

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

第二卷第二期 中華民國一〇三年七月



VOLUME 2, NO. 2

Jul. 2014

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



內政部國土測繪中心共同發行

# 中華民國地籍測量學會第17屆組織表

## 一、理監事會：

理事長：盧鄂生

副理事長：蕭輔導

常務理事：高書屏、洪本善、梁東海

理事：謝福勝、何維信、吳宗寶、王定平、江俊泓、崔國強、陳惠玲、朱上岸、梁崇智、蕭萬禧、楊名、  
江渾欽、紀聰吉、周天穎、張嘉強、吳相忠

常務監事：蘇惠璋

監事：史天元、朱金水、蕭正宏、容承明

秘書長：鄭彩堂(兼任)

副秘書長：蔡鴻勳(兼任)

秘書：陳鶴欽(兼任)

會員資格審查委員會：由秘書處兼辦

## 二、各種委員會：

### (一)服務委員會：

主任委員：李萬凱

委員：江俊泓、孔繁榮、盧金胡、王啟鋒、陳振文、王定平、高書屏、鄭宏達、王文燦、李建利、  
楊燿東

總幹事：張台義

### (二)編輯委員會：

主任委員：楊名

委員：陳春盛、吳究、史天元、黃灝雄、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：洪本善

委員：陳惠玲、駱旭琛、吳宗寶、江日春、蕭萬禧、賴偉君、林志清、鄭鼎耀、彭丈、黃文華

總幹事：王敏雄

幹事：謝東發、董荔偉

### (四)獎章委員會：

主任委員：蕭輔導

委員：張元旭、黃榮峰、曾國鈞、謝福來、曾清涼、洪本善

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：周天穎

委員：曾耀賢、陳惠玲、江俊泓、張坤樹、葉美伶

總幹事：邱明全

幹事：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](mailto:cscs.editor@gmail.com)

## 台灣西南部半動態基準之建立

景國恩<sup>1\*</sup> 孔冠傑<sup>2</sup>

論文收件日期：103.01.09

論文修改日期：103.03.28

論文接受日期：103.04.09

### 摘 要

臺灣目前採用的”靜態式”大地坐標基準(Taiwan Geodetic Datum 1997, TWD97)，因境內菲律賓海板塊與歐亞板塊之擠壓，導致隨著時間的累積而漸失其精度。本研究蒐集中央地質調查所 2004 至 2010 年台灣西南部 221 個 GPS 移動站的水平速度資料，應用克立金內插法以及塊體模型法產生區域內的水平速度模型，並據此建立半動態基準以維護區域內坐標系統的精度與延長使用年限，同時，本研究亦另使用區域內獨立的 44 個 GPS 連續站的水平速度資料進行模型精度之驗證。由分析結果得知，以克立金內插法建立的地表水平速度模型，移動站的模型推估值與觀測值的差異量，在 N、E 方向的均方根值均為 $\pm 0.3$  mm/yr；連續站則在 N、E 方向分別為 $\pm 1.9$  mm/yr 與 $\pm 2.2$  mm/yr。以塊體模型法建立的速度模型，其移動站的模型推估值與觀測值的差異量，於 N、E 方向分別為 $\pm 2.0$  mm/yr 與 $\pm 2.8$  mm/yr；連續站的差異量則分別為 $\pm 2.0$  mm/yr 與 $\pm 2.9$  mm/yr。最後亦將坐標轉換法之成果納入比較，結果指出在沒有瞬間大型的板塊位移發生時，克立金內插法建立的速度模型可以維持其精度約 25 年，塊體模型可維持約 15 年，而坐標轉換法則維持不到 3 年。

**關鍵詞：**水平速度場、克立金內插法、坐標轉換法、塊體模型

---

<sup>1</sup> 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>2</sup> 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

\* 通訊作者，TEL：(06)2757575 # 63840，E-mail: [jingkuen@mail.ncku.edu.tw](mailto:jingkuen@mail.ncku.edu.tw)。

# Establishment of Semi-Dynamic Datum in SW Taiwan

Kuo-En Ching<sup>1\*</sup>, Kuan-Chieh Kung<sup>2</sup>

## Abstract

The precision of Taiwan's current static geocentric datum (Taiwan Geodetic Datum 1997, TWD97) is losing with time due to the collision between the Eurasian and the Philippine Sea plates. In order to sustain the precision of Taiwan's datum, observations from 221 campaign-mode GPS stations and 44 continuous GPS stations in SW Taiwan are used to examine the performance of semi-dynamic datum. In this study, we first estimated a horizontal velocity field in SW Taiwan using the data from 221 campaign-mode GPS stations. Then the velocity models were constructed by adopting an exponential function in a Kriging interpolation model and a tectonic block model (DEFNODE), respectively. The RMS misfits of velocity model inferred from the Kriging interpolation in N and E components are  $\pm 0.3$  mm/yr and  $\pm 0.3$  mm/yr, respectively. The RMS misfits of velocity model derived from the block model in N and E components are 2.0 mm/yr and 2.8 mm/yr, respectively. Next, observations from 44 continuous GPS stations were adopted to realize the precision of semi-dynamic datum. The performances of the Kriging interpolation are  $\pm 1.9$  mm/yr in N component and  $\pm 2.2$  mm/yr in the E component, respectively. For the block model, the RMS of residual errors were averaged  $\pm 2.0$  mm/yr in N component and  $\pm 2.9$  mm/yr in E component. The coordinate transformation is also used in this study for comparison with the velocity models. Assuming no large coseismic offsets and the surveyed coordinate difference less than 24 mm, the precision of the Kriging interpolation model is estimated to survive ~25 years, the precision of block model could be kept about 15 years, and the precision of coordinate transformation is evaluated to preserve less than 3 years.

**Keywords:** Coordinate Transformation, Horizontal Velocity Field, Kriging Interpolation, Tectonic Block Model

---

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>2</sup> Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

\* Corresponding Author, TEL: +886-6-2757575 # 63840, E-mail: [jyrau@mail.ncku.edu.tw](mailto:jyrau@mail.ncku.edu.tw).

## 一、前言

國家坐標系統提供社會基礎建設、測繪科技發展、學術研究分析等之根本，因此，建立高精度且具較長使用年限之坐標系統為國家發展的一項重要目標(Grant et al., 1999)。傳統建立的”靜態式”坐標系統，其坐標值不隨時間而改變，使得位處板塊邊界的區域，因為板塊運動的影響而出現長周期規律性的偏移或瞬時性的局部位移(例如：地震)，造成坐標精度下降而縮短坐標系統的使用年限(Pearson et al., 2010)。為維持既有坐標系統的精確性，除了現行耗費龐大經費之全面性大規模國家控制點重測作業外，在考量節省人力及經費成本等因素下，建立不同時期的坐標轉換機制已衍然而生；半動態基準之概念即是一個能夠克服板塊運動影響之方法，且已被日本、美國、紐西蘭等位於板塊運動活躍區域之國家所採用並研究、分析(Walcott, 1984; Grant et al., 1999; Tanaka et al., 2007; Pearson et al., 2010)。半動態基準的目的在於解決坐標點位受到板塊運動的影響，考慮在不同時間點上，點位置受到變動程度之不同，而加入了時間的維度來描述點位的正確坐標(Grant et al., 1999)。因此，由於考慮了板塊運動的影響，所以坐標系統的使用年限得以延長，同時亦可以降低更新坐標系統時所需要的人力、物力等經費成本(Tanaka et al., 2007)。

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處(圖 1)，亦面臨了坐標系統精度因為活躍的板塊運動而隨著時間下降的問題，因此，建立區域的半動態基準確有其必要性。由圖 2 台灣的 GPS 水平速度場可以得知，台灣東部與西南部地區相較於其它區域具有較大的速度梯度，例如：台灣西南部的旗山斷層至六甲-木屐寮斷層一帶即約有 0.7-1.4  $\mu\text{strain}/\text{yr}$  的最大壓縮量(Yu and Chen, 1994)。相對來說，台灣東部區域的地震活動較西南部地區頻繁，其形成原因亦較複雜，另亦因為台灣西南部為人口稠密、經濟高度發展的地區，對於高精度的坐標基準需求亦較高，因此，本研究設定台灣西南部地區為研究區域，收集區域內 GPS 連續站以及移動站的觀測資料以估計各站的水平速度量，並藉此產生區域的水平速度模型，最後根據這模型建立區域的半動態基準。

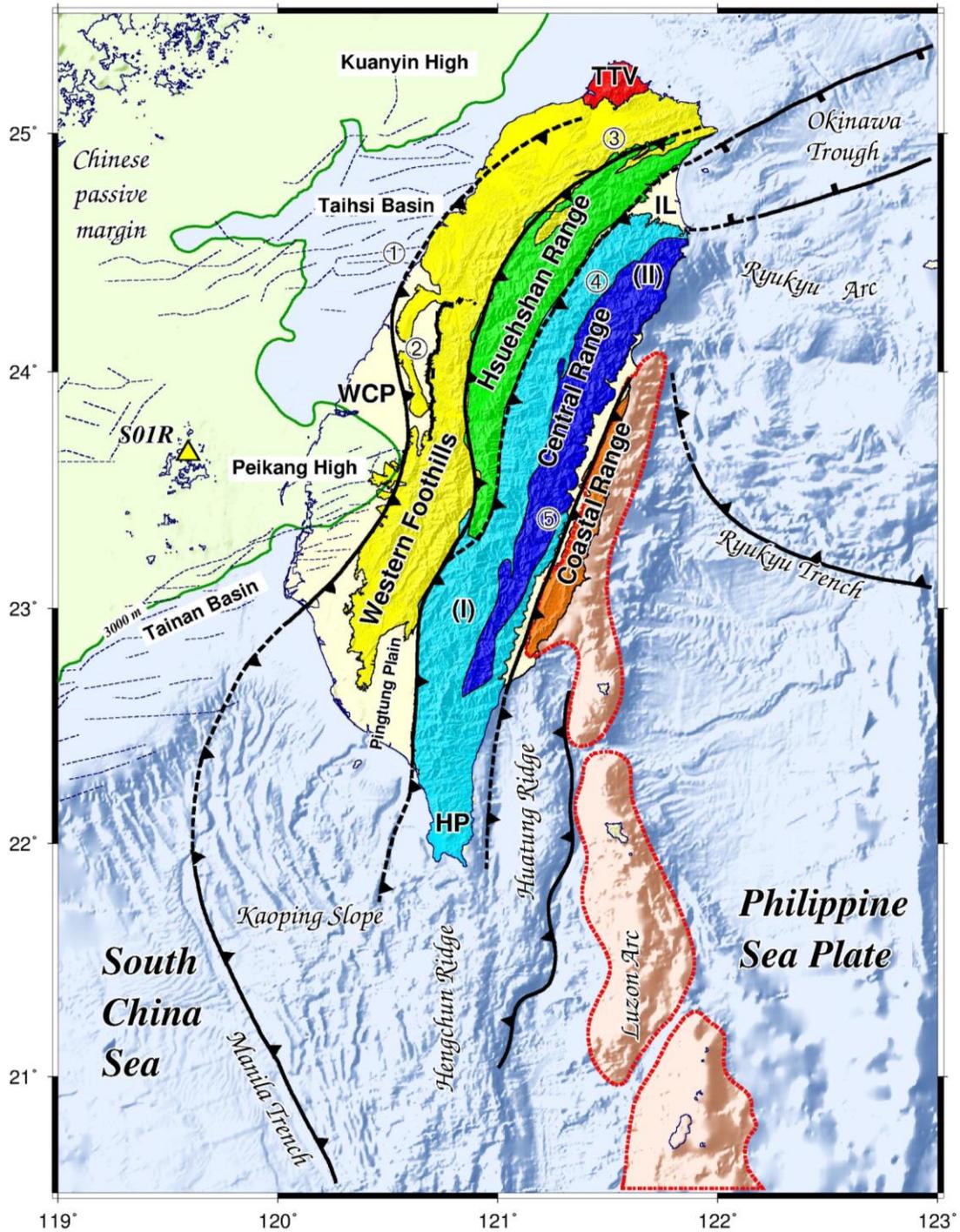


圖1 台灣大地構造框架。大陸邊緣之淺綠色區域表示先第三系基盤高區之位置(Lin et al., 2003)。藍色虛線為碰撞造山前所發育之正斷層。WCP為西部海岸平原；TTV為大屯火山；HP為恆春半島；IL為宜蘭平原。數字1-5分別代表變形前緣、車籠埔斷層、屈尺斷層、梨山斷層及縱谷斷層。I-II分別代表中央山脈西翼板岩區及中央山脈東翼變質雜岩區

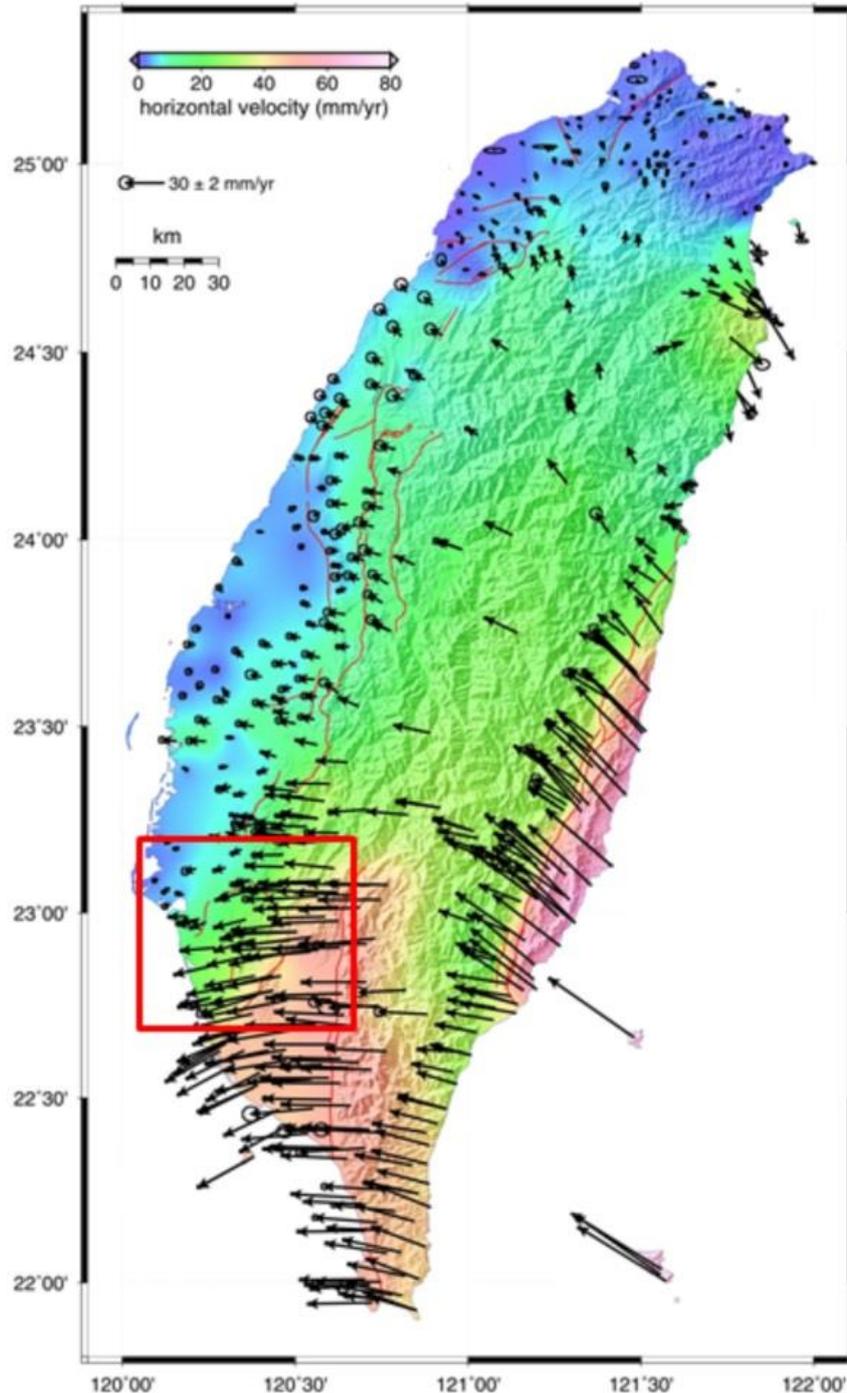


圖2 相對於澎湖S01R測站，台灣地區1995至2005年之GPS水平速度場(Ching et al., 2011)。紅色方框標示本研究之區域

一般而言，板塊位移與斷層錯動所產生的地表變形主要有：(1)大地震造成的永久同震變形(coseismic deformation)；(2)大地震發生前的震間變形(interseismic deformation)，其主要反映板塊長時期的相對位移與斷層之間鎖定交互作用的結果(McCaffery, 2013)；(3)大地震發生後的持續且非線性變化的板塊位移，其將延續一段時間，這種板塊位移形態稱為震後變形(postseismic deformation)，其數值模式通常較複雜而不易量化(e.g., Nur and Mavko, 1974; Thatcher and Rundle, 1984; Tse and

Rice, 1986; Roeloffs, 1996; Peltzer et al., 1996)。台灣西南部區域，2004 至 2010 年間未有重大地震發生，因此，本研究蒐集此時期 221 個 GPS 移動站的觀測資料進行坐標解算並以時間序列估算各站的水平速度時，僅考量震間變形的影響，然後整合 221 個移動站的速度量，分別以克立金內插法與塊體模型法建立區域的水平速度模型，接著，另以區域內 44 個 GPS 連續站之速度值進行各速度模型精度的檢驗。最後，併同坐標轉換法的結果進行比較，評估各種方法隨時間之增加而變化的推估精度，並探討各基準的最大使用年限。

## 二、地質背景

台灣造山帶一般被認為是歐亞板塊與菲律賓海板塊以約 82 mm/yr 的速度相互擠壓成的(Yu et al., 1997; Ching et al., 2011) (圖 1)。本研究區域主要分佈範圍從西部麓山帶至西南沿海平原，西部麓山帶是由沉積於中央山脈西面次等地槽內的新第三紀地層所構成，這些岩層受褶皺後產生一連串緊密相連的向斜與背斜構造，多數是軸面向東南傾的不對稱褶皺。區域內斷層很多，並常為許多主要褶皺構造的邊界，大部分之斷層屬於低角度的逆斷層，逆衝斷塊皆為東南向西北移動，造成顯著的覆瓦狀斷層系統，為本區地質構造特色(何春蓀, 2003)。根據中央地質調查所 2010 年公布的活動斷層分布圖，指出本研究區內主要活動斷層有：六甲-木屐寮斷層、觸口斷層、左鎮斷層、新化斷層、後甲里斷層、小岡山斷層、旗山斷層與潮州斷層；此外，根據研究指出，台灣西南部另有 2 條推斷性斷層，鳳山轉換斷層(Ching et al., 2007)與高屏斷層(Shyu et al., 2005) (圖 3)。西南部沿海平原主要以更新統與全新統地層為主，層面較為平坦，地表主要為沖積層(何春蓀, 2003)。

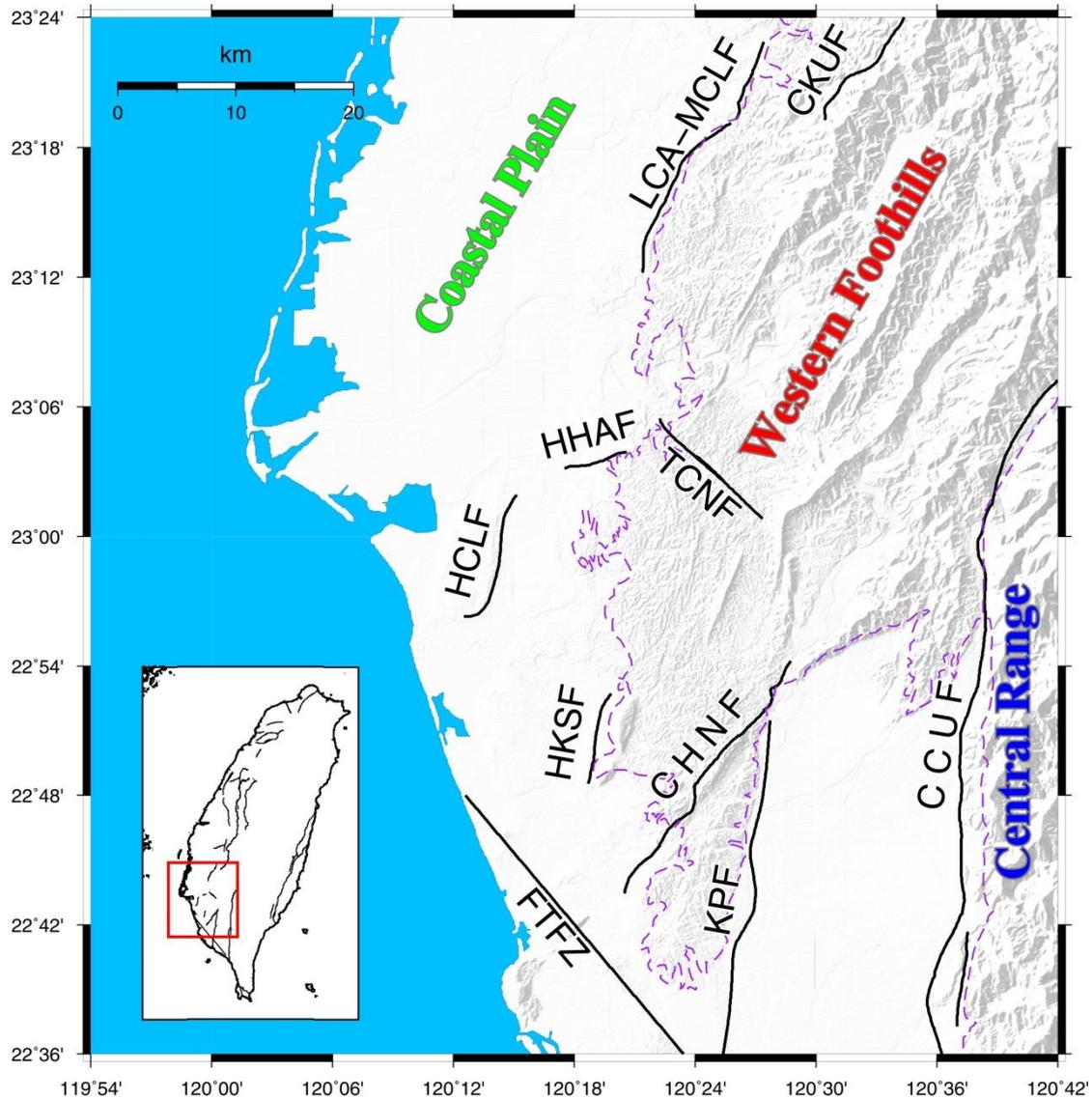


圖3 研究區域地質分區圖。紫色虛線為地質分區界線；黑色實線為活動斷層位置；Coastal Plain：西部沿海平原區；Western Foothills：西部麓山帶；Central Range：中央山脈；LCA-MCLF：六甲-木屐寮斷層；CKUF：觸口斷層；HCLF：後甲里斷層；HHAF：新化斷層；TCNF：左鎮斷層；HKSF：小岡山斷層；CHNF：旗山斷層；FTFZ：鳳山轉換斷層帶；KPF：高屏斷層；CCUF：潮州斷層

此外，台灣西南部主要之構造活動特徵為脫逸構造(escaping tectonics) (Lu and Malavieille, 1994; Lu et al., 1998; Lacombe et al., 2001; Hu et al., 2007; Ching et al., 2007)。Lu and Malavieille (1994)與 Lu et al. (1998)首先指出因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。Lacombe et al. (2001)認為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(圖 3)。

### 三、GPS 資料處理與速度場解算

本研究使用的 GPS 資料來自經濟部中央地質調查所於台灣西南部地區架設的 221 個 GPS 移動站(campaign-mode GPS stations)以及 44 個主要由交通部中央氣象局、中央研究院、中央地質調查所、國土測繪中心等機構設立的 GPS 連續站(continuous GPS stations) (圖 4)。資料蒐集時間自 2004 至 2010 年，GPS 移動站每年施測兩次，每次觀測時間約 6 個小時。

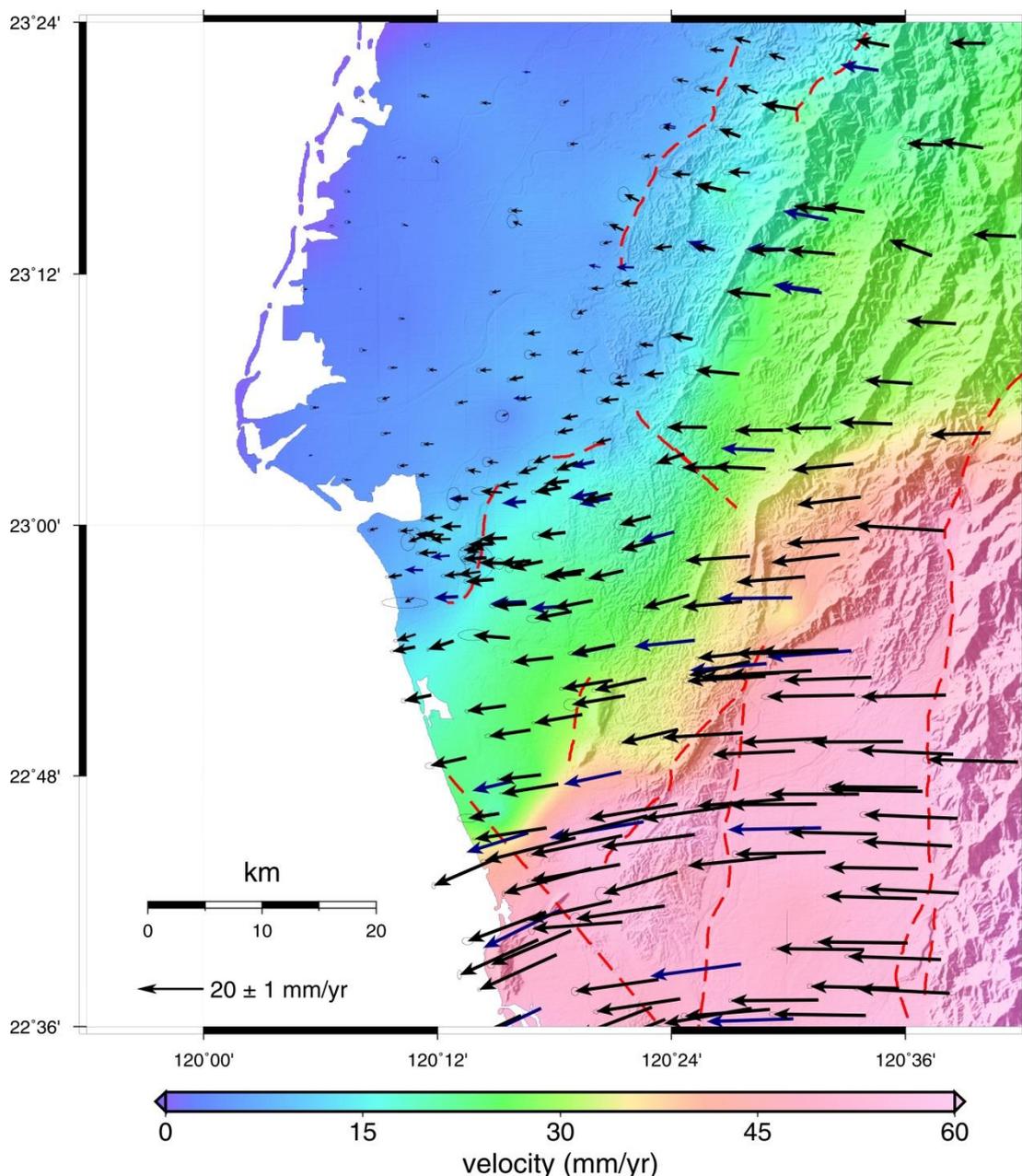


圖4 相對於澎湖S01R測站，台灣西南部之GPS水平速度場。黑色箭頭代表GPS移動站速度之大小與方向，藍色箭頭代表GPS連續站速度之大小與方向。紅色虛線為活動斷層位置。底圖色階代表水平速度之變化

為解算各測站的坐標，本研究採用 Bernese 5.0 軟體進行 GPS 資料計算(Dach et al., 2007)，使用 International GNSS Service 公佈的精確星曆(SP3)以獲得資料處理時段的衛星軌道參數，且不進行軌道修正。並為避免低仰角觀測量具有較大雜訊之影響，GPS 觀測資料仰角設定 15°以上始予以計算。對流層折射效應則採用 Saastamoinen model 進行估算。藉由約制 5 個 IGS 測站(美國關島-GUAM、印度-IISC、俄羅斯-IRKT、西澳-PERT 以及日本-TSKB)於 ITRF2008 坐標系 2005.0 時刻的坐標及速度場，可以獲得研究區域內 GPS 連續站每日與移動站各時段的坐標解。

接續，將各測站計算得到的每日(或各時段)坐標解，透過時間序列分析，以最小二乘法估計各測站相對於中國大陸邊緣之澎湖測站(S01R)的各坐標分量時間序列，以獲得各站 2004 至 2010 年的震間水平速度量(圖 4)。

由(圖 4)顯示，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，約為 45 mm/yr，自東向西方位角由約 290°轉至約 240°；再往西至海岸平原，其速度量皆小於 10 mm/yr，此外，在旗山斷層至六甲-木屐寮斷層間約 20 km 的範圍內，則約有 30 mm/yr 的顯著速度梯度存在。

#### 四、速度模型之建立

本研究使用 221 個 GPS 移動站的水平速度量，分別採用(1)克立金內插法；(2)塊體模型法建立研究區域的水平速度模型。

##### (一) 4.1 克立金速度模型

克立金內插法為 Mathron 學者於 1963 年提出，是一種由已知點群內插推測特定區域範圍內某未知點對應數值的方法。當散佈於特定空間中的某種分佈現象具有空間結構性時，即可以運用克立金內插法連繫建立其間的對應關係。若以  $z(x)$  表示此分佈現象的觀測值， $x$  表示對應的空間位置，則可以利用不同觀測點的觀測值計算得對應於不同距離下的半變異數(semi-variance)平均值，即可藉此擬合獲得半變異數(元)函數，在滿足最佳線性無偏估計的條件下，半變異數值經過轉換後可得到對應的權重係數以推算未知點的內插估計值。各半變異數函數主要用以表示資料點之間與距離的相關性，對於建立水平速度模型而言，點位間隨著距離之增加，其速度的相關性亦隨之下降，而其相關性的變化為一緩和且漸進的形態；當點位之間距離過大時，彼此可視為無相關性存在。常用的半變異數函數有線性函數、高斯函數、球面函數以及指數函數(exponential model) (Hans, 2003)，其中，高斯函數在特定間隔距離中，其相關性會呈現急速下降的情況，線性模式則是以線性之型態直線降低，均與本研究的速度模型之變化趨勢較不一致；相對地，指數與球面函數則較能符合本研究欲建立的半變異數模型緩和且漸進的相關性變化形態，且此二者在臨界距離之外，點位之間即呈現無相關性。為選定一較適合的半變異數出數，本研究以 44 個 GPS 連續站的水平速度資料進行擬合分析，比較 4 個半變異數函數的擬合精度如表 1 之 RMS (root mean square)估計結果，可以得知，相較於其他的半變異數函數，指數函數於本研究區域具有較佳的擬合精度。因此，本研究選擇指數型態的半

變異數函數，運用 221 個 GPS 移動站的水平速度量，以克立金內插法建立研究區域之水平速度模型(圖 5)。

表 1 半變異數函數於 44 個 GPS 連續站之擬合精度比較 (mm/yr)

函數類型	E 分量	N 分量
指數	2.21	1.86
高斯	2.76	1.96
線性	3.85	2.35
球面	2.22	1.89

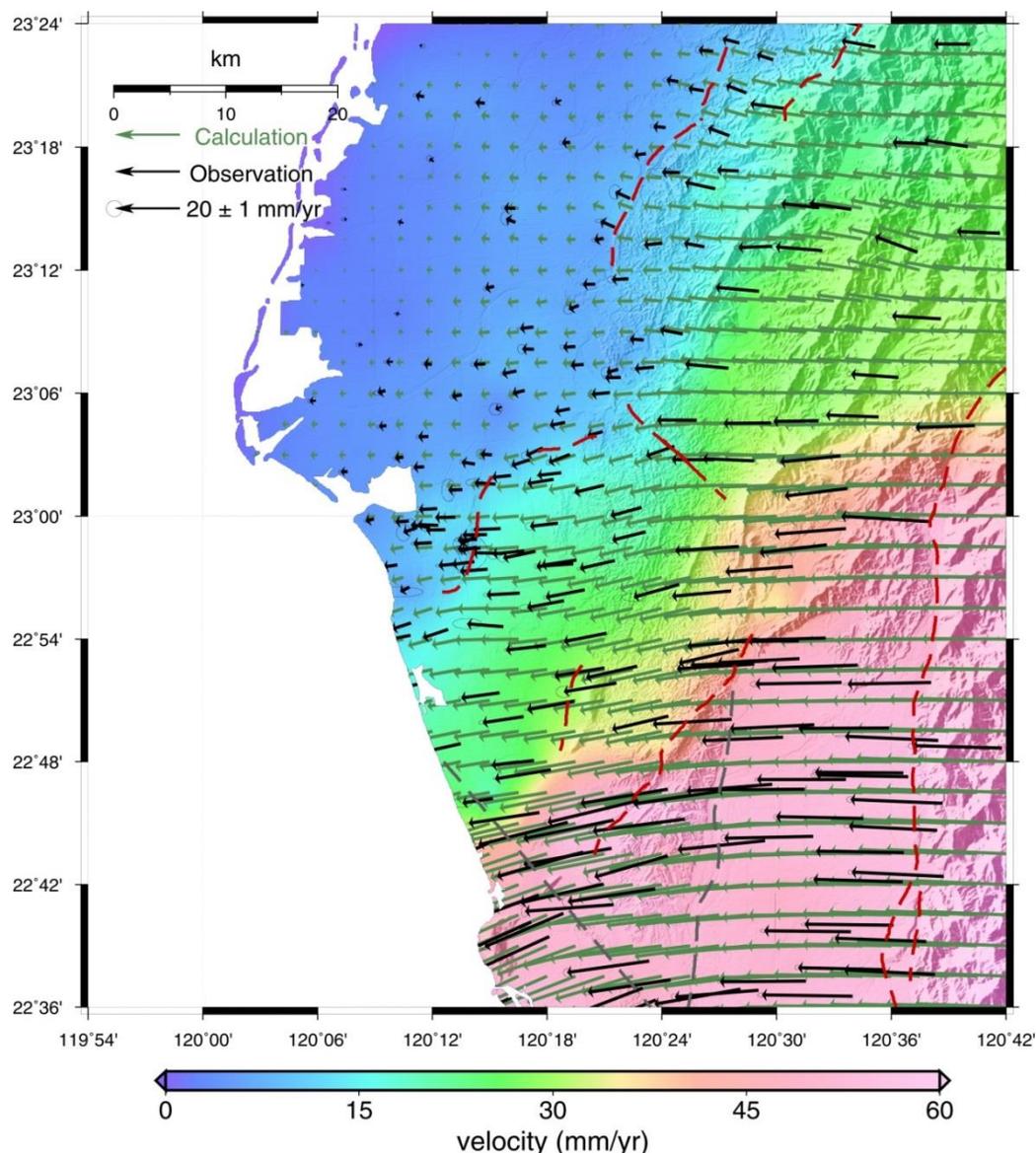


圖5 克立金內插法速度模型。黑色箭頭為GPS移動站速度場，綠色箭頭為克立金內插法所建立的網格速度模型

在模型精度分析方面，本研究先利用克立金速度模型推估 221 個 GPS 移動站的水平速度，並與其已知的水平速度量進行比較，獲得 E 分量為 $\pm 0.3$  mm/yr；N 分量亦為 $\pm 0.3$  mm/yr 之內在精度分析結果。並亦以此模型推估 44 個 GPS 連續站的水平

