



108 及 109 年度 LiDAR 技術更新 數值地形模型成果測製工作採購案 第 3 作業區

Updating Taiwan DEM by LiDAR technique –
2019 & 2020 3rd Work zone

108 年度工作總報告 Final Report

主辦機關：內政部國土測繪中心

National Land Surveying and Mapping Center (NLSC)

執行單位：中興測量有限公司

Chung Hsing Surveying Co. Ltd.

中 華 民 國 108 年 12 月 27 日

摘 要

內政部推動「落實智慧國土—國土測繪圖資更新及維運計畫」，自 105 年起以 LiDAR 技術更新 2,111 幅(1/5000)範圍數值地形模型。內政部國土測繪中心於 108 及 109 年度規劃辦理「**108 及 109 年度 LiDAR 技術更新數值地形模型成果測製工作採購案**」(以下簡稱本計畫)，辦理 1,458 個圖幅(1/5000)範圍數值地形模型更新作業。

中興測量有限公司執行範圍為第三作業區，108 年度涵蓋新竹、宜蘭、台中、南投及花蓮等縣市，共 182 個圖幅(1/5000)。產製成果內容為 1 公尺解析度之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和數值覆蓋面模型(Digital Surface Model, DSM)數值地形資料成果，以及地面解析度 25 公分之正射鑲嵌影像。其中 DEM 和 DSM 為依據內政部「高精度及高解析度數值地形模型測製規範」(草案)規定辦理，且 DEM 精度達 Level 2B 產品等級。

飛行員透過現場待命、多處即時監控影像等相關飛航配套方案，於飛航過程中，判斷測區雲蔽狀況，立即調整當日飛航計畫，確實把握航拍機會，至 108 年 8 月 1 日完成共 30 架次之飛航掃瞄，順利完成本計畫各項工作內容。

本計畫於每條航帶之頭、中及尾部適當地點皆布設高程平差控制點，為提升平差控制點位平面及橢球高程精度，方便到達之控制點位全面採用 GNSS 靜態觀測，而山區困難到達之點位，則採航測立體像對以立製方式讀取坐標。透過 LMS 和 TerraMatch 等商業軟體萃取點雲特徵線及特徵面，進行全區點雲航帶平差計算。經平差計算後，各子測區航帶間重疊區域點雲之高程精度皆優於 15 公分。

光達點雲編輯為產製 DEM/DSM 成果之重要處理程序之一，為保留真實穿透至地面之點雲測點，先對所掃瞄之地形指定地面類別進程式自動分類，再逐幅進行人工編輯。本公司具多年光達點雲編輯經驗，配合本計畫之需求釐訂重點及注意事項，藉由定期教育訓練和會議討論，有效掌握

作業人員濾除能力並予以提升。另外，經由本計畫監審方建議，本公司彈性調整點雲濾除檢核流程，除採用自動化程式，檢查過濾、分類所產生錯誤之修正，以提高自檢效率外。本公司今年亦使用點雲編輯分級制度，針對各種不同地形地面點分類之難易程度分級，協助編輯人員執行過濾作業，並據此評估每一位編輯人員之分類能力與效率；預先進行作業區域圖幅分配，可縮短整體人工點雲濾除作業時間，並同時確保成果品質。最後以SCOP++軟體產製出1公尺網格之DEM/DSM。本計畫依內政部「空載光達測製數值地形模型標準作業(草案)」做為DEM精度評估與分析規範，經檢核後各類地形DEM成果皆符合精度標準。

本計畫成果除符合合約規範要求外，透過光達系統硬體升級與點雲分類編輯技術之精進，本計畫整體光達點雲穿透率較往年提升。唯部分區域尚因飛航安全考量無法降低航高，或是受現地植被過密影響等因素，所造成地面點穿透率稍低之問題，則加入全波形點雲萃取資訊進行輔助，以提供完整及高精度的光達點雲成果資料。高精度數值地形模型可供後續進行山崩與土石流等地質因子判釋與地形變異、地質特性分析。

關鍵字：空載光達、數值地形模型、數值地表模型、數值高程模型

Abstract

The National Land Surveying and Mapping Center conducts the project "Updating Taiwan DEM by LiDAR technique - 2019 & 2020". CHS Surveying Co. Limited won the contract of the third work zone, which covers Yilan, Hsinchu, Taichung, Nantou, Hualien. It is about 1,279 square kilometers, equivalent to 182 maps of 1/5,000 scale. The major tasks of the contract include the productions of Digital Surface Model (DSM), Digital Elevation Model (DEM), and orthophoto.

Experienced pilots and LiDAR system operators stood by every day to catch the limited chances, even for only a short flight. A total of 30 flights were completed on Aug 1, 2019 for the third work zone.

The overall adjustment for the third work zone were accomplished with the help of ground control points and the cross flight lines. There were at least three vertical control points, 2 of which on the ends and 1 in the middle of each strip, for adjustment. For those vertical control points located in accessible lands, a static GNSS survey was conducted. The average height difference between the overlapping flight lines was less than 15 cm after block adjustment.

The point cloud classification is important for ensuring the accuracy of the digital terrain model. The classification result should preserve the ground points. Points of vegetation, artificial structure, and temporary mound. Preliminary point cloud filtering was followed by manual point cloud editing for detailed classifications. CHS point cloud classification team has years of experience. Regular group meetings and trainings were implemented to share experiences, especially for this project, and to enhance the ability of team members. After reviewing the recommendations of the parties, the self-examination became integrity and efficiency. A series of procedures with programs are designed to check the quality of point cloud editing. The final point clouds version after manual editing can be provided to the SCOP++ software for 1m by 1m DEM / DSM productions. In the end, the DSM/DEM evaluation and accuracy analysis of the project were carried out followed the "Standard DEM/DSM operation

procedure for airborne LiDAR (draft)". All DEM/DSM products passed the test which indicate good accuracies of digital models on terrains with various land covers.

Achievements of CHS in this project show their ambition on not only to meet the requirements of the contract specification. Higher point cloud density and penetration rate to the ground are performed by upgrade a new LiDAR system and a new filtering technology. Integrated performance and higher precision of the DEM/DSM are performed by using full waveform point cloud re-classification, the overall laser reach the ground gets more points than which in previous years. DEM/DSM can be used for various applications such as environmental factor analysis on geological evaluations.

Keywords: Airborne LiDAR, Digital Terrain Model (DTM), Digital Surface Model (DSM), Digital Elevation Model (DEM)



目 錄

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
目 錄	V
圖 目 錄	VII
表 目 錄	X
第一章 計畫概述.....	1
第二章 作業規劃.....	4
§2-1 作業準備.....	4
2-1-1 飛航申請作業.....	4
2-1-2 系統裝機.....	5
§2-2 飛航規劃.....	6
第三章 地面控制點選取與測量工作.....	9
§3-1 基站選取.....	9
§3-2 控制測量.....	14
3-2-1 測量規範.....	14
3-2-2 平差控制點 GNSS 測量	15
第四章 空載 LIDAR 作業.....	19
§4-1 率定與校正作業.....	19
4-1-1 率定場地點與規格.....	20
4-1-2 率定場飛行作業程序.....	21
4-1-3 率定成果.....	22
§4-2 飛航掃瞄成果.....	25
§4-3 空載 LiDAR 資料處理.....	27
§4-4 航帶平差與內部精度評估.....	31
4-4-1 航帶平差及應用軟體.....	31
4-4-2 航帶精度分析及平差處理.....	32
4-4-3 雷射掃瞄誤差來源及精度分析.....	32
4-4-4 分區航帶平差.....	34
4-4-5 航帶平差模式.....	36
4-4-6 航帶平差成果評估.....	37
4-4-7 航帶平差自我檢核成果.....	45

§4-5	DEM/DSM 製作.....	49
4-5-1	點雲編修流程.....	49
4-5-2	點雲編修狀況.....	51
4-5-3	數值高程模型成果.....	53
4-5-4	大地起伏化算.....	55
§4-6	檢核點蒐集與作業.....	56
4-6-1	測量作業方式.....	56
4-6-2	精度評估標準與作業.....	58
4-6-3	精度評估與分析.....	59
第五章	正射影像製作.....	71
§5-1	作業區航拍工作.....	71
§5-2	航拍影像處理.....	73
§5-3	空中三角測量.....	74
§5-4	彩色無縫鑲嵌正射影像製作.....	77
§5-5	正射影像外部接邊.....	81
第六章	成本分析.....	82
第七章	結論與建議.....	84
第八章	參考文獻.....	86
附件一	作業計畫	
附件二	空載光達掃瞄飛航計畫	
附件三	飛航申請公文	
附件四	地面控制測量成果報告	
附件五	校正報告	
附件六	檢查報表	
附件七	各次工作會議結論與追蹤事項辦理情形	
附件八	函文記錄	
附件九	監審廠商審查意見回覆說明	
附件十	工作總報告驗收審查會議意見回覆說明	

圖 目 錄

圖 1.1	第三作業區與各子測區示意圖.....	2
圖 2.1	飛航申請公文.....	4
圖 2.2	飛機安裝現況圖.....	6
圖 2.3	儀器架設圖.....	6
圖 2.4	飛航規劃流程.....	7
圖 2.5	測區航線展繪圖.....	8
圖 3.1	GNSS 控制點分布圖	11
圖 3.2	基站分布圖.....	12
圖 3.3	基站現況與透空圖.....	14
圖 3.4	GNSS 實際觀測網形圖	16
圖 3.5	已知點檢核基線分布圖.....	17
圖 3.6	航帶平差控制點分布圖.....	18
圖 4.1	工作流程圖.....	19
圖 4.2	率定場位置與現況示意圖.....	20
圖 4.3	率定場坡度圖.....	21
圖 4.4	率定場植被分布圖.....	21
圖 4.5	率定 GNSS 基站位置圖	21
圖 4.6	雷射點至萃取面的距離統計分布圖.....	22
圖 4.7	雷射點至萃取面的距離統計直方圖.....	23
圖 4.8	率定飛行與確認飛行成果之高程分析統計直方圖(單位：公尺).....	24
圖 4.9	平面精度分析圖(單位：公尺).....	24
圖 4.10	飛航軌跡與基站示意圖(每格為 5 公里).....	25
圖 4.11	地面基站 PDOP 圖	25
圖 4.12	機載 PDOP 圖	26
圖 4.13	空載雷射掃描資料作業流程.....	28
圖 4.14	點雲解算產製處理流程.....	28
圖 4.15	飛航軌道差異量示意圖.....	29
圖 4.16	飛航掃描航跡示意圖.....	29
圖 4.17	重疊率檢查與密度統計示意圖.....	30
圖 4.18	平差作業流程圖.....	31
圖 4.19	雷射點偏移示意圖.....	33
圖 4.20	MEASURE MATCH 比對原理示意圖	34
圖 4.21	平差前航線重疊處誤差分析圖.....	35
圖 4.22	匹配連結點示意圖.....	37
圖 4.23	平差前後重疊處平均絕對誤差差量比較.....	44
圖 4.24	平差前後測區交叉航線重疊處差量統計分析圖.....	45

圖 4.25	航線重疊處屋頂共軛面與共軛線萃取示意圖.....	46
圖 4.26	航線重疊處平差前後共軛線統計分析示意圖.....	46
圖 4.27	點雲平面精度檢核示意圖.....	48
圖 4.28	監審方軟體航帶平差高程差異量檢核圖.....	48
圖 4.29	平差後航帶間高差較大區域示意圖.....	49
圖 4.30	ITERATION ANGLE 和 ITERATION DISTANCE 示意圖 (AXELSSON, 2000).....	50
圖 4.31	橋樑之點雲分類示意圖.....	51
圖 4.32	編修檢核修正示意圖.....	51
圖 4.33	點雲編修與檢核人員分布圖.....	53
圖 4.34	SCOP++軟體介面圖.....	54
圖 4.35	測區 DEM/DSM 成果圖.....	54
圖 4.36	DEM/DSM 山地及平地成果圖.....	55
圖 4.37	各類別檢核點實測照片.....	57
圖 4.38	檢核點分布圖.....	58
圖 4.39	低海拔之裸露地(B)精度成果圖.....	61
圖 4.40	低海拔之林地(F)精度成果圖.....	61
圖 4.41	低海拔之矮植被(L)精度成果圖.....	61
圖 4.42	低海拔之都會區(U)精度成果圖.....	62
圖 4.43	低海拔之植生地(V)精度成果圖.....	62
圖 4.44	低海拔之濕地(W)精度成果圖.....	62
圖 4.45	低海拔之橫斷面(S)精度成果圖.....	62
圖 4.46	中高海拔之裸露地(B)精度成果圖.....	63
圖 4.47	中高海拔之林地(F)精度成果圖.....	63
圖 4.48	中高海拔之密林(D)精度成果圖.....	63
圖 4.49	中高海拔之矮植被(L)精度成果圖.....	63
圖 4.50	中高低海拔之植生地(V)精度成果圖.....	64
圖 4.51	中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖.....	64
圖 4.52	低海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺).....	67
圖 4.53	中高海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺).....	68
圖 5.1	正射影像製作流程圖.....	71
圖 5.2	測區航照涵蓋示意圖.....	72
圖 5.3	影像色調調整情形.....	74
圖 5.4	測區連結點匹配示意圖.....	75
圖 5.5	空三連結點及空三報表示意圖.....	75
圖 5.6	空三後外方位改正數示意圖.....	75
圖 5.7	空三分區範圍圖.....	76
圖 5.8	影像特徵點與平面控制點較差示意圖.....	77

圖 5.9	色差調整前後示意圖.....	78
圖 5.10	水體繪製成果.....	79
圖 5.11	數值高程造成扭曲錯移現象示意圖.....	79
圖 5.12	平地正射影像成果圖.....	80
圖 5.13	山區正射影像成果圖.....	80
圖 5.14	第三作業區正射影像成果.....	80

表 目 錄

表 1.1	交付成果說明表.....	3
表 1.2	各階段繳交日期與文號列表.....	3
表 2.1	空載設備規格.....	5
表 2.2	航線規劃相關規範.....	7
表 2.3	飛航掃瞄參數表.....	7
表 3.1	已知 GNSS 連續站一覽表	9
表 3.2	新設地面控制點坐標成果表(TWD97【2010】坐標)(單位:公尺).....	10
表 4.1	光達率定系統高程分析統計表.....	24
表 4.2	本計畫作業執行時間與基站測量時間統計表.....	26
表 4.3	各子測區密度統計表.....	30
表 4.4	平差前航線重疊處誤差統計分析.....	35
表 4.5	平差後航線重疊處誤差統計分析.....	38
表 4.6	第一子測區航線重疊處平差前後差量統計表.....	38
表 4.7	第二子測區航線重疊處平差前後差量統計表.....	40
表 4.8	平面控制點檢核點雲屋角點差值表(單位:公尺).....	47
表 4.9	點雲編修自檢紀錄表範例.....	52
表 4.10	地形類別列表.....	56
表 4.11	土地覆蓋分區列表.....	57
表 4.12	地形類別與地表植被覆蓋類別調整參數對照表.....	59
表 4.13	低海拔各類土地覆蓋分區基本精度分析表(單位:公尺).....	60
表 4.14	中高海拔各類土地覆蓋分區基本精度分析表(單位:公尺).....	60
表 4.15	低海拔數值精度中央集中趨勢分析表(單位:公尺).....	65
表 4.16	中高海拔數值精度中央集中趨勢分析表(單位:公尺).....	65
表 4.17	檢核點數值精度偏態檢驗表(單位:公尺).....	66
表 4.18	低海拔 DEM 數值適合度檢驗.....	70
表 4.19	中高海拔 DEM 數值適合度檢驗.....	70
表 5.1	空三平差成果統計表.....	76
表 5.2	平面控制點檢核影像差值表(單位:公尺).....	77
表 6.1	各項作業成本統計分析表.....	83
表 6.2	作業人員性平等資訊統計.....	83

第一章 計畫概述

1. 計畫緣起與目的

世界銀行於 2005 年指出，台灣屬於全世界災害高風險的區域，且全球前 10 大地震及颱風災害風險最高的城市中，台灣就佔了其中 4 名。全球氣候異常，許多地區遭受前所未見的災變，災後重建區域的規劃、防洪重建工程、水庫營運安全與河川、野溪疏濬、清疏，地形構造變動分析，都迫切需要災後的數值地形模型資料提供。

內政部於民國 93 年至 99 年間陸續建置全臺灣數值地形模型，並於民國 99 至 101 年由經濟部中央地質調查所主導「莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作案」，接續於 102 至 104 年主導「非莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作案」，連續六年以 LiDAR 技術完成全臺掃瞄與 DTM 建置，該資料除可應用於國土規劃、防救災運用外，亦對於民生、科技、建設等方面，具有極高的應用價值。

經行政院核定推動「落實智慧國土-國土測繪圖資更新及維運計畫(105-109)」，規劃自民國 105 年度起，以 LiDAR 技術數值地形模型，經調查各相關機關資料需求，由內政部率領啟動第 2 次全臺光達掃瞄計畫，並考量圖資更新年度、地形起伏變化等情形，繼 105 至 107 年度合計辦理 2,111 個圖幅(1/5000)範圍數值地形模型更新作業後。接續以本計畫於 108 及 109 年度規劃辦理 1,458 個圖幅(1/5000)範圍數值地形模型更新作業，並分為三作業區，分別第 1 作業區為 481 個圖幅(1/5000)、第 2 作業區為 485 個圖幅(1/5000)以及第 3 作業區 492 個圖幅(1/5000)。藉由持續更新高解析度數值地形模型資料成果，建立完善的國家空間資訊資料庫，以供國土建設及未來規劃之重要依據。

2. 計畫範圍

本公司執行第三作業區，108 年度測區範圍橫跨新竹、宜蘭、台中、南投、花蓮等縣市，共執行 182 個圖幅（基本地形圖比例尺 1/5,000），面積約 1,279 平方公里，平地比例約 2%，山區約 98%。配合期程於第 2 階段和第 3 階段各繳交點雲資料 73 幅和 109 幅，後續報告內容稱之第一子測區和第二子測區，第三作業區位置以及子測區分布如下圖所示。

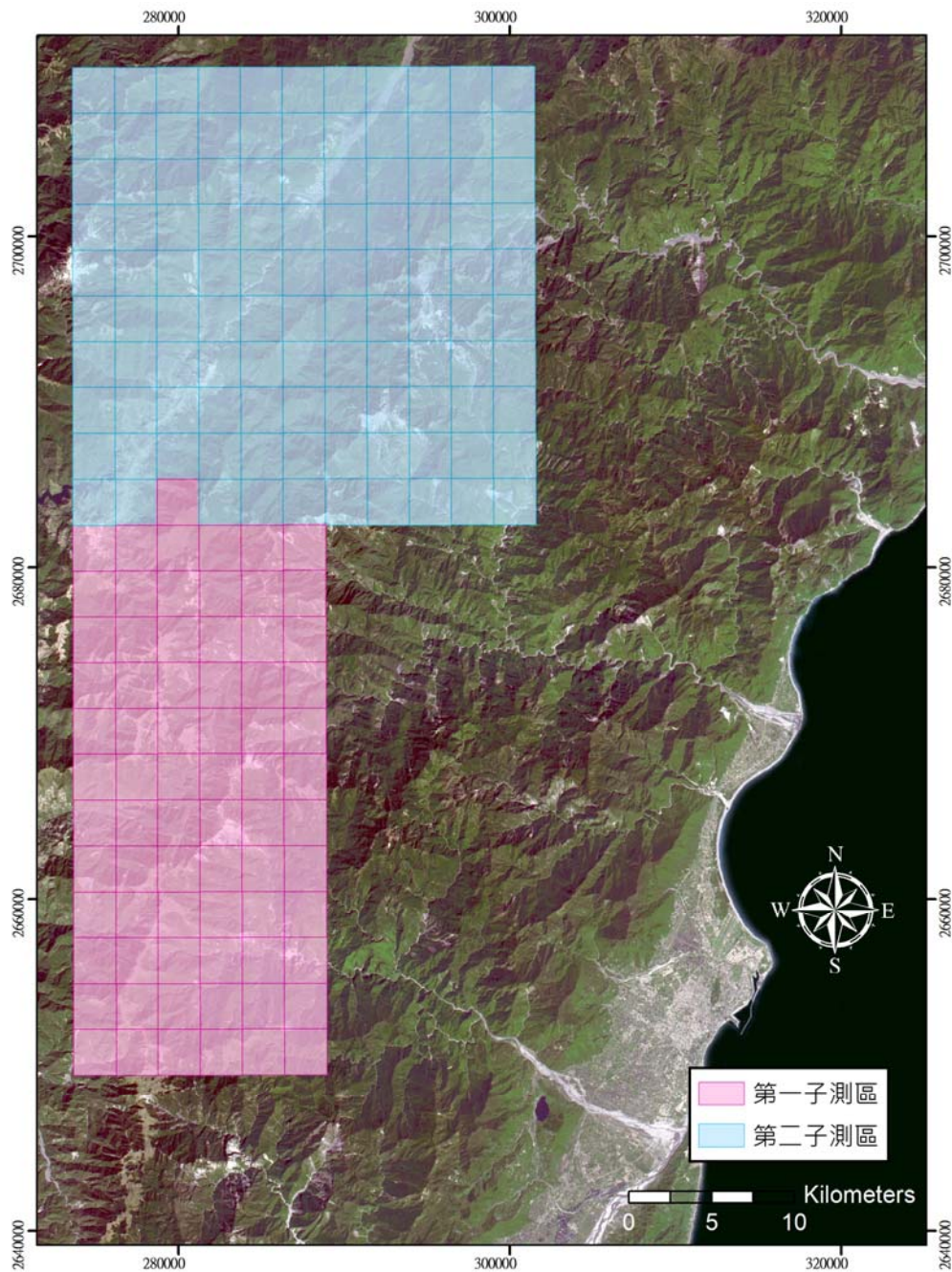


圖 1.1 第三作業區與各子測區示意圖

3. 各階段期程

為製作 LiDAR 高解析度地形模型，計畫流程包含飛航規劃與執行、地面控制測量、地面 GNSS 基站控制測量、資料後處理、數值高程模型(DEM)與數值地表模型(DSM)製作及精度檢核分析，相應之內容如後各章介紹，成果資料繳交項目細項如表 1.1 所示，實際繳交日期以及文號列表如表 1.2 所示，公文請參閱附件八。

表 1.1 交付成果說明表

階段	交付項目	繳交期限
第 1 階段	108 年度作業計畫(空載光達掃瞄飛航計畫)初稿 10 份及電子檔 2 份。	決標次日起 20 個日曆天。
第 2 階段	1. DEM 與 DSM 成果【含圖幅接邊處理，同點雲資料處理繳交之圖幅、點雲資料處理(108 年度範圍 40%以上圖幅)及控制測量(繳交 108 年度範圍)】。	108 年 9 月 30 日
	2. 正射影像成果(同點雲資料處理繳交之圖幅)。	
第 3 階段	1. DEM 與 DSM 成果【含圖幅接邊處理，同點雲資料處理繳交之圖幅、點雲資料處理(108 年度範圍之剩餘圖幅數)】。	109 年 1 月 31 日
	2. 正射影像成果(同點雲資料處理繳交之圖幅)。	
第 4 階段	108 年度工作總報告(初稿)10 份及電子檔 2 份。	109 年 2 月 25 日
	修正後 108 年度工作總報告 5 份及電子檔 2 份。	依機關指定期限內繳交。

表 1.2 各階段繳交日期與文號列表

階段	提送監審方 日期/文號	通過監審方審查 日期/文號	提送貴中心 日期/文號	通過貴中心審查 日期/文號
第 1 階段	108.01.25 中興測字第 1070000018 號	108.01.30 成大研總字第 1081100918 號	108.01.31 中興測字第 1080000021 號	108.02.25 測形字第 1081570081 號
第 2 階段	108.09.10 中興測字第 1080000373 號	108.09.23 成大研總字第 1081107360 號	108.09.24 中興測字第 1080000398 號	108.10.24 測形字第 1081570387 號
第 3 階段	108.11.18 中興測字第 1080000481 號	108.11.25 成大研總字第 1081108634 號	108.11.27 中興測字第 1080000494 號	108.12.16 測形字第 1081570479 號
第 4 階段	108.12.02 中興測字第 1080000508 號	108.12.12 成大研總字第 1081109106 號	108.12.13 中興測字第 1080000529 號	108.12.26 測形字第 1081570491 號

第二章 作業規劃

§2-1 作業準備

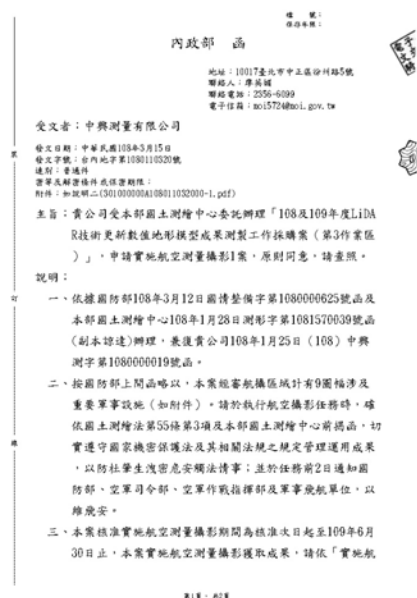
2-1-1 飛航申請作業

本團隊於本計畫簽約後函請航空公司向內政部申請飛航許可：依照「飛航及管制辦法」、「航空器飛航作業管理規則」與飛航指南等相關規定作業，如需 C 類空域內作業，應先與相關航管單位協調後實施。且作業前務必通知空軍總司令部及飛航管制聯合協調中心，作業時勿涉及軍事設施。

本團隊針對作業所需，租用前進航空 C208B 飛機和德安航空 BK-117 飛機，依天氣狀況之許可執行掃瞄作業。並依「國土測繪法」及「實施航空測量攝影及遙感探測管理規則」等相關規定，檢附相關文件向內政部申請實施本計畫航空測量攝影或遙感探測許可後，已於 108 年 3 月 15 日通過申請(台內地字 1080110320 號)，可依天候及潮汐時間辦理空載光達掃瞄作業。德安航空之 BK-117 型飛機及前進航空 C208B 型飛機，分別於 108 年 4 月 3 日與 108 年 4 月 12 日通過本年度作業飛航申請(空運管字第 1080008000 號及空運管字第 1080008615 號)，核准公文如附件三所示。



(a) 飛航申請(提送航攝實施計畫書)



(b) 內政部核准飛航申請

圖 2.1 飛航申請公文

2-1-2 系統裝機

本計畫使用 Optech ALTM Pegasus HA500 空載光達搭載全波形感測器與 PhaseOne iXU-R1000 數位相機規格如表 2.1 所示，裝載於德安航空 BK-117 和前進航空 C208B 飛機載台如圖 2.2 所示，本計畫實際執行僅使用德安航空直升機。安裝重點包括掃瞄儀安置在攝影窗、控制組件安置於機艙座、GNSS 天線安裝、電力系統介面安裝等。

表 2.1 空載設備規格

空載光達 Optech ALTM Pegasus HA500	
	· 掃瞄旋角視域 FOV：0~75 度 · 脈衝率 PRF：100~500kHz · 掃瞄鏡頻率:0~140Hz · 掃瞄形式：Oscillating, Mirror, Z-shaped · 高程精度：15cm (1σ,航高 1,200m) 25cm (1σ,航高 32500m) · 水平精度：1/7,500 航高 · 斜距解析度：1 cm · 最大掃瞄帶寬：0~0.93 航高 · GNSS：Trimble · 定位系統：POS AV™ AP50 (OEM) · 全波形：支援全波形記錄
量測型數位相機 PhaseOne iXU-R1000	
	· 像幅大小：11608×8708 · 像元尺寸:4.6um · 鏡頭焦距：50mm · FOV：40 · 快門速度:1/600s

Optech ALTM Pegasus HA500 雷射掃瞄儀感測器安裝步驟：首先依據照相機基座的規格安置感測器圖 2.3(a)，「控制組件」裝置後如圖 2.3 (b)，將所有接線接上後即算初步完成如圖 2.3 (c)。

雷射掃瞄儀電力系統需 28 伏特直流電力，瞬時啟動最大電流 21 安培。配置一轉接頭連結掃瞄儀到飛機電力系統電力接合後，再實施地電阻的檢測、電流檢測，以確保機具的穩定及飛行安全，並向交通部民航局申請補充型別檢定證後，方可執行飛航掃瞄任務。



(a) 德安航空之 BK-117 飛機



(b) ALTM 裝設於定翼機之現況圖



(c) 前進航空之 C208B 飛機



(d) ALTM 裝設於旋翼機之現況圖

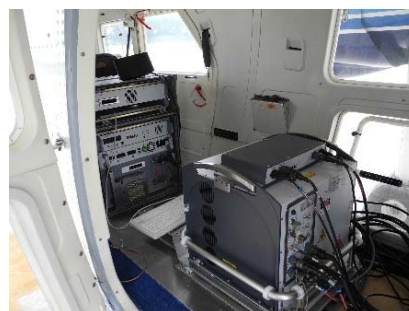
圖 2.2 飛機安裝現況圖



(a) 感測器安裝坐架



(b) 控制組件



(c) 接線成果

圖 2.3 儀器架設圖

§2-2 飛航規劃

空載雷射掃瞄資料獲取前需要有完整的飛航規劃，考慮內容包括掃瞄區範圍、實施之地形、預定規劃的載體航高、掃瞄儀掃瞄角度、點雲密度及分布航線間的重疊率、交叉航線位置、點雲穿透表現和航區管制等種種條件，確定飛航任務符合規範要求，本計畫航線相關規範要求如表 2.2。

掃瞄任務之規劃會影響點雲品質，如點雲密度、遮蔽程度、航帶檢核與重疊區分析等重要資訊，飛航規劃作業的方法與步驟流程說明參照圖 2.4。

表 2.2 航線規劃相關規範

項目	說明
飛航掃描計畫範圍	應包含全部工作區域
航線轉彎掃描資料	不得使用於後續資料產製
航帶重疊率	重疊率應大於 40%，建議重疊率宜採 50%
點雲密度條件	每平方公尺密度 2 點為原則
空載光達掃描之 FOV	設定不應超過 40 度
航拍影像前後重疊率	前後重疊率應為 60%±5%
航拍影像 GSD	應優於或等於 25 公分
海岸地區航線	原則上為飛航當日低潮位前後 2 小時進行掃描，以蒐集最大面積海岸沙洲及潮間帶資料
交叉航線規劃	各條航線之頭尾皆有交叉航線，且每隔至多 25 公里，應進行垂直各航線之交叉掃描飛航

掃描任務之規劃會影響點雲品質，如點雲密度、遮蔽程度、航帶檢核與重疊區分析等重要資訊，飛航規劃作業的方法與步驟流程說明參照圖 2.4。依據本計畫嚴格之重疊率及密度要求，和作業經驗，考量地形起伏對上述要求之影響，規劃出最佳掃描參數，規劃成果及說明如表 2.3 及圖 2.5 所示，共 152 條航線里程共 3451 公里。



圖 2.4 飛航規劃流程

表 2.3 飛航掃描參數表

飛航區域	航線編號	航線數	最高點高程 (m)	最低點高程 (m)	平均點高程 (m)	平均離地高 (m)	航高 (m)	航速 (kt)	掃描角度 (deg)	掃描頻率 (Hz)	脈衝頻率 (KHz)	平均掃描帶寬 (m)	平均側向重疊率 (%)	影像左右重疊率 (%)	平均點雲密度 (pt/m ²)
A	1~51	51	3850	1800	2400	1900	4300	95	±20	38	100	1368	58.9	50	2.5
A+	92~143	52	3850	3000	3300	1300	4600	95	±20	38	100	720	58.5	50	2.5
B	52~91	40	1800	600	1300	1700	3000	95	±20	38	100	1224	57.6	50	2.9
Cross Line	144~152	9	3500	1200	2400	1600	4000	95	±20	38	100	1152			
Total	152	總公里數				3451km									

*飛航規劃航帶重疊率大於合約要求 40%，表列為規劃平均值

**飛航規劃點雲密度大於合約要求 2.0 點，表列為規劃平均值

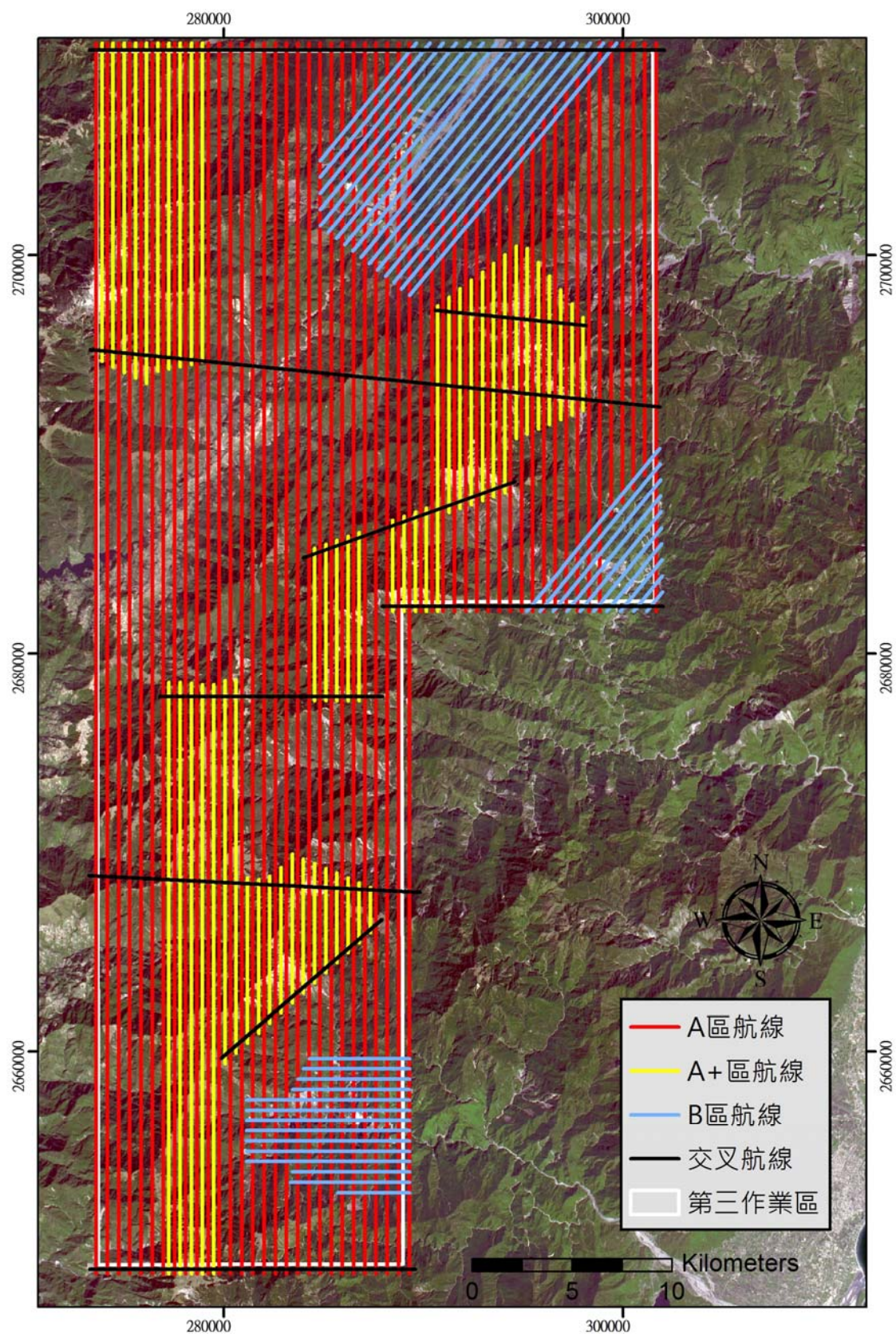


圖 2.5 測區航線展繪圖

第三章 地面控制點選取與測量工作

§3-1 基站選取

1. 框架說明

本計畫坐標系統採用內政部公告之 TWD97【2010】，其參考時刻為 2010 年 1 月 1 日，平面坐標系統採用 TWD97，高程系統為 WGS84 橢球高。正高成果則使用內政部公告之大地起伏模式進行正高轉換計算。

2. 外購站說明

為聯測解算新架設地面基站坐標，外購測區附近 18 個已知 GNSS 連續站提供監審單位併同新設點進行坐標計算，設立單位包含內政部國土測繪中心及交通部中央氣象局列表如表 3.1，位置分布如圖 3.1。

表 3.1 已知 GNSS 連續站一覽表

設立單位	數量	點號
內政部國土測繪中心	3	WULI,KFN2,WARO
交通部中央氣象局	15	BLOW,CLAN,HAN2,HNSN,HUAN,JYAN,MFEN,NDHU,NIUT,NSAN,PLA2,SLIN,SPAO,THAI,TUNM

