

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

莊峰輔^{1*} 湯凱佩² 王敏雄³ 梁旭文⁴ 劉正倫⁵

論文收件日期：104.06.17

論文修改日期：104.07.27

論文接受日期：104.08.10

摘 要

虛擬基準站即時動態定位技術(Virtual Base Station-Real Time Kinematic, VBS-RTK)可於短時間內獲得高精度定位成果，但其坐標非法定坐標系統。內政部國土測繪中心e-GNSS即時動態定位系統(簡稱e-GNSS系統)採用VBS-RTK定位技術，提供使用者即時且高精度之定位服務，測量成果坐標系統為e-GNSS系統2013年坐標(簡稱e-GNSS[2013])。本研究利用e-GNSS系統與RTCM3.1資料傳輸技術，建立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最佳轉換模型，解決VBS-RTK測量成果與法定坐標系統不同之情況，讓使用者在測量時可即時獲得法定坐標系統成果，轉換成果平面精度優於5公分，高程精度優於10公分，符合一般工程測量、中、小比例尺製圖及管測測量等工作精度需求，可節省測量工作成本與時間。

為研究最佳建置模型與內插計算方法，本研究分別以諧和面法(Harmonic Surface)、克利金法(Kriging)及距離反比權重法(Inverse distance weighted)等3種方法組成殘差網格修正模型，並以雙線性法(bi-linear)、雙二次曲線法(bi-quadratic)及雙雲形曲線法(bi-spline)等3種內插計算方法對模型精度進行驗證，驗證結果克利金法建置之殘差網格修正模型精度最佳，雙線性法內插計算成果優於雙二次曲線法與雙雲形曲線法。

關鍵字： e-GNSS、RTCM3.1、VBS-RTK、坐標轉換

¹ 課員，控制測量課，內政部國土測繪中心。

² 專員，控制測量課，內政部國土測繪中心。

³ 課長，企劃課，內政部國土測繪中心。

⁴ 課長，控制測量課，內政部國土測繪中心。

⁵ 主任，內政部國土測繪中心。

* 通訊作者，TEL：(04)22522966#255，E-mail：23087@mail.nlsc.gov.tw。

A Study on VBS-RTK Determining Legal Coordinates by 3D Real-time Coordinate Transformation

Feng-Fu Chuang^{1*}, Kai-Pei Tang², Min-Hsiung Wang³, Hsu-Wen Liang⁴,
Jeng-Lun Liu⁵

Abstract

VBS-RTK is an efficient technique to determine high precision coordinates within a short period of time, but the coordinates are not based on legal coordinate systems. The e-GNSS real-time kinematic positioning system of the National Land Surveying and Mapping Center was based on VBS-RTK technique to provide high precision positioning service, the coordinate system named e-GNSS[2013]. In this study, e-GNSS real-time kinematic positioning system and RTCM3.1 data transfer technique is used to solve problems about that VBS-RTK could not determine the legal coordinates immediately by establishing a 3D real-time coordinate transformation model, the transformed accuracy was better than 5 cm for horizontal coordinates, and better than 10 cm for ellipsoid and orthometric height individually. The majority of surveying assignments can enjoy the benefit and convenience of this service.

This study chose Harmonic surface, Kriging and Inverse distance weighted gridding algorithm to establish transformation models, and bi-linear, bi-quadratic and bi-spline interpolation algorithm to analyze external accuracy of transformation results are used to find out which gridding and interpolation algorithm is the best for establishing transformation model. The results of this study showed that the best gridding algorithm was Kriging, the best interpolation algorithm was bi-linear.

Keywords: Coordinate Transformation, e-GNSS, RTCM3.1, VBS-RTK

¹ Officer, Department of Control Survey Section, National Land Surveying and Mapping Center.

² Executive Officer, Department of Control Survey Section, National Land Surveying and Mapping Center.

³ Section Chief, Department of Planning and Technology Section, National Land Surveying and Mapping Center.

⁴ Section Chief, Department of Control Survey Section, National Land Surveying and Mapping Center.

⁵ Director, National Land Surveying and Mapping Center.

* Corresponding Author, TEL: +886-4-22522966#255, E-mail: 23087@mail.nlsc.gov.tw.

一、前言

虛擬基準站即時動態定位技術(Virtual Base Station-Real Time Kinematic, VBS-RTK)的基本概念是由多個衛星定位基準站(以下簡稱基準站)所組成的全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)觀測網,全天候連續接收衛星資料,並經由網路或其他通訊設備與控制及計算中心連接,彙整計算產生區域改正參數資料庫,藉以計算出任一移動站附近之虛擬基準站的相關資料。所以在基準站所構成的基線網範圍內,使用者只需在觀測點位上架設移動站衛星定位接收儀,將單點定位坐標透過網路以美國國家海洋電子學會(National Marine Electronics Association, NMEA)專為衛星定位接收儀輸出資料訂定之標準傳輸格式傳送至控制及計算中心,計算虛擬基準站的模擬觀測量後,再以國際海運系統無線電技術委員會(The Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM)制定之差分GNSS標準格式回傳給移動站,進行超短距離之即時動態定位(Real Time Kinematic, RTK)計算,在短時間內即可即時求得公分級精度定位坐標(內政部土地測量局, 2006)。

因VBS-RTK測量成果須仰賴高精度的基準站坐標,作為定位誤差修正的基礎,故就國家坐標系統一致性與各項測繪業務成果整體考量,各基準站之坐標理應以內政部現行公告之TWD97或TWD97[2010]坐標系統為基準,不僅可避免坐標系統轉換所衍生的轉換誤差,使用上亦更為便利。惟臺灣位處地殼變動劇烈地帶,各地區域性地表位移量在方位及量級上均明顯不同,因此若使用法定TWD97或TWD97[2010]坐標系統,在臺灣本島東部及南部等地表位移量較大之地區,將因各基準站坐標間之相對精度不足,影響VBS-RTK定位精度成果與品質。

內政部國土測繪中心e-GNSS即時動態定位系統(以下簡稱e-GNSS系統)係採用VBS-RTK定位技術,提供使用者即時且高精度之定位服務,坐標系統以237個基準站101年12月1日至102年1月31日計62天之衛星觀測資料為基礎,採用Bernese軟體計算基線,再依據內政部公告之TWD97[2010]坐標框架定義,約制於竹南基準站計算其他基準站坐標,為e-GNSS系統2013年坐標(簡稱e-GNSS[2013]),與法定坐標系統不同,如欲獲得法定坐標,需辦理已知控制點連測並進行坐標轉換與最小二乘配置計算。因坐標轉換與最小二乘配置計算涉及程式操作與專業技術,非測量專業人員不易應用,亦無法於測量現場即時獲得法定坐標成果與正高。

本研究採用七參數坐標轉換與建置殘差網格修正模型之方式,以RTCM 3.1 Type 1021及Type 1023之資料格式,分別將七參數,殘差網格修正模型與網格內插計算方法傳送給使用者,研擬建立1套便利可靠的作法供e-GNSS系統應用,讓使用者可簡單快速地將VBS-RTK測量成果即時轉換至法定坐標系統,節省連測已知控制點與計算坐標轉換與最小二乘配置的繁複程序,降低測量工作技術門檻,提升測量工作效率與成果品質。

二、即時坐標轉換地形

現行將e-GNSS系統VBS-RTK測量成果轉換至法定坐標系統之坐標轉換方法,

較嚴謹的作法係於具法定坐標之已知控制點辦理VBS-RTK測量，獲得e-GNSS[2013]坐標，再利用四參數或六參數平面坐標轉換與最小二乘配置計算，將e-GNSS[2013]坐標轉換至法定坐標系統，無法進行即時坐標轉換。

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。RTCM 3.1提供type 1021~1027等7種轉換訊息讓使用者自行應用(如表1)，本研究主要係透過type1021傳送坐標轉換七參數；type1023傳送經緯度網格殘差資料及網格內插模式，達成VBS-RTK測量成果即時轉換至法定坐標系統(Mohamed, 2008)。

表1 RTCM 3.1 轉換訊息說明表

訊息	訊息名稱	訊息說明	功能
1021	Helmert/Abridged Molodenski轉換	傳送Helmert/Abridged Molodenski轉換7個參數	進行7參數坐標轉換
1022	Molodenski-Badekas轉換	傳送Molodenski-Badekas轉換10個參數	進行10參數坐標轉換
1023	球面坐標殘差網格	傳送球面坐標殘差網格資訊	進行球面坐標殘差修正
1024	卡氏坐標殘差網格	傳送卡氏坐標殘差網格資訊	進行卡氏坐標殘差修正
1025	地圖投影	傳送所有地圖投影參數(除了LCC2SP及OM投影)	進行地圖投影
1026	LCC2SP投影	傳送Lambert Conformal Conical with 2 SP地圖投影參數	進行LCC2SP投影
1027	OM投影	傳送Oblique Mercator地圖投影參數	進行OM投影

