



NLSC-110-11

110 年及 111 年 LiDAR 技術更新
數值地形模型成果測製工作
(第 1 作業區)

110 年工作總報告

Report of updating Taiwan DEM by LiDAR
technique in 2021
(1st Work zone)

主辦機關：內政部國土測繪中心

執行單位：中興測量有限公司

中華民國 110 年 12 月 31 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 3,177 幅(1/5000)範圍數值地形模型。內政部國土測繪中心於 110 及 111 年度規劃辦理「**110 年及 111 年 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 1,642 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 1 作業區，110 年度橫跨新竹、桃園、臺北與新北等縣市，共 266 個圖幅(1/5000)，總面積為 1,712 平方公里，依期程分為第 1 子測區 107 幅及第 2 子測區 159 幅。工作內容主要如下包含：

- 一、 空載雷射掃瞄飛航計畫規劃與申請。
- 二、 地面 GNSS 基站控制測量。
- 三、 空載雷射掃瞄施測資料獲取。
- 四、 雷射掃瞄點雲資料處理。
- 五、 數值地表模型(DSM)與數值高程模型(DEM)製作。
- 六、 正射影像製作。

本計畫飛航掃瞄總計執行 25 架次飛航作業，共 157 條航線。航高 2,300m，採用 Optech ALTM Pegasus HA500 執行雷射掃瞄，並以 Phase One iXU-R1000 進行航空攝影。獲取每平方公尺高於 2 點點雲密度，並確保每條航線重疊率原則 50%之高密度成果。

光達率定控制場設置於彰化縣彰濱工業區，飛航掃瞄相互垂直四方向兩個航高之航線，採用 LMS 軟體自動搜尋重疊航帶內之平面(Tie Plane)之方法進行共軛匹配，以最小二乘法率定計算，利用平差後航帶間之高程殘差與共軛面法向量之分布評估航帶平差成果之可靠性，率定成果和確認飛行高程精度皆符合小於 10 公分標準。

本測區採用已知連續基站與新架設之 1 站基站進行軌跡解算，解算點雲資料品管後進行航帶平差，每條航帶頭、中及尾人車可到達處，採用全面靜態 GNSS 測設高程平差控制點共計 130 點，另有平面平差控制點共計 30 點及空三測點 3 點。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。經航帶平差計算後重疊數據之平均絕對差量 2 子測區分別約為 7.0 公分和 9.6 公分。

點雲之過濾分類採用 TerraSolid 軟體進行初步過濾，再接續進行人工編修，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，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。續以產製出 1 公尺×1 公尺之 DEM/DSM。並以不同土地覆蓋分區檢核點進行精度檢核。

本計畫於空載光達掃瞄同時進行航拍攝影，並經空中三角測量、正射糾正、色彩平衡、接邊鑲嵌等作業程序，產製地面解析度為 25 公分之正射影像。並以正射影像描繪出水體邊緣線，用以提供後續空載光達點雲資料編修水域內水點。

據以往經驗飛航任務會因天候不佳延宕，本測區藉由提早飛航待命，順利完成飛航任務及產製符合契約規範要求之 266 圖幅成果。透過適宜的航線規劃與點雲分類編輯技術之精進，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 in 2021". CHS Surveying Co. Limited won the contract for the first work zone, which covers Hsinchu, Taoyuan, Taipei and New Taipei. It is about 1,712 square kilometers, equivalent to 266 map sheets of 1/5,000 scale, which was divided into 107 sheets in sub-survey-area 1 and 159 sheets in sub-survey-area 2. The major works include:

- I. Flight planning and permission application for airborne laser scanning.
- II. Ground Control Survey for GNSS base stations.
- III. Airborne laser scanning and data acquisition.
- IV. Data processing for laser scanning point clouds.
- V. Digital surface model (DSM) and digital elevation model (DEM) production, orthometric height correction, artificial quality checking, data editing, and map mosaicking.
- VI. Orthophoto production

The project uses Optech ALTM Pegasus to scan about 25 flight tracks with flight height of 2300 m. Phase One iXU-R1000 aerial photography is also used. We also take over 2.0 points clouds per meter square scanning density and 50% overlap of scanning zones on all contiguous scanning strips to ensure the high density and high quality results.

LiDAR calibration site is located in Changhua Coastal Industrial Park, Changhua County. It covers mutually perpendicular flight in 4 direction and 2 altitudes. The LMS software is used to automatically search the tie plan as conjugate matching for band strip adjustment. Least squares were used in calibration calculations. In addition, the relative height among flights and the overall distribution of the normal vectors of tie plans can be used to estimate the reliability of the strip adjustment outcomes assessment. The results of calibration

and the accuracy of the flight elevation must be confirmed to the accuracy of less than 10 cm standard.

Trajectories are processed with kinematic GNSS raw data are combined with base station data. There are 1 GNSS base stations settled for this project. The front, middle, and tail parts of each flight are surveyed with static GNSS height measurement. In total, there are 130 vertical adjustment points, 30 horizontal adjustment control points, and 3 aero triangulation points. Characteristic lines and planes were extracted from point clouds via the LMS and TerraMatch. After strip adjustment, this project has an average of about 7.0 cm and 9.6 cm absolute height difference between the overlapping flights in two sub-survey-areas.

Point clouds classification uses TerraSolid software for preliminary filtering. In order to achieve high accuracy of the results, the point clouds must be followed with manual editing. The final edited point clouds can be used to generate contour, and used for self-check. CHS point cloud classification team has years of experience. Regular group meetings and training 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 efficient. A series of procedures with programs are designed to check the quality of point cloud editing. Finally, the results of manual editing point clouds completed continued to produce 1 m × 1 m DEM / DSM. Different areas can be checked with different accuracy standards according to different land cover.

The project uses LiDAR scanning with simultaneous aerial photography and processed with aerial triangulation, orthorectification, color balance, mosaic, and edge alignment. The final production of the orthophotos has a 25 cm resolution. The boundary lines of water bodies can be described with these orthophotos, and provide for the use of following LiDAR point clouds data editing for water points.

According to the experience, flight delays are due to climate reasons. We meet the requirements of the contract specification and complete 186 sheets by early standby. Integrated performance and higher precision of the DEM/DSM are

performed by suitable flight planning and skill improvement of point cloud classification. 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	VII
圖 目 錄	IX
表 目 錄	XII
第一章 計畫概述.....	1
第二章 作業規劃.....	4
§2-1 作業準備.....	4
§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.....	12
第四章 空載 LiDAR 作業.....	16
§4-1 率定與校正作業.....	16
§4-2 飛航掃瞄成果.....	25
§4-3 空載 LiDAR 資料處理.....	28
§4-4 航帶平差與內部精度評估.....	33
§4-5 DEM/DSM 製作.....	52
§4-6 檢核點蒐集與作業.....	62
第五章 正射影像製作.....	77
§5-1 作業區航拍工作.....	77
§5-2 航拍影像處理.....	79
§5-3 空中三角測量.....	80
§5-4 彩色無縫鑲嵌正射影像製作.....	84
§5-5 正射影像外部接邊.....	91
第六章 成本分析.....	92
第七章 機敏資料管制.....	94
第八章 檢討與建議.....	95

第九章 參考文獻.....99

- 附件一 110 年工作總報告審查意見回覆表
- 附件二 作業計畫(含空載光達掃描飛航計畫)
- 附件三 地面控制測量成果報告
- 附件四 校正報告
- 附件五 檢核點照片與坐標列表
- 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

圖 目 錄

圖 1.1	第 1 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.....	6
圖 2.5	測區航線展繪圖.....	8
圖 3.1	GNSS 控制點與基站分布圖	9
圖 3.2	CH61 基站現況與透空圖	12
圖 3.3	GNSS 實際觀測網形圖	14
圖 3.4	已知點檢核基線分布圖.....	14
圖 3.5	航帶平差控制點分布圖.....	15
圖 4.1	工作流程圖.....	16
圖 4.2	率定場位置與現況示意圖.....	17
圖 4.3	率定場坡度圖.....	18
圖 4.4	率定場植被分布圖.....	18
圖 4.5	率定場平均下速率等值圖.....	18
圖 4.6	率定 GNSS 基站位置圖	19
圖 4.7	雷射點至萃取面的距離統計分布圖.....	21
圖 4.8	雷射點至萃取面的距離統計直方圖.....	23
圖 4.9	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 4.10	平面精度分析圖(單位：公尺).....	25
圖 4.11	飛航軌跡與基站示意圖(每格為 10 公里).....	25
圖 4.12	地面基站 PDOP 圖	26
圖 4.13	機載 PDOP 圖	26
圖 4.14	空載雷射掃瞄資料作業流程.....	28
圖 4.15	點雲解算產製處理流程.....	29
圖 4.16	飛航軌道差異量示意圖.....	29
圖 4.17	飛航掃瞄航跡示意圖.....	30
圖 4.18	重疊率檢查與密度統計示意圖.....	31
圖 4.19	地面點孔洞分析評估統計(摘錄自監審方檢查通知).....	33
圖 4.19	平差作業流程圖.....	34
圖 4.20	雷射點偏移示意圖.....	36
圖 4.21	MEASURE MATCH 比對原理示意圖	37
圖 4.22	平差前航線重疊處誤差分析圖.....	38
圖 4.23	匹配連結點示意圖.....	40

圖 4.24	平差前後重疊處平均絕對誤差差量比較.....	46
圖 4.25	平差前後測區交叉航線重疊處差量統計分析圖.....	47
圖 4.26	航線重疊處屋頂共軛面與共軛線萃取示意圖.....	48
圖 4.27	航線重疊處平差前後共軛線統計分析示意圖.....	48
圖 4.28	點雲平面精度檢核示意圖.....	50
圖 4.29	監審方軟體航帶平差高程差異量檢核圖.....	51
圖 4.30	平差後航帶間高差較大區域示意圖.....	51
圖 4.31	ITERATION ANGLE 和 ITERATION DISTANCE 示意圖 (AXELSSON, 2000).....	52
圖 4.32	橋樑之點雲分類示意圖.....	53
圖 4.33	地形編修示意圖.....	53
圖 4.34	點雲編修與檢核人員分布圖.....	54
圖 4.35	SCOP++軟體介面圖.....	56
圖 4.36	測區 DEM/DSM 成果圖.....	57
圖 4.37	DEM/DSM 山地及平地成果圖.....	61
圖 4.38	檢核點分布圖.....	62
圖 4.39	各類別檢核點實測照片.....	64
圖 4.40	低海拔之裸露地(B)精度成果圖.....	67
圖 4.41	低海拔之林地(F)精度成果圖.....	67
圖 4.42	低海拔之矮植被(L)精度成果圖.....	67
圖 4.43	低海拔之都會區(U)精度成果圖.....	67
圖 4.44	低海拔之植生地(V)精度成果圖.....	68
圖 4.45	低海拔之濕地(W)精度成果圖.....	68
圖 4.46	低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1.....	68
圖 4.47	低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-2.....	68
圖 4.48	中高海拔之裸露地(B)精度成果圖.....	69
圖 4.49	中高海拔之林地(F)精度成果圖.....	69
圖 4.50	中高海拔之密林(D)精度成果圖.....	69
圖 4.51	中高海拔之矮植被(L)精度成果圖.....	69
圖 4.52	中高低海拔之植生地(V)精度成果圖.....	70
圖 4.53	中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1.....	70
圖 4.54	中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-2.....	70
圖 4.55	低海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺).....	73
圖 4.56	中高海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺).....	74
圖 5.1	正射影像製作流程圖.....	77
圖 5.2	測區航照涵蓋圖.....	78
圖 5.3	影像色調調整情形.....	80

圖 5.4	空三分區與航空標控制點分布圖.....	81
圖 5.5	測區連結點匹配示意圖.....	82
圖 5.6	空三連結點及空三報表示意圖.....	82
圖 5.7	空三後外方位改正數示意圖.....	82
圖 5.8	色差調整前後示意圖.....	84
圖 5.9	高架道路高差位移糾正示意圖.....	86
圖 5.10	正射影像編修示意圖.....	86
圖 5.11	平地正射影像成果圖(96232079).....	87
圖 5.12	山區正射影像成果圖(97234092).....	87
圖 5.13	第 1 作業區正射影像成果.....	87
圖 5.14	正射影像點雲強度檢核示意圖.....	88
圖 5.15	影像檢核點檢核示意圖.....	88
圖 5.16	水體繪製成果.....	90
圖 5.17	TGOS 詮釋資料編輯系統 2.0 操作畫面.....	90
圖 5.18	責任接邊範圍示意圖.....	91

表 目 錄

表 1.1	交付成果說明表(含各階段繳交期限).....	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.....	8
表 3.1	地面控制點坐標成果表(TWD97【2020】坐標).....	11
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.....	27
表 4.3	各子測區密度統計表.....	32
表 4.4	平差前航線重疊處誤差統計分析.....	37
表 4.5	平差後航線重疊處誤差統計分析.....	41
表 4.6	第一子測區航線重疊處平差前後差量統計表.....	41
表 4.7	第二子測區航線重疊處平差前後差量統計表.....	42
表 4.8	平面控制點檢核點雲屋角點差值表(單位:公尺).....	49
表 4.9	點雲編修自檢紀錄表範例.....	55
表 4.10	地形類別列表.....	63
表 4.11	土地覆蓋分區列表.....	63
表 4.12	地形類別與地表植被覆蓋類別調整參數對照表.....	65
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).....	66
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).....	66
表 4.15	低海拔數值精度中央集中趨勢分析表(單位:公尺).....	71
表 4.16	中高海拔數值精度中央集中趨勢分析表(單位:公尺).....	71
表 4.17	檢核點數值精度偏態檢驗表(單位:公尺).....	72
表 4.18	低海拔 DEM 數值適合度檢驗.....	76
表 4.19	中高海拔 DEM 數值適合度檢驗.....	76
表 5.1	相機相關規範.....	78
表 5.2	空三平差成果統計表.....	83
表 5.3	平面控制點檢核影像差值表(單位:公尺).....	88
表 6.1	各項作業成本統計分析表.....	93
表 6.2	作業人員性平等資訊統計.....	93

第一章 計畫概述

1. 計畫緣起與目的

臺灣位於板塊交界處，地震頻繁且多颱風及水災等天然災害，以至於地質敏感地區具有地質結構破碎、崩塌、土石滑動等頻繁地形地貌變動，對於災後重建區域的規劃、國土保育工作、防洪重建工程、水庫營運安全與河川、野溪疏濬、清疏、等各種分析，均需仰賴可靠之高解析度數值地形模型資料，提供重要的地形高程資訊，決策時有更準確之參考依據，國家應持續規劃及更新國土資料，以強化國家空間資訊基礎。

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(DTM)包含數值高程模型(DEM)及數值地表模型(DSM)資料。並於民國 99 年起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」與「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，截至 109 年度止辦理 3,177 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 110 及 111 年度規劃辦理 1,642 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 551 個圖幅(1/5000)、第 2 作業區為 540 個圖幅(1/5000)以及第 3 作業區 551 個圖幅(1/5000)。並由貴中心另案委由監審方協助成果檢核與監審作業，俾達成計畫預期成效。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 1 作業區，110 年度測區範圍橫跨新竹、桃園、臺北與新

北等縣市，共執行 266 個圖幅（基本地形圖比例尺 1/5,000），面積約 1,712 平方公里，平地比例約 90%，山區約 10%。配合期程於第 2 階段和第 3 階段各繳交點雲資料 107 幅和 159 幅，後續報告內容稱之第 1 子測區和第 2 子測區，第 1 作業區位置以及子測區分布如下圖所示。

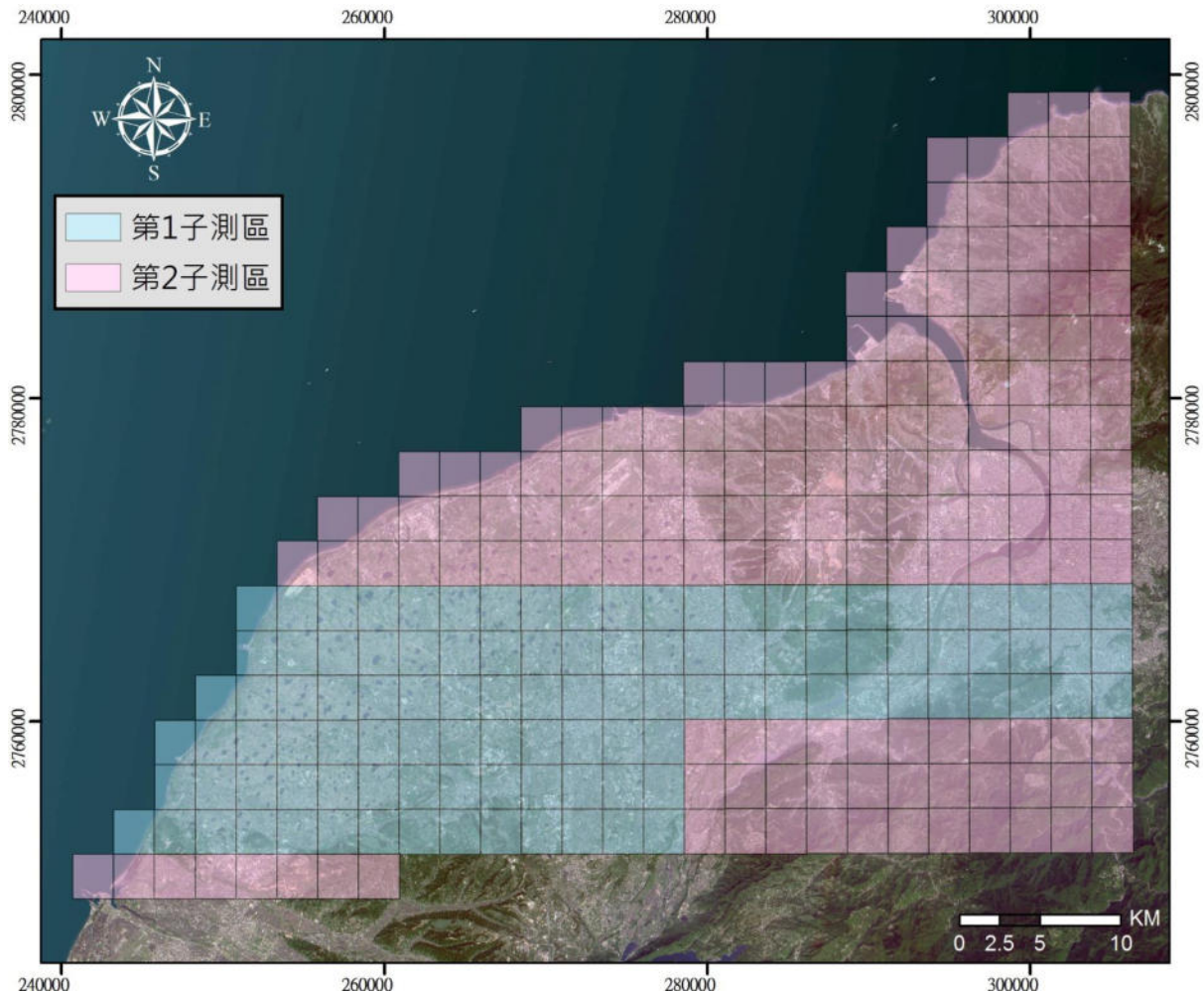


圖 1.1 第 1 作業區與各子測區示意圖

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(含各階段繳交期限)

階段	交付項目	原契約 繳交期限	展延 繳交期限
第 1 階段	110 年作業計畫(含空載光達掃瞄飛航計畫)初稿 10 份及電子檔 2 份。	110/2/8	
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(110 年度範圍 40%以上圖幅)及控制測量(繳交 110 年度範圍)】。	110/8/31	110/9/23
	2.正射影像成果(繳交點雲所含圖幅之資料)。		
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(110 年範圍之剩餘圖幅數)】。	110/11/30	110/12/23
	2.正射影像成果(同點雲資料處理繳交之圖幅)。		
第 4 階段	110 年度工作總報告(初稿)10 份及電子檔 3 份。	110/12/10	111/1/2
	修正後 110 年度工作總報告 8 份及電子檔 3 份。	機關指定期限繳交。	

*因新冠肺炎疫情全國三級警戒影響履約工作執行，110 年 8 月 2 日測形字第 1101335107 號函展延第 2 階段~第 4 階段履約期限。

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	110.01.28 中興測字 第 1100000051 號	110.02.03 成大產創字 第 1101100346 號	110.02.08 中興測字 第 1100000080 號	110.02.26 測形字 第 1101570092 號
第 2 階段	110.09.11 中興測字 第 1100000208 號	110.09.16 成大產創字 第 1101102957 號	110.09.16 中興測字 第 1100000511 號	110.09.22 測形字 第 1101301804 號
第 3 階段	110.12.08 中興測字 第 1100000680 號	110.12.15 成大產創字 第 1101104080 號	110.12.16 中興測字 第 1100000695 號	110.12.28 測形字 第 1101570553 號
第 4 階段	110.12.20 中興測字 第 1100000704 號	110.12.23 成大產創字 第 1101104235 號	110.12.24 中興測字 第 1100000718 號	110.12.30 測形字 第 1101570570 號

第二章 作業規劃

§2-1 作業準備

2-1-1 飛航申請作業

本團隊針對作業所需，租用德安航空 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，於 110 年 3 月 3 日通過申請(台內地字第 1100106602 號)，可依天候及潮汐時間辦理空載光達掃瞄作業。

並於本計畫簽約後函請航空公司向交通部民用航空局申請飛航許可：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。



圖 2.1 飛航申請公文

德安航空之 BK-117 型飛機，於 110 年 3 月 16 日、110 年 3 月 22 日及 110 年 6 月 21 日通過 110 年度作業飛航申請(空運管字第 1100007108 號、空運管字第 1100007658 號、空運管字第 1100016242 號)，核准公文如附件八所示。

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	
	<ul style="list-style-type: none"> · 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：<5-20cm,1σ · 水平精度：1/5,500 航高,1σ · 雷射波長：1064nm · 光束發散角度：0.25mrad(1/e) · 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	
	<ul style="list-style-type: none"> · 像幅大小：11608×8708 · 像元尺寸:4.6um · 鏡頭焦距：50mm · FOV：56.2 · 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

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。



圖 2.4 飛航規劃流程

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
航帶影像重疊率	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 50 度
航空攝影方式	採垂直連續攝影(攝影軸傾斜角應小於 15 度)
航拍影像前後重疊率	前後重疊率應大於 80%
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。關於參數設定，脈衝頻率設定與航高有關，依照測區地形與規範要求規劃航高後，即能決定脈衝頻率參數。掃描頻率則和 FOV 參數連動，於選定 FOV 角度後設定掃描頻率，使點雲沿飛行方向和垂直飛行方向點距相近，即得到掃瞄點均勻分布之點雲，於相同平均點雲密度下更有效的記錄現況地形。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，規劃出最佳掃瞄參數，規劃成果及說明如表 2.3 及圖 2.5 所示，共 96 條航線里程共 3467 公里。

表 2.3 飛航掃瞄參數表

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)	掃瞄角度 (deg)	掃描頻率 (Hz)	雷射脈衝率 (KHz)	平均掃描帶寬 (m)	平均重疊帶寬 (%)	影像左右重疊率 (%)	平均點雲密度 (pt/m ²)
A	1~41	41	400	0	200	2100	2300	100	±20	38	100	1529	54	69	>2.2
B	42~70	29	900	0	600	1700	2300	100	±20	38	100	1237	60	78	>2.2
C	71~85	15	1100	0	800	1500	2300	100	±20	38	100	1092	59	72	>2.2
Cross	86~90	5	400	0	200	2100	2300	100	±20	38	100	1529	-	-	-
Coast	800~805	6	50	0	25	2275	2300	100	±20	38	100	1638	-	-	-
Total	96	總公里數		3467											

*影像前後重疊率設定為 85%。

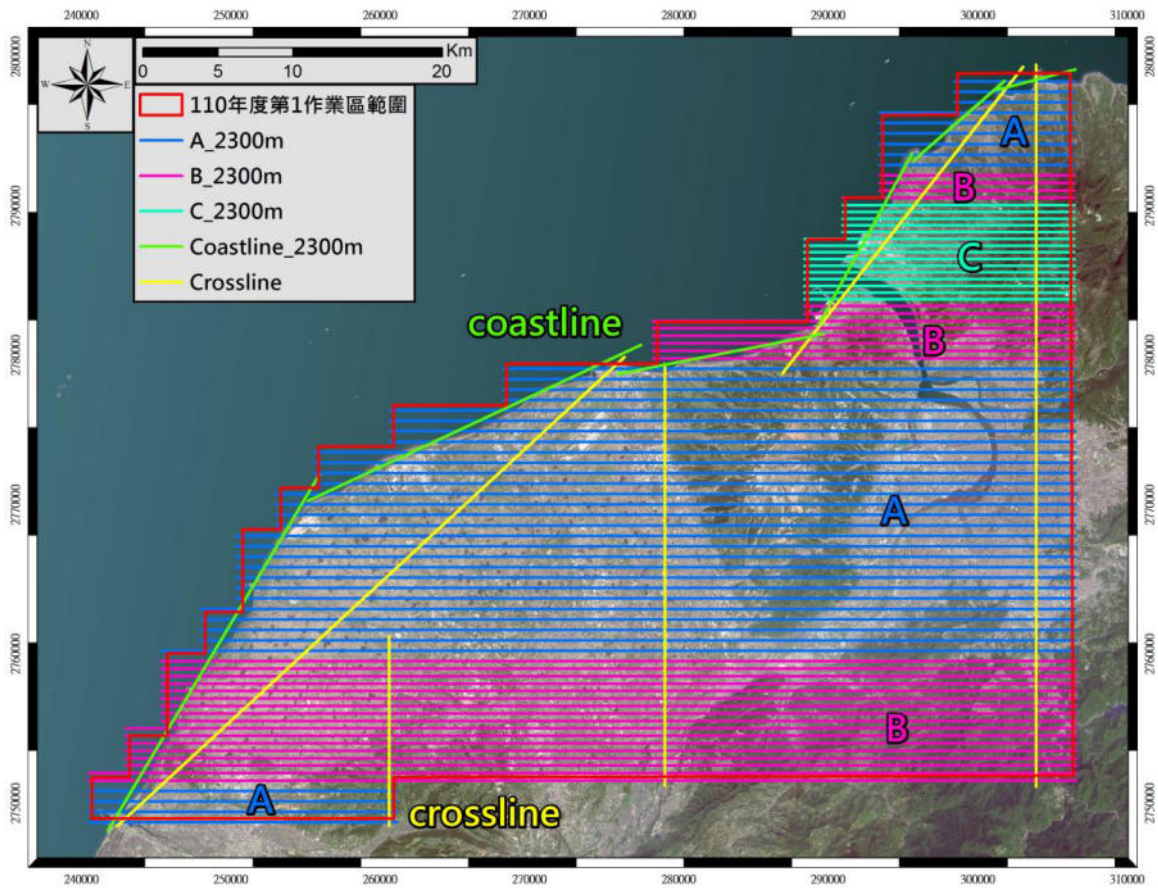


圖 2.5 測區航線展繪圖

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

本計畫平面坐標系統採用內政部公告之 TWD97【2020】，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 25 個已知 GNSS 連續站提供監審方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等，位置分布如圖 3.1

3. 新架設站說明

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。本計畫參考既有連續衛星追蹤站位置，自行布設 GNSS 連續站 CH61，基站坐標列表如表 3.1。

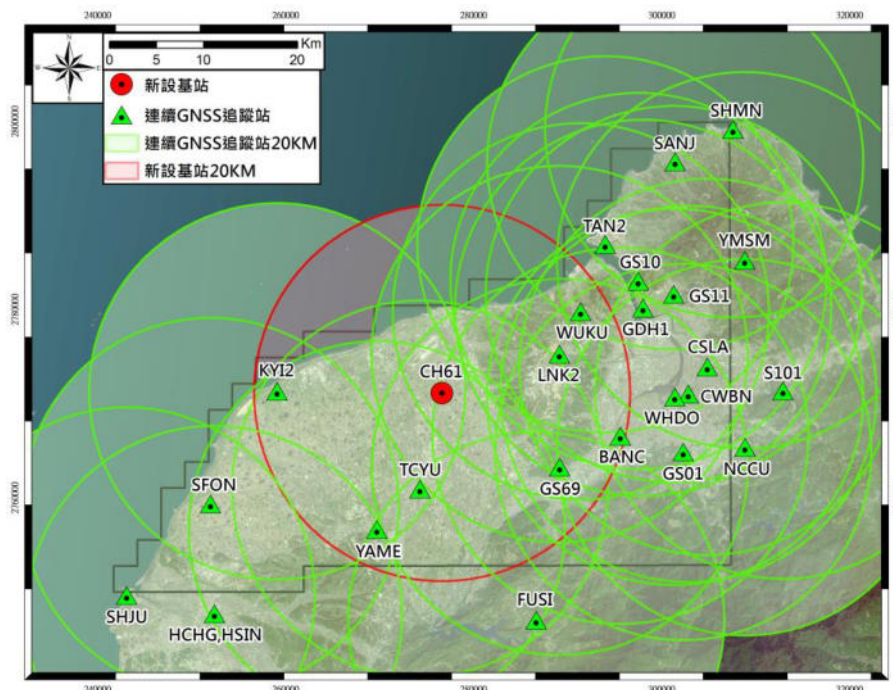


圖 3.1 GNSS 控制點與基站分布圖

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 【2020】 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) 相關資料提供監審方，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 110 年 4 月 2 日至 110 年 4 月 4 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 3.1。

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，計畫新架設 CH61 基站屬此架設方式。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 3.2。

表 3.1 地面控制點坐標成果表(TWD97【2020】坐標)

點號	點名	設立單位	縱坐標 N(m)	橫坐標 E(m)	橢球高 h(m)
CH61	大華國小	CHS 架設	2770137.620	275636.160	93.863
FUSI	復興	內政部國土測繪中心	2746020.388	285668.876	502.098
HCHG	新竹縣府	內政部國土測繪中心	2746653.098	251412.634	84.666
SHJU	南寮	內政部國土測繪中心	2748621.129	242112.676	24.414
SHMN	石門	內政部國土測繪中心	2798179.454	306610.430	46.683
TCYU	中壢	內政部國土測繪中心	2759970.992	273309.003	207.359
YMSM	陽明山	內政部國土測繪中心	2784255.637	307868.468	783.940
BANC	板橋	交通部中央氣象局	2765590.570	294628.074	31.076
CWBN	氣象局	交通部中央氣象局	2770047.287	301862.184	55.709
HSIN	新竹	交通部中央氣象局	2746699.359	251441.911	48.835
KYI2	觀音	交通部中央氣象局	2770316.645	258124.259	32.372
LNK2	林口	交通部中央氣象局	2774429.802	288045.454	282.946
SANJ	三芝	交通部中央氣象局	2794758.575	300451.816	74.204
SFON	新豐	交通部中央氣象局	2758345.217	251026.861	52.839
TAN2	淡水古蹟博物館	交通部中央氣象局	2785618.400	293478.776	68.333
WUKU	五股坑	交通部中央氣象局	2778827.731	290405.352	225.864
YAME	楊梅	交通部中央氣象局	2755650.597	268718.428	218.843
GS01	地調所	經濟部中央地質調查所	2763879.704	301302.356	53.459
GS10	竹圍國中	經濟部中央地質調查所	2782045.543	296534.305	52.156
GS11	北投國小	經濟部中央地質調查所	2780664.522	300292.123	46.586
GS69	樹林垃圾掩埋場	經濟部中央地質調查所	2762283.181	288184.828	132.378
CSLA	中山地政事務所	臺北市政府	2772922.760	303874.151	48.073
GDH1	關渡醫院	臺北市政府	2779190.767	297036.045	78.952
NCCU	政大	臺北市政府	2764379.906	307897.809	107.592
WHDO	萬華行政中心	臺北市政府	2769734.614	300430.494	81.492
S101	南港	臺北市政府(中研院)	2770398.466	311943.529	59.150

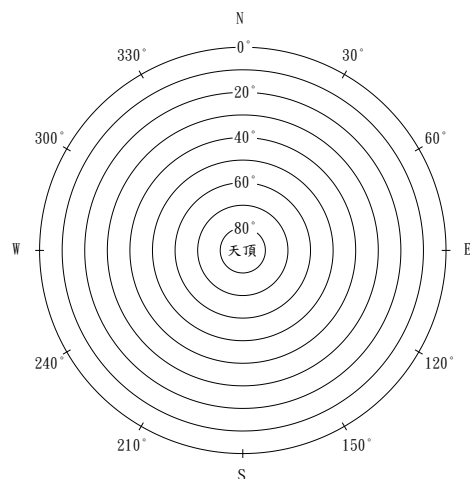


圖 3.2 CH61 基站現況與透空圖

§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 測量作業依照契約規範主要依照「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 控制點 GNSS 測量

控制點測設主要分為高程控制點與平面控制點兩部分，為有效提昇高程控制點的精度，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 110 年 2 月 22 日至 2 月 26 日，計 5 個工作天共觀測 19 個時段，其實際觀測網形如圖 3.3。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 3.4)，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，求得新設控制點之坐標。

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)。並於平面控制點測設時段一併施測臨近全控點，後續比對坐標值，確認平面控制點系統(VBS-RTK)和全控點系統(靜態 GNSS)一致。

