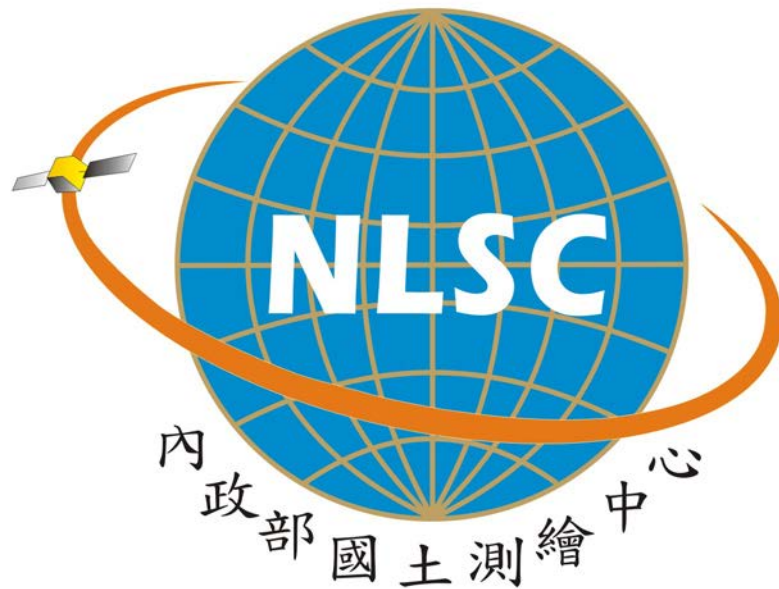


三維即時坐標轉換輔助 VBS-RTK
定位技術獲得法定坐標系統測量
成果之研究



內政部國土測繪中心自行研究報告

中華民國 103 年 9 月

103-301000100G-0004

「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」

| | | |
|-------|----|-----|
| 研究人員： | 技士 | 莊峰輔 |
| | 課員 | 湯凱佩 |
| | 技正 | 王敏雄 |
| | 課長 | 梁旭文 |
| | 主任 | 劉正倫 |

內政部國土測繪中心自行研究報告

中華民國 103 年 9 月

MINISTRY OF THE INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT

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

BY

Feng-Fu Chuang

Kai-Pei Tang

Min-Hsiung Wang

Hsu-Wen Liang

Jeng-Lun Liu

September, 2014

目次

| | |
|-----------------------------|-----|
| 表次..... | II |
| 圖次..... | III |
| 摘要..... | V |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 第一節 研究緣起與背景..... | 1 |
| 第二節 研究動機與目的..... | 3 |
| 第三節 研究方法與流程..... | 5 |
| 第二章 VBS-RTK與即時坐標轉換..... | 7 |
| 第一節 VBS-RTK定位技術..... | 7 |
| 第二節 e-GNSS即時動態定位系統..... | 9 |
| 第三節 現行法定坐標系統..... | 12 |
| 第四節 即時坐標轉換..... | 14 |
| 第三章 模型建置與精度分析..... | 22 |
| 第一節 殘差網格修正模型建置方法..... | 22 |
| 第二節 建置坐標轉換模型..... | 25 |
| 第三節 模型精度驗證分析..... | 34 |
| 第四節 網格解析度對模型精度影響..... | 65 |
| 第五節 轉換控制點數量對模型精度影響..... | 73 |
| 第六節 VBS-RTK觀測時間對轉換精度影響..... | 79 |
| 第四章 結論與建議..... | 81 |
| 第一節 結論..... | 81 |
| 第二節 建議..... | 83 |
| 參考書目..... | 85 |

表次

| | |
|---|----|
| 表 2-1 e-GNSS系統基準站統計表 | 10 |
| 表 2-2 e-GNSS[2013]坐標框架定義 | 11 |
| 表 2-3 RTCM 3.1 轉換訊息說明表 | 14 |
| 表 2-4 RTCM 3.1 type 1021 傳送資料說明 | 15 |
| 表 2-5 RTCM 3.1 type 1023 傳送資料說明 | 16 |
| 表 3-1 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度統計表 | 37 |
| 表 3-2 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度統計表 | 39 |
| 表 3-3 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度統計表 | 39 |
| 表 3-4 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表 | 43 |
| 表 3-5 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表 | 45 |
| 表 3-6 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表 | 47 |
| 表 3-7 基本控制點e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表 | 49 |
| 表 3-8 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度統計表 | 51 |
| 表 3-9 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度統計表 | 53 |
| 表 3-10 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度統計表 | 53 |
| 表 3-11 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表 | 57 |
| 表 3-12 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表 | 59 |
| 表 3-13 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表 | 61 |
| 表 3-14 基本控制點e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表 | 63 |
| 表 3-15 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度內部精度統計表 | 66 |
| 表 3-16 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度統計表 | 68 |
| 表 3-17 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度內部精度統計表 | 70 |
| 表 3-18 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度統計表 | 70 |
| 表 3-19 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度統計表 | 74 |
| 表 3-20 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度統計表 | 76 |
| 表 3-21 e-GNSS[2013]→TWD97 不同觀測時間轉換精度統計表 | 79 |
| 表 3-22 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同觀測時間轉換精度統計表 | 80 |

圖次

| | |
|---|----|
| 圖 2-1 VBS-RTK定位技術示意圖..... | 8 |
| 圖 2-2 e-GNSS系統基準站點位分布圖 | 9 |
| 圖 2-3 e-GNSS系統控制計算中心實景 | 10 |
| 圖 2-4 RTCM 3.1 type 1021 轉換網格示意圖 | 15 |
| 圖 2-5 RTCM type 1023 殘差網格示意圖 | 17 |
| 圖 2-6 雙線性內插示意圖 | 18 |
| 圖 2-7 雙二次曲線性內插示意圖 | 19 |
| 圖 2-8 雙雲形曲線性內插示意圖 | 20 |
| 圖 2-9 即時坐標轉換作業流程示意圖 | 21 |
| 圖 3-1 普通克利金法半變異元圖範例..... | 23 |
| 圖 3-2 坐標轉換模型建置流程 | 25 |
| 圖 3-3 e-GNSS[2013]轉TWD97 轉換控制點分布圖..... | 27 |
| 圖 3-4 e-GNSS[2013]轉TWD97 轉換控制點篩選方式..... | 28 |
| 圖 3-5 諧和面法與克利金法殘差網格修正模型差異圖 | 29 |
| 圖 3-6 諧和面法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖 | 29 |
| 圖 3-7 克利金法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖 | 30 |
| 圖 3-8 e-GNSS[2013]轉TWD97[2010]轉換控制點分布圖 | 31 |
| 圖 3-9 諧和面法與克利金法殘差網格修正模型差異圖 | 32 |
| 圖 3-10 諧和面法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖 | 32 |
| 圖 3-11 克利金法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖..... | 33 |
| 圖 3-12 e-GNSS[2013]轉TWD97 外部精度驗證點位分布圖 | 35 |
| 圖 3-13 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度平面分量較差圖 | 36 |
| 圖 3-14 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度橢球高分量較差圖 | 37 |
| 圖 3-15 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度平面分量較差圖 | 38 |
| 圖 3-16 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度橢球高分量較差圖 | 38 |
| 圖 3-17 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度平面分量較差圖 | 40 |
| 圖 3-18 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度橢球高分量較差圖 | 40 |
| 圖 3-19 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度平面分量較差圖 | 42 |
| 圖 3-20 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度橢球高分量較差圖 | 42 |
| 圖 3-21 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度正高分量較差圖 | 43 |
| 圖 3-22 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度平面分量較差圖 | 44 |
| 圖 3-23 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度橢球高分量較差圖 | 44 |
| 圖 3-24 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度正高分量較差圖 | 45 |
| 圖 3-25 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度平面分量較差圖 | 46 |
| 圖 3-26 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度橢球高分量較差圖 | 46 |

| | |
|--|----|
| 圖 3-27 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度正高分量較差圖 | 47 |
| 圖 3-28 基本控制點e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度驗證圖 | 48 |
| 圖 3-29 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度平面分量較差圖 | 50 |
| 圖 3-30 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度橢球高分量較差圖..... | 51 |
| 圖 3-31 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度平面分量較差圖 | 52 |
| 圖 3-32 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度橢球高分量較差圖..... | 52 |
| 圖 3-33 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度平面分量較差圖 | 54 |
| 圖 3-34 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度橢球高分量較差圖 | 54 |
| 圖 3-35 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度平面分量較差圖 | 56 |
| 圖 3-36 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度橢球高分量較差圖..... | 56 |
| 圖 3-37 諧和面法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度正高分量較差圖 | 57 |
| 圖 3-38 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度平面分量較差圖 | 58 |
| 圖 3-39 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度橢球高分量較差圖..... | 58 |
| 圖 3-40 克利金法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度正高分量較差圖 | 59 |
| 圖 3-41 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度平面分量較差圖 | 60 |
| 圖 3-42 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度橢球高分量較差圖 | 60 |
| 圖 3-43 距離反比權重法e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度正高分量較差圖 | 61 |
| 圖 3-44 基本控制點e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度驗證圖 | 63 |
| 圖 3-45 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度內部精度平面分量較差圖 | 65 |
| 圖 3-46 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度內部精度橢球高分量較差圖 | 66 |
| 圖 3-47 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度平面分量較差圖 | 67 |
| 圖 3-48 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度橢球高分量較差圖 | 67 |
| 圖 3-49 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度正高分量較差圖 | 68 |
| 圖 3-50 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度內部精度平面分量較差圖 | 69 |
| 圖 3-51 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度內部精度橢球高分量較差圖 | 69 |
| 圖 3-52 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度平面分量較差圖 | 70 |
| 圖 3-53 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度橢球高分量較差圖 | 71 |
| 圖 3-54 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度正高分量較差圖 | 71 |
| 圖 3-55 e-GNSS[2013]→TWD97 調整前後轉換控制點分布圖 | 73 |
| 圖 3-56 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]調整前後轉換控制點分布圖 | 74 |
| 圖 3-57 e-GNSS[2013]→TWD97 不同轉換控制點數量外部精度平面分量較差圖 | 75 |
| 圖 3-58 e-GNSS[2013]→TWD97 不同轉換控制點數量外部精度橢球高分量較差 | 75 |
| 圖 3-59 e-GNSS[2013]→TWD97 不同轉換控制點數量外部精度正高分量較差圖 | 76 |
| 圖 3-60 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同轉換控制點數量外部精度平面分量較差圖 | 77 |
| 圖 3-61 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同轉換控制點數量外部精度橢球高分量較差圖 | 77 |
| 圖 3-62 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同轉換控制點數量外部精度正高分量較差圖 | 78 |
| 圖 4-1 精度需求高於研究成果之建議作業方式 | 84 |

摘要

關鍵詞：坐標轉換、殘差網格、VBS-RTK、e-GNSS、RTCM 3.1

一、研究緣起

虛擬基準站即時動態定位技術（Virtual Base Station-Real Time Kinematic, VBS-RTK）係採用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，計算基準站涵蓋地區之定位誤差，再配合距移動站最近的實體基準站觀測資料，產製虛擬基準站作為 RTK 主站，透過網路傳送給使用者進行超短基線 RTK 即時動態定位計算，故須仰賴高精度的基準坐標，作為定位誤差修正的理論基礎。

就國家坐標系統一致性與各項測繪業務成果整體考量，VBS-RTK 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向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，測量成果坐標系統為 e-GNSS 系統 2013 年坐標（簡稱 e-GNSS[2013]），與法定坐標系統不同。目前 e-GNSS 系統測量成果欲轉換至法定坐標系統，尚須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，不僅增加測量工作成本與時間，且坐標轉換與最小二乘配置計算之專業技術門檻較高，不利一般使用者應用，亦無法提供使用者在測量現場即可獲得所需之法定坐標成果。

本研究利用 e-GNSS 系統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標準作業程序，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，節省測量工作成本與時間。

二、研究方法及過程

(一) 蒐集資料

蒐集國內外有關 VBS-RTK 定位技術、坐標轉換、離散點組網格計算模式與 RTCM 3.1 之相關文獻，了解有關 VBS-RTK 定位技術原理與 RTCM 3.1 支援即時坐標轉換之格式內容與使用限制，確認研究方向。

觀測計算臺灣本島各基準站與基本控制點 e-GNSS[2013]坐標資料，並蒐集 TWD97、TWD97[2010]及 TWVD2001 公告坐標，作為計算七參數、殘差網格修正模型與轉換精度驗證之依據。

(二) 建置模型

透過 Helmert 嚴密法七參數坐標轉換，將 e-GNSS[2013]測量成果至 TWD97 與 TWD97[2010]坐標系統，求得七參數。再依轉換後坐標與公告坐標之殘差，搭配內政部公告之大地起伏資料，分別使用諧和面法 (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。

(三) 即時轉換

將本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，分別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 RTCM 3.1 Type 1021 及 Type 1023 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。

(四) 精度驗證

以建置模型的基準站與基本控制點 e-GNSS[2013]坐標，透過本研究建置之模型轉換至法定坐標系統，並分別以雙線性、雙二次曲線及雙雲形曲線等 3 種內插計算方法，測試轉換成果差異，驗證轉換成果內部精度；再以一等水準點 e-GNSS[2013]測量成果及未納入建置模型的基本控制點 e-GNSS[2013]坐標，透過本研究建置之模型轉換至法定坐標系統，並分別以雙線性、雙二次曲線及雙雲形曲線等 3 種內插計算方法，測試轉換成果差異，驗證轉換成果外部精度，以分析評估最佳模型建置方法。

確認最佳模型建置方法後，另以調整建置模型網格解析度、建置模型

點位數量與 VBS-RTK 觀測時間的方式，分析研究網格解析度、點位數量與觀測時間對轉換精度之影響，以供爾後建立轉換模型參考應用。

三、重要發現

經建置模型、即時轉換與精度驗證結果，本研究對於以三維即時坐標轉換輔助 VBS-RTK 技術獲得法定坐標系統測量成果有以下幾點重要發現：

- (一) 本研究成果可即時將 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。

透過 RTCM 3.1 Type 1021 及 Type 1023 將坐標轉換參數、殘差網格修正模型與網格內插計算方法等資訊即時傳送給 e-GNSS 系統使用者，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），轉換成果在平面精度優於 5 公分，在高程精度優於 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，對於建築、工程、製圖及管線測量等精度需求低於轉換精度之工作，可節省大量測量工作成本與時間，降低 VBS-RTK 應用技術門檻，有助於 e-GNSS 系統推廣應用。

- (二) 克利金法為最佳建置模型方法，雙線性內插為最佳內插計算方法。

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、克利金法及距離反比權重法等 3 種方法組成殘差網格修正模型，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。

- (三) 網格解析度越高，內部精度越好，外部精度影響則不明顯。

為研究網格解析度對模型精度之影響，本研究以克利金法分別建置網格解析度為 30 秒、60 秒及 120 秒之殘差網格修正模型，再以雙線性內插計算坐標轉換成果，分析比較不同網格解析度之殘差網格修正模型對轉換成果之影響。研究結果顯示，網格解析度越高，內部精度越好，但對外部精度幾乎沒有影響，主要應與精度驗

證點位和建置模型點位之相關性有關。

(四) 轉換控制點數量越多，未必可提升坐標轉換模型精度。

為研究轉換控制點數量對模型精度之影響，本研究利用不同轉換控制點數量，以克利金法建置殘差網格修正模型，以雙線性內插計算坐標轉換成果，分析比較轉換控制點數量對轉換成果之影響。研究結果顯示，轉換控制點數量越多，未必可提升坐標轉換模型精度，若轉換控制點轉換前後坐標的相對關係正確且分布夠均勻，則增加轉換控制點數量，對提升坐標轉換模型精度幫助有限。

(五) VBS-RTK 觀測時間長短對轉換精度無顯著影響。

考量部分測量工作無法在單一點位長時間觀測，為研究 VBS-RTK 觀測時間對轉換精度之影響，本研究將 VBS-RTK 測量成果分別取前 10 筆、前 30 筆及前 180 筆固定解，以克利金法建置之殘差網格修正模型及雙線性內插進行坐標轉換精度檢核，分析 VBS-RTK 觀測時間對轉換精度之影響。研究結果顯示，VBS-RTK 觀測時間長短對轉換精度無顯著影響，即 VBS-RTK 觀測 10 筆固定解之精度與觀測 180 筆固定解之精度無顯著差異。

四、 主要建議事項

依據研究數據與成果，本研究提供有關 VBS-RTK 定位技術即時獲得法定坐標系統測量成果之立即可行建議與長期性建議如下：

(一) 立即可行建議

1. 本研究成果已實際應用於 e-GNSS 系統，提供使用者將 VBS-RTK 測量成果即時轉換至法定坐標系統。

主辦機關：內政部國土測繪中心

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 系統目前已實際用本研究成果，提供使用者依需求自行選

擇測量成果之坐標系統，讓使用者在外業測量現場即可獲得法定坐標，節省測量工作成本與時間，降低使用技術門檻，有助於 e-GNSS 系統推廣應用。

2. e-GNSS 系統結合本研究成果，實現現代化高程測量。

主辦機關：內政部

協辦機關：內政部國土測繪中心

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現代化高程測量。

(二) 長期性建議

1. 蒐集控制點 TWD67，建置坐標轉換模型。

主辦機關：內政部國土測繪中心

協辦機關：各縣市政府地政單位

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，故有使用 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，提升工作效能。

2. 定期更新 e-GNSS 系統基準站坐標，建立臺灣半動態基準。

主辦機關：內政部

協辦機關：內政部國土測繪中心

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，建立臺灣半動態基準。

Abstract

Keywords: coordinate transformation, residual grid, VBS-RTK, e-GNSS, RTCM 3.1

A. Background

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 like TWD97, TWD97[2010] and TWVD2001. 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 is used as an example to solve problems about that VBS-RTK could not determine the legal coordinates immediately by establishing a 3D real-time coordinate transformation model.

