# 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**

### 第七卷 第一期

中華民國一〇八年一月



VOLUME 7, NO. 1

January 2019

Published by Chinese Society of Cadastral Survey & National Land Surveying and Mapping Center



一、理監事會:
理事長:黃榮峰
副理事長:謝福來
常務理事:蕭輔導、高書屛、黃進雄
理  事:洪本善、崔國強、吳宗寶、江渾欽、楊 名、周天穎、吳相忠、王定平、王啟鋒、
蕭萬禧、梁崇智、紀聰吉、謝福勝、張元旭、邱仲銘、陳惠玲
常務監事:蘇惠璋
監 事:史天元、蕭正宏、容承明、白敏思
秘書長:鄭彩堂(兼任)
副秘書長:李文聖(兼任)
秘書:黃錦桂(兼任)、陳鶴欽(兼任)
幹 事:何美娟、楊雅茜
(一)服務委員會:
主任委員:崔國強
委 員:王定平、黃仰澤、賴澄標、鄭宏逵、蘇昱彰、朱上岸、黃建華、吳啟賢
總幹事:梁崇智
幹 事:劉彥秀、吳震緯、蕭爵增
主仕委員:楊 名
委 頁:史大兀、林老生、洪本善、洪栄宏、陳繼潘、寅倬央、晉士樑、楊明德、 
總編輯:陳國華
編
────────────────────────────────────
(二)研究發展安員習:
土 忙 安 貝 . 洪 平 苦 禾
安 · 貝 · 丄 仏 L ` 竹 心 셰 ` 竹 豆 廷 ` 犬 木 貝 ` 犬 耳 鸠 ` 貝 乂 半 ` 枳 庠 石 ` 酮 旭 坏 ` 
りたい いってい いっちょう ひょう ひょう ひょう ひょう ひょう ひょう ひょう ひょう ひょう ひ
や 打 争・ 体 に 示
云 · 洪太姜、張元旭、曾清凉、曾國鈞、謝福來
全····································
(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:蕭泰中
幹事:謝正亮
(六)國際事務委員會:
1. · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
委 員:李文聖、葉美伶、曾耀賢、盧鄂生、羅正方
總幹事:邱明全
幹 事:李佩珊、湯美華
(七)界址鑑定及諮詢委員會:
主任委員:盧鄂生
委 員:邱仲銘、江渾欽、洪本善、崔國強、謝福勝、王年水、駱旭琛、吳宗寶、
吴相忠、曾耀賢、蕭萬禧、王啟鋒

學會地址:408台中市南屯區黎明路二段335巷28號

網 址:<u>http://www.cadastralsurvey.org.tw</u>; 電子郵件:<u>cscs.editor@gmail.com</u>

國土測繪與空間資訊 民國一〇八年一月 第七卷 第一期 第 1 頁至第 14 頁 Taiwan Journal of Geoinformatics Vol. 7, No. 1, pp. 1~14

# 結合 GPS 及 BDS 對於定位效能之提升:

# 應用於大地監測

吴岱育<sup>1</sup>、楊名<sup>2\*</sup>

論文收件日期:107.09.07 論文修改日期:107.10.12 論文接受日期:107.10.22

#### 摘要

全球定位系統(Global Positioning System, GPS)精密定位可提供使用者靜態定位 以及逐一時刻定位高精度的定位成果,並廣泛的運用在大地監測之上,如:地殼變 形監測、控制測量、海嘯早期預警以及估計同震位移等。而若是可改善GPS的定位 效能,勢必對大地監測能產生助益。近年來由於中國的北斗衛星導航系統(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)正式提供亞太地區服務,並且由於其衛星的軌道特 性,使得BDS在台灣地區具有與GPS相當的可視衛星數,此外再加上都是以CDMA 的方式傳播訊號,顯示兩者之間有較高的相容性。因此在本研究中希望藉由結合GPS 及BDS,增強衛星幾何,達到提升定位效能的目標。在實驗中,蒐集了 5 條基線 (50~265km), 並分析加入BDS之後對於靜態定位連續站模式、靜態定位移動站模式 以及逐一時刻定位成果的影響。其成果顯示:(1)在靜態定位連續站模式中,GPS與 GPS+BDS會有精度相似的每日解,在平面精度上幾乎一致,而高程精度則是 GPS+BDS會略優於GPS。(2)在靜態定位移動站模式中,當觀測時間在 2 小時內 GPS+BDS能夠明顯的提升定位精度,而在觀測時間大於 4 小時之後可以預期 GPS+BDS與GPS會有相似的定位精度。在觀測時間小於2小時,GPS+BDS可以縮 短定位精度達到預設精度門檻值所需的時間 (3)而在逐一時刻定位的部分, GPS+BDS在平面精度及高程精度上分別約有 19%及 23%的提升。

關鍵詞:北斗衛星導航系統、全球定位系統、逐一時刻定位、精度分析、靜態定位

<sup>1</sup> 碩士生,國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 教授,國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> 通訊作者, TEL: (06)2757575#63820, E-mail: <u>myang@mail.ncku.edu.tw</u>。

# Combining GPS and BDS to improve positioning performance: application to geodetic monitoring

Dai-Yu  $Wu^1$ , Ming  $Yang^{2^*}$ 

#### Abstract

GPS (Global Positioning System) precise positioning can provide accurate static and epoch-by-epoch positioning result, and is widely used in geodetic monitoring. The BDS (BeiDou Navigation Satellite System) has been fully-operational in Asia-Pacific region. Currently in Taiwan, BDS can provide as many visible satellites as GPS can provide. Moreover, both of BDS and GPS transmit signal are based on CDMA, which means these two systems are highly compatible. Therefore, we expect to achieve better positioning performance by combining GPS and BDS. In this study, we develop a generalized computation method and use the method to perform GPS-only and GPS+BDS relative positioning and to evaluate the impact of GPS+BDS in continuously operating reference station (CORS) mode, in campaign mode, and in epoch-by-epoch positioning. For data analyses, five experimental baselines which ranging from 50km to 265km were collected. The results indicate that (1) in CORS mode, GPS+BDS has similar horizontal daily solutions as GPS, and is slightly better than GPS in vertical daily solutions; (2) in campaign mode, for data length  $\leq 2hr$ , obvious positioning accuracy improvement could be obtained by GPS+BDS. For data length  $\geq$  4hr, GPS+BDS would have similar positioning accuracy as GPS. For data length  $\leq 2hr$ , the required occupation time for achieving a predefined accuracy can be significantly reduced by applied GPS+BDS; (3) for epoch-by-epoch positioning, the positioning accuracy can be improved by 19% in horizontal direction and by 23% in vertical direction.

**Keywords**: Accuracy analysis, BDS, Epoch-by-epoch positioning, GPS, Static positioning

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>\*</sup> Corresponding Author, TEL:(06)2757575#63820, E-mail: myang@mail.ncku.edu.tw.

#### 一、前言

GPS(Global Positioning System)精密定位目前被廣泛的應用在大地監測 (Geodetic Monitoring)之上(Feng et al., 2015; Inazu et al., 2016; Larson, 2009)。而 GPS 定位在大地監測的應用上,根據資料處理方式可分為靜態定位(Static Positioning)以 及逐一時刻定位(Epoch-By-Epoch Positioning)兩類。靜態定位透過累積觀測量數目 的方式,計算出高精度的待測站坐標,其根據觀測時間長短又可以分成持續觀測的 連續站(Continuously Operating Reference Stations, CORS)模式,以及觀測時間較短的 移動站(Campaign)模式。逐一時刻定位則是根據每個時刻的衛星幾何計算出當下待 測站的位置,因此定位精度會與定位瞬間的衛星幾何及殘餘系統誤差大小相關。這 些大地監測的應用與經濟活動以及生命安全相關連,由於 GPS 定位效能會直接影響 到大地監測成果的準確性,因此 GPS 定位效能的提升對大地監測的應用而言為一個 重要的課題。

隨著衛星科技的發展,各國紛紛建置出各自的全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite Systems, GNSS),除了目前被廣泛使用的 GPS 之外,在臺灣地區 有提供正式定位服務的系統尚有俄羅斯的 GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System)和中國的北斗衛星導航系統(BeiDou System, BDS)。而使用者可以透過結合 這些不同的衛星系統獲得比現有 GPS 單星系更多的可視衛星數,藉此增強衛星幾何, 提升定位精度,因此衛星定位技術也逐漸朝向結合多星系發展。在靜態定位的部分, Li and Zhang (2014)認為結合 GPS 及 GLONASS 進行靜態定位,可以縮短定位精度 達到小於 10 公分時所需的觀測時間。Dawidowicz and Krzan (2014)在透空度不好的 環境之下進行靜態測量,並發現在觀測時間較短的測試段中,結合 GPS 及 GLONASS 可以獲得較好的定位精度。在逐一時刻定位的部分, Shi et al. (2013)結合 GPS 及 BDS 進行逐一時刻定位的分析,獲得 GPS+BDS 雙星系可以提升定位精度之成果。Capilla et al. (2016) 設計一個模擬地滑移動模式的實驗場並進行動態定位,其成果顯示結合 GPS 及 GLONASS 可以獲得較好的定位成果。從文獻回顧中可了解到結合多星系確 實可以提升定位效能,而目前在臺灣地區提供正式定位服務的系統有 GPS、 GLONASS 以及 BDS,其中 GLONASS 目前主要是以頻分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)的方式傳播訊號, 此種傳播方式會造成週波值的求解過程較 為複雜(Wang et al., 2001)。而 GPS 與 BDS 則都是以碼分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)的方式傳播訊號,顯示這兩個系統之間有較高的相容性,再加上目 前臺灣地區 GPS 與 BDS 一整天具有接近的平均可視衛星數,因此本研究中將藉由 結合 GPS 以及 BDS 來增強衛星幾何,提升定位效能,並根據定位方法以及大地監 測的應用,分成三個主題來探討 BDS 加入之後的影響:1. 對於靜態定位的連續站 模式之每日解精度的影響。2. 對於靜態定位的移動站模式定位誤差達到選定精度所 需觀測時間,以及 GPS 和 GPS+BDS 的定位精度與觀測時間長度之間的關係。3.對 於逐一時刻定位精度的影響。

#### 二、方法

本研究之基線計算方法是根據 Chu and Yang (2014)而來。計算方法之流程圖如圖 1 所示。原始觀測量的部分採用 GPS 及 BDS 的虛擬距離及載波相位觀測量,並 在計算時可以彈性的使用單星系或是雙星系的觀測量。接著為消除一階電離層的影響,因此採用無電離層組合以及 HMW(Hatch-Melbourne-Wübbena)組合,而對流層 的部分則是先使用經驗模型來降低其影響,然後再利用附加參數吸收殘餘對流層延 遲的影響。在推估參數的部分是使用卡曼濾波器(Kalman, 1960),其中待定的未知參 數有基線分量、整數週波未定值以及天頂對流層延遲,並會根據衛星仰角給予不同 權值。卡曼濾波器計算出來的成果為實數解。為了要恢復週波的整數特性,因此後 續會利用 LAMBDA(Teunissen, 1995)進行整數週波未定值的搜尋,並將解算成果固 定為整數解。



三、資料

在觀測資料的部分,本研究總共使用四個測站的資料,分別為CKSV、LSB0、 NCUS 以及 HFAN,這些測站皆是採用 Trimble NetR9 之接收儀。這四個測站總共可 以組出六條基線,其中由於 LSB0-CKSV(134 公里)與 HFAN-LSB0(141 公里)這兩條 基線距離相近,根據基線觀測量的品質,因此捨棄 LSB0-CKSV。本研究所使用的 五條基線其基線長度、觀測日期及觀測時間間隔如表 1 所示,其中觀測資料為使用 2017/08/25(GPST)一整天之資料,在這段時間內 GPS 與 BDS 平均可視衛星分別為 7.8 與 9.3 顆。各基線與測站位置的相對關係如圖 2 所示。此外,四個測站坐標值是 利用 GIPSY 的靜態模式計算出一個月坐標值的平均值,即每月解,並將其作為測站 坐標的參考值,而在計算每月解時會檢查其坐標時間序列是否有異常,以免造成參 考值精度不足。

參考站	待測站	基線長度	觀測日期(GPST)	觀測時間間隔
NCUS	HFAN	50 公里	2017/08/25	5 秒
NCUS	LSB0	106 公里	2017/08/25	5 秒
HFAN	LSB0	141 公里	2017/08/25	5 秒
NCUS	CKSV	239 公里	2017/08/25	5 秒
HFAN	CKSV	265 公里	2017/08/25	5 秒

表1本研究中所使用之基線觀測資料表



圖 2 基線相對位置關係圖

四、成果

#### (一) 靜態定位-連續站模式成果分析

在成果分析中,利用比較 GPS 與 GPS+BDS 兩者每日解的差值,來分析結合 GPS 及 BDS 對每日解定位精度的提升是否有所幫助。表 2 為單星系與雙星系每日 解的成果,表中 GPS 與 GPS+BDS 的定位誤差為卡曼濾波器計算出來的坐標值減去 待測站的參考坐標值。

從表2中可發現單星系與雙星系各基線在平面與高程的定位誤差皆小於1公分, 顯示無論是單星系還是雙星系在每日解都可達到數公厘等級的定位精度。而單星系 與雙星系在平面方向的RMSE值皆為4公厘,在高程方向則分別為7公厘與5公厘, 顯示雙星系在高程方向的精度略優於單星系。整體而言,單星系與雙星系在每日解 成果的差異不大,尤其在平面方向上兩者幾乎沒差異。也就是說,當累積一整天的 觀測量時,GPS本身即具有很強的衛星幾何,此時 BDS的加入對於定位成果並不 會有顯著的提升,並且會預期兩者在平面方向的定位成果會十分接近。

