



NLSC-108-5

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

109 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 109 年 12 月

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，109 年度涵蓋新竹、宜蘭、台中、南投及花蓮等縣市，共 186 個圖幅(1/5000)，總面積為 1,320 平方公里，依期程分為第 1 子測區 75 幅及第 2 子測區 111 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 27 架次飛航作業，共 225 條航線。航高 2,000~3,500m，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，飛航掃瞄相互垂直之 8 條航線，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 8 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 29 點，另有平面平差控制點共計 18 點及空三測點 148 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 14.1 公分和 14.0 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合約規範要求之 186 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 - 2019 & 2020 ”. CHS Surveying Co. Limited won the contract for the third work zone, which covers Yilan, Hsinchu, Taichung, Nantou, and Hualien. It is about 1,320 square kilometers, equivalent to 186 map sheets of 1/5,000 scale, which was divided into 75 sheets in sub-survey-area 1 and 111 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 27 flight tracks with flight height of 2000~3500 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 8 mutually perpendicular flight. 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 8 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 29 vertical adjustment points, 18 horizontal adjustment control points, and 148 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 14.1 cm and 14.0 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
2-1-1 飛航申請作業.....	4
2-1-2 系統裝機.....	5
§2-2 飛航規劃.....	7
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.....	13
3-2-1 測量規範.....	13
3-2-2 平差控制點 GNSS 測量	14
第四章 空載 LiDAR 作業.....	18
§4-1 率定與校正作業.....	18
4-1-1 率定場地地點與規格.....	19
4-1-2 率定場飛行作業程序.....	21
4-1-3 率定成果.....	21
§4-2 飛航掃瞄成果.....	24
§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.....	35
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.....	46
§4-5	DEM/DSM 製作.....	51
4-5-1	點雲編修流程.....	51
4-5-2	點雲編修狀況.....	53
4-5-3	數值高程模型成果.....	55
4-5-4	大地起伏化算.....	60
§4-6	檢核點蒐集與作業.....	61
4-6-1	測量作業方式.....	61
4-6-2	精度評估標準與作業.....	64
4-6-3	精度評估與分析.....	64
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.....	85
§5-5	正射影像外部接邊.....	89
第六章	成本分析.....	90
第七章	結論與建議.....	92
第八章	參考文獻.....	95
附件一	109 年度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	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	

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.....	11
圖 3.3	基站現況與透空圖.....	13
圖 3.4	GNSS 實際觀測網形圖	15
圖 3.5	已知點檢核基線分布圖.....	16
圖 3.6	航帶平差控制點分布圖.....	17
圖 4.1	工作流程圖.....	18
圖 4.2	率定場位置與現況示意圖.....	19
圖 4.3	率定場坡度圖.....	20
圖 4.4	率定場植被分布圖.....	20
圖 4.5	率定 GNSS 基站位置圖	20
圖 4.6	雷射點至萃取面的距離統計分布圖.....	21
圖 4.7	雷射點至萃取面的距離統計直方圖.....	22
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).....	23
圖 4.9	平面精度分析圖(單位：公尺).....	23
圖 4.10	飛航軌跡與基站示意圖(每格為 5 公里).....	24
圖 4.11	飛航完竣相關公文.....	25
圖 4.12	地面基站 PDOP 圖	25
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.....	28
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.....	29
圖 4.18	重疊率檢查與密度統計示意圖.....	30
圖 4.19	平差作業流程圖.....	31
圖 4.20	雷射點偏移示意圖.....	33
圖 4.21	MEASURE MATCH 比對原理示意圖	34
圖 4.22	平差前航線重疊處誤差分析圖.....	35
圖 4.23	匹配連結點示意圖.....	37

圖 4.24	平差前後重疊處平均絕對誤差差量比較.....	45
圖 4.25	平差前後測區交叉航線重疊處差量統計分析圖.....	46
圖 4.26	航線重疊處屋頂共軌面與共軌線萃取示意圖.....	47
圖 4.27	航線重疊處平差前後共軌線統計分析示意圖.....	47
圖 4.28	點雲平面精度檢核示意圖.....	49
圖 4.29	監審方軟體航帶平差高程差異量檢核圖.....	50
圖 4.30	平差後航帶間高差較大區域示意圖.....	50
圖 4.31	ITERATION ANGLE 和 ITERATION DISTANCE 示意圖 (AXELSSON, 2000).....	51
圖 4.32	橋樑之點雲分類示意圖.....	52
圖 4.33	編修檢核修正示意圖.....	52
圖 4.34	點雲編修與檢核人員分布圖.....	53
圖 4.35	SCOP++軟體介面圖.....	55
圖 4.36	測區 DEM/DSM 成果圖.....	56
圖 4.37	DEM/DSM 山地及平地成果圖.....	60
圖 4.38	各類別檢核點實測照片.....	63
圖 4.39	檢核點分布圖.....	63
圖 4.40	低海拔之裸露地(B)精度成果圖.....	66
圖 4.41	低海拔之林地(F)精度成果圖.....	66
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.....	67
圖 4.45	低海拔之濕地(W)精度成果圖.....	67
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.....	68
圖 4.49	中高海拔之林地(F)精度成果圖.....	68
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.....	69
圖 4.53	中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1.....	69
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	測區連結點匹配示意圖.....	81

圖 5.5	空三連結點及空三報表示意圖.....	81
圖 5.6	空三後外方位改正數示意圖.....	81
圖 5.7	空三分區範圍圖.....	82
圖 5.8	影像特徵點檢核與平面控制點分布圖.....	84
圖 5.9	色差調整前後示意圖.....	85
圖 5.10	水體繪製成果.....	86
圖 5.11	數值高程造成扭曲錯移現象示意圖.....	87
圖 5.12	TGOS 詮釋資料編輯系統 2.0 操作畫面.....	87
圖 5.13	平地正射影像成果圖.....	88
圖 5.14	山區正射影像成果圖.....	88
圖 5.15	第三作業區正射影像成果.....	88
圖 5.16	責任接邊範圍示意圖.....	89

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.....	8
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).....	10
表 4.1	光達率定系統高程分析統計表.....	23
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.....	34
表 4.5	平差後航線重疊處誤差統計分析.....	37
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.....	41
表 4.8	平面控制點檢核點雲屋角點差值表(單位:公尺).....	48
表 4.9	點雲編修自檢紀錄表範例.....	54
表 4.10	地形類別列表.....	62
表 4.11	土地覆蓋分區列表.....	62
表 4.12	地形類別與地表植被覆蓋類別調整參數對照表.....	64
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).....	65
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).....	65
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	空三平差成果統計表.....	82
表 5.2	平面控制點檢核影像差值表(單位:公尺).....	83
表 6.1	各項作業成本統計分析表.....	91
表 6.2	作業人員性平等資訊統計.....	91

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，109 年度測區範圍橫跨臺東、花蓮及屏東等縣市，共執行 186 個圖幅（基本地形圖比例尺 1/5,000），面積約 1,320 平方公里，平地比例約 32%，山區約 78%。配合期程於第 6 階段和第 7 階段各繳交點雲資料 75 幅和 111 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。

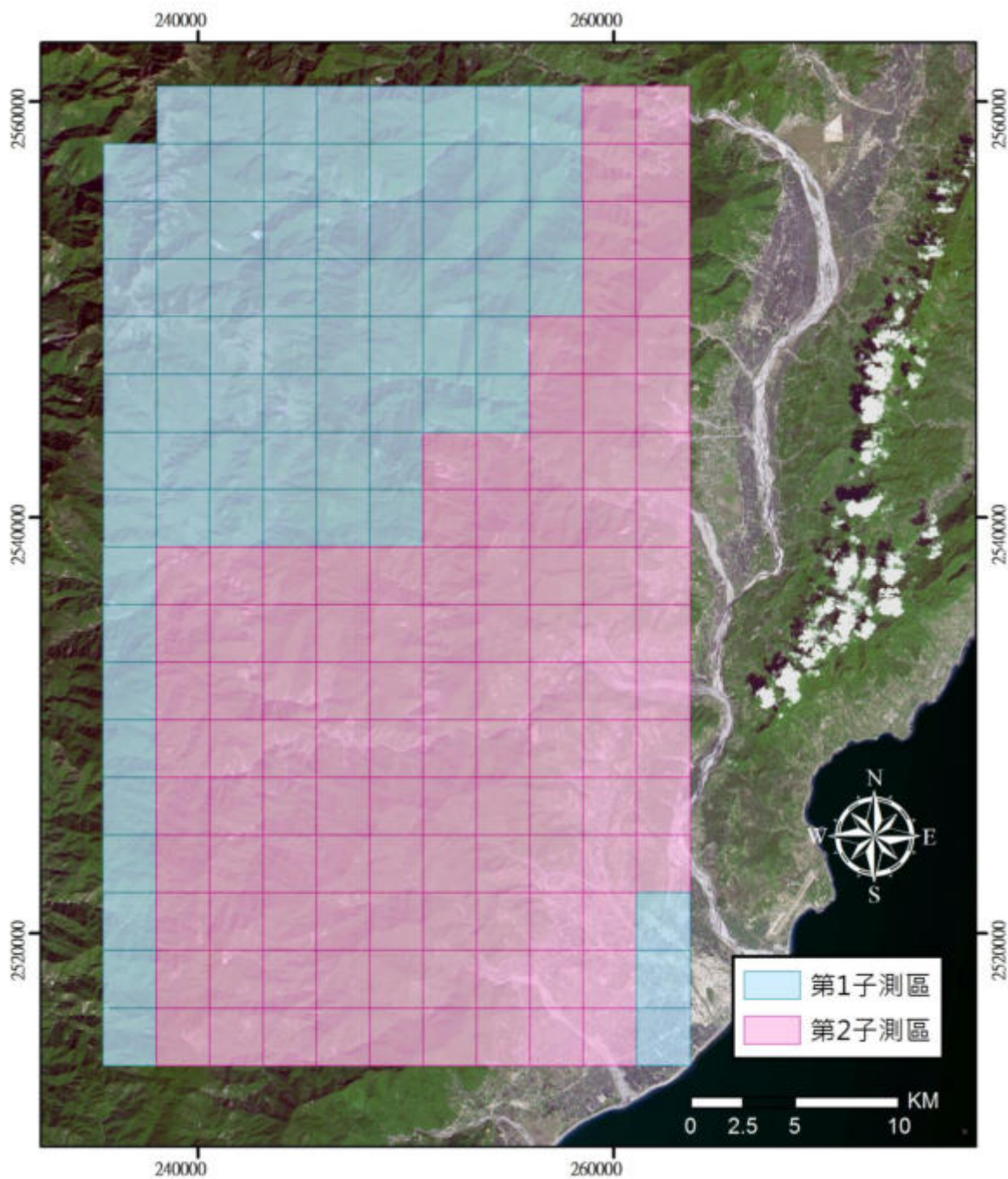


圖 1.1 第三作業區與各子測區示意圖

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，公文請參閱附件七。

表 1.1 交付成果說明表

階段	交付項目	繳交期限
第 5 階段	109 年度作業計畫(含空載光達掃瞄飛航計畫)初稿 10 份及電子檔 2 份。	102 年 12 月 30 日
第 6 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(109 年度範圍 40%以上圖幅)及控制測量(繳交 109 年度範圍)】。	109 年 5 月 30 日
	2.正射影像成果(繳交點雲所含圖幅之資料)。	
第 7 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(109 年度範圍之剩餘圖幅數)】。	109 年 10 月 15 日
	2.正射影像成果(同點雲資料處理繳交之圖幅)。	
第 8 階段	109 年度工作總報告(初稿)10 份及電子檔 2 份。	109 年 11 月 10 日
	修正後 109 年度工作總報告 5 份及電子檔 2 份。	109 年 12 月 15 日 (機關指定期限繳交)

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 5 階段	108.09.18 中興測字第 1080000390 號	108.10.07 成大研總字第 1081107642 號	108.10.23 中興測字第 1080000439 號	108.11.21 測形字第 1081303395 號
第 6 階段	109.05.18 中興測字第 1090000211 號	109.05.25 成大研總字第 1091103839 號	108.05.29 中興測字第 1090000234 號	109.06.17 測形字第 1091570293 號
第 7 階段	109.09.29 中興測字第 1090000449 號	109.10.08 成大產創字第 1091107726 號	109.10.15 中興測字第 1090000460 號	109.11.11 測形字第 1091570486 號
第 8 階段	109.11.03 中興測字第 1090000504 號	109.11.05 成大產創字第 1091108031 號	109.11.10 中興測字第 1090000521 號	109.12.07 測形字第 1091570531 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，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。



(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

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 108 年度作業飛航申請(空運管字第 1080008000 號及空運管字第 1080008615 號)，並於 108 年 12 月 15 日與 108 年 11 月 7 日通過 109 年度作業飛航申請(空運管字第 1080031280 號及空運管字第 1080027021 號)，核准公文如附件二所示。

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：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	
	<ul style="list-style-type: none"> · 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。



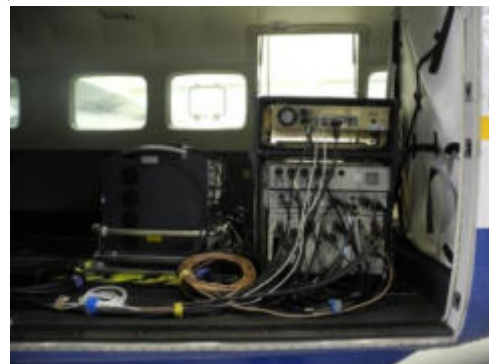
(a) 德安航空之 BK-117 飛機



(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。



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 159 條航線里程共 3045 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	67~110	44	2385	230	1180	1820	3000	100	±20	38	100	1325	62	50	>2.2
A+	111~116	6	2385	1480	1983	1017	3000	100	±20	38	100	740	66	50	>2.2
B	17~42	26	3044	729	2128	1872	4000	100	±20	38	100	1363	63	50	>2.2
C	1~11	11	3289	1324	2448	1552	4000	100	±20	38	100	1130	65	50	>2.2
C+	12~16	5	3289	2580	3022	978	4000	100	±20	38	100	712	72	50	>2.2
D	117~146	30	1334	13	425	1975	2400	100	±20	38	100	1438	62	50	>2.2
E	43~66	24	2499	703	1679	1821	3500	100	±20	38	100	1326	62	50	>2.2
Coast	801	1	1334	13	425	1975	2400	100	±20	38	100	1438			
Cross1	151~153	3	3289	230	2183	3770	4000	100	±20	38	100	1368			
Cross2	156.160.162	3	3044	230	2128	3270	3500	100	±20	38	100	1008			
Cross3	154~155	2	2385	1480	1983	1520	3000	100	±20	38	100	792			
Cross4	157.159.161	4	2385	13	1180	2387	2400	100	±20	38	100	936			
Total	159	總公里數		3045km											

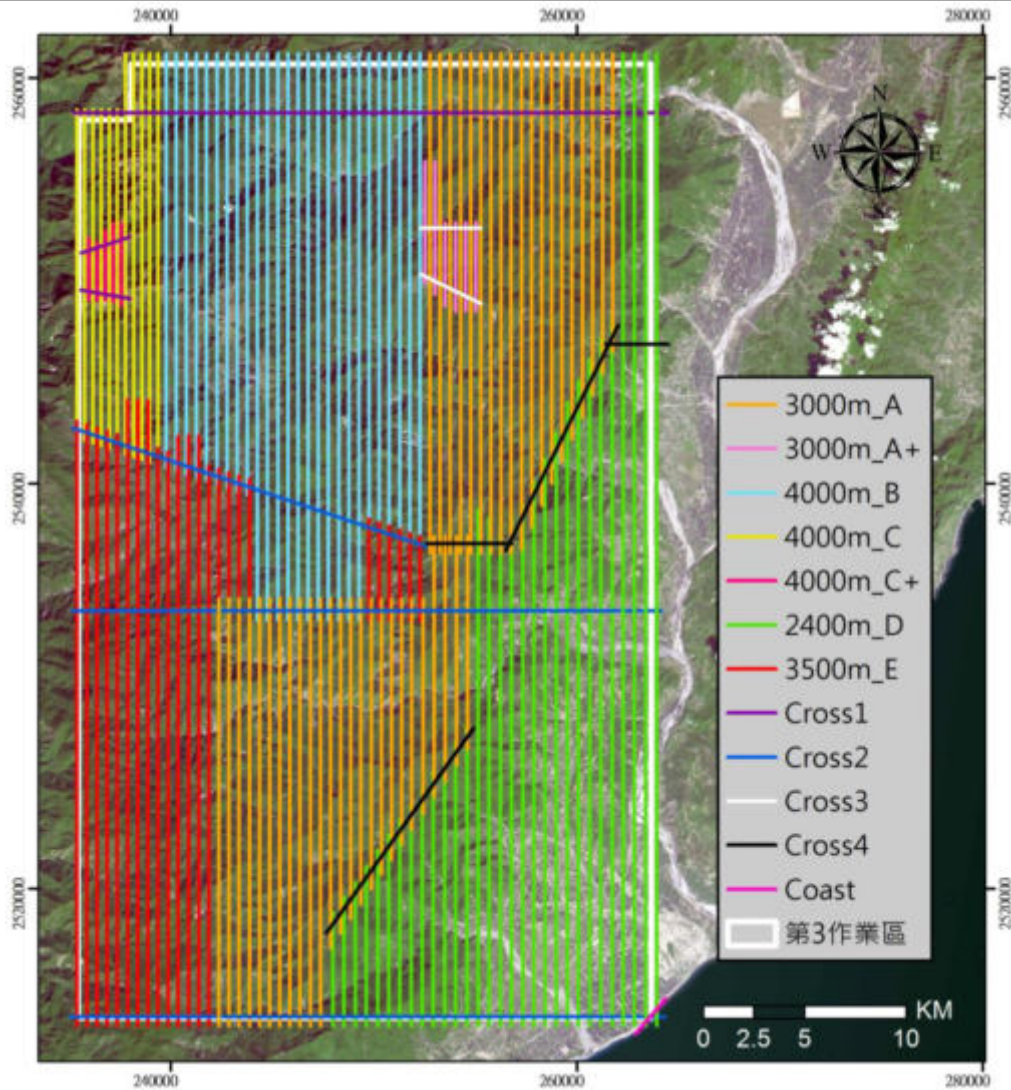


圖 2.5 測區航線展繪圖

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 15 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	1	TMAM
內政部國土測繪中心	5	CISH, FUGN, MAJA, TAYN, WULU
交通部中央氣象局	6	CHUL, KUA2, LONT, SINL, TTCS, TTUN
經濟部中央地質調查所	2	GS45, GS55
高雄市政府	1	XIAN

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，參考既有連續衛星追蹤站規劃基站位置。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 8 點(CH53~CH60)，均採用 GNSS 連續站的方式架設於透空良好位置。

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 109 年 02 月 11 日至 109 年 02 月 13 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。

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)

點號	點名	縱坐標 N(m)	橫坐標 E(m)	橢球高 h(m)	架設方式
CH53	森濤民宅	2551725.333	224880.423	1587.204	高架式
CH54	森濤民宅	2551724.309	224879.894	1587.199	高架式
CH55	多納國小	2534365.148	220886.220	486.217	高架式
CH56	多納國小	2534364.892	220887.243	486.095	高架式
CH57	霧臺國小	2516102.657	222421.782	875.673	屋頂式
CH58	霧鹿國小	2563022.847	254245.953	927.695	高架式
CH59	紅葉國小	2532459.977	256498.744	362.694	高架式
CH60	紅葉國小	2532459.737	256499.506	362.688	高架式

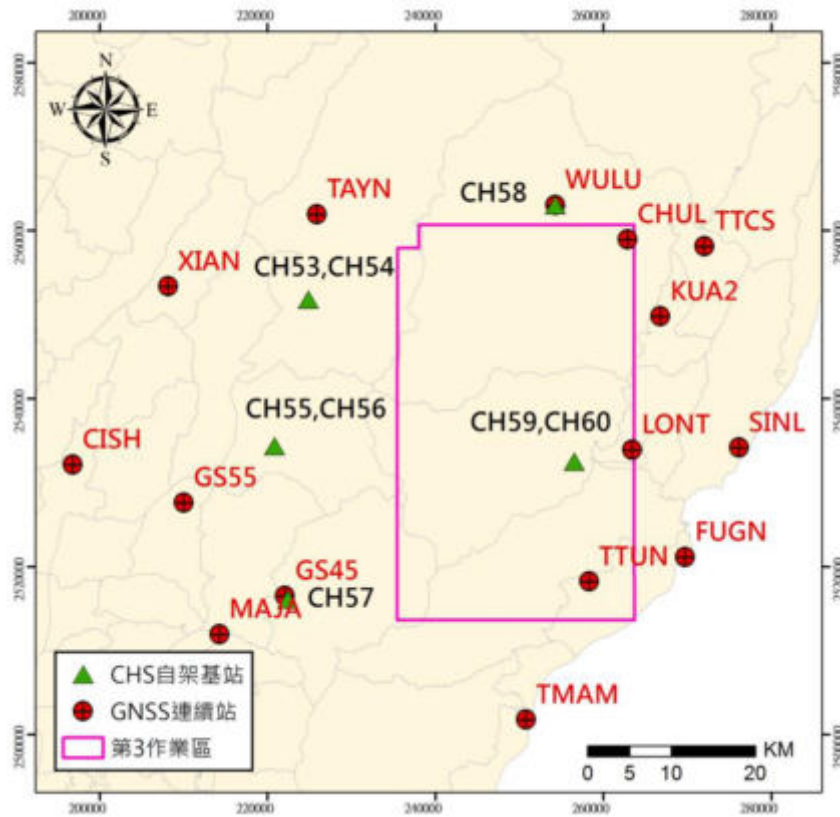


圖 3.1 GNSS 控制點分布圖

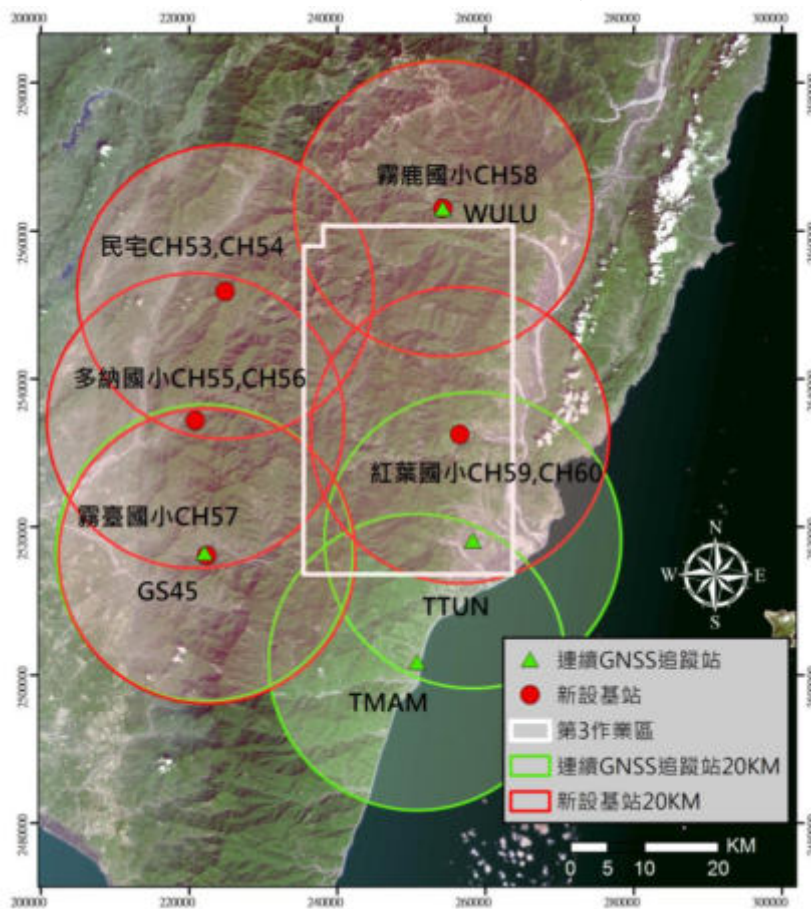
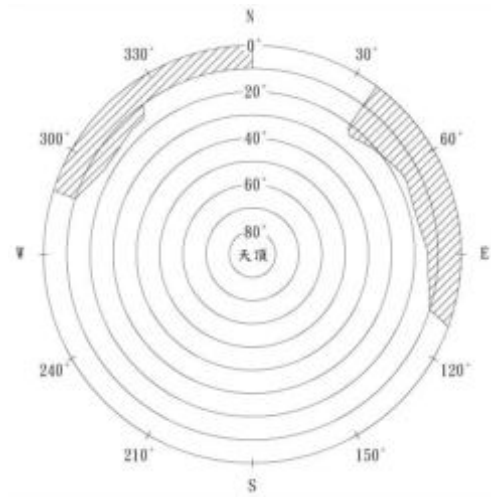


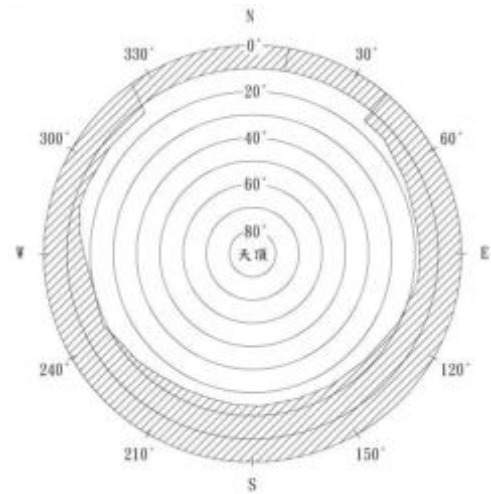
圖 3.2 基站分布圖



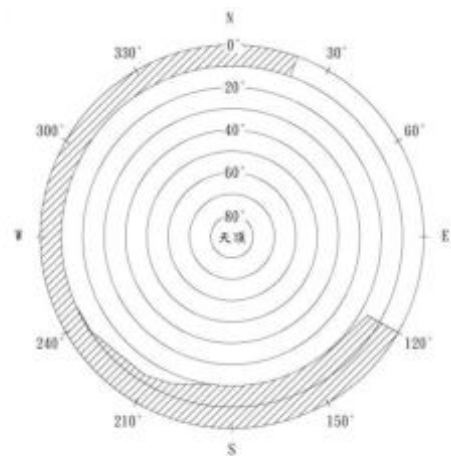
(a) CH53、CH54

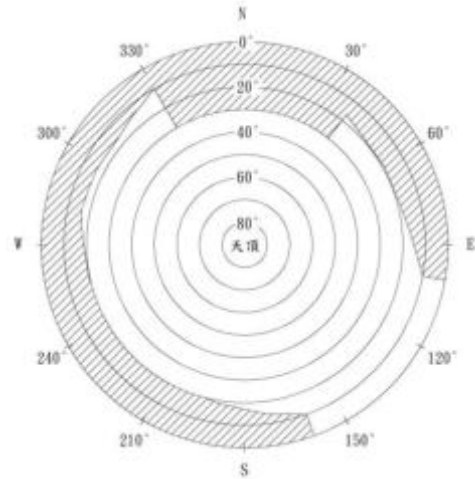


(b) CH55、CH56

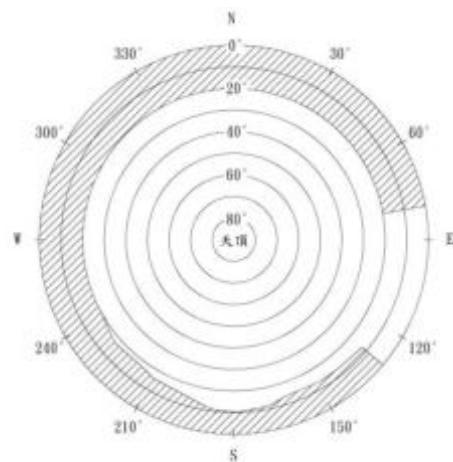


(c) CH57





(d)CH58



(e) CH59、CH60

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 108 年 12 月 05 日至 12 月 06 日，計 2 個工作天共觀測 7 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。