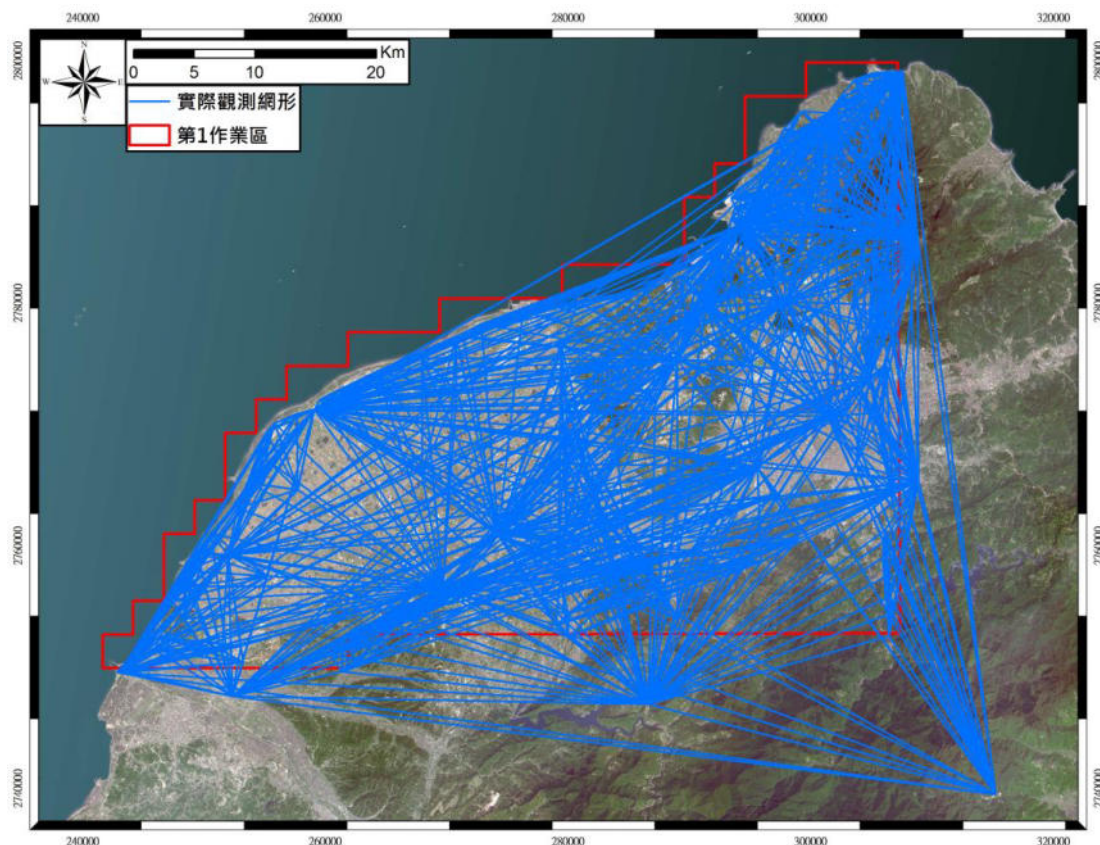


圖 3.3 GNSS 實際觀測網形圖

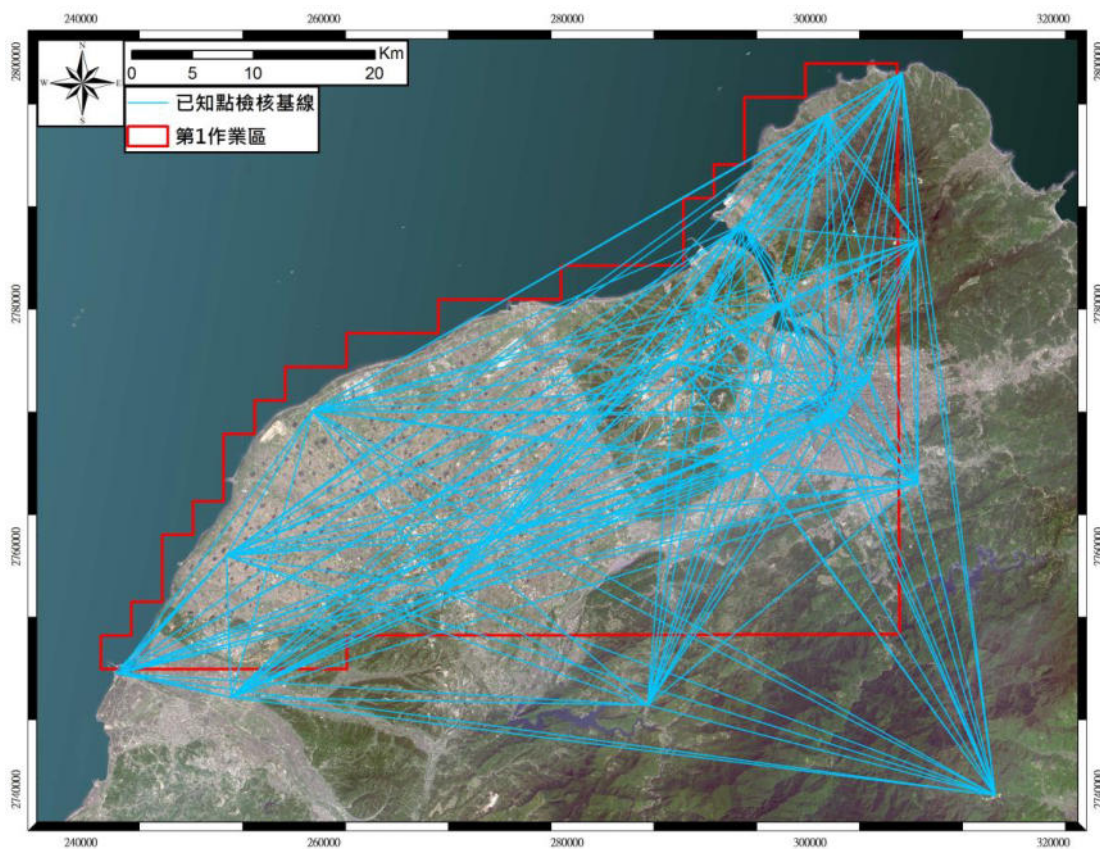


圖 3.4 已知點檢核基線分布圖

本年度航帶平差控制點測設分為航帶高程控制點及平面控制點，提供航帶平差使用，以及空三檢核點，皆於測設後製作點之記。航帶平差控制點依規範於測區四角應布設 1 組全控點，另外配合空三分區四角規劃全控點，且皆布設航空標並採靜態基線測量方式測設，測區共 25 點。配合航線以鋼釘設置於航帶頭、中及尾各至少 1 控制點，以方格標布設，供航帶平差高程約制。為有效提昇精度，採靜態基線測量方式測設，測區共 91 點。空三檢核點須達 5%圖幅數量，本次作業區規劃共 14 點均勻分布於各空三分區內，布設航空標並採靜態基線測量方式測設。平面控制點受限於地物環境影響，則採用之 VBS-RTK 方式測設共 30 點。另外亦與同年度相鄰作業區交換控制點，共同使用，點位分布如圖 3.5 所示，點坐標成果如附件三。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五千分之一地形圖作業規定。

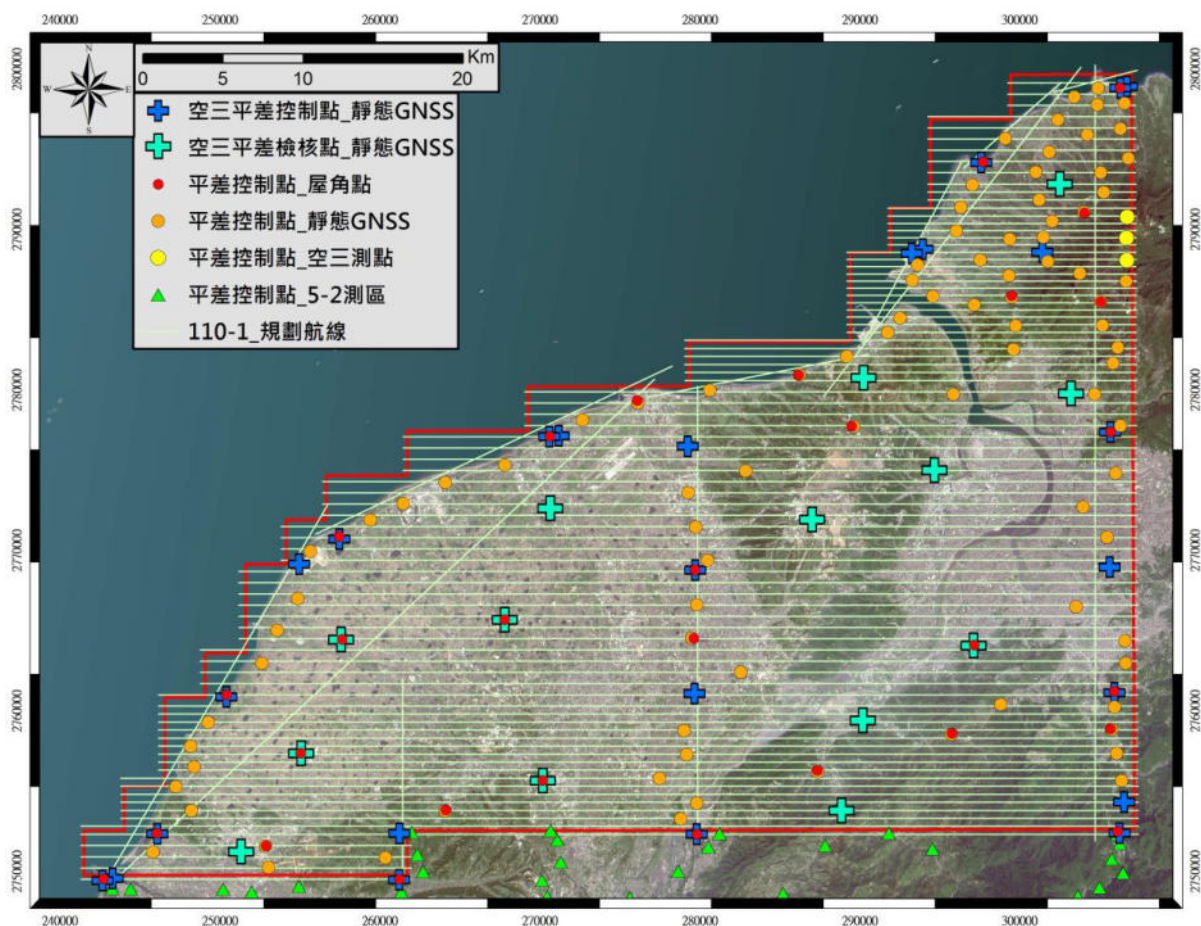


圖 3.5 航帶平差控制點分布圖

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。

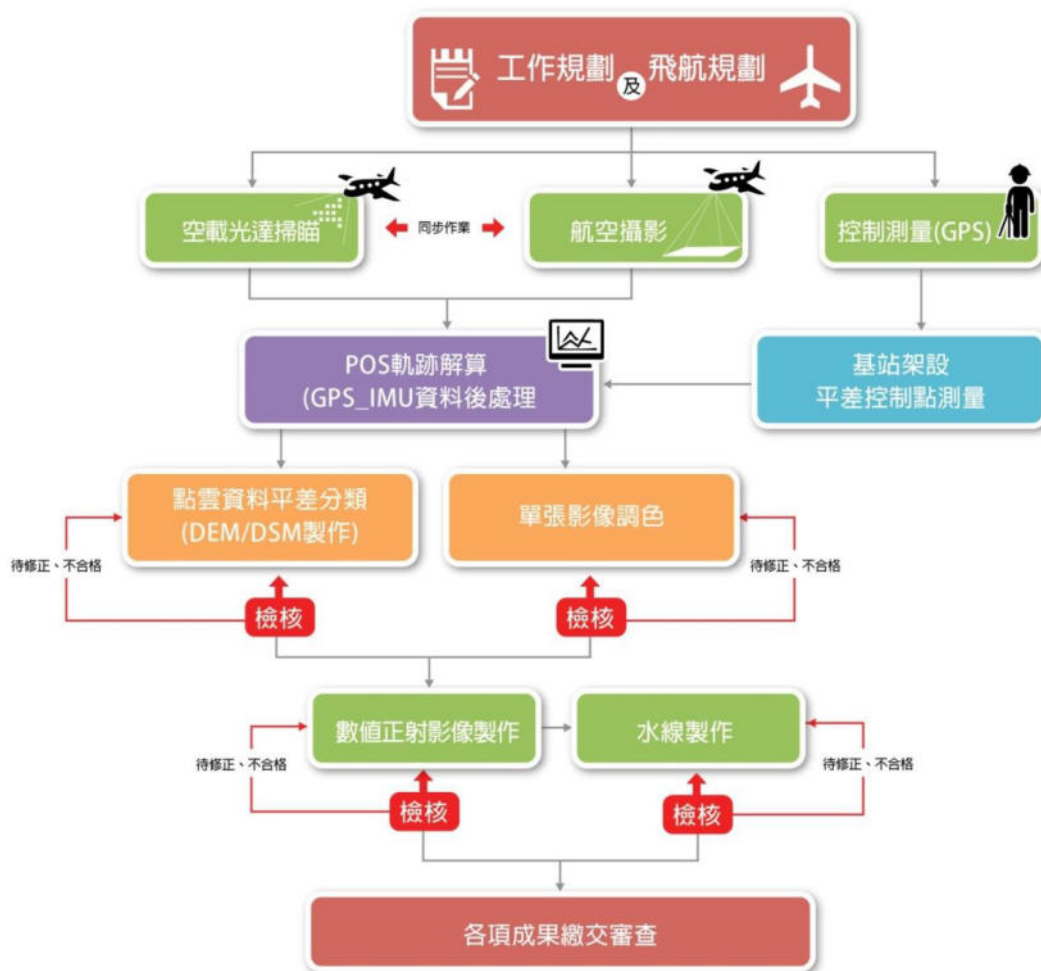


圖 4.1 工作流程圖

§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 110 年 3 月 1 日執行，並於同年 3 月 9 日通過光達設備校正(報告編號 I202101040301)，校正報告書如附件四所示。

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 1.5 平方公里。

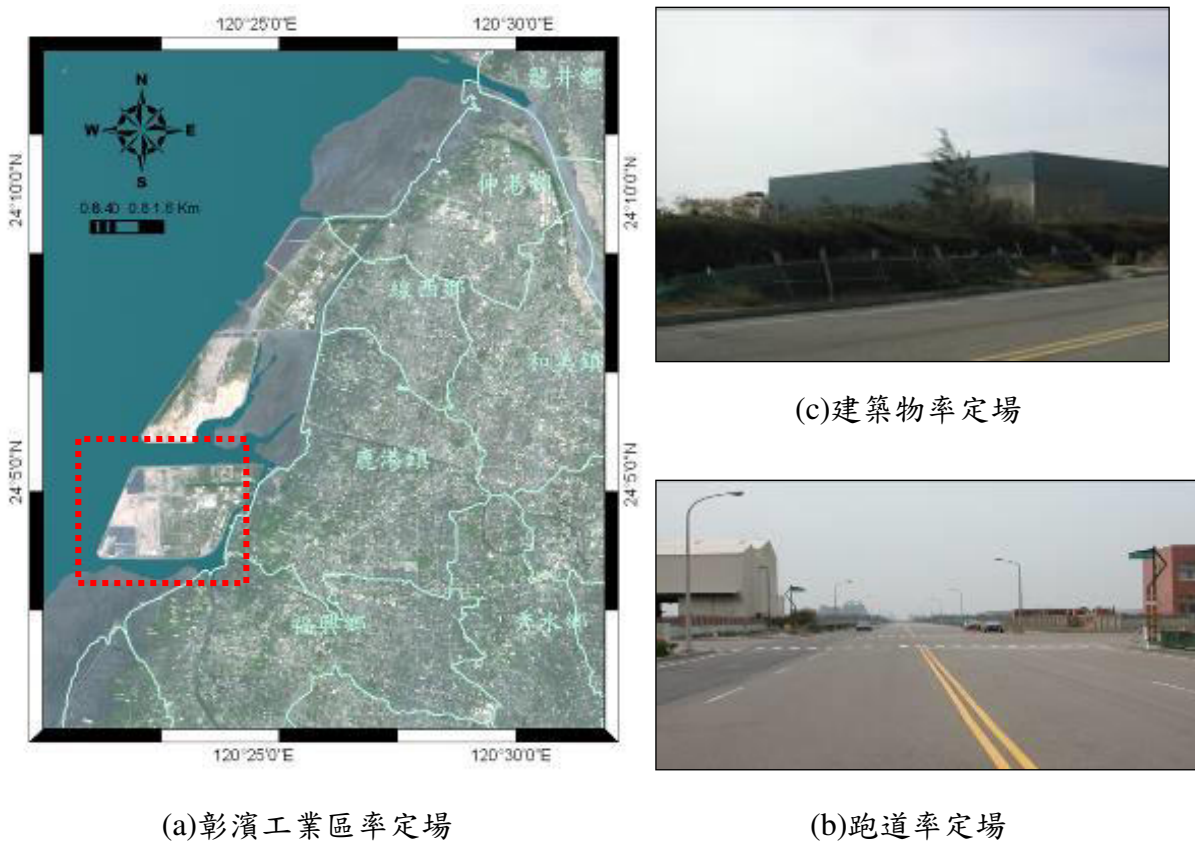


圖 4.2 率定場位置與現況示意圖

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，並參考經濟部水利署地層下陷監測資訊整合服務系統，此地區於 106 年至 109 年的資料，並無地層下陷之數據，故此位置為符合本儀器率定之作業地區。故此位置為符合本儀器率定之作業地區。

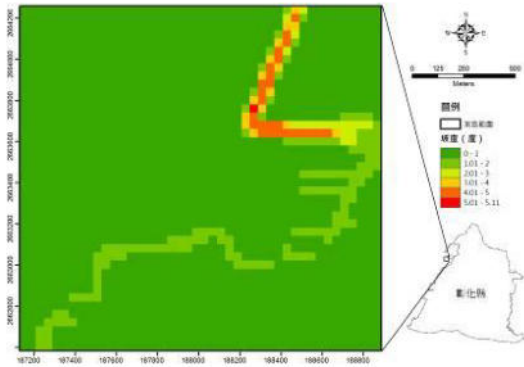


圖 4.3 率定場坡度圖

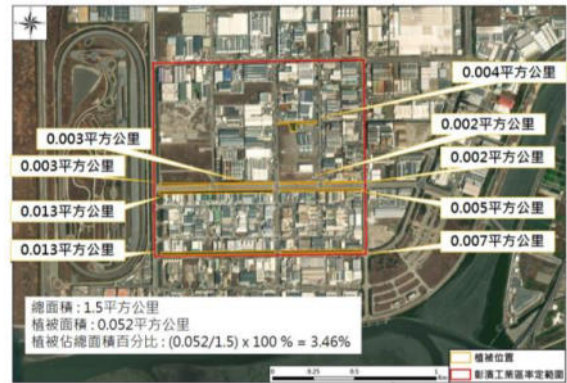


圖 4.4 率定場植被分布圖



圖 4.5 率定場平均下速率等值圖

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 5 公里內，透過長時間聯測算出其坐標，其分布圖如圖 4.6。



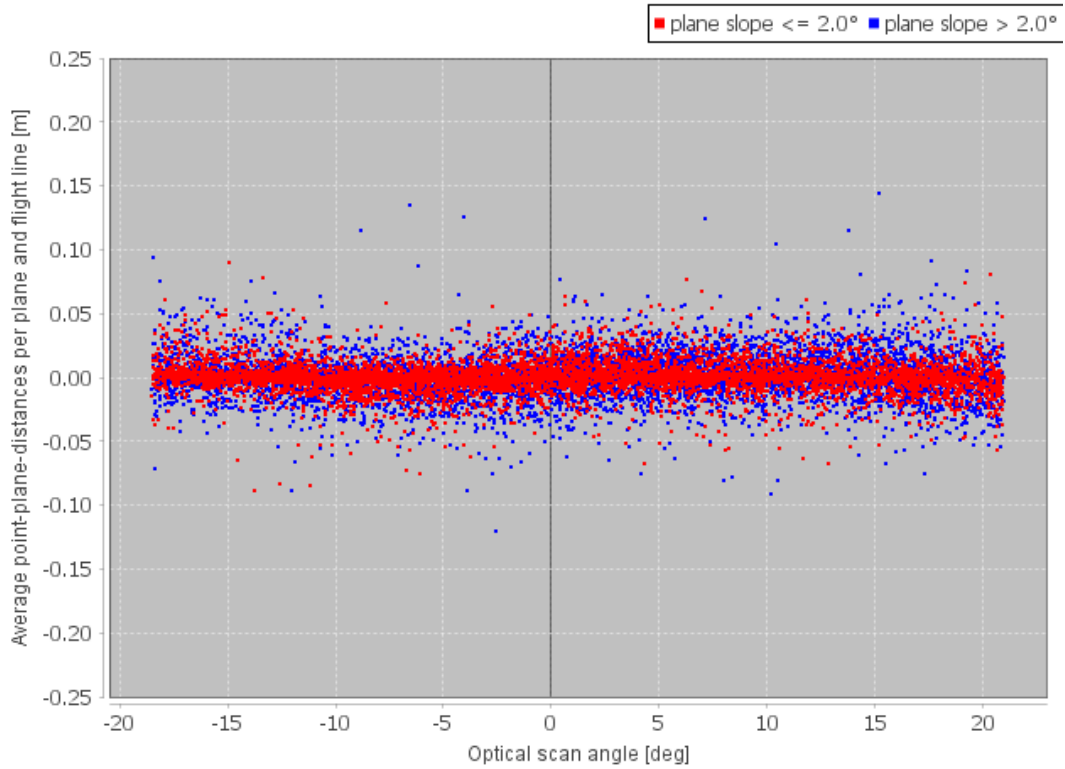
圖 4.6 率定 GNSS 基站位置圖

4-1-2 率定場飛行作業程序

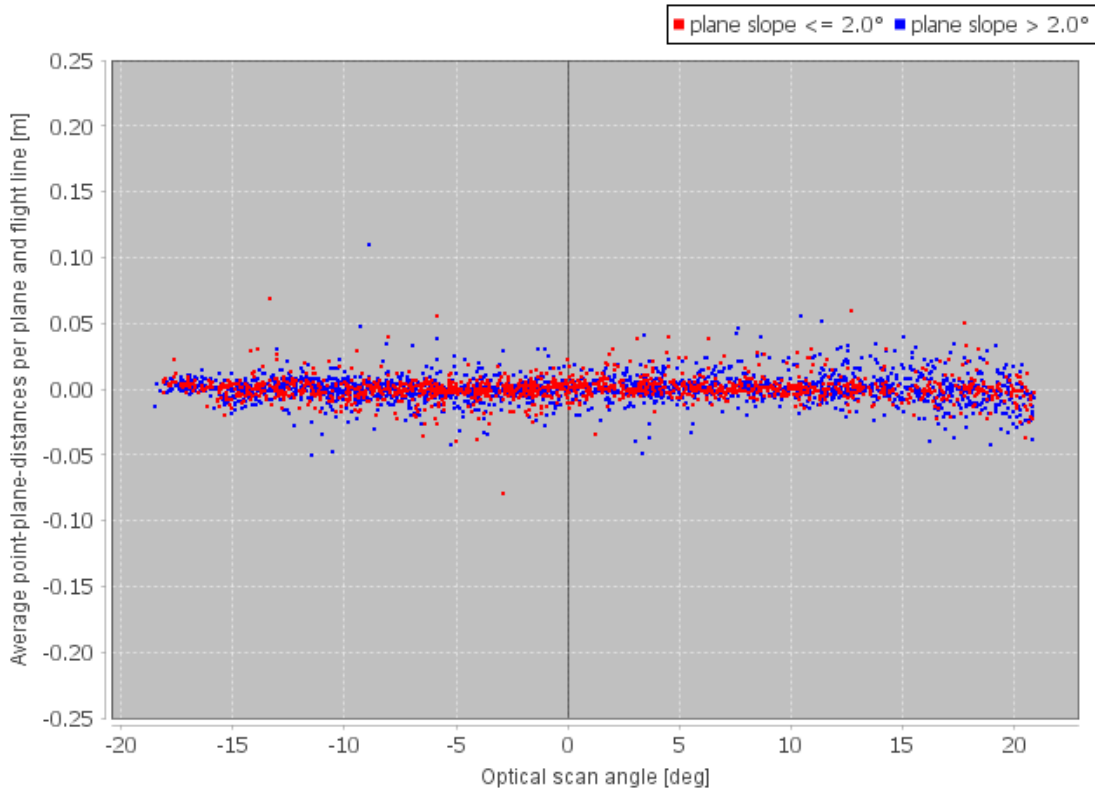
使用空載光達設備為 Optech Pegasus HA500。載具部分使用德安航空載具(BK-117)，於點雲資料使用前執行率定作業，於 110 年 4 月 5 日及 110 年 9 月 4 日，執行率定作業以修正偏差量，以確保雷射點雲精確度。第二次率定作業係因 110 年 7 月 9 日配合航空公司其他業務安排進行設備拆卸，設備裝設後續飛航架次皆使用第二次率定成果進行資料處理。率定作業參照加拿大原廠 Optech 公司建議與規定，執行相關過程與精度評估。

