

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

第五卷 第二期

中華民國一〇六年七月



VOLUME 5, NO. 2

July. 2017

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19屆組織表

一、理監事會：

理事長：黃榮峰

副理事長：謝福來

常務理事：蕭輔導、高書屏、黃進雄

理事：洪本善、崔國強、吳宗寶、江澤欽、楊名、周天穎、吳相忠、王定平、王啟鋒、
蕭萬禧、梁崇智、紀聰吉、謝福勝、張元旭、邱仲銘、陳惠玲

常務監事：蘇惠璋

監事：史天元、蕭正宏、容承明、白敏思

秘書長：鄭彩堂(兼任)

副秘書長：李文聖(兼任)

秘書：黃錦桂(兼任)、陳鶴欽(兼任)

二、各種委員會：

(一)服務委員會：

主任委員：崔國強

委員：王定平、王啟鋒、李建利、鄭宏達、盧金胡

總幹事：梁崇智

(二)編輯委員會：

主任委員：楊名

委員：史天元、林老生、洪本善、洪榮宏、楊明德、趙鍵哲、陳繼藩、饒瑞鈞

總編輯：陳國華

編輯：陳鶴欽

幹事：林以珊

(三)研究發展委員會：

主任委員：洪本善

委員：王宏仁、江日春、李旭志、林志清、吳宗寶、吳聲鴻、黃文華

駱旭琛、蕭萬禧、謝福勝

總幹事：陳世崇

幹事：謝東發、董荔偉

(四)獎章委員會：

主任委員：蕭輔導

委員：洪本善、張元旭、曾清涼、曾國鈞、謝福來

幹事：由本會秘書處兼任

(五)教育訓練委員會：

主任委員：劉正倫

委員：崔國強、李文聖、葉文凱

總幹事：蕭泰中

幹事：謝正亮

(六)國際事務委員會：

主任委員：周天穎

委員：李文聖、葉美伶、曾耀賢、盧鄂生、羅正方

總幹事：邱明全

幹事：李佩珊、湯美華

學會地址：408台中市南屯區黎明路二段335巷28號

網址：<http://www.cadastralsurvey.org.tw>

電子郵件：cscs.editor@gmail.com

臺灣半動態基準之建立與展望

景國恩^{1*}、楊名²、陳鶴欽³、林文勇³、梁旭文⁴、劉正倫⁵

論文收件日期：106.06.02

論文修改日期：106.06.19

論文接受日期：106.06.25

摘要

臺灣位於板塊邊界的區域，會因板塊間的相對運動使得靜態國家坐標系統隨時間的推進而漸失去其原有的精度。然而，臺灣現行的TWD97[2010]仍屬於靜態的坐標系統，故如何有效延續此國家坐標系統的精確性乃為國家測繪工作的一項重要任務，而建立臺灣地區的半動態基準則扮演了相當重要的角色。半動態基準包含了靜態大地基準(即TWD97[2010])與地表變形。地表變形模式則包含了「速度網格模型」和「位移網格模型」。在建立速度網格模型方面，本研究完成全臺 2000 年 01 月至 2016 年 09 月 437 個GPS連續站資料之計算，獲得全臺的水平速度場，並結合 785 個經濟部中央地質調查所 2002 年至 2015 年之GPS水平速度場，利用克立金空間內插法建立臺灣地區的水平速度網格模型。在建立位移網格模型方面，本研究藉由比較利用不同精度星曆計算得到的同震位移場，顯示所有計算結果近乎一致，亦即利用超快速星曆求解GPS資料即可在最短時間內建立高精度的近即時地表同震位移場。同時在建置震源模型方面，亦指出單一斷層滑移量模型所獲得的位移網格模型較空間內插模型所得到的結果更加合理。本研究進一步利用半動態基準的地表變形模型檢核內政部國土測繪中心 2013 年與 2016 年基本控制點檢測成果。採用半動態基準可將 2013 年之坐標轉換至 2016 年的計算坐標，再將其與 2016 年實際觀測的檢測坐標成果進行差異比較發現，兩者有相當高的一致性，有 91%的測站坐標差異量在 6 公分以內。而剩餘未能被適當估算的基本控制點多分布在山區，可能是由大規模崩塌等區域活動所造成。本研究也建議半動態基準可以配合內政部國土測繪中心現行之e-GNSS系統，利用e-GNSS基準站的坐標時間序列協助檢驗地表變形模式之速度模型精度變化，幫助決定地表速度場更新時機之判斷。最後，就高程半動態基準的發展而言，除了解析長期穩定的震間垂直速度場之外，未來還需要掌握例如地層下陷等非自然因素造成的地表垂直位移，以達到高程基準更新維護之目的。

關鍵詞：半動態基準、地表變形模式、克立金空間內插、斷層錯位模型、電子化全球衛星即時動態定位系統

¹ 副教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 技正，內政部國土測繪中心控制測量課。

⁴ 課長，內政部國土測繪中心控制測量課。

⁵ 主任，內政部國土測繪中心。

* 通訊作者，TEL：(06) 2757575 轉 63840，E-mail：jingkuen@mail.ncku.edu.tw。

Establishment and Further Development of Taiwan Semi-dynamic Datum

Kuo-En Ching^{1*}, Ming Yang², He-Chin Chen³, Wen-Yung Lin³, Hsu-Wen Liang⁴, Jeng-Lun Liu⁵

Abstract

The accuracy of static national coordinate system in any country, located at the present-day plate boundary such as Taiwan, will be decreased due to the relative motions among different plates. However, the current national coordinate system in Taiwan, TWD97[2010], is still a static datum. Therefore, maintaining the accuracy of national coordinate system in high level efficiently is the main issue in Taiwan. One solution of this issue is to establish a semi-dynamic datum. The semi-dynamic datum is consisted of a static geodetic datum, i.e., TWD97[2010] in Taiwan and a surface deformation model, containing the velocity grid model and the displacement grid model. In this study, observations of the 437 continuous GPS sites from Jan. 2001 to Sep. 2016 were adapted to estimate the horizontal velocity field. We also integrated the horizontal velocity field between 2002 and 2015 from 785 campaign-mode GPS sites surveyed by the Central Geological Survey to derive the horizontal grid velocity model in Taiwan by using the Kriging spatial interpolation method. Furthermore, the coseismic displacements of 2016 Meinong earthquake estimated using ultra-rapid ephemerides are consistent with the results using final ephemerides. In other words, the near real-time coseismic displacement field would be solved using ultra-rapid ephemerides in the future. In addition, the displacement grid model inferred from the uniform slip model is more suitable than the model derived from the spatial interpolation. The resurveying results of the basic control points from the National Land Surveying and Mapping Center (NLSC) in 2013 and 2016, respectively, were used for the exterior checking on the accuracy of semi-dynamic datum in this study. The calculated coordinates in 2016, derived from observations in 2013 using the semi-dynamic datum, are nearly corresponding with the observed coordinates in 2016. The coordinate differences in 91% stations are less than 6 cm. The outliers of comparisons are mostly located in the mountain range, which may be caused by the deep-seated landslides. In addition, the e-GNSS established by the NLSC is proposed to be used for checking the accuracy of velocity model and for the timing

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

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

³ Specialist, Control Surveying Section, National Land Surveying and Mapping Center, M.O.I.

⁴ Section Chief, Control Surveying Section, National Land Surveying and Mapping Center, M.O.I.

⁵ Director-General, National Land Surveying and Mapping Center, M.O.I.

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

decision of velocity model renewal. Finally, in order to develop the vertical semi-dynamic datum, we have to estimate the vertical velocity field and collect land subsidence information simultaneously for improving and maintaining the vertical datum in a high accuracy level.

Keywords: Semi-dynamic datum, Surface deformation model, Kriging spatial interpolation, Fault dislocation model, e-GNSS

一、前言

坐標系統為數值化描述地表位置之重要依據，亦為國家建設、測繪發展、學術研究的基礎。理論上，國家坐標系統不應隨著時間的增長而產生變化。然而在實務上，位於板塊邊界的區域，會因為板塊相對運動的影響，使得國家控制點坐標產生長期近似穩定的相對位移，或因如地震之瞬間事件衍生地表的永久性錯動，造成坐標系統隨時間而漸失去其原有的精度致不敷各界使用(e.g., Grant *et al.*, 1995; Yoshiyuki *et al.*, 2007)。

全面辦理國家基本控制點檢測作業為維持國家靜態坐標系統精確性最簡單、最具體方式。然而，此項作業需花費較高之測繪經費，除非遇有如地震、大規模崩塌等重大自然災害產生之顯著地表變位而必須全面檢測之外，否則不宜短期間辦理全面檢測工作。

為了考慮板塊運動造成的控制點變位，動態基準是另一個可能的解決方案(Grant *et al.*, 1999; Tregoning and Jackson, 1999)，利用地表變形模型以時間為函數將控制點坐標更新至現在時刻，或可經由連續之觀測達到更新坐標的目的。簡言之，動態基準是一個控制點坐標隨著時間函數改變的基準。由於基準坐標不斷地更新至現在時刻，因此，動態基準為一完全的四維基準，包含了三維坐標以及時間，乃為動態基準的特色。但是在實務上，由於動態基準包含時間變數，造成基準隨著時間而連續地改變，此將造成所有測量或坐標成果管理上的困難，且從資料整合、共享的觀點來看，不同時刻的坐標成果需要轉換至相同時刻才能一起使用，其將造成使用者的困擾。因此，如何有效應用現有之測繪資源以有效率地維護國家坐標系統，同時又兼具反映板塊運動引起的變位量以及便於測繪成果管理即是一大挑戰。

在國際上，日本、紐西蘭、印尼以及美國等位處板塊相對運動顯著的國家，皆已採用或建議採用半動態基準來維持其國家坐標系統之精確性(e.g., Grant *et al.*, 1995; Yoshiyuki *et al.*, 2007; Ching and Chen, 2015)。在半動態基準中，納入一個變形模型來模擬區域中點位的變位量，透過變形模型可以推估點位在任意時刻的坐標，至此與動態基準的概念相同，而半動態基準與動態基準主要的差別在於，在動態基準中，透過變形模型將特定或參考時刻的點位坐標推估至現在時刻的點位坐標，最後的坐標成果為現在時刻的點位坐標；但在半動態基準中，點位坐標最後均參考至特定時刻或參考時刻，最後的坐標成果為特定或參考時刻的點位坐標。所以，半動態基準不似動態基準是四維的，它的坐標成果固定於特定的時刻，與靜態基準一樣是三維的。亦可以說半動態基準在本質上是一個靜態基準，其透過變形模型以修正

板塊運動引起的變位。因此，半動態基準包含了靜態大地基準及地殼(地表)變形 (crustal/surface deformation)兩大部分，其中地殼(地表)變形包含了(1)震間速度場 (interseismic velocity field)，即兩個主要地震發生間的地表穩定運動，若無主要地震發生，其速度值並不會有顯著改變；與(2)同震位移場(coseismic displacement field)，即主要地震所造成之地表永久位移。雖然震間速度場與同震位移場皆包含水平和垂直兩個分量，但目前日本、紐西蘭及美國均先集中於水平分量上的探討與建置工作。利用震間速度場與同震位移場可分別產生半動態基準所需地表變形模式對應的「地表速度模型」與「同震地表位移模型」。

臺灣地區亦位於活躍的板塊邊界(Yu *et al.*, 1997; Yu *et al.*, 1999; Yu and Kuo, 2001) (圖 1)，地殼的應變速率約為 0.1-1.0 $\mu\text{strain/yr}$ (Bos *et al.*, 2003; Chang *et al.*, 2003; Hsu *et al.*, 2009; Ching and Chen, 2015)，特別在臺灣西南部旗山斷層至六甲-木屐寮斷層間有約 0.7-1.4 $\mu\text{strain/yr}$ 之最大壓縮量(Yu and Chen, 1994)，遠高於日本地區平均約為 0.1 $\mu\text{strain/yr}$ (Sagiya *et al.*, 2000)，以及美國南加州地區平均約為 0.1 $\mu\text{strain/yr}$ (Ward, 1994)。在震間時期，相對於澎湖，臺灣東部地區的地表速率可達約 70 mm/yr。自有大地測量紀錄以來，臺灣因為大地震造成的同震位移量，小則約 30 mm，如 2010 年 *Mw* 6.2 甲仙地震(Ching *et al.*, 2011)，大則可達約 10 m，例如 1999 年 *Mw* 7.6 集集地震(Yu *et al.*, 2001)。臺灣地區為建立統一的國家坐標系統，內政部於 1998 年 3 月 17 日公布「1997 臺灣大地基準(TWD97)」及參考坐標系統(Yang *et al.*, 2001)。近年來，為因應並修正臺灣區域逐漸累積的板塊運動以及因地震、風災、水災所產生的位移影響以維護 TWD97 基準，內政部於 2012 年 3 月 30 日公告新的國家坐標系統名為一九九七坐標系統 2010 年成果(簡稱 TWD97[2010])(內政部國土測繪中心，2012)，由於未有點位的速度，因此，就本質言，TWD97[2010]仍屬於「靜態」的坐標系統，隨著時間的推移，可預見其將逐漸失去原成果的精度。故如何有效延續此國家坐標系統的精確性乃為國家測繪工作的一項重要任務，而建立臺灣地區之半動態基準則扮演了相當重要的角色(內政部國土測繪中心，2013; 2016)。

二、現代化 TWD97 國家平面坐標系統地表變形模式之建立

由於半動態基準包含了靜態大地基準及地殼(地表)變形，因此如何精確地評估地殼(地表)變形對靜態大地基準所造成的影響，即是半動態基準建立的基礎。本研究建立地表變形模式以推求臺灣地區各地各時期之地表變形型態。「地表變形模式」包含了(1)「速度網格模型」，用以描繪震間速度場之型態；(2)「位移網格模型」，用以描述地震或大規模崩塌等突發事件所造成的永久位移場。

(一)「速度網格模型」之建立

為了建立臺灣地區之速度網格模型，本研究首先蒐集並分析全臺 437 個 GPS 連續站之資料以獲得 2000 年 01 月至 2016 年 09 月的全臺水平速度場(圖 2)(內政部國土測繪中心，2013; 2014; 2015; 2016)，並結合 785 個經濟部中央地質調查所 2002 年至 2015 年之 GPS 水平速度場(圖 2)，最後利用克立金空間內插法(Kriging)建立臺灣地區的水平速度網格模型。

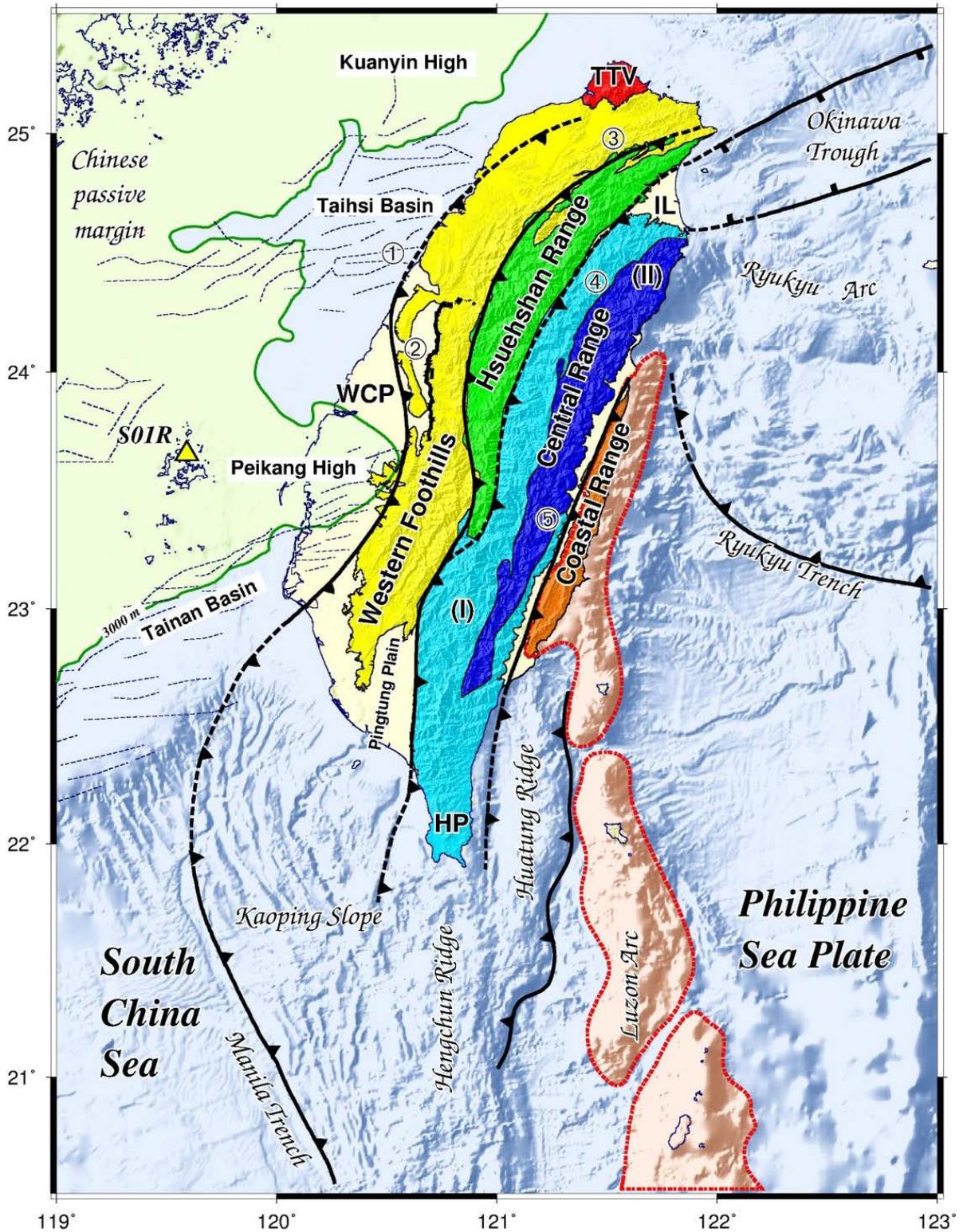


圖 1 臺灣大地構造框架。綠色區域為先第三系基盤高區之位置(Lin *et al.*, 2003)。虛線為碰撞造山前所發育之正斷層。WCP 為西部海岸平原；TTV 為大屯火山；HP 為恆春半島；IL 為宜蘭平原。數字 1-5 分別代表變形前緣、車籠埔斷層、屈尺斷層、梨山斷層及縱谷斷層。I-II 分別代表中央山脈西翼板岩區及中央山脈東翼變質雜岩區。

1. 2000 年至 2016 年臺灣水平速度場

本研究蒐集來自交通部中央氣象局、經濟部中央地質調查所、內政部國土測繪中心、中央研究院地球科學所及其他單位共 437 個 2000 年 01 月至 2016 年 09 月的全臺 GPS 連續站資料(圖 2)，並利用 Bernese 5.0 軟體進行資料的解算，藉由連接至鄰近臺灣的 7 個 IGS 國際站(BJFS、TSKB、SHAO、WUHN、GUAM、PIMO、COCO)進行網形平差計算，獲得各 GPS 連續站的每日坐標解，並進行坐標時間序列分析以推估各站的速度，提供建立內插網格速度模型使用。雖然本研究為了連繫 TWD97[2010]框架亦選用筑波站(TSKB)聯合解算，但因為該站於 2011 年日本東北地震後亦有 10 公分以上的位移量，因此本研究在該地震發生後的坐標計算中會放鬆 TSKB 的坐標與速度約制。

在資料解算策略上，本研究首先解算 5 個共同聯測站(HENC、KMNM、S01R、SALU、TNML)最小約制於金門站(KMNM)的坐標時間序列，確認這些共同聯測站坐標變化的穩定性。由於此 5 個共同聯測站與國內各 GPS 連續站相距皆在 200 公里內，相對於直接由國際 IGS 站求解國內各 GPS 連續站之坐標，將可避免因基線過長造成坐標解算精度不佳與不穩定之情況；接續，聯合國內 5 個共同聯測站與全臺各 GPS 連續站的每日觀測資料，進行最小約制於 KMNM 站 ITRF2008@2005.0 坐標之計算，以得到各 GPS 連續站相對於 KMNM 的每日坐標值以及坐標時間序列成果。

接著本研究即利用各 GPS 連續站的坐標時間序列成果估計各站相對於測站 KMNM 的速度量。本研究依據坐標時間序列的型態分別採用式 1 至式 3 的方程式進行坐標時間序列之擬合(Nikolaidis, 2002)，分述如下：

- (1) 在觀測資料蒐集期間內，沒有因為地震而產生明顯地表位移之連續站，可採用式 1 進行擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + v \quad (1)$$

其中 a 為截距， b 為測站速率， v 為殘差值， t_i 為坐標時間序列中的時刻。

- (2) 於觀測資料蒐集期間內，雖然有地震造成明顯之同震位移，但是若震後的地表速率並無明顯改變，則可採用式 2 擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_j) + v \quad (2)$$

其中 C_j 為地震造成之同震位移， n_c 為有產生同震位移量之總地震事件數， T_j 為地震事件發生之時間， H 為階層函數；亦即事件發生前之數值為 0，事件發生後之數值為 1。

- (3) 若連續站於觀測期間內，不但有因為地震造成的明顯同震位移，且震後的地表速率亦發生改變，可採用式 3 進行擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_j) + \sum_{j=1}^{n_d} d_j H(t_i - T_j)t_i + v \quad (3)$$

其中 d_j 為地震震後地表位移的改變速率， n_d 為有產生地震震後地表速率改變量之總地震事件數。

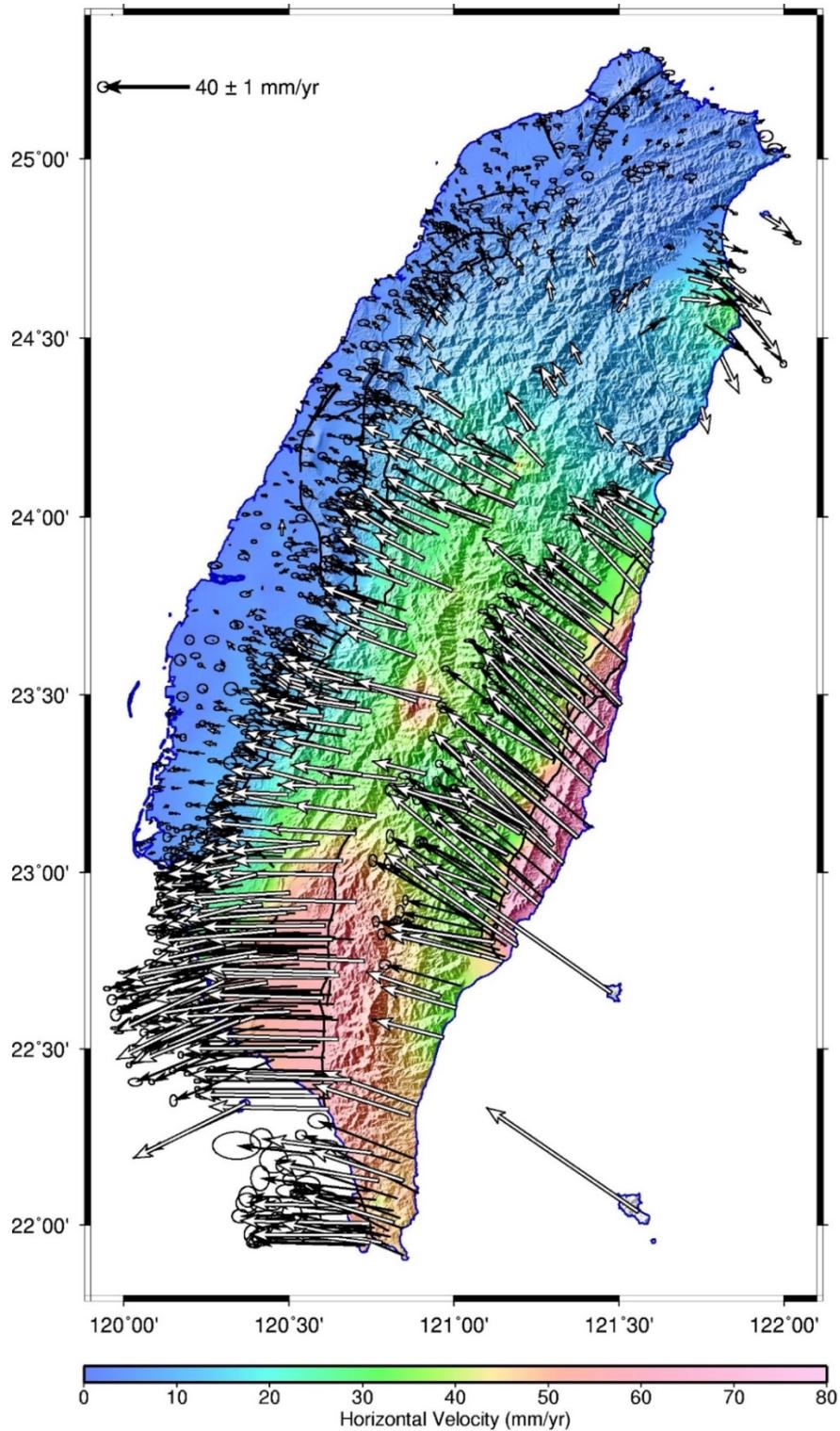


圖 2 臺灣地區 2000 年 01 月至 2016 年 09 月相對於金門站 KMNM 之地表水平速度場。白色箭頭為全臺 437 個 GPS 連續站速度場，黑色箭頭為 785 個經濟部中央地質調查所之 GPS 水平速度場。黑色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

由於震後的非線性變形並不容易在半動態基準的變形模型中進行維護，因此本研究主要採用式 1 至式 3 以最小二乘法擬合估算各 GPS 連續站相對於 KMNМ 的速度量。針對震後的非線性變形處理，本研究建議初步先以不同時期的速度模型來維護，爾後再考慮是否要引用震後數值模型來提供此參數。

除了本研究計算所獲得到之 437 個 GPS 連續站速度場，本研究亦透過內政部國土測繪中心取得經濟部中央地質調查所 785 個 GPS 移動站相對於 KMNМ 站之水平速度場，由於兩者之速度場計算方法一致，故將兩者合併後，獲得 2000 年 01 月至 2016 年 09 月完整的全臺水平速度場(圖 2)。其水平速度場顯示，在西部麓山帶、宜蘭平原與花東縱谷一帶有顯著的水平方向速度梯度存在，其中，作為縱谷斷層最為活躍一段的池上斷層，更呈現潛移斷層之速度形態特徵，於斷層兩側有顯著之速度落差(圖 2)。

2. 內插網格模式-克立金法(Kriging)

克立金(Kriging)法是由 Mathron 學者於 1963 年所提出，最早應用於礦脈在空間上分布的推測，是一種由已知點群的已知值推測特定區域範圍內某未知點群之對應值的內插方法。當散布於特定空間中的某種現象具有空間結構性時，可採用 $Z(x)$ 表示此現象的觀測值，其中 x 為空間的位置，其可以為一個坐標，或是區域，甚至是一個面或一個立體的區塊。利用已知點群的已知值，可以計算得不同距離的半變異數平均值，並採用適當的半變異元模式即可擬合得半變異元函數，其表示隨著距離的不同，點群之間的相關程度也隨之改變，在滿足最佳線性無偏估計的條件下，半變異元模式函數值經過適當的轉換可成為權重係數，用以推估未知點的對應值。半變異圖定義如下：

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = E[Z(x+h) - E(x)]^2 = 2r(h) \quad (4)$$

式中， x 為空間中某一點的位置， $Z(x)$ 為該點空間位置的隨機函數， $r(h)$ 為半變異函數(semivariogram)，代表點群的均方差隨著距離 h 增加而建立的函數關係。

半變異元函數 $r(h)$ 會隨著距離變大增加，而成為定值，亦即基元值(Sill)。半變異元的值至基元值間的距離稱為影響距離(Influence Range, A)，在此影響範圍外的資料無相關性存在。另一個為碎塊效應(Nugget Effect, C_0)，若 C_0 值越大，代表空間相關性不佳，而當 C_0 與基元值相等時，代表資料間並無相關性存在。

3. 水平速度網格模型

建置區域半動態基準之要件之一為必須具有一高精度的速度場模型，應用此模型可以推估給定時間下任意位置所對應的坐標值，使得在穩定的速度下，且未有重大的板塊瞬時運動或其他造成顯著位移事件發生時，得以維持國家坐標系統的精確性。簡言之，高精度的速度場模型對於區域性半動態基準之建立扮演重要角色。如何獲得一個高品質的速度場模型，進而建立區域性的半動態基準以維護國家坐標系統的精確度為一重要的課題與發展趨勢。

本研究依據由 437 個 GPS 連續站與 785 個 GPS 移動站得到之水平速度場結果指出(圖 2)，池上斷層為造成斷層兩側顯著速度落差之潛移斷層，因此在建立水平速度網格模型時，本研究將縱谷斷層視為不連續的速度邊界，把臺灣分成兩個網格

分區，利用克里金內插法分別建立對應的水平速度網格模型(圖 3)。克里金法內插計算得到的最佳擬合參數如表 1 與表 2 所列，由其內插推估的模型誤差(圖 4)可以得知，在如中央山脈等資料點較少的區域，其推估的標準差均較大。

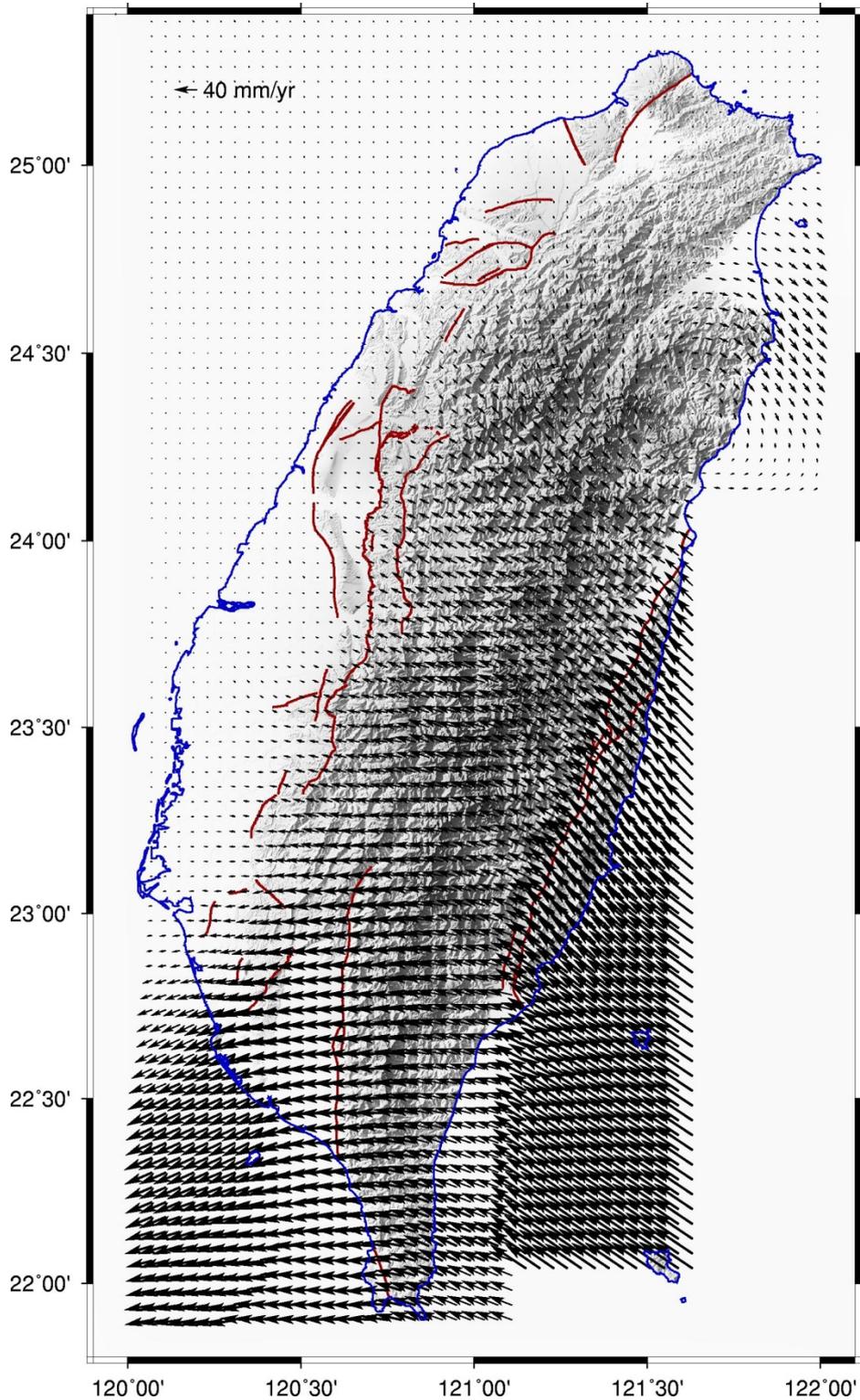


圖 3 臺灣地區 2000 年 01 月至 2016 年 09 月之地表水平速度網格模型。紅色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

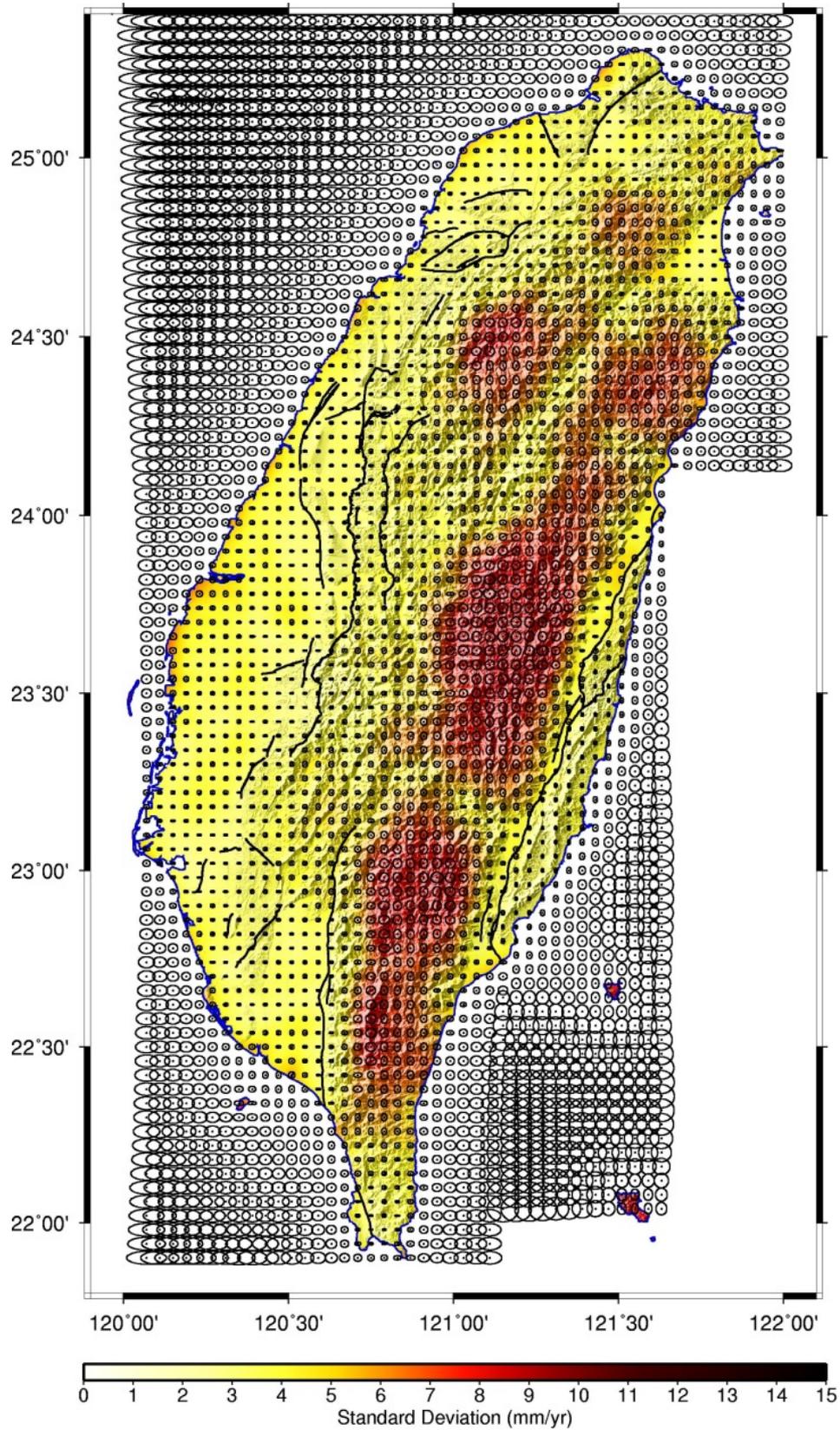


圖 4 臺灣地區 2000 年 01 月至 2016 年 09 月之地表水平速度網格誤差模型。黑色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

