

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized representation of a building with the letters 'NCTU' on it, a book, and a graduation cap. At the bottom of the emblem, the year '1896' is displayed. The text '東沙衛星追蹤站穩定度分析' is overlaid on the central part of the logo.

東沙衛星追蹤站穩定度分析

研究生：陳薇帆

指導教授：史天元

中華民國一百零一年七月

# 東沙衛星追蹤站穩定度分析

The Stability of Dongsha Continuously Operating Reference Station

研究生：陳薇帆      Student：Wei-Fan Chen

指導教授：史天元    Advisor：Dr. Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

# 東沙衛星追蹤站穩定度分析

學生：陳薇帆

指導教授：史天元

國立交通大學土木工程學系

## 中文摘要

東沙島位於東沙環礁，由珊瑚沙堆疊而成。由於珊瑚沙膠著程度低，故其上建築物有沉陷傾斜之可能。東沙衛星追蹤站為 TWD97 基準之框架點位之一，故該點位之穩定性具有深入探討確認之重要性。

本研究使用 1995 至 2012 年十八年接收頻率 30 秒之 GPS 觀測數據，於每年選定一天進行精密單點定位計算後，組成座標時間序列，分析該點之變化特質。而東沙地區氣候可分為西南季風與東北季風兩個季節，前者由五月至十月，後者由十一月至四月，為了解不同季節之差異，選取近三年二月及八月之第一個星期，進行逐筆精密單點定位計算衛星追蹤站之座標並分析其點位變化，此觀測數據亦為 30 秒觀測數據。本研究使用 GPS 網路自動化算系統 CSRS-PPP 和 APPS 以及 GPS 數據後處理軟體 GrafNav 進行精密單點定位解算，並對於各測站座標變化進行分析。

由逐年選定一天計算之分析成果中顯示，墾丁衛星追蹤站座標點位變化趨勢呈現往西移動，移動量約為 30 公分，陽明山、北港及東沙衛星追蹤站平面座標呈現朝東南方移動之變化趨勢，陽明山衛星追蹤站移動量往東約為 60 公分，往南約為 24 公分，北港衛星追蹤站移動量為往東約 60 公分，往南約 15 公分，東沙衛星追蹤站移動量往東約為 55 公分，往南約為 20 公分。陽明山、墾丁及東沙追蹤站在垂直方向無明顯趨勢變化，北港衛星追蹤站高程下降約為 42 公分。由近三年 2 月及 8 月第一個星期之成果分析中顯示，衛星追蹤站之點位變化趨勢與季節氣流較無相關。

關鍵字：精密單點定位、時間序列

# **The Stability of Dongsha Satellite Tracking Station**

**Student : Wei-Fan Chen**

**Advisor : Dr. Tian-Yuan Shih**

**Department of Civil Engineering**

**National Chiao Tung University**

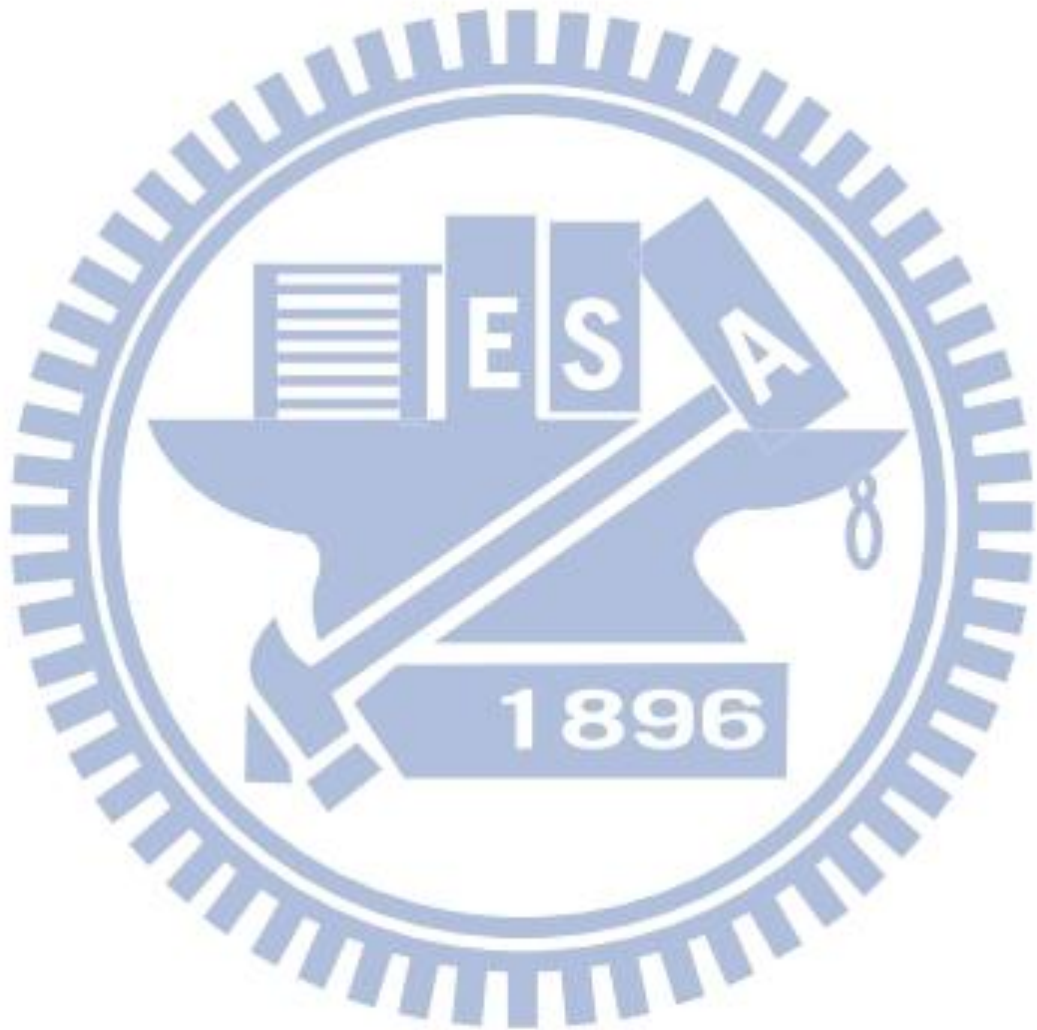
## **Abstract**

Dongsha Island is a part of Dongsha Atoll. The top soil is mainly decomposed coral reef. Because the cementation level of this type soil is low, the construction on top may suffer subsidence problem. Dongsha satellite tracking station established by MOI is one of the eight framework stations for TWD97. The importance is high. This study investigates the stability of Dongsha satellite tracking station.

GPS data collected during 1995 to 2012 at 30 second interval is used for analysis. Precise Point Positioning (PPP) schemes, namely, CSRS-PPP, APPS and GrafNav, are applied for deriving the three dimensional coordinates for study. The first analysis takes one day in each year and comparing the daily solution. The second analysis takes the first week of February and August in 2009, 2010, and 2011. The weather of Dongsha area can be classified into the South-west wind and North-east wind seasons. The first season is generally from May to October, and November to April for the second.

From the first analysis, the horizontal coordinates of KDNM is about 30 cm westward. The (E,N) coordinates change of YMSM, PKGM, and TNSM are (-24 cm, 60 cm), (-15cm, 60cm), (-20cm, 55cm) respectively. There is no significant trend of elevation change for KDNM, YMSM, and TNSM tracking station. But, the height of PKGM decreased 42 cm. For the second analysis, no significant relation between the coordinate change and the seasons is observed.

Keywords: Precise Point Positioning 、 CSRS-PPP 、 APPS 、 GrafNav



## 致謝

首先，感謝指導教授 史天元老師在碩士求學過程中的悉心指導與學術啟發，在研究所兩年當中給予充足的發揮空間，同時適時的指引學生論文方向，教導我不僅在專業領域的知識，也了解如何正確的學習。並感謝李振燾老師、游豐吉老師及張智安老師對此論文熱忱指導與給予寶貴意見，使此論文更臻完備，在此僅致最深的謝意。

碩士生生涯裡承蒙許多人的支持與鼓勵才能不斷的成長與進步。感謝研究室中俊毅學長、雅信學姊、佳筠學姊、暉尊學長在課業及研究上給予協助與耐心教導，使論文有所雛型至完成。感謝碩班同學伶蓓、昭儀、郁珊、士涵、柏溶、詠升及邦和，有你們使我的碩士生活充滿回憶，感謝你們在這段時間裡互相鼓勵，能夠認識你們真的很幸運，祝福你們在畢業之後的下一個人生階段都能繼續發光發熱，達到自己的目標。感謝學弟妹張朔、麵包、鬼鬼、宛宜、以諾在偶爾煩悶的生活中帶來歡樂，也祝福你們都能夠達到你們所想要的目標。謝謝你們陪伴我度過碩班美好的時光。

最後，感謝我身後永遠的避風港，爸爸、媽媽，弟弟、Will 為我默默的付出並給予鼓勵，你們的支持是我前進的動力，謝謝你們。

願與我親愛的家人與朋友分享這份喜悅。

# 目錄

|  |     |
|--|-----|
| 中文摘要 .....                             | I   |
| ABSTRACT .....                         | II  |
| 致謝 .....                               | IV  |
| 目錄 .....                               | V   |
| 圖目錄 .....                              | VII |
| 表目錄 .....                              | IX  |
| 第一章 前言 .....                           | 1   |
| 1.1 研究方法與流程 .....                      | 1   |
| 1.2 論文架構 .....                         | 1   |
| 第二章 研究方法 .....                         | 3   |
| 2.1 GPS 定位原理 .....                     | 3   |
| 2.2 精密單點定位 .....                       | 4   |
| 2.2.1 精密單點定位基本觀測方程式 .....              | 5   |
| 2.2.2 精密單點定位誤差來源及改正 .....              | 7   |
| 2.2.2.1 與衛星相關之誤差來源 .....               | 7   |
| 2.2.2.2 與訊號傳遞相關之誤差來源 .....             | 8   |
| 2.2.2.3 與接收儀相關之誤差來源 .....              | 9   |
| 2.3 使用之軟體 .....                        | 9   |
| 2.3.1 GrafNav .....                    | 9   |
| 2.3.2 CSRS-PPP 線上計算服務 .....            | 11  |
| 2.3.3 APPS .....                       | 14  |
| 2.3.4 GrafNav、CSRS-PPP、APPS 比較分析 ..... | 16  |

|  |    |
|--|----|
| 第三章 衛星追蹤站與數據 .....                       | 18 |
| 3.1 衛星追蹤站組成架構 .....                      | 20 |
| 3.2 東沙衛星追蹤站簡介 .....                      | 21 |
| 3.3 衛星追蹤站速度場評估 .....                     | 22 |
| 第四章 實驗成果與分析 .....                        | 26 |
| 4.1 實驗成果 .....                           | 26 |
| 4.1.1 1995 年~2012 每年選擇一天進行精密單點定位解算 ..... | 26 |
| 4.1.1.1 APPS 解算成果 .....                  | 26 |
| 4.1.1.2 CSRS 解算成果 .....                  | 32 |
| 4.1.1.3 GrafNav 解算成果 .....               | 37 |
| 4.1.1.4 各衛星追蹤站平面座標分析 .....               | 42 |
| 4.1.2 近三年中 2 月及 8 月第一周進行精密單點解算 .....     | 43 |
| 4.2 實驗成果分析 .....                         | 49 |
| 第五章 結論與建議 .....                          | 50 |
| 參考文獻 .....                               | 51 |



## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 2-1 GPS 定位原理示意圖 .....                    | 3  |
| 圖 2-2、GrafNav 使用介面 .....                   | 10 |
| 圖 2-3、估計平面位置標準差 .....                      | 10 |
| 圖 2-4、觀測時衛星之數目 .....                       | 11 |
| 圖 2-5、點位解算高度剖面圖 .....                      | 11 |
| 圖 2-6、CSRS 線上服務選項介面 .....                  | 12 |
| 圖 2-7、CSRS-PPP 系統使用介面 .....                | 13 |
| 圖 2-8、坐標中誤差分布示意圖 .....                     | 14 |
| 圖 2-9、對流層延遲分布示意圖 .....                     | 14 |
| 圖 2-10、APPS 系統使用介面 .....                   | 15 |
| 圖 2-11、CSRS-PPP 精度分析圖 (CSRS, 2012) .....   | 17 |
| 圖 3-1、國內衛星追蹤站分布圖 .....                     | 19 |
| 圖 3-2、本研究探討之衛星追蹤站在歐亞及菲律賓海板塊上之分布位置 .....    | 20 |
| 圖 3-3、衛星追蹤站儀器設備配置圖(內政部, 2012) .....        | 21 |
| 圖 3-4、追蹤站副點 TSAA .....                     | 22 |
| 圖 3-5、東沙衛星追蹤站天線柱 .....                     | 22 |
| 圖 3-6、TWTF 衛星追蹤站點位坐標 1997~2012 年歷年變化 ..... | 23 |
| 圖 3-7、TNML 衛星追蹤站點位坐標 1997~2012 年歷年變化 ..... | 24 |
| 圖 3-8、TCMS 衛星追蹤站點位坐標 1997~2012 年歷年變化 ..... | 25 |
| 圖 4-1、使用 APPS 系統解算 KDNM 歷年座標變化圖 .....      | 28 |
| 圖 4-2、使用 APPS 系統解算 PKGM 歷年座標變化圖 .....      | 29 |
| 圖 4-3、使用 APPS 系統解算 YMSM 歷年座標變化圖 .....      | 30 |
| 圖 4-4、使用 APPS 系統解算 TNSM 歷年座標變化圖 .....      | 31 |
| 圖 4-5、使用 CSRS 系統解算 KDNM 歷年座標變化圖 .....      | 33 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 4-6、使用 CSRS 系統解算 YMSM 歷年座標變化圖 .....                | 34 |
| 圖 4-7、使用 CSRS 系統解算 PKGM 歷年座標變化圖 .....                | 35 |
| 圖 4-8、使用 CSRS 系統解算 TNSM 歷年座標變化圖 .....                | 36 |
| 圖 4-9、使用 GrafNav 系統解算 TNSM 歷年座標變化圖 .....             | 38 |
| 圖 4-10、使用 GrafNav 系統解算 KDNM 歷年座標變化圖 .....            | 39 |
| 圖 4-11、使用 GrafNav 系統解算 PKGM 歷年座標變化圖 .....            | 40 |
| 圖 4-12、使用 GrafNav 系統解算 TMSM 歷年座標變化圖.....             | 41 |
| 圖 4-13、YMSM、PKGM、KDNM 及 TNSM 四個衛星追蹤站之平面點位坐標變化趨勢..... | 43 |
| 圖 4-14、YMSM 衛星追蹤站點位解算成果圖 .....                       | 45 |
| 圖 4-15、TNSM 衛星追蹤站點位解算成果圖 .....                       | 46 |
| 圖 4-16、PKGM 衛星追蹤站點位解算成果圖 .....                       | 47 |
| 圖 4-17、KDNM 衛星追蹤站點位解算成果圖 .....                       | 48 |

## 表目錄

|   |    |
|---|----|
| 表 2-1、IGS 精密星曆產品比較表(IGS, 2009).....                   | 5  |
| 表 2-2、PPP 搭配 IGS 精密產品之精度(Shen and Gao, 2002).....     | 5  |
| 表 2-3、精密單點定位觀測方程式之符號說明(Witchayangkoon, 2000).....     | 6  |
| 表 2-4、成果概述檔資訊(邱煥欽, 2008).....                         | 14 |
| 表 2-5、Grafnav、CSRS-PPP、APPS 之比較.....                  | 16 |
| 表 3-1、台灣地區 8 個衛星追蹤站概略座標(張紫玲, 2004).....               | 19 |
| 表 3-2、TWTF、TNML 及 TCMS 衛星追蹤位於 1997~2012 年間點位坐標變化..... | 25 |
| 表 4-1、APPS 解算成果時間序列分析之較差絕對範圍(單位:公尺).....              | 27 |
| 表 4-2、APPS 時間序列之較差平均值及中誤差(單位:公尺).....                 | 27 |
| 表 4-3、CSRS 解算成果時間序列分析之較差絕對範圍(單位:公尺).....              | 32 |
| 表 4-4、CSRS 時間序列之較差平均值及中誤差(單位:公尺).....                 | 32 |
| 表 4-5、GrafNav 解算成果時間序列分析之較差絕對範圍(單位:公尺).....           | 37 |
| 表 4-6、GrafNav 時間序列之較差平均值及中誤差(單位:公尺).....              | 37 |

# 第一章 前言

台灣地區位於環太平洋地震帶上，地處歐亞大陸與菲律賓板塊的接合線上，屬造山運動頻繁的區域。菲律賓板塊以每年約 7 公分速度朝西北方向移動，導致台灣本島及周邊產生頻繁的地震，近幾年更因 1999 年集集、2001 年成功等大地震造成嚴重傷害及財產損失，使得各界對地殼變位監測極為重視(饒瑞鈞等，2006)。

台灣地區自民國 81 年開始，由內政部陸續設置了八個衛星追蹤站，其設置之衛星追蹤站為全天 24 小時連續接收 GPS 衛星訊號之資料收集站，將衛星追蹤站所蒐集之數據與國際 IGS 追蹤站聯測並求解後，可得國內衛星追蹤站於國際參考框架 ITRF 的座標及速度量。此八個衛星追蹤站資訊為訂定國家座標基準框架及控制點測量之依據，因此其點位座標維護具有相當之重要性。

本研究以 1995 年至 2012 年間，由台北陽明山衛星追蹤站、雲林北港衛星追蹤站、屏東墾丁衛星追蹤站以及高雄東沙衛星追蹤站所蒐集之 GPS 衛星訊號資料進行精密單點定位解算，透過不同時間序列組合以分析此四個衛星追蹤站點位變化情形。

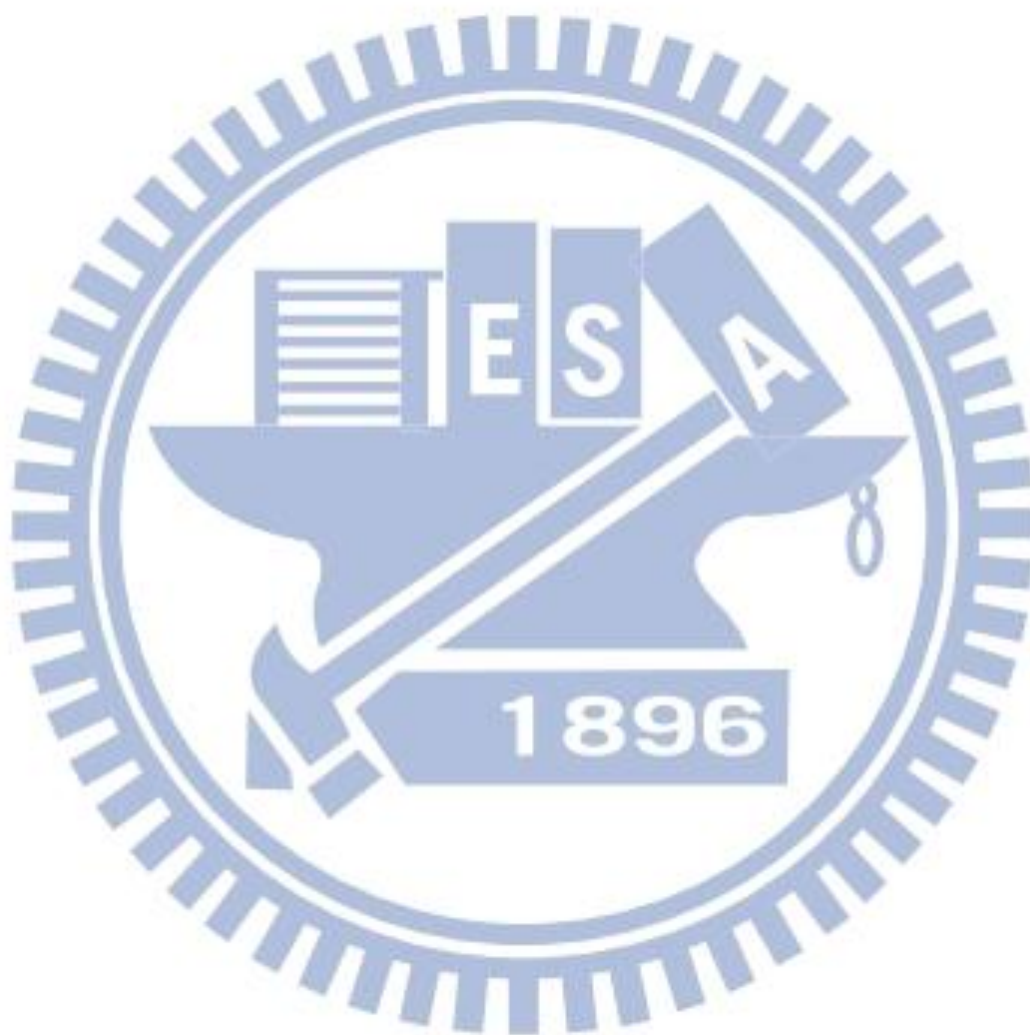
## 1.1 研究方法與流程

本研究使用 CSRS-PPP、APPS 以及 GrafNav 作為觀測數據之解算工具。CSRS-PPP 及 APPS 為網路自動化精密單點定位解算服務系統；GrafNav 為一高精度 GPS 數據後處理軟體。以不同的時間序列組合方式分析此四個衛星追蹤站自 1995 年至 2012 年之變化情形以及季節氣流對於東沙衛星追蹤站之解算座標之影響。數據處理共分為兩組，第一組為 1995 年至 2012 年每年各選擇一天之 4 個衛星追蹤站觀測資料；第二組為近三年內依照季節選擇每年 2 月及 8 月共六組衛星追蹤站觀測資料。以上資料皆以 CSRS-PPP、APPS 以及 GrafNav 進行靜態模式精密單點定位解算。

## 1.2 論文架構

本研究論文架構共分為四章。第一章說明本論文之研究目的以及研究方法；第二章研究方法中，介紹 GPS 定位原理、精密單點定位方法及相關誤差來源之介紹，並介紹研究中所使用的數據處理系統及軟體，以及簡介衛星追蹤站之架構與相關資訊。第三章