B. Study method and process

1. Data Collection

Collect reference about VBS-RTK, coordinate transformation, gridding methodology and RTCM 3.1. Compute e-GNSS[2013] and find out the legal coordinates of TWD97, TWD97[2010] and TWVD2001 of base stations and control points.

2. Transformation model establishment

Compute transformation parameters about e-GNSS[2013] to TWD97 and e-GNSS[2013] to TWD97[2010] by Helmert 7-parameters coordinate transformation. Determine the residuals of base stations and control points. This study used Harmonic surface, Kriging and Inverse distance weighted gridding method to establish transformation models.

3. Real-time transformation

Accomplishment of VBS-RTK determining legal coordinates by the type 1021 and type 1023 of RTCM 3.1

4. Accuracy testing

In this study, bi-linear, bi-quadratic and bi-spline interpolation method to analyze internal and external accuracy of transformation results were used, and find out which gridding and interpolation method is the best for

establishing transformation model. Besides, we also analyzed how to establish a high accuracy transformation model by adjusting the grid resolution, common point number of established transformation model and survey periods of VBS-RTK.

C. Important discoveries

There are 5 important discoveries coming up from this study:

1. This study has achieved e-GNSS VBS-RTK determining legal coordinates by 3D real-time coordinate transformation. The transformed accuracy for horizontal coordinate was better than 5 cm, for ellipsoid and orthometric height was better than 10cm.
2. The best gridding method in this study was Kriging, the best interpolation method in this study was bi-linear.
3. The higher grid resolution, results better internal accuracy, but that did not improve external accuracy.
4. There were no significant relationships between common point number and the accuracy of coordinate transformation model.
5. There were no significant relationships between observation periods of VBS-RTK and accuracy of transformation.

D. Recommendations

There are 4 recommendations submitted after this study:

1. The research results of this study were applied to e-GNSS real-time kinematic positioning system, providing VBS-RTK determining legal coordinates for users.
2. Using e-GNSS real-time kinematic positioning system and the research results of this study will achieve height modernization in Taiwan.
3. If there are enough legal coordinates of TWD67, using the research results of this study will establish e-GNSS to TWD67 coordinate transformation model for users.
4. Through regular updating coordinates of e-GNSS base station and using the research results of this study will establish semi-dynamic datum of Taiwan.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

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, 並經由網路或其它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, 並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理論基礎, 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 2012 年 12 月 1 日至 2013 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。目前辦理 e-GNSS 系統 VBS-RTK 測量欲獲得法定坐標，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，無法於測量現場即時獲得法定坐標成果，且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，亦無法獲得正高成果。

第二節 研究動機與目的

e-GNSS 系統可快速獲得公分等級精度之 VBS-RTK 測量成果，但受基準站間相對精度限制，其測量成果為 e-GNSS[2013]坐標。目前常見將 e-GNSS[2013]坐標轉換至法定 TWD97 或 TWD97[2010]坐標之作法如下：

一、坐標分量平移法

- (一) 適用時機：定位成果精度等級需求不高者，例如可應用於低於 10cm 精度之相關測繪業務。
- (二) 作業方法：於測區範圍內至少選定 1 經檢核可用之已知控制點，進行 VBS-RTK 定位後，取其 e-GNSS[2013]坐標與已知控制點 TWD97 或 TWD97[2010]坐標分量較差 ($\Delta N, \Delta E, \Delta h$)，作為坐標分量平移之基準值，計算獲得法定坐標成果。
- (三) 優點：
 - 1. 無須辦理繁複內業坐標轉換與最小二乘配置計算，作業簡易方便。
 - 2. 可於測量現場獲得法定坐標系統測量成果。
- (四) 缺點：
 - 1. 僅適用於小範圍測區，且測區範圍內須無明顯地表變位量不一致之現象。
 - 2. 已知控制點須經檢核確認已知坐標之可用性，否則發生定位成果錯誤或大誤差之風險，將相對提高。
 - 3. 正高需透過大地起伏模型另外計算。

二、四參數或六參數平面坐標轉換與最小二乘配置計算

- (一) 適用時機：定位成果精度等級需求較高者，如應用於優於 10cm 精度之測繪業務。
- (二) 作業方法：於測區外圍選定 4 個（含）以上經檢核可用且均勻包圍測區之已知控制點，進行 VBS-RTK 定位後，將已知控制點 e-GNSS[2013]與 TWD97 或 TWD97[2010]坐標使用 Helmert 4 參數或 Affine 6 參數進行平面坐標轉換，再以最小二乘配置法，將各轉換共同點坐標殘差加權配賦至各待測點，計算獲得法定坐標成果。

(三) 優點：

1. 採用嚴密的坐標轉換及殘差配置計算，可掌控轉換成果精度品質。
2. 轉換已知控制點預先經過檢核處理，可有效剔除坐標變位量不一致之控制點，轉換後坐標成果發生大誤差或錯誤之風險相對降低。

(四) 缺點：

1. 僅適用於小範圍測區。
2. 僅具備平面(N,E)坐標轉換功能，無法處理橢球高(h)轉換，正高則需透過大地起伏模型另外計算。
3. 須由具備相當理論基礎與工作經驗之專業人員操作計算，技術門檻相對較高，增加作業成本與時間。
4. 無法於測量現場獲得法定坐標系統測量成果。

為整合上述 2 種轉換方法之優點，解決其缺點，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 套更便利且更可靠的作法供 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。

第三節 研究方法與流程

一、資料蒐集

蒐集國內外有關 VBS-RTK 定位技術、坐標轉換、離散點組網格計算模式與 RTCM 3.1 之相關文獻，了解有關 VBS-RTK 定位技術原理與 RTCM 3.1 支援即時坐標轉換之格式內容與使用限制，確認研究方向。

觀測計算臺灣本島各基準站與基本控制點 e-GNSS[2013]坐標資料，並搜集 TWD97、TWD97[2010]及 TWVD2001 公告坐標，作為計算七參數、殘差網格修正模型與轉換精度驗證之依據。

二、建置模型

將 e-GNSS[2013]測量成果透過 Helmert 嚴密法七參數坐標轉換至 TWD97 與 TWD97[2010]坐標系統，求得七參數。再依轉換後坐標與公告坐標之殘差，搭配內政部公告之大地起伏資料，分別使用諧和面法 (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。

三、即時轉換

將本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，分別以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 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。

四、精度驗證

以建置模型的基準站與基本控制點 e-GNSS[2013]坐標，透過本研究建置之模型轉換至法定坐標系統，並分析不同內插方式對轉換成果之影響，驗證轉換成果內部精度；再以一等水準點 e-GNSS[2013]測量成果及未納入建置模型的基本控制點 e-GNSS[2013]坐標，透過本研究建置之模型轉換至法定坐標系統，並分析不同內插方式對轉換成果之影響，驗證轉換成果外部精度，以分析評估最佳模型建置方法。

確認最佳模型建置方法後，另以調整建置模型網格解析度、建置模型點位數量與 VBS-RTK 觀測時間的方式，分析研究網格解析度、點位數量

與觀測時間對轉換精度之影響，以供爾後建立轉換模型參考應用。

五、撰寫研究報告

將資料蒐集及研究測試成果，依據內政部推動自行研究發展獎勵作業規定之研究報告格式，撰寫「應用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」研究報告。

第二章 VBS-RTK 與即時坐標轉換

第一節 VBS-RTK 定位技術

傳統單主站即時動態定位技術 (Real Time Kinematic, RTK) 應用上的主要瓶頸,在於主站系統誤差改正參數之有效作用距離,因定位誤差的空間相關性,會隨著主站與移動站間距離的增加,而逐漸失去誤差模型的有效性,特別是電離層殘餘誤差。而利用虛擬基準站即時動態定位技術,將可有效增加傳統單主站 RTK 定位之作業範圍,其採用多個衛星定位基準站所組成的觀測網絡來估算涵蓋範圍內之定位誤差,配合最鄰近的實體基準站觀測資料,建構虛擬基準站 (Virtual Base Station, VBS) 作為 RTK 主站使用。因該虛擬基準站與實體移動站間因距離甚短,誤差模型具有高度相關的特性,在 RTK 差分解算的過程中,系統誤差即可完整地消除,獲得高精度及高可靠度的定位成果。因此,在 VBS-RTK 定位解算過程中,移動站並不是接收某個實際基準站的實際觀測資料,而是接收由控制及計算中心所傳出的虛擬觀測數據,也就是 RTK 主站是經過人工產製的虛擬化基準站,但其意義就如同使用者是接收實體基準站觀測資料一般,這種網路化 RTK 定位技術,稱之為虛擬基準站 RTK 定位技術或簡稱為 VBS-RTK 定位技術 (內政部土地測量局, 2006)。

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 GNSS 觀測網,全天候連續接收衛星資料,並經由網路或其它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 (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,並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 (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 (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)。

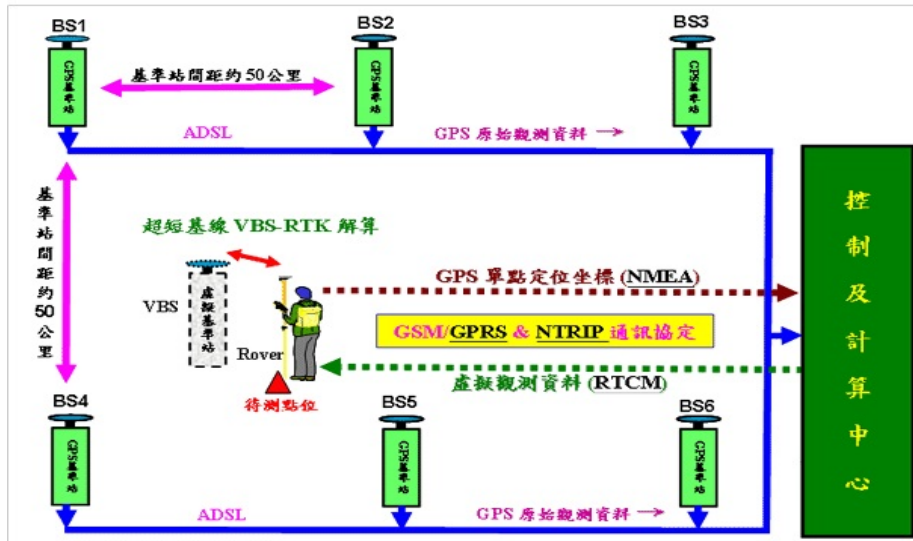


圖 2-1 VBS-RTK 定位技術示意圖（內政部土地測量局，2006）

VBS-RTK 測量成果須仰賴高精度的基準坐標，作為定位誤差修正的理論基礎，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，為維持基準站間之相對關係，確保測量成果精度品質，VBS-RTK 各基準站坐標須定期計算更新，故其測量成果屬 VBS-RTK 系統之坐標，非法定坐標。

VBS-RTK 定位測量之優缺點綜整如下：

一、優點

- (一) 可擴大有效作業範圍，提高定位精度及可靠度。
- (二) 測量誤差及初始化時間不因距離增長而增加。
- (三) 使用者無須架設區域性主站。
- (四) 單人單機即可作業。
- (五) 可縮短作業時間，增加產能，降低作業成本。
- (六) 所有使用者皆在同一框架下進行即時定位。
- (七) 可提供全面性的定位成果品質監控。

二、缺點

- (一) 測量成果非法定坐標系統。
- (二) 無法獲得正高。

第二節 e-GNSS 即時動態定位系統

內政部國土測繪中心（以下簡稱本中心）於 2006 年建置全國性 e-GPS 即時動態定位系統，2009 年正式營運，2014 年將基準站衛星定位接收儀及系統軟體全面升級為可接收處理 GPS 與 GLONASS 雙星系資料，並正式更名為 e-GNSS 系統。e-GNSS 系統之核心技術即為 VBS-RTK 定位技術，其基本組成架構分為 3 大單元（內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態定位系統入口網站，2014）：

一、衛星定位基準網

基準站連續接收 GPS 與 GLONASS 觀測資料，並透過網際網路將資料即時傳輸至控制計算中心，進行區域修正參數計算。為避免各機關重複建置基準站造成資源浪費，本中心與相關單位簽署合作契約，共享基準站資料，目前 e-GNSS 系統線上營運基準站數量為 78 站，並備有 47 個備援站，以供基準站故障時，可維持 78 個基準站提供服務，確保定位精度。各基準站間之平均距離約 30 公里，分布情形如圖 2-2，基準站統計資料如表 2-1。

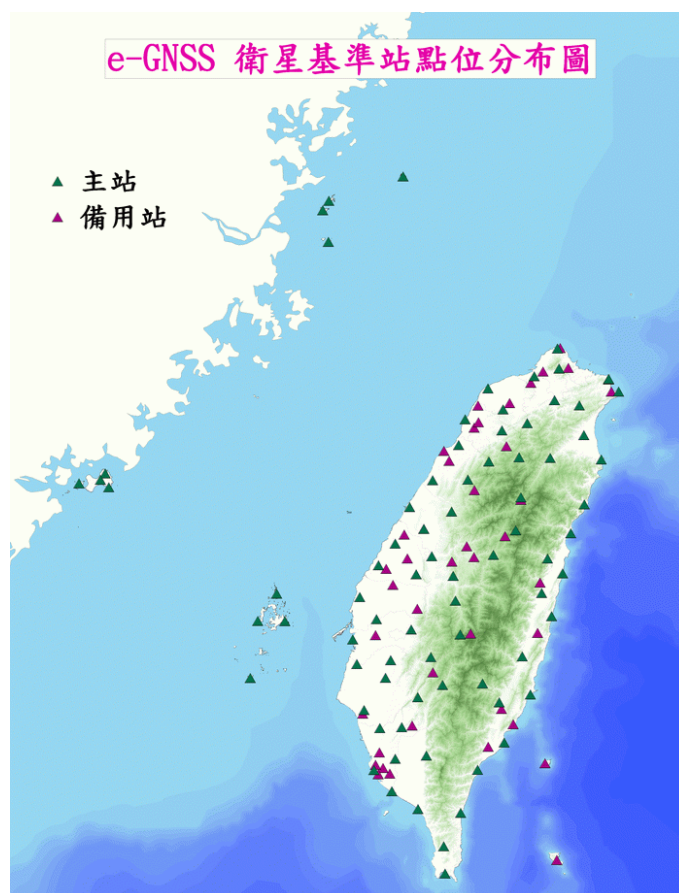


圖 2-2 e-GNSS 系統基準站點位分布圖

表 2-1 e-GNSS 系統基準站統計表

| 單位 | 基準站數量 | 主要服務基準站 | 備用基準站 |
|------------------------|-------|---------|-------|
| 內政部國土測繪中心 | 62 | 52 | 10 |
| 交通部中央氣象局 | 42 | 18 | 24 |
| 高雄市政府地政局 | 10 | 4 | 6 |
| 經濟部中央地質調查所 | 4 | 2 | 2 |
| 國立成功大學 衛星資訊研究中心 | 3 | 1 | 2 |
| 行政院農業委員會 林務局南投林區管理處 | 2 | 1 | 1 |
| 新竹縣政府 | 1 | 0 | 1 |
| 健行科技大學 | 1 | 0 | 1 |
| 總計 | 125 | 78 | 47 |

二、控制計算中心

e-GNSS 控制計算中心（圖 2-3）建置於本中心地籍資料庫 4 樓電腦機房，主要硬體包括防火牆、路由器、交換器、伺服器、磁碟陣列儲存系統、不斷電系統及磁帶機等設備，核心定位軟體為美國 Trimble Navigation 公司所研發之 PIVOT 定位系統軟體，其主要功能包括 Trimble Instrument Configurator(TIC)、Trimble Ephemeris Download(TED)及 Trimble Streaming Manager (TSM) 等三大模組，以進行基準站遠端控制、資料下載使用及進行 DGNSS 差分定位解算與公分級 VBS-RTK 即時動態定位解算。



圖 2-3 e-GNSS 系統控制計算中心實景

三、移動站使用者

使用 VBS-RTK 定位之使用者，至少須準備衛星定位接收儀、連結網路設備及 NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol, NTRIP) 通訊協定操作軟體等 3 種軟硬體，才可進行單點定位坐標計算、坐標傳輸至控制計算中心及 VBS-RTK 計算。

e-GNSS 系統因須即時計算並處理各基準站涵蓋範圍內之定位誤差修正資料，並依每個使用者單點定位坐標產出虛擬衛星觀測資料，回傳給使用進行超短基線之 RTK 即時動態定位解算，故需有高精度的坐標來維持各基準站間相對關係之正確性。為配合內政部於 2012 年 3 月 30 日公布 TWD97[2010]坐標系統，使 e-GNSS 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，e-GNSS 系統整合 237 個具有 TWD97[2010]坐標成果之基準站 2012 年 12 月 1 日至 2013 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，約制在竹南基準站三維空間坐標，解算各基準站 e-GNSS[2013]坐標，作為 e-GNSS 臺灣本島坐標系統。至於澎湖、金門及馬祖地區則維持原 TWD97[1997]坐標框架，不予變更。

表 2-2 e-GNSS[2013]坐標框架定義

| 國際坐標基準框架 | | ITRF 94 | |
|------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| 坐標定義起始時刻 | | 2013 年 1 月 1 日 12:00:00 | |
| 固定站點名 | X | Y | Z |
| 竹南站 (JUNA) | - 2975765.1265m | 4976994.6606m | 2647324.0276m |
| 年平均速度量 | -0.0221 m/yr | - 0.0096 m/yr | - 0.0102 m/yr |

第三節 現行法定坐標系統

依據基本測量實施規則規定，臺灣現行法定坐標系統為 TWD97，高程系統為 TWVD[2001]，惟臺灣位於板塊碰撞劇烈地帶，地表上之衛星追蹤站及各級衛星控制點亦隨同變動其位置，且因地域不同而各有其特性，在長期累積下致部分地區套合引用有所困難，故中央主管機關內政部於 2012 年 3 月 30 日公告 TWD97[2010]坐標系統。有關臺灣現行坐標系統與高程系統說明如下：

