕對精度達水平5公分、高程10公分。
- (三)高程精度：平差點雲後經地面檢核點驗證誤差需小於15公分。

表 2-1 無人機光達系統規格

Unmanned Aerial System: Matrice 600 Pro	
Flight Range / Time:	3 km / 30 mins.
Max Wind Resistance:	8 m/s
Dimensions	1668 mm x 1518 mm x 759 mm
Weight:	9.1 kg (with batteries)
Payload/Lidar: RIEGL Mini-Vux-1-UAV	
	
Weight:	2.4 kg (With M600 Kit / Applanix APX-15)
Position Accuracy:	Applanix APX-15(IMU Sample Rate: 200 Hz) Horizontal:5cm ;Vertical:10cm (Post-Processed)
Scan-lines:	100 lines/sec.
Measurements	100,000pts/sec.
FOV:	360 degree
Max. Range:	250m (@ Target Reflectance 60%)
Range Accuracy:	1.5 cm

二、無人機攝影系統應至少可達下列性能規格及成果要求：

(一)具備可見光1吋片幅以上感光元件。

(二)具備RTK/PPK(Real-Time Kinematic / Post-Processing Kinematic)功能，以利後處理定位資料解算效能。

第二節 無人機光達作業流程

無人機光達作業流程概述如下，資料處理流程如圖 2-1 所示，過程範例如圖 2-2 至圖 2-5 所示。

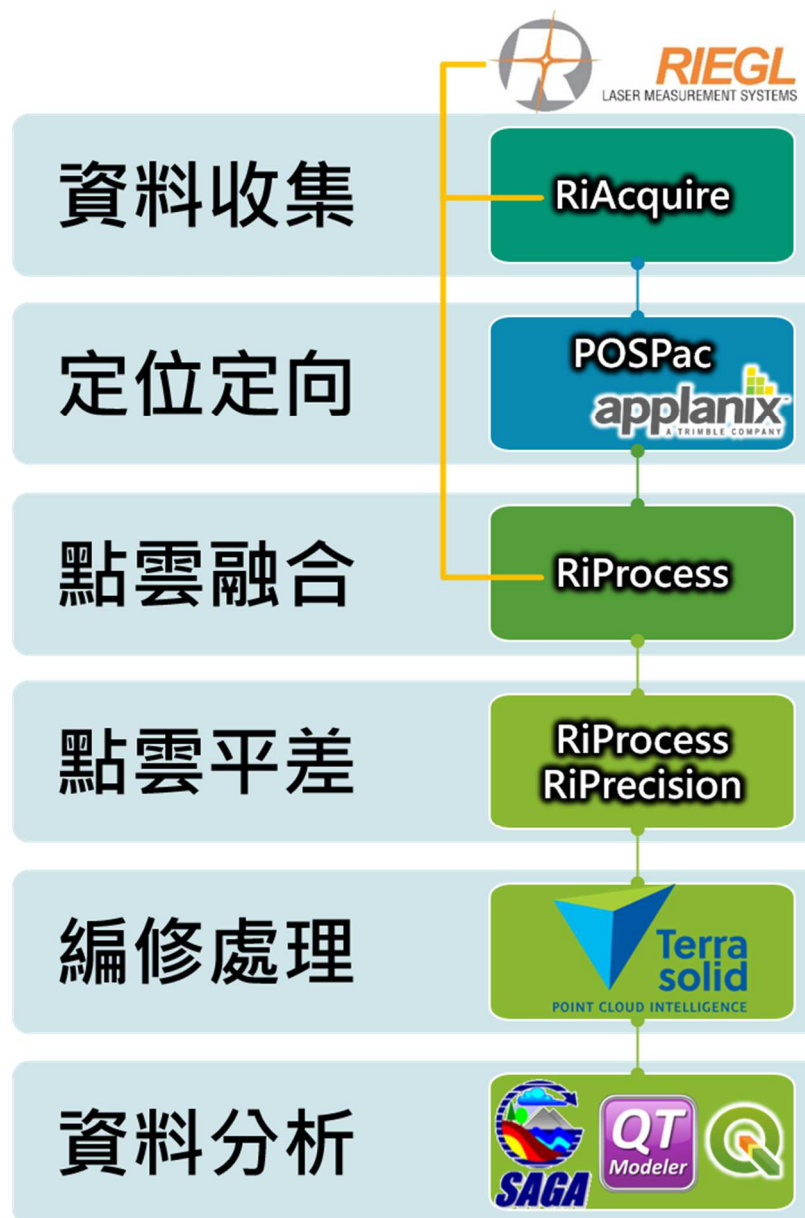


圖 2-1 無人機光達資料處理流程

一、任務規劃：

依照所採用的光達系統性能及成果需求進行航線設計，並規劃地表高程檢核點分佈；如同時需實施航空攝影測量，得合併航標點需求進行規劃。

二、無人機光達掃瞄作業：

現場飛航掃瞄任務執行應依照所採用的定位定向系統之校準程序進行，同時需架設靜態衛星接收儀(或採用距離測區 10km 半徑以內之衛星追蹤站資料)，據以進行定位定向系統後處理，以確保成果點雲品質。

三、地表高程檢核點測量：

測區內應至少測量 4 個地表高程檢核點，採用 e-GNSS 方式，並依據內政部國土測繪中心「採用虛擬基準站即時動態定位技術辦理加密控制及圖根測量作業手冊」原則辦理。

四、無人機光達掃瞄資料處理：

含定位定向資料後處理、點雲融合平差與高程檢核、地表點分類及 DSM/DEM 產製；資料分析則採用包含 SAGA(System for Automated Geoscientific Analyses)、QTM(Quick Terrain Modeler)及 QGIS(Quantum GIS)等軟體進行。

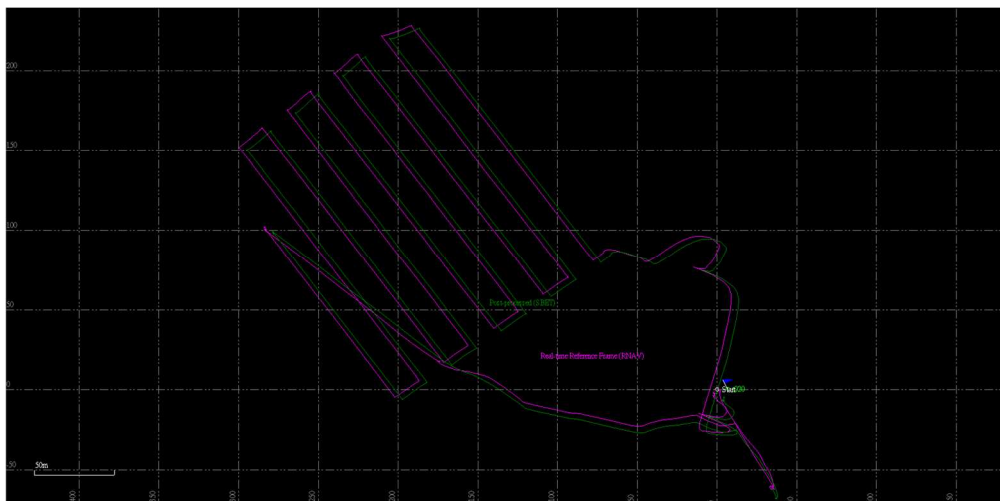


圖 2-2 Applanix POSPac 定位定向系統軌跡處理

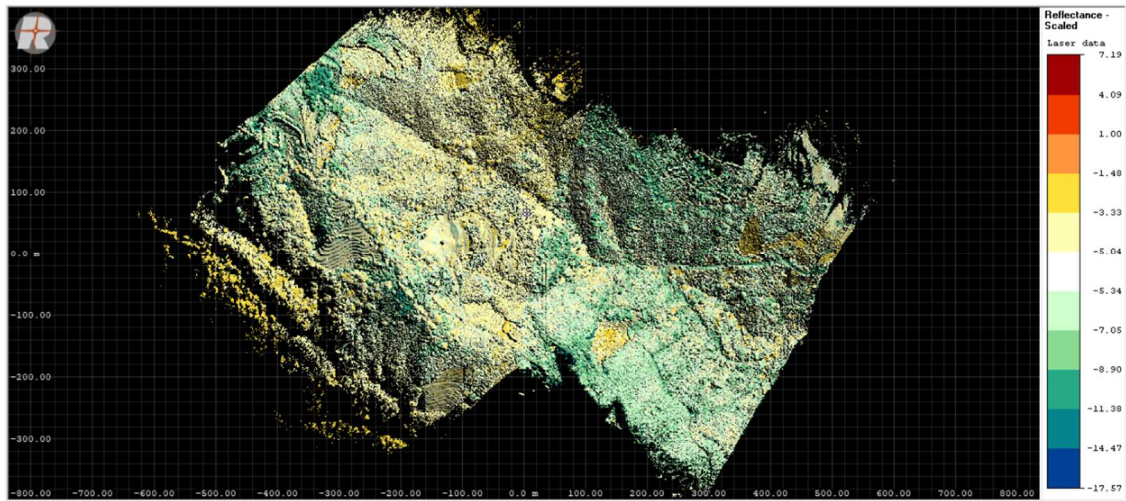


圖 2-3 RIEGL RiProcess 點雲融合

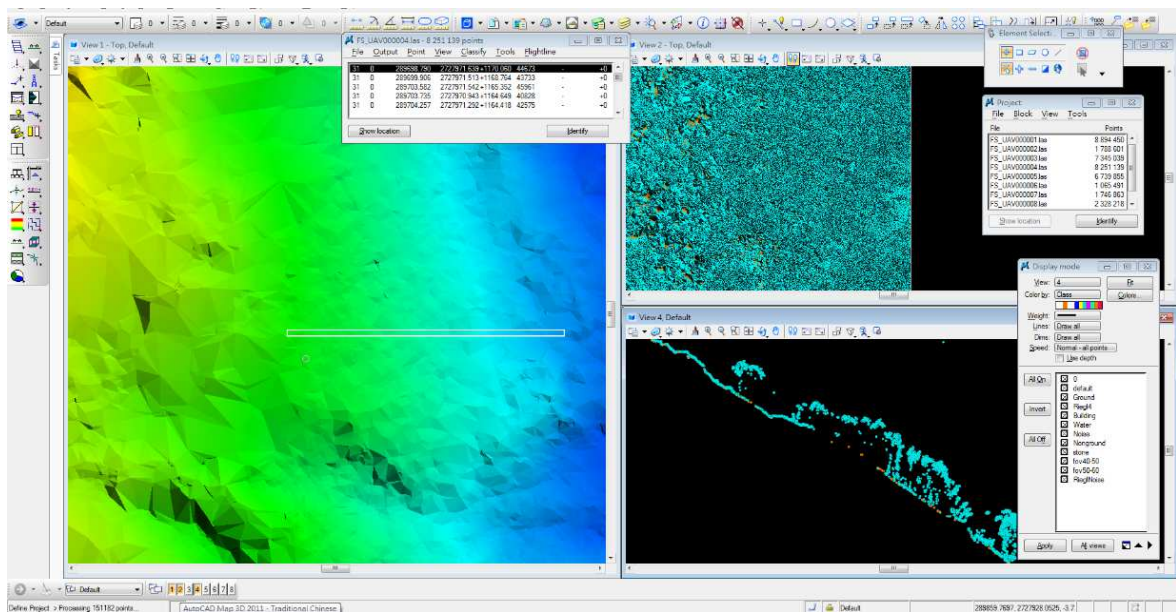


圖 2-4 TerraSolid 點雲編修

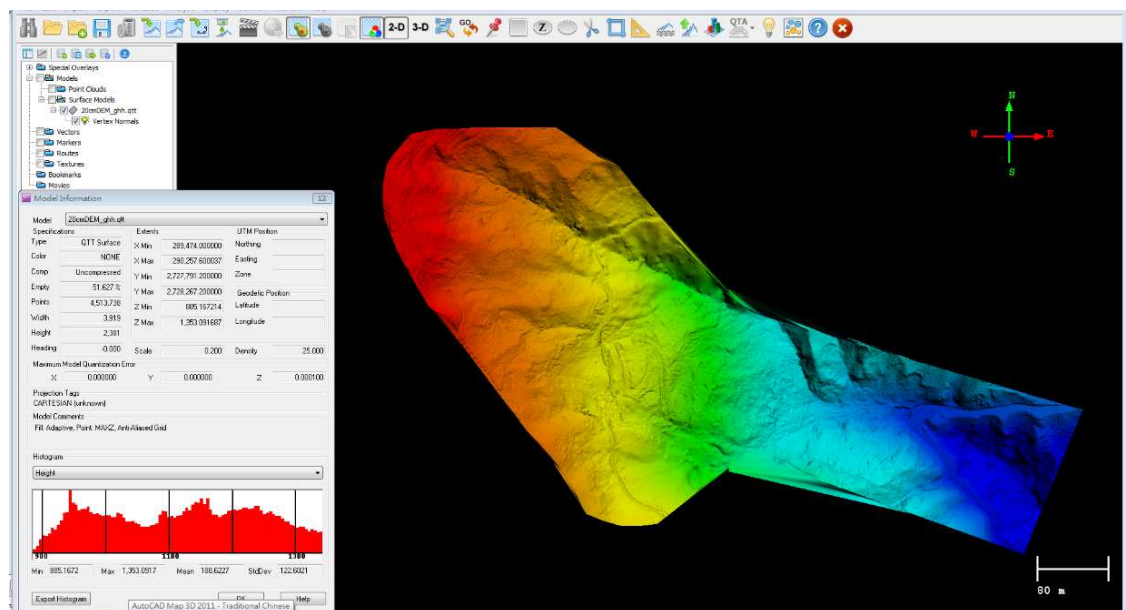


圖 2-5 Quick Terrain Modeler DEM 分析

第三節 控制測量作業

控制測量(無人機飛行任務基站、地面控制點與檢核點測量)採用儀器規格如表 2-2 所示，即時動態定位採用 e-GNSS 系統，並依據「採用虛擬基準站即時動態定位技術辦理加密控制及圖根測量作業手冊」原則辦理。

相關圖資之坐標系統定義以 TWD97@2010 基準為主，橢球高與正高系統轉換則採用內政部國土測繪中心三維坐標轉換服務(<https://egnss.nlsc.gov.tw/trans/>)來進行。

表 2-2 衛星定位儀(基站/控制點/檢核點測量)

GNSS Receiver:STONEX S9II	
Accuracy:	$\pm 2.5\text{mm} + 1\text{ppm}$
Static Accuracy:	Plane: 2.5mm+1ppm Elevation: 5mm+1ppm
RTK Accuracy:	Plane: 8mm + 1ppm Elevation: 15mm + 1ppm
Tracked Signals:	BeiDou/GPS/GLONASS/Galileo
GNSS Data Rate:	Max: 50 Hz (Default: 1 Hz)




