中華民國地籍測量學會期刊

國土測繪與空間資訊

Taiwan Journal of Geoinformatics

第一卷 第二期

中華民國一O二年七月



VOLUME 1, NO. 2

Jul. 2013

PUBLISHED BY CHINESE SOCIETY

OF CADASTRAL SURVEY

一、理監事會:
理事長:盧鄂生
副理事長:高書屏
常務理事:林燕山、何維信、洪本善
理 事:蕭輔導、吳萬順、曾清凉、曾德福、蘇惠璋、蕭正宏、梁東海、王定平、許 松、紀聰吉
常務理事:朱金水
監 事:謝福勝、蕭萬禧、容承明、陳杰宗
秘書長:鄭彩堂
副秘書長:曾耀賢
秘 書:陳鶴欽
二、各種委員會:
(一)服務委員會:
主任委員:江渾欽
委 員:余致義、梁世昌、黃仰澤、賴澄漂、沈明佑
總幹事:林昌鑑
(二)編輯委員會:
主任委員:楊 名
委 員:陳春盛、吴 究、史天元、黃灝雄、曾義星、洪本善、洪榮宏、趙鍵哲、楊明德
總編輯:陳國華
編 輯:陳鶴欽、游豐銘、何美娟
(三)研究發展委員會:
主任委員:曾清凉
委 員:陳惠玲、駱旭琛、吳宗寶、江日春、蕭萬禧、吳文貴、林志清、張順一、簡燦榮、鄭鼎耀
候進雄
總幹事:王敏雄
幹 事:謝東發、王朝隆
(四)獎章委員會:
主任委員:吳萬順
委 員:林燕山、紀聰吉、陳錫禎、曾國鈞、謝福來
幹 事:由本會秘書處兼任
(五)教育訓練委員會:
主任委員:劉正倫
委 員:崔國強、李文聖、葉文凱
總幹事:林世賢
幹 事:謝正亮
(六)國際事務委員會:
主任委員:何維信
委 員:周天穎、張嘉強、駱旭琛、陳惠玲、張坤樹、鄭宏逵
總幹事:曾耀賢
幹 事:邱明全、李佩珊、湯美華、鄒慶敏
學會地址:231新北市新店區三民路29巷4弄10號

網 址:http://www.cadastralsurvey.org.tw

電子郵件:cscs.editor@gmail.com

國土測繪與空間資訊 民國一〇二年七月 第一卷 第二期 第83頁至第98頁 Taiwan Journal of Geoinformatics Vol. 1, No. 2, July 2013, pp. 83~98

陸基式移動製圖之定位定向混合式整合架構

朱建勳1* 江凱偉2 蕭輔導3 陳杰宗4

論文收件日期:101.10.03 論文修改日期:101.10.23 論文接受日期:101.11.27

摘要

早期發展的移動式測繪系統(Mobile Mapping System, MMS), 受限於求解外方 位參數需控制點,造成應用上受到諸多限制。透過全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)/慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)定 位定向整合技術,可於無控制點之環境下,直接求得載台位置與與姿態角,並經過 固定臂舆軸角化算,可求相機拍攝瞬刻之外方位參數。其後,以共線式及前方交會 之原理,即可求得物空間座標,以達到直接地理定位之目的。商業上最常使用的 GNSS/INS 定位定向整合策略--鬆耦合(Loosely Couple, LC)架構,以 GNSS 卡曼濾 波器(Kalman Filter, KF)及 INS/GNSS KF 組成。透過 GNSS KF 計算位置與速度解, 並以其結果輸入 INS/GNSS KF,用以更新、補償 INS 的導航資訊; LC 具有較簡單 且更彈性的架構來取得導航資訊,然而當接收器追蹤衛星少於 4 顆時,GNSS KF 無法提供位置與速度解,此特性於台灣高遮蔽率的都市區域相當不利。另一種整合 策略-緊耦合(Tightly Couple, TC)架構,透過唯一 INS/GNSS KF 接收 GNSS 原始觀 測資料,對 INS 導航解進行更新、補償;此架構於衛星少於 4 顆多於 1 顆時仍可更 新·毫無疑問的緊耦合架構更適用於都市區域。然而,台灣地去仍然有許多 GNSS 完 全遮蔽區域,本研究利用 TC 之結果,虛擬整體測試軌跡之 GNSS 位置,並以階層 式輔助 INS 之整合,稱為混合式緊耦合(Hybrid Tightly Coupled, HTC)架構,本研究 同時利用約20個檢核點,完成基於各軌跡之直接地理定位分析。

關鍵詞:卡曼濾波器、直接地理定位、緊耦合、鬆耦合

¹ 博士生,國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 副教授,國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 司長,內政部地政司。

⁴ 科長,內政部地政司。

^{*} 通訊作者, TEL: (06)2370876#800, E-mail: <u>chienhsun0229@msn.com</u>。

The development of a Hybrid Integration Scheme for Land Mobile Mapping Applications

Chien-Hsun Chu^{1*}, Kai-Wei Chiang², Fu-Dou Xiao³, Jie-Chung Chen⁴

Abstract

Nowadays the most common technologies used for positioning and orientation of a mobile mapping system include using Global Navigation Satellite System (GNSS) as a major positioning sensor and Inertial Navigation System (INS) as the major orientation sensor. Through the GNSS/INS system and calibration parameters the Exterior Orientation parameters (EOPs) of each one image can be derived in the free control point. Using more than two geo-referenced images the object three dimensional coordinate can be intersected and calculated. The integration strategy of the most commercially system is the Loosely Coupled (LC) architecture, that has the simplest architecture using the GNSS solutions to aid the INS navigation information with proper optimization estimator. The LC does combine the two sensors' solutions when the number of tracked satellite is more than four. In recent year, another commonly integration strategy is known as Tightly coupled (TC) architecture. Because the TC uses the GNSS measurements to aid INS, it can integrate measurements provided by GNSS receiver and INS unless no GNSS satellite is tracked. Obviously, the TC architecture is a better candidate for land based mobile mapping applications than LC in Taiwan. Unfortunately, there are still many GNSS denied environment in the urban area, therefore the TC architecture is still not robust and stable enough for Mobile Mapping System (MMS) application. The objective of this research is to develop Hybrid Tightly Coupled (HTC) to generate virtual and seamless GNSS solution that can be applied in the LC architecture. The present study investigates the impact of LC, TC and HTC INS/GNSS integration schemes on Direct Geo-referencing (DG) in terms of positioning accuracy using the land-based Mobile Mapping System (MMS) van developed at the Department of Geomatics at National Cheng Kung University in Taiwan. The performance analysis is conducted by performing a DG operation with 20 check points that is producing their coordinates without using any ground control points from images taken with the mapping van processed based on LC, TC and HTC schemes, respectively and compare with known

¹ Phd. Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² Associate Professor, Department of Geomatics at National Cheng Kung University.

³ Chief, Department of Land Administration, M. O. I.

⁴ Section Chief, Department of Land Administration, M. O. I.

^{*} Corresponding Author, TEL: +886-6-2370876#800, E-mail: chienhsun0229@msn.com.

coordinates of those check points for further analysis.

Keywords: Direct Geo-referencing, Kalman Filter, Loosely Couple, Tightly Coupled

一、前 言

近十年來,地理資訊系統需求日益漸增,以傳統測量高成本方式獲取資料已日 不敷出,限制了地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)的發展。故要有 效地建立 GIS 資料庫是一個困難但必要的挑戰。移動測繪系統(Mobile Mapping) System, MMS)是良好的解決辦法, MMS 的平台可以是飛機、船艦、地面交通工 具或人, 並整合 CCD 相機、錄影機、雷射掃描儀、慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)、全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)等多元感 測器,以達到直接地理定位之目的(Chiang et al., 2008)。多元感测器整合定位定向系 統對於多平台製圖系統之直接定位成果影響至鉅,其中包含了位置、姿態、時間同 步、影像觀測和率定參數等誤差,其表示式可寫為:($\delta r_{INS}^{m}(t) + \delta R_{h}^{m}(t)$ · $(S^i \cdot R^m_S \cdot r^S + a^b) + (V + \omega) \cdot \delta T$ (El-Sheimy, 2005) 。 一般而言, 其精度與 GNSS 訊號品質、感測器硬體規格、多元感測器融合最佳推估演算法、多元感測器整合架 構、載體作業環境與動態模式高度相關。傳統的多元感測器融合即時導航定位演算 法是以擴張卡曼濾波器(Extended Kalman filter, EKF)為主,而針對直接定位與移動測 圖之後處理應用使用平滑器來滿足高精度之需求。平滑器是用在濾波過程後之處理, 目的就是利用全部過去、現在和未來的觀測量來找出一個理想估算解,而全部的平 滑演算法皆須根據所得之濾波解來運算,因此,好的濾波解才有好的平滑解。

平滑器問題分類成三種: fixed-point, fixed-lag 和 fixed-interval。Fixed-point 平 滑是用在特定點的狀態,如衛星的進入軌道時間或化學加工的反應初始情況等。 Fixed-lag 平滑則用在當固定延遲估算並沒有附於棘手的問題時,因此,此法主要用 在如通信和遙測資料來解決問題。而 Fixed-interval 平滑則用在大部份的測量應用上, 因為測量是想得到所有觀測點的最佳的位置資訊,然而要達到如此的需求必經後處 理的方式。因此研究所使用的為基於 Fixed-interval 平滑法的(Rauch-Tung-Striebel, RTS)平滑器。圖 1(a)所示為目前商用定位定向軟體所使用之傳統 INS/GNSS 開放式 鬆耦合架構(Loosely Coupled, LC)。然而近年來相關的研究顯示此法具有一些無法克 服的限制,而這些限制會造成整合式定位系統在無衛星訊號時的定位定向誤差累積, 如圖 1(b)左所示。上述的卡曼濾波器演算法在 GNSS 訊號失鎖的條件下會造成定位 定向解之殘差隨時間累積之效應,如圖1(b)右之紅實線所示。故該演算法僅適用於 即時性中低精度定位定向之需求。但是在一般移動式製圖系統的應用中反而是以後 處理之模式為主。故可以透過使用平滑器的方式將卡曼濾波器定位定向解之殘差改 善近 60%~70%, 如圖 1(b)右之藍實線所示。這些殘餘誤差對於多平台製圖應用而言 是很不利的。除了核心演算法之演進外,多元感測器資料之整合架構亦影響整體定 位定向系統之效能甚鉅。目前多數的商用移動遙測製圖系統使用鬆耦合的架構為其 多元感測器整合之核心算法(如圖1所示)。

由於使用者必須同時接受四顆以上的衛星訊號,負責處理 GNSS 觀測量的卡曼 濾波器才能解算出 GNSS 所提供的導航解,很多時候使用者並不能同時收到四顆或 以上的衛星訊號,造成的原因諸如不開闊的觀測區域造成遮蔽,例如:高樓大廈林

立處、隧道、綠色隧道等等。當然,在如隧道這種天空視角完全被遮蔽的情況下, 理論上是完全收不到 GNSS 的訊號的,因此也不可能得到任何的 GNSS 導航解,此 時就必須依靠 INS 本身的獨自運作。但如高樓大廈林立處,有時雖無法接收到四顆 或以上的衛星訊號,或是可以收到四顆或以上的衛星訊號但卻是品質不良的反射訊 號,這些都無法提供正確的衛星導航解,如圖2所示。



圖 1(a) 傳統 EKF/平滑器之鬆耦合架構



圖 1(b) 傳統 EKF/平滑器誤差行為(無 GNSS 更新之環境)



圖 2 GNSS 訊號遮蔽之環境

緊耦合整合架構,基本上是將兩系統在觀測量的部分就做整合,換句話說,緊 耦合緊密地將 INS/GNSS 視為同一個系統,一同進行導航解算,如圖 3 所示。此種 架構的整合,最大的優點在於當 GNSS 訊號薄弱時,系統只要能收到一顆衛星的正 常訊號,即可進行導航解算。因此,緊耦合之設計可以說是 INS/GNSS 在軟體方面 最佳的整合方式。如果將鬆耦合系統相同運用在衛星遞減的情況,且與緊耦合比較, 就可以輕易地看出其中的差別。透過緊耦合的整合架構,不需要仰賴四顆以上的衛 星以提供整合的導航解。當導航衛星數在四顆以上時,緊耦合與鬆耦合整合架構的 定位精度表現差異不大。然當衛星數量少於四顆時,鬆耦合整合架構的定位誤差急 速地隨間增加,相對的,緊耦合整合架構的定位精度仍維持平穩直至衛星數量減少 至零顆。純就技術觀點而言,在已完成初始化的前提下,緊耦合整合架構僅需要一 顆衛星就能持續地提供相對穩定的導航解。故其較適合於 GNSS 訊號遮蔽效應普及 的台灣地區。



圖 3 緊耦合架構

然而現行商用緊耦合架構之潛在問題之一為GNSS訊號於遮蔽效應活躍區域之 訊號品質欠佳,儘管GNSS衛星接收儀可以勉強收到一顆衛星,但其觀測量品質不 佳,如此可以影響定位精度達數十公分,而此類因衛星訊好品質不佳所造成的定位 精度損失並無法藉由傳統差分模式或虛擬參考站即時動態(Virtual Reference Station, VRS / Real Time Kinematic, RTK)的方式移除;對於車載與個人系統之應用,現有的 GNSS接收儀在中高速動態定位模式(>50公里/小時),在台灣的大都會地區有至少 30%的地區無法有效的鎖定一顆衛星並即時提供有效觀測量,如此即造成GNSS脫 落之現象,如圖4所示台北市內湖地區之GNSS訊號遮蔽實例,約35~40%之時間 GNSS衛星數量是少於一顆的。



圖 4 GNSS 在台北市區訊號脫落之實例

如圖 5 左所示,鬆耦合與緊耦合的架構在衛星數量大於 4 時其定位精度是相似 的,但是當衛星數量小於 4 時,鬆耦合架構定位精度就隨時間遞減,而緊耦合架構 之定位精度仍可維持相當穩定的行為,然一旦衛星數量減為 0 時,現有緊耦合架構 之定位精度仍會隨時間遞減。圖 5 右所示為實測成果,藍色線為 GNSS 解,紅色線 為鬆耦合解而白色線為緊耦合解。測試環境為高速公路下交流道,平面道路上方有 高架道路而路旁有高樓,所以這一段路徑的 GNSS 衛星可用率約為 55%,故在衛星 數量小於 4 時,紅色軌跡逐漸飄移至對向車道,而白色軌跡仍維持在正確車道上, 唯因為在測試軌跡後半段因無法鎖定衛星時間長達 5 分鐘,所以白色軌跡亦逐漸飄 移至對向車道。



圖 5 商用鬆耦合與緊耦合定位定向架構之比較

本研究針對可視衛星少於1顆的狀況,提出混合式架構以發展抗GNSS訊號脫落及干擾之定位定向演算法,本演算法能較現有緊耦合架構提升至少30%~50%之直接定位精度。

二、混合式架構

如前所述,目前多數的商用移動遙測製圖系統使用鬆耦合的架構為其多元感測 器整合之核心算法,但此類演算法對衛星訊號之遮蔽效應相當敏感,所以近年來緊 耦合架構逐漸成為主流,其優點在於當 GNSS 訊號薄弱時,系統只要能收到一顆衛 星的正常訊號,即可進行導航解算。當導航衛星數在四顆以上時,緊耦合與鬆耦合 整合架構的定位精度表現差異不大。然當衛星數量少於四顆時,鬆耦合整合架構的 定位誤差急速地隨間增加,相對的,緊耦合整合架構的定位精度仍維持平穩直至衛 星數量減少至零顆。 然而現行商用緊耦合架構之潛在問題之一為 GNSS 訊號於遮蔽效應活躍區域 之訊號品質欠佳,儘管 GNSS 衛星接收儀可以勉強收到一顆衛星,但其觀測量品質 不佳,如此可以影響定位精度達數十公分,而此類因衛星訊好品質不佳所造成的定 位精度損失並無法藉由傳統差分模式或 VRS RTK 的方式移除;同時一旦衛星數量 減為 0 時,現有緊耦合架構之定位精度仍會隨時間遞減。故本研究發展混合式架構 (Hybrid Tightly Coupled, HTC),其目的為抗 GNSS 訊號脫落及干擾之定位定向演算 法架構,如圖 12 所示。該演算法將結合現有鬆、緊耦合架構並提出一個階層式架 構以發展抗 GNSS 訊號脫落及干擾之定位定向演算法,透過緊耦合架構先產生第一 個階段的定位定向解,再將位置、速度與姿態輸入至閉合式鬆耦合架構進行第二階 段之最佳定位定向解,如此,該鬆耦合架構將緊耦合架構視為虛擬的 GNSS。

而本研究所提出的虛擬 GNSS 概念相對於現有軟體使用的實體 GNSS 而言具備 連續不會斷訊與提供姿態更新之優勢,此演算法除了可以有效提供現有商用戰術等 級規格之定位定向系統精度外,對於低成本微機電慣性測量儀之應用勢必會有更顯 著的協助,如此透過低成本的定位定向系統可以進一步的推廣多平台製圖系統於傳 統空間資訊與非空間資訊領域之應用。混合式架構將鬆耦合架構做些微改變,利用 基於緊耦合架構解模擬的 GNSS 解,作為更新條件,修正 INS 偏移及尺度因子之飄 移,完成整合式定位定向解。其模擬的 GNSS 解,是將資料先利用緊耦合架構解算, 再以 RTS 平滑器過濾雜訊,利用平滑後的導航解一位置及速度,當作系統 GNSS 天 線的位置與速度,作為卡曼濾波器之更新觀測方程式,透過閉合式架構修正 INS 內 的偏移及尺度因子之誤差,圖 6 為混合式定位定向架構,圖 7 為資料處理流程。



三、系統架構

圖 8 為本文使用的移動測繪系統外觀。包括定位及定向感測器、CCD 相機。



圖 8 移動測繪系統

(一) 車體架構

使用車內電源,並不足以提供所有感測器穩定電力。因此必須設計一個電力系統方能確保 MMS 的穩定。圖 9 為本研究使用的電源供應器,能夠提供 2500 瓦的電壓,保持所有感測器獲得穩定電力。除此之外,本系統使用的外接電池,能透過載具的電源,於系統運作時同時充電,如此可減少不必要操作時間,並增加系統運作持久性,已達 MMS 高機動性之功用(李玉華、江凱偉, 2010)。



圖9 電力系統

載具內部空間,裝置定位定向系統主控電腦,以及觸發相機拍攝之主控電腦及 其他相關的配件,內部空間經過調整後如下圖 10 所示。圖 10 也展示了本系統的車 頂架。因載具並非鋼體,於系統運作時,會使得各感測器間相對關係改變,為確保 所有感測器在相同的環境下運作,因此設計車頂架,以提高系統穩定性及精度。



圖 10 內部及車頂架

(二) 定位及定向感測器

本研究使用的定位及定向系統(Positioning and Orientation System, POS),是由戰 術等級 INS SPAN-CPT 以及 NovAtel ProPak-V3 GNSS 接收器組成,如下圖 11。由 嵌入 SPAN-CPT 的雙頻接收機 OEM-V,其加速度計精度約 0.75(mg)、陀螺儀精度 約 1(度/時),以及 Century Instrument Company 安裝的基準站 Civil-NET[™],其內的 ProPak V3 接收機來獲取 GNSS 觀測量。原始 GNSS 觀測量透過 GrafNav[™] 8.30 軟 體進行差分處理,以獲取用來更新 LC 架構其 INS 的觀測量。



圖 11 SPAN-CPT 及 NovAtel ProPak -V3(Novatel, 2012)

(三) CCD 相機

本研究使用兩台 AVT Stingary(AVT-A0, AVT-A1)及四台 Basler(Bas-A2, Bas-A3, Bas-A4, Bas-A5)數位 CCD 相機。圖 12 展示這些相機的圖片。相機規格如下表 1。因為這些相機裝有電子快門,能快速驅動拍照瞬刻,最高可達致每秒 14 張,顯著 增強 MMS 的影像獲取能力。