實驗成果與分析中，呈現以每年選擇一天之時間序列分析衛星追蹤站之點位變化情形，以不同季節之時間序列分析東南氣流及西北氣流對於衛星追蹤站之定位解算精度；第四章結論與建議中，將列出研究成果總結與建議事項。



## 第二章 研究方法

精密單點定位與傳統單點定位不同的地方在於使用精密星曆及時錶資料進行定位解算，具有可獨立作業、不受基線長度影響、不需基準站資料等優點。本研究中使用 CSRS-PPP、APPS 以及 GrafNav 作為進行精密單點定位之解算工具。

### 2.1 GPS 定位原理

GPS 定位基本觀念為在空中衛星座標已知的情況下，觀測到接收儀與衛星間之距離並計算出地面待測點位之三維空間位置座標，如圖 2-1 所示。同時觀測三顆衛星所得之衛星與地面待測點之瞬時空間距離即可解算出地面待測點之座標，由於一般接收儀內部之石英鐘與衛星內部之原子鐘仍存在著一時錶誤差，在解算待測點座標時，通常會將時錶誤差視為一未知數一併進行求解，因此在進行 GPS 定位時，必須同時觀測四顆衛星得到四個觀測量方能求解待測點之位置及時錶誤差，若觀測衛星數為四顆以上，在求解時則可增加平差計算的多餘觀測量，使求得之待測點座標成果更加精確、可靠。

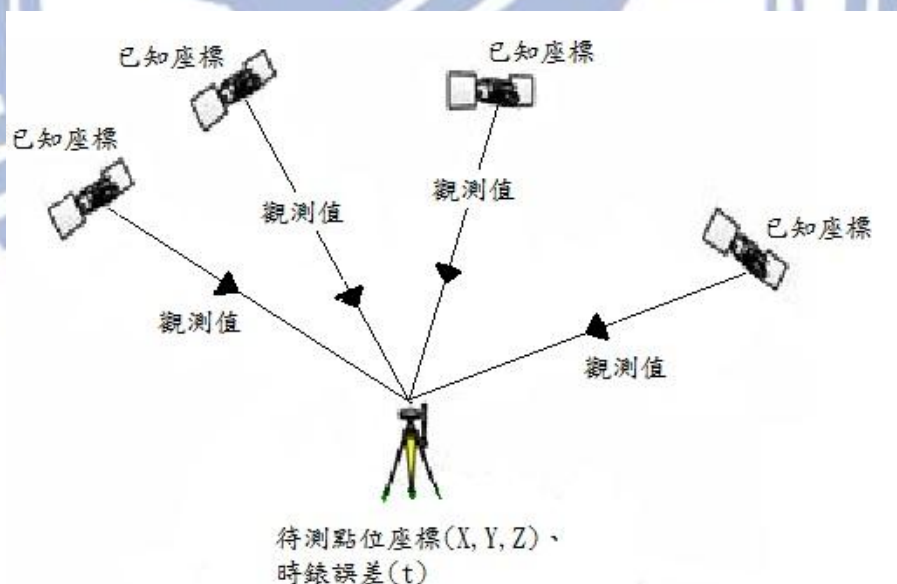


圖 2-1 GPS 定位原理示意圖

GPS 定位可分為相對定位以及絕對定位。相對定位需要 2 台以上之接收儀同時進行觀測衛星訊號，一部接收儀設置於參考站上，其座標為已知值，其他接收儀設置於測站上，透過二次或三次差分，消除或減少參考站及測站之間之共同系統誤差，例如衛星時

鐘誤差、接收儀時鐘誤差、對流層誤差及電離層誤差等，進而提高待測點位的定位精度；絕對定位為可直接量測出測站在 GPS 衛星定位系統所採用的 WGS84 坐標系中相對於座標原點之定位方法，其特點在於可使用一台接收儀即可進行定位並求解出待測點絕對座標。

## 2.2 精密單點定位

在單點定位中，使用者利用單一部接收儀接收衛星訊號，依據 GPS 廣播星曆改正衛星時鐘誤差，並以對流層及電離層誤差模式改正其誤差，推算接收儀及衛星之間距離觀測量後進行後方交會求解出地面待測點的絕對座標，且一併求解接收儀時錶誤差。而單點定位尚有許多誤差未改善完整，例如來自廣播星曆中的衛星軌道誤差以及剩餘的衛星時錶誤差，為了提升單點定位精度，發展出使用精密星曆之精密單點定位，對於對流層延遲誤差、電離層誤差及天線相位中心誤差等未模式化的誤差進行處理改正。

目前提供精密星曆的單位有 IGS(International GNSS Service)，此機構藉由全球網型衛星追蹤站聯測，免費提供各種 GPS 原始觀測資料、預估或經過後處理的廣播星曆、精密星曆、衛星時錶資料等資料給使用者參考使用。

由 IGS 發布所發布的精密星曆及衛星時錶資料，依照發布時間的延遲量分為不同的等級，如表 2-1 所示。第一種為最終產品(final product)，發布時間延遲量約為 12 至 18 天，其衛星軌道誤差精度小於 2.5 公分，衛星時錶資料均方根誤差約為 20ps，為準確度最高之產品。第二種為快速產品(Rapid product)，發布時間延遲量約為 17 至 41 個小時，其衛星軌道誤差精度約為 2.5 公分，衛星時錶資料均方根誤差約為 75ps。第三種為超快速產品(Ultra Rapid product)，分為 3 至 9 小時發布一次以及即時發布，其不同在於軌道衛星誤差，前者誤差精度約為 3 公分，後者誤差精度約為 5 公分；而衛星時錶資料的部分，前者均方根誤差約為 150ps，後者約為 3ns。使用者可依照即時性以及精度的要求選擇不同的產品進行衛星軌道誤差以及衛星時錶誤差之改正。目前進行精密單點定位測量時，若搭配 IGS 所提供之後處理衛星時錶資料產品，可達到之定位精度如表 2-2 所示。

表 2-1、IGS 精密星曆產品比較表(IGS, 2009)

| 產品種類                           | 衛星軌道誤差/<br>衛星時錶誤差 | 精度                       | 時間取樣間隔                | 發布時間       |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|------------|
| Broadcast                      | Orbits            | ~100cm                   | Daily                 | Real time  |
|                                | Sat. clocks       | RMS:~5ns<br>SDev:~2.5ns  |                       |            |
| Ultra-Rapid(predicted<br>half) | Orbits            | ~5cm                     | 15 min                | Real time  |
|                                | Sat. clocks       | RMS:~3ns<br>SDev:~1.5ns  |                       |            |
| Ultra-Rapid(observed<br>half)  | Orbits            | ~3cm                     | 15 min                | 3-9hours   |
|                                | Sat. clocks       | RMS:~150ps<br>SDev:~50ps |                       |            |
| Rapid                          | Orbits            | ~2.5cm                   | 15 min                | 17-41hours |
|                                | Sat. clocks       | RMS:~75ps<br>SDev:~25ps  | 5 min                 |            |
| Final                          | Orbits            | ~2.5cm                   | 15 min                | 12-18days  |
|                                | Sat. clocks       | RMS:~75ps<br>SDev:~20ps  | Sat.:30s<br>Stn:5 min |            |

表 2-2、PPP 搭配 IGS 精密產品之精度(Shen and Gao, 2002)

| Receiver            | Observation<br>Processed | PPP<br>Mode | Precision(cm) |           |        |
|---------------------|--------------------------|-------------|---------------|-----------|--------|
|                     |                          |             | Latitude      | Longitude | Height |
| Dual<br>Frequency   | Code&<br>Carrier         | Static      | 1             | 1         | 2      |
|                     |                          | Kinematic   | 5             | 4         | 10     |
| Single<br>Frequency | Code<br>Only             | Static      | 10            | 10        | 100    |
|                     |                          | Kinematic   | 50            | 50        | 150    |
| Single<br>Frequency | Code &<br>Carrier        | Static      | 2             | 3         | 4      |
|                     |                          | Kinematic   | 25            | 25        | 50     |

### 2.2.1 精密單點定位基本觀測方程式

精密單點定位不同於相對定位技術所採用差分解算模式，在相對定位中，透過差分模式可消除或降低衛星鐘錶誤差、接收儀鐘錶誤差、衛星軌道誤差以及大氣傳播誤差等 GPS 之誤差來源，以提高解算精度。在精密單點定位中使用單一接收儀進行資料接收，不必同時觀測參考基準站即可進行定位，其測站之間獨立不相關，且定位成果建立在全球坐標系統上(King et al., 2002)。精密單點定位的觀測方程式為非差分觀測量所組成，



透過將觀測量經過適當之誤差模式改正後，使得衛星定位誤差之影響降至最低。

衛星訊號在傳遞的過程中，經過大氣層時會受到對流層、電離層等影響，以及衛星軌道本身計算時造成的軌道誤差，衛星、接收儀內部之鐘錶誤差，也包括觀測時受到的雜訊影響等，下列式中分別為使用電碼虛擬距離與載波相位觀測方程式，將上述各誤差引入觀測方程式如式 2-1、2-2 所示，其詳細內容如表 2-3 所示。

$$\Phi_{i,k}^p = \rho_k^p - cdt_k + cdt^p + \frac{c}{f_i} N_{i,k}^p + I_{k,i,\Phi}^p + T_k^p + d_{k,i,\Phi} + d_{k,i,\Phi}^p + d_{i,\Phi}^p + \varepsilon_{k,i,\Phi}^p \quad (2-1)$$

$$P_{i,k}^p = \rho_k^p - cdt_k + cdt^p + I_{k,i,P}^p + T_k^p + d_{k,i,P} + d_{k,i,P}^p + d_{i,P}^p + \varepsilon_{k,i,P}^p \quad (2-2)$$

表 2-3、精密單點定位觀測方程式之符號說明(Witchayangkoon, 2000)

| 符號         | 說明               | 符號  | 說明                           |
|------------|------------------|---|------------------------------|
| $i$        | 頻率識別號(1或2)       | $dt_k$  | 接收儀鐘錶差(單位:秒)                 |
| $f_i$      | 頻率               | $dt^p$  | 衛星軌道誤差(單位:公尺)                |
| $k$        | 接收站識別號           | $I_{k,i,P}^p, I_{k,i,\Phi}^p$                     | 電離層誤差(單位:公尺)                 |
| $p$        | 衛星識別號            | $T_k^p$   | 對流層誤差(單位:公尺)                 |
| $\Phi_k^p$ | 載波相位距離觀測量(單位:公尺) | $d_{k,i,P}, d_{k,i,\Phi}$                         | 接收儀震盪器誤差                     |
| $P_k^p$    | 虛擬距離觀測量(單位:公尺)   | $d_{k,i,P}^p, d_{k,i,\Phi}^p$                     | 虛擬距離觀測量及載波距離觀測量之多路徑效應(單位:公尺) |
| $\rho_k^p$ | 真實幾何距離(單位:公尺)    | $d_{i,P}^p, d_{i,\Phi}^p$                         | 衛星震盪器誤差                      |
| $N_k^p$    | 整數週波未定值          | $\varepsilon_{k,i,P}^p, \varepsilon_{k,i,\Phi}^p$ | 觀測時之雜訊誤差(單位:公尺)              |

精密單點定位主要重點在於資料後處理的方法，即誤差模式化。將原始觀測檔進行觀測量品質篩選後，使用國際組織 JPL 或 IGS 所提供之精密星曆資料，包含衛星軌道、衛星時表誤差之改正參數，以電碼及載波兩種觀測量組成電離層誤差線性方程式，及其

他誤差模式例如地潮、海潮、大氣改正等誤差來源模式，使各誤差項的影像降低(Leick, 2004；Zumberge et al., 1997；Witchayangkoon, 2000)，最後進行最小二乘估計將粗差別除，獲得測站坐標、接收儀時錶差、對流層延遲量及精度指標等未知數。

## 2.2.2 精密單點定位誤差來源及改正

精密單點定位為使用單台接收儀的虛擬觀測量與相位觀測量，結合全球若干個 IGS 或 JPL 等國際組織之追蹤站所計算出的精密星曆與衛星時表誤差資料進行單點定位解算。由於精密單點定位不同於相對定位使用差分模式進行解算，觀測量當中之系統誤差無法透過差分的方式降低或消除，但可藉由數學模型或附加參數一併解算的方式估計出系統誤差之影響，因此資料之預處理與誤差的消除與改正在精密單點定位中是相當重要的。

在精密單點定位之觀測量處理中所需考慮的誤差來源主要分為三類，第一類為與衛星有關之誤差，包含衛星軌道誤差、衛星時錶誤差、衛星天線相位中心偏差；第二類為與訊號傳遞有關之誤差，包含電離層延遲誤差、對流層延遲誤差、多路徑效應；第三類為與接收儀、測站相關之誤差，包含接收儀時錶誤差、接收儀天線相位中心偏差、固體潮改正及地球自轉等(曾清涼，1999)。

### 2.2.2.1 與衛星相關之誤差來源

衛星軌道誤差是指衛星星曆中提供的衛星軌道與其真實軌道之相異量。一般使用之廣播星曆的準確度大約為 5 公尺，經過後處理之精密星曆準確度約為 3 到 5 公分。精密單點定位計算中，無法像差分定位一樣消除衛星軌道誤差的影響，誤差量會影響接收儀與衛星間之幾何距離，因而產生定位誤差。因此在精密單點定位解算過程中所使用之衛星星曆為精密星曆，無法使用廣播星曆。

衛星內部安裝原子鐘可與地面控制中心之標準原子鐘進行同步，但其時錶頻率飄移仍會引起衛星鐘錶時間與標準 GPS 時間之間產生差異，稱為衛星時錶誤差。此誤差來源對於定位準確度之影響相當大，若欲要求公分級的定位準確度，則必須要求衛星時錶的準確度達到奈秒之等級。衛星時錶誤差可以由 GPS 系統透過地面監測站連續監測衛

星而得以修正，此方法可以使衛星鐘錶時間與標準 GPS 時間同步維持在 20ns 以內。進行精密單點定位時，無法透過差分模式將此項誤差消除，不同衛星之間的時錶誤差也不盡相同，因此在求解過程中，需將衛星時錶誤差假設為未知參數一併求解。

衛星天線相位中心偏差所造成之誤差影響是由於衛星天線相位中心與理論上的相位中心不一致所產生之誤差，由於描述衛星軌道位置時所使用的衛星軌道參數模型是依據衛星相位幾何中心所定義的，但使用者之接收儀觀測量是對應於衛星天線相位中心，因此進行精密單點定位解算時，須將此偏差量考慮進基本觀測方程式其中。

### 2.2.2.2 與訊號傳遞相關之誤差來源

衛星訊號通過大氣層時會受到電離層和對流層之影響，可分為電離層延遲誤差及對流層延遲誤差，此兩種誤差之介紹如下。

電離層距離地表約 50 至 1000 公里之大氣層範圍，由許多離子化微粒及電漿所組成，濃度在白天、晚上或不同季節而不相同，當衛星訊號通過電離層時會產生折射而使得傳播速度和路徑產生變化，因而產生延遲現象。進行精密單點定位時，使用者可透過 GPS 雙頻觀測量之線性組合來降低電離層效應所造成之影響，

對流層距離地表約 40 公里之大氣層範圍，對流層之大氣狀態比電離層更加的複雜，當衛星訊號通過對流層時，受到對流層中乾、濕空氣之影響導致衛星訊號傳播速度及路徑產生變化，因而產生延遲現象。對流層延遲誤差可分為乾分量及濕分量，乾分量佔對流層延遲誤差約 90% 的誤差量，與當地大氣絕對溫度與大氣壓力呈現緩慢且可預測的變化；而濕分量佔整體對流層延遲誤差之影響比例較小，在衛星訊號傳播時受到對流層中水蒸氣之影響，誤差量雖佔整體比例較小，但由於大氣層中水蒸氣含量變化劇烈導致濕分量較難透過地表的觀測量進行預估。在精密單點定位當中，可藉由數學模型或附加參數一併解算的方式估計出此誤差之影響，經過修正後可有效修正其誤差。

在訊號傳播時，當衛星訊號傳送至地面時，理論上應該直接由接收儀天線接收，但實際上衛星訊號會被接收儀附近地物反射而被接收儀接收此訊號，使得直接訊號與反射訊號被天線接收時間不同，稱為多路徑效應。直接訊號與反射訊號之間會互相干擾，甚

至會造成週波脫落影響解算精度。消除多路徑效應可透過分析信噪比值、或以濾波的方式，利用頻譜分析濾除多路徑效應所造成的影響。在實際上測量時，可藉由加裝天線盤的擋板或選擇四周遮蔽物、地物較少且透空度高的地點作為觀測站架設位置，以降低多路徑效應之影響。

### 2.2.2.3 與接收儀相關之誤差來源

與接收儀相關之誤差來源包含接收儀天線相位中心誤差、接收儀時錶誤差等系統誤差，上述誤差之介紹如下。

接收儀天線的相位中心理論上來說應該與其幾何中心一致，但接收儀之相位中心會隨著衛星訊號輸入的強度與方向的不同而產生變化，稱為接收儀天線相位中心誤差。在精密單點定位解算時，須利用率定之改正值來消除此誤差。

接收儀內部裝有高精度石英鐘，但其時錶頻率飄移仍會引起接收儀鐘錶時間與標準 GPS 時間之間產生差異，稱為衛星時錶誤差。在精密單點定位之數據處理中，將此誤差設為一未知參數一併求解，以消除此誤差對於定位精度之影響。

## 2.3 使用之軟體

本研究使用商用軟體 GrafNav 及網路即時線上 GPS 自動化算服務作為解算精密單點定位之工具，以了解各軟體對於解算精密單點定位之使用方式及解算精度等。近年來有許多國際組織研發出網路 GPS 自動化算服務，例如 NRC(Natural Resources Canada)所發展的「CSRS-PPP」、NASA(National Aeronautics and Space Administration)所發展的「Auto-Gipsy」(Ghoddousi, 2006)。使用者透過網路上傳觀測資料至計算系統，系統立即進行自動化解算，並將解算成果回傳至使用者電子信箱或在網頁上直接展示其解算成果，透過這些 GPS 線上計算服務系統，使用者可快速的得到解算成果，提高 GPS 數據解算之便利性。

### 2.3.1 GrafNav

GrafNav(NovAtel, 2009)包含靜態及動態基線解算處理、解算單點定位及精密單點定位可提供使用者進行 GPS 數據後處理之解算，其使用介面如圖 2-2 所示。使用 GrafNav

進行精密單點定位解算時， GrafNav 提供專案建置時標準流程，使用者可依序匯入欲解算之點位觀測量資料、精密星曆資料，使用者可從 IGS 或 JPL 等國際組織下載對應觀測量時間之精密星曆資料。

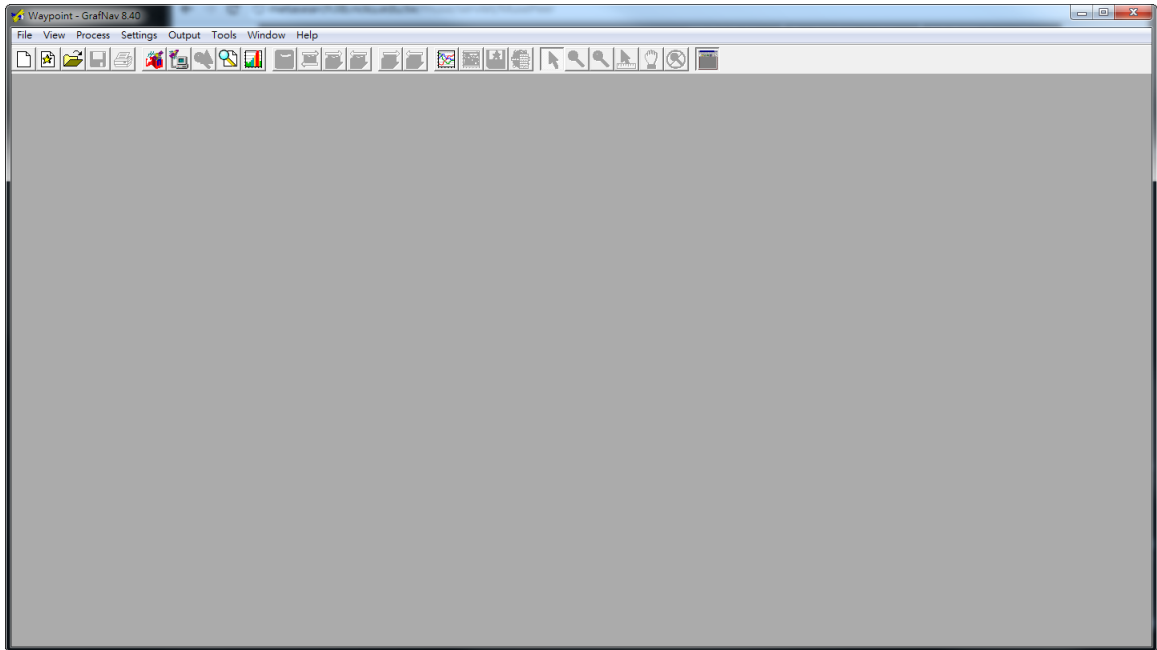


圖 2-2、GrafNav 使用介面

點位解算後成果分析部分， GrafNav 提供包含點位計算成果、解算精度、觀測量品質分析等，並繪製成圖表。圖 2-3 為估計平面位置標準差、圖 2-4 為觀測時衛星之數目、圖 2-5 為點位解算高度剖面圖。