第四節 GNSS 監測點架設

雙頻 GNSS 衛星定位監測點應架設於崩塌區內，應包含電力供應及資料回傳功能，架設成果如圖 2-6 所示。



圖 2-6 GNSS 監測點現場架設範例

第五節 成果資料分析範例

多個時期之崩塌區地形成果分析，包括崩塌、變異量分析等，範例如圖 2-7 所示(水保局技研組提供)。

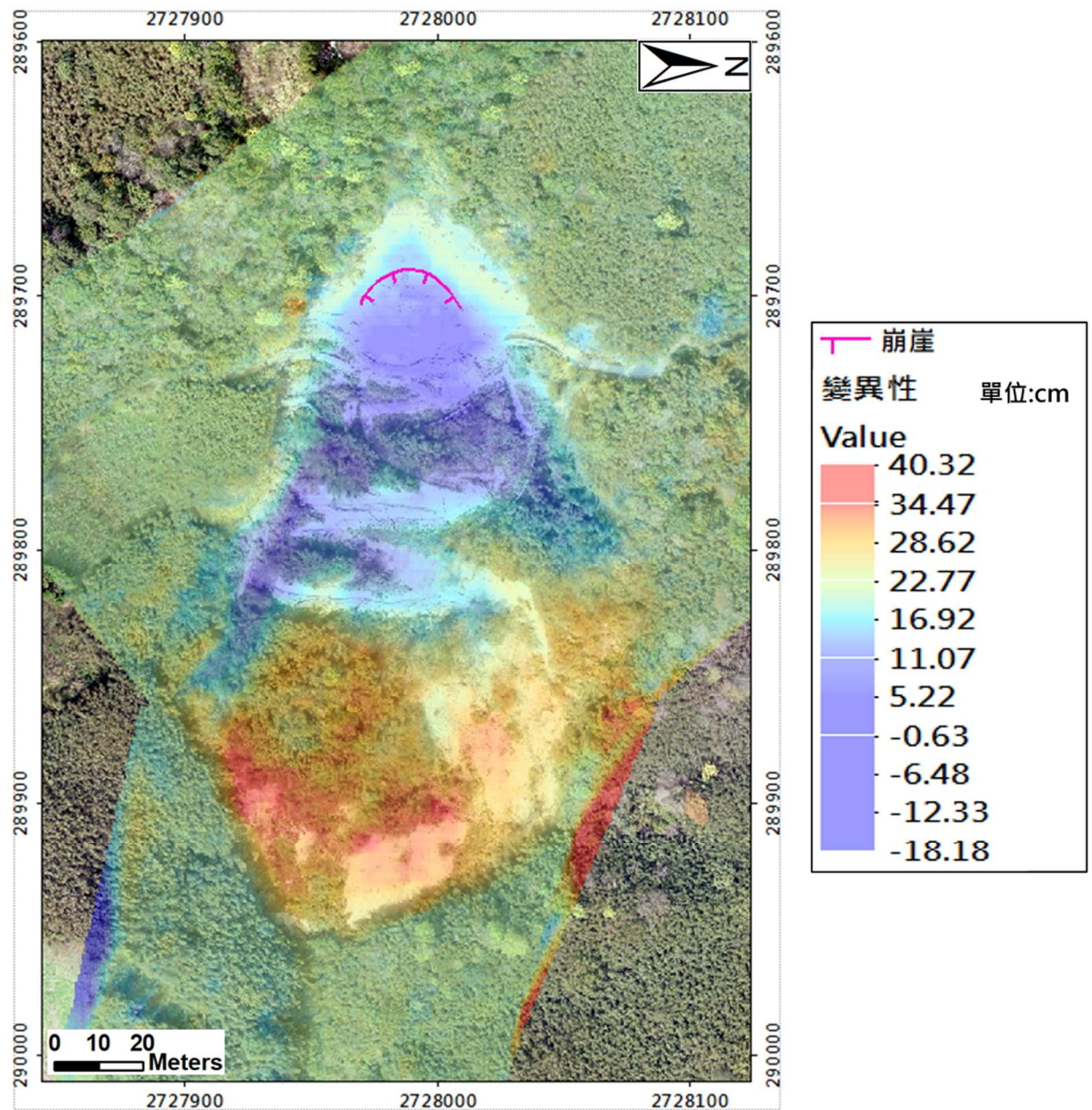


圖 2-7 成果分析範例(水保局技研組提供)

第三章 專案管制

第一節 人力編制

本計畫執行團隊之專業人力編組如表 3-1 所示。

表 3-1 專業人力編組

類別	姓名	職稱	最高學歷科系	擬任工作內容	相關經歷與專長
計畫 主持人	李明軒	經理	成功大學測量及空間 資訊系研究所	本案指揮督導 成果分析	測量技師 工作經歷:9 年
協同 主持人	楊豐毓	經理	政治大學地政所	點雲處理規劃 資料品管	測量技師 工作經歷:9 年
控制 測量組	林文凱	副理	蘭陽技術學院土木科	控制測量作業 GNSS 架設	控制測量 工作經歷:16 年
	曾渝超	組長	台北科技大學土木工 程系與防災研究所	控制測量作業 GNSS 架設	控制測量 工作經歷:6 年
無人機 作業組	黃明江	主任	台北科技大學土木工 程系與防災研究所	無人機任務規劃 空域協調	無人機團隊總指揮 工作經歷:5 年
	林育聖	飛行員	關山高工建築科	無人機飛行任務	無人機飛行任務 工作經歷:8 年
	黃建富	飛行員	光武技術學院機械工 程科	無人機飛行任務	無人機飛行任務 工作經歷:5 年

類別	姓名	職稱	最高學歷科系	擬任工作內容	相關經歷與專長
	周詩凱	飛行員	聯合大學機械工程學系	無人機飛行任務	無人機飛行任務 工作經歷:5 年
	黃治芄	飛行員	嘉南藥理大學應用空間資訊系	無人機飛行任務	無人機飛行任務 工作經歷:2 年
資料處理組	孫睦涵	工程師	健行科技大學應用空間資訊系	點雲及資料處理	點雲資料處理 工作經歷:7 年
	陳品蓉	工程師	嘉南藥理大學應用空間資訊系	點雲及資料處理	點雲資料處理 工作經歷:6 年
	吳家惠	工程師	樹德科技大學動畫與遊戲設計系	點雲及資料處理	點雲資料處理 工作經歷:5 年

第二節 工作進度管制

本計畫工作執進度控管與時程規劃如圖 3-1 所示，因執行無人機飛行任務需審慎評估天候條件與現場狀況，各次任務執行時間點由機關通知並確認範圍後進行規劃與進場。

項目及說明		工作天	110年度			
			5	10	15	20
1	飛行任務規劃	5				
2	原始資料處理	2				
3	點雲資料處理		3	2		
4	歷次成果資料分析				5	
5	成果報告撰寫					5

機關通知後五天內進場
執行無人機飛行任務

包含軌跡、點雲及
航拍影像成果處理及檢核 (1~2工作天)

點雲資料處理包含點雲分類、DEM成果產製
及圖面繪製與配置 (3~5工作天)

歷次成果資料分析 (3~5工作天)

成果報告撰寫 (3~5工作天)

圖 3-1 工作進度規劃

第三節 品質管制計畫

本公司為 ISO9001 認證通過之廠商，執行之計畫案均需依照 ISO 之作業流程來辦理，其中交互審查機制由「協同主持人(資料品管組)」負責(執業測量技師)，且獨立於資料成果製作，經由分工合作及交互審查檢核下，確保檢核效率及避免檢核盲點，經送交計畫主持人最終審核後方由測量技師進行專業簽署(測量技師簽證)，以確保本計畫相關成果之品質。



圖 3-2 品質管制流程圖

第四章 執行成果

第一節 e-GNSS 測量成果

本計畫配合第一次飛行任務共執行兩次現場 e-GNSS 測量(3 月 4 日及 3 月 15 日)，無人機相關資料處理坐標基準以 3 月 4 日之成果為準，成果如表 4-1 所示，現場工作照如圖 4-1 所示，經 3 月 15 日之成果查核坐標應無顯著變位，成果記錄詳參閱附錄 2.e-GNSS 作業-點之記。

表 4-1 e-GNSS 測量成果

Point	TWD97@2010[2021年 3月 4日]				Point	TWD97@2010[2021年 3月 15日]			
	N	E	橢高	正高		N	E	橢高	正高
T01	2728065.320	289729.618	1184.637	1161.770	T01	2728065.324	289729.639	1184.661	1161.794
T02	2728067.015	289730.046	1184.621	1161.754	T02	2728067.009	289730.047	1184.679	1161.812
T03	2727945.155	290068.003	967.301	944.423	T03	2727945.152	290068.016	967.349	944.471
T05	2727955.576	290228.408	976.114	953.238	T05	2727955.574	290228.406	976.154	953.278
GS01	2727934.420	290076.161	966.756	943.876	GS01	2727934.424	290076.165	966.772	943.892
GS02	2727955.470	290224.153	976.003	953.127	GS02	2727955.461	290224.163	976.020	953.144
					GS03	2728249.925	289531.512	1343.104	1320.249
					GS04	2728198.606	289514.243	1354.872	1332.012



圖 4-1 e-GNSS 測量工作照

第二節 無人機航拍資料處理

本計畫第一次無人機航拍(110年3月1日)原始資料軌跡、曝光點及點雲檢查成果如圖 4-2 所示，資料均滿足涵蓋計畫範圍與規劃點密度(100 點/m² 以上)，航拍影像 PPK(Post-Processing Kinematic)解算報表如圖 4-3 所示，精度符合預期品質。

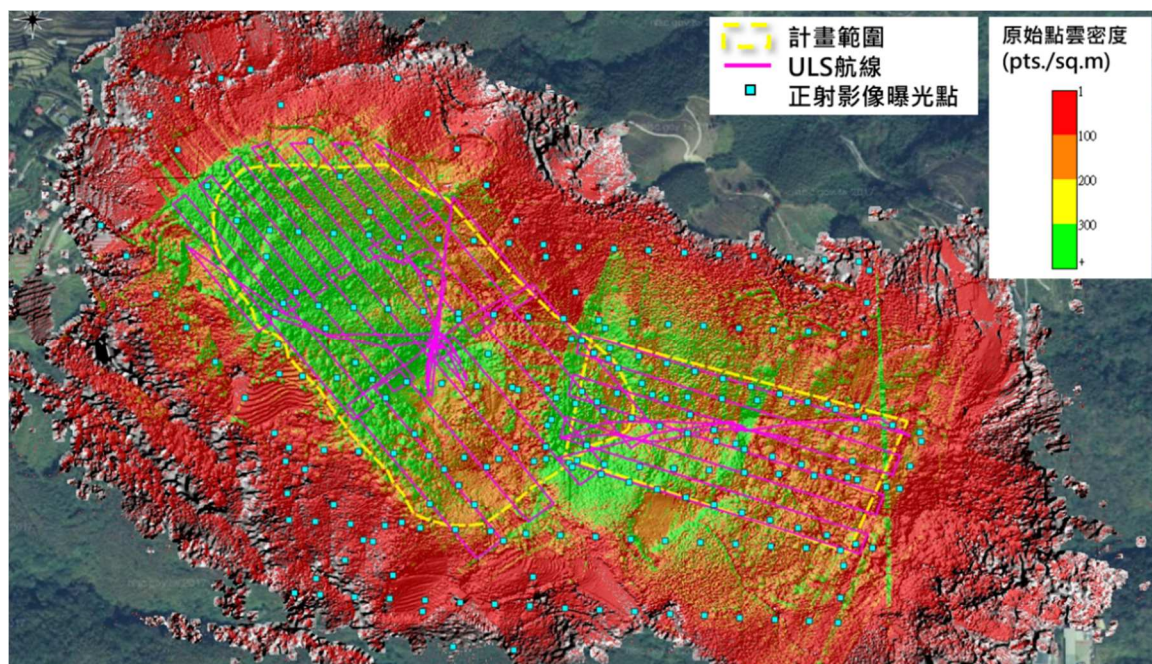


圖 4-2 無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(3/1 成果)

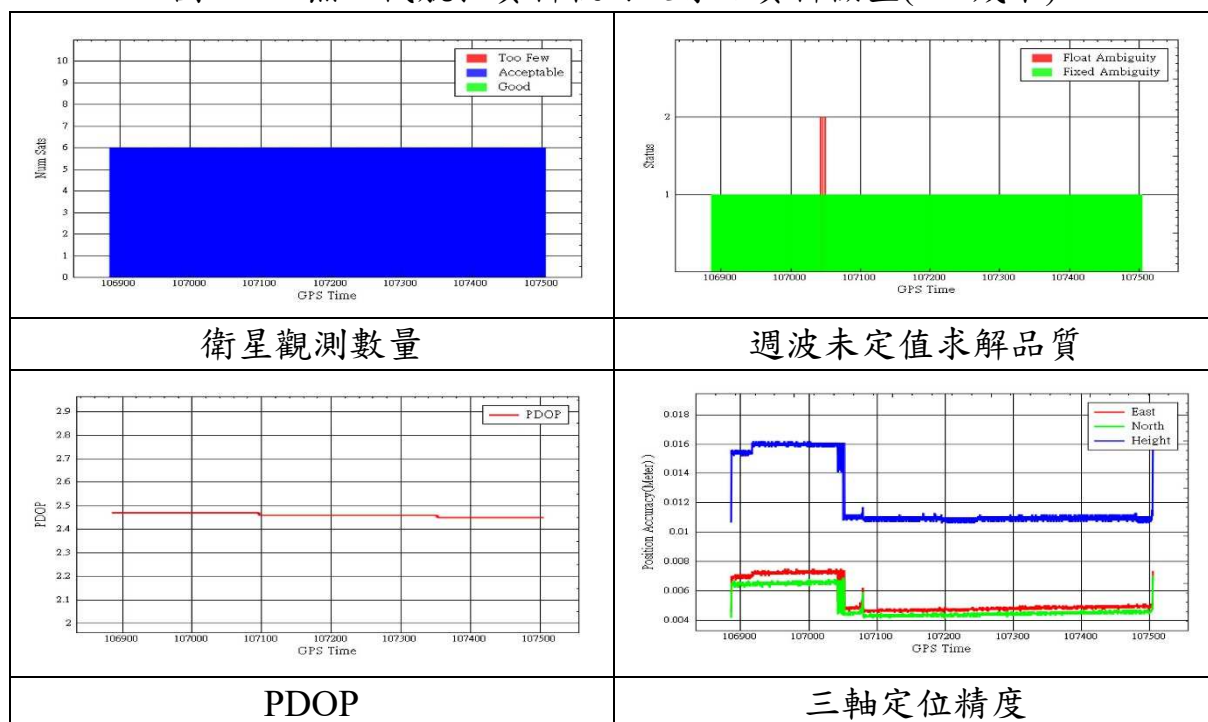


圖 4-3 無人機航拍影像 PPK 後處理報表(3/1 成果)

本計畫第二次無人機航拍(110年8月17)原始資料軌跡、曝光點及點雲檢查成果如圖 4-4 所示，資料均滿足涵蓋計畫範圍與規劃點密度，航拍影像 PPK(Post-Processing Kinematic)解算報表如圖 4-5 所示，精度符合預期品質。

