

GPS 地震監測短期數據計算之強化(I)

The Augmentation of Short Term GPS Data Processing on Earthquake Monitoring (I)

主管單位：交通部中央氣象局

何慶雄¹ 王亭介¹ 洪煌凱² 蔡俊雄³ 林冠全³

¹國立成功大學航太系 ²國立成功大學衛星資訊中心

³中央氣象局地震測報中心

摘要

本計畫之總體目的，在協助中央氣象局，強化 GPS 地震監測短期數據計算，並針對短期地表變動現象，採取不同的短期數據處理策略，本年度研究目標在建立 GPS 虛擬參考站(Virtual Reference Station; VRS)技術，包括估算多主站修正量，計算虛擬參考站觀測量，以及運用此觀測量於動態定位 KGPS (Kinematic GPS)以偵測瞬間移位。本研究已完成初步 VRS 資料處理技術，且應用於三個地震個案，初步結果顯示，VRS 技術可偵測公分級暫時性位移。

關鍵詞：全球定位系統、動態定位、虛擬參考站

Abstract

The overall purpose of this project is to assist the Central Weather Bureau (CWB) in strengthening its processing capability of short term GPS data during earthquakes. In addition, the short term surface motion due to earthquakes will be investigated. As a result, different data processing strategies will be studied. The main target of first year study is to establish the capability of GPS Virtual Reference Station (VRS) technique. It includes the estimation of correction data from multiple master stations, the observation computation of assigned virtual reference site, and the application of derived observables to the kinematic GPS (KGPS) to obtain epoch-by-epoch solutions that are capable of reflecting transient displacement. The preliminary data processing procedures of VRS technique has been established in this study. Three earthquake cases have been investigated. The results show that the applied method is capable of detecting centimeter-level transient displacements.

Keywords: Global Positioning System、kinematic GPS、Virtual Reference Station

一、前言

運用動態定位 (Kinematic GPS; KGPS)技術，進行歷時(epoch) 短基線(二十公里以下)GPS 資料定位解算，已經可以偵測因地震而導致的地表平面移位，解算精度可達二公分。從以往結果[Ho, etl., 2004; 何慶雄等, 2006; 何慶雄等, 2007]可發現一般地震瞬間移位，時間非常短(約二十分鐘內)，其移位現象可區分為暫時性位移(transient displacement)以及永久性位移(permanent displacement)兩種，其中暫時性位移量可能比永久性位移量高出數倍，但變動時間非常短(約三十秒內)，尤其是初始位移變動時間僅一二秒，且位移變化量最大。GPS 計算永久性位移已行之有年[例如劉啟清等, 2005]，若採用歷時(目前為每一秒)基線解方式，將可以進一步偵測上述兩種位移。

然而 GPS 基準網往往超過二十公里以上，以達傳統 KGPS 動態定位技術應用極限，因此目前中基線(三十公里以上) 歷時基線解計算能力仍然有限，主要尚存誤差為軌道誤差與大氣層(如電離層)延遲干擾，此二誤差對於週波未定值的求解，具有顯著的影響，除非更引進高精度的動態定位技術[Günther RETSCHER, 2002; 陳宏宇等, 2003]。

針對上述誤差干擾，目前以 GPS 虛擬參考站(Virtual Reference Station; VRS)技術為較可行的方法之一，被視為未來俱提高中基線(三十公里以上)計算精度的技術之一，且將朝大區域固定主站方向的發展。目前 GPS VRS 應用於三十公里以上基線，平面計算精度可達五公分[Günther RETSCHER, 2002]，這對一般僅一二公分的地震位移，顯然不足仍值得深入研究。

目前國際間已積極建立多基準固定站，例如美國大地測量局 (National Geodetic Survey; NGS) 已陸續佈設了 GPS 連續運行參考站系統 (Continuous Operational Reference System; CORS)，用戶可以透過網際網路 (如 Internet) 下載所需資料。

在歐洲，英國建立類似於美國 CORS 的"連續運行 GPS 基準站系統(COGRS)"，迄今已完成 55 個 GPS 連續運行基準站。另外德國已建立由 100 多個永久性 GPS 追蹤站所組成的全國衛星定位網，它提供不同層次的服務，也其中也包含發展虛擬參考站 (VRS) 的 RTK(Real Time KGPS)定位服務功能[Lambert Wanninger, 2007]。