速度，亦與其已知的獨立水平速度進行比較，得到外在精度分析成果，在 E 分量為  $\pm 2.2$  mm/yr；N 分量為  $\pm 1.9$  mm/yr (圖 6)，在大部分的地區，各站的殘差量(residual)皆在 2 mm/yr 以內，然而，在旗山斷層附近則有較大的殘差量，達 3 至 4 mm/yr 以上。

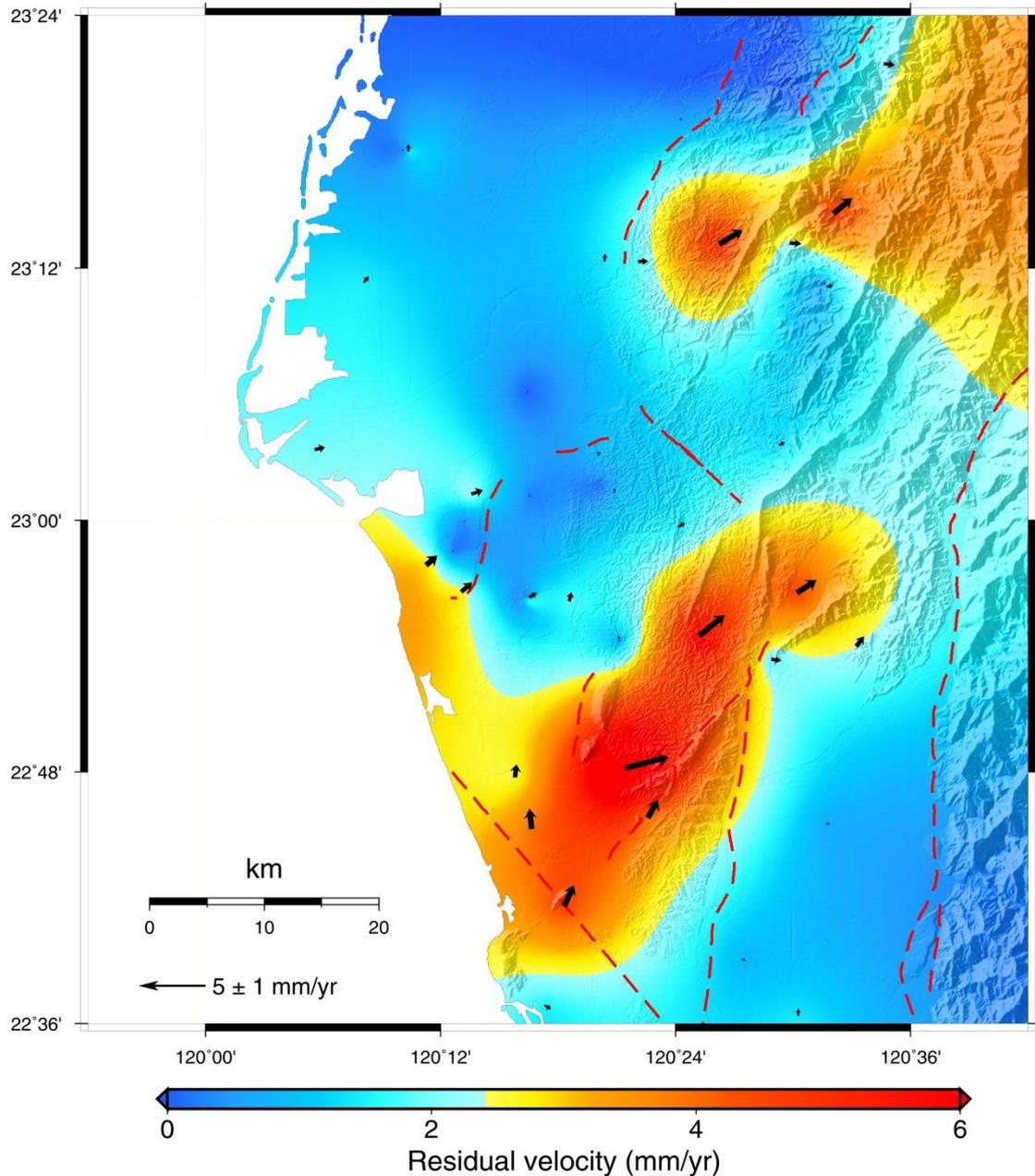


圖6 克立金速度模型得到的連續站速度殘差量分布圖。黑色箭頭為速度殘差量。底圖色階代表速度殘差量之大小

## (二) 4.2 塊體模型

本研究欲進行台灣西南部地區地表震間速度場的估算，其震間速度大部分可以分解為塊體旋轉與塊體之間因斷層活動所導致地表變形效應(McCaffery, 2013)。塊體旋轉意指將地球表面切割成多個剛性塊體，每一個塊體皆圍繞其歐拉軸於地表面上旋轉，歐拉軸與地表面的交點稱為歐拉極(Euler pole)。藉由各塊體歐拉極的位

置及其角速度，即能夠描述該塊體的運動行為。另外，兩塊體運動型態的差異亦會使得位於塊體交界處的斷層發生錯動，若斷層面有鎖定(locking)的情形，其在地表即會產生漸變的速度梯度。據此概念，本研究採用塊體模型 DEFNODE (McCaffery, 2013)，運用研究區域內 221 個 GPS 移動站的水平速度量反演各塊體的旋轉量及斷層滑移速率等參數，以此建立水平速度模型。而塊體模型的最佳解將由卡方檢定( $\chi^2$ , reduced Chi Square)來判斷，如公式(1)所示。

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i / \sigma_i)^2}{n} \quad (1)$$

其中， $n$  為自由度， $r_i$  為觀測值和理論值的差異值， $\sigma_i$  為觀測資料的誤差。

本研究採用閉合球面多邊形塊體，使其涵蓋整個研究區域。在同一塊體之內，每個觀測點均假設以同樣的角速度旋轉。依據 Ching et al. (2011)的塊體劃分，並參考中央地質調查所 2010 年公布的台灣活動斷層分布圖及研究區域內顯著的 GPS 速度梯度。本研究將台灣西南部地區劃分成 11 個塊體(圖 7)，如下所示：

1. 塊體 EURA：為參考塊體，標示歐亞大陸的位置，位於台灣海峽東側，故未標註於圖 7 中。
2. 塊體 A：嘉南平原區，東界為六甲-木屐寮斷層，南界為新化斷層。
3. 塊體 B：西部麓山帶地區(I)，西界為六甲-木屐寮斷層，東界為觸口斷層，南界為左鎮斷層。
4. 塊體 C：西部麓山帶地區(II)，東界為旗山斷層北端延伸，西界為觸口斷層，南界為左鎮斷層。
5. 塊體 D：西部麓山帶地區(III)，東界為旗山斷層，西界為小岡山斷層，南界為鳳山轉換斷層帶，東北界為左鎮斷層。
6. 塊體 E：台南高雄間之西部海岸平原，主要邊界為小岡山斷層、新化斷層和後甲里斷層。
7. 塊體 F：台南台地區域，東邊界為後甲里斷層，西邊界沿台南台地地緣劃分，北邊界為新化斷層延續。
8. 塊體 G：屏東平原，東邊界為潮州斷層，西邊界為高屏斷層，北邊界為旗山斷層。
9. 塊體 H：西部麓山帶地區(IV)，東邊界為高屏斷層，北邊界為旗山斷層，南邊界為鳳山轉換斷層。
10. 塊體 I：西部海岸平原，主要為鳳山轉換斷層帶西側。
11. 塊體 J：中央山脈，主要涵蓋潮州斷層東側之區域。

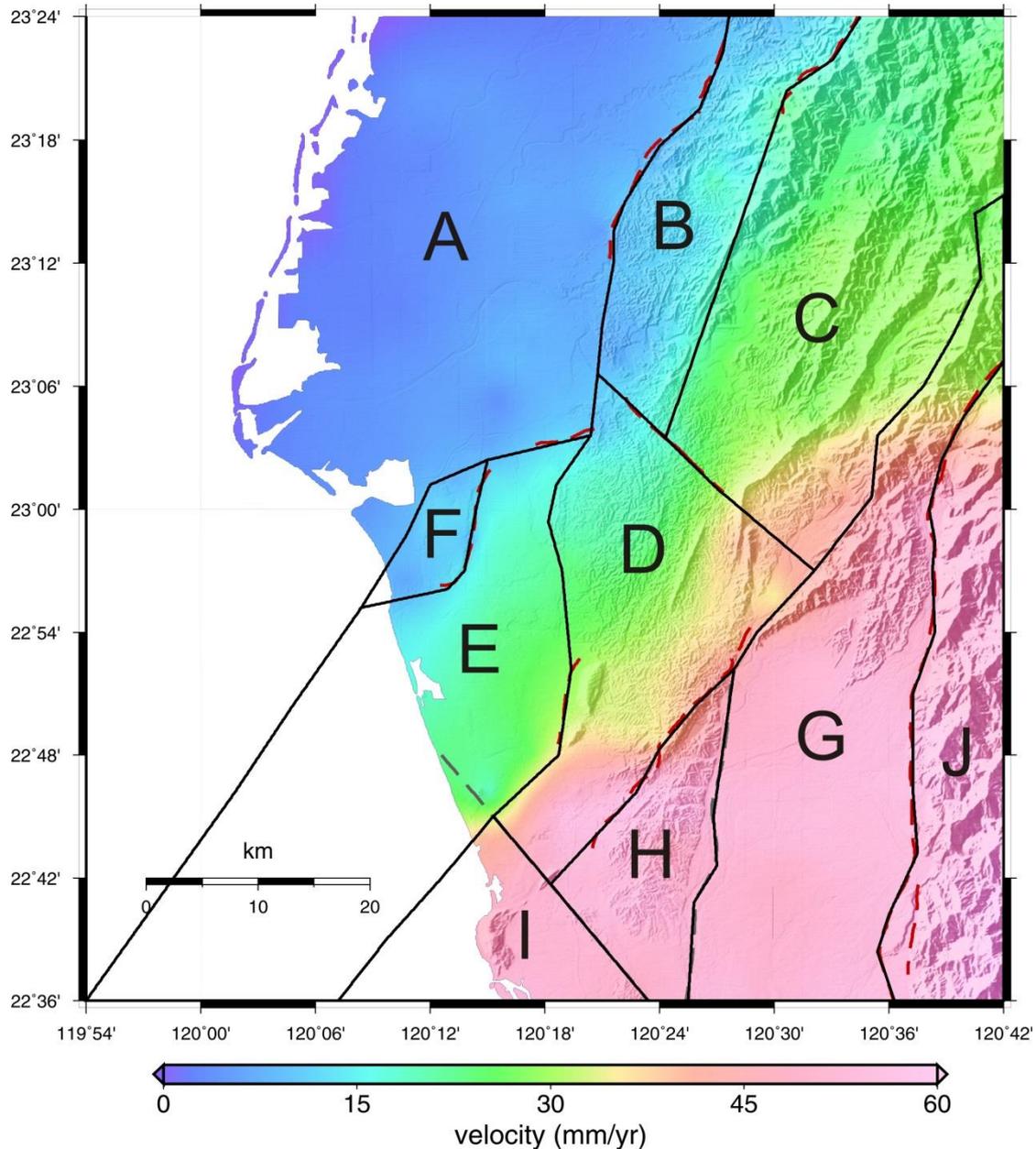


圖7 研究區域之塊體劃分。黑色實線表示塊體邊界，紅色破折線表示活動斷層，灰色破折線代表推測之活動斷層。A: 嘉南平原區，B: 西部麓山帶區(I)，C: 西部麓山帶區(II)，D: 西部麓山帶區(III)，E: 台南高雄間之西部海岸平原區，F: 台南台地區，G: 屏東平原區，H: 西部麓山帶地區(IV)，I: 西部海岸平原，J: 中央山脈區

就邊界斷層之建立，在塊體模型程式 DEFNODE 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。就斷層鎖定特性而言，本研究藉由設定斷層面節點上的斷層鎖定率  $\phi$  值來進行各塊體參數之計算，並假設  $\phi$  值不隨時間而改變。在強制約制斷層的頂部，當  $\phi$  值設定為 0 時，即表示完全的滑移，反之，即完全的鎖定。由於台灣西南部地區的斷層並沒有明顯的地表滑移證據，所以各斷層頂部的  $\phi$  值均設定為 1，亦即完全鎖定。本研究設定了 9 條主要邊界斷層的幾何條件，其乃主要參照 Ching et al. (2011) 提出的斷層幾何，

並考慮了反射震測及平衡剖面(balanced cross sections)等資訊(Huang et al., 2004)。同時，在台灣增積模型的假設下(e.g., Davis et al., 1983; Dahlen and Suppe, 1988)，本研究設定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 5 km 逐漸增加至約 7 km，傾角也從西約 25°逐漸增加至東約 45°。

本研究利用 221 個 GPS 移動站的水平速度量應用塊體模型 DEFNODE 建立的最佳水平速度模型(圖 8)，其  $\chi^2$  為 1.29。運用此模型推估 221 個 GPS 移動站的水平速度，並與各站的已知水平速度量進行比較，可獲得 E 分量±2.8 mm/yr；N 分量±2.0 mm/yr 的內在精度結果。同時，亦以模型推估 44 個 GPS 連續站的水平速度，與其獨立的已知水平速度進行比較，得到外在精度之分析成果在 E 分量為±2.9 mm/yr；N 分量為±2.0 mm/yr(圖 9)。將(圖 9)與克立金速度模型的結果(圖 6)進行比較，可以發現在大部分的區域，殘差值大多在 2 mm/yr 以內，但在西部麓山帶地區，殘差值有整體偏高的趨勢，約 4 mm/yr 以上，同樣地，在旗山斷層附近，亦有較大的殘差量，也約達 4 mm/yr 以上。

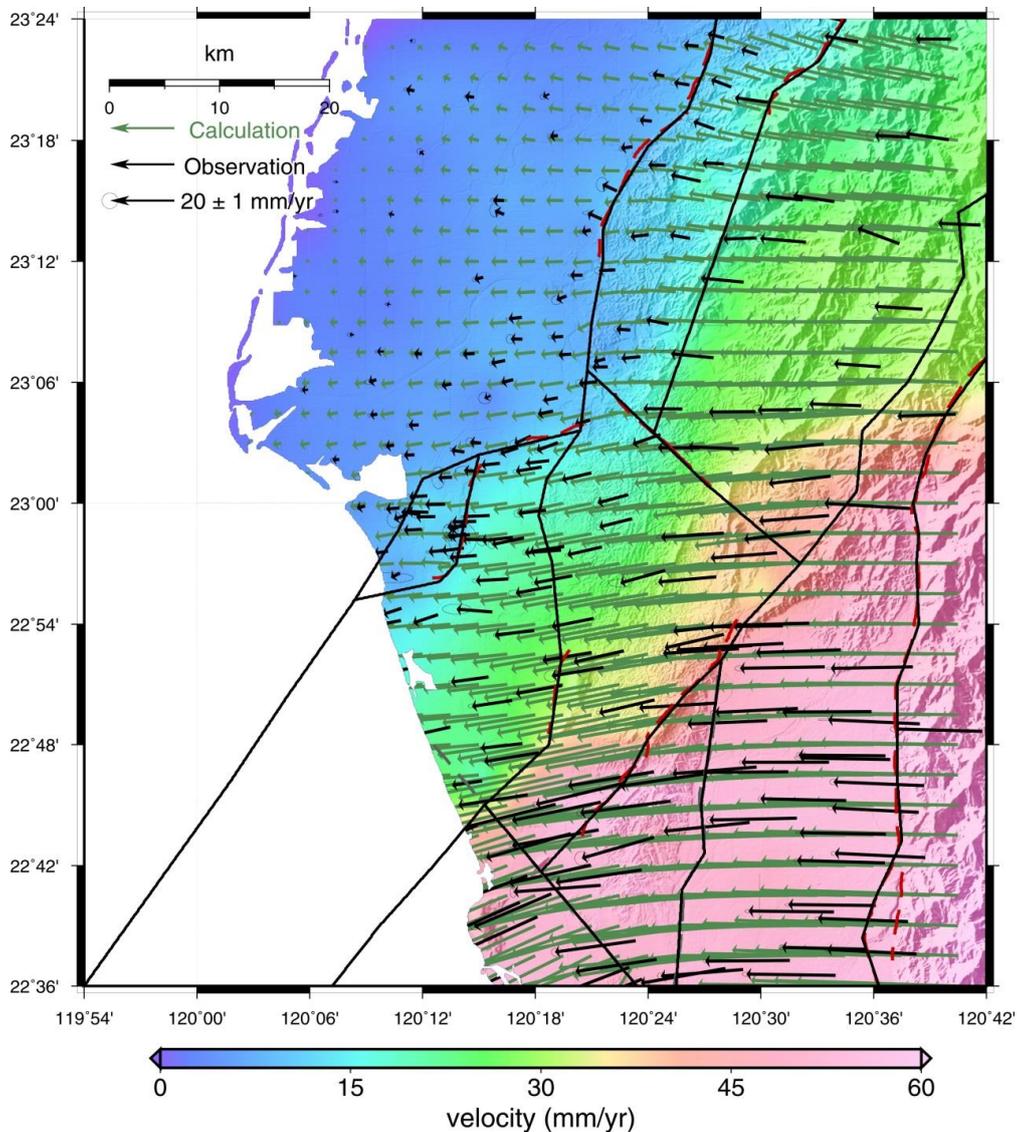


圖8 塊體模型推估的速度模型。黑色箭頭為GPS移動站速度場，綠色箭頭為塊體模型建立的網格速度模型。黑色實線代表塊體邊界

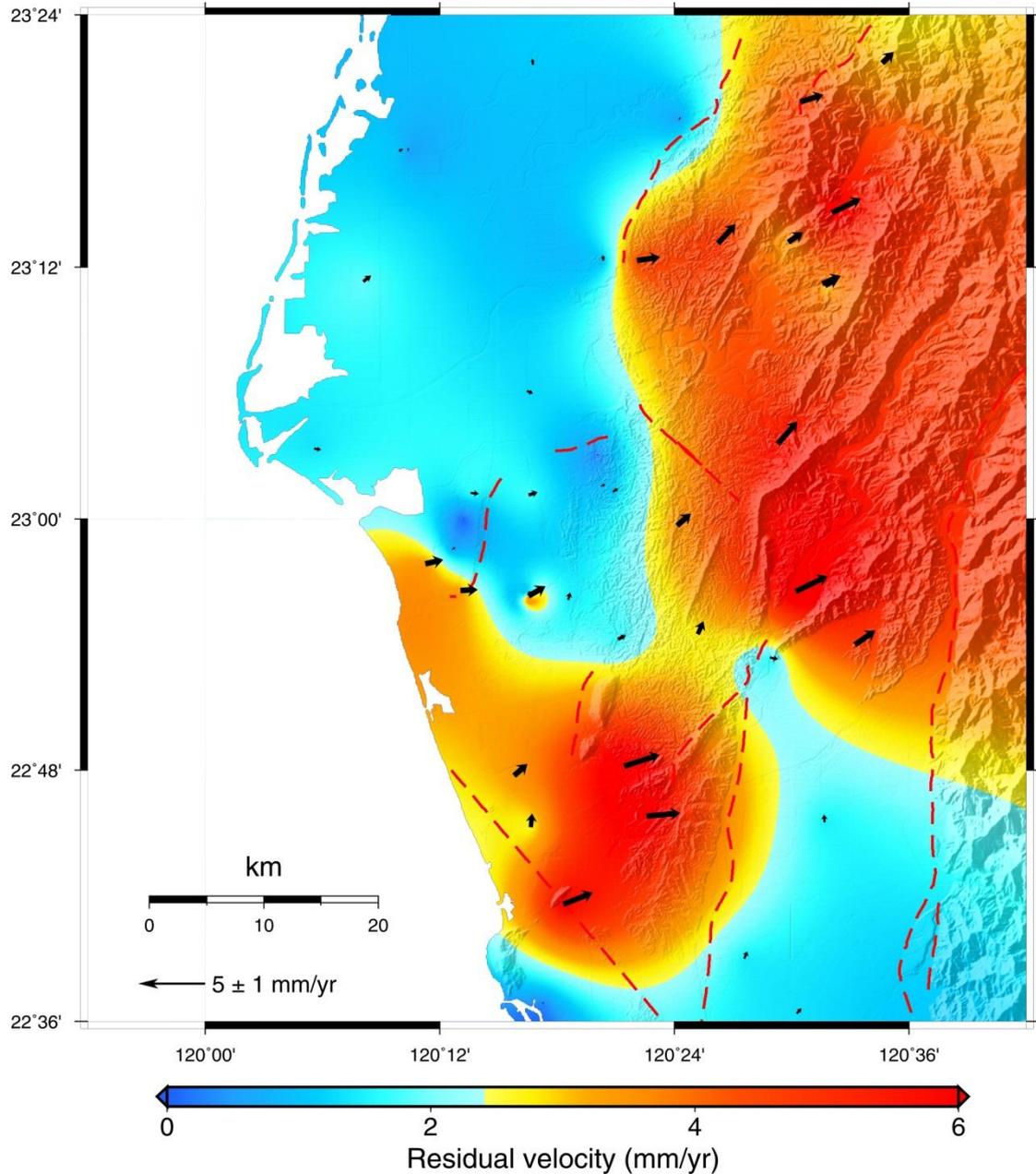


圖9 塊體模型得到的連續站速度殘差量分布圖。黑色箭頭為速度殘差量。底圖色階代表速度殘差量之大小

### 五、坐標轉換法

傳統上，同一坐標基準(亦可以不同的坐標基準)，在不同時刻下的坐標值，可以藉由坐標轉換法估算各區域各時刻的轉換參數以吸收因為各種綜合因素(例如：板塊運動因素)所造成的點位偏移量。亦即，在區域內選定若干個控制點，於參考時刻  $t_0$  下觀測得其坐標，另在  $t_1$  時刻下亦觀測得同一組點位之坐標，若兩個時刻的坐標值出現不一致且必須修正之情況，則可採用坐標轉換法，以較簡易的方式將  $t_0$  時刻的坐標值轉換至  $t_1$  時刻的對應值上，如此，即可不必藉由建立速度模型的方式，而能夠維持在不同時刻下的點位坐標的一致性與精度。

本研究採用仿射轉換法(affine transformation)，考慮  $x$ 、 $y$  軸的兩個平移量、兩個尺度因子、一個旋轉量以及一個剪力形變量，共六個轉換參數，公式如下：

$$x' = ax + by + f \quad (2)$$

$$y' = cx + dy + g \quad (3)$$

其中， $x$  及  $y$  為  $t_0$  時刻的坐標， $x'$  及  $y'$  為  $t_1$  時刻之坐標， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $f$  及  $g$  為坐標轉換參數，為決定此六個轉換參數，至少須有三個已知點位(在兩個時刻下均有對應的坐標值)方可解算。

台灣地區分別於 2003 年 12 月 10 日在台東成功發生  $M_w=6.8$  以及 2010 年 3 月 4 日在高雄甲仙發生  $M_w=6.4$  的強震。本研究為避開這兩個地震造成的同震位移影響，僅考慮震間變形造成的長時期相對位移與斷層鎖定作用，特別選定研究區域內 2004 至 2009 年，每年皆有觀測資料的 GPS 移動站，共計 33 個(圖 10)。由於點位遺失的關係，所以研究區域中間部分並無每年連續施測之點位。以此 33 站每年的坐標計算值，分別估算 2004 年與其他觀測年之間的 Affine 坐標轉換參數，並應用各年份之間的轉換參數將 44 個 GPS 連續站的 2004 年坐標分別轉換至各觀測年(即 2005 至 2009 年)的對應坐標，比較各年份轉換後的坐標值其與各年實際觀測的坐標值，其差異量如表 2。由結果可以顯示，差異量的 RMS 值由 2005 年的  $\pm 7.8$  mm 逐年遞增至 2009 年的  $\pm 19.1$  mm，顯示隨著兩時刻的間距拉長，RMS 隨之越大。

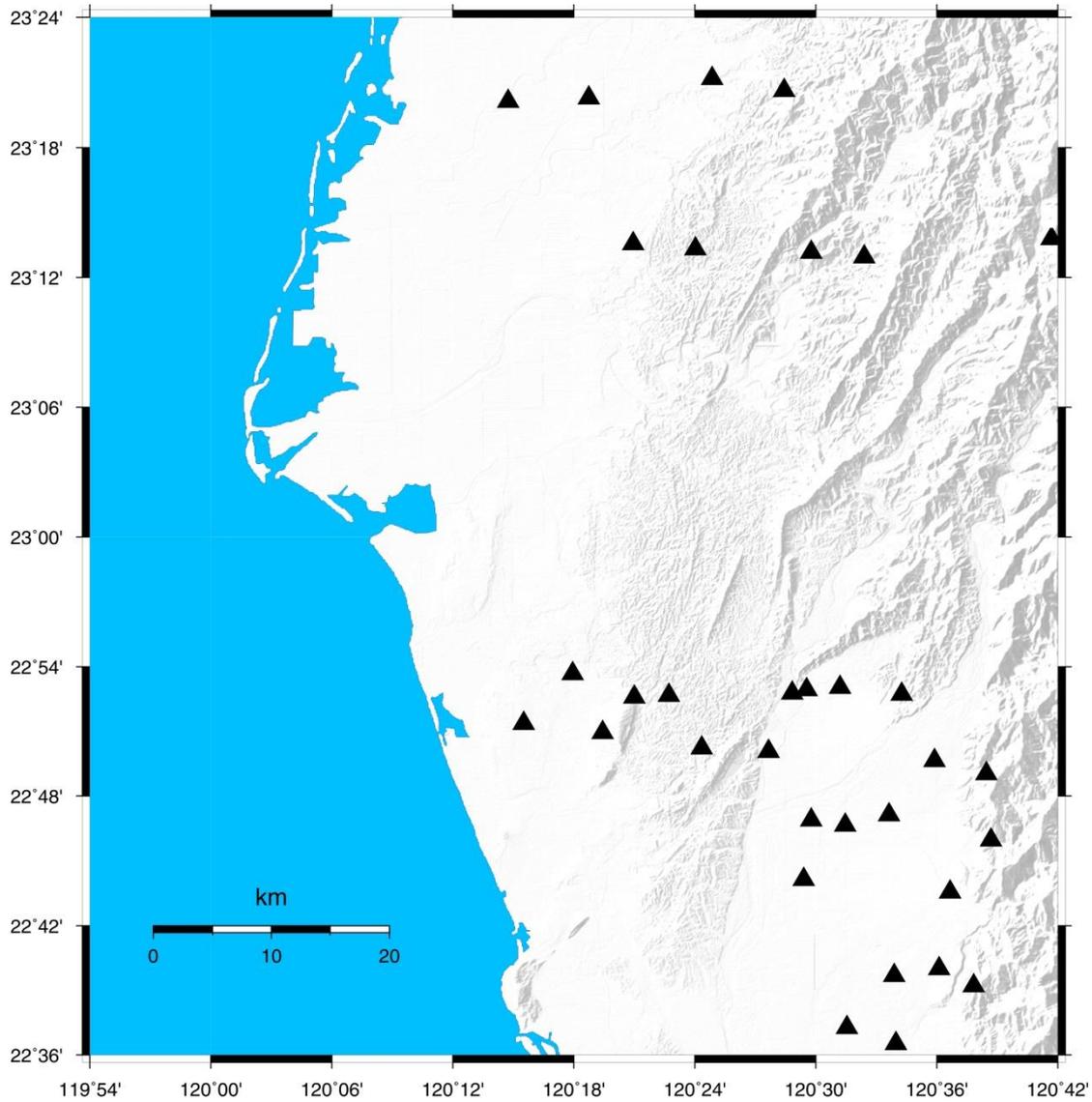


圖10 本研究坐標轉換法使用之已知控制點分布圖

表 2 各年份轉換參數應用於 44 個 GPS 連續站之各年差異量 RMS 值(±mm)

	04 到 05	04 到 06	04 到 07	04 到 08	04 到 09
RMS	7.8	10.8	12.4	15.9	19.1

## 六、討 論

為評估、比較克立金模型、塊體模型以及靜態坐標基準的使用精度與使用年限，本研究以區域內的 44 個 GPS 連續站資料進行分析檢核，分別利用各速度模型推求各連續站於 2005.0、2006.0、2007.0、2008.0、2009.0 以及 2010.167(高雄甲仙地震之前)的模型坐標值，並與對應時刻的觀測坐標值進行比較，得到各年份於此 44 個連續站的坐標平均殘差值，利用線性迴歸方式估計此平均殘差值隨時間的變化量。由圖 11 至圖 12 的比較可以發現，克立金速度模型所建立的半動態基準無論在 N 分量或 E 分量都優於塊體模型之成果，且隨著使用時限之增長，兩者坐標的平均殘差值也隨之增大。若以台閩地區一、二等衛星控制點的坐標中誤差以及國外(例

如：美國與加拿大)使用的點位精度評估方式，可以得到國內各級衛星控制點坐標分量較差值之規範(張嘉強等, 2001)，以此可推得一等衛星控制點坐標分量之較差應小於 24 mm。如此，即可據以評估各半動態基準、坐標轉換法以及靜態基準的使用年限(圖 13)。

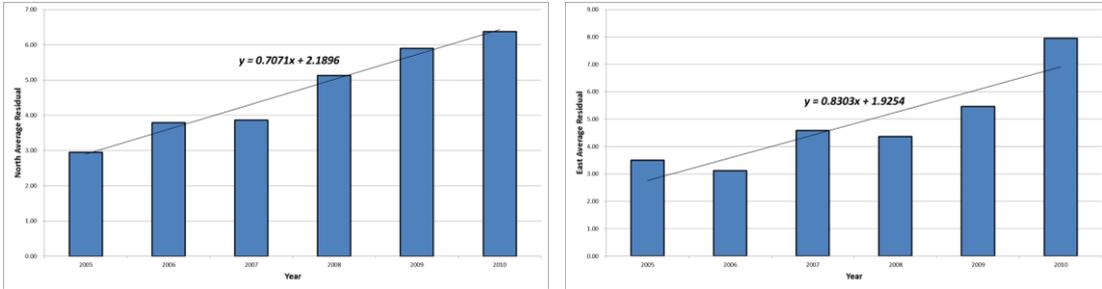


圖 11 克立金速度模型N分量(左圖)及E分量(右圖)年平均殘差量及其線性公式

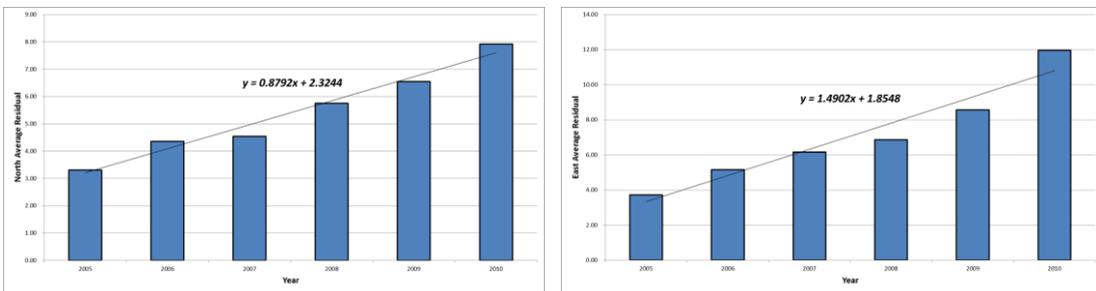


圖 12 塊體速度模型N分量(左圖)及E分量(右圖)年平均殘差量及其線性公式

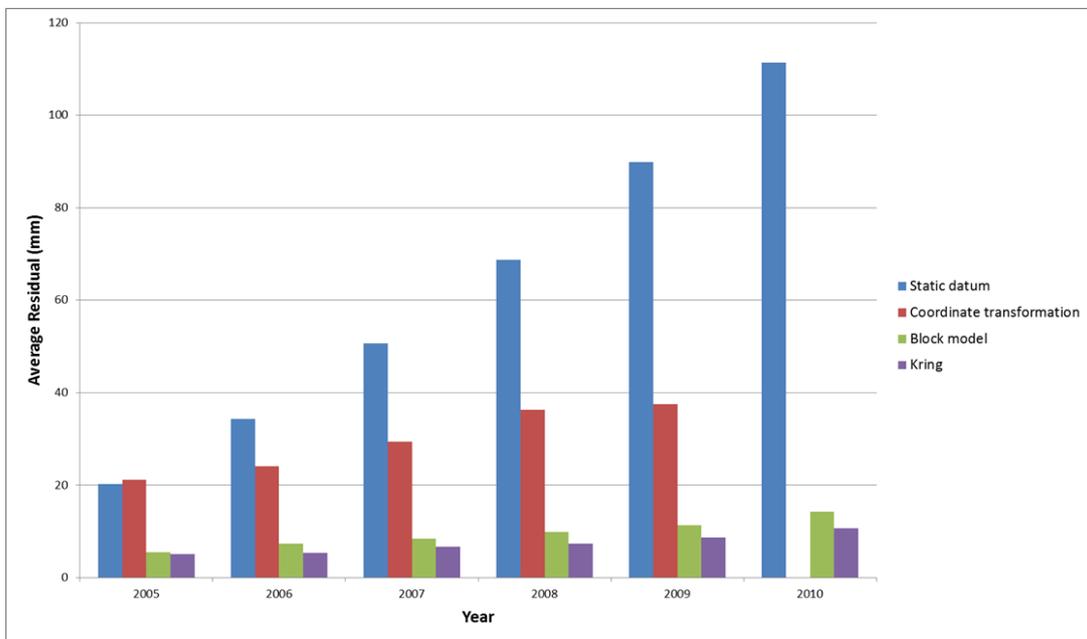


圖 13 靜態坐標基準、坐標轉換法、塊體模型及克立金內插法估算的年平均殘差量之比較

成果顯示在臺灣西南部地區，由 44 個 GPS 連續站的 N、E 分量年平均殘差值的時間變化趨勢可以推估(圖 11~圖 13)，克立金模型建立的半動態基準，其使用年