3. 新架設站說明

本計畫地面基站以採自行布設之點位為原則，此乃因地面基站需要較佳透空度，故採用自行布設之點位。地面控制點於飛航掃瞄時應維持每條航線至少有二個 GNSS 基站同步接收 GNSS 觀測量，基站與航線範圍應小於 20 公里。地面 GNSS 控制點共計新設 10 點(CH43~CH52)，均採用 GNSS 連續站的方式架設，以每 2 點為一組分別設置於透空良好位置總計 5 處。

基站控制測量主要參考「基本測量實施規則」所規定之加密控制點施測標準，為提高控制點成果精度，其施測準則如下：

- (1) 控制點採用 TWD97【2010】坐標系統。
- (2) 已知點引用前需進行檢測，並於檢測合格後方可引用。
- (3) 新設控制點採用 GNSS 連續站方式架設，並採用具抗多路徑效應型式之天線。

- (4) 採靜態測量方式觀測，同一測段的每一測點必須同步連續觀測 24 小時以上(並提供連續資料 3 日)。
- (5) 儀器紀錄 epoch 為 30 秒 (每 30 秒接收 1 筆資料)，接收衛星最低仰角為 0 度。
- (6) 相關資料提供監審單位，併同其它作業區計算並提供最後之控制點坐標。

為計算各控制點坐標，蒐集 108 年 03 月 22 日至 108 月 03 月 24 日共 3 日資料，及周遭已知連續站資料同步解算坐標以確保坐標成果一致性，新設控制點使用 Trimble 5700(搭配 Zephyr Geodetic 天線盤)及 Trimble NetR9(搭配 Zephyr Geodetic 2 天線盤)衛星定位接收儀施測，監審方解算新設控制點坐標成果如表 3.2。而於計畫期間逢 108 年 4 月 18 日花蓮地震，經檢測確認未影響基站資料與坐標可正常使用。

基站架設又可分為高架式與固定式，高架式主要為建物頂端有遮雨棚或無女兒牆時使用，利用高架的鋼管架設天線盤；若建物頂端有女兒牆且無其他遮蔽物時，則天線盤採固定方式直接架設於女兒牆上。基站之接收儀與主機設備均設置於室內，可確保設備有效的運作，並透過網路回傳觀測資料。架設現況與透空圖如圖 3.3。

表 3.2 新設地面控制點坐標成果表(TWD97【2010】坐標)(單位:公尺)

點號	點名	縱坐標 N(m)	橫坐標 E(m)	橢球高 h(m)	架設方式
CH43	梨山國小	2683385.057	276389.855	2060.569	高架式
CH44	梨山國小	2683384.165	276390.531	2060.570	高架式
CH45	廬山國小	2658895.842	268924.331	1443.846	高架式
CH46	廬山國小	2658895.733	268923.542	1443.846	高架式
CH47	南山國小	2703520.852	288654.087	1177.184	屋頂式
CH48	南山國小	2703521.283	288654.335	1177.133	屋頂式
CH49	西寶國小	2678004.079	299028.174	978.225	高架式
CH50	西寶國小	2678003.819	299027.789	978.180	高架式
CH51	銅門國小	2651310.923	300157.025	204.085	屋頂式
CH52	銅門國小	2651310.298	300157.985	204.098	屋頂式

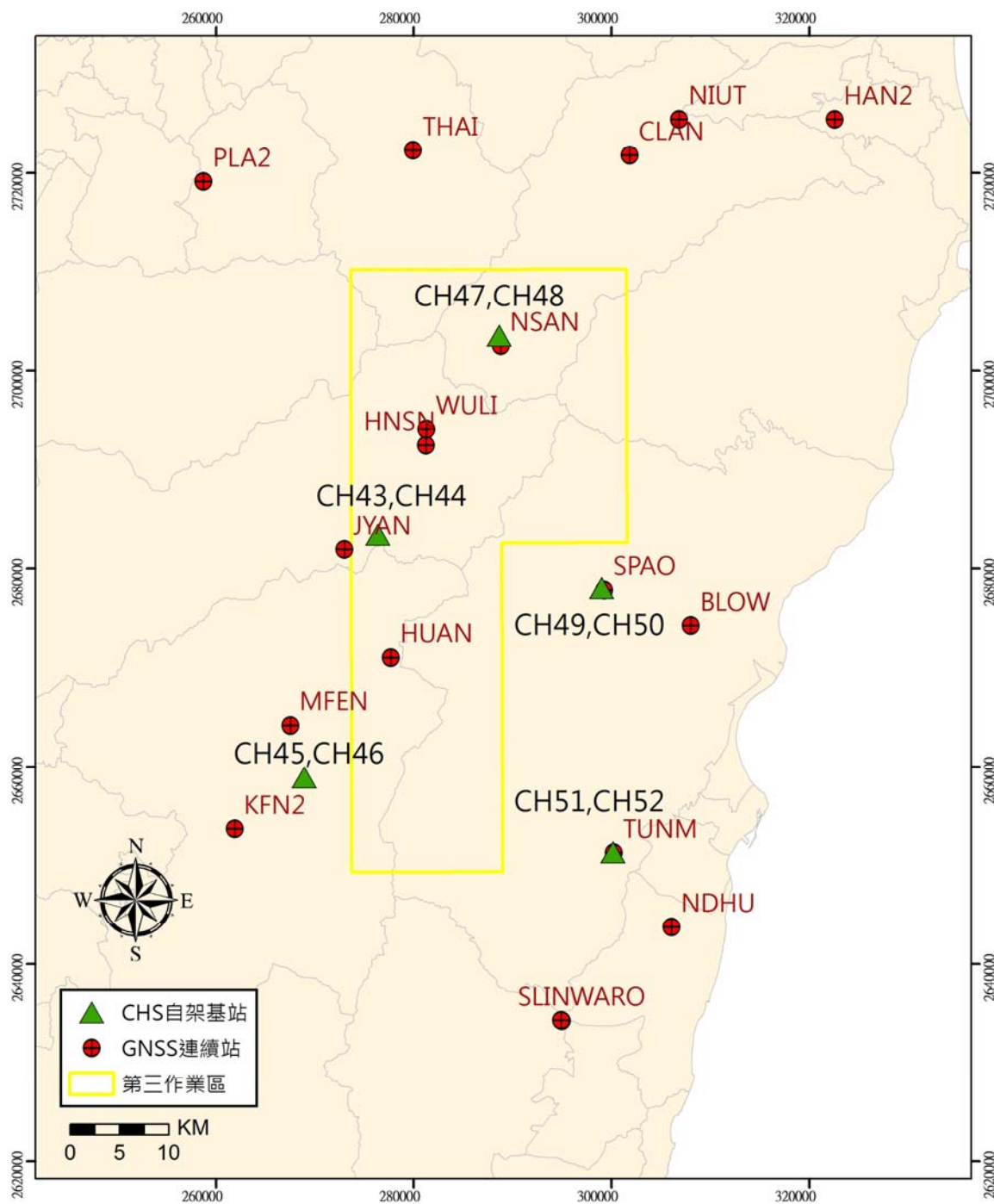


圖 3.1 GNSS 控制點分布圖

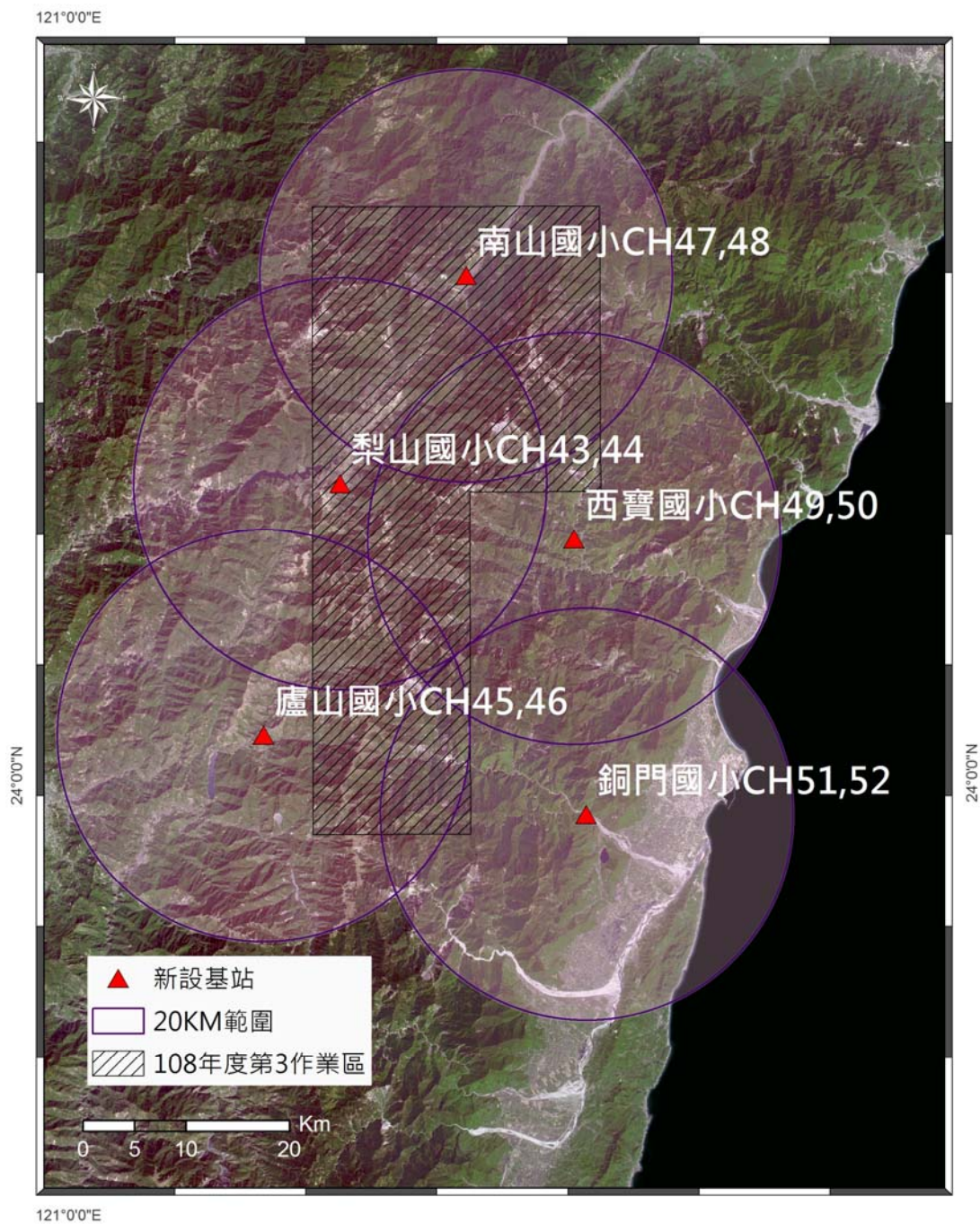
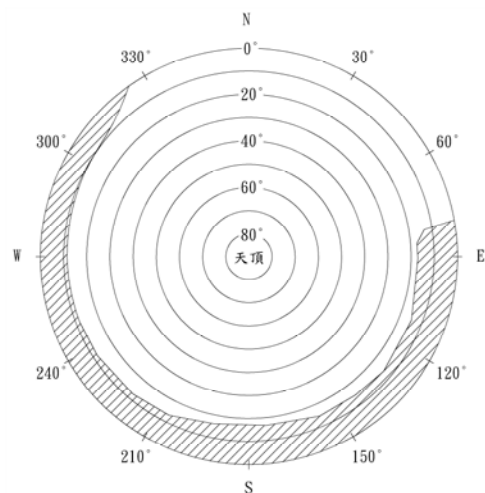


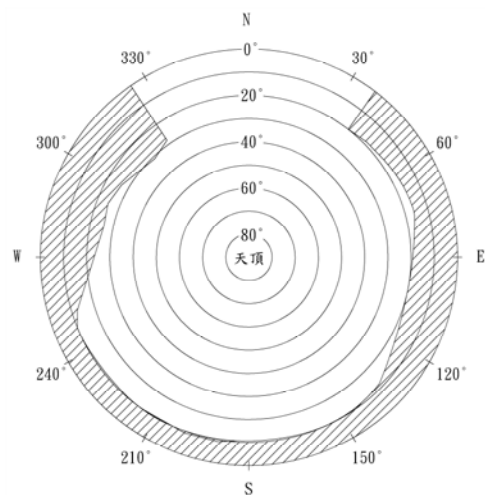
圖 3.2 基站分布圖



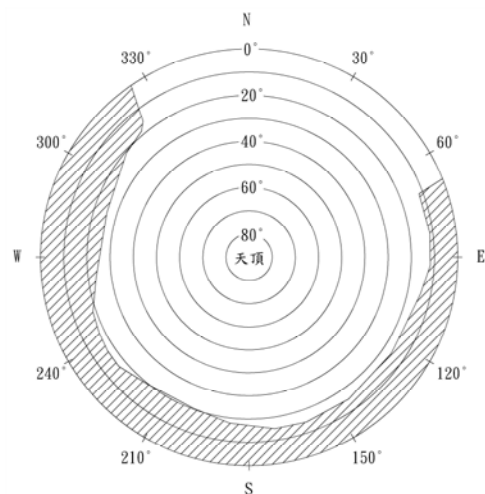
(a) CH43、CH44



(b) CH45、CH46

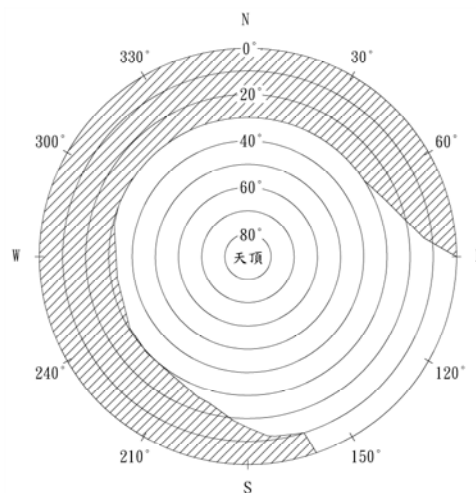


(c) CH47、CH48





(d)CH49、CH50



(e) CH51、CH52

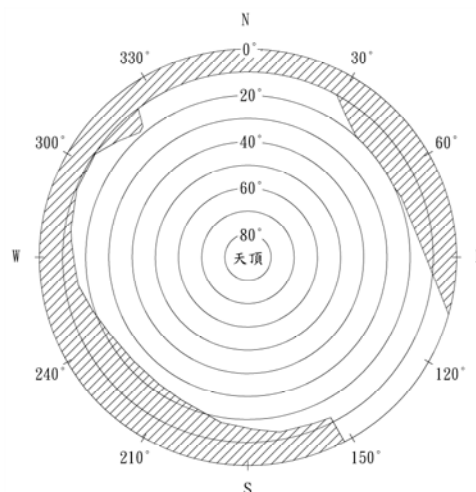


圖 3.3 基站現況與透空圖

§3-2 控制測量

地面控制測量成果之工作內容主要包括地面 GNSS 基站控制測量及平差控制點測設工作，其中地面 GNSS 基站相關內容已於 3-1 小節說明。

3-2-1 測量規範

本計畫 GNSS 測量作業依照合約規範主要依照「基本測量實施規則」所規定之加密控制點施測標準，其施測準則如下：

1.地面 GNSS 基站坐標成果：

(1) 設置為固定站者：應於架設完成後，蒐集至少 2 天（48 小時）之觀測

- 檔，並記錄儀器、天線盤型號及天線高等資料。
- (2) 為移動站者：應辦理 GNSS 靜態觀測，重複觀測次數為 2 次以上（腳架重擺），每次觀測時間均大於 6 小時，且應同步連測附近點位。
 - (3) 其他機關設置之連續追蹤站：應向該機關申請並取得至少 2 天（48 小時）之觀測檔，並記錄儀器、天線盤型號及天線高等資料。
 - (4) 全測區應統一進行坐標解算，以確保成果框架之一致性。
 - (5) 地面 GNSS 基站採 GNSS 靜態測量，精度應符合內政部「基本測量實施規則」之加密控制測量規定。
- 2.航帶平差控制點及平面控制點得採 GNSS 靜態測量並依內政部「基本測量實施規則」之加密控制測量規定辦理，或採 VBS-RTK 動態測量方式，重複觀測至少 2 次，每次收斂筆數應達 180 筆，計算每次觀測之平均坐標值，檢核其坐標差平面方向應小於 4 公分，高程方向應小於 10 公分。如 VBS-RTK 測量無法收斂時，則應取得連續 10 分鐘以上、記錄頻率為 1 Hz 之靜態觀測資料，並以 VBS-RTK 後處理方式計算該點坐標。

3-2-2 平差控制點 GNSS 測量

平差控制點測設主要分為高程控制點與平面控制點兩部分，為有效提升高程控制點的精度，以提供後續航帶平差使用，本計畫採靜態基線測量方式測設；而平面控制點因受限於地物環境影響，以 VBS-RTK 方式測設。

GNSS 外業靜態測量自 108 年 04 月 08 日至 04 月 10 日，計 3 個工作天共觀測 10 個時段，其實際觀測網形如圖 3.4。並對已知點進行精度檢核，主要以相鄰點位間的最短基線進行比較(圖 3.5)，經實際計算後，聯測的已知點間的相對精度均能滿足規範之要求，因此後續計算時，以其坐標約制平差，求得新設平差控制點之坐標。

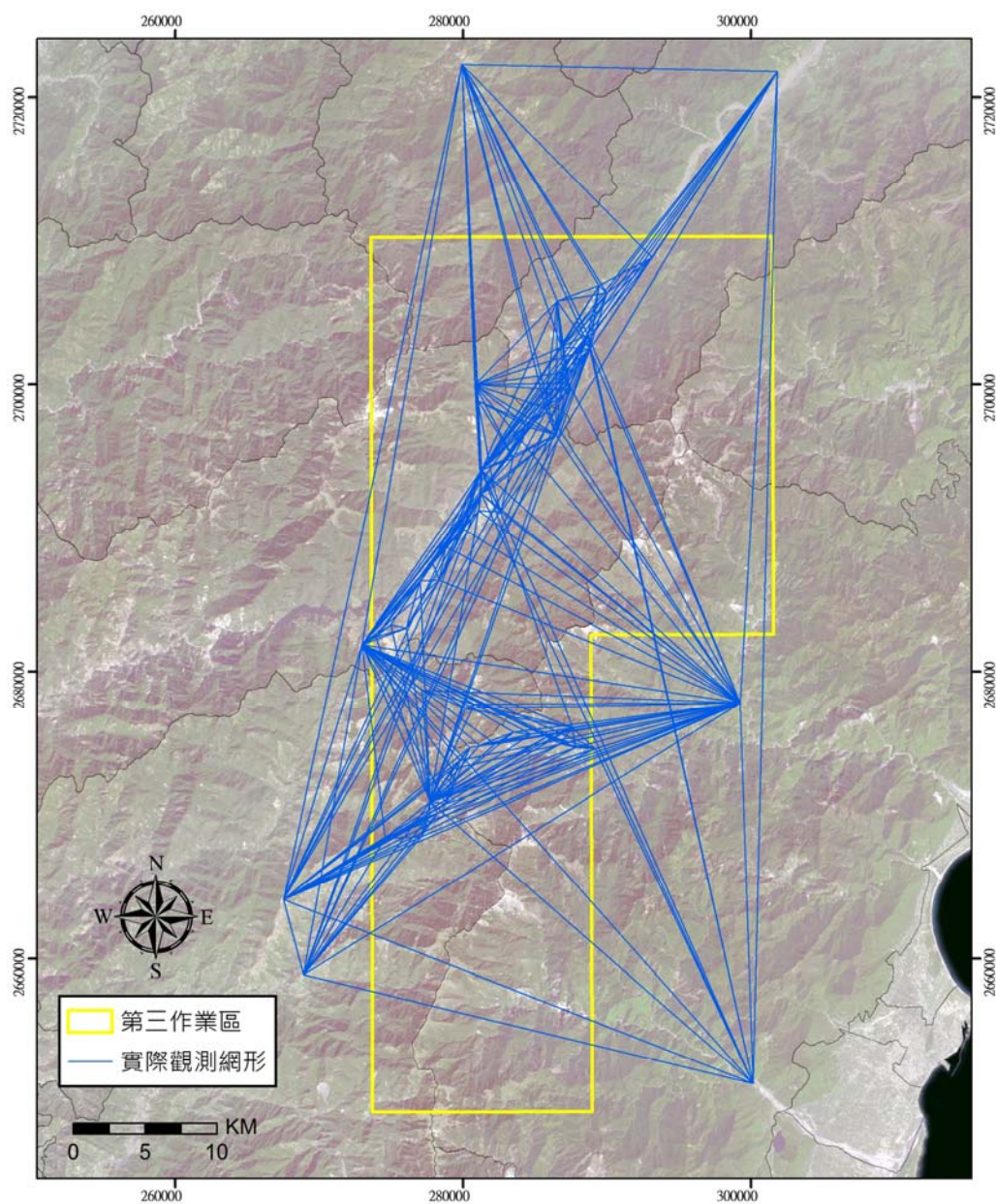


圖 3.4 GNSS 實際觀測網形圖

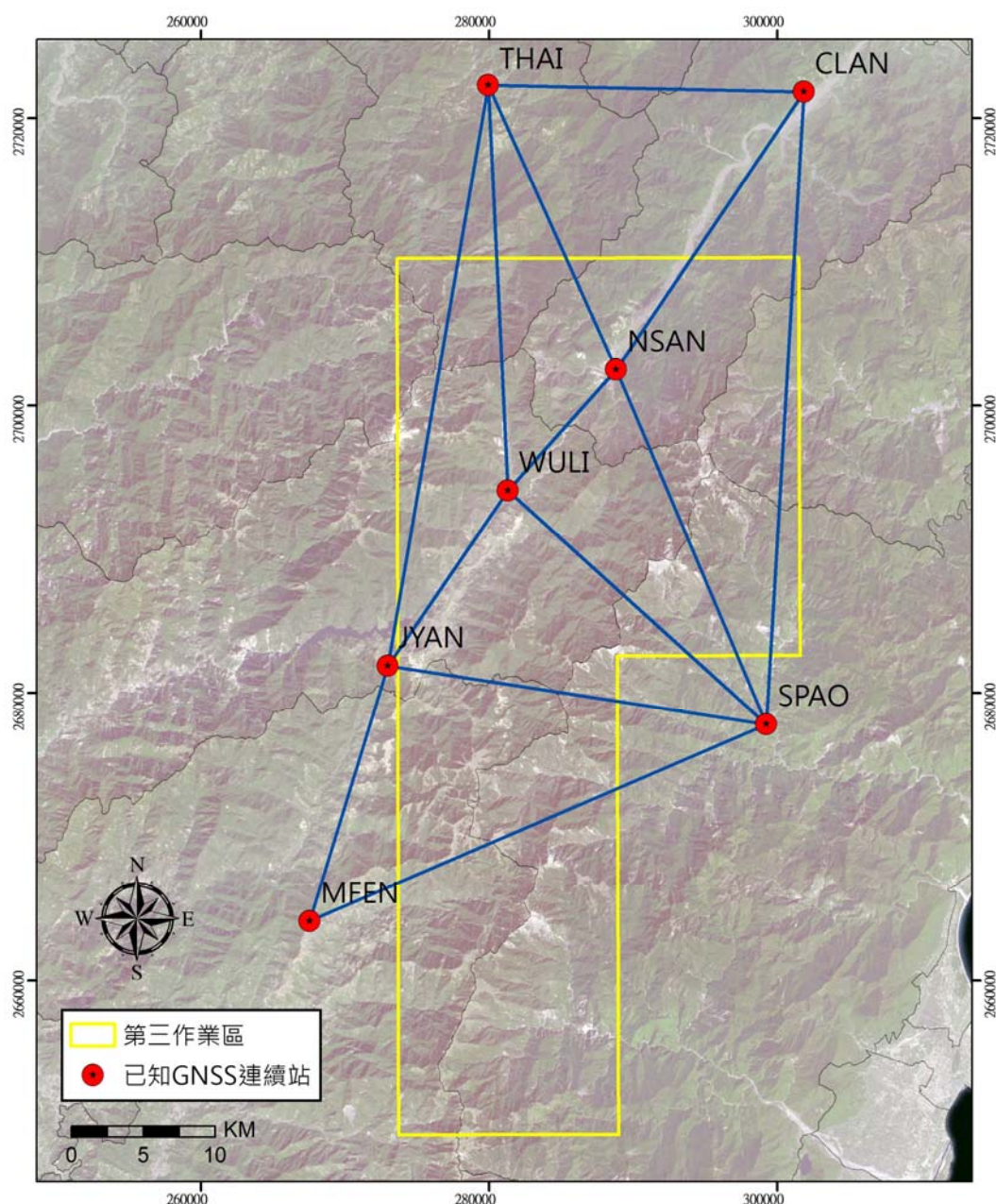


圖 3.5 已知點檢核基線分布圖

平面控制點多選用屋角特徵點，礙於地物環境影響無法適用 GNSS 靜態測量，故其坐標測設採用內政部國土測繪中心之「e-GNSS 即時動態定位系統」所提供之即時動態定位服務測設，其系統利用多個衛星定位基準站所組成的 GNSS 網絡，評估涵蓋地區的定位誤差，再配合最鄰近的實體基準站觀測資料，產製一個虛擬的基準站（Virtual Base Station；VBS），供即時動態定位(Real-Time Kinematic；RTK)主站使用，並透過網路及無線數據傳輸的即時動態定位技術(VBS-RTK)。並同時聯測平差高程控制點，以確認平面和高程控制點之系統一致。

另外若為人車無法到達之區域，則採用空中三角測量測設控制點。本計畫完成測區平差高程控制點 39 點、平面特徵點 12 點及平差高程控制空三測點 194 點，提供航帶平差使用，點位分布如圖 3.6，點坐標成果如附件四。其中空三測點之空中三角連結點可靠度與平差殘餘誤差均方根值符合一千分之一地形圖作業規定。

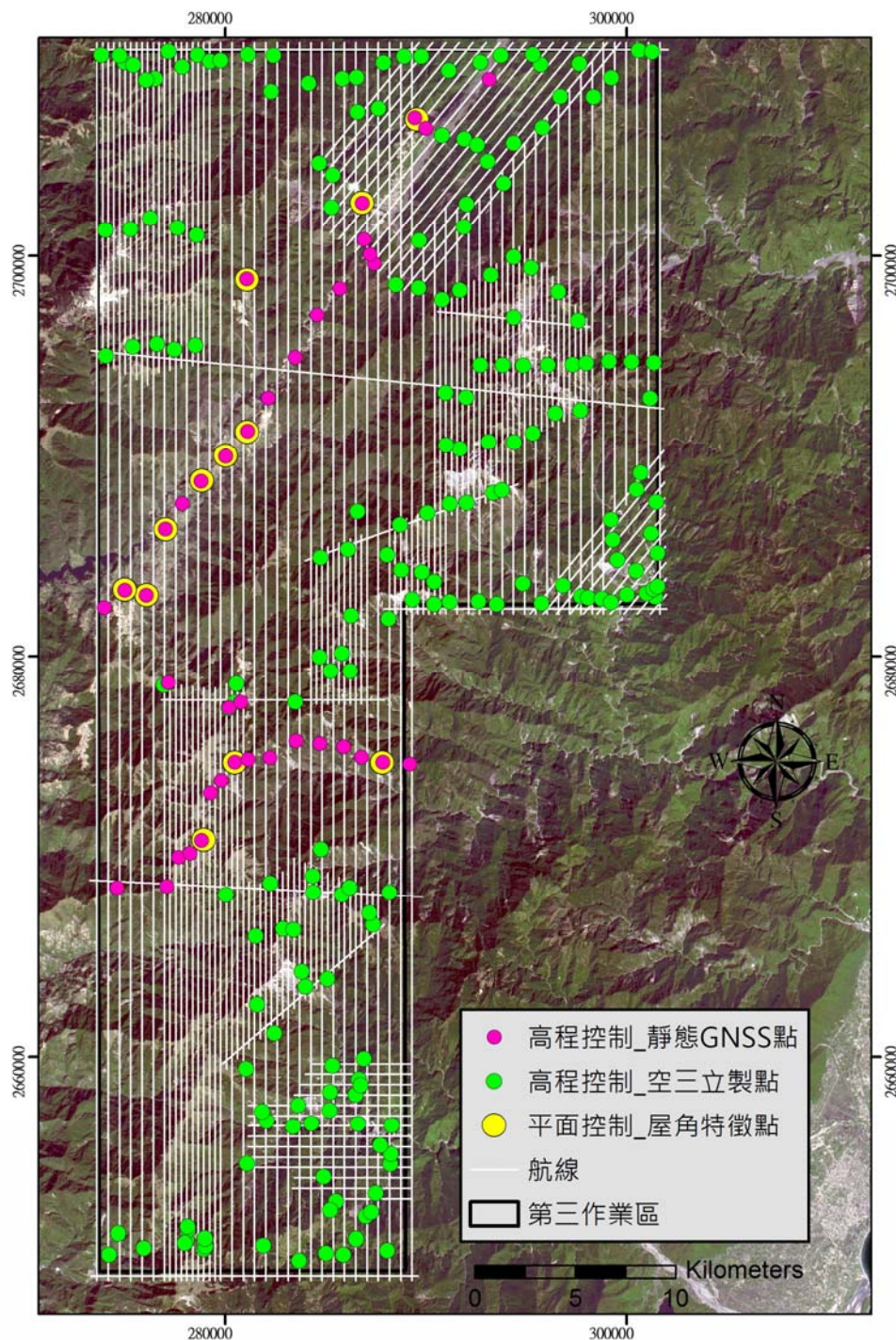


圖 3.6 航帶平差控制點分布圖

第四章 空載 LiDAR 作業

空載雷射掃瞄之作業流程：從飛航掃瞄規劃、基站設置、空中資料掃瞄、點雲解算、點雲分類與編修及成果產出，其相關作業流程如圖 4.1 所示。

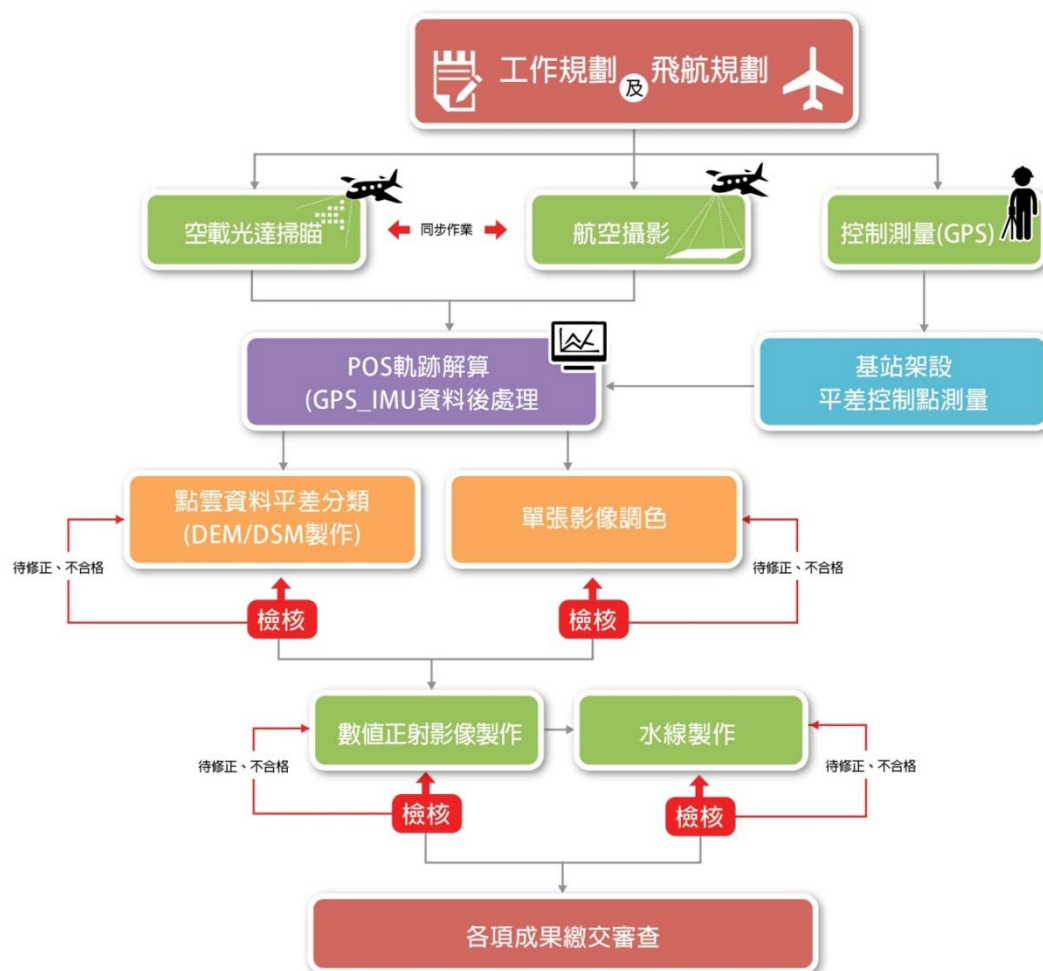


圖 4.1 工作流程圖

§4-1 率定與校正作業

雷射掃瞄器坐標系與機身坐標系之間，常因安置上或時間上的影響，造成不平行之偏差量，適時的修正偏差量方可得到較正確的結果。以重覆漸進的方式來求解雷射掃瞄器的安置角，在每一次迭代過程中，依序分別針對俯仰角、航偏角和側向傾斜角進行率定，並且每求得一個角度，即需重新計算所有點位資料，再以新的資料進行下一次的計算。當三個角度的改正值都收斂到可接受的範圍內時，即小於姿態角精度，得完成率定的工作，

本計畫採用之儀器在原廠建議與規定下，以此方式進行實際飛行，確實完成率定作業。

另外於任務執行前亦先執行南崗校正場飛航，以檢校本計畫所用之光達設備和中像幅像機坐標器差值，通過檢校後，內政部國土測繪中心測量儀器校正實驗室將出具校正報告做為品保參據。校正飛航已於 108 年 2 月 26 日執行，並於同年 3 月 14 日通過光達設備校正(報告編號 I201812170401)，校正報告書如附件五所示。

4-1-1 率定場地點與規格

完整空載光達系統之率定需要兩個分別的控制場，分別為建築物率定場及跑道率定場。此次擇定之率定場地位於彰濱工業區內，面積為 6.6 平方公里。

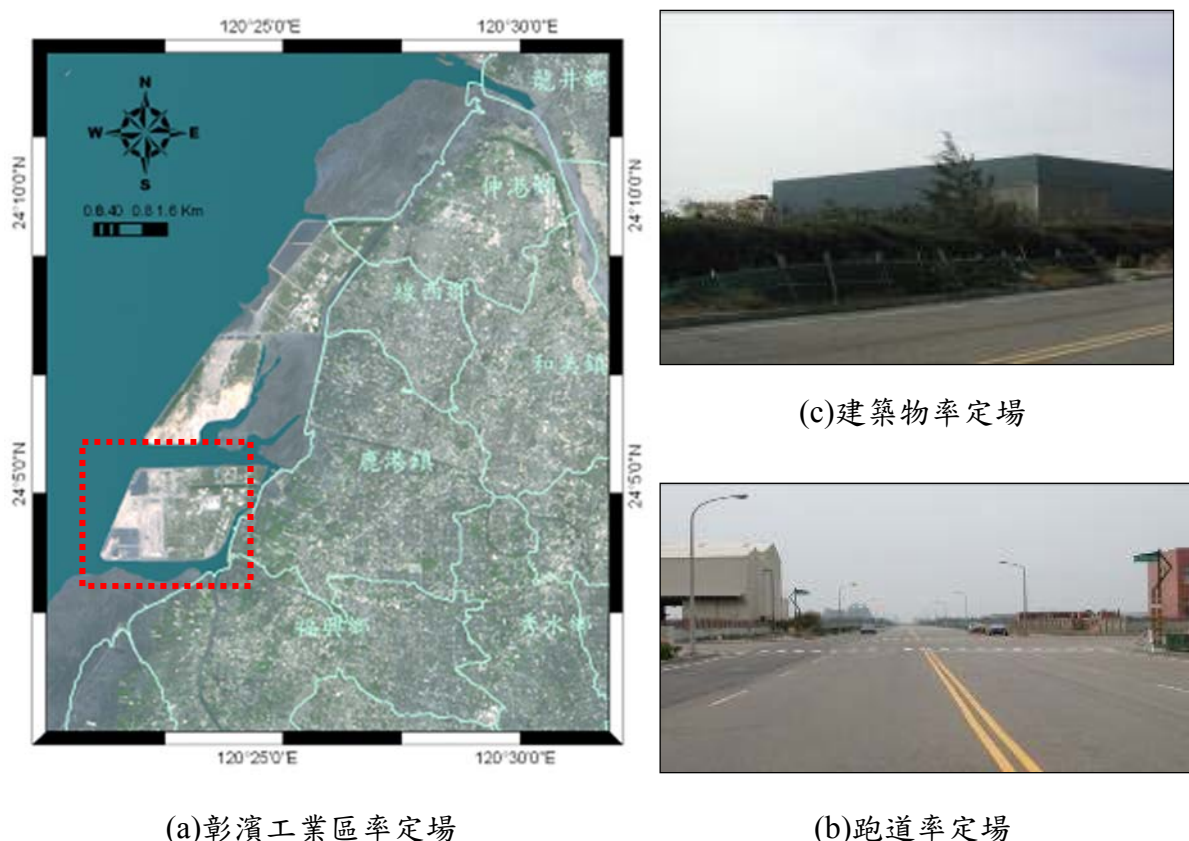


圖 4.2 率定場位置與現況示意圖

平原地區的彰濱工業區具有容易辨識之大型建物(平頂、斜頂)及道路標線等明顯特徵，且率定場內之地表坡度平緩小於 10 度且極少植被覆蓋，為小於 10%之覆蓋率，故此位置為符合本儀器率定之作業地區。

