

將國際坐標框架套合於台灣 GPS 連續站觀測網 之最適方法探討

Strategy for building a coordinate reference frame suitable for Taiwan

洪煌凱¹ 饒瑞鈞² 陳鶴欽³ 謝光紀⁴
Huang-Kai Hung Ruey-Juin Rau He-Chin Chen Kuang-Chi Hsieh

摘要

本研究考慮台灣及其離島地區在板塊及地理上之特殊性, 提出一套適合於台灣之區域坐標框架策略, 並利用國內26個GPS連續站, 與鄰近國際IGS站聯算求得套合於國際坐標參考框架下之國內連續站坐標, 進而求解全台367個連續站在2009年12月至2010年1月之坐標。經由不同策略之比較與分析, 發現利用區域網(14個IGS站加上26個國內核心站)求得之參考站坐標與加入世界網合併之坐標比較後, 發現具有公分級之系統平移量, 而內部網型之差異較小。2010年前後所解算之坐標成果與ITRF2005官方公佈之坐標已有公分級之差距, 其原因在於2006年提出之ITRF2005官方坐標無法反應之後因不同因素所產生之偏移或非線性行為。最後, 解算全台灣367個連續站之成果, 其坐標三方向之加權均方根(wrms)分別為0.7 mm, 0.8 mm和2.7 mm, 其成果具高度重複性。

關鍵詞: GPS 連續站、國際地球參考框架、國際 GPS/GNSS 服務中心(IGS)

Abstract

We provide a novel strategy to build a coordinate reference frame in Taiwan using observations from continuous GPS stations. Twenty six CGPS core stations in Taiwan and fourteen IGS sites were calculated together and their coordinates were derived in different definition of reference frames. Furthermore, 367 CGPS sites coordinates were estimated in the ITRF2005 frame. The results show that the coordinate differences between regional and international networks have systematic offsets and the coordinates have high consistencies after removing the systematic offsets between these two networks. The weighted root mean square (WRMS) of GPS coordinate time series from 367 CGPS sites in Taiwan are 0.7 mm, 0.8 mm, and 2.7 mm in NS, EW, and vertical components, respectively.

Key word: continuous GPS station (CGPS), ITRF, International GNSS Service(IGS)

1 成功大學地球科學系 博士候選人
2 成功大學地球科學系 副教授
3 內政部國土測繪中心 技正
4 成功大學地球科學系 碩士生

一、前言

台灣的坐標框架系統，自從1970年末期利用三角三邊測量所建立的TWD67坐標系到1997年利用GPS基準站觀測建立之固定於1997.0年、套合至ITRF94之TWD97坐標系[Yang et al., 2001]，目前之地籍測量仍以TWD97坐標系為主。由於台灣本島深受板塊運動與地震之影響，在台灣架設之參考點或基準站常常發生不連續的偏移與速度的改變。因此，近15年前所定義之TWD97坐標系常無法與現今的量測結果做精確的套合；在應用GPS進行相關測量工作時，也常常因不正確之參考站坐標，而在強制附合平差之成果，造成網型上之扭曲。此外，TWD97乃利用內政部第一期8個GPS連續站與國際IGS站聯算並建立在ITRF94框架下。在此之後，ITRF所使用之國際連續站持續增加，也陸續公布了新的框架，如ITRF2000、ITRF2005、ITRF2008 [Altamimi et al., 2007; Altamimi et al., 2011]。目前IGS(International GNSS Service)所發布之精密星曆(IGS final orbit)也在2006年11月後使用ITRF2005框架進行軌道計算。現今世界上利用GPS計算坐標與速度場之研究也已套合於ITRF2000與ITRF2005框架為主。因此，TWD97(ITRF94)坐標系統已與現今主流之坐標框架不符。

然而，利用GPS建立台灣之坐標框架系統並套合至國際框架下有二點需克服之困難，其分述如下：

(一)台灣附近缺乏穩定且均勻之IGS站分布；就北美與北歐地區之CGPS站解算工作，其挑選作為參考站之IGS站，均有良好分布且其坐標時間序列穩定性高[Calais et al., 2006;

Lidberg et al., 2007]。但台灣附近之IGS站數少且不均，台灣以東因太平洋而造成東邊幾無參考站可供選擇。此外，離台灣較近之IGS站，常由於地震或其它因素而造成其坐標時間序列呈不連續或非線性之行為，如新加坡之NTUS，中國之WUHN，菲律賓之PIMO等。位於台灣本島之2個IGS站，桃園縣中華電信研究所之TWTF站與新竹市工研院量測中心站TNML，在時間序列上之表現也不甚理想；TWTF之南北向時間序列有強烈之年週期性變化，且在高程向有非線性之變化；TNML則是觀測資料缺漏多。所以該2站作為參考站，其所得之結果也許會造成疑慮[TWTF與TNML之時間序列可參考中研院GPSLAB，<http://gps.earth.sinica.edu.tw/>]。