一、TWD97 坐標系統

內政部於 1980 年公布檢測之控制點已陸續遺失、毀損情形嚴重，各單位因業務需要，零星補建，缺乏整體規劃，且精度不一。故為建立完整、統一、高精度之基本控制點系統，自 1993 年起應用高精度全球定位系統測量技術，迄 1997 年止共建立 8 個衛星追蹤站及 105 個一等衛星點及 622 個二等衛星點，以供各界應用。該系統定名為一九九七臺灣地區大地基準，簡稱 TWD97，由內政部以 87 年 3 月 17 日台(87)內地字第 8781107 號函訂定，採用之測量基準如下：

- (一) 採用國際地球參考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF)。ITRF 為利用全球測站網之觀測資料成果推算所得之地心坐標系統，其方位採國際時間局 (Bureau International de l'Heure, BIH) 定義在 1984.0 時刻之方位。
- (二) 參考橢球體採用 1980 年國際大地測量學與地球物理學會 (International Union of Geodesy and geophysics, IUGG) 公布之 GRS80 參考橢球體，其橢球參數如下：
長半徑： $a = 6378137$ 公尺
扁率： $f = 1/298.257222101$
- (三) 採用橫梅氏投影經差二度分帶，其中央子午線為東經 121 度，投影原點向西平移 250,000 公尺，中央子午線尺度比為 0.9999；另澎湖、金門及馬祖等地區之投影方式，亦採用橫麥卡托投影經差二度分帶，其中央子午線定於東經 119 度，投影原點向西平移 250,000 公尺，中央子午線尺度比為 0.9999。
- (四) 地籍坐標系統及 TWD67 坐標系統因早期測量技術及點位遺失率高

等因素影響，於進行後續加密控制測量時，常發現較大之網形張力，影響成果精度。且 1999 年九二一大地震後，中部地區三角點多已位移，無法再提供應用，內政部遂以 90 年 5 月 2 日台內地字第 9060856 號令發布關於地籍測量實施規則第 4 條之測量基準，採用 TWD97 系統。

二、TWD97[2010]坐標系統

自內政部 1998 年公布衛星追蹤站及各級控制點 TWD97 坐標已歷經 10 餘年，有鑑於臺灣地區位於地殼板塊碰撞劇烈地帶，部分地區點位已產生明顯位移，致套合引用有實務上困難，無法符合目前測繪作業之精度需求，故針對大地基準及坐標系統是否變動或更新等議題，由內政部於 2009 年 10 月起邀集專家學者召開「大地基準及坐標系統更新維護機制」會議討論，確認點位成果及基準框架繼續採用一九九七坐標系統 (TWD97)，並於 101 年 3 月 30 日台內地字第 1010137288 號公告大地基準及一九九七坐標系統 2010 年成果(簡稱 TWD97[2010])。其測量基準定義均與 TWD97 相同，惟套合至國際固定站之 2010.0 時刻成果。

三、TWVD2001 高程系統

臺灣的高程系統採用正高系統，臺灣高程基準係定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，並採用基隆驗潮站 1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得，並命名為 2001 臺灣高程基準 (Taiwan Vertical Datum 2001，簡稱 TWVD 2001)。內政部為配合各界需求，整合平面及高程控制系統，提供現代化三度空間控制資訊，便利各界使用，自 1999 年度起至 2002 年度止，分 4 年在臺灣本島施測 2,065 個一等水準點，並分別於 2002 年 5 月 8 日及 2003 年 11 月 11 日公告一等一級與一等二級水準測量成果，提供一等水準點正高成果供各界應用。

因臺灣本島位於地殼板塊碰撞劇烈地帶，且西南沿海地層下陷影響高程系統甚鉅，為維護測量成果之正確性，內政部於 2006 年交由本中心辦理臺灣本島一等水準點水準測量檢測工作，2009 年 3 月 10 日公告檢測成果供各界應用。本研究考量臺灣本島地表高程變化量大，為確保研究成果可用性，有關 TWVD2001 正高，係使用 2009 年公告檢測成果。

第四節 即時坐標轉換

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 2-3)，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 2-3 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 2-4)，轉換網格示意圖如圖 2-4。

表 2-4 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) |
| 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 |

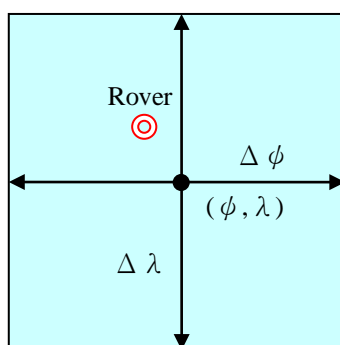


圖 2-4 RTCM 3.1 type 1021 轉換網格示意圖

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)：

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

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 2-5)，殘差網格示意圖如圖 2-5。

表 2-5 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($\Delta\lambda$) |
| 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 |

| 資料名稱 | 數值 | 數值說明 |
|----------|----|-----------------------------------|
| 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 |

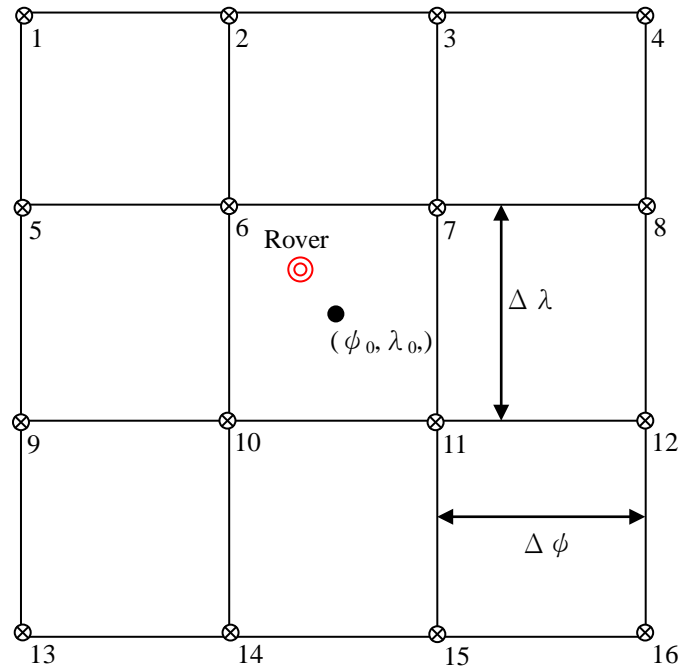


圖 2-5 RTCM type 1023 殘差網格示意圖

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，各種網格內插方法說明如下：

一、雙線性內插

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，以圖 2-6 為例，雙線性內插計算原理如下：

(一) 線性內插計算公式如下：

$$\frac{x_r - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{f_r - f_1}{f_2 - f_1}$$

其中 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。

(二) 分別以格點 {6、7}、{10、11} 及移動站坐標之 X 分量透過線性內

插計算公式求出 P1、P2 處之殘差修正量。

- (三) 以 P1、P2 及移動站站標之 Y 分量透過線性內插計算公式求出移動站之殘差修正量。

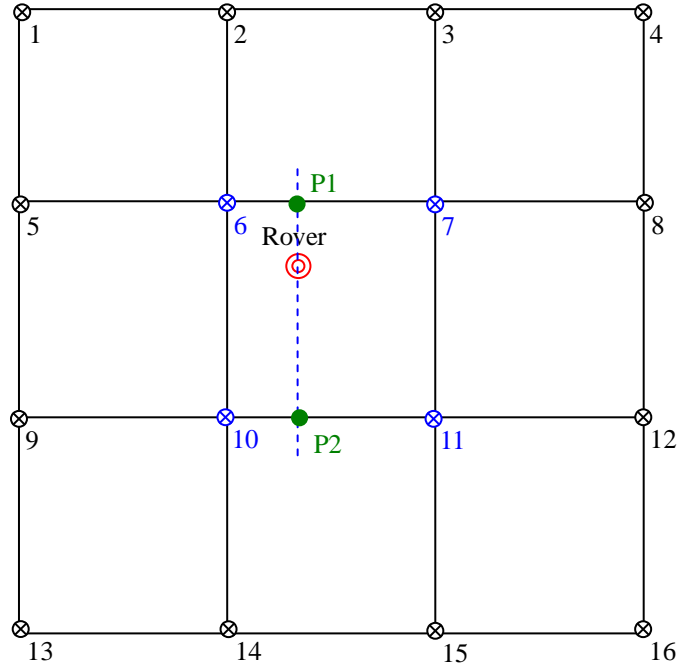


圖 2-6 雙線性內插示意圖

二、雙二次曲線內插

使用移動站所在網格周圍 9 格點之坐標及殘差修正量進行內插，以圖 2-7 例，雙二次曲線內插計算原理如下：

- (一) 二次曲線函數如下：

$$f = ax^2 + bx + c$$

其中 a 、 b 、 c 為未知數， x 為格點坐標分量， f 為格點殘差修正量。

- (二) 分別以格點 {1、2、3}、{5、6、7} 及 {9、10、11} 透過二次曲線函數求出 X 分量 3 組二次曲線函數之未知數 a 、 b 、 c 。
- (三) 將移動站站標 X 分量透過 3 組二次曲線函數內插求出 P1、P2、P3 之殘差修正量。
- (四) 以 P1、P2、P3 透過二次曲線函數求出 Y 分量二次曲線函數之未知數 a 、 b 、 c 。
- (五) 將移動站站標 Y 分量透過二次曲線函數內插求出移動站之殘差修正量。

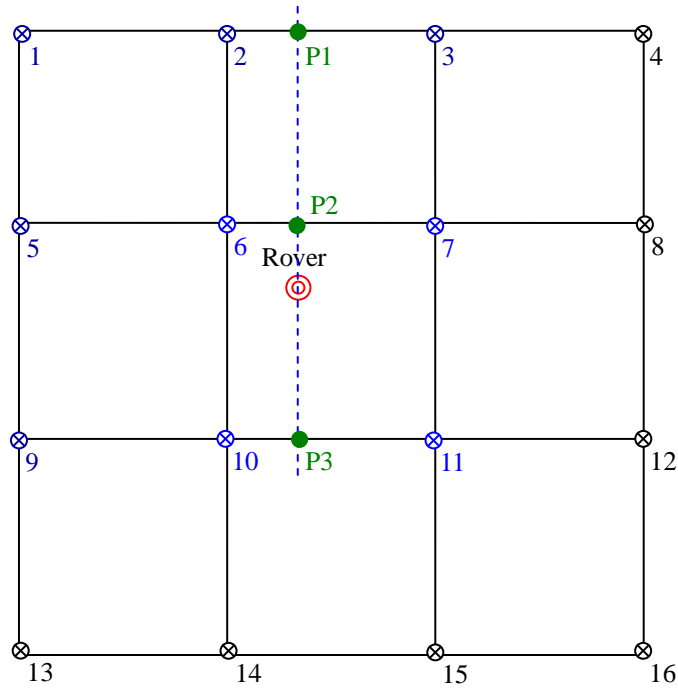


圖 2-7 雙二次曲線性內插示意圖

三、雙雲形曲線內插

使用移動站所在網格周圍 16 格點之坐標及殘差修正量進行內插，以圖 2-8 例，雙雲形曲線內插計算原理如下：

(一) 雲形曲線函數如下：

$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i, i = 1 \sim n-1$$

其中 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 為未知數， x 為格點坐標分量， f_i 為格點殘差修正量。

(二) 雲形曲線內插計算原理，是在兩相鄰格點間，找出一合理的三次多項式，每個多項式必須滿足：

1. 每個曲線 f_i 必通過已知的 (x_i, y_i) 及 (x_{i+1}, y_{i+1}) ，即 $f(x_i) = y_i$ 與 $f(x_{i+1}) = y_{i+1}$ 。
2. 相鄰曲線接點必須平滑，即一階導函數與二階導函數數值相等： $f'_{i-1}(x_i) = f'_i(x_i)$ ， $i = 2 \sim n-1$ ； $f''_{i-1}(x_i) = f''_i(x_i)$ ， $i = 2 \sim n-1$ 。
3. 兩端點的二階導函數初值 $f''_1(x_1) = 0$ 、 $f''_{n-1}(x_n) = 0$ (natural spline)。

(三) 分別以格點 $\{1, 2, 3, 4\}$ 、 $\{5, 6, 7, 8\}$ 及 $\{9, 10, 11, 12\}$

透過雲形曲線函數求出 X 分量 4 組雲形曲線函數之未知數 a 、 b 、 c 、 d 。

- (四) 將移動站坐標 X 分量透過 4 組雲形曲線函數內插求出 P1、P2、P3、P4 之殘差修正量。
- (五) 以 P1、P2、P3、P4 透過雲形曲線函數求出 Y 分量雲形曲線函數之未知數 a 、 b 、 c 、 d
- (六) 將移動站坐標 Y 分量透過雲形曲線函數內插求出移動站之殘差修正量。

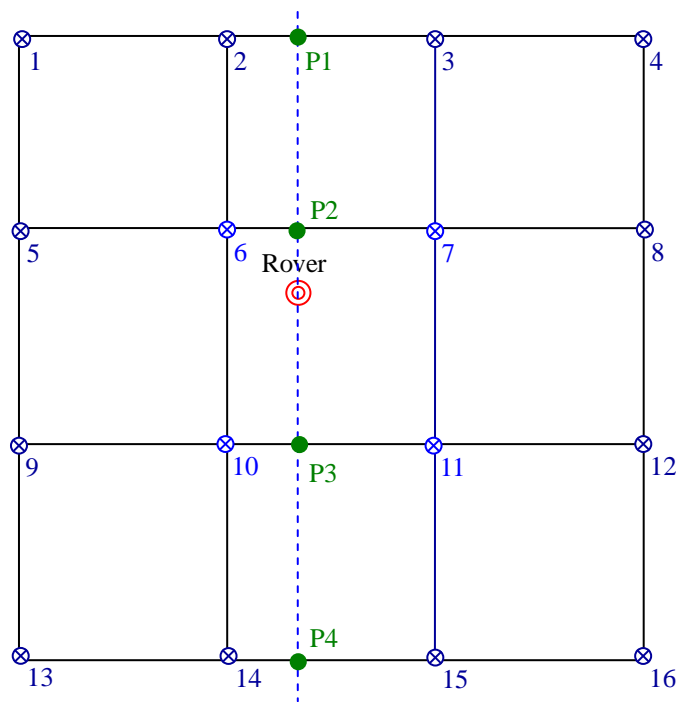


圖 2-8 雙雲形曲線性內插示意圖

本研究依 RTCM 3.1 type 1021 及 type 1023 資料規定格式，計算坐標轉換七參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（圖 2-9）。

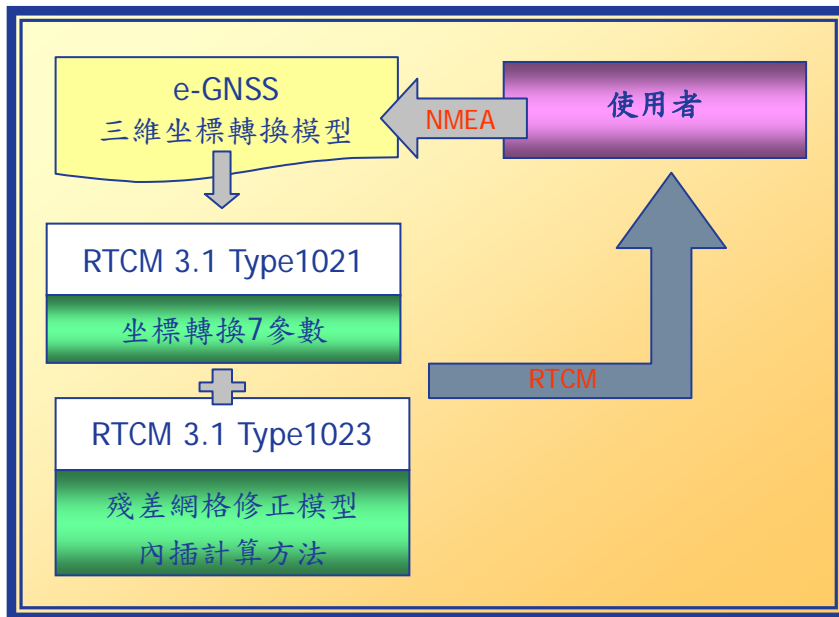


圖 2-9 即時坐標轉換作業流程示意圖

第三章 模型建置與精度分析

第一節 殘差網格修正模型建置方法

RTCM 3.1 提供 VBS-RTK 測量成果即時轉換至法定坐標系統之途徑，type 1021 提供坐標轉換所需轉換參數，type 1023 則提供殘差網格修正模型與內插計算方法。為分析不同建置殘差網格修正模型的方法對轉換成果之影響，本研究有關 type 1021 之資訊以一般常用之 Helmert 嚴密法七參數求得，type 1023 之殘差修正網格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，以分析不同殘差網格修正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。

一、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：

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

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）。

二、克利金法

克利金法又名地質統計法（Geostatistics technique），是根據資料在空間中分佈的統計特性，決定線性內插係數的一種技術。在不同的趨勢條件假設下，又可分為數學上不包含「不偏估條件」的「簡單克利金法」（simple Kriging）；包含「平均值為常數」假設的「不偏估條件」的「普通克利金

法」(ordinary Kriging)；以及包含「平均值為某種空間趨勢函數」假設的「不偏估條件」的「通用克利金法」(universal Kriging) (交通部中央氣象局，2009)。

本研究假設殘差修正量具有定常性，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，2012)：

$$\gamma(s_i, s_j)^2 = \text{var}(Z(s_i) - Z(s_j))$$

空間中 2 點 s_i ， s_j 越接近，我們會預期 2 點的殘差修正量越相似，就如同 $Z(s_i) - Z(s_j)$ 也越小一樣，其中半變異元 (如圖 3-1) 包含碎塊效應 (nugget，是在距離為 0 時的半變異數，代表空間雜訊)、範圍 (range，是空間相關的部分，它顯示半變異數隨著距離增加，超過範圍之的半變異數，將是持平的狀態) 及基值 (sill，達到持平狀態的 r 值)。

