

## 利用 GPS 連續站監測九芎坑斷層活動特性 與地區性訊號分析

### A Study on the Characteristics and Regional Signals for Chiuchungkeng Fault with Continuous GPS Stations

翁志傑<sup>1</sup>  
Chih-Chieh Weng

鄭凱謙<sup>1,\*</sup>  
Kai-Chien Cheng

王維豪<sup>1</sup>  
Wei-Hau Wang

#### 摘要

台灣主要的地震多發生於西部地區造山前緣附近，本研究選定台灣西部雲林至台南造山帶前緣地區的九芎坑斷層進行全球定位系統(GPS)的連續觀測分析，以便了解此地區地表活動的行為，所得之結果可作為未來此地區大地基準更新或維護的參考。為了連續監測九芎坑斷層的活動，了解其地表變化量，中正大學地環系架設了10個全球定位系統之CGPS站(Continuous GPS stations, CGPS stations)，配合經濟部中央地質調所的7個CGPS站，共同構成一個地區性的GPS監測網，研究使用的是Bermese V.5.0來解算各CGPS站之坐標解，以便於觀察九芎坑斷層在地表的變化量，及斷層活動特性與地區性訊號，研究的時間段為2007年9月1日至2010年12月31日，共1218天。本CGPS監測網在每年5月至10月間，CGPS站的坐標每日解有明顯離散的現象(大約為 $\pm 2$  cm)，與台灣梅雨和颱風季節的時段相符，在以FFT檢驗後，發現三條基線的最顯著信號之頻率為一年一次，符合台灣的乾濕季。為了確定離散顯著的時段是由乾濕季的因素所影響，因此使用每日雨量資料加以比對，發現一年最大的降雨量都落在離散之時段，大約為7到9月，且頻譜的結果與乾濕季吻合。GPS觀測所得的斷層壓縮量介於 $3.61 \pm 0.48$ 到 $6.15 \pm 0.68$  mm之間，由北向南遞增，斷層整體是在被擠壓的狀況，並且發現在斷層的北端有右移的量( $0.99 \pm 0.31$  mm)，最後測試模擬出九芎坑斷層面的可行性。

**關鍵詞：**GPS 連續站、季節信號、壓縮量。

#### Abstract

Major earthquakes generally occurred in western Taiwan. This study uses Continuous Global Positioning System (CGPS) stations from Yulin to Tainan. In order to continuously monitor the activities of Chiuchungkeng fault, 10 CGPS stations established by the Department of Earth and Environmental Science, National Chung Cheng University. In addition 7 other CGPS stations from

1 國立中正大學地球科學環境學系 碩士班研究生

2\* 國立中正大學地球科學環境學系 助理教授 email: [cheng.168@ccu.edu.tw](mailto:cheng.168@ccu.edu.tw)

3 國立中正大學地球科學環境學系 教授

the Central Geological Survey were also included in this study. Bernese v.5.0 GPS was used to solve for the coordinates of the CGPS stations. The time span of study period is 2007/9/1 - 2010/12/31, a total of 1218 days. It is found that a relative larger deviation, about  $\pm 2$  cm, in the daily coordinates between May to October in each year, which corresponds well with the rainy season and the typhoon season in Taiwan. In the FFT test we found the most significant signal of frequency is once a year, is match with wet and dry season in Taiwan. With correspondence to the official rainfall record, it is found that the most deviation in the daily GPS solution occurred at the days close to the occurrence of the maximum rainfall each year. The fault is being compressed between  $3.61 \pm 0.48$  and  $6.15 \pm 0.68$ , increase from north to south, and found the northern end of the fault has shifted to right lateral ( $0.99 \pm 0.31$  mm). Finally we tested the feasibility of simulating the fault plane of Chiuchungkeng fault.

**Keyword: Continuous GPS Stations, Seasonal Signals, Compression.**

## 一、前言

台灣是由菲律賓海板塊持續的向歐亞大陸板塊聚合，因此被擠壓抬升，並且在西部丘陵與平原的交界產生應力累積，以及地震的發生，如1906年的梅山地震、1941年的中埔地震、1964年的白河地震、1998年的瑞里地震和1999年的嘉義地震。因此對於嘉南地區的斷層作進一步的了解是必要的。

九芎坑斷層自古坑斷層南側沿著平原與麓山帶交界往南延伸至嘉義竹崎北側，長約23公里(顏禎弟，2005)，並於竹崎北側轉變為背斜的形式。九芎坑斷層被林啟文(2000)分類為第一類活動斷層，其性質為逆斷層兼具右移的特性，並且在第四紀岩層和紅土緩起伏面錯移。由許晉耀(2003)的影像判釋和野外地質調查中，判斷出九芎坑斷層的活動造成地貌改變，在麓山帶的前緣形成了古坑東側丘陵、劍湖山丘陵和梅山東側丘陵，分別使石牛溪、大湖口溪和倒孔山溪發生改道的現象，因此判斷九芎坑斷層曾經活動過。

由顏禎弟(2005)估計，若嘉南地區의九芎坑斷層再次活動，可能將會產生芮氏規模6.2的地震，會帶來人命和經濟的

損失，因此九芎坑斷層為一具有觸發災害性的活動斷層(許晉耀，2003)。由經濟部(2010)的定義，九芎坑斷層在過去十萬年內曾活動過，且未來可能再度的活動。此外，從台灣測量工作的角度來看，在訂定大地參考基準(geodetic datum)時，需要考慮地區的地表變動的行為，才能正確地理解(realization)大地參考系統(terrestrial reference system)。

如果地表有明顯的地殼變形但卻未考慮，則此部份變形量因為沒有適當的附加參數吸收，會影響解算出來的大地參考框架的速度場的正確性。正如採用不正確的數學模型進行最小二乘的參數估計，得到的結果也不會正確。有鑒於九芎坑斷層有再次活動的可能性，因此探討斷層活動的特性與地區性信號確有必要。

本研究的雲嘉地區以及九芎坑斷層的分布位置，如圖1所示，並標示出各個CGPS站的分布位置，套用了台灣的地形資料，而紅色的線是第四節主要會探討的四條基線。為了能夠簡化並清楚的區分四條研究基線，在此定義出這四條基線各自的代號，位於九芎坑斷層北端的YOKN-JNHU基線為Baseline 1，其次位於斷層中段的DANA-TAPN基線為Baseline

