

## 高頻 GPS 連續站動態定位時間序列之精度分析

洪煌凱<sup>1</sup> 饒瑞鈞<sup>2\*</sup> 陳鶴欽<sup>3</sup>

論文收件日期：101.03.21

論文修改日期：101.05.20

論文接受日期：101.08.10

### 摘要

本研究利用 GPS 連續站觀測資料進行動態定位處理，並利用恆星日濾波法與空間濾波法改進坐標時間序列之重複性，期而促進 GPS 在短時間監測位移之效能。研究成果發現，1 Hz GPS 觀測資料經過恆星日濾波法以及空間濾波法修正之後，可有效降低標準差至水平方向約 0.8-1.0 cm，垂直方向約 1.8-4.6 cm。本文再以 2010 年 3 月 4 日之甲仙地震為例，利用 GPS 取得地震時間段之同震與地震波波形，並與積分後之強震儀資料進行比對。結果可知，甲仙地震造成測站 CISH、MLON 與 SHWA 有東西向 1.0 cm 之同震位移量。相較於強震儀紀錄探測地震波形，GPS 與強震儀位移獲得之地震波大致相符，但取樣頻率為每秒 1 筆之 GPS 位移仍不足獲得完整正確之波形。

**關鍵詞：**GPS 連續站、甲仙地震、空間濾波法、恆星日濾波法

---

<sup>1</sup> 博士班研究生，國立成功大學地球科學學系。

<sup>2</sup> 副教授，國立成功大學地球科學學系。

<sup>3</sup> 技正，內政部國土測繪中心；兼任助理教授，建國科技大學。

\* 通訊作者，TEL: (06)2757575 # 65425，E-mail: [raurj@mail.ncku.edu.tw](mailto:raurj@mail.ncku.edu.tw)。

# Precision analysis of kinematic position time series from high-rate continuous GPS observations

Huang-Kai Hung<sup>1</sup>, Ruey-Juin Rau<sup>2\*</sup>, He-Chin Chen<sup>3</sup>

## Abstract

Modified sidereal filtering and Spatial filtering methods are used to improve the precision of kinematic position time series generated from continuous GPS stations. The results show the precision of GPS kinematic position time series after filtering are 0.8-1.0 cm and 1.8-4.6 cm in horizontal and vertical components, respectively. The co-seismic displacements in station CISH、MLON and SHWA from Jiashian earthquake is 1.0 cm in EW direction. The seismic waveform derived from GPS is consistent with integral seismic displacement, but the GPS waveform has aliasing due to lower sampling rate of measurements.

**Keywords:** Continuous GPS, Jiashian Earthquake, Modified Sidereal Filtering, Spatial Filtering

---

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University.

<sup>3</sup> Specialist, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior; Adjunct Assistant Professor, ChienKuo Technology University.

\* Corresponding Author, TEL: +886-6-275-7575#65425, E-mail: [raurj@mail.ncku.edu.tw](mailto:raurj@mail.ncku.edu.tw).

## 一、前言

GPS 定位技術經超過 20 年之發展與應用，目前已被廣泛的被應用於國家基本測量與地表監測。台灣至今所使用之 TWD97 坐標框架系統，均使用靜態 GPS 定位技術所建立(Yang et al., 2001)。「內政部辦理一等、二等衛星控制點測量作業規範」明定一等、二等之衛星控制點之 GPS 觀測時間需超過 4 小時與 2 小時以上。因此，此後之國家衛星控制點均利用 GPS 靜態測量進行建立與維護。隨著求解單一時刻之周波未定值技術之發展，GPS 動態定位(Kinematic GPS)與即時動態定位技術(GPS-RTK)大幅縮短了定位所需的時間(Hofmann et al., 1994; 楊名與余致義, 1997)。於是，動態定位也被應用於土地複丈、圖解地籍圖數化與圖根點之增、補建作業(楊名與余致義, 1997; 陳芳茂與周天穎, 2002; 蘇添旺與高書屏, 2003; 鄭彩堂與高書屏, 2001)。而之後的虛擬參考站技術(VBS-RTK)之建立，讓 RTK 使用者不需要自行架設基站，即可獲得與精度 RTK 定位相同或以上之定位成果(Rizos, 2002; 曾清涼等, 2004)。目前國土測繪中心的 e-GPS 系統(<http://www.egps.nlsc.gov.tw/>)就是涵蓋台、澎、金、馬全區之虛擬參考站系統，並開放給一般企業與民眾之使用並廣泛應用於各種工程與控制測量之作業(王敏雄等, 2006; 高書屏等, 2006; 崔國強與王敏浩, 2006; 劉榮增等, 2011)。

然而，對於在台灣之 GPS 連續站(CGPS)進行動態定位分析來推求地表位移仍少。目前國內大部份的文獻利用 GPS 連續站探測地表位移仍以靜態定位為主，並應用於地殼長期速度變化、山區地滑及地下水效應等(Yu et al., 1997, 2001; Hu et al., 2006; Su et al., 2009)。而在國外相關文獻已有利用高頻(取樣率高於 1 秒)GPS 動態定位成果來擷取因地震所產生之搖晃與永久位移(Larson et al, 2003; Bock et al., 2004; Bilich et al., 2008)、橋樑因車流所造成之振動問題以及高樓因風動所引致之搖晃問題進行探討(Hristopoulos et al., 2007; Kogan et al., 2008)。在台灣之相關研究，則有利用高頻 GPS 動態定位探測 2002 年台北 331 地震與 2006 年屏東恆春地震來獲取其瞬時地表運動(Chen et al., 2004, 2008)。

台灣目前所架設之連續站，已趨近於 400 站(<http://gps.earth.sinica.edu.tw/>)，而提供 1 秒之高頻資料也超過 200 站。本研究蒐集及解算台灣高頻 GPS 觀測資料，並對於其位移時間序列進行分析與探討，並利用濾波法改善其位移重複性之程度，期望提升台灣在連續站用於監測動態位移之精度。之後並以 2010 年甲仙地震為例，說明經濾波改正後之結果進行監測同震位移之能力。

## 二、資料蒐集與解算方法

### (一) 資料來源說明

來來本研究蒐集內政部國土測繪中心與中央氣象局之 7 站 CGPS 觀測資料，包含金門烈嶼 LEYU、澎湖吉貝 JIBE、澎湖湖西 HUSI、澎湖外鞍 WIAN、澎湖七美 CIME、高雄旗山 CISH 與台南新化 SHWA，如圖 1 所示，觀測時間為 2010 年 3 月