RTCM 3.1 type 1021傳送之資料為坐標轉換參數，包括坐標轉換方法、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資訊(如表2)。

表2 RTCM 3.1 type 1021 傳送資料說明

資料名稱	數值	數值說明
坐標轉換方法	1	0=Helmert線性式轉換 1=Helmert嚴密法轉換 2=Abridged Molodenski轉換 3=Molodenski-Badekas轉換
高程系統	1	0=橢球高(h) 1=正高(H) 2=大地起伏(N)
移動站緯度	23	緯度網格重心(ϕ)
移動站經度	121	經度網格重心(λ)

資料名稱	數值	數值說明
緯度解析度	0.0083	網格緯度解析度($\Delta \phi$)
經度解析度	0.0083	網格經度解析度($\Delta \lambda$)
轉換參數-dX	0.8089	dX平移參數值
轉換參數-dY	-0.0816	dY平移參數值
轉換參數-dZ	0.8705	dZ平移參數值
轉換參數- ω	0.0591	ω 旋轉參數值
轉換參數- ϕ	-0.0349	ϕ 旋轉參數值
轉換參數- κ	-0.0514	κ 旋轉參數值
轉換參數-S	0.0179	S尺度參數值
來源坐標橢球長半徑	6378137	來源坐標橢球長半徑
來源坐標橢球短半徑	6356752.3141	來源坐標橢球短半徑
目標坐標橢球長半徑	6378137	目標坐標橢球長半徑
目標坐標橢球短半徑	6356752.3141	目標坐標橢球短半徑

RTCM 3.1 type 1021支援Helmert線性式七參數、Helmert嚴密法七參數、Abridged Molodenski七參數及Molodenski-Badekas十參數等4種坐標轉換方法。考量TWD97、TWD97[2010]及e-GNSS[2013]坐標系統之參考橢球與坐標框架相同，本研究僅以一般常用之Helmert嚴密法七參數坐標轉換將e-GNSS[2013]坐標轉換至TWD97及TWD97[2010]坐標系統，不對其他3種坐標轉換方法做進一步探討，其轉換公式如下(Fritzensmeier et al., 1985; Rapp, 1993)：

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

其中S表尺度因子， $R = R_1(\omega)R_2(\phi)R_3(\kappa)$ ，為Cardan旋轉矩陣，(X,Y,Z)和(x,y,z)為目標及來源坐標，(dX,dY,dZ)為平移參數。

RTCM 3.1 type 1023傳送之資料為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、每一個網格的殘差修正量與網格內插計算方法等資訊(如表3)，殘差網格示意圖如圖1。

表3 RTCM 3.1 type 1023 傳送資料說明

資料名稱	數值	數值說明
坐標轉換後緯度	23.0005	網格緯度重心(ϕ_0)
坐標轉換後經度	121.0005	網格經度重心(λ_0)
網格緯度解析度	0.0083	網格緯度解析度($\Delta \phi$)
網格經度解析度	0.0083	網格經度解析度($\Delta \lambda$)

資料名稱	數值	數值說明
緯度修正量平均值	0.00001	16個網格緯度修正量平均值
經度修正量平均值	0.00001	16個網格經度修正量平均值
高程修正量平均值	20.1234	16個網格高程修正量平均值
網格1_緯度修正量	0.00005	網格1在緯度方向的修正量
網格1_經度修正量	-0.00005	網格1在經度方向的修正量
網格1_高程修正量	20.1111	網格1在高程方向的修正量
網格2_緯度修正量	0.00002	網格2在緯度方向的修正量
網格2_經度修正量	-0.00002	網格2在經度方向的修正量
網格2_高程修正量	20.2222	網格2在高程方向的修正量
...
網格16_緯度修正量	0.00002	網格16在緯度方向的修正量
網格16_經度修正量	-0.00002	網格16在經度方向的修正量
網格16_高程修正量	20.2222	網格16在高程方向的修正量
平面坐標內插方法	0	0=雙線性內插 1=雙二次曲線內插 2=雙雲形曲線內插
高程坐標內插方法	0	0=雙線性內插 1=雙二次曲線內插 2=雙雲形曲線內插

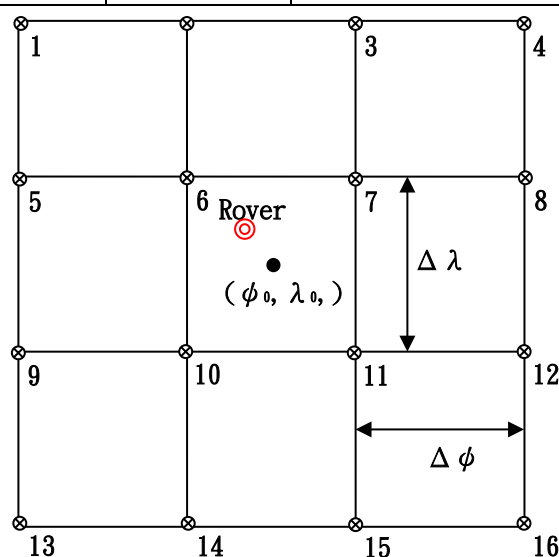


圖1 RTCM type 1023 殘差網格示意圖

RTCM 3.1 type 1023支援雙線性(bi-linear)、雙二次曲線(bi-quadratic)及雙雲形曲線(bi-spline)等3種網格內插方法，為分析不同網格內插方法對轉換成果之影響，本研究分別以上述3種網格內插方法進行測試，以評估最適合e-GNSS系統之網格內插方法。

三、建置坐標轉換模型

(一) 離散點位組成網格模型

本研究有關type 1021之資訊以Helmert嚴密法七參數求得，type 1023之殘差網格修正模型則分別以諧和面法(Harmonic surface)、克利金法(Kriging)及距離反比權重法(Inverse distance weighted)等3種將離散點位組成網格模型之方法，建置網格解析度30秒之殘差網格修正模型，以分析不同模型建置方法對轉換成果之影響。

離散點位組成網格模型之方法，依照選用控制點方式的不同，可以分為全域型內插法(global interpolation)與區域型內插法(local interpolation)。全域型內插法是使用全部的控制點來推估網格格點殘差修正量，區域型內插法則是以每個網格格點坐標為中心，使用一定距離範圍以內的控制點來推估網格格點殘差修正量。本研究因轉換控制點數量不多，為避免納入推估網格格點殘差修正量之轉換控制點數量較少，以致影響殘差修正量之正確性與可靠性，本研究採用全域型內插法推估網格格點殘差修正量。

1. 諧和面法

諧和面法的基本原理是假設殘差修正量的極值只會出現在已知點所在位置，計算時殘差修正量須滿足下列偏微分方程式：

$$(1-T) \times L(L(z)) + T \times L(z) = 0 \quad (2)$$

其中T為張力因子(tension factor)， $0 \leq T \leq 1$ ；L為Laplace運算子，即 $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ，

當T=0時為最小曲率解，當T=1時為諧和面解(林廷融，2002)。

2. 克利金法

採用普通克利金法計算網格格點殘差修正量， $Z(s) = \mu + \varepsilon(s)$ ，其中 μ 是未知的常數，可利用簡單的預測方法，靈活預測其值，用於有某種趨勢的數據(如點與點之間存在空間相依性)。利用經驗值獲得半變異元及協方差(Semi-variogram and covariance)參數，可應用於趨勢分析並可得到未知數之觀測誤差量。半變異元定義如下(內政部國土測繪中心，2012a)：

$$\gamma(s_i, s_j) = \text{var}(Z(s_i) - Z(s_j)) \quad (3)$$

3. 距離反比權重法

以每個網格格點坐標為中心，依距離格點越遠影響程度越小之定義，利用下列方程式計算網格格點的殘差修正量(內政部國土測繪中心，2012b)：

$$Z_a = \frac{\sum_{i=1}^s Z_i \cdot \frac{1}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i^k}} \quad (4)$$

其中 Z_a 是網格格點a的殘差修正量， Z_i 是已知點i的殘差修正量， d_i 是已知點i

與網格格點 a 的距離， s 是已知點數量， k 是權重，本研究 $k=2$ 。

(二) 坐標轉換模型

為將e-GNSS系統VBS-RTK定位成果e-GNSS[2013]坐標即時轉換至法定TWD97及TWD97[2010]坐標，須藉由同時具e-GNSS[2013]與TWD97之控制點及同時具e-GNSS[2013]與TWD97[2010]之控制點，才可計算坐標轉換參數並建置殘差網格修正模型。如欲將e-GNSS[2013]坐標即時轉換至法定TWVD2001正高，則須於殘差網格修正模型加入大地起伏模型，才可將轉換後之TWD97與TWD97[2010]橢球高轉換為正高，本研究建置坐標轉換模型之方法如圖2。