圖 12 AVT Stingary 及 Basler scouts (STEMMER, 2012)

Cell size	4.4um*4.4um				
Frame rates	up to 14				
Picture size	1624*1234				
Shutter speed	47us~67s				
Digital interface	IEEE1394b				

表1 相機規格

(四) 系統運作

基於前述提到的特性,MMS 能夠透過內插獲得影像拍攝瞬刻之對應的 INS/GNSS POS 資料,利用該資料可化算出各影像之外方位。在本例中,直接地理 定位(Direct Geo-referencing, DG)的公式用來計算物體位置(El-Sheimy, 1996),如圖 13 及公式(1)。



圖 13 DG 的概念示意圖

 $r_p^m = +R(t)_b^m(a_c^b + s_p R_c^b r_p^c)$

(1)

量測影像坐標取得rg項;µp以立體測圖技術求定;R(t)b^M及r(t)^m。是從 INS/GNSS POS 在曝光時間 t 的內插;這些都是已知項。為了完成 DG 的公式必須要建立率定 程序。這些程序包含固定臂與軸角化算參數,以分別求定ab與Rb。 其中

- 1. r_p^m 代表地面點 P 在地理坐標系統(Mapping Frame)中位置向量。
- r(t)^m代表在時間 t 時, GNSS/INS 整合解算後所量測得之 Body(INS)位置向量 (相對於地理坐標系統)。
- 3. R^m代表相機之旋轉矩陣。
- 4. a^b代表相機透視中心到 Body-frame 的位置向量,必須透過 Lever-arm 率定求解。
- R(t)^m_b代表在時間 t 時, Body-frame 所觀測得之姿態所轉成之旋轉矩陣(相對於 地理坐標)。R^b_c代表相機相對於 Body-frame 之旋轉矩陣,必須透過 Boresight

率定求解。

- s_p代表地物點影像坐標 p 到地物點 P 之尺度(Scale),就相機而言必須透過立體 影像前方交會求解而得。
- 7. rp代表影像點之位置向量。

"兩階段率定法"進行軸角與固定臂之率定(李玉華、江凱偉,2010)。此率定方 法是利用地面控制點先針對率定用的照片進行空三平差,所解算得到之外方位參數 再與GNSS及INS定位定向成果比較,將兩者之位置及姿態平均差異量求平均而得。 例如每一幅影像在空三平差後即可獲得相機透視中心之位置相量(r_c^m),同時透過 GNSS/INS 聯合解算後得到 INS 之位置向量(r_b^m),因此依照公式2可以求解相機到 INS 間固定臂位置偏移量(r_b^c)(Li,2010)。

 $\mathbf{r}_{\mathbf{b}}^{\mathbf{c}} = \mathbf{R}_{\mathbf{m}}^{\mathbf{c}}(\mathbf{r}_{\mathbf{b}}^{\mathbf{m}} - \mathbf{r}_{\mathbf{c}}^{\mathbf{m}})$

由公式2可以得知空三成果與GNSS/INS之定位精度將間接影響到後續直接地 理定位的精度,因此本方法必須選取合適的地面控制場,因為它必須能夠同時滿足 空三平差所需的控制點分布與精度,以及GNSS觀測時沒有訊號遮蔽及多路徑效應 等現象,才能確保率定成果之精度。通常空三平差會有多張影像共同平差,因此公 式2可以選擇等權平均或依照平差結果位置之協變方(Covariance)進行加權平均,以 獲得較合理的率定成果。

就相機之軸角率定而言,同樣的每一幅影像都可以透過空三平差成果得到其相對於地理坐標系統之旋轉矩陣(R^m_c),且同一時間也可透過 INS 求得 INS 相對於地理 坐標系統之旋轉矩陣(R^m_b),因此在相機相對於 INS 之旋轉矩陣即可利用公式 3 求解 而得(Li, 2010)。

$$\mathbf{R}_b^{\mathsf{c}} = (\mathbf{R}_{\mathsf{c}}^{\mathsf{m}})^{-1}(\mathbf{R}_b^{\mathsf{m}})$$

(3)

衣之 网络牧牛龙绵木									
		lever-arm(m)		Boresight (deg)					
相機名稱	x y		z	omega	phi	kappa			
AVT-A0	0.030	0.032	0.031	0.6395526866	0.2719570127	0.5901279991			
AVT-A1	0.025	0.029	0.028	0.6339074664	0.2728997744	0.5875334189			
Bas-A2	0.028	0.027	0.030	0.7972359722	0.2751286031	0.8483553093			
Bas-A3	0.026	0.030	0.033	0.9283198343	0.2500016069	0.8201280061			
Bas-A4	0.026	0.028	0.027	0.9231194903	0.2698256492	0.8178075545			
Bas-A5	0.026	0.026	0.027	0.7814491403	0.2685545601	0.8332480187			

表2 兩階段率定結果

表2為兩階段率定結果,固定臂精度約為2-3公分,軸角精度約為1度以內。

四、實驗與結果

混合式定位定向演算法測試,其測試區域為台北市內湖區。圖 4 為 GNSS 衛星 數目及軌跡,本次測試利用緊耦合架構輔以輪速計所計算的平滑解做為參考軌跡, 旨在測試無輪速計輔助之鬆耦合(LC)、緊耦合(TC)和混合式(HTC)架構之定位誤差。

(2)

本次測試所使用的系統為本系擁有的 SPAN- CPT 戰術等級慣性測量儀,圖 14 和表 3 為定位誤差分析結果,其中縱軸表示當地水平坐標系東-北-天三個方向,橫軸表 示 GPS 時間,而表 3 中 AVG、STD 和 RMS 分別平均值、標準差和均方根。本研 究所發展之混合式架構於都市遮蔽率區域之定位精度有明顯的提升,在定位精度方 面,藉由 RMS 進步幅度的絕對值與原始誤差之比,可計算進步比率,如混合式架 構效益較緊耦合架構(2.183-0.186)/2.183=0.915,提升約 91%,而緊耦合較鬆耦合則 提升約 60%。



圖 14 位置誤差圖

表	3	定位	郌	羔	表
1X	5	人工	吓	灴	x

	AVG			STD			RMS		
	LC	TC	HTC	LC	TC	HTC	LC	TC	HTC
N (m)	-0.264	-0.225	0.002	3.139	1.596	0.085	3.150	1.612	0.085
E (m)	0.366	0.175	0.012	2.991	1.371	0.114	3.013	1.382	0.115
H (m)	0.958	-0.072	-0.007	3.251	0.500	0.118	3.389	0.505	0.118
2D (m)	0.451	0.285	0.012	4.336	2.104	0.143	4.359	2.123	0.143
3D (m)	1.059	0.294	0.014	5.419	2.163	0.185	5.522	2.183	0.186

本次實驗亦使用了約 20 個檢核點,檢核基於 LC、TC 和 HTC 軌跡解之直接地 理定位能力,圖 15 為成功大學測量及空間資訊學系所發展之直接地理定位模組介 面,藉由數張透過直接地理定位所得含有外方位的影像量測共軛點,並利用共線式 完成前方交會,可直接獲得物空間三維座標,在與檢核點做誤差分析。本實驗檢核 點中,可分為兩區,一為開闊地之檢核點,另一為高遮蔽都市區之檢核點,明顯地, 可預期處開闊地之誤差較小,圖 16 左為開闊地各個檢核點在各方向之誤差圖,右 則為都市區之誤差圖,而圖 17 為各檢核點三維總誤差。由圖中明顯可看出開闊地 誤差較都市區誤差小一量級。表 4 為其誤差分析,由表中可看出,開闊地中三種演 算其直接定理定位能力相近,但於都市區域內,HTC 明顯優於 LC 和 TC 架構。

0.0





EDDOD	AVG			STD			RMS		
EKKUK	LC	TC	HTC	LC	TC	HTC	LC	TC	HTC
IN THE OPEN SKY									
N (m)	0.060	0.142	0.122	0.419	0.275	0.345	0.404	0.298	0.351
E (m)	-0.118	-0.148	-0.204	0.247	0.179	0.201	0.263	0.226	0.279
H (m)	-0.025	0.081	0.100	0.307	0.407	0.304	0.294	0.396	0.307
2D (m)	0.374	0.266	0.393	0.319	0.275	0.226	0.482	0.374	0.448
3D (m)	0.447	0.440	0.473	0.361	0.337	0.281	0.564	0.545	0.544
			IN	I THE U	IRBAN				
N (m)	0.584	-0.650	0.101	6.787	2.325	1.344	6.566	2.333	1.299
E (m)	3.470	-0.098	-1.034	4.960	3.946	2.247	5.907	3.803	2.399
H (m)	-4.136	-0.454	-0.454	6.643	1.234	1.038	7.621	1.273	1.098
2D (m)	6.891	3.189	2.046	5.732	3.239	1.873	8.832	4.462	2.729
3D (m)	9.137	3.589	2.365	7.527	3.053	1.815	11.666	4.640	2.941

表4 直接地理定位誤差分析

五、結論

本研究使用加速度計精度約 0.75(mg)、陀螺儀精度約 1(度/時)之 INS 整合大地 級之 GNSS 接收機作為定位定向系統,並搭載 6 台工業相機,於無遮蔽區域三維直 接地理定位能力約為 50 公分。同時,使用二階段率定於固定臂精度可達 2-3 公分, 軸角可達 1 度以內。本研究進一步發展混合式架構(HTC)與其他兩種架構,於開闊 區域之直接地理定位能力皆約為 50 公分,但於都市區高遮蔽率區域,HTC 較商業 軟體所使用之 TC 於水平定位能力約有 90%的精度提升,於三維方向則約有 36%的 定位精度。

参考文獻

- 李玉華、江凱偉,2010,《車載移動式製圖系統之系統率定及其直接地理定位效能 分析》,國立成功大學測量及空間資訊所碩士論文。
- Chiang, K. W., A., Noureldin, and N., El-Sheimy, 2008, Developing a low cost MEMS IMU/GNSS integration scheme using Constructive Neural Networks, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44(2), pp. 582-594.
- El-Sheimy, N., 1996, *The development of VISAT A mobile survey system for GIS applications*, Thesis (Ph.D), Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary: Canada.
- El-Sheimy, N., 2005, An overview of mobile mapping systems, *Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8*: Egypt.
- Li, Y. H., 2010, The calibration methodology of a low cost land vehicle mobile mapping system, *Proceedings of ION GNSS 2010*: USA.
- Novatel, 2012, SPAN-CPT Single Enclosure GPS/INS Receiver, OEM GPS & GNSS Navigation Systems | NovAtel,

http://www.novatel.com/products/span-gnss-inertial-systems/span-combined-system s/span-cpt/ (Last Checked 2013/06/05). STEMMER, 2012, AVT Stingray - CCD cameras with FireWire interface, AVT Stingray - Stemmer Imaging,

http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/products/line/avt.stingray (Last Checked 2013/06/05).

國土測繪與空間資訊 民國一〇二年七月 第一卷 第二期 第 99 頁至第 117 頁 Taiwan Journal of Geoinformatics Vol. 1, No. 2, July 2013, pp. 99~117

台灣地區動態座標框架立之先期研究

-台灣現今之地殼變形模式

景國恩^{1*} 許書琴² 孔冠傑³ 陳芊如⁴ 趙荃敏⁴

- 論文收件日期:101.10.16
- 論文修改日期:101.12.25
- 論文接受日期:102.01.21

摘要

為進行台灣地區動態大地基準建立之先期研究工作,本研究使用 1995-2005 年 531 個 GPS 水平速度場與 2000-2008 年 1843 個精密水準測量成果來建立並分 析台灣地區現今之地表速度場模型。分析相對於澎湖白沙測站 S01R 之速度場顯 示,水平速度場由東部海岸地區約70 mm/yr 向台灣西北海岸地區逐漸遞減至近 平無位移, 並在台灣北部呈順時針旋轉型態, 於台灣南部則略呈逆時針旋轉之型 熊。此外,台灣地區之垂直速度場顯示,約 10-20 mm/yr 之抬升速率,主要發生 在中央山脈與海岸山脈南部地區,最大抬升速率約為 23 mm/yr,其他地區如平 原或盆地則主要顯示為沉陷。在台灣西南部平原地區因為人為抽水的關係導致其 沉陷速率普遍大於 20 mm/yr,最大沉陷速率約為 113 mm/yr。接著,本研究將台 灣區分為 27 個構造塊體並考慮 21 條活動斷層之滑移虧損速率,藉由三維塊體模 型反演台灣水平速度場來估算各塊體與活動斷層之歐拉極位置、塊體運動速率、 斷層長期滑移速率與斷層鎖定率,並最終建立台灣水平速度場模型。由於動態框 架之建立仍需考慮更複雜之地殼變形行為,因此在後續之研究工作中,本研究團 隊將會持續針對垂直速度場模型、主要地震同震位移模型與其震後變形模型之連 結進行 , 並會與現行之 TWD97@2010 座標框架進行銜接, 期能在不久的將來 提出適合台灣之動態框架。

關鍵字:GPS 水平速度場、三維塊體模型、水平速度場模型

¹ 助理教授,國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 碩士,國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 學士,國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁴ 研究助理,國立成功大學測量及空間資訊學系。

^{*} 通訊作者, TEL: (06)2757575 # 63840, Email: jingkuen@mail.ncku.edu.tw。

Preliminary study for establishment of dynamic datum in Taiwan –

Modern crustal deformation of Taiwan

Kuo-En Ching^{1*}, Shu-Chin Hsu², Kuan-Chieh Kung³,

Chien-Ju Chen⁴, Chuan-Min Chao⁴

Abstract

In order to establish the dynamic datum of Taiwan in the future, in this study we adopted 531 GPS horizontal velocities from 1995 to 2005 and 1843 precise leveling measurements from 2000 to 2008 to establish and analyze the present-day surface velocity model in Taiwan. The horizontal velocity field, relative to the station S01R, shows that the velocity of ~70 mm/yr in eastern coast gradually decreases to nearly no deformation in northwestern coast in Taiwan. In northern Taiwan, velocity field represents a clockwise rotation pattern, while a counterclockwise rotation pattern is revealed in southern Taiwan. Based on the vertical velocity field in Taiwan relative to the S01R, the uplift rate of 10-20 mm/yr is mainly observed in the Central Range and the southern Coastal Range with the maximum rate of ~23 mm/yr. On the contrary, the land subsidence is presented in other regions, such as the plains and basins, with the maximum subsidence rate of ~113 mm/yr. Next, we divided Taiwan into 27 tectonic blocks and 21 faults used to estimate the slip deficit. We inverted the Taiwan horizontal velocities for the locations of Euler poles, block motions, long-term fault slip rates, and fault coupling coefficients using the 3D block model. Finally, the horizontal velocity model in Taiwan is proposed based on the block modeling results. In order for establishing the dynamic datum of Taiwan, more complicated crustal deformation behaviors caused by earthquakes are needed be considered. Therefore we will continue working for the establishments of vertical velocity model, coseismic displacement models, and their following postseismic deformation models to propose a suitable Taiwan dynamic datum in the future. We will also try to apply the proposed dynamic model to the TWD97@2010 coordinate frame.

Keywords: 3D block model, GPS horizontal velocity, Horizontal velocity model

¹ Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

³ Bachelor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

⁴ Research Assistant, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

^{*}Corresponding Author, TEL:+886-6-2757575 #63840, E-mail: jingkuen@mail.ncku.edu.tw.

一、前 言

2011年3月11日發生於日本 Mw 9.0 宮城外海地震不僅對日本東北及關東地 區帶來災害性的地表震動、建物損毀、海嘯侵襲、人員傷亡與核子災難等難以估 算之危害;由另一個角度觀之,這次地震也將日本東北地區的國土一次性地向東 推移最大約 5.3 公尺,沉陷約 1.2 公尺的量值(e.g., Ozawa et al., 2011)。如此短時 間內大規模、大面積之地表位移對於國家及區域控制網之建立與維護影響甚鉅。 然而,由於板塊位移與斷層錯動所產生之地表變形並不僅僅侷限於大地震所造成 之同震變形(coseismic deformation);大地震之前的震間變形(interseismic deformation)反映板塊長時期的相對位移行為與斷層鎖定間交互作用的結果 (McCaffery, 2002);而在大地震發生之後總會伴隨著持續且非線性變化之地表位 移,並延續將近一年或是更長的時間,這種地表位移形態我們則稱之為震後變形 (postseismic deformation) (e.g., Nur and Mavko, 1974; Thatcher and Rundle, 1984; Tse and Rice, 1986; Roeloffs, 1996; Peltzer et al., 1996)。 換言之, 由於受到板塊運 動與斷層特性的交互作用,我們必須考量如何在節省人力及經費成本下,建立不 同時期的座標轉換機制。因此,在如日本、紐西蘭、美西等地殼活躍的區域中, 結合靜態座標框架及地殼變形特性之動態大地基準的建立與維護是一個相當重 要的課題(e.g., Blick et al., 2005; Tanaka et al., 2007; Pearson et al., 2010; Pearson and Snay, 2012; Snay, 2012) •

台灣同樣也位於活躍之板塊邊界(Yu et al., 1997; Yu et al., 1999; Yu and Kuo, 2001)(圖 1),其地殼應變速率約為 0.1-1.0 μ strain/yr (Bos et al., 2003; Chang et al., 2003; Hsu et al., 2009a),特別是台灣西南部旗山斷層至六甲-木屐寮斷層間之區域 有約 0.7-1.4 μ strain/yr 之最大壓縮量(Yu and Chen, 1994),遠高於日本地區平均約 0.1 μ strain/yr (Sagiya et al., 2000)及美國南加州地區平均約 0.1 μ strain/yr (Ward, 1994)之應變速率。在震間時期(interseismic period),台灣東部地區的地表速率即 可達到約 70 mm/yr。自有大地測量之紀錄以來,台灣地區大地震發生所造成之 最大同震位移量(coseismic displacement),小的有約 30 mm,如 2010 年 M_w 6.2 甲 仙地震(Ching et al., 2011c),大的則可達到約 10 公尺,1999 年 M_w 7.6 集集地震(Yu et al., 2001)。此外,在台灣陸地上,1999 年 M_w 7.6 集集地震與 2003 年 M_w 6.8 成功地震也皆紀錄到顯著之震後變形(e.g., Hsu et al., 2002; 2007; 2009b; 2009c; Yu et al., 2003; Chen et al., 2006; Cheng et al., 2009)。因此,台灣地區動態大地基 準之建立是勢在必行的工作。

本研究做為台灣地區動態大地基準建立之先期研究工作,我們先以震間時期 之地表速率進行模擬,解析這段時期地表位移速率受到板塊運動與斷層活動行為 之影響。就震間時期動態大地基準之建立工作,雖然我們可以採用內差的方法簡 單地建立起地表速度模型,但是,由於斷層活動行為之影響並非利用內差模式即 可求得之結果,特別是具有潛移行為(creeping)的斷層,其斷層兩側的速度場會有 相當顯著之差異(e.g., Yu et al., 2001)。此外,透過模擬的手段,還可協助我們分

析將來大地震可能發生之區域及量級,因此本研究捨棄較簡單之內插法,而採用較為複雜之塊體模型來進行速度場模型之建立。

二、地質背景

由於蘭嶼相對於澎湖白沙之速度約 82 mm/yr (Yu et al., 1997),故一般認為台灣 造山帶之生成源於歐亞板塊與菲律賓海板塊之相互擠壓作用(圖 1)。在台灣造山 帶之東北部,菲律賓海板塊沿著琉球海溝(琉球島弧隱沒系統)向北隱沒至歐亞板 塊之下;相反地,菲律賓海板塊於台灣南部沿著馬尼拉海溝(呂宋島弧隱沒系統) 向西仰衝至歐亞板塊之上。由於菲律賓海板塊相對於歐亞板塊向西北方向移動 (Yu et al., 1997),發生在台灣造山帶之弧陸碰撞就以 60-90 km/my 的速率向南傳 遞,使台灣實質見證了一個全程-初期(南部)、中期(中部)及末期(北部)-的造山 運動(Suppe, 1981, 1984; Teng, 1990; Huang et al., 1997; Lallemand and Tsien, 1997; Huang et al., 2000)。