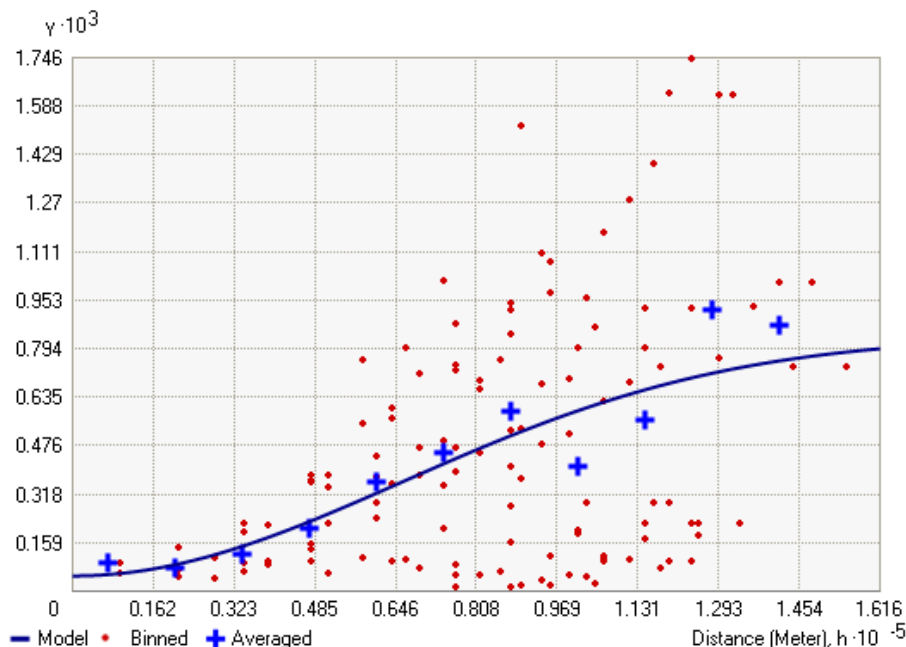


圖 3-1 普通克利金法半變異元圖範例 (內政部國土測繪中心，2012)

半變異元圖必須與數學函數或模型擬合 (fit)，如高斯 (gaussian)、線性 (linear)、球面 (spherical)、圓形 (circular) 和指數 (exponential) 模

型，使圖形中趨勢線與資料吻合，擬合過後的半變異元圖便可用估算任何給定距離的半變異數，本研究使用之數學函數為線性模型。

三、距離反比權重法

距離反比權重法是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，2012）：

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

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 $k=2$ 。

第二節 建置坐標轉換模型

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，則須於殘差修正網格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 3-2，詳細流程說明如下：

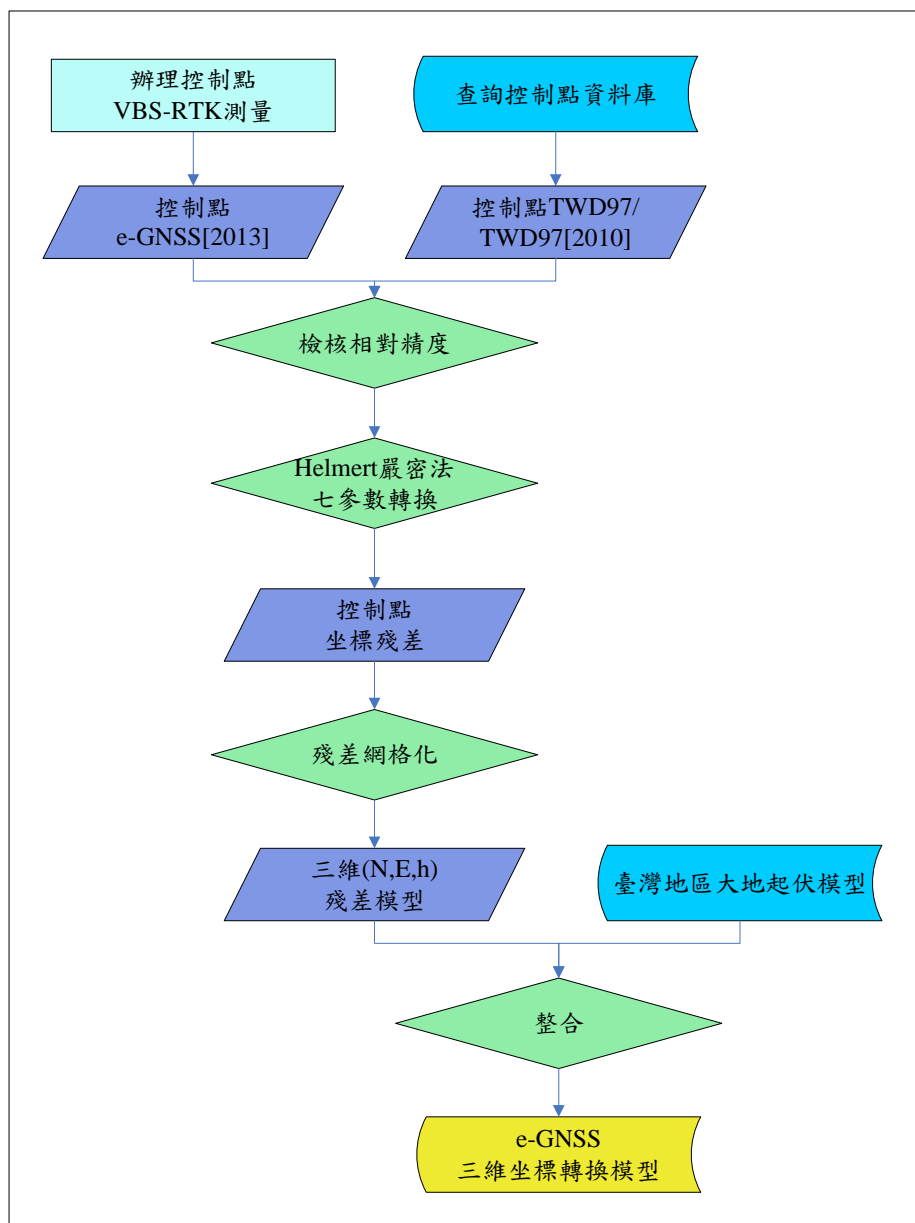


圖 3-2 坐標轉換模型建置流程

- 一、於具 TWD97 及 TWD97[2010]之控制點辦理 e-GNSS 系統 VBS-RTK 測量，獲得控制點 e-GNSS[2013]坐標。
- 二、查詢控制點資料庫，獲得控制點公告 TWD97 及 TWD97[2010]坐標。
- 三、利用控制點 e-GNSS[2013]與 TWD97 坐標；e-GNSS[2013]與 TWD97[2010]坐標檢核其相對關係，確保納入建置坐標轉換模型之控制點坐標可用性。
- 四、進行 Helmert 嚴密法七參數坐標轉換，獲得坐標轉換 7 個參數與控制點七參數轉換後坐標。
- 五、將控制點公告坐標與七參數轉換後坐標相減，獲得控制點坐標殘差。
- 六、將控制點殘差資料利用諧和面法、克利金法及距離反比權重法，組成殘差網格修正模型。
- 七、整合殘差網格修正模型與大地起伏模型，分別獲得 e-GNSS[2013]轉法定 TWD97、TWD97[2010]及 TWVD2001 轉換模型。

為評估 VBS-RTK 測量成果透過三維即時坐標轉換至法定坐標系統之精度，本研究建置 e-GNSS[2013]轉 TWD97 與 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]兩組坐標轉換模型，在加入大地起伏模型後，更可將 e-GNSS[2013]測量成果轉換至 TWVD2001 正高。

一、e-GNSS[2013]轉 TWD97

e-GNSS 系統為確保使用者 VBS-RTK 定位成果精度品質，須定期更新基準站坐標，故就計算建置轉換模型來說，如果能利用基準站均勻分布且連續觀測之特性，以臺灣本島之基準站 e-GNSS 坐標與 TWD97 坐標計算建置轉換模型，將可節省於已知控制點測量 e-GNSS 坐標的外業人力、時間與成本。惟 TWD97 坐標系統於 1998 年公告使用，當時臺灣本島基準站數量有限，不足供計算建置轉換模型，故本研究利用本中心 2013 年基本控制點檢測資料，將其測量成果計算約制於基準站 e-GNSS[2013]坐標，獲得 1,452 點基本控制點 e-GNSS[2013]坐標（含約制基準站）。因計算獲得 e-GNSS[2013]坐標之 1,452 點基本控制點並非所有點位均具有 TWD97 坐標，經比對控制點資料庫後，計有 1,196 點基本控制點同時具有 e-GNSS[2013]與 TWD97 坐標，點位分布情形如圖 3-3。

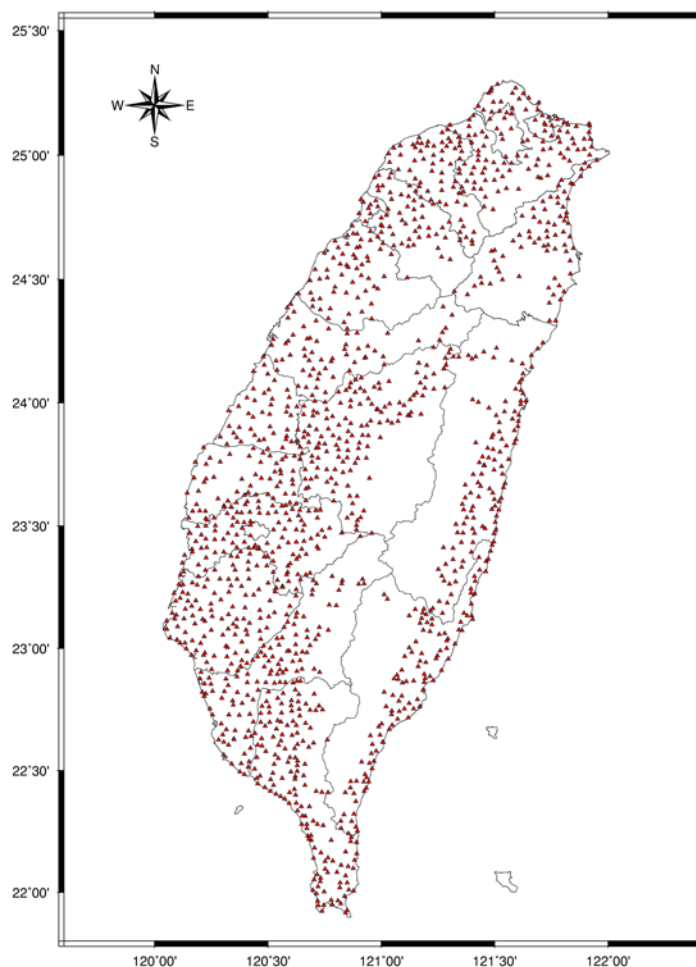


圖 3-3 e-GNSS[2013]轉 TWD97 轉換控制點分布圖

因 TWD97 坐標公告至今已十餘年，部分基本控制點因地表位移或人為移動等因素，其公告坐標已不可使用。為檢核篩選目前公告坐標仍可使用的基本控制點，本研究以比較基本控制點 e-GNSS[2013]與 TWD97 坐標相對關係之方式，將相對關係變化較不合理之點位剔除，避免影響轉換模型精度，檢核篩選方式如下：

- (一) 檢核比較 1,196 點基本控制點 e-GNSS[2013]與 TWD97 坐標相對關係，獲得兩坐標系統點與點間之距離與角度較差。
- (二) 以點為單位，逐點尋找半徑 20 公里以內之其他點位，分析其距離相對精度，以下列原則篩選剔除基本控制點（圖 3-4）：
 1. 某 1 點位和其他 2 個（含）以上點位間之距離相對精度（距離較

差/距離長度) 未達 $1/20,000$ ，則剔除該點位。

2. 某 1 點位和另 1 點位兩者間之距離相對精度未達 $1/20,000$ ，因無法判斷哪個點位之坐標無法使用，故將該 2 點均剔除。

(三) 經以上述方式檢核篩選基本控制點坐標，總計篩選剔除 136 點，剩餘 1,060 點作為 e-GNSS[2013]轉 TWD97 之轉換控制點，將可有效控制在 20 公里範圍內之轉換精度至少達 $1/20,000$ 。

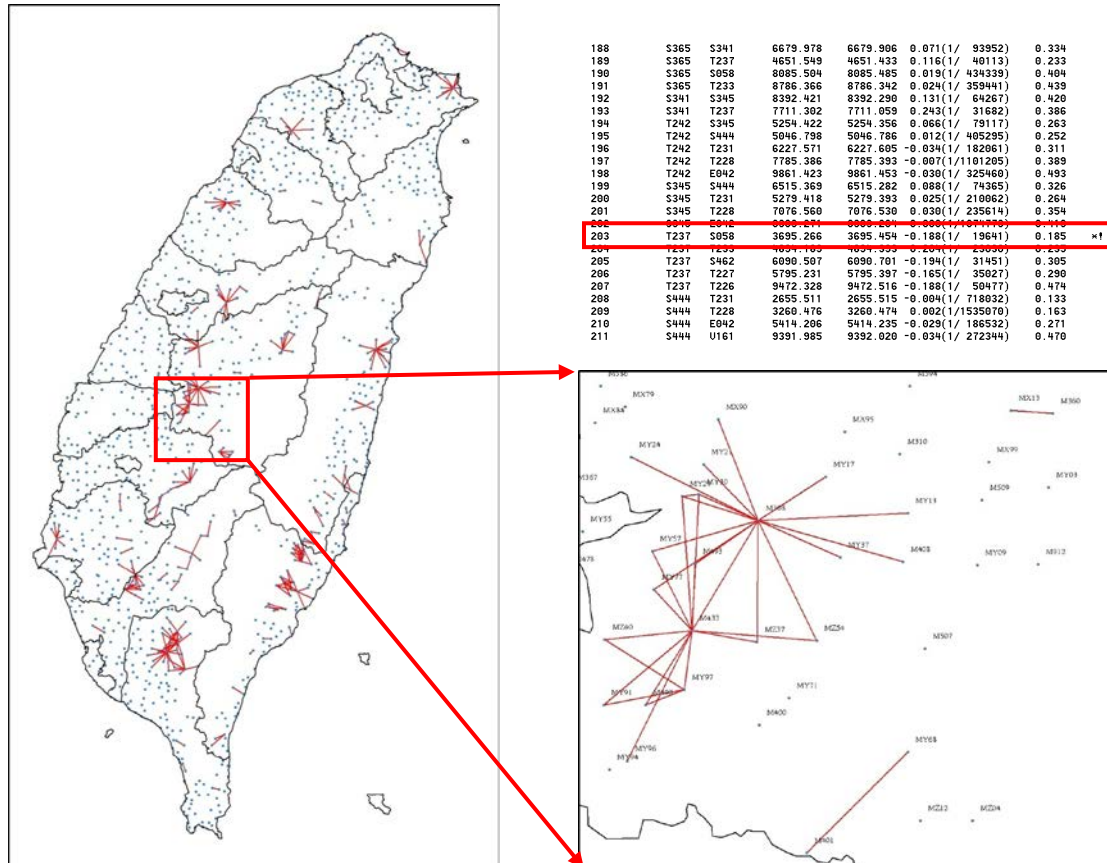


圖 3-4 e-GNSS[2013]轉 TWD97 轉換控制點篩選方式

檢核確認 e-GNSS[2013]轉 TWD97 之轉換控制點後，依 Helmert 嚴密法七參數坐標轉換，獲得坐標轉換 7 個參數與控制點殘差。本研究為分析不同殘差網格修正模型建置方法對轉換成果之影響，分別以諧和面法、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，建立 3 套網格解析度 30 秒之 e-GNSS[2013]轉 TWD97 殘差網格修正模型，並加入內政部 103 年 6 月 4 日台內地字第 1030178307 號公告之 103 年臺灣地區大地起伏模型成果，即可將 e-GNSS[2013]測量成果藉由轉換之 TWD97 橢球高與大地起伏轉換為 TWVD2001 正高。

圖 3-5 至圖 3-7 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 ± 0.1 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。

