

台灣地區水平速度場與模型之研究

甯方璽¹ 李宜珊^{2*} 熊育賢¹

¹國立政治大學地政學系

²國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘 要

臺灣因地處歐亞板塊及菲律賓海板塊交界，各區域會因為板塊間非線性運動往不同的方向旋轉、位移。臺灣使用的坐標系統為 TWD97 建立於 ITRF94 框架下，不能表達臺灣複雜的地殼變動，需加上速度場與變形模型來改正因地殼運動造成之坐標偏移。本研究利用 2005 年至 2015 年間臺灣地區連續運行參考站 GPS 觀測資料計算水平速度場，以內插、曲面擬合、局部加權回歸散點平滑等方法建立臺灣地區水平速度與變形模型。臺灣地區參考站坐標解算之水平精度為 2mm-3mm、高程精度為 6mm-10mm，速度場之年度平均標準差在 N 軸為 0.38cm/yr，E 軸為 0.52cm/yr。水平速度場模型方面以內插法中的線性及三次內插法建立之模型有最好的精度。

關鍵詞：連續運行參考站，板塊運動，速度場，變形模型

The Study of Establishing Horizontal Velocity and Model in Taiwan Area

Fang-Shii Ning¹, Yi-Shan Li^{2*} and Yu-Hsien Hsiung¹

¹Department of Land Economics, National Chengchi University Department

²Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

ABSTRACT

Taiwan is located along the bounding of the Eurasian and the Philippine plate. Therefore, the crust shifts and rotates in different directions due to the changing stress field. The currently Taiwan coordinate system (TWD97) is built in ITRF94, and the velocity and deformation model are needed to correct the distortion which caused by the crustal motion. This study used 11 years (2005-2015) of Taiwan Continuously Operating Reference Station's (CORS) GPS data to investigate the horizontal velocity field and established the horizontal velocity and deformation model by curve fitting, interpolation and Locally Weighted Scatterplot Smoothing method. The horizontal coordinate accuracy of the CORS is about 2mm-3mm, the vertical accuracy is about 6mm-10mm, and the average standard deviation of velocity field is 3.81mm/yr in N axis, 5.18mm/yr in E axis. As for velocity model, linear and cubic spline interpolations have better model accuracy.

Keywords : CORS, plate motion, velocity field, deformation model

文稿收件日期 108.3.3;文稿修正後接受日期 108.6.19; *通訊作者
Manuscript received March 3, 2019; revised June 19, 2019; * Corresponding author

一、前言

國家坐標乃各項測量作業的基礎，而穩定且可靠的大地基準更是影響測量成果精度高低的關鍵，舉凡民生建設、國防軍事、與人民土地財產相關的地籍測量等，都必須要有穩固的大地基準才能順利推行。然而隨著全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)的發展，其全天候不間斷地運行、全球覆蓋、三維定位授時等特性使得 GNSS 被廣泛運用於測量及工程領域，而透過觀測資料的後處理可以使相對定位的精度達到毫米等級，因此能夠應用於地表變形監測此類高精度要求的大地測量[1]。

環太平洋地震帶的日本、紐西蘭及美國西部等地，也受到板塊之間聚合、滑動等運動影響，國家坐標系統之間的幾何精度會隨著時間下降，然而為了避免全面重測造成人力資本的大量浪費，日、紐、美等國皆有嘗試建構新的大地基準以替代傳統的靜態大地基準[2][3][4]。相較於傳統的靜態基準，半動態基準與動態基準皆是在原有的靜態大地基準的基礎上，配合地表運動的速度場模型加以改正，使其有隨時間而動態調整的特性，因此穩定的大地基準可應用於各項測繪作業中，其中如地籍測量此類牽涉到人民土地財產權益的類型，坐標值時刻都在變動的動態基準於使用上有諸多不便，因此各國最後選擇以兼容靜態與動態基準兩者特性的半動態基準(semi-dynamic datum)來改善固有的框架變形問題[2][3][5]。

臺灣島位於亞洲大陸東部，太平洋西北側，地處於菲律賓群島及琉球群島之間，同時也位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處。其中位於臺灣東部的花東縱谷被認為是兩個板塊碰撞的邊界處，以花東縱谷為界，西半部多半位於歐亞板塊之上，東半部則位於菲律賓海板塊之上[6]。菲律賓海板塊於臺灣東部外海隱沒至歐亞板塊之下進而造成了琉球海溝、琉球島弧、沖繩海槽等地質構造[7]。兩個板塊之間相互聚合、靠近因而產生的非線性運動導致臺灣島上各個區域每年以不同的速度及方向在偏移、旋轉。然而板塊間頻繁的運動會導致國家坐標框架中控制點之間的相對關係改變，坐標框架的精度也會隨著使用年限的增加

而下降。

臺灣目前使用的基準為 1997 臺灣大地基準(Taiwan Datum 97, TWD97)，其為一個靜態基準，框架中的控制點一旦經公布後其坐標數值並不會隨著時間而改變，故坐標間的相對精度會因為板塊運動而隨著時間變長下降，往往在幾何精度漸漸不堪使用時需要進行全面的重測，造成大量人力及成本的浪費。透過半動態基準的建立即可解決非線性板塊運動造成框架幾何精度下降的問題[8][9][10]。在原有的靜態基準中加上地區的地殼變形模型進行改正，在求得坐標改正量後再將其轉換至基準初始定義的時刻下[2]，使坐標可以隨著時間推移而改變其值以避免有框架變形問題發生。然而要建立半動態基準則必須要有可靠的速度場模型，用以推估坐標在地震間受板塊移動影響而變動之值，再配合因地震而造成的地表變形模型做改正，方可令框架與時俱進並隨著現況而更新，使各項測量作業及各類應用能夠順利推行。

本研究將利用臺灣地區連續運行參考站(Continuously Operating Reference Station, CORS)的全球定位系統(Global Positioning System, GPS)觀測資料，藉以建立臺灣各區域之地表速度場模型並比較分析臺灣地區地表變形之趨勢。並利用利用多項式曲面擬合、局部加權迴歸散點平滑法及數種內插方式建立臺灣地區水平速度場模型，並透過交叉驗證法檢驗各方法產生之速度場模型精度。

二、研究資料與軟體

本研究使用之 GPS 觀測站相關分布以及研究軟體等內容詳述如下。

2.1 研究資料

本研究所使用為交通部中央氣象局的地球物理資料管理系統(Geophysical Database Management System, GDMS)提供的雙頻 GPS 觀測站，目前 GDMS 系統中共有 293 站，紀錄時間自 1994 年 4 月 14 日起，至今仍在持續運作中，本研究使用的資料範圍為 2005 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日止共 11 年的連續觀測資料，測站分布圖如圖 1 所示。

為求資料整體的完整性，本研究選取在此時間段內觀測資料重疊率高的 150 站作為研究資料。由於受限於天線更換、接收儀汰換更新、天災等等不可抗力因素，11 年間的觀測資料難免會有站數不一致的情形，此 150 站在 2005 年至 2015 年間每年皆有足夠觀測天數涵蓋的連續觀測站共有 92 站，佔所有比例之 62%，另觀測時間覆蓋達 10 年的站點有 42

站，佔所有比例之 28%、9 年有 9 站，佔 6%、8 年有 5 站，佔 3%、7 年有 2 站，佔 1%，比例如圖 2 所示。為了求得固定於 ITRF 下的坐標水平速度場，除了求得的臺灣地區觀測站之外，仍必須與國際觀測站共同解算，因此選取了臺灣附近共 23 個 IGS(International GNSS service)測站，分布如圖 3。

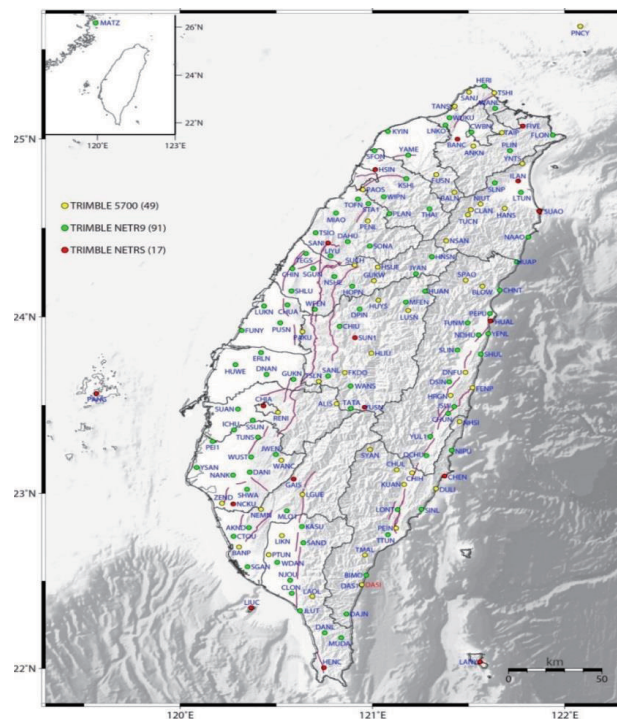


圖 1. GDMS 測站分布圖(中央氣象局地球物理觀測資料展示平台，2016)