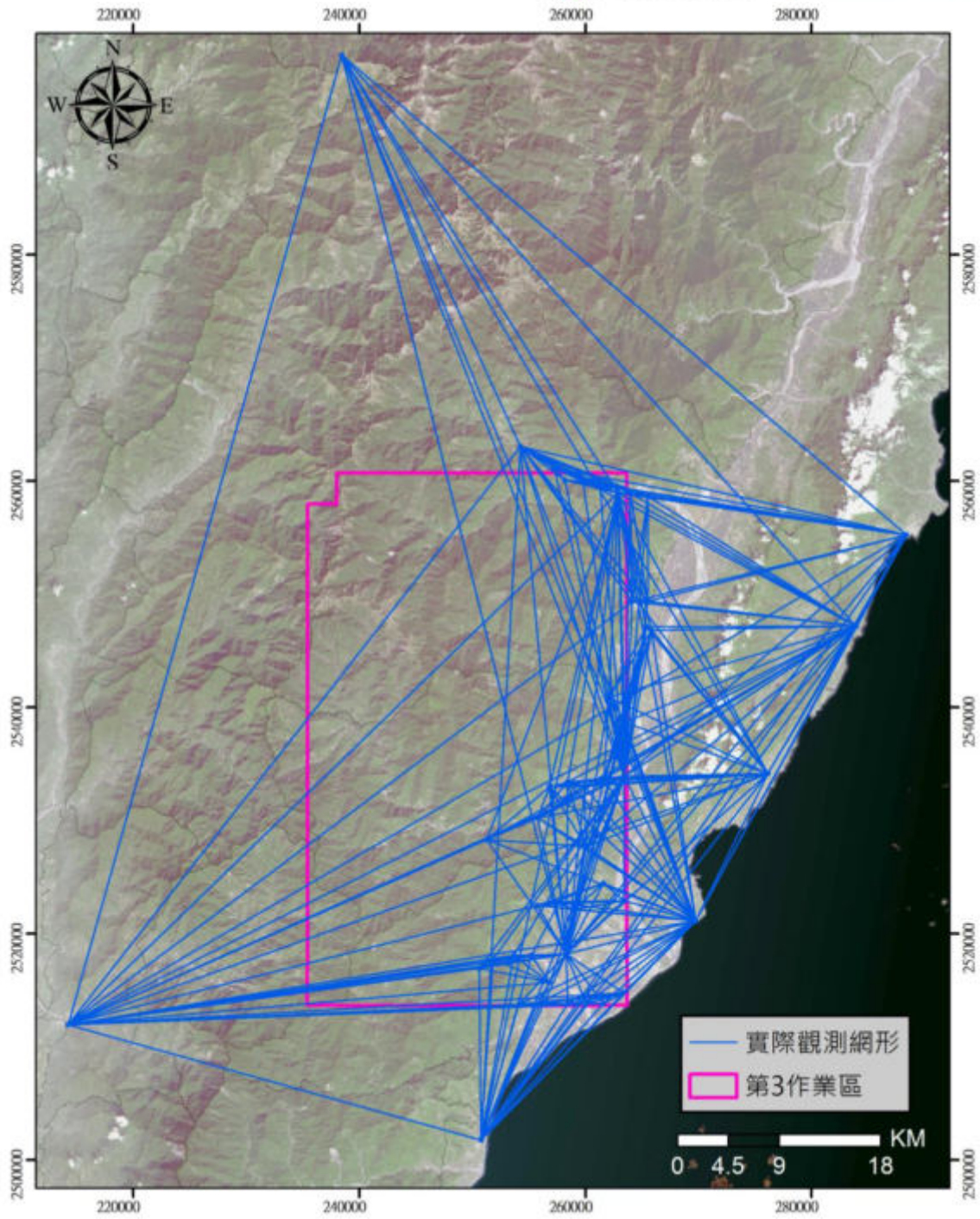


圖 3.4 GNSS 實際觀測網形圖

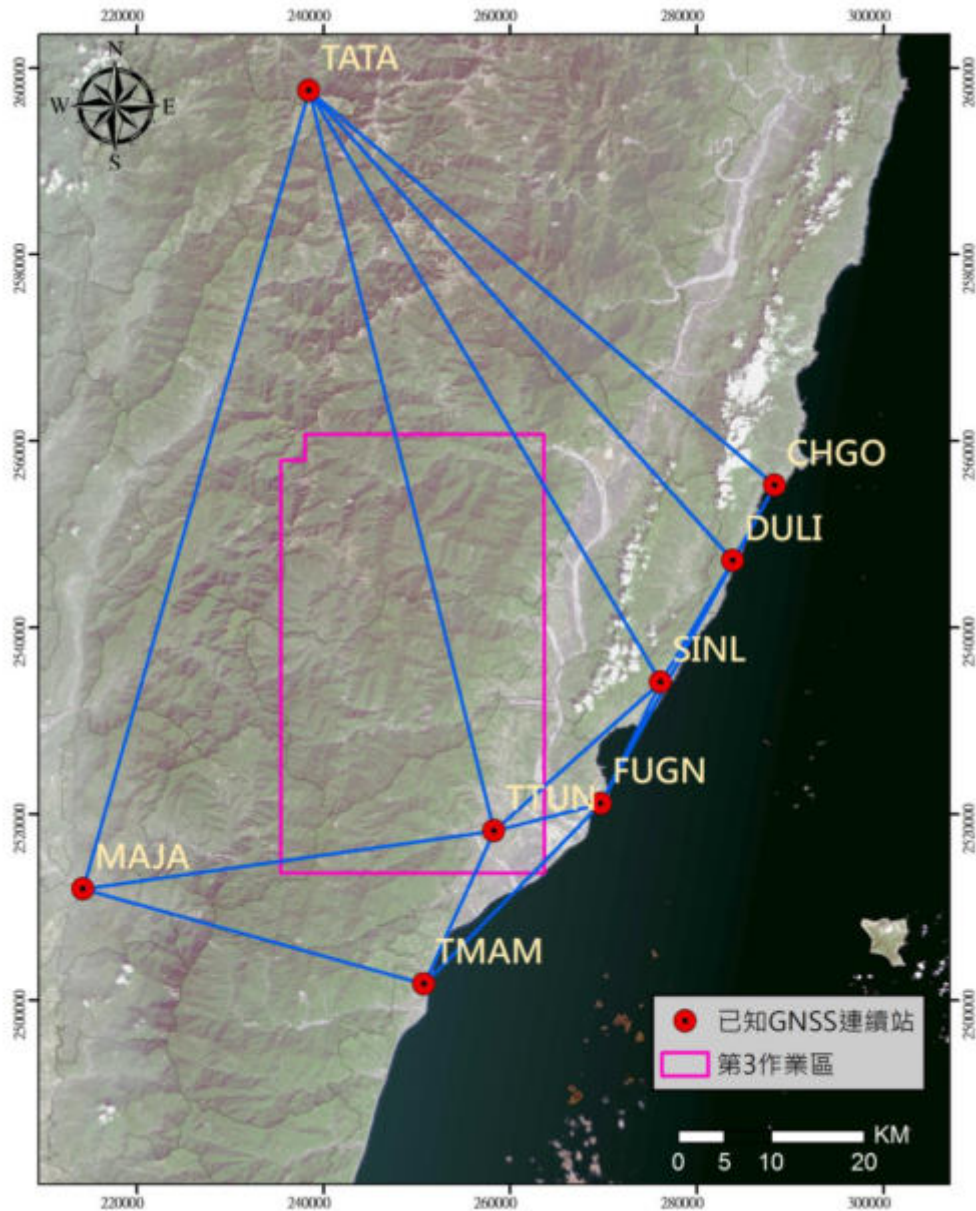


圖 3.5 已知點檢核基線分布圖

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 30 點、平面特徵點 18 點及平差高程控制空三測點 148 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。

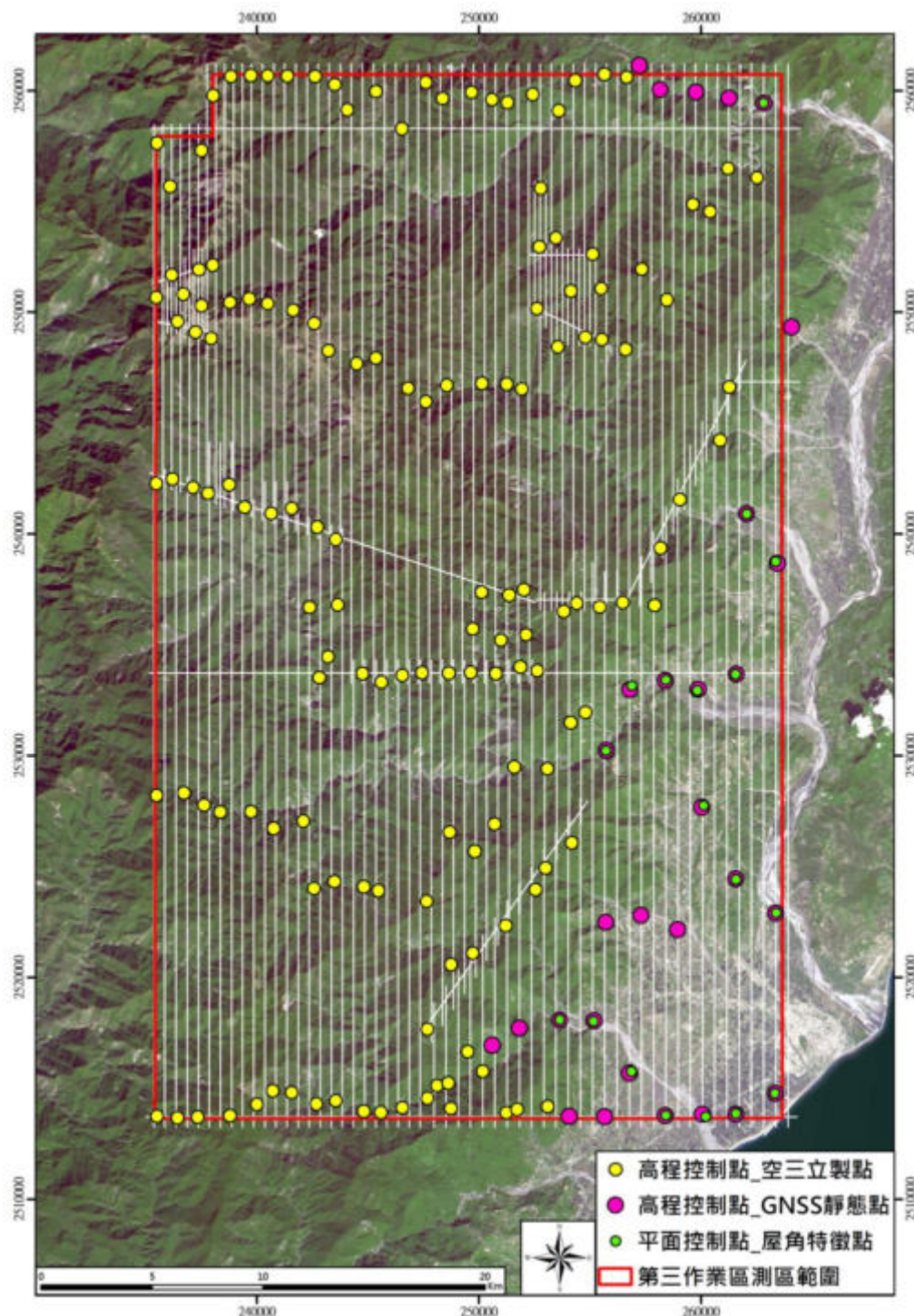


圖 3.6 航帶平差控制點分布圖

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。

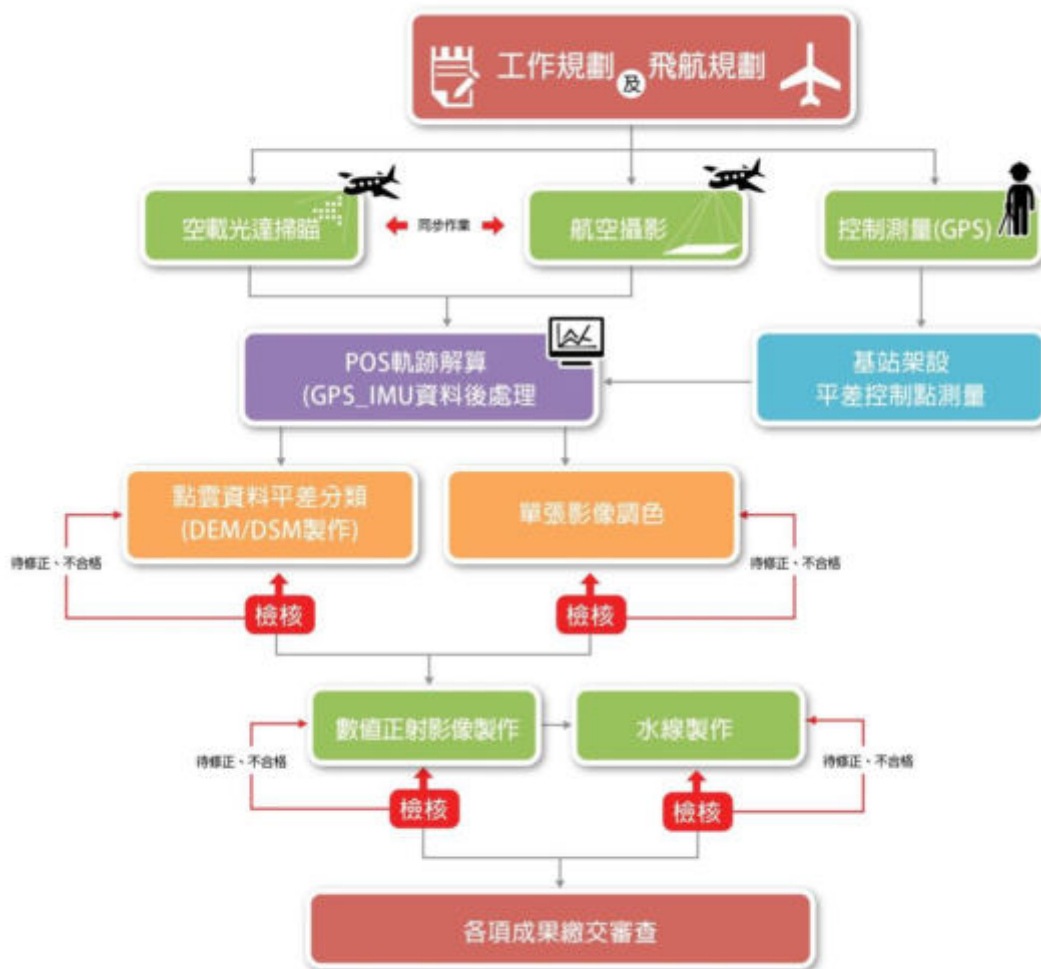


圖 4.1 工作流程圖

§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 6.6 平方公里。

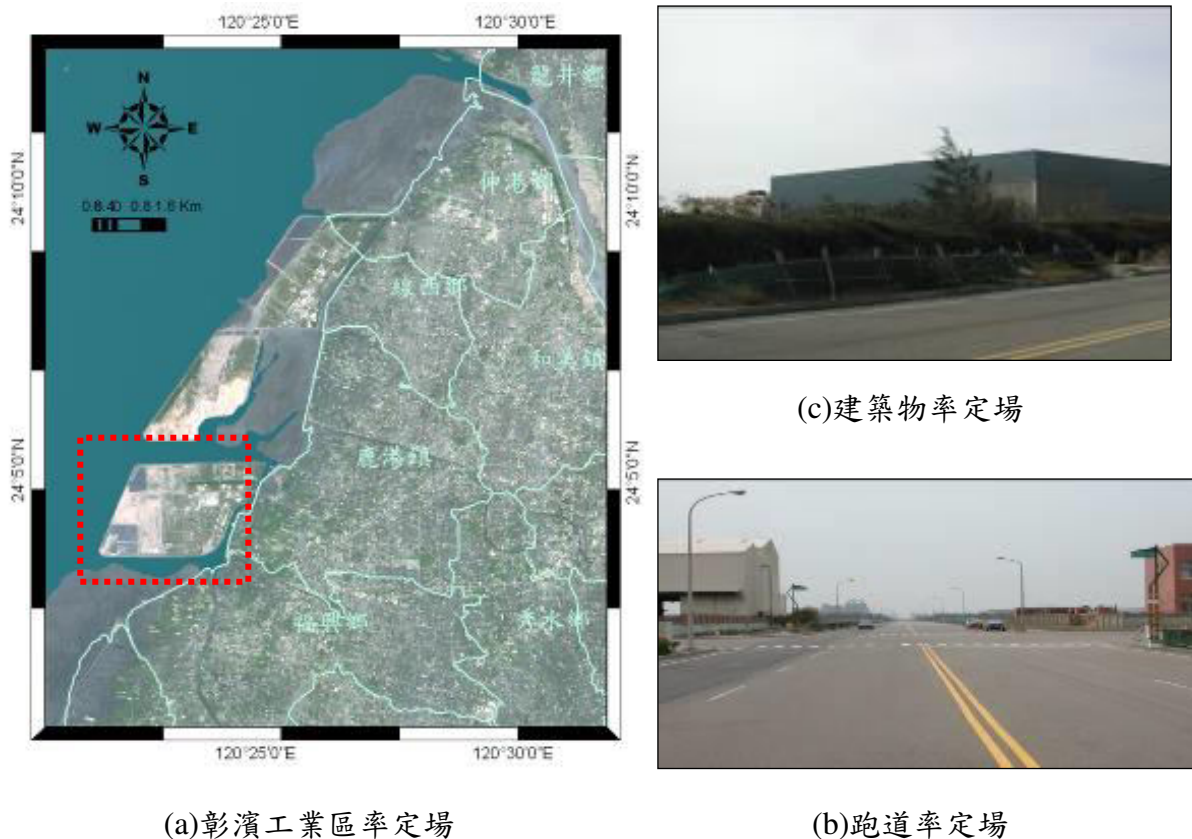


圖 4.2 率定場位置與現況示意圖

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。

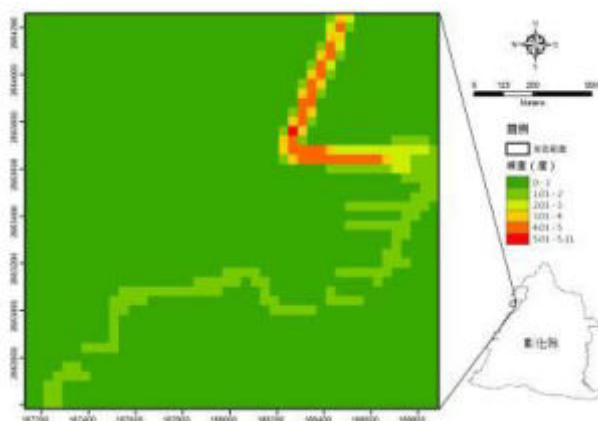


圖 4.3 率定場坡度圖

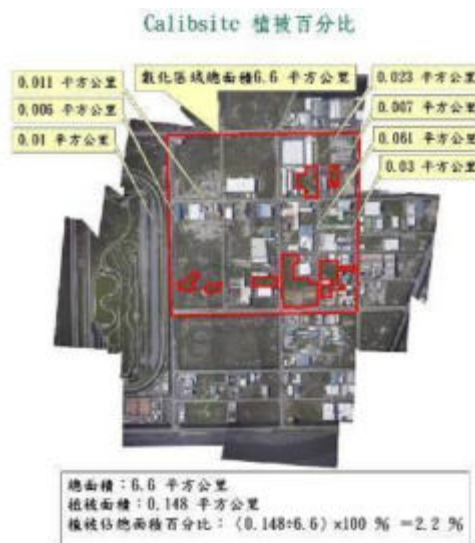


圖 4.4 率定場植被分布圖

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。



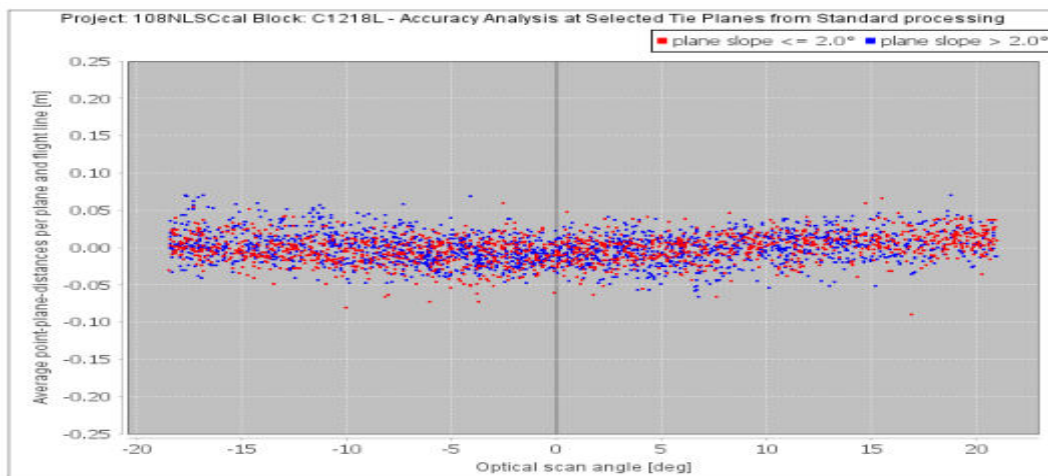
圖 4.5 率定 GNSS 基站位置圖

4-1-2 率定場飛行作業程序

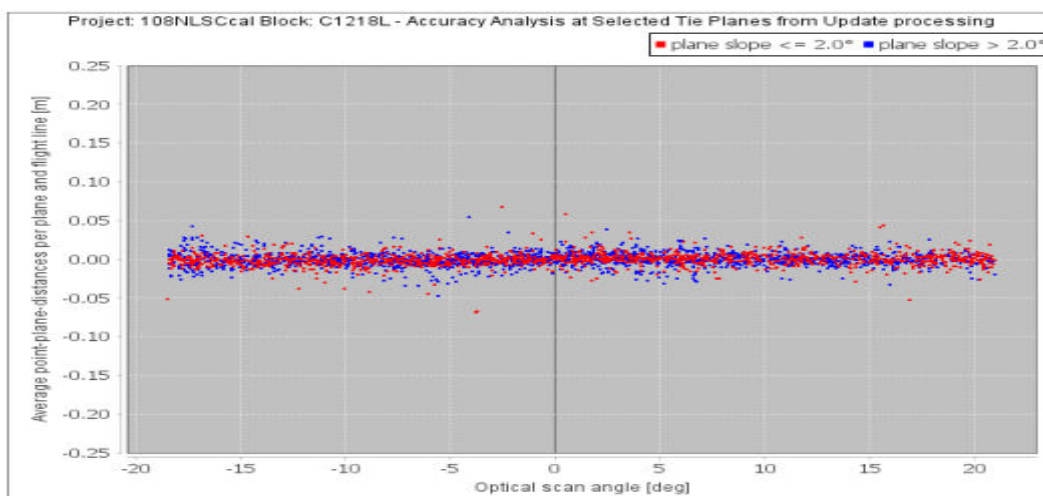
使用空載光達設備為 Optech Pegasus HA500。載具部分使用德安航空載具(BK-117)，於點雲資料使用前執行率定作業，於 108 年 12 月 18 日，執行率定作業以修正偏差量，以確保雷射點雲精確度。率定作業參照加拿大原廠 Optech 公司建議與規定，執行相關過程與精度評估。

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。



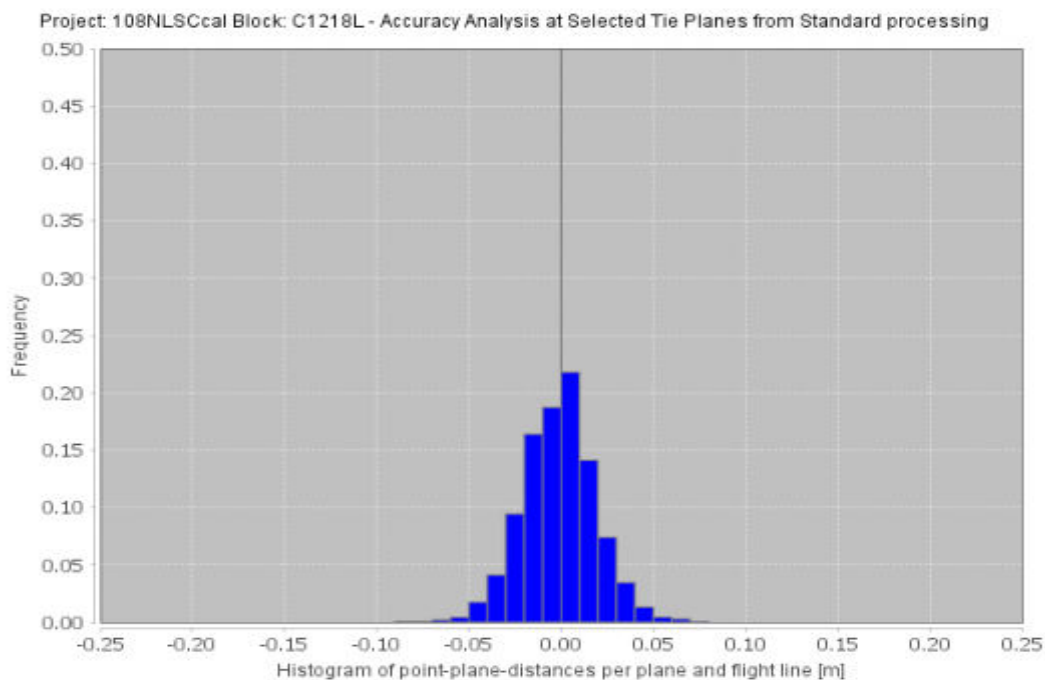
(a) 率定前



(b) 率定後

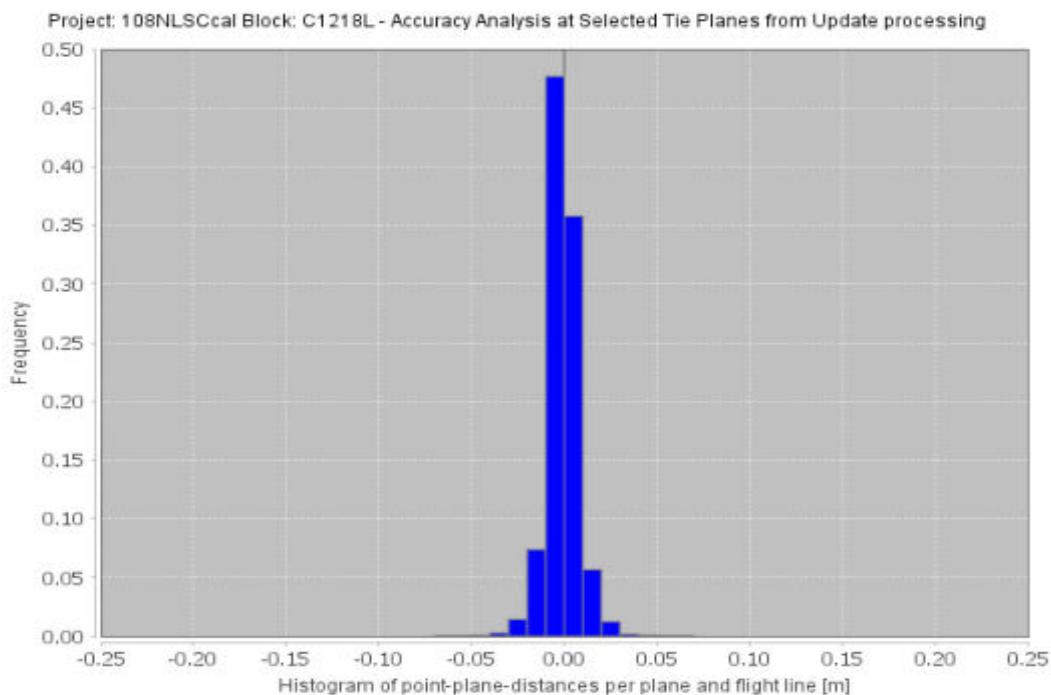
圖 4.6 雷射點至萃取面的距離統計分布圖

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



(a) 率定前

Accuracy Verification - At Selected Tie Planes



(b) 率定後

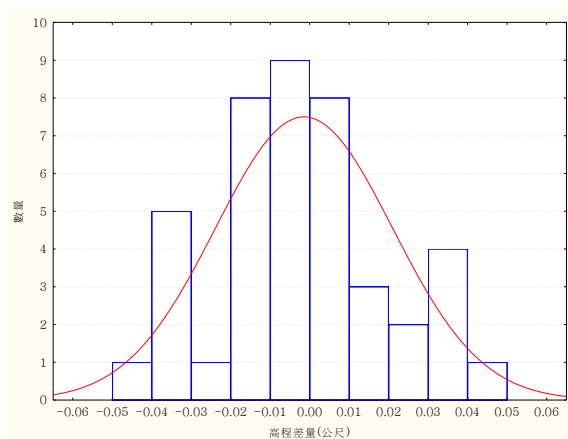
圖 4.7 雷射點至萃取面的距離統計直方圖

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，

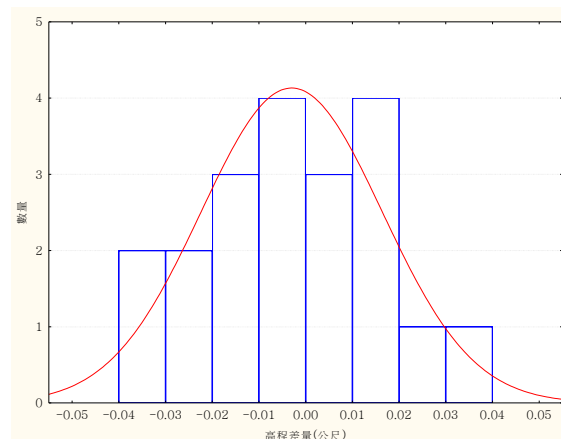
再次與地面實測點比較，其高程坐標差值應小於 0.1 公尺。以率定後新參數值算出新的成果，再次與平坦面進行比對。若高程誤差量大於 0.1 公尺精度，方需針對測距距離進行修正。率定後雷射點成果與實測點比對，皆符合依原廠建議與合約規範，詳如下列統計成果所示：

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	0.045	0.020	0.000
確認飛行成果	0.038	0.000	0.000