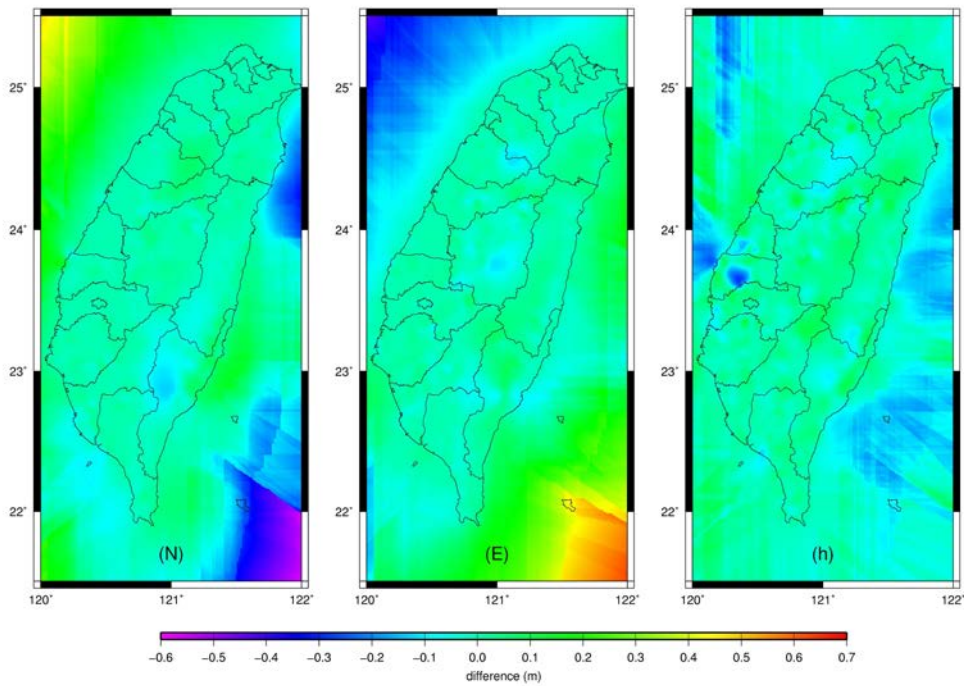


圖 3-5 諧和面法與克利金法殘差網格修正模型差異圖

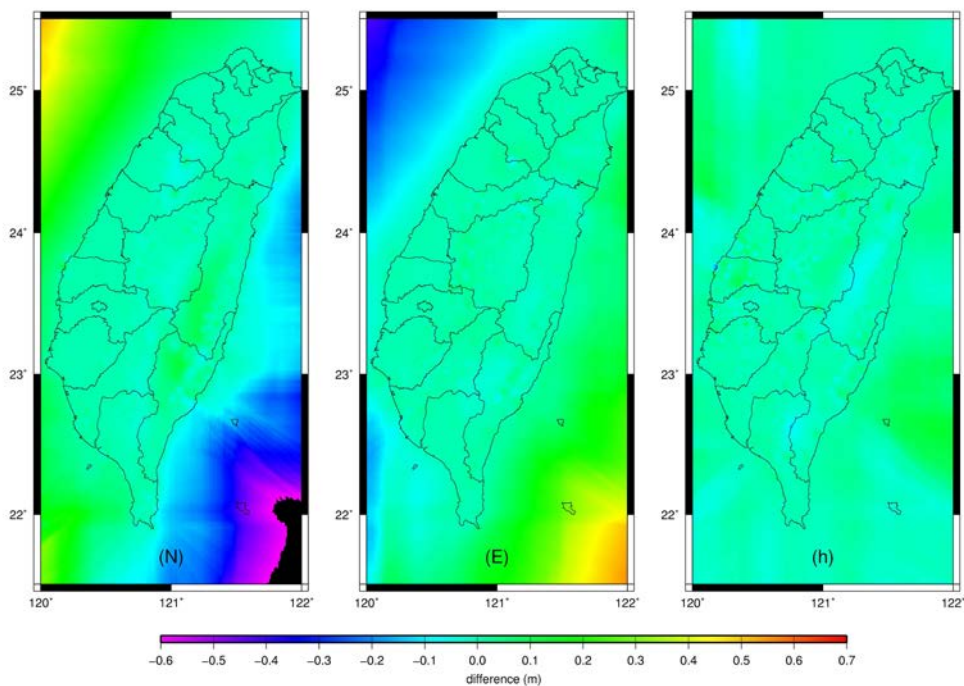


圖 3-6 諧和面法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖

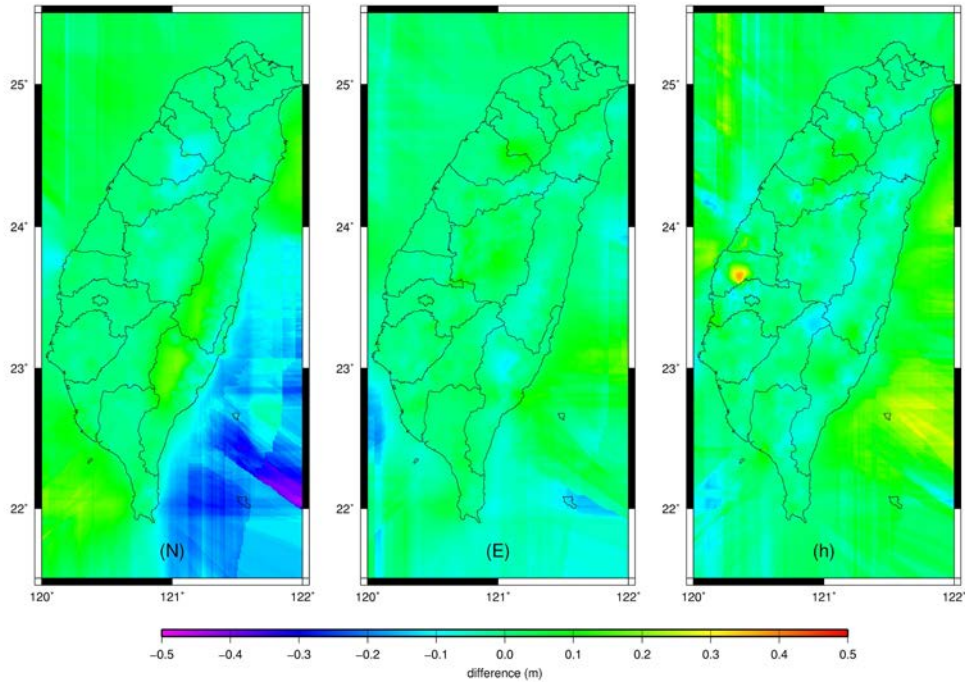


圖 3-7 克利金法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖

二、e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]

內政部 2012 年公告 237 個基準站 TWD97[2010]坐標，包括 18 個衛星追蹤站與 219 個一等衛星控制點（GPS 連續站）。本研究蒐集上述 237 個基準站 101 年 12 月 1 日至 102 年 1 月 31 日計 62 天資料，篩選資料量與品質後，依據內政部公告之 TWD97[2010]坐標框架定義，約制在竹南基準站三維空間坐標，計算獲得 210 個基準站 e-GNSS[2013]坐標，點位分布情形如圖 3-8。

TWD97[2010]坐標公告至今僅 3 年，為確保轉換控制點相對關係符合前述 e-GNSS[2013]轉 TWD97 之相對精度，仍依相同標準檢核基準站 e-GNSS[2013]與 TWD97[2010]之相對關係，檢核結果相對精度均達 $1/20,000$ ，故 210 個基準站全數作為 e-GNSS[2013]轉 TWD97 之轉換控制點。

檢核確認 e-GNSS[2013]轉 TWD97 之轉換控制點後，依 Helmert 嚴密法七參數坐標轉換，獲得坐標轉換 7 個參數與控制點殘差。再分別以諧和面法、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，建立 3 套網格解析度 30 秒之 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]殘差網格修正模型，並加入內政部 103 年 6 月 4 日台內地字第 1030178307 號公告之 103 年臺灣地區大地起伏模型成果，即可將 e-GNSS[2013]測量成果藉由轉

換之 TWD97[2010] 橢球高與大地起伏轉換為 TWVD2001 正高。

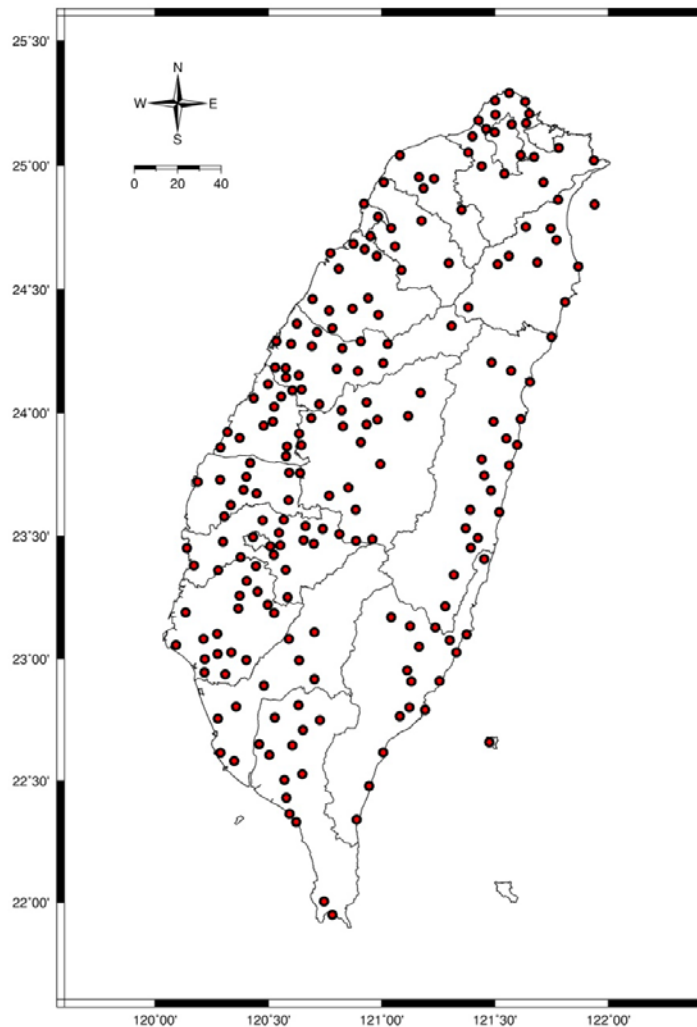


圖 3-8 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]轉換控制點分布圖

圖 3-9 至圖 3-11 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。

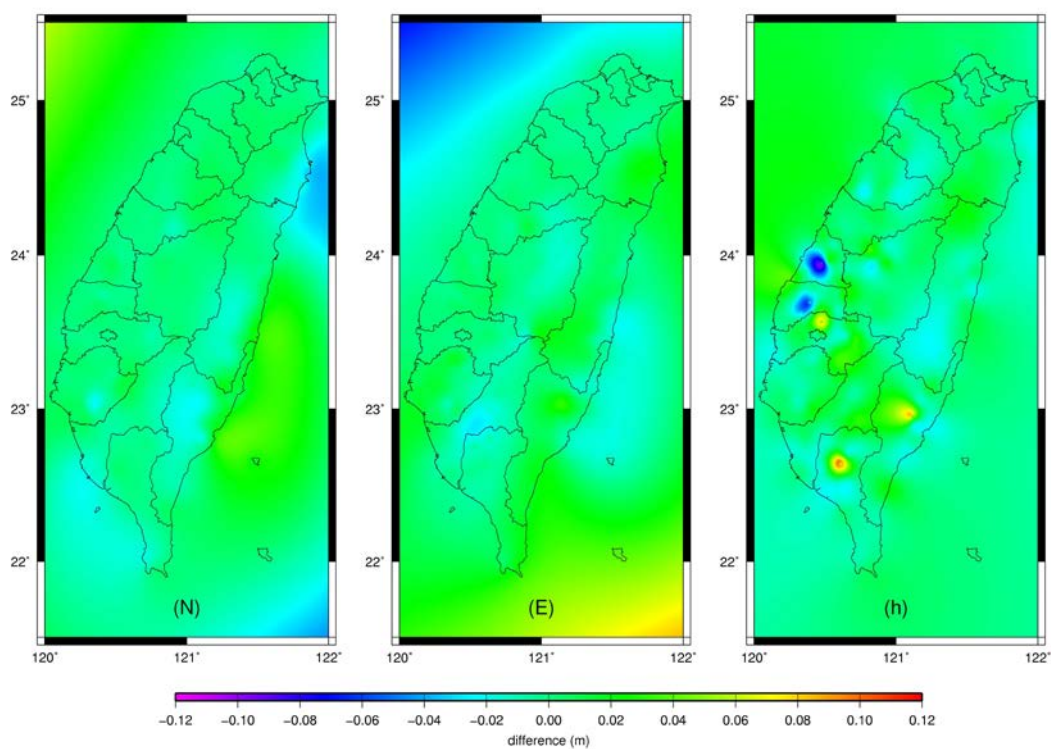


圖 3-9 諧和面法與克利金法殘差網格修正模型差異圖

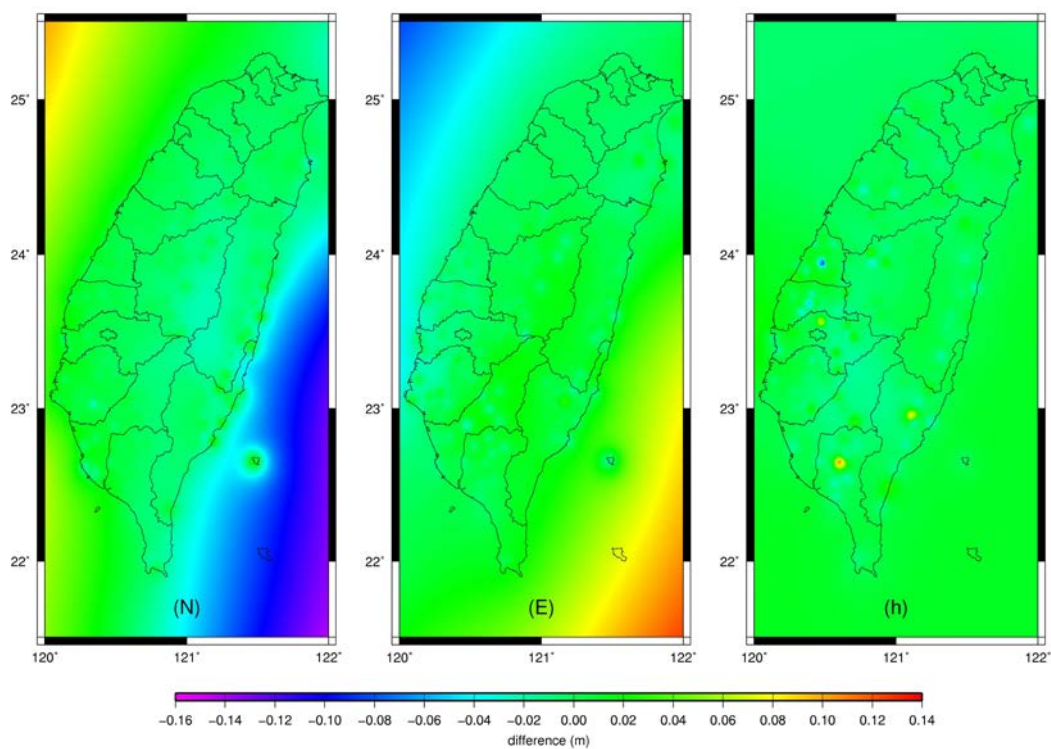


圖 3-10 諧和面法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖

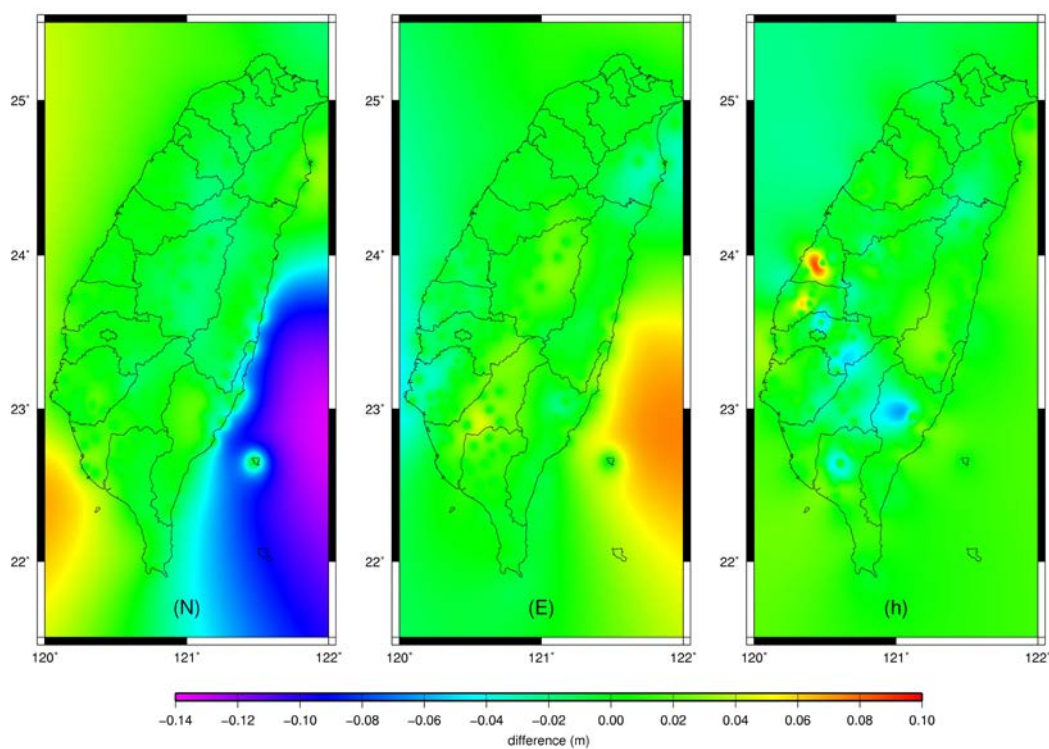


圖 3-11 克利金法與距離反比權重法殘差網格修正模型差異圖

諧和面法、克利金法與距離反比權重法等 3 種方法建置之殘差網格修正模型，在臺灣本島陸地範圍內無明顯差異，僅克利金法在雲林地區之橢球高分量，明顯與其他 2 種方法差異較大。為分析不同方法建置之殘差網格修正模型對轉換精度之影響，後續章節將就模型之內、外部精度進行驗證，以評估確認最佳建置模型之方法。

第三節 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，本節分別使用諧和面法、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 之內外部精度，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

(一) 建置模型及精度驗證資料

1. 建置坐標轉換模型點位：使用本中心 2013 年度基本控制點檢測工作辦理之 1,060 點基本控制點，其 e-GNSS[2013]坐標是利用基本控制點 6 小時靜態觀測資料結合基準站資料共同解算，並約制於基準站 e-GNSS[2013]坐標計算獲得；其 TWD97 坐標是公告坐標。
2. 內部精度驗證資料：使用建置坐標轉換模型之 1,060 點基本控制點 e-GNSS[2013]坐標，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，作為內部精度評估指標，以驗證坐標轉換模型是否正確可用。
3. 外部精度驗證資料
 - (1) TWD97 坐標 (N,E,h)：使用本中心 2013 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，點位分布情形如圖 3-12。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，故實際進行外部精度驗證點數為 345 點。

(2) TWVD2001 正高 (H): 使用本中心 2013 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 2009 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。