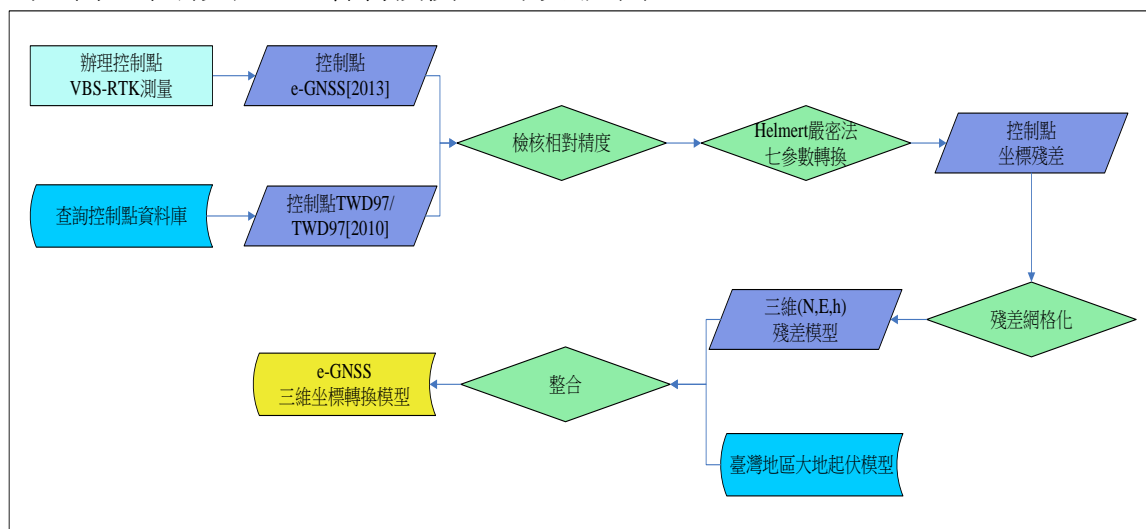


圖2 坐標轉換模型建置流程

1. e-GNSS[2013]轉TWD97

使用1,196點具有e-GNSS[2013]與TWD97坐標之基本控制點建置坐標轉換模型，點位分布情形如圖3(a)。圖3(b)至圖3(d)分別為e-GNSS[2013]轉TWD97坐標轉換模型之諧和面法與克利金法、諧和面法與距離反比權重法及克利金法與距離反比權重法等3套殘差網格修正模型各坐標分量彼此間之差異情形。在臺灣本島陸地範圍內，平面分量差異大多都在 ± 0.1 公尺以內，橢球高分量亦大多都在 ± 0.2 公尺以內，僅在雲林地區，克利金法明顯與其他2方法差異較大。

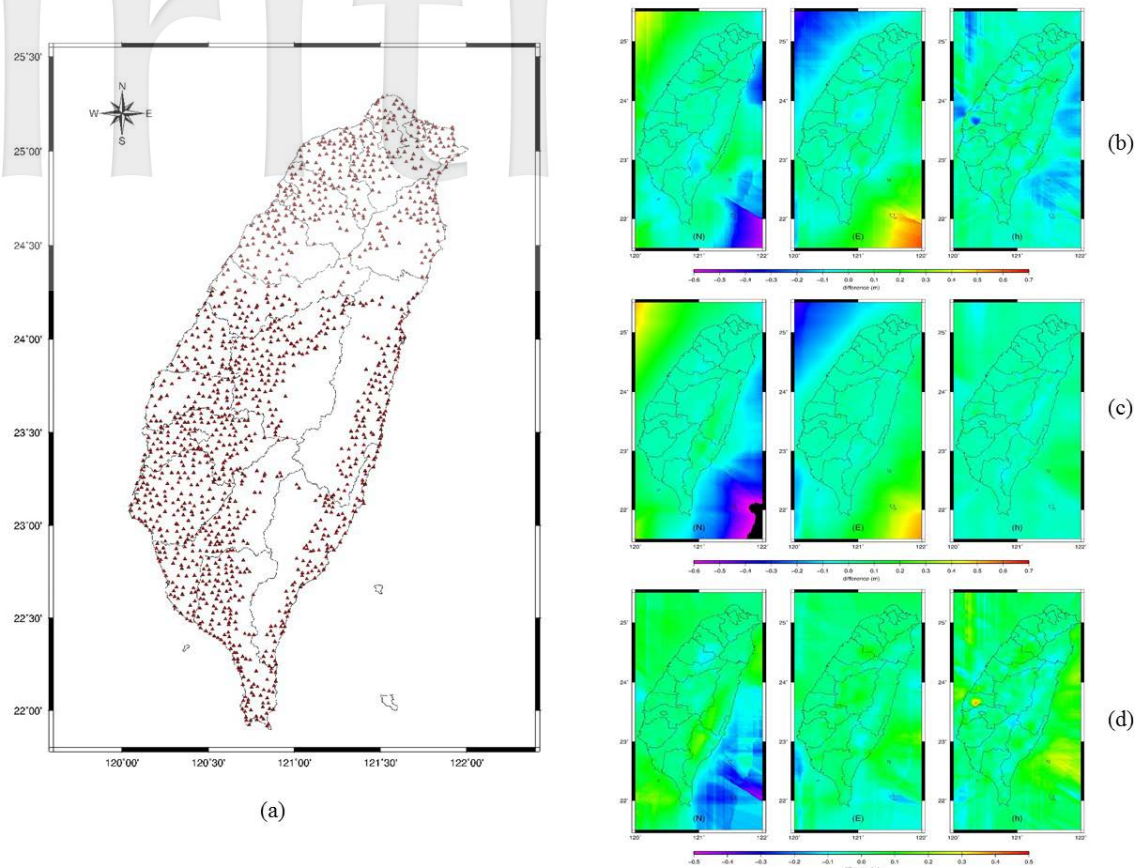


圖3 (a)e-GNSS[2013]轉 TWD97 轉換控制點分布圖 (b)諧和面法與克利金法殘差網格修正模型差異圖 (c)諧和面法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖 (d)克利金法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖

2. e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]

使用210個具有e-GNSS[2013]與TWD97坐標之衛星定位基準站建置坐標轉換模型，點位分布情形如圖4(a)。圖4(b)至圖4(d)分別為諧和面法與克利金法、諧和面法與距離反比權重法及克利金法與距離反比權重法等3套殘差網格修正模型彼此間之差異情形。在臺灣本島陸地範圍內，平面分量差異大多都在 ± 0.06 公尺以內，橢球高分量亦大多都在 ± 0.1 公尺以內，僅在雲林地區，克利金法明顯與其他2方法差異較大，各模型間差異大致與e-GNSS[2013]轉TWD97之模型相同。

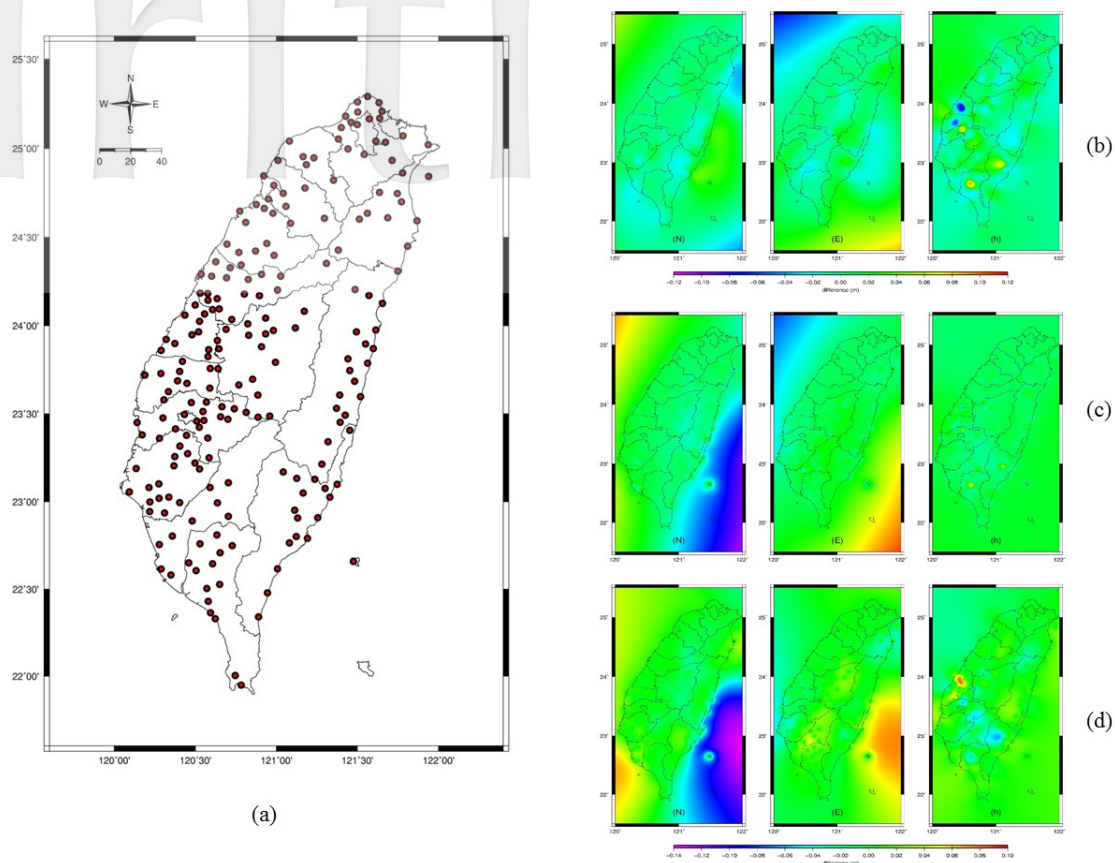


圖4 (a)e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]轉換控制點分布圖 (b)諧和面法與克利金法殘差網格修正模型差異圖 (c)諧和面法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖 (d)克利金法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖

四、模型精度驗證分析

為驗證三維即時坐標轉換成果精度品質，並分析不同方法建置之殘差網格修正模型與內插方法對轉換成果之影響，本研究分別使用諧和面法、克利金法及距離反比權重法等3種將離散點位組成網格模型之方法，與雙線性、雙二次曲線及雙雲形曲線等3種內插方式，分析e-GNSS[2013]轉TWD97及TWVD2001與e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]及TWVD2001之外部精度，藉由實際分析數據，評估確認最佳建置模型與內插計算方法，作為爾後e-GNSS系統更新坐標後，計算建置坐標轉換模型之依據。

(一) e-GNSS[2013]轉TWD97及TWVD2001

TWD97坐標(N,E,h)使用本中心102年12月於489點一等水準點辦理e-GNSS系統VBS-RTK測量成果，每個點位觀測2測回，至少接收180筆固定解，2測回坐標取平均獲得e-GNSS[2013]坐標成果。將其透過建置之坐標轉換模型轉換至TWD97坐標系統，比較轉換TWD97與公告TWD97坐標差異，作為外部精度評估指標，以評估坐標轉換模型實際精度。其中部分一等水準點因遺失補建，無公告坐標可供參考，實

際進行外部精度驗證點數為345點。

TWVD2001正高(H)使用本中心102年12月於489點水準點辦理e-GNSS測量之VBS-RTK成果，將其透過建置之坐標轉換模型轉換至TWVD2001正高，比較轉換正高與98年3月10日公告檢測正高成果差異，作為外部精度評估指標。其中部分一等水準點因遺失補建，無公告正高可供參考，故實際進行外部精度驗證點數為408點。

1. 諧和面法

- (1) 利用諧和面法建置之坐標轉換模型，以3種內插方法模擬計算之結果如表4，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖5。
- (2) 3種內插方法內插成果無顯著差異，且不論那一種內插方法，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差在平面分量約0.046公尺，橢球高分量約0.101公尺，正高分量約0.122公尺；平均值在平面分量約0.005公尺，橢球高分量約-0.025公尺，正高分量約0.050公尺，表示轉換模型在平面分量有微量系統差，在橢球高與正高分量則有較大之系統差。平面與橢球高分量之系統差，應係建置坐標轉換模型的基本控制點及外部精度驗證之一等水準點公告坐標測設年度與約制點位不同所致。另橢球高與正高分量之系統差方向不同，且正高分量之系統差明顯大於橢球高分量，主要係因本研究係以98年3月10日公告檢測之正高做為外部精度驗證依據，轉換正高係以轉換後TWD97橢球高及大地起伏模型計算獲得，兩正高成果之間存在約10年的時間因素(轉換正高比公告正高早10年)。若以雲林地區為例，該地區每年約有5~10公分之地層下陷量，很明顯便可看出橢球高分量較差為負的，正高分量較差為正的，轉換成果實屬合理。

2. 克利金法

- (1) 利用克利金法建置之坐標轉換模型，以3種內插方法模擬計算之結果如表5，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖6。
- (2) 3種內插方法內插成果無顯著差異，且不論那一種內插方法，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差在平面分量約0.041公尺，橢球高分量約0.094公尺，正高分量約0.133公尺；平均值在平面分量約0.007公尺，橢球高分量約-0.021公尺，正高分量約0.053公尺，模型精度及轉換成果與諧和面法無顯著差異。

3. 距離反比權重法

- (1) 利用距離反比權重法建置之坐標轉換模型，以3種內插方法模擬計算之結果如表6，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖7。
- (2) 3種內插方法內插成果無顯著差異，且不論那一種內插方法，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差在平面分量約0.048公尺，橢球高分量約0.105公尺，正高分量約0.121公尺；平均值在平面分量約0.005公尺，橢球高分量約-0.026公尺，正高分量約0.050公尺，模型精度及轉換成果與諧和面法或克利金法無顯著差異。

表4 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表(單位：公尺)

內插方式	雙線性				雙二次曲線				雙雲形曲線			
分量	N	E	h	H	N	E	h	H	N	E	h	H
MAX	0.301	0.109	0.318	0.565	0.300	0.108	0.331	0.575	0.301	0.109	0.318	0.564
MIN	-0.217	-0.135	-0.579	-0.340	-0.217	-0.133	-0.581	-0.342	-0.217	-0.135	-0.579	-0.340
STD	0.046	0.036	0.101	0.119	0.046	0.037	0.100	0.122	0.046	0.036	0.100	0.120
MEAN	0.005	0.005	-0.024	0.044	0.005	0.004	-0.025	0.050	0.005	0.005	-0.024	0.044

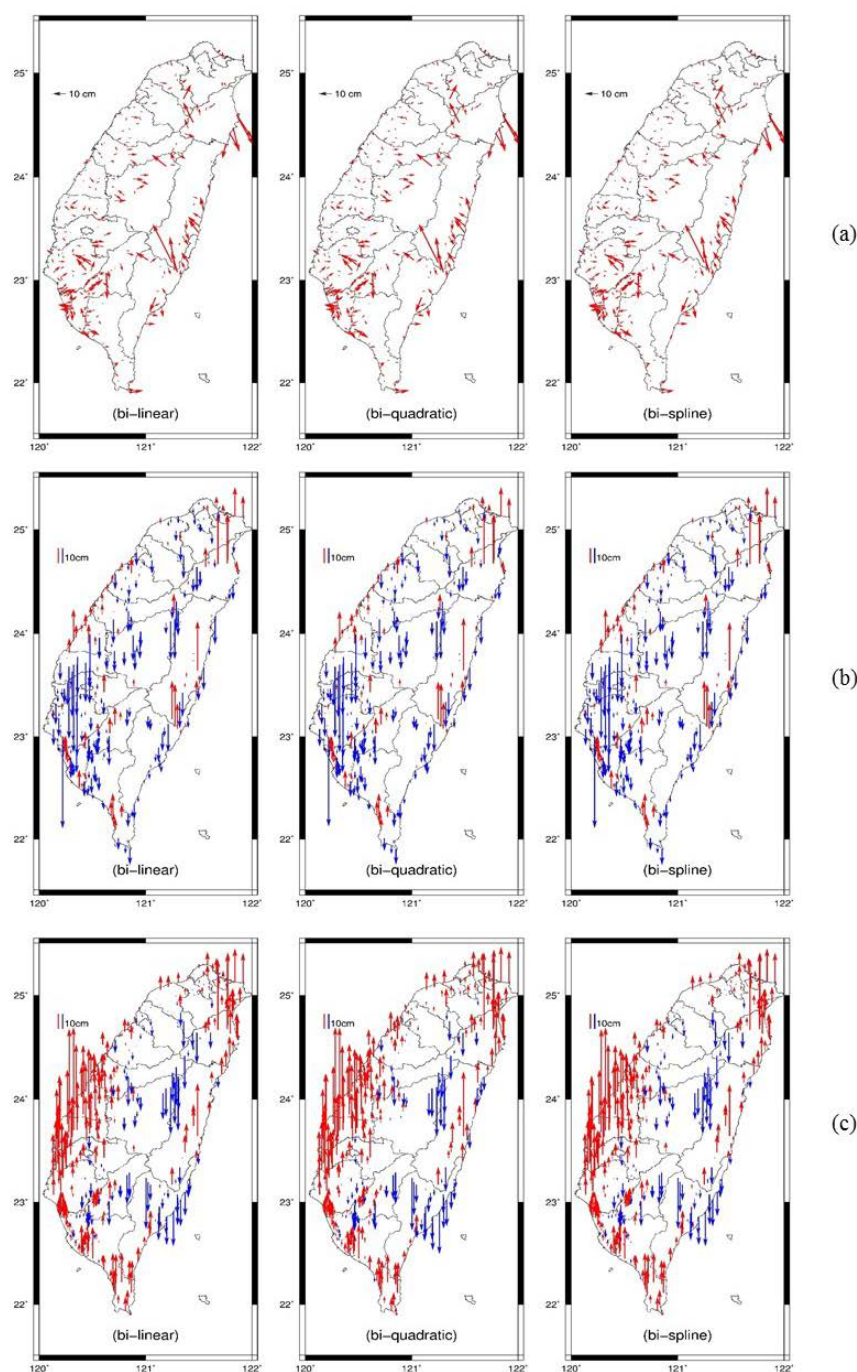


圖5 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度(a)平面分量較差圖 (b)橢球高分量較差圖 (c)正高分量較差圖