表 1 克立金內插計算之最佳擬合參數統計(縱谷斷層以東)

網格間距(經/緯度)	0.04/0.04	
內插範圍	22.04 ~ 24.00 (緯度) 121.15 ~ 121.62 (經度)	
坐標分量	E 方向	N 方向
最佳擬合半變異元函數	高斯(Gaussian)函數	高斯(Gaussian)函數
碎塊效應(Nugget Effect, C_0)	18.0000	49.4000
基元值(Still)	346.90000	270.30000
影響距離(Influence Range, A)	1.6628	1.5588
擬合判定係數(R^2)	0.945	0.920

表 2 克立金內插計算之最佳擬合參數統計(縱谷斷層以西)

網格間距(經/緯度)	0.04/0.04	
內插範圍	21.90 ~ 26.38 (緯度) 120.07 ~ 121.99 (經度)	
坐標分量	E 方向	N 方向
最佳擬合半變異元函數	球面(Spherical)函數	高斯(Gaussian)函數
碎塊效應(Nugget Effect, C_0)	1.0000	3.1000
基元值(Still)	812.90000	55.6600
影響距離(Influence Range, A)	4.0460	0.9336
擬合判定係數(R^2)	0.934	0.849

(二) 「位移網格模型」之建立 - 以 2016 年美濃地震為例

本研究利用 2016 年美濃地震的同震位移資料，進行地表同震位移網格模型之建立分析。位移網格模型建置之研究工作可區分為兩個部分：(1)就資料解算部分，由於現今 GPS 公開的衛星軌道資料包含超快速星曆(Ultra rapid orbits; IGU)、快速星曆(Rapid orbits; IGR)以及最終精密星曆(Final orbits; IGS)。因此本研究探討地表同震位移場的可信度與衛星軌道之精度是否相關。(2)就模型建立部分，目前常見的地表同震位移模型主要採用斷層錯位模型(Dislocation model)與內插法，因此本研究在半動態基準建立的過程中，測試探討產生地表同震位移模型之最佳方法。

1. 2016 年美濃地震同震位移場

在資料解算部分，雖然就國家坐標基準的立場而言，需要一個準確的同震位移量以進行最終的精確修正或計算。然而，考慮到地震災害發生時，即需要即時的災後測量調查，並透過地表位移場以推估重災區的分布位置而協助救災工作的進行，因此，推估一個近即時的地表同震位移模型即相當重要。本研究分別採用超快速星曆、快速星曆以及最終精密星曆分別求解 2016 年美濃地震發生時所蒐集全臺 320 個 GPS 連續站之資料，並獲得各站坐標時間序列成果，各站的同震位移場估算則利用式 2 擬合地震前 5 天與地震後 3 天之坐標時間序列而得(圖 5)。圖中黑色箭頭為超快速星曆的地表同震位移成果、藍色箭頭為快速星曆之地表同震位移成果、紅色箭頭為最終精密星曆之地表同震位移成果。由此三種不同星曆擬合成果之比較可以

發現，2016 年美濃地震造成之地表水平位移量約在 20-30 mm 之間，垂直位移量同樣亦約在 20-30 mm 間，然而超快速星曆所獲得之水平及垂直地表位移量與最終精密星曆之結果近乎一致，差異量大部分皆在 2 mm 以下，換言之，利用超快速星曆能夠獲得即時且可靠的地表同震位移量。

2. 水平位移模型

在模型建置部分，本研究首先採用斷層錯位模型推求地表同震位移模型。斷層錯位模型的基本原理為利用錯位模型(Okada, 1985; 1992)，假設地球為表面平坦且於高程方向無限延伸的彈性半空間(elastic half-space)，其介質特性為具 0.25 蒲松比的彈性體。欲計算地表上任一點位的位移量，需先利用地表觀測資料當作約制條件以推估斷層參數，這些斷層參數包括斷層位置、深度、長度、寬度、走向、傾角及二個分量的斷層滑移量(走向滑移量 strike slip 和傾向滑移量 dip slip)，藉由估計的斷層參數即可推算地表任意點位的位移量。

針對 2016 年美濃地震，本研究採用較簡單的單一斷層面，根據中央地震矩張量自動解算系統(AutoBATS)提供的震源機制解，將斷層幾何參數中的走向(strike)與傾角(dip)初始值分別設定為 270.29°與 48.23°，接續利用蒙地卡羅法進行最佳斷層面之搜尋。最終獲得之最佳斷層面參數分別為走向 282.67°、傾角 7.94°與斷層滑移角(rake) 30.64°。美濃地震的地表同震位移場擬合結果如圖 6 所示，其中，黑色箭頭為地表觀測值，藍色箭頭為模型計算值，黃色矩形為斷層面投影至地表的位置。隨後的步驟為利用得到的震源參數推算各網格點的水平地表同震位移網格模型(圖 7)。

除了採用斷層錯位模型推求地表同震位移量之外，本研究另採用 matlab 內建之 linear 內插函數進行直接空間內插，以推求各網格點的水平地表同震位移網格模型(圖 8)。比較利用斷層錯位模型(圖 7)與空間內插法(圖 8)得到的地表同震位移結果可以發現，雖然採用斷層模型建立地表同震位移模型較不容易，然而，反觀利用空間內插法建立的地表同震位移模型，其較容易受到錯誤資料的影響而得到不合理的結果，因此斷層錯位模型仍應為建置地表同震位移模型的主要方法。最後，由於同震位移場並不涉及斷層分區的問題，其只與地震震源的特性有關，因此，本研究採用與速度模型一致的網格點數，建立全臺美濃地震的水平方向地表同震位移網格模型(圖 9)。

(三) 地表變形模式之建立與測試

在地表變形主要是受到斷層與地震活動影響且不考慮大地震震後變形效應之前提下，地表各測站的坐標時間序列可以利用式 2 來描述。換言之，只要知道某一時刻的測站坐標、不同時期的地表速度模型，以及不同的顯著地震之地表同震位移模型，即可以透過式 2 來推求不同時刻下的各測站坐標值。

內政部國土測繪中心於 2013 年與 2016 年分別完成臺灣區域 1341 個基本控制點的檢測工作，並進行最小約制於金門站(KMNM)坐標的網形平差計算，因此，本研究直接採用此兩次的基本控制點坐標檢測結果，對本研究建立的地表變形模型進行驗證與精度分析。

在未使用地表變形模型進行坐標修正時，2013 年與 2016 年檢測成果的坐標差

異量及方向如圖 10，可得知兩個時期坐標差異的型態與全臺地表速度場相當類似，在臺灣的南部與東部有最大的差異量，約為 200-400 mm。計有 288 個測站(21%)的坐標差異量在 2 公分以內，608 個測站(45%)的坐標差異量在 6 公分以內(圖 10)。

接續，本研究以 2013 年的基本控制點檢測坐標為起算值，考慮各控制點於 2013 年至 2016 年間之速度場，推算 2016 年的基本控制點坐標，再與 2016 年實際觀測得到的坐標檢測成果進行差異比較(圖 11)。由結果發現，即使在臺灣的南部與東部地區，其坐標之差異均有顯著的改善(圖 11)。計有 680 個測站(51%)的坐標差異量在 2 公分以內，1219 個測站(91%)之坐標差異量在 6 公分以內(圖 11)。

本研究進一步將美濃地震造成之同震位移場引入計算，以推求 2016 年的基本控制點坐標，將其再與 2016 年度實際觀測的檢測坐標成果進行差異比較(圖 12)。可以發現，雖然美濃地震造成的同震位移量並不顯著，但是對於臺灣西南部基本控制點的坐標差異仍有進一步的改善效果(圖 12)。並計有 686 個測站(51%)的坐標差異量在 2 公分以內，1221 個測站(91%)的坐標差異量在 6 公分以內(圖 12)。

另外，由圖 12 可得知，坐標差異在 6 公分以上的基本控制點，其坐標差異方向並無顯著之系統性，顯示造成 2013 年至 2016 年之間的坐標差異因素主要來自於板塊運動所造成的地表速度場，其次則是來自於顯著地震造成的同震地表位移場。此外，本研究亦發現剩餘未能被適當估算的基本控制點(坐標差異在 6 公分以上之點位)多分布在山區，換言之，山區的邊坡效應，如大規模崩塌，可能是局部坐標差量的影響因素來源。

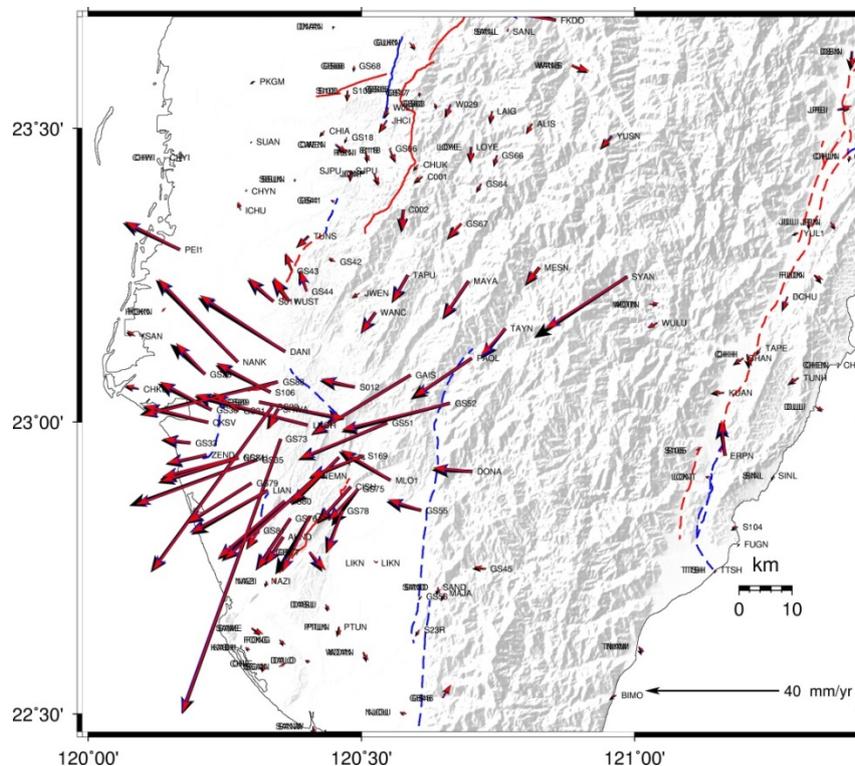


圖 5 2016 年美濃地震水平地表同震位移場。黑色箭頭為超快速星曆的地表同震位移成果、藍色箭頭為快速星曆之地表同震位移成果、紅色箭頭為最終精密星曆之地表同震位移成果。紅色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

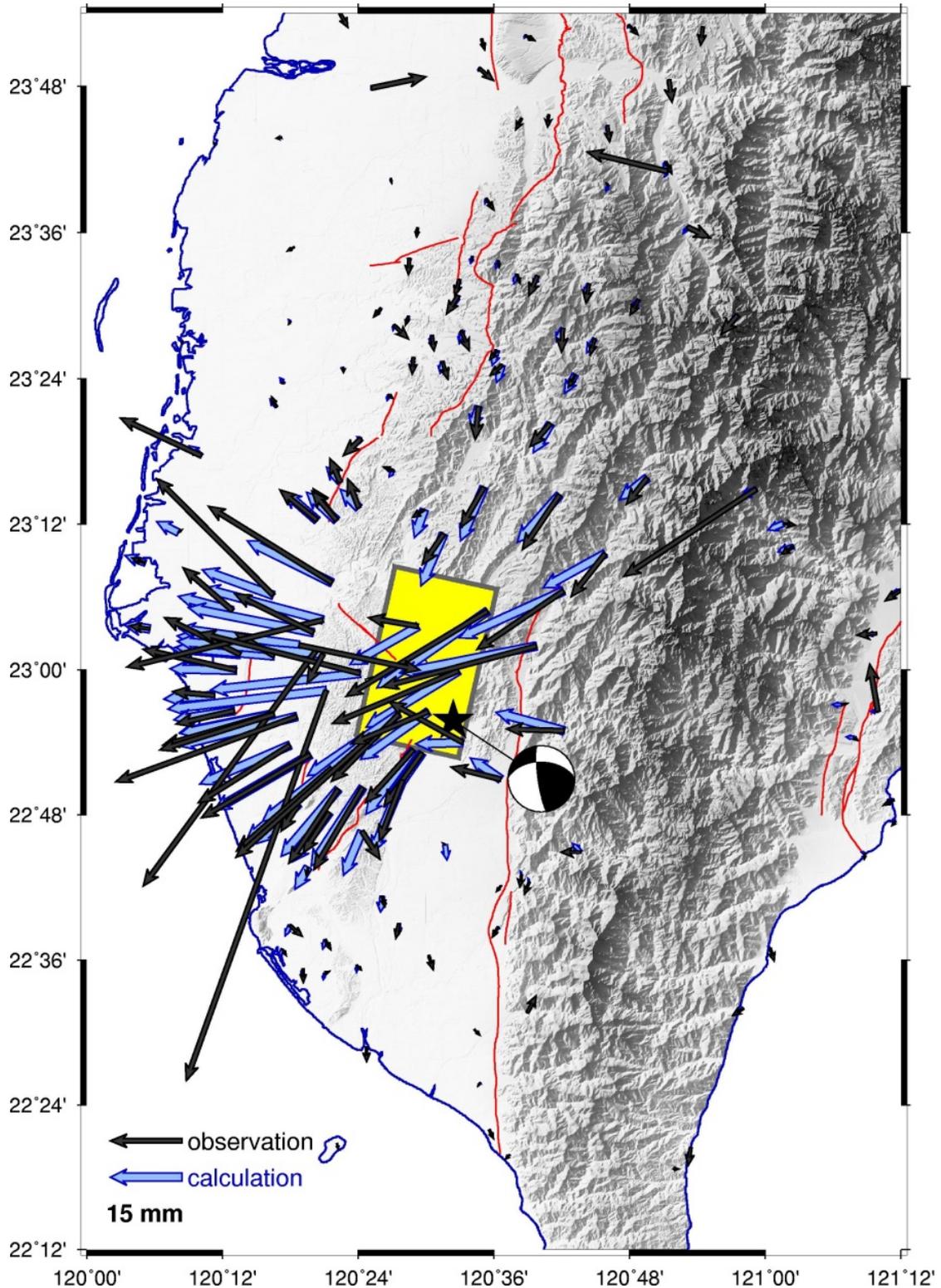


圖 6 2016 年美濃地震水平地表同震位移場及其最佳斷層模型之擬合結果。黑色箭頭為水平同震位移場觀測值，藍色箭頭為最佳斷層模型之水平同震位移場計算值。黃色矩形為斷層面投影至地表的位置。黑色星號為主震震央位置，海灘球為本次地震之震源機制解。紅色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

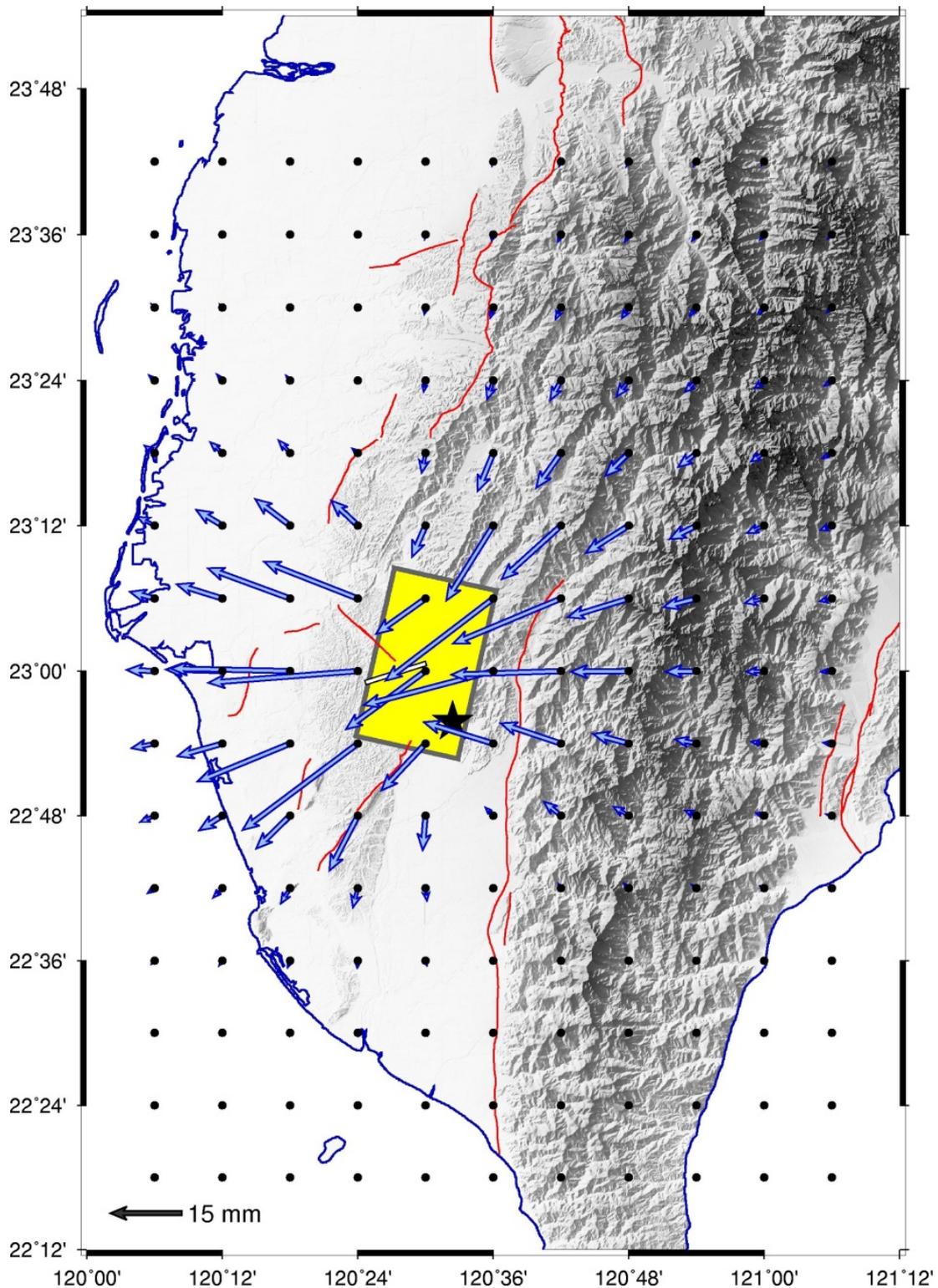


圖 7 2016 年美濃地震斷層錯位模型推求之水平地表同震位移網格模型。藍色箭頭為最佳斷層模型推求之水平地表同震位移網格模型。黃色矩形為斷層面投影至地表的位置，白色粗線指示斷層滑移方向。黑色星號為主震震央位置。紅色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

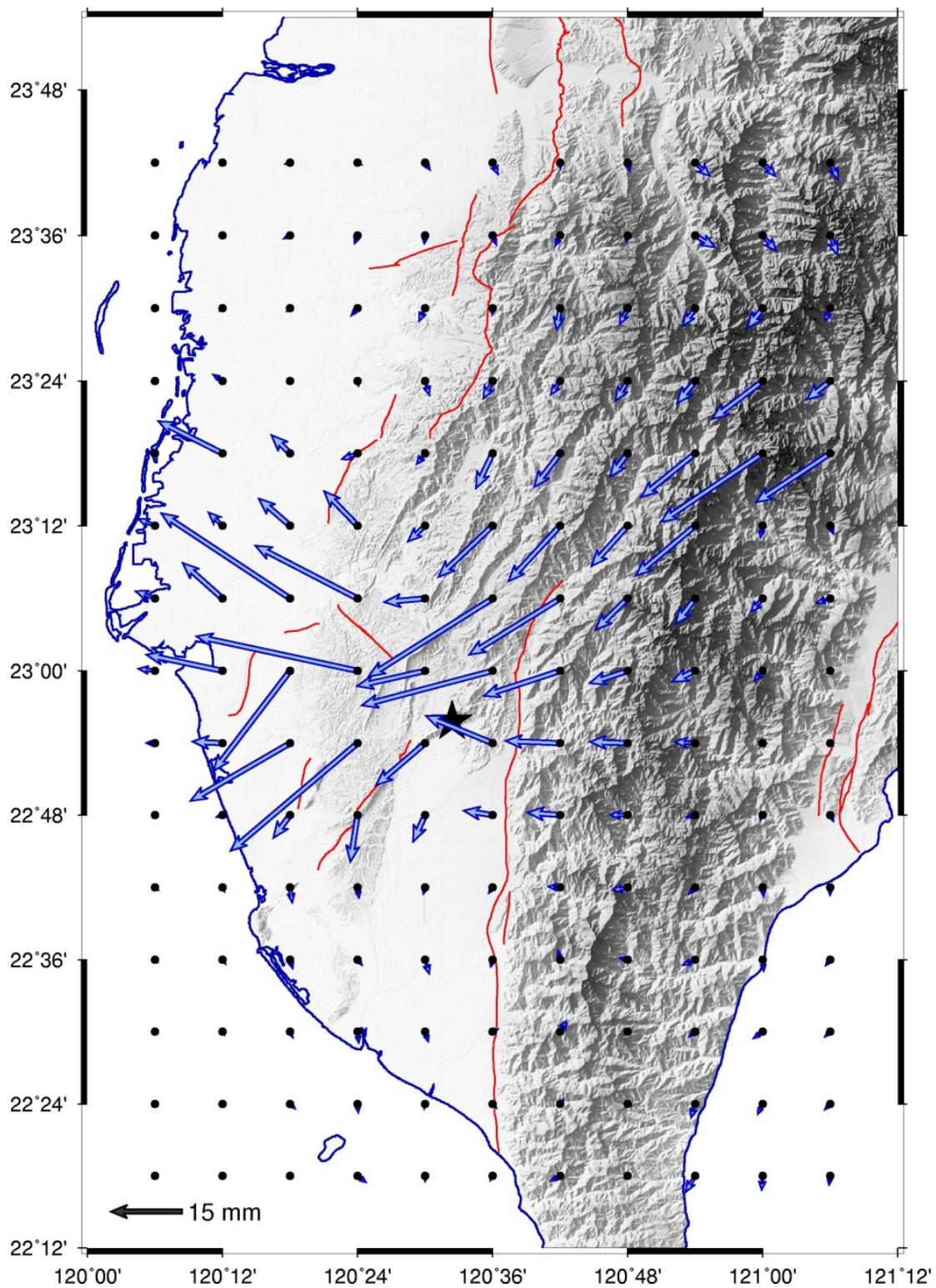


圖 8 2016 年美濃地震空間內插法推求之水平地表同震位移網格模型。藍色箭頭為空間內插法推求之水平地表同震位移網格模型。黑色星號為主震震央位置。紅色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

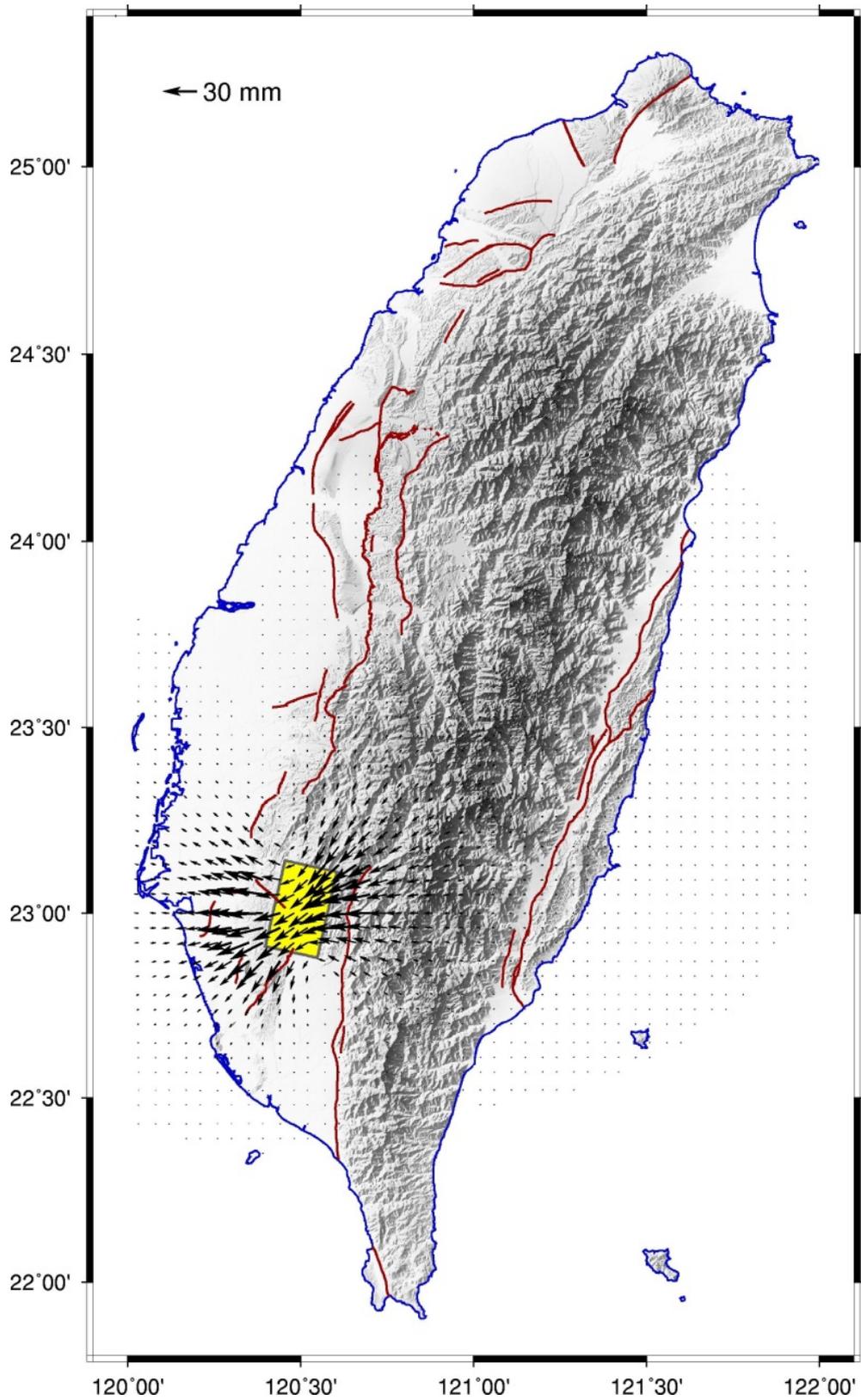


圖 9 2016 年美濃地震之全臺水平地表同震位移網格模型。黑色箭頭為最佳斷層模型推求之水平地表同震位移網格模型。黃色矩形為斷層面投影至地表的位置。紅色實線為經濟部中央地質調查所公告之活動斷層。

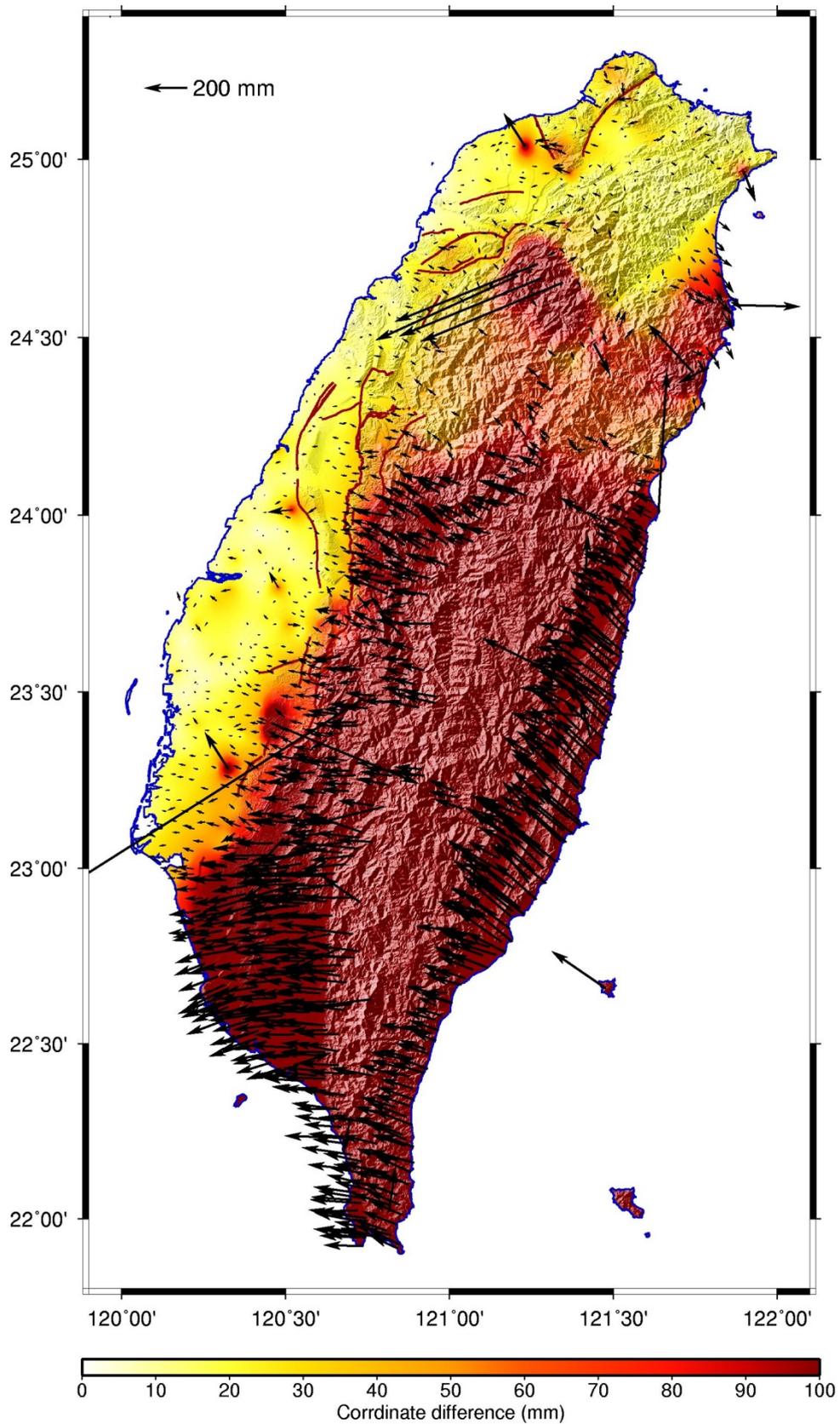


圖 10 2013 年與 2016 年兩時期基本控制點之原始坐標差異圖。黑色箭頭為原始坐標差異向量。底圖色階代表坐標差異量。

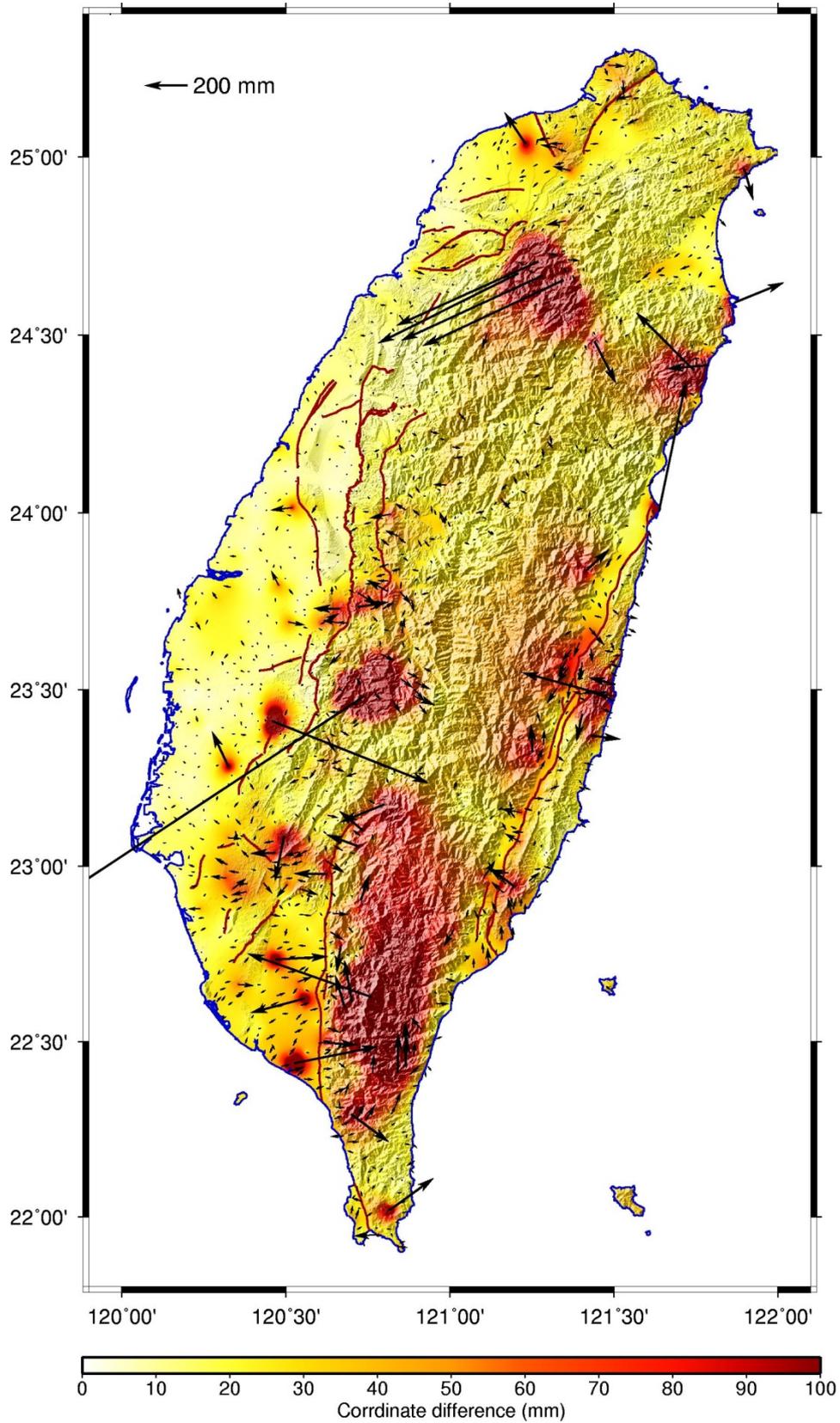


圖 11 2013 年與 2016 年經速度模型修正之基本控制點坐標差異圖。黑色箭頭為坐標差異向量。底圖色階代表坐標差異量。

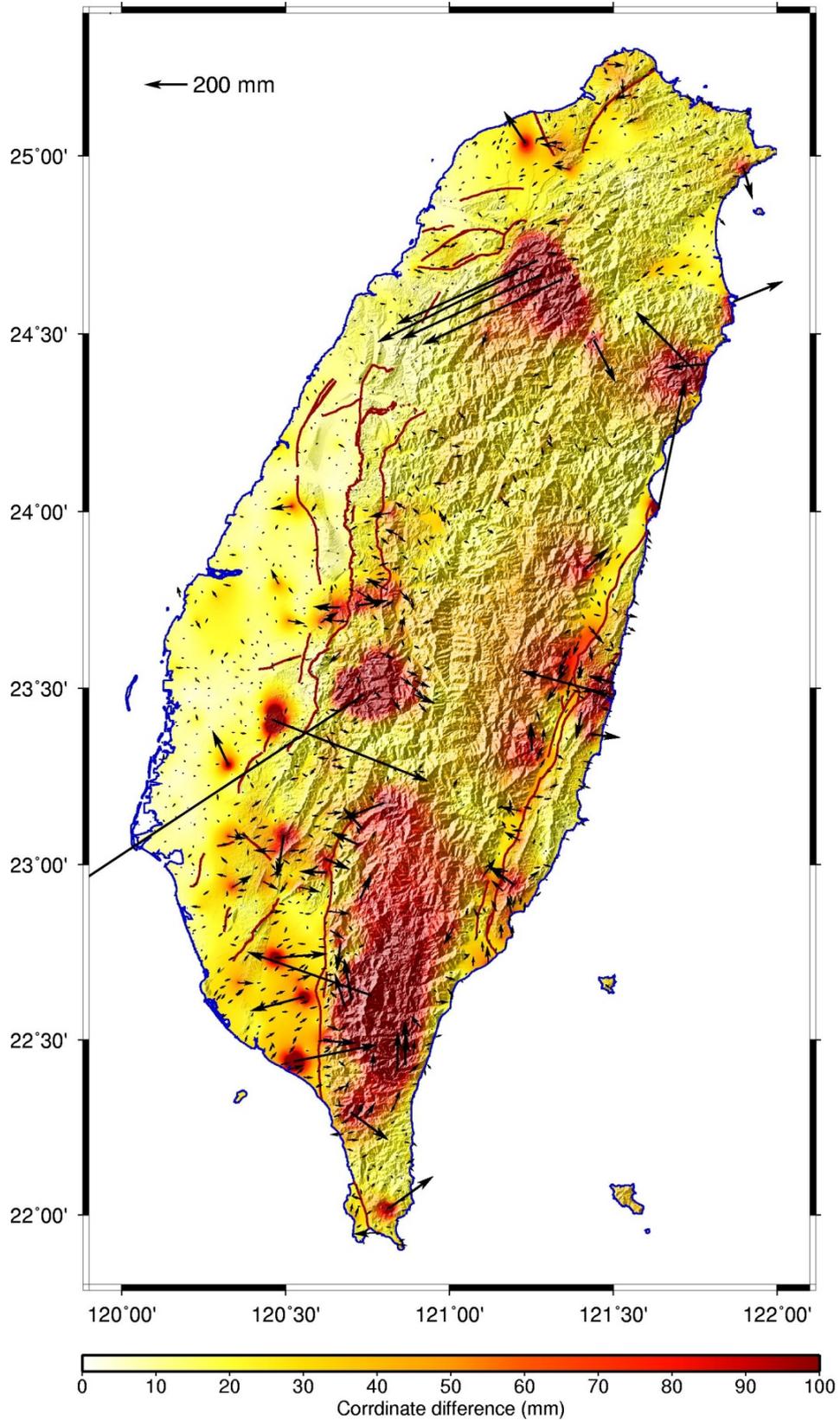


圖 12 2013 年與 2016 年經速度模型與同震模型修正之基本控制點坐標差異。黑色箭頭為坐標差異向量。底圖色階代表坐標差異量。

三、地表變形模式和 e-GNSS 與現行體制之結合與應用

由於臺灣地區位於活躍的板塊邊界，如何應用現有之測繪資源，以有效率地解決國家坐標系統隨時間而漸失去其原有的精度，即是一大挑戰。邱元宏(2016)、Han(2010; 2011)與 Chiu and Shih(2014)等提出，將大地基準站坐標以框架轉換方式進行大地基準之轉換，為一可思考之大地基準維護方式。邱元宏(2016)提出的轉換方式可分成三大類：(1)先在法定參考框架上進行時間外插，再進行框架轉換至現行 ITRF 框架；(2)直接以靜態基準與現行 ITRF 框架之間的框架轉換參數進行轉換；(3)先將法定參考框架坐標成果以聯合模式(ITRF combination model)進行框架轉換至現行 ITRF 框架，再以聯合模式求得之現行 ITRF 點位速度場進行時間外插。然而，此方法需要面對兩個主要的問題：(1)需要儘可能增加臺灣參與國際聯測的 IGS 站個數，以能獲得較佳的結果；(2)現行之靜態基準與 ITRF 框架並無法處理臺灣地區複雜之應變分布型態，導致國家坐標系統精度無法極為有效的提升；(3)在法定坐標系統與各 ITRF 框架之轉換過程會累積過大的誤差。