(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。

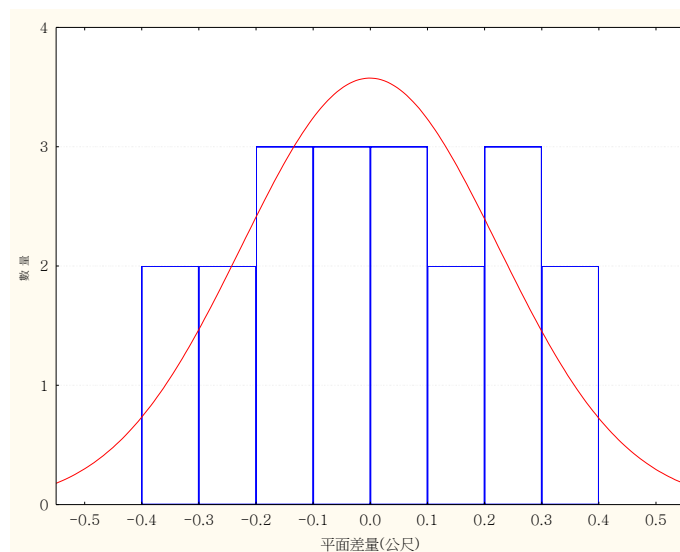


圖 4.9 平面精度分析圖(單位：公尺)

§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)。

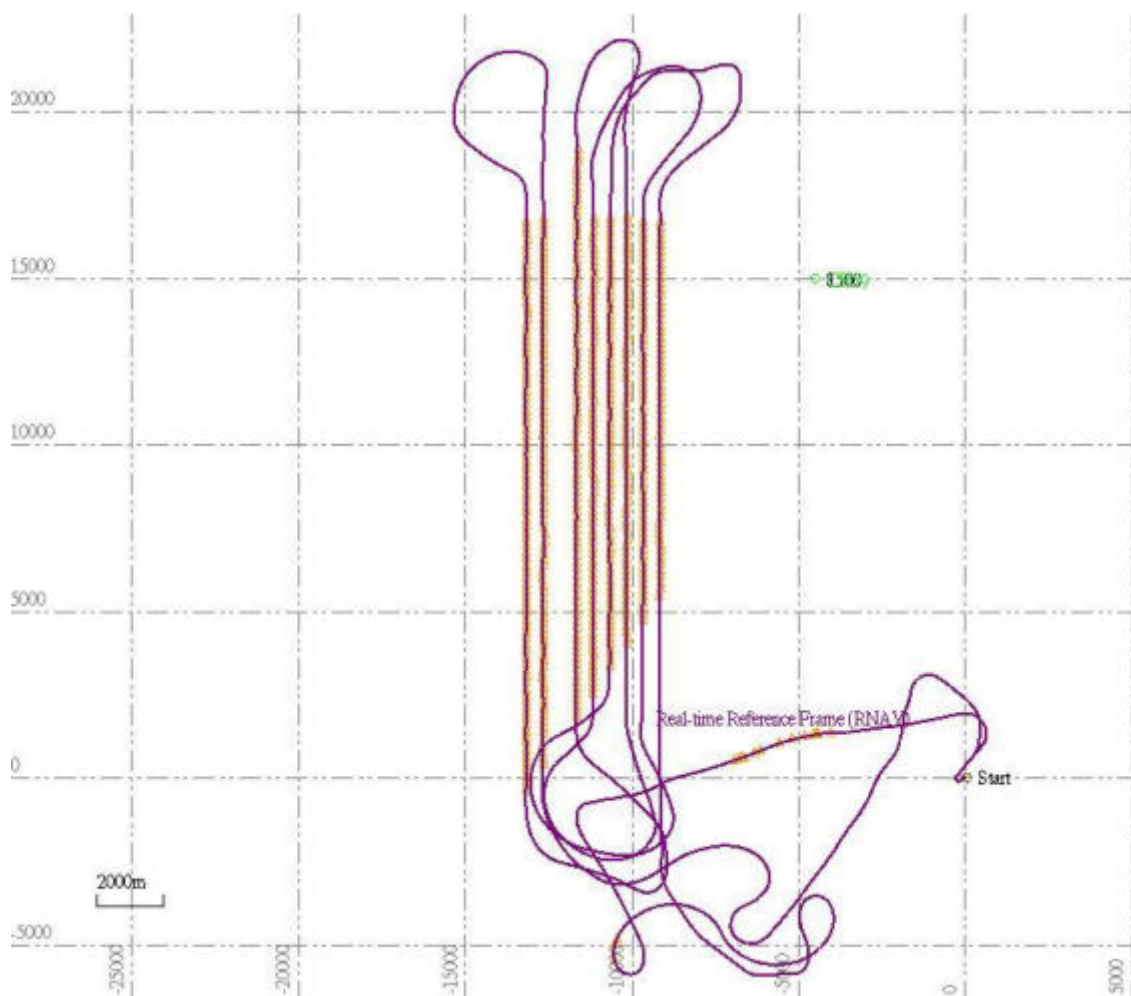
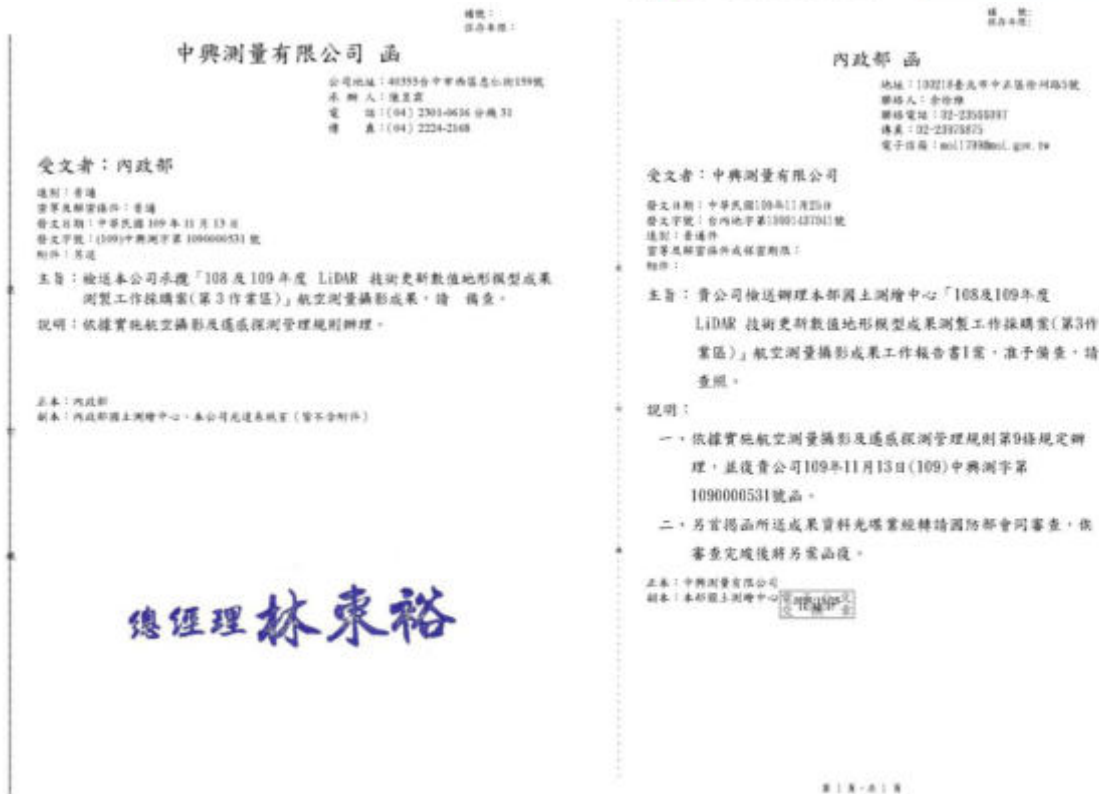


圖 4.10 飛航軌跡與基站示意圖(每格為 5 公里)

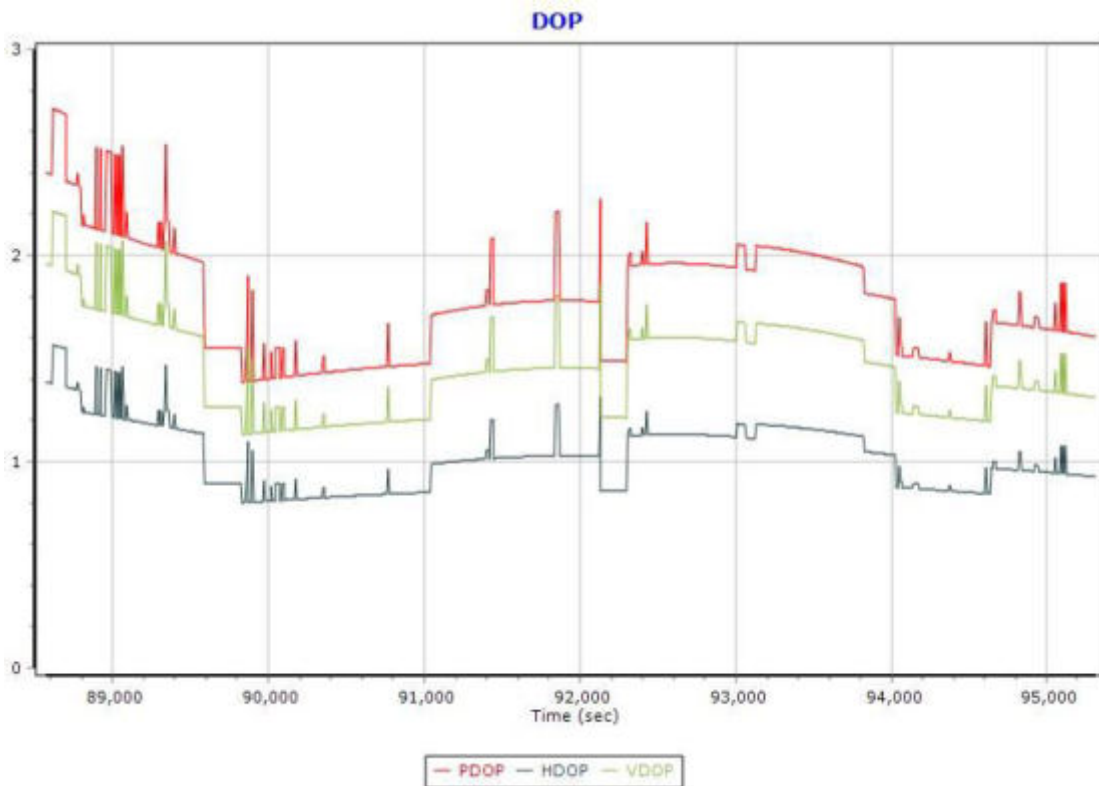
自 108 年 11 月 2 日至 109 年 7 月 6 日共執行 27 架次飛航任務，總計 225 條航線(含補飛)。並於飛航完竣後，依據實施航空測量攝影及遙感探測管理規則，於 109 年 11 月 13 日提送工作報告書及航攝獲取之影像至內政部備查，並於 109 年 11 月 25 日獲得准予備查公文(台內地字第 10901437041 號)，如圖 4.11 所示。另外基站之 PDOP 規範要求 GNSS 需小於 3，且飛航時定位光達掃瞄成果之 GNSS 原始 PDOP 值不得大於 4(圖 4.13)，本計畫所有架次執行成果皆符合規範要求。



(a) 提送內政部備查

(b) 內政部准予備查公文

圖 4.11 飛航完竣相關公文



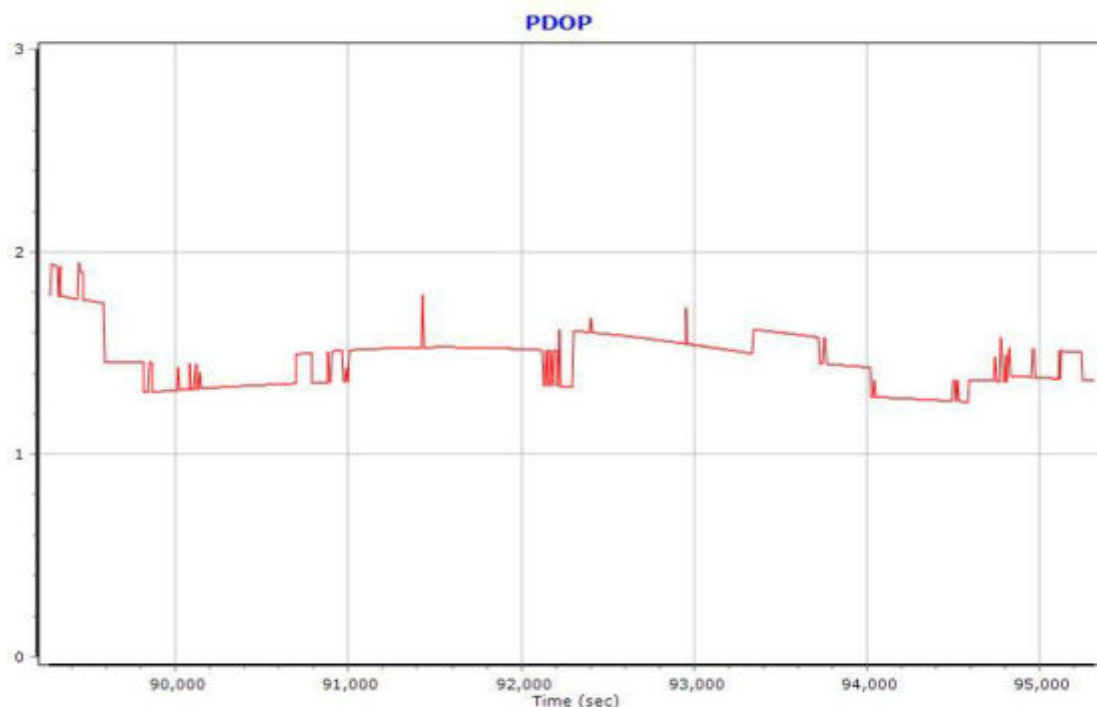


圖 4.13 機載 PDOP 圖

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	1081102a	07:08:17~09:27:20	06:00:00~09:59:59
2	1081102b	10:00:04~12:05:55	09:00:00~12:59:59
3	1081103a	07:13:02~09:17:50	07:00:00~09:59:59
4	1081103b	09:52:39~11:15:05	09:00:00~11:59:59
5	1081106	07:09:34~08:43:46	06:00:00~08:59:59
6	1081110	07:31:41~09:58:49	07:00:00~10:59:59
7	1081123	07:12:32~09:19:38	07:00:00~09:59:59
8	1081209	07:15:04~09:24:43	07:00:00~09:59:59
9	1081211a	07:14:22~09:18:31	07:00:00~09:59:59
10	1081211b	09:47:01~12:48:22	09:00:00~12:59:59
11	1081224a	07:53:42~10:04:27	07:00:00~10:59:59
12	1090104a	07:49:49~09:59:52	07:00:00~10:59:59
13	1090202a	07:59:23~09:56:26	07:00:00~10:59:59

序號	作業日期	執行時間	基站使用時間
14	1090216a	07:52:36~10:06:36	07:00:00~10:59:59
15	1090225a	11:01:34~13:09:58	10:00:00~13:59:59
16	1090226a	08:25:23~10:15:04	08:00:00~10:59:59
17	1090309a	08:36:08~10:28:37	08:00:00~10:59:59
18	1090509a	07:45:13~09:40:21	07:00:00~09:59:59
19	1090531a	10:01:26~11:51:18	09:00:00~12:59:59
20	1090603a	07:46:18~10:09:53	07:00:00~10:59:59
21	1090604a	07:06:37~09:30:07	06:00:00~09:59:59
22	1090605a	07:11:26~09:29:35	07:00:00~09:59:59
23	1090606a	08:21:28~10:29:03	08:00:00~10:59:59
24	1090615a	07:03:26~09:03:04	06:00:00~09:59:59
25	1090616a	07:07:52~07:53:27	06:00:00~08:59:59
26	1090617a	07:09:57~08:51:45	06:00:00~09:59:59
27	1090706a	05:59:03~07:41:01	05:00:00~07:59:59

§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。

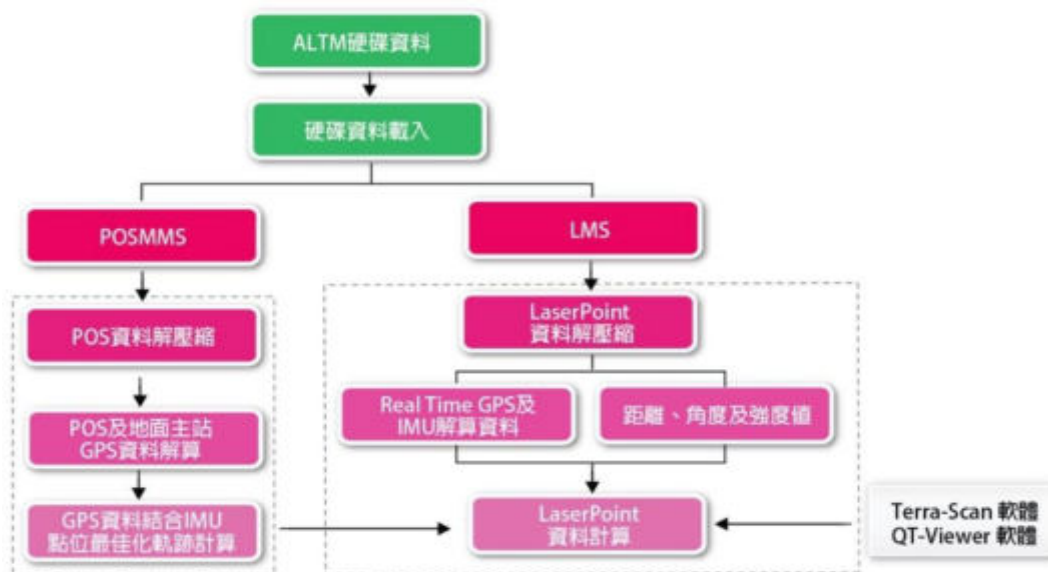


圖 4.14 空載雷射掃瞄資料作業流程

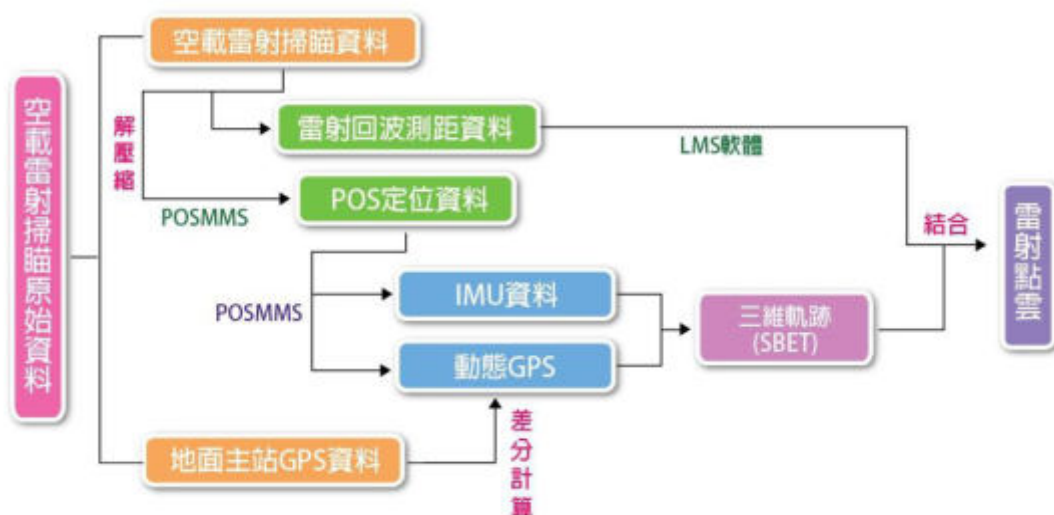


圖 4.15 點雲解算產製處理流程

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 4.16)。

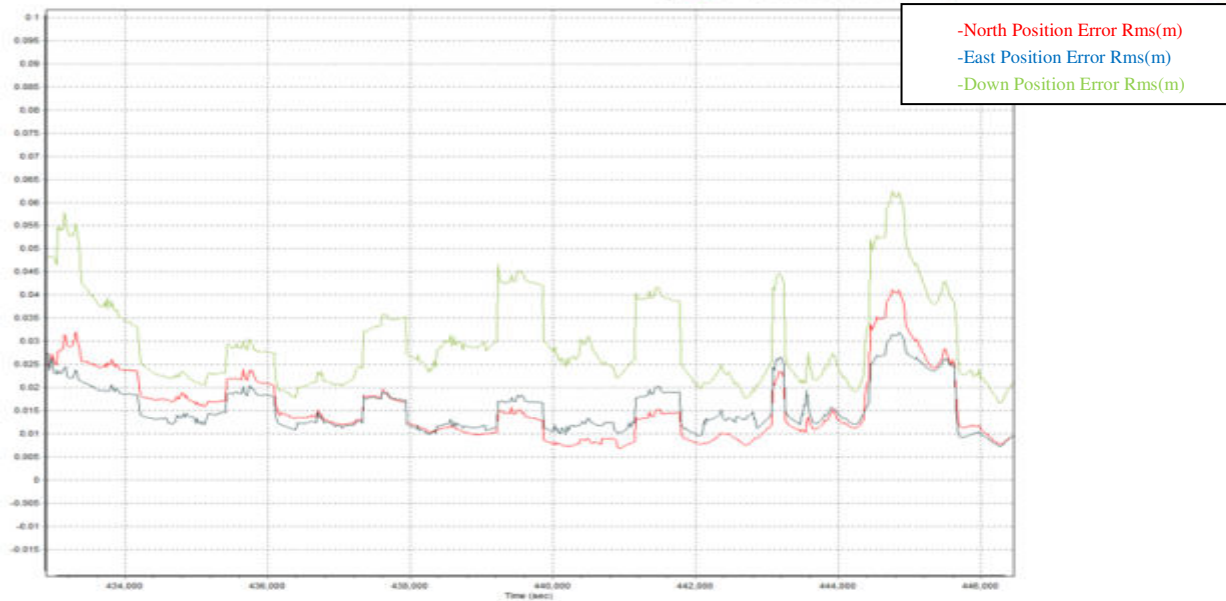


圖 4.16 飛航軌道差異量示意圖

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)。

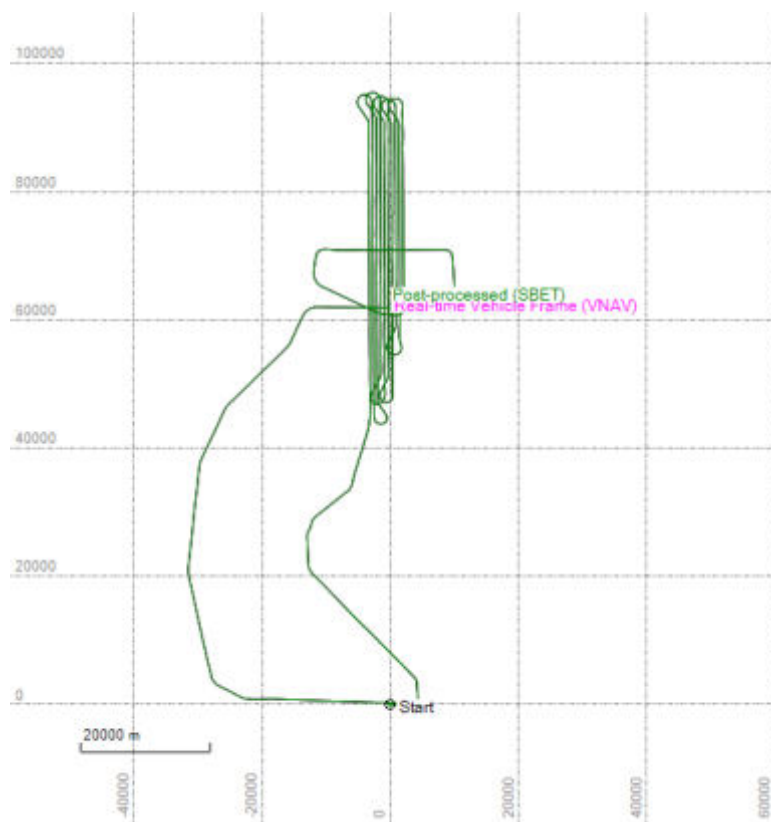


圖 4.17 飛航掃瞄航跡示意圖

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% 之合約要求，如圖 4.18。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。

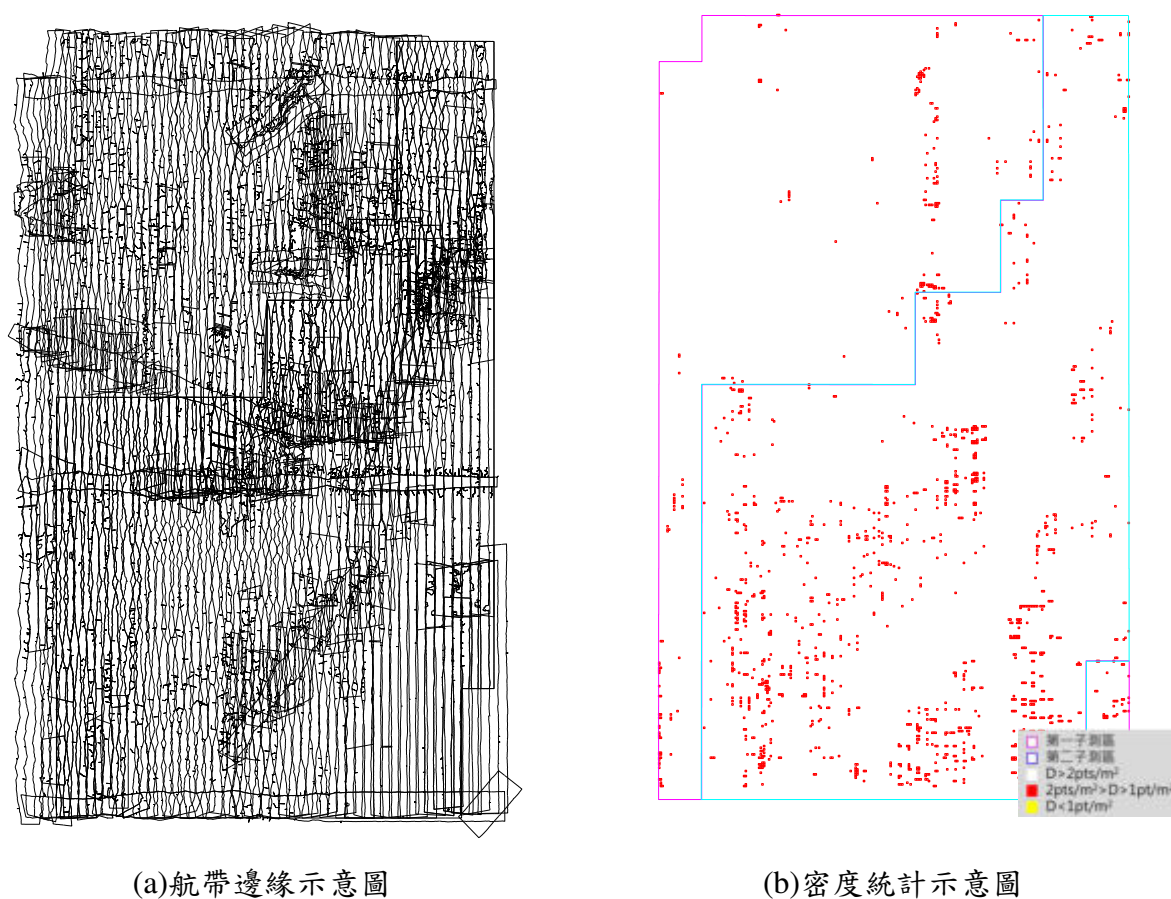


圖 4.18 重疊率檢查與密度統計示意圖

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)	是否通過合約規定 (<10%)	低密度比例 (<1 pts/m ²)	是否通過合約規定 (<5%)
第一子測區	99.5%	0.5%	通過	0.0%	通過
第二子測區	98.5%	1.4%	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、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 4.19 所示。



圖 4.19 平差作業流程圖

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 4.20 所示，其中不同航線之房屋脊線有明顯偏移。

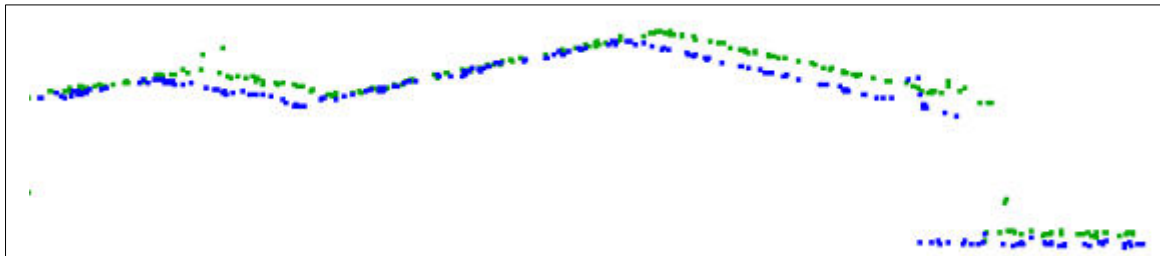


圖 4.20 雷射點偏移示意圖

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 4.21 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。