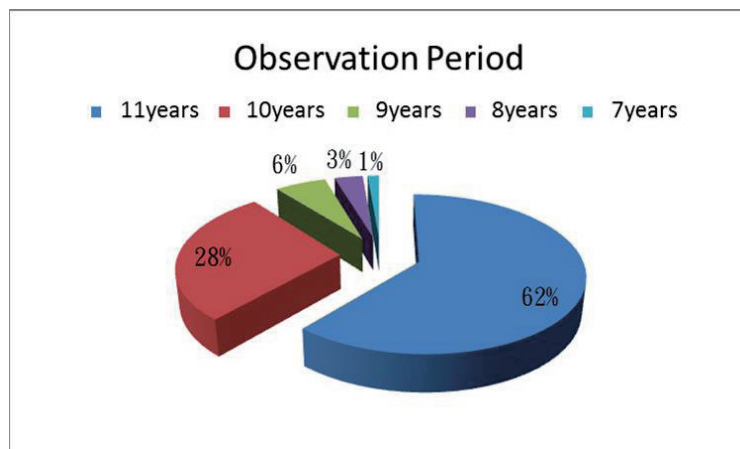


圖 2. 測站觀測時間

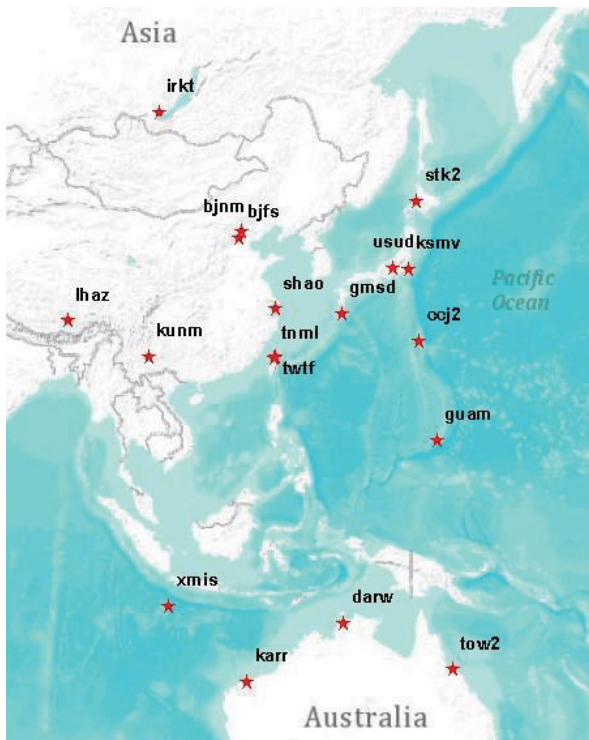


圖 3. 所使用 IGS 測站分布圖

2.2 研究軟體

本研究使用的軟體為 GAMIT/GLOBK，版本為 10.6，GAMIT/GLOBK 為美國麻省理工學院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)以及加州大學聖地牙哥分校斯克利普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)、哈佛大學史密斯天體物理中心(Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, CfA)等機構共同開發的研究型 GPS 相對定位解算軟體。GAMIT 是利用雙差的載波相位觀測資料解算基線，GLOBK 則是一個卡爾曼濾波器可以用來處理不同天的區域網與國際網合併、坐標的整體平差、旋轉、平移等等，甚至可以用來做時間序列的分析[11]。GAMIT 及 GLOBK 除了可以解算出測站的坐標參數外，還能夠解算衛星軌道參數、衛星天線偏差、地球自轉參數、地球質量中心變化、測站對流層延遲參數、電離層改正參數等等[12]，因此其應用的領域也漸漸從大地測量學延伸到地球動力學、衛星動力學、氣象學及地球物理學等等領域。

本研究使用 GAMIT/GLOBK 進行處理，其流程如圖 4 所示。GAMIT 的操作可以拆分

為幾個部分，makex 是用來處理觀測資料轉檔的套件，其功能在將一般常見的衛星資料觀測檔 RINEX(Receiver Independent Exchange Format)轉換成 GAMIT 所使用的觀測檔格式 xfile，目的在於將檔案從 ASCII 格式轉換為 Binary 格式縮減觀測檔的存儲容量以減輕作業系統的負擔並加快處理速度。Arc 則是負責進行衛星軌道的計算，model 用來建立觀測資料的法方程式還有估計殘差，autcln 負責粗差偵測以及移除週波脫落的情形，最後由 solve 進行基於最小二乘法的平差和分析[13]。本研究於 GAMIT 解算時相關之參數設定如下列五點：

- (1) 利用已知坐標之地面參考站進行衛星軌道的估計。
- (2) 將極移、地球固體潮、海潮模型皆列入改正。
- (3) 利用 Saastamoinen 模型改正大氣層乾溼部分的延遲，全球氣溫及氣壓模型(GPT50)被採納為先驗延遲改正[11]。
- (4) 地球固體潮和極移模型分別採用 IERS Conventions 2003(International Earth Rotation and Reference Systems Service Conventions 2003) 及 FES2004(Finite Element Solution 2004)。

區域網解算時將各 IGS 測站予以寬鬆的約制，X、Y、Z 三軸各 0.05 公尺。

在完成了 GAMIT 的解算之後可以得到以天為單位區域網每日解，下個階段則是利用 GLOBK 來合併區域網的每日解與 MIT 每週公布的 IGS 測站每日解算成果，透過 htoglb 將每日解成果轉換成 hfile 後合併，然而 hfile 內所包含的內容有基於最小二乘估計的參考站坐標、大氣參數的估計、方差-協方差矩陣及衛星軌道估計參數等[11][14][15]，利用 GLOBK 之主要原因為，GAMIT 能夠解算的最長時段為 24 小時，因此連續多天的觀測資料會以一天為單位呈現，稱作每日解(daily solution)，舉例來說，一次處理七天的連續資料則會獲得七的每日解，然而為了推求站點年度的速度場，在 GAMIT 處理完後仍需要將每

日解進行合併。一般常用的多時段合併方法為最小二乘法，而 GLOBK 中則是利用卡爾曼濾波法進行每日解的聯合平差，其優勢在於計算速度較快，需要的記憶體容量較小。

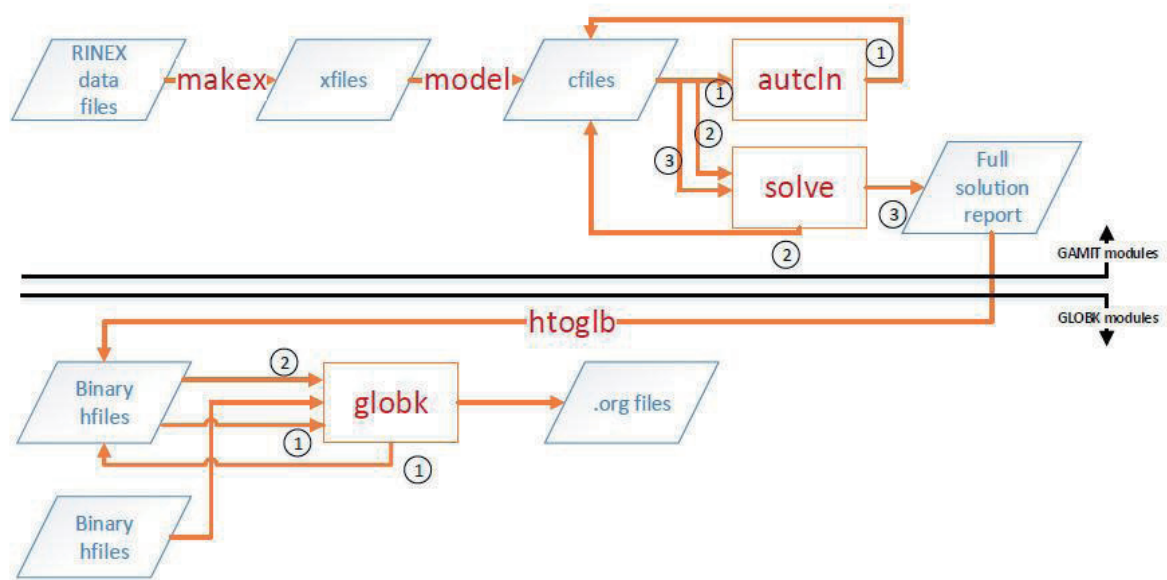


圖 4. GAMIT/GLOBK 作業流程圖

三、研究方法

本文採用之研究方法包括時間序列分析與水平速度模型建立兩大部分，各法詳細說明如下。

3.1 時間序列分析

透過 GLOBK 進行區域網與國際網的每日解合併之後，獲得固定於 ITRF 之下的每日坐標解算成果，以 Nicolasdias 提出的時間序列方程式[16]，如式 1 所示。

$$y(t_i) = a + bt_i c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{g_j}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{h_j}) t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \exp\left(-\frac{t_i - T_{k_j}}{\tau_j}\right) H(t_i - T_{k_j}) + v_i \quad (1)$$