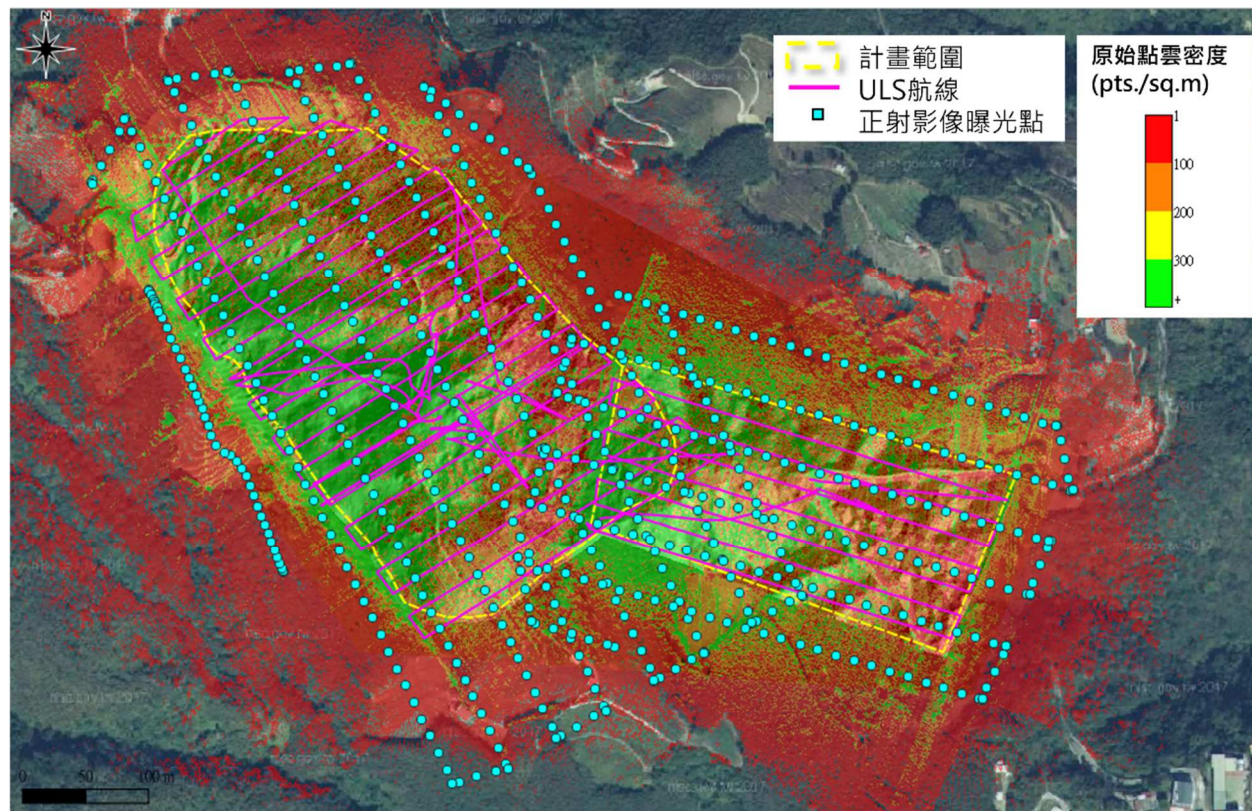


圖 4-4 無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(8/17 成果)

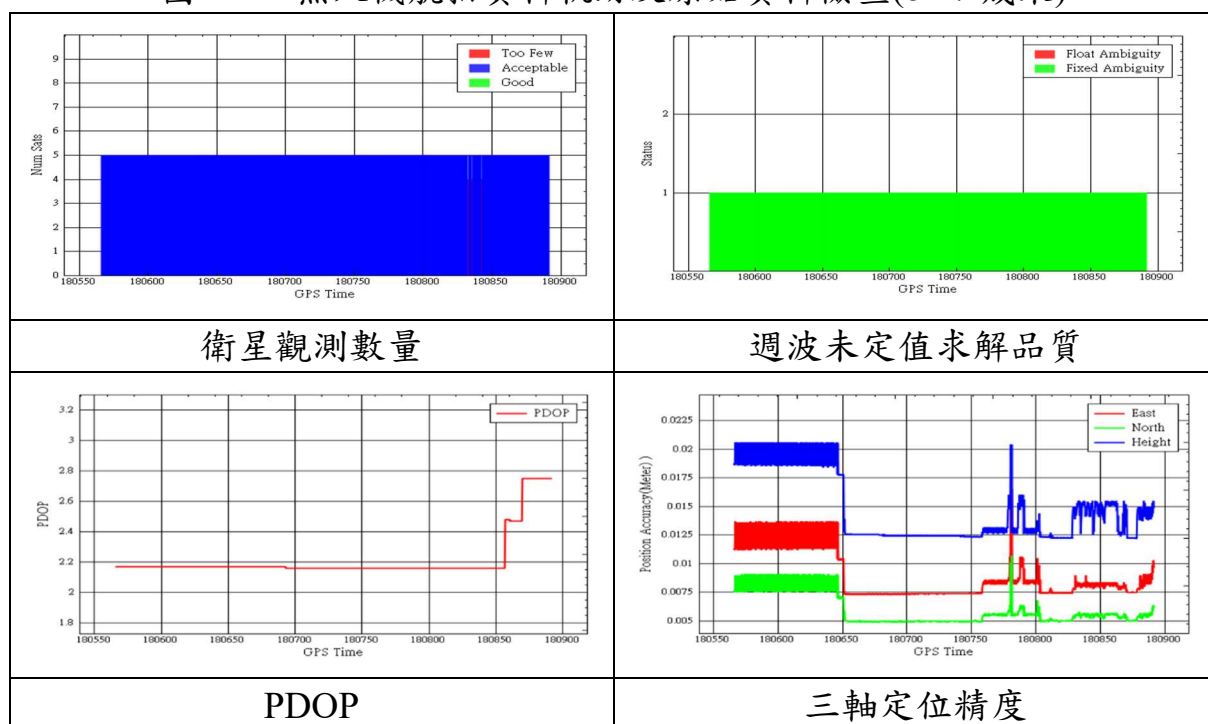


圖 4-5 無人機航拍影像 PPK 後處理報表(8/17 成果)

本計畫第三次無人機航拍(110 年 10 月 19)原始資料軌跡、曝光點及點雲檢查成果如圖 4-6 所示，資料均滿足涵蓋計畫範圍與規劃點密度)，航拍影像 PPK(Post-Processing Kinematic)解算報表如圖 4-7 所示，精度符合預期品質。

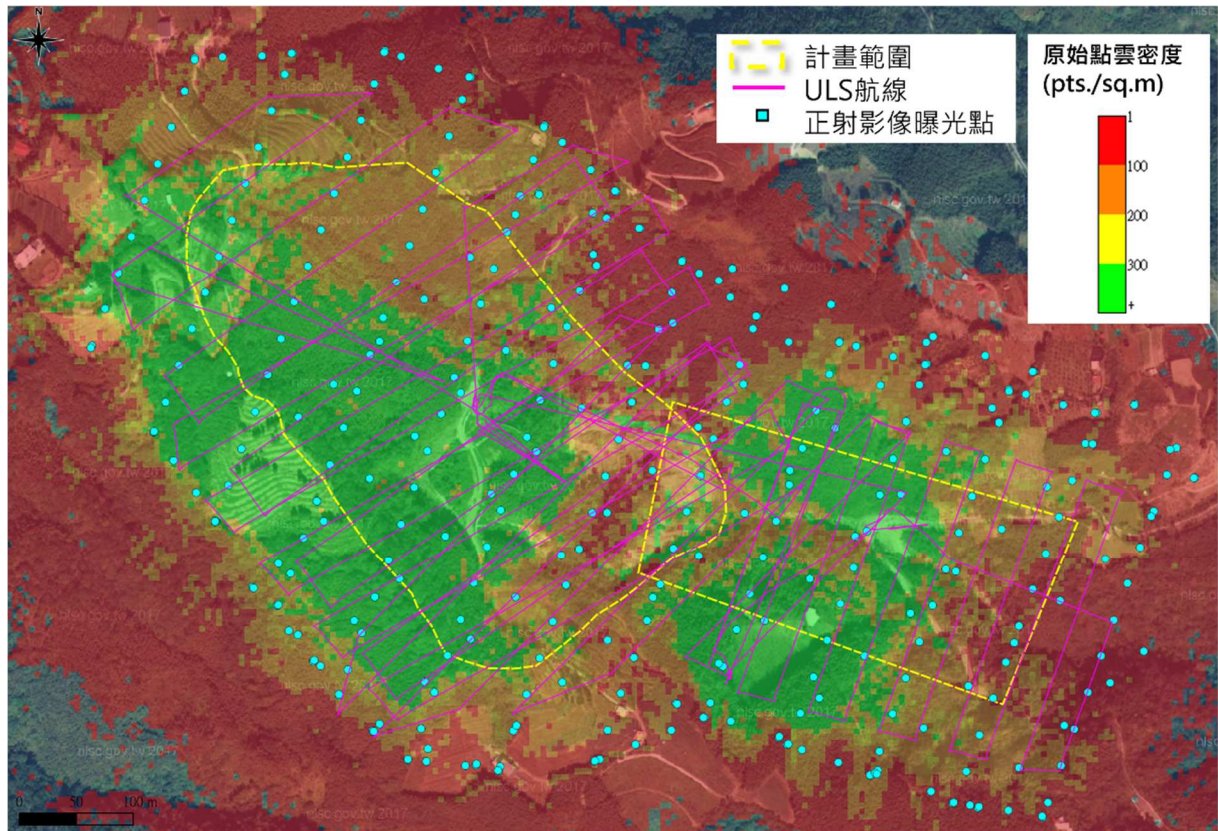


圖 4-6 無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(10/19 成果)

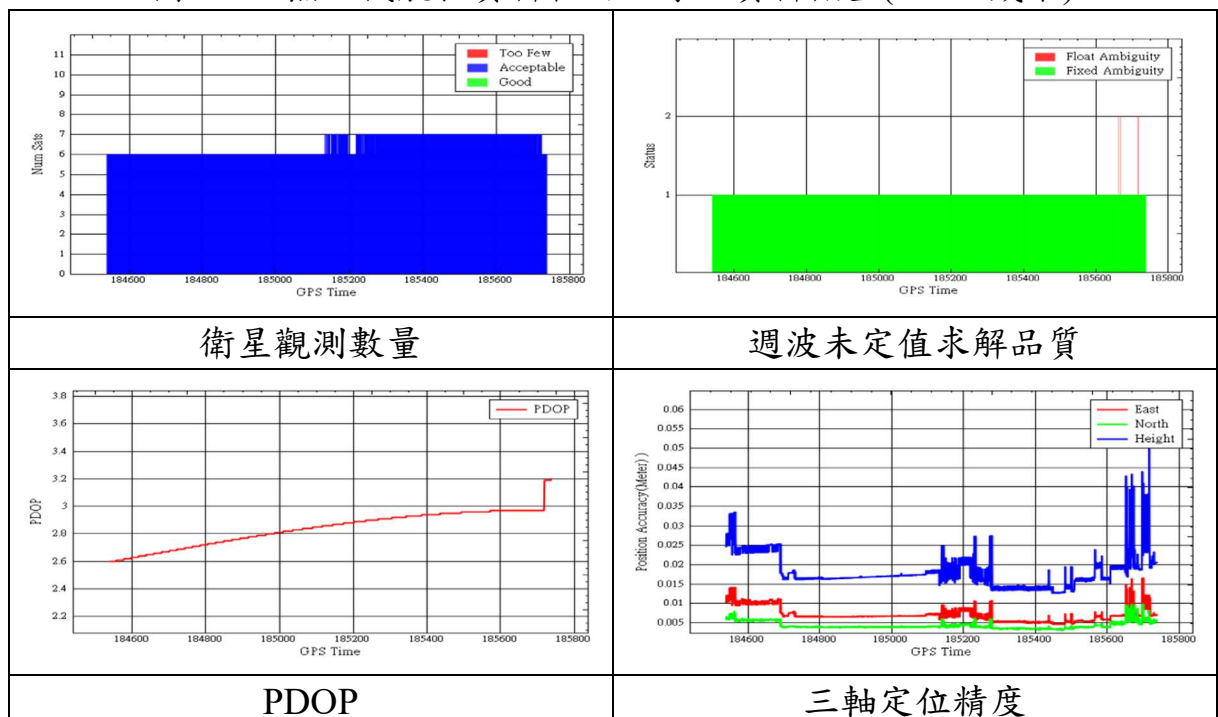


圖 4-7 無人機航拍資料軌跡及原始資料檢查(10/19 成果)

第三節 航拍正射影像成果

航拍正射影像處理採用 Agisoft Metashape 軟體進行，影像方位經像機率定參數及空三平差計算後，利用密匹配產生點雲後進行正射影像糾正，並以控制點約制坐標與高程系統，成果如圖 4-8 至圖 4-13 所示。

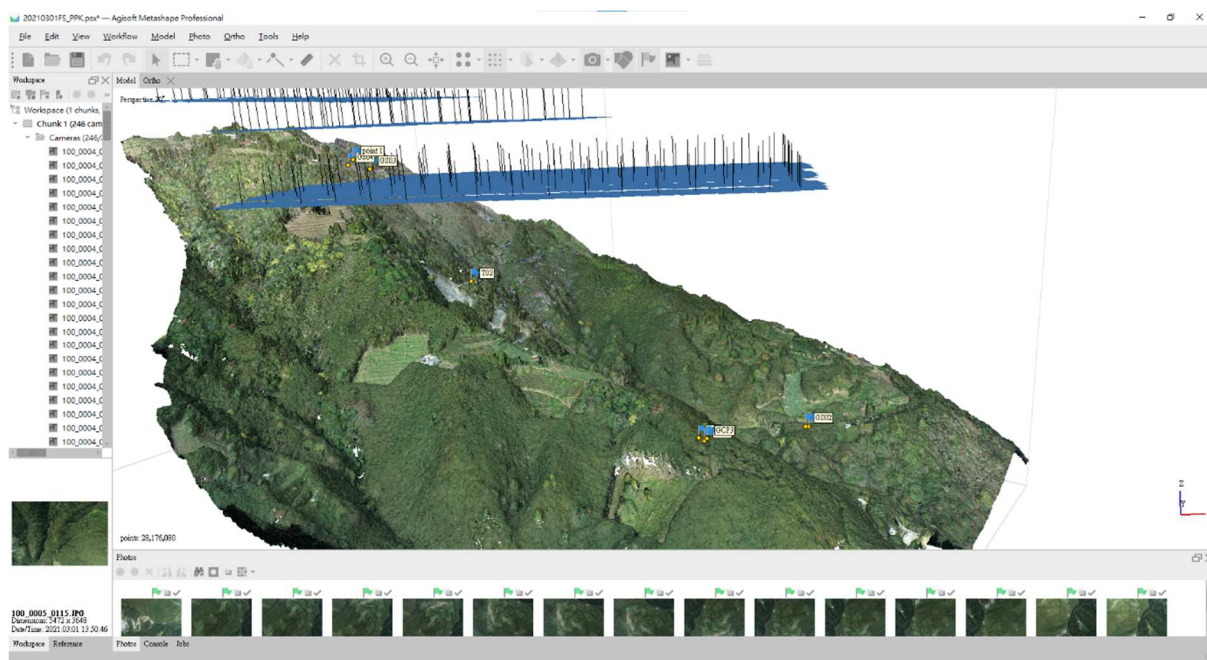


圖 4-8 航拍影像空三計算與密匹配(3/1 成果)