甘始目中	平面定位誤差(m)		高程定位誤差(m)	
	GPS	GPS+BDS	GPS	GPS+BDS
50km	0.002	0.001	-0.006	0.000
106km	0.004	0.004	0.001	0.001
141km	0.005	0.003	0.009	0.000
239km	0.004	0.006	-0.009	-0.008
265km	0.005	0.005	-0.003	-0.009
平均值	0.004	0.004	-0.002	-0.003
RMSE	0.004	0.004	0.007	0.005

表 2 GPS 與 GPS+BDS 之每日解

#### (二)靜態定位-移動站模式成果分析

1.定位精度達到門檻值所需時間



這部分是以收斂時間來評估定位精度達到門檻值所需時間,如圖3所示,收斂時間的定義為若定位誤差(藍色實線)在第 t 個時刻(橘色圓點)之後一直小於門檻值(綠色虛線),則代表達到收斂,而第 t 個時刻即為收斂時間,其中定位誤差為該時刻卡曼濾波器計算出來的坐標值減去待測站的參考坐標值。而在這部分中是給予平

面方向5公分、高程方向10公分作為門檻值。

圖 4 為各基線的平面收斂時間成果,圖中上半部為 GPS 的成果,下半部為 GPS+BDS 的成果。其中,縱軸為定位誤差,橫軸為時間,不同顏色的線代表各基 線的定位誤差時間序列,各顏色的圓點則對應各基線在何時達到收斂門檻。圖中可 看出,GPS 的收斂時間與基線長度相關,即較長的基線所需要的收斂時間是比較長 的,而 GPS+BDS 在短時間內(例如:5分鐘內)就完成收斂的情況下,其收斂時間與 基線長度較沒有明顯的關係,但大抵上較長的基線仍所需要較久的時間才能完成收 斂。整體而言,從圖中可看出,一開始定位誤差較大且變化劇烈的部分在加入 BDS 觀測量之後很明顯的有縮短的現象,代表 GPS+BDS 所需的收斂時間比 GPS 短。



圖 5 為將各基線平面及高程方向收斂時間平均值繪製成折線圖之成果,圖中縱軸為收斂時間,橫軸為基線長度,藍色的線為 GPS 單星系的成果,橘色的線為 GPS+BDS 的成果。從圖中可看出,單星系及雙星系在平面及高程方向,都有隨基線長度增加收斂時間平均值也變大的趨勢存在。這是由於基線拉長的情況下,殘餘系統誤差也會隨之增加,造成定位誤差會有偏大的情形。整體而言在,GPS+BDS 相較於 GPS 在平面方向以及高程方向分別可縮短 79.40%以及 65.62%的收斂時間。

7



圖 5 收斂時間平均值之成果

2.定位精度與觀測時間長度之關係

由前一節中的圖 4 可看出當觀測一段時間之後定位誤差會趨近零,因此在此小節中則是要計算觀測時間長度為 1、2、4、8、12 及 24 小時的定位誤差,並分析定位誤差的 RMSE 值隨時間的變化,其中定位誤差為卡曼濾波器計算出來的坐標值減去待測站的參考坐標值,RMSE 值則是根據相同觀測時間長度中所有基線之所有時段的定位誤差計算得來。圖 6 為定位誤差與觀測時間長度之關係,圖中左邊為平面方向的成果,右邊為高程方向的成果。其中,橫軸代表觀測時間長度,縱軸為 RMSE值,藍色實線為 GPS 的成果,橘色實線為 GPS+BDS 的成果。



圖 6 定位誤差與觀測時間長度之關係

從圖 6 中可看出,平面及高程方向的 RMSE 值都存在著隨觀測時間增長而遞減 的趨勢,並且達到一定長度的觀測時間之後 RMSE 值便不再有太大的變化。從圖中 可看出無論是平面還是高程方向上,觀測時間在兩小時內,橘色的線必定會在藍線 的下方,顯示當觀測時間小於兩小時(綠色框起)時 GPS+BDS 會有較好的定位精度。 而當觀測時間超過 4 小時(紅色框起)時,可看出兩條線會很接近,代表 GPS+BDS 與 GPS 會有相似的定位精度。



圖 7 RDOP 值與時間之關係(265 公里)

圖 7 為 265 公里基線 RDOP (Relative Dilution Of Precision)的時間序列圖,其中 橫軸為時間,縱軸為 RDOP 值,藍線代表 GPS,橘線代表 GPS+BDS,而 RDOP 是 由法矩陣的逆矩陣(N^(-1))得來。由於 DOP 值乘上先驗的觀測精度可得到先驗的定 位精度,因此可以透過比較 RDOP 值的大小來預期 GPS 與 GPS+BDS 定位精度的優 劣。圖中綠色框起代表 GPS+BDS 的 RDOP 值小於 GPS 的 RDOP 值,因此可預期 當觀測時間小於 2 小時時,GPS+BDS 的定位精度會優於 GPS。圖中紅色框起代表 GPS 與 GPS+BDS 具有相近的 RDOP 值,顯示當累積觀測時間長度約達到 4 小時後 可預期兩者會有相近的定位精度,與前一段的分析具有相似的結論。

#### (三) 逐一時刻定位成果分析

1.NCKU與GAMIT在GPS單星系之成果比較

為了解本研究使用的 MATLAB 程式(簡稱 NCKU)在逐一時刻定位的效能,因此 首先會與科學軟體 GAMIT 所計算出來的定位成果進行比較。圖 8、9 顯示 50 及 265 公里基線 NCKU 以及 GAMIT 的定位誤差,其中左半邊為平面定位誤差的散佈圖, 其縱軸及橫軸分別代表南北方向及東西方向的定位誤差;右半邊為高程定位誤差的 時間序列圖,其縱軸及橫軸分別代表高程方向的定位誤差及時間,藍色代表 NCKU 的定位成果,橘色則為 GAMIT 的成果。



圖 9 265 公里基線定位誤差(NCKU vs. GAMIT)

在平面方向上,可發現兩者的定位誤差散布情形是接近的。而在高程方面上可 發現兩者的定位誤差時間序列在基線較短(圖 8)的情況下,其趨勢是接近的,而在 基線較長(圖 9)的情況下,兩者趨勢雖並不相近,但是定位誤差時間序列有較大的 震盪皆是反映定位成果較差。至於趨勢不相近的原因,推測可能是由於 NCKU 與 GAMIT 在降低系統誤差影響上所使用的經驗模型(尤其是對流層延遲)不同、計算時 所採用的主衛星不同等原因所導致。表 3 表示 NCKU 與 GMAIT 於逐一時刻定位成 果的 RMSE 值。平面方向上 NCKU 與 GAMIT 的 RMSE 值是接近的,其 RMSE 值 的差異在 3 公厘以內。而在高程方向中,NCKU 在 239 及 265 公里基線的 RMSE 值 略優於 GAMIT,但兩者差異在 1 公分之內,而其餘三條基線的差異則是在 2 公厘 左右,故在逐一時刻定位成果上 NCKU 具有與 GAMIT 相似的效能。

甘伯巨莊	平面 RMSE 值(m)		高程 RMSE 值(m)	
举禄衣反	NCKU	GAMIT	NCKU	GAMIT
50km	0.015	0.014	0.027	0.029
106km	0.015	0.015	0.033	0.032
141km	0.017	0.016	0.039	0.037
239km	0.017	0.020	0.050	0.058
265km	0.020	0.020	0.055	0.064

表 3 NCKU 與 GMAIT 於逐一時刻定位成果之比較

1.NCKU 中 GPS 與結合 GPS 及 BDS 之比較

由前一節可知道,NCKU中 GPS 在逐一時刻定位上與科學軟體 GAMIT 具有相 近的效能。因此本節將分析在 NCKU 中結合 BDS 之後對於逐一時刻定位成果所帶 來的影響,圖 10、11 顯示 50 及 265 公里基線 GPS 與 GPS+BDS 之定位誤差,左半 邊為平面定位誤差的散佈圖,縱軸及橫軸分別代表南北方向及東西方向的定位誤差, 右半邊為高程定位誤差的時間序列圖,縱軸及橫軸分別代表高程方向的定位誤差及 時間,藍色代表 GPS 的定位成果,橘色為 GPS+BDS 的成果。



圖 10 50 公里基線定位誤差(GPS vs. GPS+BDS)



圖 11 265 公里基線定位誤差(GPS vs. GPS+BDS)

從圖 10 及 11 中可發現,在平面方向定位誤差散布圖中,GPS+BDS 定位誤差的散布程度較 GPS 更集中。而在高程方向定位誤差時間序列圖中,GPS+BDS 後定位誤差的散布情形較小且整體的平均值也比較接近於零,代表 GPS+BDS 定位精度較好。表4表示 GPS 與 GPS+BDS 於逐一時刻定位成果的 RMSE 值。圖 12 則為將表4的成果繪製成折線圖,其中縱軸為 RMSE 值,橫軸為基線長度。從圖 12 中可發現橘線皆是在藍線的下方,代表 GPS+BDS 的定位精度較 GPS 還好。整體而言將五條基線的提升量取平均之後,可發現結合 GPS 及 BDS 相較於 GPS 單星系在逐一時刻定位成果中,在平面方向以及高程方向分別有 19.03%以及 23.66%的提升。

甘伯	平面 RMSE 值(m)		相目恒中(0/)	高程 RM	SE 值(m)	<b>坦白柜中(0/)</b>
本家	GPS	<b>GPS+BDS</b>	「 延升 幅 反 (70)	GPS	<b>GPS+BDS</b>	挺升帕皮(70)
50km	0.015	0.014	10.24%	0.027	0.022	18.22%
106km	0.015	0.011	24.27%	0.033	0.025	23.39%
141km	0.017	0.014	17.26%	0.039	0.029	24.59%
239km	0.017	0.014	18.42%	0.050	0.038	23.89%
265km	0.020	0.015	24.97%	0.055	0.039	28.19%

表 4 GPS 與 GPS+BDS 於逐一時刻定位成果之比較



圖 12 逐一時刻定位成果(GPS vs. GPS+BDS)

五、結論

為了瞭解結合 GPS 以及 BDS 之後對於定位效能的影響,本研究探討在靜態定 位中,結合 BDS 之後對於連續站模式每日解精度與移動站模式的收斂時間及定位 精度與觀測時間之關係的影響,以及逐一時刻定位精度在加入 BDS 之後的改善效 益。根據實驗分析提出以下結論議:

(1)在靜態定位連續站模式中,GPS與GPS+BDS會有精度相似的每日解,在平面精度上幾乎一致,而高程精度則是GPS+BDS會略優於GPS。

- (2)在靜態定位移動站模式中,當觀測時間在2小時內GPS+BDS能夠明顯的提升定 位精度,而在觀測時間大於4小時之後可以預期GPS+BDS與GPS會有相似的定 位精度。在觀測時間小於2小時,GPS+BDS可以縮短定位精度達到預設精度門 檻值所需的時間。
- (3)在逐一時刻定位的部分, GPS+BDS 在平面精度及高程精度上分別約有 19%及 23%的提升。

#### 謝誌

作者感謝內政部地政司『107 年度 LiDAR 技術更新數值地形模型成果檢核與監 審工作案(案號: 106SU1215)』以及科技部計畫 104-2221-E-006-047-MY3 的支持。

#### 參考文獻

- Capilla, R. M., J. L. Berné, A. Martín and R. Rodrigo, 2016, Simulation case study of deformations and landslides using real-time GNSS precise point positioning technique, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), pp.1856-1873.
- Chu, F. Y. and M. Yang, 2014, GPS/Galileo long baseline computation: method and performance analyses, *GPS Solutions*, 18(2), pp.263-272.
- Dawidowicz, K. and G. Krzan, 2014, Accuracy of single receiver static GNSS measurements under conditions of limited satellite availability, *Survey Review*, 46(337), pp.278-287.
- Feng, L., E. M. Hill, P. Banerjee, I. Hermawan, L. L. H. Tsang, D. H. Natawidjaja, B.W. Suwargadi and K. Sieh, 2015, A unified GPS-based earthquake catalog for the Sumatran plate boundary between 2002 and 2013, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5), pp.3566-3598.
- Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya and Y. Ohta, 2016, Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, *Geoscience Letters*, 3(1), 25.
- Kalman, R.E., 1960, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of basic Engineering*, 82(1), pp.35-45.
- Larson, K.M., 2009, GPS seismology, Journal of Geodesy, 83(3), pp.227-233.
- Li, P. and X. Zhang, 2014, Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning, *GPS Solutions*, 18(3), pp.461-471.
- Shi, C., Q. Zhao, Z. Hu, J. Liu, 2013, Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites, *GPS Solutions*, 17(1), pp.103-119.
- Teunissen, P. J. G., 1995, The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation, *Journal of Geodesy*, 70(1), pp.65-82.
- Wang, J., C. Rizos, M. P. Stewart, A. Leick, 2001, GPS and GLONASS Integration: Modeling and Ambiguity Resolution Issues, *GPS Solutions*, 5(1), pp.55-64.