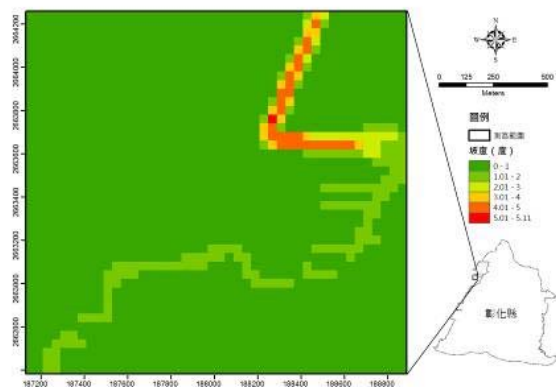


圖 4.3 率定場坡度圖



圖 4.4 率定場植被分布圖

率定場基站為 R003 與 R005 兩站，為透空度良好且符合距航線距離 20 公里內，透過長時間聯測算出其坐標，其分布圖如圖 4.5。



圖 4.5 率定 GNSS 基站位置圖

4-1-2 率定場飛行作業程序

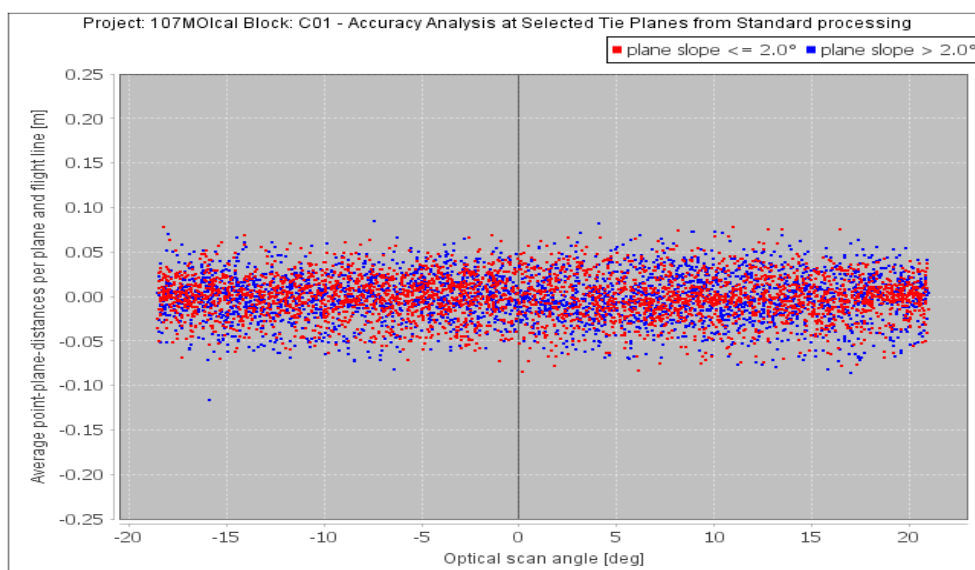
使用空載光達設備為 Optech Pegasus HA500。載具部分使用德安航空載具(BK-117)，於點雲資料使用前執行率定作業，於 107 年 12 月 19 日，執行率定作業以修正偏差量，以確保雷射點雲精確度。率定作業參照加拿

大原廠 Optech 公司建議與規定，執行相關過程與精度評估。

4-1-3 率定成果

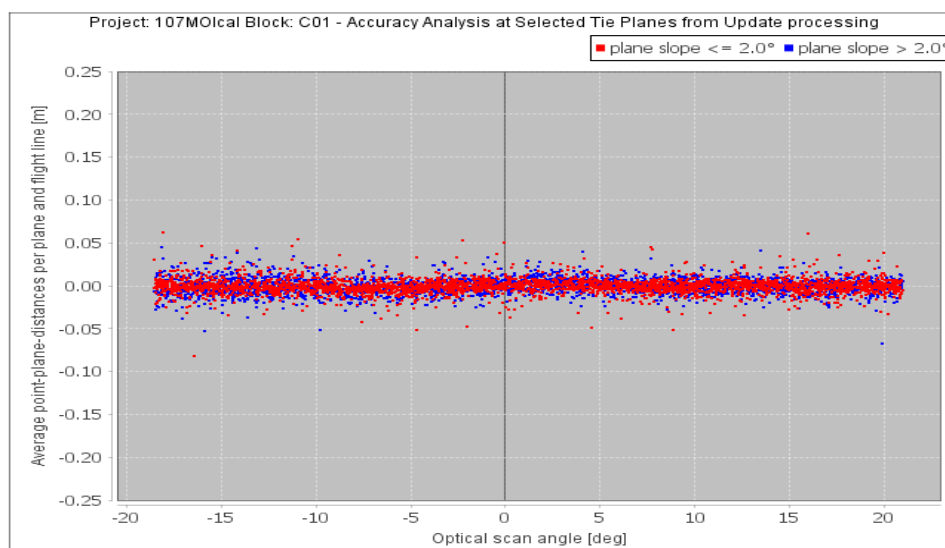
率定飛行後以多條航帶之共軛面進行雷射點至萃取面的距離的分析，若儀器率定不完全，其誤差將會反應於點至面的距離。將率定前後的雷射點至共軛面的分析成果以圖 4.6~圖 4.7 表示。

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



(a) 率定前

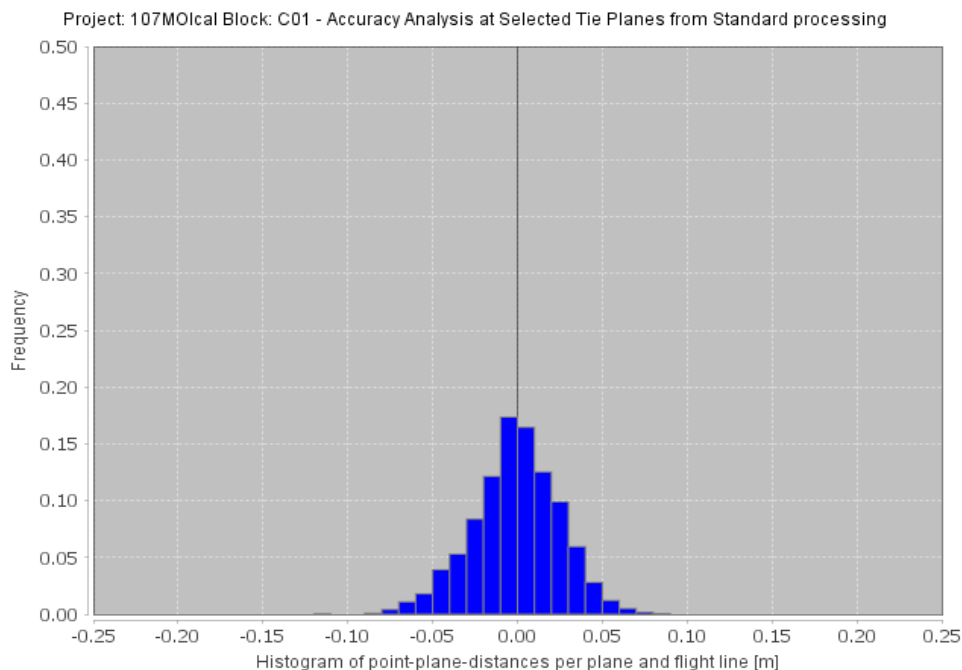
Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



(b) 率定後

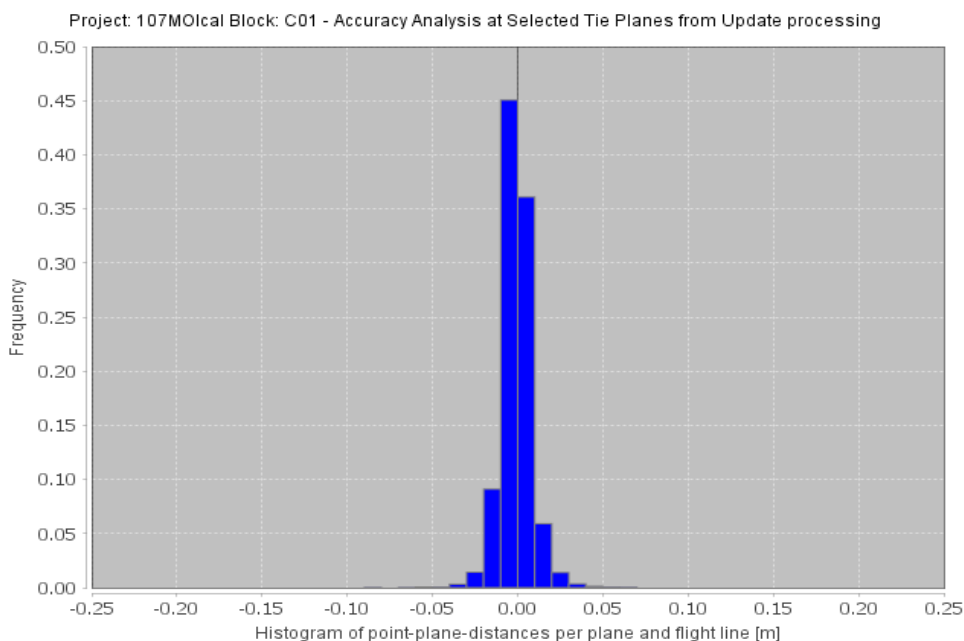
圖 4.6 雷射點至萃取面的距離統計分布圖

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



(a) 率定前

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



(b) 率定後

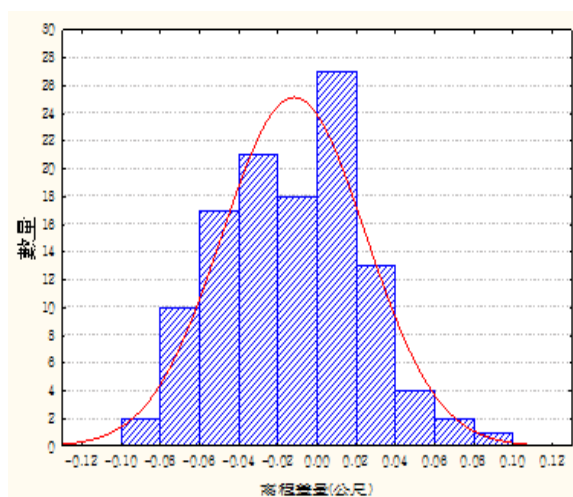
圖 4.7 雷射點至萃取面的距離統計直方圖

雷射點雲的高程精度是將率定後的成果，比對一條平坦且堅硬的地表，例如柏油路，將雷射點分布軌跡比對平坦面進行高程精度分析。求得之率定參數解算確認飛行之點雲資料，確認不同航帶間之點雲無明顯偏移後，再次與地面實測點比較，其高程坐標差值亦應小於 0.1 公尺。以率定後新參

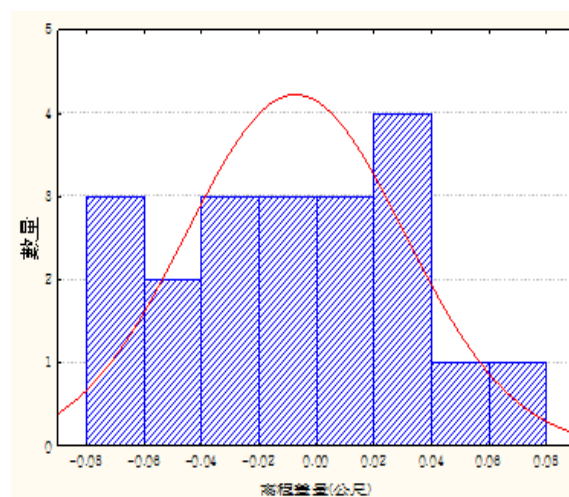
數值算出新的成果，再次與平坦面進行比對。若高程誤差量大於 0.1 公尺精度，方需針對測距距離進行修正。率定後雷射點成果與實測點比對，皆符合依原廠建議與合約規範，詳如下列統計成果所示：

表 4.1 光達率定系統高程分析統計表

高程統計分析	最大差異量(m)	平均差異量(m)	均方根誤差(m)
率定飛行成果	0.092	0.012	0.027
確認飛行成果	0.076	0.010	0.030



(a)率定飛行成果比對



(b)確認飛行成果比對

圖 4.8 率定飛行與確認飛行成果之高程分析統計直方圖(單位：公尺)

空載光達依率定作業飛航高度之平面精度約為 0.4 公尺，將率定參數帶入確認飛行航線，比對其雷射點與實際屋頂實測得之屋頂平面位置，兩次率定平面差量皆小於 0.4 公尺 (圖 4.9)，確認率定參數可用。

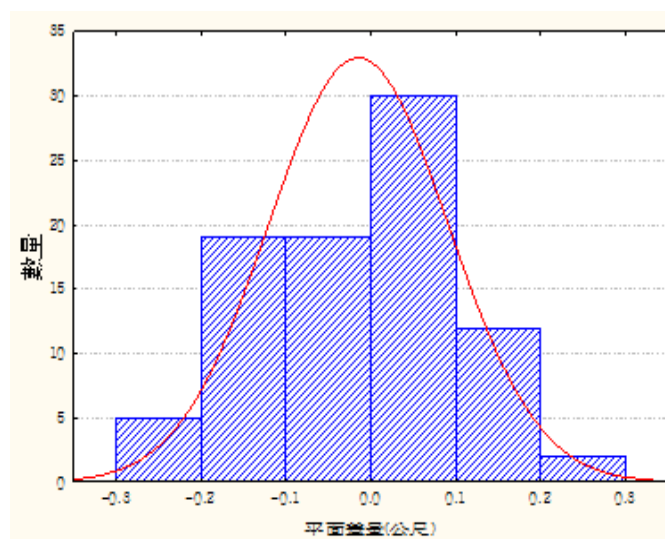


圖 4.9 平面精度分析圖(單位：公尺)

§4-2 飛航掃瞄成果

本計畫於飛航掃瞄同步使用透空度良好之自架設地面基站接收 GNSS 衛星定位資訊，且基站接收時間應比光達掃瞄系統測量時間早 10 分鐘開機且晚 10 分鐘關機，基站與航線範圍皆小於 20 公里(圖 4.10)。規範要求 GNSS 基站之 PDOP 需小於 3，且飛航時定位光達掃瞄成果之 GNSS 原始 PDOP 值不得大於 4(圖 4.12)，本計畫所有架次執行成果皆符合規範要求。

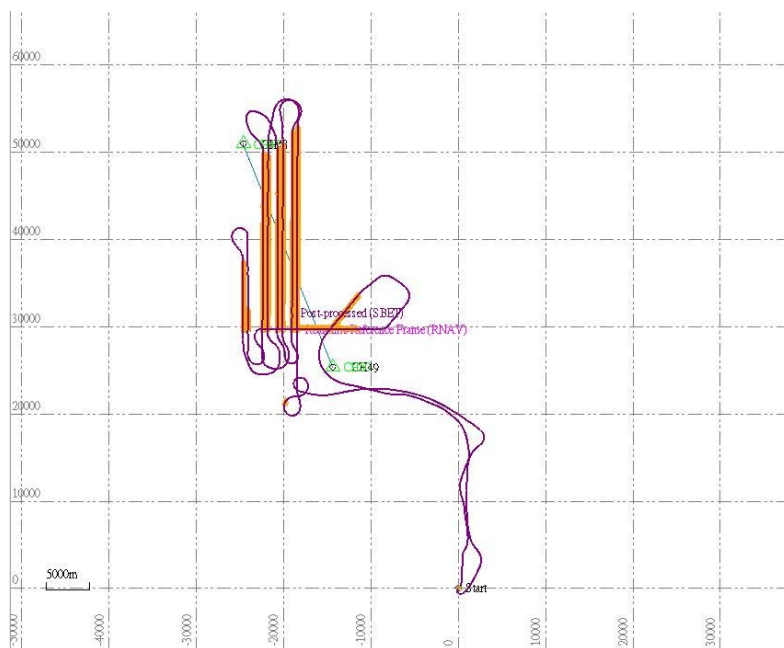


圖 4.10 飛航軌跡與基站示意圖(每格為 5 公里)

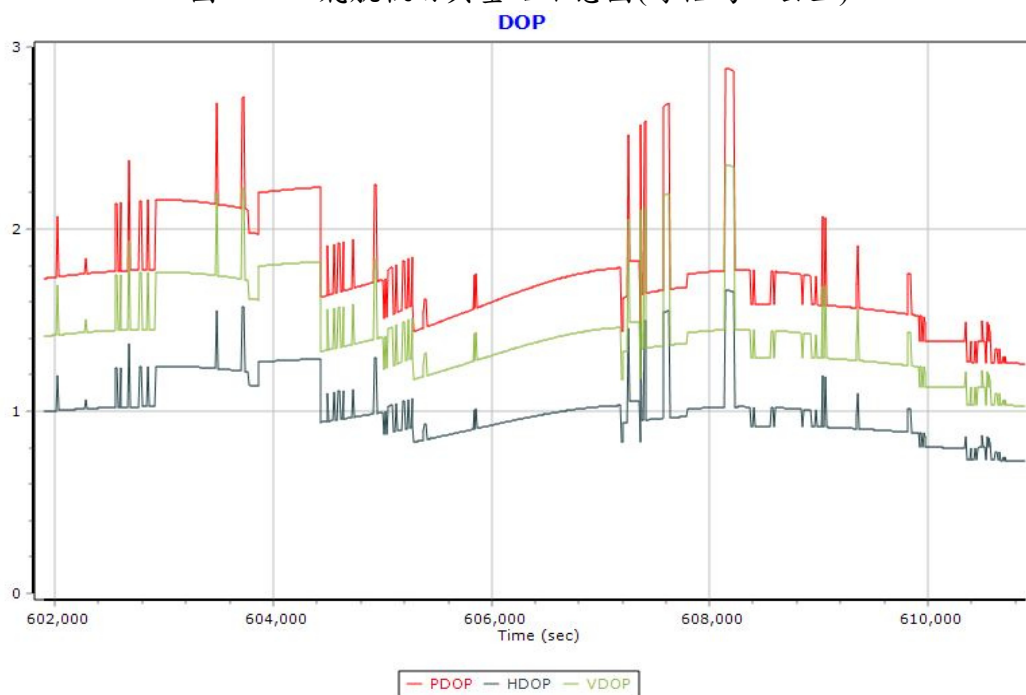


圖 4.11 地面基站 PDOP 圖

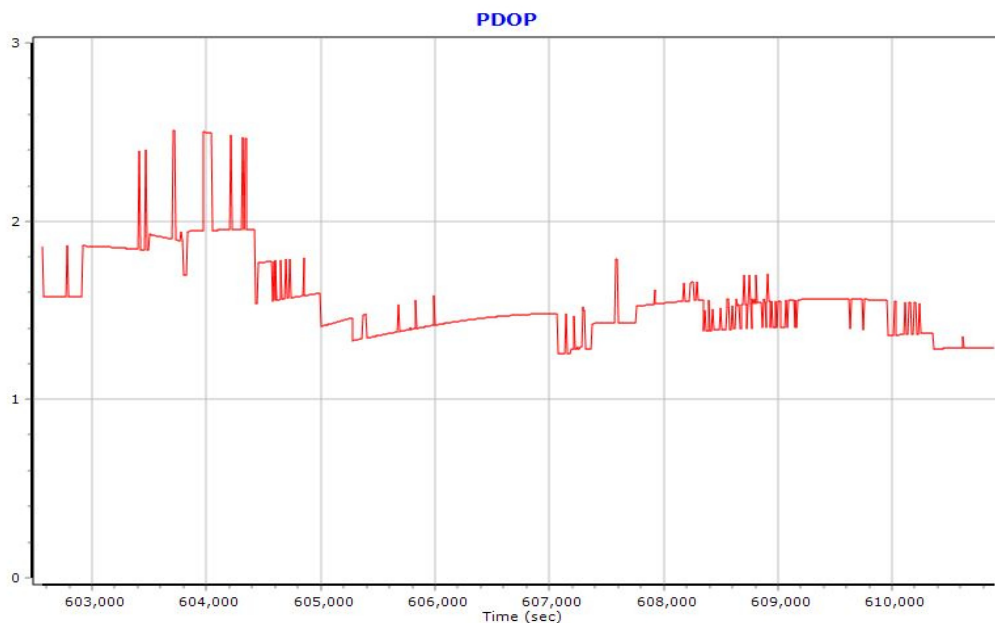


圖 4.12 機載 PDOP 圖

每次飛航任務掃瞄前，將航線軌跡資料輸入導航系統中，飛行員依照所規劃之航線路徑飛行。當飛機升空後，專員依 LiDAR 儀器標準作業程序操作空載光達瞄設備，逐條獲取原始光達掃瞄資料，同時逐條航線記錄原始光達掃瞄相關資料。

表 4.2 本計畫作業執行時間與基站測量時間統計表

序號	作業日期	執行時間	基站使用時間
1	1080409	07:49:00~10:37:25	07:00:00~10:59:59
2	1080410	07:28:52~09:46:55	07:00:00~09:59:59
3	1080423	07:28:18~09:57:45	07:00:00~10:59:59
4	1080424	07:19:01~09:42:48	07:00:00~09:59:59
5	1080425A	07:13:40~09:29:21	07:00:00~09:59:59
6	1080425B	09:58:00~11:55:13	09:00:00~12:59:59
7	1080426	09:18:31~11:16:11	09:00:00~11:59:59
8	1080429	07:25:58~09:37:57	07:00:00~09:59:59
9	1080430	07:23:52~09:29:21	07:00:00~09:59:59
10	1080511	07:40:08~09:24:21	07:00:00~09:59:59
11	1080512	07:54:36~09:59:43	07:00:00~10:59:59
12	1080513	07:26:03~10:03:27	07:00:00~10:59:59
13	1080514A	07:32:04~09:47:29	07:00:00~09:59:59
14	1080514B	10:21:38~12:37:34	10:00:00~12:59:59
15	1080515	07:51:53~10:09:38	07:00:00~10:59:59
16	1080616	07:46:17~09:58:11	07:00:00~10:59:59

序號	作業日期	執行時間	基站使用時間
17	1080619	07:41:56~09:46:08	07:00:00~09:59:59
18	1080620	09:15:22~11:31:34	09:00:00~11:59:59
19	1080621	07:42:07~09:54:29	07:00:00~10:59:59
20	1080712	07:48:40~11:34:51	07:00:00~11:59:59
21	1080713	07:07:58~11:50:05	06:00:00~12:59:59
22	1080716A	07:03:36~09:24:28	06:00:00~09:59:59
23	1080716B	09:59:05~12:10:07	09:00:00~12:59:59
24	1080717	07:21:56~09:20:39	07:00:00~09:59:59
25	1080723	07:02:21~09:05:46	06:00:00~09:59:59
26	1080729	06:38:51~08:38:14	06:00:00~08:59:59
27	1080730A	06:41:03~08:44:50	06:00:00~08:59:59
28	1080730B	09:12:58~11:26:41	09:00:00~11:59:59
29	1080731	06:53:26~08:49:50	06:00:00~08:59:59
30	1080801	07:17:37~08:50:36	07:00:00~09:59:59

§4-3 空載 LiDAR 資料處理

空載 LiDAR 資料前處理作業包括原始資料整理備份、飛航掃瞄航跡 POS 解算及 LiDAR 原始點雲產出。雷射掃瞄資料作業流程如圖 4.13。

1. 資料整理備份

- (1) 蒐集彙整地面 GNSS 固定基站資料。
- (2) 下載 LiDAR 載體動態 GNSS 與 IMU 資料。
- (3) 下載 LiDAR 掃瞄原始資料，並依航線日期分類。
- (4) 原始資料依一定命名法則備份存檔。

2. LiDAR 掃瞄飛航軌跡 POS 解算

彙整地面 GNSS 固定基站資料及載體 POS (GNSS、IMU) 資料，再搭配雷射掃瞄回波測距資料，進行後續解算，資料後處理如圖 4.14。

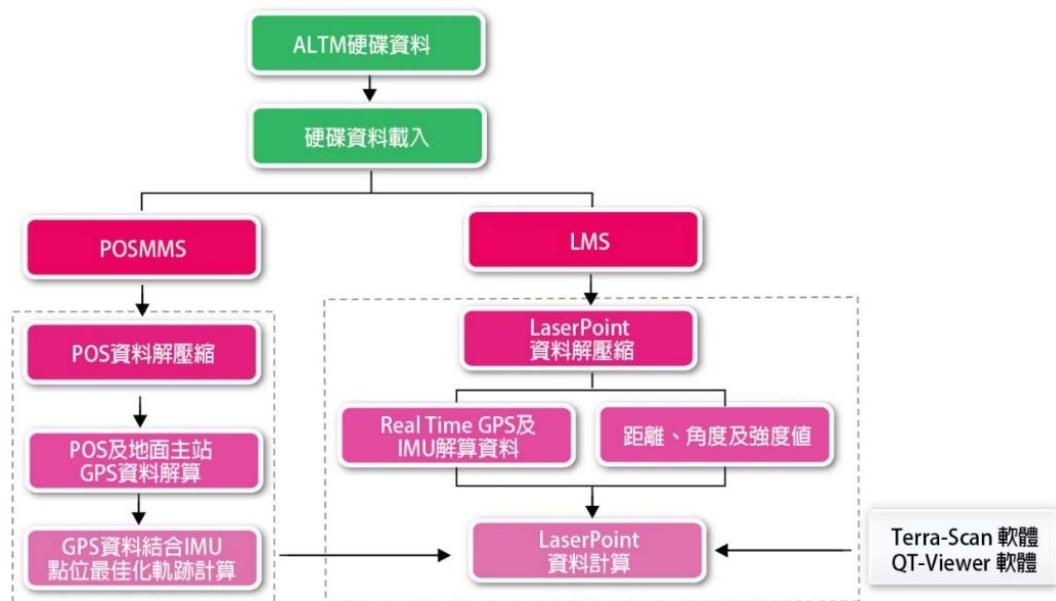


圖 4.13 空載雷射掃瞄資料作業流程

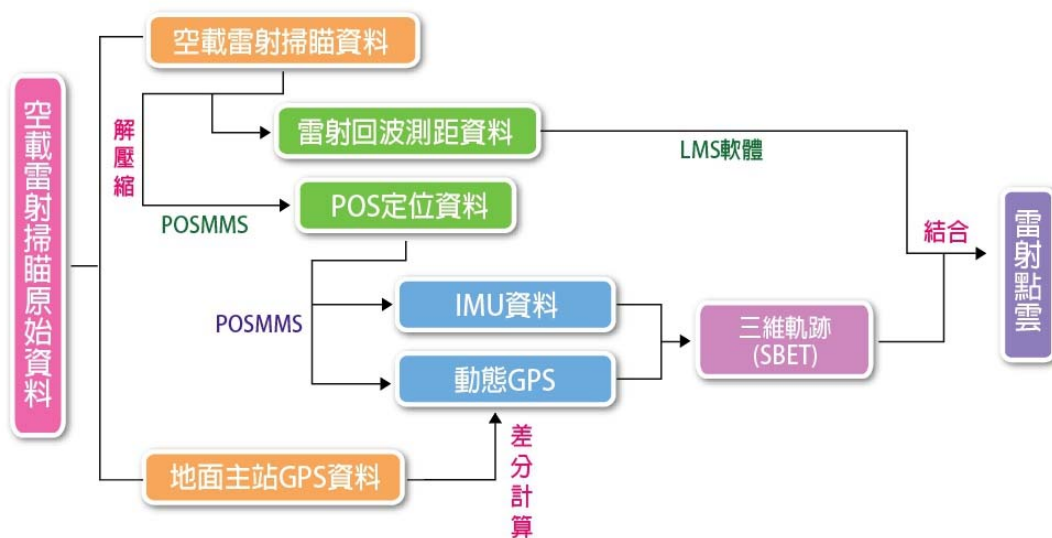


圖 4.14 點雲解算產製處理流程

以 POS GNSS 軟體將地面 GNSS 主站資料及 ALTM 系統之 GNSS 資料進行結合，過程中需輸入地面 GNSS 主站之坐標值，設定相關參數應用如 C/A Code、L1 相位值及利用 L2 載波處理電離層效應後，以動態差分原理求解 LiDAR 掃瞄儀航跡之精確三維坐標，其正向解與反向解差異應達一定之標準，如評估需在 0.2 公尺以內(如圖 4.15)。

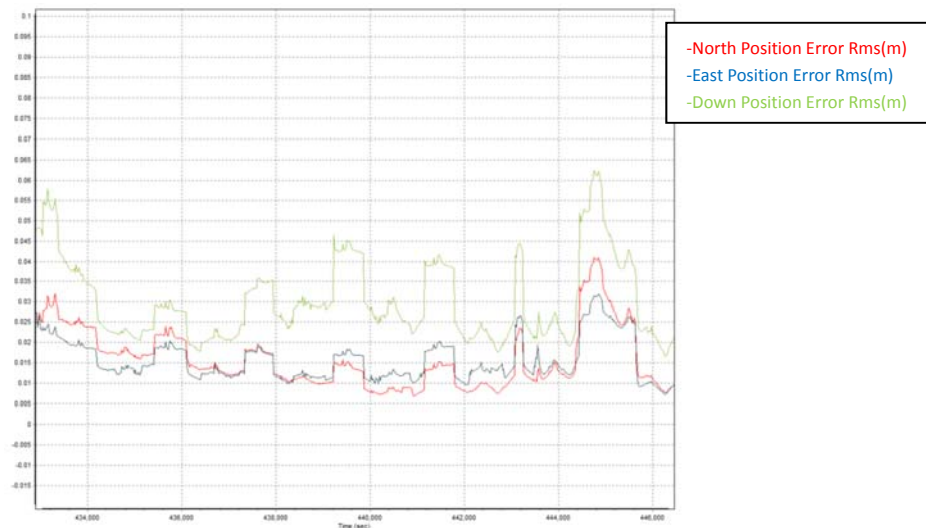


圖 4.15 飛航軌道差異量示意圖

最終將載體 IMU 記錄資料與所解算的 GNSS 坐標結合於三維航跡上，求解出 LiDAR 掃瞄儀之瞬間三維位置與姿態資訊 (POS)，一般稱為 Sbet 飛航軌跡資料(圖 4.16)。

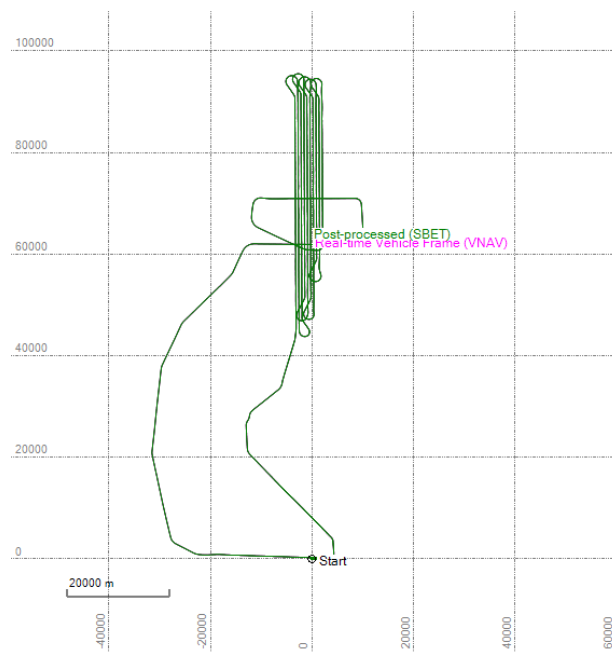
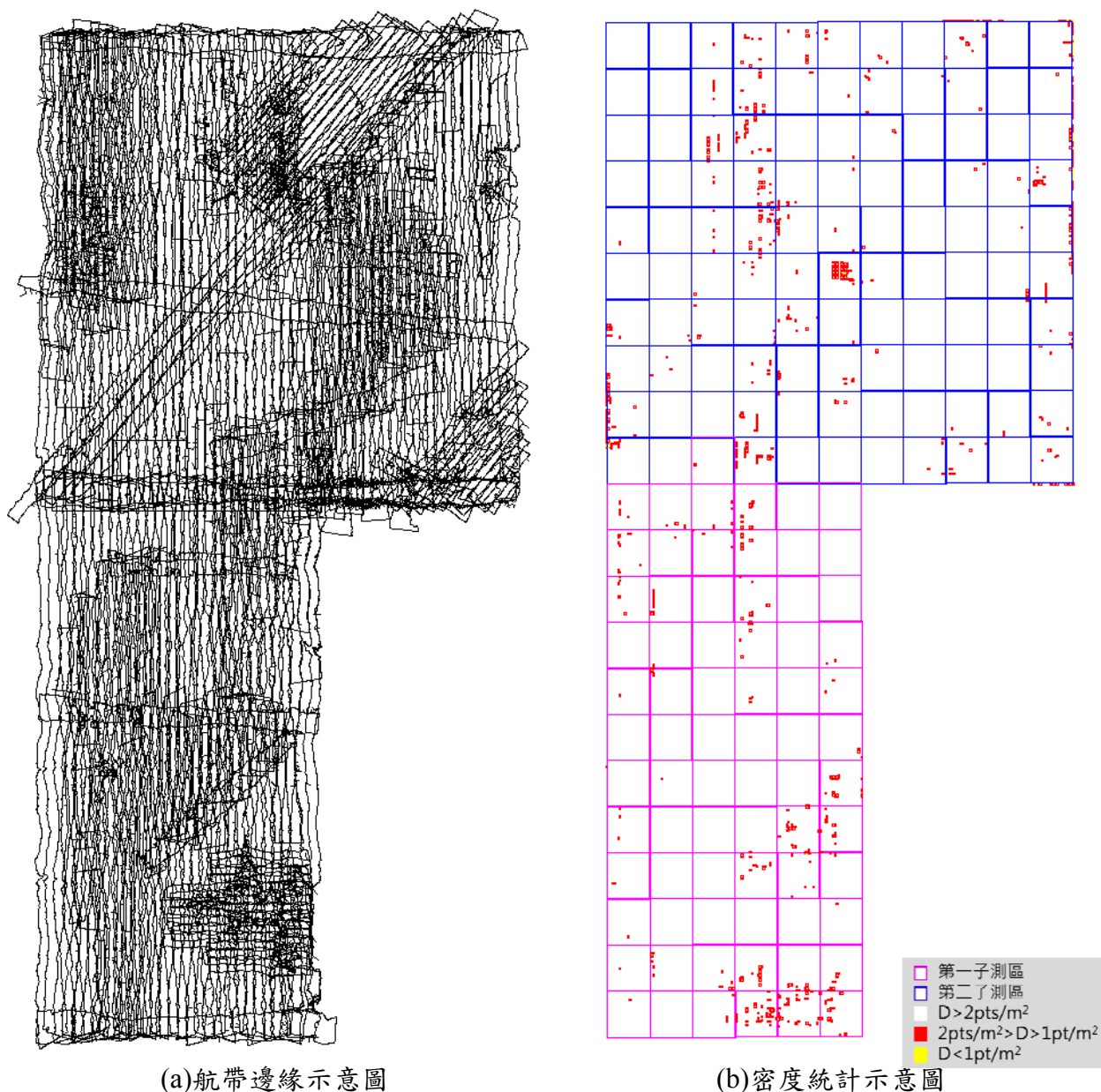


圖 4.16 飛航掃瞄航跡示意圖

3. 原始點雲產出與檢核

結合 LiDAR 之 POS Sbet 軌跡資料與雷射掃瞄測距資料後，將掃瞄角與距離代入 Optech LMS 軟體中，配合計算後的軌跡資訊輸入，加入各項系統誤差率定參數及坐標投影參數，逐條航線求解原始點雲資料。

