

中華民國地籍測量學會期刊

# 國土測繪與空間資訊

Taiwan Journal of Geoinformatics

移動製圖系統特刊

第二卷 第一期

中華民國一〇三年一月



VOLUME 2, NO. 1

Jan. 2014

Published by Chinese Society of Cadastral Survey &  
National Land Surveying and Mapping Center



內政部國土測繪中心共同發行

# 中華民國地籍測量學會第17屆組織表

## 一、理監事會：

理事長：盧鄂生

副理事長：蕭輔導

常務理事：高書屏、洪本善、梁東海

理事：謝福勝、何維信、吳宗寶、王定平、江俊泓、崔國強、陳惠玲、朱上岸、梁崇智、蕭萬禧、楊名、  
江渾欽、紀聰吉、周天穎、張嘉強、吳相忠

常務監事：蘇惠璋

監事：史天元、朱金水、蕭正宏、容承明

秘書長：鄭彩堂（兼任）

副秘書長：蔡鴻勳（兼任）

秘書：陳鶴欽（兼任）

會員資格審查委員會：由秘書處兼辦

## 二、各種委員會：

### (一)服務委員會：

主任委員：李萬凱

委員：江俊泓、孔繁榮、盧金胡、王啟鋒、陳振文、王定平、高書屏、鄭宏達、王文燦、李建利、  
楊燿東

總幹事：張台義

### (二)編輯委員會：

主任委員：楊名

委員：陳春盛、吳究、史天元、黃灝雄、洪本善、洪榮宏、趙鍵哲、楊明德

總編輯：陳國華

編輯：陳鶴欽、游豐銘、何美娟

### (三)研究發展委員會：

主任委員：洪本善

委員：陳惠玲、駱旭琛、吳宗寶、江日春、蕭萬禧、賴偉君、林志清、鄭鼎耀、彭丈、黃文華

總幹事：王敏雄

幹事：謝東發、董荔偉

### (四)獎章委員會：

主任委員：蕭輔導

委員：張元旭、黃榮峰、曾國鈞、謝福來、曾清涼、洪本善

幹事：由本會秘書處兼任

### (五)教育訓練委員會：

主任委員：劉正倫

委員：崔國強、李文聖、葉文凱

總幹事：林世賢

幹事：謝正亮

### (六)國際事務委員會：

主任委員：周天穎

委員：曾耀賢、陳惠玲、江俊泓、張坤樹、葉美伶

總幹事：邱明全

幹事：李佩珊、湯美華、鄒慶敏

學會地址：231新北市新店區三民路29巷4弄10號

網址：<http://www.cadastralsurvey.org.tw>

電子郵件：[cscs.editor@gmail.com](mailto:cscs.editor@gmail.com)

# 特刊引言

## 移動製圖系統

空間定位(Positioning)及導航(Navigation)科技的發展，結合各式光學感測器(Optic Sensors)與攝影測量(Photogrammetry)技術，帶動了移動製圖科技(Mobile Mapping Technology, MMT)的研究與發展，形成各式空載(Airborne)、車載(Vehicle-Based)或人員攜帶(Portable)之移動式製圖系統(Mobile Mapping Systems, MMS)，大幅提升了空間資料獲取及製圖的效率。具高精度定位定向系統(Positioning and Orientation System, POS)之 MMS，其測量精度通常能達到大比例尺的製圖標準，適合於地形圖測繪、三維城市模型建置、各式工程測量、及天然災害評估等應用。而具低階定位及定向功能之 MMS 則適合於許多非傳統的空間資訊收集的應用，例如道路導航資訊收集、街景調查及展示、交通設施的調查及維護、及防災應用等。應用各式載台、定位定向及感測器的組合，可充分發揮 MMS 的機動性及多功能性的優勢。本特刊共四篇文章，前三篇涵蓋無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、車載光達及人員攜帶式系統相關之理論及應用，第四篇則探討即時動態定位系統應用於 MMS 之定位表現，期待本特刊能拋磚引玉帶動國內移動製圖科技的發展。

客座編輯 曾義星 教授

於 國立成功大學測量及空間資訊學系



## 無人機攝影測量與直接地理定位之精度分析

饒見有<sup>1\*</sup> 陳智揚<sup>2</sup> 詹鈞評<sup>3</sup> 劉暹<sup>4</sup> 李文慶<sup>5</sup>

論文收件日期：102.08.09

論文修改日期：102.11.08

論文接受日期：102.12.03

### 摘 要

利用無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)進行空中攝影獲取地面影像，與有人機相比其成本較低廉、機動性與彈性也相對較高。然而無人機受到載重、空間與續航時間之限制，所能攜帶的感測器也相對必須較小、較輕，因此只能使用消費型數位相機，而其內方位較不穩定且像幅涵蓋之地面範圍也比專業航測相機小很多，在相同面積與重疊百分比要求下，拍攝的影像數量將大幅增加，會增加空三平差之處理時間、複雜度與困難度。此外，在山區拍攝時，可能整張影像的內容皆為樹林，會導致重複性紋理、陰影與均調區等問題，容易造成連結點自動匹配失敗或錯誤，進而無法以傳統空中三角測量求解影像之外方位參數。由於台灣山區每逢豪雨就會造成地質災害，因此本研究提出在定翼型無人機上裝載 NovAtel SPAN-CPT 戰術級慣性導航儀(Inertial Measurement Unit, IMU)、雙頻 GPS 接收儀與 Canon 5D Mark II 數位相機，透過直接地理定位(Direct Georeferencing, DG)迅速解算影像之外方位參數，以便在災後快速提供災情空間資訊給災防單位，同時評估應用本系統於航測製圖之可能性。本研究在系統率定上包括使用室內率定場率定相機之內方位參數，以及使用戶外地面控制場與二階段率定法解算 IMU 與相機之軸角(Boresight Angles)。研究成果顯示在 1,200 公尺航高下，以直接地理定位解算得相片外方位參數，再以前方交會檢驗其定位精度，可得到小於 1 公尺之水平方向誤差與小於 4 公尺之高程誤差。顯示本系統直接地理定位之準確度可應用在災後快速提供災情空間資訊。而在地形圖測製部分，有/無利用地面控制點進行空三平差產製 DSM 後其高程內部精度可達 1 公尺，立體製圖水平方向絕對定位誤差則在 50 公分以內。因此，若有災害前後之 UAV 影像，甚至可推估崩塌地之土石流失與堆積量

**關鍵詞：**系統率定、直接地理定位、無人機、數值地表模型

<sup>1</sup> 副教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>2</sup> 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>3</sup> 博士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>4</sup> 處長，日成航太科技股份有限公司。

<sup>5</sup> 總經理，天空飛行科技股份有限公司。

\* 通訊作者，TEL：(06)2757575#63839，E-mail: [jyrau@mail.ncku.edu.tw](mailto:jyrau@mail.ncku.edu.tw)。

# Accuracy Analyses of UAV Photogrammetry and Direct Georeferencing

Jiann-Yeou Rau<sup>1\*</sup>, Chih-Yang Chen<sup>2</sup>, Jyun-Ping, Jhan<sup>3</sup>,  
Kircheis Liu<sup>4</sup>, William Lee<sup>5</sup>

## Abstract

Comparing with manned aircraft, an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is a more flexible with lower cost platform for aerial photo acquisition. However, its payload, space, and endurance time is comparably lower and generally only light and small format consumer grade digital camera can be carried out. That means, its footprint coverage will be smaller and more images are necessary to cover the same area, and may contain only forest within one image when flying over the mountainous area. Thus, it is a difficult to utilize the conventional aerial triangulation (AT) procedure to obtain the images' exterior orientation parameters (EOPs) that requires uniform distributed tie-points within the images. Because, it is difficult to match tie-points automatically due to the image context has repetitive pattern, shadow, and homogeneous area. Since the geological hazard happened frequently after heavy rainfall in Taiwan mountainous area, it is thus suggested to utilize a fixed-wing UAV equipped with a tactical grade SPAN-CPT IMU together with a dual-frequency GPS antenna, and a Canon EOS 5D Mark II digital camera for direct georeferencing (DG) particularly when fast response for hazard investigation is required. In this paper, an in-door camera calibration field is designed for the calibration of interior orientation parameters (IOPs) and an outdoor calibration field with two-step boresight calibration procedure is applied for the purpose of DG. Detail about the system calibration procedure and accuracy analyses will be provided in the paper. Experimental results show that for flying height with 1200 m after DG and performing accuracy assessment using space intersection through check points, the RMSE in planimetric and vertical directions are less than 1 m and 4 m, respectively. It demonstrates that the positing accuracy after DG is enough for the purpose of fast hazard area investigation. On the test of topographic mapping, the internal precision of the generated DSM through ground controlled and non-ground controlled aerial triangulation are all about 1 m, while the planimetric accuracy in stereo-mapping is within 0.5 m. If two UAV image datasets can be acquired before and after disaster, the landslide loss and deposit volume could

---

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>2</sup> Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>3</sup> Ph.D Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

<sup>4</sup> Director of Technical Developer, GEOSAT Aerospace Co., Ltd.

<sup>5</sup> General Manager, Aeroland UAV Inc.

\* Corresponding author, TEL: +886-6-2757575#63839, E-mail: [jyrau@mail.ncku.edu.tw](mailto:jyrau@mail.ncku.edu.tw).

also be estimated.

**Keywords:** System Calibration, Direct Georeferencing, Unmanned Aerial Vehicle, Digital Surface Model.

## 一、前言

台灣每年平均受到三至四個颱風的侵襲，而每個颱風平均降雨量約 800 釐米。2009 年 8 月的莫拉克颱風在三天之內降下了 3,060 釐米的雨量，造成高屏溪下游平原地區嚴重的淹水，以及在南部山區觸發大量的崩塌地與土石流地質災害，因此如何有效率地蒐集、分析及協助災害管理變成了重要的研究課題。就大規模災害而言，一般都是採用有人飛機進行航拍或利用衛星進行取像。雖然有人機可以裝載大像幅專業相機或是雷射掃描儀等大型儀器，但若飛機失事其機組人員生命的損失將難以彌補。衛星影像是極佳的選擇，但通常都有空間解析度不足的問題，例如 SPOT 系列衛星(空間解析度在 2.5~10 公尺之間)與福衛二號(空間解析度 2-8 公尺)。但若採用高解析衛星影像，例如 QuickBird (0.6 公尺)、IKONOS(1 公尺)、WorldView-2 (0.5 公尺)，則會有時間解析度及資料獲取效率不足等問題。和有人機相比，無人機相對而言成本較低廉且運作彈性高、機動性強、飛行高度低，有時可在雲底下進行拍照，或在現場等候雲散再起飛拍照，以增加資料獲取效率。但由於無人機載重與空間之限制，通常僅能裝載輕小型數位相機與低精度 GPS 接收儀，而且有飛行穩定度、安全性與續航時間較低的問題，導致其應用與推廣受到限制。

傳統上航空攝影測量是以空中三角平差求解航拍影像之外方位參數，再進行立體製圖、DTM/DSM 製作及正射糾正。空三平差過程中首要工作為透過自動影像匹配得到連結點影像坐標，並經過粗差偵錯後再使用地面控制點進行基準轉換及網型控制，進而推算得到相片之外方位參數，此程序又稱為間接地理定位(Indirect Georeferencing)。若在航拍上同時進行 GPS 觀測，則可推算得到相機透視中心初始位置。此時若採用雙頻 GPS 接收儀且有架設 GPS 地面參考站協助差分定位，則可提供高精度之位置觀測量，進而可透過權的設定當作控制，稱為 GPS 輔助空三。此時即使沒有地面控制點仍可得到相當高精度之外方位參數，但是 GPS 差分定位仍具有系統性誤差，因此必須在測區四周各佈置 2 個全控制點來修正此誤差，並於航線頭尾佈設高程控制鍊或增加兩條交叉航線取代高程控制鍊。若載台上同時有搭配慣性導航儀(IMU)進行直接地理定位提供影像之初始外方位參數，則頭尾兩條交叉航線亦可省略之(內政部，2013)。表 1 比較 GPS 輔助空三與直接地理定位之優缺點，據此可知直接地理定位時只要經過精準之系統率定，飛行軌跡可以是任意形式，例如廊道、點狀、區塊等。而拍照時亦不須要求重疊百分比，仍可在短時間(一小時)內求解得到上萬張照片的外方位參數，以協助快速災情調查。

近年來無人機之發展漸漸受到國內外學者的重視，並應用在攝影測量與遙測等方面。無人機可分為旋翼型(Rotary)與定翼型(Fixed-wing)兩大類，旋翼型無人機按其螺旋槳數量又可分為單螺旋槳(例如 Aer scout Scout B1-100、Swiss UAV NEO S-300、Schiebel's Camcopter S-100 等)與多螺旋槳(例如 Microdrones MD4-200/1000、Astec Falcon-8、AI-RIDER YJ-300-HC 等)。飛行控制則分為人員遙控(Remote Control)、自動飛控(Auto Pilot)或混和兩種機制，但有自動飛控者通常也都具有人員遙控之能力，以協助起飛降落或緊急操控。起飛方式可為跑道、彈射或車頂，降落方式則可

能為跑道、降落傘或攔截網。能源來源主要為燃料或電池兩種，一般而言使用燃料之無人機多為定翼型與單螺旋槳型，其載重與續航力較高。而多螺旋槳型無人機則多使用電池，其安全性與穩定性較高。此外，也有使用電池之定翼型無人機，例如 Sensefly SwingleCAM 與碳基的 Swallow-P 與 Avian-P。因此根據任務需求應採用不同的無人機，例如針對小型崩塌地進行長期監測，較適合採用旋翼型無人機。若要針對一個小型集水區進行監測，則應該選用燃料型無人機。國內目前有些研究單位，採用燃料型單螺旋槳無人機，但其續航力較低且都採用人員遙控，無法滿足大範圍測繪與調查的需求。為了達到測繪之目的，國內幾個 UAV 廠商，例如智飛、經緯、天空飛行，多採用燃料定翼型無人機。

表 1 GPS 輔助空三與直接地理定位之比較

|         | GPS 輔助空三               | 直接地理定位   |
|---------|------------------------|--|
| 定位定向感測器 | GPS 接收儀+地面 GPS 參考站     | GPS/IMU +地面 GPS 參考站  |
| 地面控制點   | 按製圖規範必須                | 不必要  |
| 連結點匹配   | 必須                     | 不必要  |
| 影像內容    | 必須擁有影像特徵               | 任何地物皆可，例如海面、冰原、沙漠、森林等。                                     |
| 外方位解算   | 光束法平差                  | 不須空三平差，但須先進行系統率定。  |
| 飛行軌跡    | 區塊式且需有足夠影像重疊           | 任何飛行軌跡與拍照方式皆可適用  |
| 處理時間    | 視影像數量而定，通常包括控制點量測需要幾天。 | 資料準備就緒一個小時以內即可解算完成幾千張相片之外方位參數                              |
| 定位精度    | 視地面控制點與 GPS 接收儀等級而定    | 視 GPS/IMU 等級而定，尤其是 IMU。                                    |
| 主要費用    | 地面控制測量與空三平差            | IMU 與系統率定  |
| 應用面     | 測繪與三維地形重建              | 地質災害、淹水、森林火災之調查與監測。若飛行與拍照方式符合 GPS 輔助空三程序，亦可符合測繪與三維地形重建之需求。 |

為了探討無人機同時在災害調查與攝影測量之應用，本研究擬搭載戰術等級慣性導航儀、雙頻 GPS 接收儀及全像幅 DSLR 數位相機(鏡頭焦距 50mm)，與其他設備之總重約 10 公斤，因此採用載重可達 15 公斤之 AL-40 當作無人機平台，以驗證利用無人機航拍影像進行航測製圖及直接地理定位之精度，同時評估此種架構是否可以滿足快速災情調查及高精度測繪之需求。表 2 為 AL-40 之特性，圖 1 則為 AL-40 的外觀及其裝載的 IMU 與 GPS 天線，相機則是固定在 IMU 下方，三者間以木製支架連結，企圖使此二儀器之相對位置保持不變。據此，本研究主要之目標為克服直接地理定位之系統率定問題，包括相機率定、軸角與固定臂率定、地面坐標基準轉換問題。接著則是探討以 DSLR 數位相機進行航測地形圖測製可滿足何種等級製圖之精度需求，以及採用戰術等級 IMU 進行直接地理定位其定位精度之層級是否符合快速災情調查之需求。

表 2 AL-40 與酬載之特性

|         |             |         |                                     |
|---------|-------------|---------|-------------------------------------|
| 大小(寬/長) | 3 m / 2.4 m | 續航力     | 2 小時                                |
| 空機重量    | 20 kg       | 最大飛行高度  | 5000 m                              |
| 最大起飛重量  | 40 kg       | IMU     | SPAN-CPT                            |
| 最大酬載重量  | 15 kg       | GPS 接收儀 | NovAtel <sup>®</sup> ProPak-V3 (雙頻) |
| 巡航速度    | 110 km/hr   | 相機      | Canon EOS 5D Mark II                |
| 操作範圍    | 直徑 100 km   | 鏡頭焦距    | 50 mm (FOV~ 40° x 27°)              |
| 起飛方式    | 跑道          | 降落方式    | 跑道                                  |



圖 1 AL-40 外觀及 SPAN-CPT(右上小圖)

## 二、研究方法

圖 2 為本研究之流程圖，大致上可分為五個步驟，也就是相機率定及影像變形修正、基準修正、空中三角測量、製作 DSM 與正射影像、直接地理定位和精度分析。

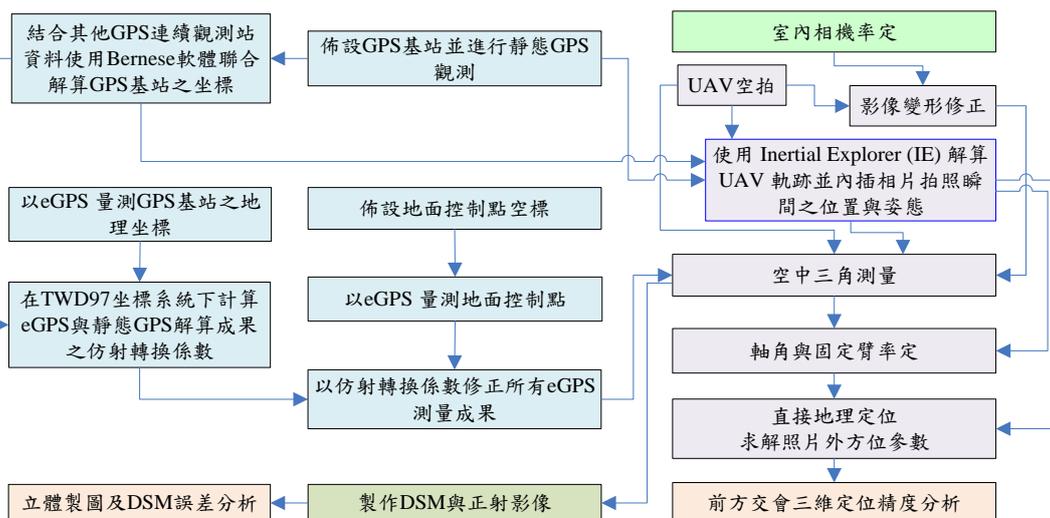


圖 2 研究流程圖

## (一) 相機率定及影像變形修正

相機內方位參數主要是用來描述光線穿過鏡頭在相機內部的成像幾何，進而修正光線的行徑以符合共線條件式，才能達到高精度測量的目的。由於本研究採用的是消費型數位相機，因此在攝影測量前，必須透過相機率定求得精確的內方位參數，以解算其焦距、像主點坐標與透鏡畸變等參數。本研究採用附加參數自率光束法平差，在拍攝率定用影像時，從不同位置對著率定場進行拍攝，以形成交會攝影提升交會幾何強度，並使平差過程達到較穩定可靠且精確的內方位參數。

本研究採用可旋轉之圓盤率定場，上面固定了 112 根長短不一的柱子，柱子一端貼附可透過軟體自動辨識的人造標，或者貼附可提供自動參考的白色圓點，進而形成三度空間率定場。在拍攝率定用影像時，相機位置固定，每旋轉圓盤 22.5-45 度拍攝一張相片，圓盤旋轉一圈後將相機本體旋轉 90 度，再重複上述程序一次，最後面對圓盤正中央拍攝兩張相片，總共拍攝 18-34 張影像，如此一來其影像分布與交會情形和從率定場四周不同位置拍攝率定場具有相同的結果。圖 3 左圖為本研究使用之室內率定場，圖 3 右圖為率定用相片之 3D 網型示意圖，其中紅色線段為人造標上已知長度的兩條線段(由四個圓形標連線而成)，供平差過程中設定模型之尺度。拍攝時須盡量將整張影像四周佈滿人造標，以提供影像外圍坐標觀測量，率定成果才能完整描述透鏡畸變情形(Rau and Yeh, 2012)。

本研究採用的是附加參數自率光束法平差(Fraser, 1997)進行像機率定，其數學模式為共線條件如式(1)及式(2)，而附加參數模式則如式(3)及式(4)，也就是將內方位參數當作附加參數，在平差求解過程中每一張影像之外方位參數及地面三維坐標觀測量都同時具有未知數的修正量，在迭代過程調整所有參數至最符合光線交會幾何，即可完成方位參數求解及率定相機。

$$x_a = x_p - f \frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{12}(Y_A - Y_0) + m_{13}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} + \Delta x \quad (1)$$

$$y_a = y_p - f \frac{m_{21}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{23}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} + \Delta y \quad (2)$$

$$\Delta x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{x} + P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \quad (3)$$

$$\Delta y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{y} + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x}\bar{y} \quad (4)$$

其中  $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ ， $\bar{x} = (x_a - x_p)$ ， $\bar{y} = (y_a - y_p)$ ， $(x_a, y_a)$  為像坐標， $(x_p, y_p)$  為像主點坐標， $f$  為焦距， $m_{11} \sim m_{33}$  為旋轉矩陣九個元素， $K_1, K_2, K_3$  是輻射透鏡畸變(Radial Lens Distortion)參數， $P_1, P_2$  為切向透鏡畸變(Decentric Lens Distortion)參數， $B_1, B_2$  則為影像感測器仿射變形參數。

接著，本研究為了後續空中三角測量、製作數值地表模型(DSM)、軸角率定與立體製圖等，先將影像進行影像變形修正，包括透鏡畸變與像主點偏移量之修正，以降低空三平差之複雜度。圖 4 為利用公式(1)~(4)修正透鏡畸變與像主點坐標前後之比較。在此為了突顯其差異，特別以廣角鏡頭所拍攝之近景影像為範例，圖 4 左

圖為影像變形修正前之影像，建物牆面與邊界之直線為弧線，修正後成為直線，可明顯看出修正之成效，後續將進一步以立體影像(核影像)來觀察其 y 視差是否有消除，以確認透鏡畸變修正成果之正確性。

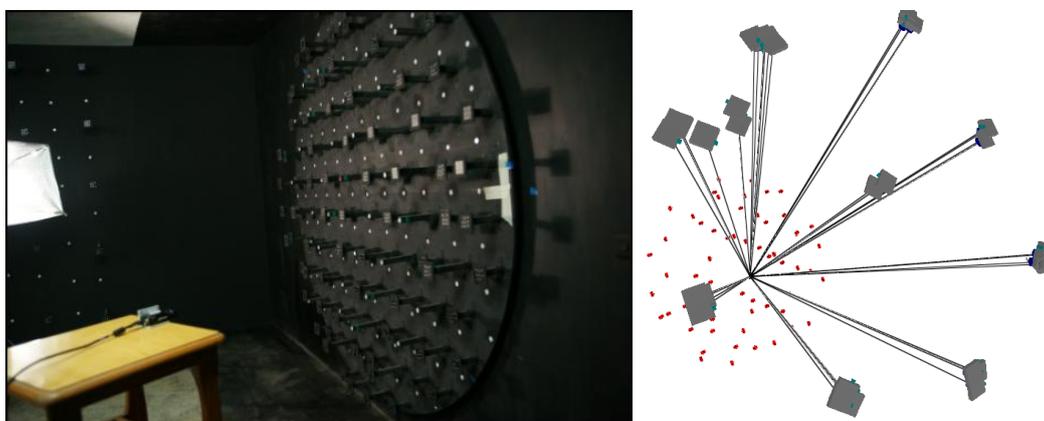


圖 3 室內相機率定場(左圖)及率定用影像 3D 網型(右圖)



圖 4 影像變形修正前(左)與後(右)之比較

## (二) 基準校正

由於 UAV 之 IMU/GPS 整體解算是以某靜態 GPS 觀測站為基準，進行 RTK 即時動態定位，而本研究在 UAV 影像空三平差解算與檢核時，是以內政部國土測繪中心建置之 eGPS 系統量測地面控制點之地理坐標，並轉換到 TWD97 地圖坐標。因此兩坐標系統必須一致，方能進行軸角與固定臂率定。然而 eGPS 坐標系統是以內政部公佈之 TWD97 國家坐標系統為起算基準，但因為臺灣地區地殼變動頻繁，部分地區之點位有明顯位移，且區域性地表位移量各地皆不同，加上參考站坐標經過數年未更新修正，導致套合引用有實務上困難。因此內政部乃於民國 98 年 10 月起邀請專家學者召開「大地基準及坐標系統更新維護機制」會議，將 GPS 參考站公告坐標更新到 2010 年，簡稱 TWD97(2010)(楊名，2013)。因此，為了將 eGPS 觀測成果轉換到 TWD97(2010)坐標系統，本研究假設兩坐標系統間在小區域範圍內平面坐標變形可使用仿射轉換來描述，因此在率定場內選擇 10 個控制點進行 eGPS 測量，並且以雙頻 GPS 接收儀做靜態 GPS 觀測 1.5 小時以上，並與周遭數個 GPS 連續觀測站資料，以 Bernese 軟體進行聯合解算，再以仿射轉換求解其轉換參數，最後套用此轉換係數到其餘 eGPS 觀測坐標點位，以便應用到後續之空三平差作業。

### (三) UAV 軌跡解算

本研究使用之 UAV 搭載了 SPAN CPT 整合式定位定向系統，包含一台戰術等級 IMU 及雙頻 GPS 接收儀，可觀測載具之位置與姿態。GPS 觀測可提供高精度位置資訊，但 GPS 取樣頻率僅 1Hz，故對於快速移動之載體可能會導致較大的內插誤差。另一方面，IMU 之取樣頻率為 100Hz，可在短時間內提供高精度之位置與姿態，但隨著觀測時間增加其飄移量會越大，位置誤差也會累加。因此兩者間必須截長補短，以 GPS 當作控制來修正 IMU 之飄移量，而 IMU 則可提供高頻率之定位定向資料，減少定位誤差，同時若在短時間(5 分鐘)內即使有 GPS 週波脫落問題，仍能提供精確的位置資訊(Shin, 2005)。

本研究使用 NovAtel 之 Inertial Explorer (IE)解算 UAV 飛行軌跡，首先會結合地面基站 GPS 觀測資料，利用 RTK 即時動態定位方式解算其軌跡。接著加入 IMU 資料與 GPS 到 IMU 之固定臂參數，透過緊耦合(Tightly-coupled)卡曼濾波器，推估整個載體(IMU Body-frame)之位置與姿態，進而內插得到每一張影像拍攝瞬間載體的位置與姿態。根據 SPAN CPT 之規格，若無 GPS 週波脫落，以 RTK 即時動態定位方式解算得到之軌跡其精度在平面方向約 2 公分，高程方向約 5 公分，而姿態角方面 Roll 和 Pitch 約 0.015 度，Heading 約 0.05 度。

### (四) GPS 輔助空三及航測製圖

本研究採用二階段率定法(Skaloud, 1999)求解 IMU 與相機間之軸角與固定臂參數，因此首先需進行嚴密的 GPS 輔助空中三角測量，以計算影像之外方位參數。由於本研究之 GPS 天線(約 5(寬) x 7(長) x 1(深)立方公分)、IMU(約 15.2(寬) x 16.8(長) x 8.9(深)立方公分)與相機(約 15.2(寬) x 11.35(長) x 12.5(深)立方公分)，在組裝時為上下排成接近一直線，從天線中心到相機透視中心僅約 15 公分。故在利用 ISAT 進行 GPS 輔助空三時，可設定相機透視中心先驗中誤差為 15 公分。由於在前述 UAV 軌跡解算後，已將 GPS 位置化算到 IMU 載體中心，而 IMU 座標軸原點(可從 IMU 外殼標示之三軸估計而得)與相機透視中心之位置(離 CMOS 感測器約 5 公分處)距離不到 10 公分，在先驗中誤差 15 公分範圍內，因此本研究直接以 IMU 載體中心位置，當作相機透視中心之初始位置。

本研究採用三種商用軟體，各軟體在本研究之角色彙整於表 3 中。首先本文利用 Pix4D Pix4UAV<sup>®</sup> 軟體進行影像匹配得到連結點影像坐標(Strecha and Bronstein, 2012)，其平差過程會進行自動化錯誤過濾，但結果仍會有少數錯誤。因此，本研究再將匹配得到之連結點影像坐標匯入 Photometrix Australis<sup>®</sup> 進行自由網平差並以人工協助粗差偵錯、檢查網型、檢驗影像坐標後驗中誤差，再設定一些地面控制點進行七參數基準轉換，檢驗其模型轉換誤差，進而間接評估內方位參數與網型內部精度。

經過上述程序後，本研究再將連結點影像坐標、像片初始位置及地面控制點等匯入 Intergraph ISAT<sup>®</sup> (Image Station Automatic Triangulation)進行自由網或最小約制平差，確認影像坐標觀測量沒有大錯誤，再透過控制點與檢核點檢驗空三平差成果

之內部與外部精度，若精度符合後續率定需求，即可進行二階段直接地理定位之系統率定。

由於 *Australis*<sup>®</sup> 沒有將地面控制點加入空三平差，以協助網型約制的機制，僅能做基準轉換，而 *Pix4UAV*<sup>®</sup> 則無法調整觀測量之先驗中誤差與控制點之權重，其空三平差過程對使用者而言是一個黑盒子。因此本研究以 *ISAT* 解算之影像外方位參數，協助軸角與固定臂參數之率定。

此外，本研究同時利用 *Pix4UAV* 商用軟體，以全自動密集影像匹配技術(*Dense Matching*)(*Strecha et al.*, 2003; *Strecha et al.*, 2004; *Tola et al.*, 2012)得到共軛點影像坐標，最後以前方交會產生地表三維點雲，進而內插成網格式數值表面模型(*DSM*)，以及製作真實正射影像(*True Orthoimage*)(*Strecha et al.*, 2008)。

表 3 三種商業軟體在本文所扮演之角色

|                   | <i>Pix4UAV</i> | <i>Australis</i> | <i>ISAT</i> |
|-------------------|----------------|------------------|-------------|
| 相機率定              |                | V                |             |
| 連結點影像匹配           | V              |                  |             |
| 連結點錯誤過濾           | V(自動)          | V(人工)            |             |
| 設定控制點做基準轉換        | V              | V                |             |
| 自由網平差             |                | V                | V           |
| 最小約制/強制附合平差       |                |                  | V           |
| 檢核點檢驗外部精度         |                |                  | V           |
| 二階段率定之 EOP 參考資料來源 |                |                  | V           |
| 自動匹配產生 DSM        | V              |                  |             |
| 製作真實正射影像          | V              |                  |             |