亞洲地區日本已建立約 1200 個 GPS 連續運行追蹤站網的綜合服務系統—GEONET，它以監測地殼運動、地震預報為主要目的，並且已發展成為 GPS RTK 定位服務網。香港地政總署正在建立香港動態基準站控制網，總共 13 個基準站，主要是為大地測量提供參考基準，其他功能則為 DGPS、RTK、GPS 快速靜態定位之服務[鄧雅群, 2006]。

國內內政部土測局已開始建立 GPS 參考主站，並建構「台灣 e-GPS 電子基準站系統」。這種網路化 GPS 即時定位系統 (e-GPS 系統) 可提供在台灣地區公分等級的即時定位服務[王敏雄等, 2004]。而目前中央氣象局亦積極建立地表地動觀測網，包括已設置上百座 GPS 站，而相當多站間的距離都超過二十公里，一年超過六級以上地震平均超過二十次，平面位移可達二公分，將很適合引進 GPS VRS 技術，建構此

技術的經費亦不高，因此本計畫第一年以建立虛擬基準站(VRS) 應用技術為目標，以中央氣象局現有 GPS 資料進行測試，第二年將以提升計算精度為目標，並以氣象局現有 GPS 站地理分佈，研發不同的短期數據處理策略。

二、資料收集與處理

本研究團隊先前處理過的中央氣象局 GPS 資料(取樣時間為一秒)，除了 2005 年 3 月 6 日外[何慶雄等, 2006]，亦包括 2006 年 4 月 1 日[何慶雄等, 2007]，今年(2007)新收集到較顯著的地震發生在 2006 年 12 月 26 日(DOY 360) 7.0 級恆春地震(見圖 1)，與 2007 年 9 月 22 日(DOY 264) 5.0 南澳地震(見圖 2)，其中 2006 年 12 月 26 日的恆春地震為雙主震，地震發生時間分別為 2006/12/26 之 20 時 26 分 21.0 秒，以及 20 時 34 分 15.1 秒 (見圖 1)，相差約八分鐘。

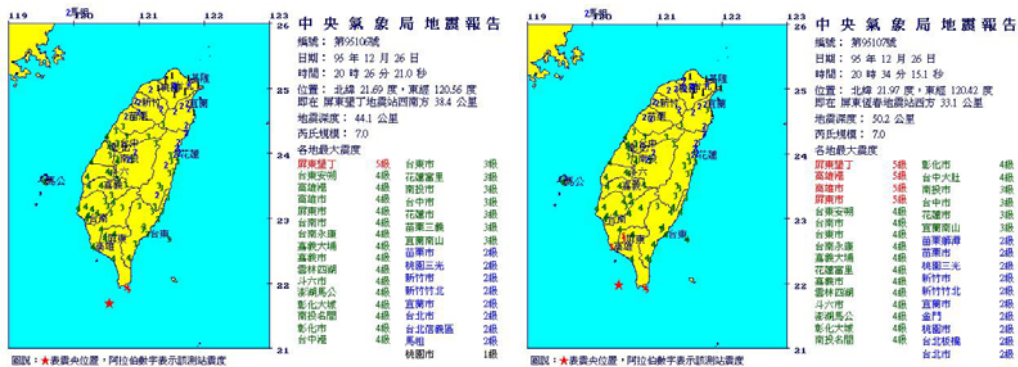


圖 1：2006/12/26 恆春地震資訊[氣象局網站, 2006]

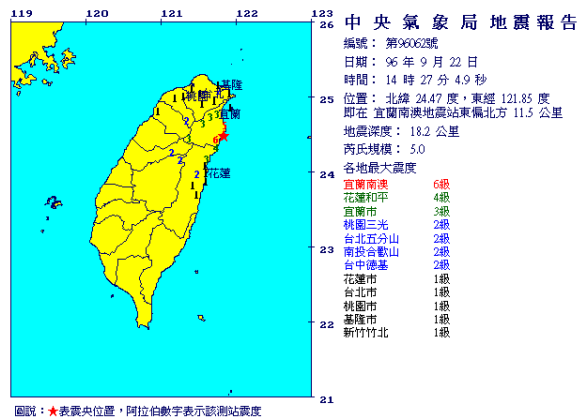


圖 2：2007/09/22 南澳地震資訊[氣象局網站, 2007]

分析各地震時段的狀況發現，2006/4/1 段大部份 GPS 站皆有明顯位移，不適合採用為 VRS 解的固定主站，因此此地震時段 GPS 資料並不列入本年度研究。2006/12/26 恆春雙地震，小琉球(LIUC)與恆春(HENC)皆有明顯位移，將視為移動站，恆春(HENC)站距離震央最近，而小琉球(LIUC)則列為測試站。歷時 VRS 解之恆春