利用監審方提供之程式，展繪各航帶點雲邊緣線，藉此檢查航帶間重疊率滿足大於 40%之合約要求，如圖 4.17。點雲密度方面則以 100×100 平方公尺為單位統計，確保測區內點雲密度達規範要求，統計如表 4.3 所示。密度不足比例與密度過低比例，皆符合合約要求。而局部小區域點雲密度較低，係因航線掃瞄時受些許霧氣影響，並未影響點雲地形描述。



子測區編號	密度合格比例 ($>2 \text{ pts/m}^2$)	密度不足比例 ($1 \sim 2 \text{ pts/m}^2$)	是否通過合約規定 <10%	低密度比例 ($<1 \text{ pts/m}^2$)	是否通過合約規定 <5%
第一子測區	99.3%	0.7%	通過	0.0%	通過
第二子測區	99.1%	0.9%	通過	0.0%	通過

§4-4 航帶平差與內部精度評估

由於 LiDAR 掃瞄航帶間存有系統與偶然誤差，造成航帶重疊區之高程有不一致現象。因此，當 LiDAR 飛航掃瞄完成後，需進行航帶平差修正。空載雷射掃瞄儀利用 GNSS 及 IMU 結合，使掃瞄的儀器坐標能轉換到通用的國家大地坐標系統，因此定位精度將受到各種量測值與設定值的影響。若系統率定不完整，GNSS 與 IMU 系統誤差會影響到解算雷射測點三維坐標的精度，造成的平面誤差約一公尺，高程誤差則約 0.05%航高(Baltsavias, 1999；童俊雄,2004)。為獲得高精度且實用性之雷射點雲成果，須對點雲資料進行資料誤差的改正，方法為直接對儀器進行率定，再進行航帶平差以降低或消除率定後剩餘系統誤差。

為了減少系統誤差，本工作藉率定飛行及良好的飛行計畫，以控管整個雷射掃瞄之精度，並採用 TerraMatch 模組進行雷射掃瞄航帶平差，利用航帶重疊數據連結點的高程與訊號強度值(intensity)進行連結點的量測以評估重疊航帶的內部精度不符值，進一步改正誤差以提高資料品質。

4-4-1 航帶平差及應用軟體

平差作業流程之應用程式為 TerraScan 及 TerraMatch 商用軟體，整個作業的環境是架構在 MicroStation 下，由於平差觀測量必須是針對相同地面或地物在不同航帶之雷射點結果，為確保航帶間具有高程差值為相同地面，因此在進行平差作業前，應用 TerraScan 的雷射點分類能力及互動式分類工具列進行各種地物點之前期分類作業，後利用 TerraMatch 進行相關航帶平差作業。

TerraMatch 為 TerraSolid 與瑞典 Digpro AB 公司合作研發軟體，具有雷射掃瞄航帶平差之功用，其核心平差理論於前段所述，藉由比對航帶重疊區之差量以進行掃瞄時方位參數(Roll、



圖 4.18 平差作業流程圖

Pitch、Heading 及 dZ 等)之改正，求得系統誤差來增加雷射點精度。其作業程序如圖 4.18 所示。

4-4-2 航帶精度分析及平差處理

雷射掃瞄(Laser Scanning)利用高精度的 GNSS 及 IMU 進行三維坐標之解算，與傳統的航空攝影測量相較而言，雷射掃瞄不需大量的地面控制網以進行方位求定，施測時只須於測區範圍擺設二個地面 GNSS 觀測站，在飛航掃瞄時地面觀測站與掃瞄區不應超過 20 公里。然而空載雷射掃瞄儀的架構使用相當多的輔助單元，在將掃瞄的坐標轉換到通用的地面坐標系統過程中涉及多項量測步驟，使得其含有許有誤差來源：GNSS、IMU、Lever Arm、安置角、掃瞄鏡曲率以及雷射光束測距誤差等，因此其定位精度將受到各種量測值與設定值的影響。

空載雷射掃瞄三維資料的獲取實際上就是應用測距、測角(姿態及掃瞄角)定位，因此雷射掃瞄光束之空間方位誤差(Orientation Error)將直接影響雷射點之精度，造成不同航帶在重疊區域同一點之平面坐標和高程有差異。為使得後續數值高程模型能具有高精度之特性，將利用不同航帶間同一地物之不符值(Discrepancy)建立之數學模式進行航帶平差，平差之觀測量為同一地物之高程值，透過最小二乘法平差後將可求得航帶間參數模型之參數值，進而改正每條航帶之雷射點坐標。

4-4-3 雷射掃瞄誤差來源及精度分析

1. 空載雷射掃瞄資料處理

ALTM 系統利用 Optech 公司的 LMS 軟體進行雷射點資料解算得三維坐標值，此三維坐標之雷射點雲即可進行後續應用處理。ALTM 利用多回波(multiple Echoes)的觀測值，即發射單一脈衝得接收多個回訊，可同時測得地表上覆蓋物頂層和穿透至地表間數個點位，原始雷射測點數據為不規則離散測點。經濾除與分類的步驟，將最後回波值測點分類出地面點，製作成數值高程模型(DEM)，並使用全回波(all Echos)製作數值地表模型(DSM)。

本公司目前使用商業軟體 TerraScan 處理雷射測點數據的濾除與分類，並輔以後處理與品管之工具，進行檢核與視覺製圖檢視等品管流程。然而就高精度 DEM 等製作而言，若是兩航帶間存在有不符值將影響其成果，為使全區之成果一致，必須以航帶平差方式進行修正。

2. 雷射點誤差分析

空載雷射掃瞄之誤差來源主要可分為四項。

- (1) GNSS 誤差—GNSS 定位誤差。
- (2) 雷射掃瞄測距誤差—掃瞄測距誤差、大氣折射誤差及掃瞄鏡曲率誤差等。
- (3) IMU 誤差—陀螺儀飄移誤差、重力模型誤差及大地水準面誤差等。
- (4) 系統整合誤差—動態延遲誤差、GNSS 天線設置誤差、安置角誤差及地面參考站位置誤差等。

一般而言，前述誤差對平面位置之精度影響較大，實際評估之誤差值在平面誤差多大於 0.5 至 1 公尺，高程誤差也達 0.2 公尺(Baltsavias, 1999)，通常藉由雷射點資料剖面可檢視平面和高程之偏移量，如圖 4.19 所示，其中不同航線之房屋脊線有明顯偏移。

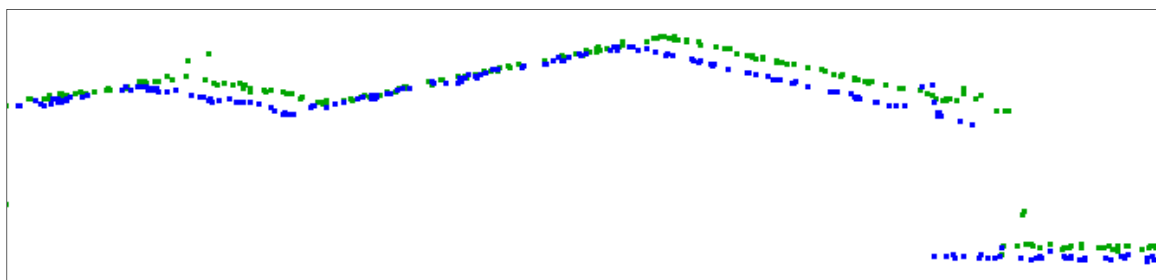


圖 4.19 雷射點偏移示意圖

然而在雷射點雲解算後，需經資料檢核的方式來確定資料的正確性。檢核方式主要分為內部精度分析與外部精度分析。內部精度分析採用航帶間重疊區之資料，利用彼此高程之差異量來檢視；而外部精度分析則是將已知的地面控制點比對雷射點資料所表現的地形趨勢面，檢視其兩者間之差異。

內部精度即航帶間精度，利用多條航帶重疊處組成之不規則三角網形進行高程差異的比對，以獲取航帶間的差異性進行評估。本分析目的為獲

致航帶間是否存在有未率定完善之系統誤差，以確保資料之精度，並進行重疊航帶誤差分析與交叉航帶誤差分析。實際作業上，為更精確的獲得航線間之精度分析結果，利用 TerraMatch 軟體之 measure match 功能進行航線重疊處高程差異比對，比對原理如圖 4.20 所示，利用航線點雲組成不規則三角網形在與另一條航線重疊處，取其最近點比對兩者高程的差異量。

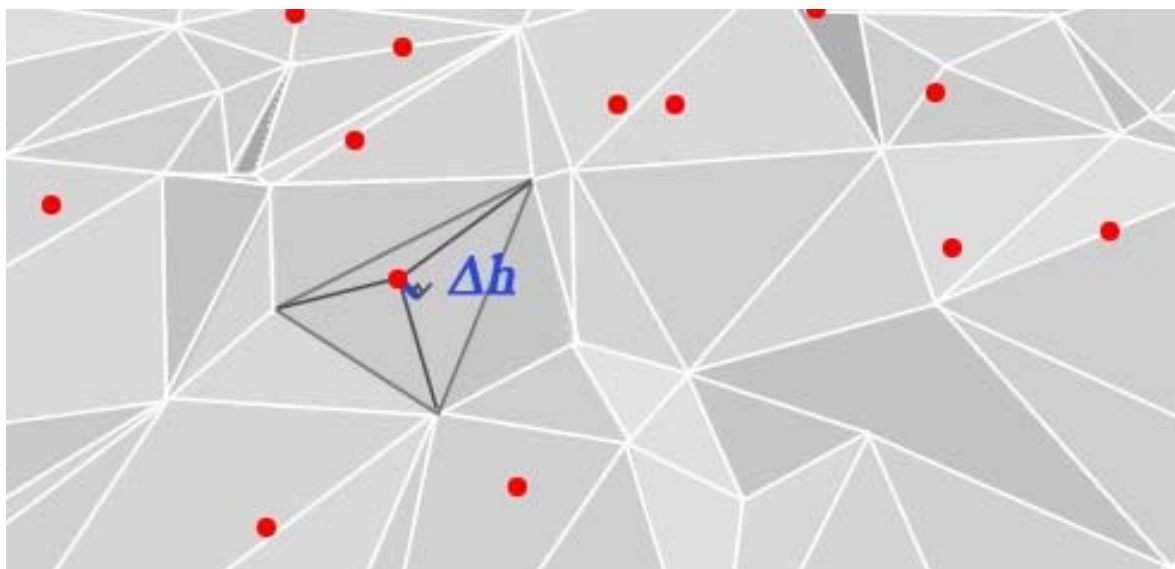


圖 4.20 Measure Match 比對原理示意圖

4-4-4 分區航帶平差

由於本計畫測區廣大，因此為使雷射點資料銜接高程一致，使用平差控制點，可有效地將資料約制區域間高程，使資料得以符合高精度之特性。並於各測區完成完整之航拍掃描作業後，先進行分區航帶平差作業，並繳交成果至監審方審查，再進行後續點雲分類作業，可保持成果產製之時效。

於進行航帶平差前，利用 TerraMatch 軟體之 measure match 功能進行航線重疊處高程差異比對，分析整體航帶間誤差情形，可確保率定完善無系統偏差。並可對於數值異常航線進行了解，評估是否需要調整該條航帶先驗精度，若該條航線點雲品質不佳(如雲洞比率過高或因天氣問題穿透不佳)，則考慮重新飛航。

本計畫子測區平差前各航帶重疊處高程誤差分析圖如圖 4.21 所示，數據統計如表 4.4 所示，所使用之航線皆可進行平差，且無率定不完善導致之明顯系統誤差。

表 4.4 平差前航線重疊處誤差統計分析

統計項目		最大值(m)	最小值(m)	平均值(m)	標準差(m)
第一子測區	平均絕對差量	0.176	0.127	0.152	0.010
	平均差量	0.057	-0.067	0.001	0.026
第二子測區	平均絕對差量	0.330	0.018	0.240	0.040
	平均差量	0.142	-0.174	-0.002	0.068

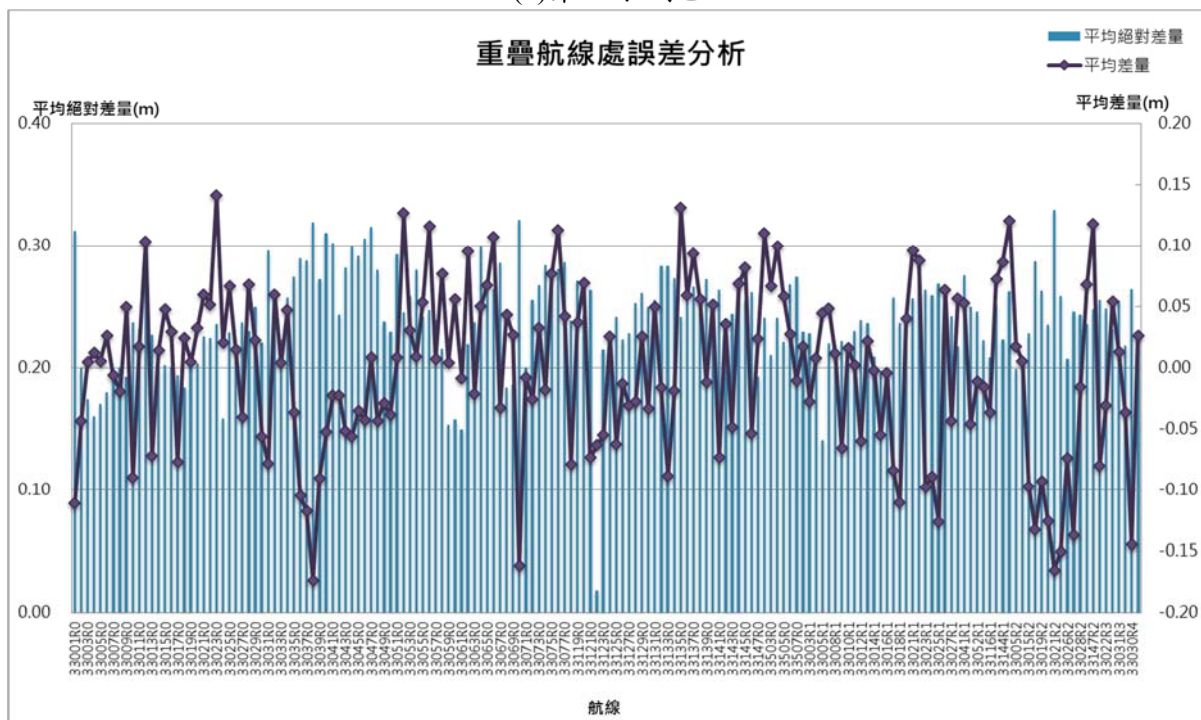
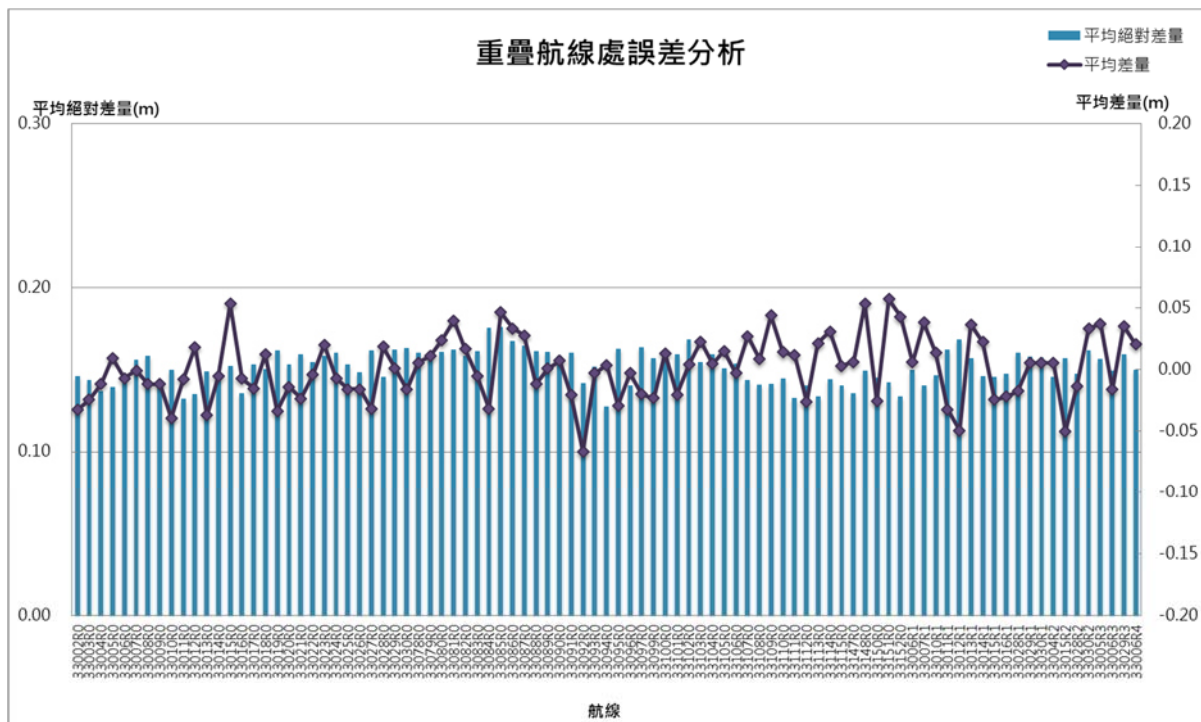


圖 4.21 平差前航線重疊處誤差分析圖

4-4-5 航帶平差模式

航帶間存在誤差將影響後續應用，上述誤差可經由率定飛行及良好的飛行計畫控管整個雷射掃瞄之精度，大部分的誤差都可以被界定出來加以檢定，然而即使如此，實務經驗上仍無法解決資料存在之誤差量，因此應用航帶平差理論提高資料品質是必要之手段。

空載雷射掃瞄儀的架構都是由 GNSS 及 IMU 結合，使掃瞄的坐標能轉換到通用的地面坐標系統，因此其定位精度將受到各種量測值與設定值的影響，若系統率定不完整，GNSS 與 IMU 系統誤差會傳播到解算雷射測點三維坐標的精度，為了檢驗並減少系統誤差，本工作採用商業軟體 TerraMatch 進行雷射掃瞄航帶平差，利用航帶重疊數據連結點的高程進行連結點的量測，以評估重疊航帶的內部精度不符值，並進一步改正系統誤差(TerraSolid，2010)。

實際上計算所得的掃瞄點坐標之誤差來源可能受到相當多因素之影響，包含系統性及偶然性之誤差，系統性之誤差只能將航帶轉換參數所能描述的誤差量代入予以糾正，剩餘之誤差量則視為偶然誤差利用最小二乘方式平差之，因此進行航帶平差時須先界定所謂的航帶間幾何轉換參數，才能藉以發展航帶平差之數學模式。

由於掃瞄幾何條件的未知參數之間存在參數高相關，為減少未知參數量，在隨機模式高相關參數(如平移參數、旋轉參數、平移參數線性漂移量、旋轉參數線性漂移量等)中，優先選取姿態參數求定，加權值效果，另外實際應用上可加入地面已知控制點作為約制。

未知參數需要輸入先驗精度，如角度量先驗標準差依偏航角(heading)、顛簸角(pitch)、滾動角(roll)依序為 0.008 度、0.005 度、0.005 度(本儀器使用慣性導航儀 LN200 之理論精度)，長度相關向量 0.01 公尺。航帶平差輸入資料包括：(1)時間序列的航跡三維坐標(2)時間序列的點雲三維坐標(3)地面已知點三維坐標(本作業加入各航線間頭中尾三點)。利用航帶重疊數據，進行航帶平差與平差成果評估，可獲得航帶之間的內部精度，並可進行系統性誤差的改正(林志交，2004)。

平差作業流程包括處理雲點資料，針對較適合作為匹配連結點之地面及平坦斜坡面屋脊線等進行分類，以提高自動萃取匹配連結點(Tie Line)品質和效率。此作法將選取均勻分布於航帶重疊區之匹配連結點。



(a) 屋脊線匹配點

(b) 匹配連結點差量

圖 4.22 匹配連結點示意圖

如圖 4.18 其中屋脊線匹配連結點。由此功能可檢視該連結點位置於各航帶間偏差量，即為航帶相對平差選之使用之觀測量。剔除萃取錯誤之匹配連結點後，以 TerraMatch 軟體之 Find Tie Line Match 功能決定欲求解之參數進行航帶平差計算與改正。最後再進行航帶平差成果評估。

4-4-6 航帶平差成果評估

利用航帶平差以獲得更準確及可靠之成果，消除航帶間尚存之偏移量，降低製作 DEM 時於航帶重疊區域之混淆。可由重疊處誤差分析結果，了解平差後雷射掃瞄測高精度，各測區平差後航帶誤差分析成果如表 4.5 所示，各測區平差後平均絕對差量皆小於 0.2 公尺，平均絕對差量標準差小於 0.04 公尺，無明顯航帶偏差，可用於後續資料產製。詳細各航線高程差量如表 4.6 與表 4.7，統計圖表如圖 4.23 與圖 4.24。

表 4.5 平差後航線重疊處誤差統計分析

統計項目		最大值(m)	最小值(m)	平均值(m)	標準差(m)
第一子測區	平均絕對差量	0.179	0.065	0.140	0.020
	平均差量	0.089	-0.071	0.002	0.027
第二子測區	平均絕對差量	0.100	0.074	0.086	0.005
	平均差量	0.032	-0.023	0.000	0.010

表 4.6 第一子測區航線重疊處平差前後差量統計表

航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對差量(m)	平均差量(m)
33002R0	11206972	0.146	-0.033	8275664	0.086	-0.013
33003R0	18308365	0.144	-0.024	14484794	0.081	0.005
33004R0	19944091	0.137	-0.012	16038475	0.078	-0.005
33005R0	25892161	0.139	0.010	20323238	0.080	-0.010
33006R0	28084127	0.143	-0.007	22743376	0.083	-0.005
33007R0	17143561	0.156	-0.001	14977108	0.082	0.003
33008R0	17719936	0.158	-0.012	14265971	0.086	-0.006
33009R0	27100105	0.144	-0.012	22531855	0.082	0.009
33010R0	30999811	0.150	-0.039	27198575	0.082	0.008
33011R0	35325825	0.132	-0.008	32921627	0.076	0.002
33012R0	34891026	0.135	0.018	31307795	0.079	-0.006
33013R0	23502977	0.149	-0.037	21724774	0.081	0.004
33014R0	23471353	0.146	-0.005	20786524	0.080	0.005
33015R0	2640267	0.152	0.053	1920780	0.091	-0.023
33016R0	1977405	0.136	-0.007	1372072	0.088	-0.013
33017R0	13416868	0.153	-0.015	11273877	0.084	0.001
33018R0	13315578	0.150	0.012	10810339	0.086	-0.001
33019R0	13752690	0.162	-0.034	11546349	0.087	-0.007
33020R0	15829154	0.153	-0.014	12058097	0.089	0.004
33021R0	15563727	0.159	-0.024	11573768	0.091	-0.008
33022R0	16011969	0.155	-0.004	11960884	0.089	-0.007
33023R0	13766749	0.158	0.020	10845618	0.089	-0.005
33024R0	13523060	0.160	-0.007	10779905	0.089	0.008
33025R0	14145187	0.153	-0.016	11147581	0.088	0.001
33026R0	13761500	0.148	-0.016	11195476	0.084	0.002
33027R0	12901721	0.162	-0.032	10956471	0.082	-0.002
33028R0	15032321	0.146	0.019	11271121	0.083	-0.001
33029R0	10363959	0.162	0.001	6610755	0.089	-0.004
33030R0	6124168	0.163	-0.016	3569542	0.091	-0.002
33078R0	2122253	0.160	0.006	1428192	0.091	0.011
33079R0	2144814	0.160	0.011	1295987	0.093	-0.008
33080R0	2004497	0.161	0.024	1471946	0.090	0.011
33081R0	2639366	0.162	0.040	2052305	0.089	0.015
33082R0	2754930	0.159	0.017	2103542	0.088	0.009
33083R0	3009446	0.161	-0.005	2444263	0.089	0.008
33084R0	3254528	0.176	-0.032	2750969	0.089	-0.006
33085R0	3481636	0.176	0.047	2878677	0.087	0.008
33086R0	4072769	0.168	0.034	3305198	0.089	0.003

航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
33087R0	4467647	0.165	0.028	3118957	0.093	0.001
33088R0	3155784	0.161	-0.012	2189358	0.093	-0.008
33089R0	2546048	0.161	0.001	1772608	0.091	0.009
33090R0	2749018	0.159	0.007	2177305	0.087	0.009
33091R0	1967369	0.160	-0.021	1483564	0.089	0.003
33092R0	3740912	0.142	-0.067	3690837	0.074	-0.007
33093R0	4473894	0.152	-0.003	3347682	0.088	-0.023
33094R0	4883305	0.127	0.004	4289951	0.078	-0.003
33095R0	4034163	0.163	-0.029	3599021	0.086	-0.006
33096R0	4649976	0.140	-0.003	3728367	0.083	-0.006
33097R0	7854102	0.164	-0.020	6784501	0.087	-0.020
33099R0	7650837	0.157	-0.023	6571114	0.085	-0.002
33100R0	5635950	0.156	0.013	3440646	0.096	0.032
33101R0	6079989	0.160	-0.020	5267101	0.086	-0.012
33102R0	7440468	0.169	0.004	5801289	0.092	0.025
33103R0	9562547	0.155	0.023	8146259	0.087	0.012
33104R0	12873500	0.160	0.005	9291473	0.092	-0.016
33105R0	8272850	0.151	0.015	6990869	0.087	-0.009
33106R0	7789719	0.154	-0.003	6596955	0.086	-0.001
33107R0	6255868	0.144	0.027	5277509	0.087	-0.008
33108R0	8602109	0.141	0.009	7536060	0.083	0.005
33109R0	16719324	0.142	0.044	15147079	0.082	-0.011
33110R0	19105328	0.145	0.014	17898496	0.078	0.001
33111R0	31944383	0.133	0.012	30236801	0.077	0.005
33112R0	36732483	0.141	-0.026	35356179	0.076	0.003
33113R0	37429610	0.134	0.022	34070092	0.078	-0.007
33114R0	32083163	0.144	0.031	28511257	0.080	0.001
33115R0	23262227	0.141	0.003	18999603	0.085	-0.007
33147R0	19686695	0.135	0.006	14467499	0.078	0.009
33148R0	3484346	0.149	0.054	2859257	0.085	0.009
33150R0	13988628	0.145	-0.025	11794831	0.084	0.004
33151R0	9527150	0.143	0.057	8158509	0.079	0.011
33152R0	12195584	0.134	0.043	11029112	0.076	-0.015
33006R1	6855965	0.150	0.006	5228243	0.087	0.003
33007R1	6114378	0.140	0.038	5208682	0.074	0.018
33010R1	2345217	0.146	0.014	1821407	0.078	-0.009
33011R1	1213776	0.162	-0.032	974909	0.085	0.003
33012R1	1028923	0.169	-0.049	869591	0.087	0.000
33013R1	1194176	0.157	0.037	1061983	0.085	0.003
33014R1	2076975	0.146	0.023	1661198	0.086	-0.004
33015R1	22460323	0.146	-0.025	18675245	0.081	0.009
33016R1	17880690	0.147	-0.022	15203466	0.082	-0.006
33028R1	913573	0.160	-0.017	445393	0.096	-0.006
33029R1	2731175	0.158	0.005	1834132	0.091	-0.013
33030R1	619505	0.157	0.006	219858	0.100	0.019
33004R2	2742131	0.146	0.006	1877618	0.092	-0.002
33015R2	2716705	0.157	-0.050	2168291	0.088	0.002

航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
33028R2	12103036	0.148	-0.014	8766017	0.083	0.002
33030R2	2341626	0.162	0.033	1581750	0.091	0.021
33005R3	9020486	0.157	0.037	6241619	0.090	0.007
33006R3	18532817	0.149	-0.016	14190257	0.088	0.008
33029R3	3013952	0.160	0.036	1510065	0.094	0.004
33006R4	11082998	0.150	0.021	7736864	0.089	0.006

* R1、R2 表示該航線第 2、3 次飛行，以此類推。粗體為交叉航帶。

表 4.7 第二子測區航線重疊處平差前後差量統計表

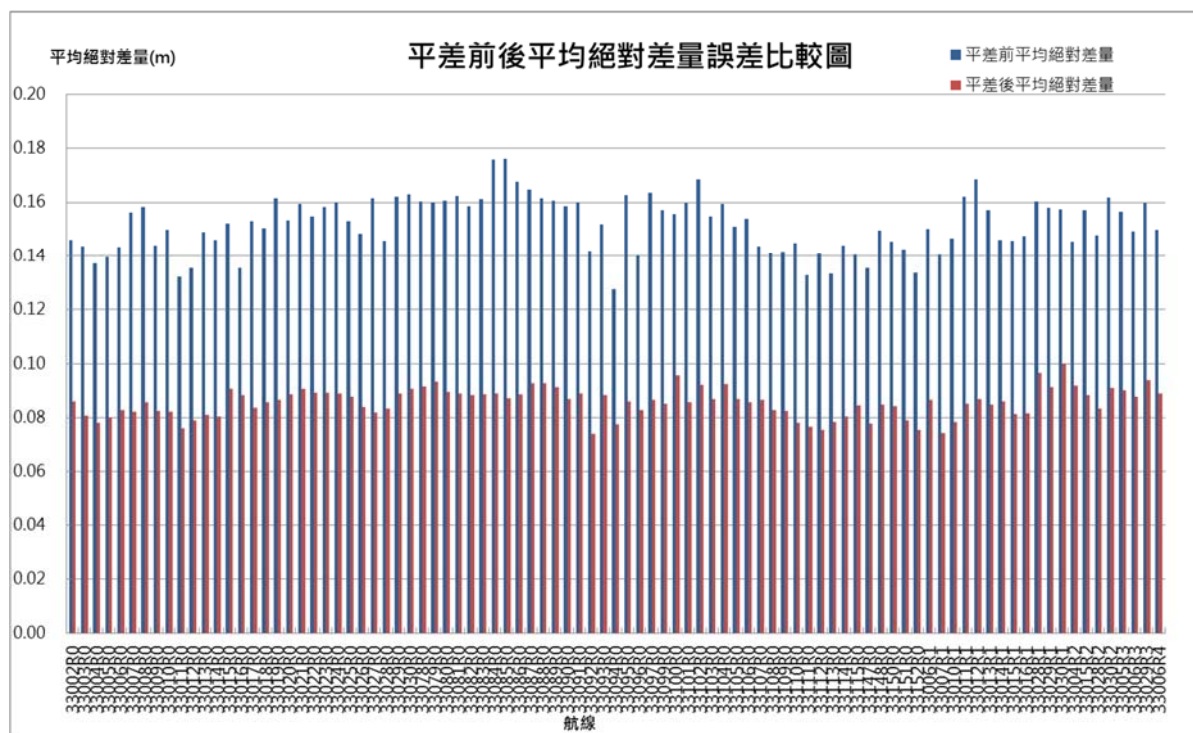
航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
33001R0	12262226	0.313	-0.111	7308515	0.159	-0.007
33002R0	2332949	0.200	-0.043	941596	0.139	-0.036
33003R0	5803087	0.175	0.005	2535113	0.105	0.009
33004R0	8340581	0.161	0.012	3505074	0.095	0.015
33005R0	9982440	0.171	0.006	3978261	0.101	-0.047
33006R0	8147065	0.180	0.026	3842557	0.104	0.022
33007R0	3950574	0.197	-0.006	1629200	0.108	0.013
33008R0	2559862	0.201	-0.019	944346	0.109	-0.033
33009R0	2279286	0.193	0.050	724140	0.124	0.014
33010R0	1724032	0.238	-0.089	456196	0.131	0.008
33011R0	880112	0.232	0.018	208838	0.158	-0.046
33012R0	780821	0.272	0.103	196725	0.161	0.075
33013R0	1236357	0.227	-0.072	405712	0.130	0.023
33014R0	1908717	0.200	0.014	650305	0.125	0.004
33015R0	22754606	0.202	0.048	13297431	0.139	-0.028
33016R0	19314360	0.201	0.030	10830430	0.135	-0.027
33017R0	1665377	0.194	-0.077	588307	0.138	-0.057
33018R0	1234589	0.184	0.024	455152	0.137	-0.036
33019R0	1099297	0.203	0.005	394912	0.151	-0.033
33020R0	1314664	0.204	0.033	522470	0.162	-0.050
33021R0	1868673	0.226	0.060	954461	0.140	0.044
33022R0	1750270	0.224	0.052	796407	0.137	0.019
33023R0	1450280	0.236	0.142	545984	0.148	0.088
33024R0	116964	0.159	0.021	82757	0.117	0.052
33025R0	2560468	0.229	0.067	1095585	0.145	0.063
33026R0	2669569	0.218	0.015	1124137	0.128	0.018
33027R0	2669173	0.237	-0.040	1080063	0.124	0.003
33028R0	6179718	0.230	0.068	3424498	0.137	0.011
33029R0	4464439	0.250	0.023	2328586	0.133	-0.025
33030R0	3335673	0.221	-0.056	2100518	0.127	-0.001
33031R0	11875612	0.296	-0.078	7195799	0.163	0.019
33032R0	15442471	0.234	0.060	9428838	0.158	0.016
33033R0	15251096	0.223	0.004	9157112	0.146	-0.023
33034R0	14056138	0.258	0.047	8148934	0.143	-0.001

航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
33035R0	14579083	0.275	-0.036	8710581	0.136	-0.016
33036R0	19538294	0.290	-0.105	12697823	0.161	-0.003
33037R0	16247329	0.288	-0.118	10452217	0.149	0.014
33038R0	14369014	0.320	-0.174	8982972	0.154	0.011
33039R0	14705696	0.272	-0.090	8970863	0.152	0.000
33040R0	17896439	0.311	-0.052	10449068	0.145	-0.003
33041R0	19356841	0.302	-0.023	11020761	0.164	0.034
33042R0	17655234	0.244	-0.022	11374520	0.134	-0.011
33043R0	17006503	0.282	-0.052	10196186	0.144	-0.003
33044R0	16324223	0.301	-0.056	9477832	0.159	-0.014
33045R0	17672536	0.291	-0.035	10569094	0.146	-0.010
33046R0	12966182	0.306	-0.043	7810290	0.139	-0.001
33047R0	10497062	0.316	0.009	6247987	0.146	-0.024
33048R0	12312291	0.280	-0.043	7351430	0.147	0.011
33049R0	14461693	0.238	-0.029	9369773	0.140	0.007
33050R0	11071956	0.229	-0.038	7409770	0.134	-0.015
33051R0	5702065	0.293	0.009	3220815	0.149	0.013
33052R0	23412658	0.246	0.127	14251008	0.146	0.015
33053R0	14618604	0.259	0.031	9011216	0.159	-0.004
33054R0	10801337	0.280	0.009	6548799	0.178	0.038
33055R0	9800364	0.243	0.054	5815013	0.156	0.016
33056R0	24550630	0.247	0.116	16629215	0.145	0.026
33057R0	6652867	0.239	0.008	3626469	0.164	0.022
33058R0	20643297	0.215	0.077	12550713	0.143	0.011
33059R0	17965698	0.154	0.004	12815521	0.075	0.009
33060R0	18773500	0.158	0.056	13826442	0.065	0.011
33061R0	15855814	0.150	-0.009	11256656	0.066	-0.005
33062R0	9146177	0.220	0.095	5713873	0.097	0.023
33063R0	4901779	0.237	-0.021	2850446	0.125	0.010
33064R0	4996700	0.300	0.051	2885103	0.168	0.001
33065R0	6485045	0.264	0.068	4106750	0.151	0.024
33066R0	6982623	0.264	0.107	4328045	0.155	0.007
33067R0	6894346	0.286	-0.033	4127991	0.159	0.026
33068R0	2190717	0.184	0.044	1433422	0.084	-0.002
33069R0	1110574	0.187	0.027	689064	0.095	0.028
33070R0	149768	0.321	-0.162	67211	0.143	0.038
33071R0	3007913	0.201	-0.008	1925596	0.088	-0.009
33072R0	3002642	0.256	-0.025	1701782	0.129	-0.017
33073R0	3053380	0.267	0.033	1972169	0.143	0.014
33074R0	3405623	0.284	-0.018	2309359	0.143	-0.016
33075R0	3798363	0.274	0.077	2409320	0.153	0.043
33076R0	4182136	0.281	0.113	2604224	0.158	-0.034
33077R0	4289370	0.287	0.042	2764478	0.157	-0.032
33116R0	7723081	0.238	-0.079	5104082	0.172	0.086
33119R0	4237790	0.271	0.037	2695423	0.163	0.056
33120R0	9068544	0.243	0.070	6359425	0.150	0.005
33121R0	12348826	0.264	-0.073	7969113	0.172	-0.019

