

# 100 年度發展與應用多平台 遙測製圖技術工作案

## 工作總報告書 修訂本

計畫主持人：江凱偉 副教授  
共同主持人：曾義星 教授  
楊 名 教授  
詹紹勳 副教授  
饒見有 助理教授

委託單位：內政部  
投標單位：財團法人成大研究發展基金會  
執行單位：國立成功大學測量及空間資訊學系

中 華 民 國 100 年 12 月 23 日

## 中文摘要

現有空間資訊系統之效益建構在系統空間及屬性資料時效性以及正確性，並藉此發揮它的功能並表示真實世界的現象。然而，傳統測量以及屬性調查作業從開始收集資料到系統建置完成往往需要半年以上的時間，已不符合科技發展的趨勢與成本效益。近年來測量與空間資訊技術正在逐漸革新，移動遙測製圖系統結合攝影測量製圖的技術與精密整合式定位定向系統，搭配多種的數位影像感測器來收集空間資料，逐步實現快速即時移動式測量及空間資料收集技術。

自主研發適用不同平台之移動遙測製圖技術為各國發展移動遙測製圖技術之理想目標，本案彙整多平台定位技術相關資料、合法引進具備高階光纖陀螺儀之慣性測量儀，並自行研製含軟體之INS/GNSS 整合式定位定向系統；以近半的成本下能夠提供與商用系統相匹敵之定位定向精度，並進一步評估引進及建立國內慣性測量儀之標準率定程序並透過國際公認的標準測試程序與設備進行INS/GNSS 整合式定位定向系統規格測試與分析，成功開發設計具顯著效益之新解算模式定位定向演算法等關鍵技術，並利用這些基礎建置空間資訊整合展示平台。同時針對發展空載傾斜攝影定位系統技術與建置個人攜帶式定位系統之可行性初期評估與規劃，期進一步提升我國自主組裝多平台移動遙測製圖設備能力與研發能量，厚植未來國際自動化測繪技術競爭力。相關成果除可加速國土規劃外，並藉以培養優質人才、提升學術水準及國家競爭力。

## **Abstracts**

The efficiency and advantages of spatial information systems rely on the validity and time effectiveness of spatial and attribute information to work properly and express the phenomena of real world. However, traditional surveying techniques can't fit the trend of technology revolution and cost reduction due to their heavy labor works and slow project progress. Generally speaking, survey and geomatics technologies have been revolutionized since the early nineties in the last century. Advances in satellite and inertial technology made it possible to think about mobile mapping in a new way. Instead of using ground control points as references for orienting the images in space, the trajectory and orientation of the imager platform can now be determined directly. Cameras, along with positioning and orientation sensors, are integrated and mounted on a land vehicle for mapping purposes. Objects of interest can be directly measured and mapped from images that have been geo-referenced using positioning and orientation sensors.

The Self-development of mobile mapping technologies applied for various platforms can be considered as the ultimate objective of geomatics communities around the globe. This pilot project collects fruitful references considering multi-platform mobile mapping technologies in term of applications, historical overviews as well as regulations, develops a multi-sensor integrated positioning and orientation system based on a tactical grade FOG IMU with superior performance and less expense compared to commercial systems with similar specification without ITAR export license control, evaluates the standard calibration and testing procedure and facilities to verify the performance of INS/GNSS integrated systems to guarantee the quality of mapping missions as well as implement novel and novel multi-sensor integration algorithms to enhance the performance mobile mapping systems significantly and develop software platform for spatial information visualization, processing and analysis. In addition, this project conducts plot study concerning the developments of airborne oblique image photogrammetric and portable mobile mapping platforms,

respectively, to enhance Taiwan's capability of research and development for advanced mobile mapping technologies and to be comparable to regional and international geomatics and navigation communities. The progress of this project is beneficial to the development of national spatial planning program as well provide proper and professional training to young scholars and engineers thus enhance the competitiveness and academic achievement around the world.



## 目錄

摘要	I
目錄	III
圖目錄	VI
表目錄	XIII
第一章 前言 .....	15
第二章 多平台定位技術資料彙整 .....	10
2.1 多平台定位技術之沿革 .....	15
2.1.1 車載移動遙測製圖技術之回顧 .....	15
2.1.2 空載移動遙測製圖技術之回顧 .....	26
2.1.3 個人攜行移動測繪系統之回顧 .....	31
2.1.4 船載移動遙測製圖技術之回顧 .....	33
2.2 多平台定位技術應用實例之回顧 .....	34
2.3 多平台定位技術發展趨勢 .....	38
2.3.1 數位影像系統 .....	39
2.3.2 高精度定位定向系統 .....	40
2.4 多平台定位技術之比較與分析 .....	58
2.5 現有多平台定位技術自我檢核機制 .....	65
2.6 國內外多平台定位作業及驗收規範 .....	78
2.7 本章小結 .....	84
第三章 規劃整合慣性導航系統 .....	85
3.1 國內外慣性測量儀規格回顧 .....	85
3.2 引進戰術等級慣性測量儀並完成與雙頻載波相位 GNSS 接收儀之機電整合 .....	95
3.3 研發慣性導航系統軟體模擬器 .....	98
3.4 評估自行研製戰術級慣性測量儀之可行性 .....	107
3.5 多元感測器定位定向系統之靜態與動態性能驗證 .....	110
3.6 本章小結 .....	118
第四章 評估引進及建立國內慣性測量儀之標準率定程序 .....	120
4.1 發展具備陀螺儀之慣性測量儀誤差校正模型 .....	123

4.2 建立慣性測量儀各系統誤差之率定模式 .....	131
4.2.1 率定模式介紹.....	133
4.2.2 測試及結果.....	136
4.3 研擬提升慣性測量儀穩定性之技術 .....	143
4.4 研發慣性測量儀率定實驗室與外業率定技術 .....	152
4.5 評估建立定位定向系統性能評估之標準程序 .....	156
4.6 評估建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性 .....	162
4.6.1 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之陀螺儀測試旋轉台	165
4.6.2 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之加速度計測試平台	166
4.6.3 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之溫度櫃 .....	167
4.7 本章小結.....	168
第五章 設計新解算模式之定位定向演算法 .....	170
5.1 發展使用地平坐標系之慣性導航方程式軟體 .....	171
5.1.1 坐標系統簡介.....	172
5.1.2 INS 導航方程式 .....	176
5.1.3 INS/GNSS 整合架構.....	181
5.1.4 CAINS 軟體使用者介面與效能分析 .....	190
5.2 發展精密單點定位動態軌跡演算法 .....	196
5.3 評估精密單點定位動態軌跡演算法於定位定向技術之應用效 益 .....	208
5.6 分析主要 GNSS 之效能對於定位性能之影響 .....	226
5.7 評估結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術應用之可 行性 .....	231
5.8 本章小結.....	237
第六章 評估發展多元空載傾斜攝影定位系統技術及其應用 .....	239
6.1 國內外空載傾斜攝影技術之沿革歷程文獻蒐集 .....	239
6.2 空載傾斜攝影技術應用實例相關文獻之蒐集（至少需含 3 個 領域） .....	242
6.3 評估自主空載傾斜影像軟硬體技術 .....	248
6.4 本章小結.....	261
第七章 建置空間資訊整合展示平台 .....	262
7.1 完成潛在使用單位之訪談（至少包含 5 個領域） .....	262
7.2 完成空載傾斜攝影應用層面之規劃，進而評估未來多平台遙 測資訊整合系統的全面施行效益與實際成本 .....	264

7.3	空載傾斜攝影影像查詢與展示程式相關演算法之研發 .....	269
7.4	空載傾斜攝影影像單機版三維地理資訊應用系統開發工作	273
7.5	空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢雛形系統開發工作 ....	280
7.4	本章小結 .....	288
第八章	評估建置個人攜帶式定位系統之可行性 .....	289
8.1	個人攜帶式定位系統之規劃與設計 .....	289
8.2	評估影像模組與定位定向系統機電整合之可行性 .....	289
8.3	建立個人攜帶式定位系統之相機透鏡畸變率定校正方式 ....	290
8.4	建立個人攜帶式定位系統之率定演算法 .....	293
8.5	研擬個人攜帶式定位系統之效能驗證方式 .....	295
8.6	評估建立個人通信定位系統之可行性 .....	297
8.7	本章小結 .....	297
第九章	教育訓練及推廣及論文期刊 .....	299
第十章	結論與建議 .....	304
10.1	結論 .....	304
10.2	建議事項 .....	306
第十一章	成果審查會議委員意見 .....	309
11.1	期中成果審查會議委員意見 .....	309
11.2	期末成果審查會議委員意見 .....	326
	參考文獻 .....	330

## 圖目錄

圖 1.1 移動遙測製圖系統之作業流程(a)與組成元件(b) .....	2
圖 1.2 移動遙測製圖系統可拓展之領域.....	3
圖 1.3 自主的移動遙測製圖技術與其他產業之關連.....	4
圖 1.4 本案之執行主軸.....	4
圖 1.5 分月進度折線圖.....	7
圖 2.1 早期移動式測量及空間資料收集技術之範例.....	10
圖 2.2 衛星訊號遮蔽的效應.....	11
圖 2.3 環架式 INS 與固裝式慣性測量儀之比較 .....	12
圖 2.4 INS 之誤差行為 .....	12
圖 2.5 直接定位技術之演進.....	13
圖 2.6 Alberta MHIS.....	16
圖 2.7 Alberta MHIS 之 INS/GPS 整合設計.....	16
圖 2.8 GPSVan .....	16
圖 2.9 VISAT 第一代 .....	17
圖 2.10 VISAT 第二代 .....	18
圖 2.11 VISAT 第三代 .....	18
圖 2.12 Street mapper 車載 MMS .....	18
圖 2.13 第一代(左)與第二代鷹眼平台(右).....	19
圖 2.14 系統直接定位成果與各檢核點坐標差異.....	20
圖 2.15 系統直接定位成果與各檢核點坐標差異直方統計圖.....	20
圖 2.16 Google Street View 介面 .....	22
圖 2.17 TOPCON 公司開發的移動測圖系統.....	23
圖 2.18 Optech 的測量車 Lynx Mobile Mapper.....	24
圖 2.19 立得空間測量車 LD-2000 RH .....	24
圖 2.20 卡內基大學 Red Team 團隊自動車感測器整合架構 .....	25
圖 2.21 自動車：Sandstorm(左)、Stanley (右)、Hilander(中) .....	25
圖 2.22 自動車：Boss(左)、Junior(右)、Talos(下圖左).....	26
圖 2.23 Google 自走車計畫.....	26
圖 2.24 第一部空載直接定位移動遙測製圖技術.....	27
圖 2.25 美國俄亥俄州立大學製圖中心發展之直接定位空載移動測繪系統.....	28
圖 2.26 商用空載移動遙測製圖技術之範例.....	28
圖 2.27 空載移動遙測製圖技術之航測製圖流程比較.....	29
圖 2.28 空載雷射掃描系統之原理.....	30
圖 2.29 空載雷射掃描系統之範例.....	30
圖 2.30 個人攜行移動測繪系統原型.....	32
圖 2.31 個人攜行移動測繪系統操作介面.....	32
圖 2.32 船載光達移動遙測製圖系統架構(上)與作業成果(下).....	33
圖 2.33 船載光達移動遙測製圖系統其他範例.....	34
圖 2.34 森林火點直接定位系統.....	35
圖 2.35 武漢大學所發展之車載移動測繪系統.....	35
圖 2.36 Visimind MMS 與作業實例.....	36

圖 2.37	個人攜帶系統與作業實例.....	36
圖 2.38	空載 IFSAR 製圖系統.....	37
圖 2.39	Yamaha RMAX Type II G.....	38
圖 2.40	宅島火山監測成果.....	38
圖 2.41	GPS 星群(2011 年 7 月 25 日).....	41
圖 2.42	GLONASS 星群(2011 年 7 月 25 日).....	42
圖 2.43	多系統 GNSS 聯合定位之範例.....	43
圖 2.44	慣性感測系統之分類.....	45
圖 2.45	戰術等級慣性測量儀之範例.....	46
圖 2.46	微機電戰術等級慣性測量儀之範例.....	47
圖 2.47	微機電戰術等級慣性測量儀之範例.....	47
圖 2.48	現有與未來陀螺儀技術之比較.....	47
圖 2.49	高階微機電慣性測量儀之效能.....	48
圖 2.50	擴張卡曼濾波器/平滑器之鬆耦合多元感測器整合架構.....	52
圖 2.51	擴張卡曼濾波器/平滑器之緊耦合多元感測器整合架構.....	52
圖 2.52	有人機與無人機航測製圖流程之比較.....	55
圖 2.53	空載與車載移動測繪系統聯合資料處理範例一.....	56
圖 2.54	空載與車載移動測繪系統聯合資料處理範例二.....	56
圖 2.55	空載遙測製圖系統.....	57
圖 2.56	車載遙測製圖系統.....	58
圖 2.57	資料處理範例.....	58
圖 2.58	測試軌跡.....	59
圖 2.59	直接定位量測範例.....	60
圖 2.60	(左)低仰角(右)高仰角 GPS 衛星數量.....	60
圖 2.61	不同直接定位演算法姿態誤差比較.....	61
圖 2.62	不同直接定位演算法定位誤差比較.....	62
圖 2.63	鬆耦合應用於直接地理定位的定位誤差.....	63
圖 2.64	緊耦合應用於直接地理定位的定位誤差.....	64
圖 2.65	GPS/INS 定位誤差.....	66
圖 2.66	時鐘卡概念.....	69
圖 2.67	系統硬體概念圖.....	69
圖 2.68	前向濾波、後向濾波與平滑化誤差累積情況.....	72
圖 2.69	QC 與 ISO 流程比較.....	74
圖 2.70	核幾合關係.....	75
圖 3.1	整合式定位定向技術之關鍵技術.....	85
圖 3.2	導航等級慣性測量儀之性價比.....	86
圖 3.3	雷射陀螺儀範例與原理.....	86
圖 3.4	雷射陀螺儀慣性測量儀與效能範例.....	87
圖 3.5	光纖陀螺儀與慣性測量儀範例.....	88
圖 3.6	各慣性測量儀定位定向效益比較表(無 GNSS 訊號脫落).....	94
圖 3.7	各慣性測量儀定位定向效益比較表(10 秒 GNSS 訊號脫落).....	94
圖 3.8	各慣性測量儀定位定向效益比較表(60 秒 GNSS 訊號脫落).....	95
圖 3.9	(a)利用 GPS 1PPS 訊號實現 IMU/GNSS 觀測量同步 (b)	

INS/GNSS/Camera 資料同步之方法 .....	97
圖 3.10 LCI 慣性測量儀規格與尚未封裝前之照片 .....	97
圖 3.11 多元感測器定位定向系統之整合架構 .....	98
圖 3.12 慣性測量儀原始觀測量之擷取與顯示 .....	98
圖 3.13 LCI 慣性測量儀所提供之原始觀測量 .....	98
圖 3.14 整合式定位定向系統模擬器之主要架構 .....	99
圖 3.15 整合式定位定向系統模擬器之操作介面 .....	100
圖 3.16 多位置測試法率定模型(12 位置) .....	101
圖 3.17 動態模擬軌跡 .....	102
圖 3.18 陀螺儀及加速度計在動態模擬下之觀測量輸出 .....	102
圖 3.19 平面位置誤差比較圖 .....	103
圖 3.20 靜態模擬陀螺儀之三軸觀測量輸出 .....	103
圖 3.21 靜態模擬加速度計之三軸觀測量輸出 .....	104
圖 3.22 慣性測量儀 HG-1700 平面位置、速度、姿態誤差圖 .....	105
圖 3.23 慣性測量儀 iMAR 平面位置、速度、姿態誤差圖 .....	105
圖 3.24 慣性測量儀 LN-200 及 LCI 平面位置、速度、姿態誤差圖 .....	106
圖 3.25 導航等級慣性測量儀平面位置、速度、姿態誤差圖 .....	106
圖 3.26 路測使用之二套慣性測量儀 .....	111
圖 3.27 路測車之內部配置 .....	111
圖 3.28 路測車儀器在車頂之配置 .....	112
圖 3.29 本次路測軌跡與衛星數量分佈(新竹) .....	112
圖 3.30 本次路測平面測試與參考軌跡 .....	113
圖 3.31 本次路測高度變化與參考高度變化 .....	113
圖 3.32 定位誤差序列 .....	114
圖 3.33 定向誤差序列 .....	114
圖 3.34 本次路測軌跡(北宜) .....	116
圖 3.35 本次路測平面測試與參考軌跡 .....	116
圖 3.36 定位誤差序列 .....	117
圖 3.37 定向誤差序列 .....	117
圖 3.38 LCI 即時解之效能 .....	118
圖 4.1 慣性測量儀之內部配置(以光纖陀螺儀為例) .....	120
圖 4.2 1mg 指北加速度計飄移對慣性導航解之影響(4 小時) .....	122
圖 4.3 1 度/小時指東陀螺飄移對慣性導航解之影響 .....	122
圖 4.4 模擬中慣性測量儀之設置 .....	123
圖 4.5 慣性測量儀靜態觀測量值理論輸出示意圖 .....	123
圖 4.6 慣性測量儀各系統誤差之影響 .....	124
圖 4.7 慣性測量儀偏差對觀測量之影響 .....	125
圖 4.8 慣性測量儀偏差對觀測量影響之實際範例 .....	125
圖 4.9 尺度因子對觀測量之影響 .....	126
圖 4.10 軸交誤差 .....	126
圖 4.11 軸交誤差對觀測量之影響 .....	127
圖 4.12 隨機過程之自相關函數 .....	127
圖 4.13 一階高斯馬可夫過程之自相關函數 .....	128

圖 4.14	一階高斯馬可夫之範例.....	129
圖 4.15	高階雷射陀螺儀雜訊影響之範例.....	129
圖 4.16	高階慣性測量儀加速度計輸出範例(含各式系統誤差).....	130
圖 4.17	微機電加速度計輸出範例(含各式系統誤差).....	130
圖 4.18	IEEE 1554-2005 號標準文件所建議之測試程序.....	133
圖 4.19	率定模式之架構圖.....	134
圖 4.20	12 位置測試.....	135
圖 4.21	偏差及尺度因子率定原理.....	136
圖 4.22	第 1、2 位置觀測量.....	137
圖 4.23	第 3、4 位置觀測量.....	137
圖 4.24	第 5、6 位置觀測量.....	138
圖 4.25	第 7、8 位置觀測量.....	138
圖 4.26	第 9、10 位置觀測量.....	139
圖 4.27	第 11、12 位置觀測量.....	139
圖 4.28	12 位置誤差圖.....	140
圖 4.29	12 位置誤差圖.....	143
圖 4.30	阿倫變方時間區分.....	143
圖 4.31	理想值角速度資料之阿倫分析.....	144
圖 4.32	理想值加速度資料之阿倫分析.....	145
圖 4.33	阿倫變方分析法.....	145
圖 4.34	LCI 加速度計之阿倫變方分析.....	146
圖 4.35	LCI 陀螺儀之阿倫變方分析.....	146
圖 4.36	閉合式鬆耦合架構.....	148
圖 4.37	開放式鬆耦合架構.....	148
圖 4.38	測試軌跡圖.....	149
圖 4.39	回饋時間間隔為 1 秒之位置誤差變化.....	149
圖 4.40	回饋時間間隔為 1 秒之姿態誤差變化.....	150
圖 4.41	回饋時間間隔為 180 秒之位置誤差變化.....	150
圖 4.42	回饋時間間隔為 180 秒之姿態誤差變化.....	151
圖 4.43	外業多位置法.....	152
圖 4.44	影響定位定向系統性能之因子.....	158
圖 4.45	整合式定位定向系統之測試項目.....	159
圖 4.46	整合式定位定向系統之測試項目.....	159
圖 4.47	GNSS 接收儀定位精度測試項目.....	160
圖 4.48	整合式定位定向系統精度測試項目.....	160
圖 4.49	慣性測量儀專業動態測試設備.....	161
圖 4.50	慣性測量儀專業溫度測試設備.....	162
圖 4.51	專業慣性測量儀率定及校正實驗室.....	163
圖 4.52	雙頻雙系統之 GNSS 訊號室內播放設備.....	163
圖 4.53	雙頻雙系統之 GNSS 訊號室內播放設備.....	164
圖 4.54	單軸轉台.....	165
圖 4.55	雙軸轉台.....	165
圖 4.56	三軸轉台.....	165
圖 4.57	單軸線性加速度測試台範例.....	167

圖 4.58 溫度櫃之範例.....	167
圖 5.1 都市地區之 GNSS 訊號遮蔽影響.....	171
圖 5.2 慣性坐標系統(i-frame).....	172
圖 5.3 地心地固坐標系統.....	173
圖 5.4 當地水平坐標系統.....	174
圖 5.5 載體坐標系統.....	174
圖 5.6 當地水平坐標系統的導航方程式.....	181
圖 5.7 固定區間逆向平滑演算法之概念.....	185
圖 5.8 擴張卡曼濾波器與 RTS 平滑器於 GNSS 訊號脫落時之效益.....	187
圖 5.9 商用定位定向軟體所使用的傳統開放式鬆耦合架構.....	189
圖 5.10 CAINS-21 軟體使用之改良閉合式鬆耦合架構.....	189
圖 5.11 CAINS-21 軟體介面主視窗.....	190
圖 5.12 CAINS-21 使用者操作介面.....	191
圖 5.13 KINGSPAD 軟體之操作介面.....	192
圖 5.14 測試系統之配置.....	192
圖 5.15 平面參考軌跡.....	192
圖 5.16 高程參考軌跡.....	193
圖 5.17 擴張曼濾波器之定位誤差序列.....	193
圖 5.18 擴張卡曼濾波器及非諧和約制之定位誤差序列.....	193
圖 5.19 擴張卡曼濾波器、非諧和約制及輪速計更新之定位誤差序列.....	194
圖 5.20 擴張曼濾波器之定向誤差序列.....	194
圖 5.21 擴張卡曼濾波器及非諧和約制之定位誤差序列.....	195
圖 5.22 擴張卡曼濾波器、非諧和約制及輪速計更新之定向誤差序列.....	195
圖 5.23 IGS 之觀測網.....	197
圖 5.24 精密單點定位處理器主視窗系統畫面.....	198
圖 5.25 精密單點定位處理器主視窗系統畫面.....	199
圖 5.26 地球與月球的示意圖.....	202
圖 5.27 精密單點定位動態軌跡演算法之資料處理流程.....	208
圖 5.28 CAINS-21 與精密單點定位之整合架構.....	209
圖 5.29 車載定位定向系統之測試場地.....	210
圖 5.30 DGNSS 軌跡與 KINGSPAD 參考軌跡之比較.....	210
圖 5.31 PPP 軌跡與 KINGSPAD 參考軌跡之比較.....	211
圖 5.32 CAINS-21 軌跡(DGNSS)與 KINGSPAD 參考軌跡之比較.....	212
圖 5.33 CAINS-21 軌跡(PPP)與 KINGSPAD 參考軌跡之比較.....	213
圖 5.34 DGNSS 與 PPP 之動態軌跡誤差序列.....	214
圖 5.35 CAINS-21 於不同整合策略下之定位定向解誤差序列.....	214
圖 5.36 類神經網路訓練架構.....	219
圖 5.37 訓練後最終網路結構圖.....	221
圖 5.38 動態類神經網路嵌入式的鬆耦合定位定向演算法架構.....	222
圖 5.39 成大歸仁校區實驗之儀器設置.....	223
圖 5.40 成大歸仁校區實驗軌跡.....	223
圖 5.41 實驗期間 GPS 衛星顆數與 PDOP 值變化.....	224
圖 5.42 姿態參數誤差補償.....	224



圖 5.43	位置參數誤差補償.....	225
圖 5.44	本團隊持續開發中的 GNSS 軟體模擬器模擬器 .....	227
圖 5.45	可視衛星數目，(a) GPS、(b) GLONASS.....	228
圖 5.46	GNSS 不同基線距離下相對定位誤差比較 .....	231
圖 5.47	新竹-台北測試軌跡與衛星分佈 .....	235
圖 5.48	新竹-台北測試軌跡成果 .....	236
圖 5.49	新竹-台北測試之定位誤差 .....	237
圖 5.50	新竹-台北測試之定向誤差 .....	237
圖 6.1	90 年代發展的 9 鏡頭及 8 鏡頭空載攝影系統.....	240
圖 6.2	Z/I Imaging KS-135 相機拍攝結果.....	240
圖 6.3	微軟 Bing Map 傾斜攝影應用範例 .....	240
圖 6.4	Google Map 上傾斜攝影應用範例 .....	241
圖 6.5	MIDAS 傾斜攝影範例 1.....	242
圖 6.6	MIDAS 傾斜攝影範例 2.....	243
圖 6.7	英國 Yell 電子地圖網站提供之傾斜攝影服務 .....	244
圖 6.8	瑞典 Eniro 電子地圖網站提供之傾斜攝影服務.....	244
圖 6.9	瑞典 Eniro 電子地圖網站提供之街景影像服務.....	245
圖 6.10	瑞典 Eniro 電子地圖網站提供之空載正射及 GIS 圖資影像服務 .....	245
圖 6.11	澳洲 Nearmap 的電子地圖網站，整合澳洲多時期的空照影像包括 2011 年澳洲大水災後影像，可以立即且清楚地掌握整各災情狀況 .....	246
圖 6.12	澳洲 Nearmap 的電子地圖網站提供之水災前傾斜攝影影像.....	246
圖 6.13	利用空載傾斜攝影進行災前災後變遷分析及災損評估.....	247
圖 6.14	提升行人安全之規劃.....	248
圖 6.15	本團隊設計之五鏡頭攝影系統及相機機架外觀.....	249
圖 6.16	相機同步拍攝檢測之實驗狀況.....	250
圖 6.17	同步拍攝之範例.....	251
圖 6.18	非同步拍攝之範例.....	251
圖 6.19	本團隊於 2010 年 6 月 6 日拍攝之成大校園附近傾斜攝影照片.....	252
圖 6.23	應用軟體系統設計理念.....	255
圖 6.24	淡藍色系使用者人機介面.....	256
圖 6.25	灰黑色系與英文版使用者人機介面.....	257
圖 6.26	匯入內外方位參數.....	257
圖 6.27	內外方位參數編輯.....	257
圖 6.28	自動影像搜尋.....	258
圖 6.29	向量圖層套疊.....	258
圖 6.32	向量圖層 Symbology 設定後 .....	259
圖 6.33	共軛點量測顯示核線.....	259
圖 6.34	前方交會.....	260
圖 6.35	單像或多像三維數化.....	260
圖 6.36	雙(多)螢幕觀測.....	261
圖 7.1	ADS 40 航測系統不同視角拍攝方式.....	264
圖 7.2	連續性空載傾斜攝影成像是條帶影像.....	264

圖 7.3 框幅式空載傾斜攝影成像方式是中心投影影像.....	265
圖 7.4 空載傾斜攝影影像進行影像空間與物空間轉換.....	265
圖 7.5 傾斜影像與物空間轉換示意圖.....	266
圖 7.6 資料結構建立階段程式架構圖.....	269
圖 7.7 主要執行階段程式架構圖.....	271
圖 7.8 單機版系統一開始執行的畫面.....	274
圖 7.9 單機版系統中顯示拍攝點位.....	275
圖 7.10 單機版系統的自動套疊影像功能.....	275
圖 7.11 在單機版系統中套疊空載影像與路網圖層.....	276
圖 7.12 單機版垂直影像自動偵測功能.....	276
圖 7.13 單機版向左(右)旋轉功能.....	277
圖 7.14 單機版前(後/左/右)移動功能.....	278
圖 7.15 單機版場景比對，左為套疊空載影像之效果，右為原始底圖.....	278
圖 7.16 單機版 GIS 量測功能：量測面積.....	279
圖 7.17 單機版模型建置功能.....	279
圖 7.18 空載傾斜影像網際網路展示查詢離形系統介面.....	281
圖 7.19 網際網路展示查詢系統一開始執行的畫面.....	281
圖 7.20 網際網路系統自動判斷影像功能並套疊路網圖層.....	282
圖 7.21 網際網路系統垂直影像自動偵測功能.....	282
圖 7.22 網際網路系統向左(右)旋轉功能.....	283
圖 7.23 網際網路系統前(後/左/右)移動功能.....	284
圖 7.24 網際網路系統之相片查看功能.....	284
圖 7.25 網際網路版場景比對功能，左為套疊空載影像之效果，右為原始底圖 .....	285
圖 7.26 網際網路系統之 GIS 量測功能：量測面積.....	285
圖 7.27 網際網路系統模型建置功能.....	286
圖 8.1 系統整體建置.....	290
圖 8.2 室內相機率定場之圓盤.....	290
圖 8.3 Australis 解算及率定結果.....	291
圖 8.4 室內環場影像之相對方位率定場.....	291
圖 8.5 相對方位率定之拍攝與整體解算.....	291
圖 8.6 簡化上三角之運算矩陣.....	292
圖 8.7 坐標系統之統一與轉換關係.....	293
圖 8.8 室外大型率定場(實驗).....	293
圖 8.9 系統關係建立.....	294
圖 9.1 新解算模式之定位定向演算法之介紹與實作授課情形.....	302
圖 9.2 空間資訊整合展示平台之介紹與實作授課情形.....	303
圖 9.3 多平台定位技術之歷史回顧與未來發展展望授課情形.....	303
圖 9.4 移動式測繪系統直接定位技術及其應用授課情形.....	304

## 表目錄

表 1.1 分月進度表.....	8
表 2.1 可搭載之各式感測器.....	13
表 2.2 現有空間資訊擷取技術之優缺點.....	14
表 2.3 系統直接定位能力驗證.....	20
表 2.4 國際上研究單位所發展的車載遙測製圖平台.....	21
表 2.5 不同定位模式之比較.....	29
表 2.6 未來各衛星系統的比較表.....	43
表 2.7 慣性測量儀之分類規格.....	45
表 2.8 INS/GNSS 整合式定位系統的性能提升策略.....	51
表 2.9 各式直接定位遙測平台之效益比較.....	53
表 2.10 多平台移動測繪系統間之互補性.....	54
表 2.11 多平台定位技術之演算法架構比較.....	59
表 2.12 定位誤差的比較分析.....	63
表 2.13 DG 的誤差分析比較.....	64
表 2.14 誤差來源與大小.....	70
表 2.15 現有影像處理流程之自我成果檢核.....	78
表 3.1 現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統硬體使用之慣性測量儀(一) .....	90
表 3.2 現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統硬體使用之慣性測量儀(二) .....	91
表 3.3 現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統軟體.....	92
表 3.4 慣性測量儀之模擬參數設定.....	101
表 3.5 慣性測量儀之平面位置誤差統計表.....	106
表 3.6 慣性測量儀之姿態誤差統計表.....	106
表 3.7 雷射陀螺儀+石英加速度計之戰術等級慣性測量儀方案的 SWOT 分析表 .....	109
表 3.8 光纖陀螺儀+石英加速度計之戰術等級慣性測量儀方案的 SWOT 分析表 .....	109
表 3.9 微機電陀螺儀+石英加速度計之戰術等級慣性測量儀方案的 SWOT 分析 表.....	110
表 3.10 定位定向誤差統計表.....	115
表 3.11 定位定向誤差統計表.....	118
表 4.1 三軸方向示意圖.....	135
表 4.2 模擬之各項誤差真值.....	136
表 4.3 估算系統偏差之率定結果.....	140
表 4.4 估算系統偏差及尺度因子率定之結果.....	142
表 4.5 不同回饋時間間隔之位置誤差比較.....	151
表 4.6 不同回饋時間間隔姿態誤差比較.....	151
表 4.7 定位定向系統規格與作業平台之關係.....	158
表 4.8 整合式定位定向系統精度測試範例.....	161

表 4.9 建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性的 SWOT 分析表 .....	164
表 4.10 可考慮採購之雙軸轉台之規格 .....	166
表 5.1 正常重力的常數係數 .....	177
表 5.2 GNSS、INS 及 INS/GNSS 整合之特色比較 .....	182
表 5.3 一般 INS/GNSS 整合架構的簡易比較 .....	188
表 5.4 定位定向解誤差統計表 .....	196
表 5.5 GNSS 衛星天線相位中心偏差 .....	205
表 5.6 目前精密單點定位技術與 IGS 產品搭配下所能獲得之精度 .....	208
表 5.7 定位定向誤差之比較表 .....	215
表 5.8 TGO 的 SWOT 分析表 .....	216
表 5.9 GrafNav 的 SWOT 分析表 .....	217
表 5.10 RTKLIB 的 SWOT 分析表 .....	217
表 5.11 三種套裝軟體主要差異 .....	217
表 5.12 詳細實驗狀況標示 .....	223
表 5.13 位置、姿態測試結果統計表 .....	225
表 5.14 四種星系結合使用之整理，數值為 120 天觀測時段之平均值 .....	229
表 5.15 不同 GNSS 處理模式輔助的精密定位定向效益分析 .....	233
表 5.16 結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術應用的 SWOT 分析表 .....	234
表 5.17 新竹-台北測試之精度分析表 .....	237
表 6.1 同步檢測相關參數及檢測成果 .....	250
表 7.1 本訪談報告受訪者列表 .....	262
表 8.1 相對方位之距離解算的成果 .....	292
表 8.2 相對方位之旋轉矩陣與角度平差後之結果 .....	292
表 8.3 PMMS 與 MMS 之效能比較驗證表 .....	296
表 9.1 參與國內外學術會議及提送期刊論文情況 .....	299
表 9.2 爭取主辦權之國際研討會 .....	300
表 9.3 專利申請資料表 .....	300
表 9.4 課程及授課時間表 .....	301

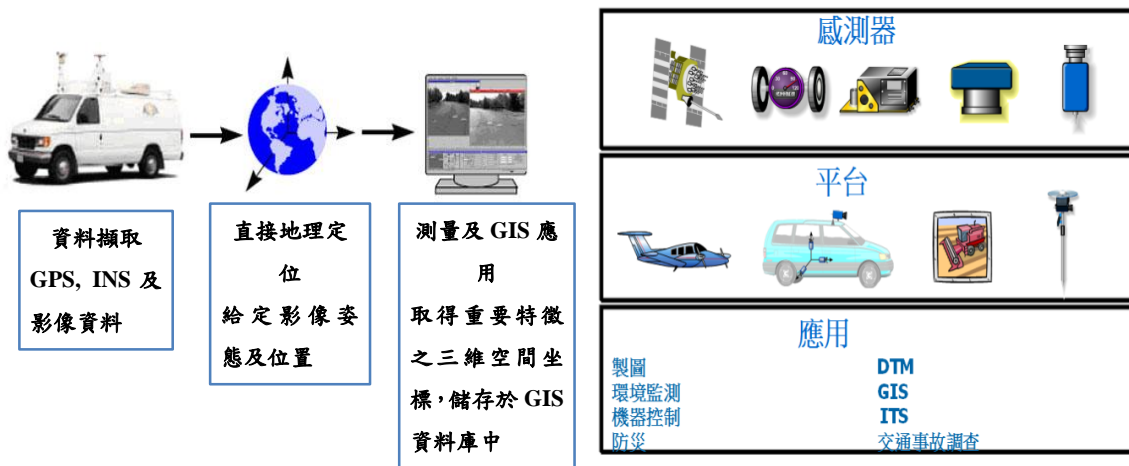
## 第一章 前言

現有空間資訊系統(spatial information systems)在空間資訊與地理資料的採集與管理層次仍然存在很多技術上的問題。其效益建構在系統空間及屬性資料時效性以及其正確性，並藉此發揮它的功能並表示真實世界的現象。然而，利用傳統測量技術作為採集空間資訊的方法並無法全然符合成本考量，傳統測量以及屬性調查作業從開始收集資料到系統建置完成往往需要半年以上的時間，已不符合科技發展的趨勢與成本效益。近年來測量與空間資訊技術正在逐漸革新，攝影測量製圖的技術與精密整合式定位定向系統結合，搭配多種的數位影像感測器來收集空間資料，逐步實現快速即時移動式測量及空間資料收集技術。這類整合多元感測器並具備直接定位能力(Direct Geo-referencing, DG)及多感測器系統的空間資訊獲取移動平台；移動遙測製圖系統(Mobile Mapping Systems, MMS)，正是國內外空間資訊領域產官學各界因應此挑戰的最佳利器，值得一提的是這類系統最早完全由空間資訊領域之學者為了因應空間資訊領域需求主導開發，並與機電整合與軟體工程相關領域之工程師合作而設計的軟硬體架構，目前已廣泛應用於非傳統測量之應用領域中，全球移動遙測製圖系統相關之空間資訊與非空間資訊產業產值(含應用)迄今已成長至高達每年數十億美元，未來還將持續成長(Schwarz and El-Sheimy, 2008)。

移動遙測製圖系統整合全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)及慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)形成高精度直接定位系統，並結合多種高效率影像感測器，搭配高精度率定場，能快速獲取並儲存感測資料，直接解算並獲得感測器方位，最後透過高度自動化的軟體系統進行資料處理，獲得所需的空間資訊，移動遙測製圖系統之作業流程如圖 1.1a 所示。移動平台可以是衛星、飛機、直昇機、船舶、汽車或人，所搭載的定位定向感測器可能包括 GNSS 接收儀、INS 及航位推算感測器(Dead Reckoning, DR)感測器等，觀測感測器系統則可以是相機、攝影機、多光譜掃描儀或雷射掃描儀(laser scanner)等，如圖 1.1b 所示。

如前所述，移動遙測製圖系統之核心為具備多元感測器整合架構之整合式定位定向系統(Positioning and Orientation System, POS)，此架構包含不須使用外在電波訊號的自主連續相對定位的慣性導航系

統、輪速計(odometer)、與仰賴電波定位之絕對定位技術如全球導航衛星系統，如此可在資料採集過程中無須使用地面控制點而直接計算具備高採樣率之感測器方位。同時搭載如高頻高密度距離觀測之雷射掃描儀，結合多解析、多波段光譜掃描儀及數位相機等多種類的影像感測器，則可獲取各應用領域的幾何與屬性資訊。配合不斷進步之電腦運算能力與容量，搭配各類移動平台機動性並考量各種需求，便能在相應的領域上發揮相應價值，移動遙測製圖系統的應用面也隨之更深更廣。



(a) (b)  
圖 1.1 移動遙測製圖系統之作業流程(a)與組成元件(b)  
(El-Sheimy, 1996)

在空間資訊相關應用領域方面，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，可以顯著地節省許多傳統測量所需要的人力及時間，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。都市規劃與設計方面，透過雷射掃描及影像處理，可以建立一個三維的都市模型，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來模擬各種狀況。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。

而在其他非傳統測量應用方面，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，透過無線通訊技術以發展無人控制載具，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，開發無人自動駕駛車更能實質擴展到民生用途及軍事技術上，關於移動遙測製圖系

統更廣泛之應用請參考圖 1.2。

目前國內外運作中的商用或研究型的移動遙測製圖平台甚多，在此無法逐一詳述，但這些商用移動遙測製圖平台之特性包含性能可靠且精度符合製圖需求、大量生產效率高、價格昂貴、未有標準化規格與軟硬體之升級彈性有所限制，且升級所費不貲。舉例來說，一套商用空載遙測製圖系統之售價至少四千萬元；相似地，一套商用車載遙測製圖技術之售價至少三~四千萬，但其軟硬體成本其實往往不到售價一半。國家或民間業者每年投入大筆資金採購相關軟硬體設備，但此舉對於國內空間資訊產業技術升級是有限的。圖 1.3 說明發展自主移動遙測製圖技術對於國內其他產業之影響。除了積極發展不同平台之移動測繪技術外，未來更須發展多平台移動遙測製圖技術資料整合架構提供更有效率之空間資訊採集、分析與應用。

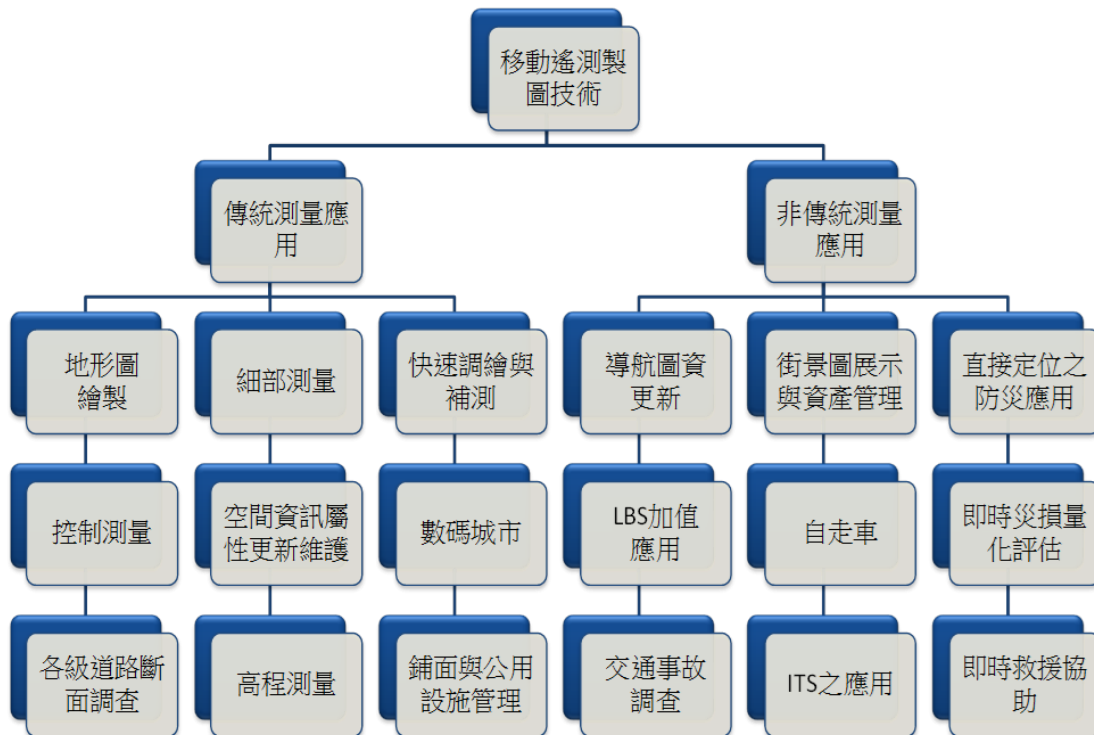


圖 1.2 移動遙測製圖系統可拓展之領域



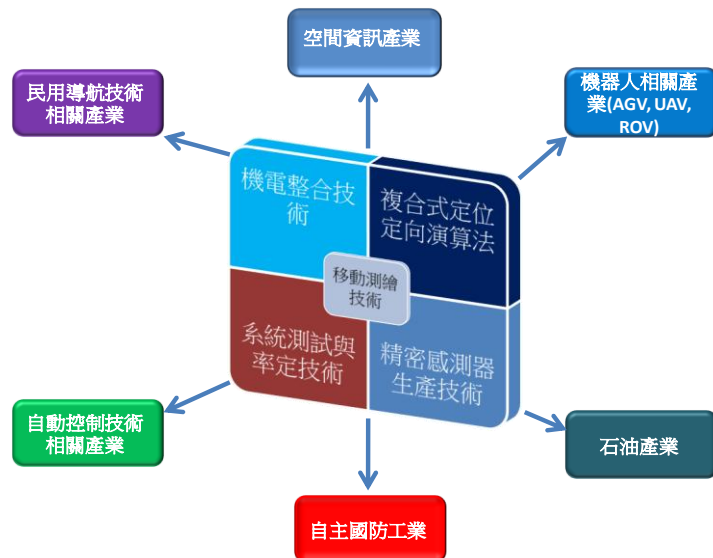


圖 1.3 自主的移動遙測製圖技術與其他產業之關連



圖 1.4 本案之執行主軸

本工作案在既有成果上進一步提升我國自主研製多平台移動遙測製圖設備能力與應用軟體研發能量，厚植未來國際自動化測繪技術競爭力。研發成果除可加速國土規劃外，並藉以培養優質人才、提升學術水準及國家競爭力，圖 1.4 說明本案完整執行架構。根據工作計畫書之內容，本案於九個月中完成的工作項目如下：



## 一、多平台定位技術資料彙整

1. 蒐集國內外多平台定位技術之沿革歷程。
2. 比較國內外現有多平台定位技術之計算方式、演算法差異及誤差分析。
3. 蒐集多平台定位技術應用實例之相關文獻（至少需含 3 個領域）。
4. 現有多平台定位技術自我檢核機制。
5. 國外內多平台定位作業及驗收規範。
6. 評估多平台定位技術發展趨勢。

## 二、規劃整合慣性導航系統

1. 蒐集國內外慣性測量儀規格、成本、效能、穩定性及規範等相關文件，作為評估引進慣性測量儀及擬定相關規範之參考。
2. 引進可提供含速度變量、角度變量等原始觀測量，並支援輪速計訊號之戰術級（Tactical）慣性測量儀。
3. 評估自行研製戰術級慣性測量儀之可行性，及評估慣性測量儀組裝於空載、船載、車載及個人攜帶式等操作模式之可行性。
4. 研發慣性導航系統軟體模擬器，並完成戰術級慣性測量儀之動態與靜態定位理論性能模擬分析(含位置、速度與姿態誤差，模擬器需含原始碼)。
5. 完成戰術級慣性測量儀、雙頻載波相位接收儀及感測器之機電整合（多元感測器定位定向系統）、並設計觀測量同步演算法及開發原始資料擷取系統。
6. 完成多元感測器定位定向系統之靜態與動態性能驗證。

## 三、評估引進及建立國內慣性測量儀之標準率定程序

1. 發展具備陀螺儀之慣性測量儀誤差校正模型。
2. 建立慣性測量儀各系統誤差之率定模式。
3. 研擬提升慣性測量儀穩定性之技術(具備原始碼)。
4. 研發慣性測量儀率定實驗室與外業率定技術。
5. 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之陀螺儀測試旋轉台。
6. 評估引進適用於慣性測量儀率定之溫度櫃與加速度計測試平台。
7. 評估建立定位定向系統性能評估之標準程序。
8. 評估建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性。

#### 四、設計新解算模式之定位定向演算法

1. 發展地平坐標系之慣性導航方程式，並評估其精度。(具備原始碼)
2. 發展精密單點定位動態軌跡演算法(具備原始碼)。
3. 分析含現代化 GPS、現代化 GLONASS、Galileo 與 Compass 等主要 GNSS 之效能對於定位性能之影響。
4. 評估精密單點定位動態軌跡演算法於定位定向技術之應用。
5. 評估發展多系統 GNSS 載波相位差分定位動態軌跡演算法之可行性。
6. 評估結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術應用之可行性。

#### 五、評估發展多元空載傾斜攝影定位系統技術及其應用

1. 蒐集國內外空載傾斜攝影技術之沿革歷程文獻。
2. 蒐集空載傾斜攝影技術應用實例之相關文獻(至少需含 3 個領域)
3. 評估自行組裝多鏡頭空載傾斜攝影及定位攝影系統之可行性。
4. 開發空載傾斜影像資料搜尋與瀏覽模組(具備原始碼)。

#### 六、建置空間資訊整合展示平台(含單機版及網路版)

1. 至相關單位進行訪談，具體規劃傾斜攝影之應用層面。
2. 研提單機版三維地理資訊應用系統。
3. 設計可對外提供一般民眾使用之空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢系統。

#### 七、評估建置個人攜帶式定位系統之可行性

1. 個人攜帶式定位系統之規劃與設計。
2. 評估影像模組與定位定向系統機電整合之可行性。
3. 建立個人攜帶式定位系統之率定演算法。
4. 設計個人攜帶式定位系統之相機透鏡畸變率定校正方式。
5. 研擬個人攜帶式定位系統之效能驗證方式。
6. 潛在使用者之訪談報告(至少需含 3 個領域)。
7. 評估建立個人通信定位系統之可行性。

#### 八、教育訓練及推廣

#### 九、論文期刊

本團隊執行本案之各項任務時程，遵照本案之工作計畫書預定時程進行，並於 100 年度 4 月起每個月工作專案月報回報至內政部地政司，作為每月進度檢核依據。表 1.1 為執行本案之分月進度表，圖 1.5 為分月進度折線圖，統計至 12 月底止，本團隊於各項任務皆超前完成進度，順利完成工作計畫書所規劃之各項工作。

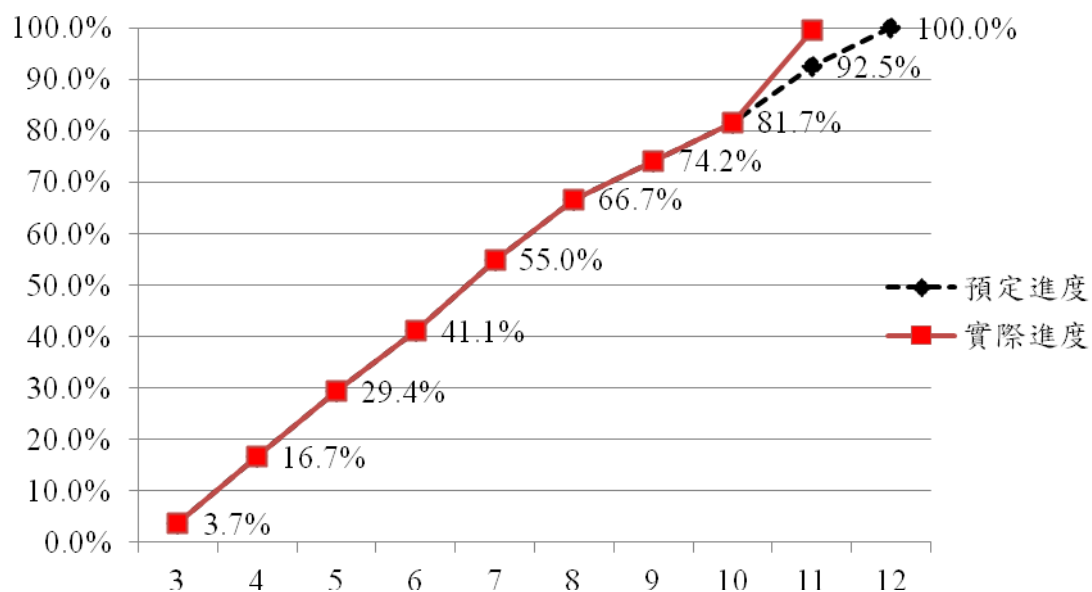


圖 1.5 分月進度折線圖

任務名稱	權重	年度	100 年度									
		月份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多平台定位技術資料彙整	14%	預定	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		實際	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0	
規劃整合慣性導航系統	14%	預定	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		實際	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0	
評估引進及建立國內慣性測量	14%	預定	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

表 1.1 分月進度表

儀之標準率定程序		實際	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0	
設計新解算模式之定位定向定向演算法	14%	預定	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		實際	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0
評估發展多元空載傾斜攝影定位系統技術及其應用	14%	預定	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		實際	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0
建置空間資訊整合展示平台訪談報告	2.5%	預定	0.5	1.0	1.0								
		實際	0.5	1.0	1.0								
單機版三維地理資訊應用雛型系統	7%	預定	0.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4					
		實際	0.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4					
空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢雛型系統	7%	預定	0.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4					
		實際	0.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4					
評估建置個人攜帶式定位(及測圖)系統之可行性	7%	預定	0.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4					
		實際	0.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4					
教育訓練及推廣	1%	預定										1.0	
		實際										0.5	
論文期刊	2.5%	預定					1.2					1.3	
		實際					1.2					1.3	
工作計畫書	1%	預定	0.5	0.5									
		實際	0.5	0.5									
期中報告	1%	預定					1.0						
		實際					1.0						
期末報告	1%	預定										1.0	
		實際										1.0	
總進度	100%	預定	3.7	16.7	29.4	41.1	55.0	66.7	74.2	81.7	92.5	100.0	
		實際	3.7	16.7	29.4	41.1	55.0	66.7	74.2	81.7	99.5		

## 第二章 多平台定位技術資料彙整

測量及空間領域對於移動式測量及空間資料收集技術之需求始於攝影測量發展初期，如圖 2.1 所示。故移動遙測製圖系統的觀念可溯及 20 世紀初航空攝影測量之始，以飛機為平台搭載相機，利用地面控制點及影像重疊共軛點量測反算影像方位，此種定位方式稱為間接式定位(Indirect Geo-referencing)，此為移動遙測製圖系統的原始形式。而自 1980 年代起隨著衛星定位技術之發展，從早期使用美國 GPS (Global Positioning System) 的單一系統，接下來伴隨俄羅斯的 GLONASS (GLObal Navigation Satellite System) 之發展提供早期多系統衛星定位技術之雛型，故航空攝影測量結合雙系統衛星動態定位技術，使得求解影像方位的過程僅需少量控制點，如此可大幅節省外業人事成本與提升作業效率。歐美的空間資訊工程相關研究機構也約略在此時期陸續提出來整合衛星定位技術及數位相機的車載移動遙測技術(El-Sheimy, 1996)，但在此階段車載移動遙測只侷限於可行性探討、雛型設計與系統整合及原型系統測試。

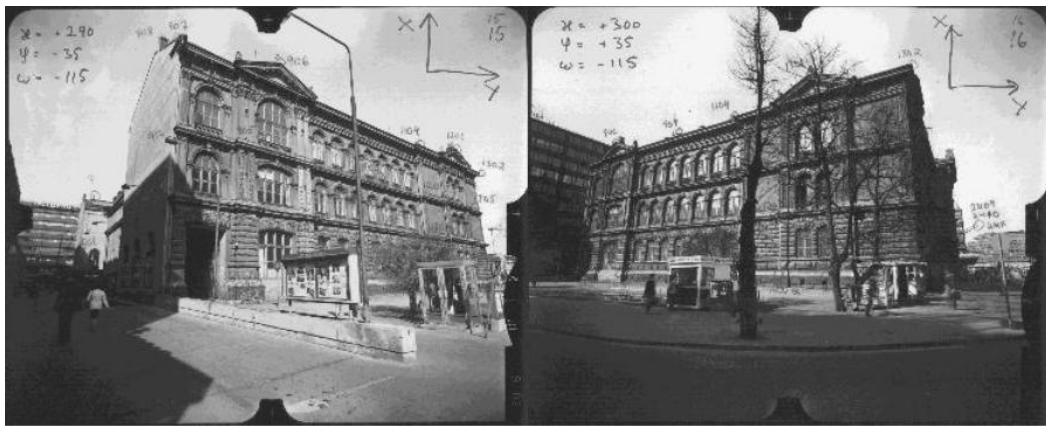


圖 2.1 早期移動式測量及空間資料收集技術之範例

但衛星定位技術在市區、地下道、隧道、森林等地區仍然會受到訊號遮蔽的效應所影響，一般來說，第一種狀況為使用者接收儀無法鎖定超過 4 顆衛星，故無法獲得定位解；而第二種狀況為使用者雖鎖定超過 4 顆衛星，但其觀測量品質不佳，導致定位精度不佳，如圖 2.2 所示。同時在空載系統之應用時亦常因劇烈的姿態變化而導致衛星失鎖而無法獲得定位解之狀況。

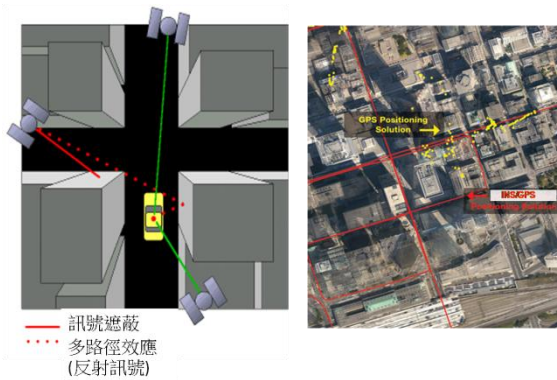
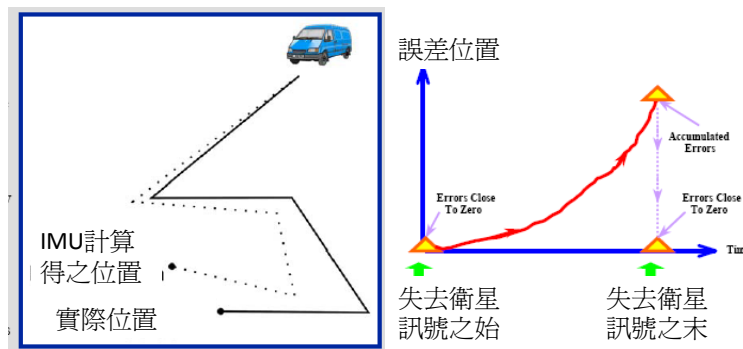
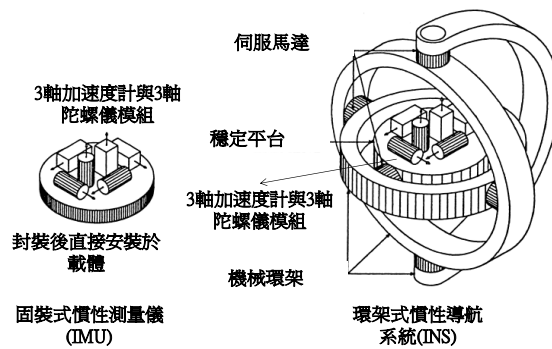


圖 2.2 衛星訊號遮蔽的效應

早期的慣性導航技術皆是為符合軍事平台之需求所建立的，因此一直被視為敏感度極高且受相關國家管制的導航系統。早期的 INS 使用機械環架式設計，其精度高但體積龐大，無法應用於移動遙測製圖中，如圖 2.3 右所示。自 1980 年起，固裝式(strapdown)慣性測量儀(Inertial Measurements Unit, IMU)之發展因光學陀螺儀與石英加速度計技術發展普及而逐漸成為主流，這類慣性測量儀具備精度高與體積小等特性，如圖 2.3 左所示。故吸引歐美空間資訊領域研究學者深入探討將慣性導航技術引入移動遙測製圖技術之可行性。

慣性導航技術需要初始的位置及姿態供加速度的轉換及積分運算。載體的初始位置可以透過輔助感測器(如衛星定位技術)給定，但姿態部分則需要一段10至15分鐘的初始對準(alignment)的程序，初始的水平姿態可藉由加速度計在完全靜止的模式下的輸出來決定，而初始的方位角則要透過陀螺儀偵測地球自轉的速度來計算。因為地球自轉的速度很慢，所以需要較精密的陀螺儀(陀螺儀之飄移要小於10度/小時)才有辦法偵測。這個相對於載體及導航坐標系的初始姿態矩陣確定之後，整個INS可切換至自由導航模式。此時的INS不像衛星接收儀需要接收外來的信號進行導航，裝載有INS的載體可以進行自主導航(autonomous navigation)(Titterton and Weston, 2004)，慣性導航技術具有高採樣頻率及短時間內高精度之特性，所以可以被使用來解決衛星定位所遭遇諸如訊號遮蔽、低採樣頻率、週波脫落、易被干擾等限制。但INS在獨自運作的模式下其定位誤差在五分鐘之內約略與時間的平方成正比，如圖2.4所示。而整合式定位及定向系統能夠克服單一系統之缺點且提供更穩定的定位及定向成果，故目前不管在軍用或民用的整合系統發展皆趨向於使用慣性導航及衛星定位技術。主要的動機在於此二系統具有互補之特徵，衛星定位技術在無訊號遮蔽的環境下可以提供穩定的定位及導航資訊，故它可用來減低慣性導航因為積分加速度計及角速度之系統誤差所造成隨時間累積的定位誤差，對於高動態運動的物體而言，衛星定位技術無法提供足夠的採樣

頻率來追蹤載體的運動。另外慣性導航技術可以提供衛星定位技術所無法提供的高採樣率姿態參數。國外相關研究機構曾經嘗試以GNSS天線陣列的方式來獲取載體的姿態參數，唯受限於基線長度、採樣率與精度不符合移動遙測製圖應用領域的需求。故約於1995年前後，整合INS及GNSS的直接定位系統於是實現，並開始應用於飛機及汽車移動遙測製圖平台，1996年加拿大Applanix公司所發展的POS系列產品是第一個商用的直接定位系統，圖2.5所示為直接定位技術的發展流程。



如前所述，移動遙測製圖移動平台可以是衛星、飛機、直昇機、船舶、汽車或人，所搭載的定位定向感測器可能包括 GNSS 接收儀、INS 及里程計數器等，觀測感測器系統則可以是相機、攝影機、多光譜掃瞄儀或雷射掃瞄儀等。表 2.1 所示為各式移動遙測製圖相關感測器與其所提供資料之屬性。配合不斷進步之電腦運算能力與容量，搭配各類移動平台之機動性並考量各種需求，便能在相應的領域上發揮相應價值，移動遙測製圖的應用面也隨之更深更廣。

精密整合式定位定向系統與空載多光譜影像感測器(或數位相機)結合，是目前航空攝影測量領域最先進的移動遙測製圖技術，如 Leica ADS40、Z/I Imaging 及 Vexcel UltraCam 等；精密整合式定位定向系



統與空載雷射掃描儀結合則形成空載光達(Airborne LiDAR)，是目前直接獲得三維空間資訊的先進系統，如 Leica ALS50 及 Optech ALTM；而直接定位系統與近景數位相機、攝影機或雷射掃描儀結合於汽車平台上，則形成所謂的車載移動遙測製圖系統，是相當有效率的空間資訊收集利器，如加拿大 Calgary 大學的 VISAT 即為一例。

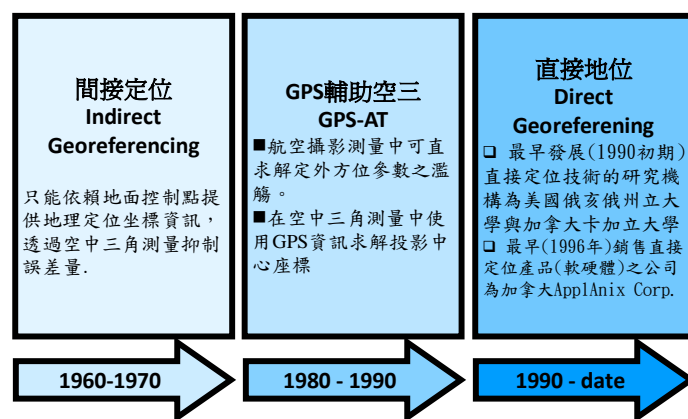


圖 2.5 直接定位技術之演進

表 2.2 比較現有空間資訊擷取技術之優缺點。與現有其他空間資訊擷取技術相較之下，多平台移動遙測製圖技術並不一定可以提供更好之定位精度，但仍具備如下之優點(Ellum, 2001)：

1. 以遙測技術快速獲取空間與屬性資料。
2. 資料可以重複使用與更新。
3. 作業效率高。
4. 提昇製圖技術自動化之程度。
5. 大幅減少作業成本(泛指施測面積之單價)。

表 2.1 可搭載之各式感測器(摘自 El-Sheimy, 1996)

感測器種類	資料屬性	資料特性
多光譜線性掃描儀(推掃式)	影像/幾何	多光譜影像，幾何精度取決與解析度
CCD 相機	影像/幾何	影像，幾何精度取決與解析度
雷射掃描儀	影像/幾何	影像、距離與方位角
雷達	影像/幾何	物體厚度
超音波感測器	幾何	距離
GNSS 定位及定向技術	幾何	高精度之位置與中精度之姿態訊息(需多天線陣列)
慣性定位定向技術	幾何	低至高精度位置與姿態訊息(精度取決於慣性測量儀等級)
輪速計	幾何	距離(精度與行走距離有關)

表 2.2 現有空間資訊擷取技術之優缺點(摘自 Ellum, 2001)

空間資訊擷取技術	優點	缺點
近景攝影測量	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 非侵入性的資料蒐集技術</li> <li>■ 資料可以重複使用</li> <li>■ 資料擷取快速</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 需大量控制點</li> <li>■ 作業成本高</li> </ul>
全測站	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 高精度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 需大量人力</li> <li>■ 作業成本高</li> <li>■ 作業時間長</li> <li>■ 侵入的資料蒐集</li> <li>■ 不適用大區域高密度的空間資訊蒐集</li> </ul>
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 高精度</li> <li>■ 作業模式簡易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 需大量人力</li> <li>■ 作業成本高，時間長</li> <li>■ 侵入式的資料蒐集</li> <li>■ 不適用 GNSS 訊號遮蔽區域</li> </ul>
傳統航測	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 非侵入性的資料蒐集技術</li> <li>■ 資料可以重複使用</li> <li>■ 資料擷取快速</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 需大量控制點</li> <li>■ 作業成本高</li> <li>■ 天候限制</li> </ul>
多平台移動遙測製圖技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 無控制點需求</li> <li>■ 非侵入性的資料蒐集技術</li> <li>■ 資料可以重複使用</li> <li>■ 資料擷取快速</li> <li>■ 作業時短</li> <li>■ 作業成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 硬體成本昂貴</li> <li>■ 操作模式複雜</li> </ul>

## 2.1 多平台定位技術之沿革

如前所述，移動遙測製圖技術可搭載於飛機上，但其可涵蓋作業範圍與天氣依賴性之缺點與傳統航測技術相似。與傳統測量技術相較之下，車載移動遙測製圖技術具備低的侵入性與較佳的空間資訊擷取效率，同時因為待測目標與影像系統距離遠小於空載系統，故車載系統可以提供較完整的涵蓋面，同時車載系統可於較差天氣條件下運作，然而車載系統之缺點為其定位精度隨待測目標與影像系統距離增加而變差，整合式定位定向系統精度受 GNSS 訊號遮蔽狀況遠較空載系統嚴重而其作業環境亦受既有路網的限制。個人攜行式的移動遙測製圖技術的機動性遠較上述二者高，具備更佳的作業彈性，唯因為個人負重的限制，所以其可攜帶的系統精度自然較上述二者為低。所以本案之目的除了移動遙測製圖技術核心技術外，更將著重於探討未來多平台移動遙測製圖技術之作業模式與其成果之聯合處理架構，故本節首先針對多平台定位技術之沿革歷程擇要提供精簡的回顧。

### 2.1.1 車載移動遙測製圖技術之回顧

車載移動遙測製圖技術的濫觴可追溯至 1980 年代初期部分加拿大的省政府及美國州政府提出的移動式高速公路設施維護系統 (Mobile Highway Inventory System, MHIS) 之需求 (Lapucha, 1990)。從 1980 年代迄今，目前初估至少 1000 台車載移動遙測製圖系統 (含街景車) 正遍布世界各地提供快速的空間資訊擷取方案，其中重要的里程碑可分為三個階段；第一階段為前 INS 時期，約自 1983 年至 1993 年；第二階段為後 INS 時期，約自 1993 年起至 2000 年；而最後一個階段為車載光達時期，約自 2000 年起至迄今。為因應不同使用者之需求，車載移動遙測製圖技術在這 30 年來其定位定向系統與觀測系統皆有明顯的變化，以下就分這三個時期簡單介紹代表性的系統與參考文獻。

前 INS 時代的第一個代表性系統為加拿大亞伯達省政府與卡加利大學 (University of Calgary) 共同發展 Alberta MHIS，請參考圖 2.6。早期的車載移動遙測製圖技術使用航位推算感測器，如陀螺儀 (gyroscopes)、加速度計 (accelerometers) 及里程計速器 (odometer) 等，利用相對定位的原理求取定位解 (Schwarz et al., 1993)。此時期所用的感測器多為類比式相機，所拍攝的照片詳實記錄公路設施的狀況，提供維修單位近即時的公路資訊。1988 年加拿大 Alberta MHIS

在車載移動遙測製圖技術上，首先應用差分全球定位技術(Differential GPS, DGPS) 來提供相機投影中心的位置參數，隨後並在 1990 年評估引入 INS 來提供投影中心精確的姿態參數以及適時在 GPS 衛星失鎖導致無導航解時提供高精度的位置參數(Lapucha, 1990)，當時所使用的 Litton-LN 90-100 INS 與 GPS 接收儀設置圖請參考圖 2.7。而此時期第二個代表性系統為美國俄亥俄州立大學(The Ohio State University)製圖中心(Center for Mapping)研發車載移動遙測製圖系統，稱為 GPSVan。該系統使用 GPS 及里程計數器提供導航參數，該系統主要感測器為兩部可動態連續拍攝立體像對的相機，透過近景攝影測量的原理可獲得特徵物的三維空間坐標，其定位精度界於 0.3m 至 3m 間(Grejner-Brzezinska, 2001)，細節請參考圖 2.8。

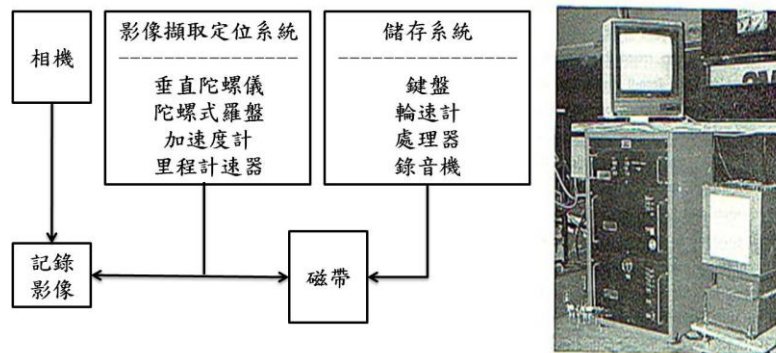


圖 2.6 Alberta MHIS(摘自 Lapucha, 1990)

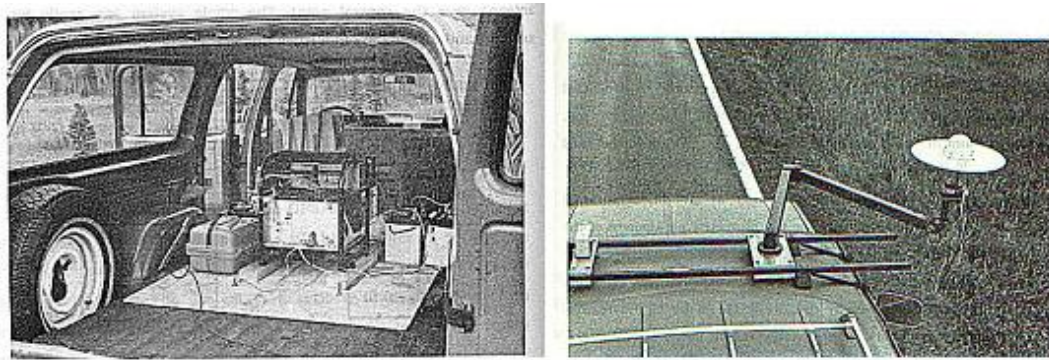


圖 2.7 Alberta MHIS 之 INS/GPS 整合設計(摘自 Lapucha, 1990)



圖 2.8 GPSVan (摘自 Grejner-Brzezinska, 2001)



後 INS 時代的代表系統為加拿大卡加利大學所研發的 VISAT 系列，該校投入車載移動遙測製圖技術的研發已將近 30 年，首先於 1993 年順利將 INS/GPS 系統整合至 Alberta MHIS 中並發展出第一代的遙測製圖技術架構，稱為 VISAT Van 第一代(Schwarz et al., 1993)。接下來提出的 VISAT 第二代整合了 INS/GPS、里程計數器、彩色 CCD 相機、攝影機等完整架構 (El-Shiemy, 1996)。這套系統為全球首度引入使用雷射陀螺儀(Ring Laser Gyroscope, RLG)之導航等級 INS(陀螺飄移 $<0.01$ 度/小時)之系統，其定位精度為 0.1 至 1 公尺。該系統具備可調式的攝影間隔與較高的拍攝行車速度(100km/hr)。2003 年該系統亦獲得加拿大研究學會大筆研究資金，在 VISAT 第二代的基礎上，針對硬體及相關軟體性能進行升級並打造全新的車輛，稱為 VISAT 第三代。與 VISAT 第二代相較之下，除電力系統大幅升級之外，控制電腦體積也大幅縮小，CCD 相機之性能大幅提昇並使用更高等級的 INS/GPS 整合系統，VISAT 系統之細節請參考圖 2.9 至圖 2.11。

後光達時期約自迄今，與前二個階段的遙測製圖技術相較之下，其主要差異在影像擷取感測器部分新增的車載雷射掃描儀或光達(Li et al., 2001)。圖 2.12 所示為 Street Mapper 公司於 2005 年所發展搭載雷射掃描儀的車載移動遙測製圖。



圖 2.9 VISAT 第一代(摘自 Schwarz et al., 1993)



圖 2.10 VISAT 第二代(摘自 El-Sheimy, 1996)



圖 2.11 VISAT 第三代(University of Calgary 提供)



圖 2.12 Street mapper 車載 MMS(Street Mapper 提供)

國內關於車載移動遙測製圖系統相關的完整研發工作始於 2008 年，成功大學於 2008 年起在國科會連續三年資助下開始嘗試自主研發車載移動遙測製圖技術(含軟硬體)，目前成果顯示無控制點直接平面定位精度為 15 公分(均方根誤差)，三維定位精度為 28 公分(均方根誤差)(Li, 2010)。該系統使用的整合式定位定向系統為使用包含使用

高階戰術等級微機電陀螺儀(陀螺飄移 10 度/小時)之慣性測量儀與 GNSS 接收儀與輪速計自行組裝之原型系統，如圖 2.13 左所示，而非一般商用系統使用高階光纖陀螺儀(Fiber Optic Gyroscope, FOG)之慣性測量儀，而部份成果亦於美國導航學會 GNSS2010 年會發表並獲得最佳論文獎(Li, 2010)。自行研發了包含多感測器系統整合與觀測量同步、機電設計、精密定位定向演算法、感測器率定與直接定位模組等自主研發的移動測圖關鍵技術，也成功為國家訓練相關的技術人才。

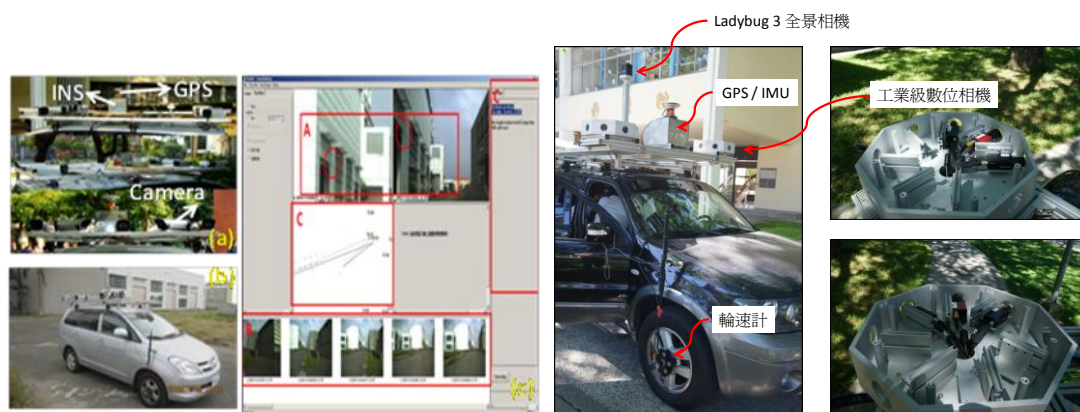


圖 2.13 第一代(左)與第二代鷹眼平台(右)

同時國科會於 2011 年起連續三年資助本系進一步驗證車載移動遙測製圖系統與無人機載遙測製圖系統在防災減災之相關應用，同時因應災區之崎嶇地形，目前已發展之鷹眼平台第一代重新安裝至四輪傳動車上以提高在災區作業之機動性。同時針對電力需求與載台內部完成設計與規劃、並完成直接定位酬載(含定位定向模組與相機)之安裝與初步地面測試，如圖 2.13 右所示。表 2.3 為鷹眼平台在檢定場直接定位能力之各項驗證指標，而直接定位誤差圖與直方統計圖分別顯示在圖 2.14、圖 2.15。折線分布圖中點與點間並無關係(依點號順序排列)，連線僅為易於分析系統直接定位能力變動情形。由表 2.3 所示各項指標，鷹眼平台在水平方面定位誤差為 0.154 公尺(均方根誤差)，高程方面為 0.234 公尺(均方根誤差)，三維定位誤差 0.280 公尺(均方根誤差)。顯示本鷹眼平台目前已擁有平面 15 公分及三維 28 公分之動態直接定位能力。

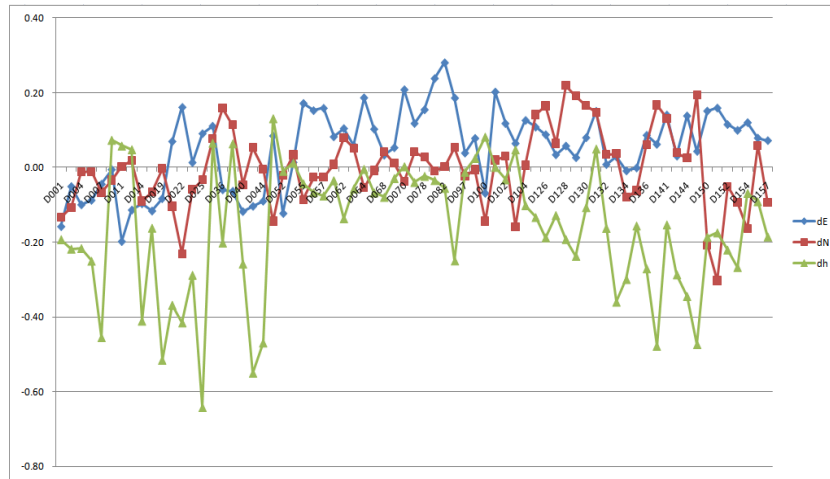


圖 2.14 系統直接定位成果與各檢核點坐標差異(縱軸單位：公尺)

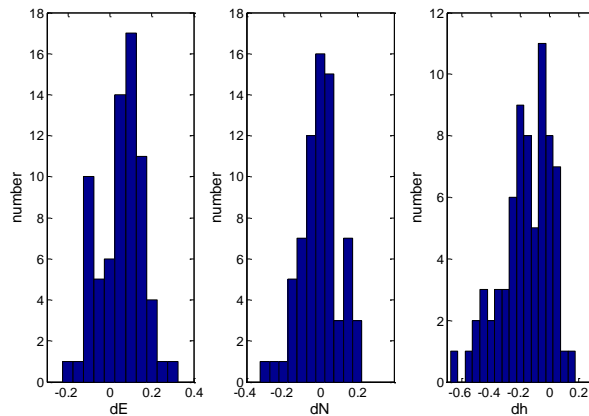


圖 2.15 系統直接定位成果與各檢核點坐標差異直方統計圖(橫軸單位：公尺)

表 2.3 系統直接定位能力驗證

	東(公尺)	北(公尺)	橢球高(公尺)
數量	71		
最大值	0.281	-0.303	-0.642
最小值	-0.001	0.002	0.001
平均值	0.051	-0.002	-0.159
標準差	0.103	0.103	0.174
均方根誤差	0.115	0.102	0.234
平面誤差	0.154		
高度誤差			0.234
三維	0.280		

其他國家之空間資訊領域學界與產業界在這段時間亦積極地發展車載移動遙測製圖技術，表 2.4 僅就各文獻中所描述各系統重要參



數進行比較。由這些發展趨勢可知，車載移動遙測製圖技術確實是能夠滿足空間資訊相關領域，日漸迫切需求的快速採集資料解決方案，而近年來國內外商用車載移動遙測製圖技術之實例；包含了 Google Street View、TOPCON、Optech's Lynx Mobile Mapper、Leador Spatial LD-2000 RH 等擇要介紹介紹如下。

表 2.4 國際上研究單位所發展的車載遙測製圖平台(摘自 Li, 2010)

Name/Year	Developers	Platform	Sensors	
			Navigation	Mapping
<b>GPSVan™</b> [1993]	The Ohio State University	Van, train	GPS, 2 gyros, 2 odometers (wheel counter)	2 monochrome digital cameras, 2 VHS cameras
<b>CDSS</b> [1998]	Geodetic Institute Aachen	Van	C/A code GPS, 2 odometers, barometer	2 monochrome CCD digital cameras
<b>KiSS™</b> [2001]	University of the Federal Armed Forces Munich	Van	GPS, IMU, odometer, barometer, inclinometer, compass	2 monochrome digital cameras, VHS camera (for archival purposes)
<b>VISAT™</b> [1996]	University of Calgary	Van	Dual frequency GPS, navigation-grade IMU	8 monochrome digital cameras, 1 VHS camera (for archival purposes)
<b>TruckMAP™</b> [1996]	John E. Chance and Associates	Van	Dual-antenna GPS, digital attitude sensor	Reflectorless laser range-finder
<b>Gator Communicator™</b> [2000]	University of Florida	Person	GPS, digital compass, inclinometer	2 CCD digital cameras
<b>GIM™</b> [1994]	NAVSYS Corp.	Truck	GPS, low-cost IMU	1 CCD digital camera, 1 VHS camera
<b>Indoor MMS</b> [1997]	National Research Council, Canada	Mobile robotic platform	Wheel encoders	8 CCD digital cameras, bi-iris laser scanner (also used for navigation)
<b>GL-EYE™</b> [1998]	NAVSYS Corp.	Land vehicle	GPS, low-cost IMU	1 CCD digital camera
<b>Backpack MMS</b> [2001]	University of Calgary	Person	GPS, digital compass, inclinometer	Colour consumer digital camera
<b>WUMMS</b> [1999]	Wuhan Technical University	Truck	GPS, unspecified dead-reckoning sensor	CCD digital camera, laser range-finder
<b>GPSVision™</b> [2002]	Lambda Tech.	Van	GPS, navigation-grade IMU	2 colour CCD digital cameras
<b>ON-SIGHT™</b> [2002]	Transmap Corp.	Van	GPS, navigation-grade IMU	Up to 5 digital CCD cameras
<b>MoSES</b> [2001]	University of the Federal Armed Forces Munich	Van	GPS, navigation-grade IMU, odometer, barometer,	2 CCD digital cameras (possible laser scanner and
<b>GEOVan</b> [2002]	Geospan Corp.	Van	GPS, dead reckoning	10 VHS, voice recorder
<b>RGIAS</b> [2002]	Rowe Surveying and Engineering Co.	Truck	GPS	Video, laser
<b>MANDLI</b> [2002]	Mandli Comm.	Van	GPS	2 CCD digital cameras
<b>FRANK</b> [1995]	Delft TU	Car		Fish-eye camera
<b>RCAMS</b> [1999]	Geomatics Technologies Pty. Ltd	Car, train, aircraft	GPS, INS	2 analogue cameras
<b>ROMDAS</b> [2002]	Highway and Traffic Consultants		GPS, speedometer sensor, and bump integrator	1 video camera
<b>UMMID</b> [2000]	São Paulo State University	Van	GPS	2 digital video cameras (DVCAM)
<b>Dyna</b> [1999]	Udine University	Van	GPS	1 CCD digital camera
<b>LD-2000-RH</b> (2004)	Wuhan Technical University (Leador)	Truck	GPS+ Tactical grade INS+DR	CCD digital camera,
<b>4-S Van</b> [2006]	ETRI, Daejeon, Korea.	Van	GPS+INS+DMI	CCD digital camera
<b>VISAT 2006™</b> [2006]	University of Calgary	Van	Dual frequency GPS, navigation-grade IMU	6 monochrome CCD digital cameras, 1 colour VHS camera, laser scanner
<b>Tele Atlas Mobile Mapping Van</b> [2007]	Tele Atlas	Van	GPS+INS+DR	4 CCD digital camera, laser scanner
<b>Hawkeyes</b> [2010]	National Cheng Kung University	Van	GPS+INS+DMI	6 CCD digital camera

## ■ Google Street View

Google 於 2007 年 5 月開始進行名為 Google Street View 計畫，該計畫主要是針對 Google Earth 以及 Google Maps 增加街景導覽的功能，該功能可給予使用者身歷其境的感覺，只要於地圖街道上選定一點，即可透過 Street View 得知該地點實地的 360 度全景景象，這些全景影像資料便是透過 Google 自行發展的街景車於世界各地蒐集資料而來。目前 Google Street View 功能在 Google Maps 的介面如圖 2.16 所示。

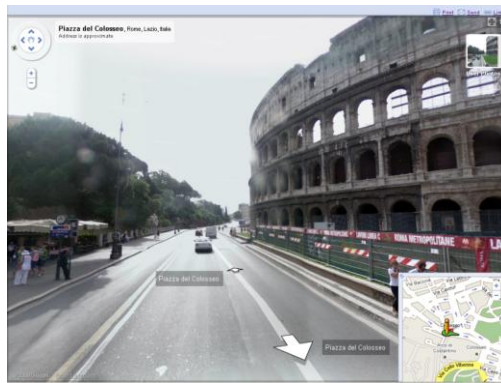


圖 2.16 Google Street View 介面(摘自 <http://maps.google.com.tw/>)

2008 年底開始於台灣進行拍攝工作的 Google 街景車基本配備至少含有 GPS、相機、光達。360 度全景景象的產生過程主要是透過相機拍攝，並將相機拍攝時間與 GPS 軌跡的時間同步處理，GPS 資料提供拍攝相片時所在的位置，像片則組成拍攝位置的全景景象，此即 Street View 的基本運作原理。此外，Google 測量車上裝置的光達儀器為德國 SICK AG 公司所生產的 LMS291 系列型號，可用來建立 3D 的建物模型。

## ■ TOPCON

TOPCON 公司發展的移動遙測平台名為 IP-S2 Mobile Mapping System，該平台的早期版本曾經在 2007 美國導航學會所舉行之 GNSS2007 上展出，當時系統的版本相當簡單，主要是由 GPS 以及光達組成，而在 2009 年則發表了較完整的版本，其組成元件如圖 2.17 所示。IP-S2 的定位定向系統採用了測量級的雙頻多系統(如 GPS、GLONASS、WAAS)的 GNSS 接收機和高階戰術等級精度的慣性測量儀(Honeywell HG1700 Series)為其核心架構，在 GNSS 正常狀況下位置精度可以達到平面精度 15 公分與垂直方向精度 25 公分；方位角精度則可達到 0.05 度，另外在 GNSS 訊號遮蔽 30 秒以內時平面精度可

維持 55 公分與垂直方向精度 30 公分；方位角精度則可達到 0.075 度(使用飄移為 1 度/小時雷射陀螺儀之慣性測量儀)。除了 GNSS 以及慣性測量儀之外，IP-S2 系統也可以整合里程計提供額外的速度及位置資訊，但此款系統受國際武器輸出管制(International Traffic in Arms Regulations, ITAR)，需要申請美國國務院出口許可，國內成功大學航太工程學系曾申請進口該系列之慣性測量儀(飄移 5 度/小時)，但未獲得許可。目前國內代理商引進的型號為 IP-S2 Lite 系列之產品，使用的慣性測量儀屬高階微機電系統，微機電陀螺儀與加速度之飄移分別為 25 度/小時與 8mg。



圖 2.17 TOPCON 公司開發的移動測圖系統(摘自 <http://www.topconpositioning.com/products/mobile-mapping/ip-s2>)

IP-S2 的感測器介面可以根據使用需求，同時整合相機以及光達系統，其中整合相機時拍照速率可以達到 15fps，而搭配 IP-S2 的光達系統則可以產生方圓 30 公尺內物件的點雲資料。IP-S2 的資料擷取與處理系統功能相當完備，時間同步的機制可以替各種感測器資料打上統一的時間資訊，搭配戰術級的慣性測量儀更可以提供外方位元素的資料在每張照片中，以符合測量製圖的需求。

## ■ Optech's Lynx Mobile Mapper

加拿大 Optech 公司在 ISPRS 2008 會議中展出一款該公司自行發展的測量車 Lynx Mobile Mapper，如圖 2.18 所示，主要組成元件為高精度的定位定向系統、測量等級光達系統、相機。Lynx Mobile Mapper 的定位定向系統核心為 Applanix/Trimble POS LV，為目前商用系統中整體效能最佳的系統之一，除了使用雷射陀螺儀之導航等級慣性測量儀之外，INS/GPS 運算的核心軟體 POSpac Land 亦提供緊耦合的整合架構，整體的定位可達公分級精度，姿態角的精度則依據選配的慣性測量儀而有所不同，一般而言其精度都可以達到 0.05 度，惟此系統部分慣性測量儀等級受到出口管制，目前台灣無法使用該系統。



圖 2.18 Optech 的測量車 Lynx Mobile Mapper(摘自 <http://www.optech.ca/index.htm>)

■ Leador Spatial LD-2000 RH

圖 2.19 所示為中國武漢大學李德仁院士所屬的立得空間信息技術發展有限公司(Leador Spatial)開發的 LD-2000 RH。LD-2000 RH 為立得空間開發的三種型號車載移動遙測平台中製圖精度最高的型號，實地測量的精度可達到 20 公分，符合中國大陸 1/2000 比例尺製圖的規範。在測量車上搭配了戰術等級以上的慣性導航設備，其陀螺感測器為光纖陀螺，此外再搭配雙頻的 GPS 接收儀以及里程計數器，在影像擷取的部份則搭配了四台 CCD 相機和一組錄影機。該系統由於發展的時間至少已有 5 年以上的時間，各系統之間的整合應該已經相當成熟，同時也在中國發展出非常多型態的應用領域。



圖 2.19 立得空間測量車 LD-2000 RH (摘自 Li et al., 2001)



自 2004 年以來美國國防部發起一個與車載移動遙測製圖技術相關應用的競賽，DARPA Grand Challenge，該競賽之目的就是在發展無人操控的自動車。這種自動車的核心元件與遙測製圖技術相同，整合了 INS 與 GNSS 的精確定位及定向元件，以及若干遙測感測器。以卡內基大學(Carnegie Mellon University) Red Team 團隊的自動車為例，其利用長、短距雷達搭配雷射掃描儀，並以 INS/GPS 整合系統提供定位資訊，搭配直接定位讓自動車根據環境判斷路徑，在人工智慧技術下無需人為控制自主行駛，見圖 2.20。

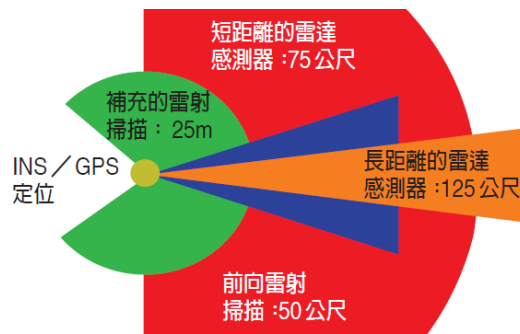


圖 2.20 卡內基大學 Red Team 團隊自動車感測器整合架構

參賽車輛必須在無人控制的情況下，獨自行駛規劃的數百公里路程，而且沿途要能閃避障礙物。在 2005 年的賽事中已經有若干團隊可以完成全程，如 Red Team 的 Sandstorm、Hilander 與 Stanford Racing Team 的 Stanley，系統架構細節請參考圖 2.21。2005 年賽場都是在人煙稀少的郊區，相較於都市區而言，所遇到的狀況比較單純。2007 Urban Challenge 比賽場地移至都市區，遭遇的問題及挑戰比以往困難許多；除遵守各項交通規則與號誌，並須即時判斷路況以避免發生事故。Urban Challenge 其中三組優勝隊伍 Tartan Racing – Boss、Stanford Racing – Junior 和 MIT – Talos 之系統架構細節請參考圖 2.22。此一競賽實質提昇無人駕駛載具於民生用途與軍事技術的發展。這也是搭載直接定位能力之移動遙測製圖系統在未來可以延伸發展的方向。



圖 2.21 自動車：Sandstorm(左)、Stanley (右)、Hilander(中)  
(摘自 <http://www.cs.cmu.edu/~red/Red/redteam.html>)



圖 2.22 自動車：Boss(左)、Junior(右)、Talos(下圖左)  
(摘自 DARPA, 2007)

目前 Google 公司利用圖 2.23 中 Stanley 平台技術已發展出共有 7 輛原型自走車，分別已在完全自動駕駛的情況下，至少行駛逾 14 萬英里(超過 22.5 萬公里)路程。



圖 2.23 Google 自走車計畫

### 2.1.2 空載移動遙測製圖技術之回顧

空載移動遙測製圖技術的發展可追溯自 1990 年代初期，與車載移動遙測製圖技術相似，其中重要的里程碑可分為三個階段；第一階段為前 INS 時期，約自 1985 年至 1995 年；第二階段為後 INS 時期，約自 1995 年起至 2000 年；而最後一個階段為空載光達時期，約自 2000 年起至迄今。在前 INS 時期，歐美諸多學者提出以 GPS 多天線陣列之方式提供飛機的姿態(Cohen and Parkinson, 1992; El-Mowafy and Schwarz, 1994)，如此可應用至空中三角之解算程序中，但此種設計所提供之精度(0.1 至 0.03 度)受限於應用在航測飛機上可安置多天線陣列之基線長度(2 至 10 公尺)與 GPS 整數週波未定值之解算問題，故無法成為具備直接定位能力的空載移動遙測製圖技術主流產品(Mostafa and Schwarz, 1999)。

在前 INS 時期，約自 1990 年代初期歐美已有諸多學者已認知到慣性測量儀對發展空載移動遙測製圖技術之必要性(Cannon and Schwarz, 1990; Schwarz et al, 1993; Skaloud et al, 1994; Lechner and Lahmann, 1995)，而最早配置慣性測量儀之研究型空載移動遙測製圖技術為由加拿大卡加利大學空間資訊工程系所開發(Skaloud et al, 1996)，如圖 2.24 所示。其無控制點直接定位精度約為 30~40 公分。而空載系統之發展落後於車載系統之原因在於高精度 INS 的取得。在 1990 年初期發展的車載系統絕大部分只使用輪速計與陀螺儀，而空載系統對於完整的 INS 提供高精度三軸姿態解之需求更勝於車載系統，卡加利大學於 1993 年領先全世界引入 INS 應用於車載系統，故不難理解空載移動遙測製圖技術之研發時程略晚於車載系統之原因。

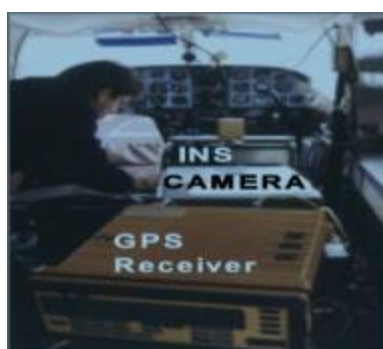


圖 2.24 第一部空載直接定位移動遙測製圖技術  
(摘自 Skaloud et al, 1996)

同時美國俄亥俄州立大學於製圖中心於 1998 年發展類似的空載遙測製圖系統(Airborne Integrated Mapping System, AIMS)，其無控制點直接定位精度約為 20~30 公分(Toth and Grejner-Brzezinska, 1998)。該系統架構細節請參考圖 2.25，圖 2.26 所示為目前商用空載遙測製圖系統之範例。圖 2.27 比較了傳統空三與直接定位航測製圖流程之比較，引入直接定位技術之後，其人力以及時間成本可以大量減少，製圖效率大量提高。根據 Grejner-Brzezinska(2001)之統計，直接定位航測製圖成本可以節省至少 70%，而其精度亦可滿足絕大部分業主的需求且其製圖效率亦可提升至少 60%。



圖 2.25 美國俄亥俄州立大學製圖中心發展之直接定位空載移動測繪系統(摘自 Toth and Grejner-Brezekinska, 1998)

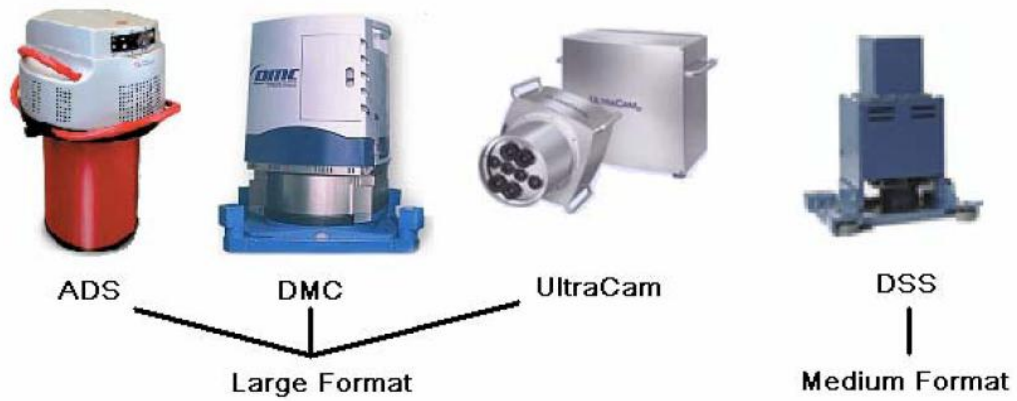


圖 2.26 商用空載移動遙測製圖技術之範例(Courtesy of Leica Geosystems, ZI/Imaging, Vexcel and Applanix, respectively)

Ip 等人(2004)整合了傳統使用地控點之間接定位(空三)與直接定位發展出使用整合式定位演算法(Integrated Sensor Orientation, ISO)之空載移動測繪系統以提升空載移動測繪系統之穩定性,如表 2.5 所示。



表 2.5 不同定位模式之比較(摘自 Ip et al., 2004)

方法	優點	缺點
直接定位	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不需使用空三計算(系統率定時除外)</li> <li>● 可不依靠地面控制點(高精度控制測量除外)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 定位精度受制於 GPS 解</li> <li>● 建議使用高精度整合 INS/GNSS 系統</li> <li>● 一次性硬體採購成本較高</li> <li>● 需要高精度的系統率定參數</li> </ul>
間接定位	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 需地面控制點進行求解</li> <li>● 嚴格求解程序可減少內方位參數誤差產生的影響</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 需地面控制點</li> <li>● 大量重疊的影像</li> <li>● 大量的資料處理程序</li> </ul>
整合式定位	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 結合直接與間接地理定位各自的優點</li> <li>● 可使用較低精度的整合 INS/GNSS 系統</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大量重疊的影像</li> <li>● 仍需使用 DEM 製作正射影像</li> </ul>

圖 2.27 簡要地比較了傳統空三與直接定位航測製圖流程，引入直接定位技術之後，其作業成本可以大量減少，製圖效率大量提高。

### 航測製圖流程之比較

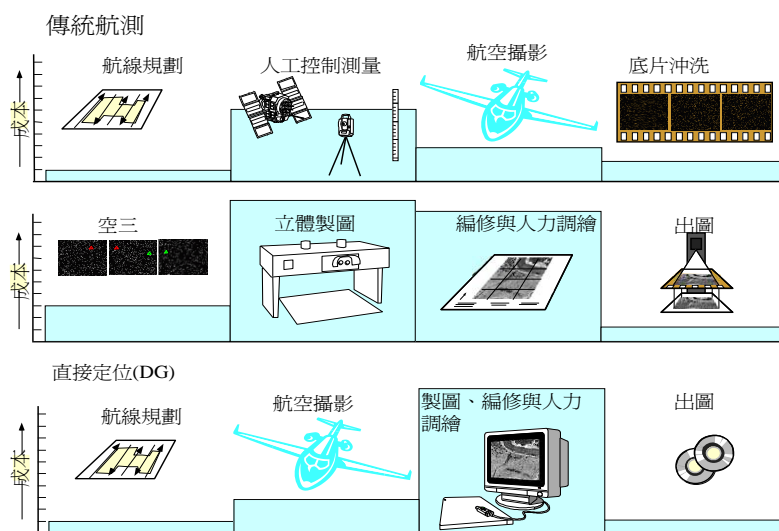


圖 2.27 空載移動遙測製圖技術之航測製圖流程比較

(摘自 Toth and Grejner-Brzezinska, 1998; Ip et al., 2004)

最後一個階段為空載光達時期，與前二個階段的空載遙測製圖技術相較之下，其主要差異在影像擷取感測器部分搭載雷射掃描儀或光達(Axelsson, 1999; Wehr and Lohr, 1999)，空載雷射掃描製圖技術原理與範例如圖 2.28 與圖 2.29 所示。空載雷射掃描最早之實驗可追溯至 1970 至 1980 年代，但一直到雷射掃描儀與 INS/GPS 整合式定位定向系統之相關軟硬體技術成熟後自 1995 年後才逐漸引入空間資訊領域之相關應用(Axelsson, 1999)。

系統

- 1.位置: GNSS
- 2.姿態: 慣性測量儀
- 3.雷射掃描儀(波長500~1500nm), 為高頻率掃描儀, 接收反射訊號, 量測訊號單行方向時間

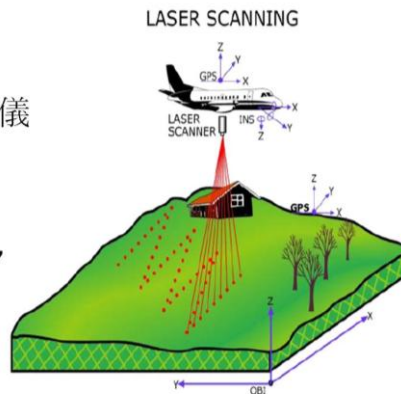


圖 2.28 空載雷射掃描系統之原理

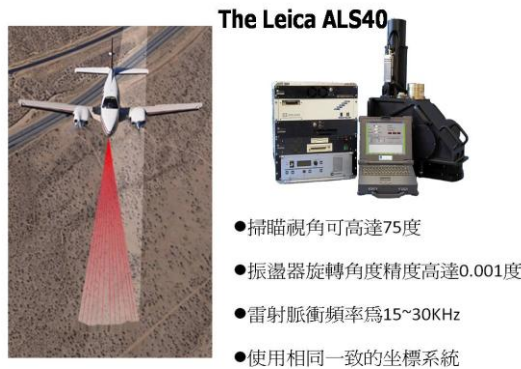


圖 2.29 空載雷射掃描系統之範例

國內有部分大型測量公司與農林航測所等單位陸續引進空載移動測繪系統從事測圖作業，但無單位實際進行具備直接定位能力之空載移動測繪系統研製。成功大學測量及空間資訊系於 2009 年起接受國科會資助進行空載傾斜攝影之直接定位系統之先期研究，並逐漸掌握相關之關鍵技術。同時除了使用各式量測型相機所開發之空載移動測繪系統外，在 2000 年前後陸續有廠商與研究單位如工研院、交通大學、中央大學與成功大學等機構因應政府機關委託案之故陸續引進了光達之空載移動測繪系統，目前國內沒有任何研究機構從事空載光

達移動測繪系統之研發工作。

空載雷射掃瞄儀為目前商業化的技術，在平坦無植被覆蓋理想測區，經過精密的系統率定後，其地形測量作業於高程精度可達 15 公分(劉榮寬等人，2005)。目前空載雷射掃瞄測高技術主要用於快速取得大範圍面積的三維地形資料，生成數值地形圖，特別用於測繪森林覆蓋區域和山區地形圖(Petzold et al., 1999; Kraus and Pfeifer, 1998; Pereira and Wicherson, 1999; Wehr and Lohr, 1999)。

此外，空載雷射掃瞄儀也用於獲取大範圍高精度的數值地形模型(DTM)；測繪線狀地物如電線等電力設施、電塔路線圖(林志交等，2004)、高速公路；獲取森林地區地表的三維資訊，進行植被參數測定(吳至誠，2005)；海岸地帶地形測繪，如監測海岸變化、侵蝕情況(徐偉城等，2005)；其他如防災評估、冰面變化監測、地震災區等危險區域的測繪研究(史天元等，2002)。

經由過去文獻可知，利用空載雷射掃瞄儀可快速且精確的獲取研究區域範圍的三維點雲數據，並且可以據以導出詳細地形地貌，包括數值地形、等高線圖、各方向之剖面圖、各角度之三維透視模擬照片等，以提供針對該區域之最佳了解與對策。若有早期高程資料，則可以評估地形變化，提供高程差異量分析、崩塌土石方量估算或數值模擬等。

### 2.1.3 個人攜行移動測繪系統之回顧

個人攜行移動測繪的發展可追溯自 2000 年代初期，加拿大卡加利大學空間資訊工程系發展出輕量且低成本之個人攜行移動測繪系統之原型(Ellum, 2001)，如圖 2.30 與 2.31 所示。在相機與待測物距離維持 30 公尺之條件下，該系統無控制點平面直接定位精度為約為 20 公分，高程精度約為 10 公分(Ellum, 2001)。系統硬體成本在新台幣 50 萬元以下，本原型只使用數位磁羅盤而非使用慣性測量系統提供姿態訊息，唯數位磁羅盤在都市地區易受磁場干擾而呈現不穩狀態，未來宜以慣性測量儀取而代之以提供更穩定之姿態訊息(Ellum, 2001)。

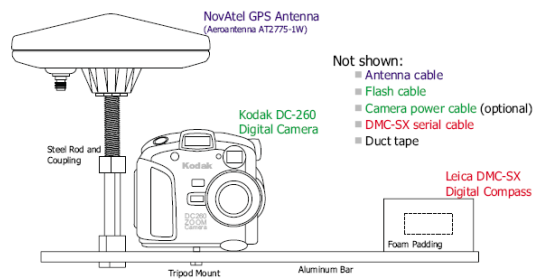
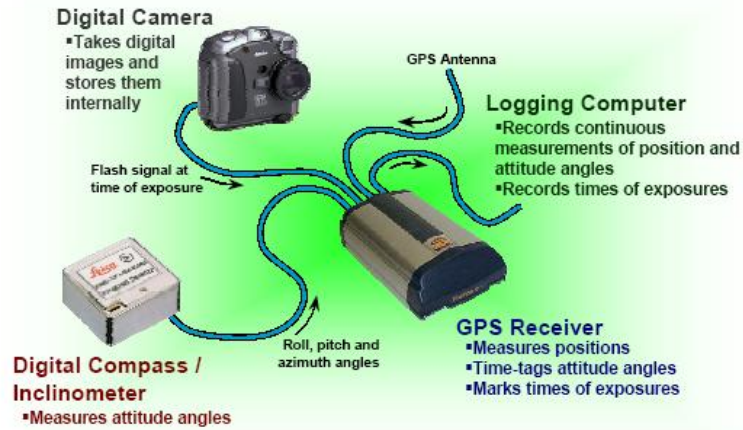


圖 2.30 個人攜行移動測繪系統原型(摘自 Ellum, 2001)

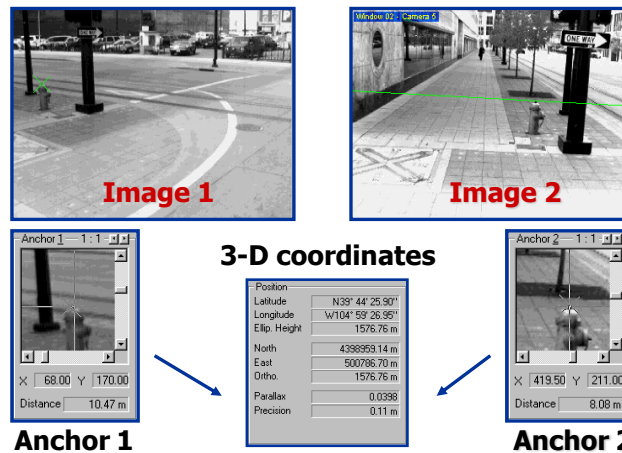


圖 2.31 個人攜行移動測繪系統操作介面(Ellum, 2001)

目前國內外市場上並無商用個人攜行移動測繪系統可以取得。但考量其成本、精度與機動性之優勢，個人攜行移動測繪系統在小區域與大尺度之測繪作業上仍有一定之優勢。故本案嘗試規劃之個人攜帶式定位(及測圖)系統(Portable Mobile Mapping System, PMMS)之軟硬體架構，此種系統可於車輛及航空器等機械載具不易到達之地區，進行空間資訊蒐集。此種系統強調輕便，適合個人攜帶至車輛不易到達之地區，進行定位並快速蒐集影像資訊，以實施目標區域測圖。個人攜帶式測圖系統尤其有利於災區之測量，於第一時間以人員攜帶系統進入災區蒐集空間資訊，以有效達到災損評估及災區域監控之目的，



相關細節請參考第八章評估建置個人攜帶式定位系統之可行性。

#### 2.1.4 船載移動遙測製圖技術之回顧

船載移動遙測製圖技術之發展與應用可追溯至 2005 年(Zach et al., 2011)，其主要之系統架構沿用車載光達之移動遙測系統架構，並增加穩定平台之功能以克服海象對精度之影響。Zach 等人於 2011 年發表利用 RIGEL VMX-250 搭配 GNSS 接收儀、戰術等級慣性測量儀至於船上並於義大利威尼斯地區沿運河掃描相關古蹟，如圖 2.32 所示。將多系統平台置於船載平台，針對河道兩旁的目標物進行掃描，並記錄在河道上行駛軌跡。圖 2.33 為其他相關船載系統之範例應用。



圖 2.32 船載光達移動遙測製圖系統架構(上)與作業成果(下)  
(摘自 Zach et al., 2011)



圖 2.33 船載光達移動遙測製圖系統其他範例(摘自 Zach et al.,2011)

本案初步成果顯示，在短時間內可以得到高解析度的成果。而未來希望可以達到更高密度更高解析的資料，並提高掃瞄與資料處理的速度，對於建物的微小損壞或精細的建物紋理或圖形，可更仔細地描繪出來；而對於潮溼的建物或外牆，可藉由測量反射率的研究，取得更多不同所需的資訊，做進一步相關的探討。

## 2.2 多平台定位技術應用實例之回顧

加拿大卡加利大學空間資訊工程系利用該系自有的空載移動遙測製圖技術發展森林火點直接定位系統(Wright, 2004)，該系統可以即時提供森林火點之坐標，其即時直接定位平面精度為 3 公尺。該系統配備了數位攝影機、熱感相機與 INS/GPS 整合定位定向系統，如圖 2.34 所示。

大陸武漢大學於 2000 年初期亦積極發展移動測繪技術，目前仍以車載系統為主，如圖 2.35 所示。武漢大學目前已具備多感測器系統整合、觀測量處理、自有率定技術、直接定位模組與豐富的實際作業經驗(Li et al., 2001)。

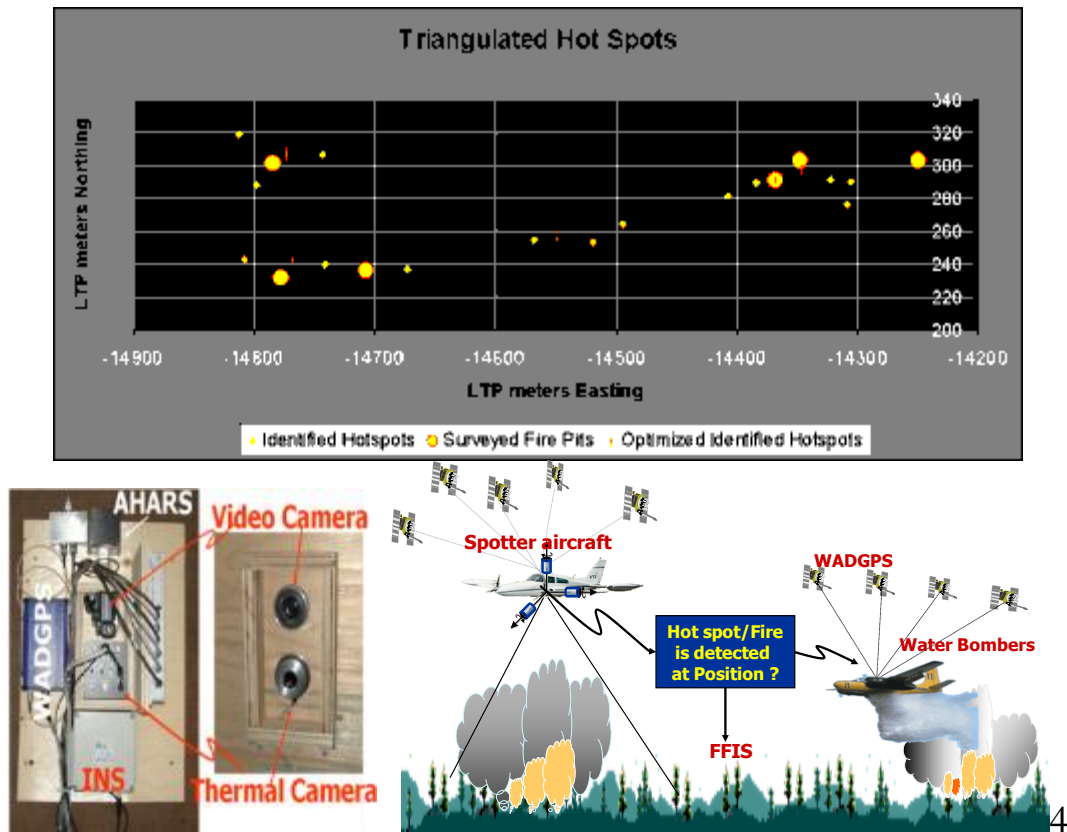


圖 2.34 森林火點直接定位系統(摘自 Wright, 2004)