在國外的研究中，紐西蘭於 1998 年發展新的大地基準(New Zealand Geodetic Datum 2000, NZGD2000)，為了延長 NZGD2000 的使用年限，紐西蘭利用境內的 GPS 觀測站資料建立區域速度場模型，以此推估各時刻的國家坐標系統，並反映區域內因板塊相對運動產生的點位變位量(Grant *et al.*, 1995)。日本亦於 2002 年公佈其大地基準(Japanese Geodetic Datum 2000, JGD2000)，由於位處西太平洋數個板塊的交界帶上，日本政府建置了高密度 GPS 連續站網用以監測區域的板塊活動，藉此建立速度場模型作為坐標變位量之修正，以維護國家坐標系統的精度(Yoshiyuki *et al.*, 2007)。

在臺灣，本研究之驗證結果指出，做為半動態基準之地表變形模型確實具有相當高的可行性，可以很好地扮演坐標轉換的角色，處理臺灣地區複雜之應變分布型態，提供不同時刻間各測站坐標的推算。因此，持續蒐集並且持續常態解算臺灣全區的 GPS 連續觀測站、移動站與內政部國土測繪中心基本控制點的觀測資料(包含蒐集的水準資料)。同時，在顯著地震事件發生時，立即進行震源區基本控制點的觀測，以掌握可靠的地表同震位移場。如此，將可以有效掌握長期且高密度分布的三維地表變位資訊，有助於建立可靠的速度模型以及高精度的半動態基準，藉以精進國家坐標系統變形模式。

此外，由於內政部國土測繪中心現行之 e-GNSS 系統可以每日即時解算各基準站之坐標，故本研究也建議可以配合 e-GNSS 系統，藉由 e-GNSS 基準站的坐標時間序列來協助查核變形模型之預估坐標與實際坐標間之差異量，檢驗地表變形模型中速度模型的精度變化。幫助決定地表速度場更新時機之判斷。至於實際的速度模型與同震位移模型更換時機，可以在下一階段的研究工作中，針對控制測量、地籍測量之精度需求及地球科學的相關研究中進一步討論。另一方面，本研究獲得的地表變形模型可以進一步提供作為 e-GNSS 系統基準站坐標更新的參考資訊，現行規劃 2 年更新 1 次基準站坐標之作業目的，在於維護基準站之間的幾何相對精度，提高待測點坐標之解算精度，並利用傳統坐標轉換方式將 e-GNSS 系統得到的坐標轉

換成國家公告坐標。然而，利用半動態基準模型，即可推估控制點之間合理的網形幾何關係，維持待測點坐標之相對精度。此外，半動態基準本身即扮演著坐標轉換之功能，可以將任一時刻的坐標高精度地轉換至公告坐標值。

就長遠規劃而言，採用半動態基準取代靜態大地基準，可以有效降低大地基準更新維護的成本。然而在全面推動半動態基準之前，地表速度模型之建置可以提供全臺地表應變速率分布的資訊(圖 13)。目前已知臺灣地區的最大應變速率可達 2-5 $\mu\text{strain/yr}$ (圖 13)。若假設控制點的平面坐標精度規範為 2-6 公分之間，則當地表應變速率達 2 $\mu\text{strain/yr}$ 時，約 10 年時間每 1 km 的基線長度即會產生約 2 公分之差異。換言之，在實施現行靜態大地基準的條件下，約 10 年臺灣即需要進行大地基準的更新維護。

此外，由地籍測量的角度觀之，只要施測地區並未跨越顯著的應變速率帶，則其施測結果將不受斷層運動的影響，因此一張詳細的全臺地表應變速率分布資訊，對於地籍測量之規劃是相當有用的。然而，目前全臺地表應變速率分布的資訊並不細緻，在應用上有其侷限，因此，未來可以引入內政部國土測繪中心約 1400 個基本控制點的檢測資料(圖 13)，針對應變速率大於 2 $\mu\text{strain/yr}$ 的高應變速率地區（包含西部山麓地區、宜蘭地區與花東地區）進行加密與分析，以能獲得詳細可用的全臺地表應變速率分布資訊，協助各地方政府於地籍測量作業的區塊劃分。

四、未來高程半動態基準之嘗試與挑戰

活躍板塊邊界對於坐標系統的影響不單只是作用在平面坐標基準上，板塊邊界之活動也會產生地表垂直變形而造成高程基準的精度降低。同樣地，現行之臺灣高程基準也是靜態框架(Yang *et al.*, 2003)，因此，本研究的下一階段將嘗試針對高程半動態框架之建立進行探討分析並藉此瞭解面臨的挑戰之處(內政部國土測繪中心，2011)。

地表垂直變形如同水平變形一樣，主要由於板塊遠場運動造成之地表垂直速度與瞬時變形所造成的地表垂直位移所構成(Nikolaidis, 2002)。在地表垂直速度場方面，由於其活動特性和水平速度場一樣，在大地震之間並不會有顯著的速度差異出現，因此，在建置震間時期垂直變形的模型方面，可以採用與水平分量一致的推估方法，亦即藉由運動模式進行地表垂直變形的系統性估算與預測，建立模式化板塊運動(或塊體運動)。

然而，在水平變形模式的建置與精進工作中，由於控制水平地表變形的機制主要來自於構造活動，諸如遠場之板塊運動或是塊體運動，以及近場的活動斷層滑移速率時空變化，因此其運動模式較可以進行系統性的估算與預期，至於比較次要的影響，例如大規模崩塌或其他因素，因為其影響範圍較小，因此可以在未來再思考如何將此因素納入模式中；然而，對於臺灣地區的地表垂直變形模式而言，除了如同地表水平變形會受到構造活動的控制之外，其他例如地下水抽取之人為作用，或是因為氣候變化導致的地下水位改變，亦或是地表大規模崩塌的發生，均會對地表垂直變形產生顯著時空變化，且這些變形特徵皆非線性變化。因此，應該如何在本

研究的下一階段工作中，納入這些非線性之地表垂直變形以精進高程基準，將是建立高程半動態基準的重要任務。

最後，就高程半動態基準的發展而言，在資料的蒐集與分析上，除了持續解算分析內政部國土測繪中心蒐集提供的臺灣地區 GPS 連續觀測站資料，持續分析經濟部中央地質調查所 GPS 移動站與精密水準歷年觀測成果，以及內政部國土測繪中心的臺灣一等水準網水準測量成果等，獲得高精度且穩定的震間垂直速度場之外；還需要蒐集經濟部水利署水準測量成果以有效掌握非自然因素造成的地表垂直位移，例如前述的地層下陷。此外，在地層下陷區也將需要透過短周期高頻率的速度場更新機制，以達到高程基準更新維護之目的，並評估應用下陷區域內的 GNSS 監測站橢球高變化速率等資訊，以輔助維持區域內高程系統的精度。

五、結 論

半動態基準包含了靜態大地基準及地表變形，靜態大地基準可以依臺灣現行之 TWD97[2010]來執行，而半動態基準建立的基礎則在於地表變形模式的建立。地表變形模式包含了「速度網格模型」和「位移網格模型」。為了建立臺灣地區之速度網格模型，本研究完成全臺 2000 年 01 月至 2016 年 09 月 437 個 GPS 連續站資料之計算，獲得的全臺水平速度場，並結合 785 個經濟部中央地質調查所 2002 年至 2015 年之 GPS 水平速度場，最後利用克立金空間內插法建立臺灣地區的水平速度網格模型。此外，地表同震位移場的估算亦是精進現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式的重要一環。本研究比較不同精度星曆計算得之同震位移場差異，近乎一致的計算結果顯示，利用超快速星曆求解 GPS 資料即可在最短時間內建立高精度之近即時地表同震位移場。同時在震源模型之建立上，亦指出單一斷層滑移量模型所獲得之位移網格模型較空間內插模型所得到的結果更加合理。

本研究進一步利用半動態基準之地表變形模型檢核內政部國土測繪中心 2013 年與 2016 年基本控制點檢測成果。在未使用地表變形模型進行坐標轉換前，兩個時期的坐標差異量及方向與全臺地表速度場相當類似。在將地表變形模型引入計算後，可推求 2013 年在 2016 年時的計算坐標，將其與 2016 年實際觀測的檢測坐標成果進行差異比較發現，兩者有相當高的一致性，計有 51% 的測站坐標差異量在 2 公分以內，91% 的測站坐標差異量在 6 公分以內。此外，本研究亦發現剩餘未能被適當估算的基本控制點(坐標差異在 6 公分以上之點位)多分布在山區，可能由如大規模崩塌之區域活動所造成。

本研究也建議半動態基準可以配合內政部國土測繪中心現行之 e-GNSS 系統，利用 e-GNSS 基準站的坐標時間序列協助檢驗地表變形模型中速度模型的精度變化，幫助決定地表速度場更新時機之判斷。而利用半動態基準模型，也可推估控制點之間合理的網形幾何關係，維持待測點坐標之相對精度。換言之，半動態基準本身即扮演著坐標轉換的功能，可以將任一時刻的坐標高精度地轉換至公告坐標值。

最後，就高程半動態框架的發展而言，除了解析長期穩定的震間垂直速度場之外，未來還需要蒐集經濟部水利署水準測量成果以掌握如地層下陷等非自然因素造

成的地表垂直位移，以達到高程基準更新維護之目的。

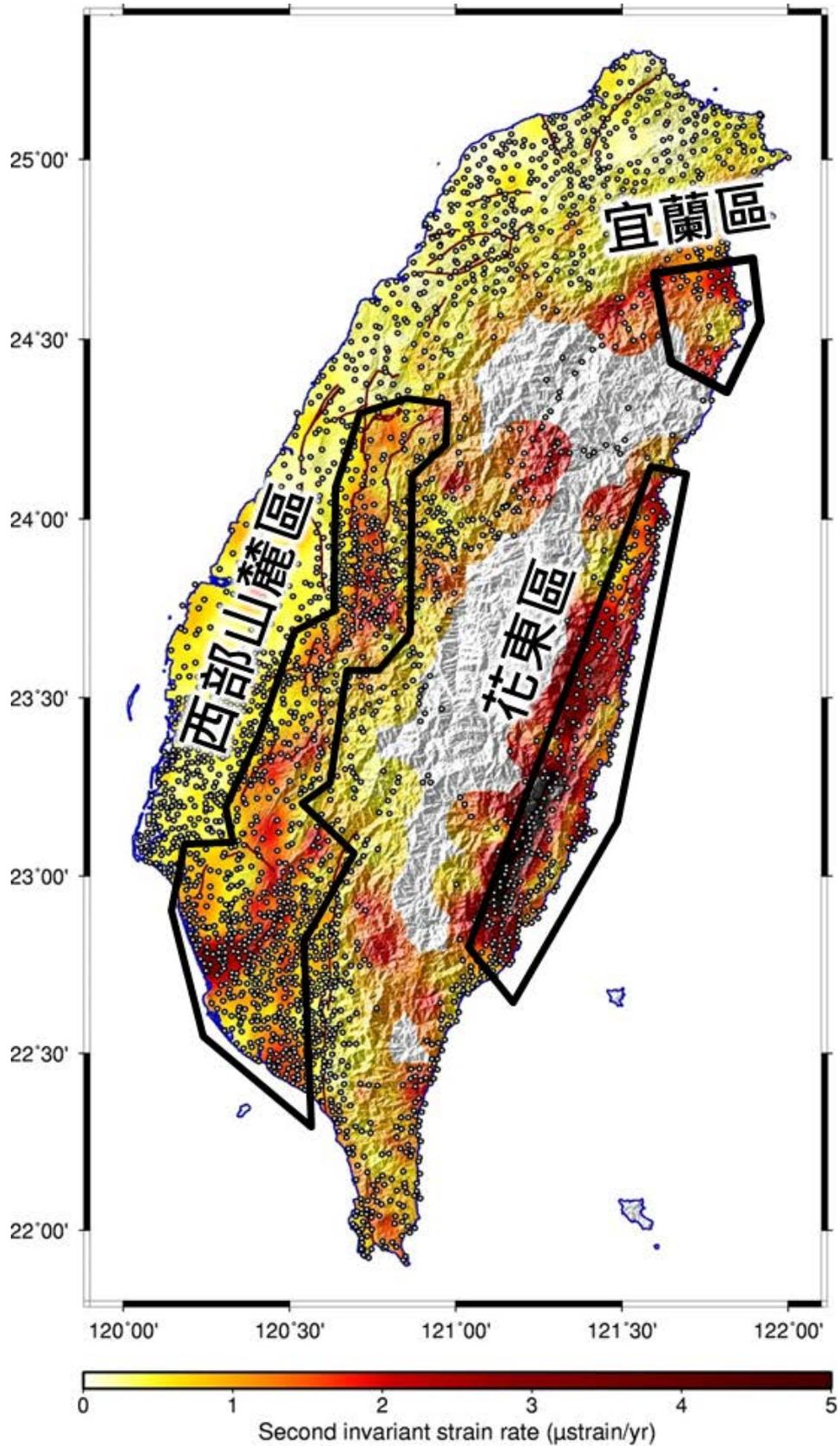


圖 13 全臺地表應變速率場與測量控制點分布圖。白色圓圈為測量控制點。底圖色階代表應變速率值。

致 謝

作者們特別感謝匿名審查委員提供之寶貴審查意見，使本文內容更盡完善，謹此致謝。同時，本研究承蒙內政部國土測繪中心 102-105 年度「建置及精進現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式工作」案提供 GNSS 觀測及相關研究資料與經費支援，使本研究得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

- 內政部國土測繪中心，2011，《100 年度臺灣地區發展高程現代化作業技術先期研究 期末報告》，國立交通大學。
- 內政部國土測繪中心，2012，《101 年大地基準及一九九七坐標系統 2010 成果工作 總報告》，內政部國土測繪中心。
- 內政部國土測繪中心，2013，《102 年度建置現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式 工作總報告》，國立成功大學。
- 內政部國土測繪中心，2014，《103 年度臺灣地區 GPS 連續觀測站資料解算工作案 期末報告》，國立臺北大學。
- 內政部國土測繪中心，2015，《104 年度臺灣地區 GPS 連續觀測站資料解算工作案 期末報告》，國立臺北大學。
- 內政部國土測繪中心，2016，《105 年度精進現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式 工作總報告書》，國立臺北大學。
- 邱元宏，2016，《時變基準於臺灣基本測量與地籍測量影響探討》，國立交通大學土 木工程學系博士論文。
- Bos, A. G., W. Spakman, and M. C. J. Nyst, 2003, Surface deformation and tectonic setting of Taiwan inferred from a GPS velocity field, *J. Geophys. Res.*, 108, 2458, doi:10.1028/2002JB002336, B10.
- Chang, C.-P., T.-Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J.-C. Lee, and S.-B. Yu, 2003, Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: Constraints from GPS observations and tectonic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 115-127.
- Ching, K.-E., K. M. Johnson, R.-J. Rau, R. Y. Chuang, L.-C. Kuo, and P.-L. Leu, 2011, Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 301, 78-86.
- Ching, K.-E. and K.-H. Chen, 2015, Tectonic effect for establishing a semi-dynamic datum in Southwest Taiwan, *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-14.
- Chiu, Y.-H., and P. T.-Y. Shih, 2014, National Datum Uncertainty due to Reference Frame Transformation: Case Study for the Geodetic Datum of Taiwan, *Journal of Surveying Engineering*, 140(3): 05014002.
- Grant, D. B. and M. B. Pearse, 1995, Proposal for a dynamic national geodetic datum for New Zealand, IUGG XXI General Assembly Boulder Colorado, 2-14.

- 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, IUGG99 General Assembly, Birmingham UK, 18-30.
- Han, J. Y., 2010, Noniterative approach for solving the indirect problems of linear reference frame transformations, *Journal of Surveying Engineering*, 136(4), 150-156.
- Han, J. Y., S. W. Yu, and B. H. W. van Gelder, 2011, Time-variant reference frame transformations in a deforming area, *Survey Review*, 43(321), 284-295.
- Hsu, Y.-J., S.-B. Yu, M. Simons, L.-C. Kuo, and H.-Y. Chen, 2009, Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, 479, 4-18.
- Lin, A.-T., A. B. Watts, and S. P. Hesselbo, 2003, Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Seamargin in the Taiwan region, *Basin Res.*, 15, 453-478.
- Nikolaidis, R., 2002, Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System, Ph.D. Thesis, University of California, San Diego.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000, Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *PAGEOPH*, 157, 2303-2322.
- Tregoning, P., and Jackson, R., 1999, The need for dynamic datums, *Geomatics Research Australasia*, 71: 87-102.
- Ward, S. N., 1994, A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1293-1309.
- Yang, M., C. L. Tseng, and J. Y. Yu, 2001, Establishment and maintenance of Taiwan geodetic datum 1997, *J. Surv. Eng.*, 127, 119-132.
- Yang, M., K. H. Chen, and S. W. Shiao, 2003, A new height reference network in Taiwan, *Surv. Rev.*, 37, 260-268.
- Yoshiyuki T., S. Hiroaki, S. Jun, I. Kazumi, T. Tomoo, H. Hideaki, K. Tamotsu, M. Shigeru, H. Yuki, T. Mikio, K. Yuki, and I. Tetsuro, 2007, Efficient maintenance of the Japanese geodetic datum 2000 using crustal deformation models – PatchJGD & semi-dynamic datum, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 54.
- Yu, S.-B., and H.-Y. Chen, 1994, Global positioning system measurements of crustal deformation in the Taiwan arc-continent collision zone, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 5, 477-498.
- Yu, S.-B., H.-Y. Chen, and L.-C. Kuo, 1997, Velocity field of GPS Stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, 274, 41-59.
- Yu, S.-B., L.-C. Kuo, R.-S. Punongbayan, and E.-G. Ramos, 1999, GPS observation of

- crustal motion in the Taiwan-Luzon region, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 923-926.
- Yu, S.-B., and L.-C. Kuo, 2001, Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 199-217.
- Yu, S.-B., L.-C. Kuo, Y.-J. Hsu, H.-H. Su, C.-C. Liu, C.-S. Hou, J.-F. Lee, T.-C. Lai, C.-C. Liu, C.-L. Liu, T.-F. Tseng, C.-S. Tsai, and T.-C. Shin, 2001, Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 995-1012.

利用低成本 GNSS/IMU 浮標監測海洋訊號

黃昱倫¹ 林立青² 郭重言^{3*} 施巧慧¹ 江凱偉³ 鄭凱謙⁴ 楊三興⁵ 張瀚文¹

論文收件日期：105.10.22

論文修改日期：106.01.25

論文接受日期：106.05.01

摘 要

海表面高度變化包含不同頻率訊號，例如海嘯、氣象海嘯、海潮、風暴潮以及洋流等，這些變化直接或間接地影響人類生命與財產安全，因此準確監測海水面高成為一個重要的研究課題。現今海水面高度變化都以潮位站、衛星測高、傳統加速度浮標來進行觀測，然而潮位站資料含有地殼變動訊號，衛星測高在沿岸區域觀測精度較低，傳統加速度浮標造價昂貴、體積龐大與受到低頻雜訊的影響，且三者皆無法測得所有頻率之海水面訊號。本研究引入高頻取樣全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)浮標觀測量來觀測海水面變化，另藉由慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)接收之加速度及角速度等資料，提供GNSS訊號遮蔽時資料與浮標傾斜之改正。最後整合GNSS相對定位或精密單點定位成果與IMU觀測量求得水面變化，並將成果與現地波高計、潮位站以及港外波浪觀測資料進行比較。本研究於兩處進行實驗測試，首先於成功大學水工試驗中型斷面水槽內，利用造波機產生固定頻率之規則波，並將GNSS、IMU以及智慧型手機IMU觀測水面變化與波高計資料相互比較，成果顯示觀測之規則波振幅與頻率結果一致。另一實驗地點為台南安平港，GNSS相對定位與安平潮位站資料差值標準差(Standard Deviation, SD)可達 1 公分等級，精密單點定位解之SD最佳可達 3 公分左右，而GNSS和IMU整合解精度並無增進。分別利用GNSS、IMU以及智慧型手機IMU觀測水面結果進行能量頻譜分析與有效波高計算，成果顯示除智慧型手機外，GNSS與IMU可有效偵測實際的波浪頻率，但三者皆無法偵測實際波高振幅變化。因實驗地點位處於港內，浮標傾斜較小，且GNSS天線盤離水面僅 20 公分，故浮標傾斜角改正對觀測結果提升有限。本研究自組的GNSS/IMU浮標，相對於市面銷售之整合儀器價格相對低廉，量測精度也符合海水面觀測所需。

關鍵詞：全球導航衛星系統、慣性量測單元、浮標、海水面

¹ 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系。

² 博士後研究員，中央研究院環境變遷研究中心。

³ 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁴ 副教授，國立中正大學地球與環境科學系。

⁵ 副工程司，經濟部水利署第五河川局。

* 通訊作者，TEL：(06) 2757575 轉 63826，E-mail：kuo70@mail.ncku.edu.tw。

Monitoring Ocean Signals Using Low-Cost GNSS/IMU

Buoys

Yu-Lun Huang¹, Li-Ching Lin², Chung-Yen Kuo^{3*}, Chiao-Hui Shih¹,
Kai-wei Chiang³, Kai-Chien Cheng⁴, San-Hsing Yang⁵, Han-Wen Chang¹

Abstract

Sea surface heights contain ocean signals with different frequencies, including tsunami, meteotsunami, ocean tides, storm surges and currents, which have direct and indirect impacts on the economy and life of the coastal residents. Therefore, accurately monitoring sea surface height is an important and necessary task. Nowadays, tide gauges, satellite altimetry and the traditional accelerometer buoys are commonly used for monitoring ocean surfaces; however, tide gauge measurements contain crustal deformation, altimetric measurements are inaccurate near the coastal regions, and the accelerometer buoys are expensive, bulky and the measurements are contaminated by low-frequency noises. All of them are not capable of sensing ocean signals with all frequencies. In this study, we built the Global Navigation Satellite System (GNSS)/Inertial Measurement Unit (IMU) buoys to measure sea surface heights. GNSS observations are used for buoy positioning and a small, low-cost and self-assembly autonomous IMU, independently collecting continuous acceleration and angular velocity data, could provide positions when GNSS signals are blocked and tilt corrections of the moving buoys. We integrated the Relative Positioning (RP) or Precise Point Positioning (PPP) solutions with IMU data, and then evaluate the performance by comparing with in situ gauges or sea wave buoy observations. In the study, the experiments were performed in two places. One was conducted in the tank of Hydraulics Laboratory of NCKU, Tainan, and the results show that GNSS and IMU both can detect the frequencies and amplitudes of the simulated regular wave heights, also the observed heights agree with those from the water gauge. The other was conducted in the Anping Harbor, Tainan. The Standard Deviation (SD) differences of DGNSS and PPP solutions can reach 1 cm and 3 cm, respectively, compared with Anping tide gauge. And the GNSS/IMU integrated solutions have the same results. In addition, the GNSS, IMU, and smartphone IMU both have an ability to observe the wave frequencies, but not the amplitudes compared with the wave gauge. The tilt correction of the buoy does not significantly improve the accuracy of the

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

² Postdoctoral Fellow, Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica.

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

⁴ Associate Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, National Chung Cheng University.

⁵ Associate Engineer, The 5th River Management Office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.

* Corresponding Author, TEL: +886-6-2757575 ext. 63826, E-mail: kuo70@mail.ncku.edu.tw.

observed heights since the field survey was in the harbor and the height of the antenna height is short at 20 cm only.

Keywords: Buoy, Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Measurement Unit (IMU), Sea surface

一、緒 論

海表面變動包含多種不同頻率的海洋訊號，例如波浪(wave)、海嘯(tsunami)、氣象海嘯(meteotsunami)、海潮(ocean tide)、風暴潮(storm surge)以及洋流(current)等，而這些現象對沿岸地區的居住環境有重大的影響，也可能造成破壞，直接或間接地影響人類生命與財產安全，因此如何有效且精確地監測海洋不同頻率訊號儼然成為一個重要的研究課題。現今海水面高度變化監測技術發展日新月異，常見用於量測海水面高度變化的方法如潮位站(tide gauge)、衛星測高(satellite altimetry)、傳統加速度資料浮標等，各儀器有所屬的觀測特性與適用時機，但亦存在其缺點與限制性。

潮位站建置成本較為昂貴且設址取得不易，觀測資料也受地表垂直變動影響。潮位站資料大多為 6 分鐘取樣，因取樣頻率限制，無法觀測到高頻海洋訊號，例如氣象海嘯，另外潮位站也無法量測波浪變化。衛星測高於沿岸地區因反射波形複雜和地球物理改正精度差，造成海面高度觀測精度較低；又因測高衛星地面重複軌跡週期性，導致無法有效偵測高頻海洋訊號(Deng and Featherstone, 2006)。加速度浮標造價昂貴，浮標本體體積較大、重量較重，操作上需要較多人力來進行組裝與搬運操作，機動性較低；另一方面，將加速度資料轉換成水位頻譜時易受到低頻雜訊的影響，而降低觀測精度(張育璋，2007)。

為克服上述儀器之限制，前人引入全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)浮標來監測海水面高度變動，先前 GNSS 浮標已被證實可以有效蒐集高頻且連續的海水面變化資料(Cheng, 2005)。GNSS 取樣頻率可達數十赫茲，故可量測不同頻率的海洋訊號，短至數秒長至數年週期的訊號。GNSS 浮標造價相較於前述儀器來得便宜，因重量較輕、體積較小，在實際操作上機動性較高，較易於單人進行操作；另一方面，GNSS 浮標可直接精確的量測公分等級海水面橢球高度，且量測精度在空間上是均勻的。為了更有效提升 GNSS 浮標監測海水面變化之精度，前人相繼提出不同的改善方法，如 Kato 等(2000)提出利用 GNSS 浮標搭配即時動態定位技術(Real-time kinematic, RTK)長時間監測外海狀態，透過動態相對定位(Relative Positioning, RP)技術，同時間以多台接收儀進行觀測，如此可大幅降低電離層以及對流層延遲誤差之影響，進而求解出 GNSS 浮標之動態位置；Kuo 等人(2012)提出利用精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)進行 GPS 浮標近即時精密定位，針對 International GNSS Service (IGS)不同星曆產品分析其解算成果，結果顯示利用 IGS 最終產品(Final Product)星曆計算之高程方向均方根誤差為 10 公分等級。

然而，GNSS 觀測時會因觀測地點受遮蔽而導致訊號遺失與周波脫落(Cycle Slips)的情形。另外，在實際觀測中，浮標本體會受到風力、波浪、洋流等因素影響，浮標本身除了上下起伏運動之外，也會有前後、左右方向的搖晃與傾斜運動，導致浮標垂直軸向隨之改變，進而影響觀測的波高資料精度(Tucker, 1956)。為了改善 GNSS 浮標監測海水面變化之精度，本研究利用自行組裝的低成本慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)，搭配高精度的 GNSS 接收儀，組成 GNSS/IMU 系統浮標，因 IMU 觀測較不易受到外在海象環境影響而中斷運作，可透過其所觀測的浮標三軸加速度和姿態角方位資訊，改善因 GNSS 衛星顆數不足或訊號遮蔽時定位精度較差的情況，提供更可靠、更精確的定位成果。另外，IMU 觀測姿態角資料也可用於浮標傾角改正，求得浮標真正垂直變動量。

本研究實驗場地分成兩部分。首先將裝有 GNSS、IMU、智慧型手機 IMU 的浮標放置於國立成功大學水工試驗的中型斷面水槽內進行測試實驗，驗證 GNSS、IMU 與智慧型手機 IMU 是否能有效偵測規則波的振幅與頻率。之後將浮標放置於台南安平商港內進行海上觀測，比較 GNSS/IMU 浮標與港研中心安平潮位站觀測之海水面資料來評估此浮標觀測精度；同時亦分別利用 GNSS、IMU、智慧型手機 IMU 觀測資料進行能量頻譜分析與有效波高計算，並與港研中心港外波浪觀測站實測波高與週期資料比較，以評估各儀器解算成果精度。最後結合 GNSS 與 IMU 觀測資料求得整合解成果，並進行整合解精度評估與有效波高計算。

二、研究方法

(一) 相對定位

相對定位為透過兩台或兩台以上的接收儀同時接收 GPS 衛星所傳遞的訊號，其中一台接收儀的地面坐標已知，稱為固定站，其於接收儀稱為移動站；若接收儀之間的相對距離不遠，則彼此間的衛星訊號傳遞路徑的物理條件相似，可藉由觀測方程式線性組合來大幅降低系統誤差之影響(如衛星時錶差、接收儀時錶差、對流層及電離層延遲誤差等)，接著透過求解移動站與固定站間的基線向量，並根據已知的固定站坐標即可得到各移動站的地面坐標。公式(1)與公式(2)分別為二次差分電碼虛擬距離觀測量與載波相位觀測量(曾清涼、儲慶美，1999)。

$$\Delta\nabla P = \Delta\nabla\rho + \Delta\nabla dtrop + \Delta\nabla dion + \Delta\nabla\varepsilon \quad (1)$$

$$\Delta\nabla\Phi = \Delta\nabla\rho + \Delta\nabla dtrop - \Delta\nabla dion + \lambda \times \Delta\nabla N + \Delta\nabla\varepsilon \quad (2)$$

其中， P 為虛擬距離觀測量； Φ 為載波相位觀測量； $\Delta\nabla$ 為二次差分處理； ρ 為接收儀與衛星之間的實際距離； $dtrop$ 為對流層延遲誤差； $dion$ 為電離層延遲誤差； λ 為載波波長； N 為周波未定值； ε 為其餘雜訊及誤差。

(二) 精密單點定位

精密單點定位的觀測方程式是由非差分觀測量所組成，雖然其觀測量相較於差分後的觀測量來的多，但因其待估參數較多、觀測方程式較複雜，無法如同相對定位一樣可透過差分的方式大幅消除系統誤差的影響。所以，若欲達到高精度、高準確度的定位結果，必須同時使用電碼虛擬距離觀測量與載波相位觀測量；除此之外，須針對衛星軌道誤差進行改正，其他未經模式化的誤差，如衛星姿態誤差、大氣層延遲誤差、接收儀定心定平誤差也都必須加以處理，上述整體的處理程序稱為精密單點定位(He'roux et al., 2001)。公式(3)與公式(4)分別為精密單點定位電碼虛擬距離觀測量與載波相位觀測量。

$$P(Li) = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/Li} + d_{mult/p(Li)} + \varepsilon(P(Li)) \quad (3)$$

$$\Phi(Li) = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/Li} + \lambda_i N_i + d_{mult/\Phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(Li)) \quad (4)$$

其中， P 為虛擬距離觀測量； Φ 為載波相位觀測量； dt 為接收儀時錶誤差； dT 為衛星時錶誤差； d_{orb} 為衛星軌道誤差； d_{mult} 為多路徑效應誤差。

(三) GNSS/INS 整合系統

GNSS 適用於全天候與全時間的導航定位，可長時間維持高精度的特性，提供使用者高精度的定位、定向導航資訊與時間訊息。然而，GNSS 易受到衛星訊號遮蔽、電子儀器干擾及周波脫落的影響，降低導航定位精度。

慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)本身不須依賴外界訊息、不受外界干擾、不發射能量以及隱蔽性高等特性，其適用於任何環境下進行運作，例如：室內、隧道、水底，屬於自主性的導航系統。而 INS 不僅可提供載體的位置與速度，亦可提供載體的姿態角與航向資訊，並且具備高取樣頻率、短時間觀測高精度與高穩定性之優點，但作業前必須進行初始校準(Alignment)工作以及定位誤差會隨時間累積之特性為其主要缺點(El-Sheimy, 2004)。本實驗中浮標本體會受到風力、波浪、洋流等因素影響，產生前後左右各方向的搖晃與傾斜運動，觀測精度亦會受其影響；因此，透過 GNSS 與 INS 整合系統，結合 GNSS 與 INS 兩者所屬優勢互補的特性，以提升整體定位成果精度；表 1 為單一系統與 GNSS/INS 整合系統之優缺點比較。本研究使用 POINTER 軟體進行 GNSS 和 IMU 資料整合，POINTER 為經緯衛星資訊股份有限公司所設計的軟體，可用於解算車載移動式測繪系統(Mobile Mapping System, MMS)或導航應用上的資料。計算時先將 GNSS 資料透過前述 GNSS 軟體進行處理解算後，再將 GNSS 解算成果與 IMU 觀測資料一併輸入至 POINTER 內進行鬆耦合(Loosely Coupled)整合解計算，所輸入的 GNSS 與 IMU 資料須符合其專屬的格式，最終可輸出整合解之三維方向位置、三軸速度、三軸姿態以及精度指標等資訊。