### (五) 直接地理定位(Direct Georeferencing)

直接地理定位屬於直接感測器定位(*Direct Sensor Orientation*)之一環，可透過 *GPS/IMU* 之位置與姿態直接推估得到感測器之位置與姿態。圖 5 為直接地理定位之示意圖，感測器之位置與姿態可以透過公式(5)與公式(6)計算得到。

$$r_c^m = r(t)_{GPS}^m - R(t)_b^m a_{GPS}^b + R(t)_b^m a_c^b \quad (5)$$

$$R_c^m = R(t)_b^m R_c^b \quad (6)$$

其中

$r_c^m$  為相機相對於地圖坐標系統(*Mapping Frame*)之位置向量。

$r(t)_{GPS}^m$  代表在攝影瞬間(*t*)，差分定位後 *GPS* 天線中心相對於地圖坐標系統之位置向量。

$R(t)_b^m$  代表在攝影瞬間(*t*)，*GPS/IMU* 整體解算後 *Body-frame* 相對於地圖坐標之旋轉矩陣。

$a_{GPS}^b$  代表 *GPS* 接收儀相對於 *IMU* 之空間偏移量(*Lever-arm*)，可透過地面測量而得。

$a_c^b$  代表相機相對於 *IMU* 之空間偏移量(*Lever-arm*)，通常也是透過地面測量而得。



階段或二階段系統率定(Skaloud, 1999; Cramer and Stallmann, 2002)而得。但由於空三平差過程相機之位置與姿態具有高相關，位置之變異量大於固定臂，導致固定臂之率定成果不可靠，因此大都以地面測量取代之。本研究為了分析其影響量，仍利用兩階段率定法率定固定臂系統偏差量，也就是在空三平差後即可獲得每一幅影像透視中心在地圖坐標系統之位置向量( $r_c^m$ )，同時透過 GPS/IMU 整體解算後 Body-frame 在攝影瞬間(t)相對於地圖坐標系統之位置向量( $r(t)_b^m$ )，因此依照公式(9)可以求解固定臂( $a_c^b$ )之位置向量。

$$a_c^b = R(t)_m^b(r_c^m - r(t)_b^m) \quad (9)$$

在軸角率定方面，每一幅影像都可以透過空三平差得到相機相對於地圖坐標系統之旋轉矩陣( $R_c^m$ )，同一時間也可透過 GPS/IMU 整體解算後 Body-frame 在攝影瞬間(t)相對於地圖坐標系統之旋轉矩陣( $R(t)_b^m$ )，因此相機相對於 IMU 之旋轉矩陣即可利用公式(10)求解而得，進而可推求其相對旋轉角或稱為安置角(Mounting angles)。

$$R_c^b = R(t)_m^b R_c^m \quad (10)$$

本研究利用上述程序及公式(9)與(10)率定得到每一組相片之軸角與固定臂參數，由於一張照片即可率定得到一組參數，因此再透過平均方式求得最後之系統偏差量，進而統計其標準偏差以評估率定成果之內部精度。經由上述程序即可透過直接地理定位方式，不經傳統空三平差程序，求得每一張影像之外方位參數。假設相機、GPS 天線、IMU 等設備之相對位置在率定後與其他拍攝任務過程中都沒有變動，率定航拍只須做一次，往後在緊急時刻如自然災害發生時，啟動此無人機到災區進行航拍，可立即套用軸角與固定臂參數，快速計算得到每一張影像之外方位，即可進行災區範圍之數化或量測，提供精確之災情空間資訊給防救災單位，協助決策支援。

### 三、案例測試

本研究之實驗區位於屏東縣高樹鄉，面積約 9 平方公里。實驗中共進行兩個架次之 UAV 航拍，航高分別為 600 公尺(12 條航線)與 1200 公尺(14 條航線)，圖 6 及圖 7 分別顯示兩個架次之 UAV 飛行軌跡，包括控制點之分布及地面 GPS 參考站(NCKULIKN)之位置。圖中黃色區域為空三平差使用之影像區域，紅色區域則為系統率定使用之影像範圍，其範圍在測區中心且區域較小，主要是為了使選用之影像皆有一致的交會幾何與穩定的外方位參數。

#### (一) 地面控制點

本研究利用 eGPS 系統測量 35 個地面控制點，求得 TWD97 平面坐標與橢球高。其中 10 個控制點另外使用雙頻 GPS 天線進行 1.5 小時以上之靜態觀測，並使用 Bernese© 解算其坐標，過程中與鄰近的兩個 GPS 連續觀測站 G441 與 GS45 進行聯

合解算，以求得精確的地心坐標、經緯度及橢球高，接著再將經緯度轉換成 TWD97(2010)平面坐標，而為了避免大地起伏轉換之誤差，率定時高程系統維持為橢球高。利用這 10 個控制點以仿射轉換模式計算兩個坐標系統間之轉換參數，結果發現此二系統間在 E 與 N 方向分別具有 48 公分與-29 公分之平移量，而轉換過程之標準偏差為 4.9 公分，最大差異僅 7 公分，因此轉換成果可滿足後續空三平差與系統率定之精度需求。



圖 6 600 公尺航高之軌跡、地面控制點分布、空三平差範圍(黃色框)與率定用影像範圍(紅色框)

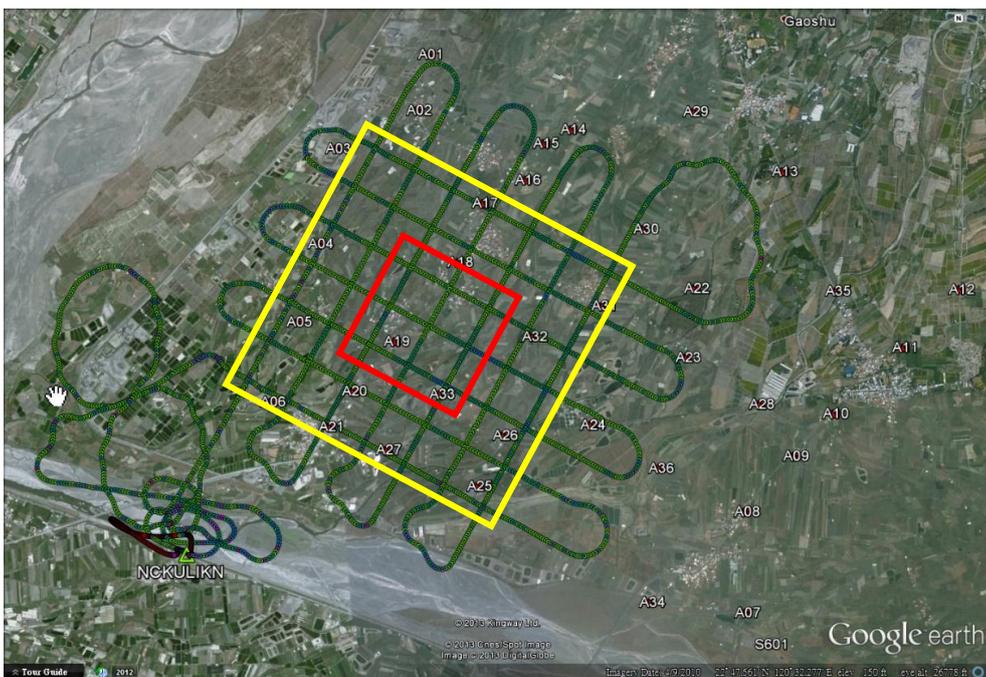


圖 7 1200 公尺航高之軌跡、地面控制點分布、空三平差範圍(黃色框)與率定用影像範圍(紅色框)

## (二) 無人機攝影測量

### 1. GPS 輔助空三平差

本實驗共進行兩個架次之 UAV 航拍，航高分別為 600 公尺與 1200 公尺，影像之前後重疊率與側向重疊率分別為 80% 與 50%。在 600 公尺航高共拍攝 1270 張影像，1200 公尺航高則拍攝 1449 張影像，本研究選用圖 6 與圖 7 黃色區域內之影像進行空三平差計算，其中為了計算效率 Australis 及 ISAT 軟體是採用跳片後仍具有 60% 以上重疊率之影像。表 4 為分別使用三種空三平差軟體解算後之誤差分析，包括檢驗控制點之內部精度及影像觀測量殘差之中誤差( $\sigma_0$ )。一般經驗使用特徵匹配進行空三平差其  $\sigma_0$  可達 0.3 個像元，但從表 4 之  $\sigma_0$  得知本項實驗拍攝之影像其影像坐標量測誤差達 0.63~1.2 個像元，主要原因是此 UAV 仍在建置測試階段，尚未考慮到避震問題，因此部分影像有模糊效應。

整體而言三種軟體空三平差後控制點 RMS 的高程精度皆比平面精度差，主要原因是本次實驗採用 50 mm 鏡頭，其視野角較小僅約 27 度 x 40 度，基線航高比約在 0.05~0.2 之間，使得空三平差網型幾何強度較弱，且高程定位精度較差。而 Australis<sup>®</sup> 計算成果控制點 RMS 在高程部分比其他兩套軟體高很多，主要是因為 Australis<sup>®</sup> 平差計算時並沒有控制點約制機制，僅能進行基準轉換將區域坐標系統轉換到與控制點相同的坐標系統，因此沒有辦法利用控制點維持應有之網型。由於實驗過程中，內方位之率定時間與 UAV 航拍時間差距太久，且實驗過程中有多次起降與拍照測試，導致內方位參數或許有些變化。此時影像坐標觀測量仍帶有些許系統誤差，導致平差後誤差傳播到連結點地面坐標造成網型變形，因此控制點 RMS 誤差較大。

另一方面，Pix4UAV 計算成果看似非常準確，但使用者無法控制及調整其平差計算之參數，如觀測量之權重等，皆包裝在程式的黑盒子當中。最後在 ISAT 空三平差時，我們可以調整各項觀測數據之權重，例如影像初始位置及姿態、地面控制點和影像坐標量測先驗中誤差等，表 5 顯示本實驗所設定之權重。表 6 為影像連結點數量之統計，顯示有多少連結點被多少張影像觀測到，還有一張影像中有多少匹配成功之連結點。由此表可知因為重疊百分比相當高，尤其在航高 1200 公尺時採用雙重區塊(double block)，因此多餘觀測數相當高，空三成果可靠度高。但空三成果檢核點高程誤差仍較大，原因跟鏡頭之 FOV 及影像之 B/H 比值較小有直接關係。而高程誤差在航高 1200 公尺比航高 600 公尺大，則是與像比例尺(影像解析度)有直接相關。因此後續研究可考慮以較低的航高及使用較短焦距之鏡頭，例如 24mm，以提升影像解析度、B/H 比值與網型強度，並且隨時進行相機率定，以觀察內方位參數之穩定性。

表 4 空三平差誤差分析成果

| UAV<br>航高 | 影像<br>數量 | 空三軟體      | B/H  | 控制點<br>數量 | 控制點 RMS (m) |       |       | Sigma0<br>(Pixel) | 檢核點<br>數量 | 檢核點 RMSE (m) |       |       |
|-----------|----------|-----------|------|-----------|-------------|-------|-------|-------------------|-----------|--------------|-------|-------|
|           |          |           |      |           | E           | N     | H     |                   |           | E            | N     | H     |
| 600 m     | 568      | Pix4UAV   | 0.1  | 9         | 0.117       | 0.116 | 0.660 |                   |           | NA           |       |       |
|           | 283      | Australis | 0.2  | 13        | 0.333       | 0.300 | 7.235 | 0.63              |           | NA           |       |       |
|           |          | ISAT      | 0.2  | 7         | 0.153       | 0.175 | 0.474 | 1.20              | 4         | 0.197        | 0.359 | 1.214 |
| 1200 m    | 679      | Pix4UAV   | 0.05 | 8         | 0.045       | 0.120 | 0.330 |                   |           | NA           |       |       |
|           | 339      | Australis | 0.1  | 13        | 0.330       | 0.304 | 4.961 | 0.77              |           | NA           |       |       |
|           |          | ISAT      | 0.1  | 8         | 0.151       | 0.243 | 0.330 | 1.17              | 5         | 0.206        | 0.571 | 3.141 |

表 5 ISAT 空三平差各觀測量權重之設定

|                     |          |          |
|---------------------|----------|----------|
| 航高(m)               | 600      | 1200     |
| 影像坐標先驗中誤差( $\mu$ m) | 3        | 3        |
| 影像位置先驗中誤差(m)        | 0.15     | 0.15     |
| 地面控制點先驗中誤差(m) 平面/高程 | 0.05/0.1 | 0.05/0.1 |
| 地面檢核點先驗中誤差(m)       | 10,000   | 10,000   |

表 6 影像連結點統計

| 航高 600 公尺 |          | 航高 1200 公尺 |          |
|-----------|----------|------------|----------|
| 影像觀測數量    | 連結點數量    | 影像觀測數量     | 連結點數量    |
| 2 - 3     | 1806674  | 2 - 3      | 2174890  |
| 4 - 5     | 197151   | 4 - 7      | 218532   |
| 6 - 7     | 34836    | 8 - 11     | 28412    |
| 8 - 9     | 12136    | 12 - 15    | 8143     |
| 10 - 11   | 3765     | 16 - 19    | 3331     |
| 12 - 13   | 817      | 20 - 23    | 1691     |
| 14 - 15   | 208      | 24 - 27    | 955      |
| 16 - 17   | 46       | 28 - 31    | 540      |
|           |          | 32 - 35    | 316      |
|           |          | 36 - 39    | 180      |
|           |          | 40 - 43    | 44       |
| 每張影像連結點數量 |          | 每張影像連結點數量  |          |
| Median    | 9275     | Median     | 9394     |
| Min.      | 910      | Min.       | 2612     |
| Max.      | 17614    | Max.       | 28424    |
| Mean      | 9126.669 | Mean       | 9473.127 |

## 2.產製 DSM 之準確度與可靠度分析

為了比較有無利用地面控制點對產製之 DSM 準確度的影響，在利用 Pix4UAV 進行空三平差及製作 DSM 時，將比較有無設定控制點之成果。在 600 公尺與 1200 公尺航高拍攝之影像其空間解析度分別約為 7.7 公分與 15.4 公分，實驗中設定 DSM 網格大小分別為 1 公尺與 2 公尺。由於本研究布置之檢核點是在平面道路上，因此在 DSM 誤差分析時可檢驗高程之準確度。表 7 為誤差分析成果，由此得知不管是否使用地面控制點，兩種航高產生之 DSM 其內部精度(標準偏差)皆在 90 公分以內。

若有使用地面控制點，則所產生之 DSM 準確度(均方根誤差)仍可達 51-61 公分，但最大誤差可達 1.71 公尺。而若沒有使用地面控制點，則會有約 1.03 公尺與 5.33 公尺之系統性偏差，因此均方根誤差也隨之擴大，此與載體之位置初始值及 B/H 比值太小有關。

表 7 DSM 高程誤差分析成果

| 航高 (m)    | 600   |       | 1200  |      |
|-----------|-------|-------|-------|------|
| GSD (m)   | 1     |       | 2     |      |
| B/H       | 0.1   |       | 0.05  |      |
| GCP       | 有     | 無     | 有     | 無    |
| 最大值 (m)   | 1.71  | 2.71  | 1.04  | 6.93 |
| 最小值 (m)   | -0.63 | -0.79 | -0.59 | 3.75 |
| 平均值 (m)   | 0.14  | 1.03  | 0.06  | 5.33 |
| 標準偏差 (m)  | 0.39  | 0.86  | 0.51  | 0.88 |
| 均方根誤差 (m) | 0.61  | 1.31  | 0.51  | 5.39 |

本研究採用視覺比較法及相減法進行可靠度分析。由於量化之可靠度分析仰賴正確之多餘觀測數，但本研究採用全自動多影像密集匹配產製 DSM，每一個前方交會計算得到之點雲是由多少張影像觀測得到無法得知，況且影像匹配也有可能發生錯誤，因此無法以量化方式分析每一個點雲之可靠度。國內外使用空載光達產製 DSM 與 DTM 已經是相當普遍且被接受的作法，因此本研究乃利用空載光達產製之 DSM 與本研究產製之 DSM 進行視覺上與高程上之差異分析，間接評估其可靠度。

圖 8 顯示兩個案例，其中空載光達是由自強工程顧問有限公司所提供，其航高約 1,600 公尺，掃瞄頻率為 170 KHz，點雲密度約 1.4 點/m<sup>3</sup>，產製 DSM 時為使用第一回波資訊以 Kriging 模式內插得到網格 DSM。而 UAV 產製之 DSM 部分是採用 600 公尺航高拍攝之影像，圖 8 以假色顯示高程之變化，同時搭配真實正射影像以了解地物真實內容。由於利用影像匹配量測共軛點時若遇到均調區(例如屋頂或水體)或有重複紋理(樹林或草地等)容易造成匹配之不確定性，而導致可靠度較低之成果，因此 Pix4UAV 會放棄這類成果，因而在圖 8 可以發現一些黑色區塊，表示這些地方沒有產生 DSM。

由圖 8 亦可觀察到，兩種方法製作之 DSM 有相當高之相似性，顯示本 UAV 系統產製之 DSM 其合理性與可靠度高。主要差異發生在樹木與建物邊界，因為影像無法透過樹木看到地面，因此樹木部分透過 UAV 影像產製之 DSM 較為濃密。但空載光達有機會透過稀疏之樹葉縫隙掃描到地面，因此產製之 DSM 在樹木區域有可能發生較多的空隙。而建物邊界在影像中為明顯之地物特徵，會被萃取並進行匹配得到建物邊界資訊，但空載光達是以規則掃描方式取樣，不一定會直接量測到建物邊界，因此空載光達 DSM 在建物邊界會有比較多的毛邊現象。

接著，本研究將此二 DSM 進行相減，以量化分析兩者之差異。圖 9 為一範例，其中圖 9-1 為空載光達產製之 DSM，圖 9-2 為 UAV 航拍製作之 DSM，圖 9-3 為兩者之差值，圖 9-4 為真實正射影像，圖 9-5 為 DSM 差值之直方圖，圖 9-6 為圖 9-3

箭頭處之 DSM 差值。由圖 9 可見主要差異發生在建物邊緣，其中橢圓虛線處之建物顯示在圖 9-7，由於該建物牆面並非垂直平面，而空載光達掃描方向為東西向，航線偏西邊，因此會掃到牆面與屋頂女兒牆及屋頂面，經過內插後產生了鋸齒狀的邊界。此外圖 9 橢圓實線處則因為相對於掃描方向該處是坐落在建物的遮蔽區，建物旁邊沒有點雲資料，在內插時使用到地面與屋頂面點雲，因此其高度變化並不明銳，但 UAV 航拍影像因為重疊率高達 80%，因此遮蔽效應較少，經過影像匹配後可得到建物邊界與地面之點雲，故內插成網格 DSM 後成果較合理。此外，由 DSM 差值直方圖可看出其分布主要坐落在 0 附近，標準偏差約 2 公尺，顯示兩者之一致性相當高。因此若針對小範圍之崩塌地或河床進行定期的 UAV 航拍監測，製作不同時期之 DSM，將有機會評估崩塌地或河床中土石的流失率、流失量與堆積量，對於災害、森林、河川與集水區之管理會有相當大的幫助。

### 3.立體測繪 y 視差及定位誤差分析

由於航測製圖標準作業程序多採用數值航測工作站(Digital Photogrammetry Workstation, DPW)進行立體觀測及繪圖，若立體影像具有 y 視差，操作者將無法觀測到立體，也就無法進行數化製圖。為了驗證利用 UAV 搭載 DSLR 數位相機仍可達到此目的，在此除了以立體觀測檢驗 y 視差外，並以立體量測地面檢核點三維地圖坐標，以統計其三維定位之準確度。

圖 10 為使用 ERDAS Imagine LPS 搭配 MicroStation\PRO600 模組進行立體觀測之成果，其中左圖因為影像之內、外方位參數準確度不足導致立體影像上有 y 視差現象，例如左圖中左右影像上之紅色十字形浮測標，其位置在影像之 y 方向有很大的差異，但右圖都可準確量測到相同的地物，表示右圖立體影像之內外方位參數都具有相當高之準確度。

另外，由圖 10 畫面最下方可以看到立體量測後地物之三維坐標，因此本研究接著以相同程序量測檢核點地圖坐標，並與真值比較進行立體製圖之誤差分析，所使用之外方位參數為 ISAT 空三平差成果，影像為經過透鏡畸變修正後之影像。表 8 為立體量測誤差分析成果，顯示三個軸向之均方根誤差(RMSE)、最大誤差、最小誤差及平均誤差。兩者在平面 RMSE 部分都在 50 公分以內，可達到 1:2500 製圖精度之要求，但高程 RMSE 比平面大 1.8 倍到 5.8 倍，其比值與 B/H 有高相關。此外，1200 公尺航高之影像，最大誤差高達 6.16 公尺，檢視立體影像可發現少數影像仍具有些許 y 視差，對立體量測精度造成影響，表示部分影像之外方位參數仍有較大的誤差，主要原因估計仍是影像模糊效應所致。

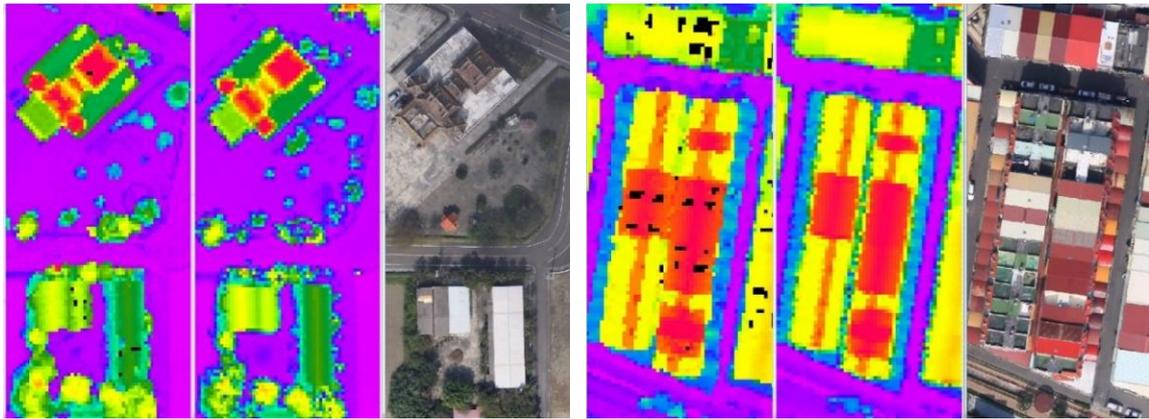


圖 8 (左)UAV 產製之 DSM、(中)空載光達產製之 DSM、(右)真實正射影像

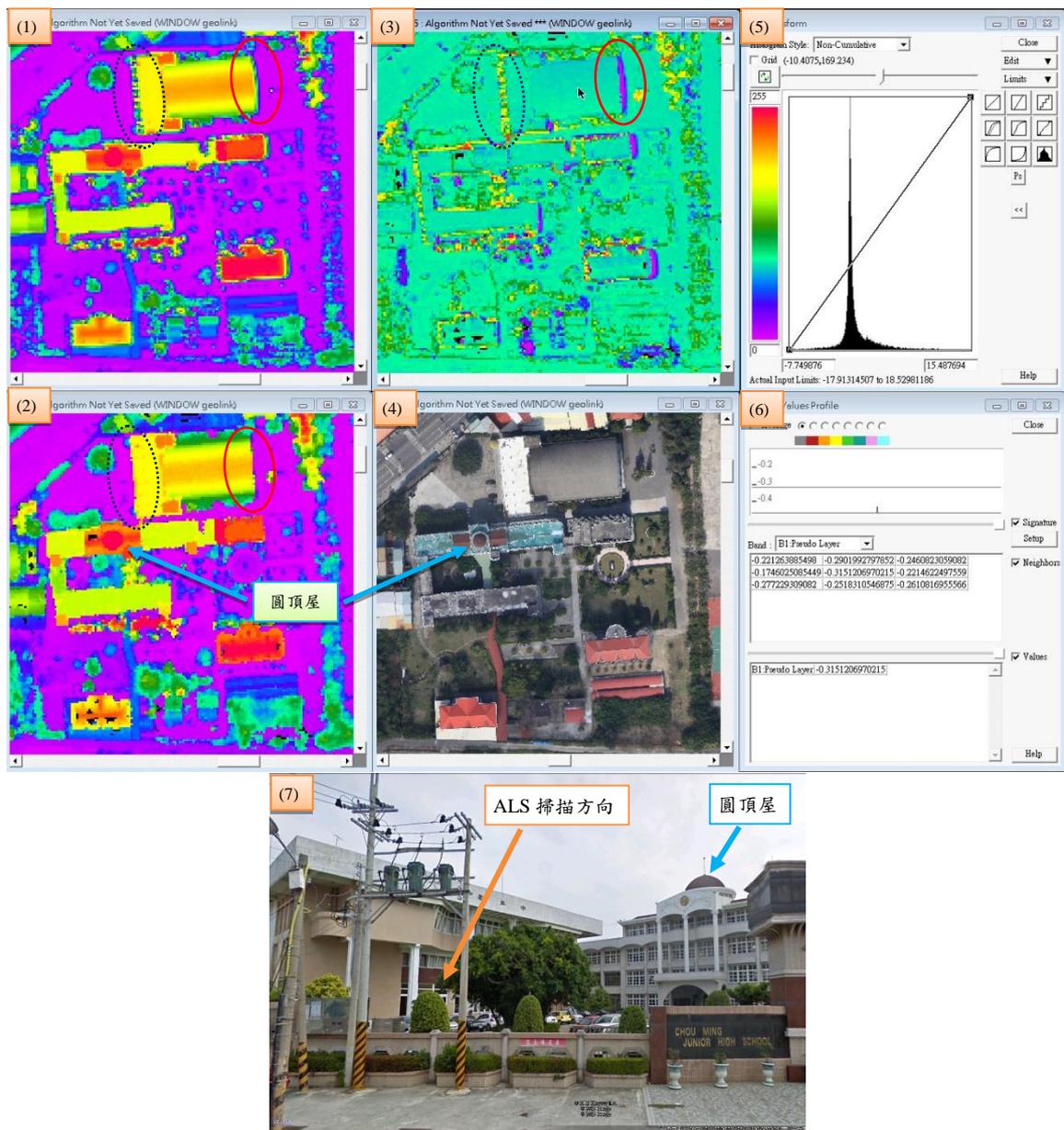


圖 9 空載光達 DSM 與 UAV-DSM 之高程差異分析

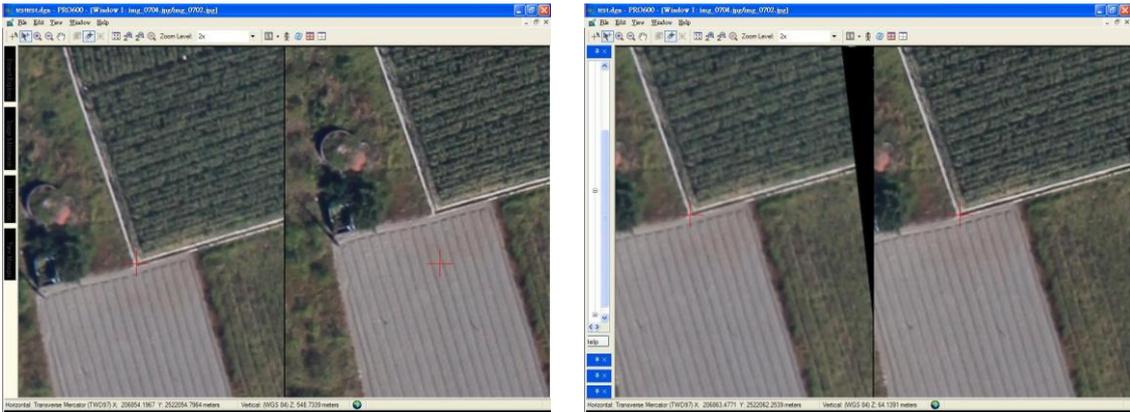


圖 10 以 DPW 進行立體觀測:(左圖)有 y 視差，(右圖)無 y 視差

表 8 立體量測誤差分析成果

| UAV 航高 (m) | 600   |       |       | 1200  |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 檢核點數       | 11    |       |       | 12    |       |       |
| B/H        | 0.2   |       |       | 0.1   |       |       |
| 軸向         | E     | N     | H     | E     | N     | H     |
| 最大值 (m)    | -0.40 | -1.03 | -1.62 | -0.67 | -0.73 | -6.16 |
| 最小值 (m)    | 0.49  | 0.58  | 0.62  | 0.75  | 0.73  | 0.89  |
| 平均值 (m)    | 0.06  | -0.16 | -0.60 | -0.02 | -0.19 | -2.63 |
| 標準偏差 (m)   | 0.30  | 0.41  | 0.78  | 0.39  | 0.42  | 2.13  |
| 均方根誤差 (m)  | 0.29  | 0.42  | 0.96  | 0.37  | 0.44  | 3.33  |

### (三) 直接地理定位

#### 1. 軸角與固定臂率定精度分析

雖然前述 ISAT 空三計算成果精度並非理想，本實驗還是利用此成果進行軸角與固定臂率定，兩組不同航高之影像資料分別使用了 100 張和 88 張做軸角與固定臂率定。表 9 顯示率定成果及內部精度(標準偏差)，此標準偏差是由率定之平均值與原始觀測數據的差值統計而得。從表中可得知三個軸角的標準偏差皆在 0.05 至 0.15 度內，比 SPAN-CPT 規格約高三倍，此精度在預期範圍內。

此外，由於受到空三平差精度的影響，固定臂率定之成果不合理(dZ 高達 46.57 公分)，且內部精度不夠高，標準偏差高達 86.29 公分。由於空三平差時相機透視中心之位置與姿態具有高相關，即使是微小之姿態角誤差在航高 600-1200 公尺下，仍會造成相當大之位置偏移，不利於固定臂之率定。因此本研究後續直接地理定位時，將不使用此固定臂率定成果，而改由人工量測成果會比較合理。此項率定研究仍需繼續改善，未來可考慮一階段率定法，在實驗室內率定兩感測器之相對方位，並給予較高之權重，則此項率定成果應會更準確合理。另外，由表 9 亦可發現兩個架次率定成果(平均值)有明顯的差異，軸角差異最大達 0.4 度，估計其原因是兩次飛行測試間，用來固定 IMU 與相機間的框架發生了變動，改變了兩個感測器間的相對方位。

表 9 軸角與固定臂率定成果與內部精度

|          | 影像數量 | UAV 航高 | 平均值     |         |         | 標準偏差   |        |        |
|----------|------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
|          |      |        | dOmega  | dPhi    | dKappa  | dOmega | dPhi   | dKappa |
| 軸角 (度)   | 100  | 600-m  | -1.1337 | -0.6126 | -0.0324 | 0.0706 | 0.1463 | 0.1203 |
|          | 88   | 1200-m | -0.7314 | -0.9487 | -0.0477 | 0.0447 | 0.0423 | 0.1108 |
|          |      |        | dX      | dY      | dZ      | dX     | dY     | dZ     |
| 固定臂 (公尺) | 100  | 600-m  | 0.0568  | -0.0850 | 0.4657  | 0.4221 | 0.4494 | 0.4496 |
|          | 88   | 1200-m | -0.1100 | 0.0045  | 0.0022  | 0.4840 | 0.6511 | 0.8629 |

## 2.DG 定位誤差分析

以 UAV 影像進行直接地理定位其目的乃是要進行快速災情調查，同時進行量測與數化災情範圍，因此本研究在此評估應用直接地理定位求得之外方位參數，以前方交會量測地面點位之地圖坐標，進而與地面控制點真值比較其差異。在此本實驗套用上一程序求得之軸角參數，但固定臂部分則是使用人工量測的成果。表 10 顯示三維定位誤差分析成果。量測方式為在實驗區內每個地面控制點挑選 4 張影像，以人工量測影像坐標再利用前方交會計算其地圖坐標。當率定參數與 DG 影像為同一組時，其水平方向誤差皆小於 1 公尺，高程方向誤差皆小於 4 公尺。但是若將 600 公尺航高之率定參數，套用在 1200 公尺航高拍攝之影像上，則量測誤差會大於 4 公尺，最大誤差甚至達到 50 公尺。此成果顯示目前固定 IMU 與相機之方式，在 UAV 起降過程造成的震動效應會造成兩者之相對關係產生變化。目前成果顯示，即便 UAV 距離目標達 1200 公尺，仍可達到平面定位誤差在 1 公尺以內，對於快速災情調查之需求已經相當足夠。

表 10 直接地理定位誤差分析

| 率定影像      | 600-m 航線 |       |       | 1200-m 航線 |       |       | 600-m 航線 |       |        |
|-----------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|----------|-------|--------|
|           | DG 影像    |       |       | DG 影像     |       |       | DG 影像    |       |        |
| 方向        | E        | N     | H     | E         | N     | H     | E        | N     | H      |
| 最大值 (m)   | -0.79    | -0.89 | -5.48 | -1.43     | -1.02 | -7.82 | -7.97    | -9.09 | -50.87 |
| 最小值 (m)   | 0.61     | 1.42  | 3.45  | 1.41      | 1.05  | 2.33  | 10.79    | 7.33  | 38.31  |
| 平均值 (m)   | -0.15    | 0.26  | -1.06 | 0.10      | 0.05  | -2.28 | 1.83     | 0.12  | -7.98  |
| 標準偏差 (m)  | 0.46     | 0.69  | 3.06  | 0.77      | 0.71  | 2.99  | 6.37     | 4.78  | 29.07  |
| 均方根誤差 (m) | 0.46     | 0.71  | 3.09  | 0.74      | 0.68  | 3.66  | 6.39     | 4.60  | 29.05  |
| 檢核點數      | 10       |       |       | 12        |       |       | 13       |       |        |