表5 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表(單位：公尺)

內插方式	雙線性				雙二次曲線				雙雲形曲線			
分量	N	E	h	H	N	E	h	H	N	E	h	H
MAX	0.309	0.101	0.318	0.589	0.305	0.093	0.319	0.607	0.309	0.133	0.318	0.588
MIN	-0.213	-0.179	-0.589	-0.365	-0.214	-0.177	-0.573	-0.375	-0.213	-0.179	-0.589	-0.365
STD	0.040	0.035	0.094	0.130	0.040	0.036	0.094	0.133	0.041	0.036	0.094	0.130
MEAN	0.007	0.004	-0.021	0.046	0.007	0.003	-0.022	0.053	0.007	0.004	-0.021	0.046

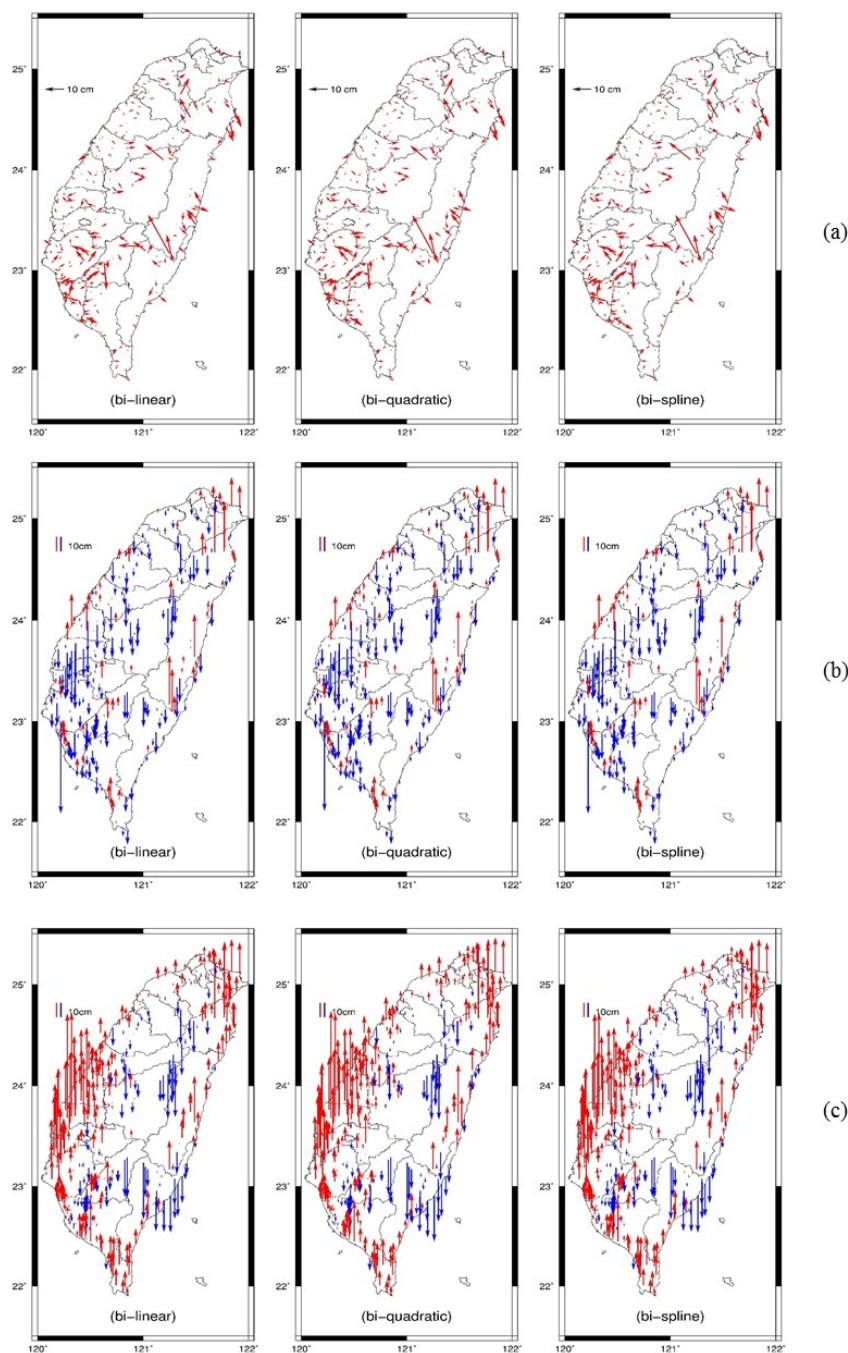
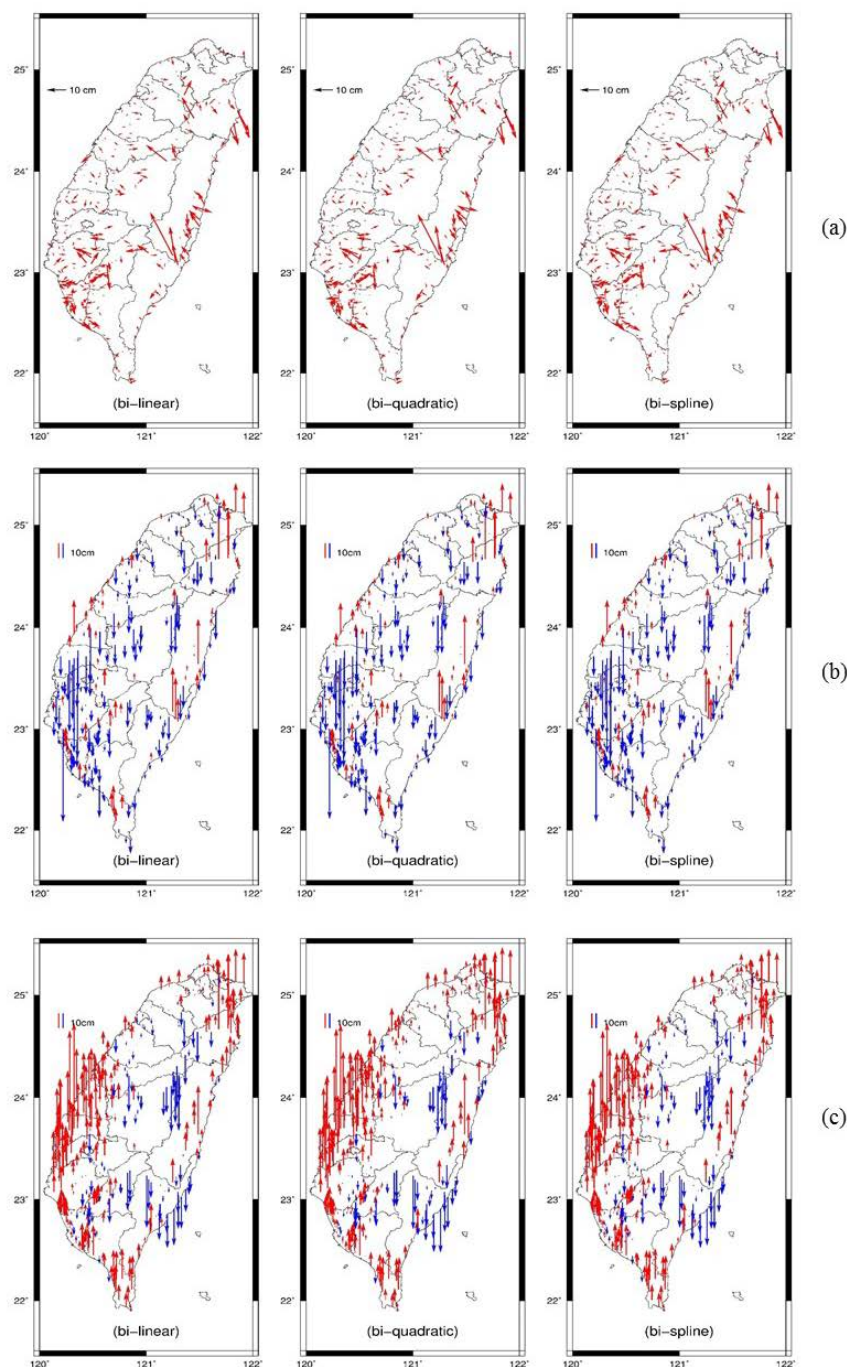