圖 4-9 航拍正射影像成果(3/1 成果)

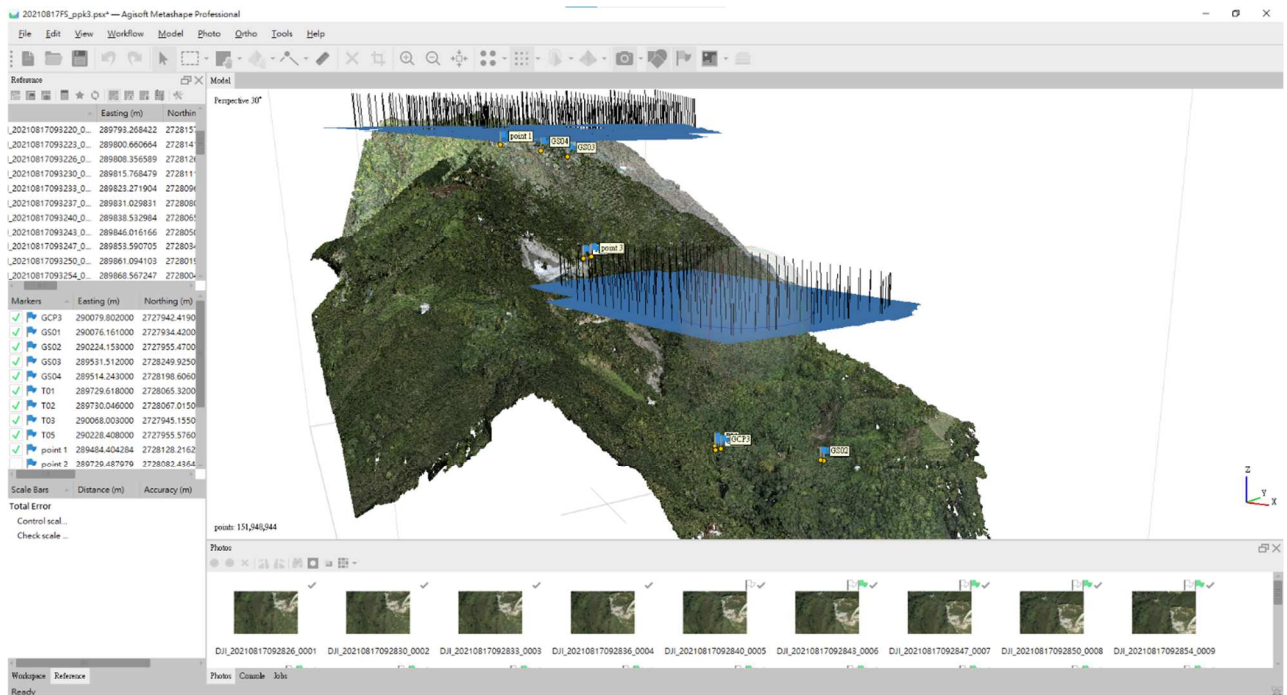


圖 4-10 航拍影像空三計算與密匹配(8/17 成果)



圖 4-11 航拍正射影像成果(8/17 成果)

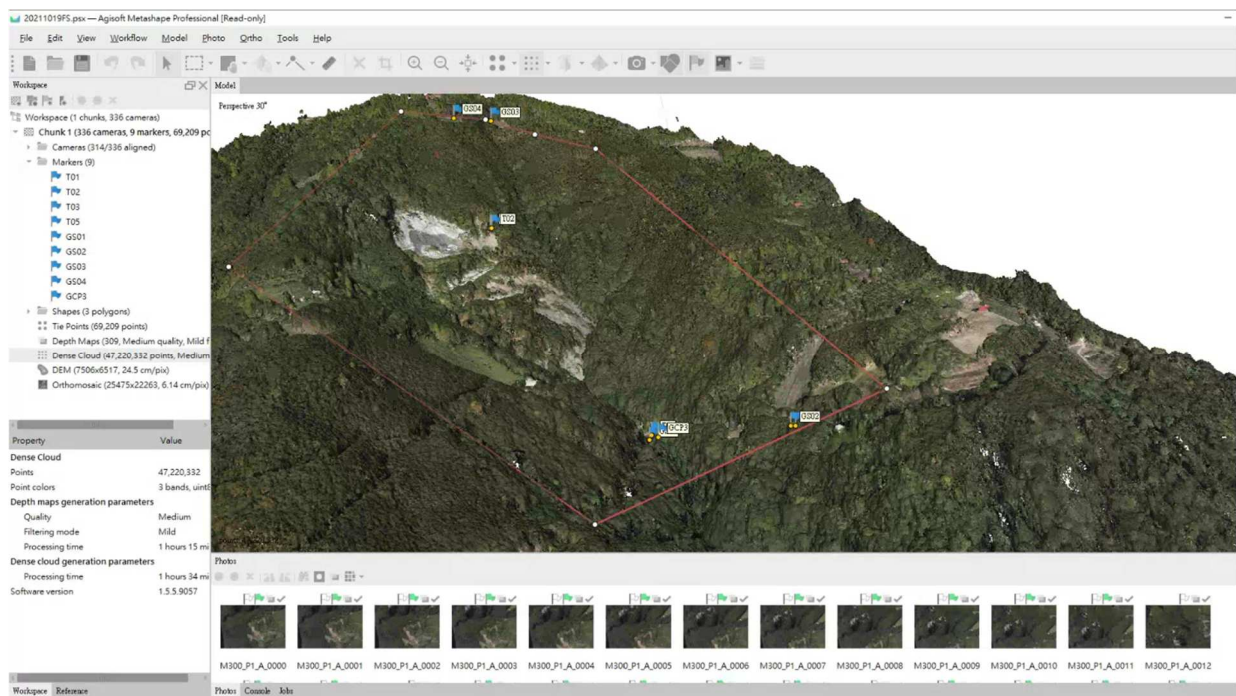


圖 4-12 航拍影像空三計算與密匹配(10/19 成果)



圖 4-13 航拍正射影像成果(10/19 成果)

第四節 無人機光達點雲成果

無人機光達點雲經軌跡融合及平差(示意如圖 4-14)後，利用航拍正射影像進行對位與上彩(賦予 RGB 顏色)，並經過剖面與高程檢核如圖 4-15 所示，方可進行點雲編修及後續 DEM 產製並生程等高線圖，如圖 4-16 及圖 4-17 所示；DEM 分析方式採用 SAGA 軟體中的 Sky View Factor(SVF)方式來進行渲染與檢視，成果如圖 4-18 所示。軌跡及點雲平差融合報告詳參閱附錄 3；定位定向系統後處理報表詳參閱附錄 4。

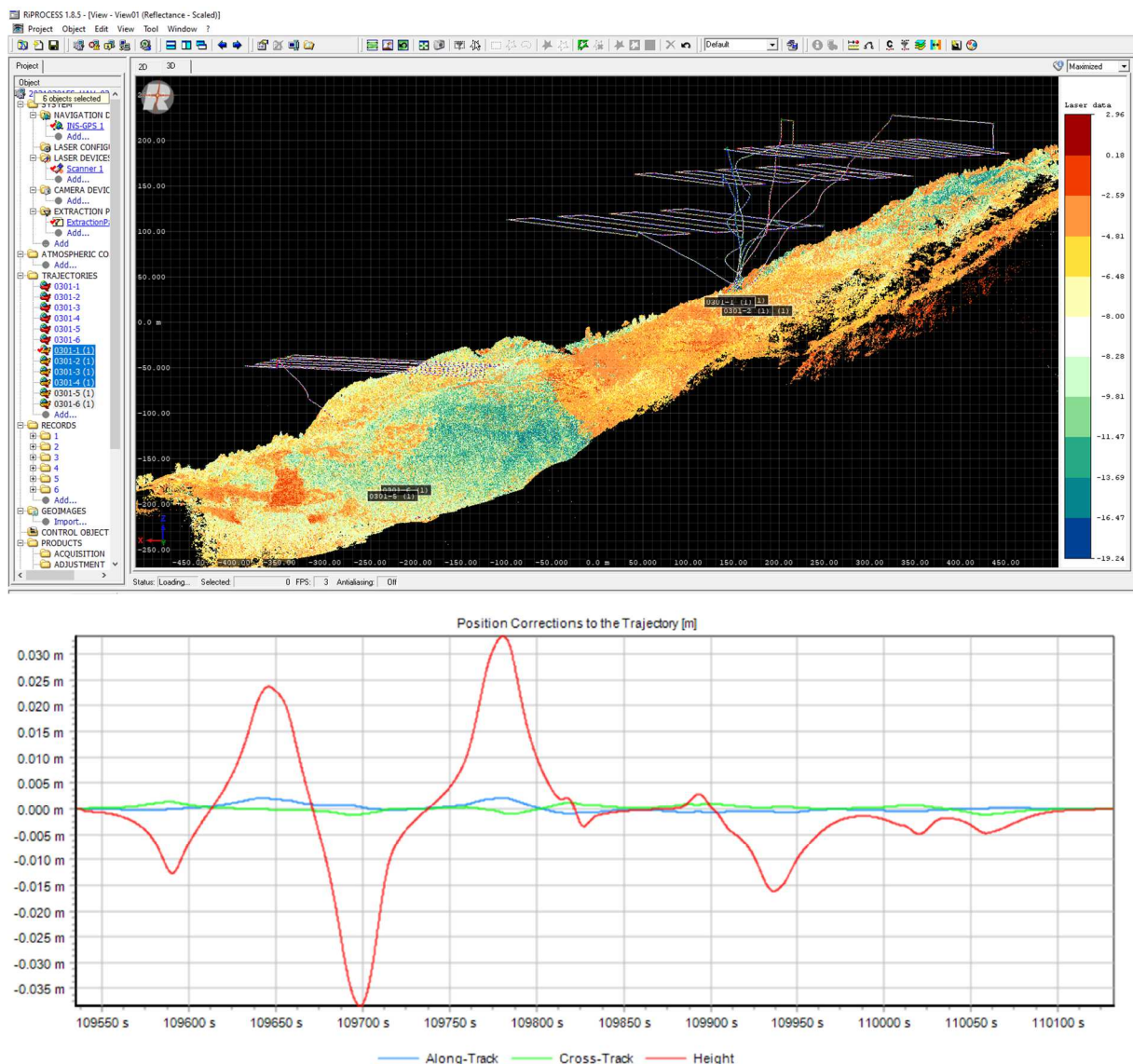


圖 4-14 點雲融合軌跡及平差成果

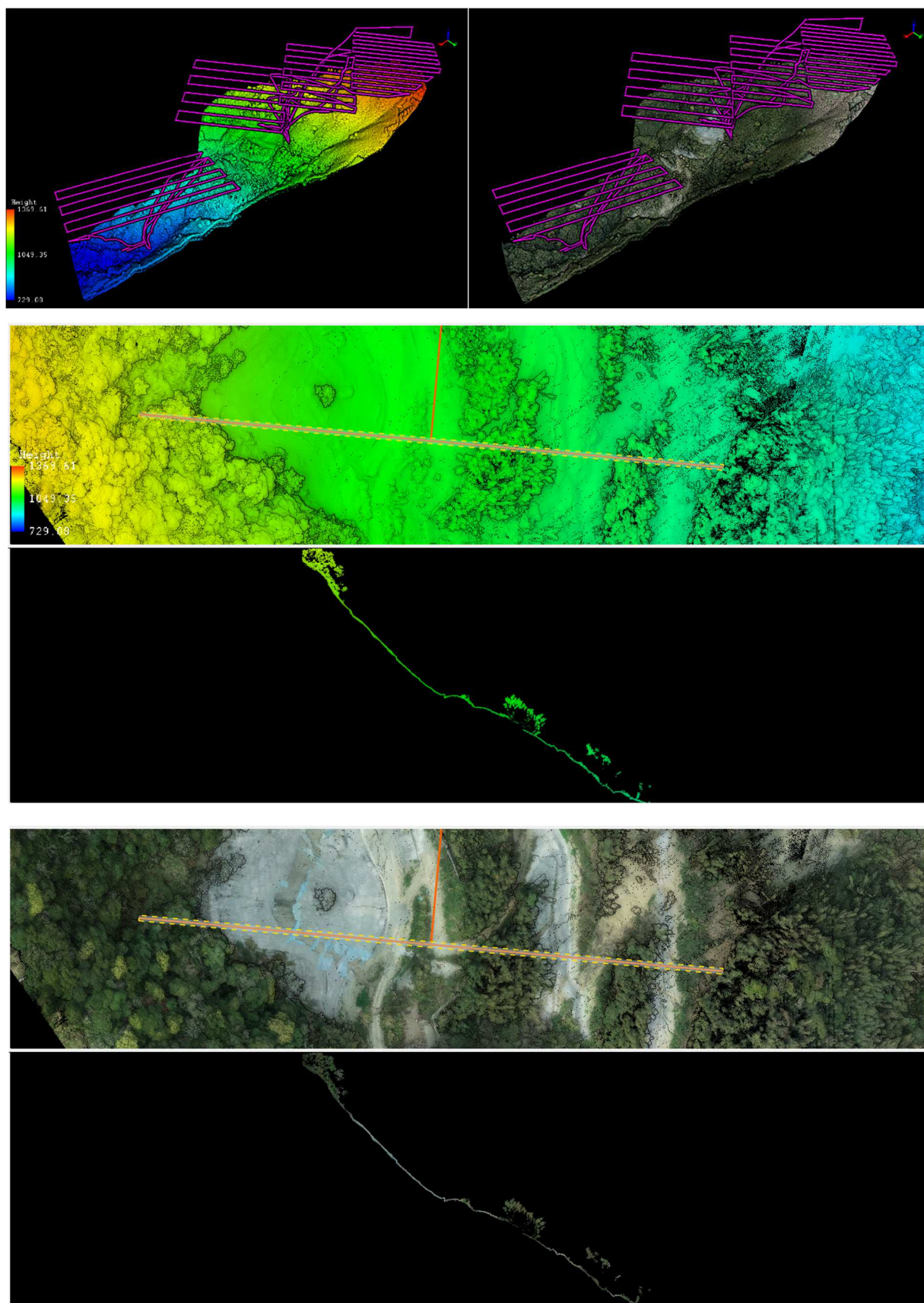


圖 4-15 無人機光達點雲處理成果(彩色與高程色階)