## 四、結論

本研究以載重約 15 公斤之 AL-40 UAV 搭載雙頻 GPS 天線、戰術等級 IMU 及 DSLR 數位相機，突破大部分 UAV 無法進行高精度直接地理定位問題，同時評估其在測繪應用之可能性。以下歸納本研究主要成果：

### 1. 相機率定及影像變形修正

本研究以一可旋轉之圓型率定場進行全自動相機率定，同時進行影像變形修正，讓影像不再具有透鏡畸變效應與像主點偏移問題，如此一來可降低空三平差與立體製圖過程中可能造成之不穩定性及 y 視差問題。此外，由於各種空三平差軟體對於透鏡畸變參數之定義多少會有些不同，若能先行

修正，亦可降低空三平差過程之複雜度。

## 2. 空三平差

本研究測試三種平差軟體得知，Australis 因為無法使用控制點約制網型，當鏡頭焦距較長，FOV 較小時，網型強度較弱，此時若附加參數數學模式與修正成果不夠完美，影像坐標之誤差會傳播到連結點物空間坐標或改變外方位參數而導致網型變形。而 Pix4UAV 軟體無法設定各種觀測量之權，因此無法有效掌握空三平差成果之可靠度。ISAT 為測繪領域常用之空三平差軟體，可讓使用者掌握每一步驟，但本研究目前使用之影像有些微影像模糊效應，導致影像坐標後驗中誤差(Sigma0)達 1 個像元以上，加上 B/H 比值太小的因素，控制點及檢核點 RMS 在高程之誤差仍太大，因此平差成果尚未達到理想目標。

## 3. DSM 準確度與可靠度

本研究使用 Pix4UAV 軟體產製 DSM，並以道路上之控制點當檢核點，評估其準確度，由成果可知在 600 公尺航高可以產製網格一公尺之 DSM，1200 公尺航高則適合產製兩公尺網格 DSM。若空三平差過程有使用地面控制點，則其高程絕對精度可達 50-60 公分。若未使用地面控制，則會有系統性高程偏移約 1-5.3 公尺，絕對精度也會下降到 1.3-5.4 公尺。本研究同時跟空載光達產製之 DSM 進行可靠度分析，發現兩者之一致性相當高，主要差異是發生在建物邊界(與光達掃描角度及 DSM 內插方式有關)與樹木(空載光達可部分穿透稀疏樹葉到達地面)。不管有無利用地面控制點，產製之 DSM 其內部精度約在 1 公尺以內，因此若應用本 UAV 系統拍攝崩塌地與製作不同時期之 DSM，有機會可應用在土石流失與堆積之估算。

## 4. 立體製圖

利用本研究所建議之 UAV 影像處理流程，可減少立體觀測之 y 視差問題，而立體製圖之準確度在平面方向可達到 1:2500 比例尺之製圖精度要求。

## 5. 直接地理定位準確度分析

本研究顯示，即使在航高 1200 公尺使用直接地理定位後之外方位參數進行前方交會，其平面誤差仍可在 1 公尺以內，此準確度對快速災情調查已經相當足夠。

本研究仍有改善空間，包括消除因為震動造成之影像模糊效應，以及改採 24 mm 之蔡司鏡頭以提高影像品質、增加 FOV 與基線航高比、提升網型強度，但缺點是會降低影像解析度約一倍，因此在率定時建議降低航高以維持高程精度。此外，為了確保 IMU 與相機之相對關係不變，必須以更穩固的方式固定 IMU 與相機，以避免兩者之相對關係在多次起降後產生變化，進而影響直接地理定位之準確度。

## 致 謝

本研究承蒙國科會專題研究計畫(編號: NSC 101-2119-M-006-004)及內政部地政司-102 年度多平台製圖技術工作案之經費補助，以及自強工程顧問有限公司提供

空載光達資料，使本研究得以順利完成。此外本文投稿過程中兩位匿名審查委員提供相當珍貴之意見與建議，使本文更為完整與正確，作者特此致謝。

### 參考文獻

- 楊名，2013，台灣坐標系統現代化，主題演講，《第三十二屆測量及空間資訊研討會暨第2屆兩岸重力及大地水準面研討會》，交通大學：台灣。
- 內政部，2013，基本圖測製說明，  
[http://bmap.nslc.gov.tw/bmap/ch/index.php?option=com\\_jotloader&view=categories&cid=0\\_c60944e3e536492bf09e48dfe7f92f87&Itemid=61&id=2](http://bmap.nslc.gov.tw/bmap/ch/index.php?option=com_jotloader&view=categories&cid=0_c60944e3e536492bf09e48dfe7f92f87&Itemid=61&id=2)。
- Cramer, M., and Stallmann, D., 2002, System calibration for direct georeferencing, *ISPRS Comm. III Symposium 'Photogrammetric Computer Vision: Switzerland*.
- Chiang, K.W., Chang, H.W., Li, C.Y., and Huang, Y.-W., 2011, An ANN embedded RTS smoother for an INS/GPS integrated positioning and orientation system, *Applied Soft Computing*, 11, pp. 2633-2644.
- Fraser, C., 1997, Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(4), pp. 149-159.
- Shin, E.H., 2005, *Estimation techniques for low-cost inertial navigation*, Thesis (Ph.D.), Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary: Canada.
- Strecha, C., Tuytelaars, T., and Gool, L. V., 2003, Dense matching of multiple wide-baseline views, *Proceedings of 9th IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, pp. 1194-1201, Washington: IEEE Computer Society.
- Strecha, C., Fransens, R., and Gool, L.V., 2004, Wide-baseline stereo from multiple views: a probabilistic account, *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, pp. 552-559, Washington: IEEE Computer Society.
- Strecha, C., Gool, L. V., and Fua, P., 2008, A generative model for true orthorectification, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: Beijing.
- Strecha, C., and Bronstein, A. M., 2012, LDAHash: Improved matching with smaller descriptors, *IEEE Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34(1), pp.1-14.
- Rau, J. Y., and Yeh, P. C., 2012, A semi-automatic image-based close range 3D modeling pipeline using a multi-camera configuration, *Sensors*, 12(8), pp. 11271-11293.
- Skaloud, J., 1999, *Optimizing georeferencing of airborne survey systems by INS/DGPS*, Thesis (Ph.D.), University of Calgary: Canada.
- Tola, E., Strecha, C., and Fua, P., 2012, Efficient large-scale multi-view stereo for ultra high-resolution image sets, *Machine Vision and Applications*, 23(5), pp. 903-920.

## 車載光達點雲中直立圓桿之模塑

邱式鴻<sup>1\*</sup> 吳志文<sup>2</sup>

論文收件日期：102.08.09

論文修改日期：102.10.14

論文接受日期：102.11.04

### 摘要

隨著移動測繪系統(mobile mapping system, MMS)發展，車載光達系統可有效獲取詳細路廊(road corridor)的三維點雲資料。由於車載光達系統紀錄大量的點雲資料與複雜的路廊資訊，需經處理，才可模塑點雲中路廊的物件。其中，直立圓桿是路廊資訊中重要地物的基本元件，故本研究發展模塑車載點雲中直立圓桿的演算法。直立圓桿模塑的演算法必須面臨車載光達系統所蒐集的點雲無法完整涵蓋整個直立圓桿表面，以及所蒐集的點雲不僅包含直立圓桿上的點、亦可能包含附著於直立圓桿上的物件點(如廣告招牌等)等兩個重大的問題，意即這些點雲資料蒐集不完全且包含許多雜訊。因此，本研究所發展的演算法中先以物空間資訊將車載點雲中的地面點濾除並留下非地面點，其中地面點包含屬於路面與人行道上的點。接著，將非地面點透過八分樹體元結構化(octree-structured voxel space)後，並以其相鄰性加以群聚，進而組成非地面點之點群。由於直立圓桿上可能含有許多附著物(如廣告招牌等)，因此本研究發展以 RANSAC(RANdom SAmple Consensus)為基礎之演算法判斷經前述處理聚集後之非地面點群是否包含直立圓桿，並計算其圓面參數。實驗結果顯示在複雜的街景中，本研究所發展直立圓桿模塑之漏授率(Omission)為 31.8%、誤授率(Commission)為 60.5%；各直立圓桿求定之圓面參數與人工量測之結果比較在 X 坐標方向的 RMSE 為 0.032m，在 Y 坐標方向 RMSE 為 0.046m，而半徑的 RMSE 則為 0.031m。

**關鍵詞：**車載光達、直立圓桿、移動測繪

<sup>1</sup> 副教授，國立政治大學地政學系。

<sup>2</sup> 研究生，國立政治大學地政學系。

\* 通訊作者，TEL：(02)29393091 #51657，E-Mail: [chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw)。

# Modeling of Vertical Pole-Like Objects from Vehicle-Borne LiDAR Point Cloud

Shih-Hong Chio<sup>1\*</sup>, Chih-Wen Wu<sup>2</sup>

## Abstract

With the development of mobile mapping system (MMS), vehicle-borne LiDAR system can obtain precise 3D point cloud of the detailed road corridor efficiently. Because the vehicle-borne LiDAR system records numerous points cloud and complicated information of road corridor, those point cloud can be used in reconstructing the objects in road corridor after data preprocessing. In the objects of road corridor, vertical pole-like objects is one of most important and basic objects. Therefore, this study focuses on modeling vertical pole-like objects from vehicle-borne LiDAR point cloud. In the vehicle-borne point cloud, the data might describe vertical pole-like objects incompletely and might be always with many irrelevant points from the attached objects. First of all, the ground points will be filtered through scene knowledge. Then, the non-ground points will be clustered through the octree-structured voxel space and connected-component labeling (CCL) algorithm. In the clustering LiDAR points, they cannot describe complete vertical pole-like objects and some points might belong to attached objects. Therefore, the automatic algorithm based on RANSAC (RANdom SAmple Consensus) is developed to extract and model vertical pole-like objects from those clustering LiDAR points in this study. The result shows the omission of vertical pole-like objects by the modeling approach developed by this study is 31.8% and the commission of vertical pole-like objects is 60.5% under the complicated street environment. Moreover, the circle parameters of vertical pole-like objects, i.e. the coordinate of circular center and the circular radius, are compared with those measured manually in this study. The RMSEs in X, Y coordinate components are 0.032m and 0.046m, respectively. The RMSE of circular radius is 0.031m.

**Keywords:** Mobile Mapping, Vehicle-Borne LiDAR, Vertical Pole-Like Object

---

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University.

<sup>2</sup> Graduate student, Department of Land Economics, National Chengchi University.

\* Corresponding Author, TEL: +886-2-29393091#51657, E-mail: [chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw).

## 一、前言

隨著 POS(Position and Orientation System)定位定向系統精度的提高，移動式測繪系統(Mobile Mapping System, MMS)的發展越趨快速。POS 定位定向系統由慣性導航系統(inertial navigation system, INS)及全球衛星定位系統(global positioning system, GPS)所構成，MMS 中結合 POS 並裝載各種蒐集空間資料的遙測感測器，包含數位攝影機、相機、多光譜感測器、或雷射掃描儀等。其中又以裝載雷射掃描儀的車載雷射掃描系統(又稱車載光達系統)能同時獲取大量點雲的 3D 坐標，使得後續發展與應用越受重視。如 Optech Lynx Mobile Mapper V200 由具最大 200kHz 點發射頻率(point repetition frequency, PRF) 與最遠掃描距離 200m 的 1~2 個掃描儀所組成；3D Laser Mapping 公司的 StreetMapper 360 則使用具 300kHz PRF 與最遠掃描距離 300m 的 1~2 個 RIEGL VQ-250 掃描儀所組成；芬蘭大地學會(Finnish Geodetic Institute)所發展的 FGI Roamer 則由具 120kHz 量測頻率的 Faro LS 880 掃描儀與 NovAtel HG1700 SPAN58 INS 系統所組成(Kukko et al., 2007)；以及 RIEGL 的行動掃描系統 VMX-250，強調其堅固耐用、是易於安裝的整合系統，車頂上方的平台包括兩台 RIEGL 2D 雷射掃描儀 VQ-250、慣性導航裝置、全球衛星定位裝置，此系統可安裝於任何車輛、船舶快速取得三維坐標資料。RIEGL VQ-250 掃描儀雷射發射頻率為 300,000 點/秒，為全波形的雷射掃描儀器可進行 360 度掃描且能即時進行波形分析獲取多回波資訊，其最大測距 500 m，精度 10 mm，掃描角度 360 度(迅聯光電有限公司，2010)。西元 2004 年關於車載雷射掃描系統的回顧文獻可參考(Schwarz and El-Sheimy, 2004)，相關原理則可參閱(Petrie and Toth, 2009)。

車載光達系統可以直接獲取目標物三維點雲資料，因此可獲取詳盡的路廊(road corridor)資訊，對於道路環境的模式化與文件化(documentation)有相當助益。而所謂道路環境文件化包含道路幾何和道路環境的文件化。道路幾何使用道路幾何設計參數，如車速、車道數、車道寬、道路縱橫方向的坡度，道路鋪面材質等等來描述；而道路環境則是指道路兩旁及其鄰近的相關地形地物包含建物、樹木、植栽、電力線、交通號誌、燈桿等(Mumtaz, 2007)。建立完整的路廊資訊可應用於噪音模擬(noise modeling)、道路安全、道路及相關設施維護、定位服務(location-based services)及汽車和行人導航，甚至發展未來駕駛協助系統(Future Driver Assistance System)(Brenner, 2009)。

由於車載光達系統紀錄大量的點雲資料與複雜的路廊資訊，需經處理後，才可模塑點雲中路廊的物件。在本研究中將路廊資訊分成路面地物與路旁地物兩大類。路面地物包含道路面、燈柱、電力桿、電線桿及交通號誌桿(含紅綠燈)等地物；路旁地物包括路樹、建物外牆、柱狀物、門及窗戶。其中，直立圓桿是燈柱、電力桿、電線桿及交通號誌桿(含紅綠燈)等重要路面地物的基本元件，故本研究發展模塑車載點雲中直立圓桿的演算法。直立圓桿模塑的演算法必須能處理車載光達系統所蒐集的點雲無法完整涵蓋整個直立圓桿表面的問題，亦必須處理所蒐集的點雲不僅包含直立圓桿上的點亦可能包含附著於直立圓桿上的物點(如廣告招牌等)干擾的問題，

因此如何由這些蒐集不完整且包含許多雜訊的點雲資料模塑直立圓桿狀物則是本研究之重點。而目前國內對於車載光達系統點雲資料處理的研究甚少，比較相關的研究是李育華(2009)於 2009 年分析探討車載移動式製圖系統之系統率定及其直接地理定位之效能，但也僅就系統建構部分進行研究與探討，且其架設的感應器是數位相機。因此以下針對國外對於車載光達點雲資料包含直立圓桿的燈柱、電力桿、電線桿及交通號誌桿(含紅綠燈)路面地物萃取或模塑之文獻回顧。由於車載光達點雲資料與地面光達點雲資料均屬於高密度的點雲資料，雖然兩者點雲資料的特性仍有些差異，但由地面光達點雲萃取直立圓桿的演算法仍值得參考，因此以下文獻亦回顧此類文獻。

首先是 Lehtomäki et al. (2010)提出由車載雷射掃描點雲自動萃取如交通號誌、燈桿等擬桿狀物(pole-like)的演算法，所謂擬桿狀物意即交通號誌桿、燈柱及樹幹等。由人工探討該演算法發現桿狀物的正確率是 77.7%、正確偵測率為 81.0%。該演算法分成四階段，第一階段是掃描線分割，將每一掃描斷面上點雲分成相近的點群，然後移除長點群，留下可能是掃過桿狀物的短點群。第二階段叢集點群產生候選桿叢集(candidate pole clusters)。第三階段則是合併叢集成同一桿狀物。第四階段將候選叢集分類成桿狀物與非桿狀物，使用於分類的特徵包含叢集的形狀、長度、方位和點密度。大部分桿狀物和樹幹為圓柱或角錐狀則其具圓形橫斷面，因此可用已發展由點雲中自動圓柱體偵測的方法偵測與萃取(Bolles and Fischler, 1981; Lukács et al., 1998; Chaperon and Goulette, 2001; Marshall et al., 2001; Rabbani and van den Heuvel, 2005; Schnabe et al. 2007; Luo and Wang, 2008)；其中使用 Hough transform (Rabbani and van den Heuvel, 2005)、RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) (Bolles and Fischler, 1981; Chaperon and Goulette, 2001; Schnabel et al., 2007)和最小二乘法擬合求其參數(Lukács et al., 1998; Marshall and Lukacs, 2001)。此外，Brenner(2009)假設桿狀物是直立圓桿，掃描點出現在核心區，外側區域則無掃描點。由圓柱堆疊(cylindrical stacks)分析其結構，直立圓桿則由某數量以上的堆疊圓柱體所構成。為確定每一堆疊圓柱外區域確實無點，另外執行光線密度分析(ray density analysis)。堆疊確認後則由區域的點推估直立圓桿的真正位置。Manandhar and Shibasaki(2001)則由垂直掃描線得到的點雲資料中，由個別掃描線上偵測垂直直線段，進而偵測垂直桿狀物。Chen et al.(2007) 提出由點雲和影像萃取交通號誌(traffic signs and signals)的方法。先將點雲叢集成不同地物並將點叢集投影至垂直面，最後根據變方-協變方矩陣(covariance matrix)分解的特徵值(eigenvalue)所得投影面的延長方向萃取桿狀體。至於 Luo and Wang(2008)則是由地面雷射掃描所得之室內點雲資料快速萃取中國古建築的柱狀體特徵，其作法是首先將點雲切出數個薄層並由薄層內的點雲辨識柱狀特徵，然後取得柱狀體之投影參數，接著比較相鄰薄層局部的投影參數並將相似柱狀體參數取得整體的柱狀體投影參數，最後模塑柱狀體。上述 Brenner(2009)、Manandhar and Shibasaki(2001)和 Chen et al.(2007)所提出的模塑車載光達資料中直立圓桿的方法均是針對較單純的直立圓桿，未強調若遇複雜場景時，尤其是桿狀物上具其他附著物時，該如何處理，因此本研究除解決車載光達系統所蒐集的點雲無

法完整涵蓋整個直立圓桿表面的問題外，更重要的是解決所蒐集的點雲不僅包含直立圓桿上的點、亦可能包含附著於直立圓桿上的物點(如廣告招牌等)的問題，以下將介紹本研究之方法及步驟。

## 二、研究方法及步驟

由於車載光達點雲資料量相當龐大且經掃描而得之路廊地物點雲眾多且複雜，因此本研究藉由引入物空間之路廊場景知識，分析車載光達點雲資料的特性並發展由點雲資料自動萃取並模糊路廊中燈柱、電線桿及交通號誌中基本結構直立圓桿的演算法。流程圖如圖 1 所示，以下詳細描述演算法的整個處理流程。

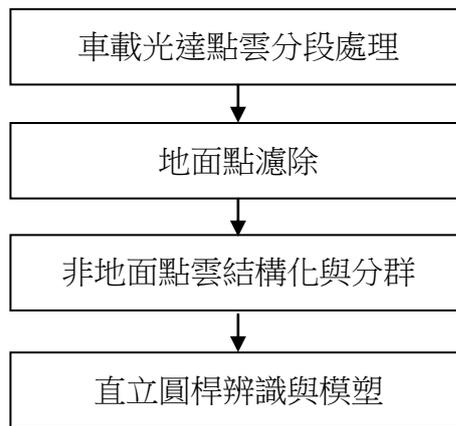


圖 1 車載光達點雲中直立圓桿模塑流程圖

### (一) 車載光達點雲分段處理

首先，因為裝載光達系統之車子於蒐集點雲資料時必於道路上行駛，因此依據車載光達系統上 GPS 所紀錄之車行軌跡，即可知路網之狀況(如圖 2)；此外，燈柱、電線桿及交通號誌中基本結構直立圓桿必位於路旁，因此為簡化後續之處理可先依據 GPS 所紀錄之車行軌跡將點雲資料分段，接著再依據分段的車載光達點雲進行後續處理發展演算法模塑直立圓桿。GPS 紀錄之車行軌跡分段是依據其所紀錄經緯度坐標轉換成的 X、Y 坐標，計算其前後位置軌跡變化角度，將大於某一角度(如九十度)視為分段點，如此一來即可將車行軌跡分段，並依據分段軌跡資料將點雲資料分類供後續處理。



圖 2 車載光達系統上 GPS 所紀錄之車行軌跡示意圖

## (二) 地面點濾除

此步驟將分段點雲資料中之地面點雲濾除，這些點包含道路、人行道上的點雲，其目的是簡化後續處理，即僅針對非地面點雲群聚處理，由群聚點雲中發展萃取直立圓桿之演算法，因此本研究透過物空間路廊場景知識將地面點分離。而物空間路廊場景中，顯示於車載光達掃描時所紀錄之車行軌跡為其重要之物空間知識，藉車行軌跡資料可濾除地面點。以圖 3 為例，非地面點的高程一定大於地面點的高程，可藉由車載光達掃描系統上 GPS 所紀錄之分段車行軌跡中的平均高程( $Z_{GPS(i)}$ )以及 GPS 天線的高度  $h_1$ (即圖 3 中  $GPS(i)$  點至地面的垂直距離  $h_1$ )推算其約略之地面高程  $Z_1$ ，即  $Z_1 = Z_{GPS(i)} - h_1$ 。而地面點過濾的方式則是以車載光達分段點雲中各點高程若小於推論之地面高程  $Z_1$ ，就將其視為地面點予以濾除。

此外，由於包含燈柱、電線桿及交通號誌中基本結構的直立圓桿必位於道路兩旁附近，因此再以離分段車行軌跡某一距離範圍外之約制排除離路旁較遠之點雲。

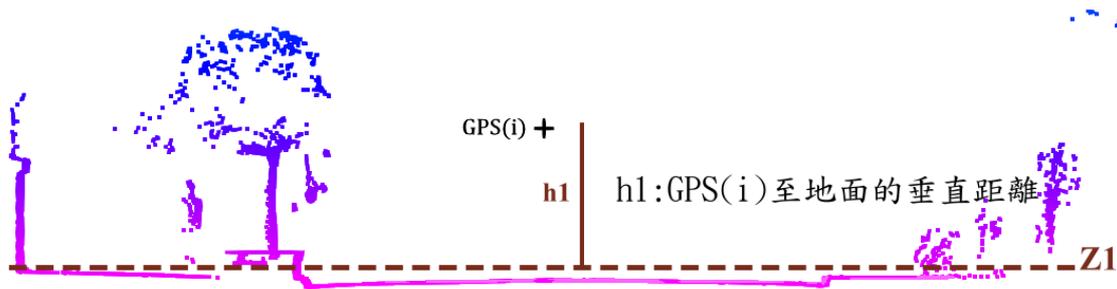


圖 3 地面點與非地面點濾除所用之物空間路廊場景知識圖示說明

## (三) 非地面點雲結構化與分群

得到非地面點雲之後，其後使用八分樹(octree-structured voxel space)將非地面點雲結構化，並使用 CCL(connected-component labeling)演算法(王焱，2011)將非地面點雲結構化之體元群聚成點群。

其概念為將點雲以八分樹之方式結構化將點雲分割，組成數個三維網格，又稱體元(voxel)，如圖 4 所示。其後針對分割之體元，以 CCL(Connected-Component

Labeling)演算法判斷體元間之相鄰性，並將相鄰之體元予以合併，其中相鄰性有三種，分別為 6 相鄰、18 相鄰、26 相鄰(如圖 5)。本研究經觀察實驗區內直立圓桿大多含有附著物且鄰近於廣告招牌、路樹等，其間距約 2cm~20cm 不等，故設定體元大小為 10cm 進行非地面點雲之八分樹結構化分割，然而此設定可能會導致點雲過度分割，因此為減少過度分割之影響，於 CCL 將相鄰結構化之體元群聚成點群時則採用 26 相鄰。

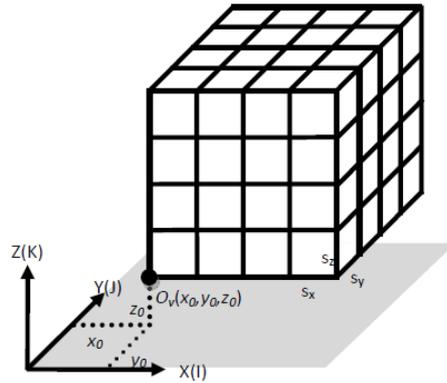


圖 4 八分樹之方式結構化與體元說明圖示(王焱，2011)

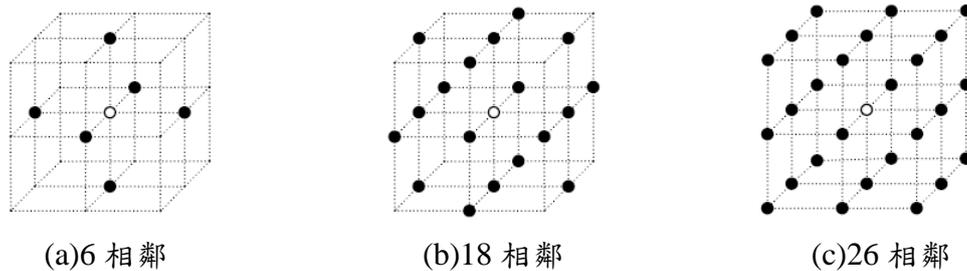


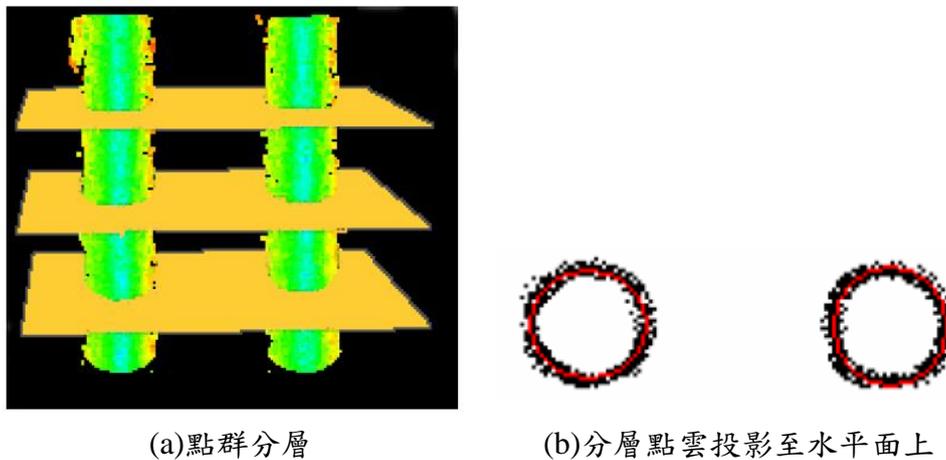
圖 5 體元之相鄰性(王焱，2011)

#### (四) 直立圓桿辨識與模塑

此階段處理是將前述非地面點雲結構化並群聚後的點群，根據物空間路廊場景中直立圓桿物件知識(object knowledge)以 RANSAC 方法(Fischler and Bolles, 1981)判斷群聚之點群是否包含直立圓桿，若包含直立圓桿點群則予以模塑。然現實中絕大多數的直立圓桿上仍有其他附著物，導致偵測不易，如圖 6 為一屬於交通號誌的直立圓桿，整支直立圓桿的 2/3 上部分有甚多之附著物，而 1/3 下部分雖有附著物，但較少。因此本研究加入點群分層處理(Lou and Wang, 2008)的概念，將每分層內之點雲投影至水平面上求定其包含圓心位置與半徑之圓面參數。



圖 6 含附著物之直立圓桿(圖片來源:GOOGLE 街景服務@政大校門口)



(a)點群分層

(b)分層點雲投影至水平面上

圖 7 點群分層概念圖(Lou and Wang, 2008)

Lou and Wang(2008)研究中採用之點雲資料為地面雷射掃描資料，故其圓桿點雲分層後投影至水平面仍保持圓桿圓外形之完整性(如圖 7(b))，然而車載光達點雲受到掃描方式、遮蔽、附著物等影響，導致分層內之點雲投影至水平面之圓桿圓外形較不完整且包含其他附著物等雜點，以本研究實驗區之兩隻含直立圓桿之燈桿為例(見圖 8 與 9)，其中圖 8 為附著物較少之單純燈桿，分析其不同厚度分層之分層內點雲之俯視圖，如圖 8(a)~(c)所示。可發現當分層厚度增加時，如圖 8(a)為全部燈桿點雲，將有非直立圓桿上多餘雜訊點加入，或如圖 8(b)直立圓桿因傾斜導致不易於求定其圓面參數；反之，當分層厚度減少時，如圖 8(c)，將可取到屬於直立圓桿上之點雲與減少直立圓桿因傾斜所造成之影響，但若分層厚度太小亦可能導致點雲過於稀疏不利於偵測及求定直立圓桿圓面參數。

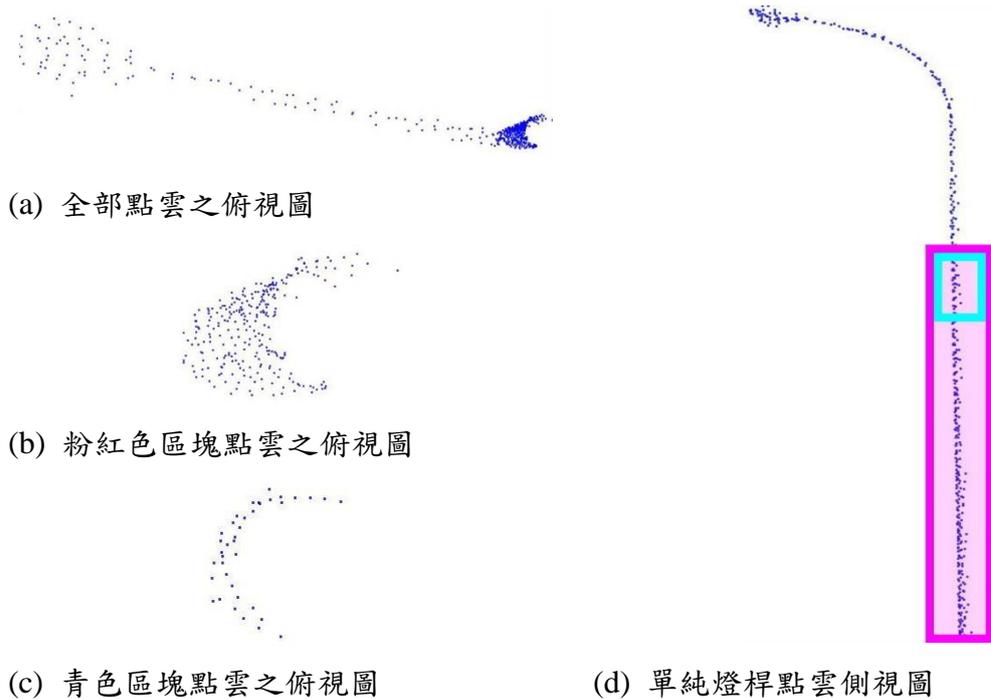


圖 8 含較少附著物之燈桿不同厚度分層點雲俯視圖

而圖 9 為附著物較多之直立圓桿，分析其不同分層厚度之分層內點雲之俯視圖，如圖 9(a)~(c)所示。可發現當分層厚度增加時，如圖 9(a)與 9(b)，與圖 8 分析結果相同，將有非直立圓桿上多餘的雜點加入導致不易於偵測並求定直立圓桿圓面參數；反之，當分層厚度減少時，如圖 9(c)，將有更大機會取到屬於直立圓桿上之點雲求定其圓面參數，但若分層厚度太小，與圖 8 分析結果相同，可能導致點雲過於稀疏不利於偵測及求定直立圓桿圓面參數。