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 4.7~圖 4.8 表示。

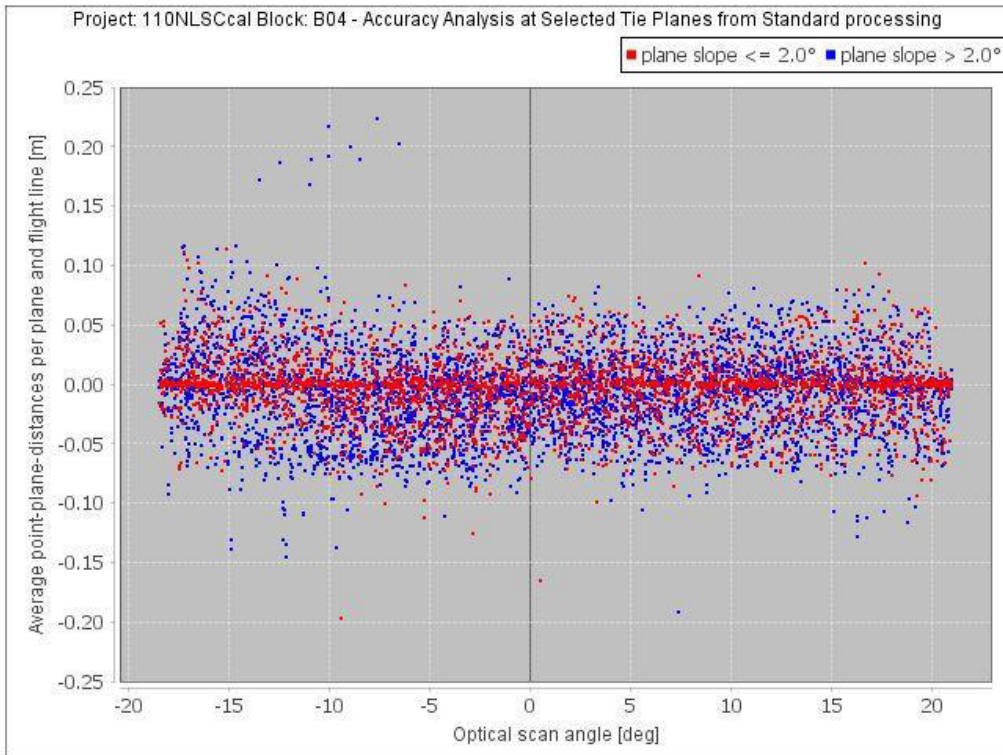


(a) 4/5 率定前



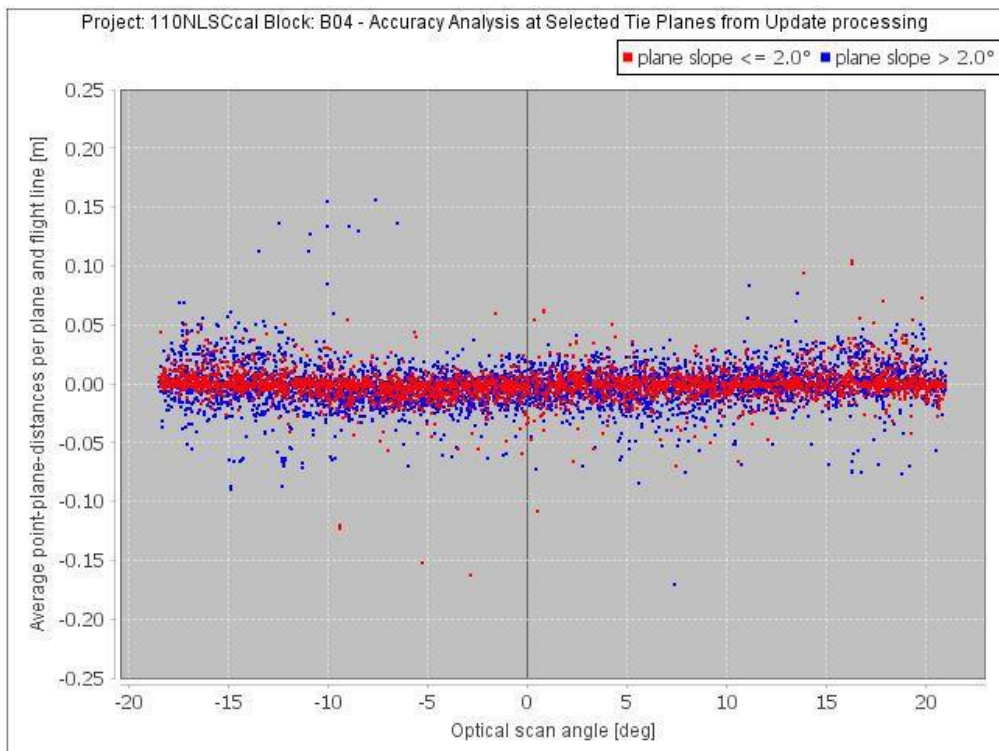
(b) 4/5 率定後

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



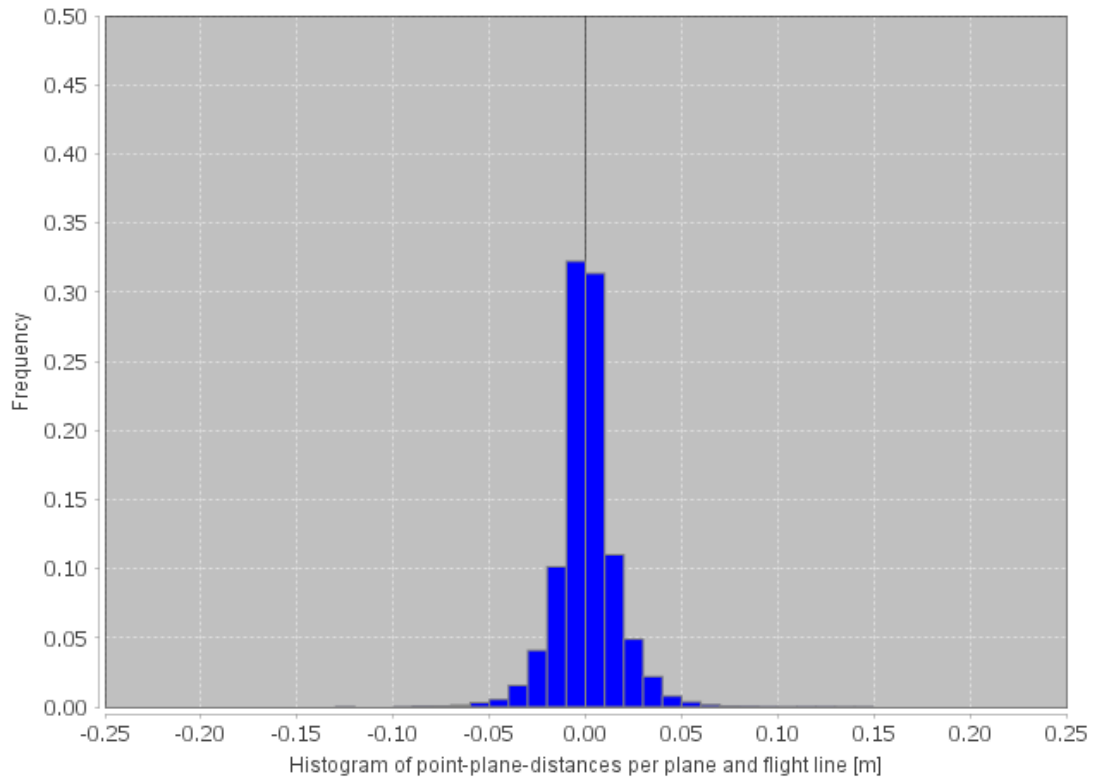
(c) 9/4 率定前

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes

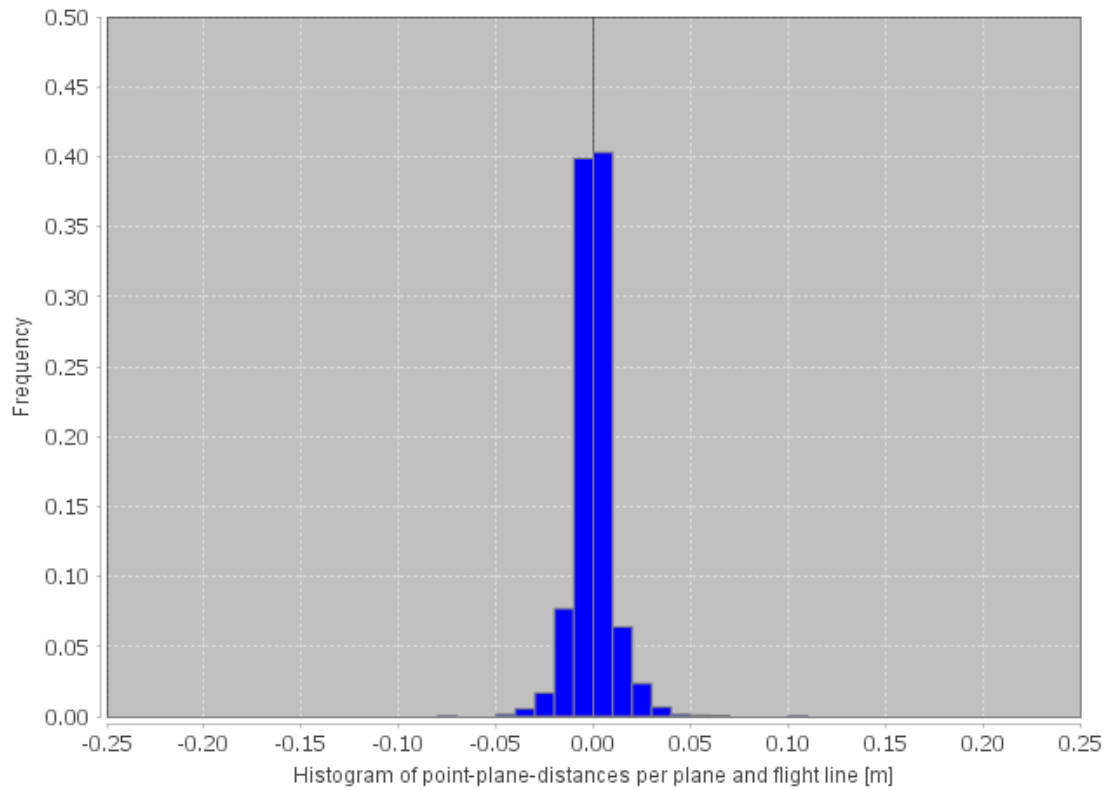


(d) 9/4 率定後

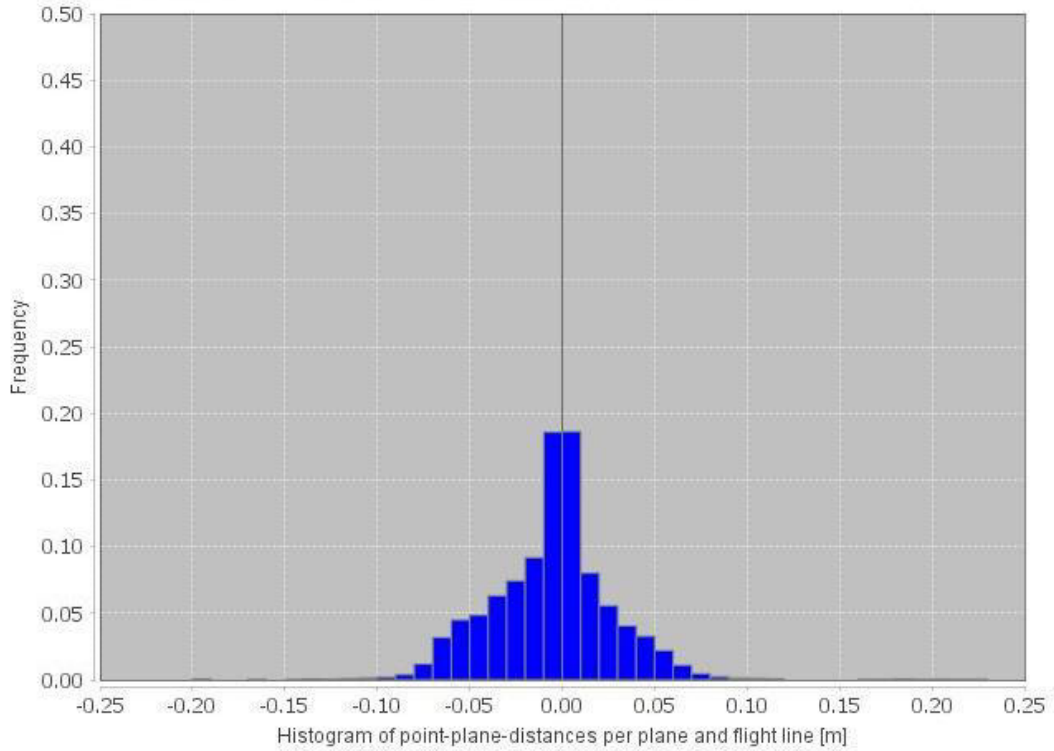
圖 4.7 雷射點至萃取面的距離統計分布圖



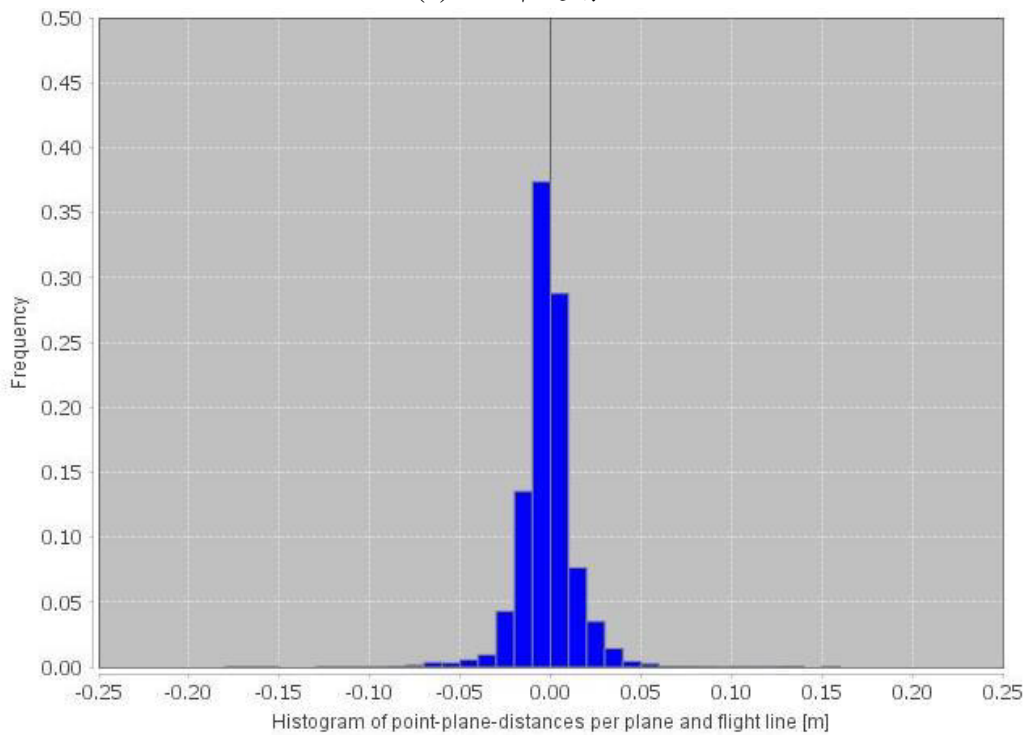
(a) 4/5 率定前



(b) 4/5 率定後



(c) 9/4 率定前



(d) 9/4 率定後

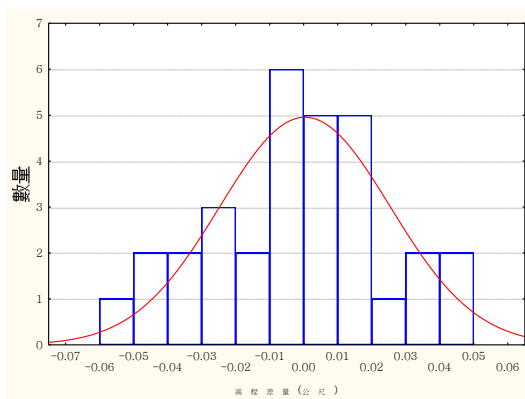
圖 4.8 雷射點至萃取面的距離統計直方圖

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

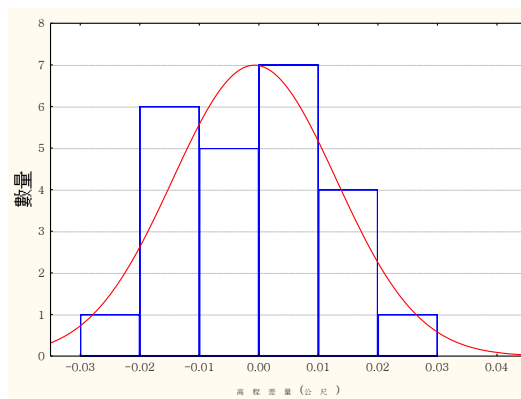
定參數解算確認飛行之點雲資料，確認不同航帶間之點雲無明顯偏移後，再次與地面實測點比較，其高程坐標差值應小於 0.1 公尺。以率定後新參數值算出新的成果，再次與平坦面進行比對。若高程誤差量大於 0.1 公尺精度，方需針對測距距離進行修正。率定後雷射點成果與實測點比對，皆符合依原廠建議與契約規範，詳如下列統計成果所示：

表 4.1 光達率定系統高程分析統計表

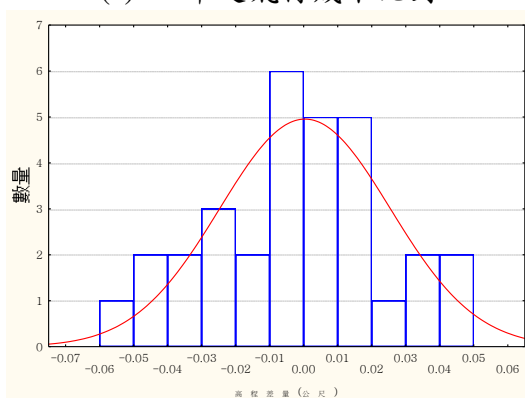
高程統計分析	最大差異量(m)	平均差異量(m)	均方根誤差(m)
4/5 率定飛行成果	0.052	0.000	0.001
4/5 確認飛行成果	0.032	0.000	0.000
9/4 率定飛行成果	0.054	0.001	0.002
9/4 確認飛行成果	0.038	0.000	0.000



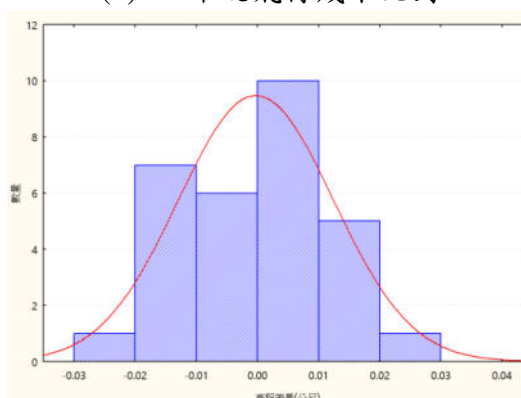
(a)4/5 率定飛行成果比對



(b)4/5 確認飛行成果比對



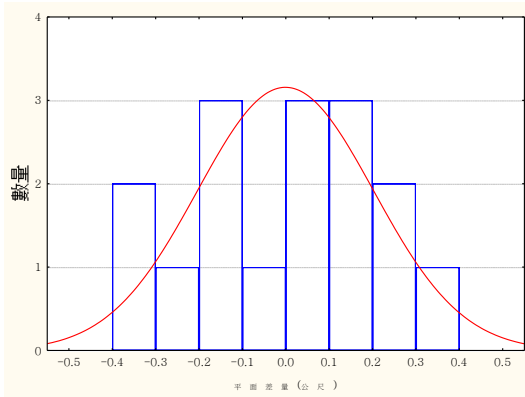
(c)9/4 率定飛行成果比對



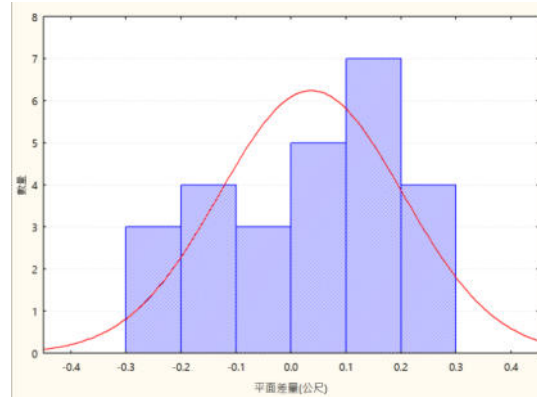
(d)9/4 確認飛行成果比對

圖 4.9 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 4.10)，確認率定參數可用。



(a)4/5 平面精度分析圖



(b)9/4 平面精度分析圖

圖 4.10 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 4.11)。

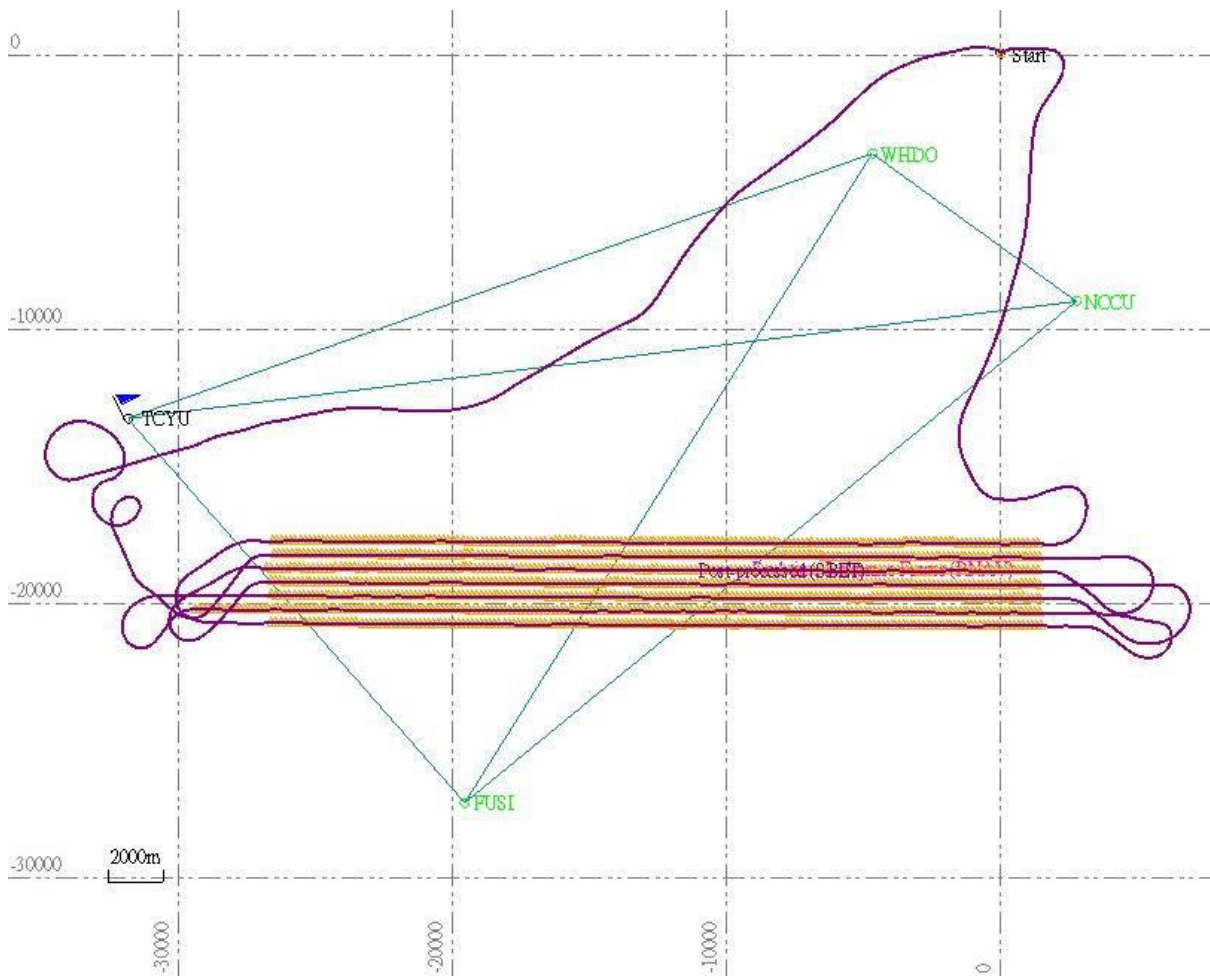


圖 4.11 飛航軌跡與基站示意圖(每格為 10 公里)

自 110 年 4 月 7 日至 110 年 8 月 30 日共 25 架次飛航任務，總計 157 條航線(含補飛)。本測區於 110 年 3 月 22 日通過民航局申請後，至 8 月 30 日共 161 日，扣除航空器無法執行任務天數共 23 天(飛機保養、航空器號誌異常、發動機異常、航空公司驗證業務、航空器檢修)，飛航作業可飛天數共計 138 天，皆進行飛航待命把握天氣良好時段進行飛航作業。於飛航完竣後，將依據實施航空測量攝影及遙感探測管理規則，預計於 111 年 1 月提送工作報告書及航攝獲取之影像至內政部備查。

另外基站之 PDOP 規範要求 GNSS 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 4.13)，本計畫所有架次執行成果皆符合規範要求。

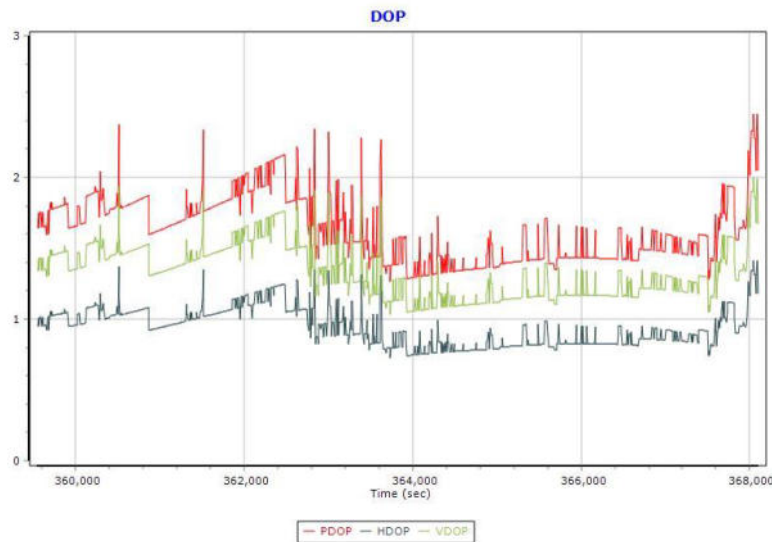


圖 4.12 地面基站 PDOP 圖

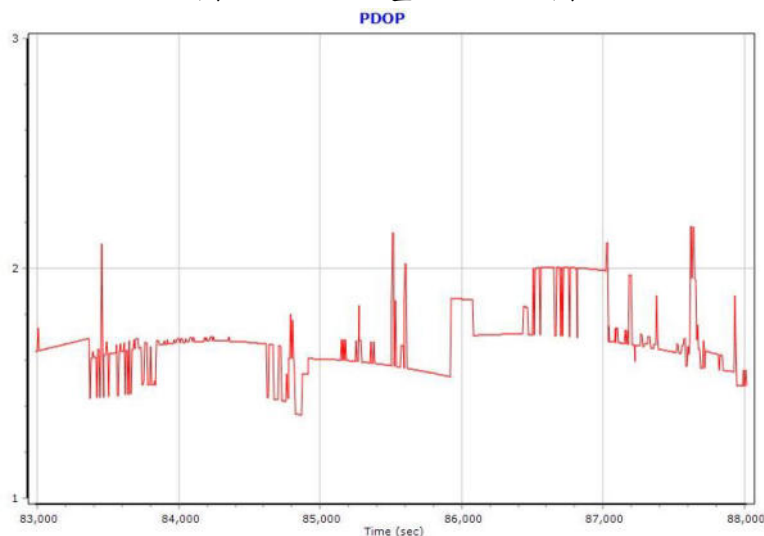


圖 4.13 機載 PDOP 圖

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掃瞄設備，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	2021/04/07a	07:55:05~10:19:51	07:00:00~10:59:59
2	2021/04/07b	11:02:58~13:06:23	10:41:21~13:59:59
3	2021/04/12a	12:04:58~14:37:12	11:00:00~14:59:59
4	2021/04/13a	07:34:33~09:51:24	07:00:00~10:59:59
5	2021/04/20a	08:32:06~10:44:06	08:00:00~10:59:59
6	2021/04/20b	11:19:33~13:28:48	11:00:00~13:59:59
7	2021/04/21a	07:31:51~08:47:29	07:00:00~08:59:59
8	2021/05/16a	10:30:33~12:24:23	08:00:00~13:59:59
9	2021/05/17a	07:15:54~09:46:04	07:00:00~09:59:59
10	2021/05/20a	11:52:19~14:15:07	11:00:00~14:58:12
11	2021/05/27a	10:01:56~12:14:53	09:00:00~12:59:59
12	2021/05/28a	07:28:04~09:35:22	07:00:11~09:59:59
13	2021/06/14a	06:45:49~08:27:03	06:00:00~08:59:59
14	2021/06/15a	07:00:42~09:08:09	06:00:00~09:59:59
15	2021/06/18a	07:10:03~09:30:32	06:00:00~10:29:59
16	2021/06/18b	10:19:42~12:30:29	08:00:00~13:59:59
17	2021/07/26a	06:42:28~08:43:09	06:00:00~09:59:59
18	2021/08/16a	06:36:13~08:42:02	06:00:00~08:59:59
19	2021/08/16b	09:33:05~10:44:01	08:00:00~10:59:59
20	2021/08/25a	06:45:08~08:48:24	06:00:00~08:59:59
21	2021/08/25b	09:28:59~10:33:11	06:00:00~10:59:59
22	2021/08/26a	06:46:53~08:52:25	06:00:00~11:59:59
23	2021/08/27a	06:24:44~08:36:10	06:00:00~09:59:59
24	2021/08/28a	06:26:39~08:47:17	06:00:00~11:59:59
25	2021/08/30a	06:38:01~08:37:17	06:00:00~11:59:59

§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 4.14。

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 4.15。

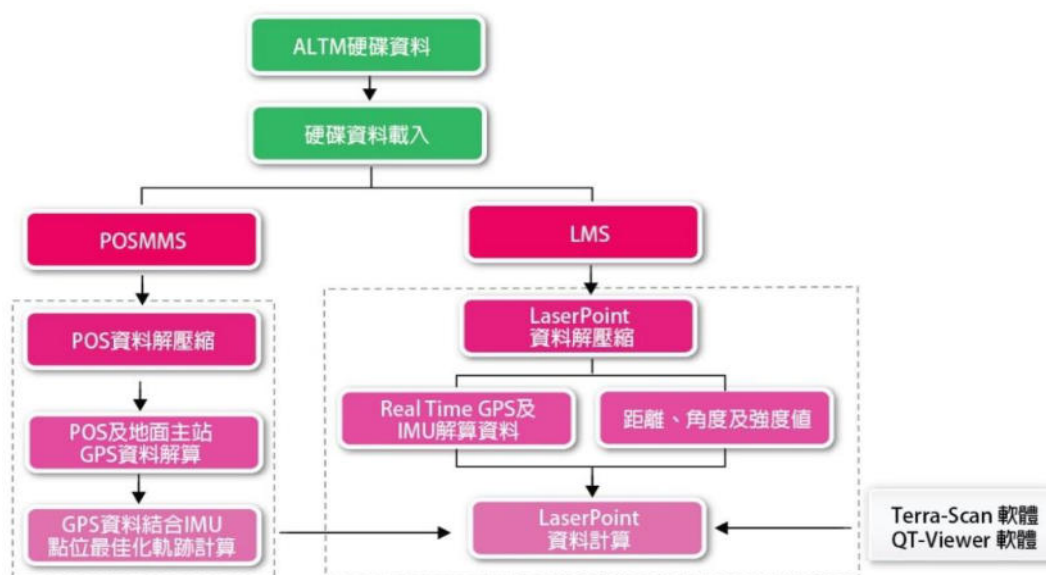


圖 4.14 空載雷射掃瞄資料作業流程

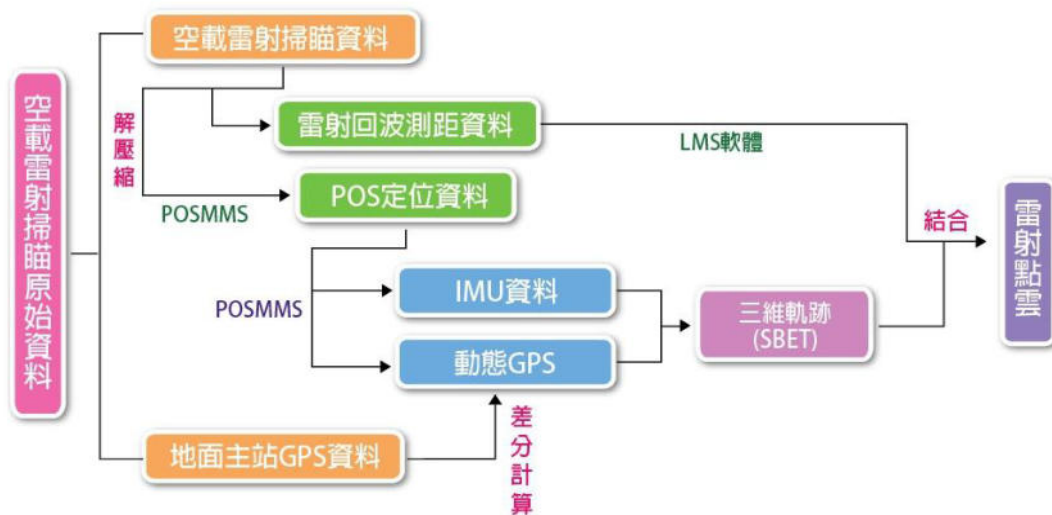


圖 4.15 點雲解算產製處理流程

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 掃描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 4.16)。

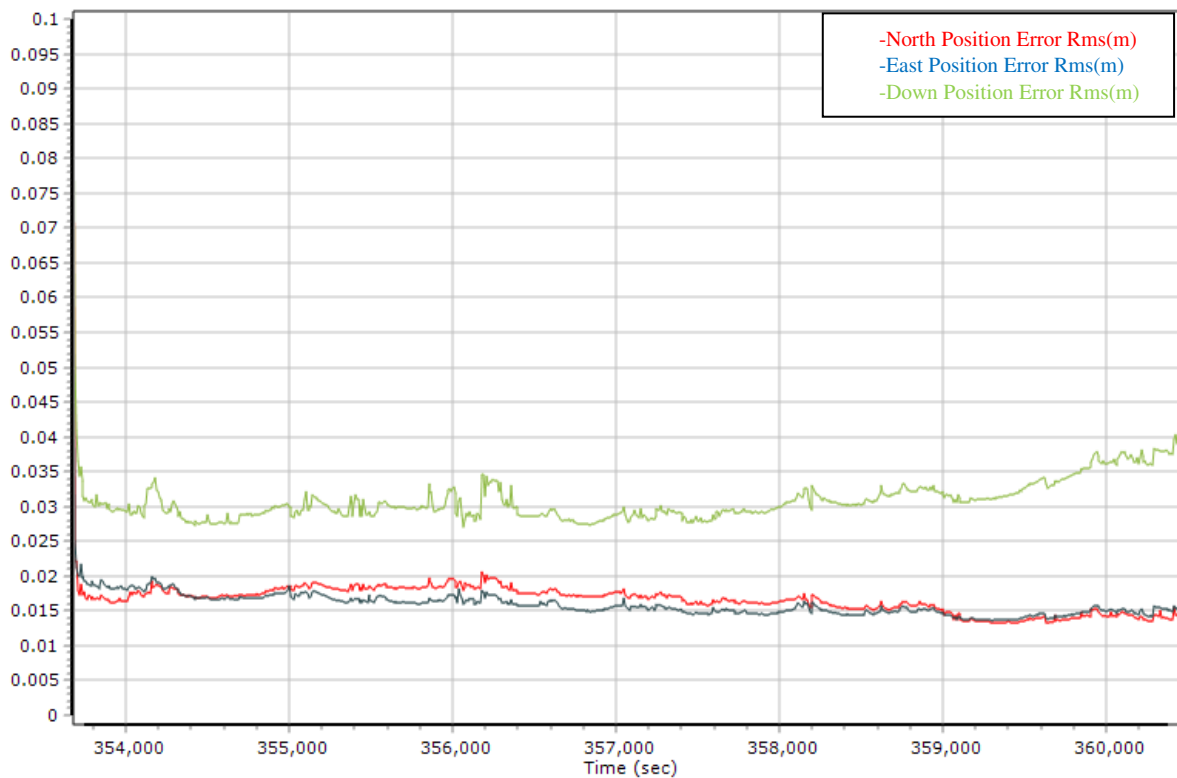


圖 4.16 飛航軌道差異量示意圖

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 4.17)。

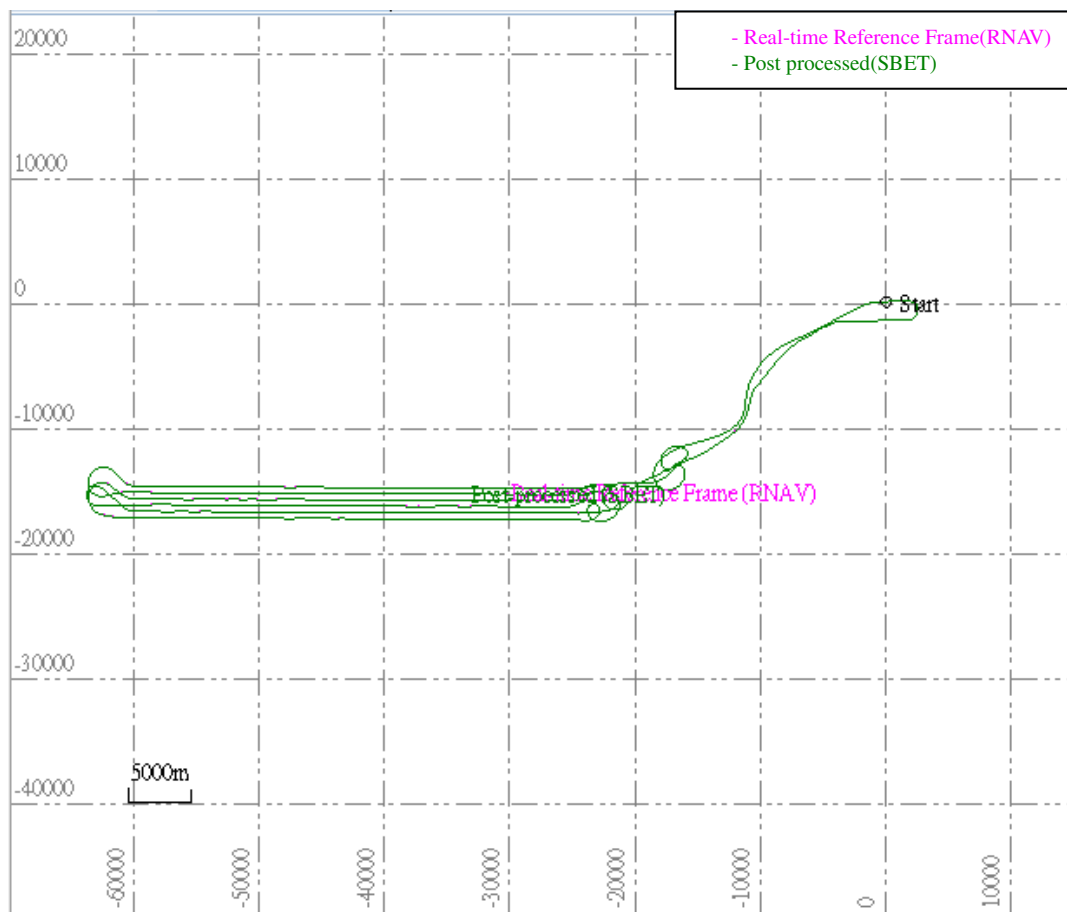
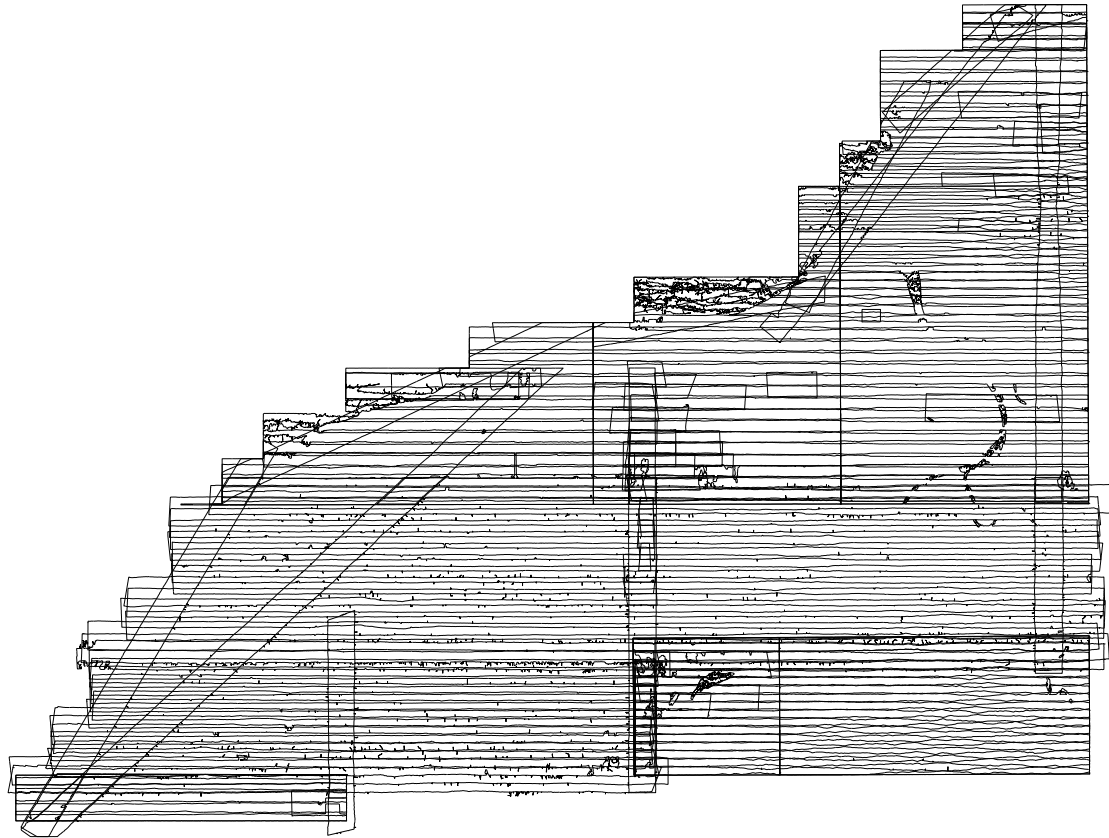