1 日至 3 月 4 日，共 4 天，觀測取樣頻率為 1 秒。衛星軌道資料使用由 International GNSS Service (IGS)機構所提供之最終解(IGSF)。

## (二) GPS 動態定位解算方法

本研究所使用之解算軟體為 GAMIT/GLOBK 10.35 之 TRACK 模組。TRACK 動態相對定位模組為麻省理工學院(Massachusetts Institute of Technology)行星、地球與大氣科學系教授 Tom Herring 團隊所研發之動態解算後處理軟體(Chen, 1998; Herring et al., 2009)。該軟體在計算每時刻之位置之前已處理了全時段之觀測量，並且利用卡曼濾波(Kalman Filter)技術估計在解算位置時所需之參數。對於週波未定值之求解，TRACK 使用 Melbourne-Wubena 寬巷組合應用於在長基線之網型，藉以消除電離層之影響。為取得最佳之解算成果，TRACK 軟體會持續迭代至未收斂之週波未定值數為最小。針對 10 公里以內之基線，利用區域環境之一致性，在差分的過程可消除大部份之誤差，使定位之成功率較高。而隨著基線長度增加，兩地之電離層與對流層遲延量變異性較大，因此利用差分濾除誤差之效能降低，其定位精度亦隨之降低。在大於 100 公里之基線，週波未定值常有不收斂之情形。此時 TRACK 可利用在 GAMIT 靜態計算中所獲得參數代入第二次之解算來獲得更佳之定位成果。該軟體經超過之十年持續更新與進步，其定位精度與模式均有所提升，在空載光達之定位應用(King et al., 2009)與地震波導致之地表位移(Davis and Smalley, 2009)均獲得良好之結果。TRACK 動態定位模組之演算細部流程於圖 2 所示。

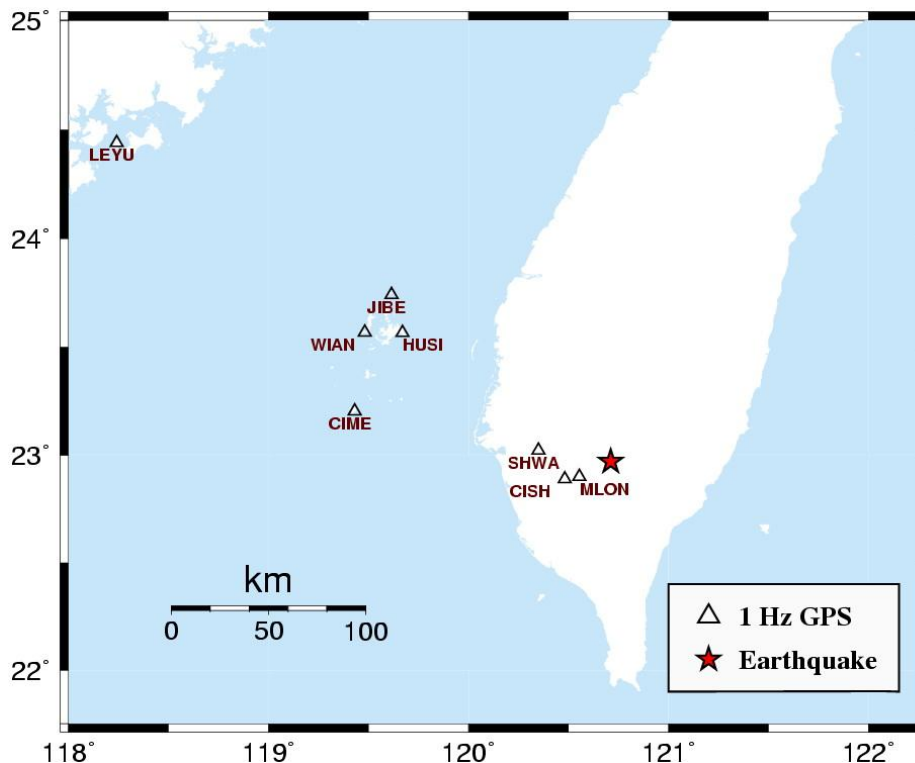


圖1 GPS 連續站之分布圖。其中烈嶼站 LEYU 為本文所使用之參考站，澎湖 JIBE WIAN、HUSI、CIME 等 4 站用來組成空間濾波，而離震央約 40 公里內之 SHWA CISH、MLON 等 3 站乃用來探討高頻 GPS 之精度與在地震發生時之反應訊號