雙地震網固定主站，包括南州(NJOU)、加祿堂(JLUT)、小港(SGAN)、昌隆(CLON)四 GPS 站(見圖 3)，主要考量此站距離震央較遠。雖然小琉球(LIUC)與恆春(HENC)不在固定主站網內(參考圖 3)，但因恆春雙地震震度都很大，將是 VRS 技術最好網外測試個案。

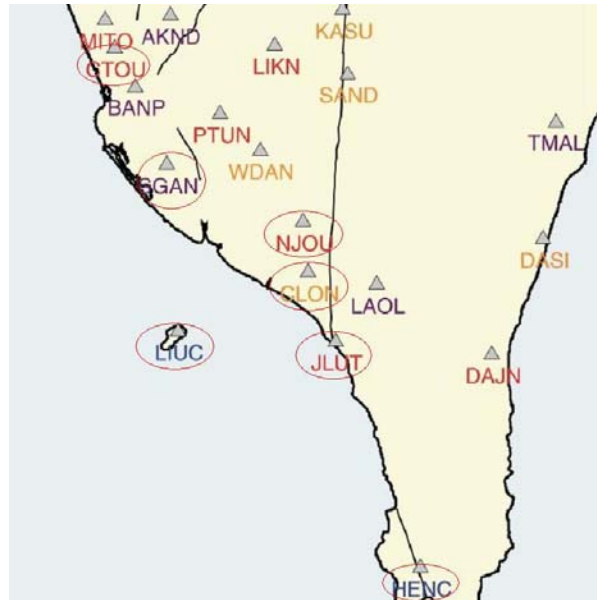


圖 3：2006/12/26 恆春地震 GPS 站地理分佈圖

2007/09/22 南澳地震雖然震度不大，但因為是淺層地震，所以南澳地震站測出六級震度，比 2006/12/26 恆春周圍地震站測到的震度還大，因此本研究將之列入 VRS 測試個案。南澳地震 GPS 站包括 ILAN、SLNP、LTUN、CLAN、HANS、SUAO、SUAB、NAAO、HUAP、BLOW、CHNT 共十一站(見圖 4 分佈圖)，為縮短 VRS 資料處理時間，各站皆先進行先期靜態資料處理步驟，確定地震時段資料品質，並選出其中四 GPS 站為 VRS 解算的固定主站，包括 LTUN、CLAN、HANS、CHNT，而距離震央最近南澳(NAAO) 站則選為移動站。

由於上述新收集兩次地震 GPS 站分佈較廣，因此本研究選取一較小區域的地震網：2005 年 3 月 5 日(DOY 64 UTC) 5.9 級之蘇澳淺層地震，GPS 站包括雙連埤(SLNP)、土場(TUCN)、寒溪(HANS)、牛鬥(NIUT)、羅東(LTUN)五站(見圖 5)，其最長基線約二十四公里。蘇澳站(SUAO) 最靠近震央，但地震發生當年尚未設立，因此 VRS 求解時，將以靠近蘇澳站之寒溪站(HANS)為移動站。