即使使用分層概念處理附著物問題，可發現分層內的點雲資料中仍有非直立圓桿的點雲(見圖 9(c))，故本研究發展以 RANSAC 為基礎之演算法由分層內點雲資料中求定直立圓桿圓面參數，解決點雲中仍有附著物點雲干擾之問題。本研究中以 RANSAC 概念求定直立圓桿圓面參數之作法是將每分層內點雲投影至水平面上，針對投影後之點雲，隨機取三個點，計算圓心位置與半徑之圓面參數，利用 RANSAC 概念重複 61 組的取樣後，將其 61 組所得之半徑值排序，取半徑中位數與其前後各 10 組，共 21 組計算其半徑、圓心 X 與 Y 坐標之標準差，若有一分層內之點雲所求定之半徑、圓心 X 與 Y 坐標三種標準差均於門檻值以內者，則將此點群視為包含直立圓桿。

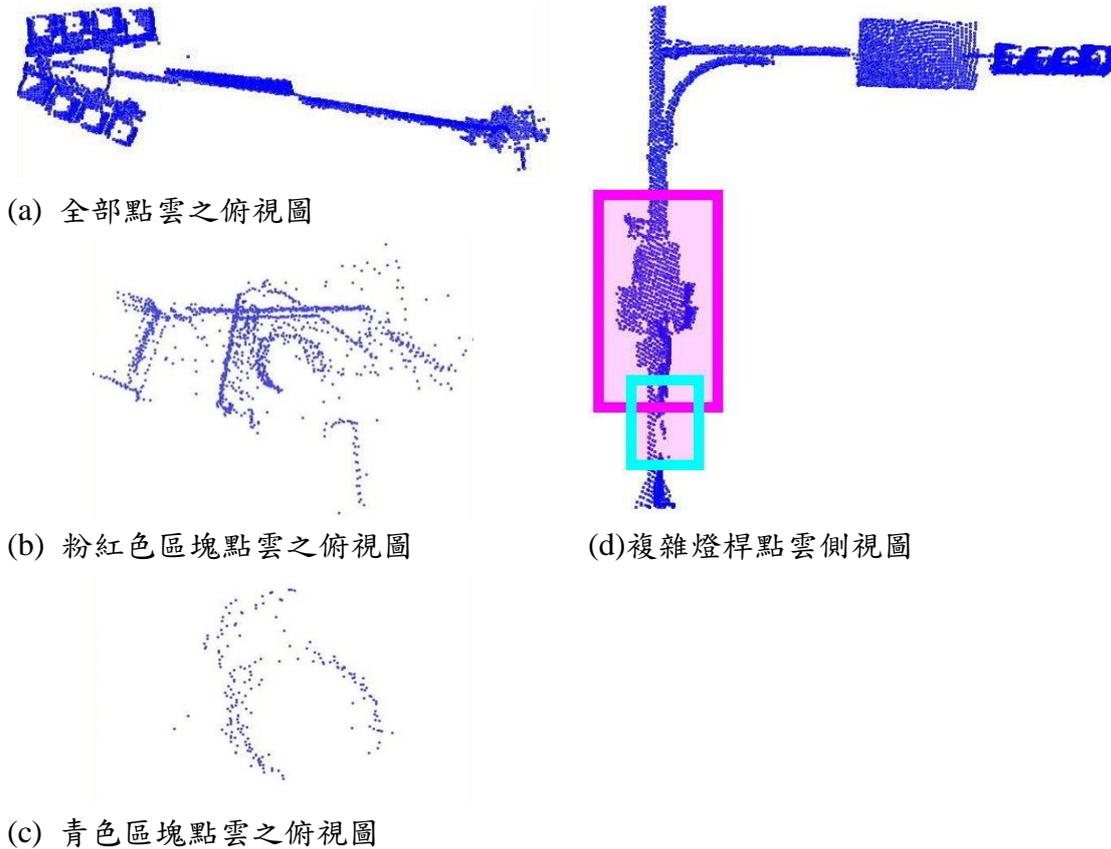


圖 9 含較多附著物之燈桿不同厚度分層點雲俯視圖

引用分層概念以及以 RANSAC 為基礎之演算法由分層內點雲資料中求定直立圓桿圓面參數之前，本研究先引入下列直立圓桿物空間物件知識，排除不含直立圓桿之點群，使得後續以 RANSAC 為基礎之演算法偵測判斷點群是否包含直立圓桿更有效率，所判斷出含直立圓桿之點群後可以直立圓桿圓面參數過濾點群中屬於直立圓桿之最高與最低高程，進一步模塑直立圓桿高度，以下介紹於本研究中採用之直立圓桿物空間物件知識：

1. 點雲數量：包含直立圓桿之點群其點數量應大於某一定數量，否則有可能會因點雲過於稀疏不利於偵測及求定直立圓桿圓面參數。此點數之門檻值與掃描距離與密度有關，經推算路旁含直立圓桿之點數至少需 50 點。
2. 直立圓桿高度：直立圓桿之高度應於一定範圍內，此可透過勘察實驗區內含直立圓桿之地物高度設定，本研究實驗區內含直立圓桿之地物包含交通號誌、燈桿與公車站牌，包含這些地物之直立圓桿高度約界於 1.5m~10m 之間，因此直立圓桿高度值需界於 1.5m~10m 之間，亦即點群中最高與最低的高程值之差必須界於 1.5m~10m 之間。
3. 直立圓桿半徑：直立圓桿圓面半徑應落於一定範圍，此亦可透過勘查實驗區內直立圓桿之粗細予以設定。以本研究實驗區為例，路口之交通號誌直立圓桿與燈桿皆屬於較粗之直立圓桿，其半徑約為 10cm，而公車站牌之直立圓桿於本實驗區

中通常較細，其半徑約為 2cm，故採用 2cm~10cm 為此參數之設定。

除了上述直立圓桿物空間物件知識：包含點雲數量、直立圓桿高度以及半徑之門檻值外，點群之分層之厚度牽涉到是否能從八分樹結構化與群集後之點群中偵測到直立圓桿。如先前圖 6 所示，因直立圓桿上經常有附著物，如交通號誌、廣告招牌等。為解決附著物之問題，點雲分層處理需考慮分層之高度參數(即分層厚度)設定。以圖 6 為例，可發現直立圓桿上有許多附著物，而較少附著物之厚度約為 80cm，但人群走動等其他人為因素可能導致周遭干擾增加，加上實驗區內之大部分直立圓桿上無附著物之厚度約界於 30cm~80cm 之間，故後續分層處理時所使用的每層分層厚度為 50cm。而只要有一分層內點雲可以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數則判斷此八分樹結構化並經 CCL 群聚成之點群具直立圓桿。僅用一分層內點雲以 RANSAC 為基礎演算法求定圓面參數即判斷點群中具直立圓桿的主因是實驗區內之環境複雜，若如先前所述，點群分層處理時分層厚度設定為 50cm，能成功以 RANSAC 為基礎之演算法計算圓面參數之層數約為 1~2 層，故本研究只要有一分層內點雲可以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數則判斷此點群具直立圓桿。綜合前述探討，將所使用直立圓桿點群之物件知識相關門檻值整理如表 1。其中以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數需滿足 X,Y 坐標標準差應小於 10cm 是考量直立圓桿中可能傾斜、且如燈桿大多是上部較細下部較粗。

表 1 直立圓桿點群物空間物件知識整理表

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| 點雲數量門檻                      | 應大於 50 個點   |
| 直立圓桿高度範圍                    | 界於 1.5m~10m |
| 點雲分層之厚度                     | 50cm        |
| RANSAC 半徑中位數範圍              | 界於 2cm~10cm |
| RANSAC 半徑標準差                | 應小於 2cm     |
| RANSAC X 坐標標準差              | 應小於 10cm    |
| RANSAC Y 坐標標準差              | 應小於 10cm    |
| 成功以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數之層數 | 1 層         |

### 三、研究成果

#### (一) 實驗區與實驗資料介紹

本實驗所採用之點雲資料為 RIEGL VMX-250 車載光達系統掃描所得之點雲資料，並依據車行軌跡資料分段處理取得位於政大附近指南路某一路段(見圖 10)之點雲資料(如圖 11 所示)進行實驗，而實驗區中有 22 支直立圓桿，其分布如圖 12 所示。



圖 10 車載光達點雲分段實驗區範圍圖示

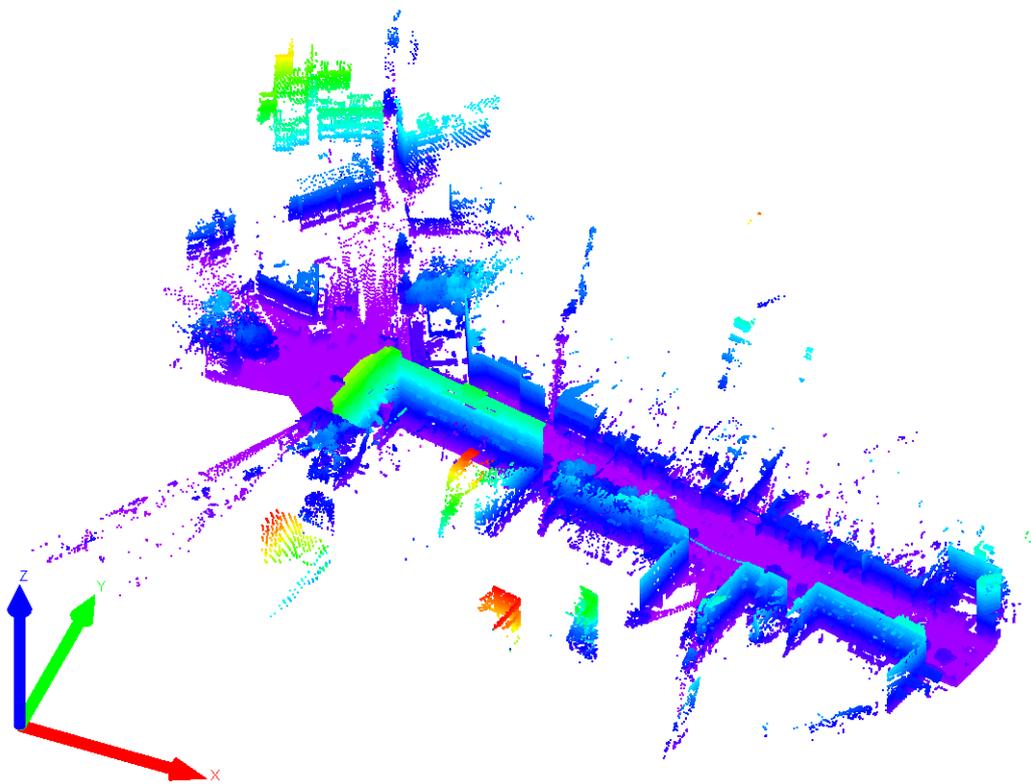


圖 11 以 GPS 定位之車行軌跡分段後實驗區範圍光達點雲資料圖示

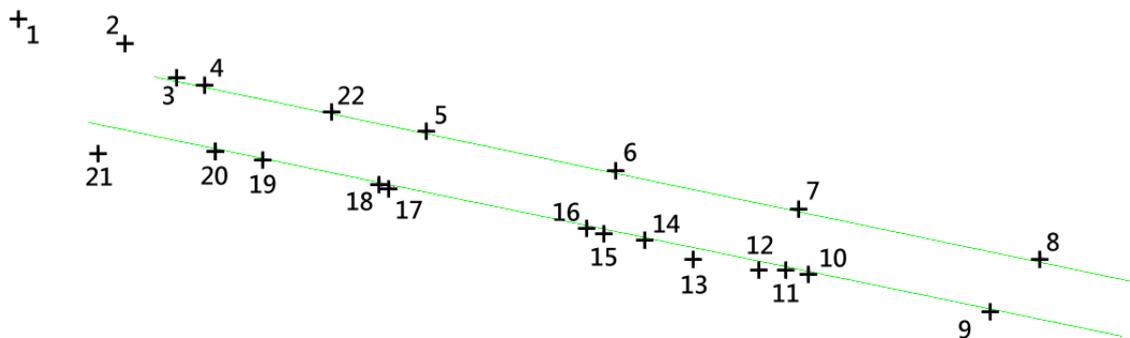


圖 12 實驗區範圍直立圓桿分布圖

## (二) 地面點濾除

藉由車載光達系統上 GPS 所紀錄之車行軌跡資料以及 GPS 天線的高度及物空間路廊場景知識濾除含有道路面、人行道等地面點得到非地面點雲，再以離分段車行軌跡某一距離範圍外之約制條件排除離路旁較遠之點雲，結果如圖 13 所示，可見路面、人行道等地面點皆已濾除。此階段處理所需之 GPS 天線的高度可事先量測，而離分段車行軌跡某一距離範圍值是由人工方式於點雲中量測所得，本研究中量得 GPS 天線高度約 2.3m，離分段車行軌跡距離範圍則依據路寬與人行道寬度設為 10m。

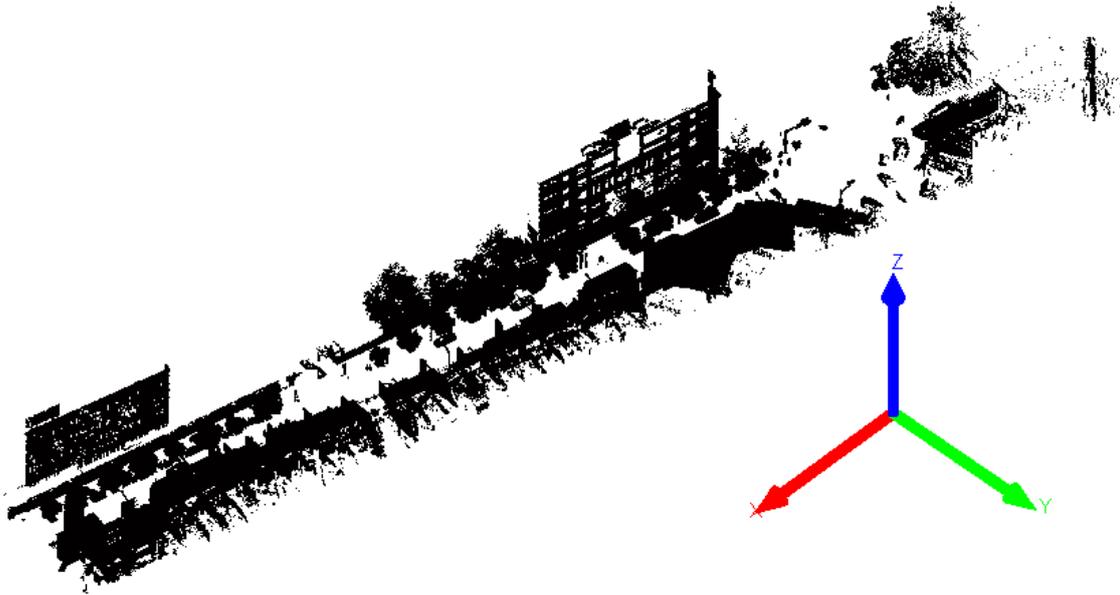


圖 13 濾除地面點之結果圖示

## (三) 非路面點雲結構化及分群

將所得之非地面點以 10cm 網格大小將點雲以八分樹結構化分割，並以 26 相鄰之 CCL 演算法群聚，其成果如下圖 14 所示，不同顏色代表不同點群。26 相鄰之 CCL 演算法群聚結果中，仍有部分含直立圓桿的地物因與廣告招牌、遮雨棚、陽台等物體相鄰(如圖 15 紅色矩形框所示的路燈)，導致經八分樹結構化分割及 CCL 演算法群聚後仍無法將其有效分離出來。

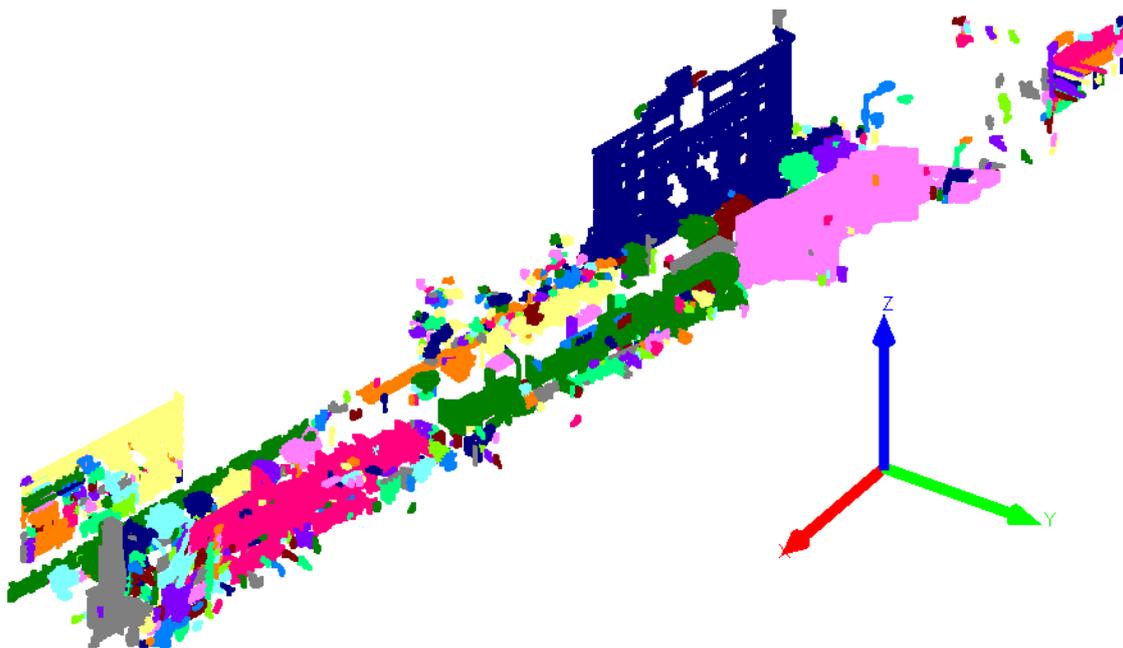


圖 14 非路面點雲經八分樹結構化與 CCL 演算法群聚之成果

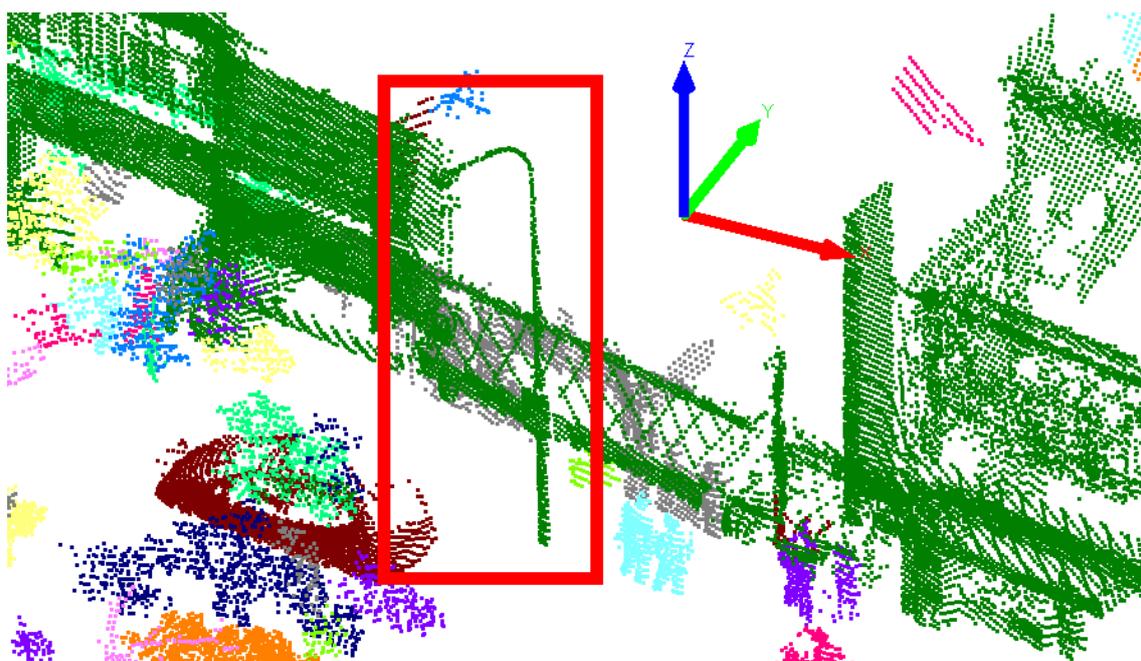


圖 15 紅色框選處含直立圓桿之路燈點雲未被獨立群聚分離

#### (四) 直立圓桿辨識與模塑

非地面點雲結構化及分群群聚點群後，將點群點數小於 50 點之點群濾除後，共得到 704 個點群。經表 1 直立圓桿點群物空間物件知識相關門檻值設定之後以 RANSAC 為基礎的演算法判斷 38 個點群可能包含直立圓桿，其中有 15 個點群確實包含直立圓桿，23 個點群不包含直立圓桿而包含其他地物，7 個點群應包含直立圓桿但漏判。直立圓桿漏授率(Omission)為 31.8%，即正確判斷率 68.2%，然而誤授率(Commission)為 60.5%，即錯誤判斷率約六成。漏判之直立圓桿分別為編號 6、7、9、

11、15、16、19 共七支，詳見圖 16。由圖 16 可見漏判之 7 支直立圓桿，其周圍皆有相鄰之物體，如廣告招牌、遮雨棚、路樹等，因此導致八分樹分割與 CCL 演算法群聚無法有效將其分離出來。

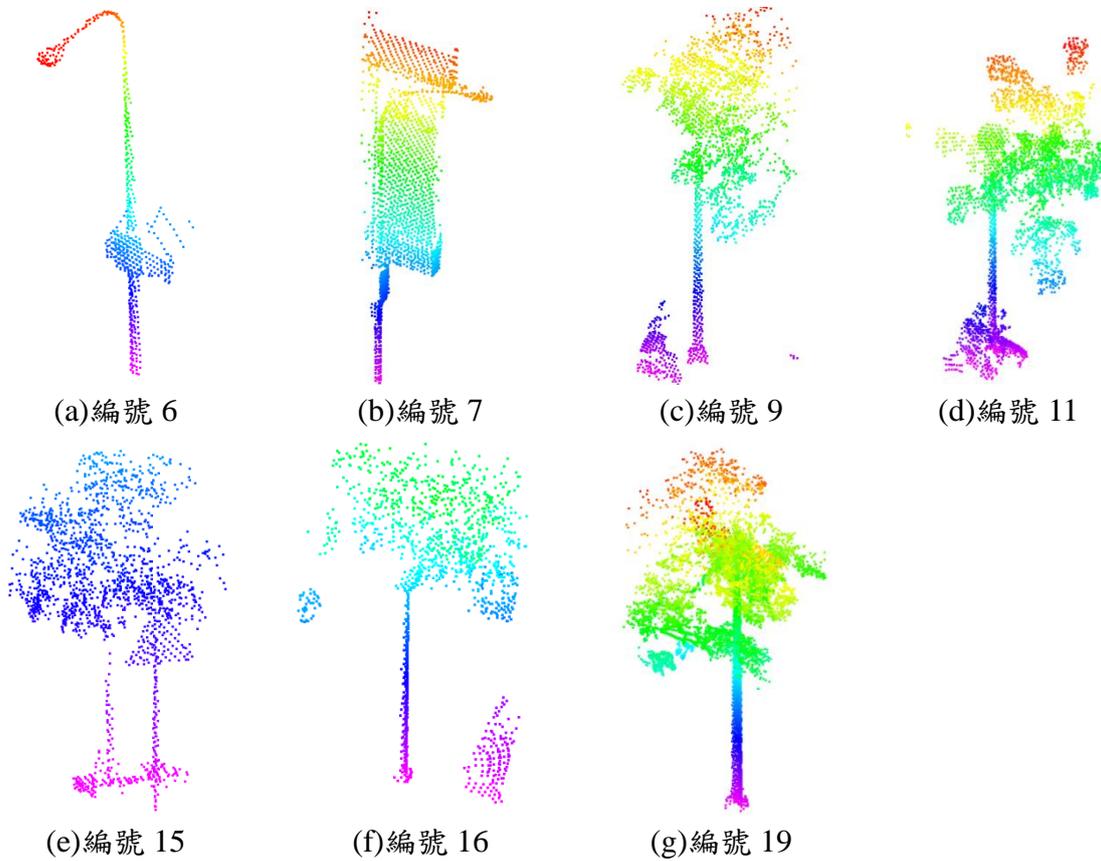


圖 16 未被正確判斷包含直立圓桿之點群

經本研究之方法判斷之非直立圓桿，共有 23 支，誤授率高達 60.5%。其中主要可以分成三種類型，分別為完整樹木點雲、過度分割樹木點雲與行人點雲。其中，可發現若樹木點雲中因樹幹為類似直立圓桿，易被本研究所發展之方法判斷包含直立圓桿，如圖 17(a)所示。而樹木之點雲因過度分割分成兩群點群時(如圖 17(b)所示)，由於樹幹類似直立圓桿故亦會被本研究所發展之方法判斷包含直立圓桿(如圖 17(b)下圖所示)。此外，行人之點雲因雙腳亦類似直立圓桿，因此亦被誤判為包含直立圓桿。上述樹幹或行人雙腳被誤判為直立圓桿是因本研究所發展於分層點群中以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數方法辨識是否包含直立圓桿時，僅以一層能成功以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數即辨識其包含直立圓桿，其條件過鬆，且 RANSAC 為基礎之演算法圓面參數中的圓心參數標準標門檻值為 10cm 亦過於寬鬆，導致誤判率高達六成。

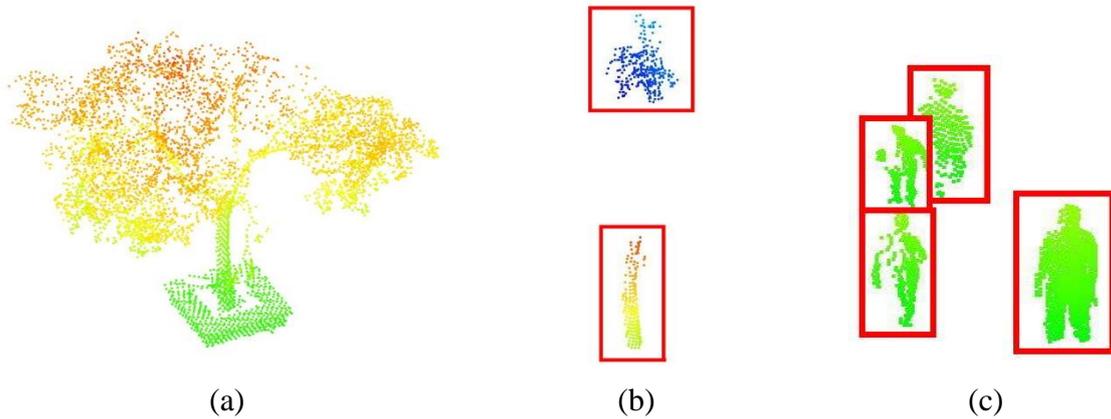


圖 17 錯誤判斷之點群(a)完整樹木點雲 (b)過度分割之樹木點雲 (c)行人點雲

而被正確判斷的 15 支直立圓桿中，現階段乃以人工量測方式量測直立圓桿高度，並將以 RANSAC 為基礎的演算法所求定之圓面參數結合圓桿高度完成模塑，如圖 17 所示。

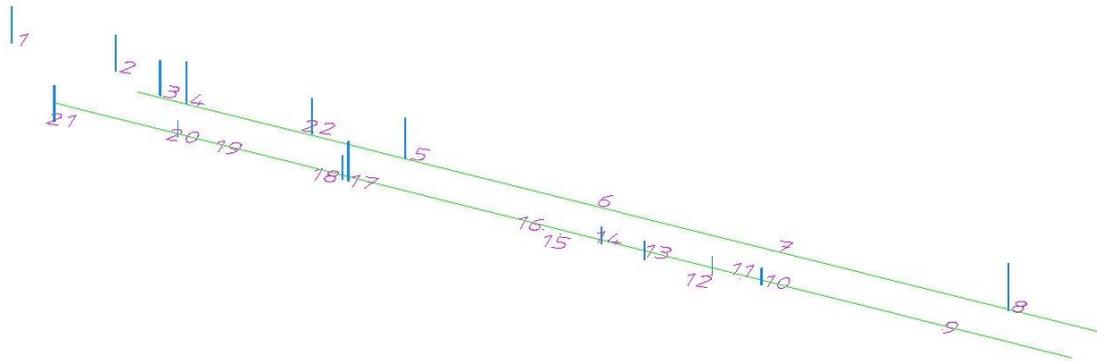


圖 18 直立圓桿模塑之成果

接著將模塑出的各直立圓桿與人工量測之圓面參數比較，結果如下表所示。在 X 坐標方向誤差最大為編號 18 直立圓桿，其誤差約為 0.041m 左右。在 Y 坐標方向誤差最大為編號 10 直立圓桿，其誤差為 0.079m 左右。在半徑差中，誤差最大為編號 12 直立圓桿，其差值約為 0.05m 左右。整體而言，在 X 坐標方向 RMSE 為 0.032m，在 Y 坐標方向 RMSE 為 0.046m，半徑 RMSE 為 0.031m。

表 2 直立圓桿 RANSAC 圓面參數與人工數化之成果比較

| 編號   | X 坐標差值<br>$\Delta X(m)$ | Y 坐標差值<br>$\Delta Y(m)$ | 半徑差值<br>$\Delta R(m)$ | 編號 | X 坐標差值<br>$\Delta X(m)$ | Y 坐標差值<br>$\Delta Y(m)$ | 半徑差值<br>$\Delta R(m)$ |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1  | 0.007                   | 0.055                   | 0.043                 | 13 | -0.033                  | -0.034                  | 0.045                 |
| 2  | 0.020                   | 0.005                   | 0.013                 | 14 | -0.017                  | -0.024                  | 0.025                 |
| 3  | 0.009                   | -0.031                  | -0.021                | 17 | 0.019                   | -0.006                  | -0.029                |
| 4  | -0.004                  | 0.033                   | 0.004                 | 18 | <b>-0.041</b>           | 0.000                   | -0.014                |
| 5  | 0.007                   | 0.006                   | 0.008                 | 20 | -0.040                  | -0.052                  | -0.007                |
| 8  | 0.005                   | 0.004                   | -0.006                | 21 | -0.032                  | -0.077                  | 0.011                 |
| 10   | -0.039                  | <b>-0.079</b>           | 0.029                 | 22 | 0.006                   | -0.002                  | 0.000                 |
| 12   | -0.058                  | -0.037                  | <b>0.0548</b>         |    |                         |                         |                       |
| RMSE(m) 圓心 X 坐標：0.032 圓心 Y 坐標：0.046 半徑 R：0.031 |                         |                         |                       |    |                         |                         |                       |

#### 四、結論與建議

由於車載光達點雲資料量相當大且所掃描得到的相關路廊地物點雲眾多且複雜，因此演算法中加入物空間中的場景與物件的相關知識並運用 RNASAC 的概念協助處理。首先依據 GPS 紀錄之車行軌跡進行分段處理得到分段點雲資料，接著用分段車行軌跡紀錄之平均高程與 GPS 天線高推算出之地面約略高程濾除含有路面、人行道之地面點，緊接著，將其餘之非地面點雲以八分樹結構化及以 CCL 群聚演算法群聚成點群，最後以 RANSAC 為基礎之演算法與物空間路廊場景物件知識判斷點群是否包含直立圓桿，並針對直立圓桿予以模塑。而經本研究可發現經上述步驟之處理後，實驗結果顯示直立圓桿模塑之漏授率(Omission)為 31.8%、誤授率(Commission)為 60.5%；各直立圓桿萃取出之圓面參數與人工量測之結果比較在 X 坐標方向的 RMSE 為 0.032m，在 Y 坐標方向 RMSE 為 0.046m，而半徑的 RMSE 則為 0.031m。綜合上述本研究所發展之方法於本實驗區中約可以 70% 正確判斷率判斷包含直立圓桿點群並模塑，而無法正確判斷與模塑的主因是含直立圓桿的地物與相鄰之物體(如廣告招牌、遮雨棚、路樹)太過於接近，導致八分樹體元結構化分割與群聚時不易將這些含直立圓桿的地物確實分離。

而在本實驗中，使用本研究所提出以 RANSAC 為基礎判斷點群是否包含直立圓桿之演算法亦亦萃取出部分路樹，因此可以由此延伸應可發展偵測與模塑路樹之演算法。此外，本研究中於分層點群中僅以一層能成功以 RANSAC 為基礎之演算法求定圓面參數即辨識其包含直立圓桿，其條件過鬆，未來應可以設定更嚴苛之條件，如滿足 RANSAC 設定之直立圓桿物空間物件知識的層數增加等或將圓面參數中的圓心參數中誤差門檻值設更嚴。為提升擬合之精度，未來亦可加入權迭代最小二乘強鈍估值擬合法，而圓面參數之初值則可採用以 RANSAC 為基礎演算法所得之圓面參數作為初值。此外，可發現若擬合點群之雜訊太多，其以 RANSAC 為基礎演算法效果仍有限。因此未來除了可深入了解強鈍估值法抗粗差的程度外，亦可朝向其他抗差的擬合模式發展。

## 致謝

本研究為國科會計畫計畫編號：NSC 100-2221-E-004-010 經費贊助之部分研究成果，特致謝忱，並感謝詮華國土測繪有限公司提供車載光達掃描資料。

## 參考文獻

- 王焱，2011，《光達點雲區塊化》，國立成功大學測量及空間資訊學系博士論文。
- 李育華，2009，《車載移動式製圖系統之系統率定及其直接地理定位之效能分析》，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 迅聯光電有限公司，2010，產品世界--移動載具型雷射掃描儀，迅聯光電有限公司，[http://www.linkfast.com.tw/product\\_rieg\\_c.htm](http://www.linkfast.com.tw/product_rieg_c.htm)，取用日期：2010年12月28日。
- Brenner, C., 2009, Extraction of features from mobile laser scanning data for future driver assistance systems, in M. Sester et al. eds., *Advances in GIScience*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pp. 25-42.
- Bolles, R., M., Fischler, 1981, A ransac-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data, *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence : Vancouver*.
- Chaperon, T., F., Goulette, 2001, Extracting cylinders in full 3D data using a random sampling method and the Gaussian image, *Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference: Germany*.
- Chen, Y.-Z., H.-J., Zhao and R., Shibasaki, 2007, A mobile system combining laser scanners and cameras for urban spatial objects extraction, *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics: Hong Kong*.
- Kukko, A., C.-O., Andrei, V.-M., Salminen, H., Kaartinen, Y., Chen, P., Rönholm, H., Hyypä, J., Hyypä, R., Chen, H., Haggrén, I., Kosonen, , K. Čapek, 2007, Road environment mapping system of the Finnish Geodetic Institute – FGI Roamer, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, XXXVI (3/W52)*, p.241-247.
- Lehtomäki, M., A., Jaakkola, Juha., Hyypä, A., Kukko, H., Kaartinen, 2010, Detection of vertical pole-like objects in a road environment using vehicle-based laser scanning data, *Remote Sensing, 2*, pp. 641-664.
- Lukács, G., R., Martin, D., Marshall, 1998, Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation, *Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision, Freiburg: Germany*.
- Luo, D., Y., Wang, 2008, Rapid extracting pillars by slicing point clouds, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, XXXVII(B3b)*, pp. 215-218.
- Manandhar, D., R., Shibasaki, 2001, Feature extraction from range data, *Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing: Singapore*.