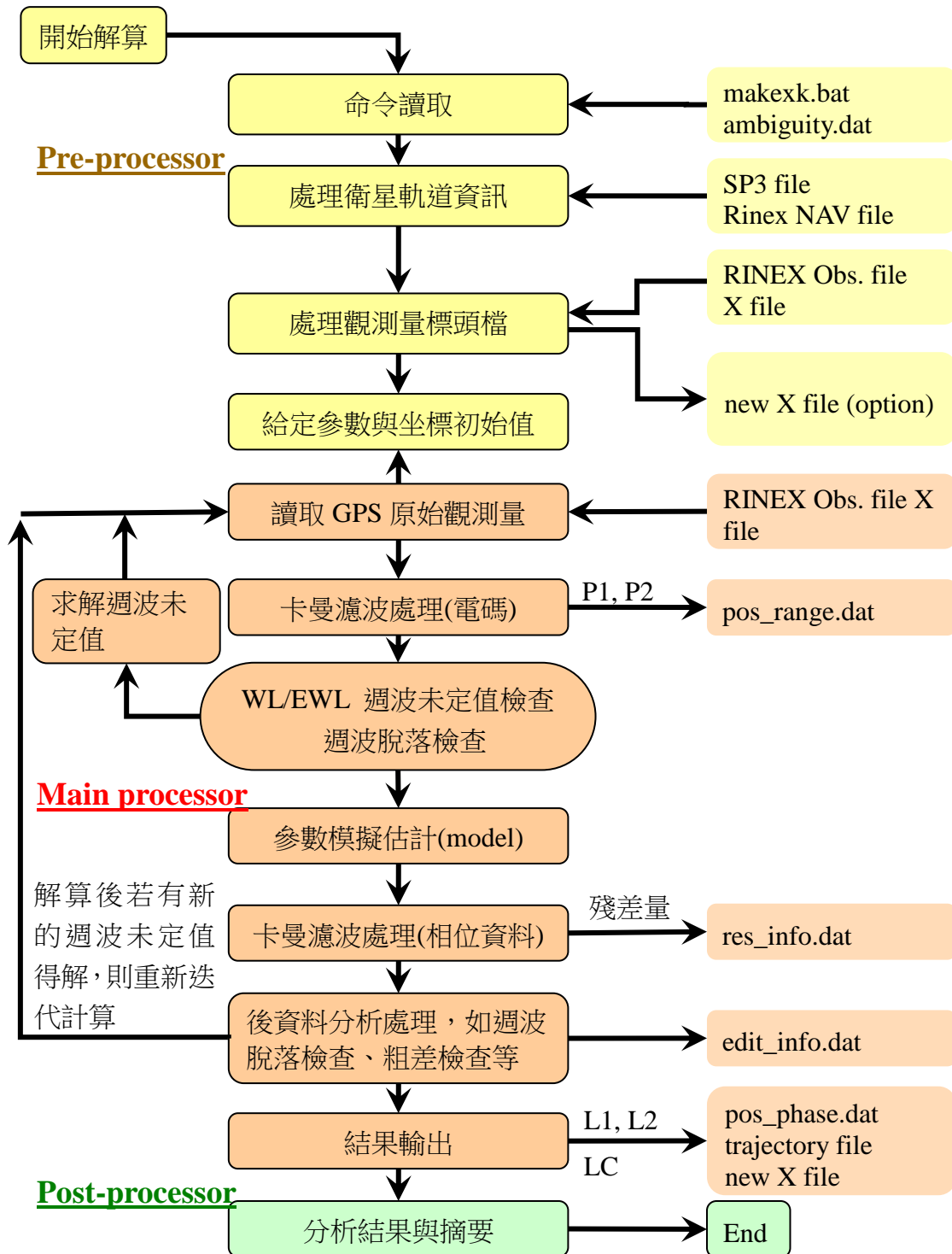


圖2 GPS 動態定位解算模組 TRACK 之演算流程 (修改自 Chen, 1998)

### (三) 濾波種類與說明

#### 1. 恆星日濾波(Sidereal Filtering)

恆星日之定義是地球上某點對某個恆星連續兩次經過其上空同一點之時間間隔。恆星日由於地球之自轉速度些微快於 24 小時，其時間段約略小於一天，且由於地球章動(nutation)之作用而導致恆星日時間間隔並不固定。平均恆星日約為 23

時 56 分 4 秒，比太陽日少了 236 秒。Bock et al.(2000)首先提出 GPS 連續站進行動態定位解算，其定位成果偏差會有一恆星日之重複週期，並首次提出恆星日濾波法提昇定位精度。Choi et al. (2004) 發現 GPS 衛星群之軌道週期均不一致，並且也會隨時間而改變，並提出了修正恆星日濾波法 (Modified Sidereal Filtering)，其軌道重複時間則比平均恆星日少 9 秒。Agnew and Larson(2007)更建立了對單一衛星估計其重複軌道週期之演算法，並公開計算軟體，只要輸入星曆資料，即能獲得某時段某顆衛星之重複週期，而該研究所建議之週期為 247 秒(比平均恆星日少 11 秒)。

為了實際理解恆星日濾波法之作用，我們利用圖 3 來說明。圖 3 為旗山站(CISH)與美濃站(MLON)經動態定位後所得之東西向坐標時間序列，計算時所鎖定之參考站為烈嶼(LEYU)。圖 3 之三條黑線分別為 2010 年 3 月 1 日、2 日、3 日之時間序列，橫軸為該天之時間，單位為秒，起算 0 秒為該天之格林威治時間 0 點，對應於中原時間為早上 8 點，顯示之時間段乃從 0 秒至 2400 秒。縱軸則為位移，單位為公釐(mm)。觀察 CISH 三天之位移序列發現，動態定位之成果有約 3 cm 之變異(藍色線)。為獲得 3 月 4 日經恆星日濾波後之位移量，我們將 3 月 1 日至 4 日之 GPS 每時刻坐標解，以(86400-247)秒之週期，取得 1 日至 3 日之某時刻之加權平均值，而該值即為恆星日濾波之改正量，如公式(1)所示。圖 3 之第 4 條序列(Modified Sidereal Filtering)即為提供給 3 月 4 日序列來扣除之濾波改正量(綠線)。所求得之恆星日濾波改正量與 4 日之時間序列比較(第 5 條序列)之差即為經恆星日濾波改正量後之坐標序列(第 5 條序列)。圖中第 6 條序列在約 1150 秒之時段有一較大之變動，該變動可對應至甲仙地震之時間。

$$(mp_i)_d = \sum_{k=d-3}^{k=d-1} \left[ \frac{(x_i)_k}{(\sigma_i^2)_k} \right] / \left[ \sum_{k=d-3}^{k=d-1} \frac{1}{(\sigma_i^2)_k} \right] \quad (1)$$

$$(x_i)_d^{flt} = (x_i)_d - (mp_i)_d \quad (2)$$

其中，mp 為與恆星日濾波改正量，d 表示天數，i 為資料取樣之某時刻(epoch)， $x_i$  為某時刻之坐標值，而  $\sigma_i$  為單一時刻坐標之標準差(formal error)。