2，而後位於斷層南端的GS18-GS06基線為Baseline 3，最後位在六甲的對照組LUJA-DACU基線為Baseline 4。使用斷層上、下兩側近距離的CGPS站，其研究的時間段以資料較為完整的2007年9月1日至2010年12月31日，三年半的時間。所使用解算軟體Bernese v. 5.0 (Dach et al., 2007)來進行解算每日解，其解算各站點位坐標的方式是採用高精度的相對定位，並且以基線為單位來進行分析。為了觀測九芎坑斷層的活動狀況，在觀察基線的時間序列時，特別挑選斷層的上盤和下盤所組合的基線。挑選的CGPS站範圍在古坑至竹崎之間，並且以較為南部的台南六甲之基線組來當作對照組，利用這四條基線，來觀察出上盤和下盤的交互運動，並使用基線組互相比對在這三年半中斷層的活動量。

## 二、資料解算流程

本研究所採用的解算軟體為瑞士柏恩大學天文研究所 (Institute of Astronomy, University of Berne)所開發的Bernese GPS Software Version 5.0之GPS資料處理軟體(Dach et al., 2007)。其特點為可安裝於不同的作業系統平台(例如：Windows、Linux)，能夠處理多種型式的接收儀和天線盤，本研究所採用的作業系統為Windows版本的介面。另外Bernese還提供了BPE運作引擎(Bernese Processing Engine)可以自動化處理GPS的資料計算，可計算出軌道參數、極運動(Polar Motion)參數、地球旋轉(Earth Rotation)參數、對流層參數和電離層模型。

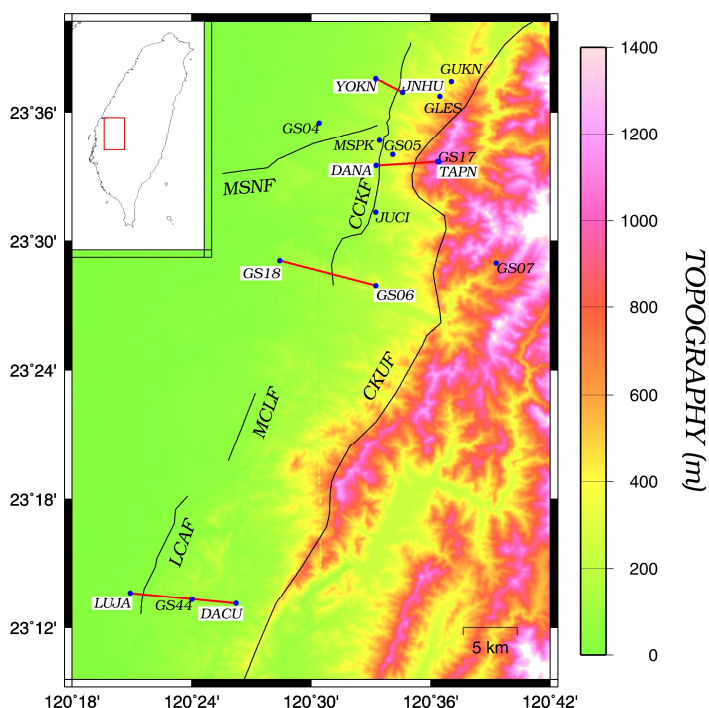


圖 1 研究區的 CGPS 站與研究的基線分布圖。藍色圓點為 CGPS 站，紅色的線為研究的四條基線。MSNF：梅山斷層，CCKF：九芎坑斷層，CKUF：觸口斷層，MCLF：木屐寮斷層，LCAF：六甲斷層。

Bernese解算資料的流程圖如圖2，本研究碰到的狀況如：初始點位坐標為0、天線盤或是接收儀無資料、站名有錯誤。因此在資料解算之前，RINEX資料必須作前處理的部分，使用的工具為TEQC (Translation, Editing, and Quality Checking) 軟體，是由大學導航聯盟 (University NAVSTAR Consortium, UNAVCO) 所研發，使得RINEX檔方便的切割成所需要的時間頻率、更正天線盤

或接收儀的型號、更正站名(Estey and Meertens, 1999)。而後會套用自動化檢驗程式，此程式可以作為國際IGS站的檢驗動作(蔡旻穎，2007)，其檢驗的目的是為了確定IGS站之每日坐標解是穩定的。

利用自動化程式所建立的約制檔於Bernese執行每日解的運算流程，其中包含了使用Bernese的BPE自動化批次處理，本研究所採用Bernese的自動解算批次程式參考(郭隆晨，2008)，分述如下。