於台灣地區附近之歐亞板塊上具有兩個主要的基盤高區(basement high),北 邊為觀音高區(Kuanyin high);南邊則為北港高區(Peikang high)(圖1)。這些構造 高區相對於鄰近之造山帶具有高度的構造穩定性,亦即具有較高之岩石強度 (Yang et al., 1991; Lin and Watt, 2002)。故歐亞板塊上南北二基盤高區的存在再加 上向西北方向聚合之菲律賓海板塊,此二者間之交互作用最終導致台灣造山帶中 北北東走向之主要構造呈現 S 形之形態(Lu et al., 1998; Lacombe et al., 2003)(圖 1)。

基於岩石組成及主要構造的差異,台灣大致上可以區分為五個北北東走向之 主要地質分區,各個地質分區間則由斷層相互區隔(圖 1)。由西向東,此五個地 質分區分別是西部海岸平原(Western Coastal Plain)、西部麓山帶(Western Foothills)、雪山山脈(Hseuhshan Range)、中央山脈(Central Range)及海岸山脈 (Coastal Range)(圖 1)。西部海岸平原由上新統至更新統之沖積扇沉積物所組成, 沉積物來源主要為西部麓山帶與中央山脈。西部麓山帶是由晚漸新統、中新統與 早更新統之地層所組成。雪山山脈主要由始新統與漸新統之沉積物所組成,並具 有輕度變質。西部海岸平原、西部麓山帶與雪山山脈三者在構造上是由一系列的 褶皺與逆衝斷層所組成,其構造位態主要為北至東北走向,向東或東南傾斜 (Suppe, 1980; Ho, 1986)。中央山脈之主要特色是由一系列第三系之變質岩所組成。 海岸山脈是由屬於北部呂宋島弧之晚第三系安山岩質火成岩與濁流岩相沉積物 所組成。於中央山脈及海岸山脈間存在著一條重要的邊界(圖 1),花東縱谷 (Longitudinal Valley)。此縱谷標示著以西為歐亞板塊與以東為菲律賓板塊的縫合 帶(Angelier et al., 2000; Lee et al., 2001)。

除了上述五個主要的構造分區外,台灣其他地區仍有一些值得注意的構造特 性。過去一些研究認為,台灣西南部之構造特徵被脫逸構造(escaping tectonics) 所支配(Lu and Malavieille, 1994; Lu et al., 1998; Lacombe et al., 2001; Hu et al., 2007; Ching et al., 2007b)。Lu and Malavieille (1994)與 Lu et al. (1998)首先指出因

景國恩、許書琴、孔冠傑、陳芊如、趙荃敏:台灣地區動態座標框架立之先期研究 -台灣現今之地殼變形模式

菲律賓板塊向西北方向擠壓且北港高區扮演一個地殼尺度之嵌入體(indenter),使 得介於北港高區與馬尼拉隱沒帶間之台灣西南部地殼塊體(crustal block)朝西南 西方向被擠出。隨後,Lacombe et al. (2001)建議此西南向之脫逸行為主要可表現 在位於台南斷層(Tainan fault)、梅嶺斷層(Meilin fault)、旗山斷層(Chishan fault) 上之右移斷層滑動分量與潮州斷層(Chaochou fault)上之左移斷層滑動分量。在台 灣中西部地區,由於弧陸碰撞(arc-continent collision)的作用,導致具有數十公里 累積滑移量之疊瓦狀逆衝岩片(thrust sheet)不斷地向西遞進而進入前陸地區 (foreland) (e.g., Suppe, 1981; Teng, 1990; Shyu et al., 2005)。此外,兩條現今正在活 動、N140℃ 走向的左移轉換斷層帶(transfer fault zone) – 三義-埔里與嘉義轉換斷 層帶 – 被較密集之地震活動帶所標示出來(Zhuang et al., 2005)。在台灣北部逐漸由 碰撞邊界轉變為琉球隱沒帶之應力環境(Suppe, 1984; Viallon et al., 1986; Teng, 1996; Clift et al., 2003; Rau et al., 2008)。台灣東北部介於雪山山脈與中央山脈之 間的宜蘭平原則被認為是具南北伸張環境之沖繩海槽(Okinawa trough)的向西延 伸。

三、資 料

本研究使用 1995-2005 年 531 個 GPS 水平速度場與 2000-2008 年 1843 個精 密水準測量成果來探討台灣地區現今之地表速度場特性(圖2)。其中,1995至 2005 年 531 個 GPS 水平速度場資料(圖 2a) 主要是由内政部 1995-2005 年分布 於台灣北部、南部與東部之 303 個 GPS 移動站(campaign-mode GPS stations),經 濟部中央地質調查所 1996-1999 年集集地震前分布於台灣中部之 78 個 GPS 移動 站,9個 GPS 連續站(包含 BANC、CK01、KDNM、PKGM、TAIW、TMAM、 TNML、TWTF、YMSM),以及 Yu et al. (1997)於 1993-1999 年集集地震前蒐集 之 141 GPS 水平速度場資料所組成。就 2000-2008 年 1843 個精密水準測量成果 部分(圖 2b), 是採用內政部 2000-2008 年一等一級與一等二級水準測量資料。內 政部於 2000-2003 年期間於台灣地區分兩階段進行 2065 個一等水準點之水準測 量工作。第一階段完成涵蓋台灣全島 1010 個水準點且長約 2200 km 之一等一級 水準網的施測與計算,藉此建立台灣新的高程基礎(Taiwan Vertical Datum 2001, TWVD2001) (Yang et al., 2003); 第二階段則於 TWD2001 的基礎下進行加密, 完 成包含 1055 個水準點且長約 2300 km 之一等二級水準網的測量與平差計算。自 2000 至 2008 年間,此水準網共完成 4 次重複測量(Chen et al., 2011),本研究採 用此 4 次重複測量資料所獲得之垂直速度場(Chen et al., 2011)來進行後續之工 作。

四、地表速度場

本研究估算之地表速度場皆相對於中國大陸邊緣測站 S01R。在水平速度場 估算方面,我們首先採用 GPS 計算軟體 Bernese 4.2 版,在約制 ITRF2000 座標

框架下 TSKB、GUAM、TID2 及 WUHN 等 IGS 測站之座標與速度場來求得各 GPS 測站資料之每日座標解。本研究為嘗試建立台灣地區之速度模型,在初步簡 化問題之條件下,根據各測站相對於 S01R 測站之座標時間序列,我們利用最小 二乘法來推求各測站之水平速度場。然而在資料蒐集期間,台灣發生兩個主要的 地震事件:一為台灣東北部 2002 年 M_L 6.8 花蓮外海地震,於台灣島上產生 55 mm 之最大同震位移量(Chen et al., 2004; Rau et al., 2008);另一為台灣東南部 2003 年 M_w 6.8 成功地震,產生 302 mm 之最大同震位移量(Wu et al., 2006; Ching et al., 2007a)。在忽略這兩個地震產生之震後變形影響,各測站之水平速度場(Vs)可藉 由 $Vs = (V \times \Delta T - D) / \Delta T$ 推求。其中 V 為未經修正之原始速度場, ΔT 為觀測時 段,而 D 為各測站之同震位移修正量(Ching et al., 2011b)。

此水平速度場顯示(圖 2a),台灣北部之速度量值介於 0-5 mm/yr,方向大致 朝北。台灣西北部一帶之速度量約為 0.1-8.9 mm/yr,朝北北西方向。台灣中部地 區速度場由東約 14 mm/yr 向西逐漸遞減至約 1-4 mm/yr,主要朝西北方向,速度 梯度並無明顯變化。台灣西南部旗山斷層與中央山脈西翼之間,速度量近乎一致 (46.7 ± 4.3 mm/yr),由東向西方位角由 292°轉至 244°。再往西至海岸平原,其速 度場皆小於 10 mm/yr。於台灣東部海岸山脈之速度場由東約 70 mm/yr 往西漸減 為 25 mm/yr,呈西北方向。蘭陽平原之速度量值介於~11.9-32.0 mm/yr,向東漸 增,且其速度方位角由西往東、由北往南依順時鐘方向逐漸由東北方向轉為東南 方向。

在垂直速度場之計算方面,因為水準和 GPS 垂直速度場所採用的參考站並 不一致,所以我們必須調整水準垂直速度場的參考框架,使其與 GPS 垂直速度 場的框架一致。為此,我們假設一組 GPS 站和水準點都位於同一位置上並且無 量測誤差發生,則兩者的速度差異將直接反映參考框架的不同(Ching et al., 2011a)。因此,我們比較 GPS 和水準點位相距在1公里內之垂直速度場,假設兩 者間之距離越小,則兩者的垂直速度會越接近(Ching et al., 2011a)。最後,推得 之水準垂直速度改正量為-3.64 ± 0.19 mm/yr (Ching et al., 2011a)。

垂直速度場顯示(圖 2b),約 10-20 mm/yr 之抬升速率主要發生在中央山脈與 南部海岸山脈地區,其他地區主要顯示為沉陷。中央山脈之最大抬升速率為 22.9 mm/yr,南部海岸山脈之最大抬升速率約為 25.8 mm/yr。在台灣西南部平原地區 因為人為抽水的關係導致其沉陷速率普遍大於 20.0 mm/yr,其中最大沉陷速率為 113.0 mm/yr。

五、塊體模型

斷層在受到周圍塊體運動作用下會發生變形並累積應變能量,當斷層所累積 的能量超過斷層弱面之強度時會釋放能量並造成滑移錯動,亦即地震。故藉由地 表位移場之監測並配合不同之斷層模型分析,可以協盼我們估算不同時期之斷層 滑移速率,更進一步可評估應變累積之大小及各構造之發震能力。

(一) 塊體模型原理說明

本研究所估算之地表位移場為台灣地區之震間速度場。由於震間速度場可以 由塊體旋轉與斷層活動兩者間的交互作用來進行描述,故本研究透過塊體模型模 擬地表速度場來了解塊體的運動行為(塊體旋轉)及塊體間交互作用在斷層上所 產生的應變。塊體旋轉意指將地球表面切割成多個剛性塊體,每一個塊體繞著其 歐拉軸在地球表面上旋轉,而歐拉軸與地球表面的交點為轉動極,又稱為歐拉極 (Euler pole)。藉由各塊體歐拉極的位置及其角速度,便能描述該塊體的運動行為。 兩塊體運動型態的差異會造成位於交界之斷層發生錯動,若斷層滑移的情形不是 連續且穩定的,就代表斷層有鎖定(locking 或 stuck)的情形,即應變量將累積於 斷層內。

依據上述內容, GPS 速度場為塊體旋轉及斷層滑移所造成地表滑移之總和(如(1)式所示)。

(1)

$$\vec{V}_i = \vec{V}_b + \vec{V}_f$$

(1)式中, \vec{V}_i 為地表速度場(短期變形速率), \vec{V}_b 為塊體旋轉量(長期變形速率), \vec{V}_t 為斷層活動量(斷層虧損速率)。

為了解台灣各斷層地震循環的特性,本計畫採用 Robbert McCaffery 所發展的塊體模型程式 DEFNODE (McCaffery, 2002),藉由反演 GPS 觀測資料,可推求斷層面上的滑移速率及斷層鎖定率、塊體旋轉極點及旋轉角速率等特性。在模型中,斷層錯動所產生之地表位移是依據 Okada 的公式(Okada, 1985)進行計算,可用來模擬塊體邊界斷層的鎖定及同震滑移現象。在此模型內,我們假定長期(包含無數次之地震週期)斷層滑移速率(long-term slip rate)是指在無摩擦力之斷層面上的滑移速率。換言之,長期斷層滑移速率是由相鄰兩塊體之相對運動速率來評估且並無長期垂直運動之發生(McCaffrey, 2002)。於 DEFNODE 中,速度場是由(1)式呈現,其中 $\bar{V}_b \gtrsim V_f$ 以(2)與(3)式計算:

$$\vec{V}_b = \sum_{b=1}^{B} H(X \in \Lambda_b) [\Omega_{rb} \times X] \cdot \hat{i}$$
⁽²⁾

於(2)式中, B 為塊體編號, H 為邏輯函數(測站 X 在塊體 B 上時, H=1; 反 之則為 0), Λ_b 為塊體 b 的範圍, Ω_b 為塊體 b 相對於參考框架的旋轉軸, \hat{i} 為 i方向上的單位向量。因為斷層面上具有摩擦力,因此在大部份的斷層上,短期斷 層滑移速率(short-term slip rate)都假設小於長期斷層滑移速率。

$$\vec{V}_f = \sum_{k=1}^F \sum_{n=1}^{Nk} \sum_{j=1}^2 \varphi_{nk} G_{ij}(X, X_{nk}) [\Omega_{hf} \times X_{nk}] \cdot \hat{j}$$
(3)

(3)式中, *F* 為斷層編號, N_k 為第 *k* 條斷層上的節點數目, φ_{nk} 為斷層鎖定率 (coupling coefficient; 當 $\varphi_{nk} = 1$ 表示斷層完全鎖定, 當 $\varphi_{nk} = 0$ 代表斷層處於潛移 的狀態), G_{ij} 為描述斷層活動所造成地表位移量變化的格林函數, Ω_{hf} 為斷層下盤 f相對於上盤 h 的旋轉軸, \hat{j} 為 j 方向上的單位向量。

此外,在 DEFNODE 程式中,斷層是由一系列的節點所組成,各個節點分 別以不同的參數設定來反映斷層幾何及斷層滑移的形式。我們沿著斷層面,在這 些節點上評估 φ 值。我們假定斷層鎖定率 φ 為不隨時間改變的值,同時也強制約 制斷層底部的 φ 值為0。此外,因為台灣多數之斷層並沒有明顯地表潛移之證據, 所以我們也強制約制斷層頂部之 φ 值為1;然而,縱谷斷層南段是惟一不對斷層 頂部之 φ 值進行強制約制的斷層,因為此斷層有明顯地表潛移的證據(e.g., Lee et al., 2003)。最後,塊體斷層模型的最佳解由卡方檢定(χ^2 , Reduced Chi Square) 來判斷,如(4)式。

$$\chi^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (r_{i} / \sigma_{i})^{2}}{n}$$
(4)

(4)式中,n為自由度, r_i 為觀測值和理論值的差值, σ_i 為觀測資料的誤差。

(二) 塊體之建立

本研究所採用的塊體為地球表面上的閉合球面多邊形,並且涵蓋整個研究區域。在同一塊體內,每個點都假設以同樣的角速度旋轉。在初始的模型測試裡, 我們只建立三個塊體,包含了參考塊體(穩定大陸邊緣 EURA)、菲律賓海板塊和 台灣造山帶。然而,根據初步之反演結果,我們並無法獲得良好的擬合。因此, 本研究進一步根據活動斷層及地震帶的分布與顯著速度梯度之位置藉由試誤法 來逐漸增加塊體的數量。最後我們在本研究中區分出 27 個塊體(Ching et al., 2011b)(圖 3)。

(三)估算滑移虧損速率之斷層

基於以下三個原因,在台灣我們只考慮 21 條活動斷層之滑移虧損速率(slip rate deficit) (Ching et al., 2011b)。一,反映菲律賓海板塊西緣(YMSD、NORT、NHSS、ILAN與RYUK塊體的西緣)的地表構造並不清楚;二,我們沒有足夠的資料涵蓋範圍可以去評估三義-埔里與嘉義轉換斷層帶(transfer fault zone)以及位於山區塊體邊界的滑移虧損速率;三,我們並沒有資料來進行外海斷層滑移虧損速率之評估。因此,本研究將上述不確定的塊體邊界都認定為完全的潛移斷層。具有滑移虧損速率之斷層是由一系列位於球形表面之節點所組成(McCaffrey, 2002)。斷層節點與節點之間則是由長 2 公里和寬 1 公里的四邊形組成。在整個塊體模型中,斷層幾何是固定不變的。

根據反射震測、平衡剖面(balanced cross sections)的資料(e.g., Huang et al., 2004; Yang et al., 2006)和地震活動分布(e.g., Hsu, 1990; Rau et al., 1995; Carena et al., 2002),我們假定斷層深度可延伸至 5-20 公里,此深度以下之斷層則假設其運動行為完全為潛移,其斷層滑移速率為相鄰兩塊體之相對速度(Ching et al., 2011b)。除了車籠埔斷層和池上斷層外,我們至今仍然無法掌握大部分斷層傾角

的角度。因此,在台灣增積楔模型的假設下(e.g., Davis et al., 1983; Dahlen and Suppe, 1988),我們假設台灣西部向東傾斜逆斷層的底部深度由西向東逐漸由深度約5km逐漸增加至約7km,傾角也從西約25°逐漸增加至東約45°。

(四)反演結果

在不考慮因斷層鎖定所造成彈性應變的前提,我們首先藉由反演水平速度場 計算每個構造塊體的歐拉極初始位置。我們選擇塊體 EURA (穩定大陸邊緣)作為 此模型的參考塊體,換言之,所有其他的塊體皆相對於 EURA 塊體運動。此外, 初部結果顯示台灣西北部之 CHMO 和 MIAO 塊體具有相同的歐拉極,這可能暗 示三義-埔里轉移斷層之北段區域在此十年間完全鎖定,因此,在接下來的反演 過程中,我們僅僅估計 25 個塊體的角速度。

於隨後的反演工作中,我們將上述歐拉極的位置與角速度作為同時反演塊體 運動與斷層震間鎖定率之先驗值。此模型之卡方檢定(χ²)為 3.30。本次的反演有 852 的自由度(dof):1062 個觀測值和 210 自由參數(3 個參數為 25 個板塊角速度 再加上 135 斷層參數)(Ching et al., 2011b)。

反演結果指出,許多塊體具有顯著的殘差(除了 YMSD、WNOR、NORT、 NHSS、ILAN、CHMO、MIAO 及 EFSB 外)(圖 4a),這些殘差可能代表塊體邊界 並沒有被適當的定義或是塊體內具有不可恢復的非彈性應變(即永久應變率或內 部應變率)。因為我們沒有足夠的 GPS 資料去建立新的塊體或是某些區域主要構 造的位置並不明確,特別是針對山區內的塊體,因此,在本文中我們暫時將這些 殘差值視為因內部應變(internal strain)所導致的結果,且極可能是由於塊體中數 個小斷層之運動速率過小(<< 1 mm/yr),以至於 GPS 無法觀測到(McCaffrey, 2005)。 因此,我們使用速度殘差去推斷每個塊體的內部應變速率(Ching et al., 2011b) (圖 4b)。

藉由塊體模擬最佳解所獲得的歐拉極位置、塊體運動速率、斷層長期滑移速 率與斷層鎖定率分別顯示於圖 5。如果歐拉極中心和塊體中心距離過遠,我們以 黑色粗箭頭將塊體運動註記為塊體移動(block translation) (圖 5a);如果歐拉極接 近塊體中心,我們以細的彎曲箭頭將塊體運動註記為塊體旋轉(block rotation) (圖 5a)。

六、結論與建議

本研究使用 1995-2005 年 531 個 GPS 水平速度場與 2000-2008 年 1843 個精 密水準測量成果得知,相對於澎湖白沙測站 S01R 之台灣水平速度場由東部海岸 地區約 70 mm/yr 向西北逐漸遞減,同時在台灣北部略呈順時針旋轉型態,在台 灣西南部則略呈逆時針旋轉之型態。此外,台灣地區之垂直速度場在山區主要為 抬升,最大抬升速率為 22.9 mm/yr,在平原或盆地地區則為下陷之型態,最大沉 陷速率為 113.0 mm/yr。

本研究之地表變形分析結果顯示,台灣地區之地表速度場因深受各區域之構

造活動所控制,而有截然不同之型態特性。另外,塊體WCPN、CHYI與WTFH所 估算之歐拉極皆具有較大誤差,此結果可能與非構造活動所產生之地層下陷有關。同 時,我們也必須注意到,大地震的發生常常會改變既有之速度場。換言之,台灣 地區除非在空間及時間上擁有非常密集與可靠之速度場,否則將難以採用內差的 方法來簡單地建立起合理之座標轉換模式。而本研究成功地採用塊體模型來建立 台灣地區之水平速度場模型,雖然方法上相對比較複雜,但是在永續發展的概念 中,卻可以採用空間分布較為稀疏之 GPS 連續站資料進行速度場維護,以節省 GPS 外業之人力與花費,同時也能提高速度場估算之精度。

然而我們也必須注意到,基於本研究所採用塊體模型主要應用在隱沒帶構造 環境之假設,對於採用本塊體模型建立台灣地區垂直速度場模型之工作,可能會 有未知的問題產生,我們仍然需要持續的工作來進行研究。此外,在動態框架的 建立工作中,我們還必須考慮地震所造成之同震位移及後續之震後變形效應。這 些工作也是我們隨後要持續探討的部分。因此,在爾後之研究工作中,本研究團 隊將會持續針對垂直速度模型、主要地震同震位移模型與其震後變形模型之連結 進行研究,並會與現行之 TWD97@2010 座標框架進行銜接,期能在不久的將來 提出適合台灣之動態框架。

參考文獻

- Angelier, J., H. C. Chu, J. C. Lee, and J. C. Hu, 2000, Active faulting and earthquake hazard: the case study of the Chihshang fault, Taiwan, *Journal of Geophysical Research*, 29, pp. 151-185.
- Blick, G., C. Crook, D. Grant, and J. Beavan, 2005, Implementation of a semi-dynamic datum for New Zealand, *International Association of Geodesy Symposia*, 128, pp. 38-43.
- Bos, A. G., W. Spakman, and M. C. J. Nyst, 2003, Surface deformation and tectonic setting of Taiwan inferred from a GPS velocity field, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2002JB002336.
- Carena, S., J. Suppe, and H. Kao, 2002, Active detachment of Taiwan illuminated by small earthquakes and its control of first-order topography, *Geology*, 30, pp. 935-938.
- Chang, C. P., T. Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J. C. Lee, and S. B. Yu, 2003, Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: Constraints from GPS observations and tectonic data, *Earth and Planetary Science Letters*, 214, pp. 115-127.
- Chen H. Y., S. B. Yu, L. C. Kuo and C. C. Liu, 2006, Coseismic and postseismic displacements of the 10 December 2003 (MW 6.5) Chengkung, eastern Taiwan, earthquake, *Earth Planets Space*, 58, pp. 5-21.
- Chen H. Y., L. C. Kuo, and S. B. Yu, 2004, Coseismic movement and seismic ground

motion associated with the 31 March 2002 Hualien "331" earthquake, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15, pp. 683-695.