(二)台灣本島地殼運動速度變化大且大地震頻仍；台灣由於地處兩板塊之交界處，菲律賓海板塊每年約以8.2公分的速度往西北方擠壓，其中約有40%由花東縱谷斷層吸收其縮短量[Yu et al., 1997]。此外，台灣之東北部與西南部也因板塊碰撞而分別造成了順時針與逆時針之旋轉 [Ching et al., 2007; Hsu et al., 2009; Yu et al., 1997]。如台灣如此快速而複雜的板塊運動行為，就現行單以給定參考站之單一坐標與線性之速度場，實不足以反應參考站之真實位移。此外，台灣之大地震頻仍，如1999年9月21日之集集大地震、2002年3月31日之花蓮外海地震、2003年12月10日之台東成功地震、2006年12月26日之恆春外海地震及

2010年3月4日之高雄甲仙地震，以上地震均對其震央及其鄰近區域產生不同程度之同震與震後變形 [Ching *et al.*, 2007; Ching *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2001]。受到以上地震影響之區域，其參考點坐標已經偏移，若無合適的數學模式進行改正，則該參考點也無法反應真實位移；而實施相關測量工作時，也容易造成網型之扭曲。

本研究考慮台灣及其離島地區在板塊上、地理上之特殊性，提出一套建立台灣區域坐標參考框架之CGPS站解算策略。並結合台灣各單位之連續站網之連續站觀測量，計算台灣367站(國內359站，日本GEONET網8站，共367站)在2009年12月至2010年1月之連續站坐標，一能獲得最能符合現今實際位置且有效套合至國際框架ITRF2005之坐標，二能對未來作長期計算台灣高密度觀測網工作提供方法與驗證之參考。

二、資料蒐集與解算方法

本研究蒐集國內各單位之CGPS站與國際IGS站之觀測資料，觀測時間為2009年12月至2010年1月，共62天。在國內站方面，蒐集了不同單位(包含經濟部中央地質調查所、彰化縣政府、國立成功大學、名家公司、中華電信、交通部中央氣象局、清雲大學、逢甲大學、花蓮縣政府、中央研究院地球科學研究所、日本國土地理院、內政部地政司、國立宜蘭大學、內政部國土測繪中心、工業技術研究院量測技術發展中心、國立臺灣大學、台南縣政府、經濟部水利署)之連續站共367站之觀測資料，如圖 1所示。

在IGS站方面，本研究從SOPAC資料庫取得了TSKB(日本筑波)等14站之觀測資料，其地理分布如圖2所示。衛星軌道資料使用由International GNSS Service (IGS)機構所提供之最終解(IGSF)。本研究最後蒐集Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC)所提供之SINEX解來進行國際IGS站與國內連續GPS站之框架套合與求解。

本研究所使用之解算軟體為GAMIT/GLOBK 10.35。GAMIT是由MIT(Massachusetts Institute of Technology)、SIO(Scripps Institution of Oceanography)與CfA(Harvard - Smithsonian Center for Astrophysics)共同研發之高精度GPS科學解算軟體，而GLOBK同樣為MIT所撰寫之大地測量之網型平差軟體[Herring *et al.*, 2008]。GAMIT軟體在10.3版本後修正成模組式計算，對於一般解算每日解成果之用戶，只需安排好正確之控制檔及觀測量，之後再執行其批次檔及輸入相關參數，即可自動化解算。GLOBK則主要用來合併不同時段或不同觀測量(GPS、VLBI、SLR等觀測量)之整體網型平差軟體，對於目前高精度GPS解算之主流軟體，如GAMIT、BERNESE和GIPSY等，以上軟體所計算之自由網均可相容於GLOBK並進行合併工作。除此之外，對參考站之約制，GLOBK有兩種方法可供選擇；一為有限約制法(finite constraints)，此法可對各參考站自行定義容許移動量，缺點為在不了解參考站之真實位移下，容易產生過度約制(over constraints)之情形，進而造成網型之扭曲。二為整體約制法(generalized constraints)，藉由對各參考站與待測站所組成之基線網，利用平移、旋轉等方式

得到一最小平差量之解 [Dong *et al.*, 1998]，不會造成過度約制之問題。在本研究中，均利用整體約制法進行參考站之約制工作。

本研究即利用 GAMIT 軟體進行每日之自由網鬆馳解計算，之後再以 GLOBK 進行框架約制獲得所有連續站時間序列及速度場，其中在 GAMIT 軟體計算下之詳細參數設定如下：

- 甲. 是否加入地面參考站控制對衛星軌道進行估計：是
- 乙. 是否估計極潮 (pole tide)、固體潮 (earth tide) 及海潮 (ocean tide) 效應：是
- 丙. 取樣時間間隔：30 秒。
- 丁. 衛星截止角 (cut off angle)：15 度。
- 戊. 對流層估計：初始氣象參數模式採 GPT50 [Boehm *et al.*, 2007]，乾、濕映射函數 (mapping function) 採 GMF 模式 (Global Mapping Function) [Boehm *et al.*, 2006]，估計間隔為 2 小時。
- 己. 固體潮模式：IERS2003。
海潮模式：FES2004。