限約為 25 年；塊體模型的約為 15 年；坐標轉換法則維持不到 3 年，而靜態坐標基準由於未考慮板塊位移的影響，因此，其年平均殘差值的增幅最快，其次依序為坐標轉換法、塊體模型與克立金模型。

## 七、結 論

本研究利用中央地質調查所 2004 至 2010 年台灣西南部 221 個 GPS 移動站之水平速度量，應用克立金內插法以及塊體模型法產生水平速度模型以建立區域內的半動態基準藉以維護坐標系統的精度。透過 44 個 GPS 連續站之水平速度資料進行模型精度的驗證，克立金內插法與塊體模型法建立的速度模型，其模型的計算值與觀測值在 N、E 分量上的差異分別為克立金法 $\pm 1.9$  mm/yr 與 $\pm 2.2$  mm/yr；塊體模型法約 $\pm 2.0$  mm/yr 與 $\pm 2.9$  mm/yr。在無大地震發生以及坐標差異量不大於 24 mm 的設定下，克立金模型建立的半動態基準約可以使用 25 年，塊體模型則約為 15 年。

值得注意的是，克立金內插模型的良好表現乃是建立在本研究區域台灣西南部擁有高密度分佈的 GPS 觀測站前提之下。相對地，塊體模型之建立則需要較了解區域內的地質構造背景，因此，在構造較複雜的區域，塊體模型較不易得到較高精度的速度模型，但是因為其建立模型時考慮了地球物理之特性，故相較於克立金模型，塊體模型較不需要高密度的地表觀測站資料，即可獲得相當精度的速度模型。而坐標轉換法純粹以簡單的數學形式，利用數個轉換參數來吸收點位隨著時間而產生的位移量，因此，僅適用於精度需求不高之作業；此外，坐標轉換法亦僅能推估觀測時刻內的坐標值，無法對未來時刻的點位變化量進行估算。

在地籍測量實務操作上，利用本研究之成果可以消除地殼運動強烈地區因構造活動造成公告(法定)坐標之偏移，因此，藉由半動態坐標系統之建立，可以延長公告坐標之使用年限。

## 誌謝

感謝經濟部中央地質調查所提供 2004 年至 2010 年之 GPS 重複觀測站資料。感謝氣象局、中央研究院、中央地質調查所、國土測繪中心等機構提供 GPS 連續站資料。感謝經濟部中央地質調查所與行政院國家科學委員會（計畫編號：101-2116-M-006-012-）對本研究之經費提供。

## 參考文獻

- 何春蓀，2003，《臺灣地質概論》，二版，經濟部中央地質調查所：臺北縣。
- 張嘉強、李振燾、陳文豐、李安邦、李豐華、孫永大，2001，《基本控制點檢測作業規範》，內政部土地測量局委託研究報告。
- Ching, K. E., R. J. Rau, J. C. Lee, and J. C. Hu, 2007, Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-2005, *Earth Planetary*

- Science Letters*, 262, pp.601-619.
- Ching, K. E., R. J. Rau, K. M. Johnson, J. C. Hu, and J. C. Lee, 2011, Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, *Journal of Geophysical Research*, 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.
- 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*, 218, Processes in Continental Lithospheric Deformation, pp. 161-178.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl, 2007, *Bernese GPS software version 5.0.*, Switzerland: Astronomical Institute, University of Bern.
- Davis, D., J. Suppe, and F. A. Dahlen, 1983, Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges, *Journal of Geophysical Research*, 88, pp.1,153-1,172.
- Grant, D. B., G. H. Blick, M. B. Pearse, R. J. Beavan, and P. J. Morgan, 1999, The development and implementation of New Zealand Geodetic Datum 2000, *Processes in International Union of Geodesy and Geophysics XXII General Assembly*: Birmingham.
- Hans, W., 2003, *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*, 3rd edition, Berlin: Springer.
- Hu, J. C., C. S. Hou, L. C. Shen, Y. C. Chan, R. F. Chen, C. Huang, R. J. Rau, H. 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(3), pp. 287-302.
- 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(1), 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(1), pp. 323-345.
- Lin, A. T., A. B. Watts, and S.P. Hesselbo, 2003, Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region, *Basin Research*, 15(4), 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 Planetary Science Letters*, 121, pp.477-494.
- Lu, C. Y., F. S. Jeng, K. J. Chang, 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(3), pp. 533-550.
- McCaffrey, R., 2013, Crustal block rotations and plate coupling, in S. Stein and J. T. Freymueller eds, *Plate Boundary Zones*, Washington: Processes in American Geophysical Union, doi: 10.1029/GD030p0101.
- Nur, A., and G. Mavko, 1974, Post-seismic viscoelastic rebound, *Science*, 183(4121), pp. 204-206.
- Pearson, C., R. McCaffrey, J. L. Elliott, and R. Snay, 2010, HTDP 3.0: Software for Coping with the Coordinate Changes Associated with Crustal Motion, *Journal of Surveying Engineering*, 136(2), pp. 80-90.
- Peltzer, G., P. Rosen, F. Rogez, and K. Hudnut, 1996, Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow, *Science*, 273(5279), pp.1202-1204.
- Roeloffs, E. A., 1996, Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrological phenomena, *Advances in geophysics*, 37, pp. 135-195.
- 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(B8), doi:10.1029/2004JB003251.
- Tanaka, Y., H. Saita, J. Sugawara, K. Iwata, T. Toyoda, H. Hirai, T. Kawaguchi, S. Matsuzaka, Y. Hatanaka, M. Tobita, Y. Kuroishi and T. Imakiire, 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.
- 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(B9), 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(B9), pp. 9452-9472.
- 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(4), pp. 477-498.
- 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.
- Walcott R. I., 1984, The major structural elements of New Zealand, in Walcott R. I. eds., *An introduction to the recent crustal movements of New Zealand*, New Zealand: Processes in Royal Society of New Zealand, pp.1-6.



## 鳳山轉換斷層現今之斷層活動行為及其地震潛能分析

趙荃敏<sup>1</sup> 景國恩<sup>2\*</sup> 李寧<sup>3</sup> 陳建良<sup>4</sup>

論文收件日期：103.01.09

論文修改日期：103.03.28

論文接受日期：103.04.09

### 摘 要

藉由台灣西南部之地形特徵解析與歷年 GPS 觀測資料分析顯示，鳳山轉換斷層極可能為台灣西南部主要活動斷層之一。然而，目前對於鳳山轉換斷層的地表變形形態及其地震潛能所知甚少，故本研究利用台灣西南部 2002 至 2010 年共 205 個 GPS 測站資料，分析鳳山轉換斷層的斷層活動行為及其地震潛能。本研究首先以 Bernese 軟體解算 GPS 資料來獲得各測站之每日坐標時間序列，並採用最小二乘法計算相對於澎湖之水平速度場。水平速度場分析結果指出，旗山斷層以西約為 10-30 mm/yr，以東則約為 50 mm/yr。速度方位角除了在跨鳳山轉換斷層以西之沿海區域約為 245°外，其他區域則約為 268°。跨越鳳山轉換斷層之速度剖面顯示，跨斷層的平行斷層走向分量皆約為 15 mm/yr。而垂直斷層走向分量於斷層北段有約 1.9 mm/yr 之擠壓速率，中段有約 1 mm/yr 之伸張速率，南段則有約 5.2 mm/yr 之伸張速率。亦即，鳳山轉換斷層為一條以左移為主之走向滑移斷層，斷層北段為具有擠壓分量之鎖定斷層，斷層中段以及南段則為具有伸張分量之潛移斷層。二維斷層模型之結果顯示，斷層傾角約為 50°，深度則約為 7 至 13 公里。斷層北段之最大震間滑移速率約為 17.0 mm/yr，斷層中段約為 25.8 mm/yr，而斷層南段則約為 36.0 mm/yr。最後藉由斷層模型進一步估計斷層帶之能量累積約為  $2.15 \times 10^{24}$  dyne-cm/yr，且預估之地震週期約為 117 年。

**關鍵字：**二維斷層模型、全球定位系統、潛移、應變速率分析、鎖定

<sup>1</sup> 專任助理，國立臺北大學不動產與城鄉環境學系。

<sup>2</sup> 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>3</sup> 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

<sup>4</sup> 技正，中央地質調查所。

\* 通訊作者，TEL：(06)2757575 # 63840，E-mail: [jingkuen@mail.ncku.edu.tw](mailto:jingkuen@mail.ncku.edu.tw)。

# Fault Behavior Analysis of the Fengshan Transfer Fault and Its Earthquake Potential Assessment

Chuan-Min Chao<sup>1</sup>, Kuo-En Ching<sup>2\*</sup>, Ning Lee<sup>3</sup>, Jian-Liang Chen<sup>4</sup>

## Abstract

The analysis of GPS measurements around the Fengshan transfer fault(FTFZ) indicates that the FTFZ may be a major active fault in SW Taiwan. However, the fault geometry, the deformation pattern, and the earthquake potential of the FTFZ still remain unclear. Therefore the observations of 205 GPS stations from 2002 to 2010 are used to understand the deformation pattern in SW Taiwan. The pattern of the horizontal velocity field shows a significant velocity gradient from 30 mm/yr to 10 mm/yr west of the Chishan fault, whereas velocities are about 50 mm/yr in 268° east of the Chishan fault. For the area west of the FTFZ, the velocity azimuth changes into 245°. The horizontal velocity profile shows that the fault parallel component has about 15 mm/yr difference across the fault, indicating a sinistral strike-slip fault. Across the northern segment of the fault, it shows an about 1.9 mm/yr shorteningrate, while about 1.0 mm/yr and 5.2 mm/yr extension rates are across the central and southern segments, respectively. Therefore the FTFZ is a left-lateral fault and the northern segment is locked with contraction, while the central and southern segments are creeping with extension. The fault geometry of the FTFZ inferred by 2D fault model shows the dip is ~50° and the depth is about 7 to 13 km. The maximum interseismic slip rates are~17.0 mm/yr, ~25.8 mm/yr, and ~36.0 mm/yr for the northern, central, and southern segments, respectively. Based on the modeling result, the estimated energy accumulation rate is  $2.15 \times 10^{24}$  dyne-cm/yr and the recurrence interval of the earthquake is about 117 years.

**Keywords:** 2D Fault Model, Creeping, GPS, Locked, Strain Rate Analysis

---

<sup>1</sup> Project Assistant, Department of Real Estate & Built Environment, National Taipei University.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>3</sup> Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

<sup>4</sup> Technical Specialist, Central Geological Survey.

\* Corresponding Author, TEL: +886-6-2757575 # 63840, E-mail: [jingkuen@mail.ncku.edu.tw](mailto:jingkuen@mail.ncku.edu.tw).

## 一、前言

在地質上，根據不同的分類法則，如斷層上下盤相互之運動關係，我們可以對斷層進行分類，如逆斷層、正斷層與走向滑移斷層。而轉換斷層(transfer fault)則是根據斷層發育之成因所劃分之斷層類型，其形成成因是由於相鄰之逆衝岩片(thrust sheet)具有不同的運動速率而在岩片邊界產生之斷裂構造，其多為走向滑移斷層之運動型態。轉換斷層的運動方向多垂直於逆斷層的走向，且近乎平行板塊的運動方向(Calassou et al., 1993; McClay, 1991)。

藉由數位高程模型(DEM)、空拍影像、空載雷達側視影像和 SPOT-P 及 Landsat 影像所進行之地貌特徵、流域異常分析指出(Deffontaines et al., 1994, 1997)，台灣西部有數條走向約 $140^{\circ}$ 且相互平行之主要線形，這些線形被解釋為台灣西部麓山帶地區之轉換斷層帶(transfer fault zones)，是由於歐亞板塊與菲律賓海板塊相互間的擠壓與北港高區和觀音高區等嵌入體之交互作用(圖1)的產物(Deffontaines et al., 1994, 1997)。在這些轉換斷層中，鳳山轉換斷層通過了高雄都會區並向東南進入屏東平原，長度約63.4 km(圖2)，根據 Wells and Coppersmith(1994)的經驗式指出，該斷層具有發生  $M_w$ 6.9地震的潛力。因此，確認鳳山轉換斷層的活動特性及其可能的地震潛能將提供政府在國土規劃中非常重要的資訊。

根據過去水平 GPS 速度場的結果分析指出，鳳山轉換斷層是左移之走向滑移斷層，跨斷層之速度變化量為10 mm/yr(Ching et al., 2007)。鳳山轉換斷層帶的北段和南段有較大的應變率發生，而在斷層帶中段部分則有較小的伸張量。此外，鳳山轉換斷層和旗山斷層可能形成共軛型態的斷層系統，反映了地殼尺度的應力機制在台灣西南部所造成的脫逸構造(tectonic escape) (Ching et al., 2007)。同時初步的速度剖面分析指出，鳳山轉換斷層有可能是潛移斷層(Ching et al., 2007)。世界上針對潛移斷層，如美西的聖安德列斯斷層(San Andreas fault)、海沃德斷層(Hayward fault)和菲律賓的萊特斷層(Leyte fault)的研究指出，潛移斷層滑移速率的變化可能會使周圍斷層原先估計的彈性應變能釋放過程更加複雜，而這些將在該地區地震潛能評估的工作中，特別是在預期未來地震事件的發生時間中，扮演十分重要的角色(Bürgmann et al., 2000; Ben-Zion et al., 1993)。

為了評估鳳山轉換斷層的活動性及其地震潛能，本研究使用了2002-2010年205個 GPS 觀測資料來探討台灣西南部變形型態。

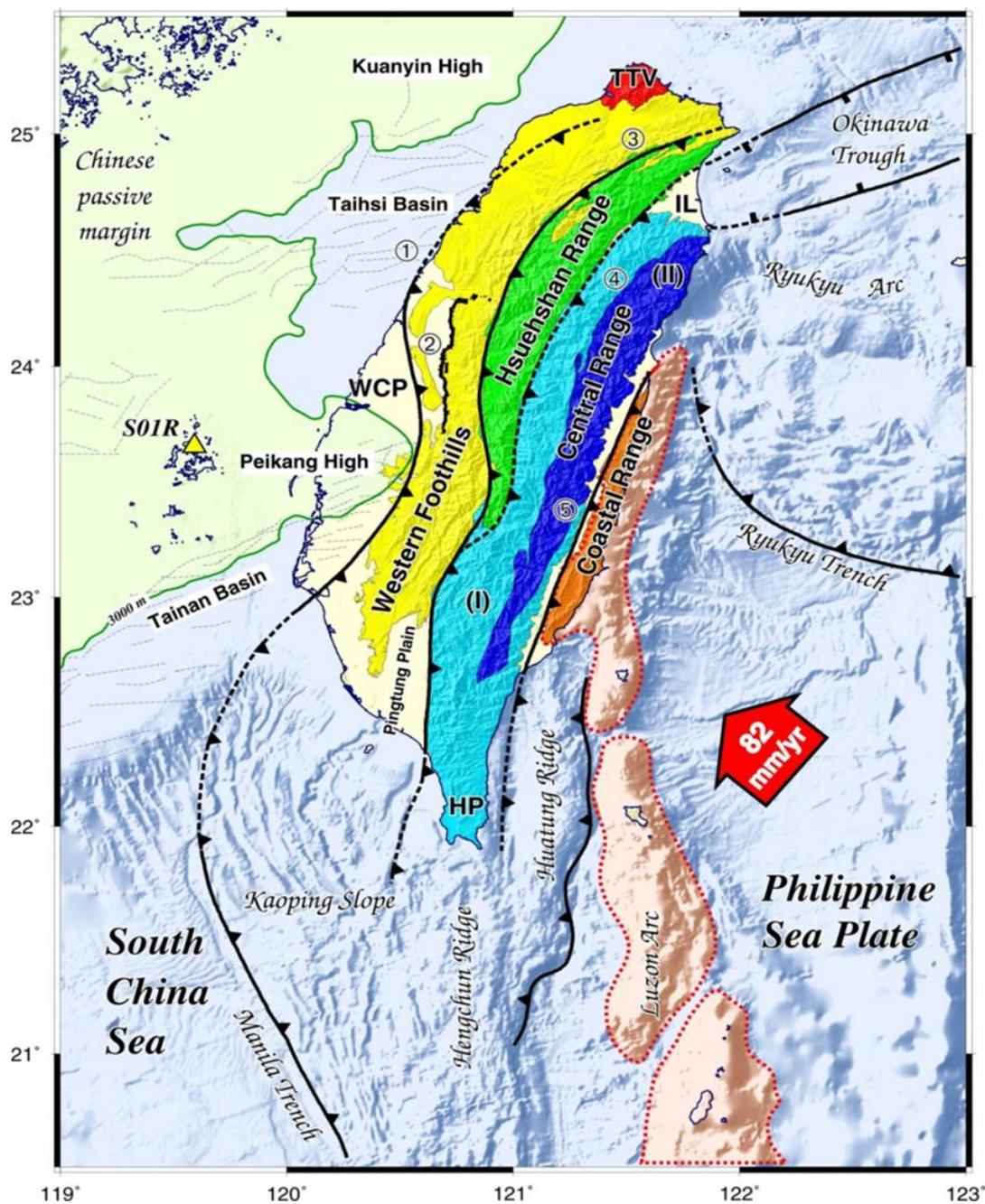


圖1 台灣之大地構造框架(Ching et al., 2011)。WCP為西部海岸平原；TTV為大屯火山；HP為恆春半島；IL為宜蘭平原。數字1-5分別代表變形前緣、車籠埔斷層、屈尺斷層、梨山斷層及縱谷斷層。I-II分別代表中央山脈板岩區及中央山脈變質雜岩區

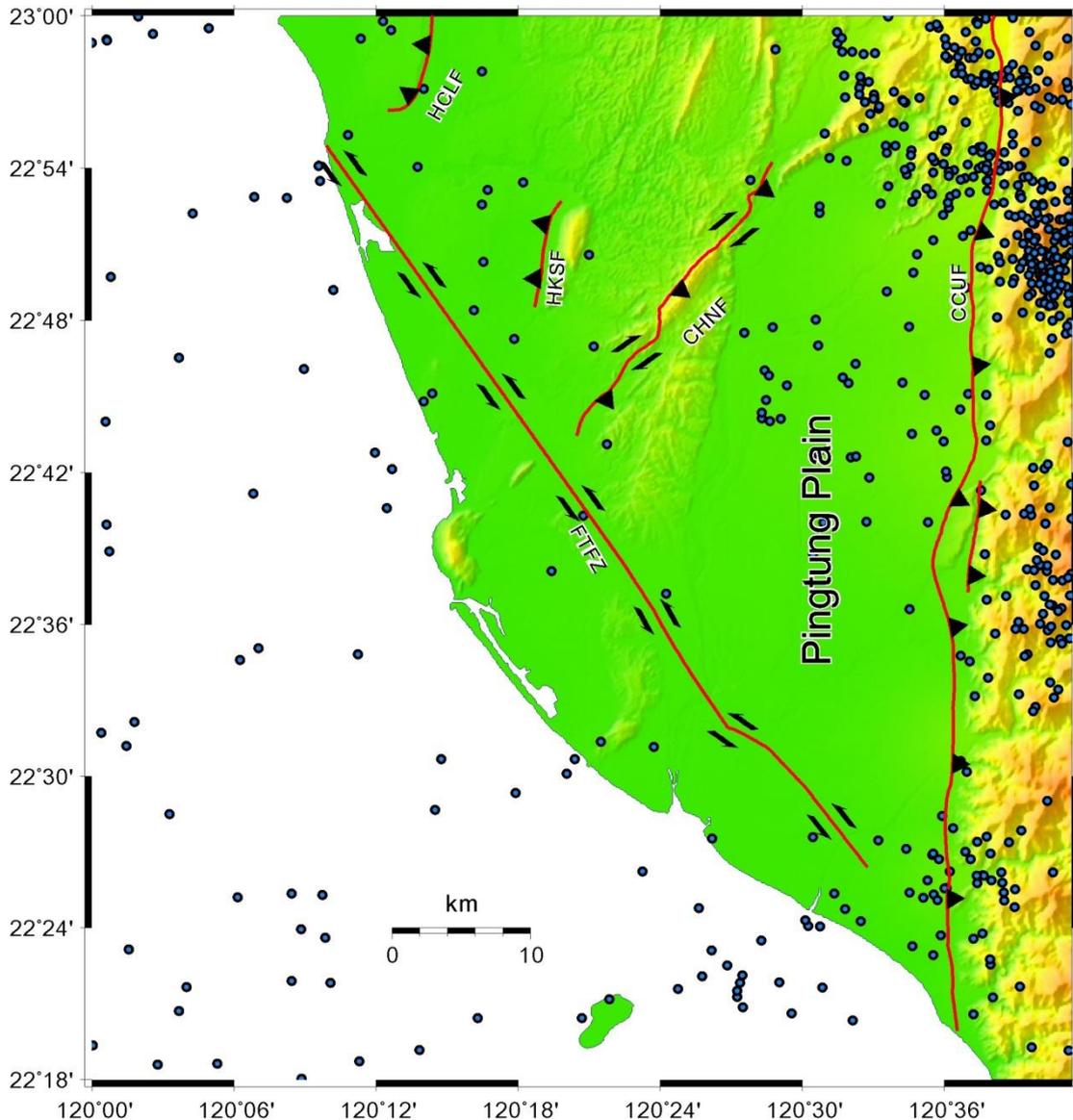


圖2 台灣西南部之活動斷層與地震分布。紅線為活動斷層，藍點為 1991 到 2011 年間  $M_L > 3$  的地震震央。HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層

## 二、地質背景

台灣西南部是了解馬尼拉隱沒帶(隱沒)向北進入台灣增積楔(碰撞)的關鍵區域 (Lacombe et al., 2001) (圖 1)。本地區主要包含三個地質分區：中央山脈、西部麓山帶南端和屏東平原(圖 2)。中央山脈位於研究區域東邊，主要岩性組成為先第三紀變質基盤岩和始新世到中新世之板岩(Crespi et al., 1996)，構造上則是以韌性的皺褶為主所組成。除褶皺外，中央山脈仍具有發育於上部地殼之脆性正斷層(Chai, 1972; Crespi et al., 1996)。這些正斷層的出現，反映中央山脈因底部加積 (underplating)所產生之抬升作用(Chai, 1972; Crespi et al., 1996)。在台灣西南部之北方及西北方為西部麓山帶之南緣，為上新世至更新世期間，因中央山脈發育、荷

重增加，導致山脈前緣板塊撓曲所產生之前陸盆地(Lin and Watts, 2002)。台灣西部山麓的地層由中新世的淺海沉積和上新世-更新世泥岩所組成(Angelier et al., 1986)。臺灣西部麓山帶的地質構造特徵是由一系列向東傾斜之褶皺逆衝帶所構成，且通常伴隨有平緩的褶皺構造。這些逆衝斷層之發育時間大致在上新世至更新世。在中央山脈和西部山麓中間的屏東平原主要包含了超過 5000 公尺厚的上新世至第四紀河相到海相的沉積物(Chiang et al., 2004; Shyu et al., 2005)。

在台灣西南部有許多運動學模型被提出，並試圖描述台灣西南部的側向擠壓變形型態。這些模型中，常見的觀點為台灣西南部因受到板塊間持續擠壓碰撞與作為嵌入體之北港高地間的交互作用，導致台灣西南部的物質往西南方向被擠出之脫逸構造(Ching et al., 2007; Hu et al., 2001, 2007; Lacombe et al., 2001; Lu and Malavieille, 1994)。Lacombe et al.(2001)和 Hu et al.(2007)指出台灣西南部之脫逸構造可以分解成四個朝南南西或朝南方移動且近乎剛性的塊體運動。區分這些塊體的主要構造由西向東分別為北北東-南南西走向之變形前緣與旗山斷層，及接近南北走向之高屏斷層與潮州斷層。Ching et al.(2007)進一步說明屏東平原為一相對剛性之塊體，而位於旗山斷層和變形前緣間之區域則受到強烈的擠壓作用。因此旗山斷層明顯地作為強烈變形帶和屏東平原的邊界斷層。

本研究區域之主要斷層包含有潮州斷層、旗山斷層、鳳山轉換斷層、後甲里斷層及小崗山斷層(圖2)。以下將簡要的逐一說明。

### (一)潮州斷層

利用地震、外業測量、地貌分析及地球物理觀測等方法，可以得知台灣西南部有數條主要斷層。其中最明顯的地形特徵是南北走向的潮州斷層，這條斷層由西部麓山帶往南延伸到屏東平原末端，總長約80公里，區分了中央山脈和屏東平原兩個地質分區，同時也是台灣造山帶主要的邊界斷層。到目前為止，潮州斷層之斷層幾何和斷層活動性仍在持續的爭論中，早期的解釋認為潮州斷層是具有左移分量之高角度逆衝斷層(Wiltschko et al., 2010)；近期的沉積構造分析則顯示潮州段層是個低角度向西逆移的斷層(Mouthereau et al., 2001)。Lewis et al.(2004)則根據地磁調查、布蓋重力異常與震測數據分析指出，潮州斷層的幾何型態可能受控於位在深部基盤(basement)的早期正斷層，隨著菲律賓板塊和歐亞板塊的相互擠壓，這些早期正斷層受到擠壓應力而沿著既有之斷層面被重新活化為逆斷層，而發育成高角度逆斷層，亦即現今之潮州斷層。然而由於缺乏地表露頭，故並無明顯證據指出此斷層具有走向滑移之分量(Lewis et al., 2004)。從地表速度場分析顯示潮州斷層可能為左移之高角度逆斷層，且斷層淺部在現今之震間期為鎖定之特性(Ching et al., 2007; Hu et al., 2007)。Wiltschko et al.(2010)同時表示，潮州斷層的抬升速率沿斷層面向南逐漸減少。

## (二)旗山斷層

由衛星影像和地質調查可知，坐落於西部麓山帶之旗山斷層為東北-西南走向(Sun, 1963; Wang, 1976)。早期研究指出旗山斷層是具有走向滑移分量且向東傾斜的高角度逆斷層(Sun, 1963)。雖然地質調查結果顯示旗山斷層有左移之走向滑移分量(Tsan and Keng, 1968)，但近期的 GPS 觀測結果顯示，旗山斷層為具有右移分量之逆斷層(Ching et al., 2007; Hu et al., 2007; Lacombe et al., 2001)。

## (三)鳳山轉換斷層

由西部麓山帶的 DEM 分析可知，鳳山轉換斷層為 N140°E 走向的斷層(Deffontaines et al., 1994, 1997; Lacombe et al., 1999)。西部麓山帶南部東南東-西北西方向(N105°E)的擠壓應力與高雄地區 N140°E-N150°E 的應力狀態，同時使致鳳山轉換斷層為具有伸張分量的左移走向滑移斷層(Deffontaines et al., 1997)。地表速度場分析顯示鳳山轉換斷層具有左移的運動型態，且向東南延伸至屏東平原的海岸線(Ching et al., 2007)。

## (四)後甲里斷層

從空拍影像分析可知後甲里斷層位於台南台地東緣(Sun, 1964)。後甲里斷層被認為是具有滑脫構造(décollement)的盲斷層(Fruneau et al., 2001)。從地球物理數據顯示其抬升速率在台南台地上有約11 mm/yr，在台南台地邊緣則降至近乎零(Huang et al., 2009)。Huang et al.(2009)假設後甲里斷層之斷層面延伸至地表，因此靠近台南台地的地方沒有盲斷層。地球物理測量結果同時顯示短期的變形速率較長期的抬升速率大，暗示了台南東部可能具有地震發生的可能性(Huang et al., 2009)。

## (五)小崗山斷層

北北東走向的小崗山斷層深度約為 8 公里，並在 DEM 上可看出一明顯的斷層崖面(Sun, 1964)。根據震測調查，小崗山斷層為向東傾斜之逆衝斷層(Hsu and Chang, 1979)，近來的地表測量資料顯示，跨小崗山斷層並沒有明顯的速度不連續出現(許書琴, 2012)。另外，震測剖面分析，小崗山斷層可能為大崗山背斜與其下之泥貫入體(mud diapir)向上抬升所造成(翁群評, 2001)。

# 三、GPS 資料及解算策略

## (一) GPS 資料

本研究所使用的 GPS 資料來源包含中央地質調查所設置之168個 GPS 移動站及37個2002-2010年間設置的 GPS 連續站(圖3)。

GPS 移動站每年定期量測，每次皆有3-10站同時進行施測，使用之儀器為雙頻大地型接收儀。通常每站每次會進行兩個測回，每個測回約6-14小時，使用仰角高於15°之可用衛星資訊。資料取樣頻率為15秒。所採用的 GPS 移動站資料中，約有

43%的GPS資料有6年以上之觀測成果,37%的GPS資料蒐集時間介於2.5年至6年,其餘測站之資料蒐集時間約1.0-2.5年。

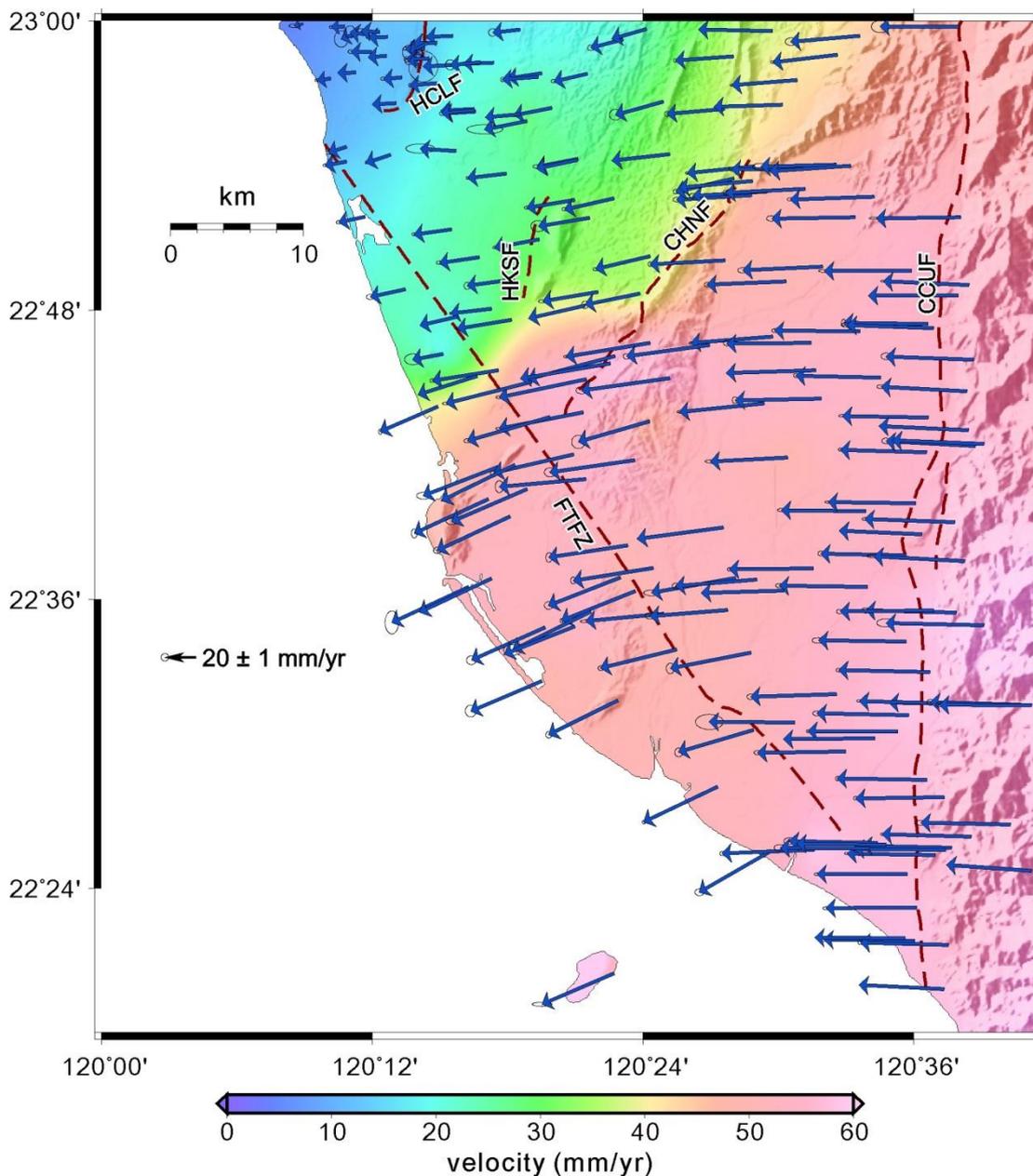


圖3 台灣西南部相對於澎湖之 GPS 水平速度場。藍色的箭頭為速度向量，紅色虛線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層

本研究所蒐集之 GPS 連續站資料至少需有3年之觀測量，多數的測站有5到6年的觀測量，最長的則有9年的觀測時間。所有測站皆為24小時接收資料，其取樣速率為15秒或30秒，多由中央研究院、內政部、中央地質調查所與中央氣象局所設立之測站。

## (二)解算策略

GPS 資料採用軟體 Bernese v.5.0進行解算。坐標解算過程中，本研究使用國際 GNSS 機構(IGS)所提供之精密星曆並使用 IERS Bullet B 值改正極運動影響，並使用電碼進行單點定位及接收儀時間的改正，在進行相對定位之前，先以載波相位三次差分函式進行週波脫落補償並篩除量測粗差。為利用相對定位求解坐標參數，本研究組成二次差分載波相位觀測方程式，採用 QIF(Quasi Ionosphere-Free)模式，求得 L1及 L2的週波未定值(Steigenberger et al., 2006)，並以 Saastamoinen model 改正對流層傳播影響(Saastamoinen, 1972)。

為提升 GPS 坐標解算精度，並求解各個測站在國際地球參考框架(ITRF2008)下的每日坐標解，本研究將計算的過程分成兩個步驟。首先約制四個在台灣四周全球 IGS 基準站(TSKB、GUAM、PERT、IISC)在 ITRF2008下之坐標與速度場，以求解六個國內固定站(PKGM、S01R、KDNM、CKSV、LIUC 及 KMNM)的位置及速度場。接著再以六個國內固定站的先驗坐標和速度量求解西南部台灣所有 GPS 測站之坐標。整體而言，獲得移動站水平坐標的誤差量約±3-8 mm，垂直坐標的誤差量約±10-20 mm；而 GPS 連續站水平坐標的誤差量約±2-5 mm，垂直坐標的誤差量約±10-15 mm。