其中 t_i 從 $i = 1, 2, 3 \dots n$ 時，第一、二項為線性變化， a 為截距， b 為測站速率；第三、

四項為年週期估計，係數分別為 c 、 d ；第五、六項為半年週期，係數分別為 e 、 f ；第七項為地震造成之同震位移量，係數為 g_j ；第八項為震後線性速率改變量，係數為 h_j ；第九項為地震後呈指數衰減的現象之修正，係數為 k_j ；最後 v_i 為觀測誤差；其中 H 為階層函數 (Heaviside step function)， τ_j 為鬆弛時間 (relaxation time)。再利用繪圖軟體 GMT(The Generic Mapping Tool)將測站的每日解成果繪製成年度時間序列圖，如圖 5 為 2006 年測站 DARW (澳洲達爾文) 之時間序列圖。

圖中橫軸表示年積日(DOY)縱軸表示相對於平均值的偏移量單位為毫米(mm)，圖中的藍點表示為該參考站於該年積日的位置，藍線表示其標準差。然而透過時間序列圖的繪製，可以達到以下幾點目的：

(1) 看出該參考站位移速度與方向

如圖 5 所示，DARW 於 2006 以每年 56.03mm 的速度向北方移動，同時以每年 37.97mm 的速度往東方移動，而垂直方向的位移速度則相當小，每年以 10.82mm 往上抬升。

(2) 可用作精度及影響因子評估

由藍點位置及標準差可以檢測平差結果的精度，例如於年積日約 350 日時，該點位置偏離原本的趨勢且其標準差較其他日明顯為大，因此可就該日的解算成果進一步探究造成精度較低的原因，可能為地震造成參考站位置的偏移、資料品質不佳或是其他因素所影響。並且在後續整體平差以估計站點年度速度場時，必須將此點剔除，否則將會造成後續速度估計的錯誤。另外透過不同年度間同參考站的時間序列圖來做比較，甚至可能進一步探求是否有季節性或者週年性因素的影響。然而標準差較大的天數會在後續使用 GLOBK 計算年度速度場時給予較低的權重以減輕它的影響

讓品質不致下降[17]。

(3) 震間、同震、震後位移判定

透過長時間的連續資料繪製的時間序列圖，除了可以看出測站移動的速度與方向，同時也是用來判定地震循環的重要依據。在地震發生之間的時期，站點因地殼運動而以穩定的速率進行位移，其震間變形的移動速度與型態可以透過線性函數來表示。然而同震和震後變形雖然無法以簡單的數學模式預測之，但透過時間序列圖可以明確判定其與震間變形的區別，在後續建立速度場模型時可以確保速度資料的正確，同時也為建立變形模型提供資料的時間範圍參考。

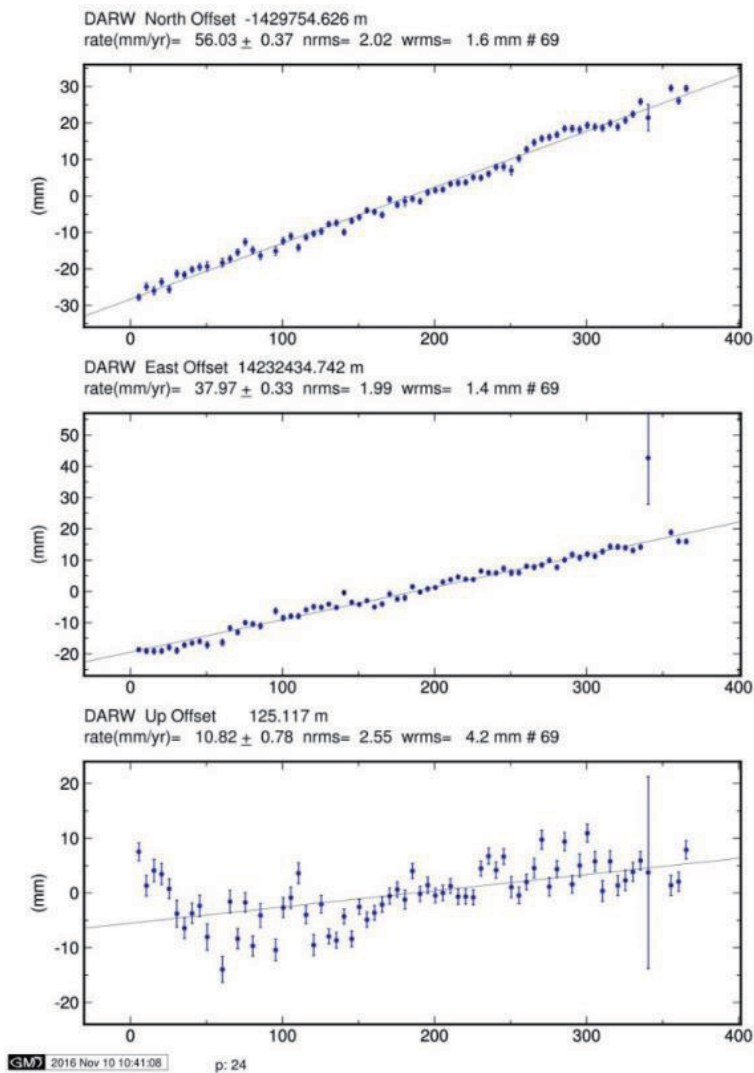


圖 5. DARW（澳洲達爾文）2006 時間序列

3.2 水平速度模型建立

本研究以密集分布的 GPS 觀測站速度場以多項式曲面擬合及數種內插方式建立臺灣地區水平速度模型，並比較分析各方法之精度與優劣，方法分述如下。

(1) 多項式曲面擬合

所謂多項式曲面擬合乃是一種資料擬合的方法，通過建立一連續的函數，可能為線和面，使其能夠吻合已知的數據並且能以該函數預測未知的樣本點，如圖 6 所示，依照函數的維度與次方數可以在分為曲線擬合(curve fitting)或者曲面擬合(surface fitting)。本研究利用參考站之平面投影坐標及速度場為輸入項目以二元函數擬合速度模型，分別使用三次、四次及五次項進行擬合，以五次多項式為例：

$$\begin{aligned} Z = & a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2 + a_7 x^3 \\ & + a_8 x^2 y + a_9 xy^2 + a_{10} y^3 + a_{11} x^4 + a_{12} x^3 y \\ & + a_{13} x^2 y^2 + a_{14} xy^3 + a_{15} y^4 + a_{16} x^5 + a_{17} x^4 y \\ & + a_{18} x^3 y^2 + a_{19} x^2 y^3 + a_{20} xy^4 + a_{21} y^5 \end{aligned} \quad (2)$$

上式中，五次多項式中未知參數共有 21 個，需要大於 21 個已知點才能求解。隨著多項式次數的提高，未知參數也隨之增加，也因此需要更多的樣本才能求解，這樣的情形使實務的應用上更加困難。

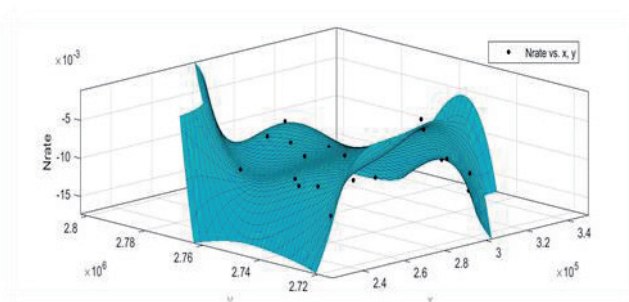


圖 6. 曲面擬合示意圖

(2) 內插法

所謂的內插是數值分析中通過已知的離散數據來求得未知數據的方法，而內插法的種類繁多，應用面向也各有不同，本研究選用以下五種：線性內插法(Linear interpolation)、最鄰近內插法(Nearest neighbor)、三次樣條內插法(Cubic spline)、雙調和樣條內插法(Biharmonic spline)、薄板樣條內插法(Thin-plate spline)。

(3) 局部加權回歸散點平滑法

所謂局部加權回歸散點平滑法(Locally Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS)屬於一種局部回歸，有別於傳統的回歸方法，其專注於整體曲面的擬合上而非特定參數的求取。例如今待求一點 x ，則 x 點的擬合取決於與 x 相近距離的已知點，而通過跨度 α (span) 的選擇以決定選取的距離範圍， α 通常介於 0 到 1 之間，當 α 小於 1 時代表相鄰於 x 的數據比例，其加權的模式為

$$Model = \left[1 - \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^3 \right]^3 \quad (3)$$

其中 D 代表已知點與 x 之距離函數。至於 α 大於 1 時則使用所有的已知點進行擬合，如果在使用時設定太小的跨度會令 x 周圍沒有足夠的數據進行精確擬合，導致較大的方差。但若設定的跨度太大，會使擬合平面過於平滑，導致有較大的偏差產生，為過過度擬合的情形 [18]。