圖 2.35 武漢大學所發展之車載移動測繪系統(Li et al., 2001)

Wang 等人(2008)年利用車載系統進行道路邊線的萃取。成果顯示其可利用拍攝的影像萃取出所有可見的車道線，包含中央分道線與車道分隔線，並將測得的成果建立於 GIS 資料庫中，轉換成公用的格式，未來可提供大眾使用。

Gajdamowicz 等人(2007)整合了數位相機、車載光達與 INS/GNSS



定位定向系統發展了 Visimind MMS，如圖 2.36 所示。本系統的特殊之處在於定位定向演算法，可以整合來自事先於測量區域佈置之控制點，藉由攝影測量反投影定位定向系統之位置、雷射掃描儀所提供之定位定向系統與控制點之距離觀測量，以減低在都市地區因 GNSS 訊號遮蔽之影響而導致定位定向解精度變差之效應。其原理為透過一定數量的地面控制點來彌補 GNSS 衛星數量之不足。本系統成功地應用於土耳其伊斯坦堡古城區之數位典藏計畫，本案成果顯示該系統在 GNSS 訊號遮蔽區域作業之平面定位精度在 10 公分，而高度為 5 公分。

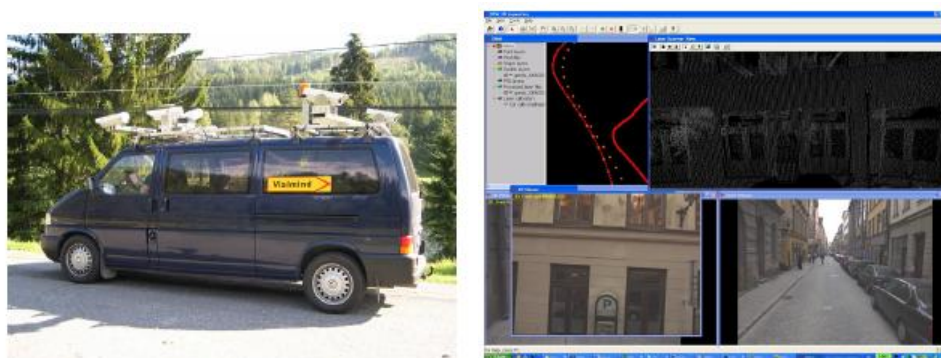


圖 2.36 Visimind MMS 與作業實例(摘自 Gajdamowicz et al., 2007)

Coppa 等人(2007)利用前述卡加利大學發展的個人攜帶式系統進行硬體與軟體功能更新，如圖 2.37 左所示，並應用於火山活動相關之製圖應用，該地因巷道狹小所以無法利用空載與車載移動遙測製圖系統作業，如圖 2.37 右。以同時量測 10 張照片之結果為例，在物距為 20 公尺條件下，本系統平面與高度定位精度分別為 20 公分與 30 公分。

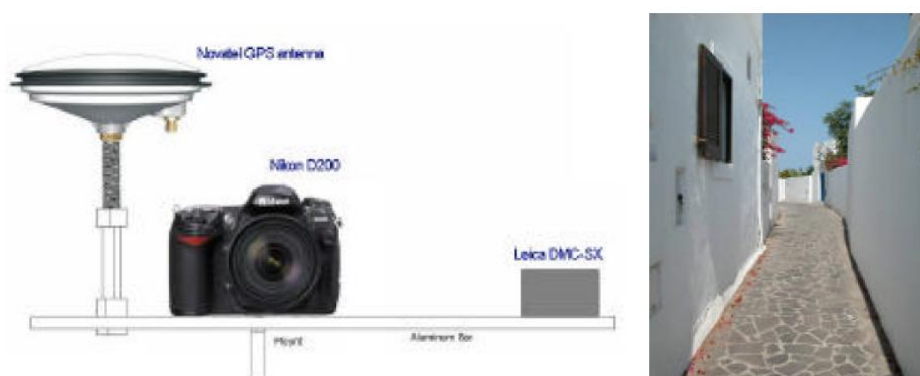


圖 2.37 個人攜帶系統與作業實例(摘自 Coppa et al., 2007)

Wei and Coyne(2008)提出結合空載合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, IFSAR)與 INS/GNSS 定位定



向系統的空載移動遙測製圖系統，如圖 2.38 所示。因為搭載了高精度的 INS/GNSS 定位定向系統，所以本系統可以在無地面控制點的操作模式下直接提供高精度參考大地水準面之 DEM、重力場資料與正射影像。與現有大地水準面模型相較之下，本系統所提供的大地水準面模型之相對精度為 5 至 10 公分。

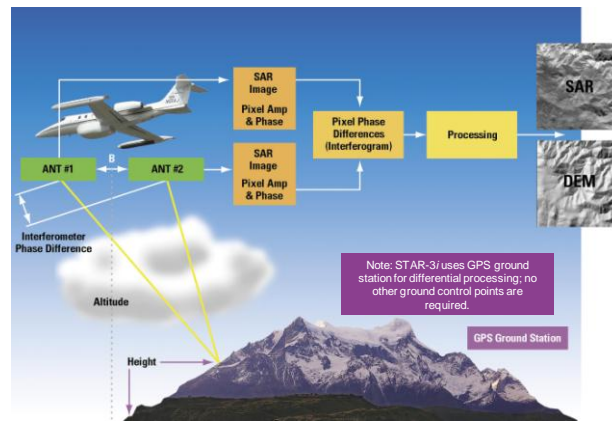


圖 2.38 空載 IFSAR 製圖系統(摘自 Wei and Coyne, 2008)

Hu 等人(2008)探討利用搭載了 INS/GNSS 定位定向系統的 LEICA 空載移動遙測製圖系統 ADS40 於 1/10000、1/5000、1/1000 與 1/500 等不同比例尺之製圖應用效益評估。實驗結果顯示本系統與傳統航測相機所提供之結果顯示，該系統於無地面控制點輔助的模式中可符合 1/10000 之製圖精度，但若符合 1/5000 或更高之製圖精度，則需要少量控制點之輔助。

Graefe(2011)開發移動式車載遙測製圖系統，搭載高性能掃描儀和多台照相機做為感測器，藉由設計可彈性的系統模組，達到許多不同的測量任務。該系統已應用於公路建設的監測、鐵路隧道調查等應用，而實驗成果顯示，其平面與高程定位精度皆可達到小於公分等級，因此未來可應用於更多艱困的測繪地區，包含道路建設，隧道監控或機器人轉向等開發研究。

Pyka 等人(2011)利用雷射掃瞄儀搭載於空載遙測製圖系統，進行鐵路測量及軌道相關數據的蒐集，針對不同的點雲密度及飛行高度進行一系列的研究與分析。由實驗證明，雷射掃瞄儀可成功置於空載系統，藉由表面匹配演算法調整參數，可成功獲得鐵軌位置，適當的分類點雲坐標，當高度為 500 公尺時，已可成功接收其激光束反射訊號，強度值已相當穩定，同時獲得的圖像與掃描數據皆可成功應用。而初步成果顯示，其均方根誤差值約可達到 0.05 公尺。

Li 等人(2011)發表陸基移動遙測製圖系統(L-MMS)，搭載雙頻

GNSS 接收器、慣性測量儀、CCD 攝影機與相機，進行公路交通設施與交通標誌自動化檢測與分析。經由初步成果顯示，系統可成功接收公路硬體設施，並可成功檢測到小於數十公分的道路裂縫，於標記損壞成功辨識比例不低於 85%，成功偵測交通標誌比例超過 90%，其交通標誌測量精度可達 2~5 公分。

日本山葉發動機株式會社 2003 年發表的 RMAX Type II G，如圖 2.39 所示，主要應用於節省農業事務成本，大幅提升農業方面之運用，如：噴灑農業或肥料、植物生育觀察、播灑種子等應用。此外也進行一系列北海道有珠山的災害觀測與三宅島的火山監測，如圖 2.40 所示，達到了實際運用的目標。由此可得知自動導航 UAV 為未來之主要趨勢，而其應用也將隨之愈來愈廣泛。



圖 2.39 Yamaha RMAX Type II G

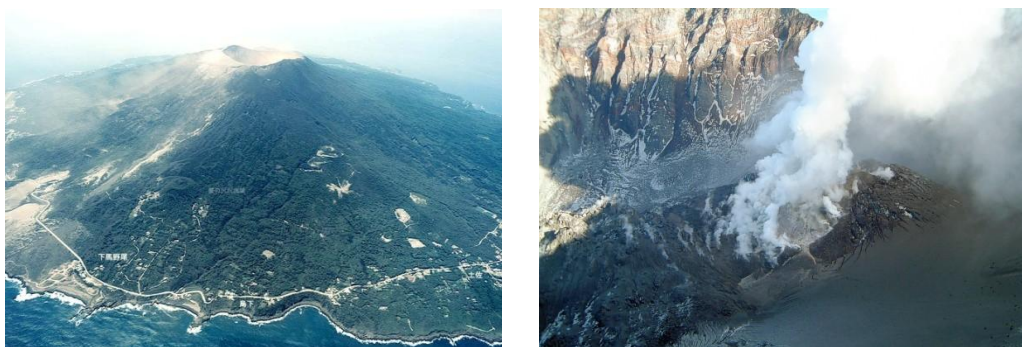


圖 2.40 宅島火山監測成果

### 2.3 多平台定位技術發展趨勢

如前所述，一個移動遙測製圖系統涵蓋數位影像系統、整合多元感測器之高精度定位定向系統與不同作業平台等基本架構，而移動遙測製圖系統之發展總與硬體成本與精度息息相關。近年來由於空間資訊產業對作業流程自動化的需求與日俱增，所以移動遙測製圖系統之發展已由 2005 年前的由專業研究機構執行的原型開發測試階段逐漸

變成商業產品，而日漸成為空間資訊產業中蒐集空間資料的必要工具，而多平台定位技術之未來發展趨勢也將根據符合使用者追求使用更少的硬體成本但獲取而更高的精度與利潤之基本需求而持續演化。故多平台定位技術之未來發展趨勢可根據數位影像系統、整合多元感測器之高精度定位定向系統與不同作業平台不同層面之演化進行討論(Schwarz and El-Sheimy, 2008)。

### 2.3.1 數位影像系統

目前移動遙測製圖系統已全面使用數位光電或主動式電子元件之影像感測器；這些影像感測器包含使用像幅的數位相機、使用線掃描技術的多光譜線掃描儀、光達與 IFSAR/INSAR。移動遙測製圖系統之發展與數位影像技術之發展息息相關，其中又以像幅式數位相機演進的影響最為深遠，此類相機符合空載移動遙測製圖系統之發展，但因在 1990 年代時 CCD 相機之解析度不足，所以最早使用像幅式數位相機反為車載移動遙測製圖系統所用，此乃因在車載移動遙測製圖系統之應用中待測點之距離遠小於空載系統應用之航高要求。

唯近年來 CCD 相機解析度與像幅大小已逐漸提升，近年來已有許多使用高規格之單眼數位相機進行空載移動遙測製圖系統之研發與測試，其成果是相當令人振奮的。例如成功大學測量及空間資訊系持續研發中的空載傾斜攝影移動遙測製圖系統亦使用商用規格的單眼數位相機，其定位精度符合國內之 1/5000 地形圖之製圖規範。使用數位相機的優點是顯而易見的；使用者無須掃描底片故可提升製圖效率，同時數位影像處理技術可提高特徵物萃取自動化程度，而數位影像之更新與儲存更為簡易。

同時使用線掃描技術的掃描技術將亦持續精進，加拿大卡加利大學於空間資訊工程系於 2008 年針對 LEICA ADS40 與 ZI DMCTM 之測試成果顯示其精度可以超越傳統的攝影測量技術(Schwarz and El-Sheimy, 2008)。

與空載移動遙測製圖系統數位影像技術另一個重要的發展為空載高光譜影像系統，透過不同頻譜影像之組合可以衍生出許多重要特徵以提供環境監測、礦產分布探勘、植被、防災與國土資源管理等相關應用。尤其若將光達點雲與高光譜影像系統結合，可提供更有效的空間與生態資源管理架構。

而在這些數位影像系統之演進中，結合 IFSAR 與 INS/GNSS 定位定向系統的空載移動遙測製圖系統近年來更受空間資訊領域之注

意，其特色為快速佈署、近乎不受天候影響、穿透雲層與多樣化製圖產品之能力。其主要產品為數值高程模型、數值正射雷達影像與地形圖。

整體而言，數位影像系統為移動遙測製圖系統之空間資訊擷取系統核心元件之一，以商用移動遙測製圖系統為例，數位影像系統(含軟硬體)約佔整套系統售價之 3/4(約三千萬)；所以未來的數位影像發展趨勢仍應該是朝向更少的硬體成本但提供更高精度的大方向努力。

### 2.3.2 高精度定位定向系統

如前述，移動遙測製圖技術之發展緊密與慣性導航技術緊密結合在一起，以商用移動遙測製圖系統為例，高精度 INS/GNSS 整合式定位定向系統(含軟硬體)約佔整套系統售價之 1/4(約一千萬)；而其中慣性測量儀的售價約佔成本的 1/2，GNSS 接收儀約佔成本的 1/4，其餘才是定位定向軟體的成本。高精度定位定向系統近二十年來的發展趨勢符合使用者以更少的硬體成本但獲取而更高的精度與利潤之基本需求，以下將針對多系統 GNSS 聯合處理架構、高精度低成本慣性測量儀與多系統整合定位定向演算法發展之趨勢進行分析。

#### ■ 多系統 GNSS 聯合處理架構

GPS 為美國自 1970 年代末期開始發展的導航衛星定位系統，目前有 32 顆衛星運行於距離地球表面約 2 萬公里的軌道中。由於設計至今已有約 30 年的時間，其定位精度已漸漸無法滿足日益升高的使用需求，因此美國已經著手進行 GPS 系統之現代化(GPS Modernization)，增加新的、改善品質的電碼觀測量，以及更重要地，將原有的雙頻觀測系統提升為三頻觀測系統。GPS 系統現代化之具體實現則於 2005 年展開，該年 9 月發射的最新 GPS Block IIR-M 衛星已經開始傳送 L2C 觀測量。此觀測量為調制在 L2 頻道的最新電碼觀測量，除了可以幫助地面接收儀對於 L2 載波觀測量的連續接收、減少由訊號失鎖所產生的週波脫落之外，更提供了訊號強度較 L1 C/A 電碼觀測量更強、品質更好的 L2 電碼觀測量以消滅電離層效應，提昇定位精度。GPS Block IIR-M 系列之衛星是 Block IIR 的第二部份；總共包含了 8 顆衛星(McDonald, 2001)。目前已有 8 顆 Block IIR-M 衛星正在運作中 (PRN 17、PRN 31、PRN12、PRN15、PRN29、PRN7、PRN01 與 PRN29)。第二步的重大改變是發展 GPS Block IIF 衛星，此系列目前規劃總共包含至少 12 顆衛星。目前美國波音公司將原訂於 2008 年 8 月由 Delta IV 火箭發射之計畫因故推遲至去年，GPS IIF



之第一顆與第二顆衛星已分別於 2010 年 5 月 28 日與 2011 年 7 月 16 日發射(PRN 25、PRN 1)，如圖 2.41 所示。目前預計於 2012 年陸續完成發射完 12 顆衛星。GPS Block IIF 衛星將傳送第三個頻率 L5(1176.45MHz)的觀測量，屆時 GPS 將正式由雙頻觀測躍升為三頻觀測系統(楊名與江凱偉，2009)。

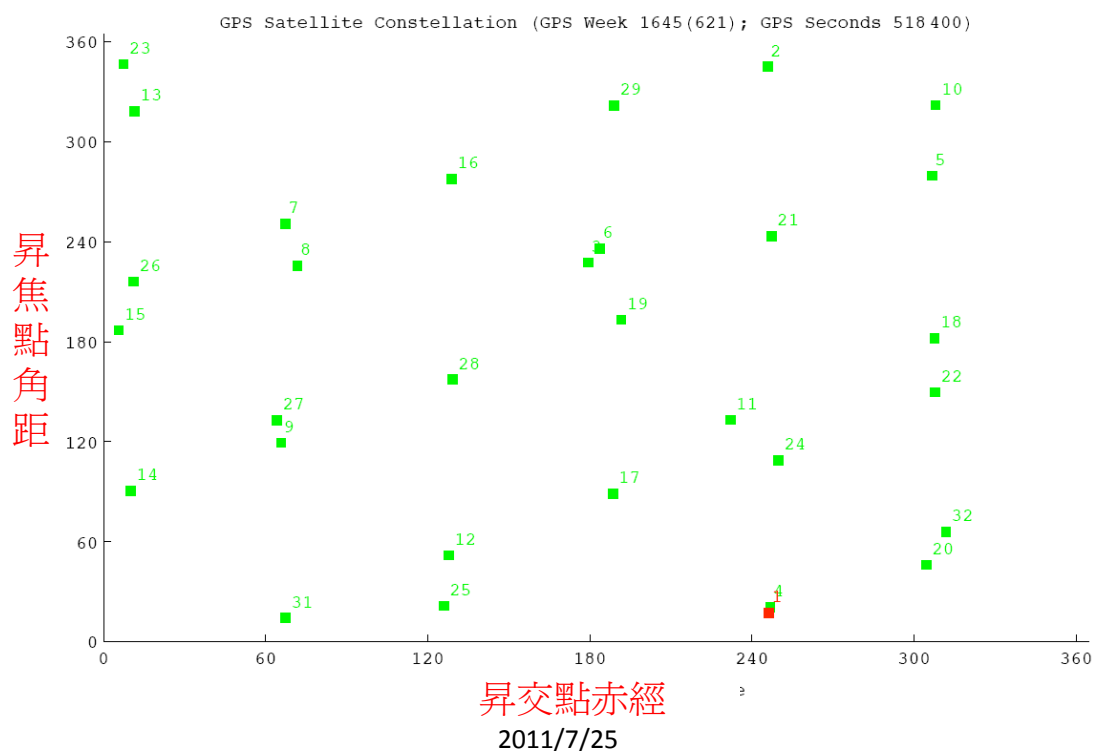


圖 2.41 GPS 星群(2011 年 7 月 25 日)

自 2001 年起俄羅斯政府決定繼續維持 GLONASS 之運作並提出類似 GPS 現代化之計畫。該計畫第一步為在 2003 年後所發射的 GLONASS-M 衛星中將第二個民用訊號調制在 L2 頻率中以增加定位精度；接下來則是在 2008 年後所發射的 GLONASS-K 衛星中將第三個民用訊號調制在 L3 頻率以進一步提升新一代 GLONASS 的性能。該計畫已在 2010 年底將衛星數量提昇 24 顆以提供全球覆蓋的高精度導航服務。除了致力於 GLONASS 的性能提升之外，俄羅斯當局並與美國與歐盟針對未來整合涵蓋 GPSIII, Galileo 及 GLONASS 的未來 GNSS 達成相關技術合作與交流的協議。如同現代化的 GPS 一樣，未來的 GLONASS 可以提供三頻民用訊號以供高精度導航、定位及時間等相關應用領域之用。如同 GPS 一樣，GLONASS 為一包含軍用及民用等雙重用途之系統。目前有 26 顆 GLONASS 衛星，皆為現代化具備雙頻民用訊號的 M 系列衛星現代化的衛星，目前可使用的衛星有 22 顆，3 顆為備用衛星，另有一顆 K 系列衛星(701K)。K 系列衛星之 L1CR 及 L5R 載波將播送碼分多址(CDMA) 的訊號。如此未來

包含 GPS、GLONASS、Galileo 與 Compass 皆會播送碼分多址 (CDMA) 的訊號，這有助於硬體製造商設計價格更為低廉但精度更高之多系統接收儀，同時軟體設計者亦能利用共頻的多系統訊號設計更為有效的聯合資料處理演算法(楊名與江凱偉，2009)。

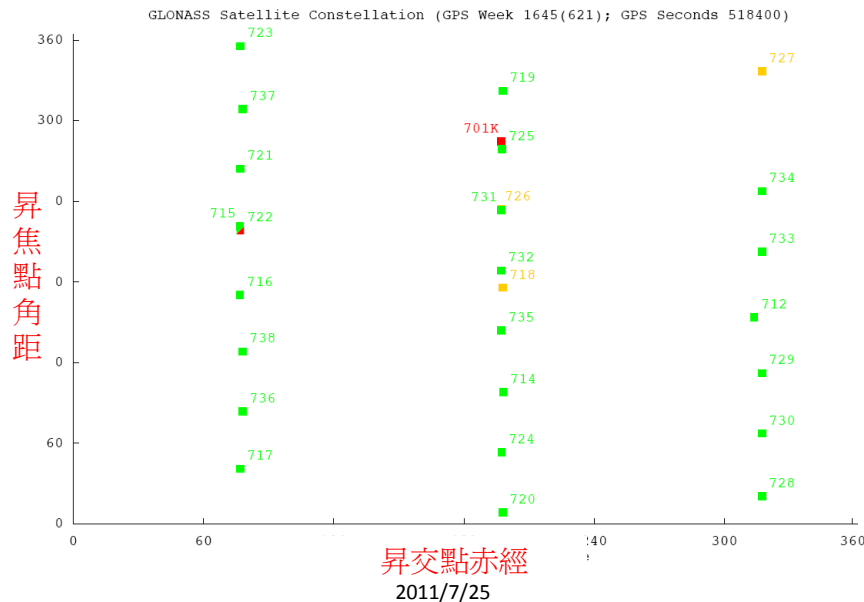


圖 2.42 GLONASS 星群(2011 年 7 月 25 日)

Galileo 的原始計畫可分為三期：第一期 (2001 迄今) 主要為研發階段；除了完成相關系統的設計外，最重要的是衛星驗證(In-Orbit Validation, IOV)。而 IOV 的主要步驟原為於 2005 年底發射 30 顆衛星中的 4 顆以驗證相關系統；然而發展期間不可抗力之經費及技術發展問題等致使第一期的計畫有所延誤。如前所述，第一顆 Galileo 衛星 (GIOVE-A) 延遲至 2005 年 12 月 28 日成功發射升空。第二期主要為完成衛星剩餘 26 顆衛星的發射與地面相關硬體設施的建設。第三期為完成整個系統設置並開始提供商業運轉。但因第一期計畫的延誤導致整個計畫達到全面商業運轉的時程會延至 2013 ~2015 年。第二顆測試衛星(GIOVE-B) 於 2006 年完成組裝並於 2008 年 4 月 27 日完成發射。

中國政府已投注大量資源發展類似 GPS 或 Galileo 自主的全球導航衛星系統，稱為北斗二號(Compass Navigation Satellite System, CNSS)。與北斗一號以 3 顆衛星提供區域的導航服務之功能相較之下，未來的北斗二號衛星之數量預計將達到 35 顆，這些衛星群將由 5 顆靜止衛星、30 顆的中軌道衛星與傾斜軌道衛星所組成，目前有 1 顆中軌衛星，4 顆靜止衛星與 4 顆傾斜軌道衛星，完整的 30<sup>+</sup> 星群預計將於 2015 年建置完成(楊名與江凱偉，2009)，未來的 Compass 將

提供五種免費的公開服務(Open Service)與 5 種授權服務(Authorized Service)，表 2.6 所示為未來 GNSS 之參數比較表。預計在 2015 年之後一般使用者可以無限制使用 4 個衛星導航系統所提供的多頻觀測量已獲致更高的即時單點定位精度；未來不論是即時導航或高精度測量定位皆可使用雙系統或叁系統的接收儀以提高定位精度，圖 2.43 為多系統 GNSS 聯合定位之範例。

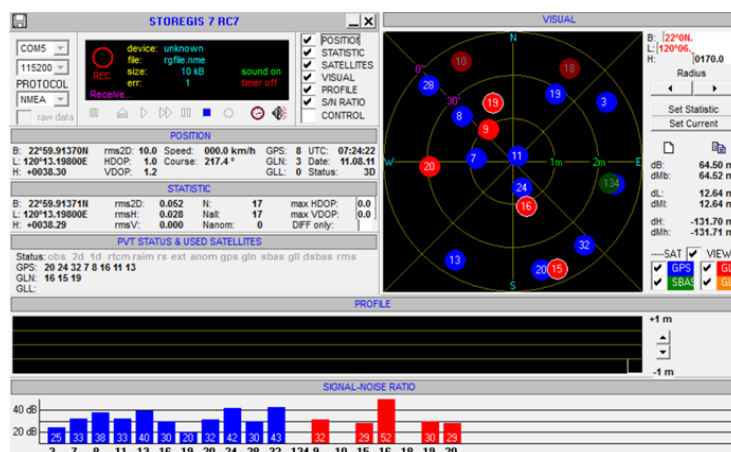


圖 2.43 多系統 GNSS 聯合定位之範例

表 2.6 未來各衛星系統的比較表(Huang and Tsai, 2008)

	GPS	Galileo	GLONASS	Compass/Beidou
衛星數量 (2015 年)	28	30	26	35
軌道面(度)	6	3	3	MEO : 3
傾角(度)	55	56	64.9	MEO : 55
軌道高度 (公里)	20200	23230	19100	MEO : 21500 GEO : 35785
運行週期	11 小時 56 分	14 小時 05 分	11 小時 15 分	MEO : 12 小時 50 分 GEO : 24 小時 00 分
使用頻率 (民用) (MHz)	L1 : 1575.42 L2 : 1227.60 L5 : 1176.45	E1 : 1575.42 E5b : 1207.14 E5a : 1176.45	G1 : 1602~1616 G2 : 1246~1257 3rd : 未定	B-1 : 1561.10 B1-2 : 1589.74 B3 : 1268.52 B2 : 1207.14
參考坐標系統	WGS-84	GTRF	PZ-90	Beijing 1954 coordinate system
時間系統	GPST	GST	UTC(SU)	Chinese coordinated universal time
傳輸方式	CDMA (碼分多址)	CDMA (碼分多址)	FDMA/CDMA (頻/碼分多址)	CDMA (碼分多址)

目前以虛擬主站進行動態定位的 e-GPS 或 e-RTK 技術已普遍為

空間資訊領域所使用，然對於移動遙測製圖之應用而言，車載與機載平台之高速運動對於 e-GPS 或 e-RTK 所需之即時資訊傳輸是一大挑戰，故對於移動遙測製圖之應用而言，e-GPS 或 e-RTK 並不是必然的選項。其原因有二；其一為移動遙測製圖之應用無須即時獲得定位定向解，故一般皆透過後處理的軟體解算以獲得更高精度(接近一倍)之相關資訊。而受限於移動遙測製圖系統所使用的定位定向軟體之計算架構，目前移動遙測製圖之作業模式仍仰賴使用者在測區自行架設 GNSS 主站以提供後處理之用，如此除增加作業成本外，定位精度亦受主站基線之限制，所以未來對移動遙測製圖系統所使用的多元感測器定位定向軟體而言，如何在後處理的架構下實現高精度 GNSS 虛擬主站差分動態定位相當重要的發展方向，如此使用者不需架設大量 GNSS 主站而且能夠確保整個資料擷取任務期間定位定向精度是均勻的。

然而，多系統 GNSS 聯合處理架構之發展並不意味著該系統已經無需仰賴其他輔助感測器，可獨自應付各種移動遙測製圖應用環境。未來的 GNSS 在市區、地下道、隧道、森林等地區仍然會受到訊號遮蔽的效應所影響，如前所述，第一種狀況為使用者接收儀無法所鎖定超過 4 顆衛星，故無法獲得定位解；而第二種狀況為使用者雖鎖定超過 4 顆衛星，但其觀測量品質不佳，導致定位精度不佳，而空載系統在飛機高動態之運動下仍會產生週波脫落與衛星失鎖問題。故對於移動遙測製圖之應用而言，持續朝向整合多元感測器定位定向系統之發展才是妥善的策略。

## ■ 高精度低成本慣性測量儀

整個移動遙測製圖技術之發展里程與固裝式慣性測量儀之發展是高度相關的，由直接定位技術之觀點來看，沒有慣性測量儀就不會有今日蓬勃發展的移動遙測製圖相關產業。圖 2.44 所示為慣性感測系統之分類；其一為大家熟知的 INS，具備完整的系統誤差改正模型與導航電腦故其可以提供補償後的原始觀測量供後處理應用與即時導航解；其二為移動遙測製圖技術普遍使用的慣性測量儀，具備完整的系統誤差改正模型故其可以提供補償後的原始觀測量供後處理應用；而其三為慣性感測器模組(Inertial Sensor Assembly, ISA)，只具備輸出未補償原始觀測量之能力。就移動遙測製圖技術之應用而言，因為作業模式之特性與精度之需求，標準的作業程序為透過後處理方式進行精密定位定向解之計算。以使用相同的觀測量為例，在相同的 GNSS 訊號脫落時段，透過後處理定位定向軟體所獲得之定位定向精度比即時解高出近 60%。故移動遙測製圖技術其實並不需要使用到最



昂貴的 INS，而是選用慣性測量儀即可，表 2.7 所示為慣性測量儀之分類規格。最適合車載系統的慣性測量儀為導航等級系統，此等級系統一般使用雷射陀螺儀，而此等級系統受到國際武器輸出許可之嚴格管制，目前台灣幾乎是確定無法拿到美國國務院之出口許可，但歐洲的出口管制對於民間的使用者較為友善，故在使用者出具終端使用者說明與保證該系統只在歐盟核准之地區作業之條件下，是有機會取得此等級系統。

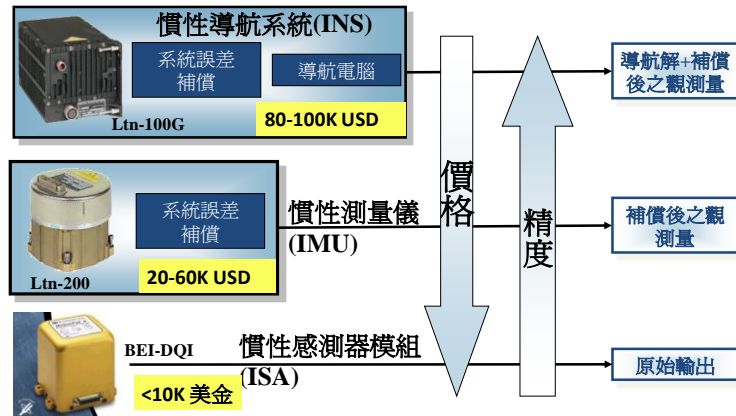



圖 2.44 慣性感測系統之分類

表 2.7 慣性測量儀之分類規格(Titterton and Weston, 2004)

效能	戰略等級 (INS)	導航等級 (INS 或 IMU)	戰術等級 (IMU 或 ISA)	微機電等級 (IMU 或 ISA)
定位誤差(純慣性導航模式)	< 30 公尺/小時 (>500,000美金)	2-4公里/小時 (150K-300k美金)	20-40公里/小時 (20K-120K美金)	50-500公尺/分鐘 (<10K美金)
陀螺飄移(度/小時)	0.0001	0.01-0.001	0.1-10	10-3600
加速度飄移	1 μg	50-100 μg	100-1000 μg	0.1-0.5 g
出口管制	<input type="checkbox"/> ITAR(有錢買不到)	<input type="checkbox"/> ITAR(買到可能性低)	<input type="checkbox"/> ITAR(美國產品) <input type="checkbox"/> EU(歐洲產品)	<input type="checkbox"/> 無
應用	<input type="checkbox"/> 洲際彈道飛彈 <input type="checkbox"/> 潛水艇	<input type="checkbox"/> 車載移動遙測製圖系統 <input type="checkbox"/> 空載底片型移動遙測製圖系統 <input type="checkbox"/> IFSAR <input type="checkbox"/> 輪車導航系統 <input type="checkbox"/> 指北系統	<input type="checkbox"/> 與GNSS整合提供一般移動遙測製圖應用 <input type="checkbox"/> LIDAR <input type="checkbox"/> 空載像幅型移動遙測製圖系統 <input type="checkbox"/> 戰術飛彈	<input type="checkbox"/> 個人攜行式系統

事實上本案在執行之初曾透過加拿大卡加利大學與德國慣性測量儀供應商之協助獲得德國政府確認本案可以順利取得使用雷射陀螺儀之慣性測量儀(飄移為 0.01 度/小時)，且整個交貨時程小於四個月，惟最後因為預算之故(原廠報價為 16 萬歐元)，故只得退而求其次選用使用光纖陀螺儀之慣性測量儀(飄移為 < 1 度/小時)，該系統細節將於第三章詳述之。目前台灣所有的商用空載與車載移動遙測製圖

皆採用戰術等級之慣性測量儀，如上表所示，戰術等級慣性測量儀，如 Applanix 使用之 LN200 其原廠(Northropgrumman)售價約為 5 萬美金，如圖 2.45 所示，但經 Applanix 等公司整合成定位定向系統後其售價在台接近一千萬，且該系統受國際武器輸出管制故需申請出口許可，一般需時半年。



The Litton LN200 system		
	陀螺	加速度計
飄移	1 deg/hr (1 sigma)	0.3 mg (1 sigma)
飄移穩定性	<0.1 deg/hr (1 sigma) (60 min)	35 µg (1 sigma) (10 sec)
尺度因子	100 ppm (1 sigma)	350 ppm (1 sigma)
隨機遊走	0.07 deg/sqrt(hr)	60 µg/sqrt(hz)
軸交	0.1 mrad (1 sigma)	0.2 mrad (1 sigma)

圖 2.45 戰術等級慣性測量儀之範例

近年來微機電技術之快速演進帶給移動遙測製圖技術永續發展另一道曙光，微機電慣性測量儀具備價格低廉與性能穩定之特色，相較於使用同一規格的光纖陀螺儀系統而言，其售價只需其 1/2，同時微機電慣性測量儀一直為人所詬病的雜訊與穩定性不佳之效應亦持續改善中，圖 2.46 所示為成功大學發展鷹眼系統所使用的微機電戰術等級慣性測量儀，其原廠售價約為 1 萬美金，成本為光纖陀螺儀系統之 1/5，此時若搭配先進定位定向演算法與其他輔助感測器可以將定位定向精度提升至使用光纖陀螺儀系統之 9 成(Chiang and Chang, 2010)。圖 2.47 顯示未來五年內高階戰術(光纖陀螺儀)與導航(雷射陀螺儀)等級慣性測量儀售價將減半(Schwarz and El-Sheimy, 2008)，唯出口管制之程序仍然會存在；相反的，微機電陀螺儀之飄移將持續減小，預計在 2012 年底會有飄移為 0.01 度/小時之微機電陀螺儀問世，對於移動遙測製圖技術而言，此等級系統之效能已近似導航等級慣性測量儀之效能，如圖 2.48 所示。而其售價預計為現有使用雷射陀螺儀系統之 1/4，最重要的是此等級系統將不受出口許可之限制。

微機電戰術等級IMU範例



規格	陀螺	加速度計
飄移	10 deg/hr (1 sigma)	1.5 mg (1 sigma)
飄移穩定性	3 deg/hr (1 sigma)	200 µg (1 sigma)
尺度因子	350 ppm (1 sigma)	350 ppm (1 sigma)
隨機遊走	0.035 deg/sqrt(hr)	60 µg/sqrt(hz)
軸交	0.2 mrad (1 sigma)	0.2 mrad (1 sigma)

圖 2.46 微機電戰術等級慣性測量儀之範例

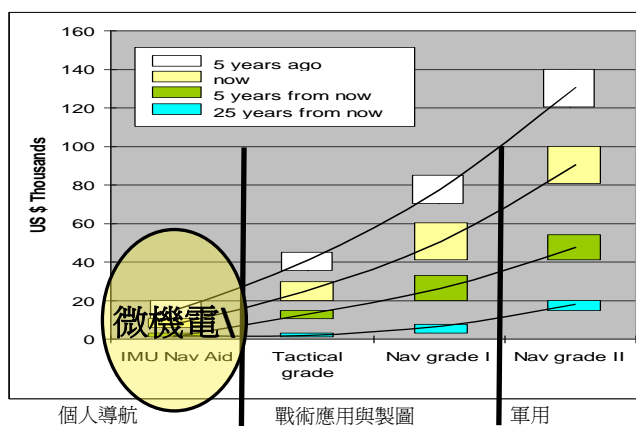
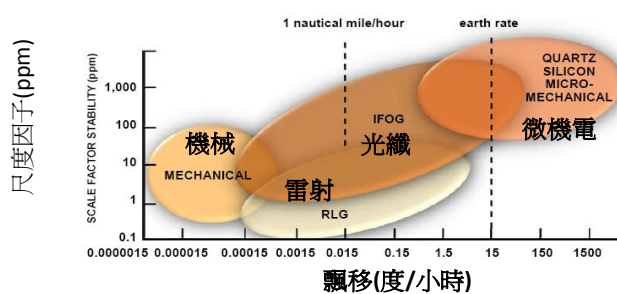


圖 2.47 微機電戰術等級慣性測量儀之範例 (摘自 Schwarz and El-Sheimy, 2008)

現有陀螺儀科技

RLG = Ring Laser Gyro  
IFOG = Interferometric Fiber Optic Gyro



五年後陀螺儀科技

IFOG = Interferometric Fiber Optic Gyro  
MEMS = Micro-Electro-Mechanical Systems  
MOEMS = Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems

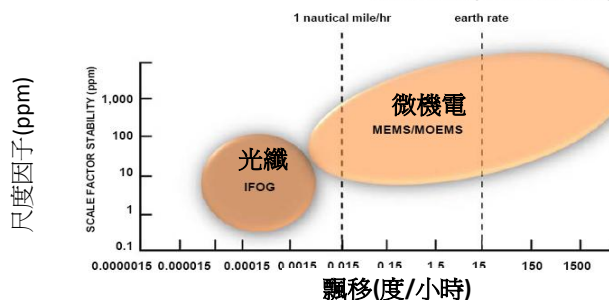


圖 2.48 現有與未來陀螺儀技術之比較 (摘自 Schwarz and El-Sheimy, 2008)

圖 2.49 所示為利用一組高階三軸微機電陀螺儀(飄移 0.5 度/小時)與三軸石英加速度計(0.5mg)所組合的慣性測量儀搭配本案發展的軟體 CAINS-21(詳見第五章)測試本系統於 1 個小時期間 GNSS 訊號脫落時之效能，其平面精度約為 1 公里，滾轉與俯仰精度約為 0.1 度而航向為 0.5 度，此等級效能已與表 2.7 中所列使用雷射陀螺儀導航等級系統一致(Shin, 2005)，而其成本只為導航等級系統之 1/5，所以未來的定位定向系統之趨勢仍應該是朝向更少的硬體成本但提供更高精度的大方向努力。

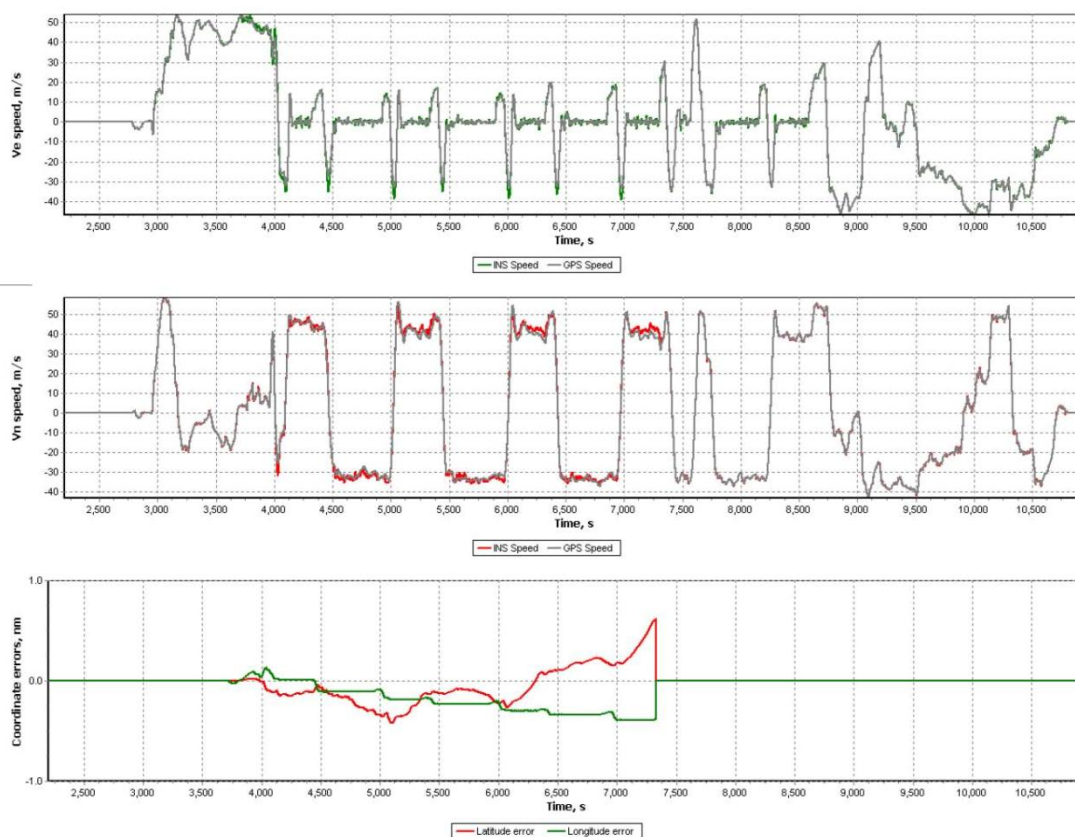


圖 2.49 高階微機電慣性測量儀之效能

## ■ 多系統整合定位定向演算法

整合 INS 及 GNSS 定位及定向系統已逐漸成為新一代空間資訊擷取系統之核心元件。導航界對一個不間斷且穩定的導航系統之需求催生了 INS/GNSS 整合式定位定向系統。然而空間資訊工程領域對於一個能夠提供配備諸如數位相機、光達及攝影機的遙測平台精確定位及定向的需求更進一步的提升整合式定位科技發展的技術水準。研製符合遙測製圖及測量系統高精度需求的定位及定向系統正是目前國外相關學術界及業界正努力發展的方向。上述精密 INS/GNSS 整合式定位及定向系統結合遙測感測器之應用不限於移動遙測製圖應用之領

域。事實上相關技術也被機器人工業領域引用為無人機器人的定位定向模組，在可見的未來將 INS 與多系統多頻率之 GNSS 整合於一個晶片上不再是個遙不可及的夢想。故整合微機電慣性測量裝置的新一代整合式定位及定向系統將是相關產業中不可忽視的明星產品。

但是由於其整合的技術包含軟硬體層次，對一般使用者而言較為複雜加上高等級慣性測量儀之取得較為不易，故市面上所有使用 INS/GNSS 整合的之空載遙測製圖系統製造廠商大部分都選擇使用加拿大 Applanix 公司所發展的 POS 系列產品提供精密的定位定向資訊以利直接定位之應用(包含自走車)。該公司所提供的 POS 系統除了在硬體層次整合了 INS 與 GNSS 之資訊外，並提供使用者相關資料處理的軟體 POSpac。唯其缺點之一為單價過高，一套整合戰術等級慣性測量儀的 POS AV510 系統(此系統即為目前所有光達產品及空載攝影製圖系統所使用的系統)在台灣地區要價超過 7 佰萬台幣，其缺點之二為該公司並不支援一般國外客戶軟硬體研發平台。亦即上述軟硬體無法分開使用，例如使用者無法單獨使用 POSAV 所提供的觀測量利用自行開發的軟體進行計算；反之，使用者亦無法利用該公司的軟體針對其他 INS/GNSS 系統所提供的觀測量進行計算。這些限制對一般的研究機構而言是相當不利的(Chiang et al., 2009)。

目前整個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張卡曼濾波器(Extended Kalman filter, EKF)為主，而針對直接定位與移動測圖之後處理應用使用平滑器來滿足高精度之需求。平滑器是用在濾波過程後之處理，目的就是利用全部過去、現在和未來的觀測量來找出一個理想估算解，而全部的平滑演算法皆須根據所得之濾波解來運算，因此，好的濾波解才有好的平滑解。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誤差累積(Chiang, 2004)。

如前所述，傳統的整合演算法是透過使用卡曼濾波器及平滑器來分別滿足對即時及後處理應用之需求。目前雖然有很多產品及研究都是利用相同的概念來處理 INS/GNSS 整合系統在即時及後處理之需求(Shin, 2005)。但不同使用者對系統的認知不同，故所開發出來的卡曼濾波器所具備之狀態數目、動態模型及誤差模型皆或有不同(Chiang, 2004)，同時每個開發者對濾波器參數調整(filter tuning)的能力更影響軟體的效能(Chiang et al., 2009)。一般而言，INS/GNSS 整合式定位定向系統的性能提升策略有二，如表 2.8 所示。



近年來許多替代的核心算法逐漸吸引相關研究機構的興趣。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區分為下列三大類：

1. 採樣濾波器演算法(Sampling filter approach)：這部份的演算法主要的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)。相關的演算法包含量子濾波器(Partial filter, PF) (Bergman, 1999)、無跡卡曼濾波器(Unscented Kalman filter, UKF) (Julier and 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，這類演算法的主要共通特色在於藉由模仿人類學習的方式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 et al., 2003)、適應性模糊神經系統(Adaptive Neuron Fuzzy Inference System)(El-Sheimy et al, 2004) 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。

表 2.8 INS/GNSS 整合式定位系統的性能提升策略

優缺點	硬體層次	軟體層次
策略	購買導航等級的慣性測量儀	INS/GNSS 演算法的進化
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 有效</li> <li>■ 使用者無須投入大量時間與人力</li> <li>■ 立竿見影</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 便宜</li> <li>■ 使用者可以進行研發</li> <li>■ 未來的擴充性</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 出口限制（台灣買不到）</li> <li>■ 價格昂貴</li> <li>■ 製造商的解決方案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 使用者對整合系統的了解決定軟體之貢獻</li> <li>■ 軟體參數的調校</li> </ul>

除了核心演算法之演進外，多元感測器資料之整合架構亦影響整體定位定向系統之效能甚鉅。目前多數的商用移動遙測製圖系統使用鬆耦合的架構為其多元感測器整合之核心算法(如圖 2.50 所示)，仍然將 INS 及 GNSS 視為兩個獨立的系統，此種結合方式當其中一個系統無法單獨求解時，就會完全失去整合的意義，同樣成為單一系統的運作模式。由於使用者必須同時接受四顆以上的衛星訊號，負責處理 GNSS 觀測量的卡曼濾波器才能解算出 GNSS 所提供的導航解，很多時候使用者並不能同時收到四顆或以上的衛星訊號，造成的原因諸如不開闊的觀測區域造成遮蔽，例如：高樓大廈林立處、隧道、綠色隧道等等。當然，在如隧道這種天空視角完全被遮蔽的情況下，理論上是完全收不到 GNSS 的訊號的，因此也不可能得到任何的 GNSS 導航解，此時就必須依靠 INS 本身的獨自運作。但如高樓大廈林立處，有時雖無法接收到四顆或以上的衛星訊號，或是可以收到四顆或以上的衛星訊號但卻是品質不良的反射訊號，這些都無法提供正確的衛星導航解。因此，另一種最佳化的 INS/GNSS 整合架構油然而生，緊耦合 INS/GNSS 整合架構，圖 2.51 所示為利用傳統擴張卡曼濾波器與平滑器所發展緊耦合 INS/GNSS 多元感測器整合架構。

緊耦合整合架構，基本上是將兩系統在觀測量的部分就做整合，換句話說，緊耦合緊密地將 INS/GNSS 視為同一個系統，一同進行導



航解算，此種架構的整合，最大的優點在於當GNSS訊號薄弱時，系統只要能收到一顆衛星的正常訊號，即可進行導航解算。因此，緊耦合之設計可以說是INS/GNSS在軟體方面最佳的整合方式。如果將鬆耦合系統相同運用在衛星遮減的情況，且與緊耦合比較，就可以輕易地看出其中的差別。透過緊耦合的整合架構，不需要仰賴4顆以上的衛星以提供整合的導航解。當導航衛星數在四顆以上時，緊耦合與鬆耦合整合架構的定位精度表現差異不大。然當衛星數量少於四顆時，鬆耦合整合架構的定位精度急速地隨間增加，相對的，緊耦合整合架構的定位精度仍維持平穩直至衛星數量減少至零顆。純就技術觀點而言，在已完成初始化的前提下，緊耦合整合架構僅需要一顆衛星就能持續地提供相對穩定的導航解。故其特別適合於GNSS訊號遮蔽效應普及的台灣地區。相對來說，鬆耦合整合架對於訊號遮蔽的敏感度限制其於發展真正無縫定位系統之可行性，故緊耦合整合架構可視為未來無縫定位系統之主流架構。

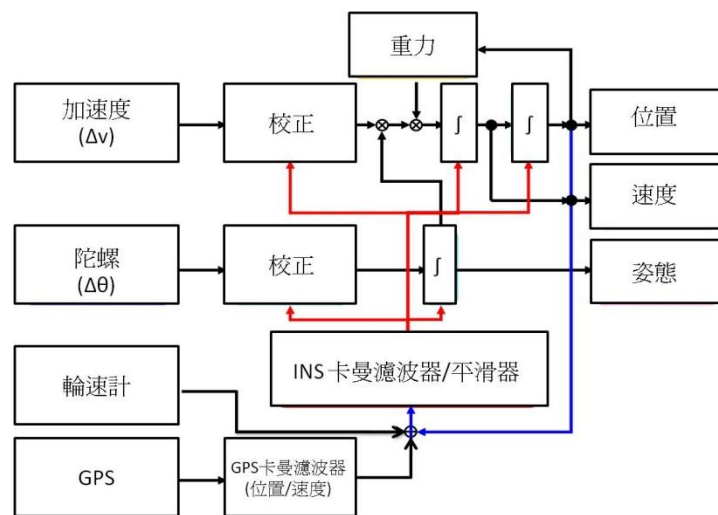


圖 2.50 擴張卡曼濾波器/平滑器之鬆耦合多元感測器整合架構

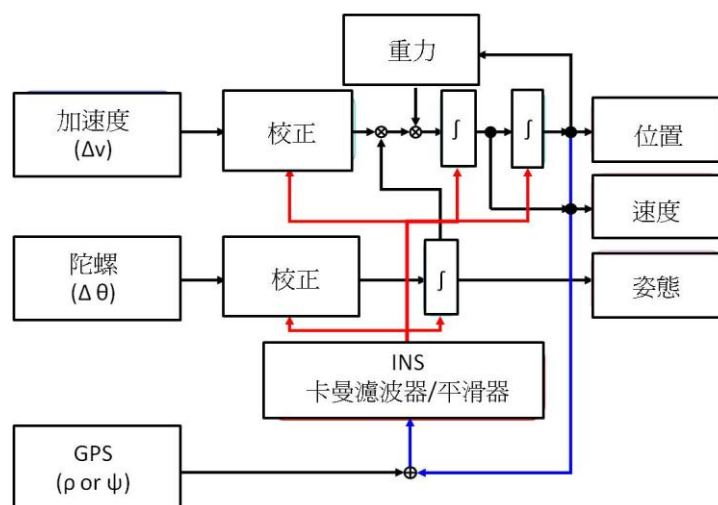


圖 2.51 擴張卡曼濾波器/平滑器之緊耦合多元感測器整合架構

## ■ 不同作業平台之聯合作業架構

如前所述，空載移動遙測製圖技術可涵蓋之作業範圍與天氣之依賴性之缺點與傳統航測技術相似。與傳統測量技術相較之下，車載移動遙測製圖技術具備低的侵入性與較佳的空間資訊擷取效率，可以提供較完整的涵蓋面，同時車載系統可於較差天氣條件下運作，然而車載系統之缺點為系統精度受GNSS訊號遮蔽狀況遠較空載系統嚴重與其作業環境亦受既有路網的限制。而個人攜行式的移動遙測製圖技術的機動性遠較上述二者高，具備更佳的作業彈性，唯因為個人負重的限制，所以其可攜帶的系統精度自然較上述二者為低，表2.9所示為各式直接定位遙測平台之效益比較。表2.10為多平台移動測繪系統間之互補性。

表 2.9 各式直接定位遙測平台之效益比較

平台	系統						應用							
	IMU	GPS	光達	相機	載重	成本	大範圍實驗	小區域實驗	機動性	地面移動限制	氣候因素限制	定位精度(3DRMS)	數碼城市應用	快速救災應用
定翼型飛機	戰術級	大地級	有	數位/底片	大於50公斤	高	可	可	低	無	高	小於20公分	可	低
旋翼型飛機	戰術級	大地級	有	數位	大於50公斤	高	不可	可	低	無	高	小於20公分	可	低
無人控制飛機	微機電級	L1 phase	有	數位	小於25公斤	低	不可	可	高	無	低	小於50公分	可	高
無人控制旋翼型飛機	微機電級	L1 phase	有	數位	小於10公斤	低	不可	可	高	無	低	小於50公分	可	高
車載	戰術級	大地級	有	數位/底片	大於100公斤	高	可	可	高	有	低	小於20公分	可	高
個人攜帶式	微機電級	L1 phase	無	數位	小於25公斤	低	不可	可	高	無	低	小於50公分	可	高

					斤									
--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

表 2.10 多平台移動測繪系統間之互補性

	空載移動測繪系統	車載移動測繪系統	個人攜行移動測繪系統
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大範圍調查</li> <li>● 軟硬體技術成熟</li> <li>● 相關技術規範成熟</li> <li>● 精度佳</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大範圍或小區域調查都適用</li> <li>● 目前拍攝時無須申請</li> <li>● 影像重疊率高</li> <li>● 彌補航測攝影時，地面或低樓層建物影像遮蔽問題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 適用小區域或車載無法到達之處</li> <li>● 拍照處無死角</li> <li>● 輕量且低成本</li> <li>● 不再受限於窄巷或山區等地理環境因素</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 成本高</li> <li>● 空域申請不易</li> <li>● 不便進行較小區域的資料收集或更新</li> <li>● 地面或低樓層建物影像的遮蔽易被遮蔽</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 無法獲得建物最上方的資訊</li> <li>● 車子無法到達之巷弄則無法獲得資料</li> <li>● 缺乏完善技術規範</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 拍攝時間受限於人的體力與電池</li> <li>● 穩定性不足</li> <li>● 相關技術尚未成熟</li> </ul>
時間解析度	更新頻率受限於飛行次數	更新頻率快	更新頻率快
空間解析度	無控制點平面控制點直接定位精度約為 20~30 公分	無控制點直接平面定位精度為 15 公分	該系統無控制點平面直接定位精度為約為 20 公分
觀測方向	由上往下拍攝，傾角 45 度範圍內	地面 360 度環景	地面 360 度環景
成本	在三者之中，成本最高	硬體成本在新台幣 500 萬元	硬體成本在新台幣 100 萬元以下
應用	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 測量與製圖</li> <li>● 適合 GIS 圖資屬性之調查與更新</li> <li>● 城市建模</li> <li>● 地物變遷偵測</li> <li>● 環境影響評估</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● GIS 資料建置</li> <li>● 取代傳統路調，加速 GIS 圖資更新</li> <li>● 快速災損評估</li> <li>● 應用於 3D 數位城市建模</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可針對車子無法進入之災區勘災</li> <li>● 協助古蹟、建築調查與保存</li> <li>● 活動紀錄</li> </ul>

空載移動遙測製圖技術未來之發展趨勢將包含引入無人機(UAV)平台，搭載整合導航定位與姿態感測器、成本相對低廉的數位相機、即時影像、無線通訊系統及多種感測器等，進行空拍任務，機動性極高，且相對安全而價廉，加上對地感測之航高遠低於其他星載與空載平台，故能獲取極高地面解析度的影像，對於空間資料的蒐集與調查更加便利而快速，大幅提昇了空間資訊取得之時效性。雖然大部分的飛行控制皆搭載低成本的 INS/GNSS 整合系統，但其僅限 UAV 飛控之用(Eisenbeiss, 2004; Haarbrink and Eisenbeiss, 2008)。然而更重要的，UAV 攝影測量平台結合 INS/GNSS 整合定位定向系統，可不需經由地面控制點而直接地提供攝影時刻相機的外方位元素。圖 2.52(左)比較了傳統有人機的傳統空三與直接定位航測製圖流程之比較，引入直接定位技術之後，其成本可以大量減少，製圖效率大量提高。然而其飛行成本並不適合小區域之災損評估。圖 2.52(右)比較無人機的傳統空三與直接定位航測製圖流程之比較，相較於有人機之作業流程，無人機的航測製圖成本可大幅減少。同時若能引入直接定位模組，則無控制點的直接定位技術可以滿足快速災損評估與人員救援之應用。目前國外亦有人提出利用無人直升機作為酬載整合 INS/GNSS 系統的平台，並將之應用於攝影測量，但其資料處理策略仍須仰賴地面控制點並藉由 INS/GNSS 系統之輔助以提升空中三角之效率(Nagai et al., 2008)。

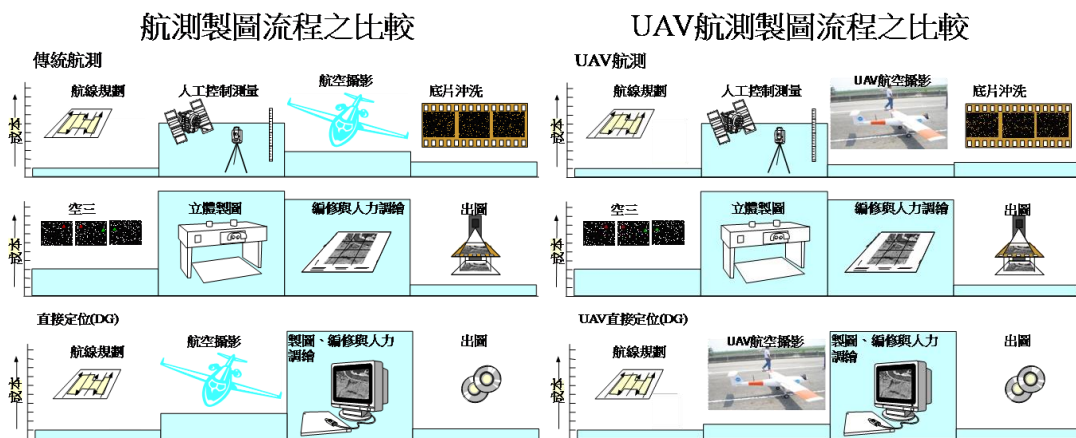


圖 2.52 有人機與無人機航測製圖流程之比較

未來除積極發展不同平台之移動遙測製圖技術外，更須發展多平台移動測繪系統資料整合架構，提供更有效率的空間資訊採集、分析與應用。圖 2.53 與 2.54 所示為加拿大卡加利大學空間資訊工程系最新發展空載與車載移動測繪系統聯合資料作業與處理範例，圖左為空

載移動測繪系統所拍攝之航測影像，而圖中則為車載移動測繪系統所拍攝之六幅影像。車載系統可以提供控制測量、快速影像編修、地表特徵物屬性蒐集、快速調繪與圖資更新。空載直接定位遙測影像可提供地表特徵物屬性之能力有限，透過車載所提供之影像，使用者除了可以快速將相關的製圖程序完成外，更能快速建立 GIS 所需之大量屬性資料。同時車載系統可提供快速的屬性更新以維持地形地物與資料庫屬性的正確性。換言之，相對於無論是利用航測或地測方式進行圖資或屬性更新所需之大量人力與金錢，透過多平台直接定位之遙測技術可以快速完成。故透過陸基(包含車載與個人攜帶式系統)直接定位遙測系統，控制測量、快速影像編修、地表特徵物屬性蒐集、調繪與圖資更新所需之人力可以大幅減少。故人力與經費之節省是相當可觀的。

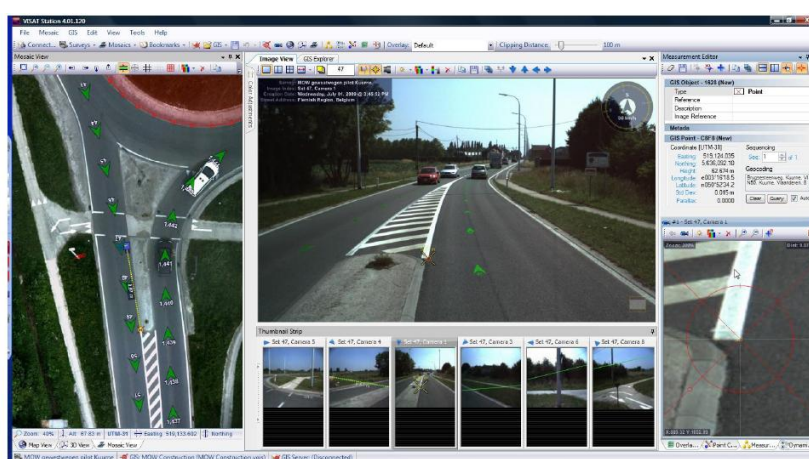


圖 2.53 空載與車載移動測繪系統聯合資料處理範例一



圖 2.54 空載與車載移動測繪系統聯合資料處理範例二

其他也有許多相關研究利用空載與車載聯合系統，搭載 INS/GNSS與光達或其他感測器，進行資料的蒐集與處理。藉由直接定位系統提供的高解析度彩色正射地圖、高精度三維點雲和數值地表



模型、傾斜與不同視角攝影取得的影像與高密度點雲，經由上述數據相結合，可得高精度、高密度的三維地形模型(Al-Hanbali 等人, 2009)。圖2.55與2.56分別為空載與車載系統，其資料處理程序如圖2.57所示。初步成果顯示，其影像每個像元的精度為10公分；也可由圖上辨識區域內挖掘和填土地點；進一步可得三維模型和彩色圖像；經成果分析可知其為40公尺深的運河河道。



圖 2.55 空載遙測製圖系統(摘自 Al-Hanbali et al., 2009)





圖 2.56 車載遙測製圖系統

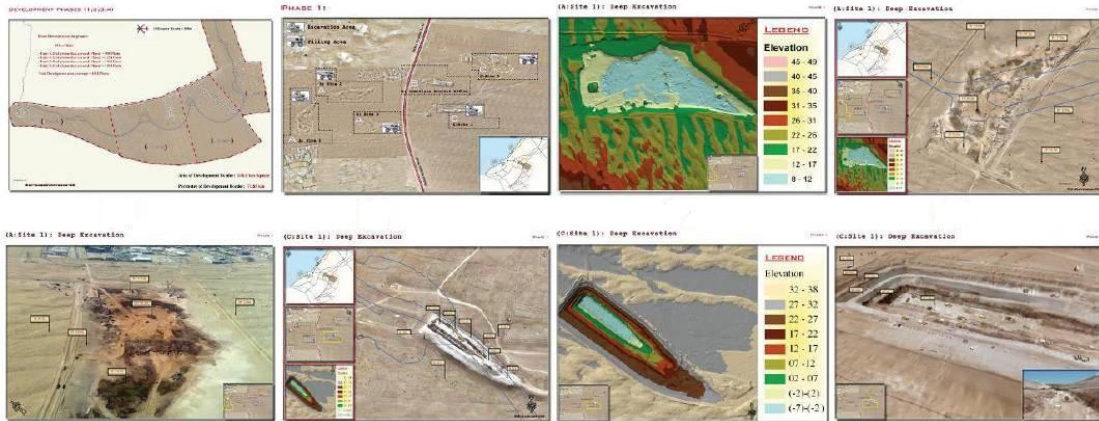


圖 2.57 資料處理範例(摘自 Al-Hanbali et al., 2009)

## 2.4 多平台定位技術之比較與分析

如前所述，目前包含 GNSS 與 INS 之多平台定位技術主要可分為鬆耦合和緊耦合架構。在鬆耦合架構中，使用者必須同時接受 4 顆以上的衛星訊號才能提供 GNSS 導航解以輔助並補償 INS 狀態。而緊耦合架構只需仰賴 1 顆以上的衛星以提供整合的導航解。當導航衛星數在 4 顆以上時，緊耦合與鬆耦合整合架構的定位精度表現差異不大。而當衛星數量少於 4 顆時，鬆耦合整合架構的定位精度急速地隨時間降低，相對的，緊耦合整合架構的定位精度仍維持平穩直至衛星數量減少至 0 顆。表 2.11 所示為鬆耦合與緊耦合架構比較。

本案採用實測資料分析鬆耦合與緊耦合多平台定位技術的效能，實驗區域為成功大學歸仁校區。圖 2.58 所示為測試軌跡。系統由點 S 出發，沿著藍色軌跡前進。根據輪速計以每 8 公尺的間距控制觸發器，相機在接收觸發脈衝後拍攝影像，同一時刻的時間同步感測器則記錄下時間的標籤。圖 2.59 所示為本案自行研發之直接定位軟體之量測範例，圖 2.59B 所示為匯入待量測之影像，圖 2.59A 為特徵點量測介面，圖 2.59C 為相機交會情形而圖 2.59D 為直接定位之成果。

圖 2.60 為透過調整可視仰角以移除衛星，模擬不同可用衛星的數量，以驗證鬆耦合與緊耦合多平台定位技術的效能與衛星數量的關係。如圖所示，當仰角較低時(如圖 2.60 左)，大部分的時間可視衛星皆有 5 顆以上，隨著仰角增加(如圖 2.60 右)，許多時段可視衛星小於 4 顆，甚至僅有 0~1 顆，如此可用於模擬 GNSS 發生斷訊的情況。

表 2.11 多平台定位技術之演算法架構比較

	鬆耦合(Loosely Couple)	緊耦合(Tightly Couple)
卡曼濾波器/平滑器數量	2 個	1 個
觀測量輸入	GNSS 速度與位置解；INS 之原始觀測量，輪速計速度，氣壓高度，GNSS 航向儀	GNSS 與 INS 原始觀測量，輪速計速度，氣壓高度，GNSS 航向儀
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 目前為最常使用方法</li> <li>■ 具有適應性的模組結合</li> <li>■ 適合平行處理，具可靠性</li> <li>■ 架構簡單</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 最佳化的設計</li> <li>■ 具備單顆衛星定位定向能力</li> <li>■ INS 輔助解算 GNSS 週波未定值</li> <li>■ 5 秒鎖定衛星之能力</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 次佳化的設計</li> <li>■ 衛星顆數至少需 4 顆</li> <li>■ INS 資料並不用來輔助解算 GNSS 週波未定值</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 數學模式複雜</li> <li>■ 誤差狀態矩陣龐大</li> <li>■ 架構複雜</li> </ul>



圖 2.58 測試軌跡

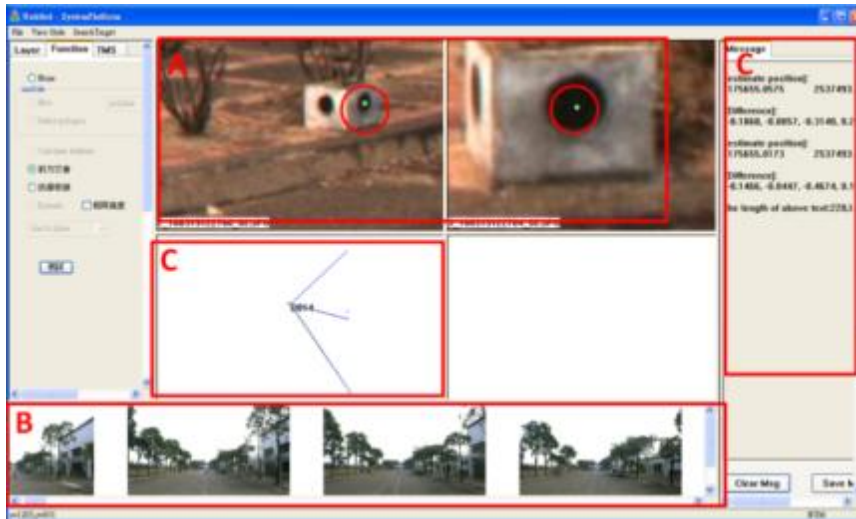


圖 2.59 直接定位量測範例

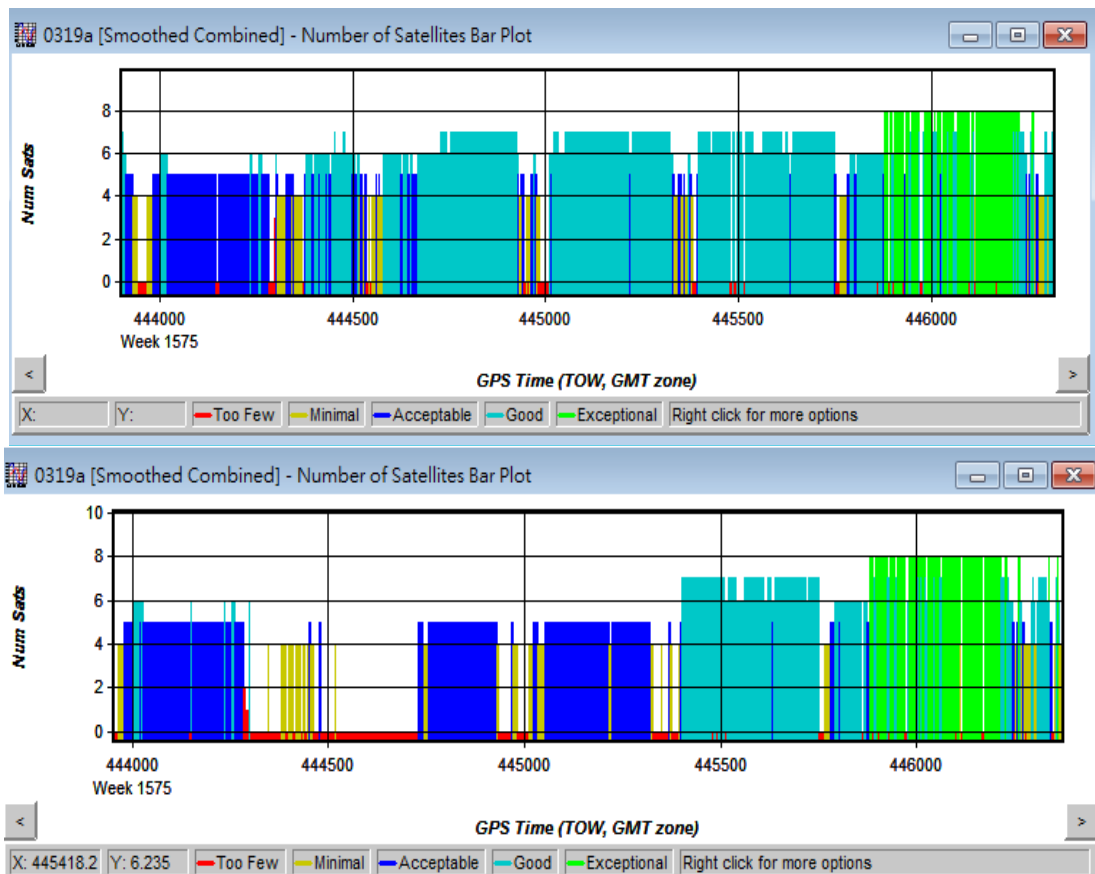


圖 2.60 (左)低仰角(右)高仰角 GPS 衛星數量

本節利用緊耦合直接定位演算法搭配輪速計在具備完整的 GNSS 衛星數量之環境下所計算得到的軌跡為參考軌跡。透過在模擬 GNSS 衛星訊號脫落環境下使用鬆耦合與緊耦合直接定位演算法之軌跡為測試軌跡(無輪速計)，將測試軌跡(含姿態)與參考軌跡比較以進行效益分析。此種利用較高精度參考軌跡配合模擬或真實的 GNSS 訊號脫

落期間測試系統所提供測試軌跡進行定位定向精度之測試程序為國外產學界公認的測試程序(Chiang, 2004; Shin,2005)。一般的測試程序可以搭配較測試系統等級更高的參考系統與透過更嚴謹的計算模式產生之動態軌跡進行效益分析；或者可以使用同一套系統但透過更嚴謹的計算模式產生之動態軌跡進行效益分析。故本次測試之參考軌跡與測試軌跡皆是使用 NovAtel SPAN-CPT(光纖陀螺儀, 飄儀穩定度 1 度/ 小時)，但採用不同的資料處理策略，這符合國際公認的定位定向系統動態測試程序(Chiang, 2004; Shin,2005)。

圖 2.61、圖 2.62、表 2.12 為不同直接定位技術 POS 解的定位及定向精度比較分析。一般來說，緊耦合直接定位演算法的效能相對於鬆耦合直接定位演算法更為穩定。由表 2.12 結果可知，當減少可視衛星數量時，緊耦合直接定位演算法分別可以提升水平與垂直定位精度達 80%與 50%。相較之下，緊耦合直接定位演算法姿態估計的精度在 GNSS 訊號脫落的環境下略優於鬆耦合直接定位演算法。

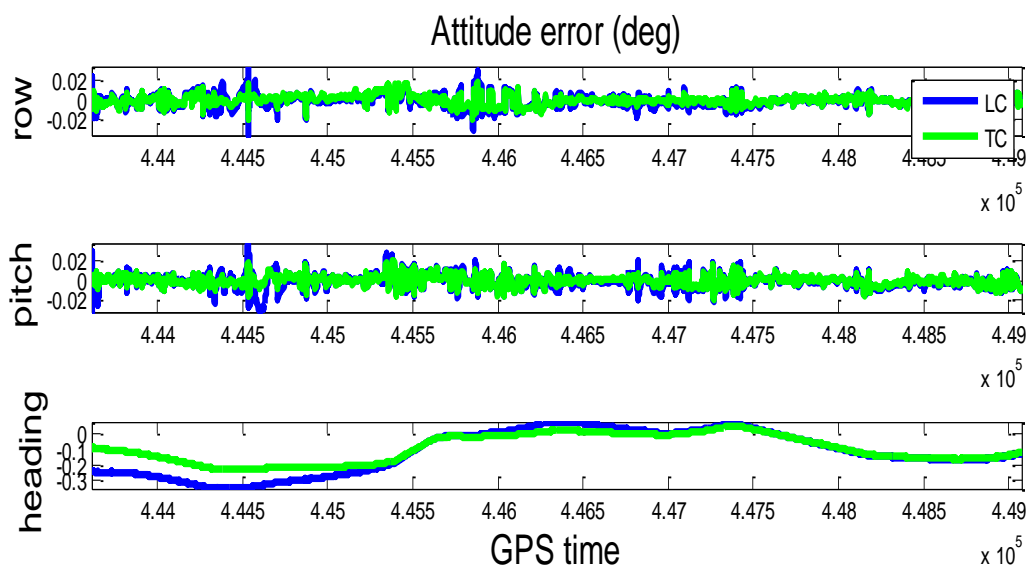


圖 2.61 不同直接定位演算法姿態誤差比較

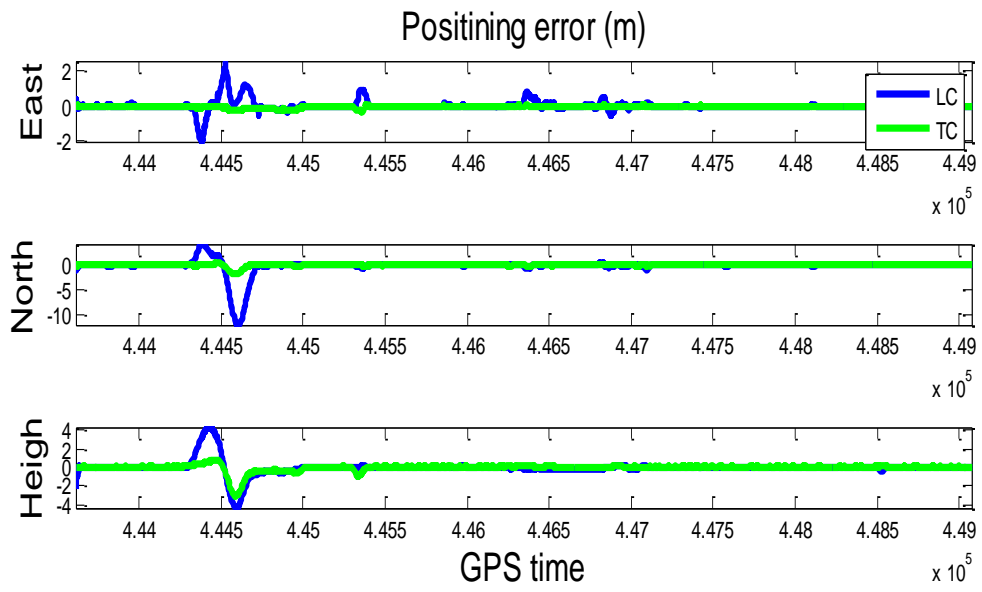


圖 2.62 不同直接定位演算法定位誤差比較

表 2.12 定位誤差的比較分析

	LC			TC		
	AVG	STD	RMS	AVG	STD	RMS
East (m)	0.031	0.293	0.293	-0.019	0.056	0.056
North(m)	-0.160	1.557	1.557	-0.021	0.205	0.205
Height(m)	-0.019	0.803	0.803	0.004	0.397	0.397
Roll (Deg)	-0.001	0.006	0.006	0.000	0.005	0.005
Pitch(Deg)	-0.001	0.007	0.007	0.000	0.005	0.005
Heading(Deg)	-0.118	0.139	0.090	-0.093	0.090	0.090

圖 2.63 與圖 2.64 表示利用上述在模擬 GNSS 衛星訊號脫落環境下使用鬆耦合與緊耦合直接定位演算法提供之定位定向解，匯入影像量測定位模組量測 40 個檢核點之物空間坐標，並與這些檢核點事先透過地測所獲得之高精度已知坐標比較進行分析。圖中紅色矩形表示模擬 GNSS 衛星訊號少於 4 顆所量測之檢核點，當衛星可視數量小於 4 顆時，鬆耦合直接定位演算法的定位精度快速降低，如圖 2.63 所示。而緊耦合直接定位演算法的檢核點定位精度相較之下則穩定許多，如圖 2.64 所示。

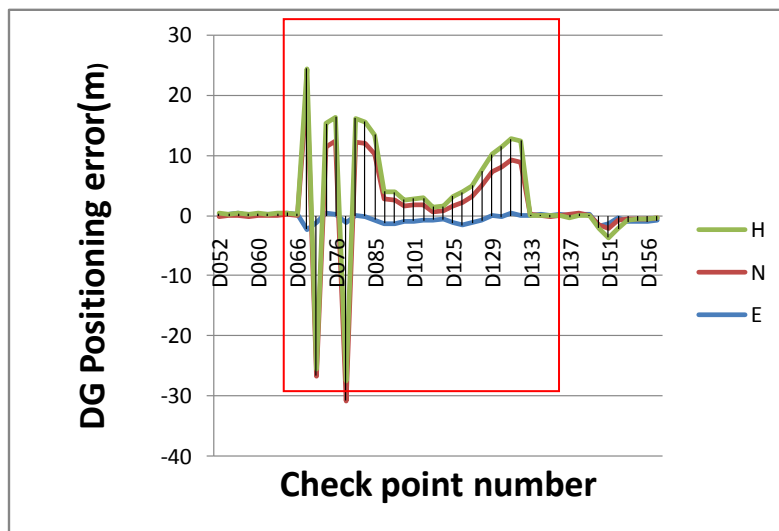


圖 2.63 鬆耦合應用於直接地理定位的定位誤差



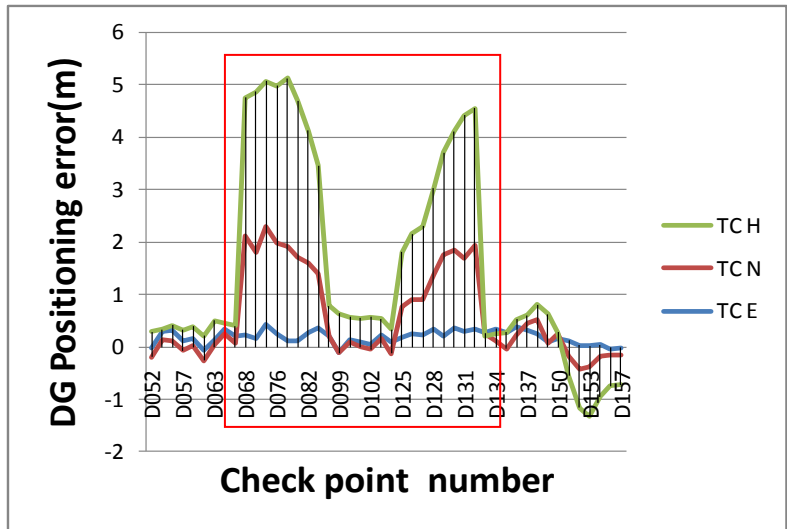


圖 2.64 緊耦合應用於直接地理定位的定位誤差

表 2.13 所示為不同的可視衛星數量時，包含完整的衛星可視數量(多於 4 顆)與少於 4 顆，緊耦合與鬆耦合直接定位演算法應用於直接地理定位的誤差分析比較。如表 2.13 所示，當衛星數量大於 4 顆時，鬆耦合與緊耦合直接定位演算法的成果並無太大的差別，然而當衛星數量小於 4 顆時，緊耦合系統的影響特徵點直接定位之三維定位精度，相較於鬆耦合系統改善 80%左右。根據初步實驗的結果，當 GNSS 接收訊號處於不佳的環境時，如高樓大廈林立的都市，緊耦合直接定位演算法能夠提供更可靠且穩定的成果。

表 2.13 DG 的誤差分析比較

		LC (m)			TC (m)		
		E	N	H	E	N	H
Full NVS	AVG	0.015	0.011	0.027	0.006	0.004	0.026
	STD	0.122	0.105	0.163	0.080	0.068	0.161
	RMS	0.076	0.106	0.117	0.074	0.066	0.144
	2D	0.130			0.099		
	3D	0.176			0.173		
NVS<4	AVG	-0.431	2.026	1.1643	0.185	0.390	0.912
	STD	0.693	8.129	1.553	0.133	0.768	1.176
	RMS	0.810	8.292	1.927	0.229	0.854	1.478
	2D	8.330			0.885		
	3D	8.551			1.722		

## 2.5 現有多平台定位技術自我檢核機制

直接定位模組進行影像處理之過程包含 GNSS 定位、INS 位置/姿態、系統率定、相機精度、拍攝影像幾何關係等。因此，設計之模組的觀測量誤差及系統誤差可用來評估三維定位精度。下述為一階誤差分析公式：

$$\begin{aligned}\delta r_i^m = & \delta r_{INS}^m(t) + \delta R_b^m(t) \cdot (S^i \cdot R_S^m \cdot r^S + a^b) + \\ & R_b^m(t) \cdot (S^i \cdot \delta R_S^m \cdot r^S + \delta a^b) + \\ & R_b^m(t) \cdot (\delta S^i \cdot R_S^m \cdot r^S + S^i \cdot R_S^m \cdot \delta r^S) + (V + \omega) \cdot \delta T\end{aligned}\tag{2.1}$$

上述公式包含 INS/GNSS 定位誤差、INS 定位誤差、率定誤差、目標物位置及幾何誤差、同步化誤差，此五種主要的誤差將影響後續計算三維直接定位的精度。詳細公式說明請參考文獻 El-Sheimy et. al. (1995)與 Schwarz 和 El-Sheimy (1996)。

### ■ INS/GNSS 誤差

整合 INS/GNSS 系統內各自系統存在的誤差與剩餘誤差於更新時造成的影響量將決定 POS 系統的精度。圖 2.65 所示為當基線長為 20 公里時，INS/GNSS 的定位誤差成果。圖中所示，實驗過程可視衛星數目為 5 顆，定位誤差為 10 公分等級，均方根誤差為 7 公分。當衛星失鎖或缺乏零速更新(ZUPT)時，INS 系統將獨立運作，由於 INS 系統特性，誤差將快速累積。當重新取得衛星訊號時，INS 可幫助 GNSS 重新計算得相位未定值。

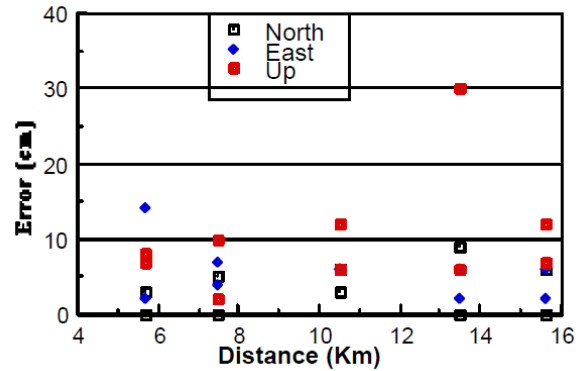


圖 2.65 GPS/INS 定位誤差(摘自 El-Sheimy, 1996)

當 INS 獨立運作時，INS 誤差來自於初始位置誤差、初始速度誤差、初始姿態誤差、陀螺儀飄移、加速度計偏差等。由於這些誤差的來源，INS 運算結果包含了(1)長期誤差，稱之為舒勒震盪(Schuler oscillations)，週期約為 84.4 分鐘，詳情請參閱文獻 Britting (1971)；(2)短期誤差，約為 20 到 30 秒。一般 INS /GNSS 定位誤差約為 5 公分(週波未定值已知)，速度誤差為 2 公分/秒(二次差分成果)，未模式化的加速度計偏差可達到 10 到 20 mGal，未模式化的初始姿態為 10 arcsec，INS 系統在獨自運作的環境於 20 秒將累積到 57 公分的誤差。式 2.2 為 INS 系定位誤差公式：

$$\delta P_{t_2} = \delta P_{t_1} + \delta V_{t_1} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \delta a_{t_1} \cdot (t_2 - t_1)^2 + \delta \varepsilon \quad (2.2)$$

其中， $\delta P_{t_1}$  為時間  $t_1$  的位置誤差

$\delta P_{t_2}$  為時間  $t_2$  的位置誤差

$\delta V_{t_1}$  為時間  $t_1$  的速度誤差

$\delta a_{t_1}$  為時間  $t_1$  的加速度偏差誤差

$\delta \varepsilon$  為平台的初始姿態誤差

INS 系統計算更新時會受到 GNSS 誤差來源的影響。由於 GNSS 為時間獨立運作的系統，不同於 INS 需要其他資訊協助運作，因此沒有上述 INS 的誤差。而 GNSS 的誤差包含(1)多路徑效應，當系統在動態模式情況時常被忽略，其誤差約為公分等級；(2)恆定偏差，主

要來自於初始週波未定時之系統偏差。靜態初始化時間長短、基線長度、電離層活動影響等都會影響 GNSS 的恆定偏差值。當基線長短於 7 公里，觀測時間 20 分鐘，其偏差量約為±5 公分。若考慮太陽活動與長基線，其影響恆定偏差值將會更大；(3)相位觀測量雜訊，來自於電離層活動及高速動態運作下的影響，詳細內容請參考文獻 Zhang (1995)。

## ■ 率定誤差

相機率定的目的主要為瞭解該鏡頭之透鏡畸變模式、焦距與像主點等內方位參數，以便在進行三維坐標量測時可自動修正其系統性誤差。由於所使用之數位相機並沒有框標可以決定影像坐標，且數位相機之 CCD 是使用高精密的次微米半導體科技所製作，其像平面影像坐標的定義及平坦性較底片穩定且一致。因此可採用附加參數自率光束法平差進行相機率定，也就是將內方位參數變當作附加參數來求解。如公式 2.3、2.4 所示為中心透視投影之共線條件式，其中  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  之目的即是用以補償透鏡畸變之附加參數。

$$x_a = x_p - c \frac{r_{11}(x_A - x_O) + r_{12}(y_A - y_O) + r_{13}(z_A - z_O)}{r_{21}(x_A - x_O) + r_{22}(y_A - y_O) + r_{23}(z_A - z_O)} + \Delta x \quad (2.3)$$

$$y_a = y_p - c \frac{r_{21}(x_A - x_O) + r_{22}(y_A - y_O) + r_{23}(z_A - z_O)}{r_{31}(x_A - x_O) + r_{32}(y_A - y_O) + r_{33}(z_A - z_O)} + \Delta y \quad (2.4)$$

而固定臂(lever arm)與軸角(boresight)率定，即 INS 中心、GNSS 天線中心、相機透視投影中心之間的相對偏移量及三軸的偏差量，其偏移量將會影響後續定位的精度。首先針對地面控制點進行拍攝，並量測所有率定用影像間之連結點，透過光束法平差求解得影像之外方位參數，再與經線性內插之 INS/GNSS 定位定向成果比較，最後計算兩者之位置及姿態平均差異量後完成率定。以下為線性內插之公式：

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2.5)$$

其中， $x$  為影像攝影瞬刻記錄至 100nsec 之時鐘卡時間資訊。

$y$  為該影像拍攝瞬刻待求之 INS/GNSS 定位定向位置、姿態資訊。

$x_0$  為小於並最接近該影像拍攝瞬刻 INS/GNSS 位置、姿態資訊之時間。

$y_0$  為小於並最接近該影像拍攝瞬刻 INS/GNSS 位置、姿態資

訊。

$x_1$  為大於並最接近該影像拍攝時刻 INS/GNSS 位置、姿態資訊之時間。

$y_1$  為大於並最接近該影像拍攝時刻 INS/GNSS 位置、姿態資訊。

利用軟體利用人工量測連結點及核線檢核等功能進行像點量測提昇像點量測精度，並進行光束法平差求解，達成良好的外方位參數成果，而後便得以進行感測器間相對關係的求解。

在固定臂率定方面，每一幅影像在光束法平差後即可獲得相機透視中心在物空間坐標框架之位置向量( $r_c^M$ )，同時透過 INS/GNSS 感測器，經內插可以得到 INS/GNSS 中心在該攝影瞬刻下之物空間坐標系位置向量( $r_{INS/GNSS}^M$ )，因此依照下式求解固定臂( $r_{INS/GNSS\_c}^b$ )。

$$r_{INS/GNSS\_c}^b = R_M^b(r_c^M - r_{INS/GNSS}^M) \quad (2.6)$$

在相機之軸角率定方面，每一幅影像都可以透過光束法平差成果得到相機與物空間坐標框架間之旋轉矩陣( $R_M^c$ )，同一時間也透過 INS/GNSS 及內插程式求得 INS/GNSS 在該攝影瞬刻下相對於物空間坐標系統之旋轉矩陣( $R_M^b$ )，因此相機相對於 INS 之旋轉矩陣即可利用下式求解而得。

$$R_c^b = R_M^b(R_M^c)^{-1} \quad (2.7)$$

由上述公式可知光束法平差成果與 INS/GNSS 之定向定位精度將間接影響到後續直接定位的精度，因此良好的地面控制場之控制點分布與精度、外方位解算時的近景攝影網型幾何及 GNSS 之觀測品質(訊號遮蔽或者多路徑效應等現象)，才能確保率定成果之精度。

## ■ 同步化誤差

由於我們每個感測器間的震盪器頻率不同，儀器規格也不同，使得其採樣頻率上難以一致(如 100Hz 的 IMU 與每秒可拍攝 14 張的影像感測器)，因此資料匹配便是一個重要的議題，以電腦內部軟體比對的方式並不是一個太好的作法，當電腦同時執行許多程式時，並非同時處理，而是存在先執行與後執行的問題，這樣的情形將造成執行上的延遲，也就是所謂的執行權限的問題，假如我們不處理這些問題，那麼資料的同步誤差將是影響移動遙測製圖系統的重要因素。

透過 GNSS 時鐘卡，以穩定每秒 1 脈衝的 GNSS 訊號作為時間起始，秒間則以時鐘卡之震盪器進行時間區分作為其他感測器的比對參考，這樣一來就可以知道感測器訊號位於 GNSS 第幾秒訊號的脈衝下的第幾個時間區分，最後由接收之導航訊息便可得到絕對之協調世界時(Coordinated Universal Time, UTC)，這樣一來便可以與其他感測器資料進行比對，內插得出其相應的資料，例如我們影像拍攝時刻的 INS/GNSS 位置及姿態資料，這樣的一個能力，便滿足移動遙測製圖系統的直接定位需求。圖 2.66 所示為時鐘卡概念說明，圖 2.67 為硬體設計的概念圖。

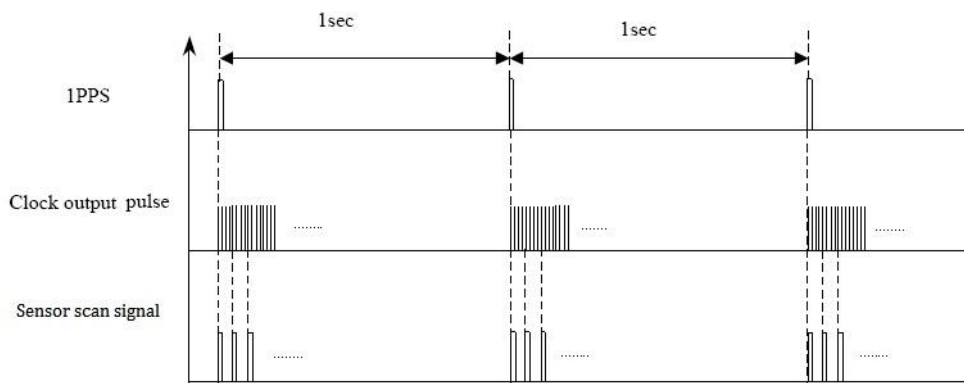


圖 2.66 時鐘卡概念

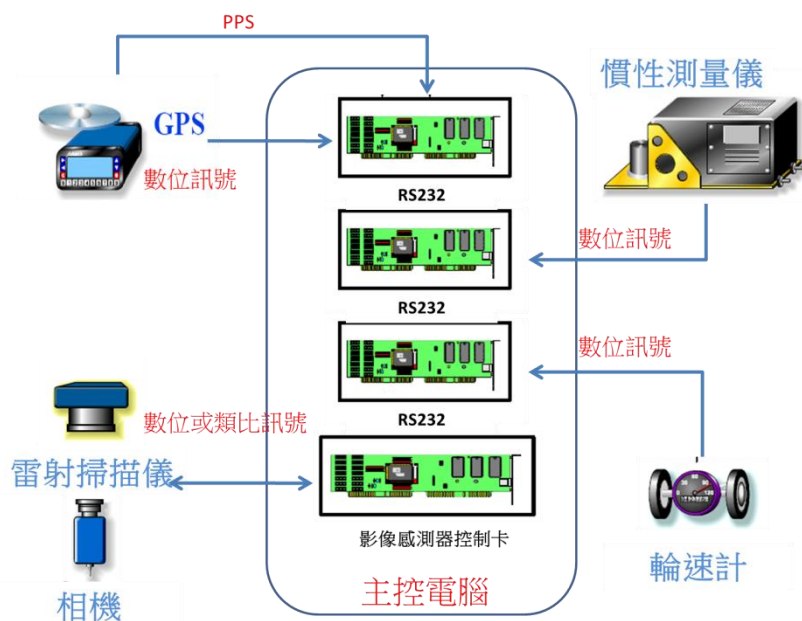


圖 2.67 系統硬體設計概念圖

根據上述不同的誤差來源整理如表 2.14 所示，表 2.14 所示為不同誤差來源所造成的影響量。由表中可知，除了因目標物位置與幾合位置不佳所產生的誤差  $\delta S^i$ ，為縱向(along-track)方向的誤差影響較大外，其他系統所產生的誤差皆小於 10 公分。因此可經由此誤差表格



訂定成果自我檢核機制，做為系統評估的標準。

#### ■ 直接定位技術之自我檢核機制

自我檢核機制(Quality Control, QC)為系統發生 GNSS 週波脫落、GNSS 訊號斷訊、INS 飄移造成的誤差累積等情況時，利用警告系統所訂定合理的誤差範圍，做為平台定位技術自我檢核方法。由表 2.14 所示可知，當系統運作時所儲存的 INS/GNSS 等不同感測器資料，經過計算後有多少比例的資料達到合理的精度範圍，驗證系統是否正常運作，例如後處理的軌跡有 98%的資料標準差小於 30 公分，即代表資料檢核合格。

表 2.14 所示為當衛星覆蓋完整且訊號接收良好時可達到上述精度，但現實可能因市區高樓遮蔽或干擾造成衛星分佈幾合不佳、訊號中斷、週波脫落等情況，自我檢核機制主要應用於上述 GNSS 接收不良的情況。因此當 GNSS 定位精度超出特定情況時，檢測系統即時將此狀況回報提醒使用者，協助因應的對策。當完成任務後，將針對檢核機制技術提供的訊息進行討論，再進行後續後處理平滑化計算等程序。

表 2.14 誤差來源與大小(El-Sheimy, 1996)

誤差來源	預估大小	對 $\delta r_i^m$ 影響	特性
INS/GNSS 位置誤差	5-10 公分	5-10 公分	對於同一張影像上的任意點，誤差影響皆一致。
INS/GNSS 姿態誤差	1-5 arcminutes	實際距離 30 公尺時存在 1-4 公分的影響	相機與物體之間的距離方程式。
率定誤差 $\delta R_s^b$	1-3 arcminutes	實際距離 30 公尺時存在 1-2.5 公分的影響。	相機與物體之間的距離將影響三維坐標精度，其誤差值為一常數。
率定誤差 $\delta a^b$	0.1-0.3 公分	實際距離 30 公尺時存在 2-6 公分的影響。	取決於相機的三維配置，關鍵點在於相機基座的製作
目標物位置與幾合誤差 $\delta r^s$	0.5 pixel	實際距離 7 公尺時存在 0.5 公分的影響。 實際距離 30 公尺時存在 2.5 公分的影響。	取決於相機的三維配置，導致橫向 (across-track) 誤差。

目標物位置與幾合誤差 $\delta S^i$	0.5 pixel	實際距離 7 公尺時存在 2.5 公分的影響。 實際距離 30 公尺時存在 16 公分的影響。	取決於相機的三維配置，其說明關於縱向誤差，關鍵點在於相機基座的製作。
同步誤差 $V\delta T$	1-2 msec	當時速 60 公里時存在 1.8-3.6 公分的影響。	其引入縱向誤差，可藉由時鐘卡降低其誤差。
同步誤差 $\omega\delta T$	1-2 msec	當 $\omega$ 為每秒 30 度時存在 1.8-3.6 acrmin 的影響(實際距離 30 公尺時存在 1.5-3 公分的影響)。	其說明關於橫向誤差，為相機與物體的距離誤差大小方程式。

針對較差的衛星幾何分佈情況，若其僅增加了 GNSS 的雜訊，那麼影響的程度並不大。若是考慮整合 GNSS 與 INS，並給予適當的權重值，也可減緩因 GNSS 分佈不佳所造成的定位精度降低。目前較常利用 INS 的零速更新方式，維持 GNSS 的位置精度。因此可藉由 DOP(Dilution Of Precision)值的利用，即時監測衛星幾何情況，當精度降低時，可給予適當的警訊。

週波未定值檢測方式為利用 INS 提供的坐標預測 GNSS 相位觀測量三次差分成果，其為一近即時的計算方式，藉由三次差分預測與觀測值進行比較，計算得週波脫落值，公式如式(2.8)所示，詳細說明請參考文獻 Schwarz et. al. (1994)。

$$v = \delta \nabla \Delta \varphi_{\text{predicted}} - \delta \nabla \Delta \varphi_{\text{measured}}$$

$$\delta \nabla \Delta \varphi_{\text{predicted}} = \nabla \Delta \rho(t) - \nabla \Delta \rho(t-1) \quad (2.8)$$

$$\delta \nabla \Delta \varphi_{\text{measured}} = \nabla \Delta \varphi(t) - \nabla \Delta \varphi(t-1)$$

其中， $t$  為現在時刻。

$t-1$  為前一個時刻。

$\nabla \Delta \rho$  為 INS 的預測坐標計算得到的二次差分範圍。

$\nabla \Delta \varphi$  為 GNSS 相位觀測量計算得到的相位二次差成果。

而關於 INS 資料處理部分，一般是用預測方法進行計算，即濾波器利用 INS 觀測資料預測下一時刻的位置。而卡曼濾波器的狀態數量、資料計算量、與誤差累積情況受限於 INS 等級的好壞。例如針於導航等級的系統，若失去 GNSS 訊號的時間間隔約為 20~30 秒，誤差將快速累積。但若將預測結果與平滑化後的成果做整合，定位定向誤差將可降低，如圖 2.68 所示。圖中成果所示，使用前向或後向濾波預測方式，誤差將隨時間快速累積，而平滑化成果中間部分誤差較大，但仍小於前向與後向濾波的誤差值。詳細介紹可參考文獻 Lapucha (1990)與 Cannon (1991)。

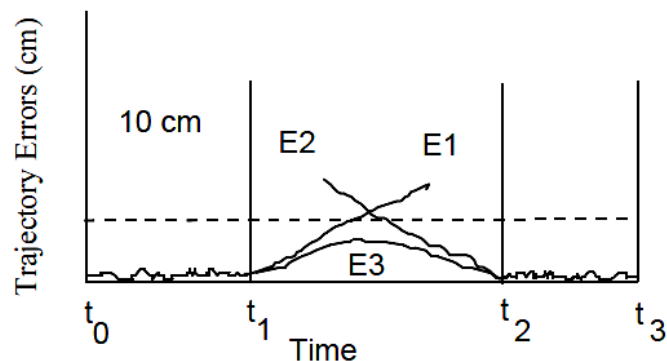


圖 2.68 前向濾波、後向濾波與平滑化誤差累積情況(El-Sheimy, 1996)

自我檢核機制可在系統運作時，透過監控 GNSS 與 INS 資料的正確性、每顆衛星訊號是否中斷、INS 誤差累積情形等，適時警告使用者系統是否有錯誤的發生。在這種情況下，可利用車輛停止時所提供的零速更新、輪速計資料、或額外可幫助整合系統的資訊，提供系統任務時正確的位置軌跡精度成果，避免錯誤的發生。

#### ■ 影像量測及率定之自我檢核機制

直接地理定位的關鍵為，假設系統率定參數於任務運作時為一常數，其率定參數包含 IMU/GNSS 與 IMU/相機感測器的固定臂補償、軸角率定、相機內方位幾合、當地坐標基準平移等。過去許多文獻介紹地面與空中率定(Ellum et al, 2003; Hinsken et al, 2002; Mostafa, 2002; Greening, 2000)，透過上述文獻可率定出軸角與相機參數，應用於後續直接定位，但仍有不足之處，因此需利用自我檢核機制做為影像率定考量。以下為自我檢核機制流程整理：

#### ■ 直接地理定位系統剩餘誤差最小化，包含軸角與相機參數

- 透過多餘的軸角值與檢核點(check point)驗證直接定位系統
- 偵測率定誤差，包含 IMU/影像感測器的固定臂與系統同步問題
- 當自我檢核區域內存在已知地面控制點時，偵測出錯誤的基站坐標及當地基準平移誤差

自我檢核機制的數學模式與空載系統率定流程有許多相似之處 (Mostafa, 2002; Greening, 2000; Ellum et al, 2003)，其概念主要來自於空載平台 GPS/IMU 的率定及光束法平差解算。系統在擁有足夠的地面控制點區域進行觀測，根據近景攝影測量原理構成多個共線條件觀測方程，以光束法平差求解影像外方位參數，比對定位及導航系統結果得出差值即為率定之成果；或將軸角及固定臂參數結合近景之共線條件觀測方程，以整體光束法平差求解得軸角及固定臂參數達成率定目的。對於空載系統率定，軸角及固定臂參數率定對於相對定位精度影響相當的大。其他系統參數如 IMU/影像感測器的固定臂及各系統同步化也可被精確的率定出來，同時對於地面控制點及基站坐標位置皆有嚴格的控管。因此經由自我檢核重新計算取得系統與任務精確的參數後，可用來計算得新的外方位參數，而計算的重點取決於系統參數的穩定性、資料的連續性、影像的品質好壞。圖 2.69 所示為自我檢核機制與整合式感測器定向(ISO)流程比較圖。此種程序適用於空載、車載與個人攜型移動遙測製圖系統。

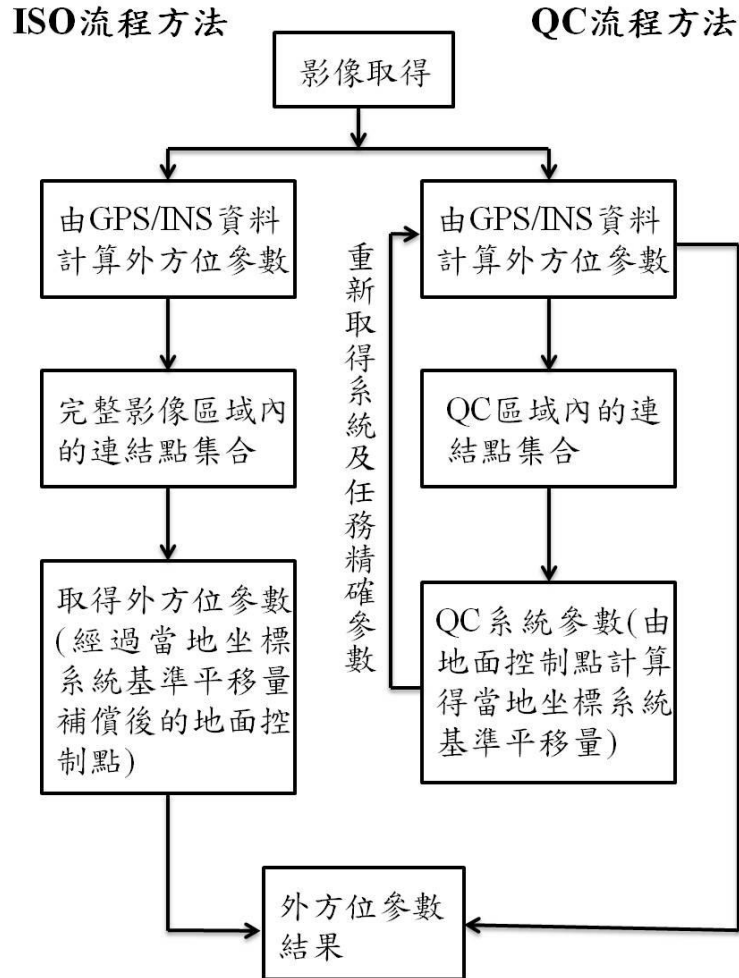


圖 2.69 QC 與 ISO 流程比較

處理影像資料時，資料匹配自動化、計算取得成果可以減少影像量測所需的時間，節省大量人力。以下說明為利用匹配法，計算得兩張連續拍攝重疊的影像時相機的幾合關係。如圖 2.70 所示為兩張立體像片拍攝相機  $i$  與  $j$  的透視投影中心  $C_i$  與  $C_j$  的核幾合(Epipolar geometry)關係，由物空間的點  $P$  與透視投影中心  $C_i$  與  $C_j$  可決定一核面(Epipolar plane)，影像中共軛點的連線延伸為核線(Epipolar line)，如圖中  $L_i$  與  $L_j$  所示， $P_i$  與  $P_j$  必定位於核線上。核幾合的好處為可藉由一維核線表示二維資訊，詳細內容可參考文獻 Zhang (1988)與 Yan and Zuxun (1988)。



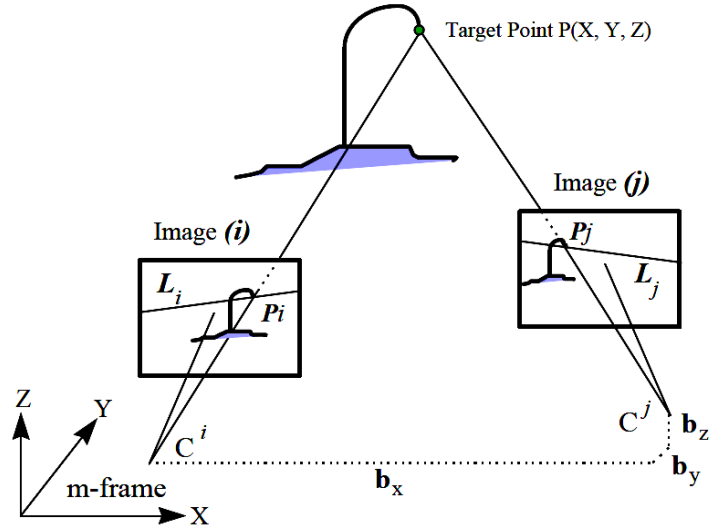


圖 2.70 核幾合關係

推導核線方程式的基本為共面式條件，其概念為相對應的物點、像點、相機透視投影中心的連線光束皆共面。影像(i)的共面條件方程式如下：

$$\begin{vmatrix} b_x^{C_i} & b_y^{C_i} & b_z^{C_i} \\ \bar{x}_{P_i}^{C_i} & \bar{y}_{P_i}^{C_i} & -f^{C_i} \\ \bar{x}^{C_i} & \bar{y}^{C_i} & -f^{C_i} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.9)$$

其中， $\begin{bmatrix} b_x^{C_i} \\ b_y^{C_i} \\ b_z^{C_i} \end{bmatrix} = R_m^{C_i} \cdot \begin{bmatrix} b_x^m \\ b_y^m \\ b_z^m \end{bmatrix}$ ，為相機 i 坐標系統的基底向量。

$\begin{bmatrix} b_x^m \\ b_y^m \\ b_z^m \end{bmatrix}$  為立體像對 i 與 j 於 m-frame 的基底向量。

$R_m^{C_i}$  為相機 i 於 m-frame 與 c-frame 之間的坐標旋轉矩陣。

$f^{C_i}$  為相機  $C_i$  的焦距長。

$\bar{x}^{C_i}$  與  $\bar{y}^{C_i}$  為核線  $L_i$  上任意點的影像坐標。

$\bar{x}_{P_i}^{C_i}$  與  $\bar{y}_{P_i}^{C_i}$  為量測核線  $L_i$  上點 P 的影像坐標。

式(2.9)中的核線  $L_i$  可改寫如下式：

$$\bar{y}^{Cj} = \frac{f^{Cj} b_x^{Cj} + \bar{x}_{Pi}^{Cj} b_z^{Cj}}{f^{Cj} b_x^{Cj} + \bar{x}_{Pi}^{Cj} b_z^{Cj}} \bar{x}^{Cj} + \frac{\bar{y}_{Pi}^{Cj} b_x^{Cj} - \bar{x}_{Pi}^{Cj} b_y^{Cj}}{f^{Cj} b_x^{Cj} + \bar{x}_{Pi}^{Cj} b_z^{Cj}} f^{Cj} \quad (2.10)$$

同理，相機 j 可寫如下式：

$$\begin{vmatrix} b_x^{Cj} & b_y^{Cj} & b_z^{Cj} \\ x_{Pi}^{Cj} & y_{Pi}^{Cj} & z_{Pi}^{Cj} \\ \bar{x}^{Cj} & \bar{y}^{Cj} & -f^{Cj} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.11)$$

其中， $\begin{bmatrix} x_{Pi}^{Cj} \\ y_{Pi}^{Cj} \\ z_{Pi}^{Cj} \end{bmatrix} = R_{Ci}^{Cj} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{Pi}^{Cj} \\ \bar{y}_{Pi}^{Cj} \\ -f^{Cj} \end{bmatrix}$ ，為像點 Pi 於相機 Cj 坐標系統的坐標。

核線 Lj 可寫如下式：

$$\bar{y}^{Cj} = \frac{y_{Pi}^{Cj} b_z^{Cj} - z_{Pi}^{Cj} b_y^{Cj}}{x_{Pi}^{Cj} b_z^{Cj} - z_{Pi}^{Cj} b_x^{Cj}} \bar{x}^{Cj} + \frac{y_{Pi}^{Cj} b_x^{Cj} - x_{Pi}^{Cj} b_y^{Cj}}{x_{Pi}^{Cj} b_z^{Cj} - z_{Pi}^{Cj} b_x^{Cj}} f^{Cj} \quad (2.12)$$

#### ■ 自我檢核機制應用於多平台系統

因此將自我檢核機制應用於測繪車上的直接定位應用，可確保定位精度的優劣，提升定位解的品質。針對車載平台上相機相對方位約制條件，需固定相機與穩固的平台上，因此可率定得到各相機的相對位置及拍攝方向，當進一步做各相片相對方位之核幾何計算，可減少核線單窗搜尋的時間。而物空間幾何約制條件，任何物空間的點位也可當作附加約制條件，常見的如建物的垂直或水平的線段，其約制方程式為  $X_j - X_j = Y_j - Y_j = 0$ 。平行線段可提供可靠的方向約制條件，做為 INS 系統姿態資訊參考。相關線段萃取自動化請參考文獻 Xin (1995)。