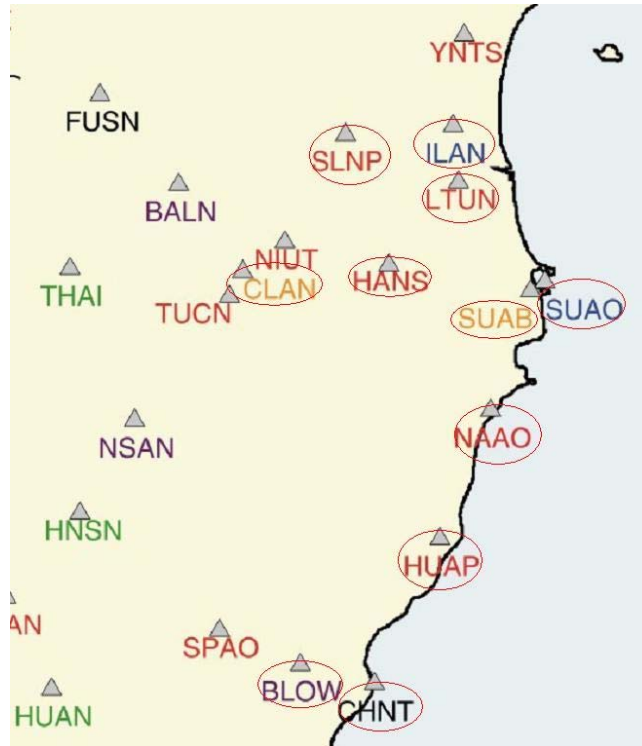


圖 4：2007/09/22 南澳地震 GPS 站地理分佈圖



圖 5：2005/03/05 蘇澳地震 GPS 站地理分佈圖

本計畫第一年的研究目標在建立 GPS 虛擬參考站(VRS)技術，以下將就基本概念與架構，以及資料處理步驟作說明。VRS 的基本觀念係由多個 GPS 接收站組成之主站網，計算中心彙整所有主站所接收之資料，估算該主站網所涵蓋地區的 GPS 誤差模型，並計算出任一未知站附近之虛擬主站的相關資料，並算出虛擬主站之模擬觀測量，進而求得未知站之點位坐標，其中模擬觀測量之計算將分下列四個方法與步驟進行[鄧雅群, 2006]，VRS 資料處理流程參考圖 6：

1) 以卡爾曼濾波求解網中，二次差分週波未定值：

在 VRS 定位系統運作時，可利用基線向量已知的特性，精密地求解出各站間二次差分的週波未定值，即可求解出每一個時刻各基準站間的二次差系統誤差影響

量，用以建立網內系統誤差模型。未知參數方面，對每一組二次差主站及衛星組合，均包括了二次差電離層影響量、載波以及寬巷線性組合的週波未定值；另外對每一主站的未知參數還包括一個相對於主基準站的相對對流層天頂延遲量，亦列為估算的參數，若採用卡爾曼濾波演算法則，可快速收斂週波未定估算值。

2) 求解網中二次差分系統誤差改正量：

在組成二次差觀測量時，會先選定一主基準站，為方便每一主站與此主基準站載波相位數據組成二次差，並利用上述卡爾曼濾波法，求解二次差週波未定值。當週波未定值(假設未有週波脫落情況)確定後，便進行以疊代的方式同時求得基準站與GPS衛星間之距離，並由四個距離組成二次差觀測量之幾何項，每一筆二次差觀測量，減去此幾何項與估算之未定值，即為該二次差之系統誤差改正量，此改正量內含電離層、對流層及軌道的誤差。

3) 求解內插參數及主站到 VRS 的系統誤差改正量：

若要將區域網中各主站所求得的系統誤差資訊，以內插的方式求解區域內任一點的系統誤差，必須先定義內插模式，由於GPS觀測量中的系統誤差與距離相關，其與區域內主站的空間位置有高相關性，因此可以一多項式表示系統誤差與位置的關係，多項式的型式與所需的最少主站數目(不含主基準站)及所構成的表面形式之間的關係：線性平面時所需最少基準站數目為2，雙線性曲面時所需最少主站數目為3，二次曲面時所需最少主站數目為5，因此區域網中基準站數目將決定系統誤差內插模式，當然也間接影響虛擬觀測量精度。

接著選取一未知站附近之點為虛擬參考站(VRS)，並利用上述建立之系統誤差改正模式，內插出主基準站到此虛擬參考站(VRS)的二次差系統誤差改正量。

4) 產生 VRS 的虛構觀測量：

基本之GPS觀測量至少包括虛擬距離與載波相位，欲虛構虛擬參考站此二觀測量，必須引用上述的二次差改正量，並直接利用選取之虛擬參考站站標及衛星軌道求得幾何距離，以及利用主基準站的實際觀測量求得。因週波未定值已決定，虛擬參考站(VRS)的虛構載波相位無此項，而建構虛擬距離時僅須引用衛星實際的軌道與時表誤差值，並不含虛構虛擬參考站之時錶誤差值。