## 四、地表水平速度場分析

### (一)水平速度場計算

GPS 水平速度場之計算資料是採用2002至2010年各測站的坐標時間序列。使用下列式1擬合第  $n$  個站中第  $i$  個坐標分量之時間序列。

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + v_n^i \quad (1)$$

式中， $x_n^i(t)$ 為每個測站的觀測位移量； $t$ 為時間，單位為年； $a_n^i$ 為截距， $b_n^i$ 為測站線性速度， $v_n^i$ 為殘差。

就 GPS 連續站的時間序列，本研究使用空間濾波技術移除測站粗差與各測站間的共通誤差(Wdowinski et al., 1997)後，使用最小二乘法計算所有測站相對於澎湖(S01R)的 E、N 與垂直分量的速度。

### (二)台灣西南部水平速度場

從水平速度(圖3)可以看出旗山斷層為台灣西南部速度差異的分界。旗山斷層以西存在一顯著的速度梯度，速度由東南往西北從30 mm/yr 遞減到10 mm/yr，而旗山斷層以東的速度平均約為50 mm/yr，方向約 N268°。就速度方向而言，在旗山斷層以西的屏東平原沿海地區和高雄地區，其速度方位角逐漸轉向 N245°。同時，速度方位角的改變也顯示了旗山斷層兩側的差異，斷層東側的速度向量方位角呈逆時針旋轉，反之其西側為順時針旋轉。須注意的是，後甲里斷層、小崗山斷層和旗山斷層都坐落在速度梯度的邊界。跨後甲里斷層之速度梯度變化約為15 mm/yr

- 20 mm/yr，跨小崗山斷層之速度梯度變化約20 mm/yr - 30 mm/yr，跨旗山斷層之速度梯度變化約為40 mm/yr - 50 mm/yr。

## 五、應變速率估算

### (一)應變速率計算

應變速率之計算是基於平面應變的假設，為地殼受應力作用反映於水平速度梯度之變化，和垂直速度分量無關。由於應變速率張量獨立於速度參考框架，故由應變速率場可看出同一位置的應變累積速率及其對應的地震風險評估(Ward, 1994)。將 GPS 速度量帶入(2)式可以估計每個待算點的應變率張量 $\dot{\epsilon}_{ee}$ ， $\dot{\epsilon}_{nn}$ 和 $\dot{\epsilon}_{en}$ 。

$$\begin{bmatrix} v_e^i \\ v_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_e^j \\ v_n^j \\ \dot{\epsilon}_{ee}^j \\ \dot{\epsilon}_{en}^j \\ \dot{\epsilon}_{nn}^j \\ \dot{\omega}^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_e^i \\ e_n^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， $v_e$ 、 $v_n$ 為速度的E、N分量， $\Delta x_{ij}$ 、 $\Delta y_{ij}$ 為觀測點*i*到待算點*j*的距離分量， $\dot{\epsilon}_{ee}^j$ 、 $\dot{\epsilon}_{en}^j$ 、 $\dot{\epsilon}_{nn}^j$ 為內差點*j*的應變速率張量， $\dot{\omega}^j$ 為待算點*j*的旋轉率， $e_e^i$ 和 $e_n^i$ 為觀測點*i*的速度分量殘差。每一個待算點的速度分量、應變率張量分量和旋轉速率可以藉周圍的觀測點以最小二乘法求得。

取得應變率張量後，可由 Prescott(1979)提出的方程式求得主應變率及剪應變率的大小和方位角。其中，面膨脹速率與傾向滑移斷層作用相關，而剪應變速率則與走向滑移斷層作用有關(Sagiya et al., 2000)。

### (二)台灣西南部應變速率場

在計算應變速率時，本研究首先採用組成三角網的方式，計算各三角網之應變量，再根據鄰近三角網應變量之相似度，將台灣西南部重新區分為29個小網以獲得更可靠的應變分布型態(圖4)。一般來說，主應變速率在主要斷層沿線有顯著的特徵，在鳳山轉換斷層中南段有~0.8  $\mu\text{strain/yr}$ 的最大伸張速率，而~1.2 $\mu\text{strain/yr}$ 的最大擠壓速率分布在旗山斷層和潮州斷層中段。就鳳山轉換斷層，有西北西-東南東方向約0.8 $\mu\text{strain/yr}$ 的壓縮量，在斷層中段有北北東-南南西方向約0.2 $\mu\text{strain/yr}$ 的伸張量，在斷層南段則有北北東-南南西方向約0.7  $\mu\text{strain/yr}$ 的伸張量(圖4)。就後甲里斷層，其東側有約0.7  $\mu\text{strain/yr}$ 的東-西向擠壓量，其西側有約0.2  $\mu\text{strain/yr}$ 的東北-西南方向的伸張。就小崗山斷層，有約0.3  $\mu\text{strain/yr}$ 的東-西擠壓量。就旗山斷層，有約2.0  $\mu\text{strain/yr}$ 的西北-東南擠壓。最後，就潮州斷層，其北段和中段區域有約1.0  $\mu\text{strain/yr}$ 的東-西擠壓量，而南段則有約0.2  $\mu\text{strain/yr}$ 的西北-東南向伸張量(圖4)。

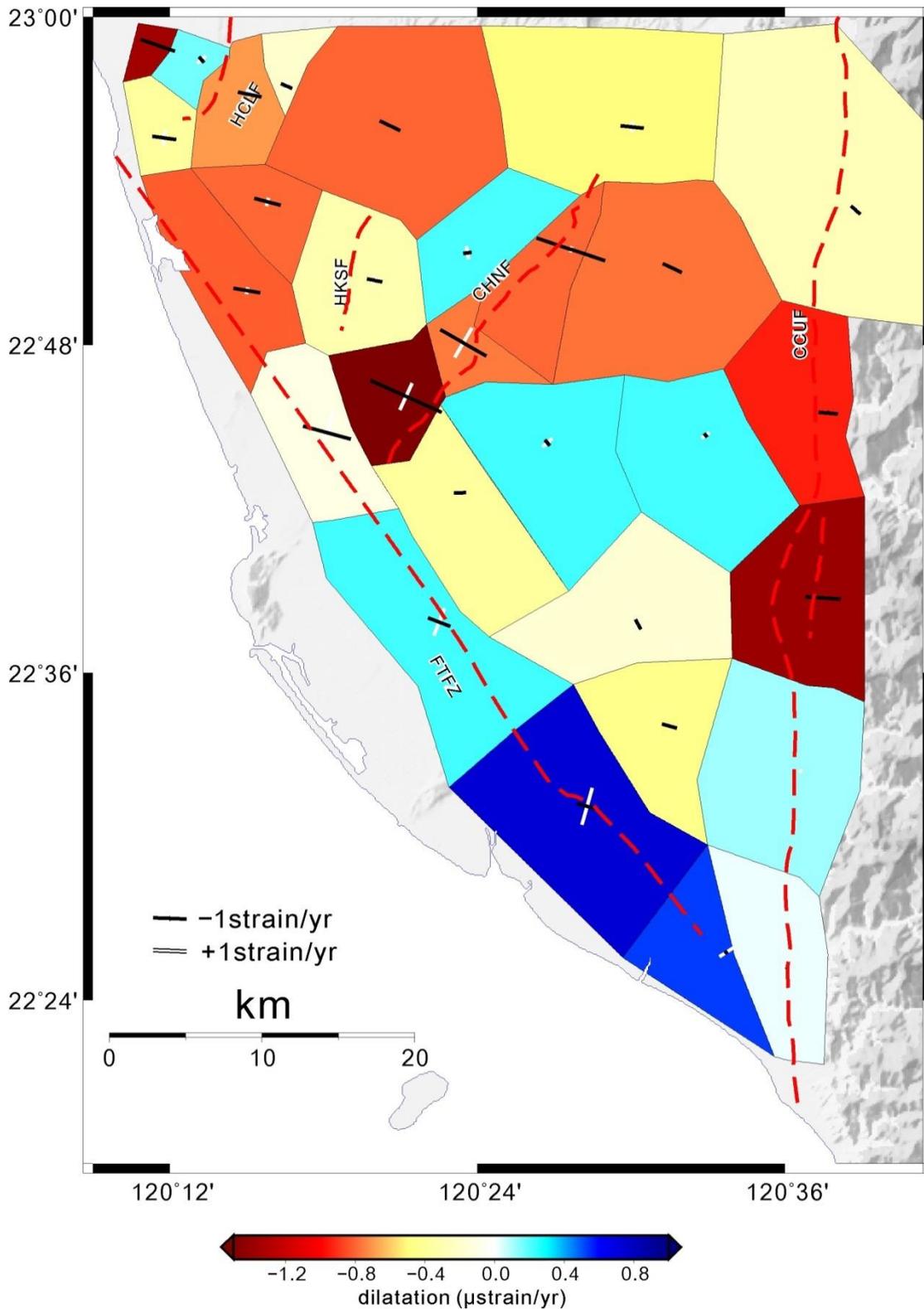


圖4 台灣西南部主應變率分布圖。黑色線段代表擠壓，白色代表伸張。色階變化表示面膨脹率的大小，正值為伸張，負值為壓縮。紅色虛線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層

剪切應變速率場顯示(圖 5)， $\sim 3.0 \mu\text{strain/yr}$  之較大剪切應變率主要集中於鳳山轉換斷層和旗山斷層，而其他地區剪切應變速率多小於  $2.0 \mu\text{strain/yr}$ 。鳳山轉換斷層北段具有約  $1.3 \mu\text{strain/yr}$  的左剪應變率，中段有約  $3.5 \mu\text{strain/yr}$  的左剪應變率，南段則有約  $2.4 \mu\text{strain/yr}$  的左剪應變率。而沿旗山斷層具有約  $4.0 \mu\text{strain/yr}$  之右剪應變率，沿潮州斷層有約  $0.5\text{-}1.0 \mu\text{strain/yr}$  的較低剪應變速率。最後，後甲里斷層和小崗山斷層之剪應變速率約為  $1.0 \mu\text{strain/yr}$ 。

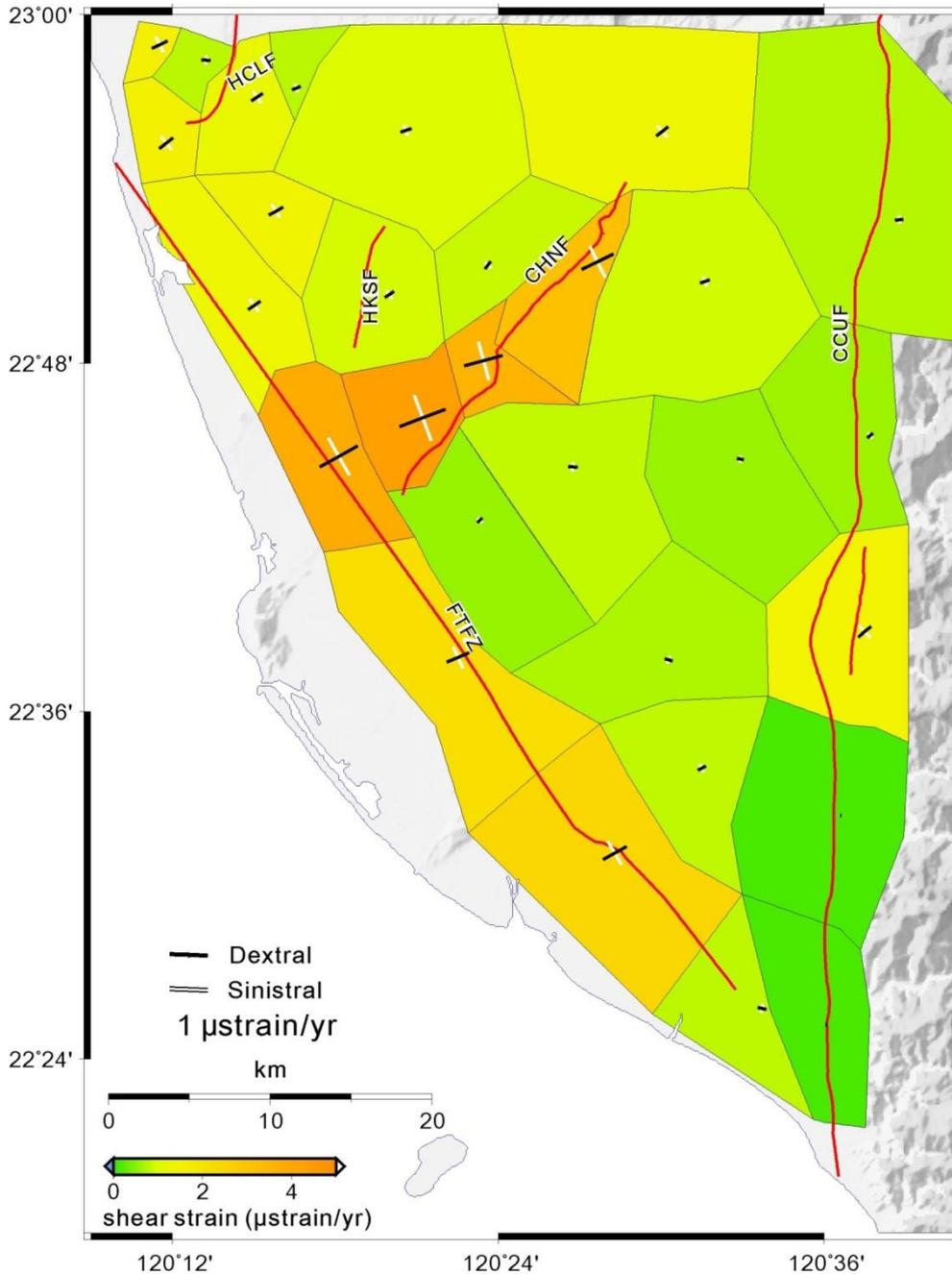


圖5 台灣西南部剪應變率分布圖。圖中粗線段反映剪應變率的數量及方向；黑色線段為右剪應變，白色線段為左剪應變。色階標示剪應變率大小。紅色實線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層

## 六、二維斷層模型

### (一)二維斷層模型理論

由於地表速度場沿斷層走向方向往往會有空間上的差異，因此本研究在鳳山轉換斷層的北、中、南三個區段分別選取跨斷層之速度剖面(圖 6)，將水平速度分解成平行斷層走向及垂直斷層走向兩個分量進行分析，其中垂直斷層走向分量之正值為東北東方向，負值則為西南西方向；平行斷層走向分量之正值為北北西方向，負值為南南東方向(圖 6)。同時，本研究亦利用二維斷層模型反演各剖面之水平速度向量以求得斷層滑移速率及斷層幾何參數。此斷層模型假設震間地表速度場是由塊體運動(block motion)和反向滑移模型(back-slip model)所組成。塊體運動是指因板塊運動導致之塊體長期運動行為；反向滑移模型是指因斷層面上摩擦力所產生之地表速度變化。由於缺乏地震事件及其他斷層幾何資訊的數據，故本研究採用蒙地卡羅(Monte Carlo)法搜尋最佳之斷層參數(斷層之傾角、深度、斷層位置)。由於斷層滑移速率可能沿斷層深度而有所變化，所以本研究將北段和南段剖面的斷層劃分成 15 的小斷層(patch)，將中段剖面的斷層劃分為 10 個小斷層，並採用平滑參數約制不同小斷層間斷層滑移速率的相關性。

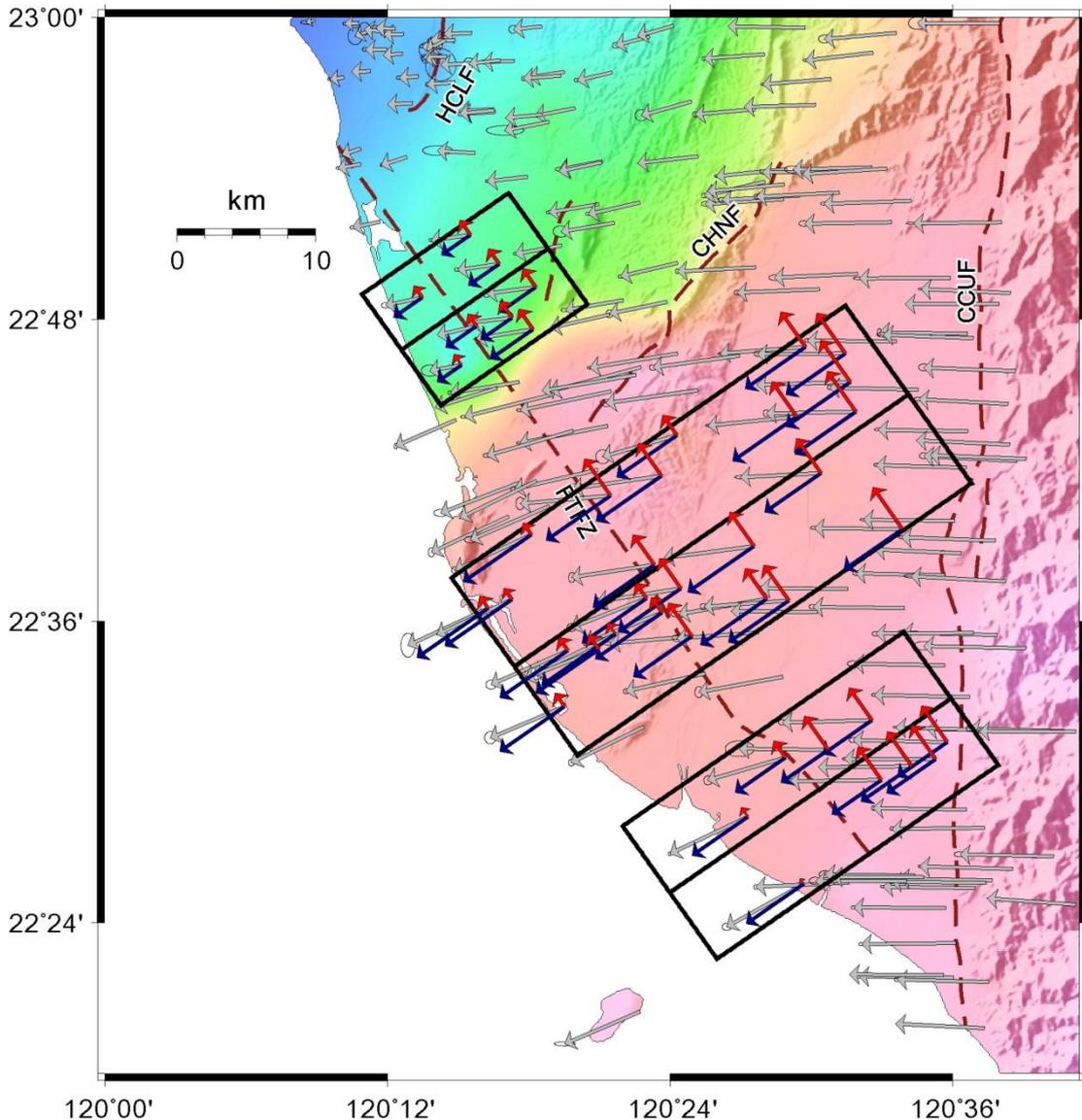


圖6 鳳山轉換斷層北、中、南三段之速度剖面位置圖。藍色箭頭為垂直斷層走向分量，紅色箭頭為平行斷層走向分量。紅色虛線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層、CCUF：潮州斷層、FTFZ：鳳山轉換斷層帶

## (二) 斷層模擬結果

### 1. 斷層北段模擬結果

斷層北段在跨越斷層約4公里的寬度間有約1.6 mm/yr 之左移分量速率變化及約1.9 mm/yr 的擠壓速率。其模擬結果指出(圖7A)，平行斷層走向分量有約4.1 mm/yr 的差異(misfit)，而垂直斷層走向分量則有約1.7 mm/yr 之差異。斷層幾何之最佳解顯示(圖7B)，斷層傾角為 $50^\circ$ ，斷層深度約7.9 km。

斷層滑移速率分布顯示(圖7C)，斷層長期走向滑移速率為17.7 mm/yr，逆衝分量為14.6 mm/yr。斷層的反向走向滑移速率在深度7.1 km 處是2.3 mm/yr，同時，其反向傾向滑移速率是2.0 mm/yr。因此，最大震間走向滑移分量約為15.4 mm/yr，最大震間傾向滑移速率約為12.6 mm/yr。此外，近地表之震間斷層滑移速率皆為零。

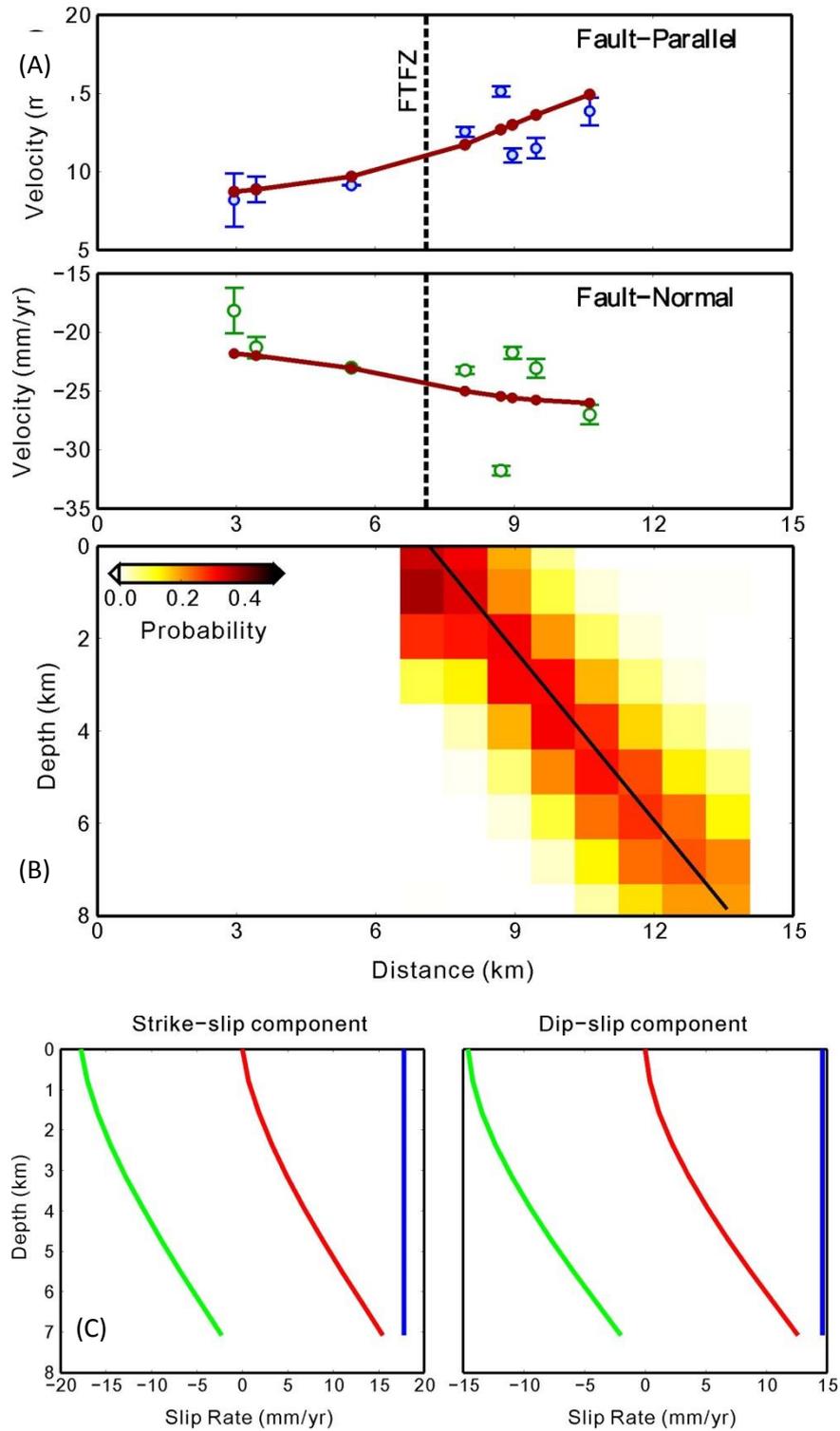


圖7 斷層北段模型剖面及滑移速率分布。(A)為模擬結果及觀測量之比較值。藍點為觀測值，紅點為模擬結果。(B)為推測之斷層幾何。色階背景為斷層可能之分布位置。(C)為滑移速率分布。藍線為長期滑移速率，紅線為震間滑移速率；綠線為反向滑移速率

## 2. 斷層中段模擬結果

斷層中段在跨越斷層約4公里的寬度間有約20.9 mm/yr 的明顯左移分量速率變化及約1.0 mm/yr 的伸張速率。其模擬結果指出(圖8A)，平行斷層走向分量有約為11.2 mm/yr 的差異(misfit)，而垂直斷層走向分量則有約1.8 mm/yr 之差異。斷層幾何之最佳解顯示(圖8B)，斷層傾角為48°，斷層深度為約13.2 km。

斷層滑移速率分布顯示(圖8C)，斷層長期走向滑移速率為25.8 mm/yr，正向滑移分量為2.7 mm/yr。斷層的反向走向滑移速率在深度13.2 km 處是2.5 mm/yr，而其反向傾向滑移速率是0.0 mm/yr。所以，最大震間走向滑移分量約為23.3 mm/yr，最大震間傾向滑移速率約為2.7 mm/yr。在近地表處，則有約10.0 mm/yr 之震間走向滑移速率及約2.5 mm/yr 之震間傾向滑移速率。

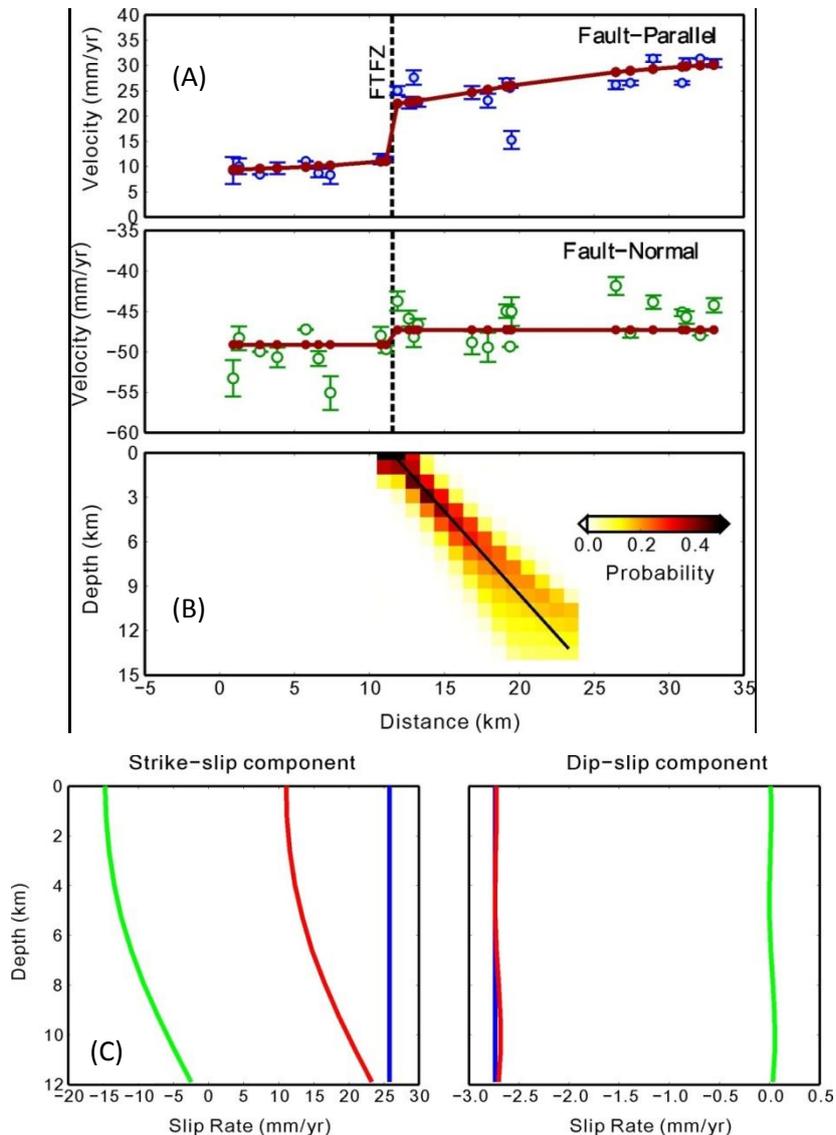


圖8 斷層中段模型剖面及滑移速率分布。(A)為模擬結果及觀測量之比較值。藍點為觀測值，紅點為模擬結果。(B)為推測之斷層幾何。色階背景為斷層可能之分布位置。(C)為滑移速率分布。藍線為長期滑移速率，紅線為震間滑移速率；綠線為反向滑移速率

### 3. 斷層南段模擬結果

斷層南段在跨越斷層約8公里的寬度間有約23.4 mm/yr 之明顯左移分量速率變化及約4.5 mm/yr 的伸張速率。其模擬結果指出(圖9A)，平行斷層走向分量有約22.9 mm/yr 的差異(misfit)，垂直斷層走向分量則有約4.67 mm/yr 之差異。斷層幾何之最佳解顯示(圖9B)，斷層傾角為50°，斷層深度約為7.8 km。

斷層滑移速率分布顯示(圖9C)，斷層長期走向滑移速率為26.2 mm/yr，正向滑移分量為9.7 mm/yr。斷層的反向走向滑移速率在深度7.8 km 處是0.8 mm/yr，而其反向傾向滑移速率為0.6 mm/yr。故最大震間走向滑移分量約為25.4 mm/yr，而最大震間傾向滑移速率約為9.2 mm/yr。在近地表處，則有約20.0 mm/yr 之震間走向滑移速率及約5.7 mm/yr 之震間傾向滑移速率。

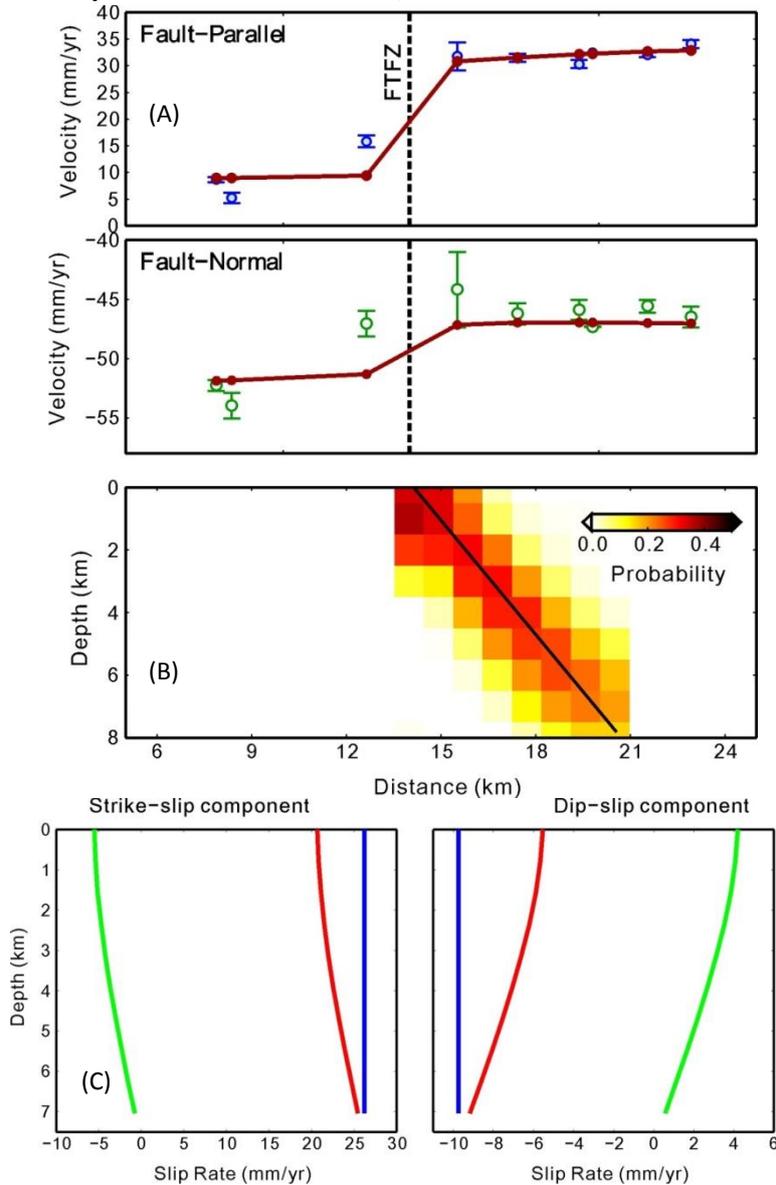


圖9 斷層南段模型剖面及滑移速率分布。(A)為模擬結果及觀測量之比較值。藍點為觀測值，紅點為模擬結果。(B)為推測之斷層幾何。色階背景為斷層可能之分布位置。(C)為滑移速率分布。藍線為長期滑移速率，紅線為震間滑移速率；綠線為反向滑移速率

## 七、討 論

### (一)斷層運動行為分析

根據 Deffontains et al.(1997)分析解釋，鳳山轉換斷層是具正斷層分量之左移斷層，但 Deffontains et al.(1997)藉由 DEM 的分析只辨識出鳳山轉換斷層之北段及中段。而本研究跨斷層北段約 1.9 mm/yr 的擠壓速率顯示，北段斷層是左移且具逆衝分量之走向滑移斷層。相反地，中段和南段約 1.0 mm/yr 和 5.2 mm/yr 的伸張速率顯示，斷層中段和南段的運動行為為左移且具正斷層分量。先前的研究(Ching et al., 2007; Deffontains et al., 1997)同樣指出，鳳山轉換斷層是一個左移斷層，本研究之速度剖面分析與斷層模擬結果和先前研究結果相同。但本研究進一步闡述了鳳山轉換斷層沿著斷層走向之空間變化，就跨斷層之速度差異與斷層模擬結果指出，斷層北段之走向滑移速率較慢，約 17.7 mm/yr，近地表的斷層滑移速率為零，反映斷層北段近地表之鎖定特性；往南之走向滑移速率則略為增加，約 25.8 mm/yr(中段)與 26.2 mm/yr(南段)，此兩段的近地表震間滑移速率皆不等於零，說明斷層中段和南段有極高的可能性為潛移行為。而類似如鳳山轉換斷層一樣由潛移到鎖定的斷層型態，同樣出現在美國的聖安德列斯斷層與海沃德斷層和菲律賓的萊特斷層，其斷層滑移速率沿著斷層走向而改變。然而，造成斷層中段和南段潛移行為以及北段為鎖定的成因目前並不清楚。