- Marshall, D., G., Lukacs and R., Martin, 2001, Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23, pp. 304-314.
- Mumtaz, S. A., 2007, Extracting physical and environmental information for Irish roads using airborne laser scanning (ALS), MPhil Research Project, Dublin Institute of Technology.  
<http://www.tnet.teagasc.ie/lerc/downloads/EORS/3rd%20session/salman%20ali.pdf>.
- Petrie, G., C.K., Toth, 2009, *Terrestrial laser scanners: in topographic laser ranging and scanning, principles and processing*, Boca Raton: CRC Press.
- Rabbani, T., F., van den Heuvel, 2005, Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing*, XXXVI (3/W19), pp. 60-65.
- Fischler, M.A., R.B., Bolles, 1981, Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, 24(6), pp. 381-395.
- Schnabel, R., R., Wahl and R., Klein, 2007, Efficient ransac for point-cloud shape detection, *Computer Graphics Forum*, 26, pp. 214-226.
- Schwarz K.P., N., El-Sheimy 2004, Mobile mapping systems - state of the art and future trends, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing*, XXXV (B5), pp. 759-768.



## 可攜式全景影像測繪系統之設計及光束法平差

陳永泉<sup>1\*</sup> 蔡博慶<sup>2</sup> 王彬權<sup>2</sup> 曾義星<sup>3</sup>

論文收件日期：102.08.09

論文修改日期：102.10.25

論文接受日期：102.11.06

### 摘要

車載移動式測繪系統結合導航定位及光學感測器，大幅提升了空間資料獲取及測繪的效率，能夠進行大範圍的空間資料蒐集。人員攜帶式移動式測繪系統具有輕便攜帶、容易施測、且價位低等好處，有利於車載系統無法進入或艱困環境等區域的應用。針對如道路周邊外之場景、災害現場、橋梁河道設施、或山區林地等，本文提出一套輕便又能達到高效率觀測及定位的可攜式全景影像測繪系統，得以快速擷取三維空間資訊。此系統結合六台數位單眼相機及 GPS 接收儀於一個方便攜帶及操作的六角形平台，六部相機以環形排列固定於平台以獲取環景影像，並以 GPS 進行平台之定位。所有相機皆經過內方位率定，並以具有四周佈滿標點的室內率定場，率定六部相機之相對位置及方位關係，再應用一個室外率定場求平台中心位置與六部相機之相對位置關係。在應用上，本系統可在不使用控制點的情況下達成多測站平台方位解算，並換算得每張影像的外方位元素以進行物空間點位測繪。平台方位解算是利用不同拍攝站間影像的連結點及平台中心位置觀測量，以相機與平台中心的相對位置及方位關係為約制條件，進行光束法平差，解算各測站之平台方位。實驗結果顯示，本系統可成功以多測站無控制點的情況下達成平台方位解算，以檢核點檢驗測繪點位，顯示各坐標差值的 RMSD 都在 3 公分以內，唯 Y 坐標有約 6 公分的系統性偏差。但加入少數控制點即可明顯改善系統性偏差，使得三軸坐標的平均偏差量皆小於 1 公分，各坐標差值的 RMSD 都在 0.5 公分以內。顯示加入控制點可大幅改善測站方位解算的誤差，提升定位之精度。本文亦應用此系統於房屋三維模型的測繪，展示場景實物測繪的實用性及方便性。

**關鍵詞：**可攜式、光束法平差、全景影像、移動測繪系統、攝影測量

<sup>1</sup> 講師，德霖技術學院營建科技系。

<sup>2</sup> 碩士，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>3</sup> 教授，國立成功大學測量與空間資訊學系。

\* 通訊作者，TEL：(02)22733567#376，E-mail: [cyc1130@yahoo.com.tw](mailto:cyc1130@yahoo.com.tw)。

# The Design and Bundle Adjustment of a Portable Panoramic Image Mapping System

Yung-Chuan Chen<sup>1\*</sup>, Po-Chin Tsai<sup>2</sup>, Ping-Chuan Wang<sup>2</sup>, Yi-Hsing Tseng<sup>3</sup>

## Abstract

The car-based mobile mapping systems (MMSs) are usually equipped with the navigation systems and the image sensors. These car-based systems can be used to gather the spatial information and to generate the maps efficiently, and they can be applied to collecting the spatial information of large areas. However, the portable mobile mapping systems have a lot of advantages, such as convenience of portability, versatility of mapping, and low cost. These portable systems can be used in remote areas that can't be accessed by car-based MMSs. This paper proposes a Portable Panoramic Image Mapping System (PPIMS) which can be used to collect 3D spatial information quickly. The PPIMS is not very heavy to carry, and it is also very efficient for mapping and positioning. This system can be applied to mapping of remote areas, disaster areas, mountains and forest areas. The PPIMS is equipped with six cameras, a GPS receiver and a platform. The platform is very easy to carry and operate. The six cameras are rigidly mounted on the platform to capture panoramic images, and the GPS can provide the position information of the platform. The interior orientation of each camera has been calibrated in advance, and then the relative position and orientation relationship between cameras has been calibrated in an indoor calibration field where hundreds of photogrammetric targets are well distributed along the walls, ceiling, and floor. Finally, the relative position relationship between the platform center and the six cameras are calibrated in an outdoor calibration field. The platform orientations of the stations can be calculated even without any control point, and then the exterior orientation elements of each image can be determined. Following this, the coordinates of the object points can be computed using the intersection method. The bundle adjustment procedure for the PPIMS is used to figure out the platform orientation. In this procedure, the observations include the image coordinates of the tie points and the coordinates of the platform center of different stations. Therefore, the relative position and orientation relationship between the cameras and the GPS are constraint conditions. According to the experimental results, the platform orientation of the stations can be calculated successfully even without any control point. Using the check points to evaluate the positioning accuracy, the RMSD of

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Construction Science and Engineering, De-Lin Institute of Technology.

<sup>2</sup> Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>3</sup> Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

\* Corresponding Author, TEL: 886-2-22733567#376, E-mail: [cyc1130@yahoo.com](mailto:cyc1130@yahoo.com).

the coordinate differences is better than 3cm, but the systematic error of Y coordinate is about 6 cm. On the other hand, when three control points are used, the systematic error can be improved, the average coordinate difference is not greater than 1cm, and the RMSD of each coordinate difference is always better than 0.5 cm. Using only a few control points, the precision of station orientation is better, and the accuracies of positioning also can be improved significantly. The PPIMS is also used to generate a 3D building model, thus the versatility and convenience of this equipment has been demonstrated in this experiment.

**Keyword:** Bundle adjustment, Mobile mapping system, Panoramic image, Photogrammetry, Portable

## 一、前言

空間定位及導航科技與數位攝影測量技術的整合，形成各式空載、車載或人員攜帶之移動式測繪系統(Mobile Mapping System)，帶動了移動測繪科技的研究與發展，大幅提升了空間資料獲取及測繪的效率。目前所發展的移動式測繪系統以車載及空載系統為主，此類型系統能夠進行大範圍的空間資料蒐集，自動化定位及定方位且測量精度能夠達到大比例尺的製圖標準，適合於地形圖測繪、三維城市模型建置、各式工程測量、及天然災害評估等應用，也適合於許多非傳統測繪上的應用，例如道路導航資訊收集、街景調查及展示、交通設施的調查及維護、及防災應用等，充分發揮移動式測繪系統的多功能性及優勢。

相對於空載以及車載移動式測繪系統，人員攜帶式移動式測繪系統具有輕便攜帶、容易施測、且價位低等好處，缺點是難以應用於大範圍的測繪。目前可攜式系統雖然較為稀有，但有其必要性，空載系統有大範圍涵蓋的優勢，但缺乏地物立面的資訊，車載系統可補足空載系統不足之處，但僅限於載具能夠到達的區域，對於車載系統無法進入之區域，例如道路周邊外之場景、災害現場、橋梁河道設施、及山區林地等，必須倚賴可攜式系統。傳統上，這些困難區域乃應用地面測繪或近景攝影測量施測，現場需布設控制點且觀測工時長，測繪效率不彰。現行可攜式測繪系統，例如 Backpack Mobile Mapping System (Ellum, 2001)或 Point Grey 的 Ladybug 全景相機，應可結合精密定位及定方位技術，提升現場觀測的效率，有利於艱困環境的應用。然而如何簡化可攜式系統的配備達到輕便攜帶，但又能達到高效率觀測及定位定方位的要求，尚有待研究發展。

針對可攜式系統的訴求，本研究提出一套輕便又能達到高效率觀測及定位定方位的觀測系統，稱為可攜式全景影像測繪系統(Portable Panoramic Image Mapping System, PPIMS)。PPIMS 配備六部高解析度單眼相機，以環狀的排列的方式固定於平台，平台上設置同時曝光機制，使得六幅同時成像的影像可構成環場全景影像。平台上可設置 GPS 天線，以獲得曝光時之平台中心位置。PPIMS 未裝置慣性導航系統(因為精準的慣性導航裝置價格昂貴，且需要電源及電腦配合運作)，無法直接獲得載台方位之觀測量。因此，本研究採用間接方式，利用不同拍攝站間影像的連結點(tie points)及平台中心位置觀測量，以相機與平台中心的相對位置及方位關係為約制條件，進行光束法平差，解算各測站之平台方位，再轉換計算得每張影像的外方位元素，之後即可利用多測站全景影像的前方交會進行測繪。如同所有的多感測器測繪系統，PPIMS 必須先經過系統率定，以確定相機與平台中心的相對位置及方位關係。本系統應用一個四周佈滿標點的室內率定場，求得六部相機之相對位置及方位關係，再應用一個室外率定場求平台中心位置與六部相機之相對位置關係。

簡而言之，PPIMS 是一套具有 GPS 定位的多相機近景攝影測量系統。整套系統相當輕便可攜帶，但觀測時採靜態拍攝，使用高解析單眼相機獲取高品質影像，有利於影像測繪。PPIMS 提供了一種廉價且有效率的空間資訊獲取的方式，針對大

型測繪系統無法運達之測區，提供另一種測繪方法的選擇，並期待能與車載或空載測繪系統互相輔助以獲得更完整之空間資訊。

## 二、系統設計與建置

設計 PPIMS 主要的訴求是發展具機動性與便利性的測繪系統，為了使各站拍攝能獲取全景之影像，採用六部相機同時拍照。考量系統的可攜性，相機的選擇以重量輕且拍攝的影像品質也穩定的小型單眼相機。整個應體系統的建置可分：平台設計、相機與相機率定、及 GPS 動態定位裝置三方面來說明。

### (一)平台設計

平台的功能除可固定六部相機外，還需具備同步擊發相機快門的裝置，而平台中心上方需固定 GPS 天線，平台下方則需連接測桿或三腳架基座。首先，依據相機的視場角及構成全景影像的條件，採用正六邊形的平台，六邊形各邊長為 15cm，分別可架設一台相機，相鄰相機間之像幅重疊率約為 20%。平台中間鋁桿上方有 GPS 天線標準接頭，裝上所有設備的系統如圖 1 所示，總重量約 3 公斤。本系統採用機械式的同步擊發裝置，運用魚絲線操縱 6 根小桿子擊發相機快門，6 條魚絲線頭都連到平台下方套在中間鋁桿上的滑動環，往下拉動套環即可同步擊發 6 部相機，如圖 2 所示。



圖 1 PPIMS 系統外觀



圖 2 機械式的同步擊發裝置

整套系統可以拆解以方便攜帶，拆解後所有組件如圖 3，重新組裝後所有相機可以保持原來的相對關係。測桿總長度為 2 公尺，可拆成兩截各為 1 公尺，因此在野外能夠因需求而增減系統拍攝之高度，圖 4 為實地拍攝時系統架站之情形。



圖 3 系統拆解後所有組件



圖 4 實地拍攝時系統架站之情形

## (二)相機與相機率定

系統雛形採用 Sony Nex-3 小型單眼相機，影像解析度為  $4592 \times 3056$  像素。此相機之體積小重量輕，可搭配單眼廣角鏡頭，相機規格如表 1。拍攝時可解除自動對焦功能，並將對焦物距固定於無窮遠處，使得像距等於焦距。如此每次拍攝之成像面與鏡頭的幾何關係可以維持不變，亦即內方位保持一致。因此，相機經過內方位率定後所得到之內方位參數，將能應用於所拍攝影像之內方位改正。

表 1 Sony Nex-3 小型單眼相機規格

|         |                                    |
|---------|------------------------------------|
| 焦距      | 16mm                               |
| 感光元件像素  | 1460 萬像素                           |
| 感光元件大小  | $23.4 \times 15.6$ mm              |
| 最大解像度   | $4592 \times 3056$                 |
| 機身重量    | 239 克                              |
| 重量(含電池) | 297 克                              |
| 體積:     | $117.2 \times 62.6 \times 33.4$ mm |
| 垂直視角    | 約 52 度                             |
| 水平視角    | 約 72 度                             |

本研究應用 Australis 商業軟體進行自率光束法相機率定，率定場為一個直徑約 240 公分，佈滿軟體可辨識標點之圓形轉盤。藉由轉動圓形轉盤，等同於率定場固定不動而改變相機拍攝位置，達到不同拍攝角度之多重疊影像的目的（如圖 5），以增加解算參數之準確度。

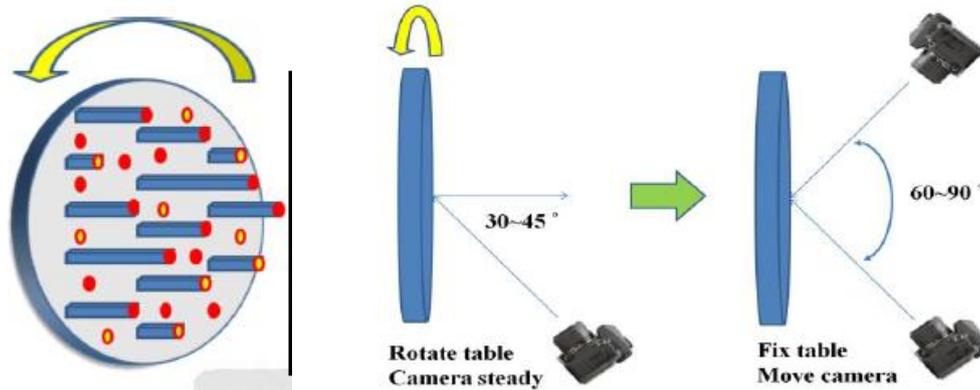


圖 5 旋轉圓盤率定場及獲得不同拍攝角度之多重疊影像的方法

所採用的 6 部相機皆須經過內方位率定，率定得的參數包括相機焦距( $f$ )、像主點( $x_p, y_p$ )及透鏡畸變差。透鏡畸變差以像坐標改正量( $\Delta x$ 、 $\Delta y$ )之函數表示之，函數參數包含了輻射透鏡畸變係數、偏心透鏡畸變係數及像平面線性變形係數等，關係式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x} + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{x} + P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x} \cdot \bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y &= \bar{y} + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{y} + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x} \cdot \bar{y} \end{aligned} \quad (1)$$

其中：

$$\bar{x} = x - x_p, \bar{y} = y - y_p, r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2,$$

$K_1, K_2, K_3$ ：輻射透鏡畸變係數 (Radial Lens Distortion)；

$P_1, P_2$ ：偏心透鏡畸變係數 (Decentric Lens Distortion)；

$b_1, b_2$ ：像平面線性變形係數。

### (三)GPS 動態定位裝置

本系統安裝的 GPS 接收儀乃具有應用虛擬參考系統(Virtual Reference System, VRS)進行動態定位的功能，因此可以透過 GPRS 無線上網的方式，與國土測繪中心所建構之高精度電子化全球衛星即時動態定位系統(eGPS)連線，經由 eGPS 系統即時提供坐標解算改正資料，可即時獲得高精度之定位坐標成果。因此本系統不需要架設基站，單人即可進行觀測作業，符合本可攜性系統之要求，達到快速、準確且方便操作之特性。

## 三、PPIMS 測繪原理

應用 PPIMS 於測量及製圖的工作步驟包含率定、外方位解算及測繪。率定步驟包括相機內方位率定及系統率定，率定工作完成後，若系統架構未改變則不需重複做。經過率定的 PPIMS 即可應用於測繪，須先進行外方位解算，才能進行物空間點位測繪。外方位解算步驟是利用不同拍攝站間影像的連結點及平台中心位置觀測量，以相機與平台中心的相對位置及方位關係為約制條件，進行光束法平差，解算各測站之平台方位，再轉換計算得每張影像的外方位元素。當每張影像具有外方位元素

後，即可應用一般近景攝影測量多影像前方交會方式進行測繪。整體流程如圖 6 所示。

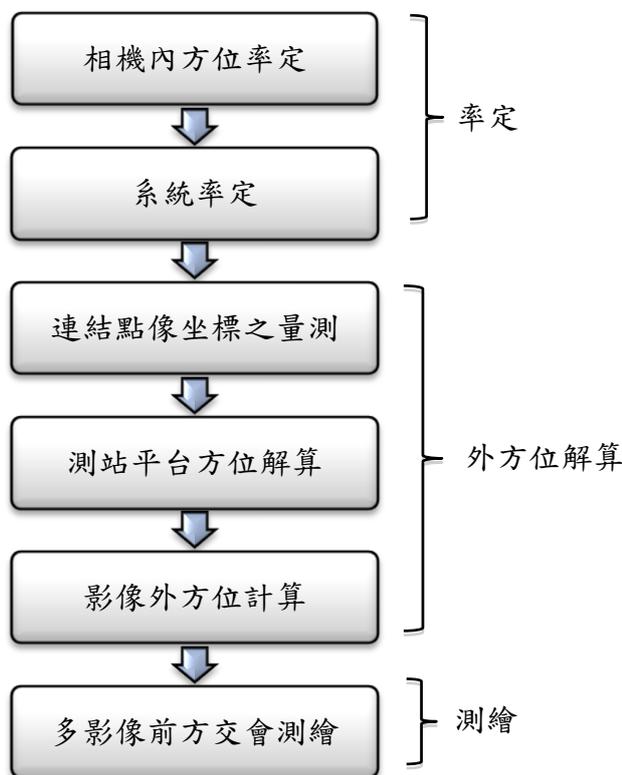


圖 6 應用 PPIMS 進行測繪之整體工作流程圖

經過內方位及系統率定的 PPIMS，相當於一部具有定位功能的量測型(metric)全景近景攝影測量系統。只要能夠解算每個測站的平台方位，即可計算得每張影像的外方位元素。理論上，在單一測站的情況，由於測站本身具有 GPS 定位，可藉由兩個控制點解算平台方位。若測站本身不具有 GPS 定位，也可以應用三個控制點以後方交會的方法解算平台位置及方位，如圖 7 所示。實務上，PPIMS 可利用多測站的連結關係解算平台方位，而不需要任何控制點，只要能在不同測站的重疊影像量取共軛點的影像坐標，即可以光束法平差進行平台方位的解算，如圖 8 所示。

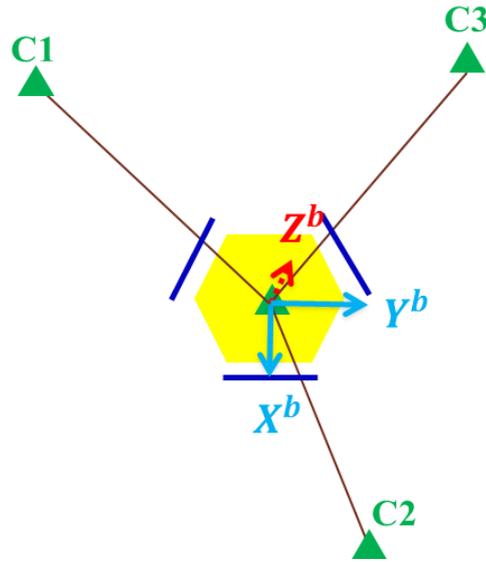


圖 7 單測站透過控制點解算平台方位示意圖

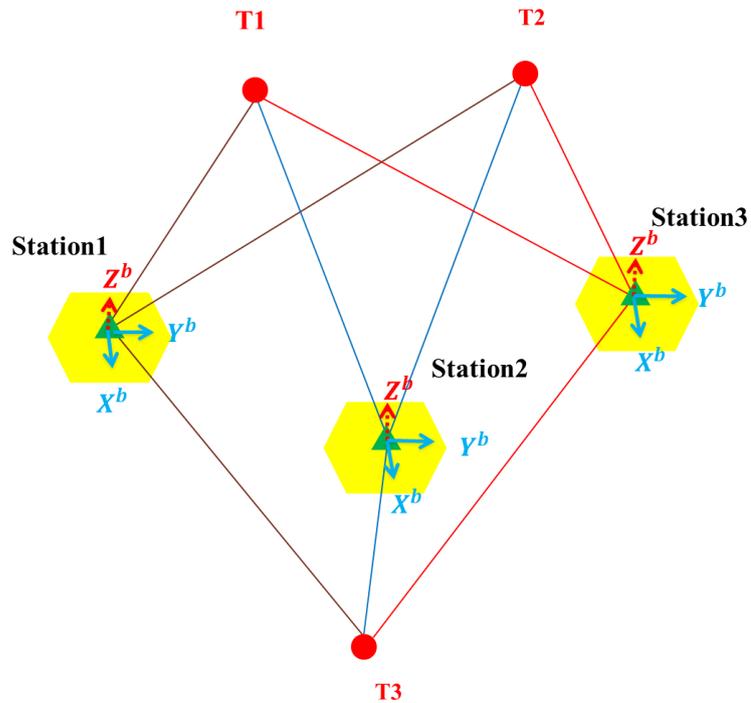


圖 8 多測站以光束法平差解算平台方位示意圖

一旦獲得測站的平台，即可計算得每張影像的外方位參數。亦即可以應用兩張影像的前方交會獲得物空間點位三維坐標，如圖 9 所示。當然，若透過多張不同測站的影像交會，可以獲得更高精度且更可靠的點位坐標。

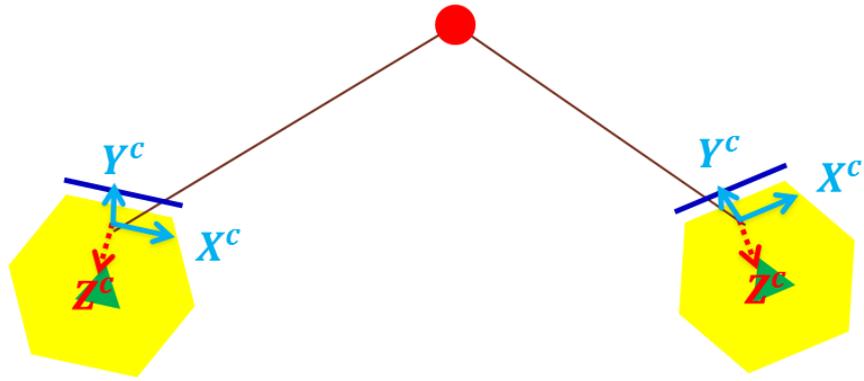


圖 9 以多測站影像前方交會獲得物空間點位三維坐標示意圖

#### 四、坐標框架與轉換

移動式測繪系統中每個感測器都會建立一個相對於感測器參考點的坐標系統，稱為感測器坐標框架(sensor frame)。而通常感測器是固定於平台，若平台本身也定義一個參考坐標系統，即平台坐標框架(body frame)，則感測器與平台坐標框架間的轉換關係是固定的。而測繪的目的是將測得的物空間坐標轉換至統一的製圖坐標系統，即製圖坐標框架(mapping frame)。PPIMS 的感測器是 6 部相機，編號為  $C_0 \sim C_5$ ，各部相機所成立的坐標框架稱為  $C_i$  Frame，平台坐標框架以 GPS 天線中心為原點，稱為 B Frame，製圖坐標框架則為 M Frame。三種坐標框架的定義及相對關係如圖 10 所示，釐清這些坐標框架間的轉換關係，才能解算影像方位進而應用 PPIMS 進行測繪。

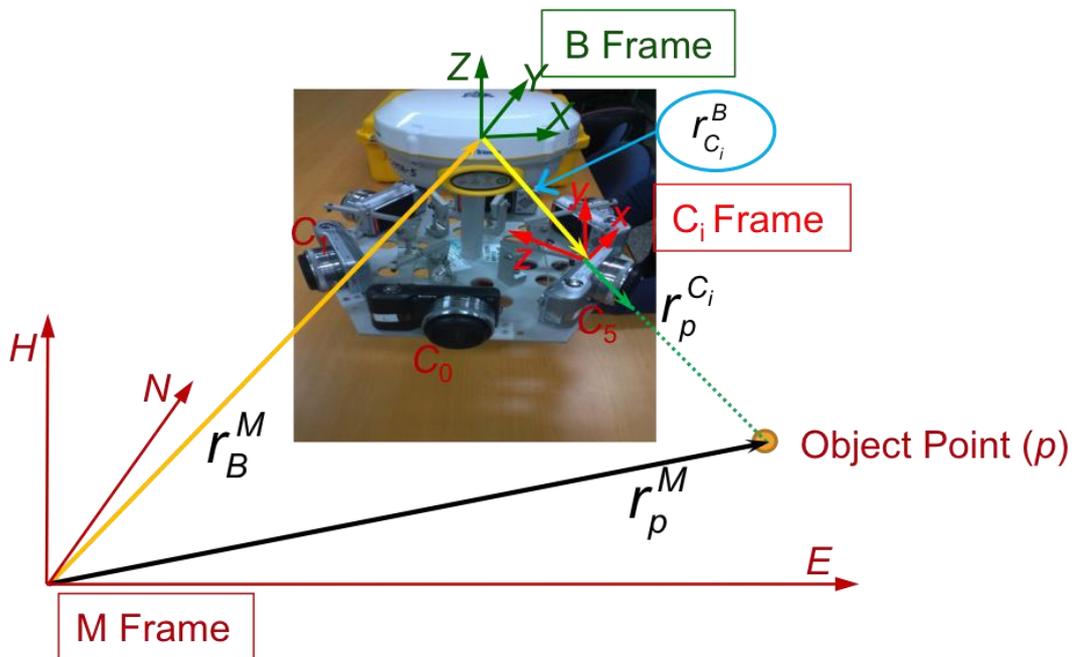


圖 10 PPIMS 所涉及的三種坐標框架定義及相對關係

### (一)相機坐標框架(Ci Frame)

各部相機的坐標框架乃依據其成像面及投影中心來定義，相機坐標框架的原點設在投影中心，相機框架與影像坐標框架(image frame)的幾何關係如圖 11。透過相機內方位的率定，可獲得相機焦距( $f$ )、像主點(principal point)坐標( $c_0, r_0$ )及透鏡畸變差，而可將任一像元影像坐標轉換為相機坐標框架的坐標  $(x, y, -f)$ ，其轉換公式如式(2)，至於改正透鏡畸變差之公式如式(1)。

$$\begin{aligned} x &= (c - c_0) \cdot ds \\ y &= (r_0 - r) \cdot ds \end{aligned} \quad (2)$$

其中，

- ( $c, r$ ): 影像坐標;
- ( $c_0, r_0$ ): 像主點影像坐標;
- $ds$ : 像元尺寸。

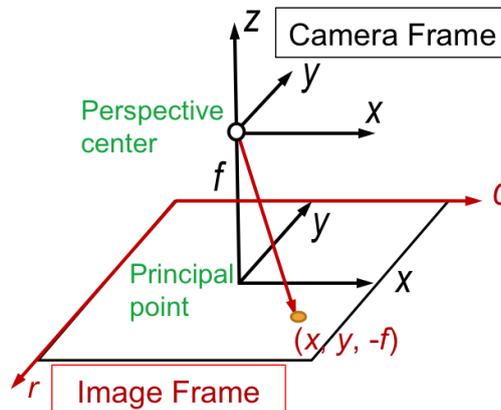


圖 11 相機框架與影像坐標框架的幾何關係示意圖

### (二)平台坐標框架(B Frame)

PPIMS 六部相機皆假設固定於平台上，各部相機坐標框架相對於平台坐標框架是維持不變的，所以平台坐標框架是所相機的共同參考框架。在具有慣性導航系統的移動式測繪系統，多採用慣性導航裝置之導航坐標框架為平台坐標框架。由於本系統沒有裝載慣性導航系統，而以 GPS 天線之相位中心為平台坐標框架的原點，而坐標框架之三個坐標軸則參考至  $C_0$  相機，以  $C_0$  相機為基準，將  $x$ -軸順時針旋轉 90 度，使  $z$ -軸朝上(如圖 12 所示)，即為平台坐標框架的參考軸向，因此載台坐標系統的方位與該相機的方位息息相關。

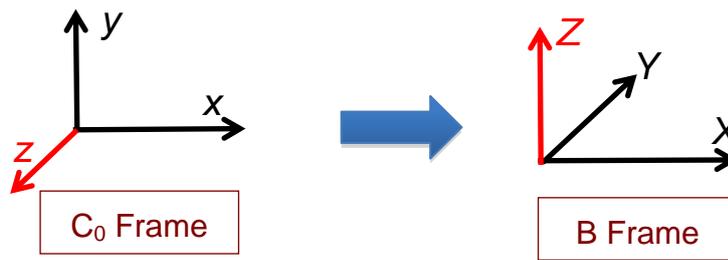


圖 12 平台坐標框架之三個坐標軸參考至 C0 相機的方式

### (三)製圖坐標框架(M Frame)

製圖坐標框架是物空間坐標參考系統，可以是任意定義的三維直角坐標框架，視不同之需求目的，可能是當地水平坐標框架(Local Coordinate Frame)、地心地固坐標框架(Earth Centered Earth Fixed Coordinate Frame)、或地圖投影坐標框架（如 TWD97 坐標系統）等。而 PPIMS 的 GPS 觀測結果必須透過已知控制點，轉換至製圖坐標框架，如此所得的測繪成果才能參考至統一的坐標系統。

