



NLSC-109-13

109 年度精進光達測繪車定位 精度委託研究報告

Report on Improving Positioning Accuracy of LiDAR-mounted
Mobile Mapping System (MMS) – 2020

主辦機關：內政部國土測繪中心

National Land Surveying and Mapping Center
(NLSC)

執行單位：國立成功大學

National Cheng Kung University (NCKU)

中華民國 109 年 12 月 15 日

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

109 年度精進光達測繪車定位精度 委託研究報告

受委託單位：國立成功大學

研究主持人：郭重言 教授

協同主持人：江凱偉 教授

研究期程：中華民國 109 年 2 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 140 萬元

內政部國土測繪中心 委託研究

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

摘要

目前移動式製圖系統已被廣泛運用在空間資訊工程領域，特別是產製高精地圖(High Definition Map, HD Map)。藉由高精度的定位定向系統配合各式各樣的製圖感測器，例如光達、相機等，來獲取空間中精確的三維資訊。光達式車載移動測繪系統(簡稱光達測繪車)整合了精密定位定向系統及光達系統等空間資訊蒐集技術，除了製作各種精度地圖外，其他應用領域亦相當廣泛，是獲取空間資訊出色的利器之一。然而測繪車於全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)訊號嚴重遮蔽地區，例如高樓都市地區或隧道處，其定位精度將會大幅降低。為了提升光達測繪車於 GNSS 訊號遮蔽區域之定位精度，本案期以同步定位與製圖技術(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)理論為基礎，結合車載光達觀測量、輪速計及固定標等輔助資訊，研發提高光達測繪車定位精度之技術，進而提升光達測繪車產製成果之品質和增加成果可靠度。本案提出兩種 SLAM 演算法，分別為點基之迭代最近點法(Iterative Closet Point, ICP)與分佈法之常態分布轉換法(Normal Distribution Transform, NDT)，進行不同時刻點雲間之匹配與轉換，並以光達里程計之概念提供速度及航向角觀測量反饋擴增式卡曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF)用於與原有之 INS/GNSS 觀測量整合。

為了分析本案所提方法之效能，於三個不同環境(弱遮蔽透空、半遮蔽及全遮蔽)執行五次實驗。其結果顯示，NDT 演算法比起 ICP 演算法能提供更精確且穩定的速度及航向角觀測量。而從整體定位成果分析中，在空曠的環境中加入 SLAM 的成效不明顯，幾乎沒有任何改善，原因為該場域中 GNSS 較少出現訊號中斷之情況，故使用 INS/GNSS 整合即可達到理想精度。相對來說，在半遮蔽或全遮蔽的環境中加入 SLAM 及輪速計對於定位精度就有顯著的提升。

此外，在本案的測試中，整合 INS/GNSS/Odometer/NDT 具有良好的表現，可有效地降低在 GNSS 接收不良環境的定位誤差，在長時間 GNSS 中斷的環境中，平面及三維定位成果可達到最大 83% 的改善。另外，本案亦使用固定標資訊以達與高精地圖要求相近之精度。最重要的是若使用本案提出的整合架構，固定標佈設密度可由 100 公尺延長至 160 公尺甚至 240 公尺。最後，由本案的成果分析可歸納出，透過不同感測器的組合是增強 MMS 測繪能力的有效方式。

關鍵詞: 移動式製圖系統、SLAM、ICP、NDT、光達里程計、高精地圖

ABSTRACT

Recently, Mobile Mapping Technology (MMT) has been widely applied in the field of geomatics engineering, especially for producing the High Definition Map (HD Map). By combining high-precision Positioning and Orientation Systems (POSs) with multi-mapping sensors such as Light Detection and Ranging (LiDAR), cameras, and others, 3D geospatial information can be then obtained precisely. The LiDAR-mounted Mobile Mapping Systems (MMS), one of the best tools for collecting geospatial information, integrates several technologies, such as POSs and LiDAR systems, which can be used for producing maps with specific accuracy and it is also efficiently exploited in different domain applications. However, the positioning accuracy will significantly decrease in the areas, like urban areas or tunnels, where Global Navigation Satellite System (GNSS) signals are blocked or contaminated by multipath effects. In order to improve the positioning accuracy and ensure the reliability of the LiDAR-mounted MMS in the GNSS-denied areas, this project aims to develop a technique based on Simultaneous Localization And Mapping (SLAM), combining with LiDAR measurements and the additional information from odometer and fixed markers to enhance the performance. In this study, two registration methods of 3D point cloud: point-based method or Iterative Closest Point (ICP) and distribution-based method or Normal Distribution Transform (NDT) will be tested. Further, ICP and NDT-based LiDAR Odometry (LO) techniques have been introduced and developed by aiming to perform and feed the LO-derived velocity and heading measurement update into Extended Kalman Filter (EKF) model of INS/GNSS.

To analyze the performance of the proposed methodology, five experiments with three main different environments (i.e. open sky, semi open sky and GNSS-

denied environment) are conducted. The obtained results show that NDT algorithm can provide more an accurate velocity-derived and heading measurements and more stable than using ICP algorithm for all five field tests. For navigation solution, the statistic shows that in open sky environment, there are no improvement in position and attitude components from the INS/GNSS/NDT compared with INS/GNSS. Because there is few signal blocking, therefore, INS/GNSS can perform to reach its best accuracy. In contrast with GNSS-denied scenes, there are significant improvement in position and attitude components (especially in vertical and heading, respectively) from the INS/GNSS/NDT compared with INS/GNSS.

Furthermore, the integration of INS/GNSS/Odometer/NDT can have a good performance and decrease the RMSE in 2D and 3D position with maximum 83% improvement in long GNSS outage environment. Moreover, this project also utilizes fixed marker information to achieve the accuracy close to that HD map requires. The bottom line is that the results shows the desity of the fixed markers can be reduced from 100 m to 160 m or 240 m if the integration of INS/GNSS/Odmeter is used. Finally, we can summarize for this project that combination of different sensors is an effective way for enhancing the capability of the MMS.

Keywords: Mobile Mapping System, Simultaneous Localization And Mapping, Iterative Closest Point, Normal Distribution Transform, LiDAR Odometry, HD map

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	XII
第一章 研究主旨.....	1
1.1 計畫名稱.....	1
1.2 研究背景.....	1
1.3 計畫目標.....	1
1.4 計畫重要性.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 移動製圖定位及定向系統技術發展.....	4
2.2 光達直接地理定位.....	8
2.3 同步定位與製圖技術(SLAM).....	14
2.3.1 點基法.....	17
2.3.2 特徵法.....	18
2.3.3 分佈法.....	19
2.4 研究採用方法之原因.....	21

第三章 研究過程.....	23
3.1 研究架構.....	23
3.2 移動製圖定位定向開發.....	26
3.2.1 坐標系統簡介.....	26
3.2.2 坐標轉換.....	29
3.2.3 INS 導航方程式.....	30
3.2.4 慣性導航整合衛星定位開發.....	36
3.2.5 輔助約制條件整合架構.....	39
3.2.6 移動定位定向程式開發.....	41
3.3 光達直接地理定位開發.....	44
3.3.1 光達系統介紹.....	44
3.3.2 光達直接地理定位演算法開發.....	47
3.3.3 規劃光達直接地理定位率定.....	49
3.3.4 VLP-16 光達率定成果.....	51
3.4 同步定位與製圖技術開發.....	55
3.4.1 迭代最近點法(ICP).....	56
3.4.2 常態分布變換(NDT).....	57
3.5 固定標設計與測試.....	58
3.5.1 固定標材質、顏色需求.....	58

3.5.2 固定標設計與製作.....	60
3.5.3 固定標掃描成果.....	61
第四章 成果驗證.....	63
4.1 驗證場域與實驗設計.....	63
4.2 SLAM 成果驗證.....	68
4.3 研發總成果驗證.....	79
第五章 研究結論.....	109
附錄一 期中報告審查意見及處理情形.....	114
附錄二 研究報告審查意見及處理情形.....	120
參考文獻.....	126

表目錄

表 2.1 相關文獻率定參數比較表.....	13
表 3.1 IMU 規格比較.....	25
表 3.2 建議慣性測量元件等級規格與配合地面控制點輔助密度.....	26
表 3.3 正常重力的常數係數.....	31
表 3.4 GNSS、INS 及 INS/GNSS 整合之特色比較.....	36
表 3.5 VLP-16 規格.....	45
表 3.6 花園夜市率定成果-固定臂與軸角參數比較.....	52
表 3.7 花園夜市率定成果-平面閉合精度.....	52
表 3.8 港灣技術研究中心率定成果-固定臂與軸角參數比較.....	53
表 3.9 港灣技術研究中心率定成果-平面閉合精度.....	53
表 3.10 不同材質之固定標之比較.....	58
表 3.11 實驗車速與標心量測誤差範圍.....	62
表 4.1 各驗證場域環境描述.....	66
表 4.2 國土測繪中心 FSAS IMU 飄移測試.....	66
表 4.3 1006A—LDAR-SLAM 誤差分析.....	68
表 4.4 1006B—LDAR-SLAM 誤差分析.....	71
表 4.5 1007A—LDAR-SLAM 誤差分析.....	73
表 4.6 1007A—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 1).....	74

表 4.7 1007A—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 3).....	74
表 4.8 1007A—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 5).....	75
表 4.9 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析.....	75
表 4.10 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 1).....	77
表 4.11 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 3).....	77
表 4.12 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 5).....	77
表 4.13 1007C—LDAR-SLAM 誤差分析.....	78
表 4.14 各組實驗 GNSS 中斷情形	80
表 4.15 1006A-整體定位誤差統計資訊	81
表 4.16 1006A-整體姿態誤差統計資訊	81
表 4.17 1006A-定位誤差統計資訊(V=30 km/hr).....	82
表 4.18 1006A-定位誤差統計資訊(V=40 km/hr).....	82
表 4.19 1006A-姿態誤差統計資訊(V=30 km/hr).....	83
表 4.20 1006A-姿態誤差統計資訊(V=40 km/hr).....	83
表 4.21 1006B-總體定位誤差統計資訊.....	84
表 4.22 1006B-總體姿態誤差統計資訊.....	84
表 4.23 1006B-定位誤差統計資訊(V=30 km/hr).....	85
表 4.24 1006B-定位誤差統計資訊(V=40 km/hr).....	85
表 4.25 1006B-姿態誤差統計資訊(V=30 km/hr).....	86

表 4.26 1006B-姿態誤差統計資訊(V=40 km/hr).....	86
表 4.27 1007A 總體定位誤差統計資訊.....	87
表 4.28 1007A 總體姿態誤差統計資訊.....	87
表 4.29 1007A 定位誤差統計資訊(內線道:路線 1).....	88
表 4.30 1007A 定位誤差統計資訊(內線道:路線 3).....	88
表 4.31 1007A 定位誤差統計資訊(內線道:路線 5).....	89
表 4.32 1007A 定位誤差統計資訊(外線道:路線 2).....	89
表 4.33 1007A 定位誤差統計資訊(外線道:路線 4).....	90
表 4.34 1007A 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 1).....	90
表 4.35 1007A 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 3).....	90
表 4.36 1007A 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 5).....	91
表 4.37 1007A 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 2).....	91
表 4.38 1007A 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 4).....	91
表 4.39 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 1).....	92
表 4.40 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 3).....	93
表 4.41 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 5).....	93
表 4.42 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 4).....	94
表 4.43 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 2).....	94
表 4.44 1007A 不同布設密度之固定標定位誤差統計資訊(內線道:路線 2)...	95

表 4.45 1007B 總體定位誤差統計資訊.....	96
表 4.46 1007B 總體姿態誤差統計資訊.....	96
表 4.47 1007B 定位誤差統計資訊(內線道:路線 1).....	97
表 4.48 1007B 定位誤差統計資訊(內線道:路線 3).....	97
表 4.49 1007B 定位誤差統計資訊(內線道:路線 5).....	98
表 4.50 1007B 定位誤差統計資訊(外線道:路線 2).....	98
表 4.51 1007B 定位誤差統計資訊(外線道:路線 4).....	99
表 4.52 1007B 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 1).....	99
表 4.53 1007B 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 3).....	99
表 4.54 1007B 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 5).....	100
表 4.55 1007B 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 2).....	100
表 4.56 1007B 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 4).....	100
表 4.57 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 1).....	102
表 4.58 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 3).....	102
表 4.59 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 5).....	103
表 4.60 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 4).....	103
表 4.61 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 2).....	104
表 4.62 1007B 不同布設密度之固定標定位誤差統計資訊(內線道:路線 2).104	
表 4.63 1007C 總體定位誤差統計資訊.....	105

表 4.64 1007C 總體姿態誤差統計資訊.....	105
表 5.1 建議技術可推廣之產官學研單位.....	113

圖目錄

圖 1.1 移動遙測製圖系統可拓展應用之領域.....	3
圖 2.1 (左)傳統 EKF/平滑器之鬆耦合架構；(右)無 GNSS 觀測量更新環境之 誤差行為.....	5
圖 2.2 INS/GNSS 開放式(上)與閉合式迴路(下).....	7
圖 2.3 直接地理定位演算法.....	8
圖 2.4 空載光達直接地理定位示意圖.....	9
圖 2.5 軸角誤差於空載光達直接地理定位影響量.....	10
圖 2.6 固定臂誤差於空載光達直接地理定位影響量.....	11
圖 2.7 距離與角度觀測誤差於空載光達直接地理定位影響量.....	11
圖 2.8 距離與角度觀測誤差於移動雷射掃描系統直接地理定位影響.....	12
圖 2.9 機器人製圖演算法地圖展示.....	15
圖 2.10 LOAM 演算法流程圖.....	16
圖 2.11 迭代最近點演算法。(a)點對點；(b)點對面；(c) GICP.....	17
圖 2.12 迭代最近點演算法流程圖.....	17
圖 2.13 ICP 點雲相對位移量預測。(上)點對點轉換(下)點對面轉換.....	18
圖 2.14 LOAM 演算法特徵點萃取示意圖.....	19
圖 2.15 LOAM 演算法 LiDAR 里程計與 LiDAR 製圖整合示意圖.....	19
圖 2.16 2D 常態分佈變換匹配流程圖.....	20

圖 2.17 二維與三維高斯地圖於常態分佈變換匹配	20
圖 2.18 匹配方式比較示意圖.....	21
圖 3.1 本案研究流程圖.....	24
圖 3.2 整合各演算法架構圖.....	25
圖 3.3 慣性坐標系統(i-frame)	26
圖 3.4 地心地固坐標系統(e-frame).....	27
圖 3.5 區域地平坐標系統(l-frame)	28
圖 3.6 載體坐標系統.....	28
圖 3.7 區域地平坐標系統的導航方程式.....	35
圖 3.8 鬆耦合 INS/GNSS 整合架構.....	39
圖 3.9 NHC 與 ZUPT 的假設條件	40
圖 3.10 AINS 介面說明。(左) INS/GNSS 資料讀取；(右) 動態約制介面 ...	41
圖 3.11 AINS 介面說明。(左)初始對準；(右)INS 誤差模型參數.....	41
圖 3.12 新增 NLSC 格式.....	42
圖 3.13 使用國土測繪中心資料進行解算之成果	42
圖 3.14 測繪中心輪速計資料(紅色)與參考解速度(綠色)比較	43
圖 3.15 輪速計偵錯系統.....	43
圖 3.16 VLP-16 主體設計圖.....	44
圖 3.17 VLP-16 硬體配置.....	46

圖 3.18 VLP-16 原始資料解算示意圖	46
圖 3.19 傳統攝影測量直接定位原理	47
圖 3.20 光達直接定位原理	48
圖 3.21 (左) 花園夜市光達率定所使用平面與軌跡；(右) 花園夜市光達率定 迭代收斂圖	52
圖 3.22 花園夜市光達率定平面閉合差圖(左)率定前(右)率定後	53
圖 3.23 (左)港灣技術研究中心光達率定所使用平面與軌跡；(右)港灣技術研 究中心光達率定迭帶收斂圖	54
圖 3.24 港灣技術研究中心光達率定平面閉合差圖(左)率定前(右)率定後 ...	54
圖 3.25 光達 SLAM 執行架構	56
圖 3.26 多種顏色及不同反射材質之固定標	59
圖 3.27 光達實際掃描成果。(上)Topcon GLS-1500；(下)Leica Scanstation P40	59
圖 3.28 市售固定標樣式	60
圖 3.29 建議之固定標樣式	61
圖 3.30 固定標掃描測試成果	61
圖 3.31 Z+F 光達掃描方式	62
圖 4.1 驗證場域—台南沙崙高鐵站高架下道路及周邊道路	63
圖 4.2 驗證場域—台中環中路高架下方道路(北向道路)	64
圖 4.3 驗證場域—台中環中路高架下方道路(壓力測試)	65

圖 4.4 固定標布設數量.....	67
圖 4.5 固定標布設情況 (左)外線道-路燈基座；(右)內線道-高架橋墩.....	67
圖 4.6 1006A 之速度比較圖(NDT).....	69
圖 4.7 1006A 航向比較圖(NDT).....	69
圖 4.8 1006A 二維軌跡比較圖(a)ICP；(b)NDT [SLAM 軌跡(藍點)；IE 參考解(綠點)].....	70
圖 4.9 1006B 之速度比較圖(NDT).....	71
圖 4.10 1006B 航向比較圖(NDT).....	72
圖 4.11 1006B 二維軌跡比較圖(a)ICP；(b)NDT [SLAM 軌跡(藍點)；IE 參考解(綠點)].....	72
圖 4.12 1007A 之速度比較圖(NDT).....	73
圖 4.13 1007A 之航向比較圖(NDT).....	74
圖 4.14 1007B 之速度比較圖(NDT).....	76
圖 4.15 1007B 之航向比較圖(NDT).....	76
圖 4.16 1007C 之速度比較圖(NDT).....	78
圖 4.17 1007C 之航向比較圖(NDT).....	79
圖 4.18 各實驗平面(2D)定位精度分析.....	106
圖 4.19 各實驗三維(3D)定位精度分析.....	107
圖 4.20 各實驗誤差累積圖.....	108

第一章 研究主旨

1.1 計畫名稱

本計畫名稱為『109 年度精進測繪車定位精度委託研究採購案』，以下簡稱本案。

1.2 研究背景

近年來測量與空間資訊技術正在逐漸革新，攝影測量製圖技術與精密整合式定位定向系統結合，搭配多種感測器來蒐集空間資料，逐步實現快速即時移動式測量及空間資料之多平台製圖技術。這類技術整合衛星、飛機、直升機、船舶、汽機車等不同載具及多種高效率影像感測器，輔以全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)、慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)、機電整合及軟體工程模擬器等元件所形成之先進製圖技術。

光達車載移動測繪系統(簡稱光達測繪車)整合了精密定位定向系統、高階相機及光達系統等空間資訊蒐集技術，除了可以快速地進行環境重建並製作各種精度地圖以因應不同領域應用外，透過光達率定處理技術更可以快速地建置與產製精確且龐大的點雲資料並提供後續分析及應用，是獲取空間資訊出色的利器之一。目前的室外移動測繪系統結合傳統測量模式，已經能夠滿足測繪工作上對精度以及效率的需求，不但減少人員需求也提高時效性，加上衛星及航照影像的支援，目前室外圖資的資源已經相當豐富且幾乎涵蓋全球。然而測繪車於 GNSS 訊號嚴重遮蔽地區，例如高樓都市地區、綠色叢林或隧道處，其定位精度將會大幅降低，在沒有衛星定位訊號或衛星訊號受到多路徑嚴重影響的情況下，加入同步定位與製圖技術(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)和光達資料輔助提升整體定位精度已成為現今車載移動測繪技術主要研究課題之一。

1.3 計畫目標

為提升光達測繪車於 GNSS 訊號遮蔽區域定位精度，本案期以 SLAM 技術為基礎，結合車載光達觀測量、現場布設固定標或道路兩旁特徵點、交通號誌等，發展提高光達測繪車定位精度之技術，此技術可提升光達測繪車產製成果之品質。此外，本案亦會分析如要符合高精地圖(High Definition Map, HD Map)之精度需求，地面控制點(或特徵點)所需布設密度。本案將發展透過光達三維點雲資料、移動製圖定位定向技術及固定標的輔助達到三維製圖與量測目的，採用光達系統與定位定向系統，發展直接地理定位技術並同時

融合 SLAM 技術以提升光達測繪車定位成果精度與可靠度。

1.4 計畫重要性

移動式的遙測及製圖系統採用多種製圖感測器的搭配，以及整合式導航定位定向系統來蒐集空間資料，短時間內可蒐集大量資料並縮短人力與時間兩項成本。近年來國土保安、環境變遷監控、防救災應變、資源探測保護等各式應用，更加重視資料更新的即時性，因此發展快速且低成本的資料擷取平台，乃成為各國遙感探測技術與測繪製圖發展的重要課題。而眾多資料的統整與應用中，利用空間資訊系統(Spatial Information Systems)進行評估各式天災所造成的損害、救災決策支援、即時人員救援的相關應用也越來越廣泛。

考量到移動遙測製圖系統的機動性以及對數位影像處理與蒐集的能力，進一步提升空間資訊相關應用領域的服務層面，其高自動化的地形測繪與影像製圖能力更是符合全自動科技趨勢的潮流，而其所產製圖資則提供如導航、虛擬實境(Virtual Reality, VR)、建置模型等用途。近來，三維數碼城市為最熱門的議題，利用三維化的城市模型模擬各種狀況，其中一個很重要的應用就是模擬天然災害造成的損害，來建立都市對應天災的預防及應變措施。而移動遙測製圖系統，則可應用在都市規劃與設計方面，透過雷射掃描及影像處理，可建立三維的都市模型，做為區域設計與規劃的依據，而把建立都市模型的相關屬性做進一步的擴充，並與空間資訊系統結合，便可以建立一個三維數碼城市。而在其他非傳統測量應用方面，例如建立交通標誌資訊以規劃交通路線，或用來調查都市地區的基礎公共建設，如人孔、變電箱、電線桿，甚至透過影像處理技術獲取路牌、招牌上所隱含的屬性資訊，更新導航電子地圖，整合並更進一步加值定位服務技術。在載具結合上，透過無線通訊技術可發展無人載具，搭配直接定位技術滿足即時監控及救災需求。若更進一步整合人工智慧技術，開發自駕車技術更能實質擴展到民生用途及軍事技術上，移動遙測製圖系統可發展之應用如圖 1.1 所示。然而所有應用成果與否都與製圖系統定位精度有關，因此製圖系統定位精度提升是一相當重要的研究課題。

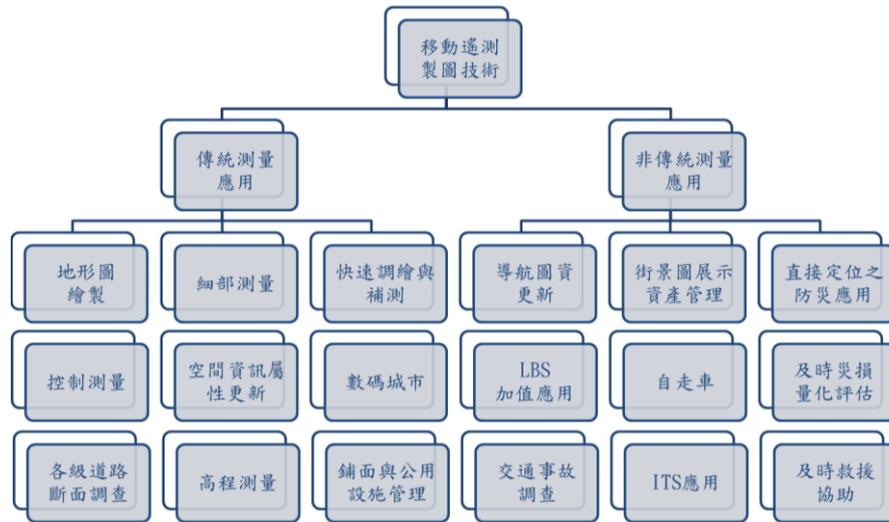


圖 1.1 移動遙測製圖系統可拓展應用之領域(江凱偉等人, 2011)

第二章 文獻回顧

2.1 移動製圖定位及定向系統技術發展

移動式遙測製圖技術之演進與慣性測量儀器之發展是密不可分的，就直接定位技術觀點而言，沒有 INS 就不會有今日蓬勃發展的移動式遙測製圖相關產業。INS/GNSS 整合式定位定向系統已逐漸成為新一代空間資訊系統之核心元件。然而空間資訊領域對於精確定位定向之需求更進一步地提升整合式定位科技發展的技術水準。

整合式定位定向系統的關鍵在於核心演算法部分。傳統的即時導航定位演算法是以擴增式卡曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF)為主，而針對直接定位與移動測圖之後處理應用則使用平滑器(Smoothing)來滿足高精度之需求。平滑器之目的為利用過去、現在和未來的觀測量計算出理想估算解，而全部的平滑演算法皆須根據所得之濾波解來運算，故有好的濾波解才有好的平滑解。

INS/GNSS 兩系統觀測量整合方面，目前商用定位定向軟體所使用之演算法為傳統 INS/GNSS 開放式鬆耦合架構，如圖 2.1(左)所示。然而近年來相關的研究顯示此法具有一些無法克服的限制，而這些限制會造成整合式定位系統在無衛星訊號時的定位定向誤差累積(Chiang, 2004)。卡曼濾波器演算法在 GNSS 訊號失鎖的條件下會造成定位定向解之殘差隨時間累積之效應，如圖 2.1(右)之紅實線所示。故該演算法僅適用於即時性中低精度定位定向之需求。然而一般移動式製圖系統的應用中是以後處理模式為主。故可以透過使用平滑器的方式將卡曼濾波器定位定向解之殘差改善近 60%~70%，如圖 2.1(右)之藍實線所示。

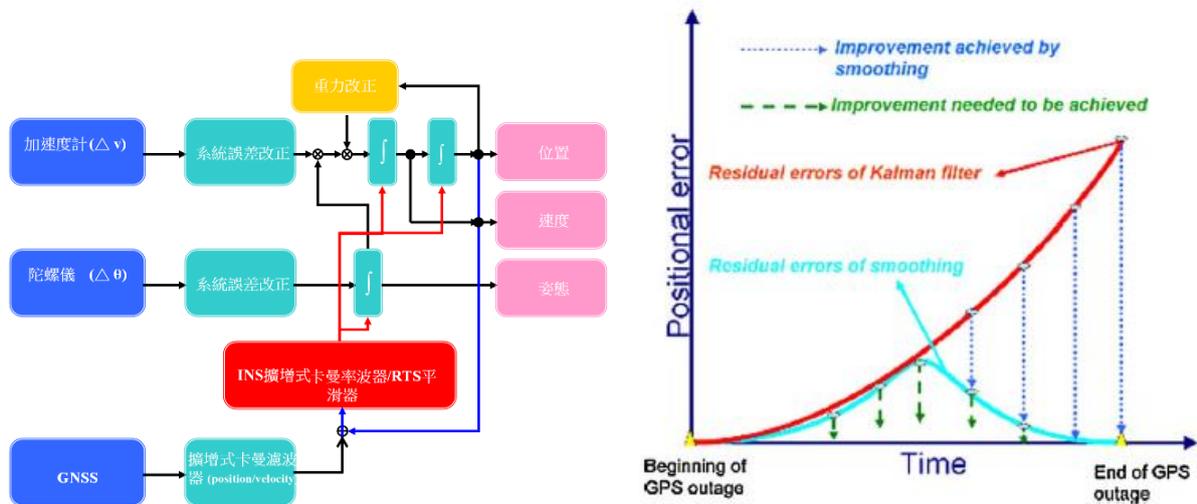


圖 2.1 (左)傳統 EKF/平滑器之鬆耦合架構；(右)無 GNSS 觀測量更新環境之誤差行為(Chiang 等人, 2011)

近年來許多替代的核心算法逐漸吸引相關研究機構和學者的興趣。因此，替代卡曼濾波器的核心算法也將是在發展新一代整合式定位定向系統不可或缺的一個重要的環節。根據 Shin (2005)與 Chiang 等人(2009)所彙整之結果顯示，目前在世界各研究機構替代 INS/GNSS 核心演算法的發展方向上可分為下列三大類：

1. 採樣濾波器演算法(Sampling Filter Approach)：此演算法主要特色在於依循傳統卡曼濾波器的精神依照相關統計特性建立相關的誤差動態模型及感測器誤差模型；唯有別於傳統卡曼濾波器將非線性化的 INS/GNSS 整合問題進行線性化之過程，絕大多數的新式採樣濾波演算法採用非線性的模型來處理相關的導航及定位問題。傳統卡曼濾波器乃針對近似模型提供最佳解，而此類採樣濾波器可以針對精確模型提出近似解。同時這類演算法可以處理非高斯雜訊與高度非線性的問題。根據國外相關研究結果顯示，這些包含高階近似的非線性模型的確能夠有效的提升系統之定位精度(Shin, 2005)。相關的演算法包含粒子濾波器(Particle filter, PF)、無跡卡曼濾波器(Unscented Kalman filter, UKF) (Julier & Uhlmann, 1997) 及適應性卡曼濾波器(Adaptive Kalman Filter)。
2. 人工智慧演算法(Artificial intelligent approach)：有別於前述傳統演算法透過人為建模的方式設計相關動態模型，這類演算法的主要特色在於藉由模仿人類學習的方式來建立非線性的誤差動態模型。根據國外相關研究結果顯示，這些藉由人工智慧所建立非線性模型的確能夠有效的大幅提升系統之定位精度(Chiang, 2004)。相關的演算法包含類神經網路

(Artificial Neural Networks)(Chiang, 2004)、適應性模糊神經系統(Adaptive Neuron Fuzzy Inference System)(El-Sheimy, 2005)及專家系統(Expert System)。

3. 混合法(Hybrid approach): 此類定位定向演算法主要整合了目前以卡曼濾波器/平滑器為主之演算法與第二類的演算法發展混合式的演算法。Goodall 等人(2005)整合了卡曼濾波器與類神經網路發展即時定位演算法。而 Chiang 等人(2009)首先發展整合了平滑器與類神經網路發展後處理的精確定位定向演算法供移動測繪系統之應用，更進一步發展整合了平滑器與自成長類神經網路發展後處理的精確定位定向演算法供移動測繪系統之應用。

由於導航系統(INS/GNSS)各自之工作原理都存在著自身難以克服的缺點，但兩者卻又具備很強的互補性，透過 INS 和 GNSS 獨立系統的觀測整合除了可以發揮各自的優勢特性外，並隨著整合程度的加深，INS/GNSS 整合架構搭配各式核心演算法的整體定向定位性能，將遠優於原有之各自獨立系統。鬆耦合 INS/GNSS 整合方式是最早發展也為最基本的整合架構，即 INS 利用導航方程式，GNSS 則透過獨立的卡曼濾波器求得導航解，最後再以負責整合的卡曼濾波器求取最佳的整合解，目前大部分的整合系統都是以此架構為主，其理論發展也相對健全(Groves et al., 2007)。在衛星顆數良好與參數設定良好的情況下，鬆耦合架構與緊耦合架構的表現其實並無太大差異(Gautier & Parkinson, 2003)。

此外，在整合架構的結構方面，按照對 INS 的誤差補償方式不同，又可分為開放式迴路(Open loop)和閉合式迴路(Closed loop)。開放式迴路的運作係將卡曼濾波器經由觀測量更新後，計算得到狀態向量的改正值，再將 INS 輸出的導航訊息進行修正，得到改正後之位置、速度及姿態解，並不將卡曼濾波器所估算出的偏心量反饋至 INS；閉合式迴路則將卡曼濾波器所估算出的觀測量偏心值反饋至 INS 系統(Godha, 2006)。IMU 觀測量的偏心量誤差良好與否可以決定一個系統的好壞，必須以模式化加以估算及消除；由於開放式迴路並未將估算之偏心量進行反饋，一旦隨著系統運作的時間增長，偏心量所造成 INS 的導航誤差將隨時間的平方成正比(Chiang, 2004)，最終導致 INS 無法獨立運作，影響到整合系統的解算成果。由此可知，開放式迴路的系統運作只適合搭配相當高等級的 IMU(Sukkarieh, 2000)。反觀閉合式迴路會將觀測量偏心值進行反饋機制，在進行 INS 導航解算前就可先將大部份的觀測量系統誤差移除，如此一來系統只剩由感測器雜訊所造成的隨機誤差，大幅減少 INS 因為加速度計及陀螺儀本身的觀測量誤差所造成的導航誤差，

從而持續提供合理的導航解算。由於閉合式迴路的優點，所以目前 INS/GNSS 整合系統(尤其是微機電等級之低成本 IMU)大多是採用此種架構，圖 2.2 為 INS/GNSS 開放式與閉合式迴路示意圖。在開放式迴路中，IMU 觀測之原始速度與角度變化量 $\Delta v^b, \Delta \theta_{ib}^b$ 經過機制組合(Mechanization)後，得到改正地球物理參數影響之位置、速度與姿態 $p_{INS}^n, v_{INS}^n, a_{INS}^n$ ，再經由卡曼濾波器與 GPS 觀測量 p_{GPS}^n, v_{GPS}^n 估計位置、速度與姿態的增量 $\delta p_{KF}^n, \delta v_{KF}^n, \delta a_{KF}^n$ 得到整合之位置、速度、姿態 $p_{KF}^n, v_{KF}^n, a_{KF}^n$ 。而閉合式迴路中，因為會加卡曼濾波器估計之偏心值回饋至 IMU 原始觀測量，將含偏心值之 IMU 觀測量 $\Delta \tilde{v}^b, \Delta \tilde{\theta}_{ib}^b$ 改正為不含偏心值之 IMU 觀測量 $\Delta v^b, \Delta \theta_{ib}^b$ 。

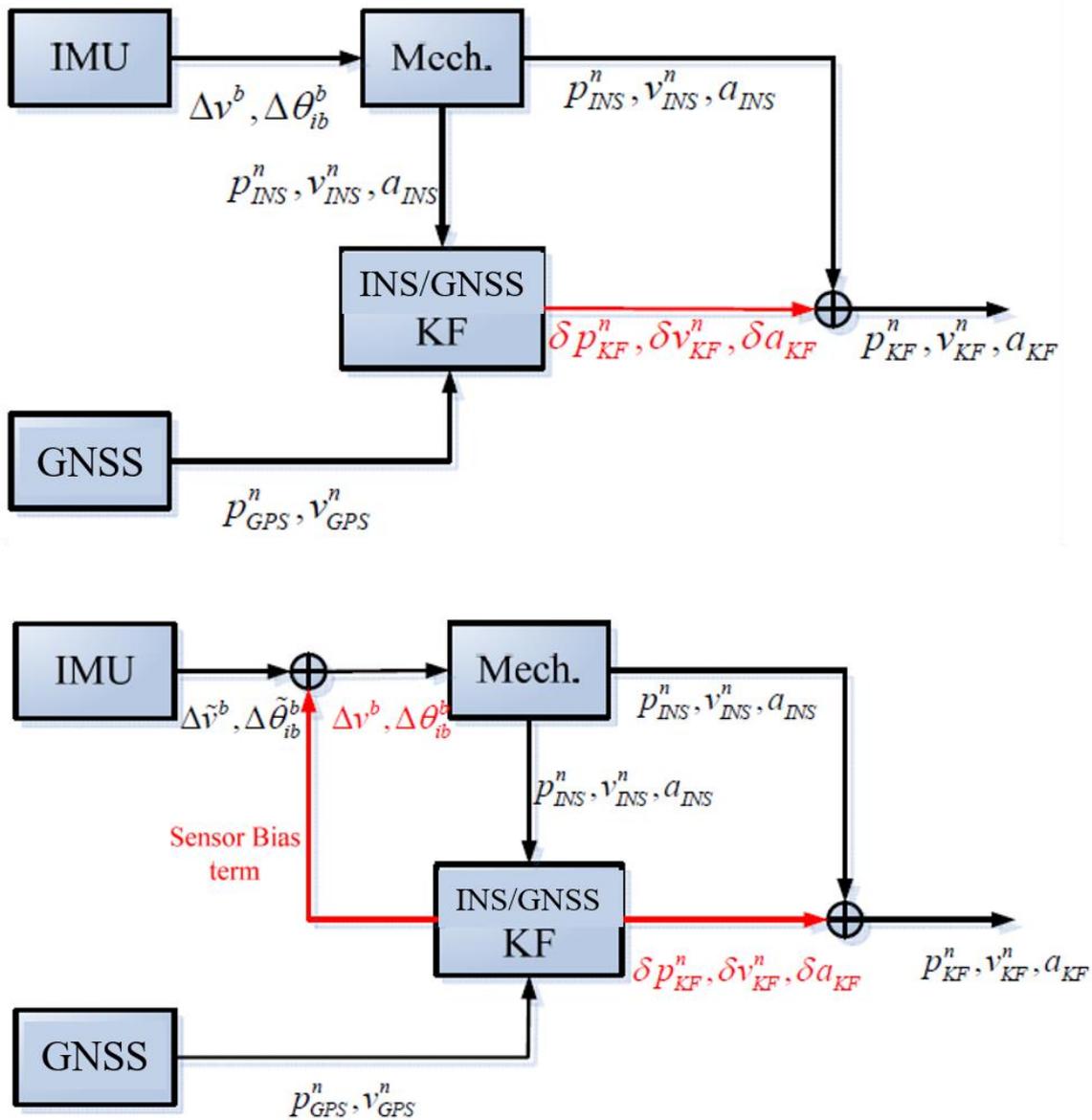


圖 2.2 INS/GNSS 開放式(上)與閉合式迴路(下) (修改自胡智祐, 2009)

2.2 光達直接地理定位

光達系統(Light Detection And Ranging, LiDAR)主要藉由本身主動式的感測器，藉由距離與角度的觀測量，大量獲取空間中的物點坐標，相較以往的全測站儀，光達系統可在短時間內得到大量的點雲資訊。而這些點雲資訊可整合於不同系統中，在基於已知的相對關係參數(軸角與固定臂)上，透過不同坐標系統間轉換進一步推算且實現光達的直接地理定位成果(Vaughn et al., 1996; Schenk, 2001; El-Sheimy et al., 2005; Shan & Toth, 2009)。其中，直接地理定位原理中主要包含了製圖坐標系統、慣性元件的載體坐標系統與光達本身的坐標系統。相關轉換公式如圖 2.3 所示。

$$\begin{array}{c}
 \text{GPS/INS} \\
 \downarrow \\
 \vec{X}_G = \vec{X}_0 + R_b^m \left(\begin{array}{c} \vec{P}_G + R_{lu}^b(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa) R_{lb}^{lu}(\alpha, \beta) \\ \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{array} \right] \end{array} \right)
 \end{array}$$

↑ ↑
 Lever-arm Boresight

圖 2.3 直接地理定位演算公式(Bang, 2010)

早期移動製圖系統皆基於空載平台進行開發，透過空載平台，可利用大範圍掃描視角的光達感測器，掃描飛機下的建物與地形地物，快速產製數值地形模型。其直接地理定位原理配合圖 2.3 與圖 2.4 可以看出各個坐標系統之間的轉換參數與相對關係。

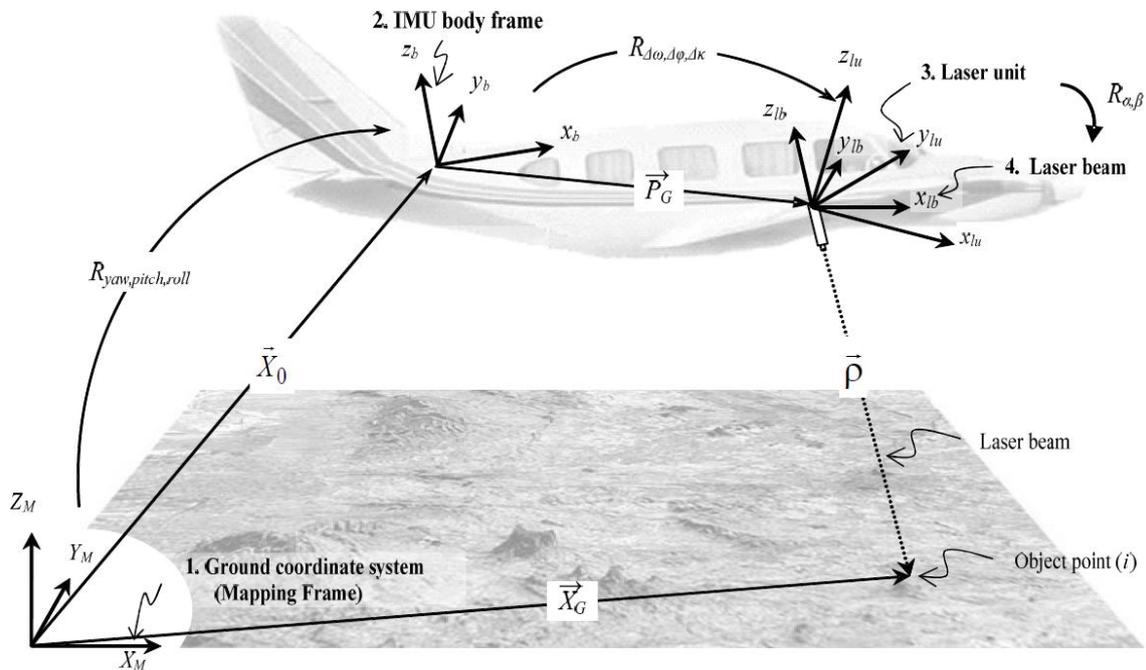


圖 2.4 空載光達直接地理定位示意圖(Bang, 2010)

基於前人研究下，光達系統中的直接地理定位可以分為(1)隨機誤差：定位定向觀測量、光達角度與距離觀測量中的雜訊；以及(2)系統性誤差：軸角、固定臂以及光達角度與距離觀測量中的固定偏差量(Huising & Gomes Pereira, 1998; Baltsavias, 1999; Schenk, 2001; Glennie, 2007; May & Toth, 2007)。而系統誤差對於直接地理定位成果的影響量，可以利用圖 2.5 到圖 2.7 來進行說明。