國土測繪與空間資訊 民國一〇八年一月 第七卷 第一期 第 15 頁至第 32 頁 Taiwan Journal of Geoinformatics Vol. 7, No. 1, pp. 15 ~ 32

### 以三維共軛覘標提昇

# 三維雷射掃描儀掃描建物效益之研究

林老生1\*、施宇鴻2

論文收件日期:106.02.28

論文修改日期:107.10.07

論文接受日期:107.10.22

#### 摘要

欲完成大規模建築體之掃描作業,除了應選擇適合之掃描設備外,於作業過程 中,更應考量掃描測站數量之多寡,因測站數量會直接影響掃描作業之成本與效益。 本研究將以三維雷射掃描儀作為掃描建築物之工具,採用三維共軛球型覘標作為相 鄰測站間之共軛覘標,比較分析較佳掃描作業與一般掃描作業方式,對金門大學圓 樓之掃描效益。依實驗結果顯示,倘若對大範圍之建築物體掃描,使用較佳掃描之 作業方式,不但,點雲接合精度合乎建築掃描規範;而且,由於增加掃描儀與共軛 覘標間之掃描距離,使得掃描時間及掃描測站數減少約25%~50%。

關鍵詞:三維共軛球型覘標、三維雷射掃描儀、掃描效益

<sup>1</sup> 教授,國立政治大學地政學系。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 碩士生,國立政治大學地政學系。

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> 通訊作者, TEL: (02)2939-3091 轉 50606, E-mail: <u>lslin@nccu.edu.tw</u>。

# Study on Promoting the Efficiency of Scanning Buildings by 3D Laser Scanner Using Conjugated 3D Sphere Markers

Lao-Sheng Lin<sup>1\*</sup>, Yu-Hong Shih<sup>2</sup>

#### Abstract

To scan the large scale architectures should not only choose the appropriate scanning tool, but also, consider the amount of laser scanner station in the process of scanning. The amount of laser scanner station would directly affect the cost and benefit of whole scanning process. The 3D laser scanner was selected as the scanning tool to the Round House of National Quemoy University, and 3D sphere marker used as the conjugated marker between neighborhood scanning stations. Two scanning approaches were proposed in this article, i.e. the most efficient way and the general way of scanning. According to the experiment result, while scanning the large scale architecture, the most efficient way can extend the scanning distance and take less time and stations, also achieve the same accuracy as the general way.

Keywords: 3D laser scanner, Conjugated 3D sphere marker, Scanning efficiency

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Master, Department of Land Economics, National Chengchi University.

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel: +886-2-29393091 ext. 50606, E-mail: lslin@nccu.edu.tw.

#### 一、前言

目前應用三維雷射掃描技術,仍以建置三維點雲模型為主,其應用領域包含三 維數位模型、數位典藏、多媒體展示等。以目前軟硬體設備來說,使用者僅需依循 作業手冊操作,便可完成三維點雲模型之擷取及建置,技術上並無太大困難處;然 而,在實際上則必須考量許多因素。以掃描建築物體為例,為完成大規模建築物體 之掃描作業,除了選擇適合之掃描儀器設備外,更應考量掃描測站之多寡,因測站 數量將會直接影響掃描作業之成本及效益。掃描測站之多寡,則決定於掃描儀與共 軛覘標間的掃描距離長短;若掃描距離可以放長,則所需的掃描測站可能減少。掃 描距離的長短,又與所用的圓形共軛覘標的直徑大小、共軛覘標是 2D 或 3D 等因 素有關(Becerik-Gerber et al., 2011;施宇鴻,2015;劉榮信,2010;蔡佳琳,2011)。

根據施宇鴻(2015)的實驗結果顯示,利用直徑分別為 12 公分及 14.5 公分之三 維共軛覘標,在 5 到 40 公尺等不同掃描距離下,比較加密與非加密(詳見第三節說 明)點雲資料求得的共軛覘標球心坐標精度,發現:(1)直徑為 12 公分之共軛覘標,掃 描距離在 25 公尺以內;(2)直徑為 14.5 公分之共軛覘標,掃描距離在 30 公尺以內 等情況下,非加密點雲資料求得的共軛覘標球心坐標精度與由加密資料求得者相當。 因此,為了探討以三維共軛覘標提升掃描建物效益,本實驗設計兩種掃描方式:一般 掃描作業及較佳掃描作業(詳見第三節說明)。以金門大學之圓樓為實驗區,利用 FARO Photon 120 雷射掃描儀為工具,搭配直徑為 14.5 公分及 12 公分之三維共軛 覘標,分別以一般掃描及較佳掃描等兩種作業方式,對圓樓實施掃描,經過點雲接 合及點雲模型建立等程序後,作有關掃描建物效益分析。

#### 二、相關理論與文獻回顧

#### (一) 三維雷射掃描技術

雷射掃描儀技術源起於 1960 年代,其原理為輻射激發光線之能量,形成雷射 光,且雷射光發出之光亮度比普通光源強,也比太陽光亮度強達 2500 億倍,其凝 聚性(Coherence)極高,又具有高反射性質,係利用雷射光發射與接收反射光能時間 差或相位差,其可測得雷射發射位置及反射位置之距離,因此於工程測量上早已應 用雷射光作為高精度距離測量(張明政,2004)。雷射掃描儀係以主動式之雷射光對 目標物表面掃描,所得之點雲資料可分為三維坐標值(X,Y,Z)及反射強度值(I),其 坐標原點通常為儀器之中心。解算掃描儀中心至掃描點之角度與距離,即可推算該 掃描點相對於掃描儀中心之(X,Y,Z)坐標;反射強度值,則為掃描儀接收反射光能, 透過掃描儀系統運算所得之物理量。而近年來,三維雷射掃描技術發展已相當成熟, 應用於工程測量之高精度雷射掃描儀陸續商業化,其可快速掃描待測物,不需反射 稜鏡即可直接獲取高密度之掃描點三維坐標(曾義星、史天元,2003);且此技術不 再受限於傳統人工測繪、數位相機及數位錄影等設備,透過三維雷射掃描儀(3D Laser Scanner),不論是時間、精度及便利性,都較傳統測繪方式優秀(曾威雄,2012)。 其獲取之三維向量資料,在後續應用可發揮全方位之功能,不但縮短作業時間、提升品質,同時降低作業成本,因此雷射掃描已逐步成為各領域之重要工具。

#### (二) 共軛覘標與掃描距離之關係

蔡佳琳(2011)提出改良的二階矩法計算公式,計算圓形覘標中心坐標及直徑差, 並透過直徑定義其判釋度,以不同尺寸二維覘標於不同掃描距離,進行「掃描距離 一覘標尺寸—覘標判釋度」三者關係建立。其研究成果顯示,若掃描一棟建物,使 用直徑 12 公分之圓形覘標,距離掃描儀 30 公尺處掃描,假設需要 20 個掃描測站; 若換成 18 公分之圓形覘標,距掃描儀 35 公尺,則僅需要 12 個掃描測站即可完成 相同工作,減少 8 個掃描測站之操作時間。

Becerik-Gerber 等(2011)以不同共軛覘標類型和佈局,探討擺設覘標時間、架設 掃描儀之時間及掃描時間。實驗結果顯示,於室內或室外對不同覘標掃描,三維覘 標比二維覘標在擺設覘標時間上,節省約15%之時間;雖然於架設掃描儀及擺設覘 標,掃描三維覘標比二維覘標多花2%之時間;但在掃描時間上,三維覘標較二維 覘標節省8%時間。可以明顯得知,使用三維覘標掃描優於二維覘標。

施宇鴻(2015),利用直徑分別為 12 公分及 14.5 公分之三維共軛覘標,在 5 到 40 公尺等不同掃描距離下,比較加密與非加密(詳見第三節說明)點雲資料求得的共 軛覘標球心坐標精度,發現:(1)直徑為 12 公分之共軛覘標,掃描距離在 25 公尺以 內;(2)直徑為 14.5 公分之共軛覘標,掃描距離在 30 公尺以內等情況下,非加密點 雲資料求得的共軛覘標球心坐標精度與由加密資料求得者相當。

#### 三、實驗資料與方法

#### (一) 實驗用之掃描儀與三維共軛覘標

本研究採用 FARO Photon 120 機型之雷射掃描儀作為研究使用之設備,其規格如表1所示。其有效掃描距離為153公尺,掃描速度為每秒976,000點坐標資料, 掃描測距原理為連續波相位差時間法,其水平向旋轉360度,垂直向旋轉320度。



表 1 FARO Photon 120 規格表

表2所示為FARO Photon 120之幾種不同的點雲密度、掃描速度及點雲分辨率。 其中,點雲密度為1/4、其點雲分辨率設置於6.136 mm/10m、掃描速度為244,000 點/秒,此密度之掃描精度(以下,簡稱為一般掃描)已符合建築掃描規範1公分以內 之要求(Stuart Gordon et al., 2000;陳煜文,2015)。

點雲密度	掃描速度	點雲分辨率
1 / 1	976,000 點/秒	1.534 mm / 10 m
1 / 2	488,000 點/秒	3.068 mm / 10 m
1 / 4	244,000 點/秒	6.136 mm / 10 m
1 / 8	122,000 點/秒	12.272 mm / 10 m

表 2 FARO Photon 120 之點雲密度、掃描速度及點雲分辨率

不同之點雲密度,取決於掃描目標物之遠近及其效益。通常選用1/1之點雲密度,於加密掃描時使用,對於較細緻之小型文物進行加密掃描;而1/2之點雲密度 多用於整面牆有較多細緻之目標物,且又可以較於1/1節省1倍時間;而1/4多 用於一般建築物掃描(通常稱為非加密掃描),其精度除可符合建築規範要求外,又 可以獲取足夠之點雲量進行點雲接合;1/8之點雲密度多用於大範圍建築物體掃描, 其掃描獲取之點雲數量雖較不足,但足以將點雲接合後,用於大範圍建築物體點雲 模型展示。

FARO Photon 120 掃描儀, 係利用反射稜鏡等角旋轉, 以獲取垂直方向與水平 方向之三維資料, 掃描時反射稜鏡旋轉角度會依照設定之點間距而改變。掃描待測 物(如建築物體)時,應架設多個測站,而每一測站皆會有獨立之坐標系統。因此, 如要建立待測物之三維點雲模型,必須將所有測站所獲取之點雲資料進行接合,而 點雲接合則有賴特徵點接合(例如:二維反射覘標、三維共軛覘標等)。因此,本研究後續的實驗,將採用 FARO Photon 120 掃描儀,搭配已知直徑分別為 14.5 公分及 12 公分之共軛覘標(如圖 1 所示)。



圖1兩種尺寸之三維共軛覘標

#### (二) 實驗區

本研究於金門大學選定一棟建物,圓樓(如圖 2 所示),作為不同掃描效益分析 之實驗區,該目標物為一圓形之建築物體,其樓地板面積為 2715.59 平方公尺,樓 高為 15 公尺。



圖2 金門大學圓樓

#### (三) 實驗方法

由於實驗區為一般建物,所以,採用掃描儀之點雲密度為 1/4(即為一般掃描, 或非加密掃描)(Stuart Gordon et al., 2000;陳煜文, 2015)。另一方面,根據實驗結果 顯示:(1)共軛覘標的大小與掃描效益有直接關係(如蔡佳琳, 2011);(2)使用三維共軛 覘標的掃描效益,優於二維共軛覘標(如 Becerik-Gerber et al., 2011)。又根據施宇鴻 (2015)的實驗結果顯示,利用直徑分別為 12 公分及 14.5 公分之共軛覘標,在 5 到 40 公尺等不同掃描距離下,比較加密與非加密點雲資料求得的共軛覘標球心坐標精 度,發現:(1)直徑為 12 公分之共軛覘標,掃描距離在 25 公尺以內;(2)直徑為 14.5 公分之共軛覘標,掃描距離在 30 公尺以內等情況下,非加密點雲資料求得的共軛 覘標球心坐標精度與由加密資料求得者相當。因此,為了探討以三維共軛覘標提升 掃描建物效益,本實驗設計兩種掃描方式:一般掃描作業及較佳掃描作業。

所謂一般掃描作業,點雲密度為 1/4,對應直徑 12 及 14.5 公分共軛覘標的掃描 距離分別為 15 及 20 公尺。另一方面,較佳掃描作業,點雲密度為 1/4,對應直徑 12 及 14.5 公分共軛覘標的掃描距離分別為 25 及 30 公尺。

實驗進行步驟,包含:(1)實際建物掃描:分別利用上述一般掃描作業、較佳掃 描作業方式,對圓樓掃描,並分別將有關之掃描時間、測站數量、掃描距離等資料 記錄,以供後續分析之用。至於,擺放共軛覘標之方法,則係以四邊形之方式擺置, 但會避免三顆以上之共軛覘標於同一直線上(如圖 3 所示),且會盡可能使共軛覘標 不在同一平面上之方式擺設。(2)檢核共軛覘標之接合精度:利用 FARO Scene 處理建 物點雲資料,以共軛覘標進行參數轉換及套疊,檢核共軛覘標之接合精度。(3)點雲 模型與分析:如果點雲接合精度在誤差範圍內(依建築掃描規定(Stuart Gordon et al., 2000;陳煜文,2015),建築物掃描之點雲接合精度應小於 1 公分以內),則可併接 點雲模型,以供分析。(4)掃描建物效益分析:針對一般掃描作業及較佳掃描作業所 需共軛覘標大小、掃描距離、所需測站個數、所需掃描時間等因素,分析比較其掃 描建物效益。



圖 3 共軛覘標之擺設方式

#### 四、實驗成果與討論

#### (一) 實際建物掃描

1.一般掃描作業,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 15 公尺

於一般掃描作業情況下,使用直徑 12 公分之共軛覘標,會將共軛覘標放置距 離掃描儀 15 公尺處,並選定任一處為起始點,且將共軛覘標之擺設位置記錄於地 面上,供掃描回起始點之共軛覘標位置不變,以利共軛覘標進行參數轉換與套疊。 以上述作業方式,實際掃描實驗對象,繞建築物一圈需要擺設8個測站方能完成建 物掃描(如圖 4 所示,圖中紅色圓圈代表擺設掃描儀的測站),其耗時約為 3 小時, 由於擺設站位較為均匀分佈,故獲取研究對象之點雲資料也較為完整。



圖 4 直徑 12 公分共軛覘標距離掃描儀 15 公尺之測站示意圖

2.一般掃描作業,直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 20 公尺

於一般掃描作業情況下,以直徑 14.5 公分之共軛覘標,距離掃描儀 20 公尺之 方式掃描,繞建築物一圈需要擺設 6 個測站(如圖 5 所示),方能完成建築物掃描, 其耗時約為 2 小時 15 分鐘,由於掃描距離有稍微拉開,因此有四個測站數中間之 點雲資料較為欠缺,但研究對象之點雲資料尚能夠清晰辨識該建築物,所以此資料 算完整接合。