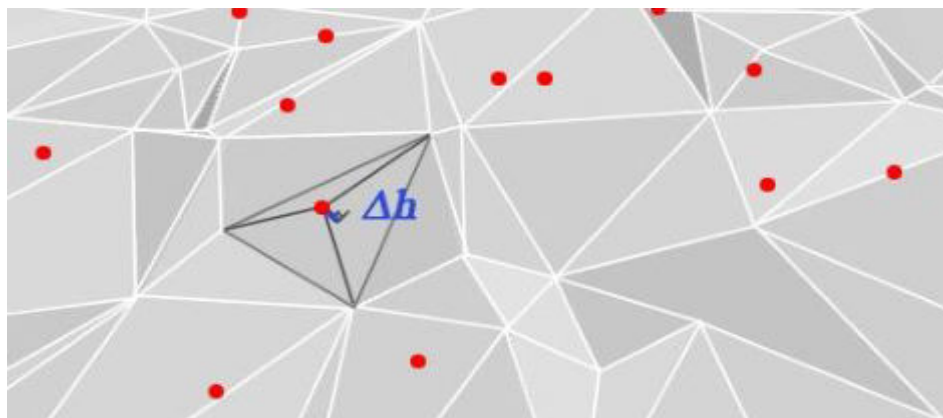


圖 4.21 Measure Match 比對原理示意圖

4-4-4 分區航帶平差

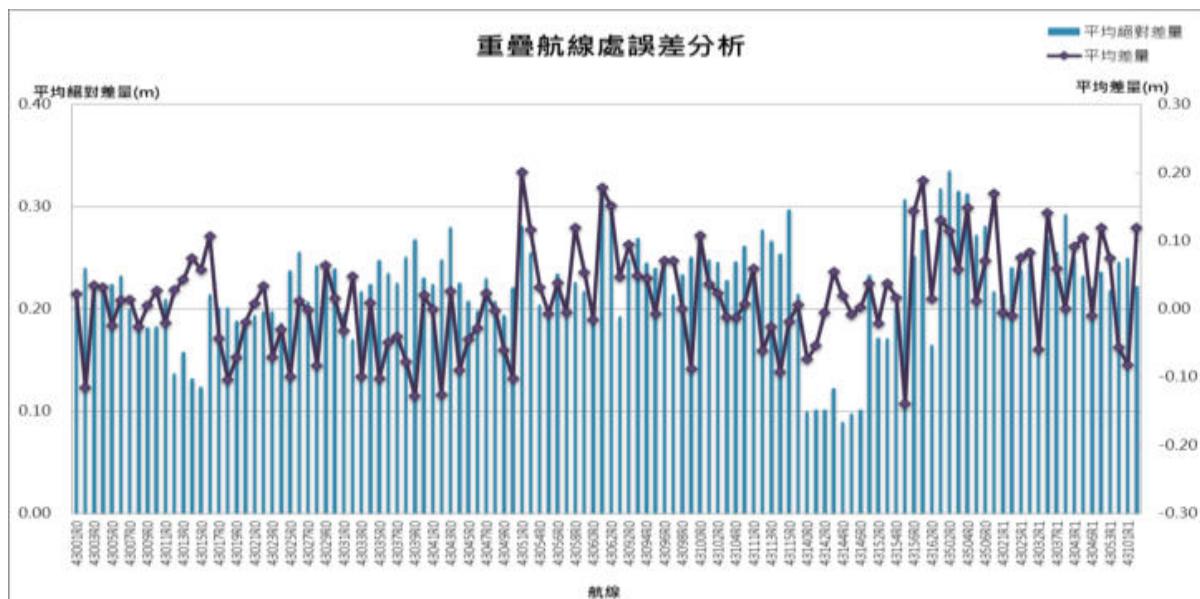
由於本計畫測區廣大，因此為使雷射點資料銜接高程一致，使用平差控制點，可有效地將資料約制區域間高程，使資料得以符合高精度之特性。並於各測區完成完整之航拍掃描作業後，先進行分區航帶平差作業，並繳交成果至監審方審查，再進行後續點雲分類作業，可保持成果產製之時效。

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。

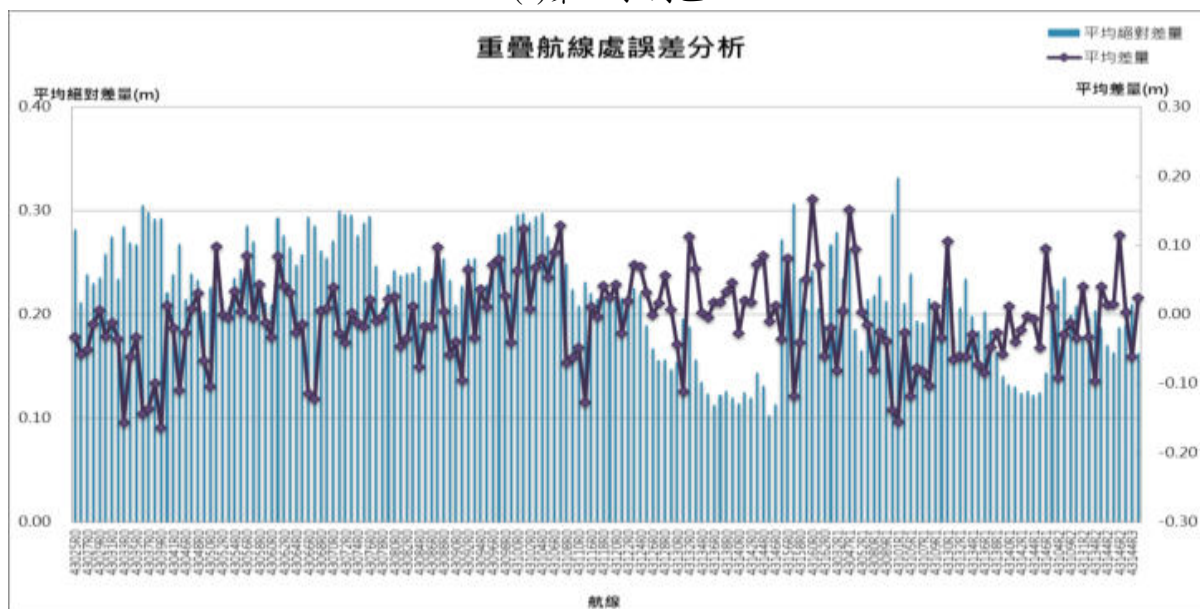
本計畫子測區平差前各航帶重疊處高程誤差分析圖如圖 4.22 所示，數據統計如表 4.4 所示，所使用之航線皆可進行平差，且無率定不完善導致之明顯系統誤差。

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	0.336	0.089	0.223	0.049
	平均差量	0.201	-0.139	0.015	0.073
第二子測區	平均絕對差量	0.333	0.103	0.222	0.052
	平均差量	0.167	-0.164	-0.008	0.064



(a)第一子測區



(b)第二子測區

圖 4.22 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 4.23 匹配連結點示意圖

如圖 4.23 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 4.24 與圖 4.25。

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	0.199	0.040	0.141	0.034
	平均差量	0.101	-0.120	0.003	0.034
第二子測區	平均絕對差量	0.198	0.045	0.140	0.038
	平均差量	0.094	-0.139	0.000	0.035

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)
43001R0	6179288	0.209	0.023	3747195	0.135	-0.013
43002R0	10115683	0.240	-0.115	7586623	0.141	-0.047
43003R0	11820428	0.224	0.035	10030371	0.136	0.011
43004R0	12602766	0.223	0.033	10694808	0.145	0.006
43005R0	14405541	0.224	-0.024	11751074	0.154	0.010
43006R0	16857729	0.233	0.014	12326188	0.176	-0.020
43007R0	17630716	0.201	0.014	13288050	0.133	0.004
43008R0	18486521	0.189	-0.026	15097758	0.129	-0.021
43009R0	17787135	0.182	0.005	14808519	0.126	0.006
43010R0	15038672	0.183	0.027	12140865	0.123	0.028
43011R0	13220414	0.210	-0.020	10062548	0.138	0.002
43012R0	58637	0.137	0.028	71509	0.087	0.013
43013R0	119776	0.158	0.043	147872	0.098	0.022
43014R0	703335	0.132	0.075	847392	0.129	0.065
43015R0	80943	0.124	0.058	98727	0.079	0.043
43016R0	4495788	0.215	0.108	4071784	0.143	0.029
43017R0	15481810	0.202	-0.043	11761936	0.129	-0.010
43018R0	15662743	0.202	-0.104	11956426	0.122	-0.029
43019R0	14939417	0.188	-0.070	10997433	0.120	-0.001
43020R0	10842317	0.185	-0.019	7168260	0.129	-0.025
43021R0	12037530	0.194	0.008	7263908	0.144	0.000
43022R0	10255801	0.198	0.034	7250872	0.138	-0.017
43023R0	10349313	0.198	-0.070	8480992	0.131	-0.006
43024R0	13605048	0.187	-0.030	10288809	0.129	-0.002
43025R0	14672561	0.238	-0.099	9394318	0.158	-0.021
43026R0	10561409	0.256	0.012	7295297	0.159	0.017
43027R0	8079465	0.207	-0.001	6362345	0.134	0.026
43028R0	8919230	0.243	-0.083	7350325	0.132	-0.016
43029R0	6735296	0.242	0.065	5452050	0.134	-0.008
43030R0	5527051	0.240	0.016	4352381	0.139	0.013
43031R0	6881437	0.197	-0.032	5572339	0.126	-0.010
43032R0	10899296	0.171	0.049	8881574	0.123	0.005
43033R0	8794224	0.217	-0.099	6185882	0.152	0.018
43034R0	7637114	0.225	0.010	4468705	0.157	-0.016
43035R0	7143085	0.248	-0.102	4277715	0.157	-0.020
43036R0	6708754	0.236	-0.049	4415481	0.149	0.007
43037R0	6425078	0.226	-0.040	3969040	0.151	-0.003
43038R0	5357659	0.251	-0.077	3352577	0.165	-0.038
43039R0	5512446	0.269	-0.128	3121322	0.154	0.007
43040R0	6199473	0.231	0.021	3092298	0.154	-0.017
43041R0	5760233	0.225	-0.001	2449438	0.172	0.002
43042R0	8417739	0.248	-0.126	3498368	0.172	0.019
43043R0	11752822	0.280	0.026	6687914	0.141	-0.012
43044R0	21126752	0.226	-0.090	16279261	0.139	-0.006

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)
43045R0	18551260	0.208	-0.044	15357467	0.134	-0.001
43046R0	13891448	0.198	-0.028	11821956	0.133	-0.003
43047R0	18604139	0.231	0.024	15166380	0.125	-0.004
43048R0	23608919	0.208	-0.003	15554926	0.113	0.000
43049R0	20006778	0.194	-0.060	11868838	0.108	0.007
43050R0	13030613	0.221	-0.102	7678753	0.116	-0.019
43051R0	5656353	0.282	0.201	3824474	0.134	0.009
43052R0	5600203	0.255	0.116	3574890	0.131	0.017
43054R0	5401573	0.204	0.032	2790671	0.133	-0.005
43055R0	4552422	0.191	-0.007	3259110	0.165	0.058
43056R0	2979937	0.234	0.039	2079611	0.188	0.094
43057R0	2086086	0.212	-0.005	1654694	0.162	-0.044
43058R0	2241447	0.227	0.120	1800650	0.148	0.008
43059R0	2645063	0.218	0.054	2181107	0.150	0.000
43060R0	2082739	0.206	-0.015	1635797	0.161	-0.036
43061R0	30202	0.323	0.178	10959	0.193	-0.118
43062R0	46358	0.303	0.152	27389	0.177	-0.112
43064R0	781403	0.193	0.047	26494	0.149	0.007
43092R0	11116073	0.250	0.095	2209825	0.171	0.009
43093R0	11102846	0.270	0.050	5217377	0.161	-0.008
43094R0	10029610	0.246	0.045	5000357	0.171	0.007
43095R0	9174945	0.240	-0.007	4282062	0.173	-0.008
43096R0	8121879	0.243	0.071	3898724	0.162	0.019
43097R0	6579044	0.215	0.071	3810347	0.138	-0.004
43098R0	5565067	0.234	0.001	3009814	0.139	-0.003
43099R0	4749140	0.251	-0.088	2456677	0.143	-0.013
43100R0	4276750	0.275	0.108	2497268	0.167	-0.001
43101R0	3789479	0.249	0.037	2562053	0.146	-0.010
43102R0	2916880	0.246	0.024	1875290	0.152	0.003
43103R0	2497561	0.228	-0.012	1282432	0.152	0.025
43104R0	2103600	0.247	-0.013	493625	0.138	0.002
43105R0	1359956	0.262	0.007	39729	0.105	0.030
43111R0	4432155	0.240	0.060	1171595	0.172	0.067
43112R0	8282629	0.278	-0.061	2493925	0.177	-0.013
43113R0	6260625	0.267	-0.026	2577370	0.195	-0.036
43114R0	6198843	0.254	-0.092	2498424	0.190	-0.009
43115R0	5087759	0.297	-0.018	1541729	0.184	0.002
43116R0	2118178	0.215	0.006	991362	0.153	0.023
43140R0	5074207	0.100	-0.074	2955103	0.048	0.032
43141R0	10165338	0.102	-0.053	7425661	0.046	-0.014
43142R0	16369208	0.102	-0.005	12128993	0.046	0.005
43143R0	17670946	0.123	0.055	13598543	0.047	0.005
43144R0	17212954	0.089	0.020	13203845	0.044	-0.006
43145R0	14080639	0.098	-0.008	9379837	0.042	0.007
43146R0	8519274	0.102	0.002	5012527	0.040	0.000

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)
43151R0	10318497	0.233	0.038	7523768	0.156	-0.015
43152R0	3284305	0.172	-0.021	2931357	0.140	-0.034
43153R0	3530551	0.171	0.038	3272686	0.113	0.010
43154R0	4718389	0.203	0.017	3397240	0.133	0.016
43155R0	3951344	0.308	-0.139	2864724	0.183	-0.120
43156R0	16879260	0.253	0.144	13116904	0.139	-0.001
43160R0	3513175	0.278	0.189	2634881	0.188	0.098
43162R0	2142972	0.165	0.015	783178	0.115	-0.003
43501R0	2431083	0.319	0.131	1070149	0.188	0.101
43502R0	2312989	0.336	0.115	1131182	0.194	0.009
43503R0	2101276	0.316	0.059	1268119	0.185	0.000
43504R0	3015593	0.313	0.149	1458569	0.199	0.036
43505R0	3473090	0.273	0.012	2037368	0.178	0.009
43506R0	2427947	0.282	0.071	1336265	0.185	-0.060
43801R0	4228284	0.217	0.170	1383299	0.054	0.017
43021R1	6042302	0.214	-0.005	733491	0.158	-0.038
43022R1	3098624	0.241	-0.009	322310	0.154	0.029
43025R1	1745842	0.239	0.076	97418	0.152	0.087
43028R1	7514457	0.245	0.083	6072934	0.136	0.009
43032R1	10157557	0.186	-0.059	8308612	0.124	0.004
43034R1	4176703	0.270	0.142	32300	0.149	-0.044
43037R1	3176977	0.256	0.059	193265	0.163	0.060
43039R1	1519083	0.293	0.000	93457	0.143	0.055
43043R1	5078505	0.251	0.092	701889	0.126	0.014
43044R1	17706878	0.233	0.106	13840274	0.137	0.024
43046R1	3036295	0.221	-0.010	2279400	0.145	0.034
43047R1	6733899	0.237	0.120	4992674	0.153	0.027
43053R1	6562174	0.219	0.075	2224481	0.108	0.019
43100R1	2054348	0.246	-0.056	1170880	0.188	0.071
43101R1	1996757	0.251	-0.082	1302546	0.156	0.002
43025R2	7845629	0.222	0.119	2845815	0.150	0.017

* 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

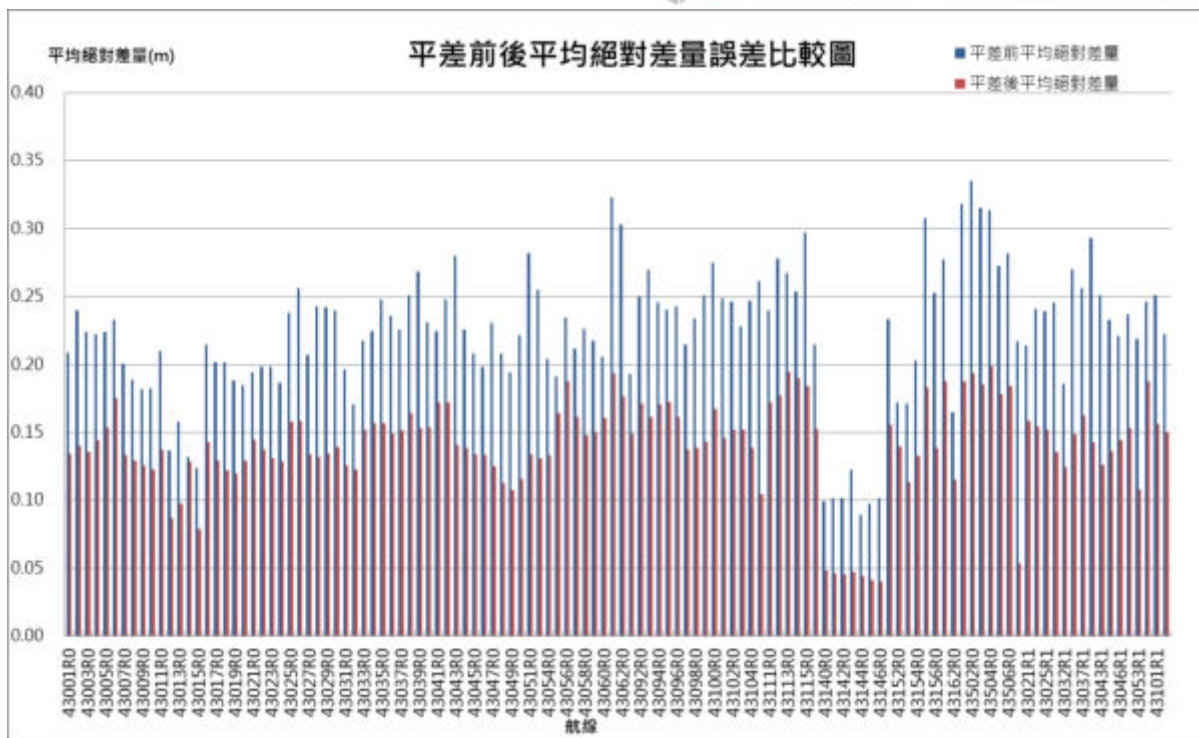
航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對差量(m)	平均差量(m)
43025R0	1082412	0.282	-0.032	783013	0.159	0.043
43026R0	2374974	0.212	-0.057	1496729	0.148	0.006
43027R0	2195722	0.239	-0.050	1426834	0.155	-0.045
43028R0	2618507	0.230	-0.013	1925227	0.128	-0.007
43029R0	2788917	0.236	0.006	2011300	0.131	0.014
43030R0	2822684	0.259	-0.032	1940611	0.140	-0.032
43031R0	2833778	0.275	-0.012	1922198	0.162	0.028
43032R0	2653826	0.234	-0.036	1828079	0.149	-0.036
43033R0	2418176	0.286	-0.156	1439123	0.196	-0.046
43034R0	2272384	0.269	-0.061	1207627	0.192	-0.030
43035R0	2693512	0.268	-0.033	1231035	0.195	0.081
43036R0	2884058	0.305	-0.144	1735853	0.194	0.002
43037R0	1209705	0.299	-0.136	1405819	0.166	-0.010
43038R0	1023132	0.292	-0.099	1377520	0.170	0.003
43039R0	1463127	0.293	-0.164	1390184	0.155	0.047
43040R0	2944357	0.221	0.013	2371341	0.151	-0.010
43041R0	3237565	0.239	-0.020	2240161	0.173	-0.016
43042R0	2818032	0.269	-0.110	1646389	0.176	0.018
43046R0	5468454	0.215	-0.026	7237497	0.129	0.000
43047R0	10704794	0.240	0.009	10884311	0.125	-0.017
43048R0	15535821	0.233	0.031	12439976	0.115	0.006
43049R0	14956164	0.203	-0.067	12055875	0.112	-0.020
43050R0	15529859	0.226	-0.104	11798969	0.113	-0.001
43051R0	13675045	0.228	0.098	9844093	0.127	0.006
43052R0	11708930	0.215	0.000	9005987	0.129	0.008
43053R0	8356544	0.207	-0.004	4918336	0.156	-0.054
43054R0	9013976	0.235	0.034	5233478	0.160	-0.006
43055R0	10778291	0.244	0.005	6144004	0.183	0.028
43056R0	10719620	0.286	0.085	6622407	0.193	0.045
43057R0	5209491	0.271	-0.004	3178025	0.185	-0.073
43058R0	4588210	0.231	0.044	3132863	0.157	-0.039
43059R0	4848447	0.212	-0.011	3386244	0.151	-0.045
43060R0	3517757	0.210	-0.033	2322792	0.155	-0.033
43061R0	3428739	0.294	0.084	1694156	0.196	-0.035
43062R0	3029108	0.277	0.042	1504627	0.186	-0.011
43063R0	3094315	0.265	0.032	1823220	0.165	-0.011
43064R0	4202007	0.248	-0.026	2807755	0.155	-0.002
43065R0	3905846	0.258	-0.014	2439135	0.160	-0.022
43066R0	2113802	0.294	-0.115	509855	0.197	-0.029
43067R0	7771070	0.286	-0.122	5126104	0.183	0.014
43068R0	9523338	0.262	0.005	6655294	0.163	-0.013
43069R0	9746877	0.255	0.009	6762253	0.147	-0.001
43070R0	7414082	0.272	0.040	5118311	0.152	0.025
43071R0	7080641	0.300	-0.027	4972119	0.149	0.007

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)
43072R0	6856744	0.297	-0.040	4919398	0.141	-0.004
43073R0	7312333	0.296	0.003	5511911	0.136	-0.007
43074R0	7307010	0.277	-0.011	5447045	0.141	0.010
43075R0	7140237	0.289	-0.017	5194350	0.145	-0.003
43076R0	7062860	0.295	0.022	4941785	0.145	0.005
43077R0	8960365	0.248	-0.009	5071818	0.153	-0.008
43078R0	10242461	0.206	-0.004	4826633	0.168	0.041
43079R0	9137588	0.228	0.023	2756986	0.197	-0.011
43080R0	3576869	0.243	0.026	2224196	0.175	-0.010
43081R0	7326738	0.238	-0.045	3339086	0.190	-0.084
43082R0	6386479	0.240	-0.035	3555034	0.198	-0.031
43083R0	7526806	0.240	0.012	4333814	0.190	-0.032
43084R0	8301585	0.247	-0.076	4878187	0.176	-0.021
43085R0	7668431	0.232	-0.016	4374010	0.165	-0.025
43086R0	6435602	0.234	-0.017	2956507	0.166	-0.039
43087R0	2702015	0.270	0.097	1275905	0.161	0.018
43088R0	4051498	0.254	0.004	1573228	0.181	-0.012
43089R0	5054984	0.234	-0.059	1515846	0.194	-0.057
43090R0	6021039	0.210	-0.039	3244644	0.161	0.003
43091R0	6873583	0.228	-0.095	3856638	0.155	0.013
43092R0	2775995	0.253	0.065	1181550	0.171	-0.029
43093R0	3941868	0.254	-0.034	2156677	0.156	0.004
43094R0	4450067	0.228	0.037	2803217	0.153	0.009
43095R0	4893692	0.229	0.011	3353440	0.160	-0.029
43096R0	4998731	0.254	0.072	3593553	0.160	0.010
43097R0	5356802	0.278	0.081	3490754	0.149	-0.028
43098R0	5017228	0.279	0.027	3228104	0.151	0.002
43099R0	4244588	0.285	-0.040	2710330	0.153	-0.012
43100R0	3967006	0.297	0.063	2648219	0.165	-0.002
43101R0	4092629	0.298	0.125	3527861	0.149	0.013
43102R0	4484325	0.289	0.009	3712663	0.149	0.003
43103R0	7321024	0.295	0.068	3140285	0.137	0.016
43104R0	7787910	0.298	0.081	1725340	0.140	0.007
43105R0	8117526	0.276	0.054	1674895	0.144	0.008
43106R0	10149147	0.256	0.090	2126952	0.144	0.008
43107R0	8993847	0.284	0.129	1932598	0.164	-0.043
43108R0	5839402	0.250	-0.069	3173787	0.145	-0.006
43109R0	7197598	0.224	-0.062	3937617	0.136	-0.013
43110R0	8311477	0.209	-0.047	4460673	0.126	0.017
43115R0	78852	0.232	-0.127	69996	0.196	-0.036
43116R0	377466	0.221	0.011	567163	0.166	0.020
43117R0	6147485	0.215	-0.003	2469418	0.147	0.003
43118R0	5514425	0.216	0.042	2786767	0.146	0.002
43119R0	4058023	0.211	0.024	2373661	0.150	0.026
43120R0	3399020	0.214	0.044	2046983	0.171	0.048

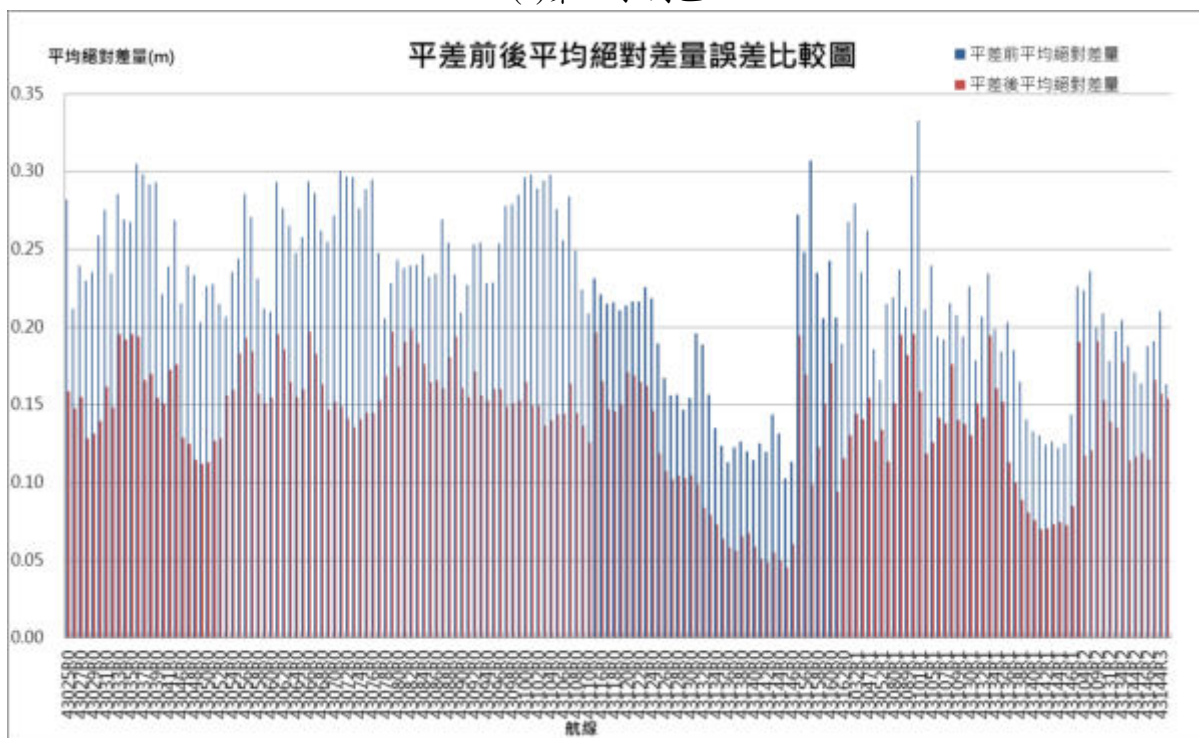
航線	平差前			平差後		
	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)	取樣點數	平均絕對 差量(m)	平均差量(m)
43121R0	3738303	0.216	-0.027	2379154	0.169	0.053
43122R0	4127947	0.217	0.020	2510972	0.165	0.081
43123R0	3929138	0.226	0.072	2050268	0.162	0.024
43124R0	3591609	0.219	0.069	1756802	0.147	0.045
43125R0	3405599	0.190	0.032	1864200	0.119	-0.003
43126R0	3478333	0.168	-0.001	2155178	0.107	0.011
43127R0	4467526	0.156	0.017	2940706	0.102	0.004
43128R0	6874342	0.157	0.056	4434078	0.104	-0.013
43129R0	10583800	0.147	0.007	5902210	0.103	-0.003
43130R0	17568816	0.155	-0.043	6688086	0.105	0.007
43131R0	31558344	0.196	-0.111	5545872	0.099	0.018
43132R0	29262726	0.189	0.113	7541843	0.084	-0.012
43133R0	31912785	0.157	0.067	15211553	0.079	0.017
43134R0	31411017	0.135	0.002	17905911	0.073	0.006
43135R0	34936901	0.124	-0.005	19958978	0.064	0.004
43136R0	39807865	0.113	0.018	24884363	0.058	0.005
43137R0	43540746	0.123	0.018	25728940	0.056	0.008
43138R0	40878640	0.126	0.033	22993349	0.066	0.004
43139R0	32508594	0.120	0.046	4125995	0.068	0.038
43140R0	30522329	0.115	-0.027	14670986	0.059	0.005
43141R0	25803883	0.125	0.021	15795638	0.051	0.003
43142R0	21095045	0.120	0.017	15521179	0.049	0.003
43143R0	18405548	0.144	0.073	13243567	0.055	0.000
43144R0	17568777	0.132	0.086	9555111	0.050	0.023
43145R0	13743184	0.103	-0.010	5716620	0.045	-0.011
43146R0	9803410	0.114	0.014	4517570	0.060	-0.002
43151R0	2036387	0.273	-0.035	671120	0.194	-0.046
43156R0	4117920	0.249	0.082	2877361	0.169	0.000
43157R0	2611149	0.307	-0.118	1876631	0.099	-0.107
43158R0	7479851	0.235	-0.040	5381065	0.123	-0.050
43159R0	3419437	0.206	0.051	2460428	0.151	0.060
43160R0	23401631	0.243	0.167	16835425	0.177	-0.139
43161R0	6860619	0.206	0.072	4936778	0.094	0.061
43162R0	29541013	0.189	-0.061	597220	0.115	-0.001
43028R1	2842119	0.268	-0.019	2088675	0.130	-0.007
43032R1	2370724	0.279	-0.081	1668204	0.144	-0.002
43046R1	1276710	0.235	0.005	1663514	0.141	0.020
43047R1	5647445	0.262	0.152	5014359	0.155	0.027
43051R1	5705995	0.186	0.095	2873066	0.127	-0.025
43052R1	4612275	0.166	0.004	3313065	0.134	0.034
43053R1	3160330	0.215	-0.015	2469367	0.113	0.013
43080R1	6035623	0.219	-0.081	3350144	0.151	0.026
43087R1	1128993	0.237	-0.025	102527	0.195	-0.001
43089R1	1646214	0.213	-0.038	514800	0.182	-0.057
43100R1	965698	0.298	-0.138	402453	0.196	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)
43101R1	1384055	0.333	-0.155	958660	0.159	-0.025
43104R1	7247708	0.211	-0.026	2846645	0.119	-0.008
43105R1	5202911	0.240	-0.118	2280071	0.126	-0.025
43106R1	6196168	0.194	-0.077	2560060	0.142	0.044
43107R1	4083993	0.192	-0.083	1704452	0.138	0.017
43108R1	4528264	0.216	-0.103	2256360	0.176	-0.032
43109R1	6518115	0.208	0.012	3583872	0.140	-0.016
43110R1	4394725	0.194	-0.034	2459628	0.138	0.010
43130R1	11326614	0.226	0.107	5255618	0.131	0.022
43131R1	31260248	0.179	-0.065	2995589	0.151	-0.047
43132R1	10997099	0.207	-0.060	2176823	0.142	0.065
43133R1	1321270	0.235	-0.062	443727	0.195	-0.070
43134R1	2838804	0.199	-0.028	740336	0.161	-0.015
43135R1	9061682	0.184	-0.073	3681889	0.152	-0.095
43136R1	15227157	0.203	-0.084	6030573	0.113	-0.016
43137R1	16928065	0.185	-0.047	8169592	0.100	0.005
43138R1	16259538	0.165	-0.026	8871410	0.089	0.001
43139R1	25026333	0.141	-0.058	15571673	0.081	-0.030
43140R1	23905173	0.133	0.012	14748670	0.076	-0.001
43141R1	20977796	0.131	-0.039	13834167	0.070	0.001
43142R1	19973084	0.125	-0.022	13878380	0.071	0.006
43143R1	21530233	0.126	-0.002	15624017	0.073	-0.006
43144R1	28469462	0.122	-0.006	19231335	0.075	-0.024
43145R1	28001593	0.125	-0.048	15012949	0.073	0.001
43146R1	12966769	0.144	0.096	6210127	0.085	0.052
43054R2	5447229	0.226	0.012	1400390	0.190	0.094
43104R2	6398869	0.224	-0.091	2396493	0.117	-0.016
43107R2	4549593	0.236	-0.029	43635	0.121	0.092
43109R2	4063691	0.200	-0.012	431395	0.191	0.085
43110R2	4286429	0.209	-0.033	965810	0.153	0.007
43131R2	14326293	0.178	0.041	95638	0.139	0.015
43132R2	5674110	0.197	-0.032	1737290	0.136	0.007
43134R2	6811792	0.205	-0.097	16046	0.177	0.063
43143R2	10069511	0.188	0.041	6217894	0.114	0.003
43144R2	5155082	0.171	0.014	3533747	0.117	-0.019
43145R2	5866519	0.164	0.015	3070524	0.119	-0.008
43146R2	2350687	0.188	0.115	746310	0.115	-0.014
43143R3	3521256	0.191	0.004	1291587	0.166	0.081
43144R3	3728390	0.210	-0.061	1579273	0.157	0.062
43145R3	8890217	0.163	0.025	1252604	0.154	0.058