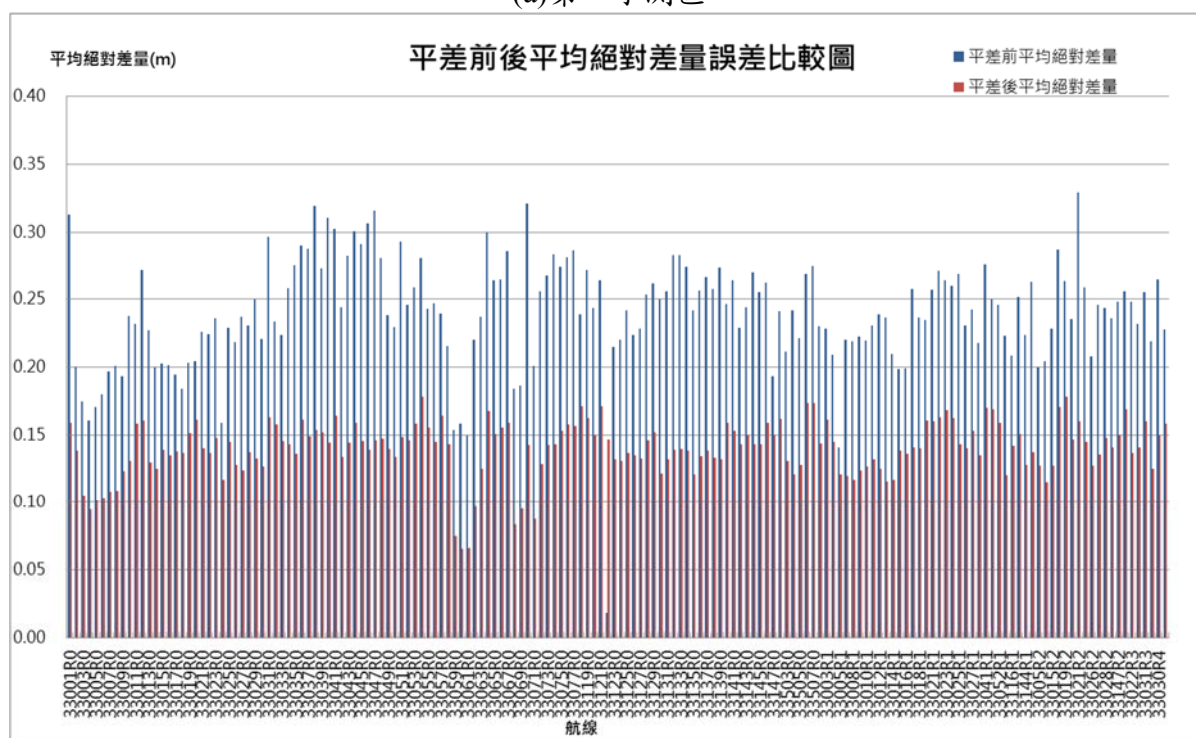
航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
33122R0	21759519	0.018	-0.063	12088622	0.147	-0.023
33123R0	17657987	0.215	-0.055	12419948	0.132	0.018
33124R0	13487683	0.220	0.026	8827422	0.131	-0.013
33125R0	10714664	0.242	-0.063	6953442	0.137	-0.008
33126R0	9879817	0.224	-0.013	6070123	0.135	0.003
33127R0	9437336	0.228	-0.030	5709805	0.133	-0.002
33128R0	8087101	0.253	-0.027	4851340	0.146	0.009
33129R0	6054505	0.262	0.026	3466282	0.152	0.001
33130R0	5682961	0.250	-0.033	3797062	0.122	0.012
33131R0	8488365	0.256	0.050	5442036	0.132	-0.014
33132R0	11000521	0.283	-0.016	6725803	0.139	0.008
33133R0	12835111	0.283	-0.088	8170586	0.140	0.013
33134R0	12444683	0.274	-0.018	8396773	0.139	0.008
33135R0	15223847	0.242	0.132	10552404	0.121	0.009
33136R0	16512089	0.256	0.059	11348318	0.135	-0.028
33137R0	15014381	0.266	0.094	9677289	0.138	0.013
33138R0	14190640	0.257	0.056	8920096	0.134	0.010
33139R0	14567031	0.273	-0.012	9255073	0.132	-0.022
33140R0	16506771	0.246	0.052	10467892	0.159	0.026
33141R0	18735709	0.264	-0.073	12142370	0.153	0.005
33142R0	16811407	0.229	0.036	10182928	0.143	-0.014
33143R0	12600658	0.244	-0.049	7505872	0.150	0.008
33144R0	3614360	0.270	0.069	10459	0.143	-0.004
33145R0	10016397	0.255	0.082	6852886	0.143	0.019
33146R0	12823657	0.262	-0.053	7837909	0.159	-0.002
33147R0	26967871	0.193	0.024	70777	0.150	0.089
33149R0	20339575	0.241	0.110	31111	0.162	0.014
33503R0	8280234	0.211	0.067	6151724	0.131	-0.018
33504R0	4216803	0.241	0.100	3183304	0.121	-0.012
33505R0	8872784	0.221	0.059	6549765	0.128	0.020
33506R0	3162567	0.268	0.028	1891080	0.174	0.003
33507R0	2598731	0.275	-0.010	1566099	0.174	0.030
33002R1	7419708	0.230	0.018	4522766	0.144	0.002
33003R1	18713843	0.228	-0.027	10654528	0.161	-0.027
33004R1	23243239	0.209	0.008	12845744	0.145	0.029
33005R1	15150495	0.141	0.045	8416942	0.121	0.022
33007R1	28762344	0.220	0.049	16919792	0.120	0.011
33008R1	24933606	0.219	0.012	14479854	0.117	0.008
33009R1	24656088	0.222	-0.065	14095385	0.124	-0.008
33010R1	21040492	0.219	0.016	12045745	0.127	-0.003
33011R1	17364303	0.231	0.002	9838823	0.132	0.000
33012R1	15823821	0.239	-0.060	9101291	0.125	0.000
33013R1	15517250	0.236	0.022	9354391	0.116	-0.003
33014R1	19420570	0.209	-0.002	11069798	0.117	0.006
33015R1	2579772	0.198	-0.055	924593	0.139	-0.014
33016R1	2224364	0.199	-0.004	875633	0.136	0.031
33017R1	13960862	0.258	-0.084	7685187	0.141	0.020

航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
33018R1	11660969	0.237	-0.111	5985003	0.141	0.022
33019R1	11699738	0.235	0.040	5213464	0.161	-0.005
33021R1	15239979	0.257	0.096	7841010	0.160	0.008
33022R1	13864279	0.271	0.088	7244936	0.163	-0.004
33023R1	15301924	0.264	-0.097	7257903	0.168	-0.056
33024R1	13940900	0.260	-0.089	6398042	0.163	-0.010
33025R1	14081951	0.269	-0.126	6834373	0.143	-0.021
33026R1	16156030	0.231	0.064	8181268	0.140	0.004
33027R1	12979801	0.242	-0.043	6896944	0.154	0.000
33040R1	3068434	0.218	0.057	1672258	0.135	0.029
33041R1	8151705	0.276	0.053	4542876	0.170	-0.023
33044R1	4852939	0.250	-0.046	2744879	0.169	-0.071
33052R1	7971346	0.246	-0.011	4574145	0.159	-0.026
33058R1	7671425	0.223	-0.016	4203258	0.120	-0.027
33116R1	6364623	0.208	-0.036	3996451	0.142	0.017
33119R1	4834147	0.252	0.073	2950103	0.151	0.011
33144R1	5373134	0.223	0.086	2868422	0.128	0.017
33147R1	6331532	0.263	0.121	754036	0.137	0.027
33005R2	31644912	0.199	0.018	18889394	0.127	-0.005
33006R2	29640406	0.204	0.006	17211059	0.115	-0.010
33015R2	22682875	0.228	-0.097	13173669	0.127	0.013
33017R2	2562794	0.287	-0.133	1239622	0.171	-0.045
33019R2	2433980	0.263	-0.093	1529602	0.179	-0.007
33020R2	3664973	0.235	-0.126	1609921	0.147	-0.053
33021R2	6206857	0.330	-0.165	3728820	0.160	-0.019
33022R2	5569188	0.259	-0.150	2578188	0.145	-0.020
33026R2	6402720	0.207	-0.074	3010533	0.128	-0.028
33027R2	4376622	0.246	-0.137	1899497	0.136	-0.027
33028R2	17130750	0.243	-0.015	9250453	0.148	0.011
33029R2	20589223	0.236	0.068	11678058	0.141	-0.025
33147R2	2716676	0.248	0.118	1176987	0.150	0.018
33020R3	2933764	0.256	-0.080	1789421	0.169	-0.031
33022R3	1174465	0.248	-0.030	646772	0.137	0.032
33030R3	15331165	0.232	0.054	10021062	0.141	-0.012
33031R3	11948788	0.255	0.013	6521671	0.161	0.045
33029R4	10290434	0.219	-0.036	5902214	0.125	-0.019
33030R4	7642093	0.265	-0.144	4636585	0.150	-0.064
33030R5	11939698	0.228	0.027	7763908	0.158	-0.042

* R1、R2 表示該航線第 2、3 次飛行，以此類推。粗體為交叉航帶。

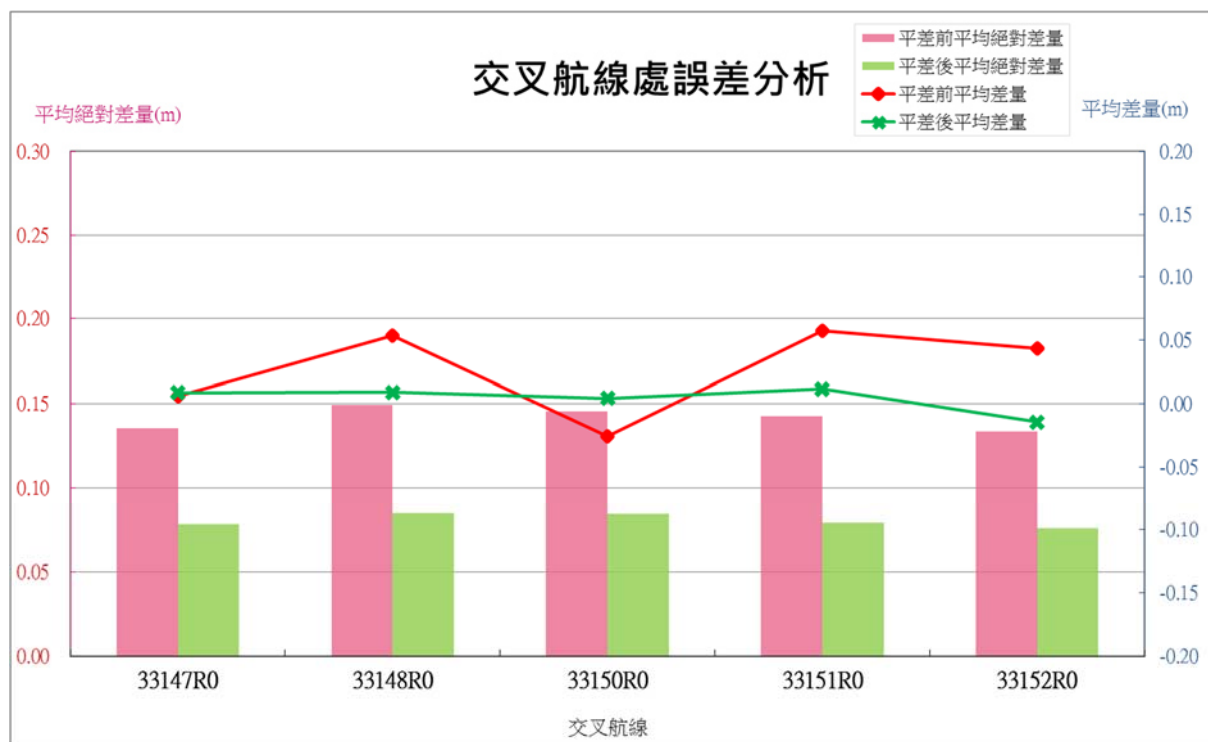


(a)第一子測區

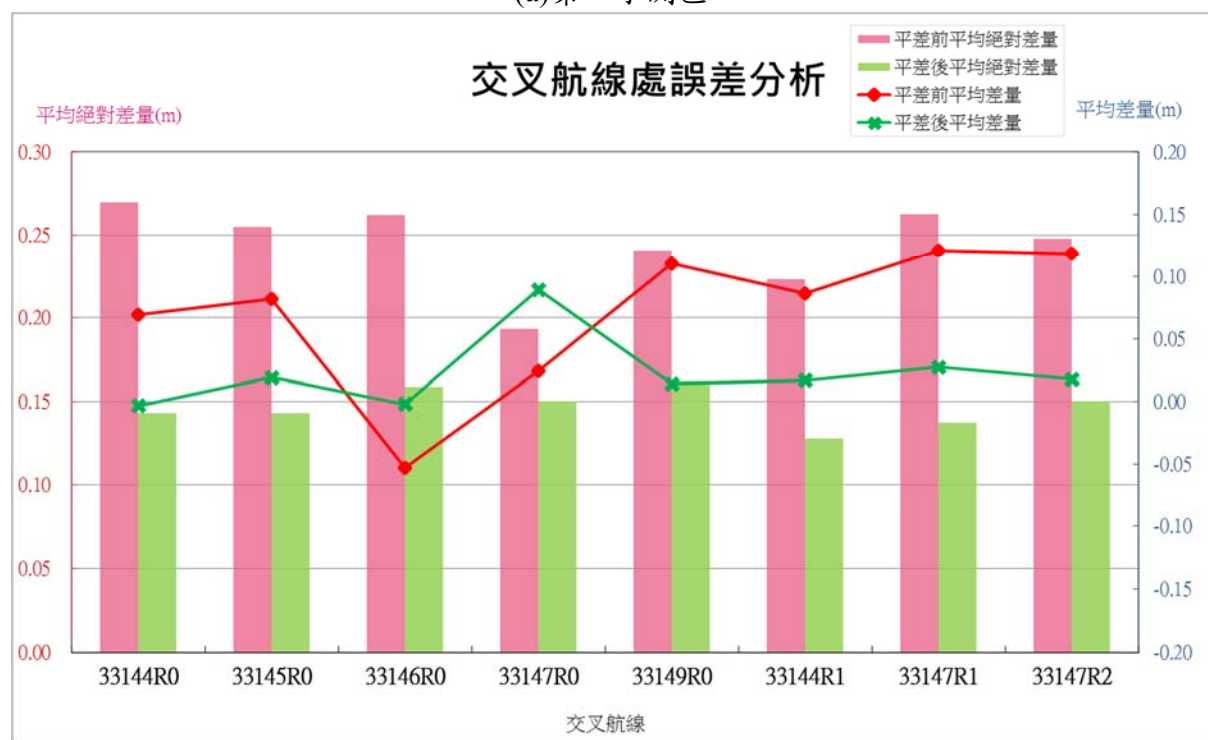


(b)第二子測區

圖 4.23 平差前後重疊處平均絕對誤差差量比較



(a)第一子測區



(b)第二子測區

圖 4.24 平差前後測區交叉航線重疊處差量統計分析圖

4-4-7 航帶平差自我檢核成果

於航帶平差過程中，另外可藉由 Optech LMS 軟體評估平差後之高程及

平面精度。因屋頂斜面和屋脊線為空間中三維向量，所以可利用其雷射點萃取共軛面、共軛線之分析功能，以屋頂為例示意如圖 4.25，其萃取各航帶重疊區域之屋頂面及屋脊線，以評估平差模式是否恰當，示意圖如圖 4.26 平差前後雷射點至共軛面差量減少，確定點雲平差成果之精度可進行後續分類作業。

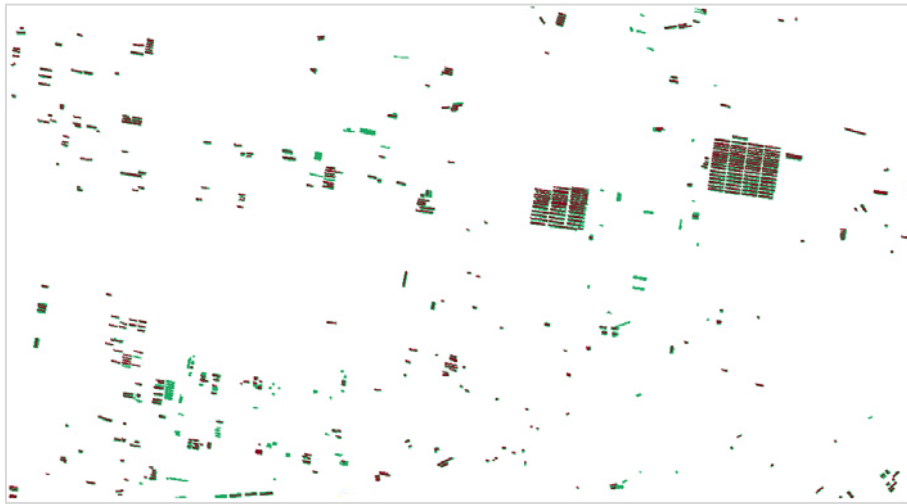
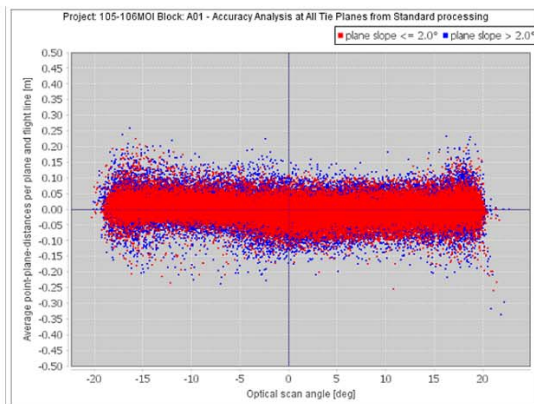
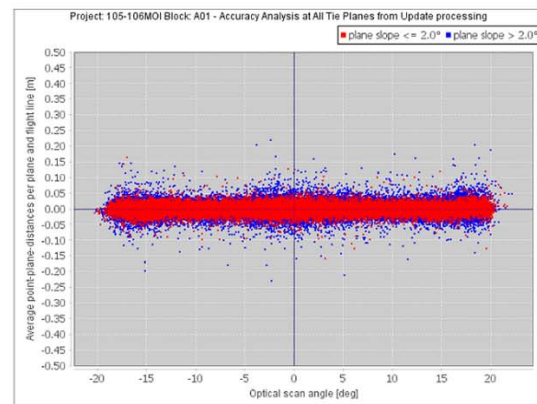


圖 4.25 航線重疊處屋頂共軛面與共軛線萃取示意圖



(a)平差前雷射點至共軛面差量分析



(b)平差後雷射點至共軛面差量分析

Roof lines analysis

Standard processing

Parameter	Dim	Mean	RMS	Minimum	Maximum
Delta East	[m]	-0.029	0.123	-0.561	0.689
Delta Height	[m]	0.038	0.093	-0.192	0.283
Delta North	[m]	0.041	0.170	-0.498	0.651
Horizontal Separation	[m]	0.039	0.210	-0.690	0.749

(c)平差前共軛線差量統計

Roof lines analysis

Refined processing

Parameter	Dim	Mean	RMS	Minimum	Maximum
Delta East	[m]	-0.001	0.075	-0.421	0.255
Delta Height	[m]	0.004	0.027	-0.076	0.096
Delta North	[m]	-0.002	0.121	-0.342	0.525
Horizontal Separation	[m]	0.001	0.142	-0.464	0.534

(d)平差後共軛線差量統計

圖 4.26 航線重疊處平差前後共軛線統計分析示意圖

1. 平面精度

航帶進行平差時引入平差高程控制點做為約制，高程精度部分將由分類後點雲產製 DEM 比對檢核點進行評估分析。平面精度部分則利用平差點雲成果和平差平面控制點即屋角特徵點進行比較分析，本計畫控制測量共完成 12 點平面控制點。因點雲無法如照片準確點出平面坐標，採用手動量測點雲屋角點多次後之平均值進行評估，差值統計如表 4.8 平面差量皆小於 45 公分。屋角特徵點施測現場照片以及點雲量測屋角點示意如圖 4.27。

表 4.8 平面控制點檢核點雲屋角點差值表(單位:公尺)

點號	平面控制點坐標		點雲量測屋角點坐標		E 方向 差量	N 方向 差量	平面差量
	E	N	E	N			
330010B	278910.851	2670819.274	278910.913	2670819.052	0.062	-0.222	0.230
330014B	280481.336	2674682.311	280481.468	2674682.21	0.132	-0.101	0.166
330015B	287827.936	2674682.002	287828.161	2674682.388	0.225	0.386	0.447
330025B	276075.375	2683049.573	276075.573	2683049.962	0.198	0.389	0.436
330026B	274982.839	2683313.926	274982.906	2683313.685	0.067	-0.241	0.250
330027B	277027.223	2686322.985	277027.17	2686323.252	-0.053	0.267	0.272
330029B	278825.306	2688768.465	278825.341	2688768.379	0.035	-0.086	0.093
330030B	280024.461	2690010.843	280024.624	2690010.962	0.163	0.119	0.202
330031B	281082.445	2691202.293	281082.741	2691201.995	0.296	-0.298	0.420
330036B	281092.163	2698802.119	281091.785	2698801.996	-0.378	-0.123	0.398
330040B	286821.504	2702653.723	286821.658	2702653.797	0.154	0.074	0.171
330042B	289558.504	2706821.245	289558.901	2706821.387	0.397	0.142	0.422
平面差量最大值		0.447		平面差量標準偏差		0.126	
平面差量最小值		0.093		平面差量均方根差		0.316	
平面差量平均值		0.292					



(a)平面控制點量測遠照



(b)平面控制點量測近照



(c)點雲和正射影像俯視圖

(d)平面控制點與點雲剖面圖

圖 4.27 點雲平面精度檢核示意圖

2. 重疊區精度評估

平差成果之點雲除經過商業軟體各式統計報表分析外，提送監審方前先以監審方自行開發之程式，統計 100×100 平方公尺為單位統計點雲高程差量，評估平差後高程差異量，確定平差成果合乎合約要求。

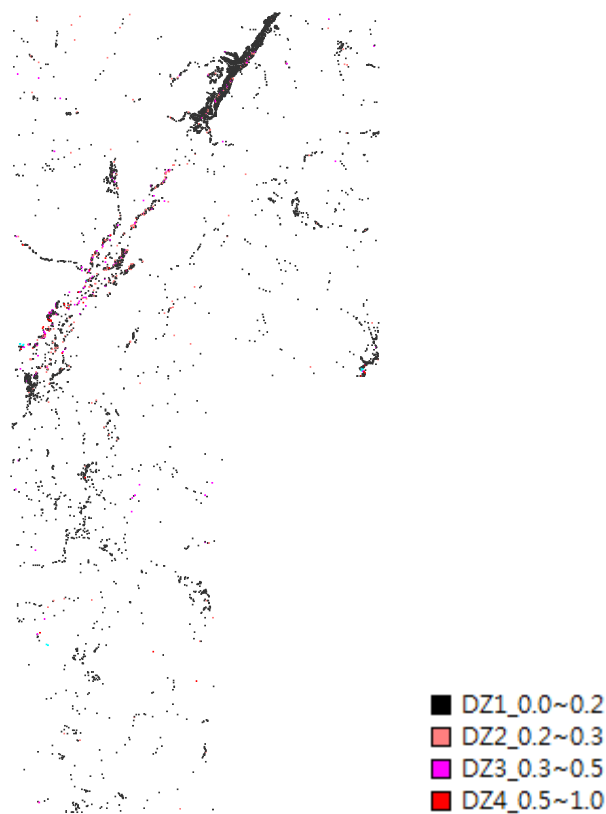


圖 4.28 監審方軟體航帶平差高程差異量檢核圖

如檢核圖圖 4.28 所示，深灰色圖例即高程絕對差量小於 20 公分，其他大於 20 公分處進行檢查，位置多為常於短時間內變遷之田地及河流地形等，本計畫飛航掃描長達 4 個月，導致此類地形於各架次間點雲高程不一致，並非平差未完善。擷取說明範例如圖 4.29。

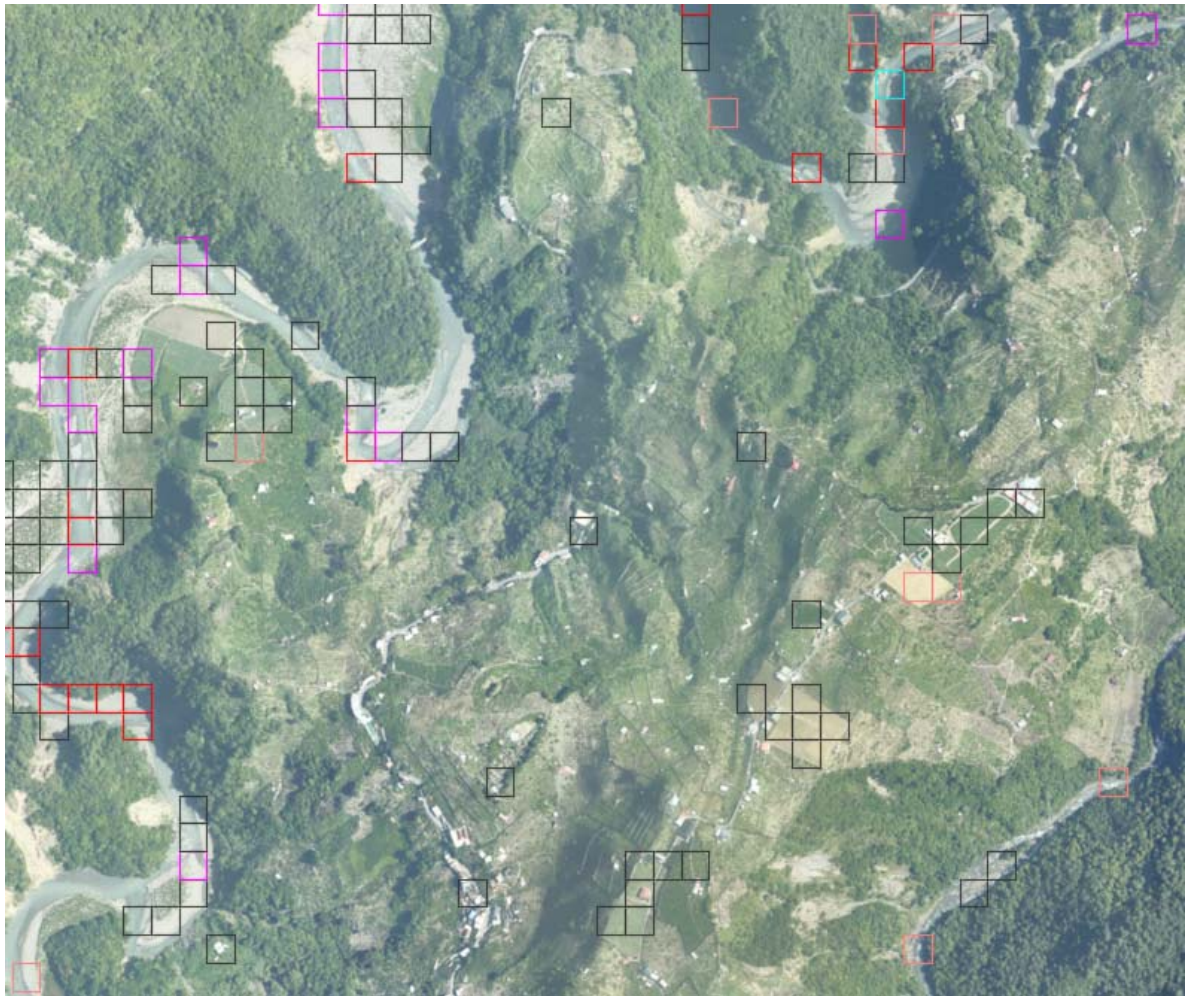


圖 4.29 平差後航帶間高差較大區域示意圖

§4-5 DEM/DSM 製作

4-5-1 點雲編修流程

1. 點雲自動過濾

原始 LiDAR 數據為不規則離散測點，製作數值地表模型(DSM)可採用經過過濾雜點之所有反射數據(All points)組成 DSM 規則網格，數值高程模型(DEM)的製作，則需執行濾除與分類的步驟，將測點分類成地面點(Ground)與非地面測點(Non-ground)。

本計畫中自動過濾工具是採用商用軟體 TerraScan 工具模組，TerraScan 處理點雲過濾的程式為使用(Axelsson, 2000)文獻的演算法，其基本原理是先選擇區域內的低點為種子點，資料結構採用 TIN 模型，組成「起始地面」，然後逐點判斷，判斷候選測點，位置落入種子點構成的 TIN 三角面內，計算候選測點與三角面的垂直距離(iteration distance)以及離最近三角面頂點的夾角(iteration angle)，當垂直距離小者，表示候選測點離「起始地面」貼近，當垂直距離小於臨界值以內者視為地面點(iteration angle 判斷亦同理)，逐次將候選測點判斷成地面點或地物點，漸進更新加密新的「起始地面」，直到所有點判斷完成(圖 4.30)。

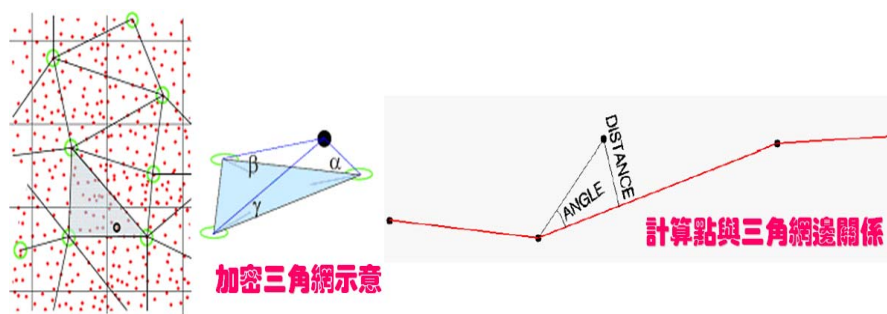


圖 4.30 Iteration angle 和 Iteration distance 示意圖 (Axelsson, 2000)

將全區已平差處理後之點雲資料，利用 TerraScan 軟體進行各種不同類別之點雲資料分類，再利用分類後之資料進行過濾與整合，分別產出僅含地表面及地形面之非地面測點與地面測點點雲資料。商業軟體 TerraScan 對點雲資料進行過濾，該軟體分類地面點的演算法引用不規則三角網 (Triangular Irregular Networks, TIN)來表示地表面，過濾處理會隨著地形坡度要變換門檻值，以及要隨著植被的特徵變換門檻值，達到參數自適性調整。

2. 人工點雲編修

分類後的空載 LiDAR 地面點雲資料，可能因雜訊或其他地物干擾，而有非預期的反射資訊出現，如地面之突然單一突出物或不合理坑洞...等，並確定在本計畫規範的密度、重疊率與高程差可達標準；將分類後的點雲資料展示於螢幕上，利用 TerraScan 及 TerraModeler 軟體中之點位編修功能，交互觀察三維表面模型與點雲剖面，將不合理或不符合定義的點位刪除或進行編輯(圖 4.31)。人工編修點位過程亦可配合地面影像，如航空照片

或高解析度衛星影像等，依不同之地表覆蓋給予不同自動過濾參數再次分類及人工編修，以確保點位分類之正確性，示意圖如圖 4.32，編修前大範圍地面點不足，編修後可呈現地形變化。

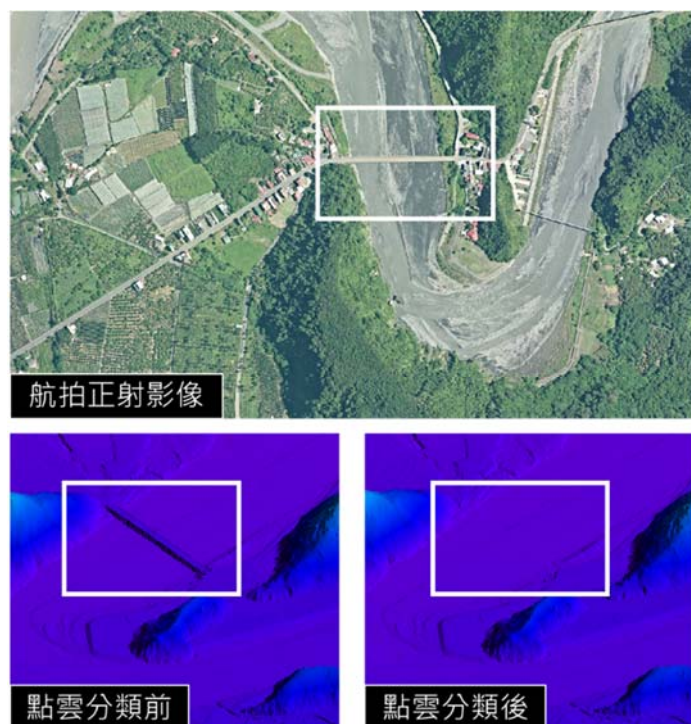


圖 4.31 橋樑之點雲分類示意圖

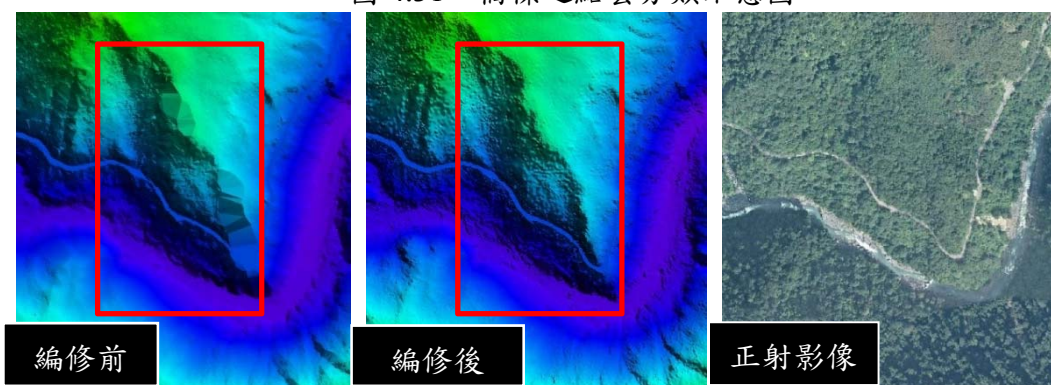


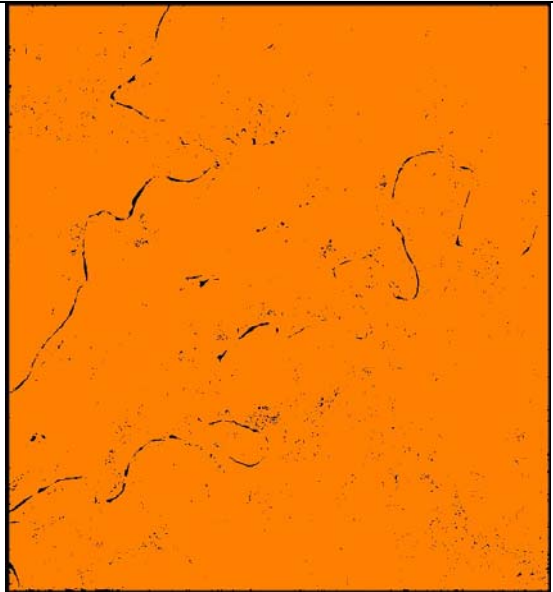
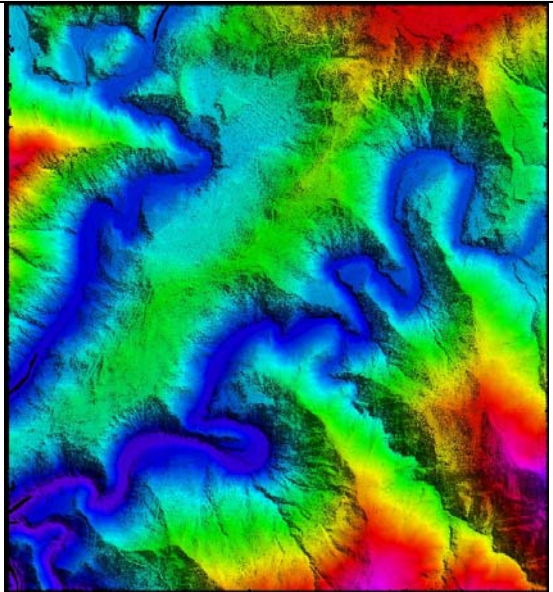
圖 4.32 編修檢核修正示意圖