就坐標計算方面，我們先行選定國內核心站 (圖 3，共 26 站) 與鄰近台灣之 IGS 站 (圖 2，共 14 站) 利用 GAMIT 共同聯算求得每日自由網鬆馳解，再經由網形平差 (GLOBK) 步驟調整不同之解算策略，經由比較求得套合至 ITRF2005 框架 (Altamimi *et al.*, 2007) 於 2010.00 年之核心站最佳坐標解，用來提供之後其他國內站解算之約制。核心站之挑選原則為歷史悠久、觀測量資料完整、與透空度佳之連續站。其不同之約制策略分述如下：

策略 1：將每日自由網鬆馳解，利用

14 個 IGS 站 (圖 2) 作為約制，約制坐標為 IERS 定義之 ITRF2005 對 IGS 站之坐標框架，利用 GLOBK 進行網型平差求解國內核心站之坐標。

策略 2：將每日自由網鬆馳解，與 SOPAC 所提供之全球 IGS 站世界網進行合併求解，約制站則由 SOPAC 所認定在 ITRF2005 中表現較佳之世界核心站 (圖 4)，約制坐標為 IERS 定義之 ITRF2005 對 IGS 站之坐標框架。

策略 3：利用 SOPAC 所提供之 SINEX 解進行合併，約制站則由 SOPAC 所認定在 ITRF2005 中表現較佳之核心站 (圖 4)，約制坐標為 IERS 定義之 ITRF2005 對 IGS 站之坐標框架。由於該法只利用國際 IGS 站進行平差計算，與國際上之 GPS 計算中心如 IGS、SOPAC、MIT 等單位所使用之國際站雷同，因此我們將該方法所得之坐標將作為真值，並分別相對於策略 1 與策略 2 作比較。

為有效解算所有國內共 367 個連續站站坐標，我們分成 11 個子網分開進行解算，如圖 5 所示。其中，每子網至少有 6 個共點站，共點站由國內核心站所挑選出，共點站挑選原則為資料完整、透空度佳與均勻分布為原則，分別為金門 (KMNM)、馬祖 (MZUM)、澎湖 (PANG)、陽明山 (YMSM)、板橋 (BANC)、鳳林 (FLNM)。在利用 GAMIT 將各子網分別計算每日自由網完成後，再利用單日整體網形平差，對所有子網進行合併，進而