- Chen, K. H., M. Yang, Y. T. Huang, K. E. Ching, and R. J. Rau, 2011, Vertical displacement rate field of Taiwan from geodetic levelling data 2000-2008, *Survey Review*, 43, pp. 296-302.
- Cheng, L. W., J. C. Lee, J. C. Hu, and H. Y. Chen, 2009, Coseismic and postseismic slip distribution of the 2003 Mw = 6.5 Chengkungearthquake in eastern Taiwan: Elastic modeling from inversion of GPS data, *Tectonophysics*, 466, pp. 335-343.
- Ching, K. E., R. J. Rau, and Y. Zeng, 2007a, Coseismic source model of the 2003 Mw
 6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements, *Journal of Geophysical Research*, 112, B06422, doi:10.1029/2006JB004439.
- Ching, K. E., R. J. Rau, J. C. Lee, and J. C. Hu, 2007b, Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-2005, *Earth and Planetary Science Letters*, 262, pp. 601-619.
- Ching, K. E., M. L. Hsieh, K. M. Johnson, K.H. Chen, R.J. Rau, and M. Yang , 2011a, Modern vertical deformation in Taiwan: precise leveling measurements and continuous GPS observations, 2000-2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242.
- Ching, K. E., R. J. Rau, K. M. Johnson, J. C. Hu, and J. C. Lee, 2011b, Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2010JB008058.
- Ching, K. E., K. M. Johnson, R. J. Rau, R. Y. Chuang, L. C. Kuo, and P. L. Leu, 2011c, Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model, *Earth and Planetary Science Letters*, 301, pp. 78-86.
- Clift, P. D., H. Schouten, and A. E. Draut, 2003, A general model of arc-continent collision and subduction polarity reversal from Taiwan and the Irish Caledonides, in Intra-Oceanic Subduction Systems: Tectonic and Magmatic Processes, in R. D. Larter and P. T. Leat, eds., *Geological Society of London, special publication*, London: The Geological Society of London, pp. 81-98,.
- Dahlen, F. A., and J. Suppe, 1988, Mechanics, growth, and erosion of mountain belts, in S. P. Clark, Jr., B. C. Burchfiel, and J. Suppe, eds., *Geological Society of America, Special Papers*, USA: Processes in Continental Lithospheric Deformation, pp. 161-178.
- Davis, D., J. Suppe, and F. A. Dahlen, 1983, Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges, *Journal of Geophysical Research*, 88, pp. 1153-1172.
- Ho, C. S., 1986, A synthesis of the geologic evolution of Taiwan, *Tectonophysics*, 125, pp.1-16.

- Hsu, V., 1990, Seismicity and tectonics of a continent-island arc collision zone at the Island of Taiwan, *Journal of Geophysical Research*, 95, pp. 4725-4734.
- Hsu, Y. J., N. Bechor, P. Segall, S. B. Yu, L. C. Kuo, and K. F. Ma, 2002, Rapid afterslip following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Geophysical Research Letters*, 29, doi:10.1029/2002GL014967.
- Hsu, Y. J., P. Segall, S. B. Yu, L. C. Kuo, and C. A. Williams, 2007, Temporal and spatial variations of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophysical Journal International*, 169, pp. 367-379.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, M. Simons, L. C. Kuo, and H. Y. Chen, 2009a, Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, 479, pp. 4-18.
- Hsu, Y. J., J. P. Avouac, S. B. Yu, C. H. Chang, Y. M. Wu, and J. Woessner, 2009b, Spatio-temporal Slip, and Stress Level on the Faults within the Western Foothills of Taiwan: Implications for Fault Frictional Properties, *Pure and Applied Geophysics*, 166, doi:10.1007/s00024-009-0510-5.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, and H. Y. Chen, 2009c, Coseismic and postseismic deformation associated with the 2003 Chengkung, Taiwan earthquake, *Geophysical Journal International*, 176, pp. 420-430.
- Hu, J. C., C. S. Hou, L. C. Shen, Y. C. Chan, R. F. Chen, C. Huang, R. J. Rau, K. H. Chen, C. W. Lin, M. H. Huang, and P. F. Nien, 2007, Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences*, 31, pp. 287-302.
- Huang, C. Y., W. Y. Wu, C. P. Chang, S. Tsao, P. B. Yuan, C. W. Lin, and K. Y. Xia, 1997, Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan, *Tectonophysics*, 281, pp. 31-51.
- Huang, C. Y., P. B. Yuan, C. W. Lin, T. K. Wang, and C. P. Chang, 2000, Geodynamic processes of Taiwan arc-continent collision and comparison with analogs in Timor, Papua New Guinea, Urals and Corsica, *Tectonophysics*, 325, pp. 1-21.
- Huang, S. T., K. M. Yang, J. H. Hung, J. C. Wu, H. H. Ting, W. W. Mei, S. H Hsu, and M. Lee, 2004, Deformation front development at the northeast margin of the Tainan basin, Tainan-Kaohsiung area, Taiwan, *Marine Geophysical Research*, 25, pp. 139-156.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, J. Angelier, and B. Deffontaines, 2001, Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan, *Tectonophysics*, 333, pp. 323-345.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, J. Angelier, H. T. Chu, and J. C. Lee, 2003, Frontal belt

curvature and oblique ramp development at an obliquely collided irregular margin: Geometry and kinematics of the NW Taiwan fold-thrust belt, *Tectonics*, 22, doi:10.1029/2002TC001436.

- Lallemand, S. E., and H. Tsien, 1997, An introduction to active collision in Taiwan *Tectonophysics*, 274, pp. 1-4.
- Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, 2001, Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, pp. 219-240.
- Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, F. S. Jeng, and R. J. Rau, 2003, Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998-2001, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2003JB002394.
- Lin, A. T., and A. B. Watts, 2002, Origin of the West Taiwan Basin by orogenic loading and flexure of a rifted continental margin, *Journal of Geophysical Research*, 107, doi:10.1029/2001JB000669.
- Lin, A. T., A. B. Watts, and S. P. Hesselbo, 2003, Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Seamargin in the Taiwan region, *Basin Research*, 15, pp. 453-478.
- Lu C. Y., and J. Malavieille, 1994, Oblique convergence, indentation and rotation tectonic in the Taiwan mountain belt: insights from experimental modeling, *Earth and Planetary Science Letters*, 121, pp. 477-494.
- Lu, C. Y., K. J. Chang, F. S. Jeng, and W. T. Jian, 1998, Impact of basement high on the structure and kinematics of the western Taiwan thrust wedge: insights from sandbox models, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9, pp. 533-550.
- McCaffrey, R., 2002, Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones, in S. Stein and J. Freymueller, eds., *Geodynamics Series*, Washington: AGU, pp. 101-122.
- McCaffrey, R., 2005, Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data, *Journal of Geophysical Research*, 110, B07401, doi:10.1029/2004JB003307.
- Nur, A., and G. Mavko, 1974, Post-seismic viscoelastic rebound, *Science*, 183, pp. 204-206.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation to shear and tensile faults in a half space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75, pp. 1135-1154.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2011, Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, 475, pp. 373-376.
- Pearson, C., R. McCaffrey, J. Elliott, and R. Snay, 2010, HTDP 3.0: Software for

Coping with the Coordinate Changes Associated with Crustal Motion, *Journal of Surveying Engineering*, 136, pp. 80-90.

- Pearson, C., and R. Snay, 2012, Introducing HTDP 3.1 to transform coordinates across time and spatial reference frames, *GPS Solutions*, 17, doi:10.1007/s10291-012-0255-y.
- Peltzer, G., P. Rosen, F. Rogez, and K. Hudnut, 1996, Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow, *Science*, 273, pp. 1202-1206.
- Rau, R. J., and F. T. Wu, 1995, Tomographic imaging of lithospheric structures under Taiwan, *Earth and Planetary Science Letters*, 133, pp. 517-532.
- Rau, R. J., K. E. Ching, J. C. Hu, and J. C. Lee, 2008, Crustal deformation and block kinematics in transition from collision to subduction: GPS measurements in northern Taiwan, 1995-2005, *Journal of Geophysical Research*, 113, B09404, doi:10.1029/2007JB005414.
- Roeloffs, E., 1996, Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrological phenomena, *Advances in Geophysics*, 37, pp.135-195.
- Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000, Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure and Applied Geophysics*, 157, pp. 2303-2322.
- Shyu, J. B. H., K. Sieh, Y. G. Chen, and C. S. Liu, 2005, Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 110, B08402, doi:10.1029/2004JB003251.
- Snay, R. A., 2012, Evolution of NAD 83 in the United States: Journey from 2D toward 4D, *Journal of Surveying Engineering*, 138, pp.161-171.
- Suppe, J., 1980, Imbricated structure of western foothills belt, south-central Taiwan, *Petroleum Geology of Taiwan*, 17, pp. 1-16.
- Suppe, J., 1981, Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan, Mem, *Geological Society of China*, 4, pp. 67-89.
- Suppe, J., 1984, Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan, Mem. *Geological Society of China*, 6, pp. 21-33.
- Tanaka, Y., H. Saita, J. Sugawara, K. Iwata, T. Toyoda, H. Hirai, T. Kawaguchi, and S. Matsuzaka, 2007, Efficient maintenance of the Japanese geodetic datum 2000 using crustal deformation models PatchJGD & semi-dynamic datum, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 54, pp. 49-59.
- Teng, L. S., 1990, Geotectonic evolution of late Cenozoic arc continent collision in Taiwan, *Tectonophysics*, 183, pp. 57-76.
- Teng, L. S., 1996, Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt, *Geology*, 24, pp. 949-952.
- Thatcher, W., and J. B. Rundle, 1984, A viscoelastic coupling model for the cyclic

deformation due to periodically repeated earthquakes at subduction zones, *Journal of Geophysical Research*, 89, pp. 7631-7640.

- Tse, S. T., and J. R. Rice, 1986, Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *Journal of Geophysical Research*, 91, pp. 9452-9472.
- Viallon, C., P. Huchon, and E. Barrier, 1986, Opening of the Okinawa basin and collision in Taiwan: A retreating trench model with lateral anchoring, *Earth and Planetary Science Letters*, 80, pp. 145-155.
- Ward, S. N., 1994, A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, pp. 1293-1309.
- Wu, Y. M., Y. G. Chen, T. C. Shin, H. Kuochen, C. S. Hou, J. C. Hu, C. H. Chang, C. F. Wu, and T. L. Teng, 2006, Coseismic versus interseismic ground deformations, fault rupture inversion and segmentation revealed by 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake in eastern Taiwan, *Geophysical Research Letters*, 33, L02312, doi:10.1029/2005GL024711.
- Yang, K. M., H. H. Ting, and J. Yuan, 1991, Structural styles and tectonic modes of Neogene extensional tectonics in southwestern Taiwan: implications for hydrocarbon exploration, *Petroleum Geology of Taiwan*, 26, pp. 1-31.
- Yang, K. M., S. T. Huang, J. C. Wu, H. H. Ting, and W. W. Mei, 2006, Review and new insights on foreland tectonics in western Taiwan, *International Geology Review*, 48, pp. 910-941.
- Yang, M., K. H. Chen, and S. W. Shiao, 2003, A new height reference network in Taiwan, *Survey Review*, 37, pp. 260-268.
- Yu, S. B., and H. Y. Chen, 1994, Global positioning system measurements of crustal deformation in the Taiwan arc-continent collision zone, *Terrestrial, Atmospheric* and Oceanic Sciences, 5, pp. 477-498.
- Yu, S. B., and L. C. Kuo, 2001, Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, pp. 199-217.
- 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, R. S. Punongbayan, and E. G. Ramos, 1999, GPS observation of crustal motion in the Taiwan-Luzon region, *Geophysical Research Letters*, 26, pp. 923-926.
- 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, pp. 995-1012.

- Yu, S. B., Y. J. Hsu, L. C. Kuo, H. Y. Chen, and C. C. Liu, 2003, GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2003JB002396.
- Zhuang, J., C. P. Chang, Y. Ogata, and Y. I. Chen, 2005, A study on the background and clustering seismicity in the Taiwan region by using point process models, *Journal of Geophysical Research*, 110, B05S18, doi:10.1029/2004JB003157.

景國恩、許書琴、孔冠傑、陳芊如、趙荃敏:台灣地區動態座標框架立之先期研究 -台灣現今之地殼變形模式



圖1 台灣大地構造框架。大陸邊緣之淺綠色區域指示先第三系基盤高區之位置 (Lin et al., 2003)。藍色虛線為碰撞造山前所發育之正斷層。WCP為西部海 岸平原;TTV為大屯火山;HP為恆春半島;IL為宜蘭平原。數字1-5分別代 表變形前緣、車籠埔斷層、屈尺斷層、梨山斷層及縱谷斷層。I-II分別代表 中央山脈西翼板岩區及中央山脈東翼變質雜岩區。



圖2 台灣地表速度場。(a)相對於澎湖S01R白沙測站之水平速度場。(b)相對於澎 湖白沙S01R測站之垂直速度場。



圖3台灣地區塊體模型建立所劃分之構造塊體及斷層分布。淡灰色線為塊體邊界, 綠色條帶則為模型所使用之斷層位置。由於綠色條帶為斷層在地表之投影, 因此該條帶之粗細代表斷層之深度或傾角變化。
景國恩、許書琴、孔冠傑、陳芊如、趙荃敏:台灣地區動態座標框架立之先期研究 -台灣現今之地殼變形模式



圖4 塊體模型之殘差分布與內部應變量。(a)塊體模型之殘差分布。(b)塊體模型 之內部應變量。藍色粗線代表伸張量及其方向;紅色粗線代表壓縮量及其方 向。



圖5 塊體模型之成果。(a)各塊體歐拉極位置及斷層長期滑移速率分布情形。黑點為歐拉極之位置,其對應之橢圓為95%可信區間之誤差橢圓。(b)斷層上之斷層鎖定率分布情形。

GNSS 應用於地籍加密控制測量之研究

黄立信1* 張宏正2

論文收件日期:101.11.30 論文修改日期:102.03.19 論文接受日期:102.04.16

摘要

本研究順應大地測量的潮流,探討利用結合美國 GPS 與俄羅斯 GLONASS 定 位系統之 GNSS(Global Navigation Satellite System)全球導航衛星定位系統,提出兩 種新的觀測技術(如 GNSS 快速靜態測量、GNSS-RTK)應用於傳統地籍加密測量工 作之可行性。由本研究結果顯示,因測量作業時其可視衛星顆數大幅增加至 14-18 顆以上,基線解算成功率於 10 分鐘即可達成 91% 優異的基線解算成功率,明顯高 於傳統 GPS 訊號(77%),進而提升衛星定位觀測的品質及提高定位精度。第一個實 驗先利用 GNSS 快速靜態測量方法檢核控制點位精度, 取樣 4 個時間段(10、20、30 及 60 分鐘) 個別分析, 成果顯示超過 85% 以上的量測數據之最大觀測誤差均可達約 2 公分上下,以 10 分鐘觀測時段成果明顯超越現有測量規範。第二個實驗以 GNSS-RTK 即時動態測量方法檢核加密點位精度,依數據可得N、E、H軸之 RMS 最大誤差可達 0.20、 0.37、0.51 公分之内,證明利用本研究方法辦理加密測量作業, 其精度已可達1公分之内;若點位成果與內政部測量公告值進行比較,結果在單主 站及雙主站之各分量誤差(ΔN, ΔE, ΔH)都可達 0.9、1.3、7.1 公分之内, 皆能滿足 地籍加密測量之規範要求。因此,本研究證明在測量實務上,利用以 GNSS 定位系 統於兩種不同之應用測量方式(GNSS 快速靜態、GNSS-RTK),皆可大幅縮短測量觀 測時間,本研究成果足以證明不僅可超越現有地籍測量之規範要求,更可作為未來 内政部修正地籍測量規範之參考依據。

關鍵詞:全球導航衛星定位系統、快速靜態測量、即時動態測量

¹ 副教授,國防大學理工學院環境資訊及工程學系。

² 碩士,國防大學理工學院 環境資訊及工程學系/桃園縣政府地政局科員。

^{*} 通訊作者,TEL: (03)3800364#132,E-mail: <u>shinn0329@gmail.com</u>。

Application of GNSS System for Cadastral Densified Control Surveying

Hwang, Lih-Shinn^{1*} Hung-Cheng Chang²

Abstract

In this study, using GNSS (Global Navigation Satellite System) which combined GPS (Global Positioning System) configuration built U.S.A with GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System) configuration built Russian to apply on Cadastral Densified Control Surveying work, and prove its possibility.

The result indicate that at least 14-18 apparently satellites can be presented by GNSS system observation, so the quality of measurement works and accuracy of positioning works could be improved about 91% baselines revolution rates 10 minutes.

The study includes two experiments. First work takes GNSS Rapid Static Surveying method to check accuracy of control points, divided different measured epochs (10,20,30 and 60 minutes) into 4 data, and result shows that above 85% data of RMS errors are estimated to be 2cm. Second work takes GNSS-RTK (Real-Time Kinematic) Surveying method to check accuracy of densified points, and it shows that most RMS in N, E and H axises are estimated to be under 0.20, 0.37 and 0.51 cm. It's provided accuracy of this study can be achieved about 1cm to handle Cadastral Densified Control Surveying work. Compared computed values of densified points of GNSS-RTK Surveying method with public values by MOI (Ministry of the Interior), it shows the most error differences of moments (Δ N, Δ E and Δ H)on single or two reference stations are estimated to be under 0.9, 1.3 and 7.1 cm. The result can be satisfied rules of Cadastral Densified Surveying work.