而現有的影像處理流程之自我成果檢核涵蓋航空攝影、控制測量、空中三角測量、立體測圖、正射影像、地形測繪及等多個工作流程之，如表 2.15 所示。

而未來使用整合 INS/GNSS 資料對於影像空三解算，有很大的幫助。但理論上，當 GNSS 發生斷訊時，地理定位成果將會降低，因此

可透過上所述的檢核機制與約制條件，幫助提升未來直接定位應用的精度。

表 2.15 現有影像處理流程之自我成果檢核

工作流程	資料	檢核項目
航空攝影	航空像片(影像)	影像比例尺、重疊度、影像品質
控制測量	控制點成果	平差計算成果表、相對誤差橢圓精度
空中三角測量作業	航測控制點	使用控制點分布、空三平差殘差
	空三平差報告	多餘觀測數、中誤差、空三點殘差
	航測檢核點	空三和影像特徵點之坐標差
立體測圖	圖檔	精度查核、地物完整性檢核
正射影像	正射影像	地形圖套疊檢核、接邊檢核、色調檢核、具高差地物之檢核
地形測繪	DEM/DSM	資料完整性、接邊檢核、DEM 與 DSM 差值之合理性

## 2.6 國內外多平台定位作業及驗收規範

目前國外並無針對多平台直接定位技術作業量身打造之驗收規範與法令規定(Gajdamowicz, 2011)，因此國內目前使用的作業規範訂定方式為，針對不同要求，如測製數值像片基本圖、不同比例尺數值航測地形圖、光達技術等，訂定各測繪製圖作業標準，有效管制並確保成果品質。以下所示為蒐集部分國內相關作業規範。未來可針對多平台所搭載的儀器等級，依儀器規格訂定不同比例尺、各種測繪作業規範，制定標準程序與精度要求等相關事宜。

1. 內政部基本圖測製規範(草案)。
2. 建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊(草案)。
3. 通用版電子地圖品質檢核作業規範。
4. 內政部LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序(草案)。

據此本項工作歸納上述規範中與定位及驗收相關之項目，並分類如下，包括比例尺、地面控制測量、空三平差、成圖精度檢核。

## (1) 比例尺

基本圖	1:5000
一千分之一數值航測地形圖	1:1000
通用版電子地圖	無
LiDAR 測製 DEM & DSM	無

## (2) 地面控制測量

基本圖	<p>航測控制點應優先使用測區內現有之已知控制點(一、二、三等衛星控制點、一等水準點)，選擇位置符合空中三角測量控制點需求，且透空度良好之點位，並於航空攝影前在點位上設置對空標誌(以下簡稱空標)，做為空中三角測量控制之用。航測控制點之分布，應適合空中三角區域平差之要求，原則如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 採用衛星定位測量(GPS)輔助空中三角測量時，測區四角各布設一組 2 個全控制點，並於測區首尾(航線端處)布設橫貫測區的高程控制鍊，除測區左右側邊外，鍊上之高程控制點應位於航線重疊區內。高程控制鍊得以增加橫貫飛行航帶的方式取代，惟此作為高程控制之橫貫航帶內，每片 9 個標準點位中，至少有 5 個必須與原測圖用航帶連結。除布設控制點外，測區中央尚必須均勻測設 5 個以上檢核點，供驗證空中三角測量品質之用。</li> <li>2. 若採 GPS 及慣性測量元件(IMU)直接地理定位(Direct Geo-referencing)時，得省略前項之高程控制部分，僅於測區四角布設全控制點即可。但是檢核點部分仍然比照前項辦理。另外必須注意控制點高程為正高系統，而直接定位為幾何高者，必須使用內政部公告之大地起伏模式進行轉換，使空中三角測量之結果最終為正高系統。</li> <li>3. 未採用 GPS 輔助空中三角測量時，平面控制點應分布在測區(空中三角區域平差之測區)周圍界線上或界線附近，點與點之間隔約為 2 個航空攝影基線(基線長以 60%之重疊率為準計算)。高程控制點應成鍊狀分布，鍊之走向與航空攝影之航線大致成垂直方向，測區兩端應各測高程控制點 1 條，測區內部約每隔 5 個航空攝影基線應各測高程控制點 1 條。組成高程控制鍊之各點應選在相鄰航帶像片左右重疊範圍內。</li> </ol>
一千分之一數值航測地形圖	<p>(一) 航測控制點應優先使用測區內現有之已知控制點位(基本控制點、加密控制點、一等水準點等)，選擇位置符合空中三角測量控制點需求且透空度良好之點位，並於航空攝影前在點位上設置對空標誌(以下簡稱空標)，做為空中三角測量控制之用。</p> <p>(二) 航測控制點之分布，應適合空中三角區域平差之要求，原則同「基本圖測製規範」相關規定</p> <p>(三) 控制測量分為平面控制及高程控制 平面控制點依據內政部公告之基本控制點成果，以「基本測量實施規則」所規定之加密控制測量方法施測。高程控制點依據內政部公告之一等水準點成果，於平地採直接水準測量，於山區得採用間接高程測量或GPS施測。</p> <p>(四) 平面控制測量</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 為提供後續修測或其他測繪工作使用，平面控制點密度至少以10公頃設置1點均勻分布測區為原則，並以現有控制點位優先共用。控制點應至少可通視其他2個控制點，但因受地形限制須採點對方式布設者，其點對間之距離不得小於300公尺，並以3點兩兩通視為原則。若現有平面控制點不足，需選擇展望良好、各方向仰角15度以上無對空障礙物、地質穩固及可長期保持現狀且不易遭破壞之地點，埋設標石布設新增控制點。</li> <li>2. 如採用GPS方法，上開控制點避免設置於雷達站、微波站、電視轉播站、金屬結構物等易干擾衛星訊號之人工構造物附近。</li> </ol>

	<p>3. 平面控制測量需聯測測區內已知控制點，測量方法及成果精度應符合內政部「基本測量實施規則」加密控制測量相關規定。</p> <p>4. 採用GPS靜態測量方法，所有接收儀最少的連續且同步觀測時間大於(含)45分鐘，衛星訊號資料紀錄間隔為5秒，點位精度因子 (PDOP)最大值不得大於10，最少重覆觀測率新設點為20%、已知高程點為25%、已知平控點為10%，不同時段最少共同測站數2個，不同時段最少基線重複觀測率5%，重複觀測基線水平分量之差值不得超過 <math>30 + 6 \times 10^{-6} L</math> 毫米 (L為單一基線長度之公里數)。</p> <p>5. 相鄰點位間之相對誤差水平距離(經必要改正後)不大於二萬分之一或較差不大於2公分，水平角度不大於20秒。</p> <p>(五) 高程控制測量</p> <p>1. 高程控制測量方式採水準測量為原則，水準測量由已知高程控制點引測閉合至另一已知高程控制點，並施以往返觀測。象統誤差改正前每測段往返閉合差不得大於10公釐；K(K為單一測段長度之公里數)，象統誤差改正後閉合水準環線閉合差不得大於10公釐；F(F為水準環線長度之公里數)。</p> <p>2. 如因地形特殊(如山區)無法以水準測量施測者，始得採間接高程測量或GPS，其起點及末端必須附合至已知高程控制點上，測段距離超過500公尺時，應作大氣折光及地球曲率改正，閉合差不得大於7公分；N(N為所經邊數)。另採用GPS，應化算為正高，並於高程控制點成果表中註記。</p>
<p>通用版電子地圖</p>	<p>(一) 平面控制測量</p> <p>1. 主控制點(不含檢測合乎精度要求之已知點、衛星控制點或其它控制點等)應選擇通視良好，不易毀損之處。</p> <p>2. 控制點之選擇應沿測區計畫航線以間隔二至四基線為原則，於航線兩側佈設。全控或平面控制點沿測圖區之外緣佈設，高程控制點均勻分佈於測區內，以確保測區內之精度。</p> <p>3. 控制測量可採用經緯儀、電子測距儀、或衛星接收儀器等合併施測。</p> <p>4. 控制測量以衛星定位測量方式施測時，其相關規定詳見「衛星定位控制測量」。</p> <p>5. 控制網系進行自由網或最小約制平差計算時，其後驗單位權中誤差應小於1.5，否則應檢核估計觀測量中誤差是否合理或觀測量是否有錯誤。平差後對原觀測值中誤差之估計在邊長不得大於五公分，角度不得大於十秒，點位之絕對誤差橢圓之長軸不得大於十公分，相鄰點位間之相對誤差橢圓之長軸不得大於水平距離的一萬分之一。強制附合平差後，上述誤差之增加量不得超過上值之30%，否則應重新檢核已知控制點之正確性。</p> <p>(二) 高程控制測量</p> <p>1. 主水準路線沿測區附近主要道路為原則，約每五個基線距離佈設一水準點，水準路線不得迂迴，如遇寬闊河流繞越橋樑過遠時，得用渡河對向水準測量方法施測，由已知水準點引測閉合至另一已知水準點，並以往返觀測，水準測量使用附圓盒氣泡水準標尺及二等精密水準儀，前後視距應約略相等，且不得大於六十公尺，標尺讀數最低不得小於三十公分，並加讀視距，平差前各測段及累計測段閉合差不得大於<math>\pm 8\text{mm}\sqrt{k}</math>(k為公里數)。</p> <p>2. 高程控制水準網必須環環相連，以最小二乘法做整體嚴密平差，不可分段單線平差，先平差的先固定，後平差的強制附合於其上之方式平差計算。各觀測值必須依測線長短及使用之儀器給予適當之權數，平差後單位權中誤差應小於1.5mm及各測線改正數必須小於<math>\pm 8\text{mm}\sqrt{k}</math>(k為公里數)。強制附合平差後，上述誤差之增加量不得超過上值之30%，否則應重新檢核已知控制點之正確性。</p> <p>3. 高程控制網若採用三角高程測量時，垂直角觀測二測回，同站同日指標差不得超過二十秒，並以對向觀測。除起站及末端必須附合至水準點上外，測站數不可太多。單線式網系測站數不得超過五個，複式網系應使相對多餘觀測數勿小於0.2(對向觀測不算網系之多餘觀測)，平差前各高程差觀測值須先做大氣折光及地球曲率改正，各測段閉合差不得超過三角高程測量</p>



	<p>精度，平差後單位權中誤差應小於 1.5 cm。強制附合平差後，上述誤差之增加量不得超過上值之 30%，否則應重新檢核已知控制點之正確性。</p> <p>4. 高程控制網若採 GPS 高程測量時，相關規定詳見「衛星定位控制測量」。三角高程測量自一水準點閉合至另一水準點時，其閉合差界限如後：  A、平均邊長為 100 公尺時，閉合差應小於 <math>2\sqrt{N}</math> cm (N 為所經邊數)。  B、平均邊長為 300 公尺時，閉合差應小於 <math>5\sqrt{N}</math> cm。  C、平均邊長為 500 公尺時，閉合差應小於 <math>9\sqrt{N}</math> cm。  D、平均邊長為 1000 公尺時，閉合差應小於 <math>17\sqrt{N}</math> cm。  E、控制點之高程值若以衛星定位測量方式施測求得時，其成果應符合上述三角高程測量相關規定。</p> <p>(三) 衛星定位控制測量</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 採用內政部公告之 TWD97 二度分帶 TM 坐標系統，相鄰兩點之主控制點應儘量相互通視。</li> <li>2. 全球衛星定位控制測量採用之接收器應具備雙頻 P-CODE、載波相位及電碼等訊號接收處理能力。</li> <li>3. 靜態衛星定位測量，控制點至少應儘量在測區內外選擇適當數量之已知平面及高程控制點加以聯測，且聯成網狀，以相對定位靜態基線測量方式施測，即相鄰二測站各設置天線及接收器，同時接收仰角十五度以上之四顆以上及分佈良好(至少三顆衛星分別分佈於三個象限)之衛星訊號，接收衛星訊號時段長度至少 40 分鐘以上，時段中任一衛星有效觀測時間至少 15 分鐘以上，觀測後之點位精度因子值(PDOP)應小於 10。若點位有遮蔽情況(仰角超過 40 度時)或較難到達者，應酌量延長觀測時間。</li> <li>4. 靜態衛星定位測量，GPS 觀測視測區範圍的大小，必要時可實行分區觀測，當分區觀測時，兩觀測時段間相鄰分區間至少有二個(含)以上的共同點，不同時段間最少共同測站數至少二個，不同時段最少基線重覆觀測率至少 5%。</li> <li>5. GPS 接收器在開始觀測前，應進行熱機及靜置。每時段觀測前後應各量取天線高一次，兩次量測值之差不得大於 3mm，取平均值作為天線高。</li> <li>6. 觀測時應按規劃的時段進行作業，同步觀測同一組衛星。接收器啟動前與作業中，應隨時逐項填寫測量手簿。當經檢查所有規定作業項目均已完成，記錄與資料完整無誤，並符合要求，方可遷站。</li> <li>7. 所有觀測量必須經過週波脫落、對流層、電離層(單頻)修正處理，計算同一時段觀測值的數據剔除率應少於 10%，經基線計算、自由網形平差或最小約制平差計算後，基線相對中誤差應少於 <math>\sigma</math>，<math>\sigma</math> 為 <math>\sqrt{[100+(25 \times S)^2]}</math> 公釐，或基線改正數不得大於三倍相對中誤差，其中 S 為相鄰兩點間距離公里數(km)，重複觀測之基線重現性應小於接收器精度的 <math>2\sqrt{2}</math> 倍。若干個獨立觀測邊組成閉合環時，各點位坐標分量閉合差應小於 <math>3\sqrt{n} \times \sigma</math>，n 為閉合環中之邊數。</li> <li>8. 衛星定位控制測量點位坐標需分別以平面、高程平差計算至臺灣 TWD97 二度分帶 TM 坐標及一等水準系統上，成果應符合前述平面及間接高程控制測量精度要求。</li> </ol>
<p>LiDAR 測製 DEM &amp; DSM</p>	<p>地面控制與檢核點蒐集提供精度檢核之地面控制與檢核點，需在合理的面積或範圍內進行蒐集；而檢核作業依遮蔽物分區需選出代表性的地面測量檢核區域，包括：(1)裸露地 (2)植生地(3)林地 (4)密林地 (5)建物區等五種。檢核時應達圖幅數之 5%，而每幅圖應包含每種土地覆蓋分區至少各 20 個地面測量檢核點。而依不同土地覆蓋分區之點雲精度，地面檢核點允許在平坦坡度(坡度在 5 度以內)，且避開(離開)地形斷線特徵處 5 公尺以上。依上述評估規定地面檢測之點位土地覆蓋分區準則如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 裸露地：植被覆蓋極少，覆蓋率在 25% 以內。</li> <li>(2) 植生地：部分植被覆蓋，覆蓋率在 25% ~ 50%。</li> <li>(3) 林地：植被覆蓋多，覆蓋率在 50% ~ 75%。</li> <li>(4) 密林地：樹林濃密區，覆蓋率在 75% 以上。</li> <li>(5) 建物區：包含樓頂(學校樓頂)、大馬路、小馬路或空地。</li> </ol>

	每一個檢核點在 5 公尺 × 5 公尺範圍內，其地表覆蓋種類及坡度需一致；並現地情況採用全測站或 GPS 測量方式進行。而覆蓋率可由點雲穿透率求得。
--	--

### (3) 空中三角測量

基本圖	以光束法量測空中三角結點時，量測中誤差不得大於 10 微米，在坡度達 IV 級以上之山地或植被覆蓋達 IV 級之林地(坡度及植被覆蓋分級如附件 D)不得大於 15 微米。
一千分之一數值航測地形圖	<p>(一) 採用數值立體測圖儀或航測影像工作站量測空中三角連結點及設有空標之平面、高程控制點。</p> <p>(二) 以光束法量測空中三角連結點時，量測中誤差不得大於 10 微米，在坡度達 IV 級以上之山地或植被覆蓋達 IV 級之林地(坡度及植被覆蓋分級如附件 D)不得大於 15 微米。</p> <p>(三) 空中三角測量連結點分布</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 每片的 9 個標準位置上至少量測 2 個點，每一標準位置至少有一量測點與同航帶或相鄰航帶像片上共軛點相連，不同鄰片允許以不同量測點連結。惟連結相鄰航帶之連結點必須至少為 4 重點(4 光線束)。當航帶前後重疊大於標準的 60%(例如為 80% 或 90%)時，則相鄰航帶間之連結可以不必每片之每一標準位置都與相鄰航帶相連，而可減至以前後重疊率 60% 計算之基線距離內，至少有一連結點為原則。</li> <li>2. 如採影像匹配自動化量測空中三角連結點，得不以上述原則分析連結強度，惟其連結應符合標準，且相鄰航帶之間仍應達到以 60% 重疊率計算基線時，每一基線距離內至少有一 4 重以上點連結鄰航帶。</li> </ol> <p>(四) 空中三角測量平差計算，需分 2 個過程進行，先以最小約制(或自由網)平差，以進行粗差偵測並得到觀測值精度的估值，其觀測值之殘餘誤差均方根值不得大於 10 微米，在坡度達 IV 級以上之山地或植被覆蓋達 IV 級之林地不得大於 15 微米。其次進行強制附合至控制點上平差，其觀測值之殘餘誤差均方根值不得大於 12 微米，在坡度達 IV 級以上之山地或植被覆蓋達 IV 級之林地不得大於 18 微米。否則必須檢核控制點或另外選擇控制點。</p>
通用版電子地圖	<p>(一) 空中三角測量應利用數值航測影像工作站，量測已知控制點及待測點位之模型坐標或像片坐標。</p> <p>(二) 如採人工量測，則空中三角點像片連接點應分布每一像片九個標準點位上，每一個位置二個，即每一像片十八點，每一像對十二點為原則。空中三角平差偵錯後，每一標準點位至少留存一點與同航帶鄰片連結，每片每側至少有二點與鄰航帶連結。結點觀測值之局部多餘觀測數(<math>r_i</math>)應大於 0.2，空三平差後結點坐標驗後精度(中誤差<math>\sigma</math>)不低於 0.6m 為原則(水面及高山區除外)。如採影像自動匹配(自動化空中三角結點量測)，則不限制結點之連結方式，但平差後各像片外方位元素之驗後精度不得低於前述人工量測之標準。</p> <p>(三) 空中三角平差可採用光束法或獨立模型法計算，最小約制平差後所得之後驗觀測值中誤差，以光束法計算時不得超過十微米，以獨立模型法計算時，平面中誤差不得超過十五微米，高程中誤差不得超過二十微米。強制附合至地面控制點後，中誤之增加量不得超過上述值之百分之三十，否則應重新檢核地面控制點之正確性。</p>
LiDAR 測製 DEM & DSM	<p>依據本規範所訂的 DEM 等級 1B、2B 及 3B 產品必須經過航帶平差之作業流程，針對這兩種產品檢核其航帶平差的作業是否合乎作業標準。航帶平差檢核通過後才能進行數據的整合並進行點雲過濾工作。原則上採書面檢查，必要時可請作業單位補量共軛點或控制點，並重新計算。檢核工作應包含下列項目：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 共軛點位高程差量取方法：檢核其作業是否符合上一節所述之相對高程差量取方式。</li> <li>2. 共軛點分佈情形：檢核航帶重疊區是否每隔 5000 公尺就有一排共軛點，並需包含交叉航線。</li> <li>3. 平差計算結果：檢核單位權中誤差及改正數是否合乎精度要求</li> <li>4. 已知控制點：若採用加入已知控制點之約制，則須檢核整個作業區之控制</li> </ol>

	點分布，並須確認控制點之高程精度優於 10 公分。
--	---------------------------

#### (4) 成圖精度檢核

基本圖	於立體模型上檢查是否有缺漏的地物，並進行重複量測地物點平面位置及高程，地物點重複量測平面位置與原平面位置較差之均方根值不大於 2.5 公尺；地物點重複量測高程值與原高程值較差之均方根值不大於附件 D 所定高程中誤差允許值。
一千分之一數值航測地形圖	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由檢查員直接在立體模型上重複量測，並檢查與原繪製坐標之差值，差值達 5.3m (<math>3 \times 1.25m \times \sqrt{2}</math>)，即視為錯誤。</li> <li>2. 正射影像位於平坦地且表面無高差位移之明顯地物點，其位置中誤差應小於 50 公分，最大誤差應小於 2 公尺。相鄰圖幅正射影像之接邊應良好，無高差地物影像接邊相對移位應小於 50 公分。</li> <li>3. 每個立體模型採用像對基高比(B/H)不小於 0.3 之立體像對，以保障立體測圖精度。</li> <li>4. 模型縱視差需消除盡淨，控制點對點應正確，絕對方位完成後殘餘縱視差最大不得超過 20 微米，控制點之殘差不得超過 30 微米。</li> </ol>
通用版電子地圖	<p>向量資料之幾何精度檢核採抽樣檢驗，凡規範中訂定以精度(中誤差)為幾何精度標準者，則以檢核其中誤差為原則。例如檢核平面無高差的地物點，如道路邊緣交點、田埂交點等的位置，城區其圖面位置中誤差不得超過 1.25 公尺，而鄉區其圖面位置中誤差不得超過 2.5 公尺。彩色正射影像資料圖幅接合處影像接合誤差，在城區不能超過 1.25 公尺、鄉區不能超過 2.5 公尺。單棟建物長或寬超過 5m 即予以數化，建物以建物區表示不分戶，精度在無高差位移影響下，量測中誤差為 2.5m；另有在高差位移之情況下，量測中誤差不得超過 7.5m。</p> <p>註：近年實際建置案中，因業務單位多從千分之一地形圖進行縮編，因此精度可達 1.25 公尺，故未來建置案將全面以 1.25 公尺為新的標準。</p>
LiDAR 測製 DEM & DSM	<p>根據求得之各率定參數重新代回解算點雲資料，選取不同航帶之各位置進行剖面及平面檢查，確認不同航帶間之點雲無明顯偏移，且與地面實測之高程坐標差值小於 10 公分。高程精度標準以基本精度加上地形類別及地表植被覆蓋情形之精度調整參數而得</p> $\sigma = a + b + c \times t$ <p>a 為基本精度； b 為地形類別調整參數； c 為地表植被覆蓋情形調整參數； t 為地表植被平均高度。</p>

總結歸納上述四種規範，在基本圖測製規範中已經提到使用 GNSS 及慣性測量儀進行直接定位之技術，配合空中三角測量，以減少地面控制點之需求，但此作業模式並非完全使用無地面控制進行直接定位。此外，目前所有測製規範所使用之載台仍是以飛機為主，尚未包括車載與個人攜行式，尤其尚未真正使用到透過直接地理定位技術所獲取之外方位參數進行三維空間資訊之萃取。就精度需求而言，根據本團隊之研究經驗，使用戰術等級慣性測量儀之車載移動遙測系統進行直接地理定位，採用多影像共軛點量測影像坐標進行前方交會所量測得之三維坐標，在 GNSS 訊號良好下三維定位誤差可在 30 公分以下，可以滿足通用版電子地圖的精度要求。但是當 GNSS 訊號漏失 5 分鐘，三維定位誤差可達 2.5 公尺，此部分仍有待改善，也是本研究

未來目標。我國公部門未來可以考慮採用車載移動遙測系統進行通用版電子地圖之地圖更新與圖資數化的工作。

## 2.7 本章小結

本章首先針對包含車載、空載、個人攜行與船載多平台定位技術之沿革進行深入回顧並提供探討不同平台之應用實例。空載移動遙測製圖技術可涵蓋作業範圍與天氣依賴性之缺點與傳統航測技術相似。而車載移動遙測製圖技術具備低的侵入性與較佳的空間資訊擷取效率，然而車載系統之缺點為其定位精度隨待測目標與影像系統之距離增加而變差，定位定向系統精度受 GNSS 訊號遮蔽狀況遠較空載系統嚴重而其作業環境亦受既有路網的限制。個人攜行式的移動遙測製圖技術的機動性遠較上述二者高，具備更佳的作業彈性，唯因為個人負重的限制，所以其可攜帶的系統精度自然較上述二者為低。

多平台定位技術之未來發展趨勢將依據數位影像系統、整合多元感測器之高精度定位定向系統與不同作業平台不同層面之演化而符合使用者追求使用更少的硬體成本，但獲取而更高的精度與利潤之基本需求而持續演化。未來除積極發展不同平台之移動遙測製圖技術外，更須發展多平台移動測繪系統資料整合架構，提供更有效率的空間資訊採集、分析與應用。就不同的定位技術之特性而言，當衛星數量大於 4 顆時，鬆耦合與緊耦合直接定位演算法的成果並無太大的差別，然而當衛星數量小於 4 顆時，緊耦合系統的影像特徵點直接定位之三維定位精度，相較於鬆耦合系統改善 80% 左右。意即當 GNSS 接收訊號處於不佳的環境時，如高樓大廈林立的都市，緊耦合直接定位演算法能夠提供更可靠且穩定的成果。

將自我檢核機制應用於各式移動遙測製圖平台的直接定位應用，可確保定位精度的優劣，提升定位解的品質。目前國外並無針對多平台直接定位技術作業量身打造之驗收規範與法令規定。為確保未來多平台遙測製圖成果之品質，宜針對多平台所搭載的儀器等級，依儀器規格訂定不同比例尺、各種測繪作業規範，制定標準程序與精度要求等相關事宜。

### 第三章 規劃整合慣性導航系統

目前台灣地區多數使用 INS/GNSS 整合系統的之移動遙測製圖設備製造廠商，分別選擇使用來自加拿大 Applanix 公司所發展的 POS 系統與瑞士 Leica 公司所提供之 IPAS 系統以利直接定位應用(包含自走車)，圖 3.1 所示為整合式定位定向系統所包含之關鍵技術，所以本章對這些現有提供多平台移動測製圖系統使用之廠商與其系統進行彙整與介紹。事實上多數公司並無自行產製慣性測量儀之能力，都是透過供應商採購慣性測量儀，同時搭配自行研發的多元感測器機電整合架構與精密定位定向演算法。本案亦採行與這些公司相同策略，透過合法供應商得取得慣性測量儀，搭配國內自行研發的多元感測器機電整合架構、精密定位演算法與系統測試與率定技術，系統成本將節省一半以上。同時研發自有系統對國內空間資訊產業之人才訓練、加值應用之開發、國際競爭力與永續發展是有相當大的助益。



圖 3.1 整合式定位定向技術之關鍵技術

#### 3.1 國內外慣性測量儀規格回顧

目前國外具備生產戰術等級以上慣性測量儀之廠商約在 30~40 家，但是這些製造商絕大部分具備軍工背景，所以多數公司之產品接受國際武器輸出管制，而出口程序與時間依國家之政策而變，不過對這些具備軍工背景之製造商而言，多平台移動製圖系統對慣性測量儀之需求遠低於軍方，所以一般這些公司也就不願意花太多時間處理這些少量訂單，更遑論提供完整的技術資源，所以本章僅針對有移動製圖系統相關實績之慣性測量儀供應商進行規格回顧。如前所述，目前導航等級之慣性測量儀都使用雷射陀螺儀技術，其陀螺飄移一般在 0.01 度/小時之下，圖 3.2 所示為目前導航等級慣性測量儀主要供應商





速度( $\omega$ )。如前所述，本案初期曾有機會獲得一組使用雷射陀螺儀之慣性測量儀(MS2)，陀螺飄移為 0.01 度/小時，而加速度計飄移為 50  $\mu\text{g}$ ，其性能與測試範例如圖 3.4 所示，7 小時純慣性導航運作模式之定位誤差為 7 公里，可以提供原始觀測量與技術支援，唯其售價約為 16 萬歐元，超過本案之預算只得作罷。轉而朝向採購規格與精度與目前國內各移動遙測製圖系統所普遍使用的 LN200 相仿之慣性測量儀，這類戰術等級的慣性測量儀一般使用光纖陀螺儀與石英加速度計。

位置與速度精度(即時解)				
		純慣導模式		多元感測器複合模式(GNSS)
定位精度	1 $\sigma$	0.07% DT(含輪速計)	2 km/hr(純慣導)	2 m
平面速度	1 $\sigma$	2 m/s(純慣導)	1m/s(含輪速計)	0.02 m/s
垂直速度	1 $\sigma$	0.3 m/s(純慣導)	0.2m/s(含輪速計)	0.01 m/s
高度	1 $\sigma$	4m(純慣導)	2m(含輪速計)	2...4 m
姿態(滾轉與俯仰)(即時解)				
動態精度	1 $\sigma$	0.01°(純慣導)	0.008°(含輔助感測器)	0.005°
姿態(航向)				
動態精度	1 $\sigma$	0.02°(純慣導)	0.01°(含輔助感測器)	0.008°
位置與速度精度(後處理)				
		無 GPS 脫落	GPS 脫落 10 秒	GPS 脫落 60 秒
定位精度	1 $\sigma$	0.01 公尺	0.01 公尺	0.05 公尺
平面速度	1 $\sigma$	0.01 公尺/秒	0.01 公尺/秒	0.01 公尺/秒
垂直速度	1 $\sigma$	0.01 公尺/秒	0.01 公尺/秒	0.01 公尺/秒
高度	1 $\sigma$	0.01 公尺	0.01 公尺	0.01 公尺
姿態(滾轉與俯仰)(後處理)				
定向精度	1 $\sigma$	0.001°	0.001°	0.005°
姿態(航向)(後處理)				
定向精度	1 $\sigma$	0.003°	0.003°	0.005°
解析度		0.001°		

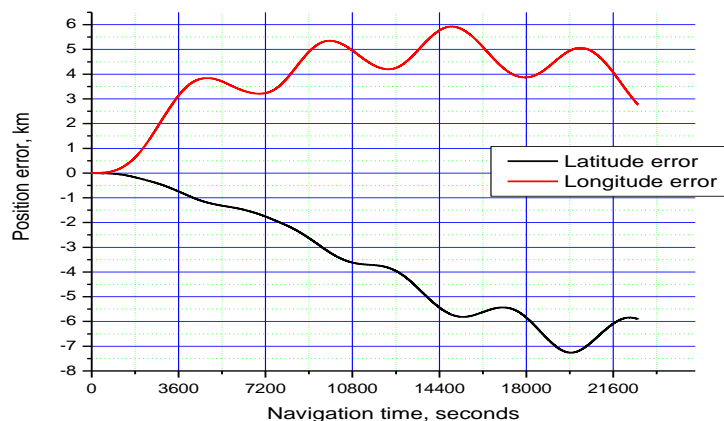
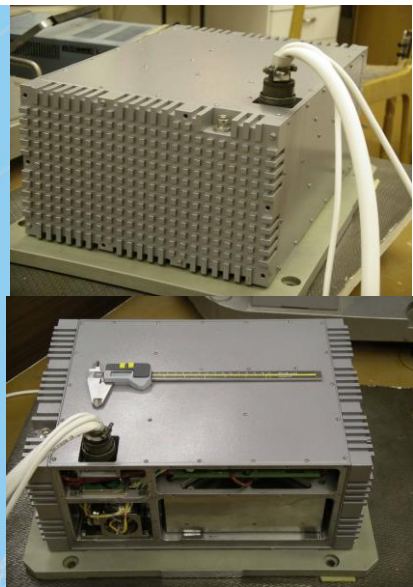


圖 3.4 雷射陀螺儀慣性測量儀與效能範例

光纖陀螺儀屬於光學陀螺儀的一種，其基本工作原理與雷射陀螺儀相似皆基於桑亞克效應效，即在同一閉合光纖迴路中從同一光源發出兩束特徵相同的光，沿相反的方向進行傳播，匯合到同一探測點，產生干涉，如圖 3.5 所示。若存在垂直於閉合光路所在平面的軸線相對慣性空間轉動的角速度，則沿正、反方向傳播的光束產生光程差，

該差值與角速度成正比。通過光程差與相應的相位差的關係，可通過檢測相位差，計算角速度。它一般由光纖傳感線圈、光學晶片、光源和光電探測器組成。與傳統的機械陀螺儀相比，具有無運動零件、耐衝擊、結構簡單、啟動時間短、靈敏度高、動態範圍寬、壽命長等優點。與另一種光學陀螺儀相比，光纖陀螺儀不需要光學鏡的高精度加工、光纖的嚴格密封和機械安裝技術，能夠有效地克服了雷射陀螺儀的閉鎖現象，易於製造。

光纖陀螺儀按照不同的分類標準，有不同的分類結果。按結構可分為單軸和多軸光纖陀螺儀，光纖陀螺儀的多軸化正是其發展方向之一。按其迴路類型可分為開環光纖陀螺儀和閉環光纖陀螺儀兩類。開環光纖陀螺儀不帶反饋，直接檢測光束輸出，省去許多複雜的光學和電路結構，具有結構簡單、價格便宜、可靠性高、消耗功率低等優點，缺點是靠增加單模光纖的長度來提高陀螺的靈敏度，輸入與輸出線性度差、動態範圍小，主要用作角度傳感器；閉環光纖陀螺儀包含閉環環節，大大降低飄移的影響，擴大了光纖儀陀螺的動態範圍，對光源強度變化和元件增益變化不敏感，陀螺儀飄移非常小，輸出線性度和穩定性質與相位變換器有關，主要應用於中等精度的系統，對光纖陀螺儀的小型化和穩定性有重要作用，是高精度光纖陀螺儀研究的主要趨勢。按照光學系統的構成可分為全光纖型和整合光學元件型。全光纖陀螺儀成本較低，但實現高精度的技術難度較大，大多用於精度要求不高和低成本的情況；整合光學元件型其光纖陀螺儀在信號處理中可以採用數位閉環技術，易於實現高精度和高穩定性，是目前最常用的光纖陀螺儀構成模式。

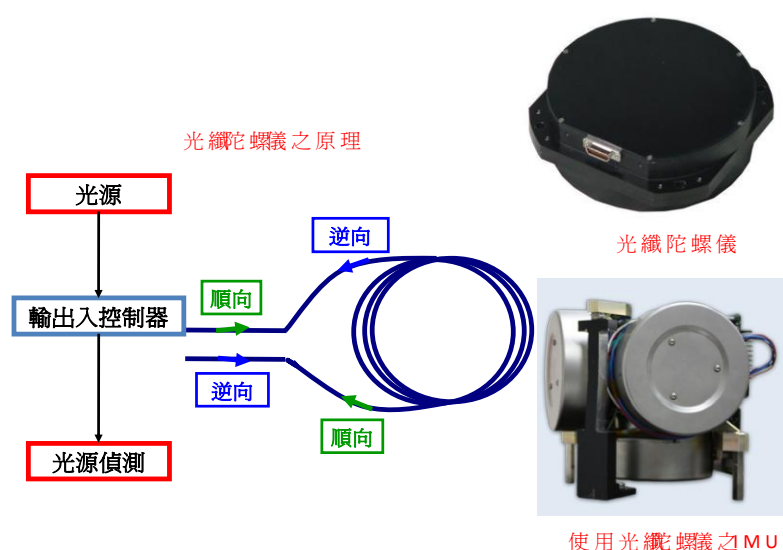


圖 3.5 光纖陀螺儀與慣性測量儀範例

光纖陀螺儀按照性能和應用的角度可分為一般級、戰術級和導航

等 3 個級別。一般級光纖陀螺儀已經產業化，主要應用於機器人、地下建造隧道、管道路徑勘測裝置和汽車導航等對精度要求不高的場合。日本、法國等國家研製、生產的這種精度的陀螺儀，已大批量應用到民用領域。戰術級光纖陀螺儀具有壽命長、可靠性高和成本低等優點，主要用於戰術飛彈、近程／中程飛彈和商用飛機的姿態對準參考系統中。導航級光纖陀螺儀主要是用於空間定位和潛艇導航，其開發和研製正逐步走向成熟，美國有關公司和研究機構是研製、生產該級別光纖陀螺儀的佼佼者；日本是緊隨美國開展光纖陀螺儀研究和應用的國家。

法國有關公司從事光纖陀螺儀的研發超過 15 年，應用領域涉及海上、水下應用和太空等。德國有關公司研製光纖陀螺儀的歷史超過 40 年，其應用領域涵蓋太空、空中、陸地和水中和軍用、民用等範圍。光纖陀螺儀發展的方向可區分為三：一是向更高精度、更高可靠性的方向發展，為航天、航空、航海、陸地之各式使用者提供高精度的慣性元件；二是朝向體積小、高度整合、價格便宜、結構更牢固的超小型化方向發展，為戰術級應用提供堅固、廉價的慣性感測器；三是朝多軸化發展。

如前所述，本案朝向採購規格與精度與目前國內各移動遙測製圖系統所普遍使用的 LN200 相仿之慣性測量儀(其陀螺飄移為 1 度/小時)。所以，本案僅就此等級慣性測量儀供應商進行規格回顧。表 3.1 與表 3.2 顯示為現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統硬體使用慣性測量儀比較表。所有規格資訊皆依原廠網站所提供之資訊而彙整，而售價為透過參加研討會時與國外原廠代表口頭詢價或與國內代理商非正式詢價，所以僅供參考，但國內正式售價與表中所列報架扣除匯率變動的影響後應該差異在新台幣 50 萬元區間，原廠提供的系統規格型錄請參閱附錄集。

根據目前商用系統主流之規格，並考慮出口管制問題來選擇無國際武器輸出管制使用光纖陀螺儀高階戰術等級慣性測量儀，引進的系統規格與現有高階商用定位定向系統(POSAV510)使用的慣性測量儀(LN200)相仿，其交貨時間少於 10 週，且可以提供原始觀測量，考量兼顧車載與空載遙測系統之應用，本案研製之多元感測器整合式定位定向系統提供支援輪速計介面，同時提供記錄相機驅動訊號之功能。

本案所引入之慣性測量儀為德國 LITEF 公司之產品(LCI IMU)，細節請參閱 3.2 節。此套系統售價約為新台幣 300 萬元，而原廠設計時提供選購經過特殊設計與本系統相容之雙系統雙頻大地等級之

GNSS 接收儀，接收儀內部的處理器與通訊接口須經特殊設計以搭配其韌體，以利多元感測器觀測量同步機制之實現，該接收儀除了提供即時整合導航解、慣性測量儀觀測量同步與儲存，亦整合了輪速計、氣壓計、航向儀與相機驅動訊號記錄等功能。然而，此接收儀要價超過新台幣 100 萬元，故本案採用本系現有的雙系統雙頻大地等級 GNSS 接收儀並經過原廠協助調整部分韌體與設定以支援本案所引入之慣性測量儀。

表 3.1 現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統硬體使用之慣性測量儀 (一)

系統	POS 系統 製造商	IMU 型號與來源	陀螺儀 種類	陀螺 儀等 級	陀螺 飄移 (度/ 小時)	加速 度計 飄移 (mg 出)	原始 觀測 量輸 出	出口 管制	交貨 時間	軟體 選購	軟體 相容 性	輪速 計模 組	輔助 感測 器相 容性	GNSS 模組	系統 售價	軟體 售價	總價
POSAV-510 (IMU-8)	Applanix	LN-200 (Northrop-grumman)	光纖 (FOG)	戰術	1	0.3	無	ITAR	>半 年	選購	無	選購	無	內建	約 750 萬	約 50 萬	約 800 萬
POSAV-510 (IMU-6)	Applanix	HG-1700(AG-58) (Honeywell)	雷射 (RLG)	戰術	1	1	無	ITAR	>半 年	選購	無	選購	無	內建	約 750 萬	約 50 萬	約 800 萬
POSAV-510 (IMU-14)	Applanix	iIMU-FSAS (iMAR)	光纖 (FOG)	戰術	1	2	無	EU	約八 週	選購	無	選購	無	內建	約 750 萬	約 50 萬	約 800 萬
SPAN-LN200	NovAtel	LN-200 (Northrop-grumman)	光纖 (FOG)	戰術	1	0.3	無	ITAR	>半 年	選購	有	選購	有	內建	約 400 萬	約 75 萬	約 500 萬
SPAN-HG	NovAtel	HG-1700(AG-58) (Honeywell)	雷射 (RLG)	戰術	1	1	無	ITAR	>半 年	選購	有	選購	有	內建	約 400 萬	約 75 萬	約 500 萬
自組系統		LCI (Litef GMBH)	光纖 (FOG)	戰術	1	0.3	有	無	<1個 月	自備	有	自備	有	選購 100 萬 自備 (約 50 萬)	約 400 萬 300 萬	約 75 萬 0 萬	約 500 萬 350 萬

本案所發展之整合定位定向系統具備觀測量同步與儲存、提供原始觀測量、整合輪速計與相機驅動訊號記錄等功能；與現有商用系統相較之下，其特色詳列於表 3.1 與表 3.2 中。本案研製之定位定向系統成本之目的為，利用不到目前台灣地區所有以 LN200 慣性測量儀為主之運作中商用定位定向系統成本的 60%，自行研發使用具備可供任何使用者使用的原始觀測量，且不受國際武器輸出管制的慣性測量儀之精密定位定向系統；以供本案其他子計畫諸如空載傾斜攝影系統與個人攜帶式遙測製圖系統之應用；同時研發過程中也密切執行精密定位定向系統之硬體與韌體研發人才訓練。而表中其他德國公司



(iMAR 與 IGI)所提供之產品都不受國際武器輸出管制,但其售價較本案引進之系統高且交貨期程較長。出口許可申請的問題在於交貨的不確定性太高,以美國國務院而言,一般的審查時程近半年,而一般系統提供者皆是在獲得許可之後才可以生產,如此將交貨時間拉長到超過半年,同時這些系統的使用限制較多,跨國作業可能會受到影響。

本案引進高階戰術等級慣性測量儀並完成整合式定位定向系統研製項目,具備下列突破性的成果:

- 合法引進且不受國際武器輸出許可管制。
- 交貨時間縮短為二個月。
- 引入之慣性測量儀之規格媲美商用定位定向系統之 LN200 慣性測量儀(目前國內的光達與航測系統所使用之 POSAV510 等級)。
- 商用系統不提供原始觀測量,本系統可以提供原始觀測量。
- 採購成本為外購系統之 40%。
- 自主研發適用高階戰術等級慣性測量儀的機電整合架構,相關研發成果擬參加美國導航學會 GNSS2012 年會之最佳論文競賽。
- 精密定位定向系統之硬體與軟體研發人才訓練。

表 3.2 現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統硬體使用之慣性測量儀 (二)

系統	POS 系統 製造商	IMU 型號與來源	陀螺儀 種類	陀螺 儀等 級	陀螺 飄移 (度/ 小時)	加速 度計 飄移 (mg)	原始 觀測 量輸 出	出口 管制	交貨 時間	軟體 選購	軟體 相容 性	輪速 計模 組	輔助 感測 器相 容性	GNSS 模組	系統 售價	軟體 售價	總價
IPAS-2(DUS4)	Leica	LN-200 (Northrop-grumman)	光纖 (FOG)	戰術	1	0.3	無	ITAR	>半 年	選購	無	選購	無	內建	約 750 萬	約 50 萬	約 800 萬
IPAS-2(NUS4)	Leica	iIMU-FSAS (iMAR)	光纖 (FOG)	戰術	1	2	無	EU	約八 週	選購	無	選購	無	內建	約 750 萬	約 50 萬	約 800 萬
iNAV-FMS-E	iMAR	iIMU-FSAS (iMAR)	光纖 (FOG)	戰術	1	2	無	EU	約八 週	選購	無	選購	有	內建	約 450 萬	約 50 萬	約 500 萬
IGI-Aero Control (IMU IIe)	IGI	IGI	光纖 (FOG)	戰術	0.1	0.5	無	EU	約八 週	選購	無	選購	有	內建	約 900 萬	約 50 萬	約 950 萬
LANDINS	IXSEA	IMU 90	光纖 (FOG)	戰術	0.05	0.5	無	EU	約八 週	選購	有	選購	無	內建	約 1000 萬	約 50 萬	約 1050 萬
自組系統		LCI (Litef GMBH)	光纖 (FOG)	戰術	1	0.3	有	無	<1個 月	自備	有	自備	有	選購	約 100 萬	約 400 萬	約 500 萬
														自備	約 50 萬	約 300 萬	約 350 萬

表 3.3 所示為現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統軟體與本案自行研發軟體之比較表。一般而言，遙測製圖系統之系統製造商所提供的軟體一般不分開販售且為封閉的設計，意即某公司所發展的軟體只支援該公司的硬體，而使用者若有二套來自不同系統製造商所提供之定位定向系統但都使用同一型號慣性測量儀，此問題依然無解。而這些軟體的訂價一般在新台幣 50 萬元至 100 萬元之間，使用者每年花費至少新台幣 15 萬元至 30 萬元進行軟體升級，而這些所謂的軟體升級過程有七成是除錯與系統參數更新。本案自行研發定位定向系統軟體之目的為引入更先進的演算法架構，以進一步提升系統之精度並執行精密定位定向系統軟體研發人才訓練。本案研發軟體架構與商用軟體大略相同，且多了人工智慧之輔助功能，這點是目前這些商業軟體所缺乏的功能(參考表 3.1~表 3.3)，自主研發定位定向系統軟體之詳細特色及其與現有商用系統之比較請見表 3.3。而該軟體亦提供本案其他子計畫諸如空載傾斜攝影系統與個人攜帶式遙測製圖系統之應用。

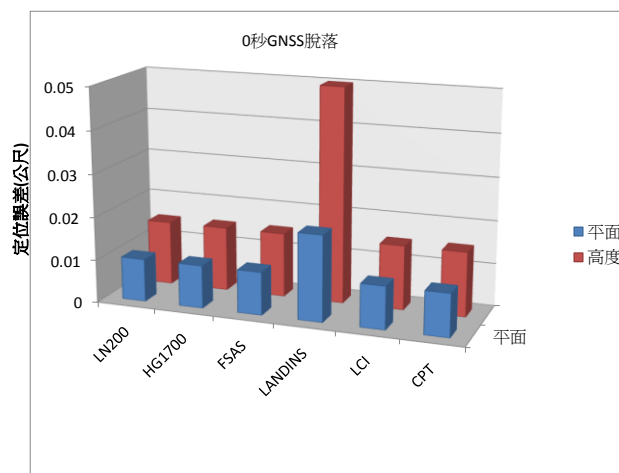
表 3.3 現有遙測製圖系統搭配之商用定位定向系統軟體

軟體	製造商	擴張式卡 濾波器	平滑器	多感測器 融合演算 法架構	IMU 硬體 相容性	人工 智慧 出	原始 觀測 量輸 出	模擬 GNSS 脫落 功能	輪速 計觀 測量	原始 碼	GNSS 觀測料 處理模 組	跟隨式 虛擬主 站功能 應率 定模 組	軸角 與遙 臂效 時間內 插功能	相機 Trigger 策略	軟體 販售 策略	軟體售價	軟體升級
POSPac MMS	Applanix	支援	支援	鬆/緊耦 合	自 家	無	無	無	支援	無	Grafnav	支援	內建	內建	搭售	50 萬	選購(15 萬/ 年)
Inertial Explorer	NovAtel	支援	支援	鬆/緊耦 合	任 意	無	有	有	支援	無	Grafnav	無	無	內建	可分 售	75 萬	選購(15 萬/ 年)
LEICA IPAS Freebird	Leica	支援	支援	鬆/緊耦 合	自 家	無	無	無	無	無	Grafnav	無	內建	內建	搭售	50 萬	選購(15 萬/ 年)
iWP+	iMAR	支援	支援	鬆/緊耦 合	自 家	無	無	無	無	無	Grafnav	無	無	內建	搭售	50 萬	選購(15 萬/ 年)
AEROoffice	IGI	支援	支援	鬆/緊耦 合	自 家	無	無	無	無	無	Grafnav	無	內建	內建	搭售	50 萬	選購(15 萬/ 年)
Delph INS	IXSEA	支援	支援	鬆耦合	自 家	無	有	無	無	無	Grafnav	無	內建	內建	搭售	50 萬	選購(15 萬/ 年)
KINGSPAD	University of Calgary	支援	支援	鬆/緊耦 合	任 意	無	有	有	有	有	內建	無	無	無	自售	60 萬(執行 檔) 300 萬(原始 碼)	選購(15 萬/ 年)
自有軟體	NCKU	支援	支援	鬆/緊耦 合	任 意	有	有	有	有	有	內建	開發中	內建	內建	0	0	0

圖 3.6 至圖 3.8 為依據各系統提供者所提供其系統在不同 GNSS



訊號脫落長度的定位定向效益分析，此種根據 GNSS 訊號脫落長度來觀察與分析定位定向成果遞減之程序為美國導航學會與導航領域相關研究機構與系統發展者所公認之標準測試程序(Chiang, 2004; Shin,2005)。如此系統發展者可以深入評估各家慣性測量儀精度與定位定向演算法效能，圖中只列出系統提供者有提供相關數據之系統，請參考附錄集中各系統之簡介。而圖中之 CPT 系統為本系自有的中階光纖陀螺儀之慣性測量儀(飄移穩定性約為 1 度/小時)。在無 GNSS 訊號脫落情形下，各系統之差異不大，但如將 GNSS 訊號脫落時間增加至 60 秒，慣性測量儀規格的影响就相當顯著。就這些圖的成果而言，本案所採購之 LITEF LCI 慣性測量儀(陀螺飄移小於 1 度/小時，飄移穩定性約為 0.1 度/小時)之效能不會比 POSAV510(陀螺飄移 1 度/小時，飄移穩定性約為 0.1 度/小時)之成果差，且成本不到其 50%，圖 3.6 中各家商用系統之報價在 750 萬至 1000 萬間，故引入合格且價廉慣性測量儀並發展自有的多感測器整合技術可視為本工作項目重要的突破點之一。定位定向系統於 GNSS 訊號脫落時間之表現與慣性測量儀規格、定位定向演算法效益與載體動態行為等息息相關，所以測試時必須重覆針對同一訊號脫落之時間長度作不同的動態行為所歸納出來的成果。



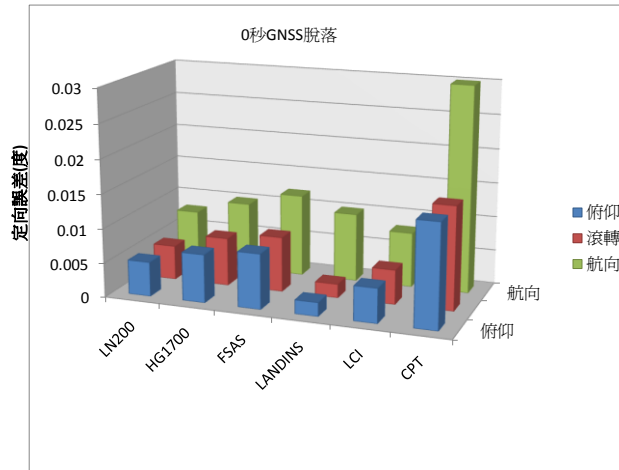


圖 3.6 各慣性測量儀定位定向效益比較表(無 GNSS 訊號脫落)

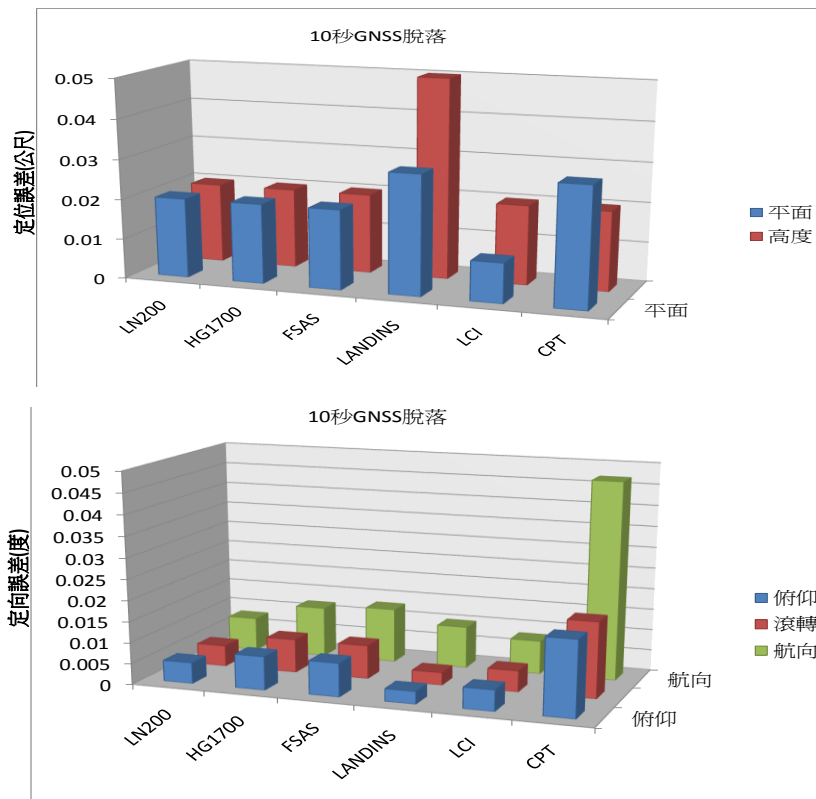


圖 3.7 各慣性測量儀定位定向效益比較表(10 秒 GNSS 訊號脫落)

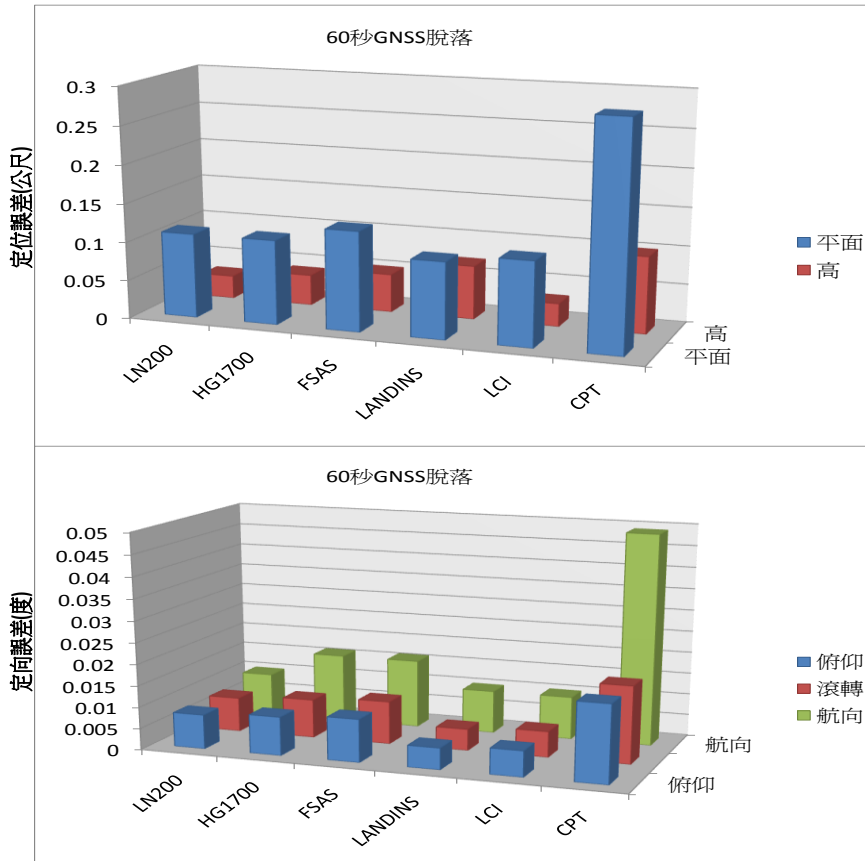


圖 3.8 各慣性測量儀定位定向效益比較表(60 秒 GNSS 訊號脫落)

### 3.2 引進戰術等級慣性測量儀並完成與雙頻載波相位 GNSS 接收儀之機電整合

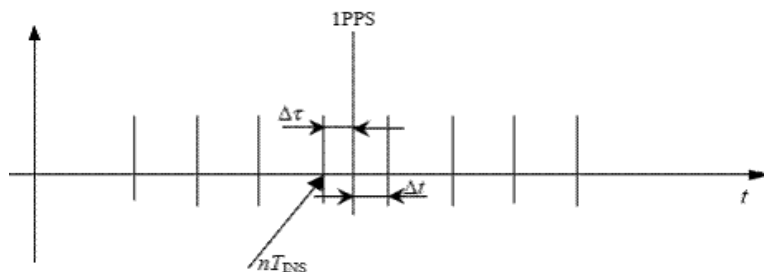
設計精確的多感測器數據整合演算法是系統發展的關鍵，在進行數據整合設計時，首先必須保證用於整合的導航與影像數據在整合的時間點是一致的，意即在解決 IMU、GNSS 與影像感測器之即時數據同步問題，多元感測器整合式定位定向系統的設計才有實際意義。故本案自行開發一套多感測器的資料擷取系統。該系統主要之功能為即時擷取感測器所提供之觀測量並完成時間同步之程序待後處理模式之應用。

如前所述，資料同步為數據整合最重要的一個環節。故在此先以 IMU/GNSS 整合為例說明如何透過 GNSS 訊號提供多感測器之數據整合。GNSS 一般所使用的採樣頻率為 1Hz。相對的，IMU 的採樣頻率一般為 50Hz 至 200 Hz。在一般的硬體整合條件下，二個導航系統無法使用相同的時標亦無法同時啟動。另外值得注意的是導航訊息更新時刻並不是數據載入的時刻。在每個導航子系統中，導航數據載入後仍須經過計算和通信才能最終輸出導航訊息。換言之，在做數據同步時需要同步的數據所對應的時刻是數據載入時刻，該時刻之數據才具有瞬時觀測量之物理意義。故數據同步所要解決的問題是如何將來

自 IMU 與 GNSS 在不同時標下的數據作前處理，以符合精密定位定向演算法中針對同一時刻觀測量進行更新的假設。

設 IMU 的數據更新週期為  $T_{INS}$ ，由於 IMU 時標飄移而導致  $T_{INS}$  的變化是緩慢與而細微的，這種飄移的累積只導致 IMU 和 GPS 的時標差  $\Delta t$  變化，故可視  $T_{INS}$  是恆定的。GPS 接收機所提供的秒同步脈衝(1 Plus Per Second, 1 PPS)為與 UTC 時刻對齊每整秒出現一次的脈衝，由 GPS 接收機所提供的 PPS 的訊號的精度是非常高的。GPS 接收機嚴格的在每一個 PPS 脈衝的邊緣時刻進行一次虛擬距離、虛擬距離變化率、載波相位測量、GPS 標準授時及定位等服務。故可以認定 GPS 的數據更新頻率為就是準確的 1Hz。相對的  $T_{INS}$  遠遠小於 1s，一般都小於 50 ms，所以利用 GPS 的 1PPS 的脈衝作為同步的標準時刻在 IMU/GNSS 數據的同步是目前業界的標準程序。故本案擬採用上述之方式分別對 IMU 之觀測量與 GPS 之觀測量進行數據同步以完成硬體整合平台之核心技術，IMU 與 GNSS 觀測量的同步。

二種數據的同步示意圖如圖 3.9(a)所示，圖中的長豎線為 GPS 之 1PPS 脈衝，即 GPS 數據之更新點；短豎線表示 INS 數據更新時刻。從圖 3.9(a)所示在 GPS 數據更新點上 IMU 沒有數據輸出。設 GPS 與前一個 IMU 資料的同步時間差為  $\Delta\tau$ ，GPS 與後一個 IMU 資料的同步時間差為  $\Delta t$ ，而在同步時間點(1PPS 上緣)上，透過  $\Delta\tau$  及  $\Delta t$  作內插計算即可算出 IMU 在每一個 PPS 點上之值，如此即可獲得二個訊號在同一時間點上的同步化量測數據。此外，對於高動態模式下運動的載體而言，需要更精確的內插模型，因此可採用高階拉格朗日多項式內插法(Lagrange Interpolation)作 IMU 觀測量內插。上述 IMU 與 GNSS 觀測量的同步為硬體整合平台之核心技術。相同的技術可以沿用至多感測器(包含 CCD 相機與 LiDAR)數據整合與處理，如圖 3.9(b)所示。



(a)

$$T_{INS}^{GPS} = T_{INS}^c + (T_{pps}^{GPS} - T_{pps}^c)$$

The computer time of the INS pulse interrupt
The GPS time defined by the PPS
The computer time at the PPS interrupt

$$T_{Camera}^{GPS} = T_{Camera}^c + (T_{pps}^{GPS} - T_{pps}^c)$$

The computer time of the INS pulse interrupt
The GPS time defined by the PPS
The computer time at the PPS interrupt

(b)

圖 3.9 (a)利用 GPS 1PPS 訊號實現 IMU/GNSS 觀測量同步 (b) INS/GNSS/Camera 資料同步之方法

LCI 慣性測量儀規格與尚未封裝前之照片如圖 3.10 所示，現有商用系統使用之 LN200 慣性測量儀之規格請參考圖 2.45。而圖 3.8 顯示 LCI 慣性測量儀之定位定向精度與商用系統相似。而圖 3.10 與圖 3.11 為本節發展的多元感測器整合之架構，除 LCI 慣性測量儀之外，NovAtel Propak 雙系統雙頻 GNSS 大地等級接收儀、GNSS 天線與輪速計皆為本系自有之設備。圖 3.12 顯示程式順利完成慣性測量儀觀測量同步與顯示。圖 3.13 顯示為 LCI 慣性測量儀所提供之原始觀測量，此為多數移動遙測製圖系統製造商使用之慣性測量儀所無法提供之資訊。

LITEF LCI 戰術等級IMU之規格

- 陀螺飄移 < 1度/小時
- 陀螺飄移穩定性 0.1度/小時
- 陀螺尺度因子: 200 ppm
- 陀螺ARW: <0.05度/√小時
- 加速度計飄移: <1mg
- 加速度計尺度因子: 250 ppm
- 無ITAR管制



圖 3.10 LCI 慣性測量儀規格與尚未封裝前之照片

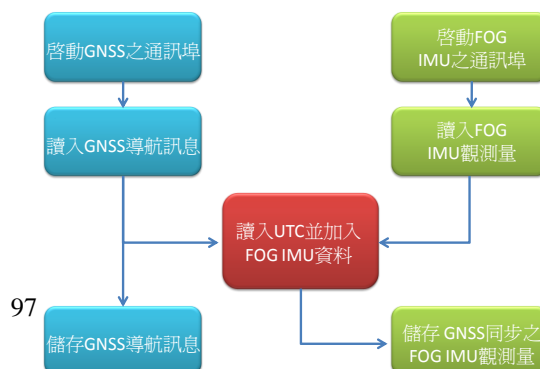






圖 3.11 多元感測器定位定向系統之整合架構

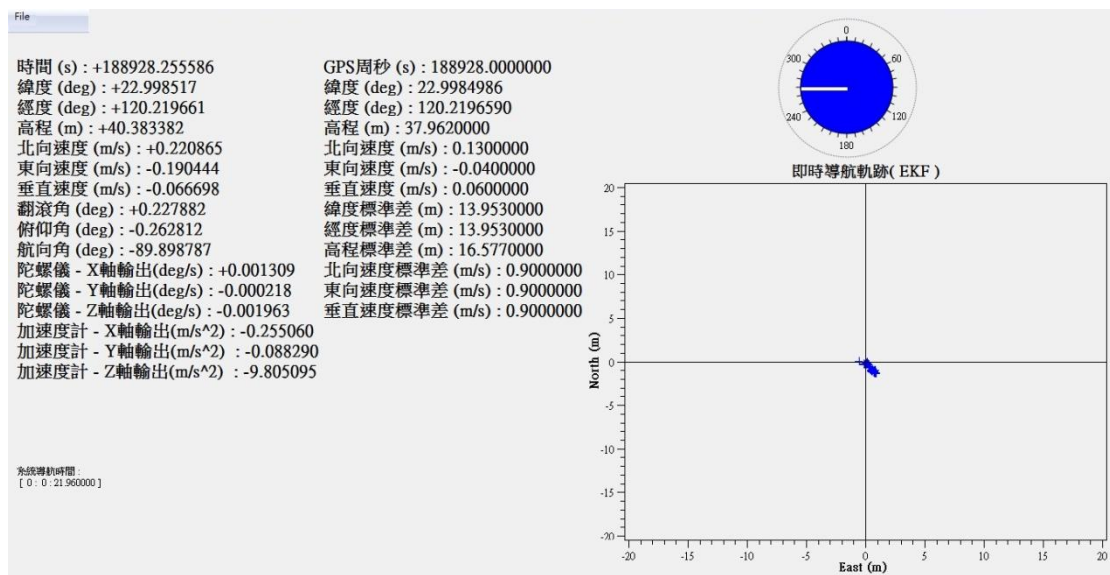


圖 3.12 慣性測量儀原始觀測量之擷取與顯示

陀螺儀 - X軸輸出(deg/s) : -0.009381  
 陀螺儀 - Y軸輸出(deg/s) : -0.006981  
 陀螺儀 - Z軸輸出(deg/s) : -0.001309  
 加速度計 - X軸輸出(m/s^2) : -0.137340  
 加速度計 - Y軸輸出(m/s^2) : -0.095647  
 加速度計 - Z軸輸出(m/s^2) : -9.822263

圖 3.13 LCI 慣性測量儀所提供之原始觀測量

### 3.3 研發慣性導航系統軟體模擬器

為了解慣性測量儀之性能，本節依慣性測量儀之規格，模擬其動態與靜態之定位理論性能分析，該模擬器稱之為整合式定位定向系統模擬器，主要架構分為三大部分，分別為軌跡產生器、觀測量模擬器及最佳狀態估算器等部分，如圖 3.14 所示。

不論是飛行載體、地面載體等，使用者只要給予所希望載體的動



態軌跡，軌跡產生器提供了載體真實的運動軌跡。如此經由諸如設計直線速度、加速度、角速度及持續時間等動態運動方程即可得到運動體的完整路徑。觀測量模擬器則是負責提供載體在運動過程中慣性測量儀之觀測量( $\Delta v$ ,  $\Delta\theta$ )及全球衛星導航系統依據鬆耦合整合方式所需之位置解(P)與速度解(V)或緊耦合整合方式所需之虛擬距離( $\rho$ )及載波相位( $\phi$ )等模擬觀測量。整合系統的估算器之內容，包含以鬆耦合與緊耦合方式實現包含卡曼濾波器(適合即時導航)與平滑器之INS/GNSS最佳化整合架構。故透過本模擬器可以針對不同規格之慣性測量儀進行靜態與動態理論效能分析，實際估算出慣性測量儀之系統誤差，再經由率定進行系統性的誤差改正，此步驟在發展整合定位定向系統的初期是相當重要的。

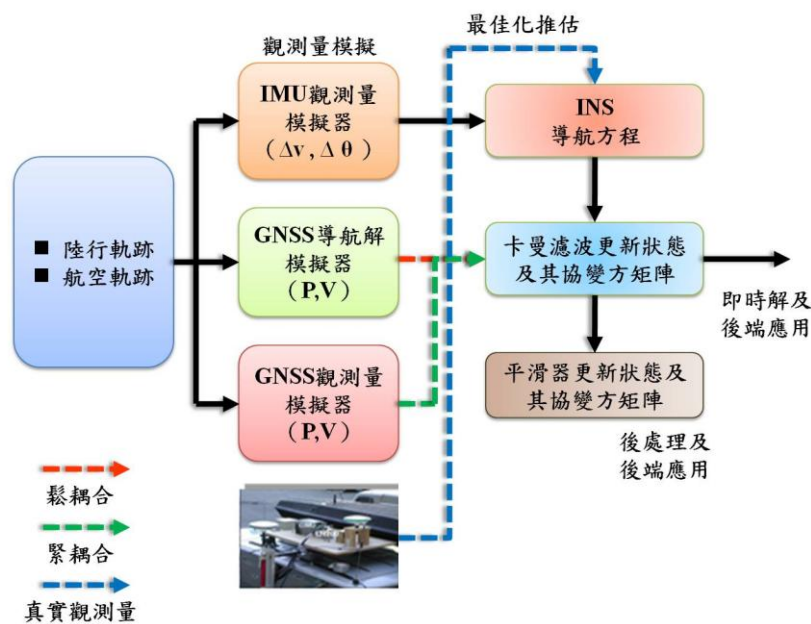


圖 3.14 整合式定位定向系統模擬器之主要架構

依照慣性測量儀所提供之規格，設定整合式定位定向系統模擬器之系統參數：使用者系統所在位置(經、緯度及橢球高)、陀螺儀三軸之系統飄移(gyro bias in deg/hr)、陀螺儀三軸之尺度因子(gyro scale factor)、陀螺儀三軸之雜訊(gyro noise)、加速度計三軸之系統飄移(accelerometer bias in micro-g)、加速度計三軸之尺度因子(accelerometer scale factor)、加速度計三軸之雜訊(accelerometer noise)、初始傾斜平面誤差(initial tilt error)、初始速度平面誤差(initial velocity error)及系統輸出頻率，該系統模擬器為MATLAB程式運算並使用MATLAB GUI介面作展示，如圖3.15所示。

整合式定位定向系統模擬器軌跡產生器可產生兩種動態模擬軌

跡Figure1 and Figure2及單點靜態模擬Static20min，動態模擬軌跡中Figure1為8字形軌跡，Figure2則為複雜軌跡。單點靜態模擬Static20min則是假設慣性測量儀於載體坐標系中的三軸對準當地水平坐標系中的三軸(正東、正北及天頂方向)，可產生慣性測量儀之12個位置靜態觀測量輸出，其12個位置擺設如圖3.16所示，此單點靜態模擬功能可提供觀測量輸出，以便本團隊後續作慣性測量儀之靜態率定，進行模擬多位置測試法率定模型。

得到動態軌跡後，經由慣性導航方程式之逆推導，得到慣性測量儀之三軸加速度和角速度，詳細慣性測量儀觀測量之模擬器運作原理與數學基礎可參考胡智祐(2009)之研究。在給定整合式定位定向系統模擬器之系統參數後，選擇軌跡之下拉式選單(Path)，產生動態軌跡，以擴張卡曼濾波器作為演算核心之最佳狀態估算器，計算出該系統之整合導航解。



圖 3.15 整合式定位定向系統模擬器之操作介面

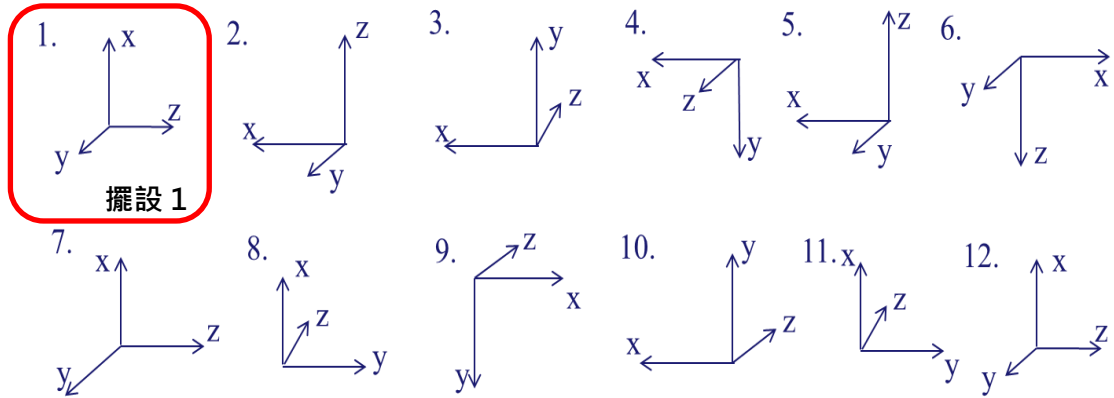


圖 3.16 多位置測試法率定模型(12 位置)

以表 3.4 為例進行系統模擬，依序輸入整合式定位定向系統模擬器之系統參數後，選定 **Figure2** 可產生模擬動態軌跡，其動態軌跡如圖 3.17 所示，得到動態軌跡後引入 INS/GNSS 模擬觀測量，經由最佳狀態估算器計算出該系統之整合導航解，並計算出其平面位置的飄移量。圖 3.18 為 INS 之模擬觀測量輸出，圖 3.19 為模擬整合式定位定向系統未經由最佳狀態估算器與經由最佳狀態估算器之平面位置誤差比較圖，由圖 3.19 可以看出經由最佳狀態估算器所得到之導航解，在 25 分鐘的運行下，可提供較佳的 INS/GNSS 整合解。若是選定 **Static20min** 可產生慣性測量儀靜態模擬，即可得到該模擬系統之 12 個位置 20 分鐘靜態觀測量輸出，模擬之系統參數同表 3.4 之設定，圖 3.20 及圖 3.21 為多位置測試法率定模型擺設 1 的模擬靜態觀測量之陀螺儀及加速度計三軸觀測量輸出。

表 3.4 慣性測量儀之模擬參數設定

感測器	飄移量 (Bias)	尺度因子	雜訊
加速度計	0.0001g	500ppm	$50\mu\text{g}/\sqrt{\text{hr}}$
陀螺儀	0.75deg/hr	300ppm	$0.1\text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$

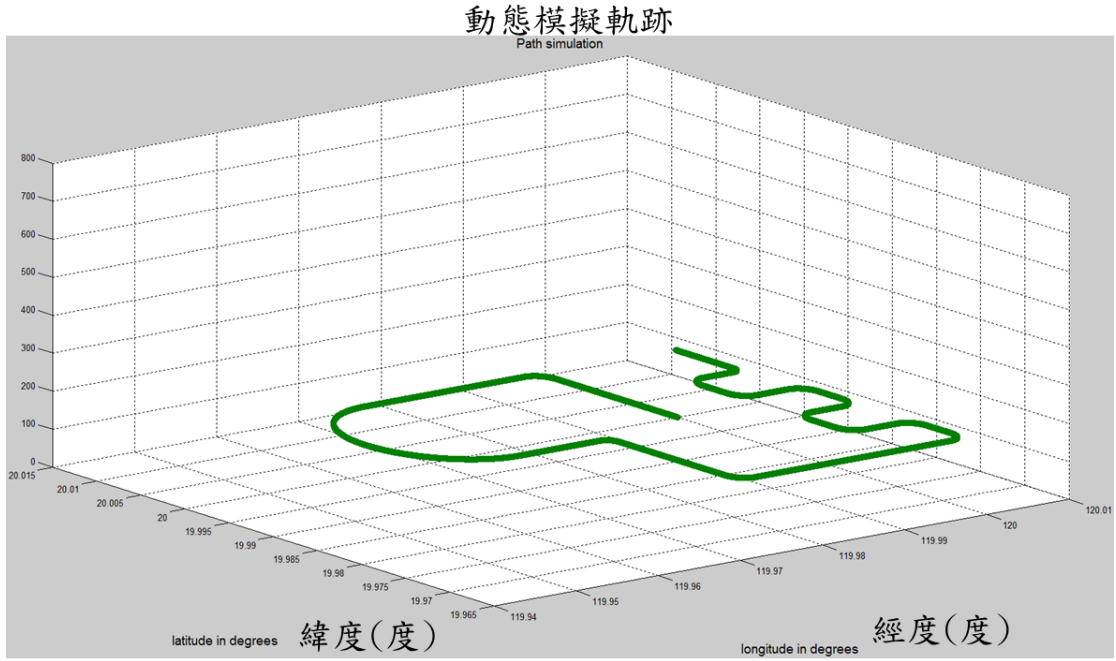


圖 3.17 動態模擬軌跡

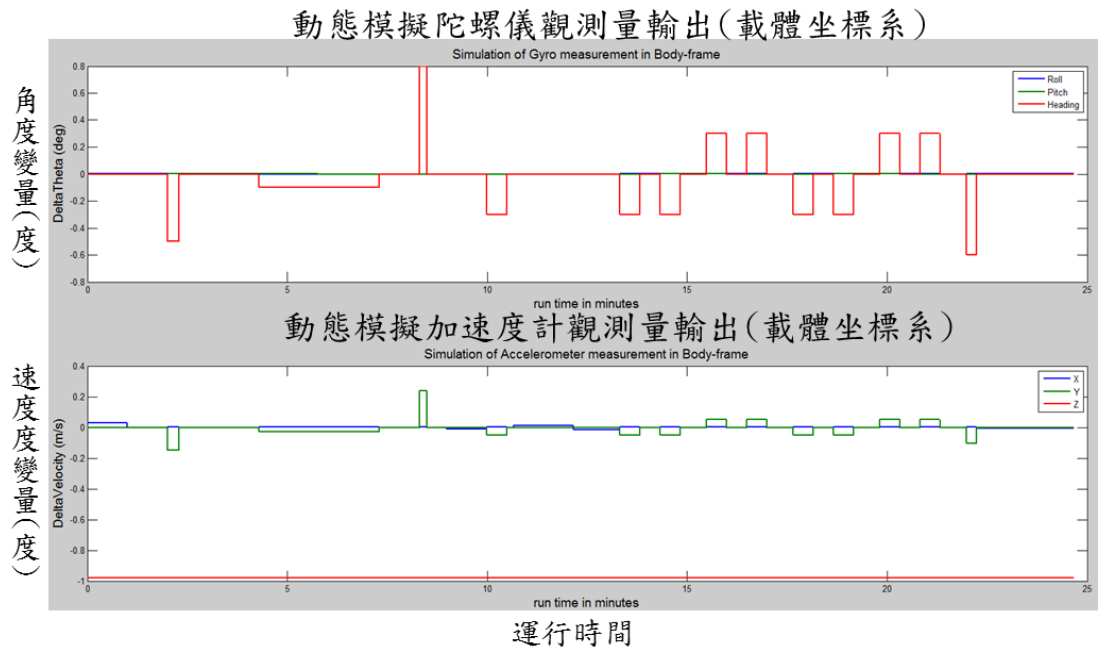


圖 3.18 陀螺儀及加速度計在動態模擬下之觀測量輸出

15狀態卡曼濾波器之最佳推估

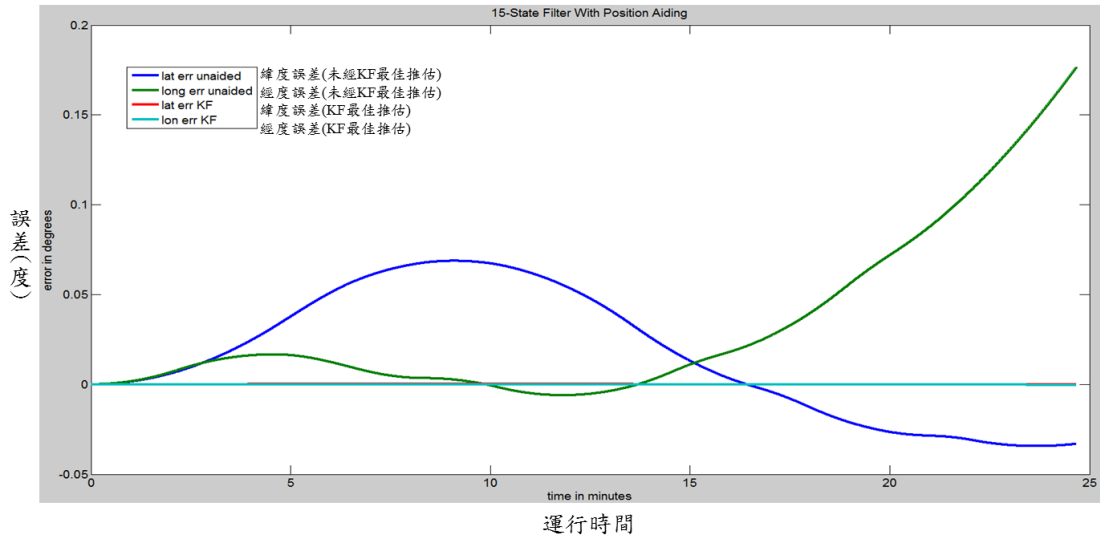


圖 3.19 平面位置誤差比較圖

角度輸出

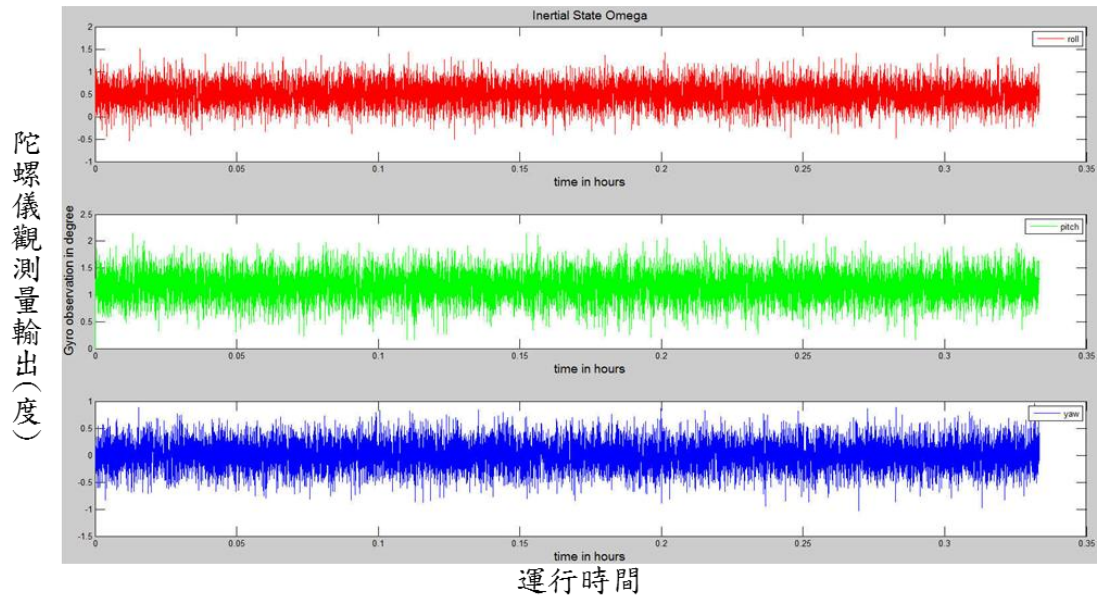


圖 3.20 靜態模擬陀螺儀之三軸觀測量輸出



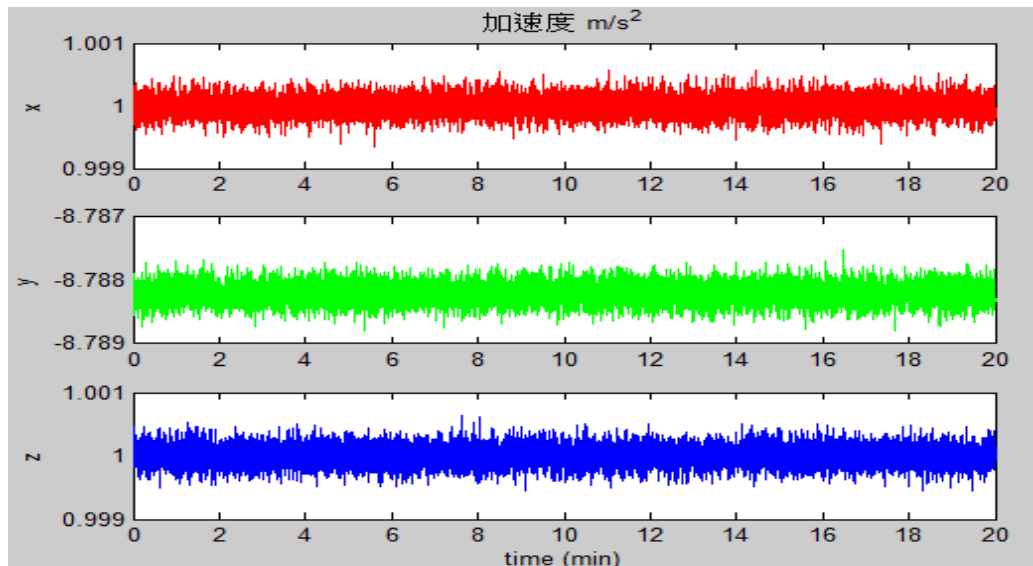


圖 3.21 靜態模擬加速度計之三軸觀測量輸出

另外，本節更利用整合式定位定向系統模擬器進行 LCI 與其他目前同等級之慣性測量儀(LN200、HG-1700 及 iMAR)進行初步效益分析，圖 3.22 至圖 3.24 為依照其陀螺儀及加速度計之系統飄移量進行 4 小時靜態模擬分析，輸出系統平面位置誤差圖(P-errors)、速度誤差圖(V-errors)及姿態誤差圖(A-errors)，圖 3.22 至圖 3.24 之模擬分析結果顯示該 4 種型號之慣性測量儀在平面位置、速度、姿態的誤差飄移量極值沒有明顯的差異，僅誤差隨時間變化的波動稍有不同，證明了該 4 種型號之慣性測量儀為同等級之慣性測量儀。同時更進一步利用整合式定位定向系統模擬器進行導航等級之慣性導航系統(MS-2)效益分析，該導航等級系統其陀螺儀飄移 0.01 度/小時，加速度計飄移 50  $\mu\text{g}$ ，其模擬結果如圖 3.25 所示，其平面位置誤差從戰術等級系統之  $10^5$  飄移量提升至  $10^3$  公尺等級，其速度誤差從戰術等級系統之  $10^2$  飄移量提升至  $10^0$ ，其姿態誤差從戰術等級系統之 0.5 度姿態誤差提升至 0.01 度。該 5 組慣性測量儀(MS2、LCI、LN200、HG-1700 及 iMAR)之平面位置及姿態誤差統計表如表 3.5 及表 3.6 所示。



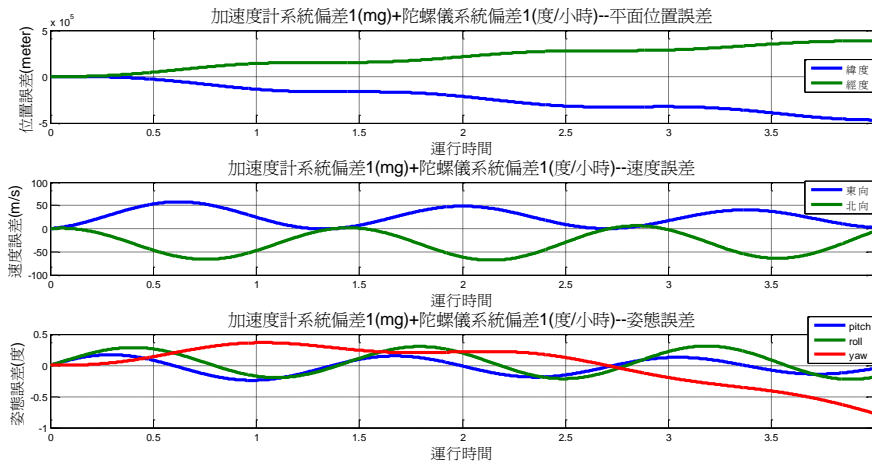


圖 3.22 慣性測量儀 HG-1700 平面位置、速度、姿態誤差圖

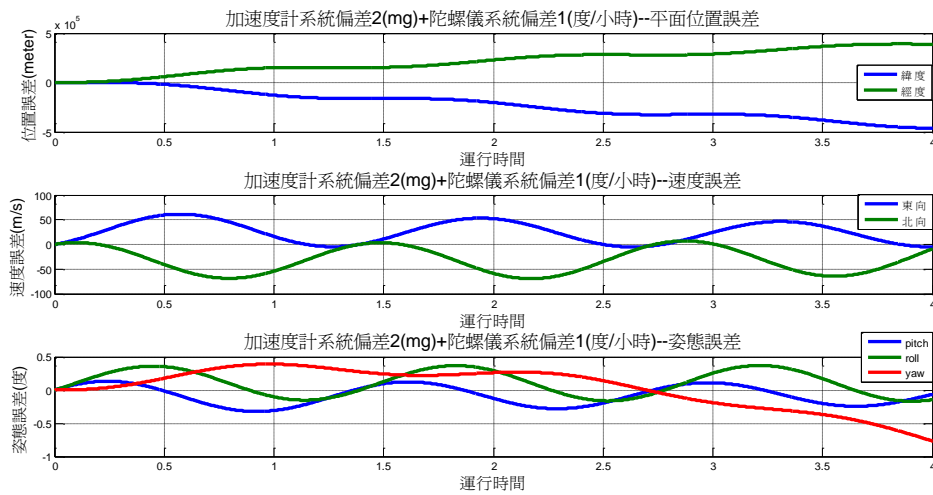


圖 3.23 慣性測量儀 iMAR 平面位置、速度、姿態誤差圖

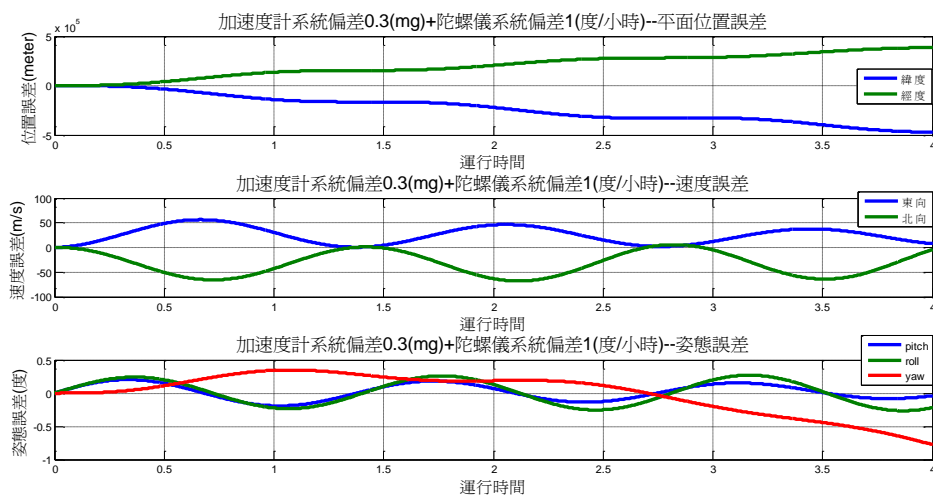


圖 3.24 慣性測量儀 LN-200 及 LCI 平面位置、速度、姿態誤差圖

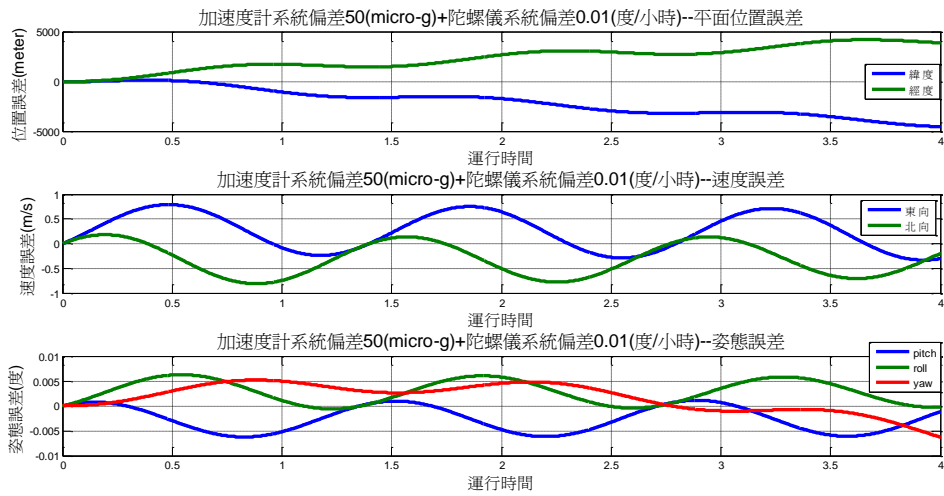


圖 3.25 導航等級慣性測量儀平面位置、速度、姿態誤差圖

表 3.5 慣性測量儀之平面位置誤差統計表

系統	平面位置				等級
	最大誤差(公尺)		均方根誤差(公尺)		
	北向	東向	北向	東向	
MS-2	4538	4262	2428	2672	導航
LCI	450623	338655	257601	233051	戰術
LN200	450623	338655	257601	233051	戰術
HG-1700	467175	387634	263566	237628	戰術
iMAR	462210	391011	257874	244276	戰術

表 3.6 慣性測量儀之姿態誤差統計表

系統	姿態						等級
	最大誤差(度)			均方根誤差(度)			
	航向	俯仰	滾轉	航向	俯仰	滾轉	
MS-2	0.0063	0.0063	0.0062	0.0037	0.0037	0.0032	導航
LCI	0.7744	0.2701	0.2038	0.2990	0.1818	0.1179	戰術
LN200	0.7744	0.2701	0.2038	0.2990	0.1818	0.1179	戰術
HG-1700	0.7768	0.3102	0.2392	0.2994	0.1890	0.1255	戰術
iMAR	0.7812	0.3156	0.2567	0.3055	0.1899	0.1315	戰術

### 3.4 評估自行研製戰術級慣性測量儀之可行性

如前所述目前國外具備生產戰術等級以上慣性測量儀之廠商分部在包含美國、法國、德國、俄羅斯、日本、以色列與中國等約 30~40 家具備軍工背景之廠商，這些公司的產品接受國際武器輸出管制，出口程序與時間依國家之政策而變。研製戰術級慣性測量儀之關鍵在於高精度光學陀螺儀的取得。目前台灣民間並無自製戰術級慣性測量儀與光學陀螺儀之能力，而軍方曾經研製飄移為 1 度/小時之光纖陀螺儀與雷射陀螺儀，但因產量與良率問題並後續並無任何量產計畫。

生產高精度的之光纖陀螺儀與雷射陀螺儀需要深厚的光學工業基礎，但若是能與國外產製光學陀螺儀的廠商進行合作引進戰術等級的光學陀螺儀(飄移 1-0.1 度/小時)在台灣進行慣性測量儀之組裝與率定，相關成本(約 200 萬)將較目前商用公司引進的戰術等級的 POS 系統(約 800 萬)節省 3/4。透過自行引進慣性測量儀並研製戰術等級的 POS 系統之成本約 300 萬。組裝戰術等級慣性測量儀所需的石英加速度計規格約在 1mg 至 0.1mg 之間，這種規格的加速度計目前沒有管制的問題。

近年來微機電技術之快速演進帶給移動遙測製圖技術永續發展另一道曙光，微機電慣性測量儀具備價格低廉與性能穩定之特色，相較於使用同一規格的光纖陀螺儀系統而言，其售價只需其 1/2，同時微機電慣性測量儀一直為人所詬病的雜訊與穩定性不佳之效應亦持續改善中，所以未來透過使用戰術等級的微機電陀螺儀(飄移 1-0.1 度/小時)搭配戰術等級的石英加速度計(1-0.1 mg)組裝之慣性測量儀應該可以符合一般多平台移動遙測製圖技術之應用，而低廉且自主研製的慣性測量儀可以加速移動遙測製圖技術之普及。表 3.7 至 3.9 針對使用不同感測器組合方案針對自行研製戰術級慣性測量儀之課題進行 SWOT 分析。

目前國外商用空載移動遙測製圖系統與船載海測之相關應用皆使用戰術等級光纖陀螺儀之慣性測量儀，其主要原因除了成本考量未使用雷射陀螺儀之外，同時 GNSS 訊號在這些應用場景中之收訊狀況較佳，除特殊原因外鮮有超過 10 秒之 GNSS 衛星訊號脫落。相反的，國外商用車載移動遙測製圖系統多半配備導航等級雷射陀螺儀之慣性測量儀以克服車載應用常遭遇超過數分鐘之 GNSS 衛星訊號脫落。以使用 Honeywell CIMU 的 Applanix POSLV 系統為例；在 5 分鐘 GNSS 衛星訊號脫落下，利用平滑器估算得最大定位誤差約為 10

公尺(Chiang, 2004; Shin,2005)，而使用 LN200 的 Applanix POS AV 系統在同一時期利用平滑器估算得最大定位誤差約為 100 公尺(Chiang, 2004; Shin,2005)。然此時若搭配本案所研發的 CAINS-21 軟體在輪速計的輔助下其平滑器估算得最大定位誤差約為 10 公尺。Applanix POS AV 的售價約在 800 萬而 Applanix POS LV 系列因其慣性測量儀使用雷射陀螺儀所以無法進口到台灣，預估其售價在 1500 萬至 2000 萬台幣。

故本節建議未來朝向引進戰術等級光纖陀螺儀與石英加速度計作為慣性量主要元件，以及研製慣性測量儀搭配輔助感測器與先進多感測器整合演算法，以求所有多平台遙測製圖系統之應用需求；同時亦可嘗試研製戰術等級微機電陀螺儀取代光纖陀螺儀，並研製搭配該等級慣性測量儀、輔助感測器與先進多感測器整合演算法，以符合部分空載、車載、個人與海測之應用以符合作業成本與精度需求之考量。

表 3.7 雷射陀螺儀+石英加速度計之戰術等級慣性測量儀方案的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
<ol style="list-style-type: none"> <li>雷射陀螺儀飄移小(&lt;0.01 度/小時)</li> <li>石英加速度計飄移小(&lt;1mg)</li> <li>精度高</li> <li>精度可符合所有多平台遙測系統之應用</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>價格最昂貴(單顆雷射陀螺高於 150 萬台幣)</li> <li>易受震動影響</li> <li>體積大</li> <li>偏重</li> <li>測試與率定程序複雜</li> <li>台灣不具備自製雷射陀螺儀技術</li> </ol>
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
<ol style="list-style-type: none"> <li>車載移動遙測製圖技術對使用雷射陀螺儀之需求高。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>雷射陀螺儀受管制無法出口到台灣</li> <li>需要精密光學工業之基礎</li> <li>需要高精度的率定與測試設施</li> </ol>

表 3.8 光纖陀螺儀+石英加速度計之戰術等級慣性測量儀方案的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
<ol style="list-style-type: none"> <li>光纖陀螺儀飄移適中(1-0.1 度/小時)</li> <li>石英加速度計飄移小(&lt;1mg)</li> <li>精度高</li> <li>抗震性較佳</li> <li>光纖陀螺儀之民用系統管制較有彈性</li> <li>精度可符合所有多平台遙測系統之應用</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>價格昂貴(單顆光纖陀螺儀售價高於 30 萬台幣)</li> <li>測試與率定程序複雜</li> <li>光纖陀螺儀受管制故出貨期較長(超過 6 個月)</li> </ol>
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
<ol style="list-style-type: none"> <li>目前台灣各單位使用之商用 POS 系統皆使用光纖陀螺儀與石英加速度計之方案。</li> <li>搭配先進演算法與輔助感測器可達車載移動遙測製圖技術之精度需求</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>光纖陀螺儀受管制故出貨期較長(超過 6 個月)</li> <li>台灣不具備自製光纖陀螺儀技術</li> </ol>

表 3.9 微機電陀螺儀+石英加速度計之戰術等級慣性測量儀方案的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 微機電陀螺儀(1-0.5 度/小時)</li> <li>2. 石英加速度計飄移小(&lt;1mg)</li> <li>3. 精度合乎需求</li> <li>4. 體積小</li> <li>5. 重量輕</li> <li>6. 無出口管制</li> <li>7. 便宜(單顆戰術等級微機電陀螺儀售價低於 20 萬台幣)</li> <li>8. 可符合部分空載、船載系統之應用</li> <li>9. 台灣具備自製微機電陀螺儀技術</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 穩定性待提升</li> <li>2. 目前無商用演算法與輔助感測器可支援微機電陀螺儀與石英加速度計之方案可達車載移動遙測製圖技術之精度需求。</li> </ol>
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本案發展之先進定位定向演算法與輔助感測器可支援微機電陀螺儀與石英加速度計之方案達車載移動遙測製圖技術之精度需求。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 目前並無使用微機電陀螺儀與石英加速度計之商用 POS 系統方案。</li> </ol>

### 3.5 多元感測器定位定向系統之靜態與動態性能驗證

為驗證本章自行研製多元感測器定位定向系統之性能，本團隊向儀科中心洽借使用戰術等級 LN200 慣性測量儀之 Applanix POSAV 510 系統，並委託該中心利用商用 POSpac MMS 軟體以鬆耦合架構產生以 POS AV 510 系統之測試軌跡與姿態解提供進一步的分析。本次實驗於 100 年 10 月 31 日在新竹市區執行，而動態 GNSS 差分軌跡計算所需之 GNSS 主站設在新竹市地政事務所之衛星基準點，此次路測時間約為一個小時。同時本案利用 LCI 慣性測量儀研製之多元感測器定位定向系統搭配本案研發之 CAINS-21 軟體產生測試軌跡與姿態解提供進一步的分析。本次實驗的參考軌跡與姿態為使用 KINGSPAD 軟體以 LN200 觀測量並以緊耦合架構產生之軌跡與姿態。本次實驗之儀器設置如圖 3.26 至 3.28 所示，而圖 3.29 所示為此次路測之軌跡



與衛星數量分佈。如前所述，此種利用較高精度參考軌跡配合模擬或真實的 GNSS 訊號脫落期間測試系統所提供測試軌跡進行定位定向精度之測試程序為國外產學界公認的測試程序 (Chiang, 2004; Shin,2005)

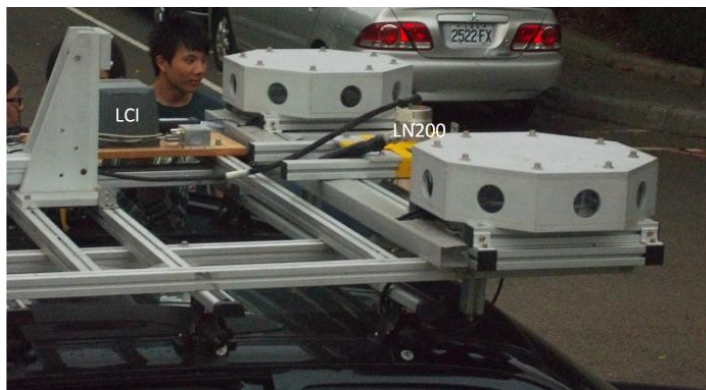


圖 3.26 路測使用之二套慣性測量儀

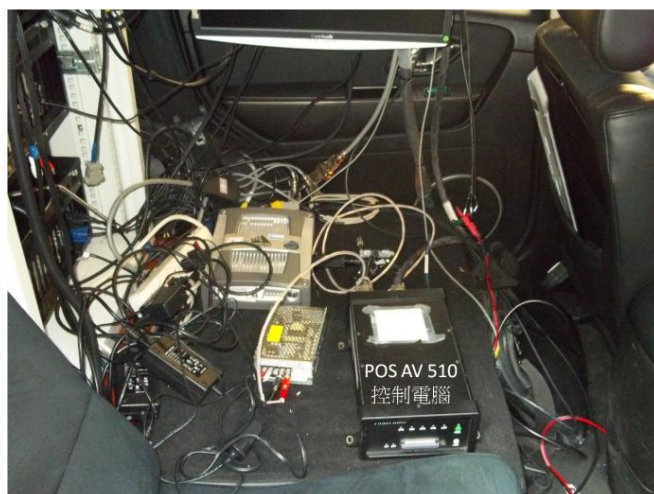


圖 3.27 路測車之內部配置



圖 3.28 路測車儀器在車頂之配置

圖 3.30 與 3.31 所示為分別為測試系統(LN200 與 LCI)與參考系統所產生之平面軌跡與高度變化。圖 3.32 與 3.33 所示為分別為測試系統(LN200 與 LCI)與參考軌跡比較之後所得之定位定向誤差序列，而表 3.10 為定位定向誤差統計表。在 GNSS 訊號遮蔽嚴重之新竹市測試區所得之成果顯示，研發的多元感測器定位定向系統在未使用輪速計的條件下搭配 CAINS-21 所得之定位定向解可與要價 800 萬的商用系統提供相似的定位定向功能。意即本案研發的系統在節省近 1/3 的成本下，性能不遜於目前商用系統。

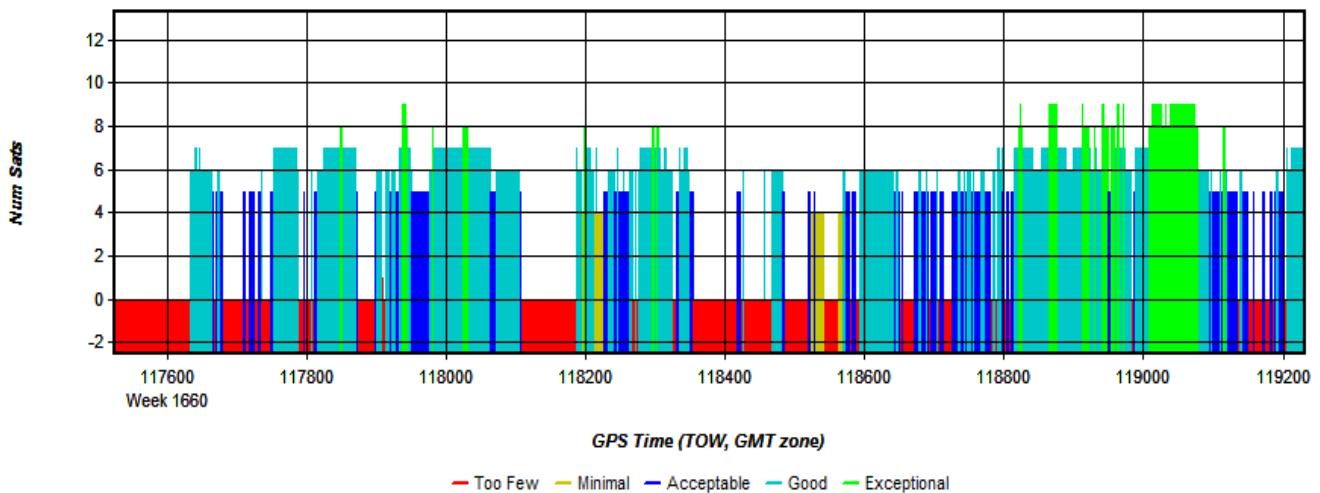


圖 3.29 本次路測軌跡與衛星數量分佈(新竹)

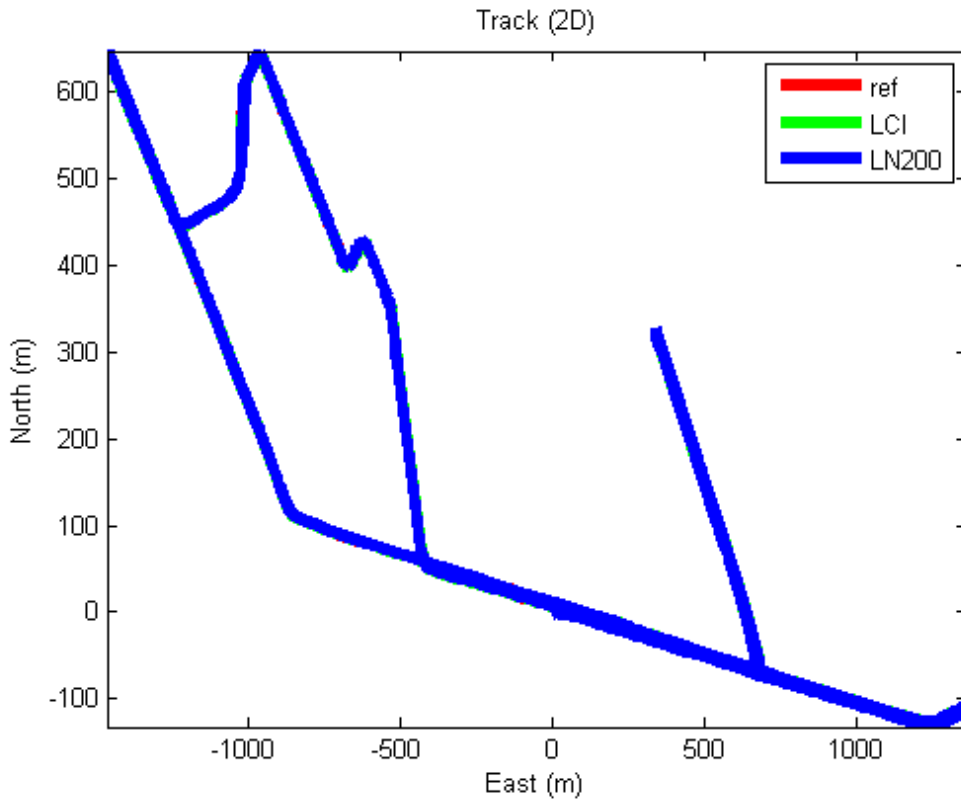


圖 3.30 本次路測平面測試與參考軌跡

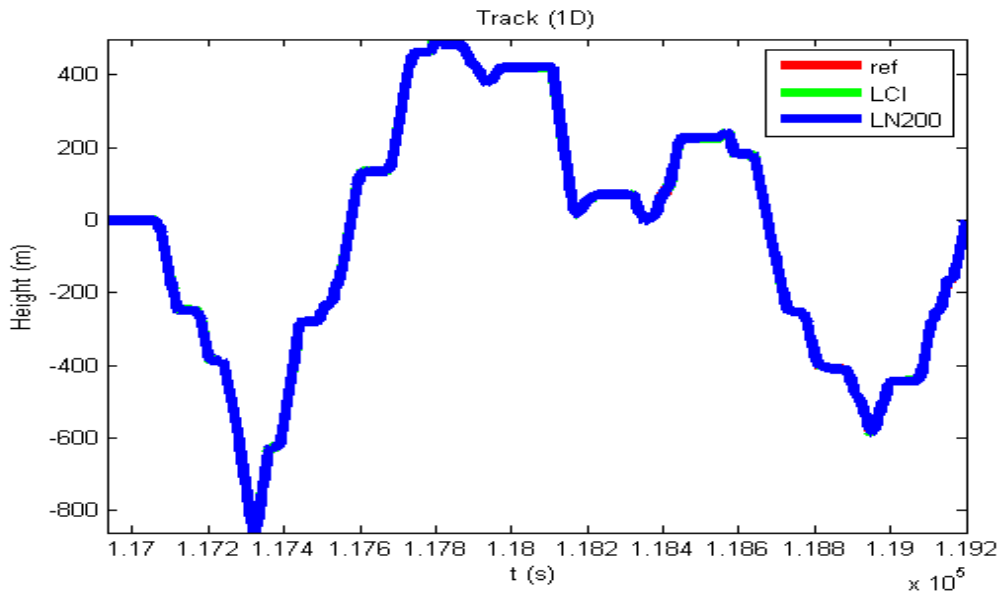


圖 3.31 本次路測高度變化與參考高度變化

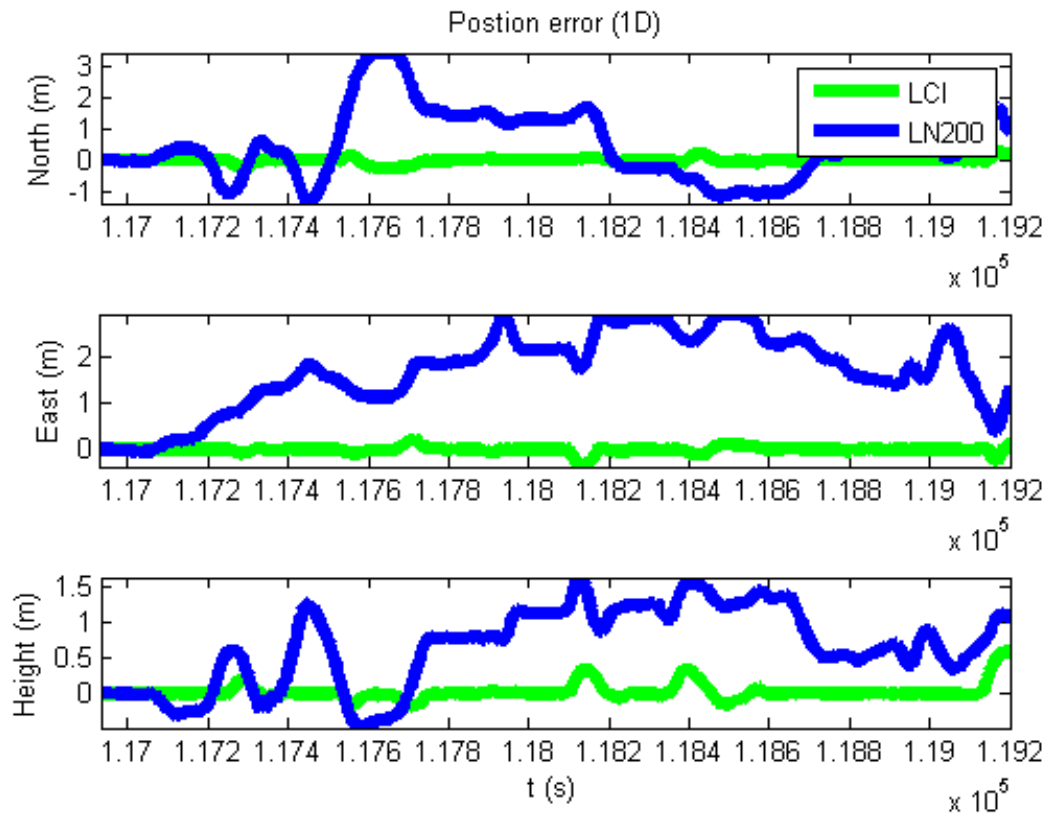


圖 3.32 定位誤差序列

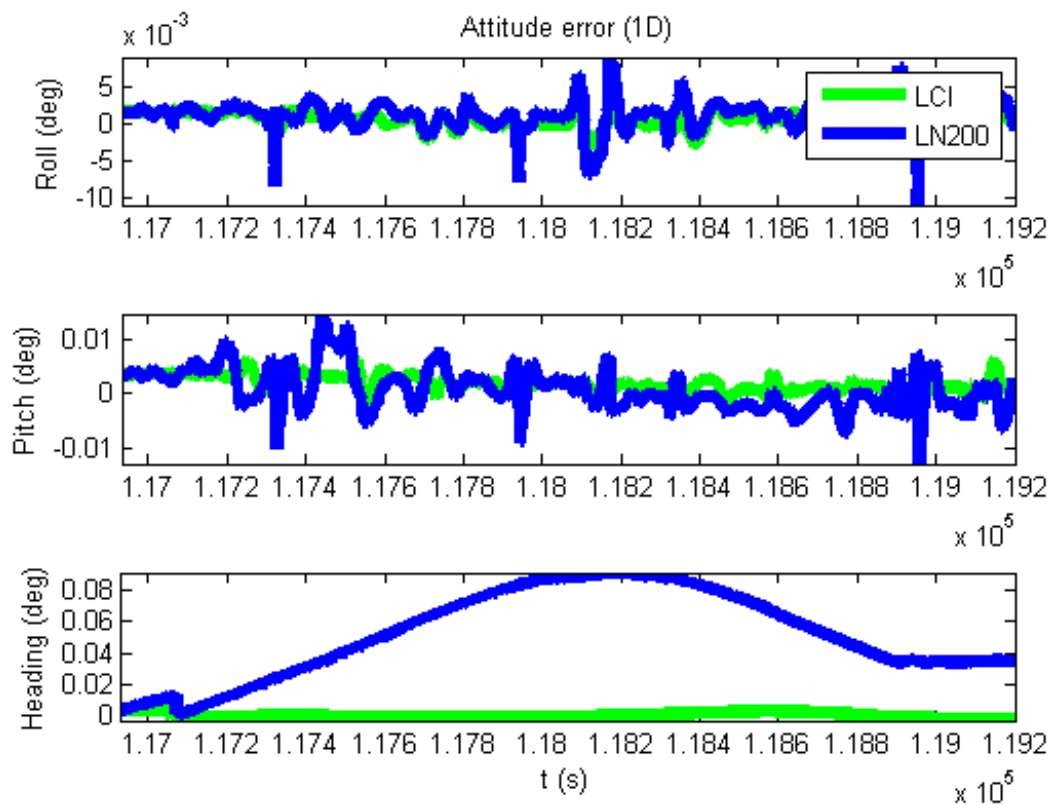


圖 3.33 定向誤差序列

表 3.10 定位定向誤差統計表

		北 (公尺)	東 (公尺)	高 (公尺)	滾轉(度)	俯仰(度)	航向(度)
<b>LCI</b>	平均值	-0.0107	-0.0117	0.0210	5.0086e-04	0.0018	0.0002
	標準偏差	0.0784	0.0656	0.1102	0.0010	0.0014	0.0016
	均方根誤差	0.0792	0.0666	0.1122	0.0011	0.0023	0.0016
<b>LN200</b>	平均值	0.4903	1.7020	0.6522	0.0011	6.6570e-04	0.0521
	標準偏差	1.1060	0.8429	0.5592	0.0020	0.0039	0.0275
	均方根誤差	1.1980	0.8900	0.5679	0.0022	0.0046	0.0355