得到初步之各站時間序列。再檢視各站時間序列，濾除三倍標準差之粗差後，最後再進行整體網形平差求得各站於 2010.00 年之坐標。

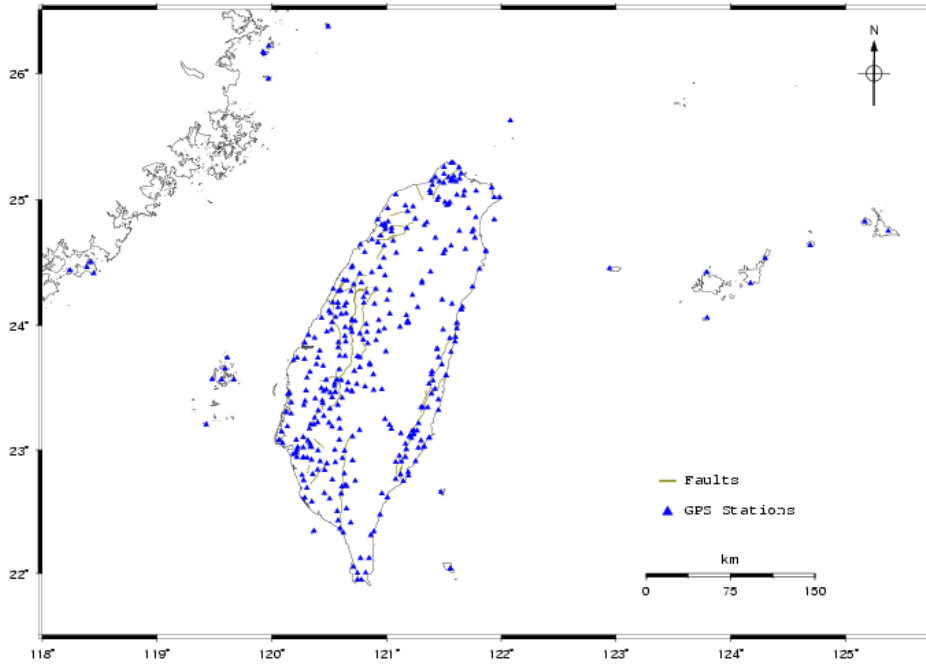


圖 1 台灣與鄰近離島之 367 個連續站分布圖

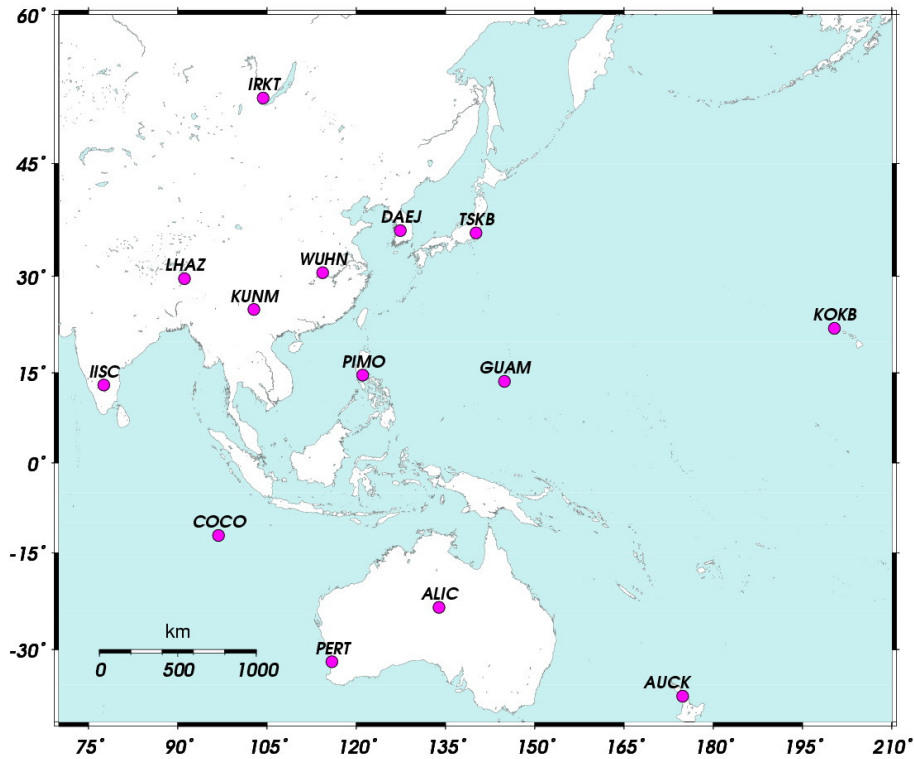


圖 2 選定之 14 個國際 IGS 站分布圖

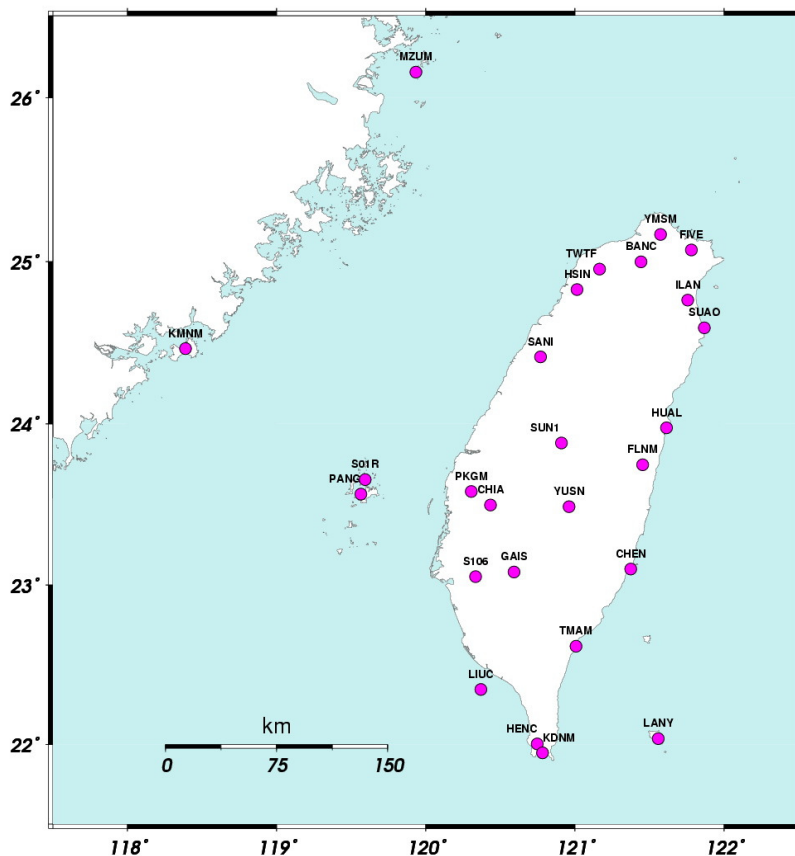


圖 3 選定之 26 站國內核心站分布圖

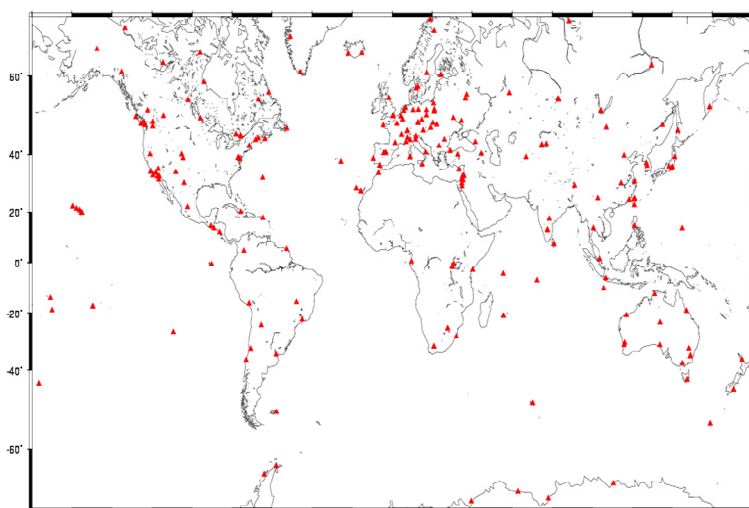


圖 4 進行網型平差與世界 SINEX 網合併時所約制之世界核心站。紅色三角點為選定之約制站，其選取來源乃從 SOPAC 所提供之 itr2005good.txt 檔案 (<http://sopac.ucsd.edu/processing/gamit/>)

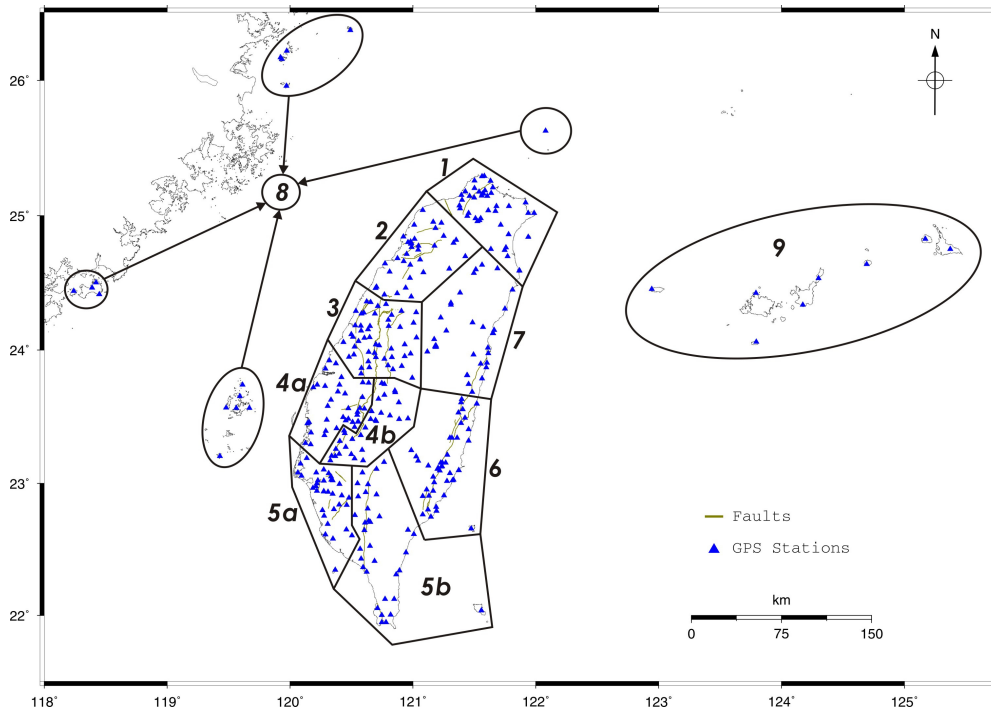


圖 5 GPS 連續站子網分布圖(藍色三角點為各連續站位置)

三、約制策略之比較與討論