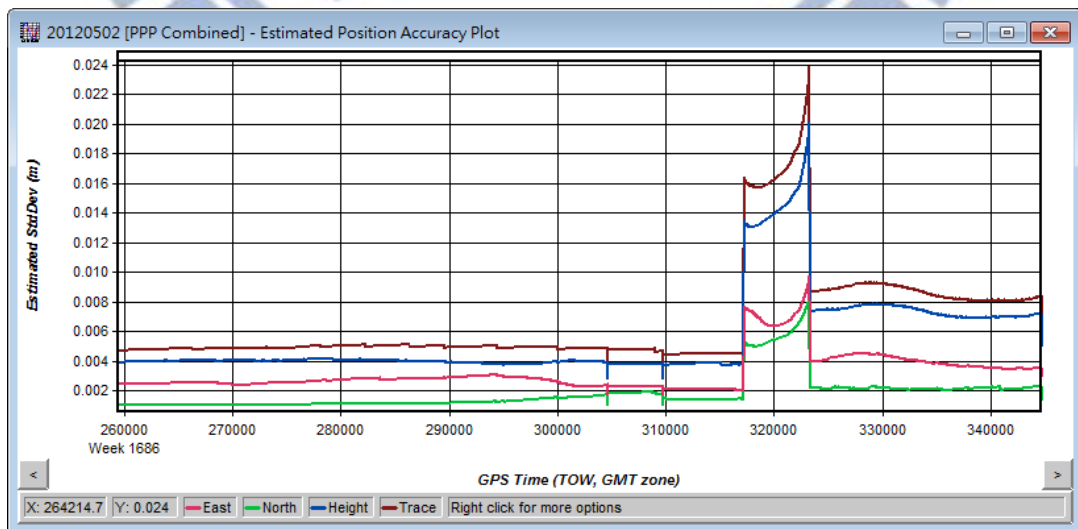


圖 2-3、估計平面位置標準差

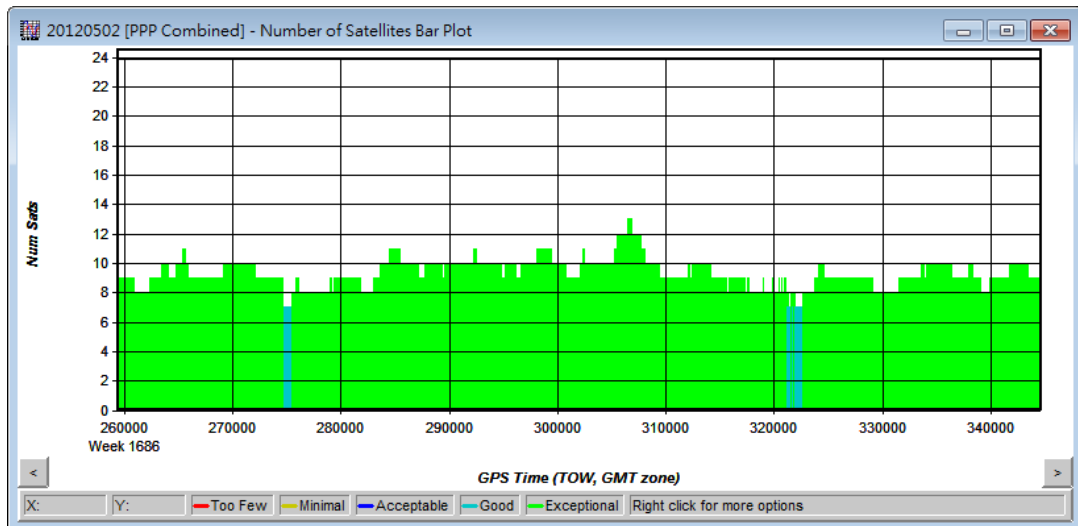


圖 2-4、觀測時衛星之數目

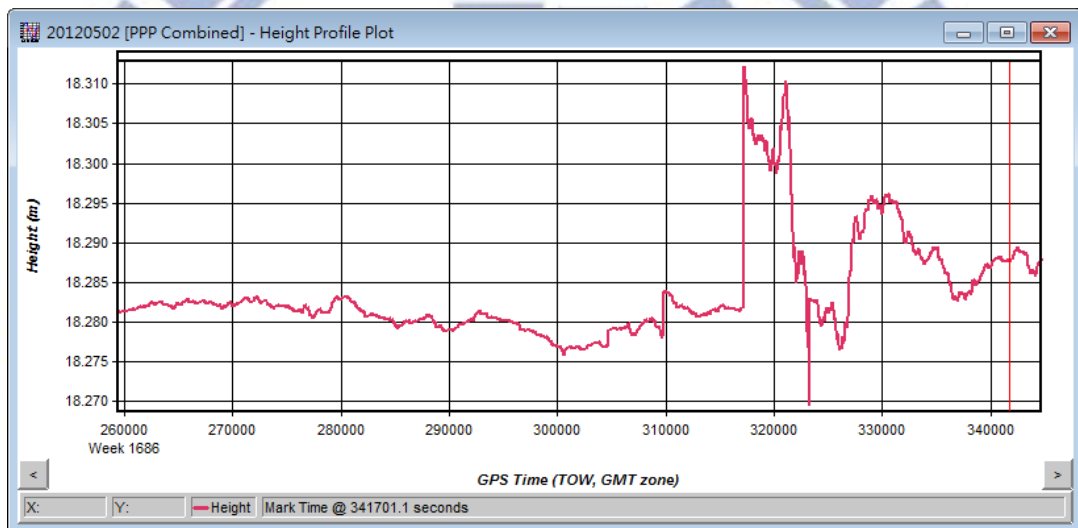


圖 2-5、點位解算高度剖面圖

### 2.3.2 CSRS-PPP 線上計算服務

CSRS-PPP 提供使用者在網際網路上可方便且快速解算精密單點定位，此 GPS 網路即時計算工具包含在「CSRS Online Geodetic Tools」當中，此系統為 NRC 所建置的 GPS 線上計算服務系統，其系統所提供之服務如圖 2-6 所示，主要提供精密單點計算、座標轉換以及精密星曆下載，座標轉換的部分主要包含大地座標轉換、高程基準轉換，同時也提供使用者 GPS Calendar 之查詢。

## Online Geodetic Tools

- [NTv2](#) Transforms between [NAD27](#) and [NAD83\(Original\)](#) geographic or [UTM](#) coordinates. \*  
([NTv2 Details](#))
- [TRNOBS](#) Transforms Latitude/Longitude/Ellipsoidal Heights between the [NAD83CSRS](#) and [ITRF](#) reference systems. ([TRNOBS Details](#))
- [GSRUG](#) Converts between Geographic and UTM coordinates. ([GSRUG Details](#))
- [INDIR](#) Perform either a geodetic direct or inverse computation.  
([INDIR Details](#))
- [GPS-H](#) Transforms Canadian [NAD83CSRS/ITRF](#) ellipsoidal heights to orthometric heights compatible to [CGVD28](#) (height above mean sea level) using [HT2\\_0](#) model.  
([GPS-H Details](#))
- [CSRS-PPP](#) An online Global GPS Processing Service - Process [RINEX](#) observations from single or dual-frequency receivers operation in static or kinematic mode.  
([CSRS-PPP Details](#))
- [GPS](#) These calendars will help you convert a typical calendar day to either the [Day Calendar](#) of Year or GPS Week #.

### Related Information

\* Contact your [Provincial Survey Agency](#) for other transforms Grid Shift Files that might be available for your area. Example: "NAD83(Original)" to "NAD83CSRS " or "ATS77" to "NAD83CSRS".

圖 2-6、CSRS 線上服務選項介面

在 CSRS(Canadian Spatial Reference System)所提供的線上服務中，使用者可免費註冊使用者帳號，註冊完成後，透過電子信箱及密碼即可登入使用 CSRS 線上計算服務。

使用者透過網際網路於 CSRS-PPP 網頁上傳觀測檔案並設定兩項參數即可進行線上計算精密單點定位。第一項參數需設定解算模式為靜態(Static)或動態(Kinematic)，在 CSRS-PPP 靜態解算模式中，解算成果可獲得測站的單一坐標估值，在動態解算模式中，解算成果為獲得每一筆觀測量的坐標估值，而動態解算模式之觀測量解算方法分為兩種，分別為 Forward 以及 Backward，以觀測資料隨時間序列向前或向後計算做為區別；第二項需設定的參數為座標系統，分為 NAD83(North American Datum of 1983)以及 ITRF 兩種解算座標成果表示方式，使用介面如圖 2-7 所示。使用者上傳觀測檔時需注意觀測檔格式，觀測檔格式必須為 RINEX 格式，使用者可上傳原始觀測檔即 O 檔，亦接受 zip(.z)、gzip(.gz)及 UNIX Compress(.Z)三種壓縮檔案格式(NRC, 2009)，檢查檔案格式無誤並設定其參數後，即可進行精密單點定位解算。

## Canadian Spatial Reference System

### CSRS-PPP

CSRS-PPP is an on-line application for GPS data post-processing that allows GPS users to submit observation data over the Internet and recover, using precise GPS Orbit and Clock information, enhanced positioning precisions in the Canadian Spatial Reference System (CSRS) and the International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

#### Select RINEX Observation File

(Name: use only Western Roman alphanumeric, including hyphen and underscore)  
(Compression: none or zip (.zip), gzip (.gz) or UNIX Compress (.Z))  
(Format: RINEX or Compact RINEX (Hatanaka))

#### Select Mode of Processing

Static  
Kinematic

#### Select Reference System

NAD83(CSRs)  
ITRF (Epoch of GPS data)

#### Optional OTL File (Who should use this file?)

#### Enter/Change E-Mail to which results will be sent

wfchen528@gmail.com

**File Upload/Processing**

圖 2-7、CSRS-PPP 系統使用介面

當 CSRS-PPP 完成解算後，系統會將解算成果傳送至使用者之電子信箱中，成果部分包含成果概述檔、完整成果檔及圖像成果檔三個檔案可提供使用者下載。成果概述檔案內容主要分為三個部分，詳細內容如表 2-4 所示。完整成果檔內容包含每筆觀測資料 (epoch-by-epoch) 的屬性資料、參數改正值、對流層改正值、坐標較差值及坐標估值等，屬性資料包含站名、參考座標框架、觀測日期時間、GDOP 值等。圖像成果檔的部分包含隨時間序列之圖像成果，如坐標之經緯度及橢球高較差值、坐標中誤差、對流層延遲誤差、測站時鐘誤差、電碼及載波觀測量殘差、週波未定值等圖像成果；圖 2-8 為坐標中誤差分布示意圖、圖 2-9 為對流層延遲分布示意圖。



表 2-4、成果概述檔資訊(邱煥欽，2008)

| 項目     | 包含資訊   |
|--------|--|
| 詮釋資料   | 匯入及系統內部使用之檔案描述。例如觀測檔名稱、衛星精密星曆及衛星鐘錶使用名稱。  |
| 參數改正資料 | 包含週波脫落收斂值、衛星天線相位中心偏移量、接收儀天線相位中心偏移量、地面氣象資訊、坐標轉換參數、海潮改正值。                                  |
| 坐標計算資料 | 解算觀測量處理資訊(解算模式、觀測資料類型、參考框架、坐標系統、測站名稱、觀測時間間隔、觀測量筆數)、坐標估值(卡氏坐標、經緯度座標、橢球高、坐標差值、中誤差)、衛星殘差資訊。 |

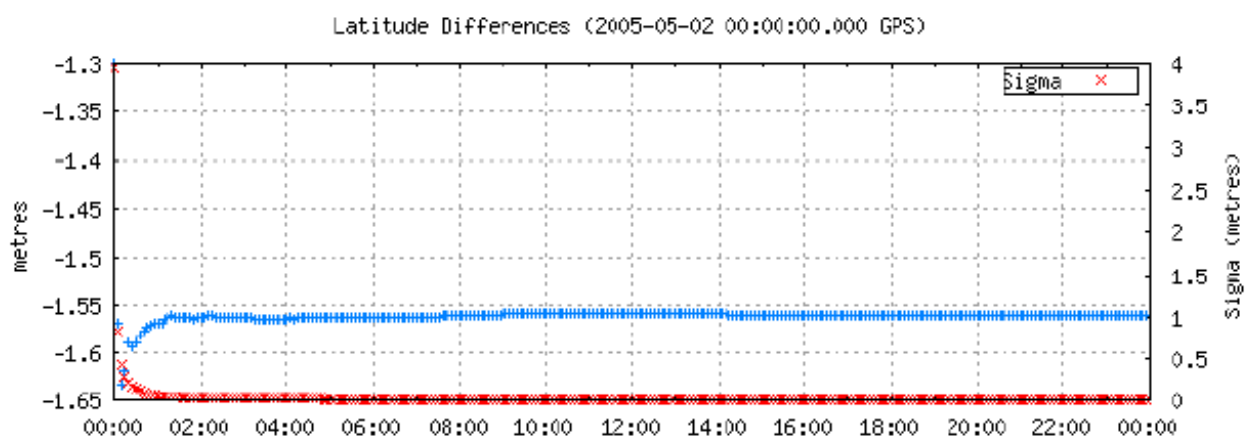


圖 2-8、坐標中誤差分布示意圖

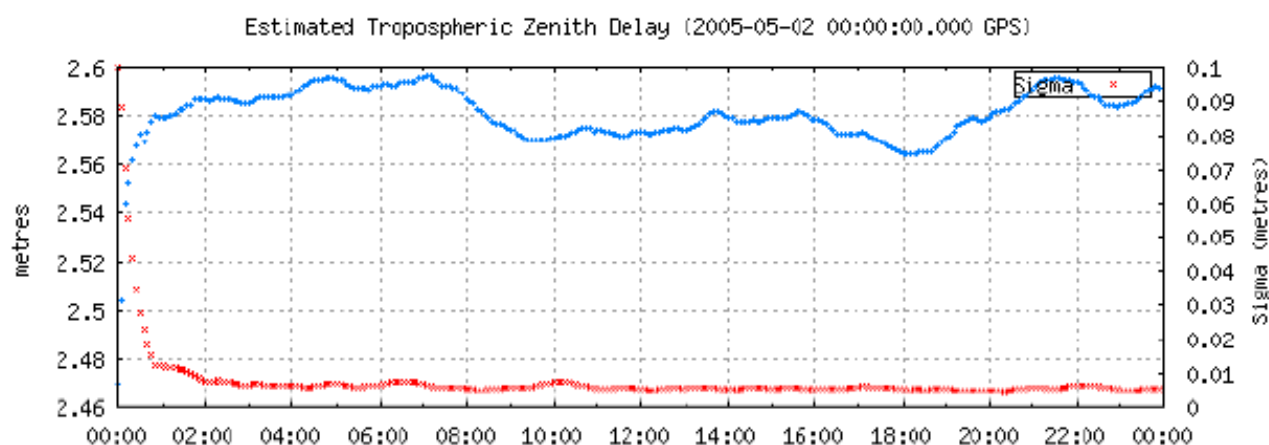


圖 2-9、對流層延遲分布示意圖

### 2.3.3 APPS

APPS(Automatic Precise Positioning Service)為 Auto Gipsy(AG)之延續，自 2008 年 9 月開始，JPL 增進解算模式功能後改名為 APPS。AG 與 APPS 不同的地方在於 APPS 可

進行動態解算、可使用即時軌道與鐘錶改正計算故無需等待、計算更快速。

使用 APPS 進行精密單點定位時，使用者透過網際網路上傳觀測檔案並設定四項參數，即可進行線上計算精密單點定位。第一項參數須設定解算模式為靜態或動態，第二項參數須設定電碼觀測量為 C/A 碼或 P 碼，第三項參數須設定是否使用壓力模型數據，此功能主要為加強位置解算之準確性，特別在解算動態模式時可提供更準確之解算成果。第四項須設定參數為輸入衛星截止高度及輸出資料之時間間隔。使用介面如圖 2-10 所示。APPS 可進行解算之觀測量檔案格式為 RINEX，使用者可上傳原始觀測檔即.O 檔，亦接受壓縮檔案格式。

| APPS Options         |  |
|----------------------|--|
| Processing Mode      | <input checked="" type="radio"/> Static<br><input type="radio"/> Kinematic   |
| Measurement Type     | <input type="radio"/> Single Frequency<br><input checked="" type="radio"/> Dual Frequency  |
| Orbits/Clocks used   | JPL Final: Data prior to 2012-07-14<br>JPL Rapid: Data from 2012-07-14 to 2012-07-26<br>JPL Ultra R/T: Data from 2012-07-26 to present |
| L1 Code              | <input type="radio"/> CA Code<br><input checked="" type="radio"/> P Code   |
| Model Pressure Data? | <input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No  |
| Advanced Options     | <input type="text" value="7.5"/> Elevation Angle Cutoff<br><input type="text" value="300"/> Solution Output Rate (seconds)             |

圖 2-10、APPS 系統使用介面

在 APPS 中所使用的精密衛星軌道誤差資料及衛星時錶差資料為 JPL 所提供，分為三種類型，第一種為最終產品，也稱為 FlinnR，發布時間延遲量約為 13 天，其衛星軌道誤差精度小於 3 公分；第二種為快速產品，稱為 QuickLookR，發布時間延遲量約為

1~13 天，其衛星軌道誤差精度約 5 公分；第三種為即時產品，稱為 Ultra R/T，可即時提供衛星軌道誤差資料及衛星時錶差資料，其衛星軌道誤差精度約為 8 公分。APPS 會依照使用者上傳之觀測量檔案之觀測日期搭配不同的產品進行衛星軌道誤差以及衛星時錶誤差之改正。

在 APPS 所提供的線上服務中，使用者可免費註冊使用者帳號，註冊完成後透過電子信箱及密碼即可登入使用 APPS 線上計算服務。

當 APPS 解算完成後，系統提供之解算成果包括估計位置座標，其座標參考框架為 ITRF2008，解算成果中提供卡氏直角座標及經緯度、橢球高兩種座標表示方式，且提供對流層延遲誤差濕分量之改正量、接收儀時鐘誤差等。

### 2.3.4 GrafNav、CSRS-PPP、APPS 比較分析

GrafNav、CSRS-PPP、APPS 為本研究中進行精密單點定位時所使用之軟體，CSRS-PPP 及 APPS 屬於網路即時線上解算軟體，當使用者進行解算時，需匯入觀測數據檔案並且設定軟體所提供之參數，例如坐標框架、進行動態或靜態解算等參數，網路即時線上解算軟體完成精密單點定位解算後，將解算成果傳送至使用者之信箱提供使用者下載。GrafNav 為高精度 GPS 數據後處理軟體，可進行靜態及動態基線解算處理、解算單點定位及精密單點定位；進行精密單點定位解算時，使用者需匯入觀測數據檔案，GrafNav 提供輔助搜尋精密星曆之功能，若欲節省精密星曆搜尋時間，可自行下載精密星曆檔案匯入 GrafNav 進行解算，匯出解算成果時可依照使用者需求轉換到不同的坐標框架。將 Grafnav、CSRS-PPP、APPS 之軟體使用環境、解算模式、操作程序、解算成果以及解算精度整理後如表 2-5 所示。

表 2-5、Grafnav、CSRS-PPP、APPS 之比較

|        | GrafNav                 | CSRS-PPP | APPS        |
|--------|-------------------------|----------|-------------|
| 軟體使用環境 | 需安裝於 Windows 作業系統       | 透過網際網路   | 透過網際網路      |
| 解算模式   | 靜態及動態基線解算處理、單點定位及精密單點定位 | 靜態精密單點定位 | 靜態/動態精密單點定位 |

|      |   |   |                                  |
|------|---|---|----------------------------------|
| 操作程序 | 需設定專案內容包含專案名稱、匯入觀測數據/廣播星曆/精密星曆，選擇解算模式即可進行解算 | 匯入觀測數據，設定坐標系統即可進行解算                               | 匯入觀測數據，設定解算模式、數據型式、電碼種類即可進行解算    |
| 解算成果 | 包含位置坐標、專案設定參數資料，使用者依需求繪製相關圖表(坐標解算成果/數據品質)   | 包含成果概述檔(詮釋資料/參數改正資料/坐標計算資料)、完整成果檔及圖像成果檔，          | 包含估計位置座標、對流層延遲誤差濕分量之改正量、接收儀時鐘誤差等 |
| 解算精度 | 可達公分等級                                      | 其精度與觀測時間有關，若觀測時間達到連續12小時以上，其精度可達到1公分。其變化如圖2-11所示。 | 可達公分等級                           |

CACS Data -- 186 RINEX Files -- Interpolated Clocks

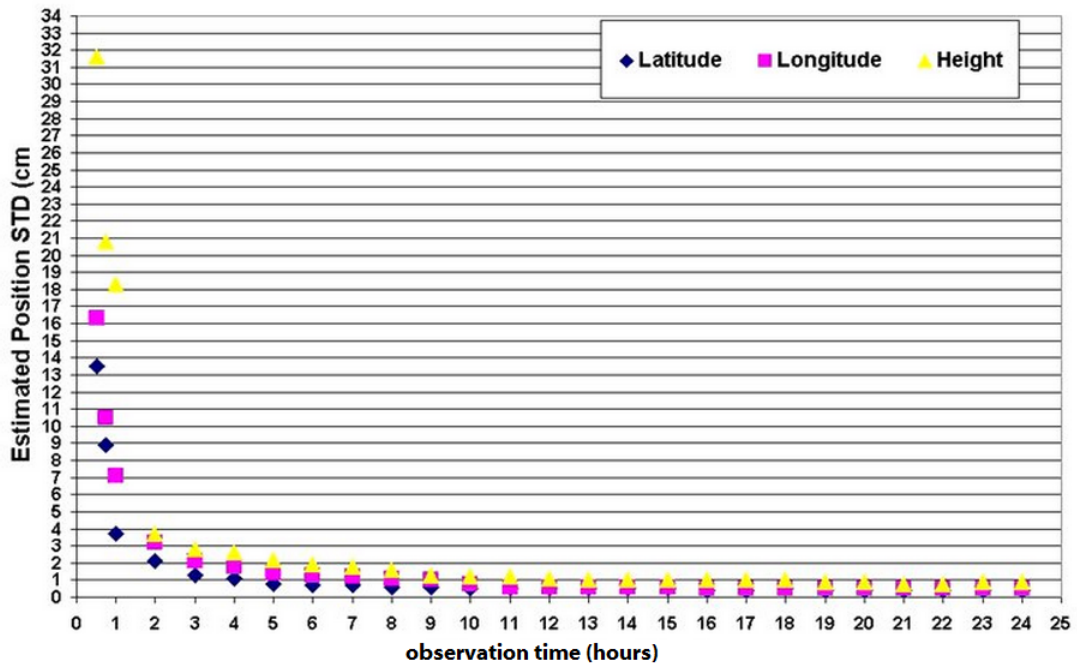


圖 2-11、CSRS-PPP 精度分析圖 (CSRS, 2012)