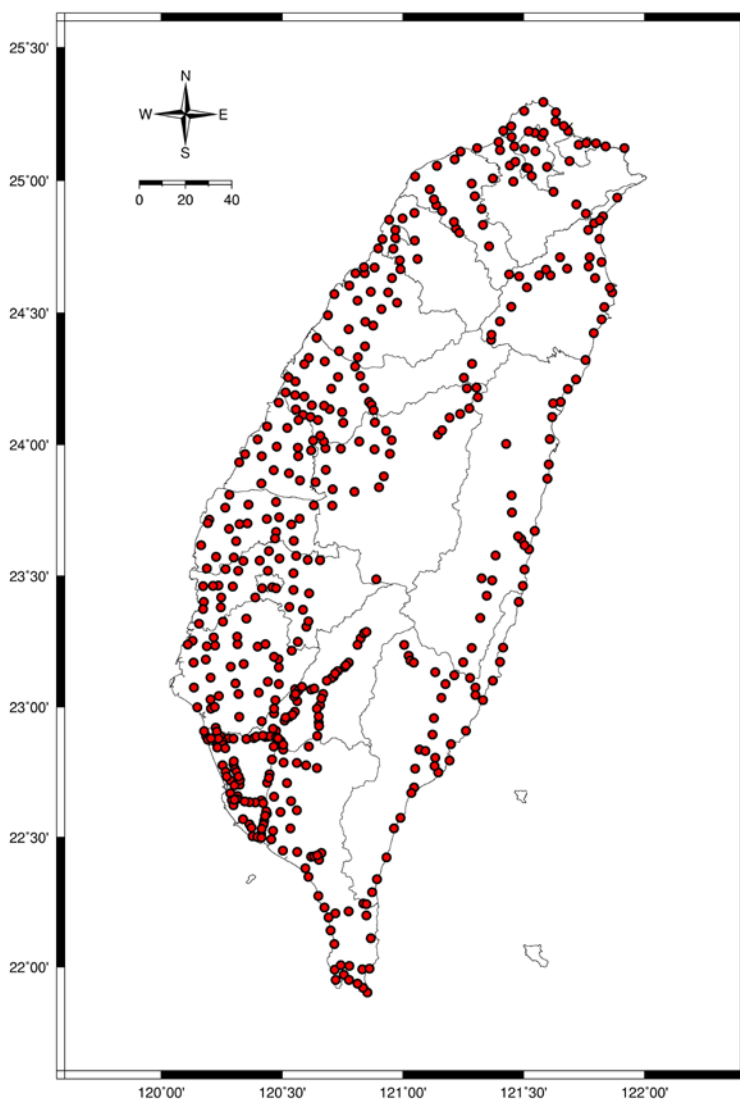


圖 3-12 e-GNSS[2013]轉 TWD97 外部精度驗證點位分布圖

(二) 內部精度驗證結果

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 3-1，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-13 及圖 3-14。
- (2) 3 種內插方法轉換後坐標與公告坐標各分量較差之平均值皆為 0.000 公尺，表示轉換模型無明顯系統差。
- (3) 3 種內插方法以雙線性內插成果最佳，中誤差在平面分量 N 方向為 0.013 公尺、E 方向為 0.015 公尺，橢球高分量為 0.027 公尺，表示轉換模型內部精度在平面分量約 2 公分，橢球高分量約 3 公分。
- (4) 由圖表發現，部分點位經雙雲形曲線內插之成果，其較差明顯大於雙線性與雙二次曲線內插成果，表示雙雲形曲線內插方法在某些地區不適用，會有錯誤產生。

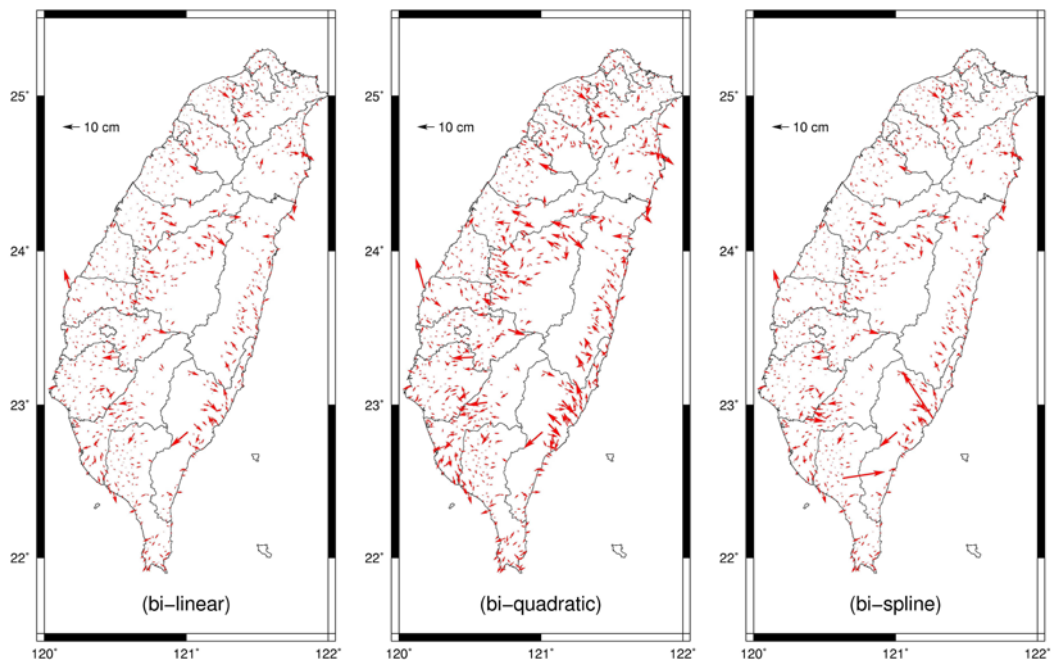


圖 3-13 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度平面分量較差圖

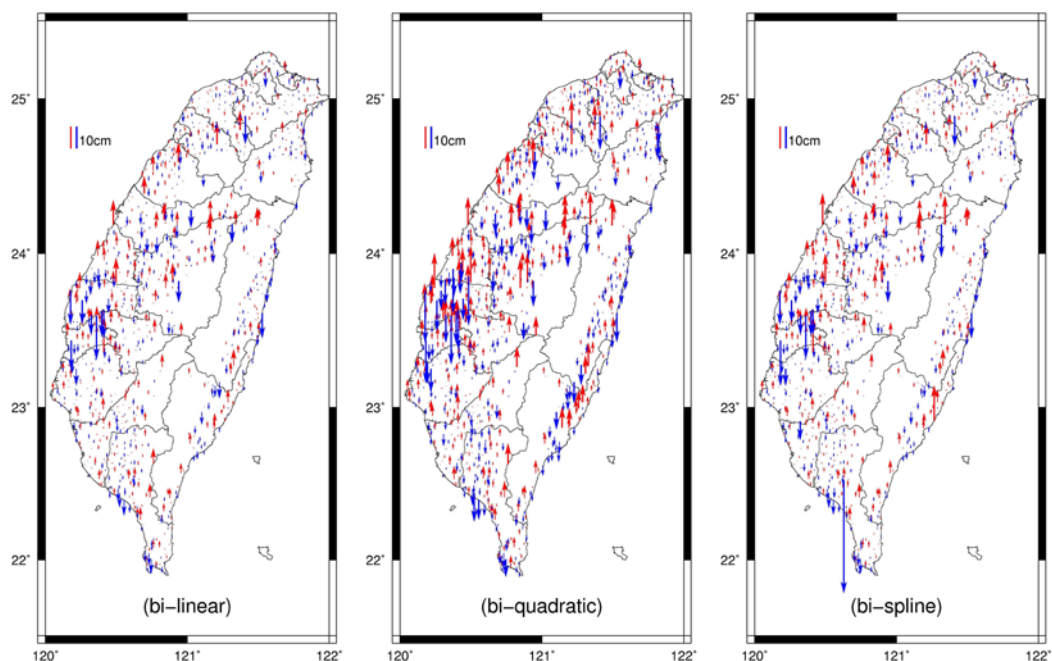


圖 3-14 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度橢球高分量較差圖

表 3-1 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度統計表 (單位：公尺)

| 內插方式 | 雙線性 | | | 雙二次曲線 | | | 雙雲形曲線 | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.100 | 0.070 | 0.158 | 0.158 | 0.090 | 0.188 | 0.240 | 0.222 | 0.156 |
| MIN | -0.076 | -0.090 | -0.185 | -0.094 | -0.115 | -0.220 | -0.077 | -0.159 | -0.476 |
| STD | 0.013 | 0.015 | 0.027 | 0.019 | 0.021 | 0.040 | 0.015 | 0.018 | 0.032 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

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 3-2，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-15 及圖 3-16。
- (2) 3 種內插方法轉換後坐標與公告坐標各分量較差之平均值皆小於 0.001 公尺，表示轉換模型無明顯系統差。
- (3) 3 種內插方法以雙線性內插成果最佳，中誤差在平面分量 N 方向為 0.005 公尺、E 方向為 0.005 公尺，橢球高分量為 0.011 公尺，表示轉換模型內部精度在平面及橢球高分量約 1 公分。

(4) 由圖表發現，部分點位經雙雲形曲線內插之成果，其較差明顯大於雙線性與雙二次曲線內插成果，表示雙雲形曲線內插方法在某些地區不適用，會有錯誤產生。

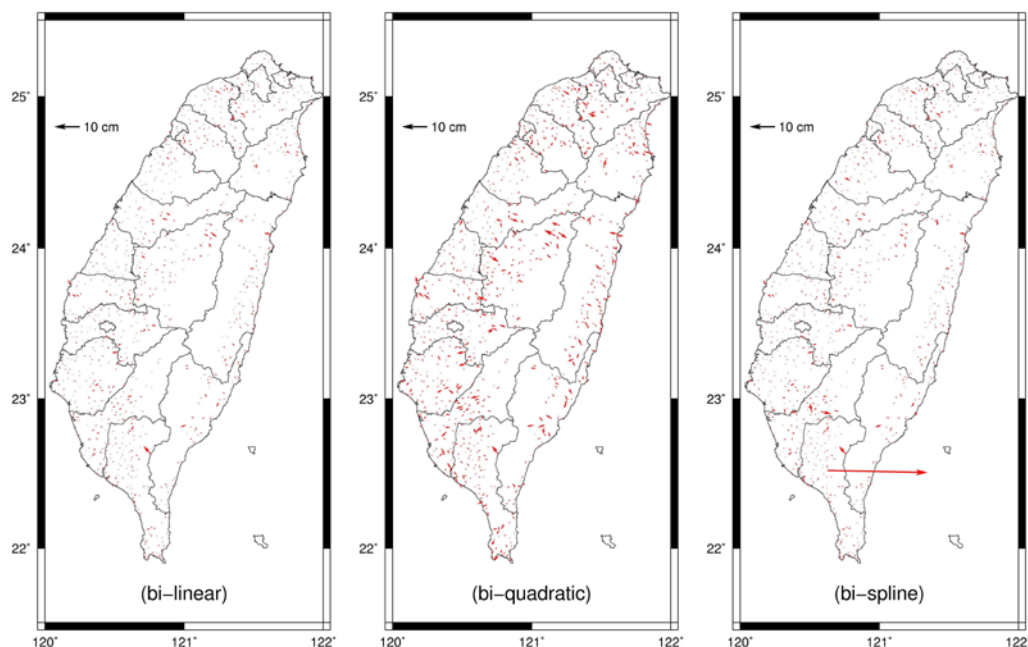


圖 3-15 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度平面分量較差圖

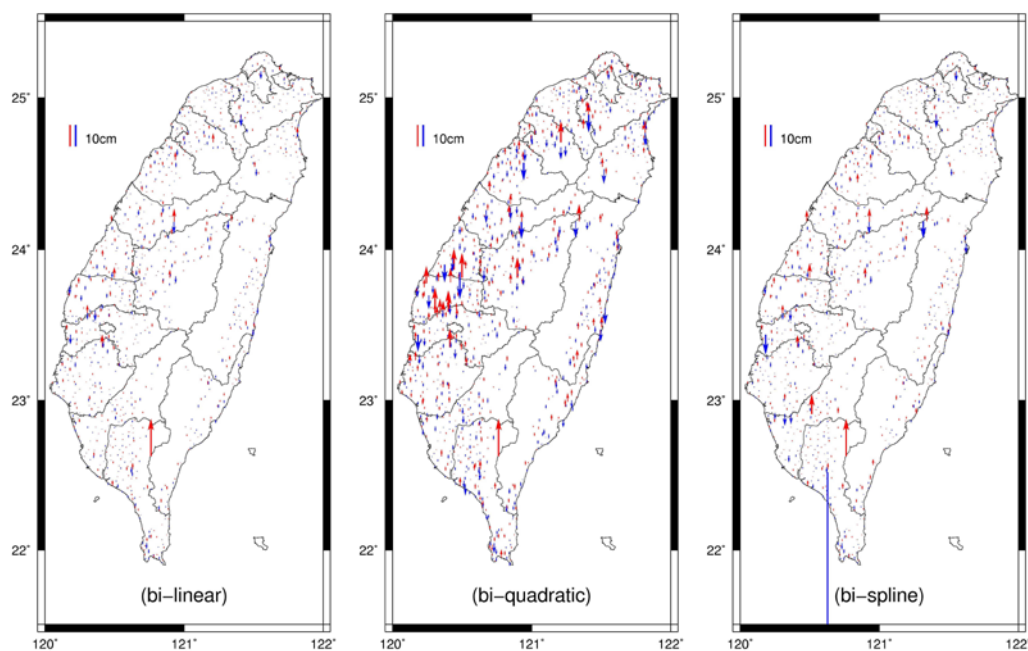


圖 3-16 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度橢球高分量較差圖

表 3-2 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度統計表 (單位:公尺)

| 內插方式 | 雙線性 | | | 雙二次曲線 | | | 雙雲形曲線 | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.044 | 0.029 | 0.160 | 0.046 | 0.050 | 0.160 | 0.048 | 0.537 | 0.160 |
| MIN | -0.023 | -0.038 | -0.050 | -0.034 | -0.059 | -0.116 | -0.030 | -0.038 | -1.350 |
| STD | 0.005 | 0.005 | 0.011 | 0.009 | 0.010 | 0.021 | 0.005 | 0.017 | 0.043 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | -0.001 |

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 3-3，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-17 及圖 3-18。
- (2) 3 種內插方法轉換後坐標與公告坐標各分量較差之平均值皆小於 0.001 公尺，表示轉換模型無明顯系統差。
- (3) 3 種內插方法以雙線性內插成果最佳，中誤差在平面分量 N 方向為 0.005 公尺、E 方向為 0.005 公尺，橢球高分量為 0.012 公尺，表示轉換模型內部精度在平面及橢球高分量約 1 公分。
- (4) 由圖表發現，部分點位經雙雲形曲線內插之成果，其較差之最大與最小值明顯大於雙線性與雙二次曲線內插成果，表示雙雲形曲線內插方法在某些地區不適用，會有錯誤產生。

表 3-3 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度統計表 (單位:公尺)

| 內插方式 | 雙線性 | | | 雙二次曲線 | | | 雙雲形曲線 | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.061 | 0.025 | 0.214 | 0.063 | 0.051 | 0.214 | 0.248 | 0.660 | 0.216 |
| MIN | -0.022 | -0.042 | -0.088 | -0.043 | -0.058 | -0.146 | -0.049 | -0.122 | -1.291 |
| STD | 0.005 | 0.005 | 0.012 | 0.011 | 0.012 | 0.025 | 0.011 | 0.022 | 0.042 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | -0.001 |

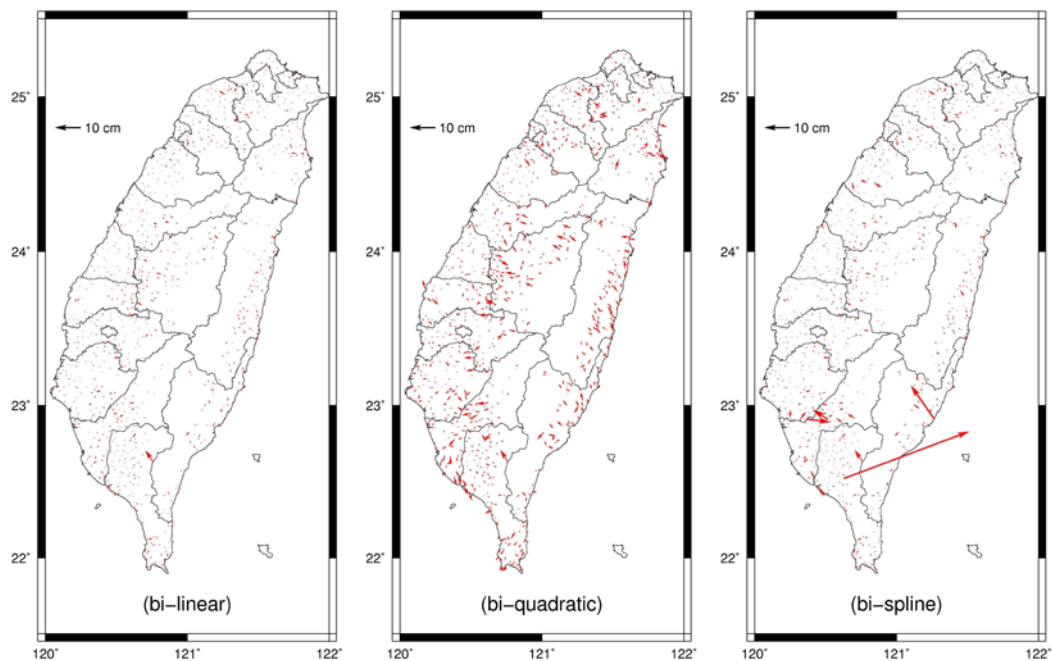


圖 3-17 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度平面分量較差圖

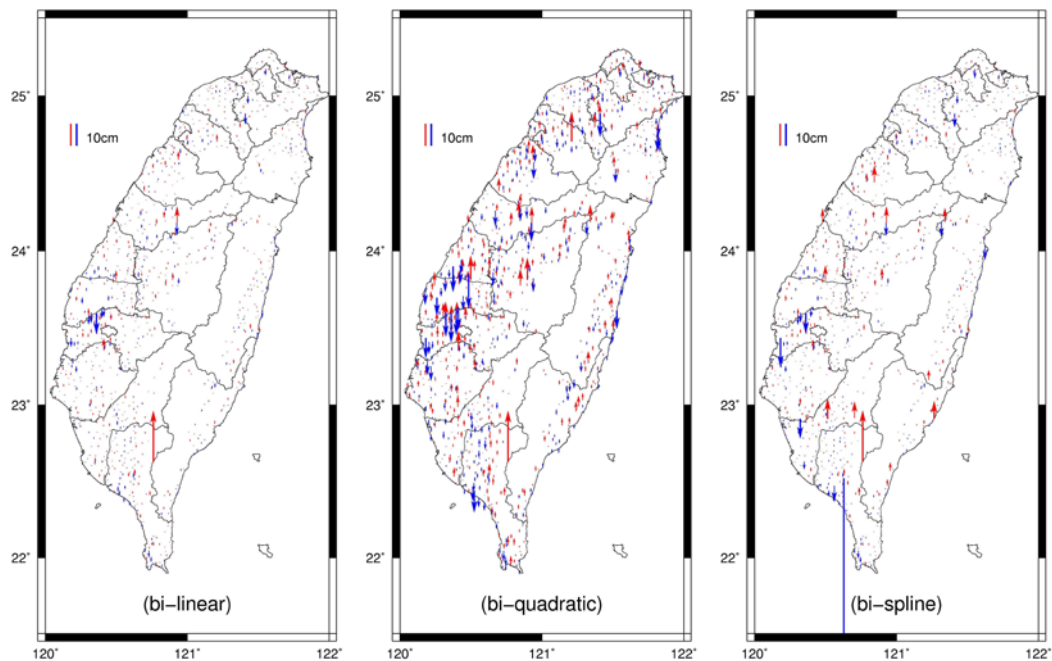


圖 3-18 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 內部精度橢球高分量較差圖

4. 小結

- (1) 雙線性內插成果在 3 種方法建置之坐標轉換模型，均優於雙二次曲線與雙雲形曲線內插成果。
- (2) 以雙線性內插成果比較 3 種方法建置之坐標轉換模型，克金法與距離反比權重法精度差異不大，均略優於諧和面法。