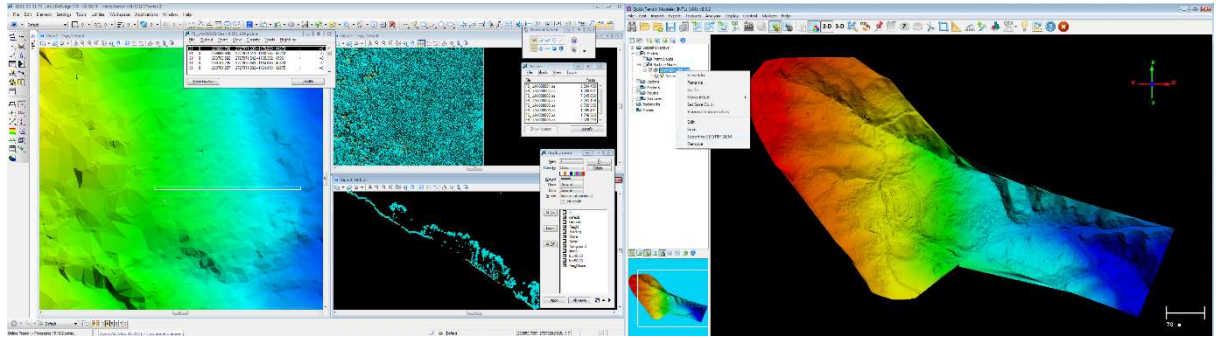


圖 4-16 點雲編修處理-DEM 產製

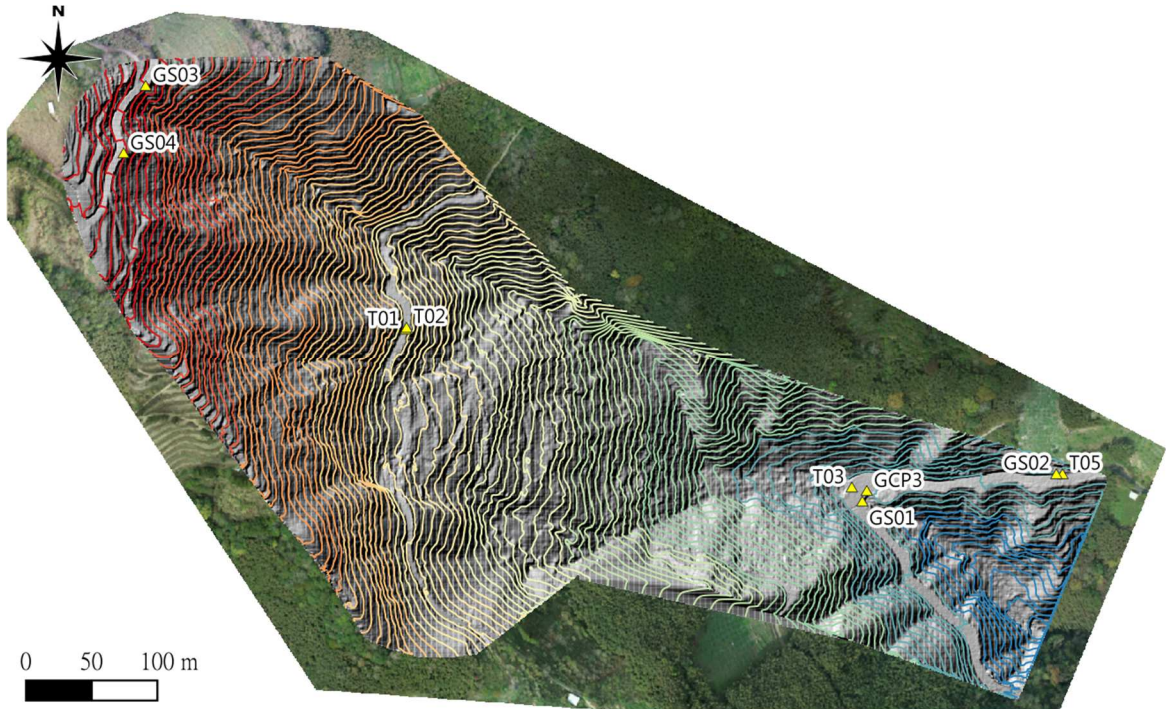


圖 4-17 DEM 產生等高線成果

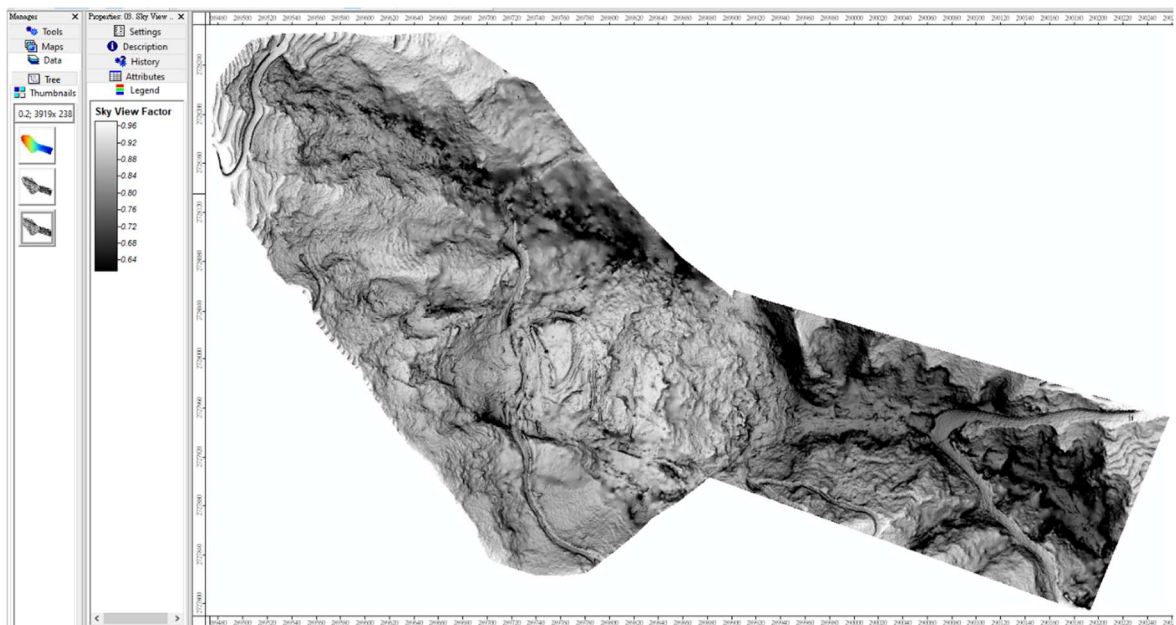


圖 4-18 DEM 產生 SVF 成果

第五節 前兩期工作成果比對分析

將第一期(3/1)及第二期(8/17)工作成果(DEM、正射影像)進行套疊比對，分別節錄重點變異於本節說明如下。數值高程模型-兩期成果差異如圖 4-19 所示，由圖例色階可顯見其崩落範圍(高程降低)及土方堆積範圍(高程增加)；繪製特徵參考線並針對崩塌重點區局部放大檢視如圖 4-20 所示。

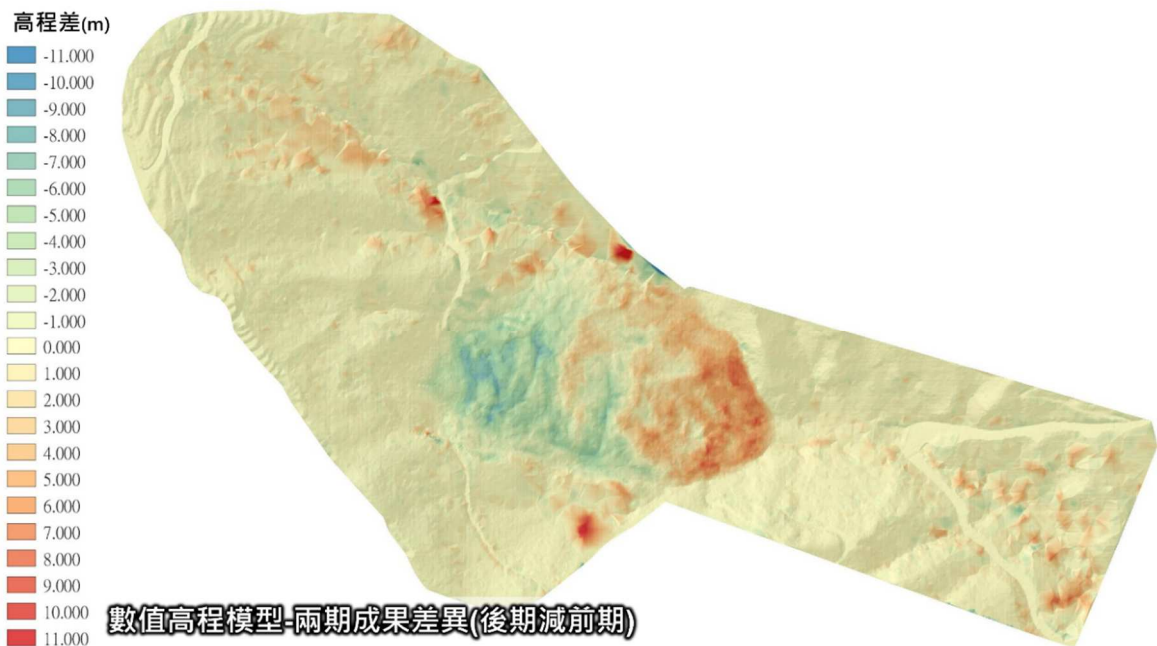


圖 4-19 數值高程模型兩期差異(第二期減第一期)

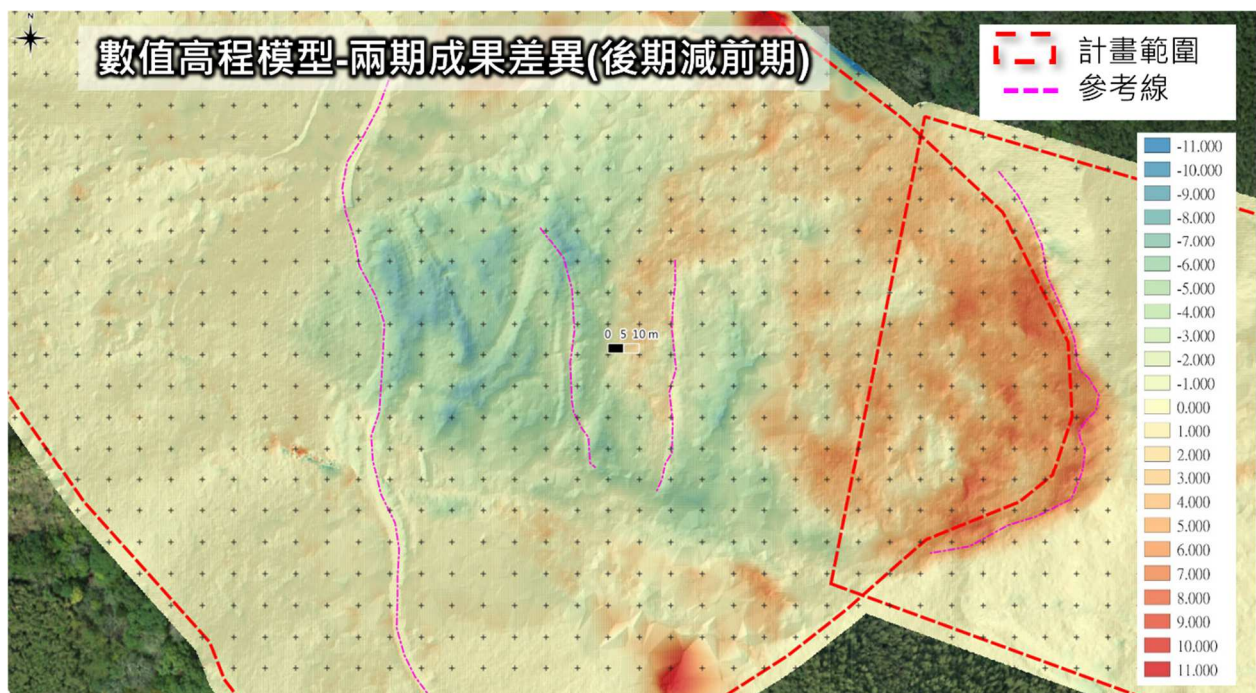


圖 4-20 數值高程模型兩期差異(第二期減第一期)-崩塌重點區

將兩期數值高程模型以陰影圖渲染(Hillshade)並套疊崩塌地地形特徵參考線即可清楚顯現其變異量之方向與尺度如圖 4-21 及 4-22 所示，滑動方向為由西向東，水平距離已達近 10 公尺。