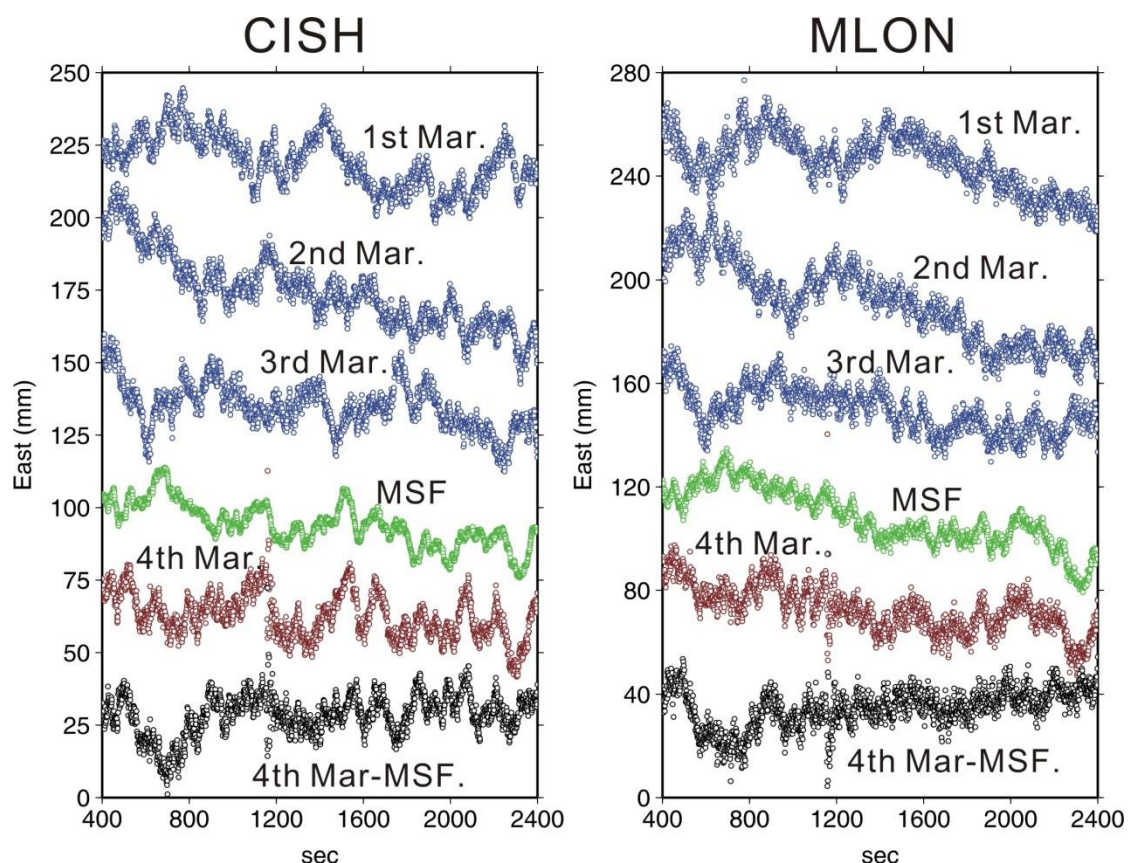


圖3 恆星日濾波法示意圖。由上而下第 1-3 條序列分別為旗山站 CISH 與美濃站 MLON 於 3 月 1 日至 3 日之東西向每時刻坐標解。第 4 條序列則是經由 1 日至 3 日之位移資料組成之 3 月 4 日恆星日濾波改正量(MSF)。第 5 條序列則為 3 月 4 日(發震日期)之坐標序列。第 6 條序列則為 3 月 4 日之坐標序列扣除 MSF 之成果

## 2.空間濾波(Spatial Filtering)

空間濾波技術最先是用於 GPS 每日靜態定位之時間序列成果，乃藉由估計一個區域中 GPS 測站群在同一天之共同誤差偏移量(common mode noise)，再對每一時間序列扣除該偏移量以提升座標精度之方法。本技術最先由 Wdowski et al.(1997)所提出，之後便廣泛成為 GPS 每日位移時間序列之既定流程(Nikolaidis, 2002)。空間濾波法乃透過計算與目標站相鄰站之時間平均，統計 S 個測站的總和之後，計算出共同平均的殘差值，該殘差即為該時刻之修正量，如公式(3)、(4)所示。Bilich et al.(2008)將此法應用於高頻動態定位時間序列上，並配合恆星日濾波法改善其動態定位精度，獲得在 2003 年於阿拉斯加之 Danali 地震之震波波形。

因此在本研究中，我們將金門烈嶼站 LEYU 選為參考站，求待測站之位移。為了在組成空間濾波時不要受到個別站之環境影響，我們選定透空度良好且距離相鄰的 4 站，即澎湖地區的 JIBE、WIAN、HUSI 以及 CIME 站，來做為組成空間濾波之基準站，如圖 4 所示。最後將此 4 序列同一時刻之位移量進行平均，即得到空間濾波修正量，即為圖 4 中第 5 條序列。

$$\bar{\varepsilon}(d) = \frac{\sum_{s=1}^N \varepsilon_s(d)}{N} \quad (3)$$

$$\hat{O}_s(d) = O_s(d) - \bar{\varepsilon}(d) \quad (4)$$

其中， $\varepsilon(d)$ 為某時刻殘差量， $s$ 為某 GPS 站之序號， $N$ 為用來產生濾波之 GPS 站之總數， $O(d)$ 為某時刻之原觀測量。公式(3)說明利用平均法取得某時刻之空間濾波改正值，公式(4)說明原始序列減去空間濾波改正值而獲得改正後時間序列。