* R1、R2 表示該航線第 2、3 次飛行，以此類推。粗體為交叉航帶。

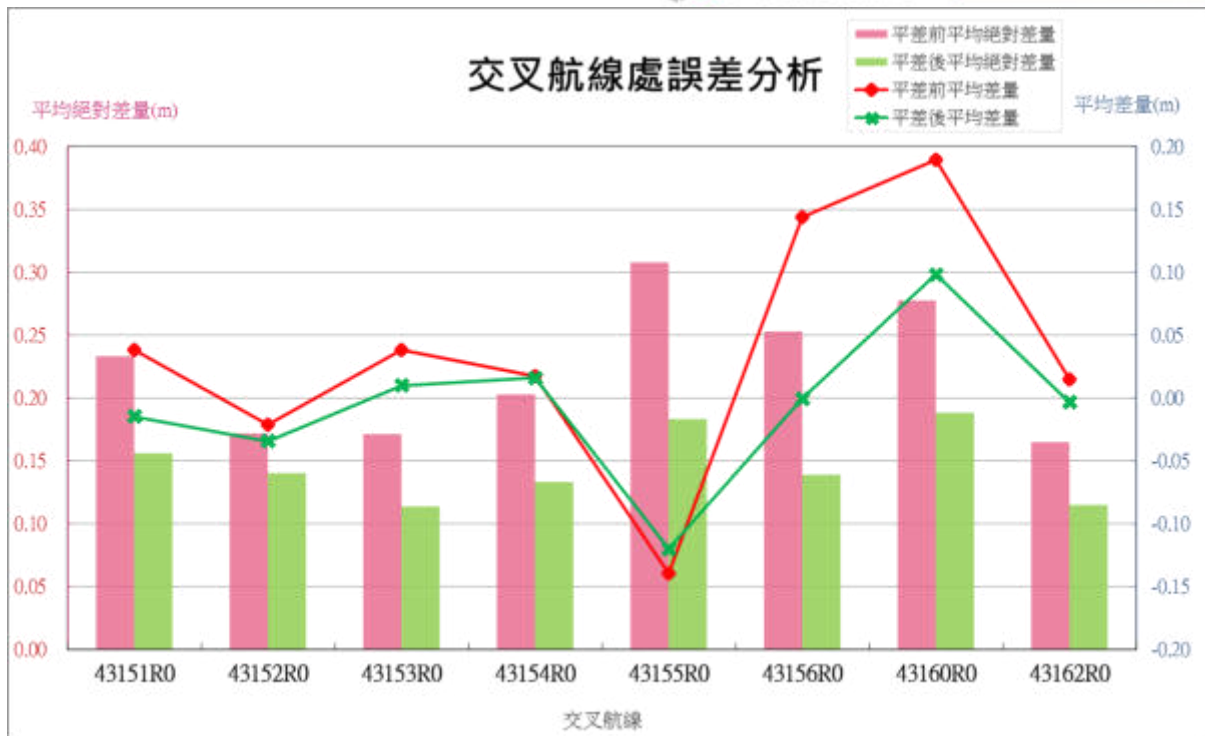


(a)第一子測區

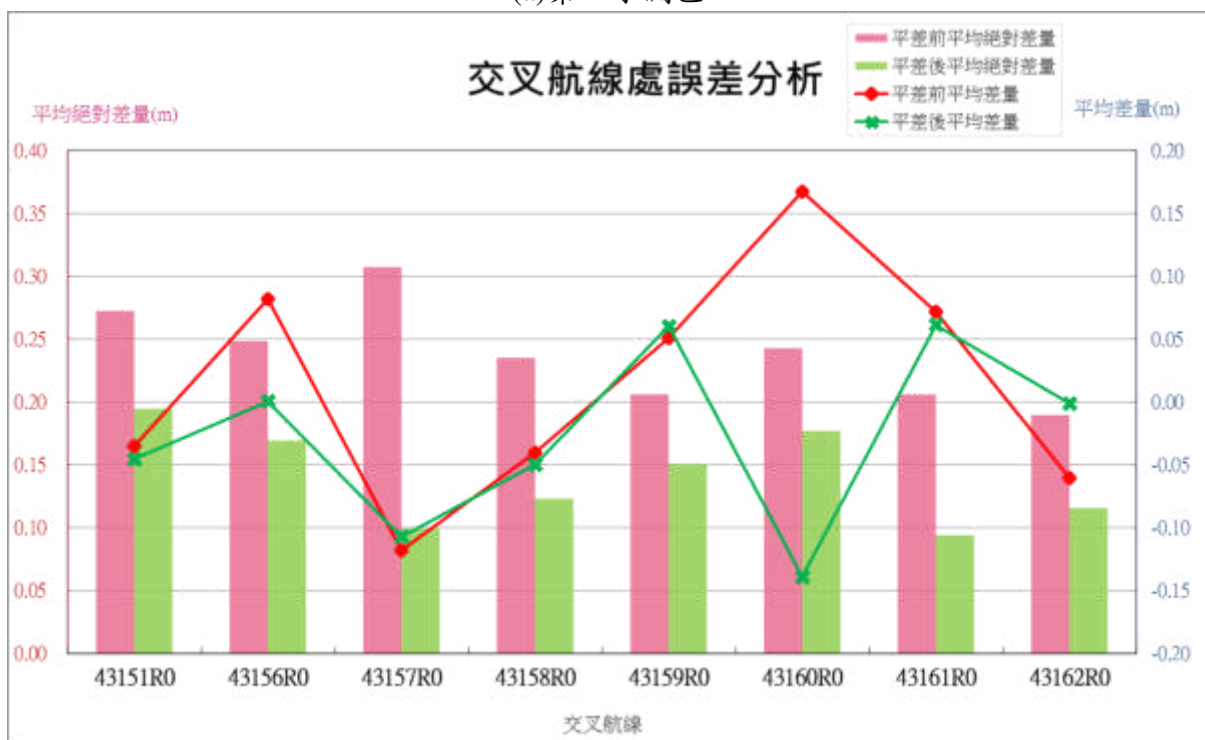


(b)第二子測區

圖 4.24 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 4.25 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 4.26，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 4.27 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。

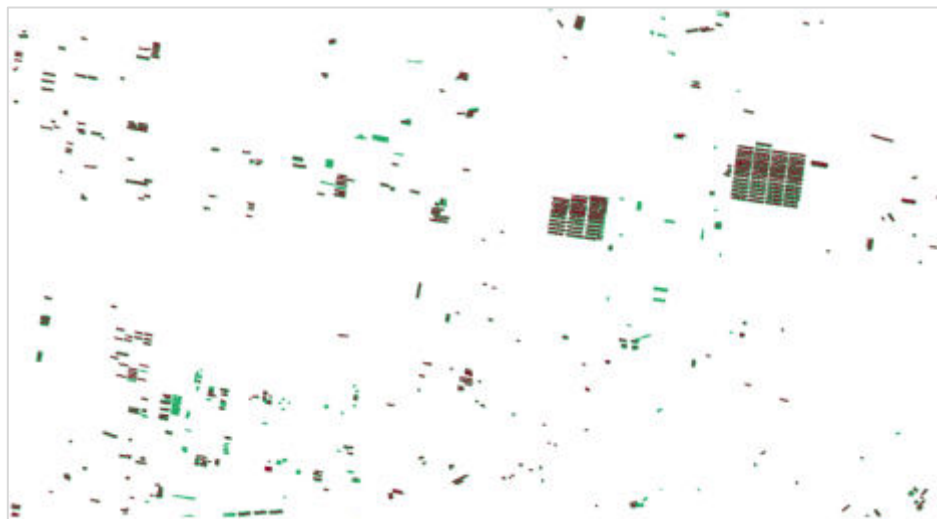
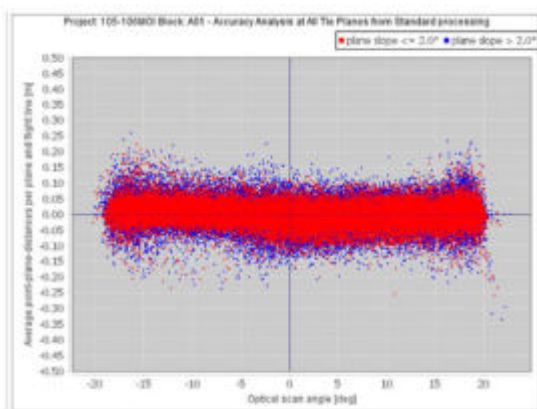
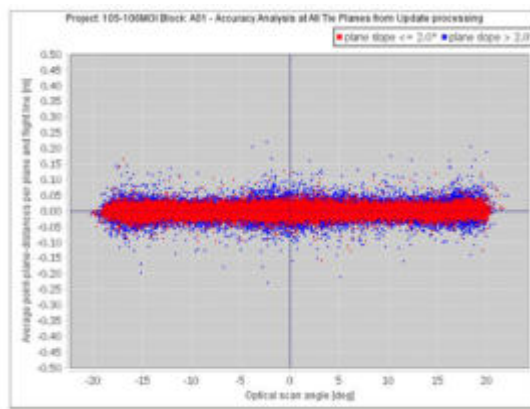


圖 4.26 航線重疊處屋頂共軛面與共軛線萃取示意圖



(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 4.27 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 18 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 4.28。

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			
43-0006B	258422.106	2513777.727	258421.828	2513777.972	-0.278	0.245	0.371
43-0007B	260228.357	2513725.036	260228.485	2513724.747	0.128	-0.289	0.316
43-0008B	261587.568	2513857.251	261587.731	2513857.607	0.163	0.356	0.392
43-0009B	253652.588	2518098.587	253652.584	2518098.22	-0.004	-0.367	0.367
43-0010B	255170.092	2518027.196	255169.917	2518027.344	-0.175	0.148	0.229
43-0011B	256868.529	2515767.608	256868.862	2515767.899	0.333	0.291	0.442
43-0012B	263338.892	2514761.848	263338.881	2514761.955	-0.011	0.107	0.108
43-0013B	261571.374	2533684.885	261571.24	2533684.693	-0.134	-0.192	0.234
43-0014B	263377.175	2538768.519	263377.417	2538768.775	0.242	0.256	0.352
43-0018B	260142.308	2527755.461	260142.651	2527755.241	0.343	-0.220	0.407
43-0019B	255726.266	2530234.205	255725.836	2530234.265	-0.430	0.060	0.434
43-0022B	262068.318	2540911.963	262068.427	2540911.793	0.109	-0.170	0.202
43-0025B	261584.999	2524424.61	261584.821	2524424.327	-0.178	-0.283	0.334
43-0026B	259844.776	2532956.087	259844.514	2532955.781	-0.262	-0.306	0.403
43-0029B	263401.113	2522912.421	263400.845	2522912.108	-0.268	-0.313	0.412
43-0030B	256890.907	2533154.852	256890.707	2533155.229	-0.200	0.377	0.427
43-0031B	258421.634	2533418.099	258421.325	2533418.413	-0.309	0.314	0.441
43-0033B	262828.799	2559458.372	262828.457	2559458.128	-0.342	-0.244	0.420
平面差量最大值	0.442		平面差量標準偏差		0.096		
平面差量最小值	0.108		平面差量均方根差		0.372		
平面差量平均值	0.349						



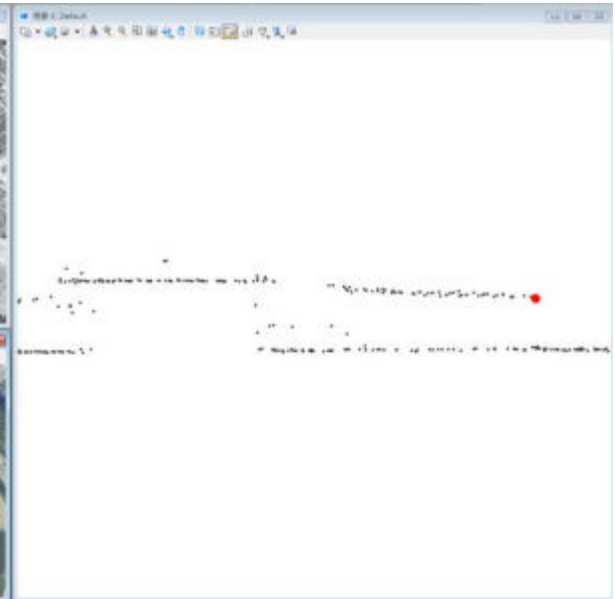
(a)平面控制點量測遠照



(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 4.28 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。

如檢核圖圖 4.29 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 8 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 4.30。



圖 4.29 監審方軟體航帶平差高程差異量檢核圖



圖 4.30 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 4.31)。

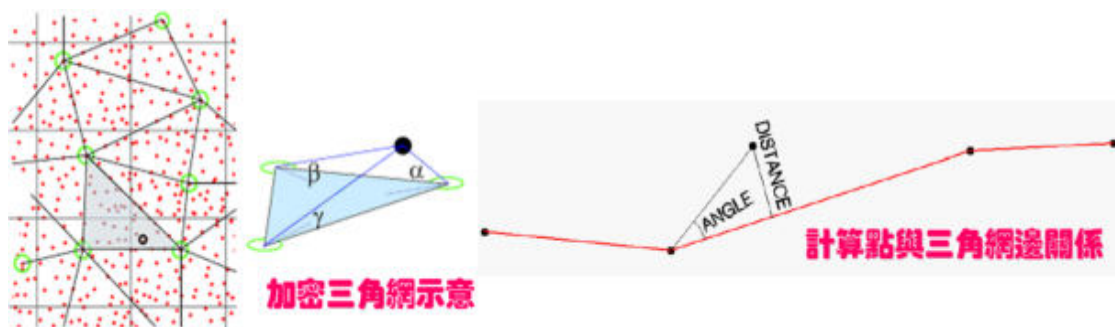


圖 4.31 Iteration angle 和 Iteration distance 示意圖 (Axelsson, 2000)

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 4.32)。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 4.33，編修前大範圍地面點不足，編修後可呈現地形變化。



圖 4.32 橋樑之點雲分類示意圖

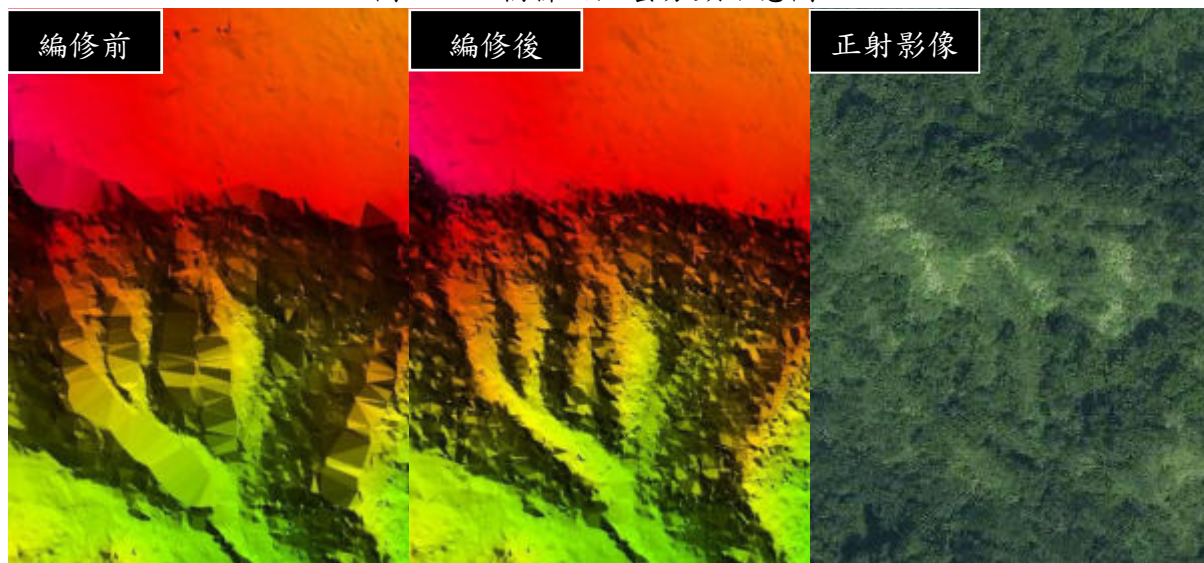


圖 4.33 編修檢核修正示意圖

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 4.34，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。

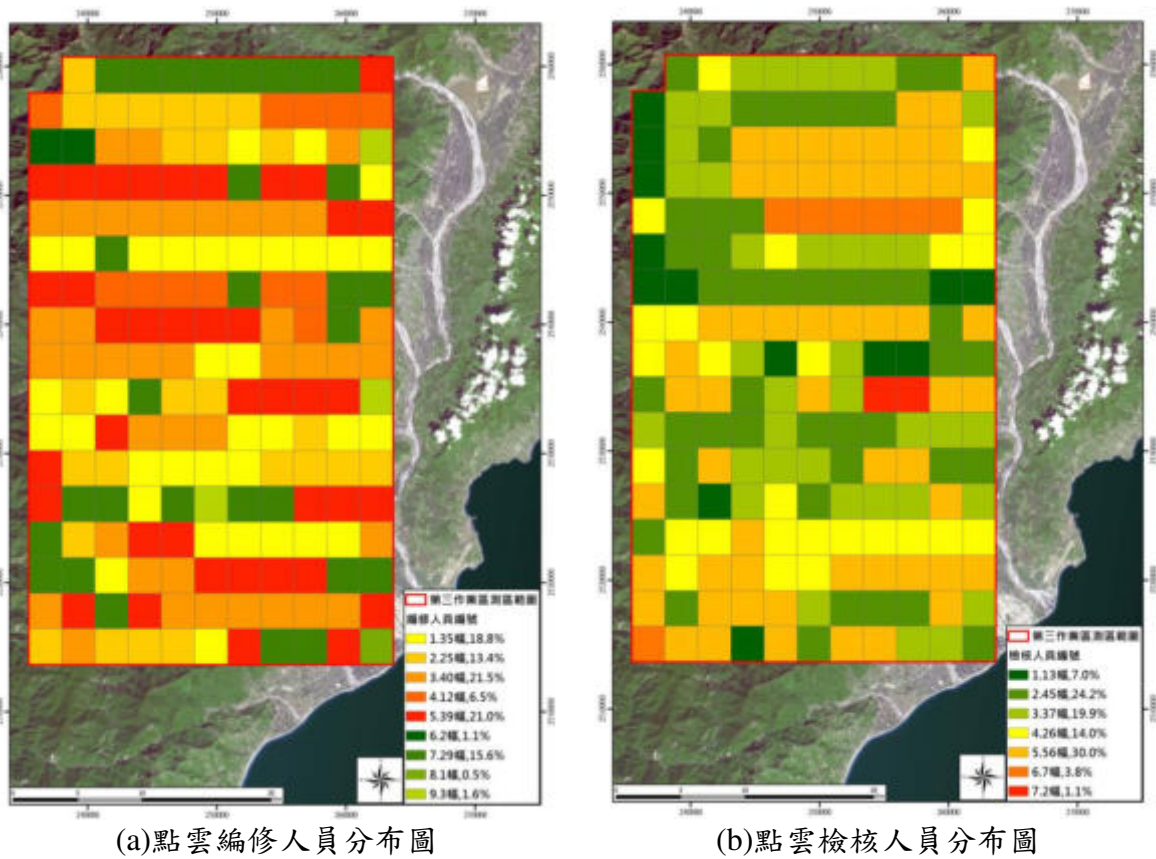
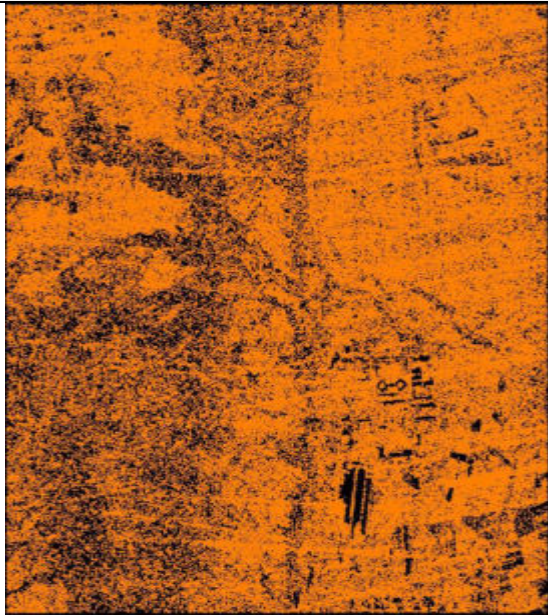
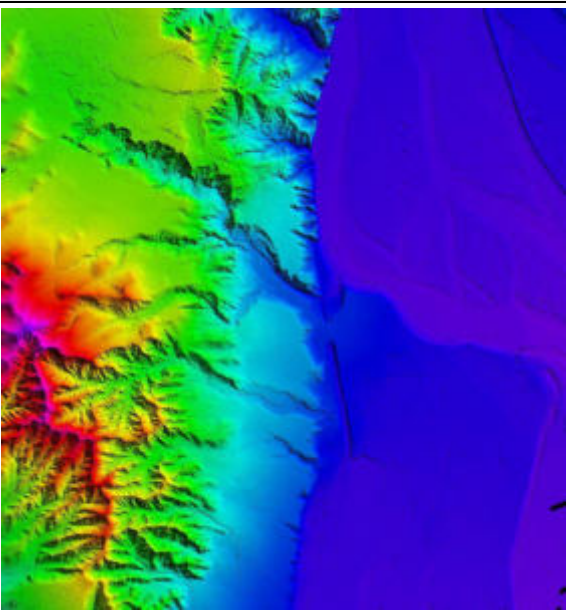


圖 4.34 點雲編修與檢核人員分布圖

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	臺東	航線標號	140,141,142,143,144,145,146
圖號	96184075	總點雲數	36,948,224
資料產製人員	董 OO	完成日期	2019/6/24
圖幅審查人員	王 OO	審查日期	2019/8/26
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			

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 1x1 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 4.35，測區成果如圖 4.37 及圖 4.36。

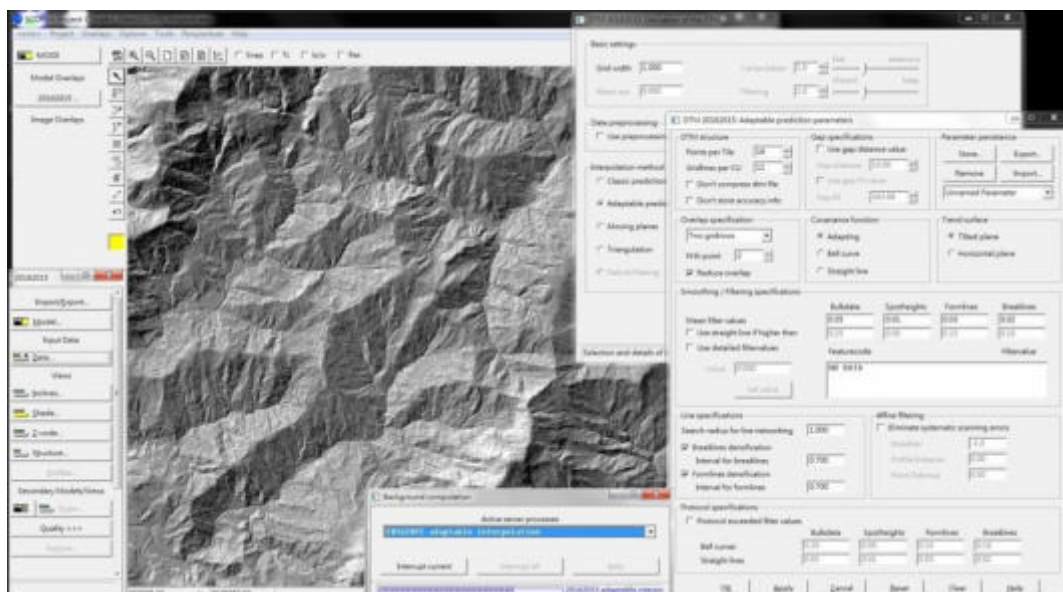


圖 4.35 SCOP++軟體介面圖

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。第三作業區責任接邊圖幅共 77 幅，分布如章節 5-5。