三個軸角(roll, pitch and yaw) 誤差在來往不同航帶上，造成的影響量也不同，如圖 2.5 所示(假設沒有固定臂誤差下)。Roll 角在 Y 方向上有影響，pitch 角則造成 X 與 Z 方向上的誤差，而 yaw 角則是影響 Y 方向上的誤差量。

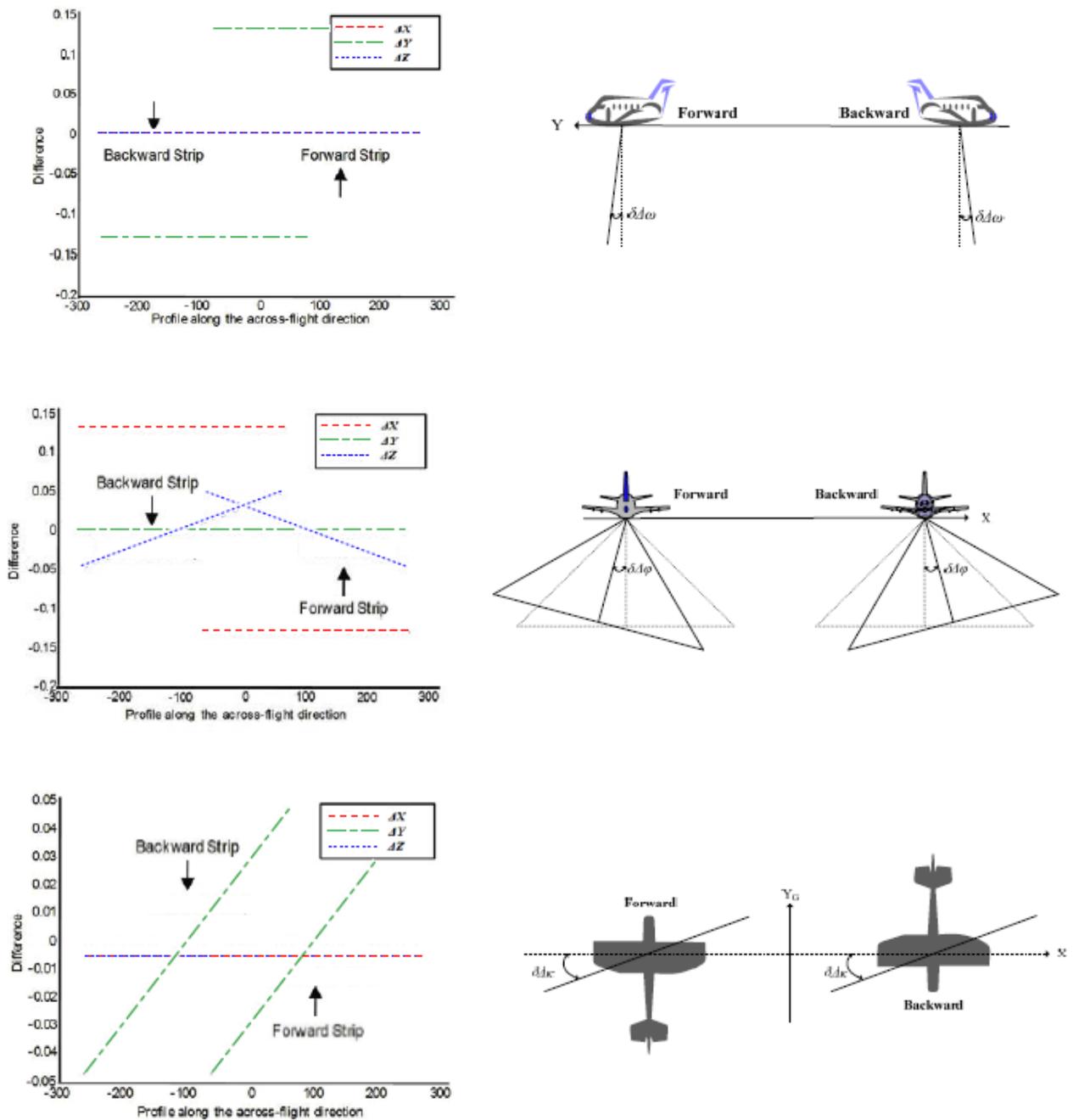


圖 2.5 軸角誤差於空載光達直接地理定位影響量(Bang, 2010)

相對於軸角誤差，固定臂誤差可以利用實驗室量測，來初步給定初始值，其影響量也隨著初始值的精確度，而影響最後成果。整體影響量示意圖如 2.6 所示。在前後航帶的飛行中，隨著固定臂誤差的大小，其影響在 X，Y 與 Z 方向上，會有兩倍的延伸量(假設沒有軸角誤差下)。

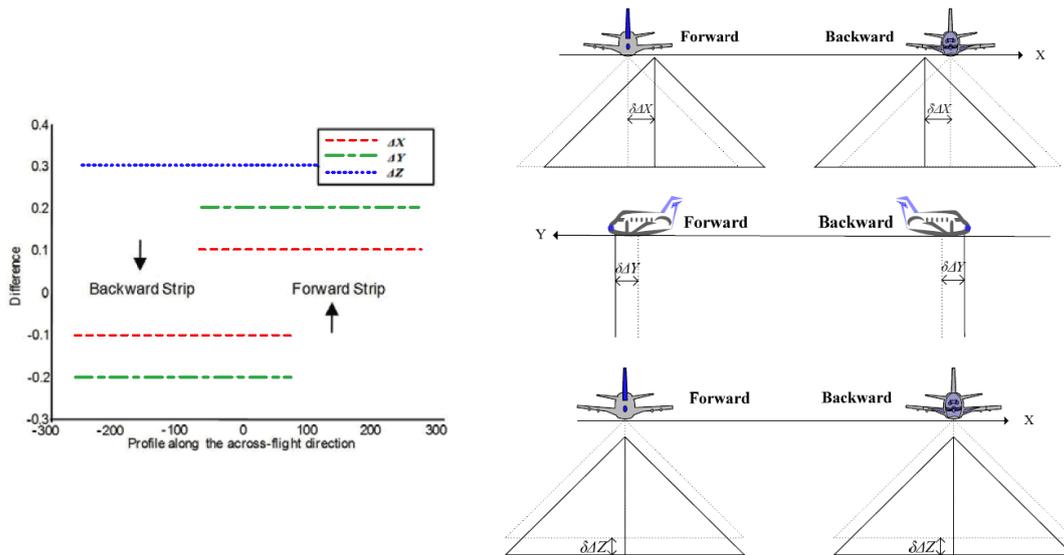


圖 2.6 固定臂誤差於空載光達直接地理定位影響量(Bang, 2010)

在原始觀測量的誤差中，如圖 2.7 所示，距離觀測值的誤差會對於 X 方向上有所影響，呈現線性影響，然而，在 Z 方向上，則會呈現一個弧度的影響量，這是因為觀測角度上的差異，導致不同距離，其誤差量也呈現不同量級。同理可證，在角度觀測量上的誤差，也可以在 Z 方向上呈現類似的趨勢。

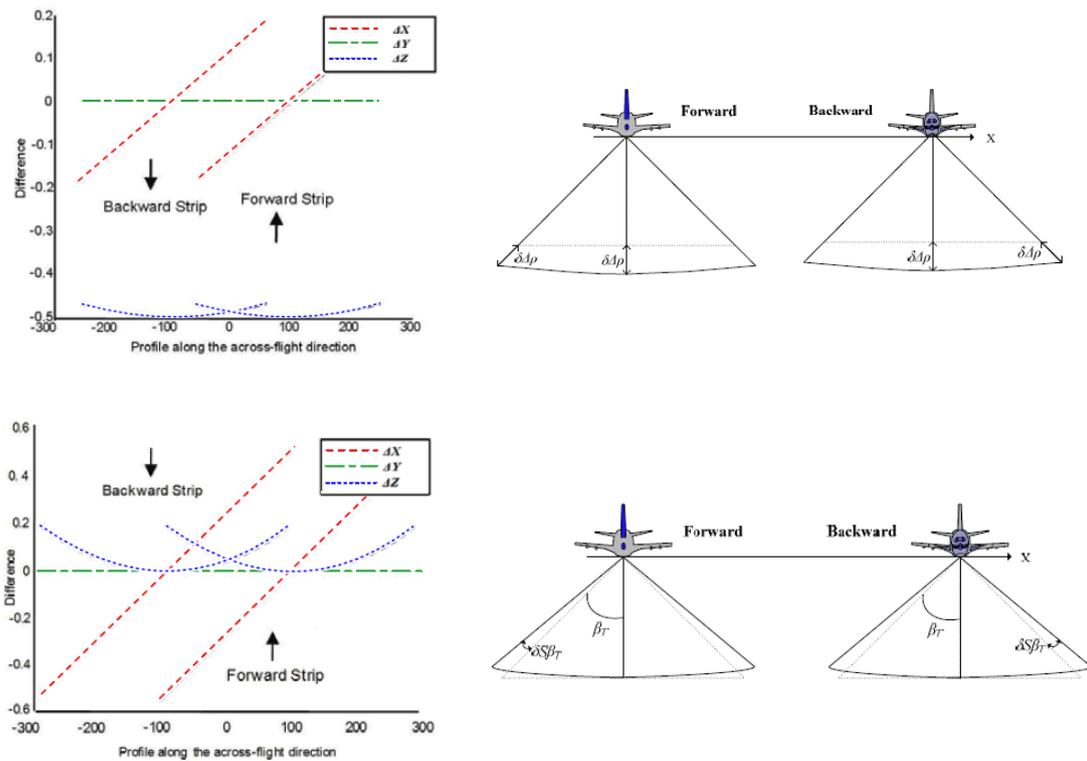


圖 2.7 距離與角度觀測誤差於空載光達直接地理定位影響量(Bang, 2010)

而在移動光達掃描系統(MLS)上，亦容易被以下誤差源干擾，例如於GNSS，INS 和光達之間的時間同步誤差、INS / GNSS 測量的殘差、系統安裝誤差、光達測距和編碼器角度誤差等。這些誤差的一部分由系統誤差組成，例如安裝參數，編碼器角度和光達測距誤差 (Bang, 2010) 以及水平和垂直改正 (Glennie, Lichti, 2010)，這些誤差對重疊區域造成的誤差如圖 2.8 所示。以軸角誤差為例如，此系統誤差導致兩個沿相反的行駛方向掃描成果之間的點雲產生旋轉與偏移。

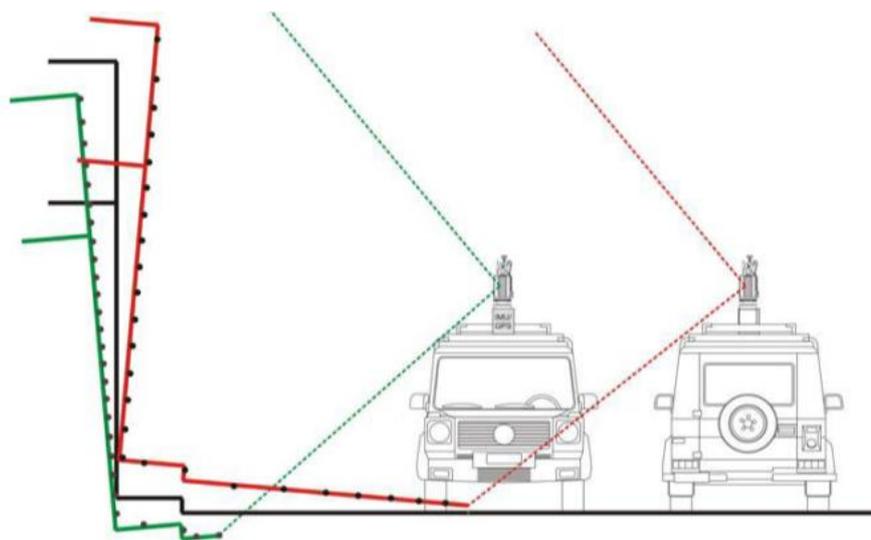


圖 2.8 距離與角度觀測誤差於移動雷射掃描系統直接地理定位影響(Rieger et al. 2010)

在率定方式上，早期研究中，皆考慮如何消除不同航帶之間的偏差量，不管是利用控制點或者是幾何特徵物上 (Maas, 2000; Vosselman, 2002)。Schenk(2001)提出了系統性誤差的概念於光達系統中，應此後續的相關率定也研究以此系統性誤差為基礎。Burman (2000)中提出利用不同航帶高度上的偏差與點雲反射強度的差異來進行率定。同樣的概念也被應用在 Toth (2002)的研究中。差異在於 Toth 提出的方式不需要進一步使用原始觀測量，單純使用點雲坐標即可。Filin (2003)提出了使用自然幾何特徵物來進行率定，投過是先量測的控制平面，來匹配與計算不同航帶之間的平面偏差。Skaloud & Lichti (2006)也提出類似的概念，但是不需要是先量測控制平面，而是把平面的法向量特徵也帶入率定模型中，一併計算。Habib (2007)則把攝影測量的資料一併納入光達中，透過光束法航帶平差後的資訊，進一步延伸進行光達的率定。表 2.1 為上述方法的比較與所率定之參數。然而使用攝影測量的校正系統時，共軛點或線之間的辨識並不容易，尤其在使用低成本的光達系統時更是如此。因此，後續學者又陸續提出了基於最小化共軛特徵間的距離，以

率定固定避雨是準軸誤差的方法 (Ravi et al, 2018; Renaudin et al, 2011; Skaloud and Lichti, 2006)。這些基於特徵的率定方式也適用於不同的平台，例如陸地車輛，降落傘，背包和氣球，甚至是地面機器人 (Glennie, 2012; Glennie et al, 2013; Jung et al, 2015)。而隨著低成本光達的普及，基於 VLP-16 這類低成本的光達的率定方法也陸續被提出，如利用平面方程式或圓柱方程式作為測距及測角觀測量的約制條件(Chan, Ting On, et al, 2020; Chan, Ting On, and Derek D. Lichti, 2015)

表 2.1 相關文獻率定參數比較表(Bang, 2010)

Proposed by	Considered systematic errors									
	$\Delta\omega$	$\Delta\varphi$	$\Delta\kappa$	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta\rho$	S_ρ	$\Delta\beta$	S_β
Baltsavias (1999a)	•	•	•	•	•	•	•		•	
Morin (2000)	•	•	•							•
Burman (2000)	•	•	•	•	•	•				
Schenk (2001)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Toth (2002)	•	•	•							
Filin (2003)	•	•	•				•			
Skaloud and Lichti (2006)	•	•	•				•			
Jung/Lee (2006)	•	•				•		•		
Habib et al. (2007)	•	•	•	•	•	•				

2.3 同步定位與製圖技術(SLAM)

在移動製圖技術核心中，主要可以分為兩種，一種為定位核心技術，另一項則是製圖技術。在定位核心技術中，一般最常見的定位演算法以 INS/GNSS 整合式定位成果為主。為了解決 INS 的誤差飄移問題，配合卡曼濾波器與 Rauch-Tung-Striebel (RTS) 平滑器的慣性導航整合解算也在近幾年來廣泛應用在衛星遮蔽的區域上(Chiang et al., 2012)。室內定位技術中，目前最廣為探討的另外有兩種自主性的定位技術，(1) 機器人輪速計與(2) 視覺里程演算法。機器人輪速計演算法為利用機器人輪速計取得兩個輪軸所轉的圈數，由圈數推算行走距離，配合機器人兩輪軸間距離來推算行進中方位變化，以航位推算的方式來推導機器人下一時刻的位置(Chong, 1997)。而視覺里程演算法則是利用兩張相片之間的相對關係，來推導相機本體的移動。利用此兩張相片各個特徵點之間的位移量，搭配最小二乘演算法解算，可進一步推導出位置，速度，姿態等定位資訊(Lategahn et al., 2012)。

機器人領域中，即時的感知環境與自主行動為機器人在執行任務中主要的基本能力之一。而主要問題點在於如何在建構環境的當下同時認知機器人載體本身姿態與位置，同步定位與製圖技術(SLAM)便是機器人製圖中主要發展與探討的項目之一(Wurm et al., 2010)。同步定位與製圖技術(SLAM)牽涉到建立一致性的地圖與持續性的自我定位需求，這兩者相輔相成，但也增加了演算法的複雜程度(Burgard et al., 2009)。依據不同地圖架構與演算法特質，可將同步定位與製圖技術(SLAM)分為不同方法。

在機器人製圖技術中，地圖通常以兩種方式表示，一種為利用環境中的明顯地標，來顯示地標點的位置，基於此地標點位置來反饋定位成果與重建環境，如圖 2.9 (a)。而另一種地圖表示方式為網格式表示法，如圖 2.9 (b)，透過感測器資料，將網格分為兩種屬性，一種為開放，一種遮蔽，透過各個網格之間的屬性，來滿足製圖需求。網格表示法地圖中兩種穩定程度較高的演算法為 Gmapping 與 Hector SLAM。Gmapping 是一個解決 SLAM 問題的高效率方法，將雷射資料透過 Rao-Blackwellized 粒子濾波器進行網格式圖資學習，該方法以擴展卡曼濾波(EKF)處理非線性，而粒子濾波處理非高斯部分，濾波器內每個粒子分別攜帶相異環境的圖資成果，關鍵在於如何減少粒子數量，故設計能精確計算機器人的移動和當下近期時間內的觀察，藉由相互比對可大幅降低濾波器所預測機器人位置的不確定性，此外，選擇性實現重新採樣運算以減低粒子消耗量。用 Gmapping 方法可以從機器人所收集的雷射與位置資料中，建立機器人定位資訊與地圖資訊兩者之間的關係，產製出二維平面圖(Grisetti et al., 2007)，公式(2.1)為主要的核心方程式。

$$p(x_{1:t}, m \mid z_{1:t}, u_{1:t-1}) = p(m \mid x_{1:t}, z_{1:t}) \cdot p(x_{1:t} \mid z_{1:t}, u_{1:t-1}), \quad (2.1)$$

上式中， x 為機器人本身的軌跡， z 為感測資料， m 為所建構的地圖， u 則為機器人輪速計的觀測量輔助定位成果，利用輪速計觀測量與感測資料建構出所要的地圖並且反饋定位。

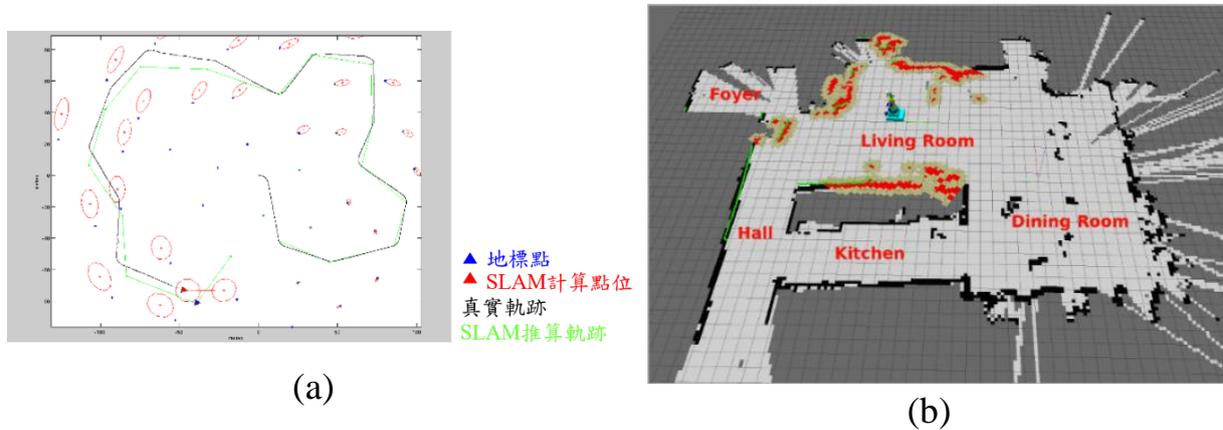


圖 2.9 機器人製圖演算法地圖展示

Hector SLAM(Heterogeneous Cooperating Team of Robots Simultaneous Localization And Mapping)，是從原本 RoboFrame 機器人系統中的演算法轉型變成 ROS(Robot Operating System)形式的套裝軟體。Hector SLAM 演算法不需耗費大量的運算資源，同時做地圖環境現場的學習和雷射掃描儀框架速度下二維平面位置的即時估計，當雷射掃描儀在複雜環境中移動，估計障礙物可能位置並予以描繪，重複掃描後用濾波器不斷對地圖做修正。Hector SLAM 是利用初始的位置資訊，對現有的圖資與感測器資料進行連接，將兩者資料對齊後再反饋定位與姿態等資訊(Kohlbrecher et al., 2011)。一般運用於重量輕、低耗能及低成本之處理器，此演算法可結合慣性感測器進行三維姿態的估計。

另一種以特徵式的地圖為基礎的演算法，稱為快速同步定位與製圖(FastSLAM)。該演算法藉由粒子濾波器來進行軌跡預測之外，更加入擴增式卡曼濾波器的特徵點觀測量更新，建構出機器人軌跡與地圖(Montemerlo et al., 2002)。而第二代的快速即時定位與製圖(FastSLAM2)則為了減少計算複雜度，利用最小二乘法配合線匹配的方式來得出更準確的後驗機率分布函數與整體成果(Armesto et al., 2006)。而圖形式的同步定位與製圖(Graph-SLAM)演算法在近來也受到熱烈討論。地圖特徵圖形代表的當下感測資料與機器人位置的成果，同時也可以視為一種輔助演算法的限制條件。其中可以利用電腦視覺技術中的光束法平差(Bundle Adjustment)或者萊文貝格－馬夸特法(Levenberg-Marquardt)來進行最佳化的求解(Konolige et al., 2010)。而 Thrun

(2006)提出在地圖特徵線上加入非線性的限制條件並且將感測資料與機器人動態模型組成資訊矩陣(Information Matrix)來建立各個特徵圖形與軌跡資料的相關性。

上述演算法主要為室內環境下的開發與二維雷射掃描儀的應用。然而現今硬體成本急速下降，三維的雷射掃描儀或稱光達(Light Detection and Ranging, Lidar)也陸續應用在機器人或者自走載具的應用上。Zhang 等人(2014)提出光達里程計與製圖演算法(Lidar Odometry And Mapping, LOAM)，採用了點雲拼接與 SLAM 技術，在室內室外下可以有效輔助整合系統。圖 2.10 所示為 LOAM 演算法流程圖。處理流程的第一個步驟為將光達點雲資料進行初步拼接，對於每個固定時刻的光達點雲資料進行拼接，並且以 10 赫茲的頻率處理運行光達里程計(Lidar Odometry)演算法，而經過轉換與糾正後的點雲資料，以 1 赫茲的頻率拼接之前的點雲資料來產製整體製圖成果。

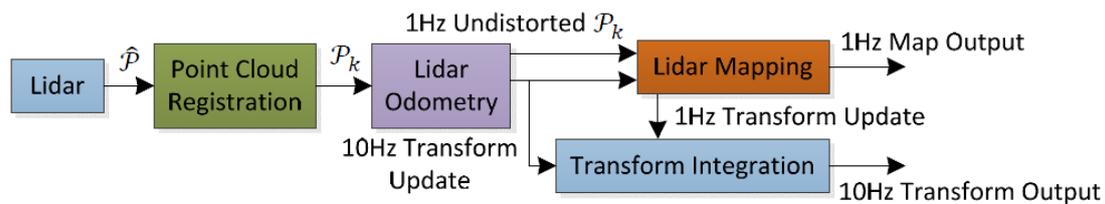


圖 2.10 LOAM 演算法流程圖(Zhang et al., 2014)

同步定位與製圖技術大部分工作是透過匹配前後時刻的點雲資料，也稱為點雲匹配，用於預測兩個連續點雲之間的相對轉換(Ren et al., 2019)。點雲匹配是同步定位與製圖技術的基礎。給定兩個具有不同姿勢的相鄰點雲掃描觀測量，目標是找到最能使這兩個掃描對齊的變換(即一組平移和旋轉參數)(Li et al., 2020)。基於 LiDAR 的點雲匹配方法通常分為三類：(1)點基法；(2)特徵法；(3)分佈法或基於數學特徵的方法(Ren et al., 2019)。基於上述文獻探討，本團隊也將現今同步定位與製圖技術的匹配方式進行整理，依據文獻上的原理與概念，討論並且開發對於國土測繪中心光達最適合的同步定位與製圖技術。

2.3.1 點基法

一般的點基法是迭代最近點(Iterative Closest Point, ICP)(Besl & McKay, 1992)，此方法利用迭代方式計算空間中各點的對應關係。在每次迭代中，ICP 都會根據選擇的最近點最小化距離函數，以計算兩個點雲之間的轉換。點對點 ICP 是 ICP 系列中最流行的方法，該方法使用點對點距離來計算最接近的點。後續學者提出了許多 ICP 變形，如圖 2.11，除了傳統的點對點，也研發出點對面 ICP 和 Generalized-ICP(GICP)，以提高算法的精度，效率和穩健性(Li et al., 2020)。

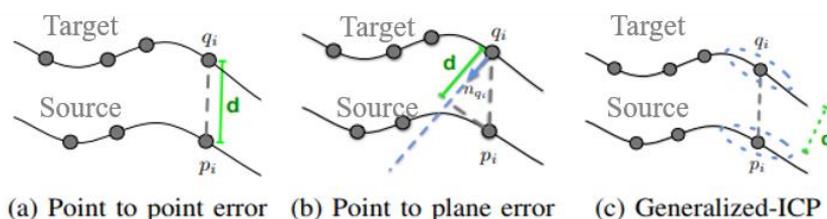


圖 2.11 迭代最近點演算法。(a)點對點；(b)點對面；(c) GICP (Holz et al., 2015)

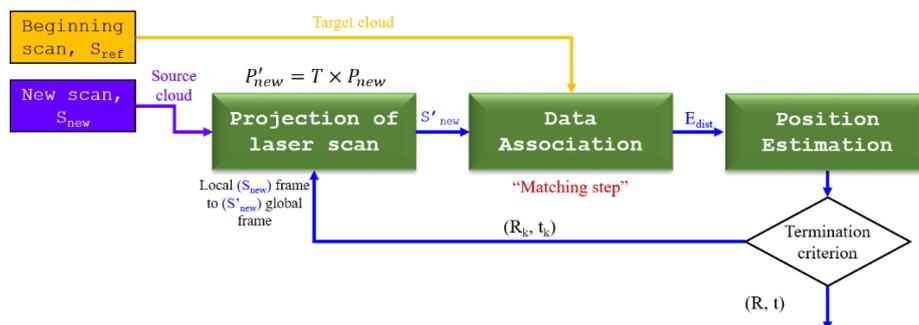


圖 2.12 迭代最近點演算法流程圖

圖 2.12 說明了 ICP 算法通過最小化兩次掃描中對應點之間的平方距離之和來迭代地優化兩次重疊掃描的相對姿態(Besl & McKay, 1992)。此外，ICP 的兩個主要問題是它是基於點的，因此沒有利用每個點周圍的局部表面形狀，並且在共軛點中最鄰近的搜索相當耗時(Magnusson et al., 2007)。但是，在許多情況下，點到面 ICP 顯示更準確(Magnusson et al., 2015)。圖 2.13 展示了點對點與點對面的轉換成果，可以看出來，在點雲密度較高的情況下，ICP 不論是點對點與點對面接可以有良好的匹配效果。

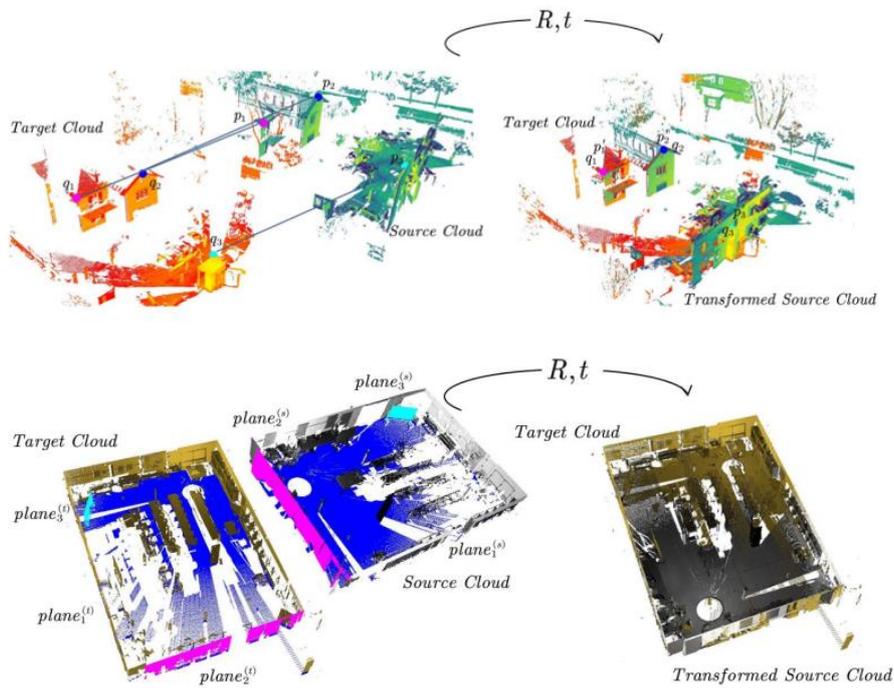


圖 2.13 ICP 點雲相對位移量預測。(上)點對點轉換(下)點對面轉換

2.3.2 特徵法

特徵法通常基於法線或曲率等特徵，也有應用於特定環境的其他自定義特徵。通過使用 LiDAR odometry and mapping (LOAM) 算法(Zhang et al., 2014) 及其改進算法(Shan & Englot., 2018)，通過將特徵點與邊緣線段和平面進行匹配來實現 LiDAR 里程計，並且實現了很高的姿態估計精度在各種情況下。然而，這種方法在諸如公路等幾何資訊較少的環境中，估計精度較差(Li et al., 2020)。

在 LOAM 演算法中(如式 2.2 所示)，如果選擇了一個點，則從最大 c 值開始選擇特徵點作為邊緣點，從最小 c 值開始選擇平面點作為邊緣點。從走廊場景和嘈雜環境中提取的特徵點的示例如圖 2.14 所示。在圖 2.14 中，邊緣點和平面點分別用黃色和紅色標記。但是，該算法是專門為 VLP-16 光達設計的。圖 2.15 展示了 LiDAR 里程計的匹配結果與 LiDAR 製圖的整合成果，透過連續的點雲匹配，可以把相鄰的點雲資料對齊，而將這些點雲存放在全域地圖中，可以達到最佳的製圖效用。

$$c = \frac{1}{|S| \cdot \|X_{(k,i)}^L\|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_{(k,i)}^L - X_{(k,j)}^L) \right\| \quad (2.2)$$

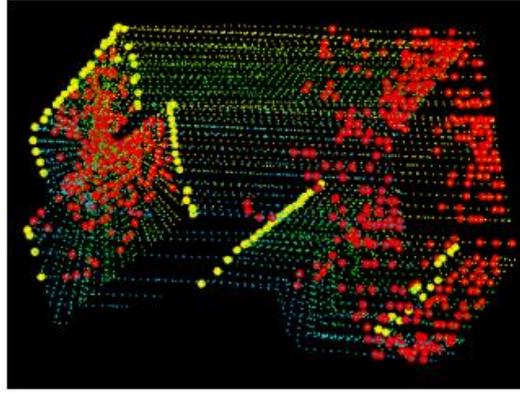


圖 2.14 LOAM 演算法特徵點萃取示意圖 (Zhang et al., 2014)

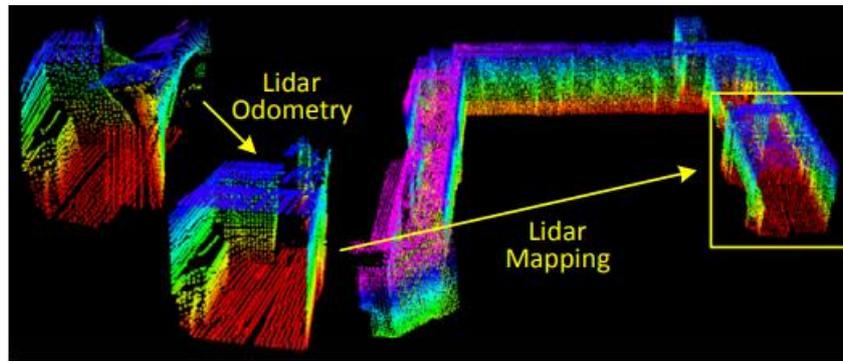


圖 2.15 LOAM 演算法 LiDAR 里程計與 LiDAR 製圖整合示意圖 (Zhang et al., 2014)

2.3.3 分佈法

除了點基法的掃描匹配和特徵法的掃描匹配外，另外還有分佈法，它們使用各種數學屬性來表徵掃描數據和姿勢變化，其中最著名的是基於常態分佈變換匹配(NDT)(Biber & Straßer, 2003)及其改進算法(Magnusson et al., 2007)。

該演算法流程如圖 2.16，通過將模型所佔據的空間細分為規則大小的像元(在 2D 情況下為正方形，在 3D 情況下為立方體)，NDT 將點表示為一組高斯概率分佈如圖 2.17。該方法不是直接處理點，而是迭代地計算點到分佈(P2D-NDT)或分佈到分佈(D2D-NDT)的對應關係，並在每個迭代步驟中最小化距離函數(Li et al., 2020)。

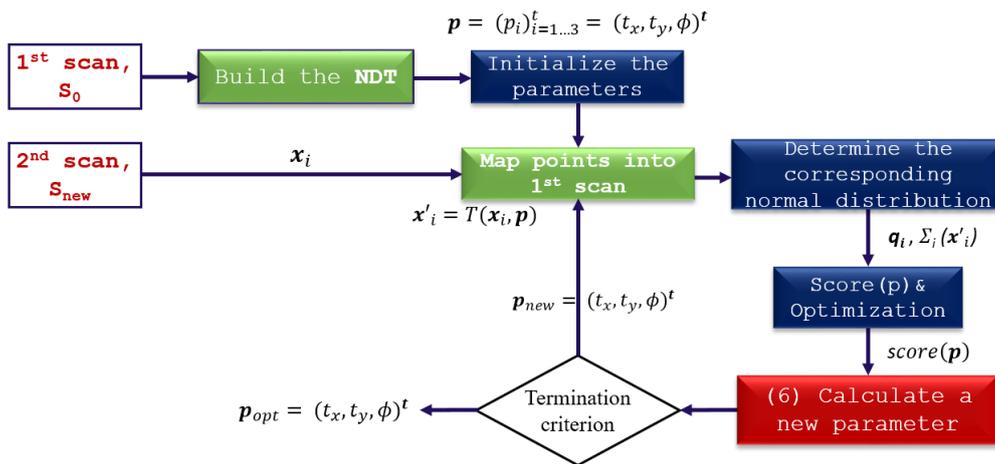
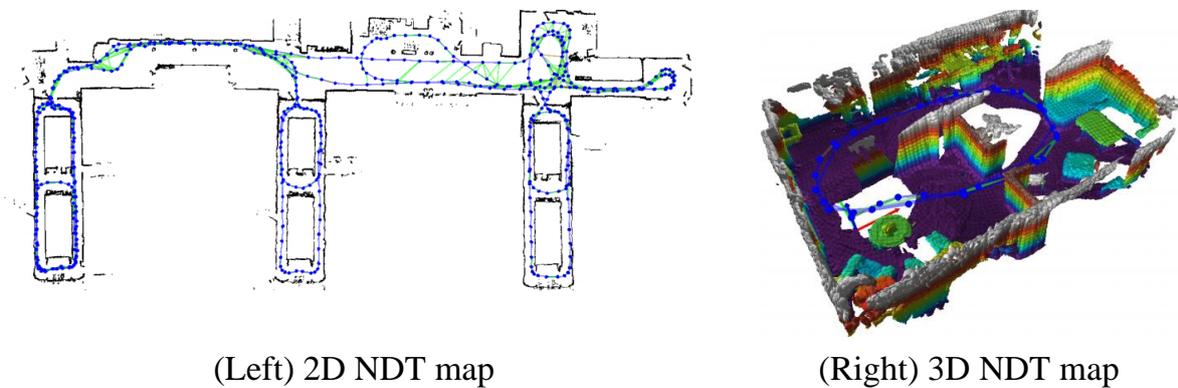


圖 2.16 2D 常態分佈變換匹配流程圖
(Biber & Straßer, 2003; Magnusson et al., 2007)

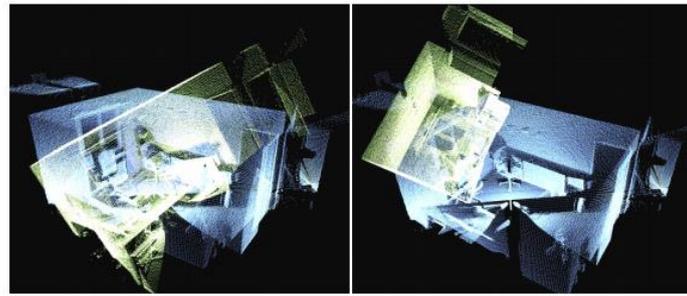


(Left) 2D NDT map

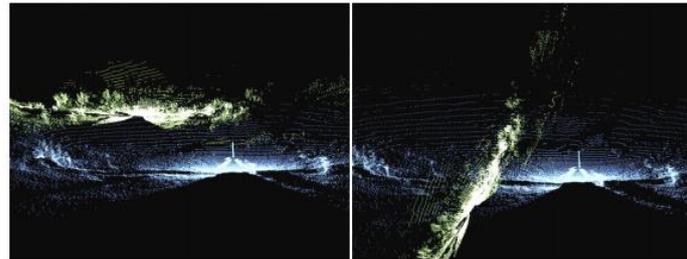
(Right) 3D NDT map

圖 2.17 二維與三維高斯地圖於常態分佈變換匹配 (Einhorn & Gross, 2013)

此外，通過判斷中匹配後的誤差成果分析，如圖 2.18 所示，從文獻中分析，即超過 12 萬次掃描匹配的結果(Magnusson et al., 2015)，文獻中得出結論，與基於點對點的方法相比，使用 NDT 的算法通常提供更準確，更可靠的成果，特別是當掃描重疊較小或初始對齊方式較差時。



(a) Apartment, “easy”, 93% overlap. (b) Apartment, “hard”, 93% overlap.



(c) Plain, “easy”, 37% overlap. (d) Plain, “hard”, 37% overlap.