表 1 單一系統與整合系統之比較(胡智祐，2009；姚冠宇，2010)

	GNSS	INS	GNSS/INS
優點	長時間觀測精度高 不受重力影響 精度與時間無關	短時間觀測精度高 姿態資訊較精確 高取樣頻率 訊號不易中斷	高精度的位置與速度資訊 姿態資訊較準確 高取樣頻率 GNSS 訊號遮蔽時仍有導航解 周波脫落偵測
缺點	姿態資訊之雜訊量高 低取樣頻率 易發生周波脫落與訊號失鎖	誤差量隨時間累積 受重力影響 需要初始與空中對準及率定	

(四) 能量頻譜分析與有效波高計算

GNSS/IMU 浮標量測成果可分為 GNSS 三維坐標解和 IMU 加速度與角速度資訊，將 GNSS 坐標解中的高程方向位移，經由傅立葉轉換(Fourier Transform)即可進行能量頻譜分析與有效波高計算；而加速度資料可先透過傅立葉轉換，將資料從時間域轉至頻率域，緊接著轉換成位移變化量，並於濾除低頻雜訊後，得以進行能量頻譜分析與有效波高計算。詳細步驟如下所示：

1. 加速度轉換成位移

利用傅立葉轉換，將加速度從時間域($a(t)$)轉至頻率域($a(\omega)$)，再由公式(5)求得 $x(\omega)$ 後經傅立葉逆轉換，即可得到位移變化時間序列。公式(5)如下所示：

$$x(\omega) = \int v(\omega) = \iint a(\omega) = a(\omega) \times 1/\omega^2 \quad (5)$$

其中， $x(t)$ 、 $x(\omega)$ 為位移變化時間序列與傅立葉係數； $a(t)$ 、 $a(\omega)$ 為加速度變化時間序列與傅立葉係數； ω 為圓頻率($\omega = 2\pi f$)。

2. 濾除低頻訊號

浮標觀測之加速度受到位置、浮標傾角、電子干擾、訊號誤差等影響，含有低頻雜訊，因此在低頻處會出現假像能量(Huang, 1998)。根據美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的標準，海洋波浪能量頻率範圍為 0.03~0.4Hz (張育瑋, 2007)。針對頻率與能量間的關係，本研究利用高斯濾波(Gaussian filter)或高通濾波(High-pass filter)濾除頻率 0.0325Hz 以下的訊號。

3. 能量頻譜分析與有效波高計算

頻率域中的位移變化時間序列 $x(f)$ 是將時間域中的位移變化時間序列經過傅立葉轉換而得，並依照公式(6)可得到能量頻譜密度函數，用以判斷波浪訊號的主要頻率，推測可能的海洋狀態(National Data Buoy Center, 2015)。

$$s(f) = E[x(f) * x^*(f)] \quad (6)$$

其中， $E[]$ 為期望值； $s(f)$ 為能量頻譜密度函數； $x(f)$ 為水位變化的傅立葉係數； $x^*(f)$ 為 $x(f)$ 的共軛複數

有效波高是指瞬間或長時間連續觀測之所有波高值，量值由大到小排列，選取量值的前 1/3 的波高並計算其平均值即為有效波高，有效波高可由公式(7)表示為：

$$WVHT = 4 * \sqrt{\sum (s(f) * d(f))} \quad (7)$$

其中， $WVHT$ 為有效波高； $d(f)$ 為頻率區間，通常介於 $0.005 \sim 0.02 Hz$ ； f_l 為波浪最低頻率($0.0325 Hz$)； f_u 為波浪最高頻率($0.485 Hz$)。

(五) 浮標傾斜角改正

浮標在海上因受到風力、波浪、洋流等現象影響，產生前後、左右方向的搖晃與傾斜運動，因為浮標垂直軸向隨時間改變，進而影響觀測波高的精度，因此本研究將浮標軸向改正回原始的平穩狀態。首先找出浮標瞬時的傾斜角度，再利用傾斜角度計算高度改正量。

圖 1 為浮標傾斜角改正示意圖，透過 IMU 觀測量可以得到三個軸向的姿態變化，進而求得浮標的傾斜角度(γ)。另一方面，因天線盤之天線參考點(Antenna Reference Point, ARP)至浮標赤道(Equator)的距離(ARP_E)已知，並假設浮標赤道至平均海水面(WL)的距離(E_WL)很接近可視為零，當浮標發生傾斜時，透過 ARP_E 與 γ 之間的三角函數關係，可求得天線參考點至海水面的距離(ARP_WL)；最後，ARP_E 與 ARP_WL 兩者之差值即為浮標傾斜所降低的高度，將予以進行高程改正，詳細計算如公式(8)~(10)所示(Riley *et al.*, 2014)。

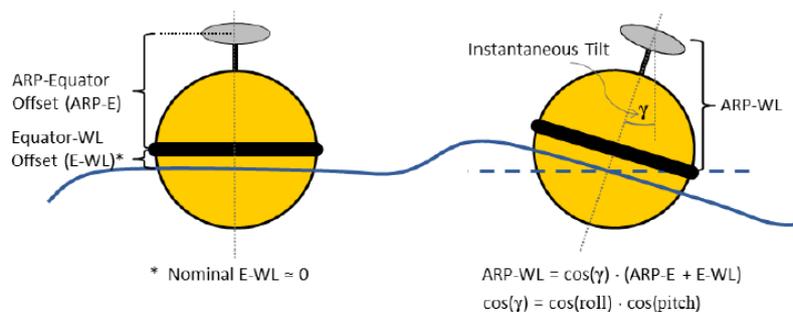


圖 1 浮標傾斜角改正示意圖(Riley *et al.*, 2014)

$$\gamma = \cos^{-1}[\cos(\text{roll}) * \cos(\text{pitch})] \quad (8)$$

$$ARP_{WL} = (ARP_E + E_WL) * \cos(\gamma) \quad (9)$$

$$Height_{Correction} = (ARP_E) - (ARP_WL) \quad (10)$$

三、實驗儀器與地點

(一)GNSS/IMU 浮標

本研究中使用的浮標有兩種，其一為 Waverider GNSS Buoy 如圖 2(左)所示；另一為自行設計與組裝的浮標，下方裝不鏽鋼重物，如圖 2(右)所示。兩浮標皆裝設相同的儀器，其中配備 Trimble R4 雙星系多頻接收儀，天線盤型號為 TRMR4-3，接收儀型號為 Trimble R4-3，接收頻率皆為 1Hz；另外裝設 Mouser ADIS 系列之 IMU(型號 584-ADIS16448AMLZ，相關規格說明請參照 Mouser ELECTRONICS 網站)，其包含陀螺儀、加速度計、磁力計、壓力計、溫度計等感測原件，取樣頻率為 20Hz，相對於市面銷售之整合 GNSS/IMU 儀器，價錢相對低廉；另外，放置 ASUS Zenfone6 智慧型手機於浮標上，其內建低價單頻 GPS、IMU、電子羅盤、陀螺儀等感測器，取樣頻率為 10Hz。



圖 2 本實驗所使用之浮標 (左)Waverider GNSS Buoy；(右)自製 GNSS 浮標

(二)成功大學水工試驗所水槽測試

為了確認 GNSS、IMU 以及智慧型手機量測規則波的效能，先於成功大學水工試驗所的中型斷面水槽進行測試，實驗日期為 2016 年 3 月 31 日。水槽水深為 140 公分，藉由造波機產生週期 3 秒鐘的規則波，造波波高分別為 10、20、30、40、50 公分，各波高分別造波 5 次，每次造波持續時間 2 分鐘，水槽實地擺設狀況如圖 3 所示。測試時大、小浮標上分別裝載 GNSS、IMU 與智慧型手機，將大、小兩浮標一起放置於水槽內進行量測，水槽中設置波高計，其觀測量可視為真值進行比較分析。同時岸上亦架設 GNSS 固定站，用於 GNSS 相對定位解算時之參考主站。



圖 3 成功大學水工試驗所水槽實地擺放示意圖

(三)安平港海上實測

另一實驗於安平商港內進行浮標實地海上測試，實驗日期為 2015 年 2 月 6 日，觀測時間為上午 9 點至下午 5 點，共計 8 小時。放置地點臨近安平潮位站，因此可假設浮標與潮位站量測之海水面高程變化量一致，利用潮位站資料進行浮標量測量評估。本實驗目的為分析比較 GNSS、IMU、智慧型手機之觀測量與潮位站、港外波浪觀測站實測資料之差異，驗證各種不同量測儀器的成果與其可行性，各儀器的型號種類等資訊與前述水槽測試相同。現場浮標擺設狀況如圖 4 所示。

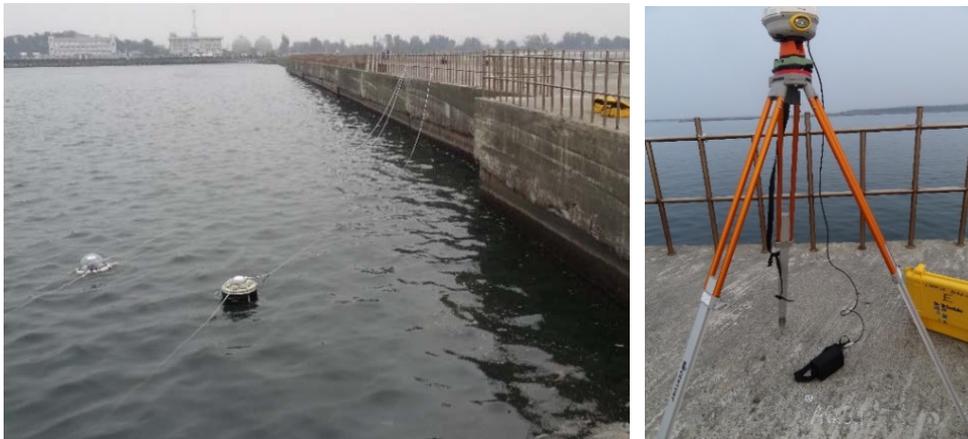


圖 4 安平港現場儀器擺設；(左)兩浮標移動站，(右)岸上固定站

四、實驗成果

(一) 成功大學水工試驗所水槽測試成果

因各波高觀測成果相似，本文僅呈現大浮標 GNSS、IMU 與 ZenFone6 智慧型手機於波高 10 與 50 公分最佳解成果圖(圖 5~10)。圖 5~7 為水面高度位移時序成果，由圖可看出各儀器大致可偵測出規則波變化趨勢，唯波高較大時(例如 50 公分)，因浮標本身吃水量較大，導致所測得的高度變化量相較於波高計資料來得小，使得兩者間有較大差異；另外，因浮標放置於水槽內，GNSS 成果會受到水槽兩側水泥壁之環境遮蔽的影響，導致某些時段的觀測成果與波高計資料差異較為明顯。圖 8~10 顯示出不論在何種儀器與波高下，能量頻譜圖皆反應出在頻率 $0.333Hz$ 為能量最強處，與造波機產生週期 3 秒的規則波相符合。表 2 為兩浮標各儀器與波高計觀測之有效波高比較，分別計算差值得平均值和標準偏差(Standard Deviation, SD)。由表可看出大浮標觀測精度相對比小浮標好；另外，以大浮標為例，因 GNSS 易因水槽環境導致訊號遮蔽，例如在波高 50 公分時，對照於觀測當時的觀測檔品質(如圖 11)，其衛星顆數較少、高程標準偏差較大等因素，使得觀測結果受到影響，整體差值平均可達 4 公分，標準偏差大致為 1~3 公分；然而，以短時間的觀測而言，因 IMU 與 ZenFone6 不受訊號遮蔽之影響，成果略優於 GNSS，整體差值平均皆不超過 2 公分，標準偏差皆低於 1 公分。

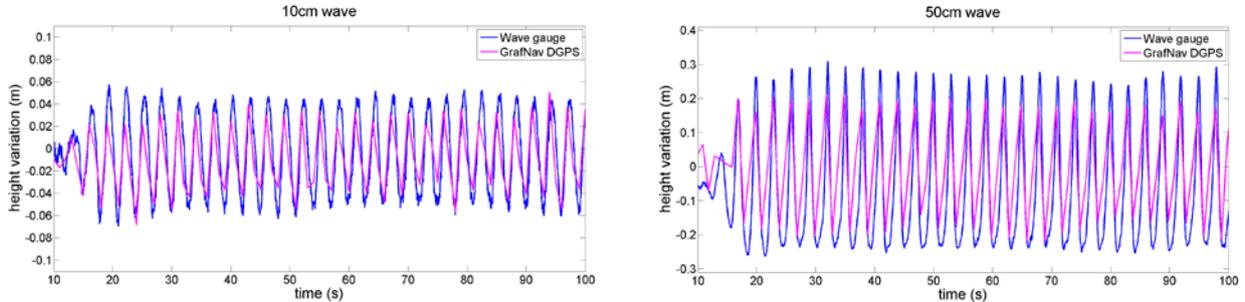


圖 5 GNSS 水面高度位移時序圖；(左)波高 10cm，(右)波高 50cm

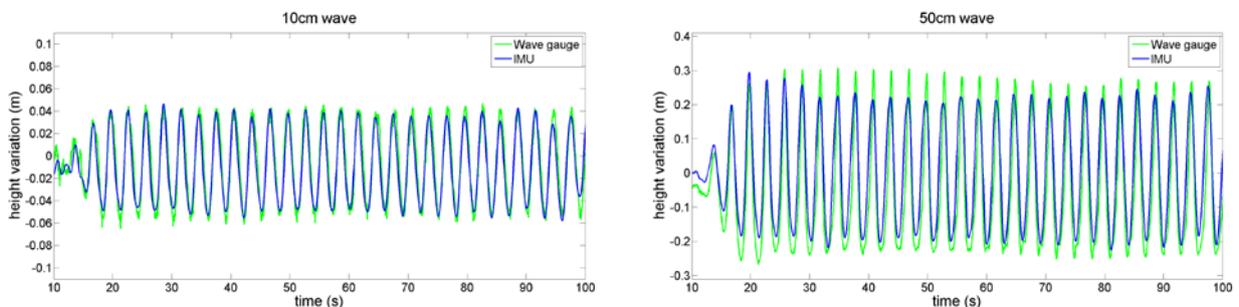


圖 6 IMU 水面高度位移時序圖；(左)波高 10cm，(右)波高 50cm

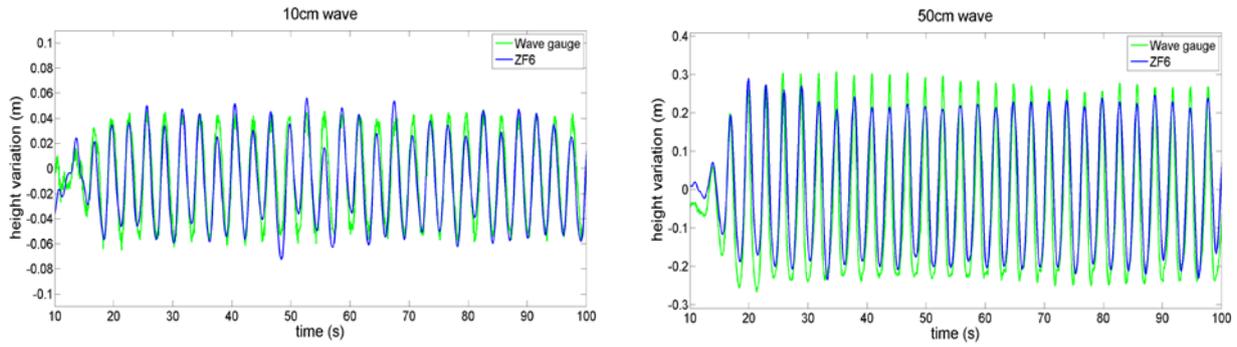


圖 7 ZenFone6 水面高度位移時序圖；(左)波高 10cm，(右)波高 50cm

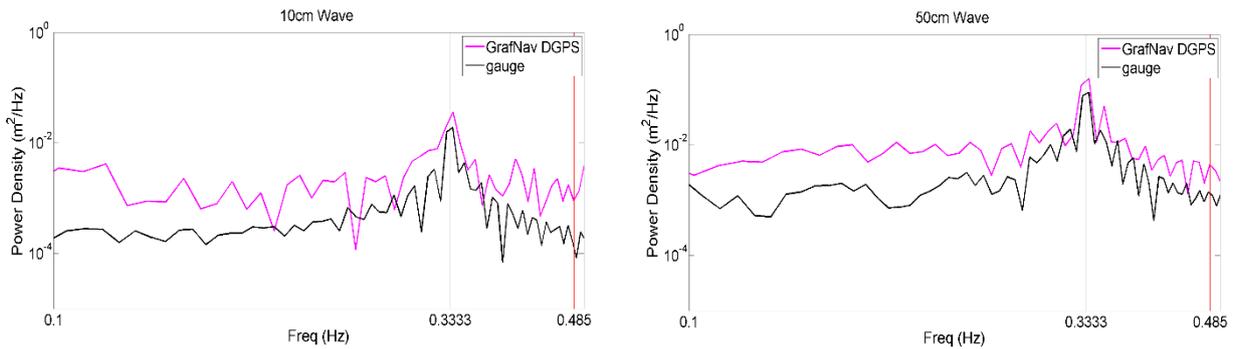


圖 8 GNSS 能量頻譜圖；(左)波高 10cm，(右)波高 50cm

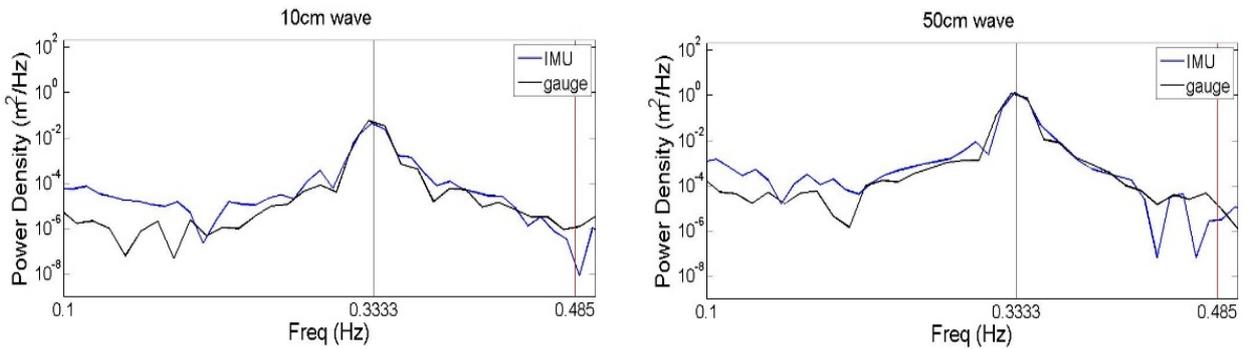


圖 9 IMU 能量頻譜圖；(左)波高 10cm，(右)波高 50cm

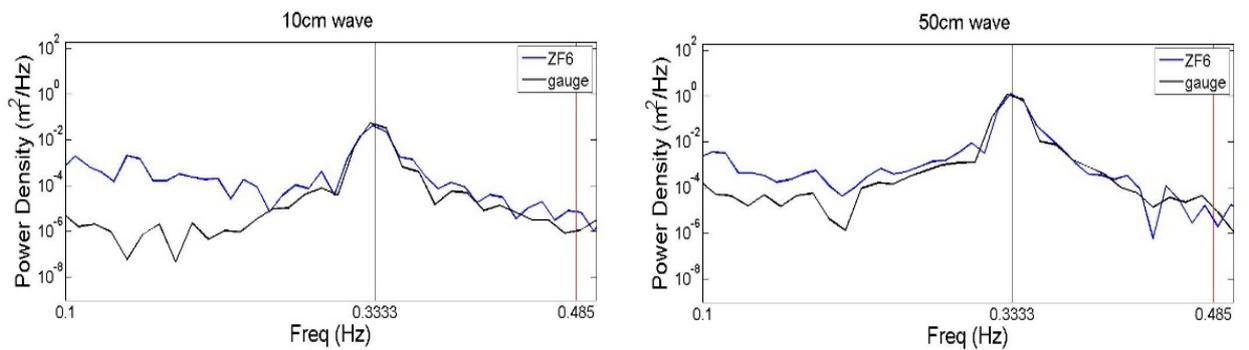


圖 10 ZenFone6 能量頻譜圖；(左)波高 10cm，(右)波高 50cm

表 2 浮標各儀器與波高計之有效波高差值平均與標準偏差

Difference (cm)	GNSS		IMU		ZenFone6	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
大浮標						
10cm	1.0	0.6	1.1	0.3	0.9	0.3
20cm	3.4	2.4	2.0	0.3	1.7	0.3
30cm	2.5	2.2	2.5	0.6	2.4	0.7
40cm	4.6	2.1	2.6	0.4	2.0	0.6
50cm	3.5	3.0	2.0	0.4	1.3	0.5
小浮標						
10cm	1.2	1.0	1.1	0.6	3.0	2.9
20cm	1.5	1.2	2.4	0.1	2.1	1.1
30cm	4.7	4.3	3.7	0.9	3.8	0.5
40cm	11.0	4.6	4.6	0.8	6.6	3.0
50cm	9.6	5.6	6.4	1.1	8.0	2.1

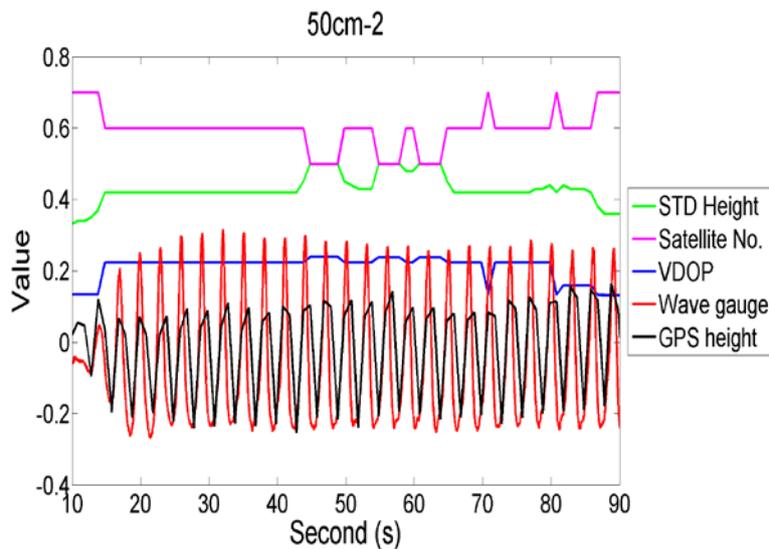


圖 11 波高 50 公分之大浮標 GNSS 解算結果與觀測檔品質

(二)安平港海上實測成果

本實驗以安平港潮位站與港外波浪觀測站觀測資料作為各儀器解算成果的精度驗證依據，成果指標可分為以下三類進行探討：首先為各儀器解算水面高度位移時序圖，其次為各儀器解算成果之能量頻譜分析，最後則是將各儀器的解算成果進行有效波高計算。以下皆以小浮標觀測資料進行計算。

視安平潮位站紀錄之潮位資料為真值，分別比較不同 GNSS 軟體解算成果與潮位站資料，計算兩者高程差值之 SD。本文分別利用 GAMIT TRACK 與 GrafNav 進行相對定位和 GIPSY OASIS 與 GrafNav 進行精密單點定位，比較不同定位演算法

和不同軟體之計算結果，不同軟體之詳細敘述可參考黃昱倫(2016)。圖 12 為不同 GNSS 軟體解算之成果，顯示出 GAMIT TRACK 與 GrafNav 相對定位成果可達 1 公分左右等級，而 GIPSY OASIS 與 GrafNav 精密單點定位成果之 SD 值介於 3~5 公分。整體而言，相對定位優於精密單點定位的成果。圖 13 為不同 GNSS 軟體解算與 IMU 觀測資料之整合解成果，IGAMIT 與 IGrafNav 相對定位的成果亦可達到 1 公分左右，IGIPSY 與 IGrafNav 精密單點定位約為 3~5 公分的成果，成果顯示 IMU 資料在 GNSS 資料近完整且觀測環境良好情況下幫助有限。

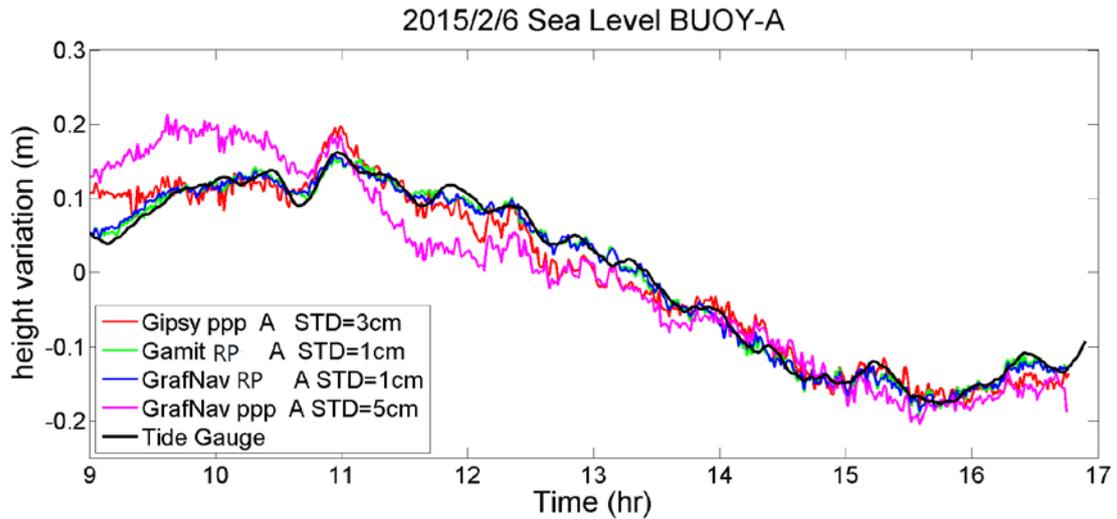


圖 12 各種 GNSS 軟體解算之水面高度位移時序圖(小浮標)

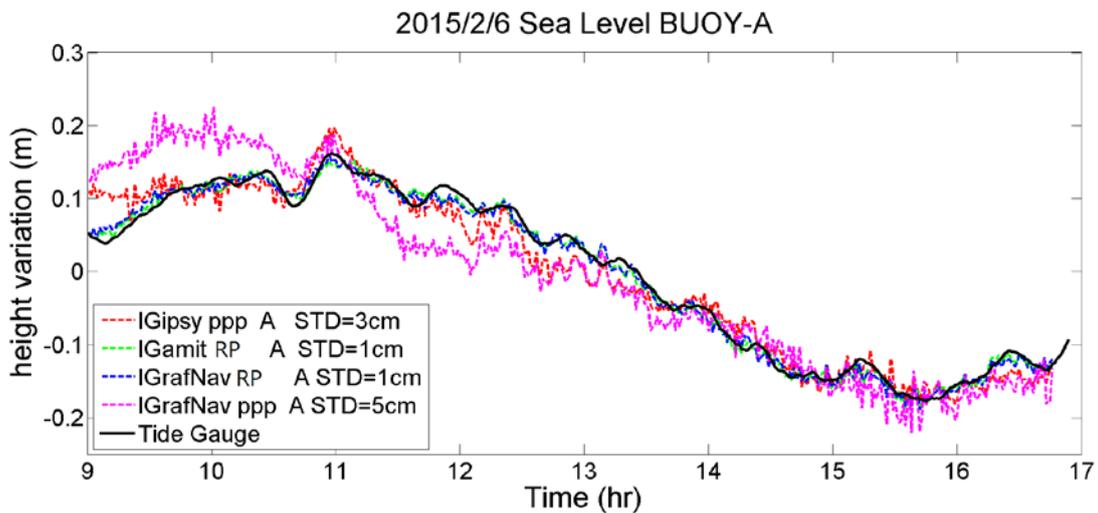


圖 13 GNSS/IMU 整合解之水面高度位移時序圖(小浮標)

表 3 為安平港外波浪觀測站與各儀器之觀測波浪頻率平均值，圖 14 為各儀器觀測成果能量頻譜圖。其成果顯示 2015/2/6 當日港外波浪頻率觀測值約為 0.137Hz ，GNSS、IMU 以及 GNSS/IMU 整合解所量測的能量鋒值皆位於 $0.100\sim 0.101\text{Hz}$ 範圍內，所量測的頻率值與港外觀測值相當接近，然而 ZenFone6 觀測成果則無明顯的能量鋒值。

表 3 安平港外波浪觀測站與小浮標 GNSS、IMU、ZF6 與 GNSS/IMU 整合解之波浪頻率平均值(單位：Hz)

實驗日期與時間	波浪觀測站	GNSS	IMU	ZenFone6	GNSS/IMU
2015/02/06 (09:00~17:00)	0.137	0.100~0.101	0.100~0.101	N/A	0.100~0.101

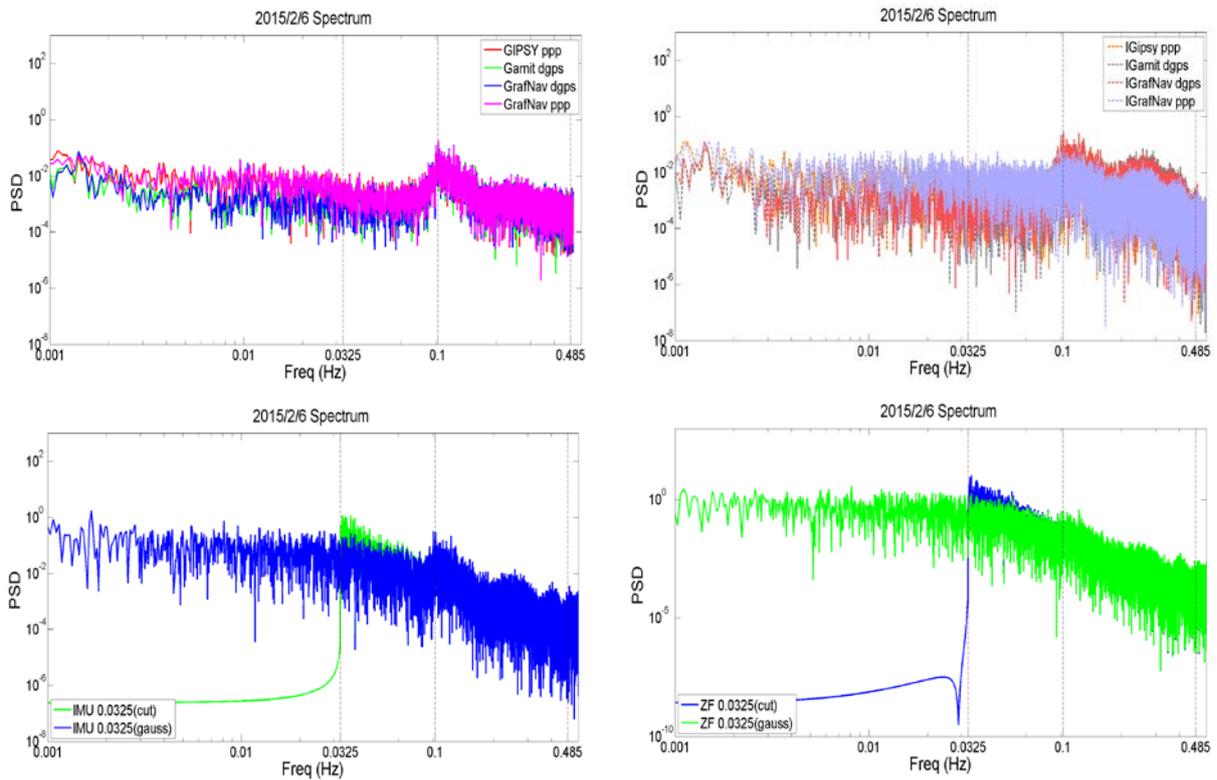


圖 14 水面高度位移能量頻譜圖。

(左上)GNSS，(右上)GNSS/IMU 整合解(左下)IMU，(右下)ZenFone6

表 4~6 為港外波浪觀測站與各儀器每小時有效波高成果數據，其成果顯示港外觀測之波高值從上午 9 點至下午 1 點逐漸變大，下午 1 點後到 3 點逐漸變小，但是變化的幅度不大，至多為 10 公分左右；對照於浮標上各儀器的有效波高結果，各 GNSS 軟體解算的波高值整體差異不大，隨時間上升或下降的趨勢也不大明顯；而 GNSS/IMU 整合解成果僅於上午 10 點至下午 1 點間呈現逐漸上升的趨勢，但整體變化幅度並未超過 5 公分，亦即整合 GNSS 與 IMU 觀測量並無明顯的提升效果；另一方面，IMU 與 ZenFone6 所解算的波高值，明顯比港外觀測波高值大，隨時間變化的趨勢亦不相同，兩儀器皆無法有效偵測實際波高的變化趨勢。

表 4 港外波浪觀測站與小浮標 GNSS 觀測之有效波高數值(單位：cm)

2015/02/06 BUOY-A (Hr)	Wave gauge	GAMIT RP	GIPSY PPP	GrafNav RP	GrafNav PPP
8	46	15	15	15	15
9	44	14	14	14	14
10	45	11	11	11	11
11	46	12	12	12	12
12	53	13	13	13	13
13	56	14	14	14	14
14	55	13	13	13	13
15	52	14	14	13	14
16	57	13	13	13	13

表 5 港外波浪觀測站與小浮標 GNSS/IMU 整合解之有效波高數值(單位：cm)

2015/02/06 BUOY-A (Hr)	Wave gauge	IGAMIT RP	IGIPSY PPP	IGrafNav RP	IGrafNav PPP
8	46	19	18	18	9
9	44	16	14	16	10
10	45	15	13	13	8
11	46	17	16	16	12
12	53	18	17	17	12
13	56	20	19	19	14
14	55	19	18	18	15
15	52	20	20	19	19
16	57	21	20	19	16

表 6 港外波浪觀測站與小浮標 IMU 和 ZenFone6 觀測之有效波高數值(單位：cm)

2015/02/06 BUOY-A (Hr)	Wave gauge	IMU 0.0325 cut	IMU 0.0325 gauss	ZF6 0.0325 cut	ZF6 0.0325 gauss
8	46	17	16	22	18
9	44	17	15	42	30
10	45	18	14	32	22
11	46	26	19	53	35
12	53	20	16	34	22
13	56	26	19	55	36
14	55	32	21	75	49
15	52	44	28	87	53
16	57	33	22	64	39

五、結 論

本研究利用 GNSS/IMU 浮標(同時放置 ASUS ZenFone6 手機於浮標上)於成功大學水工試驗水槽與台南安平商港內進行儀器測試,用來評估此 GNSS/IMU 浮標觀測海洋訊號之精度。於成功大學水工試驗水槽測試中發現,GNSS、IMU 以及 ZenFone6 手機皆可偵測出規則波的週期(3 秒)和振幅變化,最佳精度可達 1 公分,但因 GNSS 會受到水槽兩側壁之環境遮蔽影響,使得某些時段的觀測成果較差,相對應的水位變化量值與波高計資料有著明顯出入。有效波高計算的部分,隨著波高上升,各儀器波高量測值與波高計間的差異更為明顯,整體差值平均至多可達 4 公分左右等級。

台南安平商港內海上實測成果顯示,比較不同 GNSS 軟體所計算海水面變化和潮位站資料,GAMIT TRACK 與 GrafNav 相對定位成果差異不大,皆可達 1 公分左右的精度等級,而 GIPSY OASIS 與 GrafNav 精密單點定位成果精度大致上介於 3~5 公分,整體而言,相對定位的結果優於精密單點定位。GNSS 與 IMU 成果的能量頻譜峰值與港外波浪頻率平均值相似,而 ZenFone6 手機較無明顯的能量峰值,亦即 GNSS 與 IMU 可分別偵測出實際海洋訊號之頻率,而 ZenFone6 手機內建的慣性感測器規格較為低廉,則無法有效偵測之。有效波高計算成果部分,以港外波浪觀測站波高資料為參考真值來進行比較,GNSS 所計算的波高值明顯小於港外觀測數據,因海象環境較為平穩,港外觀測的周日波高變化量不超過 10 公分,又因浮標施放地點為安平商港內區域,距離港外海域較遠、海面波動較為靜穩,量測的數值較無法明顯反應出港外實際波高變化的趨勢。IMU 與 ZenFone6 手機部分,所計算的波高值明顯與港外觀測量有著差異,隨時間變化的趨勢也不相同,兩儀器亦無法有效偵測港外實際波高的變化趨勢。

GNSS/IMU 整合解成果與單獨使用 GNSS 結果近似,主要是 GNSS 解算成果已達公分等級之精度,且 GNSS 資料無明顯缺少,因此 IMU 資料無法明顯改進定位結果。浮標實驗地點的海洋環境單純、海面變化起伏小,浮標傾斜角度不會超過 15 度,且浮標高度低(GNSS 天線盤距離水面約 20 公分),使得計算之傾斜改正量小於 1 公分,因此 IMU 觀測傾斜資料對於海水面垂直變動監測精度的提升相當有限。因本研究自組的 GNSS/IMU 浮標,相對於市面銷售之整合儀器價格相對低廉,量測精度也符合海水面觀測所需;往後若將實驗場景移至港外海面上,整體 GNSS/IMU 整合技術所帶來的影響性會較為顯著,所觀測的結果更貼近於實際海面狀況;另外,可嘗試將 GNSS 與 IMU 掛載於氣象局所建置的海上資料浮標上進行觀測,由於此類型的浮標高度可達 5 公尺,使得浮標傾斜所導致的高程改正顯得更為重要。

致 謝

本研究由台灣科技部計畫資助(MOST 103-2221-E-006-115-MY3)。感謝交通部港研所提供安平潮位站資料和成功大學水工試驗所提供水槽進行測試。

參考文獻

- 胡智祐，2009，發展低成本緊耦合式 INS/GPS 整合無縫車用導航系統之研究，國立成功大學測量及空間資訊研究所碩士論文。
- 黃昱倫，2016，利用低成本 GNSS/IMU 浮標監測海洋訊號，國立成功大學測量及空間資訊研究所碩士論文。
- 姚冠宇，2010，適應性卡曼濾波器於緊耦合架構 INS/GPS 整合系統之研究，國立成功大學測量及空間資訊研究所碩士論文。
- 張育璋，2007，GPS 量測波浪之研究，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 曾清涼、儲慶美，1999，*GPS 衛星測量原理與應用*，第二版，國立成功大學衛星資訊研究中心。
- Cheng, K., 2005, Analysis of Water Level Measurements Using GPS. Ph.D. dissertation, the Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- Deng, X., and W.E. Featherstone, 2006, A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia, *Journal of Geophysical Research*, 111.
- El-Sheimy, N., 2004, Inertial techniques and INS/GPS Integration. *Lecture Notes ENGO 623*, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Calgary, Canada.
- Huang, M. C., 1998, Time domain simulation of data buoy motion, *Proceedings National Science Council ROC(A)*, 22, 6, 820-830.
- Héroux, P., J. Kouba, P. Collins, and F. Lahaye, 2001, GPS carrier-phase point positioning with precise orbit products, *Proceedings of the KIS 2001*, Banff, Alberta, Canada, June 5-8.
- Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, 2000, Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Planets Space*, 52, 841-845.
- Kuo, C.Y, K.W. Chiu, K.W. Chiang, K. Cheng, L.C. Lin, H.Z. Tseng, F.Y. Chu, W.H. Lan, and H.T. Lin, 2012, High-Frequency Sea Level Variations Observed by GPS Buoys Using Precise Point Positioning Technique, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 23(2), 209-218.
- National Data Buoy Center (NDBC), 2015, How are significant wave height, dominant period, average period, and wave steepness calculated, Mississippi, USA.
- Riley, J. L., B.R. Murray, O.A. Hauser, D.B. Wolcott, R. M. Heitsenrether, and S.K. Gill, 2014, GPS Water Level Buoy for Hydrographic Survey Applications, Final Report: Proof-of-Concept/NWLON-Comparison Project. Silver Spring, MD.
- Tucker, M. J., 1956, A shipborne wave recorder, *Transaction Royal Institution of Naval Architects*, 98, 236-246.