### 第三章 衛星追蹤站與數據

台灣地區之基本控制點在早期使用傳統測量方法測量點位坐標，其點位間必須具有良好的通視，因此控制點位置必須選在高海拔之山頂，測量人員必須攜帶沉重之測量儀器至山頂進行測量，也常因為受到風雨、霧氣之天候因素影響測量進度需耗費大量人力、經費以及時間，由於地形因素受限於基本控制點三角網之幾何圖形強度而無法提高其精度。內政部因此規劃採用衛星定位測量方法進行台灣及離島區域之地區基本控制點測量工作，衛星定位測量方法特點在於施測時不受天候影響，點位間不必互相通視，點位位置只需選擇透空度在 65 度以上之地點，衛星定位測量方法突破傳統測量方法在人力、時間以及精度上的限制(臺北市地政局，2012)。

內政部於民國 82 及 83 年間在台閩地區設置了八個衛星追蹤站，其衛星追蹤站分別位於陽明山、墾丁、鳳林、金門、馬祖、北港、太麻里及東沙等八個地區，其分佈圖如圖 3-1 所示，其概略座標如表 3-1 所示。衛星追蹤站為一全天 24 小時連續觀測衛星訊號之無人接收站，因此接受之衛星資料相當豐富，其解算精度極高因此可做為國家坐標系統之依據，衛星追蹤站之位置需具備以下條件:1.對空通視良好(仰角十度以上透空無遮蔽物)、2.地質穩固，無局部滑動之虞、3.附近地形地物應長期保持現狀，不做其他用途、4. 遠離廣播電台、雷達站、微波站及其他電磁波源，以避免訊號干擾、5. 需有完善電力及電信設備，以利資料接收及傳輸(內政部，2012)。



圖 3-1、國內衛星追蹤站分布圖

表 3-1、台灣地區 8 個衛星追蹤站概略座標(張紫玲，2004)

| 站名           | 位置  | 經度       | 緯度      |
|--------------|-----|----------|---------|
| 東沙追蹤站(TNSM)  | 高雄市 | E116°43' | N20°42' |
| 陽明山追蹤站(YMSM) | 台北市 | E121°34' | N25°10' |
| 北港追蹤站(PKGM)  | 雲林縣 | E120°18' | N23°35' |
| 墾丁追蹤站(KDNM)  | 屏東縣 | E120°47' | N21°57' |
| 鳳林追蹤站(FLNM)  | 花蓮縣 | E121°27' | N23°45' |
| 馬祖追蹤站(MZUM)  | 連江縣 | E119°56' | N26°09' |
| 太麻里追蹤站(TMAM) | 台東縣 | E121°00' | N22°37' |
| 金門追蹤站(KMNM)  | 金門縣 | E118°23' | N24°41' |

此 8 個衛星追蹤站為全天候 24 小時運轉之無人接收站，衛星追蹤站所用的 GPS 儀器為美國 AOA 公司所生產的 Turbo Rogue 型號 SNR8000 接收儀，設定每 30 秒接收一筆衛星訊號，每天將前一日 24 小時所接收的觀測資料下載至衛星追蹤站的電腦中建檔儲存，再透過數據機及電話線將每天的原始觀測檔傳送回內政部衛星測量中心整理並儲存。其原始觀測檔為 Conan Binary 型態的主要考量是因為此種型態的檔案所佔的記憶體空間比較小，傳輸的時間也比較少，目前國際間也多採此一方式。當檔案傳回衛星中心後，為提供後續各界之使用，再將原始觀測檔資料轉換成 RINEX 格式，儲存於資料庫中供外界使用（張紫鈴，2004）。

本研究中所使用的四個衛星追蹤站分別為陽明山、北港、墾丁以及東沙衛星追蹤站，由圖 3-2 中標示出四個衛星站在歐亞板塊以及菲律賓海板塊上之分布位置，陽明山、北港及東沙衛星追蹤站分布於歐亞板塊，而墾丁衛星追蹤站則是位於菲律賓海板塊接近歐亞板塊之交界處。



圖 3-2、本研究探討之衛星追蹤站在歐亞及菲律賓海板塊上之分布位置

### 3.1 衛星追蹤站組成架構

衛星追蹤站為長期全天候觀測之接收站，具有相當高精度站位座標，為一、二等衛星控制點之依據，做為訂定 1997 台灣大地基準之基準；此外衛星追蹤站亦可提供進行

衛星定位施測者同時段觀測數據，具有提升定位精度、降低儀器及人力使用數量之便利性。衛星追蹤站之架構主要可分為儀器房、天線柱及氣象設備三部分。儀器房內放置衛星接收儀、時間接收儀、工業用電腦、數據機及不斷電系統等設備，每日下載資料儲存於在電腦中，再由工作人員於固定時間以 E-mail 方式傳送至內政部管理人員；氣象設備包含溫度計、濕度計、壓力計等，紀錄追蹤站周圍氣候資訊；天線柱上則安裝有衛星接收儀天線及時間接收儀，接收衛星訊號，各項設備之配置如圖 3-3 所示。

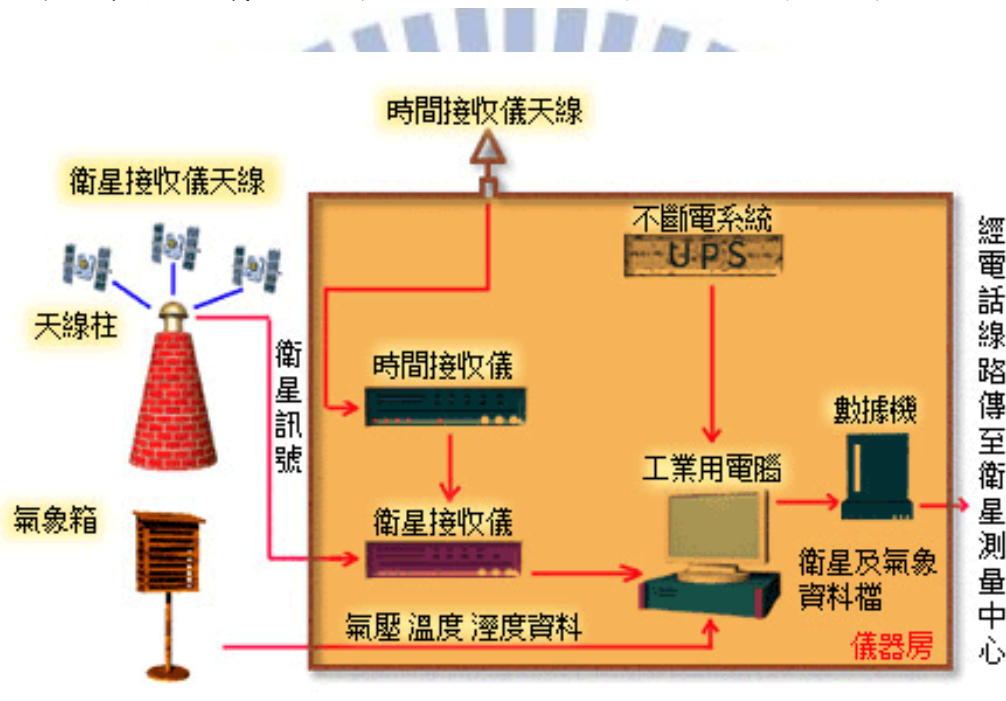


圖 3-3、衛星追蹤站儀器設備配置圖(內政部，2012)

### 3.2 東沙衛星追蹤站簡介

東沙衛星追蹤站於民國 83 年設置完成，其點位設置於東沙島的東光牧場，位於東沙本島中央略偏東南處，鄰近周圍設有 TSAA、TSAB 及 TSAC 三個控制點，其中 TSAA 為追蹤站副點，如圖 3-4 所示。東沙衛星追蹤站從設置完成至今，於民國 93 年 10 月 5 日時更換過一次衛星接收儀天線，東沙衛星追蹤站天線柱如圖 3-5 所示。





圖 3-4、追蹤站副點 TSAA



圖 3-5、東沙衛星追蹤站天線柱

### 3.3 衛星追蹤站速度場評估

國際地球參考系統 ITRS(International Terrestrial Reference System)為國際間協議完成之空間坐標系統，由國際地球旋轉組織 IERS(International Earth Rotation Service)經由分析全球測站觀測數據以所建立而成。ITRF 為一動態框架之概念與實現，內容包括一系列參考站之瞬時坐標及速度分量，以供計算不同時刻之坐標值，並分析不同時刻觀測之解算成果。由 IERS 應用 VLBI( Very Long Baseline Interferometry)、SLR (Satellite Laser Ranging)、LLR (Lunar Laser Ranging)、DORIS( Doppler Orbitography and Radio Positioning

Integrated by Satellite)及 GPS 等太空科技空間定位技術測定一組涵蓋全球點位的坐標和速度場定義 ITRF 之坐標框架，以具體實現 ITRS 空間坐標系統(ITRF, 2009)。這組由全球測站的空間坐標所形成之框架，稱為國際地球參考框架 ITRF(蔡旻穎，2007)。

台灣地區在桃園及新竹光復院區共設置三處 GPS 衛星追蹤站，站名為 TWTF、TNML 及 TCMS，加入 IGS(International GPS Service for Geodynamics)，做為國內 GPS 接收儀定位檢校及板塊運動監測之參考。藉由分析 TWTF、TNML 及 TCMS 衛星追蹤站於 1995 年至 2012 年在 ITRF2008 國際地球參考框架下之點位坐標變化情形，了解其點位速度場變化。以 1997 年所解算之坐標值作為坐標較差值基準，其速度場變化如圖 3-6~3-8 所示，TWTF、TNML 及 TCMS 衛星追蹤站於 1997 年至 2012 年間點位變化趨勢為逐漸向東南方移動，其點位變化坐標數據如表 3-2 所示。

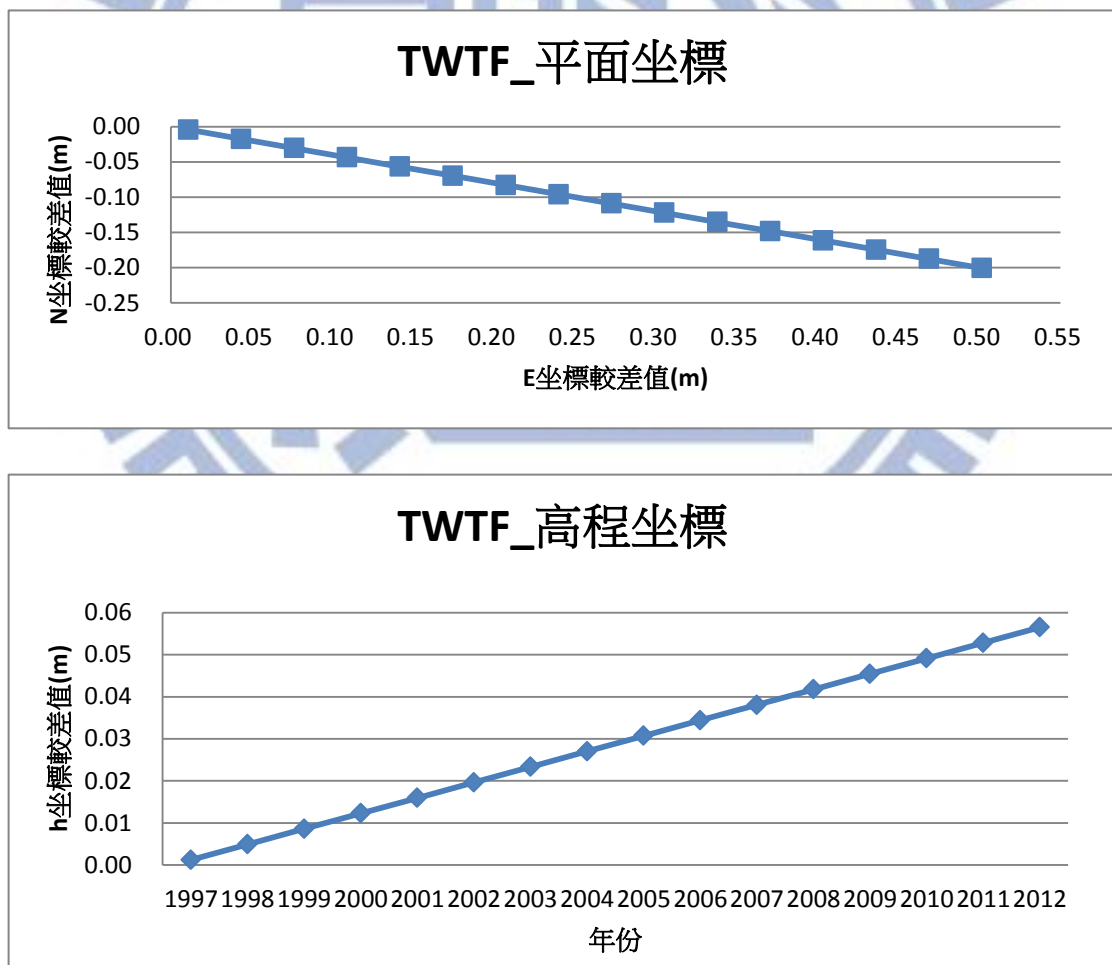


圖 3-6、TWTF 衛星追蹤站點位坐標 1997~2012 年歷年變化

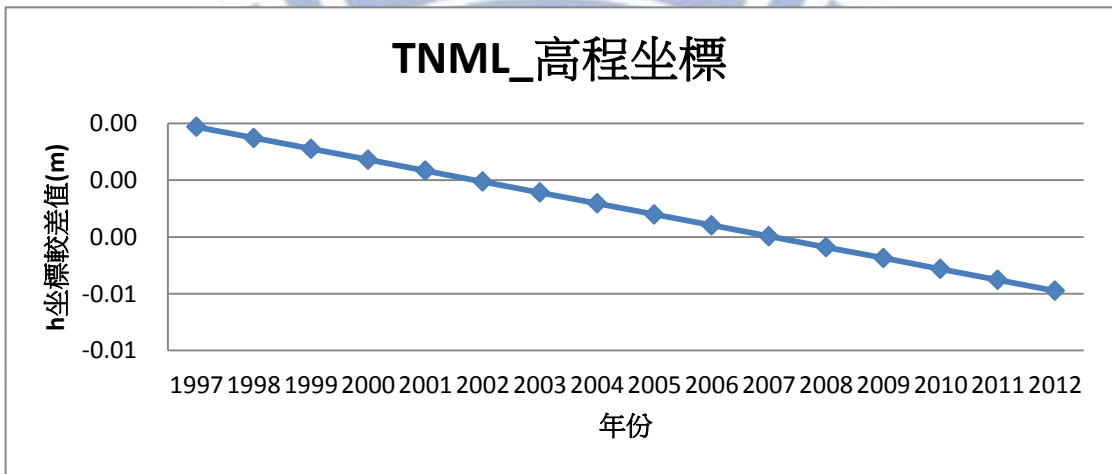
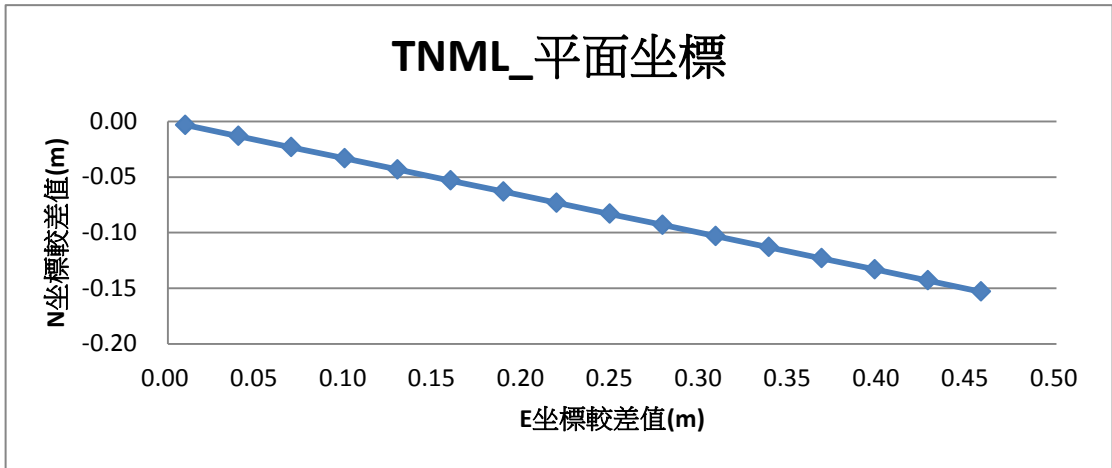
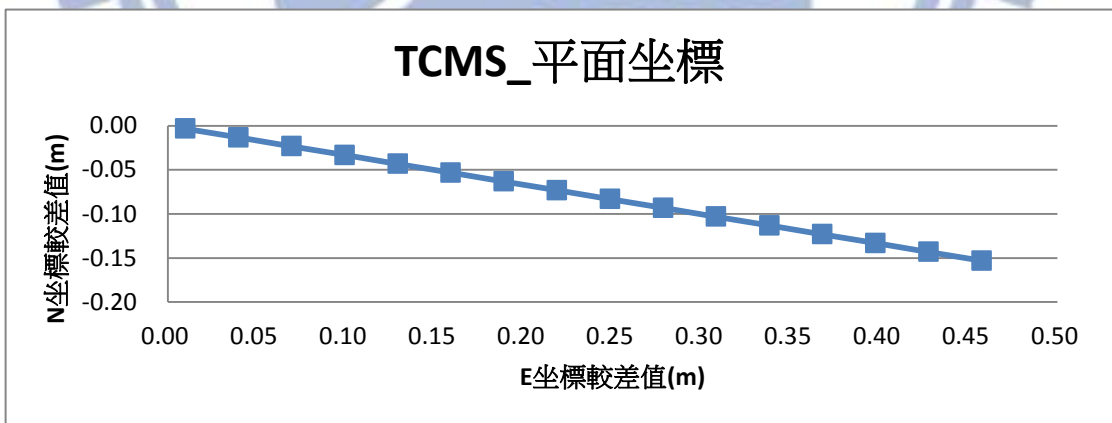


圖 3-7、TNML 衛星追蹤站點位坐標 1997~2012 年歷年變化



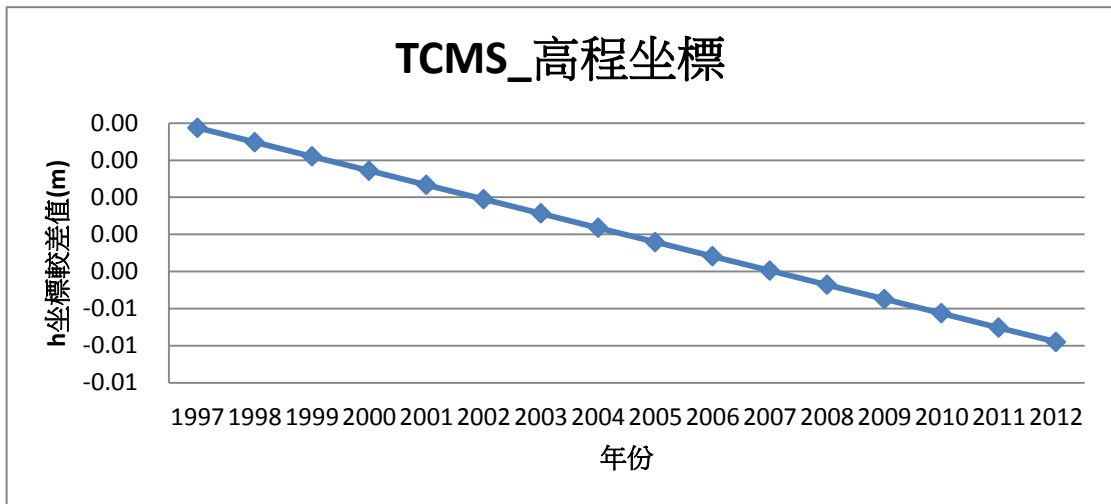


圖 3-8、TCMS 衛星追蹤站點位坐標 1997~2012 年歷年變化

表 3-2、TWTF、TNML 及 TCMS 衛星追蹤位於 1997~2012 年間點位坐標變化  
(單位:公分)

|      | E     | N      | h     |
|------|-------|--------|-------|
| TWTF | 49.07 | -19.64 | 5.53  |
| TNML | 44.76 | -14.97 | -0.58 |
| TCMS | 44.76 | -14.98 | -0.58 |

## 第四章 實驗成果與分析

本研究使用數據為陽明山、北港、墾丁以及東沙等四個衛星追蹤站之全天候 24 小時之觀測數據資料，其接收頻率為 30 秒。以 1995 年至 2012 年逐年選定一天進行精密單點計算之解算成果分析四個衛星追蹤站點位變化之情形，以近三年 2 月及 8 月第一周逐筆進行精密單點計算之解算成果了解季節氣流對於衛星追蹤站點位座標變化之影響。

### 4.1 實驗成果

本研究使用 GPS 後處理軟體 GrafNav 和網路自動化算服務系統 CSRS-PPP 及 APPS 分別對收集之觀測資料進行精密單點定位，並將計算成果轉換至台灣橫麥卡托二度分帶座標系統上。透過兩種時間序列組合之方式，第一種時間序列組合方式為在 1995 年~2012 年當中選擇每一年之 5 月 2 日，第二種時間序列組合方式為選擇近三年中 2 月及 8 月第一周，分析 CSRS-PPP、APPS 及 GrafNav 所計算之解算成果，包含坐標較差值、較差絕對值範圍、較差平均值及中誤差，其中座標較差值計算方式為解算成果與座標基準相減，陽明山、北港、墾丁之衛星追蹤站坐標較差值當中所使用的坐標基準為 1995 年之計算成果，東沙衛星追蹤站坐標較差值之基準為 1994 年內政部公告坐標值。

#### 4.1.1 1995 年~2012 每年選擇一天進行精密單點定位解算

此部分以 1995~2012 十八年選擇每一年的 5 月 2 日之時間序列作為基礎，將陽明山 (YMSM)、北港(PKGM)、墾丁(KDNM)、東沙(TNSM)4 個衛星追蹤站全天靜態觀測資料進行 CSRS-PPP、APPS 以及 GrafNav 精密單點定位解算。由於 5 月 2 日在 1995 年~2012 年間皆有此天數據，因此選擇此日作為研究數據。