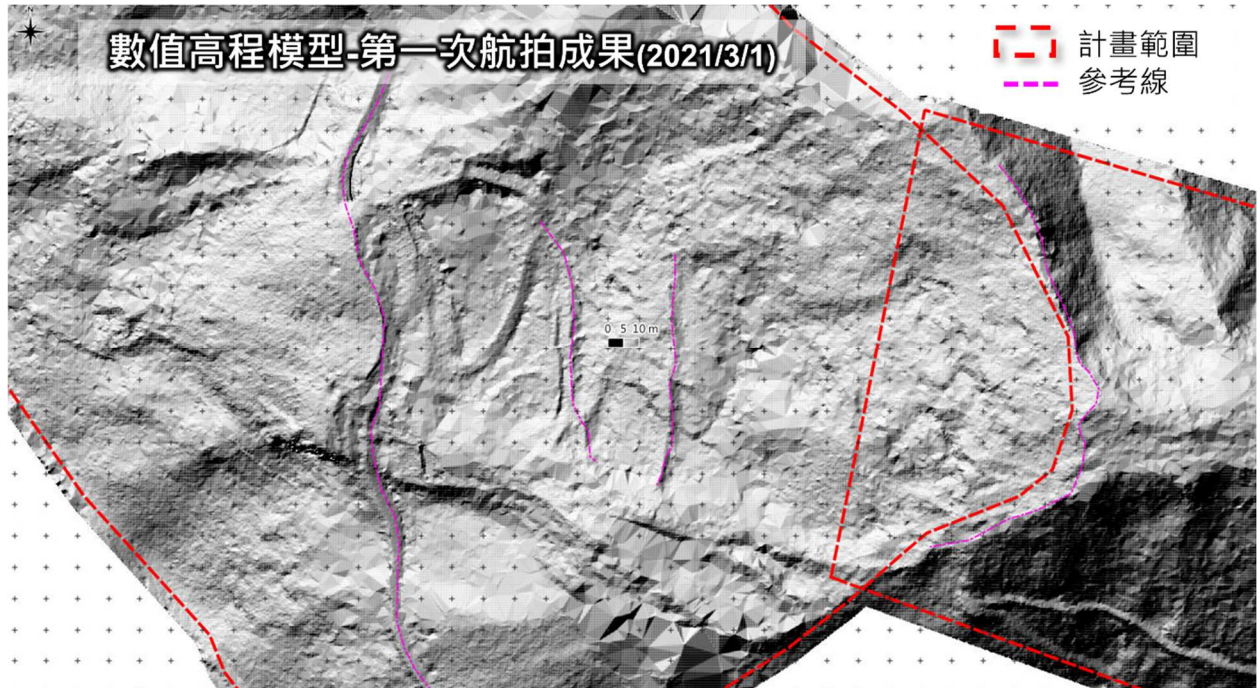


圖 4-21 數值高程模型(3/1 成果)-參考線套疊

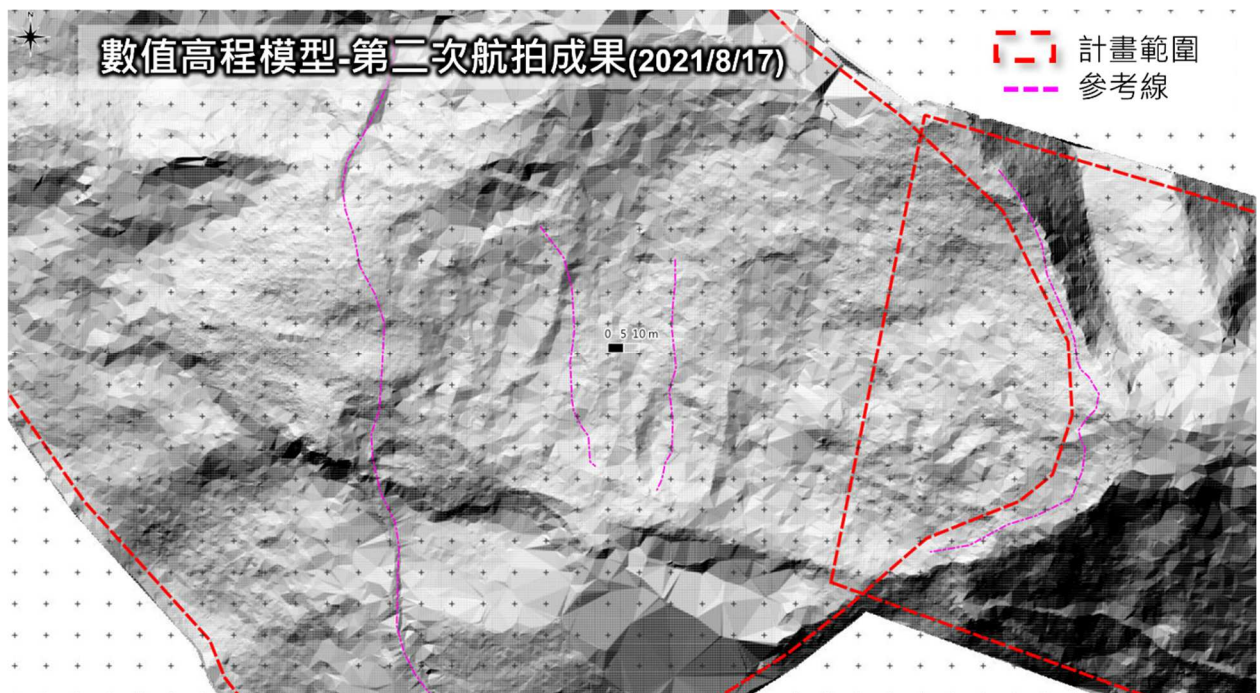


圖 4-22 數值高程模型(8/17 成果)-參考線套疊

同理將正射影像套疊前述之參考線位置，可以由可見光資訊識別地貌特徵之顯著變化與塊體之滑動，如圖 4-23 及圖 4-24 所示。



圖 4-23 航拍正射影像(3/1 成果)-參考線套疊



圖 4-24 航拍正射影像(8/17 成果)-參考線套疊

從細部等高線(1 公尺間距)，高程範圍取 980 至 1000 公尺間，進行崩塌土方堆積區變異趨勢之分析，成果如圖 4-25 及圖 4-26 所示，可以清楚看到堆積區在第二期(8/17 成果)之等高線間距縮短，表示地形坡度之顯著抬升；進一步比對各組等高線之前後期差異如圖 4-27 至 4-37 所示，可以觀察到地形顯著變化之尺度與方向，同時確認兩期地形無變異區域之等高線維持穩定趨勢。

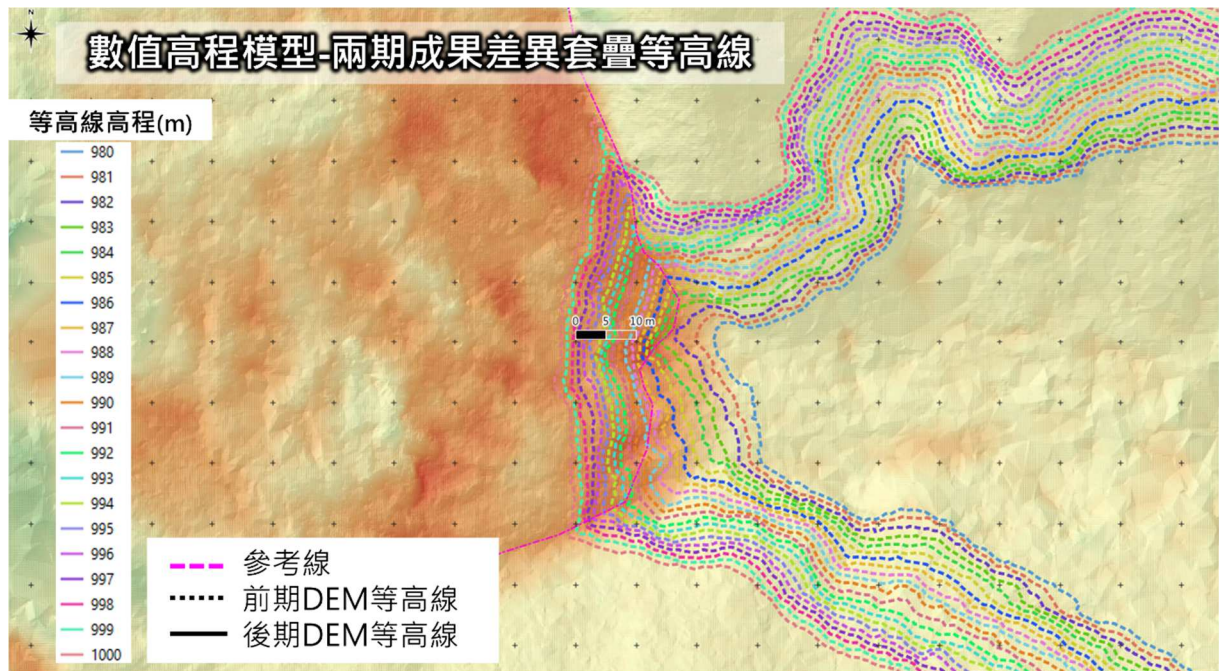


圖 4-25 崩塌土方堆積區等高線套疊(3/1 成果)

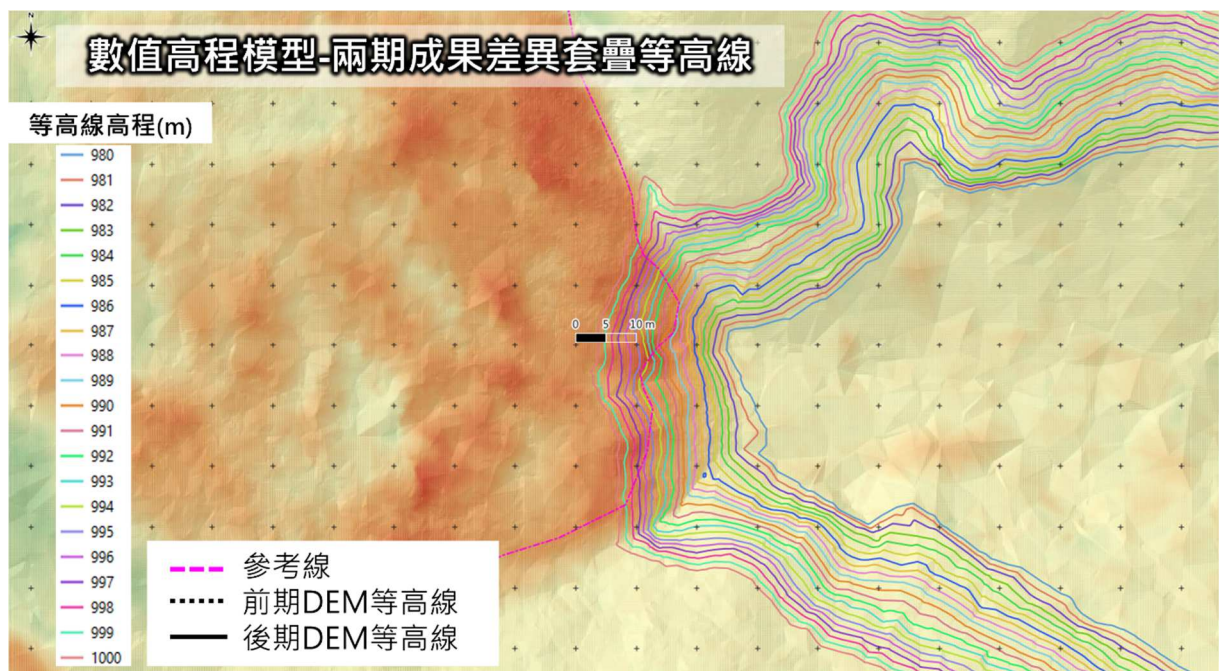


圖 4-26 崩塌土方堆積區等高線套疊(8/17 成果)

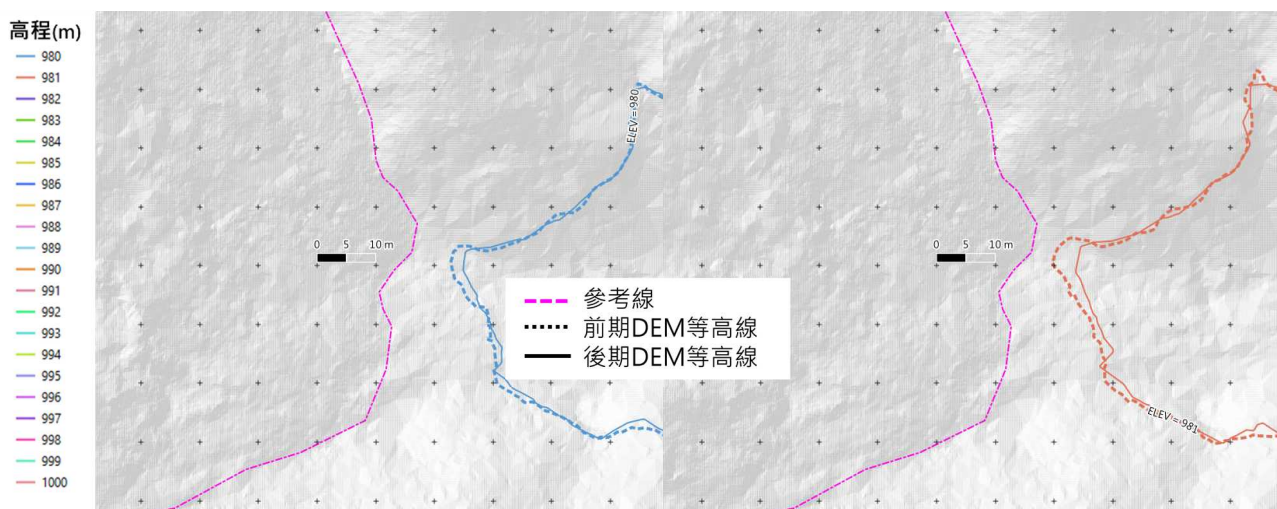


圖 4-27 等高線一至二期變化(左:ELEV=980、右:ELEV=981)

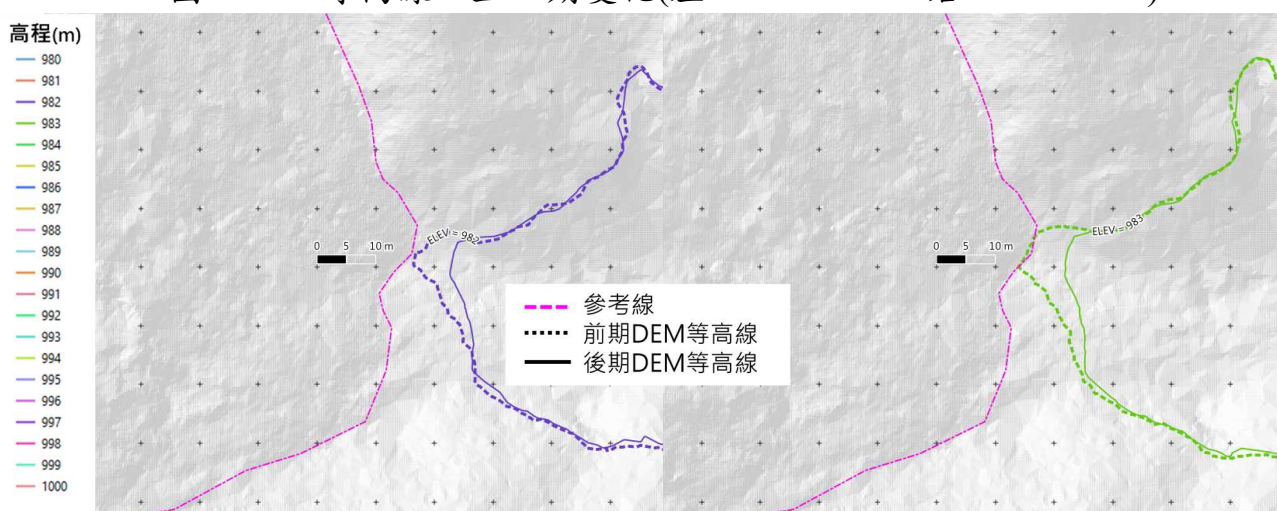


圖 4-28 等高線一至二期變化(左:ELEV=982、右:ELEV=983)

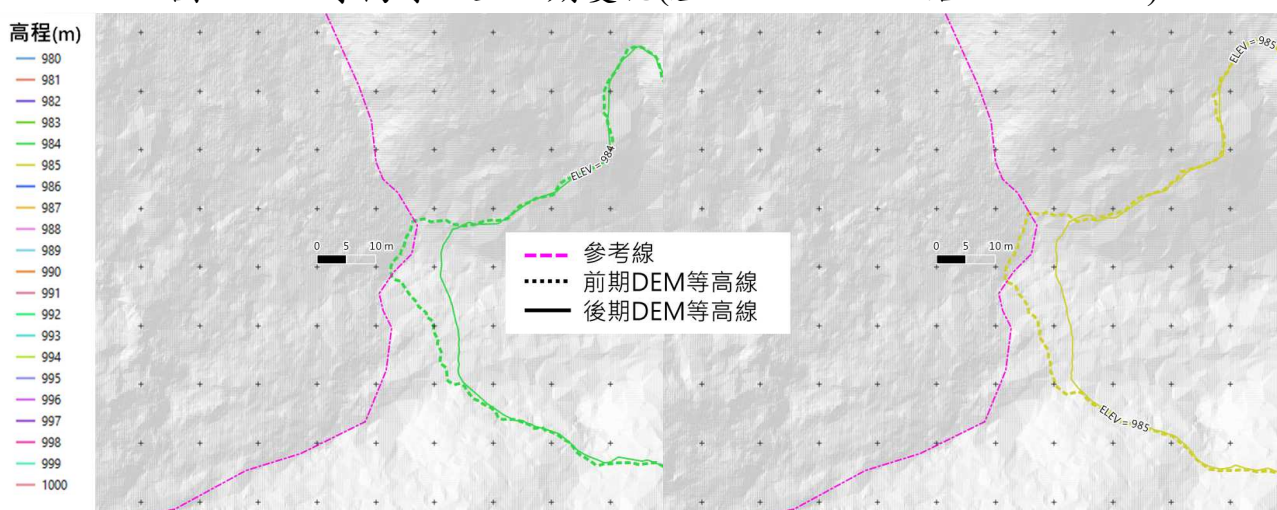


圖 4-29 等高線一至二期變化(左:ELEV=984、右:ELEV=985)