圖 4.17 飛航掃瞄航跡示意圖

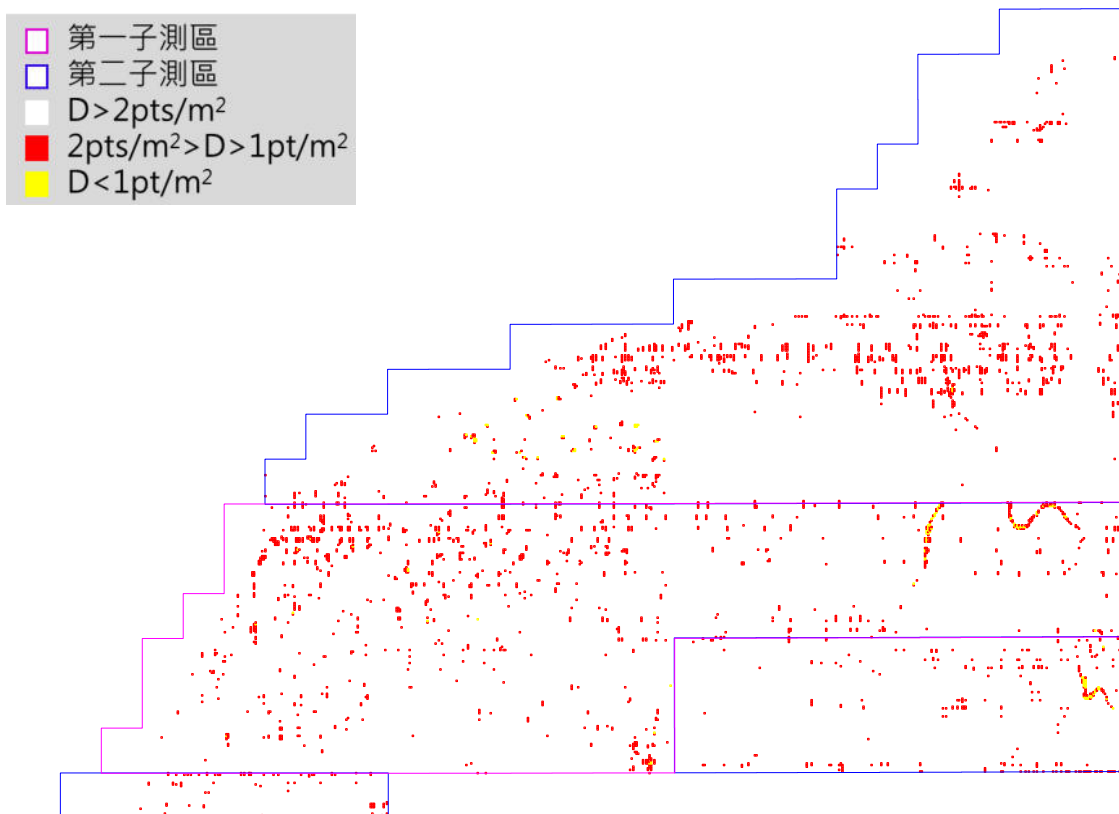
3. 原始點雲產出與檢核

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% 之契約要求，如圖 4.18 航帶間皆有近 50% 之重疊，符合規範要求。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。密度不足比例與低密度比例，皆符合契約要求。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。



(a)航帶邊緣示意圖



(b)密度統計示意圖

圖 4.18 重疊率檢查與密度統計示意圖

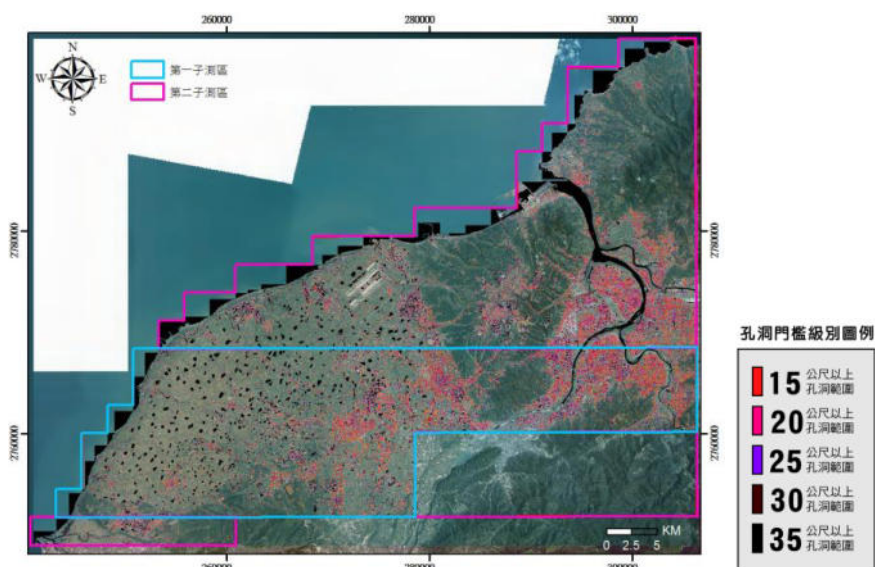
表 4.3 各子測區密度統計表

子測區編號	密度合格比例 (>2 pts/m ²)	密度不足比例 (1~2 pts/m ²)	是否通過契約規定 <10%	低密度比例 (<1 pts/m ²)	是否通過契約規定 <5%
第一子測區	98.02%	1.89%	通過	0.09%	通過
第二子測區	98.13%	1.79%	通過	0.08%	通過

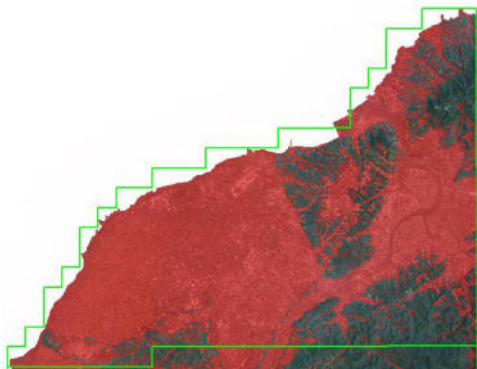
4. 孔洞分析

監審方為確保地形測製成果品質，以產製地面點孔洞分析來對山區點雲過濾成果進行分析和量化分級。統計方式為將分類後之地面點雲，進行 Delaunay 三角剖分分析，剖分成數個三角形，當單一三角形之最大邊長超過 10 公尺，則該三角形所涵蓋區域即視為地面點大孔洞範圍。評估標準為扣除圖幅內平坦地、水域及建物區，統計地面點大孔洞範圍，比例若大於 30% 直接判定為不通過，或小於 10% 即視為合格，介於 10%~30% 間則適用於浮動門檻，同圖幅既有成果比較並額外賦予 +10% 之彈性容許門檻。若該圖幅可供分析面積未達 36 公頃則不列入孔洞分析。統計各圖幅大孔洞是否通過檢核後，不通過之圖幅數量需小於 1/10，則判定地面點空間分布檢查合格。而本公司自我要求地面點空間分布檢查不通過之圖幅數量需等於 0。

監審方第一子測區檢查結果 107 中幅有 75 幅為平地，其餘 32 幅之孔洞分析結果為通過；第二子測區檢查結果 159 中幅有 58 幅為平地，其餘 101 幅之孔洞分析結果為通過。且全區列入統計之圖幅，孔洞表現皆優於既有光達資料，地面點分布評估較前期改善，監審方分析圖表如圖 4.19。



(a) 第 1 作業區孔洞分析圖



(b)第 1 作業區不列入孔洞遮罩(紅)

Table (c) 第一子測區統計表: A detailed data table showing statistical results for the first sub-plot. It includes columns for plot ID (e.g., M021001), station coordinates, and statistical metrics such as '總站數(%)', '不列入孔洞遮罩站數(%)', and '地面點孔洞分析評估統計'.

(c)第一子測區統計表

Table (d) 第二子測區統計表: A detailed data table showing statistical results for the second sub-plot. It follows a similar structure to Table (c), listing station data and statistical analysis for a different area.

(d)第二子測區統計表

圖 4.19 地面點孔洞分析評估統計(摘錄自監審方檢查通知)

§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，以控管整個雷射掃描之精度，並採用 TerraMatch 模組進行雷射掃描航帶平差，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，具有雷射掃描航帶平差之功用，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描時方位參數(Roll、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 4.20 所示。

4-4-2 航帶精度分析及平差處理

雷射掃描(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，雷射掃描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



圖 4.20 平差作業流程圖

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)，並使用第一回波資訊製作數值地表模型(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 4.21 所示，其中不同航線之房屋脊線有明顯偏移。

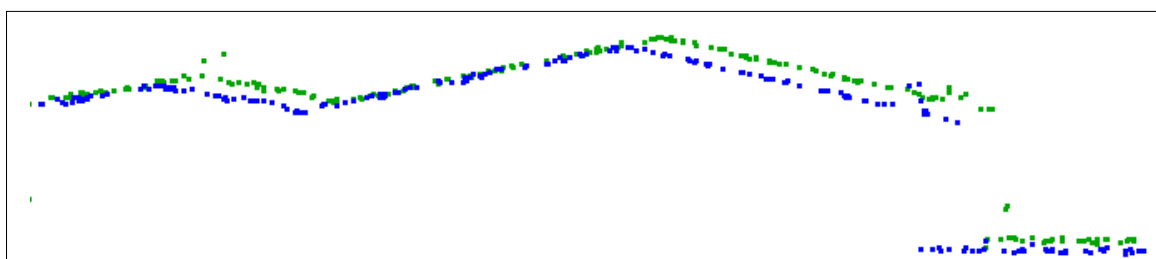


圖 4.21 雷射點偏移示意圖

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 4.22 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。

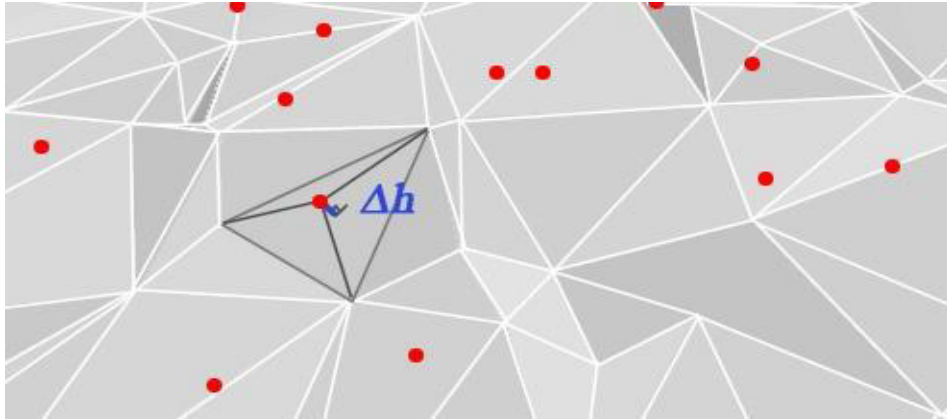


圖 4.22 Measure Match 比對原理示意圖

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，使用航帶平差控制點，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瞄作業後，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 4.23 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	0.282	0.110	0.159	0.037
	平均差量	0.150	-0.145	-0.005	0.067
第二子測區	平均絕對差量	0.387	0.047	0.129	0.076
	平均差量	0.308	-0.254	-0.001	0.076

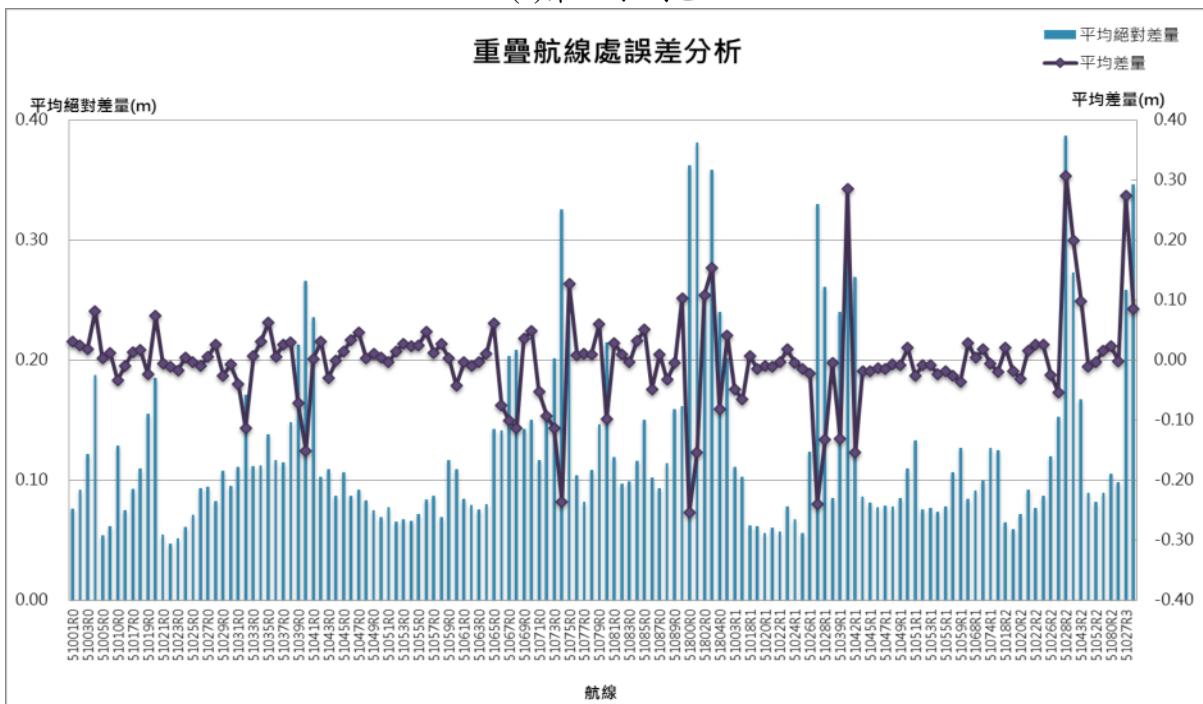
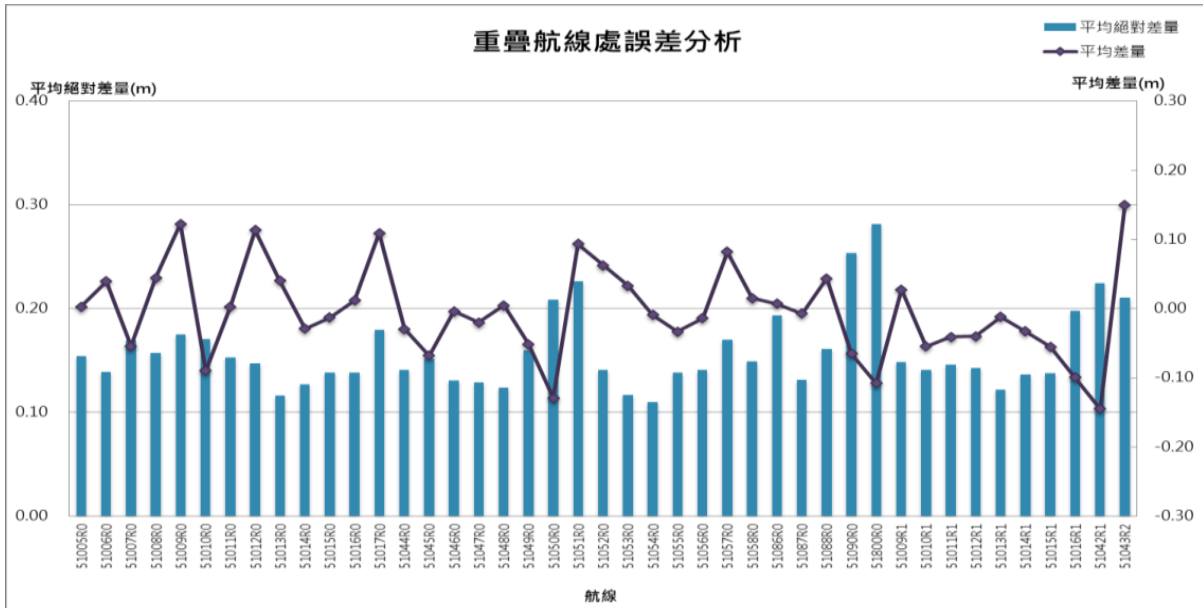


圖 4.23 平差前航線重疊處誤差分析圖

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。

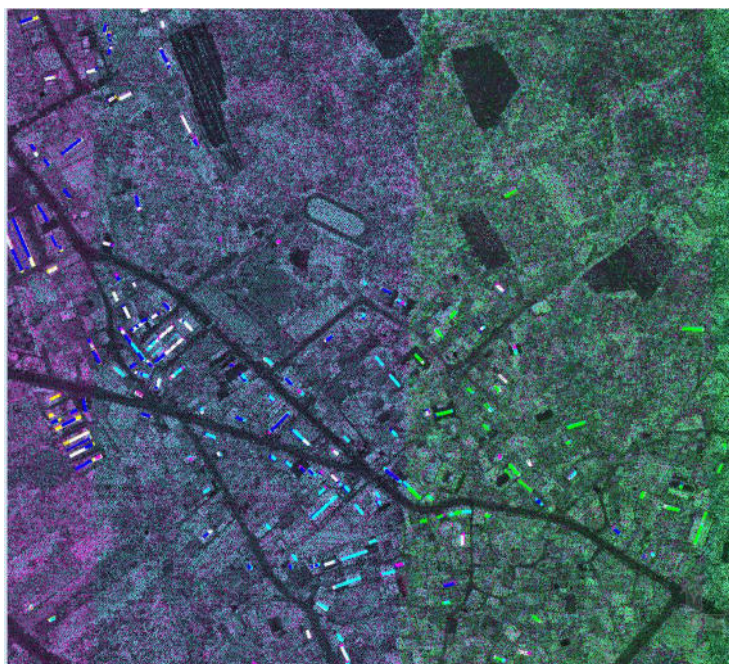
空載雷射掃瞄儀的架構都是由 GNSS 及 IMU 結合，使掃瞄的坐標能轉換到通用的地面坐標系統，因此其定位精度將受到各種量測值與設定值的影響，若系統率定不完整，GNSS 與 IMU 系統誤差會傳播到解算雷射測點三維坐標的精度，為了檢驗並減少系統誤差，本工作採用商業軟體 TerraMatch 進行雷射掃瞄航帶平差，利用航帶重疊數據連結點的高程進行連結點的量測，以評估重疊航帶的內部精度不符值，並進一步改正系統誤差(TerraSolid, 2010)。

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

File	Line	Position	Tools	Vi
Ground line	2022 42	323055.8 0.214 -0.247		
	3023 42	564174.0 0.153 +0.197		
Ground line	3023 42	564178.4 0.041 +0.240		
	2022 42	323060.9 0.058 -0.303		
Ground line	3023 42	564178.5 0.045 +0.267		
	2022 42	323061.2 0.121 -0.355		
Ground line	3023 42	564178.3 0.025 +0.253		
	2022 42	323060.6 0.035 -0.318		
Ground line	2022 42	323061.3 0.006 -0.302		
	3023 42	564178.7 0.004 +0.239		
Ground line	3023 42	564178.2 0.046 +0.245		
	2022 42	323060.8 0.064 -0.309		
Ground line	2022 42	323056.2 0.102 -0.307		
	3023 42	564174.2 0.073 +0.244		
Ground line	3023 42	564178.4 0.017 +0.263		

(b) 匹配連結點差量

圖 4.24 匹配連結點示意圖

如圖 4.24 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

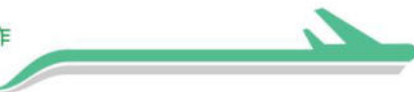
利用航帶平差以獲得更準確及可靠之成果，消除航帶間尚存之偏移量，降低製作 DEM 時於航帶重疊區域之混淆。可由重疊處誤差分析結果，了解平差後雷射掃瞄測高精度，各測區平差後航帶誤差分析成果如表 4.5 所示，各測區平差後平均絕對差量皆小於 0.2 公尺，平均絕對差量標準差小於 0.05 公尺，無明顯航帶偏差，可用於後續資料產製。詳細各航線高程差量如表 4.6 與表 4.7，統計圖表如圖 4.25 與圖 4.26。

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	0.194	0.042	0.070	0.028
	平均差量	0.046	-0.083	-0.002	0.022
第二子測區	平均絕對差量	0.190	0.043	0.096	0.036
	平均差量	0.186	-0.185	-0.001	0.046

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)
51005R0	66492572	0.155	0.003	34412042	0.049	0.011
51006R0	69044767	0.139	0.040	47151857	0.056	-0.009
51007R0	68564431	0.170	-0.054	46785505	0.059	0.006
51008R0	73448082	0.157	0.045	48941245	0.059	-0.017
51009R0	34574632	0.175	0.123	19423017	0.073	-0.014
51010R0	49593612	0.171	-0.090	34408287	0.058	0.001
51011R0	50483473	0.153	0.003	34472914	0.055	0.021
51012R0	48924606	0.147	0.114	32253396	0.054	-0.013
51013R0	49141144	0.116	0.041	32487147	0.051	0.012
51014R0	48582186	0.127	-0.029	33146776	0.047	0.008
51015R0	47029349	0.139	-0.013	33522640	0.048	0.002
51016R0	44327297	0.138	0.012	28676943	0.047	0.010
51017R0	42414665	0.179	0.109	22420041	0.051	0.008
51044R0	48812848	0.141	-0.030	40381564	0.076	0.015
51045R0	53500661	0.152	-0.068	41330255	0.091	0.031
51046R0	56794491	0.131	-0.004	45846012	0.092	-0.024
51047R0	58021951	0.129	-0.020	48115331	0.075	-0.003
51048R0	62229160	0.124	0.005	50685414	0.068	0.018
51049R0	62338369	0.160	-0.051	50551500	0.064	-0.004
51050R0	64211172	0.208	-0.129	52977352	0.083	-0.015
51051R0	65763900	0.227	0.094	55112741	0.086	0.026
51052R0	69541062	0.141	0.063	57695899	0.077	0.004
51053R0	72332673	0.117	0.033	60568128	0.069	-0.007
51054R0	71556795	0.110	-0.009	59708192	0.072	0.002
51055R0	71707181	0.138	-0.033	59062704	0.082	0.003
51056R0	66610481	0.141	-0.014	55984510	0.095	-0.022
51057R0	66021071	0.170	0.082	54509847	0.092	0.046
51058R0	68188590	0.149	0.015	50352416	0.072	0.011
51086R0	20683950	0.193	0.007	15424170	0.081	-0.015
51087R0	39006820	0.131	-0.007	31567007	0.051	0.019
51088R0	11872743	0.161	0.044	4290197	0.042	0.003
51090R0	46572566	0.254	-0.065	25771356	0.150	-0.083
51800R0	29623395	0.282	-0.108	26295776	0.194	-0.062

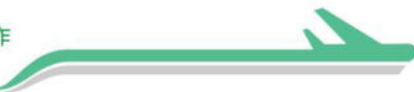


航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
51009R1	50856245	0.149	0.028	35341579	0.055	0.004
51010R1	32663499	0.141	-0.055	19378584	0.066	-0.008
51011R1	28879375	0.146	-0.041	17752831	0.060	-0.003
51012R1	23740133	0.143	-0.040	15778511	0.053	-0.009
51013R1	24411231	0.122	-0.012	14555958	0.049	-0.004
51014R1	25054875	0.137	-0.033	16796439	0.050	-0.008
51015R1	25070286	0.138	-0.055	17423114	0.052	-0.004
51016R1	22780962	0.198	-0.099	15510128	0.051	-0.010
51042R1	9732732	0.225	-0.145	8067125	0.063	0.002
51043R2	32976813	0.211	0.150	25032192	0.082	-0.023

* 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)
51001R0	2883226	0.076	0.031	8638691	0.0738	-0.0074
51002R0	6633800	0.092	0.025	18514133	0.0853	0.027
51003R0	8030158	0.122	0.019	22628976	0.1107	0.0165
51004R0	6359668	0.188	0.082	18198190	0.1196	0.0391
51005R0	3387377	0.055	0.003	6331497	0.0577	0.0369
51006R0	423909	0.062	0.012	383869	0.0615	-0.012
51010R0	138421	0.129	-0.033	196421	0.129	-0.013
51016R0	3646562	0.075	-0.009	1753136	0.0624	-0.0074
51017R0	16113774	0.093	0.014	12667725	0.0916	0.0375
51018R0	12774479	0.110	0.017	10669141	0.1023	-0.0232
51019R0	16457138	0.156	-0.023	14548746	0.1243	0.0222
51020R0	20889966	0.186	0.074	15317030	0.1122	-0.0136
51021R0	12454639	0.055	-0.005	17163697	0.0492	-0.0024
51022R0	10055589	0.047	-0.011	14437586	0.0462	0.0011
51023R0	9119642	0.052	-0.017	11354820	0.0568	-0.0062
51024R0	9313025	0.061	0.005	10698926	0.067	-0.0132
51025R0	8932219	0.071	-0.003	11825399	0.1014	-0.0191
51026R0	8456654	0.094	-0.010	10527445	0.1015	0.0095
51027R0	6210517	0.095	0.005	5307034	0.1107	0.0646
51028R0	7477014	0.083	0.027	6825534	0.0624	0.0065
51029R0	11933110	0.108	-0.025	12756294	0.0723	-0.0149
51030R0	10977636	0.095	-0.007	14033962	0.0733	-0.0068
51031R0	10434525	0.111	-0.039	15395710	0.0833	-0.0116
51032R0	10078716	0.171	-0.113	17592824	0.1251	-0.0627
51033R0	3114736	0.112	0.007	9669241	0.1071	0.0176
51034R0	2679283	0.112	0.031	7870909	0.102	0.0142
51035R0	2341192	0.139	0.063	6535357	0.1341	0.0704



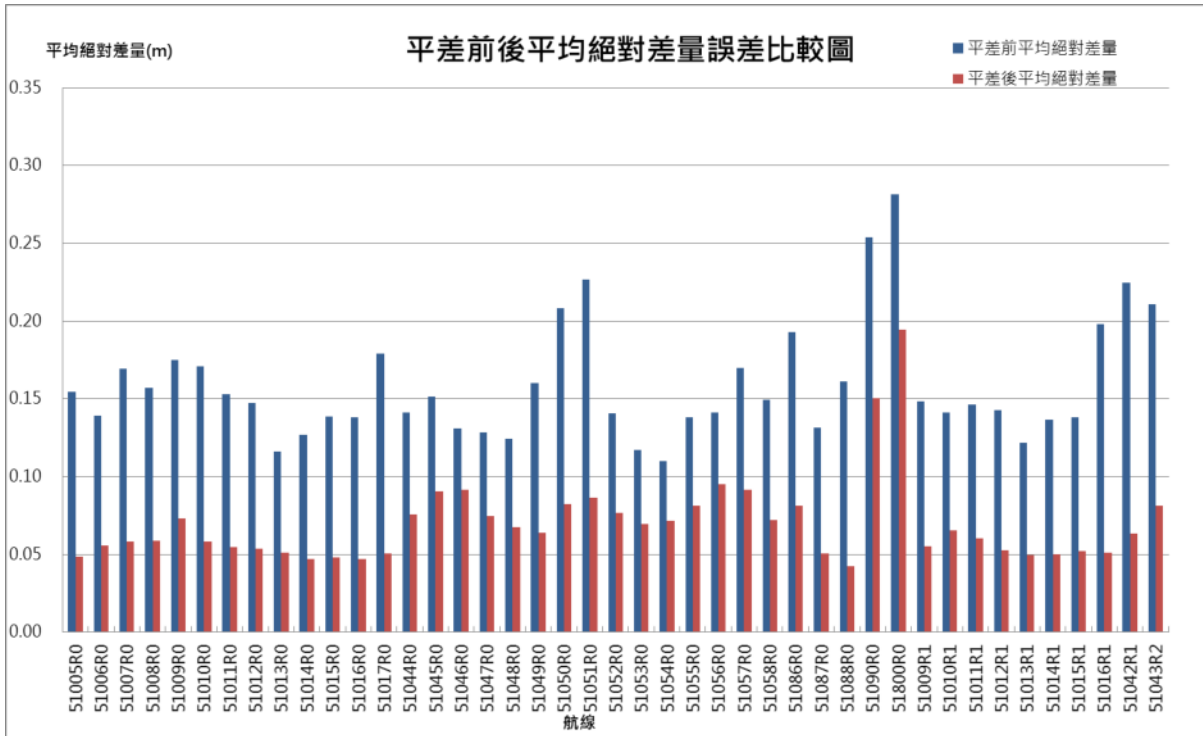
航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
51036R0	2796040	0.117	0.006	7299338	0.116	0.0219
51037R0	3316869	0.115	0.026	7879360	0.1098	0.0153
51038R0	3695078	0.148	0.030	10156603	0.1469	0.0598
51039R0	3565279	0.213	-0.071	12805742	0.121	-0.0852
51040R0	4544846	0.267	-0.151	12196414	0.167	-0.1643
51041R0	2932783	0.236	0.003	3837902	0.1723	-0.0264
51042R0	1659135	0.103	0.031	2290402	0.1042	0.0613
51043R0	2600509	0.109	-0.030	5339138	0.0937	-0.0119
51044R0	1770274	0.087	-0.001	107468	0.1384	0.0787
51045R0	1336172	0.107	0.015	348372	0.0721	0.0072
51046R0	1061803	0.087	0.034	392250	0.0681	-0.0096
51047R0	2064704	0.092	0.047	374601	0.0574	0.0167
51048R0	1643372	0.084	0.003	475002	0.0431	-0.0153
51049R0	1619546	0.075	0.011	432002	0.0443	0.0081
51050R0	1337776	0.069	0.004	470488	0.0556	-0.0106
51051R0	2198439	0.078	-0.003	614684	0.0627	-0.0226
51052R0	1643559	0.066	0.015	735268	0.0634	0.0012
51053R0	1781083	0.067	0.028	697691	0.052	-0.0117
51054R0	1607347	0.067	0.024	565758	0.0654	0.0342
51055R0	1871113	0.072	0.026	865316	0.0554	-0.0069
51056R0	1445533	0.084	0.047	4293071	0.0594	0.0103
51057R0	7954176	0.087	0.013	20062896	0.0723	0.0151
51058R0	7002221	0.069	0.027	16374388	0.0615	-0.0122
51059R0	7925187	0.117	0.003	18381124	0.1236	-0.0407
51060R0	7544257	0.109	-0.042	18984397	0.1184	-0.0582
51061R0	7797875	0.084	-0.003	18369556	0.0872	-0.0152
51062R0	7757033	0.080	-0.009	17745231	0.0753	-0.0111
51063R0	7125290	0.076	-0.003	16001372	0.0681	-0.0142
51064R0	7391022	0.080	0.011	16764397	0.0657	0.0061
51065R0	5916122	0.143	0.061	13798529	0.068	-0.0014
51066R0	5642351	0.141	-0.075	14430176	0.0687	-0.0038
51067R0	3783335	0.204	-0.100	9132097	0.1142	-0.0128
51068R0	3704677	0.208	-0.113	9116835	0.1102	-0.0183
51069R0	3827273	0.143	0.037	9325028	0.1179	0.0013
51070R0	3455744	0.150	0.049	9863035	0.1364	0.0128
51071R0	4697473	0.117	-0.052	13677941	0.0859	0.0144
51072R0	4937080	0.157	-0.092	13670149	0.1001	-0.0118
51073R0	4277049	0.202	-0.114	12203963	0.1336	-0.0626
51074R0	4613038	0.326	-0.236	10737048	0.1562	-0.0422
51075R0	4042207	0.236	0.127	9260722	0.116	0.0033
51076R0	4522274	0.104	0.009	12296467	0.085	-0.0196
51077R0	5141921	0.082	0.011	14411987	0.0788	-0.0079
51078R0	6308726	0.109	0.010	15536321	0.0902	0.0051
51079R0	6487434	0.147	0.061	12190981	0.0957	0.0115
51080R0	5868308	0.215	-0.098	12392490	0.1083	-0.0112