總結來說，本研究以速度剖面分析作為判釋斷層分段邊界之依據(圖 7-9)，鳳山轉換斷層北段和中段的邊界距斷層北端點約 23 公里，而中段和南段的邊界則位於 53 公里處。此外，鳳山轉換斷層是左移走向滑移斷層，且北段是鎖定行為且具有擠壓分量，中段和南段則是潛移行為且具有伸張分量(圖 10)。

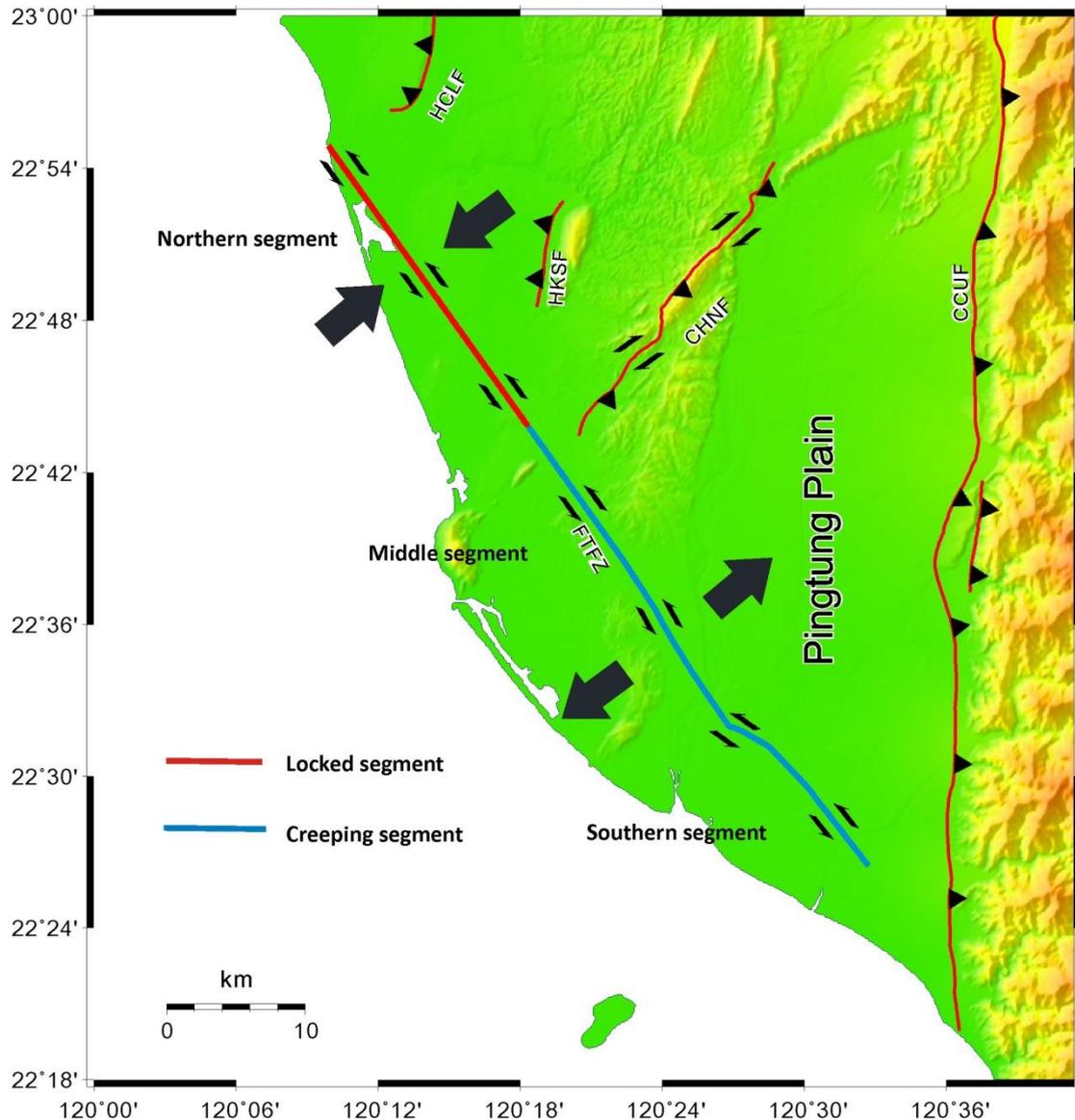


圖10 鳳山轉換斷層現今之運動型態

## (二)地震潛能評估

評估地震潛能對於預期地震事件的發生與地震防災工作而言是十分重要的 (Bürgmann et al., 2000; Ben-Zion et al., 1993; Lienkaemper et al., 1991)。本研究使用計算地震矩(seismic moment)估算鳳山轉換斷層每年累積的能量， $\dot{M}_0 = \mu \cdot A \cdot D$ ，其中  $\mu$  為剪切係數( $3 \times 10^{23}$  dyne/cm<sup>2</sup>)； $A$  為斷層滑移面積，在本研究中是藉由地表速度場的梯度變化假設斷層的長度，並根據斷層模型所獲得之斷層傾角與斷層深度來決定斷層寬度； $D$  是錯位模型推估之斷層反向滑移速率。假設鳳山轉換斷層北段的長度為 23 公里，由斷層模型推估之深度為 7.9 公里，則估計之能量累積速率為  $7.94 \times 10^{23}$  dyne-cm/yr；假設中段長度約為 30 公里，斷層模型推估之深度為 13.2 公里，則估計之能量累積速率為  $1.24 \times 10^{24}$  dyne-cm/yr。假設南段約為 10.8 公里長，由錯位模型推估之深度為 7.8 公里，估計之能量累積速率為  $1.15 \times 10^{23}$

dyne-cm/yr。故鳳山轉換斷層總累積能量速率為  $2.15 \times 10^{24}$  dyne-cm/yr。接著再根據斷層長度與規模之經驗關係式(Wells and Coppersmith, 1994)，假設斷層帶總長為 63.8 公里，如果此斷層為發震構造，則估計其對應之地震矩規模  $M_w$  為 6.9，而此規模所對應之能量  $M_0$  為  $2.51 \times 10^{26}$  dyne-cm(Hanks and Kanamori, 1979)，故地震重複週期  $T_r = M_0/\dot{M}_0$  約為 117 年。

## 八、結 論

本研究使用 2002-2010 年 205 個 GPS 觀測資料評估鳳山轉換斷層的活動性及地震潛能。GPS 觀測量之水平速度場顯示(圖 3)，旗山斷層以西，有一顯著東北-西南走向約 20.0 mm/yr 的速度梯度；旗山斷層以東的速度則接近一致，約為 50.0 mm/yr。

主應變速率場(圖 4)顯示鳳山轉換斷層北段有西北西-東南東方向 0.8  $\mu$ strain/yr 的擠壓速率，在中段則觀察到有北北東-南南西方向 0.2  $\mu$ strain/yr 的伸張速率，在南段同樣也有北北東-南南西方向 0.7  $\mu$ strain/yr 的伸張速率。而剪應變速率場則顯示(圖 5)，鳳山轉換斷層北段之左剪應變率約為 1.3  $\mu$ strain/yr，中段約為 3.5  $\mu$ strain/yr，南段則約為 2.4  $\mu$ strain/yr。

由 GPS 速度剖面分析與二維斷層模擬可看出(圖 7-9)，跨斷層三個分段之平行斷層走向分量皆約為 15.0 mm/yr，而北段跨斷層有約 1.9 mm/yr 的擠壓速率，在中段有約 1.0 mm/yr 的伸張速率，在斷層南段則有約 5.2 mm/yr 的伸張速率。此外，鳳山轉換斷層是一條以左移為主的走向滑移斷層，斷層北段為鎖定斷層並有擠壓分量，中段與南段則為具伸張分量之潛移斷層。最後，依據斷層模擬結果指出，鳳山轉換斷層的傾角約為  $50^\circ$ ，深度約為 7-13 公里，估計斷層帶之能量累積約為  $2.15 \times 10^{24}$  dyne-cm/yr，若其為發震構造，則預估之地震週期約為 117 年。然而由於此斷層是位於台灣西南部之泥岩區，這些累積之能量並不一定會透過地震之形式進行釋放，如慢地震事件，因此我們仍需持續對此構造之活動特性進行深入的研究。

## 誌謝

感謝經濟部中央地質調查所提供 2002 年至 2010 年之 GPS 重複觀測站資料。感謝經濟部中央地質調查所與行政院國家科學委員會(計畫編號：101-2116-M-006-012-)對本研究之經費提供。

## 參考文獻

- 翁群評，2001，《小崗山斷層及其附近構造》，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 許書琴，2012，《泥貫入體與逆斷層活動在台灣西南部陸域造成之現今地表變形》，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- Angelier, J., E. Barrier, and H. T. Chu, 1986, Plate collision and paleostress trajectories

- in a fold-thrust belt: the foothills of Taiwan, *Tectonophysics*, 125, pp. 161-178.
- Bürgmann, R., D. Schmidt, R. M. Nadeau, M. d'Alessio, E. Fielding, D. Manaker, T. V. McEvilly, and M. H. Murray, 2000, Earthquake potential along the northern Hayward Fault, California, *Science*, 289(5482), pp. 1178-1182.
- Ben-Zion, Y., J. R. Rice, and R. Dmowska, 1993, Interaction of the San Andreas Fault Creeping Segment with Adjacent great rupture zones and earthquake recurrence at Parkfield, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B2), pp. 2135-2144.
- Calassou, S., C. Larroque, and J. Malavieille, 1993, Transfer zones of deformation in thrust wedges: An experimental study, *Tectonophysics*, 221(3-4), pp. 325-344.
- Chai, B. H. T., 1972, Structure and tectonic evolution of Taiwan, *American Journal of Science*, 272(5), pp. 389-422.
- Chiang, C.S., H.S. Yu, and Y.W. Chou, 2004, Characteristics of the wedge-top depozone of the southern Taiwan foreland basin system, *Basin Research*, 16(1), pp. 65-78.
- Ching, K. E., R.J. Rau, J.C. Lee, and J.C. Hu, 2007, Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995–2005, *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4), pp. 601-619.
- Ching, K. E., M. L. Hsieh, K. M. Johnson, K. H. Chen, R. J. Rau, and M. Yang, 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, doi: 10.1029/2011JB008242.
- Crespi, J. M., Y. C. Chan, and M. S. Swaim, 1996, Synorogenic extension and exhumation of the Taiwan hinterland, *Geology*, 24(3), pp. 247-250.
- Deffontaines, B., J. C. Lee, J. Angelier, J. Carvalho, and J. P. Rudant, 1994, New geomorphic data on the active Taiwan orogen: A multisource approach, *Journal of Geophysical Research*, 99(B10), pp. 20243-20266.
- Deffontaines, B., O. Lacombe, J. Angelier, H. T. Chu, F. Mouthereau, C. T. Lee, J. Deramond, J. F. Lee, M. S. Yu, and P. M. Liew, 1997, Quaternary transfer faulting in the Taiwan Foothills: evidence from a multisource approach, *Tectonophysics*, 274(1-3), pp. 61-82.
- Fruneau, B., E. Pathier, D. Raymond, B. Deffontaines, C. T. Lee, H. T. Wang, J. Angelier, J. P. Rudant, and C. P. Chang, 2001, Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR Interferometry, *Geophysical Research Letters*, 28(16), pp. 3071-3074.
- Hanks, T. C., and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), pp. 2348-2350.
- Hsu, T., and H. Chang, 1979, Quaternary faulting in Taiwan, *Memoir of the Geological Society of China*, 3, pp. 155-165.
- Hu, J. C., S. B. Yu, J. Angelier, and H. T. Chu, 2001, Active deformation of Taiwan from

- GPS measurements and numerical simulations, *Journal of Geophysical Research*, 106(B2), pp. 2265-2280.
- Hu, J.C., C. S. Hou, L. C. Shen, Y. C. Chan, R. F. Chen, C. Huang, R. J. Rau, K. H. 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(3), pp. 287-302.
- Huang, M. H., J. C. Hu, K. E. Ching, R. J. Rau, C. S. Hsieh, E. Pathier, B. Fruneau, and B. Deffontaines, 2009, Active deformation of Tainan tableland of southwestern Taiwan based on geodetic measurements and SAR interferometry, *Tectonophysics*, 466(3-4), pp. 322-334.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, B. Defontaines, J. Angelier, H. T. Chu, and C. T. Lee, 1999, Geometry and quaternary kinematics of fold-and-thrust units of southwestern Taiwan, *Tectonics*, 18(6), pp. 1198-1223.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, J. Angelier, and B. Deffontaines, 2001, Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan, *Tectonophysics*, 333(1-2), pp. 323-345.
- Lewis, C., S. W. Chen, and P. C. Yen, 2004, Magnetic Surveying of the Chaochou Fault of Southern Taiwan: Culmination of Basement-Involved Surface Thrusting in Arc-Continent Collision, *International Geology Review*, 46(5), pp. 399-408.
- Lienkaemper, J. J., G. Borchardt, and M. Lisowski, 1991, Historic creep rate and potential for seismic slip along the Hayward Fault, California, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B11), pp. 18261-18283.
- 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.
- Lu, C. Y., and J. Malavieille, 1994, Oblique convergence, indentation and rotation tectonics in the Taiwan Mountain Belt: Insights from experimental modelling, *Earth and Planetary Science Letters*, 121(3-4), pp. 477-494.
- McClay, K. R., 1991, *Glossary of thrust tectonic terms*, London: Chapman and Hall.
- Mouthereau, F., O. Lacombe, B. Deffontaines, J. Angelier, and S. Brusset, 2001, Deformation history of the southwestern Taiwan foreland thrust belt: insights from tectono-sedimentary analyses and balanced cross-sections, *Tectonophysics*, 333(1-2), pp. 293-318.
- Prescott, W. H., J. C. Savage, and W. T. Kinoshita, 1979, Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978, *Journal of Geophysical Research*, 84, pp. 5423-5435.
- Saastamoinen, J., 1972, Contributions to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin*

- Geodesique*, 105(1), pp. 279-298.
- Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000, Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, *Pure and Applied Geophysics*, 157(11-12), 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: Solid Earth*, 110(B8), doi: 10.1029/2004JB003251.
- Steigenberger, P., M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke, and S. Vey, 2006, Reprocessing of a global GPS network, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5), doi: 10.1029/2005JB003747.
- Sun, S., 1963, The reef limestones and the geologic structures in the vicinity of Kaohsiung City, Taiwan, *Petroleum Geology of Taiwan*, 2, pp. 47-64.
- Sun, S., 1964, Photogeologic study of the Tainan-Kaohsiung coastal plain area, Taiwan, *Petroleum Geology of Taiwan*, 3, pp. 39-51.
- Tsan, S., and W. Keng, 1968, The Neogene rocks and major structural features of southwestern Taiwan, *Proceeding of the Geological Society of China*, 11, pp.45-59.
- Wang, S., 1976, ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwestern Taiwan, *Petroleum Geology of Taiwan*, 13, pp. 37-57.
- Ward, S. N., 1994, A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), pp. 1293-1309.
- Wdowinski, S., Y. Bock, J. Zhang, and P. Fang, 1997, Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 102(B8), doi: 10.1029/97JB01378.
- 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.
- Wiltschko, D. V., L. Hassler, J. H. Hung, and H. S. Liao, 2010, From accretion to collision: Motion and evolution of the Chaochou Fault, southern Taiwan, *Tectonics*, 29(2), doi: 10.1029/2008TC002398.



## e-GNSS 與 GPS 相對定位於地籍測量之精度分析

葉大綱<sup>1\*</sup> 許育源<sup>2</sup> 崔國強<sup>3</sup>

論文收件日期：103.04.02

論文修改日期：103.05.02

論文接受日期：103.05.25

### 摘 要

在使用 GPS 靜態相對定位進行施測時，通常需要在控制點架設參考站來進行相對定位，而需要花費較多的測量時間、人力及成本，而近年來國內的衛星基準站已完成佈設於全台灣，或許可將這些衛星基準站視為相對定位的參考站，對此本實驗於臺北及宜蘭的一、二等衛星控制點進行施測，並使用 TWD97 與 TWD97[2010] 的衛星基準站資料來進行解算，以探討使用此種方式所得到的成果是否能滿足地籍測量規範之要求。本次研究中使用 e-GNSS 與靜態相對定位兩種方式來進行施測，e-GNSS 在兩地區的平面標準差皆在兩公分以內，台北地區的外部精度均可達到地籍測量實施規則最大誤差 6 公分之要求，但宜蘭地區平均誤差則需經過坐標轉換後才能達到規範值，但在單筆資料上仍有超過 6 公分之部分，於使用上仍需注意。靜態定位數據以陽明山衛星追蹤站進行解算時，研究顯示當基線距離大於 20 公里時使用商業軟體解算偶會發生較大之誤差，若剔除較大誤差之點位，台北地區各點位的平面方向誤差皆能在 6 公分以內，但宜蘭地區經過坐標轉換後仍有較大的誤差，坐標轉換改正後誤差範圍在 4.6~57.4 公分之間。

**關鍵詞：**e-GNSS、GPS 靜態測量、坐標轉換、地籍測量

---

<sup>1</sup> 副教授，國立臺北大學不動產與城鄉環境學系。

<sup>2</sup> 碩士生，國立宜蘭大學土木工程學系。

<sup>3</sup> 副教授，國立宜蘭大學土木工程學系。

\* 通訊作者，TEL：(02)86741111#67430，E-mail:[bigsteel@mail.ntpu.edu.tw](mailto:bigsteel@mail.ntpu.edu.tw)。

# Precision Analysis on Cadastral Surveying by Using e-GNSS and GPS Relative Positioning

Ta-Kang Yeh<sup>1\*</sup>, Yu-Yuan Hsu<sup>2</sup>, Gwo-Chyang Tsuei<sup>3</sup>

## Abstract

When the GPS static relative positioning is adopted for surveying, the reference stations are required to be setup at control points. Therefore, more time, cost and manpower are required. In recent years, the GPS reference stations have been constructed in Taiwan, these GPS stations may be treated as the reference stations for relative positioning. In this study, the GPS receivers were setup on the satellite controlling points of Taipei and Yilan, and the data from the reference stations with TWD97 and TWD97[2010] coordinates were utilized for data processing. Two approaches of e-GNSS and static relative positioning were adopted, and the standard deviations in horizontal direction in both areas were within 2 cm. When it came to the external precision, the maximum error of positioning precision was within 6 cm, which was in according with the standard of cadastral surveying. However, the positioning results after coordinate transformation were better than 6 cm in Yilan area averagely, there was still parts exceeding 6 cm in singular data. When the GPS data were processed by using the Yangming mountain reference station, the larger errors were occurred by using commercial software when the baselines were longer than 20 km. If the larger errors were excluded, the external precisions in horizontal direction in Taipei area were within 6 cm. On the other hand, the errors after coordinate transformation in Yilan area were 4.6~57.4 cm.

**Keywords:** Coordinate Transformation, Cadastral Surveying, e-GNSS, GPS Static Relative Positioning,

---

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University.

<sup>2</sup> Master, Department of Civil Engineering, National Ilan University.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Ilan University.

\* Corresponding Author, TEL:+886-2-86741111# 67430,E-mail:[bigsteel@mail.ntpu.edu.tw](mailto:bigsteel@mail.ntpu.edu.tw).

## 一、前言

內政部國土測繪中心自 93 年度起編列經費展辦全國性 e-GPS 衛星定位基準站建置工作(e-GPS 已於 2014 年正式更名為 e-GNSS)，係以基站距離不超過 50 km 為原則進行建置，初期規劃至 95 年度止於臺灣本島及澎湖、金門、綠島、蘭嶼等離島地區建置 66 處基準站；包括 93 年度建置臺灣本島北部地區 23 處基準站，94 年度建置臺灣本島北部地區 20 處基準站，95 年度建置離島及加密臺灣本島地區計 23 處基準站。另為避免重複建置造成資源浪費，故進行衛星定位基準網規劃時，均優先將各機關已建置完成之現有基準站納入整體考量，再依網形分布密度，選擇適當地點辦理後續基準站各項建置工作，目前已完成所有基準站之建置及整合，本島及離島共計 87 座(內政部國土測繪中心，2013)。

而近年來衛星定位應用層面逐漸廣泛，各政府機關單位依其主管業務設置 GPS 連續觀測站進行精密定位、環境監測及科學研究等作業，內政部國土測繪中心亦建置電子化全球衛星即時動態定位系統，將衛星定位技術結合網路達到快速且可獲取高精度之坐標成果。目前國內各機關設置之衛星追蹤站數量已相當多，故由內政部國土測繪中心收集各機關單位之 GPS 連續觀測站資料進行分析，點位成果及基準框架繼續採用一九九七坐標系統(TWD97)，坐標成果為一九九七坐標系統 2010 年成果(簡稱為 TWD97[2010])。

有鑒於臺灣位於板塊碰撞劇烈地帶，衛星追蹤站及各級衛星控制點因地域不同，其位置亦有所變動，自內政部 87 年公布衛星追蹤站及各級控制點 TWD97 坐標迄今已歷經 10 餘年，部分地區點位已產生明顯位移，致套合引用有實務上困難而造成無法符合目前測繪作業之精度需求，在使用 GPS 靜態相對定位進行施測時，通常需要於控制點架設參考站來進行相對定位以提高其精度，在其中常會耗費大量的人力資源以及時間，在考量到控制點在維護上的不易，且使用之衛星接收設備在價錢上較為昂貴，在連接數據庫上也是筆不小的開銷的情況下，本研究採用於衛星控制點進行單一主站施測，並使用衛星基準站資料來解算，以探討此種方式所能達到的精準度及實用性。

## 二、坐標基準與坐標轉換

### (一) TWD97 坐標基準

虎子山坐標系統使用多年後，原有之點位除損毀、流失外，由於各單位為因應本身業務需求，對於控制點不足地區多採零星補設的方式，未經整體性規劃，以致於測設點位之精度不一，影響測量成果品質甚巨。虎子山坐標系統建立當時，由於測量技術限制等因素導致基本三角點坐標成果精度不佳，早已不敷各級控制測量使用。惟自 1980 年代興起 GPS 衛星定位測量技術後，其高精度定位、野外作業快速、避免通視與天候影響、高度電腦外業數據處理及具高可靠度等特色之優異表現已廣

被證實，因而世界各國大多改採 GPS 衛星測量技術來辦理國家大地網之控制測量工作。因此，為建立我國完整、統一、高精度之基本控制點系統，以配合國家整體發展需要，內政部遂自民國 82 年度開始辦理「應用全球定位系統實施台閩地區基本控制點測量計畫」，並配合衛星定位測量廣泛應用之潮流趨勢，邀請產、官、學界代表召開二次研討，並匯集二次會議之討論意見後，訂定一個國家新的大地基準。

依照實施計畫之內容，內政部於民國 82 及 83 年間分別在陽明山、墾丁、鳳林、金門、北港、太麻里、馬祖、東沙等地，設置八個 GPS 衛星基準站，衛星基準站全天候 24 小時連續不斷接收 GPS 衛星信號，並與國際基準站聯測，精確解算求得八個衛星基準站之地心坐標，以做為後續測設各級衛星控制點之坐標依據。其後，則參酌 TWD67 原有三角點及中央研究院設立之衛星控制點，並配合網形分佈與實用性之考量，規劃設立一等衛星控制點計 105 點、二等衛星控制點計 621 點，而於民國 84 至 87 年間陸續辦理一、二等衛星控制點之測量工作，並經過嚴密平差計算後將其成果予以公告使用(張嘉強，2002)。

依此作業架構所公布之國家新坐標系統稱為 1997 台灣大地基準，簡稱為 TWD97。其正式公告之定義如下(內政部地政司衛星測量中心，2013)：

1. 國家新坐標系統之名稱命名為 1997 台灣大地基準，其建構係採用國際地球參考框架 ITRF94。
2. 國家新坐標系統之參考橢球體採用 1980 年 IUGG 公布之 GRS80 大地參考系統，其橢球長半徑為 6378137 公尺，扁率為 1/298.257222101。
3. 台灣、琉球嶼、綠島、蘭嶼及龜山島等地區，其投影方式採用橫麥卡托投影，經差每 2°分帶，中央子午線為東經 121°，投影原點向西平移 250,000 公尺，中央子午線尺度比為 0.9999；另澎湖、金門及馬祖等地之投影方式，亦採用橫麥卡托投影，經差每 2°分帶，中央子午線為東經 119°，投影原點向西平移 250,000 公尺，中央子午線尺度比為 0.9999。

## (二) TWD97[2010]坐標基準

內政部自 87 年公布衛星基準站及各級控制點 TWD97 坐標後已歷經 10 餘年，分析衛星基準站觀測成果可知，外島地區坐標呈現穩定變化，而臺灣本島坐標多有變化且變化量不一。又因近年來衛星定位應用層面逐漸廣泛，各機關單位依其主管業務設置 GPS 連續觀測站進行精密定位、環境監測及科學研究等作業，內政部國土測繪中心亦建置電子化全球衛星即時動態定位系統，將衛星定位技術結合網路達到快速且可獲取高精度之坐標成果。目前國內各地政機關設置之衛星基準站數量已相當多，「大地基準及坐標系統更新維護機制」會議第 2 次會議決議，交由內政部國土測繪中心辦理「2010 年國內 GPS 連續觀測站資料解算工作」及「一九九七坐標系統之 2010 年成果」，並於該次會議確認點位成果及基準框架繼續採用一九九七坐標系統，坐標成果為一九九七坐標系統 2010 年成果。

後經內政部重新選擇大地基準使用之衛星追蹤站，另選取部分 GPS 連續觀測站增設為一等衛星控制點，國土測繪中心依解算獲得之衛星追蹤站及一等衛星控制點(GPS 連續站)坐標值後，再進行一、二及三等衛星控制點整體平差，計算完成 TWD97[2010]坐標值。包括衛星追蹤站 18 站、一等衛星控制點(GPS 連續站)219 點、一等衛星控制點 105 點、二等衛星控制點 569 點及三等衛星控制點 2102 點，共計 3013 點之成果，將完整、統一且高精度之基本控制點坐標提供各界使用(內政部國土測繪中心，2012)。

### (三) 七參數坐標轉換

三維空間中同一點的兩組地心坐標進行轉換時，在考慮沒有網形變形的理想情形下，多係利用七參數來進行坐標的正交轉換工作，其中七參數包括一個尺度參數、三個原點平移參數以及三個軸旋轉參數，因該模式計使用七個參數，故至少需三個共同之地控點坐標才能加以求解。本研究利用參數坐標轉換法，比較坐標轉換前與轉換後之差異性並評估其優缺點，藉以提昇 e-GNSS 定位之精度。本研究考慮台灣地區基準轉換之影響因素如下：

$$\text{基準轉換} = \text{參考框架之轉換(3D)} + \text{網形變形(2D+1D)} + \text{偶然誤差(2D+1D)} \quad (1)$$

因此轉換的第一步驟將採用相似轉換之七參數法，配合附有未知數的條件平差法模式，本研究在七參數法採用 Bursa-Wolf 模式。在三度空間同一點的兩組卡氏坐標轉換中，首先能夠假定一個普遍的線性轉換，其形式如下(Rapp, 1993)：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中包含十二個未知參數  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3$  與  $j = 0, 1, 2, 3$ )，兩組卡氏坐標  $(X, Y, Z)$  與  $(x, y, z)$ 。若考慮三度空間坐標為正交(orthogonal)轉換的特殊情形時，則(2)式的未知參數須滿足下面的條件式：

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

將(3)的條件式代入(2)可將十二參數約化成六參數，寫成下面正交坐標轉換的六參數形式：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中六參數包含平移參數( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ )與旋轉參數( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ )。如果認為兩個坐標系統間有一尺度上的差異，則可以引進單一的尺度參數  $S$ ，使六參數變成七參數的正交坐標轉換，形式如下：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = SR(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

所以在沒有網形變形的理想情形時，應只需利用七參數即可勝任三度空間坐標的正交轉換，其中七參數包含一個尺度參數、三個平移參數、三個旋轉參數，下面舉述在基準轉換時利用七參數法較常應用的 Bursa-Wolf 模式轉換法。

Bursa-Wolf 的七參數模式包含平移參數( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ )、尺度參數( $S$ )與旋轉參數( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ )，並且假設旋轉參數的值很小，兩組坐標分別為( $X, Y, Z$ )與( $x, y, z$ )，其轉換法程式如下：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{BW} + S \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 三、資料蒐集與處理

本研究於台北、宜蘭各個點位施測之 VBS-RTK，主要使用內政部國土測繪中心所提供之 NLSC 系統與宏遠儀器所提供之 Control 系統，在施測時儀器主要接收臨近基準站所傳遞之訊號來進行定位，而基準站之分布多寡和接收數量與施作 VBS-RTK 後所得到精度有著很大的關連性，兩個系統之基準站分布情形如圖 1 所示。

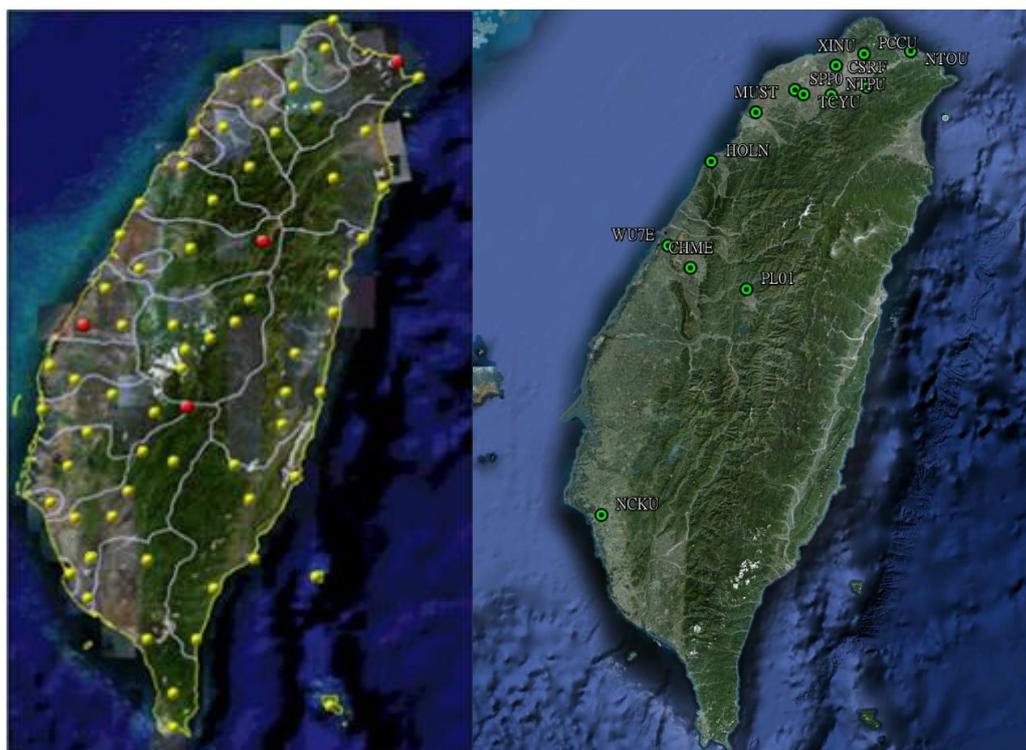


圖1 內政部衛星基準站(左圖)與宏遠儀器衛星基準站(右圖)之分布情形

為探討小區域的坐標轉換與比對，因此選擇台北與宜蘭為測試區域，挑選這兩個地區的一、二衛星控制點來進行施測，詳如表 1 所示。在台北部分為 18 個衛星控制點，而宜蘭部分則是 7 個衛星控制點為本實驗的測試點，其分布情形如圖 2 所示。並於內政部地政司申請 101 年與 87 年之政府公告值，來進行本研究的外部精度驗證。

表 1 本次研究所施測之衛星控制點

地區	施測時間	點號	點名	地區	施測時間	點號	點名
宜蘭	2013.01.12	N407	武罕莊	台北	2013.01.26	N828	南港山
	2013.01.12	N914	大興村		2013.01.28	N337	大崎頭山
	2013.01.13	N912	中一結		2013.01.28	N808	新店地政事務所
	2013.01.14	N425	三抱竹		2013.01.29	N372	尖山
	2013.01.14	N629	三塊厝		2013.01.29	N802	中山地政事務所
	2013.01.15	N637	紅紫林		2013.01.30	N701	石尖山
	2013.01.15	N718	部后莊		2013.01.30	N395	待老坑山
台北	2013.01.23	N321	紗帽山		2013.01.31	N803	新莊地政事務所
	2013.01.24	N401	新庄子		2013.01.31	N654	風爐塞山
	2013.01.24	N001	七星山		2013.02.01	N043	溪子口山
	2013.01.25	N529	北投		2013.02.02	N345	五指山
	2013.01.25	N773	下田寮		2013.02.02	N904	鼻頭
	2013.01.26	N813	太平嶺				