圖 2.18 匹配方式比較示意圖 (Magnusson et al., 2015)

2.4 研究採用方法之原因

■ 定位定向演算法

本案採用定向定位演算法能有效地整合不同感測器間之觀測量並提升定位精度；而在觀測量整合時選用傳統的擴增式卡曼濾波器(EKF)，原因為其架構簡單且能有效地處理本案非線性之問題；最後搭配後處理技術(平滑器)以提昇整合式系統的定位精度，而本案使用的 RTS 平滑器具有計算時間短、定位精度高等優勢。此外，雖然緊耦合整合方式能提供較穩定的定位成果，但其存在觀測量之間相關性依賴的問題且演算法計算量大，較不易滿足即時性定位的需求，故本案仍採用鬆耦合整合不同觀測量資料，以減少演算法上的計算負擔，並且降低觀測量之間相關性依賴的問題。

■ 光達直接地理定位

本案採用傳統移動製圖技術中直接地理定位原理，在可靠的定位定向演算法上，利用光達直接地理定位，可直接從光達載體系統之坐標直接求得通用的全球坐標系統下之物點坐標(三維坐標)，對於蒐集大量點雲來獲取三維空間資訊有極大的幫助。

■ 同步定位及製圖技術(SLAM)

本案旨在發展以 SLAM 為基礎之精進光達定位精度整合演算法。在都市叢林或者室內環境，GNSS 接收訊號受到嚴峻的考驗。然而，SLAM 可在 GNSS 接收環境惡劣之情況下，輔助移動式測繪系統能持續提供導航定位及製圖服務，並期望能提升光達點雲定位精度。在此環境下，SLAM 依靠週遭環境特徵物來發揮其優勢，藉由都市中的建物或者室內環境的梁柱、牆壁等可靠特徵物來強化定位能力。另外，SLAM 技術主要任務是匹配前後時刻的點雲資料，點雲匹配是 SLAM 技術的基礎。基於 LiDAR 的點雲匹配方法通常分為三類：(1)點基法；(2)特徵法；(3)分佈法或基於數學特徵的方法。而在本案中最終採用以第三種類別中的 NDT 算法為主的點雲匹配演算法。當掃描重疊較小或初始對齊方式較差時，使用 NDT 的算法通常可提供更準確、更可靠的成果。主要原因為 NDT 需計算大量點雲之高斯分布，而 ICP 只考慮多點選取匹配求得點雲間之轉換參數，若初始值選定不佳，一旦匹配到錯誤的點位，容易收斂至局部最佳解。而特徵法之 LOAM 算法目前在程式上以 C++ 為主，與成大所提出之 AINS 軟體整併不易因此亦未予以考慮。而另外現今自駕車模擬軟體如 Autoware，皆是使用 NDT 匹配演算法與點雲地圖進行匹配與定位，因有越多點雲時 NDT 可求得更好的成果，於未來的擴充性亦是本案所選擇的原因。

第三章 研究過程

3.1 研究架構

本案將開發適用於室外環境的車載移動製圖系統，希望藉由同步定位及製圖技術(SLAM)提供輔助觀測量，在 GNSS 訊號嚴重遮蔽環境中給予整合演算法可靠的觀測量，降低慣性導航的漂移誤差行為。但 SLAM 演算法在快速的移動載台上(如測繪車)，該演算法仍有偏移與發散的風險，因此透過 INS/GNSS 初始值輔助，可增加其演算法收斂可靠度；另一方面，同步定位及製圖技術(SLAM)也可以提供穩定的速度觀測量，在沒有 GNSS 觀測量的情況下，也可以利用該速度觀測量，減少慣性導航的誤差累積。

另外，本團隊於期中報告提出國土測繪中心光達之基礎光學原理與光達機構與本團隊習慣使用之 VLP-16 光達不同，故執行同步定位與製圖技術(SLAM)上需採取不同策略。再加上國土測繪中心光達為線掃式光達，其固定時間內所提供之光達點雲觀測量為一條線，若車載運動模式為直線前進，前後時刻將無重複掃描點雲可供後續匹配使用。因此，本團隊亦提出多次掃描(多航線)之應對策略並請國土測繪中心於台中環中路進行測試，但在後續測試中確認國土測繪中心光達測繪車之 Z+F 光達系統掃描點雲與既有之 SLAM 演算法相容性不足，致無法直接驗證 ICP 與 NDT 之 SLAM 演算法，本團隊於工作會議建議將成大自有之 VLP-16 光達加裝於國土測繪中心光達測繪車，以執行同步定位與製圖技術提升車載定位精度之用，而國土測繪中心之 Z+F 光達則於定位軌跡精度提升後執行後續製圖作業。

本案研究流程如圖 3.1 所示，前期透過文獻蒐集了解國內外相關研究之發展情況並評估不同演算法於本案之合適度。本案方法開發包含：(1)移動製圖定位定向技術；(2)VLP-16 光達直接地理定位；(3)VLP-16 光達同步定位與製圖技術(SLAM)及(4)加入固定標資訊，各演算法之整合架構如圖 3.2 所示，本案提出「鬆耦合」的整合架構，透過 EKF 將各個演算法模組化且克服傳統鬆耦合各自為政的缺點，利用同步定位及製圖技術(SLAM)的優勢補足移動測繪系統定位定向在 GNSS 訊號嚴重遮蔽或於室內環境時精確度急速下降的問題。另一方面也利用移動測繪系統定位定向的全球坐標框架輔助，減少同步定位及製圖演算法發散或者局部最佳解的困境。第一個主體架構為定位定向系統，透過 INS/GNSS 與 RTS 平滑化最佳解整合，可以得出優化之後的導航資訊，透過這些資訊與光達觀測量，實現光達直接地理定位並且輔助同步定位及製圖技術，給予可靠的初始值。同時，同步定位及製圖技術(SLAM)在都市環境或是室內環境下，有著較佳的解算成果。透過轉換過的速度與航

向資訊，能反饋給 INS/GNSS 整合濾波器中，進而提升整體精度。另外，本計畫更於整合架構中加入輪速計之速度資訊，而此整合架構亦可擴充採用其他感測器觀測量，例如氣壓計的相對高程資訊與雙天線或者磁羅盤的航向資訊等。最後更加入固定標(或特徵點)之坐標輔助資訊進一步提高整體定位軌跡精度，本案各演算法的詳細執行情況將於第四章至第七章敘述之。

本案將進行四種情境測試與成果驗證，分別為：1.僅加入光達 SLAM 速度、航向角(Heading)觀測量；2.僅加入光達點雲中之固定標(或特徵點)坐標輔助資訊；3.同時加入光達 SLAM 速度、航向角觀測量及光達點雲中之固定標(或特徵點)坐標輔助資訊及 4.對照組(僅利用移動測繪系統原有 INS/GNSS 觀測量所解算之定位成果)等四項測試成果，而本計畫之定位軌跡真值資訊則由高階捷聯導航級慣性測量元件 iNAV-RQH 系統提供並比較四項定位成果精度以評估本案所開發演算法之效益。參考系統(真值)所使用之 iNAV-RQH IMU 與國土測繪中心測試系統 Novatel IMU-FSAS 規格比較如表 3.1 所示，由表可看出不論在陀螺儀或加速度計的漂移穩定性上，本案所使用的參考系統皆優於測試系統(陀螺儀為 375 倍；加速度計約為 70 倍)，足以作為本案參考解使用。

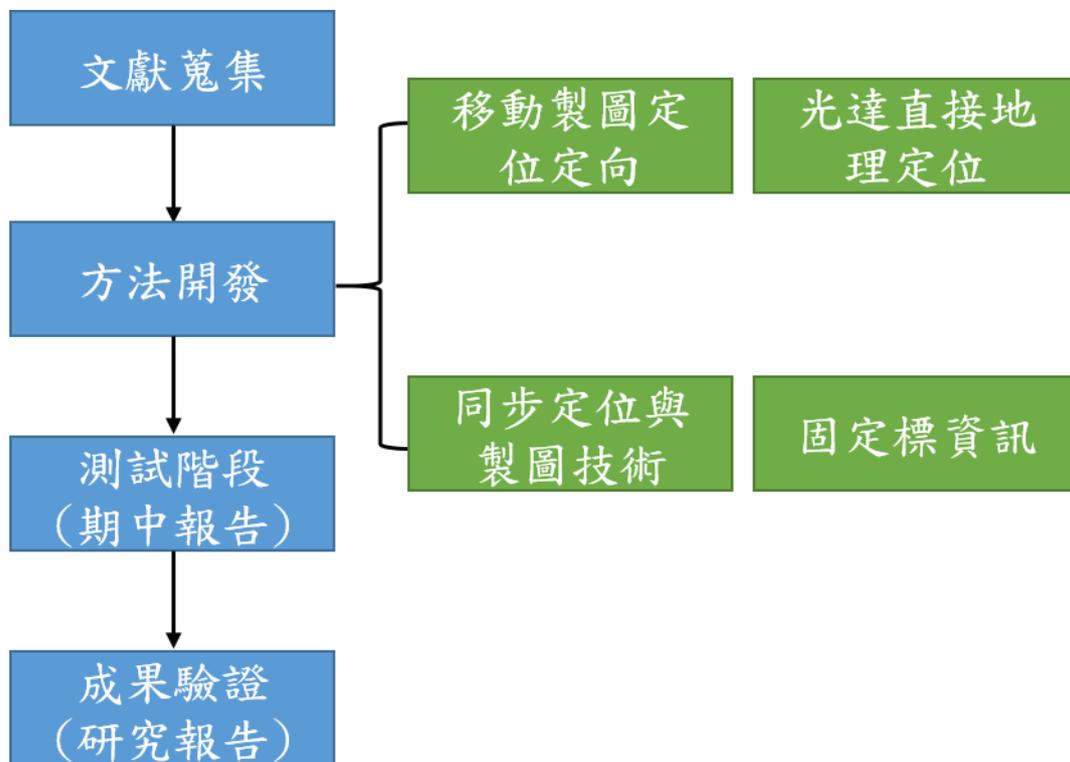


圖 3.1 本案研究流程圖

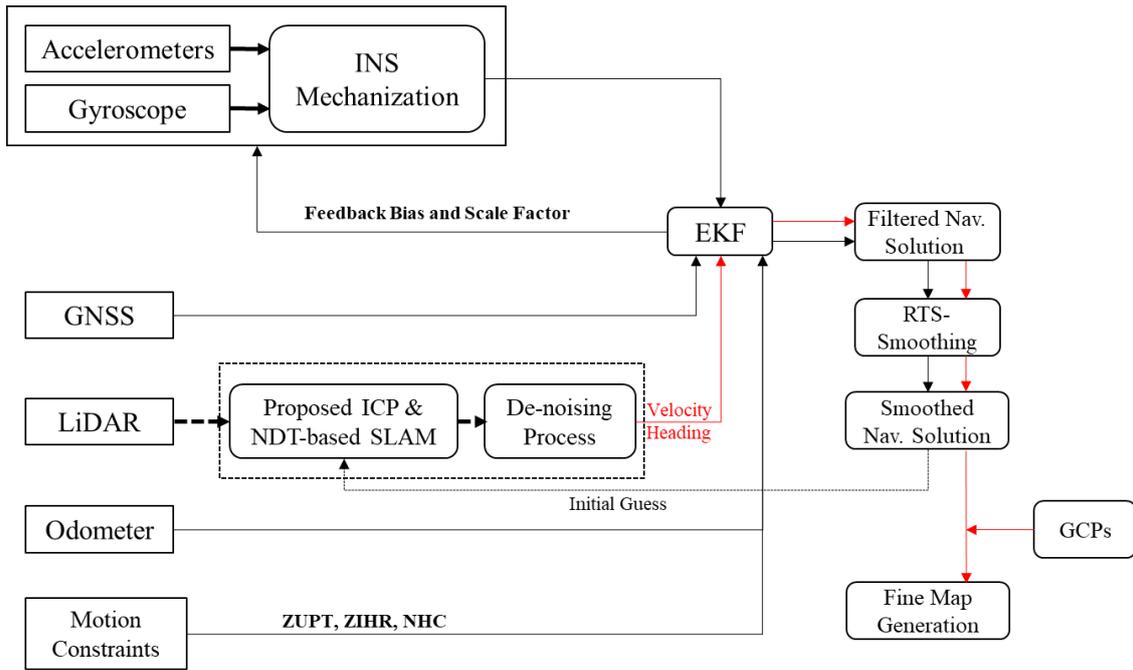


圖 3.2 整合各演算法架構圖

表 3.1 IMU 規格比較

	iNAV-RQH	
	Accelerometer	Gyroscope
Bias Instability	< 15 μg	< 0.002°/hr
Random Walk Noise	8 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.0018°/ $\sqrt{\text{hr}}$
	Novatel IMU-FSAS	
	Accelerometer	Gyroscope
Bias Instability	$\leq 1 \text{ mg}$	$\leq 0.75^\circ/\text{hr}$
Random Walk Noise	—	$\leq 0.1^\circ/\sqrt{\text{hr}}$

此外，本案亦會分析若利用同步定位及製圖技術(SLAM)欲達成高精地圖定位精度需求，實驗場域地面控制點(或特徵點)所需布設的密度。表 3.2 依據 TAICS TR-0010 v2.0:2019「高精地圖製圖作業指引 v2.0」列舉出移動式製圖系統在搭載不同規格的慣性測量元件的情況下所建議布設的地面輔助控制點密度，本案會依據國土測繪中心慣性測量元件的規格佐以相符的控制點密度，並探討加入同步定位及製圖技術(SLAM)輔助後，是否能減少地面控制點的布設密度。

表 3.2 建議慣性測量元件等級規格與配合地面控制點輔助密度

(台灣資通產業標準協會，2019)

規格	陀螺漂移與加速度計漂移 ⁷ 穩定性(Stability)	建議地面控制點輔助間隔
導航等級	<ul style="list-style-type: none"> 陀螺漂移穩定性：0.001-0.01 度/小時 加速度計漂移穩定性：50-100μg 	每 500 公尺
高階戰術等級	<ul style="list-style-type: none"> 陀螺漂移穩定性：0.1-1 度/小時 加速度計漂移穩定性：100-300μg 	每 300 公尺
中階戰術等級	<ul style="list-style-type: none"> 陀螺漂移穩定性：1-10 度/小時 加速度計漂移穩定性：300-1000μg 	每 100 公尺
其他等級	<ul style="list-style-type: none"> 陀螺漂移穩定性：>1 度/小時 加速度計漂移穩定性：>2mg 	每 30 公尺

3.2 移動製圖定位定向開發

3.2.1 坐標系統簡介

慣性坐標系統(Inertial Frame, i-frame)是為協議的慣性坐標系統(Conventional inertial reference system, CIS)的實踐。以地心為其中心，z-軸平行地球旋轉軸，x-軸方向為地心指向春分點，x-軸、y-軸與 z-軸形成一右旋正交框架，如圖 3.3，其春分點為天球赤道與黃道之昇交點，而實際上使用赤經系統當作慣性坐標系統，因為赤經系統極接近慣性坐標系統(Titterton and Weston, 2004)。

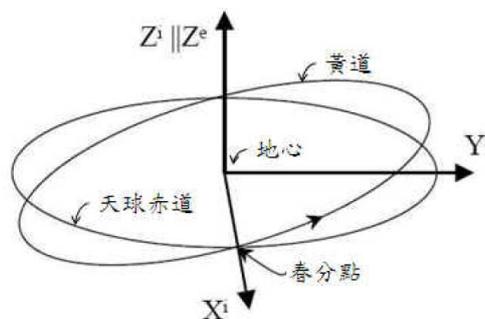


圖 3.3 慣性坐標系統(i-frame)

地心地固坐標系統(Earth-center, Earth-fixed coordinate system, e-frame)是指協議的地球坐標系統(Conventional Terrestrial Reference System, CTRS)，它的中心位在地球的質量中心，z-軸的方向為地心指向協議的地球極(Conventional terrestrial Pole, CTP)也就是平行地球自轉軸，x-軸為地心指向格林威治零子午圈和赤道的交點，x-軸、y-軸和 z-軸構成一個右旋正交框架，如圖 3.4 所示。WGS84(World Geodetic System 1984)坐標系統是協議的地心地固坐標系統 CTS 的具體實現之一，為美國國防部為全球定位系統 GPS 所建立的，並作為美國國防部的 GPS 廣播星曆和精密星曆的參考坐標系統。在慣性導航中所提到的地心地固坐標系統通常也是使用 WGS84 坐標系統，本案所發展的慣性導航方程式亦是使用 WGS84 之橢球為參考橢球(Titterton and Weston, 2004)。

區域地平坐標系統(The local level frame, l-frame)原點為感測器的中心，z-軸的方向定義為測站的橢球面法線方向，y-軸指向地平北方(橢球子午圈方向)，x-軸、y-軸和 z-軸構成一個右旋正交框架。此種框架稱之為北-東-地系統(North-East-Down, NED)，如圖 3.5 (a)所示(Titterton and Weston, 2004)。但在慣性導航系統中，另一種定義為東-北-天系統(East-North-Up, ENU)的區域地平坐標系統也被廣為使用，如圖 3.5 (b)，使用東-北-天系統的好處在於當高程增加時 z-軸是為正向的；當北-東-地系統被應用在導航課題上時，可構成一右旋坐標系統，且如果感測器為指向北方和處於水平狀態就符合一測站固定(vehicle-fixed)、三姿態角(滾轉-俯仰-航向)的坐標型態(Titterton and Weston, 2004)。

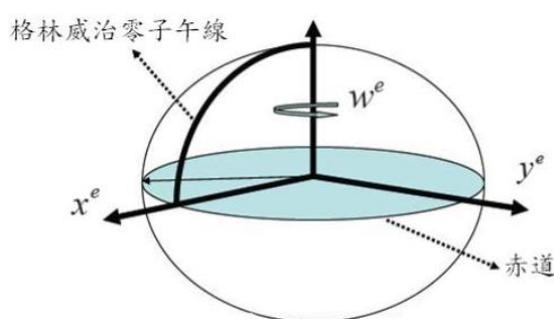


圖 3.4 地心地固坐標系統(e-frame)

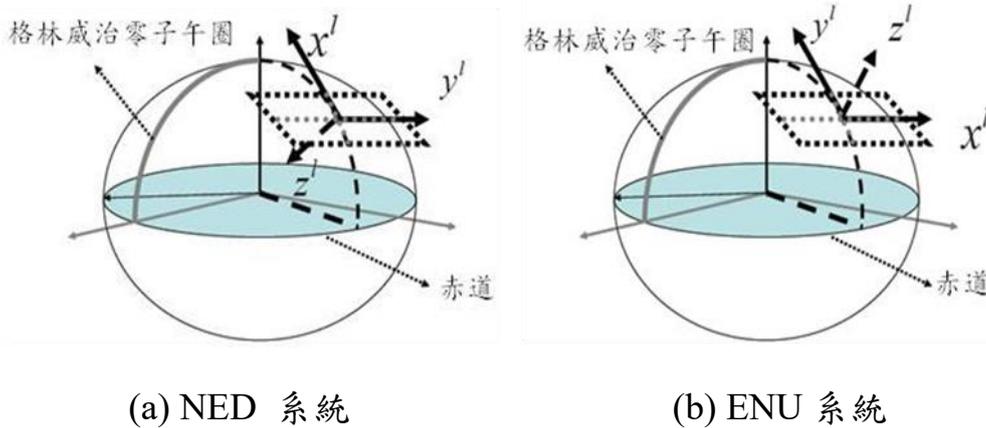


圖 3.5 區域地平坐標系統(l-frame)

載體坐標系統(The Vehicle frame, v-frame)為一正交的坐標系統，其三軸分別指向載體前方、載體右側和重力線方向，此三軸即為載體的三正交軸。而相對應的旋轉角分別稱為滾轉-俯仰-航向，定義為逆時鐘方向為正，如圖 3.6 所示(Titterton and Weston, 2004)。導航坐標系統(The Navigation frame, n-frame)可以是任意定義的坐標系統，其所代表的意義為期望慣性導航系統在所選定的坐標系統下進行導航解算。就陸地導航而言，區域地平坐標系統(l-frame)及地心地固坐標系統(e-frame)是最常使用的導航坐標系統。一旦確定了導航坐標系統，其與載體坐標系統之間的關係就必須被建立起來，以達到從觀測量換算到導航解的目的，本案的導航坐標系統(n-frame)為區域地平坐標系統(l-frame)。

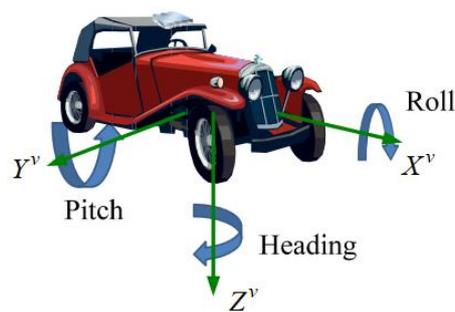


圖 3.6 載體坐標系統

3.2.2 坐標轉換

上述所提到的坐標系統，皆是在慣性導航中可能牽涉到的坐標系統，也因此坐標系統的轉換在慣性導航中是一門重要的課題。例如慣性測量儀所量測到的值也就是慣性導航中最原始的觀測量 f^b 、 ω_{ib}^b ，其所用的坐標系統為載體坐標系統，但在導航中，習慣上將坐標換算到區域地平坐標系統或是地心地固坐標系統上，因此必須進行坐標系統的轉換。而兩坐標系統之間的轉換關係，主要有三種表示方法，分別為尤拉角(Euler Angles)、方向餘弦矩陣(Direction Cosine Matrix, DCM)及四元數法(Quaternion)。從地心地固坐標系統(e-frame)轉換至導航坐標系統(n-frame)之 DCM 可由式(3.1)表示：

$$C_e^n = R_y(-\phi - \pi/2)R_z(\lambda)$$

$$= \begin{pmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \phi \cos \lambda & -\cos \phi \sin \lambda & -\sin \phi \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

式(3.1)中 ϕ 是緯度， λ 是經度， R_y 和 R_z 是表示坐標系統之 y 軸與 z 軸之旋轉，而 DCM 從區域地平坐標系統(n-frame)轉至地心地固坐標系統(e-frame)可以式(3.2)表示：

$$C_n^e = (C_e^n)^T = \begin{pmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \lambda & -\cos \phi \cos \lambda \\ -\sin \phi \sin \lambda & \cos \lambda & -\cos \phi \sin \lambda \\ \cos \phi & 0 & -\sin \phi \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

由區域地平坐標系統(n-frame)轉至載體坐標系統(b-frame)之 DCM 的定義由下式表示(Titterton & Weston, 2004)：

$$C_n^b = R_x(\varphi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad (3.3)$$

式(3.3)中的 ϕ ， θ ， ψ 分別代表尤拉角度滾轉-俯仰-航向，因此從載體坐標系統(b-frame)轉至區域地平坐標系統(n-frame)之 DCM 如下所示：

$$C_b^n = (C_n^b)^T = R_z(-\psi)R_y(-\theta)R_x(-\varphi)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 1 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} = \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\theta\sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix}$$

3.2.3 INS 導航方程式

設計精確的多感測器數據整合演算法是系統發展的關鍵，在進行數據整合設計時，首先必須保證用於整合的導航與影像數據在整合的時間點是一致的，意即在解決 IMU、GNSS 與影像感測器之即時數據同步問題，多元感測器整合式定位定向系統的設計才有實際意義。故本案自行開發一套多感測器的資料擷取系統。該系統主要之功能為即時擷取感測器所提供之觀測量並完成時間同步之程序待後處理模式之應用。

固裝式慣性測量儀輸出載體坐標系的角度和速度增量，因此離散積分演算法就被應用來將固裝式慣性測量儀觀測量轉換成可用的導航資料。根據牛頓第二運動定律，在地球上一個運動質點的基本公式，由慣性坐標系統所表示如下：

$$r^i = f^i + \bar{g}^i \quad (3.5)$$

式(3.5)中， r^i 為加速度向量， f^i 為合力向量， \bar{g}^i 為重力向量。

上述的運動公式轉換至區域地平坐標系統(l-frame)並以一階微分方程式表示，詳細推導請參考(Chiang, 2004)。

$$\begin{bmatrix} r^l \\ v^l \\ C_b^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}v^l \\ C_b^l f^b - (2w_{ie}^l + w_{el}^l) \times v^l + g^l \\ C_b^l (\Omega_{ib}^b - \Omega_{il}^b) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ M+h & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & (N+h)\cos\varphi & -1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

合力 f^b 是由加速度計所觀測的原始輸出，被定義為空間中真實加速度和重力加速度的差異，由載體坐標系統(b-frame)和區域地平坐標系統(l-frame)間的轉換矩陣 C_b^l 如式(3.4)所示。M 和 N 為分別為子午圈和卯酉圈的曲率半徑，如下表示 (Schwarz & Wei, 1999)：

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.8)$$

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.9)$$

式(3.8)和式(3.9)中 a 和 e 分別為為參考橢球面的半主軸和線性離心率。

在區域地平坐標系統的位置向量由曲線坐標所得，其包含緯度 φ ，經度 λ 和橢球高 h ：

$$r^l = [\varphi \quad \lambda \quad h]^T \quad (3.10)$$

區域地平坐標系統的速度向量由下表示：

$$v^n = \begin{bmatrix} v_N \\ v_E \\ v_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (M+h) & 0 & 0 \\ 0 & (N+h)\cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

式(3.11)中 v_N , v_E 和 v_D 為北向，東向，和下向的速度分量，l-frame 的重力向量表示為在大地緯度 φ 和橢球高 h 的正常重力 (Schwarz & Wei, 1999)。

$$g^l = [0 \quad 0 \quad \gamma]^T, \gamma = a_1(1 + a_2 \sin^2 \varphi + a_3 \sin^4 \varphi) + (a_4 + a_5 \sin^2 \varphi)h + a_6 h^2 \quad (3.12)$$

式(3.12)中 a_1 到 a_6 為常數，如表 3.3 所示。

以區域地平坐標系統為主，地球自轉速度向量投射至地球坐標系統分量可表示如下：

$$w_{ie}^e = [0, 0, w_e]^T \quad (3.13)$$

表 3.3 正常重力的常數係數

$a_1(m/sec^2)$	9.7803267715	$a_4(m/sec^2)$	-0.0000030876910891
$a_2(m/sec^2)$	0.0052790414	$a_5(m/sec^2)$	0.0000000043977311
$a_3(m/sec^2)$	0.0000232718	$a_6(m/sec^2)$	0.00000000000007211

利用式(3.13)將向量投射至區域地平坐標系統：

$$w_{ie}^l = C_e^l w_{ie}^e = [w_e \cos \varphi \quad 0 \quad -w_e \sin \varphi]^T \quad (3.14)$$

地球自轉分量表示以地球坐標系統為主，區域地平坐標系統的地球自轉分量，可利用緯度和經度的速率變化所得：

$$W_{el}^l = [\lambda \cos \varphi \quad -\varphi \quad -\lambda \sin \varphi]^T = \left[\frac{v_E}{(N+h)} \quad \frac{-v_N}{(M+h)} \quad \frac{-v_E \tan \varphi}{(N+h)} \right]^T \quad (3.15)$$

Ω_{ie}^l 和 Ω_{el}^l 是非對稱矩陣，相當於 w_{ie}^l 和 w_{el}^l ，角速度 w_{ib}^b 為陀螺儀的原始輸出， Ω_{ib}^b 則為其非對稱矩陣。

$$w_{ib}^b = \begin{bmatrix} w_x & w_y & w_z \end{bmatrix}^T \quad (3.16)$$

角速度 Ω_{il}^b 減去 Ω_{ib}^b 來消除地球旋轉速率和區域地平坐標系統的方位變化。因此， Ω_{il}^b 由下表示：

$$\Omega_{il}^b = \Omega_{ie}^b + \Omega_{el}^b \quad (3.17)$$

因此，亦可得到 w_{il}^b ：

$$w_{il}^b = C_l^b (w_{ie}^l + w_{el}^l) = C_l^b w_{il}^l = C_l^b \left[w_e \cos \varphi + \frac{v_E}{(N+h)} \quad \frac{-v_N}{(M+h)} \quad -w_e \sin \varphi - \frac{v_E \tan \varphi}{(N+h)} \right]^T \quad (3.18)$$

所以，可透過 w_{il}^b 得到 Ω_{il}^b 。

■ 系統誤差補償

慣性測量儀輸出之觀測量通常為載體在三軸上速度變量 $\Delta \tilde{v}_f$ 及角度變量 $\Delta \tilde{\theta}_{ib}^b$ ，且為離散的形式，如再分別對時間做一次積分及二次積分，則可得到載體的速度、位置和姿態角，以達到導航的目的，這是慣性導航的基本概念。由於加速度計及陀螺儀本身的一些系統性及非系統系的誤差，會造成量測到的觀測量並非理想的變動量。因此在使用原始的觀測量進行導航前，一些系統性誤差必須用以改正原始的觀測量，而非系統性的誤差就以適當的模型進行模式化。主要的系統性誤差分別為偏差及尺度因子，利用改正過後的慣性測量儀觀測量 Δv_f 和 $\Delta \theta_{ib}^b$ 進行輸入到慣性導航方程式即可進行相關計算。

$$\Delta \theta_{ib}^b = (\Delta \tilde{\theta}_{ib}^b - b_\omega \Delta t) / (1 + s_\omega) \quad (3.19)$$

$$\Delta \underline{v}_f = \begin{pmatrix} 1/(1 + s_{gx}) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1 + s_{gy}) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(1 + s_{gz}) \end{pmatrix} (\Delta \underline{v}_f - \underline{b}_g \Delta t) \quad (3.20)$$

其中，

$\Delta\tilde{\theta}_{ib}^b$ ：誤差補償前角度增量。

$\Delta\theta_{ib}^b$ ：誤差補償後角度增量。

b_ω ：陀螺角速度偏差。

s_ω ：陀螺角速度尺度因子。

Δt ：時間增量。

$\Delta\tilde{v}_f$ ：誤差補償前速度增量。

Δv_f ：誤差補償後速度增量。

b_g ：加速度計加速度偏差。

s_g ：加速度計加速度尺度因子。

■ 姿態積分

導航坐標系統中載體角度的增量可由下列公式得到(Schwarz & Wei, 1999)。

$$\Delta\underline{\theta}_{nb}^b = (\Delta\theta_x \ \Delta\theta_y \ \Delta\theta_z)^T = \Delta\underline{\theta}_{ib}^b - C_n^b (\underline{w}_{ie}^n + \underline{w}_{en}^n) \Delta t \quad (3.21)$$

而角度增量的大小由下列公式計算。

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_x^2 + \Delta\theta_y^2 + \Delta\theta_z^2} \quad (3.22)$$

計算角度增量的公式可用來更新四元數：

$$\begin{pmatrix} q_1(t_{k+1}) \\ q_2(t_{k+1}) \\ q_3(t_{k+1}) \\ q_4(t_{k+1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1(t_k) \\ q_2(t_k) \\ q_3(t_k) \\ q_4(t_k) \end{pmatrix} + 0.5 \begin{pmatrix} c & s\Delta\theta_z & -s\Delta\theta_y & s\Delta\theta_x \\ -s\Delta\theta_z & c & s\Delta\theta_x & s\Delta\theta_z \\ s\Delta\theta_y & -s\Delta\theta_x & c & s\Delta\theta_z \\ -s\Delta\theta_x & -s\Delta\theta_y & -s\Delta\theta_z^b & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1(t_k) \\ q_2(t_k) \\ q_3(t_k) \\ q_4(t_k) \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

式(3.23)中參數 s 和 c 可由下式所得

$$\begin{aligned} s &= \frac{2}{\Delta\theta} \sin \frac{\Delta\theta}{2} = 1 - \frac{\Delta\theta^2}{24} + \frac{\Delta\theta^4}{1920} + \dots \\ c &= 2(\cos \frac{\Delta\theta}{2} - 1) = -\frac{\Delta\theta^2}{4} + \frac{\Delta\theta^4}{192} + \dots \end{aligned} \quad (3.24)$$

透過對準過程得到初始 DCM 後就可計算四元數法的初始值。

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.25(C_{32} - C_{23}) / 0.5\sqrt{1 + C_{11} + C_{22} + C_{33}} \\ 0.25(C_{13} - C_{31}) / 0.5\sqrt{1 + C_{11} + C_{22} + C_{33}} \\ 0.25(C_{21} - C_{12}) / 0.5\sqrt{1 + C_{11} + C_{22} + C_{33}} \\ 0.5\sqrt{1 + C_{11} + C_{22} + C_{33}} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

DCM 可由下式更新：

$$C_b^l = \begin{pmatrix} (q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2) & 2(q_1q_2 - q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) & (q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 + q_4^2) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_4) & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & (q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_4^2) \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

姿態之尤拉角度滾轉，俯仰與航向分別由下列公式獲得：

$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{C_{31}}{\sqrt{1 - C_{31}^2}} \right) \quad (3.27)$$

$$\phi = a \tan 2(C_{32}, C_{33}) \quad (3.28)$$

$$\psi = a \tan 2(C_{21}, C_{11}) \quad (3.29)$$

式(3.27)~式(3.29)中 C_{ij} 的 i, j 範圍為 $1 \leq i, j \leq 3$ ，表示第 (i, j) 項的 DCM 矩陣，而 atan2 是四元數的反正切函數。

■ 速度和位置積分

載體坐標系速度增量轉至導航坐標系的方程式如下(Schwarz & Wei, 1999)。

$$\Delta v_f^l = C_b^l \begin{bmatrix} 1 & 0.5\Delta\theta_z & -0.5\Delta\theta_y \\ -0.5\Delta\theta_z & 1 & 0.5\Delta\theta_x \\ 0.5\Delta\theta_y & -0.5\Delta\theta_x & 1 \end{bmatrix} \Delta v_f^b \quad (3.30)$$

船划效應、科氏力改正與正常重力改正可透過式(3.31)完成。

$$\Delta v^l = \Delta v_f^l - (2w_{ie}^l + w_{el}^l) \times v^l \Delta t + g^l \Delta t \quad (3.31)$$

速度積分可透過式(3.32)進行。

$$v_{k+1}^l = v_k^l + \Delta v_{k+1}^l \quad (3.32)$$

最後位置積分則可以利用二階 Runge-Kutta 方法得到：

$$r_{k+1}^l = r_k^l + 0.5 \begin{bmatrix} \frac{1}{(M+h)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(N+h)\cos\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} (v_k^l + v_{k+1}^l) \Delta t \quad (3.33)$$

圖 3.7 為本案所發展之區域地平坐標系統的 INS 導航演算流程圖。

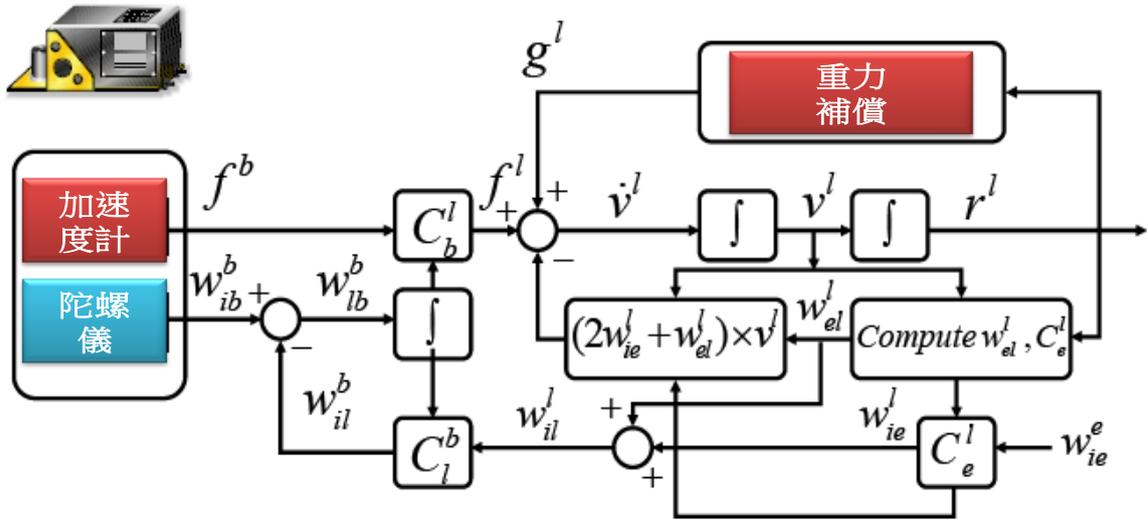


圖 3.7 區域地平坐標系統的導航方程式(Chiang, 2004)

3.2.4 慣性導航整合衛星定位開發

INS 和 GNSS 各有其優缺點，而且兩者間具有明顯的互補性；若將兩者進行整合以便補強兩者單獨系統定位的各種不足則可形成一個更優越的導航系統。此系統可為使用者提供更高精度、更好的可靠性、及豐富導航訊息。表 3.4 為 GNSS 與 INS 之特性與優缺點表，以及整合後之特性表。

表 3.4 GNSS、INS 及 INS/GNSS 整合之特色比較(胡智祐, 2009)

	INS	GNSS	INS/GNSS
優點	短時間獲得高精度位置、速度。 準確姿態資訊。 高觀測量輸出頻率 獨立運作系統。 無訊號遮蔽。	長時間獲得高精度位置、速度。 不論時間，精度皆一致。 不易受重力影響。	高位置與速度精度。 準確姿態之決定。 高資料頻率。 GNSS 遮蔽時亦有導航輸出。
缺點	精度隨時間下降。 受重力影響。 需要初始對準、飛行率定。	具有姿態雜訊。 低觀測量輸出頻率。 無獨立運作。 週波脫落和失鎖。	週波脫落偵測。 GNSS 訊號搜尋時間降低。 重力向量之決定。 阻抗人為干擾。

在 INS/GNSS 整合定位定向演算法之發展過程中，最優估計數據處理理論中卡曼濾波器理論扮演了相當重要的角色，它提供了整合式導航系統重要的理論基礎。卡曼濾波器(Kalman filter, KF)自 1960 年由 Rudolph E. Kalman 博士發表其著名關於離散資料線性濾波器遞迴解法(Kalman, 1960)之論文後，即廣泛的被使用在導航及控制等相關領域。該濾波器由一系列預測器(predictor)與補償器(corrector)以及將估計後狀態參數之變方最小化的數學式所構成。在導航及動態定位的領域中，它被公認為是目前在整合系統開發過程中核心演算法的唯一選擇(羅貽駢, 2008)。卡曼博士首先成功採用了狀態空間的概念並用狀態方程式描述系統，同時以訊號作為狀態，改變了對濾波問題的一般描述。它不是要求直接給出訊號過程的二階特性或頻譜密度函

數，而是把訊號視為在白雜訊作用下的一個線性系統的輸出，且將此種輸入與輸出的關係用一個狀態方程來描述。傳統卡曼濾波為線性濾波，即狀態方程和觀測方程均為線性方程式。然而在許多實務上，系統的物理或數學模型有時需用非線性方程來描述，且在很多情況下，系統的觀測方程式也多為非線性的，如 GNSS 單點定位和差分定位的定位方程式都是非線性。這時若仍然使用線性卡曼濾波方程式來估算系統狀態，則必須利用泰勒展開式對非線性方程和觀測方程式進行線性化，並導出適合此種情況的線性卡曼濾波方程 (Brown & Hwang, 1997)。

卡曼博士最初提出的濾波理論只適用於線性系統，Bucy 等人(1971)提出並研究了擴增式卡曼濾波(EKF)，將卡曼濾波理論進一步應用到非線性領域。EKF 的算法是將非線性系統進行線性化，即對非線性系統進行泰勒級數展開並取其一階近似，但這樣無可避免地會引入了線性化誤差，當線性化假設不成立時，採用這種算法會導致濾波器性能下降甚至造成發散；另外，在一般情況下計算系統狀態方程和觀測方程的 Jacobian 矩陣或 Hessians 矩陣是不易實現的。後來，多種二階式擴展卡曼濾波方法的提出及應用，進一步提高了卡曼濾波對非線性系統的估計性能，二階濾波方法考慮了泰勒級數展開的二次項，因此減少了由於線性化所引起的估計誤差，提高了對非線性系統的濾波精度，但同時也增加了運算量。但於現今應用而言，擴增式卡曼濾波器仍是導航定位領域中較為廣泛應用的最佳化濾波器。其計算流程分為預估與更新兩個步驟；預估部份是將現實狀態移至下一時刻狀態間的時間轉換，更新方程式的原理為利用新觀測量輸入先前狀態而得到往後理想狀態的估算值。

導航過程中慣性感測器所含的誤差必須要經過補償才能確保定位定向解之正確性，建立適當的動態誤差模型並利用卡曼濾波器可以幫助修正導航解的誤差。將 INS 導航方程式線性化並省略其高次項，得到動態誤差模型。除了導航解(3 個位置、3 個速度與 3 個姿態共 9 個元素)的誤差外，通常也會把感測器的誤差(3 個加速度偏差、3 個陀螺飄移、3 個加速度計尺度因子及 3 個陀螺尺度因子)加入考慮，構成一個 21 個參數的誤差狀態向量(error state vector)，動態誤差模型可用一階微分方程式表示如下：

$$\dot{x} = Fx + Gw \quad (3.34)$$

其中， x 為慣性導航誤差的狀態向量，共有 21 個元素

$$[\delta p_{1 \times 3} \quad \delta v_{1 \times 3} \quad \delta A_{1 \times 3} \quad b_{a,1 \times 3} \quad b_{g,1 \times 3} \quad s_{a,1 \times 3} \quad s_{g,1 \times 3}]^T$$

F ：動態矩陣

w ：系統雜訊

而觀測量更新模型表示如下：

$$Z = Hx + v \quad (3.35)$$

H ：動態矩陣

v ：觀測量雜訊

卡曼濾波器透過反饋來估計這些參數，卡曼濾波的方程式分為兩類：預測以及更新，預測方程式利用時刻的狀態來推估下一個時刻的狀態：

$$\hat{x}_k(-) = \Phi_k \hat{x}_{k-1}(+) \quad (3.36)$$

$$P(-) = \Phi_k P_{k-1}(+) \Phi_k^T + Q_{k-1} \quad (3.37)$$

其中，

P ：狀態誤差的變方協一變方矩陣估計值。

Q ：系統誤差矩陣。

(-)：表示預測後的估計值。

(+)：表示更新後的估計值。

狀態更新方程是透過新的觀測量與之前一時刻的狀態去得到下一時刻最佳的狀態估值，更新的方程式如下：

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (3.38)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k (Z_k - H_k \hat{x}_k(-)) \quad (3.39)$$

$$P_k(+) = P_k(-) - K_k H_k^T P_k(-) \quad (3.40)$$

其中，

K ：卡曼增益矩陣

Z ：位置與速度觀測量的更新向量

R ：觀測量的變方—協變方矩陣

上述的狀態數量可依設計者之考量、感測器品質及 INS/GNSS 整合模式的不同而異，在傳統卡曼濾波器的使用上有擴增式卡曼濾波器 EKF 及線性化卡曼濾波器可供選擇(Linearized Kalman Filter, LKF)(Brown & Huang, 1992)，本案採用擴增式卡曼濾波器，如圖 3.8 所示。

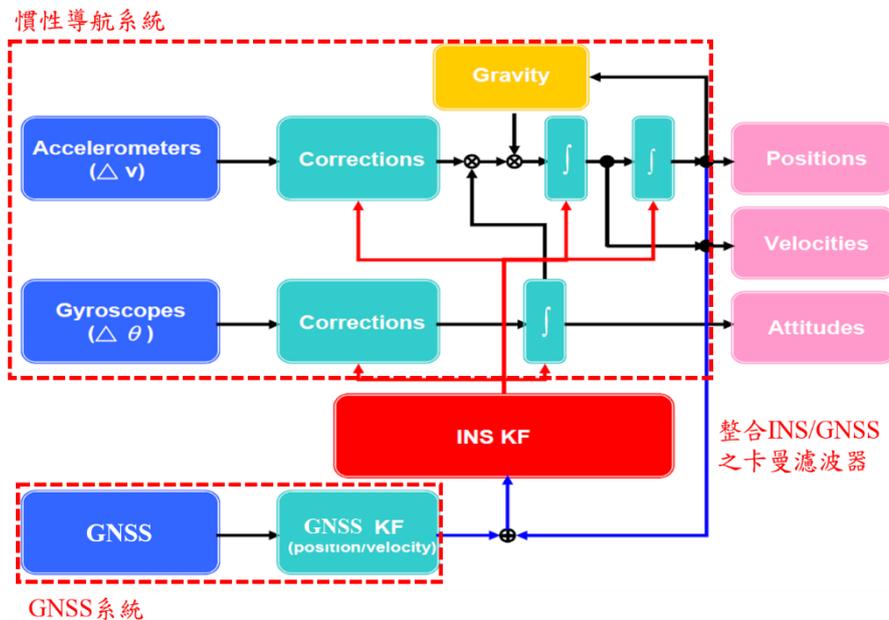


圖 3.8 鬆耦合 INS/GNSS 整合架構

3.2.5 輔助約制條件整合架構

在本案開發上，因為微機電等級慣性元件本身誤差量級較大，也較不穩定，在短時間下，就會產生較大的誤差。在沒有衛星定位解或者額外的感測器輔助之下，定位成果往往不理想。因此，本案針對車載系統上，新增相關輔助約制條件。該輔助約制條件則是基於車載系統中，車子本身的運動行為模式來制定的約制條件。第一個約制條件為非諧和約制(Non-holonomic constraints, NHC)，第二個為零速更新(Zero Velocity Update, ZUPT)，第三個為利用輪速計提供車速更新。