### (四)坐標框架之向量與轉換關係

本文以  $r$  代表坐標框架之向量，其上標代表此向量所參考的坐標框架，而其下標則表示向量的端點。如圖 13 表示某 A 坐標框架中， $P$  點之向量( $r_P^A$ )表示如式(3)， $P_1$  點至  $P_2$  點之向量( $r_{P_1 \rightarrow P_2}^A$ )表示如式(4)。而坐標框架之移位(Translation)及旋轉(Rotation)亦可表示為移位向量( $r$ )及旋轉矩陣( $R$ )，如圖 14 表示從 A 坐標框架轉換至 B 坐標框架，其中  $r_B^A$  代表移位向量， $R_A^B$  則為旋轉矩陣。

$$r_P^A = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$r_{P_1 \rightarrow P_2}^A = \begin{bmatrix} X_{P_2} - X_{P_1} \\ Y_{P_2} - Y_{P_1} \\ Z_{P_2} - Z_{P_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

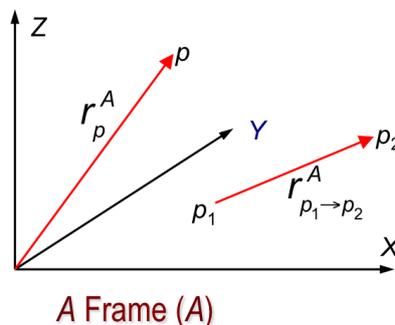


圖 13 某 A 坐標框架中 P 點之向量及 P1 點至 P2 點之向量

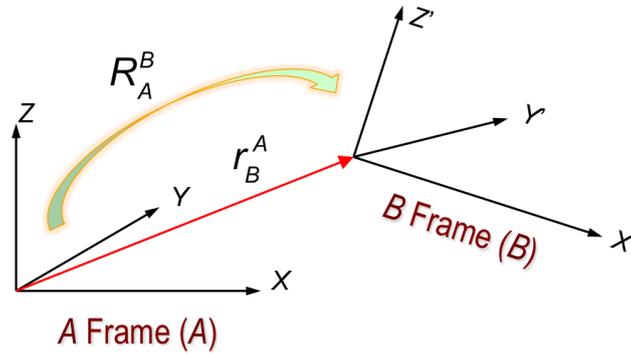


圖 14 從 A 至 B 之坐標框架轉換關係

### (五)PPIMS 之幾何關係式

如圖 10，PPIMS 所涉及的坐標框架有 M Frame、B Frame 及  $C_i$  Frame，因此某觀測點  $P$  之物空間與像空間點位坐標之幾何關係可表示如下式：

$$r_P^M = r_B^M + R_B^M r_{C_i}^B + k R_B^M R_{C_i}^B r_P^{C_i} \quad (5)$$

式中

- $r_P^M$ ：定義於 M Frame 之  $P$  點向量；
- $r_B^M$ ：M Frame 至 B Frame 之移位向量；
- $k$ ：點位投影之尺度參數；
- $R_B^M$ ：B Frame 至 M Frame 之旋轉矩陣；
- $r_{C_i}^B$ ： $C_i$  Frame 至 B Frame 之移位向量；
- $R_{C_i}^B$ ： $C_i$  Frame 至 B Frame 之旋轉矩陣；
- $r_P^{C_i}$ ：定義於  $C_i$  Frame 之  $P$  點向量。

### (六)系統率定

系統率定的目的是求出  $C_i$  Frame 至 B Frame 之轉換關係，包含  $C_i$  Frame 至 B Frame 之移位向量( $r_{C_i}^B$ )，又稱為相機之桿臂(lever arm)，以及  $C_i$  Frame 至 B Frame 之旋轉矩陣( $R_{C_i}^B$ )，如圖 15 所示。系統率定可採用室內率定場法，應用四面牆面、天花板及地面皆佈滿反射標的室內率定場，以多站拍攝之所有影像，經光束法平差解算各部相機與平台之轉換關係(王彬權，2012)。

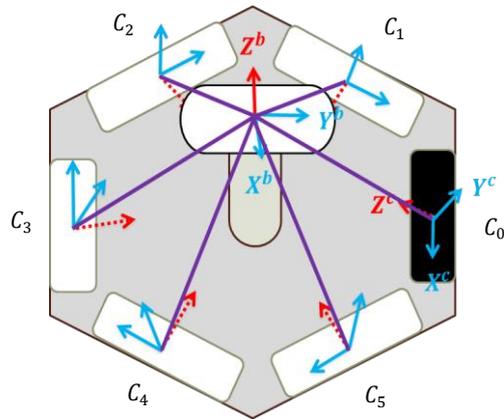


圖 15 系統率定所決定之 Ci Frame 至 B Frame 轉換關係

### 五、外方位解算

PPIMS 可利用 GPS 觀測量，獲得測站之平台中心位置坐標，但測站之平台姿態仍是未知，須透過不同拍攝站間影像的連結點，以光束法平差解算各測站之平台方位，再轉換計算得每張影像的外方位元素，其步驟如圖 6。其觀測網形平差概念如圖 7 及 8，主要的觀測量是影像連結點像坐標及測站平台中心坐標。正常情況可利用多測站的連結關係解算平台方位，而不需要任何控制點，但若 GPS 無法接收足夠衛星資料以供定位，可加入控制點坐標觀測量來解算。

#### (一)平台方位解算

如同影像的外方位元素，平台的方位元素為  $r_B^M$  及  $R_B^M$ ，若測站之平台中心位置已透過 GPS 觀測而得，則實質的未知量只有平台姿態  $R_B^M$ 。依據上述網形平差概念，可匯入平差系統的觀測量有三種：影像連結點、測站平台中心坐標、及控制點坐標，其觀測方程式如下：

$$\hat{r}_p^{C_i} + V_{r_p^{C_i}} = k^{-1} R_B^{C_i} R_M^B (r_p^M - r_B^M) - k^{-1} R_B^{C_i} r_{C_i}^B$$

$$\hat{r}_B^M + V_{r_B^M} = r_B^M \tag{6}$$

$$\hat{r}_p^M + V_{r_p^M} = r_p^M$$

式中左項代表三種觀測量及其改正數，右項中  $r_{C_i}^B$  及  $R_B^{C_i}$  為系統率定已知值，其餘  $r_B^M$ 、 $R_B^M$  及  $r_p^M$  為未知參數，而將影像連結點觀測方程式組成共線式時可將尺度參數  $k$  消除。設  $n$  為影像觀測點數， $p$  為測站數， $q$  為控制點數， $m$  為連結點數，則觀測方程式個數為  $2n + 3p + 3q$ ，而未知參數個數為  $6p + 3(q + m)$ 。式(6)的最小二乘解算條件是觀測方程式個數須大於未知參數個數，而且必須  $(p + q) \geq 3$ 。

## (二)影像外方位計算

解算得平台方位後，可利用平台方位參數及系統率定值，轉換計算得每張影像的外方位元素，其計算式如下：

$$\begin{aligned} r_{C_i}^M &= r_B^M + R_B^M r_{C_i}^B \\ R_{C_i}^M &= R_B^M R_{C_i}^B \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$r_{C_i}^M$ ：定義於M Frame， $C_i$ 之位置向量；  
 $R_{C_i}^M$ ： $C_i$  Frame 至 M Frame 之旋轉矩陣。

## 六、實驗成果與分析

實驗分兩部分，第一部分是方位求解及定位精度測試，第二部分則是應用案例的示範。

### (一)定位精度測試

此實驗利用國立成功大學歸仁校區之建物群所建立的環形檢驗場進行測試，環形檢驗場乃由 5 棟建物的牆面所構成，5 棟建物分別編碼為 E0~E4，如圖 16 所示。本實驗以建物牆面上可清楚辨識的特徵點為檢核點，檢核點編碼為四碼，前兩碼為建物編碼，後兩碼則為序號碼，如圖 17 所示。所有檢核點皆使用全測站儀以前方交會方法觀測計算得地面坐標，觀測點位精度優於 2 公分。本實驗以 PPIMS 拍攝檢驗場，經平台方位解算並計算得每張影像的外方位元素，再透過多影像前方交會獲得觀測點位坐標，將所得的點位坐標與檢驗坐標比較分析定位精度。

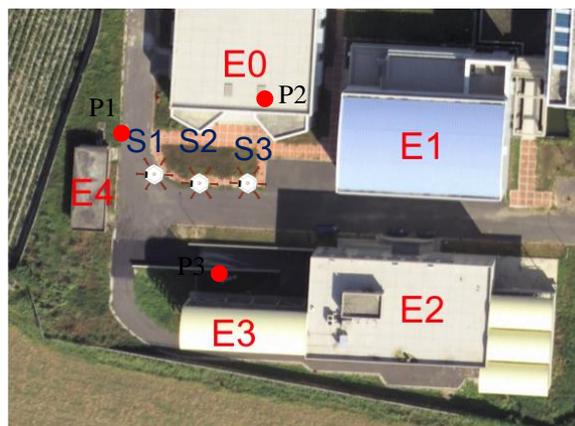


圖 16 定位精度實驗之環形檢驗場



圖 17 環形檢驗場編號 E0 建物之牆面檢核點分佈圖

本實驗以圖 16 中 S1、S2 及 S3 等 3 個測站的資料為測試資料，先以無控制點的方式進行多測站平台方位解算，之後加入 P1、P2 及 P3 等 3 個控制點參與平差，分別將兩組結果與檢核點比較，並評估其定位精度。無控制點的解算成果與檢核點的坐標差值如表 2 所示，各坐標差值的直方圖如圖 18，而各坐標差值的平均值、均方根差值(Root Mean Square Difference, RMSD)、及最大差異量等統計量如表 3。無控制點的成果顯示 Y 坐標約有 6 公分的系統性偏差，而 X 及 Z 坐標的平均偏差量則小於 1 公分，各坐標差值的 RMSD 都在 3 公分以內。在此實驗中，應是由於測站位置的分佈接近於同一直線上，因而造成特定方向的系統偏差。檢驗所有差異量，發現 E1 建物牆面上的點誤差大，例如 E106、E108、及 E112 的 X 與 Y 坐標誤差分別達到 20 至 30 公分，E2 建物牆面上的點誤差次之，例如 E245、E250、E251 及 E254 的 X 與 Y 坐標誤差分別達到 10 至 20 公分，其餘點位坐標誤差都在 10 公分之內。加入控制點的解算成果與檢核點的坐標差值如表 4 所示，各坐標差值的直方圖如圖 19，各坐標差值的平均值、RMSD、及最大差異量等統計量如表 5。有控制點的成果顯示無明顯的系統性偏差，三軸坐標的平均偏差量皆小於 1 公分，各坐標差值的 RMSD 都在 0.5 公分以內。檢驗所有差異量，雖然最大誤差的點位還是在 E1 建物牆面上，但誤差量已改善至 13 公分內。顯示加入了控制點後，可改善求解時因測站與連結點之幾何分布不佳的影響，大幅改善測站方位解算的誤差，提升定位之精度。因此實務上若觀測效率為主要訴求，可以無控制點的方式進行觀測，而若應用需求為高精度測量，則可考慮加入少量的控制點。

表 2 無控制點的多測站解算成果與檢核點的坐標差值。

| Point | dX (m) | dY (m) | dZ (m) | Point | dX (m) | dY (m) | dZ (m) |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| E001  | -0.009 | 0.076  | -0.064 | E254  | -0.152 | 0.111  | 0.085  |
| E002  | -0.008 | 0.054  | -0.062 | E304  | -0.046 | 0.070  | 0.068  |
| E004  | -0.009 | 0.030  | -0.072 | E306  | -0.059 | 0.060  | 0.098  |
| E009  | -0.002 | 0.059  | -0.051 | E316  | -0.013 | 0.055  | 0.087  |
| E010  | -0.009 | 0.020  | -0.052 | E318  | -0.026 | 0.045  | 0.094  |

|      |        |       |        |      |        |        |        |
|------|--------|-------|--------|------|--------|--------|--------|
| E012 | 0.005  | 0.036 | -0.063 | E321 | 0.010  | 0.057  | 0.072  |
| E015 | 0.005  | 0.074 | -0.039 | E323 | 0.001  | 0.032  | 0.091  |
| E016 | -0.005 | 0.020 | -0.060 | E327 | 0.015  | 0.036  | 0.084  |
| E026 | 0.025  | 0.066 | -0.091 | E329 | 0.006  | 0.018  | 0.090  |
| E029 | 0.041  | 0.100 | -0.069 | E337 | 0.009  | 0.017  | 0.089  |
| E032 | 0.069  | 0.128 | -0.039 | E403 | -0.004 | -0.016 | 0.035  |
| E043 | 0.097  | 0.080 | -0.040 | E405 | -0.003 | -0.023 | 0.033  |
| E106 | 0.211  | 0.220 | 0.020  | E406 | -0.003 | -0.003 | 0.014  |
| E108 | 0.328  | 0.247 | -0.007 | E410 | 0.008  | -0.019 | 0.015  |
| E112 | 0.312  | 0.201 | 0.047  | E420 | -0.021 | -0.018 | -0.016 |
| E245 | -0.180 | 0.192 | 0.039  | E428 | -0.016 | -0.010 | -0.048 |
| E250 | -0.130 | 0.146 | 0.023  | E429 | -0.015 | -0.014 | -0.049 |
| E251 | -0.131 | 0.138 | 0.032  | E430 | -0.011 | -0.023 | -0.048 |

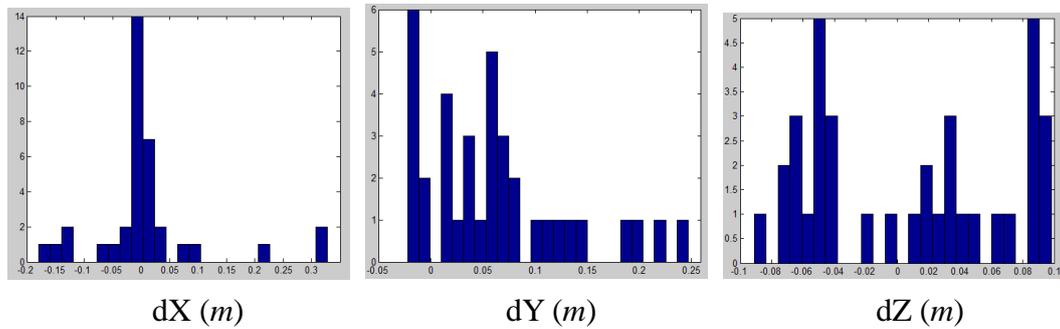


圖 18 無控制點解算成果與檢核點的坐標差值之統計直方圖

表 3 無控制點解算成果與檢核點的坐標差值之統計分析

|         | dX (m) | dY (m) | dZ (m) | Norm (m) |
|---------|--------|--------|--------|----------|
| Average | 0.008  | 0.063  | 0.007  | 0.064    |
| RMSD    | ±0.027 | ±0.017 | ±0.005 | ±0.032   |
| Max     | 0.328  | 0.247  | 0.098  | 0.422    |

表 4 有控制點前方交會之成果與檢核點之比較-多測站

| Point | dX (m) | dY (m) | dZ (m) | Point | dX (m) | dY (m) | dZ (m) |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| E001  | 0.006  | -0.006 | -0.004 | E254  | -0.027 | -0.022 | -0.006 |
| E002  | 0.003  | -0.007 | -0.007 | E304  | -0.012 | -0.028 | -0.007 |
| E004  | 0.000  | -0.007 | -0.007 | E306  | -0.016 | -0.032 | 0.002  |
| E009  | 0.004  | 0.000  | -0.004 | E316  | 0.000  | -0.041 | 0.015  |
| E010  | -0.003 | -0.004 | 0.005  | E318  | -0.013 | -0.027 | 0.007  |
| E012  | 0.000  | -0.002 | -0.012 | E321  | 0.015  | -0.032 | 0.006  |
| E015  | 0.009  | 0.008  | 0.007  | E323  | 0.000  | -0.015 | 0.002  |

|      |        |        |        |      |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| E016 | -0.002 | -0.007 | 0.006  | E327 | 0.009  | -0.031 | 0.003  |
| E026 | 0.011  | 0.008  | -0.015 | E329 | 0.003  | -0.038 | -0.001 |
| E029 | 0.019  | 0.019  | -0.006 | E337 | -0.003 | -0.019 | 0.000  |
| E032 | 0.039  | 0.037  | 0.006  | E403 | -0.004 | 0.000  | 0.001  |
| E043 | 0.034  | 0.007  | -0.007 | E405 | -0.002 | 0.000  | 0.003  |
| E106 | 0.086  | 0.055  | 0.022  | E406 | -0.004 | -0.006 | -0.003 |
| E108 | 0.125  | 0.069  | 0.015  | E410 | -0.009 | -0.010 | 0.000  |
| E112 | 0.128  | 0.048  | 0.027  | E420 | -0.005 | -0.014 | -0.002 |
| E245 | -0.088 | 0.047  | -0.006 | E428 | -0.001 | -0.009 | -0.004 |
| E250 | -0.038 | 0.003  | -0.022 | E429 | 0.003  | -0.010 | -0.002 |
| E251 | -0.036 | -0.008 | -0.017 | E430 | 0.003  | -0.013 | -0.002 |

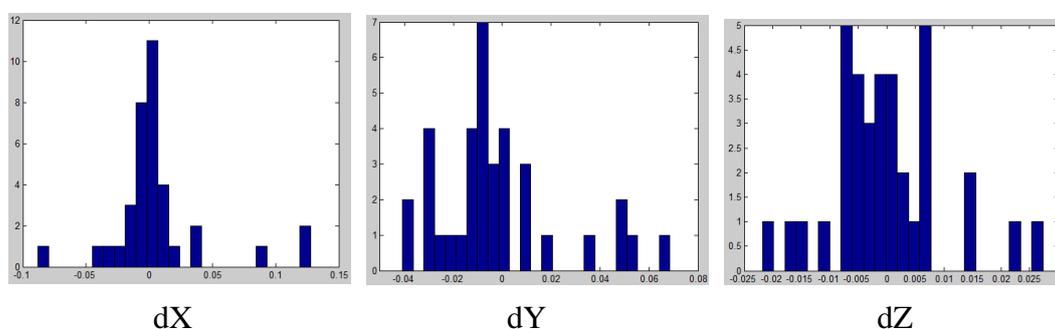


圖 19 有控制點之前方交會成果與各檢核點坐標差異之直方統計圖

表 5 有控制點解算成果與檢核點的坐標差值之統計分析

|         | dX (m) | dY (m) | dZ (m) | Norm (m) |
|---------|--------|--------|--------|----------|
| Average | 0.007  | -0.002 | 0.000  | 0.007    |
| RMSD    | ±0.004 | ±0.001 | ±0.005 | ±0.006   |
| Max     | 0.128  | 0.069  | 0.027  | 0.148    |

## (二)應用案例示範

本實驗以成功大學校園某建物為應用實例，示範以無控制點方式進行多測站平台方位解算並進行三維房屋模型測繪。在建物四周規劃 7 個測站如圖 20，其中一測站拍攝之六張影像如圖 21，拍攝得之目標建物影像如圖 22。以多測站聯立解算得所有測站平台方位，測站平台方位之後驗精度如表 6，姿態角之後驗精度在 0.01 至 1.60 度間，而測站平台位置之後驗精度均在 4.4 公分以內，並以此方位解算成果進行測繪。

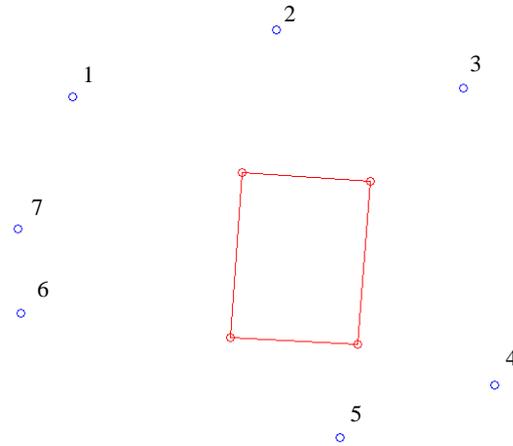


圖 20 建物測繪案例之規劃的拍攝測站分布圖

| 相機 5 | 相機 4 | 相機 3 | 相機 2 | 相機 1 | 相機 0 |
|------|------|------|------|------|------|
|      |      |      |      |      |      |

圖 21 一測站拍攝之六張影像



(a) 建物正面影像

(b) 建物左側影像



(c) 建物右後方影像

(d) 建物背面影像

圖 22 建物測繪案例所拍攝之目標建物影像

表 6 建物測繪案例之測站平台方位後驗精度

| 測站 | 後驗精度<br>$\hat{\sigma}_\omega$ (deg.) | 後驗精度<br>$\hat{\sigma}_\phi$ (deg.) | 後驗精度<br>$\hat{\sigma}_\kappa$ (deg.) | 後驗精度<br>$\hat{\sigma}_X$ (m) | 後驗精度<br>$\hat{\sigma}_Y$ (m) | 後驗精度<br>$\hat{\sigma}_Z$ (m) |
|----|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1  | 0.19                                 | 0.10                               | 0.12                                 | 0.020                        | 0.019                        | 0.022                        |
| 2  | 0.19                                 | 0.11                               | 0.11                                 | 0.023                        | 0.021                        | 0.022                        |
| 3  | 0.30                                 | 0.12                               | 0.09                                 | 0.023                        | 0.022                        | 0.023                        |
| 4  | 0.15                                 | 0.39                               | 0.19                                 | 0.040                        | 0.039                        | 0.044                        |
| 5  | 0.03                                 | 0.01                               | 0.01                                 | 0.002                        | 0.002                        | 0.002                        |
| 6  | 0.36                                 | 1.60                               | 0.31                                 | 0.027                        | 0.028                        | 0.028                        |
| 7  | 0.09                                 | 0.36                               | 0.06                                 | 0.008                        | 0.01                         | 0.009                        |

利用所解算得的平台方位，計算各張影像之外方位參數，將影像與其對應之外方位參數匯入三維建模軟體 PhotoModeler 中，進行房屋三維模型的建置，將影像數貼於房屋三維模型上所得成果如圖 23，此實驗案例展示 PPIMS 應用於實物測繪的可行性。



圖 23 房屋三維模型測繪成果

## 七、結論與建議

建立一套輕巧並便利於個人攜帶的多相機移動式測繪系統是可行的，本文所提的 PPIMS 結合六台數位單眼相機及 GPS 接收儀於一個方便攜帶及操作的六角形平台，六部相機以環形排列固定於平台以獲取環景影像，並以 GPS 進行平台之定位。PPIMS 可在不使用控制點的情況下達成多測站平台方位解算，並換算得每張影像的外方位元素以進行物空間點位測繪。實驗案例以檢核點檢驗測繪點位，顯示各坐標差值的 RMSD 都在 3 公分以內，唯 Y 坐標有約 6 公分的系統性偏差。若加入少數控制點即可明顯改善系統性偏差，使得三軸坐標的平均偏差量皆小於 1 公分，各坐標差值的 RMSD 都在 0.5 公分以內。PPIMS 可應用於房屋三維模型的測繪，本文應用例展示場景實物測繪的實用性及方便性。PPIMS 針對大型測繪系統無法運達之測區，提供了一種輕便且有效率的空間資訊獲取的方式，期能與車載或空載測繪系統互相輔助以獲得更完整之空間資訊。

本文所建立的 PPIMS 雛形屬測試階段系統，在系統操作的方便性及穩定性的考量上尚有改進之處，以下為未來對於本系統可進行修改以及改進的方向：

1. 相機同時的拍攝，由於本系統中藉由設計了 6 跟小桿子並連於控制拉環的方式使各台相機能夠同時進行拍攝，但由於拉下拉環時的施力不當造成平台的傾斜並使得各相機並非同時拍攝，而產生些許偏差，故未來可採用藍芽或紅外線的方式進行遠端遙控，以避免產生此問題。
2. 垂直視角的增加，本系統使用多台 Sony Nex-3 相機以環行配置的方式獲取全景影像，但其垂直視角約為 55 度，部分空間資訊可能無法蒐集完整，因此未來除了可選擇垂直視角較大之相機外並可設計將相機由原本的水平放置改為垂直放置，並增加相機個數以保持能夠獲取全景影像下同時增加其垂直拍攝之角度。
3. 腳架的設計，本系統之固定方式目前是以稜鏡腳架固定，如圖 4 所示，以此方式進行固定較為麻煩且容易晃動，因此可針對本系統設計專用之腳架，使其更為穩固及便利。
4. 測站與控制點的分布不能於同一直線上，在定位精度測試實驗中，因測站位置的分佈接近於同一直線上，造成 Y 方向的系統偏差。
5. 影響 PPIMS 定位精度的因素，包含平台之 GPS 定位誤差、相機影像之解析度、相機內方位率定之精度、系統率定之精度、影像量測誤差、連接點數量及分布、控制點之數量及分布、影像交會幾何、量測目標與測站之距離等相當複雜之因素，本文目前以檢核點之最後坐標成果評估定位精度，後續研究將可深入探討個別因素之影響情形。

本文所提出之多相機移動式測繪系統的方位解算方法，同樣可延伸應用於車載及空載之測繪系統，並可利用多影像匹配的技術，快速獲得共軛點之影像坐標，進而能夠將其應用於即時解算上，快速的獲得系統及影像之外方位資訊。

### 參考文獻

- 王彬權，2012，《可攜式全景影像測繪系統之系統率定》，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- Ellum, C. M., 2001, *The development of a backpack mobile mapping system*, UCGE Report NO. 20101, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.



# 電子化全球衛星即時動態定位系統應用 於車載移動製圖平台定位表現之研究

張詒翔<sup>1</sup> 楊名<sup>2\*</sup>

論文收件日期：102.10.08

論文修改日期：102.10.22

論文接受日期：102.11.14

## 摘 要

移動式車載製圖系統(Mobile Mapping System, MMS)發展至今，已相當成熟。其平台上搭載定位定向系統，並包含多種的感測器。其中所搭載全球衛星定位系統 ( Global Position System, GPS )具有高精度、快速、方便等多種優點。現今 MMS 搭載的 GPS 儀器多為後處理用，此方式雖然能保有高精度，但獲得成果的時間較長。現今台灣內政部國土測繪中心建置了一套電子化全球衛星即時動態定位系統 (e-GPS)可以實現即時動態定位，且突破單一參考站 RTK 的有效範圍限制，帶來更快速、更方便的定位成果。其定位精度之成果與可用性的表現，即成為本研究的目的。本研究嘗試以現行常用的動態後處理，與即時處理進行比較。發現即時處理在產生虛擬參考站時，採用較為嚴格的標準，因此得到的結果相當可靠，但也因衛星的觀測資料篩選較為嚴格，會有覆蓋率降低的情形發生。

**關鍵詞：**即時處理、車載移動製圖系統、動態後處理、電子化全球衛星即時動態定位系統

---

<sup>1</sup> 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>2</sup> 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

\* 通訊作者，TEL：(06)2757575# 63801，E-mail: [myang@mail.ncku.edu.tw](mailto:myang@mail.ncku.edu.tw)。

# A Feasibility Study of Using e-GPS for Mobile Mapping System

Yi-Hsiang Chang<sup>1</sup>, Ming Yang<sup>2\*</sup>

## Abstract

Mobile Mapping System (MMS) has been developed quite maturely. MMS is equipped with positioning and orientation systems, including a variety of sensors. One of the sensors is Global Position System (GPS). It has many advantages, such as high precision, fast and convenient positioning. Most of GPS data processing for MMS is post-processing. Post-processing can maintain high accuracy, but it cannot position in real-time. National Land Surveying and Mapping Center has constructed a network real-time kinematic (RTK) system named e-GPS. The e-GPS brings faster and more convenient positioning results. This research aims at using e-GPS for MMS, but the feasibility of e-GPS for MMS is still unclear, so we attempt to compare post-processing and real-time processing. Because environment condition will significantly affect the position accuracy of GPS, we tested MMS in three different types of environment conditions. The results show that real-time processing uses more strict standards for producing virtual reference station (VRS) observations. The results of real-time processing are quite reliable, but real-time processing deletes satellite observations more than post-processing, so real-time processing sometimes leads to reduced number of positioning results.

**Keywords:** e-GPS, Mobile Mapping System, Post-processed, Real-time

---

<sup>1</sup> Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>2</sup> Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

\* Corresponding Author, TEL: +886-6-2757575# 63801, E-mail: [myang@mail.ncku.edu.tw](mailto:myang@mail.ncku.edu.tw).