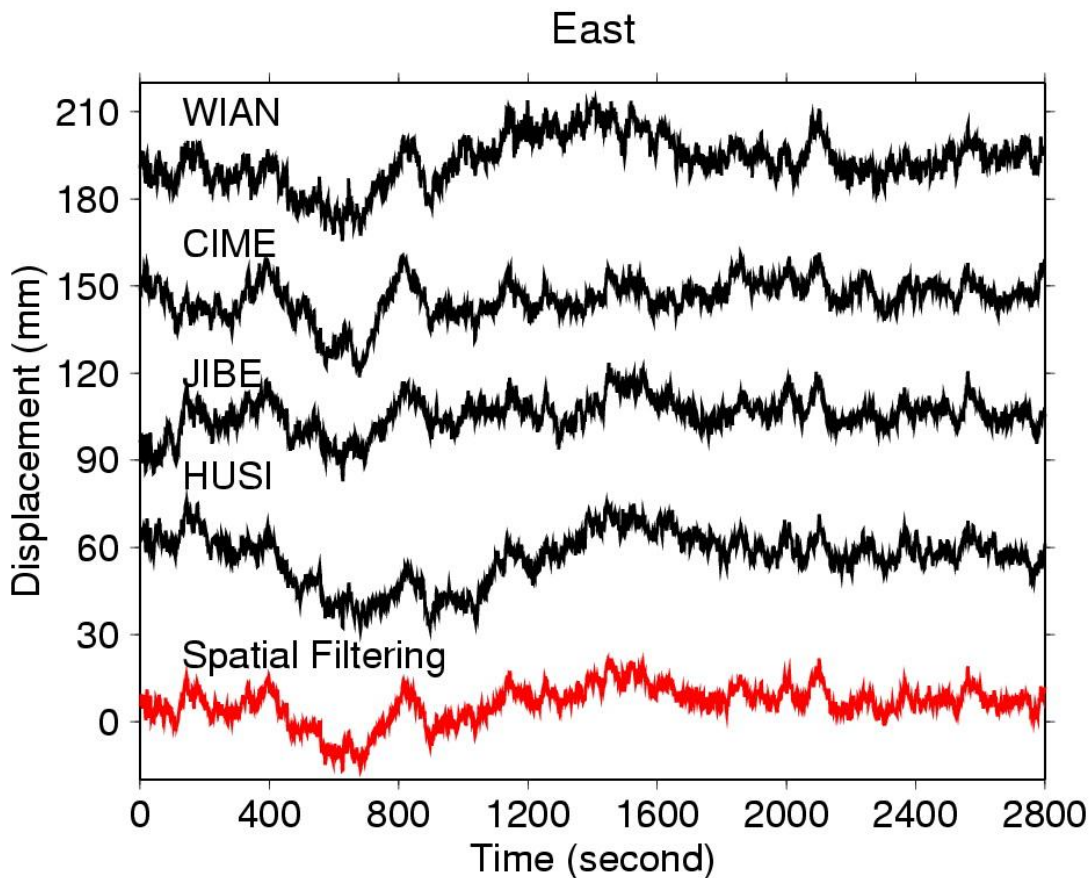


圖4 空間濾波法示意圖。圖中前4條序列由上至下依序為 GPS 測站 WIAN、CIME、JIBE 與 HUSI 在 3 月 4 日格林威治時間 0 時起算至 2800 秒之東西向時間序列，第 5 條序列則是由前 4 條序列所組成之空間濾波改正量

### 三、研究結果

本研究為了解 GPS 連續站之動態定位經兩種濾波法所得之精度成果，並應用於 2010 年 3 月 4 日甲仙地震之同震位移估計，我們主要以離甲仙地震震央附近之旗山站 CISH、美濃站 MLON 與新化站 SHWA 之定位成果進行探討。其定位精度經濾波改正前後之序列標準差如表一所示。未經濾波之結果在水平向之標準差約在 12-17



mm，原始高程向標準差則約為 120-180 mm。經恆星日濾波改正後，精度可改善至水平向 8-12 mm，高程向 35-50 mm。序列經恆星日濾波與空間濾波改正後，標準差可進一步提升至水平向為 4-10 mm，高程項為 18-46 mm，比原始之序列提升了 2 倍以上之精度。針對 CISH 等 3 站之序列成果分析，如圖 5 所示，未經濾波之序列有約 30 mm 振幅之波動，並且有向下偏移之趨勢，高差可超過 4 cm。而經兩濾波後之成果，能有效的將波動降低和去除低頻之偏移。圖 6 則進一步利用頻譜分析說明兩種濾波在不同頻率下之精度改正功效。由原始序列與經恆星日濾波後之成果比較後，我們發現恆星日濾波(MSF)可有效濾除頻率 0.01 Hz 以下之雜訊(等同週期 100 秒以上之雜訊)。而加入空間濾波(SP)後，其 0.01 Hz 以下之雜訊較 MSF 為弱，但對於頻率 0.01-0.2 Hz 間之雜訊折減則較 MSF 為強。

圖 7 顯示 CISH 等 3 站在甲仙地震時間段前後之坐標位移情形。圖中仍可顯示二種濾波法對位移序列重複性之改進效果。圖中發現在甲仙地震發震後約 10 秒，三方向之序列均產生明顯之振動。觀察經過濾波後之東西向序列，發現在 CISH 站與 SHWA 在振動後產生一向西之永久變形，約 1 cm。而 SHWA 站則是向東位移約 1 cm。此外，3 站在地震發生時均產生振幅 6 cm 以上之震動。

為了探討 GPS 解析地震波波型之能力，我們利用台南新化站 SHWA 為例，並且取得在此站附近之強震站(CHY063)作比較。強震站所記錄之觀測量為加速度，因此在與 GPS 結果比較前，我們先將該資料進行積分，其處理程式為 IRIS 機構之 SAC 軟體，而獲得強震儀位移，如圖 8 所示。兩者資料比較後發現，在地震發震後約 30 秒，序列均有較大之位移產生，依據強震儀位移之結果，其最大振幅分別為南北向 16 cm，東西向 29 cm 與高程向 12 cm。GPS 位移與強震儀位移大致相同，但強震儀在震前與震後時段有明顯之低頻位移，而 GPS 結果較為平穩。相較於強震儀結果，GPS 位移重複性較差，特別在高程向更明顯。此外，在地表搖動之時間段，雖然兩觀測在同時刻之位移一致，但 GPS 位移和強震儀位移所得之波形仍有偏差，GPS 位移所得之最大振幅也比強震儀結果為小。

表1 CISH 等 3 個 GPS 連續站之動態定位在三方向之分析結果，其中 RAW 為未經濾波之序列標準差，而 MSF 與 SP 分別代表經恆星日濾波與空間濾波後之作用

		CISH(mm)	MLON(mm)	SHWA(mm)
East	RAW	11.9	13.5	14.1
	after MSF	8.2	10.0	8.5
	after MSF and SP	4.5	7.2	5.2
North	RAW	11.7	16.8	15.7
	after MSF	10.1	12.4	9.3
	after MSF and SP	4.3	10.8	5.2
Vertical	RAW	117.5	176.3	122.5
	after MSF	34.9	41.2	49.0
	after MSF and SP	17.9	45.6	46.0