非諧和約制與零速更新都是常用於 INS/GNSS 車載整合系統中的約制演算法，在 INS 失去 GNSS 輔助時，像是室內的應用環境等，約制純慣性狀態下 INS 的導航誤差，使導航解有更長的時間能維持在良好的精度(Shin, 2005)。NHC 是依據汽車移動的特性，當載體行進時其側向與垂直方向的速度應為零。ZUPT 則假設當車體靜止時，車體坐標系統的三軸方向其速度皆應為零。而相對於 NHC 提供側向約制，輪速計則是提供載體行進方向上的速度觀測量作為更新以約制車載運動狀態。此外，需要注意的是三種約制演算法皆是

在感測器坐標系統與載體坐標系統具有穩固關係的前提下，才能滿足假設的條件。圖 3.9 為 NHC 與 ZUPT 的概念示意圖。

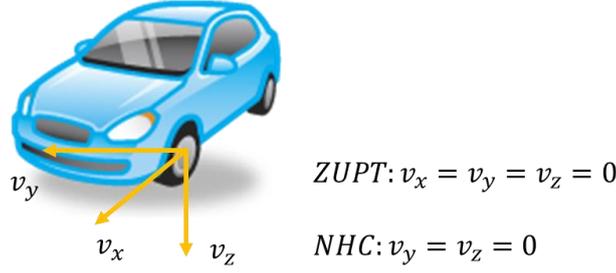


圖 3.9 NHC 與 ZUPT 的假設條件

NHC 應用於 EKF 中的模型方程式如下：

$$\begin{cases} v_y^b = 0 \\ v_z^b = 0 \end{cases} \quad (3.41)$$

式中 v_y^b 與 v_z^b 代表在感測器坐標系統 b 下的車體在側向 y 與垂直方向 z 的速度。而 INS 估計的速度向量可以透過下列方程式從導航坐標系統轉換至相同的感測器坐標系統下：

$$v^b = C_n^b v^n \quad (3.42)$$

式中 C_n^b 為導航坐標系統 n 轉換至感測器坐標系統 b 之坐標轉換矩陣。此時 NHC 約制下的觀測方程式就可以用下列公式表示：

$$\delta z = \begin{bmatrix} v_y^b - 0 \\ v_z^b - 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} C_n^b \delta v^n + \begin{bmatrix} \varepsilon_{vy} \\ \varepsilon_{vz} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

式中 ε_{vy} 與 ε_{vz} 分別表示對應方向的速度雜訊。同理，ZUPT 的觀測方程式如下：

$$\delta z = \begin{bmatrix} \hat{v}_N^n & -0 \\ \hat{v}_E^n & -0 \\ \hat{v}_D^n & -0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{vx} \\ n_{vy} \\ n_{vz} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

式中 \hat{v}_N^n 、 \hat{v}_E^n 與 \hat{v}_D^n 分別為導航坐標系統 n 下，INS 估計的北方、東方與垂直方向的速度估計分量，n 則為對應的速度雜訊。

而輪速計的觀測方程式如下：

$$v_{wheel}^v = C_b^v C_n^b V_{IMU}^n + C_b^v (\omega_{nb}^b \times) l_{wheel}^b \quad (3.45)$$

式中 l_{wheel}^b 為輪速計在載體坐標系中的固定臂。

3.2.6 移動定位定向程式開發

本案所開發之移動定位定向程式(以下簡稱 AINS)為基於 Matlab 所開發之 INS/GNSS 整合軟體。圖 3.10 中對介面各區域的功能進行了介紹，執行上可依序數字 1 至 5 的流程進行 INS/GNSS 整合導航成果解算。

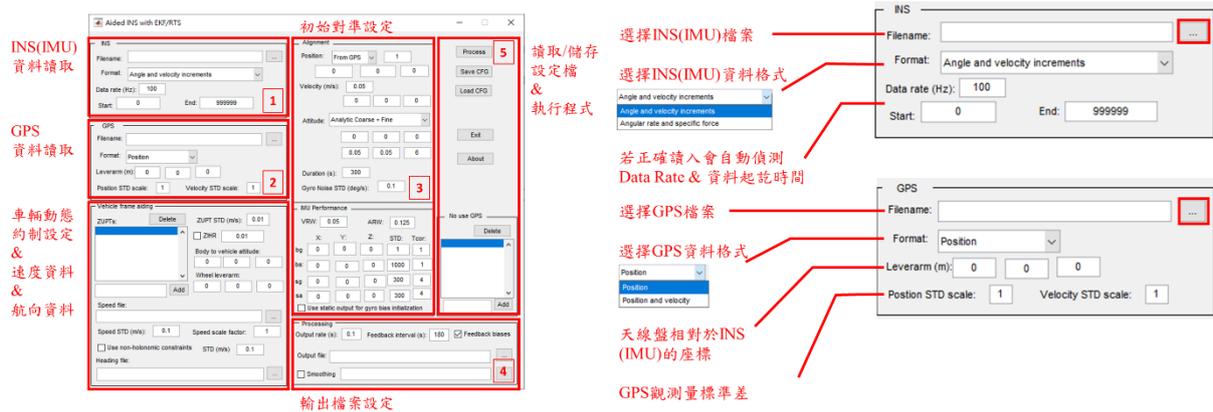


圖 3.10 AINS 介面說明。(左) INS/GNSS 資料讀取；(右) 動態約制介面

圖 3.10(左)對目前 INS 以及 GNSS 資料讀取的介面做了說明；圖 3.10(右)對動態約制介面的各個選項做了說明，包含零速更新(ZUPT)、非諧和約制(NHC)、輪速計、航向等設定與讀取。圖 3.11(左)則是對初始對準說明；圖 3.11(右)則是 INS 誤差模型的參數設定。

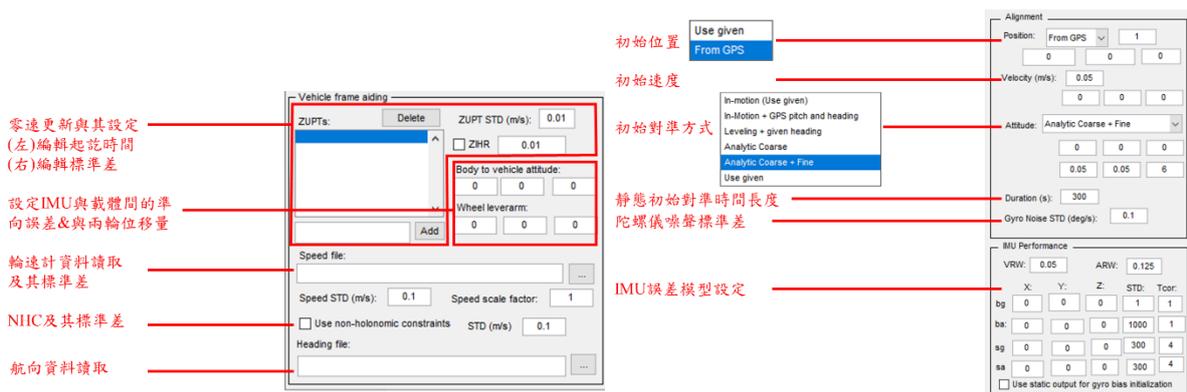


圖 3.11 AINS 介面說明。(左)初始對準；(右)INS 誤差模型參數

為了顧及本案開發程式能與國土測繪中心之資料良好的銜接。在本案工作中，特別針對國土測繪中心之資料格式於使用者介面上增設 NLSC 資料格

式，如圖 3.12 所示。而使用光達率定實驗之 IMU 資料及 GNSS 資料進行測試，得到的結果如圖 3.13 所示。

The image shows a software configuration window with two main sections: INS and GPS. In the INS section, the 'Filename' field contains ':CT\NLSC2020\AINS_NLSC\Demo\20200416A_IMU.ASC', the 'Format' dropdown is set to 'Angle and velocity increments', and the 'NLSC' format is selected in a secondary dropdown. The 'Data rate (Hz)' is set to 200, 'Start' is 353707.485, and 'End' is 355094.220. In the GPS section, the 'Filename' is 'NLSC\Demo\20200416A_(F-C-R3)POS-2_VRS_200HZ.txt', the 'Format' is 'Position', and three 'Leverarm (m)' fields are set to 0. The 'Position STD scale' and 'Velocity STD scale' are both set to 1.

圖 3.12 新增 NLSC 格式



圖 3.13 使用國土測繪中心資料進行解算之成果

本團隊亦嘗試使用國土測繪中心所提供之輪速計資料於 AINS 軟體中提供輔助資訊。惟發現國土測繪中心之輪速計存在資料脫落之問題，如圖 3.14 所示。後續處理上，也在 AINS 軟體中加入保護機制，當輪速=0 且估計速度與輪速差之絕對值大於三倍標準差時，視為輪速輸出有誤，自動將該筆輪速資料移除，如圖 3.15 所示。

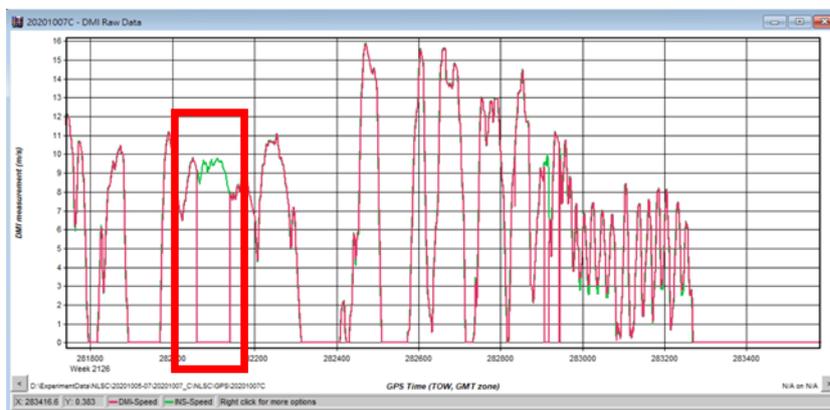


圖 3.14 測繪中心輪速計資料(紅色)與參考解速度(綠色)比較

```

Vn = 0.000, Vx = 0.000, Vd = 0.000
==== Initial Attitude (deg) ====
Roll = 1.184, Pitch = 3.294, Heading = 80.000
Start: 281152.320, End: 283580.810
At time 281893 Odometer DATA DROP detected!
At time 281894 Odometer DATA DROP detected!
At time 281895 Odometer DATA DROP detected!
At time 281896 Odometer DATA DROP detected!
At time 281897 Odometer DATA DROP detected!
At time 281898 Odometer DATA DROP detected!
At time 281899 Odometer DATA DROP detected!
>>

```

圖 3.15 輪速計偵錯系統

3.3 光達直接地理定位開發

隨著傳統測量技術的演變與成長，現今測量與空間資訊技術多元發展，在眾多空間資訊技術中，最廣為人知的技術為即時移動式測量及空間資料收集平台-移動式的遙測及製圖系統。移動式的測繪系統，不同於以往傳統影像測量技術的資料收集方式，本案結合光達系統與定位定向系統發展光達直接地理定位。透過光達三維點雲資料的輔助達到三維製圖與量測目的，本案採用光達系統與定位定向系統，發展直接地理定位與率定技術來做進一步的延伸應用。利用光達系統的高度感測能力，可量測大量資訊，相比於傳統移動測繪系統可以節省時間與人力成本。而利用光達整合定位定向系統與製圖技術除了可以快速的進行環境重建外，透過光達率定處理技術更可以快速地建置與產製精確且龐大的點雲資料並提供後續分析及應用。

3.3.1 光達系統介紹

本團隊採用光達系統為 Velodyne VLP-16，並搭配商業的戰術等級定位定向系統。VLP-16 為 Velodyne 推出的小型光達，此款光達將重量與體積大幅縮小，與之前的版本相比，成本也大幅降低。圖 3.16 為光達主體的設計圖，圖中清楚標示光達主體的大小與相關設置，而相位中心與角度標示也利於後續軸角與固定臂的計算。表 3.5 為 VLP-16 光達的規格，最大有效範圍為 100 公尺，360 度水平掃描，並有 30 度的垂直掃描範圍，水平角度解析度為 0.1 度而垂直則為 2 度。整體測距精度為 3 公分。以往影像在蒐集與建置上需要花費較長的時間，而光達點雲資訊為短時間提供模型或者圖資的重要來源，此外 VLP-16 本身重量與體積較小，可提供較大的使用彈性。

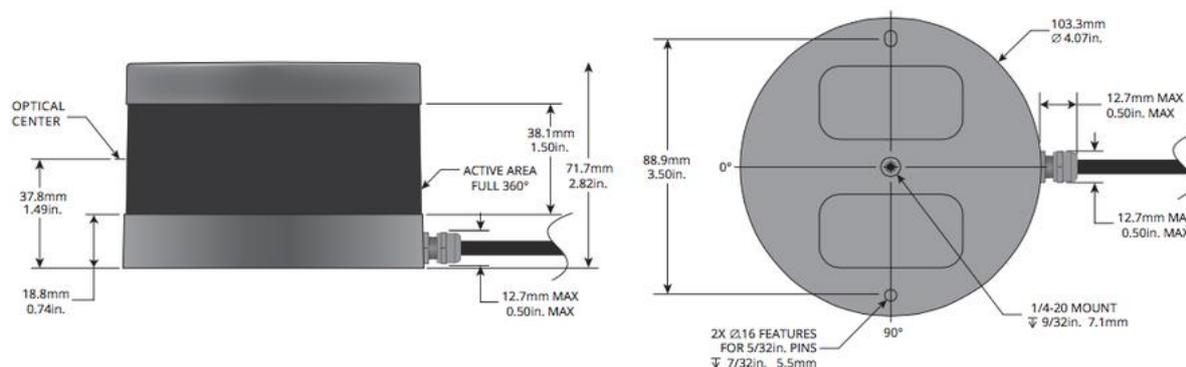


圖 3.16 VLP-16 主體設計圖(VLP-16 User Manual, 2016)

表 3.5 VLP-16 規格(VLP-16 User Manual, 2016)

產品名稱	光達
型號	VLP-16
測距範圍	最大測距距離: 100m
精度	±30mm
掃描範圍 (水平)	360°
掃描範圍 (垂直)	30°(±15°)
掃描速度	5-20Hz
角度解析度 (水平)	0.1°
角度解析度 (垂直)	2°
重量	830g
體積 (直徑*高)	103x72mm

光達系統中，提供了與 GNSS 整合資料，對於未來規劃與定位模組的整合上，有較可靠的資料使用。不同於以往外部資料後處理整合的程序，VLP-16 提供了專屬控制盒進行整合使用，提供較佳的時間整合機制。圖 3.17 為整套硬體設備的初步規劃。配合外部 GNSS 天線的使用，傳輸衛星系統時間與位置給控制盒，在資料的收集上有較大的便利性，目前不需依賴外部的定位系統即可以達到初步的資料整合與蒐集，未來配合慣性導航系統預期可提升整體圖資精度。而考慮到資料採集與未來硬體配置的需求，硬體本身採集資料的頻率與掃描範圍也可以調整。針對未來使用的需求，可以控制資料的接收速度，進而控制資料量，避免多餘的空間浪費。而掃描範圍的設定則可以依據光達主體擺放位置的不同，針對興趣範圍內進行資料採集，有效提升後續資料處理的速度。

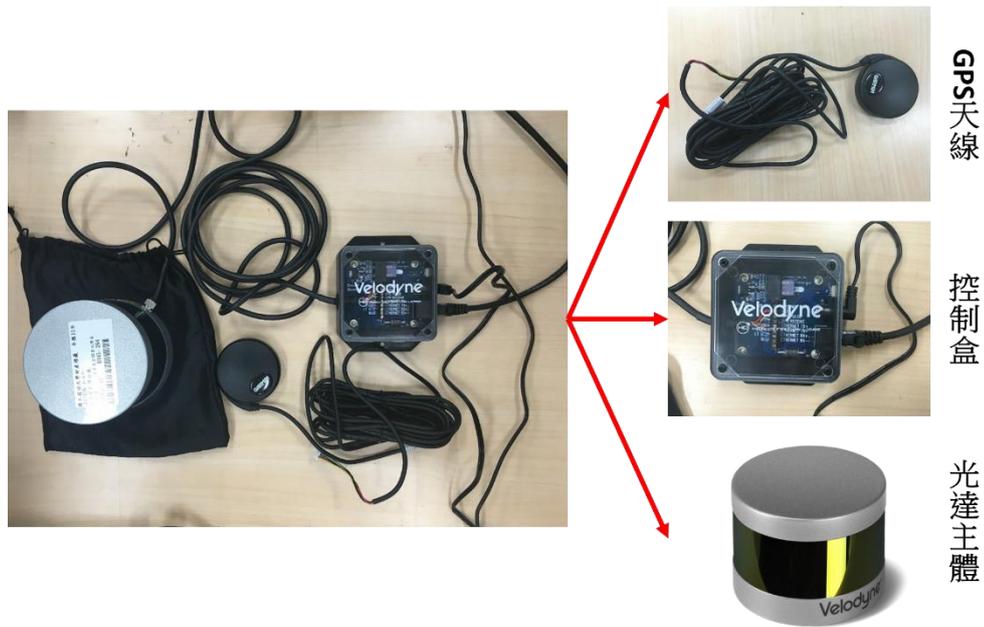


圖 3.17 VLP-16 硬體配置

本團隊也開發相關點雲計算演算法與直接地理定位方式，因此，硬體本身資料採集的依據與資料解讀是後續處理計算的重要步驟之一。由原廠提供的資料解算示意圖中(如圖 3.18 所示)，透過水平掃射角度 α 與垂直角 ω ，搭配觀測距離，可計算相位中心與反射點的位置向量，在後續與外部 INS/GNSS 定位系統整合上，只要確定軸角與固定臂的數值，即可以推算光達點雲絕對坐標，達到移動製圖所需的直接地理定位成果。

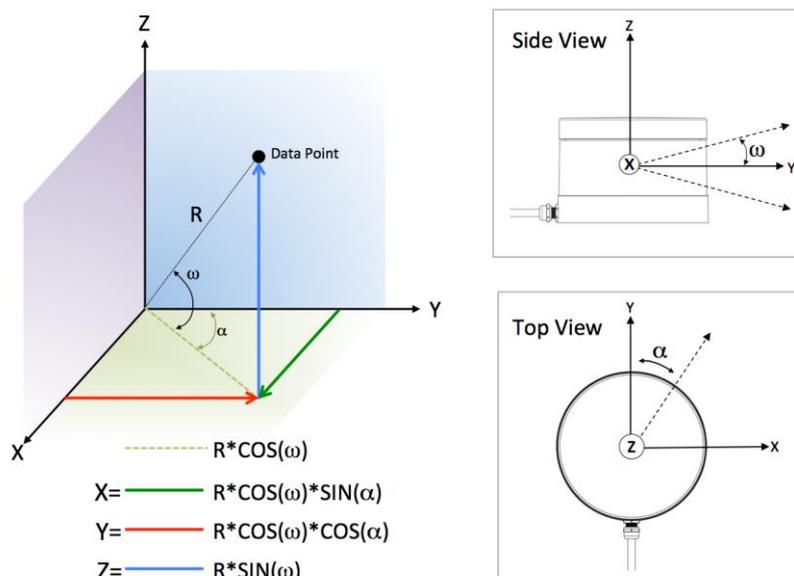


圖 3.18 VLP-16 原始資料解算示意圖(VLP-16 User Manual, 2016)

3.3.2 光達直接地理定位演算法開發

本案目前採用直接地理定位處理光達資料，使用傳統攝影測量直接地理定位之核心原理，主要的概念為透過衛星接收儀與慣性測量儀，搭配事先率定好的慣性測量儀與光達間的空間關係(含平移與旋轉)，直接觀測時慣性測量儀中心的位置與姿態投影至光達中心，在化算到點雲坐標。圖 3.19 為傳統直接定位原理。

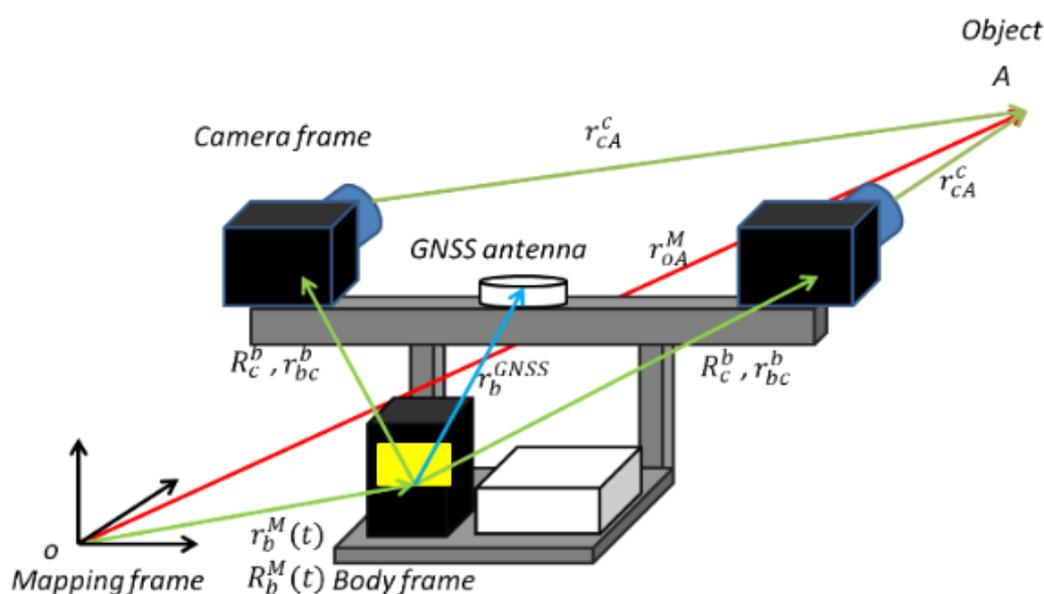


圖 3.19 傳統攝影測量直接定位原理

本案著重於找出定位定向 POS 與光達系統之間的相對位置關係，來進一步提升光達直接地理定位的精度，如圖 3.20。直接地理定位技術著重在使用導航資訊，如位置與姿態，進一步賦予製圖觀測量在空間中的坐標。圖 3.20 中，我們可以看到光達系統的坐標，是基於光達坐標系統下所量測，其量測原理與計算如 3.3.1 節中圖 3.18 所示。利用導航資訊計算出該物點在製圖坐標系統中或者通用的全球坐標系統中的三維位置資訊。式 3.46 中，物點在製圖坐標系統中以 r_i^m 表示，利用在不同時刻的導航資訊(r_{nav}^m 與 R_b^m) 配合率定所得的軸角及固定臂參數(R_i^b 與 r_{nav}^b)，進而推算光達坐標系統中的物點(r_i^l)坐標。

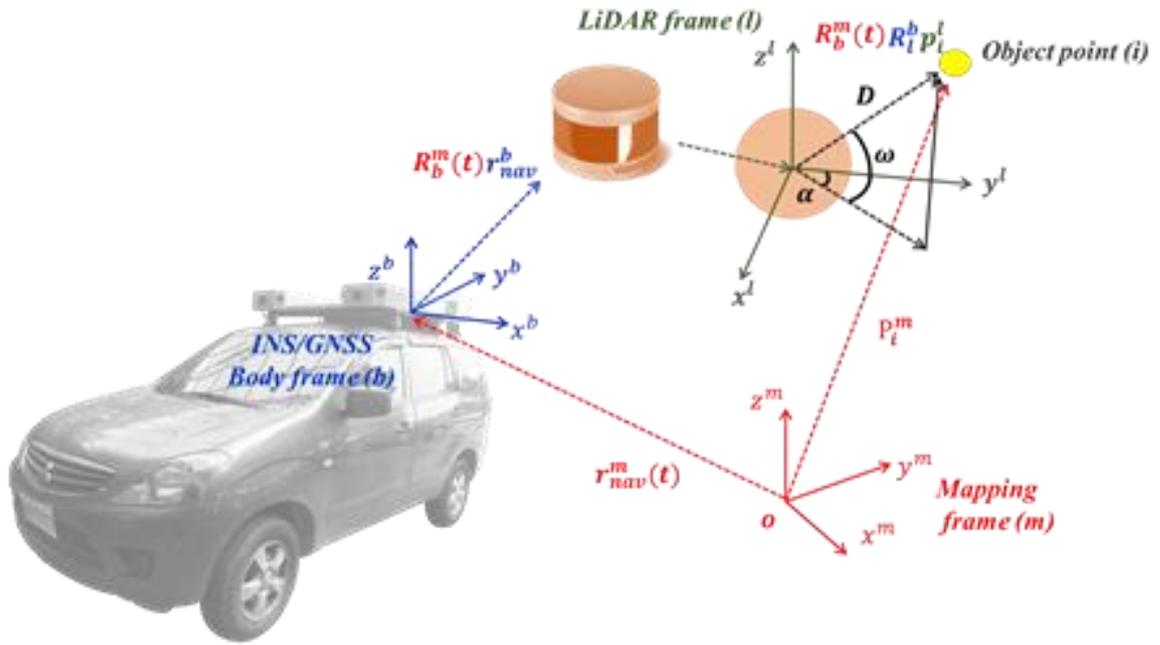


圖 3.20 光達直接定位原理

$$r_i^m = r_{nav}^m(t) + R_b^m(t) \times (R_l^b r_i^l + r_{nav}^b) \quad (3.46)$$

為了將兩套系統觀測量進行深度的整合，本團隊將利用系統中的 GPS 時間，來進行時間同步。該作業流程可分為下述幾個步驟：

1. 時間同步：光達觀測量中，本身系統控制器中有記錄各個點雲資料的原始量與時間戳，該光達時間戳可利用 GPS 的時間資訊，進行初步的對準。
2. 時間對準：透過第一階段的同步，可以將光達時間戳對應的 GPS 時間給計算出來，同時可以去計算定位定向系統的也是以 GPS 時間的導航資訊。
3. 內插導航資訊：在計算對應的導航資訊中，因兩者系統的輸出平率不一致，我們可以去內插出對應的精確導航資訊，避免時間不一致的問題產生。
4. 加入率定參數：藉由率定或者量測的軸角與固定臂參數，讓演算法可以將位於光達坐標系統的物點坐標轉換至以載體為主的坐標系統中。
5. 直接地理定位：透過式 5.1，將導航資訊與率定參數加入計算，可以實現直接地理定位成果。

3.3.3 規劃光達直接地理定位率定

現今光達儀器技術發展成熟，除了高規格的商業系統之外，許多公司也開始開發除了測量應用之外的光達感測儀器。這類儀器在使用上更具彈性，可應用於機器人感測和自走車，甚至是現在廣為流行的無人飛行載具上。然而，價格相較便宜外，在軟體的設計與儀器的率定上，比一般商業系統簡陋許多。因此，本案主要開發一套整合 INS/GNSS 的光達直接地理定位系統，並規劃相關作業流程與程序，以執行光達率定相關作業。

在率定中，可以看到各個誤差在不同航帶或者不同掃描方向上的影響程度。其中，主要影響量則是軸角與固定臂的影響。而本案感測器在 VLP-16 在出廠率定中，已經有提供原始觀測量(距離與角度)的改正量，因此在本案率定軸角與固定臂，透過文獻中的相關公式與率定方式來進行計算。並且呈現相關率定成果與精度評估方式。

率定平差模式的推導上，我們可以先從直接地理定位的理論中開始，如式 3.47 所示，透過直接地理定位，賦予導航資訊與率定值讓我們可以得到在製圖坐標系統中的點雲位置。

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^m + R_b^m \left[R_s^b \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \right] \quad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D * \cos(\omega) * \sin(\alpha) \\ D * \cos(\omega) * \cos(\alpha) \\ D * \sin(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

在直接地理定位之前，也必須將點雲本身的原始觀測量如，距離以及水平跟仰角轉換成三維的坐標，該坐標落於光達本身之坐標框架，透過率定值進一步與載體本身坐標框架結合，再轉換至我們常用之製圖坐標系統中。

本案率定目標中，著重在軸角與固定臂上，但由於車載系統中，多半皆平面道路，而多數牆面也垂直於地面，這些地理條件限制，導致在高程方向的固定臂解算法，會帶有較大的相關性與較差的幾何資料。故此，本案在垂直固定臂值解算上，只採用初始量測值(捲尺量測)做為真值。

Skaloud & Lichti (2006)提出的率定模型，主要給空載光達來進行，為了本案運用於車載系統上的需求，本團隊推導相關公式，設計一套適用於本車載系統與感測器的率定模型。使用低成本光達，因為解析度上的限制與成本考量，並無法得到密度較高以及與彩色影像匹配完善的彩色點雲，因此傳統的控制點，一階段或者二階段率定並無法完全採用。而根據文獻中的率定模型，本案延續採用以平面特徵來進行的率定方式。式 3.49 為率定模型之方程式。 $\vec{s}_j = [s_1, s_2, s_3, s_4]^T$ 為平面特徵法向量的表現方式，構成平面方程式： $s_1x_i + s_2y_i + s_3z_i + s_4 = 0$ 。

$$\left\langle \vec{s}_j, \begin{bmatrix} \vec{r}_i \\ 1 \end{bmatrix} \right\rangle = 0 = f(\vec{\ell}, \vec{x}_1, \vec{x}_2) \quad (3.49)$$

率定模型之主要概念在於，透過直接地理定位之點雲，在不同方向或者航帶的掃描上，所觀測到的點雲所構成的平面特徵在製圖坐標系統下，具有統一且一致的平面法向量。因此透過式 3.49 中，我們可以理解到經過直接地理定位之點雲坐標 \vec{r}_i 須符合平面方程式。其中，方程式 f 裡面， $\vec{\ell}_i = [X, Y, Z, r, p, y, l_x, l_y, l_z]^T$ 為觀測量，三維載體坐標、旋轉角度以及點雲資訊。而 $\vec{x}_1 = [a_x, a_y, \alpha, \beta, \gamma]^T$ 為主要之率定參數，固定臂與軸角。 \vec{x}_2 則為平面法向量參數，因此，總共有 9 個未知數。此外，為了避免空間中有無限多組平面法向量，也需要對法向量進行約制，加入法向量約制方程式 $s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 - 1 = 0$ 。

在實現最小二乘法平差之前，因式 3.46 不為線性方程式，因此需要將其線性化，過一階泰勒展開式組成 Jacobian Matrix。而率定模型同時包含條件與間接觀測模型，因此採用 Gauss-Helmert 的混和式平差方法。式 3.50 為率定之線性化公式。 $A_1 = \partial f / \partial \vec{x}_1$ ， $A_2 = \partial f / \partial \vec{x}_2$ 分別對固定臂及軸角未知數與平面法向量進行偏微分，與其對應則是增量。B 則為對觀測量進行偏微分，其對應之觀測量誤差量。透過給定初始值，我們可以求解出 w 值，給後續組合式平差模型使用。而公式 3.51 為約制條件線性化之公式。對法向量約制方程式進行偏微分求出 G 矩陣並且透過初始平面法向量求出 w_c 。

$$A_1 \hat{\delta}_1 + A_2 \hat{\delta}_2 + B \hat{v} + w = 0$$

$$\begin{matrix} m, u_1 & m, u_2 & m, n & m, 1 & m, 1 \\ u_1, 1 & u_2, 1 & n, 1 & & \end{matrix} \quad (3.50)$$

$$G \delta_2 + w_c = v_c$$

$$\begin{matrix} c, u_2 & c, 1 & c, 1 \\ u_2, 1 & & \end{matrix} \quad (3.51)$$

平差過程中，為了權衡各個參數與變數之間的信賴程度與關係，需要針

對各個觀測量進行權重之考量，在觀測量方面，我們可以透過慣性導航與衛星定位之結果與感測器精度，來推算其觀測量之權重，同時，在對於約制條件，如法向量，其權種更應大於觀測量，藉此可有效來提升位置數解算效率，加快整體成果收斂。式 3.52 為最小二乘之平差矩陣模型，P 與 P_c 為觀測量之權重與平面法向量之權重。藉此可組成法方程矩陣 N，並且推算最後未知數增量。如式 3.53 與 3.54。

$$\begin{bmatrix} A_1^T(BP^{-1}B^T)^{-1}A_1 & A_1^T(BP^{-1}B^T)^{-1}A_2 \\ A_2^T(BP^{-1}B^T)^{-1}A_1 & A_2^T(BP^{-1}B^T)^{-1}A_2 + G^TP_cG \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T(BP^{-1}B^T)^{-1}w \\ A_2^T(BP^{-1}B^T)^{-1}w + G^TP_cw_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$N\hat{\delta} + u = 0 \quad (3.53)$$

$$\hat{\delta} = -N^{-1}u \quad (3.54)$$

透過反覆的迭代求解增量，可設定相關門檻值來確保迭帶次數不會無限循環，也保障求解之參數不會是局部最佳解。

3.3.4 VLP-16 光達率定成果

本案中包含兩次光達率定。分別為台南-花園夜市(台南實驗場域使用); 台中-港灣技術研究中心(台中實驗場域使用)。率定之平面方程式迭帶初始值來自現場使用捲尺量測之固定臂長，而軸角參數則因量測困難故以 0 為初始值。

■ 台南-花園夜市

表 3.6 為率定前後固定臂與軸角參數之比較，由圖 3.21 可確認本次率定成果之收斂情形，經過 5 次迭代後收斂。而由表 3.7 及圖 3.22 可見平面閉合差經過率定後由原本近-0.2 公尺的平均誤差及 0.6 公尺的標準差降低至趨近零。

表 3.6 花園夜市率定成果-固定臂與軸角參數比較

Initial Boresight Lever-Arm Value					
Roll(degree)	Pitch(degree)	Yaw(degree)	Ax(meter)	Ay(meter)	Az(meter)
0	0	0	-0.204	1.000	-0.079
Calibration Boresight Lever-Arm Value					
-0.099	0.076	-0.063	-0.203	1.016	-0.079

表 3.7 花園夜市率定成果-平面閉合精度

Misclosure		
	Before Calibration	After Calibration
Number of Points	141293	141293
Average(meter)	-0.199	-1.413e-09
STD(meter)	0.595	1.453e-09

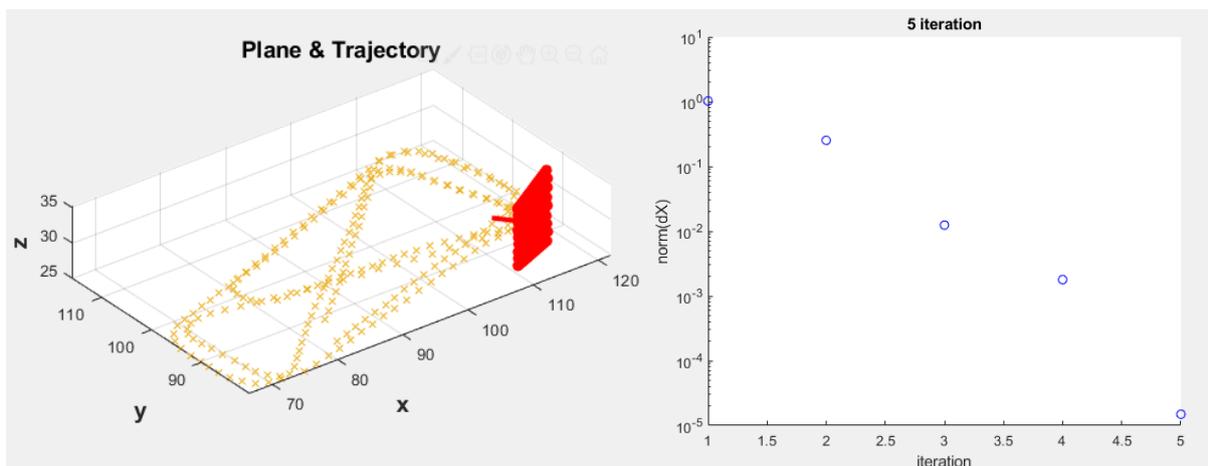


圖 3.21 (左) 花園夜市光達率定所使用平面與軌跡；(右) 花園夜市光達率定迭代收斂圖

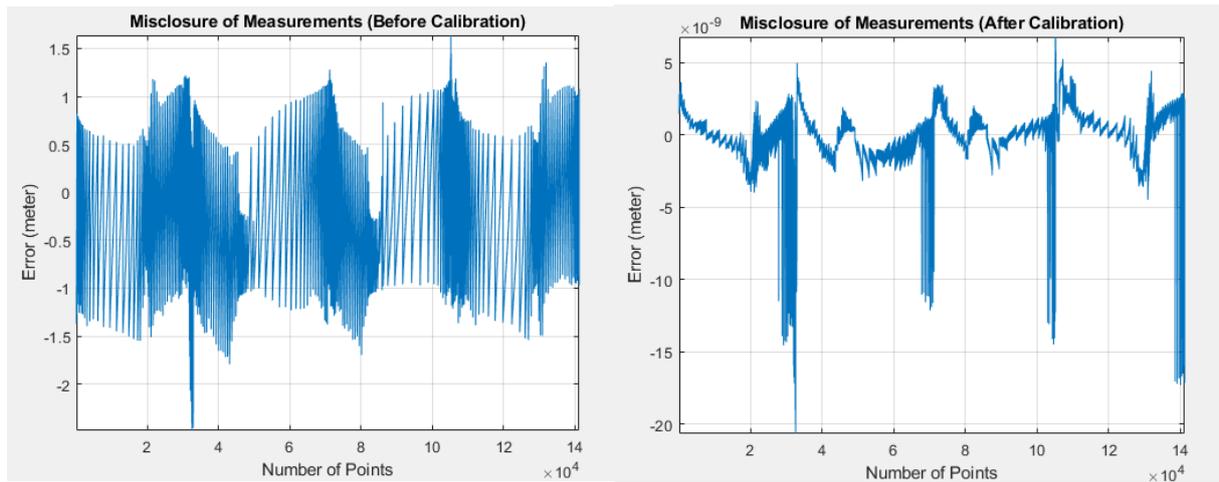


圖 3.22 花園夜市光達率定平面閉合差圖(左)率定前(右)率定後

■ 台中-港灣技術研究中心

表 3.8 為率定前後固定臂與軸角參數之比，由圖 3.23 可確認本次率定成果之收斂情形，經過 10 次迭代後收斂。而由表 3.9 及圖 3.24 可見平面閉合差經過率定後由原本近 1 公尺的平均誤差及 0.25 公尺的標準差降低至微米等級。

表 3.8 港灣技術研究中心率定成果-固定臂與軸角參數比較

Initial Boresight Lever-Arm Value					
Roll(degree)	Pitch(degree)	Yaw(degree)	Ax(meter)	Ay(meter)	Az(meter)
0	0	0	-0.204	1.000	-0.079
Calibration Boresight Lever-Arm Value					
-0.408	0.952	-1.903	-0.206	1.234	-0.079

表 3.9 港灣技術研究中心率定成果-平面閉合精度

Misclosure		
	Before Calibration	After Calibration
Number of Points	100352	100352
Average(meter)	0.918	-1.749e-06
STD(meter)	0.258	3.064e-05

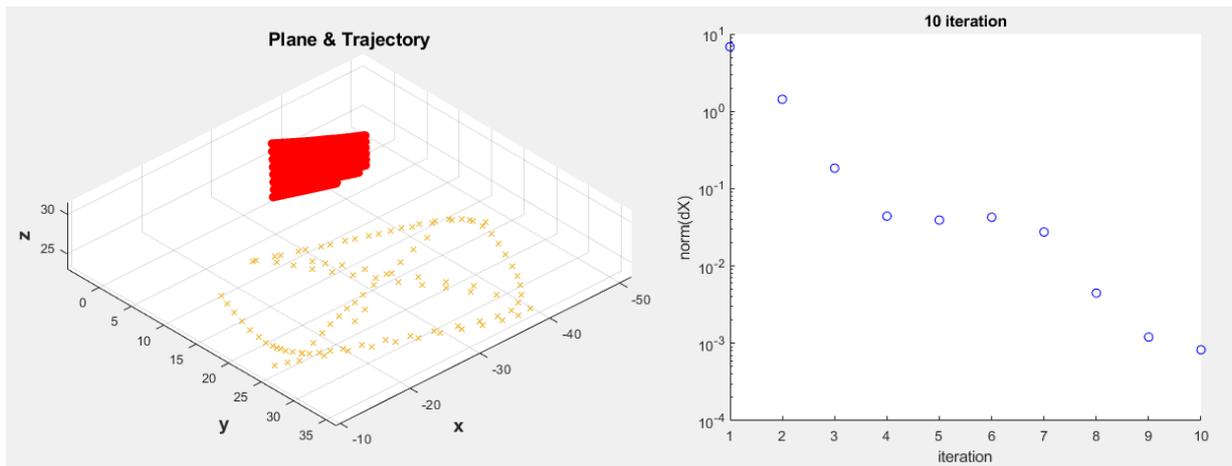


圖 3.23 (左)港灣技術研究中心光達率定所使用平面與軌跡；(右)港灣技術研究中心光達率定迭帶收斂圖

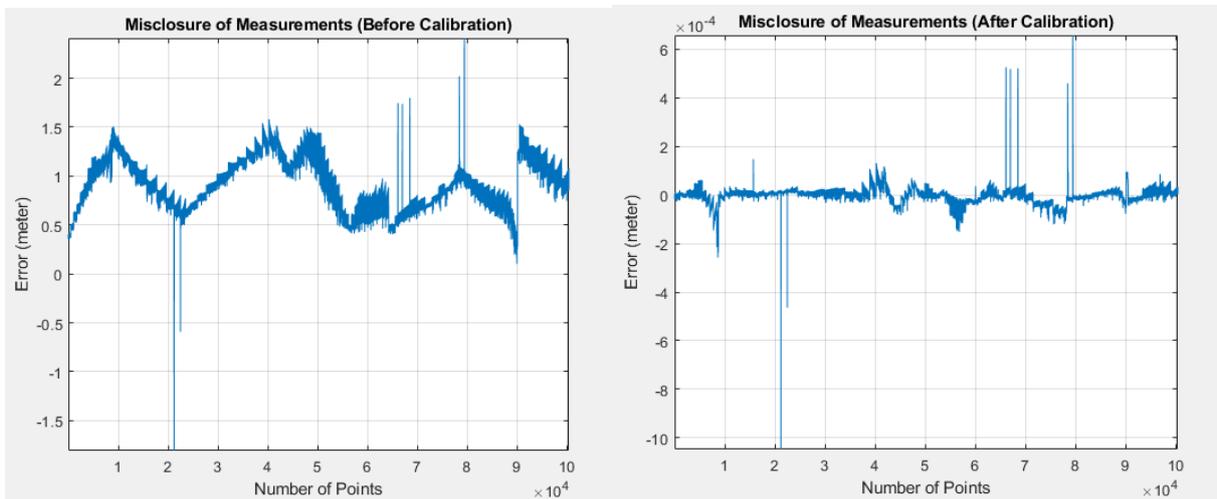


圖 3.24 港灣技術研究中心光達率定平面閉合差圖(左)率定前(右)率定後

3.4 同步定位與製圖技術開發

本小節將針對本案研提之光達 SLAM 演算法進行詳細描述，圖 3.25 所示為光達 SLAM 執行架構，目前的演算法開發可分為四大部分，分別為(1)點雲預處理(Pre-processing)、(2)點雲匹配(Registration)、(3)點雲成果優化(Refinement)及(4)去除雜訊或平滑等過程(De-noising/Smoothing)。透過上述流程即可求得速度及航向角觀測量，用以反饋 EKF 並與原有之 INS/GNSS 觀測量進行整合。