By the using methods (Rapid Static Surveying and RTK Surveying) of GNSS, this study also proved satellite observation time could be reduced and the positioning accuracy could be raised in Taiwan Cadastral Densified Control Surveying work.

Keywords: GNSS (Global Navigation Satellite System), Rapid Static Surveying, RTK(Real-Time Kinematic) Surveying.

¹ Associate Professor, Department of Environmental Information and Engineering, National Defense University, C.C.I.T.

² Master, Department of Environmental Information and Engineering, National Defense University, C.C.I.T. / Employee, Land Administration Bureau, Taoyuan County Government.

^{*} Corresponding Author, TEL:+886-3-3800364#132, E-mail: shinn0329@gmail.com.

一、前 言

臺灣地區自民國78年起全面實施數值地籍圖重測至今,其測量成果應用於土地複丈 及重大決策上,確實相當便利與實用。早期地籍圖重測工作,主要選定以市區且為都市 計畫地區等精華發展範圍為辦理地區,以配合各項都市計畫之發展。惟早期重測成果距 今時間久遠,且面臨都市之發展建設,電信、電力、自來水、瓦斯…等地下管線埋設, 以及道路拓寬、排水溝之鋪設與施作、土地開發或人為蓄意破壞等問題,使得重測當時 測設之控制點與都市計畫樁損毀殆盡,不但造成地政人員辦理土地複丈業務造成困擾, 更讓控制點維護管理面臨衝擊,影響後續重大土地決策之應用。

現階段地籍圖重測工作中已知控制點檢測、新設加密控制點測量方面,係以 GPS (Global Positioning System)靜態測量方式辦理,測設時需調援較多衛星接收儀器及測量 人力同步進行觀測,因新設加密控制點選點考量點位至少需三點成族,且點位坐標需經 後處理內業平差計算才能獲得坐標,致使點位坐標無法即時獲得。再者,目前各縣市選 定地籍圖重測辦理地區,已漸漸從都會區轉為農村、郊區及山區,其辦理地區面積較為 廣大,若再以傳統測量作業方式辦理控制測量作業,勢必將浪費大量人力、時間及成本, 實非吾等所期望。

(一)研究方法與流程

本研究以 101 年度平鎮重測區公告確定之 TWD97 系統加密控制點坐標為基準值, 與 GNSS 快速靜態測量方式施測研究區內之已知基本控制點、新建加密控制點,並以 GNSS-RTK 即時動態測量方式解算點位坐標成果,再與公告 TWD97 點位坐標進行比較 分析。藉由本研究方法分析 GNSS 測量成果點位精度,是否符合地籍測量控制點精度規 範要求,其中本研究採用:

- 1. GNSS 快速靜態測量:結合 GPS/GLONASS 雙系統採用快速靜態測量檢核已知加密控制點成果,並進行可靠度分析及成果驗證。
- GNSS-RTK 測量: 仿效傳統 RTK 定位測量方式,配合以雙主站 GPS/GLONASS 雙系 統測量方式進行,檢核已知加密控制點成果,並進行可靠度分析及成果驗證。
 本研究作業流程(如圖 1)如下:



圖1 研究流程

二、GPS/GLONASS 系統介紹

(一) GPS 系統發展

美國國防部於 1973 年實驗設計一種 4 顆衛星的導航系統,初期命名為 TRANSIT 系統。這些衛星位於地球較高軌道,主要提供海運及軍事的應用,但因準確度不夠,其 位置信號最快只能兩小時更新一次,實用價值大打折扣。但美國也因此驗證了以衛星作 定位導航的可行性,著手開發正式的系統取代此系統的運行。

西元 1974 年美國發射名為導航之星(NavStar)衛星定位系統的第一顆衛星,開始將 原子鐘放入太空,此原子鐘是決定地面與衛星時間同步及換算距離的時間基礎,驗證了 其穩定性與準確度之後,1977 年發射此系列的第二顆衛星,結束對原子鐘在衛星定位系 統中作為信號抵達時間運算的試驗(安守中,2006)。

1983年,美國客機因導航錯誤偏離航道遭俄國空軍擊落,此事件促使次年美國政府 宣布開放 GPS 部分導航功能給民間使用,且根據美國國會的決議,不論政治立場如何, 均開放全世界每個角落可以免費使用 GPS 的訊號。1991 年波斯灣戰爭時期,用於定位 的衛星包含第一代實驗性衛星(Block-I)以及部分的第二代衛星(Block-II),總數達到 21 顆,亦是 GPS 第一次實際運用在前線戰役中,至此 GPS 定位能力開始逐漸被世人所熟 知。其後,因 GPS 系統用於民間定位服務的精度高於原先設計,美國國防部基於國家 安全考量,在1990年三月於系統中加入降低精度的SA干擾碼,此人為的干擾碼將原先的導航誤差提高至百公尺的範圍(安守中,2006)。

在 1993 年 12 月 8 日第 24 顆 GPS 衛星進入太空軌道運行後, GPS 已經達到初步操 作能力(IOC, Initial Operation Capability), 24 顆 GPS 衛星(包含初期測試用的 Block-I 與 量產型 Block-II/IIA)提供 24 小時全天候的定位與導航資訊。美國空軍太空司令部(AFSC, U.S. Air Force Space Command)於 1995 年 4 月 27 日宣布 GPS 已達到完整操作能力(FOC, Full Operational Capability),將 IOC 中的 Block-I 衛星加以汰換, 24 顆衛星全部由 Block-II/IIA 衛星所組成,成功的滿足軍事實務的操作。

2000年5月1日因應民間的要求,美國總統克林頓宣布停止SA干擾碼的發送。這 是GPS歷史上一個重要里程碑,此舉使GPS定位精度提高十倍,誤差由100~150公尺 縮減至10~15公尺,開啟了GPS在民間應用的新紀元。解除SA的好處如下(曾清涼、 儲慶美,1999):

1. 對於位置、方位及速度的準確度提高約十倍。

2. DGPS 差分修正的功能精度提高 1~5m。

3. 使用上無須更新軟硬體。

關閉 SA 效應為 GPS 現代化的開始,接著將一個新的軍用訊號(M-Code)及第二個民 用訊號(L2C)加到 L2 頻率上,最後則是將第三個民用訊號加到 L5 頻率上。現階段尚未 考慮將現有 L1 上的 C/A 電碼提升至 L1C。下一個現代化計畫則是設計及發射新一代衛 星 GPS Block III 以提供未來至 2030 年高精度軍用與民用系統的需求 (http://gge.unb.ca/Resources/)。GPS 現代化的時間表如表 1 所示。

截至 2012 年 3 月 29 日止,在軌的 GPS 衛星共有 31 顆,正常運作的衛星有 31 顆。 GPS 星群分布如圖 2 所示,圖中編號 5、7、12、15、17、29 及 31 號等七顆衛星為現代 化的 Block IIR-M 衛星。



圖2 2012 年 3 月 29 日 GPS 星群分圖(<u>http://gge.unb.ca/Resources/</u>)

相關措施	實施時間
● 取消 SA	• 2000 年 5 月
● 衛星 IIR-M 衛星性能提升項目	• 2005 年 5 月 26 日發射第一顆傳送 L2C
◎新的 L2 民用電碼(L2C)	的 GPS IIR-M 衛星
◎L1 & L2 的軍用碼(M)	● 預計 2014 年完成 24 顆衛星傳送 L2C 訊
	號的計畫
● 衛星 IIF 衛星性能提升項目	 原預計 2008 年第三季發射第一顆傳送
◎ 新的 L2 民用電碼(L2C)	L5 及 L2C 的 GPS IIF 衛星,但至今仍
◎ L1&L2 的軍用碼(M)	處於延宕狀態
◎ 新的 L5 民用電碼	• 預計 2016 年完成 24 顆衛星傳送 L2 及
	L5 訊號的計畫
● 衛星 III 衛星性能提升項目	• 預計 2014 年發射第一顆傳送 L5、L2C
◎ 新的 L2 民用電碼(L2C)	及 L1C 的 GPS III 衛星
◎ 增強軍用碼(M)之功率	• 預計 2021 年完成 24 顆衛星傳送 L1 訊
◎ 新的 L1 民用電碼(L1C)	號的計畫

表1 GPS 現代化的時間表(蔡孟倫, 2008)

(二) GLONASS 系統發展

GLONASS 全球導航衛星系統是另一個全球性衛星定位系統,為美俄兩國冷戰時期的產物,其建置目的與美國 GPS 一樣是以軍事使用為主,可全天候、任何地點、任何時間、不限人數來進行使用,由俄羅斯國防部規劃、操作及管理整個系統(http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/)。

GLONASS 系統的第一顆衛星於 1982 年 10 月 12 日發射,1984 年 1 月完成第一批 可供測試用的 4 顆衛星。1990~1991 年間,俄羅斯政府共發射 10~12 顆衛星,至 1995 年 3 月共發射了 23 次,於軌道上成功部署 59 顆衛星,此時俄羅斯政府宣布 GLONASS 系統無償對全球民用用戶開放,並且不會採取任何人為降低系统精度的措施。隔年 1 月 18 日俄羅斯官方正式宣布 24 顆衛星導航系統完成部署。但由於衛星生命期只有三年, 且俄羅斯政府出現財力不足的問題,至 2001 年衛星數目直線下降只剩 7 顆,導致系統 無法順利運行。

基於國家安全及導航系統自主性等因素的考量下,俄羅斯政府決定繼續維持 GLONASS系統之運作,並提出類似 GPS 現代化之計畫,計畫在 2011 年前將 GLONASS 系統恢復到 24 顆在軌運行的工作衛星。該計畫第一步為發射壽命更長的第二代衛星 GLONASS-M 衛星(M 表示 Modified,改良型的意思),其衛星上將第二個民用訊號調制 在 L2 頻率,增加了定位的精度。從 1999 年開始陸續發射,1999~2002 年發射的 GLONASS-M 衛星壽命為 5 年,2003 年以後發射的 GLONASS-M 衛星壽命為 7 年。接 著為發展中的第三代 GLONASS-K 衛星,其將第三個民用訊號調制在 L3 頻率,進一步 提升新一代 GLONASS 的性能,且重量更輕,設計使用壽命超過 10 年,在衛星壽命方 面,可以達到和美國相同的水準。根據俄羅斯官方宣稱,計畫在 2017 年完成 GLONASS 系統的更新換代,全面升級為 GLONASS-M 和 GLONASS-K 系統,以提高定位精度, 從目前的 20 m 提高至米級(陳俊勇,2009)。

124

與前期衛星相比,GLONASS-M具有以下優勢(Zinoview, 2005):

- 1. 使用年限更長(由3年提升為7年)。
- 2. 增加了民用 L2 訊號。
- 3. 裝備更穩定的時鐘(由^{5×10⁻¹³}提升為^{1×10⁻¹³})與更精確的時鐘差改正(由 20ns 提 升為 8ns)。
- 4. 額外的 GLONASS-M 導航訊號。
- 5. 衛星間無線電鏈結。

截至 2012 年 3 月 29 日止,以建置完成的 GLONASS 衛星共有 31 顆。GLONASS 星群分布如圖 3 所示。





(三) GPS/GLONASS 系統整合

GPS 和 GLONASS 均是使用衛星訊號的定位系統,能提供高精度三維位置、速度和時間資訊,被廣泛應用於導航、測繪和許多領域。GLONASS 系統在工作原理、系統組成和服務內容上和 GPS 系統十分相似,定位原理也大致相同,但二種系統之間仍存在著差異性,若想結合兩種系統達到雙系統觀測的優勢,便需瞭解彼此特性的異同,方能進行整合運用,兩種系統的差異如表2所示。

由表2可知,GPS與GLONASS系統在軌道建置方法、軌道中運行的角度、坐標系統、時間系統與載波頻率間存在著差異,但是相同具有L1及L2兩個頻道,一個提供軍用,一個開放給民間使用。

導航系統	GPS	GLONASS
衛星數目	24/31	24/31
軌道面	6 (軌道間相距 60°)	3 (軌道間相距 180°)
每個軌道上的衛星數	4(非均匀分布)	8(均匀分布)
軌道傾角	55°	64.8°
衛星高度	20,200 公里	19,100 公里
衛星軌道半長軸	26,560 公里	25,510 公里
衛星週期	11 h 58 m 00s	11 h 15 m 40 s
地面追蹤重複週期	1個恆星日	8個恆星日
坐標系統	WGS84	PZ90
時間系統	UTC (USNO)	UTC (SU)
訊號型式	CDMA(碼分多址)	FDMA(頻分多址)
	L1:1575.42 MHz	L1:1602+0.5625K MHz
載波頻率	L2:1227.60 MHz	L2:1246+0.4375K MHz
	L5:1176.45 MHz	K = -7 ~ 24
給碼	L1:CA-Code	L1:CA-Code
хунц ~~vy	L1&L2:P- Code	L1&L2:P- Code
廣播軌道參數	克卜勒六軌道參數(每小時)	衛星位置、速度、加速度(每 30 分鐘)

表2 GPS 系統與 GLONASS 系統差異

要實現 GPS 與 GLONASS 系統的整合,必須解決兩系統間坐標系統、時間系統與 載波頻率上的差異等三個問題:坐標系統方面,GPS 系統所使用的是 WGS-84 坐標,而 GLONASS 系統則為 PZ-90 坐標,系統結合上須將 PZ-90 的坐標轉換至 WGS-84 坐標; 兩者坐標系統的轉換之間有 Y 軸的 2.5 m 平移量及繞 Z 軸的 1.9×10⁻⁶ rad 旋轉量 (Leick, 2000)。在時間系統方面,因為 GPS Time 與 GLONASS Time 其與 UTC (Universal Coordiated Time) 間的差值不同,且二者是以不同天文台所制訂的UTC 為準, GPS 系統所使用的是 UTC (USNO)時間,GLONAS 系統則使用 UTC (SU)時間,兩者之 間有一個整數潤秒差與非整數的秒差,經轉換後有近 1µsec 的差異,故整合時需考慮雙 衛星系統間的差值再進行轉換。在載波頻率上的差異,GPS 系統使用的是 CDMA 方式, 其每一通道的信號有相同之載波波長,而 GLONASS 系統則是使用 FDMA 方式,其每 一通道的信號之載波波長不同,因此在高精度測量中,在使用其載波相位時,就必須考 盧其頻率代號方能轉換至正確的距離差。以下針對此三個問題進行探討說明。

1. 坐標系統整合

由於 GPS 和 GLONASS 採用不同的坐標系,為了對 GPS/GLONASS 接收儀的經度、 緯度和高度進行估計,必須建立地球形狀的橢球模型;GLONASS 與 GPS 衛星的坐標系 統皆是以地心地固坐標系統表示,地球原子差異甚小,但為提高精度,仍須計算兩坐標 系之差異。在進行 GPS/GLONASS 雙系統整合時,是將 GLONASS 的 PZ-90 坐標系統 轉換至 GPS 的 WGS-84 坐標系統,由於 PZ-90 坐標系統與 WGS-84 坐標系統,兩系統 在 z 軸方向的定義相同,因此轉換時僅需作 xy 平面的旋轉與原點之平移

2. 時間系統整合

由前一章時間系統說明可知,GLONASS時間(GLONASST)與GPS時間(GPST)兩者 之間除存在3小時的整數偏差外,還存在一個偏差(1^s×n-19^s)。另外,UTC(SU)與 UTC(USNO)之間也存在數十奈秒的偏差,俄羅斯政府計畫將兩者的偏差放入導航電文 中,以利於GPS/GLONASS的組合應用。由GLONASST與UTC的關係和GPST與 UTC的關係,可得(王永泉,2008):

GLONASST=GPST-1^s × n -19^s +03^h 00^m

(1)

式中n為調整參數,由國際地球自轉組織IERS (International Earth Rotation Service)發布, 不同的年份會有不同的差值。

整合 GLONASS 的 UTC (SU) 時間系統與 GPS 的 UTC (USNO) 時間系統,有兩種 方式,一種是作 UTC 時間系統之轉換,另一種則是修改定位的方程式,分別敘述如下(蔡 宜學,2000):

UTC (USNO)與UTC (SU)時間系統間之轉換方法,所採取的方式是配合前述的坐標系統之轉換,將GLONASS衛星視為額外的GPS衛星,利用此種方法與單獨使用GPS系統時相同,定位時總共僅需四顆GPS與GLONASS衛星即可。

另一種修改定位方程式方法,乃是將 GPS 系統的鐘差與 GLONASS 系統的鐘差分 開處理,也就是說定位的方程式需增加一 GLONASS 的鐘差未知數,而使用此種方法以 單點定位進行解算時,除計算點位坐標(X,Y,Z)與接收儀時鐘誤差外,仍需計算 GPS 與 GLONASS 兩系統的時間差異,即5個未知數求解,因此必須比原先多一顆衛星,至 少需要五顆衛星才能作定位;因將兩系統的鐘差分開進行處理,故採用此種方法可以避 免兩系統精度互相影響。

3. 載波頻率的差異

不同於 GPS 衛星使用相同的載波頻率(L1:1575.42 MHz, L2:1227.60 MHz), GLONASS 係以不同的載波頻率來區別不同的衛星,頻率 L1:(1602+0.5626n)MHz、 L2:(1246+0.4375n)MHz, 其中 n 為 GLONASS 的頻道編號, n=-7~24, 即 L1:1598.0625~1615.5 MHz、L2:1242.9375~1256.5 MHz。

因為 GPS 和 GLONASS 使用頻率不同,為使接收儀能同時接收 GPS 與 GLONASS 之衛星訊號,雙系統接收儀必須先解決儀器內部的公共頻率源,因此結合 GPS/GLONASS 的接收儀均經過特殊頻率設計。

另外在 GPS/GLONASS 訊號的差分處理方面,因為每顆 GLONASS 衛星訊號均具有不同的載波頻率,處理上若單純把 GLONASS 訊號視為額外的 GPS 訊號來求解,將無法得到 GPS 對 GLONASS 差分訊號的週波未定值,故處理上將個別解算 GPS 對 GPS 差分的週波未定值及 GLONASS 對 GLONASS 差分的週波未定值(曾清涼、儲慶美,1999)。

127

三、研究作業模式

(一) GNSS 快速靜態測量作業

本研究作業使用 10 部 Leica ATX1230-GG 型號之衛星定位接收儀觀測 10 個時段, 觀測參數:遮蔽角 15°、1 秒記錄 1 筆,每時段觀測 60 分鐘。觀測時程自民國 100 年 12 月 6 日起至 100 年 12 月 8 日止,實施 GNSS 衛星定位測量觀測,觀測時段網絡圖及觀 測時段表如圖 4 及表 3 所示。

研究計算處理取樣以 10 分鐘、20 分鐘、30 分鐘、60 分鐘予以計算處理,其計算軟 體採用 Topcon Tools 7.2 版軟體及網形平差計算軟體,處理基線解算、偵錯,並固定檢 核合格之已知控制點,採強制附合網形平差計算,並將計算結果與公告 TWD97 坐標進 行分析比較。

(二) GNSS-RTK 即時動態測量作業

本研究作業使用儀器為 TOPCON GR-3(GPS+GLONASS+GALILEO) GNSS 接收儀, 施測作業時間於民國 101 年 3 月 04、10 日二日; RTK 參考基站分別架設於內政部公告 之二等衛星控制點 H178 及 H189 點位,並以雙主站 GPS/GLONASS 測量模式進行,檢 測點位共計 6 站,分為 GH01、GH02、GH03、GH05、GH07、GH08 點位(如圖 5)。儀 器接收時間設定 10 秒記錄 1 筆每站共取 5 筆求最或是值,接收仰角設為 15 度以上。