四、成果與分析

研究成果共分為三個部分，第一部分為坐標每日解及坐標解算成果與速度場解算成果；第二部分為利用解算得到的水平速度進行坐標預測與實際解算得到的真實坐標之比較分析；第三部分為水平速度模型建立與精度檢核，將依照第一部分解算之水平速度場趨勢將臺灣分為四個區域進行分析比較。分別為北部地區、中西部地區、西南部地區及東部地區。

4.1 每日解與坐標解算成果

依據前述之研究方法與步驟，利用 GAMIT 與 GLOBK 進行 GPS 觀測量之處理過程，可以得到兩個主要的解算成果，分別為 GAMIT 每日解成果與 GLOBK 的年度解算成果。而其中每日解成果其包含臺灣地區參考站與 IGS 參考站共同解算之基線解，此階段的平差過程屬於寬鬆約制，因此其坐標不能作為最後的結果，但可以針對每日解的報表中得知該天資料的品質與處理狀況，例如週波未定值求解比率，包含寬巷(Wide Lane, WL)及窄巷(Narrow Lane, NL)週波未定值求解比率、總

計採用時刻(epoch)數及坐標三軸標準差等。而週波未定值求解比率應該保持在 85%以上以確保結果是可靠的，若是比率低於 85% 可以是因為觀測時段過短造成資料不足，或是資料雜訊過多的緣故。而其中窄巷的求解比率必須要高於 80%，影響比率高低的因素有觀測時段長短、網型的範圍大小及幾何強度、先驗坐標及衛星軌道參數的準確度及大氣條件等[10]，在本研究實驗中所有的每日解算成果，其寬巷及窄巷週波未定值求解比率皆落在 80%-95% 之間。本研究解算之十年資料其中平面坐標 N、E 兩軸標準差之平均可以達到 2-3mm，至於 U 軸則因為對流層延遲的誤差雖然可以透過模型改正，但在長基線的情況下仍然會對 GPS 高程造成相當的影響，故其精度通常與平面精度相差兩到三倍，本研究的高程標準差平均落於 6-10mm 之間。

4.2 水平速度場解算成果

為了較具體的表現臺灣地區年度的水平速度場的趨勢，本研究從 GLOBK 平差後的報表中將坐標位移的速度及方位角擷取後，透過 GMT 來繪製成圖，圖 7 為 2005 到 2015 年臺灣地區參考站水平速度場圖，箭頭方向為站點位移方向，箭頭度則表示為位移速度，長度比例尺如右下角，箭頭尾端的圓圈表示該站的誤差橢圓。由圖中，可以發現臺灣各個區域以差異相當大的速度及方向在移動，臺灣北部及西部區域以每年 20-40mm 向東南方移動，北部及西部地區有著相當一致的移動趨勢，此現象於不同年度間仍然符合；西南部則因為兩個板塊的擠壓以每年 20-30mm 往西南方移動，此地區的移動情形相較於其他區域來的複雜，除了有方向上的複雜性同時也包含移動量的複雜性；中央山脈附近直到花東縱谷西側的參考站則近乎沒有水平方向的移動，其移動量值甚至小於其誤差橢圓的範圍；花東縱谷東側的參考站則以每年 40-50mm 往西北方移動，與北部及西部地區在方向上呈現相反的趨勢。

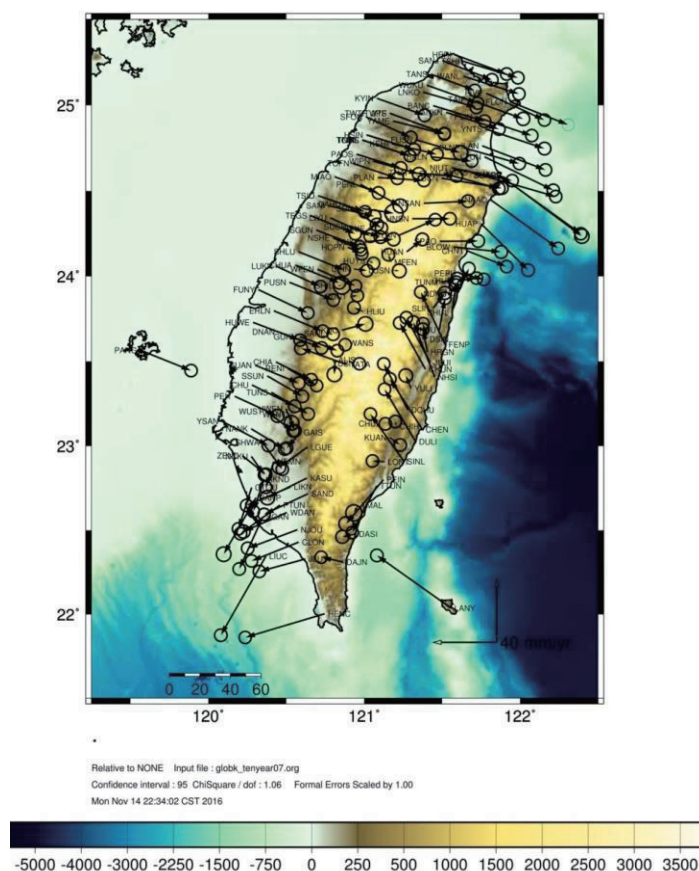


圖 7. 臺灣地區參考站水平速度場

有鑑於臺灣地區複雜的變動情形，在後續建立水平速度場模型時若不加以分類而直接以臺灣全區進行建模，會發生樣本差異過大而導致模型精度較低的情形。故依照站點之水平速度解算結果本研究將臺灣區域分為四個區域進行建模，分別為北部、中西部、西南部和東部地區。除了考量各地區內站點移動速率與

方向的特性，同時也將站點數量考量在內，北部有最一致的移動方向和速率；中西部在移動方向上也有相當的一致性，但其移動速率的差異較北部大；西南部則在方向及速率上都較北部及中西部複雜，但站點分布仍屬均勻；東部則有差異最大的方向及速率範圍。各地區之變動情形表 1。

表 1. 臺灣地區速度場移動情形

地區	採計站數	移動速度(cm/yr)	平均移動速度 (cm/yr)	方位角(deg)
北部	39	2.30 – 5.42	3.42	88.827 - 112.125
中西部	45	0.34 – 3.41	2.16	91.556 - 181.708
西南部	21	1.20 – 4.91	2.64	127.848 - 245.067
東部	45	0.16 – 6.55	2.16	1.316 - 358.113

如表 1 所示，在四個地區中除了西南部的站點數量較少，其餘三個地區的站點數量皆達到 40 站左右的站點數量。從年度的移動速度及方位來看，北部地區相較其他三個地區有最為穩定的移動速度，北部地區平均每年以 34mm 的速度位移且區域中最小與最大移動速度間的差值亦為四區最小，其位移速度之方位角範圍落於 88 到 112 度之間，整體向東偏南方向移動。中西部地區多數站點之移動方向與速度和北部地區相似，但整個中西部地區之移動速度較北部地區低，其中移動速度最小的站點每年僅移動不到 5mm，另外其方位角之範圍也較北部地區廣。西南部地區之方位角範圍又較中西部更為廣，但是西南部地區並不存在如中西部站點移動速度過小的問題，故此區域內的坐標相對關係變形程度較北部及中西部嚴重。至於東部地區則為四個區域中變動情形最為複雜的區域，無論在方向及速度上東部地區站點都呈現差異相當大的情形，其方位角的範圍自 1 到 358 度都有，其中除了包含所有站點中移動速度最大的 6.5cm，同時也有靠近中央山脈的站點站點近乎沒有水平方向的移動。

臺灣地區站點在經過整體平差之後的平面坐標精度為 2-3mm，而透過每日解的年度合

併後得到的各站點水平速度場之平面精度亦落於 2-3mm 之間。雖然各個年度的速度解算成果都有相當小的標準差，但是相同的站點在年度之間仍然會得到不同的速度解算成果，因此透過比較此 92 站於各年度間的速度場量值可以得到每一個站點的平均速度及其標準差，由於臺灣各地區之移動方向與速度差異甚大，故比較站點之速度平均值並無從比較結果精度，但將站點各年度之速度值與 11 年之速度平均值相較而求出的標準差則可以用來作為速度場精度的判斷依據，其標準差的分布情形依照 N、E、U 三軸製成圖 8、圖 9 及圖 10，圖中橫軸表示標準差範圍，單位為 cm/yr，縱軸表示落於該範圍之個數在求出各站點之平均速度與標準差後可以求得整體之平均標準差，如表 2 所示。表 2 中所示，臺灣地區參考站之南北方向速度場之平均標準差較東西方向小，其平均標準差為 0.38cm，東西方向之平均標準差為 0.52cm，至於高程之標準差則為 1.26cm，並沒有低於公分等級。探討其高程標準差遠遠高於 N、E 軸的原因主要兩個，其一是因為長基線的 GPS 解算結果在高程坐標的解算精度遠不及平面坐標，導致在解算速度時因為誤差傳播而使最後的精度僅達到公分等級。