首先，點雲預處理之目的為移除離群值，例如地面點及距離光達較遠之點雲，另一方面可透過預處理縮減點雲容量以減少後續計算時間。預處理一般包含設定極限距離(Limit range)、移除地面點(Remove ground points)、降噪處理(De-noising)及降採樣(Down-sampling)。

第二步驟為點雲匹配，也是整個 SLAM 中最重要的一环，本案研提之 NDT 與 ICP 即為處理點雲匹配之演算法。透過匹配連續掃描之光達點雲，可得基底/參考點雲(固定)與目前點雲(移動)間之轉換關係(含平移及旋轉)。而在匹配的過程中需要每個掃描點雲的正確初始資訊，實務執行以內插 GPS Time 之方式取得來自 INS/GNSS 整合解(GNSS 接收良好處)或 INS(GNSS 遮蔽處)的位置與姿態訊息。

第三步驟為點雲優化處理，輸入為原始點雲、預處理點雲及 ICP/NDT 所求得之點雲間之轉換關係，其目的為透過重新計算 1 Hz 的轉換關係以優化 Pose(含位置及姿態)，並為下一組匹配點雲構建地圖。

最後，成功匹配完所有點雲後，將透過降噪平滑的方式處理 SLAM 原始輸出之速度及航向角觀測量以提供 EKF 穩定的更新值，而在本案中所使用的降噪方法為小波降噪法(Wavelet de-noising) (Donoho, 1995)。

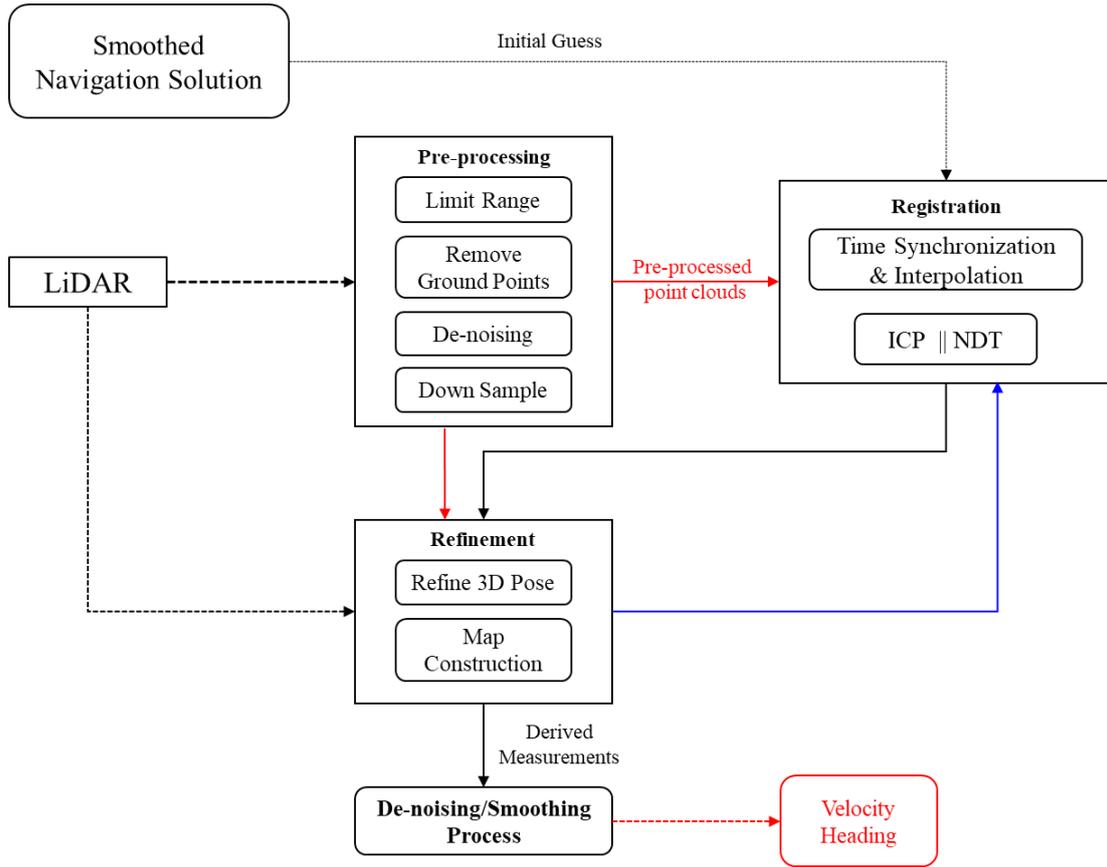


圖 3.25 光達 SLAM 執行架構

3.4.1 迭代最近點法(ICP)

ICP 演算法的核心概念非常簡單，即給定一初始值後演算法會迭代地計算出所有點之對應關係。在每次迭代中，ICP 會最小化兩點雲間之距離函數，以選定之最近點計算兩點雲間的轉換關係。點對點 ICP 距離函數定義如式 (3.55)：

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_d} \|\mathbf{s}_i - (\mathbf{R}\mathbf{d}_j + \mathbf{t})\|^2 \quad (3.55)$$

其中 N_m 及 N_d 為參考點雲 \mathbf{s}_i 及目前點雲(待匹配之點雲) \mathbf{d}_j 的點雲數量。而 \mathbf{R} 及 \mathbf{t} 為兩點雲間之旋轉矩陣及平移向量。

而點對面 ICP 則是最小化參考點與目標平面中之目標點間之距離平方總和，其公式表示如下：

$$\mathbf{T}_{opt} = \operatorname{argmin}_T \sum_{i=1}^N ((\mathbf{T}\mathbf{s}_i - \mathbf{d}_i)\mathbf{n}_i)^2 \quad (3.56)$$

其中 N 為點雲數, n_i 是與目標點相對應之法向量。 T 為參考點與目標點之間之轉換，包含旋轉矩陣及平移向量。

3.4.2 常態分布變換(NDT)

NDT 演算法第一步是先將點雲所在的空間細分為規則網格(2D)或立方體(3D)，然後針對每個網格或立方體計算其平均值 \mathbf{q} 與協變方 \mathbf{C} ，其公式表示如下：

$$\mathbf{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.57)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mathbf{q})(x_i - \mathbf{q})^T \quad (3.58)$$

其中 $x_{i=1,2,3,\dots,n}$ 為網格或立方體中之點雲

後續可透過高斯分布 $N(\mathbf{q}, \mathbf{C})$ 計算在特定點 x 的機率密度函數(Probability density function, PDF)，其表示如式(3.60)所示：

$$p(x) = \frac{1}{c} \exp\left(-\frac{(x-\mathbf{q})^T \mathbf{C}^{-1} (x-\mathbf{q})}{2}\right) \quad (3.59)$$

而點雲間之旋轉及平移關係可用向量 \mathbf{p} 表示， $\mathbf{p} = [\mathbf{t}|\mathbf{r}|\phi]$ ， $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]$ 為平移， $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]$ 為三軸之旋轉， ϕ 為旋轉角。如此一來，特定點 x 於點雲間的轉換方程式可表示如下：

$$T(\mathbf{p}, x) = \mathbf{r}x + \mathbf{t} \quad (3.60)$$

該算法進一步透過評估所有光達點上的 PDF 來決定當前 Pose(含位置及姿態)的適合度，並透過分數函數 s 來表示：

$$s(\mathbf{p}) = -\sum_{i=1}^n pdf(T(\mathbf{p}, x_i)) \quad (3.61)$$

由式(3.61)可知，一旦給定轉換參數 \mathbf{p} ，即可透過 PDF 函數和轉換方程式 T 決定最小化問題，實務上通常使用牛頓法進行迭待求解。

3.5 固定標設計與測試

本案目標為透過 SLAM 演算法提升光達測繪車於都市區或其他 GNSS 訊號易受遮蔽場域之定位精度。然而，若能於測區適當引入控制點或特徵點條件約制，有助益於定位精度之提升，因此本案設計並結合利用布設固定標以輔助前述 SLAM 演算法進一步提升載具定位品質。

3.5.1 固定標材質、顏色需求

實務上，固定標材質選擇需滿足下列條件：(1)對雷射光反射能力強，固定標於整體點雲中須具有較高之強度值(Intensity)；(2)經掃描後點雲分布形狀能維持原固定標幾何形狀，達到易辨識之功能；(3)容易製作且材質易取得，達成後續標準化與普及性之需求。表 3.10 為不同種固定標材質、反射強度、完整性及是否容易製作之比較(賴志凱, 2004)。

表 3.10 不同材質之固定標之比較(賴志凱, 2004)

材質	強度值	完整性	是否容易製作
一般反光標	200-230	不佳	不易
測量用反射貼紙	過強	不佳	不易
鐵盤	75-85	佳	不易
鋁片	55-255	佳	不易
黑色塑膠板	55-255	佳	易
包裝紙	50-255	不佳	易
厚紙板	190-230	佳	易
一般用紙	180-230	佳	易
保麗龍	200-255	佳	易
稜鏡	240-255	可	可使用現有產品

固定標製作除了需考慮本身材質外，固定標顏色亦是影響反射強度的一大關鍵。Bolkas & Martinez (2017)探討多種顏色、不同反射面性質之固定標及光達掃描入射角對於反射強度值影響之實驗。圖 3.26 為 Bolkas & Martinez (2017)實驗之固定標，總共八種顏色，每種顏色具備兩種不同反射性質之標面，左為平光漆，可達到最小的反光效果，右為半亮光漆，能營造出光滑且

稍為反光之表面。該研究利用兩組光達設備，分別為 Topcon GLS-1500 及 Leica Scanstation P40。其測試成果如圖 3.27 所示，左為平光漆標面反射成果；右為半亮光漆反射成果。可看出平光漆的反射強度值皆小於半亮光漆，而實驗中黑色與白色之反射強度值具有最大的反差，故本案將以黑白兩種顏色搭配來設計固定標。



圖 3.26 多種顏色及不同反射材質之固定標(Bolkas & Martinez, 2017)

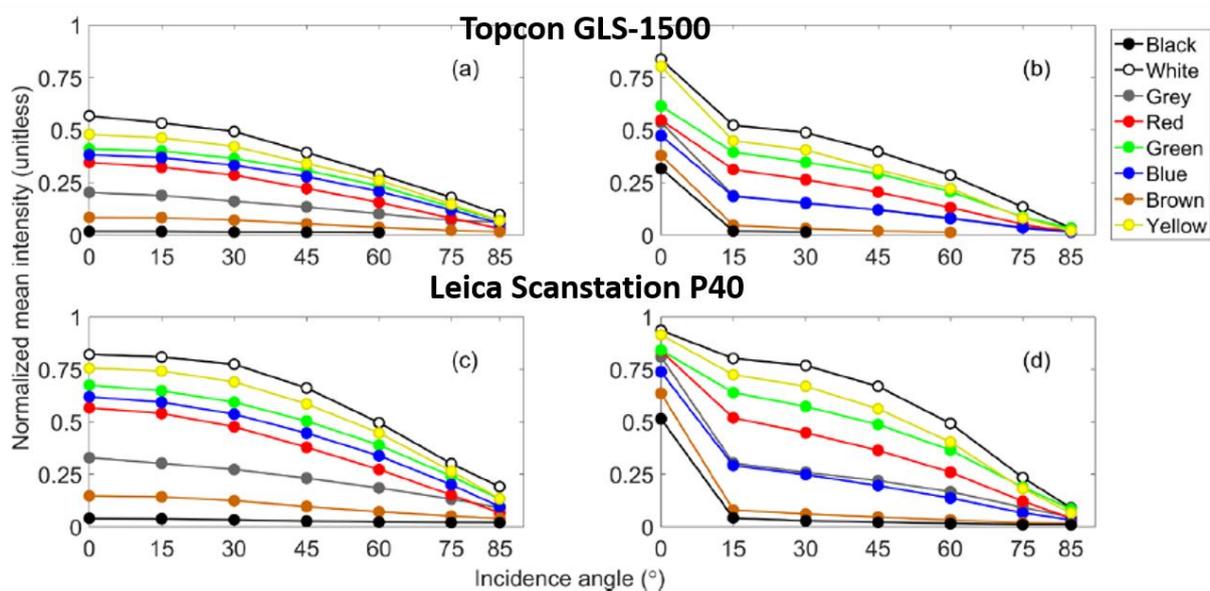


圖 3.27 光達實際掃描成果(Bolkas & Martinez, 2017)。(上)Topcon GLS-1500；(下)Leica Scanstation P40

3.5.2 固定標設計與製作

圖 3.28 為目前市售常見的固定標樣式，大致可分為圓形標或方標，大小介於 2.5 公分至 20 公分之間，視不同應用場合可使用不同的標型。而各大廠牌之光達最常用的固定標如圖 3.29 所示，左為黑白相間之圓形標，右為黑白相間之棋盤格標。故本案依照此兩款固定標進行製作，並實地測試光達掃描之反應。

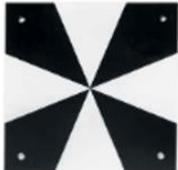
<p>[Waterproof]</p>  <p>RSL300 Laser Scanner Target £9.00 inc VAT</p> <p>[20 cm*16 cm]</p>	<p>[Plastic]</p>  <p>13D - 3mm Point in 10mm Ring Target £2.22 inc VAT</p> <p>[Diameter: 4 cm]</p>	<p>[Plastic]</p>  <p>13BL Circles Target £3.24 inc VAT</p> <p>[Diameter: 6 cm]</p>	<p>[Plastic]</p>  <p>13B Circle Target and Support £7.80 inc VAT</p> <p>[Diameter: 6 cm]</p>	<p>[Self-adhesive vinyl]</p>  <p>SCCS Fluorescent SAV Yellow Target £0.42 inc VAT</p> <p>[2.5 cm*2.5 cm]</p>
<p>[Aluminum]</p>  <p>13G-2 Maltese Cross in Anodised Black & Silver £4.92 inc VAT</p> <p>[10 cm*10 cm]</p>	<p>[Self-adhesive]</p>  <p>3" x 3" Square Planer £114.00 inc VAT</p> <p>[7.6 cm*7.6 cm]</p>	<p>[Self-adhesive]</p>  <p>6" Circular Planer £252.00 inc VAT</p> <p>[Diameter:15.2 cm]</p>	 <p>3" x 3" Tilt & Turn £162.00 inc VAT</p> <p>[7.6 cm*7.6 cm]</p>	 <p>6" Circular Tilt & Turn £324.00 inc VAT</p> <p>[Diameter:15.2 cm]</p>
 <p>6" Grey & White Tilt & Turn for P20 £324.00 inc VAT</p> <p>[Diameter:15.2 cm]</p>	 <p>6" Black & White Tilt & Turn for P30 & P40 £324.00 inc VAT</p> <p>[Diameter:15.2 cm]</p>	<p>[Aluminum]</p>  <p>Scanning Target 46-LZ100 £234.00 inc VAT</p> <p>[Diameter:10 cm]</p>	<p>[Aluminum]</p>  <p>Scan Target 46-LZ200 £234.00 inc VAT</p> <p>[20 cm*20 cm]</p>	 <p>Leica GZT21 Scanning Target £264.00 inc VAT</p> <p>[Diameter:11.4 cm]</p>

圖 3.28 市售固定標樣式

(<https://www.sccsurvey.co.uk/survey-equipment-accessories/targets/scanning-targets.html>)



圖 3.29 建議之固定標樣式

3.5.3 固定標掃描成果

由於本案採用人工於點雲中辨識固定標，故掃描測試目的為確定固定標能於點雲中清晰可見即可，測試階段一共製作了兩種大小(30*30 cm 及 40*40 cm)的棋盤格標與圓形標，測試地點位於成大歸仁校區內，掃描測試成果如圖 3.30 所示。固定標佈設高度最好能與光達等高，這是因為訊號會有最好的反射特性且掃描之點雲較不易變形。另外，由於不是所有場域都能將固定標佈設於光達等高的位置，故掃描測試亦有將某些標放置於較低位置，其高度約為一般道路路緣石或道路旁路燈基座位置(離地約 50cm-80 cm)。掃描測試亦有將標採用不同的旋轉方式(正放及旋轉 45 度)以測試掃描差異(圖中藍框處)，固定標放置的位置大約距離光達一個車道寬(2-3 m)以符合實際應用情景。

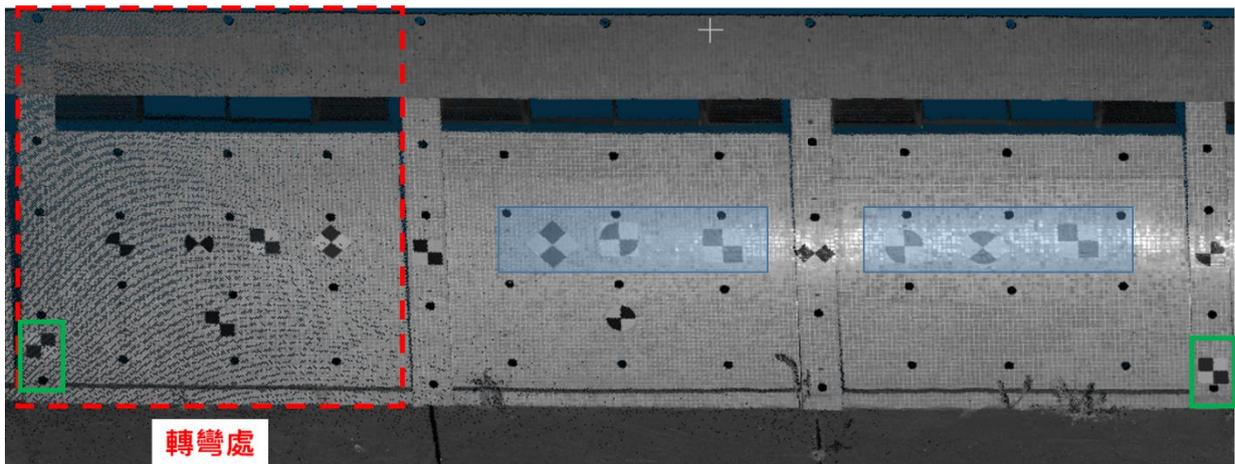


圖 3.30 固定標掃描測試成果

國土測繪中心 Z+F 擺放約為傾斜 45 度，故針對環境中物體以斜掃方式進行，如圖 3.31 所示。本案將測試點雲局部放大以確認各個固定標的掃描細

節，可發現不論是棋盤格標或是圓標皆可清楚的顯示，且擺放的角度或高度亦不造成太大差異，故皆可當作固定標使用。為了製作方便本案最後以棋盤格標為例，佈設於實驗場域做為提升定位精度之輔助資訊用。另外，國土測繪中心於台中港研中心所建置的率定場亦採用棋盤格標，故在與 Z+F 光達配合上亦已經過完整測試。此外，由於車速是最直接影響點雲密度之因素，故本案亦評估在不同車速下固定標標心可能之量測誤差，其算法如下：

棋盤格標對角線長度／標面點雲數(幾線)

此算法可計算出每線點雲之間距，可約略估計若以人工量測時因誤判而量測至相鄰點雲間之誤差，如表 3.11 所示，可供後續實務作業參考。後續實地驗證作業將使用 Z+F 軟體量測固定標(必要時可佐以開源軟體 Cloud Compare 輔助)，並透過 Z+F 內建之軌跡修正功能(Spline 修正)執行軌跡修正作業以提升整體定位精度。

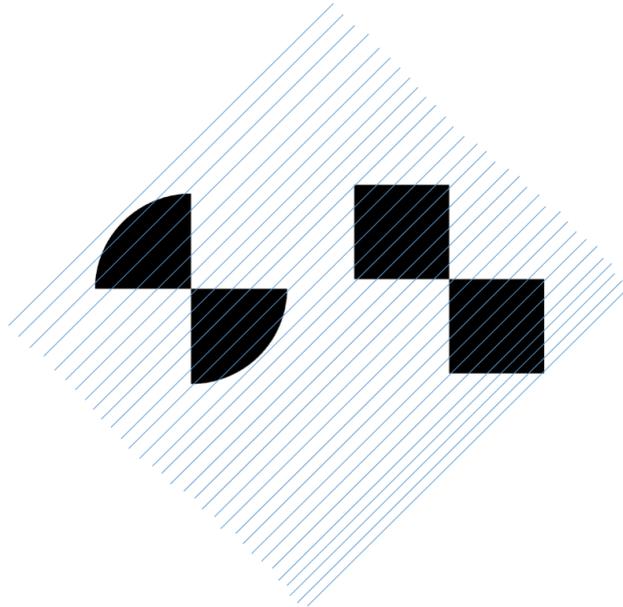


圖 3.31 Z+F 光達掃描方式

表 3.11 實驗車速與標心量測誤差範圍

實驗車速(km/hr)	人工量測標心可能之誤差(cm)
15	1.5
30	3.0
40	4.0

第四章 成果驗證

4.1 驗證場域與實驗設計

本案之驗證場域為(1)台南沙崙高鐵高架下道路及周邊道路，如圖 4.1 所示，(2)台中環中路高架下方道路，如圖 4.2、圖 4.3 所示。各組實驗描述如表 4.1 所示，將本案接收環境大致分為弱遮蔽區(GNSS 失鎖率 15%)、半遮蔽區(GNSS 失鎖率 50%-65%)及全遮蔽區(GNSS 失鎖率 100%)三種環境。1006A、1006B 兩筆實驗資料主要用於測試及驗證本案所開發之 ICP 及 NDT 之 SLAM 演算法之可靠性。本案主要測試路段為 1007A、1007B 兩筆資料(公益路二段至市政南一路)，此場域 GNSS 訊號接收環境惡劣且位於交通繁忙之主要幹道，足以代表實際環境，亦是測量實務上頗具挑戰之地點。執行 SLAM 計算時會採用整體路徑資料(包含迴轉所行駛之路段)，佈設固定標之測試路段以北向道路為主，分別行走於內線道(3 線)及外線道(2 線)，每段長度約為 950 公尺至 1 公里，並採取透空->遮蔽->透空之原則進行實驗，南向外側道路(圖 4.2 綠線)及龍富路(圖 4.2 黃線)則僅作為迴轉使用。另外本案亦於該區執行系統之壓力測試(1007C，圖 4.3)以評估本案所開發之整合系統對於國土測繪中心光達測繪車提升之效益，其全長 11km，全遮蔽環境約 3.5 公里(特指高架下路段，不包含迴轉路段)。又因慣性導航系統(INS)在無衛星觀測量輔助時誤差會隨時間累積，以及光達點雲密度受測繪車行進速度影響之特性。於實驗中亦規劃兩種不同的行車速度(30 km/hr、40 km/hr)，以評估不同行進速度下是否會影響 SLAM 演算法及整合系統之表現。本案所蒐集之資料總行走長度約為 60 公里，符合契約至少執行 10 公里測試之規定。



圖 4.1 驗證場域—台南沙崙高鐵站高架下道路及周邊道路

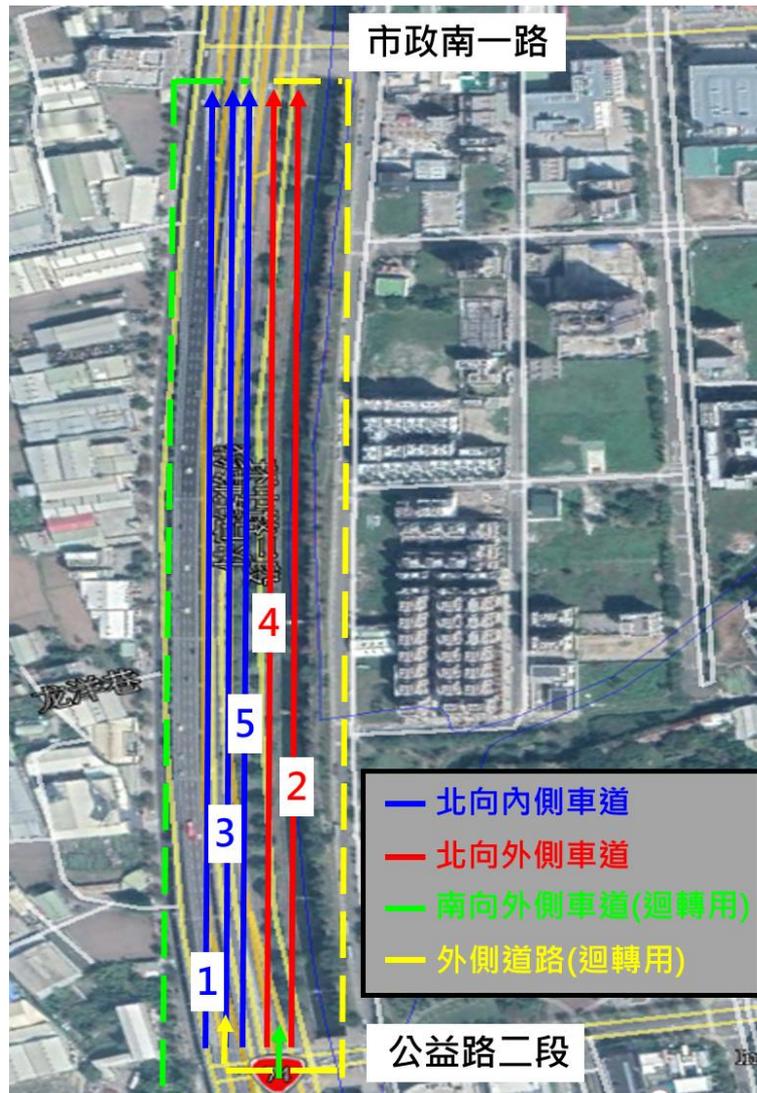


圖 4.2 驗證場域一台中環中路高架下方道路(北向道路)

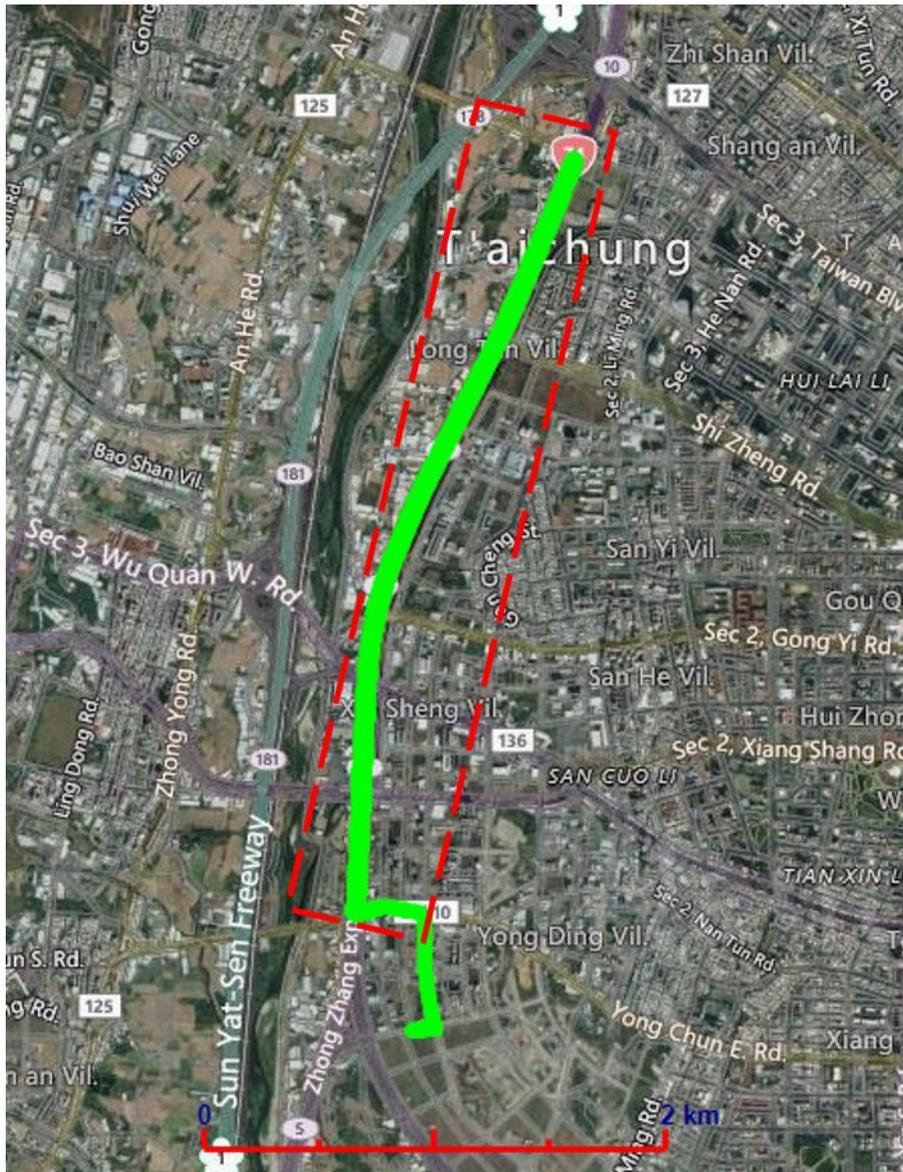


圖 4.3 驗證場域—台中環中路高架下方道路(壓力測試)

表 4.1 各驗證場域環境描述

實驗日期	路徑代號	實驗總長度 (km)	環境描述	車速 (km/hr)
20201006	1006A	9.41	弱遮蔽區(GNSS 失鎖率 15%) 1/4 道路位於高架旁 1/4 道路位於樹木密集區 2/4 一般道路(開闊環境)	30/40
20201006	1006B	9.87	半遮蔽區(GNSS 失鎖率 50%-65%) 高鐵及台鐵高架下方道路	30/40
20201007	1007A	15.75	半遮蔽(外線道)+全遮蔽區(內線道) 環中路(內線道*3+外線道*2) **公益路二段至市政南一路**	30
20201007	1007B	15.05	同上	40
20201007	1007C	11.03	全遮蔽區(3.5km) **永春東路至朝馬路**	30-40

另外，本案亦於台中環中路主要測試場域(1007A、1007B)布設固定標，佈標密度依據則參考表 3.1 之建議(100 公尺)及國土測繪中心 FSAS IMU 之飄移測試(表 4.2)，對應實驗之行走均速(30-40 km/hr)，若要將定位精度控制在 20-30 cm 內，大約 80-100 m 須布設一個固定標，故本案以 80 m 間距為原則。固定標之布設數量如圖 4.4 所示，本案一共布設 23 個固定標(內線道:12+外線道:11)，固定標之絕對坐標(TWD97)由國土測繪中心測量隊協助測量之；實際布設狀況則如圖 4.5 所示。

表 4.2 國土測繪中心 FSAS IMU 飄移測試

時速(km/hr)	精度門檻(m)	可行走時間(s)	可行走距離(m)
30	0.2	8.6	71.7
35			83.6
40			95.6
30	0.3	11.1	92.5
35			107.9
40			123.3



圖 4.4 固定標布設數量

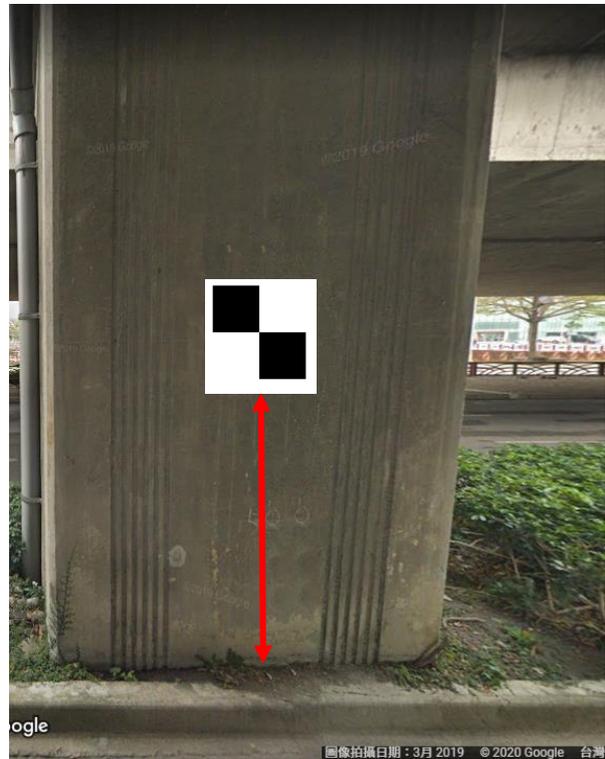


圖 4.5 固定標布設情況 (左)外線道-路燈基座；(右)內線道-高架橋墩

4.2 SLAM 成果驗證

由於點雲匹配是 LiDAR 同步定位與製圖系統的基礎，因此為了提高算法的精度、效率和穩健性，以在具有低幾何訊息的環境中實現良好的估計精度，故需要對 3D 點雲匹配方法進行全面測試和評估。本團隊使用 VLP-16 光達資料，測試 ICP 和 NDT 同步定位與製圖技術的演算法。為了驗證測試系統的準確性，分別使用 Inertial Explorer (IE) 商業軟體之緊耦合整合解和 INS/GNSS 的導航結果作為參考系統和測試系統。本小節將在以下五個不同的實驗中分析同步定位與製圖技術的觀測量更新評估（即水平速度及航向更新）。

■ 1006A-SLAM 成果

為了確認來自 LiDAR-SLAM 觀測量的可靠性，首先需要分析比較每種匹配方法(即 ICP 和 NDT)的水平速度和航向角觀測量精度，成果如表 4.3 所示。由表可看出藉由 NDT-SLAM 可獲得較高精度且接近 INS/GNSS 整合解之觀測量更新。

表 4.3 1006A—LDAR-SLAM 誤差分析

Error	ICP			NDT			INS/GNSS		
	V_E (m/s)	V_N (m/s)	Heading (deg.)	V_E (m/s)	V_N (m/s)	Heading (deg.)	V_E (m/s)	V_N (m/s)	Heading (deg.)
STD	4.31	4.65	12.82	0.15	0.12	1.53	0.03	0.03	1.00
RMSE	4.31	4.65	12.82	0.15	0.12	1.54	0.03	0.03	1.00

如上所示，與 ICP-SLAM 的方法相比，該場域中 NDT-SLAM 方法的速度和航向較穩定且更接近參考的速度和航向解。因此，即使使用稀疏點雲，NDT 也可以比 ICP（點對點）在前後時刻點雲之間具有更強的匹配能力。圖 4.6 和圖 4.7 顯示 NDT-SLAM 求得之速度和航向的比較結果。

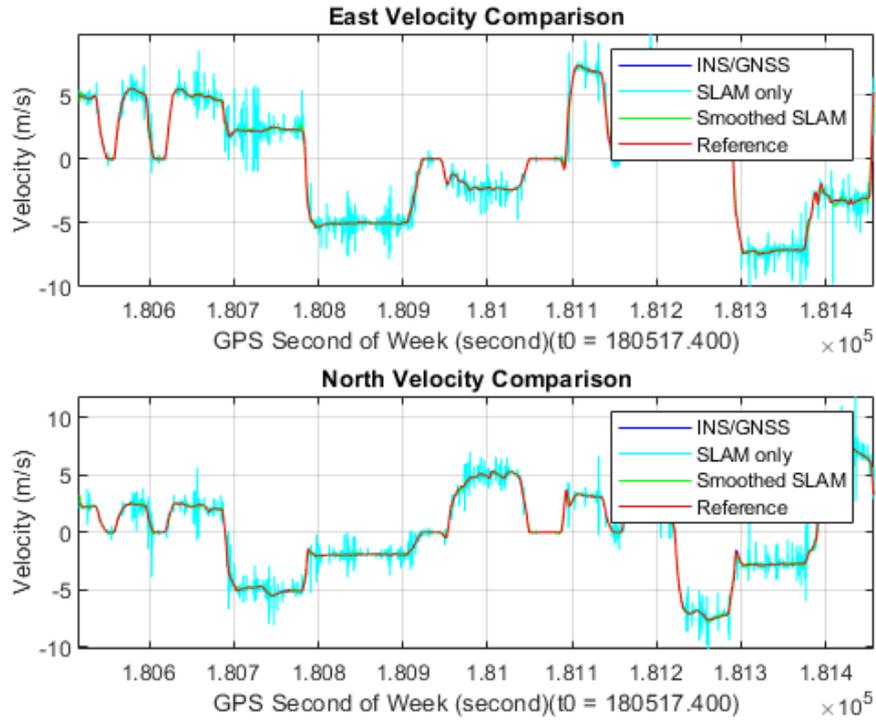


圖 4.6 1006A 之速度比較圖(NDT)

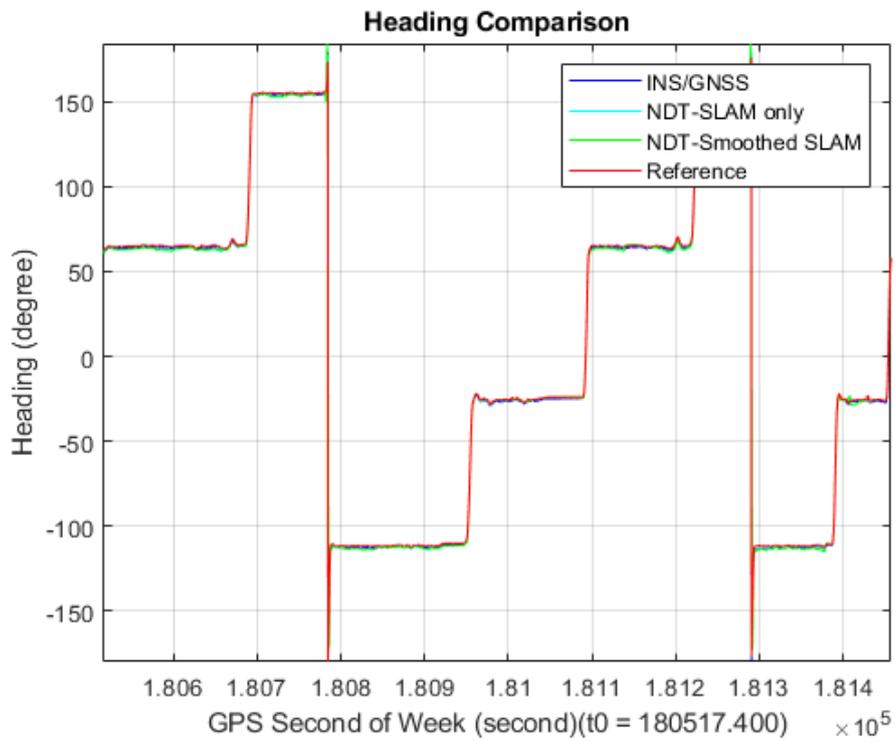


圖 4.7 1006A 航向比較圖(NDT)

為了全面評估 SLAM 更新觀測量的有效性，圖 4.8 顯示兩種匹配方法與參考解相比的二維軌跡。由圖可看出 NDT-SLAM 解與參考解較一致。因此，與 ICP-SLAM 演算法相比，該測試中的 NDT 演算法可以對 EKF 濾波器提供更可靠的 SLAM 觀測量更新。

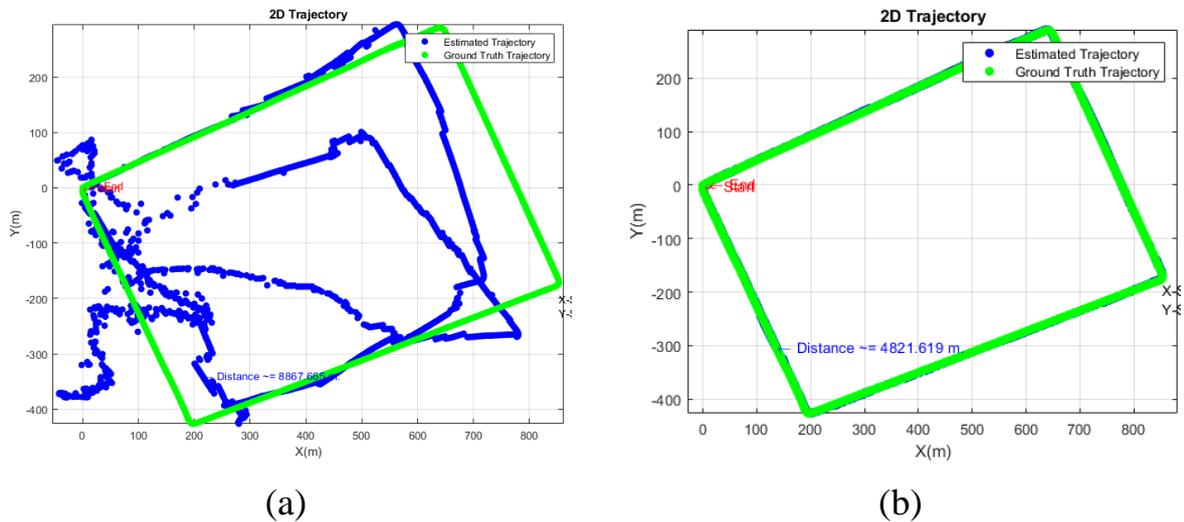


圖 4.8 1006A 二維軌跡比較圖(a)ICP；(b)NDT [SLAM 軌跡(藍點)；IE 參考解(綠點)]