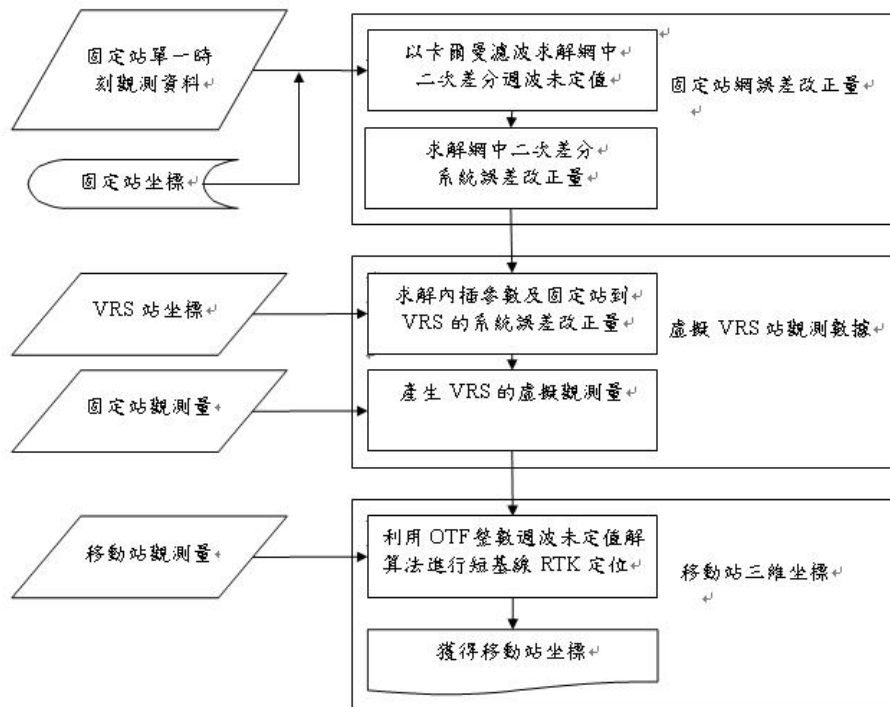


圖 6：VRS 資料處理流程圖[改自鄧雅群, 2006]

三、結果分析

2005/03/05 蘇澳地震 VRS 資料處理結果

進行 GPS 站 VRS 歷時(目前為每一秒)坐標解時，本研究採用國立成功大學衛星資訊中心之 GPS 虛擬基準站(Virtual Master Station; VMS)，與 Trimble Total Control 兩種軟體，進行上述步驟演算，以瞭解 VRS 基本概念與架構。研究首先處理 2005/03/05 蘇澳地震 GPS 資料，以測試在小區塊(三十公里以內) VRS 適用程度。

執行 VRS 資料處理過程之前，本研究會先進行先期靜態資料處理，以評估地震時段資料品質，並選出其中 GPS 站為 VRS 解算的固定主站;其次再以 KGPS 技術進行單基線 KGPS 計算，其結果將用來與 VRS 解算結果比較。圖 7 為 2005/3/5 蘇澳地震前後固定羅東(LTUN) 站，寒溪(HANS)站坐標 KGPS 變動差圖，地震發生在 19 時 6 分 31.6 秒(約為圖中 691.6 秒處)，寒溪(HANS)站東西向(綠色米字點線) 在當時刻有明顯變動，一分鐘內變動落差約五公分。其次是以 VRS 技術進行解算，雙連埤(SLNP)、牛鬥(NIUT)、羅東(LTUN)三站選為固定主站，圖 8 為 VRS 解算結果，與圖七 KGPS 結果比對，三維坐標在地震前(0 - 600 秒)解算變動較合理，有效降低震前變動。而震時 VRS 解變動較小僅有兩公分變動(見圖 8 690 - 850 秒間)，惟實際地震位移尚難釐清。