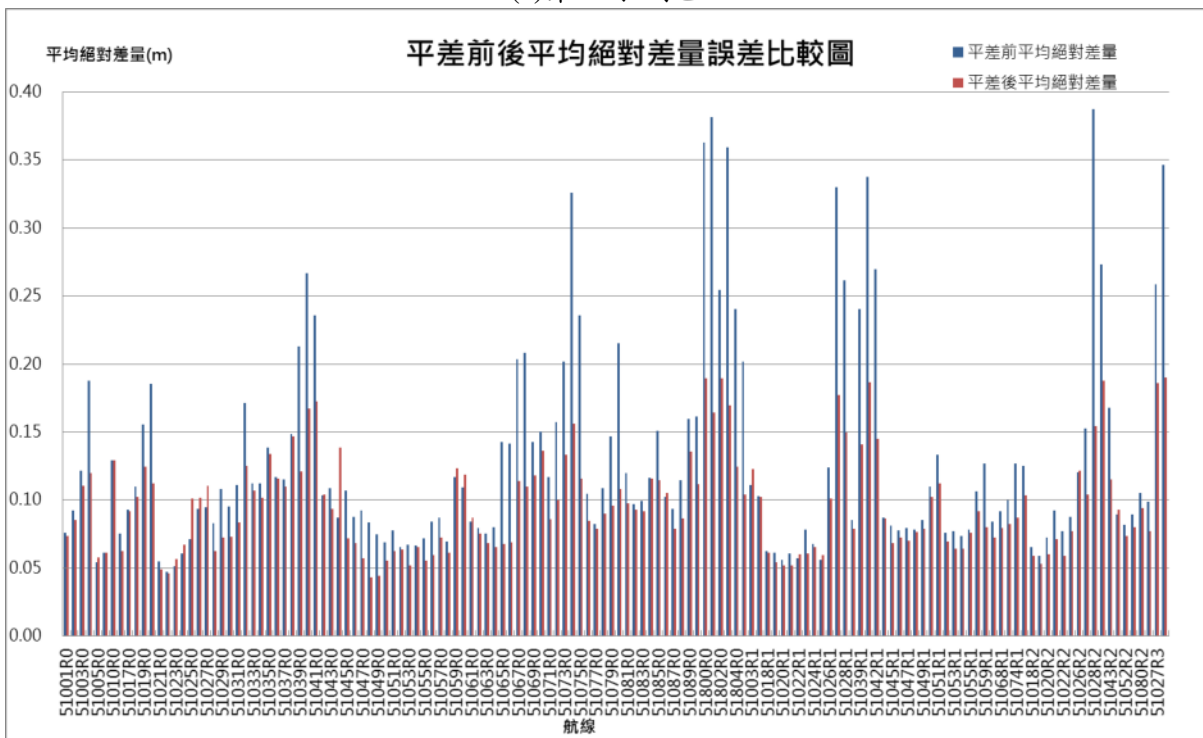
航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
51081R0	4996223	0.120	0.029	11352048	0.0974	-0.0341
51082R0	4040211	0.097	0.010	9763570	0.0927	0.0291
51083R0	3544684	0.099	-0.003	8950916	0.0918	0.0044
51084R0	3368385	0.116	0.032	9089709	0.1156	0.0241
51085R0	3579713	0.151	0.051	9218371	0.1145	0.0315
51086R0	318486	0.102	-0.048	472608	0.1053	-0.0728
51087R0	18107721	0.093	0.010	30524998	0.0791	0.0276
51088R0	9558455	0.115	-0.033	9045729	0.0866	0.0026
51089R0	15728907	0.159	-0.004	41634097	0.1355	0.0148
51090R0	7638363	0.162	0.103	12163054	0.1117	-0.0312
51800R0	4731143	0.363	-0.254	8183838	0.1894	-0.1845
51801R0	11573391	0.382	-0.153	8504705	0.1645	-0.0139
51802R0	6086851	0.254	0.109	16686128	0.1896	0.1295
51803R0	7533695	0.359	0.155	24936950	0.1698	-0.0143
51804R0	5473058	0.240	-0.081	20615337	0.1247	-0.0852
51805R0	2600351	0.202	0.042	4784326	0.1039	-0.0257
51003R1	318424	0.111	-0.048	256112	0.1229	-0.0729
51016R1	2293646	0.103	-0.065	1347054	0.1025	-0.0761
51018R1	15618021	0.063	0.008	19488463	0.0612	-0.0242
51019R1	15823777	0.062	-0.015	21023224	0.0544	-0.0047
51020R1	13691558	0.056	-0.010	20397294	0.0517	0.0036
51021R1	5317811	0.061	-0.010	11884383	0.0521	-0.0018
51022R1	3976394	0.057	-0.003	8967385	0.0599	0.0093
51023R1	10449943	0.078	0.018	11847604	0.0609	0.0064
51024R1	11275448	0.068	-0.004	12599865	0.0654	-0.0046
51025R1	4033856	0.056	-0.014	3563980	0.0597	0.013
51026R1	12035284	0.124	-0.022	12321497	0.1014	-0.0035
51027R1	15053271	0.330	-0.239	12383904	0.1774	-0.028
51028R1	9746611	0.261	-0.133	7261357	0.1497	0.0063
51033R1	971314	0.085	-0.004	2812811	0.079	0.0148
51039R1	4167783	0.240	-0.131	14465617	0.1411	-0.1458
51040R1	4875252	0.338	0.286	10999436	0.1868	0.1857
51042R1	5112134	0.269	-0.154	10230139	0.1449	0.0388
51044R1	4221952	0.087	-0.018	7735198	0.0866	0.0001
51045R1	5365509	0.081	-0.018	8606505	0.0686	-0.0044
51046R1	4829265	0.078	-0.013	8474508	0.0725	-0.0003
51047R1	5814971	0.079	-0.015	9134050	0.07	-0.006
51048R1	4682352	0.078	-0.007	8847705	0.0768	-0.0135
51049R1	5643562	0.085	-0.008	10170871	0.0789	0.0047
51050R1	5512027	0.110	0.021	11373005	0.1022	0.0202
51051R1	3407647	0.133	-0.026	8734862	0.1124	-0.017
51052R1	3975351	0.076	-0.008	9106868	0.0693	0.0021
51053R1	5691287	0.077	-0.007	12688208	0.0641	-0.0075
51054R1	8388516	0.074	-0.024	14774433	0.0645	-0.0092
51055R1	8271613	0.078	-0.018	16556797	0.0762	-0.0161

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)
51056R1	5588083	0.107	-0.026	15027553	0.0918	0.0008
51059R1	534140	0.127	-0.035	131984	0.0803	-0.0234
51067R1	476201	0.084	0.029	1182553	0.0725	-0.0019
51068R1	1217564	0.092	0.004	1895021	0.0793	-0.0054
51070R1	463097	0.100	0.019	798090	0.0824	-0.007
51074R1	283822	0.127	-0.006	446120	0.0871	0.0053
51080R1	406864	0.125	-0.019	620072	0.1033	-0.0197
51018R2	15069868	0.065	0.021	19248368	0.059	-0.0011
51019R2	17283345	0.059	-0.018	22763239	0.0534	0.0159
51020R2	5200241	0.072	-0.030	11575585	0.0601	-0.0023
51021R2	14842994	0.092	0.016	17214304	0.071	0.0056
51022R2	11010503	0.077	0.026	13921571	0.0591	-0.0024
51025R2	12630870	0.087	0.026	13509185	0.0773	-0.0159
51026R2	4573626	0.120	-0.024	7874447	0.1219	0.0554
51027R2	1179772	0.153	-0.053	938200	0.1043	-0.0244
51028R2	5759996	0.387	0.308	3483605	0.1545	0.0491
51039R2	5686638	0.273	0.200	14339101	0.1877	0.1853
51043R2	4011944	0.168	0.099	5531506	0.1152	-0.012
51051R2	3952197	0.090	-0.010	7140263	0.0932	-0.021
51052R2	7203149	0.082	-0.003	14299712	0.0738	-0.0024
51056R2	2275984	0.090	0.016	7802758	0.0799	-0.0023
51080R2	1660198	0.105	0.024	1930140	0.0944	-0.0093
51020R3	20101575	0.099	-0.001	24487108	0.0774	-0.0125
51027R3	9345984	0.259	0.275	6107053	0.1862	0.1593
51027R4	6011480	0.347	0.085	5290493	0.1902	0.0182

* R1、R2 表示該航線第 2、3 次飛行，以此類推。粗體為交叉航帶。

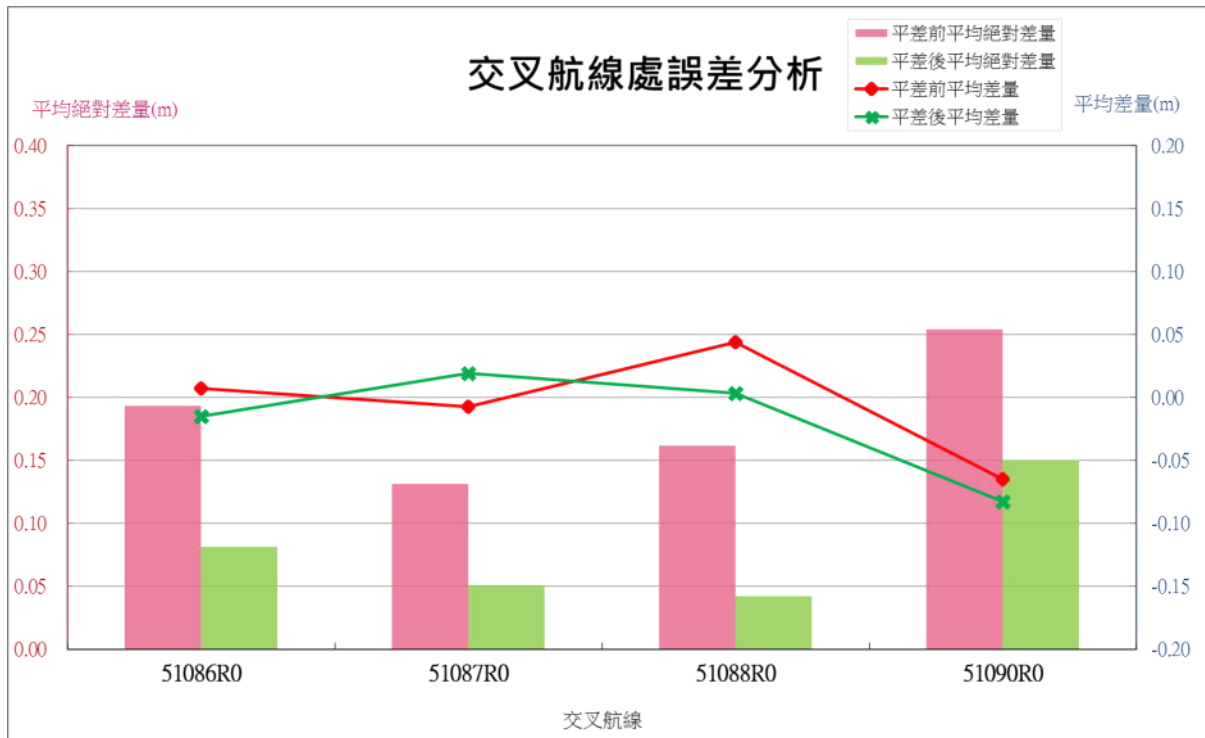


(a)第一子測區

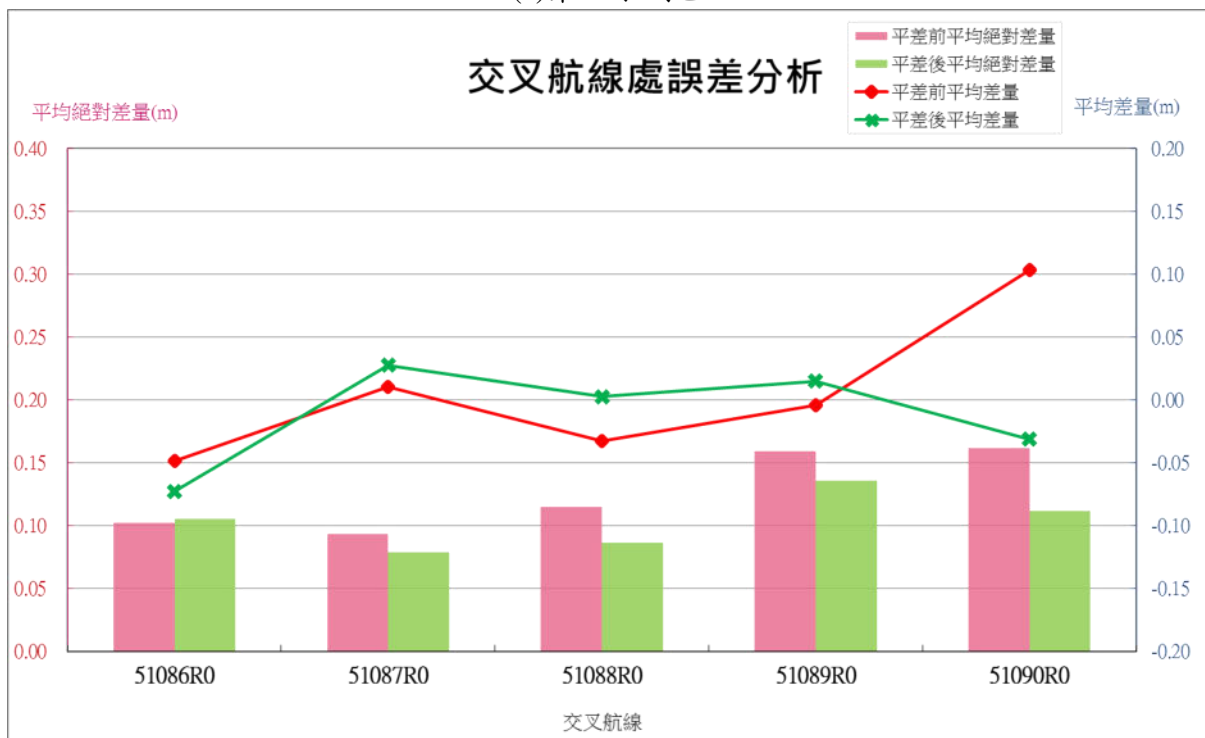


(b)第二子測區

圖 4.25 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 4.26 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 4.27，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 4.28 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。

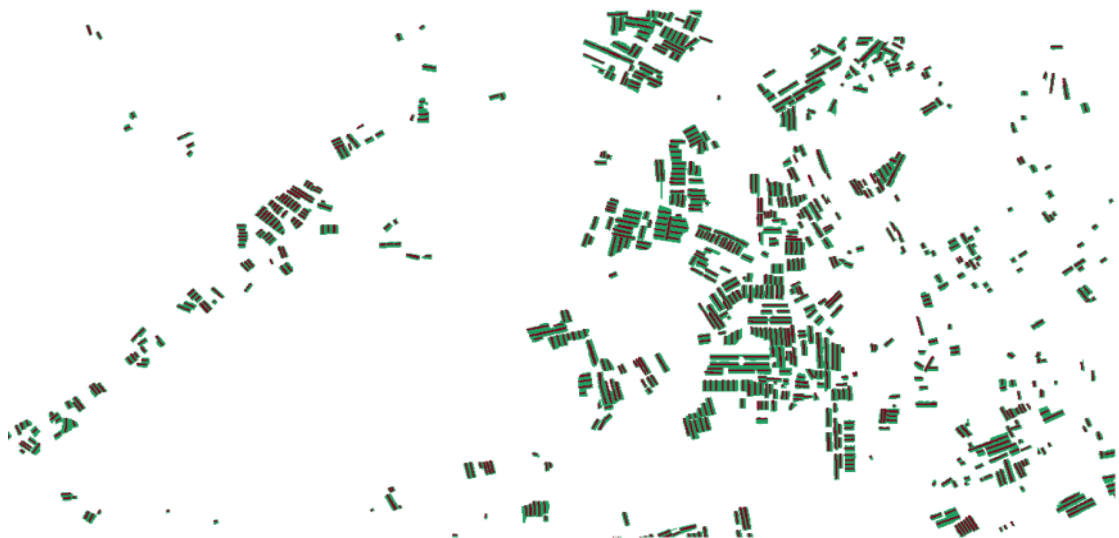
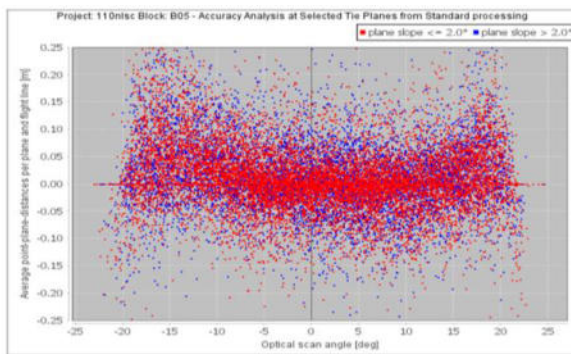


圖 4.27 航線重疊處屋頂共軛面與共軛線萃取示意圖



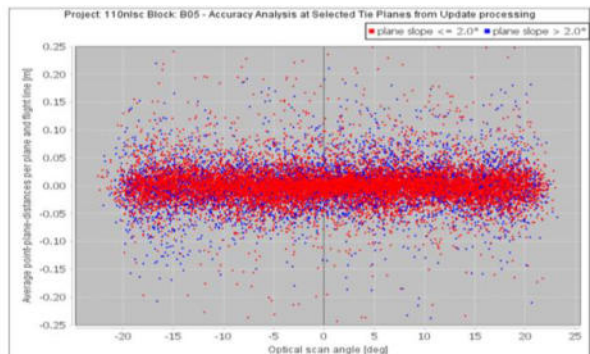
(a) 平差前雷射點至共軛面差量分析

Roof lines analysis

Standard processing ▾

Parameter	Dim	Mean	RMS	Minimum	Maximum
Delta East	[m]	0.065	0.244	-0.586	0.707
Delta Height	[m]	-0.013	0.067	-0.382	0.244
Delta North	[m]	-0.053	0.164	-0.935	0.426
Horizontal Separation	[m]	-0.063	0.293	-0.718	0.948

(c) 平差前屋脊共軛線差量統計



(b) 平差後雷射點至共軛面差量分析

Roof lines analysis

Refined processing ▾

Parameter	Dim	Mean	RMS	Minimum	Maximum
Delta East	[m]	-0.003	0.115	-0.414	0.456
Delta Height	[m]	0.005	0.027	-0.079	0.116
Delta North	[m]	-0.019	0.074	-0.393	0.313
Horizontal Separation	[m]	0.008	0.136	-0.544	0.429

(d) 平差後屋脊共軛線差量統計

圖 4.28 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，參閱章節 4-6。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 30 點平面控制點。因點雲無法如照片準確點出平面坐標，採手動量測點雲屋角點三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 4.29。

表 4.8 平面控制點檢核點雲屋角點差值表(單位:公尺)

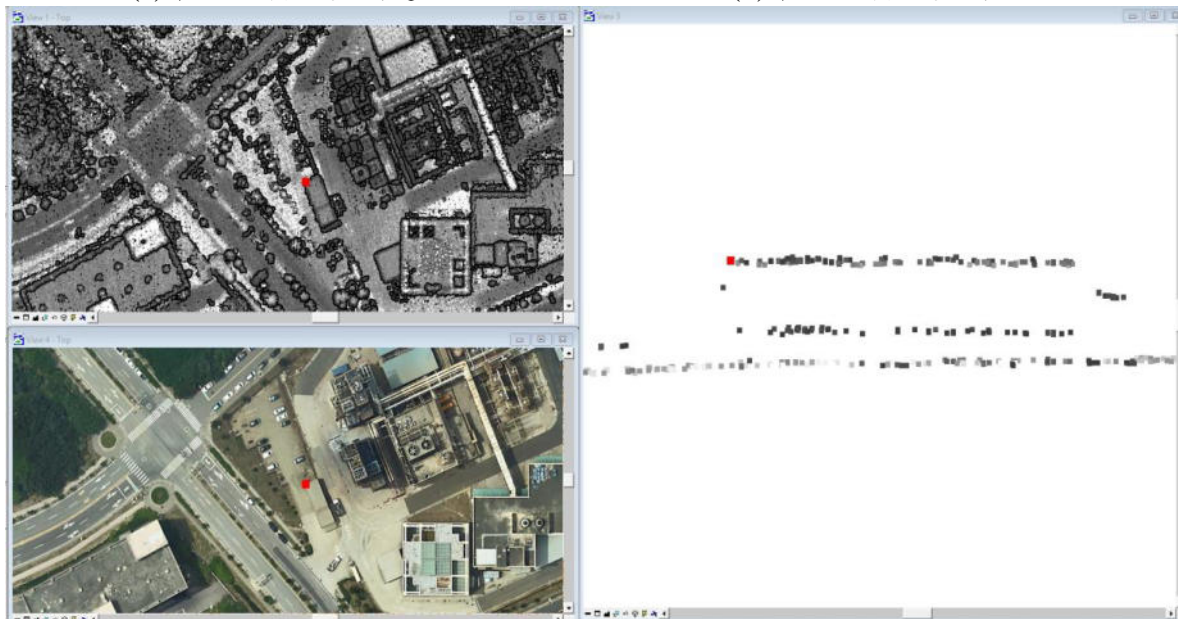
點號	平面控制點坐標		點雲量測屋角點坐標		E 方向 差量	N 方向 差量	平面差量
	E	N	E	N			
51-0002B	305516.484	2798084.029	305516.346	2798084.299	-0.138	0.270	0.303
51-0004B	305346.983	2751714.09	305347.115	2751714.41	0.132	0.320	0.346
51-0006B	241930.983	2748757.261	241930.888	2748757.299	-0.095	0.038	0.102
51-0007B	296912.892	2793469.939	296913.114	2793469.794	0.222	-0.145	0.265
51-0010B	304889.398	2776614.263	304889.051	2776614.332	-0.347	0.069	0.354
51-0012B	269838.556	2776345.445	269838.722	2776345.638	0.166	0.193	0.255
51-0014B	278917.277	2768012.831	278917.029	2768012.512	-0.248	-0.319	0.404
51-0016B	256653.755	2770081.486	256653.976	2770081.234	0.221	-0.252	0.335
51-0017B	249630.218	2760226.581	249630.403	2760226.561	0.185	-0.020	0.186
51-0019B	305122.808	2760424.211	305122.434	2760424.331	-0.374	0.120	0.393
51-0021B	279027.163	2751524.047	279026.822	2751523.816	-0.341	-0.231	0.412
51-0023B	245259.246	2751602.25	245259.34	2751602.416	0.094	0.166	0.191
51-0025B	260434.478	2748729.295	260434.229	2748729.446	-0.249	0.151	0.291
51-0027B	252086.099	2750808.943	252086.027	2750808.982	-0.072	0.039	0.082
51-0028B	304900.683	2758099.584	304900.755	2758099.826	0.072	0.242	0.252
51-0032B	263342.192	2753044.574	263342.02	2753044.485	-0.172	-0.089	0.194
51-0036B	286565.013	2755511.025	286565.327	2755511.147	0.314	0.122	0.337
51-0039B	303259.687	2790269.632	303259.804	2790269.725	0.117	0.093	0.149
51-0043B	278834.547	2763742.184	278834.54	2763742.463	-0.007	0.279	0.279
51-0059B	288714.874	2776970.4	288715.284	2776970.526	0.410	0.126	0.429
51-0061B	275297.93	2778574.151	275298.061	2778573.904	0.131	-0.247	0.280
51-0071B	298718.747	2785118.616	298718.777	2785118.577	0.030	-0.039	0.049
51-0094B	304304.12	2784749.221	304303.972	2784749.313	-0.148	0.092	0.174

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			
51-0103B	294997.559	2757811.619	294997.275	2757811.91	-0.284	0.291	0.407
51-0107B	285401.619	2780160.298	285401.358	2780160.266	-0.261	-0.032	0.263
51-0118B	254252.809	2756579.554	254252.524	2756579.398	-0.285	-0.156	0.325
51-0119B	256857.349	2763681.504	256857.764	2763681.651	0.415	0.147	0.440
51-0126B	296390.992	2763332.954	296391.000	2763332.972	0.008	0.018	0.020
51-0127B	267017.046	2764914.601	267016.938	2764914.542	-0.108	-0.059	0.123
51-0128B	269405.291	2754885.097	269405.125	2754885.06	-0.166	-0.037	0.170
平面差量最大值			0.440		平面差量標準偏差		0.117
平面差量最小值			0.020		平面差量均方根差		0.290
平面差量平均值			0.260				



(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 4.29 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，確定平差成果合乎契約要求。

如檢核圖圖 4.30 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海、河道、池塘或農田地形等，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 4.31。

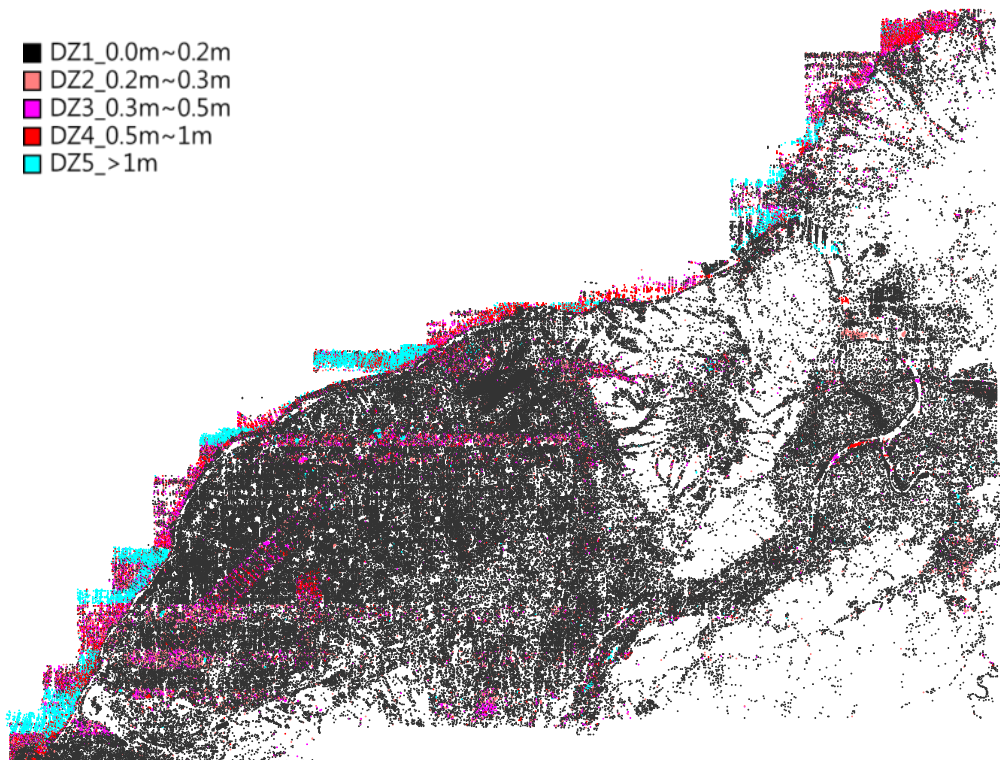


圖 4.30 監審方軟體航帶平差高程差異量檢核圖



圖 4.31 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，可採用經濾雜點之點雲製作數值地表模型(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 4.32)。

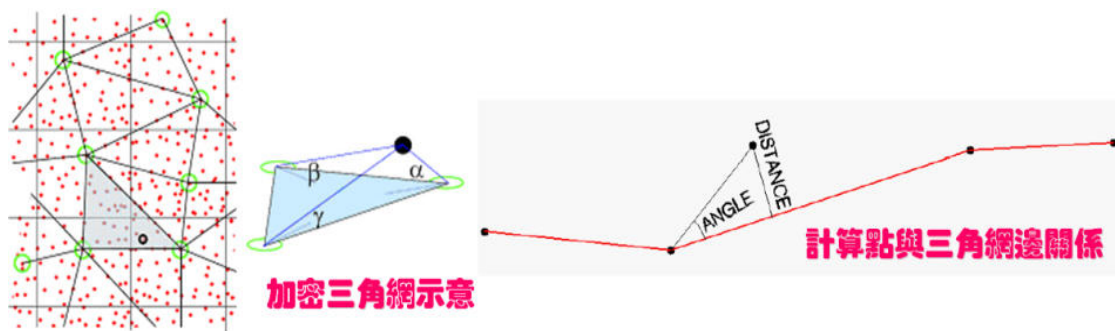


圖 4.32 Iteration angle 和 Iteration distance 示意圖 (Axelsson, 2000)

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)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 4.33)。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 4.34，編修前大範圍地面點不足，編修後可呈現地形變化。

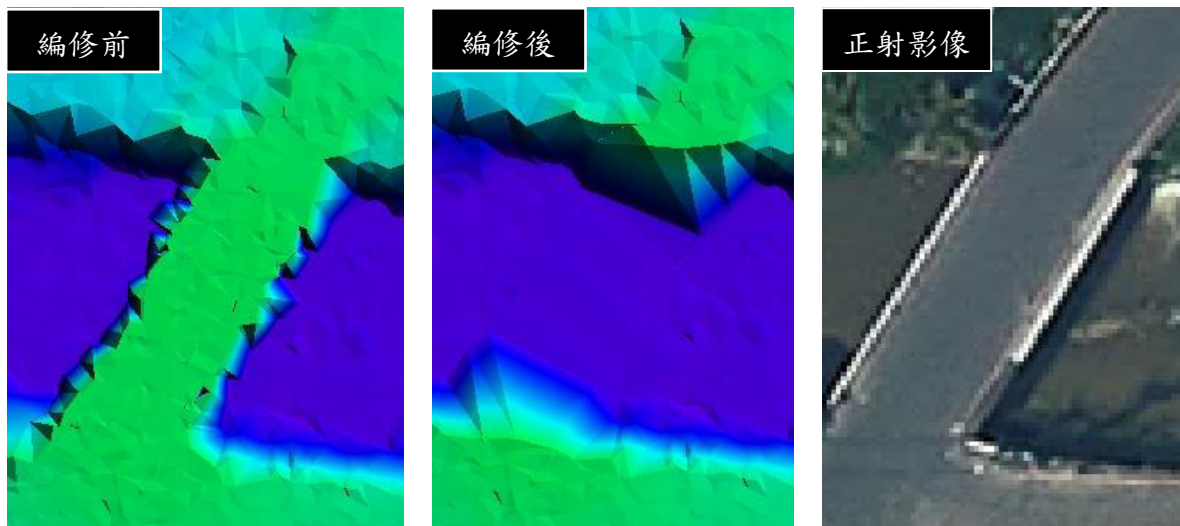


圖 4.33 橋樑之點雲分類示意圖

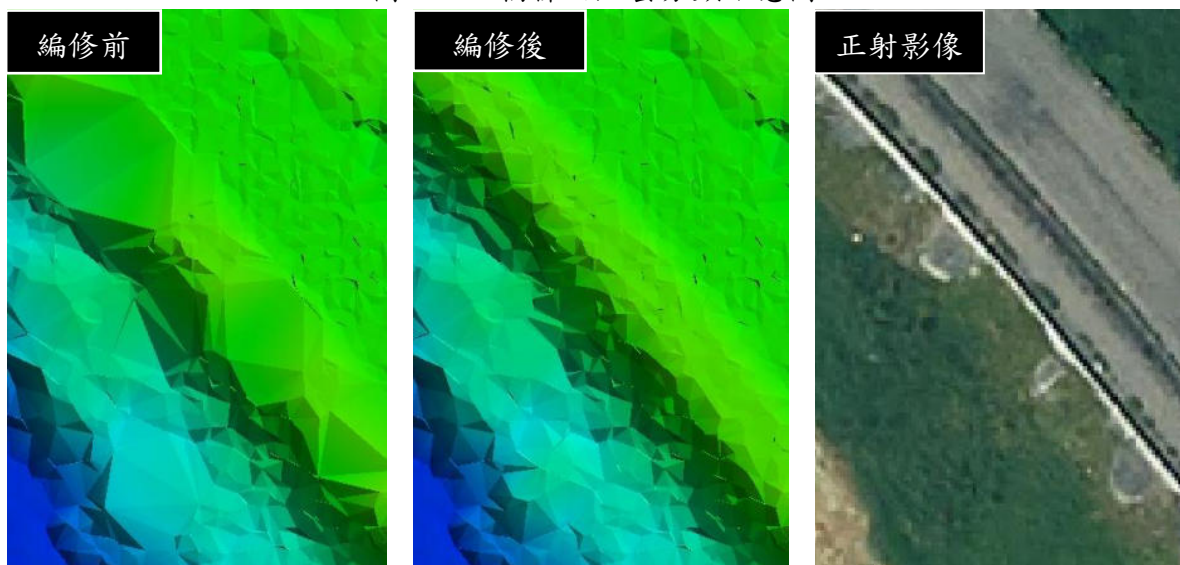
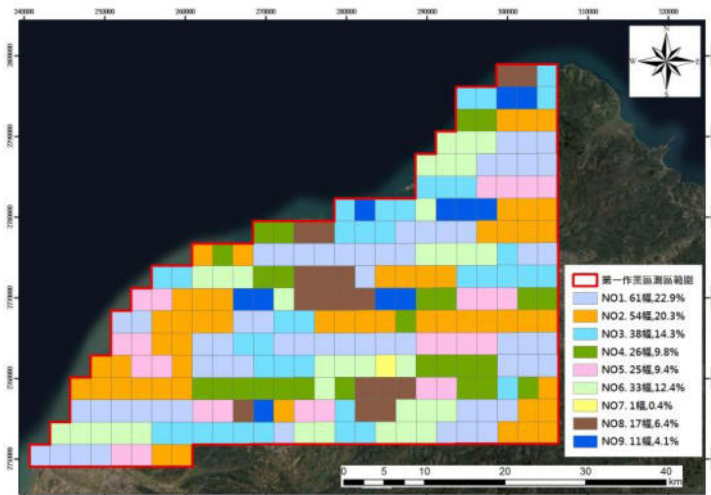


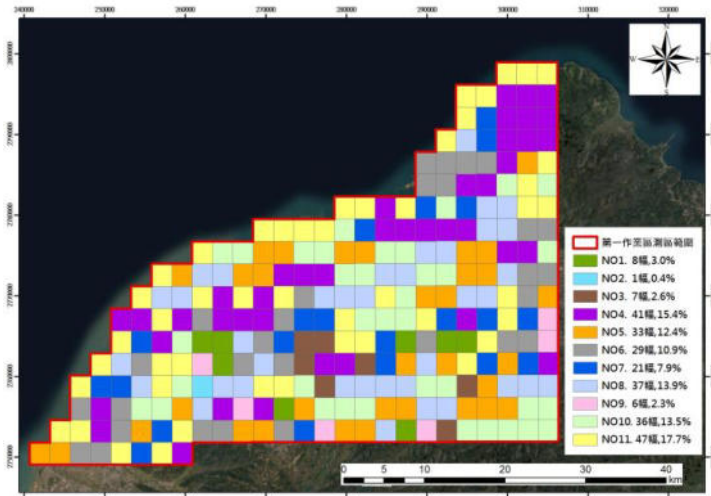
圖 4.34 地形編修示意圖

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，並負責分配圖幅之測區內部圖幅接邊，完成後自檢和填表如表 4.9 再提交檢核人員。第 1 作業區點雲編修人員共 9 位，品管檢核人員共 11 位，圖幅分配繪製於圖 4.35，提交監審方之圖幅皆為合格或待修正，無不合格圖幅，藉由良好之點雲過濾與檢核能力確保產製成果品質。



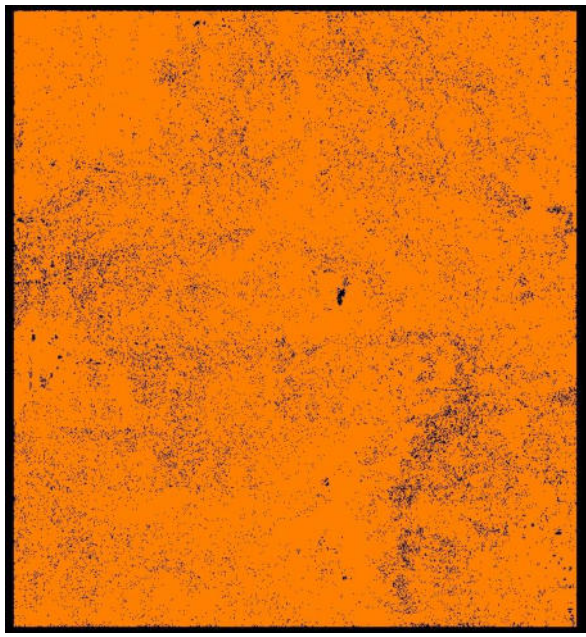
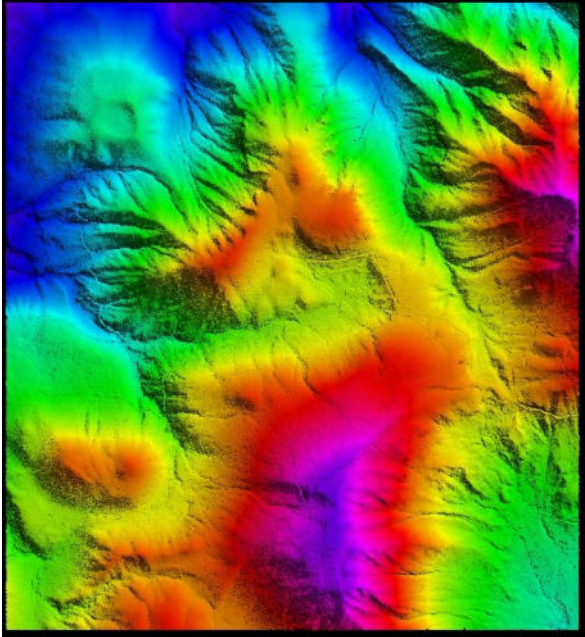
(a)點雲編修人員分布圖