圖 8 中，在 N 方向中共有 52 站的速度標準差位於 0.25~0.50cm/yr 的區間中，佔全部站點的 57%，其中有 19 站的速度標準差小於 0.25cm/yr，佔 20%，15 站介於 0.50~0.75 之間，佔 16%，僅有 6 站介於 0.75~1.00 之間，佔 7%。所有的站點於 N 方向的速度標準差皆小於公分等級。圖 9 中，在 E 方向中共有 55 站的速

度標準差位於 0.25~0.50cm/yr 的區間，站全部站點的 60%，然而小於 0.25cm/yr 的站點僅有一站，位於 0.50~0.75cm/yr 區間共有 27 站，站全部站點的 29%，由此可見在 E 方向的整體標準差較 N 方向稍大，但平均速度標準差小於公分等級的站點仍然佔了 94%。

表 2. 臺灣地區速度場平均標準差

方向	平均標準差(cm)	最大標準差(cm)	最小標準差(cm)
N	0.38	0.99	0.01
E	0.52	1.59	0.18
U	1.26	5.36	0.47

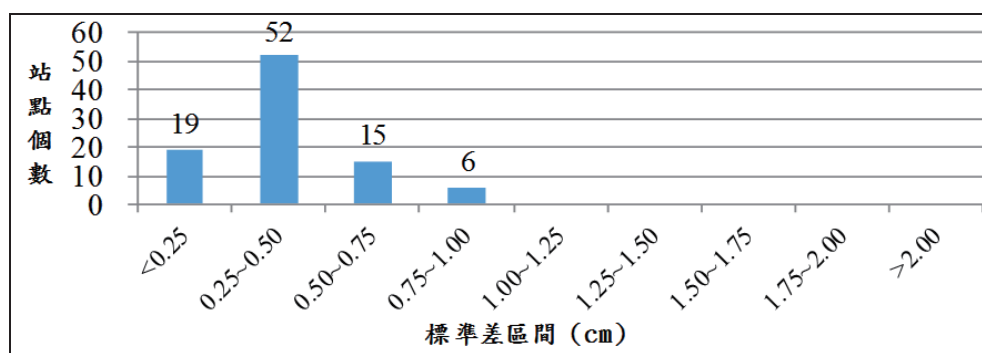


圖 8. N 軸平均標準差分布圖

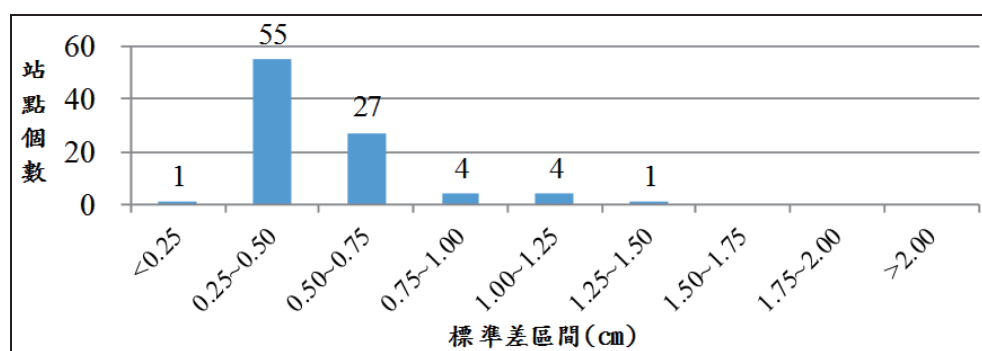


圖 9. E 軸平均標準差分布圖

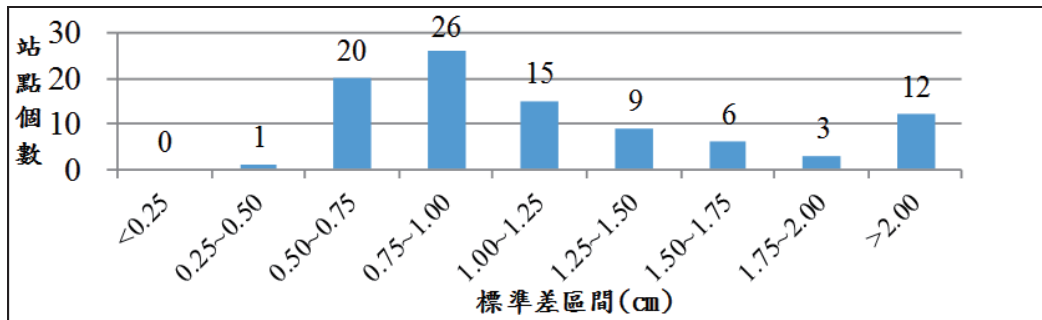


圖 10. U 軸平均標準差分布圖

4.3 水平速度模型

根據前述之水平速度場成果，本研究將臺灣地區分為四個部分進行建模，分別為北部、中西部、西南部與東部地區。而建立速度模型之方法分別以多項式曲面擬合、內插法及局部加權回歸散點平滑法為基礎，並利用 MATLAB 為平台進行模型的建立與展示。再透過交叉驗證法中的留一驗證法(Leave one out cross validation, LOOCV)進行模型的內部精度檢核，LOOCV 是交叉驗證法中最嚴謹的一種方法，其得到的模型誤差會較其他交叉驗證法大[19]。具體做法是每次建模時都從樣本中取出一個做為驗證資料，其餘樣本則做為訓練資料，在建模之後將驗證資料帶入模型中可以求得一模型之預測值，將之與驗證資料之值作比對後得到殘差，重複此步驟直到每個樣本都作為一次驗證資料，然後將每個樣本殘差以下列公式計算留一驗證法的均方根誤差(RMSE)，亦稱為 Leave-one-out RMSE (LOORMSE)。

$$LOORMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y)^2}{n}} \quad (3)$$

其中 n 代表模型樣本數量， y_i 表示以留一驗證法帶入之模型預測值，Y 代表該樣本真值。

4.3.1 北部速度模型

北部地區所含範圍自臺灣最北端起算至

蓬萊站(PENL)為止，分布示意圖如圖 11 所示，共有 39 站參與模型建立。北部地區的站點從 2005 年至 2015 年每年平均移動 3.42cm，方位角範圍位於 88.827° ~112.125° 之間，屬於移動速度及方向都十分穩定的區域，且此區域屬於人口密集發展蓬勃的區域，站點分布均勻且密度高。在模型內部精度檢驗上，北部模型以留一驗證法檢驗後結果如表 3 及圖 12 表示。

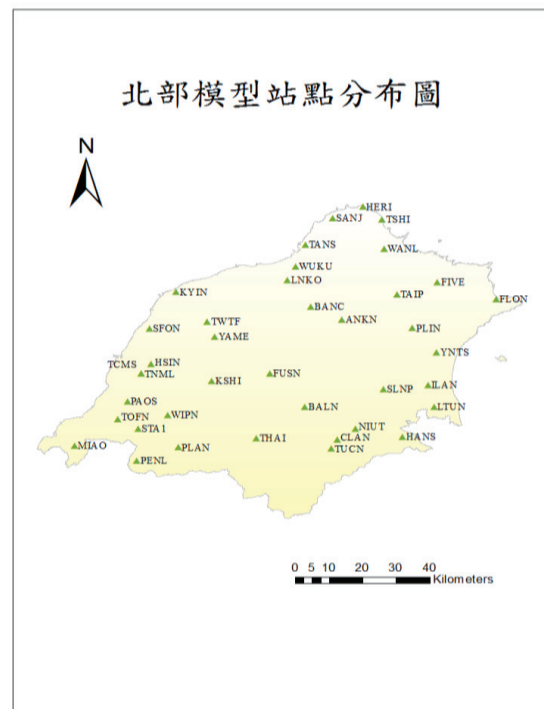


圖 11. 北部模型站點分布圖

表 3. 北部水平速度模型之估測精度

單位: 公分 cm	三次多項式 (Cubic polynomial)	四次多項式 (Quartic polynomial)	五次多項式 (Quintic polynomial)	最鄰近法 (Nearest)	線性內插法 (Linear)	三次樣條內插法 (Cubic Spline)	雙調和內插法 (Biharmonic)
N 均方根誤差	0.10	0.15	0.24	0.18	0.10	0.10	0.95
E 均方根誤差	0.15	0.17	0.41	0.30	0.15	0.15	1.13
薄板樣條插值 (Thine-plate) 線性加權回歸散點平滑法 (Linear Lowess) 二次加權回歸散點平滑法 (Quadratic Lowess)							
		(span 75)	(span 50)	(span 25)	(span75)	(span50)	(span25)
N 均方根誤差	0.95	0.18	0.16	0.13	0.12	0.12	0.23
E 均方根誤差	1.12	0.25	0.21	0.20	0.16	0.18	0.23