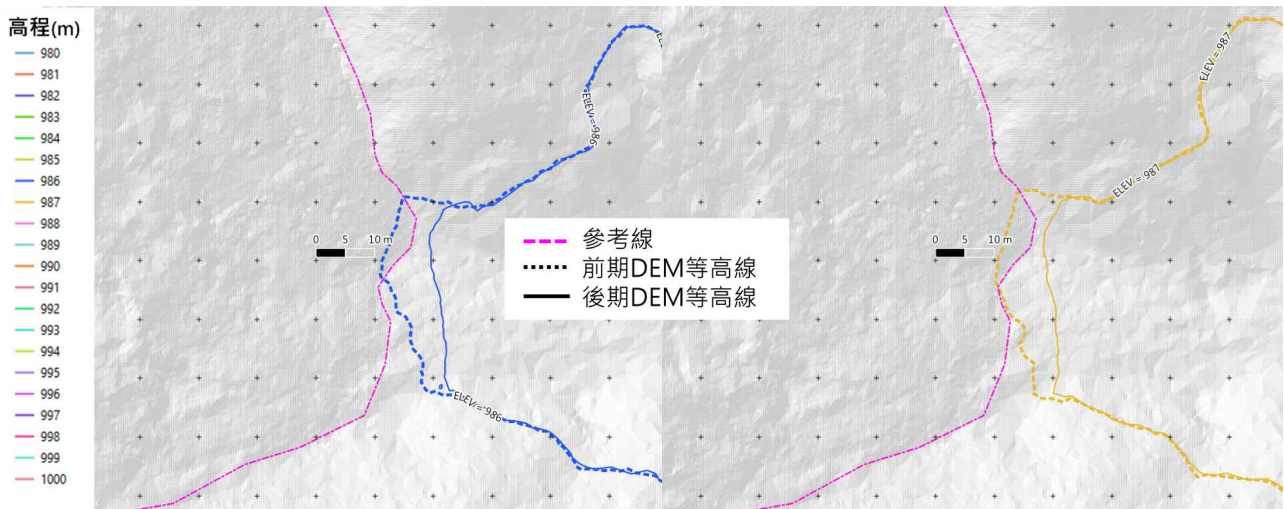


圖 4-30 等高線一至二期變化(左:ELEV=986、右:ELEV=987)

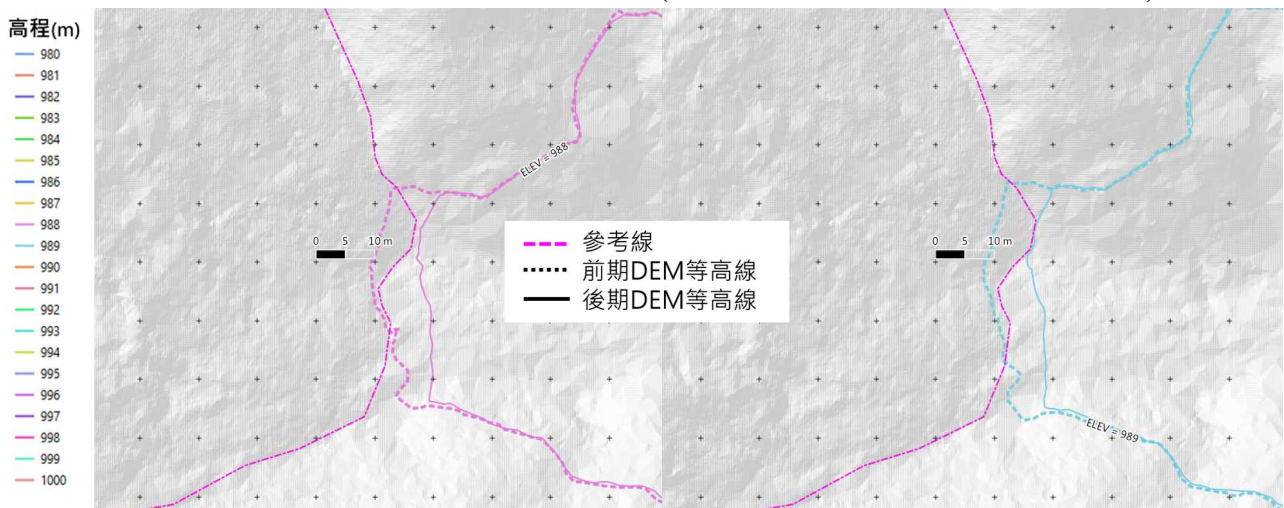


圖 4-31 等高線一至二期變化(左:ELEV=988、右:ELEV=989)

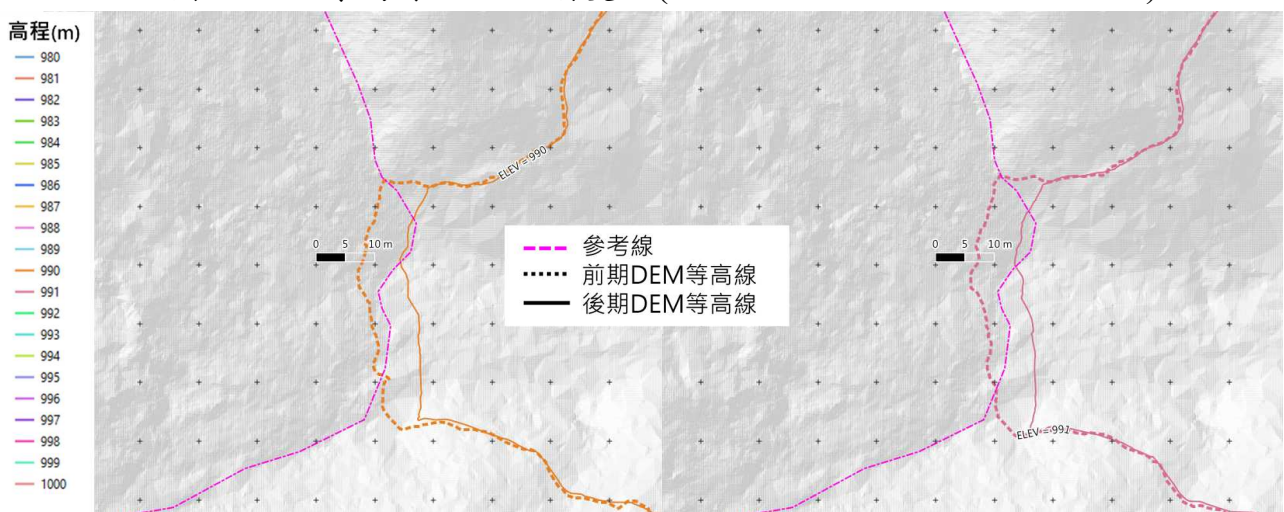


圖 4-32 等高線一至二期變化(左:ELEV=990、右:ELEV=991)

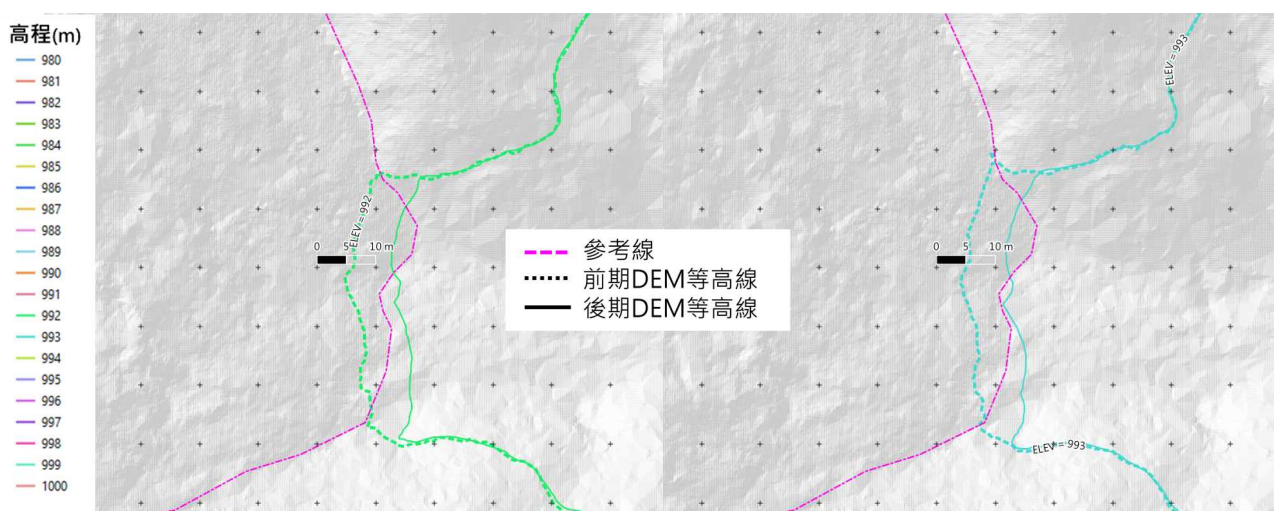


圖 4-33 等高線一至二期變化(左:ELEV=992、右:ELEV=993)

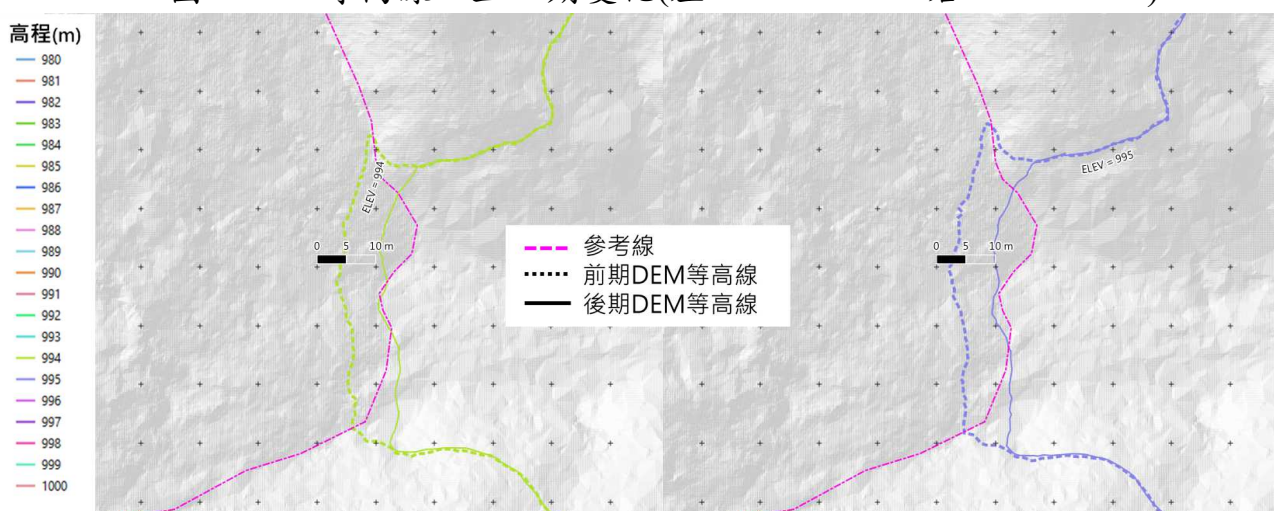


圖 4-34 等高線一至二期變化(左:ELEV=994、右:ELEV=995)

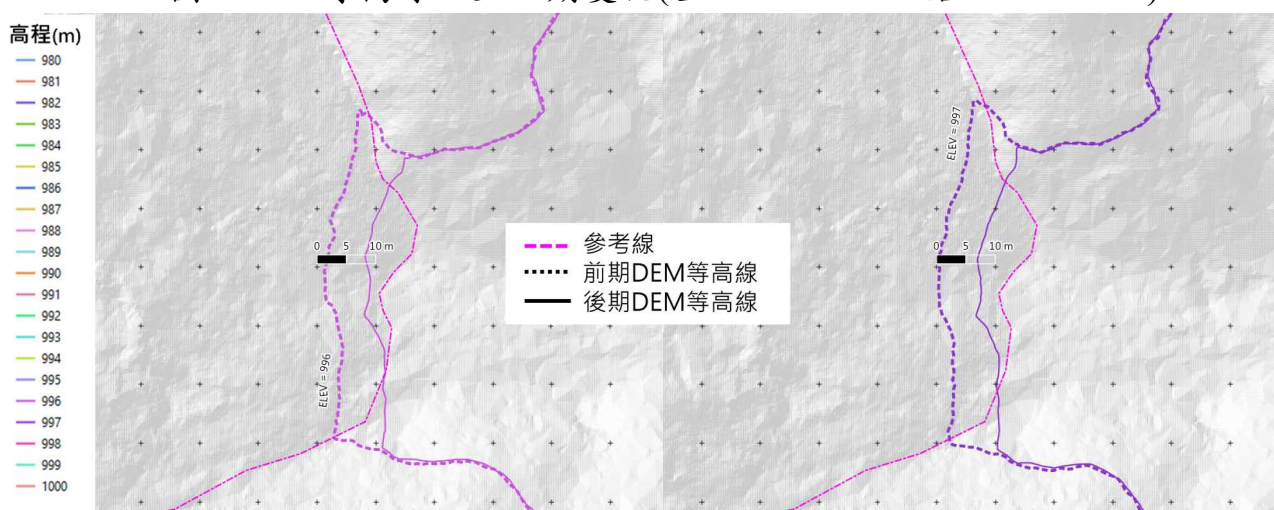


圖 4-35 等高線一至二期變化(左:ELEV=996、右:ELEV=997)

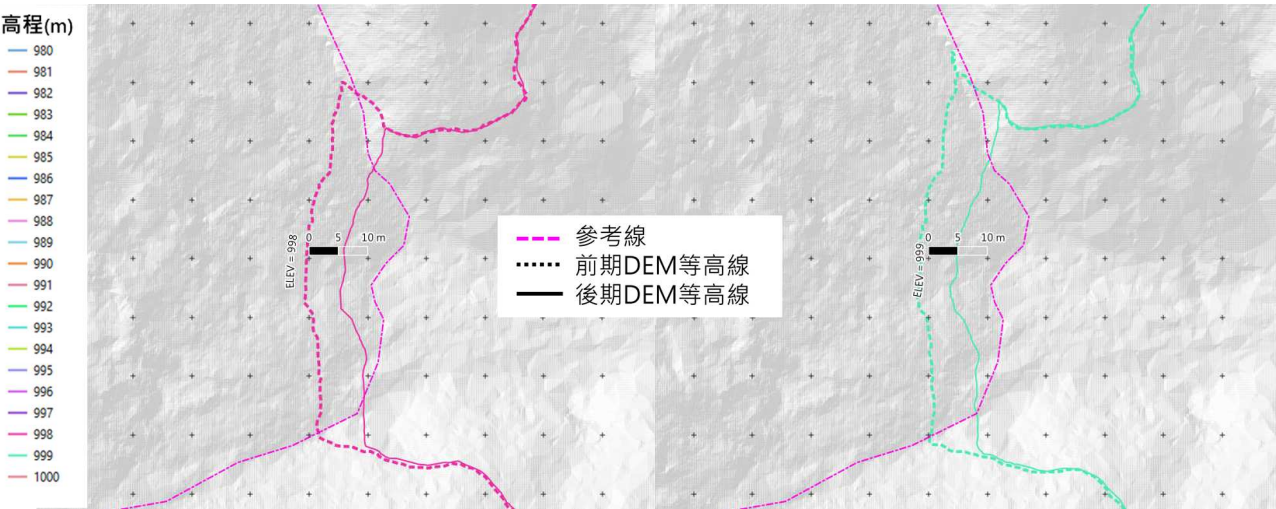


圖 4-36 等高線一至二期變化(左:ELEV=998、右:ELEV=999)