(b)點雲檢核人員分布圖

圖 4.35 點雲編修與檢核人員分布圖

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	臺北	航線標號	73,74,75,76,77,78,79,80, 81,88,1074,1080,2080
圖號	97233021	總點雲數	69,127,823
資料產製人員	曾 OO	完成日期	2021/10/28
圖幅審查人員	許 OO	審查日期	2021/11/03
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	3,076,926
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. ■	無接邊緣
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			

4-5-3 數值高程模型成果

根據內政部「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 4.36，測區成果如圖 4.37 及圖 4.38。

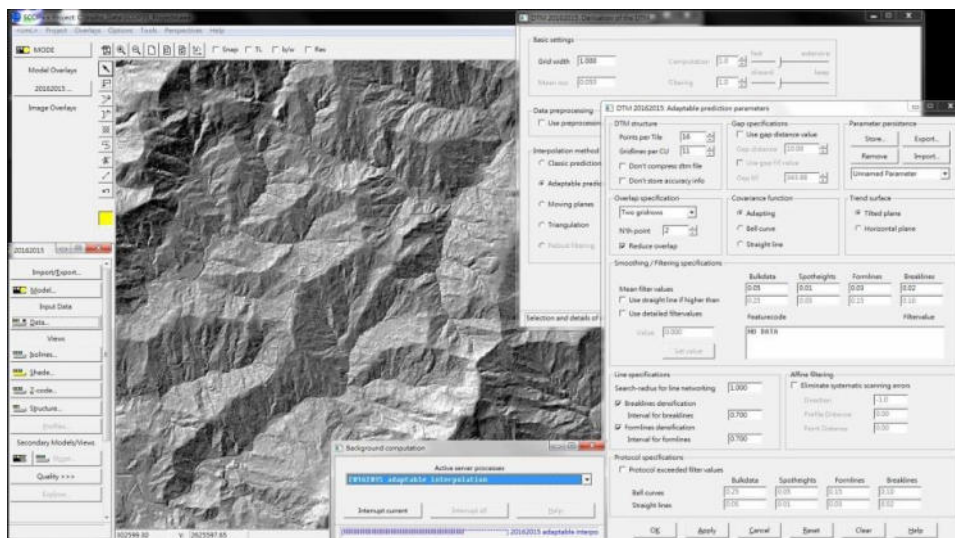


圖 4.36 SCOP++軟體介面圖

於各作業區成果產製後進行外部接邊，依契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，如高程落差過大地區將不強制接邊。第1作業區責任接邊圖幅共54幅，分布如章節5-5。但礙於相鄰之5-2作業區目前尚未完成成果提交，責任接邊工作將保留至111年執行。

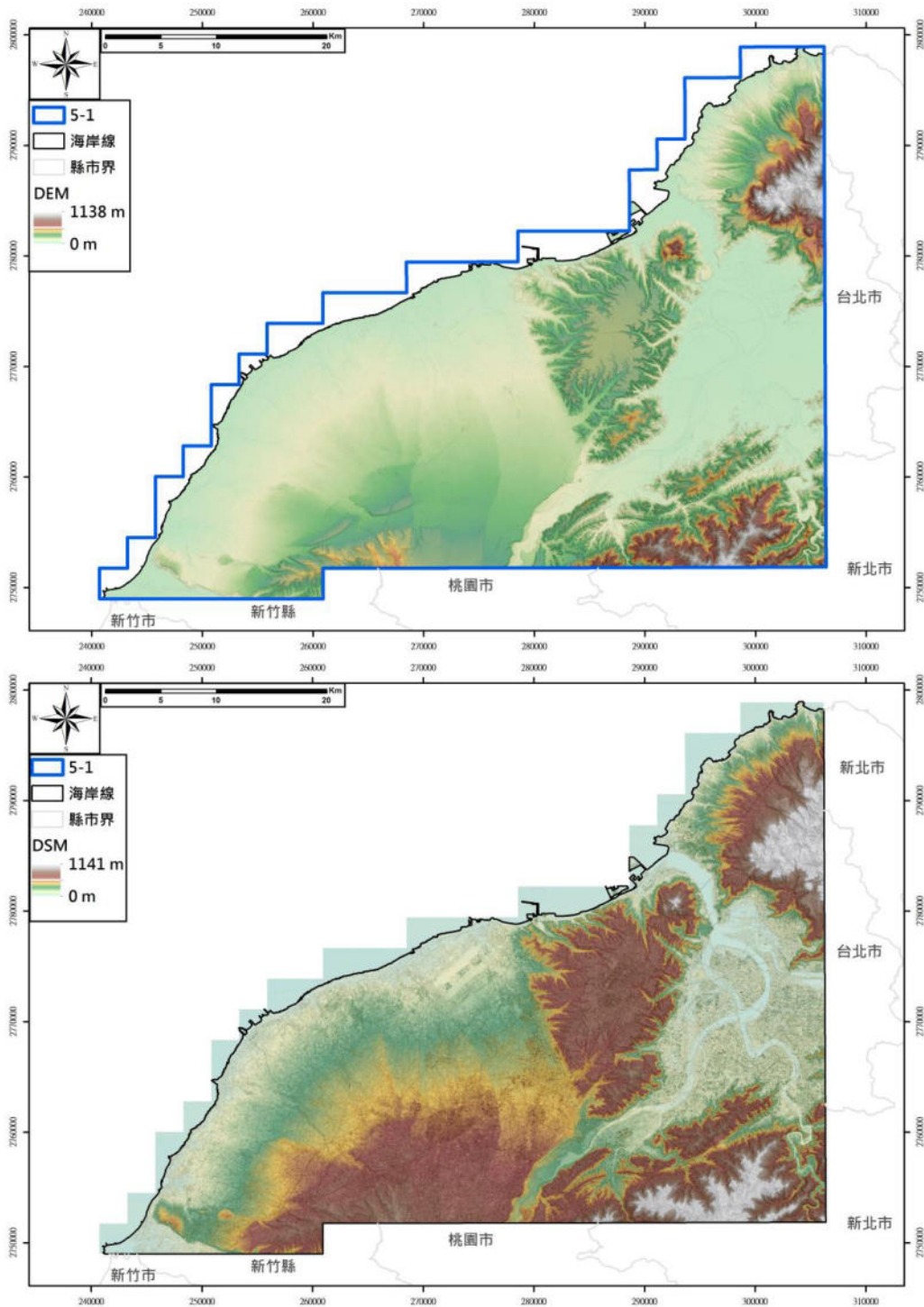


圖 4.37 測區 DEM/DSM 成果圖



(a) DEM 山區成果(96232057)



(b) DSM 山區成果(96232057)



(c) DEM 平地成果(96232059)



(d) DSM 平地成果(96232059)

圖 4.38 DEM/DSM 山地及平地成果圖

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。本次計畫 DEM 檢核作業檢核點分布如圖 4.39，檢核點內容如後說明。

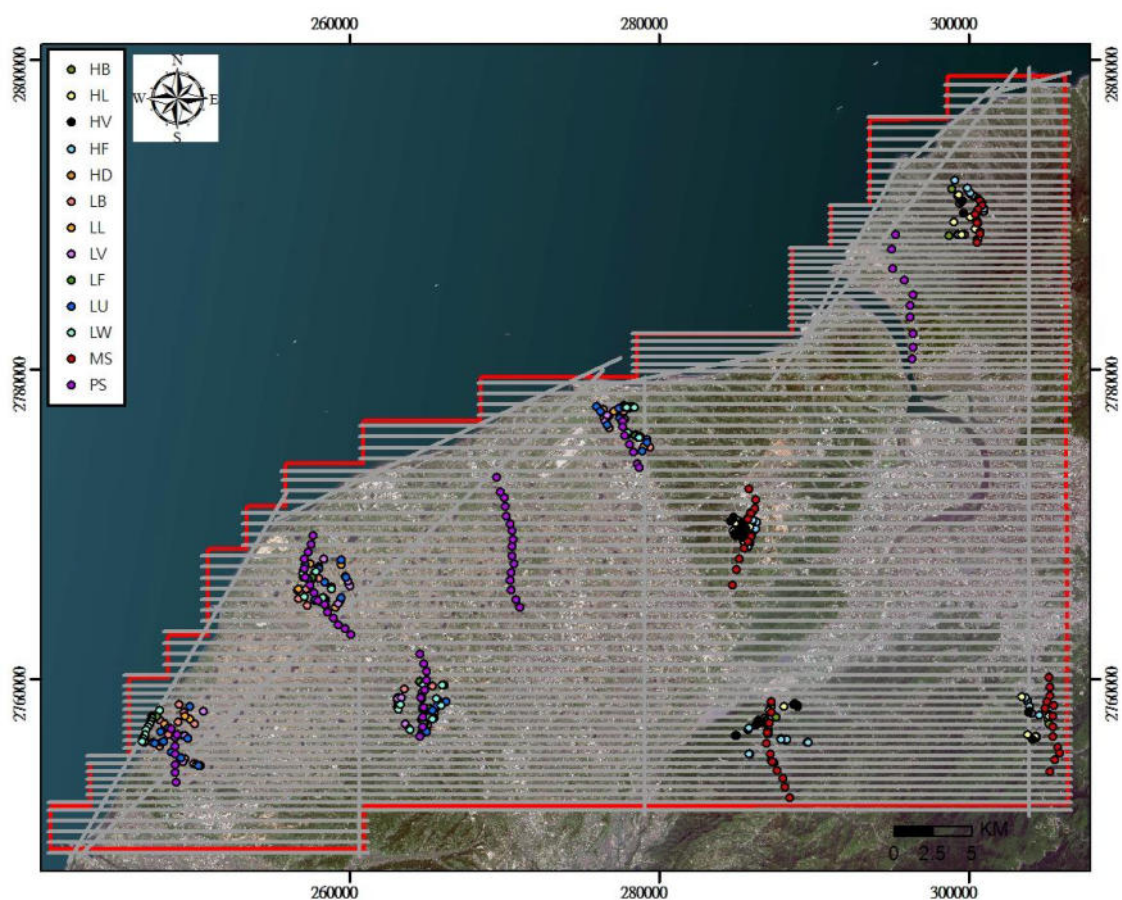


圖 4.39 檢核點分布圖

本次計畫地形包含低海拔及中高海拔測區，需分別對兩種地形進行DEM 檢核作業。依據契約要求，每種土地覆蓋分區至少要有 30 個地面測量檢核點，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。檢核點蒐集區域於測區平均選取 8 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。

另外也需分別對兩種地形進行橫互航線的橫斷面（cross section）檢核測量，低海拔及河川洪泛溢淹測製地區：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。橫斷面檢核點於測區平均選取 9 條透空平坦地進行大剖面檢核，共挑選低海拔橫斷面 6 條及高海拔橫斷面 3 條，沿道路避開地形斷線特徵處沿途進行選點。地形類別與土地覆蓋分區如表 4.10 及表 4.11，各檢核點施測範例如圖 4.40。

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	橫斷面	MS
橫斷面	PS		

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



(b) 矮植被-L



(c) 植生地-V



(d) 密林-D



(e) 林地-F



(f) 濕地-W



(g) 都會區-U



(h) 橫斷面-PS.MS

圖 4.40 各類別檢核點實測照片

4-6-2 精度評估標準與作業

本計畫規範取高程精度之 95% 信心水準 (E95) 為高程容許誤差，高程精度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：

$$\sigma^2 = a^2 + b^2 + c^2 \cdot t^2 \quad (\text{式 4.1})$$

式中 σ 為高程精度；a 為平坦裸露地區可達到的精度；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。

規範訂定高程精度 a 為 0.18 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

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	-0.001	0.120	-0.083	0.039	0.05	0.05
矮植被	36	0.058	0.171	-0.104	0.076	0.07	0.09
植生地	31	0.093	0.198	-0.034	0.096	0.06	0.11
林地	36	-0.017	0.156	-0.184	0.056	0.08	0.08
都會區	36	0.005	0.101	-0.097	0.040	0.05	0.05
濕地	35	-0.011	0.104	-0.132	0.042	0.05	0.05
橫斷面	66	-0.004	0.131	-0.129	0.043	0.05	0.05

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	34	0.001	0.111	-0.103	0.044	0.05	0.05
矮植被	31	0.052	0.154	-0.085	0.065	0.06	0.08
植生地	30	0.058	0.156	-0.091	0.073	0.06	0.09
林地	35	-0.037	0.153	-0.190	0.084	0.10	0.10
密林	34	-0.029	0.194	-0.195	0.079	0.10	0.10
橫斷面	42	0.010	0.111	-0.067	0.041	0.05	0.05

*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 4.41~圖 4.55 呈現不同土地覆蓋類型之高程較差都符合精度規範，圖表縱軸為成果高程(Z2)與檢核高程(Z1)之較差單位為公尺，橫軸為檢核點流水編碼，藍色折線即為各點高程較差，各點對應之精度規範區間為紅色折線以及綠色折線。而藍色折線皆位於紅色折線與綠色折線之間，顯示高程差值在精度規範(σ)內，皆可通過 σ 檢驗，不合格點數為零，高程較差之均方根誤差通過 σ 檢驗。

於橫斷面圖表橫軸為斷面流水號碼，由序號小至大分別對應自東到西之各橫斷面，各橫斷面檢核點精度成果由南往北依序排列。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。

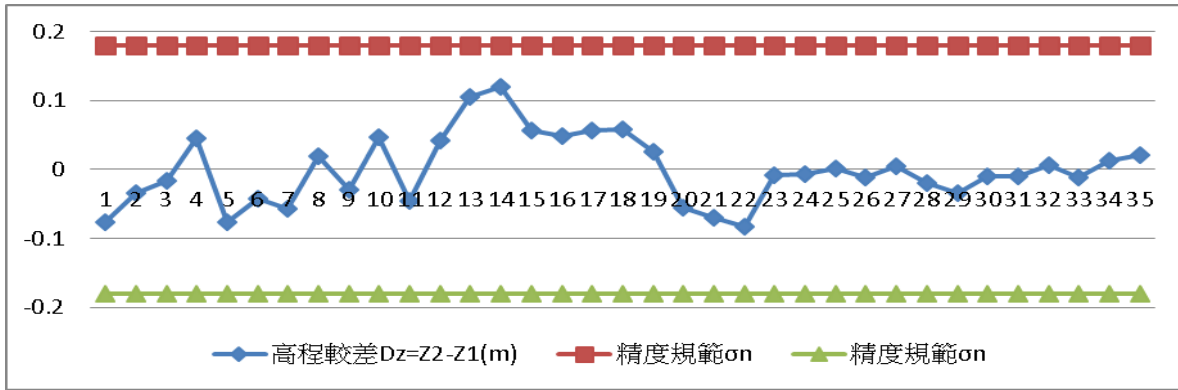


圖 4.41 低海拔之裸露地(B)精度成果圖

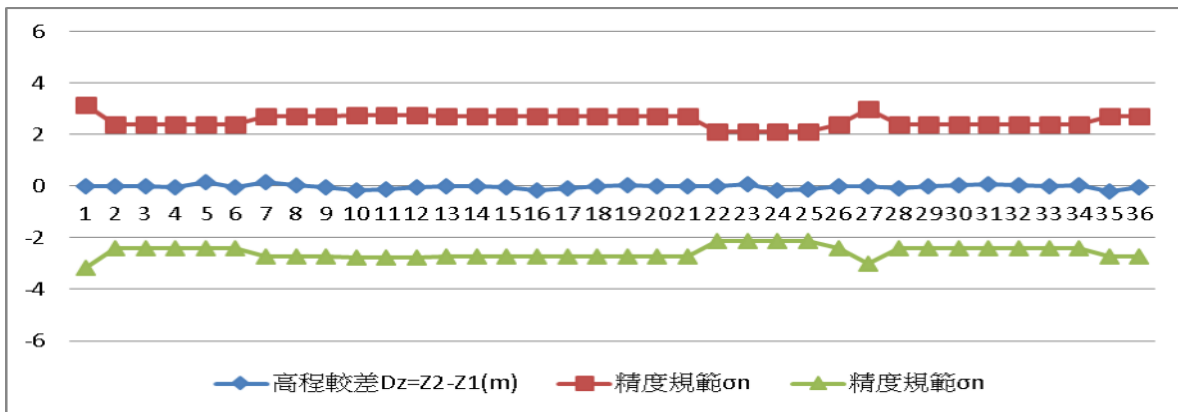


圖 4.42 低海拔之林地(F)精度成果圖

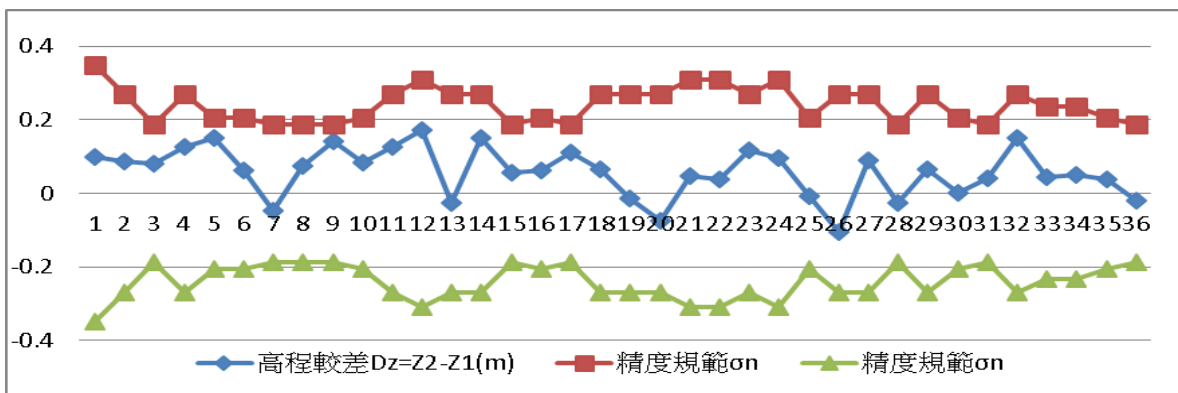


圖 4.43 低海拔之矮植被(L)精度成果圖

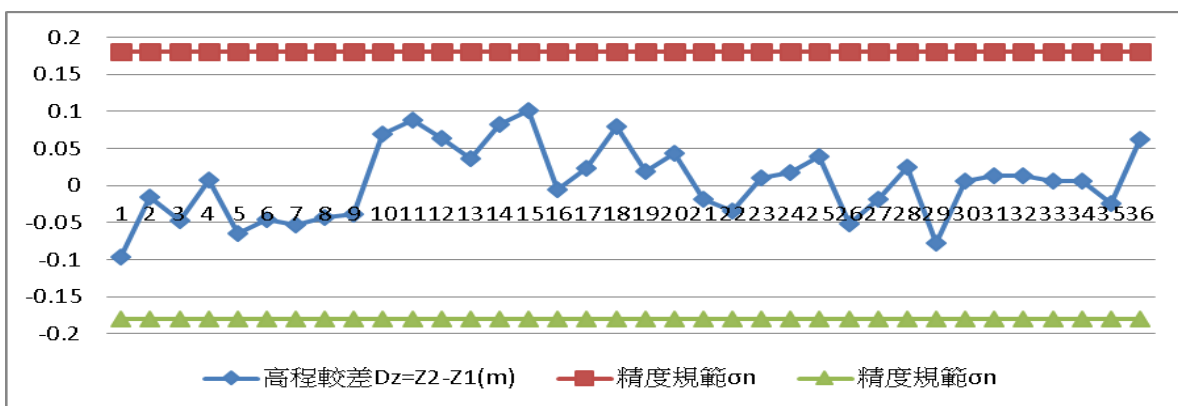


圖 4.44 低海拔之都會區(U)精度成果圖

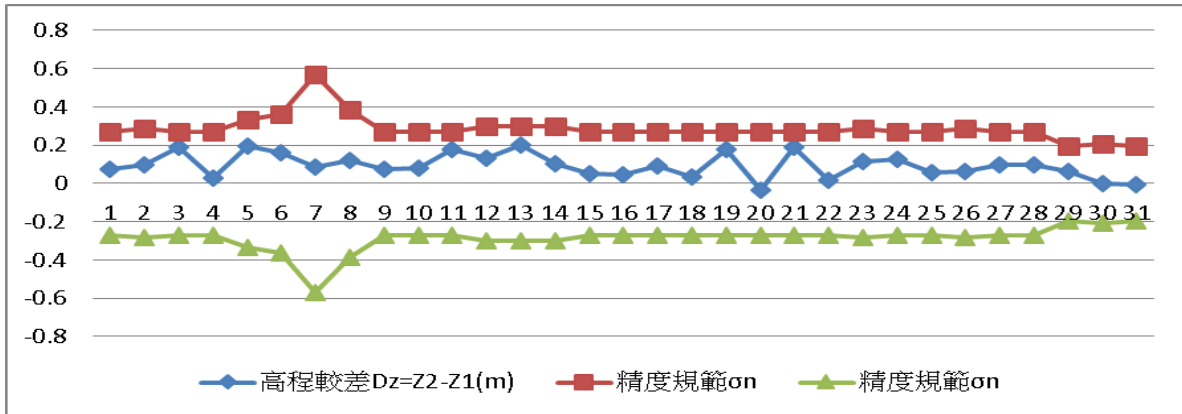


圖 4.45 低海拔之植生地(V)精度成果圖

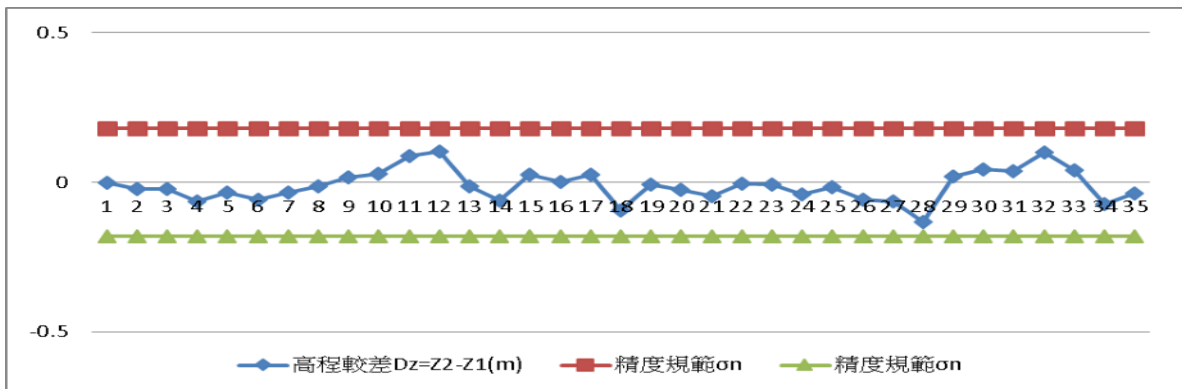


圖 4.46 低海拔之濕地(W)精度成果圖

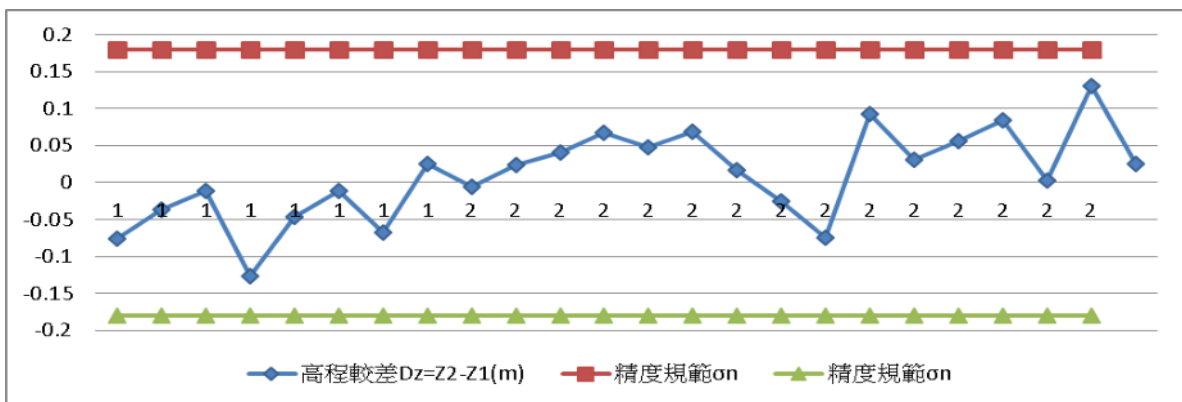


圖 4.47 低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1

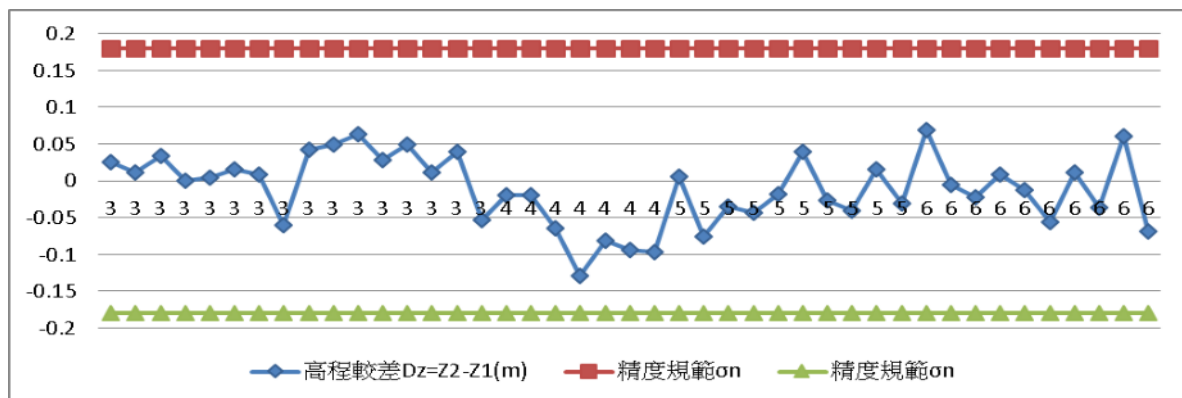


圖 4.48 低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-2

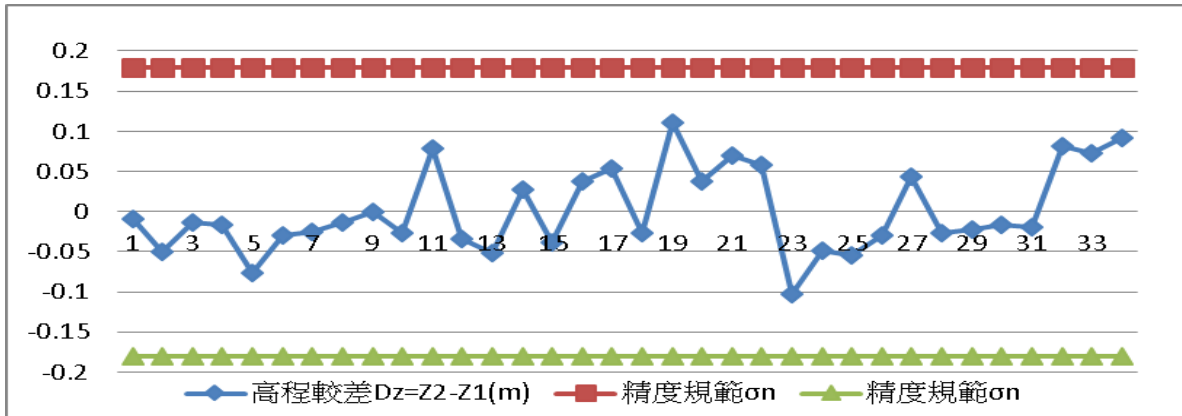


圖 4.49 中高海拔之裸露地(B)精度成果圖

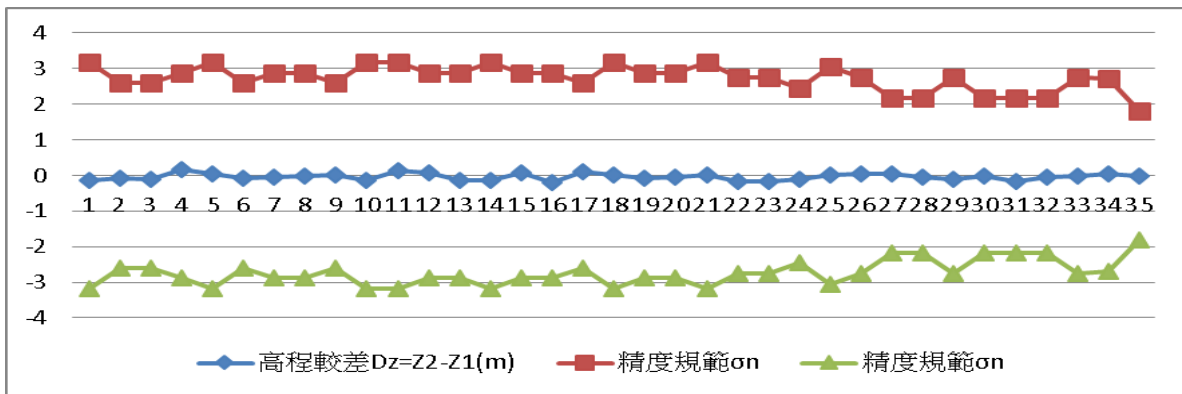


圖 4.50 中高海拔之林地(F)精度成果圖

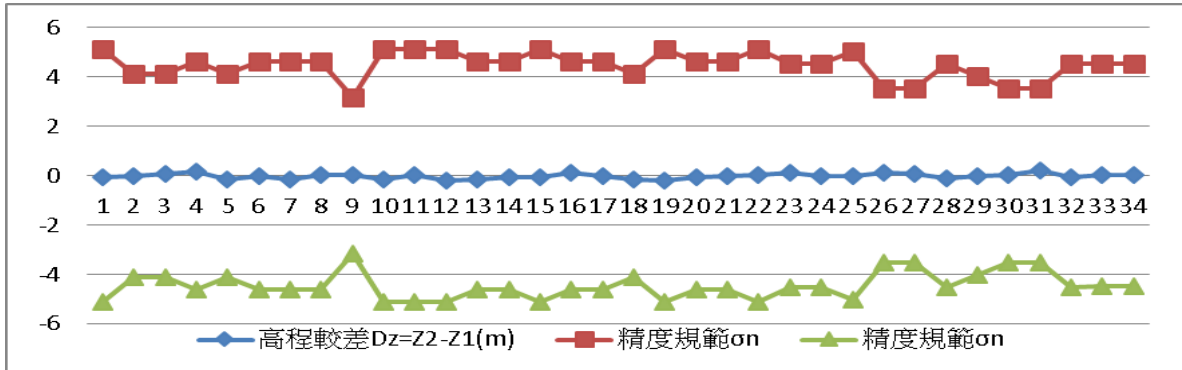


圖 4.51 中高海拔之密林(D)精度成果圖

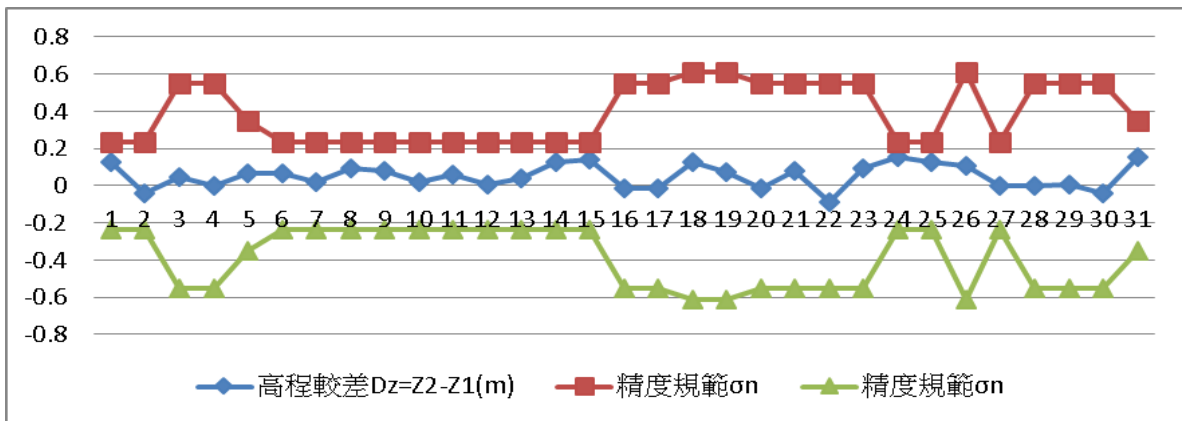


圖 4.52 中高海拔之矮植被(L)精度成果圖

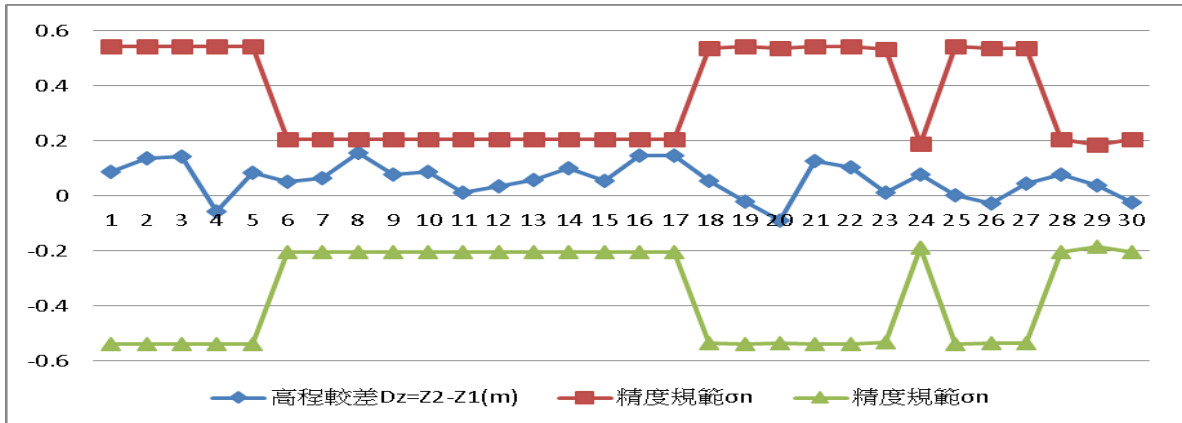


圖 4.53 中高低海拔之植生地(V)精度成果圖

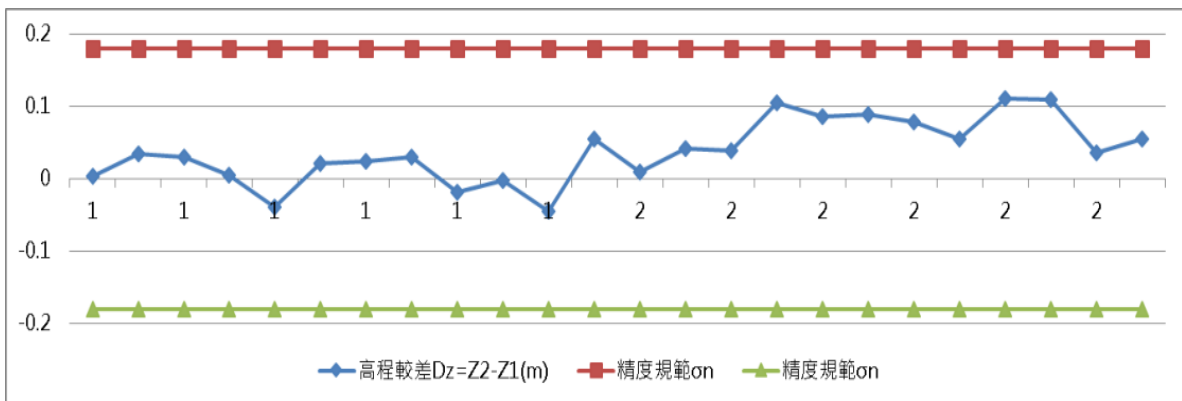


圖 4.54 中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1

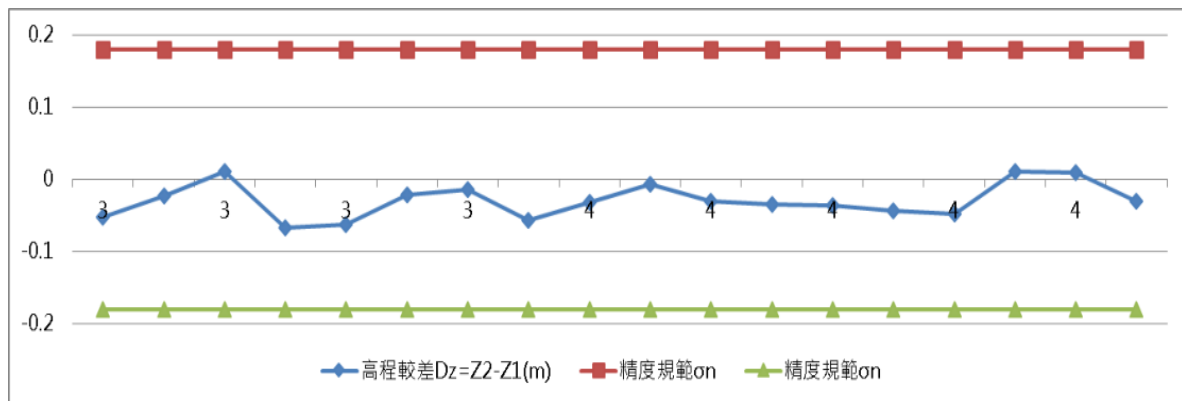


圖 4.55 中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-2

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 7 公分內，唯有高海拔植生地之誤差量較大，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	-0.001	-0.009	0.008
矮植被	0.058	0.064	-0.005
植生地	0.093	0.091	0.002
林地	-0.017	0.004	-0.020
都會區	0.005	0.007	-0.002
濕地	-0.011	-0.014	0.003
橫斷面	-0.004	0.002	-0.006