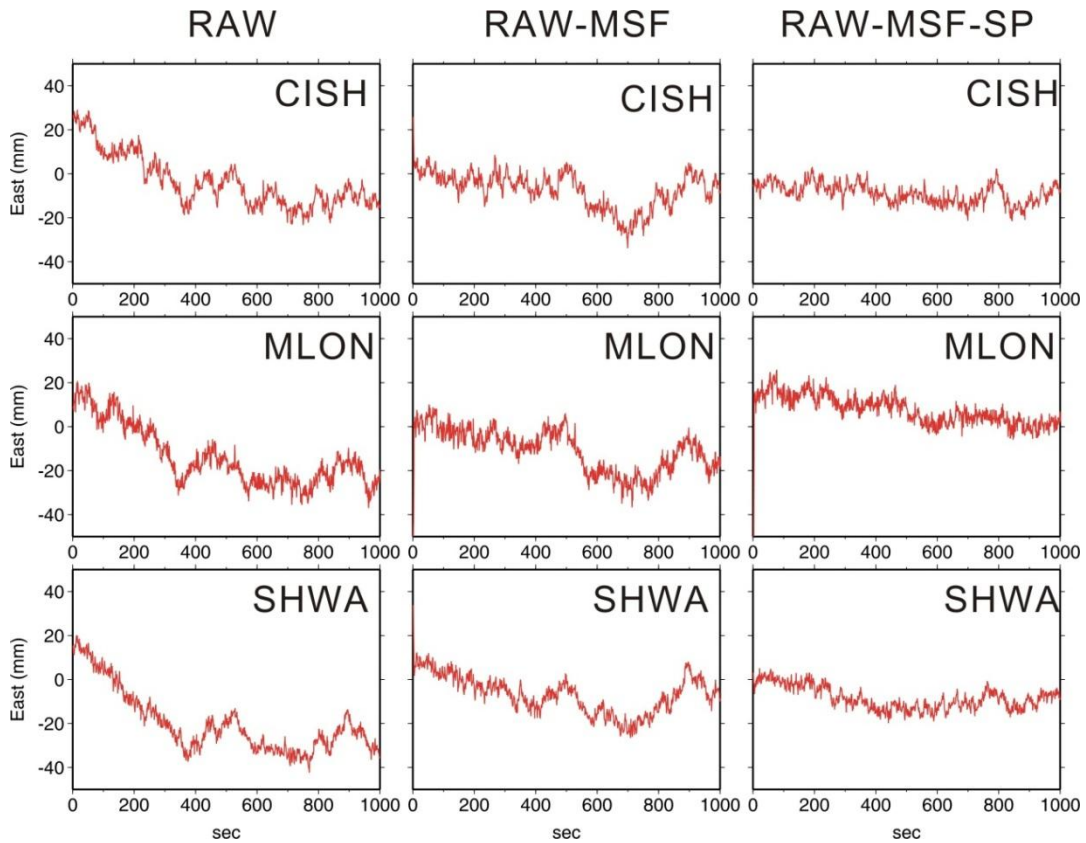


圖5 CISH 等三站在地表穩定時段於濾波前後之動態定位時間序列成果。各站之第一條序列為原始結果(RAW)，第二條與第三條分別為經恆星日濾波(MSF)後與恆星日濾波+空間濾波(MSF+SP)後之成果

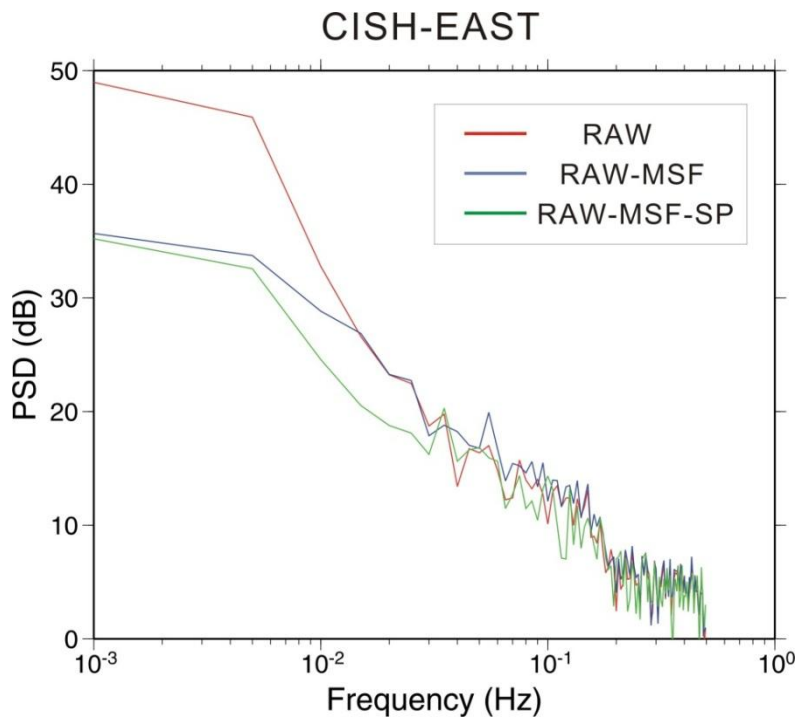


圖6 CISH 站東西向坐標時間序列之頻譜圖。圖中紅線為原始序列，藍線則為經 MSF 改正，綠線則為經 MSF+SP 改正後之成果

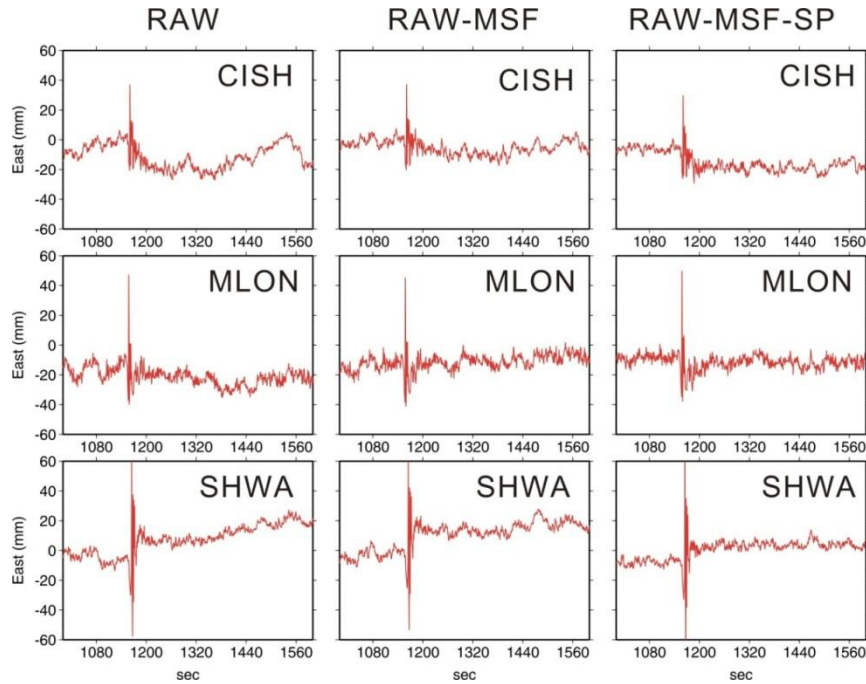


圖7 CISH 等三站在甲仙地震影響時段於濾波前後之動態定位時間序列成果。圖中灰線為發震時間。在發震時間後約 10 秒後可發現因地震所引致之地表位移。在東西向序列中，濾波前序列成果不易判斷出是否有永久位移之存在，但在濾波後在 CISH 與 MLON 能發現有一向西約 1 cm 之永久位移，SHWA 也發現有一向東約 1 cm 之永久位移