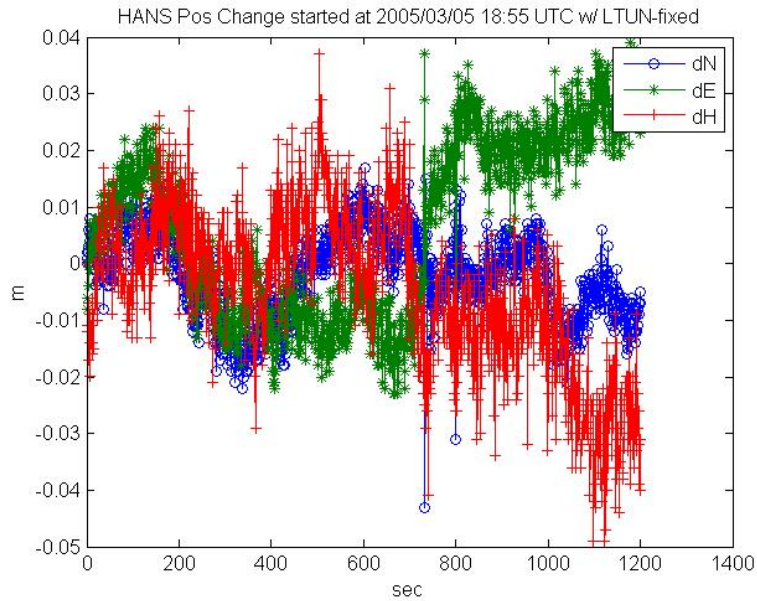


圖 7：2005/3/5 蘇澳地震 寒溪(HANS)站坐標 KGPS 變動差圖

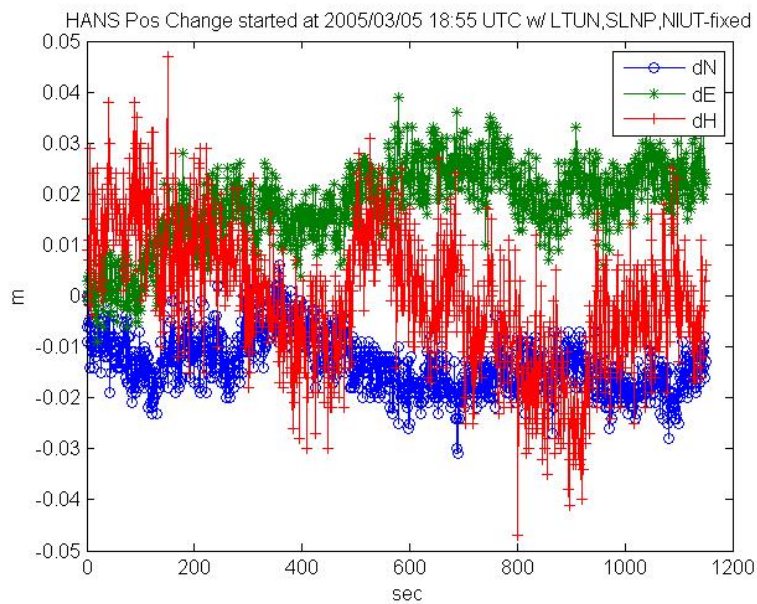


圖 8：2005/3/5 蘇澳地震 寒溪(HANS) 站坐標 VRS 變動差圖

從 2005/03/05 蘇澳地震 VRS 結果觀之，所使用之 VRS 計算軟體初步處理結果尚屬正常，可以偵測因地震而導致的二公分地表平面位移，且可有效抑制震前誤差變動，特別是 KGPS 技術以往在高程解析能力較差，VRS 對高頻及隨機變動有穩定作用，對高程(dH)解算能力有些改善，未來可能有助於判斷地震造成之數公分垂直位移。不過，此舉亦可能對微弱地震造成之位移變化，無法有效解析。

2007/09/22 南澳地震 VRS 資料處理結果

2007/09/22 南澳地震 GPS 站分佈較廣，包括 ILAN、SLNP、LTUN、CLAN、HANS、SUAO、SUAB、NAAO、HUAP、BLOW、CHNT 共十一站，最長基線近一

百公里，且地震震度又小，將可測試 VRS 網內解算的極限。其中 NAAO 站距離震央最近(參考圖 4)，本研究將之視為移動站，其餘各站先進行靜態資料處理，並選出其中 CLAN、CHNT、SUAO GPS 站為 VRS 解算的固定主站。

針對南澳地震本研究亦以兩種技術互相比較，首先以 KGPS 技術進行單基線 KGPS 計算，圖 9 為南澳(NAAO)站坐標 KGPS 變動差圖，地震發生在 6 時 27 分 4.9 秒(約為圖中 424.9 秒處)，南澳(NAAO)站東西向(綠色米字點線)有明顯變動，變動落差約五公分。其次是以 VRS 技術進行解算，VRS 解約三公分變動(見圖 10)，且持續約 775 秒(425 - 1200 秒)，同樣尚待釐清實際地震位移大小。而 KGPS 東西向在震前(350 - 425 秒)約五公分變動，VRS 解則有效抑制此震前變動。