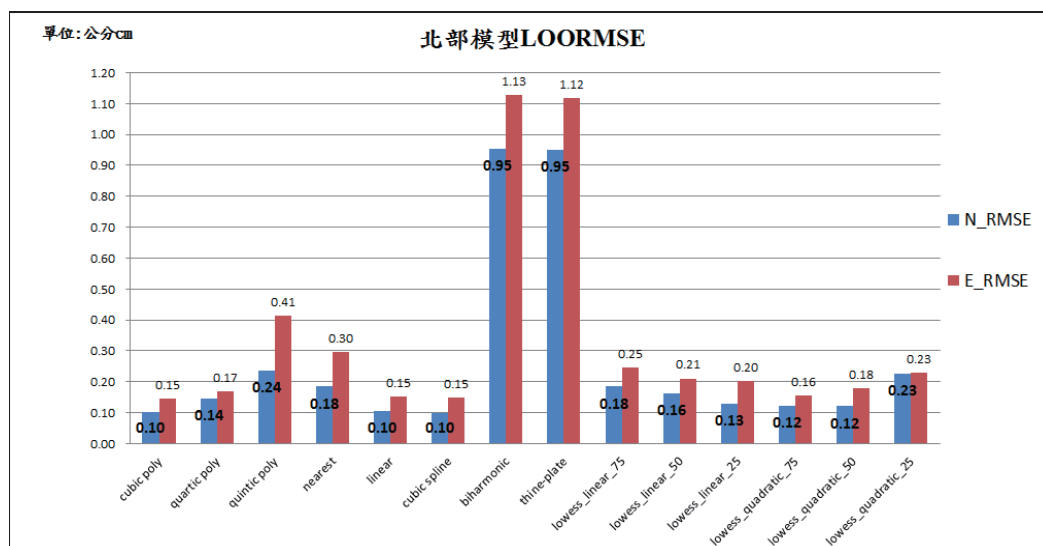


圖 12. 北部水平速度模型之估測精度圖

由表 3 及圖 12 可以發現在北部地區，多數的方法的 RMSE 可以達到 2mm 上下的精度，其中 E 軸方向的 RMSE 皆大於 N 軸方向。各方法中，多項式曲面擬合以三次多項式有最佳的模型精度；內插法中以 Linear 及 Cubic Spline 有最好的精度，而 Biharmonic 和 Thine-Plate 內插法的 RMSE 則遠遠大於其他擬合方法，僅達到公分等級；LOWESS 方法中以 Linear LOWESS 有最穩定的精度，無論是以 25%、50%或 75%的跨度(span)都能達到 2mm 上下的精度，Quadratic LOWESS 在 75% 及 50%也能達到 2mm 上下的精度但 25%時期

誤差有明顯的提升。

4.3.2 中西部速度模型

中西部地區所含範圍縱向乃從北部最南邊的站點 PENL 起，直到灣丘站(WANC)為止，至於橫向邊界則到合流坪站(HLIU)為止，分布如圖 13 所示，共有 45 站參與模型建立，中西部地區從 2005 年至 2015 年每年平均移動 2.16cm，整體移動速度較北部地區慢，且其最小移動速度的站點為 0.34cm，相當於沒有水平的移動，另外其方位角的範圍位於 91.556

° ~181.708°。此區域同樣屬於臺灣人口密集發展蓬勃的區域，區域內站點的分布密度高且

設站時間早，重複觀測時間長。在模型內部精度檢驗上，中西部模型以留一驗證法檢驗後結果如表 4 及圖 14 所示。

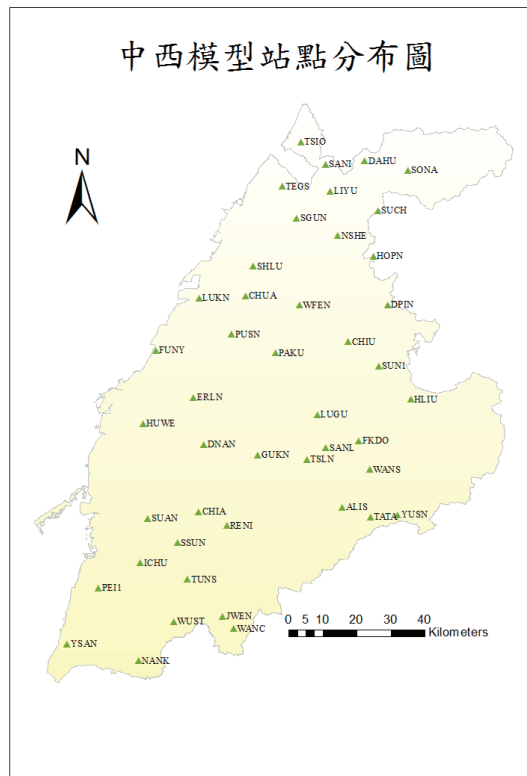


圖 13. 中西部模型站點分布圖

表 4. 中西部水平速度模型之估測精度

單位: 公分 cm	三次多項式 (Cubic polynomial)	四次多項式 (Quartic polynomial)	五次多項式 (Quintic polynomial)	最鄰近法 (Nearest)	線性內插法 (Linear)	三次樣條內插法 (Cubic Spline)	雙調和內插法 (Biharmonic)
N 均方根誤差	0.21	0.23	0.50	0.26	0.23	0.24	0.30
E 均方根誤差	0.26	0.26	0.69	0.38	0.26	0.27	0.46
	薄板樣條插值 (Thine-plate)	線性加權回歸散點平滑法 (Linear Lowess)			二次加權回歸散點平滑法 (Quadratic Lowess)		
		(span 75)	(span 50)	(span 25)	(span 75)	(span 50)	(span 25)
N 均方根誤差	0.27	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.27
E 均方根誤差	0.38	0.23	0.23	0.24	0.23	0.24	0.51

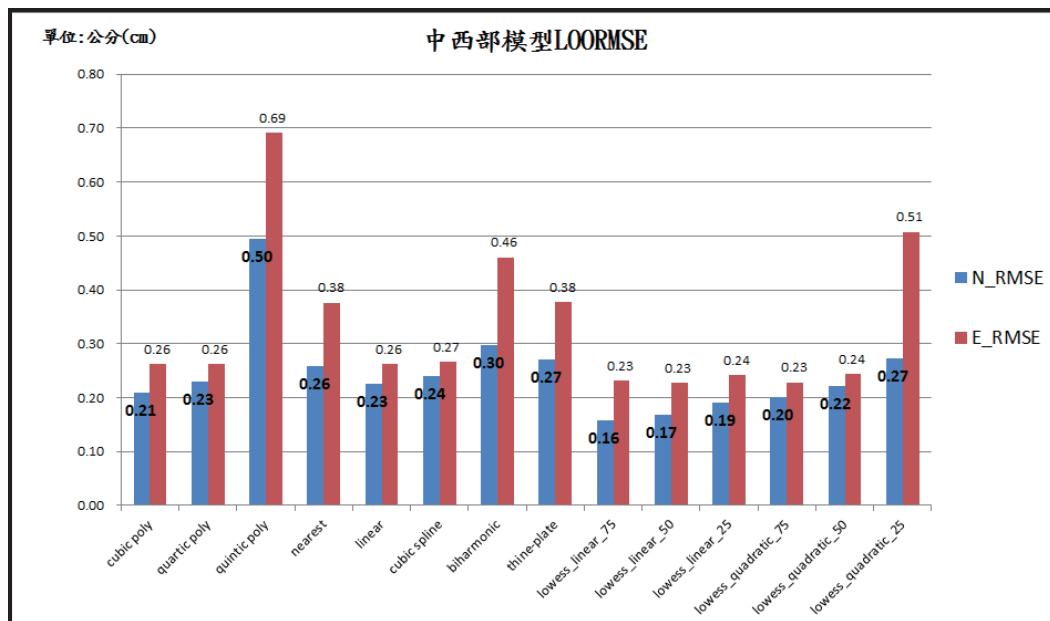


圖 14. 中西部水平速度模型之估測精度圖

由表 4 及圖 14 可以看出中西部之速度模型整體之平均誤差均大於北部地區，多數方法都可以達到 2~3mm 左右的精度，其中 E 軸方向的均方根誤差較 N 軸方向大約莫 1mm。其均方根誤差約比北部模型高出 1 至 2 個 mm，曲面擬合中仍以三次多項式擬合有最小之平均誤差，內插法則以 linear 和 cubic spline 有最小的平均誤差，LOWESS 方面中西部則以 linear 有較小的平均誤差，至於 quadratic 則以 75% 和 50% 跨度時有與 linear 有相似的精度，在 25% 跨度時均方根誤差有明顯的增加趨勢。