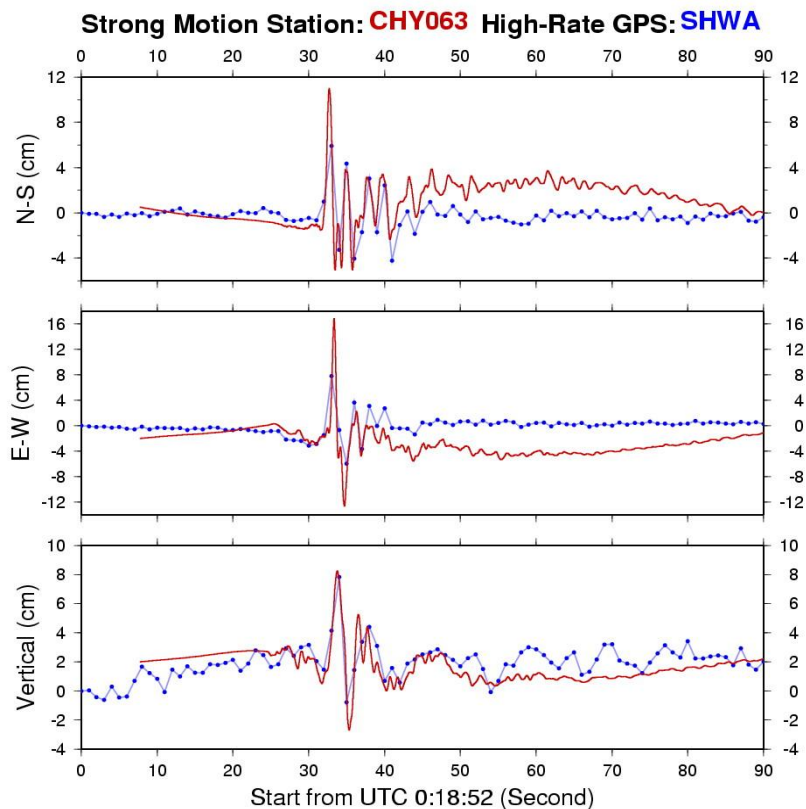


圖8 GPS 站 SHWA 與其共點之強震站 CHY063 在甲仙地震發震時段所獲取之位移成果。橫軸為時間，0 秒代表甲仙地震發震時間

#### 四、研究討論

本研究利用恆星日濾波與空間濾波法對 GPS 動態定位位移序列進行改正，提升位移序列之精度，並實際應用於探測地震前後之永久變形與地震當下之地震波波形。由結果發現，以旗山站 CISH 為例，標準差由原先之南北向 11.7 mm，東西向 11.9 mm 和高程向 117.5 mm 改進至 4.3 mm、4.5 mm 和 17.9 mm，水平項精度提升至少 2 倍，高程向至少 5 倍。單就恆星日濾波之改正效果而言，水平向均能有效改善其精度約 15-66%。高程向精度改善則為 150-328%。經恆星日濾波加上空間濾波後之成果，水平向可進一步改善至 56-171%，高程向為 116-556%。經頻譜分析結果顯示，恆星日濾波與空間濾波之主要雜訊折減频段不同。恆星日濾波的主要雜訊折減频段為週期約 100 秒以上之低頻雜訊，而空間濾波則為週期 10-100 秒之雜訊。由 Bock et al.(2000)對恆星日濾波之描述，認為該濾波主要是折減多路徑效應(multipath)對動態定位之影響。多路徑效應之原因乃與連續站周遭之環境有關，因此在我們的結果可以得知，多路徑效應對動態定位之影響，高程向比水平向為大。

本研究利用濾波後之位移序列估計 CISH 等三站之同震位移，如圖 6 所示。我們發現原始時間序列均無法確定地震前後之永久位移。但在濾波後，我們在東西向序列可發現一明顯約 1 cm 之向西位移，南北向與高程向仍無法明確斷定是否有位移存在。依據 Hsu et al.(2011)對甲仙地震用 GPS 每日解估計同震之結果，CISH、MLON 與 SHWA 之東西向同震位移分別為向西 15.4 mm、向西 14.8 mm 與向東 10.6 mm。若假設每日解之同震結果即等同於地震當下之位移，我們可以得知經濾波後之動態位移序列有能力檢測 1 cm 以上之地表位移。

在檢測地震波波形方面(圖 7)，我們發現 GPS 位移與強震儀積分後之位移結果大致相符。但我們也可發現 GPS 位移的重複性較差，特別在高程向。比較兩者之波形，可以發現強震儀所得之波形較為完整，GPS 位移則因取樣率過低而使得波形造成扭曲。由 Bilich et al.(2008)與 Larson(2009)曾說明 GPS 應用於探測地震波之優缺點，其優點在於 GPS 位移是直接觀測量，不像強震站與寬頻地震站，需要進行數值積分以及相關儀器與尺度改正。而傳統利用地震儀資料求取同震位移也常因處理方法不同與濾波频段設定不同而有所差異。缺點則為精度較差，須要有相關濾波方法進行改善，並且規模過小的地震無法探測。本研究在同震位移觀測能檢測 1 cm 以上之水平位移，而在地震波形擷取則有取樣率過低之問題，說明 1 Hz GPS 觀測仍不足以觀測近場地震波形。

#### 五、結論與建議

##### (一)結論

1. GPS 連續站動態位移經恆星日濾波法與空間濾波可有效促進位移序列精度，改善程度可從水平向從 12.0-17.0 mm 到 4-10 mm，高程向從 120-180 mm 到 18-46 mm。

2. 利用濾波改正後之 GPS 位移序列可發現旗山站 CISH 與美濃站 MLON 在甲仙地震後之同震位移為向西 1 cm，新化站 SHWA 為向東 1 cm。略低於每日解所獲得之結果。
3. 利用 GPS 位移序列探測地震波波形之結果顯示，GPS 與強震儀位移所獲得之地震波大致相符，但取樣頻率為每秒 1 筆之 GPS 位移仍不足獲得完整正確之波形。

## (二)建議

本研究證明了恆星日濾波與空間濾波在台灣 GPS 連續站應用於動態定位於地表位移的促進，將動態定位原先之公分級精度提升至公釐級。此項技術可實際應用於國家控制點之維護。未來台灣之 GPS 連續站可望成為國家基本控制點之一，而求得站台因自然或人為造成之坐標變化乃成為必行之工作，而將本研究之技術應用於 GPS 連續站坐標維護，則能獲得精確之坐標變化及坐標變化當下的時間點。

恆星日濾波法與空間濾波法可配合即時動態定位進一步改進成即時化與自動化，能將 GPS 連續站之公釐級精度坐標成果以動態即時展示，更可廣泛應用於即時控制點維護與地表位移位移動測等。