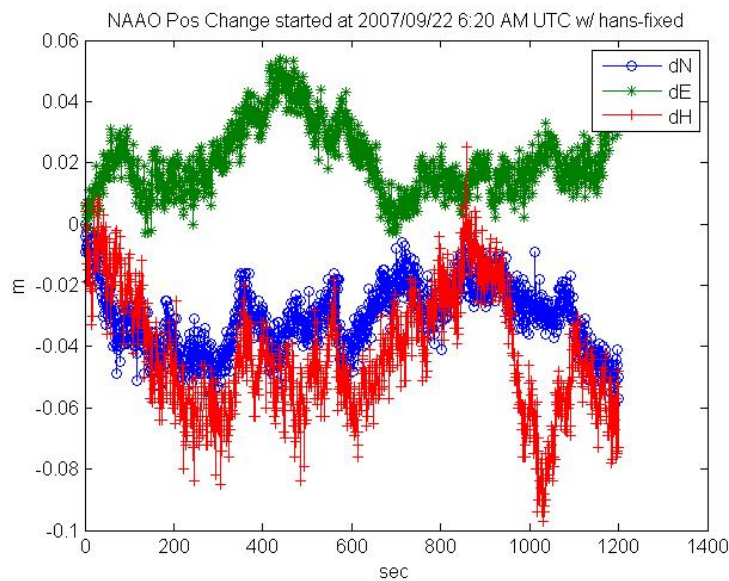


圖 9：2007/09/22 南澳地震南澳(NAAO)站坐標 KGPS 變動差圖

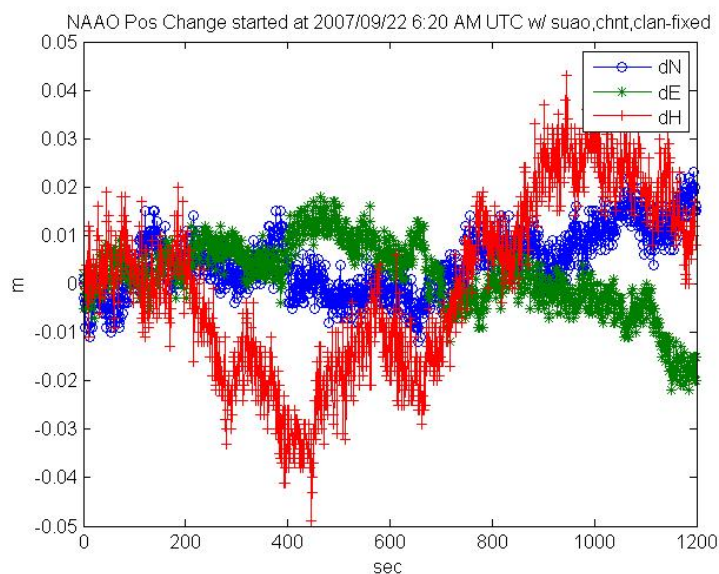


圖 10：2007/09/22 南澳地震南澳(NAAO) 站坐標 VRS 變動差圖

2006/12/26 恆春雙地震 VRS 資料處理結果

2006/12/26 恆春雙地震 GPS 站分佈亦很廣，包括 CTOU、南州(NJOU)、加祿堂(JLUT)、小港(SGAN)、昌隆(CLON)、小琉球(LIUC)、恆春(HENC)七 GPS 站(參考圖三)，最長基線超過一百公里，而距離震央最近之恆春(HENC)站，距離其他 GPS 站超過六十公里，且又在固定主站網之外，將是 VRS 與 KGPS 技術另一種考驗。

本研究首先以 KGPS 技術進行昌隆(CLON)至小琉球(LIUC)單基線計算，其中將小琉球(LIUC)視為移動站。圖 11 為 2006/12/26 恆春雙地震恆春(HENC)站坐標 KGPS 變動差圖，圖 12 為 VRS 處理後站坐標變動差圖，從兩圖觀之，第一次地震瞬間變動落差上下約二十公分，第二次地震上下超過二十五公分，顯然是因為恆春(HENC)站距離震央最近，地震造成的瞬間地表變動較小琉球(LIUC)站大。KGPS 與 VRS 結果差距有限，穩定後的向西位移量皆約五公分左右，穩定後的向北位移量約二公分，與小琉球(LIUC)站坐標變動差異亦不大。