3.較佳掃描作業,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 25 公尺

在較佳掃描作業情況下,使用直徑 12 公分之共軛覘標,距離掃描儀 25 公尺, 繞建築物一圈需擺設 6 個測站(如圖 6 所示),方能完成建築物掃描,其耗時約為 2 小時 15 分鐘,由於掃描距離有稍微拉開,因此有四個測站數中間之點雲資料較為 欠缺,但研究對象之點雲資料尚能夠清晰辨識該建築物,所以此資料算完整。



圖 5 直徑 14.5 公分共軛覘標距離掃描儀 20 公尺之測站示意圖



圖 6 直徑 12 公分共軛覘標距離掃描儀 25 公尺之測站示意圖

4.較佳掃描作業,直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 30 公尺

在較佳掃描作業情況下,以直徑 14.5 公分之共軛覘標,距離掃描儀 30 公尺, 繞建築物一圈需擺設 4 個測站(如圖 7 所示),方能完成建築物掃描,其消耗時間為 1 小時 30 分鐘,但掃描所擺設之站位間距有更加拉大,因此測站彼此間之點雲資料 較為欠缺,且兩側所獲取之點雲資料較不完整,但能夠進行資料處理與辨識研究對 象,故屬於接受範圍內。

5.小結

表 3 所示,為上述一般掃描與較佳掃描所需測站個數與掃描時間之比較表。根 據表 3 結果,可以歸納出:(1)在一般掃描作業下,採用直徑 14.5 公分的共軛覘標, 可以較採用直徑 12 公分的共軛覘標,少掉 2 個測站,相對的節省 25%的掃描時間(約 45 分)。(2)在較佳掃描作業下,採用直徑 14.5 公分的共軛覘標,可以較採用直徑 12 公分的共軛覘標,少掉 2 個測站,但是,可以節省 33%的掃描時間(約 45 分)。(3) 共軛覘標的直徑不管是 14.5 公分或是 12 公分,若採用較佳掃描作業,均可較一般 掃描作業節省 25%的掃描時間(約 45 分)。(4)若純就所需作業時間比較,採用直徑 14.5 公分的共軛覘標,以較佳掃描作業,則比採用直徑 12 公分的共軛覘標,以一 般掃描作業,在掃描時間尚可節省到 50%(約 90 分)。



圖 7 直徑 14.5 公分共軛覘標距離掃描儀 30 公尺之測站示意圖

作業方式	覘標直徑尺寸	掃描距離	測站個數	掃描時間
一机掃井	12 cm	15 m	8	3小時
一	14.5 cm	20 m	6	2小時15分鐘
訪化培业	12 cm	25 m	6	2小時15分鐘
蚁住师佃	14.5 cm	30 m	4	1小時30分鐘

表3 一般掃描與較佳掃描所需測站個數與掃描時間之比較表

#### (二) 檢核共軛覘標之接合精度

實際將建築物掃描後,其內業點雲資料處理如圖 8 之流程圖,獲取點雲資料後,將使用 FARO Scene 處理其點雲資料。首先將清除點雲資料雜訊,可透過軟體直接給予門檻值,並將雜訊剔除(如圖 9 打勾處,其門檻值為原廠建議參數值)。

濾除點雲資料之雜訊點後,便可利用共軛覘標進行參數轉換與套疊,假設有四 個測站(如A、B、C及D),掃描後獲取各站之點雲資料需透過共軛覘標進行接合, 並確認兩兩測站間之共軛覘標是否通視,然後將A測站與B測站之共軛覘標透過七 參數轉換,使B測站坐標系統之點雲轉換至A測站之坐標系統,依序將C、D測站 透過兩兩測站之共軛覘標轉換,將所有點雲轉換至A測站坐標系統,使之具有相同 坐標系統。而這種方式係透過點選共軛覘標並給予編號,依序從第一測站至最後一 測站,將所有共軛覘標給予編號(詳細如各組實驗,如圖10),即可將該筆資料之所 有測站轉換至相同坐標系統,此步驟稱為點雲接合。

在點雲接合階段,點選共軛覘標相當重要。正常情況下,若FARO Scene 能夠 辨識共軛覘標,所點選之共軛覘標則會呈現綠色圓圈(如圖 10b),但若共軛覘標放 置過遠,其所點選之共軛覘標則會呈現黃色圓圈(如圖 10a)。而綠色圓圈及黃色圓圈 則代表軟體對於共軛覘標,辨別球心位置精度之優劣情況,綠色表示位置精度成果 佳;而黃色則表示位置精度稍差。

透過上述之方法,將共軛覘標依序編號後,其站與站之點雲將利用共軛覘標球 心坐標進行坐標轉換,並可將點雲接合拼接成點雲模型,但還需瞭解該點雲資料之 接合精度,判斷點雲模型是否符合作業要求?



圖 8 點雲資料處理流程

1.一般掃描作業,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 15 公尺

在一般掃描作業下,直徑 12 公分之共軛覘標,距離掃描儀 15 公尺之點雲接合 精度如表 4 所示,最大誤差值為第八測站 2.8 mm,最小誤差值為第七測站 2.4 mm, 但其誤差皆在建築掃描規範內之精度要求。依建築掃描規範規定,建物掃描之點雲 接合精度應於 1 公分以內(Stuart Gordon et al., 2000;陳煜文, 2015)。

📝 首次加载处理		
🔽 过滤深色扫描点		
反射系数阈值:	200	
📝 过滤离群扫描点		
栅格尺	3	[像素]
距离阈值:	0.02	[m]
分配阈值:	33.3	[%]
自动检测特征		
■球	🔄 拐角点	
■棋盘板	🕅 矩形	
🔲 直线		
🥅 从标记创建对象		
📃 更新对象拟合		
🔲 应用图片		
▶ 导出图像		
🕅 布置扫描		

圖 9 清除點雲資料雜訊



(a) 點選第一組共軛覘標

(b) 點選第三組共軛覘標

圖 10 點選共軛覘標示意圖

农工量在10 AA 《八和乾你起降师福禄10 AA 《加去按日祝父				
擬合對象	平均誤差(m)	掃描測站檔名		
ScanFit -第八測站	0.0028	20150520008		
ScanFit -第一測站	0.0027	20150520001		
ScanFit -第五測站	0.0027	20150520005		
ScanFit -第四測站	0.0026	20150520004		
ScanFit -第六測站	0.0025	20150520006		
ScanFit -第三測站	0.0025	20150520003		
ScanFit -第二測站	0.0024	20150520002		
ScanFit-第七測站	0.0024	20150520007		

表4直徑12公分之共軛覘標距離掃描儀15公尺之點雲接合精度

2.一般掃描作業,直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 20 公尺

在一般掃描作業下,直徑 14.5 公分之共軛覘標,距離掃描儀 20 公尺之點雲接 合精度如表5所示,最大誤差值為第四測站1.5 mm,最小誤差值為第二測站0.9 mm, 其誤差皆在建築掃描規範內之精度要求。

擬合對象	平均誤差(m)	掃描測站
ScanFit -第四測站	0.0015	20150520012
ScanFit -第五測站	0.0015	20150520013
ScanFit -第六測站	0.0015	20150520014
ScanFit -第三測站	0.0013	20150520011
ScanFit -第一測站	0.0012	20150520009
ScanFit -第二測站	0.0009	20150520010

表 5 直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 20 公尺之點雲接合精度

3.較佳掃描作業,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 25 公尺

在較佳掃描作業下,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 25 公尺之點雲接合精度如表 6 所示,最大誤差值為第二測站 1.6 mm,最小誤差值為第六測站 1.0 mm, 其誤差皆在建築掃描規範內之精度要求。

NO EE TO AN					
擬合對象	平均誤差(m)	掃描測站			
ScanFit -第二測站	0.0016	20150520017			
ScanFit -第五測站	0.0015	20150520020			
ScanFit -第一測站	0.0015	20150520016			
ScanFit -第四測站	0.0014	20150520019			
ScanFit -第三測站	0.0011	20150520018			
ScanFit -第六測站	0.0010	20150520021			

表 6 直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 25 公尺之點雲接合精度

4.較佳掃描作業,直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 30 公尺

在較佳掃描作業下,直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 30 公尺之點雲接合 精度如表7所示,其最大誤差值為第一測站6.4 mm,最小誤差值為第三測站4.9 mm, 其誤差皆在建築掃描規範內之精度要求。

5.小結

表 8 所示,為一般掃描與較佳掃描點雲接合精度之平均誤差比較表。根據建築 掃描規範規定,建物掃描之點雲接合精度應於1公分以內(Stuart Gordon et al., 2000; 陳煜文,2015)。由表 8 的結果顯示,本實驗一般掃描與較佳掃描等 4 個狀況之點雲 接合精度之平均誤差大約在 0.9 至 6.4 mm 之間,皆小於1公分,因此,皆合乎建築 掃描規範規定。

擬合對象	平均誤差(m)	掃描測站
ScanFit -第一測站	0.0064	20150520022
ScanFit -第二測站	0.0056	20150520023
ScanFit -第四測站	0.0056	20150520025
ScanFit -第三測站	0.0049	20150520024

表7直徑14.5公分之共軛覘標距離掃描儀30公尺之點雲接合精度

表8 一般掃描與較佳掃描點雲接合精度之平均誤差比較表

作業方式	覘標直徑尺寸	掃描距離	測站個數	點雲接合精度 之平均誤差
一般掃描	12 cm	15 m	8	2.4~2.8 mm
	14.5 cm	20 m	6	0.9~1.5 mm
較佳掃描	12 cm	25 m	6	1.0~1.6 mm
	14.5 cm	30 m	4	4.9~6.4 mm

(三) 點雲模型與分析

因點雲接合精度皆在誤差範圍內,因此可拼接為點雲模型。成果如下: 1.一般掃描作業,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 15 公尺

使用直徑 12 公分之共軛覘標,以 15 公尺之方式擺設共軛覘標,繞建築物一圈

需使用 8 個掃描測站,其掃描之點雲資料如圖 11 所示,相當完整,連鄰近之建築物及道路都非常清楚。

2.一般掃描作業,直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 20 公尺

使用直徑 14.5 公分之共軛覘標,以 20 公尺之方式擺設共軛覘標,繞建築物一 圈使用 6 個掃描測站,其掃描之點雲資料相當完整(如圖 12 所示),圓樓附近之道路 都非常清楚,惟鄰近之建築物僅有一部份。



圖 11 直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 15 公尺之正立面點雲模型



圖 12 直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 20 公尺之正立面點雲模型

3.較佳掃描作業,直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 25 公尺 使用直徑 12 公分之共軛覘標,以 25 公尺之方式擺設共軛覘標,繞建築物一圈 使用6個掃描測站,其掃描之點雲資料(如圖13所示),除了建築物之相關門窗尺寸 稍不清楚外,其餘掃描之點雲資料能夠完整呈現建築物,而鄰近之建築物及道路尚 能依稀判釋。



圖 13 直徑 12 公分之共軛覘標距離掃描儀 25 公尺之正立面點雲模型

4.較佳掃描作業,直徑14.5公分之共軛覘標距離掃描儀30公尺

由圖 14 可以看出,使用直徑 14.5 公分之共軛覘標,以 30 公尺之方式擺設共軛 覘標,繞建築物一圈僅使用 4 掃描測站,除建築物門窗尺寸無法清晰辨識外,連建 築物外牆尚有許多部份缺漏,但以整體模型而言,能夠清晰辨識建築物之形狀,僅 建築物本體及周遭環境較不完整。



圖 14 直徑 14.5 公分之共軛覘標距離掃描儀 30 公尺之正立面點雲模型

#### (四) 掃描建物效益分析

經過前述實際建物掃描、檢核共軛覘標之接合精度、點雲模型與分析等實驗成 果顯示:(1)採用直徑 14.5 公分或 12 公分的共軛覘標,無論以一般掃描作業或較佳掃 描作業方式對圓樓掃描,其點雲接合精度接合乎建築掃描規範規定;而且,掃描之 點雲資料,可以併接完整點雲模型。(2)在一般掃描作業下,採用直徑 14.5 公分的 共軛覘標,可以較採用直徑 12 公分的共軛覘標,少掉 2 個測站,節省 25%的掃描 時間(約 45 分)。(3)在較佳掃描作業下,採用直徑 14.5 公分的共軛覘標,可以較採 用直徑 12 公分的共軛覘標,少掉 2 個測站,節省 33%的掃描時間(約 45 分)。(4)若 採用直徑 14.5 公分的共軛覘標,以較佳掃描作業,則比採用直徑 12 公分的共軛覘 標,以一般掃描作業,在掃描時間尚可節省到 50%(約 90 分)。

#### 五、結論

本文以金門大學之圓樓為實驗區,利用 FARO Photon 120 雷射掃描儀為工具, 搭配直徑為 14.5 公分及 12 公分之三維共軛覘標,設計一般掃描及較佳掃描等兩種 作業方式,對圓樓實施掃描、點雲接合及點雲模型建立等,以探討三維共軛覘標提 升三維雷射掃描儀掃描建物效益。

根據研究成果顯示:(1)採用直徑 14.5 公分或 12 公分的三維共軛覘標,無論以一般掃描作業或較佳掃描作業方式對圓樓掃描,其點雲接合精度接合乎建築掃描規範規定;而且,掃描之點雲資料,可以併接完整點雲模型。(2)在一般掃描作業下,採用直徑 14.5 公分的共軛覘標(掃描距離為 20 公尺),可以較採用直徑 12 公分的共軛 覘標(掃描距離為 15 公尺),節省 25%的掃描時間。(3)在較佳掃描作業下,採用直徑 14.5 公分的共軛覘標(掃描距離為 30 公尺),可以較採用直徑 12 公分的共軛覘標 (掃描距離為 25 公尺),節省 33%的掃描時間。(4)若採用直徑 14.5 公分的共軛覘標, 以較佳掃描作業(掃描距離為 30 公尺),則比採用直徑 12 公分的共軛覘標, 以較佳掃描作業(掃描距離為 30 公尺),則比採用直徑 12 公分的共軛覘標(掃描距離 為 15 公尺),以一般掃描作業,在掃描時間尚可節省到 50%。