為比較本研究利用不同策略所求得之坐標成果，我們將策略3所得之IGS站坐標視為真值，並將策略1與策略2所得之坐標與策略3相減作比較，其結果如表1所示；由表1可知，策略1與策略3在X、Y、Z之三方向較差之標準差值分別為7.6 mm，7.5 mm與4.0 mm，策略2則為3.3 mm，2.4 mm與3.9 mm。在策略1中，各方向較差值大於1 cm有KOKB、GUAM、TSKB、TWTF、PIMO、KUNM和LHAZ，其中較差之最大值为TSKB之X方向，為15.8 mm。在策略2中，各方向較差均小於1 cm，最大值为IRKT之Z方向，為8.57 mm。圖6顯示策略1與策略2相對於策略3在X、Y、Z三方向之系統差異。由圖6可發現X與Y方向均有一明顯之離群點(KOKB)，去除KOKB站觀測值後進行迴

歸分析，X、Y、Z三方向之迴歸統計值分別為0.89，0.60，0.66。為了解官方公布之ITRF2005坐標與我們所視為真值之策略3坐標之差異，表2列出了各IGS站之較差表。其中最大之差異量為TWTF之Y方向，為34.9 mm。

以下就所得之結果分節論述：

- 1.由結果顯示，合併SINEX解後之坐標成果(策略2)較接近於世界網套合於ITRF2005之框架，三方向之坐標差均在4 mm以下。策略1成果離ITRF2005較遠，三方向之坐標差約在7.5 mm。進一步探討策略1與策略2之坐標差異，由圖6可知，策略1與策略2之坐標，存在一系統上之差異，意即反應兩策略之差異主要在於整體網型外部之平移與旋轉。因此，我們可以說，若我們希

