

# 整合NDT SLAM/輪速計/固定標輔助INS/GNSS於都市區之定位效益評估

李啓民<sup>1</sup> 蘇納捷<sup>2</sup> 蔡柵<sup>3</sup> 蔡光哲<sup>4</sup> 郭重言<sup>5</sup> 江凱偉<sup>6</sup> 許展祥<sup>7</sup> 王敏雄<sup>8</sup>

Chi-Ming Lee, Surachet Srinara, Syun Tsai, Guang-Je Tsai, Chung-Yen Kuo, Kai-Wei Chiang, Chan-Hsiang Hsu, Min-Shiung Wang

## 摘要

車載移動式測繪系統定位成果的準確性與可靠度對於後續測繪應用至關重要。目前常見的定位系統，大多是以慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)整合全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)之定位模式；然而在都會區、高架下及隧道內等GNSS訊號接收極具挑戰性的場域中，此定位模式的位置與姿態誤差會隨著GNSS訊號失鎖而逐漸累積漂移誤差，導致後續定位成果不敷測繪使用。近年來，基於光達點雲之同步定位與製圖技術(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)被廣泛地應用於定位輔助與建構未知環境地圖，故本研究針對傳統INS/GNSS整合系統於GNSS訊號遮蔽區定位精度大幅降低之問題，提出整合SLAM技術與其他定位資訊(輪速計、固定標)之多感測器融合方式來提升整體定位精度。其中SLAM技術採用的是常態分佈轉換法(Normal Distribution Transform, NDT)，透過匹配不同時刻之光達點雲資料以求得平面速度與航向角觀測量。為了評估此整合模式之效益，本研究選定台中74快速道路高架下之環中路做為實驗場域。研究成果顯示，在長時間GNSS訊號中斷的環境中，在NDT SLAM與輪速計的輔助下，其平面及三維定位成果可達約40%的改善；另外，傳統測繪任務於GNSS訊號嚴重遮蔽區作業時皆會佈設地面控制點以約制定位與製圖成果，若利用本研究提出的整合架構，固定標或地面控制點佈設間距可由100公尺延長至240公尺，以符合現行高精地圖之定位規範(平面：20公分；三維：30公分)。由本研究的成果可歸納出，透過NDT SLAM技術與不同感測器之整合架構是增強車載移動式測繪系統定位能力的有效方式。

**關鍵字：**慣性導航系統、全球衛星導航系統、同步定位與製圖技術、常態分佈轉換。

---

<sup>1</sup>國立成功大學測量及空間資訊學系 博士生

<sup>2</sup>國立成功大學測量及空間資訊學系 博士生

<sup>3</sup>國立成功大學測量及空間資訊學系 博士生

<sup>4</sup>國立成功大學測量及空間資訊學系 博士

<sup>5</sup>國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

<sup>6</sup>國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

<sup>7</sup>內政部國土測繪中心 技士

<sup>8</sup>內政部國土測繪中心 課長

## 一、前言

為了解決在GNSS訊號遮蔽或其他具有挑戰的環境中，位置與姿態估計誤差會隨時間漂移和累積的問題，需要考量納入多感測器融合方案，特別是使用光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)感測器，其可以連續提供穩定和準確測距訊息之點雲資料。為了使用光達來估計車載移動式測繪系統行走時的位置與姿態，基於特徵的掃瞄匹配方法於SLAM中逐漸發展成為主流，尤其是在有足夠數量的特徵或地標的環境中，更利於執行掃瞄匹配。最廣泛被應用的基於特徵之演算法為LiDAR Odometry and mapping (LOAM) (Zhang & Singh, 2014)。近年來，Chang等人(2020)提出了INS/GNSS整合導航系統與LOAM的融合。然而，這種方法在諸如公路等幾何資訊較少的環境中，在特徵受限的環境中，從點雲資料中提取的特徵進行掃瞄匹配之方式可能效果不佳，導致估計精度較差(Li et al., 2020)。為了獲得更靈活的掃瞄匹配方法並處理特定的幾何資訊問題，故在本研究中採用基於分佈的常態分佈變換(NDT)演算法(Biber & Straßer, 2003)，使用NDT演算法通常提供更準確，更可靠的成果，特別是當掃描重疊區域較小或初始值給定精度較差時。因此，本研究將於GNSS訊號遮蔽的環境中使用INS/GNSS/NDT SLAM及搭配車載移動式測繪系統原有之輪速計整合方案，並透過佈設固定標以提升整體定位精度，如此一來即可提供相關單位執行後續高精度之測繪應用，例如產製高精地圖(High Definition Map, HD map)。