## 一、前言

全球衛星定位系統 ( Global Position System, GPS )發展至今已經超過30年的時間，因GPS具有高精度、快速、方便等多種優點，因此運用的領域非常的廣泛。除了軍事方面的用途、傳統測量工程領域、衛星大地測量之外，GPS對於導航的技術與應用，在近年來也發展十分的快速。GPS動態測量不論是以即時動態定位( Real Time Kinematic, RTK )的方式，或是以動態後處理的方式，在測量以及導航領域中，都有許多的應用，陸地方面常應用於車輛的導航，以及對定位精度需求較高的移動式車載製圖系統( Mobile Mapping System, MMS)、海上方面則有船隻的導航與定位、空中方面則有飛行載具定位的應用，各種領域皆有廣泛的應用(Lachapelle and Alves, 2002)。

隨著現今社會與科技的進步，空間資訊系統的發展與應用也越來越多元。空間資訊的收集，是空間資訊系統建置過程中不可缺少的作業，而 MMS，本身具有快速搜集空間資料的特性，是快速收集空間資訊的利器，相較於傳統人力現場調繪的方式，可以省下非常的多的人力以及時間(李育華，2010)，國內亦有發展相關 MMS 的計劃與研究(江凱偉等，2011)。

常見於 MMS 平台上的定位定向儀器，包含有 GPS、慣性導航系統(Inertial Navigation System,INS)、加速度計、陀螺、輪速計(El-Sheimy, 1996; Ellum and El-Sheimy, 2002)，而將各種定位定向儀器進行整合有助於克服單一系統之缺點，並有助於提升導航與定位之成果與精度，其中 GPS 是藉由接收衛星訊號計算出 MMS 的空間位置。

使用 GPS 在 MMS 上的實際狀況中，會有非常多的環境因素皆會造成衛星訊號斷訊，例如：大樓林立的都市間、窄小的巷弄、道路兩側之行道樹、隧道(胡智祐，2009)在無法接收到 GPS 的訊號之同時，也會影響著 GPS 的定位成果。GPS 的觀測量，可以分為電碼觀測量以及載波相位觀測量，載波相位觀測量的精度比電碼觀測量精度來的高(Leick, 1995)。美國俄亥俄州大學製圖中心所研發的第一台 MMS，稱為 GPSVan，搭載只能接收電碼的 GPS 接收儀，因此定位精度受限於 GPS 電碼的精度，最高只能達到 1 m (Ellum and El-Sheimy, 2002)。其後為提升 MMS 的定位精度，開始將 GPS 載波相位接收儀搭載於 MMS 上，以提高定位精度。使用載波相位觀測量時，必須要搜尋到整數週波值，才能達到公分級的高精度定位(Seeber, 1993; Leick, 1995)。

利用相對定位是快速消除誤差一種常見的做法，在相對定位中，因為參考站與移動站大多的誤差來源具有空間相關性，可以藉由差分的方式，將系統性誤差進行消除或是降低。RTK 即為利用此概念，消除移動站的系統性誤差，搭配整數週波未定值的搜尋法，進而達到高精度即時動態定位(Seeber, 1993)。傳統單一參考站 RTK 的有效作業距離只有數公里的範圍(Lachapelle and Alves, 2002)，因為在單一參考站的情況下，當距離增長時，參考站與移動站之間的空間相關性降低，導致系統性誤差(電離層、對流層以及軌道誤差)並沒有辦法以差分的方式直接有效的消除(Leick,

1995; Fotopoulos and Cannon, 2001)。

因此過去各國學者致力於研究各種方法，能夠改善單一參考站受範圍限制的缺點。其中，利用多參考站產生一個在移動站的附近的虛擬參考站(Virtual Reference Station, VRS)，並透過網際網路傳遞給使用者，進行超短基線差分，將系統性誤差消除，可以有效的增長移動站與參考站間的距離(Fotopoulos and Cannon, 2001)。

Applanix 公司於 2008 年推出 SmartBase 技術，其主要概念是透由後處理的方式，下載長時間觀測的衛星基準站之觀測資料，並使用該公司所發展的定位定向軟體 POSpac MMS，該軟體藉由所下載的實體參考站資料產生 VRS 來進行後處理。如此一來，移動站原本需與參考站保持 20 公里的距離，可拉長至 100 公里，可以大幅增加移動站與參考站的距離，而且仍能維持 15 公分的定位精度(Hutton et al., 2008)。但因為在台灣能夠支援自動下載資料的主站只有 2 個，因此該商用軟體目前在台灣地區是不足夠應用的。

國土測繪中心所建置的高精度之電子化全球衛星即時動態定位系統(e-GPS)即是一個網路RTK定位系統，並且以VRS的技術為核心，結合衛星定位、寬頻網路數據通訊、手機行動式數據傳輸、資料儲管及全球資訊網站這五大項的技術，以達到即時性與高精度的動態定位系統(內政部國土測繪中心，2011)。

因 e-GPS 可以達到即時量測，而 MMS 載具上的其他航位推算儀器、以及遙感探測儀器也可以達到即時性，整合系統達到即時性，在未來將會是一種趨勢。因此本研究之目的為評估 e-GPS 應用於移動式車載製圖系統上之可用性與精度分析。

## 二、研究方法

進行 GPS 動態定位，可以使用精度較低的電碼觀測量，也可以使用精度較高的載波相位觀測量進行定位。有許多的誤差影響著 GPS 的動態定位精度，這些誤差主要可以分為與衛星有關的誤差、衛星訊號傳遞時的誤差、與接收儀有關的誤差(Hoffmann-Wellenhof et al., 2001)，並且隨著移動站的移動導致環境改變，也影響著衛星訊號接收。

與衛星有關的誤差包含衛星軌道以及衛星時錶差，衛星軌道的位置與實際不符合時會存在系統性誤差，影響定位精度；衛星上面雖裝載高精度的原子鐘，但與理想的 GPS 時間仍有誤差存在。而衛星訊號在傳遞時，其傳遞路徑包含電離層、對流層、以及多路徑效應。電離層是大氣層中的游離電子，分佈區域約為距離地表 50-1000 公里左右的大氣層，GPS 訊號通過電離層時，訊號傳播的速度會發生變化，使得 GPS 測量成果產生誤差。對流層是指距離海平面大約 10 公里內的大氣層，當衛星訊號通過對流層時會發生折射而使訊號延遲，造成距離量測上的誤差，此影響量稱之為對流層誤差(Seeber, 1993)。GPS 接收儀在接收訊號時，有時候會接收到經由周圍物體反射的訊號，而此情況即為多路徑效應。尤其移動站在移動時，週遭環境條件不斷改變，衛星訊號可能經由其他物體反射，產生多路徑效應，或是因衛星訊號遮蔽，而產生週波脫落，需重新搜尋載波相位的整數解，上述狀況，會使動態定位比靜態定為更為複雜。而上述這些誤差沒有消除時，都會影響到定位成果的精

度。依照計算 GPS 定位的時間，可以分為即時處理以及後處理，而這兩種處理方式分別用不同的方式克服上述誤差(Leick, 1995)。

而使用載波相位觀測量定位時，若無消除觀測量誤差，則會導致整數週波未定值無法求解，只能求得精度較差的實數解。且若衛星訊號因遮蔽而中斷，則整數週波未定值需要重新求解，才能得到高精度的定位成果，因此求解整數週波未定值之效能表現也是影響高精度動態定位成果的因素之一。

### (一) GPS 相對定位

為了要求的高精度的 GPS 動態定位解算時，可以利用相對定位的方式進行，來消除或減低觀測量中前述之系統性誤差。最基本的相對定位中，會有兩具 GPS 接收儀同時接收 GPS 觀測資料，其中一站架設在已知點上，稱之為參考站，另一站則在未知點上，稱之為移動站，藉由移動站與參考站所接收到的觀測資料具有空間相關性，可以使用差分的方式進行解算，將衛星有關、衛星訊號傳遞時以及與接收儀相關的系統性誤差加以消除或是降低。而電碼與相位的二次差分方程式可以由下列數學式表示(Leick, 1995)：

$$P_{ij}^{kl} = (P_i^k - P_i^l) - (P_j^k - P_j^l) = \rho_{ij}^{kl} + I_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \varepsilon_{P_{ij}^{kl}} \quad (1)$$

$$\Phi_{ij}^{kl} = (\Phi_i^k - \Phi_i^l) - (\Phi_j^k - \Phi_j^l) = \rho_{ij}^{kl} - I_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \lambda \cdot N_{ij}^{kl} + \varepsilon_{\Phi_{ij}^{kl}} \quad (2)$$

其中  $P$  表示電碼觀測量， $\Phi$  表示相位觀測量， $\rho$  表示幾何距離， $T$  表示對流層效應， $\varepsilon$  表示觀測量的雜訊， $I$  代表二次差分後的電離層影響量， $T$  代表二次差分後的對流層影響量， $\lambda$  代表載波相位觀測量之波長， $N$  代表整數週波值， $k$ 、 $l$  分別代表不同衛星， $i$ 、 $j$  代表地面接收儀之參考站與移動站。

依照解算 GPS 定位成果的時間，可以分為即時處理以及後處理，但即時處理與後處理所需要處理的誤差皆相同。且無論是即時處理以及後處理，GPS 相對定位的參考站數量可以是一個或多個，如果使用多個參考站進行觀測，可以搭配最小二乘法解算，能增強幾何穩定性，提升定位成果的精度與可靠度，避免單一參考站的觀測量品質不佳，造成解算錯誤(Lachapelle and Alves, 2002)。

但是隨著移動站以及參考站之間距離逐漸拉長，其參考站與移動站之間的空間相關性漸漸降低，觀測量逐漸無法再透過差分的方式消除這些系統性誤差，因此當距離拉長時(大於 10 公里)(楊名與余致義，1997)，這些系統性誤差會無法有效的消除，因此導致定位成果不佳。尤其 MMS 的機動性非常高，很容易就超出了這樣的範圍(10 公里)，因此必須搭配其他的方式來進行解算。但後處理以及即時處理的處理方式又有所不同。

對於 MMS 而言，即時處理以及後處理，可以同時使用載波相位的觀測量以及電碼觀測量。在處理載波相位的觀測量時，無論是即時處理，或是後處理，都需要找尋出整數週波未定值，才能夠得到高精度的定位成果，而未找尋出整數週波未定值時，只能得到精度較低的實數解。部分 MMS 也會使用精度更低的電碼解。

## 1.後處理

後處理，是在接收所有的衛星觀測資料後(包含移動站與參考站)，再以後續處理的方式進行解算。為了得到高精度的動態定位成果，必須克服與衛星有關的誤差、衛星訊號傳遞時的誤差、與接收儀有關的誤差之影響量。但 MMS 機動性非常高，隨著移動站以及參考站距離拉長時，這些誤差量無法透過差分有效的消除，因此必須加以處理。

為了消除軌道誤差，在後處理計算中，因不需考慮即時性的問題，可以使用比廣播星曆精度更高，但產生時間較長的精密星曆進行解算。

電離層的誤差量，可利用雙頻載波相位觀測量，組成無電離層線性組合 (Ionosphere-Free Linear Combination) 消除觀測量中的電離層影響量，其組成是利用了電離層對衛星訊號頻率的影響與載波的頻率有關的特性。組成無電離層線性組合後，其週波未定值無法保持整數的特性，並可以由下列數學式(3)表示，以相位差為單位(Leick, 1995)。

$$\varphi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \varphi_{L1} - \frac{f_{L1} f_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \varphi_{L2} \quad (3)$$

其中  $\varphi_{IF}$  代表組成無電離層線性組合後的相位觀測量， $f_{L1}$  代表 L1 觀測量的頻率， $f_{L2}$  代表 L2 的觀測頻率。

對流層誤差中又分為乾延遲與濕延遲兩部分，其中乾延遲是由大氣層中的乾燥的大氣所引起的，主要受到溫度與氣壓所影響，依據不同衛星仰角所造成的誤差大約為 2-30 公尺(Seeber, 1993)。由於乾燥的大氣變化很穩定，因此可以精確的估計乾延遲量。一般經由對流層 Saastamoinen 模型(Saastamoinen, 1972)，修正計算後，可以將對流層的誤差修正至 3 公分以內(Treuhaf and Lanyi, 1987)。

系統性誤差消除後，利用整數週波未定值的搜尋方式，解算出載波相位的整數週波未定值，最後達到高精度的動態定位成果，若找尋不到整數週波未定值時，就只能得到精度較差的實數解，或是精度更差的電碼解。

後處理還可以對衛星訊號的觀測量進行平滑化，降低雜訊與多路徑等效應，可得到較為合理的定位成果(Fotopoulos and Cannon, 2001; Hwang et al., 2007)。

## 2.即時處理

使用單一參考站進行 RTK 定位時，是利用參考站與移動站之間的系統誤差(對流層誤差、電離層誤差、軌道誤差、衛星鐘差與接收儀鐘差)具有相關性的特性，透過差分的方式將系統性誤差消除，但當移動站以及參考站距離拉長時，則因兩測站的空間相關性下降，導致誤差無法有效的消除，為了克服此問題，因此使用 VRS 技術。

VRS 技術，是利用多個長時間連續觀測的參考站，將這些長時間觀測的資料，透過網際網路通訊技術，傳送至處理資料的控制中心，在多參考站所包圍的區域內，計算產生一個 VRS 觀測資料(Wanninger, 1995, 1998, 2002)，再利用無線網際網路之

通訊設備，即時的傳送 VRS 給移動站。此時，就會如同有一個與移動站非常接近的實體參考站在移動站附近，可以進行差分解算。因此當對流層誤差、電離層誤差、軌道誤差、衛星鐘差與接收儀鐘差，一併透由 VRS 與移動站差分消除後，再搜尋整數週波未定值，解算出載波相位的整數週波未定值，立即就能得到移動站高精度的定位成果。但當找尋不出載波相位的整數週波未定值時，就只能得到精度較差的實數解，或是精度更差的電碼解。而 VRS 技術也是國土測繪中心所建置的 e-GPS 之技術核心(內政部國土測繪中心，2011)。

而這樣方式必須要保持移動站與控制中心之間的聯繫，隨著不斷更新移動站的位置以及配合多參考站的觀測量，才能一直更新 VRS 的資料，並傳遞給移動站，進行定位(內政部國土測繪中心，2011)。

### 三、實驗資料

為了比較即時處理以及後處理的定位效能，本實驗將同樣的移動站資料，分別以即時處理以及後處理的方式進行定位，並比較定位成果，分析兩者的定位效能差異。

#### (一) 實驗資料

為比較 e-GPS 應用在 MMS 上的定位與後處理的表現之差異，因此需要有 MMS 移動站的資料，此外即時處理需使用 VRS 資料，而後處理則需要使用實體參考站的資料。

由於 MMS 在移動的過程中，會因為環境遮蔽的問題，而造成 GPS 訊號中斷，導致觀測量不連續，會發生週波脫落，整數週波未定值需要重新搜尋，或者會導致衛星觀測量不足，無法定位，造成定位成果不佳。為了評估各種真實狀況，因此本實驗設計都會區、郊區以及高速公路三種區域，分別以後處理，以及即時處理，兩種方式進行定位，然後再進行成果比較。後處理使用的參考站資料，則是向國土測繪中心申請衛星定位基準站的觀測資料。即時處理的 VRS 資料，則是向國土測繪中心申請，國土測繪中心使用 e-GPS 系統計算衛星定位基準站的觀測資料產生而得到的。並且這兩種方法的資料，皆是建立在同一個坐標系統框架下，因此可避免兩種坐標系統產生出來的系統性誤差。

#### (二) 移動站

由成功大學測量及空間資訊學系，整合式定位技術發展實驗室、數碼程式實驗室與航測及遙測實驗室所共同發展的 MMS，設有車頂架，能裝載各種儀器於車頂，並改裝電源供應的部分，能提供多組儀器穩定電能。本 MMS 的 GPS 接收天線為：大地級 NovAtel 之 GPS，另外配有戰術級 KVH 慣性量測儀以及同時擁有兩種工業級相機共 6 台，圖 1 所展示為本實驗所使用的 MMS。



圖 1 MMS

資料來源：成功大學測量及空間資訊學系整合式定位技術發展實驗室

### (三) 動態後處理之參考站資料

動態後處理所使用的參考站，即為國土測繪中心所建置的 e-GPS 系統的衛星定位基準站，其具有全天候 24 小時連續觀測且衛星透空度良好的特性，並隨時與國土測繪中心網路連線，可監測參考站是否正常運作，具有高度的穩定性，適合拿來做為參考站。

本實驗向國土測繪中心所申請一共五個衛星定位基準站，其站名分別為：CHYI(東石)、CISH(旗山)、KASH(高雄港)、CK01(台南)、CKSV(成大測量)。觀測時間為：2012/10/19 (24 小時)，其分佈區域如圖 2 所示。



圖 2 衛星定位基準站分布圖

#### (四) 即時處理之參考站資料

因本實驗中的 MMS，並未搭載可以支援無線網際網路系統的儀器，因此本實驗為評估 e-GPS 系統，採事後處理的方式，並模擬 e-GPS 系統即時運作的狀況。而即時處理需要使用到 VRS 的資料，因此本實驗規劃 MMS 的路線，並且依照 MMS 的行徑路線，向國土測繪中心申請多個 VRS 的資料，藉此模擬移動站在移動時，會不斷的更新 VRS 的位置以及參數，且每個 VRS，距離移動站的距離都限制在 5 公里內，以達到有效的消除觀測量之系統誤差，並且採用模擬即時處理的方式進行處理，以符合真實狀況。

本實驗自國土測繪中心取得 VRS 資料，分別為 VRS01、VRS02、VRS03、VRS04 資料；其分布區域坐落於 MMS 行徑路線上，如圖 3 所示，觀測時間為：2012/10/19 (24 小時)。

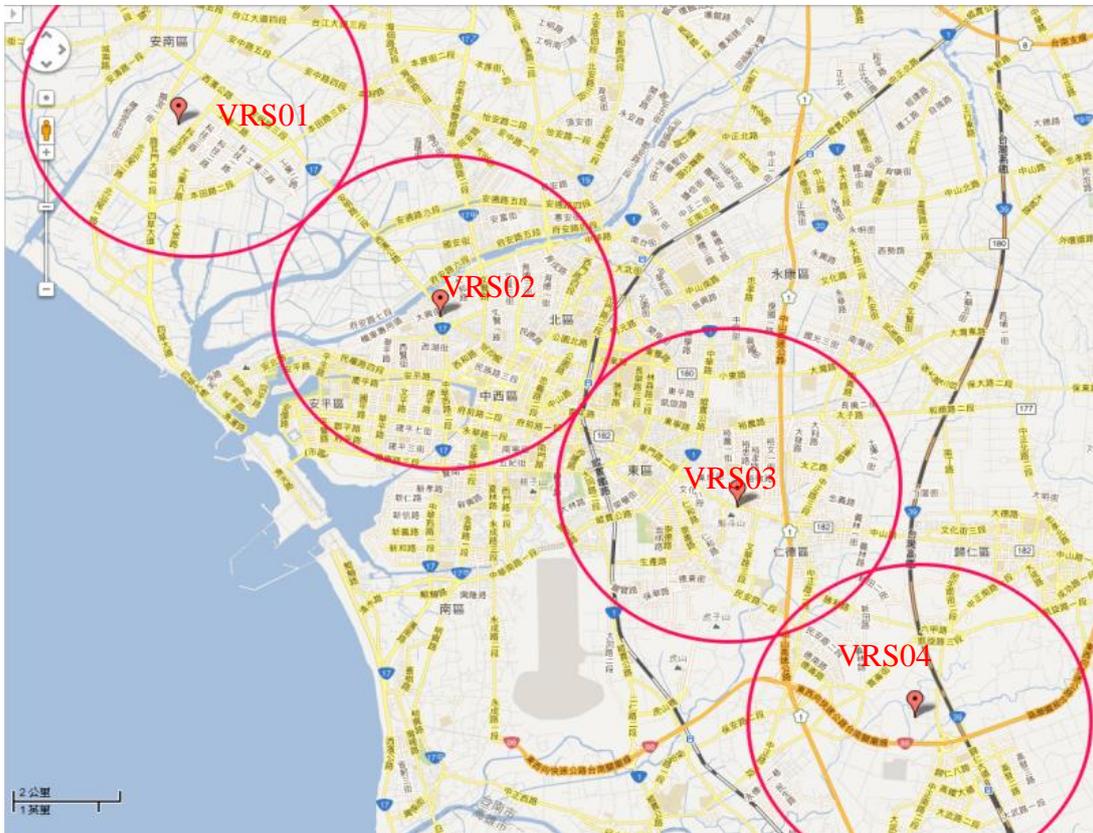


圖 3 VRS 位置與涵蓋範圍示意

#### (五) 實驗設計與資料處理

本實驗所使用的軟體為加拿大 Waypoint 所開發的 GrafNav，其為一套商用 GPS 後處理的軟體，可以處理 GPS 電碼以及雙頻觀測資料，並且可以利用雙頻觀測資料組無電離層線性組合、使用 Saastamoinen 對流層模型、使用卡爾曼濾波進行協助資料解算、批次處理多條基線、可將多條基線成果進行最小二乘平差解算。

處理方式分為即時處理以及後處理解算，以兩種定位方式，解算搭載於 MMS

的 GPS 移動站軌跡。因為移動站會因為環境受到相當大的影響，因此實驗分析將會分為郊區、都會區、高速公路區三種區域分別做比較，並且因兩者定位方式所得到的解算成果會有成果最好的整數解、成果次之的實數解、成果最差的電碼解，將分析兩種定位方式產生不同的解算比例成果之差異以及成因，詳細實驗流程如圖 4 所示。

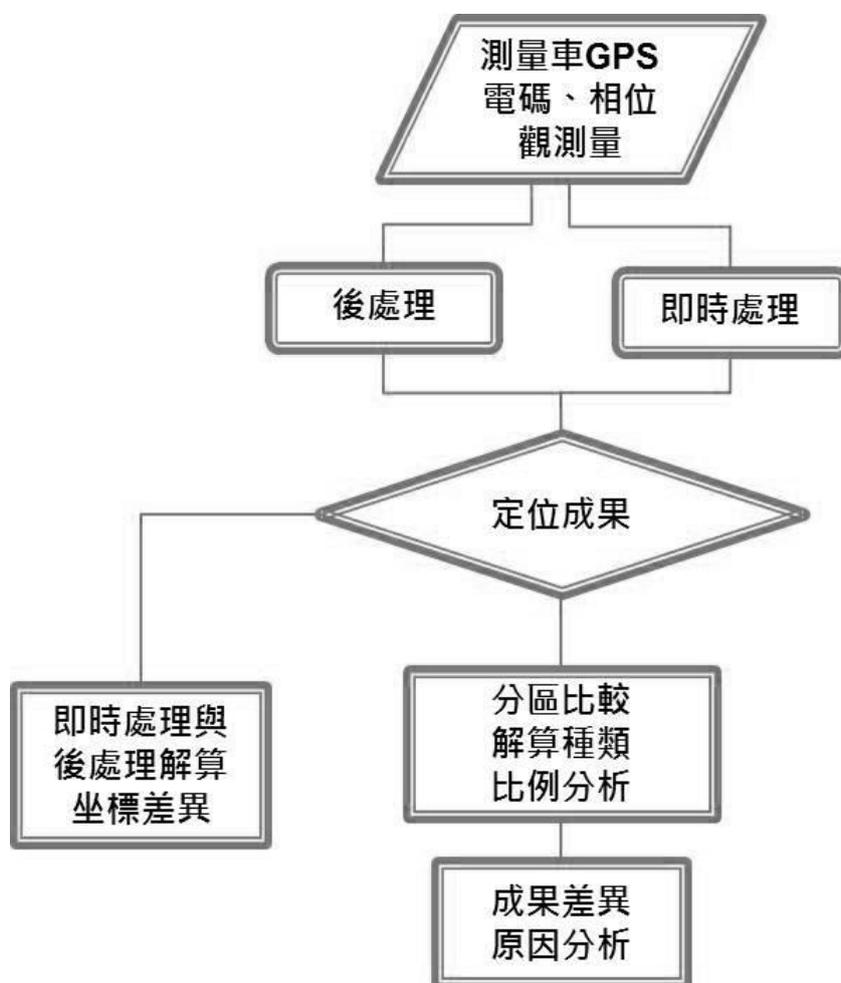


圖 4 實驗流程圖

本實驗以後處理當參考解，比較即時處理與後處理定位成果之差異性。其評估指標，則以兩種解算方式解算同一時刻、同一點位，並計算兩者之差值，統計全時刻成果，區分 e、n、u 方向，並以平均值(mean)以及均方根誤差值(Root Mean Square, RMS)量化其兩者的差異性。

#### 四、成果分析

由於 GPS 動態定位非常容易受到環境的影響(如訊號遮蔽等)，移動站在移動的過程中，由透空度良好進入透空度不好的區域，定位精度與成果立即就有可能受到影響，因此將實驗區域分為郊區、都會區、高速公路區三種區域來進行分析以及比較，並探討即時處理以及後處理兩種定位方式的定位成果，並分析成果差異以及成因。

本實驗約略的將台南市安南區劃分為透空度較好的郊區，而台南市中西區以及東區因樓房較高，將此兩區域劃分為都會區，而 MMS 最後進入了中山高速公路時，劃分為高速公路區，其時間與 GPS 時段對照如表 1 所示。

表 1 MMS 實驗區域與 GPS 時段對照表

| MMS 進入的區域 | GPS 時段(秒)     |
|-----------|---------------|
| 郊區        | 443664-447359 |
| 都會區       | 447360-450034 |
| 高速公路區     | 450034-451525 |

圖 5 以及圖 6 分別顯示出後處理以及即時處理之成果，可以看出 MMS 行徑之軌跡；其中藍色軌跡為成功求解出精度較高的整數解，綠色軌跡代為精度中等的實數解，紅色軌跡代表求解出精度較低的電碼解。



圖 5 MMS 行徑路線之軌跡  
(後處理)

圖 6 MMS 行徑路線之軌跡  
(即時處理)

圖至圖 12，則分別代表郊區、都會區、高速公路區，分別以即時處理與後處理兩種方式進行解算的時候，所會得到的整數解、實數解、電碼解、以及未解算成功的四種情況，於各區域的解算比例分佈情形。

圖 13 與圖 14 分別代表後處理與即時處理中，參與解算的衛星數量。圖 15 代表後處理參考站各個衛星仰角以及訊號接收之連續性。圖 16 代表即時處理中 VRS 各個衛星仰角以及訊號接收之連續性。圖 17 代表移動站各個衛星仰角以及訊號接收之連續性。

圖 15 至圖 17 中，橫軸代表時間(GPS time)，縱軸代表衛星編號。綠色線條代表該時刻衛星仰角在 30 度以上，青藍色線條分代表該時刻衛星仰角在 20-30 度，深藍色線條代表衛星仰角在 15-20 度，紫色線條代表該時刻衛星仰角在 10-15 度，黃色線條代表該時刻衛星仰角在 0-10 度。訊號中有紅色垂直線的部份代表該時刻訊號發生中斷。

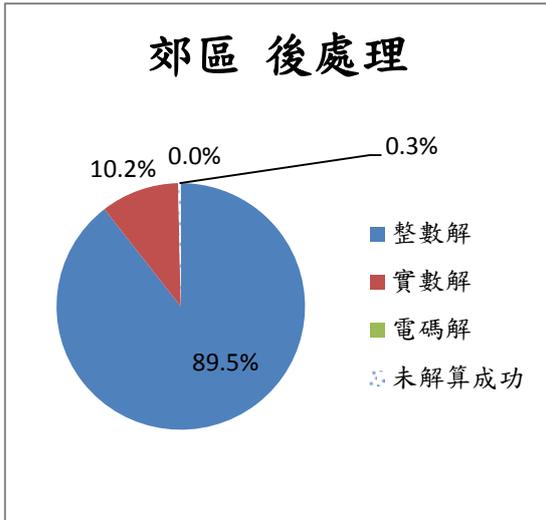


圖 7 郊區解算種類比例圖(後處理)

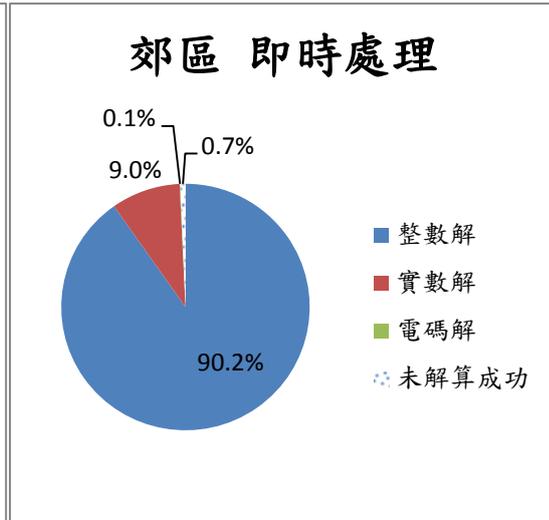


圖 8 郊區解算種類比例圖(即時處理)

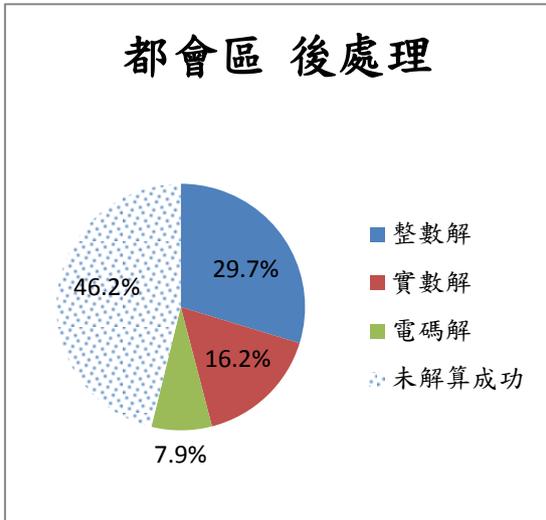


圖 9 都會區解算種類比例圖(後處理)

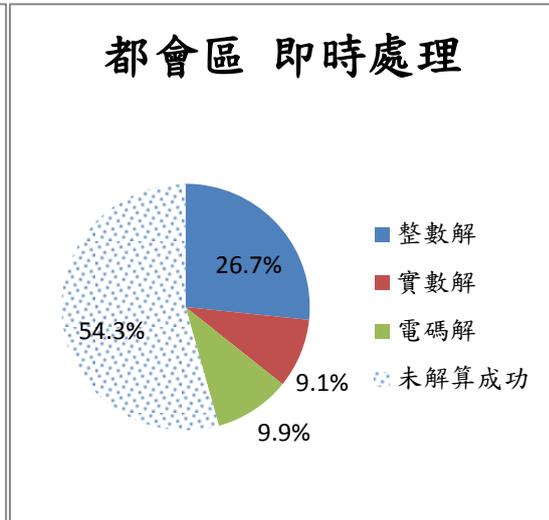


圖 10 都會區解算種類比例圖(即時處理)

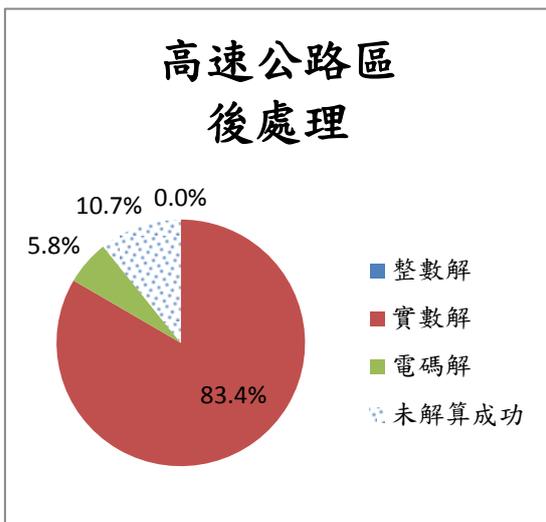


圖 11 高速公路區解算種類比例圖(後處理)

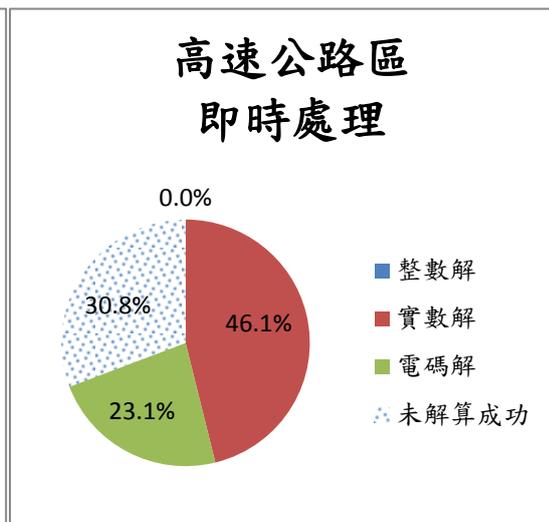


圖 12 高速公路區解算種類比例圖(即時處理)