為進一步評估 POSAV 510 與研發系統之效益，本團隊於 100 年 11 月 1 日進行第二次路測，此次路測以北二高木柵休息站為起點，主要目的在利用國道五號密集且不同長度之隧道來驗證 LN200 與 LCI 慣性測量儀之效能，測試程序同上。圖 3.34 與 3.35 所示為分別本次測試軌跡與為測試系統(LN200 與 LCI)與參考系統所產生之平面軌跡。圖 3.36 與 3.37 所示為分別為測試系統(LN200 與 LCI)與參考軌跡比較之後所得之定位定向誤差序列，而表 3.11 為定位定向誤差統計表。在因隧道數量眾多導致 GNSS 訊號遮蔽嚴重之國道五號所得之成果顯示，本案研發的多元感測器定位定向系統在未使用輪速計的條件下搭配 CAINS-21 所得之定位定向解較要價 800 萬的商用系統分別提升 30% 與 10%。此結果進一步確認本章研發的系統在節省近 1/3 的成本下，能夠提供不遜於商用系統之定位定向解供車載移動遙測製圖技術之用。

相較於上述使用後處理平滑器之成果，圖 3.38 所示為本案研發的多元感測器定位定向系統在即時卡曼濾波器的運作模式下出雪山隧道口之軌跡放大圖。如圖所示，測試車在出隧道口前 10 秒與出隧道口的軌跡點是連續接上無顯著誤差，可顯示在正確的車道上；此成果意味著本案研發的多元感測器定位定向系統在未使用輪速計的條件下，搭配 CAINS-21 所得之定位定向解在約 10 分鐘的 GNSS 訊號脫落期間可達到最大誤差小於 10 公尺之平面定位精度，推估其均方根誤差約為 3~5 公尺，此效能接近使用雷射陀螺儀之 POSLV (Shin,2005)。





圖 3.34 本次路測軌跡(北宜)

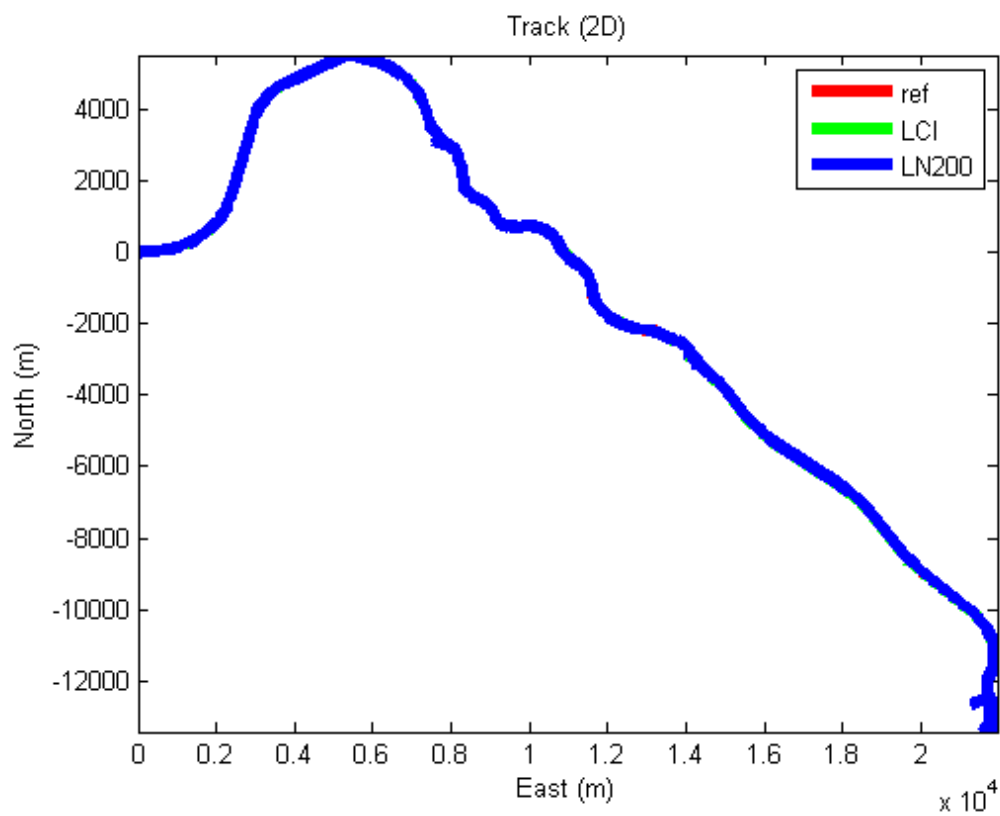


圖 3.35 本次路測平面測試與參考軌跡



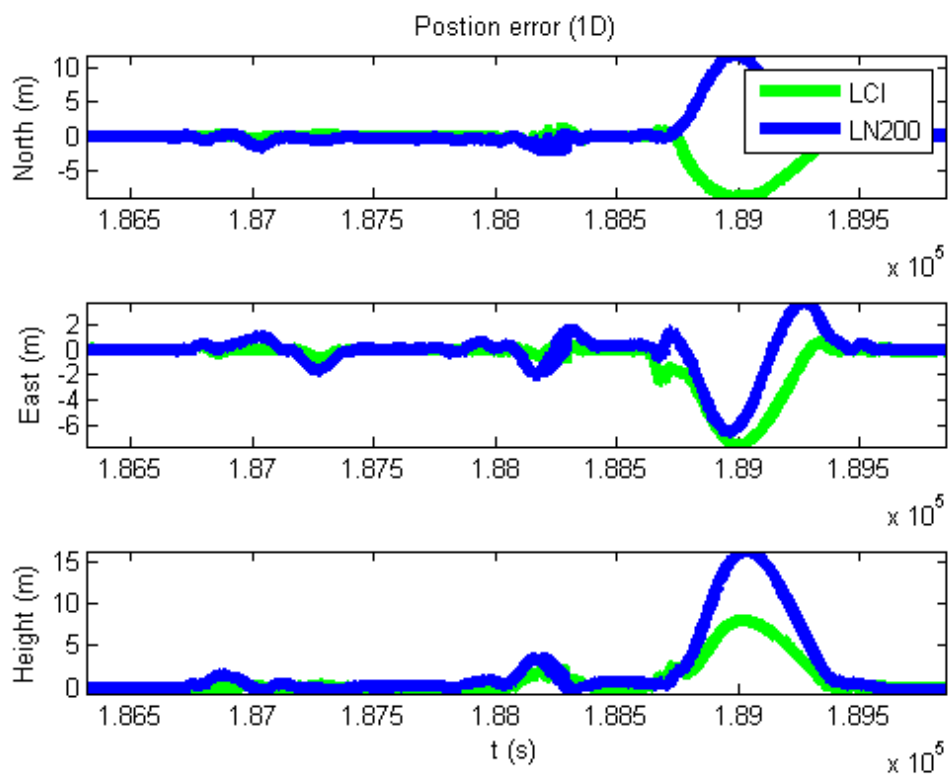


圖 3.36 定位誤差序列

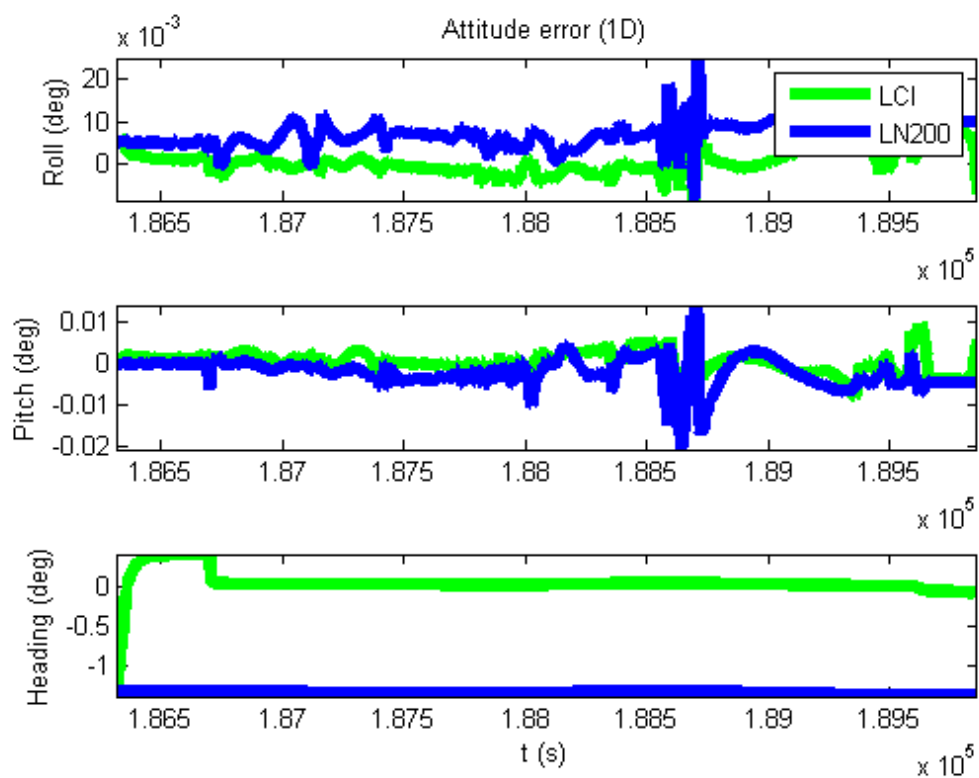


圖 3.37 定向誤差序列

表 3.11 定位定向誤差統計表

		北 (公尺)	東 (公尺)	高 (公尺)	滾轉(度)	俯仰(度)	航向(度)
LCI	平均值	-0.9619	-0.7806	0.9703	8.3334e-04	3.7209e-04	0.0467
	標準偏差	2.5168	1.9106	2.0781	0.0032	0.0027	0.0177
	均方根誤差	2.6943	2.0638	2.2934	0.0033	0.0027	0.0254
LN200	平均值	0.7798	-0.1782	2.0053	0.0072	-0.0021	-1.3354
	標準偏差	2.9103	1.6965	4.1799	0.0032	0.0035	0.0188
	均方根誤差	3.0483	1.7040	4.6591	0.0035	0.0037	0.0358



圖 3.38 LCI 即時解之效能

### 3.6 本章小結

目前國外具備生產戰術等級以上慣性測量儀之廠商絕大部分具備軍工背景，這些公司的產品接受國際武器輸出管制，出口程序與時間依國家之政策而變，本章針對有移動製圖系統相關實績之慣性測量儀供應商進行規格回顧。為了解慣性測量儀之性能，本案透過整合式定位定向系統模擬器依慣性測量儀之規格，模擬其動態與靜態之定位理論性能分析以提供選用具備合適規格的慣性測量儀。

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。本案引進之 LITEF 公司之 LCI 慣性測量儀規格與現有商用系統使用之 LN200 慣性測量儀之規格與定位定向精度相似；並透過自主研發的多元感測器整合之架構，整合 LCI 慣性測量儀，NovAtel Propak 雙系統雙頻 GNSS 大地等級接收儀、GNSS 天線與輪速計等設備。

為進一步降低系統成本與提升台灣在高精度慣性感測器技術之技術層次，未來宜朝向採用引進戰術等級光纖陀螺儀與石英加速度計以研製慣性測量儀搭配輔助感測器與先進多感測器整合演算法以符合所有多平台遙測製圖系統之應用；同時亦可嘗試使用戰術等級微機電陀螺儀與石英加速度計以研製慣性測量儀搭配輔助感測器與先進多感測器整合演算法以符合部分空載、車載、個人與海測之應用以符合作業成本與精度需求之考量。

在 GNSS 訊號遮蔽嚴重之新竹市區與數條長隧道之國道五號路測成果顯示，本案研發的多元感測器定位定向系統在未使用輪速計的條件下搭配自主研發的軟體所得之定位定向解精度不遜於要價 800 萬的商用系統。意即研發的系統在節省近 1/3 的成本下能夠提供與商用系統相似之定位定向精度以供不同平台移動遙測製圖技術之用。總而言之，本案研製之多元感測器定位定向系統具備合法引進且不受國際武器輸出許可管制、交貨時間短、規格與精度媲美同等級之商用定位定向系統、提供所有商用系統無法合法產生之原始觀測量、節省採購成本約 40%，與提供精密定位定向系統之硬體與軟體研發人才訓練等特色。

## 第四章 評估引進及建立國內慣性測量儀之標準率定程序

一個慣性測量儀主要由一組三個互相正交之陀螺儀與一組三個互相正交之加速度計所組成，圖 4.1 所示為一具慣性測量儀從最原始的一塊不銹鋼裁切成具備 3 個相互正交之支架、隨後逐一將單軸之陀螺儀與加速度計依載體坐標系之定義逐軸安裝，最後再將處理器與電路板裝妥以完成一具慣性測量儀之組裝。

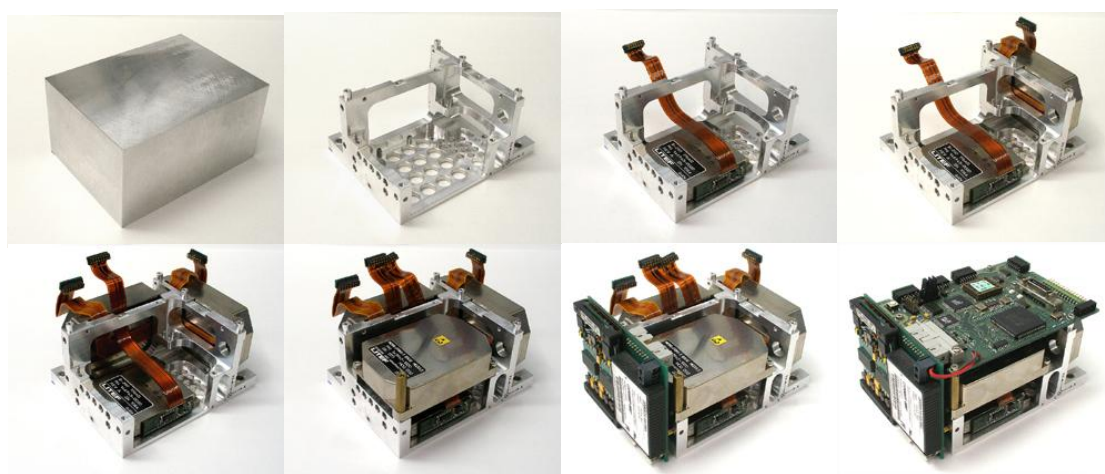


圖 4.1 慣性測量儀之內部配置(以光纖陀螺儀為例)

與所有測量儀器相同，這些慣性測量儀含有系統誤差；這些誤差可包含白雜訊、非白雜訊、加速度計偏差、陀螺偏差、尺度因子雜訊、軸交誤差與隨機誤差 (Titterton and Weston, 2004)。在這些系統誤差中，以加速度計偏差與陀螺偏差影響慣性測量儀性能最顯著。這些誤差來源與大小和慣性測量儀之製程、規格與價格息息相關。IEEE 1554-2005 號標準文件詳細規定慣性測量儀之測試與系統誤差率定程序及建議使用之相關設備(IEEE Std 1554-2005, 2005)；所有慣性測量儀製造商皆依此標準進行測試與率定並針對建立適當觀測量誤差模型，並透過專業旋轉測試平台測試陀螺儀、專業震動或加速平台測試加速度計，同時配合溫度測試櫃觀察上述系統誤差隨溫度變化之行為，再以最小二乘法平差等最佳推估工具推估上述各項系統誤差隨溫度變化的最佳估值，最後再將這誤差模式(含上述系統誤差最佳推估值)加入韌體中。

所以一般商用慣性測量儀所提供之觀測量皆已進行系統誤差補

償。這些原廠提供參數會受感測器的使用年限、溫濕度狀態與操作環境而影響其穩定度與可靠度，所以 IEEE 1554-2005 號標準文件建議對於戰術等級或以上之慣性測量儀以每半年進行完整的率定程序 (IEEE Std 1554-2005, 2005)，並重新估算率定參數，並於導航演算法前端中利用更新之率定參數進行觀測量補償，之後再進行導航計算。但目前所有提供商用的整合式定位定向系統的廠商並無提供相關機制，因為這些廠商並無自行生產慣性測量儀之能量，所以都仰賴慣性測量儀製造商提供的測試報告書，而且這些廠商並無提供使用者定期重新率定慣性測量儀之服務，同時國內亦無相關的民間或學術單位具備相關的技術或服務，這點對這些整合式定位定向系統之效能影響甚鉅。以小於 5 分鐘之時間長度而言，慣性測量儀之定位誤差與加速度計飄移 (accelerometer bias,  $b_a$ ) 與陀螺飄移 (gyro bias,  $b_g$ ) 之關係分別為

$\frac{1}{2}b_a t^2$  與  $\frac{1}{6}b_g t^3$ ，故一般習慣使用這二組參數來評定慣性測量儀之精度

與價格，上述關係說明陀螺偏差對定位誤差之影響高於加速度計偏差之影響，這也是國際武器輸出管制列管戰術等級以上慣性測量儀之規定中主要針對陀螺飄移之規格與製程進行管制。圖 4.2 與 4.3 分別比較整合式定位定向系統慣用之戰術等級慣性測量儀。將慣性測量儀之載體坐標系三軸 (X-Y-Z) 以與當地水平導航坐標系統 (E-N-U) 三軸重合，且置於完全水平之測試平台上，對其 3 軸加速度計中，指北軸 (Y 軸) 加速度計加入 1mg 加速度計飄移；與 3 軸陀螺儀中，於指東軸 (X 軸) 陀螺儀加入 1 度/小時陀螺飄移，分析觀測 4 小時內，對純慣性導航解之影響。

該結果驗證陀螺飄移對純慣性導航模式解之精度影響遠高於加速度計飄移，同時，上述戰術等級慣性測量儀，若以純慣性導航模式運作下於 4 小時之後，其定位誤差已達數百公里。因戰術等級慣性測量儀之原始設計理念為提供中短程戰術飛彈使用，這些飛彈之運作時間皆少於 5 分鐘。而對於移動遙測製圖系統之應用中，戰術等級慣性測量儀必須搭配其他輔助系統，如 GNSS 與輪速計一起運作，如此可以應付少於 2~5 分鐘內之 GNSS 訊號脫落，並提供符合直接定位應用精度需求之所需之定位定向解。

圖 4.5 所示為一個完成圖 4.4 設置慣性測量儀之理想輸出示意圖，即慣性測量儀載體坐標系之三軸 (X-Y-Z) 已與當地水平導航坐標系統 (E-N-U) 三軸重合，且置於完全水平之測試平台上，故 3 軸加速度計與 3 軸陀螺儀理論輸出值，應分別為式 (4.1) 和式 (4.2) 所示：

$$f_x = 0; f_y = 0; f_z = -g \quad (4.1)$$

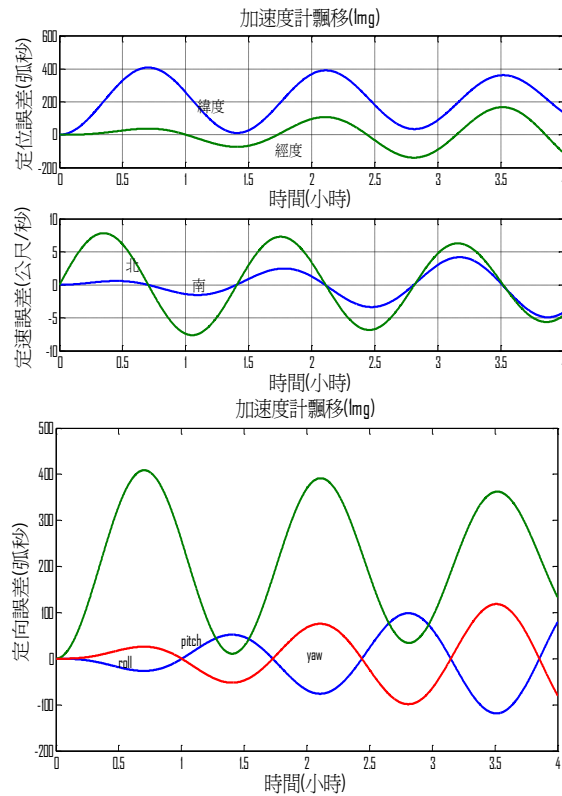


圖 4.2 1mg 指北加速度計飄移對慣性導航解之影響(4 小時)

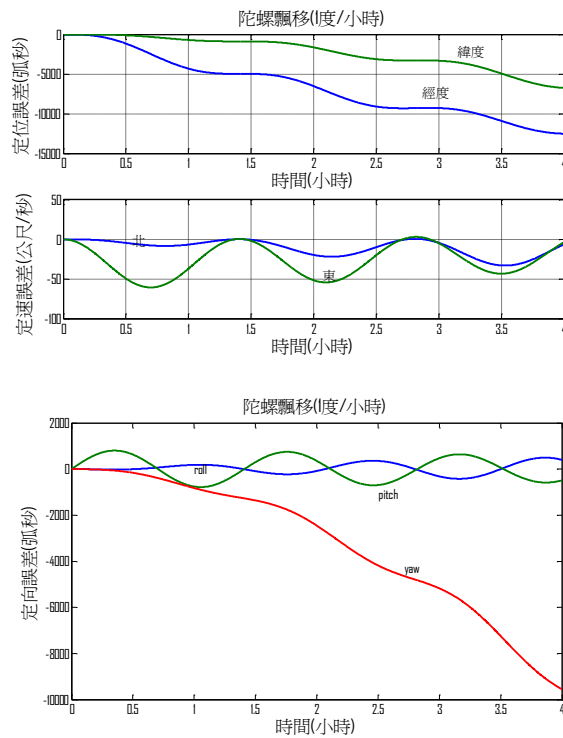


圖 4.3 1 度/小時指東陀螺飄移對慣性導航解之影響



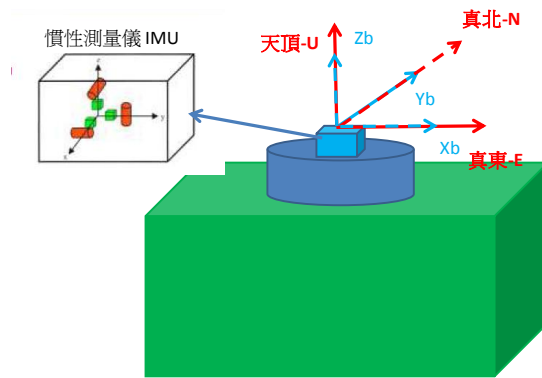


圖 4.4 模擬中慣性測量儀之設置

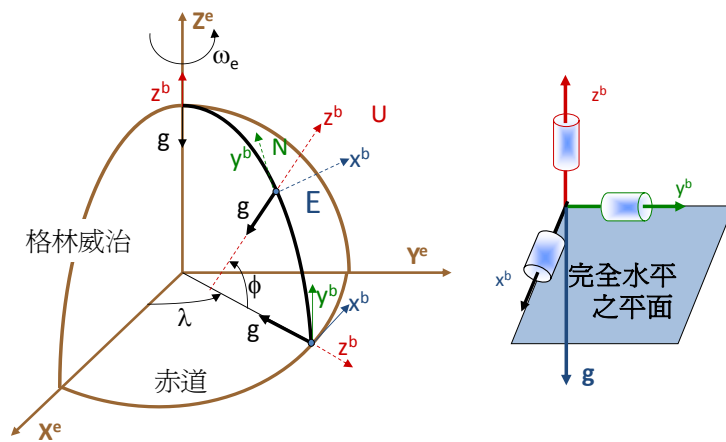


圖 4.5 慣性測量儀靜態觀測量值理論輸出示意圖

$$\begin{cases} \omega_E = \omega_X = 0 \\ \omega_N = \omega_Y = \omega_e \sin(90 - \phi) = \omega_e \cos(\phi) \\ \omega_{UP} = \omega_Z = \omega_e \cos(90 - \phi) = \omega_e \sin(\phi) \end{cases} \quad (4.2)$$

其中 $\omega_e$ 地球自轉速度；而 $\phi$ 為使用者所在之緯度。但加速度計與陀螺儀實際輸出會受各種系統誤差影響，相關數學模型將於 4.1 節詳述之。

#### 4.1 發展具備陀螺儀之慣性測量儀誤差校正模型

慣性測量儀誤差補償範圍，可以從採用一個常數對整批儀器進行單一誤差參數的修正，到採用複雜的時變多項式進行單個感測器的多

參數補償。前種類型的補償採用例如“生產線”評估得到的平均數據，並且主要對特定一類感測器呈現的系統性誤差趨勢進行補償。另一種極端情況需要通過一系列實驗室測試，確定每個感測器的特性，然後根據測試結果對每個感測器的性能進行修正。在這種情況下，對每個感測器的誤差係數進行定量評估，從而對觀測的測量值進行系統性誤差修正。利用現代計算機和數據存儲技術，此種方法變得更為可行。

前一類型的誤差補償在系統上通常非常容易實現，特別是當每個感測器被視為相同時更是如此。對於後一種情況，補償處理較為複雜和困難，這是由於補償的程度隨系統而異。當然，每個感測器都有其自身的一套誤差係數，用於修正的係數可以電子形式儲存到每個感測器內的“處理器”中。但是這種方法確實為每個感測器性能提供顯著的改善，從而提升所組成系統之精度。補償方法的選擇通常是各種因素間的折衷方案，但主要是在實現的難易程度與感測器精度改善所獲得的好處之間的平衡。當然，另一個考慮在於確定詳細特性需要的額外成本與使用更為精確感測器所付的代價之間的折衷方案。

典型慣性測量儀具備的系統誤差，包含：白雜訊、非白雜訊、加速度計偏移、陀螺儀偏移、尺度因子雜訊、軸交誤差與隨機誤差，如圖 4.6 所示，其中以偏移影響最鉅，以下將針對各感測器誤差介紹（胡智祐，2009）。

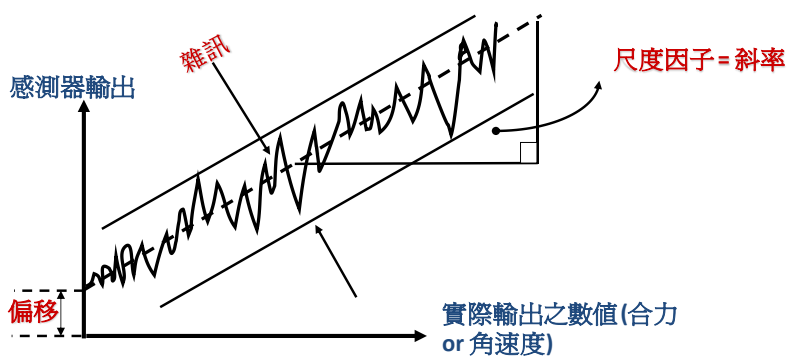


圖 4.6 慣性測量儀各系統誤差之影響

慣性測量儀觀測量偏移表示為一段時間內，感測器未受到任何加速度或是角速度的情況下，觀測量所產生的偏差及飄移，其中加速度計常用單位為公尺/(秒)<sup>2</sup>( $m/s^2$ )或 mg，而陀螺儀為度/時(deg/hr) 或弧度/秒(rad/s)。加速度計偏移與陀螺偏移更精確之分類介紹如下。其一為系統 (deterministic) 偏差；稱為原位偏移(bias offset; run-to run bias; turn-on bias)，此偏移顯示每次開機時，慣性測量儀觀測量與真值之偏

移量，等級越高的系統，此偏移量越小；如戰術等級陀螺儀之偏移量在 1 度/小時至 10 度/小時之間，此種誤差可以透過建立觀測量誤差模型以率定方式移除。其二為隨機統計型(stochastic)偏差；稱為偏差飄移 (bias drift, in-run bias)，此偏移顯示每次開機後，慣性測量儀觀測量與真實值隨時間飄移之現象，等級越高的系統，此飄移量越小；如戰術等級陀螺儀之飄移量在 1 度/小時至 10 度/小時之間。此種誤差無法透過建立觀測量誤差模型並以率定方式移除，只能透過建立適當的統計模型，並於導航方程式中妥善處理方能減低其影響。其三為偏差飄移穩定性(Bias stability)；偏差飄移之最大值，與溫度及時間有關，如圖 4.7 完整說明各飄移之關係。圖 4.8 所示為一個陀螺飄移為 7 度/小時之光纖陀螺儀，置於一個完全水平之平台上(使用者所在位置為北緯  $51^\circ$ )，輸入軸指向天頂(感測當地之地球自轉分量)，若無任何誤差，該陀螺於 3.2 小時後之輸出應該為 11.67 度/小時，然而陀螺飄移的影響，讓 3.2 小時後之輸出飄移至約為 22.4 度/小時(取下圖陀螺儀輸出之平均值)。

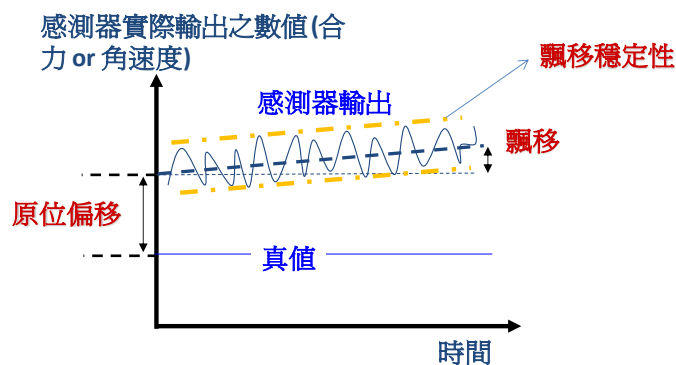


圖 4.7 慣性測量儀偏差對觀測量之影響

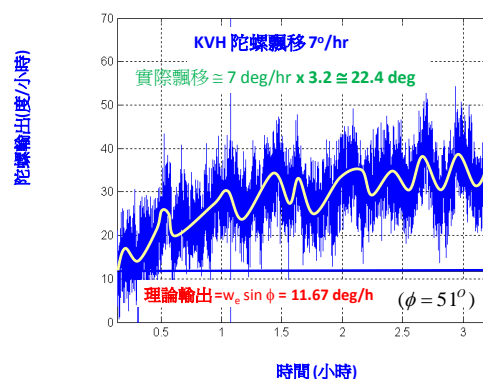


圖 4.8 慣性測量儀偏差對觀測量影響之實際範例

圖 4.9 所示為尺度因子之示意圖，該值表示感測器輸出與真值之

比例，理想感測器輸出值為 1，其特徵主要為線性分布，而加速度計可追加至非線性二次項部分。另外尺度因子的穩定度表示感測器所提供原始觀測量之準確度(與真值差異之標準偏差)，一般以 ppm 表示，例如 LN-200 陀螺尺度因子之穩定度為 100ppm，表示原廠提供尺度因子之準確度為 100ppm。尺度因子可以透過率定與導航方程式補償。

由於工業製造技術之限制，使得三軸彼此間未完美符合正交之假設，於觀測時各軸感測之觀測量受其他兩軸影響，其示意圖如圖 4.10 所示。此向系統誤差之率定相當重要，例如圖 4.11 中之 Z 軸加速度計若安裝時未能符合正交之假設，原 Z 軸加速度計之輸出會變成  $g\cos\theta$ ，較理論值小，而輸出原為零之 X 與 Y 軸卻因為重力投影分量之影響，由靜止加速度計之觀測量，經慣性導航演算法計算後會呈現運動之狀態，意即原為靜止的系統經積分後卻因重力投影誤差卻顯示為運動狀態，故妥善的率定與測試策略，對確保定位定向系統精度是相當重要的。

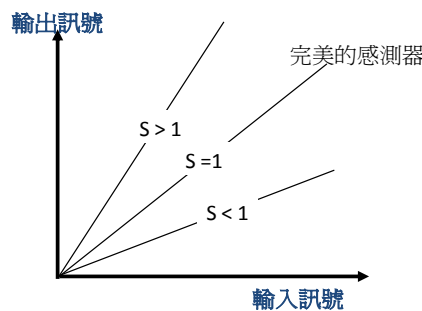


圖 4.9 尺度因子對觀測量之影響

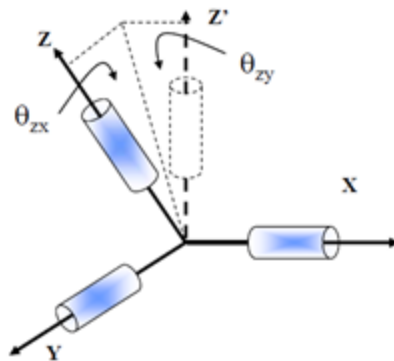


圖 4.10 軸交誤差

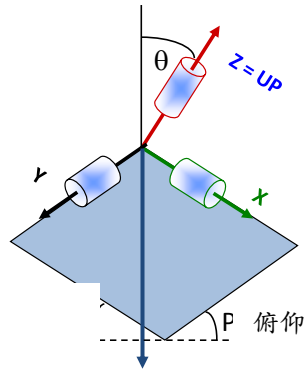


圖 4.11 軸交誤差對觀測量之影響

慣性感測元件所產生之隨機雜訊，假設為白雜訊，其定義為在靜態的隨機過程中，具有一定的功率密度，隨機過程以式(4.3)表示，而其自相關函數如式(4.4)與圖 4.12 所示。

$$x(t) = W(t) \quad (4.3)$$

$$R(\tau) = E(x(t)x(t+\tau))$$

or

$$R(\tau) = \int x(t)x(t+\tau)dt \quad (4.4)$$

其中 $R(\tau)$ 為自相關係數， $x(t)$ 為慣性測量儀之輸出。

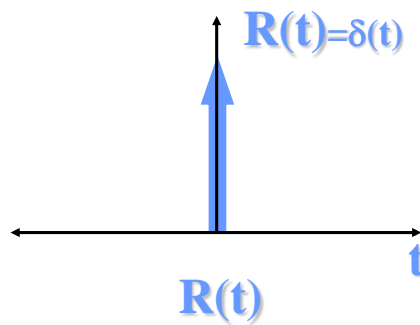


圖 4.12 隨機過程之自相關函數

慣性測量儀雜訊為非系統性的誤差，且難以從系統中移除，只能以隨機過程模式化，由於導航方程的積分過程，加速度計與陀螺儀的雜訊會分別造成速度及角度的隨機偏移量，這種偏移量可以隨機過程描述，稱為速度的隨機游走(Velocity Random Walk, VRW) 及角度的隨機游走(Angular Random Walk, ARW)(Godha, 2006)。除了隨機模式外，一般實務上常以一階高斯馬可夫模型(1<sup>st</sup> order Markov Process)描

述慣性測量儀之雜訊，其數學公式如下：

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{\tau}x(t) + \sqrt{\frac{2}{\tau}}\sigma^2W(t) \quad (4.5)$$

其中 $\sigma^2$ 為變方， $\tau$ 為相關時間(correlation time)。

$\sigma^2$ 與 $\tau$ 可透過對慣性測量儀輸出的自相關函數求得，公式如下：

$$R(t) = \sigma^2 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.6)$$

將慣性測量儀輸出的自相關函數 $R(t)$ 繪出，如圖 4.13 所示。變方可由圖上讀出，而最重要的為決定相關時間 $\tau$ 。當 $t=\tau$ 時，則 $R(t)=\sigma^2 e^{-1}=0.367\sigma^2$ ，因此藉由圖 4.13 與式(4.6)，可利用最小二乘法的方式解出相關時間。圖 4.14 左所示為將圖 4.1 之光纖陀螺儀，藉率定移除陀螺飄移之觀測量，該圖可明確看到原始觀測量受雜訊上下震盪之影響，而圖 4.14 右所示為計算該陀螺儀約 3 小時輸出所得之自相關函數，由該圖利用最小二乘法解得相關時間 $\tau$ 為 0.5 小時，藉此可以建構適用該陀螺儀之一階高斯馬可夫模型，以利後續發展最佳推估演算架構之用。而圖 4.15 所示為高階導航等級雷射陀螺儀之輸出範例，此等級系統受國際武器輸出管制，取得過程更為費時，價格更為昂貴，光是慣性測量儀本體國外原廠報價一般都超過 500 萬台幣(原廠直接報價)，若透過國內代理商銷售管道，此等級系統一般估計要超過一千萬台幣。

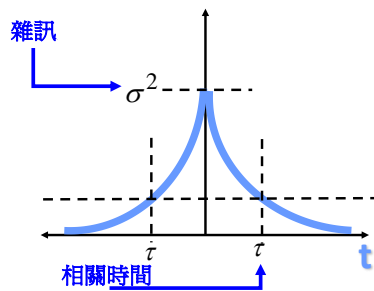


圖 4.13 一階高斯馬可夫過程之自相關函數

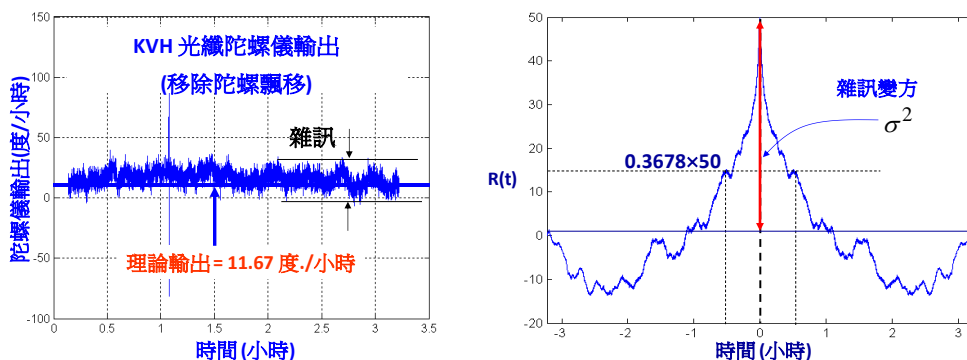




圖 4.14 一階高斯馬可夫之範例

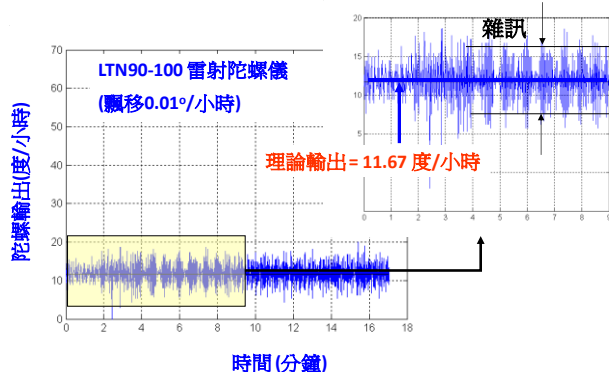


圖 4.15 高階雷射陀螺儀雜訊影響之範例

圖 4.16 所示為 LTN90-100 導航等級慣性測量儀加速度計於靜止狀態之加速度計輸出，此圖可以明確顯示上述各系統誤差對原始觀測量之影響，其中尺度因子之效應必須有輸入訊號方能顯示，故對一個完全靜止且定平之慣性測量儀而言，只有 Z 軸加速度計可以感受到重力輸出，所以尺度因子效應可以顯現出來，至於其他軸的加速度計可以看出偏差、軸交誤差與雜訊之影響，同理，對一個完全靜止且已定平定向之慣性測量儀而言(如圖 4.4)，其指北與指天頂之陀螺儀已有固定輸出，而指東陀螺儀輸出應為零，故透過這些理想值在與慣性測量儀實際提供之輸出進行比較與分析，如可以透過最佳推估工具建立這些系統誤差之補償模型，以確保定位定向系統之精度。另圖 4.17 所示為一低成本微機電慣性測量儀其三軸加速度計之輸出，與圖 4.16 相較之下，其飄移量與雜訊明顯的增加許多。

綜合上述典型慣性感測器誤差，並將之納入誤差校正模型，所得加速度計模型如式(4.7)所示(Artese and Trecroci, 2008)。

$$I_f = f + b_f + S_1 f + S_2 f^2 + Nf + \varepsilon(f) \quad (4.7)$$

- $I_f$  : 合力(specific force)觀測量 (公尺/秒<sup>2</sup>)
- $f$  : 真實合力 (公尺/秒<sup>2</sup>)
- $b_f$  : 加速度飄移 (公尺/秒<sup>2</sup>)
- $S_1$  : 線性尺度因子
- $S_2$  : 非線性尺度因子
- $N$  : 軸非正交矩陣
- $\varepsilon(f)$  : 為加速度計雜訊 (公尺/秒<sup>2</sup>)

上述加速度計之觀測量方程式包含真值、飄移量、線性尺度因子、非線性尺度因子、軸交誤差及隨機雜訊。而陀螺儀之模型則如式

(4.8)所示(Artese and Trecroci, 2008)。

$$I_{\omega} = \omega + b_{\omega} + S \omega + N \omega + \varepsilon(\omega) \quad (4.8)$$

- $I_{\omega}$ ：角速度觀測量 (度/小時)
- $\omega$ ：真實角速度 (度/小時)
- $b_{\omega}$ ：陀螺飄移 (度/小時)
- $S$ ：陀螺儀尺度因子
- $N$ ：軸非正交矩陣而
- $\varepsilon(\omega)$ ：陀螺儀雜訊 (度/小時)

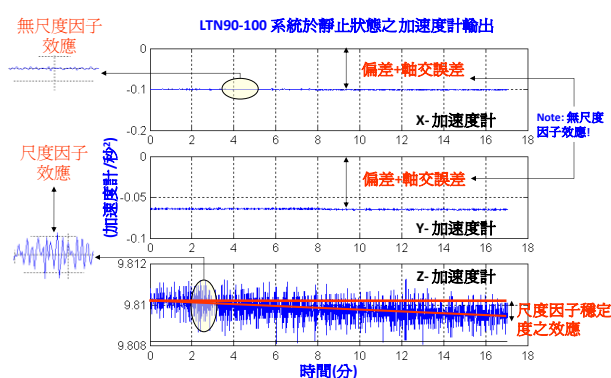


圖 4.16 高階慣性測量儀加速度計輸出範例(含各式系統誤差)

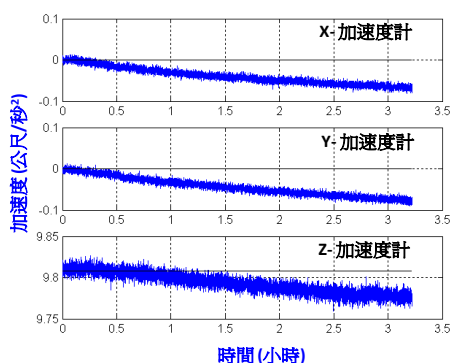


圖 4.17 微機電加速度計輸出範例(含各式系統誤差)

上述陀螺儀之觀測量方程式包含真值、飄移量、線性尺度因子、軸交誤差及隨機雜訊。建立慣性測量儀之原始觀測量方程式後，接下來即是透過標準之測試與率定設備搭配演算法計算上述各系統誤差參數最佳化估值；並於導航演算法中適當的引用這些系統誤差參數改正原始觀測量以確保定位定向系統之可靠度。

## 4.2 建立慣性測量儀各系統誤差之率定模式

根據被測試的慣性測量儀或系統以及所需的評估方式，使用者可以採用靜態或動態測試方法。在靜態測試情況下，元件或系統保持固定並觀測其對一定的自然效應或現象的響應。例如，由地球重力產生的合力可以通過一加速度計放在不同的方向來進行觀測。當進行動態測試時，使被測慣性測量儀運動，監視感測器對該擾動的響應並與參考訊號進行比較。確定慣性測量儀或系統的特性可以採取下列的 3 個步驟：

1. 採用非常簡單的測試進行初步評估，如在測驗台上進行單一的靜態位置測試以確定其響應是否與設計者或製造者的預測相同。
2. 多位置測試進行靜態測試或率定以獲得感測器或系統的性能參數。
3. 進行動態測試。測試時器件處於運動狀態，如旋轉或具有加速度的線性運動。這種形式的測試需要專門的測試設備，如速率轉台或振動台。

慣性測量儀和系統在整個開發與使用階段要實施不同的測試和率定。在樣機或初始研究開發階段，要設計測試策略用以估計感測器的性能極限，進行效益評估，且對元件不會造成損壞，正因如此樣機通常造價昂貴。根據感測器類型，測試可以在平台上進行，而不是在專門的實驗室中測試。測試通常的安排是在系列試驗中的一樣，每次只改變諸多環境激勵中的一個，以便了解感測器的響應並確定其特性。在此階段及後續階段的測試過程中，最重要的是堅持進行完整的紀錄，以記錄全部測試的詳細內容和獲得的成果。諸多的測試項目制定所謂的組合測試方案。其概念是建立一個測試方案，採用最少量的測試確定系統的性能和可靠性，原因是測試往往耗時且昂貴。因此，在測試方案中，從鑑定測試和驗收測試中紀錄的數據可以作為組合測試方案的輸入，特別是關於運行數據及與時間有關的性能變化。這些數據可以幫助估計該系統潛在的可靠性及平均故障間隔時間。隨著慣性測量儀或系統研究和開發階段的不斷進展，測試愈深入得以進一步研究其性能。一般而言，對感測器進行更為精確的評估需要在複雜的測試實驗室和專用測試設備上進行。某些元件將被測試到破壞的程度，但這通常是在嚴格控制和謹慎的方式下進行。

感測器通過對其產生的模擬或數位信號與已知的輸入運動加以

比較進行率定。這樣從速率變換測試中，陀螺儀的輸出信號可以與精確已知的旋轉速率進行比較，且尺度因子可以確定到如多少毫伏/(度·秒)的旋轉速率。類似地，採用重力向量作為精確的標準，也可以確定加速度計的尺度因子。誤差補償有幾種不同的級別可以採用。但是基本的思路都是相同的，即修正可以預測的一種或多種系統誤差對感測器精度的影響。另外，基本的要求是誤差過程可以用方程來表示並進而加以數學建模，並且可以得到對應於干擾作用(如溫度或加速度)的信號，而且可以按照需要的精度進行測量。下面給出了一個建議的測試方案，能夠對慣性測量裝置或整個慣性導航系統進行詳細檢查。

**靜態加速度測試：**將導航系統安裝到水平台上，使其每個敏感軸分別指向上和下(六位置測試)，有可能得到相對於一組基準安裝面的加速度計原位偏差、尺度因子和軸交誤差的估計。這些估計值可以通過對各種組合的加速度計觀測值求和及求差計算得到。

**靜態速率測試：**通過檢測系統在預先設定的時間週期內，以及該裝置多個不同的安裝方向所給出的角速率測量值，有可能從中得出陀螺儀固定原位偏差和與 g 相關的原位偏差。如同前面的測試，利用求和及求差的方法可以用來分離各種誤差分量。

**角度測試：**採用一台精密多位置測試台，慣性測量裝置可以轉動非常精確的已知角度。通過對這些已知的旋轉角度與由陀螺儀的速率輸出積分導出的這些旋轉角度的估值進行比較，就可以求出陀螺儀測量值各種誤差的估值。例如，如果轉台順時針和逆時針方向旋轉過相同的角度，陀螺儀對於殼體安裝誤差的估值連同陀螺儀原位偏差和尺度因子誤差就可以求出。

**慣性導航系統多位置測試：**此方法把感測器缺陷的傳播，作為在導航參考坐標系中導出的加速度分量的誤差。只要進行足夠數量的旋轉測試，這種方法就可以用於求取含有常規陀螺儀的固裝系統中大部分主要感測器誤差的估計。

在對特定裝置的測試選擇合適的一組旋轉中，通常包含繞每個軸旋轉 90°和 180°。對於包含常規陀螺儀的系統測試，符合此要求使得陀螺儀的原位偏差、與 g 相關的誤差和安裝誤差以多種不同的線性組合出現在測量方程中，並因此變為可觀測量。此外，在各單獨的方向測試時，必須保持裝置每個軸與當地垂直線對準，包括向上和向下兩個位置，以便對加速度計原位偏差、尺度因子誤差和安裝誤差加以辨

識，並可以採用兩自由度測試台來實現的一組旋轉。實際上，上述的一組測試可以按照回歸的方式實現，利用一次測試得到的誤差估值來更新或修正下次測試使用的誤差模型。採用不同的信號處理方法求取系統誤差的估值。對於這裡所述類型的實驗室測試，一般使用最小二乘法來計算誤差的幅值就已足夠，而卡曼濾波技術常常用來作為最小二乘法的另外一種選擇。圖 4.18 說明了 IEEE 1554-2005 號標準文件所建議之完整測試程序。

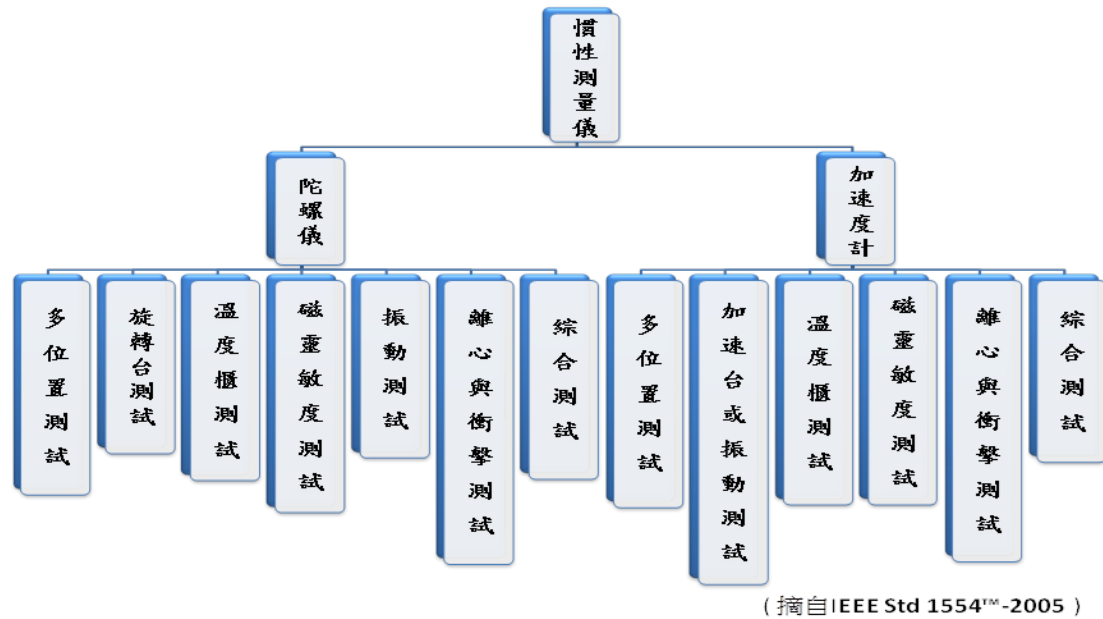


圖 4.18 IEEE 1554-2005 號標準文件所建議之測試程序

#### 4.2.1 率定模式介紹

根據上述諸多方案，本案擬依 IEEE 1554-2005 號標準文件所建議而規劃國內定位定向系統使用之慣性測量儀的測試方案應包含：靜態多位置測試、動態多位置測試、溫度櫃測試、綜合測試及阿倫變方分析，架構圖如圖 4.19 所示。

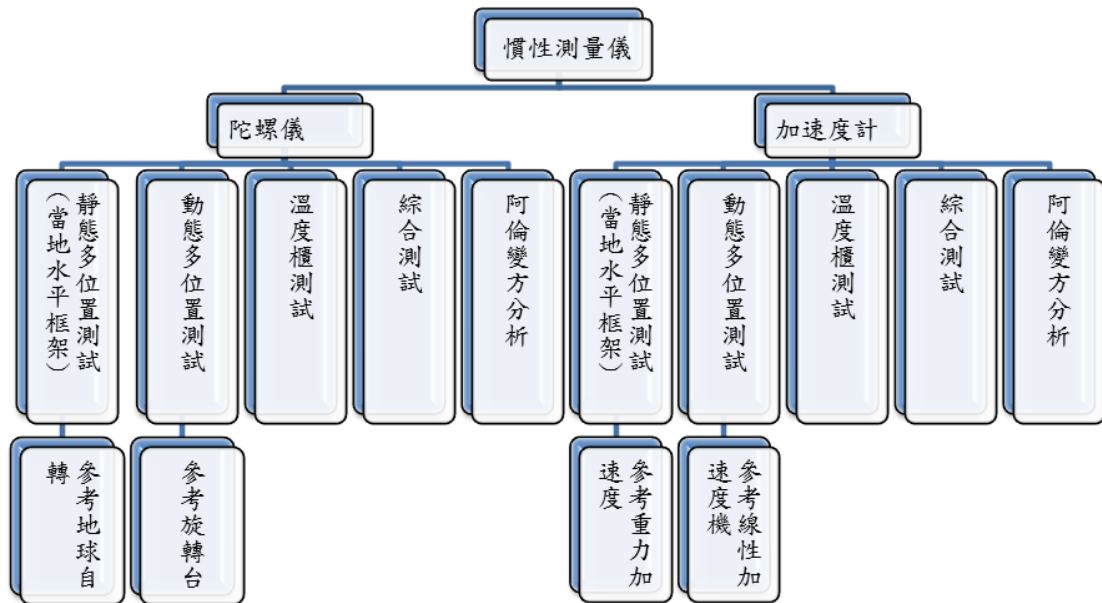


圖 4.19 率定模式之架構圖

本案規劃之靜態多位置測試以對準當地水平坐標系統，加入重力與地球自轉為參考訊號，並使用具備定平定向功能之測試平台(可旋轉以瞄準已知方位角或對準正北)，依照一定次序擺放，用來估計感測器的各種誤差，其擺放方式如圖 4.20、表 4.1 所示，使三軸輪流對齊重力線之方向。靜態多位置測試可同時用來率定陀螺儀及加速度計，慣性測量儀感測到地球的自轉訊號，可作為陀螺儀之參考，而重力加速度，則可作為加速度計之參考，圖中之方型夾具可以依照不同旋轉順序依序固定待測慣性測量儀，而旋轉台可提供指北做靜態測試與連續旋轉作動態測試。

將軸向分別對準天頂及天底，如此即可用來估計該軸陀螺儀與加速度計之原位偏差及尺度因子，如圖 4.21 所示，其簡易率定模式如式(4.9)、式(4.10) (Hayal, 2010)。

$$b = (f_1 + f_2) / 2 \quad (4.9)$$

$$S = (f_1 - f_2 - 2 * k) / (2 * k) \quad (4.10)$$

- $b$ 、 $S$ 分別為偏差及尺度因子。
- $f_1$ 、 $f_2$ 分別為指向天頂及天底感測的合力。
- $k$ 表示為參考值，如加速度計為重力加速度、陀螺儀為地球自轉。



表 4.1 三軸方向示意圖

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
X	E	E	U	S	S	D	W	W	N	N	N	D
Y	N	U	W	W	D	N	N	U	U	E	D	S
Z	U	S	S	D	E	E	D	N	E	D	W	W
$\theta$	$\theta_x = 90$	$\theta_z = 90$	$\theta_y = -90$	$\theta_x = 90$	$\theta_z = 90$	$\theta_y = 90$	$\theta_x = -90$	$\theta_y = -90$	$\theta_x = 90$	$\theta_x = 90$	$\theta_z = 90$	x

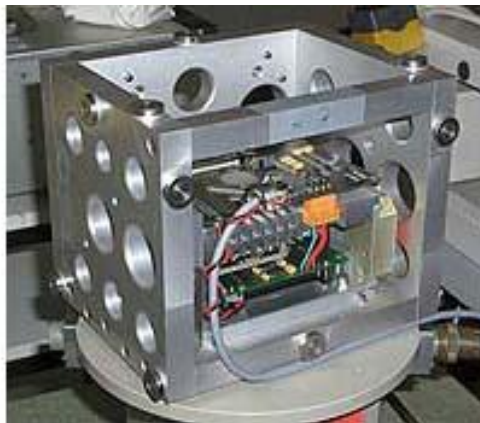
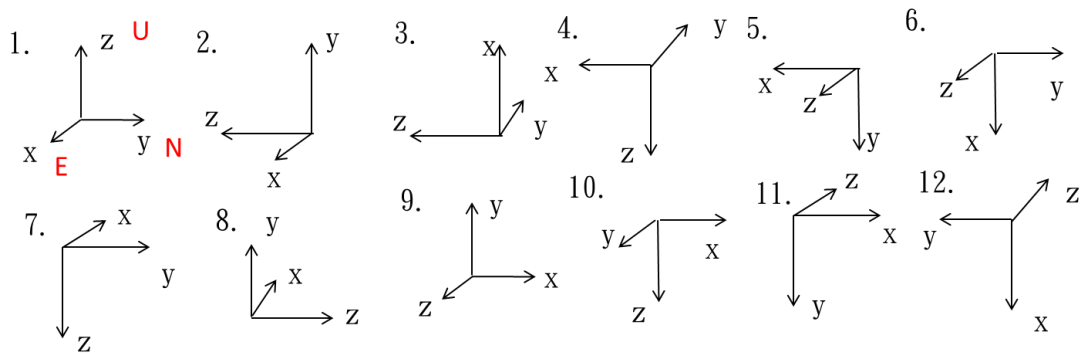


圖 4.20 12 位置測試(Titterton and Weston, 2004 )

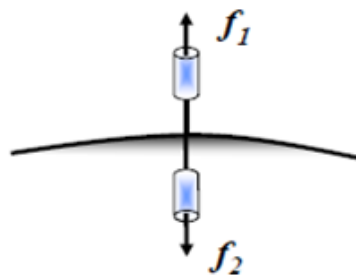


圖 4.21 偏差及尺度因子率定原理

而本案使用最小二乘法估計偏差、尺度因子、軸交誤差，故亦將兩者結果相互比較，其加速度計及陀螺儀最小二乘法模型，如式(4.11)、式(4.12)所示。透過 12 位置產生之觀測量與參考訊號比較，如此可以推估出這些參數之最佳估值(Hayal, 2010)。

$$\begin{bmatrix} l_{fx} - f_x \\ l_{fy} - f_y \\ l_{fz} - f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_x & f_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & f_y & f_y^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f_z & f_z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{fx} \\ S_{1x} \\ S_{2x} \\ b_{fy} \\ S_{1y} \\ S_{2y} \\ b_{fz} \\ S_{1z} \\ S_{2z} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} l_{\omega x} - \omega_x \\ l_{\omega y} - \omega_y \\ l_{\omega z} - \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \omega_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \omega_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\omega x} \\ S_x \\ b_{\omega y} \\ S_y \\ b_{\omega z} \\ S_z \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

#### 4.2.2 測試及結果

本團隊使用第二章所開發模擬器，將慣性測量儀，依圖 4.20 之擺放方式產生完美無誤差的觀測量，每項位置以 200 赫茲頻率觀測 20 分鐘，之後將偏差及尺度因子逐項加入，其觀測量如圖 4.22 至圖 4.27，加入之各項誤差如表 4.2 所示。

表 4.2 模擬之各項誤差真值

項目	加速度計	陀螺儀
偏差	$1 * 10^{-5}$ 公尺/秒 <sup>2</sup> = 1 mg	$4.848 * 10^{-6}$ 弧度/秒 = 1 度/小時
線性尺度因子	1000ppm	500ppm
非線性尺度因子	500ppm	NA

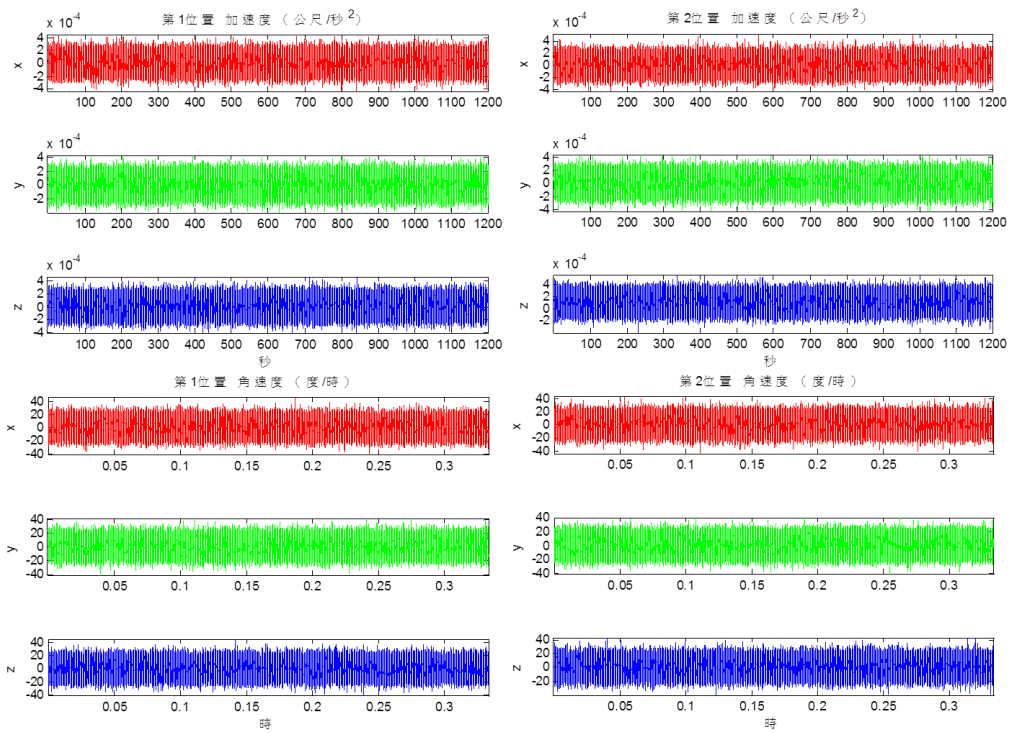


圖 4.22 第 1、2 位置觀測量

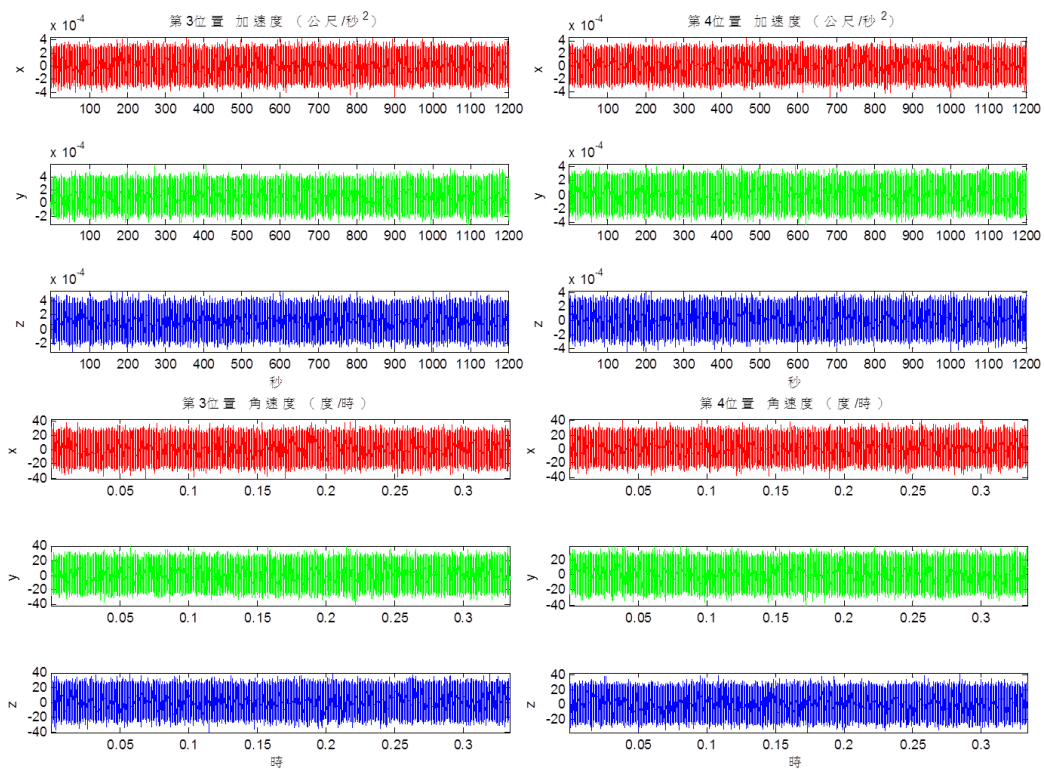


圖 4.23 第 3、4 位置觀測量

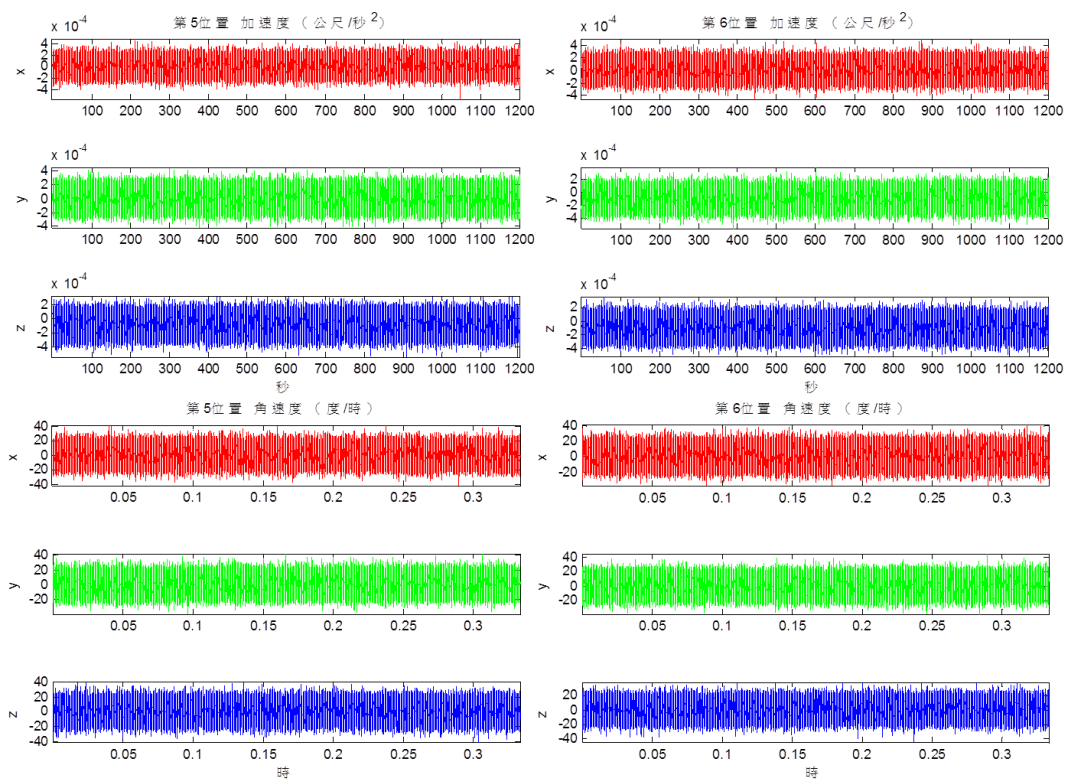


圖 4.24 第 5、6 位置觀測量

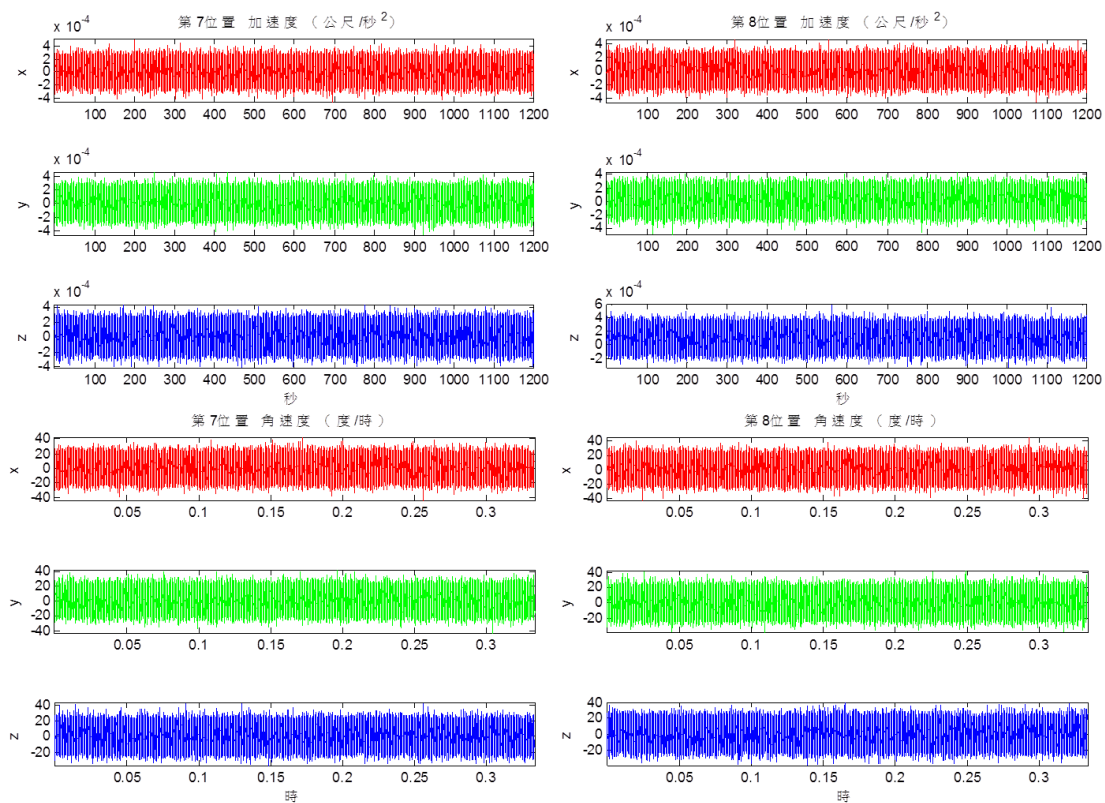


圖 4.25 第 7、8 位置觀測量

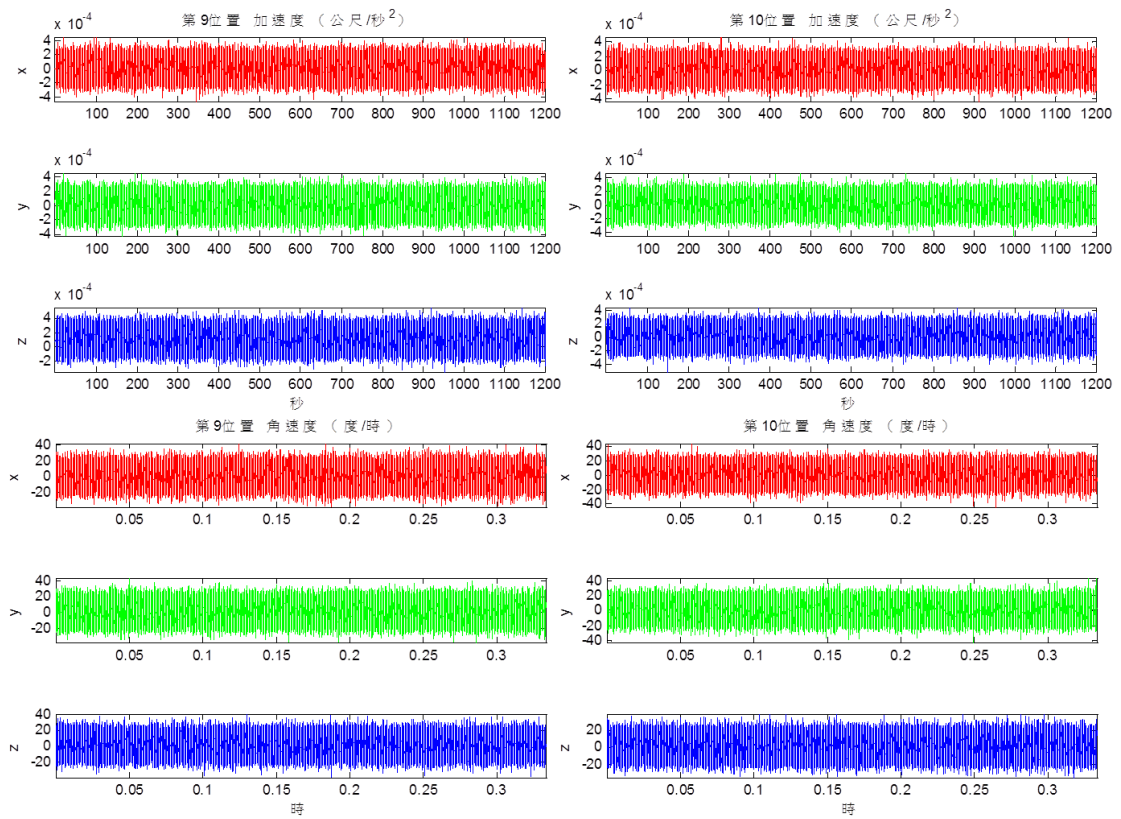


圖 4.26 第 9、10 位置觀測量

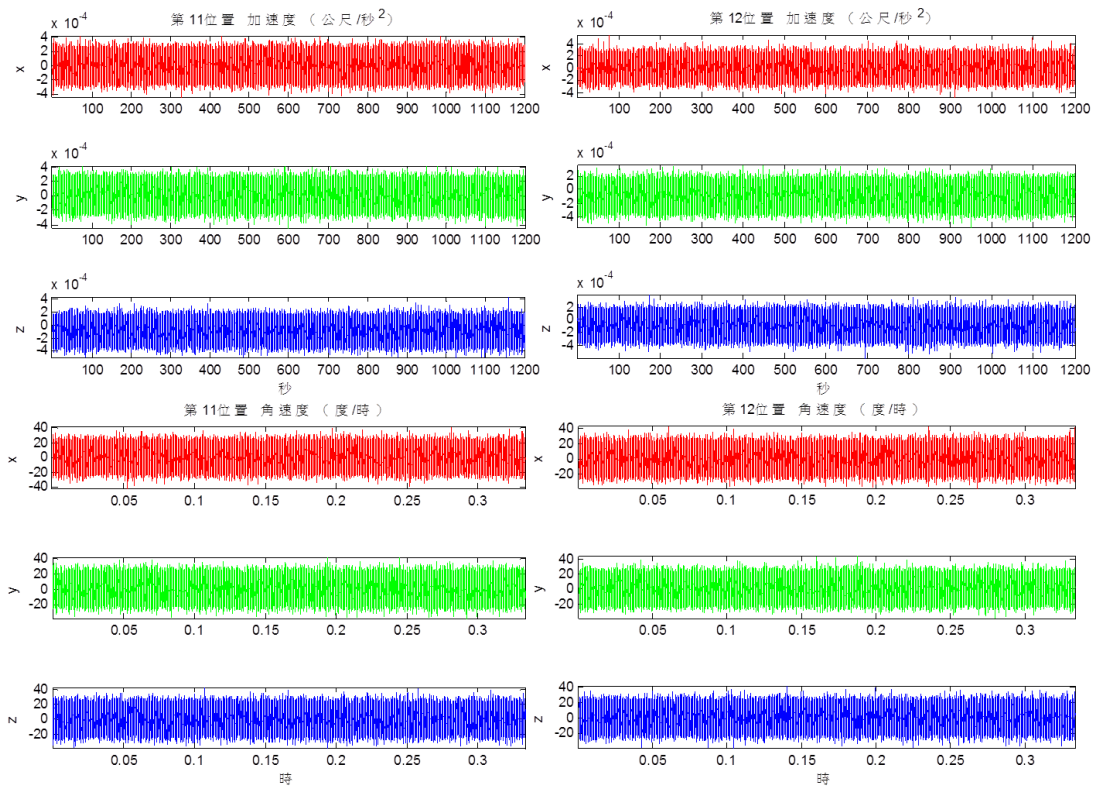


圖 4.27 第 11、12 位置觀測量

比較簡易率定模型求出之均值(可視為偏差與尺度因子)與標準偏差(可視為其穩定性)及最小二乘法之結果,其結果如表 4.3、表 4.4、圖 4.28 及圖 4.29 表示。

表 4.3 估算系統偏差之率定結果

		x	y	z
加速度計 $m/s^2$	偏差	9.99604	$9.99289 \times 10^{-6}$	$9.99214 \times 10^{-6}$
	穩定性	$7.1039 \times 10^{-5}$	$7.0653 \times 10^{-5}$	$7.0229 \times 10^{-5}$
	偏差 (最小二乘)	1.00021	$9.99996 \times 10^{-6}$	$9.99897 \times 10^{-6}$
陀螺儀 deg/hr	偏差	0.9998191	0.99917354	0.9974718
	穩定性	$3.0749 \times 10^{-5}$	$3.1106 \times 10^{-5}$	$3.0973 \times 10^{-5}$
	偏差 (最小二乘)	$4.85100 \times 10^{-6}$	$4.84758 \times 10^{-6}$	$4.84397 \times 10^{-6}$

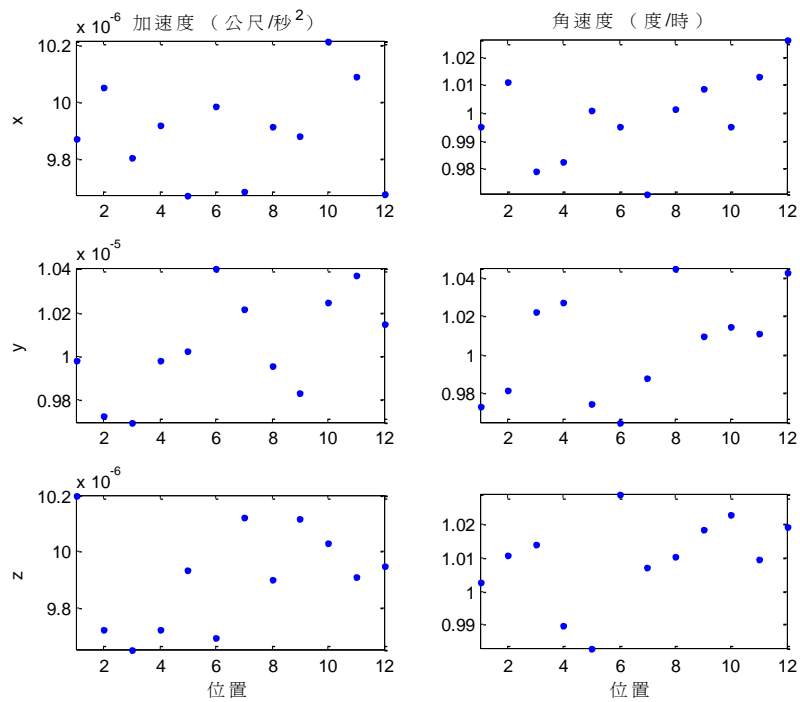


圖 4.28 12 位置誤差圖

表 4.3 所讀取之模擬觀測量只加入偏差,比較簡易率定方式及最



小二乘所求之結果，其偏差是極其相近，而圖 4.28 則為加速度計及陀螺儀於 12 位置三軸的偏差序列。

表 4.4 所讀取之模擬觀測量則同時加入偏差及尺度因子，比較簡易率定方式及最小二乘法所求之結果，可看出由簡易率定方式，其結果受尺度因子影響已偏離真值，而最小二乘法因有其對應參數，具有相當的約制能力，從表中可明顯看出較簡易模型更接近真值，而圖 4.28 則為加速度計及陀螺儀於 12 位置三軸的誤差。

將上述二表之結果與表 4.2 比較下可確認本團隊研發之簡易率定模型與最小二乘法率定架構皆可有效推估上述系統誤差之參數，接下來將持續透過不同等級模擬與真實觀測量來修正相關系統誤差模型，同時於期末報告時引入軸交誤差之推估功能。同時上表中以簡易率定模型推估所得之偏差值穩定性較大，但這些值此與加入原始觀測量中之隨機雜訊之標準偏差值(2 度/小時)接近。

表 4.4 估算系統偏差及尺度因子率定之結果

		x	y	z	
加速度計 $m/s^2$	偏差	9.97693	$9.99839 \times 10^{-6}$	$9.99668 \times 10^{-6}$	
	偏差飄移穩定性	$7.0448 \times 10^{-5}$	$7.0522 \times 10^{-5}$	$7.0410 \times 10^{-5}$	
	線性尺度因子 ppm	999.9813	1000.0396	1000.0502	
	最小二乘法	偏差	$9.99653 \times 10^{-6}$	$1000.21742 \times 10^{-6}$	$9.99674 \times 10^{-6}$
		線性尺度因子 ppm	1000.0449	1000.0092	1000.0437
		非線性尺度因子 ppm	-350.20	437.50	500.00
陀螺儀 deg/hr	偏差	0.9998887	0.9999795	1.0000241	
	偏差飄移穩定性	$3.0974 \times 10^{-5}$	$3.0778 \times 10^{-5}$	$3.0825 \times 10^{-5}$	
	線性尺度因子 ppm	7458.9407	7950.7210	-13303.3460	
	最小二乘法	偏差	0.9999583	0.9999565	0.9999929
		線性尺度因子 ppm	7076.2865	1381.3592	-5983.4290

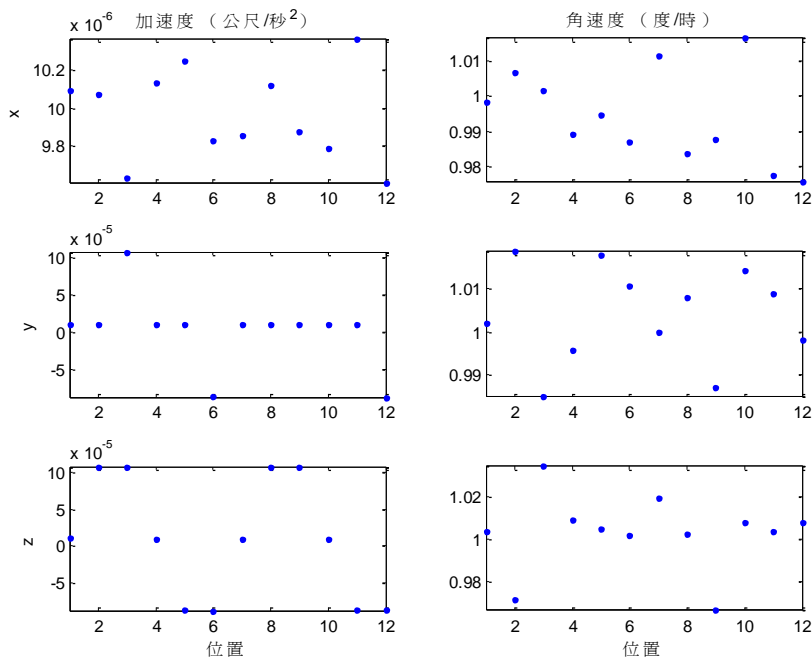


圖 4.29 12 位置誤差圖

### 4.3 研擬提升慣性測量儀穩定性之技術

本案進一步引入慣性測量儀製造商根據IEEE 1554-2005號標準文件所使用阿倫變方(Allan variance)，以進一步估算慣性測量儀系統誤差參數之穩定性。阿倫變方起初的研究目的為分析振盪器頻率的穩定性，為1966年時由David Allan所提出，隨之該方法以廣為應用在分析精密振盪器的時頻穩定性(Allan, 1966)，而到1980年代第一篇將阿倫變方分析法應用在慣性元件為Kochakian所提出(Kochakian, 1980)，1998年阿倫變方分析由IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)正式介紹為雜訊分析方法，包含線性、單一、加速度等特性之測試與推導步驟 (IEEE Std1293-1998)，而Hou和El-Sheimy(2003)將其應用在微機電等級慣性測量儀之雜訊頻譜密度分析。

阿倫變方為對一含時間序列的資料分析工具，其對整段時間資料分析其雜訊特性，進而估計其精度。首先將一系列時間資料，區分為數個連續的叢集，對每個叢集時間的輸出值做平均，計算連續二個平均之變方，再將其延伸至整個時間段，即可完成阿倫變方，其說明如圖4.30及式(4.13)~式(4.17)。

圖 4.30 中，連續資料點的時間瞬刻為 $t_0$ ，而每個叢集的時間為 $T$ ，其中 $T$ 為小於整體時間段的一半，即表示至少將整體時間區分為兩個叢集， $n$ 為各叢集的資料筆數，亦表示該叢集涵蓋的時間長度。式(4.13)中， $\bar{\Omega}_k(T)$ 表示某一叢集的輸出值平均，而該叢集為從第 $k$ 個資料點開始，並涵蓋了 $n$ 筆資料(Hou, 2004)。而定義下一序列叢集為式(4.14)。

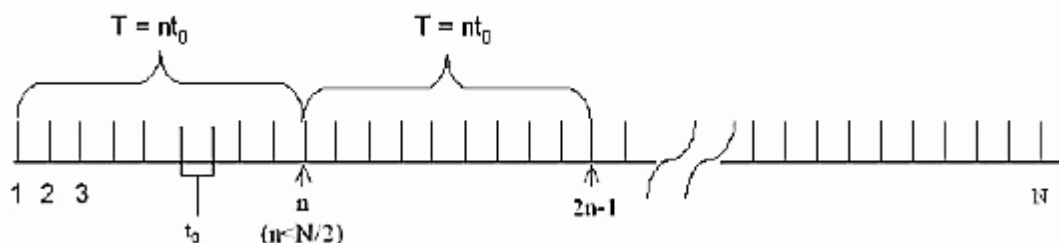


圖 4.30 阿倫變方時間區分(摘自 Hou, 2004)

$$\bar{\Omega}_k(T) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} \Omega(t) dt \quad (4.13)$$

$$\bar{\Omega}_{next}(T) = \frac{1}{T} \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+T} \Omega(t) dt \quad ; \quad t_{k+1} = t_k + T \quad (4.14)$$

定義連續兩個叢集平均值的差為 $\xi_{k+1,k}$ ，表示式如式(4.15)。計算所有叢集的差，可得一系列隨機變數。而阿倫變方定義即為計算所有差之變方，如式(4.16)(IEEE Std952-1997)，其中“<>”為表示資料中所有叢集，而式(4.16)亦可改寫成式(4.17)。

$$\xi_{k+1,k} = \bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T) \quad (4.15)$$

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(N-2n)} \langle [\bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T)]^2 \rangle \quad (4.16)$$

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} [\bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T)]^2 \quad (4.17)$$

圖 4.31 及 4.32 說明理想狀況下(只含雜訊)，透過阿倫變方分析所包含的意義，由圖中可看出白雜訊及其對應之隨機遊走(Random walk)(IEEE Std 1554-2005)。

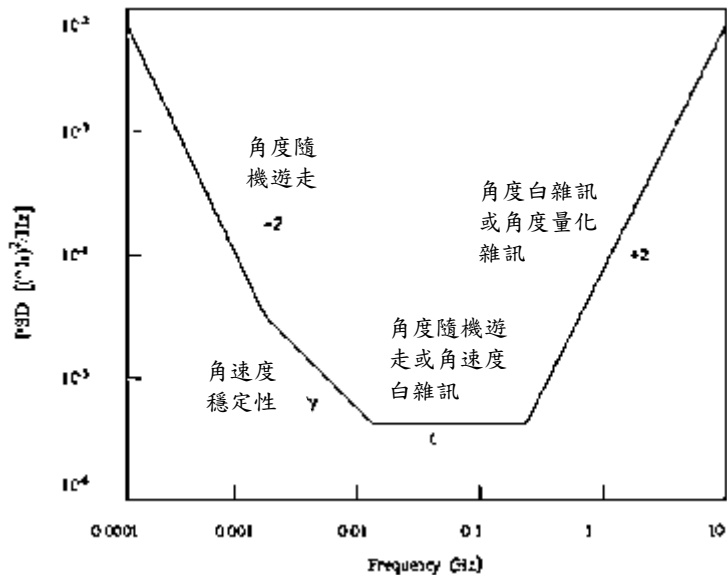


圖 4.31 理想值角速度資料之阿倫分析(摘自 IEEE Std 1554-2005)

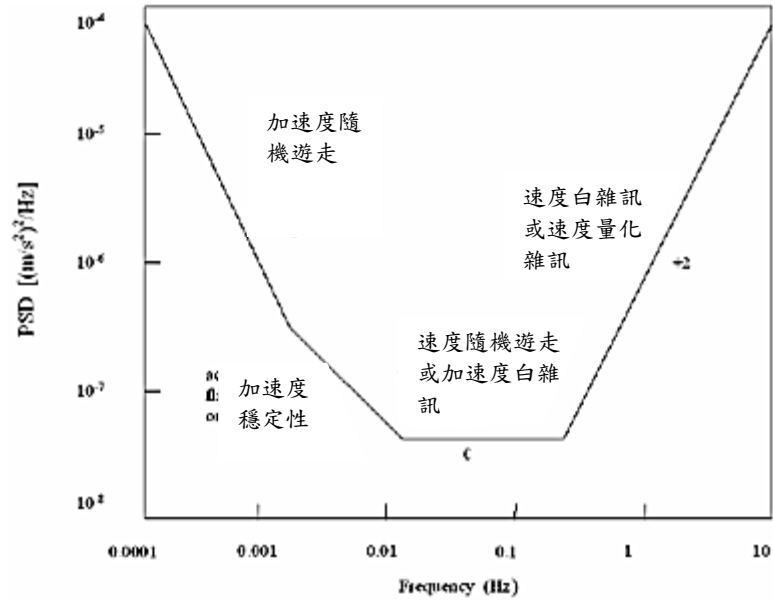


圖 4.32 理想值加速度資料之阿倫分析(摘自 IEEE Std 1554-2005)

圖 4.33 則為使用真實資料透過阿倫變方分析之結果，由圖中可清楚的估計各隨機誤差的量級。圖 4.34、4.35 為本案所使用之 LCI 進行阿倫變方分析結果，加速度計飄儀穩定性為  $100 \mu g$  而陀螺儀飄儀穩定性為  $0.01$  度/小時。

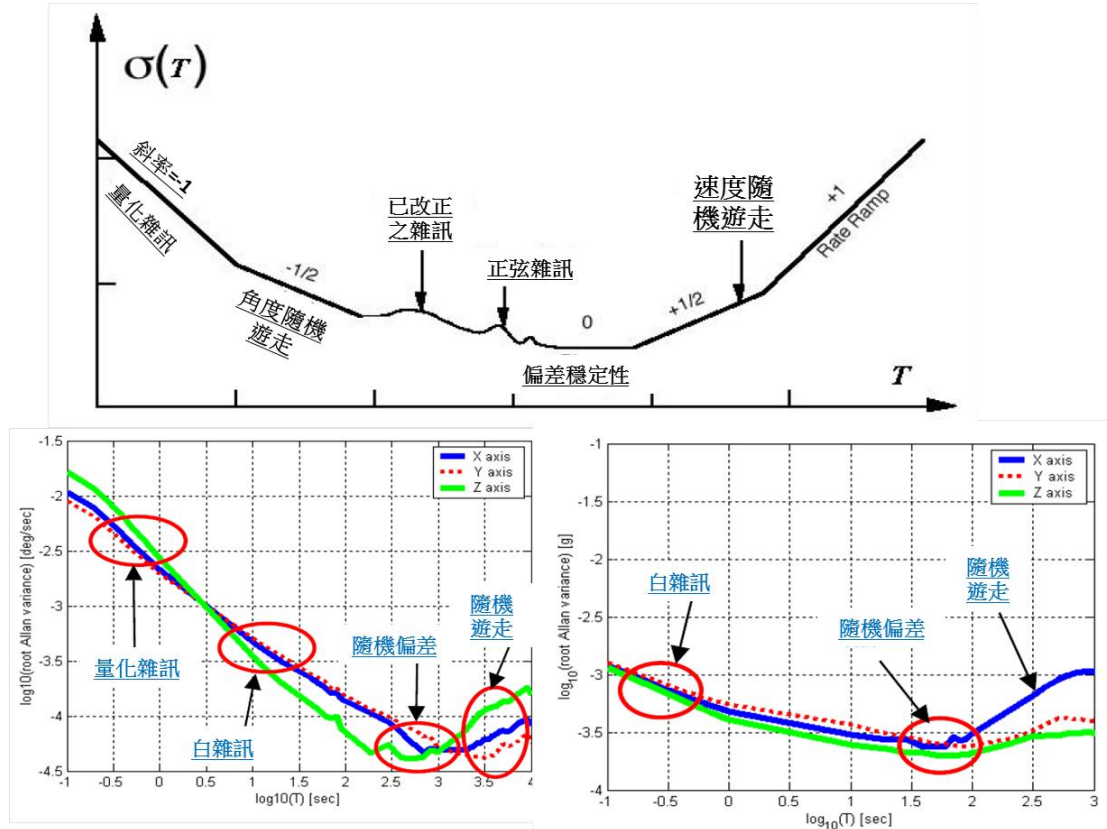


圖 4.33 阿倫變方分析法

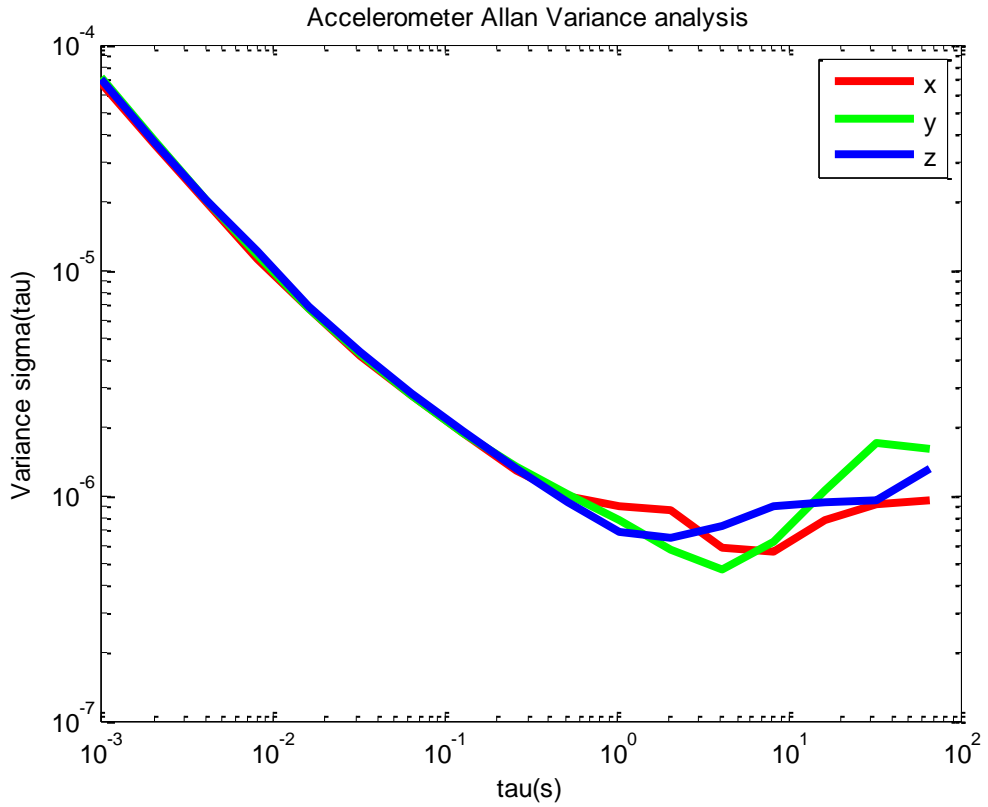


圖 4.34 LCI 加速度計之阿倫變方分析

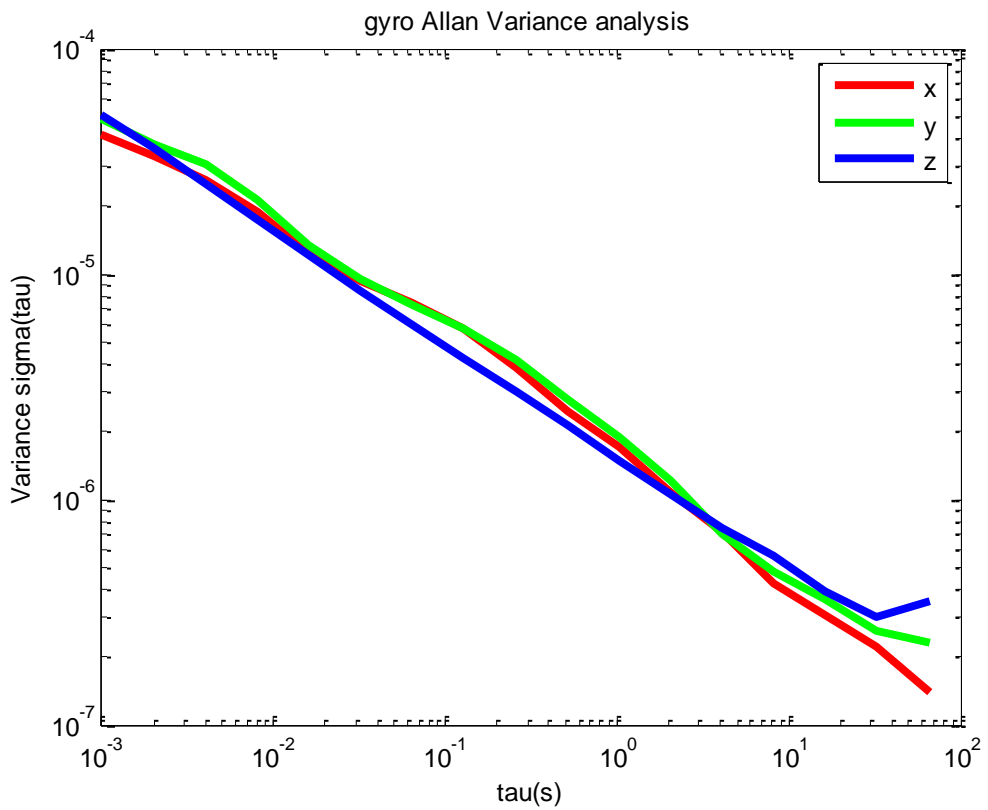


圖 4.35 LCI 陀螺儀之阿倫變方分析



本團隊研發的 CAINS-21 軟體分別將三軸陀螺儀之飄移  $\delta\omega_{x,y,z}$  與加速度計飄移  $\delta f_{x,y,z}$  利用一階高斯馬可夫模型表示，並嵌入導航演算法中，如式(4.18)及式(4.19)所示。

$$\delta\dot{\omega}^b = \begin{pmatrix} \delta\dot{\omega}_x \\ \delta\dot{\omega}_y \\ \delta\dot{\omega}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\beta_x & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_y & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_y \\ \delta\omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sqrt{2\beta_x\sigma_x^2} \\ \sqrt{2\beta_y\sigma_y^2} \\ \sqrt{2\beta_z\sigma_z^2} \end{pmatrix} w(t) \quad (4.18)$$

$$\delta\dot{f}^b = \begin{pmatrix} \delta\dot{f}_x \\ \delta\dot{f}_y \\ \delta\dot{f}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_x & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sqrt{2\alpha_x\sigma_x^2} \\ \sqrt{2\alpha_y\sigma_y^2} \\ \sqrt{2\alpha_z\sigma_z^2} \end{pmatrix} w(t) \quad (4.19)$$

其中  $\beta$ 、 $\alpha$  分別表示陀螺儀與加速度計飄移之一階高斯馬可夫模型之相關時間， $\sigma^2$  表示為其變方。

同時本案研發 CAINS-21 軟體更進一步將尺度因子嵌入導航演算法並配合閉合式鬆耦合多元感測器整合式定位定向演算法以持續提升慣性測量儀穩定性，此架構具備線上率定系統誤差(含偏差與尺度因子)之功能。透過每次卡曼率波器因接收來自 GNSS 觀測量更新所重新估算之系統誤差再送回慣性導航方程式中觀測量補償架構，以最新的系統誤差估值提供觀測量補償，此種反饋架構可視為線上率定機制。而一般商用演算法採行的是開放式鬆耦合多元感測器整合式定位定向演算，此種演算法直接採用率定報告書中的系統誤差參數進行慣性導航方程式之觀測量補償，整個計算過程中使用固定系統誤差參數。此種架構適用於使用穩定性高之導航等級慣性測量儀，但對於戰術等級與微機電等級之慣性測量儀而言，透過線上的系統誤差率定機制可以顯著的提升定位定向解之穩定性。

慣性測量儀的原始觀測量輸出，相對於真正的物理量(如加速度、角速度)通常具有訊號量值偏差及尺度因子之影響。因此，在藉由其它多元感測器的幫助下，透過擴張卡曼濾波器為其觀測量作最優估計，則可依導航方程式進一步地估算出慣性測量儀的量值偏差及尺度上誤差，最後將這些誤差回饋至系統狀態，以達到提升慣性測量儀穩定性之目的。圖 4.36 及圖 4.37 說明 2 種慣性導航系統基本求解架

構，圖 4.36 為閉合式鬆耦合多元感測器整合式定位定向演算法，可看出透過 INS 卡曼濾波器持續更新導航方程，連續修正導航方程之結果，而圖 4.37 為開放式鬆耦合多元感測器整合式定位定向演算法，則無更新導航方程。

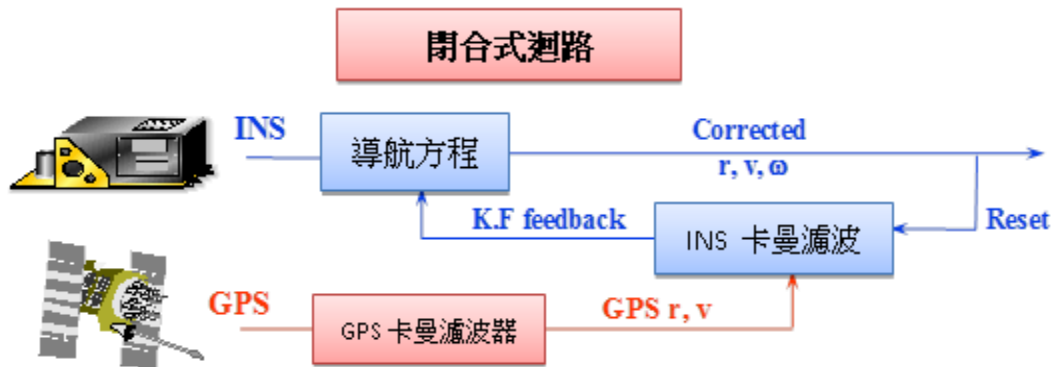


圖 4.36 閉合式鬆耦合架構

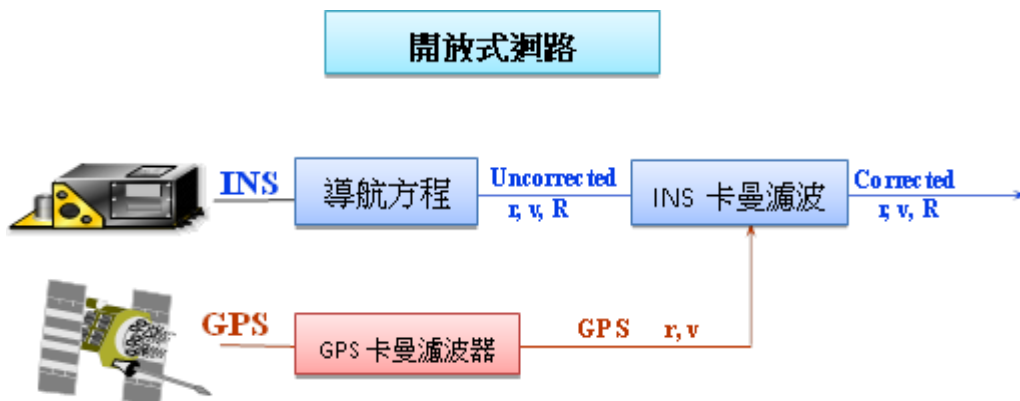


圖 4.37 開放式鬆耦合架構

本節以低精度微機電等級之慣性測量儀(單價少於 1 萬元台幣，陀螺飄移 $>1000$ 度/小時)為例，說明線上率定機制之效益，實驗地點在加拿大卡加利大學附近道路，參考軌跡為 Applanix 之 POS310 提供之最佳平滑解(無模擬 GNSS 訊號脫落)，其軌跡如下圖 4.38 所示。此種利用較高精度參考軌跡配合模擬或真實的 GNSS 訊號脫落期間測試系統所提供測試軌跡進行定位定向精度之測試程序為國外產學界公認的測試程序(Chiang, 2004; Shin, 2005)。測試系統計算過程中透過模擬 2 段 60 秒的 GNSS 訊號脫落產生測試軌跡並與高等級系統產生的參考軌跡進行比較與分析。



圖 4.38 測試軌跡圖

在 60 秒無 GNSS 訊號的情況下，針對感測器量值飄移及尺度因子之回饋時間間隔的差異(1 秒及 180 秒)，在圖 4.39、圖 4.40 中分別描述了回饋時間間隔為 1 秒之位置誤差、姿態誤差的變化，圖 4.41、圖 4.42 則描述了回饋時間間隔為 180 秒之位置誤差、姿態誤差的變化。此外，在表 4.5、4.6 中分別描述了基於不同回饋時間間隔之位置之最大誤差、均方根誤差與最大姿態誤差及均方根誤差的比較，由圖 4.39 至圖 4.42 可以看出，在 60 秒 GPS 訊號脫落的情況下，回饋時間縮短 180 倍，平面位置精度可提昇約 3 倍，高度精度可提昇 10 倍。因此，若要有效地提升慣性測量儀穩定性，線上回饋機制在導航演算法的應用相當重要。