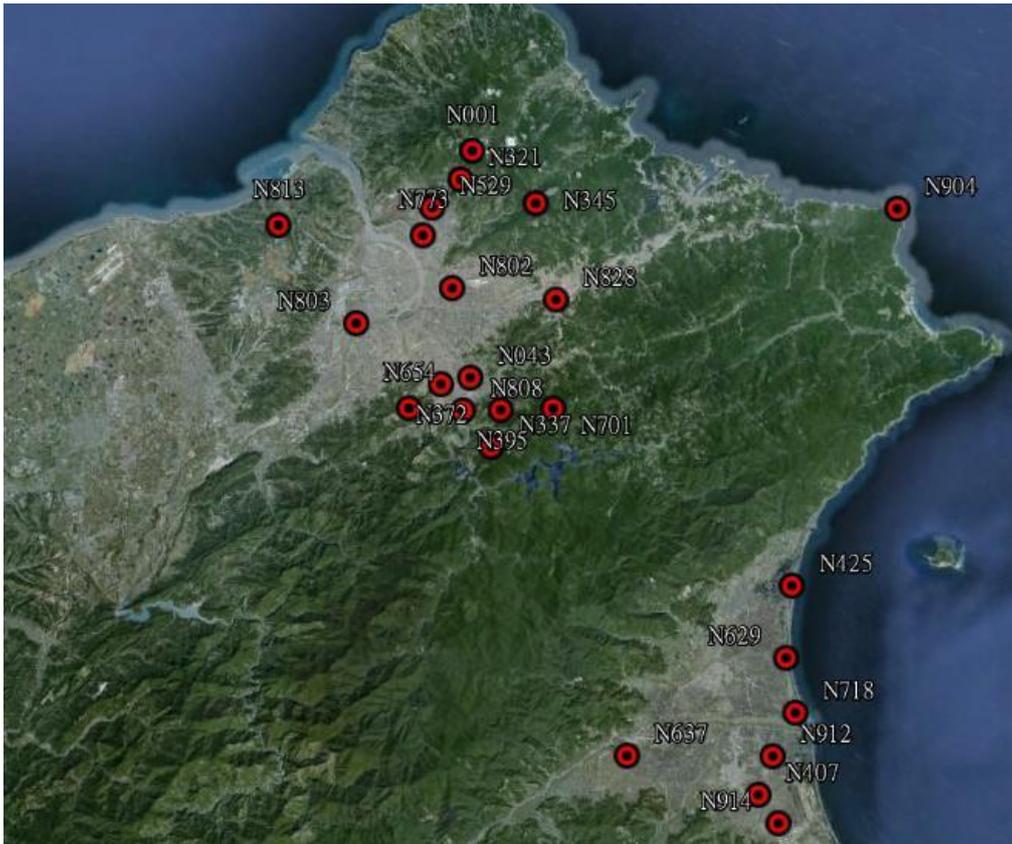


圖2 本研究所選擇施測之衛星控制點分佈圖

在外業利用 e-GNSS 方式施測時，所使用的儀器為 Leica ATX1230 衛星接收儀及其控制器，搭配 Nokia 6230i 手機以及木製腳架，並在每個點位上先後連線至 NLSC 與 Control 系統，各進行 30 次的 e-GNSS 觀測；在外業 e-GNSS 測量的部分，亦可參考內政部國土測繪中心的相關作業手冊來施測(內政部國土測繪中心，2010)。測量完畢之後便可以將各 30 筆的 e-GNSS 定位資料匯入 LGO 處理軟體中，最後再將每一筆數據資料，使用台灣地區大地基準及坐標系統轉換計算程式進行轉換，而將 TWD97 地心坐標(X, Y, Z)轉換至 TWD97 平面坐標(N, E, h)之轉換作業。在本研究中，內部精度為兩種系統於點位各施測 30 組數據之標準差；而外部精度，則是為兩種系統於點位各施測的 30 組數據平均值，再與政府公告之 TWD97 和 TWD97[2010] 坐標相減得到差異值。

靜態相對定位則是於各點施測兩小時之衛星數據收集，資料取樣間隔為每 5 秒 1 筆，衛星截角設定為 10 度；並在內業中使用 Topcon tools 對每個點位以陽明山衛星追蹤站為控制點進行坐標計算，以其進行基線解算來消除共同誤差並計算出其內部精度，而後將計算後之坐標與政府公告之 TWD97 和 TWD97[2010]坐標比較來分析其外部精度。本研究並未使用研究型解算軟體(例如：Bernese、GAMIT 等)來進行靜態資料處理，主要原因為一般工程業界仍多使用商業軟體為主，故這裡同樣使用商業軟體以求成果之客觀性。

#### 四、e-GNSS 即時動態定位

##### (一) e-GNSS 測量與 TWD97 坐標之差異

本研究將 NLSC 與 Control 兩種系統所量測的坐標平均值與政府的 TWD97 公告值相比較，以驗證此兩種系統之外部精度，其成果(N, E, h)如圖 3 至圖 5 所示。兩系統在 TWD97 部分台北 N、E 方向較佳，但在 h 方向卻較差，精度大致上符合地籍測量實施規則 73 條中所提到平面方向最大誤差 6 cm 的要求(內政部國土測繪中心，2011)。但和宜蘭地區相比大致上可看出其精度較好，但若和地籍測量所規範之精度做比較時，其誤差量還是稍嫌過大，無法直接使用 e-GNSS 來進行地籍測量的施作。而在圖中可以知道誤差值有其一致性，可能與板塊運動所造成之系統誤差相關。

將上述數據整理成表 2 後，可以得知 Control 在台北地區的 N、h 方向之差值 2.1 cm 與 5.0 cm 較 NLSC 的 5.0 cm 與 5.4 cm 為佳，而 E 方面則是 NLSC 的 1.6 cm 較 Control 的 2.4 cm 為佳。在宜蘭部分 NLSC 之數值與台北相比較差，誤差約在 20 cm 左右，若在山地中則可符合地籍測量之規範，但不適用於市地及農地測量。顯示在未改正數據前，雖然有些誤差值能得到較好的結果，但在總體數據上卻顯得參差不齊，在此部分後續利用七參數坐標轉換來進行修正。

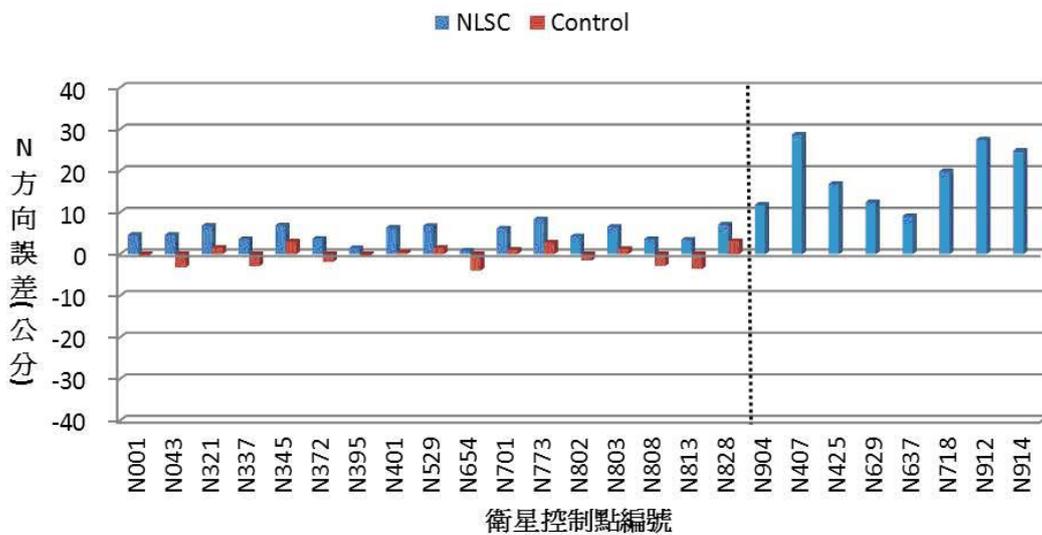


圖3 N 方向坐標與 TWD97 之差值

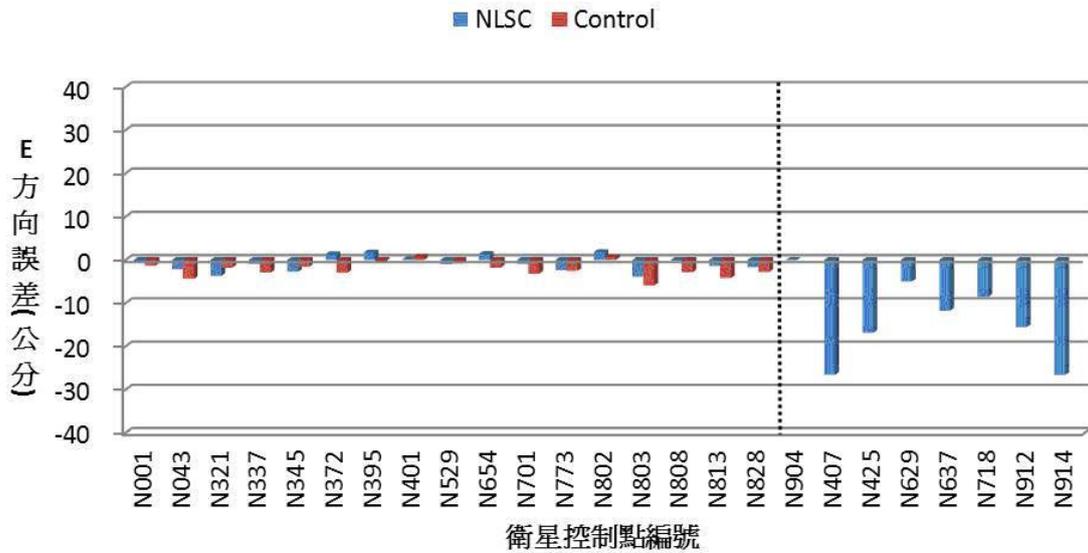


圖4 E 方向坐標與 TWD97 之差值

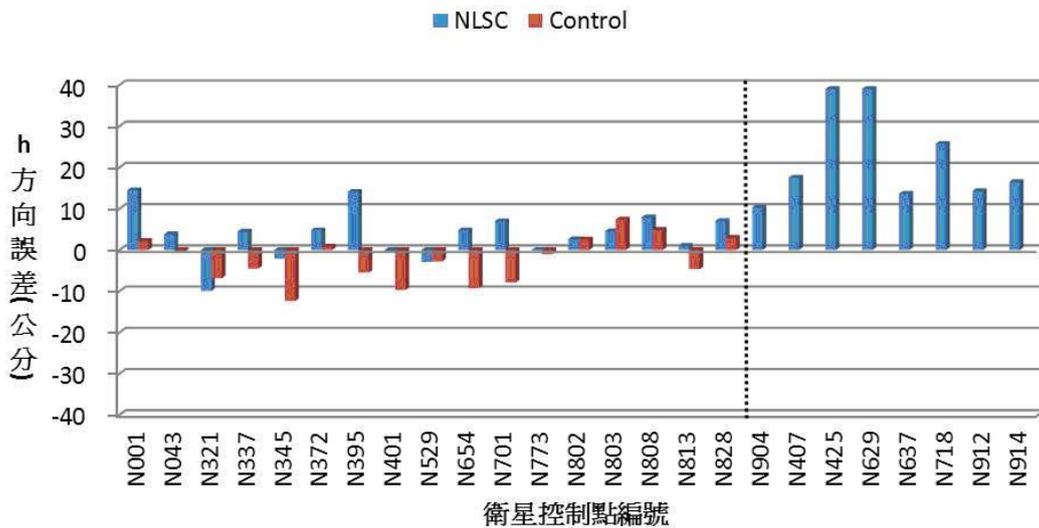


圖5 h 方向坐標與 TWD97 之差值

表 2 兩種系統於台北、宜蘭之坐標差值平均值

e-GNSS 系統	NLSC			Control			
	坐標分量	N(cm)	E(cm)	h(cm)	N(cm)	E(cm)	h(cm)
台北坐標誤差		5.0	1.6	5.4	2.1	2.4	5.0
宜蘭坐標誤差		19.9	15.8	23.7	N/A	N/A	N/A

(二) e-GNSS 測量經坐標轉換後與 TWD97 坐標之差異

而後使用兩種系統所量測之數值，經過七參數轉換修正坐標後，將其坐標誤差平均值與政府的 TWD97 公告值相比較，以評估誤差修正後之結果，其成果如圖 6 至圖 8 所示。修正後雖然部分點位精度不如修正前高，但在平均精度上來看，精度有大幅度的上升，在宜蘭地區，有部分之精度較差，由圖中可看出不論在 N、E、h

方向，其坐標差值較不具有其一致性，此一現象應該與宜蘭地區的板塊運動較為複雜有著其相關性。

在表 3 中，可知在坐標經過改正後，台北部分 NLSC 與 Control 之精度相近，並且 N、E 方向皆小於 2 cm 之誤差，雖然 h 方向之精度略差，但也小於 5 cm 之誤差，在此可看出在台北地區 NLSC 系統於坐標改正後略優於 Control 系統，雖然坐標改正前 Control 較佳，但因為 NLSC 在誤差形式上具有著一致性，而使得改正後所得的誤差較 Control 為佳；而在宜蘭部分，N、E 平均雖然皆小於 6 cm 之誤差，可是在單獨一筆的資料卻仍有大於六公分的誤差，此部分就地籍測量而言在使用上需要小心。

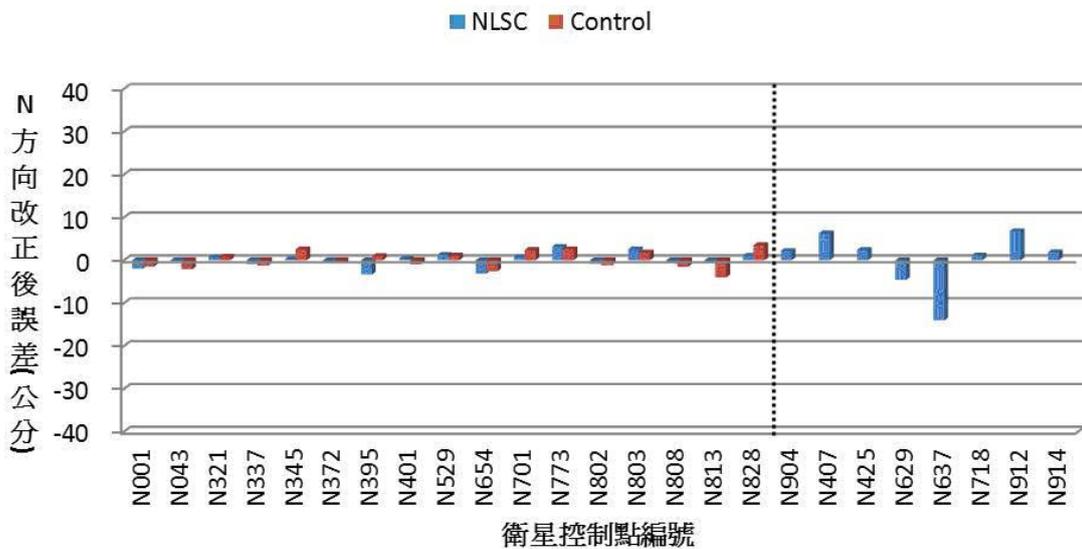


圖6 N 方向改正後坐標與 TWD97 之差值

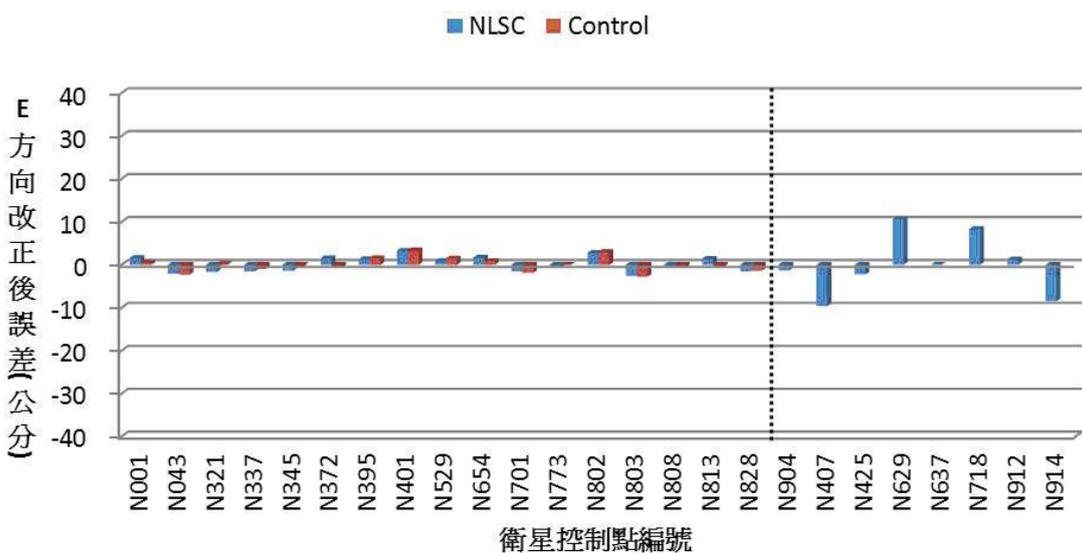


圖7 E 方向改正後坐標與 TWD97 之差值

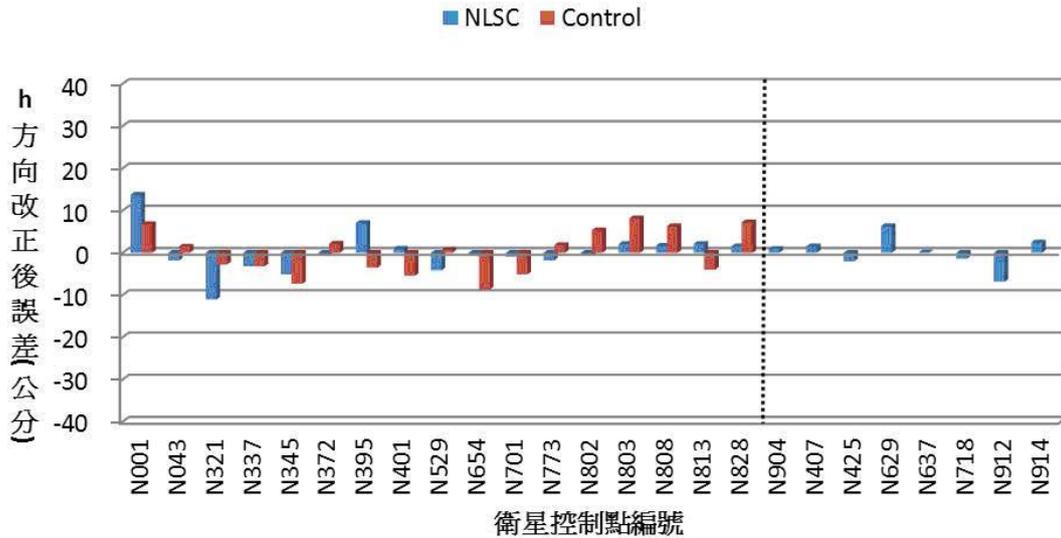


圖8 h 方向改正後坐標與 TWD97 之差值

表 3 兩種系統於台北、宜蘭之改正坐標差值平均值

e-GNSS 系統	NLSC			Control			
	坐標分量	N(cm)	E(cm)	h(cm)	N(cm)	E(cm)	h(cm)
台北坐標改正後誤差		1.6	1.3	3.5	1.9	1.3	4.7
宜蘭坐標改正後誤差		5.3	5.8	3.0	N/A	N/A	N/A

## 五、GPS 靜態相對定位

### (一) GPS 測量與 TWD97 坐標之差異

以陽明山衛星追蹤站為主站進行相對定位之成果，將其與政府之 TWD97 公告值相比對來驗證其外部精度之部分，其誤差分布形式如圖 9 至圖 11 所示。台北地區平面坐標部分除了點位 N043 的 E 方向有著 11 公分之較大誤差外，在其餘點位之誤差量皆在 6 公分的範圍內；h 方向則是點位 N395、N401 之誤差較大(分別為-17.7 公分與 28.7 公分之誤差)。N395 其標準差較大的原因可能是衛星控制點所在之區域通視不良所造成的，而 N401 在內部精度部分極佳，但外部精度的 h 方向較差，雖然台北地區的三維方向誤差較小但並無誤差規律性。

而宜蘭地區因與陽明山衛星追蹤站距離較遠使得三維方向之誤差較台北地區來的大，其 N 方向之誤差範圍在 4.2 公分~75.1 公分、E 方向誤差範圍在-52.4 公分~-0.2 公分、h 方向之誤差則是介於-2.4 公分~48 公分，在圖中可看出 N 方向的正向誤差與 E 方向的負數誤差於形式上有著相同的趨勢，此部分同樣透過七參數坐標轉換來進行誤差上的修正來降低誤差量。

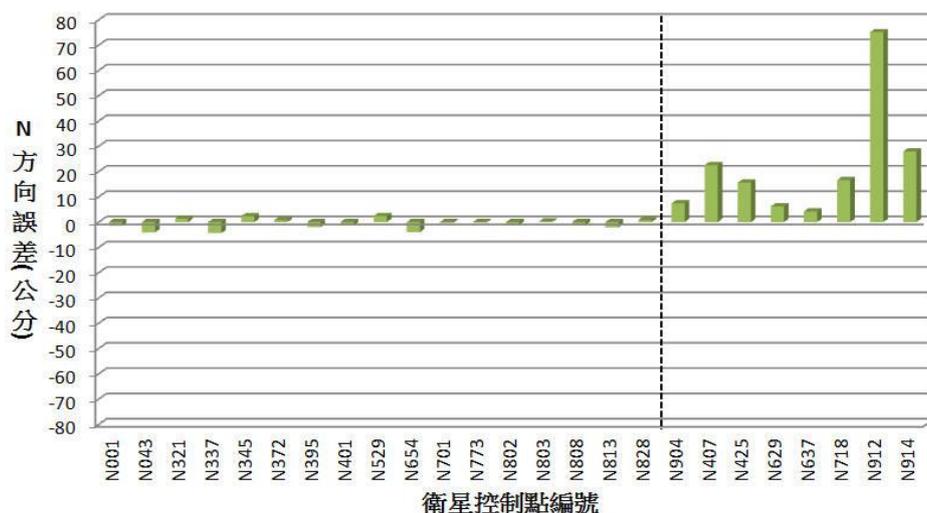


圖9 N 方向坐標與 TWD97 之差值—以 YMSM 為主站進行靜態相對定位

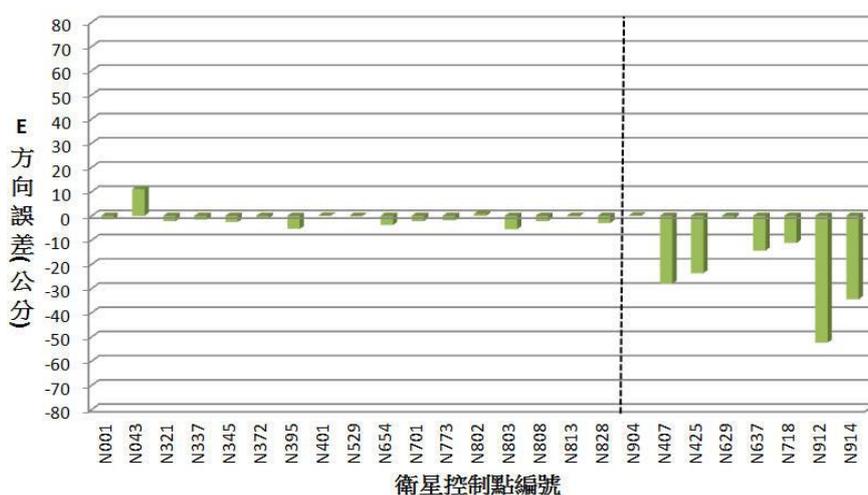


圖10 E 方向坐標與 TWD97 之差值—以 YMSM 為主站進行靜態相對定位

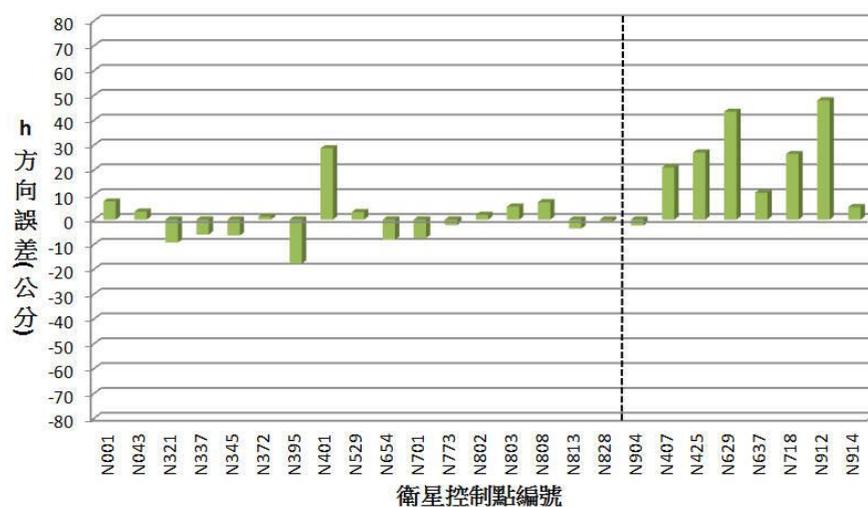


圖11 h 方向坐標與 TWD97 之差值—以 YMSM 為主站進行靜態相對定位

(二) GPS 測量經坐標轉換後與 TWD97 坐標之差異

以陽明山衛星追蹤站進行解算後之資料因為在平面方向有著一致性之誤差，在此部分經由七參數坐標轉換來降低其誤差值後，再與政府之 TWD97 公告值相比對來驗證其外部精度，其三維誤差比對成果如圖 12 至圖 14 所示。

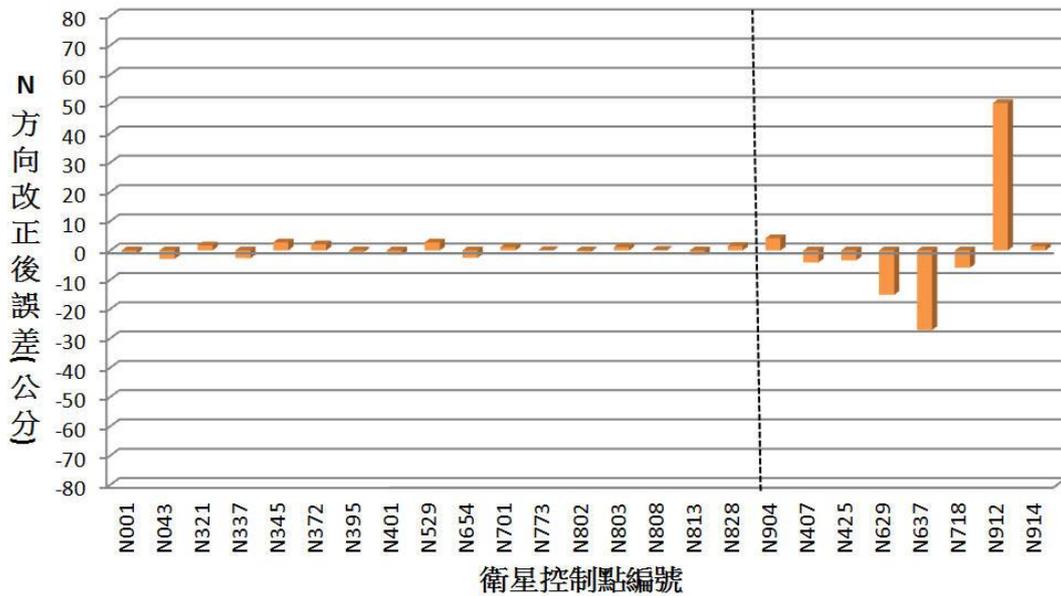


圖12 N 方向改正後坐標與 TWD97 之差值—以 YMSM 為主站進行靜態相對定位

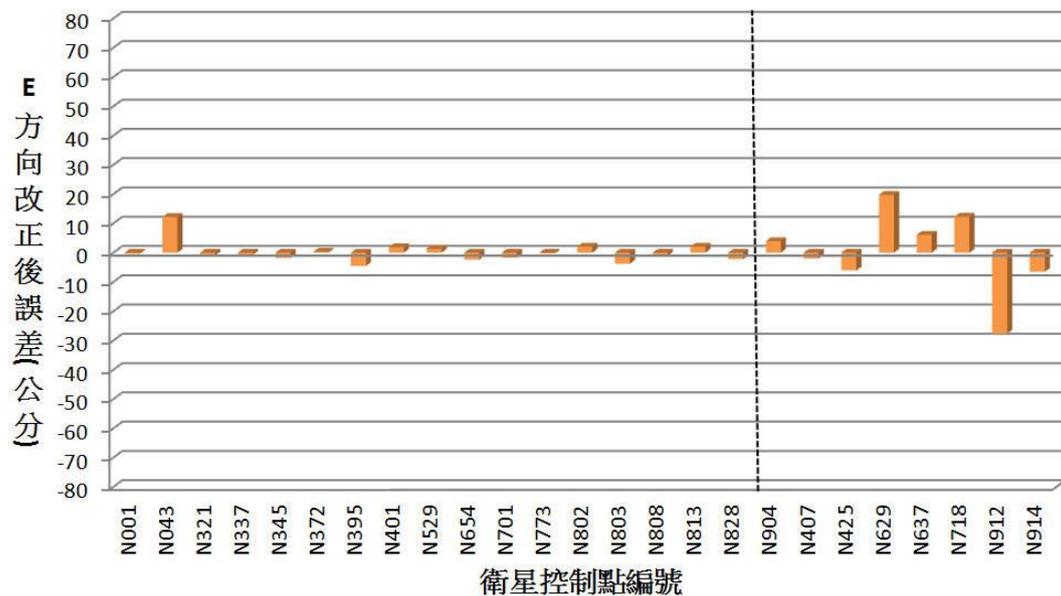


圖13 E 方向改正後坐標與 TWD97 之差值—以 YMSM 為主站進行靜態相對定位

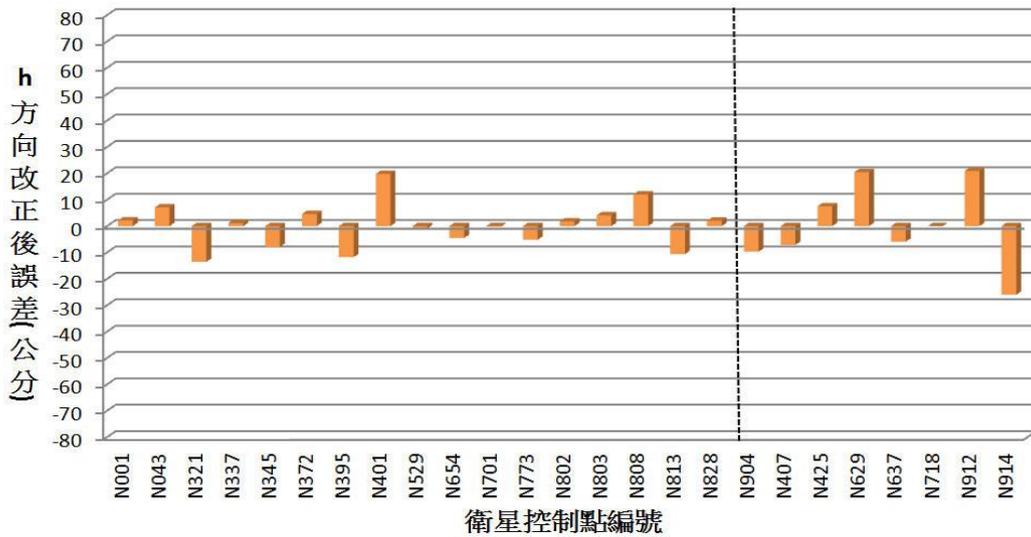


圖14 h 方向改正後坐標與 TWD97 之差值—以 YMSM 為主站進行靜態相對定位

台北地區部分，平面方向經由七參數坐標轉換後之誤差修改量以百分比來說有顯著的提升(N 方向平均誤差由 1.8 公分提升至 1.5 公分，E 方向平均誤差則是由 2.7 公分提升至 2.3 公分)如表 4，h 方向之誤差經坐標轉換後其平均誤差則是由 7 公分提升至 6.4 公分，以總體百分比來說變化幅度較小。

宜蘭地區因地層變動明顯與解算距離過長等因素，在修正前有著極大的誤差，平面方向經坐標轉換後除了點位 N629、N637 誤差變大外，其餘點位之誤差值有明顯改善之情形，N 方向平均誤差從 21.9 公分提升至 13.9 公分，E 方向平均誤差則是由 20.7 公分提升至 10.5 公分，而 h 方向經坐標改正後其平均誤差由 23 公分提升至 12.2 公分。

表 4 兩地區坐標改正前與改正後之坐標差值平均值

坐標	改正前坐標與 TWD97 誤差平均值			改正後坐標與 TWD97 誤差平均值		
	N(cm)	E(cm)	h(cm)	N(cm)	E(cm)	h(cm)
台北	1.8	2.7	7.0	1.5	2.3	6.4
宜蘭	21.9	20.7	23.0	13.9	10.5	12.2

## 六、結論與建議

(一) 在 e-GNSS 方面使用兩種系統進行施測，兩地區的平面標準差皆在 2 公分以內，在與 TWD97 坐標相比較時，台北地區(NLSC 的 N 方向平均誤差為 5.0 公分，E 方向平均誤差為 1.6 公分；Control 的 N 方向平均誤差為 2.1 公分，E 方向平均誤差為 2.4 公分)均可達到地籍測量規範中最大誤差 6 公分之要求，但宜蘭地區的誤差在 20 公分左右，其精度只能用於山區測量；而經過坐標轉換後，台北地區平面方向誤差能夠縮減內 2 公分以內，但宜蘭地區雖然平面誤差平均可小於 6 公分之誤差，但單筆資料上仍有超過 6 公分之部分，於使用上仍需要小心。

- (二) 以陽明山衛星追蹤站 TWD97 坐標進行基線解算時，研究顯示當基線距離大於 20 公里時使用商業軟體解算偶會發生較大之誤差，台北地區若剔除解算標準差較大的點位，各點位皆可在 6 公分以內的範圍(N 方向平均誤差為 1.8 公分，E 方向平均誤差為 2.7 公分)；但宜蘭地區在經過坐標轉換後仍有較大的誤差(N 方向平均誤差為 13.9 公分，E 方向平均誤差為 10.5 公分)，故此種方式較不宜使用。
- (三) 實驗中可看出，台北地區等誤差變動範圍不大的地區可使用抓取衛星追蹤站的方式來進行解算，但在宜蘭地區與地層變動較大的地區較不適合使用此種方式來進行施測。
- (四) 本次研究在施測上是採取單人單機短時間的測量，而未來可採用 3~5 年的長期觀測來收取數據，以探討誤差每年的變化程度。在解算軟體上，由於希望在軟體的取得較為容易以符合一般使用的情形，故採用商用軟體 Topcon Tools 來進行解算，而在精度要求的特定條件下，在之後可使用 Bernese、GAMIT 等軟體來進行解算，在長距離的基線解算能獲得較高的精度值。

### 參考文獻

- 內政部地政司衛星測量中心，2013，《內政部衛星追蹤站及衛星控制點測量成果說明》，<http://www.gps.moi.gov.tw/>，最近檢索時間 2013 年 6 月。
- 內政部國土測繪中心，2010，《採用虛擬基準站即時動態定位技術辦理加密控制及圖根測量作業手冊》，臺中。
- 內政部國土測繪中心，2011，《地籍測量實施規則》，臺中。
- 內政部國土測繪中心，2012，《大地基準及一九九七坐標系統 2010 年成果工作總報告》，臺中。
- 內政部國土測繪中心，2013，《<http://www.egps.nlsc.gov.tw/>》，最近檢索時間 2013 年 6 月。
- 張嘉強，2002，《TWD97 坐標系統》，GPS 衛星測量與坐標系統短期訓練課程授課講義，國防大學中正理工學院測繪工程學系。
- Rapp, R. H., 1993, *Geometric Geodesy Part II*, Department of Geodetic Science and Surveying, the Ohio State University.