■ 1006B-SLAM 成果

表 4.4 為 1006B 實驗資料使用 ICP 及 NDT 之誤差分析。由表可看出其成果與 1006A 實驗一致，皆為 NDT 優於 ICP。而 1006B 的速度及航向 RMSE 較 1006A 大，原因為執行 NDT 時會引入 INS/GNSS 的初始參考值，1006B 為半遮蔽環境，在某些 GNSS 失鎖或多路徑影響區域其觀測量精度較差。圖 4.9 及圖 4.10 為使用 NDT 之速度及航向比較圖，圖 4.11 為使用兩種匹配方法之二維軌跡圖，可再次驗證 NDT 與參考解之一致性。

由 1006A 和 1006B 實驗測試中可歸納出使用 NDT-SLAM 的成果比 ICP-SLAM 穩定。因此在台中環中路的三個場景中，ICP 與 NDT 之比較將不再重複討論。

表 4.4 1006B – LDAR-SLAM 誤差分析

Error	ICP			NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	3.47	4.65	92.60	0.43	0.32	1.43	0.03	0.02	1.11
RMSE	3.48	4.66	92.58	0.43	0.32	1.43	0.03	0.02	1.11

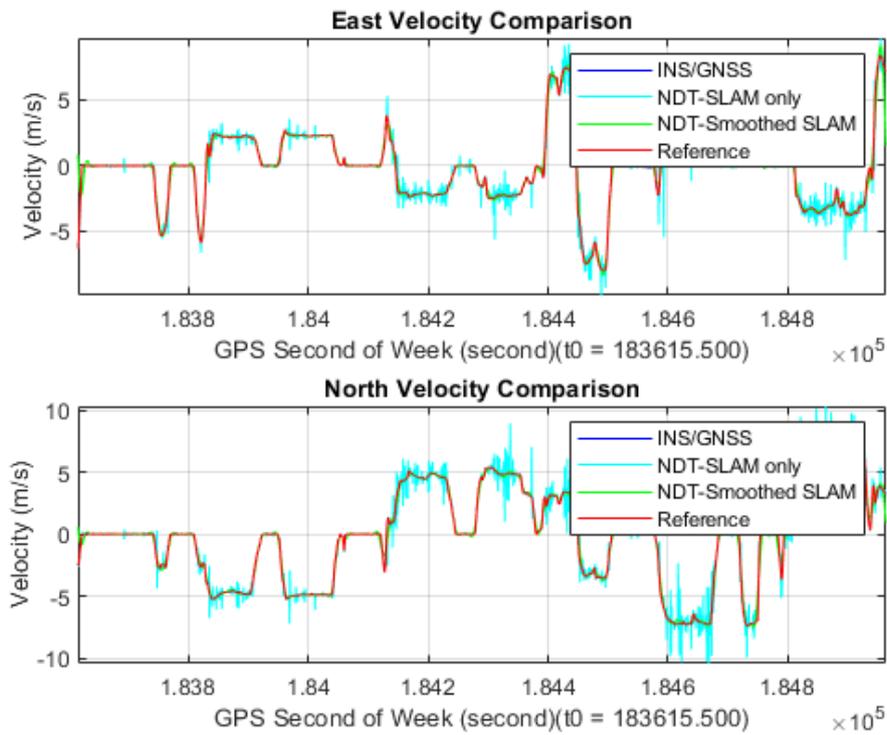


圖 4.9 1006B 之速度比較圖(NDT)

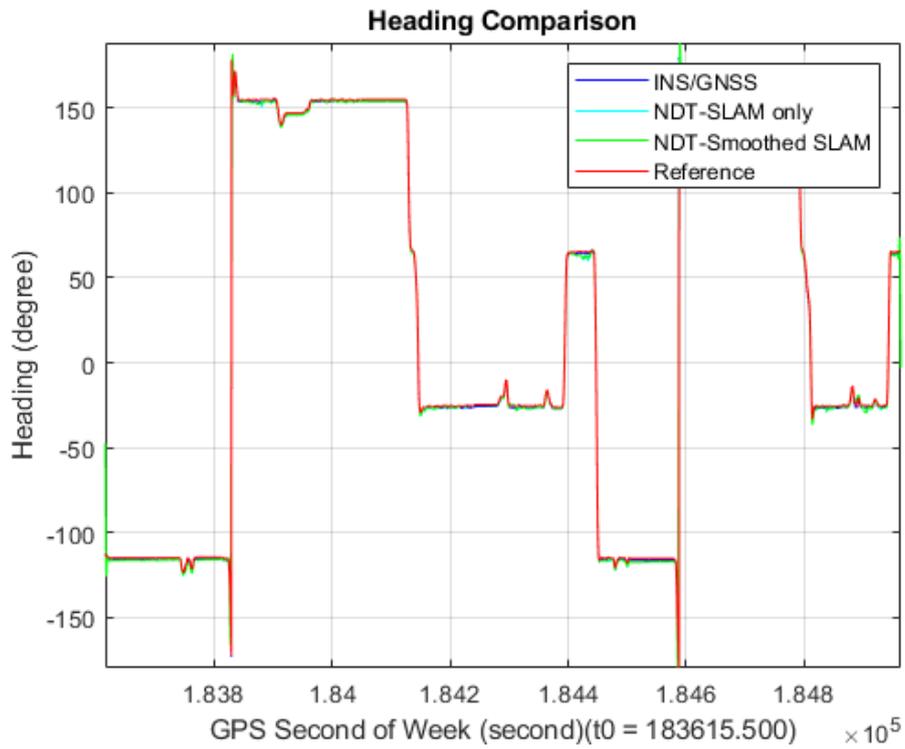


圖 4.10 1006B 航向比較圖(NDT)

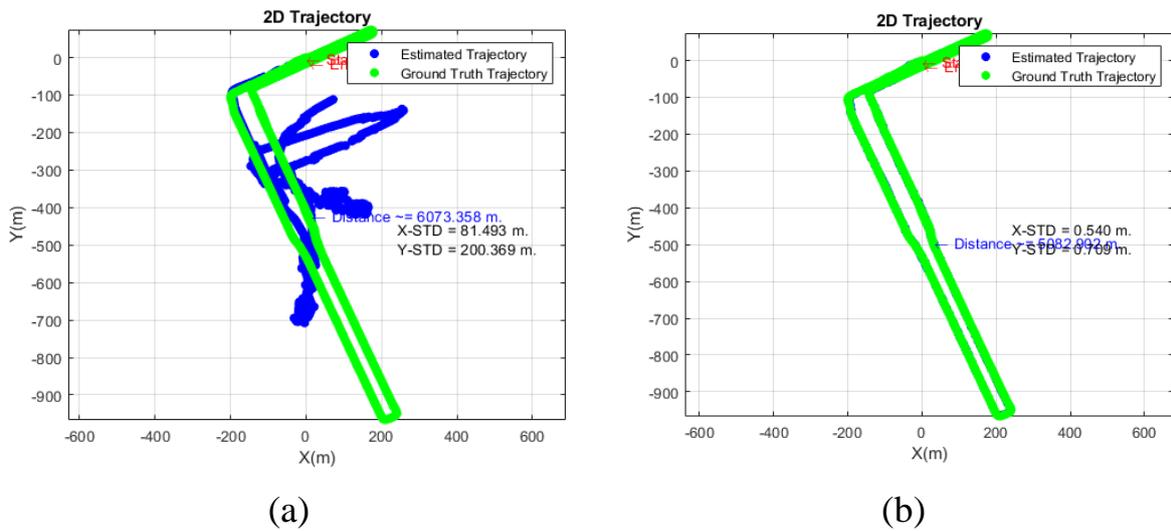


圖 4.11 1006B 二維軌跡比較圖(a)ICP；(b)NDT [SLAM 軌跡(藍點)；IE 參考解(綠點)]

■ 1007A-SLAM 成果

表 4.5 為 1007A 實驗資料使用 NDT 之誤差分析。由表可看出使用 NDT 所得之觀測量精度皆較 INS/GNSS 整合解差，原因是該場域為全遮蔽(內線道)及半遮蔽(外線道)，執行 NDT 時無法獲取準確的 INS/GNSS 初始值所導致。圖 4.12 及圖 4.13 為使用 NDT 之速度及航向比較圖。由於本案在該場域分別執行內線道與外線道資料採集作業，故在此亦針對內線道(GNSS 完全遮蔽之環境)路線 1、3、5 進行分析，其 NDT 之誤差分析如表 4.6 至表 4.8 所示。

INS/GNSS 水平速度的 RMSE 分別小於 0.50 m/s，0.32 m/s 和 0.39 m/s，而本案所提出之 NDT-SLAM 在水平速度的 RMSE 分別為 0.61 m/s，0.48 m/s 和 0.55 m/s。另外，INS/GNSS 航向的 RMSE 分別為 0.80 度，0.78 度和 0.74 度；NDT-SLAM 方法計算之航向之 RMSE 分別為 1.41 度，1.83 度和 1.12 度。

表 4.5 1007A—LDAR-SLAM 誤差分析

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.36	0.53	1.54	0.09	0.19	0.82
RMSE	0.36	0.53	1.54	0.09	0.19	0.82

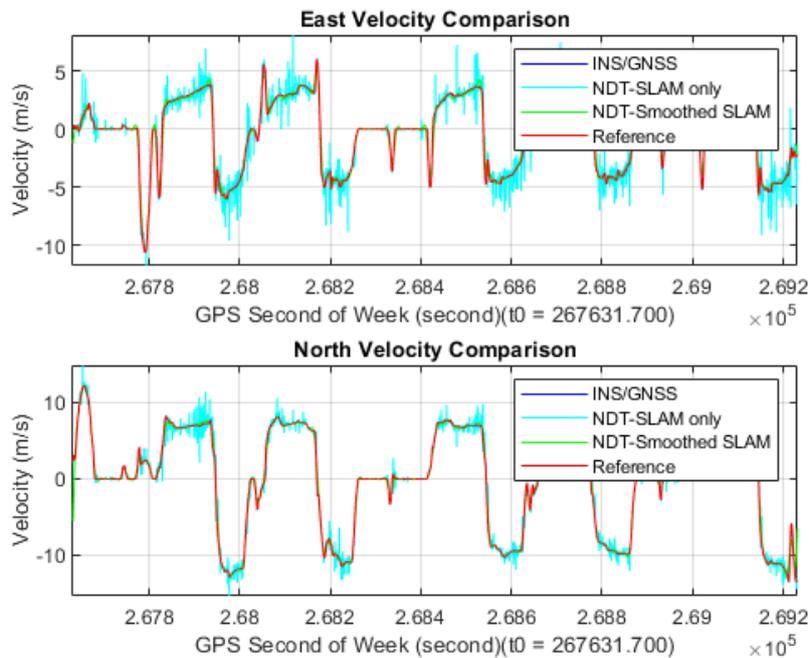


圖 4.12 1007A 之速度比較圖(NDT)

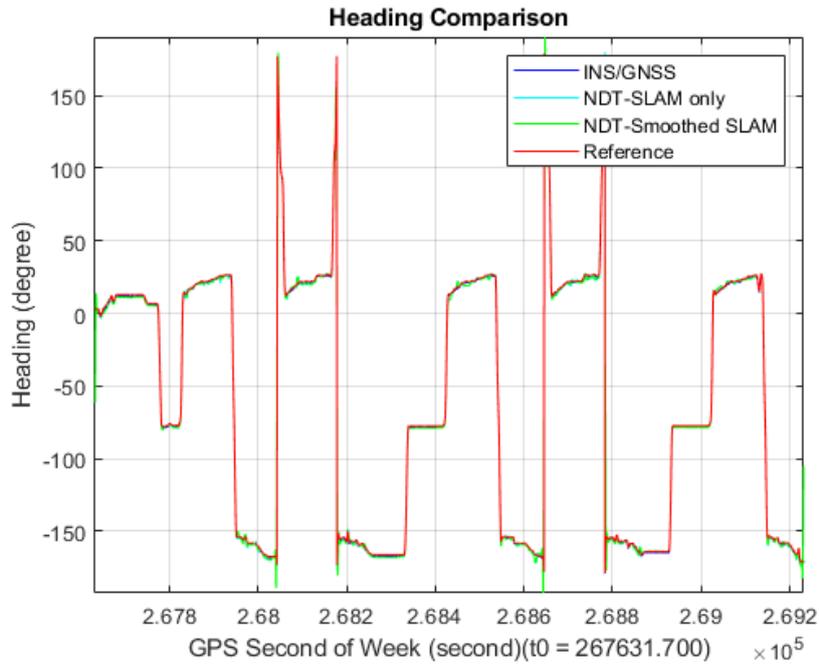


圖 4.13 1007A 之航向比較圖(NDT)

表 4.6 1007A –LDAR-SLAM 誤差分析(路線 1)

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.47	0.39	1.08	0.20	0.46	0.42
RMSE	0.47	0.39	1.41	0.20	0.46	0.80

表 4.7 1007A –LDAR-SLAM 誤差分析(路線 3)

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.38	0.29	1.71	0.14	0.29	0.52
RMSE	0.38	0.29	1.83	0.14	0.29	0.78

表 4.8 1007A—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 5)

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.40	0.38	1.12	0.17	0.35	0.48
RMSE	0.40	0.38	1.12	0.17	0.35	0.74

■ 1007B-SLAM 成果

表 4.9 為 1007B 實驗資料使用 NDT 之誤差分析。由表可看出使用 NDT 所得之觀測量精度皆較 INS/GNSS 整合解差，其原因與 1007A 實驗相同，因為該場域為全遮蔽(內線道)及半遮蔽(外線道)，執行 NDT 時無法獲取準確的初始值所導致。圖 4.14 及圖 4.15 為使用 NDT 之速度及航向比較圖。由於本案在該場域分別執行內線道與外線道資料採集作業，故在此亦針對內線道(GNSS 完全遮蔽之環境)路線 1、3、5 進行分析，其 NDT 之誤差分析如表 4.10 至表 4.12 所示。

INS/GNSS 水平速度的 RMSE 分別小於 0.04 m/s，0.07 m/s 和 0.03 m/s，而本案所提出之 NDT-SLAM 在水平速度的 RMSE 分別為 1.01 m/s，1.01 m/s 和 0.73 m/s。另外，INS/GNSS 航向的 RMSE 分別為 0.75 度，0.84 度和 0.70 度；NDT-SLAM 方法計算航向之 RMSE 分別為 1.67 度，1.61 度和 2.21 度。

表 4.9 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.29	0.31	1.50	0.03	0.05	0.76
RMSE	0.29	0.31	1.54	0.03	0.05	0.79

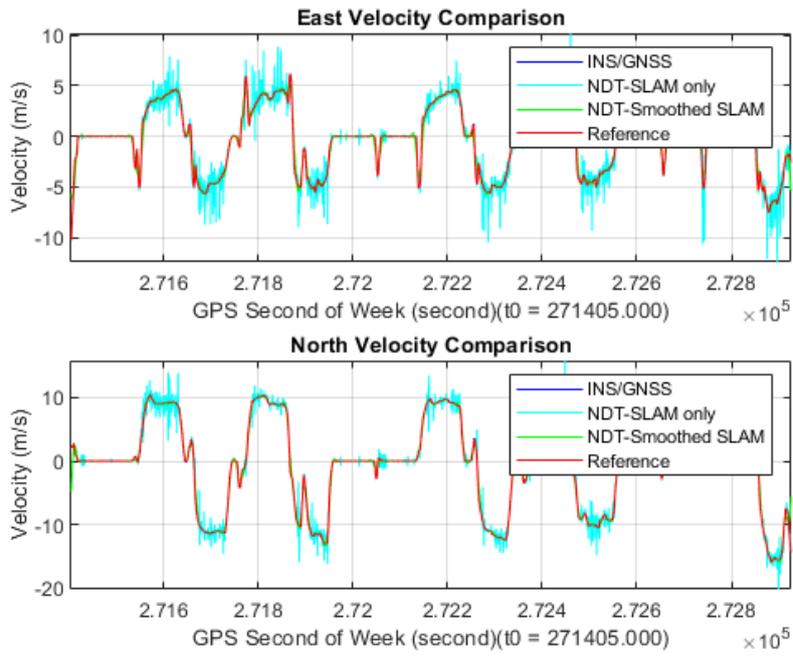


圖 4.14 1007B 之速度比較圖(NDT)

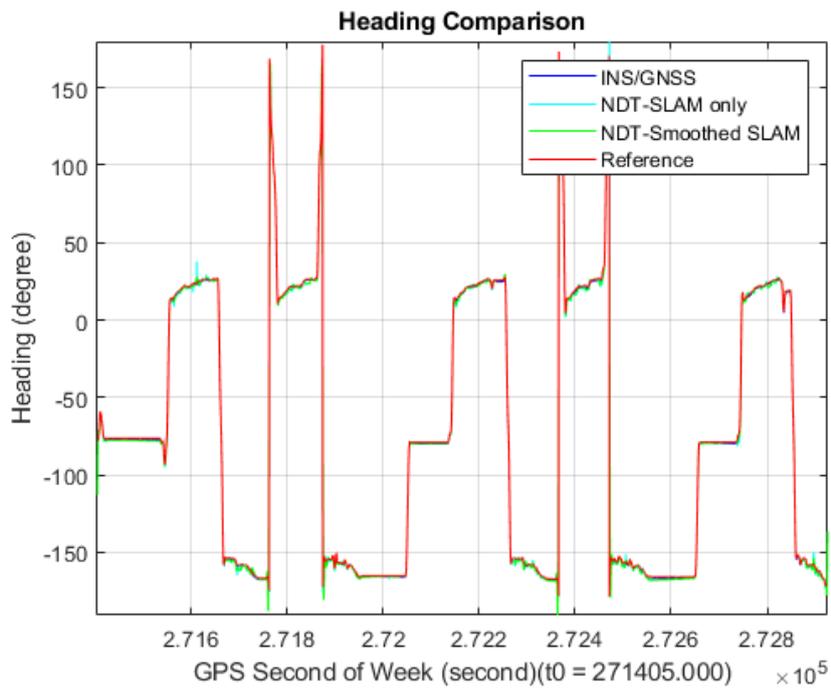


圖 4.15 1007B 之航向比較圖(NDT)

表 4.10 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 1)

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.52	0.87	1.33	0.02	0.03	0.14
RMSE	0.52	0.87	1.67	0.02	0.03	0.75

表 4.11 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 3)

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.50	0.87	1.19	0.06	0.03	0.17
RMSE	0.50	0.87	1.61	0.06	0.03	0.84

表 4.12 1007B—LDAR-SLAM 誤差分析(路線 5)

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	0.63	0.36	1.98	0.02	0.02	0.03
RMSE	0.63	0.36	2.21	0.02	0.02	0.70

■ 1007C-SLAM 成果

表 4.13 為 1007C 實驗資料使用 NDT 之誤差分析。由表可看出在長時間 GNSS 遮蔽的狀況下，NDT-SLAM 所求得的觀測量對於整體系統來說是有幫助的，可看出在東方向的速度及航向角觀測量之 RMSE 皆比 INS/GNSS 整合解小，但其誤差亦比前兩筆實驗 1007A、1007B 大，其原因是長時間的 GNSS 遮蔽也會導致 NDT-SLAM 產生誤差累積且飄移的狀況。圖 4.16 及圖 4.17 為使用 NDT 之速度及航向比較圖。

表 4.13 1007C—LDAR-SLAM 誤差分析

Error	NDT			INS/GNSS		
	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)	V _E (m/s)	V _N (m/s)	Heading (deg.)
STD	1.23	2.94	2.86	1.51	1.75	2.96
RMSE	1.23	2.94	2.88	1.51	1.75	3.53

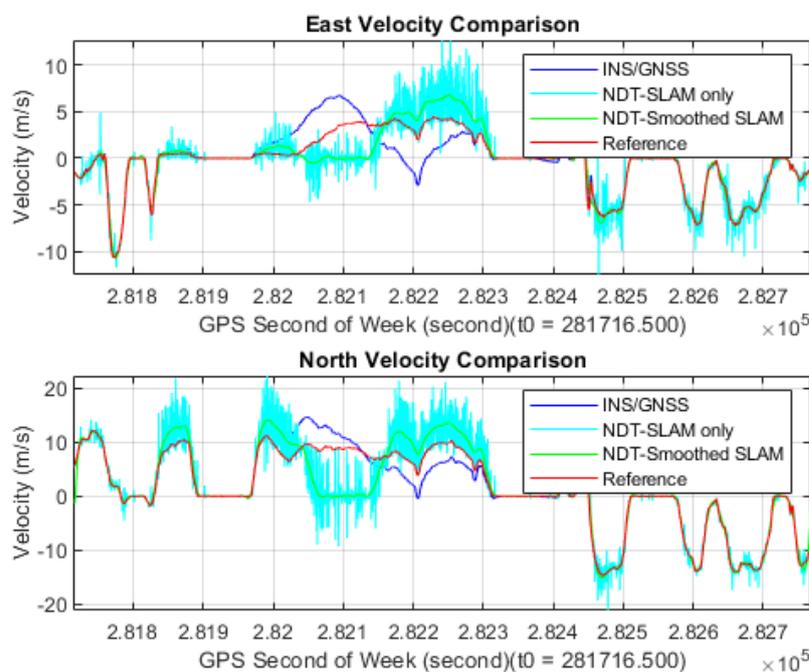


圖 4.16 1007C 之速度比較圖(NDT)

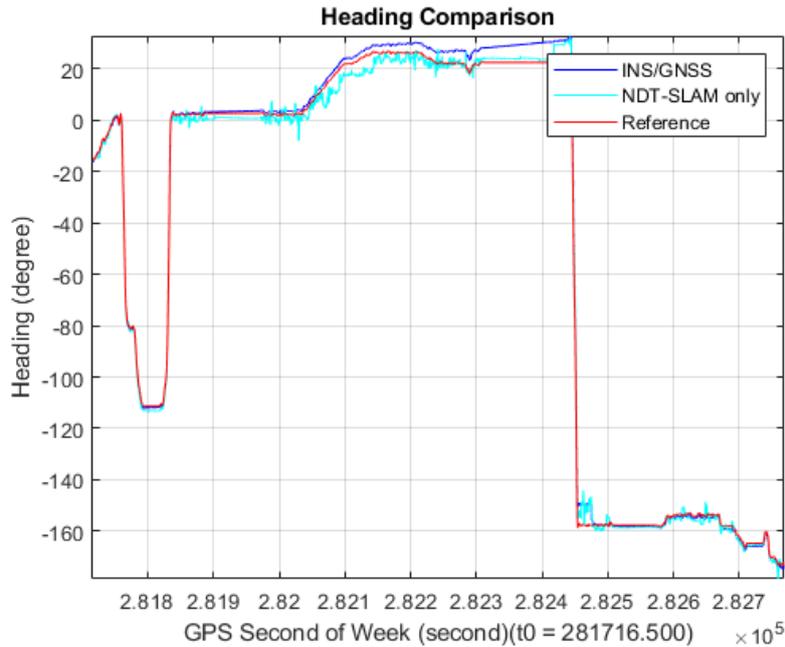


圖 4.17 1007C 之航向比較圖(NDT)

4.3 研發總成果驗證

4.2 小節比較兩種 SLAM 演算法(ICP, NDT)之點雲匹配成效後可知, NDT 於各場域中之測試情況皆優於 ICP, 因此本案最後所使用的 SLAM 成果皆為 NDT 之結果, 並比較四種不同整合情況下(1)INS/GNSS ; (2)INS/GNSS/輪速計 (Odometer) ; (3)INS/GNSS/NDT-SLAM ; (4)INS/GNSS/ 輪速計 (Odometer)/NDT-SLAM 之定位誤差及姿態誤差。另外在 1007A、1007B 兩實驗場域中更加入固定標資訊進一步提升定位精度。本案之參考解來自商用軟體 Inertial Explorer (IE)利用緊耦合整合架構計算所得, 在分析各組實驗之前, 先針對各組實驗之 GNSS Outage 時間段進行說明, 而各實驗場域之成果將接續詳述之:

本案目標為提升 GNSS 遮蔽時之光達測繪車定位精度，故在本小節說明各實驗場域 GNSS 中斷的總時間，可搭配後續各組實驗成果說明分析用。各組實驗所累積之 GNSS 中斷情形如表 4.14 所示。

表 4.14 各組實驗 GNSS 中斷情形

實驗代號	中斷次數及時間段	中斷地點	累積中斷時間(秒)
1006A	4 次	樹林區及高架旁	245
1006B	3 次	高架下	239
1007A	3 次	高架下	411
1007B	3 次	高架下	386
1007C	1 次	高架下	600

■ 台南沙崙場域-1006A 成果

1006A 實驗之整體定位誤差及姿態誤差如表 4.15、表 4.16 所示。由表 4.15 可發現不論使用何種整合方式其 RMSE 皆一致。由於 1006A 實驗為弱遮蔽場域，故 GNSS 沒有長時間中斷之情形，因此在這種環境中僅使用 INS/GNSS 整合即可達到良好的精度。表 4.16 則顯示透過 INS/GNSS/Odometer/NDT 之整合方式，對 Roll 及 Heading 角分別有 1%和 5%的改進。

另外，表 4.17、表 4.18 分別計算不同時速下之定位誤差，其結果如同整體定位誤差一樣，使用四種方法之統計資訊幾乎一致，亦顯示在弱遮蔽區行車時速對於定位成果沒有直接的影響。表 4.19 和表 4.20 為不同時速下之姿態誤差，值得一提的是透過整合多感測器之資訊(INS/GNSS/Odometer/NDT)可有效地提升航向角精度，在此實驗資料皆有近 20%的提升。

表 4.15 1006A-整體定位誤差統計資訊

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.25	1.60	3.21	1.21	1.60	3.21	3.21	1.25	3.21	1.21	1.67	3.20
Mean	0.02	0.03	-0.03	0.02	0.03	-0.03	0.02	0.03	-0.03	0.02	0.03	-0.03
STD	0.18	0.18	0.30	0.18	0.18	0.30	0.18	0.18	0.30	0.18	0.18	0.30
RMSE	0.19	0.18	0.30	0.19	0.18	0.30	0.19	0.18	0.30	0.19	0.19	0.30
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.26		0.40	0.26		0.40	0.26		0.40	0.26		0.40
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	0%		0%	0%		0%	0%		0%

表 4.16 1006A-整體姿態誤差統計資訊

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT			
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H	
Max	4.00	1.73	3.40	4.00	1.73	3.40	4.00	1.73	3.40	3.97	1.73	3.38	
Mean	1.50	0.79	-0.17	1.50	0.79	-0.17	1.50	0.79	-0.17	1.49	0.79	-0.18	
STD	0.57	0.77	1.16	0.57	0.77	1.16	0.57	0.77	1.16	0.57	0.77	1.10	
RMSE	1.60	1.11	1.17	1.60	1.11	1.17	1.60	1.11	1.17	1.59	1.11	1.11	
Improvement				0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	5%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.17 1006A-定位誤差統計資訊(V=30 km/hr)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.49	1.60	0.52	0.49	1.60	0.52	0.49	1.60	0.52	0.55	1.67	0.51
Mean	0.06	0.07	-0.04	0.06	0.07	-0.04	0.06	0.07	-0.04	0.07	0.07	-0.04
STD	0.16	0.27	0.14	0.16	0.27	0.14	0.16	0.27	0.14	0.16	0.28	0.13
RMSE	0.17	0.28	0.14	0.17	0.28	0.14	0.17	0.28	0.14	0.17	0.28	0.14
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.33		0.36	0.33		0.36	0.33		0.36	0.33		0.36
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	0%		0%	0%		0%	-2%		-2%

表 4.18 1006A-定位誤差統計資訊(V=40 km/hr)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.25	1.22	3.21	1.25	1.22	3.21	1.25	1.22	3.21	1.22	1.33	3.20
Mean	0.01	0.08	0.18	0.02	0.08	0.18	0.01	0.08	0.18	0.02	0.08	0.18
STD	0.29	0.22	0.68	0.29	0.22	0.67	0.29	0.22	0.68	0.28	0.23	0.67
RMSE	0.29	0.23	0.70	0.29	0.23	0.70	0.29	0.23	0.70	0.28	0.24	0.70
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.37		0.79	0.37		0.79	0.37		0.79	0.37		0.79
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	0%		0%	0%		0%	-1%		0%

表 4.19 1006A-姿態誤差統計資訊(V=30 km/hr)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.57	1.42	2.04	3.57	1.42	2.04	3.57	1.42	2.04	3.55	1.42	1.89
Mean	1.47	1.06	0.03	1.47	1.06	0.03	1.47	1.06	0.03	1.45	1.07	0.00
STD	0.55	0.14	0.97	0.55	0.14	0.97	0.55	0.14	0.97	0.56	0.14	0.80
RMSE	1.57	1.07	0.97	1.57	1.07	0.97	1.57	1.07	0.97	1.55	1.07	0.80
Improvement				0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	18%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.20 1006A-姿態誤差統計資訊(V=40 km/hr)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	4.00	1.60	2.45	4.00	1.60	2.45	4.00	1.60	2.45	3.97	1.62	2.23
Mean	1.63	1.07	-0.15	1.63	1.07	-0.15	1.63	1.07	-0.15	1.61	1.07	-0.11
STD	0.59	0.19	1.04	0.59	0.19	1.04	0.59	0.19	1.04	0.59	0.19	0.86
RMSE	1.73	1.09	1.05	1.73	1.09	1.05	1.73	1.09	1.05	1.71	1.09	0.87
Improvement				0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	17%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

■ 台南沙崙場域-1006B 成果

1006B 實驗之總體定位誤差及姿態誤差如表 4.21、4.22 所示。由表 4.21 可看出不論是加入輪速計輔助、使用 NDT-SLAM、同時加入輪速計及 NDT-SLAM 皆對定位精度有顯著的提升，平面精度最多可提升 61%、三維精度最多可提升 54%。因為該場域為半遮蔽，GNSS 訊號會中斷或常有來自建物或高架橋之多路徑效應而導致接收錯誤的 GNSS 觀測量，因此輪速計資訊或由 SLAM 求出之速度及航向角資訊即可當作多餘觀測量供 EKF 濾波器使用。另外，表 4.22 亦顯示加入 NDT-SLAM 技術時，航向角有 1%-4%的提升，對於計算軌跡有一定的助益。

表 4.23、表 4.24 分析不同時速下之定位成果。第一趟(V=30 km/hr)定位成果類似透空場域，使用四種整合策略其平面及三維精度皆在 20 公分、30 公分；第二趟(V=40 km/hr)之 INS/GNSS 定位成果可發現可能受不良 GNSS

觀測量影響或有長時間 GNSS Outage 發生導致 INS 產生飄移，其平面及三維定位精度皆為公尺等級，加入輪速計、NDT 後可大幅提升定位成果至平面 20 公分(提升 80%)、三維 30 公分(提升 70%)，可得知多餘觀測量對整合系統的影響力，並證明本案開發之 SLAM 演算法之助益。表 4.25 及表 4.26 則展示不同時速下之姿態誤差成果，其成果亦顯示加入 NDT-SLAM 後對航向角之精度提升能力。

表 4.21 1006B-總體定位誤差統計資訊

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	3.76	0.79	1.81	0.58	0.56	0.84	0.58	0.55	0.89	0.52	0.56	0.66
Mean	0.07	0.03	-0.05	0.01	0.02	-0.07	0.00	0.02	-0.07	0.00	0.02	-0.07
STD	0.49	0.15	0.28	0.16	0.13	0.18	0.15	0.13	0.18	0.15	0.13	0.17
RMSE	0.49	0.16	0.28	0.16	0.13	0.20	0.15	0.13	0.19	0.15	0.13	0.18
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.51		0.59	0.21		0.29	0.20		0.28	0.20		0.27
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	60%		51%	61%		52%	61%		54%

表 4.22 1006B-總體姿態誤差統計資訊

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.95	1.70	15.07	3.92	1.71	13.74	3.95	1.70	15.09	3.92	1.71	13.71
Mean	1.38	1.01	0.09	1.38	1.01	0.09	1.37	1.01	0.09	1.37	1.01	0.09
STD	0.62	0.45	1.17	0.62	0.45	1.18	0.62	0.45	1.13	0.62	0.45	1.13
RMSE	1.51	1.11	1.18	1.51	1.11	1.18	1.50	1.11	1.13	1.50	1.11	1.14
Improvement				0%	0%	0%	1%	0%	4%	0%	0%	3%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.23 1006B-定位誤差統計資訊(V=30 km/hr)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.50	0.55	0.77	0.49	0.56	0.78	0.50	0.55	0.76	0.49	0.56	0.75
Mean	-0.04	0.10	-0.05	-0.04	0.10	-0.05	-0.04	0.10	-0.05	-0.04	0.10	-0.05
STD	0.14	0.16	0.23	0.14	0.16	0.23	0.14	0.16	0.23	0.14	0.16	0.23
RMSE	0.14	0.19	0.24	0.14	0.19	0.24	0.14	0.19	0.24	0.14	0.19	0.23
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.23		0.33	0.23		0.34	0.23		0.33	0.23		0.33
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	0%		0%	0%		1%	0%		1%

表 4.24 1006B-定位誤差統計資訊(V=40 km/hr)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	3.76	0.79	1.81	0.58	0.51	0.84	0.58	0.50	0.89	0.48	0.51	0.66
Mean	0.42	0.04	0.06	0.09	-0.04	-0.04	0.07	-0.04	-0.05	0.07	-0.04	-0.07
STD	1.00	0.24	0.55	0.19	0.15	0.30	0.16	0.15	0.29	0.15	0.15	0.25
RMSE	1.09	0.25	0.55	0.21	0.16	0.31	0.18	0.16	0.30	0.16	0.16	0.26
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	1.12		1.25	0.26		0.40	0.24		0.38	0.23		0.34
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
	-		-	77%		68%	79%		69%	79%		72%

表 4.25 1006B-姿態誤差統計資訊(V=30 km/hr)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.67	1.52	2.00	3.72	1.53	2.17	3.66	1.52	1.94	3.71	1.53	2.09
Mean	1.25	0.85	-0.07	1.25	0.85	-0.07	1.23	0.85	-0.05	1.24	0.85	-0.05
STD	0.59	0.60	1.13	0.59	0.60	1.12	0.59	0.60	1.02	0.59	0.60	1.02
RMSE	1.38	1.04	1.13	1.38	1.04	1.12	1.37	1.04	1.02	1.37	1.04	1.02
Improvement	-	-	-	0%	0%	0%	1%	0%	10%	1%	0%	10%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.26 1006B-姿態誤差統計資訊(V=40 km/hr)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.68	1.41	2.22	3.57	1.42	2.26	3.66	1.41	2.14	3.55	1.43	2.18
Mean	1.29	0.88	-0.07	1.30	0.88	-0.07	1.28	0.88	-0.07	1.28	0.88	-0.07
STD	0.56	0.63	1.11	0.56	0.63	1.11	0.56	0.63	1.01	0.56	0.63	1.02
RMSE	1.41	1.08	1.11	1.41	1.08	1.11	1.40	1.08	1.01	1.40	1.08	1.02
Improvement	-	-	-	0%	0%	0%	1%	0%	9%	1%	0%	8%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

■ 台中環中路-1007A 成果

1007A 實驗之總體定位誤差及姿態誤差如表 4.27、表 4.28 所示。由表 4.28 可發現 NDT 對於本實驗場域定位提升助益有限，甚至還稍微變差(-3%)，但藉由整合輪速計資訊可將平面及三維精度提升約 40%。而在姿態誤差的部分，NDT 對於航向角的提升幅度也有限，僅 2%-3%。

由表 4.29 至表 4.33 分析五條路線各自定位誤差可發現，在內線道(路線 1, 3, 5)精度提升主要來自於整合輪速計資訊，與總體統計資訊一致，只有路線 3 因為 SLAM 可提供較佳的水平速度觀測量(可見 4.2 小節)，故有微幅(6%)的提升。原因是因為路線 1,3,5 為全遮蔽之環境，故加入輪速計資訊可有效控制 IMU 的飄移誤差，而 NDT 需要依賴 IMU 當初使值，故在表現上較差；而路線 2,4 為半遮蔽環境，因此 INS/GNSS 可提供良好的初始值，由表 4.32 和表 4.33 可看出加入 NDT 後對平面定位精度之提升；最後透過整合

INS/GNSS/Odometer/SLAM，其整體定位提升幅度為單獨加入輪速計或 NDT 之總合，內線道之平面與三維精度可提升 37%-46%；而外線道(路線 2)之平面精度可提升 14%，三維精度約提升 7%；外線道(路線 4)定位精度則稍微變差。

由表 4.34 至表 4.38 分析五條路線各自的姿態誤差可發現，五條實驗路線在加入 NDT 輔助觀測量後，航向有最少 5%、最多 23%的提升；進一步整合輪速計資訊後，航向有著 8%-23%不等的提升幅度。

表 4.27 1007A 總體定位誤差統計資訊

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	8.78	26.66	2.64	4.77	15.05	2.64	7.66	29.19	2.64	4.66	15.44	2.64
Mean	-0.33	-1.51	-0.16	-0.08	-0.94	-0.16	-0.29	-1.54	-0.16	-0.08	-0.92	-0.16
STD	1.49	4.89	0.26	0.79	2.98	0.26	1.36	5.09	0.28	0.78	2.93	0.27
RMSE	1.53	5.12	0.30	0.79	3.12	0.31	1.39	5.32	0.32	0.78	3.07	0.31
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	5.34		5.35	3.22		3.24	5.50		5.51	3.17		3.18
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	40%		40%	-3%		-3%	41%		40%

表 4.28 1007A 總體姿態誤差統計資訊

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.75	1.80	29.49	3.77	1.80	34.00	3.73	1.79	29.47	3.75	1.80	34.01
Mean	1.79	1.15	-0.17	1.80	1.15	-0.17	1.77	1.15	-0.17	1.78	1.15	-0.17
STD	1.26	0.20	1.10	1.26	0.20	1.11	1.27	0.20	1.07	1.27	0.20	1.08
RMSE	2.19	1.17	1.12	2.20	1.17	1.13	2.18	1.17	1.08	2.18	1.17	1.09
Improvement	-	-	-	0%	0%	-1%	1%	0%	3%	0%	0%	2%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.29 1007A 定位誤差統計資訊(內線道:路線 1)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	8.78	26.66	1.16	3.05	15.05	1.21	7.66	29.19	1.35	2.96	15.44	1.25
Mean	-3.79	-16.57	-0.45	-0.65	-10.43	-0.35	-3.20	-17.66	-0.42	-0.68	-10.37	-0.42
STD	3.70	8.11	0.56	1.78	4.14	0.58	3.32	9.12	0.68	1.74	4.35	0.58
RMSE	5.29	18.44	0.72	1.89	11.22	0.68	4.61	19.87	0.80	1.87	11.25	0.71
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	19.19		19.20	11.38		11.40	20.40		20.41	11.40		11.43
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	41%		5%	-6%		-6%	41%		40%

表 4.30 1007A 定位誤差統計資訊(內線道:路線 3)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	7.66	17.99	0.36	4.77	9.83	0.33	7.34	16.79	0.33	4.66	9.16	0.30
Mean	-3.73	-10.10	-0.11	-2.17	-5.77	-0.18	-3.63	-9.52	-0.07	-2.20	-5.54	-0.10
STD	2.79	5.94	0.16	1.70	3.03	0.12	2.66	5.51	0.17	1.65	2.79	0.12
RMSE	4.66	11.71	0.19	2.76	6.51	0.21	4.50	11.00	0.19	2.76	6.20	0.16
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	12.60		12.61	7.07		7.07	11.88		11.88	6.79		6.79
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	44%		44%	6%		6%	46%		46%

表 4.31 1007A 定位誤差統計資訊(內線道:路線 5)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	6.10	21.77	1.19	4.07	13.18	1.27	5.30	22.72	1.27	3.91	12.65	1.30
Mean	-1.66	-12.98	-0.93	0.38	-8.59	-0.98	-1.38	-13.44	-0.99	0.29	-8.35	-0.98
STD	2.98	6.91	0.31	2.17	3.88	0.33	2.76	7.29	0.34	2.06	3.78	0.33
RMSE	3.41	14.70	0.98	2.21	9.43	1.03	3.08	15.29	1.05	2.08	9.17	1.03
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	15.09		15.12	9.68		9.74	15.59		15.63	9.40		9.46
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
	-		-	36%		36%	-3%		-3%	38%		37%

表 4.32 1007A 定位誤差統計資訊(外線道:路線 2)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.11	1.39	0.20	0.93	1.40	0.23	1.09	1.28	0.44	0.94	1.28	0.44
Mean	0.32	-0.20	-0.13	0.26	-0.20	-0.14	0.33	-0.14	-0.26	0.29	-0.14	-0.26
STD	0.34	0.50	0.05	0.32	0.49	0.07	0.33	0.45	0.15	0.29	0.43	0.15
RMSE	0.47	0.54	0.14	0.41	0.52	0.15	0.47	0.47	0.29	0.41	0.45	0.30
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.71		0.73	0.67		0.68	0.66		0.73	0.61		0.68
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
	-		-	7%		6%	7%		0%	14%		7%

表 4.33 1007A 定位誤差統計資訊(外線道:路線 4)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.48	0.54	0.19	0.46	0.59	0.19	0.51	0.51	0.19	0.51	0.53	0.19
Mean	-0.03	-0.03	-0.11	-0.03	-0.04	-0.11	-0.04	-0.03	-0.11	-0.04	-0.03	-0.11
STD	0.15	0.19	0.05	0.15	0.20	0.05	0.16	0.19	0.05	0.16	0.19	0.05
RMSE	0.15	0.20	0.13	0.15	0.20	0.13	0.17	0.19	0.13	0.17	0.19	0.13
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.25		0.28	0.25		0.28	0.26		0.28	0.26		0.29
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
	-		-	0%		0%	-2%		-2%	-3%		-2%