## 誌謝

本研究承蒙交通部中央氣象局委託研究計畫案”高取樣率 GPS 定位解算及其在地震學之應用研究”之支持，以及國土測繪中心和中央氣象局之 GPS 觀測資料之提供。感謝 IGS 服務中心提供之精密星曆資料。

## 參考文獻

- 王敏雄、劉致忠、劉正倫、蕭輔導，2006，e-GPS 衛星基準網之 VBS-RTK 即時動態定位系統測量成果分析，《地籍測量》，第 25 卷，第 2 期，頁 1-19。
- 高書屏、梁崇智、李旭志，2006，VRS-RTK 應用於圖根點測設成果分析—以竹山鎮為例，《地籍測量》，第 25 卷，第 3 期，頁 1-16。
- 崔國強、王敏浩，2006，網路 RTK 於地籍測量應用之研究—以花蓮地區為例，《地籍測量》，第 25 卷，第 3 期，頁 17-34。
- 陳芳茂、周天穎，2002，應用 RTK 於圖解地籍圖數化地區之戶地測量可行性研究，《地籍測量》，第 21 卷，第 1 期，頁 39-57。
- 曾清涼、余致義、楊名、羅正方、林漢良，2004，台灣 e-GPS 系統建置理論與實務，《地籍測量》，第 23 卷，第 2 期，頁 13-26。
- 楊名、余致義，1997，即時動態 GPS 測量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。
- 劉榮增、黃立信、何啟佑，2011，e-GPS 系統應用於地籍圖重測加密控制測量之研究，《地籍測量》，第 30 卷，第 2 期，頁 16-31。

- 鄭彩堂、高書屏，2001，以 RTK 結合限制條件與附加參數輔助圖解地區土地複丈之初步研究，《地籍測量》，第 20 卷，第 4 期，頁 55-62。
- 蘇添旺、高書屏，2003，RTK 應用於大型都會區圖根點新補建模式之研究－以臺中市為例，《地籍測量》，第 22 卷，第 4 期，頁 1-22。
- Agnew, D. C., and K. M. Larson, 2007, Finding the repeat times of the GPS constellation, *GPS Solutions.*, 11(1), pp. 71-76.
- Bilich, A., J. F. Cassidy, and K. Larson, 2008, GPS Seismology: Application to the 2002 Mw 7.9 Denali Fault Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(2), pp. 593-606.
- Bock, Y., R. M. Nikolaidis, P. J. de Jonge, and M. Bevis, 2000, Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 105(B12), pp. 28,223-28,253.
- Bock, Y., L. Prawirodirdjo, and T. I. Melbourne, 2004, Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network, *Geophysical Research Letters*, 31, L06604, doi: 10.1029/2003GL019150.
- Chen, G., 1998, *GPS kinematic positioning for the airborne laser altimetry at Long Valley, California*, Thesis(Ph. D.), Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology: Cambridge.
- Chen, H. Y., L. C. Kuo, and S. B. Yu, 2004, Coseismic movement and seismic ground motion associated with the 31 March 2002 off Hualien, Taiwan, Earthquake, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(4), pp. 683-695.
- Chen, H. Y., J. C. Lee, L. C. Kuo, S.B. Yu and C.C. Liu, 2008, Coseismic surface GPS displacement and ground shaking associated with the 2006 Pingtung earthquake doublet, offshore southern Taiwan, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences.*, 19(6), pp. 683-696.
- Choi, K., A. Bilich, K. Larson, and P. Axelrad, 2004, Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning, *Geophysical Research Letters*, 31, L22608, doi: 10.1029/2004GL021621.
- Davis, J. P. and R. Smalley Jr., 2009, Love wave dispersion in central North America determined using absolute displacement seismograms from high-rate GPS, *Journal of Geophysical Research*, 114, B11303, doi: 10.1029/2009JB006288.
- Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky, 2009, *Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.35*, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology: Cambridge.
- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J., 1994, *GPS Theory and Practice*, 3rd edition, New York: Springer-Verlag.
- Hristopulos, D. T., S. P. Mertikas, I. Arhontakis, and J. M. W. Brownjohn, 2007, Using GPS for monitoring tall-building response to wind loading: filtering of abrupt

- changes and low-frequency noise, variography and spectral analysis of displacements, *GPS Solutions*, 11(2), pp. 85-95.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, L. C. Kuo, Y. C. Tsai, and H. Y. Chen, 2011, Coseismic deformation of the 2010 Jiashian, Taiwan earthquake and implications for fault activities in southwestern Taiwan, *Tectonophysics*, 502(3-4), pp. 328-335.
- Hu, J. C., H. T. Chu, C. S. Hou, T. H. Lai, R. F. Chen, and P. F. Nien, 2006, The contribution to tectonic subsidence by groundwater abstraction in the Pingtung area, southwestern Taiwan as determined by GPS measurements, *Quaternary International*, 147, pp. 62-69.
- King, M. A., 2009, The GPS contribution to the error budget of surface elevations derived from airborne LIDAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), pp. 874-883.
- Kogan, M. G., W. Y. Kim, Y. Bock, and A. W. Smyth, 2008, Load response on a large suspension bridge during the NYC marathon revealed by GPS and accelerometers, *Seismological Research Letters*, 79(1), pp. 12-19.
- Larson, K. M., P. Bodin, and J. Gomberg, 2003, Using 1-hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake, *Science*, 300, pp. 1,421-1,424.
- Larson, K. M., 2009, GPS seismology, *Journal of Geodesy*, 83, pp. 227-233.
- Nikolaidis, R., 2002, *Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System*, Thesis (Ph.D.), University of California: San Diego.
- Rizos, C., 2002, Network RTK research and implementation – A geodetic perspective, *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2), pp. 144-150.
- Su, M B., I. H. Chen, and C. H. Liao, 2009, Using TDR cables and GPS for landslide monitoring in high mountain area, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(B8), pp. 18,057-18,070.
- Wdowinski, S., Y. Bock, J. Zhang, P. Fang, and J. Genrich, 1997, Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 102(8), pp. 18,057-18,070.
- Yang, M., C. L. Tseng, and J. Y. Yu, 2001, Establishment and maintenance of Taiwan Geodetic Datum 1997, *J. Surveying Engineering*, 127(4), pp.119–132.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo, 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, 274, pp. 41-59.
- Yu, S. B., L. C. Kuo, Y. J. Hsu, H. H. Su, C. C. Liu, C. S. Hou, J. F. Lee, T. C. Lai, C. C. Liu, C. L. Liu, T. F. Tseng, C. S. Tsai and T. C. Shin, 2001, Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), pp. 995-1,012.