望坐標參考框架能確切套合於國際框架下，如ITRF2005，平差時加入國際SINEX解能得到較接近於國際框架之結果。但若不加入國際SINEX解，如策略1，內部網型與加入SINEX解之結果是非常類似的。這是因為本研究所使用之整體約制平差法較不會對約制站進行緊密約制(tie constraint)，因此較不會造成內部網型之扭曲。

2.KOKB站在估算兩種策略之系統關係時為差異過大之離群點，原因可能在於KOKB在策略1中最邊緣且最遠的1點，因此在之解算和約制計算時其成果不比其它站為佳。TWTF為台灣內部之IGS站，但此研究均未約制該站。此外，TWTF的長時期時間序列均顯示強烈週期性與非線性變化，因此在三

方向之較差均偏高。

3.就ITRF2005官方公告坐標與策略3之比較，發現具有公分級之坐標差與非系統性之差異。可能原因在於ITRF2005坐標的決定乃採用1996.0-2006.0年之IGS站觀測量，且包含其它之大地測量工具如VLBI、SLR等觀測整體平差求得。本研究之策略3為62天之2010年前後之GPS觀測量，就某些IGS站之坐標與速度場已發生偏移，且單純只用GPS觀測量求得。因此，在台灣鄰近的IGS站群，在2010年時的真實基線長度已和ITRF2005框架已有公分級之差異。在往後進行台灣之控制測量，若須鎖定國際IGS站並套合於ITRF2005，應考慮到該效應並評估其可能所造成之網型扭曲。

表 1 策略1與策略2相對於策略3套合於ITRF2005之較差成果，表中之粗體字為較差超過1 cm 之坐標分量 (M1:策略1、M2:策略2、M3:策略3)

	X (mm) (M2-M3)	X (mm) (M1-M3)	Y (mm) (M2-M3)	Y (mm) (M1-M3)	Z (mm) (M2-M3)	Z (mm) (M1-M3)
KOKB	1.78	-13.21	0.73	15.72	-1.60	3.35
AUCK	-0.38	2.86	0.43	2.07	-2.12	-0.99
GUAM	6.49	15.03	-5.00	-8.20	-4.71	-6.44
TSKB	7.28	15.77	-5.98	-9.51	-5.73	-11.32
ALIC	-0.38	4.41	-1.98	-6.89	-2.08	-2.99
DAEJ	0.21	8.20	-3.53	-8.37	-0.75	-6.05
TWTF	2.03	11.48	-3.58	-10.90	-0.04	-4.51
PIMO	4.56	14.54	-6.43	-14.11	0.55	-2.73
PERT	0.37	3.93	-1.29	-8.85	6.59	3.54
WUHN	-0.09	7.94	-2.32	-9.08	0.98	-4.16
IRKT	-4.97	-0.04	0.11	-5.56	8.57	0.95
KUNM	-1.78	4.31	-4.02	-10.74	1.33	-3.13
LHAZ	-1.73	2.92	-4.47	-12.25	-0.50	-6.64
IISC	-0.95	0.11	0.11	-8.33	2.90	-4.39
平均值	0.89	5.59	-2.66	-6.79	0.24	-3.25
標準差	3.33	7.62	2.42	7.47	3.87	4.03

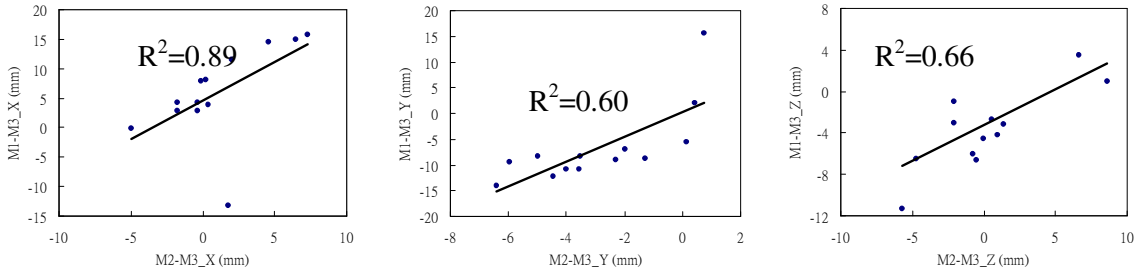


圖 6 策略 1 與策略 2 相對於策略 3 之坐標較差在 X, Y, Z 三方向之統計圖。橫軸為各站策略 2 之坐標減策略 3 之坐標，縱軸為各站策略 1 之坐標減策略 3 之坐標。趨勢線由最小二乘法求得； R^2 則去除 KOKB 站之後之迴歸統計值。 R^2 為評估兩資料之相關程度參數，接近 1 為高相關，接近 0 為低相關。