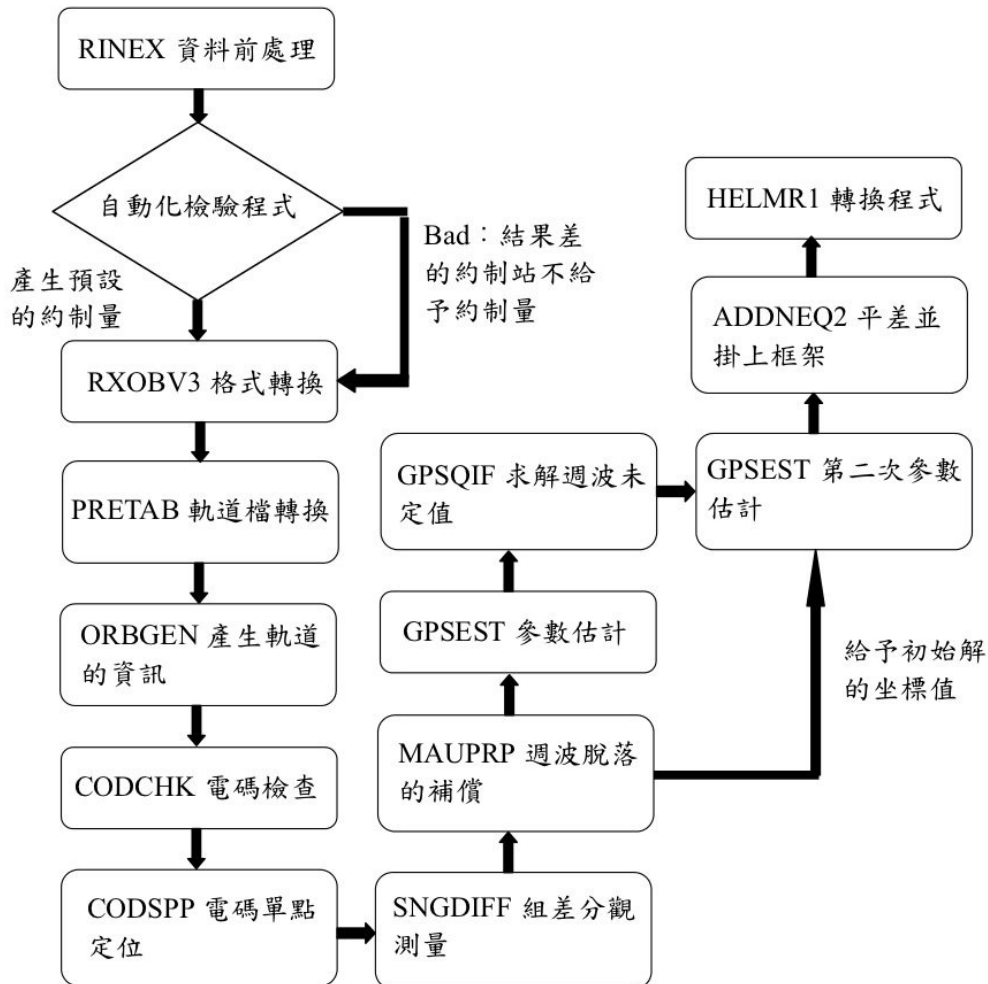


圖 2 Bernese 解算流程圖

## 2.1 自動化檢驗程式

一般GPS連續站自動化程式會檢核各約制站的基線長度，避免約制站的理論坐標與實際坐標差異過大，而造成其他被解算測站坐標值之錯誤。如果GPS連續站有移動、儀器的更換或因資料檔的資訊不正確，而產生每日解時間序列的跳動，便可在此步驟套用自動化檢驗程式而篩選剔除。由於研究採用共同約制，因此IGS站的穩定性是非常的重要，故此檢驗程式利用Bernese所解算出的各IGS站之當日實測基線長，以及按IERS公布的坐標與速度值依線性估算之基線長，並且比較兩基線長的差值是否會超過檢驗值，若超過檢驗值的量，則為基線中單一或兩個IGS站的變動量所致，其變動量會傳播到其餘CGPS站的每日解坐標上，為了避免有此狀況發生，在解算每日解前會先進行IGS站基線長度的檢驗程序。

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (1)$$

公式(1)中的 $t$ 為研究曆元， $t_0$ 為參考曆元， $[V_x, V_y, V_z]^T$ 和 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 為IERS在 $t_0$ 時刻所公布的各站速度和框架值， $[X_t, Y_t, Z_t]^T$ 為在 $t$ 時刻所推估的框架值。在 $t$ 時刻任兩個IGS站( $i$ 站和 $j$ 站)的基線長 $L_{1ij}(t)$ ，可表示如公式(2)：

$$L_{1ij}(t) = \sqrt{(X_{t_i} - X_{t_j})^2 + (Y_{t_i} - Y_{t_j})^2 + (Z_{t_i} - Z_{t_j})^2} \quad (2)$$

經Bernese的計算得到各IGS站在 $t$ 時刻之坐標值(每日解)，便可得到 $i$ 站和 $j$ 站的當日實測基線長 $L_{2ij}(t)$ 。最後利用兩種不同方式的基線 $L_{1ij}(t)$ 、 $L_{2ij}(t)$ 差值(dif)檢驗IGS站的穩定性。令dif為 $L_{2ij}(t) - L_{1ij}(t)$ ，而檢驗值是採用基線檢核標準為 $3 \text{ mm} + 0.03 \text{ ppm} \times L$  ( $L$ 為基線長，單位為

公里)(Wolf and Ghilani, 2005)，如公式(3)：

$$|dif| \leq 3 \text{ mm} + 0.03 \text{ ppm} \cdot L_{2ij}(t) \quad (3)$$

當dif大於檢驗值時，標示為Bad，而當小於等於時則不被標示，程式逐條檢驗基線後，會檢查所有被使用的IGS站，若某一個IGS站所組合的基線之測試皆為Bad，則此IGS站會被挑出此站且不會給予約制量，意即將此IGS站視為不固定的點位。程式所解算出的好壞結果會存取在一個新的檔案裡，其檔案的附檔名為CHK。

## 2.2 Bernese 計算流程

1. RXOBV3(GPS觀測資料格式轉換)：將原始資料轉換成RINEX標準格式，再將觀測資料轉換成Bernese軟體內部格式，並且將GPS觀測資料分為電碼觀測量和相位觀測量。
2. PRETAB(建立GPS衛星標準軌道)：將GPS精密星曆格式轉換成Bernese軟體內部格式，包含6個克卜勒軌道元素和2個太陽輻射參數，作為資料的編修，並且輸出GPS時錶誤差。
3. ORBGEN(產生軌道的資訊)：引用地球自轉、章動、極運動、地球固體潮、海潮、半日潮、引力位元等參數來建立Bernese內部標準軌道格式。
4. CODCHK(電碼檢查)：將有粗差的觀測量剔除。
5. CODSP(單點定位)：利用電碼觀測量配合對流層折射改正模式進行單點定位，將接收儀和GPS同步，並估計接收儀的時錶差改正量，再將其值記錄到相位觀測量中。
6. SNGDIFF(組成差分觀測量)：組成獨立的基線網一次差觀測量，所組成的原則有最大觀測量、最短基線、星狀、指定以及手動操作，本研究是採用最大觀測量，組成基線時會挑選最大共

同的觀測量，來組成線性獨立的一次差分觀測量。

7. MAUPRP(週波脫落偵測補償)：利用精密星曆與衛星時錶資料來進行修編、週波脫落(cycle slips)的補正和時錶差修正。對於週波脫落的處理採取自動的偵測和補償。
8. GPSEST(參數估計)：以相位二次差觀測量進行測站坐標，以及對流層附加改正參數之氣象檔。
9. GPSQIF(整數未定值)：求解每一條基線觀測量中的未定值之整數解。
10. GPSEST(第二次參數估計)：將求解出的整數未定值代入，並求解出坐標及對流層附加改正值(氣象檔)等參數。
11. ADDNEQ2(平差計算)：將該網內測站的法方程式矩陣(附掛於自訂的框架系統上)。
12. HELMR1(轉換程式)：將解算出來的坐標值X、Y和Z轉換成平面坐標N、E和U。