使用 GNSS-RTK 即時動態測量觀測資料進行測設研究區加密控制點,移動站觀測 參數設定:衛星資料接收仰角設定為 15 度、PDOP 值小於 5、觀測量 10 秒記錄 1 筆、 每站共取 5 筆求最或是值,其計算新設加密控制點 GNSS-RTK 坐標成果,圖 6 流程圖 之精度檢核標準如下:重複觀測之點位 2 主站成果取平均值,平面分量較差應小於 2 公 分、高程分量較差應小於 5 公分;較差超過者應重新檢視計算資料,必要時應重新辦理 外業觀測。GNSS-RTK 坐標成果地測檢核標準如下:精度規範為點位間角度較差值應小 於±20 秒,水平距相對較差比值應小於 1/20,000 之規範。其作業程序如圖 6。



圖4 加密控制測量觀測時段(1~10 時段)網絡圖

表3衛星定位測量觀測時段表

組數		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
時段											
12月6日	1	GC26	GG24	GG25	GG26	GGN	GG21	1024	GC28	GG23	GH01
1230~1330	1	0020	0024	0023	0020	0022	0021	1024	0020	0025	01101
12月6日	2	GG35	GG24	GG25	GG26	GD16	GD17	GG32	GG33	GG34	GG36
1400~1500	2	0055	0024	0023	0020	ODIO	OD17	0032	0033	0054	0050
12月6日	3	GH04	GG24	GG35	GG36	GG38	6630	GG40	H178	1024	N/180
1530~1630	5	01104	0024	0033	0050	0030	0037	00+0	11170	1024	14400
12月7日	1	CH06	GG40	CC46	GG47	CH05	6630	GG40	N/180	H187	GG51
0900~1000	+	01100	0047	00+0	00+/	01105	0037	00+0	14400	11107	0051
12月7日	5	GH06	H189	GH07	GD07	GD06	GD12	GH08	GH05	H187	GG51
1040~1140	5	01100	11107	01107	GD07	GD00	0012	GII00	01105	11107	0051
12月7日	6	GH06	H180	GH07	GD07	GB15	GG43	GG42	GG45	GG40	GG50
1230~1330	0	01100	11107	01107	GD07	OD15	00+3	00+2	00+3	0047	0050
12月7日	7	6638	GG36	GG34	6637	GG41	GG44	GG42	GG45	GG40	6630
1410~1510	/	0050	0050	0034	0037	0041	00++	00+2	00+3	00+2	0037
12月7日	8	GG32	GG33	GG34	6637	GG41	GG42	GG43	GB16	GG20	GD17
1540:1640	0	0052	0055	4004	0037	0041	0042	00+3	GDIO	0027	UD17
12月8日	0	CC14	CP15	CD07	CD06	CC20	CD01	CC42	CD16	CC20	CH02
0900~1000	フ	0014	0013	000/	0000	0030	0001	0043	0010	0029	01103
12月8日	10	GD14	GG21	GG22	GG26	GD16	GD17	GH02	GC02	GG14	GH03
1040~1140	10	0014	0021	0022	0020	0100	יועט	01102	0002	0014	01103



圖5 GNSS-RTK 測設控制點分布圖 (※紅色字部份為重覆設站)



圖6 GNSS-RTK 測設流程圖

四、研究成果分析

(一) GNSS 快速靜態測量成果

本研究外業測量使用之 GPS 衛星儀為 Leica ATX1230-GG 型號之衛星接收儀,可接收 GPS 訊號、GLONASS 訊號、GPS L2C 訊號、支援未來 GPS L5 訊號及歐洲系統 Galileo 衛星訊號。施測作業時程自 100 年 12 月 6 日起至 100 年 12 月 8 日止,計算約制點位為 1024、H178、H187、H189、GC26、GC28、GD01、GD06、GD12、GG14、GG21、GG30 等 12 點已知控制點納入強制附合平差計算,儀器接收時間設定 1 秒記錄 1 筆,接收仰角設為 15 度以上,每時段觀測 60 分鐘。由圖 7 所示,使用單 GPS 各時段可視衛星數 介於 8~10 顆,當加入 GLONASS 衛星時,可視衛星顆數增加至 14~18 顆左右,進而提 升衛星定位觀測的品質,即提高定位精度。

本研究計算軟體採用 Topcon Tools 7.2 版軟體及網形平差計算軟體,處理基線解算、 值錯,並固定檢核合格之已知控制點,採強制附合網形平差計算。其基線解算成功率比 較如圖 8 所示,原本僅用 GPS 衛星觀測需設置點位 60 分鐘才能達到之基線解算成功率, 當加入 GLONASS 衛星進行解算後,於 20 分鐘時即能達到同樣之基線解算成功率,明 顯縮短設置點位時間。

本研究將 GNSS 觀測資料以取 10 分鐘、20 分鐘、30 分鐘、60 分鐘等 4 個時間段 各別計算分析成果。由表 4 及圖 9 資料顯示,以 60 分鐘觀測資料解算檢測加密控制點 與公告坐標比較位置較差 2 公分以內者,共為 34 點,佔總觀測量之 87%;由表 5 及圖 40 資料顯示,以 30 分鐘觀測資料解算檢測加密控制點與公告坐標比較位置較差 2 公分 以內為 33 點,佔總觀測量之 85%;由表 6 及圖 11 資料顯示,以 20 分鐘觀測資料解算 檢測加密控制點與公告坐標比較位置較差 2 公分以內為 34 點,佔總觀測量之 87%;由 表 7 及圖 12 資料顯示,以 10 分鐘觀測資料解算檢測加密控制點與公告坐標比較位置較 差 2 公分以內為 36 點,佔總觀測量之 92%。由前述分析數據可知,由 GNSS 觀測所得 結果在 10 分鐘以上之觀測時間仍可獲得一定程度之點位精度。為何取樣 10 分鐘資料的 解算觀測量優於取樣 20、30、60 分鐘之資料?推論原因為利用 GNSS 觀測時,只要滿 足一定的觀測時間,當觀測衛星數目夠多時,觀測衛星的幾何分佈已不構成定位精度的 影響因子,此時觀測時間長短,與其可用解算量與總觀測量的比值,也就是基線解算成 功率,就非正比關係的考慮因素。









表 4 公告坐標與檢測加密控制點位置較差統計表(60min)

44万明(2)))	N 分量		E分量		位置較差	
較差區间(公分)	數量	比率	數量	比率	數量	比率
0~0.5	18	46%	20	51%	11	28%
0.6~1.0	13	33%	7	18%	10	25%
1.1~1.5	6	15%	6	15%	8	21%
1.6~2.0	1	3%	5	13%	5	13%
2.1~2.5	1	3%	1	3%	5	13%
>2.5	0	0%	0	0%	0	0%

林关厅明(八八)	N分量		E分量		位置較差	
戦差區间(公分)	數量	比率	數量	比率	數量	比率
0~0.5	19	49%	17	44%	8	21%
0.6~1.0	12	31%	9	23%	13	33%
1.1~1.5	7	18%	7	18%	7	18%
1.6~2.0	0	0%	3	8%	5	13%
2.1~2.5	1	2%	2	5%	5	13%
>2.5	0	0%	1	2%	1	2%

表5 公告坐標與檢測加密控制點位置較差統計表(30min)



圖9 公告坐標與檢測加密控制點位置較差圖(60min)



圖10 公告坐標與檢測加密控制點位置較差圖(30min)

林关区明(八八)	N 分量		E分量		位置較差	
教差區间(公分)	數量	比率	數量	比率	數量	比率
0~0.5	15	38%	17	43%	9	23%
0.6~1.0	18	46%	8	20%	11	28%
1.1~1.5	5	13%	7	18%	8	21%
1.6~2.0	1	3%	3	8%	6	15%
2.1~2.5	0	0%	3	8%	3	8%
>2.5	0	0%	1	3%	2	5%

表 6 公告坐標與檢測加密控制點位置較差統計表(20min)



圖11 公告坐標與檢測加密控制點位置較差圖(20min)

お 关 □ 明(八 八)	N 分量		E分量		位置較差	
教差匝间(公分)	數量	比率	數量	比率	數量	比率
0~0.5	18	46%	19	48%	9	23%
0.6~1.0	14	36%	9	23%	12	31%
1.1~1.5	6	15%	7	18%	11	28%
1.6~2.0	1	3%	2	5%	4	10%
2.1~2.5	0	0%	1	3%	2	5%
>2.5	0	0%	1	3%	1	3%

表 / 公告坐標與檢測加密控制點位置較差	差統計表	え(10min)
----------------------	------	----------



圖12 公告坐標與檢測加密控制點位置較差圖(10min)

(二) GNSS-RTK 即時動態測量成果

本研究使用儀器為 TOPCON GR-3(GPS+GLONASS+GALILEO) GNSS 接收儀,施 測作業時間於 101 年 3 月 04、10 日二日; RTK 參考基站分別架設於內政部公告之二等 衛星控制點 H178 及 H189 點位,並以雙主站 GPS/GLONASS 測量模式進行,檢測點位 共計 6 站,分為 GH01、GH02、GH03、GH05、GH07、GH08 點位。儀器接收時間設定 10 秒記錄 1 筆每站共取 5 筆求最或是值,接收仰角設為 15 度以上。

1. 各站坐標精度分析

根據表 8 成果顯示,以 H178 為參考主站接收點位坐標精度分析,N 軸方向 RMS 最大為 0.20 公分,最小為 0.04 公分;E 軸方向 RMS 最大為 0.37 公分,最小為 0.05 公分;H 軸方向 RMS 最大為 0.51 公分,最小為 0.19 公分。平面方向 RMS 介於 0.04~0.37 公分間;高程方向 RMS 介於 0.19~0.51 公分間。根據表 9 成果顯示,以 H189 為參考主站接收點位坐標精度分析,N 軸方向 RMS 最大為 0.17 公分,最小為 0.08 公分;E 軸方向 RMS 最大為 0.17 公分,最小為 0.06 公分;H 軸方向 RMS 最大為 0.48 公分,最小為 0.17 公分。平面方向 RMS 介於 0.06~0.17 公分間;高程方向 RMS 介於 0.17~0.48 公分間。

			1
昭 ト 夕	N 軸 RMS	E 軸 RMS	H 軸 RMS
芯 石	(公分)	(公分)	(公分)
GH01	0.13	0.19	0.37
GH02	0.11	0.32	0.45
GH03	0.18	0.37	0.51
GH05	0.20	0.05	0.33
GH07	0.10	0.10	0.19
GH08	0.04	0.17	0.45

表8 H178 為參考主站接收點位坐標精度分析

페니 성	N 軸 RMS	E 軸 RMS	H 軸 RMS
話る	(公分)	(公分)	(公分)
GH01	0.11	0.13	0.43
GH02	0.15	0.17	0.47
GH03	0.13	0.14	0.48
GH05	0.08	0.11	0.33
GH07	0.11	0.06	0.17
GH08	0.17	0.11	0.37

表9以H189為參考主站接收點位坐標精度分析

2. 與公告值比較

根據表 10 成果顯示,以 H178 為參考主站檢測坐標與公告值誤差, ΔN 最大為 0.9 公分, ΔE 最大為 1.3 公分, ΔH 最大為 6.1 公分,其平面誤差皆小於 2 公分,符合規範; 根據表 11 成果顯示,以 H189 為參考主站檢測坐標與公告值誤差,ΔN 最大為 0.6 公分, ΔE 最大為 1.3 公分,ΔH 最大為 6.1 公分,其平面誤差皆小於 2 公分,符合規範;根據 表 12 成果顯示,以 H178 及 H189 為參考主站檢測坐標平均值與公告值誤差,ΔN 最大 為 0.7 公分,ΔE 最大為 1.1 公分,ΔH 最大為 6.35 公分,其平面誤差皆小於 2 公分與前 兩次個別與公告值比較之成果並無差別。

综上所示,高程精度明顯低於水平精度,符合預期,故辦理 GNSS-RTK 加密控制 測量需將其點位架置於上級點位作為參考主站,其接收點位坐標精度,明顯符合預期。

點名	△N (公分)	△E(公分)	△H (公分)
GH01	0.4	0.1	3.2
GH02	0.3	0.2	2.6
GH03	0.6	0.9	4.2
GH05	0.5	0.6	5.3
GH07	0.1	1.3	6.1
GH08	0.9	0.7	3.7

表 10 以 H178 為參考主站檢測坐標與公告值誤差

表 11 以 H189 為參考主站檢測坐標與公告值誤差

點名	△N(公分)	△E(公分)	△H(公分)
GH01	0.5	0.3	3.9
GH02	0.2	0.1	4.1
GH03	0.4	0.5	5.5
GH05	0.6	0.7	4.7
GH07	0.3	0.9	6.6
GH08	0.6	1.1	7.1

點名	riangle N(公分)	△E(公分)	△H (公分)
GH01	0.45	0.20	3.55
GH02	0.25	0.15	3.35
GH03	0.50	0.70	4.85
GH05	0.55	0.65	5.00
GH07	0.20	1.10	6.35
GH08	0.75	0.90	5.40

表 12 以 H178 及 H189 為參考主站檢測坐標平均值與公告值誤差

五、結論

由本研究從實驗區之加密控制點檢測成果可知,應用 GNSS 系統辦理測量工作,其 測量成果關測量較單一 GPS 系統之觀測量,約可增加 5~8 顆可視衛星數。另外,測量 基線解算成功率於測量 20 分鐘之成果,即可相當於測量 60 分鐘測量成果成功率,因此 在求解點位坐標時,可更快達到收斂效果。藉由本研究測量數據分析,可得在相同的觀 測環境下,應用 GNSS 系統,將有效解決單一 GPS 作業時,求解衛星數目不足的問題, 進而提高點位觀測成果的可靠度。

此外,本研究提出以 GPS/GLONASS 雙系統測量方式,測設平鎮地區加密控制點, 與內政部公告之點位坐標(TWD97系統)進行比較,分別以 10 分鐘、20 分鐘、30 分鐘、 60 分鐘所得之測量成果,其點位精度均符合加密控制測量作業所要求之點位精度規範, 故在辦理地籍圖重測、控制測量以及其他應用測量範疇上,已敷使用。另本研究以雙主 站 GNSS-RTK 方式測設重測區加密控制點,亦得到可靠之點位測量成果。

綜上,本研究利用實驗數據分析,以 GPS/GLONASS 雙系統模式辦理測量工作,確 實可大量減少測量觀測時間與人力,並得到合於規範之測量成果,供後人辦理測量工作 之測設依據。

誌謝

本文撰寫期間,承蒙內政部國土測繪中心北區第二測量隊熱心提供協助,特此致謝。

参考文獻

王永泉,2008,《長航時高動態條件下 GPS/GLONASS 姿態測量研究》,上海交通大學 電子信息與電氣工程學院博士論文。

安守中,2006,《GPS 定位原理及應用》,全華科技圖書股份有限公司:臺北。

- 陳俊勇,2009,全球導航衛星系統進展及其對導航定位的改善,《大地測量與地球動力 學》,第29卷,第2期,頁1-3。
- 曾清涼、儲慶美,1999,《GPS 衛星測量原理及應用》,國立成功大學衛星資訊研究中心:臺南。

- 蔡宜學,2000,《GPS/GLONASS 整合式之導航系統》,國立臺灣大學電機工程學系碩士論文。
- 蔡孟倫,2008,《未來全球導航衛星系統於臺灣區域效能分析》,國立成功大學測量及 空間資訊學系碩士論文。
- Zinoview, A. E., 2005, Using GLONASS in Combined GNSS Receivers: Current Status, Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005): Long Beach.
- Leick, A., 2000, *GLONASS Carrier Phase*, University of Maine, <u>http://www.uni-stuttgart.de/gi/research/schriftenreihe/quo_vadis/pdf/leick.pdf</u> (Last Checked 2013/06/05).

國土測繪與空間資訊 民國一〇二年七月 第一卷 第二期 第 139 頁至第 160 頁 Taiwan Journal of Geoinformatics Vol. 1, No. 2, July 2013, pp. 139~160

利用 GPS 浮標監測氣象海嘯

林芮菁¹、曾宏正²、郭重言^{3*}、江凱偉⁴、林立青⁵、鄭凱謙⁶

論文收件日期:101.12.05 論文修改日期:102.01.08 論文接受日期:102.03.19

摘要

全球定位系統(Global Positioning System, GPS)浮標被證實可有效且快速地收集 海水面資訊,與傳統六分鐘紀錄一筆之潮位站資料相比,1-100 Hz GPS 浮標可用於 監測更高頻之海洋訊號,例如氣象海嘯和有效波高。本研究同時位於台南市安平商 港內與港外進行 GPS 浮標施測,並於岸上設置一固定站,分別利用 GrafNav 軟體、 RTKLIB 軟體、GAMIT/TRACK 軟體搭配 International GNSS Service(IGS)最終產品 精密星曆進行動態相對差分與精密單點定位解算,解算成果與安平潮位站資料相比, 驗潮站與差分定位結果差值均方根為 3~10 公分,與精密單點定位差值均方根為 7 ~12 公分。將港內與港外 GPS 浮標之動態差分定位之海水面時間序列利用希爾伯 特-黃轉換(Hilbert Huang Transform, HHT)分解成數個本質模態函數(Intrinsic Mode Functions, IMFs)分量,可以成功偵測到氣象海嘯頻率,且經由比較安平港港內外浮 標之 IMFs 和港灣共振週期計算,發現此氣象海嘯並非由安平港港灣共振引起。

關鍵詞:全球定位系統浮標、氣象海嘯、動態差分定位、精密單點定位

¹ 碩士生,國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 講師,國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 副教授,國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁴ 副教授,國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁵博士後,中央研究院地球科學所。

⁶ 副教授,國立中正大學地球與環境科學系。

^{*} 通訊作者, TEL: (06)62370876, E-mail: <u>kuo70@mail.ncku.edu.tw</u>。

Monitoring Meteotsunami Using GPS Buoys

Ruei-Jing Lin^1 \cdot Hong-Zeng Tseng² \cdot Chung-Yen Kuo^{3^*} \cdot Kai-Wei Chiang⁴ \cdot Amplitude Chia

Li-Ching Lin⁵ \ Kai-Chian Cheng⁶

Abstract

Global Positioning System (GPS) buoys have been demonstrated to effectively and economically collect sea level data. By comparing to traditional tide gauge records, 1-100 Hz GPS records can measure high-frequency oceanic signals with periods of a few seconds to a few minutes; for example, meteotsunami and significant wave height that cannot be detected from 6-minute tide gauge records. In this study, two GPS buoys were deployed inside and outside the An-ping harbor, Tainan, with an additional GPS receiver on shore as a reference station. Different softwares including GravNav, RTKLIB, and GAMIT/TRACK were used to process GPS buoy measurements, with Differential GPS (DGPS) and Precise Point Positioning (PPP) techniques and using the precise ephemerides of the final product provided by International GNSS Service (IGS). By comparing the GPS buoy positioning results derived using different softwares with An-ping tide gauge records, the Root Mean Square (RMS) of differences between tide gauge records and DGPS solution is 3~10 cm and is 7~12 cm when PPP solution is used. Finally, inside and outside of harbor GPS buoy derived sea level variations are decomposed into Intrinsic Mode Functions (IMFs) by Hilbert Huang Transformation (HHT) and the frequency of meteotsunami is successfully detected. After comparing the records of inside and outside GPS buoys and the computation of periods due to harbor resonance, meteotsunami is not amplified by harbor resonance in this area.

Keywords: GPS buoy, Kinematic Differential GPS, Meteotsunami, Precise Point Positioning

¹ Master student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² Lecturer, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

³ Associate Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

⁴ Associate Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

⁵ Postdoctoral Fellows, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica.

⁶ Associate Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, National Chung Cheng University.

^{*} Corresponding Author, TEL:+886-6-62370876 , E-mail: kuo70@mail.ncku.edu.tw.