## 二、研究架構與方法

本研究使用基於光達的NDT掃瞄匹配方法與傳統INS/GNSS整合方案進行多感測器融合。圖1為本研究提出的整合方案之流程。研究架構主要透過擴增式卡曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF)整合INS、GNSS、NDT SLAM及輪速計資訊，搭配適當的車載運動模型，最終藉由濾波器及平滑器等處理得到平滑解，最後再透過佈設之固定標或地面控制點約制得到最終導航解，亦即車載移動式製圖系統之位置與姿態資訊。本研究所提出之NDT演算法則如下列說明：

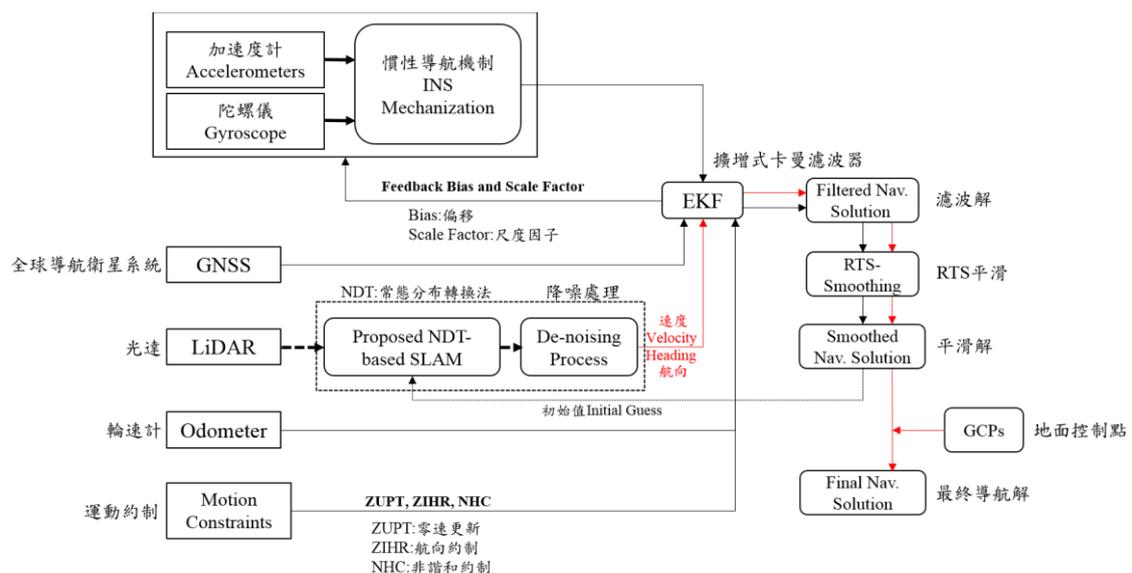


圖1、整合架構流程圖

● 常態分佈轉換法(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)，之後針對每個網格或立方體計算其平均值 $\mathbf{q}$ 與協變方 $\mathbf{C}$ ，後續可透過高斯分布 $N(\mathbf{q}, \mathbf{C})$ 計算在特定点 $x$ 的機率密度函數(Probability density function, PDF)。

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

$$T(\mathbf{p}, x) = \mathbf{r}x + \mathbf{t} \tag{1}$$

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：

$$s(\mathbf{p}) = -\sum_{i=1}^n pdf(T(\mathbf{p}, x_i)) \tag{2}$$

由式(2)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。

三、實驗設計與成果分析

本研究之實驗場域為台中74快速道路高架下方之環中路(公益路二段至市政南一路口)，此場域GNSS訊號接收環境惡劣(GNSS訊號失鎖率70%-80%)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。另外，本研究亦於實驗場域佈設固定標以約制定位成果，佈設依據為參考IMU之規格及定位精度需求，約80-100m須佈設一個固定標，本研究以80m間距為原則佈設。而本研究所使用之軌跡真值資料為利用高階捷聯導航級慣性測量元件iNAV-RQH系統經商用軟體Inertial Explore (IE) 版本8.70計算後提供。