# 旋翼 UAV 影像製作千分之一都市區局部區域 正射影像之探討

論文收件日期：103.04.08

論文修改日期：103.05.14

論文接受日期：103.05.27

邱式鴻<sup>1\*</sup>

## 摘要

正射影像(Orthoimage)是將航拍影像上的像點高差和影像傾斜位移移除，可提供正確的幾何和輻射資訊作地理資訊的底圖、或套疊數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)作為三維景觀模擬供相關研究之用。以往千分之一正射影像製作仰賴大型航空攝影飛機酬載量測型相機進行航空攝影測量取像，並依此進行資料正射影像製作。近年來無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)發展快速，以其自動導航技術的提升與穩定的航拍取像設備，使得 UAV 可以更安全、更自動化的方式、甚至可在低空雲下飛行取得高解析度的航拍影像，相當適合作為局部區域製作正射影像的航拍取像系統，尤其是旋翼型 UAV 雖航程較小、抗風性較定翼機差，但因可垂直起降、機動更強，更適合用於都市地區局部製作正射影像之航拍取像。然而旋翼型 UAV 因酬載能力僅能酬載非量測型相機航拍取像，且因其像幅涵蓋範圍有限，因此取得之 UAV 影像是否能局部製作符合都市地區千分之一精度之正射影像將是本研究探討之重點。實驗結果顯示於航線規劃後以旋翼型 UAV 航拍取得品質佳之影像，並透過自率光束法空中三角測量平差，解決以近距離近景攝影測量程序率定之相機參數無法完整描述於空中航拍取像時的相機參數問題之後，再限制每張影像製作正射影像之範圍，證實以旋翼型 UAV 影像能製作都市區局部區域符合千分之一精度要求之正射影像，而本研究最後並依據實驗結果提出結論與建議。

**關鍵詞：**正射影像、無人飛行載具、自率光束法、空中三角測量

<sup>1</sup> 副教授，國立政治大學地政學系。

\* 通訊作者，TEL:(02)29393091ext.51657，E-mail: [chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw)。

# **An Investigation into the Generation of 1/1000 Orthoimages for Local Urban Area by VTOL UAV**

## **Images**

**Shih-Hong Chio<sup>2\*</sup>**

### **Abstract**

The image displacements on aerial images due to photographic tilt and topographic relief should be exactly removed to generate orthoimages. Thus orthoimages can provide the correct geometrical and radiometric information for basic image maps for geographic information, or they can overlap with digital elevation model for landscape simulation for advanced studies. In the past, 1/1000 orthoimage generation relies on large-scale aerial aircraft with metric cameras for collecting the aerial images. In recent years, the development of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) is quite fast. Due to the automatic navigation technology, it makes UAVs be a stable platform to collect high-resolution aerial images much more safely and automatically. Also, UAVs can acquire the aerial images with low-altitude and under cloud, UAVs become quite suitable aerial image collection system to locally produce the orthoimages. Particularly, VTOL (Vertical Take Off and Landing) UAVs can take off and land vertically, therefore they are more flexible and more suitable for acquiring aerial images in urban areas to generate 1/1000 orthoimages locally. The payload capacity of VTOL UAV is much more limited than the fixed-wing UAV, thus only the non-metric camera can be implemented to collect aerial images. Additionally, the images are often limited ground coverage. Therefore, this study will focus on the investigation into the generation of 1/1000 orthoimages locally by using these collected aerial images. Based on the experimental results, after planning and acquiring the aerial images with good quality, self-calibration bundle adjustment for aerial triangulation is performed to overcome the imperfect camera parameters calibrated by the procedure of close-range photogrammetry. Next, by limiting the used image content it proves that the aerial images collected by VTOL UAVs can be used to generate the orthoimages locally in urban area. Finally, the suggestion will be presented based on the experimental results.

**Keywords:** Orthoimage, UAV, Self-calibration Bundle Adjustment, Aerotriangulation.

---

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Land Economics, National Cheng-Chi University.

\* Corresponding Author, TEL: +886-2-29393091#51657, E-mail: [chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw).

## 一、前言

正射影像是將航拍影像上的像點高差和影像傾斜位移移除，可提供正確的幾何和輻射資訊作地理資訊的底圖；並可與其他主題套疊展示，更可作為地理資料分析之基礎；或套疊數值高程模型作為三維景觀模擬供相關研究之用，具有廣泛之應用層面。而千分之一正射影像屬大比例尺圖資，原則上是以都市土地(都會區)、即將快速發展地區作為測製範圍，屬地方政府之權責，各地方政府考量其實際業務需求，研擬實施計畫推動。因此千分之一正射影像一般是縣市政府建置都會區(都市計畫區)一千分之一地形圖時所產製的成果之一。自 87 年度起內政部以「國土資訊系統基礎環境建置計畫(第一期及第二期)」、「國家地理資訊系統建置推動十年計畫」，依各縣市政府執行能力、建置範圍迫切需求程度及財力，分年補助縣市政府建置都會區(都市計畫區)一千分之一地形圖(內政部，2013)，過程中即依據內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」產製千分之一正射影像，因此目前千分之一正射影像測製方式是以載人飛行載具酬載量測型相機進行航空攝影測量取像來源，並依此進行資料處理與測製(內政部，2010)。

無人飛行載具 UAV 近年來發展快速，加上自動導航技術的提升與穩定的航拍取像設備，使得 UAV 可以更安全、更自動化的方式取得高解析度的航拍影像，UAV 亦能執行低空雲下自動化取像，相當適合作為正射影像製作時的航拍取像系統。因此內政部國土測繪中心(2010)近年來發展以 UAV 航拍影像快速更新航拍影像資料庫，運用國土利用更新機制，發展測圖技術，推廣 UAV 迅速取得國土空間資訊，以達到國土監測、環境保護配合緊急防救災應變機制等運用。而目前以定翼型 UAV 在航高 500 公尺與 1000 公尺取像後製作正射影像，其精度不論於山區或平地區均已可滿足 1/5000 正射影像製作精度要求(內政部國土測繪中心，2011)。然定翼型 UAV 用於都市地區之航拍取像有其安全性之考量，且其需要跑道起降並需以較高航高航拍取像，反觀旋翼型 UAV 雖航程較小、抗風性較定翼機差，但因可垂直起降、機動更強，更適合用於都市地區航拍取像製作局部區域千分之一正射影像。而至今尚未有研究探討旋翼型 UAV 航拍影像是否能製作滿足都市局部區域千分之一精度要求之正射影像，因此本研究將以此為探討，最後並根據實驗結果提出結論與建議。

## 二、文獻回顧

UAV 具機動性強、成本低、即時回傳感測訊息且可於高風險之惡地進行航拍感測之優勢下，廣泛應用於如考古(Bendea et al., 2007)、農業(David et al., 2007)、災難即時監測、自然資源監控(Horcher and Visser, 2004)以及作物監控(Kise et al., 2005; Laliberte et al., 2007)；UAV 亦因可依據任務需求選擇飛行高度，獲得高空間解析度之航拍影像，並可在多雲天氣於雲下拍攝影像，因此可應用於要求精度之正射影像(Bendea et al., 2007; Patias et al., 2007)、數值地形模型(Haarbrink and Eisenbeiss, 2008; Eisenbeiss and Zhang, 2006)及三維模型之建置(Pueschel et al., 2008)、甚至於三維虛擬城市建置時，UAV 所獲取高解析度影像，經過適當的影像糾正，可提供建物側面

紋理來源(Küng et al., 2011)。

應用 UAV 影像製作正射影像的相關試驗中，國外 Patias et al. (2007)於考古應用時產製 1:100 正射影像，以旋翼直升機 CropCam UAV 酬載 CANON EOS 350D 數位相機，以航高 30 公尺航拍取得地面解析力約 2 公分，九條航帶共 97 張 UAV 影像，其航帶間影像前後重疊約 60%、左右重疊約 30%，使用全測站儀測得 70 個控制點與檢核點執行空中三角測量(簡稱空三)平差，檢核點平面 RMSE 是 2.5 公分，高程 RMSE 是 4 公分；完成空三後以航測軟體 LPS (Leica Photogrammetry Suite, Leica Geosystems)製作 DEM 精度是 15 公分的數值正射影像。Li et al.(2008)介紹低空 UAV 影像應用於數值正射影像的製作，該研究中以定翼型 UAV 酬載四個小像幅數位相機航拍所組成的超寬角(super-wide-angle)大像幅影像，解決像幅涵蓋太小的問題，並以平均航高 1100 公尺航拍取得大陸貴州省約 38 平方公里的影像，完成空三平差後製作符合大陸 1/2000 比例尺精度(平面位置中誤差於平地、丘陵地不應大於 2.5 m；於山地、高山地不應大於 3.75m)的數值正射影像；該文中也介紹以 UAV 影像製作大陸廣東省約 1 平方公里符合大陸 1/500 比例尺精度(平面位置中誤差於平地、丘陵地不應大於 0.6 m；於山地、高山地不應大於 0.8m)的數值正射影像作為都市規劃之用。Ahmad(2011)則以輕型定翼的 CropCam UAV 酬載焦距 24.mm 的 Pentax Optio A40 數位相機，航拍取得航帶間影像前後約 60% 重疊、左右約 30% 重疊的影像，以 GPS 測得適當數量的控制點完成空三平差，但文中並未說明航高、UAV 影像的地面解析力、所使用影像的航帶數和影像數量、以及控制點與檢核點之數量；完成空三後以航測軟體製作數值正射影像，並以立體量測方式 6 個檢核點與 GPS 所測坐標比較評估其精度可達次米(sub-meter)級精度。Li (2011) 以 PuWen 鎮丘陵區約 20.8 平方公里的 1:2000 製圖為例，介紹低空 UAV 影像應用於在大比例尺地形圖測繪，以定翼型 UAV 酬載焦距 24.mm 的 Cannon 450D 數位相機，於平均航高 800 公尺航拍取得地面解析力約 20 公分的 UAV 影像，其航帶間影像前後約 65% 重疊、左右重疊約 35%，以適當數量的控制點完成空三平差，但文中並未說明所使用的影像的航帶數和影像數量、以及控制點之數量；完成空三後以航測軟體 Virtuozo 製作正射影像，文中亦未對其精度進行評估。

國內關於應用 UAV 影像製作正射影像的相關試驗中，則有內政部國土測繪中心(2008)於“97 年度探測感應器繪平台架構規劃暨用作業”計畫案中以旋翼機進行航拍取像並製作正射影像，拍航高度分別為 600 公尺、900 公尺、和 1200 公尺，由空三資料配合 5 公尺 DEM(Digital Elevation Model)資料，製作 800 公尺 x600 公尺範圍的旋翼型 UAV 正射影像，但並未針對精度進行檢核；且於航高 600 公尺時，地面解析度為 17 公分，完成空三之檢核點 RMSE 為 0.484 公尺、高程 RMSE 為 0.692 公尺，無法滿足製作千分之一的製圖規範。此外，內政部國土測繪中心於 2011 年與 2012 年的發展無人飛行載具航拍技術作業工作案中，使用定翼型 UAV 於航高 500 公尺與 1000 公尺取像後，以定翼型 UAV 影像完成自率光束法空三後製作正射影像，其精度不論於山區或平地區可滿足 1/5000 正射影像製作精度要求(內政部國土測繪中心，2011；內政部國土測繪中心，2012)。

綜合上述，國內外尚未針對以旋翼型 UAV 影像製作都市區局部區域之千分之一正射影像進行相關研究與探討，而國內對於正射影像位於平坦地且表面無高差位移之明顯地物點，規定其位置中誤差應小於 50 公分，最大誤差應小於 2 公尺。因此本研究將以此為探討對象，以下將分別介紹研究方法、結果分析與探討、以及結論與建議。

### 三、研究方法

本研究依據內政部(2010)建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊規定，著重於 UAV 酬載非量測型數位相機取得之航拍影像是否能局部製作滿足都市地區一千分之一正射影像之精度要求。而整個研究流程(如圖 1)則依據內政部(2010)建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊規定之一千分之一正射影像製作程序設計，主要項目分別為：一、擬定測圖計畫；二、航測控制點與檢核點布設；三、航空攝影；四、控制點與檢核點測量；五、空中三角測量；六、正射影像製作(包含數值高程模型 DEM 自動匹配與編修)；以及七、幾何精度分析。

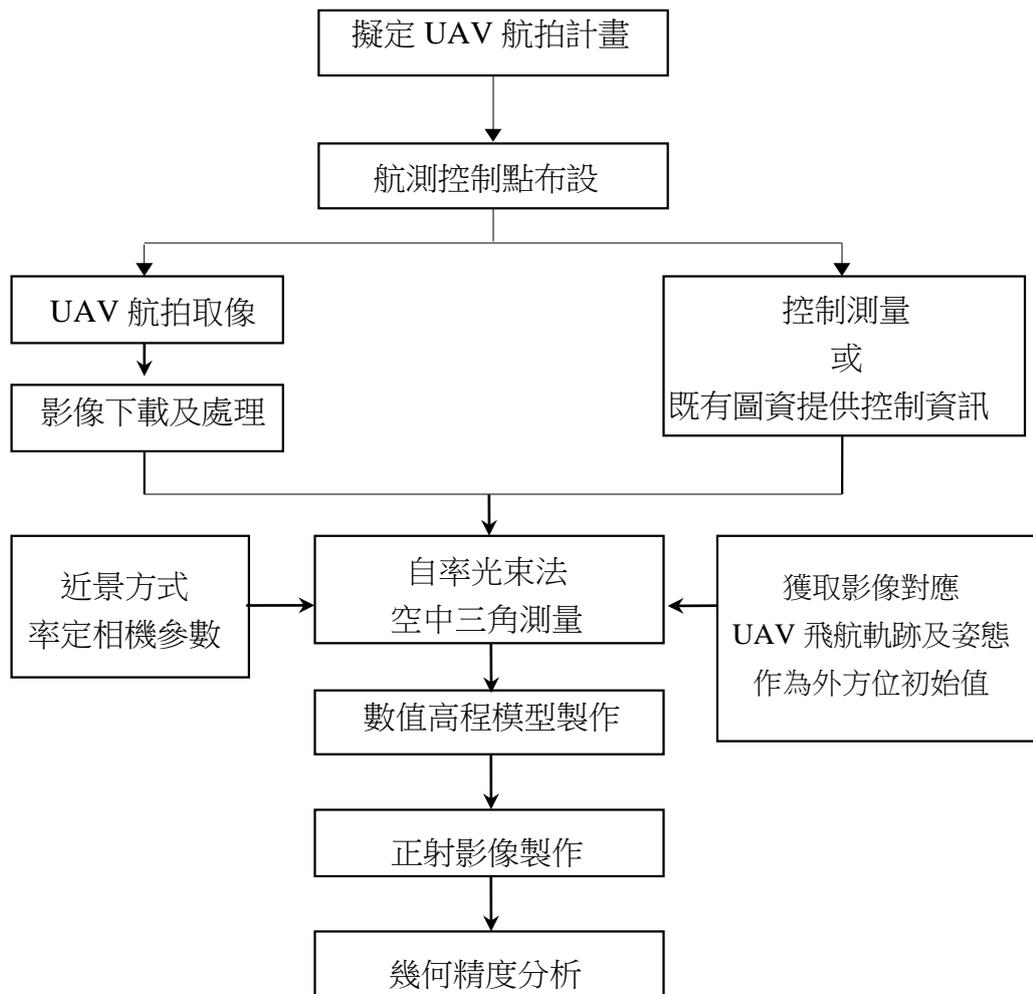


圖1 研究流程圖

如圖 1 流程圖所示，研究過程中首先依據所酬載的非量測型數位相機、以及所選定的試驗區擬訂測製地區航拍計畫，航線規劃時航線方向以南北、東西為原則，相鄰航線左右重疊率約 40%；航線內影像前後重疊率為 80%。

接著，與建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊規定(內政部，2010)之千分之一正射影像製作程序不同的是，本研究布設全控點(設計之航空標誌見圖 2)進行空中三角測量平差計算，其分布位置以規劃完之航線與影像範圍涵蓋圖，將其布設於測區界線外為原則，點位間間隔約為 2 至 4 個空中攝影基線(基線長以重疊 60% 為準計算)，全控點的平面及高程坐標測量如下：

- (一) 全控點平面坐標測量依據台北市都市發展局公告之控制點，以「數值法地籍圖重測作業手冊」所規定之 RTK 辦理圖根測量方法施測。將來自二個不同主站所得之坐標成果比較若其空間距離小於 10 公分則取平均值，作為該點之平面坐標成果。
- (二) 全控點高程坐標測量方式採水準測量為原則，水準測量由已知高程控制點引測閉合至另一已知高程控制點，並施以往返觀測。系統誤差改正前每測段往返閉合差不得大於  $10\text{mm}\sqrt{K}$  (K 為單一測段長度之 km 數)，系統誤差改正後閉合水準環線閉合差不得大於  $10\text{mm}\sqrt{F}$  (F 為水準環線長度之 km 數)。

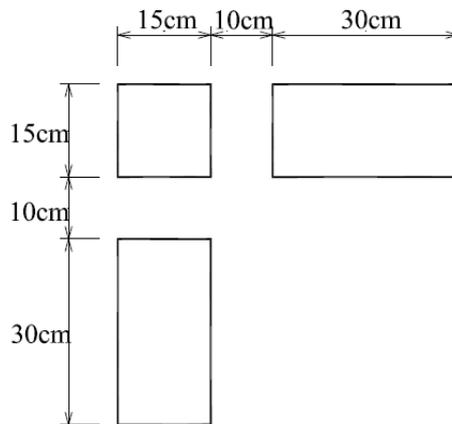


圖2 本研究所規劃之航空標誌

此外，本研究嘗試於控制點不足處，以該區既有圖資，即製作千分之一地形圖時已完成空三平差之航拍影像進行立體量測控制點(稱點特徵航空影像控制資訊)，量測時選取基線航高比大於 0.3 且重複量測無粗差之三次觀測值取其平均值作為此點特徵航空影像控制資訊之三維坐標。本研究另設自然點為檢核點，以「數值法地籍圖重測作業手冊」所規定之 RTK 辦理圖根測量方法施測，同樣將二個不同主站所得之坐標成果比較，若其空間距離小於 10 公分則取平均值，作為該點之平面坐標；所測高程則以內政部公告之大地起伏模式改正為正高。

完成航測控制點布設與測量之後，緊接著以 UAV 航拍取像並執行空三、數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)自動匹配與編修、以及正射影像製作。

由於本研究 UAV 酬載的是非量測型數位相機，依據謝幸宜(2010)，相機參數率定並不完全且率定當時之相機參數無法完整描述相機航拍時的相機狀態，雖然本研究於後續 UAV 航拍影像之空三採用自率光束法空三平差方式解決此問題，但相機仍必須先率定以取得相機參數初始值，供後續空三平差時可以執行初步粗差偵錯。因此，研究中採用 iWitnessPRO 軟體(Photometrix, 2010)進行相機率定，其特色是全自動率定，率定原理是全自動匹配率定場中所布設由 8 個黑點所組成的 20 個黑白率定標，並以自率光束法平差解算相機參數。iWitnessPRO 軟體率定的相機參數包含，所採用的附加參數數學模式如式(1)(Fraser, 1997)：

- (一) 內方位參數(the element of interior orientation)：像主距  $c$ 、像主點偏移量( $x_0$ ,  $y_0$ )。
- (二) 透鏡輻射畸變差參數(Radial distortion parameters)： $K_1, K_2, K_3$ 。
- (三) 透鏡離心畸變差參數(Decentering distortion parameters)： $P_1, P_2$ 。
- (四) 仿射畸變差參數(Affinity, non-orthogonality parameters)： $b_1, b_2$ 。

所採用的附加參數數學模式如式(1)(Fraser, 1997)：

$$\begin{aligned} \Delta x &= -x_0 - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}r^2 K_1 + \bar{x}r^4 K_2 + \bar{x}r^6 K_3 + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2 \bar{x}\bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y &= -y_0 - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}r^2 K_1 + \bar{y}r^4 K_2 + \bar{y}r^6 K_3 + 2P_1 \bar{x}\bar{y} + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$$

- 式中  $r$  : 以像主點為中心的像點輻射距離
- $x, y$  : 以影像中心為原點之原始像坐標觀測量
- $\Delta x, \Delta y$  : 原始像坐標觀測量之改正量
- $\Delta c$  : 像主距之改正量

為較精確求得相機參數，iWitness Pro 軟體使用手冊中建議率定取像時相機需設定後續取像時所用的影像解析度(全解析度最佳)且率定標佈在約 3 公尺\*3 公尺的空間中；率定標之間儘量不要在同一平面上；率定場中的某些率定標與其他率定標之間的高差需在 15~20 公分之間；先設定好欲進行 3D 量測的焦距(本研究於空中航拍取像，因此將相機設定遠距離清晰成像之後的焦距固定之)；依據設定好的焦距以及成像的距離設計率定標的大小；拍攝時離率定標至少 3 公尺~6 公尺以上；取像時最外圍的光線交會要介於 70~100 度之間(Photometrix, 2010)。

UAV 所酬載 GPS 及 AHRS(Attitude and heading reference system)(即相當於 Inertial Measurement Unit, IMU)其精度不足以輔助空三(內政部國土測繪中心，2011)，僅能提供外方位初始值。因此，本研究並未使用 GPS/IMU 資料輔助空三，而以光

束法區域平差進行空三平差解算航拍影像之方位與姿態(即外方位參數)；而 UAV 所酬載的相機為非量測型數位相機，雖已於室內率定，但依據謝幸宜(2010)研究顯示相機參數率定並不完全且率定當時之相機參數無法完整描述相機航拍時的相機狀態；因此本研究中 UAV 航拍影像之空三採用自率光束法空三平差方式，並選取 SOCET SET ORIMA 航測軟體，該軟體自率光束法空三平差採用的附加參數模式，如下式(2)，為 Brown 物理模式(Brown, 1976)，其中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  為描述像點的系統誤差，基本上可視為像坐標的函數，以 18 個參數描述之，而參數間近乎正交，以避免多數參數間高度相關。

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + x[a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6)] + b_1x + b_2y \\ &\quad + \frac{x}{c}[c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4)] + d_1xy + d_2y^2 + d_3x^2y + d_4xy^2 + d_5x^2y^2 \\ \Delta y &= y_0 + y[a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6)] \\ &\quad + \frac{y}{c}[c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4)] + d_6xy + d_7x^2 + d_8x^2y + d_9xy^2 + d_{10}x^2y^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $\Delta x, \Delta y$  : 像點改正量  
 $x_0, y_0$  : 像主點坐標  
 $c$  : 像主距  
 $a_1, a_2, a_3$  : 輻射透鏡畸變參數  
 $b_1, b_2$  : 仿射及非正交參數  
 $c_1, c_2, c_3$  : 底片不平坦參數  
 $d_1, \dots, d_{10}$  : 底片變形及非輻射方向畸變參數

而本研究亦以 SOCET SET ORIMA 航測軟體自動量測空三所需之連結點，且：

- (一) 為求自率光束法空三平差解算之正確性，連結點匹配時，於每片設定的 9 個標準位置中均需自動匹配 9 點；且於設定像點量測精度，經粗差偵錯後每一標準位置至少需保留 6 點以上，不足 6 點需以人工方式量測補足，且每一標準位置至少有二量測點與同航帶或相鄰航帶像片上共軛點相連，不同鄰片允許以不同量測點連結。
- (二) 空三平差計算時，先以最小約制(或自由網)光束法平差進行大錯去除，再進行最小約制(或自由網)自率光束法平差，之後再進行粗差偵測得到觀測值精度的估值，其觀測值之殘餘誤差均方根值不得大於 1 像元，在坡度達 IV 級以上之山地或植被覆蓋達 IV 級之林地不得大於 1.5 像元。接著強制附合至控制點上進行自率光束法平差，其觀測值之殘餘誤差均方根值增量不得大於 30%，否則必須檢核控制點或另外選擇控制點。自由網及強制網平差過程中，考量透鏡畸變差大部分來自輻射畸變差(Clarke et al., 1998)，因此本研究行自率光束法平差時，

自率參數僅使用 1.像主距(Principal distance)：CFL；2.像主點(Coordinates of Principal point)： $x_0, y_0$ ；3.透鏡之輻射畸變差。

完成 UAV 航拍影像自率空三平差後，即可同時解算出影像外方位參數及改正後的相機參數，再以數值航測影像工作站製作 2m 網格間距數值高程模型資料並製作正射影像，正射影像製作時，每一像素以使用距離像主點最近之像元為原則。

#### 四、結果分析與探討

本研究實驗區域位於臺北市士林區，北至天母東西路、東至東山路、南至德行路北側、西至忠誠路，如下圖框線所含範圍，約 1Km X 1Km，地表平均高程約 20 公尺。



圖3 試驗區



(a) 機身

(b) 遙控器

(c) 地面控制站

圖4 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼空中攝影系統(剛鈺，2012)

AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼空中攝影系統可於荷重 2500g 下飛行至少 20 分

鐘，適合小範圍的拍攝任務，可抗穩定風速 12 m/sec，可抗瞬間風速 18 m/sec。該系統所採用的非量測型相機為 Canon EOS 5D Mark II (見圖 5)。



圖5 Canon EOS 5D Mark II 單眼數位相機

Canon EOS 5D Mark II 非量測型數位相機搭配 28mm 鏡頭航拍取像，其取像寬是 3648 像元、高是 2736 像元，像元大小是  $6.4 \mu\text{m}$ 。其相機參數採用設於政治大學綜合院館北棟三樓中庭內(見下圖 6)的率定場進行相機率定。



圖6 Canon EOS 5D Mark II 相機 28mm 鏡頭的相機率定場

依據 iWitnessPRO 軟體使用手冊中建議，將 20 個黑白率定標均勻布設之後，依操作手冊率定時影像取像要點，拍攝 27 張率定用影像，以 iWitnessPRO 軟體進 28mm 鏡頭的全自動率定，圖 7 顯示率定用 27 張影像拍攝位置與率定標空間位置分布圖，表 1 為相機率定之結果。iWitnessPRO 率定報告中顯示率定的品質 1.0 為良好，預估的像點對位精度為 0.11 像元，3D 點坐標在 X、Y、Z 方向預估精度是 0.0088 單位(或 1:154200)、0.0127 單位(或 1:107200)、以及 0.0070 單位(或 1:195100)，整體精度是 0.0095 單位(或 1:143300)；而根據 iWitnessPRO 說明書，良好的率定結果整體精度通常介於 1:500~1:10000 之間，本次率定結果超過 1:10000，因此由上描述可知以 iWitnessPRO 地面近景拍攝率定成果良好無誤。

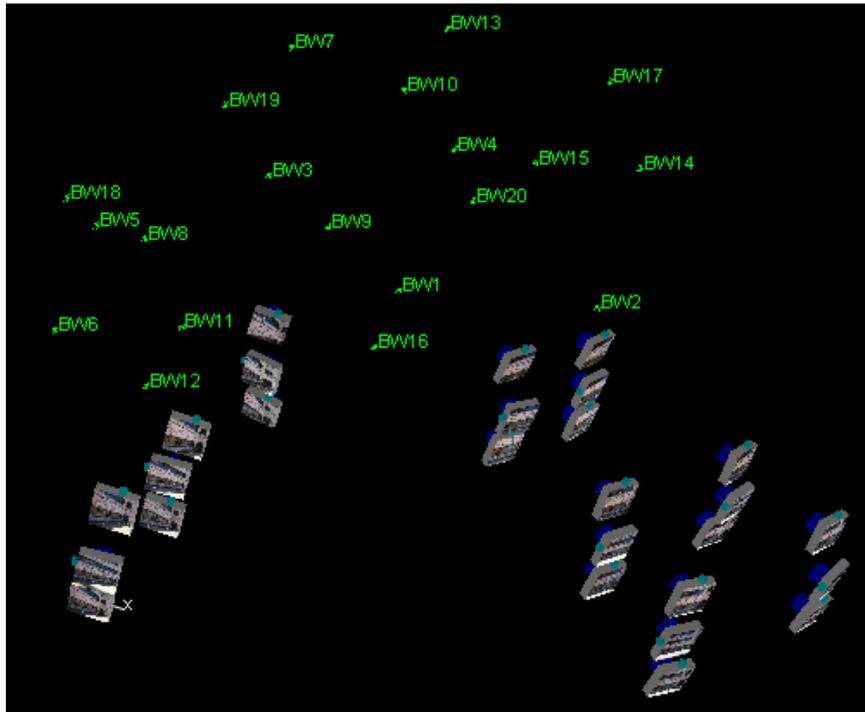


圖7 率定用 27 張相片拍攝位置與率定標空間位置分布圖

表 1 Canon EOS 5D Mark II 相機 28mm 鏡頭率定結果

率定日期		2012/07/10
Canon EOS 5D Mark II 相機		28mm 鏡頭
Principal Distance 像主距 $c$ (mm)		28.4793
Principal Point Offsets 像主點位移( $x_0, y_0$ )(mm)		(-0.0593, -0.1212)
Radial Distortion 輻射畸變差	$K_1$	1.3230e-004
	$K_2$	-2.2379e-007
	$K_3$	-1.5571e-011
Decentering Distortion 離心畸變差	$P_1$	7.2189e-006
	$P_2$	-5.8909e-006
Affinity Parameter $x$ 、 $y$ 軸尺度比	$B_1$	2.695e-004
Affinity Parameter $x$ 、 $y$ 軸非正交	$B_2$	1.225e-005

率定得到相機參數之後，接著設計以像元地面解析度約 4.5 公分，航線前後影像重疊 80%，航線間左右影像重疊 40%、以及航高離地高約 200 公尺藉由 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼 UAV 航線規劃軟體規劃航線。所規劃之航線於西元 2012 年 10 月 15 日航拍取像，當天從下午約一點到下午約四點執行航拍任務，起飛點位於天母運動公園內，當天天候多雲短暫陣雨，但仍能於雲下作業，顯示 UAV 雲下作業的特性，共花費約 3 小時順利完成航拍取像，共取得如圖 8 所示之 7 條航帶，147 張影像。所拍攝之影像有明顯之航偏角，經分析此一偏移現象其偏移量具規律性，並非載具控制系統不穩定造成，而是載具之羅盤於校正過程中因人為校正不當，導致此航偏角。

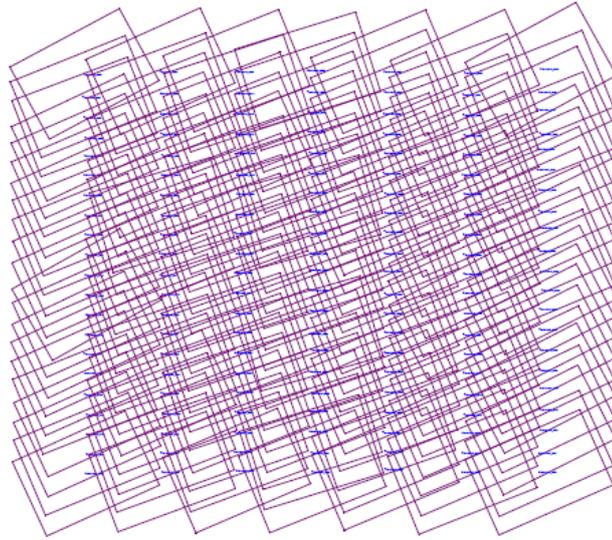


圖8 多旋翼 UAV 取像後航帶中影像前後重疊與航帶間影像左右重疊情形之圖示

將本次航拍取像結果以約每隔 10 張選取 1-2 處明顯道路標線(如下圖 9 所示)方式，共選取 22 處計算其 MTF (Modulation Transfer Function) 模糊參數均在 1 個像元以下，平均值 0.802 像元，標準差  $\pm 0.095$  像元，顯示本次航拍影像品質佳。

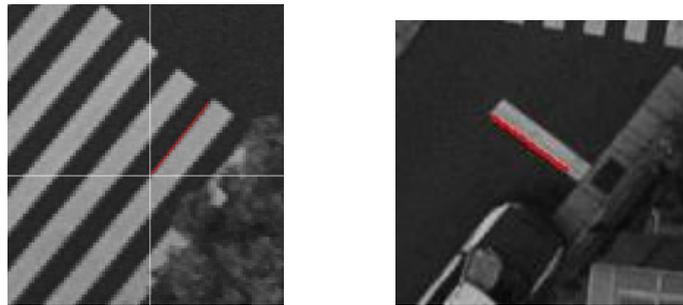


圖9 所選明顯道路標線計算 MTF 模糊參數位置示意圖(紅色線處)

接著進行空三處理，空三共使用 15 個控制點、11 個點特徵航空影像控制資訊、6 個檢核點，其分布如圖 10 所示。使用點特徵航空影像控制資訊的原因是原先控制點布設是以其他種類六旋翼 UAV 所酬載之 Ricoh GR Digital III 相機進行航線規劃，導致原布標點無法滿足空三控制之需求，因此由 101 年度「臺北市 3D 航測數值地形圖重製工作案」中涵蓋試驗區且已完成空三之航拍影像，由立體像對中量測本研究所需之點特徵航空影像控制資訊。此次空三平差採自率光束法空三平差，經粗差偵錯共得 4186 點地形點對應之像點坐標，執行自率光束法空三平差時相機率定參數僅率定像主點(x0,y0)、像主距(CFL)以及鏡頭的輻射畸變差(a1,a2,a3)，實測控制點之精度設定為(0.05m, 0.05m, 0.10m)，點特徵航空影像控制資訊之精度設定為(0.10m, 0.10m, 0.30m)，像點量測精度設定為 6 $\mu$ m，自率光束法空三平差的結果如圖 11 所示，空三平差網型如圖 12，空三平差網系總多餘觀測數除以總觀測數所得之平均多餘觀測數約 0.6，可知影像量測空三連結點平均可靠度指標 $\geq 0.6$  滿足規

範。而連結點之 N、E、h 三個方向的 RMSE(即內部精度)分別是 0.07m、0.06m、及 0.19m；檢核點精度如表 5 自率光束法空三平差成果所示，N、E、h 坐標之 RMSE 分別是 0.08m、0.11m、與 0.28m。化算成平面精度為 0.14m、高程精度 0.28m。其中高程 h 之 RMSE 是以 RTK 實測坐標以內政部公告之大地起伏公式推估的正高檢核之成果。