一、前 言

海嘯(tsunami)可分為地震與氣象海嘯,地震海嘯由地殼變動、火山爆發、隕石 撞擊或海底滑坡所引起之週期性長波;而由大氣重力波(gravity wave)、壓力跳動 (pressure jump)、熱帶氣旋(typhoon)、鋒面通過(frontal passage)等氣象因子變動所引 發週期與地震海嘯相近長波稱之為氣象海嘯(Defant, 1961; Rabinovich and Monserrat, 1996、1998)。圖 1(a)為 Monserrat 等人(2006)在西班牙量測到之地震海嘯訊號,圖 1(b)為克羅地亞觀測到之氣象海嘯記錄,由圖可以發現兩種海嘯訊號有類似的週期、 振幅與波長(Monserrat et al., 2006)。



圖1 (a)地震海嘯之海水位振盪; (b)氣象海嘯之海水位振盪(Monserrat et al., 2006)

世界各地皆有氣象海嘯發生之記錄,例如 Nomitsu(1935)、Defant(1961)、 Rabinovich and Monserrat(1996,1998)、Bryant(2001)、Vilibić(2005)、González 等人 (2001),在不同地區有不同的名稱,而學術上統一稱為氣象海嘯。表 1 為世界各地 觀測到之明顯氣象海嘯紀錄,其週期約為 10-35 分鐘,振幅約為 1-5 公尺。

		· ·	
城市	國家	最大振幅(m)	波浪週期
Nagasaki Bay	Japan	4.8	35 min
Pohang Harbor	Korea	>0.8	25 min
Ciutadella Harbor	Spain	>4	10.5 min
West Sicily	Italy	1.5	14.6 min
Malta	Malta	1	~20 min

表 1、世界各地觀測到之氣象海嘯記錄(Monserrat et al., 2006、郭力豪, 2009)

台灣沿海之海水位訊號中常包含海嘯週期長波,平時訊號強度並不明顯,但當 受到氣象因子變動如壓力跳動時會被激發,易對沿海地區造成嚴重傷亡,而 10 月 到3月間影響台灣北部的東北季風、冬季時台灣位於大陸冷氣團與海洋暖氣團之鋒 面(Front)交界處、夏季時受到熱帶性低氣壓侵襲皆為台灣氣象海嘯形成之主因。2007 年4月2日在永安及澎湖漁港附近觀測到由鋒面引起振幅約1公尺之氣象海嘯,而 2008年1月29日、2009年3月5日與2010年2月16日在桃園竹圍漁港皆觀測到 異常海水面波動,水位變化最高可達1-1.5公尺。圖2為2008年1月29和30日竹 圍15秒取樣之驗潮站資料和大氣壓力變化,當時附近區域並無地震發生,故為氣 象海嘯引起之海水面波動。



圖2 2008 年竹圍漁港觀測到之海水面異常波動及相對應之大氣壓力變化

在台灣,由於政府機關及新聞媒體的宣導下,颱風、地震、土石流等天災,往 往能夠提早預防來降低災害損失,而地震海嘯與氣象海嘯災害並不常見,但是發生 時往往讓人措手不及。先前已有許多研究利用衛星測高或潮位站資料來觀測地震海 嘯或氣象海嘯。郭力豪(2009)利用台灣周邊 12 個 15 秒取樣潮位站資料难行台灣沿 岸氣象海嘯之初步研究,發現氣象海嘯受到陣風吹送之影響而產生了近似傳遞現象。 若要分析氣象海嘯產生之水位變化與氣候因素關係,需使用高取樣頻率資料,而在 台灣,由於儲存空間及電力之考量,潮位站記錄方式大多為六分鐘一筆,因氣象海 嘯週期為十到數十分鐘(郭力豪,2009),此資料頻率對於氣象海嘯之監測略嫌不足。 Hamlington等人(2011)成功利用測高衛星觀測到 2010年智利外海地震所引發之海嘯。 因為測高衛星之軌道週期約為 10-35 天左右,若要觀測到氣象海嘯,衛星需剛好經 過海嘯波傳遞路徑,此外在外海海嘯波高十分微弱,容易受到其它頻率海洋訊號之 影響,故利用測高衛星隨時監測氣象海嘯的可能性很小。

GPS 浮標已被證實可有效搜集高頻且連續之海水面變化資料(Cheng, 2004)。為

了更有效且準確地監測海嘯資料,日本學者 Kato 等人(2001)提出利用 GPS 浮標搭 配即時動態定位(Real-time kinematic, RTK)技術長期監測外海海嘯,與動態相對差分 定位相比,定位模式相同,僅於主站和移動站間增加一數據連結,進而即時計算出 移動站位置。動態差分定位為利用多台接收儀同時觀測(主站和移動站),藉由後處 理差分大幅降低大氣層(對流層和電離層)延遲誤差之影響,求解移動站之動態位置, 但當 GPS 浮標(移動站)距離參考主站太遠時,大氣層延遲量無法利用差分消除,定 位精度將隨著基線距離增長而下降。邱冠維(2009)提出利用精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)進行 GPS 浮標近即時精密定位,分析 International GNSS Service (IGS)不同星曆產品之解算成果,並與傳統相對差分定位結果進行比較後, 發現利用 IGS 最終產品星曆計算之高程方向均方根誤差可達 10 公分。

本研究利用 GPS 浮標在台南市安平商港內與港外同時進行施測,並於港內岸上 設置一主站接收 GPS 觀測量。觀測量利用不同 GPS 解算軟體進行動態差分與精密 單點定位解算,解算成果與安平潮位站資料相比,用以了解不同 GPS 軟體在不同解 算模式下之成果優劣。此外,藉由分析港內與港外 GPS 浮標解算成果,探討 GPS 浮標是否可有效偵測到氣象海嘯以及分析氣象海嘯頻率與安平港港灣共振週期之 相關性。

二、GPS 衛星定位與 GPS 浮標

(一) GPS 衛星定位原理

GPS 定位原理是藉由電碼虛擬距離或載波相位觀測量計算 GPS 衛星與測站之 距離,利用已知衛星位置及空間後方交會法計算出測站某時刻之三維坐標。由於接 收儀時錶誤差較大,故至少需同時觀測四顆衛星才能求解出接收儀時錶誤差(*dt*)和 測站三維坐標(*X*,*Y*,*Z*)。若觀測四顆以上衛星,則以最小二乘法進行平差,求得更準 確結果。考慮 GPS 觀測量含有多項誤差,電碼虛擬距離(式(1))及載波相位(式(2))之 觀測方程式如下所示(Hofmann-Wellenhof et al., 1992):

 $P(Li) = \rho + c \times (dt - dT) + dtrop + dion_i + \varepsilon$ ⁽¹⁾

$$\Phi(Li) = \rho + c \times (dt - dT) + dtrop - dion_i + \lambda_i N_i + \varepsilon$$
⁽²⁾

其中

 $P(Li): 虛擬距離觀測量(L_i頻率, i=1 代表 L1 載波, i=2 代表 L2 載波)(公尺); <math>\rho$: 衛星與接收儀間之真實幾何距離(公尺); c: 真空中之光速(公尺/秒); dt: 接收儀時 錶誤差(秒); dT: 衛星時錶誤差(秒); $\Phi(L_i)$: 載波相位觀測量(公尺); dtrop: 對流 層延遲誤差(公尺); $dion_i$: 電離層延遲誤差(f_i 頻率, i=1,2)(公尺); λ_i : L1 與 L2 的 載波波長(公尺); N_i : L1 與 L2 的週波未定值(cycles); ε : 雜訊及多路徑效應(公尺)。

由式(1)與(2)可知, GPS 觀測量包含三類誤差,第一類為與衛星相關之誤差,包 括衛星軌道誤差、衛星時錶誤差;第二類為信號傳播相關之誤差,包括對流層延遲 誤差、電離層延遲誤差;第三類為接收儀相關之誤差,包括接收儀時錶誤差、接收 儀相位中心偏差與多路徑效應(Hofmann-Wellenholf et al., 1992)。這些誤差對 GPS 定位之影響量各不相同,須採用適當模型或方法來消除或減低。

(二) 差分相對定位

相對差分定位是藉由觀測量之相減來大幅降低系統誤差之影響,計算出未知坐標站相對於參考主站之點位向量,稱之為基線(baseline)。相對差分定位精度可應用於靜態定位與動態定位,定位精度與參考主站之坐標精度和基線長度有關。測站間對流層與電離層延遲誤差等系統誤差之相關性會隨著基線距離增加而減少,故長基線利用相對差分來消除系統誤差之效率降低,定位精度也隨著基線長度增加而下降。

(三)精密單點定位原理

Jet Propulsion Laboratory (JPL)的 Zumberge 等人在 1997 年提出精密單點定位概念,原理為利用單台接收儀之雙頻無差分觀測量進行定位。由於無法如相對差分定位藉由觀測方程式相減而消除系統誤差,故以 IGS 精密星曆產品和衛星時錶資料來 消除衛星軌道與時錶誤差,電離層延遲誤差則藉由雙頻觀測量組成無電離層模式來 消除,而對流層延遲誤差、固體潮與極潮誤差等可利用模型進行改正(Héroux et al., 2001)。電碼虛擬距離與載波相位觀測方程式如下所示(Abdel-Salam et al., 2002)。

 $P(Li) = \rho + c \times (dt - dT) + dorb + dtrop + dion_i + d_{mult/P(Li)} + \varepsilon(P(Li))$ (3)

 $\Phi(Li) = \rho + c \times (dt - dT) + dorb + dtrop - dion_i + \lambda_i N_i + d_{mult/\Phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(Li)) - dion_i + \lambda_i N_i + d_{mult/\Phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(Li))$ (4)

其中 d_{orb} :衛星軌道誤差(公尺); $d_{mult/P(Li)}$ 、 $d_{mult/\Phi(Li)}$:多路徑效應影響量(公尺); $\varepsilon(P(Li))$ 、 $\varepsilon(\Phi(Li))$:其他雜訊(公尺)。

本研究採用之精密星曆為 IGS 提供之最終產品(final product),發佈時間延遲約 12~18天,衛星軌道誤差小於3公分,衛星時錶均方根誤差約為75 ps(10⁻¹²秒),衛 星與接收儀的時錶標準偏差約為20 ps。精密單點定位解決相對差分定位精度受限於 基線長度之問題,更實現了全球無縫觀測之高精度定位結果。

(四) GPS 浮標架構

GPS 浮標是將大地測量等級(雙頻公分等級)之 GPS 天線盤安裝於浮體上,然後 對浮標進行動態觀測並記錄海水面變化,其已被證實可有效搜集海水面資料(Cheng, 2004)。GPS 浮標之設計與施測方式隨著應用層面不同而有所不同,可用來進行測 高衛星之絕對率定(Absolute Calibration of Radar Altimetry)、海洋環流觀測、潮汐等 研究(Shum and Parke, 1999; 王錫祺, 2008)、海水深度探測(water depth mapping)(Young et al., 1986)、海浪高度頻譜分析(Born et al., 1994)。

本研究所使用之 GPS 浮標設備如圖 3 所示。救生圈為浮體載具,其直徑約 80 公分、厚度約 10 公分; 壓克力板直徑約 56 公分,厚度 1 公分,周圍有 8 顆螺絲將

壓克力密封並固定於救生圈上;壓克力圓罩高度約為 25 公分;天線盤型號為 LeicaAT502,可接收雙頻之 GPS 衛星訊號,屬於大地測量等級,接收儀型號則為 LeicaSR530。



圖3 本研究所使用之 GPS 浮標儀器

三、GPS 解算軟體

(一) GrafNav 軟體

GrafNav 軟體由加拿大 Novatel 公司開發之商用軟體,可同時處理 GPS 衛星及 GLONASS 衛星訊號進行後處理靜態或動態定位之計算,此軟體支援大多數單頻和 雙頻接收儀,也提供單基線、多基線(Multi-baseline)以及精密單點定位等解算模式, 定位精度可達公分等級。以下分別進行動態差分與精密單點定位參數設定討論。

動態差分模式:藉由雙頻載波相位觀測量 L1 與 L2 組成無電離層模式來消除電 離層延遲誤差。對流層誤差則由兩個步驟來消除,第一步先使用精密單點定位解算 出參考主站的對流層天頂延遲量;第二步是將解算後之對流層延遲量加入卡曼濾波 器預估後,代入 Saastamoinen 對流層改正模式即可求得移動站之對流層誤差改正量 (Way Point Products Group, 2010)。無論是靜態或動態解算,GrafNav 軟體使用 ARTK(Advance RTK)來解算整數週波未定值。ARTK 為 On-The-Fly(OTF)演算法, 可在差分解算時固定無法回復的週波脫落,使得定位精度大幅提升。由於本研究資 料為連續動態定位解算,此軟體先將資料分別正算與反算(反算是指由較晚記錄的資 料算回至較早記錄的資料),再結合正反算解算結果來提升解算精度。

精密單點定位模式:GravNav使用內建檔案來進行天線相位中心改正和利用精 密星曆改正衛星軌道誤差以及時錶誤差。GrafNav使用 Multi-pass處理步驟,將觀 測資料連續解算三次(正算、反算再正算),結合卡曼濾波器之狀態(位置、速度、對 流層延遲以及相位模糊度),保存後應用於下一次的解算。最終解算結果由反算以及 第二次正算結果結合求得,可有效提升解算精度(Way Point Products Group, 2010)。

(二) RTKLIB 軟體

RTKLIB 為日本東京海洋大學情報通信工學研究室所開發,不僅可進行後處理 定位解算,也可進行即時定位解算。解算模式包含利用電碼觀測量進行差分定位、 利用載波相位觀測量進行動態或靜態定位、移動或固定基站解算、動態或靜態之精 密單點定位。此軟體目前仍無法處理 GLONASS 衛星訊號。

本研究選擇載波相位觀測量搭配精密星曆進行動態差分定位。誤差改正模式設定如下:對流層延遲誤差之改正模式為 Saastamoinen 模式、電離層延遲誤差則由雙頻觀測量組成之無電離層模式消除、IGS 提供之精密星曆進行衛星軌道以及衛星時錶誤差改正、利用軟體本身所提供之檔案(例如 igx5.atx)進行天線相位中心改正(Takasu, 2011)。

(三) GAMIT/TRACK 軟體

GAMIT/TRACK 軟體是在美國國家科學基金會(National Science Foundation)的 資助下,由麻省理工學院(Massachusetts Institute of Technology)、斯克里普斯海洋研 究所(Scripps Institution of Oceanography)和哈佛大學共同研發之 GPS 解算軟體,可 由網路上申請下載,該軟體須在 UNIX 系統下運行。

本研究使用 TRACK 來進行動態定位解算,TRACK 為 GAMIT/GLOBK 軟體的 GPS 動態解算模式。動態差分定位解算成功與否取決於基線長度,當距離增加時, 電離層延遲誤差與對流層延遲誤差也隨之增加。短基線解算時(小於 10 公里), TRACK 利用 L1 及 L2 組合成無電離層模式來消除電離層延遲誤差,並分別求解 L1 與 L2 之整數週波未定值;長基線解算時,TRACK 使用 Melbourne-Wubena Wide Lane 技術分別求解 L1 與 L2 的週波未定值,並使用卡爾曼濾波器平滑解算結果(Herring et al., 2010)。

四、實驗成果與分析

(一) 外業實驗及資料處理流程

為使外業施測簡便,本研究將台南市安平區地政事務所樓頂之二等衛星控制點(S810)引點至約2公里外安平商港內潮位站旁的固定點(R15),點位如圖4所示,之後進行 GPS 浮標施測外業時,將以 R15為 GPS 參考主站。引點外業於2011年11月08日同時在S810與R15進行 GPS 連續觀測,施測S810與R15所使用之天線盤型號皆為Leica AT520,接收儀型號為Leica SR530,接收頻率皆設定為1Hz,共同觀測時間為2小時10分13秒。利用 GrafNav 軟體進行靜態相對差分定位解算,將S810點位設為參考主站,其WGS84坐標值採用邱士銘(2008)網型解算之結果(緯度: 22°59'26.766685",經度:120°10'57.108706",橢球高:41.352公尺),衛星仰角設為15度,計算出R15點位在WGS84參考系統下坐標平均值(緯度:22°58'42.60082",



經度:120°10'32.75895", 橢球高:21.452 公尺)。

圖4 二等衛星控制點 S810(左圖)和引測之參考固定點 R15(右圖)。

本研究選在安平商港內外進行 GPS 浮標實驗,其主要原因為港內 GPS 浮標施 測地點鄰近於安平潮位站,可假設 GPS 浮標與潮位站量測之海水面高程變化量一致, 故 GPS 浮標觀測之橢球高變化量可利用潮位站資料進行驗證。當氣象海嘯頻率因港 灣結構產生共振效應時,波浪振幅將被放大,為了探討氣象海嘯頻率是否會與安平 港港灣產生共振情形,本研究將同時在參考主站(R15)、距離參考主站(R15) 5 公尺 之安平商港內以及距離 5 公里之港外進行 GPS 浮標施測,港內和港外施放地點如圖 5 所示。本研究透過氣象預報顯示東北季風吹拂或鋒面通過台灣周圍來排定外業施 測日期,總共進行了 3 次外業實驗,實驗日期分別為 2012 年 4 月 19 日、2012 年 5 月 8 日以及 2012 年 5 月 10 日。



圖5 本研究 GPS 浮標施放之位置。綠色圓點為港內浮標,紅色圓點為港外浮標,黃 色箭頭方向為北方。[截取自 GOOGLE MAP: <u>https://maps.google.com.tw</u>]

(二)利用不同 GPS 軟體解算之結果比較

相對差分解算為參考主站至 GPS 浮標天線盤相位中心之基線,而精密單點定位 為解算 GPS 浮標天線盤相位中心之絕對坐標。為了比較兩種定位方法之計算成果, 本研究將解算結果統一轉換至 WGS84 坐標系統。

為了探討不同 GPS 軟體在不同解算模式下之解算成果優劣,本研究使用不同 GPS 解算軟體進行 GPS 浮標資料動態差分及精密單點定位解算,使用軟體包含 GrafNav、RTKLIB、GAMIT/TRACK。為了避免低角度衛星訊號產生較嚴重延遲, 解算進行時衛星仰角皆設為 10 度。GrafNav 和 GAMIT 軟體使用 IGS 提供之 30 秒 間隔精密星曆,RTKLIB 軟體使用 Center for Orbit Determination in Europe (CODE) 提供之 5 秒間隔精密星曆。

因考慮精密單點定位初始收斂時間之因素,精密單點定位解算成果皆去除 GrafNav軟體動態差分定位起始時間前的解算資料。本研究中,我們著重於海水面 之高程變化量,故將 GPS 浮標所有高程解算結果減去其平均高程值,並以三倍中誤 差去除粗差。

圖 6~圖 11 為利用不同 GPS 軟體解算港內外浮標之結果,分別為 GrafNav 動態 差分定位解(綠色)、GrafNav 精密單點定位解(桃紅色)、RTKLIB 動態差分定位解(紅 色)、GAMIT TRACK 動態差分定位解(藍色)以及安平潮位站資料(黃色)比較圖。由 圖發現,動態差分定位 GPS 浮標結果與潮位站資料趨勢非常相近,其中又以 GrafNav 結果最符合。安平潮位站資料為一分鐘一筆,將 GPS 解算結果與安平潮位站資料相 對應時間點取出高程變化量資料,計算出 GPS 浮標與潮位站高程變化差值之均方根 (Root Mean Square, RMS),結果列於表 2。



圖 6 2012 年 04 月 19 日港內浮標 GPS 軟體解算成果圖



圖8 2012 年 05 月 08 日港內浮標 GPS 軟體解算成果圖





圖11 2012 年 05 月 10 日港外浮標 GPS 軟體解算成果圖

表 2 不同 GPS 軟體解算結果與安平潮位站高程變化量差值之均方根(RMS,單位: 公尺)