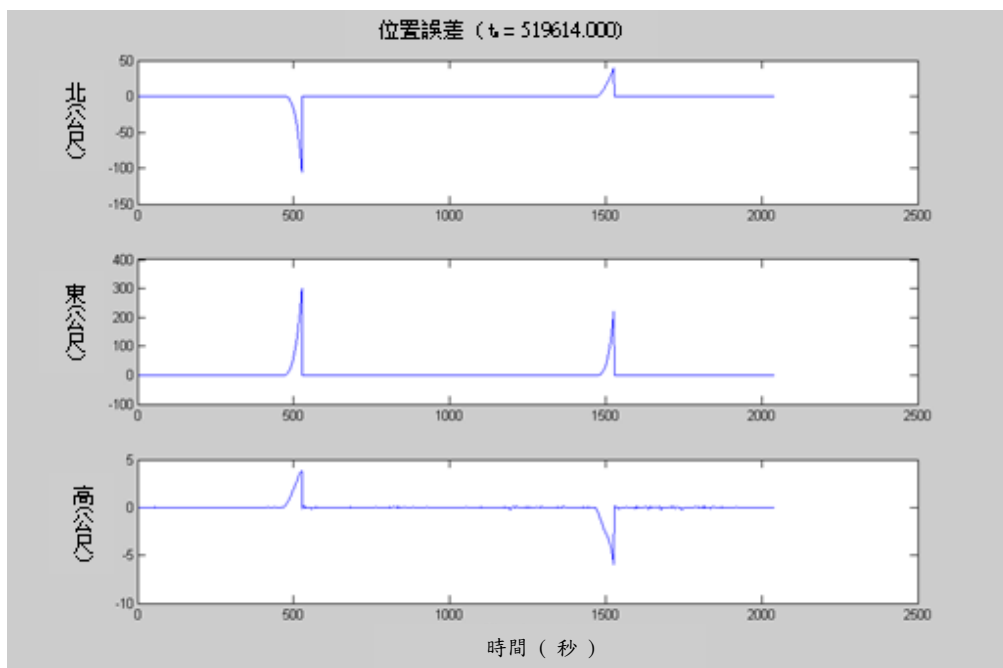


圖 4.39 回饋時間間隔為 1 秒之位置誤差變化

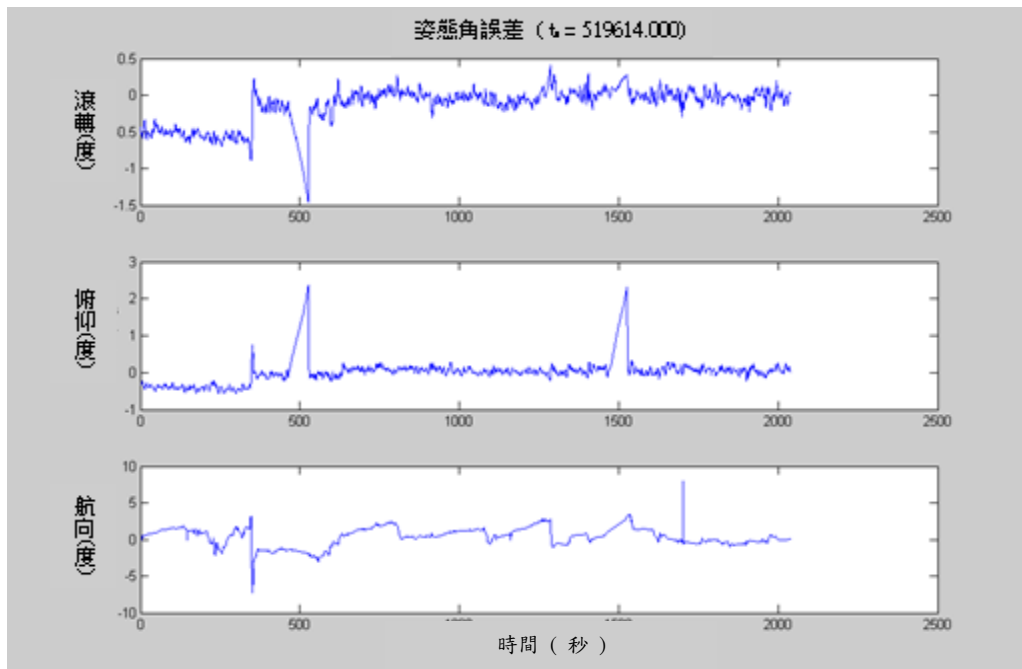


圖 4.40 回饋時間間隔為 1 秒之姿態誤差變化

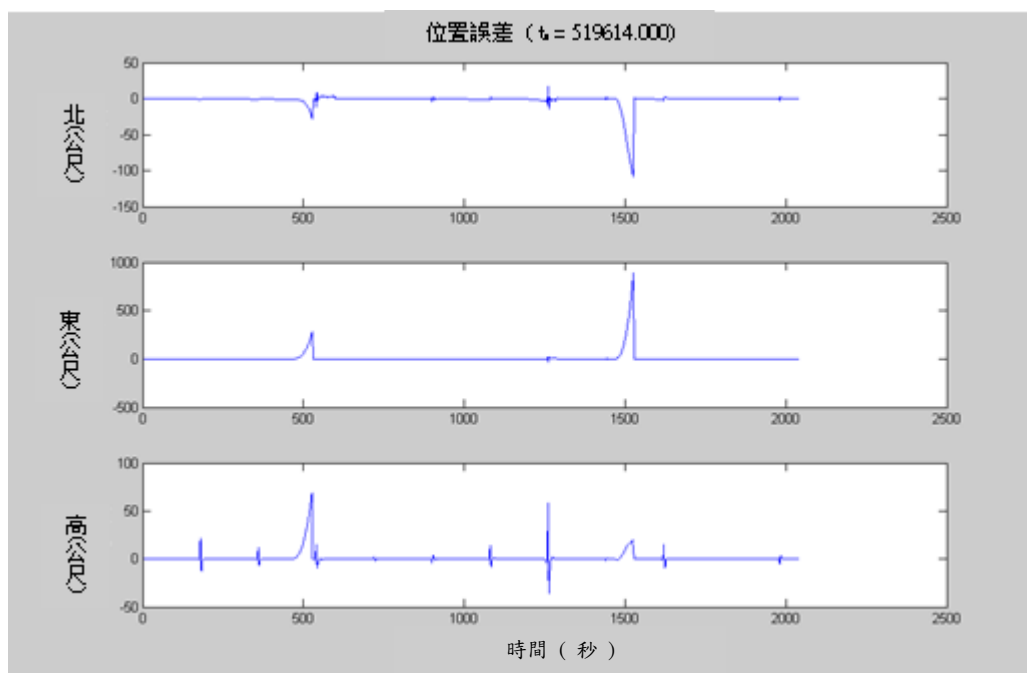


圖 4.41 回饋時間間隔為 180 秒之位置誤差變化

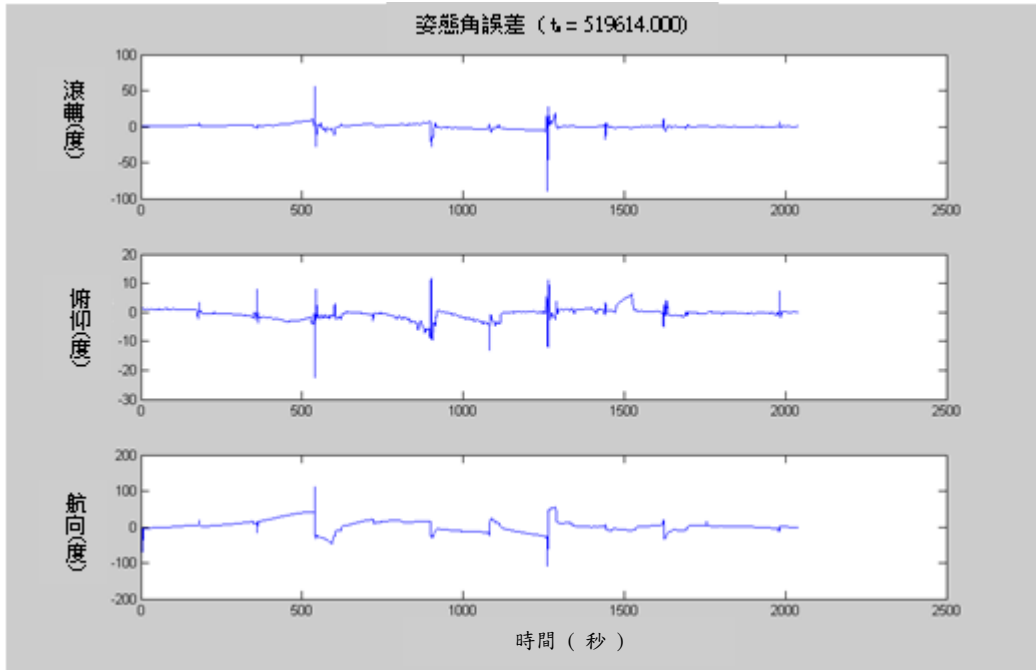


圖 4.42 回饋時間間隔為 180 秒之姿態誤差變化

表 4.5 不同回饋時間間隔之位置誤差比較

位置		北向(公尺)	東向(公尺)	高度(公尺)
最大誤差	1 秒	105.99	300.15	5.97
	180 秒	109.02	893.25	68.69
均方根	1 秒	7.71	25.32	0.63
	180 秒	10.03	67.492	5.82

表 4.6 不同回饋時間間隔姿態誤差比較

姿態		滾轉(度)	俯仰(度)	航向(度)
最大誤差	1 秒	1.4714	2.3716	7.9223
	180 秒	89.0524	22.5027	112.1461
均方根	1 秒	0.2904	0.3761	1.2887
	180 秒	4.1589	2.0317	16.2695

#### 4.4 研發慣性測量儀率定實驗室與外業率定技術

本案所研發的慣性測量儀實驗室率定技術主要依據圖 4.19 與 4.2 節中慣性測量儀各系統誤差校正模型，相關理論與範例請參考 4.2 節，本節僅針對慣性測量儀外業率定技術進行詳細說明。實驗室率定技術，提供高精度、高準確度各項慣性測量儀之誤差參數，但所需相當成本的設備，外業率定法目的為在無增加額外成本前提下，單純記錄慣性測量儀輸出，透過簡易擺放方式率定出主要誤差。

其率定原理同樣利用重力及地球自轉為參考，率定各項主要誤差，包含：加速度計和陀螺儀三軸之偏差、尺度因子及軸交誤差共 18 項未知數。雖然加速度計與陀螺儀在相同姿態下觀測為彼此獨立，但透過最小二乘法估計時，需有多餘觀測以避免計算反矩陣時產生奇異解，所以慣性測量儀之 3 軸至少須有 9 種以上相對於重力線而不同的角度，前述 12 多位置法已不敷使用，本案進一步提出外業多位置法，以重力線為參考，將慣性測量儀假設為立方體，使 6 個面、12 個邊、8 個角分別向下對齊重力線，產生 26 種相對於重力線而不同的角度，其示意圖如圖 4.43 所示，再利用最小二乘法求解。(Shin, 2001)

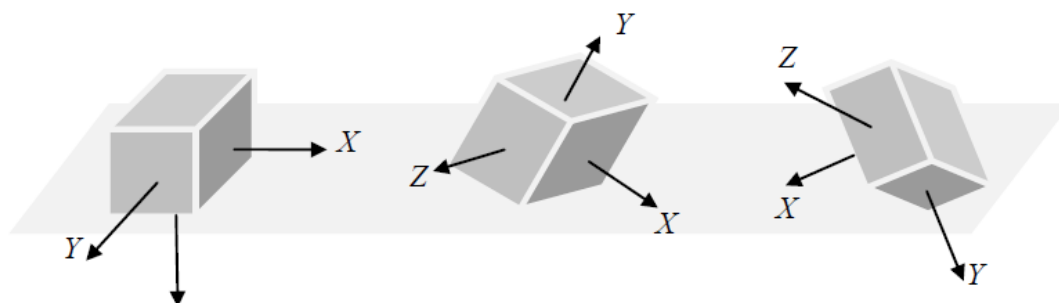


圖 4.43 外業多位置法

##### ● 外業率定原理

一般靜置之慣性測量儀所受的外力為重力，而所受的外力矩則為地球自轉，故慣性測量儀三軸加速度計所感測的合力必定為重力，同樣地，三軸陀螺儀感測出的角速度的純量和必定為地球自轉速率，故可以式 4.20 表示。(Shin, 2001)。

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = \|g\|^2$$



$$\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 = \|\omega_g\|^2 \quad (4.20)$$

其中， $\omega_g$ ：地球自轉。

於外業多位置法求最小二乘法解時，以式 4.20 為依據，建立率定模型，如式 4.21，(Shin, 2001)。

$$f_a = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 - \|g\|^2 = 0$$

$$f_\omega = \omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 - \|\omega_g\|^2 = 0 \quad (4.21)$$

單軸之加速度計、陀螺儀觀測量可以式 4.22 表示，

$$I_{ai} = b_{ai} + (1 + S_{ai})a_i + \varepsilon(a)$$

$$I_{\omega i} = b_{\omega i} + (1 + S_{\omega i})\omega_i + \varepsilon(\omega) \quad (4.22)$$

式中， $I$  為加速度觀測量， $b$  為偏差， $S$  為尺度因子， $a$  為真實加速度， $\omega$  為真實角速度， $\varepsilon$  為雜訊， $i$  為表示各單軸  $x, y, z$ 。

然慣性測量儀所含三軸彼此會互相影響，故導入軸交誤差，加速度計及陀螺儀觀測量可以式 4.23 表示。(Shin, 2001)

$$\begin{bmatrix} I_{ax} - b_{ax} \\ I_{ay} - b_{ay} \\ I_{az} - b_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + S_{ax}) & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{ayz} & (1 + S_{ay}) \cos \theta_{ayz} & 0 \\ -\sin \theta_{azy} & -\sin \theta_{azx} \cos \theta_{ayz} & (1 + S_{az}) \cos \theta_{azx} \cos \theta_{ayz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{\omega x} - b_{\omega x} \\ I_{\omega y} - b_{\omega y} \\ I_{\omega z} - b_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + S_{\omega x}) & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{\omega yz} & (1 + S_{\omega y}) \cos \theta_{\omega yz} & 0 \\ -\sin \theta_{\omega zy} & -\sin \theta_{\omega zx} \cos \theta_{\omega yz} & (1 + S_{\omega z}) \cos \theta_{\omega zx} \cos \theta_{\omega yz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

(4.23)

利用式 4.23，求出真值 $a_i$ 、 $\omega_i$ 式 4.24，(Shin, 2001)。

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{I_{ax} - b_{ax}}{(1 + S_{ax})} \\
 a_y &= a_x \tan \theta_{ayz} + \frac{I_{ay} - b_{ay}}{(1 + S_{ay}) \cos \theta_{ayz}} \\
 a_z &= -a_x \frac{\tan \theta_{ayz}}{\cos \theta_{azx}} + a_y \tan \theta_{azx} + \frac{I_{az} - b_{az}}{(1 + S_{az}) \cos \theta_{azx} \cos \theta_{azy}} \\
 \omega_x &= \frac{I_{\omega x} - b_{\omega x}}{(1 + S_{\omega x})} \\
 \omega_y &= \omega_x \tan \theta_{\omega yz} + \frac{I_{\omega y} - b_{\omega y}}{(1 + S_{\omega y}) \cos \theta_{\omega yz}} \\
 \omega_z &= -\omega_x \frac{\tan \theta_{\omega yz}}{\cos \theta_{\omega zx}} + \omega_y \tan \theta_{\omega zx} + \frac{I_{\omega z} - b_{\omega z}}{(1 + S_{\omega z}) \cos \theta_{\omega zx} \cos \theta_{\omega zy}}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

將真值帶入式 4.21 則可得加速度計及陀螺儀偏差、尺度因子和軸交誤差之最小二乘法觀測模型，如式 4.25 所示。(Shin, 2001)

$$\begin{aligned}
 &f_a \\
 &= \left[ \frac{I_{ax} - b_{ax}}{(1 + S_{ax})} \right]^2 + \left\{ \tan \theta_{ayz} \left[ \frac{I_{ax} - b_{ax}}{(1 + S_{ax})} \right] + \frac{1}{\cos \theta_{ayz}} \left[ \frac{I_{ay} - b_{ay}}{(1 + S_{ay})} \right] \right\}^2 \\
 &+ \left\{ \left( \tan \theta_{azx} \tan \theta_{ayz} - \frac{\tan \theta_{ayz}}{\cos \theta_{azx}} \right) \left[ \frac{I_{ax} - b_{ax}}{(1 + S_{ax})} \right] + \frac{\tan \theta_{azx}}{\tan \theta_{ayz}} \left[ \frac{I_{ay} - b_{ay}}{(1 + S_{ay})} \right] + \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{\cos \theta_{azx} \cos \theta_{azy}} \left[ \frac{I_{az} - b_{az}}{(1 + S_{az})} \right] \right\}^2 \\
 &- \|g\|^2 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& f_{\omega} \\
&= \left[ \frac{I_{\omega x} - b_{\omega x}}{(1 + S_{\omega x})} \right]^2 + \left\{ \tan\theta_{\omega yz} \left[ \frac{I_{\omega x} - b_{\omega x}}{(1 + S_{\omega x})} \right] + \frac{1}{\cos\theta_{\omega yz}} \left[ \frac{I_{\omega y} - b_{\omega y}}{(1 + S_{\omega y})} \right] \right\}^2 \\
&+ \left\{ \left( \tan\theta_{\omega zx} \tan\theta_{\omega yz} - \frac{\tan\theta_{\omega yz}}{\cos\theta_{\omega zx}} \right) \left[ \frac{I_{\omega x} - b_{\omega x}}{(1 + S_{\omega x})} \right] + \frac{\tan\theta_{\omega zx}}{\tan\theta_{\omega yz}} \left[ \frac{I_{\omega y} - b_{\omega y}}{(1 + S_{\omega y})} \right] + \right. \\
&\quad \left. \frac{1}{\cos\theta_{\omega zx} \cos\theta_{\omega zy}} \left[ \frac{I_{\omega z} - b_{\omega z}}{(1 + S_{\omega z})} \right] \right\}^2 \\
&- \|\omega_g\|^2 = 0
\end{aligned} \tag{4.25}$$

對於精度要求不高之外業慣性測量，只需率定三軸偏差及尺度因子則可簡化式 4.25，如式 4.26 所示，更低需求只需率定三軸偏差則可如式 4.27 所示。(Shin, 2001)

$$\begin{aligned}
f_a &= \left[ \frac{I_{ax} - b_{ax}}{(1 + S_{ax})} \right]^2 + \left[ \frac{I_{ay} - b_{ay}}{(1 + S_{ay})} \right]^2 + \left[ \frac{I_{az} - b_{az}}{(1 + S_{az})} \right]^2 - \|g\|^2 = 0 \\
f_{\omega} &= \left[ \frac{I_{\omega x} - b_{\omega x}}{(1 + S_{\omega x})} \right]^2 + \left[ \frac{I_{\omega y} - b_{\omega y}}{(1 + S_{\omega y})} \right]^2 + \left[ \frac{I_{\omega z} - b_{\omega z}}{(1 + S_{\omega z})} \right]^2 - \|\omega_g\|^2 = 0
\end{aligned} \tag{4.26}$$

$$\begin{aligned}
f_a &= (I_{ax} - b_{ax})^2 + (I_{ay} - b_{ay})^2 + (I_{az} - b_{az})^2 - \|g\|^2 = 0 \\
f_{\omega} &= (I_{\omega x} - b_{\omega x})^2 + (I_{\omega y} - b_{\omega y})^2 + (I_{\omega z} - b_{\omega z})^2 - \|\omega_g\|^2 = 0
\end{aligned} \tag{4.27}$$

#### 4.5 評估建立定位定向系統性能評估之標準程序

鑑於目前國內使用 INS/GNSS 整合定位定向系統之多平台移動遙測製圖作業愈發普及，而國內對於 INS/GNSS 整合定位定向系統之規格與效能之認知皆仰賴原廠規格書，如此並無法確保多平台遙測製圖技術之精度。同時各家系統使用之慣性測量儀規格書並無一致之規範，各家廠商對慣性測量儀各式系統誤差描述或有出入，如此易造

成使用者之困擾；同時並增添未來制定直接定位技術相關規範之難度。而目前各家商用 INS/GNSS 整合定位定向系統之製造商並沒有提供慣性感測器率定服務，即便有也是所費不貲。

故為了確保未來多平台移動遙測製圖成果之精度，本案建議針對使用多平台遙測技術參與國家地圖繪製、土地調查與防救災等相關業務作業的系統，透過標準的測試程序與設備進行 INS/GNSS 整合定位定向系統規格測試與分析確認系統之性能符合規格與任務之需求。同時相關測試成果亦可以協助率定慣性測量儀以進一步確保系統之穩定度與測繪成果之精度。

圖 4.44 所示為影響定位定向系統性能之因子，而定位定向系統精度對移動遙測製圖系統執行直接定位精度之影響約佔 40%，而此種影響於 GNSS 訊號脫落嚴重之都市區域而言顯得愈發顯著。舉例而言，在少於 5 分鐘無 GNSS 訊號之區域，定位定向系統之定位誤差與加速度計飄移(accelerometer bias,  $b_a$ )與陀螺飄移(gyro bias,  $b_g$ )之關係

分別為  $\frac{1}{2}b_a t^2$  與  $\frac{1}{6}b_g t^3$ ，故若廠商提供的慣性測量儀規格與實際測試所得之規格有所差異，其對定位誤差之影響會隨無 GNSS 訊號時間之平方(加速度飄移)與三次方(陀螺飄移)增長。同時高動態的運動下，會放大因陀螺飄移所引起之航向誤差對定位誤差之影響，而陀螺飄移所引起之航向誤差，對定位誤差與載體動態成正比。

目前有許多發展新一代的定位定向演算法之相關研究，用來進一步提升定位定向精度，這些研究之目標在於使用較低成本之慣性感測器並搭配相應定位定向演算法，以符合多平台移動遙測製圖之應用精度；故本案建議未來制定相關作業規範時，可以根據精度需求與作業環境(空載、車在與船載)，明訂定位定向系統所使用的慣性測量儀、測量級衛星接收儀之規格與多元感測器整合之演算法架構(鬆耦合與緊耦合架構)。表 4.7 針對不同平台之應用建議定位定向系統中使用的慣性測量儀、測量級衛星接收儀之規格與多元感測器整合之演算法架構。



圖 4.44 影響定位定向系統性能之因子

表 4.7 定位定向系統規格與作業平台之關係

系統規格\作業環境	空載	車載	船載
慣性測量儀	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 高階戰術等級慣性測量儀(陀螺飄移&lt;1 度/小時, 加速度計飄移&lt;1mg)</li> <li>2. 採樣頻率&gt;100Hz</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 導航等級慣性測量儀(陀螺飄移&lt;0.1 度/小時, 加速度計飄移&lt;500 <math>\mu</math>g)</li> <li>2. 高階戰術等級慣性測量儀(陀螺飄移&lt;1 度/小時, 加速度計飄移&lt;1mg)搭配輔助感測器</li> <li>3. 採樣頻率&gt;100Hz</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 高階戰術等級慣性測量儀(陀螺飄移&lt;1 度/小時, 加速度計飄移&lt;1mg)</li> <li>2. 採樣頻率&gt;100Hz</li> </ol>
衛星接收儀	雙頻雙系統大地等級衛星接收儀	雙頻雙系統大地等級衛星接收儀	雙頻雙系統大地等級衛星接收儀
輔助感測器	不需要	1. 輪速計	不需要
演算法架構	鬆耦合多元感測器整合定位定向架構	緊耦合多元感測器整合定位定向架構	鬆耦合多元感測器整合定位定向架構

確認定位定向系統規格與作業平台之關係後，本案提議之整合式定位定向系統測試項目如圖 4.45 所示，而圖 4.46 為根據 IEEE 1554-2005 號標準文件所建議之慣性測量儀測試程序，圖 4.47 與圖 4.48 所示分別為 GNSS 接收儀定位精度測試項目與整合式定位定向系統精度測試項目 (Chiang, 2004; Shin, 2005)。



# 整合式定位定向系統



圖 4.45 整合式定位定向系統之測試項目

# 慣性測量儀規格測試與率定



圖 4.46 整合式定位定向系統之測試項目

## GNSS接收儀定位精度測試(含軟體)

- 靜態測試
  - 含基樁或控制點檢校場
  - 利用已知點檢核
  - 開闊地
- 動態測試
  - 利用動態定位專業測試平台
  - 使用高精度INS/GPS整合系統(含輪速計)為參考系統
  - 緊耦合演算法
  - 利用參考軌跡檢核
  - 開闊地



圖 4.47 GNSS 接收儀定位精度測試項目 (Chiang, 2004; Shin,2005)

## 整合式定位定向系統精度測試 (含軟體)

- 靜態測試
  - 含基樁或控制點檢校場
  - 具備高定度定平與定向機制
  - 具備高精度參考方位角
  - 開闊地
  - 利用已知姿態與位置檢核
  - 模擬GNSS訊號脫落(10秒,30秒,60秒,120秒與300秒)
- 動態測試
  - 利用動態定位專業測試平台
  - 使用高精度INS/GPS整合系統(含輪速計)為參考系統
  - 緊耦合演算法
  - 利用參考軌跡檢核
  - 不同動態環境(低速,中速,高速)
  - 開闊地(標準測試軌跡搭配模擬GNSS訊號脫落)
  - 市區(具顯著GNSS訊號遮蔽)
  - 隧道



圖 4.48 整合式定位定向系統精度測試項目 (Chiang, 2004; Shin,2005)

整合式定位定向系統精度測試範例，如表 4.8 所示。這類測試主要在確認整合式定位定向系統在不同的動態環境下，GNSS 訊號脫落時間長度與定位定向系統精度關係。如圖 4.44 所示，整合式定位定向系統

在 GNSS 訊號脫落時間之誤差行為與載體動態息息相關，故這類測試必須在不同的動態環境下重複測試並分析系統之誤差行為。如前所述，整合式定位定向系統精度在誤差傳播後會顯著地影響多平台直接定位系統之精度。如圖 4.48 所示，這類測試需要精密的參考訊息，以便進行後續的精度分析，通常在靜態的模式下需要一個具備精密定向定平的旋轉台及精確的控制點，以提供正確參考位置與姿態訊息，而動態測試需在測試平台上搭載一步高等級的定位定向系統以提供驗證測試系統所需之參考訊息。本案所自行研發的多元感測器定位定向系統，再搭配輪速計與緊耦合定位定向演算架構，足以提供高精度之參考訊息，可用為測試國內目前各家公司所擁有的商用 POS 系統。

表 4.8 整合式定位定向系統精度測試範例

Outage Duration	Positioning Mode	Position Error (m)		Velocity Error (m/s)		Attitude Error (degrees)		
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Roll	Pitch	Heading
0 s	RTK	0.02	0.05	0.020	0.010	0.007	0.007	0.018
	HP	0.10	0.08	0.020	0.010	0.007	0.007	0.018
	SP	1.20	0.60	0.020	0.010	0.007	0.007	0.020
	PP?	0.01	0.02	0.010	0.010	0.005	0.005	0.008
10 s	RTK	0.07	0.06	0.022	0.010	0.007	0.007	0.018
	HP	0.28	0.28	0.024	0.011	0.008	0.008	0.022
	SP	1.66	1.17	0.024	0.012	0.008	0.008	0.025
	PP?	0.02	0.02	0.010	0.010	0.005	0.005	0.008
60 s	RTK	1.67	0.48	0.061	0.015	0.009	0.009	0.021
	HP	1.74	0.53	0.063	0.015	0.009	0.009	0.025
	SP	2.46	1.33	0.066	0.015	0.009	0.009	0.026
	PP?	0.11	0.03	0.015	0.015	0.006	0.009	0.010

圖 4.49 與圖 4.50 為圖 4.46 所示慣性測量儀測試項目中所需之專業動態測試與溫度測試設備。關於專業慣性測量儀之規格測試與率定實驗室之詳細討論請參閱 4.6 節。

## 動態多位置測試

- 動態測試平台



圖 4.49 慣性測量儀專業動態測試設備

# 溫度測試

- 溫度櫃



圖 4.50 慣性測量儀專業溫度測試設備

## 4.6 評估建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性

目前國內除中科院外，並無任何單位具備專業的慣性測量儀率定及校正實驗室，而中科院的測試設備因為軍方視慣性導航技術具備高度的敏感性故無法接受民間的委託進行系統測試。如前所述，國內目前有超過 20 套整合式定位定向系統在執行不同政府單位或民間所委託之移動遙測製圖業務，而慣性測量儀之品質與穩定性可視為整合式定位定向系統之核心；目前使用者投資近千萬元採購設備，而只能依據系統商所提供短短幾頁之測試規格，或其他使用者之回饋意見，作為系統精度依據，如此國內的空間資訊相關公司於承攬業務時，亦具備相當大之風險，而所有系統的不確定性最後將由業主承擔。本案在 4.5 節中研提了整合式定位定向系統之測試程序，即為減低定位定向系統所引發的風險。故接續此議題本案在此章節討論在國內建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性。

圖 4.51 所示為慣性測量儀製造商所用有的專業慣性測量儀率定及校正實驗室，其主要設施為高精度 3 軸的位置與速率旋轉台，用以測試戰術等級以上之陀螺儀(飄移 $<10$  度/小時)；高精度單軸線性加速度台，用以測試戰術等級以上加速度計(飄移 $<5\text{mg}$ )；溫度櫃用以測試慣性測量儀各感測器系統誤差之溫度效應，並提供合適的補償模型等精密測試儀器。專業慣性測量儀率定及校正實驗室一般設置在地下室或一樓以避免建築物振動的效應影響測試結果，室內空間之需求從 30 平方米至 100 平方米不等，而室內需提供恆溫空調以確保測試儀器之精度。





圖 4.51 專業慣性測量儀率定及校正實驗室

本節依據整合式定位定向系統測試之特性，將雙頻雙系統之 GNSS 訊號室內播放設備列入專業的專業慣性測量儀率定及校正實驗室所需具備的設備，如圖 4.52 所示。藉由此設備，使用者在屋內即可使用 GNSS 訊號進行整合式定位定向系統測試。故本案所規劃的專業慣性測量儀率定及校正實驗室所需之設備詳列於圖 4.53 中，相關規格並於後續章節討論。表 4.9 所示為根據上述規劃針對建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性的 SWOT 分析表。



圖 4.52 雙頻雙系統之 GNSS 訊號室內播放設備

表 4.9 建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之可行性的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 國內使用中整合式定位定向系統之套數逐年增加</li> <li>2. 專業的測試與率定設備可以確保多平台移動製圖作業成果之精度</li> <li>3. 落實發展本土的高階慣性導航技術</li> <li>4. 提升國內慣性測量儀相關技術人才訓練與產業發展</li> <li>5. 台灣已是目前微機電慣性感測器之最大代工廠</li> <li>6. 國際學術交流</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 測試設備需要具備穩定地基之空間(地下室)</li> <li>2. 恆溫空間</li> <li>3. 專業操作人員</li> <li>4. 專業分析與測試軟體</li> </ol>
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 中科院於近年陸續釋出國內慣性測量儀提供廠商之認證，並要求所有廠商提供之慣性測量儀須通過專業慣性測量儀率定及校正實驗室之測試與率定。</li> <li>2. 上述實驗室將優先考量委託國內之實驗室</li> <li>3. 智慧型可攜裝置之普及近一步帶動微機電慣性感測器之發展</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 進口測試設備價格昂貴</li> <li>2. 需要持續的設備維護經費</li> </ol>



圖 4.53 雙頻雙系統之 GNSS 訊號室內播放設備



#### 4.6.1 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之陀螺儀測試旋轉台

目前適用於測試戰術等級以上慣性測量儀之轉台可以區分為單軸、單軸含溫度櫃、雙軸、雙軸含溫度櫃、三軸、與三軸含溫度櫃等構型,如圖 4.54 至圖 4.56 所示。



圖 4.54 單軸轉台



圖 4.55 雙軸轉台



圖 4.56 三軸轉台

若考量可測試戰術等級以上慣性測量儀之規格，單軸轉台售價約在新台幣 100-150 萬區間，加溫度櫃需多加約 150-200 萬元；而雙軸轉台售價約在 500-800 萬區間，加溫度櫃需多加約 150-200 萬元。而三軸轉台售價超過 1500 萬區間，加溫度櫃需多加約 500 萬元。

考量本工作案之目的在於設置專業慣性測量儀率定及校正實驗室，以測試現有的慣性測量儀而非自行組裝高階之慣性測量儀，故三軸安裝系統可以不列入考慮，同時因移動遙測製圖應用中，定位定向系統安置之特性，溫度櫃亦可視預算列入選項以逐年採購之方式進行添購，或是可暫時不買。基於上述之思考原則，本節建議採購不帶櫃之雙軸轉台或帶櫃之單軸轉台。目前歐洲至少有 3 家公司，美洲至少有 2 家公司可提供這些設備，需申請出口許可，交貨時間為 6 至 8 個月。表 4.10 為本節建議未來可以考慮採購之雙軸轉台之規格，此規格亦可以測試含雷射陀螺儀之慣性測量儀。

表 4.10 可考慮採購之雙軸轉台之規格

Rotational Freedom options for all axes	Option 1: Unlimited rotation (slipping) Option 2: ± 540 deg. (wire wrap)
<b>Positioning</b>	
• Accuracy, Absolute, arcsec (deg)	± 1 (0.00028)
• Repeatability, arcsec (deg)	± 1 (0.00028)
• Resolution (command and display), deg	0.00001
<b>Rate</b>	
• Maximum*, deg/sec	Inner Axis: ± 1080 or 1800 Outer Axis: ± 360 or ± 600
• Resolution (command and display), deg/sec	0.00001
• Accuracy, % ± Resolution (measured over 360 deg.)	± 0.0001%
• Stability, % (measured over 360 deg.)	± 0.0001%
<b>Acceleration/Bandwidth**</b>	
• Peak (2 sec duration), deg/sec <sup>2</sup>	Inner Axis: 5000 Outer Axis: 585
• Max Continuous, deg/sec <sup>2</sup>	Inner Axis: 1000 Outer Axis: 190
• -3dB Bandwidth	Inner Axis: 75 Hz Outer Axis: 20 Hz
<b>Axis Wobble, arcsec, max</b>	3
<b>Orthogonality, arcsec, max</b>	± 5

#### 4.6.2 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之加速度計測試平台

如圖 4.57 所示為目前可用於測試戰術等級以上之慣性測量儀中加速度計測試平台，可區分為線性加速度台與重力振動平台，考慮到本案之目的及各商用定位定向系統之高單價，本節建議採購線性加速度台，而不需使用重力振動平台。圖 4.53 所示為單軸線性加速度測

試台之範例，本案建議的規格為載重至少 10 公斤、長度 1.5 公尺、最大速度為 5 公尺/秒與最大加速度為 5g，此種規格的系統售價約在 80 至 100 萬。



圖 4.57 單軸線性加速度測試台範例

#### 4.6.3 評估引進適用於慣性測量儀率定專用之溫度櫃

目前國外之專業慣性測量儀率定及校正實驗室在採購溫度櫃方面有不同之執行策略，若擬分析慣性測量儀系統誤差在溫度變化下的動態行為，建議可採購轉台時，採購帶溫度櫃的系統，只是這個策略需付出更多的成本。若只擬分析系統誤差在溫度變化下的靜態行為，只需採購溫度櫃即可。一般符合慣性測量儀率定及校正實驗室需求之純溫度櫃售價約在 50 萬之 100 萬之間。測試溫度區間在  $-70^{\circ}\text{C}$  to  $+150^{\circ}\text{C}$  即可，圖 4.58 所示為溫度櫃之範例。



圖 4.58 溫度櫃之範例

綜上所述，建立專業慣性測量儀率定及校正實驗室之總投資金額約為一千萬二百至一千五百萬，本案建議以逐年採購之方式逐步採購相關硬體以落實相關的規劃。此項投資相較於採購空載移動遙測製圖設備(約四千萬)與車載移動遙測製圖設備(約三千萬)而言是值得的，同時國內所有使用到慣性測量儀之業者，皆可以透過專業慣性測量儀率定及校正實驗室確認系統之規格，並確保作業之品質。

#### 4.7 本章小結

慣性測量儀含有的各式系統誤差中，以加速度計偏差與陀螺偏差影響慣性測量儀性能最顯著。這些誤差來源與大小和慣性測量儀之製程、規格與價格息息相關。IEEE 1554-2005 號標準文件詳細規定慣性測量儀之測試與系統誤差率定程序及建議使用之相關設備；所有慣性測量儀製造商皆依此標準進行測試與率定並針對建立適當觀測量誤差模型，並透過專業旋轉測試平台測試陀螺儀、專業震動或加速平台測試加速度計，同時配合溫度測試櫃觀察上述系統誤差隨溫度變化之行為，再以最小二乘法平差等最佳推估工具推估上述各項系統誤差隨溫度變化的最佳估值。目前所有提供商用的整合式定位定向系統的廠商並無提供使用者定期重新率定慣性測量儀之服務，同時國內亦無相關的民間或學術單位具備相關的技術或服務，這點對這些整合式定位定向系統之效能影響甚鉅。

本案自主研發具備陀螺儀之慣性測量儀系統誤差各系統誤差之率定模式與演算法，並透過實測與模擬觀測資料驗證其效益。同時更進一步發展線上率定系統誤差(含偏差與尺度因子)功能之軟體。此種架構適用於使用穩定性高之導航等級慣性測量儀，但對於戰術等級與微機電等級之慣性測量儀而言，透過線上的系統誤差率定機制可以顯著的提升定位定向解之穩定性。

鑑於目前國內使用 INS/GNSS 整合定位定向系統之多平台移動遙測製圖作業愈發普及，故為了確保未來多平台移動遙測製圖成果之精度，本案建議針對使用多平台遙測技術參與國家地圖繪製、土地調查與防救災等相關業務作業的系統，透過國際公認的標準測試程序與設備進行 INS/GNSS 整合定位定向系統規格測試與分析，以確認系統之性能符合規格與任務之需求。同時相關測試成果亦可以協助率定慣性測量儀以進一步確保系統之穩定度與測繪成果之精度。故本案建議未來制定相關作業規範時，可以根據精度需求與作業環境(空載、車在與船載)，明訂定位定向系統所使用的慣性測量儀、測量級衛星定位

儀之規格與多元感測器整合之演算法架構。

目前國內除中科院外，並無任何單位具備專業的慣性測量儀率定及校正實驗室，如前所述，國內目前有超過 20 套整合式定位定向系統在執行不同政府單位或民間所委託之移動遙測製圖業務，而慣性測量儀之品質與穩定性可視為整合式定位定向系統之核心；故本案評估建立國家級專業慣性測量儀率定及校正實驗室之過程中以逐年採購之方式逐步採購相關硬體以落實相關的規劃，屆時國內所有使用到慣性測量儀之業者，皆可以透過專業慣性測量儀率定及校正實驗室確認系統之規格，並確保作業之品質。

## 第五章 設計新解算模式之定位定向演算法

如前所述，精密定位定向系統之效能提昇除了仰賴進口規格更佳的慣性測量儀之外，另一個有效策略即是自行發展功能更先進多元感測器整合定位定向演算法，其優點為便宜、使用者可以進行研發且無出口管制之問題。Chiang 與 Chang(2010)之研究成果顯示，透過演算法的演化，未來的使用者有機會透過自行研發的軟體搭配低成本微機電慣性測量儀(單價低於 100 萬)而研製出符合部分移動遙測製圖精度之精密定位定向系統。如此朝向更少的硬體成本但提供更高精度的大方向努力。本案除發展具備多元感測器輔助之先進定位定向演算法外，另發展使用地平坐標系之慣性導航方程式之類神經網路嵌入式精密定位定向演算法，並評估其精度。

同時現有的 VRS 與 e-GPS 技術應用在高速動態的移動遙測製圖平台而言亦受現有通訊技術的影響而斷訊，當載體速度超過時速 70 公里時其連線效果就變差導致斷訊，就國外廠商的測試成果而言，VRS 與 e-GPS 技術之定位精度與連續度除了取決於 GNSS 主站之密度外，同時亦與通訊傳輸主站，如手機服務業者的基地台密度有關。故以台灣地區而言，都市地區因為手機業者之基地台分布密度高，以通訊之角度而言，適合 VRS 與 e-GPS 技術之動態定位應用，但都市地區 GNSS 訊號遮蔽嚴重，尤其是精密定位定向系統一般都使用雙頻大地等級 GNSS 接收儀，此等級的接收儀對於反射訊號相當敏感，所以在高樓大廈密布的都市叢林，即時的 VRS 與 e-GPS 之技術定位對需要動態定位之移動遙測技術之應用是英雄無用武之地，而郊區如高速公路此種定位模式亦受高速運動而產生通訊失聯之狀況，更遑論空載系統之應用。

故整體而言，現有的 VRS 與 e-GPS 之技術定位對移動遙測技術之應用而言有其限制，當然，GNSS 斷訊的結果可以仰賴好的慣性測量儀、其他輔助感測器與多感測器整合定位定向演算法來克服，如圖 5.1 所示，圖上多元感測器定位定向系統提供的後處理連續軌跡解精度在 2 公尺以內(傳統差分)，而 VRS 與 e-GPS 只有 65%的時間有解，其定位誤差整體而言大於 400 公尺(Shin,2005)。





圖 5.1 都市地區之 GNSS 訊號遮蔽影響

如前所述，現有移動遙測製圖精度要求高故需要仰賴後處理模式提供高精度定位定向解，故尚無急迫使用 VRS 與 e-GPS 動態定位技術之需求，但目前所有的多元感測器整合定位定向演算法都是仰賴傳統一對一或多對一實體主站與移動站搭配的方式進行差分計算，但此種傳統差分模式的缺點是基線的距離，而目前較合理的解決方案除了適度地在現有定位定向演算法融入後處理 VRS 之技術外，另一種替代方案就是檢視目前已相當成熟的精密單點定位技術(Precise Point Positioning, PPP)應用於移動遙測系統應用之效益。

另外，目前幾乎所有的商用多元感測器整合定位定向演算法都使用 Waypoint 之 Grafnav 軟體為主要的雙系統 GNSS 動態定位軌跡之處理引擎，而這一套純 GNSS 資料處理軟體一般售價依功能而定約在 30 至 60 萬之間。就其功能而言，此軟體之效能當然無庸置疑，目前全世界約 70~80% 的移動遙測製圖平台所需之 GNSS 動態定位軌跡都是來自此軟體，然而，基於深化空間資訊產業、人才訓練及提升台灣在導航領域的技術水準之觀點，本章進一步針對發展多系統 GNSS 載波相位差分定位動態軌跡演算法之可行性結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術應用之可行性進行 SWOT 分析以供未來持續發展之依據。同時因應未來多 GNSS 聯合作業模式將廣泛應用移動遙測製圖作業程序之趨勢，本案分析含現代化 GPS、現代化 GLONASS、Galileo 與 Compass 等主要 GNSS 之效能對於定位性能之影響。

## 5.1 發展使用地平坐標系之慣性導航方程式軟體

INS 為一種相對定位的導航技術。基本概念是根據慣性空間的牛頓第一及第二運動定律，藉由得知物體的加速度經由一次積分可以得

到當下載體的速度；二次積分可得到位置或是距離。有別於其他定位系統(例如：GNSS)，INS 是一種自主的導航系統，不需要藉由外來的訊號，也不會向外發送任何訊號，僅需要自身的導航系統就可進行導航定位的工作。這表示此種系統可在全天候條件下，在全球範圍內和任何介質環境內自主地、隱蔽地進行連續的三維定位和定向。雖然 INS 的定位誤差會隨著時間而累積，其誤差累積約與時間的平方成正比，但憑藉著特有的導航自主性，慣性導航系統仍為許多重要運動載體不可缺少的核心導航設備。

INS 的核心為加速度計及陀螺儀之慣性測量儀。一個完整的慣性測量包括了三個加速度計及三個陀螺儀或稱角加速度計。依照等級的不同，其觀測量也有所差別，較高等級的慣性測量儀提供觀測量為速度變量  $\Delta v^b$  及角度變量  $\Delta \theta^b$ ，而等級較低的慣性測量儀所提供觀測量為合力  $f^b$  和角速度  $\omega_{ib}^b$ 。慣性導航方程式計算過程首先針對原始的觀測量，進行系統誤差的改正，再經由慣性導航方程式的過程，最後可以得到慣性導航解，其中包括了三個位置解、三個速度解以及三個姿態角。陀螺儀元件的三軸正交擺設與加速度計的三軸相同，自成一個本體的坐標系統。在實務上，通常將盡可能地使慣性測量儀本身的坐標系統與載體坐標系統重合，減少一次坐標轉換，降低導航方程式中的複雜度。

### 5.1.1 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 5.2，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)。

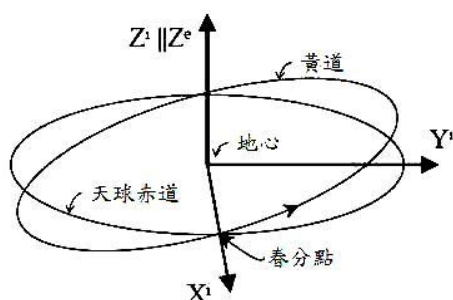


圖 5.2 慣性坐標系統(i-frame)

地心地固坐標系統(The Earth frame, 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 5.3 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)。

當地水平坐標系統(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 5.4a 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)的當地水平坐標系統也被廣為使用，如圖 5.4b，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)。

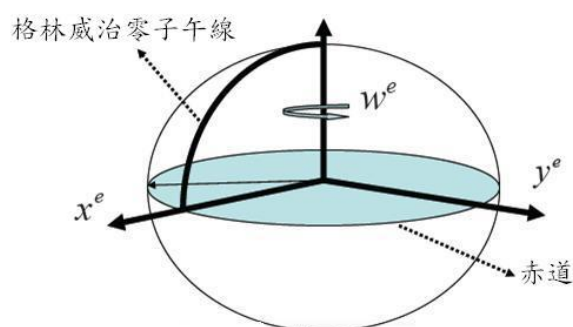


圖 5.3 地心地固坐標系統

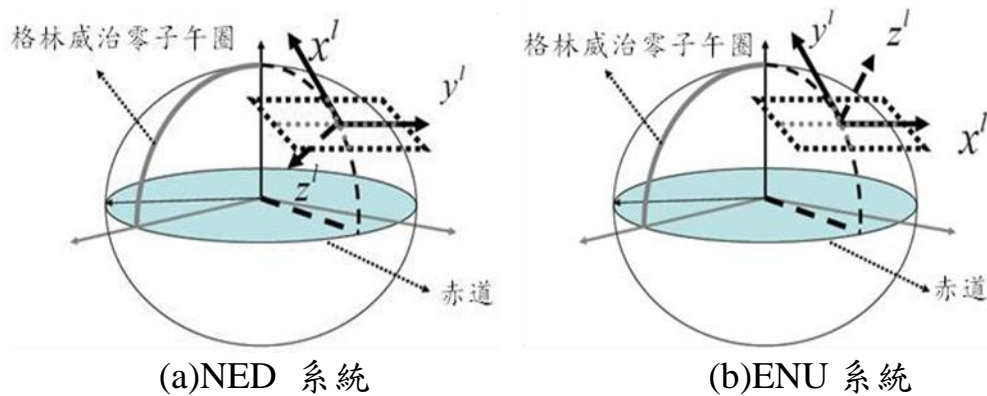


圖 5.4 當地水平坐標系統

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 5.5 所示(Titterton and Weston, 2004)。

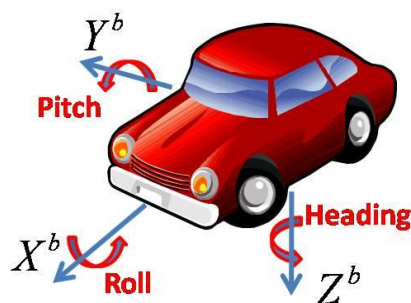


圖 5.5 載體坐標系統

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，當地水平坐標系統(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)為當地水平坐標系統(l-frame)。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，以前機械式的系統為透過環架的設計實現這種轉換關係，使用者一旦完成初始對準，慣性測量儀載體坐標系統的三軸會透過電腦控制實際對準導航坐標系統的三軸，在導航過程中會保持持續對準，而現今的固裝式慣性測量儀並無環架的設計，故載體坐標系統之三軸並無法持續對準導航坐標系統，但可以持續透過三軸陀螺儀偵測這二個系統之姿態變化並透過數學方式實現此二坐標系統之對



準。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  $f^b$ 、 $\omega_{ib}^b$ ，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當地水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)及四元素法(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(5.1)表示：

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

$$= \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \varphi \cos \lambda & -\cos \varphi \sin \lambda & -\sin \varphi \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

式(5.1)中  $\varphi$  是緯度， $\lambda$  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 從當地水平坐標系統(n-frame)轉至地心地固坐標系統(e-frame)可以下式表示：

$$C_n^e = (C_e^n)^T = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & -\cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & -\cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

由當地水平坐標系統(n-frame)轉至載體坐標系統(b-frame)之 DCM 的定義由下式表示(Titterton and Weston, 2004)：

$$C_n^b = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad (5.3)$$

式(5.3)中的  $\phi$ ， $\theta$ ， $\psi$  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)轉至當地水平坐標系統(n-frame)之 DCM 如下所示：

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

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \\ -\sin \theta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta s\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

式(5.4)中  $\sin$  和  $\cos$  分別由  $s$  和  $c$  來表示。

### 5.1.2 INS 導航方程式

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：

$$r^i = f^i + \bar{g}^i \quad (5.5)$$

式(5.5)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當地水平坐標系統(l-frame)並以一階微分方程式表示，詳細推導請參考(Chiang, 2004)。

$$\begin{bmatrix} r^l \\ v^l \\ C_b^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}v^l \\ C_b^l f^b - (2w_{ie}^l + w_{el}^l) \times v^l + g^l \\ C_b^l (\Omega_{ib}^b - \Omega_{il}^b) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(N+h)\cos\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

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)和當地水平坐標系統(l-frame)間的轉換矩陣  $C_b^l$  如式(5.4)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 and Wei, 1999)：

$$N = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.8)$$

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.9)$$

式(5.8)和式(5.9)中  $a$  和  $e$  分別為為參考橢球面的半主軸和線性離心率。

在當地水平坐標系統的位置向量由曲線坐標所得，其包含緯度  $\varphi$ ，經度  $\lambda$  和橢球高  $h$ ：



$$r^l = [\varphi \quad \lambda \quad h]^T \quad (5.10)$$

在地水平坐標系統的速度向量由下表示：

$$v^n = \begin{bmatrix} v_N \\ v_E \\ v_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (M+h) & 0 & 0 \\ 0 & (N+h)\cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

式(5.11)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  $\varphi$  和橢球高  $h$  的正常重力(Schwarz and Wei, 1999)。

$$g^l = [0 \quad 0 \quad \gamma]^T, \gamma = a_1(1 + a_2 \sin^2 \varphi + a_3 \sin^4 \varphi) + (a_4 + a_5 \sin^2 \varphi)h + a_6 h^2 \quad (5.12)$$

式(5.12)中  $a_1$  到  $a_6$  為常數，如表 5.1 所示。

以地水平坐標系統為主，地球自轉速度向量投射至地球坐標系統分量可表示如下：

$$w_{ie}^e = [0, 0, w_e]^T \quad (5.13)$$

表 5.1 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(5.13)將向量投射至地水平坐標系統：

$$w_{ie}^l = C_e^l w_{ie}^e = [w_e \cos \varphi \quad 0 \quad -w_e \sin \varphi]^T \quad (5.14)$$

地球自轉分量表示以地球坐標系統為主，地水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：

$$w_{el}^l = [\lambda \cos \varphi \quad -\dot{\varphi} \quad -\lambda \sin \varphi]^T = \begin{bmatrix} v_E / (N+h) & -v_N / (M+h) & -v_E \tan \varphi / (N+h) \end{bmatrix}^T \quad (5.15)$$

$\Omega_{ie}^l$  和  $\Omega_{el}^l$  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， $\Omega_{ib}^b$  則為其非對稱矩陣。

$$w_{ib}^b = \begin{bmatrix} w_x & w_y & w_z \end{bmatrix}^T \quad (5.16)$$

角速度  $\Omega_{il}^b$  減去  $\Omega_{ib}^b$  來消除地球旋轉速率和當地水平坐標系統的方位變化。因此， $\Omega_{il}^b$  由下表示：

$$\Omega_{il}^b = \Omega_{ie}^b + \Omega_{el}^b \quad (5.17)$$

因此，亦可得到  $w_{il}^b$ ：

$$w_{il}^b = C_l^b (w_{ie}^l + w_{el}^l) = C_l^b w_{il}^l = C_l^b \left[ w_e \cos \varphi + \frac{v_E}{(N+h)} \quad \frac{-v_N}{(M+h)} \quad -w_e \sin \varphi - \frac{v_E \tan \varphi}{(N+h)} \right]^T \quad (5.18)$$

所以，可透過  $w_{il}^b$  得到  $\Omega_{il}^b$ 。

#### ■ 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  $\Delta \underline{v}_f$  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性的誤差，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  $\Delta \underline{v}_f$  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。

$$\Delta \theta_{ib}^b = (\Delta \tilde{\theta}_{ib}^b - \mathbf{b}_\omega \Delta t) / (1 + \mathbf{s}_\omega) \quad (5.19)$$

$$\Delta \underline{v}_f = \begin{pmatrix} 1 / (1 + \mathbf{s}_{gx}) & 0 & 0 \\ 0 & 1 / (1 + \mathbf{s}_{gy}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 / (1 + \mathbf{s}_{gz}) \end{pmatrix} \Delta \underline{v}_f (-\underline{b}_g \Delta t) \quad (5.20)$$

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。

$b_{\omega}$ ：陀螺角速度偏差。

$s_{\omega}$ ：陀螺角速度尺度因子。

$\Delta t$ ：時間增量。

$\Delta\hat{v}_f$ ：誤差補償前速度增量。

$\Delta v_f$ ：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 and Wei, 1999)。

$$\Delta\theta_{nb}^b = (\Delta\theta_x \ \Delta\theta_y \ \Delta\theta_z)^T = \Delta\theta_{ib}^b - C_n^b (w_{ie}^n + w_{en}^n) \Delta t \quad (5.21)$$

而角度增量的大小由下列公式計算。

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_x^2 + \Delta\theta_y^2 + \Delta\theta_z^2} \quad (5.22)$$

計算角度增量的公式可用來更新四元數：

$$\begin{pmatrix} q_1(t_{k+1}) \\ q_2(t_{k+1}) \\ q_3(t_{k+1}) \\ q_4(t_{k+1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1(t_k) \\ q_2(t_k) \\ q_3(t_k) \\ q_4(t_k) \end{pmatrix} + 0.5 \begin{pmatrix} c & s\Delta\theta_z & -s\Delta\theta_y & s\Delta\theta_x \\ -s\Delta\theta_z & c & s\Delta\theta_x & s\Delta\theta_z \\ s\Delta\theta_y & -s\Delta\theta_x & c & s\Delta\theta_z \\ -s\Delta\theta_x & -s\Delta\theta_y & -s\Delta\theta_z^b & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1(t_k) \\ q_2(t_k) \\ q_3(t_k) \\ q_4(t_k) \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

式(5.23)中參數  $s$  和  $c$  可由下式所得

$$\begin{aligned} s &= \frac{2}{\Delta\theta} \sin \frac{\Delta\theta}{2} = 1 - \frac{\Delta\theta^2}{24} + \frac{\Delta\theta^4}{1920} + \dots \\ c &= 2(\cos \frac{\Delta\theta}{2} - 1) = -\frac{\Delta\theta^2}{4} + \frac{\Delta\theta^4}{192} + \dots \end{aligned} \quad (5.24)$$

透過對準過程得到初始 DCM 後就可計算四元數法的初始值。

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.25(C_{32} - C_{23})/0.5\sqrt{1+C_{11}+C_{22}+C_{33}} \\ 0.25(C_{13} - C_{31})/0.5\sqrt{1+C_{11}+C_{22}+C_{33}} \\ 0.25(C_{21} - C_{12})/0.5\sqrt{1+C_{11}+C_{22}+C_{33}} \\ 0.5\sqrt{1+C_{11}+C_{22}+C_{33}} \end{pmatrix} \quad (5.25)$$

DCM 可由下式更新：

$$C_b^l = \begin{pmatrix} (q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2) & 2(q_1q_2 - q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) & (q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 + q_4^2) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_4) & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & (q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_4^2) \end{pmatrix} \quad (5.26)$$

姿態之尤拉角度滾轉，俯仰與航向分別由下列公式獲得：

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{C_{31}}{\sqrt{1-C_{31}^2}}\right) \quad (5.27)$$

$$\phi = a \tan 2(C_{32}, C_{33}) \quad (5.28)$$

$$\psi = a \tan 2(C_{21}, C_{11}) \quad (5.29)$$

式(5.27)~式(5.29)中  $C_{ij}$  的  $ij$  範圍為  $1 \leq i, j \leq 3$ ，表示第  $(i, j)$  項的 DCM 矩陣，而  $\text{atan2}$  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 and Wei, 1999)。

$$\Delta v_f^l = C_b^l \begin{bmatrix} 1 & 0.5\Delta\theta_z & -0.5\Delta\theta_y \\ -0.5\Delta\theta_z & 1 & 0.5\Delta\theta_x \\ 0.5\Delta\theta_y & -0.5\Delta\theta_x & 1 \end{bmatrix} \Delta v_f^b \quad (5.30)$$

船划效應、科氏力改正與正常重力改正可透過式(5.31)完成。

$$\Delta v^l = \Delta v_f^l - (2w_{ie}^l + w_{el}^l) \times v^l \Delta t + g^l \Delta t \quad (5.31)$$

速度積分可透過式(5.32)進行。

$$v_{k+1}^l = v_k^l + \Delta v_{k+1}^l \quad (5.32)$$

最後位置積分則可以利用二階 Runge-Kutta 方法得到：

$$r_{k+1}^l = r_k^l + 0.5 \begin{bmatrix} \frac{1}{(M+h)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(N+h)\cos\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} (v_k^l + v_{k+1}^l)\Delta t \quad (5.33)$$

圖 5.6 為本案所發展之當地水平坐標系統的 INS 導航演算流程圖。

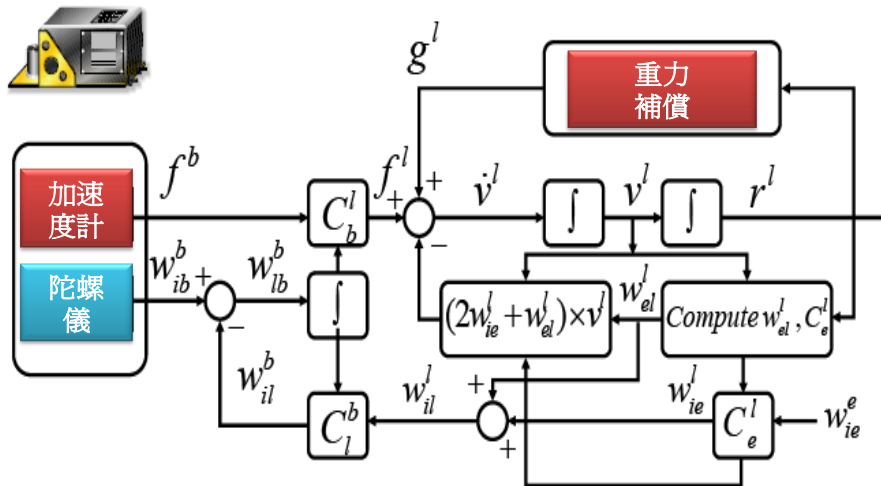


圖 5.6 當地水平坐標系統的導航方程式(Chiang, 2004)

### 5.1.3 INS/GNSS 整合架構

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 5.2 為 GNSS 與 INS 之特性與優缺點表，以及整合後之特性表。

表 5.2 GNSS、INS 及 INS/GNSS 整合之特色比較

	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 and Hwang, 1997)。

卡曼博士最初提出的濾波理論只適用於線性系統，Bucy(Bucy and Senne, 1971)等人提出並研究了擴張卡曼濾波(Extended Kalman



Filter, 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，擴張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：

$$\dot{x} = Fx + Gw \quad (5.34)$$

其中，

$x$  為慣性導航誤差的狀態向量，共有 21 個元

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

$F$ ：動態矩陣

$w$ ：系統雜訊

而觀測量更新模型表示如下：

$$Z = Hx + v \quad (5.35)$$

其中，

$x$ ：慣性導航誤差的狀態向量，共有 21 個元素

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

$H$ ：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：

$$\hat{x}_k(-) = \Phi_k \hat{x}_{k-1}(+) \quad (5.36)$$

$$P(-) = \Phi_k P_{k-1}(+) \Phi_k^T + Q_{k-1} \quad (5.37)$$

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：

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5.38)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k (Z_k - H_k \hat{x}_k(-)) \quad (5.39)$$

$$P_k(+) = P_k(-) - K_k H_k^T P_k(-) \quad (5.40)$$

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張卡曼濾波器 EKF 及線性化卡曼濾波器可供選擇 (Linearized Kalman Filter, LKF) (Brown and Huang, 1992)，本案採用擴張卡曼濾波器。平滑器是利用全部過去、現在和未來的觀測量以後處理模式來找出一個理想估算解，而全部的平滑演算法皆須根據所得之濾波解來運算，因此，好的濾波解才有好的平滑解。根據 Gelb (1974)，平滑器問題分類成三種：固定點平滑，固定延遲平滑和固定區間平滑。固定區間平滑是用在特定點的狀態，如衛星的進入軌道時間或化學加工的反應初始情況等。固定點平滑則用在當固定延遲估算並沒有附於棘手的問題時，因此，此法主要用在如通信和遙測資料來解決問題。而固定區間平滑則用在大部份的測量應用上，因為測量是想得到所有觀測點的最佳的位

置資訊，然而要達到如此的需求必經後處理的方式。本案所使用 Rauch-Tung-Striebel (RTS) 逆向平滑器。與其他固定區間平滑器比較，RTS 演算法是最容易且最簡單使用。RTS 平滑器由前掃(forward sweep)和後掃(backward sweep)所組成，前掃是將卡曼濾波器的所有預估和更新估算以及其對應的協變方矩陣儲存於每個時刻。後掃開始於順向濾波的結束點(如開始於時刻 N)，其初始條件為  $\hat{x}_{N,N}^s = \hat{x}_{N,N}$  和  $P_{N,N}^s = P_{N,N}$ 。RTS 平滑演算法如下表示(Gelb, 1974)：

$$\hat{x}_{k,N}^s = \hat{x}_{k,k} + A_k (\hat{x}_{k+1,N}^s - \hat{x}_{k+1,k}) \quad (5.41)$$

$$A_k = P_{k,k} \Phi_{k+1,k}^T P_{k+1,k}^{-1} \quad (5.42)$$

式(5.40)中  $\hat{x}_{k,N}^s$  為狀態向量之平滑估算， $A_k$  為平滑增益矩陣， $k=N-1, N-2, \dots, 0$ 。平滑狀態之協變方矩陣如下表示(Gelb, 1974)：

$$P_{k,N}^s = P_{k,k} + A_k (P_{k+1,N}^s - P_{k+1,k}) A_k^T \quad (5.43)$$

如圖 5.7a 所示，DGNSS 觀測量從時間 0 至 N 時刻全程皆可得。擴張卡曼濾波器估算每個時刻  $k$  ( $\hat{x}_{k,k}$ ) 的濾波解， $k=0,1,2 \dots N$ 。在固定區間平滑演算法中，觀測量的所有區間的初始與最終時間是固定的，就像 0 和 N，此時所要的結果就是於全部時刻  $k$  的理想平滑估算解，如圖 5.7b 所示。在此演算法中，用到 0 至 N 的所有觀測量的更新，因此時刻  $k$  的理想平滑估算為  $\hat{x}_{k,k}^s$ 。而這類型的平滑演算法由於需要 0 至 N 的全部觀測量的可得性，所以只能用在後處理模式。

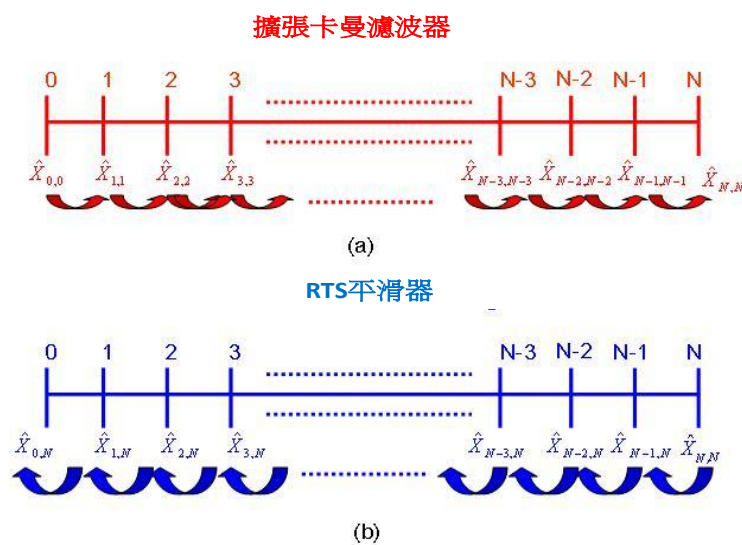


圖 5.7 固定區間逆向平滑演算法之概念

在任何時刻  $k$  的 RTS 平滑估算是透過  $k$  時刻的濾波估算與  $k+1$  時刻的平滑估算來作線性組合而得，因此 RTS 平滑估算能被用來更新順向濾波解，進而得到更優越之估算解。在計算每段時刻的平滑估算時，皆須儲存擴張卡曼濾波器每時段的預估、更新估算以及它們對應的協變方矩陣，這即是當連續性資料不中斷時，處理 INS/GNSS 整合解的例子。如果發生 GNSS 遮蔽效應時，則只能得到預估估算和協變方矩陣。如前所述，目前的多感測器整合定位定向演算法是透過使用卡曼濾波器及平滑器來分別滿足對即時及後處理應用之需求。目前雖然有很多產品及研究都是利用相同的概念來處理 INS/GNSS 整合系統在即時及後處理之需求。但不同使用者對系統的認知不同，故所開發出來的卡曼濾波器所具備之狀態數目、動態模型及誤差模型皆或有不同 (Chiang, 2004)，同時每個開發者對濾波器參數調整的能力更影響軟體的效能 (Chiang et al., 2009)。故面對一樣的系統，不同人開發的卡曼濾波器之效能絕對不會一樣。故這十年來縱使已經有上千篇的文獻討論卡曼濾波器於整合系統的應用，但這個研究課題在整合系統動態定位領域之熱度仍舊維持不墜，這點可由每年美國導航學會 ION GNSS 年會中 INS/GNSS 之相關議題發表數量獲得證實，每年 300 篇正選文章中有 50 至 60 篇與 INS/GNSS 整合課題有關。圖 5.8 所示為擴張卡曼濾波器之解與 RTS 平滑器之解於 GNSS 訊號脫落時之效能比較，一般而言，在 GNSS 訊號脫落期間，後處理的 RTS 平滑器可以提升為擴張卡曼濾波器之效能近 70%，這也是目前所有移動遙測製圖技術都採用的 RTS 平滑器為多元感測器整合之核心架構之主要原因。

表 5.3 為目前文獻記載之 INS/GNSS 整合架構之簡單比較 (Chiang, 2004)，鬆耦合架構將 INS 及 GNSS 視為兩個獨立的系統，INS 利用導航方程式；GNSS 有獨立的卡曼濾波器求導航解，最後以負責整合的擴張卡曼濾波器與平滑器以獲取最佳的整合解，其結構簡單故為目前各商用軟體所採用。而緊耦合架構，基本上是將兩系統在觀測量的部分就做整合，換句話說，緊耦合不再像是鬆耦合系統般，將兩系統視為獨立運作的導航系統，個別得到導航解之後再進行整合，取而代之的是緊密地將 INS/GNSS 視為同一個系統，一同進行定位定向解之計算，此種架構整合的最大的優點在於當 GNSS 訊號薄弱時，系統只要能收到一顆衛星的正常訊號，即可進行定位定向解之計算；然其數學模式較為複雜，故尚未全面取代鬆耦合架構。而超緊耦合架構之實現門檻較高，且其對移動遙測製圖技術並未有突破性的助益，故尚未有任何商用定位定向系統採用此架構。圖 5.9 所示為目前商用定位定向軟體所使用之傳統 INS/GNSS 開放式鬆耦合架構。而圖 5.10 所示

為本案發展具備 21 個狀態之 CAINS-21 軟體所採用的改良閉合式 INS/GNSS 鬆耦合架構。

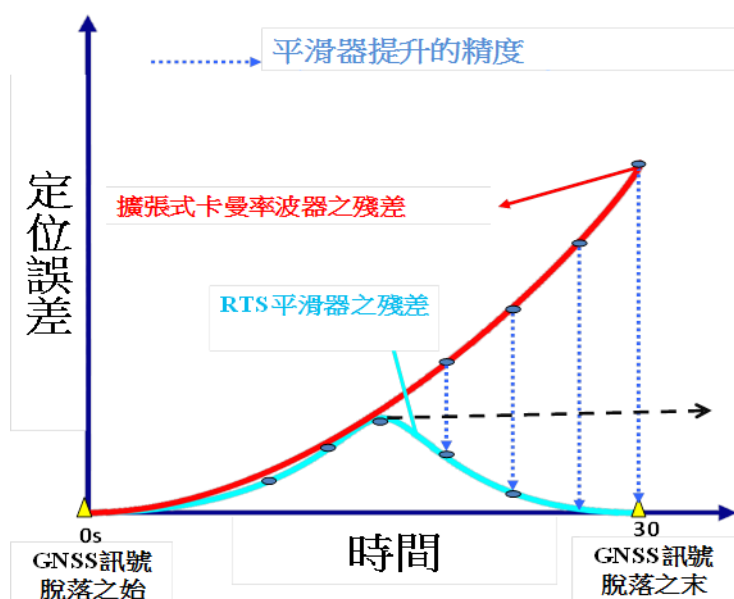


圖 5.8 擴張卡曼濾波器與 RTS 平滑器於 GNSS 訊號脫落時之效益

本節所發展之 CAINS-21 軟體除具備與一般商用軟體之平滑器架構外，同時引入輪速計、線性約制、航向輔助與高度輔助之改良式鬆耦合架構(Chiang and Chang, 2010)；同時 CAINS-21 軟體採用具備線上率定技術的閉合式設計，使用者可以依慣性測量儀之性能調整線上回饋修正系統誤差之頻率，這點是商用軟體所沒有的特色。慣性測量儀的原始觀測量輸出通常具有系統偏差及尺度因子誤差。因此在藉由其它多元感測器的整合架構幫助下，透過擴張卡曼濾波器與平滑器作狀態最佳估計，則可依導航方程式進一步地估算出慣性測量儀的偏差及尺度因子誤差，最後將這些誤差回饋至系統狀態，以達到提升慣性測量儀穩定性之目的。

如前所述，本節發展之 CAINS-21 軟體引入之線性約制演算法為非諧和約制(Non-Holonomic Constraints, NHC)，此演算法是假設一般車輛在地面行進間，不會有側向滑動，亦不會有垂直方向的跳動，故垂直於車輛行進方向的平面上之速度量應趨近於 0 (Sukkarieh, 2000)；因此，在卡曼濾波器預估狀態時，便有兩個約制條件可作為觀測量更新。由導航方程所提供的導航坐標系之速度量(n-frame 的速度量)，經由 DCM 轉換矩陣轉換成載體坐標系之速度量後，進行非諧和約制；最後，非諧和約制結果(b-frame 的速度量)輸出並轉換為 n-frame 的速度量再反饋至卡曼濾波器中求解(Shin, 2001)。

表 5.3 一般 INS/GNSS 整合架構的簡易比較(Chiang, 2004)

應用	優點	缺點
無耦合 Uncoupled	簡易之整合演算法。	無 GNSS 時，系統精度銳減。
鬆耦合 (分散式) Loosely Couple (decentralized)	INS 和 GNSS 卡曼濾波器分開應用。 個別的卡曼濾波器規模小。 具有適應性的模組結合。 適合平行處理，具可靠性。 較少的計算複雜度。	次佳化的設計。 至少需四顆衛星求穩定解。 INS 資料並不用來做模糊估算。
緊耦合 (集中式) Tightly coupled (centralized)	最佳化的設計。 少於四顆衛星的 GNS 觀測量亦能使用。	誤差狀態矩陣龐大。 運算處理複雜。
超緊耦合 (深) Ultra-tightly coupled (deep)	INS 資訊可提升動態追蹤軌跡精度。 降低 GNSS 接收儀的動態熱雜訊影響。	此組合原理需要特別硬體和取得相關 GNSS 接收儀的模組套件。 硬體需求高。

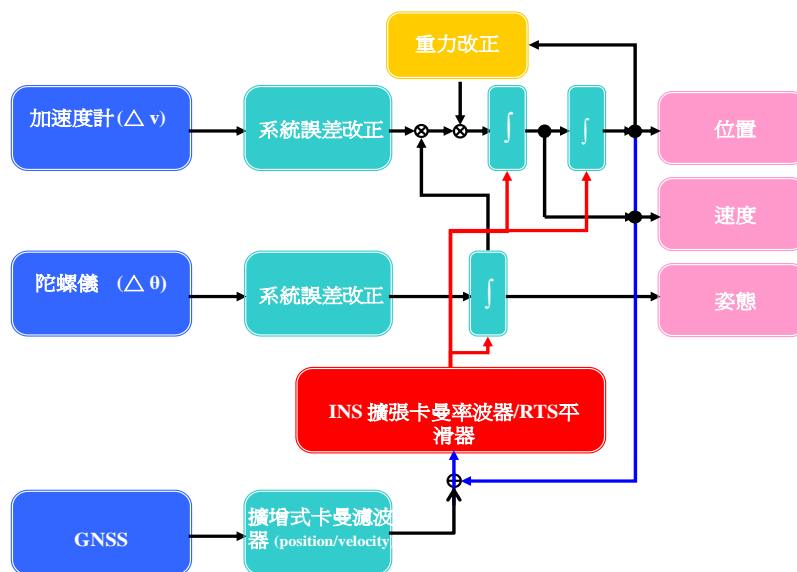




圖 5.9 商用定位定向軟體所使用的傳統開放式鬆耦合架構

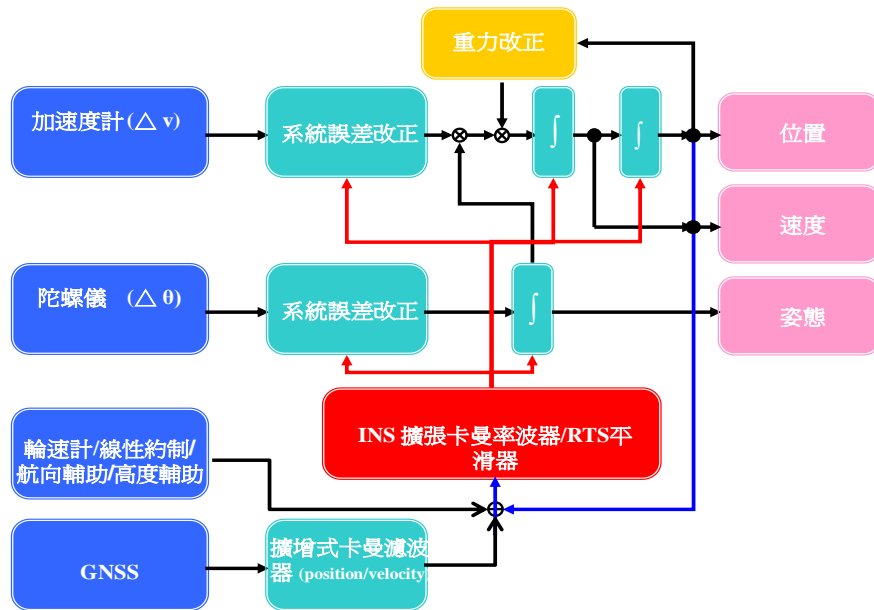


圖 5.10 CAINS-21 軟體使用之改良閉合式鬆耦合架構

該軟體同時提供零速更新技術(ZUPT)，是解決車載慣性導航系統長時間精度的一種廉價而有效的方法。它是利用載體停車時慣性導航系統的速度輸出作為系統速度誤差的觀測量，進而對其他各項誤差進行修正(Gao et al., 1995)。零速更新可透過行車輪速計資訊得到車子停止時間，若是無法取得輪速計資訊亦可透過使用者自行輸入車子停止時間；尤其在典型的都市地區，車子常因為交通號誌(例如：紅燈)或塞車而必須暫時停止，若是又剛好碰到 GNSS 衛星訊號失鎖時，零速更新就可以降低慣性測量儀隨時間累積的誤差。零速更新技術通常用來降低慣性測量儀加速度計與陀螺儀的偏差量，進而補償位置距離的誤差(Ojeda and Borenstein, 2007)。當演算法自動偵測出靜止時間，即可將慣性測量儀在靜止期間內的參考速度量調整為 0，將結合 ZUPT 修正後之速度觀測量做為慣性導航方程之速度觀測量輸出。

同時本軟體具備載體速度更新 (vehicle velocity update)之功能，車速更新的原理類似 ZUPT，差異處僅僅在於車速的部分由輪速計或其它可感測行車方向速度之感測器(如都卜勒雷達測速計、聲納感測器、空速計等)所提供。本軟體部分研究成果獲得美國導航學會 ION GNSS2011 年會之最佳論文獎(Chen and Liu, 2011)。實現商用定位定向軟體所使用的傳統鬆耦合架構與本節研發的改良式架構之詳細狀態轉移方程式與觀測量更新方程式請參考(張秀雯，2009；Chiang, 2004)。

#### 5.1.4 CAINS 軟體使用者介面與效能分析

CAINS-21 為基於 Microsoft MFC 軟體框架所完成之具圖形化使用者介面的軟體，程式主畫面如圖 5.11 所示。

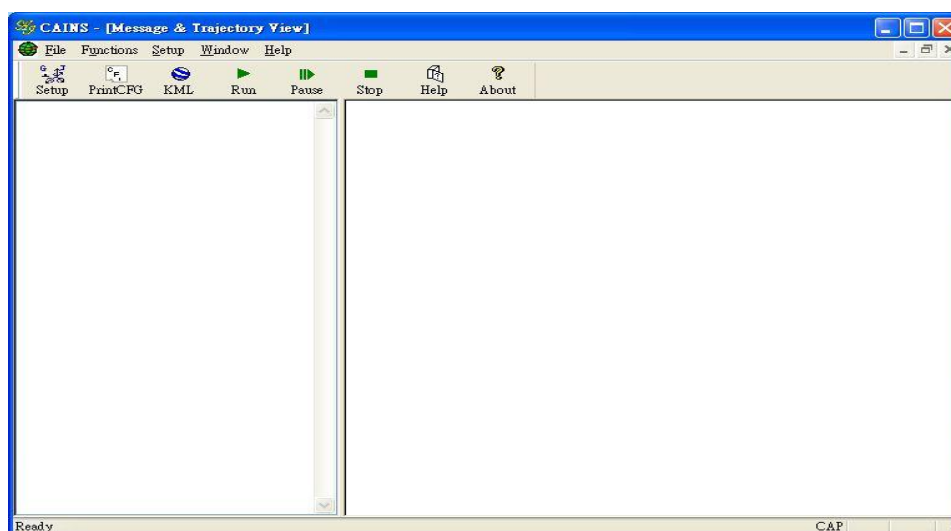


圖 5.11 CAINS-21 軟體介面主視窗

CAINS-21 由程式主畫面點選 Setup，進入專案設定介面，設定內容分為五大類；INS/GNSS 觀測資料檔及觀測參數之設定、慣性測量儀感測器效能參數之設定、模擬 GNSS 訊號脫落之設定、系統初始對準之設定與其它感測器及載體約制條件輔助導航功能之設定，如圖 5.11 所示。

為驗證 CAINS-21 之效能，本案利用加拿大卡加利大學所提供在 2005 年 3 月份於加拿大卡加利機場附近道路所測試之資料，軌跡規劃為正東向、正北向之標準測試軌跡，所使用的參考整合式定位定向系統為使用雷射陀螺儀之導航等級慣性測量儀；Honeywell CIMU(陀螺飄移為 0.01 度/小時)，參考軌跡為使用 KINGSAPD 以緊耦合方式利用定位定向系統提供之 GNSS 載波相位觀測量與慣性測量儀原始觀測量進行後處理計算，如此可以確保參考軌跡在如此的測試環境可以維持 10 公分以內之絕對精度。這套系統擁有 INS 與 GNSS 原始資料處理能力，同時自 1993 迄今已成功技轉上百套至國外產學界(包含 Waypoint 之 Grafnav 與 Inertial explorer 軟體)，目前該校所開發的 VISAT 系統亦是使用本軟體，其操作介面如圖 5.12。

測試系統為與本案所採購之 LCI 慣性測量儀同等級的 LN200，測試系統之配置如圖 5.13 所示，而參考軌跡依平面及高程分別展示

於圖 5.14 及圖 5.15。測試過程中模擬一段 5 分鐘之 GNSS 訊號脫落，分別測試 CIANS-21 之純擴張卡曼濾波器(EKF)模式、擴張卡曼濾波器及非諧和約制(EKF+NHC)與擴張卡曼濾波器、非諧和約制及輪速計更新同時運作(EKF+NHC+ODO)等三種模式之效能。

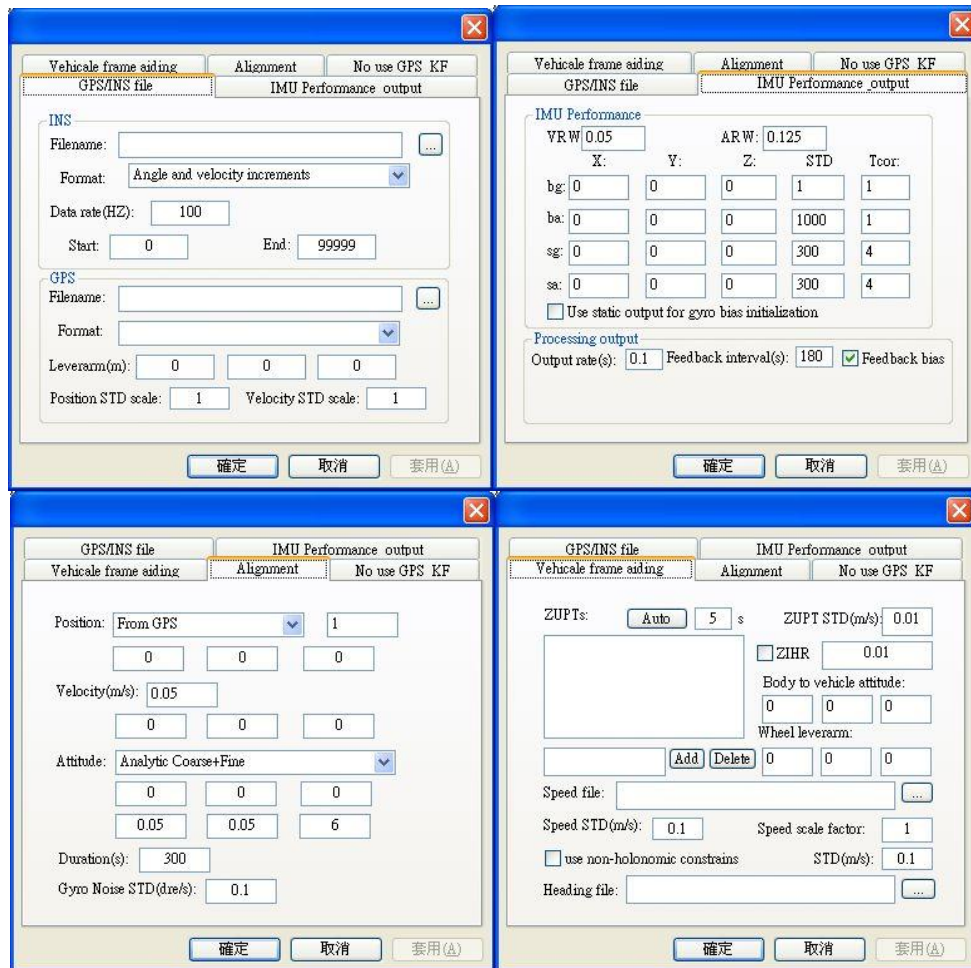


圖 5.12 CAINS-21 使用者操作介面

KINGSPAD: **K**INematic Geodetic System for **P**ositions and **A**ttitude **D**etermination

Authors: Dr. K. P. Schwarz and N. El-Sheimy  
Department of Geomatics Engineering  
The University of Calgary

**KINGSPAD™** A Kinematic Geodetic Software for Position and Attitude Determination

- Hardware Independent**
- Flexible Filtering Modes**
- Menu Driven**
- Versatile in Applications**

Available as C source code or executable

University Technologies International Inc.  
204, 5th St NW, Calgary AB, Canada, T2N 2A1  
Tel: 403-270-6277, Fax: 403-270-2594  
Email: gis@utis.ca, Internet: www.utis.ca

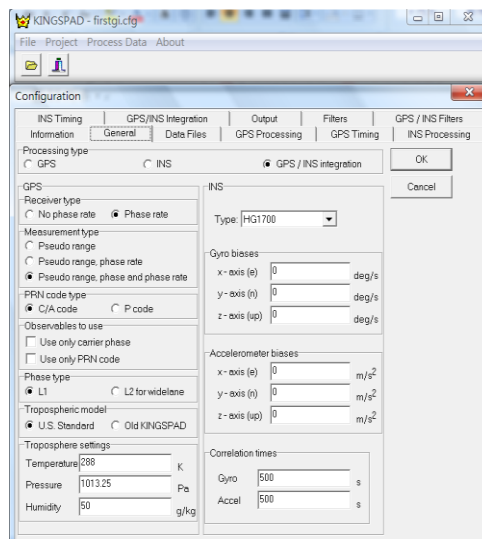


圖 5.13 KINGSPAD 軟體之操作介面



圖 5.14 測試系統之配置



圖 5.15 平面參考軌跡

圖 5.16 至圖 5.18 分別表示上述三種模式之定位定向解與參考定位定向解之定位誤差；圖 5.19 至圖 5.21 分別表示上述三種模式之定位定向解與參考定位定向解之定向誤差。

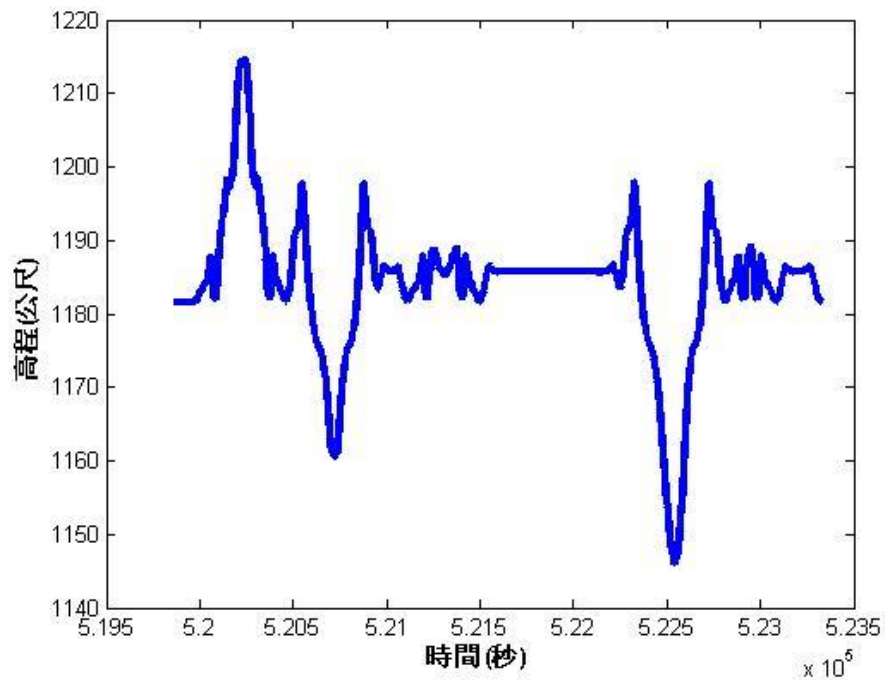




圖 5.16 高程參考軌跡

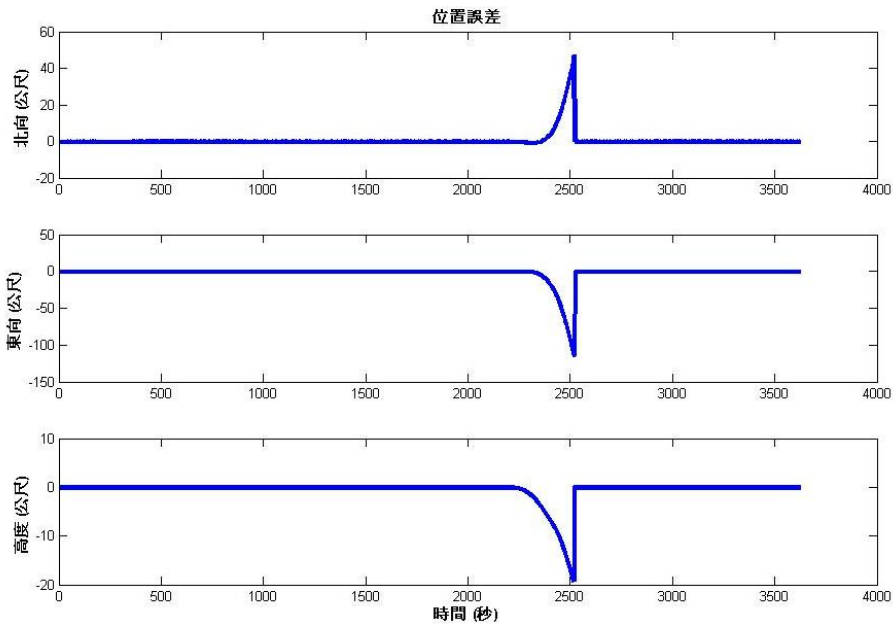


圖 5.17 擴張曼濾波器之定位誤差序列

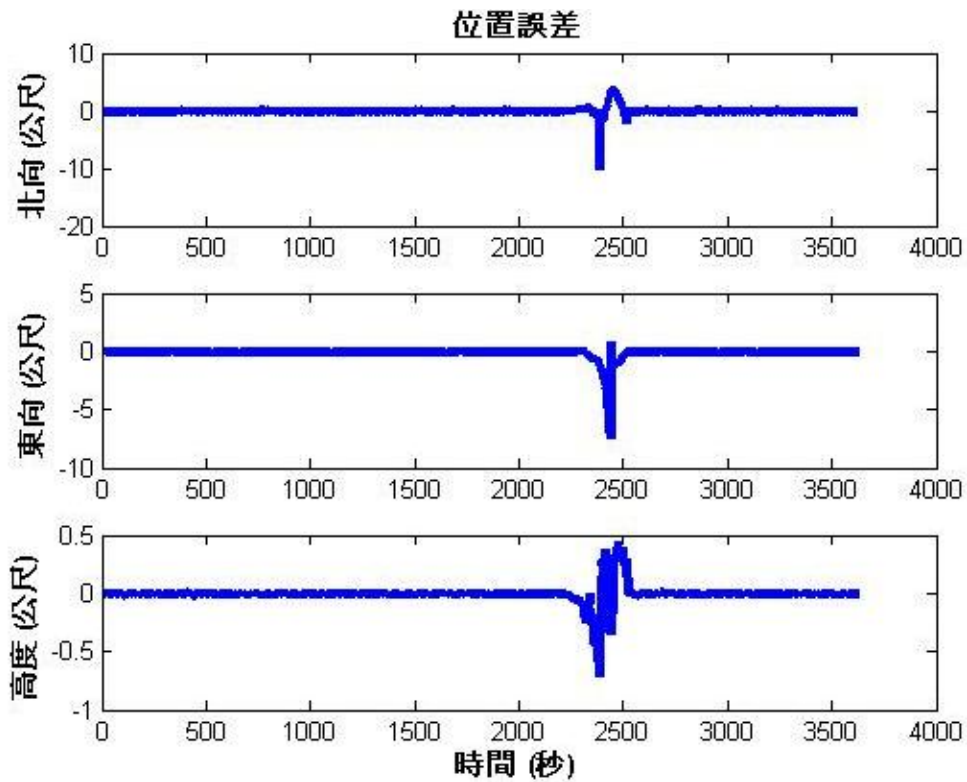


圖 5.18 擴張卡曼濾波器及非諧和約制之定位誤差序列

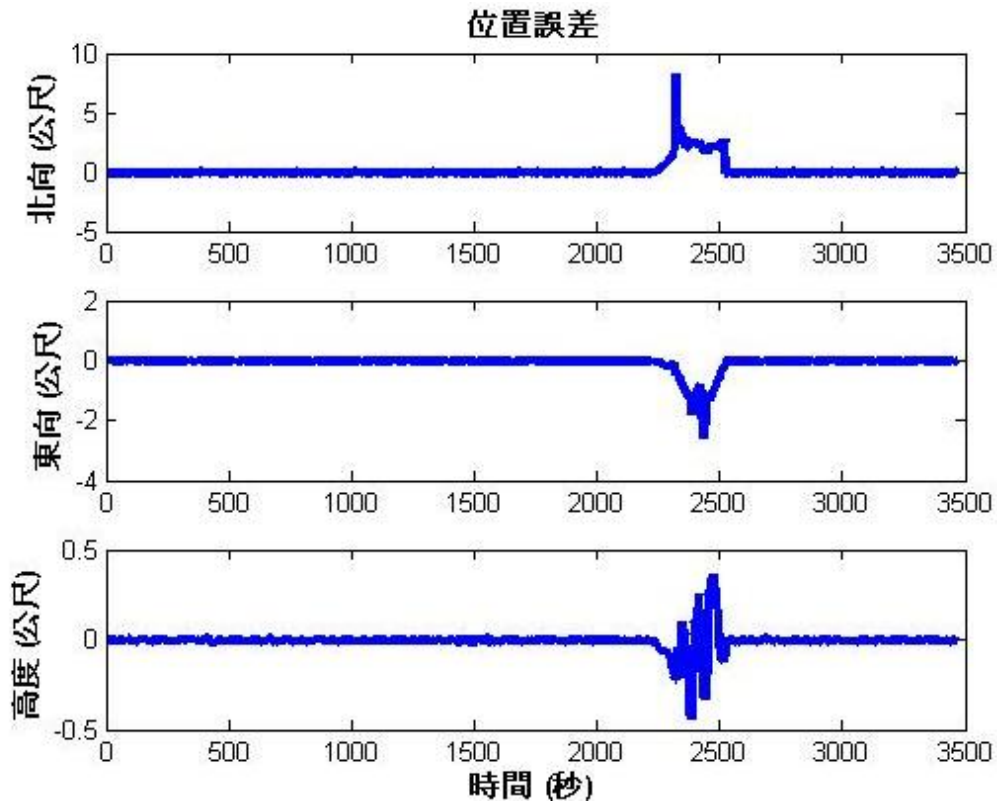


圖 5.19 擴張卡曼濾波器、非諧和約制及輪速計更新之定位誤差序列

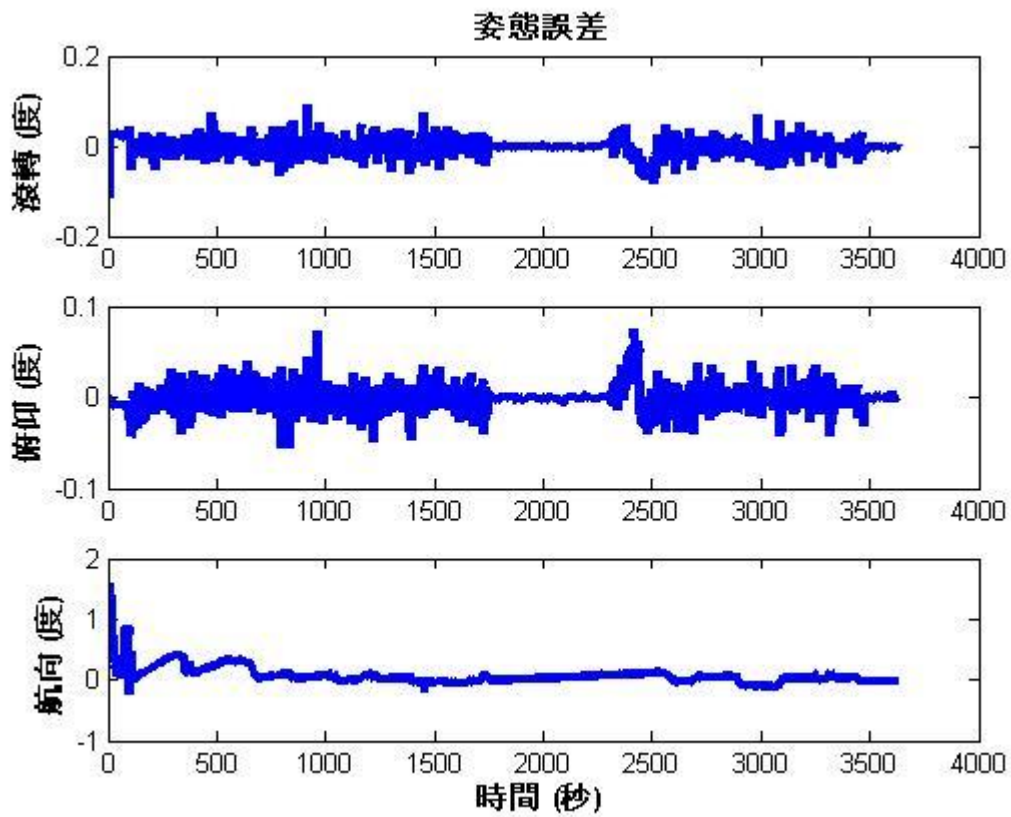


圖 5.20 擴張曼濾波器之定向誤差序列



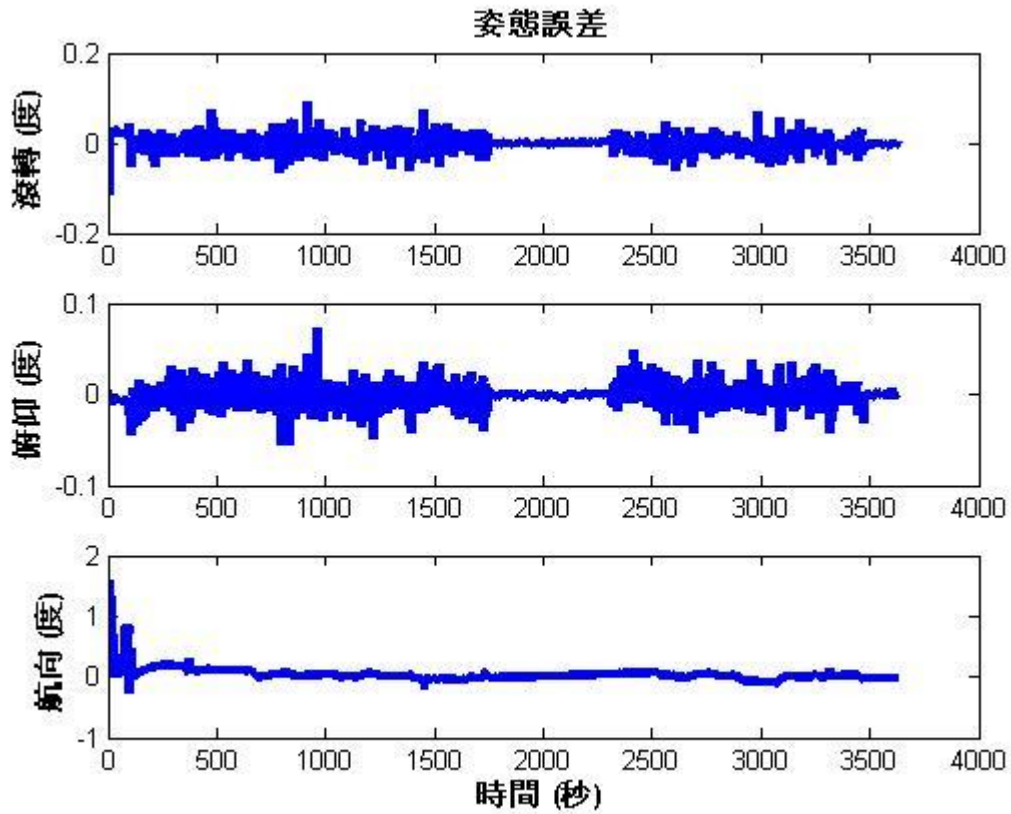


圖 5.21 擴張卡曼濾波器及非諧和約制之定位誤差序列

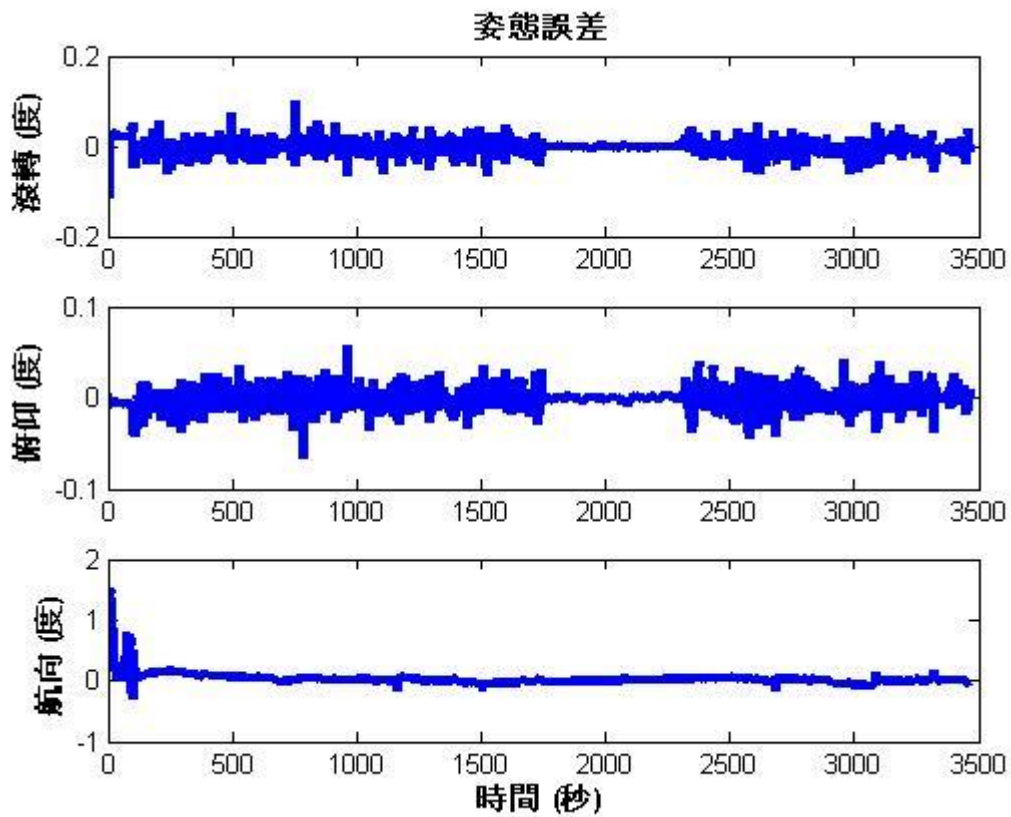


圖 5.22 擴張卡曼濾波器、非諧和約制及輪速計更新之定向誤差序列

表 5.4 所示為上述三種模式在包含一段模擬 5 分鐘 GNSS 訊號脫落之整體定位定向解之最大誤差與均方根誤差統計表。成果初步顯示本案所研發的 CAINS-21 軟體搭配輔助算法可以較原始的擴張卡曼濾波器演算法於 5 分鐘 GNSS 訊號脫落期間之定位定向解提供近 90% 之效能提昇。

表 5.4 定位定向解誤差統計表

最大誤差	北向 (公尺)	東向 (公尺)	高程 (公尺)
EKF	47.3339	115.1810	19.3193
EKF+NHC	10.1283	7.4124	0.7092
EKF+NHC+O DO	8.2420	2.5569	0.4447
	滾轉(度)	俯仰(度)	航向(度)
EKF	0.1141	0.0745	1.5993
EKF+NHC	0.1150	0.0720	1.5723
EKF+NHC+O DO	0.1151	0.0660	1.5297
均方根誤差	北向 (公尺)	東向 (公尺)	高程(公尺)
EKF	4.4930	11.3960	2.3508
EKF+NHC	0.5093	0.4743	0.0727
EKF+NHC+O DO	0.6718	0.2553	0.0501
	滾轉(度)	俯仰(度)	航向(度)
EKF	0.0158	0.0108	0.1801
EKF+NHC	0.0131	0.0090	0.1470
EKF+NHC+O DO	0.0131	0.0088	0.1418

## 5.2 發展精密單點定位動態軌跡演算法

傳統的 GNSS 的電碼單點定位 (Single Point Positioning, SPP) 精度很難滿足高精度定位的要求。因此利用載波相位觀測量進行差分的作法應運而生，藉由差分的方式可以消除或消除大部分的接收儀時鐘

差、衛星時鐘差、對流層延遲等系統誤差影響以達到公分級的高精度。因此載波相位差分定位的方法在高精度靜態測量領域獲得肯定。不過，它需要建立基準站和移動站，且受限於基準站與移動站的作業距離影響，導致精度不均勻的影響，也直接衝擊了 GNSS 定位的作業效率與精度。精密單點定位是利用高精度的 GNSS 衛星星曆和衛星時鐘差，以及單台接收儀的雙頻載波相位觀測值進行定位，此一觀念最初是由噴射推進實驗室(Jet Propulsion Laboratory, JPL) Zumberge 等人(1997) 所提出，並在他們所開發的數據處理軟體上與以實現。而 PPP 定位方法僅利用單台接收儀即可在全球範圍內進行靜態或動態定位作業，再利用國際 GNSS 服務組織(International GNSS Service, IGS) 所提供的精密星曆，實現了全球都可以使用高精度定位結果。IGS 之觀測網如圖 5.23 所示。因此，精密單點定位在現在高精度的測量工程和動態高精度的導航定位都具有無可限量的應用前景。隨著 GLONASS、Galileo 與 Compass 等 GPS 之外的全球導航定位系統相繼投入，因此可以預見未來精密單點定位在 GNSS 導航定位領域上，帶來一次新的技術革命。

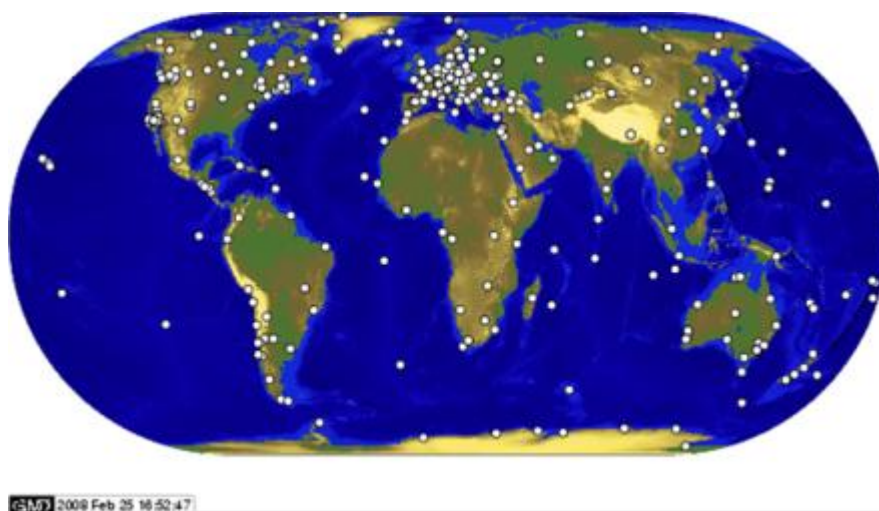


圖 5.23 IGS 之觀測網

(摘自 <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>)

目前國外導航及動態定位領域相關之產學界對於 PPP 技術的發展與相關應用之推廣。美國導航學會所主辦之 GNSS 年會亦曾於 2003 及 2004 年連續二年提供 PPP 之議程；如此足見該技術發展之重要性。加拿大 NovAtel 公司針對 PPP 技術進行五次空載系統之動態定位所做之測試；結果顯示其三維定位之均方根誤差(與導航級 INS/GNSS 定位系統搭配載波相位差分定位所產生達 5 公分級精度的動態軌跡相較)可達 5 公分。在靜態定位測試方面亦利用 IGS 之追蹤站資料進

行 24 小時觀測資料之計算；與已知檢核坐標相較之下其 3 維精度可達 2 公厘至 5 公厘。詳細資料請參考該公司網站。本系約在 2007 年與加拿大卡加利大學空間資訊工程系的高揚教授合作引進含 PPP 之技術，隨後在 2008 年與國土測繪中心合作共同發展具備中文操作介面與更新內部的模組，包含增加支援的 RINEX 格式版本、卡曼濾波器動態模型與參數調校等功能(楊名、江凱偉，2008)，該軟體之操作介面如圖 5.24 所示。當時的發展重心著重在評估 PPP 技術與差分定位技術應用在靜態測量的應用與衍生對流層濕延遲估計之技術，並未深入探討 PPP 應用在移動遙測製圖平台動態軌跡定位之效益，所以本案主要在既有的基礎上更新的 PPP 動態軌跡計算功能，如圖 5.25 所示，同時發展多重濾波 PPP 資料處理模式以配合多元感測器整合定位定向演算架構中引入 PPP 的功能。

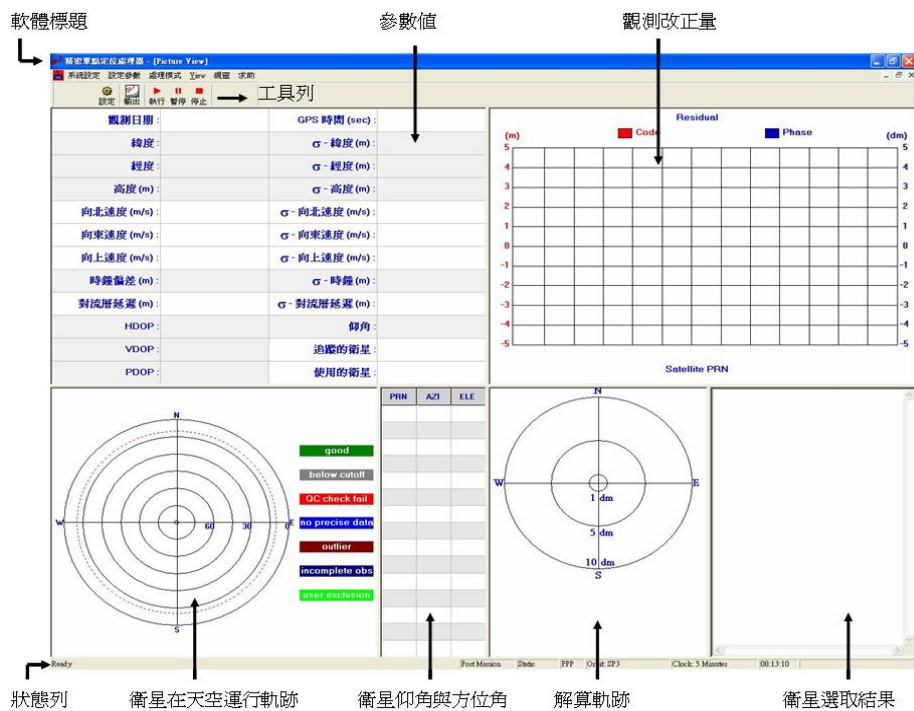


圖 5.24 精密單點定位處理器主視窗系統畫面

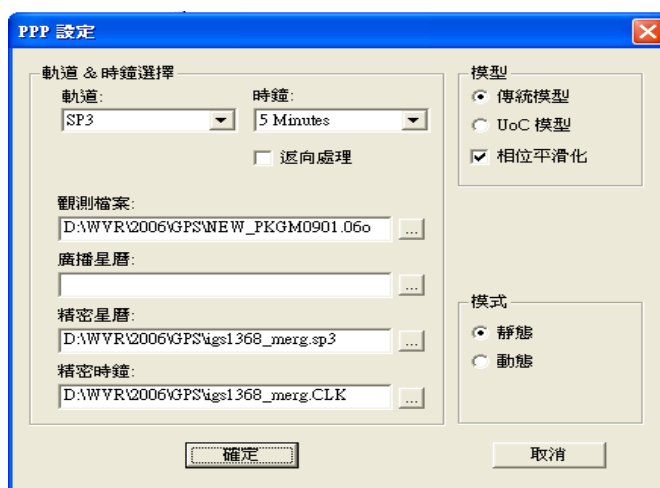


圖 5.25 精密單點定位處理器主視窗系統畫面

常用的 PPP 數學模型可列舉如下(楊名、江凱偉，2008)：

1. 經典模型：使用雙頻載波相位與虛擬距離觀測量所組成之無電離層模型 (Zumberg *et al.*, 1997)，其公式簡化如下：

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} p_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} p_2 = \rho + cdl + d_{trop} + \varepsilon(p_{IF})$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 = \rho + cdl + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\Phi_{IF}) \quad (5.44)$$

其中  $P_{IF}$  為虛擬距離  $p_1$  與  $p_2$  之無電離層線性組合； $\Phi_{IF}$  為載波相位  $\Phi_1$  與  $\Phi_2$  無電離層線性組合； $f_1^2$  為載波頻率；

$B_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_2$  為無電離層組合之週波未定值；

$\varepsilon(P_{IF})$  與  $\varepsilon(\Phi_{IF})$  分別為虛擬距離及載波相位觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。

2. 卡加利大學模型(U of C)；該模型除了採用無電離層相位組合外亦採用 L1 與 L2 二個頻率的電碼與相位的平均形式組合，如此的組合亦有降低電離層效應之功效(Gao and Shen, 2002)。相關的公式列舉如下：

$$P_{IFL1} = \frac{1}{2}(p_1 + \Phi_1) = \rho + cdl + d_{trop} + \frac{1}{2} \lambda_1 N_1 + \varepsilon(p_{IFL1})$$

$$P_{IFL2} = \frac{1}{2}(p_2 + \Phi_2) = \rho + cdl + d_{trop} + \frac{1}{2} \lambda_2 N_2 + \varepsilon(p_{IFL2})$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 = \rho + cdl + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\Phi_{IF}) \quad (5.45)$$



其中  $P_{IFL1}$  與  $P_{IFL2}$  分別為 L1 與 L2 二個頻率上虛擬距離與載波相位組合之觀測量； $\Phi_{IF}$  為載波相位  $\Phi_1$  與  $\Phi_2$  無電離層線性組合； $\varepsilon(P_{IF1})$ 、 $\varepsilon(P_{IF2})$  與  $\varepsilon(\Phi_{IF})$  分別為三種觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。

3. 無週波未定值模型；此種模型採用對前後時刻的無電離層載波相位線性組合求差以獲得無電離層虛擬距離組合觀測量與時刻差的載波相位觀測量。相關公式列舉如下：

$$\begin{aligned}
 P_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} p_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} p_2 = \rho + cdl + d_{trop} + \varepsilon(p_{IF}) \\
 \Phi_{IF} &= \Phi_{IF}(i) - \Phi_{IF}(i-1) \\
 &= \rho(i) - \rho(i-1) + c(dl(i) - dl(i-1)) + d_{trop}(i) - d_{trop}(i-1) + \varepsilon(\Delta\Phi_{IF}) \\
 &= \Delta\rho + c\Delta dl + \Delta d_{trop} + \varepsilon(\Delta\Phi_{IF})
 \end{aligned} \tag{5.46}$$

$\Delta\rho$ 、 $c\Delta dl$  與  $\Delta d_{trop}$  分別為二個相鄰時刻之幾何距離差、接收儀時鐘誤差與對流層延遲之差。觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。 $\varepsilon$  為組合觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。

經典模型應用最廣泛，其缺點為無法利用週波未定值的整數特性。未知參數的估值只能隨著觀測量的累積與幾何的變化逐步地區於收斂。其次，組合觀測值的雜訊被放大了。雜訊越大，則收斂的位置誤差也越大，故計算過程中趨於收斂所需的時間也越長。卡加利大學模型中的電碼和載波相位的這種組合不但可以消除一階電離層的影響，它還有效地降低組合觀測量中的雜訊。與原始的電碼觀測雜訊相比，組合觀測值的雜訊只有前者的一半，這點是相當重要的。如果觀測量雜訊與未被模型化的殘差之和越小，則未知參數的估計收斂越快，估值也越精確 (Gao and Shen, 2002)，從而可以加速解算過程的收斂。無週波未定值模型可以有效地降低對電腦資源的需求。但無法得到使用者的絕對位置解。此外，相位差觀測值雖消除了週波未定值參數，但卻增加觀測值間的相關性。