由於本文實驗成果,尚未加入距離誤差改正模式。因此,未來若增加距離誤差 改正模式,或許能將點雲模型接合精度有所提昇,進一步提升掃描效益。

30

#### 參考文獻

- 施宇鴻,2015,《以三維共軛覘標提昇三維雷射掃描儀掃描精度及建物效益之研究》, 國立政治大學碩士論文。
- 陳煜文,2015,《應用地面光達監測結構物之精度分析》,國立台北科技大學碩士論 文。
- 張明政,2004,《三維雷射掃描技術應用於戶地測量之研究—以建物為例》,國立中 興大學碩士論文。
- 曾義星、史天元,2003,三維雷射掃描儀:新一代測量利器,《科學發展》,第365期, 頁16-21。
- 曾威雄,2012,《三維雷射掃描儀在松山菸廠歷史建築應用之研究》,中國文化大學 碩士論文。
- 劉榮信,2010,《地面 3-DLiDAR 技術應用於重要點位裸露邊坡地滑監測模式建立 之研究》,國防大學理工學院碩士論文。
- 蔡佳琳,2011,《不同共軛覘標尺寸對於三維點雲模型套疊精度影響之研究-以FARO 120地面光達為例》,國立金門大學碩士論文。
- Becerik-Gerber, B., F. Jazizadeh, G. Kavulya and G. Calis, 2011, Assessment of Target Types and Layouts in 3D Laser Scanning for Registration Accuracy, *Automation in Construction*, 20(5), pp.649-658.
- Stuart Gordon, D. D. Lichti, M. P. Stewart and M. Tsakiri, 2000, Metric Performance of a High – Resolution Laser Scanner, *International Society for Optics and Photonics*, 4309, pp.174-185.

國土測繪與空間資訊 第七卷第一期

國土測繪與空間資訊 民國一〇八年一月 第七卷 第一期 第 33 頁至第 68 頁 Taiwan Journal of Geoinformatics Vol. 7, No. 1, pp. 33~66

## 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究

# - 同震格點位移模型新增時機之探討

蕭詩涵1、景國恩2\*、陳國華3、周逸屏4、陳鶴欽5、林文勇6

論文收件日期:107.10.22

論文修改日期:107.12.06

論文接受日期:107.12.15

#### 摘要

臺灣位處歐亞板塊及菲律賓海板塊之交界。由於板塊的相對運動,國家基本控 制點間之網形會因塊體相對位移而扭曲變形,造成臺灣現行之靜態坐標系統 TWD97[2010]逐漸失去原有的精度。而在原有靜態坐標基準中加入地表變形模型之 半動熊坐標基準,則是維護臺灣坐標基準精度之有效方法。其中,「同震格點位移 模型」是地表變形模型中的其中一個重要元素,但是該如何決定新增同震格點位移 模型的時機?為了解決這個問題,本研究首先分析GNSS連續站坐標時間序列,確 認臺灣地區GNSS之平面坐標精度約為18mm。換言之,當地震同震位移量大於18 mm,就可以被現行之GNSS觀測網記錄到。此外,由於中央氣象局在地震發生後所 提供的即時地震資訊為地震位置、深度與區域地震規模(ML),因此本研究透過臺灣 及其鄰近地區之背景地震分布,搭配斷層正演模型,搜尋會對臺灣陸地造成最大地 表同震位移量可能超過18 mm之地震的震源位置、深度與規模。根據模型結果顯示, 要在臺灣陸域產生大於 18 mm之同震水平位移量,其地震規模至少要超過ML 6.1; 越遠離臺灣陸域,則所需的最小地震規模就越大。此外,隨著震源深度的增加,所 需的最小地震規模亦由ML 6.1 增加至約ML 6.4。最後,本研究蒐集自 1999 年集集 地震後,臺灣地區已發表之地表同震位移場文獻,驗證本研究所建議之時機的正確 性。

關鍵詞:半動態基準、地表變形模式、同震格點位移模型、斷層正演模型

<sup>1</sup> 碩士生,測量及空間資訊學系,國立成功大學。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 副教授,測量及空間資訊學系,國立成功大學。

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 副教授,不動產與城鄉環境學系,國立臺北大學。

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>專任助理,不動產與城鄉環境學系,國立臺北大學。

<sup>5</sup> 課長,內政部國土測繪中心。

<sup>6</sup> 技正,內政部國土測繪中心。

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> 通訊作者, TEL: (06) 2757575 轉 63840, E-mail: <u>jingkuen@mail.ncku.edu.tw</u>。

# **Coseismic Grid Displacement Model of**

# the Semi-dynamic Datum in Taiwan

Shih-Han Hsiao<sup>1</sup>, Kuo-En Ching<sup>2</sup>\*, Kwo-Hwa Chen<sup>3</sup>, Yi-Ping Chou<sup>4</sup>, He-Chin Chen<sup>5</sup>, Wen-Yung Lin<sup>6</sup>

#### Abstract

Taiwan is located at the boundary between the Eurasian and Philippine Sea plates. The accuracy of static geodetic datum TWD97[2010] in Taiwan is therefore gradually decreasing because the network geometry of the control points is distorted due to the relative motions among plates. The semi-dynamic geodetic datum which contains the surface deformation model is proposed to maintain the accuracy of geodetic datum. The coseismic grid displacement model is one component in the surface deformation model. However, it is unclear that whether the earthquake size is large enough and its location is proper to build a coseismic grid displacement model when an earthquake occurs. To answer this question, the resultant precision of approximately 18 mm according to the analysis of continuous GNSS time series was first estimated in horizontal coordinate at Taiwan in this study. Because only three parameters, including the epicenter, focal depth and ML, related to the coseismic surface displacement are announced in the rapid report by Central Weather Bureau, the background seismicity in Taiwan area and the forward fault modeling based on aforementioned three parameters were adopted to estimate the locations and sizes of earthquakes surrounding Taiwan which may generate the inland displacement larger than 18 mm. Based on the modeling results, the size of earthquake should exceed ML 6.1. The farther from the land area of Taiwan, the required magnitude is larger. As the focal depth increases, the required minimum magnitude also increases from ML 6.1 to ML 6.4. Finally, the published coseismic displacement fields since 1999 Chi-Chi earthquakes were collected to confirm the correctness of the forward modeling results in this study.

**Keywords**: Coseismic grid displacement model, Semi-dynamic datum, Surface deformation model, Forward fault model

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Associate Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Administrative Officer, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Section Chief, National Land Surveying and Mapping Center.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Specialist, National Land Surveying and Mapping Center.

<sup>\*</sup> Corresponding Author, TEL: +886-6-2757575\*63840, E-mail: jingkuen@mail.ncku.edu.tw.
# 一、前言

大地基準為國家大地測量領域的重要基礎,也是各項測量工作的計算依據,測 量成果的優劣直接受其影響,進而與國家建設、人民權益及學術發展有重要的關聯 性。臺灣目前使用之國家大地基準 TWD97[2010]為一「靜態」大地基準,應具良好 的穩定性及精確性。然而如同日本與紐西蘭等位處於板塊邊界之國家(Grant and Pearse, 1995; Yoshiyuki et al., 2007),臺灣同樣也位處歐亞板塊及菲律賓海板塊的交 界,屬於地殼活躍的地區,在板塊相互擠壓的影響下,使得基本控制點的坐標精度 逐漸下降,也進而造成 TWD97[2010]失去其原有的精度而不敷使用(景國恩等, 2017)。

實務上,維護國家大地基準精度之方式有三,一為定期辦理全面國家基本控制 點檢測,如 TWD97 至 TWD97[2010]。然而此項作業需要消耗大量人力與測繪經費, 因此除非遭遇如大規模地震等重大事件,造成顯著之大規模地表位移而需實施全面 檢測外,短期間內頻繁辦理全面國家基本控制點檢測作業將使國家測繪業務成本過 高。二為「半動熊基準」之概念,在既有之靜熊坐標基準中考慮地殼變形的影響, 以地表變形模式取代傳統坐標轉換參數,將不同時期不同地區之測量成果轉換至靜 態基準公告時刻之坐標。最後則為「動態基準」,在此基準中控制點坐標會考慮地 殼變形特性而隨著時間變動,亦即控制點坐標會持續更新至當下時刻之正確坐標。 其中,動態基準確最能隨時反映實際地表變動之現狀,非常適合用於地質研究或其 他有即時準確坐標需求之使用者。然而就地籍或控制測量,由管理者之角度觀之, 控制點坐標隨著時間變化而持續變動之特性,將造成測繪成果不易管理;而以使用 者角度來看,欲使用不同時刻之坐標成果時,需另外加以整合始得使用,亦增加其 使用上之不便。因此,考慮地籍或控制測量管理者與使用者之需求,在板塊活動尤 其快速的臺灣地區,半動熊基準之概念是目前較合適之國家大地基準維護方式 (郭 徐伸,2014;景國恩等,2017)。為採用半動熊基準之概念來維護大地基準之精度, 則需建立地表變形模式來模擬板塊穩定運動速率及瞬間變形事件所造成的地表變 形(Grant and Pearse, 1995; Yoshiyuki et al., 2007; 景國恩等, 2017)。地表變形模式由 表示震間運動之「震間格點速度模型」以及表示如地震等瞬間變形事件之「同震格 點位移模型」所組成。然而作為國家坐標基準,半動態基準之建立與維護,在實務 應用上需要兼顧即時性與正確性。亦即在地震發生時,如何即時決定是否新增同震 格點位移模型,並快速建立正確與符合實務應用之同震格點模型是非常重要的關鍵。 快速建立正確與符合實務應用之同震格點模型部分,已經在景國恩等(2017)中進行 討論,因此本研究將聚焦在探討同震格點位移模型更新之時機。

由於地震之發生會造成地表不均匀的永久位移(Yang et al., 2000),使大地基準的精度隨著地震數目的增加而快速降低。因此,同震格點位移模型必需適時更新以對應實際地表位移,維護大地基準之精度。然而,並不是每一個地震的發生都需要建立對應之同震格點位移模型,其控制因素主要包含兩點:(1)現有測量技術所能提供之坐標精度;(2)該地震造成之最大地表位移量。換言之,只有當地震造成之最大

同震地表位移量超過現有測量技術所能提供之坐標精度時,才需要新增半動態基準 中之同震格點位移模型。由於中央氣氣象局在地震發生後公告之地震速報內容中, 僅有地震震央位置、震源深度與地震規模(ML)和地表同震位移有關,因此本研究將 針對這些參數探討同震格點位移模型新增時機之判斷。

在本研究中,首先(1)藉由 GNSS 連續站坐標時間序列之分析工作,了解臺灣各 地區 GNSS 連續站之坐標平均精度。接著,(2)本研究利用斷層正演模型,並透過背 景地震之分析建立臺灣地區之可能地震震央位置與震源深度三維網格,推求各網格 造成最大同震地表位移量超過現有測量技術所能提供之坐標精度的最小地震規模 (M<sub>L</sub>)。換言之,當任一地震發生時,根據中央氣象局地震速報系統提供之地震位置 與深度,對應本研究之網格參數資料,若速報系統提供之地震規模大於本網格建議 之最小地震規模,該地震之同震格點位移模型就需要進行新增以維護臺灣半動態基 準之精度。

# 二、GNSS 連續站坐標精度之探討

測站資料所提供之精度,為建立半動態基準之地表變形模式時最基本之誤差來 源。換言之,以 GNSS 資料所建立之半動態大地基準整體精度,不可能高於測站資 料之精度,因此觀測資料的精度值可為後續法規建立提供重要的參考依據。由於 GNSS 連續站之設站特性可免除定心定平所造成之人為測量誤差,因此,一般認為 GNSS 連續站之坐標精度為現有實務監測手段中精度最高之測量技術,且未來之半 動態基準精度維護,也將建議採用 GNSS 連續站來進行,故本研究首先藉由 GNSS 連續站坐標時間序列之分析工作,了解臺灣各地區 GNSS 測量之坐標精度。經由 GNSS 連續站坐標精度之分析,可以提供本研究以下兩項重要資訊:(1)半動態基準 的建議精度規範;(2)同震格點位移模型新增時機要素中之最大地表位移量標準。

(一)GNSS 坐標時間序列之擬合

本研究首先利用基線解算處理軟體 Bernese 5.2 解算各 GNSS 連續測站之坐標成 果,各測站的解算坐標採用最小約制金門站(KMNM)在 TWD97[2010]下之公告坐標。 接著則參考修改自 Nikolaidis (2002)之坐標時間序列擬合模式,進行地表運動速率以 及地震瞬時位移等事件之擬合:

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_g} g_i \cdot H(t_i - T_{eq}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_i \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot t_i + v_i$$
(1)

其中,a為初始坐標,b為震間期(interseismic period)之地殼運動速率,g表示瞬間 永久位移,可能為地震造成之同震位移或人為之天線盤更換,h為震後線性速率改 變量,H為階梯函數(Heaviside step function),v為殘差(如圖 1a)。 蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



圖 1 (a)測站 BALN 坐標時間序列擬合結果。紅色圓圈為原始坐標時間序列,藍色圓 圈為坐標計算值,綠線為擬合曲線。(b)測站 BALN 殘差之時間序列結果。紅色圓圈 為移除地表運動速率及地震瞬時位移等事件後之殘差值。