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	0.001	-0.016	0.017
矮植被	0.052	0.060	-0.002
植生地	0.058	-0.038	0.066
林地	-0.037	-0.039	0.002
密林	-0.029	-0.015	-0.014
橫斷面	0.010	0.008	0.002

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

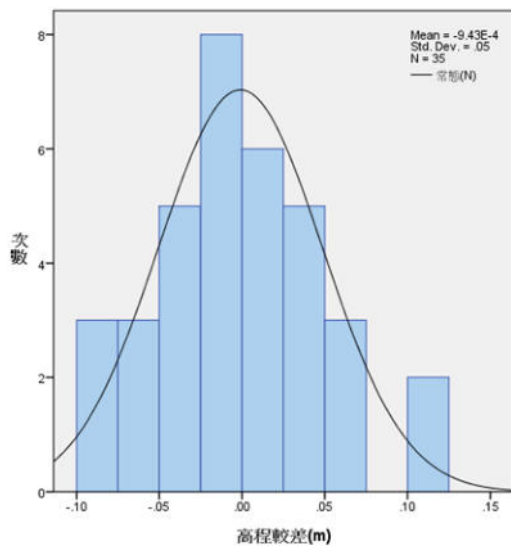
在使用一組資料分析與統計前，應對資料特性有充分足夠瞭解，以確認數據資料能滿足基本假定，才能確保統計的推論正確性，當假定不成立時(資料的偏態異於常態時)，將致使參數估計之標準偏差(standard error)與顯著性檢定(t-value)造成偏誤，嚴重時會導致估計結果的顯著性檢驗失敗(Hu & Bentler, 1995; West, Finch, & Curran, 1995)。

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

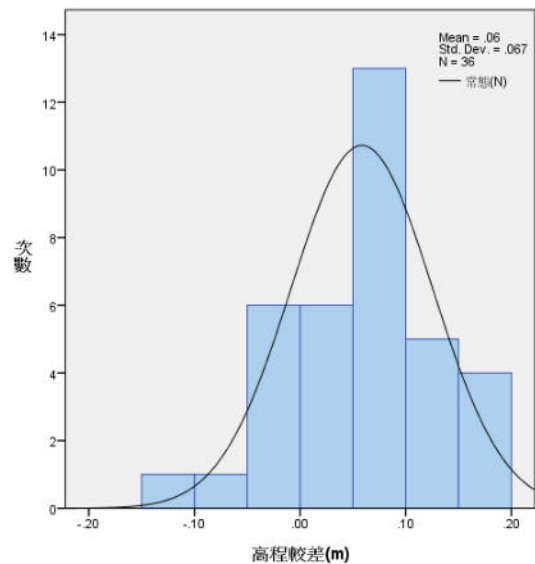
案)」中，所要檢查之偏態重點為測量誤差是否導致在直方圖上出現嚴重的雙峰圖形。本測區偏態檢驗各由高海拔與低海拔之不同土地覆蓋區域組成，其高程較差的數值之偏態如表 4.17，由結果顯示研究區內皆未出現較大偏態現象，且經由了解各種土地覆蓋類型的誤差直方圖(圖 4.56 及圖 4.57)中並未發現有雙峰圖形出現，可知此部分結果亦符合內政部草案所要求合理檢驗範圍內。

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	0.420	裸露地	34	0.412
矮植被	36	-0.491	矮植被	31	-0.116
植生地	31	0.066	植生地	30	-0.430
林地	36	-0.310	林地	35	0.191
都會區	36	0.056	密林	34	0.029
濕地	35	0.264	橫斷面	42	0.466
橫斷面	66	-0.123			



(a) 裸露地



(b) 矮植被

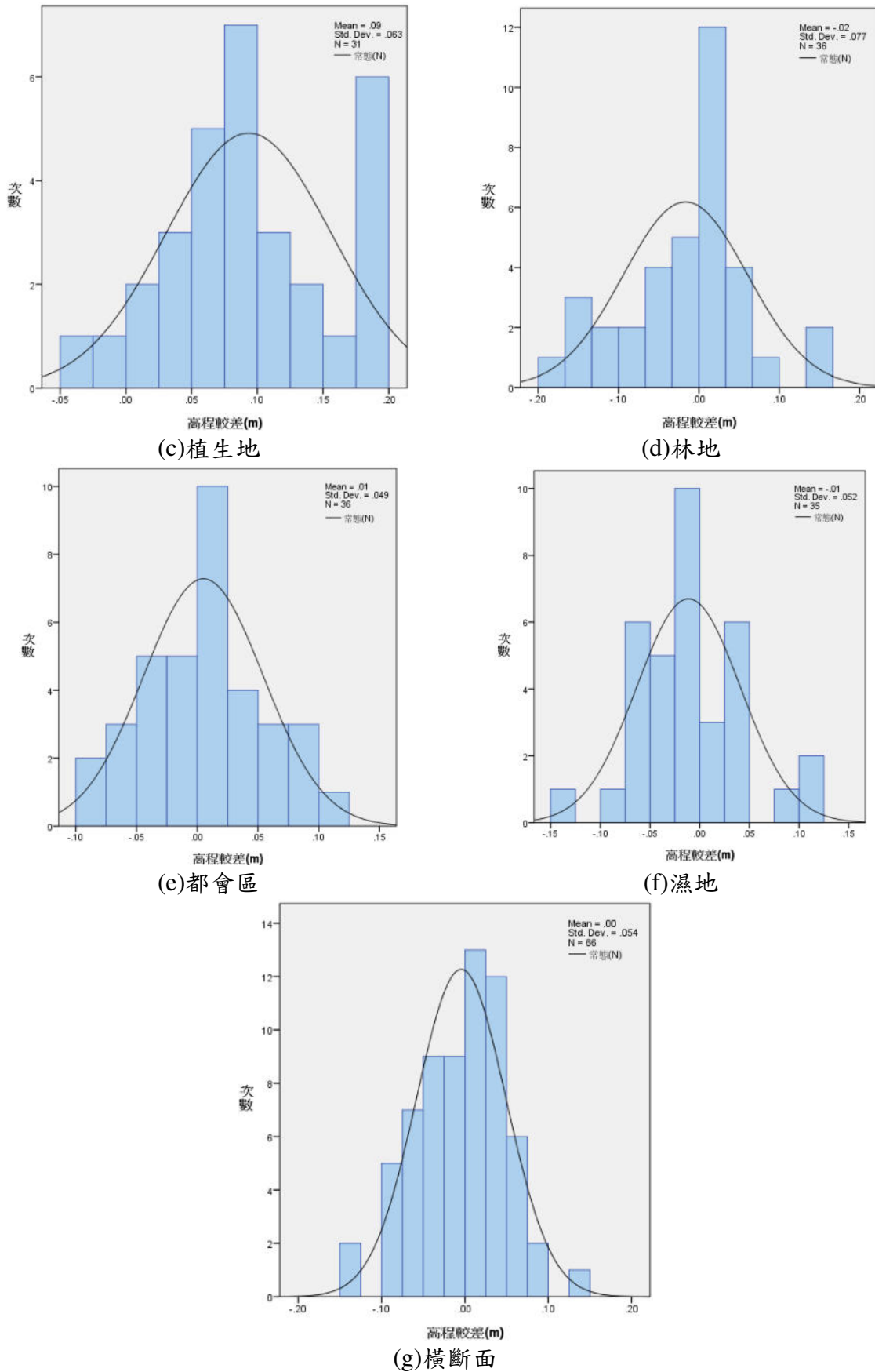
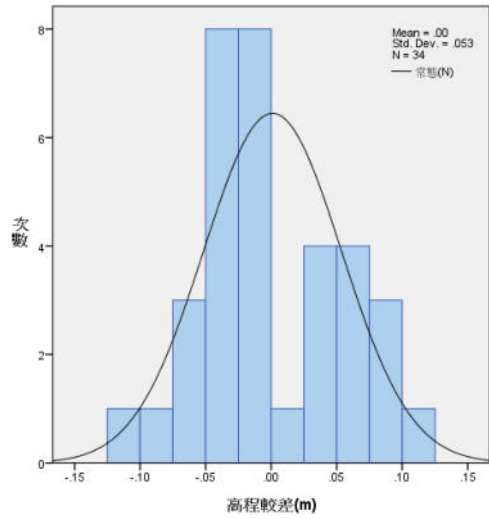
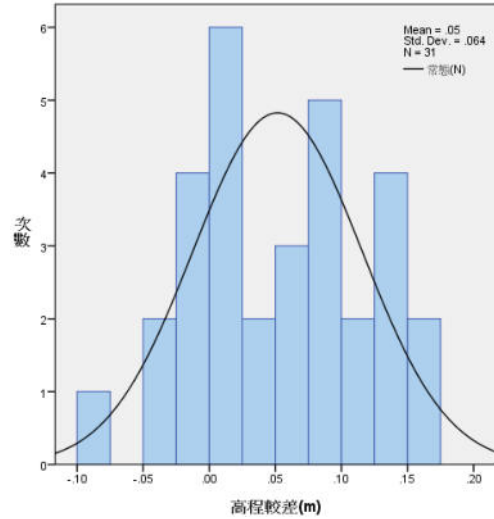


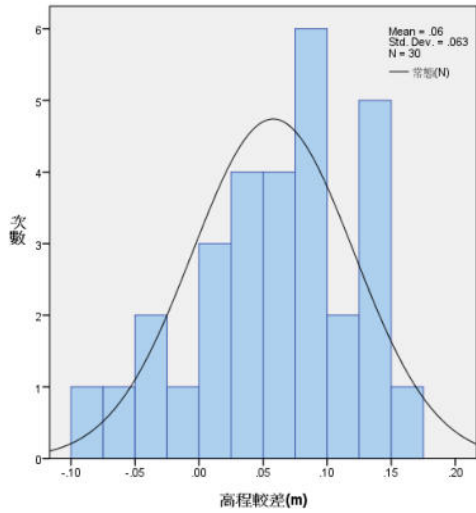
圖 4.56 低海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺)



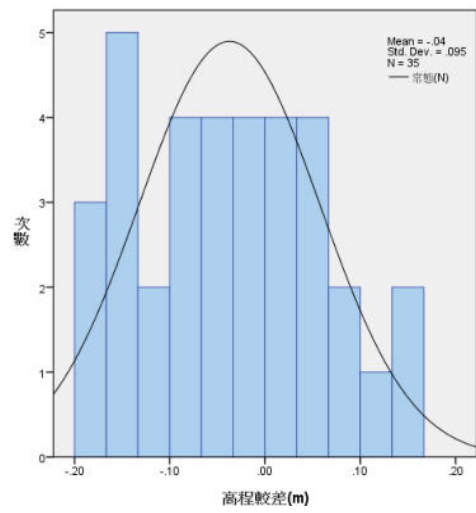
(a) 裸露地



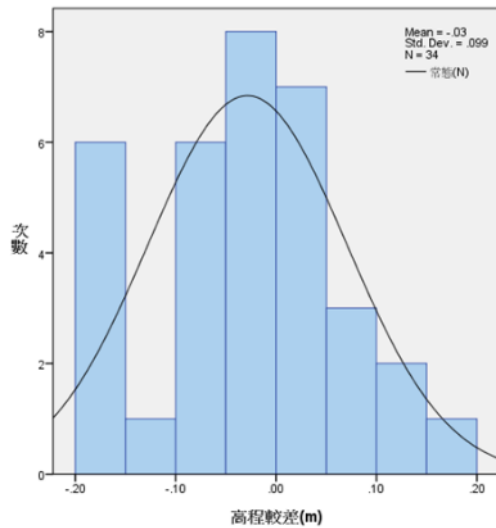
(b) 矮植被



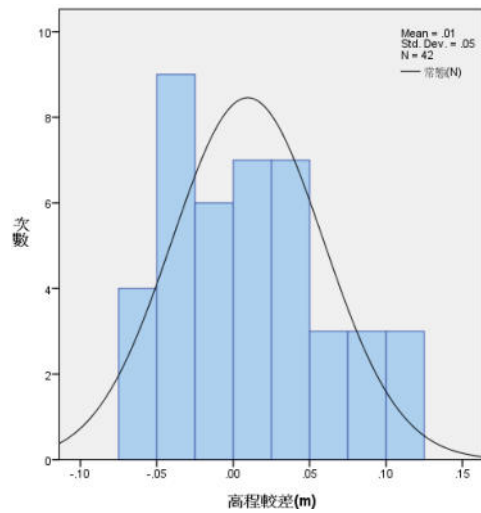
(c) 植生地



(d) 林地



(e) 密林



(f) 橫斷面

圖 4.57 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	0.002	2.403	21.664	接受 H_0
矮植被	0.004	2.510	22.465	接受 H_0
植生地	0.004	1.391	18.493	接受 H_0
林地	0.006	0.032	22.465	接受 H_0
都會區	0.002	2.445	22.465	接受 H_0
濕地	0.003	2.631	21.664	接受 H_0
橫斷面	0.003	5.304	47.450	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	0.003	2.596	20.867	接受 H_0
矮植被	0.004	0.784	18.493	接受 H_0
植生地	0.004	0.866	17.708	接受 H_0
林地	0.009	0.041	21.664	接受 H_0
密林	0.010	0.016	20.867	接受 H_0
橫斷面	0.002	2.885	27.326	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。

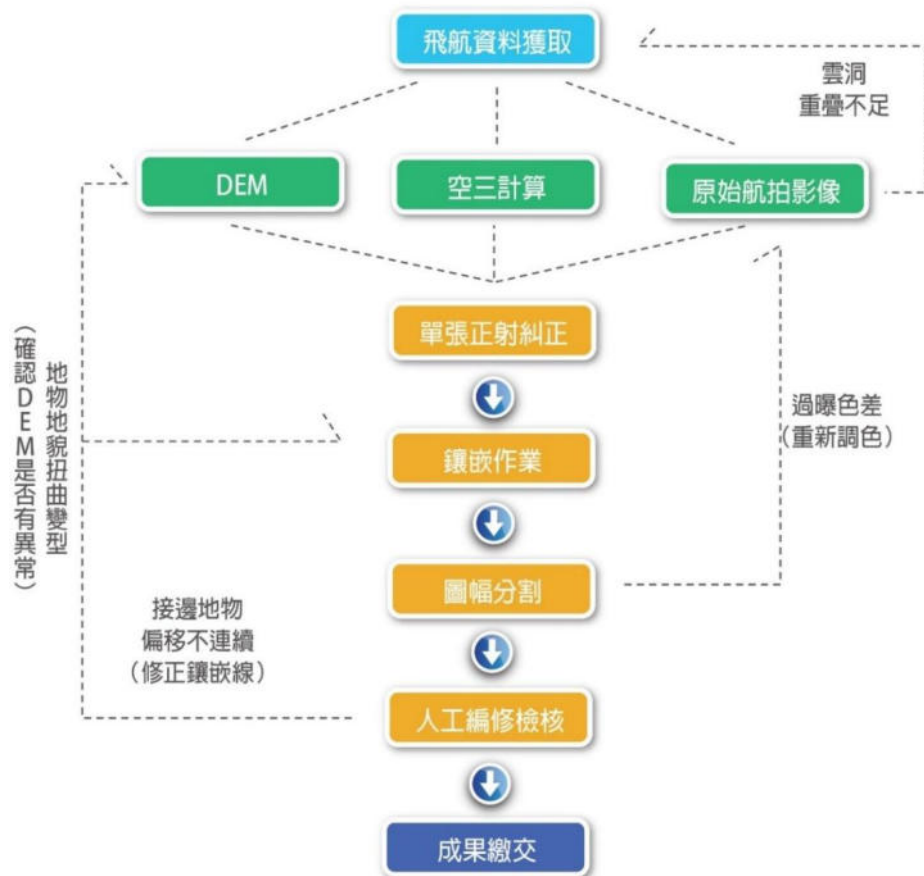


圖 5.1 正射影像製作流程圖

§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，規格符合規範要求(如表 2.1 及表 5.1)。校正飛航已於 110 年 3 月 1 日執行，並於同年 3 月 17 日通過中像幅像機校正(報告編號 F202101040201)，校正報告書如附件四所示。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 85%，側向重疊大於 50%，影像地

面解析度優於 25 公分，皆符合契約規範。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。

表 5.1 相機相關規範

項目	說明
數位式攝影機類型	採用精密測圖用之數位式攝影機
攝影機感應器尺寸	應大於 24 mm × 36 mm
影像成果位元深度	24 位元自然彩色影像(紅、綠、藍各波段均為 8 位元)
校正報告品保參據	具有最近 2 年內 TAF 認證

本計畫累積航拍共 25 架次，合計共使用 20,785 張影像進行後續處理，以航空攝影涵蓋圖展示各單張像片於測區位置如圖 5.2。

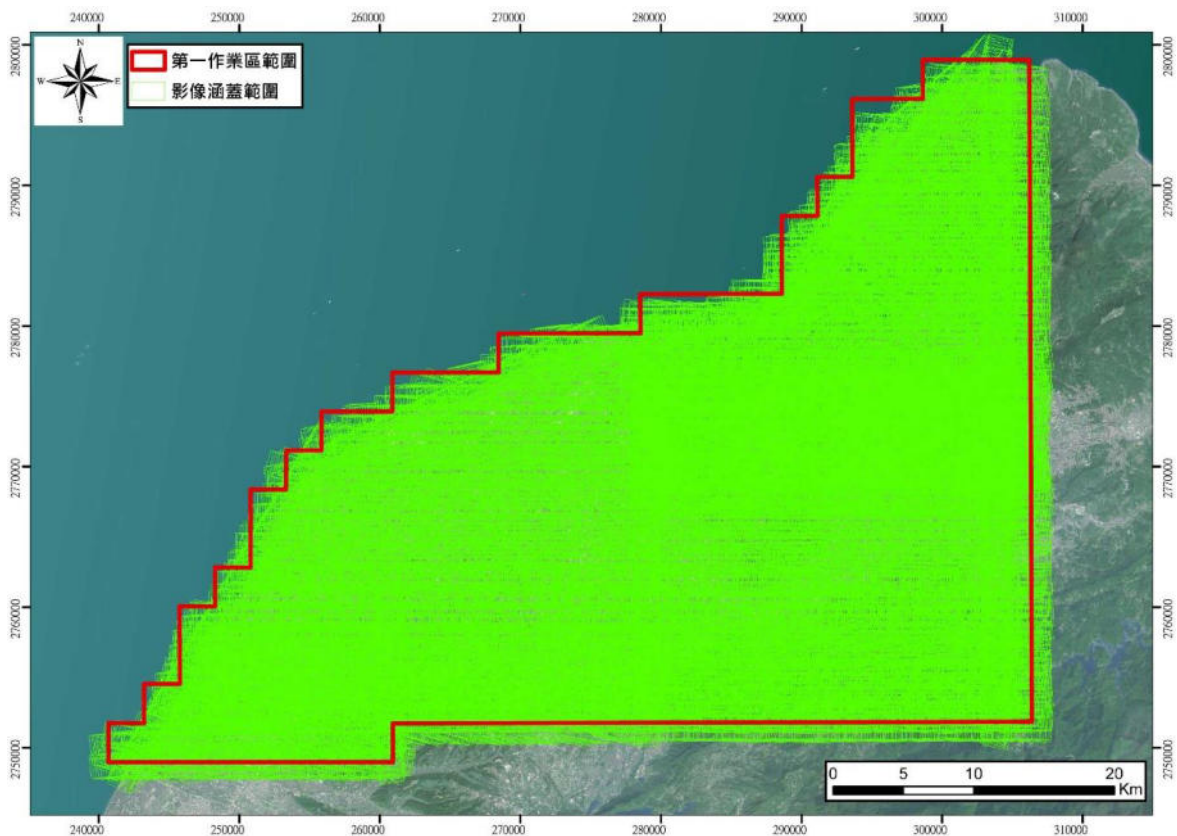


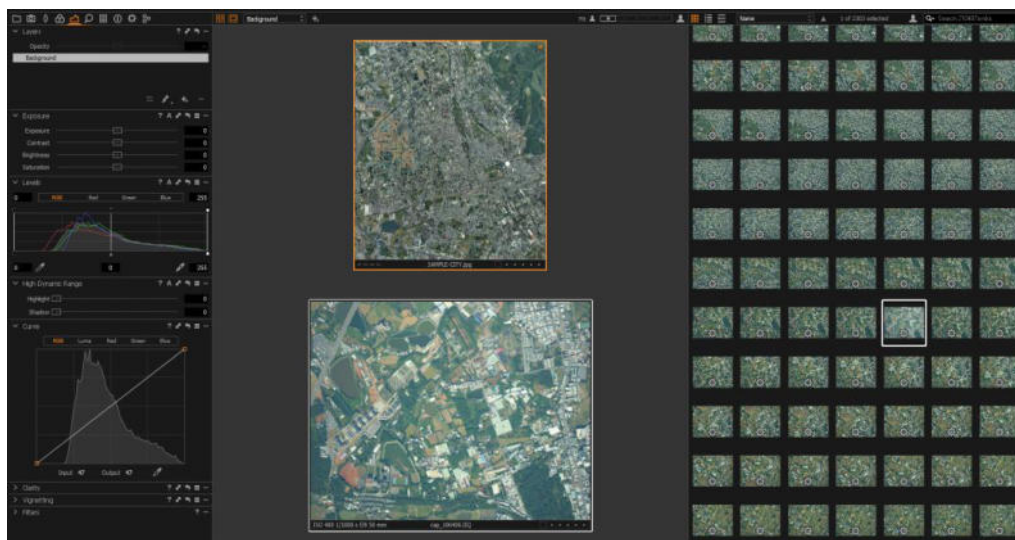
圖 5.2 測區航照涵蓋圖

§5-2 航拍影像處理

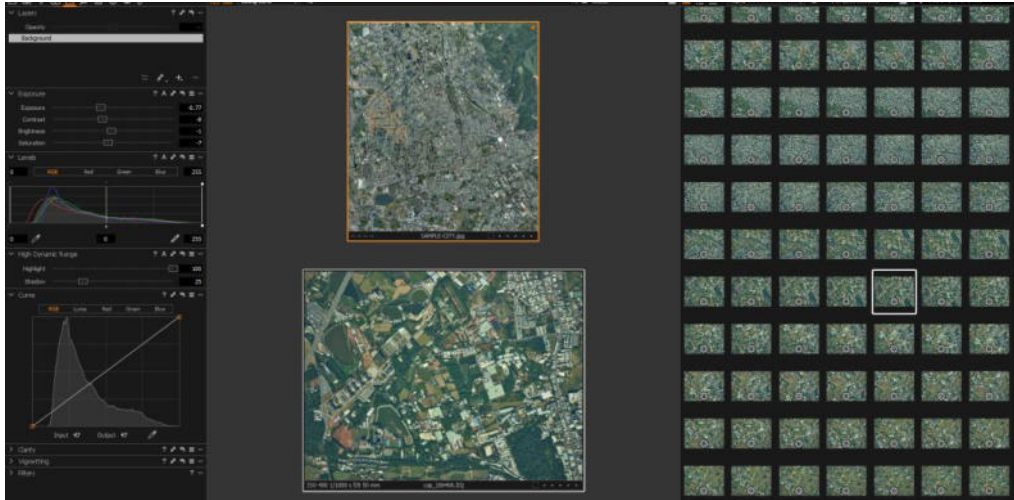
原始影像為壓縮影像檔，透過 PHASE ONE 公司發展之 CaptureOne 軟體進行影像處理，可執行影像轉檔、影像增揚與色調調整等功能，繼而轉出成可見光影像，使正射影像顯示之地物與原本天然色彩一致，並減少不同拍攝時間影像色調不一致的現象。後續以 CaptureOne 軟體及 Photoshop 軟體進行色調處理，供正射影像製作使用，操作示意圖如圖 5.3。同時於此步驟時依監審方提供之樣張調整色調，降低不同測區間色調差異。

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。

5-3-1 空三分區

因測區面積廣闊飛航架次涵蓋約 5 月之久，為能階段性進行影像內業，故採分區方式配合飛航進度進行空三作業，各測區四角均有漆標全控點，且分區重疊至少二組像對或一條航線，以確保各分區空三計算成果一致性。於各分區內均勻布設檢核點共 14 點，不加入空三平差計算僅用於檢核空三成果符合契約規範。本計畫空三分區與控制點分布如圖 5.4。

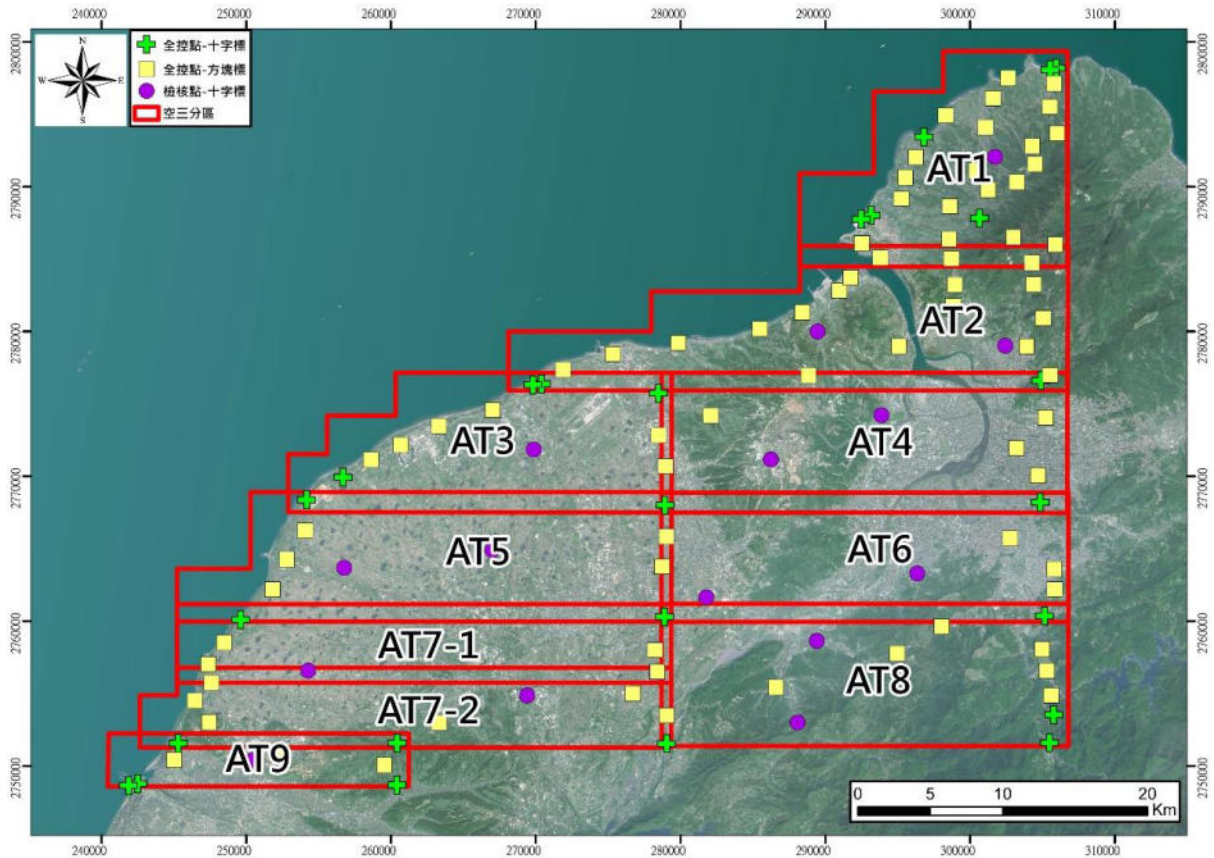


圖 5.4 空三分區與航空標控制點分布圖

5-3-2 空中三角平差作業

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，完成自由網平差。接著加入航測標地面控制點約制網形進行強制附合平差，完成空三，輸出所有影像之外方位參數，空三成果與觀測量統計表如表 5.2 所示，其中因各分區航帶有重疊，相片數加總會略大於空三成果總張數。全數檢核點計算得到之平面及高程坐標均方根誤差值並依像片比例尺換算至像片

表 5.2 空三平差成果統計表

		AT1	AT2	AT3	AT4	AT5	AT6	AT7-1	AT7-2	AT8	AT9	
航測 觀測值統計	2 重點	91	120	108	6	98	99	129	152	19	50	
	3 重點	25	243	13	5	66	178	52	15	105	8	
	4 重點	15	44	21	8	48	213	26	35	115	7	
	5 重點	41	50	11	17	40	161	25	40	102	7	
	6 重點	42	85	10	25	51	116	11	39	112	11	
	7 重點	47	98	17	37	28	140	16	54	116	20	
	8 重點以上	2785	8055	3779	5477	10672	9583	3517	5770	6777	1642	
	總觀測數	180036	523694	244206	316836	730842	582728	257880	366530	422826	90780	
	總未知數	9141	25530	11868	16731	33009	31598	11307	18330	22089	5238	
	多餘觀測量	170895	498164	232338	300105	697833	551130	246573	348200	400737	85542	
	影像張數	1592	3612	2102	2585	2629	2535	2261	2596	3439	787	
控制點中誤差	全控點	點數	28	23	14	12	11	11	6	9	17	9
		RMSX(m)	0.010	0.128	0.012	0.012	0.206	0.012	0.012	0.009	0.133	0.175
		RMSY(m)	0.014	0.188	0.015	0.013	0.27	0.017	0.021	0.021	0.142	0.144
	檢核點	點數	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1
		RMSX(m)	0.019	0.194	0.253	0.241	0.157	0.19	0.113	0.095	0.16	0.217
		RMSY(m)	0.012	0.254	0.164	0.286	0.176	0.373	0.54	0.462	0.277	0.199
X 連結點量測中誤差(m)		0.061	0.141	0.172	0.119	0.068	0.111	0.137	0.077	0.090	0.120	
Y 連結點量測中誤差(m)		0.025	0.107	0.148	0.106	0.112	0.141	0.255	0.233	0.104	0.137	
自由網中誤差(um)		2.4	2.0	2.3	2.1	2.1	2.4	2.1	2.4	2.4	2.2	
強制網中誤差(um)		2.7	2.4	2.5	2.4	3.3	2.7	2.4	2.6	2.7	2.7	
平均多餘觀測數，符合規範 ≥ 0.7		0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96	0.95	0.95	0.94	
連結點平均光線數，符合規範 ≥ 7		30.04	31.24	31.74	28.39	33.24	27.88	34.99	28.23	28.83	25.92	
連結點強度指標，符合規範 ≥ 0.3		0.91	0.95	0.96	0.98	0.97	0.91	0.93	0.87	0.92	0.94	