表 4.34 1007A 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 1)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.71	1.72	1.89	3.73	1.74	1.93	3.71	1.73	1.82	3.71	1.75	1.82
Mean	2.34	1.23	-0.67	2.37	1.23	-0.76	2.30	1.22	-0.64	2.33	1.23	-0.61
STD	0.67	0.34	0.45	0.67	0.34	0.50	0.66	0.34	0.42	0.66	0.34	0.41
RMSE	2.43	1.28	0.80	2.46	1.28	0.91	2.39	1.27	0.77	2.42	1.28	0.74
Improvement	-	-	-	-1%	2%	-14%	2%	1%	5%	1%	0%	8%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.35 1007A 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 3)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.65	1.54	1.74	3.63	1.52	1.78	3.62	1.54	1.65	3.60	1.52	1.68
Mean	2.33	1.10	-0.57	2.35	1.11	-0.56	2.30	1.10	-0.46	2.31	1.11	-0.45
STD	0.79	0.35	0.52	0.79	0.35	0.52	0.79	0.35	0.44	0.79	0.35	0.43
RMSE	2.46	1.16	0.78	2.48	1.16	0.76	2.43	1.16	0.64	2.44	1.16	0.62
Improvement	-	-	-	-1%	0%	2%	1%	0%	18%	1%	0%	20%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.36 1007A 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 5)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.75	1.63	2.01	3.77	1.65	1.92	3.73	1.65	1.83	3.75	1.65	1.77
Mean	2.23	1.19	-0.55	2.25	1.18	-0.47	2.20	1.18	-0.40	2.22	1.18	-0.37
STD	0.80	0.37	0.49	0.80	0.36	0.45	0.80	0.37	0.40	0.80	0.36	0.38
RMSE	2.37	1.25	0.73	2.39	1.24	0.65	2.34	1.23	0.56	2.36	1.23	0.53
Improvement	-	-	-	-1%	1%	12%	1%	1%	23%	0%	1%	28%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.37 1007A 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 2)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.65	1.55	1.83	3.66	1.55	1.74	3.62	1.56	1.69	3.62	1.56	1.61
Mean	2.33	1.11	-0.73	2.33	1.10	-0.73	2.29	1.11	-0.56	2.29	1.10	-0.56
STD	0.80	0.31	0.32	0.79	0.31	0.32	0.79	0.31	0.27	0.79	0.31	0.27
RMSE	2.46	1.15	0.79	2.46	1.14	0.79	2.42	1.15	0.62	2.43	1.15	0.62
Improvement	-	-	-	0%	1%	0%	1%	0%	22%	1%	0%	21%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.38 1007A 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 4)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.69	1.47	1.72	3.69	1.41	1.71	3.67	1.48	1.63	3.66	1.42	1.63
Mean	2.24	1.07	-0.78	2.24	1.06	-0.78	2.22	1.07	-0.66	2.22	1.07	-0.67
STD	0.85	0.31	0.31	0.85	0.32	0.31	0.85	0.31	0.28	0.85	0.32	0.28
RMSE	2.39	1.11	0.84	2.40	1.11	0.84	2.37	1.12	0.72	2.38	1.11	0.73
Improvement	-	-	-	0%	0%	0%	1%	0%	14%	1%	0%	13%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

另外，本案於台中環中路實驗場域加入固定標之控制資訊，採用 Z+F 軟體內之軌跡修正功能，透過 Spline 擬合之方式修正位置誤差，採用固定標後之各路線之定位誤差如表 4.39 至表 4.43 所示。本案僅使用 INS/GNSS 與 INS/GNSS/Odometer/NDT 兩種整合方式引入固定標資訊，目的為比較本案提出的整合策略與原先 INS/GNSS 加入固定標資訊之成果，並在外線道(No.2)採用不同布設密度以驗證透過本案提出的整合策略下是否可以減少佈標的數量。

由表 4.39 至表 4.43 可看出加入固定標資訊後，內線道(路線 1,3,5)平面精度及三維精度皆提升至少 97%，平面絕對精度最佳可達 27 cm、三維絕對精度可達 32 cm，已相當接近高精地圖製圖需求，而且高精地圖點雲密度要求高，本案僅利用一條路線的點雲即可達到接近的精度等級。在外線道(路線 2,4)部分，平面絕對精度最佳可達 12 cm，三維精度最佳可達 13 cm。表 4.44 顯示以路線 2 測試不同密度之固定標佈設與成果精度之關係(表 4.44)，當密度放寬至 160 m 即可達到接近高精地圖精度需求。依 TAICS TR-0010 v2.0:2019「高精地圖製圖作業指引 v2」，建議測繪中心之 IMU 等級之地面控制點佈設密度為 100m，可見利用本案所提出之整合架構可減少固定標之佈設密度。

表 4.39 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 1)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP		INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP			
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	8.78	26.66	1.16	0.65	1.87	0.99	2.96	15.44	1.25	0.38	1.26	1.16
Mean	-3.79	-16.57	-0.45	0.06	0.21	0.03	-0.68	-10.37	-0.42	0.06	0.20	0.04
STD	3.70	8.11	0.56	0.09	0.23	0.14	1.74	4.35	0.58	0.06	0.17	0.15
RMSE	5.29	18.44	0.72	0.11	0.31	0.14	1.87	11.25	0.71	0.09	0.26	0.16
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	19.19		19.20	0.33		0.36	11.40		11.43	0.27		0.32
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	98%		98%	41%		40%	99%		98%

表 4.40 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 3)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	7.66	17.99	0.36	0.38	0.76	0.15	4.66	9.16	0.30	0.32	0.77	0.14
Mean	-3.73	-10.10	-0.11	0.01	0.31	-0.02	-2.20	-5.54	-0.10	0	0.29	-0.02
STD	2.79	5.94	0.16	0.12	0.14	0.08	1.65	2.79	0.12	0.11	0.14	0.07
RMSE	4.66	11.71	0.19	0.12	0.34	0.08	2.76	6.20	0.16	0.11	0.33	0.08
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	12.60		12.61	0.36		0.37	6.79		6.79	0.34		0.35
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	97%		97%	46%		46%	97%		97%

表 4.41 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 5)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	6.10	21.77	1.19	0.73	0.75	0.22	3.91	12.65	1.30	0.43	0.60	0.37
Mean	-1.66	-12.98	-0.93	-0.01	0.32	-0.05	0.29	-8.35	-0.98	0.03	0.27	-0.08
STD	2.98	6.91	0.31	0.22	0.18	0.08	2.06	3.78	0.33	0.12	0.16	0.12
RMSE	3.41	14.70	0.98	0.22	0.37	0.09	2.08	9.17	1.03	0.12	0.32	0.15
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	15.09		15.12	0.43		0.44	9.40		9.46	0.34		0.37
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	97%		97%	38%		37%	98%		98%

表 4.42 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 4)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.48	0.54	0.19	0.25	0.15	0.13	0.51	0.53	0.19	0.22	0.18	0.16
Mean	-0.03	-0.03	-0.11	0.01	0.05	0	-0.04	-0.03	-0.11	0.02	0.08	-0.01
STD	0.15	0.19	0.05	0.06	0.05	0.06	0.16	0.19	0.05	0.07	0.05	0.07
RMSE	0.15	0.20	0.13	0.06	0.07	0.06	0.17	0.19	0.13	0.07	0.09	0.07
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.25		0.28	0.09		0.11	0.26		0.29	0.12		0.13
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	64%		61%	-3%		-2%	52%		54%

表 4.43 1007A 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 2)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.11	1.39	0.20	0.20	0.85	0.13	0.94	1.28	0.44	0.15	0.56	0.29
Mean	0.32	-0.20	-0.13	0.03	0.07	0	0.29	-0.14	-0.26	0.04	0.08	0
STD	0.34	0.50	0.05	0.05	0.15	0.07	0.29	0.43	0.15	0.05	0.12	0.08
RMSE	0.47	0.54	0.14	0.06	0.17	0.07	0.41	0.45	0.30	0.06	0.15	0.08
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.71		0.73	0.18		0.19	0.61		0.68	0.16		0.18
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	75%		74%	14%		7%	77%		75%

表 4.44 1007A 不同布設密度之固定標定位誤差統計資訊(內線道:路線 2)

Error (m.)	GCP_80m			GCP_160m			GCP_240m			GCP_320m		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.15	0.56	0.29	0.31	0.56	0.29	0.36	0.89	0.29	0.39	1.34	0.29
Mean	0.04	0.08	0	0.07	0.10	-0.01	0.03	0.16	0	0.11	0.23	0
STD	0.05	0.12	0.08	0.10	0.16	0.08	0.16	0.34	0.07	0.12	0.51	0.09
RMSE	0.06	0.15	0.08	0.12	0.19	0.08	0.16	0.37	0.07	0.16	0.56	0.09
RMSE	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D
2D & 3D	0.16	0.18	0.23	0.24	0.40	0.41	0.58	0.59				

■ 台中環中路-1007B 成果

1007B 實驗之總體定位誤差及姿態誤差如表 4.45 和表 4.46 所示。由表 4.45 發現僅加入輪速計定位精度提升幅度最大(12%)，僅加入 NDT 對於本實驗場域定位精度提升有限(5%)，而同時整合輪速計及 NDT 可將平面及三維精度提升約 8%。表 4.46 顯示 NDT 對於航向角精度的提升幅度約為 11%，相對於 1007A 而言，由於行車速度較快，故 IMU 於 GNSS 全遮蔽區之飄移誤差較小，總體誤差也從 5 公尺降低至 90 公分，故加入輪速計或 NDT 其對定位成果之提升幅度有限。

由表 4.47 至表 4.51 分析五條路線各自定位誤差發現，在路線 1 平面與三維定位精度有顯著的提升(約 50%)，而路線 3 及路線 5 則在加入輪速計輔助資訊後導致整體定位精度變差，其原因可能是實驗當下輪速計資訊有誤但與 EKF 模型預估速度之誤差沒有超過三倍標準差，故無法被輪速計檢核機制判斷出所導致。而在路線 2 及路線 4，無論加入什麼額外感測器資訊，其平面及三維定位精度皆沒有太大差異。

由表 4.52 至表 4.56 分析五條路線各自姿態誤差亦發現，其成果與 1007A 一致，在加入 NDT 後姿態中之航向角精度可提高 17%-25%。而使用本案所提出之整合架構航向角可提升 13%-20%。

表 4.45 1007B 總體定位誤差統計資訊

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.76	4.78	0.55	1.95	4.25	0.56	2.09	5.00	0.48	2.30	4.57	0.49
Mean	-0.03	-0.08	-0.11	-0.08	-0.17	-0.11	-0.08	-0.12	-0.10	-0.11	-0.18	-0.10
STD	0.32	0.82	0.09	0.32	0.68	0.09	0.33	0.76	0.09	0.38	0.69	0.09
RMSE	0.32	0.83	0.14	0.33	0.70	0.14	0.34	0.77	0.13	0.40	0.71	0.13
RMSE 2D & 3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
	0.89	0.90	0.78	0.79	0.85	0.86	0.81	0.82				
Improvement 2D & 3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D
	-	-	12%	12%	5%	5%	8%	8%				

表 4.46 1007B 總體姿態誤差統計資訊

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.97	1.66	24.58	3.86	1.78	21.21	3.93	1.66	24.56	3.85	1.78	21.22
Mean	1.48	1.05	-0.08	1.48	1.04	-0.01	1.46	1.05	-0.08	1.47	1.04	-0.01
STD	1.38	0.36	1.06	1.39	0.36	0.99	1.39	0.36	1.03	1.39	0.36	0.95
RMSE	2.03	1.10	1.07	2.03	1.10	0.99	2.02	1.11	1.03	2.02	1.10	0.95
Improvement	-	-	-	0%	0%	8%	1%	0%	3%	0%	0%	11%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.47 1007B 定位誤差統計資訊(內線道:路線 1)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.76	4.78	0.48	1.84	2.47	0.51	1.80	3.53	0.45	1.98	1.99	0.46
Mean	0.12	1.14	-0.24	-0.49	-0.09	-0.22	-0.23	0.88	-0.10	-0.75	-0.11	-0.12
STD	0.89	2.35	0.15	0.62	1.18	0.19	0.69	1.64	0.17	0.66	0.87	0.18
RMSE	0.90	2.61	0.28	0.79	1.18	0.29	0.73	1.87	0.19	1.00	0.88	0.21
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	2.76		2.78	1.42		1.45	2.00		2.01	1.33		1.35
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	48%		48%	27%		27%	52%		51%

表 4.48 1007B 定位誤差統計資訊(內線道:路線 3)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.64	4.22	0.23	1.95	4.25	0.20	2.09	5.00	0.23	2.30	4.57	0.22
Mean	-0.77	-2.63	0.12	-0.93	-2.70	0.09	-1.05	-2.70	0.16	-1.17	-2.69	0.16
STD	0.69	0.97	0.07	0.79	0.98	0.05	0.79	1.29	0.06	0.86	1.11	0.06
RMSE	1.03	2.80	0.13	1.22	2.87	0.11	1.31	2.99	0.17	1.45	2.91	0.17
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	2.98		2.99	3.12		3.12	3.27		3.27	3.25		3.25
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	-4%		-4%	-9%		-9%	-9%		-9%

表 4.49 1007B 定位誤差統計資訊(內線道:路線 5)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.04	1.97	0.55	0.75	1.88	0.56	0.63	2.06	0.48	0.91	2.54	0.49
Mean	0.32	-0.36	-0.36	-0.05	-1.13	-0.35	-0.12	-1.03	-0.27	-0.32	-1.38	-0.28
STD	0.30	0.89	0.11	0.18	0.48	0.11	0.21	0.47	0.10	0.30	0.57	0.09
RMSE	0.44	0.96	0.37	0.19	1.22	0.37	0.25	1.13	0.29	0.44	1.49	0.30
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	1.06		1.12	1.24		1.29	1.16		1.19	1.56		1.59
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	-17%		-15%	-10%		-7%	-47%		-42%

表 4.50 1007B 定位誤差統計資訊(外線道:路線 2)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.71	1.05	0.16	0.74	1.06	0.16	0.71	0.93	0.16	0.74	0.95	0.16
Mean	-0.14	-0.13	-0.09	-0.15	-0.14	-0.09	-0.14	-0.12	-0.09	-0.15	-0.13	-0.09
STD	0.20	0.32	0.03	0.21	0.32	0.03	0.21	0.30	0.03	0.22	0.30	0.03
RMSE	0.24	0.34	0.10	0.26	0.34	0.10	0.25	0.32	0.10	0.27	0.33	0.10
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.42		0.43	0.43		0.44	0.40		0.42	0.42		0.43
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	-3%		-3%	3%		3%	-1%		-1%

表 4.51 1007B 定位誤差統計資訊(外線道:路線 4)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.34	1.09	0.29	1.40	1.11	0.29	1.44	1.07	0.30	1.44	1.11	0.30
Mean	-0.19	-0.17	-0.16	-0.19	-0.17	-0.16	-0.20	-0.17	-0.16	-0.20	-0.17	-0.16
STD	0.39	0.34	0.08	0.39	0.33	0.08	0.41	0.33	0.08	0.41	0.33	0.08
RMSE	0.43	0.38	0.18	0.44	0.37	0.18	0.45	0.37	0.18	0.45	0.37	0.18
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.57		0.60	0.57		0.60	0.59		0.61	0.58		0.61
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	0%		0%	-2%		-2%	-2%		-2%

表 4.52 1007B 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 1)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.65	1.53	1.83	3.78	1.43	2.07	3.59	1.53	1.77	3.75	1.44	1.99
Mean	2.11	0.94	-0.52	2.10	0.92	-0.51	2.07	0.94	-0.42	2.07	0.92	-0.41
STD	1.16	0.52	0.71	1.16	0.52	0.74	1.15	0.52	0.63	1.15	0.52	0.65
RMSE	2.40	1.07	0.88	2.39	1.06	0.90	2.37	1.07	0.76	2.36	1.06	0.77
Improvement				0%	1%	-2%	1%	0%-	14%	2%	1%	13%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.53 1007B 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 3)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.84	1.63	2.02	3.78	1.52	2.23	3.80	1.63	1.82	3.75	1.52	2.13
Mean	2.16	1.09	-0.66	2.16	1.10	-0.66	2.12	1.09	-0.54	2.13	1.10	-0.54
STD	0.90	0.31	0.59	0.90	0.31	0.61	0.90	0.31	0.50	0.89	0.31	0.52
RMSE	2.34	1.14	0.89	2.34	1.14	0.90	2.30	1.14	0.73	2.31	1.14	0.75
Improvement				0%	0%	-1%	2%	0%	17%	1%	0%	16%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.54 1007B 姿態誤差統計資訊(內線道:路線 5)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.67	1.50	1.88	3.79	1.48	1.94	3.64	1.50	1.71	3.75	1.48	1.84
Mean	2.11	1.08	-0.51	2.10	1.07	-0.55	2.06	1.08	-0.40	2.07	1.07	-0.44
STD	0.90	0.33	0.55	0.90	0.33	0.52	0.90	0.33	0.46	0.90	0.33	0.44
RMSE	2.29	1.13	0.75	2.29	1.12	0.75	2.25	1.13	0.61	2.25	1.12	0.62
Improvement				0%	1%	0%	2%	0%	19%	2%	1%	17%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.55 1007B 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 2)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.66	1.46	1.49	3.65	1.51	1.58	3.65	1.46	1.34	3.63	1.51	1.51
Mean	2.30	1.07	-0.55	2.30	1.07	-0.55	2.27	1.07	-0.40	2.27	1.08	-0.43
STD	0.79	0.31	0.19	0.79	0.32	0.21	0.79	0.31	0.18	0.79	0.32	0.20
RMSE	2.43	1.11	0.59	2.43	1.12	0.59	2.41	1.12	0.44	2.41	1.12	0.47
Improvement				0%	-1%	0%	1%	0%-	25%	1%	-1%	20%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

表 4.56 1007B 姿態誤差統計資訊(外線道:路線 4)

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	3.84	1.51	1.96	3.86	1.56	1.84	3.83	1.51	1.84	3.85	1.56	1.75
Mean	2.28	0.99	-0.83	2.28	0.99	-0.82	2.26	1.00	-0.68	2.26	1.00	-0.68
STD	0.92	0.40	0.21	0.92	0.40	0.22	0.92	0.40	0.22	0.92	0.40	0.22
RMSE	2.46	1.07	0.86	2.46	1.07	0.85	2.44	1.08	0.71	2.44	1.07	0.71
Improvement				0%	0%	1%	1%	0%	17%	1%	0%	17%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

另外，本案於台中環中路實驗場域 1007B 加入固定標之控制資訊，採用固定標後之各路線定位誤差如表 4.57 至表 4.61 所示。本案僅使用 INS/GNSS 與 INS/GNSS/Odometer/NDT 兩種整合方式引入固定標資訊，目的為比較在本案提出的整合策略與原先 INS/GNSS 加入固定標資訊之成果，並在外線道 (No.2) 採用不同布設密度以驗證本案提出的整合策略下是否可以減少佈標的數量。

表 4.57 至表 4.61 顯示加入固定標資訊後，內線道(路線 1,3)平面精度及三維精度皆提升至少 86%，平面絕對精度最佳可達 34 cm、三維絕對精度可達 36 cm；然而路線 5 僅有約 60% 的提升，其一原因為路線 5 之 INS/GNSS 整合解誤差是三條內線道中最小的，另一原因為路線 5 距離佈設的固定標距離較遠(約 2.5 個車道寬)，再加上行車速度較快的原因，可能會導致固定標於點雲中量測精度較低，造成其平面及三維精度僅能達到 40 cm 及 50 cm。另一方面，由於固定標皆沿著車道行徑路線佈設，建議日後實施作業時應於進、出全遮蔽區路線時多佈設固定標以控制誤差，將可更進一步提升定位精度。

在外線道(路線 2,4)部分，平面絕對精度最佳可達 15 cm，三維精度最佳可達 17 cm。表 4.62 顯示以路線 2 測試不同密度之固定標佈設與成果精度之關係，當固定標密度放寬至 240 m，則可達到接近高精地圖精度需求，依 TAICS TR-0010 v2.0:2019 「高精地圖製圖作業指引 v2」，建議測繪中心之 IMU 等級之地面控制點佈設密度為 100m，可見利用本案所提出之整合架構可減少固定標之佈設密度。

綜合 1007A 與 1007B 兩筆實測資料佐以不同密度的固定標分析，1007A 可放寬固定標間距至 160 m、1007B 可放寬至 240 m，此處差異會受整體軌跡解算成果、人工選點精度、Z+F 軌跡修正模式及場域不同等影響，故日後實務作業時依據本案成果，以優規的方式或參照 TAICS TR-0010 v2.0:2019 「高精地圖製圖作業指引 v2」佈設。

表 4.57 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 1)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.76	4.78	0.48	0.63	0.50	0.38	1.98	1.99	0.46	0.65	0.45	0.40
Mean	0.12	1.14	-0.24	-0.08	0.22	-0.01	-0.75	-0.11	-0.12	-0.10	0.24	-0.02
STD	0.89	2.35	0.15	0.19	0.15	0.10	0.66	0.87	0.18	0.19	0.12	0.11
RMSE	0.90	2.61	0.28	0.21	0.27	0.10	1.00	0.88	0.21	0.21	0.26	0.11
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	2.76		2.78	0.34		0.35	1.33		1.35	0.34		0.36
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	88%		87%	52%		51%	88%		87%

表 4.58 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 3)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.64	4.22	0.23	0.43	0.81	0.19	2.30	4.57	0.22	0.46	0.79	0.19
Mean	-0.77	-2.63	0.12	0.06	0.29	0.01	-1.17	-2.69	0.16	0.05	0.33	0.01
STD	0.69	0.97	0.07	0.14	0.16	0.07	0.86	1.11	0.06	0.19	0.35	0.07
RMSE	1.03	2.80	0.13	0.15	0.33	0.07	1.45	2.91	0.17	0.17	0.38	0.07
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	2.98		2.99	0.36		0.37	3.25		3.25	0.42		0.42
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	88%		88%	-9%		-9%	86%		86%

表 4.59 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 5)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.04	1.97	0.55	0.53	0.50	0.46	0.91	2.54	0.49	0.54	0.50	0.48
Mean	0.32	-0.36	-0.36	0.18	0.30	0.22	-0.32	-1.38	-0.28	0.17	0.32	0.23
STD	0.30	0.89	0.11	0.14	0.13	0.16	0.30	0.57	0.09	0.15	0.12	0.16
RMSE	0.44	0.96	0.37	0.23	0.33	0.27	0.44	1.49	0.30	0.23	0.34	0.28
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	1.06		1.12	0.40		0.48	1.56		1.59	0.41		0.49
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	62%		57%	-47%		-42%	61%		56%

表 4.60 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 4)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	1.34	1.09	0.29	0.22	0.24	0.17	1.44	1.11	0.30	0.15	0.26	0.16
Mean	-0.19	-0.17	-0.16	0.01	0.12	-0.01	-0.20	-0.17	-0.16	0.03	0.12	-0.01
STD	0.39	0.34	0.08	0.06	0.06	0.08	0.41	0.33	0.08	0.05	0.07	0.08
RMSE	0.43	0.38	0.18	0.06	0.14	0.08	0.45	0.37	0.18	0.06	0.14	0.08
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.57		0.60	0.15		0.17	0.58		0.61	0.15		0.17
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	74%		72%	-2%		-2%	74%		72%

表 4.61 1007B 加入固定標之定位誤差統計資訊(內線道:路線 2)

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/GCP			INS/GNSS/Odom/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT/GCP		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.71	1.05	0.16	0.31	0.32	0.19	0.74	0.95	0.16	0.32	0.30	0.19
Mean	-0.14	-0.13	-0.09	0.05	0.16	-0.01	-0.15	-0.13	-0.09	0.06	0.15	-0.01
STD	0.20	0.32	0.03	0.08	0.08	0.08	0.22	0.30	0.03	0.08	0.08	0.08
RMSE	0.24	0.34	0.10	0.09	0.18	0.08	0.27	0.33	0.10	0.10	0.17	0.08
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	0.42		0.43	0.20		0.22	0.42		0.43	0.20		0.22
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	52%		49%	-1%		-1%	52%		49%

表 4.62 1007B 不同布設密度之固定標定位誤差統計資訊(內線道:路線 2)

Error (m.)	GCP_80m			GCP_160m			GCP_240m			GCP_320m		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	0.32	0.30	0.19	0.33	0.28	0.20	0.32	0.36	0.16	0.37	0.61	0.16
Mean	0.06	0.15	-0.01	0.08	0.15	-0.02	0.05	0.16	-0.01	0.10	0.20	-0.03
STD	0.08	0.08	0.08	0.10	0.08	0.08	0.10	0.11	0.06	0.17	0.18	0.08
RMSE	0.10	0.17	0.08	0.12	0.17	0.09	0.11	0.20	0.06	0.19	0.27	0.08
RMSE	2D		3D									
2D & 3D	0.20		0.22	0.21		0.23	0.22		0.23	0.33		0.34

■ 台中環中路-1007C 成果

1007C 實驗之總體定位誤差及姿態誤差如表 4.63、表 4.64 所示。由於此實驗位於長時間 GNSS outage 的環境，本案所採用的 NDT SLAM 需要使用 INS/GNSS 整合解當作初始值以利後續匹配及轉換過程，然而在此環境下，INS 本身受到 GNSS outage 而累積大量飄移誤差，所以位置及姿態皆無法準確更新，因此 NDT-SLAM 在此環境下無法對原始系統有任何提升，甚至比原始系統累積更多誤差。然而，當結合輪速計資料時，因其可提供準確的速度資訊，故在平面及三維位置皆有顯著地提升。再者，當系統有另一穩定的觀測量輔助時，再加入 NDT SLAM 可進一步提升整體系統精度，平面及三維 RMSE 也從 130 公尺降至 22 公尺，提升了 83%。此成果再次驗證透過結

合各感測器的資料可讓整合系統更穩定地執行測繪作業。而加入 NDT 亦能改善航向角之精度，提升幅度約為 6%。

此實驗成果亦可提供國土測繪中心參考，須注意在長時間 GNSS outage(約十分鐘)的情況下定位精度將大幅下降之議題，後續實務作業可透過佈設固定標或地面控制點以確保滿足相關測繪應用之精度需求。

表 4.63 1007C 總體定位誤差統計資訊

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Max	372.94	462.92	8.31	136.73	127.18	3.77	706.65	1085.91	23.74	48.43	92.55	1.68
Mean	20.93	31.73	0.42	-8.78	-7.37	0.15	43.46	76.11	1.51	-3.64	-3.34	0.07
STD	75.13	101.59	1.64	27.63	25.78	0.69	143.09	230.83	4.80	9.23	19.37	0.36
RMSE	77.99	106.43	1.69	28.99	26.81	0.71	149.54	243.05	5.04	9.92	19.66	0.37
RMSE	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	131.94		131.95	39.48		39.49	285.37		285.42	22.02		22.02
Improvement	2D		3D	2D		3D	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	-		-	70%		70%	-116%		-116%	83%		83%

表 4.64 1007C 總體姿態誤差統計資訊

Error (degree)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom			INS/GNSS/NDT			INS/GNSS/Odom/NDT		
	P	R	H	P	R	H	P	R	H	P	R	H
Max	4.97	2.24	78.16	5.07	2.07	78.12	4.97	2.02	78.07	5.07	2.01	78.13
Mean	2.00	1.02	-0.54	1.98	0.96	-0.76	1.99	1.07	-1.37	1.97	1.06	-1.26
STD	1.24	0.22	6.69	1.24	0.24	6.60	1.29	0.23	6.17	1.25	0.22	6.21
RMSE	2.35	1.05	6.71	2.34	0.99	6.64	2.37	1.09	6.32	2.33	1.08	6.33
Improvement				1%	6%	1%	-1%	-4%	6%	1%	-3%	6%

Note: R = Roll angle; P = Pitch angle; H = Heading angle

■ 綜合比較

圖 4.18、圖 4.19 統整 1006A、1006B、1007A 及 1007B 之平面及三維定位精度分析(1007C 為壓力測試且該實驗誤差量級過大故不列入一同比較)，可看出本案最終所提出之多感測器資訊整合策略，即四種觀測量之整合資訊(INS/GNSS/Odometer/SLAM)，除了在 1006A 實驗沒有顯著提升外，1007B 實驗有 8%的提升(平面&三維)，1007A 實驗有 40%的提升(平面&高程)，1006B 實驗平面和三維精度分別提升 61%和 54%。綜上所述，多感測資訊整合為移動測繪技術更穩定可靠之關鍵。另外，若欲達到高精地圖所要求之定位精度，透過加入固定標資訊(可見前述 1007A、1007B 實驗)可進一步提升定位精度。

另外，本案亦計算上述四次實驗之平面及三維誤差累積圖(Cumulative Distribution Function, CDF)，如圖 4.20 所示。除了 1006A 實驗之外，由圖中可看出使用本案之整合策略可降低各組實驗之最大誤差，且其誤差累積曲線斜率皆大於其他整合方式，亦即大多數定位誤差皆小於其他整合方式之定位誤差，再次驗證使用多感測器資訊整合於定位精度提升之潛力。

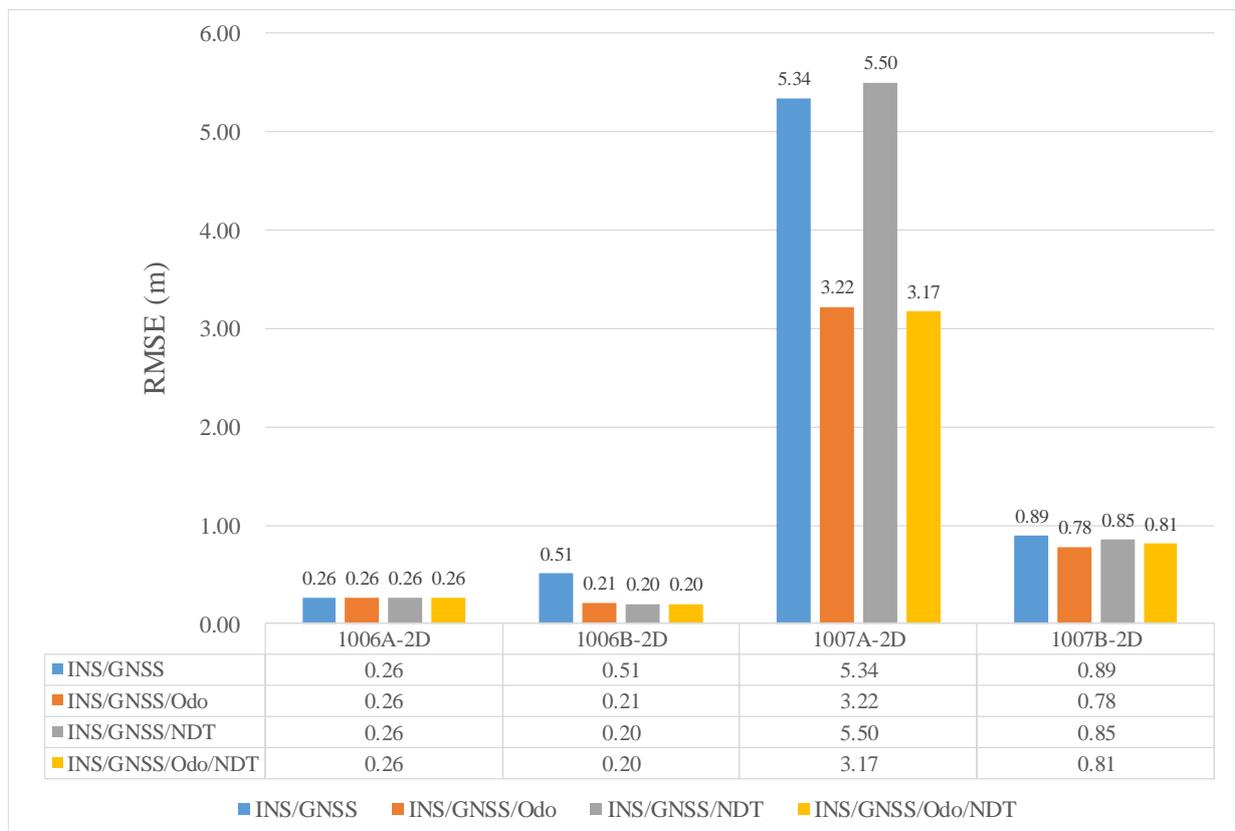


圖 4.18 各實驗平面(2D)定位精度分析

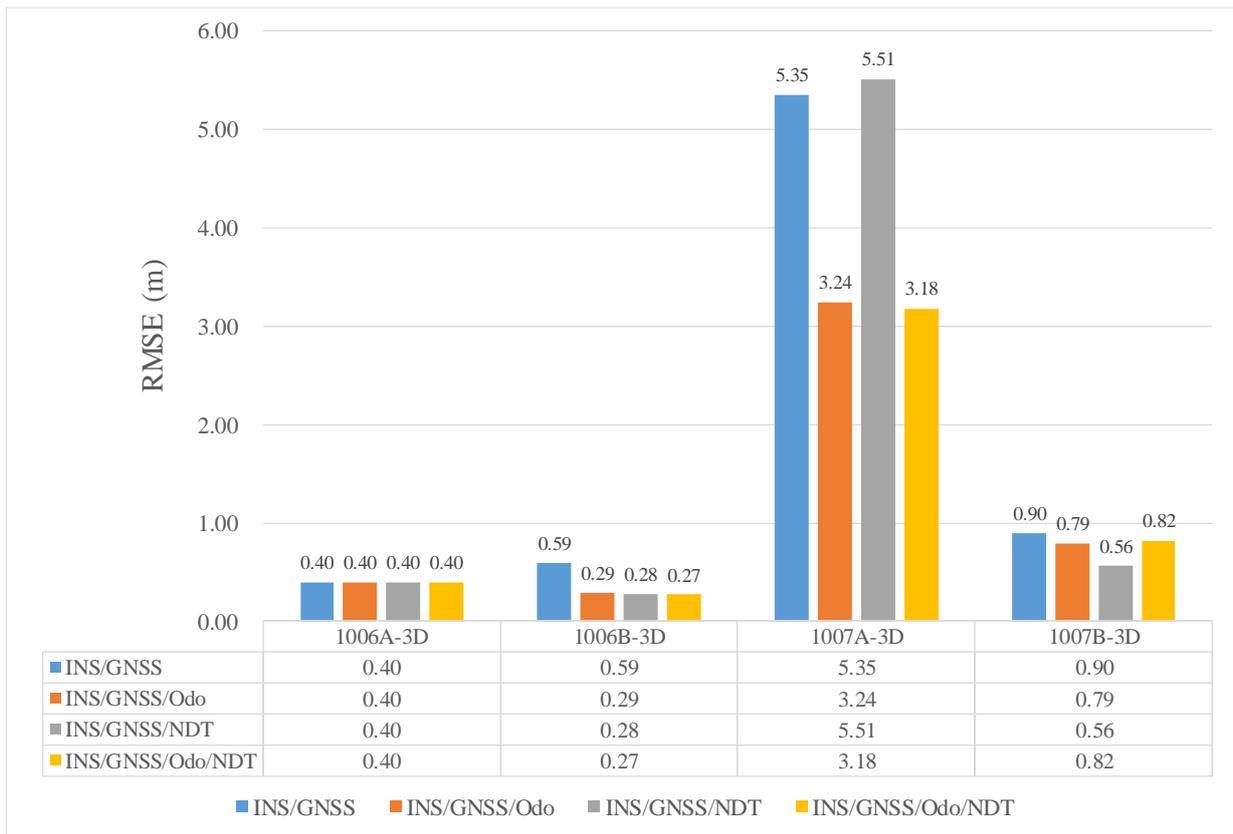


圖 4.19 各實驗三維(3D)定位精度分析

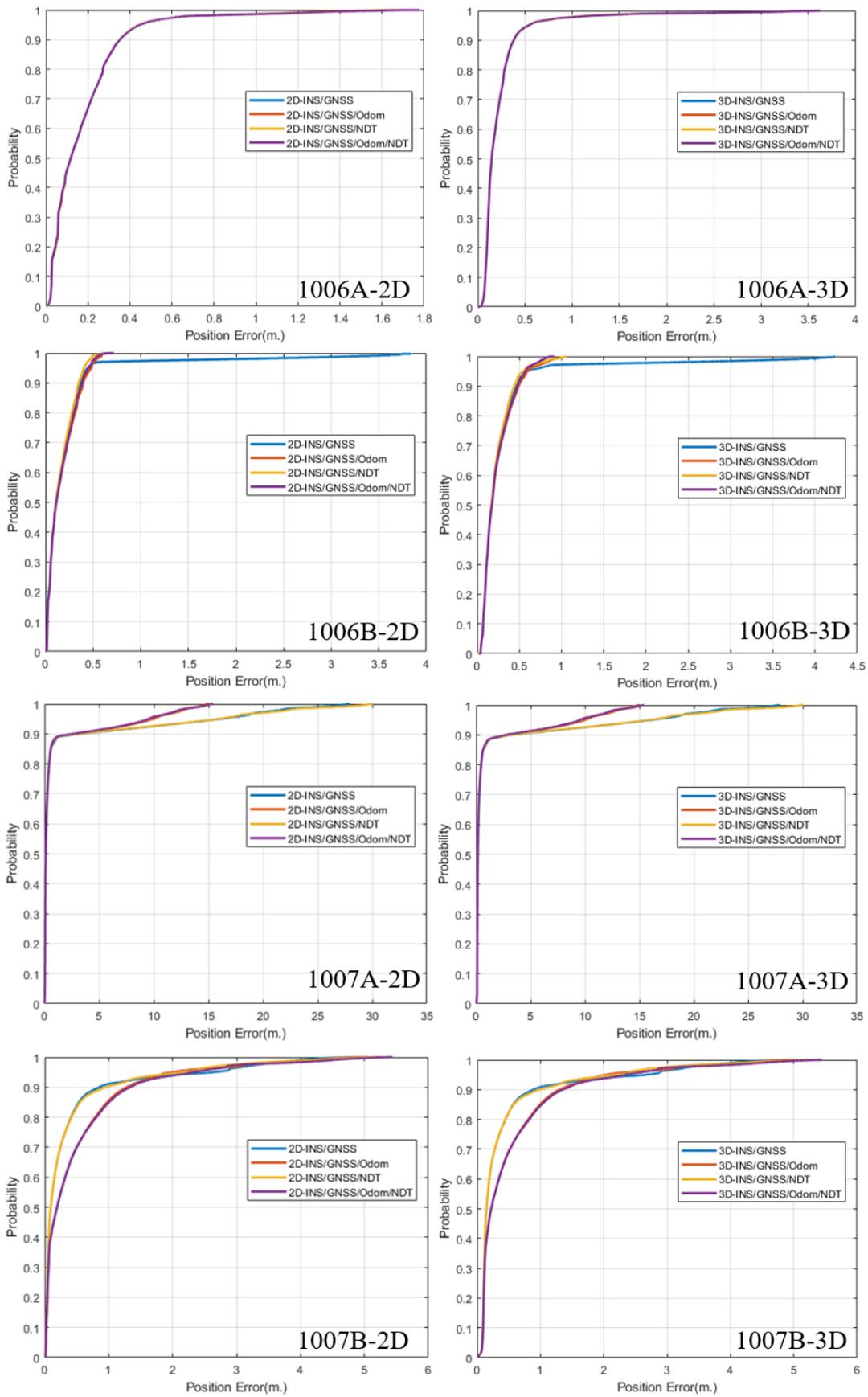


圖 4.20 各實驗誤差累積圖

第五章 研究結論

本章將總結本案重要研究成果與結論，並針對本案待精進處提出建議及對政府相關施政之助益：

■ 重要結論：

(一) 移動製圖定位定向程式開發

1. 開發 AINS 軟體並配合國土測繪中心 IMU 資料檔案格式新增轉換功能，以利本案開發及與其他演算法整合。AINS 係架構於 MATLAB 軟體所開發，原須有 MATLAB 執行環境(Runtime)才可順利執行，本團隊已將 AINS 軟體轉換成執行檔並可在無 MATLAB 環境下正常使用。
2. 本案執行過程中發現將國土測繪中心測繪車之輪速計輔助資訊加入後，其定位誤差變大，主要原因為輪速計資料轉換錯誤及資料脫落等問題所致，已將問題回報國土測繪中心並於所開發之 AINS 軟體中額外增加輪速計資料檢核機制，使其整體解算機制更完備。

(二) 光達直接地理定位

1. 本案於台南花園夜市及台中港灣技術研究中心完成 VLP-16 光達之率定與直接地理定位演算法開發，並將率定之固定臂及軸角參數供後續 SLAM 開發使用。

(三) 同步定位與製圖技術(SLAM)

1. 由於國土測繪中心光達掃描點雲與目前現有之 SLAM 演算法相容性不足，故本案改採以成大有之 VLP-16 光達加裝於測繪中心光達測繪車上以執行 SLAM 提升定位精度，而測繪中心原有之 Z+F 光達則於定位精度提升後執行後續製圖作業。本案已完成 NDT 及 ICP SLAM 演算法開發，但 NDT 演算法效能較好，故本案成果皆以 NDT SLAM 為主，ICP SLAM 成果亦提供測繪中心參考用。
2. 執行 NDT SLAM 時，許多因子皆會影響最終成果，如點雲密度、INS/GNSS 初始參考值、NDT 單窗大小、實驗環境(單調或複雜)及其他因素，其中更以前三者為最重要因素。若點雲密度高即可

求得可靠的高斯分布統計資訊；而高斯分布統計資訊又與罩窗大小息息相關，罩窗大小也須適應各種狀況調整(例如過大的罩窗可能會包含雜訊)；最後若沒有良好的初始值，容易使 NDT 陷入局部最小值而使點雲間之匹配出錯，而無法提供可靠的速度及航向角觀測量更新。