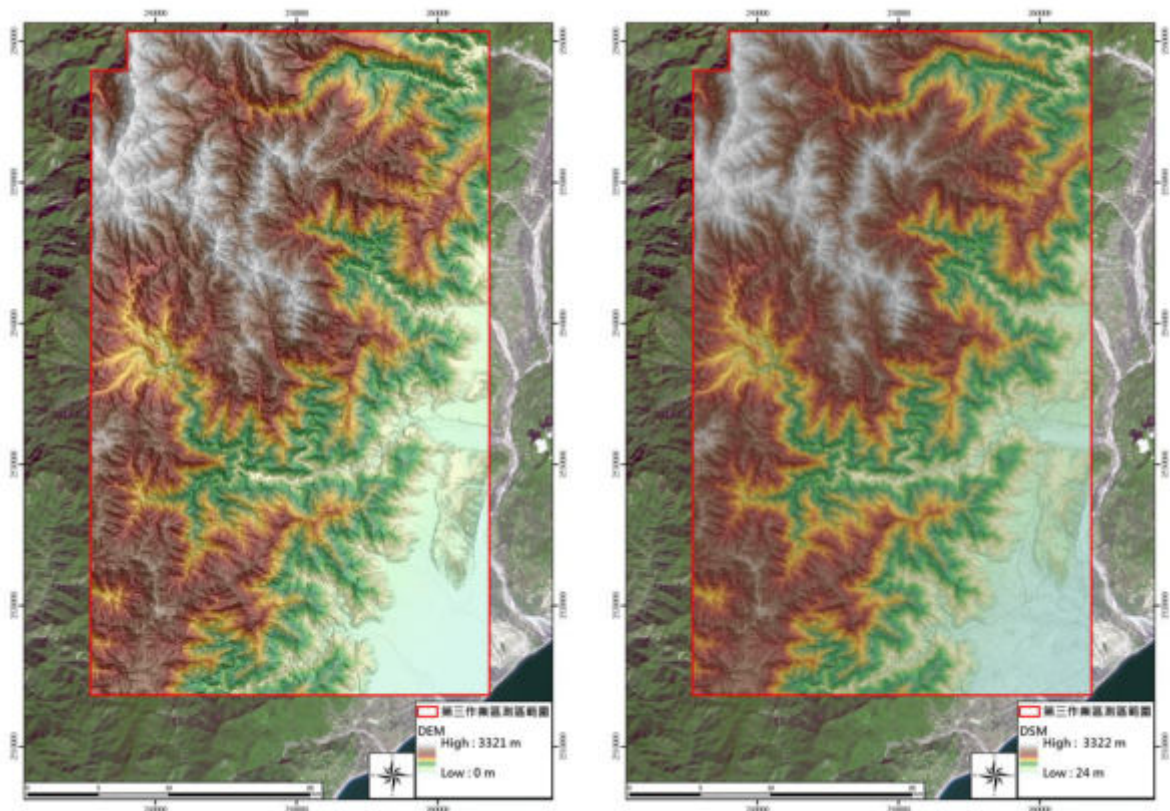
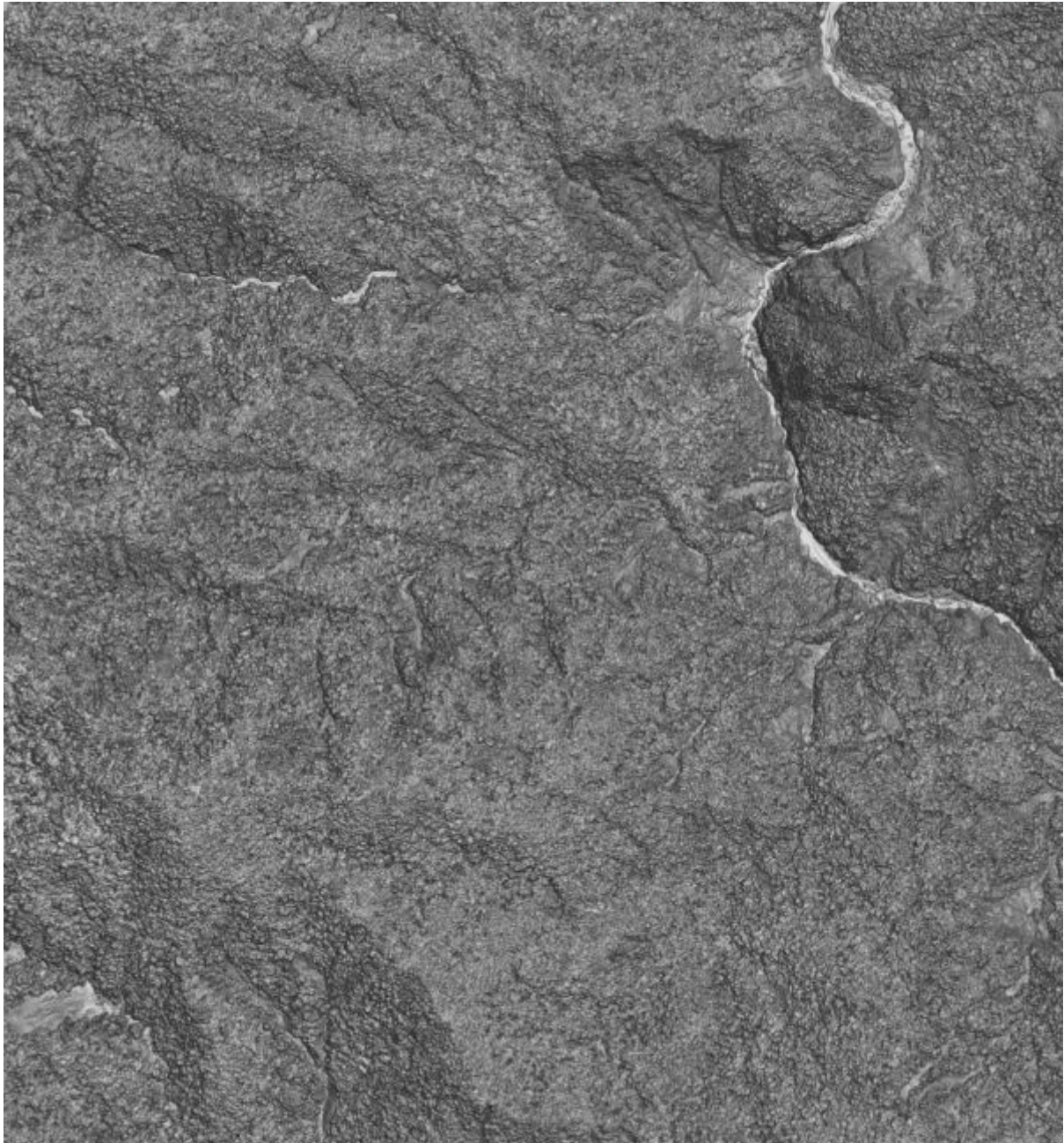


圖 4.36 測區 DEM/DSM 成果圖



(a) DSM 山區成果(95181047)



(b) DEM 山區成果(95181047)



(c) DSM 平地成果(96184084)



(d) DEM 平地成果(96184084)

圖 4.37 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。

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 4.38，DEM 檢核作業分布如圖 4.39。

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。



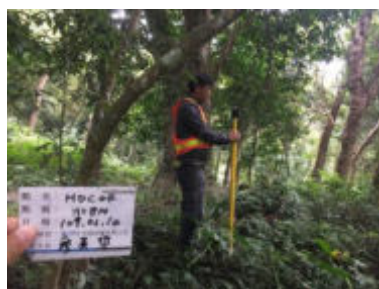
(a) 裸露地



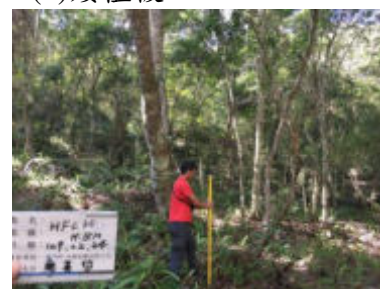
(b) 矮植被



(c) 植生地



(d) 密林



(e) 林地



(f)濕地

(g)都會區

(h)橫斷面

圖 4.38 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 4.39。

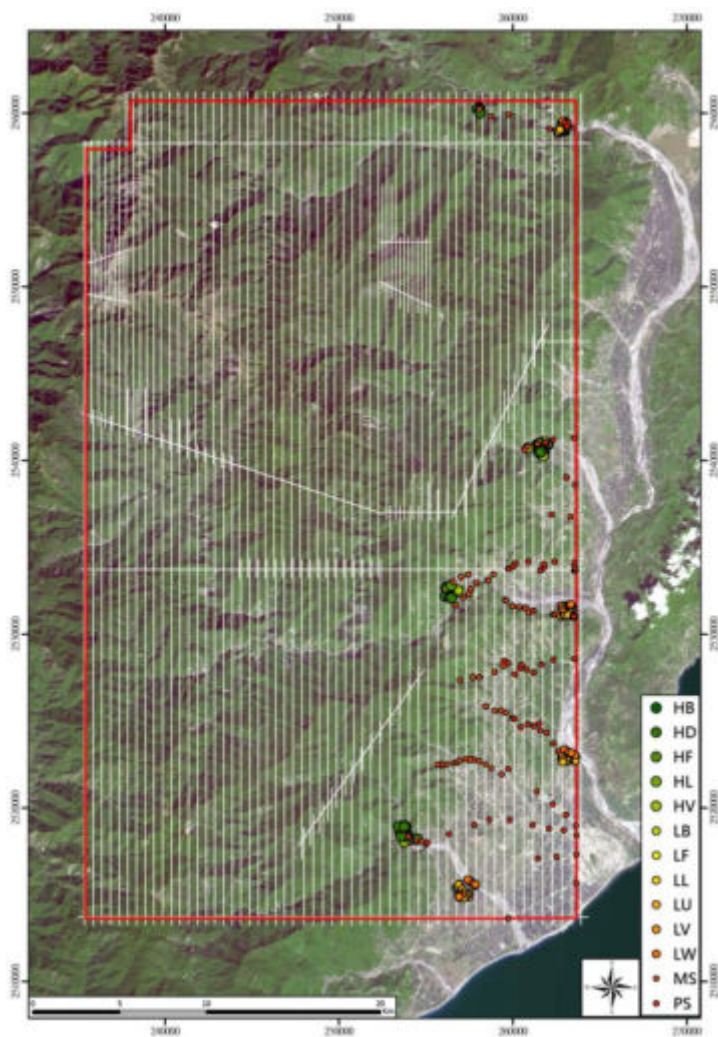


圖 4.39 檢核點分布圖

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	36	0.034	0.085	-0.039	0.040	0.03	0.05
矮植被	35	0.033	0.197	-0.104	0.047	0.05	0.06
植生地	30	0.168	0.479	-0.192	0.182	0.15	0.22
林地	30	0.066	0.441	-0.300	0.117	0.14	0.16
都會區	38	0.035	0.107	-0.049	0.043	0.04	0.05
濕地	31	0.040	0.171	-0.075	0.051	0.05	0.07
橫斷面	72	0.030	0.151	-0.056	0.045	0.05	0.06

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	35	0.036	0.141	-0.065	0.048	0.05	0.06
矮植被	33	0.051	0.134	-0.098	0.065	0.06	0.07
植生地	30	0.028	0.465	-0.283	0.169	0.21	0.21
林地	32	0.088	0.434	-0.382	0.163	0.20	0.21
密林	30	0.050	0.441	-0.413	0.242	0.28	0.28
橫斷面	74	0.054	0.222	-0.117	0.069	0.07	0.09

*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 4.40~圖 4.54 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。於橫斷面部分以橫軸號碼區隔不同條斷面，由序號小至大分別對應自北到南之各橫斷面，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。