### 三、研究區框架的計算

本研究屬於區域性的監測研究，因此不需要框架的計算，也能夠進行地區

的監測，計算研究區參考框架主要目的，在於提供後續大地測量相關研究，如控制點加密、定位等所需之參考坐標值。為了能夠得到研究區中各個CGPS站的參考框架。本研究以IGS站作為上級網，給予適當的約制量，進行大地網形的加密，以計算九芎坑斷層附近CGPS站的參考框架。

本研究中所選取的7個IGS站均為全球參考網形中的連續追蹤站，所採取的參考框架為ITRF2005。這些IGS站被選取的條件是觀測資料連續性佳，觀測的資料至少有3年、網形幾何分布良好。對此七個IGS站採用的約制方法是共同約制，再對研究區的CGPS站來作網形的加密。在本研究，將GAUM、IISC、IRKT、PERT和TSKB等IGS站的約制量為0.001 m，而在台灣的TNML和TWTF站雖也屬IGS全球參考網，分佈狀況如圖3，但因在2003年建立，相對而言資料的時間序列較短，因此約制量設定為0.003 m。網形中九芎坑斷層附近的地調所和中正大學之CGPS站是不給予約制量。

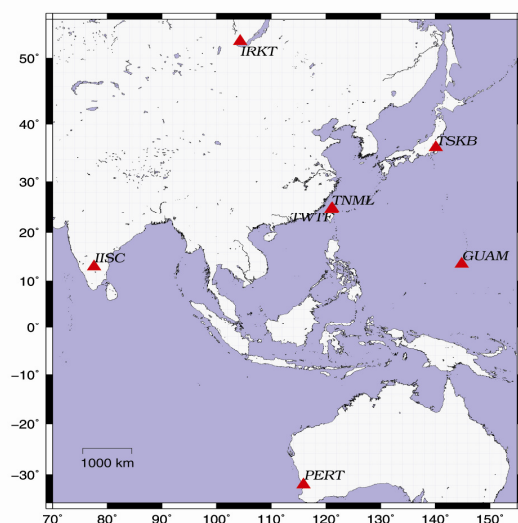


圖3 研究中所採用的IGS站分佈位置

台灣用來監測地震、斷層或地殼的變動，主要使用的框架之約制方式有兩種，一種是最小約制：將網形中的一個站坐標固定，用以補足網形計算中的秩缺(rank deficiency)數，以解算其他的站與此固定站之相對關係。另一種稱為共同約制：將網形中多個站之坐標固定，來解算其他的點位，但由此方式所需的IGS站之觀測品質較高，因為若有錯誤，則此錯誤量會傳播到其他待求解的CGPS站站坐標上。由自動化檢驗程式中已經剔除了七個IGS站每日解不穩定的時段，解算結果在研究的時段中並沒有IGS站被剔除，因此可採用共同約制方法，且由蔡旻穎(2007)的分析可以得知，在台灣監測地震或斷層所使用的約制方式，最小約制和共同約制在整體觀測網形的精度很接近。本研究測試給予七個IGS站1 cm

的約制量，所解算出來的每日基線長，與原本1和3 mm約制量的基線長之相關係數，在Baseline 1-3分別為0.80、0.78和0.83，在這個高相關的條件下，本研究在這兩種約制量的結果分析下應當很接近。由於剩餘的影響量在研究區內的各CGPS站之間是高相關，因此會在後續的相對分析中互相抵消。

## 四、結果與分析

### 4.1 基線長之變化量

由研究區的參考框架所計算出來之基線變化量時間序列，如圖4所示，從北到南以及對照組的時間序列，代表著九芎坑斷層北到南以及六甲地區的對照組地區，以此分析基線變化量的時間序列。

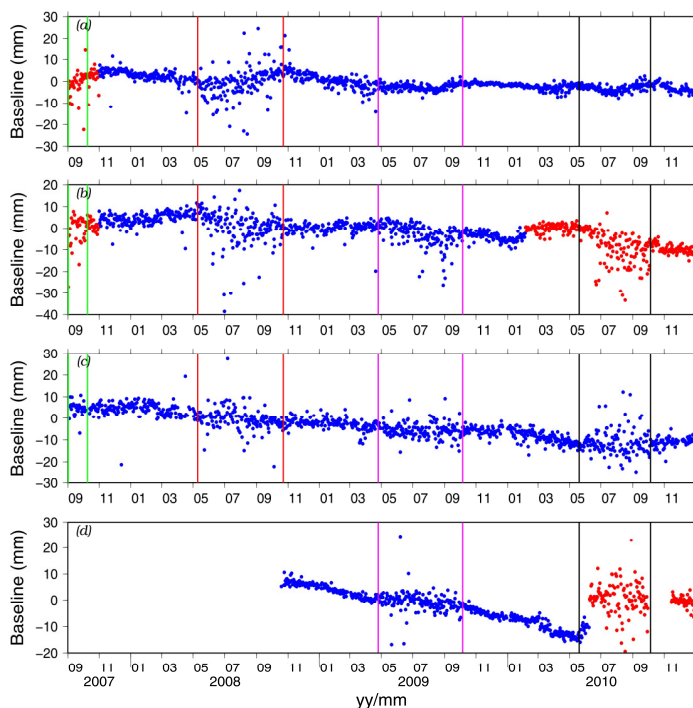


圖 4 研究時段的基線長變化量之時間序列。(a)-(d)分別為 Baseline 1-3，及六甲地區的對照組，綠、紅、紫和黑色區段為離散較顯著之時段，紅色圓點為 CGPS 站的架設有改變。

基線長的變化量之時間序列，所選取的研究時間為2007年11月1日至2010年2月4日，共827天，CGPS站的天線盤墊高、建築物要加蓋屋頂，因此DANA和LUJA站有做遷移，如圖4在Baseline 1、2和4的紅色圓點，天線盤位置變動後使得基線的長度改變，會影響到斜率與平均值。

圖中每日的基線長是各別減去基線長的總平均，以便觀測CGPS站相對移動的大小，其中綠、紅、紫和黑色的線，為基線變化量中離散較顯著的時間，特別在夏、秋季的每日解有比較顯著之離散現象，在四個時間序列中四個時段是相同的，綠色的時段為2007年9月1日至2007年10月9日，共39天，偏移量可到達 $\pm 1$  cm，紅色的時段為2008年5月10日至2008年10月23日，共166天，其偏移量可達到 $\pm 3$  cm，紫色的時段為2009年4月25日至2009年10月6日，共164天，偏移量與紅色時段相同可達到 $\pm 3$  cm，黑色的時段為2010年6月21日至2010年10月3日，共104天，偏移量可達到 $\pm 2$  cm，四個時段都落在台灣濕季的時候，推測這些離散較顯著的訊號是受到季節性之影響，而後利用台灣的氣象檔來試著修正解算較差的時段，僅有圖4的Baseline 1的紫色和黑色時段是解算穩定狀況；而圖4的Baseline 4由於DACU站是在2008年10月17日建置，因此在這個時段之前並沒有觀測的資料，在Baseline 4在DACU站，由於人為的因素造成有46天缺少資料。