應用e-GNSS檢核地籍圖重測區

加密控制測量精度分析之研究

黃立信^{1*} 王建得²

論文收件日期：105.11.04

論文修改日期：106.01.26

論文接受日期：106.05.06

摘要

TTG(Trimble Transformation Generator)坐標轉換平台模組本身具備參數轉換功能，讓使用者於e-GNSS(Electronic Global Navigation Satellite System)即時動態定位系統施測定位同時，配合TTG即可即時獲得高精度坐標成果。本文透過不同實驗區之作業，利用e-GNSS及TTG三維坐標轉換平台獲得成果，應用於地籍圖重測區辦理加密控制測量與圖根測量，希望達到提升工作效率、降低作業成本之目的。

本文研究結果歸納如下：(1)以TTG在測回時間間隔無限制，施測 2 測回，每測回紀錄 180 筆固定解之加密控制測量成果，在檢核已知點、新設加密控制點及地面觀測檢查項目中，可符作業規定之比率，平均介於 95.24%至 100%。(2)以TTG在測回時間間隔無限制下，施測 2 測回，每測回紀錄 30 筆固定解之圖根測量成果，在水平距離檢核及地面觀測檢查項目中，可符合作業規定之比率，平均介於 93.24%至 98.35%。如以地籍圖重測成果檢查作業須知RTK對圖根點位置檢核不超過 0.03m之規定，則平均符合比率介於 98.05%~99.43%。(3)結合二者之測量技術，應用於加密控制測量與圖根測量，較傳統作業方法更具效率，可大量縮短觀測時間及節省人力，即加密控制測量及圖根測量點位觀測時間，分別由原本 100 分鐘與 66 分鐘，各自縮短至 6 分鐘與 1 分鐘。

關鍵詞：e-GNSS 即時動態定位系統、TTG 坐標轉換平台、地籍圖重測、加密控制測量、圖根測量

¹ 副教授，國防大學理工學院環境資訊及工程學系。

² 碩士，國防大學理工學院，環境資訊及工程學系/課員，內政部國土測繪中心。

* 通訊作者，TEL：(03) 3800364 轉 132，E-mail：shinn0329@gmail.com。

The Precision Checking Research of Densified Control and Supplementary Control Point Surveying in Cadastral Resurvey by e-GNSS

Lih-Shinn Hwang^{1*} Chien-Te Wang²

Abstract

TTG (Trimble Transformation Generator) modules have parameter transformation functions. With TTG, using e-GNSS(Electronic Global Navigation Satellite System) measurement in order to real-time access high-precision coordinate values. Through different areas of works, the technologies which integrated e-GNSS with TTG modules could be used to densified control and Supplementary control point surveying on cadastral resurvey areas. Hope it can be reached the goals of improving efficiency and reducing operation costs.

The results of those studies are summarized as follow: (1) Two sets of TTG survey were applied without restriction of time interval and 180 fixed observations were recorded for each set. For known-point check, new densified control point check, and field survey check, the qualified ration of the obtained results are between 95.24% and 100%. (2) Two sets of TTG survey were applied without restriction of time interval and 30 fixed observations were recorded for each set. For horizontal distance check and field survey check, the qualified ratio of the obtained results are between 93.24% and 98.35%. And the average qualified ratio is 98.05%~99.43% for the requirement of the Cadastral maps retest results of inspection operations Notice, in which the requirement for the position difference of supplementary control point using RTK is less than 0.03 m. (3) The technologies which integrated e-GNSS with TTG modules could be used to densified control and Supplementary control point surveying on cadastral resurvey areas. It can be more efficient than and less times and labors than traditional methods. While points of observation time of Densified Control and Supplementary control point surveying respectively, from the original 100 and 66 minutes, shortened to 6 minutes and 1 minute.

Keywords: e-GNSS, TTG, Cadastral Resurvey, Densified Control Surveying,
Supplementary Control Point Surveying

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

² Master, Department of Environmental Information and Engineering, National Defense University, C.C.I.T./ officer, National Land Surveying and Mapping Center.

* Corresponding Author, TEL: +886-3-3800364 ext. 132, E-mail: shinn0329@gmail.com.

一、前言

目前地籍圖重測區(下稱重測區)加密控制測量與圖根測量作業，仍分別採 GPS(Global Positioning System)靜態測量與地面觀測搭配全測站經緯儀作業方式辦理，均需投入大量人力與作業時間；至現行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(內政部國土測繪中心，2010)之作業規定，點位觀測時間較為費時，且觀測資料無法即時獲得現行 TWD97 法定坐標，衍生作業繁瑣、降低作業效率及徒增作業成本之困擾。

內政部國土測繪中心(下稱國土測繪中心)配合 GNSS(Global Navigation Satellite System)雙星系的發展，原建置之 e-GPS 系統已進行軟、硬體升級，並自 2014 年 9 月 1 日正式啟用及更名為 e-GNSS(Electronic Global Navigation Satellite System)即時動態定位系統，可透過定位系統軟體 TTG (Trimble Transformation Generator)模組執行即時轉換功能，讓使用者於施測 VBS-RTK 定位同時，利用 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime, RTCM) 3.1 即時傳送坐標至使用者，讓其於外業現場即時取得平面精度 5 公分或高程精度 10 公分之轉換後坐標，並建置 e-GNSS 系統三維坐標轉換服務平台供衛星定位接收儀不支援 RTCM 3.1 資料傳輸功能者，透過該平台進行後處理方式取得法定坐標(內政部國土測繪中心，2015)。

基於上開動機，爰提供改進之處，期望可以達到下列目的：

1. 觀測時間做改變，成果精度合規範，提升作業效率，降低作業成本。
2. 利用 TTG 結合圖根網平差，建立控制測量新思維。
3. 修正手冊流程，作為未來推廣。
4. 研究成果提供作業方法之新選擇。

鑒於國土測繪中心之重測作業系統長期演變，多位前人對此作業有諸多的心得與貢獻，本研究係依循常年來地籍圖重測作業流程，針對結合衛星動態定位和坐標轉換平台所做的研究探討，表 1 即為本研究與其它研究差異性之分析。

表 1 本研究與其它研究差異性分析表

	劉榮增(100 年)	王文俊(103 年)	劉榮山(104 年)	王建得
研究區	桃園楊梅	桃園平鎮、蘆竹	桃園龜山、桃園	桃園大溪、臺中沙鹿、臺南麻豆
目的	測量應用	測量應用	測量應用	規範修正與測量應用
固定站	苗栗竹南(JUNA)	苗栗竹南(JUNA)	苗栗竹南(JUNA)	臺中測繪中心(Lsb0)
衛星接收	GPS	GPS	GPS、少許 GPS/GLONASS	GPS/GLONASS
坐標系統	e-GPS[2008]	e-GPS[2008]	e-GPS[2008]、少許 e-GNSS[2013]	e-GNSS[2015]

系統模組	GPServr \ TTC	GPServr \ TTC	GPServr \ TTC	PIVOT \ TTG
服務網	基北桃竹服務區	基北桃竹服務區	基北桃竹服務區	臺灣本島
固定解	加密 1200 筆、圖根 180 筆	加密 1200 筆、圖根 180 筆	加密 1200 筆、圖根 180 筆	加密 180 筆、圖根 30 筆
測回間隔	至少 1hr	至少 1hr	至少 1hr	無時間間隔(斷線重連)
坐標轉換	4、6 參數	4、6 參數	4、6 參數	4、6、7 參數

二、研究方法與流程

事實上，學術界利用衛星定位理論從事地籍測量研究不在少數，歸納如下：

- (一)提高作業效率、節省人力：如e-GPS觀測加密圖根點，可提高作業效率、節省人力(劉榮增，2011)。網路RTK方法有系統進行地籍測量，可大幅減少作業成本及資料處理時間(Munsung KOH, Republic of Korea and Garfield KNIGHT ,Jamaica，2014)。日本除藉助VBS RTK衛星定位技術獲得高精度成果外，並簡化地籍測量作業限制，藉以提升測量作業效能(日本國土交通省，2015)。韓國國土地理情報院運用衛星定位測量技術，自2005年起，更換GPS CORS系統接收儀為Trimble NetRs型，讓使用者利用VBS-RTK進行高效率與簡化測量作業方法(黃鶴，2011)。
- (二)解算成功率：e-GNSS 即時動態點位求解時，坐標解算成功率時可達85.7~95%以上(王文俊，2014)。
- (三)符合圖解法土地複丈規範：e-GNSS辦理圖根測量、現況測量、土地複丈之結果，均能符合地籍測量實施規則圖解法土地複丈之作業程序與相關之精度規範(劉榮山，2015)。
- (四)精度分析：VRS-RTK平面與高程精度分別在0.05m以內及0.15m以內(楊名、馮倩君，2005)。e-GPS即時動態定位系統定位精度，經驗證結果，平面與高程精度分別達0.02m與0.05m (林世賢等，2007)。虛擬參考站即時動態的定位成果，其平面與高程定位精度分別可達0.04m與0.06m(Zuhaidah Nordin. etc.，2009)。
- (五)觀測資料可用性：e-GPS即時動態定位系統觀測資料可用性高達95%以上(王敏雄，2007)。
- (六)觀測時間長短對轉換精度無顯著影響：e-GPS即時動態定位測量之研究，點位觀測每次接收120筆之固定解，其N、E坐標分量精度分別約有88%信心區間達0.02m與99.9%信心區間達0.049m(林世賢等，2007)。分別取前10筆、前30筆與前180筆固定解之觀測成果，採雙線性內插法與克利金法，進行VBS-RTK觀測時間與轉換精度間影響情形之探討，結果顯示，觀測時間長短對轉換精度並無顯著之影響，亦即觀測10筆與180筆之固定解精度，其差異性並不顯著(莊峰輔等人，2014)。

本研究係以 104 年度桃園市大溪區、臺中市沙鹿區及臺南市麻豆區等 3 個地籍圖重測區公告之 TWD97 控制測量成果為基值，利用國土測繪中心建置之 e-GNSS 即時動態定位系統，分別辦理研究區內已知基本控制點、控制測量之檢測與觀測等作業，考量現行 e-GNSS 系統提供取得 TWD97 或 TWD97(2010)之法定坐標，為便利本研究資料分析與應用，TTG 坐標成果取得方式係以 e-GNSS 辦理觀測作業後，利用 e-GNSS 三維坐標服務轉換平台之方式求得法定坐標，並利用參數坐標轉換方法取得坐標後，再與前述重測區公告之 TWD97 坐標系統進行精度比較與分析，期由本研究點位精度結果，分析 e-GNSS 系統成果是否符合相關規範要求，作為修正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規範之參考及提供辦理重測區加密控制測量、圖根測量實務應用之參考，研究流程如圖 1 所示。

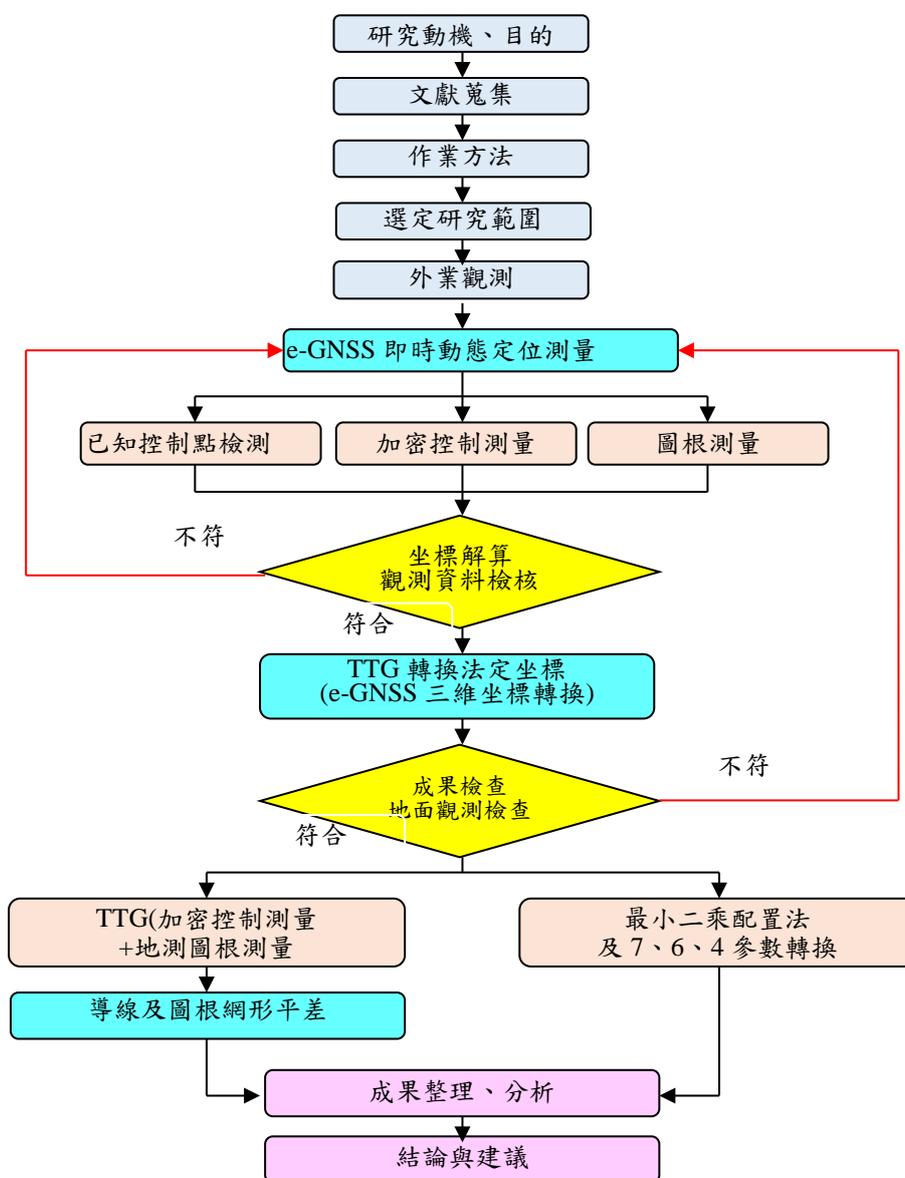


圖1 研究流程

三、系統介紹

(一) e-GNSS 系統(內政部國土測繪中心，2015)：

如圖 2 所示，e-GNSS 係結合衛星定位、寬頻網路數據通訊、Mobile Phone 行動式數據傳輸、資料儲管及全球資訊網站(Web)等 5 項先進主流科技之核心定位技術-虛擬基準站(VBS)為基礎之網路化即時動態定位(Network RTK)技術，屬即時性、高精度的動態定位系統。透過即時傳輸建置於全國各地之衛星定位基準站連續性衛星觀測資料，經由控制及計算中心對於各基準站衛星觀測資料之整合計算處理後，目前在臺灣本島（含綠島、蘭嶼）及澎湖、金門、馬祖地區，只要在可以同時接收 5 顆 GPS 衛星訊號的地方，都可以利用 GPRS 等無線上網的方式，在極短的時間內，獲得高精度之定位坐標成果。

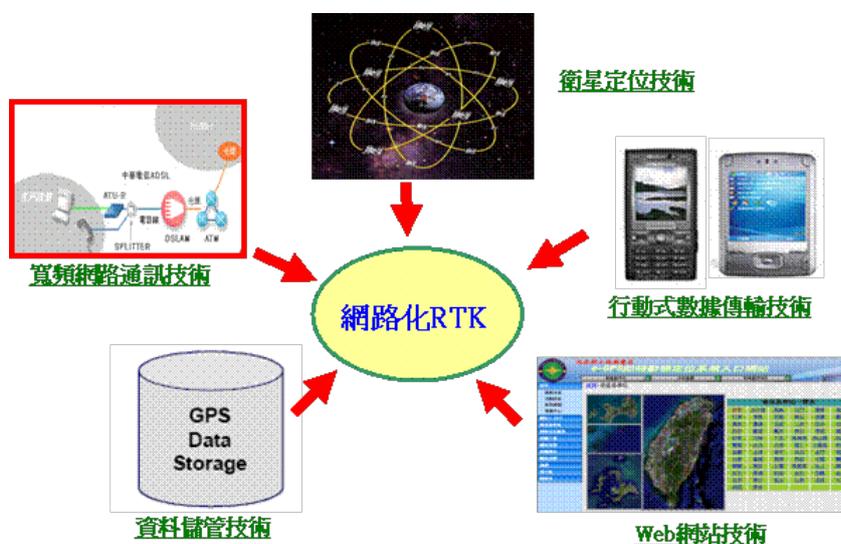


圖2 VBS-RTK示意圖(內政部國土測繪中心，2015)

另如圖 3 所示，PIVOT 定位系統軟體之功能分為 Trimble Instrument Configurator(TIC)、Trimble Ephemeris Download(TED)及 Trimble Streaming Manager(TSM)等模組，以作為衛星定位基準站遠端控制、資料下載使用及進行 DGNSS 差分定位解算及公分級 VBS-RTK 即時動態定位解算。

APP LAYER STRUCTURE											
SVRS	VRS NET	TIM	ATMO	TRI	RTX	RTX-PP	TNC	ISCOPE	TAC	TDS	TTG
TRIMBLE DYNAMIC CONTROL											
Trimble Instrument Configurator(TIC)				Trimble Ephemeris Download(TED)				Trimble Streaming Manager(TSM)			
PIVOT											

圖3 PIVOT軟體系統模組示意圖(內政部國土測繪中心，2015)

(二) e-GNSS 坐標系統(陳鶴欽等，2015)

- (1) 臺灣地區因位處於地殼變動劇烈地帶，且區域性之地表位移量各地均有明顯差異，因此造成各基準站間坐標精度已不敷進行相關資料解算，國土測繪中心乃自行定義 1 套以時間為函數之 e-GNSS 動態坐標系統，做為進行即時動態定位坐標基準平臺。
- (2) 配合內政部於 101 年 3 月 30 日公布 TWD97【2010】坐標系統，使 e-GNSS 動態坐標系統仍以內政部公布 TWD97【2010】國家坐標系統為起算基準，並儘量達到 2 套坐標系統間之最大相關性，國土測繪中心整合 237 個具有 TWD97【2010】坐標成果之 GNSS 連續觀測站 103 年 12 月 1 日至 104 年 1 月 31 日之 62 天衛星觀測資料為基礎，採用 Bernese 軟體計算基線，依據內政部公告之 TWD97【2010】坐標框架定義，約制在國土測繪中心基準站三維空間坐標，解算各基準站 e-GNSS【2015】精密坐標。至於澎湖、金門及馬祖地區維持原 TWD97【1997】坐標框架，不予變更。其坐標框架基本定義如表 2 所示。

表2 e-GNSS(2015)坐標框架定義(內政部國土測繪中心，2015)

固定站點名		測繪中心(LSB0)	
國際坐標基準框架		ITRF94	
坐標定義起始時刻		2015 年 1 月 1 日 12:00:00	
X-坐標	-2967207.333m	N-速度量	-0.0042m/年
Y-坐標	5010439.297m	E-速度量	-0.0000m/年
Z-坐標	2593842.976m	U-速度量	-0.0022m/年

(三) 三維即時坐標轉換

三維即時坐標轉換之轉換方法、資料傳送、內插計算(Mohamed Eleiche.2008，莊峰輔，2014)分述如下：

1. 轉換方法
 - (1) 國際海運系統無線電技術委員會(RTCM)制定的差分GNSS標準格式RTCM 3.1，提供VBS-RTK測量進行即時坐標轉換的方法。
 - (2) RTCM 3.1提供type 1021~1027等7種轉換訊息讓使用者自行應用。
 - (3) e-GNSS透過type1021傳送坐標轉換7參數；type1023傳送經緯度網格殘差資料及網格內插模式，即時轉換至法定坐標系統，達成VBS-RTK測量成果。
2. RTCM 3.1 Type 1021資料傳送
 - (1) RTCM 3.1 type 1021之傳送資料為坐標轉換參數，含坐標轉換方法、高程系統、伺服器接收到移動站所在網格的坐標重心、網格經度、緯度解析度、坐標轉換參數、來源坐標橢球資料與目標坐標橢球資料等相關資訊
 - (2) 坐標轉換
 - a. 採用Helmert嚴密法7參數坐標轉換將e-GNSS[2015]坐標轉換至TWD97及TWD97[2010]坐標系統。

b. 轉換公式如(2.10)式(Fritzensmeier et al., 1985; Rapp, 1993; 莊峰輔, 2014)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = S \cdot R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)式中，S 表尺度因子， $R = R_1(w_x)R_2(w_y)R_3(w_z)$ ，為旋轉矩陣因子，(X, Y, Z)和(x, y, z)為轉換坐標及起始坐標，(dX, dY, dZ)為球心距平移參數。

(3) RTCM 3.1 Type 1023資料傳送

係傳送殘差網格修正模型與網格內插計算方法，包括坐標轉換後點位所在網格的坐標重心、網格經緯度解析度、轉換後點位周圍 16 個網格殘差修正量的平均值、每個網格的殘差修正量與網格內插計算方法等資訊。至線性內差法計算係使用移動站所在網格周圍 4 個格點之坐標及殘差修正量進行內插，計算公式如(2)式：

$$\frac{x_r - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{f_r - f_1}{f_2 - f_1} \quad (2)$$

(2)式中， x_1 、 x_2 為格點坐標分量， x_r 為移動站坐標分量， f_1 、 f_2 為格點殘差修正量， f_r 為移動站殘差修正量。

3. 法定坐標三維即時坐標轉換

RTCM 3.1 type 1021 及 type 1023 資料規定格式，計算坐標轉換 7 參數並建置坐標殘差網格修正模型，使用者只要透過 NMEA 格式將單點定位坐標傳送至 e-GNSS 系統，系統即可利用 RTCM 3.1 type 1021 及 type 1023 將坐標轉換參數及殘差網格修正模型傳送給使用者，讓使用者在測量時可即時獲得坐標轉換後之法定坐標系統測量成果，即時坐標轉換示意圖如圖 4。

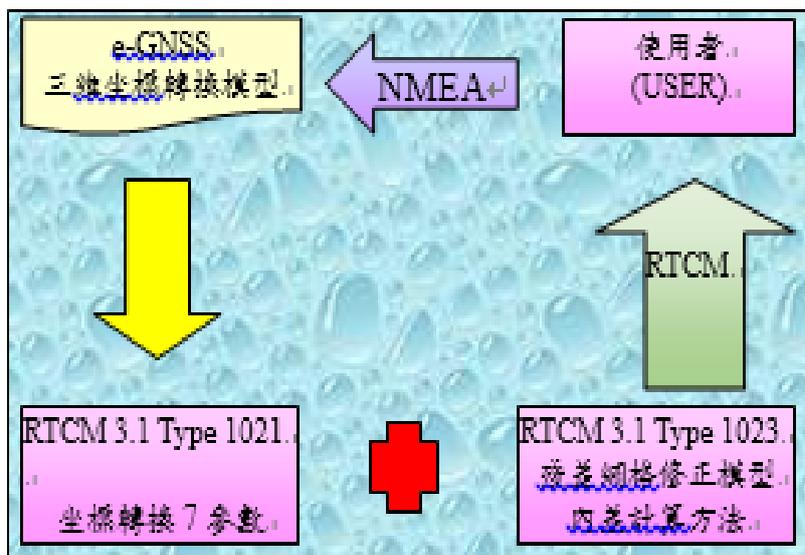


圖4 即時坐標轉換示意圖

四、資料蒐集與處理

(一) 研究區域

目前臺灣本島在 e-GNSS 系統規劃下，均為同一服務區，爰選定 104 年度辦理重測之桃園市大溪區番子寮段、臺中市沙鹿區南勢坑段南勢坑小段及臺南市麻豆埤頭段、北勢寮段及大山腳段等為研究區域。

(二) 資料蒐集

本研究於 104 年 6 月至 104 年 8 月間完成作業，總計辦理觀測已知二等衛星控制點 3 點、三等衛星控制點 4 點、內政部一等水準點 7 點、三等控制點 6 點、歷年加密控制點 18 點、104 年度 3 研究區測設加密控制點 32 點及圖根點觀測 141 點，合計觀測 211 點，研究區觀測作業情形如表 3、點位分布圖如圖 5 所示(內政部國土測繪中心，2015)。

表 3 研究區觀測作業情形一覽表

研究區		大溪	沙鹿	麻豆
應用系統		內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時定位系統		
衛星接收儀		1 部	1 部	3 部
觀測數量	加密(含已知點)	28	22	20
	圖根	31	24	86
作業期間	加密	104 年 6 月 13-14 日	104 年 6 月 5-6 日	104 年 7 月 22-24 日 (22、23 日各 0.5 日)
	圖根	104 年 7 月 25 日	104 年 6 月 5-6 日	
作業天數	加密	1.5	1.5	2
	圖根	1	1	
檢核基值		104 年度公告之 TWD97 加密控制測量、圖根測量成果		
總觀測數量		211 點		



圖 5 大溪、沙鹿、麻豆研究區點位分布示意圖(內政部國土測繪中心，2015)

(三) 作業相關設定

本研究進行觀測方式改變，相關外業及內業參數設定如表 4 及表 5 所示，觀測成果判斷係參照採用虛擬基準站即時動態定位技術辦理加密控制測量及圖根測量作業手冊及地籍測量相關規定辦理。

表4 外業測量參數設定

硬體	衛星數量	紀錄間隔	觀測方式	測回	PDOP
雙頻衛星接收儀+固定式三腳架	≥5 顆衛星以上	1 秒	加密控制點： 每測回至少接收 180 筆 FIXED 固定解 圖根點： 每測回至少接收 30 筆 FIXED 固定解	連續觀測 2 測回	< 5

表5 內業計算參數設定

計算方式	品質控制 (Ratio)	坐標中誤差	已知點檢核標準	坐標轉換
後處理 OTF 模式	2.5	$\sigma_N < 0.02m$ $\sigma_E < 0.02m$ $\sigma_h < 0.05m$	dN、dE、dh 均需 $< 0.098m$ 基線 $30mm + 6ppm * L(km)$ 方位角 < 20 秒	最小二乘配置法 坐標轉換

五、數據分析與研究成果

本章分 4 個步驟進行分析：第 1 部分，為 e-GNSS 觀測資料處理與解算精度。第 2 部分，為 TTG、e-GNSS[2015]於地籍圖重測區控制測量之探討，並分別進行已知點及加密控制測量、圖根測量之觀測量檢核、成果分析、成果檢查與地測檢核。第 3 部分，為 TTG、區域性最小二乘配置法及 7 參數轉換結合地測圖根測量之探討。第 4 部分，則進行坐標轉換結果分析，敘述如下：

(一)e-GNSS 觀測資料坐標計算處理

1. e-GNSS 觀測量解算精度：如圖 6 至圖 8 所示，研究區 e-GNSS 觀測資料後處理計算之精度解算指標水平中誤差均小於 0.02m、高程及 3D 中誤差均小於 0.05m。

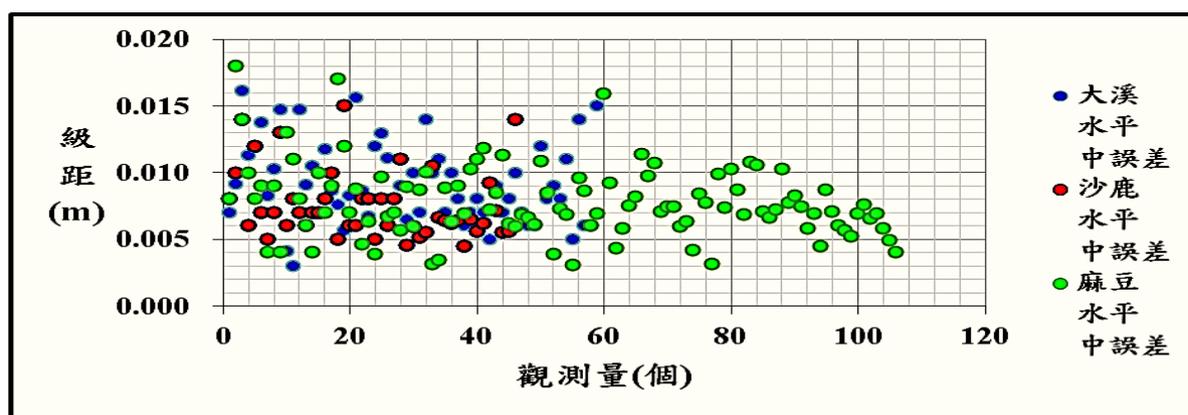


圖 6 研究區點位水平中誤差分布圖

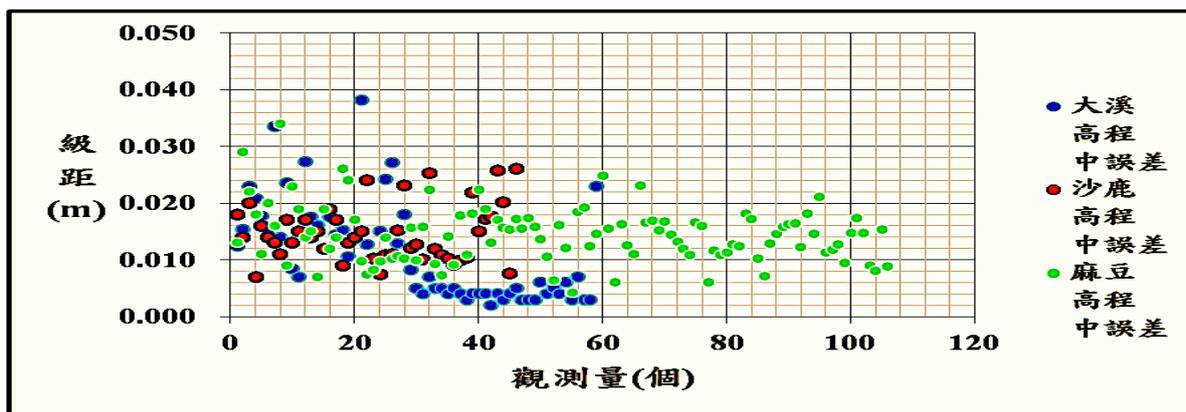


圖 7 研究區點位高程中誤差分布圖

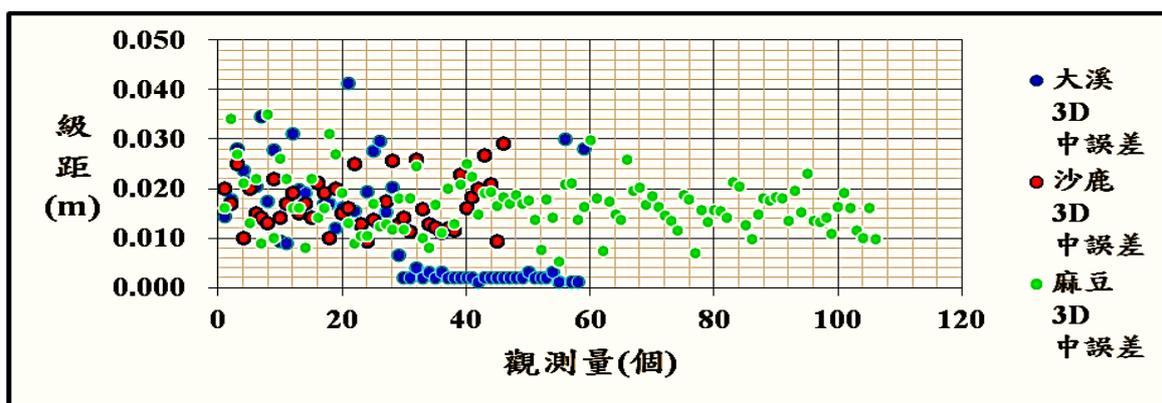


圖 8 研究區點位 3D 中誤差分布圖

2. e-GNSS 重複觀測 2 測回分量較差檢核：如表 6 所示，研究區 e-GNSS 坐標 2 測回分量較差中，N 分量較差平均達 99.26% (大溪及麻豆 100%、沙鹿 97.78%)、E 分量較差平均達 100% 符合 $\pm 0.02\text{m}$ 之規定；h 分量較差平均達 98.71% (大溪 98.35%、沙鹿 97.78%、麻豆 100%) 符合 $\pm 0.05\text{m}$ 之規定。