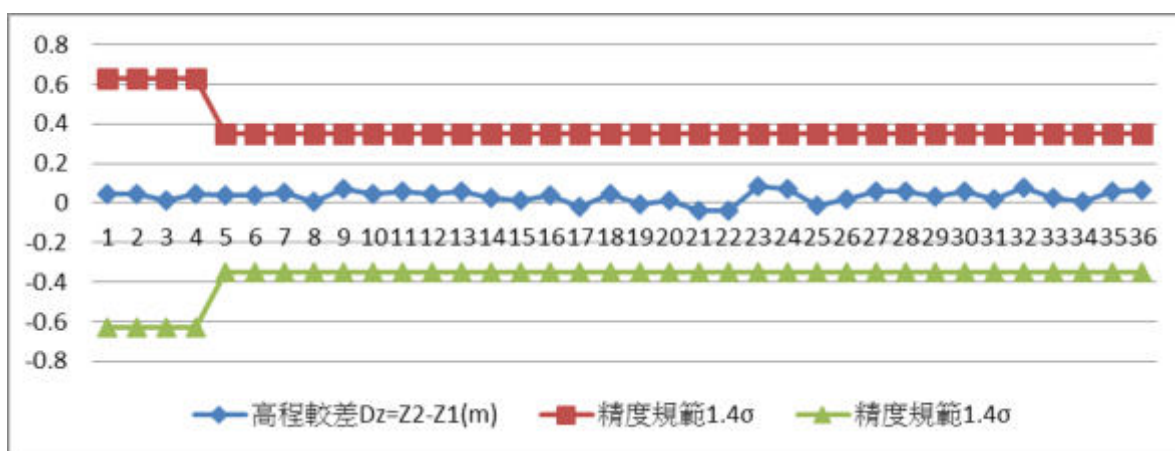


圖 4.40 低海拔之裸露地(B)精度成果圖

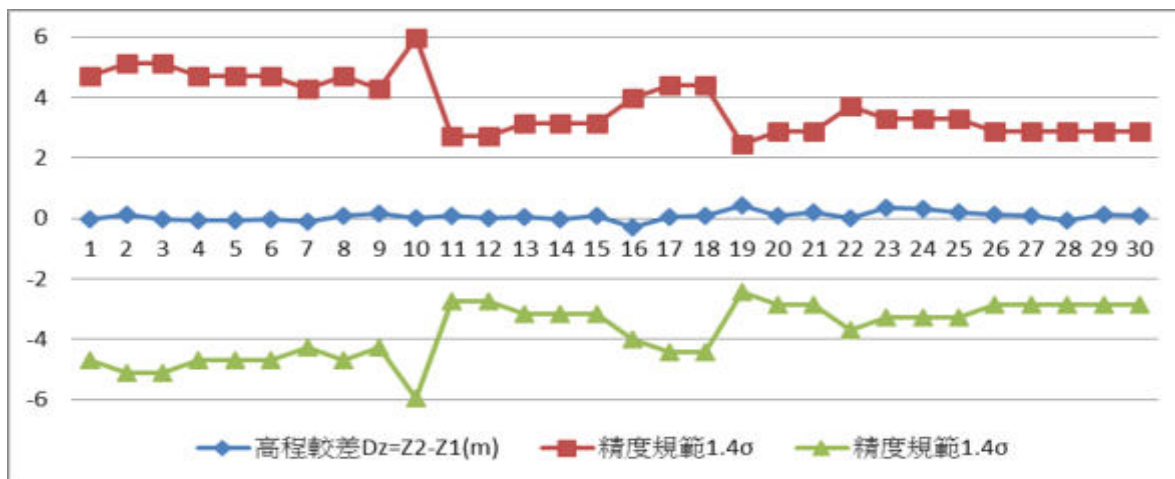


圖 4.41 低海拔之林地(F)精度成果圖

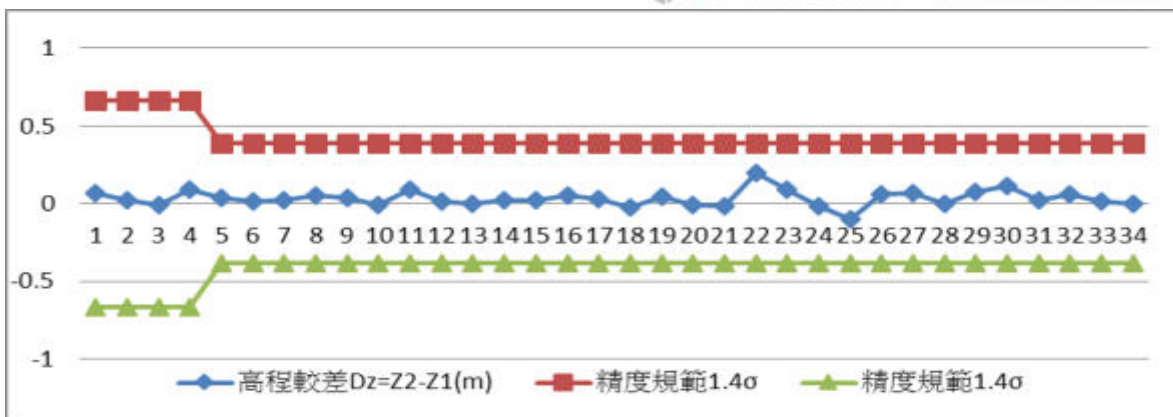


圖 4.42 低海拔之矮植被(L)精度成果圖

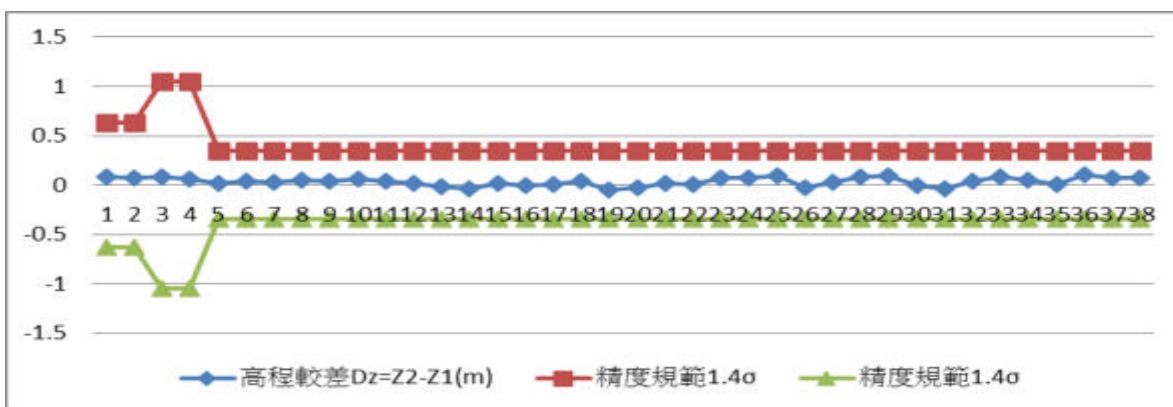


圖 4.43 低海拔之都會區(U)精度成果圖

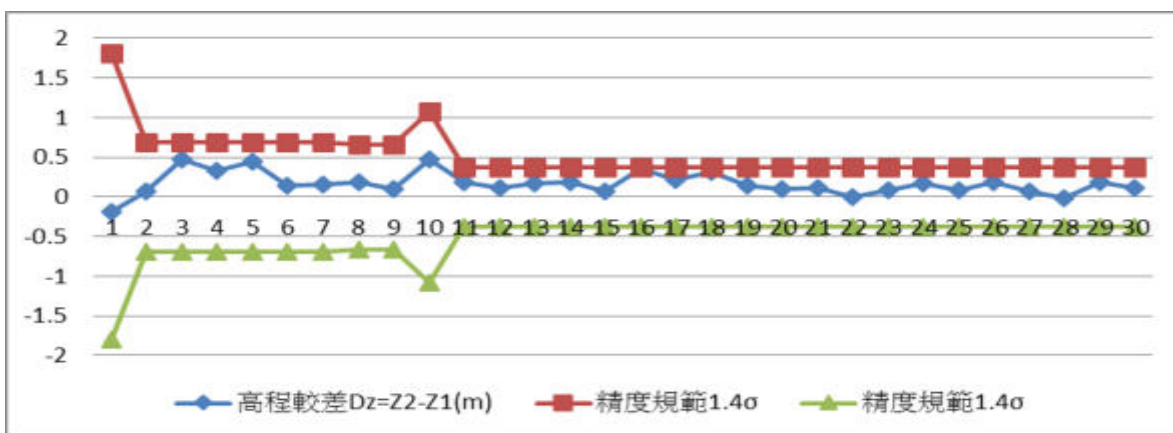


圖 4.44 低海拔之植生地(V)精度成果圖

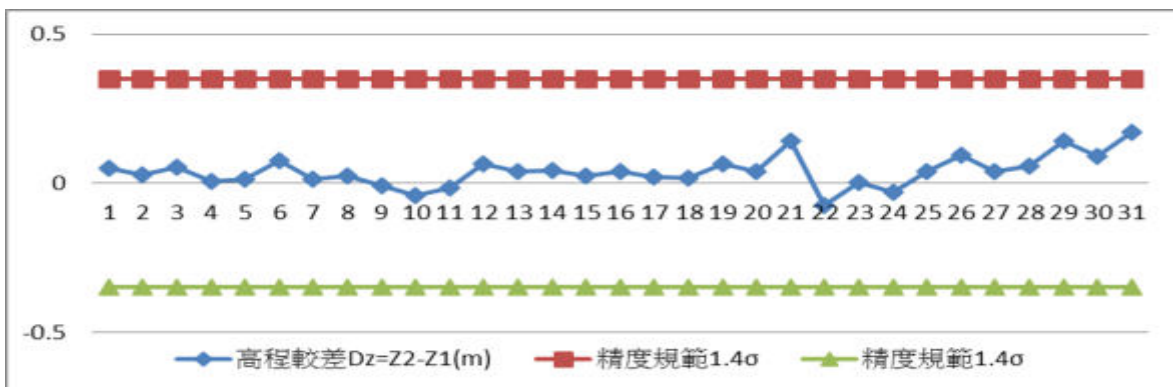


圖 4.45 低海拔之濕地(W)精度成果圖

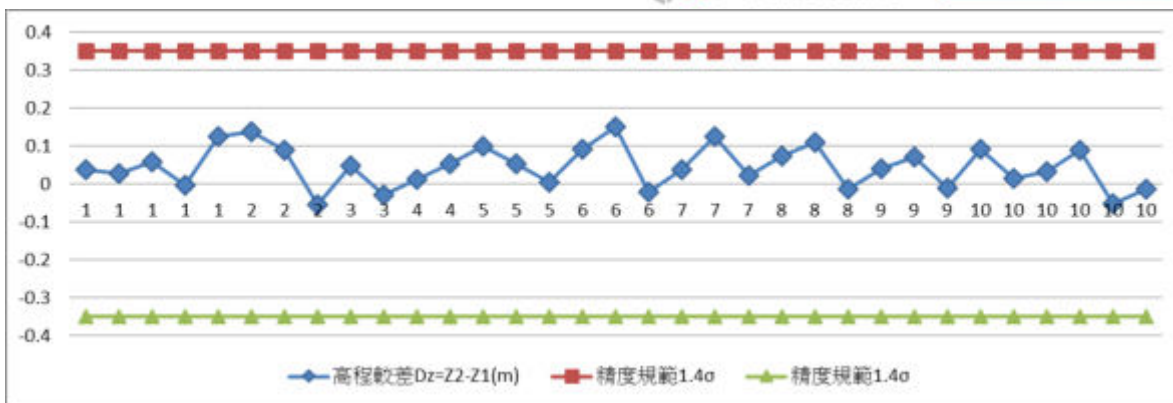


圖 4.46 低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1

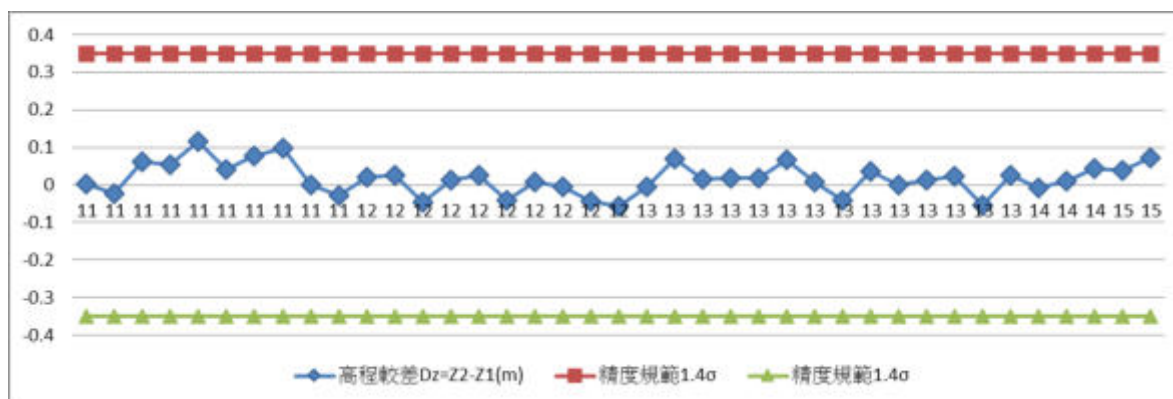


圖 4.47 低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-2

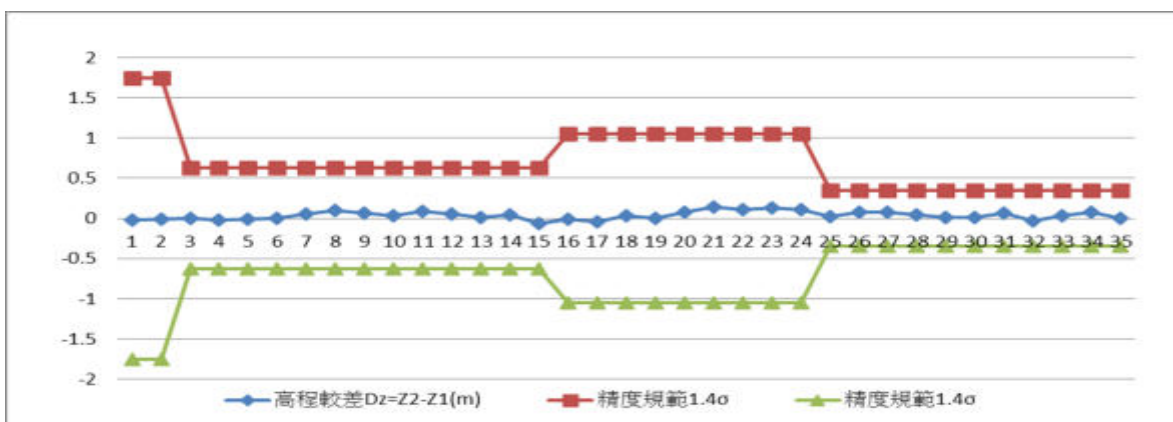


圖 4.48 中高海拔之裸露地(B)精度成果圖

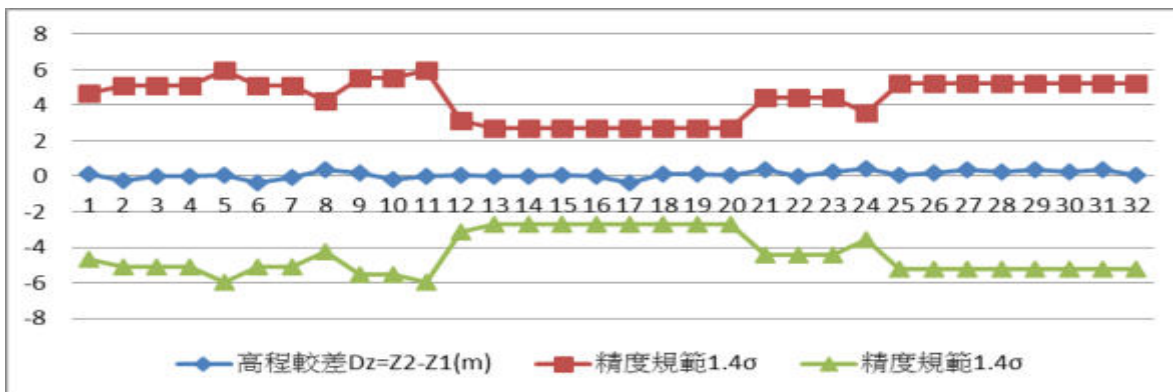


圖 4.49 中高海拔之林地(F)精度成果圖

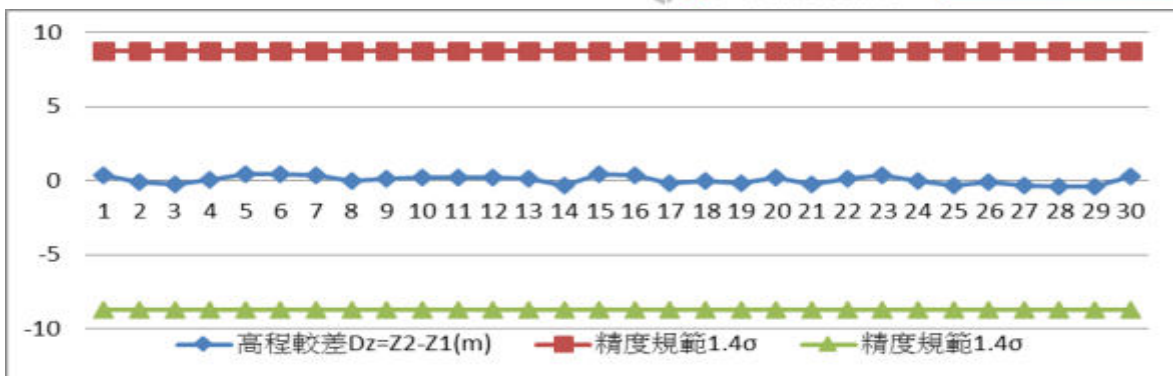


圖 4.50 中高海拔之密林(D)精度成果圖

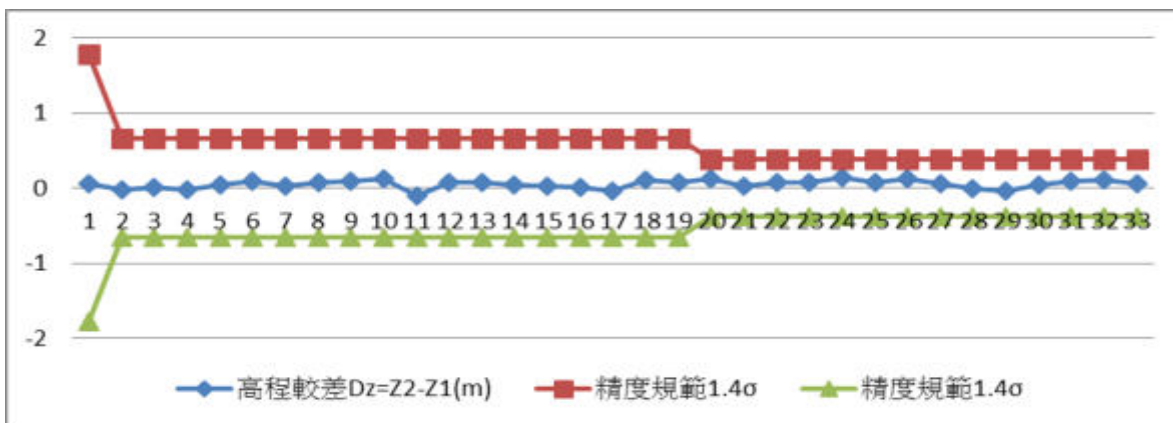


圖 4.51 中高海拔之矮植被(L)精度成果圖

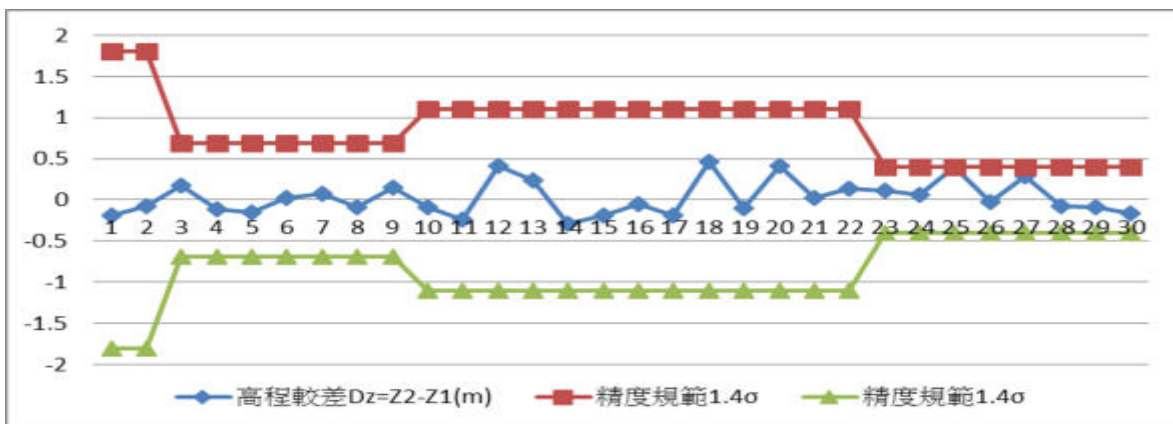


圖 4.52 中高低海拔之植生地(V)精度成果圖

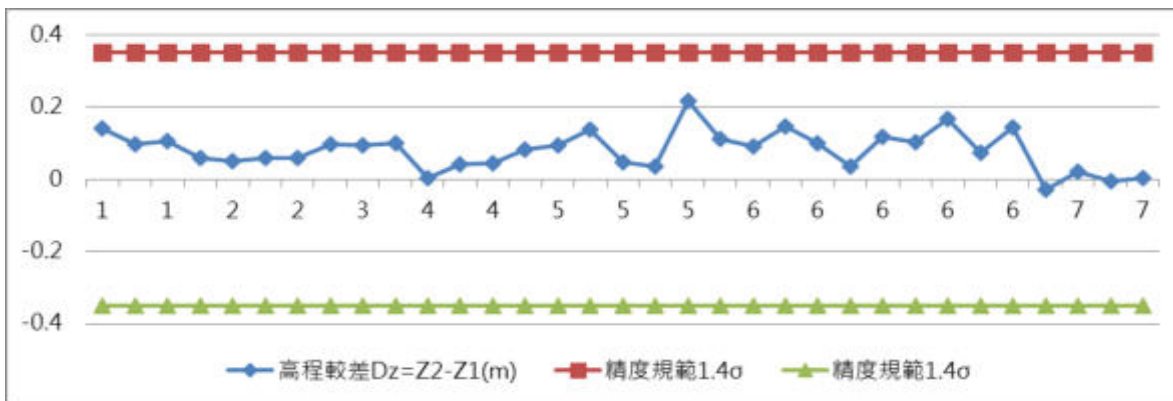


圖 4.53 中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-1

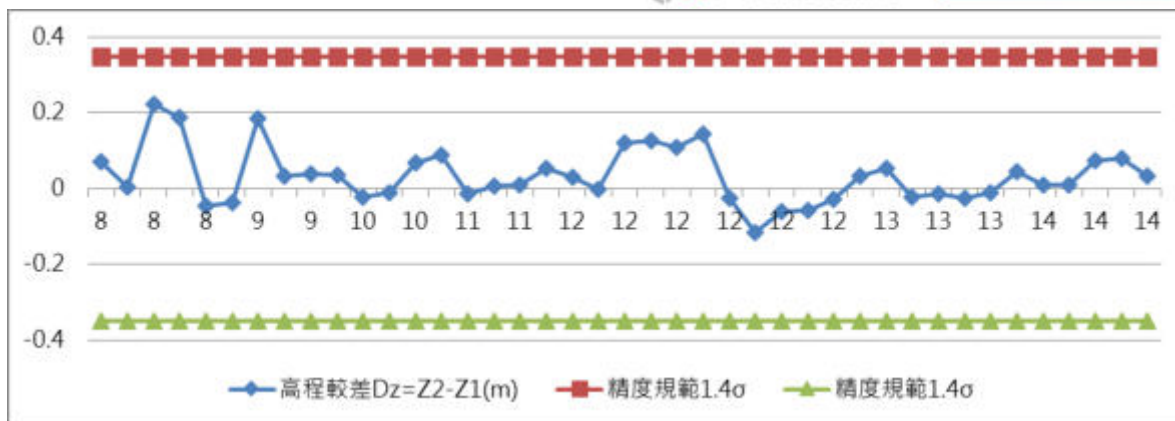


圖 4.54 中高低海拔之橫斷面(S)精度成果圖-2

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 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	0.034	0.043	-0.009
矮植被	0.033	0.023	0.010
植生地	0.168	0.149	0.018
林地	0.066	0.073	-0.007
都會區	0.035	0.039	-0.003
濕地	0.040	0.039	0.001
橫斷面	0.030	0.024	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	0.036	0.029	0.007
矮植被	0.051	0.066	-0.015
植生地	0.028	-0.038	0.066
林地	0.088	0.073	0.015
密林	0.050	0.072	-0.023
橫斷面	0.054	0.048	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

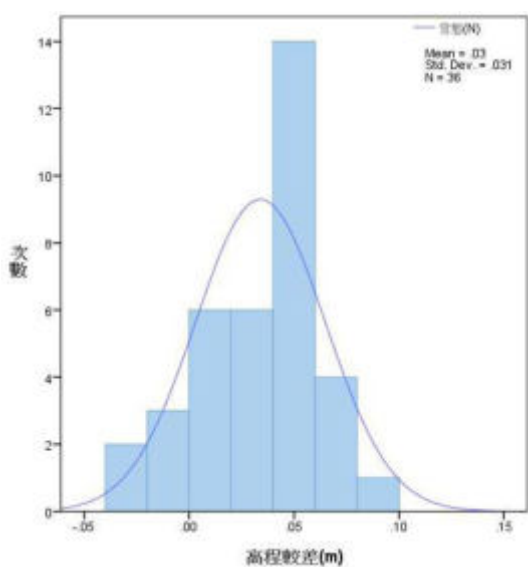
3. 數值精度偏態(Skewness)檢驗

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)。

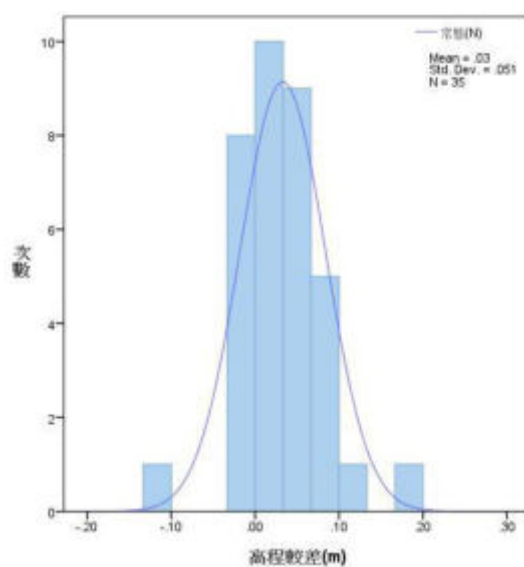
依「內政部 LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)」中，所要檢查之偏態重點為測量誤差是否導致在直方圖上出現嚴重的雙峰圖形。本研究區域偏態檢驗各由高海拔與低海拔之不同土地覆蓋區域組成，其高程較差的數值之偏態如表 4.17，由結果顯示研究區內皆未出現較大偏態現象，且經由了解各種土地覆蓋類型的誤差直方圖(圖 4.55 及圖 4.56)中並未發現有雙峰圖形出現，可知此部分結果亦符合內政部草案所要求合理檢驗範圍內。

表 4.17 檢核點數值精度偏態檢驗表(單位:公尺)

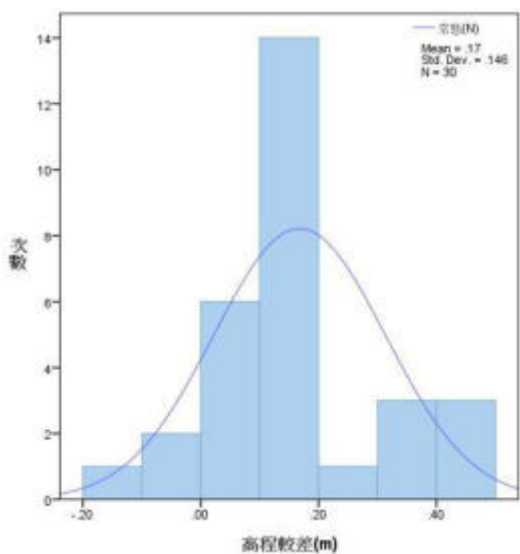
低海拔			中高海拔		
土地覆蓋類型	檢核點數	偏態 (skewness)	土地覆蓋類型	檢核點數	偏態 (skewness)
裸露地	36	-0.687	裸露地	35	0.219
矮植被	35	0.503	矮植被	33	-0.692
植生地	30	0.404	植生地	30	0.693
林地	30	0.351	林地	32	-0.358
都會區	38	-0.248	密林	30	-0.216
濕地	31	0.485	橫斷面	74	0.242
橫斷面	72	0.335			



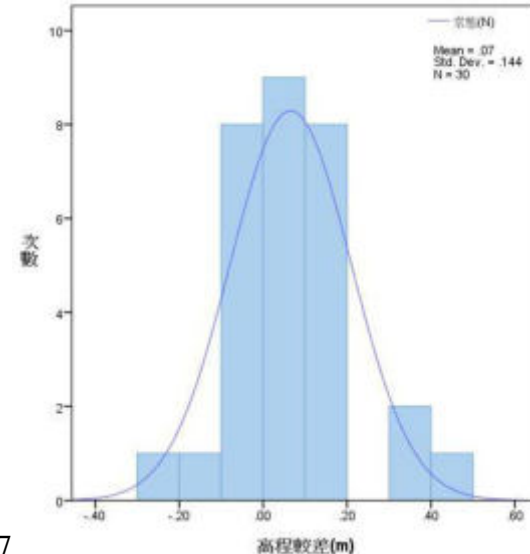
(a) 裸露地



(b) 矮植被

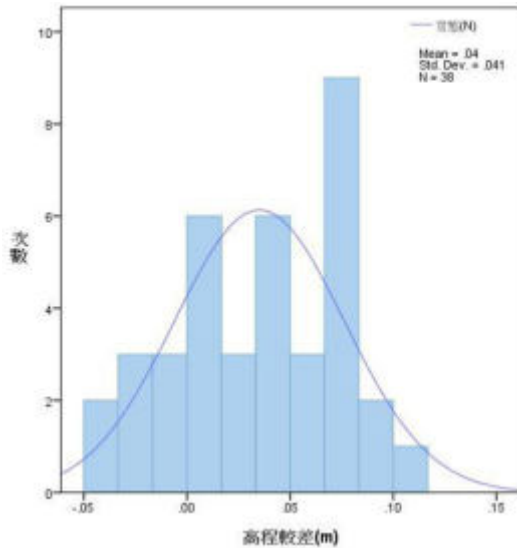


(c) 植生地

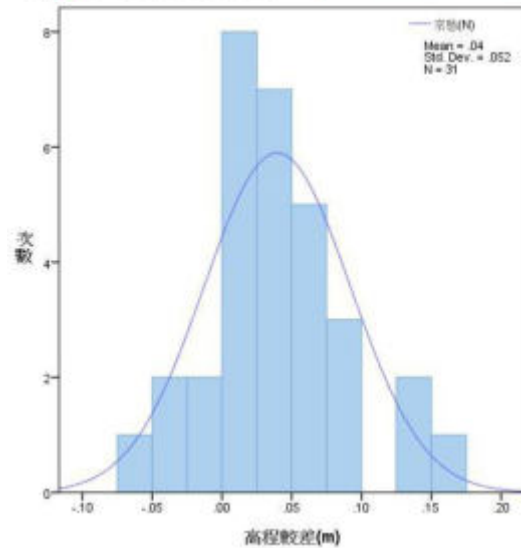


(d) 林地

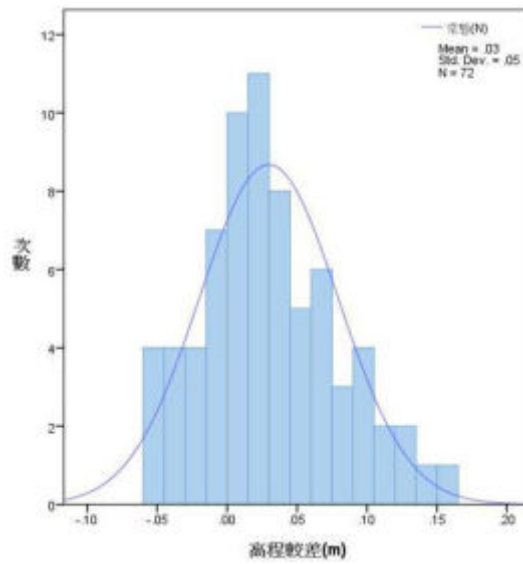
7



(e)都會區

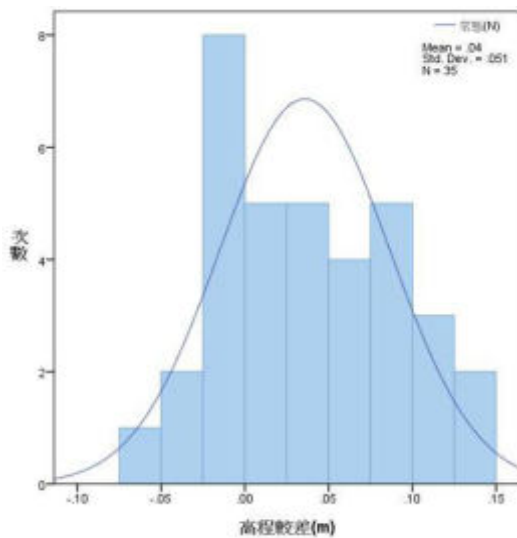


(f)濕地

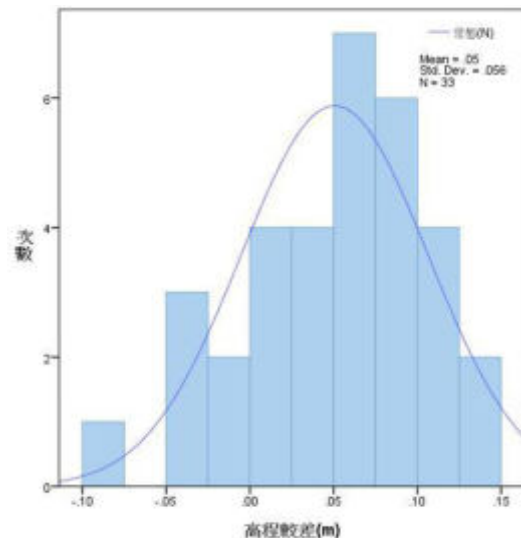


(g)橫斷面

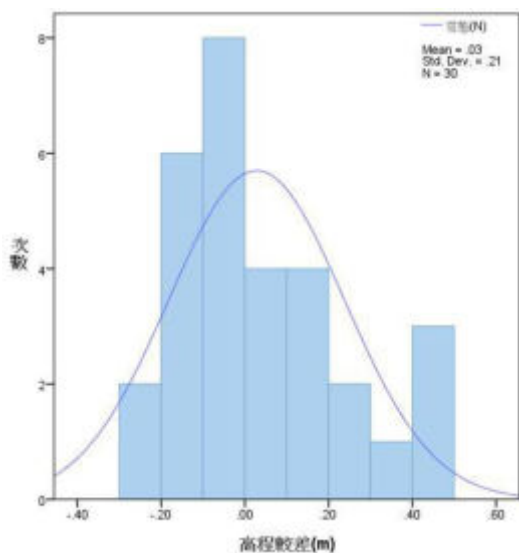
圖 4.55 低海拔測區之各土地覆蓋類型之直方圖(單位:公尺)



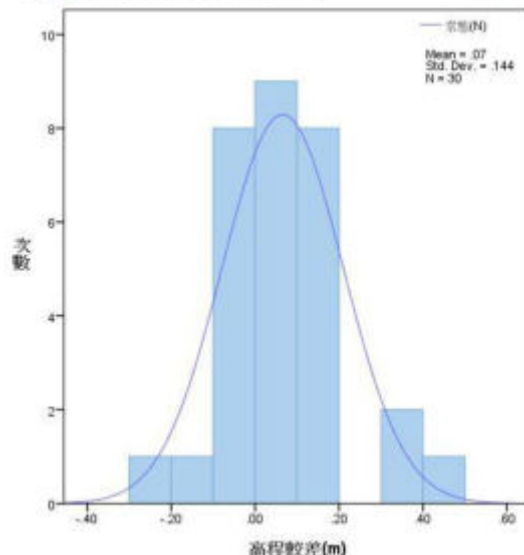
(a)裸露地



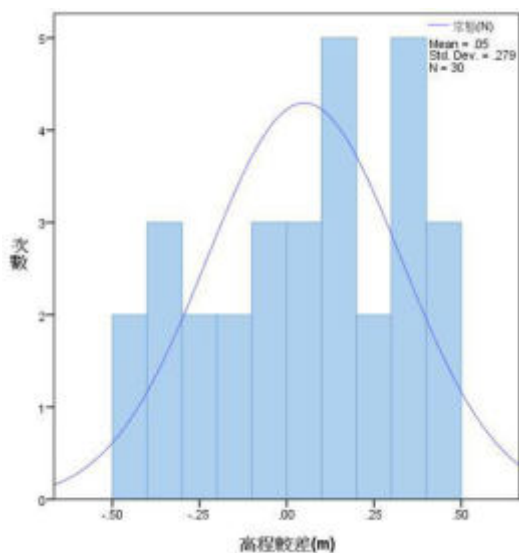
(b)矮植被



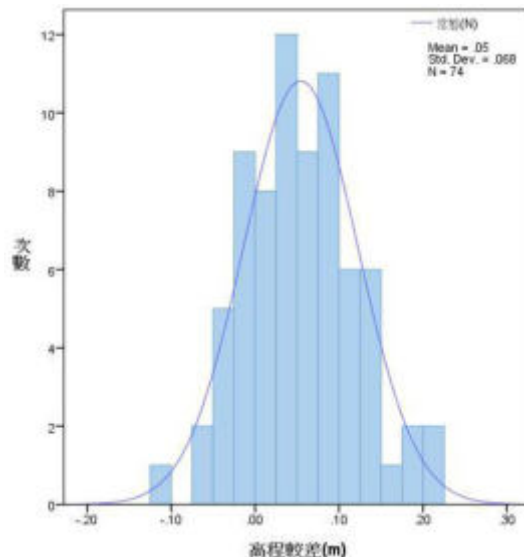
(c)植生地



(d)林地



(e)密林



(f)橫斷面

圖 4.56 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：

$$H_0 : S_D^2 \leq \sigma_D^2$$

$$H_1 : S_D^2 > \sigma_D^2 \quad (\text{式 4.6})$$

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	0.001	0.445	22.465	接受 H_0
矮植被	0.003	0.942	21.664	接受 H_0
植生地	0.023	4.097	17.708	接受 H_0
林地	0.021	0.085	17.708	接受 H_0
都會區	0.001	0.618	24.075	接受 H_0
濕地	0.003	1.264	18.493	接受 H_0
橫斷面	0.002	2.696	52.600	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	0.335	21.664	接受 H_0
矮植被	0.003	0.573	20.072	接受 H_0
植生地	0.044	2.985	17.708	接受 H_0
林地	0.037	0.119	19.281	接受 H_0
密林	0.078	0.058	17.708	接受 H_0
橫斷面	0.005	5.066	54.325	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。

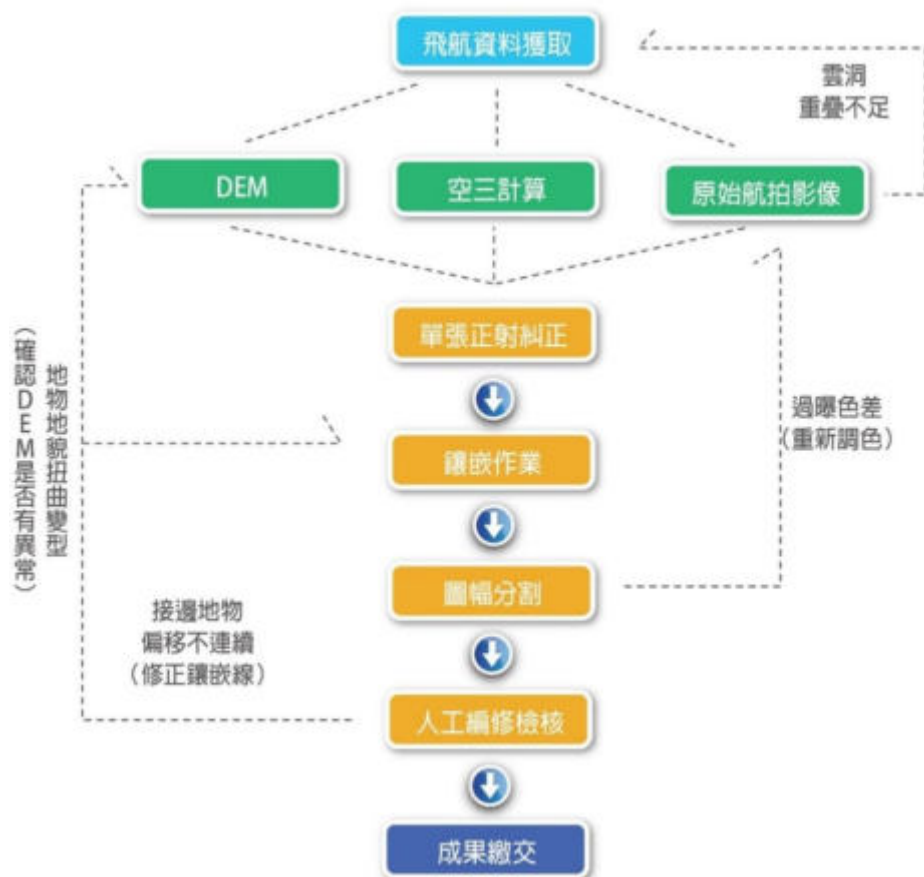


圖 5.1 正射影像製作流程圖

§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 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 27 架次，合計共使用 13,699 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。

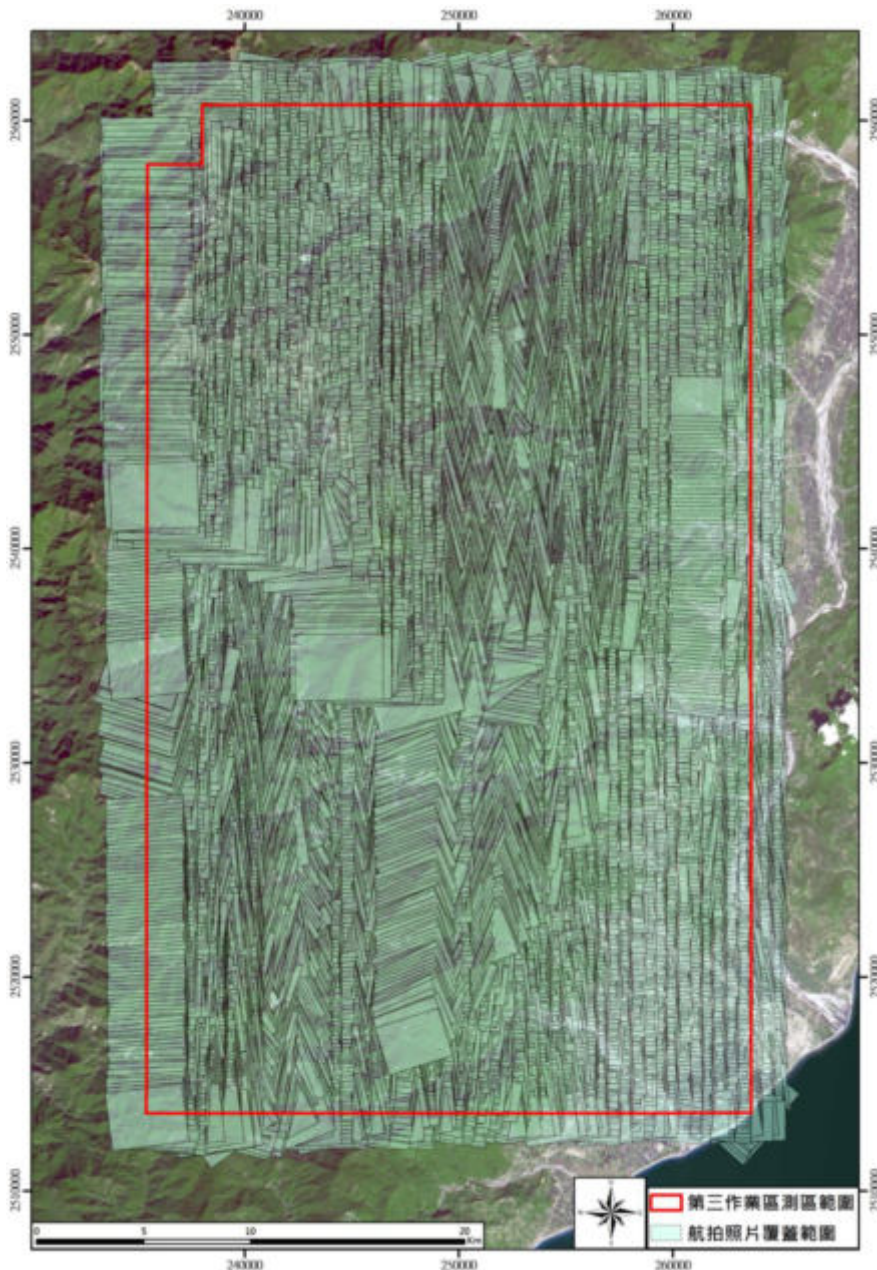


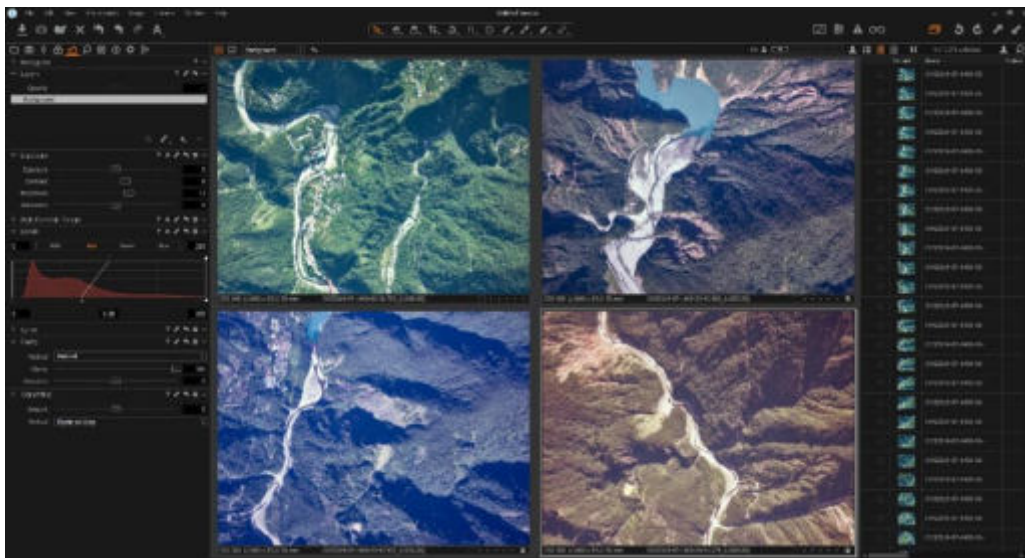
圖 5.2 測區航照涵蓋圖

§5-2 航拍影像處理

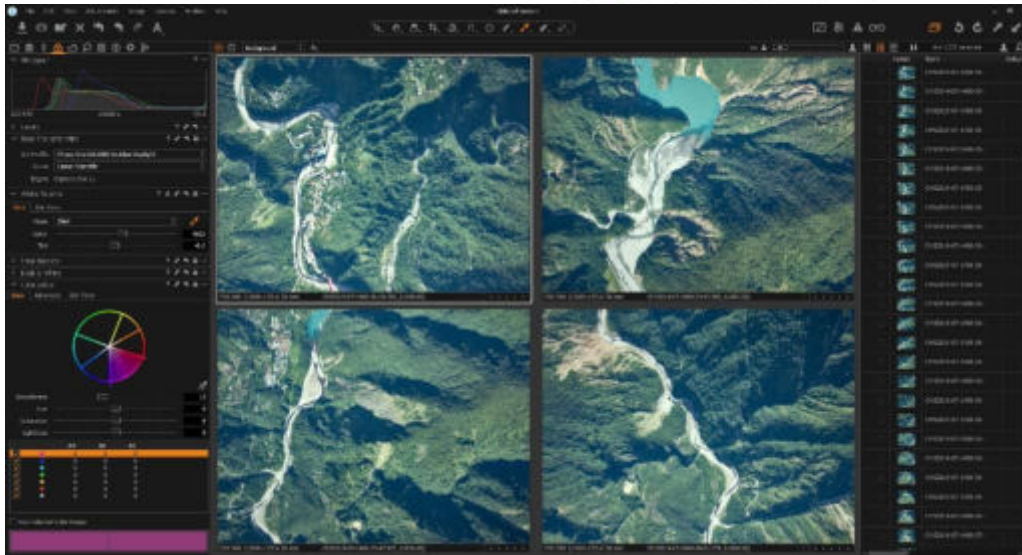
原始影像為壓縮影像檔，透過 PHASE ONE 公司發展之 CaptureOne 軟體進行影像處理，可執行影像轉檔、影像增揚與色調調整等功能，繼而轉出成可見光影像，使正射影像顯示之地物與原本天然色彩一致，並減少不同拍攝時間影像色調不一致的現象。後續以 CaptureOne 軟體及 Photoshop 軟體進行色調處理，供正射影像製作使用，操作示意圖如圖 5.3。同時於此步驟時依監審方提供之樣張調整色調，降低不同測區間色調差異。