#### 4.2 傅立葉轉換

本研究為了進一步分析基線變化量的訊號，因此使用快速傅立葉轉換

(Fast Fourier Transform, FFT)將基線長的每日解轉換成頻譜圖(spectrum)，為了避免有時間的不連續，因此將缺資料的天數補上前後一天的平均值。

為了比較本文各站的座標時間序列的頻譜，我們參考PKGM站(蔡旻穎，2007)的10年(2000–2009)和2年(2008–2009與本研究相同的時間)資料中，可以觀察到不論是用長時間的觀測(10年)，或是較短的觀測時間(2年)，所得到的最顯著信號之頻率是一致的，並且由中央研究院地球科學所GPS Lab長時間的結果中分析內政部七個CGPS站，也同樣可以得到一年一次之最顯著的頻率，推測此頻率信號是由台灣的乾溼季和溫度變化(陳慶昌等，2007)所造成之影響。研究中以Baseline 1–3在資料較完整的2008和2009年分析之訊號週期性，其頻譜如圖5所示，可以觀察到在Baseline 1–3的最顯著之信號為週年信號，其頻率為一年一次與台灣的乾濕季相符。而後利用各基線的N、E和U分量來分析，在Baseline 1之分析，可以觀察到不論是上盤的JNHU站或下盤YOKN站，其最顯著的信號之頻率均為一年一次，代表著九芎坑北端有受到台灣乾濕季的影響。各基線N、E和U分量解算結果詳翁志傑(2011)。

由Baseline 2的分量，其最顯著的信號之頻率與Baseline 1是相同，但在南北(N)分量上，其半週年信號的振幅與週年信號差異不大，而上盤的DANA站和下盤TAPN站，在南北分量的半週年信號之振幅並不顯著，如圖6，因此推測為研究的時段較短(2008–2009年)，如有較長週期的信號之頻率，而觀測的時間序列高度不足以完整解析



整個信號時會有混疊效應(aliasing)，使得長週期(低頻)的信號，在分析中由低週期(高頻)的形式反應出。在TAPN站的東西(E)分量上，頻率的混疊較為

明顯，如圖7，因此造成最顯著的信號之頻率發生在一年五次，但一年一次的乾溼季信號之頻率依然存在。

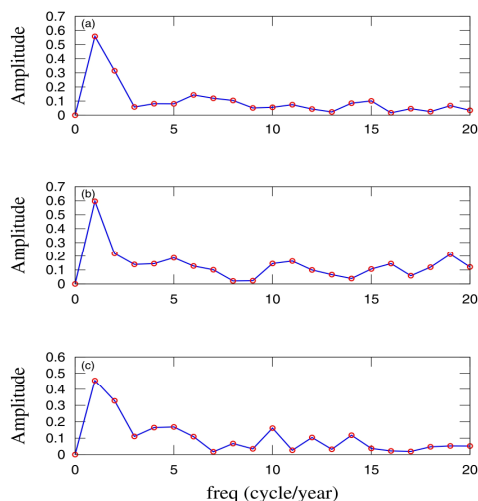


圖 5 基線的頻譜圖。(a)-(c)分別為 Baseline 1-3。

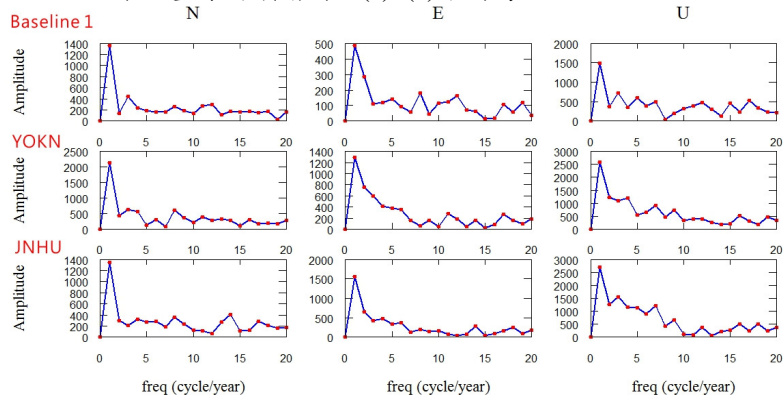


圖 6 Baseline 1、YOKN 和 JNHU 在 N、E 和 U 分量的頻譜圖。

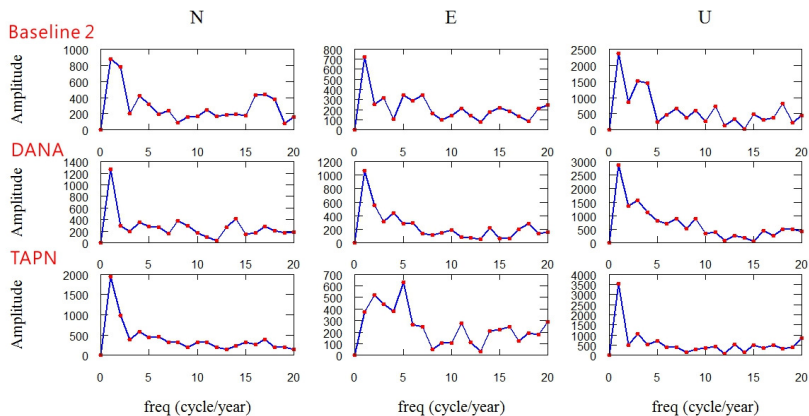


圖 7 Baseline 2、DANA 和 TAPN 在 N、E 和 U 分量的頻譜圖。

最後一條Baseline 3的頻譜分析，可以觀察到在兩站的分量上，除GS06在南北、高程分量上，有顯著的混疊外，其餘都符合台灣的乾濕季，而在Baseline 3的東西和高程分量上均有出現顯著的混疊現象，如圖8。由Baseline