表 6 研究區 e-GNSS 2 測回坐標較差分布統計表

研究區	大溪				沙鹿				麻豆			
	N	E	平面位置較差	h	N	E	平面位置較差	h	N	E	平面位置較差	h
0.05~0.06								1				
0.04~0.05				1								3
0.04~0.03				1	1			0				5
0.03~0.02				6	0		1	3				3
0.02~0.01	5	6	23	9	2	4	12	12	4	9	27	18
0~0.01	24	36	36	16	27	24	33	4	52	57	79	26
-0.01~0	26	14		7	14	16		10	45	31		27

-0.02~-0.01	4	3		11	2	2		9	5	9		15
-0.03~-0.02				3				5				7
-0.04~-0.03				4				0				1
-0.05~-0.04				0				2				1
<-0.05				1								
個數合計	59	59	59	59	46	46	46	46	106	106	106	106
N、E 分量符合 ±0.02(%)	100	100	100		97.78	100	97.78		100	100	100	
h 分量符合±0.05(%)				98.35				97.78				100

(二) TTG、e-GNSS[2015]於地籍圖重測區控制測量之探討

1. 已知點 TTG 精度檢核：考量實際作業情形，經擇定研究區外圍已知點及歷年已知點經清查後，擇定包覆且涵蓋研究區範圍之控制點如表 7 所示。

表 7 研究區已知控制點一覽表

研究區	大溪	沙鹿	麻豆
二等衛星控制點	N916、N917	1086、1087	S806
三等衛星控制點			R120、R136、R148、R165
內政部一等水準點	3021、3022、4014		I060、I077
三等控制點	HP50、H192、H211	L107、L114、L131	
歷年加密控制點	GD32	GC05、GC06、GC08、TCK625	GA56、GA60、GA64
合計	9	9	10

- (1) 已知點坐標分量檢核：如表 8 所示研究區 N、E 分量可 100%符合±0.098m；h 分量部分，沙鹿及麻豆研究區部分點位觀測成果大於±0.098m，研判約有 0.10m 之系統差所致，惟就衛星定位測量而言，通常高程方向誤差約為水平方向誤差之 3~5 倍，故該系統差仍屬合理。

表 8 研究區已知點檢測坐標分量較差分析 (單位：m)

研究區	序號	點號	TWD97			TTG			較差(m)		
			N	E	h	N	E	h	dN	dE	dh
大溪	1	3021	2753513.6	277265.2	204.1	2753513.7	277265.3	204.1	-0.01	-0.01	0.05
	2	3022	2752100.2	275255.9	222.1	2752100.2	275255.9	222.1	-0.00	-0.02	0.02
	3	4014	2753851.2	278151.8	126.4	2753851.2	278151.9	126.3	-0.00	-0.01	0.04
	4	GD32	2752870.5	276761.1	224.8	2752870.5	276761.1	224.7	0.00	-0.01	0.02

	5	H192	2753716.0	276931.1	204.3	2753716.0	276931.1	204.3	-0.01	-0.01	-0.04
	6	H211	2750026.0	276951.5	128.0	2750026.0	276951.5	128.1	-0.02	0.00	-0.07
	7	HP50	2744823.2	275979.0	323.1	2744823.1	275979.0	323.1	0.01	-0.03	0.01
	8	N916	2753927.1	276654.7	200.4	2753927.1	276654.7	200.5	-0.00	-0.01	-0.00
	9	N917	2750361.1	272498.6	249.9	2750361.1	272498.6	250.0	0.01	-0.03	-0.07
沙鹿	1	1086	2679666.9	203620.1	23.36	2679666.9	203620.1	23.46	-0.01	0.00	-0.10
	2	1087	2677488.4	203082.8	23.46	2677488.4	203082.8	23.53	-0.01	-0.00	-0.06
	3	GC05	2679667.1	205420.0	63.66	2679667.1	205420.0	63.85	0.01	-0.01	-0.18
	4	GC06	2679178.6	205404.5	64.99	2679178.6	205404.5	65.13	-0.00	-0.02	-0.13
	5	GC08	2679789.1	205903.6	69.35	2679789.0	205903.6	69.52	0.01	-0.02	-0.16
	6	L107	2680954.8	205848.8	59.17	2680954.8	205848.8	59.35	0.01	-0.03	-0.18
	7	L114	2680233.5	207455.6	132.9	2680233.5	207455.7	133.0	0.01	-0.02	-0.10
	8	L131	2677624.6	206693.5	111.5	2677624.6	206693.6	111.5	0.02	-0.03	-0.01
	9	TCK62	2678330.4	206043.5	69.57	2678330.4	206043.5	69.65	0	-0.00	-0.07
麻豆	1	GA56	2565568.8	171280.4	24.01	2565568.8	171280.4	24.12	0.00	-0.01	-0.11
	2	GA60	2567102.0	170567.4	24.39	2567102.0	170567.5	24.34	0.02	-0.03	0.05
	3	GA64	2565726.5	170258.1	32.94	2565726.5	170258.1	32.97	0.01	-0.00	-0.03
	4	I060	2567072.7	166846.8	24.30	2567072.8	166846.8	24.30	-0.01	-0.00	0.00
	5	I077	2570371.9	172309.5	24.41	2570371.9	172309.5	24.39	0.04	-0.04	0.01
	6	R120	2568765.2	170946.9	40.94	2568765.2	170946.9	41.05	-0.00	0.01	-0.10
	7	R136	2566250.0	169533.9	24.18	2566250.0	169533.9	24.17	-0.00	-0.04	0.01
	8	R148	2564423.0	171469.8	74.77	2564423.0	171469.8	74.82	0.03	-0.03	-0.05
	9	R165	2562222.8	168263.8	27.65	2562222.8	168263.8	27.69	0.01	0.01	-0.03
	1	S806	2564607.1	172965.4	43.03	2564607.1	172965.4	43.06	0.01	-0.00	-0.02

- (2) 已知點距離檢核：如表 9 所示，研究區共 117 條基線(大溪 36 條、沙鹿 36 條、麻豆 45 條)，100%符合基線水平距較差 2 萬分之一，且基線較差均符合基線長度較差量 $30\text{mm}+6\text{ppm}\times L$ 之規定。

表 9 研究區已知點檢測距離分析表

研究區		大溪	沙鹿	麻豆	合計
基線數量(條)		36	36	45	117
水平距離	相對較差比值 $<1/20,000$	36	36	45	117
	占基線數量百分比%	100%	100%	100%	100%
	基線長度較差量 $<30\text{mm}+6\text{ppm}\times L$	36	36	45	117
	占基線數量百分比%	100%	100%	100%	100%

- (3) 已知點方位角檢測：如圖 9 所示，研究區已知點方位角較差皆 100%符合角度較差量在 $\pm 20''$ 內之規定。

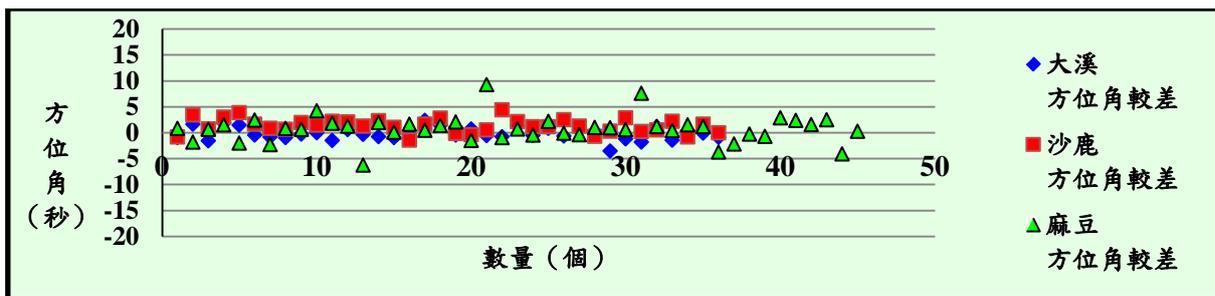


圖 9 研究區方位角檢測較差分布圖

2. TTG 檢測成果分析

(1) 已知點、加密控制點 TTG 成果分析比較：如表 10 所示，平移量修正結果，研究區平移前、後 N、E 分量均可 100%符合 $\pm 0.098m$ 之規定。經平移修正後之 h 分量平均達 95.33%(大溪 100%、沙鹿 95%、麻豆 91%)符合 $\pm 0.098m$ 之規定，明顯優於平移前平均 62.73%之成果，顯示 TTG 測量成果與現行公告之法定坐標間存有區域性系統差，其因，乃 TTG 計算前已先剔除 3 倍中誤差(粗差)，且 2 種成果之約制點亦不同所致。

表 10 研究區已知點、加密控制點 TTG 成果、平移後 TTG 成果與公告成果較差統計表

研究區	TTG 成果與公告成果分量較差									平移後 TTG 成果與公告成果分量較差								
	大溪			沙鹿			麻豆			大溪			沙鹿			麻豆		
較差級距 (m)	dN	dE	dh	dN	dE	dh	dN	dE	dh	dN	dE	dh	dN	dE	dh	dN	dE	dh
>0.098															1			2
0.080~0.090																		
0.070~0.080																		2
0.060~0.070			2								1							
0.050~0.060			1					1			2			1			1	
0.040~0.050			1				1				1			2				
0.030~0.040			2				2				2					1		
0.020~0.030			3	3			2				1	2	1	1		2	3	2
0.010~0.020	3		6	4			5	3		5	3	7	3	4	4	2	1	1
0~0.010	7	1	1	6	2		4	1	1	8	10	1	6	6	2	6	8	
-0.010~0	9	3	4	6	5		5	7	3	10	10	3	8	7	4	3	3	2
-0.020~-0.010	8	8	1	3	9	1	1	4	2	5	4	2	3	3	4	4	2	1
-0.030~-0.020	1	11	1		5			1				1	1	1		2	1	2
-0.040~-0.030		4			1			2	1							2	1	
-0.050~-0.040		1	2					2				2			1			3
-0.060~-0.050								2							2			1
-0.070~-0.060			1			1						1			1			
-0.080~-0.070			3			2			2			3						1
-0.090~-0.080									1									1
-0.098~-0.090									1									

<-0.098						18			6									
合計	28	28	28	22	22	22	20	20	20	28	28	28	20	20	20	22	22	22
符合 ±0.098	28	28	28	22	22	4	20	20	14	28	28	28	20	20	19	22	22	20
占研究區總數%	100	100	100	100	100	18.1	100	100	70	100	100	100	100	100	95	100	100	91

(2) 修正後 TTG 成果與公告成果分析：按地籍圖重測成果檢查要點對圖根點位置檢查而言，如表 11 所示，研究區 TTG 修正前、後各點平面位置坐標與原坐標較差平均分別有 71.35%(大溪 41.94%、沙鹿 95.83%、麻豆 76.74%)、87.95%(大溪 87.10%、沙鹿 100%、麻豆 76.74%)符合±0.03m 之規定。

表 11 研究區圖根點 TTG 成果、平移後 TTG 成果與公告成果較差統計表

研究區	TTG 成果與公告成果分量較差									平移後 TTG 成果與公告成果分量較差								
	大溪			沙鹿			麻豆			大溪			沙鹿			麻豆		
較差級距 (m)	dN	dE	平面位置差	dN	dE	平面位置差	dN	dE	平面位置差	dN	dE	平面位置差	dN	dE	平面位置差	dN	dE	平面位置差
0.060~0.070			1			1												
0.050~0.060			1			1												1
0.040~0.050			4			4												5
0.030~0.040			12			12			1			3				1		14
0.020~0.030	3		7	3		7			9	3	2	7			4	3		22
0.010~0.020	1		4	1		4	5		6	2	4	6	5	5	12	16	4	26
0~0.010	8		2	8		2	10	5	8	7	10	15	10	6	8	30	8	18
-0.010~0	12	2		12	2		4	6		15	10		4	9		23	22	
-0.020~-0.01	4	3		4	3		4	9		2	4		4	4		11	19	
-0.030~-0.02	2	9		2	9		1	4		2	0		1			1	18	
-0.040~-0.03	1	11		1	11						1					1	12	
-0.050~-0.04		3			3												2	
-0.060~-0.05																	1	
-0.07~-0.06		1			1													
合計	31	31	31	31	31	31	24	24	24	31	31	31	24	24	24	86	86	86
< ± 0.03	30	14	13	30	14	13	24	24	23	31	30	27	24	24	24	84	71	66
占各研究區 %	96.77	48.28	41.94	96.77	48.28	41.94	100	100	95.83	100	96.77	87.10	100	100	100	97.67	82.56	76.74

3. TTG 成果檢查

(1) 已知點、加密控制測量 TTG 成果檢查：

- a. 水平距相對精度檢：如表 12 所示，基線總計 799 條(大溪研究區 378 條、沙鹿研究區 231 條、麻豆研究區 190 條)基線，3 研究區計有 785 條(大溪研究區 374 條、沙鹿研究區 228 條、麻豆研究區 183 條)基線相對精度符合二萬分之一規定，符合比率達 98.25%(大溪 98.94%、沙鹿 98.70%、麻豆 96.32%)

表 12 研究區已知點、加密控制測量 TTG 成果水平距相對較差比值分析情形表

研究區	合計	占總基線數量百分比	大溪	占基線數量百分比	沙鹿	占基線數量百分比	麻豆	占基線數量百分比	
基線數量(條)	799	%	378	%	231	%	190	%	
水平距離	相對較差比值不符 1/20,000	14	1.75%	4	1.06%	3	1.30%	7	3.68%
	相對較差比值符合 1/20,000	785	98.25%	374	98.94%	228	98.70%	183	96.32%

b. 方位角檢查：如表 13 所示，計檢核 799 個方位角，有 798 個方位角符合 $\pm 20''$ ，符合比率達 99.86%(大溪 100%、沙鹿 99.57%、麻豆 100%)。其中沙鹿研究區 GD021 至 TCK246 方位角為 $-36.84''$ ，未符規定，研判係基線距離過短(86.255 m)之影響所致。

表 13 研究區已知點、加密控制測量 TTG 成果方位角檢查一覽表

研究區	大溪		沙鹿		麻豆	
	數量	百分比%	數量	百分比%	數量	百分比%
較差級距 (秒)						
15"~20"	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
10"~15"	1	0.26%	5	2.16%	3	1.58%
5"~10"	10	2.65%	10	4.33%	8	4.21%
0"~5"	124	32.80%	172	74.46%	93	48.95%
0"~-5"	228	60.32%	41	17.75%	78	41.05%
-5"~-10"	12	3.17%	1	0.43%	7	3.68%
-10"~-15"	2	0.53%	1	0.43%	0	0.00%
-15"~-20"	1	0.26%	0	0.00%	1	0.53%
-20"~-40"			1	0.43%		
合計	378	100%	231	100%	190	100%
< $\pm 20''$ (%)		100%		99.57%		100%

(2) 圖根測量 TTG 成果檢查：如表 14 所示，檢查水平距離相對較差比值計 4,311 條(大溪 465 條、沙鹿 276 條、麻豆 3,570 條)，平均達 98.35%(大溪 98.06%、沙鹿 93.84%、麻豆 98.74%)符合水平距離相對較差比值小於五千分之一規定。另如表 15 所示，進一步分析檢測距離與反算距離較差小於 0.02m 且水平相對較差比值小於五千分之一，平均達 98.05%(大溪 98.49%、沙鹿 96.38%、麻豆 99.27%)符合規定。

表 14 圖根測量 TTG 成果水平距相對較差比值分析表

水平距相對較差 比值(1/ppm)	大溪		沙鹿		麻豆	
	數量 (條)	百分比	數量 (條)	百分比	數量(條)	百分比

> 5,000	9	1.94%	17	6.16%	45	1.26%
5,000~10,000	19	4.09%	23	8.33%	115	3.22%
10,000~20,000	67	14.41%	62	22.46%	286	8.01%
20,000~30,000	68	14.62%	54	19.57%	312	8.74%
30,000~40,000	59	12.69%	33	11.96%	284	7.96%
40,000~50,000	50	10.75%	13	4.71%	275	7.70%
50,000~60,000	32	6.88%	13	4.71%	231	6.47%
60,000~70,000	18	3.87%	12	4.35%	191	5.35%
70,000~80,000	25	5.38%	12	4.35%	168	4.71%
80,000~90,000	12	2.58%	1	0.36%	142	3.98%
90,000~100,000	10	2.15%	4	1.45%	118	3.31%
< 100,000	96	20.65%	32	11.59%	1,403	39.30%
合計	465		276		3,570	
符合<1/5,000%		98.06%		93.84%		98.74%

表 15 距離較差大於 0.02m 且距離相對比值大於 1/5,000 統計表

研究區		合計	大溪	沙鹿	麻豆
距離總數		4,311	465	276	3,570
較差>0.02m 且 比值<1/5,000	數量(條)	4,278	458	266	3,544
	占距離總數	98.05%	98.49%	96.38%	99.27%

- (3) 研究區坐標轉換：如表 16 及圖 10 至圖 11 所示，在加密控制點最小二乘配置法及 7 參數轉換部分，在分量較差、相對比值及方位角等檢核結果，符合規定比例分別平均達 100%、99.16%及 99.86%。

表 16 研究區最小二乘配置法及 7 參數成果與公告成果分量較差表(單位:m)

項目	大溪				沙鹿				麻豆			平面較差
	dN	dE	dh	平面較差	dN	dE	dh	平面較差	dN	dE	dh	
最大值	0.009	0.018	0.080	0.027	0.011	0.019	0.017	0.024	0.009	0.018	-0.017	0.021
最小值	-0.018	-0.022	-0.063	0.005	-0.024	-0.015	-0.046	0.004	-0.011	-0.007	-0.079	0.011
平均值	-0.004	-0.001	0.022	0.012	-0.002	0.005	-0.019	0.013	-0.005	0.008	-0.040	0.015
標準偏差	0.009	0.010	0.036	0.006	0.006	0.007	0.017	0.008	-0.009	0.011	0.028	0.004

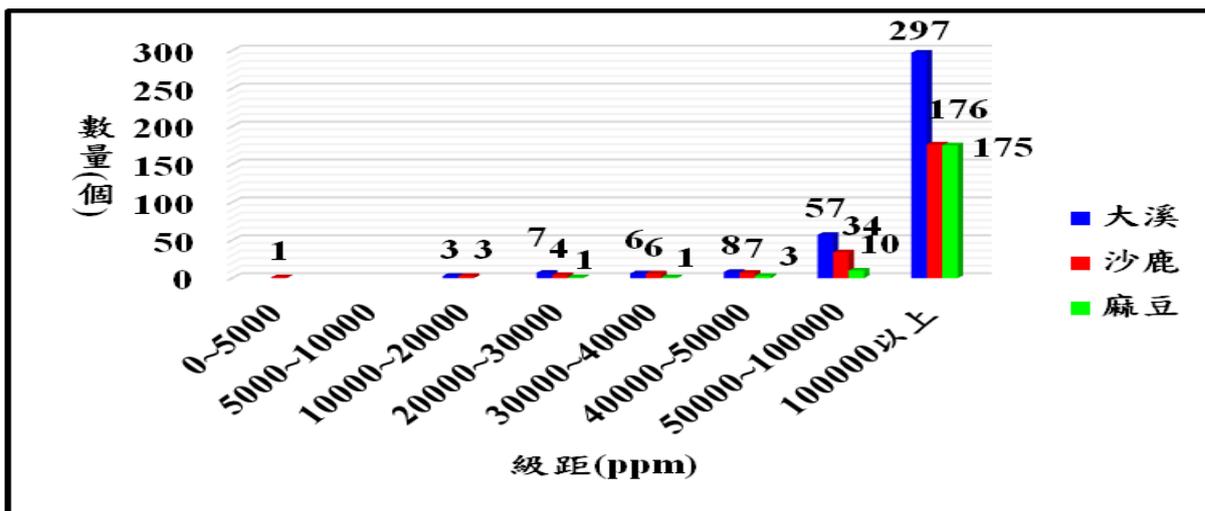


圖 10 研究區最小二乘配置法及 7 參數轉換成果距離相對比值統計圖

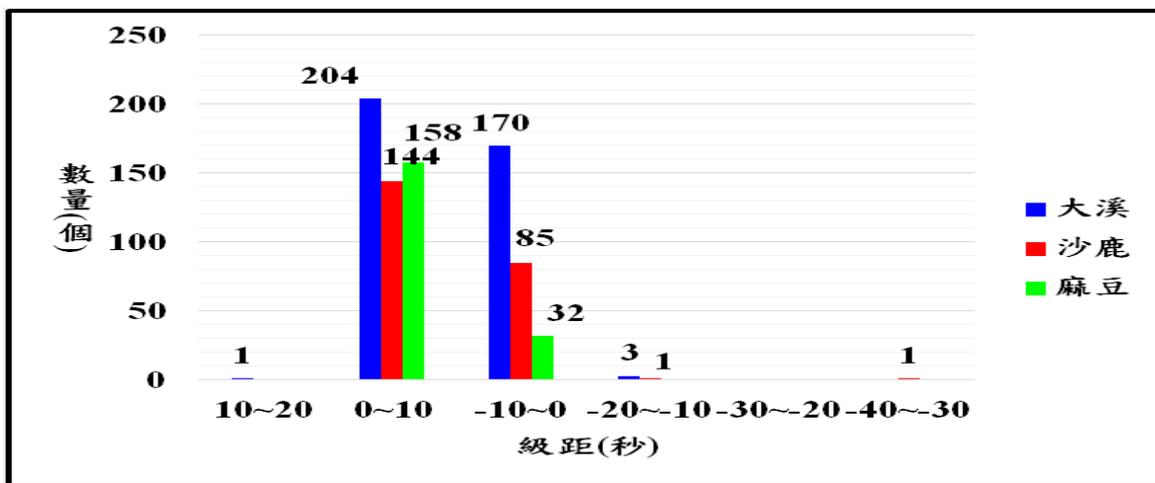


圖 11 研究區最小二乘配置法及 7 參數轉換成果方位角統計圖

另如表 17、表 18 及圖 12、圖 13 所示，圖根測量 e-GNSS[2015]透過最小二乘配置法及人工 6 參數轉換方式，在距離相對精度、方位角等檢核結果，符合規定比例，平均分別達 98.76%、99.86%。

表 17 e-GNSS[2015]與轉換後法定坐標成果距離相對較差檢核表(單位：m)

研究區		合計	大溪	沙鹿	麻豆
基線數(條)		700	378	231	91
轉換前後坐標反算距離	最大值	0.0434	0.0367	0.0414	0.0434
	最小值	-0.0652	-0.0652	-0.0302	-0.0446
符合相對較差比值		691	373	228	90
相對較差比值符合率(%)		98.76%	98.68 %	98.70 %	98.90 %

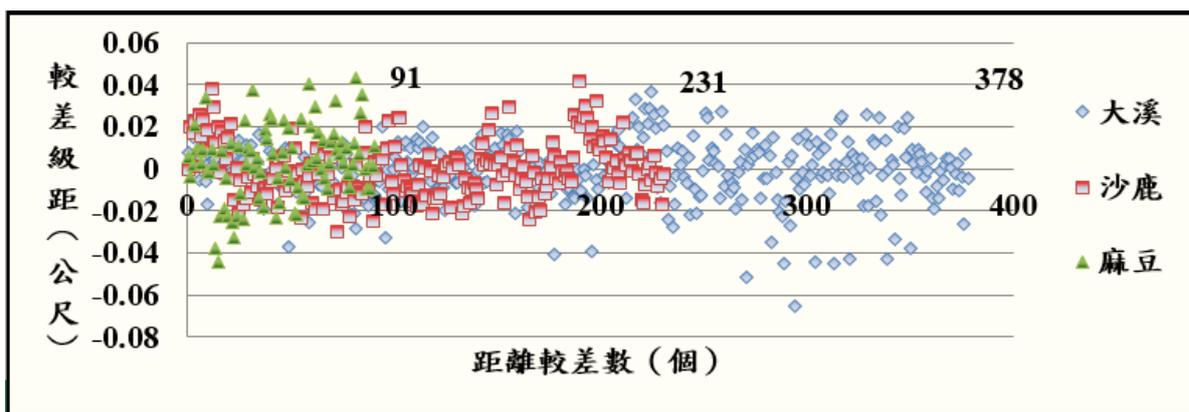


圖 12 e-GNSS[2015]轉換後與法定坐標成果距離較差分布圖

表 18 e-GNSS[2015]轉換後與法定坐標成果方位角較差檢核表(單位：秒)

研究區		合計	大溪	沙鹿	麻豆
方位角總數(個)		700	378	231	91
轉換前後坐標 反算方位角較 差(秒)	最大	19.11	19.11	13.24	11.8"
	最小	-36.8	-17.0	-36.8	-17.9
方位角符合 $\pm 20''$ 數量		699	378	230	91
方位角符合 $\pm 20''$ %		99.86	100	99.58	100

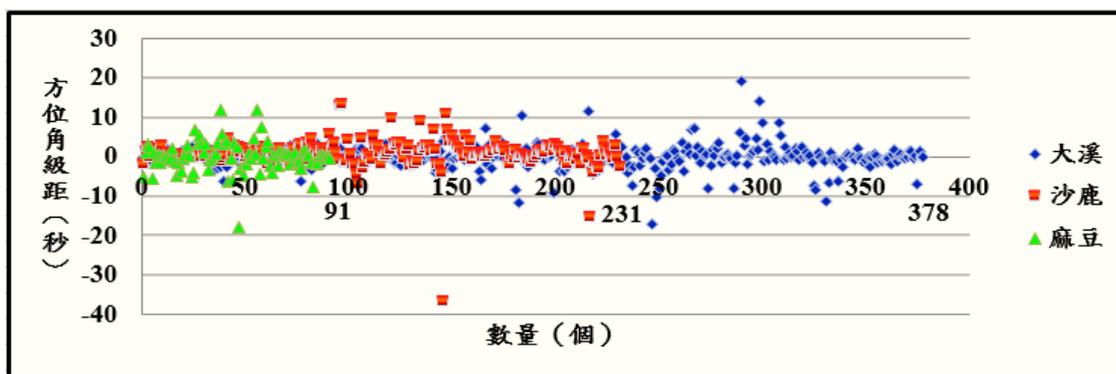


圖 13 e-GNSS[2015]轉換後與法定坐標成果方位角分布圖

4. 地面觀測檢核：

- (1) 加密TTG坐標轉換及e-GNSS坐標經最小二乘配置法及7參數轉換坐標成果與地面觀測檢核結果，在水平距相對較差比值檢核方面，總計49條(大溪研究區27條、沙鹿研究區11條、麻豆研究區11條)地面觀測資料，經化歸平均海水面改正、投影改正後，二者水平距相對較差比值符合二萬分之一比率達96.97%(大溪100%、沙鹿90.91、麻豆100%)；水平角角度檢核部分，總計35個角度，符合 $\pm 20''$ 比率達95.24%(大溪100%、沙鹿85.71、麻豆100%)，上開不符部分如表19及表20所示。

表19 TTG坐標轉換、e-GNSS最小二乘7參數轉換水平距相對較差比值不符1/20,000一覽表

研究區	起點	迄點	地測平距	海面正	水改正	投影改正	改後距離	正距	TTG			e-GNSS 最小二乘配置法及7參數轉換		
									坐標距離	較差	相對精度 1/ppm	坐標距離	較差	相對精度 1/ppm
沙鹿	GD02	TCK246	86.262	-0.001	-0.007	86.255	86.274	-0.019	4476	86.272	-0.018	4918		

表20 水平角角度檢查

研究區	後視	測站	前視	TTG			e-GNSS 最小二乘配置法7參數轉換		
				地測角度	坐標反算	較差(秒)	地測角度	坐標反算	較差(秒)
沙鹿	GD01	GD02	TCK246	83-45-21	83-44-21.4	59.6	83-45-21	83-44-22.1	58.9

(2) 圖根TTG轉換坐標、e-GNSS坐標經最小二乘配置法及6參數轉換坐標成果與地面觀測檢核結果，在水平距相對較差比值方面，計有101個(大溪25個、沙鹿18個及麻豆58個)水平距相對較差比值符合小於三千分之一或水平距較差小於2公分者計有95條，符合規定比率平均達93.24%(大溪96%、沙鹿88.89%、麻豆94.83%)，未符合規定部分如計6條，如表21所示；倘採數值法地籍圖重測作業手冊[60]所定圖根測量RTK觀測成果地面觀測檢核，水平距相對較差比值應小於三千分之一或 ≤ 3 公分，則符合比率可達99.43%(大溪100%、沙鹿98.28%、麻豆100%)。

表21 TTG、e-GNSS最小二乘配置法及6參數轉換水平距相對較差比值(不符)情形表

研究區	起點	迄點	地測平距	海面改正	投影改正	改正後距離	TTG			e-GNSS最小二乘配置法及6參數轉換		
							坐標距離	較差	相對精度 (1/ppm)	坐標距離	較差	相對精度 (1/ppm)
大溪	BH080	BH081	54.063	-0.002	-0.005	54.056	54.084	-0.028	1912	54.084	-0.028	1912
沙鹿	HE217	HE218	56.042	-0.001	-0.004	56.037	56.016	0.021	2684	56.017	0.021	2731
	HE219	BE156	64.875	-0.001	-0.005	64.869	64.894	-0.025	2628	64.894	-0.025	2614
麻豆	HF25	HF26	48.659	0	-0.001	48.658	48.624	0.034	1433	48.625	0.033	1461
	HF26	HF27	42.403	0	-0.001	42.402	42.428	-0.027	1596	42.43	-0.028	1540
	HF38	HF39	66.465	0	-0.002	66.463	66.491	-0.027	2437	66.488	-0.025	2672

(三) TTG、區域性最小二乘配置法及7參數轉換結合地測圖根測量之探討

1. 導線簡易平差：如表22所示，除沙鹿研究區幹導線有1條水平角閉合差超過 $20''\sqrt{N}$ 及大溪研究區幹導線有1條位置閉合比數未符1/5000之規定外，符合地籍測量實施規則第64條規定，整體觀測量簡易平差結果並無大錯情形。

表22 研究區導線簡易平差計算水平角閉合差情形一覽表

研究區	每條幹導線 是否符合不超過 $20''\sqrt{N}$				每條支導線 是否符合不超過 $20''\sqrt{N}+30''$			
	TTG		e-GNSS最小二乘配置法及7參數		TTG		e-GNSS最小二乘配置法及7參數	
	符合條數	不符條數	符合條數	不符條數	符合條數	不符條數	符合條數	不符條數
大溪	24	0	24	0	30	0	30	0
沙鹿	14	1(77/60)	14	1(72/60)	44	0	44	0
麻豆	9	0	9	0	32	0	32	0
合計	47	1	47	1	106	0	106	0
總條數	48		48		106		106	
比例(%)	97.92%	2.08%	97.92%	2.08%	100%	0%	100%	0%

2. 嚴密平差：如表23所示

- (1) 平面角邊平差及可靠度分析，均符合數值法地籍圖重測導線網平差後驗單位權中誤差須介於0.9至1.1、網形平均多餘觀測數須大於或等於0.3之規定。
- (2) 角度觀測量改正數：角度觀測量總計1,266個(大溪486個、沙鹿444個、麻豆336個)，其中TTG結合圖根測量成果平均達99.66%(大溪98.97%、沙鹿100%及麻豆100%)符合角度觀測量改正數小於 $\pm 20''$ 之規定；e-GNSS最小二乘法7參數轉換結合圖根測量成果平均達99.79%(大溪99.38%、沙鹿100%、麻豆100%)符合角度觀測量改正數小於 $\pm 20''$ 之規定。
- (3) 距離觀測量改正數：距離觀測量總計1,053個(大溪382個、沙鹿376個、麻豆295個)，以TTG或e-GNSS最小二乘配置法及7參數轉換成果分別結合圖根測量成果，距離觀測量改正數均可100%符合小於0.02m之規定。
- (4) 以TTG或e-GNSS最小二乘配置法及7參數轉換之加密控制測量成果取代靜態GPS加密控制測量成果，並結合地測圖根測量成果，經網形平差後，平均分別達95.49%、99.60%符合RTK圖根點重複觀測坐標值不得超過0.03m之精度規定。

表23 研究區平面角邊平差及可靠度分析

研究區	TTG			e-GNSS最小二乘配置法及7參數轉換				
	後驗單位權中誤差	網形平均多餘觀測數	角度觀測量改正數	距離觀測量改正數	後驗單位權中誤差	網形平均多餘觀測數	角度觀測量改正數	距離觀測量改正數
		總數	總數	總數		總數	總數	總數
		$< \pm 20''$	$< 0.02m$			$< \pm 20''$	$< 0.02m$	

			個數	個數			個數	個數
			百分比	百分比			百分比	百分比
大溪	0.998629	0.36	486	382	0.992816	0.36	486	382
			481	382			483	382
			98.97%	100%			99.38%	100%
沙鹿	0.993490	0.37	444	376	1.080355	0.37	444	376
			444	376			444	376
			100%	100%			100%	100%
麻豆	1.009031	0.33	336	295	0.970647	0.33	336	295
			336	295			336	295
			100%	100%			100%	100%

(四) 各類坐標轉換與研究區控制測量 TWD97 公告成果比較

1. 如圖14所示，新設加密控制點位公告成果與各坐標轉換成果分析：研究區TTG成果顯然與區域性之7參數、6參數與4參數轉換間最大約有0.03m之較差。究其因係TTG在臺灣本島同屬一個計算網與原加密控制測量成果計算以區域性方式、約制點等因素所致。
2. 如圖15所示，新設圖根點位公告成果與各坐標轉換成果分析：TTG圖根測量成果仍與公告成果較差較大，最大較差約在0.04m以內，其原因與加密控制測量相同。至6參數與4參數二者之差異量亦不明顯。

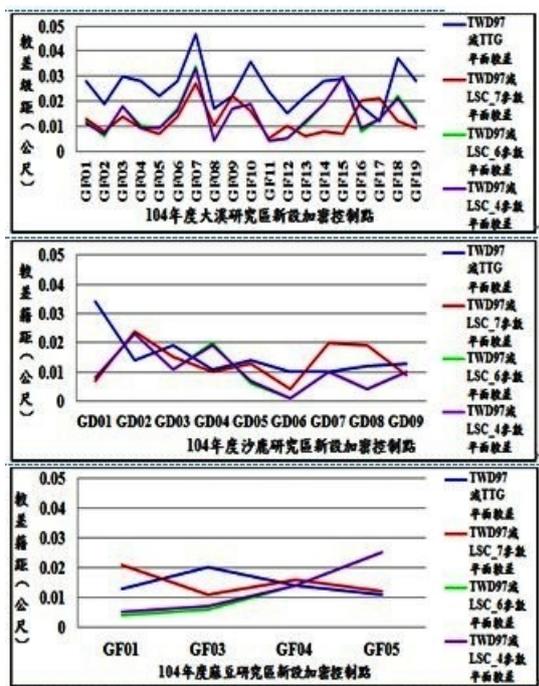


圖14 加密控制測量坐標轉換情形

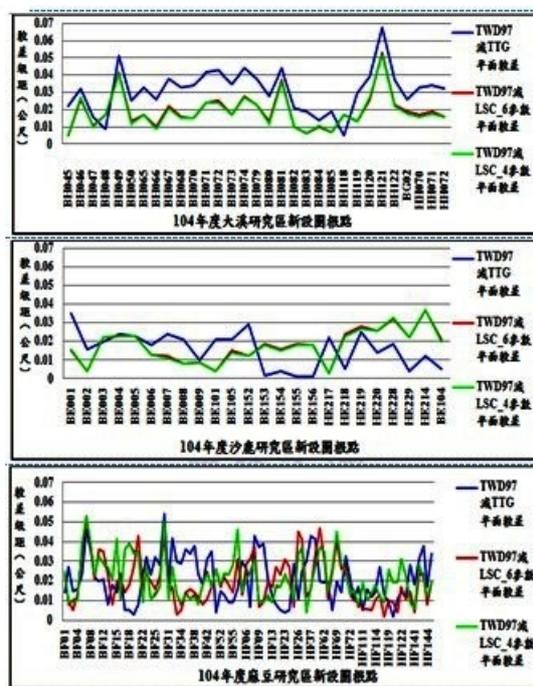


圖15 圖根測量坐標轉換情形

(五) 作業方式比較：如表 24 所示，加密控制測量與圖根測量之點位觀測時間，分別可節省 94%與 98.48%。

表 24 點位觀測時間分析表

項目		每測回觀測時間	測回數	測回間隔	納入計算時刻坐標筆數	點位觀測時間
加密控制測量	GPS 靜態觀測	20 分鐘	2	1 小時	900 筆	100 分鐘
	TTG 或 e-GNSS 參數轉換	3 分鐘	2	時間間隔無限制	180	6 分鐘
節省%						94%
圖根測量	原地面觀測	3 分鐘	2	1 小時	180 筆	66 分鐘
	TTG 或 e-GNSS 參數轉換	0.5 分鐘	2	時間間隔無限制	30 筆	1 分鐘
節省%						98.48%