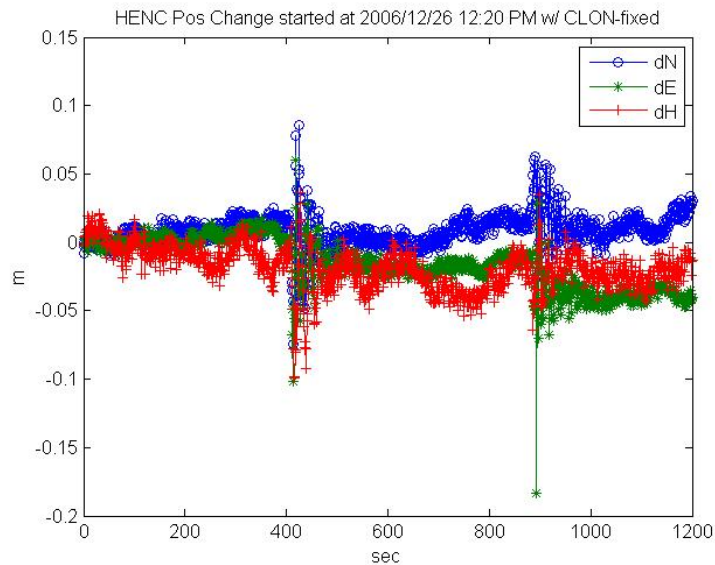


圖 11：2006/12/26 恆春雙地震 恆春(HENC)站坐標 KGPS 變動差圖

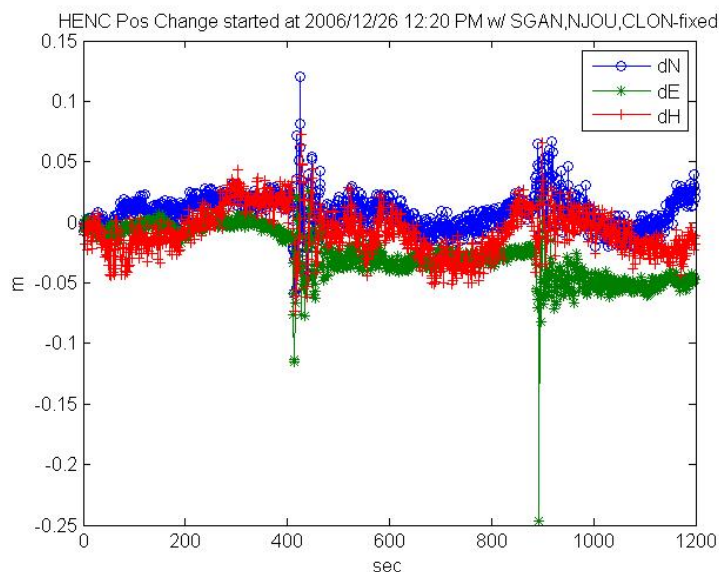


圖 12：2006/12/26 恆春雙地震 恆春(HENC)站坐標 VRS 變動差圖

四、結論

從以上三個地震個案初步結果，可得以下結論：

- 1) 採用 VRS 技術歷時解求取移動站坐標變動，可以偵測因地震而導致的地表平面移位，穩態性地表位移解算精度可達二公分。
- 2) VRS 技術亦能有效偵測暫時性位移，變動幅度超過穩態性位移的三倍，此瞬時急速變動位移在數秒之內。
- 3) 三個實際地震個案解算結果顯示，本研究已完成初步 VRS 資料處理技術，其解算程序能有效抑制震前誤差變動，未來可能有助於偵測公分級垂直位移。

參考文獻

1. 劉啟清、陳伯飛、邱太乙、楊程議(2005)，"利用 GPS 觀測資料監測地殼變動之穩定性探討"，中央氣象局地震技術報告彙編，第 39 卷，293 至 313 頁，九十四年六月。
2. 何慶雄、蔡俊雄、郭陳濤 (2006)，"應用 GPS 長期分析資料求解歷時觀測紀錄"，中央氣象局地震技術報告彙編，第 42 卷，279 頁至 292 頁，九十五年六月。
3. 何慶雄、景國恩、蔡俊雄、林冠全 (2007)，"應用 GPS 長期分析資料求解歷時觀測紀錄 (II)"，中央氣象局地震技術報告彙編，第 45 卷，315 至 332 頁，九十六年四月。
4. 陳宏宇、郭隆晨、莊王熊、余水倍 (2003)，"中長距離高精度 GPS 動態定位應用於強地動的研究"，地籍測量:中華民國地籍測量學會會刊，22 卷第 3 期，24-40 頁，92 年 9 月。

5. 鄧雅群 (2006), "GPS 之 VRS 即時動態定位精度分析", 國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 95 年 7 月。
6. 王敏雄、劉至忠、李彥弘 (2004), "全國性電子化 GPS 衛星定位基準站即時動態定位系統之建置", 第六屆 GPS 衛星科技研討會, 台南市成功大學, 12 月 2 日至 3 日, 2004。
7. Ho, C.S., Lee, C.F., Yu, J.Y., and Tsai, J.H. (2004), "Dynamic Surface Response of A Local Area Induced by Chi-Chi Earthquake Using Accelerograph and GPS Solutions", *Proceedings of ION National Technical Meeting 2004*, pp. 1005-1010, January 26-28, 2004.
8. Günther RETSCHER (2002), "Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks", *Journal of Global Positioning Systems (2002)*, Vol. 1, No. 1, Pages 40-47, May 2002.
9. Lambert Wanninger (2007), "GPS on the Web: Virtual reference stations (VRS)", www.wasoft.de/lit/gpswebvrs.html, 2007.