2和3中的混疊現象，均出現在上盤的CGPS站上，因此推估此混疊的效應與上下盤有關，而造成的影響原因還不明確，有待未來有更長的觀測時間來作分析。

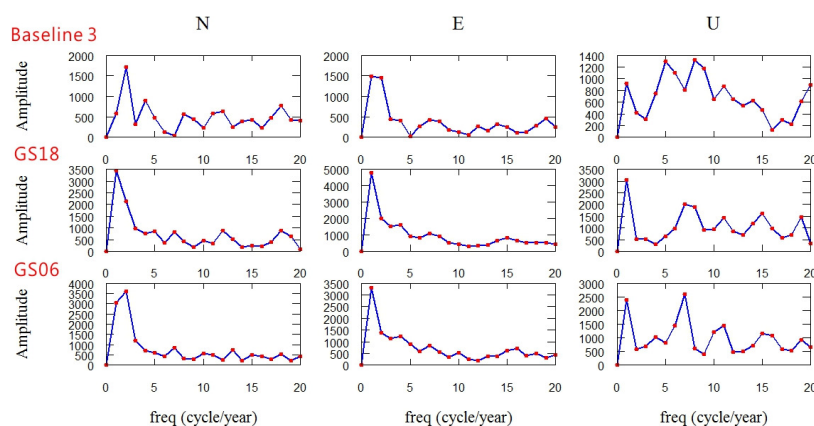


圖 8：Baseline 3、GS18 和 GS06 在 N、E 和 U 分量的頻譜圖。

#### 4.3 降雨量對照

為了進一步確定離散顯著的時段是由於乾濕季所造成之影響，因此本節利用經濟部水利署中雲嘉地區的雨量資料，來比對離散顯著的時段。

本研究採用2007年9月1日至2009年12月31日的雨量資料；選擇的降雨量監測站之地區為大埔、草嶺、中坑、沙坑、樟腦寮、大湖山、樂野、小公田、龍美、里佳、馬頭山和王爺宮，降雨量監測站的分布含蓋了主要研究的四條基線。經由GMT內建的空間內差程式，內差出四個分別位於四條基線的中點，以反應在四條基線的雨量。

四條主要的每日基線長變化量與其四個地方之每日雨量圖如圖9，藍色的圓點為基線長的變化量，而紅色的線為每日降雨量，單位為mm，由圖中的對照可以觀察到，除了少數例外，

如圖9(a)的2009年，大多基線離散顯著的時段與降雨量相關，在每年的7月至9月間均出現一年的最大降雨量。年中最大降雨量的頻率以頻譜圖來作為表示，可以觀察出九芎坑斷層北端、中段和南端的最大降雨量，其發生的頻率為一年一次，如圖10，而由圖10中可以得知發生的一次最大降雨量為7-9月，因此可以推估離散顯著的現象是受到季節性的水氣含量所影響。

#### 4.4 地表訊號

由於在雲嘉地區的研究時間段中，只有發生過幾次芮氏規模小於5.2的有感地震，根據顏禎弟(2005)的推論，九芎坑斷層如活動可能會造成芮氏規模6.2以上的地震，唯一有芮氏規模5以上的地震，是發生在台南三民鄉，距離九芎坑斷層的最南端有31 km，其能量也不足以造成九芎坑斷的