圖6 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度(a)平面分量較差圖 (b)橢球高分量較差圖 (c)正高分量較差圖

表6 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表(單位：公尺)

內插方式	雙線性				雙二次曲線				雙雲形曲線			
分量	N	E	h	H	N	E	h	H	N	E	h	H
MAX	0.343	0.107	0.318	0.550	0.329	0.103	0.318	0.563	0.343	0.130	0.318	0.549
MIN	-0.205	-0.158	-0.639	-0.352	-0.205	-0.150	-0.640	-0.352	-0.205	-0.171	-0.638	-0.352
STD	0.047	0.037	0.105	0.119	0.047	0.037	0.104	0.121	0.048	0.037	0.105	0.119
MEAN	0.005	0.005	-0.025	0.043	0.005	0.004	-0.026	0.050	0.005	0.005	-0.025	0.043


 圖7 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度(a)平面分量較差圖 (b)橢球
 高分量較差圖 (c)正高分量較差圖

4. 小結

- (1) 3種內插成果在3種方法建置之坐標轉換模型無顯著差異。
- (2) 克利金法建置之坐標轉換模型精度略優於諧和面法與距離反比權重法，但其差異小於1公分。
- (3) 因坐標轉換模型係利用基本控制點e-GNSS[2013]與TWD97坐標之相對關係建置獲得，若建置模型之基本控制點坐標變化情形無法完整反應部分地表變化較複雜之地區，則轉換精度會較差。本模型大部分轉換成果與公告成果較差在平面分量小於5公分，橢球高及正高分量小於10公分，表示模型精度尚屬可靠，僅宜蘭及臺東地區少數點位在平面分量明顯較大，可能與公告坐標因點位位移已無法使用，或VBS-RTK測量品質較差有關。

(二) e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]及TWVD2001

TWD97[2010]坐標(N,E,h)使用本中心102年12月於489點一等水準點辦理e-GNSS系統VBS-RTK測量成果，每個點位觀測2測回，至少接收180筆固定解，將2測回坐標取平均獲得e-GNSS[2013]坐標成果。將其透過建置之坐標轉換模型轉換至TWD97[2010]坐標系統，比較轉換TWD97[2010]與公告TWD97[2010]坐標差異，作為外部精度評估指標，以評估坐標轉換模型實際精度。其中部分一等水準點因遺失補建，無公告坐標可供參考，故實際進行外部精度驗證點數為424點。

TWVD2001正高(H)使用本中心102年12月於489點水準點辦理e-GNSS測量之VBS-RTK成果，將其透過建置之坐標轉換模型轉換至TWVD2001正高，比較轉換正高與98年3月10日公告檢測正高成果差異，作為外部精度評估指標。其中部分一等水準點因遺失補建，無公告正高可供參考，故實際進行外部精度驗證點數為408點。

1. 諧和面法

- (1) 利用諧和面法建置之坐標轉換模型，以3種內插方法模擬計算之結果如表7，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖8。
- (2) 3種內插方法內插成果無顯著差異，且不論那一種內插方法，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差在平面分量約0.034公尺，橢球高分量約0.068公尺，正高分量約0.079公尺；平均值在平面分量約-0.003公尺，橢球高分量約-0.028公尺，正高分量約-0.005公尺，表示轉換模型在平面及正高分量有微量系統差，在橢球高分量則有較大之系統差。平面與橢球高分量之系統差，應係建置坐標轉換模型的基準站及外部精度驗證之一等水準點公告坐標約制點位不同所致；正高分量之系統差較橢球高分量小，應係轉換正高(2010年)與公告正高(2009年)因時間因素造成的差值，恰好與橢球高分量系統差抵消所致。橢球高與正高分量之系統差方向一致且量級差異不大，主要係因本研究係以98年3月10日公告檢測之正高做為外部精度驗證依據，轉換正高係以轉換後TWD97[2010]橢球高及大地起伏模型計算獲得，兩正高成果之間時間因素影響較小。另正高分量之中誤差略大於橢球高分量，因已無時間因素影響，故其中誤差之差可視為大地起伏模型之誤差量。

2. 克利金法

- (1) 利用克利金法建置之坐標轉換模型，以3種內插方法模擬計算之結果如表8，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖9。
- (2) 3種內插方法內插成果無顯著差異，且不論那一種內插方法，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差在平面分量約0.033公尺，橢球高分量約0.072公尺，正高分量約0.079公尺；平均值在平面分量約0.003公尺，橢球高分量約-0.027公尺，正高分量約-0.005公尺，模型精度及轉換成果與諧和面法無顯著差異。

3. 距離反比權重法

- (1) 利用距離反比權重法建置之坐標轉換模型，以3種內插方法模擬計算之結果如表9，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖10。
- (2) 3種內插方法內插成果無顯著差異，且不論那一種內插方法，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差在平面分量約0.034公尺，橢球高分量約0.069公尺，正高分量約0.076公尺；平均值在平面分量約-0.004公尺，橢球高分量約-0.028公尺，正高分量約-0.006公尺，模型精度及轉換成果與諧和面法或克利金法無顯著差異。

4. 小結

- (1) 不論那一種方法建置之坐標轉換模型，3種內插成果無顯著差異。
- (2) 克利金法建置之坐標轉換模型精度略優於諧和面法與距離反比權重法，但其差異小於1公分。
- (3) 本模型大部分轉換成果與公告成果較差在平面分量小於3公分，橢球高及正高分量小於8公分，表示模型精度尚屬可靠，且略優於e-GNSS[2013]轉TWD97坐標轉換模型。
- (4) 轉換成果與公告成果平面分量較差在臺灣東部與南部地區較差，與e-GNSS[2013]轉TWD97坐標轉換模型相同，主要與該地區地表變化較複雜有關；正高分量較差相較於e-GNSS[2013]轉TWD97模型獲得之正高，較能反應點位實際現況，故目前經常利用TWD97橢球高與大地起伏模型獲得正高之作法，在地層升降較明顯之地區，存在極大的風險。

表7 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表(單位：公尺)

內插方式	雙線性				雙二次曲線				雙雲形曲線			
分量	N	E	h	H	N	E	h	H	N	E	h	H
MAX	0.147	0.109	0.316	0.349	0.147	0.109	0.316	0.403	0.147	0.109	0.316	0.349
MIN	-0.102	-0.210	-0.275	-0.304	-0.102	-0.210	-0.272	-0.277	-0.102	-0.210	-0.275	-0.301
STD	0.027	0.034	0.068	0.075	0.027	0.034	0.068	0.079	0.027	0.034	0.068	0.075
MEAN	0.002	-0.003	-0.028	-0.005	0.002	-0.003	-0.028	0.002	0.002	-0.003	-0.028	-0.005