六、結論與建議

(一)結論

1. 利用 e-GNSS 觀測資料處理坐標計算，由研究區精度解算指標水平中誤差、高程中誤差、3D 中誤差及 e-GNSS 觀測 2 測回之 N、E、h 分量觀測成果顯示 e-GNSS 並不因縮短點位觀測時間而影響解算精度，亦不因測回間無時間間隔限制而發生衛星幾何分布影響定位精度之情形。
2. TTG 精度檢核加密控制測量成果，以 TTG 在測回時間間隔無限制，施測 2 測回，每測回紀錄 180 筆固定解之控制測量成果，在檢核已知點、新設加密控制點及地面觀測檢查項目中，符合規定比率，平均介於 95.24%~100%，顯示 TTG 參數轉換模組計算成果可作為加密控制測量作業參考。
3. TTG 精度檢核圖根測量成果，以 TTG 在測回時間間隔無限制下，施測 2 測回，每測回紀錄 30 筆固定解之圖根測量成果，在水平距離檢核及地面觀測檢查等成果項目中，符合規定比率，平均介於 93.24%~98.35%顯示 TTG 參數轉換模組圖根計算成果亦可作為圖根測量作業參考。
4. 就坐標轉換而言，加密控制測量 e-GNSS 透過最小二乘配置法及人工 7 參數轉換方式，在分量較差、相對比值及方位角等檢核結果，符合規定比例分別平均達 100%、99.16%及 99.86%。另圖根測量 e-GNSS 透過最小二乘配置法及人工 6 參數轉換方式，在相對比值、方位角等檢核結果，符合規定比例，平均分別達 98.76%、99.86%。顯示配合區域性之坐標轉換方式，可為作業之參考。

5. 就圖根測量與基值之平面較差而言，由修正前、後 TTG 圖根測量成果、人工最小二乘配置法及 6 參數轉換成果，分別與基值相較，顯示配合區域性之坐標轉換方式，雖可得較佳之成果，惟平均仍有近 9% 之平面位置較差大於 0.03m，故實務應用上，為確保成果精度，e-GNSS 可適度搭配各類地測方式辦理圖根測量。
6. 以 TTG 或 e-GNSS 最小二乘配置法及 7 參數轉換之加密控制測量成果取代靜態 GPS 加密控制測量成果，並結合地測圖根測量成果，經網形平差後，顯示 TTG 本身具備參數轉換功能，大幅降低作業門檻，獲得精度甚佳之成果，實務上兩者皆可滿足加密控制測量應用之精度需求。
7. 各類坐標轉換與實驗區基值比較方面，顯示 TTG 與各轉換參數間之較差，會因區域性點位測量成果計算過程中，吸收區域性約制點強制附合之累積差或系統差，而造成與趨近於 TWD97 真實位置之 TTG 測量成果有所差異。
8. 在作業方式比較方面，利用 e-GNSS 配合人工或 TTG 參數轉換辦理控制測量作業方式，相較於傳統 GPS 靜態觀測、地面觀測等技術，或現行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所定作業方式更具效率，可節省作業與點位觀測時間比率分別達 94% 及 98.48% 以上。且加密控制測量及圖根測量點位觀測時間，分別由原本 100 分鐘與 66 分鐘，各自縮短至 6 分鐘與 1 分鐘，且精度影響不大，足可做為未來地籍圖重測區辦理控制測量作業方式之參考。

(二)建議

1. 本研究在多星系的觀測資料輔助下，以 TTG 辦理控制測量所得成果精度，多能符合相關作業規定，其成果足可提供主管地籍測量實施規則、相關作業手冊之機關，作為後續法規研修或作業手冊修訂之參考。
2. 本研究控制測量作業係考量 TTG 成果與歷年已知點、圖根點成果因區域性約制點、原成果累積差及相鄰圖根點間距長短等因素，而造成系統差，建議實務作業應用時，加密控制測量可輔以最小二乘配置法及 7 參數坐標轉換；圖根測量如考量現行公告成果不具高程值，可輔以最小二乘配置法及 6 參數坐標轉換方式辦理，否則可併同加密控制測量以最小二乘配置法及 7 參數辦理坐標轉換。
3. 研究區圖根測量成果平均約有 9% 平面位置較差大於 0.03m，係地測圖根點位間距離過短、地測成果承受加密控制測量之誤差量，致影響與 e-GNSS 觀測成果比較所致，然地測圖根點位成果亦可能非點位真正位置，故不能說 e-GNSS 成果即非點位正確位置。因此，倘顧及本文圖根測量研究結果無法完全符合地籍測量實施規則第 74 條規定、現行重測區形態為郊區或海拔 500m 以下之地區、現況參考點並非即為界址點、地籍測量實施規則第 73 條規定及縮短界址測量外業時間，建議重測區圖根測量可採地測方式，現況測量則搭配地測或 e-GNSS 蒐集參考點資料方式辦理；另 e-GNSS 測量成果精度可符合地籍測量實施規則第 76 條之規定，建議可規劃供辦理日據時期地籍圖土地複丈之應用。

4. 目前 e-GNSS 即時動態定位系統，僅加密控制測量與圖根測量訂有作業參考手冊供作業依據，其餘重測作業之界址測量、或協助指界等大量外業測量工作，皆因缺乏即時動態定位測量之相關規定，造成作業困擾。建議對 VBS-RTK 有興趣之研究者，可針對此部分進行研究，或由主管機關盡早研訂相關作業規範或手冊，以供應用。

誌 謝

本文得以完成，承蒙內政部國土測繪中心熱心提供協助，特此致謝。

參考文獻

- 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》，第 1-20 頁。
- 內政部，2011，《數值法地籍圖重測作業手冊》，初版，臺北市，內政部。
- 內政部國土測繪中心，2012，《地籍圖重測成果檢查作業須知》，初版，臺中市，內政部國土測繪中心。
- 內政部國土測繪中心，e-GNSS 即時動態定位入口網站，<http://www.egnss.nlsc.gov.tw/>，最近檢索時間 2017 年 5 月。
- 內政部國土測繪中心，e-GNSS 系統三維坐標轉換服務平台，<http://www.egnss.nlsc.gov.tw:8081>，最近檢索時間 2017 年 5 月。
- 內政部國土測繪中心，國土測繪圖資網路地圖服務，<http://maps.nlsc.gov.tw> 最近檢索時間 2017 年 5 月。
- 王敏雄，2007，《e-GPS 定位系統應用於基本控制測量作業之研究》，內政部國土測繪中心。
- 王文俊，2014，《應用 GNSS 快速靜態與 e-GNSS 比較加密圖根控制測量之研究》，國防大學環境資訊及工程學系空間科學所碩士論文。
- 日本國土交通省入口網站，<http://www.chiseki.go.jp/plan/gnss/index.html#torikumi3>，最近檢索時間 2017 年 05 月。
- 林世賢、劉至忠、劉正倫，2007，《應用 e-GPS 即時動態定位系統辦理三等控制點檢測作業可行性之探討》，內政部國土測繪中心。
- 黃鶴，2011，韓國現代化測繪發展現況，《測繪通報》，第 5 期，第 55-58 頁。
- 莊峰輔、湯凱佩、王敏雄、梁旭文、劉正倫，2014，《三維即時坐標轉換輔助 VBS-RTK 定位技術獲得法定坐標系統測量成果之研究》，內政部國土測繪中心。
- 陳鶴欽、蕭世民、莊峰輔、梁旭文，2015，《e-GNSS[2015]坐標更換及營運實務探討》，內政部國土測繪中心，<http://www.gis.tw/2015tgis/download.aspx>。最近檢索時間 2017 年 5 月。
- 楊名、馮倩君，2005，《以多參考站為基礎之 GPS 即時動態定位演算法發展》，行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告，國立成功大學測量及空間學系。
- 劉榮增，2011，《e-GPS 應用於加密控制測量之研究-以桃園縣楊梅重測區為例》，國防大學環境資訊及工程學系空間科學所碩士論文。

- 劉榮山，2015，〈運用 e-GNSS 結合多元圖資辦理土地複丈之研究-桃園市桃園區、龜山區為例〉，國防大學環境資訊及工程學系空間科學所碩士論文。
- Eleiche, M., 2008, 《RTCM 3.1 Transformation Messages In RTK GNSS Networks,》 Faculty of GeoInformatics, University of West Hungary, Hungary.
- Fritzensmeier, K., G. Kloth, W. Niemeier, and K. Eichholz, 1985, 《Simulation Studies on the Improvement of Terrestrial 2-D-Networks by Additional GPS -Information”, Inertial, Proceedings of Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys》 Schriftenreihe: Universitat der Bundeswehr Munchen and Universitarer Studiengang Vermessungswesen.
- Munsung KOH, Republic of Korea and Garfield KNIGHT, Jamaica, A Land Registration Project in Jamaica, 《FIG Congress 2014》 .
- Rapp, R. H., 1993, Geometric Geodesy Part II, 《Department of Geodetic Science and Surveying,》 The Ohio State University.
- Zuhaidah N., A. A. Wan, M. A. Wan, M. A. Zulkarnaini, and H. Y. Mohd, 2009, 《Investigation on VRS-RTK Accuracy and Integrity for Survey Application,》 Department of Geomatic Engineering, Faculty of Engineering and Science Geoinformation, Universiti Teknologi Malaysia.

網際網路地圖服務之點位坐標及距離量測精確度評估

洪翎嘉¹ 王聖鐸^{2*} 林世賢³

論文收件日期：105.12.09

論文修改日期：106.02.16

論文接受日期：106.02.27

摘要

Google 於 2005 年推出谷歌地圖(Google Maps)後，成功將網際網路地圖服務(Web Mapping Services, WMS)推廣至一般使用者，成為目前一般使用者最直覺獲取空間資訊的方式。但美國國家地理空間情報署(National Geospatial-intelligence Agency, NGA)以及國際油氣生產者協會(International Association of Oil & Gas Producers, IOGP)卻相繼建議使用者勿在網際網路麥卡托投影(Web Mercator Projection)上進行重要量測工作。在網際網路地圖上量測，除了會受限於原本圖資的測製精度之外，也會受到地圖投影方式、螢幕點選精度、圖台設計等影響，導致量測結果與實際有所出入。本研究以使用者觀點出發，採用實驗之方式，試圖釐清網際網路地圖量測精確度，以提供一般使用者參考。本研究以 Google Earth、ArcGIS Earth 以及內政部國土測繪中心臺灣通用電子地圖臺灣通用電子地圖為實驗圖台，以臺灣本島地區 119°E、120°E、121°E 三條經線及 23°N、24°N、25°N 三條緯線所交會出的 9 個整數經緯度交點為坐標量測目標，以兩點之間的 12 條邊長作為距離量測標的，評估使用者在使用上述網際網路地圖服務時所能得到之精確度。

關鍵字：網路地圖服務、精確度評估、臺灣通用電子地圖、ESRI ArcGIS Earth、Google Earth

¹ 碩士生，國立臺灣師範大學地理學系。

² 助理教授，國立臺灣師範大學地理學系。

³ 技正，內政部國土測繪中心地形及海洋測量課。

* 通訊作者，TEL：(02) 7734-1683，Email：sendo@ntnu.edu.tw。

Accuracy Assessment on Coordinates and Distance Measurements on Web Mapping Services

Ling-Chia Hung¹ Sendo Wang^{2*} Shih-Hsien Lin³

Abstract

Since Google launched their first open access web map application, Google Maps, in 2005, the web mapping service(WMS) has been widely used by people all over the world. The convenience and open accessibility of the WMS breaks down the high barrier of using professional paper map. Nowadays, people has been used to measuring coordinates and distance on the WMS rather than on the paper maps now. However, the U.S. National Geospatial-Intelligence Agency(NGA) and the International Association Oil and Gas Producers(IOGP) successively publish notices to suggest people do not measure distance on the WMS based on the Web Mercator Projection. Distortions are inevitable for any projection, therefore, every map contains distortion. But the measuring error on the WMS derives not only from the projective distortion but also from the human-machine interface and the web map platform. The objective of this research is to assess the overall accuracy of the measurement on the WMS. We choose the 9 intersection of 3 meridians, 23°N, 24°N, 25°N, and 3 parallels, 120°E, 121°E, 122°E, as the point target. The distances of the 12 edges formed by the 9 intersection are chosen for the accuracy assessment on the distance measurement. Three web mapping services, the Google Earth, the ESRI ArcGIS Earth, and the NLSC Taiwan Electronic Map are selected for the experiments. First, the Web Mercator Projection is reviewed and its projection formula is used to assess the theoretical accuracy of the 9 intersection points' coordinates. Second, we invite several participants to click 10 time on each of the 9 intersection points to evaluate the experimental accuracy on the coordinates. Finally, the measured distance of the 12 edges are compared to the geodesic length to evaluate the experimental accuracy on the distance measurements. The final results of this research can be served as a reference while people want to make measurements on the WMS.

Keywords : Accuracy Assessment, ESRI ArcGIS Earth, Google Earth, Measurements, NLSC Taiwan Electronic Map, Web Mapping Service

¹ Master student, Department of Geography, National Taiwan Normal University.

² Assistant professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University.

³ Technical Specialist, Topographic and Hydrographic Survey Section, National Land Surveying and Mapping Center.

* Corresponding Author, TEL: +886-2-7734-1683, Email: sendo@ntnu.edu.tw.

一、前言

Google 於 2005 年利用網際網路麥卡托投影製作成圖磚(Map Tile)，推出網際網路地圖服務(Web Mapping Services, WMS)—Google Maps。根據 2013 年的統計，全球超過 54% 的智慧型手機使用者至少在手機上使用過一次 Google Maps 應用程式 (Mari, 2013)，打破過去地圖僅限於專用用途的印象，成功推廣到一般使用者。網際網路地圖上進行點選、量測、導航...等已成為一般使用者最直覺獲取空間資訊的方式，但 2014 年美國國家地理空間情報署(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)曾建議「網際網路麥卡托投影不使用於軍事用途上，且其於導航使用上存在著一定的風險」(NGA, 2014)；國際油氣生產者協會(International Association of Oil & Gas Producers, IOGP)也於 2016 年 9 月提出一份對於網際網路地圖投影的報告，報告中建議「使用者勿於網際網路麥卡托投影坐標系統上進行量測距離、面積...等量測工作」(IOGP, 2016b)，基於上述各政府組織所提供之報告，網際網路地圖是否如報告中所建議，不適合應用於量測？但一般使用者最直覺獲取距離的方式，即於網際網路地圖上進行量測，例如：上個月有部落客嘗試尋找臺灣的難抵極(亦為最難抵達的極點)，其最初使用的方式則為於 Google Earth 上進行距離之量測(Tyler, 2017)。使用者實際上於使用網際網路地圖之精確度為何，本研究以此為動機，以臺灣本島地區為研究範圍，試圖釐清網際網路麥卡托投影在臺灣地區的變形量以及一般使用者在網際網路地圖上進行量測時所能得到的精度。

二、網際網路地圖投影

網際網路地圖最常使用的投影方式為球形麥卡托地圖投影(Spherical Mercator Map Projection)又稱網際網路麥卡托投影(Web Mercator Projection)或谷歌投影(Google Projection)，由於投影後方便製作圖磚，因此如：ArcGIS Online、內政部國土測繪中心臺灣通用電子地圖等網際網路地圖服務皆採用此投影方式。歐洲石油測量組織(European Petroleum Survey Group, EPSG)將全球所有大地坐標系統皆賦予代號，其對網際網路麥卡托坐標系統之 EPSG 代號為 3857，且使用「熱門視覺化的擬麥卡托」(Popular Visualization Pseudo Mercator, PVPM)的方法(EPSG 代號為 1024)。此投影方式是 2005 年 Google Maps 推出時所使用的投影方式，利用 WGS84 中參考橢球體的長半徑做為半徑(圖 1)，成為一個正圓球(Zinn, 2010)，再將 WGS84 之橢球坐標直接套用於正圓球上，以正圓球取代橢球，使得南北方向些微失真(Tsai, 2014)，離赤道越遠則扭曲的程度漸增，此投影並非為正形投影，尺度比會隨著方位角而產生變異，造成角度的變形(IOGP, 2016a)，故兩點之間並非等恆線。利用 WGS84 橢球體的緯度 φ 和經度 λ 可計算出投影後的 NE 坐標(式 1)，當緯度為 90 度時，則 N 值會無法計算，故網際網路麥卡托投影在中高緯度有較嚴重的變形 (Jenny, 2012)，變形程度大且無法校正，故建議使用者勿在網際網路麥卡托投影上進行重要的量測工作(IOGP, 2016b)。

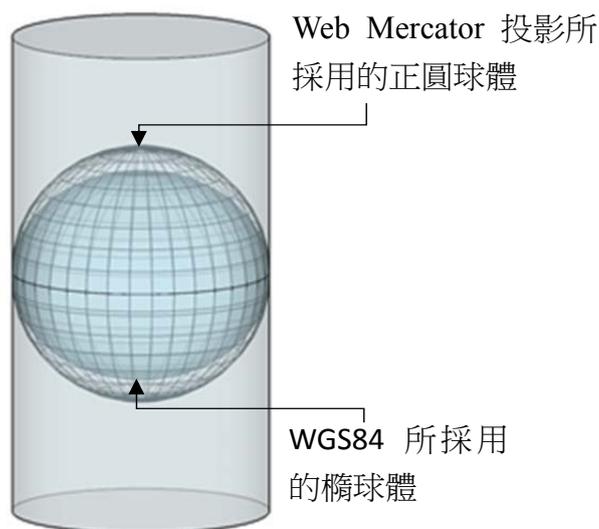


圖 1 網際網路麥卡托投影原理示意圖

$$E = FE + a (\lambda - \lambda_0)$$

$$N = FN + a \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

式中：

E = 坐標東距值

N = 坐標北距值

FE (False Easting) = 坐標西移量

FN (False Northing) = 坐標南移量

a = 參考橢球體的長半徑(即為赤道的半徑)

λ_0 = 經度原點

λ = 經度

φ = 緯度

三、大地線

地球是一個高低起伏多變的近似橢球體，常用來描述地球的球體可分為正圓球以及旋轉橢球兩種，不同於平面上量測兩點之間最短的距離為直線，正圓球上球面上兩點間的最短距離稱為大圓距離(Great Circle)。地球為近似橢球體，為了方便數學的計算並賦予其坐標系統，故通常使用可經由數學運算表示的橢球體來描述地球。此一橢球體可透過觀測地球旋轉角速率與地球質量，反求地球自轉離心率，進而算出橢球長、短半徑及扁率以定義地球原子。由於地球地表地形變化多樣，故不同的區域在決定大地基準(Datum)時，會選擇最適合的地球原子作為其坐標系統之參考橢球體，而於其球面上量測兩點間最短距離，則為大地線(Geodesic)。大地線具有唯一

性，亦即從 A 到 B 或是 B 到 A 的大地線是同一條線，而計算橢球體上兩點間距離的公式則稱「大地線公式」。本次研究將其視為真實地表上兩點之間的實際距離，即為真值，也是後續將與網際網路地圖量測結果進行精確度比較之依據。本研究採用澳洲測量局官方網站 (http://www.ga.gov.au/geodesy/datums/vincenty_inverse.jsp) 所提供計算大地線長度功能，根據該網站公告，其計算係採用 Vincenty (1975) 之大地線公式中之反算法(Inverse Formula)。

四、研究方法與流程

本研究透過實驗方式，採用提供擁有地圖量測功能的 Google Earth、ArcGIS Earth 以及臺灣通用電子地圖，三個臺灣民眾較常使用的網際網路地圖為實驗的圖台。以臺灣本島地區為研究範圍，自東經 120 度至 122 度，北緯 23 度至 25 度，跨幅一度為一格(圖 2)進行點位坐標及格線長度量測，每一長度從(a)到(l)依序給予編號，以利後續實驗結果之討論。

量測方式大致可以分為兩種，第一種為使用者直接點選於地圖上進行量測，其精度會因人為的點選誤差、圖台本身的投影誤差以及未知來源之誤差三種誤差而產生影響。首先本研究試圖釐清人為點選誤差之影響程度，故採用同一個坐標點需獨立點選十次，並取其平均之方式進行，以瞭解點選之精確度 (Accuracy) 以及精密度 (Precision)。再者為投影誤差，任一投影方法有其變形分布狀態，故本研究試圖探究網際網路地圖投影在臺灣地區的變形分布樣態為何。量測之數值除點選誤差以及投影誤差外，則本研究視之為未知來源誤差，此部分將採用與大地線公式所計算出每一格距離進行比較。第二種為使用者直接上傳一個 KML(Keyhole Markup Language)格式的檔案，此方式則屏除人為誤差，誤差唯有投影誤差以及未知來源誤差。使用者可透過編修 KML 格式之檔案，將內部坐標修改成使用者欲量測之實際坐標，再上傳 KML 格式的檔案獲取網際網路地圖所回傳之量測結果，該結果值再與大地線公式比較，而呈現其精度。

研究流程如圖 3，首先人工進行點選量測實驗，在可得知實際點選結果之圖台，如可將點選的點匯出成 KML 檔者，例如：Google Earth，將被選為點選精度分析之實驗對象，了解人為點選的誤差是否嚴重的影響量測結果。第二，人工進行距離量測實驗，將量測結果與大地線公式計算之結果進行差值比較。第三，將設計的檔案，如：被編修坐標後的 KML 檔案，將檔案上傳至網路地圖圖台，其結果再與大地線公式計算之結果進行差值比較。

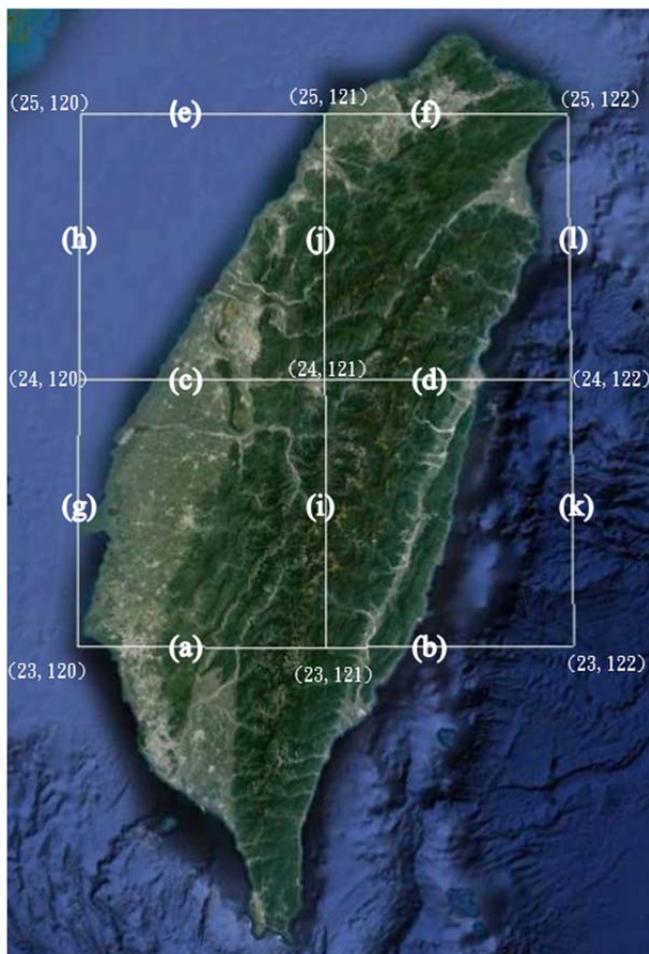


圖 2 研究範圍以及量測線段代號(截圖自 Google Earth)

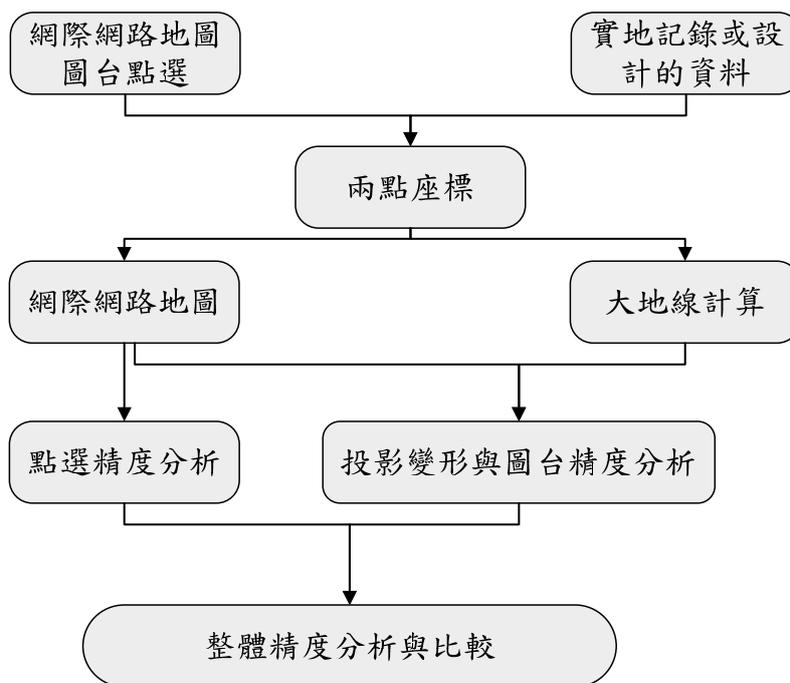


圖 3 研究流程圖

人為點選以及量測時，須將所有不必要的圖層全部關閉，以及將圖台比例尺放置最大，以降低因圖台本身可能產生的誤差。點選時，以螢幕上顯示的坐標值為依據，當坐標值變動成該次點選實驗所要的坐標值時，則進行點擊，但此次點擊的結果與實際的真值並非完全一致，故本次研究採取點選十次並平均十次結果的方法，且為了降低人為習慣所造成的誤差，故此實驗將會邀請數個實驗者在同一個裝置下進行點選實驗，試圖了解一般大眾點選時的精確度為何，並將點選的結果繪製成點選散佈圖，了解點選的精密度以及探究是否有系統誤差之問題。量測長度時，採行直接量測，但此量測將會包含人為誤差。量測方式與點選一致，量測十次並平均十次結果，每次量測的結果需與均值相減，繪製較差直方圖，了解距離量測的精密度。

實際紀錄或設計之資料是指經量測的線段匯出成 KML 檔案，再經由編修 KML 程式碼中的坐標檔，將坐標修改成真值，最後再上傳至網路地圖圖資平台，獲取線段長度之值，此方法可避免人為誤差之問題，並可以單一探究圖台因投影方式或是本身之系統問題...等，對於距離計算所造成的誤差。

五、實驗測試

(一) 網際網路地圖點選精度分析

本研究以 Google Earth 做為點選精度分析之平臺，依照研究方法所闡述的點選方式，進行點選實驗，各實驗點均點選十次。點選實驗過程中發現 Google Earth 利用點圖徵點選實驗時，會產生進位問題，如圖 4 中 $22^{\circ}59'60''$ 不等於 $23^{\circ}0'0''$ 之情況。

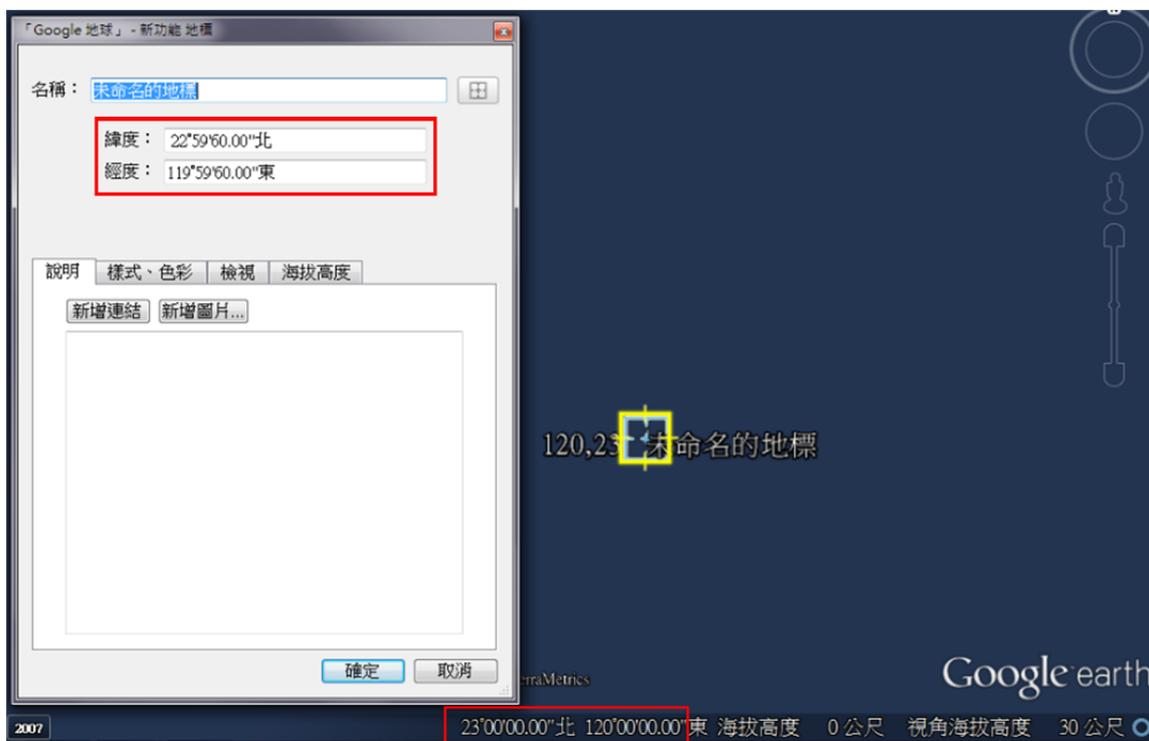


圖 4 Google Earth 點選進位問題

1. 點選量測之精密度

點選後，將所有的點匯出成 KML 之檔案格式並以程式編輯器開啟，複製各點所有點選結果之實際坐標值，以真值為坐標系統原點，將多次點選之坐標一一展點繪製成散布圖(圖 5)，結果發現各實驗點之重心皆落於第一象限。試圖釐清是人為習慣所造成的誤差，抑或圖臺本身之系統誤差，故本研究邀請其他三位實驗者依照相同的研究方法，進行點選實驗，但點選之結果，所有的實驗點之重心仍落於第一象限，推測可能為圖臺系統之誤差。

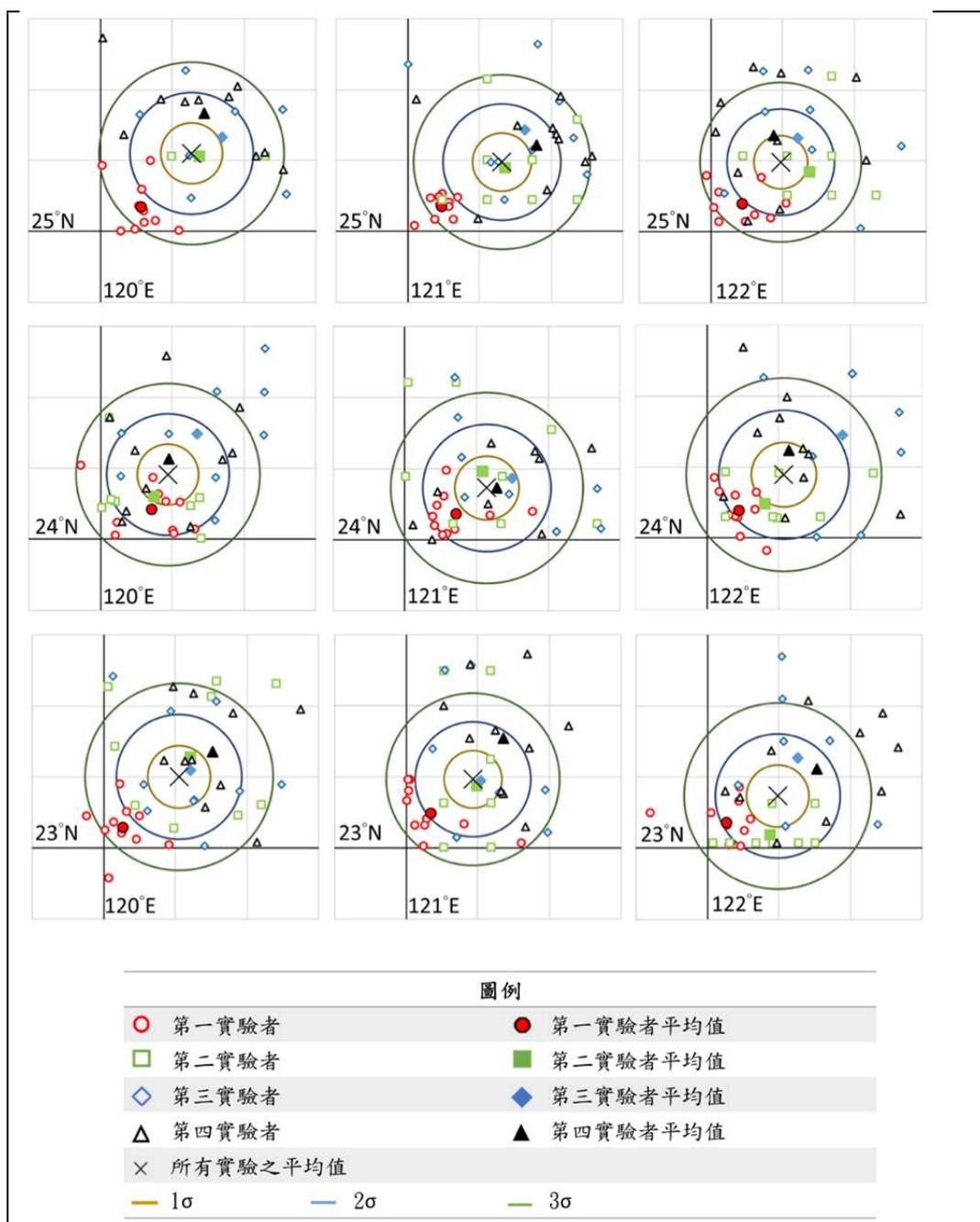


圖 5 點選實驗之結果散布圖

2. 點選量測之精確度

點選精確度之計算為實驗值與真值之差值。各實驗點四個實驗者共四十次點選實驗值，所有的值須與該坐標之真值進行相減，並計算各實驗點之標準差。圖 6 為 Google Earth 進行點選實驗後進行計算，各實驗點三倍標準差之結果，各點之三倍標準差大約於 0.12 公尺至 0.15 公尺之間，該值也是每個使用者點選時，可能造成的人為誤差。表 1 為各點實驗與真值之差值的統計表，此處的差值最大值最小值為每一個點選結果與真值之間的距離，差值最大值皆於 0.15 公尺至 0.2 公尺間，差值最小值則於 0.006 公尺至 0.021 公尺間，差值平均值皆小於 0.1 公尺。