##### 4.1.1.1 APPS 解算成果

由 APPS 系統之精密單點定位解算成果中，為了清楚了解各衛星追蹤站在平面與高程之變化情形，將各衛星追蹤站每年解算成果繪製成圖後，可清楚看到點位之變化情形，圖 4-1 至圖 4-4 依序為墾丁、北港、陽明山及東沙衛星追蹤站 APPS 系統之解算成果。

時間序列之靜態解算成果中，在(N、E、h)方向上點位座標較差絕對值範圍如表 4-1 所示、並計算較差之平均值及中誤差如表 4-2 所示。

表 4-1、APPS 解算成果時間序列分析之較差絕對範圍(單位:公尺)

| 測站    | N      | E      | h       |
|-------|--------|--------|---------|
| TNSM  | 0~0.11 | 0~0.13 | 0~0.119 |
| YMSM  | 0~0.09 | 0~0.09 | 0~0.120 |
| PKGGM | 0~0.11 | 0~0.18 | 0~0.079 |
| KDNM  | 0~0.05 | 0~0.09 | 0~0.127 |

表 4-2、APPS 時間序列之較差平均值及中誤差(單位:公尺)

| 測站    | N           | E           | h           |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| TNSM  | 0.018±0.044 | 0.031±0.031 | 0.003±0.005 |
| YMSM  | 0.019±0.036 | 0.034±0.026 | 0.030±0.005 |
| PKGGM | 0.034±0.032 | 0.046±0.038 | 0.040±0.006 |
| KDNM  | 0.016±0.03  | 0.028±0.032 | 0.042±0.048 |

由圖 4-1 墾丁衛星追蹤站之解算成果中，在 E 方向上，其點位座標呈現逐漸往西移動之趨勢，移動量約為 29 公分；在 N 方向以及高程方向上之變化幅度無明顯之趨勢。

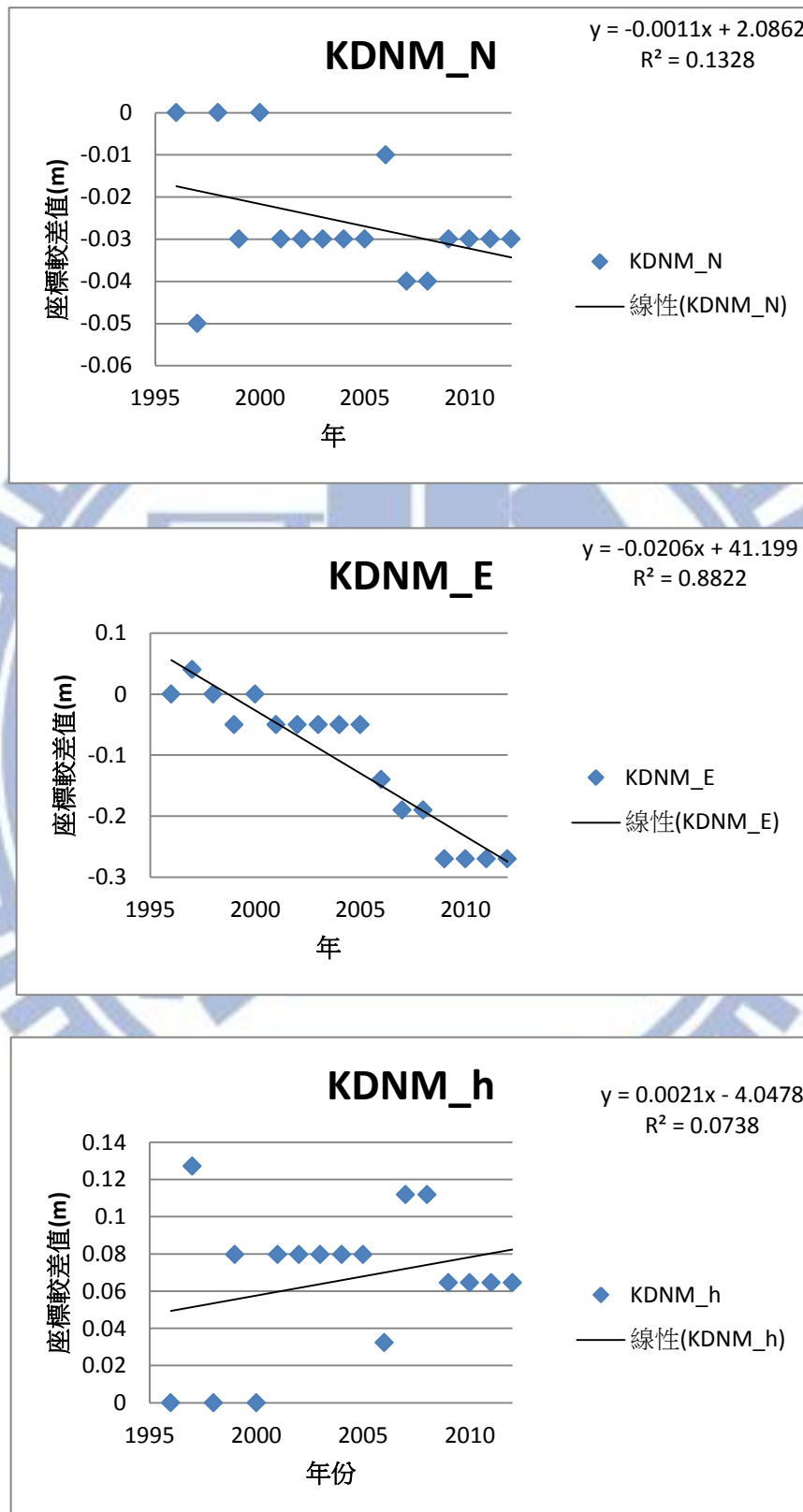


圖 4-1、使用 APPS 系統解算 KDNM 歷年座標變化圖

由圖 4-2 北港衛星追蹤站之解算成果中，在 N 方向上之變化呈現逐漸往南之趨勢，移動量約為 15 公分，在 E 方向上呈現逐漸往東之趨勢，移動量約為 60 公分；高程變化方向呈現逐年下降之趨勢，下降約為 42 公分，與其他衛星追蹤站之高程變化趨勢比較，北港衛星追蹤站之高程變化較穩定。

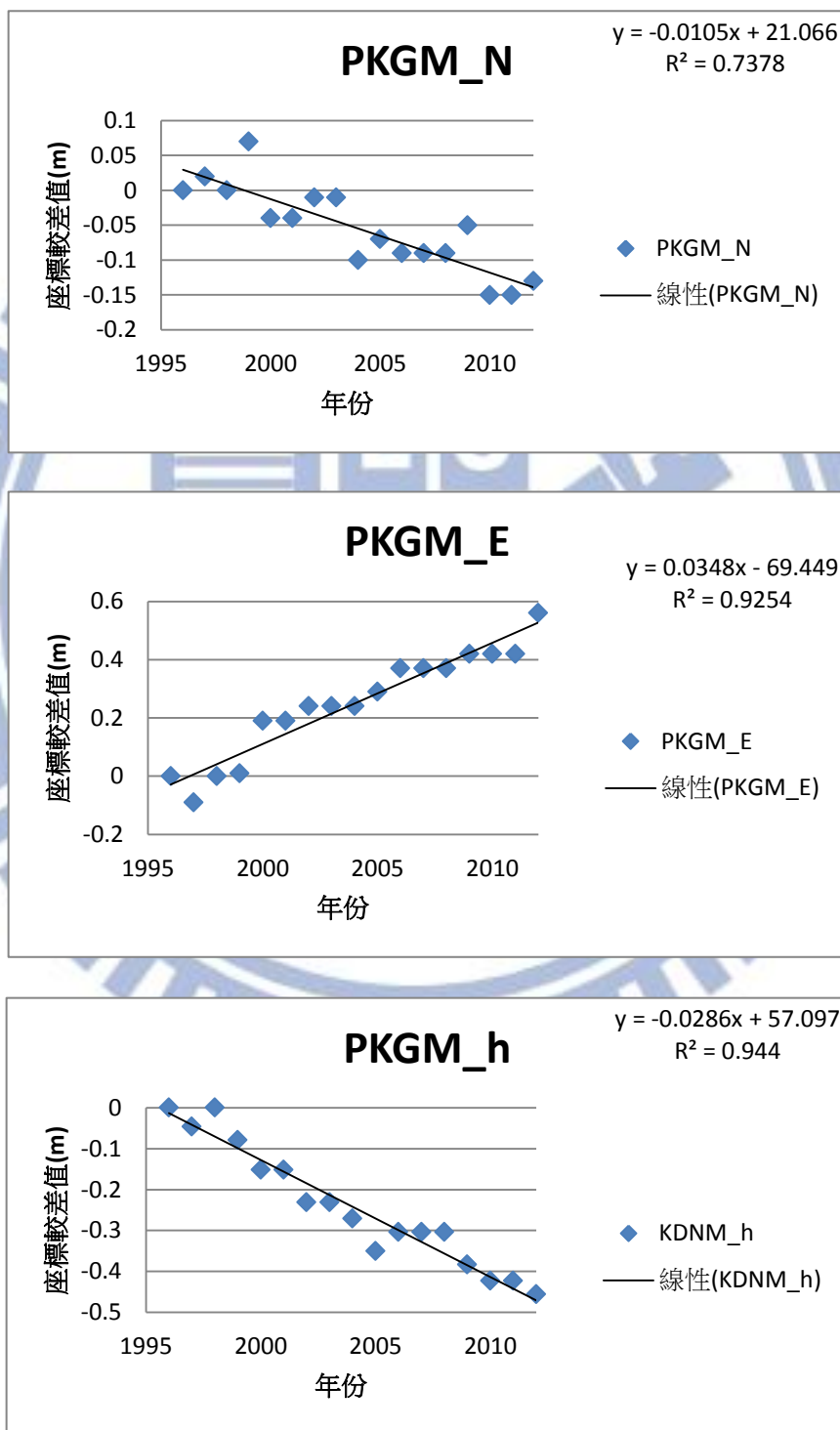


圖 4-2、使用 APPS 系統解算 PKGM 歷年座標變化圖



由圖 4-3 陽明山衛星追蹤站在 E 方向之解算成果中，可看出其點位變化趨勢為逐漸向東移動約 59 公分，而 N 方向及高程點位座標之解算成果變動幅度較大，點位往南移動約 24 公分，在高程方向上點位座標之變化較無一明顯趨勢。

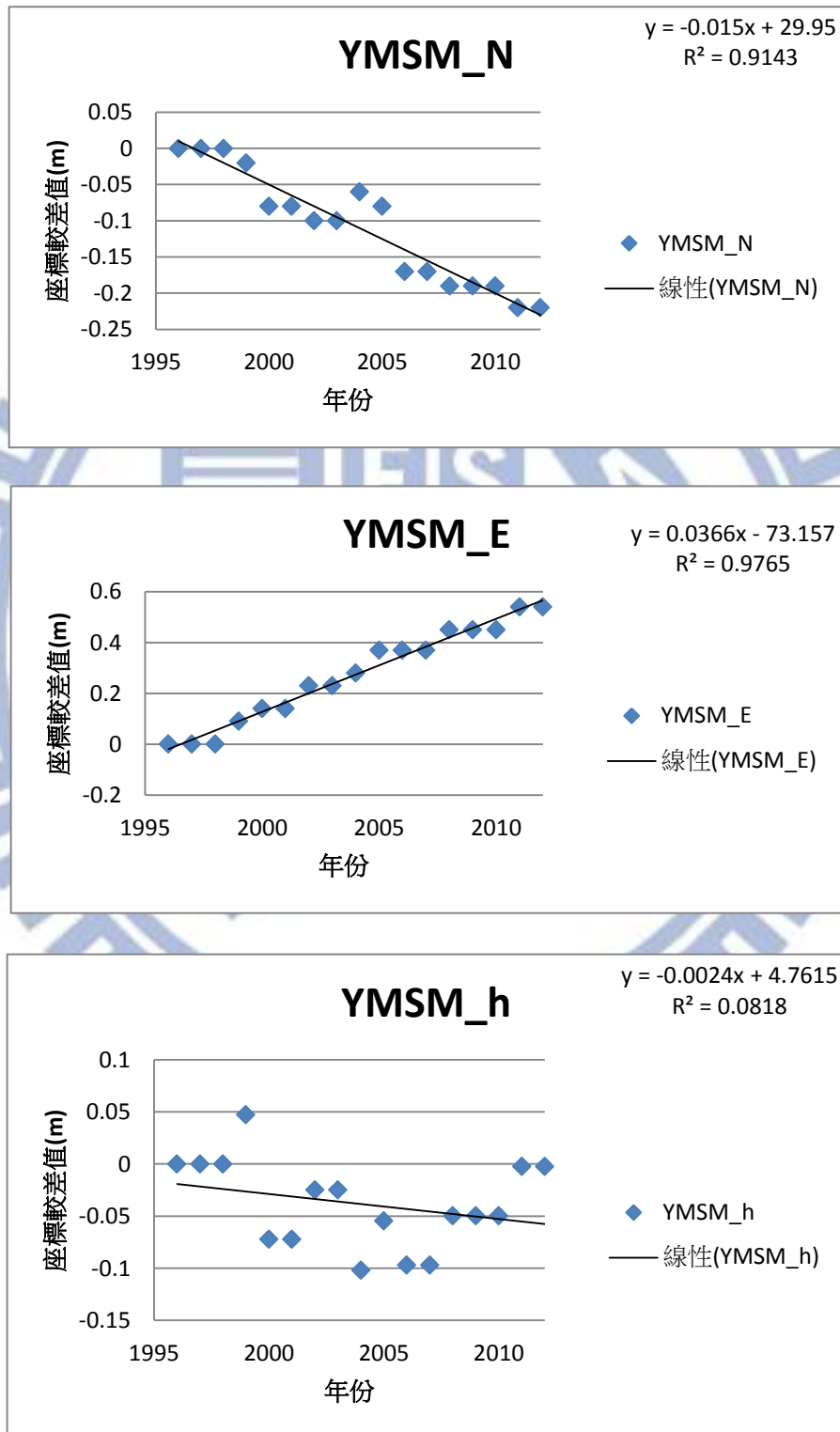


圖 4-3、使用 APPS 系統解算 YMSM 歷年座標變化圖

由圖 4-4 東沙衛星追蹤站解算成果中，在 N 方向上呈現往南移動之趨勢，移動量約為 20 公分；在 E 方向上呈現逐漸往東移動之趨勢，移動量約為 55 公分；在高程方向上無明顯之趨勢。

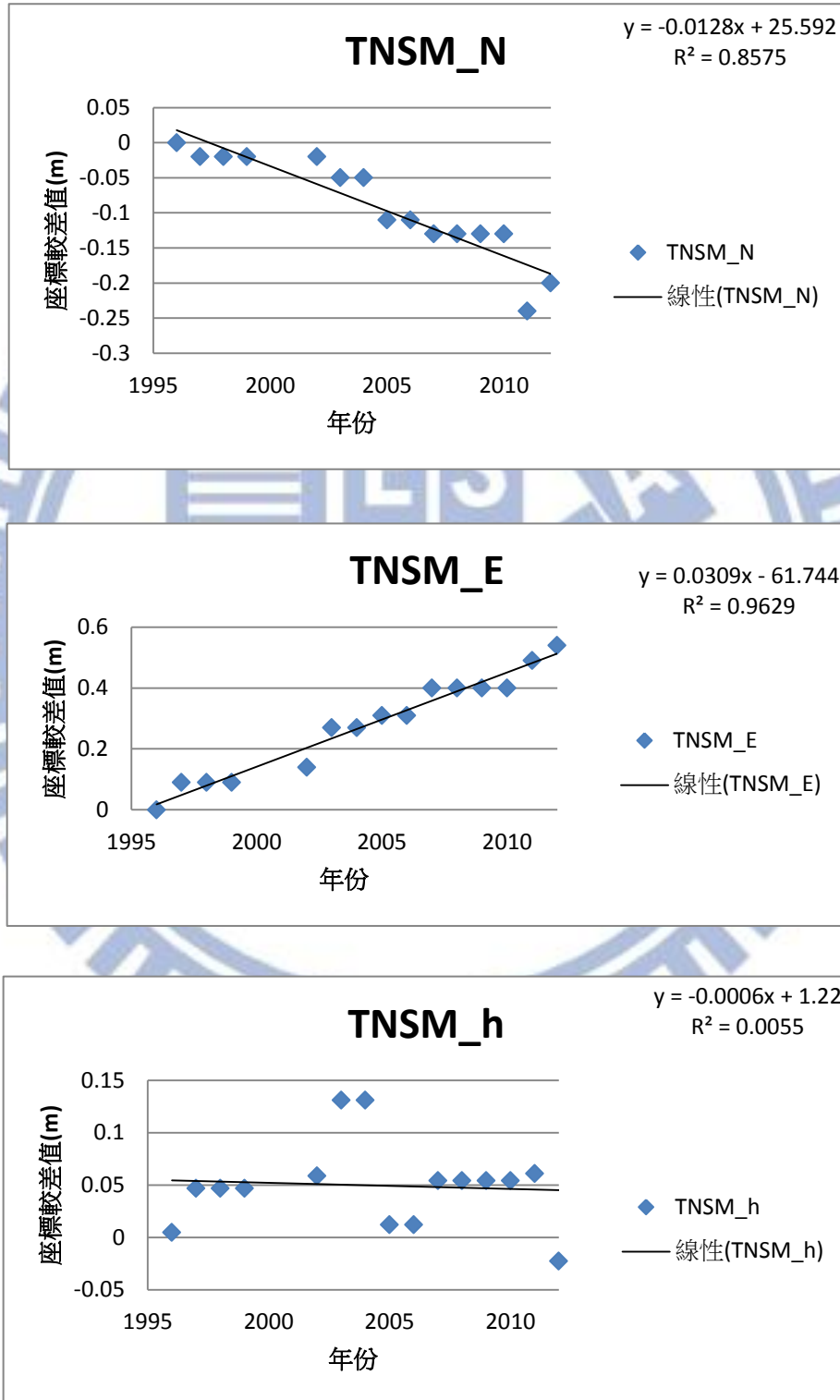


圖 4-4、使用 APPS 系統解算 TNSM 歷年座標變化圖

#### 4.1.1.2 CSRS 解算成果

使用 CSRS 系統進行精密單點定位解算後，將各衛星追蹤站解算成果在平面與高程之變化情形繪製如圖 4-5 至圖 4-8，由圖中可看到點位座標之變化情形。時間序列之靜態解算成果中，在(N、E、h)方向上點位座標較差絕對值範圍如表 4-3 所示並計算較差之平均值及中誤差如表 4-4 所示。

表 4-3、CSRS 解算成果時間序列分析之較差絕對範圍(單位:公尺)

| 測站   | N         | E         | h           |
|------|-----------|-----------|-------------|
| TNSM | 0~0.04    | 0~0.13    | 0.002~0.201 |
| YMSM | 0~0.06    | 0.01~0.1  | 0.001~0.153 |
| PKGM | 0.01~0.05 | 0.02~0.13 | 0.007~0.167 |
| KDNM | 0~0.07    | 0~0.07    | 0.002~0.129 |

表 4-4、CSRS 時間序列之較差平均值及中誤差(單位:公尺)

| 測站   | N           | E           | h           |
|------|-------------|-------------|-------------|
| TNSM | 0.016±0.012 | 0.034±0.031 | 0.049±0.064 |
| YMSM | 0.016±0.017 | 0.036±0.022 | 0.038±0.044 |
| PKGM | 0.021±0.015 | 0.044±0.030 | 0.043±0.040 |
| KDNM | 0.018±0.018 | 0.019±0.015 | 0.035±0.033 |

由圖 4-5 墾丁衛星追蹤站 CSRS 解算成果中，其座標點位在 E 方向上呈現往西移動之趨勢，移動量約為 28cm，在 N 及 E 方向上較無明顯趨勢。

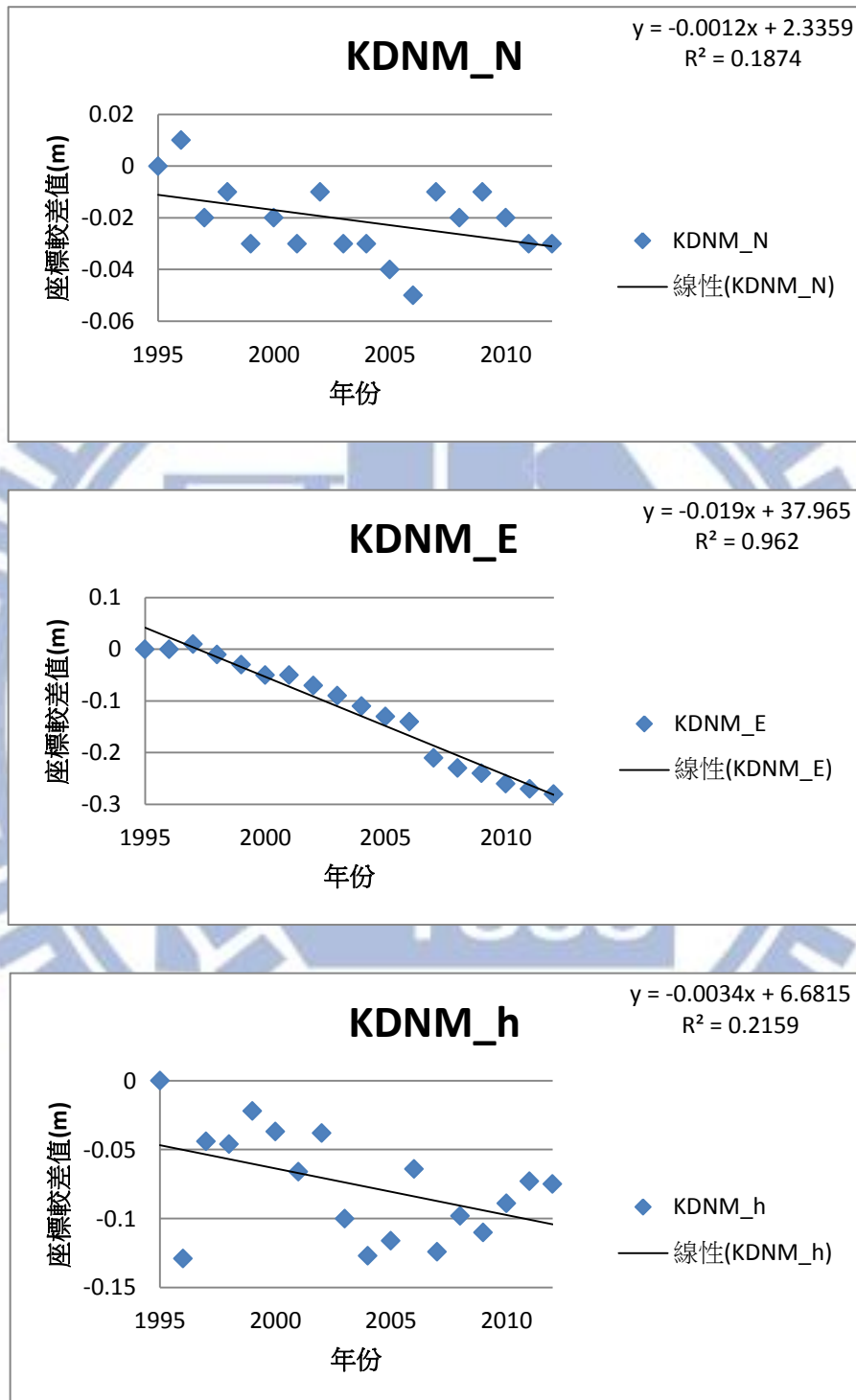


圖 4-5、使用 CSRS 系統解算 KDNM 歷年座標變化圖

圖 4-6 北港衛星追蹤站 CSRS 之解算成果中，點位座標在 N 方向上呈現往南移動之趨勢，移動量約為 13 公分；在 E 方向上，點位座標往東移動約為 60 公分，且逐年移動之速度穩定；在高程方向上呈現點位座標下降之趨勢，1995 年至 1996 年間以及 2002 年至 2003 年間其高程變化幅度較大，其他年間下降速度較穩定變化，平均一年約下降 3.5 公分。