精密單點定位的演算核心中，被估計之參數可分不變參數，如坐標及整數週波未定值；與為隨機參數，如對流層延遲及時鐘差。所使用的最佳化推估工具除了最小二乘法之外亦引入卡曼濾波器之方法。在處理數據時，除須考慮參數模型外亦需顧及其隨機模型。在精密單點定位之處理過程中，主要考慮對流層延遲及時鐘差之隨機模型。由於大氣層中水蒸氣分布隨時間不規則地變化，故其影響具備較大之隨機性。意即透過模型改正後仍有無法消除之殘差。這些殘差並



非單純的白雜訊；事實上這些殘差可被認定為一系列時間相關的隨機過程的疊加，故對流層延遲之隨機模型可使用一階高斯馬可夫模型或是隨機遊走模型。在差分相對定位中，一般可使用二次差分方式消除時鐘差之影響，故可以省略時鐘差之隨機模型。然而在精密單點定位演算法中，時鐘差是當作未知參數處理，此時需顧及其隨機模型。可以採用多項式表示時鐘差變化及其飄移量，其階數取決於時鐘的穩定度。因時鐘差變化較大，故須使用高階多項式，如此整個模型較為複雜。故亦可考慮使用白雜訊過程來描述時鐘差之隨機過程，此法較為簡單，且其等同於二次差分定位中消除時鐘差之方式，精密單點定位之參數估計之數學基礎詳見(邱冠維，2009；彭微之，2010)。

傳統 GNSS 單點定位是透過虛擬距離與廣播星曆的衛星軌道參數和時鐘差進行改正。由於虛擬距離的觀測雜訊達數十公分、廣播星曆的軌道精度為數米、衛星時鐘差的改正精度為數十奈秒，加上公尺級的電離層及對流層延遲之影響，這種單點定位技術之精度只可達十公尺等級。而精密單點定位是先利用全球若干 IGS 追蹤站算出精密衛星軌道參數與時鐘差，再利用所求得的衛星軌道參數與衛星時鐘差對單台接收儀採集的虛擬距離與相位觀測量進行無差分的定位處理。如前所述，精密單點定位是利用無差分的觀測量進行定位，故其誤差無法透過差分的方式消除，只能利用模型或和位置參數一起估計的方式消除其影響。故週波脫落之偵測與修復之問題都較差分定位模式困難，故資料之預處理是相當重要的。在無精密單點定位之數據處理中，主要考慮三類之誤差來源與處理策略說明如下(邱冠維，2009；彭微之，2010)：

#### ■ 和接收儀、測站有關的誤差來源

精密單點定位過程中所考慮與接收儀及測站有關之誤差來源如下：

- 接收儀時鐘差：由於接收儀內的晶體振盪器的飄移引起的接收儀時鐘與 GNSS 標準時之差值，接收儀一般使用高精度的石英鐘。對於無差分精密單點定位而言，因無法利用差分方式消除接收儀時鐘的影響，故計算過程中必須考慮其對定位結果的影響。在無差分的數據處理中，必須顧及接收儀時鐘差對衛星坐標計算與使用者與衛星間之幾何距離計算之影響。對於前者可先用一般之電碼虛擬距離定位求出時鐘差之概略值，接下來再透過數據處理過程與其他參數一併計算，以消除其對定位精度之影響(Gao and

Shen, 2002)。

- 接收儀天線相位中心之偏差：在 GNSS 測量中，觀測值皆是接收儀天線的相位中心為準的，理論上天線的相位中心與其幾何中心應保持一致。而實際上，天線的相位中心隨著衛星訊號輸入的強度與方向的不同而有變化，及觀測時相位中心的瞬時位置與理論上的相位中心有所不同，二者之差值可達數公釐至公分。在無差分精密單點定位之過程中，可利用事先率定的模型來消除其影響，詳細內容請見(Gao and Shen, 2002)。
- 固體潮改正：攝動天體(月球及太陽)對彈性地球的引力作用，使地球表面產生週期的漲落，稱為固體潮現象。它在地球地心與攝動天體之連線方向上拉長，與連線垂直方向趨於扁平。固體潮對測站之影響包含與緯度有關的長期偏移與主要由日週期和半日週期組成之週期項。若靜態觀測 24 小時，週期項大部分影響可以平滑消除。但長期向無法透過此方式消除，即使透過長時間觀測，其殘餘影響在徑向達 12 公分，在水準方向可達 5 公分。對於GNSS短於 100 公里之基線而言，二測站之固體潮可視為一致；但對長基線而言，就必須考慮適合的改正模式。對無差分的精密單點定位而言，由於它是直接求解測站坐標，無法透過差分方式消除，故必須透過使用改正模式以消除固體潮之影響。

一般來說，太陽-月球-地球系統可以被分成兩個雙體系統，來探討太陽相對於地球與月亮相對於地球的影響；以月亮相對於地球的影響舉例，圖5.26為地球與月球的示意圖，假設有一質量點p在地球上，則潮汐位能可以被表示如下：

$$W_p = \mu_m \left[ \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} - \frac{\rho}{r^2} \cos z \right] \quad (5.47)$$

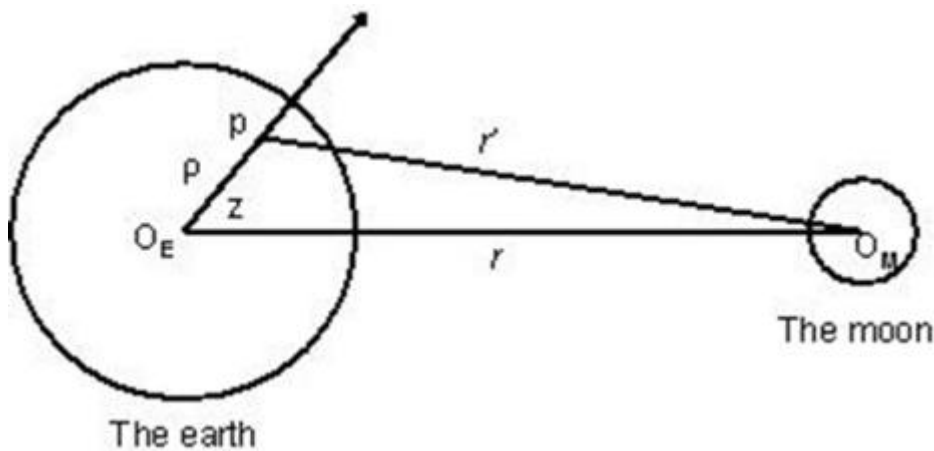


圖5.26 地球與月球的示意圖(Xu, 2003)

$r$  是地球與月球間的距離， $\rho$ 是地球中心與質量點  $p$  的距離， $\mu_m$  為月球的重力常數， $z$  為月球的方位角， $r'$  為質量點  $p$  與月球間的距離；可以被 Legendre 多項式表示成：

$$W_p = \mu_m \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\rho^n}{r^{n+1}} P_n(\cos z) \quad (5.48)$$

$P_n(\cos z)$  是一般  $n$  階的 Legendre 多項式。已知球面三角方程式如下：

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cosh \quad (5.49)$$

把式 (5.49) 代入至式 (5.48)，則潮汐位能的Laplace 方程式可以被表示成：

$$W_p = \mu_m \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\rho^n}{r^{n+1}} \left[ P_n(\sin \varphi) P_n(\sin \delta) + 2 \sum_{k=1}^n \frac{(n-k)!}{(n+k)!} P_{nk}(\sin \varphi) P_{nk}(\sin \delta) \cos kh \right] \quad (5.50)$$

$\varphi$  為質量點  $P$  的緯度， $\delta$  和  $h$  為月球的 declination angle 和 local hour angle， $P_{nk}$  式連結 degree  $n$  和 order  $k$  的 Legendre 多項式，Laplace 方程式可顯示潮汐位能幾何與週期的特性，細節請參考(Parkinson and Spilker, 1996)。

- 海洋負載改正：海洋負載產生的原因為潮汐的週期性漲落，海洋負載與固體潮的影響類似，主要由日週期和半日週期組成，但是它的影響比固體潮小一級。對單一時刻的觀測量而言，其影響為 5 公分。對 24 小時的觀測而言，其影響為公釐級。與固體潮一樣，對無差分的精密單點定位而言，由於它是直接求解測站坐標，無法透過差分方式消除，故必須透過使用改正模式以消海洋負載之影響，其改正公式列舉如下：

$$\Delta S_r = h' \frac{W_p}{g} = \sum_{n=0}^{\infty} h'_n \frac{W_p(n)}{g} \quad (5.51)$$

$$\Delta S_\varphi = l' \frac{\partial W_p}{g \partial \varphi} = \sum_{n=0}^{\infty} l'_n \frac{\partial W_p(n)}{g \partial \varphi} \quad (5.52)$$

$$\Delta S_\lambda = h' \frac{\partial W_p}{g \cos \varphi \partial \lambda} = \sum_{n=0}^{\infty} l'_n \frac{\partial W_p(n)}{g \cos \varphi \partial \lambda}$$

(5.53)

$\Delta S_r$ 、 $\Delta S_\phi$  和  $\Delta S_\lambda$  為海洋負載效應的輻射、向北、向東的三個方向， $h'$  和  $l'$  為勒夫數 (Love numbers)， $W_p(n)$  為  $n$  階的負荷位能； $g \approx \mu/R_E^2$ ， $\mu$  是地球的重力常數， $R_E$  為地球半徑。負載勒夫數可以從理論模型得到，細節請參考 (Parkinson and Spilker, 1996)。

- 地球自轉：由於地固坐標系統為非慣性坐標系，它隨地球自轉而變化。故訊號發射與接收時刻的地固坐標系統是不同的，故計算衛星到接收儀的幾何距離必須考慮地球自轉的效應。無差分的精密單點定位而言，由於它是直接求解測站坐標，故必須透過使用改正模式。GNSS 提供的星曆是 WGS-84 坐標系坐標，WGS-84 坐標系地固坐標系，而地球在不停自轉；GNSS 信號自衛星到地面測站，需要一段傳播時間  $\tau$ ，如果以測站為標準，衛星坐標發生了  $(\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S)$  的變化量，這必然引起衛星到測站的幾何距離  $\rho$  發生變化，假設變化量為  $\Delta\rho$ ，由微分公式可算出：

$$\Delta\rho = \frac{1}{\rho}[(X_S - X_R)\Delta X_S + (Y_S - Y_R)\Delta Y_S + (Z_S - Z_R)\Delta Z_S] \quad (5.54)$$

式中  $(X_S, Y_S, Z_S)$  為衛星的地心坐標， $(X_R, Y_R, Z_R)$  為地面測站的地心坐標。則  $(\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S)$  為衛星坐標變化量，可依下式計算：

$$\begin{bmatrix} \Delta X_S \\ \Delta Y_S \\ \Delta Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega\tau & 0 \\ -\omega\tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \quad (5.55)$$

式中  $\omega$  為地球自轉角速度，即得到地球自轉改正公式：

$$\Delta\rho_\omega = \frac{\omega}{C}[(X_S - X_R)\Delta Y_S - (Y_S - Y_R)\Delta X_S] \quad (5.56)$$

相關細節請參考 (Parkinson and Spilker, 1996)。

- 和衛星有關的誤差來源

精密單點定位過程中所考慮與衛星有關之誤差來源如下：

1. 衛星時鐘差：衛星時鐘頻率飄移所引起的衛星時鐘時間與 GNSS

標準時間的差值稱為衛星時鐘差。GNSS 系統透過地面監測站對衛星監測，確定衛星時鐘差，並用二項式模擬衛星時鐘的變化，但此法只能保證衛星時鐘與 GNSS 標準時同步時間在 20 奈秒之內。在無差分的數據處理中，必須顧及衛星時鐘差對衛星坐標計算與使用者與衛星間之幾何距離計算之影響。由於不同衛星的時鐘差不同，在無差分精密定位求解過程中無法如接收儀時鐘差般當作未知數來處理，而必須事先估計其大小，然後代入觀測方程式以消除其影響。精密單點定位要求衛星時鐘的改正精度要達奈秒級。故在精密單點定位中，確定衛星時鐘差是一件相當重要的工作。目前 IGS 與其分析中心為了滿足精密單點定位及精密時間傳遞等需要，也提供 5 分鐘或 30 秒的後處理精密衛星時鐘差，相關細節可參考 IGS 網站。

2. 軌道誤差：衛星星曆是 GNSS 定位中的重要起算數據。衛星軌道誤差是指衛星星曆鐘表示的衛星軌道與真正軌道之不符值。軌道誤差取決於軌道計算之數學模型、所用的軟體、所採用追蹤網的規模、追蹤站的分佈與追蹤站數據觀測時間的長短。目前廣播星曆的精度大約 5~10 公尺，事後精密星曆的精度大約為 3~5 公分的精度。與衛星時鐘差一樣，精密單點定位計算中，衛星軌道誤差會影響測站與衛星間之幾何距離，從而產生定位誤差。因此在精密單點定位中必須使用精密星曆，而無法使用廣播星曆。
3. 衛星天線相位中心改正：衛星軌道模型是針對於衛星質心而言的，IGS 提供的精密星曆與精密衛星時鐘差是針對於衛星質心的，而廣播星曆和觀測量是針對於衛星天線相位中心的，精密單點定位需要預先知道衛星天線相位中心改正和改正向量在衛星為繞地球旋轉空間中的旋轉量。表 5.5 為衛星天線在不同型衛星中的天線相位偏差。相關細節請參考 (Xu, 2003)。

表 5.5 GNSS 衛星天線相位中心偏差(Xu, 2003)

Satellite Types	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
Block I	0.2100	0.0	0.8540
Block II/IIA	0.2794	0.0	1.0259
Block IIR	0.0000	0.0	1.2053

■ 與訊號傳播有關的誤差來源

1. 對流層延遲：如前所述，對流層延遲主要有兩個延遲誤差影響；這些誤差分別為乾燥大氣層延遲與水汽影響。前者對於對流層誤

差影響非常大，在合理預估範圍內其值約為 2.3 公尺，其並與當地氣溫與大氣壓力之變化呈現緩慢且可預測的改變；後者對於整體而言影響較小，其值在天頂方向約為 1 至 60 公分。對流層誤差對於差分衛星定位有著重大的影響，許多研究將此影響視為重要發展對象。對流層誤差模型主要包含兩部分，相關細節請參考第二章。在精密單點定位的解算過程中，對流層延遲的影響首先可透過模型改正，乾分量的部分之精度可達公分級，濕分量部分的殘餘影響較大。故必須將對流層延遲的影響當作參數估計。一般可透過一階高斯馬可夫模型與隨機遊走模型進行對流層殘餘影響之估計。這亦是本案發展估算絕對對流層濕延遲之核心。

2. 電離層延遲：從地面 70 公里向上直到大氣層頂部為電離層分佈範圍，在這一層中，由於太陽的作用，使大氣發生電離，因此導致電磁波在傳遞過程發生延遲。由於一階項的電離層延遲效應與電磁波頻率平方成反比，故可透過 GNSS 雙頻觀測量以線性組合之方式消除電離層效應之影響。在前述 3 種常用精密單點定位的數學模型中皆利用此特性來消除電離層效應之影響，剩餘高階的影響約為 2~4 公分。
3. 多路徑效應：多路徑效應對於衛星定位為一主要誤差。衛星發射訊號，有的被天線直接接收，有的因地面物反射而被天線間接收，因而產生多路徑效應。由於多路徑效應不會因測站間的差分而消除，因此相對於其他衛星誤差來源較不易被預估。目前可以透過硬體與軟體方式減低多路徑效應之影響。精密單點定位的解算過程中，會將之與雜訊效應合併估算。
4. 相對論效應：相對論效應是由於衛星時鐘和接收儀時鐘所處的狀態(運動速度與重力位元)不同而引起的衛星時鐘與接收儀時鐘產生相對時鐘差所引起的。GNSS 時鐘會走得比地面時鐘快，每秒約差 0.45 毫秒，消除的方法使將 GNSS 鐘的標準頻率減少約 0.0045 MHz。但由於地球的運動和衛星軌道的變化，以及地球重力場的變化，相對論的影響並非常數，經上述改正仍有殘差，故在精密單點定位中必須引用相對論效應改正模型，由於 GNSS 衛星軌道是一個橢圓軌道，而橢圓軌道各點的出的運行速度是不相同的，相對論效應的頻率補償就不是一個常數，頻率常數補償所導致的補償殘差稱為相對論效應誤差。它所引入的 GNSS 信號延遲為：

$$\Delta t = -\frac{2e\sqrt{a\mu}}{C_0^2} \sin E \quad (5.57)$$



式(5.57)中 $e$ 為衛星橢圓軌道的偏心率； $E$ 為GNSS衛星的偏近地點角； $a$ 為GNSS衛星橢圓軌道的長半徑，現將 $a$ 、 $\mu$ 和 $C_0$ 代入上式可得：

$$\Delta t(ns) = -2289.7 \times e \times \sin E \quad (5.58)$$

當 $e=0.01$ ， $E=90^\circ$ 時，相對應效應誤差導致的時間延遲達到最大值，即為22.897 ns，相當於6.864 m的誤差。相關細節請參考(Xu, 2003)。

對精密單點定位之計算而言，目前 IGS 最終 (final) 及快速 (rapid) 之產品皆符合精度之需求，唯這些產品分別需要 13 天與 17 小時之處理流程。對於近即時的應用而言，IGS 超快速 (ultra-rapid) 產品中之平差後(adjusted)的產品符合精密單點定位計算之要求，這項產品需要 3 個小時之處理流程。最後一個產品為預估值，目前精度上不符合公分級之精密單點定位計算之要求，但其優點為即時可得。除了 IGS 之外，加拿大自然資源研究中心 (NRCan) 亦致力發展即時或近即時之產品。

精密單點定位有如下之關鍵之處：

1. 衛星軌道精度需達公分級，故須使用 IGS 提供精度達 3 ~ 5 公分之精密星曆。
2. 衛星時鐘差的改正需達奈秒級，除 JPL 提供 30 秒間隔之時鐘差外，IGS及其他分析中心均提供五分鐘間隔的時時鐘差。
3. 解算過程須考慮固體潮、海洋負載、衛星天線相位偏差等誤差的改正模型。
4. 在定位過程中採用無差分觀測量，同時虛擬距離觀測量在初始階段作為輔助觀測值參加解算。
5. 精密單點定位無法固定整數週波未定值，計算過程中需要一段收斂的過程。

有鑑於觀測技術與預測演算法之進步，未來數年內 IGS 超快速產品不管平差後與預測之產品精度皆可符合目前後處理產品之精度。故未來若搭配無線上網之技術至 IGS 自動下載相關之產品，則所謂的公分級的單點即時動態定位(Point-RTK) 是可預見的。這種精度也許尚未符合高等級控制測量之規範，但它可以滿足 70% ~ 80% 的測量應用。尤其是空載與車載移動遙測製圖系統等國外空間資訊領域正在測試的新設備與演算法，精密動態單點定位之技術必然可以簡化人力與硬體之成本，且可以提供符合精度需求之點位坐標或是動態軌跡，所以本案將持續深入探討精密單點定位技術應用至遙測製圖系

統效益。表5.6顯示目前精密單點定位技術與 IGS 產品搭配下所能獲得之精度，圖5.27所示為精密單點定位動態軌跡演算法之資料處理流程。

表 5.6 目前精密單點定位技術與 IGS 產品搭配下所能獲得之精度  
(摘自 IGS 網站)

IGS Product Table [GPS Broadcast values included for comparison] -- updated for 2009!					
GPS Satellite Ephemerides/ Satellite & Station Clocks		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	--	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 - 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 - 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	orbits	~2.5 cm	12 - 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.: 30s Stn.: 5 min

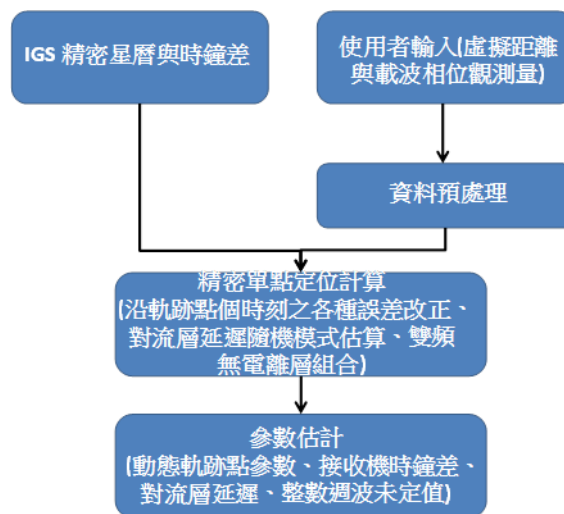


圖 5.27 精密單點定位動態軌跡演算法之資料處理流程

### 5.3 評估精密單點定位動態軌跡演算法於定位定向技術之應用效益

為評估精密單點定位動態軌跡演算法於定位定向技術之應用效益，本案首先修改 CAINS-21 之架構，讓其可以使用精密單點定位動態軌跡演算法之核心，如圖 5.28 所示，此架構可視為 CAINS-21 之精密單點定位版本，而計算結果將與加拿大卡加利大學所開發之 KINGSPAD 軟體以緊耦合模式之平滑器所提供之參考軌跡與定向解

進行效益分析。

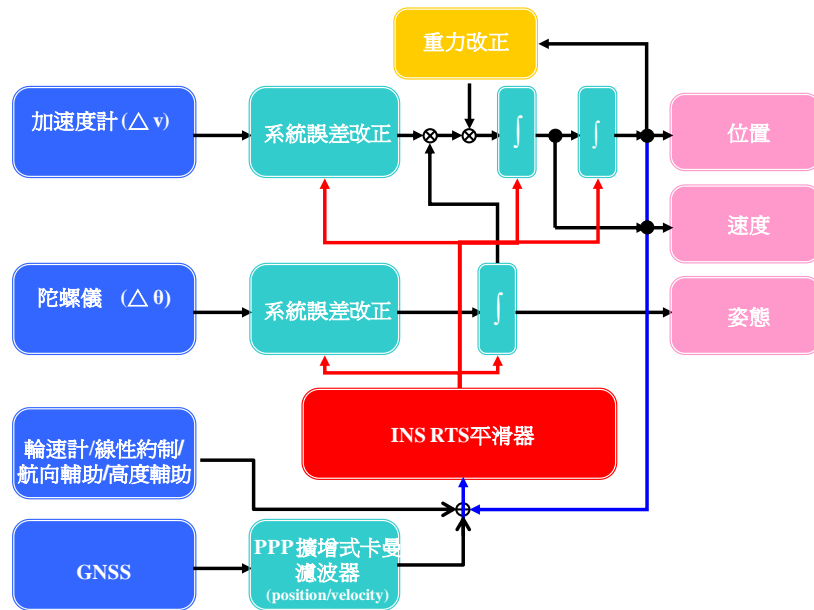


圖 5.28 CAINS-21 與精密單點定位之整合架構

圖 5.29 所示為台南市科工園區之車載定位定向系統之測試場地，當地具有規則形狀之路網與透空度良好，適合進行相關的測試，主站設置於成功大學測量及空間資訊系館頂樓，基線小於 10 公里。主站與移動站皆使用 NovAtel 的 Propak V3 雙系統雙頻大地等級 GNSS 接收儀，而測試的定位定向系統採用本系擁有的 NovAtel SPAN-CPT IMU，如前所述，使用 3 軸中階光纖陀螺儀(飄移 10 度/小時，穩定性 1 度/小時)與 3 軸微機電加速度計(飄移 50mg，穩定性 0.75mg)。成果分析首先比對一對一方式產生之 DGNSS 動態定位軌跡與參考軌跡分別於平面與高度之輸出，如圖 5.30 所示，平面軌跡中紅色為參考軌跡，而藍色為透過 KINGSAPD 以緊耦合方式利用定位定向系統提供之 GNSS 載波相位觀測量與慣性測量儀原始觀測量進行後處理計算，如此可以確保參考軌跡在如此的測試環境可以維持 10 公分以內之絕對精度。接下來以同樣方式對精密單點定位軌跡進行處理，如圖 5.31 所示。

由於測試區透空度良好，所以 GNSS 動態定位之平面軌跡與參軌跡差異不大，但從高度之時間序列來看，DGNSS 所提供之橢球高序列與參考系統較為一致而 PPP 所提供之橢球高序列將近有 20 公分之震盪。圖 5.32 與 5.33 所示為將 CAINS-21 分別以 DGNSS 及 PPP 方式計算之軌跡與參考軌跡相比之成果，而二種處理策略所得之平面軌跡成果類似，但以 CAINS-21 與 PPP 整合的策略在高度方向之成果

略差，變動量約在 20 公分範圍。



圖 5.29 車載定位定向系統之測試場地

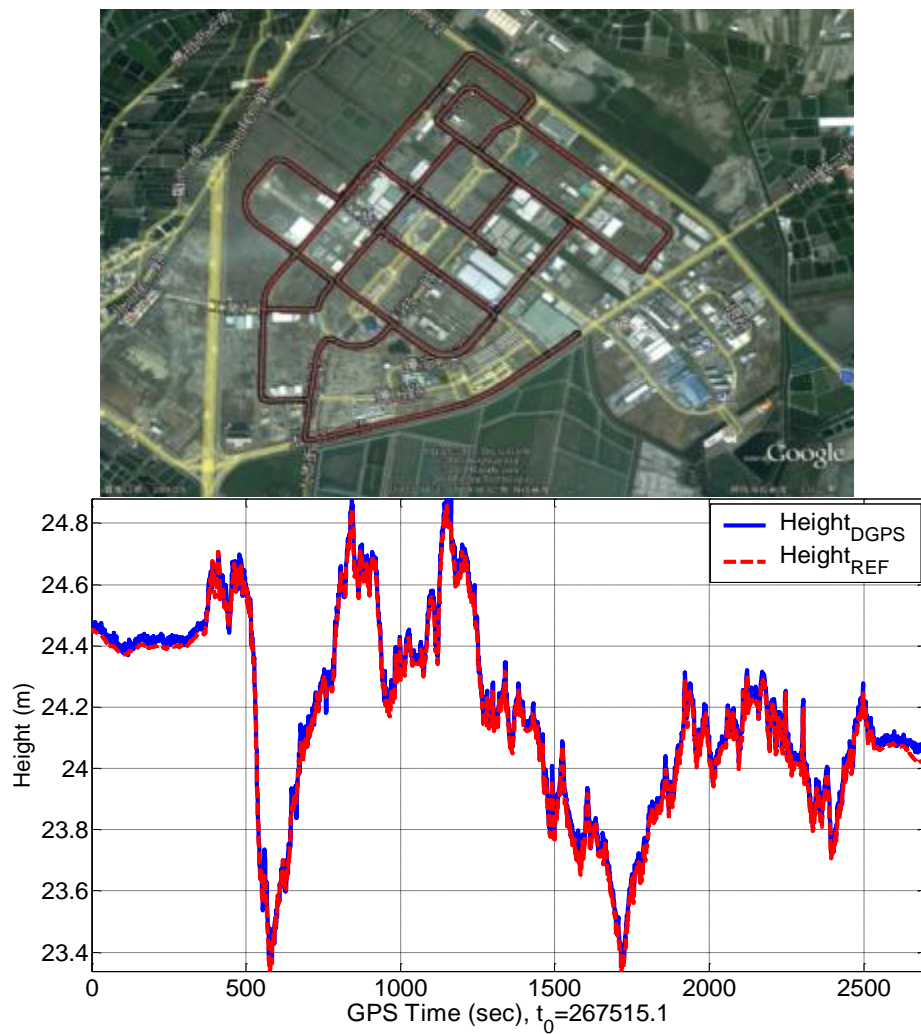


圖 5.30 DGNSS 軌跡與 KINGSPAD 參考軌跡之比較

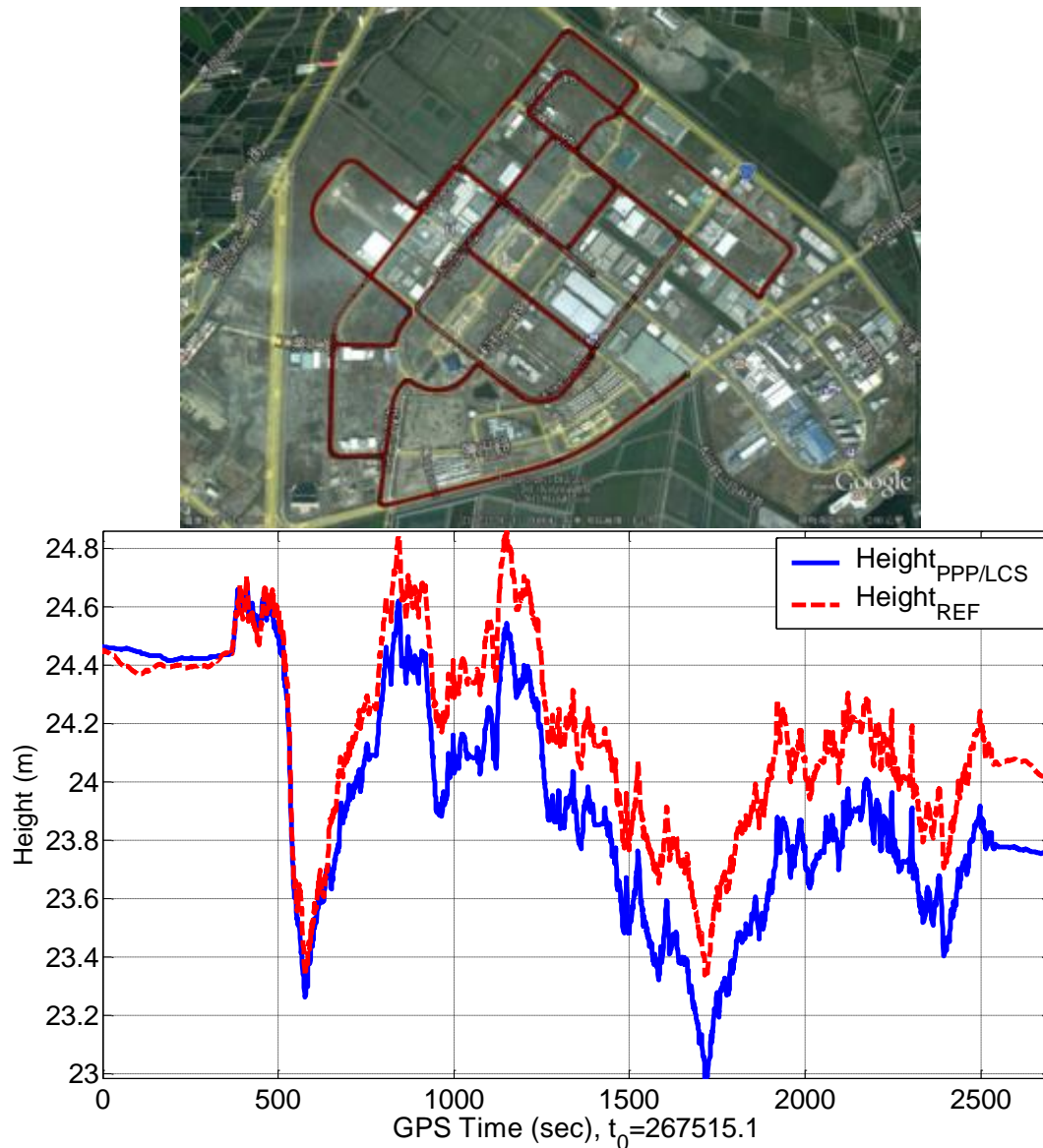


圖 5.31 PPP 軌跡與 KINGSPAD 參考軌跡之比較

圖 5.34 顯示為將 DGNSS 及 PPP 軌跡分別與參考軌跡之比較之下所得之誤差序列，二組資料顯示起始時刻之平面誤差約有 20 至 30 公分之偏差，究其原因為純 GNSS 動態定位軌跡之解算成果為化算到天線之相位中心，而參考軌跡則預先將 GNSS 觀測量經固定臂改正化算到慣性測量儀之中心，此偏差反應天線中心與慣性測量儀在安置時的位置差異。至於高度，因為天線與慣性測量儀安置於同一個平面上故無顯著系統誤差。



圖 5.35 所示為將 CAINS-21 與 DGNSS 及 PPP 整合後所得之定位定向解與參考系統比較下所得之誤差序列，一般而言 CAINS-21 與 DGNSS 之解與參考系統較為一致，CAINS-21 與 PPP 解之誤差在完成初始化後仍須至少 5 分鐘才能收斂下來。表 5.7 為各種處理策略之誤差比較表，表中純 GNSS 之平面均方根誤差偏大，但若扣除 GNSS 天線中心與慣性測量儀在安置時的位置差異，純 GNSS 之平面均方根誤差應與 CAINS-21 與 DGNSS 及 PPP 整合後所得之導航解相近。

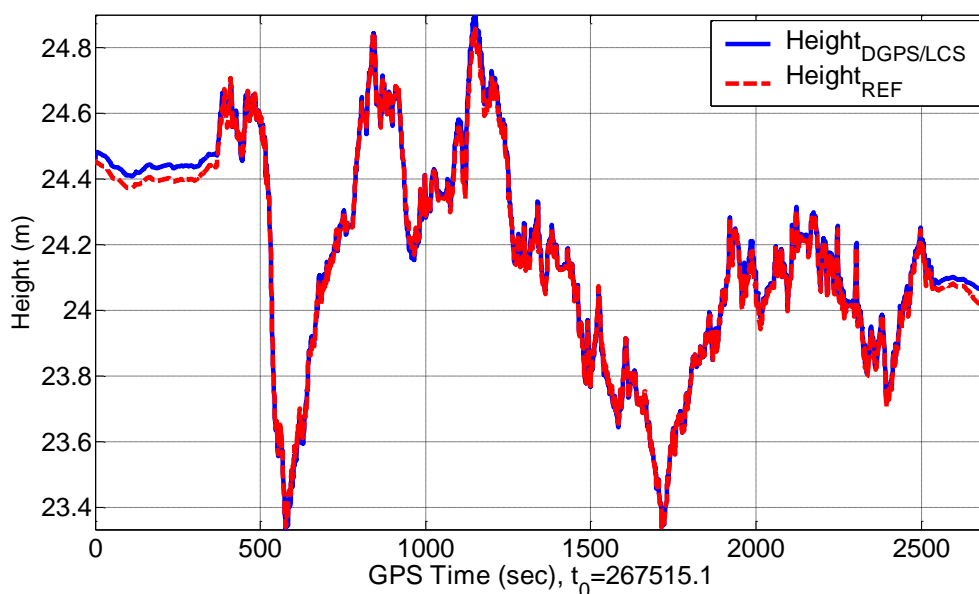


圖 5.32 CAINS-21 軌跡(DGNSS)與 KINGSPAD 參考軌跡之比較



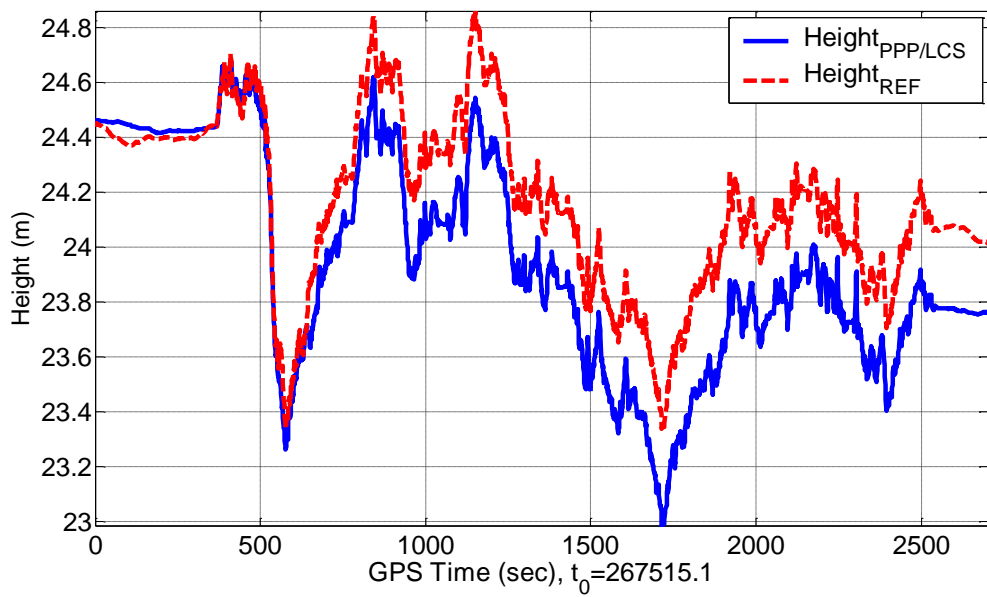


圖 5.33 CAINS-21 軌跡(PPP)與 KINGSPAD 參考軌跡之比較

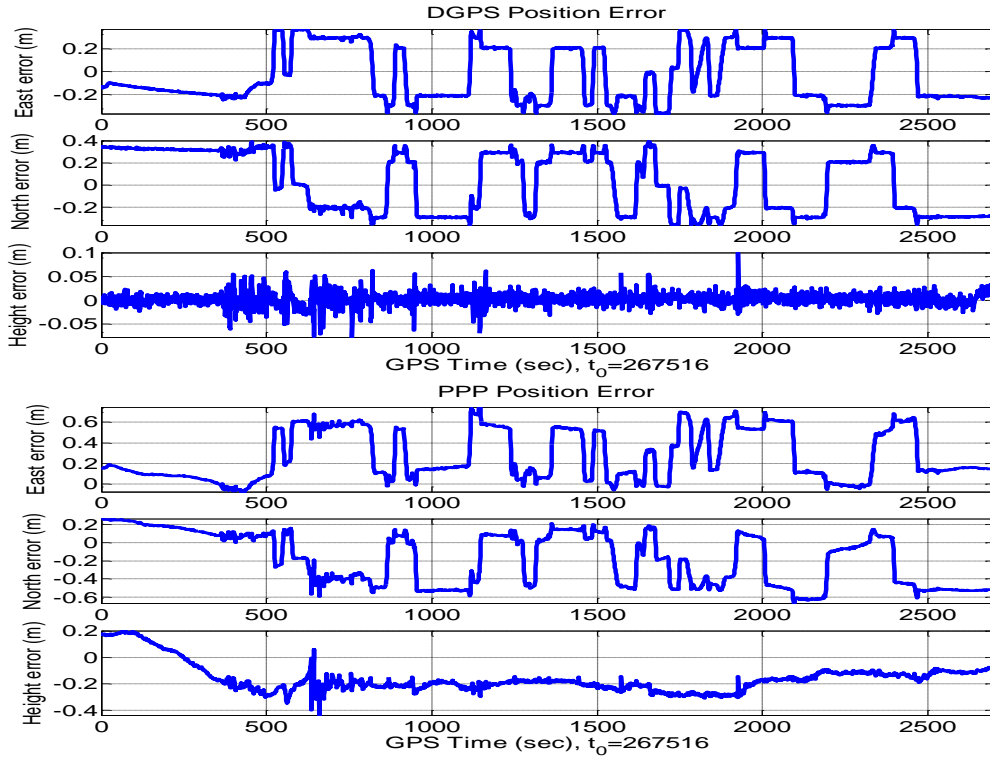


圖 5.34 DGNSS 與 PPP 之動態軌跡誤差序列

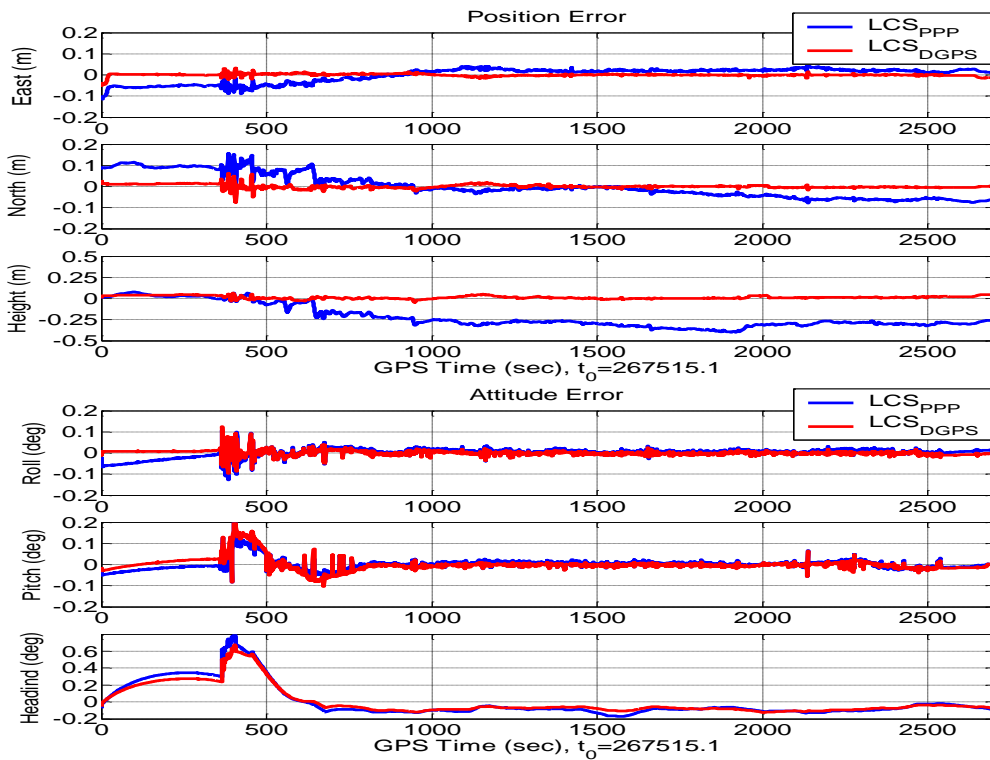


圖 5.35 CAINS-21 於不同整合策略下之定位定向解誤差序列

表 5.7 定位定向誤差之比較表

均方根誤差	東 (公尺)	北 (公尺)	高 (公尺)	滾轉 (度)	俯仰 (度)	航向 (度)
PPP	0.361	0.341	0.195	n/a		
DGPS	0.235	0.274	0.014			
PPP/LCS	0.109	0.103	0.270	0.020	0.027	0.215
DGPS/LCS	0.048	0.012	0.021	0.013	0.033	0.181

本節針對精密單點定位動態軌跡演算法於定位定向技術之應用效益之初步評估成果顯示，以車載移動遙測製圖應用而言，CAINS-21 與 PPP 整合後所得之定位定向解之平面精度約為 10 公分，高度約為 30 公分；相對的，CAINS-21 與 DGNSS 整合後定位定向解平面精度可達 5 公分，而高度約為 2 公分。上述 PPP 與 DGNSS 之精度比較成果與文獻記載成果相似，若使用者對動態軌跡精度之需求為 30 至 50 公分，則透過 PPP 與慣性測量儀整合之技術可以提供合適的精度並減少傳統 DGNSS 模式之依賴。若使用者對動態軌跡精度之需求為小於 30 公分，則 DGNSS 與慣性測量儀整合之技術仍是必要的選項。

#### 5.4 評估發展 GNSS 載波相位差分定位動態軌跡演算法

目前常用的動態計算軟體有 TGO (Trimble Geomatics Office)、GrafNav 以及 RTKLIB。

TGO 軟體是一個連接和測量的套裝軟體。它提供外業工作與設計軟體的連接。軟體可協助外業查核工作、簡化執行測量的相關任務、且輸出數據至第三方設計的軟體內，特色如下項目表示：

- GNSS 基線處理。
- 測量網形平差。
- GNSS 和傳統地形測量資料之處理。
- 資料的品質保證和品質控制。
- 道路設計資料輸入和輸出。
- 測量資料輸入和輸出。
- 數值地型模型和等高線。
- 基準轉換和投影。
- GIS 資料獲得和資料輸出。
- 特徵碼處理。

- 計畫報告。
- 測量計畫管理。

表 5.8 TGO 的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
1.成果可靠穩定。 2.可支援許多地籍以及工程測量上的業務。 3.簡易操作介面。	1.動態定位只輸出坐標成果，若要分析速度或加速度等資訊需要使用者額外處理。 2.費用昂貴。 3.RTK 需額外加購程式模組。
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
1.土地測繪相關機構採用度高。	1.需額外購買升級版本

GravfNav 相同為一套裝軟體，不同於 TGO，GravfNav 是專門設計給動態計算使用。特色如下所表示：

- GNSS 基線處理。
- 基準轉換和投影。
- 資料的品質保證和品質控制。
- 動態資料完整輸出，包含速度及其統計資訊。
- 支援大地水準面模型輸入。
- 多元化動態定位處理界面，讓使用者可以簡單地編輯管理動態軌跡。
- 支援 RTK 計算。

RTKLIB 是一個免費開放的套裝軟體，專門處理標準以及精密的 GNSS 定位計算。RTKLIB 是一個由許多可獨立使用的子程式所構成的資料庫，在軟體中還包含了數個應用程式提供給使用者方便使用。特色如下所表示：

- 支援 SBAS (Satellite Based Augmentation System)。
- 支援多種定位計算，如 SPP (Single Point Positioning), PPP (Precise Point Positioning), DGNS... 等。
- 可讀入多種 GNSS 的標準格式，如 RINEX 2.10, 2.11, 2.12, 3.00 OBS/NAV, RINEX 3.00 CLK, RTCM v.2.3, RTCM v.3.1, NTRIP 1.0, NMEA 0183, SP3-c, ANTEX 1.3, NGS PCV... 等。

表 5.9 GrafNav 的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
1.成果可靠穩定。 2.動態功能完善。 3.簡易操作介面。 4. 使用者廣 5.支援硬體多	1.此軟體以動態定位為主，無法達成所有的測量業務需求。因此必須加購額外程式模組。
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
1.土地測繪相關機構採用度高。	1.需額外購買升級版本

表 5.10 RTKLIB 的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
1.支援多星系以及許多額外觀測量。 2.數種定位方式。 3.針對不同需求時，使用者可以彈性使用。 4.免費軟體。	1.使用介面複雜。 2. 無技術支援。
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
1.研究團體誘因高。	1.使用者傾向為專業人士。 2.成果經常會因使用者經驗而不同。

建議未來在朝向自主研发 GNSS 動態軌跡計算軟體之發展策略宜參考如 RTKLIB 與其他提供原始碼之工具箱與套件之架構，此類套件之缺點為系統效能略差、支援硬體較少與開發者需具備一定的理論基礎與程式設計能力，但為國家培育 GNSS 動態軌跡計算技術專業人才之角度而言，這應該是最有效率的執行策略。

表 5.11 三種套裝軟體主要差異

項目	TGO	GrafNav	RTKLIB
開發者	Trimble	Waypoint Consulting Inc.	T. Takasu
價格	至少 10000 美金	至少 10000 美金	免費開放
支援星系	GPS	GPS, GLONASS, SBAS	GPS, GLONASS, SBAS

定位方式	相對定位	相對定位、SPP、PPP	相對定位、SPP、PPP
RTK	支援(需額外購買計算模組)	支援	支援
速度估計	不支援	支援	支援
高動態定位 (High Dynamic)	不支援	支援	不支援
資料處理方式	最小二乘	卡曼濾波	卡曼濾波以及最小二乘

## 5.5 發展類神經網路嵌入式精密定位定向演算法

如前所述，現今多平台移動遙測技術主要仰賴 GNSS 作為主要定位感測器和 INS 作為主要定向感測器。而目前常用來整合 GNSS 與 INS 的擴張卡曼濾波器與平滑器存在線性依賴性和感測模型依賴性等限制，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。多感測器系統整體的花費已然侷限了大多數多平台移動測繪系統應用的普及性，為了提升低價微機電系統慣性量測量儀和全球導航衛星系統接收儀之執行效率及多平台的精度，本節提出利用自動增刪反傳前饋類神經網路(Auto GPFBN)和固定區間平滑器(Smoother)組成的智慧型定位定向演算架構，用來學習並吸收移動式測繪平台於外在環境動態變化下，所產生的姿態和定位誤差並提供適當補償，相較於使用傳統平滑器之定位定向演算法而言，所提出之智慧型定位定向演算架構將可顯著地提升精度。

此種演算法不僅解決了前人研究提出應用於低等級 IMU/GPS 整合系統之多層前饋類神經網路(MFNN)-平滑器演算法自動化程度不足且需人工介入等問題，也提出並分析以更自動化的方式整合數種感測器的替代型智慧定位定向策略。該演算法利用自動增刪反傳前饋類神經網路之階層式類神經網路來克服傳統平滑器演算法和先前提出的 MFNN-smoother 策略的不足。所應用的 Auto GPFBN 相較於 MFNN 也有著諸如具備較為彈性的網路結構和學習時間較短等優點。值得一提的是，所提出的策略乃利用兩個連續採樣時間瞬刻位置和姿態元素的差值作為類神經網路的輸入，此舉不但可減低因為地理相依性所造成的影響，亦避免因不同測試環境下可能衍生的外插問題。



傳統上固定區間 RTS 平滑器是透過後處理模式估計最優位置誤差、速度誤差、姿態誤差、感測器的偏差和尺度參數，並補償該誤差的影響，相關敘述請參考 5.1.3 節。事實上，這種方法可以提供包括位置、速度和姿態等導航參數之最佳估值。因此，智慧型補償方法可以於 GNSS 信號中斷時預測固定區間 RTS 平滑器的誤差以產生高精度的定位和方向參數。另一方面，必須設計一個訓練演算法，事前透過大量的觀測資料進行智慧型補償架構之訓練，以確定在 GNSS 中斷時固定區間 RTS 平滑器的誤差行為。因此，本節提出 Auto GPFBN-Smoother 的架構由於著重於位置和姿態參數的補償，因此只採用此兩類參數作為類神經網路的輸入，整個系統的架構如圖 5.36 所示。

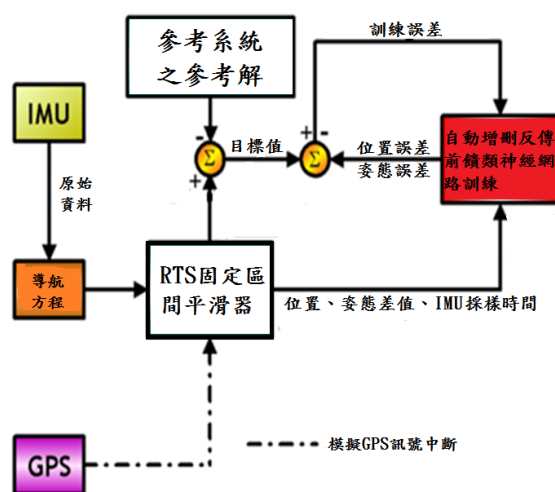


圖 5.36 類神經網路訓練架構

以參考系統之 RTS 固定區間平滑器估計連續兩個時間瞬刻之間的定位定向參數誤差作為類神經網路訓練時理想的目標值。連續兩個採樣瞬刻之位置和姿態差值及 IMU 採樣時間作為類神經網路的輸入。採用連續採樣瞬刻之差值作為神經網路輸入和輸出的目的是為了補償 GNSS 斷訊時固定區間 RTS 平滑器的殘餘位置、姿態誤差，同時避免掉外插的問題，因為如果使用傳統絕對位置和姿態及其誤差作為類神經網路輸入和輸出的話，在測試區域不同的情況下，類神經網路只能利用外插估計，顯然相對於內插而言，外插的成果是比較不可靠的，也就是所謂的地裡相依性的問題，本案所提出的策略主要就是用來克服這個問題。

而“動態”或“建設性”的自動增刪反饋前饋類神經網路(Auto GPFBN)不同於傳統的標準多層反饋前饋網絡需要透過人工訓練與試誤的方式決定網路結構，可以視需要動態增加或刪除隱藏神經元。

就我們所知，選擇一個網路的網路結構（例如隱藏神經元個數與隱藏層數）是網路設計階段最重要的一部分。本案採用的自動增刪反饋前饋類神經網路嵌入式精密定位定向演算法將每個隱藏層透過自動化的增加和刪除的神經元網路訓練過程來選取適當數量的神經元，並據以學習固定區間 RTS 平滑器的殘餘定位定向誤差。其中，Auto GPFBN 的網路結構訓練是一個反向誤差傳播前饋式訓練。訓練過程中整個網路結構的變化並不會對網路誤差造成太大的影響，通常只要幾次迭代即可降到增刪前的網路誤差。無用或無意義的神經元會被刪除，相反地，為了提高網路的性能，也可以視需求產生新的神經元。因此，網路結構會在訓練過程中隨時被修改。反覆訓練直到網路穩定為止，也就是增刪神經元不再對網路誤差有所影響時停止訓練。該演算法的流程如下：

- 1、訓練初始的網路結構。
- 2、嘗試將新的神經元插入到一個隨機選擇的隱藏層，如果接受該神經元，則再次訓練。
- 3、嘗試刪除隱藏神經元；如果發現神經元是不必要的，則刪除它，再次訓練，並重複此動作。
- 4、檢查隱藏神經元的數量和神經網路誤差。如果網路結構不再改變或網路誤差已經穩定，則完成訓練，否則跳到步驟 2。

完成訓練完成後的網路結構如圖 5.37(a)所示，圖 5.37(b)為使用多層前饋類神經網路(MFNN)-平滑器演算法透過傳統人工訓練與試誤的方式決定的網路結構。這些依據前饋類神經網路所建立之架構往往需要大量的訓練樣本及時間來決定隱藏層之層數及隱藏層神經元之數量而這些參數一旦決定之後整個神經網路之架構就此固定，故在訓練過程中唯一改變的網路參數只有權值。一般而言，上述前饋式類神經網路的參數決定過程主要為透過經驗法或是試誤法的方式決定。固定的神經網路架構對於吸納新知識是有限制的。當包含新知識的訓練樣本提供給前述已完成訓練且固定大小之神經網路架構進行重新訓練時，因為唯一能改變的參數為權值，故導致經由重新訓練前饋式類神經網路會逐漸忘記舊有的知識。

前饋類神經網路的建構本質是不利於對於需要頻繁重新訓練已達知識累積的應用領域。可以透過訓練前預習(Rehearse before training)之方式可以克服上述的問題，唯每次重新訓練時皆需要重組舊有訓練樣本與新的訓練樣本以達知識累積之效，亦即吾人可利用改變訓練庫的方式，利用已固定結構的前饋式網路完成知識累積，這點對於動態變化頻繁的 INS/GNSS 整合系統的應用而言是相當重要的成就。唯此種方式增加人為介入的層次且重新訓練的工作亦會隨著訓練庫容量

的增大而增加運算負擔。

本節發展動態類神經網路嵌入式的鬆耦合定位定向演算法。依據前饋類神經網路所建立之架構往往需要大量的訓練樣本及時間來決定隱藏層之層數及隱藏層神經元之數量。而這些參數一旦決定之後整個神經網路之架構就此固定，故在訓練過程中唯一改變的網路參數只有權值。

一般而言，上述前饋類神經網路的參數決定過程主要為透過經驗法或是試誤法的方式決定。因此，本案擬採用的動態神經網路能夠克服上述前饋類神經網路參數決定過程之限制，及前述卡曼濾波器與平滑器於 GNSS 訊號遮蔽期間之誤差累積效應。動態類神經網路的主要特徵在於它不需要使用大量的試誤程序來決定網路架構，且其可隨所遇問題之難度自動地調整架構，圖 5.38 所示為本案研發的動態類神經網路嵌入式的鬆耦合定位定向演算法架構。

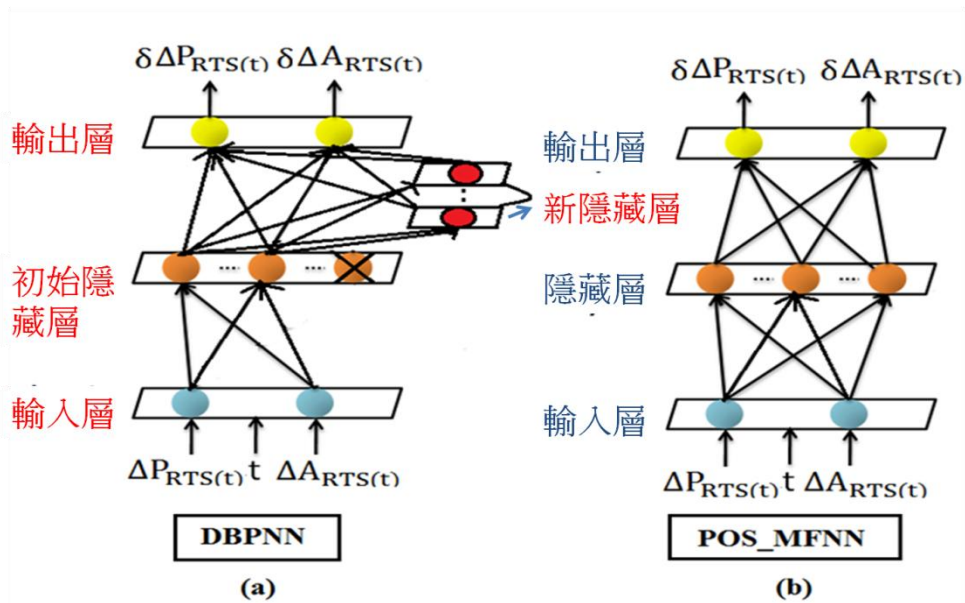


圖 5.37 訓練後最終網路結構圖

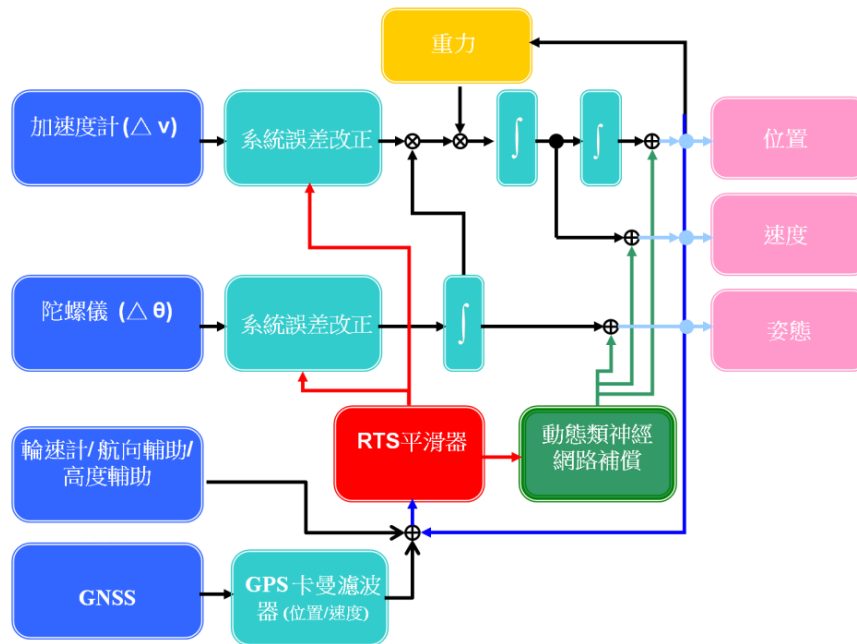


圖 5.38 動態類神經網路嵌入式的鬆耦合定位定向演算法架構

為驗證本節研發的動態類神經網路嵌入鬆耦合定位定向演算法架構之效能，本團隊於在成大歸仁校區進行路測用以驗證演算法的效能。實驗系統配置如圖 5.39 所示，參考系統由高等級 IMU(SPAN-CPT，陀螺飄移每小時 1 度)，和 GNSS 接收儀組成，測試 IMU 為低等級微機電 IMU(TPI，陀螺飄移每小時 25 度)，這些觀測資料配合差分 GNSS 的載波相位觀測量反饋到 RTS 固定區間平滑器整合軟體以產生需要的導航解，供類神經網路作後續處理與應用。圖 5.40 為本實驗的軌跡，由於測試區域全天候 GPS 衛星數量皆在 4 顆以上，因此模擬 8 個 GNSS 訊號中斷，每次中斷時間為 1 分鐘，並藉由類神經網路補償 GNSS 訊號中斷期間 RTS 固定區間平滑器的位置、姿態誤差。實驗過程中，載體的動態變化包括直線加速、等速前進、轉彎和圓環，即一般行車可能會遇到的動態環境變化，詳細實驗條件如表 5.12 所示。

本節研發的動態類神經網路嵌入式鬆耦合定位定向演算法架構之效能已事先透過在花園夜市與成大校區搜集長達 8 小時之資料進行訓練，但本節只針對完成訓練之演算法進行測試之成果進行說明。為區分訓練資料與測試資料之獨立性，本節只採用載歸仁校區所收集之資料進行測試與成果分析。



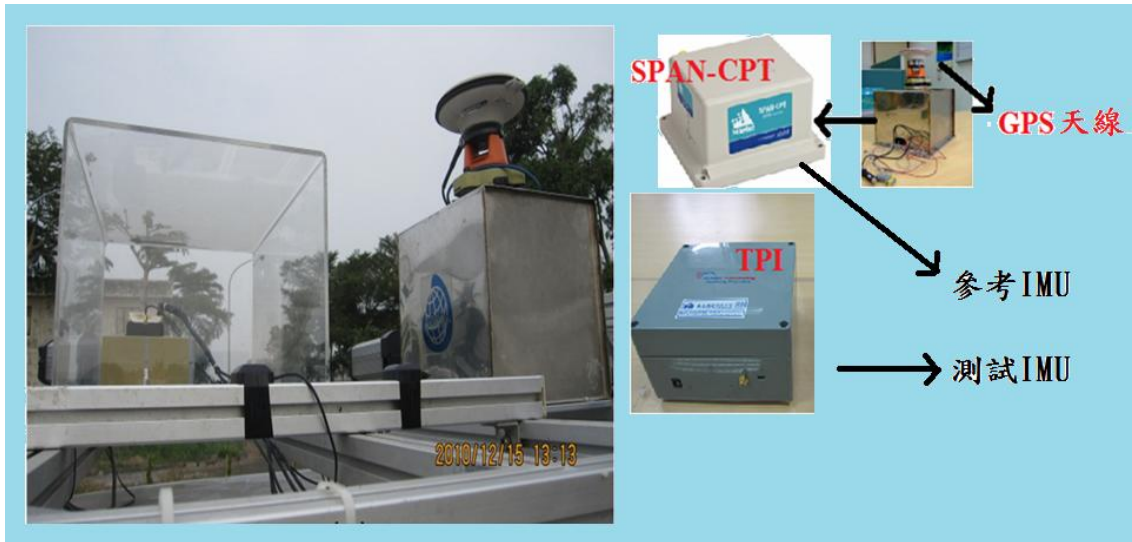


圖 5.39 成大歸仁校區實驗之儀器設置  
表 5.12 詳細實驗狀況標示

地區	衛星顆數			PDOP 值			行車速度 (公尺每秒)			日期	期間(秒)
	最少	最多	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均		
歸仁	5	12	8.8	1.35	4.18	1.95	0	50	20.3	2011/04/15	1548



圖 5.40 成大歸仁校區實驗軌跡(修改自 Google earth)

實驗期間 GPS 衛星顆數的變化及 PDOP 值如圖 5.41 所示，衛星顆數皆在 4 顆以上，PDOP 值大部分時刻皆小於 3，顯示衛星幾何分佈良好，透空條件佳，GPS 定位精度高。

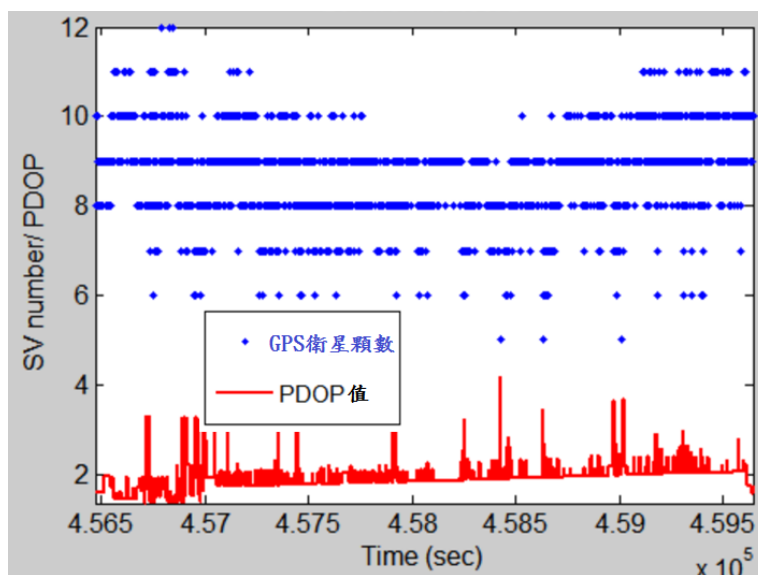


圖 5.41 實驗期間 GPS 衛星顆數與 PDOP 值變化

圖 5.42 和圖 5.43 分別顯示姿態和位置補償後的結果，由圖可知，透過類神經網路補償確實能降低固定區間 RTS 平滑器於 GNSS 訊號中斷時姿態和位置誤差，相較於傳統 MFNN-RTS 平滑器策略而言，所提出的 Auto GPFBN-RTS 平滑器不僅訓練速度較快，誤差補償的效果也較為顯著。

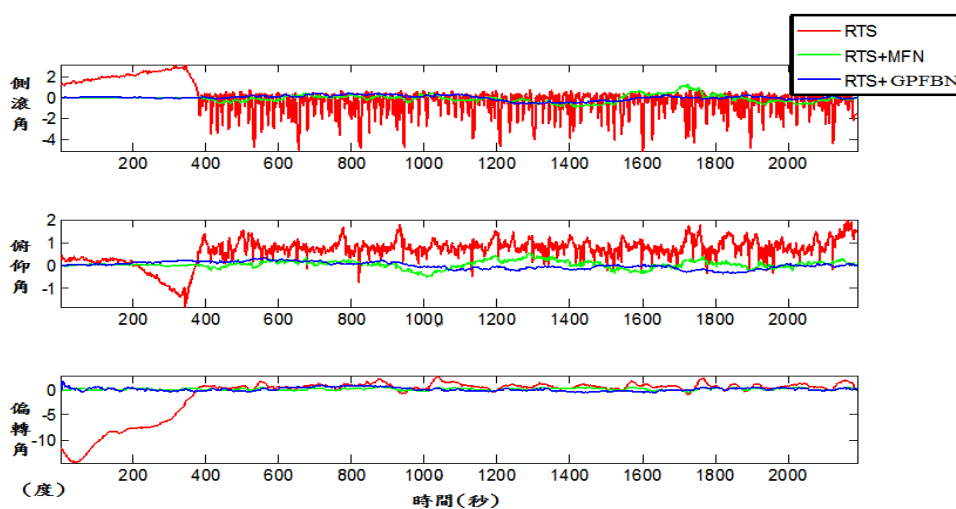


圖 5.42 姿態參數誤差補償



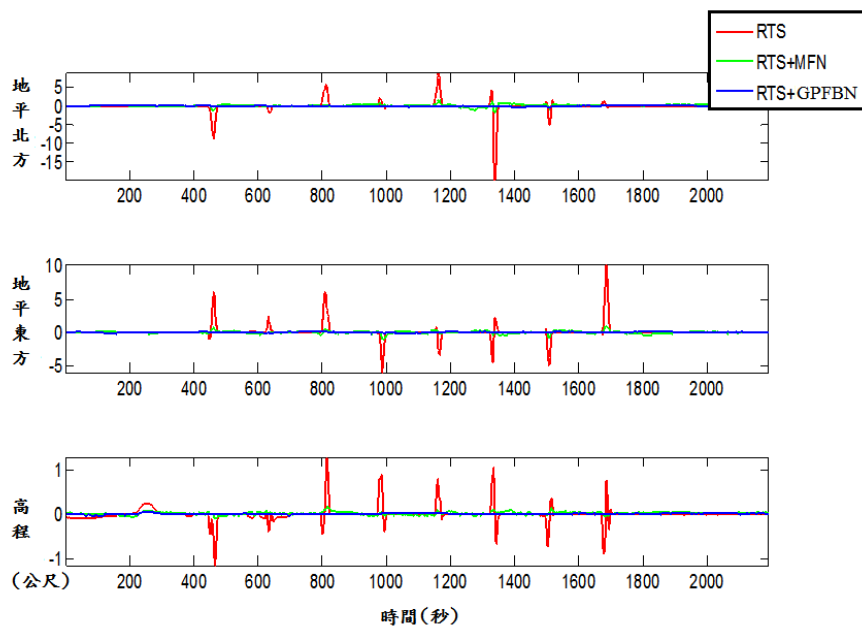


圖 5.43 位置參數誤差補償

由圖 5.43 可清楚看到模擬的 8 個 GNSS 訊號脫落期間傳統 RTS 平滑器之誤差行為，透過類神經網路架構輔助，可明顯減少訊號中斷時產生的位置誤差。表 5.13 將成果進一步量化，由表 5.13 可清楚看到，透過提出的 Auto GPFBN-Smoother 策略，本節所研發的演算法輔助定位定向精度相較於純 RTS 平滑器而言可改善至少 80% 以上。透過研發的演算法，使用低成本微機電慣性測量儀之定位定向系統(售價約為 40 萬)可以達到接近使用戰術等級慣性測量儀的參考系統(售價約 180 萬)效能。

表 5.13 位置、姿態測試結果統計表

TPI	原始均方根值	補償後均方根值		改善幅度 (%)	
	固定區間平滑器 S	MFN_S	GPFBN_S	IM	IG
側滾角誤差(度)	1.4061	0.3599	0.2282	74	84
俯仰角誤差(度)	0.8431	0.1650	0.1464	80	83
偏轉角誤差(度)	3.7749	0.4771	0.3257	87	91
地平北誤差(公尺)	1.5382	0.3430	0.1220	78	92
地平東誤差(公尺)	1.0325	0.1908	0.0741	82	93
高程誤差(公尺)	0.1741	0.0357	0.0127	80	93
S: Smoother, IM: (S-MFN_S)/S×100% IG: (S-GPFBN_S)/S×100%					

## 5.6 分析主要 GNSS 之效能對於定位性能之影響

如前所述，全球導航衛星系統(GNSS)的主要核心為美國的 GPS，俄羅斯的 GLONASS，歐盟的 Galileo 以及中國的 Compass。四個系統整合之後，GNSS 將會提供較現有 GPS 系統加倍的衛星、更多的測量頻率、以及更好的訊號品質，從而進一步提升現有 GPS 衛星定位的精度。本節探討了使用相位觀測量在相對定位精度上的提升，並分別探討使用單一星群 GPS、雙星群 GPS/GLONASS、三星群 GPS/GLONASS/Galileo 以及四星群 GPS/GLONASS/Galileo/Compass 四種情況。相對定位為精密測量所採用的主要方法，它必須同使使用兩部接收儀所蒐集的觀測量並透過二次差分技術獲得公分級的定位。二次差分技術可以消除相位觀測量上的接收儀鐘差、衛星鐘差、以及大部份的大氣延遲誤差；更重要的，二次差分技術可以保有相位觀測量上之整數週波未定值之特性(Goad and Remondi 1984; Yang 2005)。

本節的分析所使用的 GNSS 星群資料利用了一套由成功大學測量及空間資訊學系所開發出之 GNSS 軟體模擬器(楊名、江凱偉 2008)。此模擬器主要分為三個選項部分，分別為系統選項、位置選項以及輸出選項。模擬器介面如圖 5.44 所示，系統選項部分中，使用者可以任意輸入選擇的星系(現代化 GPS、現代化 GLONASS、Galileo、Compass)、觀測時間間隔、開始以及結束觀測時段。位置選項部分，使用者可以根據經緯度選擇域分析的區域，包含全球、區域以及單點。最後在輸出選項部分，使用者可以評估可視衛星數量、PDOP (plane dilution of precision)、GDOP(Geometric dilution of precision)、內可靠度、外可靠度以及衛星動態軌跡。模擬器中四種的星群位置資訊基本上利用了圓形軌道的克卜勒六參數產生；另外，模擬器還可以及時上網下載衛星的星曆(YUMA 格式)模擬出真實的 GPS 以及 GLONASS 衛星位置。目前，由於 Galileo 以及 Compass 尚未完全部屬完畢，因此兩星系的資訊以模擬的方式獲得，GPS 以及 GLONASS 可利用 YUMA 星曆獲得真實坐標位置。

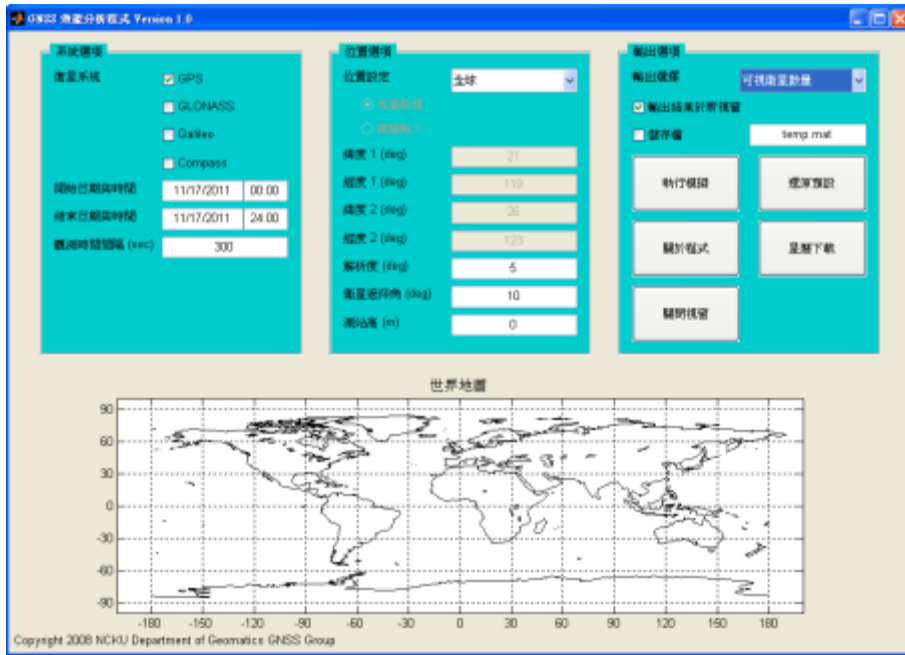


圖 5.44 本團隊持續開發中的 GNSS 軟體模擬器模擬器

相對定位誤差可以由下式表示(Lee 2002):

$$\sigma_{rel} = RPDOP \cdot \sigma \quad (5.59)$$

其中  $\sigma_{rel}$  代表相對定位誤差(positioning error)； $RHDOP$  為水平相對定位精度因子(relative plane dilution of precision)，此數值可以藉由 GNSS 軟體模擬器產生出的兩測站之 PDOP 值獲得； $\sigma$  代表測距誤差(range error)。測距誤差除了包含了相位觀測量誤差外還需考慮軌道誤差的影響，可以如下表示：

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\phi}^2 + db^2)} \quad (5.60)$$

其中  $\sigma_{\phi}$  代表相位觀測量誤差； $db$  軌道誤差的影響，此量級與星曆誤差以及兩接收儀間的基線距離成一比例關係，詳細可參考 Santerre (1991)，基線距離越長此誤差的數值越大。

測試距離分別為一公里以及五公里，觀測時間為 07/01/2011~10/31/2011，軌道誤差設定為 2 m，相位觀測量誤差為 0.002 m；觀測間隔為 8 小時並計算出逐一時刻(epoch-by-epoch)的相對定位誤差。圖 5.45 為 GPS 以及 GLONASS 的兩測站共同可視衛星數目。圖 5.46 為相對定位誤差成果，並假設相位觀測量上的週波未定值已正確求解出。

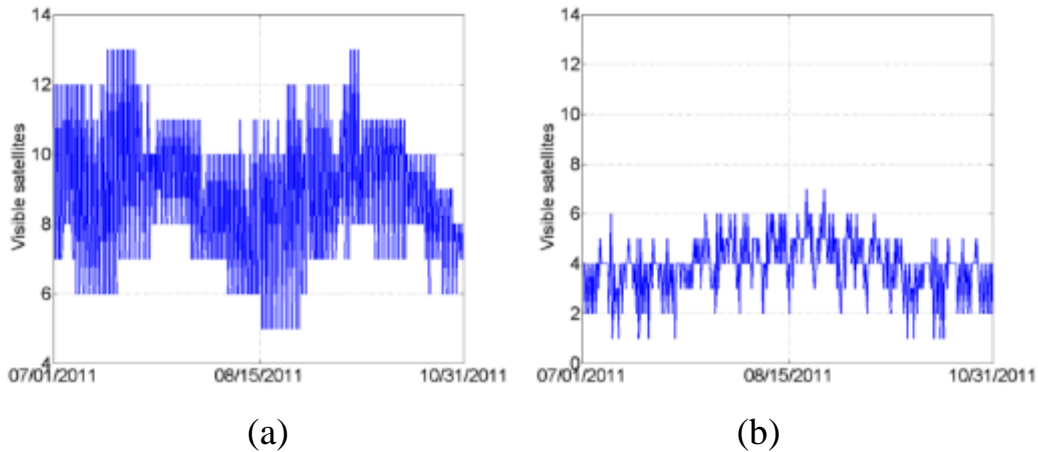


圖 5.45 可視衛星數目，(a) GPS、(b) GLONASS

成果顯示由於軌道誤差的影響，五公里基線相對定位誤差明顯高於一公里基線成果。GLONASS 目前的可視衛星數目依然小於 GPS，因此實務上不採用單一星系 GNONASS 的定位成果，因此 GLONASS 目前是以輔助 GPS 為原則。如圖 5.46 (a)以及圖 5.46 (c)的比較，於 8~9 月期間由於 GPS 可視衛星數目較少，因此造成單一星系 GPS 於誤差值較大 (大於 3 公分)，這段期間若是加入 GLONASS 的輔助，其雙星系的相對定位誤差於 8~9 月期間明顯的改善。另外，雙星系的相對定位誤差明顯的還高於三星系以及四星系，這說明了由於多重星系大幅提升了衛星幾何並降低相對定位誤差；甚至使用四星系可達到一公分以內之誤差。

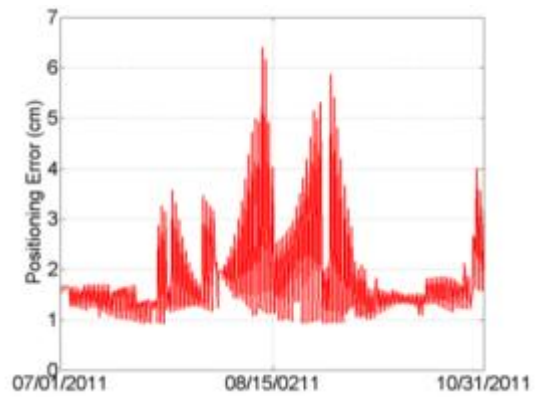
表 5.14 為四種情況的整理表，表中數值為 120 天觀測時段之平均值。在軌道誤差 2 m 情況下，其測距誤差由  $0.002 \pm m$  (1 km 基線) 增加到  $0.005 \pm m$  (5 km 基線)，因此當基線越長時將導致其定位誤差降低。整合雙星系其定位誤差也可由表中獲得，雙星系、三星系以及四星系分別可以提升 27%、55%以及 73%。

表 5.14 四種星系結合使用之整理，數值為 120 天觀測時段之平均值

兩測站距離	選用星系	兩測站共同可視衛星數目	測距誤差 ( $\pm m$ )	RPDOP	相對定位誤差 ( $\pm m$ )	定位精度改善 (%)
1 km	GPS	9	0.002	5.150	0.011	
	GPS/GLONASS	13		3.512	0.008	27
	GPS/GLONASS /Galileo	22		2.269	0.005	55
	GPS/GLONASS /Galileo/Compass	37		1.666	0.003	73
5 km	GPS	9	0.005	5.150	0.028	
	GPS/GLONASS	13		3.512	0.020	27
	GPS/GLONASS /Galileo	22		2.269	0.013	55
	GPS/GLONASS /Galileo/Compass	37		1.666	0.008	73



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



圖 5.46 GNSS 不同基線距離下相對定位誤差比較

圖 5.46(a)：基線距離 1 km，單一星群 GPS。圖 5.46(b)：基線距離 5 km，單一星群 GPS。圖 5.46(c)：基線距離 1 km，雙星群 GPS/GLONASS。圖 5.46(d)：基線距離 5km，雙星群 GPS/GLONASS。圖 5.46(e)：基線距離 1 km，三星群 GPS/GLONASS/Galileo。圖 5.46(f)：基線距離 5km，三星群 GPS/GLONASS/Galileo。圖 5.46(g)：基線距離 1km，四星群 GPS/GLONASS/Galileo/Compass。圖 5.46(h)：基線距離 5km，四星群 GPS/GLONASS/Galileo/Compass。

## 5.7 評估結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術應用之可行性

如前所述，現有的 VRS 與 e-GPS 技術已普遍應用在低動態高精度之動態定位與測量之應用，但對於高速動態的移動遙測製圖平台而言，VRS 與 e-GPS 技術面臨之挑戰列舉如下：

### ■ 通訊距離之限制

VRS 與 e-GPS 技術之定位精度取決於 GNSS 主站之密度及手機服務業者的基地台密度。

### ■ 載體運動態之限制

受限於通訊技術，VRS 與 e-GPS 技術對於運動速度超過時速 70 公里之載體即產生訊號失聯，如此不利高動態需求之移動遙測製圖技術相關之應用。

### ■ 作業環境之限制

都市地區 GNSS 訊號遮蔽嚴重，尤其是精密定位定向系統使用對於反射訊號相當敏感的雙頻大地等級 GNSS 接收儀，所以在高樓大廈密布的都市叢林，即時的 VRS 與 e-GPS 之技術定位對需要動態定位之移動遙測技術之應用是英雄無用武之地。

### ■ 成本之限制

使用 VRS 與 e-GPS 除了需要額外的通訊費用外，使用者主要之支出在於採購支援 VRS 與 e-GPS 功能之雙頻大地等級 GNSS 接收儀，一般需增加 30 至 30 萬不等。現有單頻-VRS 之接收儀並不適合移動遙測作業之特性，因此類接收儀必須持續仰賴 VRS

運作以提供 10 公分等級之動態軌跡，而單頻接收儀以後處理的傳統差分動態軌跡是遠低於雙頻接收儀所提供之軌跡。

■ 移動遙測製圖應用不需即時定位

目前移動遙測製圖平台使用後處理的平滑器符合高精度之需求，即時的 VRS 與 e-GPS 定位技術雖可以提供約 5~10 公分等級精度的動態軌跡，但在 GNSS 訊號脫落期間，定位定向系統的精度遞減程度約為後處理平滑器定位定向解的 10 倍。故目前鮮少有使用 VRS 與 e-GPS 即時定位技術之移動遙測製圖平台。同時目前商用多元感測器整合定位定向演算法不支援後處理模式的 VRS 與 e-GPS 輔助定位定向技術。

Applanix 於 2008 年推出 Smart base 技術，透過後處理模式下載基站所有觀測資料，並於該公司定位定向軟體 POSpac MMS 中引入後處理版本的 VRS 技術。其概念為透過軟體自動下載移動遙測平台作業軌跡附近的 IGS 觀測站所提供之觀測量，藉此實現透過既有主站進行後處理 VRS 輔助精密定位定向技術。如此載體離最近主站之距離可以由傳統差分模式的 20 公里擴充之 100 公里，而仍然可以維持 10~15 公分的定位精度。然而該軟體在台灣僅能自動下載二個主站之資料，如此對於台灣地區之後處理 VRS 的精密定位定向技術之應用是不夠的。表 5.15 比較傳統 PPP、DGNSS, VRS-RTK 與研議的後處理 VRS 技術於精密定位定向應用之效益。目前無其他商用軟體可以提供完整的後處理 VRS 的精密定位定向技術。故本節建議未來可以利用國土測繪中心的 e-GPS 服務發展後處理的 VRS 輔助多元感測器整合定位定向演算法，以符合日漸蓬勃多平台遙測應用之高精度需求。基於以上陳述，本節針對結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術之 SWOT 分析表如 5.16 所示。

為驗證 PPP, DGNSS 與後處理 VRS 技術於精密定位定向之應用效益，本團隊向儀科中心洽借使用戰術等級 LN 200 慣性測量儀之 Applanix POSAV 510 系統，並委託該中心利用商用 POSpac MMS 軟體以傳統 DGNSS 模式使用鬆耦合架構產生以 POS AV 510 系統之測試軌跡與姿態解提供進一步的分析。本次實驗於 100 年 10 月 31 日在新竹市區至木柵實施，而動態 GNSS 差分軌跡計算所需之 GNSS 主站設在新竹湖口與木柵，此次路測時間約為一個半小時。同時本案利用 LCI 慣性測量儀研製之多元感測器定位定向系統搭配本案研發之 CAINS-21 軟體以 PPP 模式與後處理 VRS 模式產生測試軌跡與姿態解提供進一步的分析。本次實驗的參考軌跡與姿態為使用 KINGSPAD 軟體以 LN200 觀測量及後處理 VRS 技術並以緊耦合架構產生之軌跡

與姿態。本次實驗路測之軌跡與 GNSS 衛星訊號狀態如圖 5.47 所示。本次實驗之區域包含新竹市區、國道一號、國道二號與中和交流道高架橋下之平面道路。本次傳統 DGNSS 模式所使用之主站如圖 5.47 之實體主站，而後處理 VRS 模式所使用之主站包含二個實體主站與二個用 VRS 技術產生之虛擬主站坐標與觀測量。圖 5.48 所示為依不同模式與系統產生之測試軌跡與參考軌跡，其中 DGNSS-LCI 模式表示透過後處理 VRS 模式產生之軌跡。

表 5.15 不同 GNSS 處理模式輔助的精密定位定向效益分析

	PPP	DGNSS(基線<20 公里)	VRS-RTK	後處理 VRS
開闢地精度	適中	高	高	高
都市地區精度	適中	高	高	最高
車載系統	可	可	不可	可
空載系統	可	可	不可	可
船載系統	可	近海	近海	近海
個人攜行	可	可	可	可
空間相關性	無	有	無	無
初始化時間	長	短	短	短
支援後處理	可	可	不可	可
硬體成本	高	高	最高	高
軟體成本	有	有	無	有

表 5.16 結合 e-GPS 與 VRS 技術應用於多平台定位技術應用的 SWOT 分析表

優勢(Strength)	弱勢(Weakness)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 國土測繪中心已建置完整的 e-GPS 服務</li> <li>2. 低動態高精度之使用者眾</li> <li>3. 操作模式簡單</li> <li>4. 技術成熟</li> <li>5. 節省設置主站之成本</li> <li>6. 定位精度高且均勻</li> <li>7. 傳統差分模式精度不穩定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 通訊距離之限制</li> <li>2. 載體運動態之限制</li> <li>3. 作業環境之限制</li> </ol>
機會(Opportunity)	威脅(Threat)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 目前商用軟體無完整的解決方案</li> <li>2. 自主發展支援 e-GPS 與 VRS 定位技術的後處理定位定向軟體</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 移動遙測製圖應用不需即時定位</li> <li>2. 額外之硬體採購成本</li> </ol>

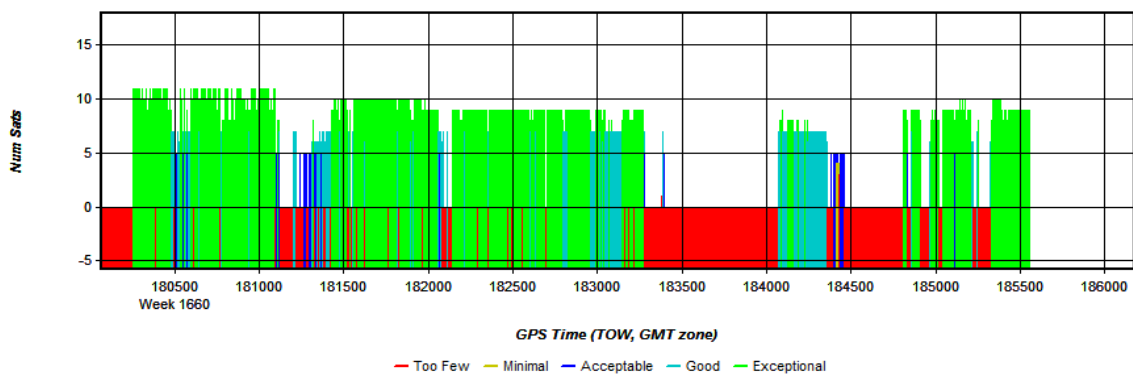


圖 5.47 新竹-台北測試軌跡與衛星分佈

圖 5.48 與圖 5.50 所示為此次路測成果之定位定向誤差圖，表 5.17 為定位定向誤差統計分析表。測試結果顯示，本節所研擬之後處理 VRS 模式搭配研製之系統可以較使用傳統 DGNS 模式的 POSAV510 提升至少 20% 之定位精度與 60% 之定向精度。而 PPP-LCI 模式之定位定向解之精度是三者中最低者，本次測試中 VRS 模式精度可以透

過發展跟隨虛擬主站技術以進一步動態縮減虛擬主站與移動站之基線距離以提升定位定向精度。

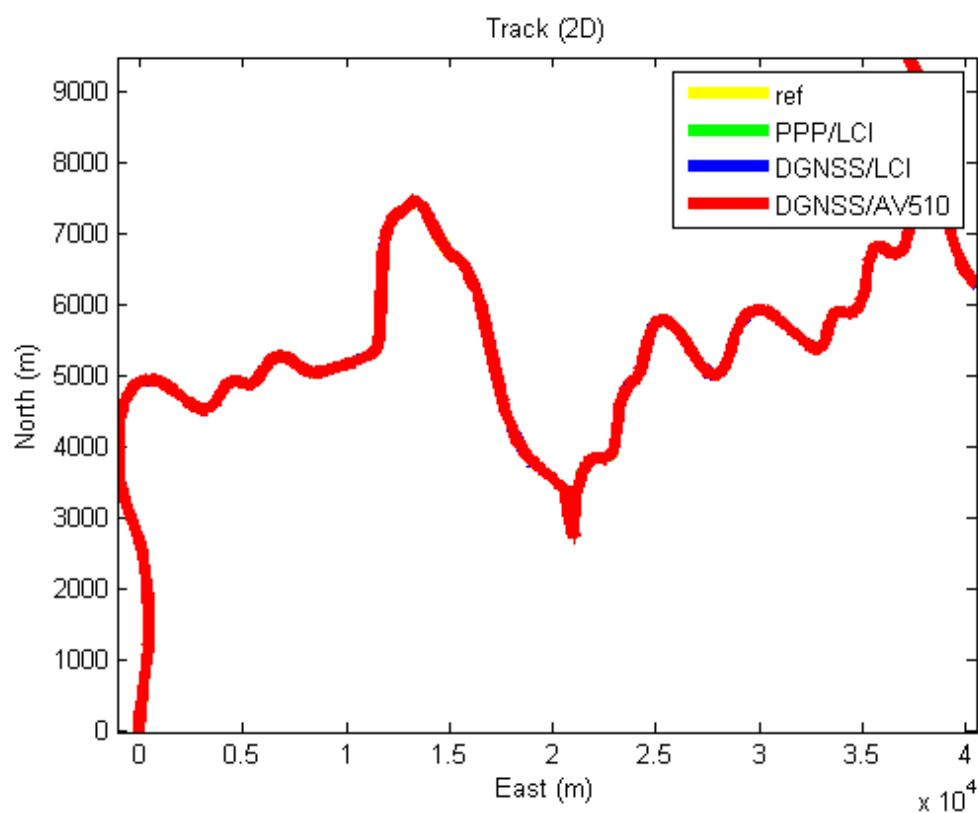


圖 5.48 新竹-台北測試軌跡成果

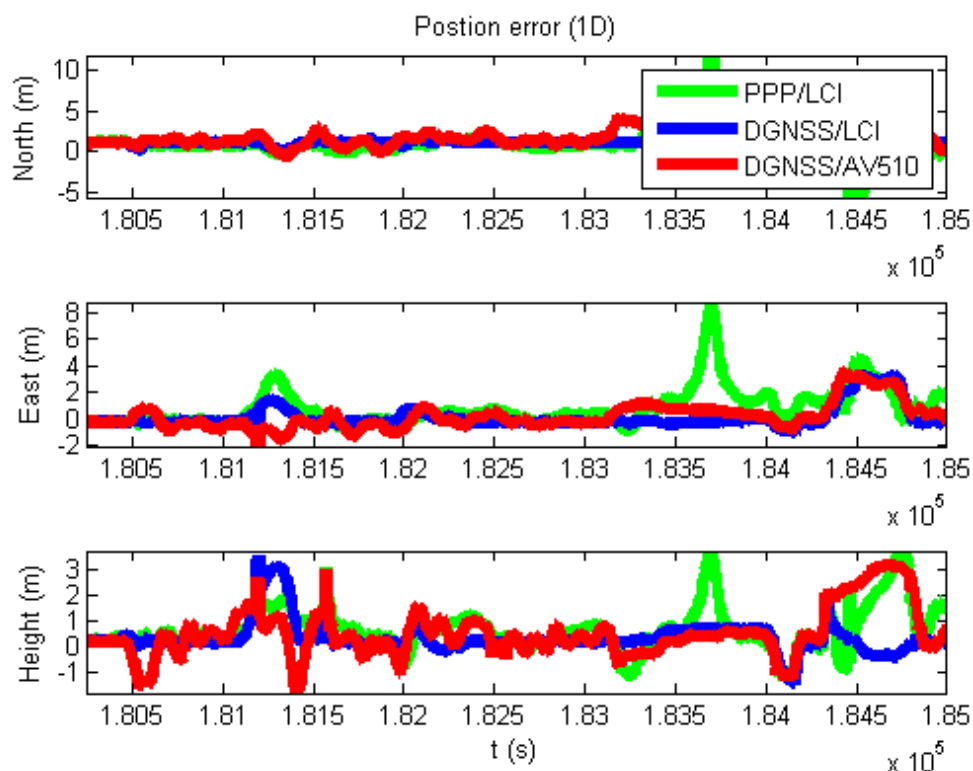




圖 5.49 新竹-台北測試之定位誤差

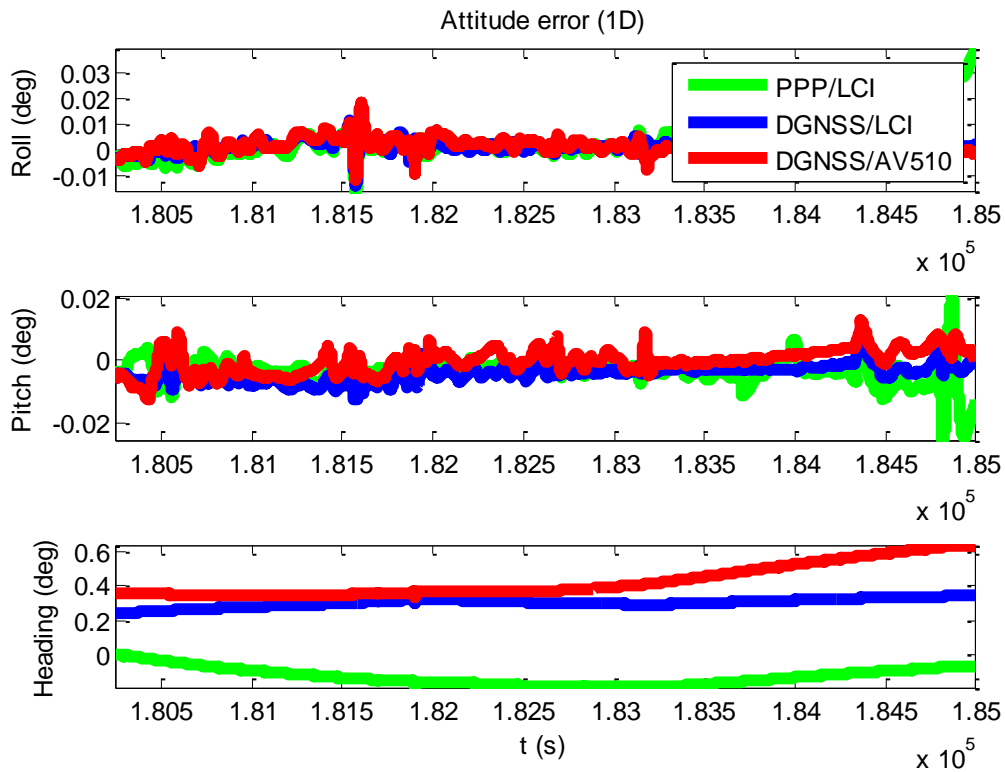


圖 5.50 新竹-台北測試之定向誤差

表 5.17 新竹-台北測試之精度分析表

		北 (公尺)	東 (公尺)	高 (公尺)	滾轉(度)	俯仰(度)	航向(度)
PPP	平均值	0.5223	0.8164	0.6664	0.0054	-0.0035	0.0406
	標準偏差	1.8672	1.3977	0.8417	0.0094	0.0045	0.0493
LCI	均方根誤差	1.9389	1.6187	1.0736	0.0108	0.0057	0.0638
DGNSS	平均值	0.8364	0.0977	0.3375	0.0013	-0.0041	0.2298
	標準偏差	0.8794	0.8492	0.6024	0.0023	0.0027	0.0233
LCI	均方根誤差	0.9254	0.9199	0.6144	0.0023	0.0028	0.0248
DGNSS	平均值	1.0917	0.1776	0.5061	0.0013	-9.8681e-05	0.2411
	標準偏差	1.0102	0.9657	0.9438	0.0028	0.0039	0.0940
POSAV510	均方根誤差	1.0110	1.1535	1.0297	0.0032	0.0047	0.1449

## 5.8 本章小結

精密定位定向系統之效能提昇除了仰賴進口規格更佳的慣性

測量儀之外，另一個有效策略即是自行發展功能更先進多元感測器整合定位定向演算法，其優點為便宜、使用者可以進行研發且無出口管制之問題。本案所發展之 CAINS-21 軟體除具備與一般商用軟體之平滑器架構外，同時引入輪速計、線性約制、航向輔助與高度輔助之改良式鬆耦合架構；具備線上率定技術的閉合式設計，使用者可以依慣性測量儀之性能調整線上回饋修正系統誤差之頻率，這點是商用軟體所沒有的特色。實測成果初步顯示所研發的 CAINS-21 軟體搭配輔助算法可以較傳統商用演算法所使用之架構於 5 分鐘 GNSS 訊號脫落期間之定位定向解提供近 90% 之效能提昇。

同時本章提出利用自動增刪反傳前饋類神經網路和固定區間平滑器組成的智慧型定位定向演算架構，用來學習並吸收移動式測繪平台於外在環境動態變化下，所產生的姿態和定位誤差並提供適當補償，實測成果顯示相較於使用傳統平滑器之定位定向演算法而言，研發的演算法輔助定位定向精度相較於純 RTS 平滑器而言可改善至少 80% 以上。透過本案所研發的演算法，使用低成本微機電慣性測量儀之定位定向系統(售價約為 40 萬)可以達到接近使用戰術等級慣性測量儀的參考系統(售價約 180 萬)效能。

針對精密單點定位動態軌跡演算法於定位定向技術之應用效益之初步評估成果顯示，若使用者對動態軌跡精度之需求為 30 至 50 公分，則透過 PPP 與慣性測量儀整合之技術可以提供合適的精度並減少傳統 DGNS 模式之依賴。若使用者對動態軌跡精度之需求為小於 30 公分，則 DGNS 與慣性測量儀整合之技術仍是必要的選項。

現有的 VRS 與 e-GPS 技術已普遍應用在低動態高精度之動態定位與測量之應用，但對於高速動態的移動遙測製圖平台而言，VRS 與 e-GPS 技術面臨之挑戰包含通訊距離之限制、載體運動態之限制、作業環境之限制、成本之限制與移動遙測製圖應用尚不需即時定位。實測成果顯示後處理 VRS 模式精度可以透過發展跟隨虛擬主站技術以進一步動態縮減虛擬主站與移動站之基線距離以進一步提升定位定向精度。故本章建議未來可以利用國土測繪中心的 e-GPS 服務發展後處理的 VRS 輔助多元感測器整合定位定向演算法以符合日漸蓬勃多平台遙測應用之高精度需求。

## 第六章 評估發展多元空載傾斜攝影定位系統技術及其應用

影像式三維地理資訊為近年來國際上相當熱門的研究與應用，傳統空載垂直攝影(Vertical Aerial Image, VAI)之目的主要為地形圖測繪，所獲取之影像以地物上方為主，原始影像多須透過立體觀測方能判釋高程。而空載傾斜攝影(Oblique Aerial Image, OAI)則可提供地物側面資訊，有利於建置三維仿真式數碼城市及土地利用與地物之判釋。

### 6.1 國內外空載傾斜攝影技術之沿革歷程文獻蒐集

空中攝影測量起源自 1858 年 Aimé Laussedat (攝影測量之父)使用風箏進行拍照及地形測量(Ghosh, 1985)，而歷史上大量使用垂直與傾斜相機進行航空攝影的做法則可追溯到 19 世紀初美國、英國、德國、法國、義大利及瑞士各國陸續有相關研究使用單一相機或整合式的架構，詳圖 6.1(Jacobsen, 2008)。Scheimflug 在 1900 年發明 8 鏡頭相機，可進行 8 個方向的傾斜攝影。Aschenbrenner 則是在 1920 年開發出 9 個鏡頭的設備，其中 8 個鏡頭為傾斜攝影，1 個為垂直攝影。Z/I Imaging 則推出 1 個垂直、2 個低傾斜及 2 個高傾斜的五鏡頭攝影系統 KS-153，如圖 6.2 所示。此外，在軍事的情報偵搜應用上，傾斜攝影一直是廣為採用的技術。近年來則由於三維仿真數碼城市的需求，希望能自動化產製牆面紋理貼圖以減少人力及時間，同時加上網際網路地圖服務的發達，例如微軟及 Google 於網路上同時展現三維仿真數碼城市及空載傾斜攝影以提供各式地圖服務（見圖 6.3 及圖 6.4），因此空載傾斜攝影技術乃又逐漸受到航遙測及空間資訊領域的重視。

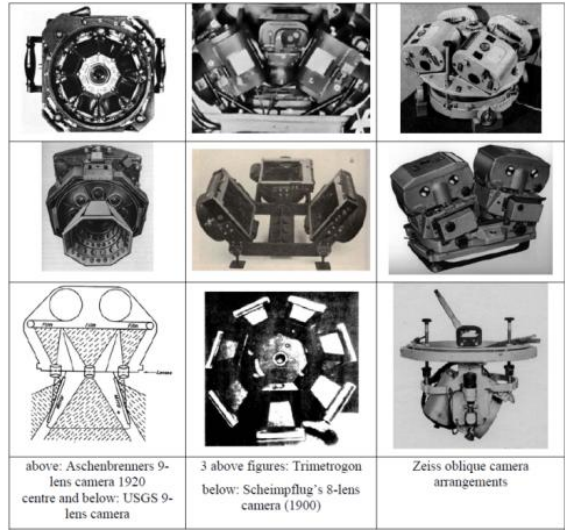


圖 6.1 90 年代發展的 9 鏡頭及 8 鏡頭空載攝影系統



圖 6.2 Z/I Imaging KS-135 相機拍攝結果

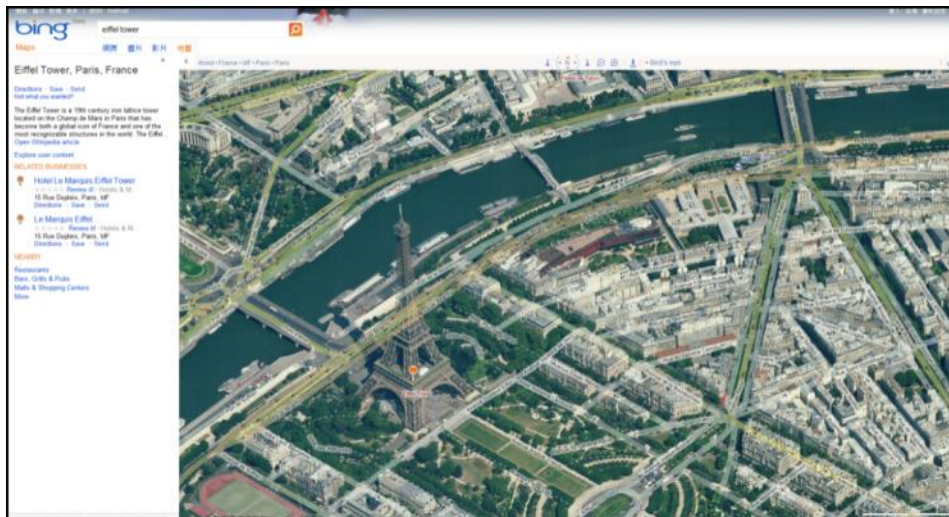


圖 6.3 微軟 Bing Map 傾斜攝影應用範例

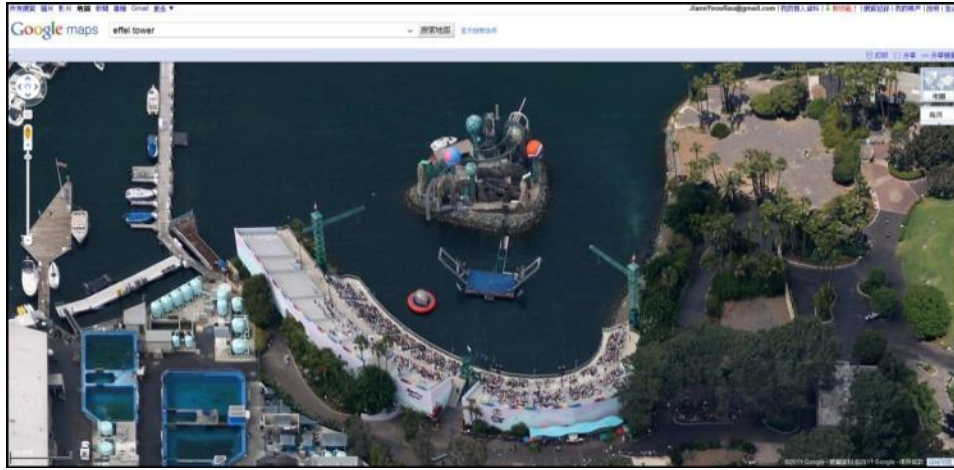


圖 6.4 Google Map 上傾斜攝影應用範例

國際上目前已經商業化的五鏡頭空載傾斜攝影系統及應用軟體，以 Pictometry 為最大的廠商，擁有相關專利，並授權給歐洲 (BLOM)、日本 (KKC)、加拿大 (MDA)、南非 (AOC)、澳洲及東南亞 (AAMHatch) 等公司，但僅對外提供拍攝及影像增值服務，不銷售軟、硬體設備。另外還有幾家小公司，例如 GeoSpan (USA)、COWI (Denmark)、Ofek (Israel)、GetMapping (U.K.)、Mapaid (Norway) 也有對外提供拍攝及影像增值服務。此外荷蘭 Track'Air 公司則是以生產多鏡頭攝影設備為主，不對外提供後續影像處理及增值服務。相關垂直與傾斜攝影之多鏡頭系統可由以下文獻得知完整說明 (Petrie, 2009)。

其中，荷蘭 Track'Air 的 MIDAS 系統是由五個 Canon EOS 1Ds Mk2/3 DSLR 專業數位相機所組成，相機像幅大小與傳統 135 底片同樣為 24 mm x 36 mm，CCD 像幅大小約 1700/2100 萬畫素。五台相機中一台採垂直攝影模式，其鏡頭焦距為 23.8mm，其角色及功能與傳統的攝影系統相同，可以直接利用數值航測工作站進行立體製圖、影像正射化與 DTM 製作等工作。另外四個鏡頭則採用傾斜攝影方式，其鏡頭焦距為 51mm，分別向飛行方向之前後左右傾斜 30~60 度 (一般多採用 45 度最被多數人接受) 拍攝。該系統通常一起搭配 Applanix POS AV 210 / 310 等級之定位定向設備，精度等級稍差，以避免敏感設備輸出問題。

本團隊工作從傾斜攝影發展歷史得知，國際社會先進國家對整合垂直及傾斜攝影之空載攝影系統的發展以經有十年以上，其應用價值相當廣泛。分析技術面及應用面可知，此項技術未來在國內之發展必定有相當高之可行性，而本案之研發成果亦可提供國內各公、私部門



在傾斜攝影發展及應用之參考。

## 6.2 空載傾斜攝影技術應用實例相關文獻之蒐集(至少需含3個領域)

圖 6.5 與圖 6.6 為 MIDAS 系統拍攝之示範影像放大到全解析度之效果，拍攝地點在美國佛羅里達。由於傾斜攝影可以看到地物之側面資訊，因此在辨識地物的能力比垂直攝影強。由此二影像可以發現其影像品質相當高，牆面之紋理材質、結構、特徵、出入口、屋頂型式等都可以清楚的辨識出來，而且有機會看到高架橋之橋墩位置，對汽車專業人士而言，甚至有可能辨識出車款，此乃垂直攝影無法達到之效果。此外，還可以看到各式都市設施、電力及電信設施等，也就是說傾斜攝影之地物判識工作就像一般人從高樓上看地表一樣的直覺，不需專業訓練。而在其他資訊的輔助下，還可以直接在傾斜攝影相片上進行量測地物的高度、長度、面積、以及套疊 GIS 圖資等，因此其功能與垂直攝影相比更加多元，更適合 GIS 圖資屬性之調查與更新。

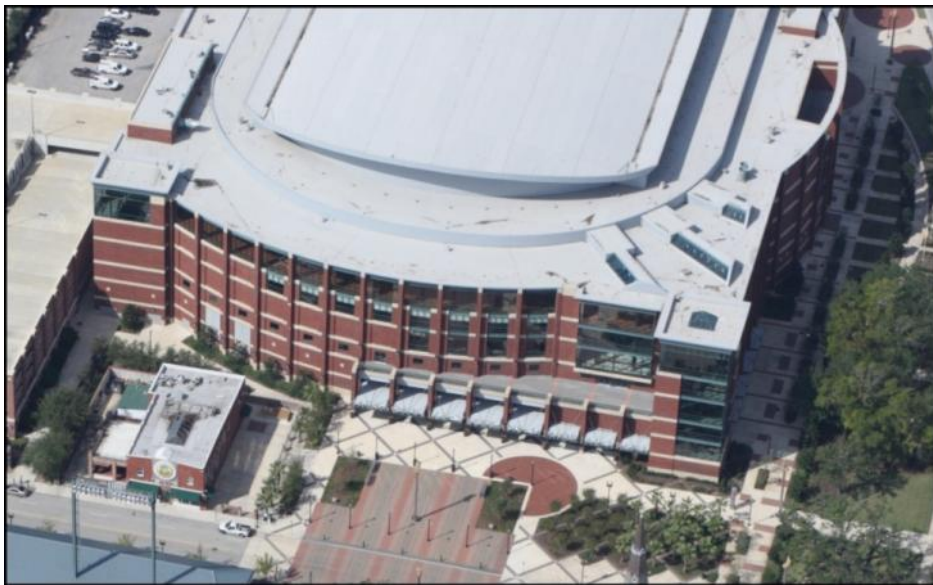


圖 6.5 MIDAS 傾斜攝影範例 1





圖 6.6 MIDAS 傾斜攝影範例 2

傾斜攝影資料之應用面相當廣，例如它可以應用於都市設計與規劃、不動產(資產調查與搜尋)、城市建模、地物變遷偵測、緊急應變(出入口位置、建物形式、地址確認、消防設施位置等)、環境影響評估、保險理賠、安全(意外分析、交通設施需求研判等)、汽車導航、執法(廢棄車輛調查、廣告看板、屋頂違法加蓋等)、土地利用調查、防救災(地震後房屋傾倒之研判、災前整備及減災規劃、災中協助決策支援與應變、災後復原規劃、執行與評估等)、商店招牌調查、數位典藏等。基於上述傾斜攝影之應用面可以得知，單獨使用空載傾斜攝影照片其應用價值即相當高，若能整合其他空間資訊，其應用領域及價值將無可限量。