地表有大幅之改變。在研究時段中，以GPS的基線分析看出基線長度在水平與垂直方向無顯著變化，表示即使有零星的地震事件發生，其能量並不

足以造成地表有大幅的同震位移。當基線長的訊號沒有同震位移時訊號時，剩下的訊號便為季節性訊號和地殼訊號，如以下的公式：

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + e(t_i) \quad (4)$$

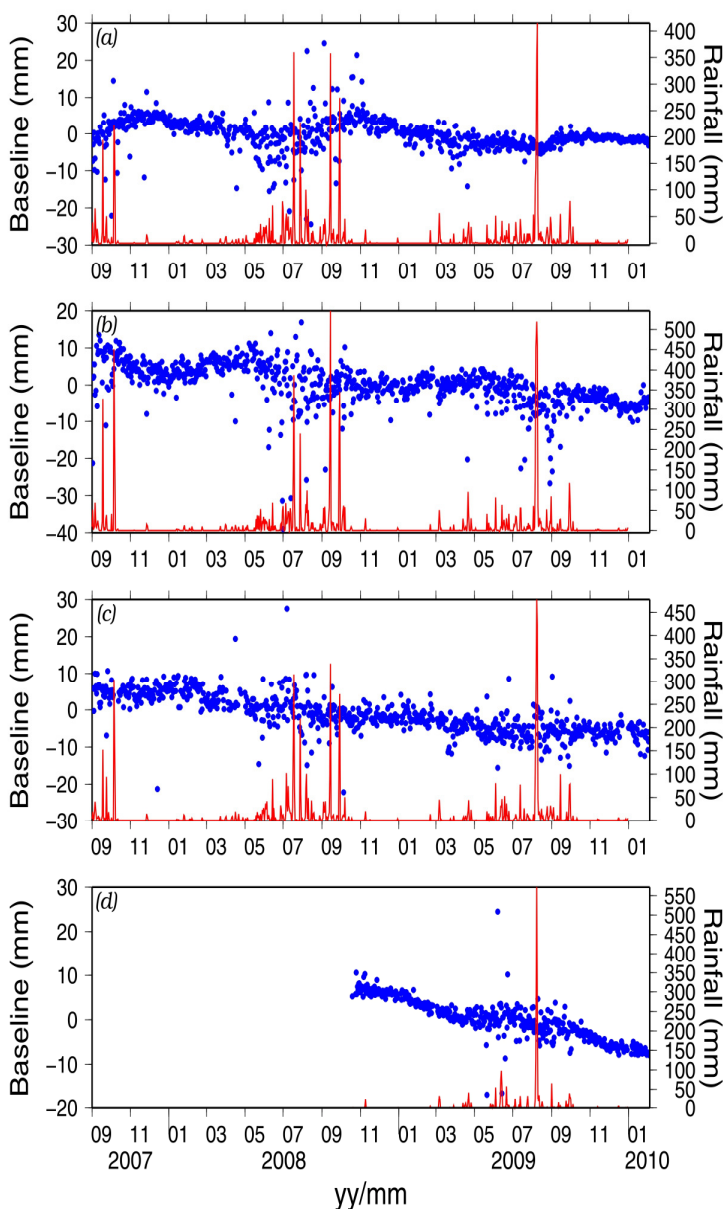


圖 9 基線長的變化量與降雨量對照之時間序列。(a)-(d)分別為為 Baseline 1-3，及六甲地區的對照組

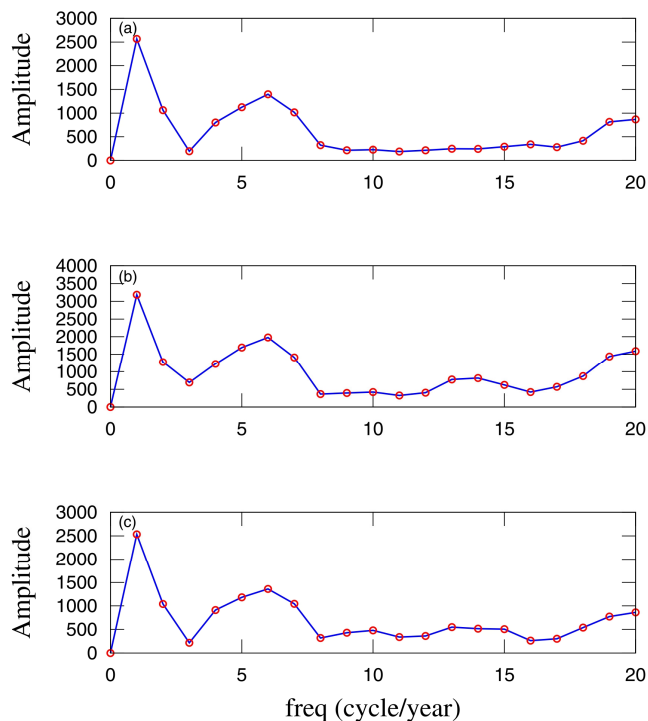


圖 10 降雨量頻譜圖。(a)-(c)分別為 Baseline 1-3。

公式(4)中a為平均值、b為斜率或速度場值、係數c、d為週年協調係數、係數e、f為半週年協調係數。

探討出研究的時段中沒有顯著的同震位移的現象發生，並且在4.3節中可以得知基線的季節性訊號，因此將基線中的季節性訊號去除掉後，所剩下的資訊便為地殼變動之訊號。三條基線各別在N、E和U分量上的地殼訊號，各基線的時間序列皆以下盤的CGPS站當作不移動的站，而觀察位在上盤相對的CGPS站之移動量。九芎坑斷層北端的Baseline 1，固定YOKN站來觀察JNHU站，可以得到有右移的情況發生，其位移的量為  $0.99 \pm 0.31$  mm。而在斷層的中段和南端，都是呈

現逆斷層的情況。在觀察4.1節的基線斜率中可以看出四條基線都是有變短之情形，由各基線的三分量斜率計算總壓縮量。在地質的角度上，基線的變短代表著斷層在作擠壓，而這個壓縮量便為基線變短的量，九芎坑的三個地區壓縮量如表1。由表1中可以觀察到九芎坑斷層北端擁有最小的壓縮量  $3.61 \pm 0.48$  mm，其餘的三個地區擁有較大的壓縮量。此現象與林啟文(2000)在九芎坑斷層北端有右移的分量是吻合的，因有右移的分量而造成壓縮量較小，其中九芎坑斷層中段的壓縮量為北端的1.2倍，而南段的壓縮量為北端的1.7倍。

表 1 地殼訊號的壓縮量與斜率

Baseline	壓縮量 (mm)	N 斜率 (mm/year)	E 斜率 (mm/year)	U 斜率 (mm/year)
1	3.61 ± 0.48	-0.40	-3.11	1.79
2	4.28 ± 0.63	1.63	-3.66	-1.51
3	6.15 ± 0.68	0.36	-5.41	2.91

#### 4.5 斷層面模擬

為了進一步了解了九芎坑斷層特性後，本文利用簡單的三條基線共6個CGPS站，測試套入poly3D軟體(Thomas, 1993)模擬九芎坑斷層的斷層面的可行性。各站資料均已去除掉季節性訊號後的位移值。poly3D能夠利用平面或多邊形組成各個位移不連續性的元素，採彈性半空間錯位模型進行正算與逆推。逆推部份包括斷層構造的應變、應力場分佈情形，正算部份包括所有元素在半空間上所產生的位移場。

本研究將九芎坑斷層北端的地表傾角設為 $30^\circ$ ，而斷層的中段為 $33^\circ$ ，最後的南端為 $36^\circ$ 。斷層三段的角度是參考翁子偉(2005)地表所量測之傾角，再根據黃旭燦(2004)所繪製的九芎坑斷層剖面圖推估斷層面之角度，在2 km處其斷層面有變緩的狀況。

有了斷層面上的各點坐標後，將這些點位坐標套入到poly3D中，並輸入研究區的柏松比(0.25)和楊氏系數(1000 Gpa)，其材料的參數是參考楊榮堃(2003)在台灣中部平原所使用之材

料參數值，poly3D軟體便能夠將鄰近的三個元素組成面之形態，以逆時鐘的方式排列，經poly3dinv的逆推得知理論地表位移值，經一次的迭代運算，便能夠得到模擬出來之地下各元素的錯動量與方位角，如此能夠得到在相對於斷層下盤固定的斷層面逆推結果。

由逆推計算所得之理論地表位移值以及方位角，與去除週期性訊號的觀測地表位移值以及方位角作比較，便能夠得知逆推出的斷層面之錯動量，與真實的錯動量之符合狀況，如圖11所示，其紅色箭頭為實際觀測的位移量及方位角，而藍色箭頭為逆推後所得到的理論地表位移量與方位角，解算的六個CGPS站均相對於S01R站。由圖11中可觀察到逆推的位移量，除了DANA站偏小13.91 mm以及方位角偏西 $1^\circ$ 之外，其餘五個CGPS站均十分接近，尤其是JNHU站在方向性均為 $263^\circ$ 以及移動量偏小0.52 mm，擁有較佳的吻合度，因此模擬出的斷層面在北端的錯動量與錯動方向較為符合真實狀況。