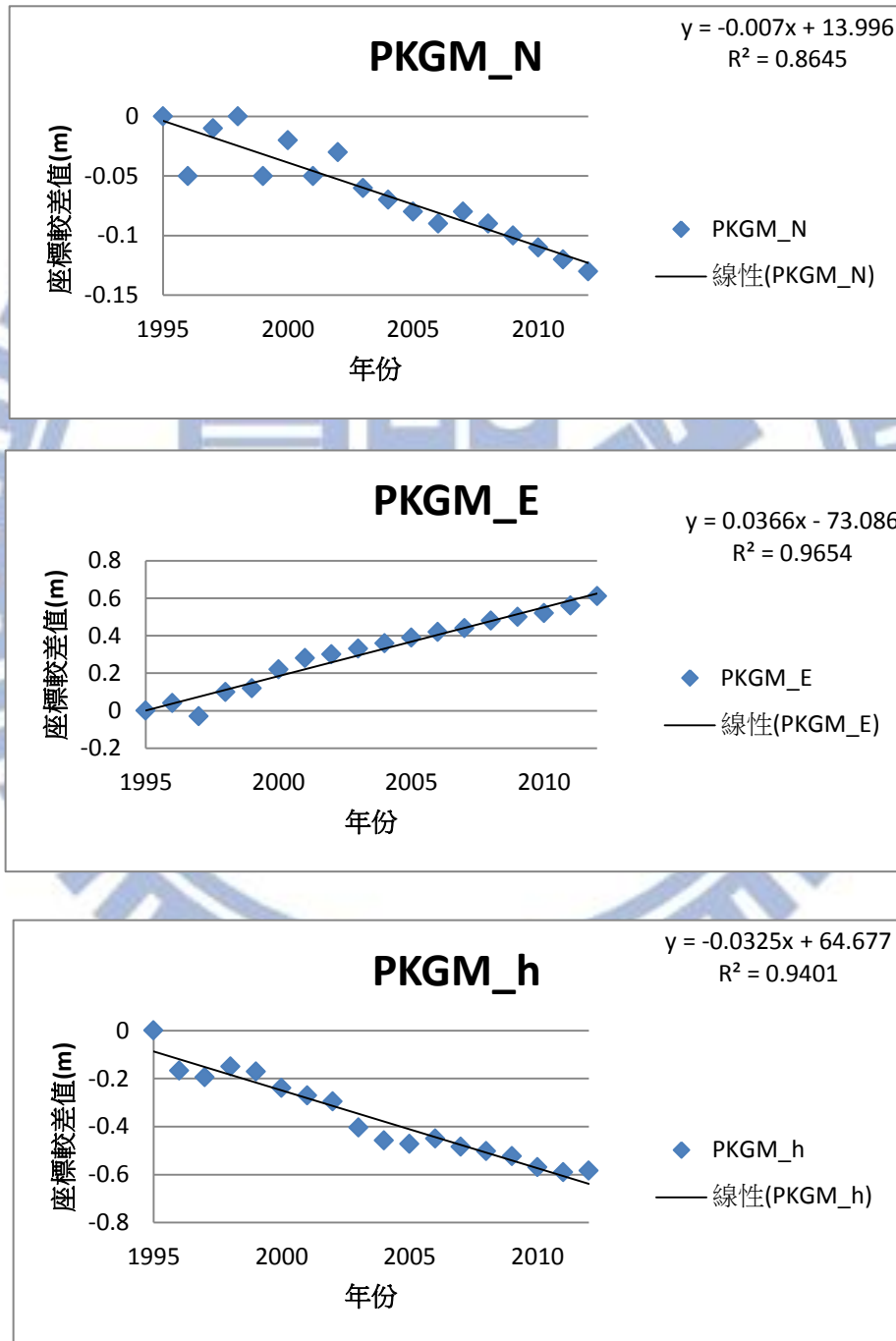


圖 4-6、使用 CSRS 系統解算 YMSM 歷年座標變化圖

由圖 4-7 陽明山衛星追蹤站 CSRS 之解算成果中，可看出點位座標在 N 方向呈現往南之趨勢，移動量約為 15 公分；E 方向呈現往東之趨勢，移動量約為 60 公分；而 h 方向無明顯趨勢。

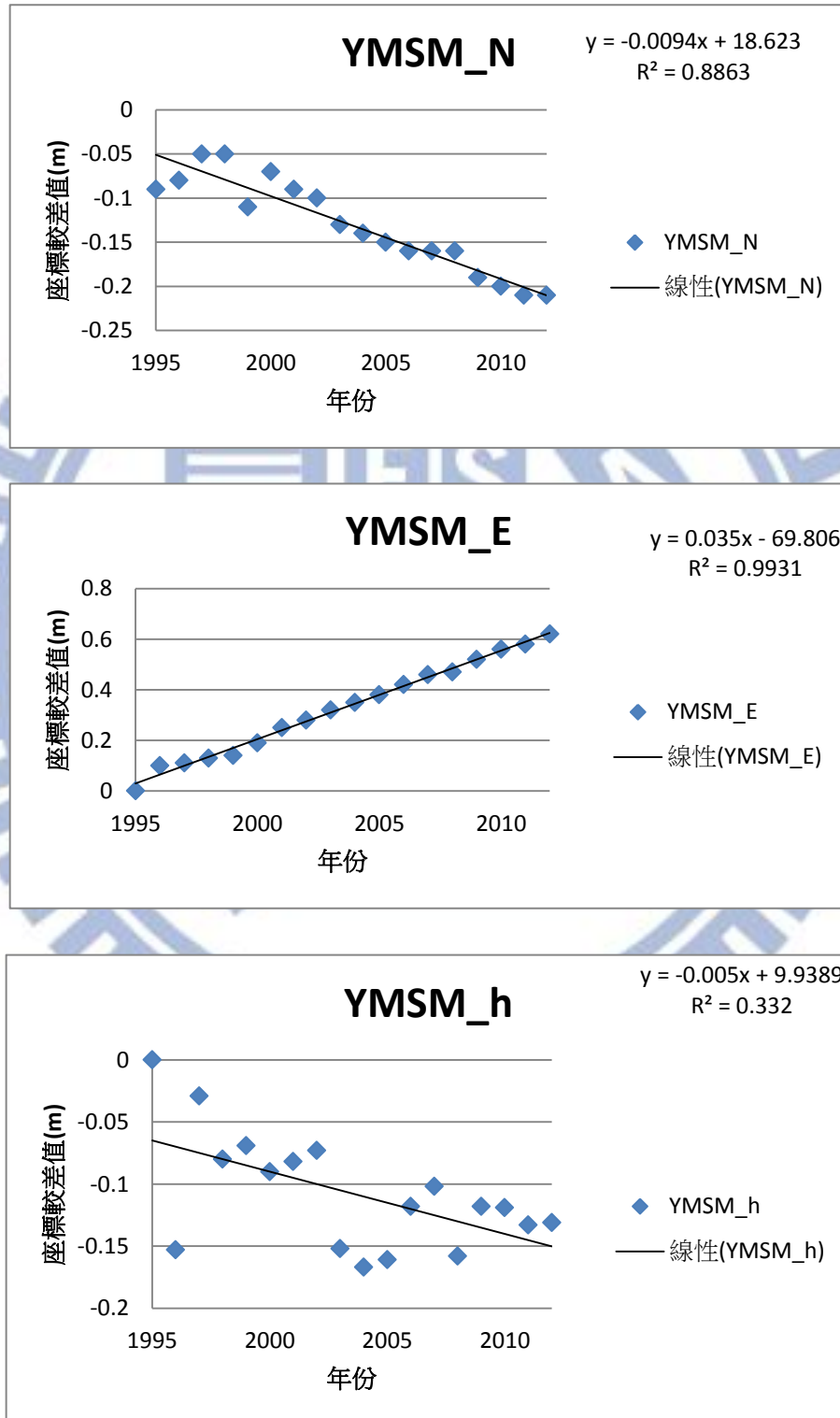


圖 4-7、使用 CSRS 系統解算 PKGM 歷年座標變化圖

由圖 4-8 東沙衛星追蹤站 CSRS 解算成果中，其點位座標在 N 方向呈現往南之趨勢，移動量約為 15 公分；在 E 方向上呈現往東之趨勢，移動量約為 50 公分，且點位座標移動速度呈現穩定；在 h 方向上，2004 年後之解算成果之變化幅度較小，呈現逐年下降之趨勢。

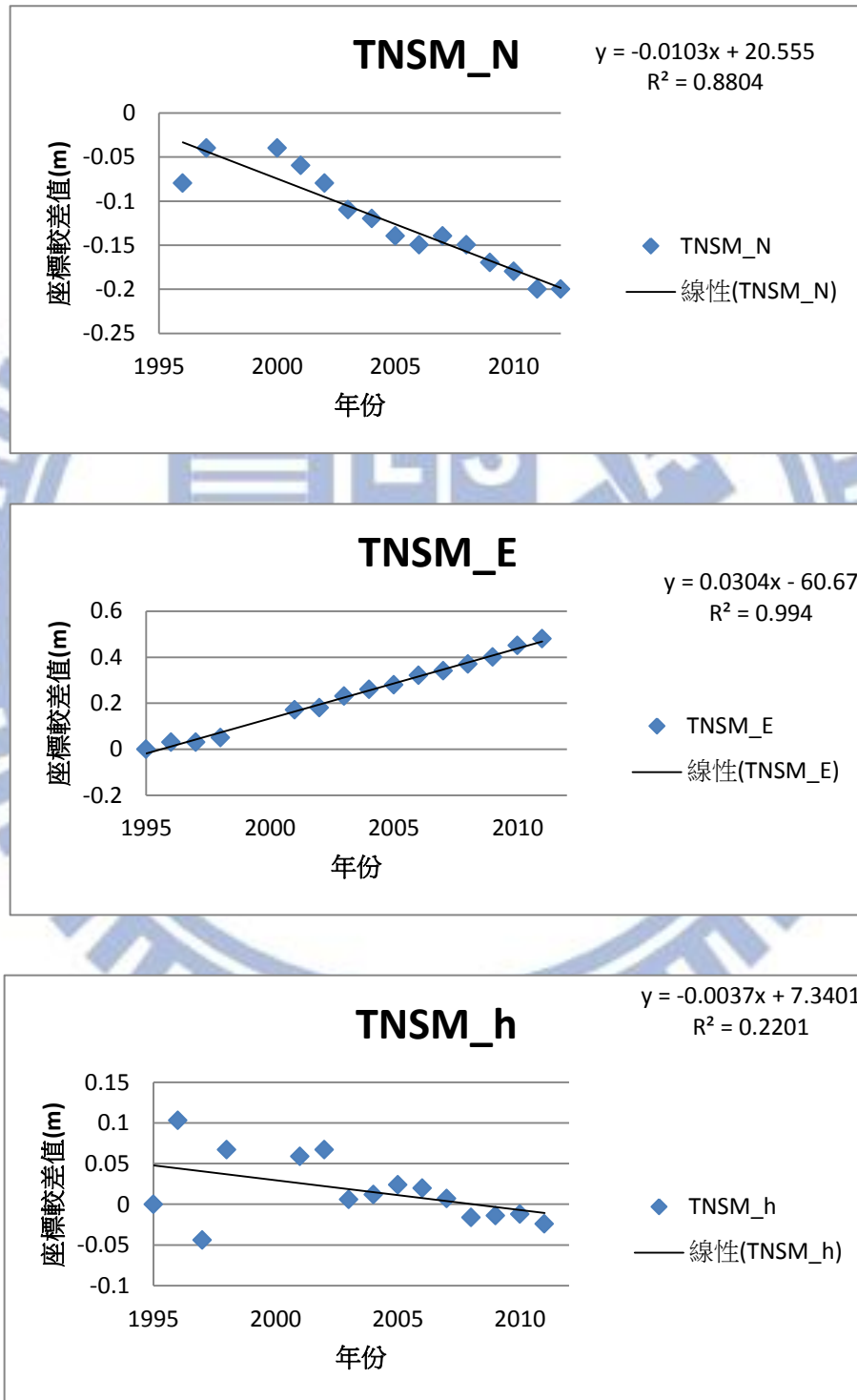


圖 4-8、使用 CSRS 系統解算 TNSM 歷年座標變化圖

### 4.1.1.3 GrafNav 解算成果

使用 GrafNav 進行精密單點定位解算後，將各衛星追蹤站每年解算成果繪製如圖 4-9~圖 4-12，以了解各衛星追蹤站在平面與高程之變化情形。在時間序列之靜態解算成果中，(N、E、h)方向上點位座標較差絕對值範圍如表 4-5 所示，並計算較差之平均值及中誤差如表 4-6 所示。

表 4-5、GrafNav 解算成果時間序列分析之較差絕對範圍(單位:公尺)

| 測站    | N         | E         | h           |
|-------|-----------|-----------|-------------|
| TNSM  | 0~0.05    | 0~0.06    | 0.002~0.051 |
| YMSM  | 0~0.14    | 0.02~0.12 | 0.002~0.088 |
| PKGGM | 0.01~0.03 | 0.01~0.07 | 0.002~0.067 |
| KDNM  | 0~0.07    | 0.01~0.37 | 0.011~0.137 |

表 4-6、GrafNav 時間序列之較差平均值及中誤差(單位:公尺)

| 測站    | N           | E           | h           |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| TNSM  | 0.021±0.016 | 0.034±0.017 | 0.002±0.015 |
| YMSM  | 0.026±0.040 | 0.045±0.027 | 0.033±0.024 |
| PKGGM | 0.015±0.007 | 0.33±0.018  | 0.028±0.019 |
| KDNM  | 0.025±0.021 | 0.076±0.108 | 0.047±0.039 |

由於東沙衛星追蹤站 2001 年和 2002 年之觀測檔數據異常造成匯入觀測檔時發生無法轉檔為 GrafNav 進行計算時之格式，而造成檔案匯入時發生錯誤而無法進行計算；在 1995~2000 之間，在 IGS 中僅提供精密星曆而無提供衛星時錶差之檔案，因此東沙衛星追蹤站解算時間序列中包含 2003~2012 年之解算成果。



由圖 4-9 東沙衛星追蹤站 GrafNav 解算成果中，其點位座標在 N 方向上呈現往南移動之趨勢，移動量約為 16 公分；在 E 方向上呈現逐漸往東之趨勢，移動量約為 30 公分；高程方向無明顯趨勢。

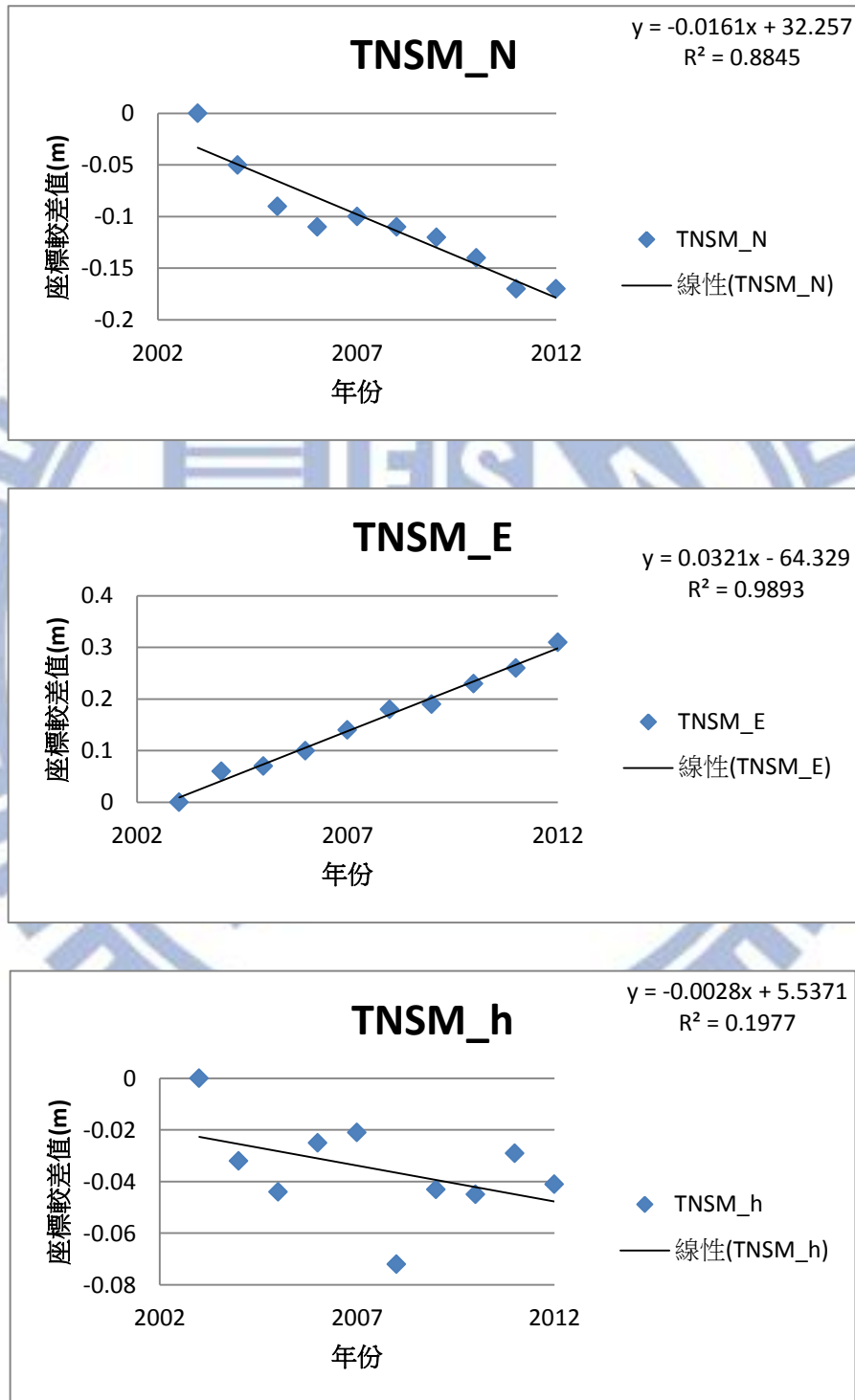


圖 4-9、使用 GrafNav 系統解算 TNSM 歷年座標變化圖

圖 4-10 墾丁衛星追蹤站 GrafNav 解算成果中，在 E 方向上呈現往東之趨勢，移動量約為 30 公分；在 N 方向及高程方向無明顯趨勢。

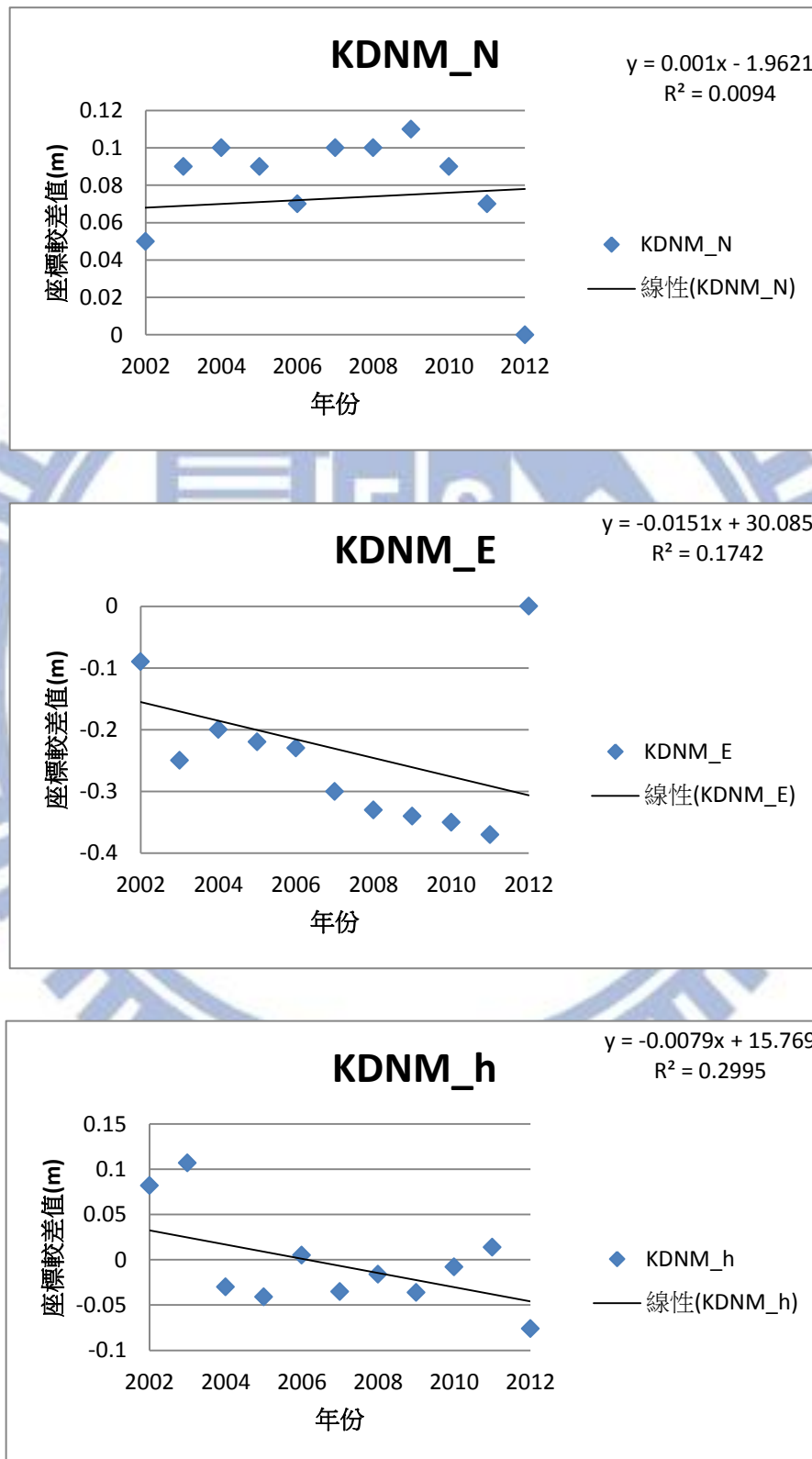


圖 4-10、使用 GrafNav 系統解算 KDNM 歷年座標變化圖

由圖 4-11 北港衛星追蹤站 GrafNav 解算成果中，其點位座標在 N 方向上呈現逐年往南之趨勢，移動量約為 10 公分；在 E 方向上呈現往東移之趨勢，移動量約為 30 公分；在高程方向呈現下降之趨勢，移動量約為 25 公分。