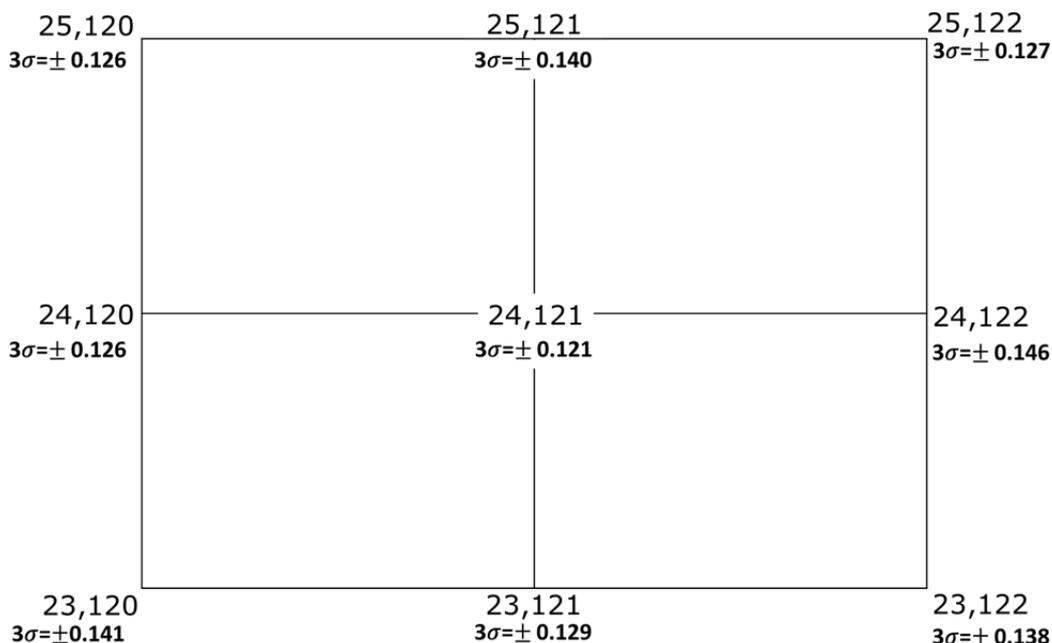


圖 6 點選量測精確度之實驗結果

表 1 點選實驗差值統計值(單位：公尺)

	差值最大值 Max	差值最小值 Min	差值平均值 Average	均方根偏差 RMSD(σ)
(23,120)	0.178	0.015	0.086	0.047
(23,121)	0.174	0.012	0.080	0.043
(23,122)	0.164	0.006	0.072	0.046
(24,120)	0.189	0.011	0.076	0.042
(24,121)	0.151	0.013	0.078	0.040
(24,122)	0.168	0.021	0.080	0.049
(25,120)	0.160	0.014	0.095	0.042
(25,121)	0.173	0.007	0.090	0.047
(25,122)	0.158	0.010	0.080	0.042

(二) 網際網路地圖距離量測精度分析

本研究以 Google Earth、ESRI ArcGIS Earth 以及國土測繪中心的臺灣通用電子地圖為距離量測之實驗圖台，網際網路圖台上將東經 120 度至 122 度，北緯 23 度至 25 度該範圍，劃分為十二條線段(圖 2)，每條線段亦量測十次，以利了解量測之精確度以及精密度。

1. 距離量測之精密度

每個網際網路地圖上的每條線段皆需量測十次取其平均，各次量測值再與該線段之平均值相減，得其差值，利用差值繪製個圖台之較差直方圖，瞭解各圖臺精密度之程度，各圖台較差直方圖之組距採用各量測線段之標準差。首先圖 7 為 Google Earth 量測之較差直方圖，其中線段(i)與(j)之分布與其他線段有較顯著之差異，對照線段實際位置，猜測可能與其位於地形起伏較大的中央山脈有關連。ArcGIS Earth 量測長度單位為公厘，此為三個圖台當中量測長度單位最小，但因其無法關閉 3D 地形特效，故所有的線段皆繪製於 3D 地形之上，從圖 8 之較差直方圖可觀察出若該線段位於海面或是平原地形，例如：圖 8(e)、(f)、(g)、(h)、(k)、(l)會呈現各量測長度與平均值的差值較小，也造成直方圖較集中、精密度較高之情況，其餘則較分散。圖 9 為臺灣通用電子地圖之較差直方圖，因其量測長度單位為公尺，故在使用量測功能時，每次量測差異程度大約為一公尺左右，也常量測到相同的數字，其分佈狀況較似於鐘狀分配。

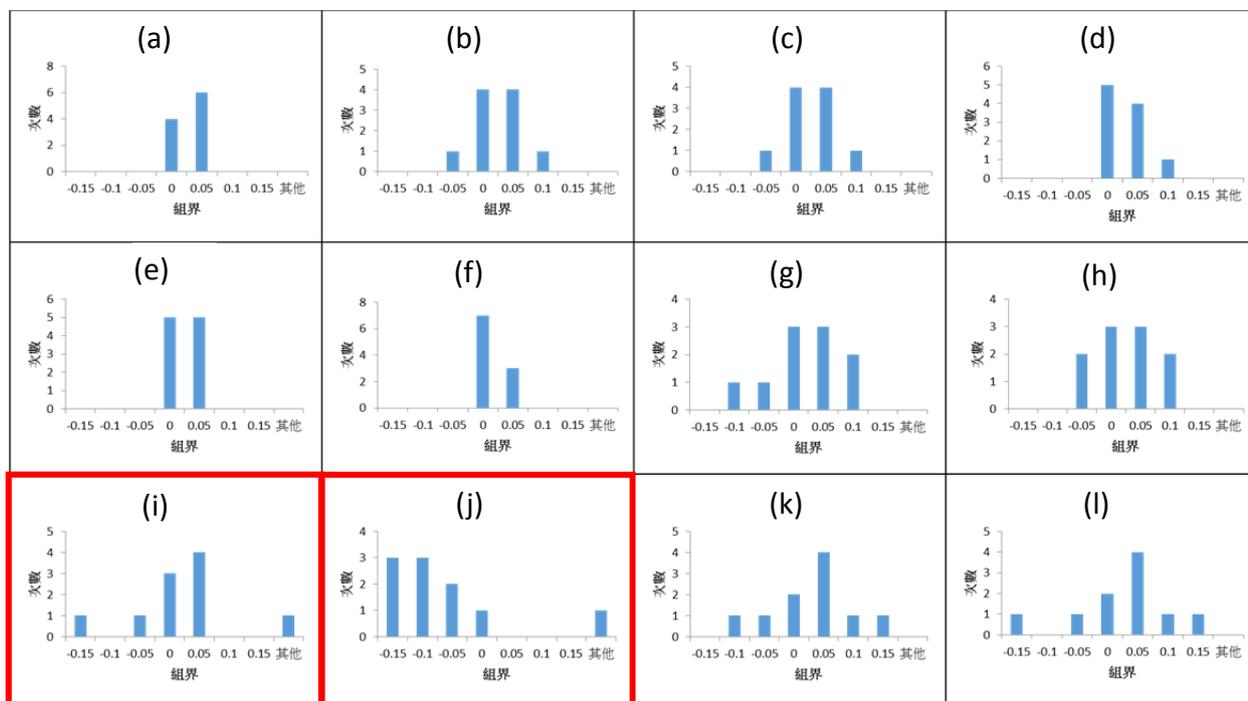


圖 7 Google Earth 距離量測結果之較差直方圖

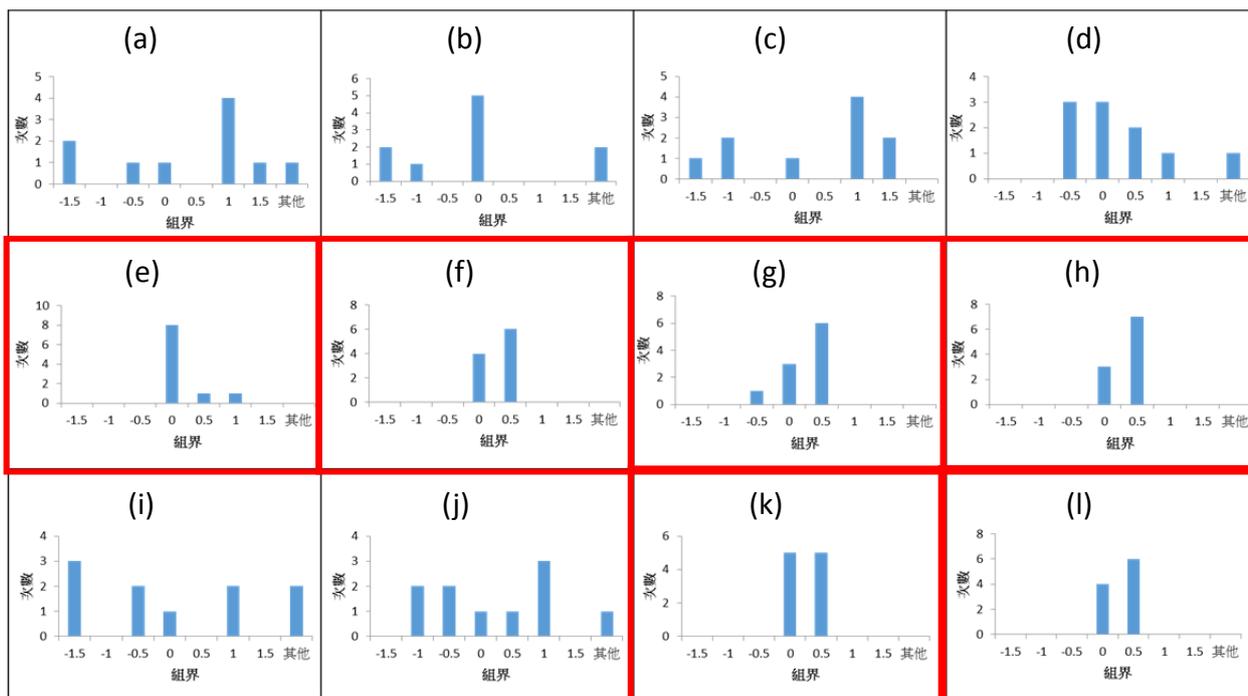


圖 8 ArcGIS Earth 距離量測結果之較差直方圖

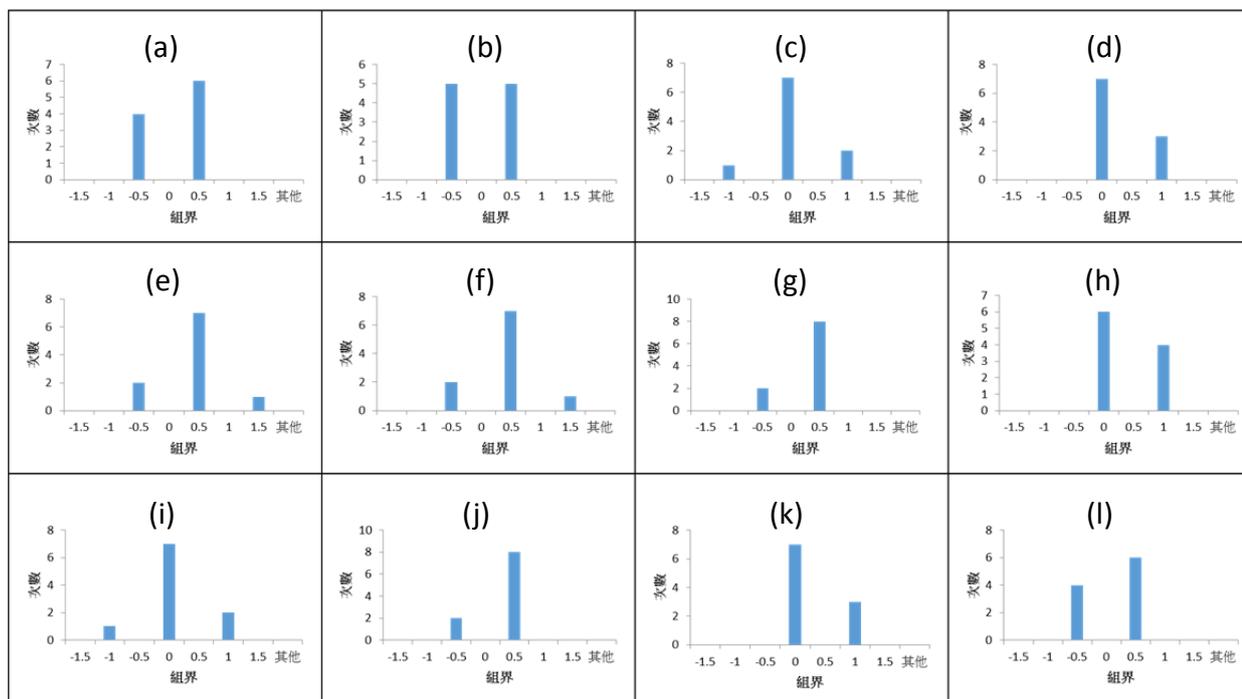


圖 9 臺灣通用電子地圖距離量測結果之較差直方圖

三個圖台唯有國土測繪中心所提供的臺灣通用電子地圖為 2D 平面電子地圖，其他兩個圖台皆有觀看地形之功能，Google Earth 可以關閉地形起伏之功能，但 ArcGIS Earth 無法關閉，但兩者於較差直方圖中皆呈現在地形起伏較大之區域其直方圖分布較分散，海面以及平原區域則分布較集中。

2. 距離量測之準確度

距離量測之值的精確度比較，本研究以大地線所計算出之距離為真值，各圖台量測線段以及大地線所計算之結果(圖 10)，後續利用上述網際網路平台之量測值與真值進行差值比較，以得量測精確度之結果。除了量測之差值比較之外，本研究試圖釐清人為誤差和投影誤差之間，何者對於量測的影響較大，故每次 Google Earth 中所量測的線段需另存成 KML 檔案格式，並修改其坐標檔，將線段兩端坐標值改為真值，再與大地線之值進行相減(圖 11 左上)。圖 11 右上為本研究自行量測之數值，圖中標示的 3σ 為點選精度分析時，所得出各點的三倍標準差，可瞭解點選誤差對於量測線段之影響。以緯度 23 度上，經度 120 度到 121 度之線段為例，兩點最大誤差相加可得 ± 0.27 m，此「點選標準差」 ± 0.27 m 小於「大地線與非量測 Google Earth 線段之差值」1.097m，故推測點選誤差小於投影誤差。表 2 至表 4 為三個圖台的差值統計值，差值最大值最小值是量測值與大地線距離相減後絕對值之結果，均方根偏差為差值之標準差，首先表 2 為 Google Earth，其線段(j)是所有線段中差值平均值會大於 1.5 公尺且三倍標準差大於 1 公尺之線段，其餘皆小於，表 3 為 ArcGIS Earth，線段(e)、(f)、(g)、(h)、(k)、(l)等差值平均值皆小於 0.2 公尺，最後表 4 為國土測繪中心臺灣通用電子地圖，差值平均值皆為 0.5 公尺左右。

臺灣通用電子地圖與 ArcGIS Earth，因圖臺量測時，不能儲存量測的檔案，故無法得知量測長度兩端點點選當下的點坐標，所以無法如同 Google Earth 般得知各點標準差。自行量測的 Google Earth 線段與大地線的差值，緯距差異 1.5 公尺，經距差異 1 公尺，臺灣通用電子地圖之量測單位雖然為公尺，但其所量測出的結果與大地線的差值卻是三種不同圖臺當中差值最小，差值平均值皆大約為 0.5 公尺左右。ArcGIS Earth 之量測單位雖然為公厘，但其在前一部份的較差直方圖中，即可看出地形起伏較大的區域，則量測出的線段間差異較大，線段平均與大地線的差值也得出相同的結果，地形起伏較的區域則與大地線公式所計算的誤差也較大，均方根偏差也大於 1 公尺。

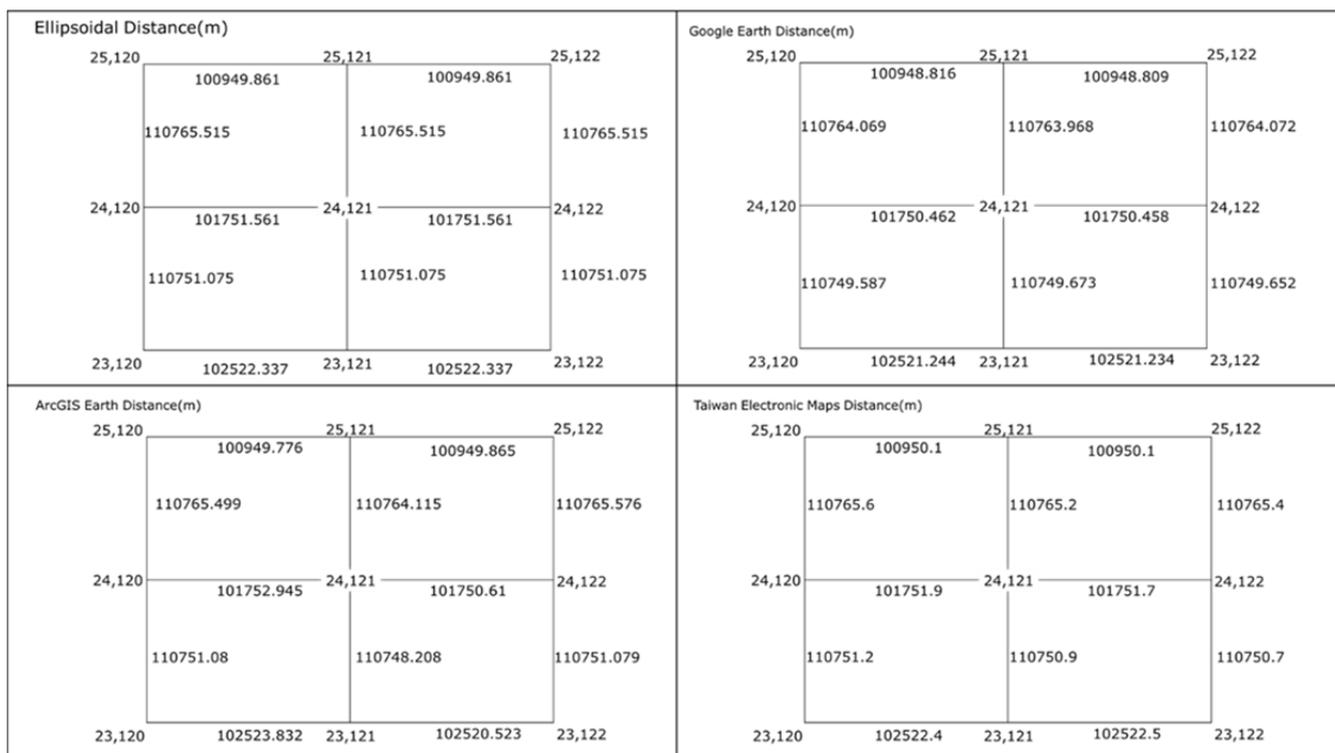


圖 10 各圖臺量測長度值示意圖(左上：大地線計算出之結果；右上：Google Earth；左下：ArcGIS Earth；右下：國土測繪中心圖資，長度單位皆為公尺)

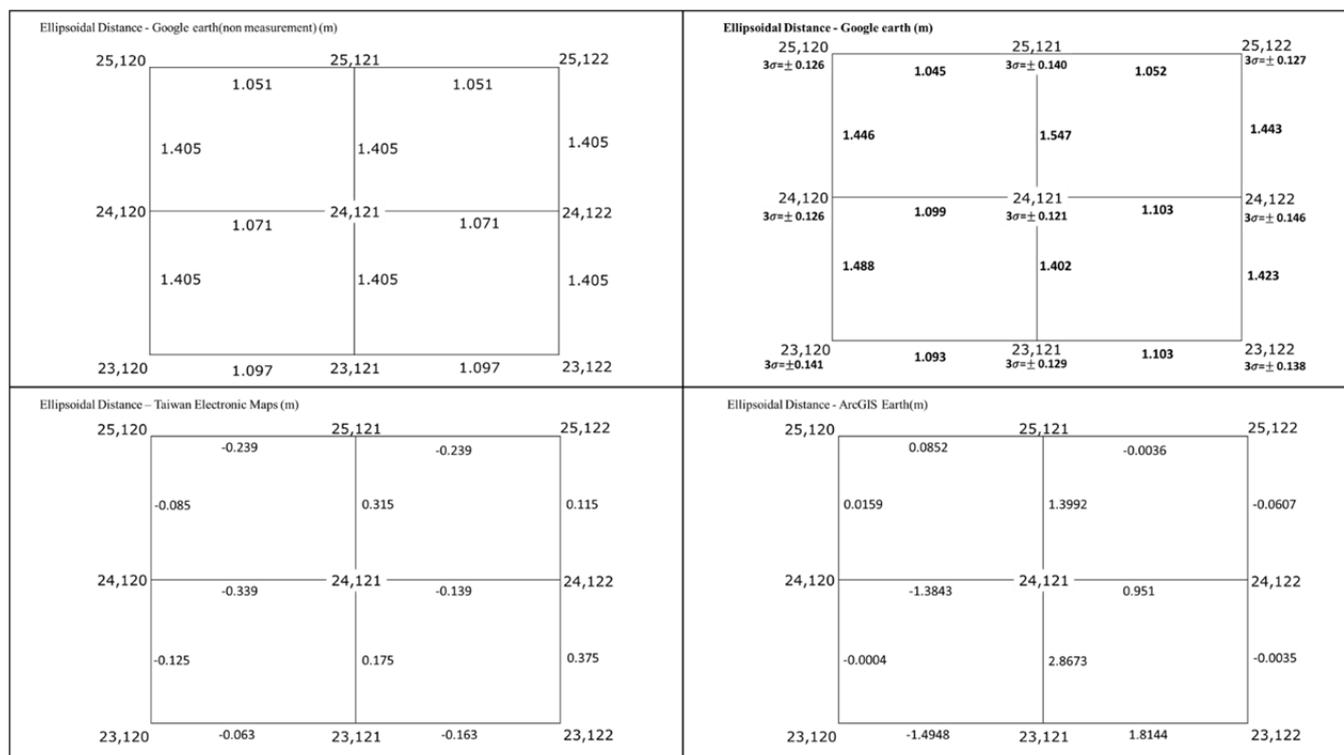


圖 11 各圖臺長度與大地線公式之差值示意圖(左上：修改 Google Earth 程式碼之非量測結果；右上：Google Earth；左下：ArcGIS Earth；右下：國土測繪中心圖資，長度單位皆為公尺)

表 2 Google Earth 距離量測實驗差值統計值

線段	距離量測		差值最大值 Max	差值最小值 Min	差值平均值 Average	均方根偏差 RMSD(σ)
	起	迄				
(a)	(23,120)	(23,121)	1.137	1.047	1.093	0.024
(b)	(23,121)	(23,122)	1.177	1.037	1.103	0.041
(c)	(24,120)	(24,121)	1.151	1.041	1.099	0.035
(d)	(24,121)	(24,122)	1.161	1.061	1.103	0.031
(e)	(25,120)	(25,121)	1.071	1.021	1.045	0.018
(f)	(25,121)	(25,122)	1.091	1.011	1.052	0.024
(g)	(23,120)	(24,120)	1.555	1.385	1.488	0.058
(h)	(24,120)	(25,120)	1.515	1.355	1.446	0.053
(i)	(23,121)	(24,121)	1.665	1.225	1.402	0.113
(j)	(24,121)	(25,121)	2.545	1.365	1.547	0.354
(k)	(23,122)	(24,122)	1.535	1.315	1.423	0.063
(l)	(24,122)	(25,122)	1.585	1.265	1.443	0.084

表 3 ArcGIS Earth 距離量測實驗差值統計值

線段	距離量測		差值最大值 Max	差值最小值 Min	差值平均值 Average	均方根偏差 RMSD(σ)
	起	迄				
(a)	(23,120)	(23,121)	5.390	0.090	1.583	1.706
(b)	(23,121)	(23,122)	6.171	0.136	1.814	1.809
(c)	(24,120)	(24,121)	4.160	0.183	1.384	1.383
(d)	(24,121)	(24,122)	2.573	0.163	0.951	0.752
(e)	(25,120)	(25,121)	0.726	0.002	0.143	0.248
(f)	(25,121)	(25,122)	0.455	0.022	0.145	0.207
(g)	(23,120)	(24,120)	0.531	0.033	0.193	0.256
(h)	(24,120)	(25,120)	0.044	0.008	0.024	0.021
(i)	(23,121)	(24,121)	6.272	0.191	2.905	2.061
(j)	(24,121)	(25,121)	3.218	0.292	1.399	1.009
(k)	(23,122)	(24,122)	0.068	0.004	0.035	0.042
(l)	(24,122)	(25,122)	0.225	0.009	0.095	0.112

表 4 國土測繪中心圖資距離量測實驗差值統計值

線段	距離量測		差值最大值 Max	差值最小值 Min	差值平均值 Average	均方根偏差 RMSD(σ)
	起	迄				
(a)	(23,120)	(23,121)	0.663	0.337	0.467	0.494
(b)	(23,121)	(23,122)	0.663	0.337	0.500	0.526
(c)	(24,120)	(24,121)	1.439	0.439	0.563	0.636
(d)	(24,121)	(24,122)	0.561	0.439	0.476	0.479
(e)	(25,120)	(25,121)	1.139	0.139	0.411	0.589
(f)	(25,121)	(25,122)	1.139	0.139	0.411	0.589
(g)	(23,120)	(24,120)	0.925	0.075	0.245	0.419
(h)	(24,120)	(25,120)	0.515	0.485	0.497	0.497
(i)	(23,121)	(24,121)	1.075	0.075	0.360	0.566
(j)	(24,121)	(25,121)	0.515	0.485	0.509	0.509
(k)	(23,122)	(24,122)	1.075	0.075	0.375	0.592
(l)	(24,122)	(25,122)	0.515	0.485	0.503	0.503

六、結論與建議

使用者透過網際網路地圖服務獲取空間資訊時，無可避免將包含人為誤差、系統誤差及圖資本身的隨機誤差。在圖台系統點選時，由於人為習慣、硬體設備、畫面比例尺大小等因素，均可能造成系統誤差，如：地形起伏特效無法關閉、經緯度進位不完全以及網際網路地圖選用地圖投影方式所產生的投影誤差。

依據上述第一部分實驗，四位受測者在 Google Earth 點選時，所有量測點位均偏於第一象限。顯示點選時可能有系統誤差，每個量測點大致與真值誤差 0.13 公尺。第二部分距離量測實驗發現，Google Earth 與 ArcGIS Earth 的 3D 地形特效會影響距離量測之精確度，若量測的線段位於地形起伏劇烈之處，會造成量測精確度較差。第三部分實驗將圖台上量測距離與大地線公式所計算出之距離進行比較，Google Earth 的非量測結果，緯距差異 1.5 公尺，經距差異 1 公尺，且經距差異則有越接近赤道地區，差異擴大之結果。但此與文獻回顧中所陳述之網路麥卡托地圖投影原理有所悖離，因該投影乃取用 WGS 84 參考橢球體之長半徑為半徑繪製正圓球，將 WGS 84 經緯度坐標標示於正圓球上再進行投影，其誤差應於越接近赤道區域而縮小，但實驗之結果卻並非如此，顯然圖台本身在計算距離時有另做改正，值得後續研究繼續研討。

Google Earth 的量測結果整體大略差異 1 公尺，ArcGIS Earth 量測若位於地形起伏劇烈之處，則與大地線公式計算之結果差異較大，可達 1.5 公尺，其餘地形起伏略小的地區則差異僅有 0.05 公尺。國土測繪中心圖資量測之誤差全小於 0.5 公尺。三個圖臺整體而論，量測長度與大地線計算的差值平均，以國土測繪中心所提供的

圖資誤差最小，Google Earth 長度量測誤差最大，平均差距一公尺。

本次實驗採取長距離進行實驗，實驗結果也顯示於網際網路地圖上每一緯距經距與大地線公式所計算出來之誤差約為一公尺左右，精度更近似於十萬分之一，各圖台於使用者執行長距離量測時，可能採行大地線的計算，而非直接利用圖台本身進行計算。建議後續研究可以更進一步採取短距離或是實際路徑分析，以利更貼近一般使用需求，也更進一步的驗證圖台於短距離時，是否也與大地線所計算出結果相似。

誌 謝

本研究部份成果承蒙科技部專題計畫(NSC 102-2511-S-003-035-MY4)補助得以完成，謹申謝忱。

參考文獻

- IOGP, 2016a, *Geomatics Guidance Note 7, part 2: Coordinate Conversions & Transformations including Formulas*. Report 373-7-2, September 2016, Retrieved from <http://www.iogp.org/pubs/373-07-2.pdf>. (Last Checked 2017/05/20).
- IOGP, 2016b, *Geomatics Guidance Note 23: Web Mercator*. Report 373-23, September 2016, Retrieved from <http://www.iogp.org/pubs/373-23.pdf>. (Last Checked 2017/05/20).
- Jenny, B., 2012, Adaptive Composite Map Projections. *Ieee Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12), 2575-2582.
- Mari, M., 2013, *Top Global Smartphone Apps, Who's in the Top 10*. 2nd August 2013, Retrieved from <http://www.globalwebindex.net/blog/top-global-smartphone-apps>. (Last Checked 2017/05/20).
- NGA, 2014, *Implementation Practice Web Mercator Map Projection*. National Geospatial-Intelligence Agency Standardization Document NGA.SIG.0011_1.0.0_WEBMERC, Version 1.0.0, 18th February 2014, Retrieved from [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/web_mercator/\(U\)%20NGA_SIG_0011_1.0.0_WEBMERC.pdf](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/web_mercator/(U)%20NGA_SIG_0011_1.0.0_WEBMERC.pdf). (Last Checked 2017/05/20).
- Tsai, H.-F., 2014, *Design and Implementation of a Web Mapping System Supporting Multiple Map Projections*. Mater Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Tyler, C., 2017, *臺灣的難抵極*. 5th January 2017, Retrieved from

[https://tylercottenie.wordpress.com/2017/01/05/台灣的難抵極/comment-page-1/ -comment-20](https://tylercottenie.wordpress.com/2017/01/05/台灣的難抵極/comment-page-1/-comment-20).(Last Checked 2017/05/20).

Zinn, N., 2010, *Web Mercator: Non-Conformal, Non-Mercator*. September 2010, Hydrometronics LLC. Retrieved from: [http://hydrometronics.com/downloads/Web%20Mercator%20-%20Non-Conformal,%20Non-Mercator%20\(full\).pdf](http://hydrometronics.com/downloads/Web%20Mercator%20-%20Non-Conformal,%20Non-Mercator%20(full).pdf). (Last Checked 2017/05/20).

投稿須知

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

各項格式說明如下：

壹、文書檔案採 A4 直式橫寫書格式，版面邊界分別為上（2.54cm）、下（2.54cm）、左（3cm）、右（2.8cm），字體以新細明體及英文 Times New Roman 等兩種字體排版。

貳、首頁（Title page），應包含下列內容：

一、標題（Article Title）：包括中、英文文章篇名。

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：

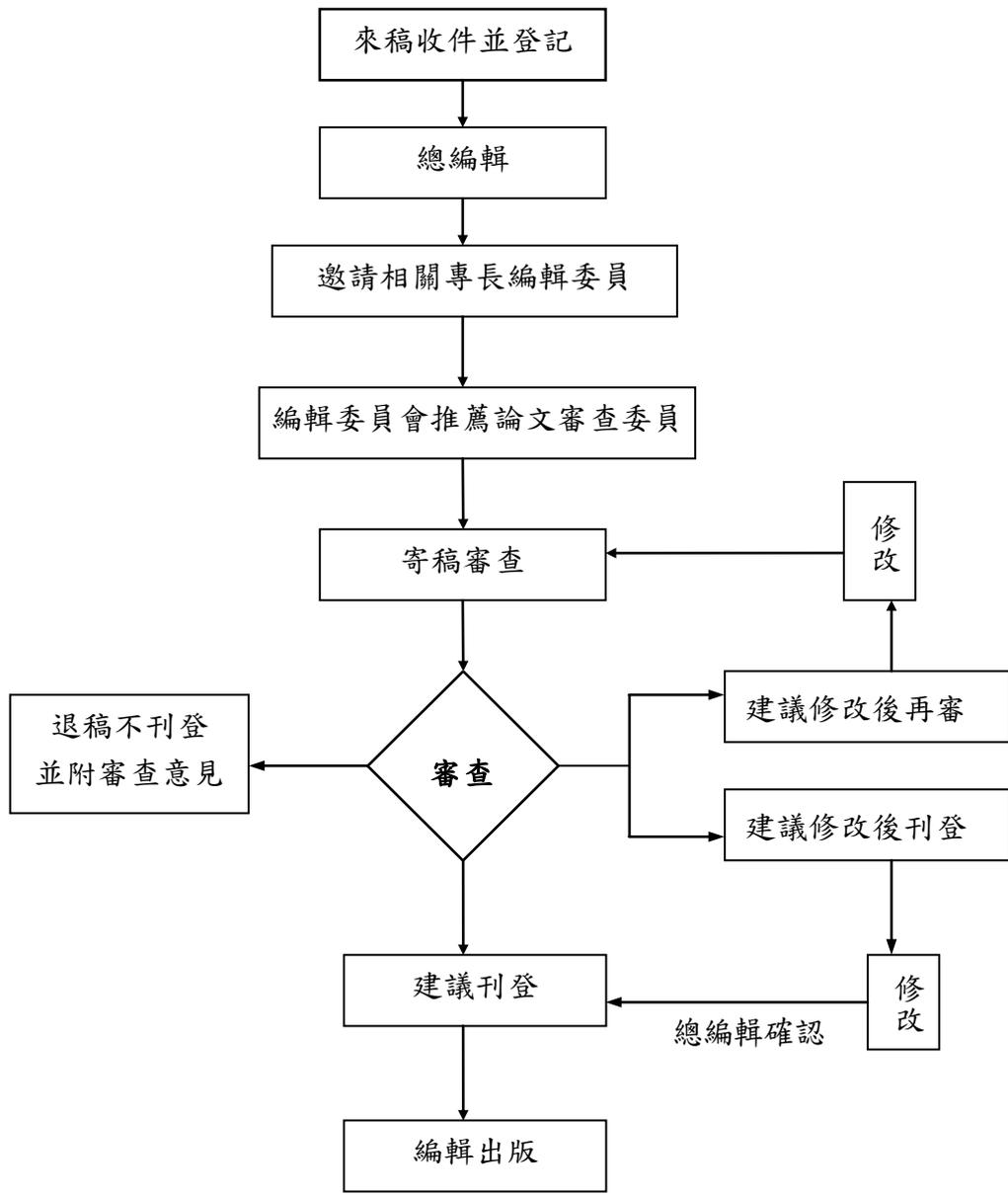
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

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

林老生 國立政治大學地政學系

洪本善 逢甲大學土地管理學系

洪榮宏 國立成功大學測量及空間資訊學系

楊明德 國立中興大學土木工程學系

趙鍵哲 國立臺灣大學土木工程學系

陳繼藩 國立中央大學太空及遙測研究中心

饒瑞鈞 國立成功大學地球科學系

總 編 輯 陳國華 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

編 輯 陳鶴欽 內政部國土測繪中心

幹 事 林以珊 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

發 行 人 黃榮峰

劉正倫

出 版 所 中華民國地籍測量學會

內政部國土測繪中心

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

第五卷第二期

民國一〇六年七月

Vol. 5, No. 2

July 2017

目 錄

CONTENTS

臺灣半動態基準之建立與展望

景國恩、楊名、陳鶴欽、林文勇、梁旭文、劉正倫.....83

Establishment and Further Development of Taiwan Semi-dynamic Datum

Kuo-En Ching, Ming Yang, He-Chin Chen, Wen-Yung Lin, Hsu-Wen Liang, Jeng-Lun Liu

利用低成本 GNSS/IMU 浮標監測海洋訊號

黃昱倫、林立青、郭重言、施巧慧、江凱偉、鄭凱謙、楊三興、張瀚文.....111

Monitoring Ocean Signals Using Low-Cost GNSS/IMU Buoys

Yu-Lun Huang, Li-Ching Lin, Chung-Yen Kuo, Chiao-Hui Shih, Kai-wei Chiang, Kai-Chien Cheng, San-Hsing Yang, Han-Wen Chang

應用 e-GNSS 檢核地籍圖重測區加密控制測量精度分析之研究

黃立信、王建得.....129

The Precision Checking Research of Densified Control and Supplementary Control Point Surveying in Cadastral Resurvey by e-GNSS

Lih-Shinn Hwang, Chien-Te Wang

網際網路地圖服務之點位坐標及距離量測精確度評估

洪翎嘉、王聖鐸、林世賢.....155

Accuracy Assessment on Coordinates and Distance Measurements on Web Mapping Services

Ling-Chia Hung, Sento Wang, Shih-Hsien Lin