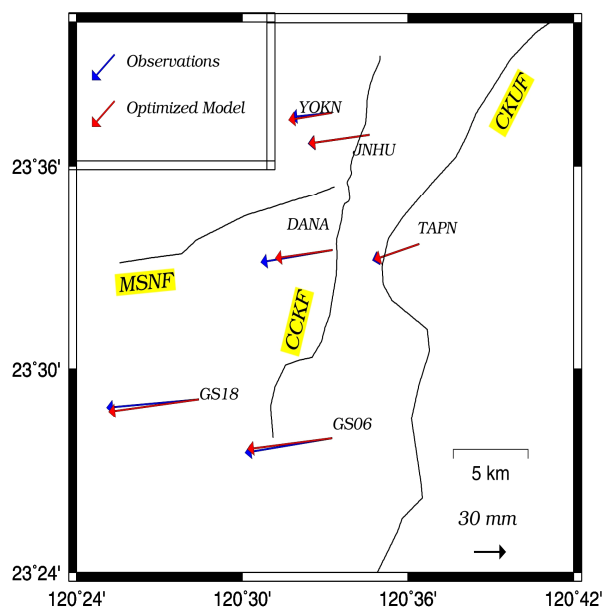


圖 11 實際觀測資料與數值模擬的比較圖。Observations：實際觀測的位移量，Optimized Model：數值模擬的位移量。

## 五、結論

整體來說，研究區的基線變動有顯著的週年性信號，主要與台灣乾濕季節有直接的關連。研究區在2008–2009年中並沒有顯著的同震位移，但是整體的區域呈現斷層互相擠壓的現象。

在基線長的變動量分析中，可以觀察到四條基線在相同的時段有出現觀測資料顯著離散之現象(平均 $\pm 2$  cm)，並發現離散顯著的時段都落在夏天與秋天。台灣內政部的CGPS站均有顯著的年週期訊號，可能為乾濕季所影響，而從研究區的3基線最顯著信號均為年週期訊號，與此現象大致符合。在上盤的CGPS站有顯著的信號混疊效應，原因之一可能是觀測時間上不足以完整呈獻某些長周期信號，有待未來觀測時間累積更長後來作進一步的分析。

7–9月基線每日解有顯著的離散現

象，在3條基線的最顯著信號之頻率為一年一次，與台灣的乾溼季吻合，因此可以推估離散顯著的現象有受到季節性的降雨量所影響。

由於在研究的時段中沒有顯著的同震位移，因此將利用基線訊號去除季節性訊號後的地殼訊號來分析，由基線整體的趨勢均持續的在縮短，反應出九芎坑斷層的上盤和下盤是在作擠壓之活動，其擠壓量由斷層北端至南端遞增，分別為 $3.61 \pm 0.48$ 、 $4.28 \pm 0.63$ 和 $6.15 \pm 0.68$  mm。而在探討地殼訊號中在N、E和U分量時，發現到斷層的北端有右移之情況  $0.99 \pm 0.31$  mm，此點可以解釋為何斷層的北端有最小的擠壓量。最後測試使用6個連續站資料模擬九芎坑斷層之斷層面，得到斷層面為逆斷層的結果，與實際地表錯動量差異介於6 cm以內，在北端的錯動量與錯動方向較為符合GPS實測狀況。更準確的斷層模擬需要更多

地面站參與，以便提供足夠的約束條件，但已不在本文探討範圍之內。

國家級大地基準的更新與維護，必須了解地殼變動的活動情形。本文目的並非著眼於採用小區域的結果，套用在國家級大地基準的制定上，因為這樣的工作必須全面考量全國測區的地殼變動的活動情形。因此只能如摘要中提到的，結果可供未來台灣制定或更新大地基準時之參考。

## 致謝

感謝兩位匿名審查委員之建議。本研究由行政院國家科學委員會提供部分經費補助(NSC 99-2116-M-194-009)。本文部份計算由國家高速網路與計算中心提供。

## 參考文獻

- 1.王維豪、林美伶、邱培凱、黃豐園、王益宗、邱培謹、張書豪,2007,歷史地震對雲嘉斷層系統的應力累積效應研究成果報告，國立中正大學應用地球物理研究所，嘉義。
- 2.王維豪,2007,震源物理與地震前兆之研究-雲嘉南地區地形變、應力加載與斷層特性研究，行政院國家科學委員會，台北。
- 3.林啟文,2000,台灣活動斷層分布圖說明書：台灣地區活動斷層個述，經濟部中央地質調查所，台北。
- 4.翁子偉,2005,以反射震測法研究九芎坑斷層及其附近構造，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，桃園。
- 5.翁志傑,2011,利用GPS連續站監測九芎坑斷層活動特性與地區性訊號分析，國立中正大學地球與環境科學系應用地球與環境科學碩士班，碩士論文，嘉義。
- 6.許晉耀,2003,九芎坑斷層之研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，台南。
- 7.郭隆晨,2008,GPS連續觀測資料自動化標準處理流程，中央研究院地球科學研究所，台北。
- 8.陳慶昌、嚴明鈺、王世宇,2007,台灣與東亞之夏季季風降雨變化，大氣科學，第35卷，第4期，第305-352頁。
- 9.黃旭燦,2004,台灣中南部褶皺逆衝斷層帶地質構造特徵分析，國立中央大學地球物理研究所，桃園。
- 10.黃毓升,2008,適用東亞地區衛星導航系統之星座設計及效能評估，國立成功大學測量及空間資訊系碩士論文，台南。
- 11.景國恩,2008,Kinematics of Taiwan Collision Zone from GPS Observations，國立成功大學地球科學研究所博士論文，台南。
- 12.楊榮堃,2003,台灣中部新構造運動之數值模擬，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，桃園。
- 13.經濟部,2010,經濟部中央地質調查所，2011年5月31日取自於<http://fault.moeacgs.gov.tw/TaiwanFaults/PageContent.aspx?>
- 14.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，台南。
- 15.顏禎弟,2005,九芎坑斷層南向延伸範圍之研究，國立中正大學地震研究所碩士論文，嘉義。
- 16.Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez

- and M. Meindl, (eds), 2007. *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.
17. Estey, L. H. and C. M. Meertens, 1999. TEQC: The Multi-Purpose Tool for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*, 3(1):42-49.
18. Wessel, P. and W. H. Smith, 2011, *The Generic Mapping Tools Version 4.5.6 Technical Reference and Cookbook*, School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii. Wolf, P. R. and C. D. Ghilani, 2005. *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics*, 11th Edition.
19. Thomas, A.L., 1993, Ploy3D: A three-dimensional, polygonal element, displacement discontinuity boundary element computer program with application to fractures, faults and cavities in the Earth's crust. *M.S. Thesis*, Stanford University, Stanford, CA.