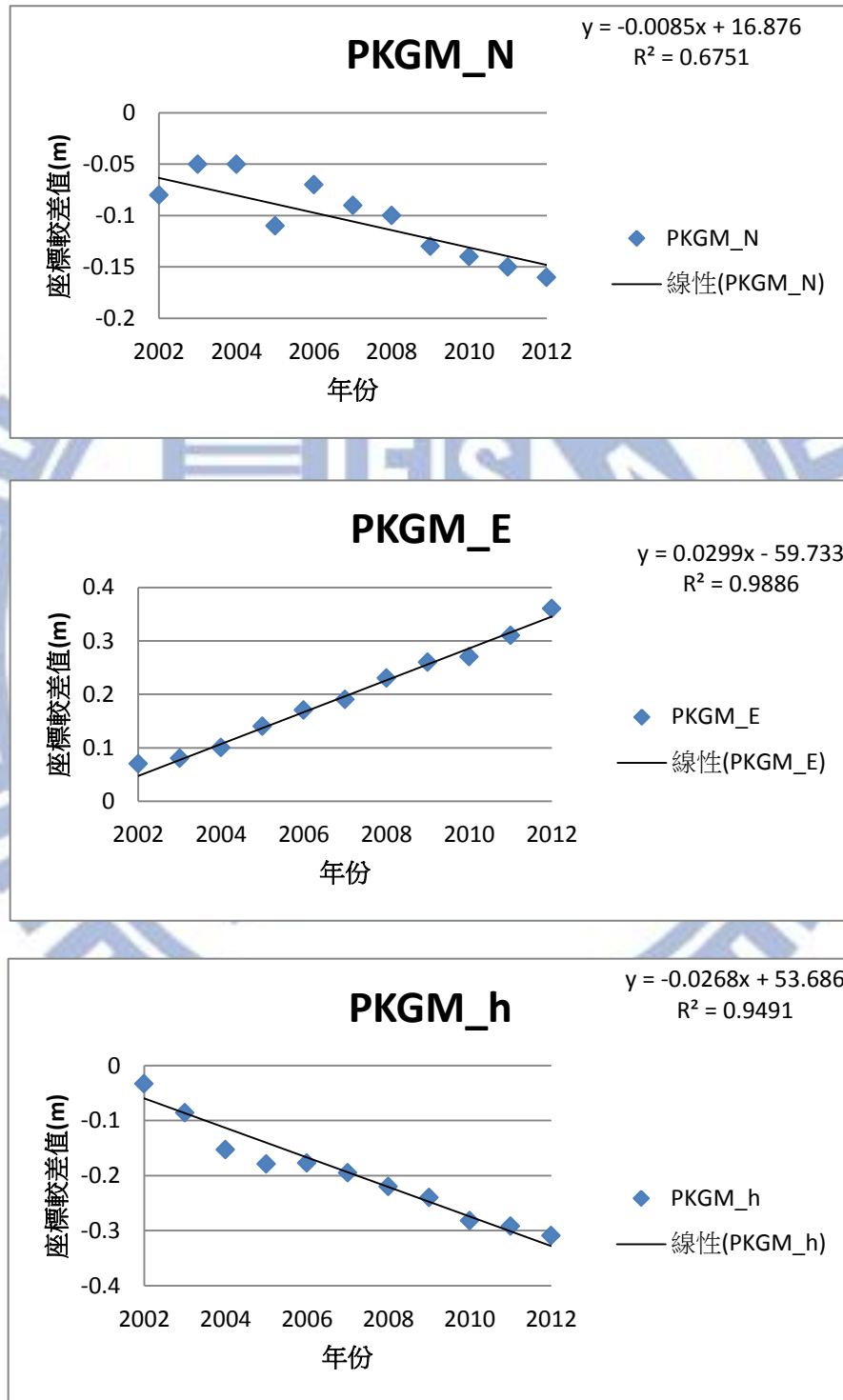


圖 4-11、使用 GrafNav 系統解算 PKGM 歷年座標變化圖

由圖 4-12 陽明山衛星追蹤站 GrafNav 解算成果中，其點位座標在 N 方向上呈現往南之趨勢，移動量約為 25 公分；在 E 方向上呈現往東之趨勢，移動量約為 55 公分；在高程方向無明顯趨勢。

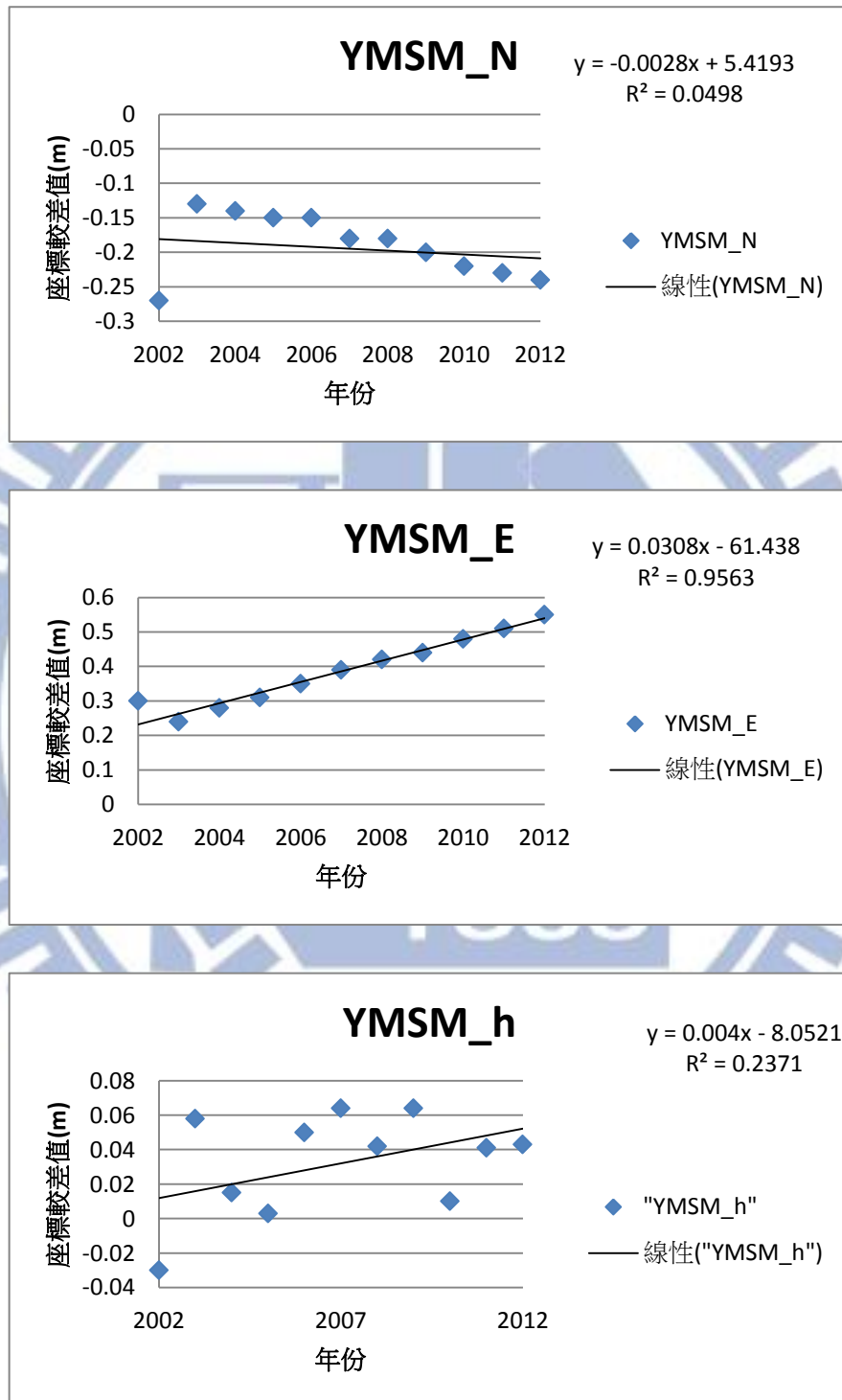
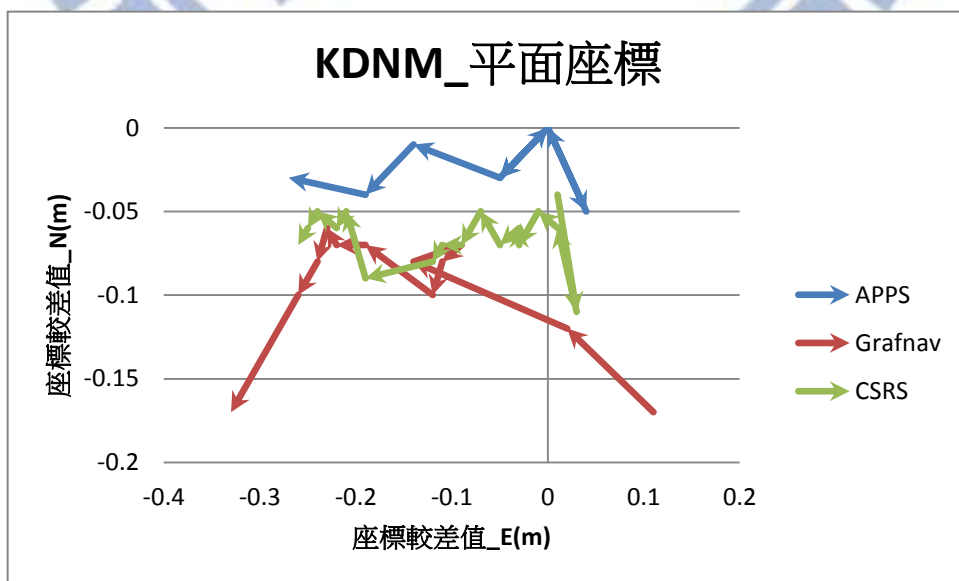
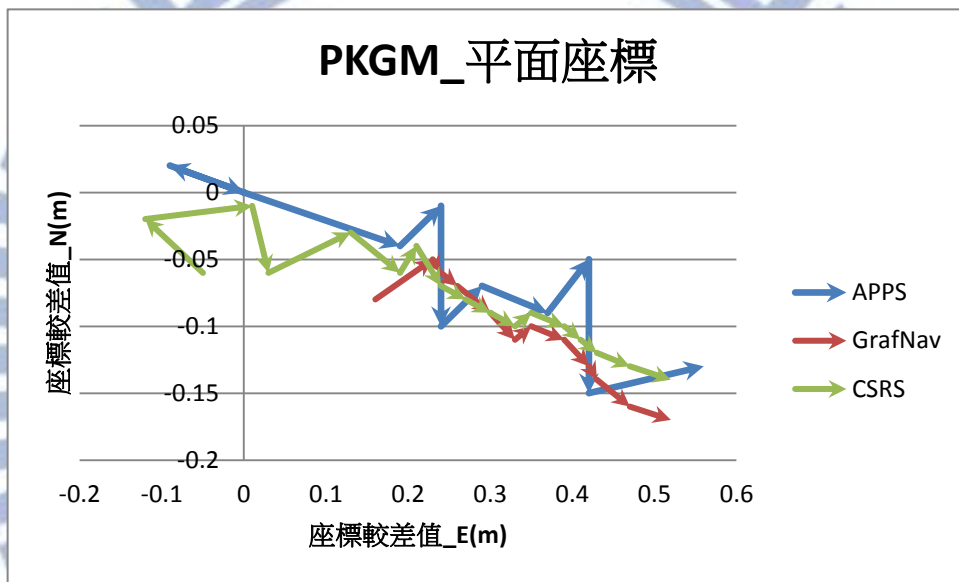


圖 4-12、使用 GrafNav 系統解算 TMSM 歷年座標變化圖

#### 4.1.1.4 各衛星追蹤站平面座標分析

將 APPS、GrafNav 及 CSRS 之平面成果比較其成果圖如圖 4-13 所示，可看出北港、陽明山及東沙衛星追蹤站其平面座標點位變化趨勢逐漸以東南方方向移動，而墾丁衛星追蹤站之平面座標點位變化方向以西南方向為趨勢。

對照 IGS 在臺灣地區所設置之衛星追蹤站之點位座標變化，IGS 衛星追蹤站設置位置位於歐亞板塊上，其點位變化在 E 方向上呈現逐漸往東之趨勢，在 N 方向呈現逐漸往南之趨勢，與陽明山、北港及東沙衛星追蹤站點位變化趨勢相同。



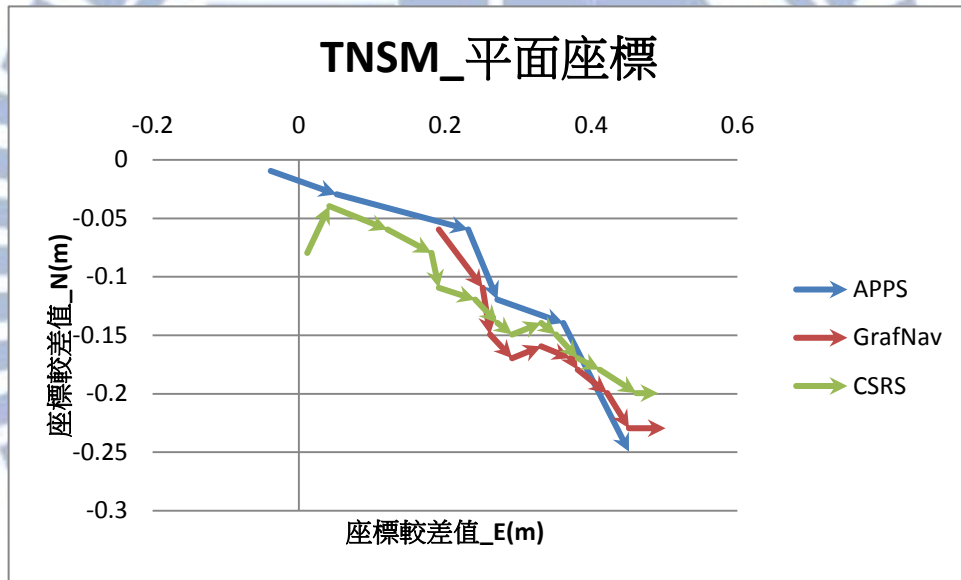
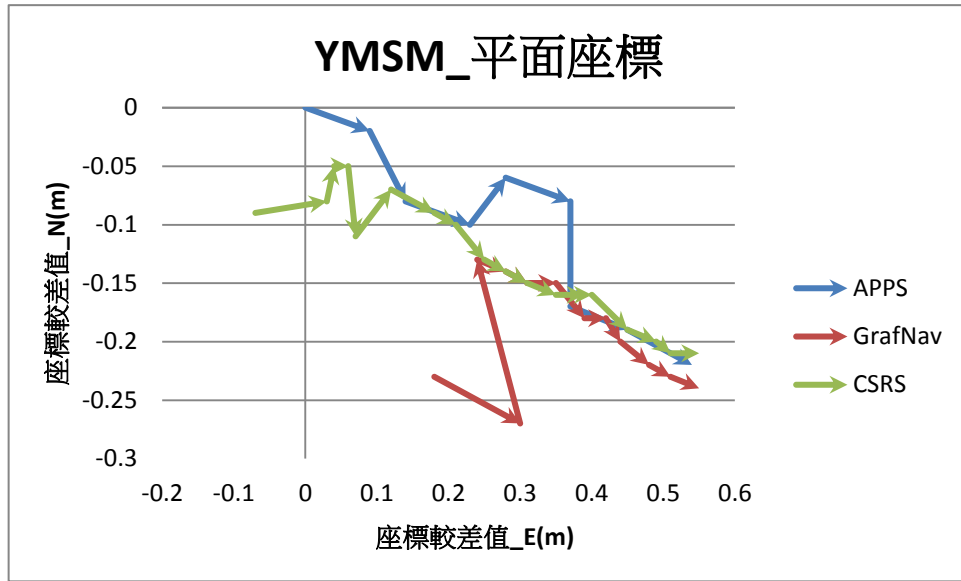
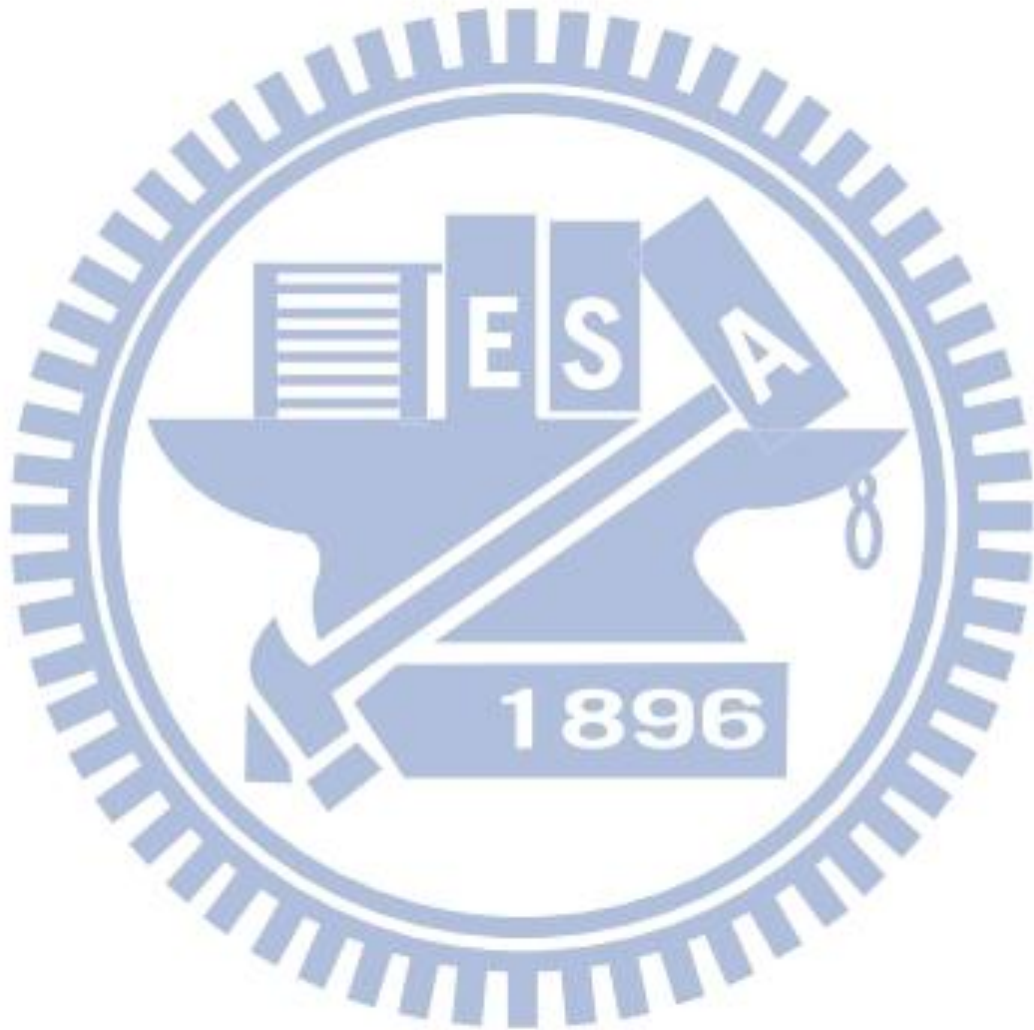


圖 4-13、YMSM、PKGM、KDNM 及 TNSM 四個衛星追蹤站之平面點位坐標變化趨勢

#### 4.1.2 近三年中 2 月及 8 月第一周進行精密單點解算

此部分以 2010、2011、2012 三年時間序列段（各年 2 月 1 日至 2 月 7 日）以及 2009、2010、2011 三年時間序列段（各年 8 月 1 日至 8 月 7 日）總共六個時間序列段作為基礎，將陽明山、北港、墾丁、東沙共 4 個衛星追蹤站全天靜態觀測資料進行 CSRS-PPP、APPS 以及 GrafNav 精密單點定位解算。其計算成果如圖 4-14 至 4-17 所示，圖中橫坐標之分區中區域 1 所對應之時間序列為 2010 二月及 2009 八月，區域 2 所對應之時間序列為 2011 二月及 2010 八月，區域 3 所對應之時間序列為 2012 二月及 2011 八