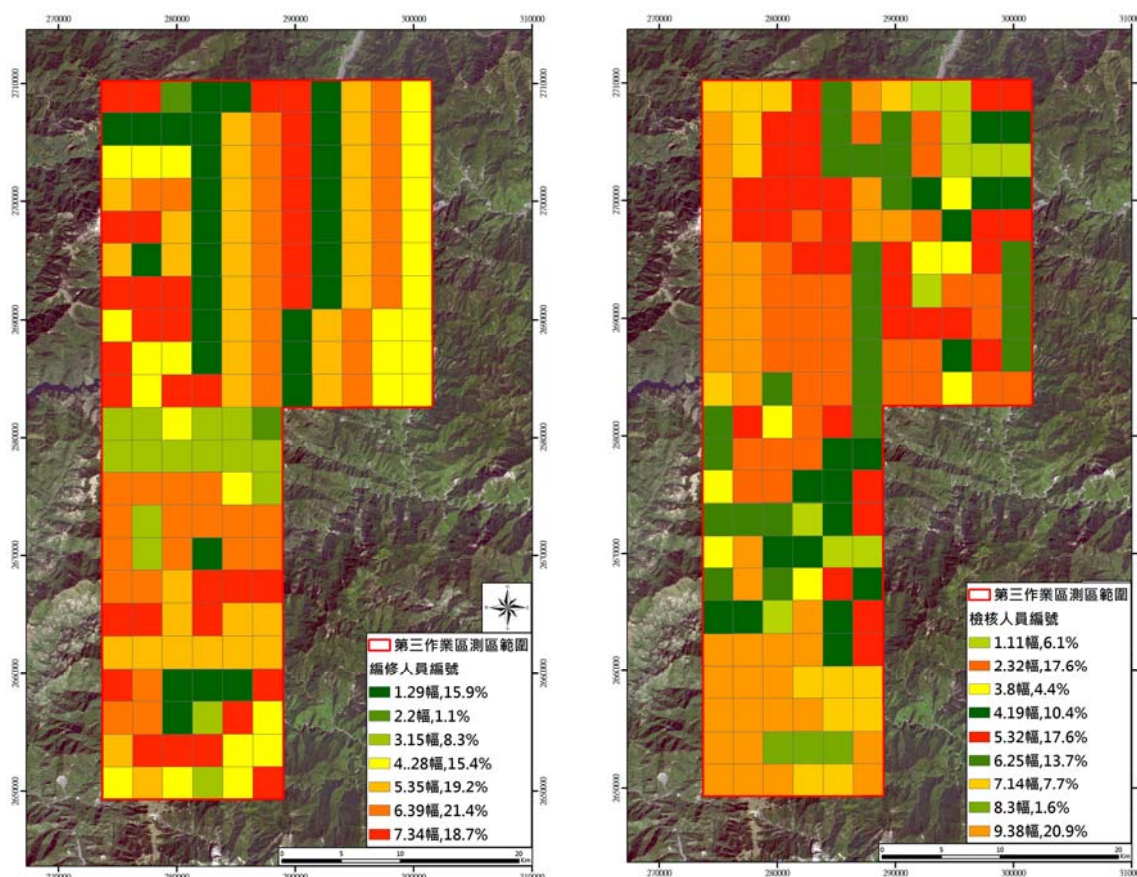
4-5-2 點雲編修狀況

延續本公司多年光達點雲編輯經驗，並針對監審方修正建議滾動式更新點雲濾除重點及注意事項，且藉由定期會議討論提升作業人員濾除能力，並對於濾除能力進行評估，確認濾除人員能因應各式地形。於點雲編修流程中，濾除人員需先檢查點雲資料正確，並確認自動分類之雲點、明顯雜點已分類完全，再進行主要非地面點濾除工作，並於圖幅提交檢核人員前

進行自檢並填表如表 4.9。點雲編修與品管檢核人員分布繪製於圖 4.33，目圖幅中超過 95%為直接合格或僅修正一次，其餘圖幅修正兩次以上大多數為，監審方複查時進一步提供改善建議。

表 4.9 點雲編修自檢紀錄表範例

點雲編修紀錄表			
圖幅位置	臺中	航線標號	15,16,52,56,58,1010,1011,1012,1013,1014,1017,2015
圖號	96211072	總點雲數	74,797,688
資料產製人員	許湘榕	完成日期	2019/10/03
圖幅審查人員	曾秋源	審查日期	2019/10/09
1.不合理點雲檢查與濾除			
A. ☐ 雲塊	B. ☐ 低點	C. ☐ 系統錯誤點	E. ☐ 缺航線
2.地面點非地面點人工編修		地面點點數	12,529,336
A. ☐	建物已濾除	G. ☐	非永久性堆積物已濾除 (土推、垃圾、工程、地基)
B. ☐	堤防或實心道路未濾除 (含土堤、魚塭及土梗等)	H. ☐	地面點確實分類(分類成果良好或 穿透率良好)
C. ☐	橋梁、涵洞已濾除(含高架)	I. ☐	無接邊線
D. ☐	不合理點雲已濾除(高點或 低點)	J. ☐	無平差問題、點雲完整(無雲洞)
E. ☐	地面點編輯完整(足以表現 地形)	K. ☐	水域點雲分類正確
F. ☐	植被已濾除	L. ☐	墳墓與大石頭編輯完整
3.地面點縮圖		4.地形渲染圖	
			
備註:無			



(a)點雲編修人員分布圖

(b)點雲檢核人員分布圖

圖 4.33 點雲編修與檢核人員分布圖

4-5-3 數值高程模型成果

根據內政部所公布之「高精度及高解析度數值地形模型測製規範(草案)」，數值地形模型可分為下列二種，其定義如下(內政部，2003)：

1. 數值高程模型(Digital Elevation Model，DEM)

描述不含植被及人工建物之地表自然地貌起伏的數值模型。此模型是以規則網格式離散點所組成。為了便於資料的管理及後續應用，在此我們定義離散點是等間距的方格點。

2. 數值地表模型(Digital Surface Model，DSM)

表示地表可見光無法穿透的最上層覆蓋物的數值模型。與數值高程模型不同之處，乃在表示建物及長年生植被的最上層覆蓋物。此模型亦是以規則網格式離散點所組成，在此我們同樣定義離散點是等間距的方格點。

經過分幅、分類與編輯處理後之地表面與地形面點雲資料，藉由記錄的高程資料，依實際需求產製 1×1 公尺整數網格的 DEM/DSM 資料，以 TerraScan 及 TerraModeler 軟體，將地面點與地表覆蓋資訊分別組成地面高程與地表覆蓋面，再利用 SCOP++內插模式進行成果產製，並進行作業區內部接邊，軟體介面如圖 4.34，測區成果如圖 4.36 及圖 4.35。

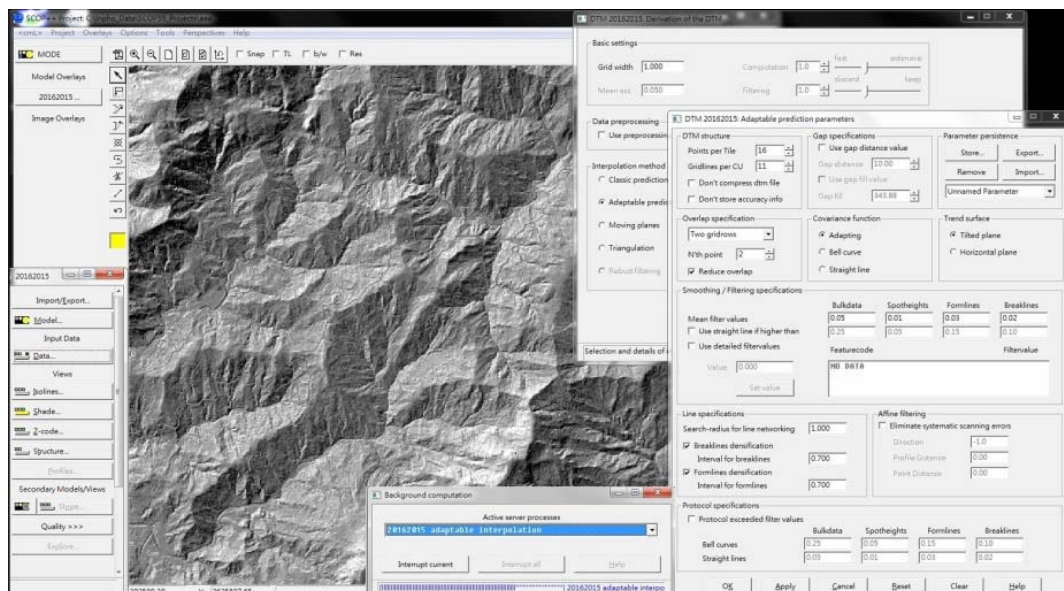


圖 4.34 SCOP++軟體介面圖

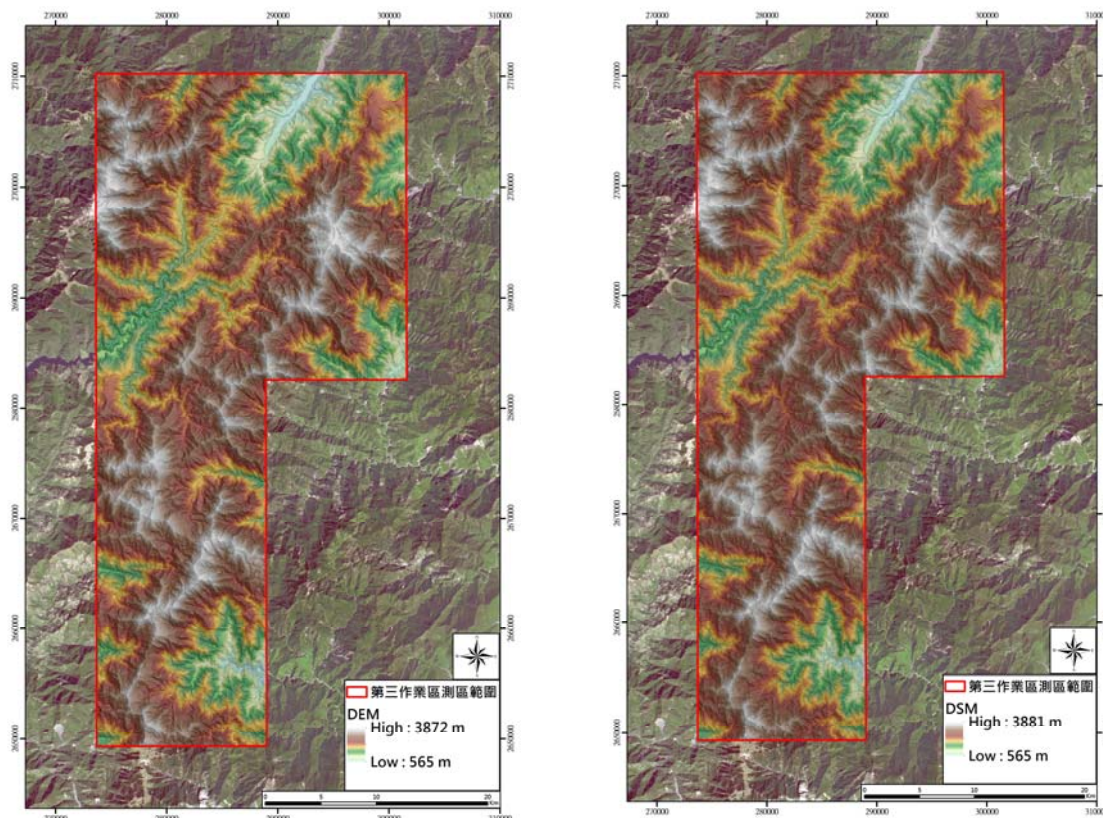
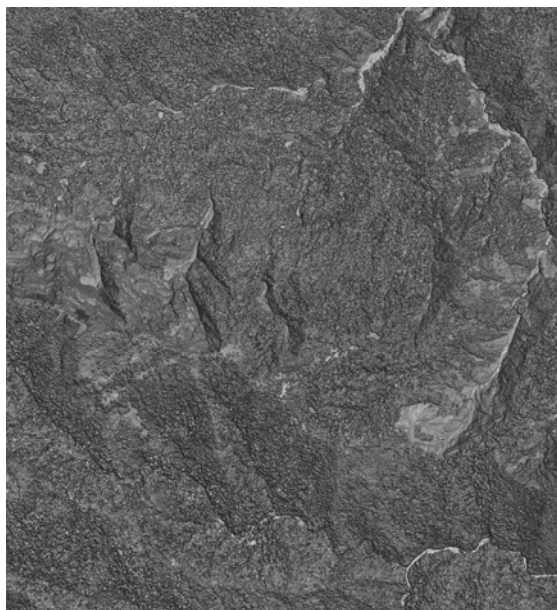


圖 4.35 測區 DEM/DSM 成果圖



(a) DSM 山區成果(96211049)



(b) DEM 山區成果(96211049)



(c) DSM 平地成果(96211016)



(d) DEM 平地成果(96211016)

圖 4.36 DEM/DSM 山地及平地成果圖

於各作業區成果產製後進行外部接邊，依合約規定因掃描時間差距造成地形明顯變遷(如：河谷、崩塌地等)，無法製作一致之地形成果，應將不一致範圍圈選成向量檔案，經認定合理後，保留該處範圍存查其中高程落差過大地區將不強制接邊，責任接邊圖幅如章節 5-5。

4-5-4 大地起伏化算

全球定位系統提供的坐標，其高程為橢球面起算的橢球高(Ellipsoid Height)，但一般民生用途所需的高程資料是以大地水準面起算的正高

(Orthometric Height)，故需要將橢球高轉為正高以提供與其他資料的整合應用。本計畫採用內政部公告之 103 年大地起伏模式(Geoid model)，由監審方統一進行正高化算。

§4-6 檢核點蒐集與作業

4-6-1 測量作業方式

透空良好之檢核位置採用 e-GNSS 定位系統進行 VBS-RTK 即時動態定位，有效率地測量出每個檢核點三維坐標。可以省下靜態測量所需的內業計算時間，且可以達到公分級的精度。於透空不良之檢核位置，例如林地或是密林，使用傳統測量方式進行導線測量。導線點上擺設全測站經緯儀並後視一已知方向，以全測站經緯儀測角、測距方式，測量附近的檢核點角度及距離並記錄之。將所記錄得的資料利用角度、距離的相對關係，可以反算出各檢核點的坐標。以此類推，直到測區內所有的地物皆已施測完畢並解算出坐標。供後續雷射點雲或 DEM 高程精度檢核使用。

1. 檢核點蒐集

本次計畫地形包含低海拔及中高海拔測區，將分別對兩種地形進行 DEM 檢核作業。依據合約要求，每種土地覆蓋分區至少要有 30 個地面測量檢核點，地形類別與土地覆蓋分區如表 4.10 及表 4.11。各檢核點應儘可能均勻分布於各圖幅，地面檢核點為平坦坡度，並避開地形斷線特徵處 1 公尺以上。檢核點蒐集區域規劃於測區平均選取 4 區進行 DEM 檢核。沿路針對可測得的地物增加測點數量，增加點位數量。並於測量時記錄選測檢核點所在位置之地形類別及平均植物高度，供計算高程精度標準參考。各檢核點施測範例如圖 4.37，DEM 檢核作業分布如圖 4.38。

表 4.10 地形類別列表

地形分類	分類編碼	定義
平地	P	地表坡度在 5 度以下的地區
丘陵	H	地表坡度在 5 度～15 度之間的地區
山地	M	地表坡度在 15 度～30 度之間的地區
陡峭山地	C	地表坡度在 30 度以上的地區

表 4.11 土地覆蓋分區列表

低海拔及河川洪泛溢淹地區		中高海拔山區	
分類名稱	分類編碼	分類名稱	分類編碼
裸露地	B	裸露地	B
矮植被	L	矮植被	L
植生地	V	植生地	V
林地	F	林地	F
都會區	U	密林地	D
濕地	W		
說明			
裸露地—以任一點為中心，半徑在 10 個網格間距的範圍內其受植被覆蓋之面積少於 25%者。			
植生地—以任一點為中心，半徑在 10 個網格間距的範圍內其受植被覆蓋之面積介於 25%~50%者，則該範圍內視為植生地。其中周圍植生高度不超過 1 公尺之草生地、矮樹群、茶區...等土地覆蓋分類			
林地—以任一點為中心，半徑在 10 個網格間距的範圍內其受樹木覆蓋之面積介於 50%~75%者。			
密林地—以任一點為中心，半徑在 10 個網格間距的範圍內其受植被覆蓋之面積大於 75%，且範圍內樹冠平均高度達 DEM 或 DSM 規範中誤差之 4 倍以上者。			



(a)裸露地



(b)矮植被



(c)植生地



(d)密林



(e)林地



(f)濕地



(g)都會區



(h)橫斷面

圖 4.37 各類別檢核點實測照片

2. 橫斷面(cross section)檢核測量

於低海拔及河川洪泛溢淹測製地區：需施行橫互航線的地面檢核剖面，檢核剖面至少有 60 個檢核點，剖面長度總和需超過 40 公里。中高海拔山區測製地區：需施行橫互航線的地面檢核剖面，檢核剖面至少有 40 個檢核點，剖面長度總和需超過 30 公里。本次計畫 DEM 檢核作業中斷線檢核分布如圖 4.38。

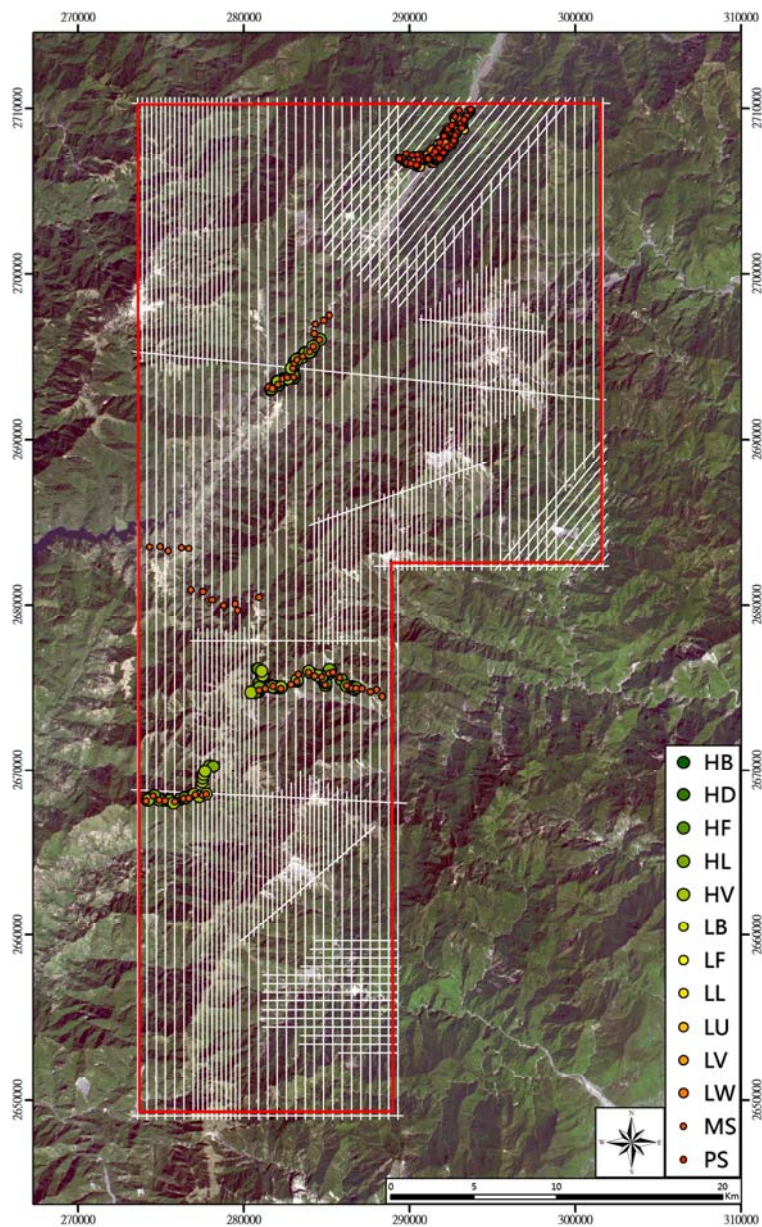


圖 4.38 檢核點分布圖

4-6-2 精度評估標準與作業

DEM 之品質依地形類別及地表植被覆蓋情形而定，高程精度標準以基

本精度加上地形類別及地表植被覆蓋情形之精度調整參數而得，計算公式如下：

$$\sigma = a + b + c \cdot t \quad (\text{式 4.1})$$

式中 a 為基本精度；b 為地形類別調整參數；c 為地表植被覆蓋情形調整參數；t 為地表植被平均高度。

本計畫定義 a 為 0.25 公尺。地形類別調整參數 b(公尺)及地表植被覆蓋情形調整參數 c(無單位)，如表 4.12 矮植被之地表植被覆蓋情形調整參數 c 比照密林地；都會區及濕地之地表植被覆蓋情形調整參數 c 比照裸露地。

表 4.12 地形類別與地表植被覆蓋類別調整參數對照表

地形類別 b		植被覆蓋類別 c	
平地	0.0	裸露地	0.0
丘陵	0.2	植生地	0.2
山地	0.5	林地	0.3
陡峭山地	1.0	密林地	0.5

依據合約規範，DEM 精度檢核遵照內政部 2005 年「LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)」進行檢核作業程序，但此草案業於 101 年度進行部分修正為「空載光達測製數值地形模型標準作業規範(草案)」。在新草案中 DEM 檢核部分，僅在 DEM 初步高程值檢驗上一律使用 1.4σ 檢驗高程較差絕對值，不再區分裸露地(1.4σ)與非裸露地(2σ)的差別。由於草案修訂後比原先合約規範更為嚴謹，因此本計畫精度評估與分析採用 101 年度「空載光達測製數值地形模型標準作業規範(草案)」進行後續外業檢核點的評估作業。

4-6-3 精度評估與分析

1. 基本精度分析

對於點雲成果進行基本精度分析，利用檢核點附近之三個最鄰近地面網格點內插其高程後與此檢核點高程比較而得出其較差值(即成果高程減檢核高程)。輸出資訊有「平均高差」為所有用以計算點高差量平均值；「最大、最小高差」分別指所有計算的點位中高差量之最小與最大值；「平均絕

對高差」為用以計算點高差絕對值的平均值；標準偏差公式(式 4.2)如下：

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (\text{式 } 4.2)$$

而誤差分佈的離散程度之均方根誤差所使用之公式為式 4.3：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (D_i)^2}{n}} \quad (\text{式 } 4.3)$$

其中 σ 為規範值，而 D_i 為檢定值 X_i 與擬真值 Y_i 之差值。

透過了解測區內檢核點的最大高差、最小高差以及均方根誤差，可以知道資料離散程度及準確度。此種初步檢驗考慮到每個樣本在統計上都具有代表性，基本精度評估之描述性統計值如下表。

表 4.13 低海拔各類土地覆蓋分區基本精度分析表(單位:公尺)

土地覆蓋類型	檢核點數	平均高差	最大高差	最小高差	平均絕對高差	標準偏差	均方根誤差
裸露地	35	0.042	0.189	-0.180	0.087	0.10	0.11
林地	30	0.168	0.428	-0.416	0.268	0.25	0.30
矮植被	33	0.070	0.299	-0.316	0.135	0.15	0.16
都會區	34	0.009	0.124	-0.111	0.054	0.06	0.06
植生地	37	0.088	0.295	-0.176	0.123	0.13	0.15
濕地	32	0.053	0.192	-0.186	0.087	0.09	0.11
橫斷面	78	0.024	0.198	-0.152	0.078	0.09	0.09

表 4.14 中高海拔各類土地覆蓋分區基本精度分析表(單位:公尺)

土地覆蓋類型	檢核點數	平均高差	最大高差	最小高差	平均絕對高差	標準偏差	均方根誤差
裸露地	31	0.076	0.197	-0.133	0.097	0.08	0.11
林地	30	0.017	0.443	-0.397	0.227	0.26	0.26
密林	33	0.045	0.372	-0.373	0.146	0.18	0.18
矮植被	34	0.128	0.251	0.002	0.128	0.07	0.15
植生地	31	0.155	0.304	-0.075	0.161	0.10	0.18
橫斷面	60	0.035	0.189	-0.145	0.065	0.07	0.08

*數值皆取到小數點以下 3 位，第 4 位以四捨五入計算，唯標準偏差與均方根誤差取到小數點下 2 位，第 3 位以四捨五入計算

透過圖 4.39~圖 4.51 呈現成果高程(Z2)與檢核高程(Z1)之較差，測區不同土地覆蓋類型之高程較差都符合不同類型之精度規範。以高海拔裸露地為例，其精度規範區間為紅色折線以及綠色折線間，其裸露地之高程較差以折線圖呈現，顯示高程差值在精度規範間，不合格點數為零，高程較差之均方根誤差通過正規化誤差指標 1.4σ 檢驗。而其他不同土地覆蓋類型較差值皆介於精度規範(σ)內，皆可通過 1.4σ 檢驗。於橫斷面部分以圖例顏色區隔不同條斷面，由序號小至大分別對應自南到北之各橫斷面，各橫斷面檢核點精度成果由西往東依序排列。本計畫檢核點於嚴苛之地形如矮植被、林地及密林皆表現良好。