(三) 外部精度驗證結果

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 3-4，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖 3-19 至圖 3-21。
- (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 N 方向為 0.046 公尺、E 方向約 0.037 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 N 方向為 0.005 公尺、E 方向約 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 2009 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。

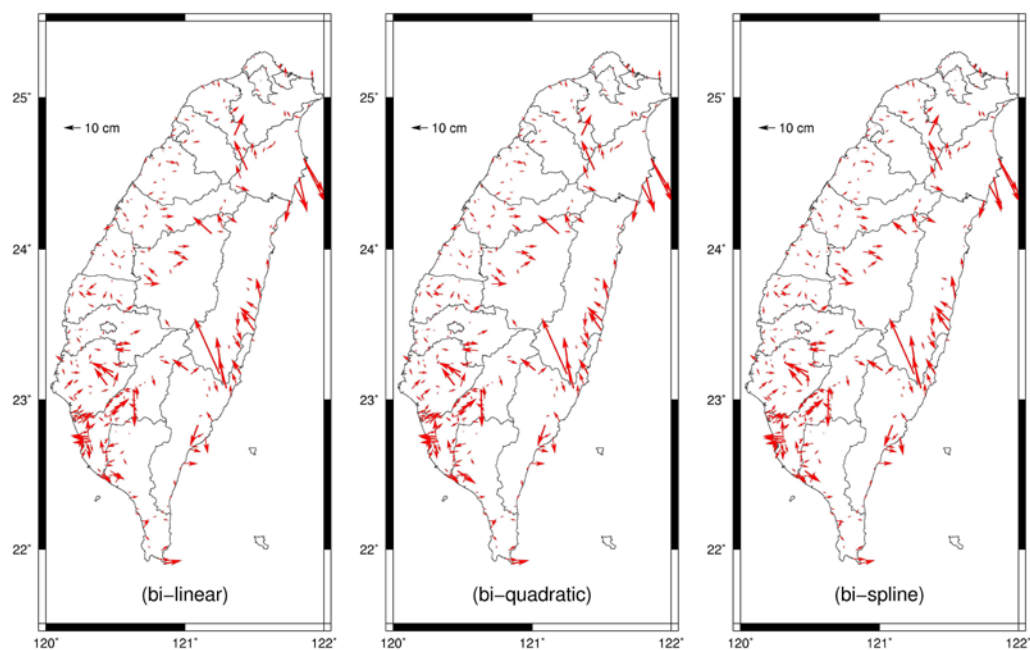


圖 3-19 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度平面分量較差圖

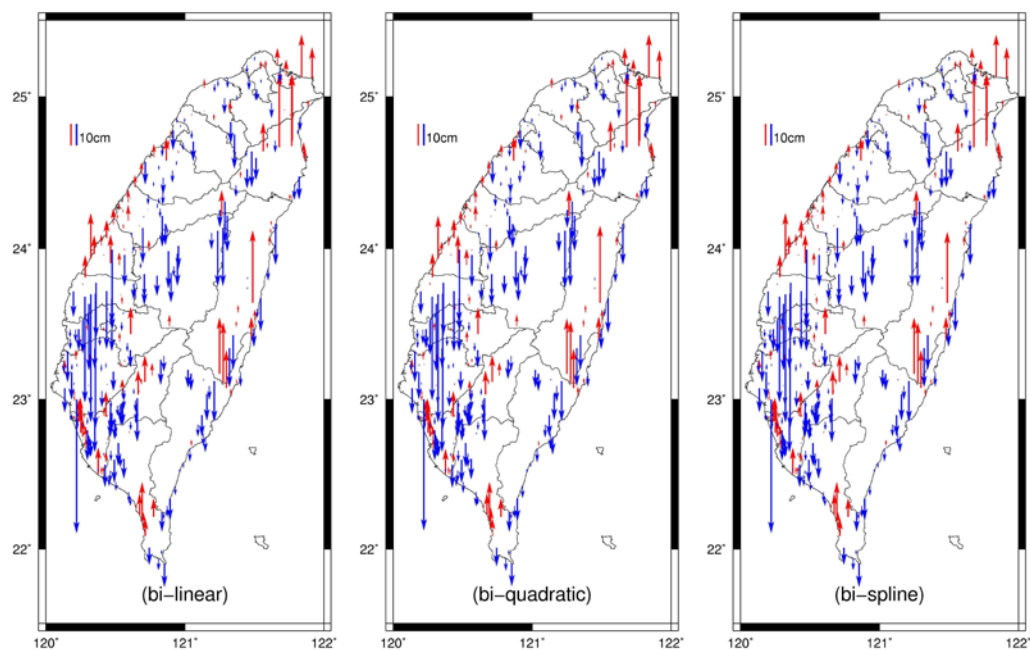


圖 3-20 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度橢球高分量較差圖

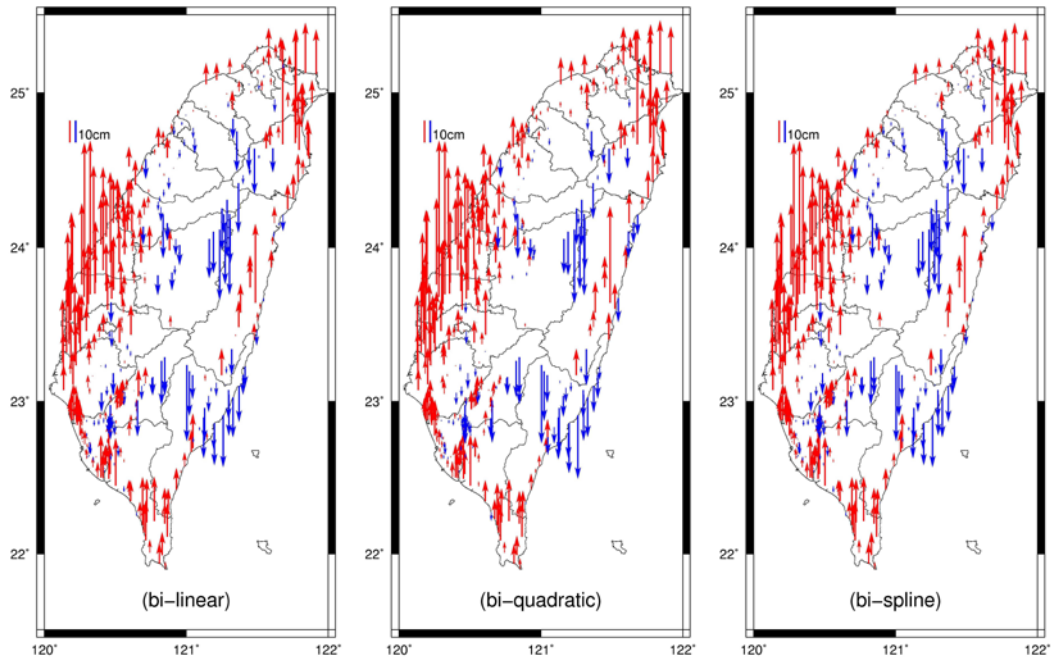


圖 3-21 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度正高分量較差圖

表 3-4 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 | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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 3-5，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖 3-22 至圖 3-24。

(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 N 方向約 0.041 公尺、E 方向約 0.036 公尺，橢球高分量為 0.094 公尺，正高分量約 0.133 公尺；平均值在平面分量 N 方向為 0.007 公尺、E 方向約 0.004 公尺，橢球高分量約 -0.022 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。

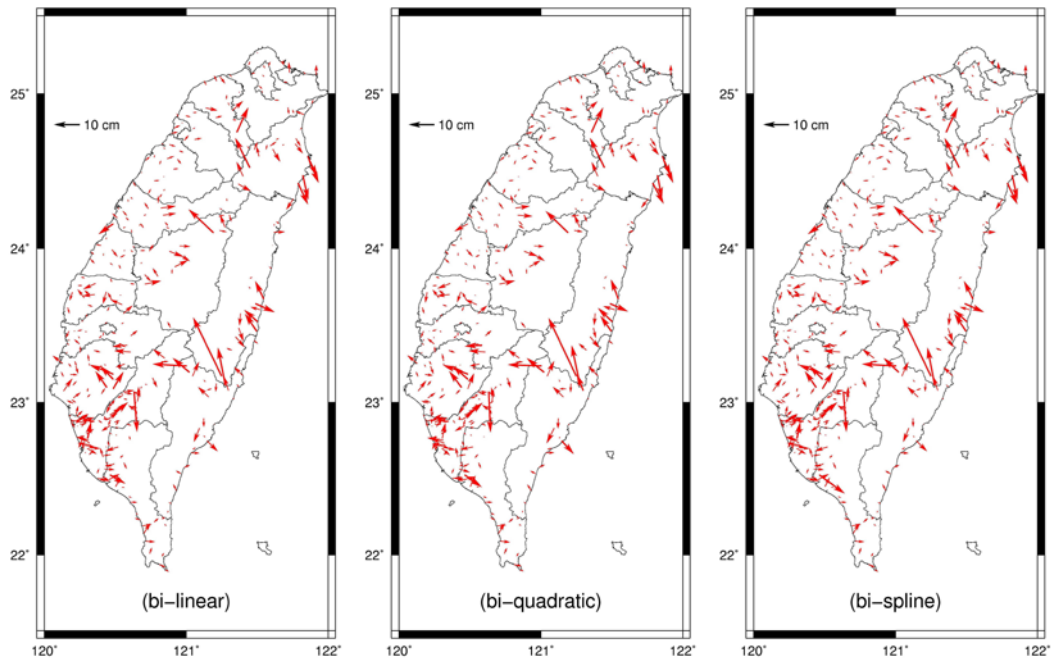


圖 3-22 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度平面分量較差圖

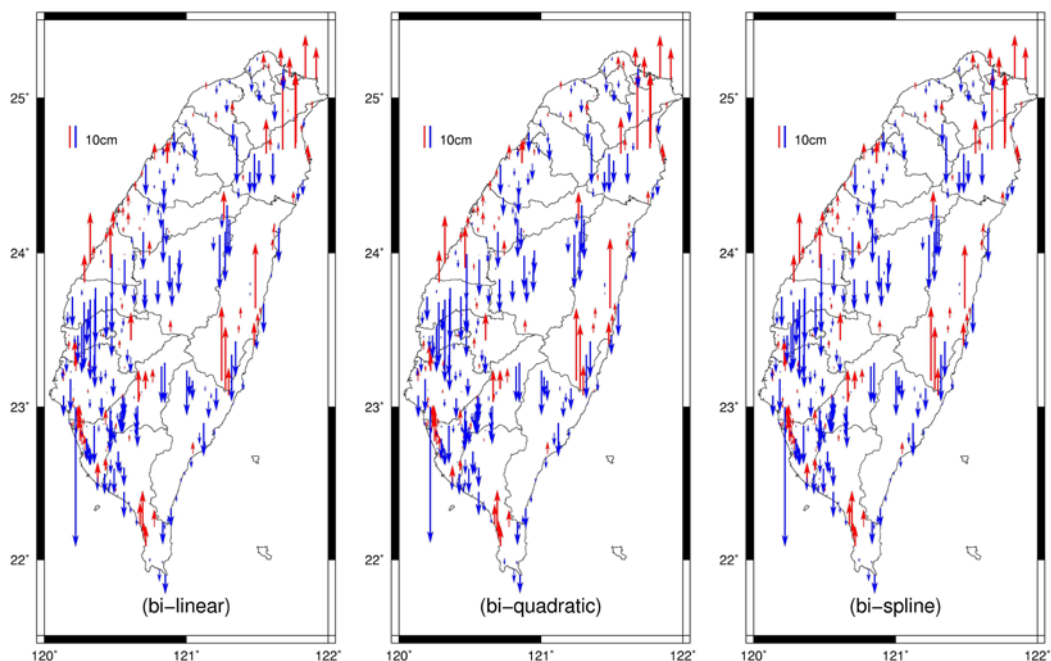


圖 3-23 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度橢球高分量較差圖

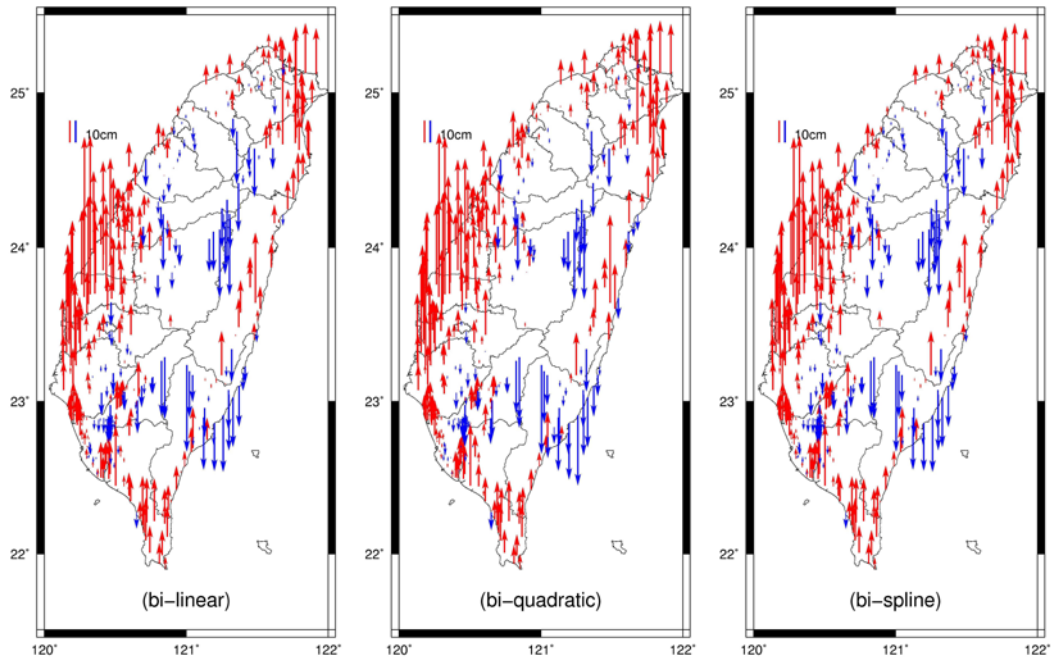


圖 3-24 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度正高分量較差圖

表 3-5 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 | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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 3-6，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖 3-25 至圖 3-27。

(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 N 方向約 0.048 公尺、E 方向為 0.037 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 N 方向為 0.005 公尺、E 方向約 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。