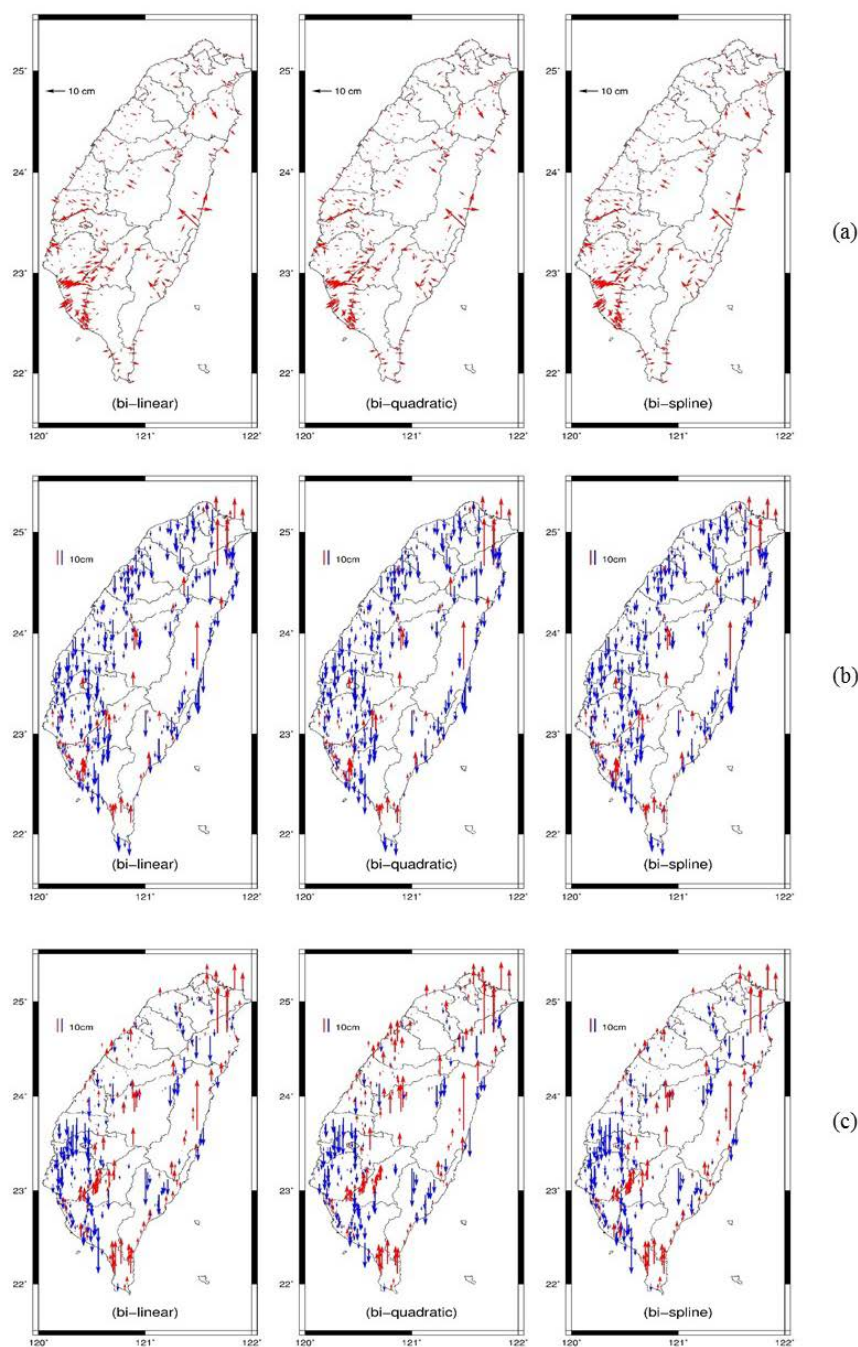


圖8 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度(a)平面分量較差圖 (b)橢球高
分量較差圖 (c)正高分量較差圖

表8 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表(單位：公尺)

內插方式	雙線性				雙二次曲線				雙雲形曲線			
分量	N	E	h	H	N	E	h	H	N	E	h	H
MAX	0.118	0.121	0.311	0.344	0.118	0.120	0.311	0.397	0.118	0.121	0.311	0.343
MIN	-0.104	-0.214	-0.307	-0.336	-0.103	-0.214	-0.301	-0.306	-0.104	-0.214	-0.307	-0.333
STD	0.025	0.033	0.072	0.076	0.025	0.033	0.071	0.079	0.025	0.033	0.072	0.076
MEAN	0.003	-0.002	-0.027	-0.005	0.003	-0.002	-0.027	0.002	0.003	-0.002	-0.027	-0.004

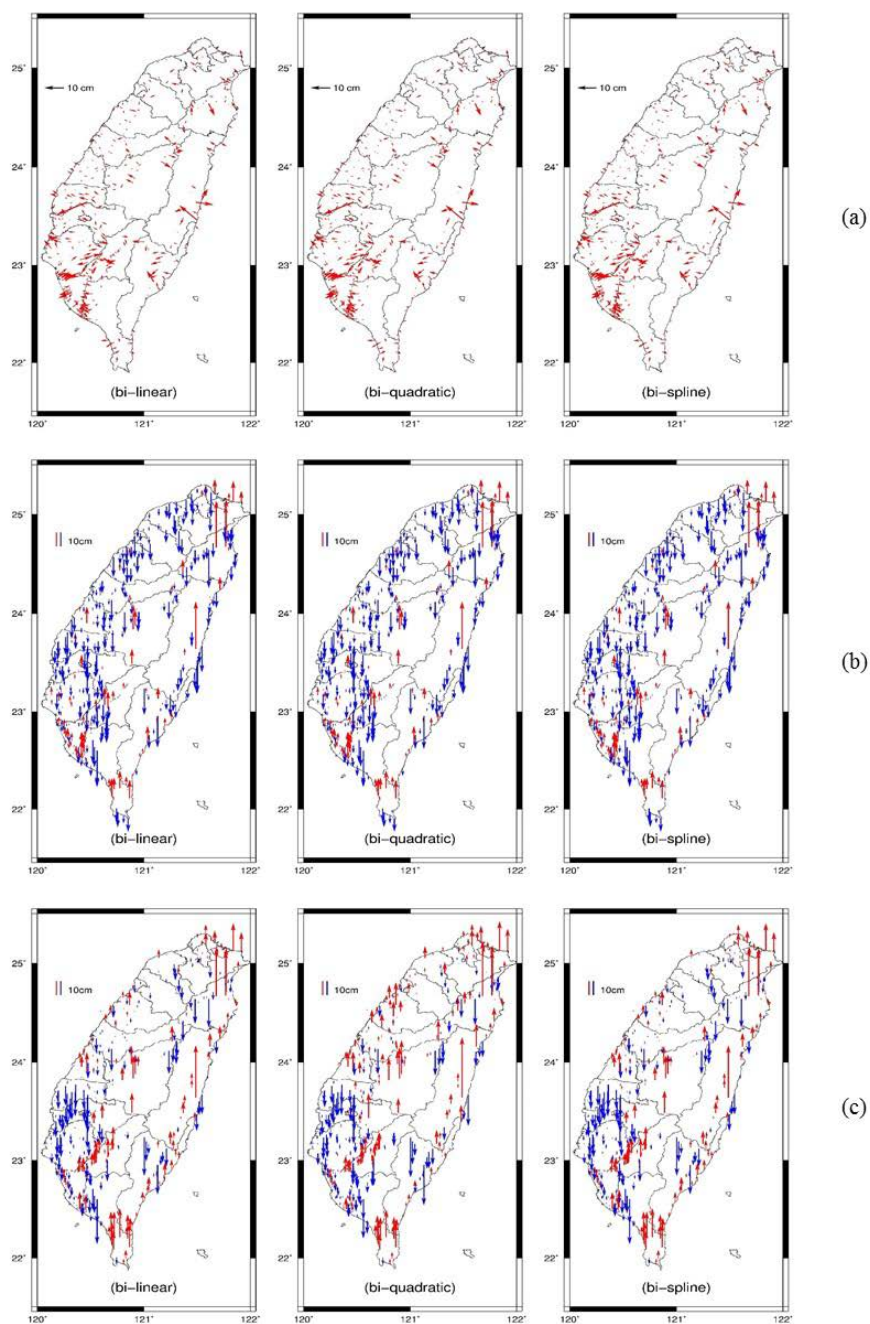


圖9 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度(a)平面分量較差圖 (b)橢球高
分量較差圖 (c)正高分量較差圖

表9 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表(單位：公尺)

內插方式	雙線性				雙二次曲線				雙雲形曲線			
分量	N	E	h	H	N	E	h	H	N	E	h	H
MAX	0.170	0.104	0.312	0.345	0.173	0.104	0.312	0.345	0.170	0.104	0.312	0.344
MIN	-0.104	-0.205	-0.269	-0.298	-0.104	-0.206	-0.266	-0.298	-0.104	-0.205	-0.269	-0.295
STD	0.027	0.034	0.069	0.076	0.027	0.034	0.069	0.076	0.027	0.034	0.069	0.076
MEAN	0.001	-0.004	-0.028	-0.006	0.001	-0.004	-0.028	-0.006	0.001	-0.004	-0.028	-0.005