在同震位移擬合的部分,本研究主要針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、 2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震,以及 2016 年美濃地震等之重大地震事件進行 擬合。然而,如果測站也記錄到其他如地滑等永久位移的小區域事件,本研究也會 進行擬合。針對非線性震後變形的擬合,由於本研究的目的不在於震後變形之特性 研究,而是為了釐清 GNSS 測站之精度,所以在有大量觀測資料的前提下,本研究 採用不同時段之不同速率這種簡化方法來達成對時間序列非線性變形的擬合。

完成臺灣地區各 GNSS 連續站 2000 年 1 月至 2017 年 9 月之坐標時間序列擬合後,為了合理的評估 GNSS 測站之坐標精度,本研究進一步移除坐標時間序列中之所有訊號(圖 lb),分析時間序列中殘差值之離散程度來了解各測站 E、N、U 分量之精度。由於在未來之應用上,將採用自動即時解算與偵測,因此本研究並沒有移除共通誤差(common-mode error)來提高坐標精度。接著,本研究將所得之各測站坐標精度進行統計分析,獲得臺灣地區整體測站平面與高程坐標精度之分布情形。各測站坐標分量精度值經由統計分析後獲得之標準差越小,則代表該地區之坐標精度具有接近的品質,反之則代表各測站精度之落差越大。



圖 2 臺灣地區 2000 至 2017 年 GNSS 連續站之坐標精度統計圖。各圖中之粗黑線為 平均值;兩條細灰線則標示出 99%可信區間的範圍。(a) E 分量之坐標精度統計圖。 (b) N 分量之坐標精度統計圖。(c)平面坐標之精度統計圖。(d)高程坐標之精度統計 圖。

(二)GNSS 連續站坐標精度之估算

根據各 GNSS 連續站之坐標時間序列擬合與統計分析成果指出(圖 2),在 68% 信賴區間下,臺灣整體測站 E 分量坐標精度為 4.8 ± 2.4 mm,N 分量之精度值為 3.4 ± 1.4 mm,整體平面精度值為 6.0 ± 2.6 mm,高程精度則為 13.0 ± 4 mm。若取三倍 標準差(99%可信區間)作為各坐標分量之精度值,則全臺各測站之平面精度約為 18 mm,高程精度則達 39 mm。

(三)臺灣地區 GNSS 連續站坐標精度之空間分布特性

依據臺灣地區各 GNSS 連續站坐標精度之空間分布型態可見(圖 3a 至圖 3d),各 測站在 N 分量的坐標精度,明顯優於 E 分量精度。在平面精度部分(圖 3c),可以見 到花東縱谷地區與西南部山麓地區之空間變化量較大。在高程精度上(圖 3d),臺灣 各地高程精度的空間變化大,精度多高於 30 mm,最高可至 100 mm,特別在西南 部沿海地區有較高的精度空間變化落差。

由於臺灣西南部地區與東部地區之坐標精度看起來較差(圖 3c 至圖 3d),為了確認此觀察結果,本研究首先針對臺灣西南部地區 GNSS 連續站坐標精度進行統計(圖 4),在 68%信賴區間下,E分量為 4.9 ± 2.4 mm,N分量之精度為 3.3 ± 1.2 mm,平面精度為 5.9 ± 2.5 mm,高程精度為 12.5 ± 4.0 mm。此結果指出,臺灣西南部地區測站整體觀測資料西南部地區整體平均精度與全臺整體精度極為相近,且精度的離散程度較低(圖 5)。

接著,就臺灣東部地區 GNSS 連續站坐標精度進行統計(圖 6),在 68%信賴區 間下,E 分量為 6.1 ± 2.8 mm,N 分量之精度值為 4.5 ± 2.0 mm,平面精度為 7.6 ± 3.5 mm,高程精度為 13.9 ± 2.5 mm。此結果確實顯示,臺灣東部地區測站整體平均精 度低於全臺整體精度(圖 7)。

# 三、同震格點位移模型之新增時機

在探討同震格點位移模型之新增時機時,只有當地震造成之最大同震地表位移 量超過現有測量技術所能提供之坐標精度時,才需要新增半動態基準中之同震格點 位移模型。由於 GNSS 連續站資料分析指出,平面坐標精度較佳,約為 18 mm,因 此本研究即設定,當臺灣及其鄰近地區任一地震可造成臺灣陸地水平位移量超過 18 mm 時,則需啟動後續之同震格點位移模型之新增工作。然而,如何根據中央氣象 局速報系統所提供的資訊來進行同震格點位移模型新增時機的判釋,則是本研究之 研究重點。

(一)臺灣地區同震格點位移模型新增時機判定網格之建立

當地震發生時,中央氣象局速報系統會自動在第一時間取得觀測資料、計算並 公布以下資訊:(1)地震發生之日期與時間。日期公告格式為年、月、日、時、分、 秒;(2)震央位置。震源投影至地表之經緯度坐標;(3)震源深度。震源至地面之垂直 距離,以公里(km)表示;(4)地震規模。地震所釋放的能量,臺灣地區採區域地震規模(M<sub>L</sub>)。因此,本研究將利用這三個參數來建立臺灣地區同震格點位移模型新增時機判定網格,協助判斷臺灣及其鄰近地區任一地震是否能在臺灣陸地造成最大地表位移量超過18 mm。



圖 3 臺灣地區 GNSS 連續站坐標各分量之精度空間分布,圓圈為 GNSS 連續站之位 置,圓圈之顏色代表測站精度大小。(a) E 分量之精度空間分布圖。(b) N 分量之精 度空間分布圖。(c)平面精度空間分布圖。(d)高程精度空間分布圖。

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



圖 4 臺灣西南部地區 2000 至 2017 年 GNSS 連續站之坐標精度統計圖。各圖中之粗 黑線為平均值;兩條細灰線則標示出 99%可信區間的範圍。(a) E 分量之坐標精度統 計圖。(b) N 分量之坐標精度統計圖。(c)平面坐標之精度統計圖。(d)高程坐標之精 度統計圖。



圖 5 臺灣西南部地區 GNSS 連續站坐標各分量之精度空間分布,圓圈為 GNSS 連續 站位置,圓圈之顏色代表測站精度大小。(a) E 分量之精度空間分布圖。(b) N 分量 之精度空間分布圖。(c)平面精度空間分布圖。(d)高程精度空間分布圖。

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



圖 6 臺灣東部地區 2000 至 2017 年 GNSS 連續站各分量之坐標精度統計圖。各圖中 之粗黑線為平均值;兩條細灰線則標示出 99%可信區間的範圍。(a) E 分量之坐標精 度統計圖。(b) N 分量之坐標精度統計圖。(c)平面坐標之精度統計圖。(d)高程坐標 之精度統計圖。



圖 7 臺灣東部地區 GNSS 連續站坐標各分量之精度空間分布,圓圈為 GNSS 連續站 位置,圓圈顏色代表測站精度值的大小。(a) E 分量之精度空間分布圖。(b) N 分量 之精度空間分布圖。(c)平面精度空間分布圖。(d)高程精度空間分布圖。

臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討

1. 地震規模之選取

要建立臺灣地區同震格點位移模型新增時機之判定網格,首先要根據臺灣及其鄰近地區的背景地震分布,建立合適的空間網格。然而,究竟該挑選規模多大的背景地震事件來確立其空間分布情形?由前述 GNSS 資料精度分析(內政部國土測繪中心,2017)可知,當同震地表水平位移量超過18 mm時,才能被 GNSS 連續站偵測到。本研究首先採用地震矩規模( $M_w$ )與地表位移量之經驗式來挑選合適之地震規模值。由於中央氣象局速報系統發布之規模為區域地震規模發( $M_L$ ),本研究首先透過 Wu et al.(2001)提供之關係式  $M_L = 4.533 \times \ln(M_W) - 2.091$ 將區域規模( $M_L$ )轉換成地震矩規模( $M_w$ )。再利用 Wells and Coppersmith (1994)的經驗式計算最大地表位移量(MD)與平均地表位移量(AD)。

 $log(MD) = -5.46 + 0.82 M_w$ 

(2)

 $log(AD) = -4.08 + 0.69 M_w$ 

(3)

由於 Wu et al.(2001)提供之關係式僅適用於  $M_L$  5.0 至 7.1 之間; Wells and Coppersmith(1994)的 MD 與  $M_w$ 關係式僅適用於  $M_w$ 介於 5.2 至 8.1 間; AD 與  $M_w$ 關係式僅適用於  $M_w$ 介於 5.6 至 8.1 時,其所計算之數值才較符合實際情況。透過計算可知(表 1),  $M_L$ 在 1.0 到 4.0 間之地表位移量皆未達 18 mm,且其地震規模範圍亦不符合經驗式之適用範圍,故僅供參考。在  $M_L$ 為 5.0 與 8.0 之部分,雖然地表位移量計算結果超過 18 mm,為可被 GNSS 連續站偵測之位移量,但其相應之  $M_w$ 不在適用範圍內,故亦僅提供參考。在採用謹慎的考慮下,本研究選取  $M_L$  4.0 以上之地震事件來建立同震格點位移模型新增時機之判定網格。

$\mathbf{M}_{\mathbf{L}}$	$\mathbf{M}_{\mathbf{W}}$	AD (mm)	MD (mm)
1.00	1.98	0.4	0.1
2.00	2.47	0.8	0.4
3.00	3.07	2.1	1.1
4.00	3.83	7.0	4.8
5.00	4.78	31.5	28.8
6.00	5.96	205.3	267.4
7.00	7.43	2121.8	4291.4
8.00	9.26	38850.8	135893.9

表1地震規模與地表位移對照表

#### 2. 網格化孕震深度

在確定採取 M<sub>L</sub> 4.0 之地震事件來建立同震格點位移模型新增時機之判定網格, 本研究由中央氣象局之地震目錄中挑選出符合之地震事件並繪製出臺灣地區 1900 年1月至 2017 年5月 M<sub>L</sub>≥4.0 之地震分布圖(圖 8)。



圖 8 臺灣 1900 年 1 月至 2017 年 5 月  $M_L \ge 4.0$  之地震分布圖。星號為 11 個臺灣及 其鄰近地區會對臺灣陸地造成顯著地表位移之主要地震分布位置。

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討

為了建立同震格點位移模型新增時機之判定網格與斷層正演模型測試,需要確認此判定網格之深度分布範圍。本研究首先將該地震分布進行網格化處理,一般來說,網格間隔越小就越能表現實際的型態與變化,但經本研究測試,以0.1°為間隔即足以表現臺灣各地區孕震帶深度分布之變化與型態,故本研究在經緯度分別各採0.1°為格點間隔距離,並搜尋各格點10 km 半徑範圍內是否有地震存在;若有地震存在,則計算出該格點範圍內震源深度最深之地震事件(圖9a)。從地質的角度觀之,由於孕震構造一般不會有突然地深度變化,因此本研究利用移動平均的方法,搜尋各個格點半徑30 km 範圍內之數值進行平均,且搜尋範圍內之格點數須大於5點, 才取其格點數值作平均計算取代原始數值,將孕震帶之最大網格深度近型平滑化(圖 9b)。本研究在此步驟之搜尋範圍數值,皆有進行不同搜尋範圍的數值測試,確認不同的搜尋半徑不會明顯的改變最大孕震深度值。



圖 9 (a)臺灣  $M_L \ge 4.0$  之地震孕震帶深度分布圖。(b)臺灣  $M_L \ge 4.0$  之地震孕震帶平 滑化深度分布圖。

## 3. 斷層錯位模型

本計畫的斷層正演模型是採用根據彈性錯動理論(Okada, 1985, 1992)所建立之 斷層錯位模型,其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表 面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間(half space),介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體(Poisson solid),即彈性模量( $\lambda$ )等於剪切模量( $\mu$ )之彈性體。沿著斷層元素 (fault patch)的斷層滑移量  $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 會使均質均向的彈性體表面產生位移場  $\Delta u_i(x_1, x_2, x_3)$ ,其關係如(3-3)式所列。其中, $\delta_{jk}$ 為克羅內克函數; $v_k$ 為正交於地 表元素 $d\Sigma$ 之餘弦函數方向;F為施力點之力量大小。

$$\boldsymbol{u}_{i} = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta \boldsymbol{u}_{j} [\lambda \delta_{jk} \frac{\partial \boldsymbol{u}_{i}^{n}}{\partial \xi_{n}} + \boldsymbol{\mu} (\frac{\partial \boldsymbol{u}_{i}^{j}}{\partial \xi_{k}} + \frac{\partial \boldsymbol{u}_{i}^{k}}{\partial \xi_{j}})] \boldsymbol{v}_{k} d\Sigma$$

$$\tag{4}$$

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係,在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括:斷層平面位置(km)、深度(km)、長度(km)、 寬度(km)、走向(°)、傾角(°)。其中,斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置;斷 層深度是指斷層斷層面下緣的深度。斷層滑移量(fault slip)包含三個方向的分量[ $S_I$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ],分別以左移(left-lateral strike slip)、逆衝(reverse dip slip)及伸張(tensile slip) 為正方向。在進行對雙偶合震源之斷層活動分析時,一般只會考慮走向滑移量( $S_I$ , strike slip)與傾向滑移量( $S_2$ , dip slip);在進行火山之岩漿沿岩脈運動分析時,才會採 用伸張滑移量( $S_3$ )。斷層滑移角(rake)指示斷層上盤相對於下盤之運動方向,其和斷 層滑移量之關係為 tan(rake) =  $S_2 / S_I$ 。地表位移量(displacement) 同樣也包含三個方 向的分量[ $U_I$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ],分別以東(East)、北(North)與上(Up)為正方向,水平位移量 (horizontal displacement)則為 $\sqrt{U1^2 + U2^2}$ sqrt( $U_1$ /2+ $U_2$ ^2)。