(四)整合成果

1. 本案使用 INS/GNSS/NDT 於 1006B 實驗獲得最佳的提升效果，平面及三維精度分別可提升 61%(RMSE:20 公分)及 52%(RMSE:30 公分)，其原因為 1006B 為半遮蔽環境，易受到 GNSS 訊號中斷及多路徑效應影響，此時 NDT-SLAM 即可提供可靠的速度及航向角更新觀測量。而在弱遮蔽環境(1006A)或全遮蔽環境(1007A, 1007B)則沒有顯著提升或稍微變差；1007C 實驗則因為 INS 系統累積大量漂移誤差，導致初始觀測量不精準，故 INS/GNSS/NDT 亦累積漂移誤差，造成成果變差約兩倍；另外使用 INS/GNSS/NDT 之整合模式對於各組實驗中之航向角皆有提升。
2. 本案最終提出多感測器資訊整合(即 INS/GNSS/Odometer/SLAM)，除了在弱遮蔽區沒有顯著提升外，1007B 場實驗有 8%的提升(平面&三維)，1007A 實驗有 40%的提升(平面&高程)，1006B 實驗平面和三維精度分別提升 61%和 54%，1007C 實驗則有 83%的提升，惟需注意長時間 GNSS 訊號失鎖情況下精度將大幅下降問題。綜上所述，多感測資訊整合為移動測繪技術更穩定可靠之關鍵。其中可發現一旦輪速計可正常運作，在各種衛星遮蔽區對定位成果皆有助益。而 SLAM 則是在半遮蔽區，也就是會接收到不良 GNSS 觀測量(亦即多路徑效應)的區域，對於避免反射訊號干擾定位成果有極大的助益。
3. 本案於台中環中路實驗(1007A 及 1007B)佈設固定標並探討佈標密度與成果精度間之關係，結果顯示增加固定標可大幅提升定位精度，而透過本案提出的整合架構可減低固定標或控制點之佈設數量(100 公尺延長至 160 公尺或 240 公尺)，但實際作業時受該次 GNSS 成果影響甚巨，故後續可以視作業場域狀況考量佈設；另外在全遮蔽場域則需要考量 IMU 本身漂移及作業要求精度，若以高精地圖精度需求(平面 20 公分；三維 30 公分)為準，以測繪中心之設備每 80 公尺需佈設一個固定標或控制點。

■ 後續精進及執行相關建議：

1. 本案執行 SLAM 匹配時會採用跳幀(Skip frame)的方式以節省計算時間，若日後計算時間不是主要考量問題時，建議採用納入每幀的光達觀測量執行點雲匹配，如此一來可獲得穩定之匹配成果及更新觀測量。
2. 後續進行測繪車作業時，特別是於 GNSS 全遮蔽區作業時，建議於出、入口多增設固定標或控制點，因為進出 GNSS 全遮蔽區時，通常 GNSS 解算成果差，出全遮蔽區需重新追蹤 GNSS 訊號並待系統穩定收斂，故多增設固定標或控制點可進一步保障整體作業精度。
3. 未來可視不同作業環境，加入既有自然點或使用道路里程碑、交通號誌等輔助資訊並評估綜合使用之可行性，進一步提升測繪車於都市區或 GNSS 訊號遮蔽區之定位精度，惟上述物體可能較難於點雲中辨識，故建議加入影像資訊以利辨識並獲取其坐標。
4. 增修測繪流程之 SOP(應用 SLAM 技術時)
 - 測繪前規劃：
 - I. 規劃掃描路線與光達掃描參數設定。
 - II. 光達系統需進行軸角及固定臂率定。若測繪中心後續加裝 Velodyne 系列光達設備，率定流程如第三章 3.3.3 小節所述。
 - III. 控制點佈設：佈設相關規定可依本案測試成果與結論以優規佈設或參考高精地圖作業指引建議佈設。
 - 執行測繪作業：
 - I. 初始對準：初始對準目的為幫助整合導航定位、定向、尋北與估計系統初始狀態，其流程共兩部分：靜態初始對準與動態初始對準。此步驟中，皆須於透空良好之場域，並避免任何 GNSS 可能收到干擾或反射訊號之環境(例如：高樓旁)。
 - A. 靜態初始對準：須將測繪車靜止於 GNSS 訊號量好處 3-5 分鐘，過程中避免一切外在震動。於此步驟中，整合導航系統須利用 GNSS 觀測量決定初始位置，並利用 IMU 觀測地球自轉分量已找到北方向，然而此方法若在靜止時有過多的干擾，所尋得之航向精度可能較低，因此亦可人工給定初始航向。

- B. 動態初始對準：測繪車於 GNSS 訊號量好處以圓形或 8 字形繞行 3-5 分鐘，過程中需包含豐富的旋轉變化。由於靜態初始對準中，無法提供陀螺儀足夠的觀測量，因此在此階段主要目的維提供陀螺儀多樣的觀測量並以 GNSS 觀測量為依據，用以估計整合導航系統狀態。
- C. 上述靜態初始對準及動態初始對準於實驗前後皆須執行一次，實驗結束前則先執行動態初始對準再執行靜態初始對準，以提供後續內業雙向濾波平滑用。

II. 測繪作業時建議行走模式：本案以 SLAM 為基礎開發定位精度提升之演算法。對於 SLAM 而言，重要的是對環境的感知能力，若在實驗過程中能重複經過相同的場域或有相同的特徵，能有效增加 SLAM 演算法的可靠度，故建議國土測繪中心日後執行 SLAM 應用時，相同場域至少需重複經過一次(特別是在 GNSS 嚴重遮蔽場域)，如此一來於 SLAM 演算法中可增加 Loop closure 約制(其概念類似閉合導線)以提升整體定位精度。重複繞行次數可依作業需求精度增加，然而，點雲匹配之計算時間也會隨之增加。

■ 對政府相關施政之助益

1. 本案致力於提升移動製圖平台之定位精度，未來可以推廣至更多的應用領域，像是快速防救災與其他傳統測繪業務等等。
2. 隨著各感測器的演進及物聯網時代來臨，未來會是以自駕車為主的交通運輸模式，但前提是需有高精地圖輔佐自駕車進行定位。目前國內大多還是以開闢區(Open Sky)的高精地圖產製為主，本案已初步完成光達測繪車於 GNSS 遮蔽區之定位精度提升，預期後續可將修正後之軌跡用於點雲直接地理定位，可於半遮蔽或全遮蔽場域獲取高精度之三維點雲，可進一步評估於交通繁忙且 GNSS 接收環境惡劣都市區產製高精地圖之可行性。
3. 若本案研發之 SLAM 技術在未來更臻成熟且穩定，建議可將此技術推廣至國內自駕車、測繪車、高精地圖應用相關之產官學研單位(如表 5.1 所列)，以達技術共享之目標。

表 5.1 建議技術可推廣之產官學研單位

分類	單位名稱
政府機關	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 內政部地政司 ◆ 內政部國土測繪中心
學校/研究單位	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 國立臺灣大學 ◆ 國立成功大學 ◆ 國立成功大學高精地圖研究發展中心 ◆ 國立交通大學 ◆ 臺灣智駕測試實驗室
產業單位	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 經緯航太科技股份有限公司 ◆ 詮華國土測繪有限公司 ◆ 自強工程顧問有限公司 ◆ 勤崴國際科技股份有限公司 ◆ 中興測量有限公司 ◆ 台灣世曦工程顧問股份有限公司 ◆ 興創知能股份有限公司 ◆ 台灣智慧駕駛股份有限公司

附錄一 期中報告審查意見及處理情形

「109 年度精進光達測繪車定位精度委託研究」期中報告審查意見

委員	審查意見	執行團隊回覆
王委員 成機	1. 國土測繪中心所設計之本案工作項目有其邏輯性，請說明本案 4 種情境之成果驗證是否與該邏輯性相關？	1. 本案 4 種情境之成果驗證分別為： (1) GNSS+IMU 定位成果； (2) GNSS+IMU+光達 SLAM 定位成果； (3) GNSS+IMU+固定標觀測量定位成果； (4) GNSS+IMU+光達 SLAM+固定標觀測量定位成果。 對照組為利用高階慣性導航設備 iNAV-RQH 提供之軌跡真值，藉由上述 4 種成果驗證方式與真值比較可分別評估僅加入固定標觀測量、僅加入光達 SLAM 及同時加入固定標觀測量及光達 SLAM 於整體定位精度提升之效益。
	2. 另上述 4 種驗證結果在未來研究報告中能否提供成本效益及費用之分析？	2. 未來研究報告可提供利用本團隊開發之演算法於國土測繪中心測繪車定位精度提升之效益分析；成本效益及費用之分析係涉及硬體設備本身規格不同而所有差異，故此部分不列入本案報告探討。
	3. P.67~P.70 表格中的數據與簡報 P.20~23 的數據不同，請說明。	3. 期中書面報告為調整後最佳化參數之成果，而簡報中數據為月報中的初步成果。另外簡報數據為標準偏差(STD)，而期中報告中數據為均方根誤差(RMSE)，故數值有所差異。

	4. 本研究之成果可否應用於自駕車提高定位精度？	4. 由於國土測繪中心光達掃描機制與大多數自駕車所使用之VLP系列光達有所差異，故本案演算法係針對國土測繪中心光達機制來進行開發。如未來應用於自駕車來提升定位精度則需額外評估演算法之適用度與硬體本身之差異。
王委員 聖鐸	1. 執行團隊確實如期如質完成期中預計進度。	1. 感謝委員肯定。
	2. P.84，提到測繪中心光達與團隊光達不同，是否能在本案完成前修改程式符合測繪中心光達資料？是否能增加說明兩者之差異。	2. 在光達直接地理定位工作項目中，測繪中心使用之光達系統較為封閉，無法讀取原始觀測量來進行率定，僅可直接使用原廠率定參數。在同步定位與製圖技術開發與整合移動定位定向與同步定位與製圖技術開發中，本團隊已開始開發符合測繪中心光達資料的演算法，可在本案結束前完成。兩者之差異可參考 5.4 章節。
	3. P.80，實地驗證時，驗證場域的透空(透空較佳)情形是否足以代表實際情境？	3. 本案驗證場域為台南沙崙周邊道路、成大歸仁校區及臺中環中路高架下道路。台南沙崙周邊道路靠近高鐵站之下方道路亦會受到高鐵高架橋遮蔽；而臺中環中路高架下道路整段皆位於高架下，透空度甚差且交通繁忙，為接收環境十分險峻之場域，足以代表實際環境。
	4. P.77，固定標掃描成果目前僅以文字作性質分析，是否能以量化方式分析？	4. 感謝委員建議，後續於本案執行中會針對固定標掃描成果進行量化分析。

	5. P.43, 使用非諧和約制(NHC)及零速更新(ZUPT)來提升精度, 在測繪車實際作業程序上是否需要對應的修改?	5. 兩約制皆是根據車輛在行車過程中的動態行為所設計, 因此只須正常行駛, 無須對測繪作業進行更動或修改。
	6. P.49, 表格中小數位數取到第 4 位是否合理? 精度的有效位數有到小數點後第 4 位嗎?	6. 因原先精度分析程式僅供內部分析使用, 在取用成果時未注意, 謝謝委員提醒, 已對此做出更正。
	7. 報告書中部分圖片內上、下標很模糊, 請在期末報告書修正。如: P.11 圖 2.1、P.13 圖 2.2, 部分圖片缺圖例, 如: P.19 圖 2.8。	7. 感謝委員建議, 會於期末報告書進行修正。
	8. 部分錯列字請修正, 如 P.18 網格式「示」表示法, P.20「方式」建立各個特徵...	8. 感謝委員建議, 已於報告書中修正。
	9. P.37 式 4.20、P.34 式 4.4、P.33 式 4.1 符號亂碼請修正, P.34 式 4.4 的 cos 與 sin 不建議縮寫, 因為後面公式有 s 和 c 兩個參數會混用。	9. 感謝委員建議, 已於報告書中修正。
	10. 名詞請統一, 如: P.35「當地」水平坐標系統? 「在地」水平坐標系統? 「水平」坐標或「平面」坐標? P.23「正態」或「常態」。	10. 感謝委員建議, 已於報告書中修正。
趙委員 鍵哲	1. 文獻回顧 2.2 節僅參考 Bang 2010 的論文, 請問 2010 年之後迄今的發展如何?	1. 感謝委員建議, 相關文獻會於後續報告中滾動修正。
	2. P.11, 圖 2.1「擴張」卡曼濾波器或「擴增式」卡曼濾波器, 是否一致?請說明。另報告中 GPS 請改用 GNSS。	2. 感謝委員建議, 已於報告書中統一為「擴增式」卡曼濾波器; 報告書中 GPS 已改成 GNSS, 並於後續工作中對 AINS 程式介面進行修正。

	<p>3. 簡報 P.15，其中平面方程式與法向量約制條件為相同的約制條件，請問為何兩者均納入？</p>	<p>3. 感謝委員建議，平面方程式主要求出外方位參數與平面法向量的數值，而法向量約制條件則是針對平面法向量進行約制，避免平差時秩虧問題，使其符合數學定義。</p>
	<p>4. 目前本案針對光達標設計僅考慮大小及距離，另外旋轉角度、點雲密度、放置高度.....等諸多因素皆可能影響是否納入考量。</p>	<p>4. 感謝委員建議，後續於場域測試中若有需要會納入考量。</p>
<p>張委員 智安</p>	<p>1. SLAM 目的是即時解算，而現行 MLS 的方法為 Bundle Adjustment 目的是為精度提升，請團隊思考 Define 目標為何要採用 SLAM？</p>	<p>1. 現行 MLS Bundle Adjustment 除了使用定位系統的導航資訊、控制點與人工的特徵點選取來進行製圖，然而在衛星定位不佳的情況並無法達到可靠精確度，需大幅度仰賴控制點。然而 SLAM 可以透過的連續匹配求出定位軌跡，並且可以輔助定位系統的導航資訊，實現在衛星定位不佳的情況也可以維持一定精確度。</p>
	<p>2. NDT for VLP 16 線，光達定位無法用在 Z+F，光達定位之角色為何？(Hector SLAM)</p>	<p>2. 本團隊採用第一趟軌跡掃描之點雲資料作為匹配的點雲資料庫，第二趟路徑，採用一秒間隔的點雲資料來匹配點雲資料庫，因此搭配上 Z+F 本身高密度的點雲資料，計算高斯分佈可有更好的可靠度。</p>
	<p>3. 光達率定只有 Wall(垂直立面)？為何未求解 A_z 參數？</p>	<p>3. 本團隊在不額外建立率定場的情況下，一般而言牆面都是垂直直立。A_z 因為幾何條件與環境限制，並不在率定求解未知數中。</p>

	4. 為何 NDT 比 ICP 之成果精度高？請補充說明。	4. 與基於點對點的方法相比(ICP)，使用 NDT 的算法通常可提供更準確、更可靠的成果，特別是當掃描重疊較小或初始對齊方式較差時。主要因為 NDT 需計算大量點雲之高斯分布，而 ICP 只考慮多點選取匹配求得點雲間之轉換參數，若初始值選定不佳，一旦匹配到錯誤的點位，容易收斂至局部最佳解。
梁委員 旭文	1. P.8, 甘特圖月次建議修改為實際月份以利閱讀。	1. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	2. P.47, 第 4 行，導致 GNSS 訊號受到汙染並有諸多跳動.....，建議修改為 GNSS 定位結果有諸多跳動.....。	2. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	3. 國土測繪中心 LMS 因為採用 Z+F 軟體輸入之點雲檔已完成直接地理定位計算，後續如何辦理本案研發成果認證，請委辦單位妥善規劃辦理。	3. 感謝委員建議。本案研發成果驗證會比較和分析原本測繪中心與本案開發軟體之製圖成果差異。
曾委員 耀賢	1. P.5, 本案工作期程自決標「次」日起 300 個日曆天，請修正。	1. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	2. P.6, 表 1.2, 月次請改為月份顯示。	2. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	3. P.48, 降低至 6 公尺左右，應為 7 公尺左右，請修正。	3. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	4. P.49, 表 4.3、表 4.4 之精度分析，其真值來源為何？請補充說明。	4. 參考解來自於 Novatel pwrpak7 GNSS 接收機及 iNAV RQH 慣性導航系統(P.48 頁)。
	5. P.58, 第 9 行，錯別字同「實」應改為同時；第 10 行，所「結」的點雲平面特徵，似為錯別字。	5. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	6. P.60, 第 2 段第 1 行，「以」改為「已」。	6. 感謝委員建議，已於報告書中修正。

	7. P.49, 表 4.3、表 4.4, 精度均為公尺級是否符合測繪所需? 是否採用 e-GNSS 反而能達到測繪所需, 兩者之間的分析比較請補充。	7. 表 4.3 和表 4.4 成果僅使用 MEMS 等級之慣性導航系統與 GNSS 接收機, 其成果用來表達本演算法對於整合定位成果確實有幫助。另外本實驗場域極為嚴峻, 若使用 e-GNSS 僅能在透空良好區達到厘米等級定位, 一旦受到嚴重反射訊號或訊號遮蔽, 誤差可能擴大至數十米等級, 並不是穩定的定位系統。
國土測繪中心	1. 研究人員名單請依研究計畫書內應有之人員名單納入報告書中。	1. 感謝中心建議, 已將研究人員名單補充於報告書 1.6 小節的研究人員名單。
	2. P.27, 圖 3.2 中有提到 ZUPT、ZIHR、NHC 等 3 種運動約制條件, 惟報告書中僅有說明 ZUPT 及 NHC 兩種約制條件, 另對照 P.45 貴團隊所開發的程式有包含 ZIHR 的模式, 為何報告中沒有針對 ZIHR 說明, 請補充。	2. 因 ZIHR 對定位成果的影響遠小於 ZUPT 與 NHC, 因此並未特別說明, 後續可視中心需求新增該說明; 或為減少 AINS 使用複雜度, 改為自動開關, 並從介面中移除。
	3. P.69, 直線場景的定位軌跡成果比 P.67 靜態場景的定位成果差距數百倍, 請補充說明兩者差異的原因。	3. 靜態場景無任何動態運動, 情景較為單純, 而動態場景因為載體移動速度較快, 在航向與行進距離的推估上一旦出現較大的誤差, 便會快速累積導致成果不佳。後續會提出精進算法的改進動態場景。
	4. P.73, 圖 6.17 折線圖的視覺效果並不理想, 各線條之間的差異呈現太小不清楚, 是否可用表格數據的方式來表達定位的較差與精度的估值。	4. 感謝中心建議, 已補充於表 6.4。

附錄二 研究報告審查意見及處理情形

「109 年度精進光達測繪車定位精度委託研究」研究報告審查意見

委員	審查意見	執行團隊回覆
洪委員 本善	1. 摘要內之英文 Keywords: MMS, ICP,縮寫，建議英文全名呈現，如：Mobile Mapping System(MMS),。	1. 感謝委員建議，已於報告書修正。
	2. P.16，最後一段第 5 行，點雲匹配方法有三種(1)基於點的方法，(2)基於特徵的方法，(3)基於分布的方法，上述方法文字上似乎不夠專業，建議給予更加專業的命名，如：點基方法、特徵基法、.....。	2. 感謝委員建議，已於報告書修正。
	3. P.24，第 2 段第 1 行，成果驗證分別有 4 種(1)僅加入光達 SLAM 速度、航向角觀測量，(2)僅加入光達點雲中之固定標輔助，(3)同時加入(1)及(2)之資訊，(4)對照組。建議第四章之成果驗證之數據，若能與上述四個小節陳述，更能呈現此四類成果分析。	3. 感謝委員建議。由於各組實驗環境差異大，報告書中欲呈現各組實驗使用四種不同整合方式之定位成果，因此直接比較於各種實驗中使用四種整合方式之定位誤差，更符合實際分析所需。另外已於報告書加入圖形比較以加強不同方法間之差異。
	4. 第四章的成果驗證比較成果表，建議增加圖形的呈現方式，會讓讀者易讀更有感受。	4. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
	5. P.87~103，表 4.29~表 4.62，成果統計資訊是否能夠以遮蔽率之百分比來呈現，取代內線道或外線道（道路）。	5. 感謝委員建議，已於報告書中新增各實驗遮蔽率(見 4.1 小節)。遮蔽率計算方式以 GNSS 失鎖的比例代表，內外線道區分資訊亦保留以供讀者了解實驗路段。
王委員 聖鐸	1. 反光標目前是以人工量測，未來是否可能透過特製標來達到自動或半自動量測？	1. 感謝委員建議，本案所採用之棋盤格標在多種光達點雲處理軟體中皆有自動偵測功能，為了確保作業精度故本案以人工方式來量測固定標標心坐標；另外本案主軸為 SLAM 演算法開發，考

		量本案規模，故在固定標自動偵測演算法則未多著墨，建議未來可納入考慮。
2.	反光標是否可採用最大反射與最大吸收的材質來製作？	2. 感謝委員建議，本案固定標顏色設計亦是考慮最大反射及最大吸收特性(黑白標)，至於特殊漆材質部分建議未來可納入考慮，但須額外考量其成本是否符合效益。
3.	是否可能利用路邊既有里程碑、指示牌或其他交通號誌標？	3. 感謝委員建議，若僅使用光達點雲辨識里程碑、指示牌及其他交通號誌須考量其距離載體距離、高度是否位於光達可掃描範圍內；另外於本案測試階段亦將指示牌納入考量，但因為其材質為強反射材質，故於點雲中較難以準確辨識標心，建議未來可結合影像資訊以辨識上述物體。
4.	反光標的室內測試成果是否可補上？尤其是傾斜測試的部分，是否有做面對光達 SLAM 之傾斜角幾度後無法量測之測試？	4. 本案並無於室內進行固定標掃描測試，僅於室外針對固定標之擺放高度、旋轉進行測試。另外，報告書中所指的傾斜是指中心 Z+F 光達設備安裝時採 45 度傾斜安裝。
5.	P.20 的「正態分布變換」請修改為「常態分布變換」。	5. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
6.	P.18，2.3.2 節的第 1 段第 1~2 行語意不清，請重新潤飾。	6. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
7.	P.7，圖 2.2 中的符號應附上說明，其中 Mech.代表意義為何？請說明。	7. 感謝委員建議，已於報告書中附上圖 2.2 符號說明；另外 Mech. 代表 Mechanization，其過程包含對 INS 原始觀測量進行地球自轉、科氏力等物理模型所造成影響之改正。
8.	P.33，式 (3.22) 及 (3.24) 下方的「四元數」請修正。	8. 感謝委員建議，經確認正確名稱為「四元數」，故修正 P.31「四元素」為「四元數」。

	9. P.105, 「重要工項結論」是否寫「重要結論」即可?	9. 感謝委員建議, 已於報告書中修正。
	10. P.107, 光達掃「瞄」或光達掃「描」請統一名詞。P.107, 倒數第 13 行之「定姿」是否用「定向」較符合前文用法?	10. 感謝委員建議, 已於報告書中修正, 統一使用掃「描」; 另外「定姿」修改為「定向」。
	11. P.27, 中的 Local Level Frame 是否翻譯為「區域地平坐標系統」? 請再確認常用翻譯名詞。	11. 感謝委員建議, 已於報告書中修正。
	12. P.27, 地心地固坐標系統似乎應該是 Earth Center Earth Fixed Coordinate System, 而 Earth Frame 似乎稱為地球框架較符合本文對 Frame 之翻譯方式。	12. 感謝委員建議, 已於報告書中修正。
	13. P.27, 第 2 段第 6 行開始, NED 或 ENU 都可以是右旋系統, 此處建議明列使用 ENU 之優點。	13. 感謝委員建議, P.27 已提及使用東-北-天(ENU)系統的優點在於當高程增加時 Z-軸為正向。
趙委員 鍵哲	1. 點雲處理之範例應提供, 並檢視及評估點雲點位誤差型態、轉換參數、匹配方法及循序/全區套合演算法選擇。	1. 相對於 ICP, NDT 之誤差模型更適合於應用在本案之情境中, 例如: 稀疏點雲、跳幀之匹配模式, 更能得到準確之匹配成果, 也體現於本案研究成果中。而本案採用的為 Sequential(循序)的匹配策略而非全域的匹配策略, 主要考量全域的匹配方式需耗費大量的計算資源, 硬體上的需求不易滿足。
	2. 點雲套合可考慮採用場景特徵(角點、線形或面特徵)。	2. 感謝委員建議, 點雲匹配時亦可採用場景特徵, 如 2.3.2 小節所敘述之特徵法(例如: LOAM), 而本案未採用 LOAM 等基於特徵之匹配方式之主要原因為該算法基於 C++ 所建構, 與本案所提出之基於 Matlab 之軟體架構不相容, 難以在短時間內整併; 另外也考量之如 Autoware 等自駕車

		軟體，亦採用 NDT 之匹配演算法，因此採用此架構未來亦有與自駕車相關系統整併之潛力(可見 2.4 小節-研究採用方法之原因)。
	3. 輪速計觀測量之功能在許多例子並不亞於光達 SLAM，宜詳加探討兩者各自可發揮之場景條件。	3. 感謝委員建議，已在結論中加以說明。
	4. 固定標目前採 80 m、160 m、240 m，因此是否其他間隔，例如 200 m 可推估或加以驗證為可允許值，宜再加考量。	4. 感謝委員建議，本案採用 80m 間距佈設固定標主要是考量中心 IMU 飄移測試成果(見表 4.2)，故密度分析僅以 80m 為倍數分析。由於佈設固定標或控制點密度易受當次實驗是否能獲取良好的 GNSS 解影響，故本案亦建議實務作業時可參考 TAICS TR-0010 v2:2019「高精地圖製圖作業指引 v2」佈設或採用本案測試結果(160m 或 240m)並以優規的方式佈設，故以 200m 為間距佈設固定標或控制點的確是後續可考量之方案。
梁委員 旭文	1. P.7，圖 2.2 內為 GPS，惟文章為 GNSS 可否做適當修正或說法。	1. 感謝委員建議，已將圖 2.2 中 GPS 修改為 GNSS。
	2. 路線 1007C 成果較其他實驗場不佳且為 20 公尺精度，建議考量全遮蔽區內設立固定標或控制點來提升作業精度之可能性。	2. 感謝委員建議，本測試場景(1007C)主要目的為測試本案所提之整合架構相較於原有 INS/GNSS 整合系統之抗誤差飄移能力。後續執行實務測繪作業時，必須透過設立固定標或控制點以提升定位精度。
	3. 附錄一期中報告審查意見，建議改為 3 個欄位來整理，以利閱讀。	3. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
史委員 天元	1. 改善率評估方法，除整體 STD 與 RMSE 等外，是否亦可以納入各筆定位之改善幅度比例或百分比呈現？	1. 感謝委員建議，已於報告書中修正，新增實驗之平面及三維誤差累積圖(類似 Cumulative Distribution Function, CDF 概

		念)。
	2. 本案以佈標點為主，自然物如交通標誌在維護與施作上或許有優勢，建議未來納入評估綜合使用。	2. 感謝委員建議，本案考量作業便利性，主要採取佈設固定標之方式，未來可視作業場域環境納入既有自然物或者交通號誌綜合使用。
	3. NDT、LOAM、ICP 除初始值之容忍度外，方法上之根本差異與適應之數據條件，建議增加相關說明。	3. ICP、LOAM、NDT 三種方法細節詳述於 2.3.1 至 2.3.3 小節。LOAM 演算法為針對 VLP-16 光達資料所設計之演算法；而 NDT 及 ICP 演算法則適用於點雲密度較高之應用情境(本案前期係針對國土測繪中心 Z+F 測繪等級光達提出此兩種方法)，尤其是 ICP。相對於 ICP，NDT 之誤差模型更適合應用於本案之情境中，例如：較稀疏點雲、跳幀之匹配模式，NDT 更能得到準確之匹配成果，也體現於本案研究成果中。此外，2.3.3 小節中亦對 ICP 與 NDT 受稀疏點雲、小重疊區等條件下進行評估，文獻指出使用 NDT 的算法通常提供更準確，更可靠的成果，特別是當掃描重疊較小或初始對齊方式較差時。
曾委員 耀賢	1. P.45，表 3.5 VLP-16 規格中，掃描速度 5-20 Hz，是否正確？	1. 在此所描述之掃描速度為點雲每幀之掃描頻率，而非每個點之掃描頻率。因此儀器規格中 5-20 Hz 是正確的，在本案中則設定為 10 Hz 進行實驗。
	2. P.65，表 4.1 盧列各驗證場域環境，包括 1006A、1006B、1007A、1007B、1007C，其中 1007A、1007B 實驗總長度 15km+，與圖 4.2 所示 5 條測試路線長(每條約 950 公尺)總合不相符(是否為包括迴轉之行駛總	2. 本案執行 SLAM 計算時，1007A, 1007B, 1007C 皆使用整段路程資料(包含迴轉路線)，考量到佈標數量以及人力配置，故主要佈標路段為 5 條測試路線(各約 950 公尺)，詳細說明已補充於 4.1 小節。

	路線)，請再予以詳細描述。 (1007C 亦同)	
	3. P.103，1007C 測試...然而在此環境下，INS 本身受到 GNSS outage 而累積大量飄移誤差，所以位置及姿態皆「無法」準確更新...，是否漏了「無法」二字。	3. 感謝委員建議，確實漏了「無法」二字，已於報告書中修正。
	4. P.104，有關 NLSC 現有設備在長時間 GNSS outage 下，僅能獲得約 40m 精度，若加裝 Velodyne 系列光達，可提升為 22m。個人覺得 22m 精度，也無法適用於任何測繪業務，這個建議沒有多大實質意義，這場域試驗的結果建議修正為【需注意長時間 GNSS outage 下精度將大幅下降問題】。	4. 感謝委員建議，已於報告書中修正。
國土測繪中心	1. 封面請改以中英文併列	1. 感謝中心建議，已於報告書修正。
	2. 請補充檢附性別平等統計分析資料。	2. 感謝中心建議，已補充性別平等統計分析。

參考文獻

- 江凱偉、曾義星、楊名、饒見有、詹劭勳 (2011)：100 年度發展與應用多平台遙測製圖技術工作案期末報告，內政部地政司。
- 社團法人台灣資通產業標準協會(2019)，高精地圖製圖作業指引 v2。
- 胡智祐(2009)：發展低成本緊耦合式 INS/GPS 整合無縫車用導航系統之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系研究所碩士論文。
- 賴志凱(2004)：地面雷射掃描儀的精度分析與檢定，國立成功大學測量及空間資訊學系研究所碩士論文。
- 羅貽駢(2008)：利用 UKF 發展 GPS/INS 整合式定位演算法之評估，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- Armesto, L., Ippoliti, G., Longhi, S., Tornero, J. (2006): FastSLAM 2.0: least-squares approach. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006). Beijing, China.
- Baltsavias, E.P. (1999). *Airborne laser scanning - basic relations and formulas*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 2-3, pp. 199-214.
- Bang, K.I. (2010). *Alternative methodologies for LiDAR system calibration* (Doctoral dissertation, University of Calgary).
- Besl, P.J., and McKay., N.D. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. In: IEEE Trans. Pat. Analysis and Mach. Intelligence 14.2 (Feb. 1992), pp. 239–256.
- Biber, P. and Straßer, W. (2003): The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching. In Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453), Las Vegas, NV, USA, 27–31 October 2003; pp. 2743–2748.
- Bolkas, D., & Martinez, A. (2018). Effect of target color and scanning geometry on terrestrial LiDAR point-cloud noise and plane fitting. *Journal of applied geodesy*, 12(1), 109-127.
- Brown, R.G. and Hwang, P.Y.C. (1997): Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, John Wiley & Sons Inc.
- Burgard, W., Stachniss, C., Grisetti, G., Steder, B., Ku`mmerle, R., Dornhege, C., Ruhnke, M., Kleiner, A., and Tardó's, J. D., (2009): A Comparison of SLAM Algorithms Based on a Graph of Relations. in Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Burman, H. (2000). *Calibration and Orientation of Airborne Image and Laser Scanner Data Using GPS and INS*, Ph.D. Thesis, Photogrammetry, Reports

No. 69, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

- Chan, T. O., & Lichti, D. D. (2015). Automatic in situ calibration of a spinning beam lidar system in static and kinematic modes. *Remote Sensing*, 7(8), 10480-10500.
- Chan, T. O., Lichti, D. D., Roesler, G., Cosandier, D., & Al-Durgham, K. (2020). RANGE SCALE-FACTOR CALIBRATION OF THE VELODYNE VLP-16 LIDAR SYSTEM FOR POSITION TRACKING APPLICATIONS.
- Chong, K.; Kleeman, L. (1997). *Accurate odometry and error modelling for a mobile robot In Robotics and Automation*. Proceedings. IEEE International Conference on, IEEE: Albuquerque, NM; Vol. 4, pp 2783 - 2788.
- Chiang, K. W. (2004). *INS/GPS integration using neural networks for land vehicular navigation applications*. (No. NR-04589 UMI).
- Chiang, K. W., Lin, Y. C., Huang, Y. W., & Chang, H. W. (2009). *An ANN-RTS smoother scheme for accurate INS/GPS integrated attitude determination*. GPS solutions, 13(3), 199-208.
- Chiang, K. W., Tsai, G. J., Chang, H. W., Joly, C., & El-Sheimy, N. (2019). Seamless navigation and mapping using an INS/GNSS/grid-based SLAM semi-tightly coupled integration scheme. *Information Fusion*, 50, 181-196.
- Chiang, K.W., Duong, T.T., Liao, J.K., Lai, Y.C., Chang, C.C., Cai, J.M., Huang, S.C. (2012). *On-line smoothing for an integrated navigation system with low-cost mems inertial sensors*. SENSORS 2012, 12, 17372-17389.
- Donoho, D. L. (1995). De-noising by soft-thresholding. *IEEE transactions on information theory*, 41(3), 613-627.
- Einhorn, E. and H.-M. Gross (2013): Generic 2D/3D SLAM with NDT Maps for Lifelong Application. In Proceeding, 6th European Conference on Mobile Robots (ECMR 2013).
- El-Sheimy, N. (1996). *The development of VISAT: a mobile survey system for GIS applications*. University of Calgary.
- El-Sheimy, N., Valeo, C., and Habib, A.F. (2005). *Digital Terrain Modelling: Acquisition, Manipulation and Applications (1st Edition)*, Artech House, Norwood, US, 257p.
- Filin, S. (2003). *Recovery of systematic biases in laser altimetry using natural surfaces*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 69, No. 11, pp. 1235-1242.
- Gautier, J. D., & Parkinson, B. W. (2003). Using the GPS/INS generalized evaluation tool (GIGET) for the comparison of loosely coupled, tightly coupled and ultra-tightly coupled integrated navigation systems. In *Proceedings of the 59th annual meeting of the institute of navigation and*

CIGTF 22nd guidance test symposium, pp. 65-76.

- Glennie, C. (2007). *Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LiDAR systems*, *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 1, No. 3, pp. 147-157.
- Glennie, C., & Lichti, D. D. (2010). Static calibration and analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning. *Remote Sensing*, 2(6), 1610-1624.
- Glennie, C. (2012). Calibration and kinematic analysis of the velodyne HDL-64E S2 lidar sensor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(4), 339-347.
- Glennie, C., Brooks, B., Ericksen, T., Hauser, D., Hudnut, K., Foster, J., & Avery, J. (2013). Compact multipurpose mobile laser scanning system—Initial tests and results. *Remote Sensing*, 5(2), 521-538.
- Godha, S. (2006). Performance evaluation of low cost MEMS-based IMU integrated with GPS for land vehicle navigation application. *UCGE report*, (20239).
- Goodall, C., El-Sheimy, N., & Chiang, K. W. (2005). The development of a GPS/MEMS INS integrated system utilizing a hybrid processing architecture. In *18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS 2005*.
- Grisetti, G.; Stachniss, C.; Burgard, W. (2007). *Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters*. *Robotics*, IEEE Transactions on 2007, 23, 34 - 46.
- Groves, P. D., Pulford, G. W., Littlefield, C. A., Nash, D. L., & Mather, C. J. (2007): *Inertial navigation versus pedestrian dead reckoning: Optimizing the integration*. In Proc. ION GNSS (pp. 2043-2055).
- Habib, A. F., Bang, K.I., Shin, S.W., and Mitishita, E. (2007). *LiDAR system self-calibration using planar patches from photogrammetric data*. The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, [CD-ROM]. 28-31 May, Padua, Italy.
- Holz, D., Ichim, A. E., Tombari, F., Rusu, R. B., and Behnke, S. (2015): *Registration with the Point Cloud Library: A Modular Framework for Aligning in 3-D*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 22(4), 110-124.
- Huising, E.J. and Gomes Pereira, L.M. G. (1998). *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 5, pp. 245-261.
- Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (1997). *New extension of the Kalman filter to nonlinear systems*. *Signal processing, sensor fusion, and target recognition VI*, 3068, 182-193.

- Jung, J., Kim, J., Yoon, S., Kim, S., Cho, H., Kim, C., & Heo, J. (2015). Bore-sight calibration of multiple laser range finders for kinematic 3D laser scanning systems. *Sensors*, 15(5), 10292-10314.
- Kohlbrecher, S., von Stryk, O., Meyer, J., Klingauf, U. (2011). *A flexible and scalable slam system with full 3d motion estimation*. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2011 IEEE International Symposium on, IEEE: Kyoto, pp 155 - 160.
- Konolige, K., Grisetti, G., Kummerle, R., Limketkai, B., Vincent, R. (2010): Efficient Sparse Pose Adjustment for 2D Mapping, In Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Oct. 2010.
- Lategahn, H., Geiger, A., Kitt, B., Stiller, C. (2012). *Motion-without-structure: Real-time multipose optimization for accurate visual odometry*. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012 IEEE, IEEE: Alcalá de Henares, pp 649 - 654.
- Li, X. Y., Du, S. T., Li, G. C., and Li, H. Y. (2020): Integrate Point-Cloud Segmentation with 3D LiDAR Scan-Matching for Mobile Robot Localization and Mapping. *Sensors*, 20(1).
- LiDAR, V. (2016). VLP-16 In VLP-16 Manual: User's Manual and Programming Guide; Velodyne LiDAR. Inc.: San Jose, CA, USA.
- Maas, H.G. (2000). *Least-squares matching with airborne laser-scanning data in a TIN structure*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 16-22 July, Amsterdam, Netherlands. pp. 548-555.
- Magnusson, M., Lilienthal, A., and Duckett, T. (2007): Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT. *Journal of Field Robotics*, 24(10), 803-827.
- Magnusson, M., Vaskevicius, N., Stoyanov, T., Pathak, K., and Birk, A. (2015): Beyond points: Evaluating recent 3D scan-matching algorithms. Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- May, N. C. and Toth, C. K. (2007). *Point positioning accuracy of airborne lidar systems: a rigorous analysis*, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, Part 3/W49B, pp. 107-111, 2007.
- Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B. (2002): Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. *Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence*; Menlo Park, CA, USA, pp 593-598.
- Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R., and Magnenat, S. (2013): Comparing ICP variants on real-world data sets, *Autonomous Robots*, vol. 34, no. 3, pp. 133-148, 2013.

- Qin, T. and Cao, S. Advanced implementation of LOAM [Internet]. 2019 [cited 2020 June 26]. Available from: <https://github.com/HKUST-Aerial-Robotics/A-LOAM>.
- Renaudin, E., Habib, A., & Kersting, A. P. (2011). Feature-Based Registration of Terrestrial Laser Scans with Minimum Overlap Using Photogrammetric Data. *Etri Journal*, 33(4), 517-527.
- Ravi, R., Shamseldin, T., Elbahnasawy, M., Lin, Y. J., & Habib, A. (2018). Bias Impact Analysis and Calibration of UAV-Based Mobile LiDAR System with Spinning Multi-Beam Laser Scanner. *Applied Sciences*, 8(2), 297.
- Ren, Z., Wang, L., and Bi, L. (2019): Robust GICP-Based 3D LiDAR SLAM for Underground Mining Environment. *Sensors (Basel)*, 19(13).
- Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., & Zach, G. (2010). Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. *Journal of Applied Geodesy*, 4(1), 13-21.
- Schenk, T. (2001). *Modelling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners, Technical Notes in Photogrammetry*. Vol. 19, The Ohio State University, Columbus, US.
- Schwarz, K.P. and Wei, M. (1999): INS/GPS Integration for Geodetic Applications, ENGO 623 Lecture Notes, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Canada.
- Shan, J. and Toth, C. K. (2009). *Topographic Laser Ranging and Scanning*. CRC Press, Boca Raton, US, 590p.
- Shan, T. and Englot, B. (2018): LeGO-LOAM: Lightweight and Ground-Optimized LiDAR Odometry and Mapping on Variable Terrain. In Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 1–5 October 2018; pp. 4758–4765.
- Shin, E. H. (2005). *Estimation Techniques for Low-cost Inertial Navigation*. UCGE report, 20219.
- Skaloud, J. and Lichti, D. (2006). *Rigorous approach to boresight self-calibration in airborne laser scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 61, No. 6, pp. 47-59.
- Sukkarieh, S. (2000). Low cost, high integrity, aided inertial navigation systems for autonomous land vehicles.
- Thrun, S., Montemerlo, M. (2006): The Graph SLAM Algorithm with Applications to Large-Scale Mapping of Urban Structures, *International Journal of Robotics Research*, v.25 n.5-6, p.403-429, May-June 2006.
- Titterton, D., & Weston, J. L. (2004). Strapdown inertial navigation technology (Vol. 17). IET.

- Toth, C. K. (2002). *Calibrating airborne LiDAR systems*. Proceedings of ISPRS Commission II Symposium, 20-23 August, Xi'an, China, pp. 475-480.
- Vaughn, C.R., Bufton, J.L., Krabill, W.B., and Rabine, D.L. (1996). *Georeferencing of airborne laser altimeter measurements*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 11, pp. 2185-2200.
- Vosselman, G. (2002). *Strip offset estimation using linear features, 3rd International Workshop on Mapping Geo-Surficial Processes using Laser Altimetry*, [CD-ROM]. 7-9 May, Columbus Ohio, US.
- Wurm, K., Stachniss, C., Grisetti, G. (2010): Bridging the gap between feature- and grid-based slam. Robot. Auton. Syst. 58(2), 140–148. selected papers from the 2007 European Conference on Mobile Robots (ECMR '07)
- Yang, Y. (2008). *Tightly Coupled MEMS INS/GPS Integration with INS Aided Receiver Tracking Loops*. UCGE Reports, 20270.
- Zhang J. and Singh S. (2014): LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. Robotics: Science and Systems Conference (RSS). Berkeley, CA, July 2014.



內政部國土測繪中心

地址：臺中市南屯區黎明路 2 段 497 號 4 樓

網址：www.nlsc.gov.tw

總機：(04)22522966

傳真：(04)22592533