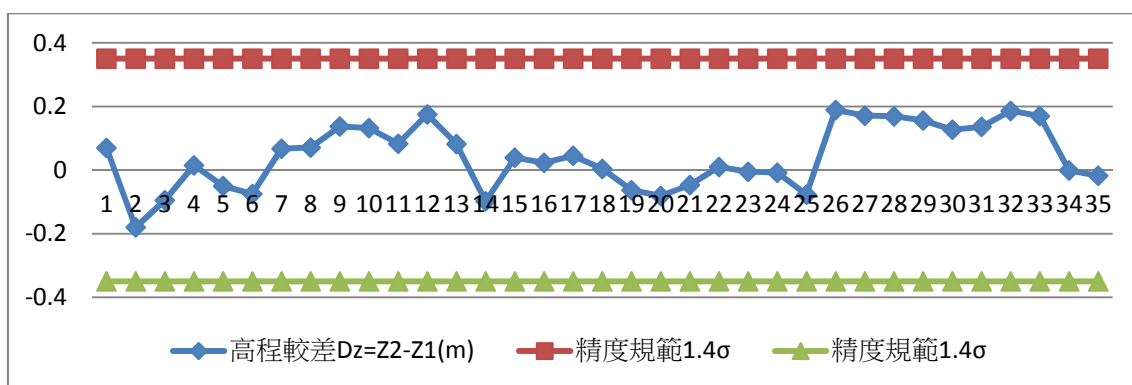


圖 4.39 低海拔之裸露地(B)精度成果圖

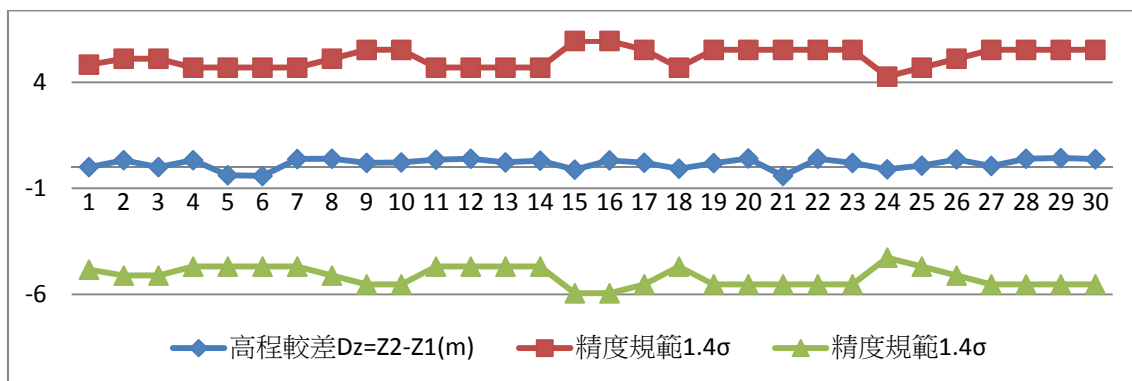


圖 4.40 低海拔之林地(F)精度成果圖

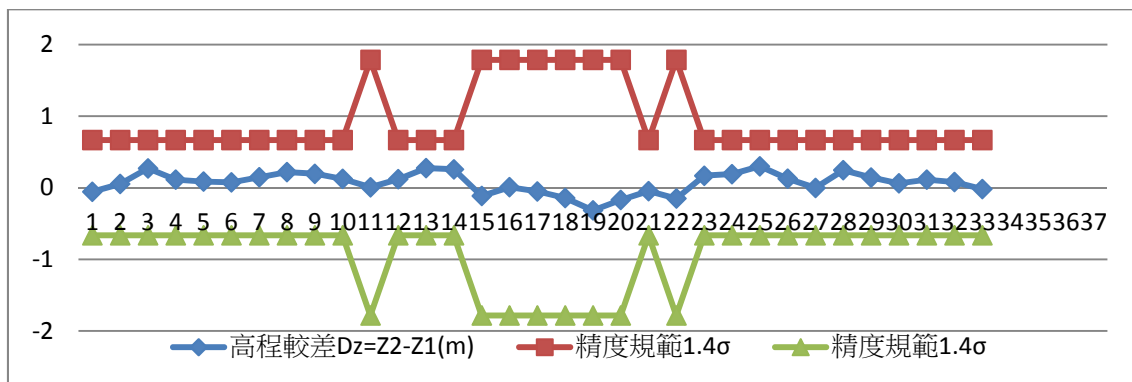


圖 4.41 低海拔之矮植被(L)精度成果圖

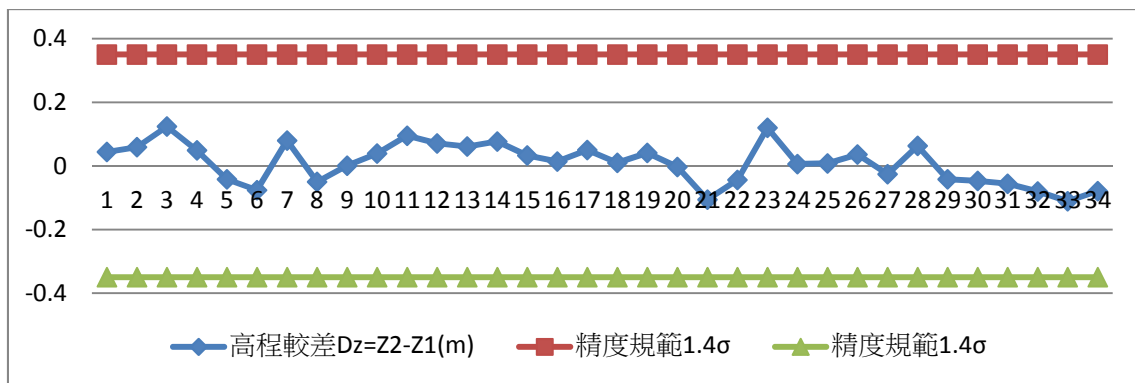


圖 4.42 低海拔之都會區(U)精度成果圖

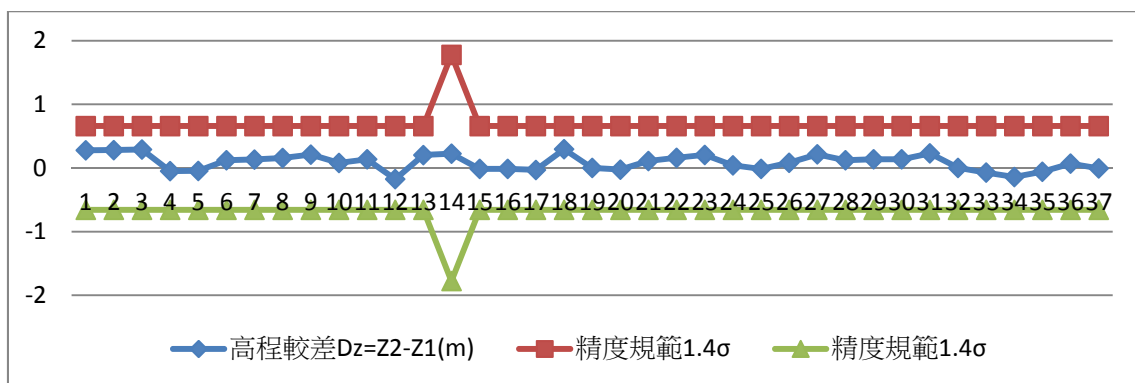


圖 4.43 低海拔之植生地(V)精度成果圖

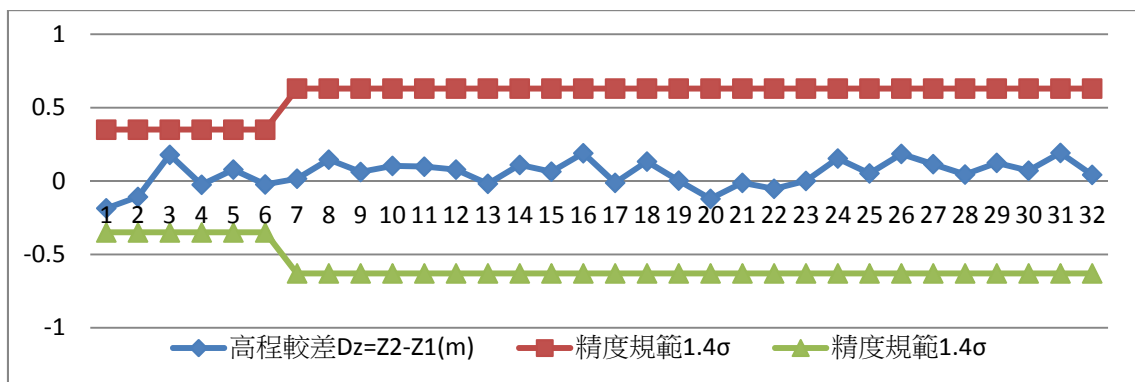


圖 4.44 低海拔之濕地(W)精度成果圖

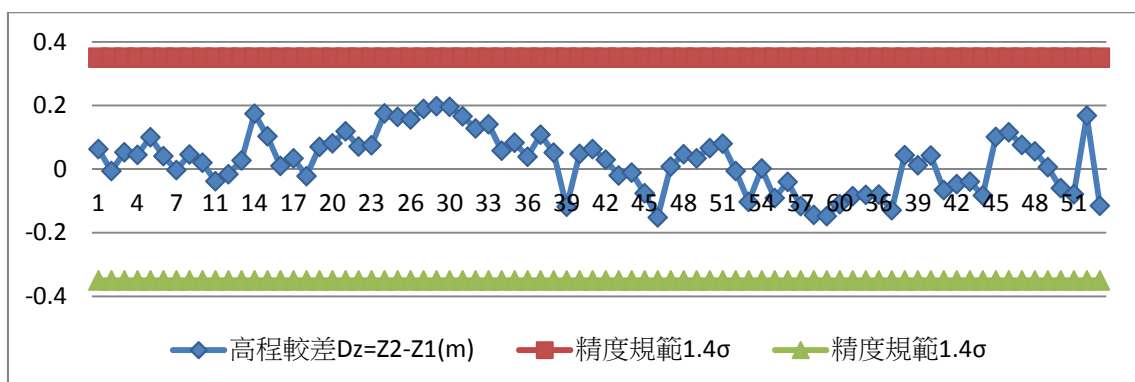


圖 4.45 低海拔之橫斷面(S)精度成果圖

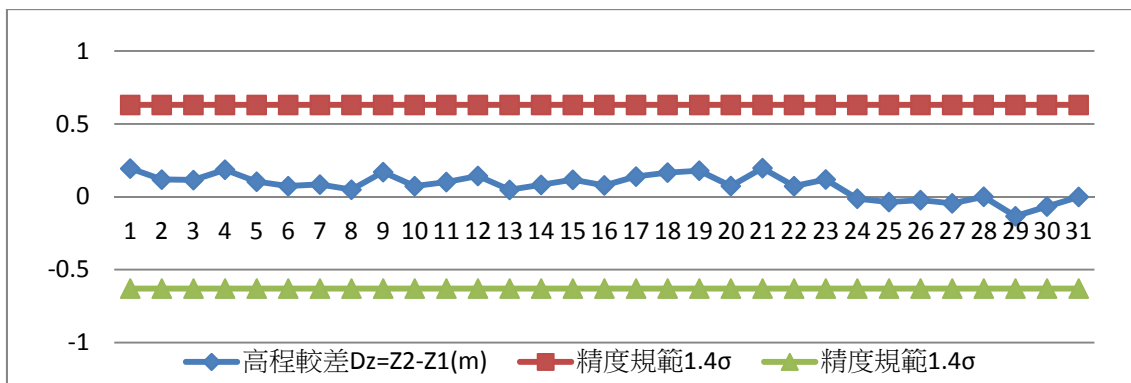


圖 4.46 中高海拔之裸露地(B)精度成果圖

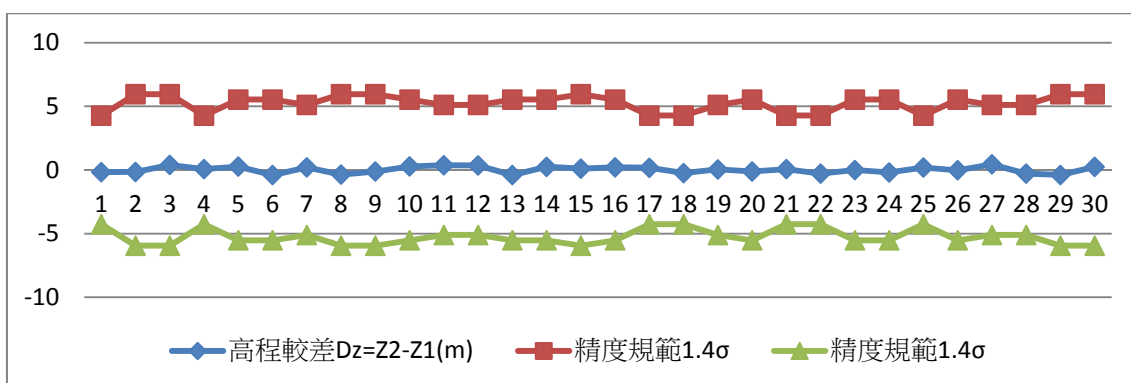


圖 4.47 中高海拔之林地(F)精度成果圖

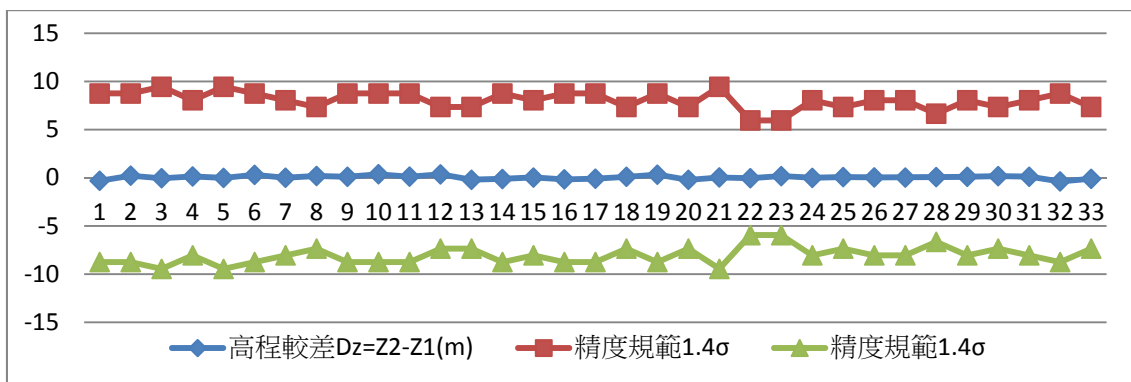


圖 4.48 中高海拔之密林(D)精度成果圖

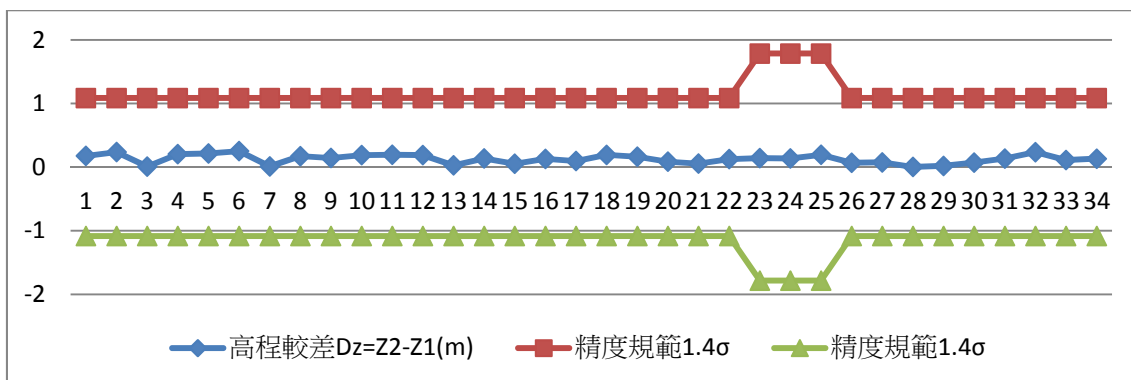


圖 4.49 中高海拔之矮植被(L)精度成果圖

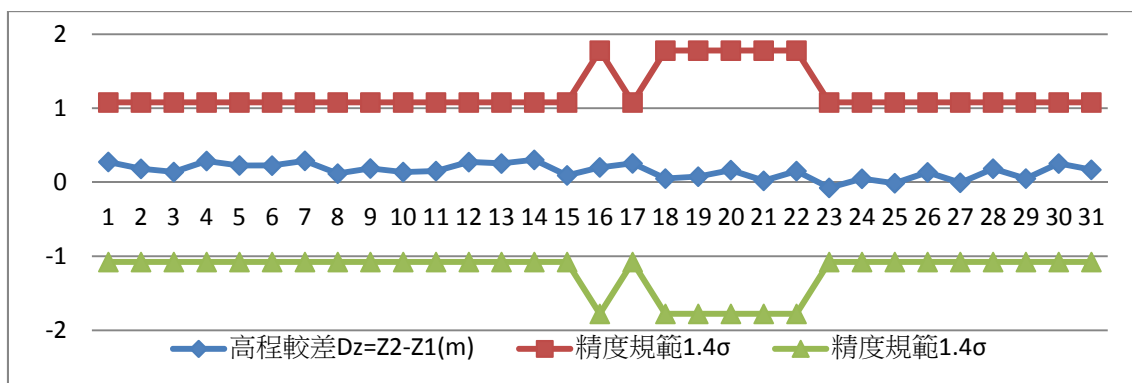


圖 4.50 中高低海拔之植生地(V)精度成果圖

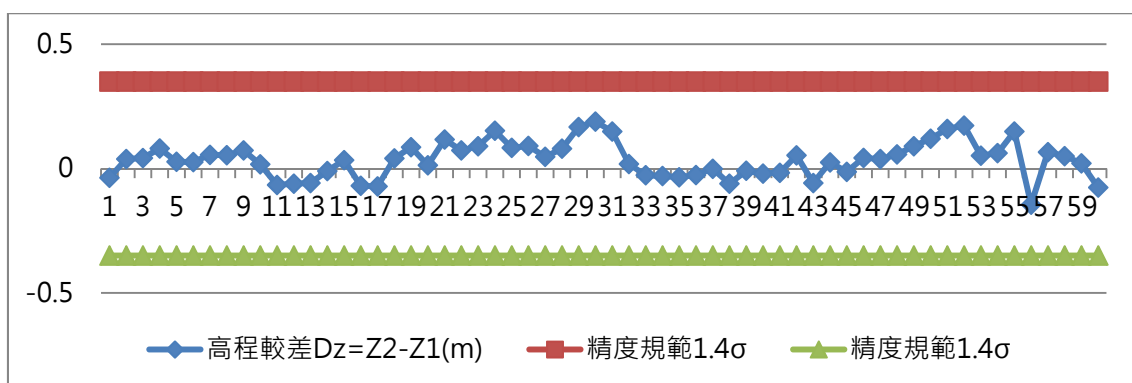


圖 4.51 中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖

2. 中央集中趨勢分析(Central Tendency)

集中趨勢顯示一組資料中某種特性共同趨勢之量數，因其可反映資料觀測值之集中位置，故又稱位置量數(location measure)。在無誤差之下，資料會呈現對稱的常態分布(即平均值等於中位數，樣本分布偏度為零)，故通常可採用平均數、中位數作為衡量指標。而依據高程較差的平均數和中位數之誤差大小可發現，算數平均數大者，則可能存在系統性誤差。根據表 4.15 數值精度中央集中趨勢表分析，了解測區內高海拔與低海拔之各種土地覆蓋的高差值，其算數平均值與中位數雖不相等，但其差量皆在 6 公分內，唯有低海拔林地之誤差量較大，以統計意涵而言，雖然中央集中趨勢在於初步檢驗是否可能存在系統性誤差問題，以實務之經驗，此點雲之成果誤差量已為低誤差，甚至在部分類別其誤差大小幾近為 0，代表此測量值已近乎真值。為理解其誤差分布的統計意涵，最後在使用獨立檢核檢地抽樣評估瞭解其誤差在統計上的表現。

表 4.15 低海拔數值精度中央集中趨勢分析表(單位:公尺)

土地覆蓋類型	平均值(M1)	中位數(M2)	誤差大小(M1-M2)
裸露地	0.042	0.039	0.003
林地	0.168	0.223	-0.055
矮植被	0.070	0.086	-0.016
都會區	0.009	0.012	-0.003
植生地	0.088	0.110	-0.022
濕地	0.053	0.063	-0.010
橫斷面	0.024	0.036	-0.012

註:數值皆取到小數點以下 3 位，第 4 位以四捨五入計算

表 4.16 中高海拔數值精度中央集中趨勢分析表(單位:公尺)

土地覆蓋類型	平均值(M1)	中位數(M2)	誤差大小(M1-M2)
裸露地	0.076	0.082	-0.006
林地	0.017	0.056	-0.039
密林	0.045	0.052	-0.007
矮植被	0.128	0.135	-0.006
植生地	0.155	0.164	-0.009
橫斷面	0.035	0.039	-0.004

註:數值皆取到小數點以下 3 位，第 4 位以四捨五入計算

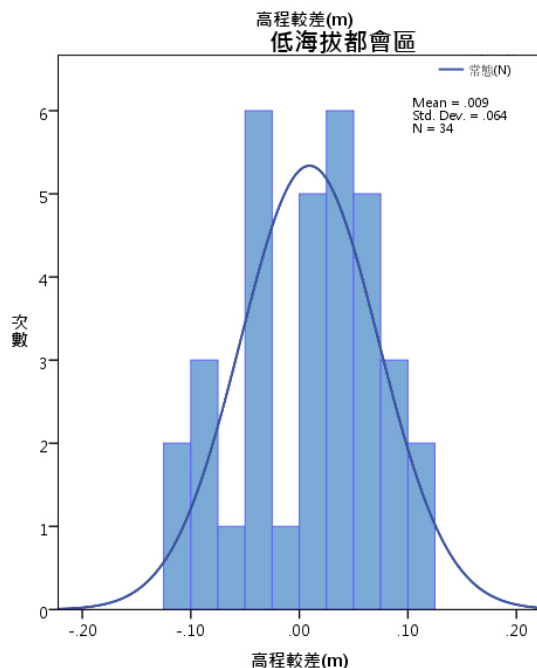
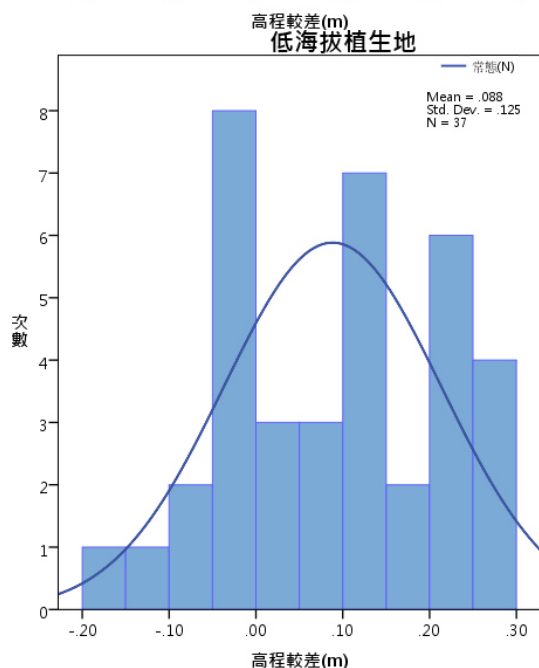
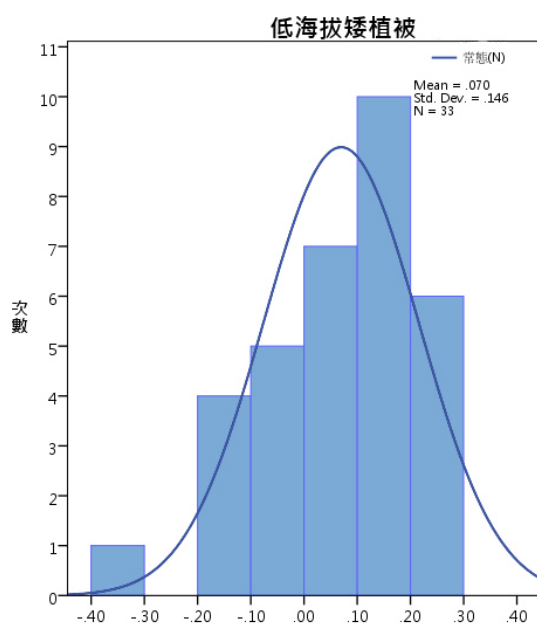
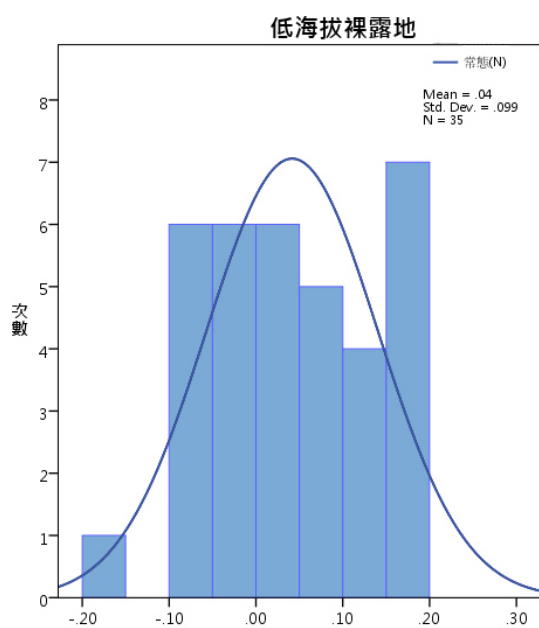
3. 數值精度偏態(Skewness)檢驗

在使用一組資料分析與統計前，應對資料特性有充分足夠瞭解，以確認數據資料能滿足基本假定，才能確保統計的推論正確性，當假定不成立時(資料的偏態異於常態時)，將致使參數估計之標準偏差(standard error)與顯著性檢定(t-value)造成偏誤，嚴重時會導致估計結果的顯著性檢驗失敗(Hu & Bentler, 1995; West, Finch, & Curran, 1995)。

依「內政部 LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)」中，所要檢查之偏態重點為測量誤差是否導致在直方圖上出現嚴重的雙峰圖形。本研究區域偏態檢驗各由高海拔與低海拔之不同土地覆蓋區域組成，其高程較差的數值之偏態如表 4.17，由結果顯示研究區內皆未出現較大偏態現象，且經由了解各種土地覆蓋類型的誤差直方圖(圖 4.52 及圖 4.53)中並未發現有雙峰圖形出現，可知此部分結果亦符合內政部草案所要求合理檢驗範圍內。

表 4.17 檢核點數值精度偏態檢驗表(單位:公尺)

低海拔			中高海拔		
土地覆蓋類型	檢核點數	偏態 (skewness)	土地覆蓋類型	檢核點數	偏態 (skewness)
裸露地	35	-0.156	裸露地	31	-0.604
林地	30	-1.146	林地	30	-0.149
矮植被	33	-0.580	密林	33	-0.256
都會區	34	-0.175	矮植被	34	-0.207
植生地	37	-0.107	植生地	31	-0.450
濕地	32	-0.551	橫斷面	60	0.053
橫斷面	78	-0.057			



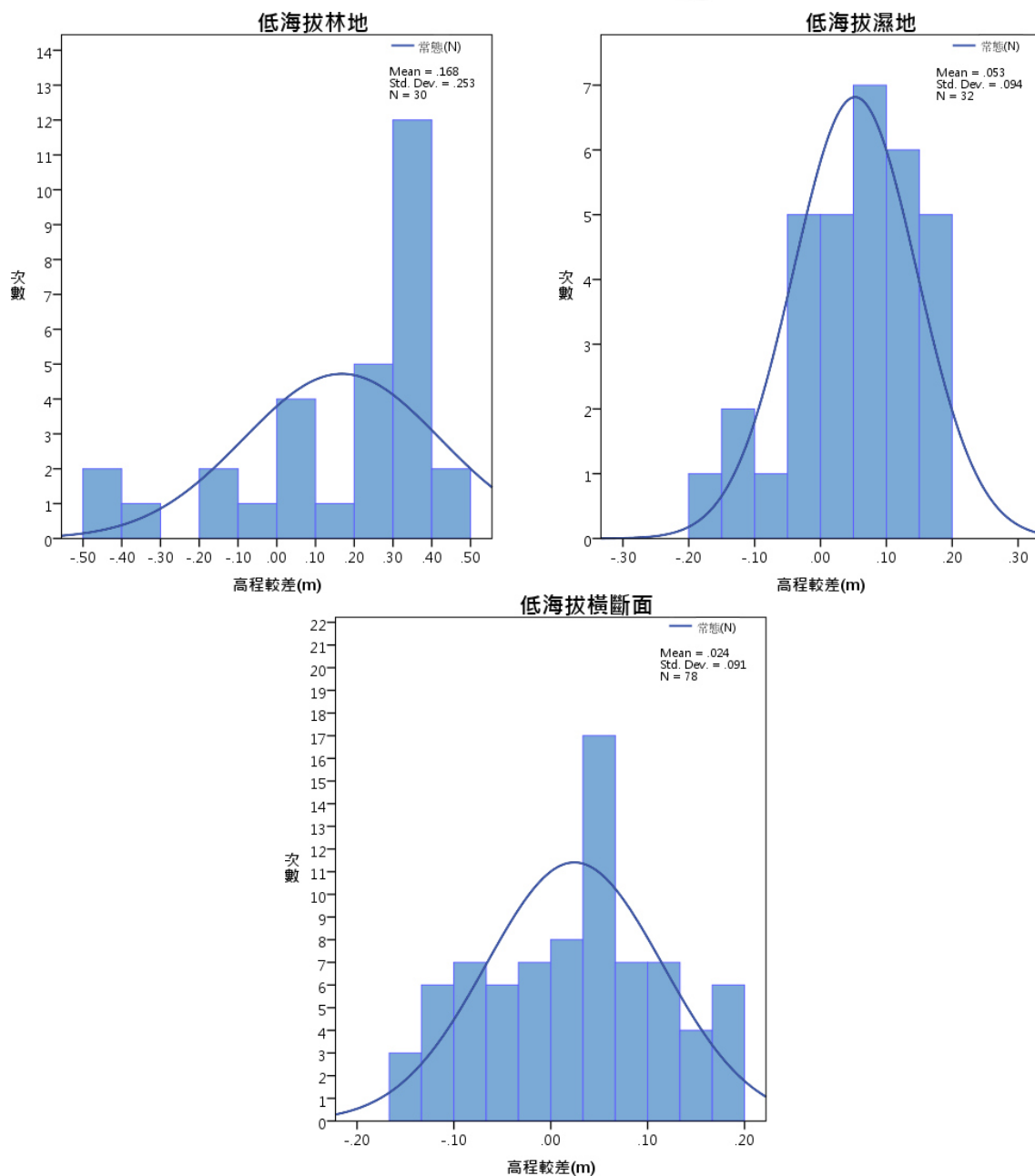


圖 4.52 低海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺)

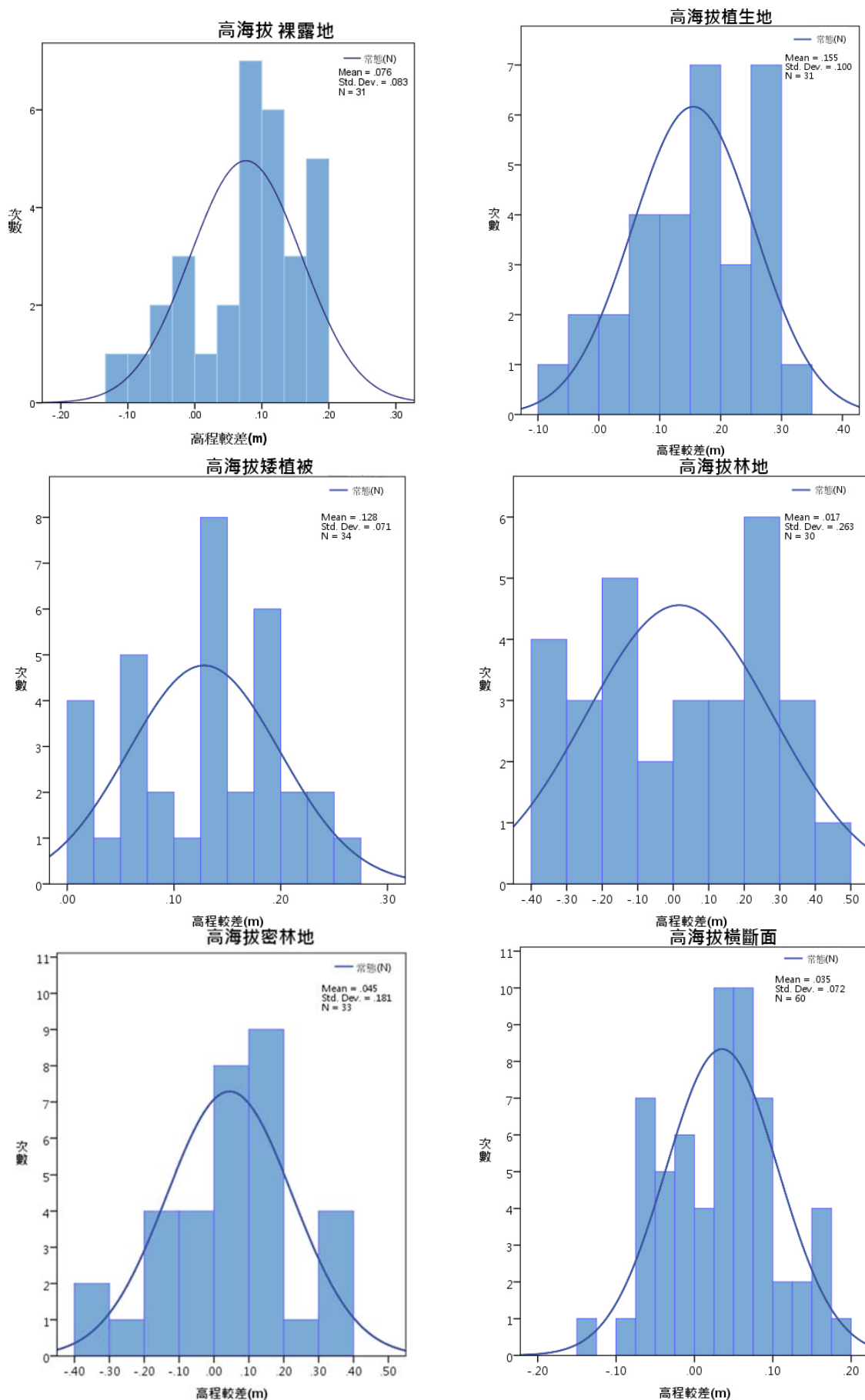


圖 4.53 中高海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺)

4. 檢驗值與被檢驗值假設檢定

除了敘述性統計的呈現，類別變項的資料可進一步使用卡方檢驗(chi-square test)來進行推論統計檢定，其檢驗原理在於檢驗樣本觀察次數與理論母群體的次數(或百分比)之間是否有顯著的差異。而卡方檢驗可針對不同群體或不同變項其分配、兩變項關聯性、同質性等關係，進行不同方法之檢驗。本研究在此使用規範內之卡方分配進行假設檢定，以了解檢驗值與被檢驗值之間的關係。

本測試區 DEM 精度評估，對其測區內每種土地覆蓋施測內容之檢核高程和成果高程進行卡方分布的檢定，以了解其成果的數值是否可視為擬真值。以內政部空載測製數值地形模型標準作業規範(101 年)之檢定方式進行。

計算由檢定值與被檢定值的差值計算差值變方的估值(式 4.3)

$$S_D^2 = \frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n-1} \quad (\text{式 4.3})$$

由檢定值中誤差 σ_c (若無理論值，則只得用估值)及被檢定值規範的中誤差 σ ，依誤差傳播計算差值標準偏差的理論值 σ_D (式 4.4)

$$\sigma_D^2 = \sigma_c^2 + \sigma^2 \quad (\text{式 4.4})$$

其中因檢核點係由 VBS-RTK 測設，因此設定檢定值中誤差 σ_c 為高程精度 20 公分，其中 σ 為內政部規範容許精度值。則可對下列運算式(式 4.5)進行檢定， α 為檢定的顯著水準(內政部規範中之 95%信賴水準區間)。

$$\frac{(n-1)S_D^2}{\sigma_D^2} < \chi_{n-1, \alpha}^2 \quad (\text{式 4.5})$$

基於上述數學運算式，目的是為了對差值的標準偏差進行檢定，對於檢定值(檢定值與被檢定值的差值計算之差值變方的估值)與被檢定值(差值標準偏差理論值)之研究假設如下：

$$\begin{aligned} H_0 : S_D^2 &\leq \sigma_D^2 \\ H_1 : S_D^2 &> \sigma_D^2 \quad (\text{式 4.6}) \end{aligned}$$

經由(式 4.5)進行最後檢驗，其結果如上式表示 $\frac{(n-1)S_D^2}{\sigma_D^2} \leq \chi_{n-1,\alpha}^2$ ，則代表接受 H_0 ，也就是檢定值與被檢定值的差值計算之差值變方的估值(S_D^2)與其理論值(σ_D^2)沒有太大顯著性差異。

根據卡方檢定結果(表 4.18)，可發現各種土地覆蓋類型之檢核高程本身的誤差以及檢定值中的誤差相較，皆為接受 H_0 ，代表本測區之高海拔與低海拔之不同土地覆蓋類型之 DEM 具有良好的精度。

表 4.18 低海拔 DEM 數值適合度檢驗

土地覆蓋類型	S_D^2	$\frac{(n-1)S_D^2}{\sigma_D^2}$	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	檢驗
裸露地	0.010	4.602	21.664	接受 H_0
林地	0.064	0.137	17.708	接受 H_0
矮植被	0.021	1.464	20.072	接受 H_0
都會區	0.004	2.001	20.867	接受 H_0
植生地	0.016	2.200	23.269	接受 H_0
濕地	0.009	1.519	19.281	接受 H_0
橫斷面	0.008	8.991	57.786	接受 H_0

表 4.19 中高海拔 DEM 數值適合度檢驗

土地覆蓋類型	S_D^2	$\frac{(n-1)S_D^2}{\sigma_D^2}$	$\chi_{n-1,\alpha}^2$	檢驗
裸露地	0.007	0.364	18.493	接受 H_0
林地	0.069	0.141	17.708	接受 H_0
密林	0.033	0.031	20.072	接受 H_0
矮植被	0.005	0.247	20.867	接受 H_0
植生地	0.010	0.396	18.493	接受 H_0
橫斷面	0.005	4.494	42.339	接受 H_0

第五章 正射影像製作

本計畫採用空載光達掃瞄作業搭配數位相機同時拍攝，達成高效率拍攝進度，產製地形資料以協助後續運用與製作，針對本次攝影之作業規範需求及前述針對各作業區域特性所規劃之飛航航線，進行航空攝影工作，正射影像製作流程如下。

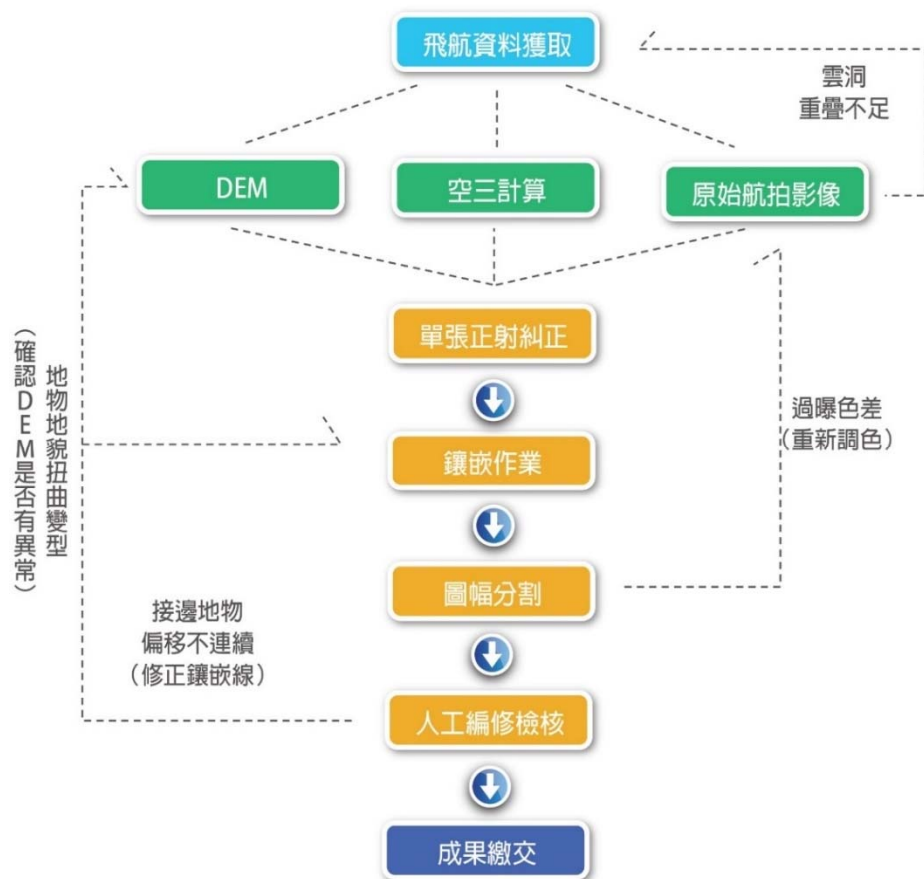


圖 5.1 正射影像製作流程圖

§5-1 作業區航拍工作

按航線規劃於光達掃瞄同時進行作業區域航拍工作，本計畫採用 Phase One IXU-RS-1000 數位相機，相幅為 11608×8708 像元，符合規範要求。校正飛航已於 108 年 2 月 26 日執行，並於同年 4 月 3 日通過中像幅像機校正(報告編號 F201812170301)，校正報告書如附件五所示。飛航規劃即考量航拍攝影參數，使航攝像片時航向重疊大於 60%，側向重疊大於 50%，影像地面解析度優於 25 公分，皆符合合約規範。攝影設備藉由 GNSS/IMU 的輔助，機上操控人員可隨時掌握飛航情形，評估蒐集之資料品質及影像重

疊率等資訊，面對任何突發狀況，都能立即應變。為獲得最大的掃瞄面積和最多有效之航拍影像，航線規劃時掃瞄時間參考中央氣象局天後預報資料。飛航待命期間，監看測區基站即時影像和搭配天氣雲圖把握天氣晴朗能見度佳之天氣進行掃瞄。

本計畫累積航拍共 30 架次，合計拍攝 15,162 餘張影像，經處理後，有效影像為 12,558 張，進行後續處理。以航空攝影涵蓋圖展示各單張像片於測區位置如圖 5.2。

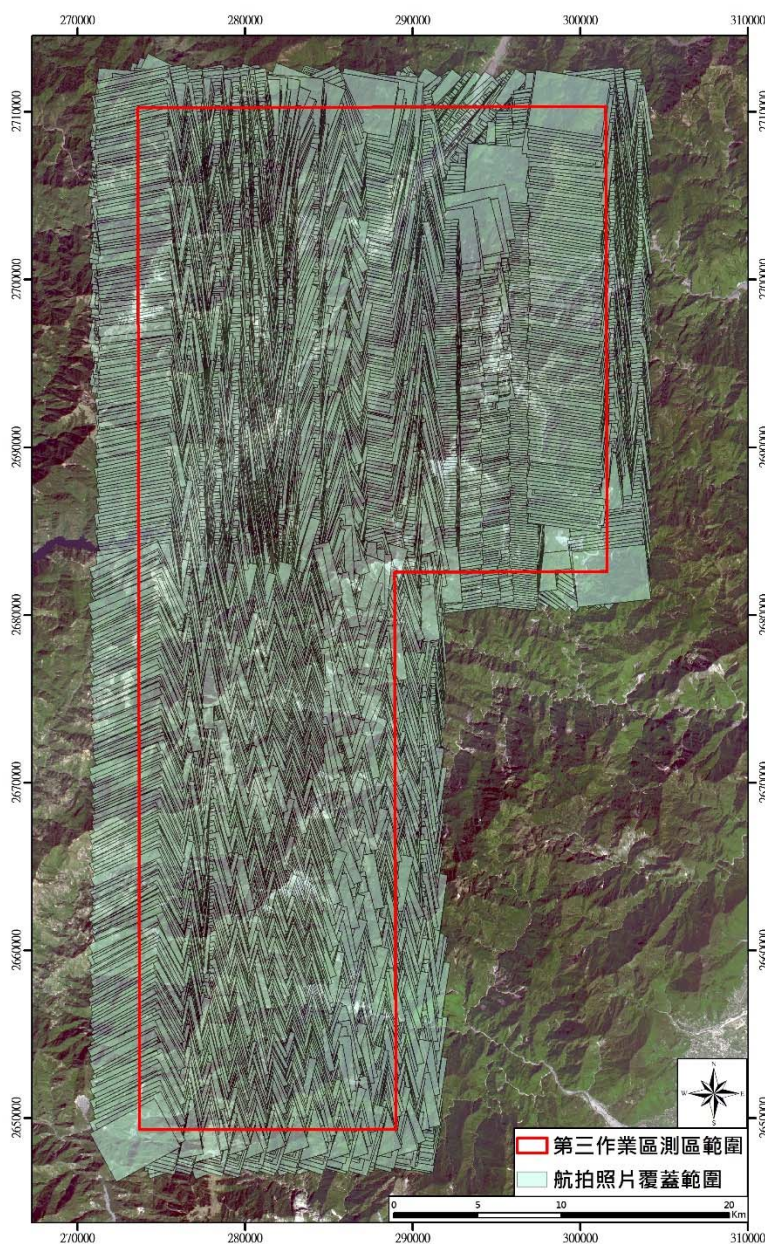


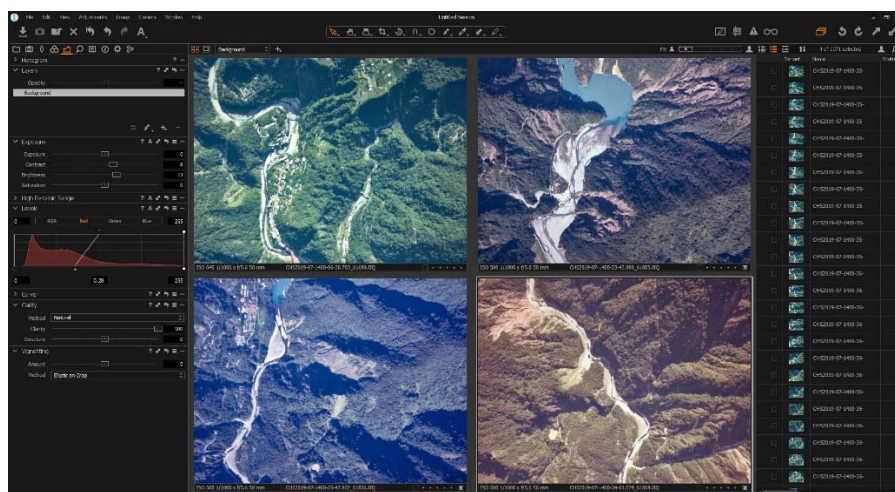
圖 5.2 測區航照涵蓋圖

§5-2 航拍影像處理

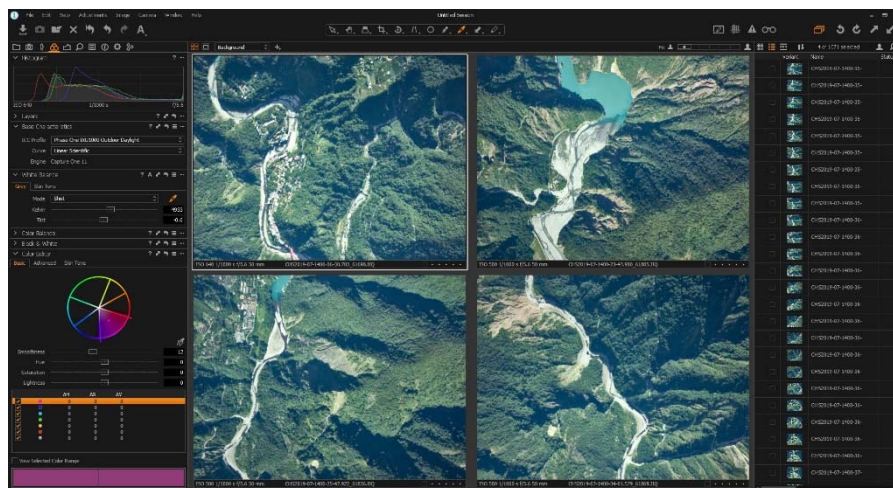
原始影像為壓縮影像檔，透過 PHASE ONE 公司發展之 CaptureOne 軟體進行影像處理，可執行影像轉檔、影像增揚與色調調整等功能，繼而轉出成可見光影像，使正射影像顯示之地物與原本天然色彩一致，並減少不同拍攝時間影像色調不一致的現象。後續以 CaptureOne 軟體及 Photoshop 軟體進行色調處理，供正射影像製作使用，操作示意圖如圖 5.3。同時於此步驟時依監審方提供之樣張調整色調，降低不同測區間色調差異。