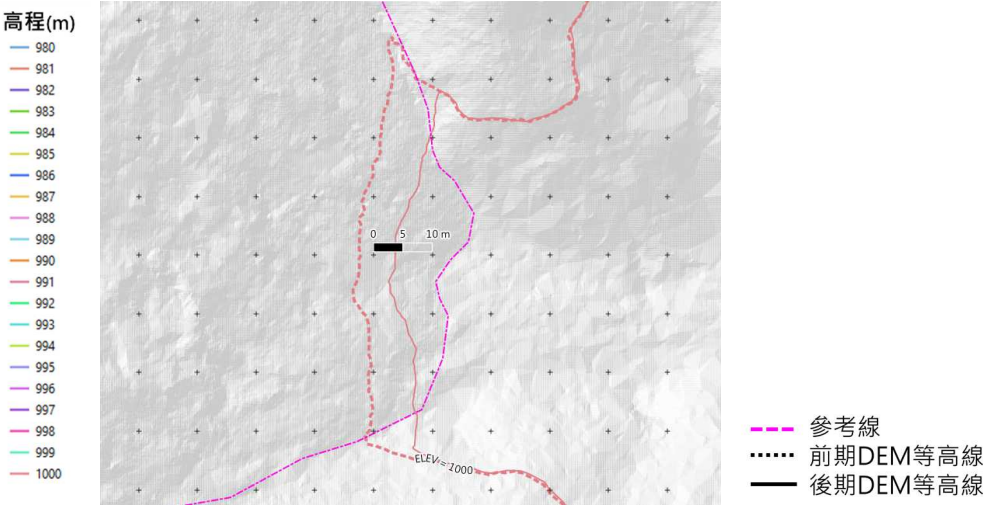


圖 4-37 等高線一至二期變化(ELEV=1,000)

第六節 第三期工作成果比對分析

將第三期工作成果(DEM、正射影像)進行套疊比對，分別節錄重點變異於本節說明如下。

數值高程模型-兩期成果差異(第三期減第二期)如圖 4-38 所示，由圖例色階可發現第二期主要崩落區周邊未見顯著差異，第二期參考線位置亦無明顯位移。

第三期數值高程模型(10/19 成果)之陰影圖套疊前兩期參考線如圖 4-39 所示；第三期航拍正射影像(10/19 成果)套疊參考線後，由可見光資訊識別地貌特徵，如圖 4-40 所示，亦未見明顯位移。

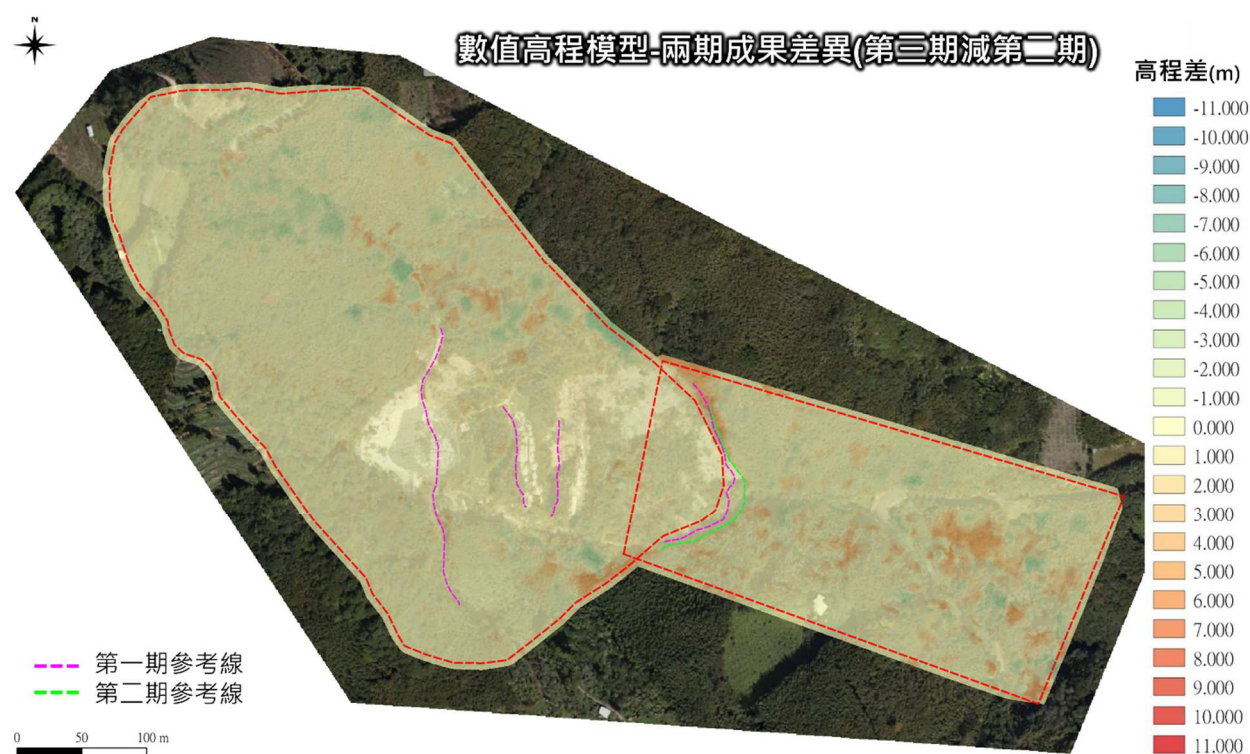


圖 4-38 數值高程模型-兩期成果差異(第三期減第二期)

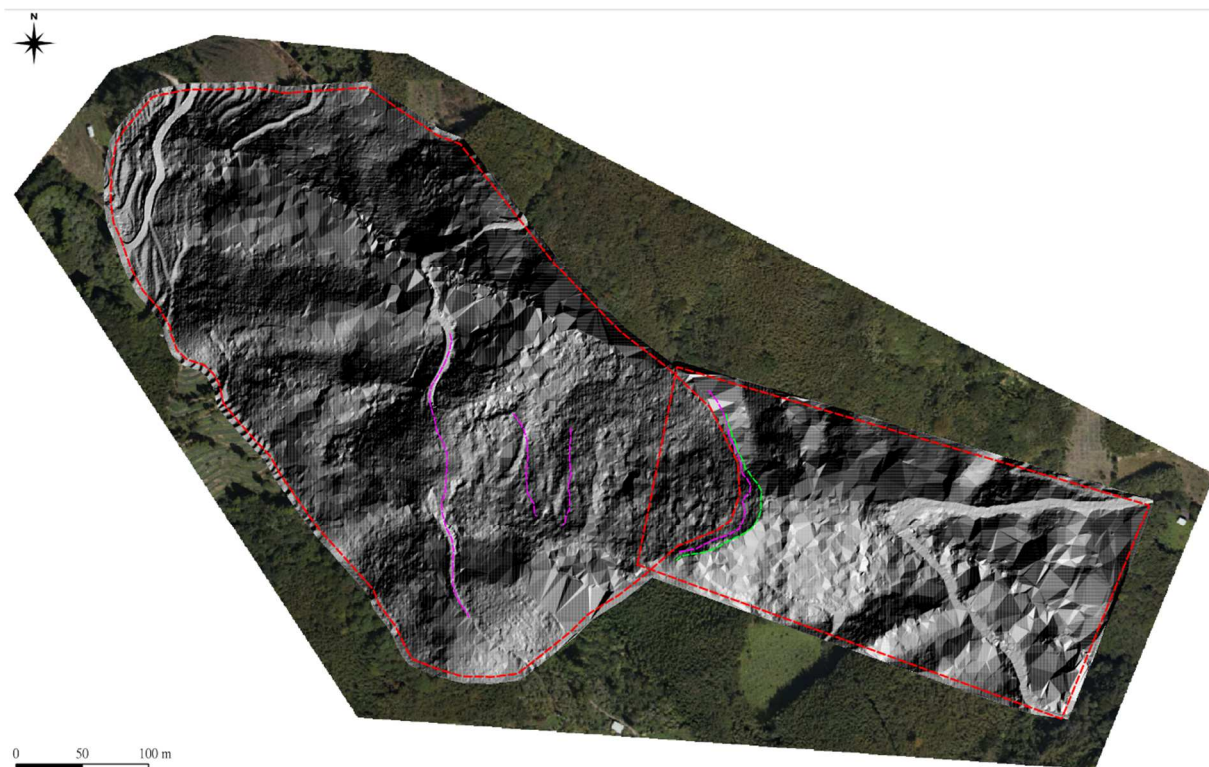


圖 4-39 數值高程模型(10/19 成果)-參考線套疊

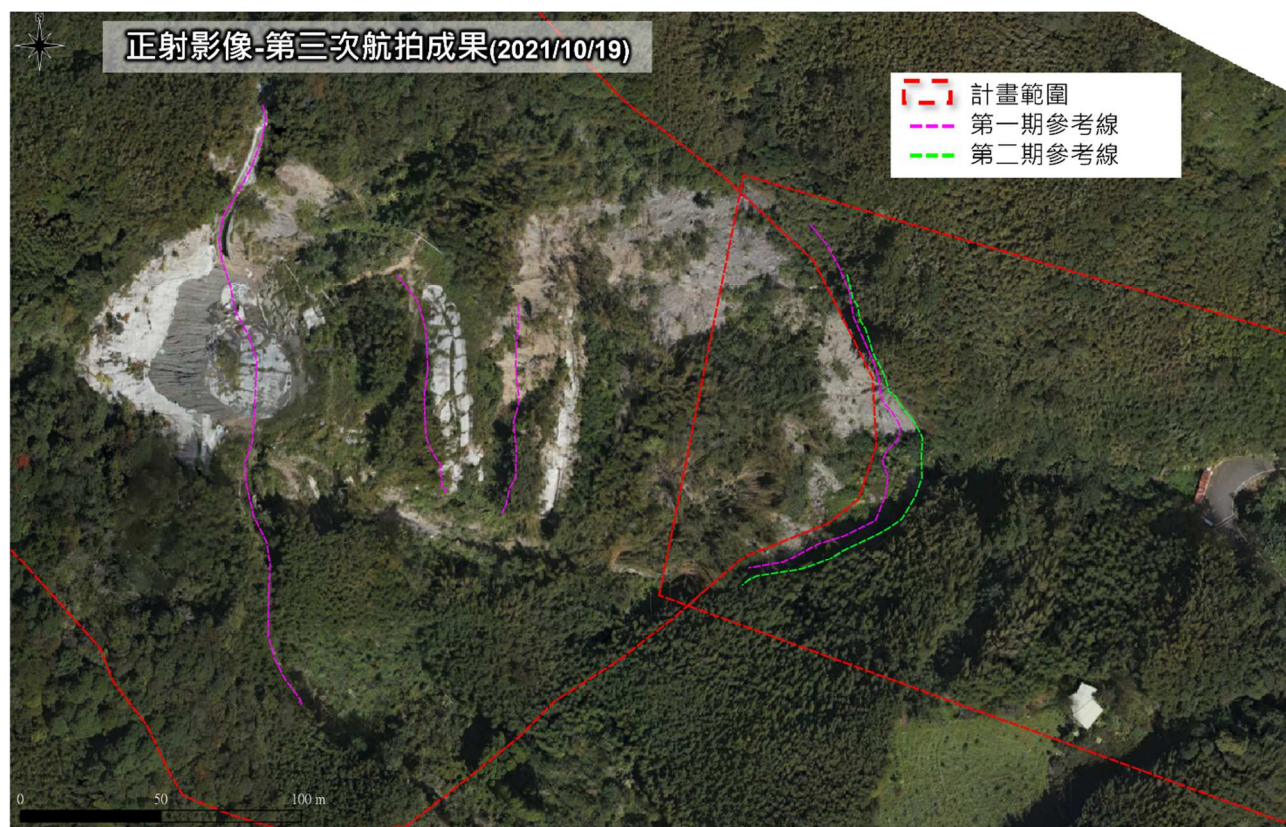


圖 4-40 航拍正射影像(10/19 成果)-參考線套疊

第五章 結論與建議

第一節 結論

一、無人機光達搭配航拍影像作業效率優勢：

本計畫採用無人機搭載光達系統及可見光像機進行高精度數值高程模型及正射影像產製，各次航拍任務現場作業均在一日內完成，顯見此技術之高效率與動員彈性；因崩塌地之高差起伏甚大，本團隊採用了兩種飛行平台來分別進行資料收集，一方面是考量兩者資料解析度的不同，對應的任務航高、航線重疊度有所區別，另一方面亦是考量酬載性能對應的飛行時間效益，故未採用兩種資料同步收集的做法。

二、崩塌地無人機航拍任務風險：

為有效利用無人機的航線作業時間，起降點及航線的安全性評估是整體任務中最大的風險及成本環節，而實際現地作業亦有可能需要配合天候來進行調整，因此每一次任務的航線資料都是寶貴的參考經驗。

三、數值高程模型搭配正射影像之資料分析優勢：

數值高程模型已濾除植被之資訊，可針對植被隱蔽下之地形資訊來進行分析，並搭配可見光之特徵來輔助判釋。

四、本計畫執行成果分析：

- (一)110年度第一期(3/1)及第二期(8/17)之成果(DEM、正射影像)套疊分析成果，滑動方向為由西向東，水平距離已達近10公尺，土方量體之主要堆積區高程變異量超過8~9公尺。
- (二)110年度第二期(8/17)及第三期(10/19)之成果(DEM、正射影像)套疊分析成果，未見顯著之地形變位。

第二節 建議

一、控制點(監測不動點)之規劃為航拍成果品質控管關鍵：

本計畫由 e-GNSS 測量建立之控制點(監測不動點)及檢核點來進行航拍影像及數值高程模型之品質管，可以確保各期成果套繪分析之一致性，若僅佈設於崩塌地範圍內，點位可能滅失或移動便喪失參考意義，故建議崩塌地監測規劃應納入航拍作業所需之控制點測量與定期檢測。

二、崩塌地變位之地表特徵與地形變異之分析需求差異：

本計畫標的之崩塌地範圍混合植被覆蓋與裸露地表，資料分析上可以從正射影像定位出水平位移量，並從數值高程模型上統計出土方堆積量與範圍，如未來分析兩者需求之頻率有差異，建議可增加航拍影像之作業頻率，無人機光達作業則勢必要同時間搭配正射影像資料。

三、崩塌地無人機飛行任務之風險評估：

- (一)現場電塔、電力線之干擾以及山區驟變之天氣狀況為現場任務之最大不確定性，因應區域的季節氣候特性，建議可預估較為寬裕的作業時程。
- (二)崩塌潛勢區通常位於陡峭地形或山谷地形之一部分，在未有高精細的航拍影像或地形資料的情況下，實際上非常難進行精準可靠的航線規劃，建議仍需要到現地進行起降點勘查及天候觀察；無人機光達作業之航線高度要求較單純影像系統之航拍要嚴苛(對地高度較低)，如先有無人機航拍正射影像與DSM將有利於整體作業評估與飛行規劃。