表 2 ITRF2005 實際公告坐標成果與策略 3 之較差成果

	X (mm) (ITRF2005-M3)	Y (mm) (ITRF2005-M3)	Z (mm) (ITRF2005-M3)
KOKB	9.95	10.43	-6.56
AUCK	-12.60	2.93	-7.38
GUAM	8.64	-0.42	-10.71
TSKB	21.43	1.58	-9.12
ALIC	-1.10	-3.72	-2.95
DAEJ	1.59	-2.35	-3.30
TWTF	20.98	-34.93	-21.88
PIMO	9.67	-18.93	-15.50
PERT	3.68	-22.14	22.33
WUHN	11.07	-23.59	-7.60
IRKT	-2.85	2.52	3.81
KUNM	-1.00	3.76	10.14
LHAZ	7.50	-16.46	-11.41
IISC	5.23	12.34	7.54
平均值	5.87	-6.36	-3.76
標準差	9.10	14.26	11.43

四、國內 367 個約制站之解算成果

就全台 367 連續站坐標計算方面，本研究採取由策略 2 所求得國內核心站之坐標進行估計約制，獲得各站之坐標序列。為探討各站之精度成果，本研究將每站的每日時間序列估計其加權均方根值(WRMS)，其成果如圖 7。各方向之時間序列之加權均方根(WRMS)分別為南北向 0.7 mm，東西向 0.8 mm 和高程向 2.7

mm。就 Herring et al. (2009) 對 GPS 坐標時間序列之統計描述說明，水平向 1-3 mm，高程向為 4-7 mm，我們的成果具高度的重複性。我們可發現圖 7 中有少數的站顯示較大之 WRMS 值，此反應了該站之坐標重複性差，可能是由於資料不完整或透空度不佳所造成之結果。此外，在此次計算之時間段中，於 2010 年 12 月 19 日在花蓮磯崎發生了一芮氏規模 6.9 之地震。我們於坐標時間序列中發現 DPIN 等 7

站在地震前後產生了不同程度之位移，如圖 8。其中最大之偏移為 ERPN 之南北向，發生了 1.4 cm 之偏移。因此，地震因素也造成了某些站之 WRMS 偏大的原因。