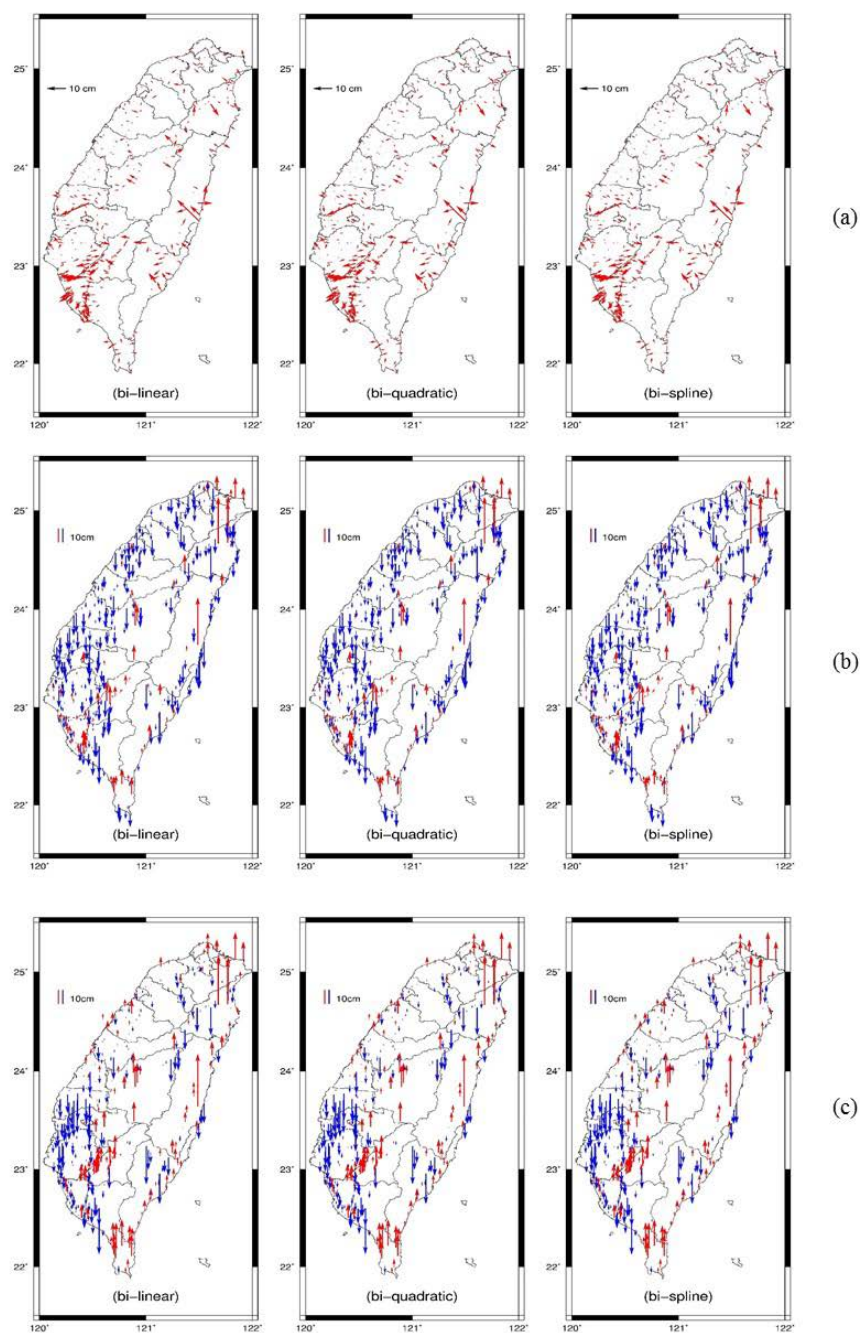


圖10 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度(a)平面分量較差圖 (b) 橢球高分量較差圖 (c)正高分量較差圖

(三) 最佳建置模型與內插計算方法

經分別使用諧和面法、克利金法及距離反比權重法等3種將離散點位組成網格模型之方法，與雙線性、雙二次曲線及雙雲形曲線等3種內插方式，分析e-GNSS[2013]轉TWD97及TWVD2001與e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]及TWVD2001之外部精度，3種內插成果無顯著差異，克利金法建置之坐標轉換模型精度略優於諧和面法與距離反比權重法，但其差異小於1公分。

五、結論與建議

(一) 結論

本研究透過三維即時坐標轉換之方法，解決VBS-RTK定位測量成果非法定坐標系統之問題，並以國內e-GNSS系統為例，研究最佳建置模型與內插計算方法，獲得以下結論：

1. 本研究利用國際海運系統無線電技術委員會(RTCM)制定之差分GNSS標準格式RTCM 3.1 type 1021及type 1023，將研究建置之坐標轉換參數、殘差網格修正模型與網格內插計算方法等資訊傳送給使用者，讓使用者可即時將VBS-RTK測量成果轉換至法定坐標系統(含正高系統)，轉換成果平面精度優於5公分，高程精度優於10公分，解決國內以往e-GNSS系統VBS-RTK測量成果非法定坐標之問題，讓使用者可更快速便利地應用e-GNSS系統進行各項測量工作，將專業的內業計算工作交由本中心負責處理，降低e-GNSS系統應用門檻，節省內業人力養成、計算時間與工作成本，擴展e-GNSS系統應用領域。
2. 為研究最佳建置模型與內插計算方法，轉換控制點經Helmert嚴密法七參數坐標轉換後，將其殘差分別以諧和面法、克利金法及距離反比權重法等3種離散點位組成網格模型之方法，建置網格解析度30秒之殘差網格修正模型，並以雙線性法、雙二次曲線法及雙雲形曲線法等3種內插計算方法，以真實觀測資料分析e-GNSS[2013]轉TWD97及TWVD2001與e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]及TWVD2001之內、外部精度。研究結果顯示，克利金法建置之殘差網格修正模型精度最佳，雙線性法內插計算成果優於雙二次曲線法與雙雲形曲線法。
3. 本研究以最佳建置模型(克利金法)與內插計算(雙線性內插)方法建置之坐標轉換模型，經實際觀測資料驗證轉換精度如下：
 - (1) e-GNSS[2013]轉TWD97及TWVD2001：(N,E,h)三維坐標轉換精度為0.040、0.035及0.094公尺，正高轉換精度為0.130公尺。
 - (2) e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]及TWVD2001：(N,E,h)三維坐標轉換精度為0.025、0.033及0.072公尺，正高轉換精度為0.076公尺。

(二) 建議

1. e-GNSS系統係採用VBS-RTK定位技術，提供使用者即時且高精度之定位服務，

測量成果為e-GNSS[2013]坐標。以往使用者須額外花費人力與時間連測已知控制點進行坐標轉換與最小二乘配置計算，才可將e-GNSS測量成果轉換至法定坐標系統，且坐標轉換與最小二乘配置計算技術門檻較高，一般使用者不容易使用。e-GNSS系統目前已實際應用本研究成果，讓使用者在測量現場簡單快速地獲得法定坐標系統測量成果，其平面精度優於5公分，高程精度優於10公分，對於測量工作精度需求低於上述精度者，均可直接應用；惟實際作業時，仍建議於測區外圍檢測部分已知控制點，以確保成果精度品質。

2. e-GNSS系統高程測量成果為橢球高，與一般工程使用之正高不同。以往欲獲得正高，須以水準測量作業方式，自已知水準點引測而來，不僅耗時費力，且在彰雲嘉沿海等地層下陷地區，每年沉陷速度大於5公分，導致一等水準點正高公告成果已無法應用。本研究建置之坐標轉換模型，可即時將e-GNSS系統VBS-RTK測量之橢球高轉換至正高，且是符合現況之正高，精度優於10公分，對於一般工程測量、中、小比例尺製圖及管線測量等工作，不僅可快速獲得正高成果，且精度足供應用，可藉由e-GNSS系統與本研究成果實現臺灣現代化高程測量。
3. 本研究受限於觀測計算之基本控制點僅少數具TWD67坐標，故無法建置e-GNSS[2013]坐標系統轉換至TWD67坐標系統之轉換模型。惟國內部分地籍圖資使用之坐標系統仍為TWD67，有使用VBS-RTK進行TWD67坐標測量需求之相關單位，亦可參考本研究之成果建置轉換模型，擴展應用領域。
4. 臺灣位處板塊交界地區，地殼變動頻繁劇烈，為確保e-GNSS系統定位成果品質，定期更新基準站坐標勢在必行。藉由e-GNSS系統定期更新坐標並搭配本研究成果，可將爾後基準站坐標更新後之VBS-RTK測量成果，轉換至更新前之坐標系統與法定坐標系統，不僅可解決基準站坐標更新前後測量成果坐標系統不一致的情況，經長期作業後，更可利用e-GNSS系統與本研究成果，建立臺灣動態基準。

參考文獻

- 內政部土地測量局，2006，《e-GPS衛星基準站即時動態定位系統VBS-RTK定位測試成果報告》，內政部土地測量局：台中。
- 內政部國土測繪中心，2012a，《大地基準及一九九七坐標系統2010年成果工作總報告》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2012b，《e-GPS即時動態定位系統坐標轉換最佳化之研究》，內政部國土測繪中心自行研究報告：台中。
- 林廷融，2002，《中華衛星二號取像區域之參考網格系統及地理資訊系統建立》，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- Fritzensmeier, K., G. Kloth, W. Niemeier, and K. Eichholz, 1985, Simulation Studies on the Improvement of Terrestrial 2D-Networks by Additional GPS-Information, in W. M. Welsch and L. A. Lapine eds., *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und*

Geoinformation der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg: Processes in International Federation of Surveyors (FIG).

Eleiche, M., 2008, *RTCM 3.1 Transformation Messages In RTK GNSS Networks*, Thesis (Ph.D.), Faculty of GeoInformatics, University of West Hungary: Székesfehérvár.

Rapp, R. H., 1993, *Geometric Geodesy Part II*, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University: Columbus.