2012 年	浮標	GrafNav		RTKLIB	TRACK
		Kinematic	GrafNav PPP	Kinematic	Kinematic
		DGPS		DGPS	DGPS
0419	港內	0.0299	0.0696	0.0326	0.0329
	港外	0.0533	0.1735	0.1523	0.0919
0508	港內	0.0302	0.0845	0.0378	0.0343
	港外	0.0411	0.1173	0.0563	0.0500
0510	港內	0.0354	0.0862	0.0382	0.0366
	港外	0.0994	0.1295	0.1090	0.0896

由圖 6 至圖 11 與表 2 可以發現 GPS 浮標實驗解算結果中,GrafNav 動態差分 定位解與潮位站資料相當吻合,港內浮標解算精度大約在 2~3 公分;港外浮標解算 精度大約在 4~10 公分。RTKLIB 與 GAMIT TRACK 動態差分定位解在港內浮標解 算精度約在 3~5 公分以下;港外浮標解算精度約為 4~15 公分左右。GrafNav 精密單 點定位解算結果比動態差分定位解差,港內浮標結果精度範圍在 7~8 公分;港外浮 標解精度約為 10 公分~20 公分。不論哪種 GPS 解算軟體或解算模式,港外浮標解 算精度皆都較港內來得差,造成原因除了港外浮標離潮位站較遠且基線距離較長外, 港外浮標觀測期間受到四草大橋遮蔽或風浪影響,此外風浪導致 GPS 浮標有進水情 形,經過太陽照射使得壓克力圓蓋內佈滿水氣,造成 GPS 訊號接收不連續,因此 GPS 浮標定位精度除了受到基線距離限制外,更取決於觀測環境好壞。

(三)希爾伯特-黃轉換(Hilbert Huang Transformation, HHT)頻率與港灣共振分析

由圖 7 至圖 12 發現,2012 年 04 月 19 日及 05 月 10 日 GPS 浮標定位解有週期 性之海水面變化量,為了確認此三天實驗之觀測結果是否偵測到氣象海嘯訊號,本 研究利用 HHT 對 GPS 浮標動態差分解進行分解,求得數個頻率之本質模態函數 (Intrinsic Mode Functions, IMF),IMF 代表之訊號包含高頻的波浪至低頻的潮汐訊號, 由於氣象海嘯週期介於數分鐘至 60 分鐘左右,本研究選擇 IMF 8 至 IMF 12 分量做 進一步分析。圖 12 至圖 17 為港內外浮標定位解之 HHT 分析結果,左邊為各 IMF 分量,右邊為不同 IMF 分量所對應之頻譜能量圖。



圖12 2012 年 04 月 19 日港內浮標差分定位解之 HHT 分析成果






圖14 2012年05月08日港內浮標差分定位解之HHT分析成果



圖15 2012年05月08日港外浮標差分定位解之HHT分析成果



圖16 2012年05月10日港內浮標差分定位解之HHT分析成果



圖17 2012 年 05 月 10 日港外浮標差分定位解之 HHT 分析成果

由圖可發現,04 月 19 日港內浮標之 HHT 分解結果中,IMF 10 分量頻譜強度 較其他分量來得大,此海洋訊號週期約為 50 分鐘,高度變化量約 9 公分,同樣現 象也發生在04 月 19 日港外浮標之 HHT 分析結果的 IMF 11 分量中,不過高度變化 量僅為 5 公分。05 月 10 日港內浮標之 HHT 分析結果中,IMF 10 分量之週期約為 40 分鐘,高度變化量約 5 公分,港外浮標 HHT 分析結果之 IMF 11 分量也有相同現 象。對照 05 月 08 日港內浮標 HHT 分析結果,IMF10 分量之週期約為 40 分鐘,高 度變化量約為 3 公分,港外浮標 HHT 分析結果之 IMF11 分量也有相同現象,但是 港內外兩分量之頻譜強度並不明顯。

對照上述海洋訊號發生當時,中央氣象局在實驗區域附近並無地震發生紀錄,因此此 40-50 分鐘週期之海洋訊號並非地震所引起的海嘯。圖 18 至圖 20 為中央氣象局提供之外業施測當天下午 2 時之地面天氣圖,由圖可以發現 04 月 19 日有鋒面和雲層位於台灣的西部沿海,05 月 08 日鋒面還位於中國大陸東南方,而 05 月 10 日有鋒面滯留在台灣的西南部附近,故推測 04 月 19 日以及 05 月 10 日在台南安平附近可能有因鋒面通過所引起之較明顯氣象海嘯訊號。



圖18 2012年04月19日下午2點地面天氣圖[截取自中央氣象局]



圖19 2012年05月08日下午2點地面天氣圖[截取自中央氣象局]



圖20 2012 年 05 月 10 日下午 2 點地面天氣圖[截取自中央氣象局]

比較氣象海嘯訊號之振幅可發現,港內浮標高度變化量雖大於港外浮標,但並 不顯著,故無受到安平商港港灣頻率共振的影響。為了證實推測,本研究計算安平 港港灣共振週期,公式(5)如下所示(Merian, 1828):

$$T_r = \frac{4L}{(2m+1)\sqrt{gH}}, m=0,1,2$$

其中 T_r:港灣共振週期(秒);L:港灣特徵長度(公尺);H:港灣深度(公尺);g:重力加速度。

(5)

本研究以安平港港灣人口至港灣內之縱深為港灣特徵長度,安平港灣特徵長度 為 3417.72 公尺,深度為 12 公尺。經由公式(5)計算求得安平商港第零階共振週期 約為 21 分鐘、第一階共振週期約為 7 分鐘、第二階共振週期約為 4 分鐘,而本研 究所測得之氣象海嘯主要週期約為 40~50 分鐘,與計算之安平商港任一個共振模態 並不相等,因此可以推測本研究所量測到之氣象海嘯訊號並沒有受到安平商港港灣 頻率共振而放大之現象存在。

五、結論

本研究利用 GPS 浮標收集台南安平商港港內和港外之海水面高度變化,結果證 實 GPS 浮標可以有效地監測氣象海嘯之海洋訊號。比較不同 GPS 解算軟體之計算 結果可以發現,在觀測環境較好且 GPS 衛星訊號不容易中斷之港內浮標解算結果, 動態相對差分定位解精度可達 3~5 公分,精密單點定位解精度可達 7~9 公分。港外 浮標解算精度較港內浮標來得差,原因在於港外 GPS 浮標施測地點易受到四草大橋 遮蔽影響,若 GPS 浮標可以放置於開闊無遮蔽之海域進行長時間連續觀測,定位精

157

度將可大幅提升。因精密單點定位只需要一台接收儀即可進行觀測,與動態相對差 分定位相比,除了更節省人力,也無需擔心定位精度會隨著基線長度增加而降低, 而本研究精密單點定位精度在港內較相對差分定位解精度來得差,約為7-8公分。

本研究 GPS 浮標在 04 月 19 日與 05 月 10 日觀測到週期為 40~50 分鐘之海洋訊號,屬於氣象海嘯(10~60 分鐘之間)之海水面變化,由 HHT 分析後發現, 04 月 19 日港內浮標之 IMF 10 分量高度變化量約為 9 公分,港外浮標之 IMF 11 分量高度變化量約為 5 公分,頻率皆為 50 分鐘左右。05 月 10 日港內與港外浮標的 IMF 10 分量高度變化量約為 5 公分,頻率約為 40 分鐘。經由安平商港港灣共振週期計算,發現氣象海嘯並沒有受到安平商港港灣頻率共振放大的影響,而此週期性的海水面高度變化現象推測是由滯留在台灣西南部之鋒面所引起。

誌謝

本研究由國科會「利用 GPS 浮標探討氣象海嘯之特性(計畫編號 101-2221-E-006-273)」和國立成功大學支助。

参考文獻

- 王錫祺,2008,《台灣海域 JASON-1 測高衛星的絕對率定與成果》,國立中正大學 地震研究所碩士論文。
- 邱士銘,2008,《使用 GPS 浮標整合台灣西南沿海垂直參考基準》,國立中正大學地 震研究所碩士論文。
- 印冠維,2009,《利用精密單點定位進行 GPS 浮標近即時精密單點定位》,國立成功 大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 郭力豪,2009,《台灣沿岸氣象海嘯特性之初步研究》,國立交通大學土木工程研究 所碩士論文。
- Abdel-Salam, M., Y., Gao, and X., Shen, 2002, Analyzing the performance characteristics of a precise point positioning system, *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation(ION GPS-2002)*: Oregon.
- Born, G. H., M. E., Parke, P., Axelrad, K. L., Gold, J., Johnson, K. W., Key, D. G., Kubitschek, and E. J., Christensen, 1994, Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy, *Journal of Geophysical Research*, 99 ,pp. 24517-24526.
- Bryant, E., 2001, *Tsunami: the underrated hazard*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Cheng, K., 2004, *GPS buoy campaigns for vertical datum improvement and radar altimeter calibration*, Geodetic Science Report No.470, Columbus: The Ohio State University.

Defant, A., 1961, Physical oceanography, New York: Pergamon Press.

Gonz'alez, J. I., S. F., Fareras, and J., Ochoa, 2001, Seismic and meteorological tsunami

contributions in the manzanillo and cabo san lukas seiches, *Marine Geodesy*, 24, pp. 219-227.

- Hamlington, B. D., R. R., Leben, O. A., Godin, J. F., Legeais, E., Gica, and V. V., Titov, 2011, Detection of the 2010 chilean tsunami using satellite altimetry, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, pp. 2391-2406.
- Héroux, P., J., Kouba, P., Collins, and F., Lahaye, 2001, GPS carrier-phase point positioning with precise orbit products, *Proceedings of the International Symposium* on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001): Banff.
- Herring, T. A., R. W., King, and S. C., McClusky, 2010, *Introduction to GAMIT/GLOBK*, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Hofmann-Wellenholf, B., H., Lichtenegger, and J., Collins, 1992, *GPS theory and practice*, 2nd edition, New York: Springer-Verlag.
- Kato, T., Y., Terada, M., Kinoshita, H., Kakimoto, H., Isshiki, T., Moriguchi, M., Takada, T., Tanno, M., Kanzaki, and J., Johnson, 2001, A new tsunami monitoring system using RTK-GPS, *Proceedings of U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Review and International Tsunami Symposium* : Seattle.
- Merian, J. R., 1828, *Ueber die bewegung tropfbarer flüssigkeiten in gefässen* [On the motion of drippable liquids in containers], Basel: Schweighauser.
- Monserrat, S., I., Vilibić, and A. B., Rabinovich, 2006, Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, pp. 1035-1051.
- Nomitsu, T., 1935, A theory of tsunamis and seiches produced by wind and barometric gradient, *Memoirs of the College of Science*, Kyoto Imperial University, A18 (4), pp. 201-214.
- Rabinovich, A. B., and S., Monserrat, 1996, Meteorological tsunamis near the balearic and kuril islands: descriptive and statistical analysis, *Natural Hazards*, 13(1), pp. 55-90.
- Rabinovich, A. B., and S., Monserrat, 1998, Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the balearic and kuril islands, *Natural Hazards*, 18(1), pp. 27-55.
- Shum, C., and M. E., Parke, 1999, *Current GPS-Buoy Sea Level Research*, Draft, Columbus: The Ohio State University.
- Takasu, T., 2011, *RTKLIB ver.2.4.1 Manual*, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, <u>http://www.rtklib.com/rtklib.htm</u> (Last Checked 2013/06/05).
- Vilibi´c, I., 2005, Numerical study of the Middle Adriatic coastal waters sensitivity to the various air pressure travelling disturbances, *Annales Geophysicae*, 23, pp.3569-3578.
 Way Point Product Group, 2010, *GrafNav/GrafNet User Guide*, Canada.

Young, L. E., S. C., Wu, and T. H., Dixon, 1986, Decimeter GPS positioning for surface

element of sea floor geodesy system, *International Symposium on Marine Positioning*: Reston.

Zumberge, J. F., M. B., Heflin, D. C., Jefferson, M. M., Watkins, and F. H., Webb, 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), pp. 5005-5017.

投稿須知

所有稿件以未曾在國內、外以任何形式刊載為限,且稿件內容不得有侵犯他人 著作權或商業宣傳行為,否則由作者自行負法律之責任。文體以中文或英文撰寫為 原則,並附中文及英文摘要。稿件須加註標點、分段及編列頁碼。內容編排以下列 順序為原則:(一)封面:包括中文及英文之論文名稱、作者姓名、作者所屬單位、 聯絡地址、電話、傳真、電子郵件住址;(二)中、英文摘要及關鍵詞等;(三) 內文;(四)註釋;(五)謝誌;(六)參考文獻;及(七)附錄與圖表。審查通 過後,無法直接由電腦列印之圖、表,應另附完稿之圖、表(不超過A4紙張),以 利編排。圖或照片應以黑白為原則,如需彩色印刷請作者自行負擔費用。內文所引 用之文獻須列於參考文獻,參考文獻請以姓氏筆劃多寡,依序以中文列出,之後再 依英文姓氏之英文字母,依序以英文列出。各項格式書寫方式,請參考下列說明:

各項格式說明如下:

- 壹、文書檔案採 A4 直式橫寫書格式,版面邊界分別為上(2.54cm)、下(2.54cm)、 左(3cm)、右(2.8cm),字體以標楷體及英文 Times New Roman 等兩種字體 排版。
- 貳、 首頁 (Title page), 應包含下列內容:
- 一、標題 (Article Title): 包括中、英文章篇名。
- 二、作者 (Author's Name):
 - 1. 包括中、英文作者姓名。
 - 分別以中、英文註腳載明作者的職稱、單位。若作者有數人,則以阿拉伯數 字1,2,3…個別標示。
 - 須標示通訊作者(加註*),註明連繫電話、E-mail,英文電話請以國際電話 方式書寫。
- 三、摘要 (Abstract): 包括中、英文摘要。
- 四、關鍵字 (Keywords): 包括中文、英文關鍵字, 分別列於中、英文摘要之下。
- 參、正文(Manuscript)
- 一、稿件標題章節編號層次及順序
 中文請按「一,(一),1.,(1),a」順序排列;英文則按「1,1.1,1.1.1.」
 順序排列。
- 二、引述用例
- (一)直接引述:
- 中文請用單引號「」;英文請用雙引號"",並以括弧標示引述文獻頁次。 (二)引述中復有引述,或特殊引用時:
 - 中文單引號「」在外,雙引號『 』在內。英文雙引號" "在外,單引號 ' '在內。

三、文獻引述用例

- (一) 文中註明引述文獻
 - 1. 請以(作者,年份)方式表示。
 - 若有數篇文章以分號(;)區隔;中英文文獻分開,並各自以引述文獻之出 版年份先後依序排列。
 - 若同一作者,有數篇文章同時引述,則以(作者,年份1、年份2);若同一 作者有同一年發表文章同時引述,則以(年份a,b)表示。
 - 若一篇文章有 2 位作者,請全部列出。中文為(作者 A 與作者 B,年份);
 英文為(作者 A and 作者 B,年份)
 - 若一篇文章有3位以上作者(含3位),中文請用(第一位作者等,年份);
 英文請(第一位作者 et al.,年份)用。
 - 6. 英文期刊第一作者姓在前,名在後,第二作者之後,名在前,姓在後。
- (二) 文中已有作者姓名時
 - 1. 請以作者(年份)方式表示
 - 2. 若有數篇文章同時引述,則以作者A(年份)、作者B(年份)...表示
 - 3. 若有必要加註說明時,請用註腳,內文註腳號碼使用上標
- 四、圖版、插圖及表用例
 - 1. 圖名請置於圖之正下方,並以圖1、圖2.....方式表示。
 - 2. 表名請置於表格之正上方,並以表1、表2.....方式表示。
 - 3. 若引用他人圖表需註明資料來源。
- 五、公式寫法用例
 - $以(1) (2) (3) \cdot \cdot \cdot \hat{K} = (A^{T} P A)^{-1} A^{T} P L$ (1)

肆、參考文獻(References)

- 一、專書:作者,年份,《書名》,版次,出版地:出版者。
- 二、期刊論文:作者,年份,篇名,《期刊名》,卷期數,頁碼。
- 三、研討會論文:作者,出版年,論文名稱,《研討會名稱》。
- 四、博碩士論文:作者,年份,《論文名稱》,學校科系名稱(碩/博士論文)。
- 五、網路等電子化資料:作者(單位),年份,篇名,網站名稱,網址。
- 六、技術報告或研究報告:作者,年份,《報告名稱》,研究單位。

中華民國地籍測量學會「國土測繪與空間資訊」 期刊論文審查辦法

中華民國 101 年 09 月 25 日第 16 屆第 6 次理監事聯席會議通過

- 第一條 為規範「國土測繪與空間資訊」期刊論文審查辦法(以下簡稱本辦法), 得依本會編輯委員會組織簡則第二條規定訂定之。
- 第二條 來稿經登記後由總編輯就來稿性質,邀請相關專長之編輯委員推薦審 查委員。編輯委員會負責對審查委員及投稿作者保持雙向匿名方式審 查,審查作業程序如附圖。
- 第三條 審查委員應於接到論文後三週內審查完畢,並將論文審查表(如附表), 連同論文寄回編輯委員會,審查意見表中須明確勾選其中一項:
 - 1·刊登。
 - 2·修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
 - 3·修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
 - 4·不適刊登(應列明審查意見)。

第四條 審查結果處理方式:

處理 第一位審查委 方式 員意見 第二位 審查委員意見	刊登	修改後刊登	修改後再審	不適刊登
刊登	刊登	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後刊登	寄回修改	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	不適刊登
不適刊登	第三位審查	第三位審查	不適刊登	不適刊登

附註:再審以一次為限。

第五條 本辦法經理監事會通過後實施,修改時亦同。



論文審查流程圖

國土測繪與空間資訊期刊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

(原名「地籍測量」)

編輯委員會

主任委員 楊 名 國立成功大學測量及空間資訊學系 編輯委員 (依姓氏筆劃順序排列)

	史天元	國立交通大學土木工程學系	
	吳 究	國立中央大學太空及遙測研究中心	
	洪本善	逢甲大學土地管理學系	
	洪榮宏	國立成功大學測量及空間資訊學系	
	陳春盛	健行科技大學應用空間資訊系	
	黃灝雄	國立政治大學地政學系	
	曾義星	國立成功大學測量及空間資訊學系	
	楊明德	國立中興大學土木工程學系	
	趙鍵哲	國立台灣大學土木工程學系	
總編輯	陳國華	國立臺北大學不動產與城鄉環境學系	
執行編輯			
	何美娟	內政部國土測繪中心	
	陳鶴欽	內政部國土測繪中心	
	游豐銘	內政部國土測繪中心	
	伍瑋雯	國立臺北大學不動產與城鄉環境學系	
	林宜璇	國立臺北大學不動產與城鄉環境學系	
發行人	盧鄂生		
出版所	中華民國地籍測量學會		

國土測繪與空間資訊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

第一卷第二期

Vol. 1, No. 2

民國一〇二年七月

July 2013

目 錄

CONTENTS

陸基式移動製圖之定位定向混合式整合架構

台灣地區動態座標框架立之先期研究--台灣現今之地殼變形模式

景國恩、許書琴、孔冠傑、陳芊如、趙荃敏......99

Preliminary study for establishment of dynamic datum in Taiwan –Modern crustal deformation of Taiwan

Kuo-En Ching, Shu-Chin Hsu, Kuan-Chieh Kung, Chien-Ju Chen, Chuan-Min Chao

GNSS 應用於地籍加密控制測量之研究

黃立信、張宏正......119

Application of GNSS System for Cadastral Densified Control Surveying Hwang, Lih-Shinn, Hung-Cheng Chang

利用 GPS 浮標監測氣象海嘯

林芮菁、曾宏正、郭重言、江凱偉、林立青、鄭凱謙......139

Monitoring Meteotsunami Using GPS Buoys Ruei-Jing Lin, Hong-Zeng Tseng, Chung-Yen Kuo, Kai-Wei Chiang, Li-Ching Lin, Kai-Chian Cheng