4.3.3 西南部速度模型

西南部地區所含範圍之縱向範圍接續自中西部模型之最南端站點 WANC，橫向邊界則往東至恆春站(HENC)為止，共有 21 站參與模型建立，如圖 15 所示。西南部地區的速度場移動情形較北部及中西部複雜許多，以整體速度場看來這個區域呈現一種旋轉的趨勢，與西部及北部整體呈現單一方向位移的情形有所不同，也因此被獨立出來作為單一部分進行建模。由於此區域所占面積為四區中最小故站點數僅有 21 站，導致在以留一驗證法驗證多項式曲面擬合之模型精度時，區

域內僅剩於 20 站不足以滿足五次多項式擬合的最小參數個數，而使模型無法建立。西南部模型以留一驗證法檢驗後結果如表 5、圖 16 所示。

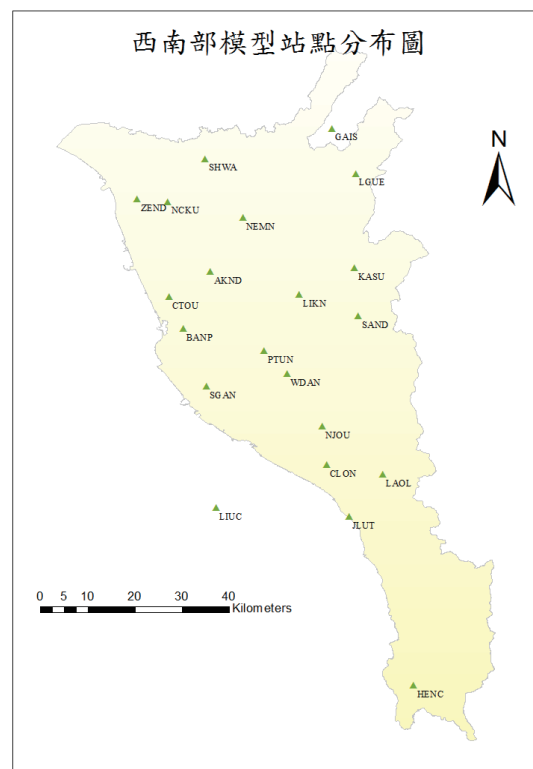


圖 15. 西南部模型站點分布圖

表 5. 西南部水平速度模型之估測精度

單位: 公分 cm	三次多項式 (Cubic polynomial)	四次多項式 (Quartic polynomial)	五次多項式 (Quintic polynomial)	最鄰近法 (Nearest)	線性內插法 (Linear)	三次樣條內插法 (Cubic Spline)	雙調和內插法 (Biharmonic)
N 均方根誤差	0.44	1.53	NaN	0.37	0.19	0.19	1.60
E 均方根誤差	0.24	0.87	NaN	0.36	0.19	0.23	0.68
	薄板樣條插值 (Thine-plate)	線性加權回歸散點平滑法 (Linear Lowess)			二次加權回歸散點平滑法 (Quadratic Lowess)		
		(Span75)	(Span50)	(Span25)	(Span75)	(Span50)	(Span25)
N 均方根誤差	0.27	0.25	0.24	0.39	0.31	0.21	11.13
E 均方根誤差	0.35	0.30	0.30	0.64	0.40	0.80	17.71

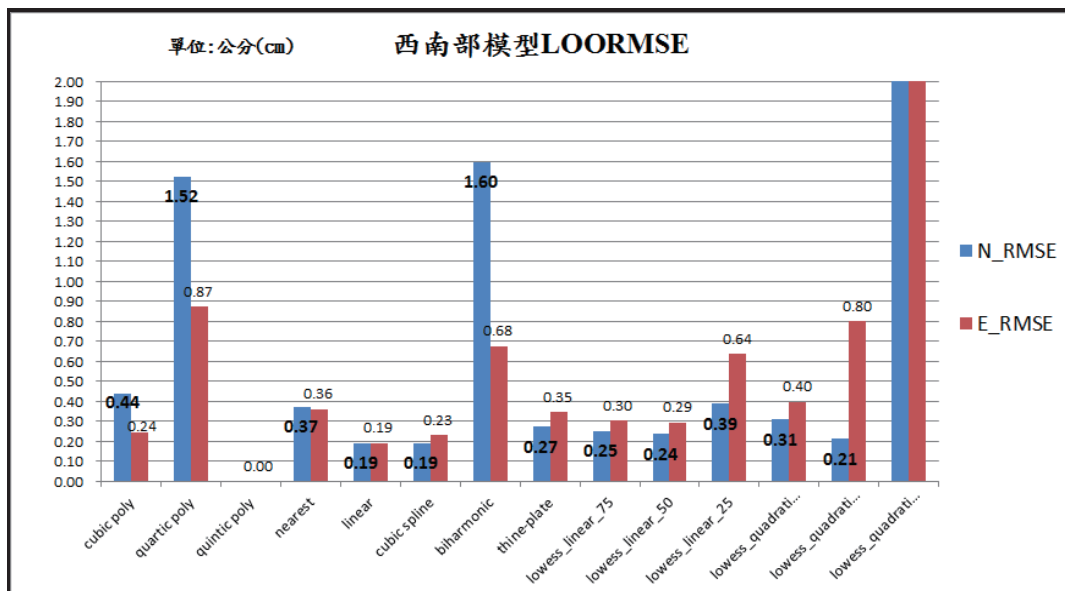


圖 16. 西南部水平速度模型之估測精度圖

在西南部模型中，各個方法間出現較大的落差，多項式擬合中三次多項式可以達到 5mm 左右的均方根誤差，但四次多項式的均方根誤差卻分別高達 1.52 及 0.87cm；而內插法中仍以 linear 和 cubic spline 有最佳的精度，均方根誤差大約為 2mm 上下；LOWESS 則以 75%和 50%跨度的 linear 模型有最佳的精度，除此之外，西南部地區並沒有明顯的 E 軸均方根誤差大於 N 軸方向的情形。

4.3.4 東部速度模型

東部地區所包含範圍西從中央山脈東部地區所包含範圍西從中央山脈起算，最北端測站為崇德站(CHNT)，最南端測站則為達仁站(DAJN)，共有 45 站參與模型建立，分布如圖 17 所示。東部地區有四區中差異最大的速度範圍及方位角範圍，主要因為此區域普遍被認為菲律賓海板塊及歐亞板塊交界地帶，因此區域的地表變形情形十分複雜。而臺灣東部地區因天然災害較多且地形崎嶇的緣故，此區域的人口不較西半部密集，此區域內的參考站數量雖不在少數，但分布上並不均勻。

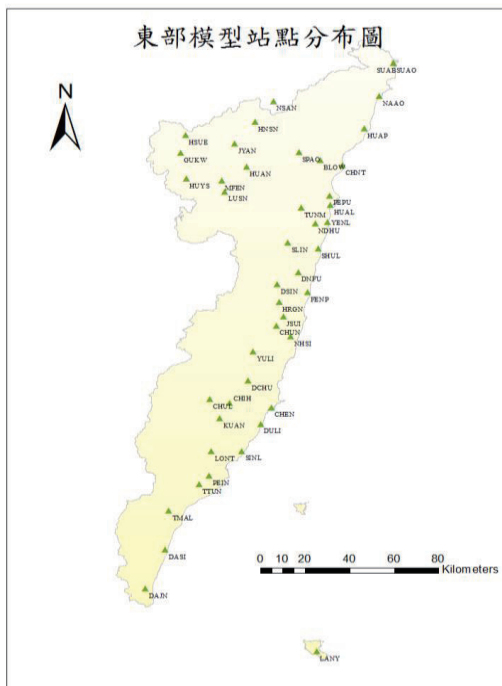


圖 17. 東部模型站點分布圖

表 6. 東部水平速度模型之估測精度

單位: 公分 cm	三次多項式 (Cubic polynomial)	四次多項式 (Quartic polynomial)	五次多項式 (Quintic polynomial)	最鄰近法 (Nearest)	線性內插法 (Linear)	三次樣條內插法 (Cubic Spline)	雙調和內插法 (Biharmonic)
N 均方根誤差	3.43	14.19	0.88	0.68	0.46	0.47	1.40
E 均方根誤差	3.83	3.04	0.58	0.49	0.29	0.32	6.08
	薄板樣條插值 (Thine-plate)	線性加權回歸散點平滑法 (Linear Lowess)			二次加權回歸散點平滑法 (Quadratic Lowess)		
		(Span75)	(Span50)	(Span25)	(Span75)	(Span50)	(Span25)
N 均方根誤差	0.49	1.19	0.90	1.08	1.34	0.47	8.98
E 均方根誤差	0.87	0.81	0.60	0.44	1.20	1.75	17.40