# 4. 斷層正演模型之斷層參數設定與測試

本研究之斷層正演模型採用單一斷層面(single fault patch),斷層幾何參數之設定 與假設主要是基於地震規模(M<sub>w</sub>)和斷層幾何之經驗式。一般常見之經驗式是採用 Wells and Coppersmith(1994)的統計結果,然而由於此文獻是早期針對全球主要地震 進行統計分析的結果,因此本研究同時也採用近期針對臺灣地區之地震活動進行統 計分析所得的經驗式(Yen and Ma, 2011),來推求斷層幾何參數。由於中央氣氣象局 公告之地震規模為區域地震規模(ML),所以需先透過下列關係式(Wu et al., 2001):  $M_L = 4.533 \times \ln(M_w) - 2.091$ (5) 將區域地震規模(M<sub>L</sub>)轉換成地震矩規模(M<sub>W</sub>)。再根據下列關係式(Kanamori, 1977)  $M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7$ (6)將地震矩規模(Mw)轉換成地震矩(Mo)。根據 Yen and Ma (2011)提出之經驗式,如果 地震矩(M<sub>0</sub>)小於等於 10<sup>20</sup> N-m, 則斷層長度(L)、寬度(W)與地震矩(M<sub>0</sub>)的關係如下:  $\log L = 1/2 \log M_0 - 8.08$ (7) $\log W = 1/2 \log M_0 - 8.08$ (8) 如果地震矩(M<sub>0</sub>)大於 10<sup>20</sup> N-m, 則斷層長度(L)、寬度(W)與地震矩(M<sub>0</sub>)的關係如下:  $\log L = 1/3 \log M_0 - 4.84$ (9)  $\log W = 1/3 \log M_0 - 5.27$ (10) 蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動熊基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討

給定的震源平面位置與深度,則假設為斷層面下緣中間的位置與深度。斷層走 向與傾角之給定會在下一個章節中討論。因此,根據以上之說明,本研究即完成單 一斷層面之斷層幾何參數(斷層位置、深度、長度、寬度、走向、傾角)設定。在斷 層滑移量(fault slip)的設定中,根據 Kanamori (1977)提出地震矩(M<sub>0</sub>)、斷層滑移量(D) 和斷層面積(A)的關係:

 $M_0 = \mu AD$ 

(11)

其中,  $\mu$ 為剪切模量(rigidity), 其值為  $3 \times 10^{11}$  N-m<sup>-2</sup>; 斷層面積(A)可以由斷層長度 (L)與寬度(W)的乘積求得。最終可以推估出斷層正演模型和規模(M<sub>L</sub>)對應之斷層滑 移量(D)。

由於本研究工作在於判斷任一地震在臺灣陸地造成之最大地表位移量是否超過 GNSS 測站之坐標精度 18 mm,因此在使用斷層正演模型計算地表位移量時,僅計 算臺灣本島陸域之地表同震位移量(圖 10)。



圖 10 斷層正演模型用於推求地表位移量之點位分布圖。黑色圓點即為斷層正演模 型使用之點位。

## 5. 斷層型態與地表位移情形之測試

常見的斷層型態有逆衝斷層(reverse fault)、正斷層(normal fault)與走向滑移斷層 (strike-slip fault),其中走向滑移斷層又分為左移斷層(left-lateral fault)與右移斷層 (right-lateral fault)。因為在本研究地表同震位移量推求的目的中,位移方向並不重 要,因此只要確認相同斷層幾何與地震規模之逆衝斷層和正斷層,以及左移斷層和 右移斷層能產生近乎一致的地表位移量,本研究就可以減少地震震源參數之搜尋。



圖 11 (a)逆衝斷層水平位移場絕對值成果。(b)逆衝斷層垂直位移場絕對值成果。(c) 正斷層水平位移場絕對值成果。(d)正斷層垂直位移場絕對值成果。

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



圖 12 (a) 左移斷層水平位移場絕對值成果。(b)左移斷層垂直位移場絕對值成果。(c) 右移斷層水平位移場絕對值成果。(d)右移斷層垂直位移場絕對值成果。

本研究首先比較逆衝斷層和正斷層所造成之地表位移量差異。假設地震規模 M<sub>L</sub>為6.6,斷層底部中間位置位於(23.60,120.70),斷層底部深度18 km,斷層走向 30°,斷層傾角30°。設定逆衝斷層之斷層滑移角為90°(純逆衝斷層),正斷層則為 -90°(純正斷層)。比較相同斷層幾何與地震規模之逆衝斷層和正斷層所造成之地表 位移量(圖11a至11d),指出兩者不論在水平位移場或是垂直位移場之絕對值是一致 的。

接著再比較左移斷層和右移斷層所造成之地表位移量差異。同樣假設地震規模 M<sub>L</sub>為6.6,斷層底部中間位置位於(23.65,120.70),斷層底部深度36 km,斷層走向 90°,斷層傾角90°。設定左移斷層之斷層滑移角為0°(純左移斷層),正斷層則為180° (純右移斷層)。比較相同斷層幾何與地震規模之逆衝斷層和正斷層所造成之地表位 移量(圖12a至12d),指出兩者不論在水平位移場或是垂直位移場之絕對值同樣也並 無差異。

因此,根據以上的模型測試結果,本研究即減少斷層正演模型中地震震源參數 之搜尋,僅針對逆衝斷層與左移走向滑移斷層下去進行後續之正演工作。

6. 斷層參數搜尋結果與分析

在斷層正演模型之參數設定方面,斷層位置是依據臺灣 M<sub>L</sub>≥4.0 之地震孕震帶 平滑深度分布格點(圖 9b)來設定,如果最終不會有任何地震對臺灣陸域造成超過最 大地表位移量標準之位移值,將不會留存任何搜尋紀錄。斷層深度的搜尋範圍是由 圖 9b 中各個格點的深度四捨五入取整數後,往地表方向每 1 公里設定一個震源格 點。斷層面的長度和寬度,則由地震規模(M<sub>L</sub>)進行設定,由規模 4.0 往規模 8,規 模 M<sub>L</sub>間隔為 0.1。由於斷層面不可能超過地表,亦即:

 $Dep < W \times \sin\theta$ 

(12)

其中, Dep 為斷層深度, W 為斷層寬度, θ 為斷層傾角。因為斷層面是不允許 超過地表面,若超過則停止該深度及更大地震規模的搜尋。又如果某一地震規模所 產生的地表位移量,有4個以上的點位超過設定之最大地表位移量標準,則停止該 深度更大地震規模的搜尋並儲存其記錄。換言之,只要該位置及深度發生更大規模 之地震,則臺灣陸域一定能記錄到明確之地表同震位移場。

就斷層的走向與傾角設定,由於臺灣主要的構造走向為東北東-西南西走向,而 此走向之構造多為逆衝斷層,雖然臺灣有不少高角度逆衝斷層(Dip > 45°),然而考 慮到低傾角之逆衝斷層會造成更大的水平地表位移量,所以在斷層正演模型中的第 一組斷層幾何之走向、傾角與斷層滑移角設定為走向 30°、傾角 30°與滑移角 90°。 又由於臺灣海峽、西部海岸平原、西部麓山帶、宜蘭平原及其向南延伸至花蓮北部 之地區,還有另一組近乎東西走向的走向滑移斷層,所以在本模型中的第二組走向、 傾角與斷層滑移角的設定為走向 90°、傾角 90°與滑移角 180°。最後在臺灣東北部 地區有近乎東西走向的琉球隱沒系統發育,因此根據臺灣背景地震的空間分布型態, 在經度 121.3°以東與緯度 23.6°以北的區域,本模型又增加第三組走向、傾角與斷層 滑移角的設定,該設定為走向 90°、傾角 30°與滑移角 90°。

根據斷層正演模型之搜尋計算結果指出,在第一組參數設定下(斷層走向 30°;

傾角 30°; 滑移角 90°) (圖 13), 要在臺灣陸域產生同震水平位移量大於 18 mm 之地 震規模至少要超過 M<sub>L</sub> 6.1。此結果同時合理地指出,在臺灣陸域地區大約需要 M<sub>L</sub> 6.1 的地震, 越遠離臺灣陸域,則所需的地震規模就越大(圖 13)。若每個網格點皆分別 擷取 10 km、15 km、20 km 與 25 km 的震源深度來看(圖 14a 至 14d), 顯示隨著深 度的增加,臺灣陸域所需的最小地震規模也跟著由 M<sub>L</sub> 6.1 增加至約 M<sub>L</sub> 6.4。此外, 臺灣西北部地區潛在最深震源之深度較小,部分格點最深深度小於 15 公里; 相對 於東部,臺灣西部區域整體之潛在最深震源深度亦較淺,除西南部海域外,多數網 格點潛在最深深度未及 25 km (圖 14a 至 14d)。

若根據第二組參數設定(斷層走向 90°;傾角 90°;滑移角 180°)之成果(圖 15), 可見臺灣陸域西北部有部分網格點無潛在震源之分布,且相較於第一組參數(斷層走 向 30°;傾角 30°;滑移角 90°),在此組參數設定下,於臺灣陸域,要產生同震水平 位移量大於 18 mm 之地震,則其規模至少要超過 ML 6.2°若分別擷取 10 km、15 km、 20 km 與 25 km 的震源深度 (圖 16a 至 16d),結果顯示隨著深度的增加,臺灣陸域 所需的最小地震規模將由 ML 6.2 增加至約 ML 6.4°此外,由圖 16a 可知,在此斷層 參數設定中,規模搜尋在斷層深度到達 10 km 前即已停止;若觀察圖 16b 則可發現, 海域部分亦在斷層深度達 15 km 前即已停止搜尋。如同前次參數設定之搜尋成果(圖 16b 至 16d),在臺灣西北部區域震源之潛在最深深度較小,西北部區域甚至有部分 格點最深深度未達 15 公里,且臺灣西部區域整體之震源潛在最深深度相較於東部 來說較淺,除西南部海域外,潛在最深深度大多未及 25 km。

而第三組參數設定(斷層走向 90°、傾角 30°與滑移角 90°)則以東北部區域為主, 網格點之分布範圍為經度 121.3°以東與緯度 23.6°以北。根據結果顯示,在臺灣陸域 要造成大於 18 mm 之同震水平位移量,地震規模至少要超過  $M_L$  6.1,且越遠往海域 延伸,其所需之地震規模越大(圖 17)。若擷取震源深度 1 0 km、15 km、20 km 與 25 km 之成果來看(圖 18a 至 18d),在臺灣陸域,所需最小地震規模會隨著震源深度 的增加,由  $M_L$  6.1 增加至  $M_L$  6.4。

為了獲得單一同震格點位移模型新增時機判定網格,並採用較保守的條件,本 研究將三組成果合併,挑選各格點在三組成果中最小之規模值,獲得最終同震格點 位移模型新增時機判定網格(圖 19)。最後結果顯示,要在臺灣陸地區域,造成大於 18 mm 之同震水平位移量,其地震規模至少要超過 M<sub>L</sub> 6.1,越遠往海域延伸,所需 之地震規模亦越大。觀察每個網格點皆分別擷取震源深度 10 km、15 km、20 km 與 25 km 之成果 (圖 20a 至 20d),可見隨著深度增加,臺灣陸域所需的最小地震規模 亦由 M<sub>L</sub> 6.1 增加至約 M<sub>L</sub> 6.4。此外,如前所述,臺灣西北部地區部分格點之潛在最 深深度小於 15 公里;且除西南部海域外,西部區域整體之潛在最深震源深度較小, 大部分皆未達 25 km。



圖 13 各震源位置正演模擬估算之最小地震規模分布圖。 (斷層走向 30°;傾角 30°;滑移角 90°)

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屛、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



圖 14 不同深度各震源位置正演模擬估算之最小地震規模分布圖。 (斷層走向 30°;傾角 30°;滑移角 90°) ((a)圖為深度 10 km 之結果;(b)圖為深度 15 km 之結果; (c)圖為深度 20 km 之結果;(d)圖為深度 25 km 之結果)



圖 15 各震源位置正演模擬估算之最小地震規模分布圖。 (斷層走向 90°;傾角 90°;滑移角 180°)

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



圖 16 不同深度各震源位置正演模擬估算之最小地震規模分布圖。 (斷層走向 90°;傾角 90°;滑移角 180°) ((a)圖為深度 10 km 之結果;(b)圖為深度 15 km 之結果; (c)圖為深度 20 km 之結果;(d)圖為深度 25 km 之結果)





蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



(斷層走向 90°;傾角 30°;滑移角 90°)

((a)圖為深度 10 km 之結果; (b)圖為深度 15 km 之結果;
(c)圖為深度 20 km 之結果; (d)圖為深度 25 km 之結果)



圖 19 各震源位置正演模擬估算之最小地震規模分布圖。

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屛、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討



((a)圖為深度 10 km 之結果; (b)圖為深度 15 km 之結果; (c)圖為深度 20 km 之結果; (d)圖為深度 25 km 之結果。)

(二)臺灣地區同震位移場文獻之彙整與網格成果驗證

為了驗證本研究建立之同震格點位移模型新增時機判定網格的正確性,本研究 收集自1999年集集地震以來之同震位移場資訊來進行成果驗證。

臺灣自 1999 年 9 月 21 日 M<sub>L</sub> 7.3 之集集地震發生後,便開始大規模設立 GNSS 監測站,因此在 1999 年集集地震後,學者就可以針對臺灣地區之顯著地震進行同 震地表位移場之研究(Yang et al., 2000; Yu et al., 2001; Chen et al., 2004, 2006, 2008, 2009; Ching et al., 2011; Chuang et al., 2013, 2014),而這些同震位移場之紀錄,即為 能夠最佳反映實際地震震源位置與規模,在不同條件下所將造成之最大地表同震位 移量。故本研究統整目前已發表和臺灣地區地表同震位移場相關的文章,分析臺灣 及其鄰近地區對臺灣陸地造成顯著地表位移之主要地震分布位置與規模(表 2;圖 8)。