§5-4 彩色無縫鑲嵌正射影像製作

1. 正射影像產製

(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單張影像正射糾正，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 5.8。



(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 5.8 色差調整前後示意圖

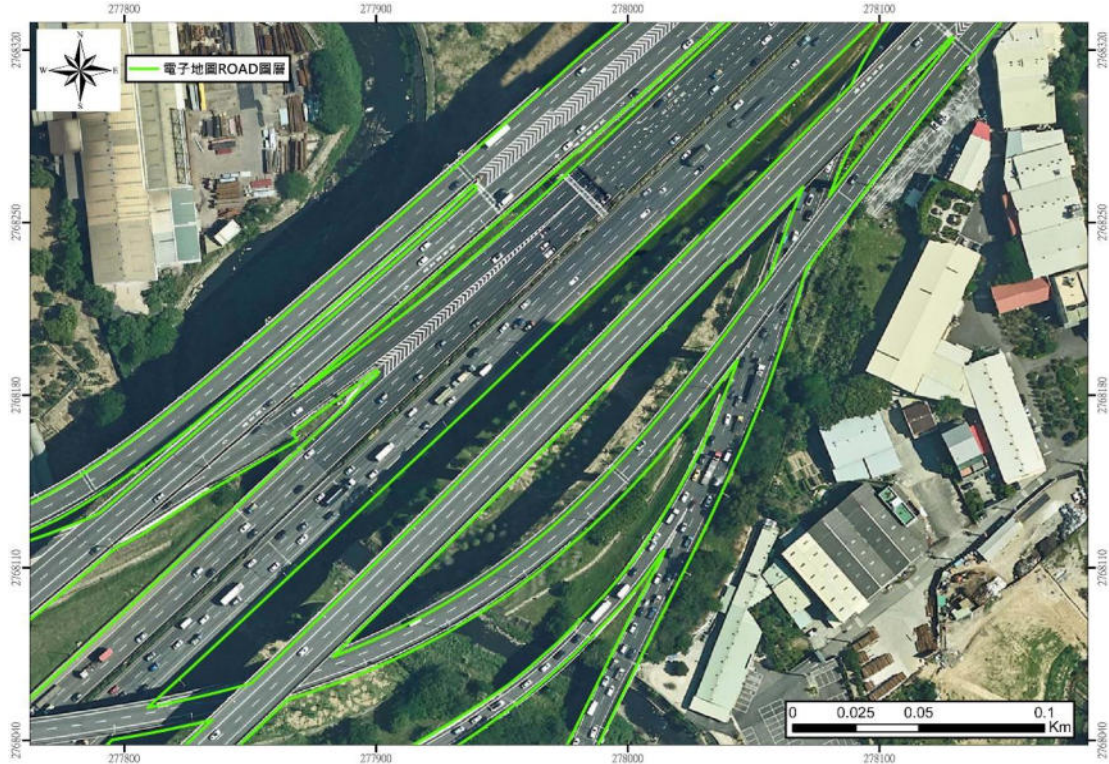
(3) 圖幅分割

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。

2. 重要意義的基礎建設高差位移糾正

本年度規範新增正射影像連續地物合理性要求，除以往要求之地貌地物完整性且無扭曲變形外，對地圖判讀有重要意義的基礎建設必須糾正高差位移，如鐵、公路和橋梁。於高差位移區域需使用光達資料產製之數值

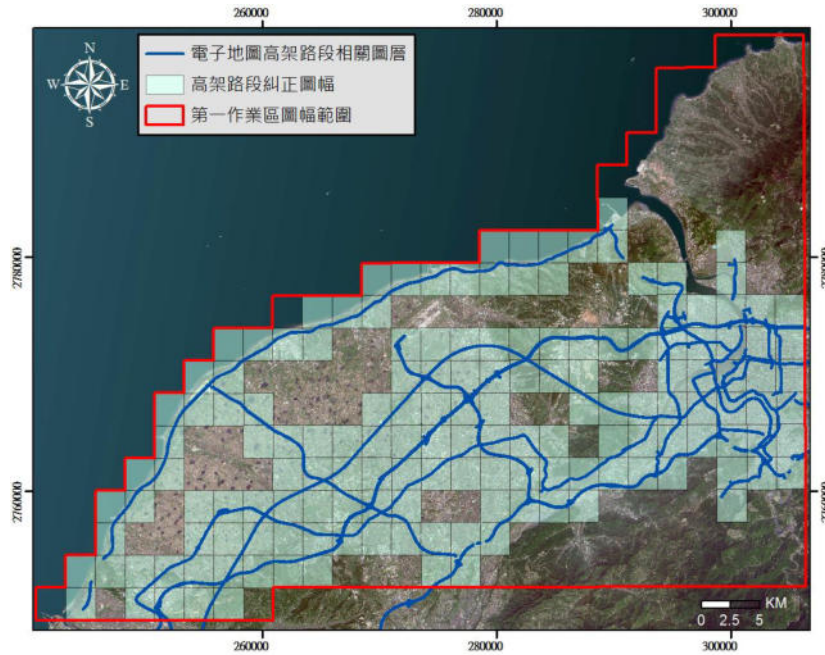
地表模型(DSM)，進行影像糾正。糾正位置參考貴中心提供之臺灣通用電子地圖相關圖層，包含道路、橋梁、立體道路、高鐵、臺鐵。並於糾正後藉由點雲強度圖確認糾正成果符合實際位置。



(a)高架道路高差位移糾正前



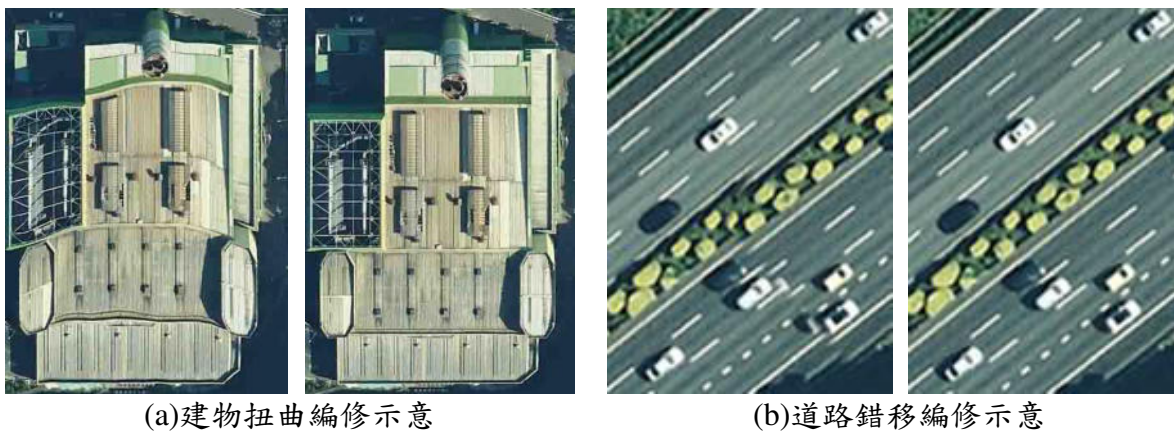
(b)高架道路高差位移糾正後



(c)涉及高架道路高差位移糾正圖幅分布
圖 5.9 高架道路高差位移糾正示意圖

3. 正射影像編修

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 5.10。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。完成之正射影像如圖 5.11 和圖 5.12 所示，第 1 作業區共 266 幅 1/5000 正射影像如圖 5.13。



(a)建物扭曲編修示意 (b)道路錯移編修示意
圖 5.10 正射影像編修示意圖

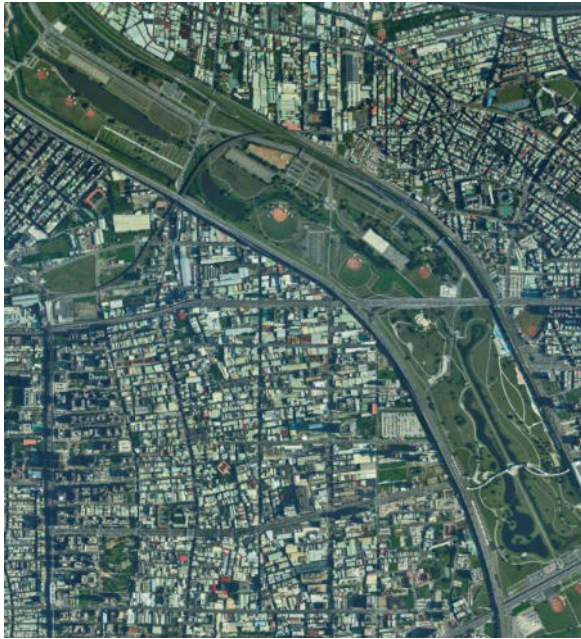


圖 5.11 平地正射影像成果圖(96232079)



圖 5.12 山區正射影像成果圖(97234092)

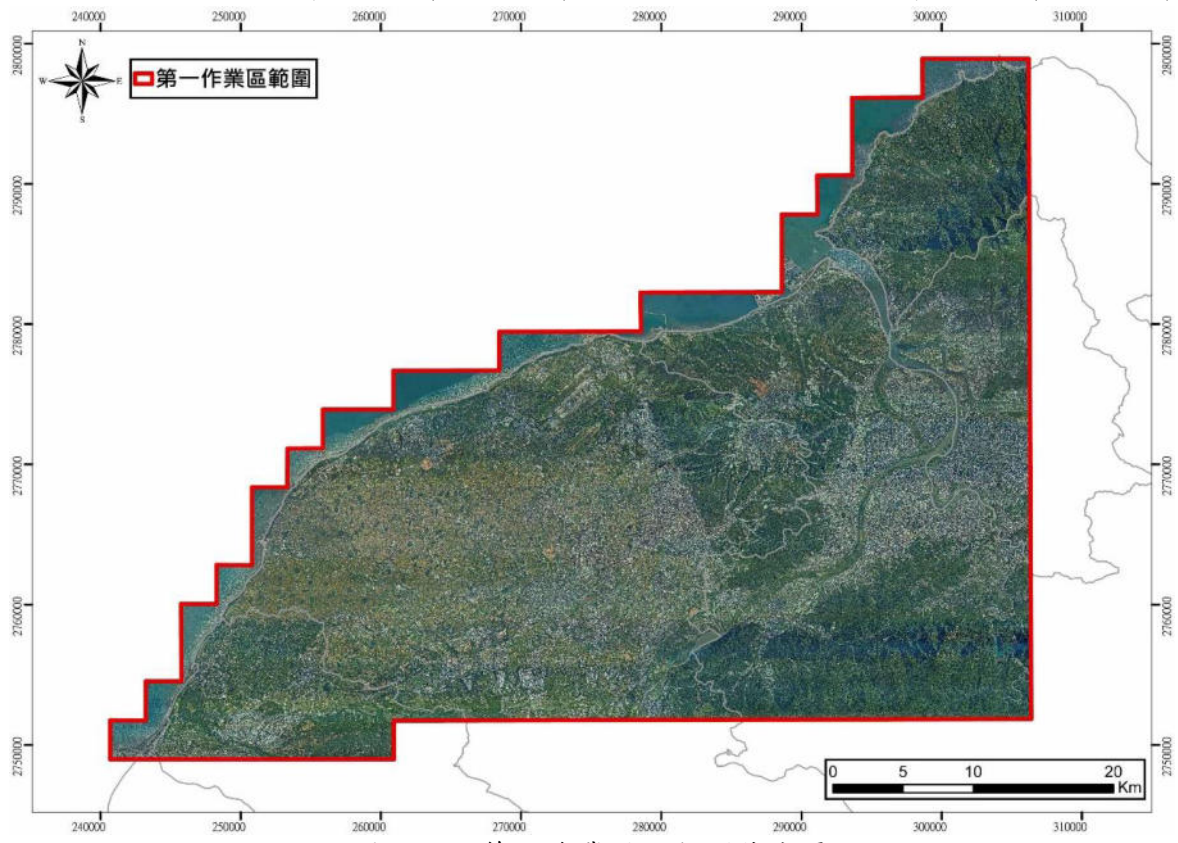


圖 5.13 第 1 作業區正射影像成果

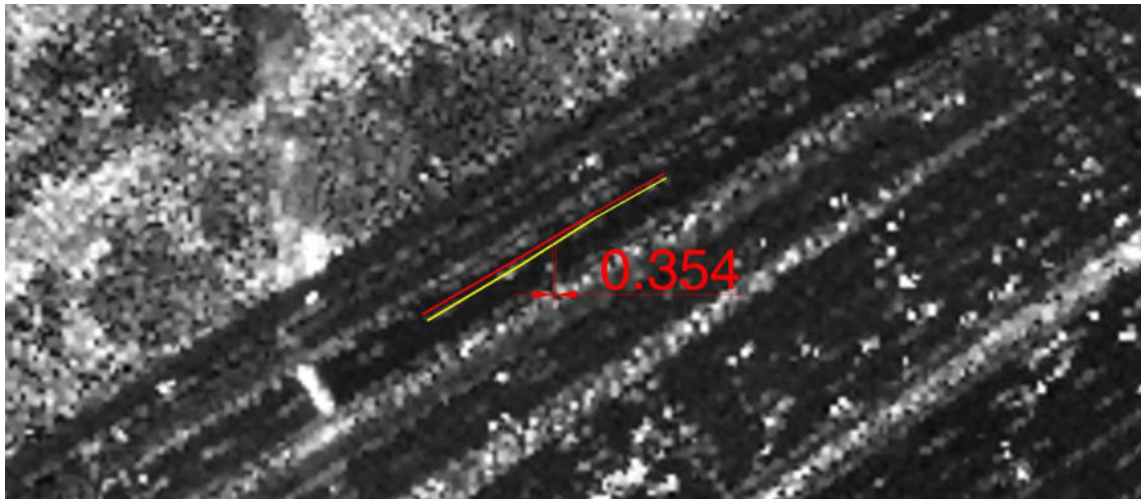
4. 正射影像精度檢核

糾正成果再利用點雲強度值影像，對於明顯之標線進行平面位置比對，確保影像平面坐標無明顯系統偏差，檢核示意圖如圖 5.14。並可再次藉影像檢核點(靜態 GNSS 控制點)進行精度檢核，經量測後偏差量皆小於 0.5 公

尺，檢核示意圖與控制點差值如圖 5.15 與表 5.3。



(a)正射影像標線數化(紅線)



(a)點雲強度影像標線數化(黃線)

圖 5.14 正射影像點雲強度檢核示意圖



圖 5.15 影像檢核點檢核示意圖

表 5.3 平面控制點檢核影像差值表(單位:公尺)

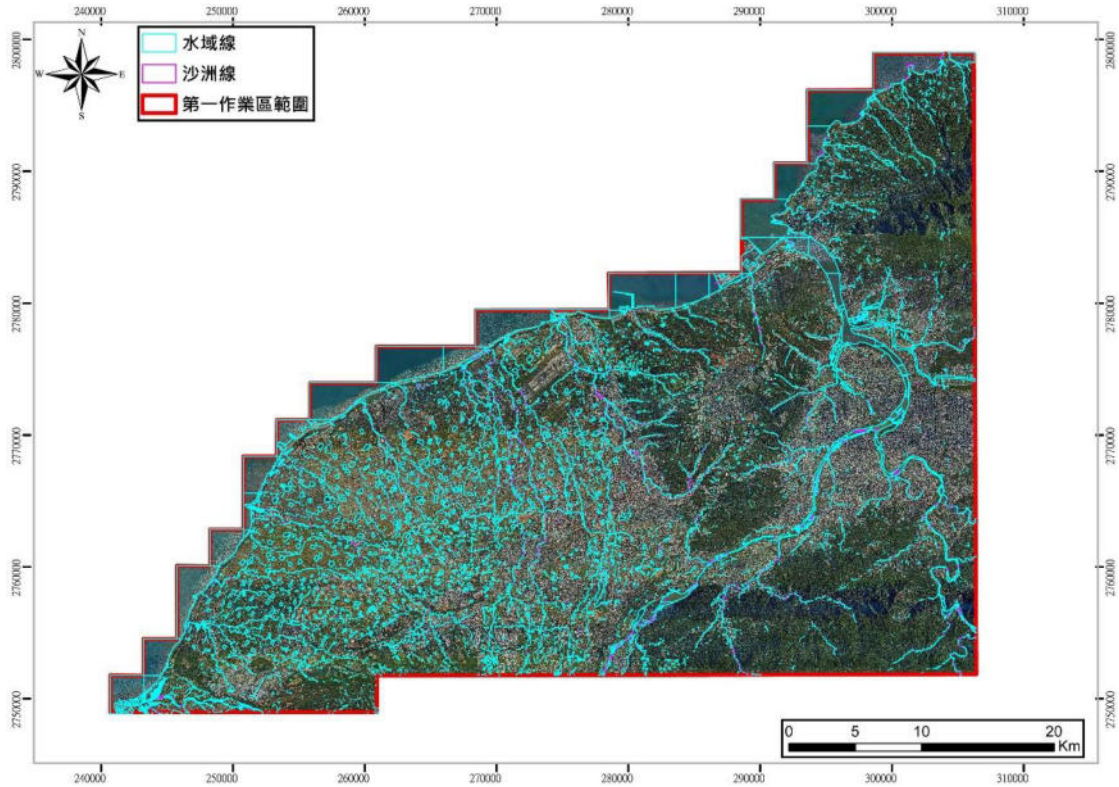
點號	平面控制點坐標		影像量測屋角點坐標		E 方向 差量	N 方向 差量	平面 差量
	E	N	E	N			
51-0117C	250523.205	2750450.523	250523.105	2750450.745	0.100	-0.222	0.244
51-0118C	254281.023	2756587.579	254280.904	2756588.031	0.119	-0.452	0.467
51-0119C	256768.371	2763687.943	256768.259	2763688.117	0.112	-0.174	0.207
51-0120C	289411.679	2758641.187	289411.564	2758640.926	0.115	0.261	0.285
51-0121C	288089.697	2753014.808	288089.420	2753015.167	0.277	-0.359	0.454
51-0122C	269866.353	2771857.690	269866.182	2771857.826	0.171	-0.136	0.218
51-0123C	293889.881	2774233.216	293889.654	2774232.980	0.227	0.236	0.327
51-0124C	289462.197	2780011.136	289462.215	2780011.219	-0.018	-0.083	0.085
51-0125C	301724.030	2792075.666	301723.962	2792075.554	0.068	0.112	0.131
51-0126C	296345.125	2763310.308	296344.974	2763310.519	0.151	-0.211	0.259
51-0127C	267016.276	2764908.070	267016.285	2764908.011	-0.009	0.059	0.060
51-0128C	269400.287	2754877.921	269400.272	2754877.854	0.015	0.067	0.069
51-0129C	286236.332	2771168.867	286236.157	2771168.879	0.175	-0.012	0.175
51-0130C	302435.382	2779030.422	302435.407	2779030.560	-0.025	-0.138	0.141
平面差量最大值	0.467		平面差量標準偏差		0.129		
平面差量最小值	0.060		平面差量均方根差		0.265		
平面差量平均值	0.223						

5. 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 5.16 所示。



(a)水體線套疊正射影像



(b)全測區水體線
圖 5.16 水體繪製成果

6. 正射影像詮釋資料製作

正射影像產製完成後需依照詮釋資料標準(NGISTD-ANC-002-2011.12)進行詮釋資料產製，紀錄案名、生產目的、坐標系統、影像格式、品質檢查報告及相關權責機關和生產單位等相關資料，並分別詳述正射影像圖號、圖名、涵蓋之縣市鄉鎮、範圍、影像獲取時間等圖幅基本資料。

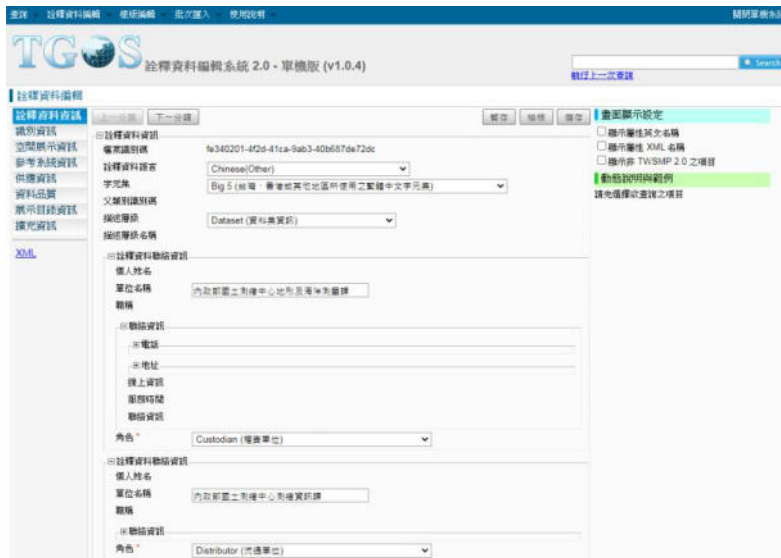
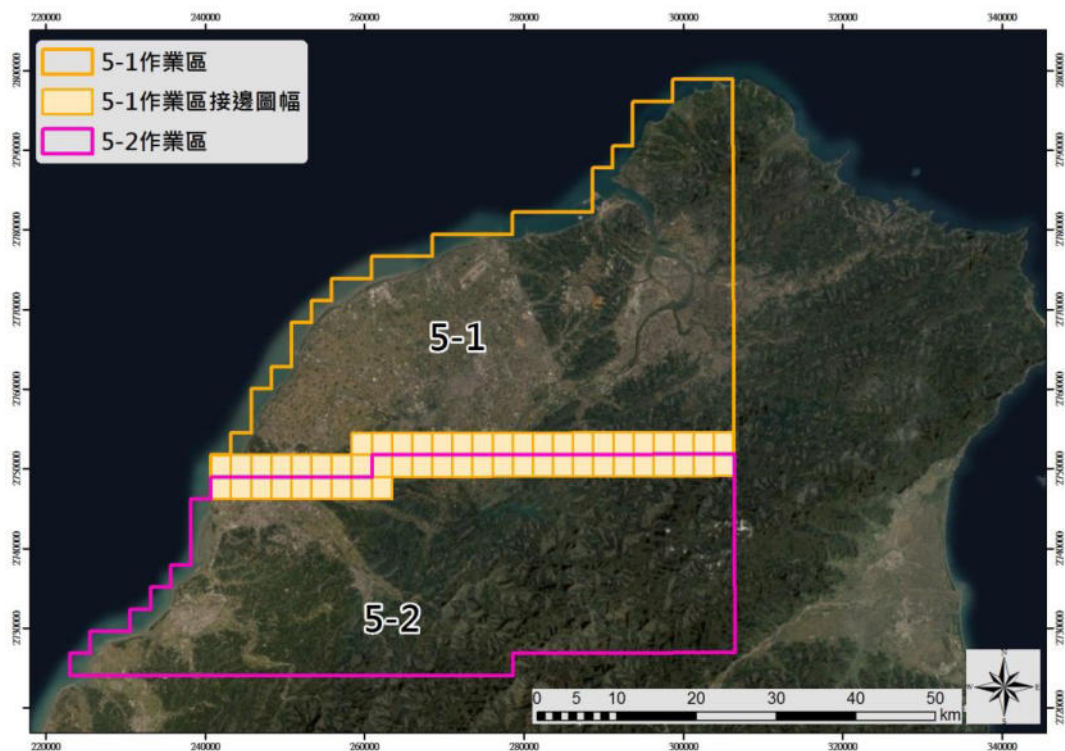


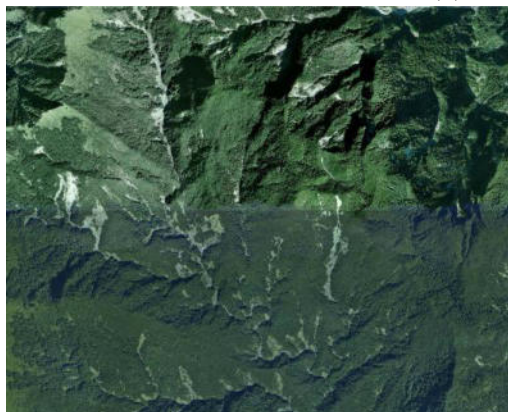
圖 5.17 TGOS 詮釋資料編輯系統 2.0 操作畫面

§5-5 正射影像外部接邊

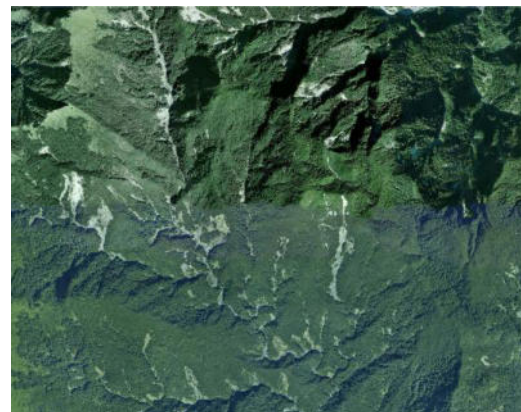
今年度三作業區皆為相鄰，經工作會議討論責任接邊分配，本作業區主要負責第1作業區與第2作業區之間，共54幅之責任接邊，需接邊之圖幅成果包含DEM、DSM和正射影像，數值地形網格成果接邊做法參考章節4-5-3。於各作業區正射影像產製完成，且經監審方判定合格後交換相鄰圖幅予負責廠商。正射影像接邊以保持地形連續為原則調整接邊線，並於色調調整後重新鑲嵌正射影像，接邊示意圖如圖5.18。礙於相鄰之5-2作業區目前尚未完成成果提交，責任接邊工作將保留至111年執行。



(a)責任接邊範圍圖



(b)影像外部接邊前示意



(c)影像外部接邊後示意

圖 5.18 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. 作業計畫與飛航掃瞄規劃

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瞄參數設計進行作業，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瞄。

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，並自行架設一 GNSS 基站備有監控設備，透過監控軟體確保接收品質無虞，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	\$72,000	\$36,000
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	1.5	\$72,000	\$108,000
2.2	平差控制點選點與測量	人月	16	\$72,000	\$1,152,000
三	空載雷射掃瞄施測資料獲取	架次	28	\$465,000	\$13,020,000
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	\$72,000	\$864,000
4.2	點雲資料過濾分類	人月	72	\$72,000	\$5,184,000
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	25	\$72,000	\$1,800,000
5.2	正射影像製作與水線繪製	人月	60	\$72,000	\$4,320,000
六	圖幅接邊處理	人月	12	\$72,000	\$864,000
七	行政管理費	人月	18	\$120,000	\$2,160,000
				總金額(新台幣)	\$29,508,000

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	17:16	5:2	3:3

第七章 機敏資料管制

本公司對於資料和作業人員皆備有保全管制設備，除一般公司保全系統外，入口設有人員管制。資料處理之辦公環境有電腦機房、作業人員門禁系統和錄影監視系統，如圖 7.1 所示。



圖 7.1 工作環境照片

本公司遵守本案規範，關於機敏向量或影像資料，設立機敏資料室並由專人負責造冊保管及存放於具安全防護功能之金屬箱櫃，確實依據內政部「測繪成果申請使用辦法」、機關「機敏測繪成果資料使用及管理注意事項」、「國家機密保護法」等規定妥善使用。

機敏資料室具備門禁管制設備、監視器及無連接網路之作業專用電腦及工作站。且使用機敏資料應填寫紀錄表，並於每月將相關記錄資料函送貴中心，監視器影像資料留存至保固期結束。於工作完成後消除機敏資料，並由貴中心派員確認，原交付之機敏資料儲存媒體則送回貴中心銷毀。



圖 7.2 機敏作業電腦



圖 7.3 機敏資料使用記錄函文

第八章 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、空三計算、正射影像製作等工作。本團隊計畫範圍為第 1 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 1 基站編號為 CH61，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 130 點；平差平面特徵控制點 30 點及空三測點 3 點，作為平差計算作業使用。
- (2) 本團隊於基站架設時一併配有攝影裝置，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 25 架次，飛航涵蓋面積約達 1,712 平方平方公里。共執行約 157 條航線(含補飛)，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契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 1 作業區使用 20,785 張彩色影像，空三計算成果符合契約規範，並以指定格式繳交。正射影像成果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，其中對於鐵路、公路及橋梁進行點雲高程正射微分糾正，以消除高差移位影響。

(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，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，少部分山路無法進入處，則使用空三成果，藉人工選取連結點方式，其類似航拍影像立體測量，取得特徵位置坐標值作為平差控制點以供後續航帶平差使用。

● 空中三角測量依規範執行

因應本年度新增之空三工項，規劃各空三分區四角設置航空標控制點，並將一般高控點皆漆方塊標，採靜態 GNSS 測設方式，提供精度良好之控制點約制。空三作業依規範執行並檢核各項標準，包含連結點強度標準、殘餘誤差均方根、最大殘餘誤差標準等，並將空三成果專案以及相關報表依指定格式提交。

● 鐵路、公路及橋樑等基礎建設進行正射微分糾正

因應本年度新增之正射影像工項，參考臺灣通用電子地圖相關圖層(鐵路、公路及橋樑)，針對非平坦地表面之高架路段進行點雲過濾，產製細緻高架區域數值地表模型進行正射微分糾正，並利用點雲強度圖檢核糾正成果，才進行最後的鑲嵌作業。此流程乃根據監審方回饋滾動式更新成形，高架路段正射微分糾正成果從符合電子地圖，橋梁邊界與點雲資料相符，最後邊線和標線與點雲強度影像對比無明顯偏移，本公司於相關工序上和工作執行皆相當努力。

● 地面點空間分布檢查

今年度監審廠商於成果檢核加入點雲孔洞分析，更進一步要求點雲於植被覆蓋地區之穿透率。而本公司於各單位空載光達案件，除符合一般密度與航帶重疊率規範外，皆自我要求點雲穿透率，提供品質良好之高精度高解析度地形模型，因此於本測區飛航任務開始後，即將解算之點雲交由監

審方進行孔洞分析，確認植被密集區孔洞值小於監審方建議值，即飛航規劃符合期待，再續執行往後之飛航任務。

第 1 作業區孔洞分析有效檢核圖幅，檢核成果大孔洞比例皆小於第一門檻 10%標準，皆為合格。不需參與既有成果孔洞比例浮動門檻比對，不通過圖幅數為零，小於契約規範 1/10。

- 穩定且良好的 DEM 品質

歷年來光達技術產製及更新數值地形案本公司皆有參與，對於資料產製各階段檢查皆有成熟之程式和方法，而產製流程中牽涉最多人力的點雲編修，為將缺失降至最低採逐幅人工檢核，監審方亦以人工方式全數檢查。本年度點雲過濾初驗無不合格圖幅，可見目前機制有效管控編修人員能力品質。

第 1 作業區 110 年度測區以都市區為主，地物複雜，於點雲編修時人員判斷較為繁複，必要時需搭配街景或其他資訊進行判斷，如是否為需保留之實心橋梁、地下車道斜坡、水利設施，或為建物、空心橋梁、臨時性土堆需要進行濾除等等。

本公司於產製 DEM 前依據內政部規範進行點雲分類之正確性檢查，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。

- 配合期程安排進行趕工

今年度期程受疫情影響，作業人員面臨、疫苗施打、疫苗不適、自主居家隔離、防疫照顧假、分流上班等，造成多項工作期程無法依規劃執行，本測區後期以趕工方式於本年度完成測區資料蒐集及成果產製。

2. 檢討與建議

(1) 今年度更新數值地形模型檢核公式，訂定高程基本精度為 0.18 公尺，當不考慮地形及地表植被覆蓋類別時，則 95%信心水準高程容許誤差 0.35 公尺，本作業區產製成果優於標準。

- (2) 目前各家廠商目前穿透率皆能符合孔洞分析建議值，建議往後隨蒐集區域累積後適度調整，以期逐步提升數值地形模型品質。
- (3) 為使計畫符合時程，必須確保飛航順利進度如預期，但天氣影響非人為可控制，因此本公司提早開始進行飛航待命，且因應疫情飛航公司與飛航人員皆採分流制度。因此相關之航租費用、待命費用及設備折舊及人事費用皆相應提高。
- (4) 另外為自我要求點雲品質，因應地形之適宜飛航規劃，不會因穿透率表現遠優於監審方孔洞標準，就降低成本減少航線或採用其他符合規範但成果較差之替代飛行方案，本公司了解成果良莠與外業收集之資料品質絕對相關，為維持一貫點雲植被穿透率表現，必定會依據飛航經驗和測區地形規劃航線並確實執行。
- (5) 根據監審方查核重要意見進行工作項目執行調整，例如點雲編修方面本計畫為後續光達點雲成果增值利用順利，對於類似雜點之高低點，分類到非地面點類別十分要求，本公司已於人工編修前安排程式自動濾除過高和過低之離群點程序，以減少此類錯誤；正射影像編修方面對於高架路面之錯誤如高差移位過大、扭曲錯移、接邊色差，滾動式更新工作流程，並加強檢核機制，降低成果產製缺失。

第九章 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(2011) 詮釋資料標準，文件編號：NGISTD-ANC-002-2011.12。
4. 內政部(2012)空載光達測製數值地形模型標準作業(草案)
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. Appanix (2019), POSMMS User Manual.
10. Axelsson, P. (2000). Processing of laser scanner data- algorithms and applications, ISPRS
JPRS, 54: pp. 138-147.
11. 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.
12. 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.
13. Optech(2018), Lidar Mapping Suite User's Guide.
14. TerraSolid, TerraScan, TerraModeler, and TerraMatch User's Guide (2019).
15. Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. ISPRS Vol. XXXIII,
Amsterdam
16. 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.