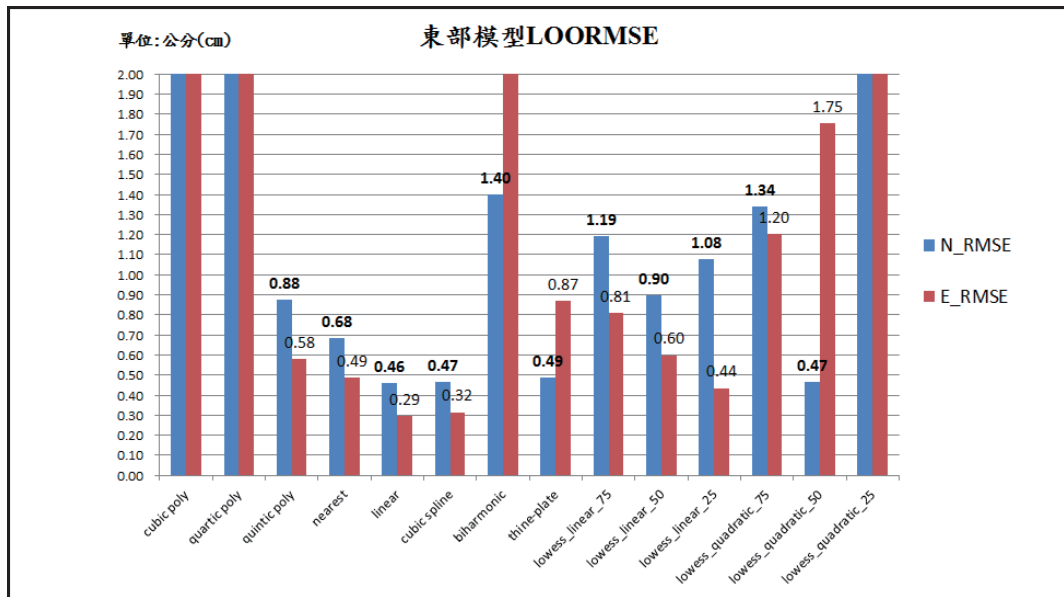


圖 18. 東部水平速度模型之估測精度圖

由表 6、圖 18 中可以看出東部地區之速度模型品質呈現很不穩定的趨勢，其中三次及四次多項式擬合在東部地區之模型精度十分的差，在其他三區有較差模型精度的五次多項式反而在東部地區有三者最低的均方根誤差；內插法則依然是 linear 及 cubic spline 有最佳的模型精度；LOWESS 方法則呈現出 N 軸與 E 軸差距甚大的結果，在 linear 模型中 E 軸皆可以達到 4-8mm 左右之模型精度，但 N 軸方面則僅達到 1cm 等級，至於 quadratic 模型中不管 N 軸及 E 軸僅達數公分等級之模型精度。

4.4 成果綜合分析

依照上述之實驗結果，對於利用多項式曲面擬合、內插法、局部加權回歸散點平滑法等建立水平速度場模型，可以得到以下幾點結論。

1. 臺灣的四個區域模型中，取各方法的 RMSE 平均值，以北部模型有最佳的精度，中西部模型有次佳的精度，西南部 and 東部模型因地表的位移情形複雜而精度較差，以東部模型的精度最差。
2. 多項式曲面擬合、內插法及局部加權回歸散點平滑法中，以內插法中的 Linear 及 Cubic Spline 法有最好的模型精度，線性的局部加權回歸散點平滑法在跨度設定高於

50% 可以達到與內插法相等的精度，以多項式曲面擬合的模型精度最差。另外透過觀察擬合圖形可以發現，內插法可以預測的範圍較其他兩種方法小，因此在實際應用上對於控制點的分布及密度要求較高，在可應用範圍較大的情況下，線性的局部加權回歸散點平滑法仍可達到相當的精度，故此方法是較內插法靈活的方法。

3. 試比較三大類方法之各別特性，其中多項式擬合以三次多項式有最好的模型精度，四次次之，五次多項式擬合會呈現過度擬合的情況，且多項式擬合屬於一次將全部的訓練資料進行模型的建立，因此在面對訓練資料異質性較高的情況，會因模型的彈性不足而效果不彰。而五種內插法中 Biharmonic Spline 和 Thin-plate Spline 因為會對於整體訓練樣本進行平滑化的關係，會使擬合後的模型過度平坦而使其精度不佳。在局部加權回歸散點平滑法中 Linear 的模型整體的精度都高於 Quadratic 模型，主要原因在於 Quadratic 在距離加權時以二次項而非線性比例進行加權，會使擬合後的模型變化過於劇烈而使曲面起伏較大。

五、結論

在坐標與水平速度場部份，本文解算之參考站水平坐標精度為 2mm-3mm，水平速度場之標準差平均約在 5mm 左右，此外在速度場的移動速度及方位角之結果皆與前人研究成果相似，臺灣北部及西部地區以每年 20mm-40mm 向東偏南方移動；西南部地區則以每年 20mm-30mm 向西南方移動；花東縱谷以東的地區以每年 40mm-50mm 向西北方向移動，與西部及北部在方向上呈現相反的趨勢。在水平速度模型內部精度檢驗中，北部有最佳的模型精度，中西部有次佳的模型精度，以東部模型精度最差。各方法間以內插法中的線性及三次樣條內插法有最佳的模型精度，線性之局部加權迴歸散點平滑法在跨度設定高於 50%時可以達到與內插法相當的模型精度，而多項式曲面擬合之模型精度最差。而在相同的控制點分布情況下，局部加權迴歸散點平滑法可以預測的範圍較內插法大，應用上較為靈活。在模型外部精度檢核中，內插法仍有最小的均方根誤差，但與其餘方法之差距不若內部檢驗時明顯，除了多項式曲面擬合外的其餘方法都能達到 5mm 左右之均方根誤差。

參考文獻

- [1] Bourne, S.J., England, P.C., and Parsons, B., 1998, "The motion of crustal blocks driven by flow of the lower lithosphere and implications for slip rates of continental strike-slip faults," *Nature*, 391(6668):655-659.
- [2] Grant, D.B., Blick, G.H., Pearce, M.B., Beavan, R.J., and Morgan, P.J., 1999, "The development and implementation of New Zealand Geodetic Datum 2000," pp 18-30 in IUGG99 General Assembly : Birmingham UK.
- [3] Hatanaka, Y., Tobita, M., Kuroishi, Y., and Imakiire, T., 2007, "Efficient Maintenance of the Japanese Geodetic Datum 2000 Using Crustal Deformation Models-PatchJGD & Semi-Dynamic Datum," *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 54:49-59.
- [4] Snay, R. A., 1999, "Using the HTDP software to transform spatial coordinates across time and between reference frames," *Surveying and Land Information Systems*, 59(1):15-25.
- [5] Blick, G., Crook, C., Grant, D., and Beavan, J., 2005, "Implementation of a semi-dynamic datum for New Zealand," pp. 38-43 in *A Window on the Future of Geodesy*, Springer, Berlin:Heidelberg
- [6] Yu, S.B., and Kuo, L.C., 2001, "Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan," *Tectonophysics*, 333: 199-217.
- [7] Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C., 1997, "Velocity field of GPS stations in the Taiwan area," *Tectonophysics*, 274: 41-59.
- [8] Grant, D.B., 1995, "A dynamic datum for a dynamic cadastre," *Australian surveyor*, 40(4): 22-28.
- [9] Grant, D., and Blick, G., 1998, "A new geocentric datum for New Zealand," *NZ Surv*, 288: 40-42.
- [10] Pearce, M. B., 1998, "A modern geodetic reference system for New Zealand," *UNISURVS*, Vol. 52.
- [11] Casula, G., 2015, "GPS Data Processing of Five Years of More Than 300 Permanent Station Archive with the Distributed Sessions Approach in Italian Peninsula", Paper presented at the 1st International Electronic Conference on Remote Sensing, Aristotle University of Thessaloniki,

- Greece, June 22-July 5.
- [12] Herring, T.A., King, R.W., and McClusky, S.C., 2010, Introduction to Gamit/Globk, Cambridge:MIT Press.
- [13] Herring, T. A., Floyd, M. A., King, R. W., and McClusky, S. C., 2015, GLOBK Reference Manual, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Cambridge:MIT Press.
- [14] Boehm, J., Heinkelmann, R., and Schuh, H., 2007, "Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications," *Journal of Geodesy*, 81: 679-683.
- [15] Dong, D., Herring, T. A., and King, R. W., 1998, "Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data," *Journal of Geodesy*, 72:200-214.
- [16] Dubbini, M., Cianfarra, P., Casula, G., Capra, A., and Salvini, F., 2010, "Active tectonics in northern Victoria Land (Antarctica) inferred from the integration of GPS data and geologic setting," *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 115, B12421.
- [17] Nikolaidis, R., Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, Ph.D. dissertation, Univ. of Calif. San Diego, 2002.
- [18] Herring, T. A., Floyd, M. A., King, R. W., and McClusky, S. C., 2015a, GLOBK Reference Manual, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. , Cambridge:MIT Press.
- [19] Cleveland, W. S., 1979, "Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots," *Journal of the American statistical association*, 74(368):829-836.
- [20] Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., Hastie, T., Friedman, J., and Tibshirani, R., 2009, The elements of statistical learning. New York: Springer.