實驗整體定位誤差如表1所示，使用本研究所提出之整合架構後，定位成果之最大誤差(Max)、平均誤差(Mean)、標準偏差(STD)及均方根誤差(RMSE)皆能有效地降低，在平面及三維的定位精度皆有40%的提升。然而此定位誤差之絕對值亦不敷後續測繪作業使用，其原因在於NDT演算法計算時會採用INS/GNSS整合解作為初始值使用，由於此場域會歷經長時間的GNSS訊號失鎖，故會影響整合解精度，也會影響NDT計算結果。因此，本研究後續將引入固定標來約制定位成果。

表1、整體定位誤差分析

Error (m.)	INS/GNSS			INS/GNSS/Odom/NDT		
	E	N	U	E	N	U
Max	8.78	26.66	2.64	4.66	15.44	2.64
Mean	-0.33	-1.51	-0.16	-0.08	-0.92	-0.16
STD	1.49	4.89	0.26	0.78	2.93	0.27
RMSE	1.53	5.12	0.30	0.78	3.07	0.31
RMSE	2D		3D	2D		3D
2D & 3D	5.34		5.35	3.17		3.18
Improvement	<b>2D</b>		<b>3D</b>	<b>2D</b>		<b>3D</b>
2D & 3D	-		-	<b>41%</b>		<b>40%</b>

加入固定標約制(絕對坐標由地面測量取得)後之定位成果如表2所示，其大幅度地提升定位精度，平面及三維之定位誤差皆由3m降低至20cm，可見佈設固定標或地面控制點對於測量實務作業的重要性。由表2分析，若僅使用原始之INS/GNSS之整合架構，80m就需要佈設控制點，而透過本研究所提出之整合架構，不僅可以提升定位精度，更可將控制點佈設間距由80m延長至240m皆可達到接近現行高精地圖之定位需求(平面：20cm; 三維：30cm)。故整合NDT SLAM技術及輪速計資訊可減少後續佈設控制點與地測之成本。

表2、固定標佈設間距分析

Error (m.)	GCP_80m			GCP_160m			GCP_240m		
	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
Mean	0.06	0.15	-0.01	0.08	0.15	-0.02	0.05	0.16	-0.01
STD	0.08	0.08	0.08	0.10	0.08	0.08	0.10	0.11	0.06
RMSE	0.10	0.17	0.08	0.12	0.17	0.09	0.11	0.20	0.06
RMSE 2D & 3D	<b>2D</b> <b>0.20</b>	<b>3D</b> <b>0.22</b>	<b>2D</b> <b>0.21</b>	<b>3D</b> <b>0.23</b>	<b>2D</b> <b>0.22</b>	<b>3D</b> <b>0.23</b>			

#### 四、結論

本研究成功地整合INS/GNSS/輪速計/NDT-SLAM及固定標資訊於GNSS嚴重遮蔽之場域提升車載移動式測繪系統之定位精度，其平面及三維之RMSE皆有40%的提升。另一方面，透過本研究所提出之整合架構可減少後續佈設控制點個數與地測成本，綜上所述，多感測器整合為使車載移動式測繪系統更穩定可靠之關鍵。

本研究執行SLAM匹配時採跳幀(Skip frame)的方式以提升計算效率，若未來計算時間非主要考量時，建議納入每幀的光達觀測量執行點雲匹配，如此一來可獲得更穩定之匹配成果。另外為了避免在某些高動態運動(如高速行駛或轉彎)導致NDT掃描匹配失敗，應考慮使用更多附有不同方向的光達掃描儀，並研究更多不同場域下之執行狀況。

#### 參考文獻

- Biber, P., and W. Straßer, "The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching," In International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2743–2748, 2003.
- Chang, L., X. Niu, and T. Liu, "GNSS/IMU/ODO/LiDAR-SLAM Integrated Navigation System Using IMU/ODO Pre-Integration," Sensors, 20, 4702, 2020.
- Li, X. Y., Du, S. T., Li, G. C., and Li, H. Y., Integrate Point-Cloud Segmentation with 3D LiDAR Scan-Matching for Mobile Robot Localization and Mapping. Sensors, 20(1), 2020.
- Zhang, J., and S. Singh, "LOAM : Lidar Odometry and Mapping in Real-time," In Robotics: Science and Systems, 1–8, 2014.