單一架次影像調整時，由於陽光照射方向或航線等因素影響，無法以相同參數一次調整所有影像，須以分區方式進行以下調整，追求色調調整最佳結果，同理亦運用於不同架次間。

- (1) 白平衡處理—選取影像中灰色像元，利用 CaptureOne 軟體平衡 RGB 強度功能，重新轉出影像。
- (2) 亮度與對比度設定—針對同區域不同航帶之影像進行參數調整，使各影像間亮度與對比接近一致。
- (3) 飽和度與色彩調和—以影像色調將影像分區，批次以適用之參數調整飽和度與色度。
- (4) 色調參數—若色調經以上步驟調整後仍與理想有偏差，再針對其特性利用其他色調參數修正之。



(a)影像色調調整前



(b)影像色調調整後
圖 5.3 影像色調調整情形

§5-3 空中三角測量

以 GNSS 與 IMU，搭配數位量測相機，利用記錄啟動快門時所送出的脈衝信號事件(Event mark)之瞬間，並分別利用 GNSS 求得拍攝瞬間的飛機位置坐標及 IMU 資料求得拍攝瞬間的姿態參數，此可作為數位影像投影中心點外方位參數資料來源，配合裝機後之安置角率定以去除攝影中心與 IMU 之系統性角度偏差，如此利用 GNSS/IMU 資料可直接求得影像外方位元素。此精確之影像外方位為初始值進行空中三角測量作業，可加速及應用航標為檢核點進行成果精度評估，並據以獲得良好及可靠之空三成果以進行後續作業。

空中三角測量採用 Intergraph ISAT (ImageStation Automatic Triangulation)軟體執行光束法平差，採自動化匹配影像特徵點，特徵點均勻分布於各影像，剔除匹配不佳之特徵點後，萃取出每張影像之連結點(Tie Point 與 Pass Point)。若有連結點分布不均形成網形不足區(Weak Area)，再以人工匹配特徵點的方式補足。

以網形均勻之連結點進行空三平差計算，過程中可根據統計報表中，連結點向量殘差值判斷其是否為正確匹配特徵點，新增或刪除連結點。反覆進行上述偵錯程序，直至所有點的殘差值都在要求精度範圍內，最後加入地面控制點約制網形，完成空三，輸出所有影像之外方位參數，空三成果如表 5.1 所示。

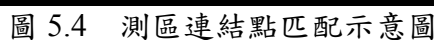


圖 5.5 空三連結點及空三報表示意圖

圖 5.6 空三後外方位改正數示意圖

表 5.1 空三平差成果統計表

分區編號	影像張數	連結點數	平均離地高 (公尺)	後驗中誤差 (微米)
AT1	4777	141769	2200	2.3
AT2	644	116358	2200	2.3
AT3	219	34046	2200	2.1
AT4	1169	162911	2200	2.1
AT5	1176	153163	2200	2.3
AT6	1311	72949	2200	2.3
AT7	1507	170626	2200	2.3
AT8	1755	303351	2200	2.3

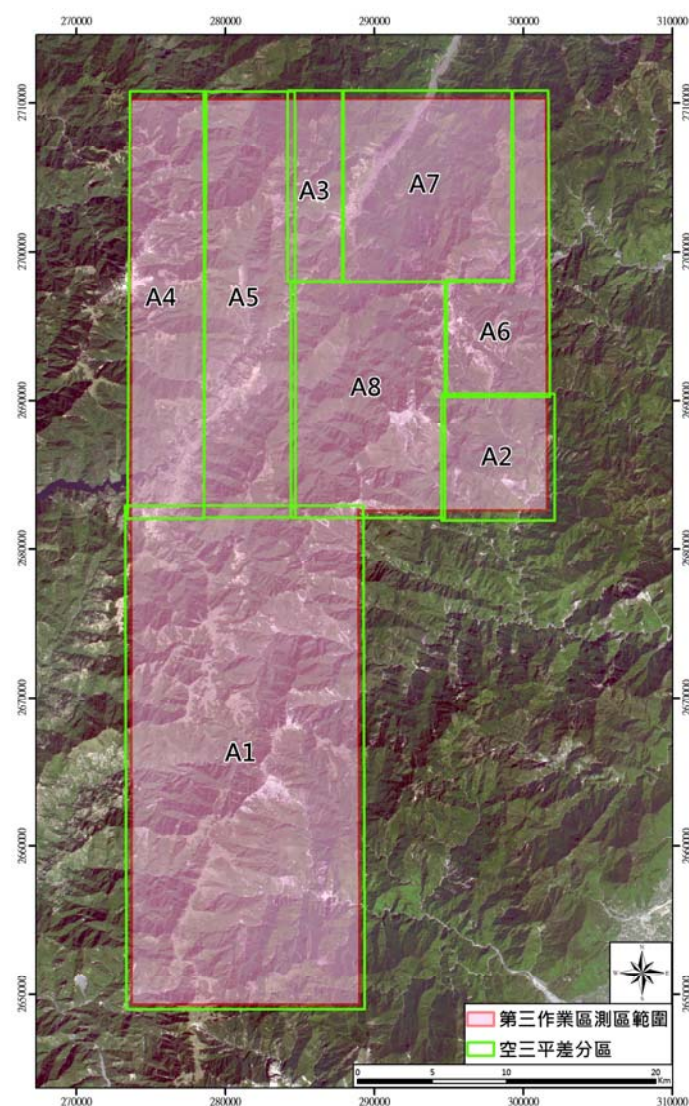


圖 5.7 空三分區範圍圖

經空三計算影像外方位參數後，以光達資料產製之數值高程模型(DEM)對影像進行正射糾正。糾正成果除了可利用點雲強度值影像，對於明顯之標線進行平面位置比對，確保空三無明顯系統偏差外。亦可藉影像可明顯辨識位置之靜態 GNSS 平差控制點進行精度檢核，經量測後偏差量皆小於

0.30 公尺，檢核示意與抽驗平差控制點分布如圖 5.8

表 5.2 平面控制點檢核影像差值表(單位:公尺)

點號	平面控制點坐標		影像控制點坐標		E 方向 差量 (公尺)	N 方向 差量 (公尺)	水平 差量 (公尺)
	E	N	E	N			
33-0015A	287834.135	2674690.794	287384.236	2674690.968	-0.101	-0.174	0.201
33-0031A	281101.358	2691235.211	281101.497	2691235.379	-0.139	-0.168	0.218
33-0041A	289985.050	2706382.450	289985.262	2706382.330	-0.212	0.120	0.240

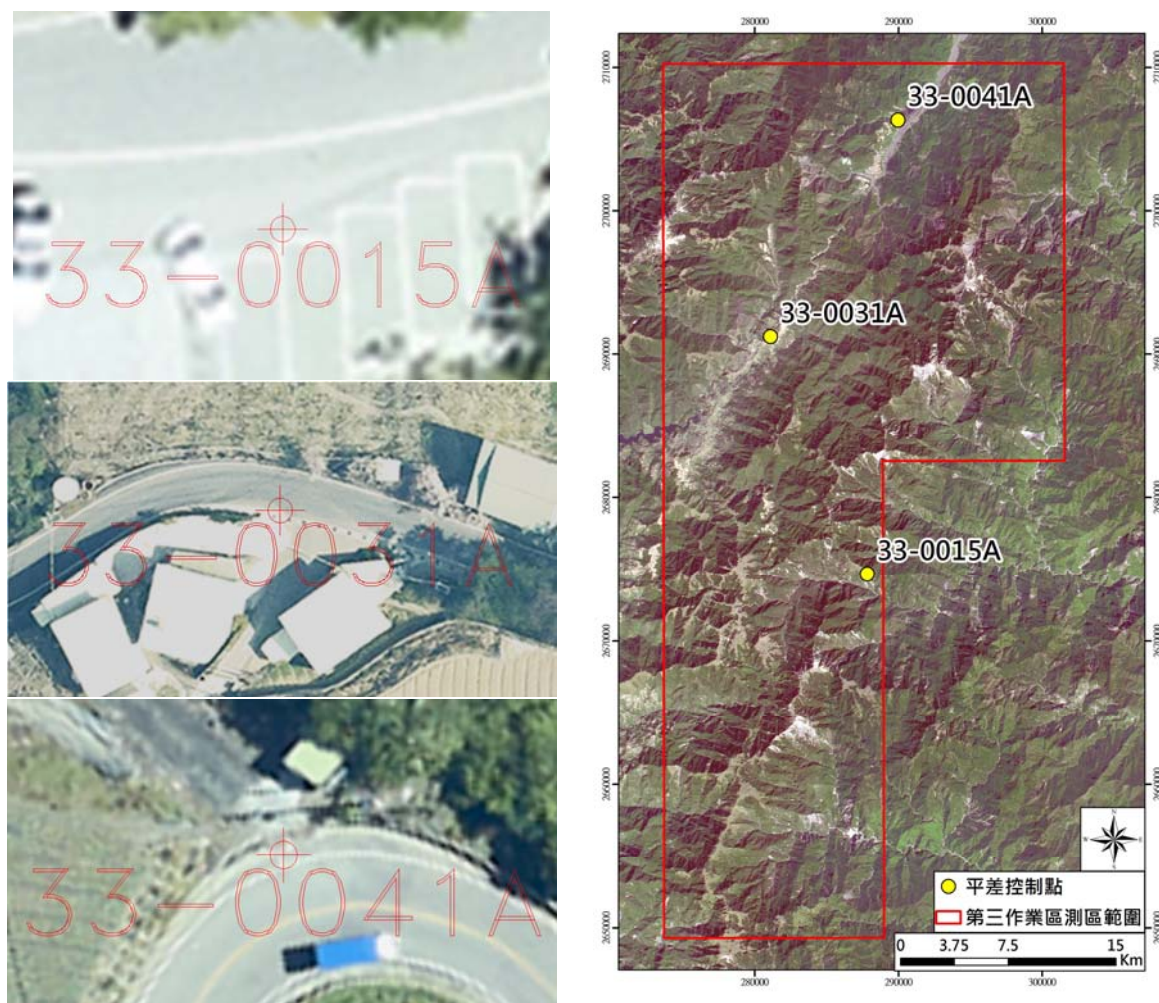


圖 5.8 影像特徵點檢核與平面控制點分布圖

§5-4 彩色無縫鑲嵌正射影像製作

1. 製作流程

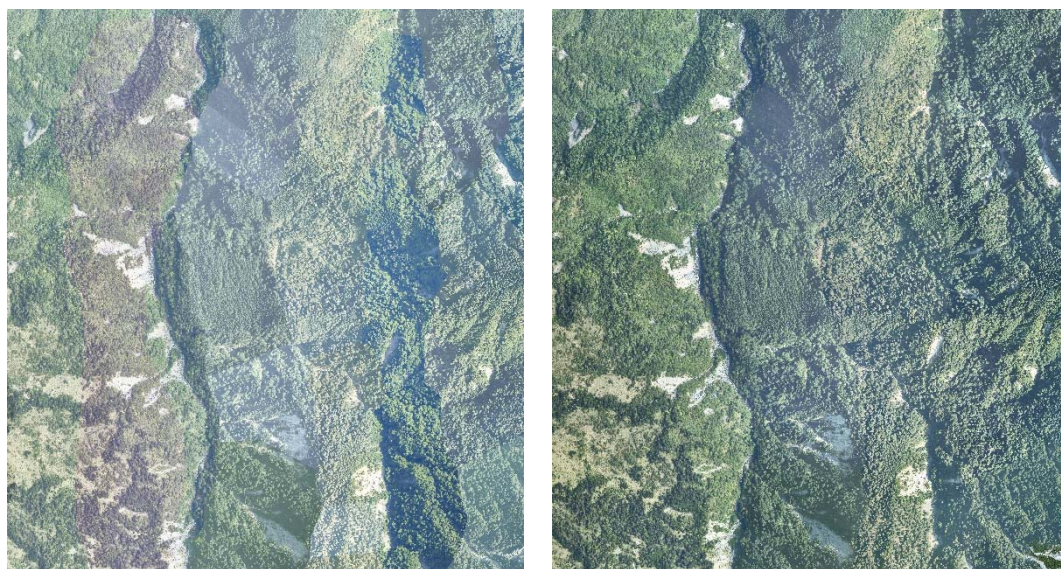
(1) 單張影像糾正

影像經過色調調整後，搭配空三解算之影像外方位參數，以及光達資料產製之數值高程模型(DEM)，便可針對所拍攝的影像作進行正射糾正，使影

像具有絕對坐標資訊。

(2) 正射影像鑲嵌

再以全區方式進行鑲嵌作業，維持每個正射影像像元位置精確。確實的色調調整，可避免鑲嵌作業時圖幅間產生明顯之接痕如圖 5.9。



(a) 色差調整前鑲嵌處色差大

(b) 色差調整後鑲嵌處色調一致

圖 5.9 色差調整前後示意圖

(3) 圖幅分割

於單幅正射影像圖適當邊界進行裁切，此步驟需保持單張圖幅邊緣像元之完整性，達到無縫鑲嵌正射影像圖之目標。

(4) 水線產製

空載光達點雲因雷射光被水體吸收之特性，於水體區域記錄非正確之高程資訊，屬不合理之點雲，需加以排除不列入後續內插產製數值地形模型所用。本計畫利用產製之 25 公分解析度正射影像成果，進行人工數化水體邊緣線、沙洲線及海岸線，將水體區域內之點雲分類為水體類別，水域線成果示意如圖 5.10 所示。

2. 自我檢核

利用上述之作業方法產出正射影像後，逐圖幅方式進行正射影像編修，排除鑲嵌線設計不佳、局部色調偏差、陰影區過大以及正射糾正後地物扭曲或錯移之情形圖 5.11。由作業人員填寫自主檢查表方式進行品管，經過

修正後再由專案負責人複驗，確保正射影像品質。

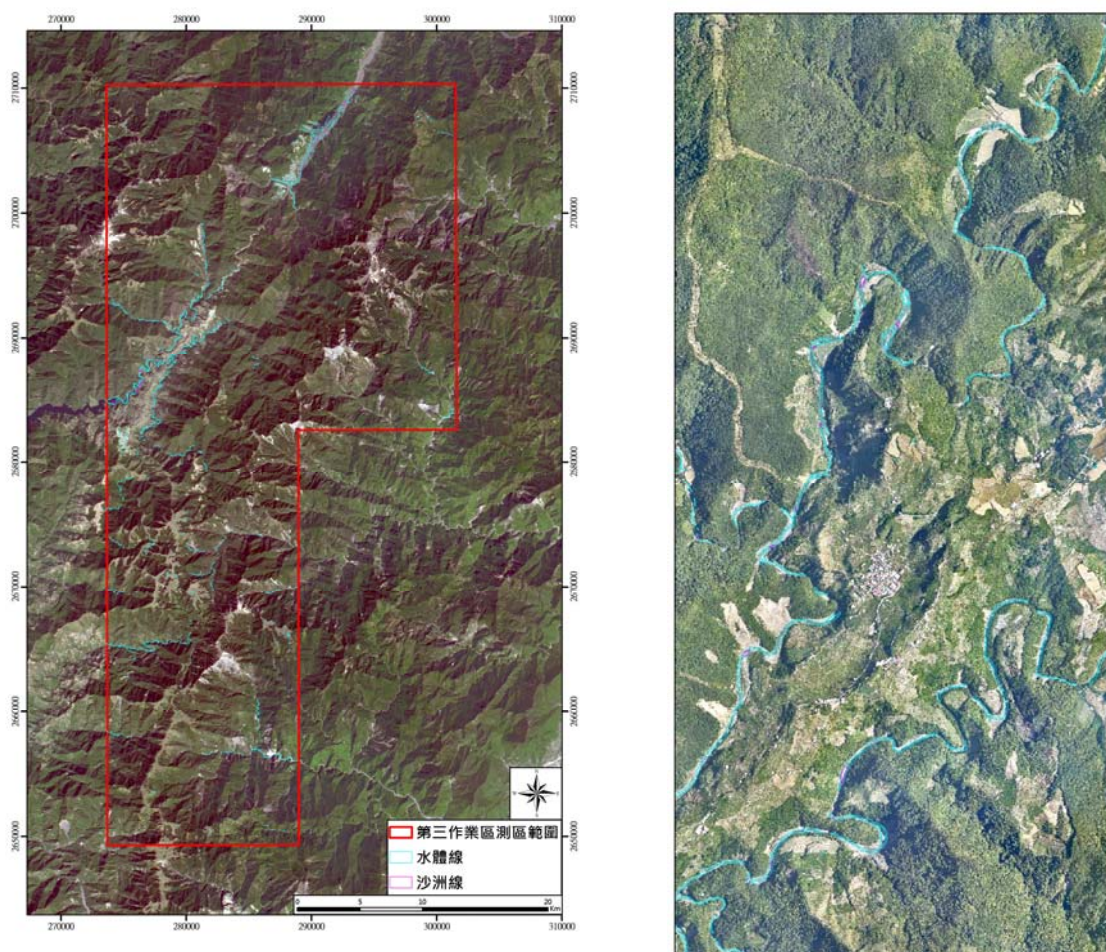


圖 5.10 水體繪製成果

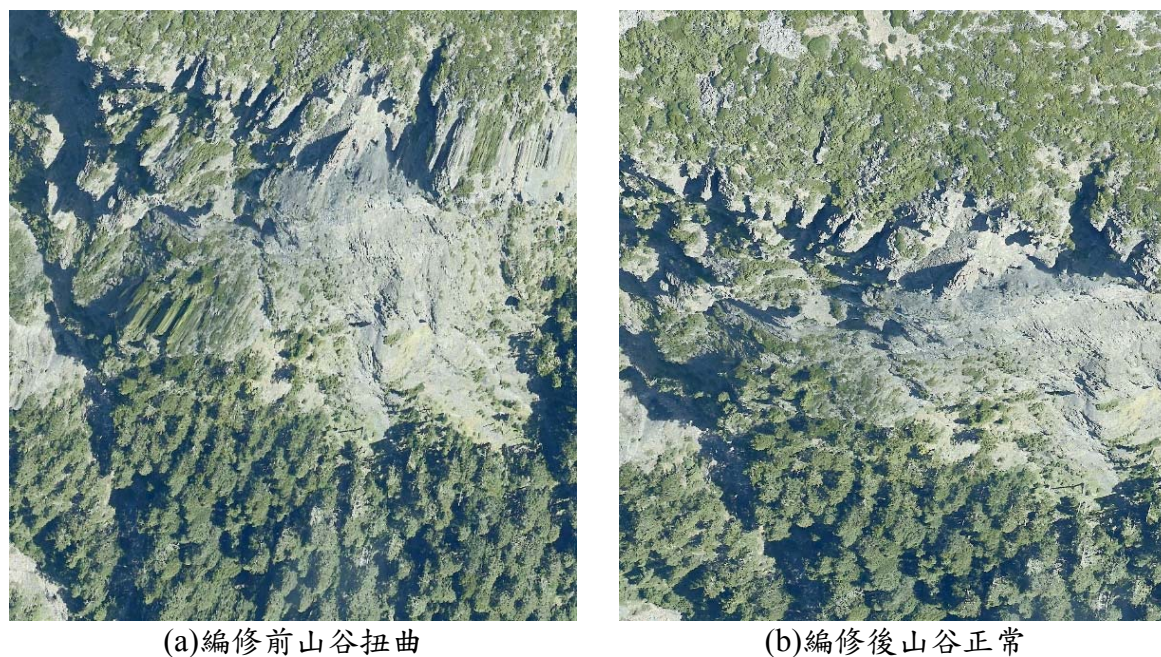


圖 5.11 數值高程造成扭曲錯移現象示意圖

完成之正射影像如圖 5.12 和圖 5.13 所示，第三作業區共 182 幅 1/5000 正射影像如圖 5.14。



圖 5.12 平地正射影像成果圖

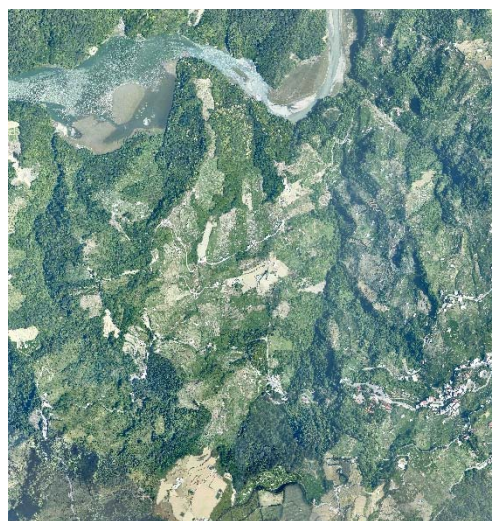


圖 5.13 山區正射影像成果圖

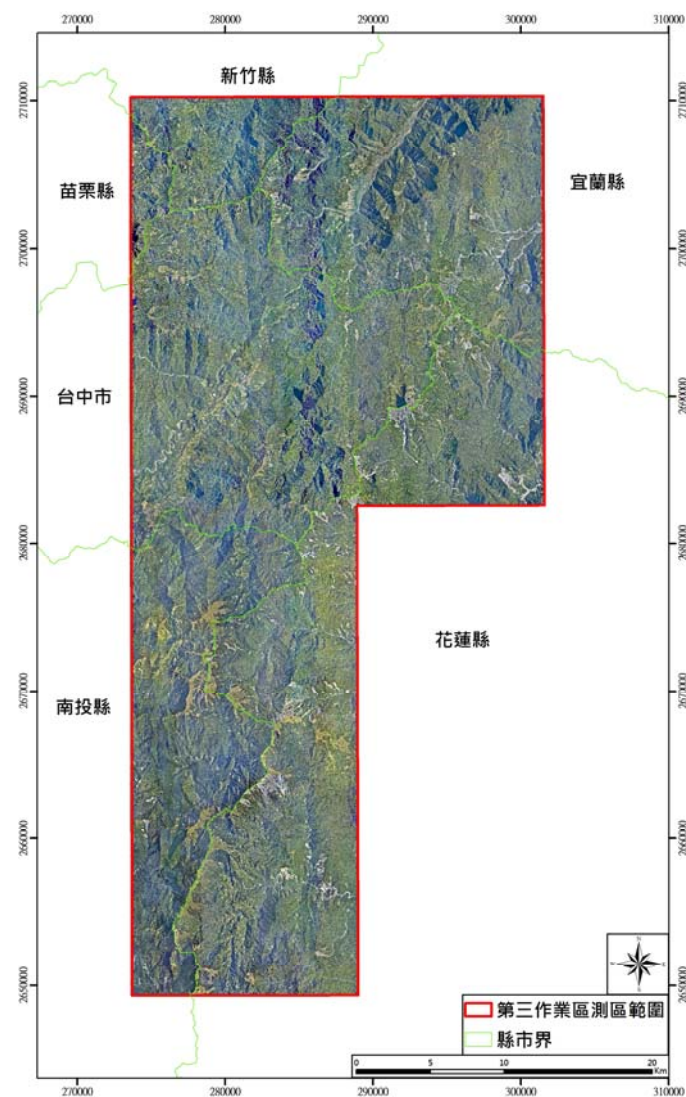


圖 5.14 第三作業區正射影像成果

§5-5 正射影像外部接邊

今年度三作業區皆為相鄰，經工作會議討論責任接邊分配，本作業區主要負責與第二作業區共 44 幅之責任接邊。

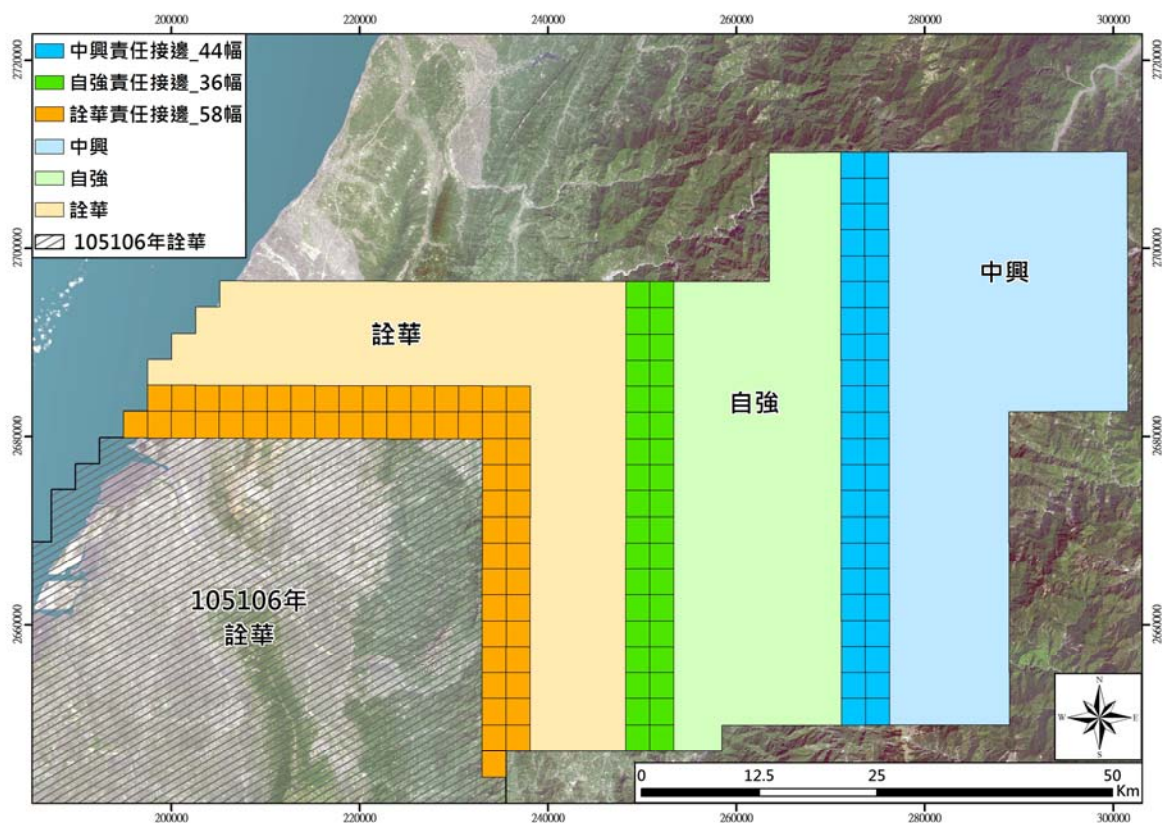


圖 5.15 責任接邊範圍示意圖

第六章 成本分析

依計畫期程逐期完成之工作項目，包含空載雷射掃瞄飛航計畫規劃與申請、地面 GNSS 基地站控制測量、空載雷射掃瞄施測資料獲取、雷射掃瞄點雲資料處理、數值地表模型(DSM)與數值高程模型(DEM)製作、正高改算、人工檢核與編修及圖幅鑲嵌處理、正射影像製作等工作，成本分析如表 6.1，各項成本分析如下所述。

1. 作業計畫與飛航掃描規劃

為確保航線成果符合本計畫規範，將本測區依地形分布規劃不同飛航掃描參數設計進行作業，透過嚴密的航線規劃與整體完善作業計畫，方可有效率完成飛航掃描。

2. 地面 GNSS 基地站控制測量

本公司為符合解算高精度軌跡，執行案件前確保基站與航線在 20 公里內，本案兩測區險峻高山區，分別需派員至現場確認透空良好後，自行架設 GNSS 基站與監控設備，並透過監控軟體確保接收品質無虞，並執行期間有專人監控與排除傳輸障礙。針對本案所需之航帶平差控制點經過嚴謹計算後獲得平差控制點坐標。

3. 空載雷射掃瞄施測資料獲取

本項目涵蓋飛航載台租賃費、空載雷射掃瞄儀設備費與資料獲取費。資料取得費用考量飛航作業受到天氣與管制影響，且須滿足點密度與重疊率，除了需要專人待命飛航執行費用外，也包含飛機租賃費用及最新光達與數位相機設備航拍作業儀器折舊費用。

4. 雷射掃瞄點雲資料處理

資料處理包含各架次軌跡解算、點雲原始資料處理與航帶平差等工作，此工作需要專業人力且富有地形編修經驗之能力。點雲編修則需具地形編修經驗專業人力投入。

5. 圖幅成果產製及圖幅鑲嵌處理與接邊

點雲品管亦需具地形編修經驗專業人力投入，透過檢核確認處理無誤方可進行幅產製成果及進行圖幅接邊處理。正射影像製作與水線繪製需專業人力投入，透過檢核確認處理無誤方可進行幅產製成果及進行圖幅接邊處理。

6. 各項報告書

本公司為達成案件順利進行，投入具經驗與協調之專任工程師作為甲丙方聯繫窗口，並配合參與不定期會議與文書撰寫與說明。

表 6.1 各項作業成本統計分析表

工作項目		單位	數量	單價	總價
一	工作計畫書及空載雷射掃瞄飛航計畫規劃與申請	人月	0.5	\$70,000	\$35,000
二	地面 GPS 基地站控制測量				
2.1	地面 GPS 基地站勘選、維護、收集、處理	人月	9	\$70,000	\$630,000
2.2	平差控制點選點與測量	人月	6	\$70,000	\$420,000
三	空載雷射掃瞄施測資料獲取	架次	30	\$343,200	\$10,296,000
四	雷射掃瞄點雲資料處理				
4.1	點雲資料前處理、解算、平差	人月	12	\$70,000	\$840,000
4.2	點雲資料過濾分類	人月	45	\$70,000	\$3,150,000
五	DEM、DSM 及正射影像製作、人工檢核與編修及圖幅鑲嵌處理				
5.1	點雲品管及整合 DEM、DSM 製作	人月	15	\$70,000	\$1,050,000
5.2	正射影像製作與水線繪製	人月	18	\$70,000	\$1,260,000
六	圖幅接邊處理	人月	7	\$70,000	\$490,000
七	行政管理費	人月	15	\$120,000	\$1,800,000
		總金額(新台幣)			\$19,971,000

另外本計畫作業過程中遵守性別工作平等法，執行期間作業投入人數統計如下表，落實性別平等。

表 6.2 作業人員性平等資訊統計

作業項目	計畫管理與監督	資料收集與處理	品管檢核	報告撰寫與行政
男女作業人員統計	2:2	13:11	3:4	3:3

第七章 檢討與建議

1. 結論

依計畫期程逐期完成之工作項目，包含空載雷射掃瞄飛航計畫規劃與申請、地面 GNSS 基地站控制測量、空載雷射掃瞄施測資料獲取、雷射掃瞄點雲資料處理、數值地表模型(DSM)與數值高程模型(DEM)製作、正高改算、人工檢核與編修及圖幅鑲嵌處理、正射影像製作等工作。本團隊計畫範圍為第三作業區，計畫之初為確保航線成果符合本計畫規範，將本測區依地形分布規劃不同飛航掃瞄參數設計進行作業。

- (1) 為確保計畫使用之控制系統一致，選擇基站與航線範圍應小於 20 公里並透空良好且無訊號干擾之虞處布設 10 個基站位置，編號依序為 CH43~CH52，並採與已知點檢測同時進行長時間 GNSS 測量以確保坐標成果一致性。此計畫中為提升精度，分別於航帶上施測平差高程控制點為 39 點；平差平面特徵控制點 12 點及空三測點 194 點，作為平差計算作業使用。
- (2) 本團隊於基站架設時新增攝影裝置，現地即時影像搭配衛星雲圖以及機場天氣觀測資料更加能夠掌握測區天氣狀況，增加飛航掃瞄有效架次數。
- (3) 累積飛航架次合計為 30 架次，飛航涵蓋面積約達 1,279 平方平方公里。共執行約 217 條航線(含補飛)，拍攝達 15,162 張影像，達本計畫規範所需之成果要求。
- (4) 以 SCOP++內插模式製作 1 公尺解析度 DEM/DSM 成果。
- (5) 土地類別檢核成果均能符合合約規定之高程精度標準：在 DEM 成果精度檢核部分，利用 VBS-RTK 及全測站經緯儀兩種方式，對不同土地覆蓋分區類型之現地實測高程進行 DEM 精度評估，
- (6) 第三作業區正射影像成果最後使用 12,558 張彩色影像，均為與雷射點雲掃瞄同時拍攝之成果，並製作成 25 公分解析度之正射影像。
- (7) 工作效率提升與努力

- 確保航帶平差最佳品質

本計畫中為了確保航帶平差所採用的高程平差點精度優於光達系統高程誤差(約 0.15 公尺)，並基於山區 e-GNSS 訊號收訊不良，所有可測之點位均採用靜態測量方式，即使山路不易進入也堅持耗時耗力的前往擺設，以期採用靜態測量方式提升平差控制點精度，少部分山路崩塌無法進入處，則使用空中三角方式量測平差控制點，以供後續航帶平差使用。

- 穩定且良好的 DEM 品質

本公司於產製 DEM 前將依據內政部規範進行點雲分類之正確性檢查，除了規範規定之 11 種類別大錯外，亦針對點雲分類的合理性再次進行詳細檢核，確保產製之 DEM 成果為良好並且是可供後續應用分析，此外透過上述 DEM 檢核評估，可發現其 DEM 品質皆符合規範，並且在部分植被覆蓋類別上遠大於合約規範精度。

2. 檢討與建議

- (1) 不同年度之地形變遷相當快速，特別是河床或崩塌地。以長期監測的概念下，建議甲方應定期辦理空載光達測繪作業，更新全臺灣之地形模型成果以提供防救災、國土規劃及工程建設等相關單位運用。
- (2) 自 107 起更新數值地形模型之基本精度要求由 0.3 公尺提昇至 0.25 公尺；點雲密度調整至每平方公尺 2 點，較既往空載光達測製案之施測標準嚴謹，本作業區產製成果優於標準，以期逐步提升數值地形模型品質。

第八章 參考文獻

1. 內政部(2003)高精度及高解析度數值地形模型測製規範(草案)。
2. 內政部(2005)LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)
3. 內政部(2012)空載光達測製數值地形模型標準作業(草案)
4. 內政部(2019)，107 年度 LiDAR 技術更新數值地形模型成果測製工作案第一作業區期末報告書。
5. 林志交、張坤樹、鄭鼎耀(2004)雷射掃瞄資料於潮間帶地形及城市區航帶平差之初探，第六屆 GNSS 衛星科技研討會，台南國立成功大學。
6. 高玉惠(2010)，空載光達應用於不同地形環境之演進與分析，高解析度光達數值地形測製與應用成果研討會，中央地質調查所期末發表會。
7. 童俊雄（2004）空載光達系統誤差分析與航帶平差方法之探討碩士論文，國立成功大學測量及空間資訊學系。
8. Appanix (2019), POSMMS User Manual.
9. Axelsson, P. (2000). Processing of laser scanner data- algorithms and applications, ISPRS JPRS, 54: pp. 138-147.
10. Baltsavias, E.P (1999). Airborne Laser scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.54, pp. 164-198.
11. Hu, L.-T., & Bentler, P. (1995). Evaluating model fit. In R. H. Hoyle (Ed.), Structural Equation modeling. Concepts, Issues, and Applications (pp. 76-99). London: Sage.
12. Optech(2018), Lidar Mapping Suite User's Guide.
13. TerraSolid, TerraScan, TerraModeler, and TerraMatch User's Guide (2019).
14. Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. ISPRS Vol. XXXIII, Amsterdam
15. West, S. G., Finch, J. F., & Curran, P. J. (1995). Structural equation models with non-normal variables: Problems and remedies. In R. Hoyle (Ed.), Structural equation modeling: Concepts, issues, and applications (pp. 56 –75). Thousand Oaks, CA: Sage.