以下針對國際上應用空載傾斜攝影之實例進行探討，包括網際網路地圖服務、災害管理、交通管理等三個領域。

- 網際網路地圖服務

國際上相關應用多整合了 GIS 地圖、衛星影像、航空照片、空載傾斜影像、及 720 街景影像，甚至 3D 建物模型的地圖服務，例如英國 Yell、挪威 FINN kart、瑞典 Eniro、澳洲 Nearmap 等電子地圖網站。前三者採用的是 C3 Technology 公司的技術，以五鏡頭系統所拍攝的影像(不使用 LiDAR)，透過自動化匹配及產生紋理貼圖的技術，全自動產生三維仿真城市模型，包括建物及樹木等。但仔細觀看其模型，可發現許多缺陷。前三個網站上所提供的傾斜影像是透過模擬三維場景的方法所產生的平面圖像，並非實際拍攝之傾斜攝影照片，因此可以無縫拼接成一大幅的傾斜觀測影像。第四個網站則是採用真正拍攝的傾斜攝影照片，經過

平行投影轉換，也可以得到類似前三者之效果，但影像改正過程較為複雜，可能會產生接縫線的現象。

此類地圖服務與傳統二維電子地圖最大不同即在所展現之圖像比較直覺，很像坐直升機瀏覽城市，同時又可套疊 GIS 圖資。而與三維動態地圖又不一樣，三維動態地圖可以任意旋轉觀看之角度，上述範例僅能以固定的傾斜角度觀看，基本上是先處理好之類三維平面地圖，並不是立即繪圖產生三維之場景。

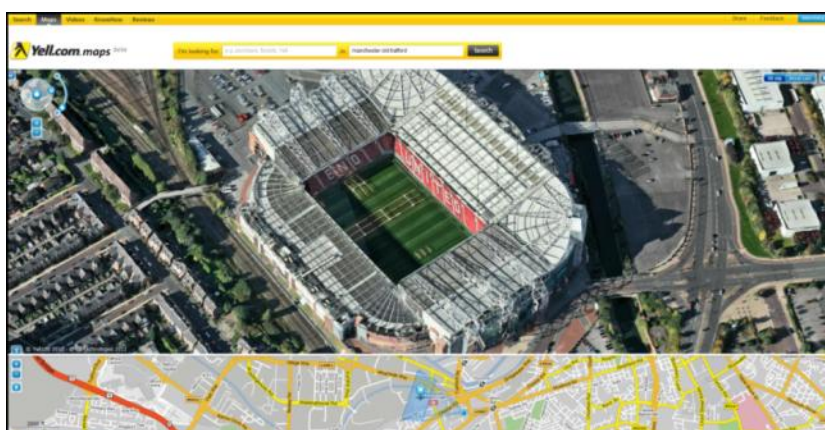


圖 6.7 英國 Yell 電子地圖網站提供之傾斜攝影服務

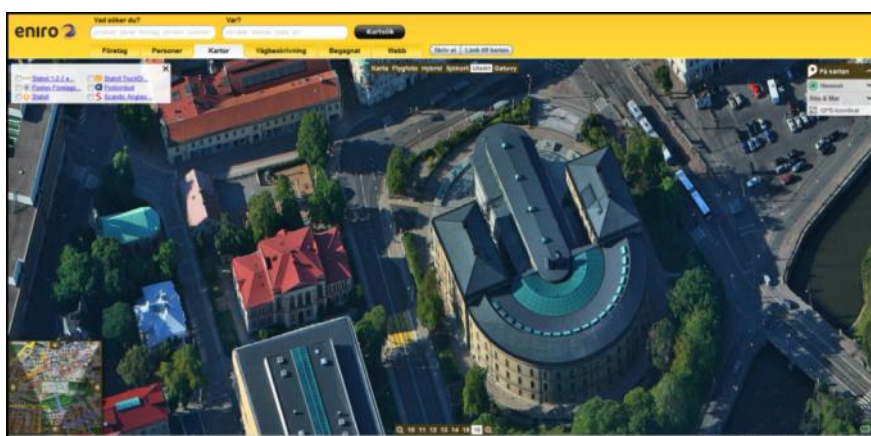


圖 6.8 瑞典 Eniro 電子地圖網站提供之傾斜攝影服務



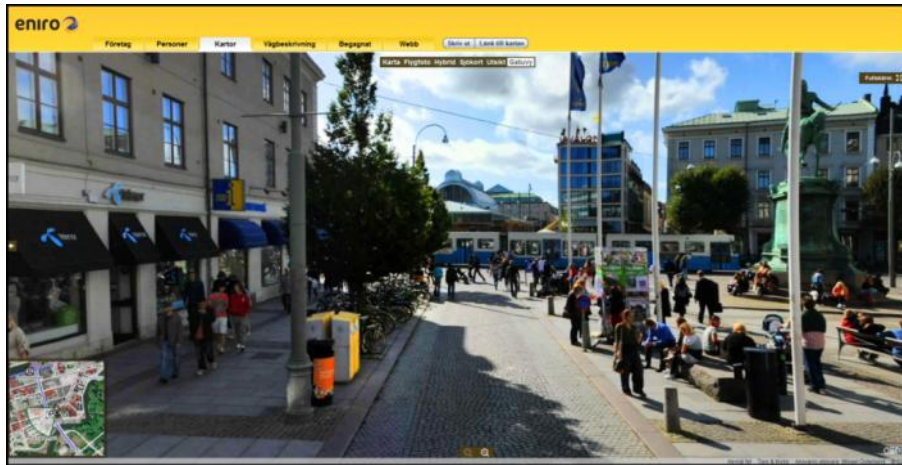


圖 6.9 瑞典 Eniro 電子地圖網站提供之街景影像服務

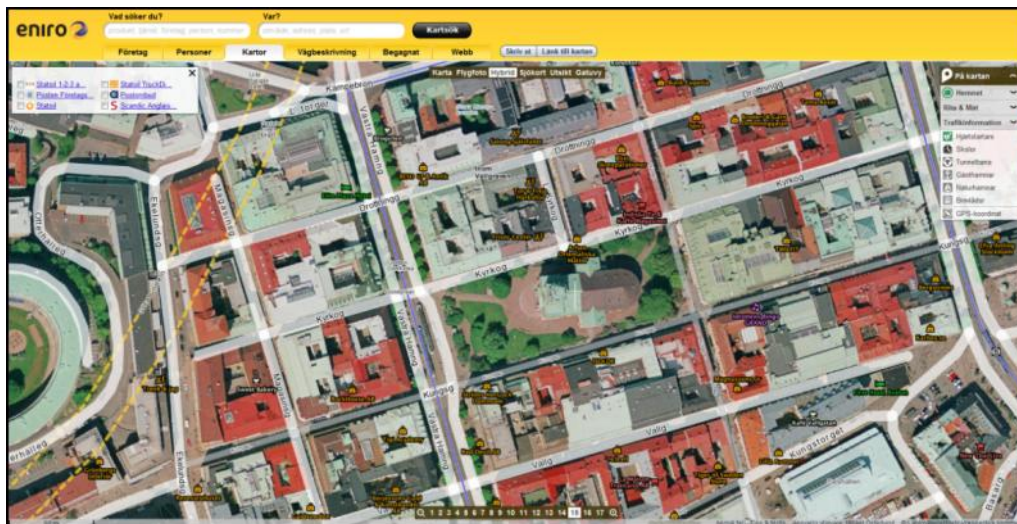


圖 6.10 瑞典 Eniro 電子地圖網站提供之空載正射及 GIS 圖資影像服務

- 災害管理

澳洲 Nearmap 整合了澳洲多時期的航照影像，包括 2011 年澳洲大水災後影像，可與災前的傾斜攝影照片整合，以提供立決策者掌握完整災情狀況。上述相關案例照片請參考圖 6.11~圖 6.12。而圖 6.13 則是利用空載傾斜攝影進行災前災後變遷分析及災損評估之案例(Bacon, 2008)。

災害管理包括四個階段，分別為減災、備災、應變及復原，空間資訊皆可以在這四個階段提供協助。傾斜攝影特別有利於災情的評估，例如地震後建物倒塌之判釋，尤其是建物垂直榻陷，

從垂直航拍影像是無法判斷其樓層下降的現象，而傾斜攝影因為可以判釋牆面資訊，因此可以很容易判斷其差異。



圖 6.11 澳洲 Nearmap 的電子地圖網站，整合澳洲多時期的空照影像包括 2011 年澳洲大水災後影像，可以立即且清楚地掌握整各災情狀況

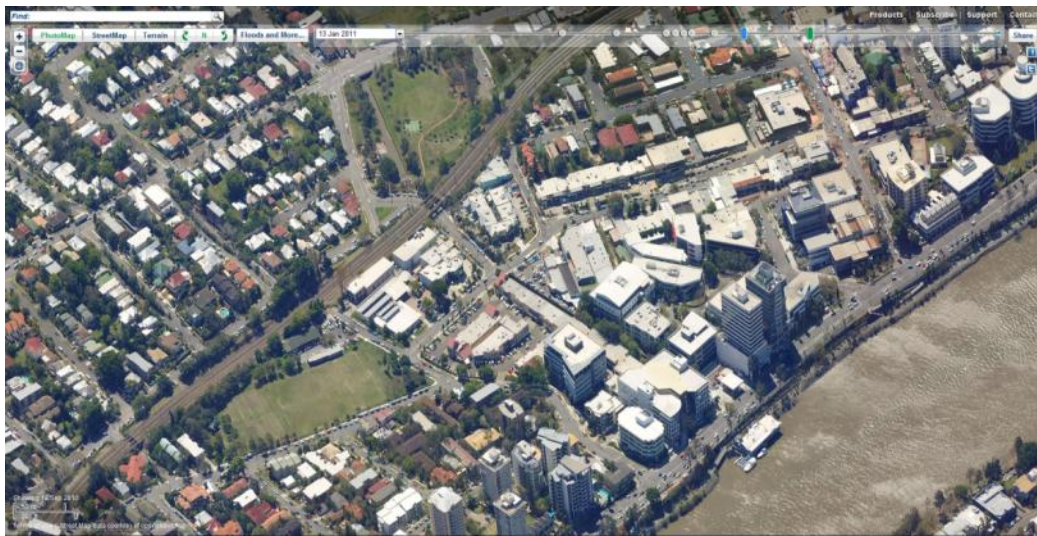


圖 6.12 澳洲 Nearmap 的電子地圖網站提供之水災前傾斜攝影影像





圖 6.13 利用空載傾斜攝影進行災前災後變遷分析及災損評估(Bacon, 2008)

● 交通規劃

交通規劃多年都是使用垂直攝影之航遙測影像，美國德州交通研究所於 2005 年開始針對空載傾斜攝影進行研究，發覺其在交通規劃上可減少人力、時間與費用，減少或免除現場調查、提升效率、提供高精度與高解析度空間資訊協助資料驗證與資訊蒐集、減少專業判釋之需求(Penelope & Brian, 2006)。

傳統上因為一張傾斜攝影影像中之尺度有相當大的變化，且不易進行量測，因此始終無法推廣其應用，近年來由於數位相機的品質提升及價格下降，同時透過適當的幾何約制即可達到在單張影像上進行量測的功能，因此若能配合 GIS 資料與使用者量測介面，即可提供交通規劃等應用，且讓規劃成果更容易讓大眾明瞭與接受。根據美國德州交通局所探討之成果，歸納空載傾斜攝影在交通規劃之應用面可包括以下幾類：

(1) 規劃與分析

- 甲、 基礎建設之清查
- 乙、 交通分析區(Traffic Analysis Zone)之確認
- 丙、 評估行人到轉運站之距離
- 丁、 土地利用分類

(2) 安全

- 甲、 達官顯要之交通路線規劃
- 乙、 緊急應變
- 丙、 行人安全(圖 6.14)
- 丁、 意外分析與報告

- 戊、 搜救
- 己、 火源控制

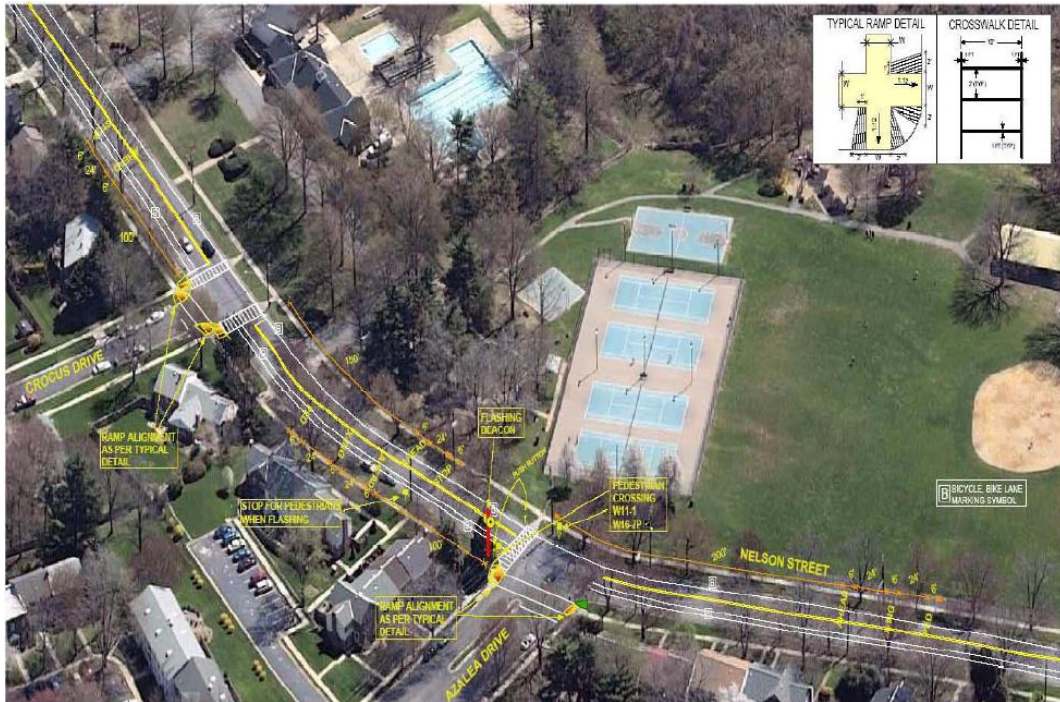


圖 6.14 提升行人安全之規劃(Penelope and Brian, 2006)

### 6.3 評估自主空載傾斜影像軟硬體技術

- 評估自行組裝直接定位多鏡頭空載傾斜攝影之可行性

有鑑於空載傾斜攝影之應用面廣泛，並且可以彌補大像幅空載攝影系統不足之處，對我國在空間資訊之蒐集及地表之監測，應可提供另一選項。然而國內外空載傾斜攝影之研究仍不夠廣泛，因此有必要進行相關研究。然而由於國際上商業化五鏡頭空載攝影系統多僅對外提供拍攝及影像加值服務，不對外銷售軟體，或者僅銷售攝影系統，但不提供影像加值服務軟體。若國內要發展傾斜攝影之應用，相關技術及公部門業務之發展必定會受到國外廠商的限制。因此有必要在國內發展相關軟硬體，已達到技術生根的目的。

為了評估在國內自行組裝多鏡頭空載傾斜攝影及定位攝影系統之可行性相當高，本團隊於 2010 年 6 月自行組裝之五鏡頭空載攝影系統，完成兩個航次各連續拍攝約 3 小時的航拍測試，共拍攝四萬多張照片。圖 6.15 為本系統懸吊系統與相機機架之外觀，相機機架上有兩個小平台可放置兩組慣性測量儀進行實驗，



由於相機與慣性測量儀為固定在同一機架上，因此可維持兩者間固定的相對方位關係。本系統所使用之相機為 5 台 SONY A850 全像幅相機，其影像解析度為 2400 萬畫素，垂直鏡頭之焦距可為 20mm 或 50mm，傾斜鏡頭之焦距為 50mm 或 85mm，傾角為 45 度。

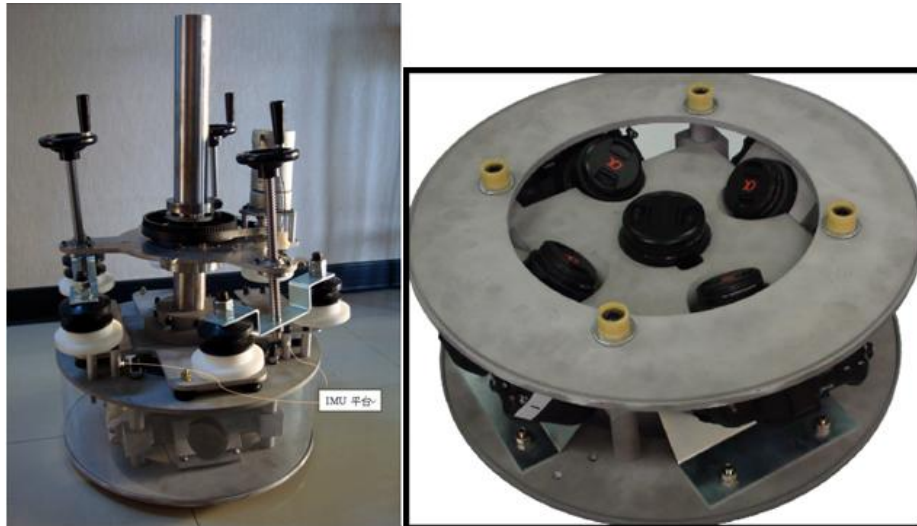


圖 6.15 本團隊設計之五鏡頭攝影系統及相機機架外觀

為了達到同步攝影之目的，本系統是透過一台主控筆記型電腦來控制拍攝之時間間距，並送出觸發訊號給各個相機拍照，同時將 Trigger Event 傳送到 Applanix POS AV-510，以便紀錄拍照之時間，然而此記錄之時間與拍照之時間會有非同步的現象，而五台相機間的拍照時間也會有非同步的差距。前項非同步現象會在 Lever-arm 率定後產生系統性誤差，仍可事後修正。而相機間拍照時若有非同步現象且非系統，則很難解決，也會造成直接定位之問題。

為了解此項同步拍攝問題，本團隊採用國家實驗研究院儀器科技研究中心所設計之「相機同步拍攝檢測儀」進行測試。圖 6.16(左圖)為 5 台 DSLR 數位相機同步拍攝檢測之實驗狀況，圖 6.16(右圖)則為檢視 LED 燈之位置是否相同之範例。其運作原理為其面板上共設計有兩排各 8 個 LED 燈，同一瞬間僅會顯示一 LED 燈，若設定顯示頻率 1000Hz，表示連續兩個燈顯示的時間間格為 1/1000 秒，而其顯示順序為從左上角依序到右下角，因此若使用兩台照相機對此面板拍照，拍攝得之照片上 LED 顯示之位置若相同，則表示此二相機同步拍照之時間差距在 1/1000 秒以內，也就是視為 1/1000 秒內同步，反之亦然。此設備 LED 燈顯

示之頻率可從 0.4Hz 到 3200Hz，也就是可檢測相機間是否可在 2.5 秒到 1/3200 秒內同步。



圖 6.16 相機同步拍攝檢測之實驗狀況

經同步拍攝檢測後，本系統在 1/1,400 秒以上皆可達到同步拍攝之能力，由於預計拍攝之快門速度為 1/1,000 秒，因此可以視為完全同步之拍攝。圖 6.17 為同步拍攝之範例，圖 6.18 為非同步拍攝之範例，由上而下為五台不同之相機，由左到右為間格 3 秒鐘連續拍攝之五張照片。此案例測試使用五台相同之 SONY A850 相機及 85mm 鏡頭，相關參數設定如表 6.1 所示。

表 6.1 同步檢測相關參數及檢測成果

模式：	S Mode	資料格式: Raw
快門：	1/1000	同步：1/1000 秒
光圈：	F2.8	同步：1/1100 秒
焦距：	Auto	同步：1/1200 秒
ISO：	Auto	同步：1/1400 秒
白平衡：	Auto	非同步：1/1500 秒

此外，本系統在拍照完畢馬上利用主控電腦與四台筆記型電腦同時接收與儲存五台相機拍攝的影像，不使用相機上的記憶體，可以避免資料量的限制，且可以儲存 RAW 格式達到最高的影像品質。但由於 RAW 格式資料量較大約 45MB，因此也限制了連續拍攝兩張的時間間隔，經過測試後可達每 2.5 秒拍攝一張，不會造成延遲。這些電腦剩餘之硬碟容量約 180GB，可儲存 4500 張以上之照片，若每 2.5 秒拍一張，可連續拍攝 3.75 小時。

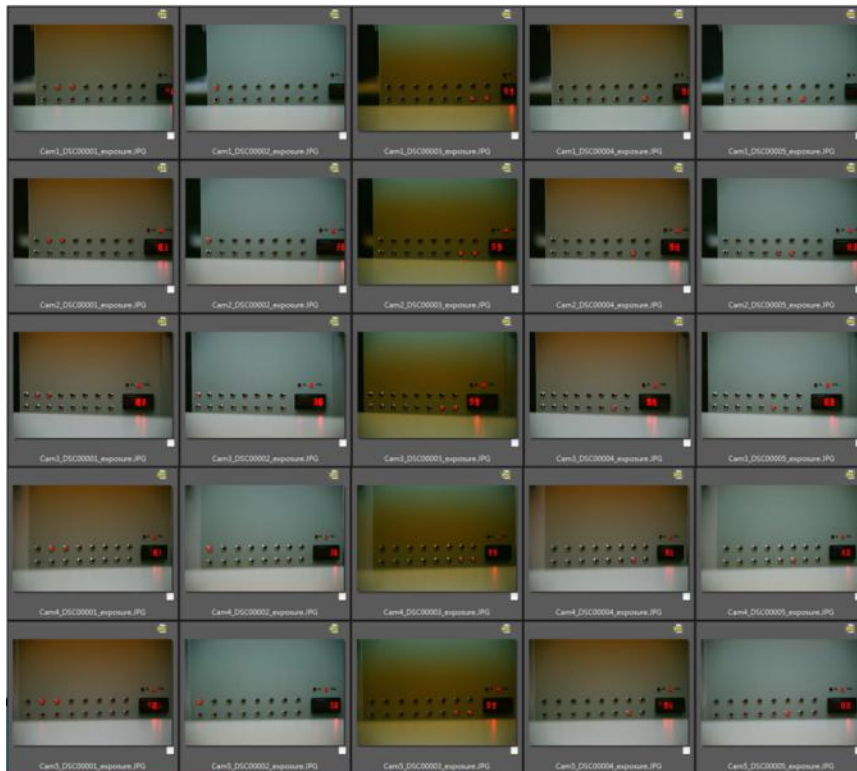


圖 6.17 同步拍攝之範例

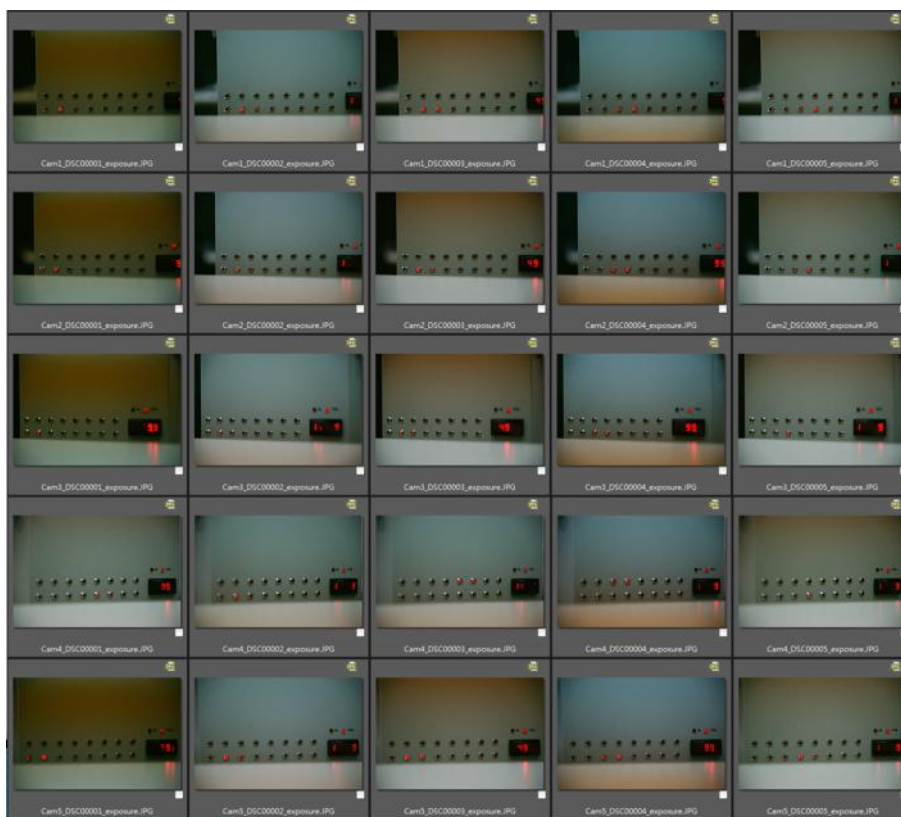


圖 6.18 非同步拍攝之範例



圖 6.19 為本團隊於 2010 年 6 月 6 日所拍攝之成大校園傾斜攝影照片，下圖為局部放大圖，可清楚看到馬路上之自行車及機車，甚至行人。而香格里拉飯店及遠東百貨群樓屋頂上的設施、牆面窗戶位置及一樓出入口等皆可輕易判讀。雖然本團隊已經完成五鏡頭空載攝影系統之製作，以及兩個航次各三小時連續拍攝的航拍經驗，但本系統仍有許多改善空間值得進一步評估其可行性，以提供下一階段升級之參考，包括相機間及相機與精密定位定向系統記錄時間之同步性檢驗、將筆記型電腦升級成為工業級電腦以提升其穩定度及資料流通之方便性、將電源改為使用飛機電源以降低載重及增加作業時間之彈性、將相機支架與 T-AS 穩定平台整合以提供更穩定的拍攝成果、和本案所開發之慣性測量儀進行整合與系統率定以達到直接定位之目的。

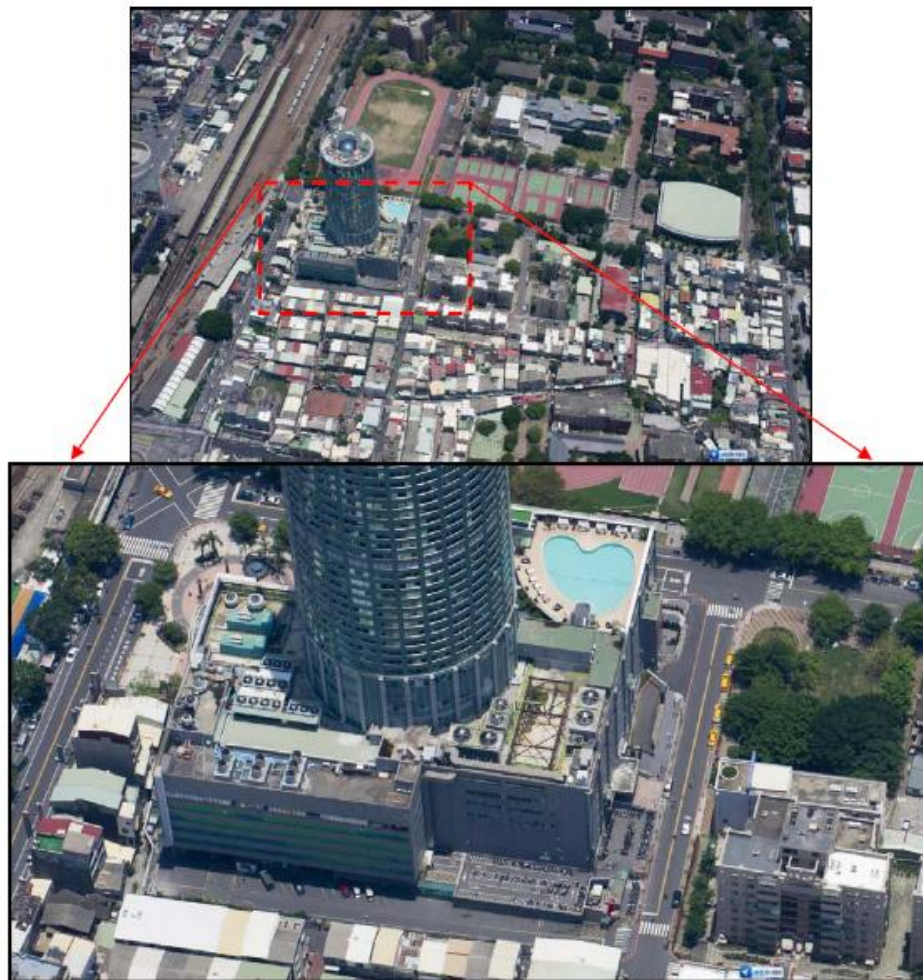


圖 6.19 本團隊於 2010 年 6 月 6 日拍攝之成大校園附近傾斜攝影照片

為了再次驗證本團隊所設計之空載傾斜攝影系統之可行性，本團隊透過其他計畫之支援於 2011 年 9 月 8 日進行一個航次約 3 小時之實際空載傾斜攝影航拍工作，基於相機同步之需求，本次航拍採用五台完全相同規格之 SONY A850 相機及 85mm 之鏡頭，其 CCD 大小 36 x 24 mm，像素大小 5.9  $\mu\text{m}$ 。飛行航高約 1350-1500 公尺，垂直相機地面涵蓋範圍約 451 x 677 平方公尺，航線之間距約 300-400 公尺，飛行速度約 185 公里/小時(100 海浬)，每 3 秒鐘拍一組照片，共拍攝 3773 組(18865 張照片)，完全沒有缺漏，顯示本系統之穩定性。垂直照片前後兩張之重疊百分比約 67%，垂直照片兩航線之重疊百分比約 40%。垂直相片之空間解析度約 11 公分，傾斜攝影近距與遠距約之空間解析度分別約 13.4 公分及 20.5 公分。

### ● 開發空載傾斜影像 3D 空間資訊蒐集系統雛型

由於小像幅五鏡頭空載攝影之成果其影像幅數將比大像幅垂直攝影之影像幅數增加許多，為了讓使用者方便找到所興趣的影像，因此必須有良好的影像搜尋及瀏覽機制，而本項工作前提是每一幅照片的內、外方位參數都已經知道，目的則在自行開發空載傾斜影像 3D 空間資料蒐集之雛型系統介面，計畫成果將包括程式原始碼。

本介面所採用之影像搜尋機制分別為 Top-down 及 Bottom-up 兩種。當匯入影像內外方位參數到資料庫時，會先以 Top-down 作法，利用影像之內外方位參數及數值地形模型，透過 Ray-tracing 的方法計算每一幅影像四個角落投影到地面之範圍，並儲存在資料庫中。如此即可在使用者點選一地物點得到其地面坐標後，搜尋是否有任何照片涵蓋到此地物點，以達到搜尋影像的目的。

Top-down 中利用 Ray-tracing 公式(如 6.1 式所示)之處理程序如下，假設地面高度( $Z_A$ )已知，利用影像四個角落之影像坐標( $x_a, y_a$ )及內外方位參數，即可求得該點投影到地面之坐標( $X_A, Y_A$ )。如此即可利用 DTM 內插得下一個預估之地面高度( $Z_A$ )，因此此過程必須進行迭代處理，直到收斂為止，以便得到準確的地面坐標( $X_A, Y_A, Z_A$ )。影像四個角落分別處理結束後，即可得到整張影像在地面之投影範圍。

$$\begin{aligned} X_A - X_C &= (Z_A - Z_C) \frac{m_{11}(x_a - x_p + \delta_x) + m_{21}(y_a - y_p + \delta_y) + m_{31}(-f)}{m_{13}(x_a - x_p + \delta_x) + m_{23}(y_a - y_p + \delta_y) + m_{33}(-f)} \\ Y_A - Y_C &= (Z_A - Z_C) \frac{m_{12}(x_a - x_p + \delta_x) + m_{22}(y_a - y_p + \delta_y) + m_{32}(-f)}{m_{13}(x_a - x_p + \delta_x) + m_{23}(y_a - y_p + \delta_y) + m_{33}(-f)} \end{aligned} \quad (6.1)$$

此外，在某些情況下也會透過 Bottom-up 的方法，即時計算某地物點反投影到影像空間，判斷該地物是否有被某影像拍攝到。所使用的公式為攝影測量中常見之共線條件式，如(6.2)式所示，給予興趣點之物空間坐標( $X_A, Y_A, Z_A$ )或匯入一地圖與 DTM，透過點選地圖得到該點之物空間坐標( $X_A, Y_A, Z_A$ )，接著即可利用共線條件式計算其在每一張照片上之影像坐標( $x_a, y_a$ )，若此坐標有座落在某一影像之範圍內即表示此照片有拍攝到此興趣點。

$$\begin{aligned} x_a - x_p + \delta_x &= -f \frac{m_{11}(X_A - X_C) + m_{12}(Y_A - Y_C) + m_{13}(Z_A - Z_C)}{m_{31}(X_A - X_C) + m_{32}(Y_A - Y_C) + m_{33}(Z_A - Z_C)} \\ y_a - y_p + \delta_y &= -f \frac{m_{21}(X_A - X_C) + m_{22}(Y_A - Y_C) + m_{23}(Z_A - Z_C)}{m_{31}(X_A - X_C) + m_{32}(Y_A - Y_C) + m_{33}(Z_A - Z_C)} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{cases} \delta_x = x_a (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \delta_y = y_a (k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \\ r = \sqrt{(x_a - x_p)^2 + (y_a - y_p)^2} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos(\varphi) \cos(\kappa) \\ m_{12} &= \sin(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) + \cos(\omega) \sin(\kappa) \\ m_{13} &= -\cos(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\omega) \sin(\kappa) \\ m_{21} &= -\cos(\varphi) \sin(\kappa) \\ m_{22} &= -\sin(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) + \cos(\omega) \cos(\kappa) \\ m_{23} &= \cos(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cos(\kappa) \\ m_{31} &= \sin(\varphi) \\ m_{32} &= -\sin(\omega) \cos(\varphi) \\ m_{33} &= \cos(\omega) \cos(\varphi) \end{aligned}$$

(6.4)

上二式中  $x_a, y_a$  表示空載傾斜影像上的像坐標， $\delta x, \delta y$  表示相機所率訂出的在 x 方向與 y 方向的透鏡畸變差分量， $k_1, k_2$  為透鏡畸變差參數， $f$  為成像時的焦距， $x_p, y_p$  為相機的像主點坐標，在理想情況下，像主點坐標被定義為視準軸與像平面之交點坐標。 $X_A, Y_A, Z_A$  為對應的 3D GIS 上物坐標， $X_C, Y_C, Z_C$  為透視中心之三維坐標， $m_{11} \sim m_{33}$  為相機姿態角  $\omega, \varphi, \kappa$  所組成之旋轉矩陣元素， $\omega$  為對 X 坐標軸之旋轉角， $\varphi$  為對 Y 坐標軸之旋轉角， $\kappa$  為對 Z 坐標軸之旋轉角， $X_C, Y_C, Z_C, \omega, \varphi, \kappa$  也稱為遠端操控攝影機之外方位參數。



在使用者介面及影像展示模組部分，相關技術牽涉到如何有效的讀取及展示 jpg 或 tif 格式之影像，以及可進行快速縮放、平移，以及線條、標記與文字等繪圖功能。本案採用 Visual Studio .NET Framework 做為使用者介面程式開發平台，自行開發相關操作介面與影像展示程式，以便完全掌握技術。

目前國際上商業化的空載傾斜攝影系統大多僅對外提供拍攝成果及影像加值服務，少數提供垂直和空載傾斜攝影應用軟體程式者，也只適用於解釋及顯示傾斜攝影的照片，完全無法滿足實現客戶端更進一步之需求應用。因此，唯有提出自己的一些特殊需求，如：對空載傾斜攝影照片進行良好的影像搜尋、管理、瀏覽、坐標測量、距離測量、面積計算、套疊、編修及產製 GIS 圖資、建構 3D 建物模型、土地利用調查等功能，結合數位攝影測量、數位影像處理與地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)三大主軸領域知識，並透過自主資通訊科技(Information and Communications Technology, ICT)技術整合研發出自有應用軟體系統(圖 6.23)，同時也可達到客製化之目的。



圖 6.20 應用軟體系統設計理念

本研究所開發之應用軟體系統平台(圖 6.24)稱為 LOC5D，其目的為協助使用者管理、搜尋及瀏覽大量的空載傾斜影像，亦可管理車載或個人攜行式影像。未來研究方向為朝向半自動地物特徵萃取與屬性設定等。本年度之工作重點則在建立雛形系統，其

設計概念與功能特色如下：

- 高度整合的資通訊科技技術平台
- OOA/OOD 物件導向分析設計
- 完整的軟體架構設計易於維護及管理
- 開放式的應用平台基礎規格
- 系統版本可分單機版與伺服器版
- 資料庫可使用 PostgreSQL、MySQL、MS SQL Server、Oracle
- 具美感之使用者人機介面設計風格(圖 6.25)
- 多語系可切換中文、英文 (圖 6.26)
- 安全管理包括登入、帳戶識別、權限設定、日誌等功能

應用軟體系統功能特色如下：

- 可將內外方位參數匯入資料庫(圖 6.26)
- 可做內外方位參數資料庫編輯(圖 6.27)
- 可依照觀測點自動搜尋判斷可觀測之影像(圖 6.28)
- 可展示、套疊及操作 GIS 圖資(圖 6.29)
- 可視定向量圖層展示之 Symbology(圖 6.30~圖 6.32)
- 可對觀測空載傾斜影像平移、縮放及旋轉操作(圖 6.33)
- 可顯示核線(圖 6.34)
- 可做前方交會(圖 6.34)，並與真值比較進行誤差統計。
- 可套疊向量圖層至影像上(圖 6.35)
- 可進行單像或多像數化(圖 6.35)
- 可使用雙(多)螢幕觀測及操作影像(圖 6.36)

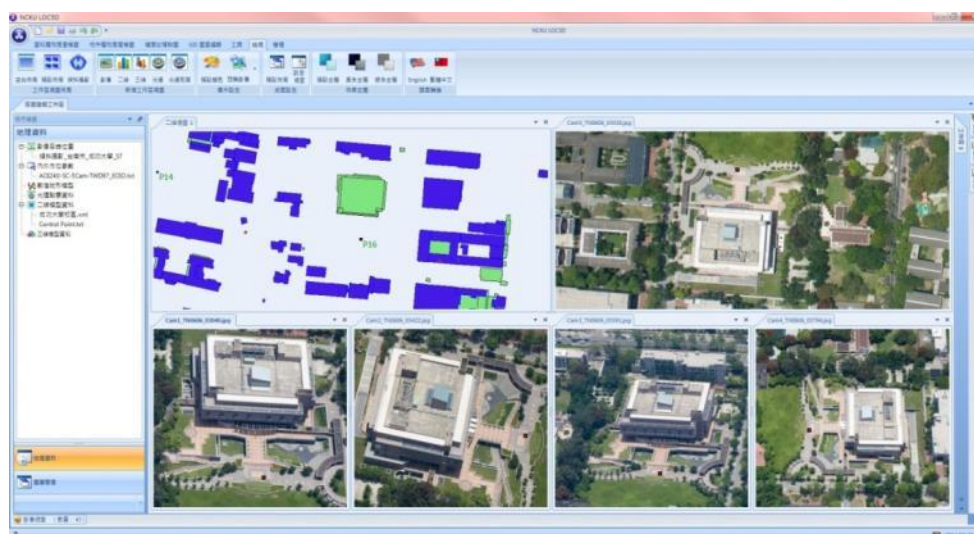


圖 6.21 淡藍色系使用者人機介面



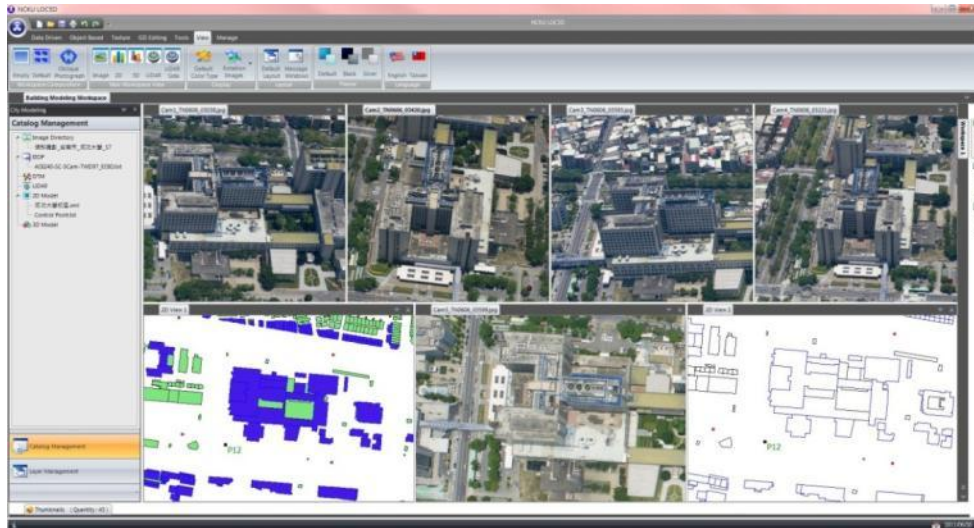


圖 6.22 灰黑色系與英文版使用者人機介面

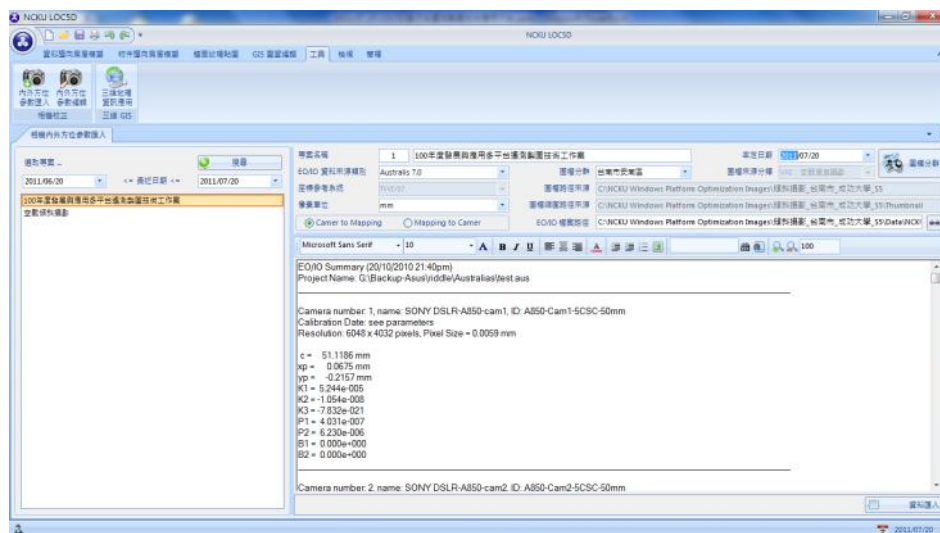


圖 6.23 匯入內外方位參數

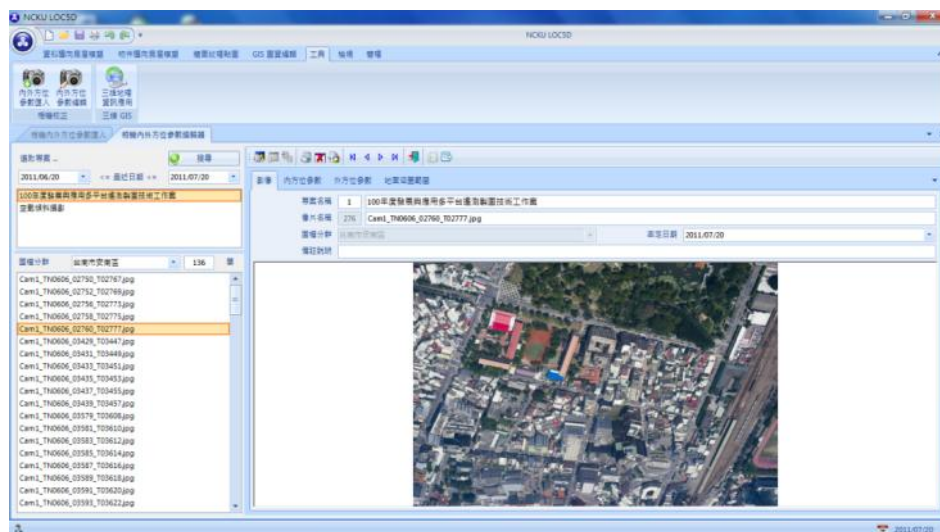


圖 6.24 內外方位參數編輯

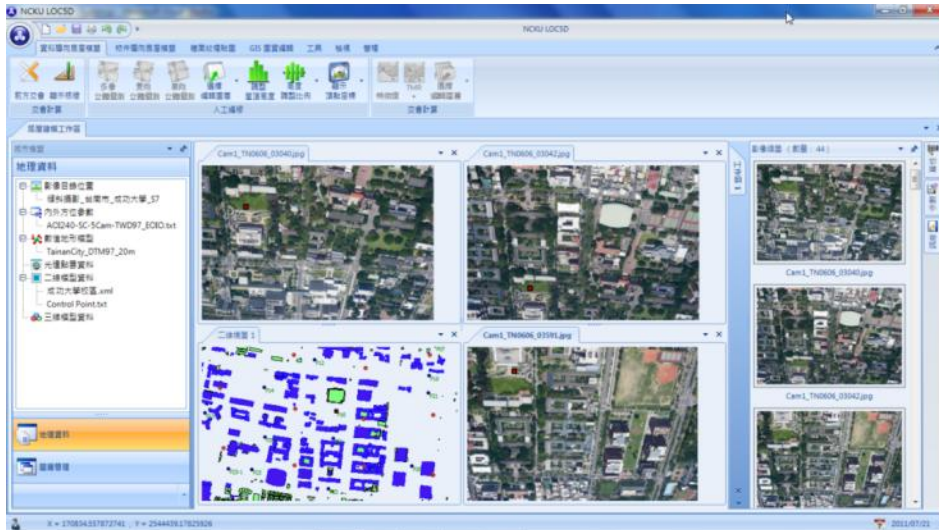


圖 6.25 自動影像搜尋

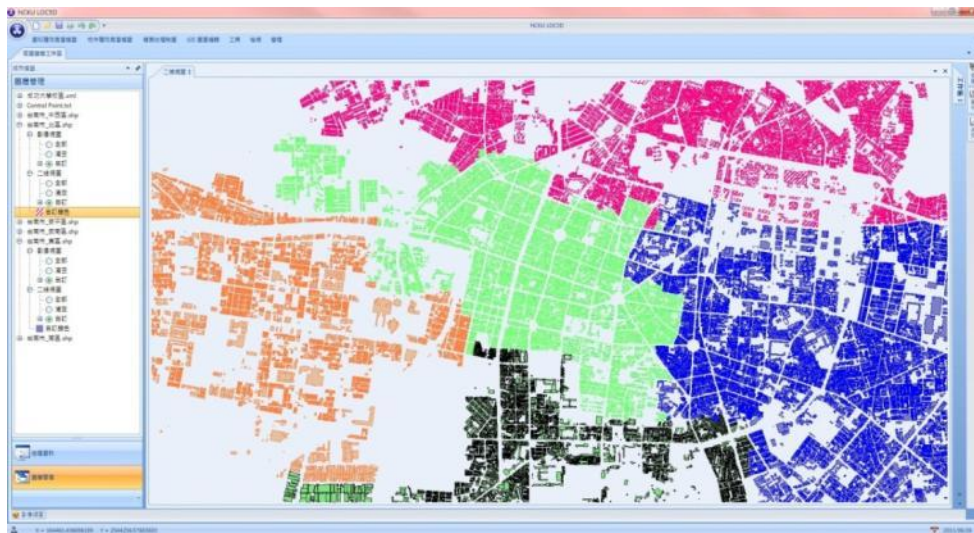


圖 6.26 向量圖層套疊

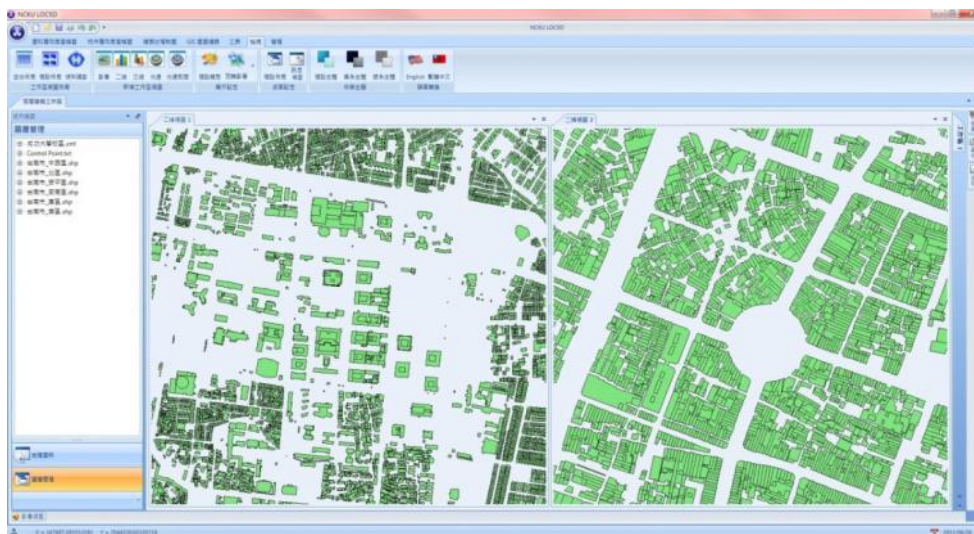


圖 6.30 向量圖層 Symbology 設定前



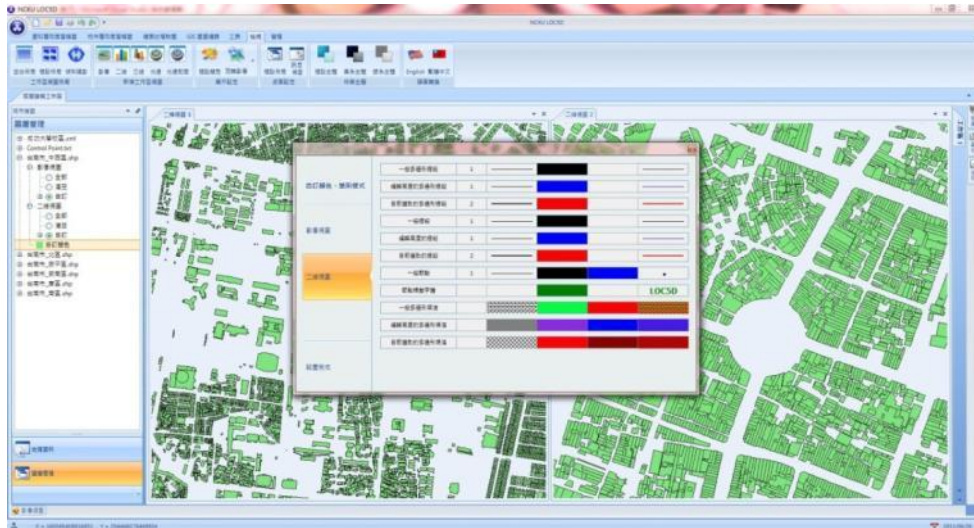


圖 6.31 向量圖層 Symbology 設定中

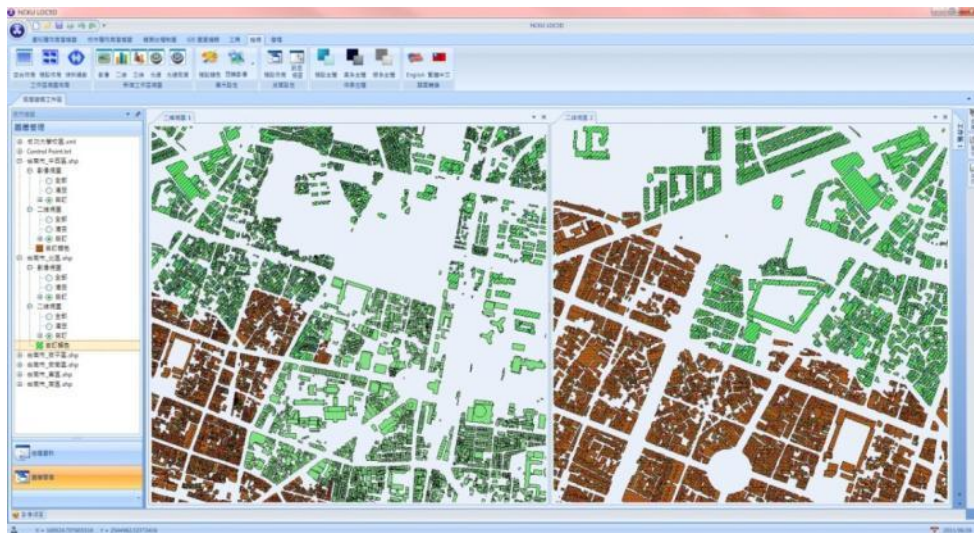


圖 6.272 向量圖層 Symbology 設定後

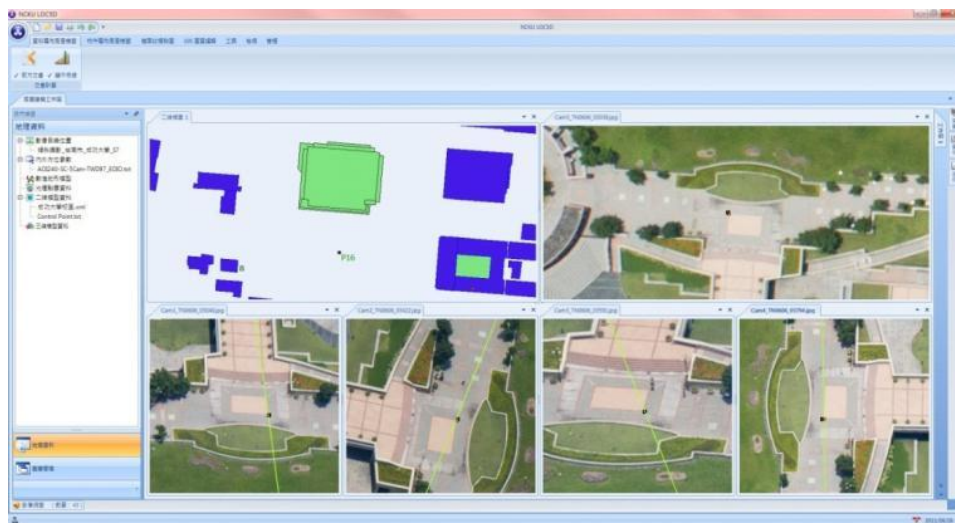


圖 6.28 共軌點量測顯示核線

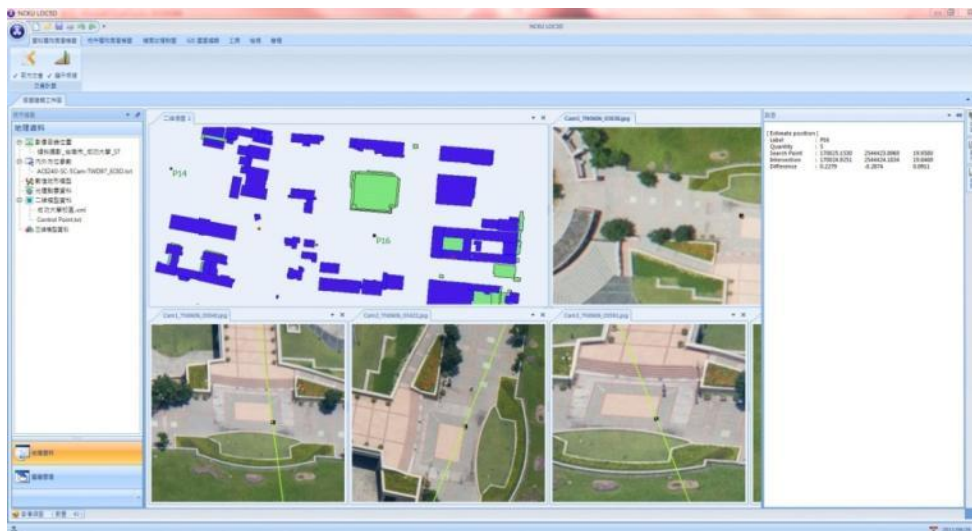


圖 6.29 前方交會

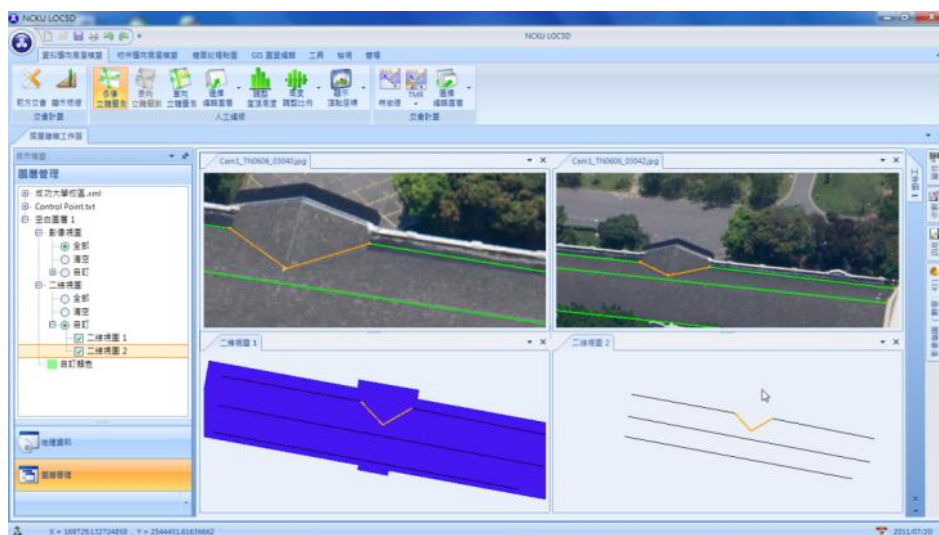


圖 6.30 單像或多像三維數化





圖 6.31 雙(多)螢幕觀測

## 6.4 本章小結

在蒐集國內外空載傾斜攝影技術之沿革歷程文獻方面，得知國際社會先進國家對整合垂直及傾斜攝影之空載攝影系統的發展以經有十年以上，其應用面相當廣泛。而在技術面及應用面之分析可知，此項技術未來在國內之發展必定有相當高之可行性。

在空載傾斜攝影技術應用實例與相關文獻之蒐集。應用面相當多，研究中針對網際網路地圖服務、災害管理、與交通規畫 3 個領域提出探討。相關經驗可供國內防救災之應用提出另一可能選項。完成空載傾斜影像 3D 空間資訊蒐集系統，提供使用者單機作業環境，可透過 GIS 圖資快速搜尋影像，提供攝影測量與三維測繪相關功能。

在空載傾斜影像資料搜尋與瀏覽模組系統雛形之建置方面，本研究開發一 LOC5D 平台，可同時接受任何具有內外方位參數的原始框幅式影像，例如測繪車影像、空載大像幅高解析航照、個人攜行式等近景拍攝影像，有利於整合多時期影像或多感測器間之 3D 資料與屬性之蒐集。

## 第七章 建置空間資訊整合展示平台

本案將運用既有商用三維空間資訊展示平台，針對本案所發展空載傾斜攝影直接定位系統所獲取之影像成果，建立符合開放式三維資訊查詢、管理、分享及展示介面空間資訊整合展示平台，用以展示多平台遙測製圖技術之應用環境。針對發展多元空載傾斜攝影定位系統技術及其應用評估部分，完成如下之工作項目：

### 7.1 完成潛在使用單位之訪談（至少包含 5 個領域）

將針對移動式測繪系統與 3D GIS 整合議題，進行相關應用單位訪談，如地政、土地利用調查、國土安全、防救災、國土及都市規劃等各機關，以瞭解國內各單位對於移動式測繪系統與 3D GIS 應用功能模組的需求，如 2D/3D GIS 圖層檢視功能、3D 場景對比功能、幾何運算功能與模型與貼圖操作等功能，並具體規劃空載傾斜攝影之應用層面，藉以訂定系統功能開發項目。本案總共完成七大領域、九個單位、十位受訪者的訪談工作，所有訪談記錄列於本報告書之附錄 B。下表 7.1 為本次訪談報告所有受訪者彙整之列表：

表 7.1 本訪談報告受訪者列表

領域	單位	姓名	訪談日期
土地利用	內政部國土測繪中心地形與海洋測量課課長	蔡季欣	2011/5/12
航太	經濟部航太工業發展推動小組專案經理	王子豪	2011/5/18
防救災	國家災害防救科技中心助研究員	吳上煜	2011/5/18
測繪領域	農林航空測量所資料課技正	黃誌勇	2011/5/18
	群立科技股份有限公司總經理	徐金煌	2011/5/12
地政	高雄市政府地政局資訊室主任、地政局專門委員	陳惠玲	2011/5/13
國土安全	空軍第 401 戰術混合聯隊照相技術隊 圖資室中校主任、圖資室中尉資訊官	顏哲良 郭彌勳	2011/5/19
	國防部軍備局生產製造中心第 401 廠影像情報所少校所長	江怡洋	2011/5/27
國土及都市規劃	臺北市政府都發局都市測量及資訊服務科股長	陳志丞	2011/5/23

彙整以上訪談成果，歸納各單位對於移動式測繪技術之期許如下：

1. 待解決之問題：

- 甲、整體關鍵問題在於能否有整合攝影與直接定位之完整套裝設備，需易於操作使用，體積重量符合任務需求之載具，而攫取之資料處理程序簡單，並依據使用者依其業務客製化資訊篩選應用軟體，以及符合測量精度規範與提升效率並節省成本。
- 乙、國土測繪中心及高雄市地政局希望此技術能協助土地利用調查，但在取得直接定位之影像後，欲全面進入作業面的關鍵在於開發出簡易使用的軟體，僅需在室內即可進行土地利用判釋，降低大量的外業調查時間與人力，同時有必要評估各平台之極限。
- 丙、3D GIS 部分目前國內 3D 資料仍不夠普及或豐富，運用主要是適用於資料套疊與展示上，而非分析工作，因此對於相關資料格式與服務提供的標準支援，以及系統展示效能要好、直觀易操作，才能顯示出資料的豐富性，同時介面應該要有善、讓政府業務承辦員及一般民眾皆能使用。

2. 預期可能之應用

- 甲、移動式測繪系統在災中緊急災情評估與災後災因調查可發揮快速資料蒐集的好處，可以支援水利單位、農業、林業、環境資源與觀光單位參考使用。
- 乙、3D GIS 可協助建物管理系統或文化資產（例如古蹟）管理、重置、重組等。可比較不同時間與尺度之空間資訊讓使用者間接了解地形與地物間相對關係。在政府對於民眾的溝通、教育或進行公眾議題的討論中，可扮演重要的平台。
- 丙、UAV 可協助觀光業、營造業、天然災害防制、災前監測、海洋污染監測、環境資訊收集、河川砂石盜採的監測、觀測林相、林業資源的調查與監測、攝影業、建築、廣告等。UAV 還可補充傳統航測不足的地方，譬如農航所因為地形或天候無法拍照或不常拍照的地方將可以利用此工具去進行獲取影像資料。由於 UAV 有低空、雲下等的優點，因此在山區，如花蓮、宜蘭等地，使用 UAV 會較傳統航測更易獲得影像。
- 丁、傾斜攝影：直接在傾斜攝影上，判釋出的災害發生地（如

崩塌地、或倒塌的建築物)與直接進行測量。救災時可以提供指揮官更多的資訊、研判搶救災資源之分配。  
戊、空載光達：可協助林務管理。

## 7.2 完成空載傾斜攝影應用層面之規劃，進而評估未來多平台遙測資訊整合系統的全面施行效益與實際成本

首先界定空載傾斜攝影類型，若依照設備拍攝方式，可以分成兩大類：

- 連續性空載傾斜攝影(Continuous Oblique)

以推掃式拍攝(Push Broom)空載傾斜攝影，例如 ADS 40 航測系統中前傾影像及後傾影像(圖 7.1)，以三條線性掃描儀向前、下、後推掃出條帶式影像。但其軌跡數學模式較框幅式影像複雜，且與一般常用之航測工作站不相符，因此較不易推廣其應用。



圖 7.1 ADS 40 航測系統不同視角拍攝方式

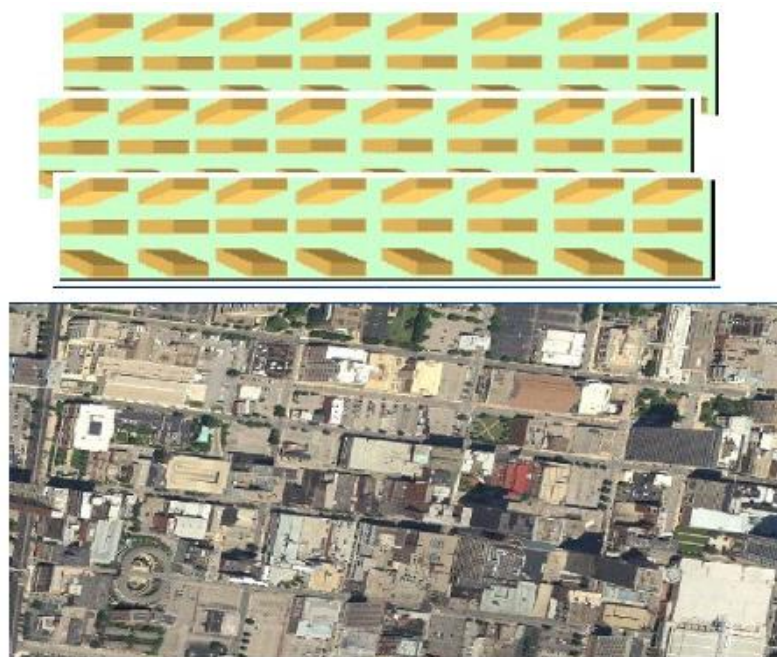


圖 7.2 連續性空載傾斜攝影成像是條帶影像



- 框幅式空載傾斜攝影(Frame-based Oblique Aerial Image)

以框幅式數位相機拍攝之空載傾斜影像，例如本團隊設計之五鏡頭攝影系統。

本案研究的對象是框幅式空載傾斜攝影影像，且影像相對於地面的傾角大，若運用傳統航空攝影測量技術，直接將框幅式空載傾斜攝影影像投影到地面，會造成很大的影像扭曲變形。框幅式空載傾斜攝影影像本身縮放與影像之間轉換，存在很多技術上的限制，解決方式是在 3D GIS 環境下，利用共線條件式(collinearity equations)進行解算求解影像空間與物空間相互關聯性，但需要針對框幅式空載傾斜攝影影像發展特殊的演算法與軟體功能。

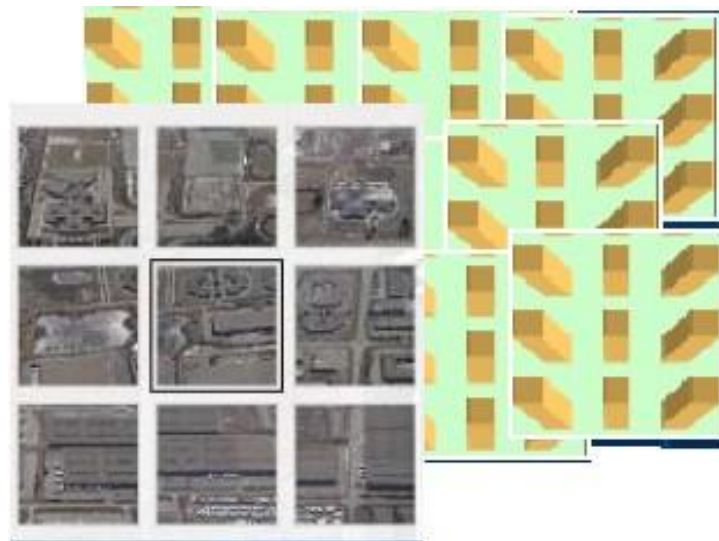


圖 7.3 框幅式空載傾斜攝影成像方式是中心投影影像

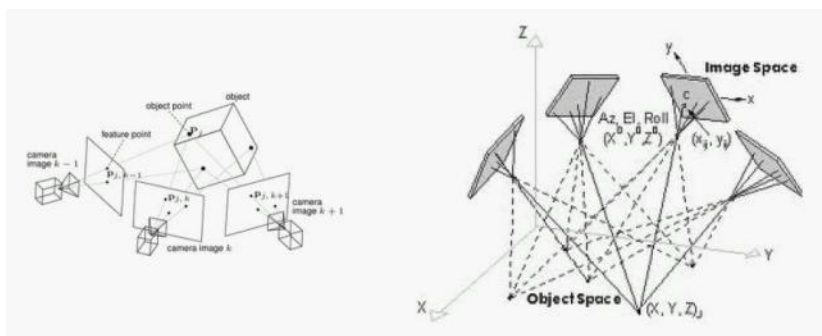


圖 7.4 空載傾斜攝影影像進行影像空間與物空間轉換

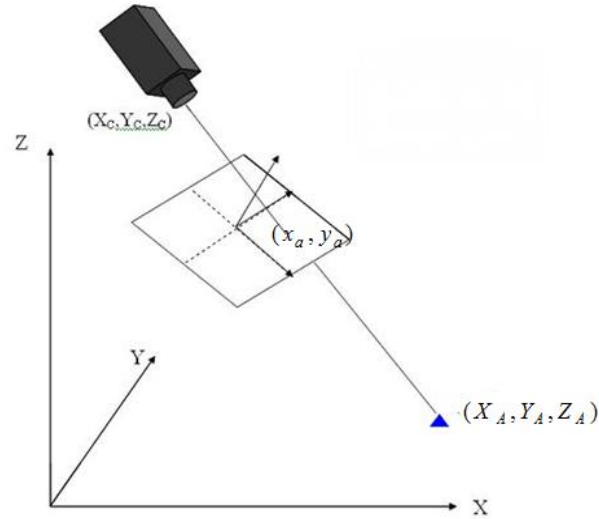


圖 7.5 傾斜影像與物空間轉換示意圖

當空載傾斜攝影影像經過率定後，獲得內方位參數與拍照瞬間的外方位參數時，即可利用共線條件式來建立拍照當時的物像轉換關係，藉此獲得空載傾斜影像上每一特徵點在 3D GIS 系統上的坐標，如圖 7.5 所示。

$$\begin{aligned} x_a - x_p + \delta_x &= -f \frac{m_{11}(X_A - X_C) + m_{12}(Y_A - Y_C) + m_{13}(Z_A - Z_C)}{m_{31}(X_A - X_C) + m_{32}(Y_A - Y_C) + m_{33}(Z_A - Z_C)} \\ y_a - y_p + \delta_y &= -f \frac{m_{21}(X_A - X_C) + m_{22}(Y_A - Y_C) + m_{23}(Z_A - Z_C)}{m_{31}(X_A - X_C) + m_{32}(Y_A - Y_C) + m_{33}(Z_A - Z_C)} \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\begin{cases} \delta_x = x_a (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \delta_y = y_a (k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \\ r = \sqrt{(x_a - x_p)^2 + (y_a - y_p)^2} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos(\varphi) \cos(\kappa) \\ m_{12} &= \sin(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) + \cos(\omega) \sin(\kappa) \\ m_{13} &= -\cos(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\omega) \sin(\kappa) \\ m_{21} &= -\cos(\varphi) \sin(\kappa) \\ m_{22} &= -\sin(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) + \cos(\omega) \cos(\kappa) \\ m_{23} &= \cos(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cos(\kappa) \\ m_{31} &= \sin(\varphi) \\ m_{32} &= -\sin(\omega) \cos(\varphi) \\ m_{33} &= \cos(\omega) \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (7.3)$$

上式中  $x_a$ 、 $y_a$  表示空載傾斜影像上的像坐標， $\delta_x$ 、 $\delta_y$  表示相機所率訂出的在  $x$  方向與  $y$  方向的透鏡畸變差分量， $k_1$ 、 $k_2$  為透



鏡畸變差參數， $f$  為成像時的焦距， $x_p$ 、 $y_p$  為相機的像主點坐標，在理想情況下，像主點坐標被定義為視準軸與像平面之交點坐標。 $X_A$ 、 $Y_A$ 、 $Z_A$  為對應的 3D GIS 上物坐標， $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $Z_c$  為透視中心之三維坐標， $m_{11} \sim m_{33}$  為相機姿態角  $\omega$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$  所組成之旋轉矩陣元素， $\omega$  為對 X 坐標軸之旋轉角， $\varphi$  為對 Y 坐標軸之旋轉角， $\kappa$  為對 Z 坐標軸之旋轉角， $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $Z_c$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$  也稱為遠端操控攝影機之外方位參數。 $X_A$ 、 $Y_A$ 、 $Z_A$  即為本階段欲求之 3D GIS 系統上的坐標。

透過文獻研究與上述潛在使用單位之訪談，對於空載傾斜攝影影像應用有以下幾項需求：

- 如何不扭曲空載傾斜影像下，在現有應用系統上套疊相關 GIS 圖層？
- 如何透過現有影像伺服器架構來存放或供應空載傾斜影像？
- 針對特定目標，如何快速搜尋所需要的空載傾斜影像及觀看角度？
- 希望原有 GIS 功能(套疊,數化..等)也能針對空載傾斜影像操作。
- 能利用空載傾斜影像來更新 GIS 資料庫(例如：土地利用)。

針對空載傾斜攝影影像特性與應用，考量到快速定位與保持空載傾斜攝影影像幾何上不扭曲，因此需要建置一個三維地理資訊系統(3D GIS)作為開發平台。考慮到軟體開發元件的功能完整性、可擴充性以及後續推廣應用成本，本案選擇國內本土 GIS 廠商藏識科技公司所開發 3D GIS 開發元件 PilotGaea GisDK，來開發空載傾斜攝影影像展示與應用系統。

PilotGaea GisDK 由一組 COM 元件組成，提供 C++、VB、VB.NET、C# 等語言進行二次系統開發使用，提供處理 GIS 議題時所需的類別與方法，包含：2D / 3D 地圖檢視器、圖層與圖素操作、幾何運算、3D 場景物件、攝影機與 3D 場景控制、模型與貼圖操作等；支援點、線、面各式的幾何物件，求距、交集、聯集、包含等常使用到的幾何運算方法；提供便利與豐富的 GIS 查詢與分析功能，如屬性搜尋、幾何搜尋、套疊分析、環域分析等，利用這些方法，輕鬆駕馭 GIS 分析議題；GisDK 也能用開發特定的圖資處理流程、圖資編輯、檔案格式轉換、坐標轉換等各

式各樣的系統；提供增加、刪除、修改、查詢圖資的方法，可以用來發展單機型的圖資編輯系統；提供開啟各種常見的 GIS 格式檔案的方法，如 SHP、MIF、DWG 等，可以用來發展單機型特定圖資處理流程的系統。

除了上述基本 GIS 圖資操作與分析功能外，單機版空載傾斜攝影影像展示與應用系統功能至少能對大量空載傾斜攝影照片進行影像搜尋、管理、展示，並且結合空載傾斜攝影定位定向輔助資訊，提供基本 GIS 操作功能。系統需求歸納如下：

- (1). 建置具有查詢功能的空載傾斜影像瀏覽平台，觀看單張空載傾斜影像時，固定視角不能旋轉，但可以利用影像縮放及平移功能查看影像內容。若平移到影像外，則自動切換到下一視角相似的影像。
- (2). 具有視角旋轉及平移功能鈕，藉此切換不同視角(向左看、向右看)以及不同位置(向前一張、向後一張)影像。
- (3). 可在空載傾斜影像上套疊 GIS 向量圖資。
- (4). 在觀測空載傾斜影像時，畫面中有一縮圖同時展示二維向量圖與目前影像之觀測方向及範圍，以便瞭解影像所在位置。
- (5). 基本 GIS 操作功能，包括坐標測量、距離測量、面積計算，以及套疊、編修產製 GIS 圖資等功能。

而開發空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢系統，將具備以下基本功能：

- (1). 以網路瀏覽器為介面，需具備基本 GIS 操作功能：圖面比例式放大縮小、視窗放大縮小、圖面平移、旋轉等功能。
- (2). 可透過網路地圖服務(Web Map Service)標準，整合外部空間資料倉儲系統及空間資料服務。
- (3). 可以在 GIS 介面上，針對空載傾斜攝影照片進行影像搜尋與展示。

針對多平台遙測資訊系統之整合，未來計畫的應用包括如下：

- (1). 整合車載與個人攜帶式移動遙測製圖系統拍攝之影像。
- (2). 可根據地標或門牌號碼查詢空載傾斜攝影影像。

(3). 產製生成 CityGML 格式，以便匯入仿真數碼城市之中。

### 7.3 空載傾斜攝影影像查詢與展示程式相關演算法之研發

為了達到上述空載傾斜攝影影像查詢與展示程式單機版與網際網路版的功能，本案選用 PilotGaea GisDK 進行二次開發。而空載傾斜攝影影像查詢與展示程式主要由兩大部分組成，第一部分為資料結構建立階段程式，負責解析影像參數並將影像之間的關係解算出來，提供展示程式執行階段使用，第二部分則為 3D GIS 圖台上展示介面程式，亦即主要執行階段程式。

#### 一、資料結構建立階段程式

資料結構建立階段程式的架構如圖 7.6 所示，包含主要的分析引擎管理者(AnalyseEngine)、參數分析引擎(ParamEngine)、影像分組(FilterEngine)、傾斜影像物件(ObliquePhotoEngine)、傾斜影像角度分析物件(AngleAxisRange)、垂直影像物件(OrthoPhotoEngine)與影像叢集分析(GroupEngine)。

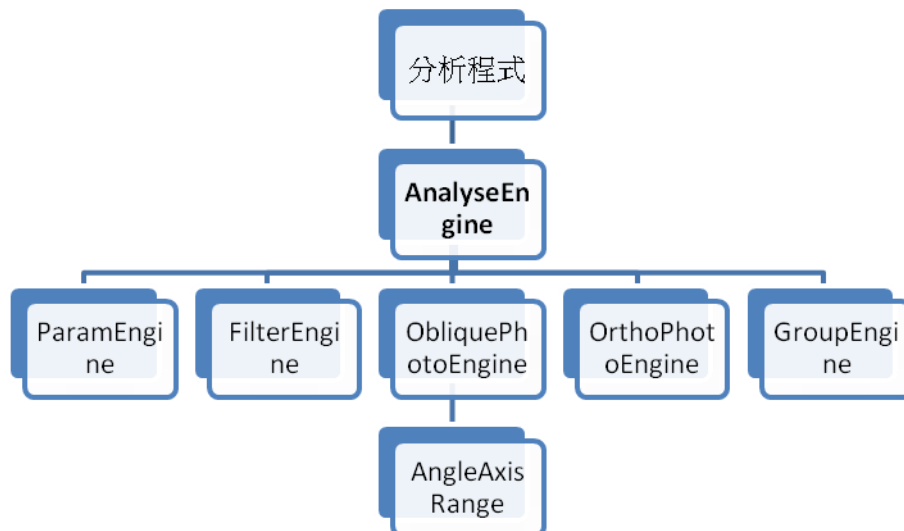


圖 7.6 資料結構建立階段程式架構圖

#### 1. AnalyseEngine：

為主要的分析引擎管理者，由它分配給其他的分析引擎處理。AnalyseEngine 元件讀入參數檔案後，將主控底下所有分析類別，分派不同的分析任務，並將分析完的結果回給主程式去使用。此類別主要的流程是先將影像參數讀入並將影像分為垂直和傾斜影像兩部分，然後再對個別的影像進行分析，找出影像之間的關聯，最後再將

影像通通放回影像族群中，做最後一次的組群影像分析，然後將分析結果傳回給主程式使用

## 2. ParamEngine :

參數分析引擎，將影像參數放入記憶體結構內。ParamEngine 主要用來解析並讀入影像參數檔，並將影像參數放入記憶體物件中，以提供之後程式的判斷和使用。此分析引擎讀取影像拍攝位置及影像的 FOV，利用共線條件式計算出影像於地表上的投影位置。爾後將參數檔中的 Heading,Roll,Tilt 將轉成 V 和 Up 兩單位向量，V(向量)是攝影機正前方所看的方向，Up(向量)是攝影機正上方的方向，V 與 Up 是互相垂直的兩向量。

## 3. FilterEngine :

FilterEngine 此物件主要是用來篩選影像，將影像分別篩選出垂直影像和傾斜影像兩部分，程式利用影像參數取得當時拍攝時的角度，藉由拍攝的角度將影像分類為垂直和傾斜兩大類別組，其中垂直影像定義為 0~15 度、傾斜影像定義為 30~60 度，且在篩選時避免錯誤參數，將事先篩選掉影像拍照時向上的向量。

## 4. ObliquePhotoEngine :

傾斜影像分析物件，主要分析傾斜影像之間的關係。首先是對所有的傾斜影像進行分析，並分類出四組方向的正向，爾後對每張影像分配一組影像的正向（此部分由 AngleAxisEngine 分析引擎負責），且找出每張影像之間前後左右的關係，並找出在同一個位置，從左方 90 度和右方 90 度角觀測的影像。

## 5. AngleAxisRange :

AngleAxisEngine 此物件主要是在將傾斜影像分析並分成四組向量，首先將所有的當時拍攝影像的角度向量，全部投影至 2D 的平面上，並計算每個向量與其他向量之間的夾角，當所有的夾角都算出後，取出當中最大的四個夾角，此時便可以將所有向量分為四組向量組，並取角度區間中的中心角度為此向量組的角度，如此將完成影像的分組。

## 6. OrthoPhotoEngine :

垂直影像分析物件，此物件主要分析垂直影像之間的關係，找出每張垂直影像之間的東西南北關係，因為垂直影像不具有方向性，因此不會有前後左右的關係。

為了要尋找垂直影像之間的東西南北關係，程式中會先取出其中一張影像，判斷此影像與其他影像之間是否有相交，若有相交，則再計算兩影像的中心點與東西南北向量的夾角，將符合 15 度以內的影像蒐集起來，最後將兩影像中心點最近的那張影像判斷為最佳的影像。

## 7. GroupEngine :

影像叢集分析，主要分析所有影像之間的聯集範圍，程式將所有的影像投影至地表的區塊，將所有投影的區塊全部聯集組合成一個最大的矩形範圍，提供主程式在系統開始執行時，攝影機將自動飛至此矩形範圍的中心點，讓系統使用者便於尋找影像。

### 二、主要執行階段程式

主要執行階段程式的架構如圖 7.7 所示，包含主要的程式引擎管理者(Engine)、攝影機物件(Camera)、影像顯示物件(CustDrawLayer)、傾斜攝影的主邏輯部分(Logic)、傾斜影像角度分析物件(AngleAxisRange)與基本量測工具(BasicTool)。

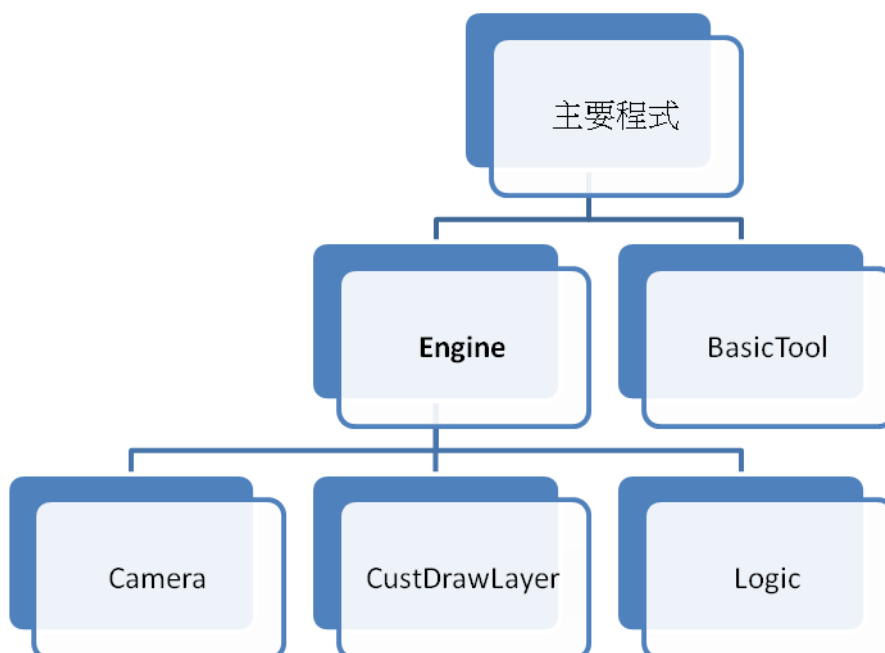


圖 7.7 主要執行階段程式架構圖

## 1. Engine :

為主要的程式引擎管理者，圖台內傾斜影像偵測的功能部分都透過此物件來執行，由它分配功能給其他的物件，此物件的主要提供自動偵測功能和提供影像間前後左右和左方旋轉和右方旋轉觀測位置的功能介面，讓前端程式呼叫功能。

## 2. Camera :

攝影機物件，掌控程式的畫面移動，主要提供程式開始時畫面的移動動畫和切換影像時的移動動畫。

## 4. CustDrawLayer :

負責將影像繪至地表顯示的物件，並可將向量圖層套疊至影像上，此物件主要提供顯示影像，將影像投影至底表上的四個點位算出後，將影像繪出四點組成的多邊形形狀。

## 5. Logic :

傾斜攝影的主邏輯部分，也是程式核心的判斷元件，裡面主要提供兩個主要的判斷邏輯，第一個是判斷當前攝影機觀看方向是否有垂直影像，另一個是判斷當前攝影機觀看方向是否有傾斜影像。

在判斷垂直影像邏輯方面，程式首先抓取當前的攝影機狀態設定，判斷攝影機的位置是否位於偵測區內，此偵測區的判定是將影像族群的範圍內和影像拍攝的高度的上下兩百公尺為設為影像偵測區，如在偵測區內，則抓取攝影機觀看方向的向量，將此向量投影至地表上，找出是否有包含此攝影機向量內的影像，最後再將計算篩選出來的每張影像的影像中心點與攝影機向量的位置距離，距離最短的那張影像則為判斷為最佳影像。

在判斷傾斜影像邏輯方面，程式先抓取當前的攝影機狀態設定，判斷攝影機的位置是否位於偵測區內，此偵測區的判定是將影像族群的範圍內和影像拍攝的高度的上下兩百公尺設定為影像偵測區，如在偵測區內，則抓取攝影機觀看方向的向量，並找出最接近此觀看方向的正向，找出屬於此正向的圖組，並將攝影機的向量投影至地表，找出包含此攝影機向量內的影像，最後計算篩選出來的每張影像的影像中心點與向量的位置距離，距離最短的那張影像則為偵測的到的最佳影像，如此正向未找到影像則繼續用其他正向判斷，直到四個正向都判斷完為止。

## 6. BasicTool :



基本量測工具，包含了 3D GIS 的量測點位位置、線段長度、面積大小、高度量測和清除畫面等基本量測功能。

#### 7.4 空載傾斜攝影影像單機版三維地理資訊應用系統開發工作

一、為了整合國內空間資訊產業之發展，並促進國內其他產業與精密慣性測量儀之結合應用，本案運用 3D GIS 二次開發元件(平台)PilotGaea GisDK，來進行開發單機版三維地理資訊應用雛形系統，本案已經運用 PilotGaea GisDK 開發完成單機版空載傾斜攝影三維地理資訊應用系統雛形，其功能特點有：

1. 系統可自動判斷最佳觀測影像及偵測選擇。
2. 系統提供垂直影像及傾斜影像觀測的選擇。
3. 系統提供場景影像比對功能。
4. 系統可對觀測影像平移及旋轉的操作。
5. 系統可套疊 GIS 各式向量圖層至影像上。

二、為了達成空載傾斜攝影影像快速搜尋、管理、展示系統，本案發展出相關的演算法：

1. 影像分析運算
  - (1).影像分組：將此次飛行的影像作分出垂直影像及傾斜影像組，並分析出此次飛行的主要四個拍攝角度。
  - (2).關聯性分析：將垂直影像及傾斜影像分析出影像之間的前後左右關聯影像。
2. 影像自動偵測

系統會自動偵測當前的使用者攝影機位置，並找出此圖組離攝影機較近的影像，系統會自動旋轉且還原影像拍攝時的位置並繪出影像和套疊路網向量。
3. 影像自動偵測設定

系統可設定是否自動偵測，讓使用者可自由於圖台中瀏覽。
4. 垂直影像及傾斜影像選擇

使用者可選擇觀看垂直影像或是傾斜影像，如於觀測模式中，系統會自動切換當前最佳影像。
5. 旋轉及平移

系統使用當前的觀看方向，向前、後、左、右及左方和右方觀看方向搜尋是否有位置符合的影像拍攝點且與此觀測方向相同的影像，有的話便漸層式繪出影像，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。

## 6. 影像比對

提供使用者比對當前影像及背景影像對應功能。

## 7. 回到初始點

系統提供使用者回到初始觀測點。

### 三、單機版三維地理資訊應用雛形系統畫面展示

1. 系統開始執行時，會先讀取參數檔，進行影像分析計算，將影像篩選出垂直影像及傾斜影像兩部分，並找出垂直影像之間的東西南北之間的關係，且對傾斜影像分組出四個主要拍攝方向的影像並找出傾斜影像之間的前後左右關係及從左方及右方觀看的相對應照片。並計算影像在地表的涵蓋範圍、影像中心距離等相關的向量運算。
2. 當計算完成進入系統後，系統會自動飛至所有傾斜影像範圍的上空(如圖 7.8 所示)，此時還可以選擇顯示拍攝點位，讓使用者更了解傾斜影像的拍攝中心的位置(圖 7.9)。



圖 7.8 單機版系統一開始執行的畫面

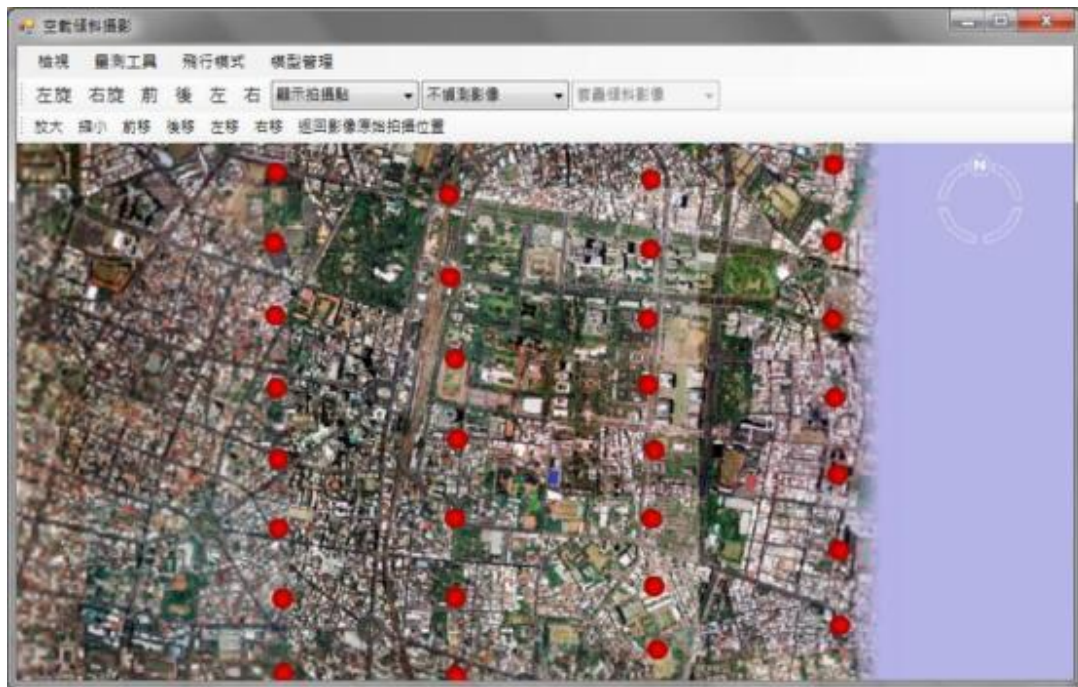


圖 7.9 單機版系統中顯示拍攝點位

3. 系統自動判斷功能：此功能會自動偵測當前的使用者攝影機位置，判斷使用者設定觀看為傾斜影像或是垂直影像，並根據當前使用者所看的位置中取出最靠近此位置的影像，如果有的話，系統會自動旋轉至影像拍攝位置並將影像繪出至地表上(圖 7.10 錯誤! 找不到參照來源。)，傾斜影像展示時可以同時套疊路網向量圖層，藉由向量圖層之套疊，使用者觀看影像時便能清楚了解影像的位置(圖 7.11)。



圖 7.10 單機版系統的自動套疊影像功能。





圖 7.11 在單機版系統中套疊空載影像與路網圖層

4. 設定是否偵測垂直影像功能：系統提供使用者選取觀看垂直影像或是觀看傾斜影像兩種模式，當使用者選取偵測垂直影像後，在系統再次執行自動偵測功能時就會依照使用者的設定去讀取垂直影像。(圖 7.12)

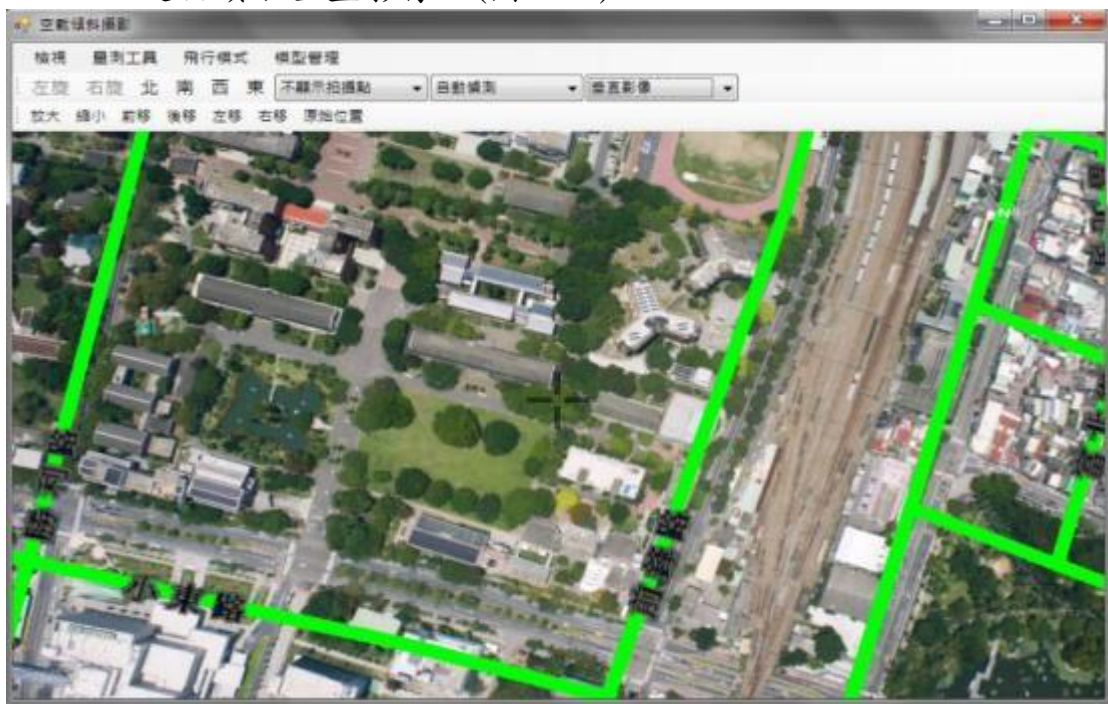


圖 7.12 單機版垂直影像自動偵測功能。

5. 旋轉功能：觀看影像的模式如果為傾斜影像時，系統將於圖

組中搜尋出跟此觀看影像投影相交且為正在觀看影像的向左(右)方觀測方向的影像，如果有此影像的話將影像繪出至地表上，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。若當前的觀看影像模式為垂直影像時，則回到原本的 3D 場景，此乃因垂直影像無觀測方向導致。



圖 7.13 單機版向左(右)旋轉功能。

6. 移動功能：觀看影像的模式如果為傾斜影像時，系統將於使用者當前的觀看方向，向前(後/左/右)方向搜尋是否有影像拍攝點，並判斷系統移動後的視域是否有影像且有相同正向，有的話便將影像繪出至地表上，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。若當前的觀看影像模式為垂直影像時，則尋找此圖組中此影像北(南/西/東)方方位的距離最近的影像，有此影像的話影像繪出至地表上，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。





圖 7.14 單機版前(後/左/右)移動功能

7. 場景比對功能：系統利用雙畫面的分割方式呈現場景比對，左右兩邊畫面能夠同步化的移動，使用者可利用此功能進行空載影像與原始背景底圖的比對。

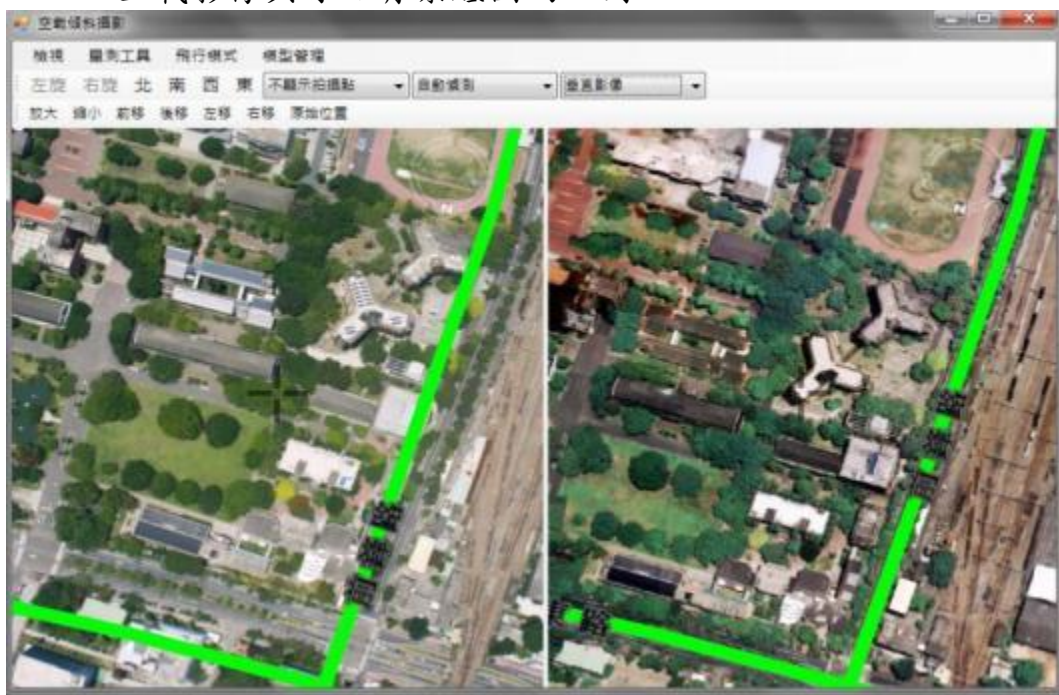


圖 7.15 單機版場景比對，左為套疊空載影像之效果，右為原始底圖。

8. GIS 基本量測功能：系統提供基本的 GIS 量測功能，包含量測位置、長度、面積以及高度等功能，使用者可利用此功能得知道路長度、建物面積等資訊。



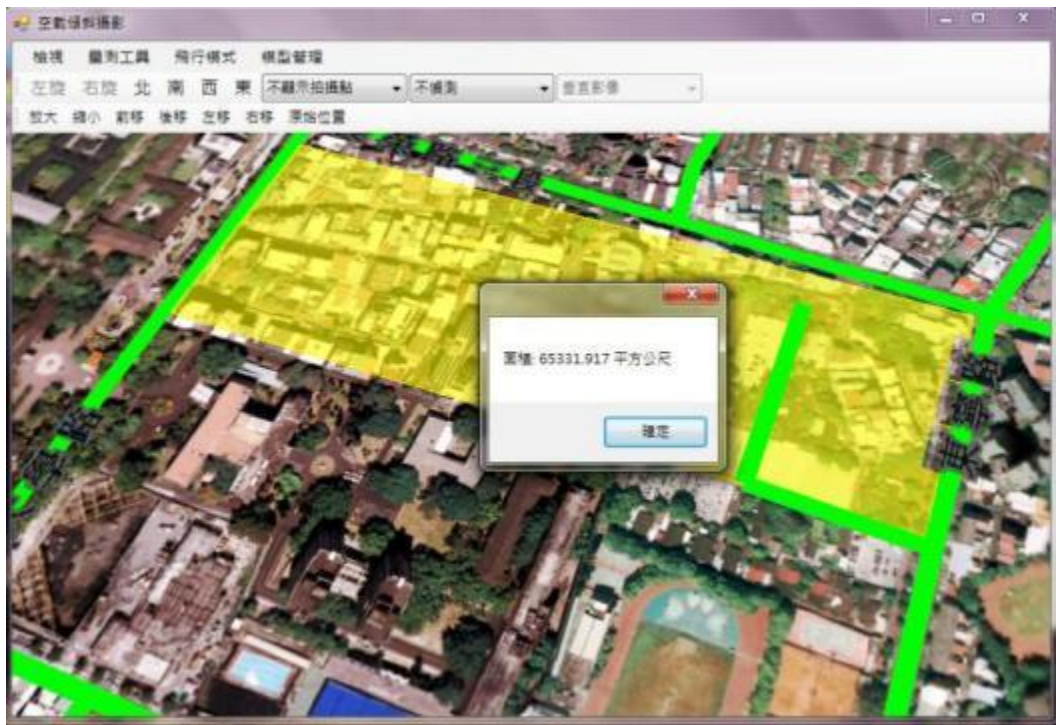


圖 7.16 單機版 GIS 量測功能：量測面積

9. 模型建置功能：系統提供模型檔(\*.x 格式)的匯入功能，並讓使用者可自行於場景建置模型、進行模型基本的編修，如平移、縮放、旋轉功能。

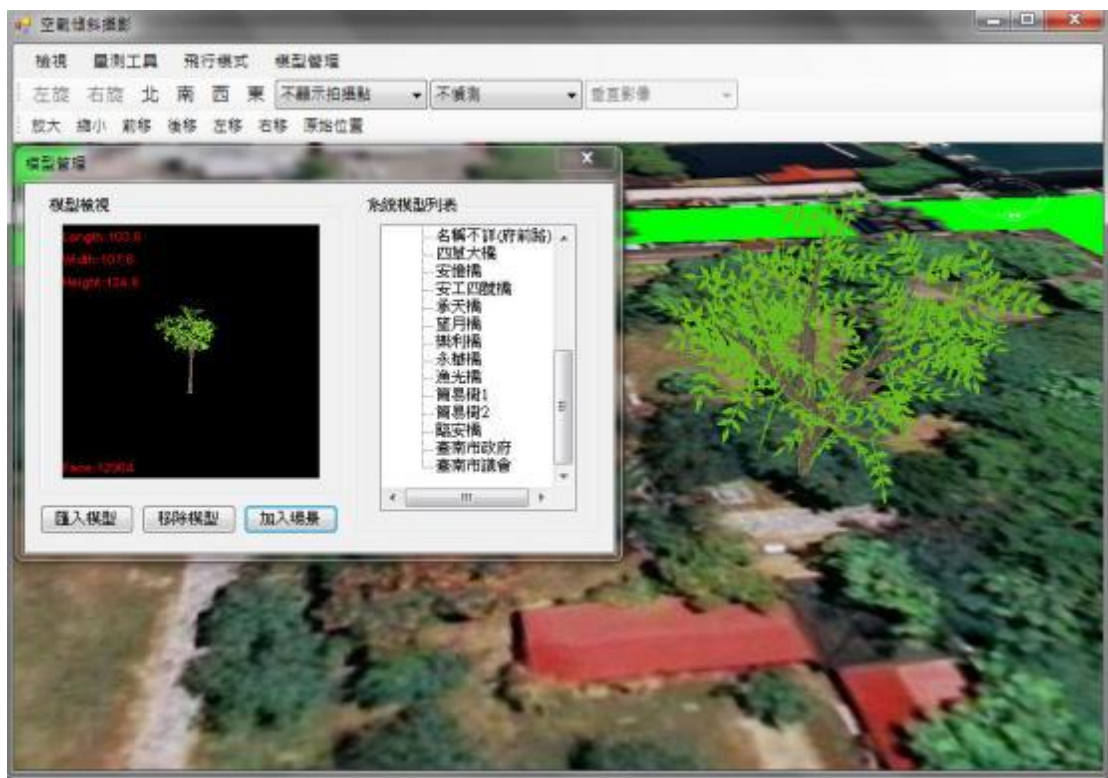


圖 7.17 單機版模型建置功能

## 7.5 空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢雛形系統開發工作

為了提升空載傾斜攝影影像支援決策之效能，以及對外提供一般民眾查詢使用服務，本案將運用 Web GIS 系統二次開發平台(元件)PilotGaea Universe，其為網際網路上高效能的 3D GIS 應用系統開發平台，提供了一組 COM 元件，可用於開發欲處理之議題的專屬系統，在 Universe 中，不止是地形，所有在 2D 的向量圖素也都能依照 2D 的樣子展繪於 3D 環境中，所有的圖素都擁有原來的屬性供分析使用，也保有原 GIS 系統上的圖層與幾何關係，PilotGaea Universe 還提供了比 2D GIS 系統更強大的 3D GIS 分析。PilotGaea Universe 的 API 支援直接讀取 KML、SHP、DWG、GeoTiff 等 GIS 常用的向量與影像格式，直接將讀入的資料覆披於場景中；並已通過國際 OGC 組織 WMS、WFS 雙認證，可以在 Universe 中直接連結網路上的 WMS 及 WFS 服務，套繪資料至場景中。

PilotGaea Universe 架構為 Client/Server 架構相關空間資料都是存放在伺服器端進行管理與發佈，目前本案已經針對研究測試區域(台南市區)收集相關空間資料包括 DTM、彩色正射影像、交通路網以及地名地標等 GIS 圖層，透過 PilotGaea Universe 發佈圖資服務，使用者只要在 Client 安裝免費的 UniverseClient，便可以透過網際網路操作 3D GIS 應用系統。本案所開發空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢雛形系統，將具備以下基本功能：

- A. 以網路瀏覽器為介面，需具備基本 GIS 操作與量測功能：圖面平移、旋轉、量測位置、長度、面積以及高度等功能。
- B. 在 GIS 介面上增加操作相片查看功能，針對空載傾斜攝影照片進行影像搜尋與展示。
- C. 藉由場景比對功能讓使用者可以輕鬆的進行空載影像與背景的比對
- D. 以網路瀏覽器為介面，使用者可以自行加入模型或向量圖資的套疊。

關於空載傾斜影像網際網路展示查詢雛形系統介面雛形如下圖 7.18 所示，系統介面中右列列出既有的空載傾斜影像清單，可以讓使用者點選空載影像。當使用者選擇其中一張空載影像時，則會在最中間主畫面區域顯示該張影像，影像的左上角為用來控制影像的工具列選項，工具列提供切換空載傾斜影像視角功能，同時可以套疊路網與地名地標 GIS 圖層等選項。



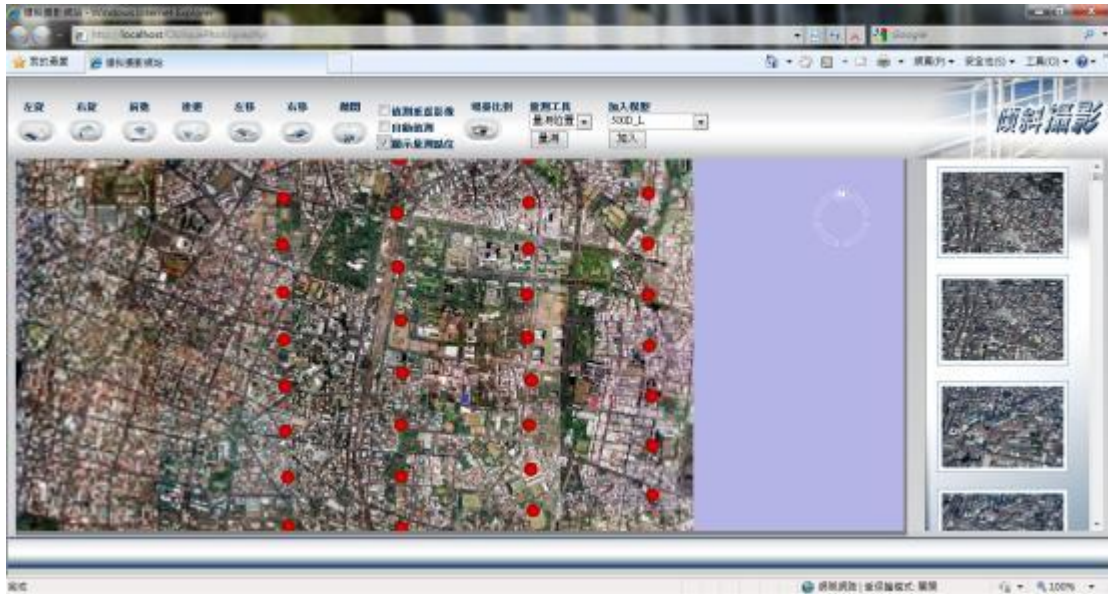


圖 7.18 空載傾斜影像網際網路展示查詢雛形系統介面

#### 一、網際網路展示查詢雛形系統畫面展示

1. 網頁啟動時會先跟伺服器(Server)取出分析過後的影像資料，伺服器會將參數檔讀入並做分析運算(同單機版邏輯)，將影像篩選出垂直影像及傾斜影像兩部分，並找出垂直影像之間的東西南北之間的關係，且對傾斜影像分組出四個主要拍攝方向的影像並找出傾斜影像之間的前後左右關係及從左方及右方觀看的相對應照片。
2. 當計算完成進入系統後，系統會自動飛至所有傾斜影像範圍的上空，並在主畫面中顯示拍攝點位、右列以小圖方式顯示所有空載影像清單。

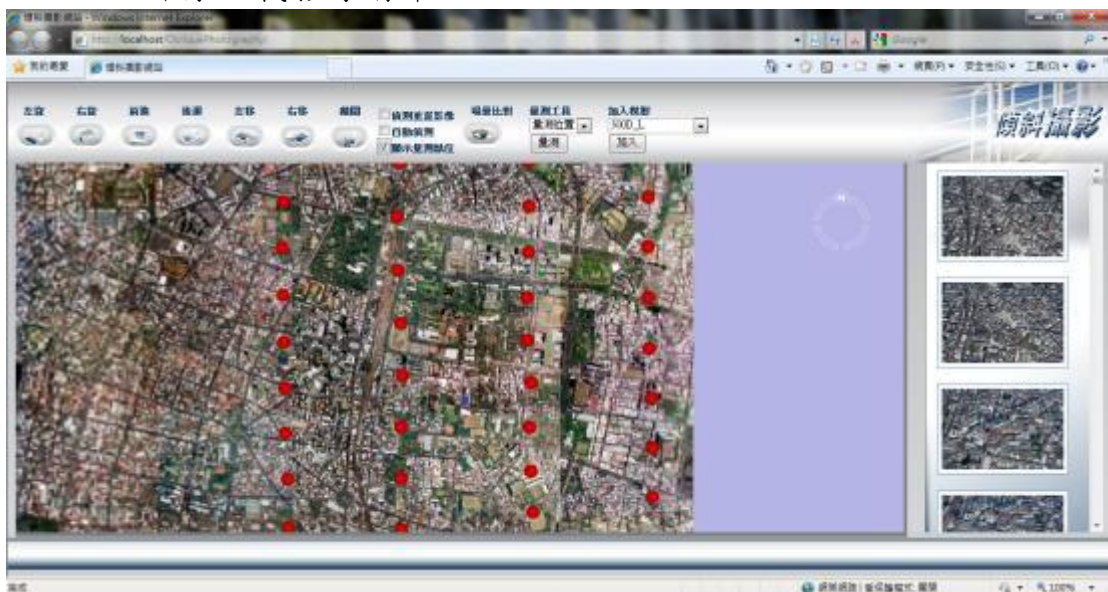


圖 7.19 網際網路展示查詢系統一開始執行的畫面

3. 系統自動判斷功能：當使用者在系統中移動式視角，系統會自動偵測當前的使用者的視角位置，判斷使用者設定觀看模式為傾斜影像或是垂直影像，並根據當前使用者所看的位置中取出最靠近此位置的影像，如果有的話，系統會自動旋轉至影像拍攝位置並將影像繪出至地表上，並套疊路網向量。