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。

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。

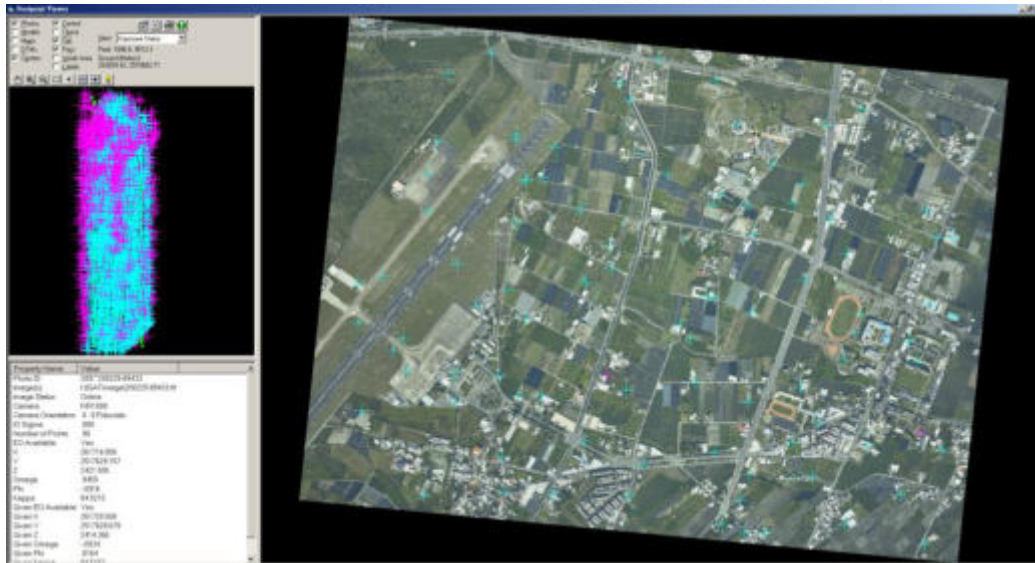


圖 5.4 測區連結點匹配示意圖

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	845	138970	4000	1.9
AT2	1059	179177	4000	2.1
AT3	850	45711	4000	2.1
AT4	1066	58673	4000	2.3
AT5	676	296527	4000	2.5
AT6	779	53710	4000	2.0
AT7	320	16748	4000	2.0
AT8	937	49893	4000	2.2
AT9	805	47829	2400	2.3
AT10	640	40490	2400	2.6
AT11	1018	152986	2400	3.1
AT12	812	53675	4000	2.8
AT13	555	38740	4000	2.6
AT14	558	52750	4000	2.8
AT15	587	36062	4000	2.8
AT16	594	37669	2400	2.5
AT17	826	88336	2400	3.0



圖 5.7 空三分區範圍圖

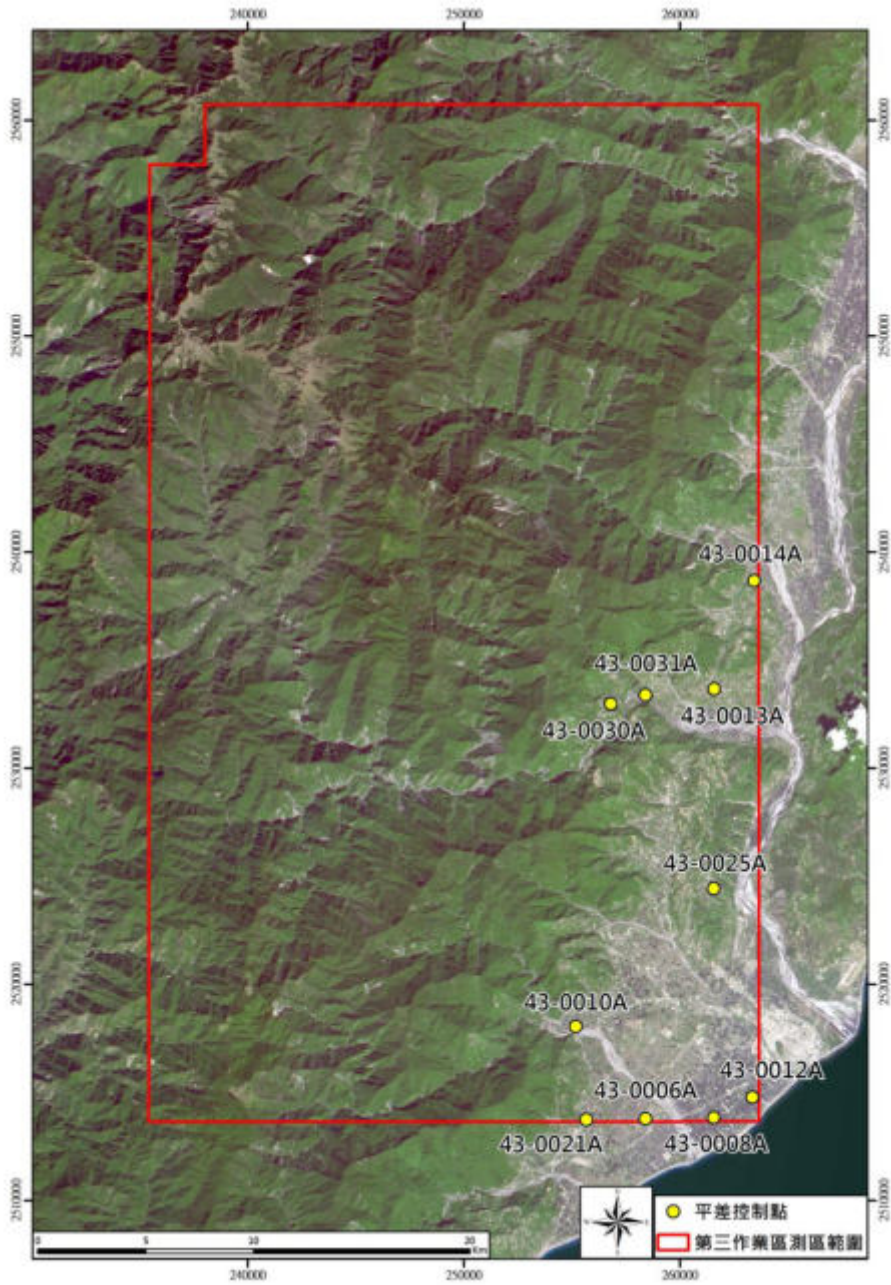
經空三計算影像外方位參數後，以光達資料產製之數值高程模型(DEM)對影像進行正射糾正。糾正成果除了可利用點雲強度值影像，對於明顯之標線進行平面位置比對，確保空三無明顯系統偏差外。亦可藉影像可明顯辨識位置之靜態 GNSS 平差控制點進行精度檢核，經量測後偏差量皆小於 0.40 公尺，檢核示意與抽驗平差控制點分布如圖 5.8。

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			
43-0006A	258415.782	2513772.265	258415.938	2513772.542	-0.156	-0.277	0.233
43-0008A	261581.727	2513824.936	261581.750	2513825.073	-0.023	-0.137	0.042
43-0010A	255190.064	2518052.607	255189.727	2518052.704	0.337	-0.097	0.346
43-0012A	263364.699	2514773.736	263364.812	2514774.100	-0.113	-0.364	0.245
43-0013A	261606.870	2533671.514	261606.671	2533671.684	0.199	-0.170	0.227
43-0014A	263448.870	2538682.489	263448.559	2538682.199	0.311	0.290	0.395
43-0021A	255675.981	2513730.838	255675.912	2513730.482	0.069	0.356	0.196
43-0025A	261581.506	2524443.852	261581.704	2524443.690	-0.198	0.162	0.224
43-0030A	256805.203	2532979.563	256804.887	2532979.353	0.316	0.210	0.360
43-0031A	258408.034	2533403.775	258407.732	2533403.539	0.302	0.236	0.358
平面差量最大值			0.395		平面差量標準偏差		0.106
平面差量最小值			0.042		平面差量均方根差		0.296
平面差量平均值			0.263				



(a) 平差控制點精度檢核示意圖



(b)平面控制點分布

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. 正射影像編修與檢核

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。完成之正射影像如圖 5.13 和圖 5.14 所示，第三作業區共 186 幅 1/5000 正射影像如圖 5.15。

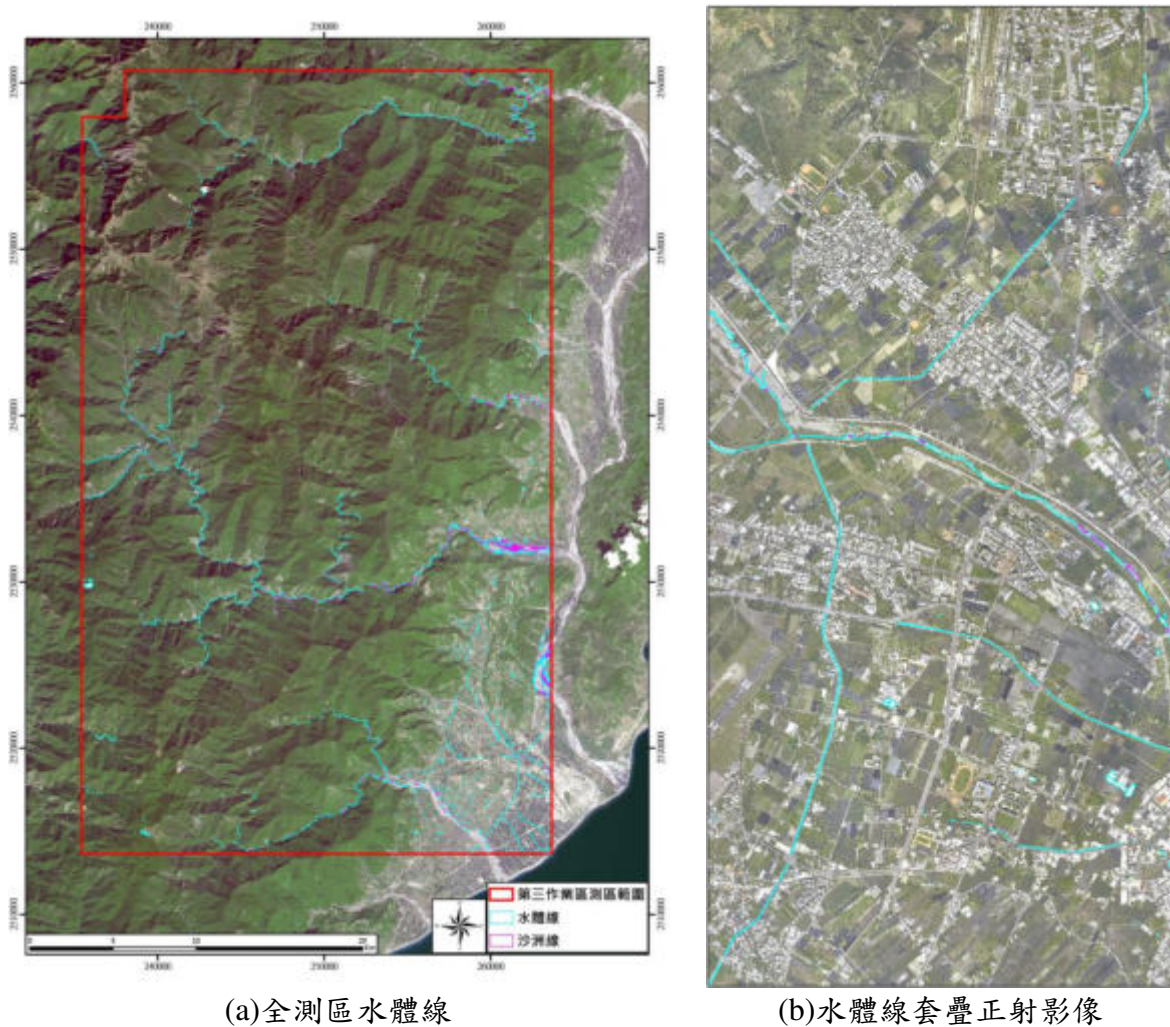


圖 5.10 水體繪製成果



(a)編修前橋梁扭曲

(b)編修後橋梁正常

圖 5.11 數值高程造成扭曲錯移現象示意圖

3. 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。

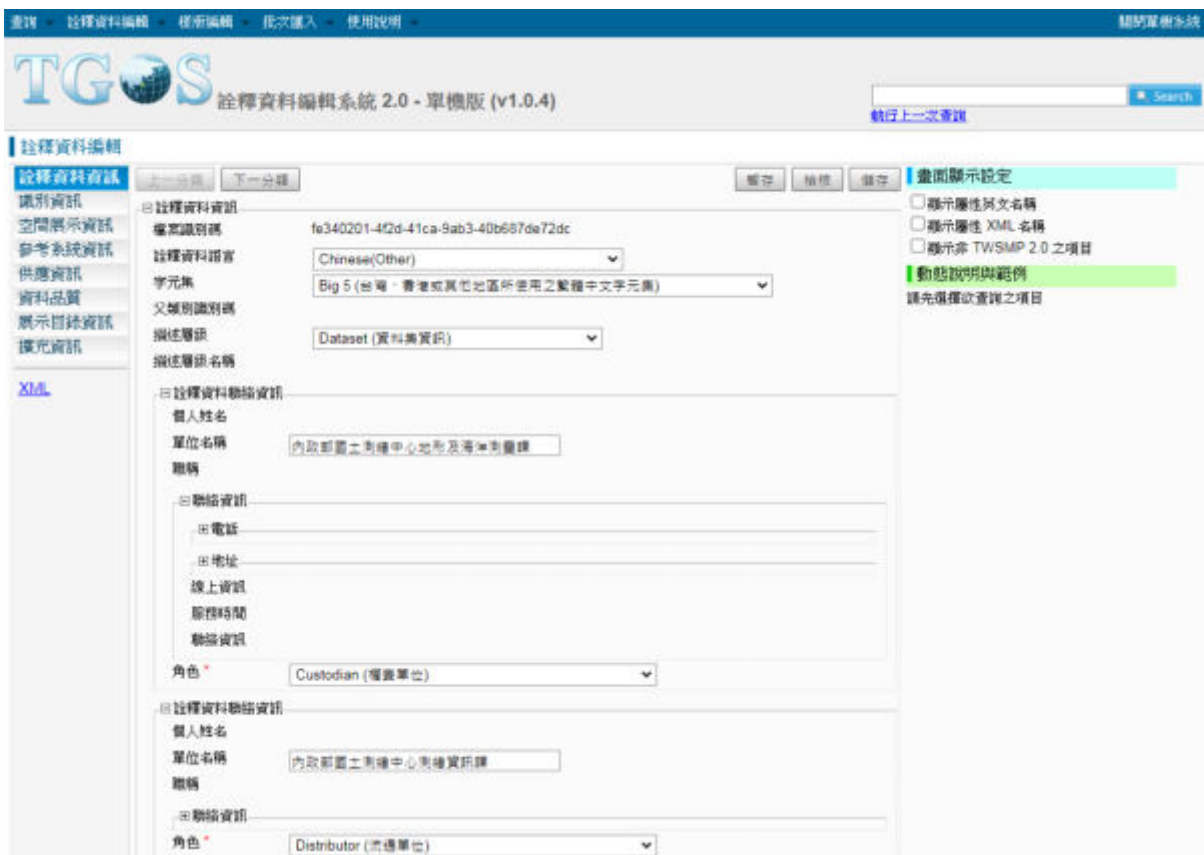


圖 5.12 TGOS 詮釋資料編輯系統 2.0 操作畫面

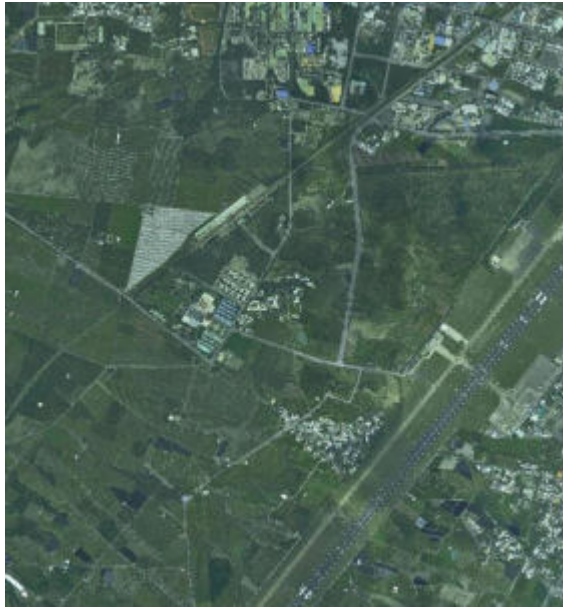


圖 5.13 平地正射影像成果圖

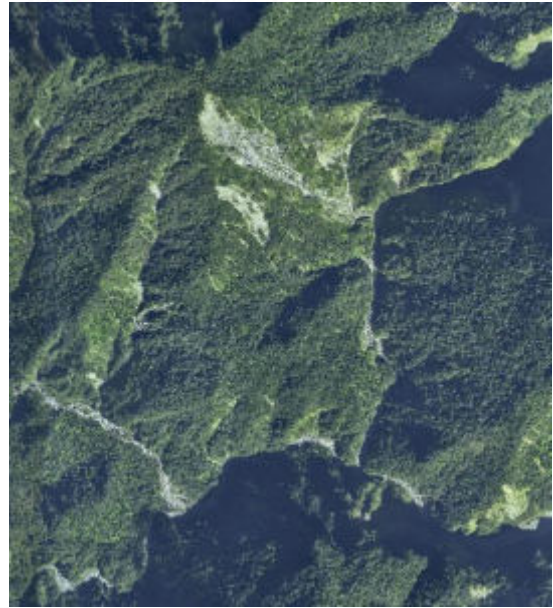


圖 5.14 山區正射影像成果圖

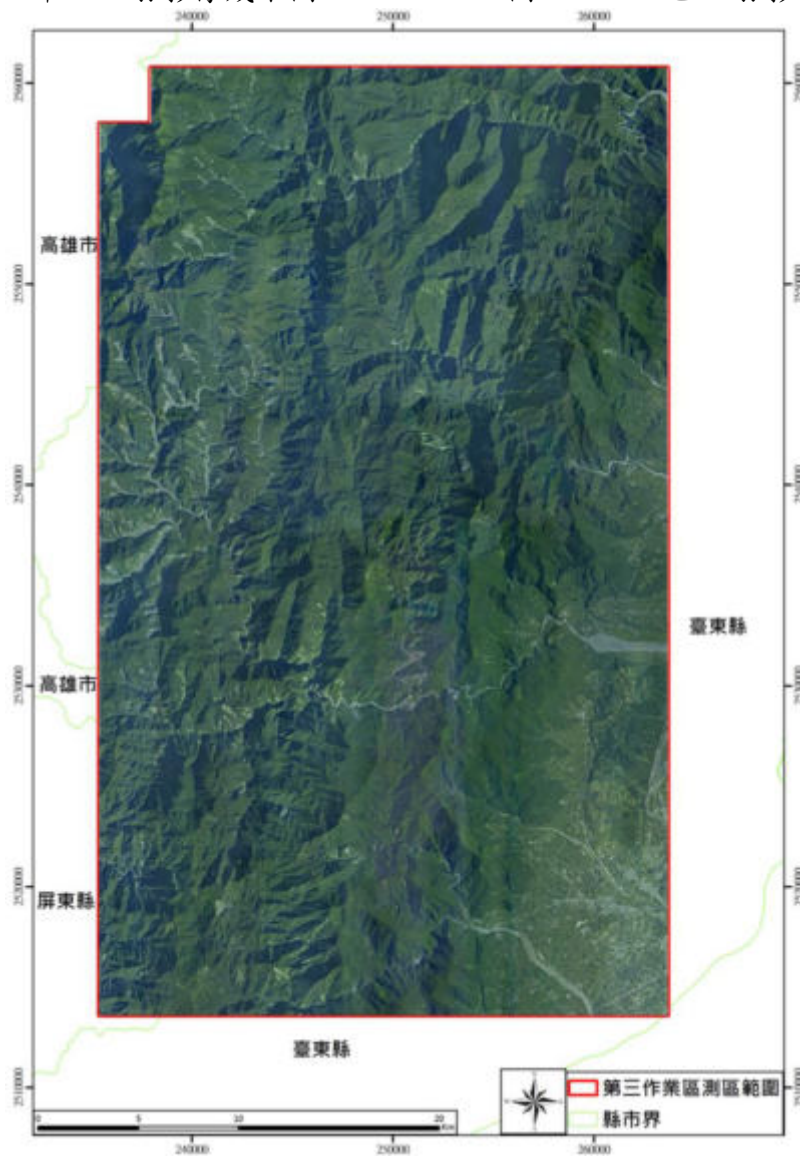
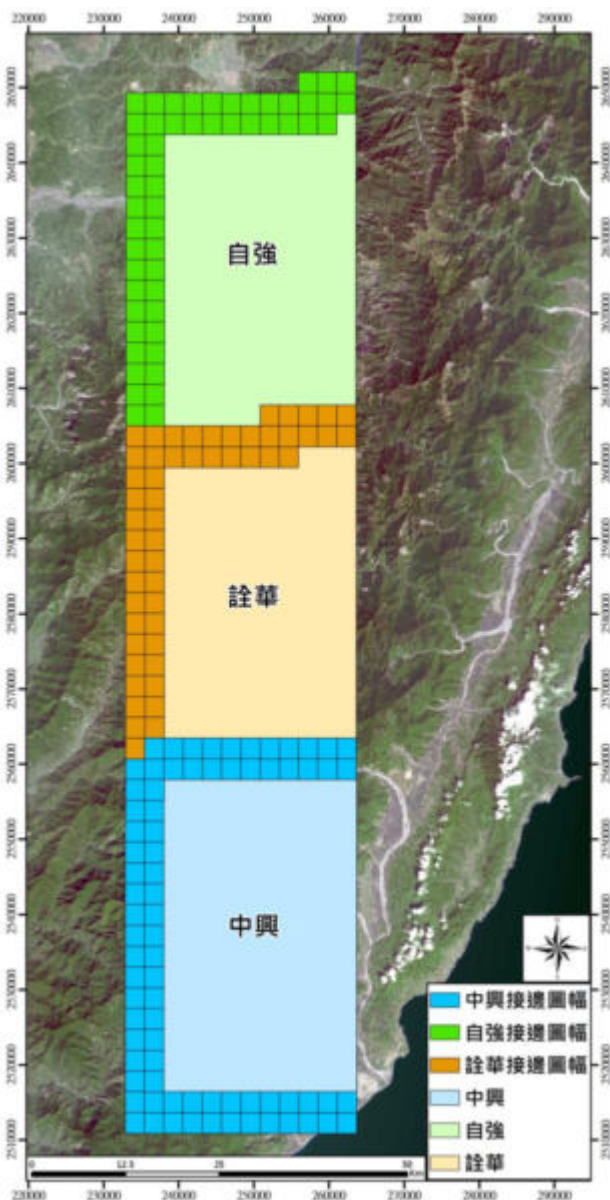


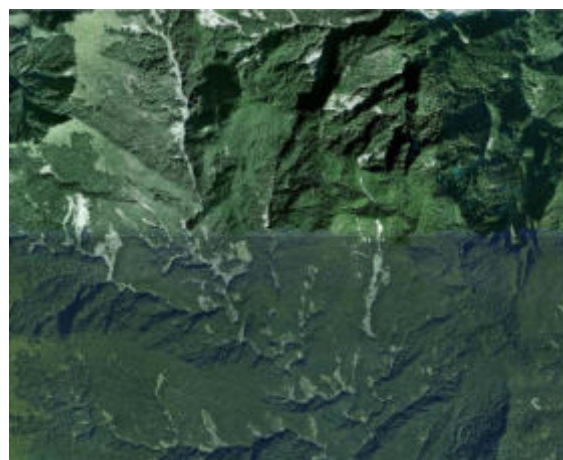
圖 5.15 第三作業區正射影像成果

§5-5 正射影像外部接邊

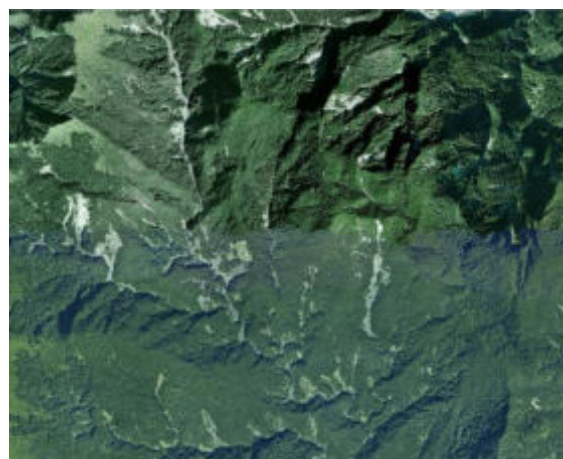
今年度三作業區皆為相鄰，經工作會議討論責任接邊分配，本作業區主要負責與第一作業區及鄰近 107 年既有圖幅成果，共 77 幅之責任接邊，需接邊之圖幅成果包含 DEM、DSM 和正射影像，數值地形網格成果接邊做法參考章節 4-5-3。於各作業區正射影像產製完成，且經監審方判定合格後交換相鄰圖幅予負責廠商。正射影像接邊以保持地形連續為原則調整接邊線，並於色調調整後重新鑲嵌正射影像，接邊示意圖如圖 5.16。



(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 5.16 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	10	\$70,000	\$700,000
2.2	平差控制點選點與測量	人月	7	\$70,000	\$490,000
三	空載雷射掃瞄施測資料獲取	式	27	\$383,000	\$10,341,000
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	48	\$70,000	\$3,360,000
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	18	\$70,000	\$1,260,000
5.2	正射影像製作與水線繪製	人月	21	\$70,000	\$1,470,000
六	圖幅接邊處理	人月	9	\$70,000	\$630,000
七	行政管理費	人月	16	\$120,000	\$1,920,000
				總金額(新台幣)	\$21,046,000

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	13:12	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 8 個基站位置，編號依序為 CH53~CH60，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 29 點；平差平面特徵控制點 18 點及空三測點 148 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 27 架次，飛航涵蓋面積約達 1,320 平方平方公里。共執行約 225 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 13,699 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，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，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。且自 109 年起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仍遠小於監審方建議值，即飛航規劃符合期待，再續執行往後之飛航任務。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，並為使飛航效率最大化採

於測區鄰近之機場進行外場待命，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。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。而近年來物價指數持續上揚，計畫執行成本亦受影響，綜合前述原因，本測區成本分析後作業成本高出契約價金約百萬，供甲方後續參考。

- (4) 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與正射影像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，對點雲分類錯誤案例都會併入教育訓練，定期內部會議討論，並評估編修人員能力確保成果品質。如點雲編修常見之錯誤如地面點過度濾除，致地形表現不足、實心道路與水利設施被濾除、植物與臨時性土堆未濾除等分類錯誤。本計畫則新加入類似雜點之高低點，分類到非地面點類別，本公司將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。正射影像編修方面常見之錯誤如地物扭曲、接邊色差及接邊色差，亦以加強檢核人員內部教育訓練方式降低往後成果產製缺失。
- (5) 第三作業區 108 年度測區以山區為主，109 年測區範圍包含山區與平地，山區和平地計畫執行差異較大之工項為外業飛航和內業編輯，山區飛航天氣較平地難掌握，變化急遽十分容易起雲，因此就近外場待命和提前待命更可把握適合飛航的天氣。而平地則因地物複雜，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，是否為需保留之水利設施或需移除之臨時性土堆等等。

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(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.