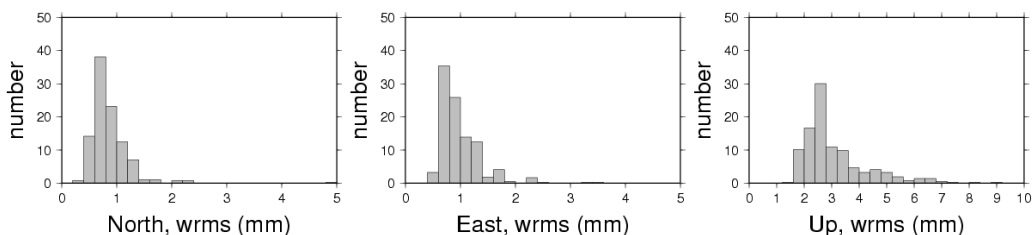


圖 7 所有連續站時間序列於南北、東西與垂直方向之加權均方根統計值

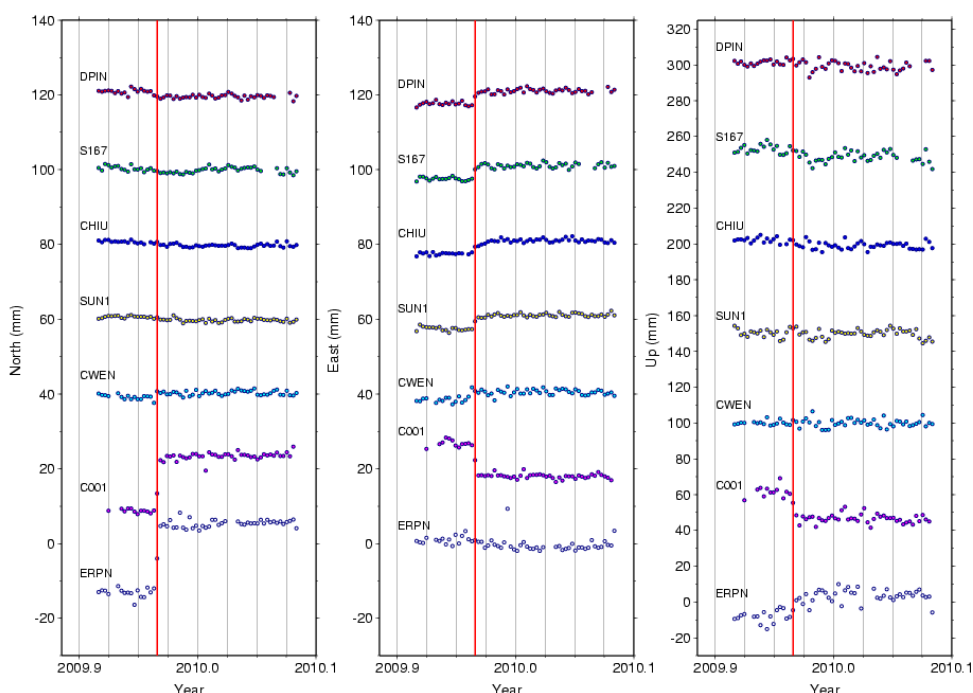


圖 8 2010 年 12 月 19 號之花蓮外海地震對 DPIN 等 7 個 CGPS 站所造成之同震位移變化

五、結論與建議

本研究比較並分析不同約制策略對坐標之影響且完成台灣 367 站之連續站坐標計算並有效套合至 ITRF2005 框架下。本研究之結論與建議，分述如下：

1. 本研究利用 GAMIT/GLOBK 計算鄰近台灣之 14 個國際站和台灣 25 個核心站，之後再利用世界網合併

求解套合於 ITRF2005 框架下，其坐標成果與用世界網合併求解之差異主要在於外部之框架平移或旋轉，而非內部之網型差異。

2. 以 2010 前後之觀測量解算成果與官方公布之 ITRF2005 坐標進行比較，發現多數站已有公分級之差異，代表台灣附近的 14 個連續站之官方公布 ITRF2005 坐標也無法真

實反應至2010年之真實位移。

- 3.就全台367連續站坐標計算，其坐標重複性三方向之分別為0.7 mm，0.8 mm和2.7 mm，其成果具高度的重複性。而且精度與內政部原公布之TWD97坐標系統所引用之8個追蹤站相當，符合「基本測量實施規則」一等基本控制點精度規範。
- 4.本研究發現我們選定之IGS站在2010年之坐標成果與官方ITRF2005之定義存在公分級之非系統性差異。而國際地球運轉與參考系統服務中心(IERS)已於2010年6月正式公布最新之國際參考框架ITRF2008坐標系統，該系統應較ITRF2005更適於近年之坐標成果平差。此外，本研究之62天GPS計算成果僅能提供單一時刻(2010.00)之坐標成果。對於坐標框架之穩定性而言，計算多年之GPS成果並估計其速度場來作為參考坐標定義，實為促進框架穩定之有效方法，並且於國外也已加以實現，如紐西蘭、日本等。因此，未來工作可朝向於更長時間的計算並套合於最新之國際參考框架以求得更為穩定之國家坐標框架。
- 5.臺灣地區未來可從上述367點中，選取適當分布位置之部份點位為一等基本控制點，這些點位具有長期觀測且多數可「即時」提供，可用以取代原本TWD97系統所公布105點基本控制點，讓點位間距可小於目前內政部國土測繪中心e-GPS系統約50公里測站間距，對於後續除可長期建立點位速度場，推估變位分析模式外，亦可提

供各界實務測量使用，有利於未來國家各項建設成果之測繪坐標統一，利於資料交換。

誌謝

本研究承蒙內政部國土測繪中心工作案”以GAMIT軟體辦理2010年國內GPS連續觀測站資料解算工作”之支持，以及各單位之GPS觀測資料之提供。感謝IGS機構提供之精密星曆資料與SOPAC所提供之SINEX解。

參考文獻

- 1.Altamimi, Z., X. Collilieux, and L. Métivier, 2011, ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame, *Journal of Geodesy*, 1-17,10.1007/s00190-011-0444-4.
- 2.Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher , 2007, ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, 112(B9), B09401, 10.1029/2007jb004949.
- 3.Boehm, J., R. Heinkelmann, and H. Schuh , 2007, Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications, *Journal of Geodesy*, 81(10), 679-683, 10.1007/s00190-007-0135-3.
- 4.Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh , 2006, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys.Res.Lett.*,33(7),L07304, 10.1029/2005gl025546.
- 5.Calais, E., J. Y. Han, C. DeMets, and J. M. Nocquet , 2006, Deformation of the North

- American plate interior from a decade of continuous GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, *112*(B6), B06402, 10.1029/2005jb004253.
6. Ching, K.-E., R.-J. Rau, and Y. Zeng, 2007, Coseismic source model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, *112*(B6), B06422, 10.1029/2006jb004439.
 7. Ching, K.-E., K. M. Johnson, R.-J. Rau, R. Y. Chuang, L.-C. Kuo, and P.-L. Leu, 2011, Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, *301*(1-2), 78-86.
 8. Dong, D., T. A. Herring, and R. W. King, 1998, Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, *72*(4), 200-214, 10.1007/s001900050161.
 9. Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky, 2009, Introduction to GAMIT /GLOBK, Release 10.35, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
 10. Hsu, Y.-J., S.-B. Yu, M. Simons, L.-C. Kuo, and H.-Y. Chen, 2009, Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, *479*(1-2), 4-18.
 11. Lidberg, M., J. Johansson, H.-G. Scherneck, and J. Davis, 2007, An improved and extended GPS-derived 3D velocity field of the glacial isostatic adjustment (GIA) in Fennoscandia, *Journal of Geodesy*, *81*(3), 213-230, 10.1007/s00190-006-0102-4.
 12. Yang, M., C. L. Tseng, and J. Y. Yu, 2001, *Establishment and maintenance of Taiwan Geodetic Datum 1997*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, ETATS-UNIS.
 13. Yu, S.-B., H.-Y. Chen, and L.-C. Kuo, 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, *274*(1-3), 41-59.
 14. Yu, S.-B., et al. 2001, Preseismic Deformation and Coseismic Displacements Associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, *91*(5), 995-1012, 10.1785/0120000722.