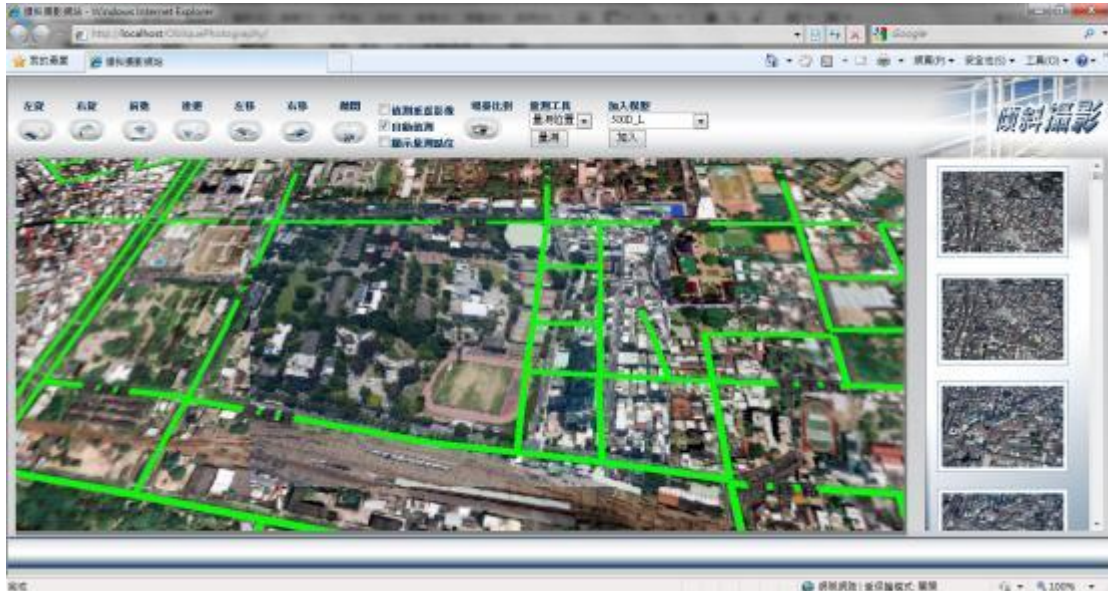


圖 7.20 網際網路系統自動判斷影像功能並套疊路網圖層

4. 影像模式選擇：系統提供使用者選取觀看垂直影像或是觀看傾斜影像兩種影像模式，當使用者選取偵測垂直影像後，在系統再次執行自動偵測功能時就會依照使用者的設定去讀取垂直影像。

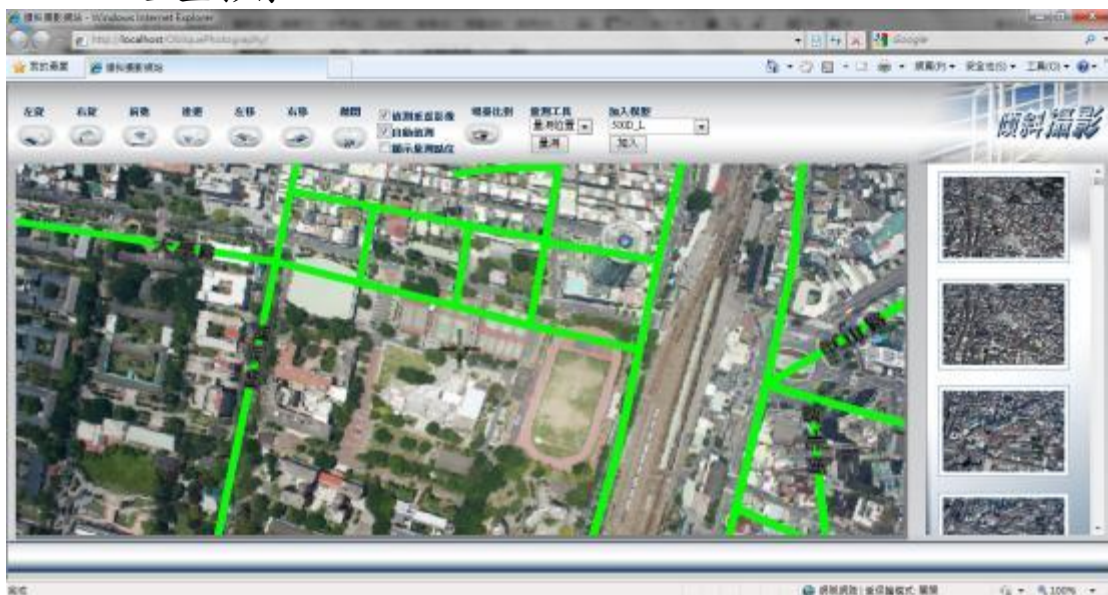


圖 7.21 網際網路系統垂直影像自動偵測功能



5. 旋轉功能：觀看影像的模式如果為傾斜影像時，系統將於圖組中搜尋出跟此觀看影像投影相交且為正在觀看影像的向左(右)方觀測方向的影像，如果有此影像的話將影像繪出至地表上，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。若當前的觀看影像模式為垂直影像時，則回到原本的 3D 場景，此乃因垂直影像無觀測方向導致。



圖 7.22 網際網路系統向左(右)旋轉功能

6. 移動功能：觀看影像的模式如果為傾斜影像時，系統將於使用者當前的觀看方向，向前(後/左/右)方向搜尋是否有影像拍攝點，並判斷系統移動後的視域是否有影像且有相同正向，有的話便將影像繪出至地表上，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。若當前的觀看影像模式為垂直影像時，則尋找此圖組中此影像北(南/西/東)方方位的距離最近的影像，有此影像的話影像繪出至地表上，如沒有則回到原本的 3D 場景中，不顯示相片。

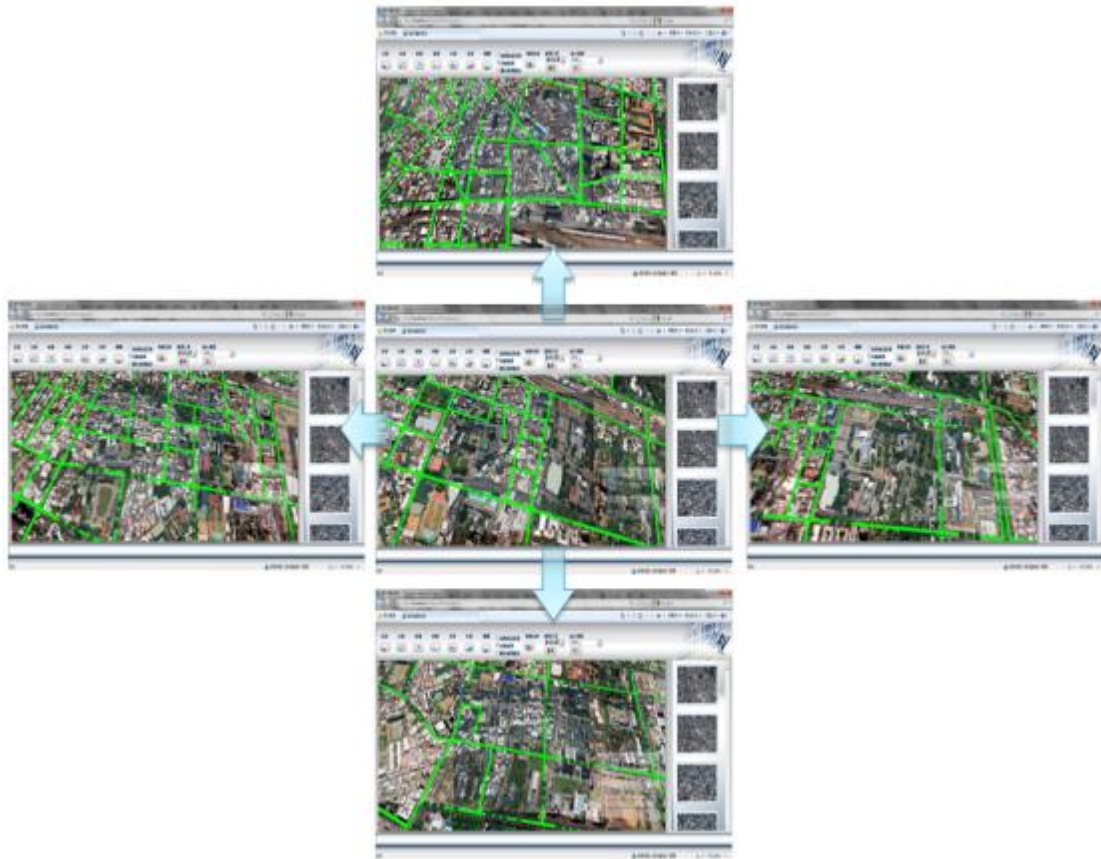


圖 7.23 網際網路系統前(後/左/右)移動功能

7. 相片查看功能：在網際網路系統中，右側顯示影像清單，當使用者點選右側影像清單的影像時，系統將自動飛至該影像拍照的位置及姿態並顯示出該影像且套疊向量圖層。

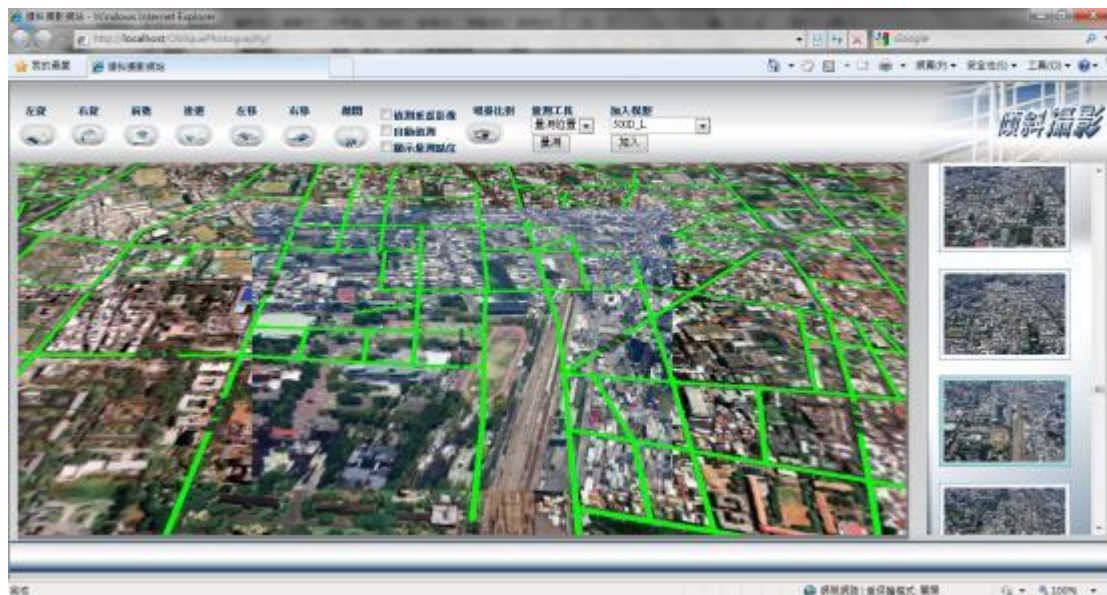


圖 7.24 網際網路系統之相片查看功能



8. 場景比對功能：系統利用雙畫面的分割方式呈現場景比對，左右兩邊畫面能夠同步化的移動，使用者可利用此功能進行空載影像與原始背景底圖的比對。



圖 7.25 網際網路版場景比對功能，左為套疊空載影像之效果，右為原始底圖

9. GIS 基本量測功能：系統提供基本的 GIS 量測功能，包含量測位置、長度、面積以及高度等功能，使用者可利用此功能得知道路長度、建物面積等資訊。

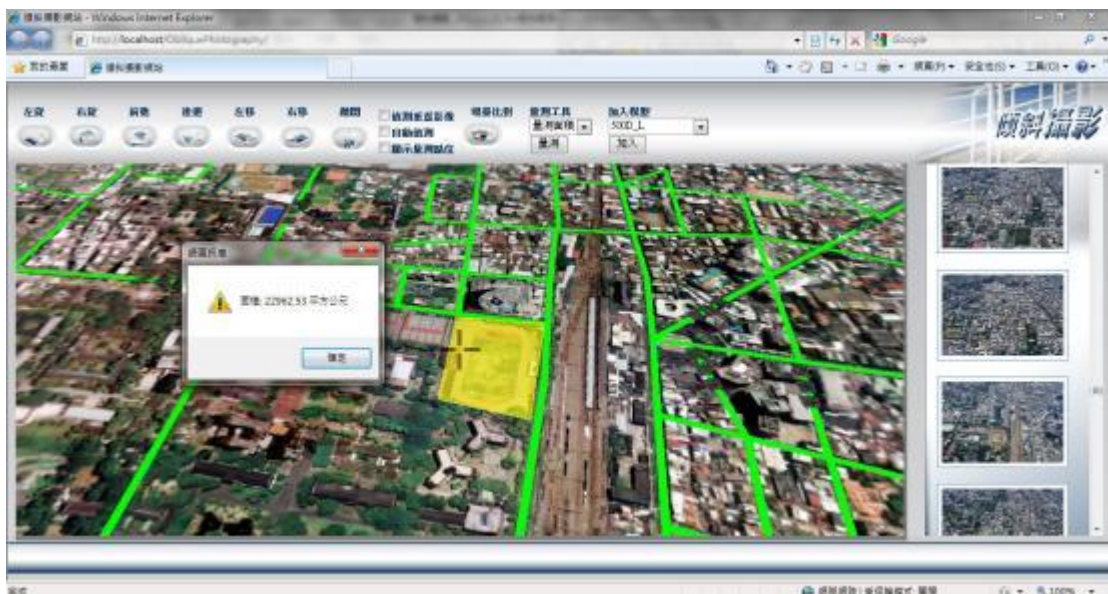


圖 7.26 網際網路系統之 GIS 量測功能：量測面積

10. 模型建置功能：系統提供模型檔(\*.x 格式)的匯入功能，並讓

使用者可自行於場景建置模型、進行模型基本的編修，如平移、縮放、旋轉功能。

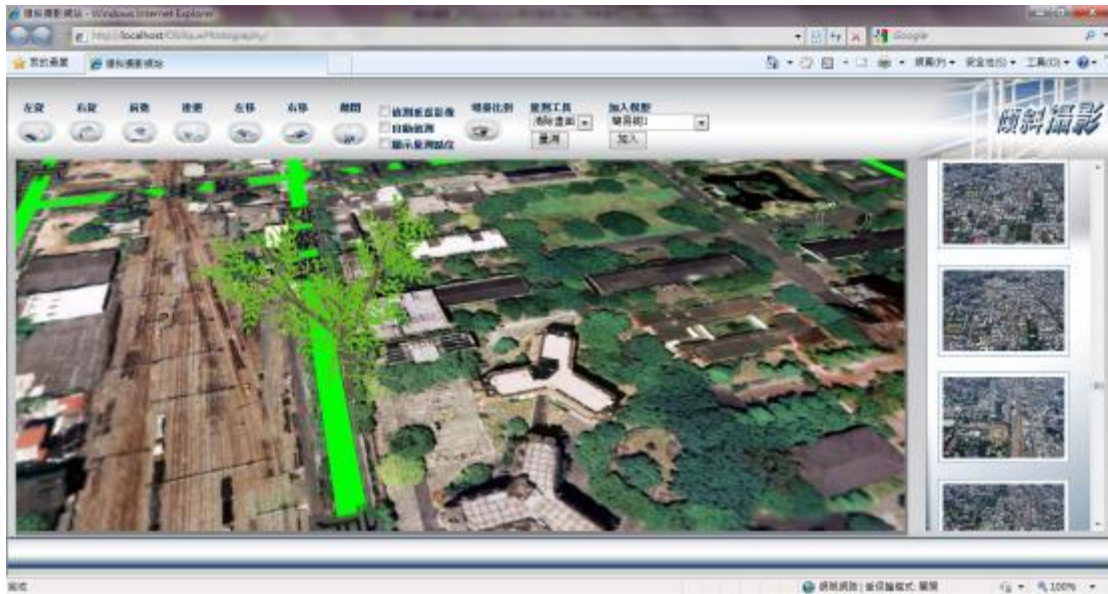


圖 7.27 網際網路系統模型建置功能

為了考量到後台 3D GIS 環境可以兼具互操作性 (Interoperability)，研究團隊參考 OGC 所定義的網路地圖服務 (Web Map Service) WMS 標準，規劃了一個適用於空載傾斜攝影影像的網路三維地圖服務協定 (暫定稱為：WPVSPlus 服務標準)，其設計理念是希望從擷取網路中三維地理資訊系統所散佈的資料庫地理資訊及屬性資料，以產生客製化的地圖影像，以 JPEG、GIF 或 PNG 等格式儲存，而這個地圖影像可以與空載傾斜攝影影像相互套疊，也就是定義客戶端 (應用程式) 如何向 3D GIS 伺服器端要求圖資與伺服器端如何對客戶端表現圖資的標準化方法。WPVSPlus 伺服器端是透過 http 和使用者互動，因此使用者是透過 URL 傳送 CGI (Common Gateway Interface) 參數和 WPVSPlus 伺服器端互動。

WPVSPlus 服務標準，包括三項服務類型：GetLayers、GetView 及 Query 三種服務。GetLayers 是取得圖層服務基本狀態資訊、GetView 是取得三維地理資訊系統投影影像、Query 則是取得傾斜投影的查尋結果，相關參數設計與案例說明如下：

### GetLayers

#### Request

```
?SERVICE=WPVSPLUS&  
REQUEST=GETLAYERS
```

#### Response

```
City,River
```

#### 描述

GetLayers 命令用來取得所有的圖層,傳回值為一個字串,以‘,’  
隔開 Layer 的名稱

## GetView

### Request

```
?SERVICE=WPVSPLUS&  
REQUEST=GETVIEW&  
CRS=EPSG:4326&  
POI=120.210040,22.995090,759.423919&  
PITCH:38.913477&  
YAW:177.300952&  
ROLL:-2.701430&  
HFOV:39.457067&  
VFOV:26.991349&  
WIDTH:6000&  
HEIGHT=4000&  
OUTPUTFORMAT=IMAGE/GIF&  
TERRAIN=NO  
LAYERS=City,River
```

### Response

Image Data

### 描述

取得傾斜投影的畫面,參數說明如下

**CRS:**可有可無,若有,一定要 EPSG:4326,代表 WGS84 經緯度

**POI:**攝影機的坐標,坐標系統為 WGS84 經緯度

**PITCH、RAW、ROLL:**攝影機的姿態

**HFOV:**攝影機水平的視角

**VFOV:**攝影機垂直的視角

**WIDTH:**攝影機產出照片的寬度(Pixel)

**HEIGHT:**攝影機產出照片的高度(Pixel)

**OUTPUTFORMAT:**傳回影像的格式,可用的選項為

IMAGE/GIF、IMAGE/PNG、IMAGE/JPEG、IMAGE/TIFF

**TERRAIN:**可有可無,代表傳回的影像資料是否要畫上地型資料,內定為”NO”,可用的選項有 YES、NO

**LAYERS:**代表要輸出的 LAYER,用‘,’隔開

## Query

### Request

```
?SERVICE=WPVSPLUS&  
REQUEST=QUERY&  
CRS=EPSG:4326&
```

POI=120.210040,22.995090,759.423919&  
PITCH:38.913477&  
YAW:177.300952&  
ROLL:-2.701430&  
HFOV:39.457067&  
VFOV:26.991349&  
WIDTH:6000&  
HEIGHT=4000&  
POINT:200,100&  
DELTA:5&  
LAYERS=City,River

### Response

Name=台南市,面積=2191

### 描述

取得傾斜投影的查尋結果,參數說明如下

**CRS:**可有可無,若有,一定要 EPSG:4326,代表 WGS84 經緯度

**POI:**攝影機的坐標,坐標系統為 WGS84 經緯度

**PITCH、RAW、ROLL:**攝影機的姿態

**HFOV:**攝影機水平的視角

**VFOV:**攝影機垂直的視角

**WIDTH:**攝影機產出照片的寬度(Pixel)

**HEIGHT:**攝影機產出照片的高度(Pixel)

**POINT:**點擊的點位,坐標為照片單位,以左上為(0,0)

**DELTA:**點位置附進幾點內的東西都算命中

**LAYERS:**代表要輸出的 LAYER,用','隔開

## 7.4 本章小結

本章完成七個領域、九個單位、十位受訪者的訪談工作，瞭解到國內各單位對於移動式遙測製圖系統的期許與可能之應用，尤其是在災害管理與土地利用兩部分，有明確與急迫的任務需求。因此，本團隊未來將針對此二方向之應用進行規劃與研究。

本章利用現有 GIS 相關技術或產品，透過二次程式開發工作，建立了多平台感測器直接定位雛形系統，完成單機版與網路版三維地理資訊應用系統雛形，如 2D/3D GIS 圖層檢視功能、3D 場景對比等功能，可根據單位需求與開放程度，提供不同層次之功能。相較於前節所開發之空載傾斜影像 3D 空間資訊蒐集系統，偏向三維製圖與資料蒐集，而本工作所開發之系統則適用於 GIS 整合應用服務，並且可以透過三維方式呈現，未來則可以朝向兩者之整合發展。



## 第八章 評估建置個人攜帶式定位系統之可行性

### 8.1 個人攜帶式定位系統之規劃與設計

個人攜帶式定位系統基礎於移動遙測製圖技術，並結合近景攝影測量、衛星即時定位原理等，發展一套可攜式全景環場的個人攜帶式定位系統。考量原移動遙測製圖技術進行測繪時所遭遇的問題，例如進行測繪時的車前安裝、軟硬體之穩定性與電力測試、測繪時考量的行車路線與地理環境等，皆為其可能產生缺陷的因素。本團隊提出之改良概念建立全景影像，並結合目前 e-GPS 即時定位來達成原移動遙測製圖技術之目的，有效降低移動遙測製圖技術之構造複雜化與電力供應，且不使用 INS 與最輕型之數位單眼相機進而提升直接定位之適地與適應性，測繪不再受限於窄巷或山區等地理環境因素，進而達到於災區能快速建立全景定位與三維模型。在文獻中 (Ellum, 2001) 也曾提出改良的背包式測繪系統，延續此研究發展一套可攜式測繪系統，經由率定與數學模型獲得定位必要之外方位元素。

### 8.2 評估影像模組與定位定向系統機電整合之可行性

使用數位單眼相機為極輕巧型(含電池 290 克)：Sony Nex-3，解析力為  $4592 \times 3056$  像元，感光元件大小  $23.4 \times 15.6$  公厘。本團隊設計並建立正六邊形之可攜式平台，裝置六台相機固定在每一邊上，此一位置考量全景影像之重疊。相機之快門共同連接於中心桿下方之統一快門環，使得相機能同步拍攝。中心桿建置 e-GPS 及時連結國土測繪中心之虛擬參考站(VRS)網型解算，並建構區域性定位誤差改正模型得以快速獲得系統中心坐標。經由實驗與測繪測試結果，從平台架設與單點即時定位約在 5~6 分鐘可完成且為公分等級，符合本團隊當初結合使用進而改善原使用 GPS 構想。整體而言，平台符合個人可攜式與結構簡化的目標，並能第一時間到達災區和山區進行測繪之可行性的，系統整體建置如圖 8.1 所示(系統大小  $40 \times 40 \times 35$  公分，高度約 2.4 公尺)。





圖 8.1 系統整體建置

### 8.3 建立個人攜帶式定位系統之相機透鏡畸變率定校正方式

本團隊進行校正方式，先於校園建立之室內相機率定場，使用圓盤拍照方式產生好的交會角度，如圖 8.2 所示，並結合使用商用軟體 Australis 之自動化率定，使環場影像之六台相機能快速進行內方位與相對位置之率定與校正(Fraser, 1997; Li, 2010)。內方位解算之整體精度平均在 0.20 pixels(圖 8.3)。而環場影像之相對方位率定場與系統率定之如圖 8.4、圖 8.5 所示。

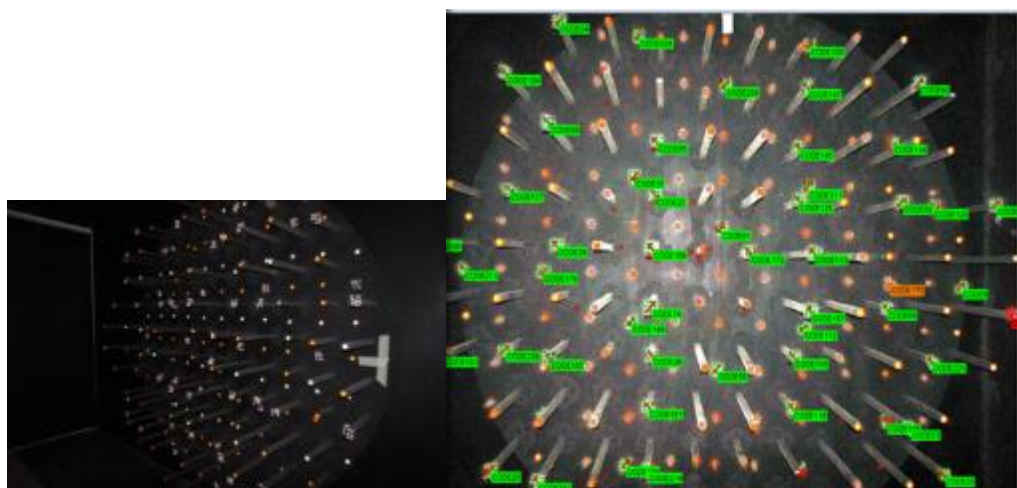


圖 8.2 室內相機率定場之圓盤

**METRIC CALIBRATION PARAMETERS**

Resolution = 4592 x 3056 pixels

Pixel width = 0.0051mm, Pixel height = 0.0051mm

	VALUE	STANDARD ERROR
Principal distance	c = 15.8540mm	0.001mm
Principal point offset in x-image coordinate	xp = -0.0688mm	0.001mm
Principal point offset in y-image coordinate	yp = 0.2443mm	0.000mm
3rd-order term of radial distortion correction	K1 = 2.50988e-004	1.3130e-006
5th-order term of radial distortion correction	K2 = -1.32011e-006	2.0795e-008
7th-order term of radial distortion correction	K3 = -9.81883e-010	1.0150e-010
Coefficient of decentering distortion	P1 = 7.3696e-005	9.186e-007
Coefficient of decentering distortion	P2 = -5.1299e-005	6.941e-007

**Measurement Accuracy Summary**

Scale set?

Estimated accuracy of 3D point coordinates (RMS 1-sigma level)

X  units, or

Y  units, or

Z  units, or

Overall  units, or

Estimated accuracy of image referencing  pixels (RMS 1-sigma level)

Quality of self-calibration (if applied)

圖 8.3 Australis 解算及率定結果



圖 8.4 室內環場影像之相對方位率定場



**Measurement Accuracy Summary**

Scale set?

Estimated accuracy of 3D point coordinates (RMS 1-sigma level)

X  mm, or

Y  mm, or

Z  mm, or

Overall  mm, or

Estimated accuracy of image referencing  pixels (RMS 1-sigma level)

Quality of self-calibration (if applied)

圖 8.5 相對方位率定之拍攝與整體解算

個人攜帶式定位系統拍攝與軟體 Australis 解算之整體精度在公厘等級以下，總共四個測站，每一測站旋轉 90 度得以產生好的交會成果進行解算。本案共有五站解算之相對位置，其相機相對距離成果約為 17.4 公分，中誤差約在 1~2 公厘 (表 8.1)。

表 8.1 相對方位之距離解算的成果

相對距離	第一站	第二站	第三站	第四站	第五站
Mean(公分)	17.47	17.52	17.44	17.43	17.40
STD(公分)	0.25	0.23	0.16	0.09	0.21

相對方位則以第六台相機為主，其他相機相對於第六台的相對方位，將方位旋轉矩陣表示為上三角矩陣(王之卓，1990)，針對每台相機在不同測站的相對方位矩陣應相同，利用上三角矩陣的三個元素值來平差每台相機相對方位並獲得其誤差。實驗結果矩陣值之差異皆為小數四位以下，而反解算三旋轉角之角度誤差約為 0.02 度，則以 20 公尺為基準之定位精度約為 7 公厘 (圖 8.6、表 8.2)。

$$R_{CB} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \longrightarrow R_{CB} = \begin{bmatrix} & a_2 & a_3 \\ & & b_3 \\ & & & \end{bmatrix}$$

圖 8.6 簡化上三角之運算矩陣

表 8.2 相對方位之旋轉矩陣與角度平差後之結果

相對方位 (相對 6)	第一台 →6	第二台 →6	第三台 →6	第四台 →6	第五台 →6
旋轉矩陣 $\sigma_0$	$2.04 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{-4}$	$3.84 \times 10^{-4}$
角度 $\omega \sigma_0$ (度)	0.026	0.018	0.009	0.021	0.024
角度 $\varphi \sigma_0$ (度)	0.017	0.020	0.020	0.014	0.019
角度 $\kappa \sigma_0$ (度)	0.030	0.044	0.016	0.042	0.031



## 8.4 建立個人攜帶式定位系統之率定演算法

個人攜帶式定位系統的率定演算法之整體流程如下依序進行：(1)相機內方位率定，(2)相機相對方位確立，(3)相機與 e-GPS 關係之建立及坐標系統的統一，(4)實地測繪與全景外方位解算。故此系統率定之量測重心在建立以平台載體坐標系統之下的 e-GPS 與環場相機之位移與方位關係。其數學模型推導關係著坐標系統的確立和坐標轉換。e-GPS 即 WGS84 系統之設定地心為原點，而相機的原點為投影中心，藉由當地坐標系統，即檢定場中心點為原點，和個人攜帶式定位系統(載體坐標系統)即 e-GPS 相位中心，進行坐標轉換。而坐標轉換的方式是利用當地水平坐標系統為個人攜帶式定位系統坐標轉換基準(尤瑞哲，2003；Li, 2010)，轉為個人攜帶式定位系統中心坐標後計算固定臂與方位，如圖 8.7。接著藉由室外大型率定場進行個人攜帶式定位系統實際測繪，如圖 8.8 建立統一坐標系統下的整體系統關係。

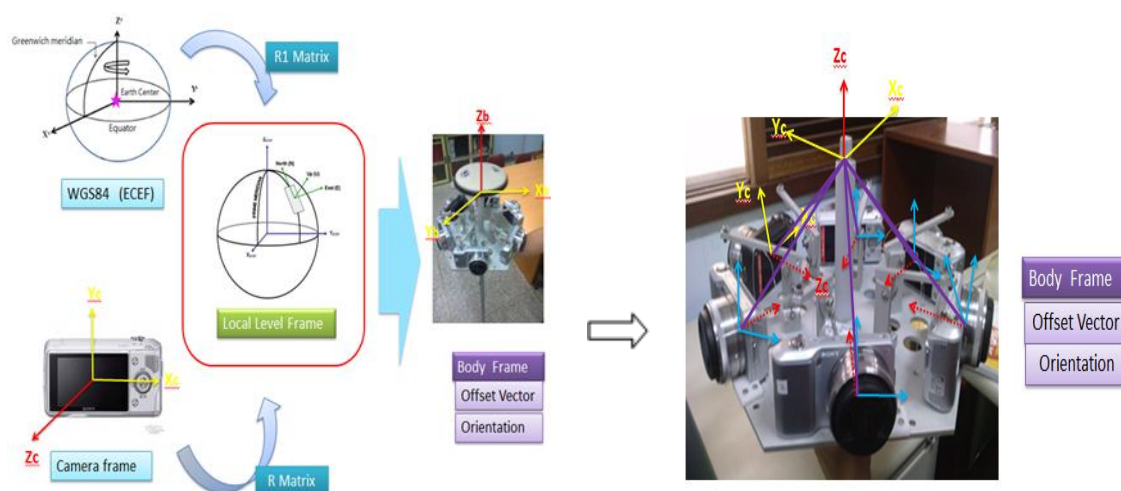


圖 8.7 坐標系統之統一與轉換關係



圖 8.8 室外大型率定場(實驗)

其數學模型和坐標系統間的關係參照式(8.1)及圖 8.9，並利用空中三角原理進行光束法平差，即決定實際拍攝測站數、影像重疊連結點、外方位未知觀測方程式建立，解算並快速恢復全景之外方位元素式(8.5)，進而達到後續直接定理定位的目的(Ellum, 2001)。

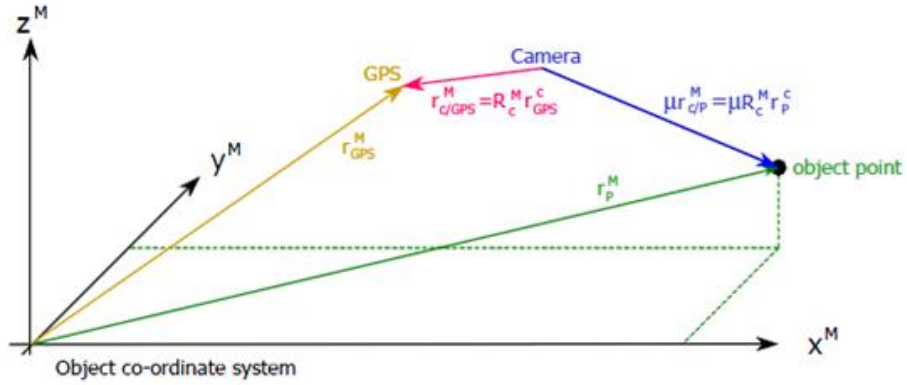


圖 8.9 系統關係建立(Ellum, 2001)

$$r_p^c = \mu^{-1} [R_M^c (r_p^M - r_{GPS}^M) + r_{GPS}^c] \quad (8.1)$$

M:當地坐標系統，C:相機坐標系統，  
GPS:平台中心 e-GPS 接收坐標，P: 拍攝物點坐標

$r_p^M$  : 在當地坐標系統下所拍攝之物點坐標向量

$r_{GPS}^M$ : 在當地坐標系統下之平台中心坐標向量

$r_p^C$  : 在相機坐標系統下之物點像坐標向量

$R_M^C$  : 將當地坐標系統轉至相機坐標系統之旋轉矩陣

將拍攝關係(8.1 式)展開整理為近景共線式 (8.2):

$$\begin{cases} x_p = -f \frac{r_{11}(X_P - X_{GPS}) + r_{12}(Y_P - Y_{GPS}) + r_{13}(Z_P - Z_{GPS}) + r_{GPS}^c}{r_{21}(X_P - X_{GPS}) + r_{22}(Y_P - Y_{GPS}) + r_{23}(Z_P - Z_{GPS}) + r_{GPS}^c} \\ y_p = -f \frac{r_{31}(X_P - X_{GPS}) + r_{32}(Y_P - Y_{GPS}) + r_{33}(Z_P - Z_{GPS}) + r_{GPS}^c}{r_{21}(X_P - X_{GPS}) + r_{22}(Y_P - Y_{GPS}) + r_{23}(Z_P - Z_{GPS}) + r_{GPS}^c} \end{cases} \quad (8.2)$$

其中，經由上述率定 PMMS 系統關係，我們已知系統間六台相機與平台之平移量與方位( $r_{C1-6}^{EGPS}$ ,  $R_{C1-6}^{EGPS}$ )，經由式(8.3)、(8.4)將影像共線式改寫為 PMMS 平台共線式(8.5)，透過平差計算求解平台方位( $R_L^{EGPS}$ )，再推算回各相機之外方位進而建立全景之定位關係(式 8.6)。



$$r_{GPS}^c = -R_{EGPS}^{c1\sim6} r_c^{EGPS} (x,y,z \text{ 平移向量}) \quad (8.3)$$

$$R_M^{c1\sim6} = R_{EGPS}^{c1\sim6} R_L^{EGPS} = K_{11} r_{11} (\text{改為平台方位}) \quad (8.4)$$

平台方位共線式：

$$\begin{cases} x_p = -f \cdot \frac{Kr_{11}(X_p - X_{EGPS}) + Kr_{12}(Y_p - Y_{EGPS}) + Kr_{13}(Z_p - Z_{EGPS}) + x}{Kr_{31}(X_p - X_{EGPS}) + Kr_{32}(Y_p - Y_{EGPS}) + Kr_{33}(Z_p - Z_{EGPS}) + z} \\ y_p = -f \cdot \frac{Kr_{21}(X_p - X_{EGPS}) + Kr_{22}(Y_p - Y_{EGPS}) + Kr_{23}(Z_p - Z_{EGPS}) + y}{Kr_{31}(X_p - X_{EGPS}) + Kr_{32}(Y_p - Y_{EGPS}) + Kr_{33}(Z_p - Z_{EGPS}) + z} \end{cases} \quad (8.5)$$

$$\text{全景之方位: } R_M^{c1\sim6} = R_{EGPS}^{c1\sim6} R_L^{EGPS}$$

$$\text{全景之投影中心: } r_{c1\sim6}^M = r_{EGPS}^M + R_{EGPS}^L r_{c1\sim6}^{EGPS} \quad (8.6)$$

## 8.5 研擬個人攜帶式定位系統之效能驗證方式

為了驗證本團隊之個人攜帶式定位系統之效能發揮，我們將採取兩種方式。包括使用大型檢定場之測繪來檢定，並同時進行測繪車之測繪，利用已知高精度的大量控制點來檢核此個人攜帶式定位系統所解算之全景外方位參數；再者則前往山區或災區之實際測繪，選擇測繪車較難進入之地區來驗證此研究之初衷，評估是否確切能達到第一時間進行直接定位之可行與完整性，且與測繪車相當抑或是更高的精度的成果，進而符合改良移動式測繪系統之更好的方式。

(1)大型檢定場之測繪成果：表 8.3、表 8.4。

表 8.3 PMMS 計算平台全景(六相機)之外方位平均誤差評估

➤ (1-1)檢驗點設為已知點：一測站，兩點已知檢驗點			
位置誤差(m)	X	Y	Z
測繪一	0.052	-0.072	-0.059
測繪二	-0.039	-0.021	-0.063
測繪三	-0.022	-0.055	-0.044
方位誤差(deg)	ω	φ	κ
測繪一	-0.039	-0.007	0.137
測繪二	0.016	0.008	0.032

測繪三	0.190	0.001	0.031
-----	-------	-------	-------

表 8.4 PMMS 計算平台全景(六相機)之外方位平均誤差評估

➤ (1-2)檢驗點設為未知點：三測站聯合 ,三點未知連結點			
位置誤差(m)	X	Y	Z
測繪一	0.052	-0.058	-0.053
測繪二	-0.039	-0.008	-0.063
測繪三	-0.023	-0.043	-0.043
方位誤差(deg)	$\omega$	$\varphi$	$\kappa$
測繪一	9.171	0.026	-0.332
測繪二	7.697	-0.446	-0.412
測繪三	9.112	-0.042	-1.568

由檢定結果評估，PMMS 系統輔以兩已知點進行測繪結果，在位置驗證 X, Y, Z 方向約 2~7 公分誤差；系統僅以多測站聯合解算，X, Y, Z 方向約為 1~6 公分誤差，兩種測繪情形精度相當。而方位解算方面，在已知點情形下 X 軸誤差約 0.2 度，Y 軸約 0.01 度，Z 軸約 0.1 度；以多測站未知點解算，X 軸產生較大誤差約 8 度，Y 軸約 0.2 度，Z 軸約 0.6 度，方位穩定性以未知點聯合解算較為不穩定。考量 PMMS 於實際測繪時之方式，將解算的全景外方位進行直接地理定位。

(2) 實際測繪系統比較驗證 如表 8.3：

表 8.3 PMMS 與 MMS 之效能比較驗證表

比較項次	個人攜帶式定位系統	移動式測繪系統
(1)	地區 / 描述	
(2)	可測繪之完整性	
(3)	率定精度(單位) 平移量(固定臂)	
(4)	率定精度(單位) 方位(軸角)	

(5)	直接定位精度 水平/高程(單位)
-----	---------------------

(1) 地區/描述：

市區、巷弄、山區.../實驗場、災區...(附照片)。

(2) 可測繪之完整性：

評估該系統所能測繪之地區範圍，整體測繪時間記錄。

(3) 率定精度：

評估系統整體率定之精度(平移與方向之解算)。

(4) 直接定位之能力：

測繪系統的最終能力之評估，以率定參數成果進行驗證(包括水平、高程與三維之精度)。

## 8.6 評估建立個人通信定位系統之可行性

個人通信設備若搭配使用 e-GPS 衛星即時動態定位系統，採用行動式 (Mobile) 通訊技術取代傳統無線電數據機，只需具備整合封包無線電服務 (General Packet Radio Service, GPRS) 網際網路與國土測繪中心進行數據通訊，快速結合多個虛擬基準站觀測資料並建構區域性定位誤差改正模型，達到優於傳統 RTK 的定位資訊。但是通訊模組與資料接收在通信設備(如：手機)連結國土測繪中心以及軟體界面的安裝和執行，仍需透過申請與收費的流程。故在建立與結合個人通信定位的部分，存在的優勢包括：(1)整體定位系統的設備和裝置減少與操作簡易化，(2)電力供應系統續航力降低，(3)更快與更佳的連線品質與穩定性。而所需加強的部分為(1)即時的服務申請與認可，(2)操作軟體與通信設備的相容性，(3)通信設備支援資料接收格式等問題。

## 8.7 本章小結

本章探討個人可攜式測圖系統之可行性，完成一個測試系統，進行可行性之評估。此系統乃組合多台小型單眼數位相機，固定於特製平台上，構成可環場相機組，再於平台上裝置 GPS 天線連接 eGPS 接收儀，可及時記錄拍攝時之平台位置坐標。為了使個人可攜式測圖系統具有精密定位的功能，本章發展了一套系統率定方法，使得拍攝

得的影像經過率定的程序，即可獲得所有影像的外方位元素。整個率定系統包括內方位及平台系統率定場的建立，以及量測及計算程序及軟體等。本測試系統經由實驗與測繪測試結果，從平台架設與單點即時定位約在 5~6 分鐘可完成，測圖精度可達數公分等級的精度，符合當初結合使用進而改善原使用 GPS 構想。此測圖系統平台符合個人可攜式與結構簡化的目標，並能第一時間到達災區和山區進行測繪之可行性的。

## 第九章 教育訓練及推廣及論期刊

本案執行迄今相關成員所參與之學術活動與發表之文章整理如表 9.1，相關投稿文章資訊請參閱附錄集。

表 9.1 參與國內外學術會議及提送期刊論文情況

項次	會議或期刊名稱	論文名稱	作者	備註
1	ISPRS 2012	The Performance of a Tight INS/GNSS/Photogrammetric Integration Scheme for Land Based MMS Applications in GNSS Denied Environments	朱建勳、 江凱偉、 曾義星、 饒見有	已接受
2	ISPRS 2012	The Performance Analysis of an AKF Based Tightly Coupled INS/GPS Integrated Positioning and Orientation Scheme with odometer and Non-holonomic Constraints	彭錕堯、 林政安、 江凱偉	已接受
3	ISPRS 2012	The Comparative DG Accuracy Analysis of a Land Based MMS Using LC and TC INS/GNSS Integration Schemes	朱建勳、 廖振凱、 江凱偉	已接受
4	2011 年台灣地理資訊學會年會暨學術研討會	運用三維地理資訊系統整合空載傾斜攝影影像	廖泫銘、 饒見有、 任念志、 楊素容	摘要接受
5	ISPRS 2012	The Performance Analysis of a 3D Map Embedded INS/GPS Fusion Algorithm for Seamless Vehicular Navigation in Elevated Highway Environments	李怡萱、 江凱偉	已接受
6	Advanced Science Letters	THE Performance Analysis of a Vehicle Based Mobile Mapping System Using Tightly Coupled INS/GNSS fusion Scheme	江凱偉、 朱建勳、 黃芸玟、 饒見有	已接受 (SCI)



			曾義星	
--	--	--	-----	--

本案執行迄今相關成員所爭取到的國際學術活動整理如表 9.2。

表 9.2 爭取主辦權之國際學術活動

項次	國際學術活動名稱	授權單位	日期	地點
1	ACRS Pre-conference Tutorial Program	ACRS LOC	2011/10/1~2011/10/2	台南
2	International Summer School of Mobile Mapping Technology 2012	ISPRS 總會	2012/6/11~2012/6/15	台南
3	8 <sup>th</sup> International Symposium on Mobile Mapping Technology and International Summer School of Mobile Mapping Technology 2013	ISPRS 總會	2013/4/22~2013/4/29 (Summer school) 2013/4/30~2013/5/2	台南

與本案相關之專利申請如表 9.3 所示，目前已填妥相關申請資料送交成功大學技轉育成中心建檔、並完成委託專利事務所檢索與審查，專利目前已在申請中。

表 9.3 專利申請資料表

項次	專利技術名稱	專利類型	專利國別	申請者	備註
1	自動增刪反傳前饋類神經網路嵌入式 INS/GNSS 整合系統及其方法 /Auto GPFBN Embedded INS/GNSS Integrated system and method	發明	中華民國	江凱偉 陳冠運	已完 成校 內申 請

此外本會已於 100 年 11 月 16 日發函請 貴司 同意於 100 年 12 月 9 日假台南國成功大學 測量及空間資訊學系 2 樓 55208 電腦教室 (上午)，以及 55250 教室(下午)舉辦，辦理一次 50 人次的教育訓練，其課程表如表 9.4 所示。教育訓練可說是整個專案計畫執行是否成功的重要因素之一，尤其是本案屬於專業技術的應用，希望在既有成果

上進一步提升我國自主研製多平台移動遙測製圖設備能力與應用軟體研發能量，厚植未來國際自動化測繪技術競爭力，本案成果除可加速國土規劃外，並藉以培養優質人才、提升學術水準及國家競爭力，故需要搭配設計完善的教育訓練，來推廣多平台移動遙測製圖技術與相關應用軟體。

### 執行成果

本次教育訓練已於100年12月9日於成功大學測量及空間學系舉辦，安排實作及理論課程共計6小時，課程時間表請參閱表9.4、表9.5，授課內容請參閱表2，教育訓練授課講義請參閱附件一。

本次教育訓練參與授課人數共37人，簽到表請參閱附件二，實際授課情形請參閱圖9.1至圖9.4。

表 9.4 課程及授課時間表

日期 時間	12月9日(星期五)
9:00-9:20	報到
9:20-10:40	<p>新解算模式之定位定向演算法之介紹與實作 (55208 電腦教室)</p> <p>講師：江凱偉 助教：劉政岳</p>
10:50-12:10	<p>空間資訊整合展示平台之介紹與實作 (55208 電腦教室)</p> <p>講師：饒見有 助教：黃承德</p>
12:10-13:10	午餐
13:10-15:00	<p>多平台定位技術之歷史回顧與未來發展展望 (55250 教室)</p> <p>講師：江凱偉</p>
15:10-17:00	<p>移動式測繪系統直接定位技術及其應用 (55250 教室)</p> <p>講師：饒見有</p>

表 9.5 教育訓練授課內容表

NO.	課程	授課內容
1.	<p><b>新解算模式之定位定向演算法之介紹與實作</b></p> <p>講師：江凱偉 助教：劉政岳</p>	<p>本課程旨在提供本案所研發的新解算模式定位定向演算法之理論基礎說明與實作，屆時將會透過這套軟體針對時測資料進行計算與相關議題之討論。</p>
2.	<p><b>空間資訊整合展示平台之介紹與實作</b></p> <p>講師：饒見有 助教：黃承德</p>	<p>本課程旨在透過實際系統操作了解空載傾斜攝影及車載攝影測繪系統在三維空間資訊收集之應用。</p>
3.	<p><b>多平台定位技術之歷史回顧與未來發展展望</b></p> <p>講師：江凱偉</p>	<p>本課程旨在提供含個人式、車載、機載與船載多平台定位技術之歷史軌跡進行回顧，同時亦針對多平台定位技術未來發展之展望進行討論。</p>
4.	<p><b>移動式測繪系統直接定位技術及其應用</b></p> <p>講師：饒見有</p>	<p>本課程旨在介紹直接感測器定位之基本原理，包括相關之系統率定程序，例如相機率定、相對方位率定、軸角與固定臂率定等。</p>



圖 9.1 新解算模式之定位定向演算法之介紹與實作授課情形



圖 9.2 空間資訊整合展示平台之介紹與實作授課情形



圖 9.3 多平台定位技術之歷史回顧與未來發展展望授課情形



圖 9.4 移動式測繪系統直接定位技術及其應用授課情形

## 第十章 結論與建議

本團隊執行本案之各項任務時程，遵照本案之工作計畫書預定時程進行，並於 100 年度 4 月起每個月工作專案月報回報至內政部地政司，作為每月進度檢核依據，本團隊各項任務皆如期完成進度。

### 10.1 結論

現有空間資訊系統之效益建構在系統空間及屬性資料時效性以及正確性，並藉此發揮它的功能並表示真實世界的現象。然而，傳統測量以及屬性調查作業從開始收集資料到系統建置完成往往需要半年以上的時間，已不符合科技發展的趨勢與成本效益。近年來測量與空間資訊技術正在逐漸革新，移動遙測製圖系統結合攝影測量製圖的技術與精密整合式定位定向系統，搭配多種的數位影像感測器來收集空間資料，逐步實現快速即時移動式測量及空間資料收集技術。

多平台定位技術未來發展趨勢將依據數位影像系統、整合多元感測器之高精度定位定向系統與不同作業平台不同層面之演化而符合使用者追求使用更少的硬體成本，但獲取而更高的精度與利潤之基本需求而持續演化。未來除積極發展不同平台之移動遙測製圖技術外，更須發展多平台移動測繪系統資料整合架構，提供更有效率的空間資訊採集、分析與應用。目前國內外並無針對多平台直接定位技術作業量身打造之驗收規範與法令規定。為確保未來多平台遙測製圖成果之品質，宜針對多平台所搭載的儀器等級，依儀器規格訂定不同比例尺、各種測繪作業規範，制定標準程序與精度要求等相關事宜。

自主研發的多元感測器定位定向系統在近半的成本下能夠提供與商用系統相似之定位定向精度以供不同平台移動遙測製圖技術之用。同時具備合法引進且不受國際武器輸出許可管制、交貨時間短、規格與精度媲美同等級之商用定位定向系統、提供所有商用系統無法合法產生之原始觀測量、節省採購成本約 40%，與提供精密定位定向系統之硬體與軟體研發人才訓練等特色。

自主研發具備陀螺儀之慣性測量儀系統誤差各系統誤差之率定



模式與演算法，並透過實測與模擬觀測資料驗證其效益。同時更進一步發展適用於使用戰術等級與微機電等級之慣性測量儀含線上率定系統誤差(含偏差與尺度因子)功能之軟體，並顯著的提升定位定向解之穩定性。鑑於目前國內使用多平台移動遙測製圖作業愈發普及，故為了確保未來多平台移動遙測製圖成果之精度，建議針對使用多平台遙測技術參與國家地圖繪製、土地調查與防救災等相關業務作業的系統，透過國際公認的標準測試程序與設備進行多元感測器整合定位定向系統規格測試與分析，以確認系統之性能符合規格與任務之需求。

自主發展之 CAINS-21 軟體引入輪速計、線性約制、航向輔助與高度輔助之改良式鬆耦合架構；具備線上率定技術的閉合式設計，使用者可以依慣性測量儀之性能調整線上回饋修正系統誤差之頻率，可以較傳統商用演算法所使用之架構於 5 分鐘 GNSS 訊號脫落期間之定位定向解提供近 90%之效能提昇。同時更進一步提出智慧型定位定向演算架構將低成本微機電慣性測量儀之定位定向系統(售價約為 40 萬)效能提升至接近使用戰術等級慣性測量儀的參考系統(售價約 180 萬)效能。對於高速動態的移動遙測製圖平台而言，VRS 與 e-GPS 技術面臨之挑戰包含通訊距離之限制、載體運動態之限制、作業環境之限制、成本之限制與移動遙測製圖應用尚不需即時定位。未來可以利用國土測繪中心的 e-GPS 服務發展後處理的 VRS 輔助多元感測器整合定位定向演算法以符合日漸蓬勃多平台遙測應用之高精度需求。

國際上整合垂直及傾斜攝影之多鏡頭空載攝影系統的發展已經有十年以上，其應用面相當廣泛。從技術面及應用面分析可知，未來在國內之發展性必定有相當高。據此，自主組裝此系統之可行性評估，並開發空載傾斜影像 3D 空間資訊蒐集系統，提供使用者透過 GIS 圖資快速搜尋影像，並且可以透過攝影測量技術進行三維測繪。而在國土利用調查之應用方面，亦進行了案例測試與模擬，比較現有土地利用調查流程，發現多平台移動式測繪系統可以提供更多視角的影像協助土地利用之判釋。在測繪車直接地理定位精度分析方面，當 GNSS 訊號良好情況時，絕對定位誤差在水平與垂直方向分別達可達 20/30 公分以內。

為了建置空間資訊整合展示平台，本團隊訪談了七個領域、九個單位共十位受訪者，瞭解到國內各單位對於移動式遙測製圖系統的期許與可能之應用，尤其是在災害管理與土地利用兩部分，有明確與急迫的任務需求。因此，未來將針對此二方向之應用進行規劃與研究，同時計畫中利用現有 GIS 相關技術或產品，透過二次程式開發工作，建立了多平台感測器直接定位雛形系統，完成單機版與網路版三維地理資訊應用系統雛形，如 2D/3D GIS 圖層檢視功能、3D 場景對比等功能，可根據單位需求與開放程度，提供不同層次之功能。相較於前

節所開發之空載傾斜影像 3D 空間資訊蒐集系統，以三維製圖與資料蒐集為目標，本系統則適用於 GIS 整合應用服務，並且可以透過三維方式呈現，未來則可以朝向兩者之整合發展。

自主研發適用不同平台之移動遙測製圖技術為各國發展移動遙測製圖技術之理想目標，本案彙整多平台定位技術之相關資料、合法引進無須出口許可之具備高階光纖陀螺儀之慣性測量儀，並自行研製含軟體之 INS/GNSS 整合式定位定向系統；並進一步評估引進及建立國內慣性測量儀之標準率定程序與開發設計新解算模式之定位定向演算法等與高精度移動遙測製圖系統關鍵技術，並利用這些基礎建置空間資訊整合展示平台。同時針對規劃發展空載傾斜攝影定位系統技術與建置個人攜帶式定位系統之可行性初期評估與規劃，期進一步提升我國自主組裝多平台移動遙測製圖設備能力與研發能量，厚植未來國際自動化測繪技術競爭力。相關成果除可加速國土規劃外，並藉以培養優質人才、提升學術水準及國家競爭力。

## 10.2 建議事項

根據本年度執行相關工作項目之成果，對於持續落實先進多平台移動遙測技術之未來發展方向所建議重點研發事項列舉如下：

### 一、 建立專業的多平台遙測系統(不含衛星遙測系統)率定及測試中心

不同定位平台所使用之定位技術、感測器、計算方式及演算法亦有所區別，為確保測量成果之精度與可靠度，本項目旨在協建立多平台遙測系統率定及測試中心(實驗室)，重點如下列。

1. 多平台遙測系統之各式系統誤差分析。
2. 建置專業的戰術等級慣性測量儀測試實驗室(含測試程序與設備)並研發相關演算法。
3. 建置專業的戰術等級定位定向系統靜態與動態測試設施(含測試程序與設備)並研發相關演算法。
4. 單相機內方位率定與多相機相對方位率定場之設計與建置。
5. 車載與個人攜行系統直接地理定位率定場與檢校場之設計與建置。

### 二、 抗 GNSS 訊號脫落與干擾戰術等級定位定向系統之研製

GNSS 訊號脫落與干擾對移動遙測製圖技術之定位定向系統影響甚鉅，而慣性測量儀之初始對準時間與多平台遙測製圖技術精度與作業成本高度相關，為提升戰術等級定位定向系統之精度與作業效率，重點如下列。

1. GNSS 訊號脫落長度對定位定向(軌跡)與直接定位成果(特徵點)精度之分析
2. 慣性測量儀初始化時間對多平台遙測製圖技術精度與作業成本分析
3. 研發慣性測量儀快速初始化(五分鐘)技術
4. 研製抗 GNSS 訊號脫落與干擾之新式強健定位定向演算架構
5. 抗 GNSS 訊號脫落與干擾定位定向系統動態測試與定位定向(軌跡)及直接定位成果(特徵點)精度分析

### 三、結合內政部 e-GPS 主站發展適用多平台遙測系統之新式後處理 VRS 多元感測器動態定位定向演算架構

內政部國土測繪中心及部分縣市政府以虛擬參考站衛星定位測量(VRS)方式，建置衛星定位基準站，全天候接收 GPS 衛星定位資訊，提供地政、都市計畫、工程、地殼變形監控等多目標定位服務及增值應用。然現有商用多元感測器動態定位定向演算架構無法充分利用內政部 e-GPS 主站與 VRS 技術進行高精度短基線之動態定位定向解之後處理，為提升多平台定位技術之精度與作業效率並降低成本，重點如下列。

1. 虛擬主站 RTK 技術於移動遙測製圖領域應用之文獻回顧
2. 分析主站空間相關性對現有後處理差分動態定位定向演算法之限制
3. 自主研發含 VRS 技術後處理多元感測器動態定位定向演算架構
4. 新式後處理 VRS 動態定位定向演算架構、傳統後處理差分模式動態定位定向演算架構與後處理精密單點定位定向演算架構之動態測試與精度分析

### 四、評估戰術等級定位定向系統於海測之應用

海水面高度可有效提供諸多科學領域重要之空間訊息，其成果之優劣與載具(如船、浮漂、航空器以及衛星等)的定位精度有關。常見的海水面高度量測方式有衛星測高與船載 GPS 測高等。GPS 已能提供平面公分等級以及橢球高 10~15 公分等級之動態定位精度，整合

船載的戰術等級定位定向系統，利用其測得的姿態角修正 GPS 天線因船行晃動、傾斜而造成的垂直向誤差，將可獲得更精確的海水面高度，重點如下列。

1. 搭配岸邊靜態固定站進行船載 GPS 資料之計算(至少 3 支接收天線分別位於船首、船尾以及船側)，並應用全測站儀器測得天線之間的相對位置以進行 GPS 定位成果之驗證。
2. 解算船重心位置的戰術等級定位定向系統量測資料，並與第(1)項 GPS 定位成果推得的船行姿態角進行比較與修正。
3. 應用第(2)項修正後的船行姿態角資訊獲得船重心位置的修正後橢球高，以推算每個觀測時刻的精確海水面高度

#### 五、多平台遙測系統聯合作業模式之研究

空載直接定位遙測影像可提供地表特徵物屬性之能力有限，透過車載與個人攜帶式所提供之影像，使用者除了可以快速將相關的製圖程序完成外，更能快速建立 GIS 所需之大量屬性資料。同時車載與個人系統可提供快速的屬性更新以維持地形地物與資料庫屬性的正確性，重點項目如下。

1. 研製、實作與驗證空載傾斜攝影系統(至少一個飛航架次)與個人攜行測繪系統。
2. 發展車載、空載與個人攜行系統聯合作業模式與操作系統，並進行絕對定位精度分析。
3. 以服務導向網路架構，整合各式 GIS 圖資與多平台遙測系統影像，發展土地利用調查及防救災應用模式與操作系統。

## 第十一章 成果審查會議委員意見

### 11.1 期中成果審查會議委員意見

#### 江委員渾欽

1. 報告書前言部分，建議加入本案工作項目說明，方便瞭解本案目的，結論部分可將工作項目進展及未來方向列出；另各章節中可加入小結做為章節結論。

#### 回覆意見：

感謝江委員之寶貴建議，已於期中報告修訂本之第二、三、四、五、六、七、八章節末，加入完成事項以及期末應完成之工作項目，並依諸位委員建議於第一章中加入完整工作項目清單俾使委員可以一目瞭然本案應完成之工作項目。同時將原報告書中之第十章工作期間與進度挪至第一章以利委員閱讀，原第十章內容也改為成果審查會議委員意見並增列結論與建議於第十一章。

2. 請於報告書中詳述本案系統功用、方向及目的，供使用者充分瞭解本系統。

#### 回覆意見：

感謝江委員之寶貴建議，已於期中報告修訂本中各章節增列針對各工作項目所發展系統之功用、方向及目的，俾協助使用者充分瞭解本系統。本案開發之空載傾斜影像資料搜尋與瀏覽模組(LOC5D)，其目的為協助使用者管理、搜尋及瀏覽大量的空載傾斜影像，亦可管理車載或個人攜行式影像。而研究方向則是朝向半自動地物特徵萃取與屬性設定等。相關補充說明詳見 6.3 節，圖 6.20 之後。

3. 本案報告書第 2、3、4、5、8 章均有列出計算公式或資料處理過程，第 6、7 章部分建議比照辦理。

#### 回覆意見：



感謝江委員之寶貴建議，由於 6~7 章節較偏向可行性評估與資訊系統雛形之建置，並非理論探討，而傾斜攝影之理論與傳統攝影測量完全一樣，因此本報告中乃未詳細探討修正報告之說明如公式(6-1)~(6-4)所示；第 7 章主要技術研發工作在於資料結構與空間索引演算法建立，本研究仍持續發展中，相關技術細節將於期末報告補充說明。

### 史委員天元

1. 本案研究主題包含慣性導航系統、傾斜攝影及個人攜帶式定位系統三大部分，建議於報告書中將各議題整合連貫，增加報告內容之完整性。

### 回覆意見：

感謝史委員之建議，已於期中報告修訂本中依各子計畫之特性將相關各議題整合連貫，同時亦針對各章節名詞之一致性進行修訂以提升報告內容之完整性。

2. 傾斜攝影之研究在學術方面已有多年探討，於商業發展方面亦有具體成果，本案所探究之突破及發展為何，請加以說明。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，本團隊之回覆如下：

1. 傾斜攝影測量之基本原理與傳統攝影測量皆相同，主要差別在於資訊內涵不同，也因此應用方向也會不同，在學術方面之探討多以資訊萃取為主，例如三維房屋模塑(包括牆面及屋頂幾何形式之重建)、自動化牆面紋理貼圖、牆面高度與寬度之量測、門窗位置及尺寸之偵測等等。
2. 商業發展中硬體部分，此部分沒有專利的限制，國際上已有幾家公司將多鏡頭傾斜攝影系統商業化，但費用相當高。以 Track' Air 之 MIDAS 為例，不包括 IMU，整套系統即將近新台幣 1500 萬。而根據本團隊之經驗，在相同規格下若自行設計製作可節省成本五分之三以上。
3. 商業發展中軟體部分，由於 Pictometry 公司擁有一些專利，導致國際上相關應用系統之發展受到阻礙，但本案基於建立本土技術之初衷仍希望能開發相關應用系統，若未來有商用

化之可能，則必須避開 Pictometry 之專利範圍。但研發部分仍可同步進行，不受專利限制，以便開發新的應用模式，如此空載傾斜攝影仍可在國內繼續進行研究與應用，不受 Pictometry 專利之約束。

4. 本案在合約規範內之工作項目主要包括：評估發展多元空載傾斜攝影定位系統技術及其應用、建置空載傾斜影像資料搜尋與瀏覽模組系統雛形、以及建置空間資訊整合展示平台。依照合約內容本案尚未牽涉深入的學術研究內涵，未來則建議在資訊萃取部分進行研究。
5. 此外本案所開發之 LOC5D 系統雖名為”空載傾斜影像資料搜尋與瀏覽模組”，但此系統也會應用在地面近景影像或垂直空拍大像幅影像，例如測繪車、Ladybug3、UAV、個人攜行式測繪系統等，因此不至於受到 Pictometry 專利之約束。

3. 報告書第 149 頁表 5.11 說明內容有誤，請修正之。

#### 回覆意見：

感謝史委員之建議，已於第五章表 5.11 中修正。

4. 有關本案繳交之各期成果，未來可開放授權一般民眾免費使用的軟體資料有哪些？

#### 回覆意見：

感謝史委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，本案在合約規範內執行各工作項目所開發各式軟體執行檔將配合地政司政策免費提供一般民眾使用。因經費與時間之限制，本案係利用現有 3D GIS 程式元件進行二次開發與功能擴充，來建立多平台空間資訊整合展示平台雛形系統，進而評估未來多平台遙測資訊整合系統的全面施行效益與實際成本。期末將交付完整雛形系統安裝程式，[單機版三維地理資訊應用雛形系統]供委辦單位內部測試與評估、[空載傾斜攝影影像網際網路展示查詢雛形系統]則可以提供委辦單位服務發佈，結合委辦單位自有版權空間資料，能提供一般民眾 GIS 圖資瀏覽應用。

#### 徐委員百輝

1. 多平台遙測製圖技術可為車載、空載、及個人攜帶三方面來探究，本案可探討多來源資料整合議題，並說明本案之突破點與方

向。

### 回覆意見：

感謝徐委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，未來將在期末報告中以持續以文獻回顧並輔以本案自行開發之軟體模組探討多平台遙測製圖技術之核心技術；多來源資料連何處理架構之相關議題，相關資料將至少包含車載與空載遙測製圖系統所提供之資料，同時將會在期末報告中完整地整理並說明本案之突破點與方向。

2. 據悉成大團隊亦有爭取國科會科技計畫補助案件，本案與國科會補助計畫間需有所區隔。

### 回覆意見：

感謝徐委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，本團隊在國科會 2008-2011 年之資助之整合型計畫中主要以完成車載移動遙測製圖系統之整體架構與精度驗證為目的，整個的研發重心在於利用現有之定位定向演算法架構與機電整合架構從時原型系統之開發與實作，而本團隊在國科會 2011-2013 資助之整合型計畫中主要發展以無人機移動遙測製圖系統輔以車載系統與個人系統探討移動遙測製圖系統在災害快速反應與減災之應用，該計畫之核心為發展具備低成本但符合定位精度之無人機與個人攜行式之直接定位籌載搭配特殊的定位定向演算法以符合災害快速反應之應用，上述二案所使用之慣性測量儀皆為微機電系統。而本案與上述二案之工作項目在系統整合層次、演算法架構與創新應用領域因應製圖精度之需求與硬體成本有一定程度之區隔。以工作項目而言，本案著墨在高階戰術等級精密定位定向系統(使用光纖陀螺儀之慣性測量儀)所需之軟硬體研發、多元感測器機電整合技術、創新的精密定位定向演算法(含人工智慧輔助)、評估未來精密定位定向系統所需之測試程序與率定技術、評估多平台遙測製圖聯合處理技術(含傾斜攝影與車載系統)等項目都是本案與這些計畫相較之下創新之處。

3. 文章內容有部分重複敘述，請逐章檢視並修正之。

### 回覆意見：

感謝徐委員之建議，本團隊已於第一、二、三、四、五、六、七、八章節內容做修正。

4. 本案中所提及之儀器精度及性能，是否能和其他商用軟體作一比較？

#### 回覆意見：

感謝徐委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，將於期末報告中洽借儀科中心之 POSAV 510 與其所附商用軟體所計算之成果與本案所自行研發之軟硬體進行比較與分析。

5. 展示系統如何處理空載及車載所獲取之影像資料？

#### 回覆意見：

感謝徐委員之寶貴建議，本案開發之 LOC5D 平台適用於所有具有內、外方位參數之框幅式影像(Frame-based Image)，因此不管是機載、UAV、船載、車載或個人攜帶式影像都可使用；整合關鍵在於是否可以取得精準之影像內、外方位參數，這正是本案重點在發展高精度直接定位技術之故。

6. 防救災單位所需求之功能如何對應到本案系統功能上？本案系統可提供防救災單位哪方面應用？

#### 回覆意見：

感謝徐委員之寶貴建議，本團隊之回覆如下：

1. 假設已經收集處理成具有內、外方位參數之影像，當災害發生後首先可以透過地址、地標資料庫(本系統尚未建置)或 GIS 圖資查詢災區之地理座標，接著即可透過本系統查詢所有歷史影像中有拍攝到該地區之影像，接著若有 3D GIS 圖資(或 2D GIS+DTM)即可套疊在原始影像上。若有空載傾斜攝影，則可瀏覽不同方向所拍攝之影像，以協助決策支援。尤其是發生地震後建物從五層樓垂直坍塌變成四層樓的現象，透過傳統垂直航拍將會很難直接判釋此種現象。
2. 若災害區域沒有歷史影像，則可利用本案所開發之直接地理定位技術，產生較低精度(視 IMU 等級而定)的外方位參數，

同時將影像匯入 LOC5D 系統後，即可進行上述應用。

3. 若災區同時擁有災前與災後之影像，則可同時展示，以便進行視覺或自動(影像校正後)變遷分析，進而評估災情。
4. 本案未來仍可繼續開發量測與模塑功能，以便在查詢到影像後進行尺寸、路徑與面積等量測，甚至可以數化災區範圍成為 3D GIS 圖資。
5. 此外亦可研發自動化資訊萃取之功能，例如水災或崩塌地範圍之偵測、以立體對自動匹配產生地表模型，同時製作地形剖面圖等功能。

### 侯委員進雄

1. 報告書各章節末段可加入小結做為章節結論。

### 回覆意見：

感謝侯委員之寶貴建議，已於期中報告修訂本之第二、三、四、五、六、七、八章節末，加入完成事項以及期末應完成之工作項目，並依諸位委員建議於第一章中加入完整工作項目清單俾使委員可以一目瞭然本案應完成之工作項目。同時將原報告書中之第十章工作期間與進度挪至第一章以利委員閱讀，原第十章內容也改為成果審查會議委員意見並增列結論與建議於第十一章。

2. 報告書中應有專節說明工作項目及繳交成果。

### 回覆意見：

感謝侯委員之寶貴建議，已於期中報告修訂本之第二、三、四、五、六、七、八章節末，加入完成事項以及期末應完成之工作項目，並依諸位委員建議於第一章中加入完整工作項目清單俾使委員可以一目瞭然本案應完成之工作項目。同時將原報告書中之第十章工作期間與進度挪至第一章以利委員閱讀，原第十章內容也改為成果審查會議委員意見並增列結論與建議於第十一章。

3. 本案中所採購的軟硬體請於期末報告前列出清單，並於本案結束時繳回內政部。

### 回覆意見：

感謝侯委員之寶貴建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，所



有繳交之各項成果將依合約規定辦理。

### 劉委員正倫

1. 據悉成大團隊亦有爭取 2008-2011 年國科會科技計畫補助案件，本案與國科會補助計畫間差異為何？

### 回覆意見：

感謝劉委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，本團隊在國科會 2008-2011 年之資助之整合型計畫中主要以完成車載移動遙測製圖系統之整體架構與精度驗證為目的，整個的研發重心在於利用現有之定位定向演算法架構與機電整合架構從時原型系統之開發與實作，而本團隊在國科會 2011-2013 資助之整合型計畫中主要發展已無人機移動遙測製圖系統輔以車載系統與個人系統探討移動遙測製圖系統在災害快速反應與減災之應用，該計畫之核心為發展具備低成本但符合定位精度之無人機與個人攜行式之直接定位籌載搭配特殊的定位定向演算法以符合災害快速反應之應用，上述二案所使用之慣性測量儀皆為微機電系統。而本案與上述二案之工作項目在系統整合層次、演算法架構與創新應用領域因應製圖精度之需求與硬體成本有一定程度之區隔。以工作項目而言，本案著墨在高階戰術等級精密定位定向系統(使用光纖陀螺儀之慣性測量儀)所需之軟硬體研發、多元感測器機電整合技術、創新的精密定位定向演算法(含人工智慧輔助)、評估未來精密定位定向系統所需之測試程序與率定技術、評估多平台遙測製圖聯合處理技術(含傾斜攝影與車載系統)等項目都是本案創新之處。

2. 本案所採購之 IMU 等相關儀器，是否可掛載於 UAV 或其他系統上？

### 回覆意見：

感謝劉委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，本案所採購之系統因重量之限制所以對於無人機之載重能力要求至少要 10 至 15 公斤，再者相關儀器造價超過 300 萬故除非有完善的飛控或儀器保險機制，本團隊傾向建議無人機之應用應以搭載微機電等級之慣性測量儀為優先考量。

3. 本案開發之軟體 CAINS-21 如何命名？

### 回覆意見：

感謝劉委員之建議，CAINS-21 之全名為 C++ Aided Inertial Navigation System-21，21 表示本軟體具備 21 個狀態之估算架構。

4. 本案中有對 e-GPS 應用於多平台系統之評估，請於完整評估後提供國土測繪中心參考。

### 回覆意見：

感謝劉委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，同時本團隊將於期末報告中探討 e-GPS 應用於多平台系統之評估。

5. 請於報告書中說明 PPP 整合解與 DGNS 整合解兩者之應用取向。

### 回覆意見：

感謝劉委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，同時本團隊於期中報告修訂本中說明 PPP 整合解與 DGNS 整合解兩者之應用取向。同時於期末報告中繼續探討此一課題。

6. 本案成大團隊於結案後繳回之儀器設備，如經內政部同意，可移至國土測繪中心進行系統整合組裝，以提升中心學術研究能力。

### 回覆意見：

感謝劉委員之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，本團隊將依合約辦理並提供必要的技術協助。

### 國科會災害防救應用科技方案辦公室

1. 成大團隊亦有爭取國科會科技計畫補助案件，本案與國科會補助計畫間差異為何？

### 回覆意見：

感謝國科會災害防救應用科技方案辦公室代表之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，本團隊在國科會 2008-2011 年之資助之整合型計畫中主要以完成車載移動遙測製圖系統之整體架構

與精度驗證為目的，整個的研發重心在於利用現有之定位定向演算法架構與機電整合架構從時原型系統之開發與實作，而本團隊在國科會 2011-2013 資助之整合型計畫中主要發展已無人機移動遙測製圖系統輔以車載系統與個人系統探討移動遙測製圖系統在災害快速反應與減災之應用，該計畫之核心為發展具備低成本但符合定位精度之無人機與個人攜行式之直接定位籌載搭配特殊的定位定向演算法以符合災害快速反應之應用，上述二案所使用之慣性測量儀皆為微機電系統。而本案與上述二案之工作項目在系統整合層次、演算法架構與創新應用領域因應製圖精度之需求與硬體成本有一定程度之區隔。以工作項目而言，本案著墨在高階戰術等級精密定位定向系統(使用光纖陀螺儀之慣性測量儀)所需之軟硬體研發、多元感測器機電整合技術、創新的精密定位定向演算法(含人工智慧輔助)、評估未來精密定位定向系統所需之測試程序與率定技術、評估多平台遙測製圖聯合處理技術(含傾斜攝影與車載系統)等項目都是本案創新之處。同時本案本案引進高階戰術等級慣性測量儀並完成整合式定位定向系統研製項目具備下列突破性的成果：

- 合法引進且不受國際武器輸出許可管制。
- 交貨時間縮短為二個月。
- 引入之慣性測量儀之規格媲美商用定位定向系統之 LN200 慣性測量儀(目前國內的光達與航測系統所使用之 POSAV510 等級)。
- 商用系統不提供原始觀測量，本系統可以提供原始觀測量。
- 採購成本為外購系統之 40%。
- 自主研發適用高階戰術等級慣性測量儀的機電整合架構，相關研發成果將參加美國導航學會 GNSS2011 與 GNSS2012 年會之最佳論文競賽。
- 精密定位定向系統之硬體與軟體研發人才訓練

2. 請將委員提問答詢內容附於報告書後。

### 回覆意見：

感謝國科會災害防救應用科技方案辦公室代表之建議，本團隊已於審查會議現場提出回覆，在期中報告修訂本之第十章納入成果審查會議委員意見。

## 國家災害防救科技中心

1. 本案成果是否能提供本中心減災平台使用？

### 回覆意見：

感謝國家災害防救科技中心代表之寶貴建議，是的，待本案結案後，經地政司同意即可協助貴中心安裝 LOC5D 平台。但若要與貴中心減災平台整合，則需要進一步了解其特性與技術，以評估其可行性。

2. 本案傾斜攝影系統是否可納入本中心災害應變平台？傾斜攝影系統是否可判讀其他來源資料之空間位置？

### 回覆意見：

感謝國家災害防救科技中心代表之寶貴建議，本團隊之回覆如下：

1. 本案目前合約規範內僅為評估空載傾斜攝影之可行性，並未實質開發空載傾斜攝影系統，報告中所提之系統為國科會產學合作計畫成果，且因目前所設計之系統使用了六台筆電，一台大型鋰鐵電池，而 IMU 則是跟國研院儀科中心租借，設備與線路之整合性仍嫌零散，無法進行快速安裝，且欠缺友善之操作性，若貴中心有興趣仍可納入災害應變平台，但若貴中心能提供經費，則本團隊可以協助建置一套真正適合作業且方便操作之空載傾斜攝影系統。
2. LOC5D 系統可接受各種來源資料，但必須是框幅式影像，且具有內、外方位參數。而未來也會加入影像串流之功能，以便套疊巨量且大範圍之高解析正射影像。

## 本部國土測繪中心

1. P2；「移動平台可以是衛星、飛機、直昇機...如圖 1.1b 所示」，此段重複敘述，可酌予刪除。

### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，已於期中報告修訂本之 P2 內容做修正。

2. P22；比較傳統空三與直接定位航測製圖流程，引入直接定位技

術後，其成本可大量減少，製圖效率大量提高。惟表 2.5 提到直接定位之缺點為成本較高。究竟直接定位方法所節省的成本及所需增加的成本為何？請說明。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，本團隊已於期中報告修訂本 P.22 第二段第 6 行、表 2.5 中修正敘述。P.22 中所提之降低成本為，降低作業成本，包括：人力及時間。而表 2.5 中所提之成本較高，為一次性硬體成本高，包含如定位定向系統及影像感測器各式感測器之採購成本。

3. P24；圖 2.27 空載移動遙測製圖技術之航測製圖流程比較，似乎直接地理對位方式比傳統方式節省許多步驟，惟直接地理對位方式除人工控制測量及空三外，其餘步驟似乎仍無法免除。另本圖出處係 1998 年文章，與現今製圖方式似有落差，建議引用年代較近的文章。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，美國俄亥俄州立大學製圖中心在空載遙測製圖系統的發展上具有其代表性的角色，圖 2.27 與原列參考文獻即為該中心的代表著作之一，而圖 2.27 所列傳統製圖流程與直接定位流程之比較僅屬概念型的類比，而本案並無意以此圖制訂相關的標準作業流程，本文引用該圖的目的主要為了彰顯在引入直接定位技術後可省卻需要大量人力與作業成本之人工控制測量及空三流程，不過本團隊在期中報告修訂本中增列一篇新的文獻以回應國土測繪中心代表之建議。

4. P25；「目前國內沒有任何研究機構從事空載移動測繪系統之研發工作」。所謂移動測繪系統是否指載台與儀器整合部分？請說明。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，原意指目前並無相關文獻提到國內研究機構從事空載移動測繪系統中載台與多感測器之機電整合架構及整體軟體研發。

5. P47；表 2.9 各式直接定位遙測平台之效益比較，所謂大範圍實驗



及小範圍實驗之定義為何？無人控制定翼飛機及無人控制旋翼飛機是否有承載光達系統的執行飛航掃描的案例？其執行範圍及定位精度為何？請說明。

### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，目前並無找到相關文獻詳細且精確定義何謂大範圍及小範圍實驗定義，就常規航測而言，一趟飛行3~4小時而作業面積可能涵蓋一二個縣市，並累計數百公里之航程，而無人機之應用主要針對載重及飛行任務距離與時間做分類。而目前民用的無人控制飛機主要起飛重量約在30公斤，飛行高度約在5000英尺以下，飛行距離可達30公里左右，大約為一個鄉鎮市區或起飛跑道方圓約15公里以內，其飛行區域稱之為小範圍實驗區。

日本目前已有相關文獻，將雷射掃瞄儀(Laser scanner)、CCD相機(包含數位相機及紅外光相機)、GPS/INS裝載於無人控制飛機上，藉由雷射掃瞄儀取得的點雲資料、數位相機的影像資料、紅外光相機取得植被資訊，監測土地狀況和農作物生長情形，並應用於農藥肥料的噴灑及森林播種等。相關文獻初步成果顯示，無人控制飛機取得之成果與地面已知點進行比較，DSM的誤差大約為10到30公分；拍攝取得資訊，其解析度與精度也足夠用於衛星遙感探測或空載遙感探測應用。

6. P150；本案所研發之多元空載傾斜攝影定位系統與個人攜帶式定位系統之互補性為何？請說明。

### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，本團隊之回覆如下：

本案所提之多平台移動測繪系統所收集之影像間，都具有時間解析度、空間解析度、觀測方向與資訊內涵之互補性，已於第二章增列表2.10，說明各系統之互補性。

7. P158；本案系統規劃，有關空載傾斜攝影除了直接採用IMU及GPS的量測值作為外方位參數外，是否可利用地形圖上之已知點以空中後交會方式求取影像之外方位參數，並適度調整影像的位置以套合資料庫內之相關圖籍？請說明。

## 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，本團隊之回覆如下：

理論上此方法是可以達到目的，但若是為了提升定位精度就要符合幾個條件，例如相機之 FOV 是否夠大，FOV 太小，後方交會幾何條件較弱，定位精度不會比較高。還有從地形圖上所數化得之地物坐標精度是否夠高、分布是否足夠，都是要考量的因素。最後則是效率問題，空載傾斜攝影系統多使用小像幅 DSLR 數位相機，以節省相機之成本，為了提供多視角影像，通常會拍攝上萬張的影像，若透過單張後方交會的方法，其效率將無法被使用者接受。

8. P171；「國土測繪中心...希望此技術能協助土地利用調查，...，僅需在室內即可進行土地利用判釋...」，此段文字似未描述本系統是否可應用在國土利用調查的方面，技術上的困難及待解決的問題為何？

## 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，本團隊之回覆如下：

- 甲、 由於空載傾斜攝影可獲得地物側面的資訊，例如樓高、樓層數、屋頂形式、屋頂加蓋情形、甚至可以分辨某些植物或樹木的種類，而地面測繪車或個人攜帶式則可以協助調查商店招牌、各式交通設施、路樹種類等。本案對於土地利用調查主要的貢獻則是可以降低外業確認土地利用型態之人力、時間與成本，同時可以提高成果品質、提供事後檢驗之影像證據。內業部分則可以透過 LOC5D 進行地物判釋、數化及屬性更新。
  - 乙、 建議未來可以局部區域嘗試土地利用調查之修測工作，結合前期土地利用資料與新拍攝空載傾斜攝影搭配 LOC5D 系統，應當能提升整體作業效率；技術上待解決的問題除了針對土地利用判釋與數化軟體功能開發外，還有一個缺點為飛機租金之成本較高，因此在郊區可以考慮使用無人飛行載具傾斜攝影，市區則是採用機載傾斜攝影。
9. 本中心目前已建置有國土利用調查、通用版電子地圖、基本圖、地籍圖等相關成果資料，本系統測試過程如有需要，本中心可協助提供。另本中心目前辦理「發展無人飛行載具航拍技術作業

案」，已於 100 年 9 月 5 日完成期中報告，全案完成後，相關成果亦可一併提供參考。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，感謝貴中心的協助與支持。

10. 本案所建置之系統未來是否可與實際業務結合，進行相關測試及作業，建請評估及說明。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，本案在期末報告中將會針對土地利用調查提出可行性評估，屆時將會跟貴中心申請相關圖資與 UAV 作業案之報告。

11. 期中報告建議增加「結論與建議」，就目前辦理結果及未來將完成工作項目說明。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心代表之建議，本團隊已於期中報告修訂本之第二、三、四、五、六、七、八章節末，加入完成事項以及期末應完成之工作項目，並依諸位委員建議於第一章中加入完整工作項目清單俾使委員可以一目瞭然本案應完成之工作項目。同時將原報告書中之第十章工作期間與進度挪至第一章以利委員閱讀，原第十章內容也改為成果審查會議委員意見並增列結論與建議於第十一章。

#### 本部地政司

1. P9，表 2-2 提到各式空間資訊擷取技術，各式擷取技術評估項目之一係為作業成本，請問各技術間作業成本評估依據為何？是否為施測面積之單價？

#### 回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，原參考文獻(Ellum, 2001)所提及各技術間作業成本評估為施測面積之單價，已將此敘述增列至期中報告之修訂本中。

2. P14，提到「國科會於 2011 年起連續 3 年資助本系驗證系統於防

災減災之相關應用」，是否可提供相關參考資料予以本部參考？

**回覆意見：**

感謝地政司承辦之建議，將提供該計畫之提案予貴部參考。

3. P17，Google Street View 所拍攝之相片是否可進行近景測量使用？其精度如何？在國外如需進行 Street View 製作，是否需獲得相關機關許可？其機關為何？

感謝地政司承辦之建議，本團隊之回覆如下：

- A. 本屆測量及空間資訊研討會(在中興大學舉行)中有相關論文探討此問題，其結論為定位精度(RMSE)約 3-4 公尺，且誤差平均值約為 7 公尺。
- B. Google Street View 因可能牽涉到個人隱私，因此有些國家已經禁止商業公司拍攝街景影像或者需要進行審查才能進行，更甚者也有明令 Google 公司將現有街景服務關閉者，相關管理機關主要都是測繪管理部門以及國土安全部門進行管制，歐洲則有民事法院依照個人隱私法直接限制 Google 公司的作為。國內國安局已經針對街景車的適法性與管理策略進行相關研議工作，主要著眼於國土測繪法與國家機密保護法中針對外國企業在本國進行測繪工作之限制，以及公開高精度測量成果，是否適用於街景測量車。
4. P23，請說明「商用空載移動遙測製圖技術之範例」其所使用的儀器配備及精度各為何，是否有標準規範？Large Format 及 Medium 各代表為何？

**回覆意見：**

感謝地政司承辦之建議，本團隊已於期中報告修訂本中增列該範例中所含系統之型錄以供比較，這些型錄包含這些系統所使用的儀器配備與精度，目前對儀器的選用之原則皆以其定位精度、製圖比例尺與硬體成本為考量，尚未有對空載移動遙測製圖系統發展之標準規範，目前皆以滿足現有的不同比例尺之製圖規範為主要依據。Large Format 表示相機之像幅大小至少超過 10000\*10000 像素而 Medium format 代表相機之像幅大小不足 10000\*10000 像素但超過 5000\*5000 像素。

5. P33，加拿大卡加利大學之測試結果略以：「精度可以超越傳統的攝影測量技術」，是否可明列出該大學完成之精度及傳統攝影測量所得到之精度，俾利說明比較。

回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，該段敘述乃摘自(Schwarz and El-Sheimy, 2008)一文，文中並未提供相關精度指標，已與該文作者聯繫洽詢能否取得相關具體之測試報告，若能獲得授權並取得相關報告，將於期末報告中補充這些資料。

6. P46，緊耦合多元感測器整合架構中，同步獲得 GNSS/INS 觀測量之方式為何？積分 GNSS 位置變化得到 INS？

回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，在緊耦合多元感測器整合架構中，系統直接由 GNSS 接收儀獲取載波相位與虛擬距離之觀測量，同時慣性導航方程式同時接收來自慣性測量儀之原始觀測量進行積分計算以獲得慣性導航方程式所解算得之載體位置，此時再與衛星定位儀所提供之衛星星曆計算使用載體與每顆衛星之距離，此時再與 GNSS 接收儀提供每顆衛星之載波相位與虛擬距離建立觀測量更新方程式，藉由此程序可以只藉由一顆衛星提供觀測量更新以協助更新慣性導航系統之誤差。

7. P57、P58、P59 之表格「原始觀測量輸出」欄位中，自組系統是否可輸入原始觀測量？

回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，自組系統可以提供原始觀測量，原表格之誤植已修訂，同時自主研發的軟體可以搭配任何可以提供原始觀測量之慣性測量儀進行資料處理，這兩點是本案自主系統重要之突破點，本案合法地突破國際對於高階慣性測量儀與精密定位定向技術之管制與壟斷。

8. P158 傾斜攝影相片重疊率為多少，如何剔除重疊過多的照片資料，減少資料量？



### 回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，本團隊之回覆如下：

- A. 傾斜與垂直攝影之重疊率可以根據相機與鏡頭的規格，以及飛機的速度來決定，兩者之重疊率不完全一樣，視所使用的鏡頭焦距而定。但若要在後續進行傳統空三平差，則建議垂直拍攝的相機，至少具有前後 60% 及航帶間 40% 的重疊百分比。
  - B. 是否要減少資料量，得視應用面與經費而定。
9. P171，傾斜攝影能取得較為詳細之土地利用資訊，傾斜攝影最小判讀區塊為何？成大團隊是否能取局部地區進行試驗，建立傾斜攝影影像判讀機制或標準？

### 回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，本團隊可以針對小區域進行土地利用調查之試驗，並在期末報告中針對此問題提出測試報告。

10. 文字更正：

- A. P12 「雷測陀螺儀」修正為「雷射陀螺儀」。
- B. P19 「經度」修正為「精度」。
- C. P42 「延製」修正為「研製」。
- D. P158 「目地」修正為「目的」。

### 回覆意見：

感謝地政司承辦之建議，下列之文字更正事項已依照辦理。

- 甲、 已於修訂本 P12 修正。
- 乙、 已於修訂本 P19 修正。
- 丙、 已於修訂本 P42 修正。
- 丁、 已於修訂本 P158 修正。

## 11.2 期末成果審查會議委員意見

### 史委員天元

1. 報告書中宜列出名詞對照表，並統一報告書中名詞用語。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，已依委員建議增列名詞對照表附錄並統一名詞用語。

2. 報告書中請列出所使用之精度效益評估及成果評估根據的文獻報告。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，已依委員建議增列報告中所使用之精度效益評估及成果評估根據的文獻報告。

3. 報告書中宜採用同等級或同規格儀器作比較。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，已於現場提出補充說明。

4. 報告書中圖表印刷不清楚之處，請修正。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，已依委員建議於各章節中修改。

5. 報告書中有關文獻回顧部分，建議避免引用產品廠商推銷文宣。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，已依照委員建議修改文獻回顧內容。

6. 報告書中 P241 部分內容描述請適當修正。

### 回覆意見：

感謝史委員之寶貴建議，已依照委員建議修改。

### 劉委員正倫

1. 報告書中，各章節小結、總結結論及計畫書規劃之工作項目多有重複描述，建議可依據主題分為三大部分撰寫。

**回覆意見：**

感謝劉委員之寶貴建議，已依照委員建議，刪除重複部分，並添加各章節小結。

2. 報告書中對未來期許、方向及發展可強化描述。

**回覆意見：**

感謝劉委員之寶貴建議，已依照委員建議增列未來期許與發展方向。

3. 空載傾斜攝影中，評估敘述宜精簡，章節分段宜明確，所使用之名詞建議統一。

**回覆意見：**

感謝劉委員之寶貴建議，將 6.3 節改成

■ 評估自主空載傾斜影像軟硬體技術

- 評估自行組裝直接定位多鏡頭空載傾斜攝影之可行性
- 開發空載傾斜影像 3D 空間資訊蒐集系統雛型

4. 報告書中第 6 章瀏覽查詢平台及第七章瀏覽平台功能上有何差異，請說明之。

**回覆意見：**

感謝劉委員之寶貴建議，第六章之軟體系統主要著重在空間資訊之蒐集，包括影像搜尋、3D GIS 圖資數化與編輯等。而第七章則著重在空間資訊服務，單機版與網路版之使用者分別定位為公部門內部業務應用與一般民眾。

**國科會災害防救應用科技方案辦公室**

本案傾斜攝影相機觸發器如何達成同步？

**回覆意見：**

感謝國科會災害防救應用科技方案辦公室之寶貴建議，本系統是透過電腦 RS232 介面定時送出訊號，並透過一台簡易電子設備放

大訊號及轉換成電壓變化，並聯結到五台數位相機與兩台 IMU，以便觸發相機拍照同時記錄觸發之 GNSS 時間，達到同步之目的。

### 國家災害防救科技中心

災害處理時防救災單位以能即時取得資料，並完成災害定位為首要目標，本案是否能提供標定位置的作業方式？

#### 回覆意見：

感謝國家災害防救科技中心之寶貴建議，是的，多平台直接定位移動式測繪系統之主要特色就是可以不使用到地面控制點，即可獲得相機之外方位參數，進一步即可透過攝影測量之原理進行三維定位、量測與模塑之目的。

### 本部國土測繪中心

1. 請補充期中報告審查意見回復情形表。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心之寶貴建議，已補充於工作總報告書修訂本第十一章。

2. P33；本研究初步結果顯示，在短時間內可以得到高解析度的成果，其資料精度可用來製作 1：100 的 CAD 地圖...。是否確有可能或是誤植，請說明。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心之寶貴建議，感謝委員建議，已補正此誤植之文字。

3. P74；臺灣地區數值像片基本圖測製規範經修訂後為內政部基本圖測製規範（草案），目前後者雖然仍是草案，但近幾年基本圖修測皆以該草案為標準，且前者部分規定已不符目前作業規定，建議引用後者即可。

#### 回覆意見：

感謝國土測繪中心之寶貴建議，依照委員建議移除「數值像片基本圖測製規範」。

4. P75；通用版電子地圖僅規範成圖精度及內容，並未規定比例尺，且表中所列比例尺對照其成圖所需精度（城區優於基本圖測製規範要求，鄉區約等同基本圖測製規範要求）亦不相符，請查明修正。

**回覆意見：**

感謝國土測繪中心之寶貴建議，依照委員建議修正相關敘述。

5. P268；應用系統是否提供不同圖層間，簡易平移與旋轉套疊功能，讓使用者能將向量與影像作較佳的套合。

**回覆意見：**

感謝國土測繪中心之寶貴建議，是的，本研究開發之 LOC5D 平台可以將向量資料套疊到原始框幅式影像上，並且可以縮放平移影像，還可以進行攝影測量三維數化與 GIS 資料編輯。

**本部地政司**

1. P81；建議公部門可考慮採用車載移動遙測系統進行通用版電子地圖更新與圖資數化工作。是否可推估以此方式進行通用版電子地圖之建置成本為何？

**回覆意見：**

感謝地政司之寶貴建議，本項建議可考慮列入未來計畫工作項目之一。

2. P134；運用模擬器產生無誤差觀測量，以 200 赫茲頻率觀察 2.5 分鐘，與期中報告 P95 頁，10 赫茲觀察 20 分鐘差異性為何？請說明。(P154 說明採樣頻率需大於 100Hz)

**回覆意見：**

感謝地政司之寶貴建議，其誤差行為完全相同，唯期末報告針對本案慣性測量儀之規格進行模擬，已針對時間部分延長並提高採樣率至 200 赫茲頻率。

3. P138；表 4.3 估算系統偏差之率定結果，陀螺儀計算單位為 rad/s，P139 頁之結論計算單位為度/小時，請統一。

**回覆意見：**

感謝地政司之寶貴建議，已統一為度/小時。



## 參考文獻

- 史天元、彭森祥、徐偉城(2002)：應用空載雷射掃描儀進行地震災區變形研究，農委會 91-農科-5.1.1-林-R1(8)計畫報告，123 頁。
- 吳至誠(2005)：空載雷射掃描資料於單株樹之量測，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，499-504 頁。
- 林志交、張坤樹、顏桂明(2004)：雷射掃描測高資料於測繪電纜線及電塔之應用，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，379-387 頁。
- 徐偉城、陳大科、劉進金、史天元、王成機、陳思仁(2005)：以空載光達建立外頂洲數值高程模型，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，27-34 頁。
- 劉榮寬、徐偉城、史天元、劉進金(2005)：空載光達系統率定初探，第二十四屆測量學術及應用研討會論文集，447-456 頁。
- 楊名、江凱偉(2008)：97 年度全球導航衛星系統(GNSS)資料聯合處理技術報告，內政部國土測繪中心。
- 楊名、江凱偉(2009)：全球導航衛星系統(GNSS)資料聯合處理技術(97 年度)，內政部國土測繪中心委託計畫期末報告修正本，國立成功大學衛星資訊研究中心，台南，261 頁。
- 尤瑞哲(2003)：測量坐標系統(第二版)，成功大學測量及空間資訊學系。
- 王之卓(1990)：Principles of Photogrammetry(with remote sensing)，測繪出版社。
- 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。
- 邱冠維(2009)：利用精密單點定位進行GPS浮標近即時精密定位，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 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碩士論文。
- 張秀雯(2009)：發展自成長式神經網路嵌入式低成本MEMS INS/GPS整合式定位定向演算法，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 彭微之(2010)：基於GPS網格PPP技術對流層溼延遲量於強降雨期間的時頻分析，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- Al-Hanbalia, N., Hutton, J., Mostafa, M.M. (2009): Mobile Mapping for Earthwork Monitoring: A Case Study on the Convergence of Photogrammetry with Advanced Positioning Techniques for Maximum Productivity and Accuracy, Proceeding of Photogrammetric Week 2009, Stuttgart, Germany.
- Allan, D.W. (1966): Statistics of Atomic Frequency Standards, Proc. IEEE, vol. 54, pp. 221-228, February 1966.
- Artese, G. and Trecroci A. (2008): Calibration of a Low Cost MEMS INS Sensor for an Integrated Navigation System, The proceeding of ISPRS Congress XXXVII, Beijing China.
- Axelsson, P. (1999): Proceeding of Laser Scanner Data-Algorithms and Application, ISPRS JPRS, vol. 54, pp.138-147.
- Bacon, T. (2008): A Better Way — Oblique Imagery in Disaster-related Damage Assessment, September, 6-7.
- Bergman, N. (1999): Recursive Bayesian Estimation Navigation and Tracking

Applications, Linkoping University, Linkoping, Sweden.

- Brown, R.G. and Hwang, P.Y.C. (1997): Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, John Wiley & Sons Inc.
- Bucy, R.S. and Senne, K.D. (1971): Digital synthesis of non-linear filters, Automatica. vol. 7, pp. 287.
- Cannon, M.E. and Schwarz, K.P. (1990): A Discussion of GPS/INS Integration for Photogrammetric Applications, Proc. IAG Symp. # 107: Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing, Banff, pp. 443-452.
- Cannon, M.E. (1991): "Airborne GPS/INS With An Application To Aerotriangulation", Ph.D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, UCSE Report Number 20040.
- Chen, K.Y. and Liu, C.Y. (2011): The Performance Evaluation of Low Cost MEMS IMU/GPS Integrated Positioning and Orientation Systems Using Novel DBPNNs Embedded Fusion Algorithms, Proceeding of ION GNSS 2011 Meeting, Portland, Oregon, USA.
- Cheng, W., Hassan, T., El-Sheimy, N. and Lavigne, M. (2008): Automatic Road Vector Extraction For Mobile Mapping Systems, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVII, Part B3b.
- Chiang, K.W. and Chang, H.W. (2010): Intelligent Sensor Positioning and Orientation Through Constructive Neural Network-Embedded INS/GPS Integration Algorithms, SENSORS, 10 (10): 9252-9285 OCT 2010.
- Chiang, K.W., Lin, Y.C., Huang, Y.W. and Chang, H.W. (2009): An ANN-RTS Smoother Scheme for Accurate INS/GPS Integrated Attitude Determination, GPS Solutions, vol. 13, Issue: 3, pp. 199-208.
- Chiang, K.W., Chang, H.W., Li, C.Y. and Huang, Y.W. (2009): An Artificial Neural Network Embedded Position and Orientation Determination Algorithm for Low Cost MEMS INS/GPS Integrated Sensors, Sensors 2009, vol. 9, No. 4, pp. 2586-2610.
- Chiang, K.W. (2004): INS/GPS Integration Using Neural Networks for Land Vehicular Navigation Applications, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, UCGE Report 20209.
- Chiang, K.W., Noureldin, A. and El-Sheimy, N. (2003): Multi-sensors Integration using Neuron Computing for Land Vehicle Navigation, GPS Solutions, vol. 6, no. 3, pp. 209-218.
- Cohen, C.E. and Parkinson, B.W. (1992): Aircraft Applications of GPS-Based Attitude Determination, Proceedings of ION GPS-92, Albuquerque, pp. 775-782.
- Coppa, U., Guarnieri, A., Pirotti, F., and Vettore, A. (2007): A BACKPACK MMS APPLICATION, The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2007), PADUA, ITALY.
- Eisenbeiss, H. (2004): A mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System overview and image acquisition, International Workshop on Processing and Visualization using High Resolution Imagery, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVI-5/W1.
- Ellum, C.M. (2001): The Development of a Backpack Mobile Mapping System, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada, UCGE Reports 20159.
- Ellum, C.M., and El-Sheimy, N., (2003): The Calibration of Image-Based Mobile Mapping Systems, 6<sup>th</sup> Conference on Optical 3D Measurement Techniques,

Switzerland.

- El-Mowafy, A. and Schwarz, K.P. (1994): Epoch by Epoch Attitude Determination Using A Multi-Antenna System in Kinematic Mode, Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS-94, Banff, Canada, pp. 331-340.
- El-Sheimy, N., Schwarz, K.P., and Gravel, M., (1995): Mobile 3-D Positioning Using GPS/INS/Video Cameras, The Mobile Mapping Symposium, Columbus, OH, USA, pp.236-249.
- El-Sheimy, N., Abdel-Hamid, W. and Lachapelle, G. (2004): An adaptive neuro-fuzzy model for bridging GPS outages in MEMS-IMU/GPS land vehicle navigation, In Proceedings of ION GNSS 2004, Long Beach, CA, USA.
- El-Sheimy, N. (1996): The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada.
- Fraser, C. S. (1997): Digital Camera Self-calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing.
- Gajdamowicz, K., Ohamn, D. and Horemuz, M. (2007): Mapping and 3D Modelling of Urban Environment Based on LIDAR, GPS/IMU and Image Data, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, no. 5/C55.
- Gajdamowicz, K., (2011): Mapping of Transmission Power Lines and Electromagnetic Field based on VISIMIND Mobile Mapping System, 7<sup>th</sup> International Symposium on Mobile Mapping Technology, Section II, Cracow, Poland.
- Gao, P., Nixon, P.R. and Skoug, W. (1995): Diffusion in HPMC Gels. II. prediction of drug release rates from hydrophilic matrix extended-release dosage forms. Pharm. Res., 12: 965-971.
- Gao, Y. (2007): Advanced Estimation Methods and Analysis, ENGO 629 Lecture Notes, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Canada.
- Gao, Y. and Shen, X. (2002): A New Method for Carrier Phase Based Precise Point Positioning, Navigation, Journal of the Institute of Navigation, vol. 49, no. 2.
- Gelb, A. (1974): Applied Optimal Estimation, The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Ghosh, S. K. (1985): History of photogrammetry
- Godha, S. (2006): Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application.
- Goodall, C., El-Sheimy, N. and Chiang, K.W. (2005): The development of a GPS/MEMS INS integrated system utilizing a hybrid processing architecture, In Proceedings of ION GNSS 2005, Long Beach, CA.
- Graefe, G. (2011): High precision kinematic 3D Engineering Surveying Applications using multiple scanners and cameras, 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology, vol. II, no. 4.
- Greening, T., Schickler, W., and Thorpe, A., (2000): The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Triangulation is not Obsolete, Proceeding of the ASPRS Annual Conference, Washington, DC, USA.
- Grejner-Brzezinska, D.A. (2001): Direct Sensor Orientation in Airborne and Land-based Mapping Applications, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Report no. 461.
- Haarbrink, R.B. and Eisenbeiss, H. (2008): Accurate DSM production from

unmanned helicopter systems, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, Part B1, pp. 1259-1264.

- Hayal, A.G. (2010): Static Calibration of the Tactical Grade Inertial Measurement Units, M.Sc. Thesis, the Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- Hein, W. G., (1995): “Progress in Airborne Gravimetry: Solved, Open and Critical Problems”, IAG Symposium G4, IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado, July 2-14, 1995, pp. 3-11, Published by Department of Geomatics Engineering, UofC, Calgary, Canada, Report Number 60010.
- Hinsken, K., Miller, S., Tempelmann, U., Uebbing, R., and Walker, S., (2002): Triangulation of LH Systems ADS40 Imagery Using Orima GPS/IMU, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Comm. III Symposium, Graz, Austria, Part A*, pp.156-162.
- Hou, H. (2004): Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance, UCEGE reports number 20201, Master's thesis, University of Calgary, Alberta, Canada.
- Hou, H. and El-Sheimy, N. (2003): Inertial Sensors Errors Modeling Using Allan Variance, Proc. of ION GPS/GNSS 2003, pp. 2860-2867, September 9 - 12, 2003, Portland, OR, USA.
- Huang, Y.S. and Tsai, M.L. (2008): The Impact of Compass/Beidou-2 on Future GNSS: A Perspective from Asia, ION GNSS 2008 Meeting, Savannah, Georgia, USA.
- Hu, W.Y., Yang, G.Y. and Yuan, H. (2008): Application and Accuracy Evaluation of Leica ADS40 for Large Scale Mapping, *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, Part B1, Commission I, Beijing.
- Ip, A.W.L., El-Sheimy, N. and Hutton, J. (2004): Performance Analysis of Integrated Sensor Orientation, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 20th ISPRS Congress, Comment V*, vol. XXXV, Part B5, pp. 797-802.
- Ip, A.W.L., El-Sheimy, N., and Mostafa, M.M.R. (2004): System Performance Analysis of IMU/DGPS Integrated System for Mobile Mapping System (MMS), *The 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2004)*, Kunming, China.
- Jacobsen, K. (2008): Geometry of vertical and oblique image combinations, *Proceedings of 28th EARSeL Symposium: Remote Sensing for a Changing Europe*.
- Juiler, S.J. and Uhlmann, J.K. (1997): A New Extension of Kalman Filter to Nonlinear Systems, In Proc. SPIE – Int. Soc. Opt. Eng (USA) (Orlando, FL, April 1997), vol. 3068, pp. 182-193.
- Kalman, R.E. (1960): A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*. vol. 82: pp. 35-45.
- Kochakian, C.R. (1980): Time-Domain Uncertainty Charts (Green Charts): A Tool for Validating the Design of IMU/Instrument Interfaces, *Proceedings of the AIAA Guidance and Control Conference*, Aug. 11-13.
- Kraus, K. and Pfeifer, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 53, pp. 193-203.
- Lapucha, D. (1990): Precise GPS/INS Positioning for Highway Inventory System, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary,

Canada.

- Lechner, W. and Lahmann, P. (1995): Airborne Photogrammetry Based on Integrated DGPS/INS Navigation, Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation (K.Linkwitz and U. Hangleiter, editors), D ,mmler Verlag, Bonn, Germany pp. 303-310.
- Li, B., Su, W., Ma, J. and Fang, L. (2011): Automated highway traffic facilities detection and analysis based on land-based Mobile Mapping System, 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology, vol. VI, no. 11.
- Li, Q., Li, B., Chen, J., Hu, Q. and Li, Y. (2001): 3D Mobile Mapping System for Road Modeling, The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMS 2001), Cario, Egypt.
- Li, Y. H. (2010): The Calibration Methodology of a Low Cost Land Vehicle Mobile Mapping System, Institute of Navigation (ION) GPS/GNSS 2010 meeting, Oregon Convention Center, Portland, Oregon, USA.
- Li, Y. H.(2010): The Calibration Methodology of a Land Vehicle Mobile Mapping System and the Performance Analysis of the Direct Geo-referencing Department of Geomatics, National Cheng Kung University
- McDonald, K.D. (2001): A Future GNSS Concern on the Modernization of GPS and the Evolution of Galileo, ION GPS 2001, Salt Lake City, UT.
- Mostafa, M.M.R. and Schwarz, K.P. (1999): An Autonomous System for Aerial Image Acquisition and Georeferencing, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting, Portland, Oregon.
- Mostafa, M.M.R., (2002): Camera/IMU Bore-sight Calibration: New Advances and Performance Analysis, Proceedings of the ASPRS Annual Meeting, Washington, DC, USA.
- Ojeda, L. and Borenstein, J. (2007): Non-GPS Navigation for Security Personnel and Emergency Responders.” Journal of Navigation. vol. 60, no. 3, pp. 391-407.
- Parkinson, B.W. and Spilker, Jr. J. (1996): Global Positioning System: Theory and Applications Volume I. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, D.C.
- Pereira, L.M.G. and Wicherson, R.J. (1999): Suitability of Laser Data for Deriving Geographical Information A Case Study In The Context Of Management Of Fluvial Zones, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 54, pp.105-114.
- Petrie, G. (2009): Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2(2009), 102–107.
- Petzold, B., Reiss, P. and Stossel, W. (1999): Laser scanning—surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 54, pp. 95-104.
- Pyka, K., Borowiec, N., Kundzierewicz, T., Poręba, M. and Słota, M. (2011): Airborne laser scanning data for railway lines survey, 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology, vol. VI, no. 4.
- Schwarz, K.P. and El-Sheimy, N., (1996): Kinematic Multi-sensor Systems For Close Range Digital Mapping, ISPRS 1996, Commission V, Working Group III, Vienna, Austria.
- Schwarz, K.P. and El-Sheimy, N. (2008): Mobile Mapping Systems – State Of The Art And Future Trends, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, TS SS 3, Beijing.
- 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.



- Schwarz, K.P., Chapman, M.E., Cannon, E. and Gong, P. (1993): An Integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 59, no. 11, pp. 1667-1674.
- Schwarz, K.P., Chapman, M., Cannon, M., Gong P., and Cosandier D. (1994): “A Precise Positioning/Attitude System in Support of Airborne Remote Sensing”, *ISPRS94*, Ottawa, Canada, June 6-10, pp. 241-248.
- Shin, E. (2001): Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications MSc thesis, UCGE Reports Number 20156, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- Shin, E.H. (2005): Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, UCGE Report 20219.
- Skaloud, J., Cramer, M. and Schwarz, K.P. (1996): Exterior Orientation by Direct Measurement of Camera Position and Attitude, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXI, Part B3, pp. 125-130.
- Skaloud, J., Cosandier, D., Schwarz, K.P. and Chapman, M.A. (1994): GPS/INS Orientation Accuracy Derived From A Medium Scale Photogrammetry Test, *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation – KIS94*, Banff, Alberta, Canada, pp. 341-348.
- Sukkarieh, S. (2000): Low Cost, High Integrity, Aided Inertial Navigation Systems for Autonomous Land Vehicles, Ph.D Thesis, Australian Centre for Field Robotics, Dept. of Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, Sydney, Australia.
- Titterton, D.H., and Weston, J.L. (2004): Strapdown Inertial Navigation Technology - 2nd Edition. In *IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics*, Series 17, N. Stewart, H. Griffiths, Eds. Institution of Electrical Engineers. Stevenage, UK.
- Toth, C., and Grejner-Brzezinska, D.A. (1998): Performance Analysis of the Airborne Integrated Mapping System, *ISPRS*, Commission II.
- Wehr, A. and Lohr, U. (1999): Airborne Laser Scanning – an Introduction and Overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 54, pp.68-82.
- Wei, M. and Coyne, T. (2008): INTEGRATED AIRBORNE IFSAR MAPPING SYSTEM, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, Part B1.
- Wright, D.B. (2004): A Feasibility Study for Real-Time Detection and Georeferencing of Forest Fire Hot Spots, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada, UCGE Reports 20197.
- Xin, Y. (1995): “Automating Procedures on A Photogrammetric Softcopy System”, M.Sc. Thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada.
- Xu, G.C. (2003): *GPS-Theory Algorithms and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Yan, L. and Zuxun, Z. (1988): “Fast Implementation For Generating Epipolar Line Images With One-Dimensional Resampling”, *Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, Institut fur Geodasie und Photogrammetrie.*, Bericht Nr. 145, April 1988.
- Zach, G., Studnicka, N., Amon, P. and Pfennigbauer, M. (2011): Extraction of Facade Maps Using a RIEGL VMX-250 Mobile Scanning System Mounted on a Boat, *7th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, vol. II, no.

1.

- Zhang, Z. (1988): “A New Approach of Epipolar-line Matching for Improving the Performance of SODAMS system”, ISPRS 16th, Commission III, Kyoto, Japan, 1988.
- Zhang, J.Q. (1995): “Development of a GPS-Aided Inertial Platform for an Airborne Scalar Gravity System”, Report No. 20090, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M. and Webb, F.H. (1997): Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., vol. 102, no. B3, pp.5005-5017.
- IEEE Standard 1554-2005 (2005): IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
- IEEE Standard 1293-1998 (1998): IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Non-gyroscopic Accelerometers.
- IEEE Standard 952-1997 (1997): IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single –Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
- Carnegie Mellon University Red Team(2005), URL: <http://www.cs.cmu.edu/~red/Red/redteam.html>
- DARPA, Urban Challenge(2007), URL: <http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>
- Google Street View, URL: <http://maps.google.com.tw>
- Optech, URL: <http://www.optech.ca/index.htm>
- TOPCON, Integrated Positioning System(2009), URL: [http://www.topconpositioning.com/applications/mapping-and-gis/high-accuracy uracy-gis/hardware/ip-s2.html](http://www.topconpositioning.com/applications/mapping-and-gis/high-accuracy-uracy-gis/hardware/ip-s2.html)
- 山 葉 發 動 機 株 式 會 社 , URL : [http://www.barnardmicrosystems.com/L4E\\_rmax.htm](http://www.barnardmicrosystems.com/L4E_rmax.htm)