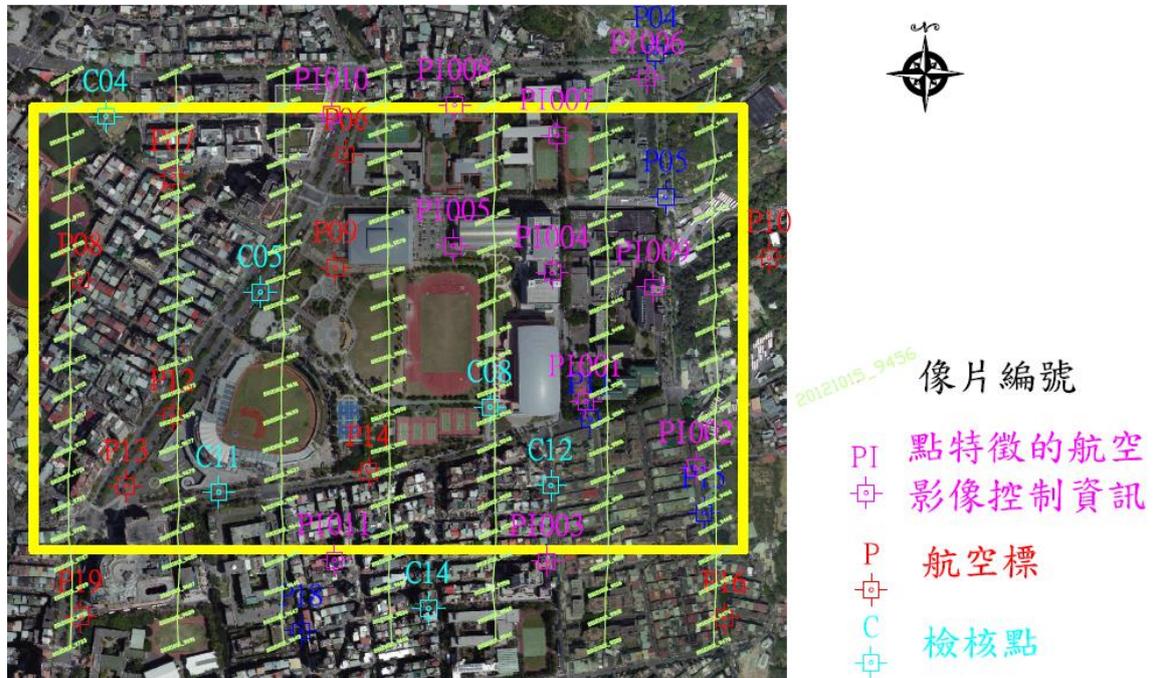


圖 10 航拍影像空三控制點與檢核點分布圖

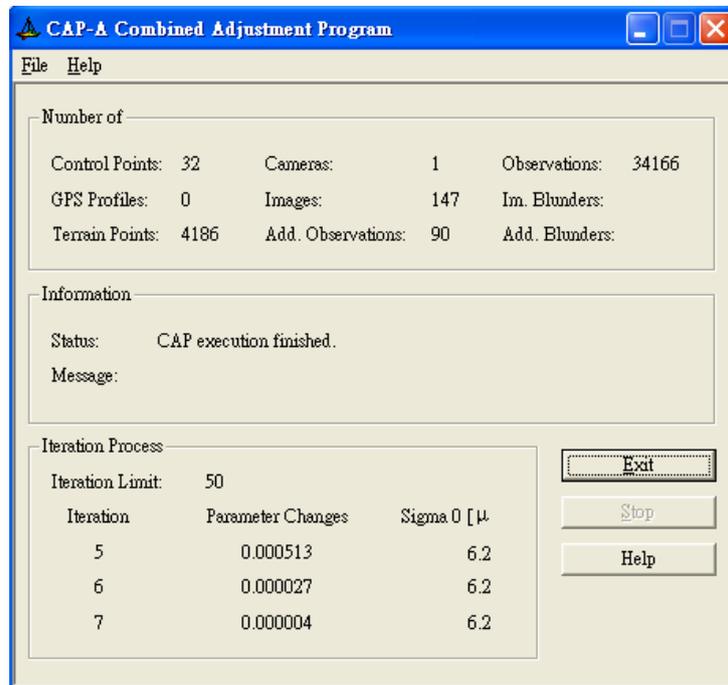


圖 11 多旋翼 UAV 航拍影像自率光束法空三平差執行結果視窗畫面

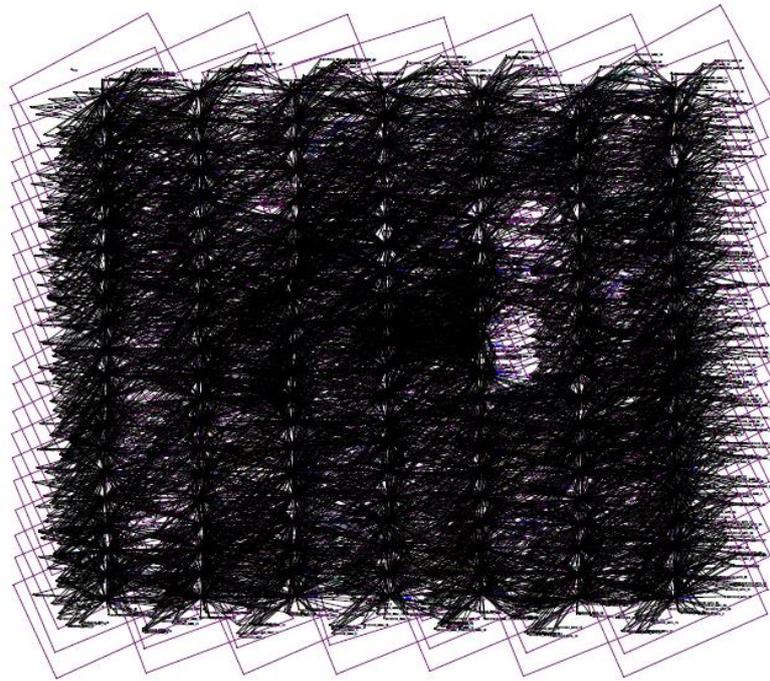


圖 12 多旋翼 UAV 航拍影像空三平差網形圖

為比較自率光束法空三平差與一般光束法空三平差之成果，本研究將上述自率光束法空三平差，經粗差偵錯共得到的 4186 點地形點對應之像點坐標資料與執行自率光束法空三平差時設定相同的實測控制點精度、點特徵航空影像控制資訊之精度、像點量測精度後執行一般光束法空三平差。由 iWitnessPRO 率定之相機參數帶入 SOCET SET ORIMA 航測軟體執行一般光束法空三平差時須特別注意，因數學模式之差異，其相機參數中畸變參數(像主點和焦距除外)正負符號要互變，亦即正變負、負變正，平差所得之  $\Sigma_0$  為  $33.1\mu\text{m}$ ，檢核點精度如表 5 一般光束法空三平差成果所示，N、E、h 坐標之 RMSE 分別是 0.08m、0.12m、與 0.39m。表 5 中可發現一般光束法空三平差之精度因其地面率定相機參數無法描述航拍時之相機參數，其高程精度的確比自率光束法空三平差精度差。比較地面率定與自率光束法空三平差兩種方式率定所得之相機參數值如表 6 所示，如前所述，地面率定與自率光束法率得的輻射畸變參數正負號確實相反。

表 5 多旋翼 UAV 航拍影像光束法空三平差檢核

點號	自率光束法空三平差			一般光束法空三平差		
	N 坐標較差(m)	E 坐標較差(m)	H 坐標較差(m)	N 坐標較差(m)	E 坐標較差(m)	h 高程較差(m)
C04	0.17	-0.24	-0.58	0.18	-0.26	-0.77
C05	0.05	-0.02	-0.17	0.05	-0.03	0.06
C08	-0.01	0.09	-0.03	-0.04	0.09	0.23
C11	0.00	0.05	-0.23	-0.01	0.07	-0.12
C12	0.06	0.01	0.13	0.03	0.01	0.38
C14	0.10	-0.05	0.22	0.06	-0.04	0.31
RMSE	0.08	0.11	0.28	0.08	0.12	0.39

表 6 Canon EOS 5D Mark II 相機參數率定之結果比較

Canon EOS 5D Mark II 28mm 鏡頭相機參數			
		原率定值	執行自率光束法空三率定結果
像主距 c (mm)		28.4793	28.4156
像主點位移( $x_0, y_0$ )(mm)		(-0.0593, -0.1212)	(-0.0789, -0.0806)
輻射畸變差	K <sub>1</sub>	1.3230e-004	-1.27e-004
	K <sub>2</sub>	-2.2379e-007	2.09e-007
	K <sub>3</sub>	-1.5571e-011	1.55e-11
離心畸變差	P <sub>1</sub>	7.2189e-006	無
	P <sub>2</sub>	-5.8909e-006	無
x、y 軸尺度比	B <sub>1</sub>	2.695e-004	無
x、y 軸非正交	B <sub>2</sub>	1.225e-005	無

本研究上述空三平差計算時並未全部使用所布設的全控點，原因是本研究一開始時使用其他類型之 UAV 進行航拍，因此控制點與檢核點是針對其酬載之相機涵蓋範圍布設，因此後續改用 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼 UAV 航拍取像時，由於控制點並非針對此 UAV 酬載之相機規劃所布設，因此必須再引用點特徵航空影像控制資訊才完成上述之空三平差實驗。後續若能針對控制布標部份加以改善應可得到更佳之空三成果。

此外，空三過程中亦發現，由於航拍高度較低(約 200 公尺)，因此像幅涵蓋地面範圍較小，因此大型建物的樓頂面即可能成像於整張影像中的大部分(如圖 13)，若該樓頂面是均調之影像將使得自動匹配發生問題。圖 12 中網形空白縫隙處即為此因素所造成。



圖 13 大型建物的樓頂面於 UAV 航拍影像中成像之圖示

本研究接著使用多旋翼 UAV 航拍影像自率光束法空三平差的成果，以 SOCET SET 航測軟體自動匹配產生數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)經人工編修所得之 DEM 成果如圖 14，再以 SOCET SET 航測軟體完成航拍影像正射影像製作，成果如圖 15 所示。

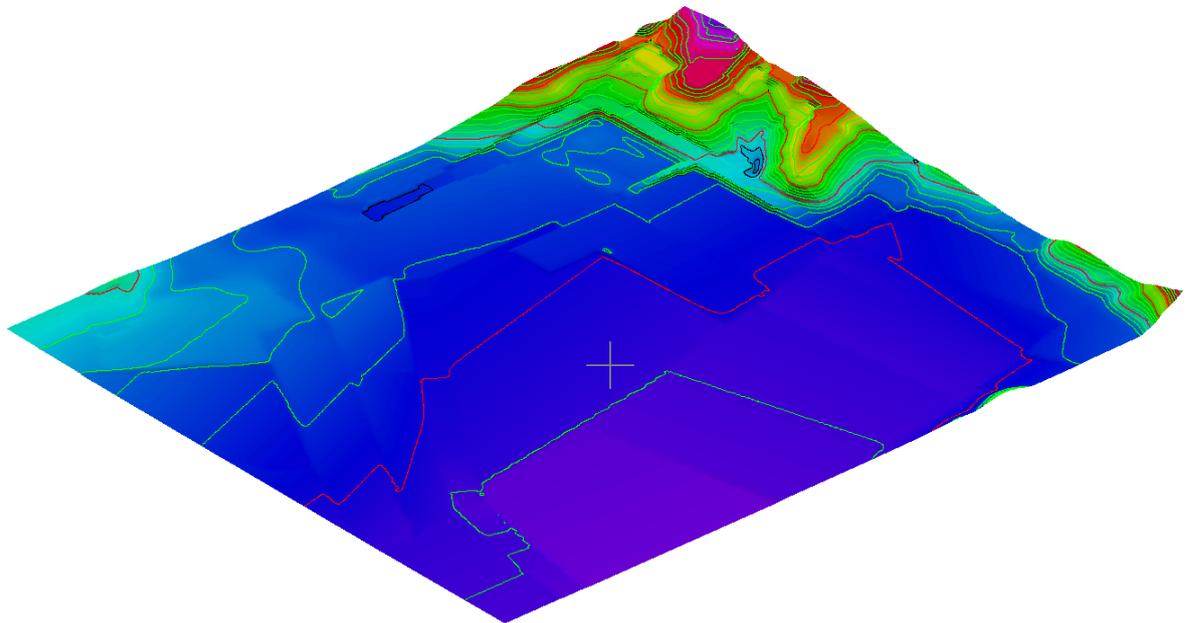


圖 14 多旋翼 UAV 航拍影像數值高程模型 3D 透視圖

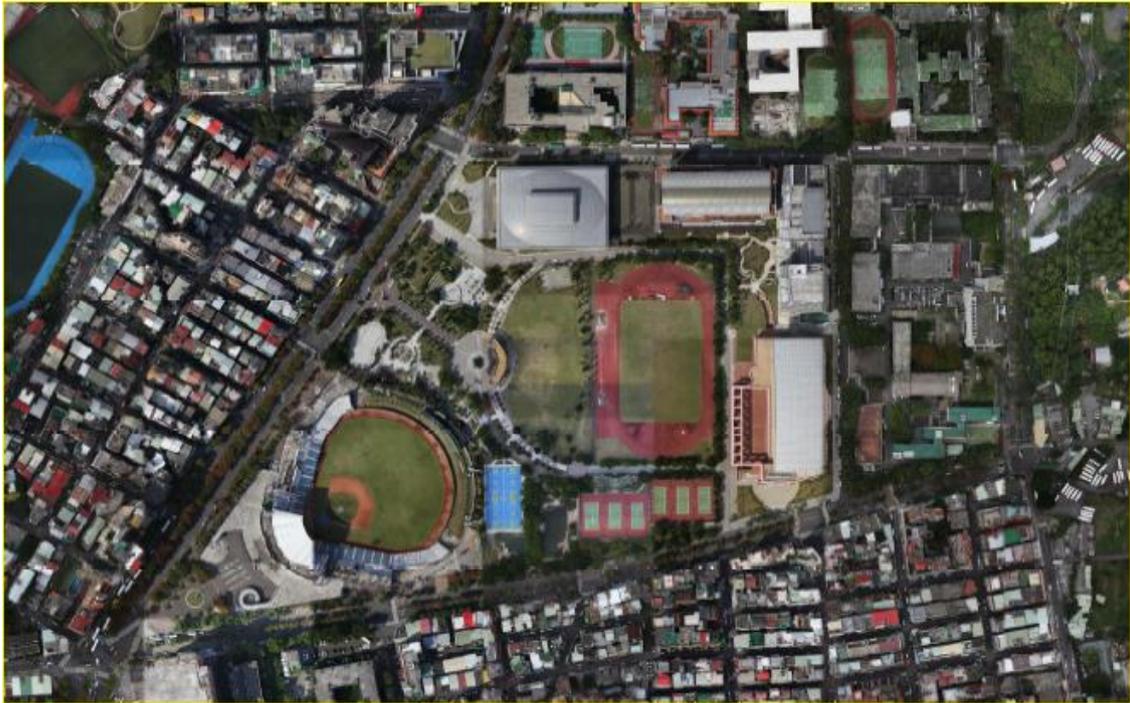


圖 15 多旋翼 UAV 航拍影像正射影像製作成果

以 UAV 進行航拍，由於受到其像幅小、航高低之影響，導致影像上建物高差位移大，於正射拼接鑲嵌作業上實有一定的作業難度，易發生建物傾斜方向不一與影像色調不連續之情形，如圖 16。故本研究中主要檢核正射影像之幾何精度，如圖 17，針對應無高差位移之處以全測站儀地面實測 20 個檢核點進行平面幾何精度檢核，檢核成果 X 坐標與 Y 坐標 RMSE 均為 0.09m，相當於平面位置 RMSE 為 0.13m，滿足千分之一正射影像位於平坦地且表面無高差位移之明顯地物點，其位置中誤差應小於 50 公分之精度要求，20 個實測地面檢核點位分布如圖 17。



(a) 建物傾斜方向不一致

(b) 影像色調不連續

圖 16 UAV 影像之正射影像問題圖示說明



(a) 正射影像精度檢核點位分布

(b) 檢核點位範例圖示

圖 17 UAV 影像之正射影像精度檢核點位分布

正射影像製作是由不包含地物的數值高程模型以及空三的成果進行正射糾正處理，但由於航拍取像高度離地高僅 200 公尺，因此建物之高差位移嚴重，此導致所製作的正射影像在高建物部分產生嚴重之位移現象，假設像片垂直攝影，則像點因高差位移  $d$  的公式如式(3)所示：

$$d = \frac{rh}{H} \tag{3}$$

其中， $r$ ：像點距像主點的距離； $h$ ：距選定基準面的物高； $H$ ：距選定基準面的航高。

表 7 是假設建物高度分別是 5.00m、10.00m、……、60.00m，像點分別距離像主點 1.50mm、2.50mm、5.00mm、7.50mm 時，選定以此區地表平均高程 20.00m 為基準面時，於航高約離地高 200m 的像點位移的數量表(分別以 mm 及像元(pixel)為單位，以像元為單位時此時一像元為 6.4 $\mu$ m)。將表 7 以像點與像主點距離為橫軸、高差位移像元數為縱軸，繪成圖 18 顯示不同建物高度於不同像點位置的高差位移像元數。

表 7 航高離地高 200 公尺像點位移數量表

離地航高(m)	200.00								
地表高程(m)	20.00								
離像主點(mm)	1.50								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.04	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23	0.30	0.38	0.45
像點位移(pixel)	5.86	11.72	17.58	23.44	29.30	35.16	46.88	58.59	<b>70.31</b>
離像主點(mm)	2.50								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.06	0.13	0.19	0.25	0.31	0.38	0.50	0.63	0.75
像點位移(pixel)	9.77	19.53	29.30	39.06	48.83	58.59	78.13	97.66	117.19
離像主點(mm)	5.00								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	1.00	1.25	<b>1.50</b>
像點位移(pixel)	19.53	39.06	58.59	78.13	97.66	117.19	156.25	195.31	<b>234.38</b>
離像主點(mm)	7.50								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.19	0.38	0.56	0.75	0.94	1.13	1.50	1.88	2.25
像點位移(pixel)	29.30	58.59	87.89	117.19	146.48	175.78	234.38	292.97	351.56

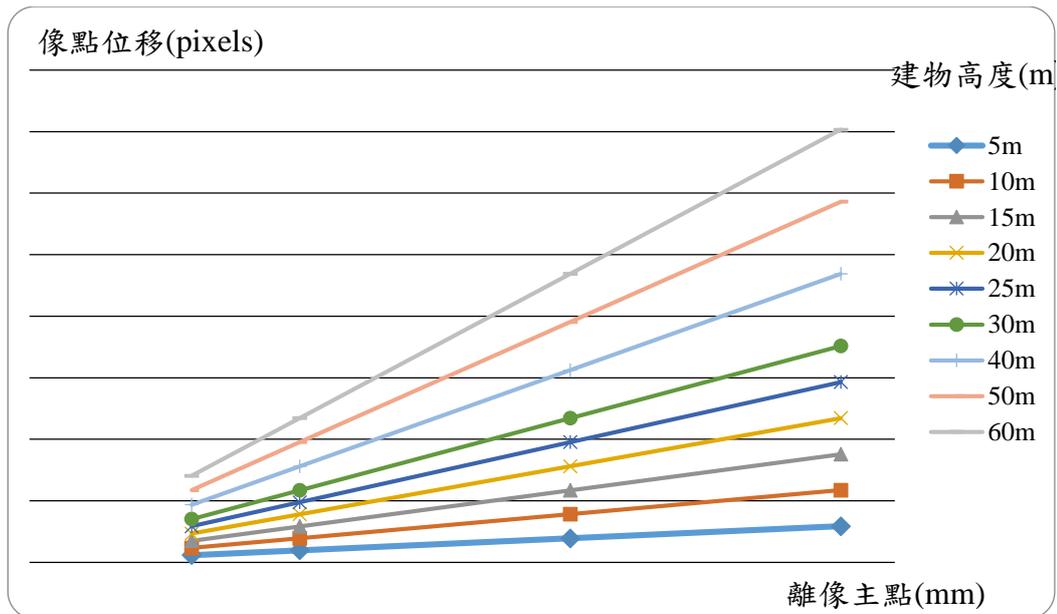


圖 18 不同建物高度於不同像點位置的高差位移像元數圖

本次研究儘量以選取離像主點約 5.00mm 範圍之中心影像製作正射影像，此時若 60m 高建物離像主點 5.00mm 時，像點位移高達 1.50mm(相當於 234.38 像元)。依據公式(3)，若航高升至離地高 300.00m 與 400.00m 時，60m 高建物離像主點 5.00mm 時，計算得到像點位移仍高達 1.00mm 與 0.75mm(相當於 156.256 與 117.19 像元)；離像主點 2.50mm 時，像點位移亦仍高達 0.50mm 與 0.38mm(相當於 78.13 與 58.59 像元)；離像主點 1.50mm 時，像點位移為 0.30mm 與 0.23mm(相當於 46.88 與 35.16 像元)，降至 50 像元內。由上述分析，航拍取像高度提高至離地高 300m 與 400m，對於較高建物(如 60m 高建物)在離像主點 5.00mm 左右的高差位移仍非常大，因此對高建物儘量取其成像於像主點中心約 1.5mm 的影像行正射糾正，如此一來於航高離地面高 200m、300m、400m 時原始成像時的高差位移可控制在 70~35 像元之間，進一步製作 10 公分解析度的正射影像時自然可將高建物的高差位移量影響降低。

## 五、結論與建議

本研究針對發展快速、變異大的都市地區，應用多旋翼 UAV 系統，在安全無慮情況下，提供垂直起降，高機動性且可於低空雲下飛行等性能，執行自主飛行並航拍高解析度之 UAV 影像，記錄飛行時的 GPS、IMU 資訊供作影像外方位初始值，探討以旋翼 UAV 酬載非量測型數位相機拍攝之影像是否能製作都市局部區域千分之一正射影像。由地面實測檢核點之精度證實以旋翼 UAV 影像製作都市區局部區域正射影像能滿足千分之一正射影像之精度要求，雖然其具取像像幅小之缺點但卻有航拍作業快速之優點。以目前研究結果顯示在慎選抗風性佳且酬載高性能相機之多旋翼之 UAV 系統，於天候狀況許可下(即使陰偶陣雨)，且在 UAV 不受任何環境干擾下，可以航高 200 公尺的飛行下於三小時內取得製作一幅千分之一正射影像所需航拍品質佳的影像，再以自率光束法空三平差同時解決以近景攝影測量率定所得

相機參數無法描述航拍時相機參數之問題，亦可同時求得航拍影像正確的拍攝位置與姿態，最後指定每張影像合適製作正射影像之區域製作符合千分之一精度之正射影像。整個研究過程亦得到以下建議可供未來工作參考：

- (一) 航拍參數建議：欲製作具精度等級之正射影像，其數位相機不可使用自動對焦功能且不可開啟防手震功能，此外為防止影像邊緣變形，以本實驗所使用之 Canon5DII 相機為例，使用 28mm 定焦鏡頭，航拍地面解析度建議以可分辨雙黃線與雙白線為主，約為 6cm 以內，因此航高約 200m~300m；而航拍時影像前後重疊 80%、側向重疊 40%，控制點分布位置以規劃完之航線與影像範圍涵蓋圖，將其布設於測區界線外為原則，點位間間隔約為 2 至 4 個空中攝影基線（基線長以重疊 60% 為準計算），且須有至少均勻分布 5 點之檢核點檢查空三精度。而後續應累積更多之經驗，建議更優之航拍參數。
- (二) 改善控制測量方式：本次研究之控制點是以「數值法地籍圖重測作業手冊」所規定之 RTK 辦理圖根測量方法施測其平面坐標，然由作業過程中發現都市區遮蔽嚴重，導致作業相當困難，因此針對在都市地區小規模區域之控制測量方式，建議將來可採用導線或導線網的控制測量方式，增進效益。
- (三) 航拍取像之改善：本次實驗所選 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼 UAV 能有效於短時間航拍取像，然於取像之航帶中相鄰影像之前後重疊與航帶間影像之左右重疊目前無法符合航空攝影測量作業之要求，如圖 8 所示。若將來改善其重疊狀況符合一般航拍影像之要求，對後續處理會更有助益。
- (四) 自率光束法空三平差之分析：本研究採用自率光束法空三平差，同時解決航拍影像之定位定向，以及以近景攝影測量方式率定相機所得參數不適用之問題，其基本假設是影像自動匹配可得涵蓋描述整個相機鏡頭的像點且影像前後重疊與左右重疊需足夠，然是否有無法大量獲取匹配像點之區域，如植被區或裸露地表，以及重疊率低於多少會導致自率光束法空三平差無法適用仍待更多經驗累積；此外，本次研究所使用的自率光束法空三平差的附加參數模式，僅使用像主點(x0,y0)、像主距(CFL)以及鏡頭的輻射畸變差(a1,a2,a3)，其他參數對空三平差影響如何，亦可進一步探究。
- (五) 點特徵航空影像控制資訊之使用：本研究於控制點不足處，以該區既有圖資，即製作一千分之一地形圖時已完成空三平差之航拍影像進行立體量測控制點（稱點特徵航空影像控制資訊），量測時選取基線航高比大於 0.3 且重複量測無粗差之三次觀測值取其平均值作為此點特徵航空影像控制資訊之三維坐標，此作法之空三精度亦滿足所需，因此後續可以繼續探究點特徵航空影像控制資訊與實測地控點的比例搭配對於空三精度之影響。
- (六) 正射影像之製作：目前航拍取像高度離地高 200 公尺，因此建物之高差位移嚴重，此導致所製作的正射影像在高建物部分產生嚴重之位移現象，因此對於高

建物儘量取成像於像主點中心附近(至少 1.5mm)範圍內的影像製作正射影像。

### 參考文獻

- 內政部，2010，《建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊》，內政部：台北。
- 內政部，2013，基本地形圖資料庫服務入口網站，<http://bmap.nlsc.gov.tw/bmap/ch/>，最近檢索時間 2013 年 6 月。
- 內政部國土測繪中心，2008，《測探測感應器測繪平台架構規劃暨應用作業工作總報告書》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2010，《測繪科技發展後續計畫-發展無人飛行載具航拍技術作業執行計畫 100 年~103 年》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2011，《100 年度發展無人飛行載具航拍技術作業工作總報告書》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2012，《101 年度發展無人飛行載具航拍技術作業工作總報告書》，內政部國土測繪中心：台中。
- 剛鈺，2012，AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼空中攝影系統，AI-RIDER，<http://www.ai-rider.com/>，最近檢索時間 2013 年 6 月。
- 謝幸宜，2010，《以自率光束法提升四旋翼 UAV 航拍影像之定位精度》，國立政治大學地政學系碩士論文。
- Ahmad, A., 2011, Digital Mapping Using Low Altitude UAV, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 19 (S), pp. 51-58.
- Bendea, H., F. Chiabrando, F. G. Tonolo, and D. Marenchino., 2007, Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site, *Paper presented at XXI International CIPA Symposium : Athens, Greece*.
- Brown, D. C., 1976, The bundle adjustment - progress and prospect, *International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing*, 21( 3), pp. 1-33.
- Chen, J., Lin, Z., Wang, X., and Y. Li, 2012, Application of UAV system for low altitude photogrammetry in SHANXI, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX(B1), pp. 351-354.
- Clarke, T. A., J. G. Fryer, and X. Wang, 1998, The Principal Point and CCD Cameras, *Photogrammetric Record*, 16(92), pp. 293-312.
- David, G. S. III, R. D. Benjamin, and R. Charles, 2007, Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields, *Journal of Field Robotics*, 25(3), pp. 133-147.
- Eisenbeiss, H., and L. Zhang. 2006, Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application, *International*

- Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI (5), pp. 90-96.
- Fraser, C. S., 1997, Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 52, pp. 149-159.
- Haarbrink, R. B., and H. Eisenbeiss, 2008, Accurate DSM production from unmanned helicopter systems, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII (B1), pp. 1259-1264.
- Horcher, A., and Rien J.M. Visser, 2004, Unmanned aerial vehicles: applications for natural resource management and monitoring, *Paper presented at the Council of Forest Engineering Annual Meeting-Machines and People, The Interface : Hot Springs, Arkansas*.
- Kise, M., Q. Zhang, and F. Rovira Más, 2005, A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance, *Biosystems Engineering*, 90(4), pp. 357-367.
- Küng, O., C. Strecha, P. Fua, D. Gurdan, M. Achtelik, K. M. Doth, and J. Stumpf, 2011, Simplified building models extraction from Ultra-light UAV Imagery. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 38(1), pp. 217-222.
- Laliberte, A. S., C. Winters, and A. Rango, 2007, Acquisition, orthorectification, and classification of hyperspatial UAV imagery, *Research Insights in Semiarid Ecosystems, RISE: Tucson*.
- Li S., 2011, The use of Low-altitude unmanned aerial vehicle system in the measurement of large scale topographic maps -Take the 1:2000 mapping of PuWen as an example, *11th South East Asian Survey Congress and 13th International Surveyors' Congress Innovation towards Sustainability: Malaysia*.
- L. Baoping, X. Sheng, Z. Xia, E. Chengwen, and Bing Li, 2008, Actualize of low altitude large scale aerophotography and geodesic base on fixed-wing unmanned aerial vehicle platform, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVII (B1), pp. 643-646.
- P. Patias, Chr. Saatsoglou-Paliadeli, O. Georgoula, M. Pateraki, A. Stamnas, and N. Kyriakoub, 2007, Photogrammetric documentation and digital representation of the macedonian palace in Vergina-Aegeae, *Paper presented at XXI International CIPA Symposium : Athens, Greece*.
- Photometrix, 2010, Australis Users Manual version 6.01, <http://photometrix.com.au> (last accessed June 14, 2014)
- Pueschel, H., M. Sauerbier, and H. Eisenbeiss, 2008, A 3D model of castle landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B8), pp. 93-98.

# 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。
2. 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。
3. 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。
2. 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： $\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L$  (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：

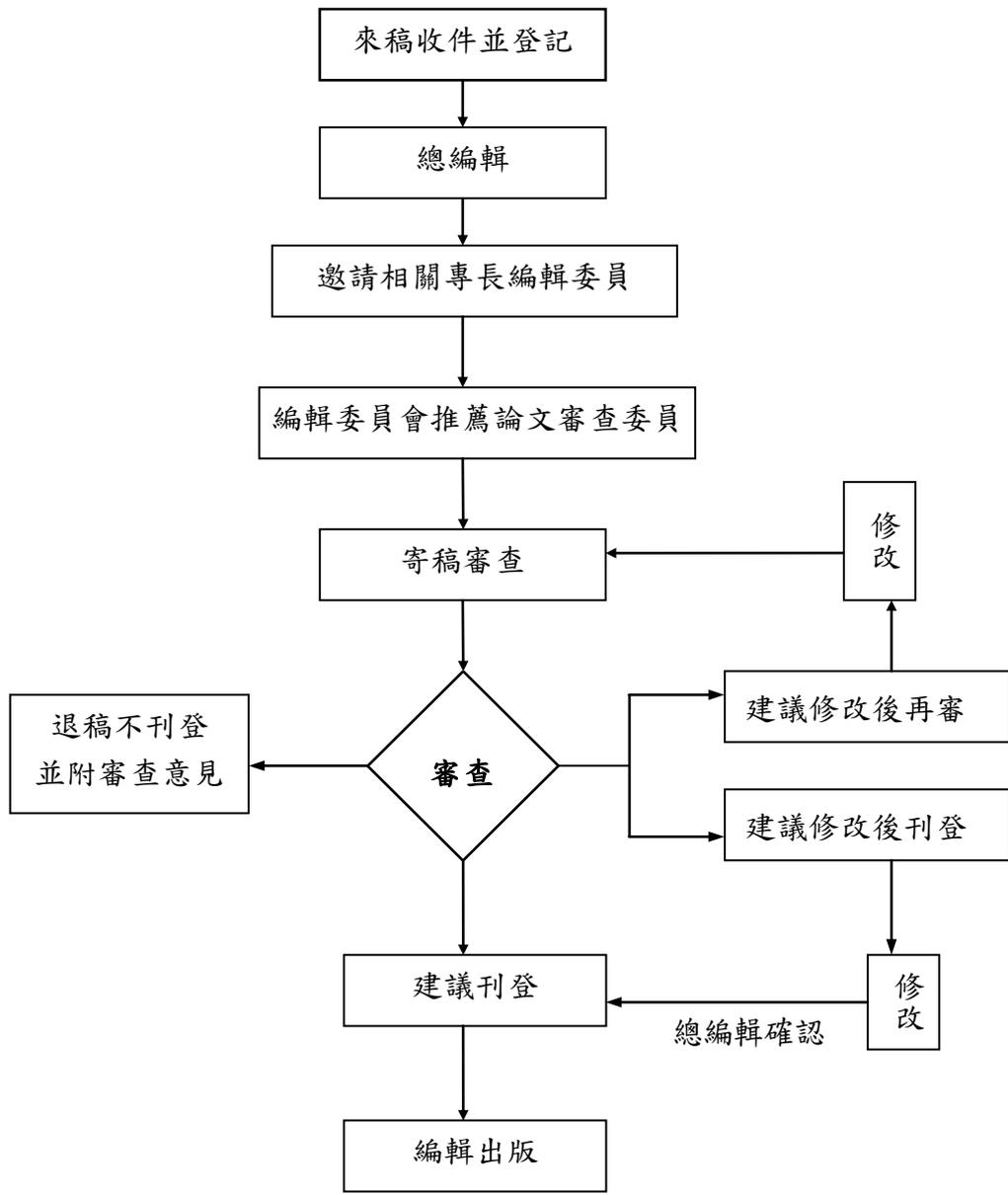
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

第四條 審查結果處理方式：

處理 方式 第一位 審查委員意見 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

---

## 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

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

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

第二卷第二期

民國一〇三年七月

Vol. 2, No. 2

July 2014

目 錄

CONTENTS

台灣西南部半動態基準之建立

景國恩、孔冠傑.....85

**Establishment of Semi-Dynamic Datum in SW Taiwan**

Kuo-En Ching, Kuan-Chieh Kung

鳳山轉換斷層現今之斷層活動行為及其地震潛能分析

趙荃敏、景國恩、李寧、陳建良.....107

**Fault Behavior Analysis of the Fengshan Transfer Fault and Its Earthquake Potential Assessment**

Chuan-Min Chao, Kuo-En Ching, Ning Lee, Jian-Liang Chen

e-GNSS 與 GPS 相對定位於地籍測量之精度分析

葉大綱、許育源、崔國強.....131

**Precision Analysis on Cadastral Surveying by Using e-GNSS and GPS Relative Positioning**

Ta-Kang Yeh, Yu-Yuan Hsu, Gwo-Chyang Tsuei

旋翼 UAV 影像製作千分之一都市區局部區域正射影像之探討

邱式鴻.....147

**An Investigation into the Generation of 1/1000 Orthoimages for Local Urban Area by VTOL UAV Images**

Shih-Hong Chio