月，由點位坐標變化情形觀察季節氣流對於衛星追蹤站座標變化之影響。陽明山衛星追蹤站受到季節氣流之影響較明顯，比較 N 方向 2009 年 8 月及 2010 年 2 月之座標值，可發現點位有向南偏移之情形，在 E 方向上點位座標則有往西移之情形，在 h 方向上點位座標有增高之情形，陽明山衛星追蹤站三年之變化具有相同之趨勢。在其他衛星追蹤站受到季節氣流影響之情形則較不明顯。



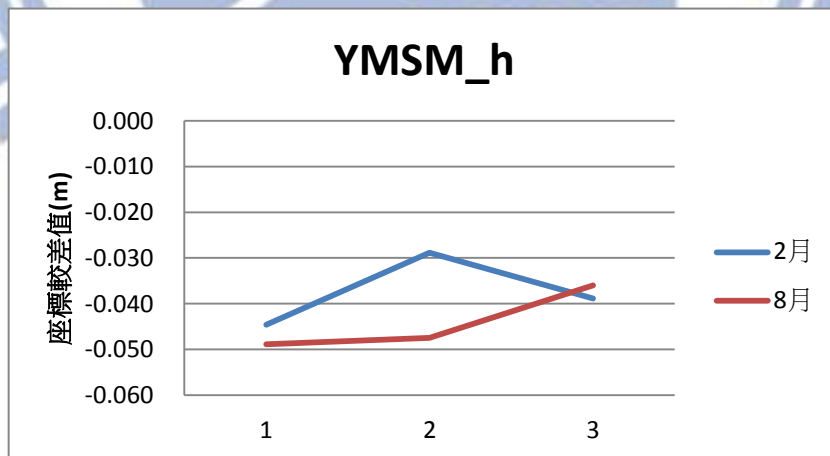
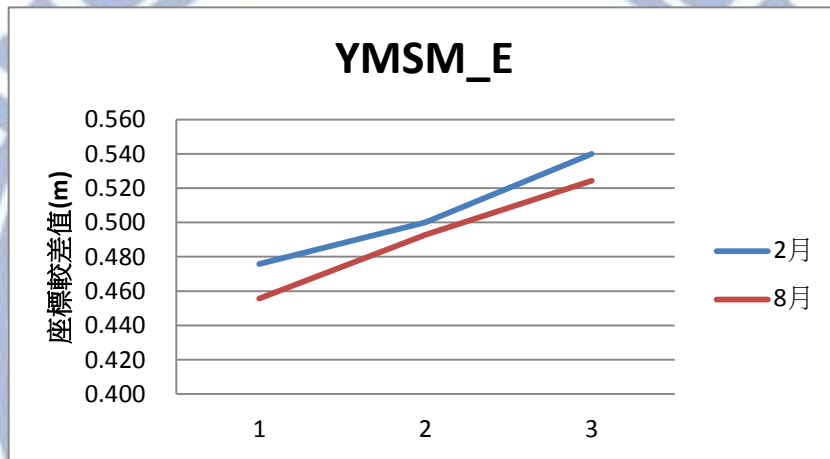
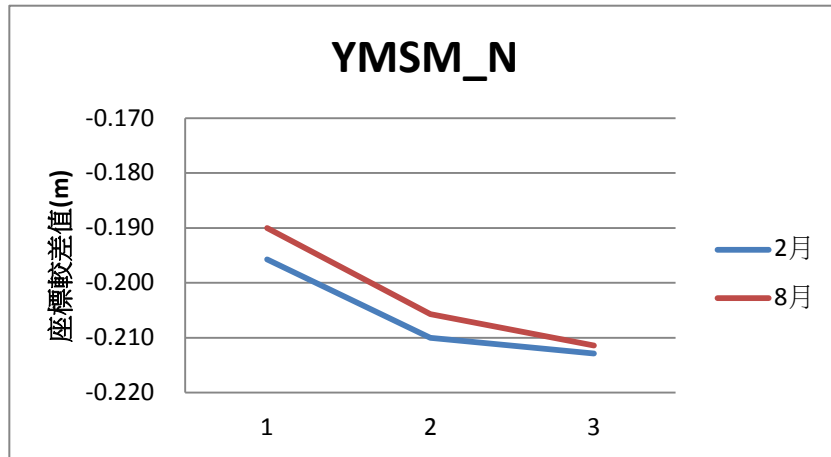


圖 4-14、YMSM 衛星追蹤站點位解算成果圖



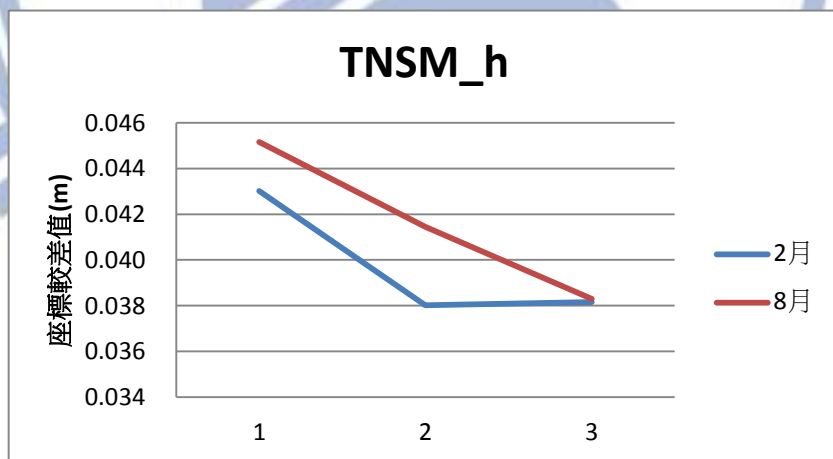
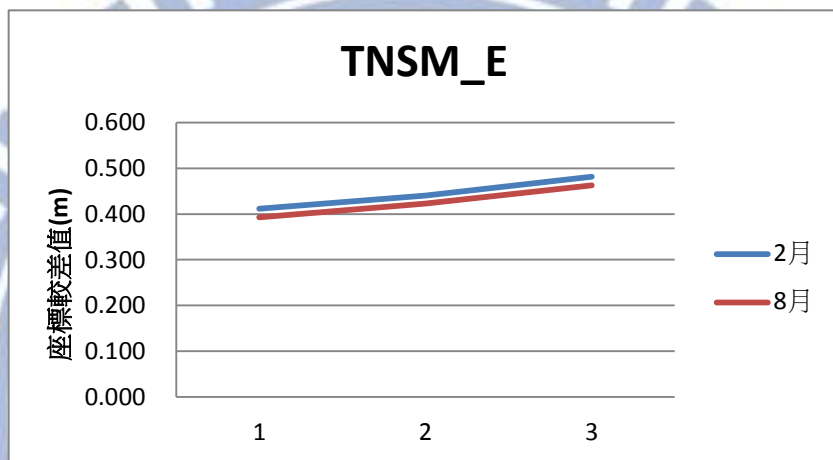
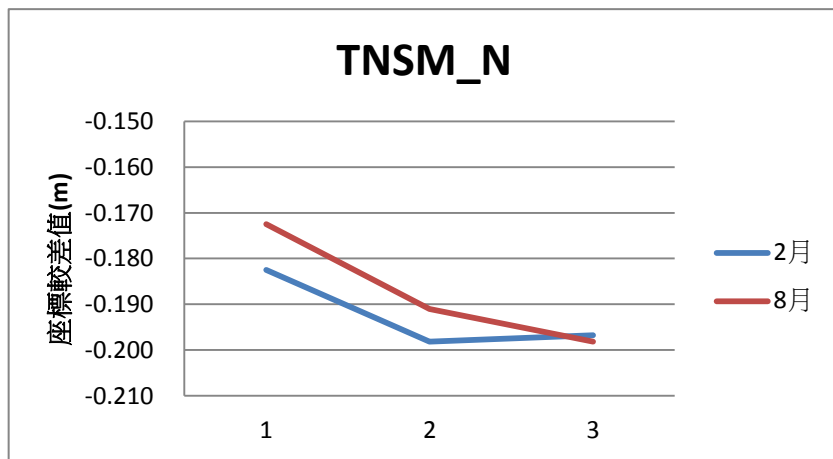


圖 4-15 、TNSM 衛星追蹤站點位解算成果圖

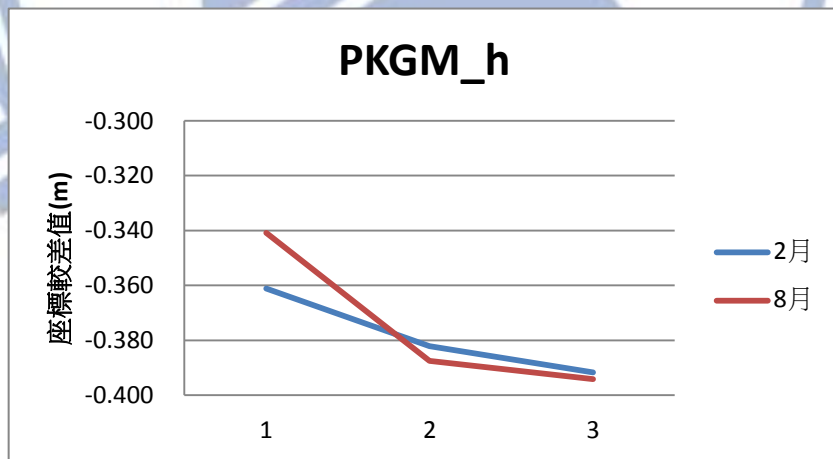
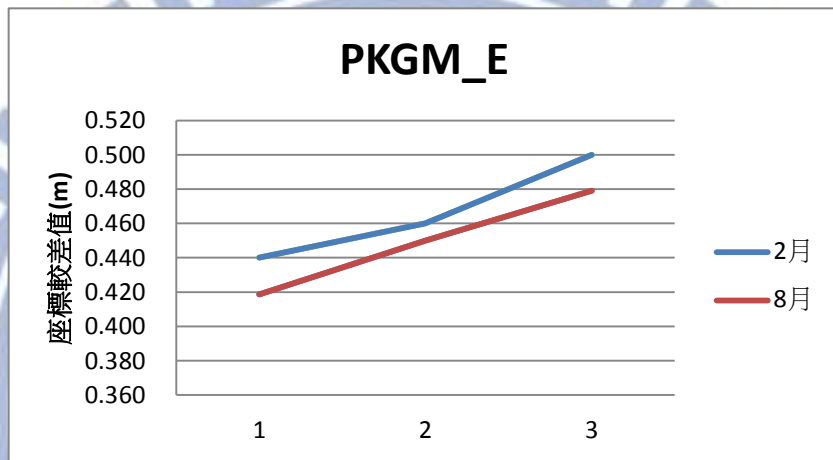
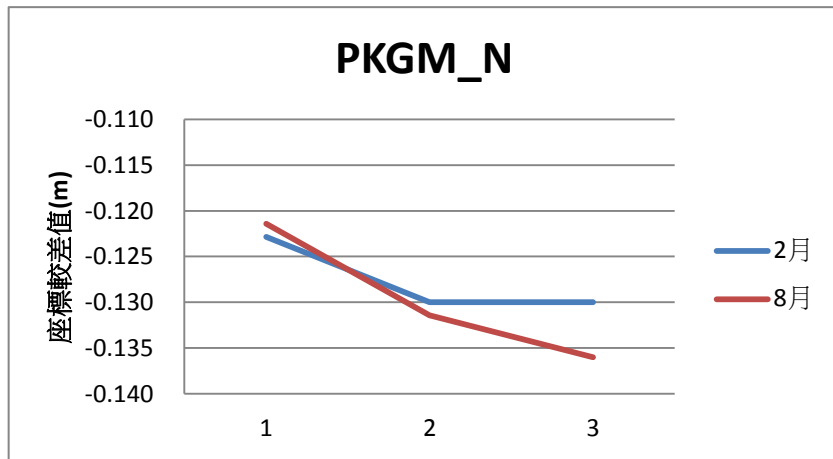


圖 4-16、PKGM 衛星追蹤站點位解算成果圖

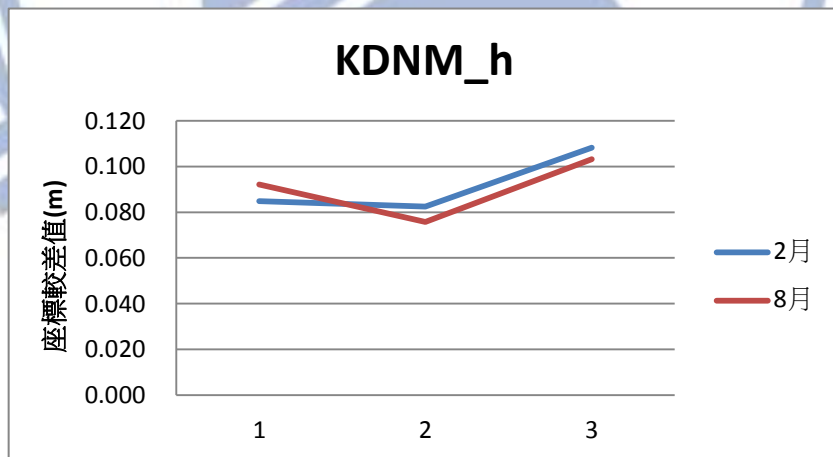
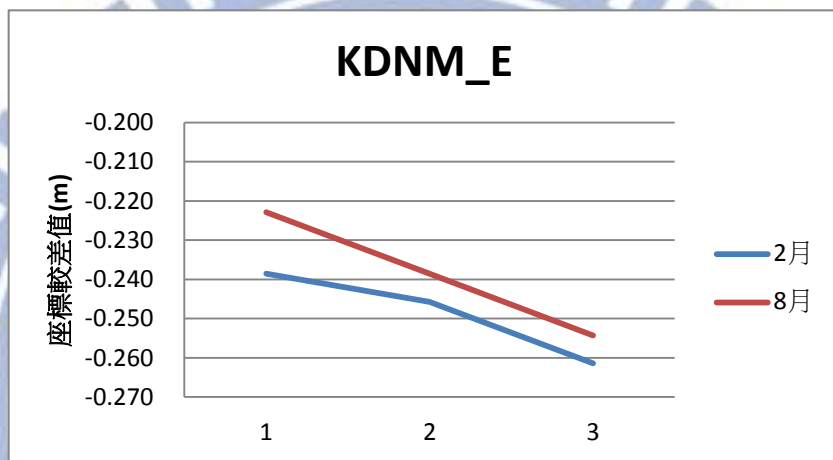
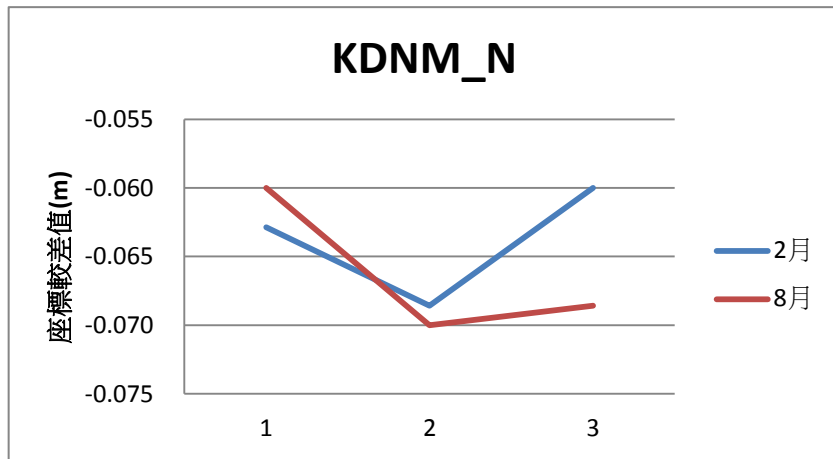


圖 4-17、KDNM 衛星追蹤站點位解算成果圖

## 4.2 實驗成果分析

使用 CSRS-PPP、APPS、GrafNav 進行精密單點定位之解算成果中，APPS 系統以及 CSRS-PPP 所解算出的座標值有 ITRF 卡氏座標(X,Y,Z)與 GRS80(Geodetic Reference System 1980)之經緯度、橢球高值，而 GrafNav 所解算出之成果以 WGS84 之經緯度、橢球高值所表示，本研究以 PROJ.4 軟體將解算成果經緯度之數據成果轉換為二度分帶橫向麥卡脫投影坐標系統已進行分析。

將四個衛星追蹤站解算成果進行回歸分析後，由成果可看出在 1995 年至 2012 年間，東沙衛星追蹤站平面座標每年座標移動量有一趨勢存在，在 N 方向上往南移約 17 公分，在 E 方向往東移約 31 公分，在高程方向上其點位座標變化趨勢較不一致，其高程值約下降 4 公分。在北港衛星追蹤站之解算成果中，可看出 N 方向上往南移動約 9 公分，在 E 方向上往東移動約 36 公分，其高程值之變化趨勢為下降 31 公分。而陽明山衛星追蹤站之解算成果中，其 N 方向之點位座標逐漸往南移動約 1 公分，其 E 方向之點位座標變化量逐漸往東移動約 37 公分。由墾丁衛星追蹤站之解算成果中，其 N 方向點位座標往南移動約 3 公分，E 方向點位座標約往西移動 44 公分，高程下降約 8 公分。可看出東沙、陽明山、北港衛星追蹤站點位座標變化趨勢為逐漸往東南方移動，而墾丁衛星追蹤站點位座標變化趨勢為逐漸往西方移動，對照於衛星追蹤站與板塊位置之相對分布圖，可推測板塊運動之變化方向。

## 第五章 結論與建議

本研究利用 CSRS-PPP、APPS 以及 GrafNav 解算兩組 GPS 衛星觀測數據:第一組為 1995 年至 2012 年每年各選擇一天之 4 個衛星追蹤站觀測資料;第二組為近三年內依照季節選擇每年 2 月及 8 月之衛星追蹤站觀測資料,就各測站之座標變化進行比較分析。

比較 CSRS-PPP 與 APPS 兩套線上即時計算精密單點定位系統,兩套系統都具有解算速度、操作介面以及解算能力高之優點。兩套服務系統提供進行 PPP 計算所需使用之精密星曆與衛星時錶差來源不同,CSRS-PPP 會自動下載當時能夠使用的精度最好的精密星曆以及衛星時錶誤差資料,而 APPS 所使用的精密星曆以及衛星時錶誤差資料室由 NASAJPL 所提供。使用者可依自行需求選擇適合之線上即時計算服務系統。

由 GrafNav 歷年座標變化圖觀察各衛星追蹤站從 1995 年至 2012 年之點位變化關係,在平面座標(N,E)方向,北港衛星追蹤站、東沙衛星追蹤站之點位座標變化情形較穩定,在高程座標 h 方向,北港衛星追蹤站呈現逐年下降之趨勢,其他衛星追蹤站之座標位移變化情形則較分散。陽明山、北港及東沙衛星追蹤站位於歐亞板塊上,其點位變化趨勢皆逐漸以東南方之方向移動,墾丁衛星追蹤站位於菲律賓海板塊,其點位變化趨勢逐漸以西方之方向移動,可看出其板塊運動所造成之地表點位變位方向情形。

分析季節氣流對衛星追蹤站座標之影響由三年之數據觀察中,在陽明山衛星追蹤站可觀察出一趨勢,但在其他衛星追蹤站其點位變化趨勢與季節氣流較無相關。

## 參考文獻

- 內政部，2012。衛星定位系統介紹-衛星追蹤站選站原則，內政部地政司衛星測量中心。  
URL: <http://www.gps.moi.gov.tw/SSCenter/Introduce/IntroducePage.aspx?Page=GPS3>  
(上次查詢:2012-7-28)
- 邱煥欽，2008。台灣 e-GPS 衛星基準站位移變化之研究，國立交通大學碩士論文。
- 張紫玲，2004。台灣地區衛星追蹤站 1999-2002 年位移速度場之分析，國立成功大學碩士論文。
- 曾清涼、儲慶美，1999。GPS 衛星測量原理與應用第二版，國立成功大學衛星資訊中心。
- 臺北市地政局，2012。全球衛星定位原理，臺北市政府地政局土地開發總隊。URL: <http://www.lda.taipei.gov.tw/ct.asp?xItem=18643&CtNode=3258&mp=111011> (上次查詢:2012-10-23)
- 蔡旻穎，2007。台灣 GPS 連續觀測站坐標時間序列分析方法研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
- 饒瑞鈞、景國恩、侯進雄，2006。地殼變型的監測，台灣活斷層與地質災害研討會，花蓮。
- Ghoddousi, R. and F. P. Dare, 2006. Online GPS Processing Services : an initial study, GSP Solution, 10:pp12-20.
- International GNSS Service, 2009. IGS products, URL : <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> (上次查詢:2012-7-26)
- ITRF, 2009. The international reference frame, URL: <http://itrf.ensg.ign.fr/>(上次查詢:2012-10-15)
- Leick, A., 2004. GPS satellite surveying, John Wiley & Sons
- Natural Resources Canada, 2004. Canadian Spatial Reference System-Online Database, URL: [http://webapp.csr.ncan.gc.ca/field/Scripts/CSRS\\_PPP\\_main\\_e.pl](http://webapp.csr.ncan.gc.ca/field/Scripts/CSRS_PPP_main_e.pl). (上次查詢 : 2012-7-28)
- Natural Resources Canada, 2009. Canadian Spatial Reference System-Online Database, URL: [http://webapp.csr.ncan.gc.ca/field/Scripts/CSRS\\_PPP\\_main\\_e.pl](http://webapp.csr.ncan.gc.ca/field/Scripts/CSRS_PPP_main_e.pl). (上次查詢 : 2012-7-28)
- NovAtel, (2009). A NovAtel Precise Positioning Product GrafNav/GrafNet User Manual. NovAtel Inc.
- Shen, X. and Gao, Y. (2002). Kinematics Processing Analysis of Carrier Phase-based Precise Point Positioning. Proceeding of FIG XXII International Congress, Washington, DC.
- Witchayangkoon, B., 2000. Elements of GPS Precise Point Positioning, PH.D. dissertation, University of Maine, Orono, Maine.
- Zumberge, J.F., M.B. Hefflin, D.C. Jefferson, M.M. Watlins, F.H. Webb, 1997. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data form Large Networks, Journal of Geophysical Research, 102(B3):5005-5017.