1999 年 M<sub>L</sub> 7.3 集集地震之震源深度約 10 km,其所造成之地表水平位移量高達 近 9.0 m,垂直位移則高達近 3.2 m,為臺灣地區有科學儀器紀錄以來造成地表位移 量最大之地震(表 2)。其餘大部分地震事件所造成之地表最大水平位移量約介於 25 mm 至 75 mm 間(表 2)。

在表 2 中規模最小且類似規模之地震事件,如 2006 年卑南地震與 2013 年 3 月 南投地震,比較其震源深度及其所分別造成之最大地表位移量,可發現 M<sub>L</sub> 6.2,震 源深度在 19 公里左右時,其所造成之最大地表水平位移量約為 11 mm,屬於不易 偵測之精度範圍;但當震源深度在 7 公里左右時,其所造成之最大地表位移達 35 mm, 已明顯超過坐標精度,可以順利被偵測到。

彙整表 2 之規模、深度與地表位移量可知,當地震規模為 6.2 之地震,震源深 度低於 13 km 左右,便可能造成超過坐標精度最大容許值 18 mm 之地表最大水平位 移量,而有啟動後續之新增同震格點位移模型工作之必要。觀察震源深度介於 14 km 到 25 km 間,ML達 6.4 以上之地震事件,其地表最大水平位移量由最小約 27 mm 至最大約 126 mm,皆造成水平位移量超過坐標精度最大容許值 18 mm。另外,在 表 2 統整之資料中,ML達 7.0 之地震在震源深度 50 km 以內,亦皆能造成 25 mm 以上之水平位移量,可推測規模達 7.0 以上,震源深度若落在 50 km 以內,便有新 增同震格點位移模型工作之必要。

最後,在比對本研究推求出之同震格點位移模型新增時機判定網格資訊與實際 的震案例(表 2),驗證了同震格點位移模型新增時機判定網格的正確性。

+++K+>
110
鯊
牛
tat.
Ent
1-1
¥
要
ᆂ
N
**
X
1
銜
ĽĽ,
eke
選
基子
*
1-
有
灣
JD
表

<b>计额审/</b> /	田本町	規模	震央	深度	地表最大水平位移量	地表最大垂直位移	44.74
TI & SUDA	THILDH	(ML)	(_)	(km)	(cm)	重 (cm)	NWX C.
1000 年價值 44 88	12/60/6661	5 2	23.85 N,	0	008	333.8	Yang et al. [2000]
1777 十·禾·兆辰	01:47:05.9	C:/	120.82 E	0	060	0.626	Yu et al. [2001]
3003 年艾蒲外治州露	2002/03/31	89	24 14 N 122 19 F	13.8	5 50		Chan at al [2004]
	14:52:50.0	0.0	24.14 IV, 122.17 E	0.61	00.0	I.	
2003年中午中期	2003/12/10	13	23.07 N,	L L 1	2 01	6 36	1200001
	12:38:13.5	0.4	121.40 E	1.1.1	12.0	C.02	Cucu et al. [2000]
1005 任由卡马鹏	2006/04/01		22.88 N,	C t	13 5	or c	
2000 十年用地陵	18:02:19.5	7.0	121.08 E	77/	10.0	-2./0	Cnen et al. [2009]
1005 任话主孙灏	2006/12/26	C r	21.89 N,	100	13 0		
2000 中应香把质	20:26:21.0	0.1	120.56 E	1.44	+C.2	C7.C	Chen et al. [2008]
1006 在陆聿钟骤	2006/12/26		21.97 N,	6.03	2 0 C	13 0	Cham 24 27 170001
2000 午 应	20:34:51.0	0.1	120.42 E	7.00	C0.7	+C.2-	Chen et al. [2006]
2010年田小小殿	2010/03/04	7.7	22.97 N,	3 44	1 C C	3 6	Chine of al [2011]
2010年中汕池殿	08:18:52.1	0.4	120.71 E	0.77	2.74	C:7	Cning <i>et al.</i> [2011]
3013年3日指约寺廠	2013/03/27	63	23.90 N,	1.01	1 00	-	Churse of al [2013]
2010年1月12年107年 1911 1911年 1911 19	10:03:19.6	7.0	121.05 E	19.4	1.00	111	Cilualig <i>et al.</i> [2012]
3013 年 6 日南丸祉館	2013/06/02	5 5	23.86 N,	145	1 08	6.6	Chunne of al [2013]
	13:43:03.2	C.0	120.97 E	C'±1	1.70	0.0	Cilualig et al. [2012]
2013 年瑞譜祉閣	2013/10/31	6.4	23.57 N,	15.0	67	14.2	Chunna at al [2014]
	20:02:09.5	t-0	121.35 E	0.01	7:0	1-1-1	Cuuang et al. [2017]
2016 年羊進祉電	2016/ 2/6	99	22 02 N 120 54 F	14.6	57	C C1	This shidy
	03:57:26.1	0.0	7 10:071 11 70:77	0.11	j	1.2.1	fume em t

蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇: 臺灣半動態基準地表變形模式精進研究 - 同震格點位移模型新增時機之探討

#### 四、結論

作為國家坐標基準,半動態基準之建立與維護,在實務應用上需要兼顧即時性 與正確性。亦即在地震發生時,如何即時決定是否新增同震格點位移模型,並快速 建立正確與符合實務應用之同震格點模型是非常重要的關鍵。快速建立正確與符合 實務應用之同震格點模型部分,已經在景國恩等(2017)中進行討論,因此本研究聚 焦在探討同震格點位移模型更新之時機。

由於「同震格點位移模型」之目的為修正地震等瞬時事件所造成之地表位移, 故當地震發生時,若其最大地表位移量超過 GNSS 連續站之可解析能力,則需要新 增同震格點位移模型。為了瞭解 GNSS 連續站之同震位移量解析能力,本研究分析 全臺 2000 年 1 月至 2017 年 9 月之 GNSS 連續站資料時間序列成果,得知全臺 GNSS 連續站之平均平面坐標精度為 18 mm,高程坐標精度為 39 mm。由於目前本研究以 水平同震位移場為主要考量,故根據前述分析結果指出,當地震之最大地表位移量 大於 18 mm,則需啟動新增同震格點位移模形之建置工作。

然而,由於地震發生時,中央氣象局速報系統所能提供之即時資訊為震源位置、 震源深度以及區域地震規模(ML)。若欲根據中央氣象局所提供之資訊即時判斷是否 需要新增同震位移格點模型,則需了解臺灣及其鄰近地區可能造成地表位移量大於 18 mm 所需之最小地震規模分布情形。而經斷層正演模型之測試分析(圖 19;圖 20 a 至 d)與文獻資料之蒐集歸納分析顯示,要在臺灣陸地區域,產生同震水平位移量大 18 mm,則其地震規模至少要大於 ML 6.1,越由海域向外延伸,則其所需之地震規 模亦越大。震源深度由 10 km 增加至 25 km 時(圖 20a 至 20d),臺灣陸域所需的最 小地震規模亦由 ML 6.1 增加至約 ML 6.4。此外,臺灣西北部地區部分格點之潛在 最深深度小於 15 公里;且除西南部海域外,西部區域整體之震源潛在最深深度較 小,大部分皆未達 25 km。簡言之,當臺灣陸域地區發生地震事件達 ML 6.1 以上, 或臺灣海域發生地震事件達 ML 6.4 以上,則其同震位移量有極大之可能會大於 18 mm,達到 GNSS 連續站可解析之精度,進而需新增同震格點位移模型以維護國家 大地基準之精度。

最後,由於臺灣目前正極力進行半動態基準之建立,因此除了同震格點位移模型之新增時機之探討外,本研究亦將進行 2010 年後臺灣地區重大地震同震位移格點模型之建立,並檢視分析其修正成果,作為後續半動態基準地表變形模式建立之參考依據。

#### 致謝

本研究承蒙內政部國土測繪中心 106-107 年度「精進現代化 TWD97 國家坐標 系統變位模式」案提供 GNSS 觀測及相關研究資料與經費支援,與中央氣象局提供 的地震目錄,使本研究得以順利完成,特此申謝。

# 參考文獻

- 內政部國土測繪中心,2017,《106年度精進現代化TWD97國家坐標系統變位模式 工作總報告書》,國立臺北大學。
- 郭徐伸,2014,《建立台灣半動態基準之水平速度模型》,國立成功大學測量及空間 資訊學系碩士論文。
- 景國恩、楊名、陳鶴欽、林文勇、梁旭文、劉正倫,2017,臺灣半動態基準之建立 與展望,《國土測繪與空間資訊》,第五卷第二期,頁 83-109。
- Chen, H. Y., L. C. Kuo and S. B. Yu, 2004, Coseismic movement and seismic ground motion associated with the 31 March 2002 off Hualien, Taiwan, earthquake, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(4), pp.683-695.
- Chen, H. Y., S. B. Yu, L. C. Kuo and C. C. Liu, 2006, Coseismic and postseismic surface displacements of the 10 December 2003 (M<sub>W</sub> 6.5) Chengkung, eastern Taiwan, earthquake, *Earth, Planets and Space*, 58(1), pp.5–21.
- Chen, H. Y., J. C. Lee, L. C. Kuo, S. B. Yu and C. C. Liu, 2008, Coseismic surface GPS displacement and ground shaking associated with the 2006 Pingtung earthquake doublet, offshore southern Taiwan, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(6), pp.683-696.
- Chen, H. Y., Y. J. Hsu, J. C. Lee, S. B. Yu, L. C. Kuo, Y. L Jiang, C. C. Liu and C. S. Tsai, 2009, Coseismic displacements and slip distribution from GPS and leveling observations for the 2006 Peinan earthquake (Mw 6.1) in southeastern Taiwan, *Earth, Planets and Space*, 61(3), pp.299-318.
- Ching, K. E., K. M. Johnson, R. J. Rau, R. Y. Chuang, L. C. Kuo and P. L. Leu, 2011, Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model, *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1-2), pp.78-86.
- Chuang, R. Y., K. M. Johnson, Y. T. Kuo, Y. M. Wu, C. H. Chang and L. C. Kuo, 2014, Active back thrust in the eastern Taiwan suture revealed by the 2013 Rueisuei earthquake: Evidence for a doubly vergent orogenic wedge?, *Geophysical Research Letters*, 41(10), pp.3464-3470.
- Chuang, R. Y., K. M. Johnson, Y. M. Wu, K. E. Ching and L. C. Kuo, 2013, A midcrustal ramp-fault structure beneath the Taiwan tectonic wedge illuminated by the 2013 Nantou earthquake series, *Geophysical Research Letters*, 40(19), pp.5080-5084.
- Grant, D. B. and M. B. Pearse, 1995, Proposal for a dynamic national geodetic datum for New Zealand, *IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado, USA*.
- Nikolaidis, R., 2002, Observation of geodetic and seismic deformation with the Global *Positioning System*, Thesis (Ph.D.), University of California : San Diego.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space,

Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4), pp.1135-1154.

- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2), pp.1018-1040.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith, 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), pp.974-1002.
- Wu, Y. M., T. C. Shin and C. H. Chang, 2001, Near Real-Time Mapping of Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity Following a Strong Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), pp.1218–1228.
- Yoshiyuki T., S. Hiroaki, S. Jun, I. Kazumi, Tomoo, T., Hideaki, H., et al., 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.
- Yu, S. B., L. C. Kuo, Y. J. Hsu, H. H. Su, C. C. Liu, C. S. Hou, et al., 2001, Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), pp.995–1012.
- Yen, Y. T. and K. F. Ma, 2011, Source-scaling relationship for M 4.6–8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2), pp.464–481.
- Yang, M., R. J. Rau, J. Y. Yu and T. T. Yu, 2000, Geodetically observed surface displacements of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Earth, Planets and Space*, 52(6), pp.403–413.

# 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),字體以新細明體及英文 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
  - ''在内。

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。
  - 3. 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。
  - 4. 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)
  - 5. 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)…依序編號。例:
$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{L}$$
 (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 本辨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

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
土仕安貝	饧	名	國

編輯委員(依姓氏筆劃順序排列)

- 林老生 國立政治大學地政學系
- 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
- 陳繼藩 國立中央大學太空及遙測研究中心
- 黃倬英 國立臺灣大學地理學系
- 詹士樑 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系
- 楊明德 國立中興大學土木工程學系
- 趙鍵哲 國立臺灣大學土木工程學系
- 饒瑞鈞 國立成功大學地球科學系
- 總 編 輯 陳國華 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系
- 編 輯 陳鶴欽 內政部國土測繪中心
- 幹 事 黃郁恩 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

發行人	黃榮峰
	劉正倫
出版所	中華民國地籍測量學會
	內政部國土測繪中心

## 國土測繪與空間資訊 TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

第七卷第一期

民國一〇八年一月

Vol. 7, No. 1

January 2019

### 目 錄

### CONTENTS

結合 GPS 及 BDS 對於定位效能之提升:應用於大地監測
吴岱育·楊名1
Combining GPS and BDS to improve positioning performance: application to
<b>geodetic monitoring</b> Dai-Yu Wu, Yang Ming
以三維共軛覘標提昇三維雷射掃描儀掃描建物效益之研究
林老生、施宇鴻15
Study on Promoting the Efficiency of Scanning Buildings by 3D Laser Scanner Using Conjugated 3D Sphere Markers Lao-Sheng Lin, Yu-Hong Shih
臺灣半動態基準地表變形模式精進研究–同震格點位移模型新增時機之探討
蕭詩涵、景國恩、陳國華、周逸屏、陳鶴欽、林文勇

**Coseismic Grid Displacement Model of the Semi-dynamic Datum in Taiwan** Shih-Han Hsiao, Kuo-En Ching, Kwo-Hwa Chen, Yi-Ping Chou, He-Chin Chen, Wen-Yung Lin