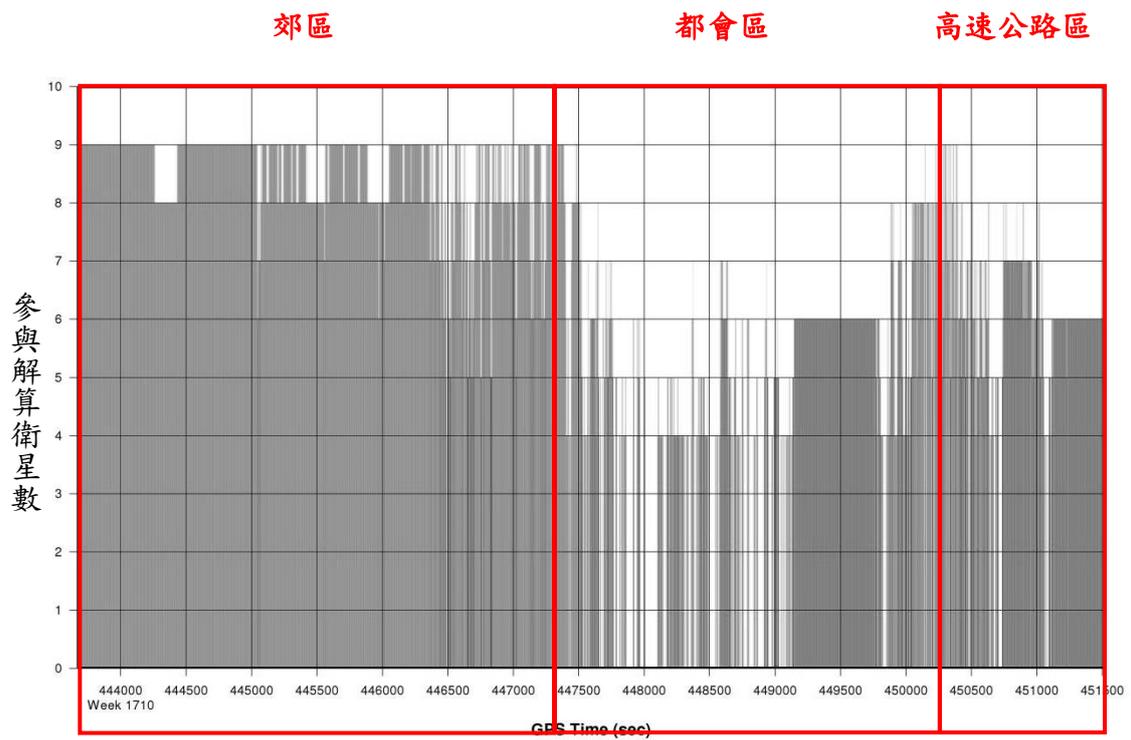


圖 13 後處理各時段參與解算的衛星數量

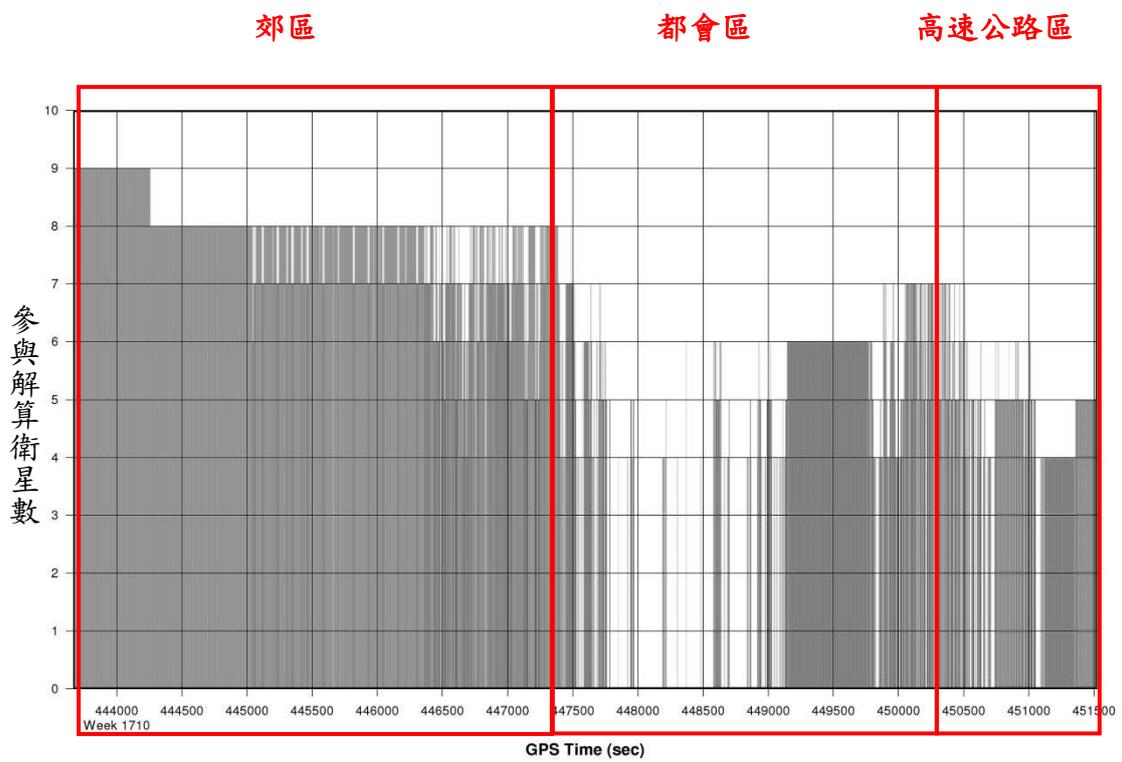


圖 14 即時處理各時段參與解算的衛星數量

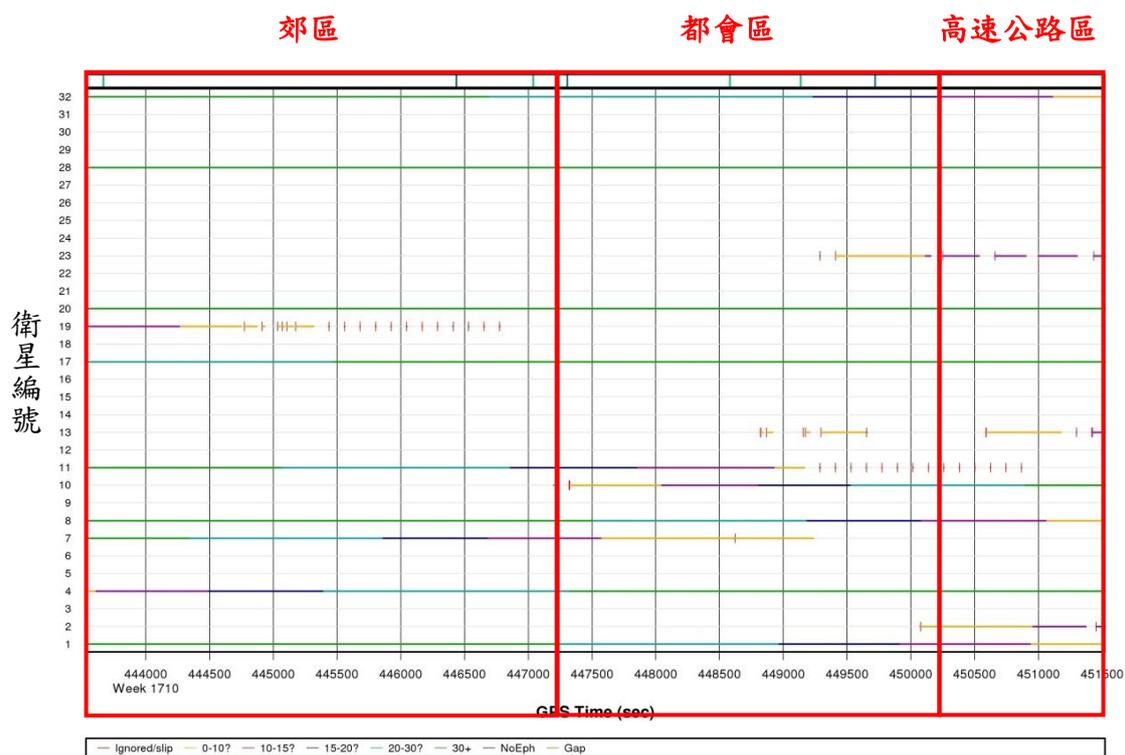


圖 15 後處理參考站衛星訊號圖

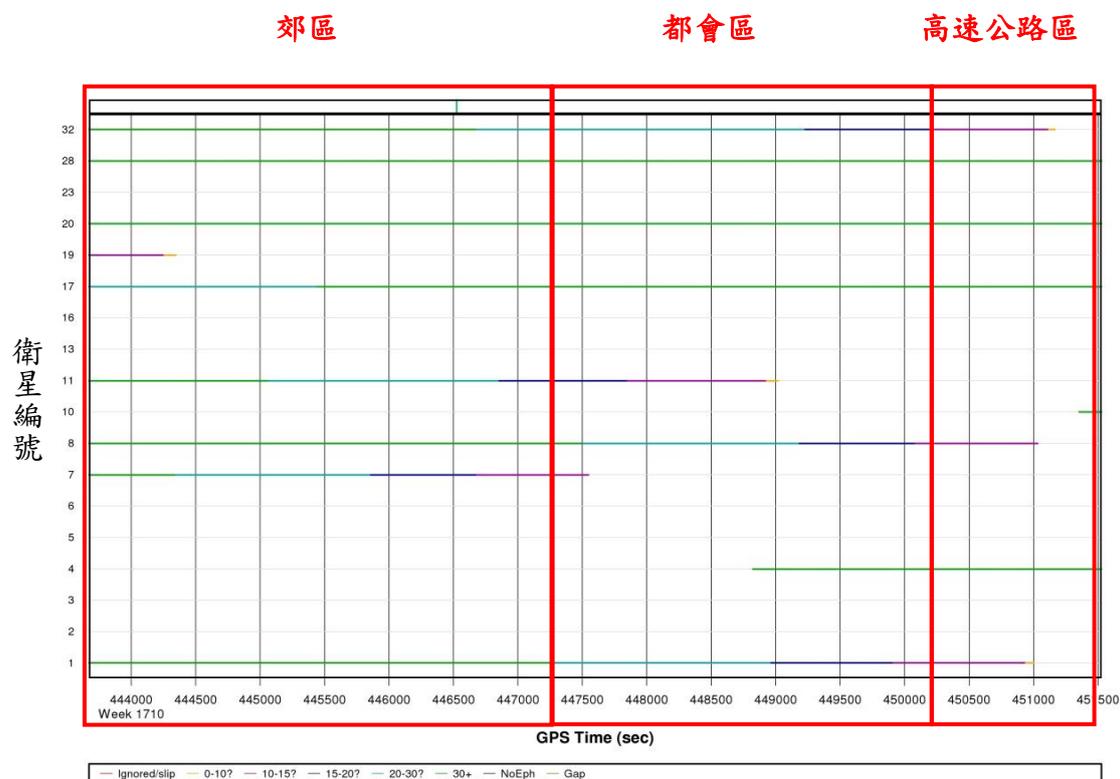


圖 16 即時處理 VRS 衛星訊號圖

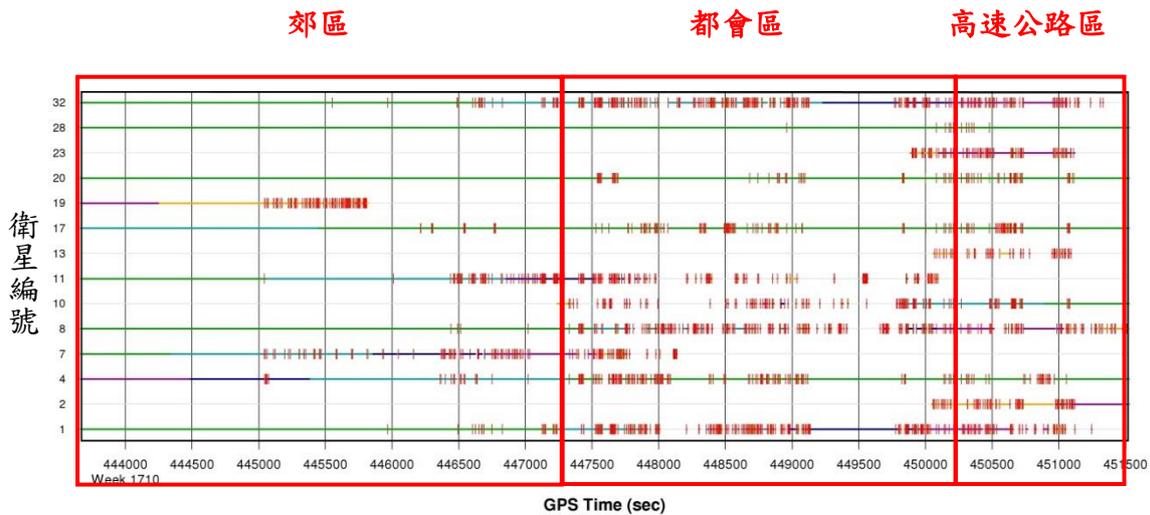


圖 17 移動站衛星訊號圖

### (一) 郊區分析

郊區的解算種類比例圖(圖 7 與圖 8)顯示，在透空度良好的郊區，兩種方法的整數解之解算比例，皆約為 90%，實數解的比例也近似，皆約為 10%，而因為此區域都是整數解以及實數解，因此解算成果就不會包含電碼解，自然電碼解的比例趨近於 0%。由此顯示，即時處理可以達到與後處理近似的成果。

進一步分析探討參與解算的衛星數量圖(圖 13 與圖 14)，得知該時段無論是即時處理，或是後處理，參與計算的衛星數，平均觀測量可達 6 到 9 顆，少部分為 5 顆衛星數，因此大多的時刻兩種方法都能解算出精度較高的整數解，少部份的時刻，則為精度中等的實數解，鮮少有精度較差的電碼解，或解算不出來的情况發生。

### (二) 都會區分析

都會區的解算種類比例圖(圖 9 跟圖 10)顯示，在透空度較差的都會區，即時處理與後處理兩者的解算能力都明顯比郊區差，未解算成功比例都比在郊區時高了不少，於本次實驗中，後處理約有 46.2%的點位是沒有解算成功的，即時處理約有 54.3%是沒有解算成功的，後處理所解算出來的點位數量明顯的較即時處理多(多了 8.1%)，代表後處理的可用性較高。

進一步分析參與解算的衛星數量圖(圖 13 與圖 14)，在都會區前段有許多時刻都是在 4 顆衛星以下，也就是沒有足夠的衛星參與解算，因此造成很多時刻兩種方法都無法定位出任何成果。同時可以發現，在後處理有很多時刻是只有 4 顆衛星進行定位時，而在同一時刻，即時處理則常發生因衛星數量不足，而無法解算的情况。

再進一步比較圖 15 與圖 16，後處理的參考站觀測量比即時處理的 VRS 觀測量多了 10 號、7 號、4 號衛星。因為後處理則保留了這些衛星觀測量，造成後處理參與解算的衛星數量比即時處理參與解算的衛星數量還要多(圖 13、圖 14)，因此推論是此原因，導致後處理解算有時候可以解算出來，但同一時刻即時處理卻無法解算；

但由移動站之衛星訊號圖(圖 17)可得知,在此區域,移動站的斷訊情況非常的嚴重,因此即便是後處理,定位成果仍然不佳。

在都會區的時候,移動站在有些區域衛星數目充足,有些區域衛星數目不足 4 顆衛星,這將直接影響後處理以及即時處理的定位表現成果。在都會區中,即時處理以及後處理所解算得到的整數解分別為 26.7%與 29.7%,兩者差了 3%。進一步比較圖 15 與圖 16 的都會區時段,部分時刻後處理的參考站觀測量比即時處理的 VRS 觀測量還要多,因此推測是後處理參考站的觀測量較充足,而同一時刻 VRS 觀測量較不足夠,導致後處理得到的整數解數量較即時處理多。

### (三) 高速公路區成果分析

解算種類比例圖(圖 11 跟圖 12)顯示,雖然移動站在透空良好的高速公路區,但即時處理與後處理都完全沒有解算出整數解,且可以發現後處理解算成功的比例比即時處理來的高。進一步分析參與解算的衛星數量圖(圖 13 與圖 14),可以發現在高速公路區域,即時處理大多約為 4 到 5 顆,後處理大多約為 5 到 7 顆,且都常有斷訊的情形發生。再進一步比較參考站之衛星訊號圖(圖 15 與圖 16),即時處理比後處理少了約 3 到 4 顆衛星。

從圖 17 移動站衛星訊號圖來看,高速公路區的移動站也常發生衛星訊號被遮蔽的情形,代表此區域的移動站觀測量也是不太穩定。進一步比較參與解算的衛星數量圖(圖 13 與圖 14),即時處理參與計算的衛星數目平均約有 4-5 顆,後處理中參與計算的衛星數目雖有 5 到 7 顆,觀測量後處理雖較即時處理多,但多出來的觀測量都是無法通過即時處理篩選門檻標準的觀測量,因此推測是多出來的觀測量品質仍然不夠好,即便參與解算的衛星顆數較多,但因為多出來的衛星觀測量品質不佳,導致定位成果的品質還是不好。

但由高速公路區域可以發現,因為後處理使用的觀測量比即時處理多,所以解算成功的百分比也比即時處理高,後處理的表現還是比即時處理好。

### (四) 後處理與即時處理坐標成果差異分析

表 2 為即時處理與後處理兩種方式的定位成果之離散差異,於各方向平均值以及 RMS 值。由表 2 我們可以得知,兩種方式的定位成果,整數解的離散程度最小,實數解的離散程度次之,電碼解的離散程度最大。

兩種方式整數解之成果,其平面 RMS 小於 5 公分,高程方向 RMS 值小於 15 公分,實數解的平面與高程方向 RMS 值皆小於 100 公分,電碼解的平面與高程方向 RMS 值皆小於 150 公分。由以上結果可以得知,當該點位解算的成果為整數解的時候,其無論是即時處理,或是後處理,兩種方式定位成果會相當接近。

實數解的離散程度以及電碼解的離散程度皆大於整數解,而電碼解的 RMS 值又比實數解來的大。所以可以得知兩種方式的定位成果,與解算的成果種類有關,整數解的差異性最小、實數解的差異性次之、電碼解的差異性最大。

表 2 即時處理與後處理成果各方向之離散程度

|               | 整數解      | 實數解      | 電碼解       |
|---------------|----------|----------|-----------|
| <b>Mean e</b> | 0.1 cm   | -6.3 cm  | -20.9 cm  |
| <b>Mean n</b> | -1.8 cm  | 5.7 cm   | 16.2 cm   |
| <b>Mean u</b> | 2.0 cm   | 38.0 cm  | 70.4 cm   |
| <b>RMS e</b>  | 3.86 cm  | 51.63 cm | 74.49 cm  |
| <b>RMS n</b>  | 4.69 cm  | 55.49 cm | 77.92 cm  |
| <b>RMS u</b>  | 10.14 cm | 92.87 cm | 143.46 cm |

## 五、結論與建議

根據本研究之成果，發現即時處理在觀測條件良好的狀況下(移動站與參考站透空度高，衛星訊號穩定、不間斷、參與相對定位解算的衛星數目達到 6 顆以上時)，與後處理的定位成果會非常接近。

在遮蔽影響嚴重的狀況下，因即時處理產生 VRS 的過程中，對於觀測量品質的條件篩選較為嚴謹，會導致不可靠的觀測量被剔除，此時若被刪除的觀測量較多時，可能會導致有許多的點位因觀測量不足，而無法解算出點位，使得 MMS 行徑路線上，定位成功的點位數量下降。而後處理則是保留了全部的資料，因為品質較差的觀測量也參與了解算，解算出來的點位數會比較多，使得 MMS 行徑路線定位成功的點位數量較高，但這些多出來的點位，也因為使用了較差的觀測量，通常定位出來的成果大多是精度較差的實數解或是電碼解。

由於 e-GPS 即時動態定位都需完成初始化，待求解出整數週波未定值之後，才可達到公分級的定位精度；但在隨時移動的載具上，可能會有精度不穩定的狀況發生。故在現今的條件下，後處理仍有其較高穩定度的優點。

因此本研究建議，若 MMS 定位目標，要可靠、高精度、且有即時性定位時，可以選擇以即時處理的方式來進行定位，如此一來可以避免後處理無法即時得到坐標位置的缺點，並且更快速、節省更多的人力的完成 MMS 定位的任務。

雖然目前國土測繪中心的 e-GPS 系統目前只支援 GPS。若未來在即時處理的處理中，能夠加入其他衛星系統，增加衛星數量時，相信能夠減少環境遮蔽而導致衛星觀測量不足的形發生，使得即時定位成果能有更好的結果。

## 參考文獻

- 內政部國土測繪中心，2011，《99 年度三等精度控制點速度場測量及管理維護作業工作總報告》，內政部。
- 江凱偉、曾義星、楊名、詹紹勳、饒見有，2011，《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》，內政部。
- 李育華，2010，《車載移動式製圖系統之系統率定及其直接地理定位之效能分析》，

- 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。
- 楊名、余致義，1997，即時動態 GPS 應用於控制測量與戶地測量之設計與實驗，《地籍測量》，第 16 卷，第 4 期，頁 1-32。
- El-Sheimy, N., 1996, *The development of VISAT-A mobile survey system for GIS applications*, Thesis (Ph.D.), Department of Geomatics Engineering, University of Calgary:Canada.
- Ellum, C. and N. El-Sheimy, 2002, Land-based mobile mapping systems, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (1), pp.13-28.
- Fotopoulos, G. and M. E. Cannon, 2001, An overview of multi-reference station methods for cm-level positioning, *GPS Solutions*, 4 (3), pp.1-10.
- Hoffmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins, 2001, *Global positioning system: theory and practice*, 6th edition, New York :Springer.
- Huttona, J., A. Ipa, T. Bourkea, B. Scherzingera, N. Gopaula, P. Cantera, I. Ovelandb and L. Blankenbergb, 2008, Tight integration of GNSS post-processed virtual reference station with inertial data for increased accuracy and productivity of airborne mapping, *Proceedings of the XXIst ISPRS Congress Technical Commission V: Beijing*.
- Hwang, C. W., Y. S. Hsiao, H. C. Shih, M. Yang, K. H. Chen, R. Forsberg and A. V. Olesen, 2007, Geodetic and geophysical results from a Taiwan airborne gravity survey: data reduction and accuracy assessment, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 112 (B4), pp.1978-2012.
- Lachapelle, G. and P. Alves, 2002, Multiple reference station approach: overview and current research, *Journal of Global Positioning Systems*, 1 (2), pp.133-136.
- Leick, A., 1995, *GPS satellite surveying*, 3rd edition, New York: John Wiley & Sons.
- Saastamoinen, J., 1972, Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, *Geophysical Monograph Series*, 15, pp.247-251.
- Seeber, G., 1993, *Satellite geodesy*, 2nd edition, New York: Walter de Gruyter.
- Treuhaft, R. and G. Lanyi, 1987, The effect of the dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements, *Radio Science*, 22 (2), pp.251-265.
- Wanninger, L., 1995, Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the ionosphere, *Proceedings of the 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1995): Palm Springs*.
- Wanninger, L., 1998, Real-time differential GPS error modelling in regional reference station networks, *Proceedings of the International Association of Geodesy Symposia: Rio de Janeiro*.
- Wanninger, L., 2002, Virtual reference stations for centimeter-level kinematic positioning,

張詒翔、楊名：電子化全球衛星即時動態定位系統應用於車載移動製圖平台定位表現之研究

*Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of  
The Institute of Navigation (ION GPS 2002): Portland.*

# 投稿須知

所有稿件以未曾在國內、外以任何形式刊載為限，且稿件內容不得有侵犯他人著作權或商業宣傳行為，否則由作者自行負法律之責任。文體以中文或英文撰寫為原則，並附中文及英文摘要。稿件須加註標點、分段及編列頁碼。內容編排以下列順序為原則：（一）封面：包括中文及英文之論文名稱、作者姓名、作者所屬單位、聯絡地址、電話、傳真、電子郵件住址；（二）中、英文摘要及關鍵詞等；（三）內文；（四）註釋；（五）謝誌；（六）參考文獻；及（七）附錄與圖表。審查通過後，無法直接由電腦列印之圖、表，應另附完稿之圖、表（不超過A4紙張），以利編排。圖或照片應以黑白為原則，如需彩色印刷請作者自行負擔費用。內文所引用之文獻須列於參考文獻，參考文獻請以姓氏筆劃多寡，依序以中文列出，之後再依英文姓氏之英文字母，依序以英文列出。各項格式書寫方式，請參考下列說明：

## 各項格式說明如下：

壹、文書檔案採 A4 直式橫寫書格式，版面邊界分別為上（2.54cm）、下（2.54cm）、左（3cm）、右（2.8cm），字體以標楷體及英文 Times New Roman 等兩種字體排版。

貳、首頁（Title page），應包含下列內容：

一、標題（Article Title）：包括中、英文章篇名。

二、作者（Author's Name）：

1. 包括中、英文作者姓名。
2. 分別以中、英文註腳載明作者的職稱、單位。若作者有數人，則以阿拉伯數字 1, 2, 3... 個別標示。
3. 須標示通訊作者(加註\*)，註明連繫電話、E-mail，英文電話請以國際電話方式書寫。

三、摘要（Abstract）：包括中、英文摘要。

四、關鍵字（Keywords）：包括中文、英文關鍵字，分別列於中、英文摘要之下。

參、正文（Manuscript）

一、稿件標題章節編號層次及順序

中文請按「一，（一），1.，（1），a」順序排列；英文則按「1，1.1，1.1.1...」順序排列。

二、引述用例

（一）直接引述：

中文請用單引號「 》」；英文請用雙引號“ ”，並以括弧標示引述文獻頁次。

（二）引述中復有引述，或特殊引用時：

中文單引號「 》」在外，雙引號『 』在內。英文雙引號“ ”在外，單引號‘ ’在內。

### 三、文獻引述用例

#### (一) 文中註明引述文獻

1. 請以 (作者, 年份) 方式表示。
2. 若有數篇文章以分號 ( ; ) 區隔; 中英文文獻分開, 並各自以引述文獻之出版年份先後依序排列。
3. 若同一作者, 有數篇文章同時引述, 則以 (作者, 年份 1、年份 2); 若同一作者有同一年發表文章同時引述, 則以 (年份 a, b) 表示。
4. 若一篇文章有 2 位作者, 請全部列出。中文為 (作者 A 與作者 B, 年份); 英文為 (作者 A and 作者 B, 年份)
5. 若一篇文章有 3 位以上作者 (含 3 位), 中文請用 (第一位作者等, 年份); 英文請 (第一位作者 *et al.*, 年份) 用。
6. 英文期刊第一作者姓在前, 名在後, 第二作者之後, 名在前, 姓在後。

#### (二) 文中已有作者姓名時

1. 請以作者 (年份) 方式表示
2. 若有數篇文章同時引述, 則以作者 A (年份)、作者 B (年份) ... 表示
3. 若有必要加註說明時, 請用註腳, 內文註腳號碼使用上標

### 四、圖版、插圖及表用例

1. 圖名請置於圖之正下方, 並以圖 1、圖 2..... 方式表示。
2. 表名請置於表格之正上方, 並以表 1、表 2..... 方式表示。
3. 若引用他人圖表需註明資料來源。

### 五、公式寫法用例

以(1)、(2)、(3)……依序編號。例： $\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L$  (1)

### 肆、參考文獻(References)

- 一、專書：作者, 年份, 《書名》, 版次, 出版地：出版者。
- 二、期刊論文：作者, 年份, 篇名, 《期刊名》, 卷期數, 頁碼。
- 三、研討會論文：作者, 出版年, 論文名稱, 《研討會名稱》。
- 四、博碩士論文：作者, 年份, 《論文名稱》, 學校科系名稱(碩/博士論文)。
- 五、網路等電子化資料：作者 (單位), 年份, 篇名, 網站名稱, 網址。
- 六、技術報告或研究報告：作者, 年份, 《報告名稱》, 研究單位。

# 中華民國地籍測量學會「國土測繪與空間資訊」 期刊論文審查辦法

中華民國 101 年 09 月 25 日第 16 屆第 6 次理監事聯席會議通過

第一條 為規範「國土測繪與空間資訊」期刊論文審查辦法(以下簡稱本辦法)，得依本會編輯委員會組織簡則第二條規定訂定之。

第二條 來稿經登記後由總編輯就來稿性質，邀請相關專長之編輯委員推薦審查委員。編輯委員會負責對審查委員及投稿作者保持雙向匿名方式審查，審查作業程序如附圖。

第三條 審查委員應於接到論文後三週內審查完畢，並將論文審查表(如附表)，連同論文寄回編輯委員會，審查意見表中須明確勾選其中一項：

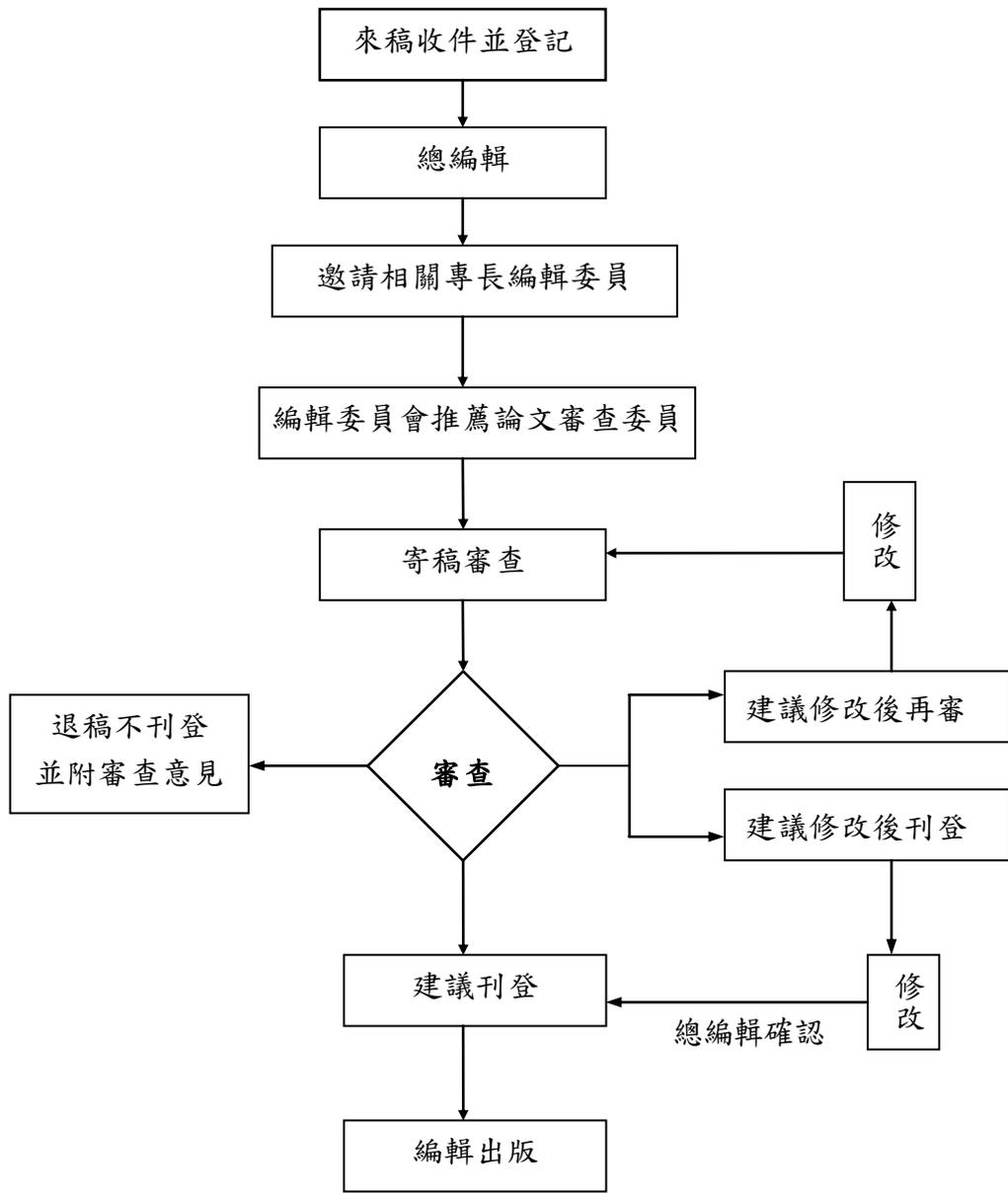
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

第四條 審查結果處理方式：

| 處理<br>方式<br>第一位<br>審查委員意見<br>第二位<br>審查委員意見 | 刊登      | 修改後刊登   | 修改後再審   | 不適刊登  |
|--|---------|---------|---------|-------|
| 刊登   | 刊登      | 寄回修改    | 寄回修改後再審 | 第三位審查 |
| 修改後刊登                                      | 寄回修改    | 寄回修改    | 寄回修改後再審 | 第三位審查 |
| 修改後再審                                      | 寄回修改後再審 | 寄回修改後再審 | 寄回修改後再審 | 不適刊登  |
| 不適刊登                                       | 第三位審查   | 第三位審查   | 不適刊登    | 不適刊登  |

附註：再審以一次為限。

第五條 本辦法經理監事會通過後實施，修改時亦同。



論文審查流程圖



# 國土測繪與空間資訊期刊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

---

## 編輯委員會

主任委員 楊 名 國立成功大學測量及空間資訊學系

## 編輯委員 (依姓氏筆劃順序排列)

史天元 國立交通大學土木工程學系

吳 究 國立中央大學太空及遙測研究中心

洪本善 逢甲大學土地管理學系

洪榮宏 國立成功大學測量及空間資訊學系

陳春盛 健行科技大學應用空間資訊系

黃灝雄 國立政治大學地政學系

楊明德 國立中興大學土木工程學系

趙鍵哲 國立台灣大學土木工程學系

總編輯 陳國華 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

## 執行編輯

何美娟 內政部國土測繪中心

陳鶴欽 內政部國土測繪中心

游豐銘 內政部國土測繪中心

伍瑋雯 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

林宜璇 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

發行人 盧鄂生

劉正倫

出版所 中華民國地籍測量學會

內政部國土測繪中心

---

國土測繪與空間資訊  
TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

第二卷第一期

民國一〇三年一月

Vol. 2, No. 1

January 2014

目 錄

CONTENTS

無人機攝影測量與直接地理定位之精度分析

饒見有、陳智揚、詹鈞評、劉暹、李文慶.....1

**Accuracy Analyses of UAV Photogrammetry and Direct Georeferencing**

Jiann-Yeou Rau, Chih-Yang Chen, Jyun-Ping, Jhan, Kircheis Liu, William Lee

車載光達點雲中直立圓桿之模塑

邱式鴻、吳志文.....23

**Modeling of Vertical Pole-Like Objects from Vehicle-Borne LiDAR Point Cloud**

Shih-Hong Chio, Chih-Wen Wu

可攜式全景影像測繪系統之設計及光束法平差

陳永泉、蔡博慶、王彬權、曾義星.....43

**The Design and Bundle Adjustment of a Portable Panoramic Image Mapping System**

Yung-Chuan Chen, Po-Chin Tsai, Ping-Chuan Wang, Yi-Hsing Tseng

電子化全球衛星即時動態定位系統應用於車載移動製圖平台定位表現之研究

張詒翔、楊名.....65

**A Feasibility Study of Using e-GPS for Mobile Mapping System**

Yi-Hsiang Chang, Ming Yang