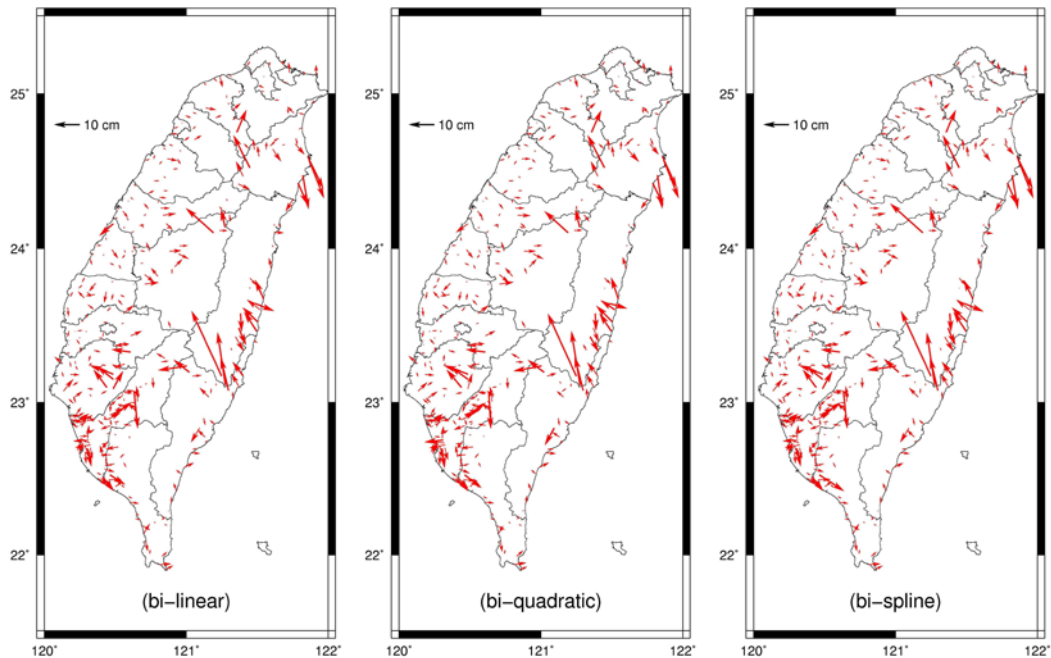


圖 3-25 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度平面分量較差圖

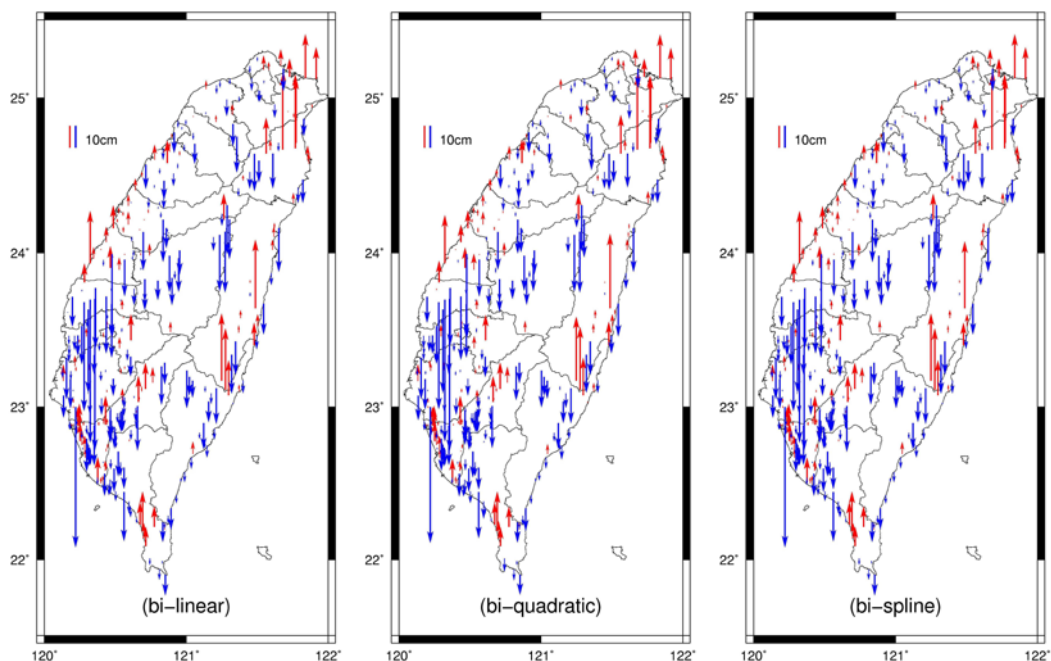


圖 3-26 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度橢球高分量較差圖

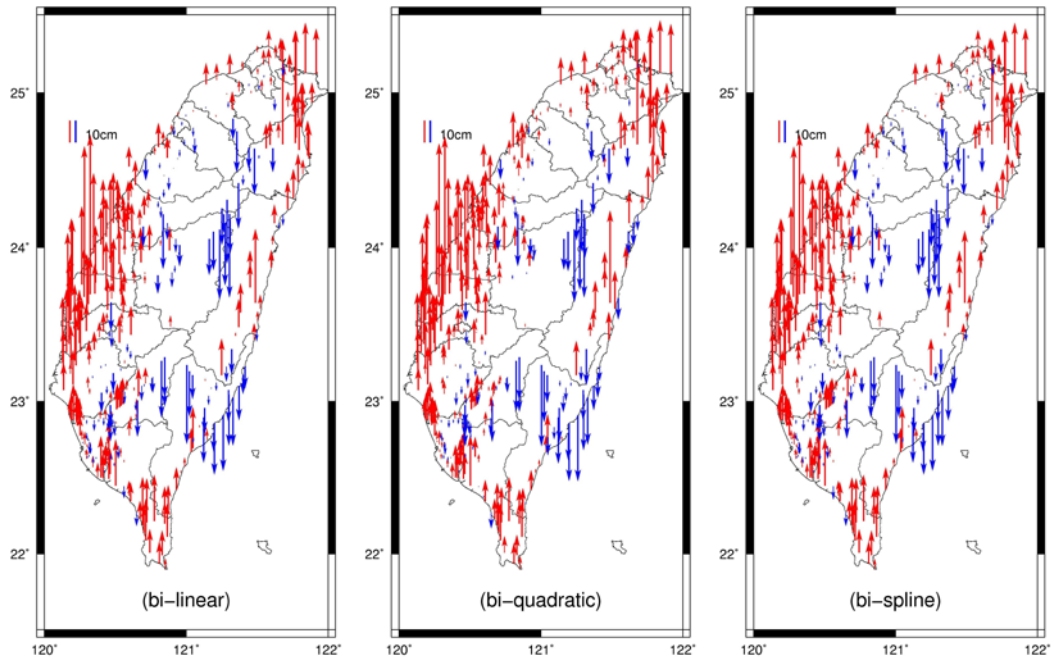


圖 3-27 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度正高分量較差圖

表 3-6 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 | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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。

(四) 基本控制點外部精度驗證

考量一等水準點與基本控制點公告 TWD97 坐標在部分地區有系統差，如利用一等水準點公告 TWD97 坐標來檢核基本控制點建置之坐標轉換模型，其精度指標較不可靠。故另從 1,060 點基本控制點中，以均勻分布為原則，挑選 941 點基本控制點作為建置坐標轉換模型點位，以克利金法建置坐標轉換模型，內插方法使用雙線性內插，檢核剩餘 119 點基本控制點之外部精度，計算結果如表 3-7，各點平面與橢球高分量較差情形如圖 3-28。

由表 3-5 及表 3-7 之數據比較一等水準點及基本控制點外部精度驗證結果，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差，在平面分量 N 方向由 0.040 公尺降為 0.026 公尺、E 方向由 0.035 公尺降為 0.033 公尺，橢球高分量由 0.094 公尺降為 0.087 公尺，外部精度驗證結果證實一等水準點與基本控制點間確實存在系統差。

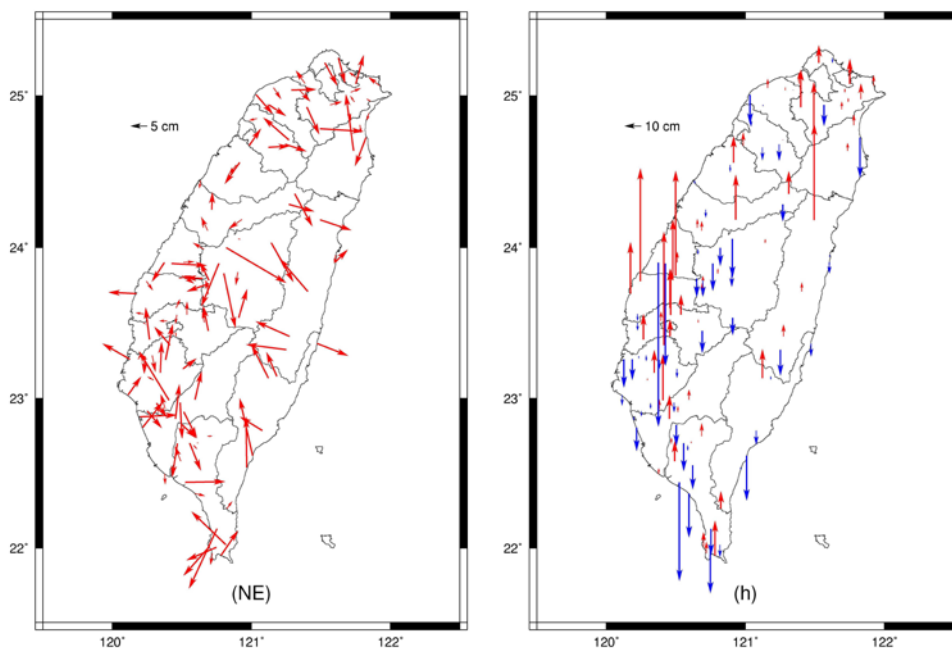


圖 3-28 基本控制點 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度驗證圖

表 3-7 基本控制點 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度統計表 (單位：公尺)

| 分量 | N | E | h |
|------|--------|--------|--------|
| MAX | 0.092 | 0.088 | 0.305 |
| MIN | -0.062 | -0.092 | -0.441 |
| STD | 0.026 | 0.033 | 0.087 |
| MEAN | 0.002 | 0.001 | 0.004 |

二、e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]及 TWVD2001

(一) 建置模型及精度驗證資料

1. 建置坐標轉換模型點位：使用臺灣本島 210 個基準站 101 年 12 月 1 日至 102 年 1 月 31 日計 62 天資料，依據內政部公告之 TWD97[2010]坐標框架定義，約制在竹南基準站三維空間坐標，計算獲得 e-GNSS[2013]坐標；其 TWD97[2010]坐標是公告坐標。
2. 內部精度驗證資料：使用建置坐標轉換模型之 210 點基準站 e-GNSS[2013]坐標，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，作為內部精度評估指標，以驗證坐標轉換模型是否正確可用。
3. 外部精度驗證資料
 - (1) TWD97[2010]坐標 (N,E,h)：使用本中心 2013 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，點位分布情形如圖 3-12。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。
 - (2) TWVD2001 正高 (H)：使用本中心 2013 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 2009

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。

(二) 內部精度驗證結果

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 3-8，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-29 及圖 3-30。
- (2) 3 種內插方法轉換後坐標與公告坐標各分量較差之平均值皆為 0.000 公尺，表示轉換模型無明顯系統差。
- (3) 3 種內插方法以雙線性內插成果最佳，中誤差在平面分量 N 方向為 0.004 公尺、E 方向為 0.004 公尺，橢球高分量為 0.012 公尺，表示轉換模型內部精度在平面及橢球高分量約 1 公分。

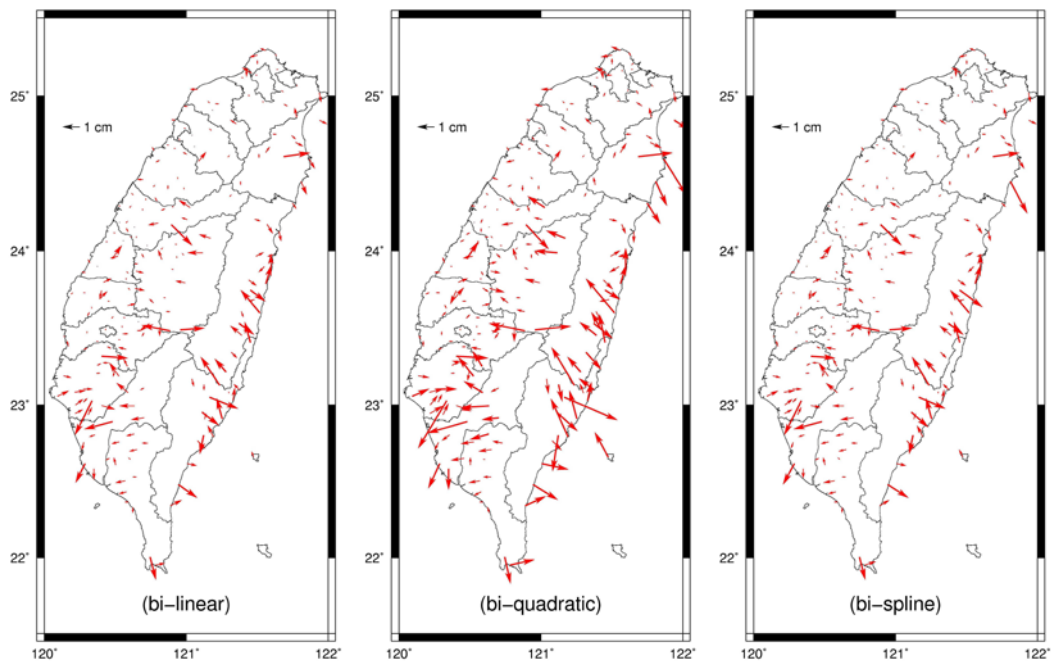


圖 3-29 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度平面分量較差圖

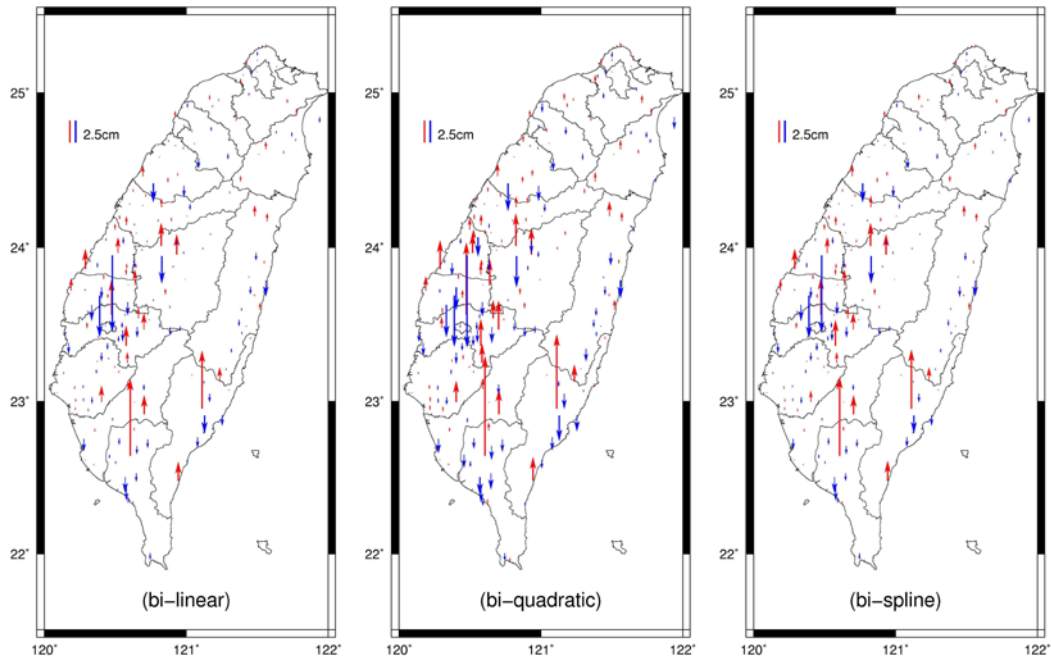


圖 3-30 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度橢球高分量較差圖

表 3-8 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度統計表 (單位：公尺)

| 內插方式 | 雙線性 | | | 雙二次曲線 | | | 雙雲形曲線 | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.015 | 0.015 | 0.081 | 0.020 | 0.028 | 0.105 | 0.015 | 0.014 | 0.083 |
| MIN | -0.018 | -0.015 | -0.081 | -0.025 | -0.021 | -0.097 | -0.018 | -0.015 | -0.082 |
| STD | 0.004 | 0.004 | 0.012 | 0.006 | 0.006 | 0.017 | 0.004 | 0.004 | 0.013 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

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 3-9，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-31 及圖 3-32。
- (2) 3 種內插方法轉換後坐標與公告坐標各分量較差之平均值皆為 0.000 公尺，表示轉換模型無明顯系統差。
- (3) 3 種內插方法無顯著差異，中誤差在平面分量 N 方向為 0.001 公尺、E 方向為 0.001 公尺，橢球高分量為 0.03 公尺，表示轉換模型內部精度在平面及橢球高分量均優於 1 公分。

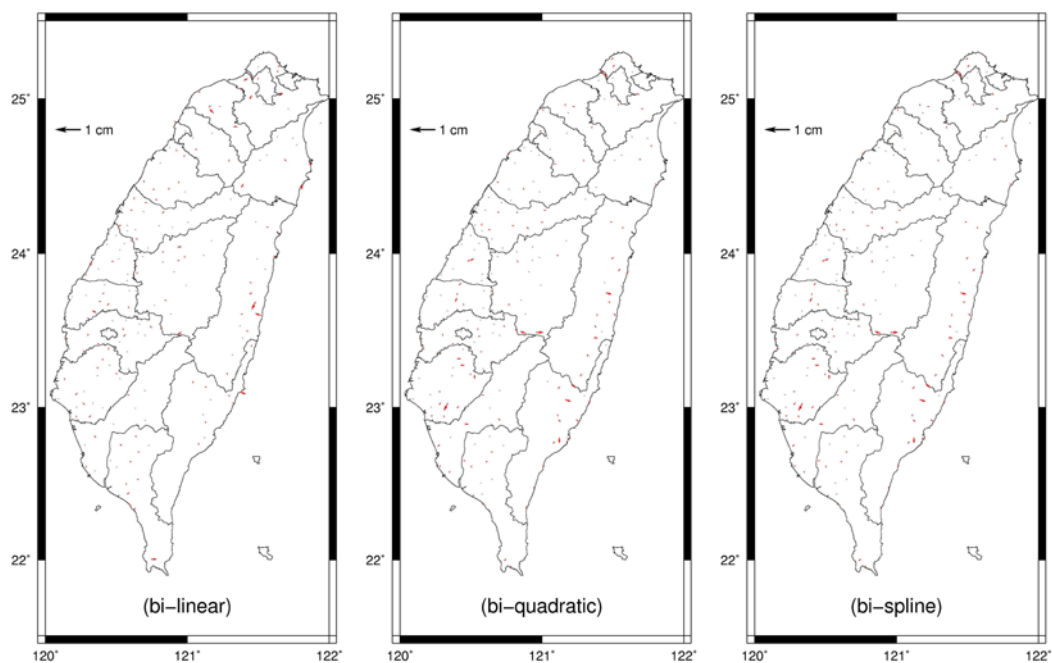


圖 3-31 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度平面分量較差圖

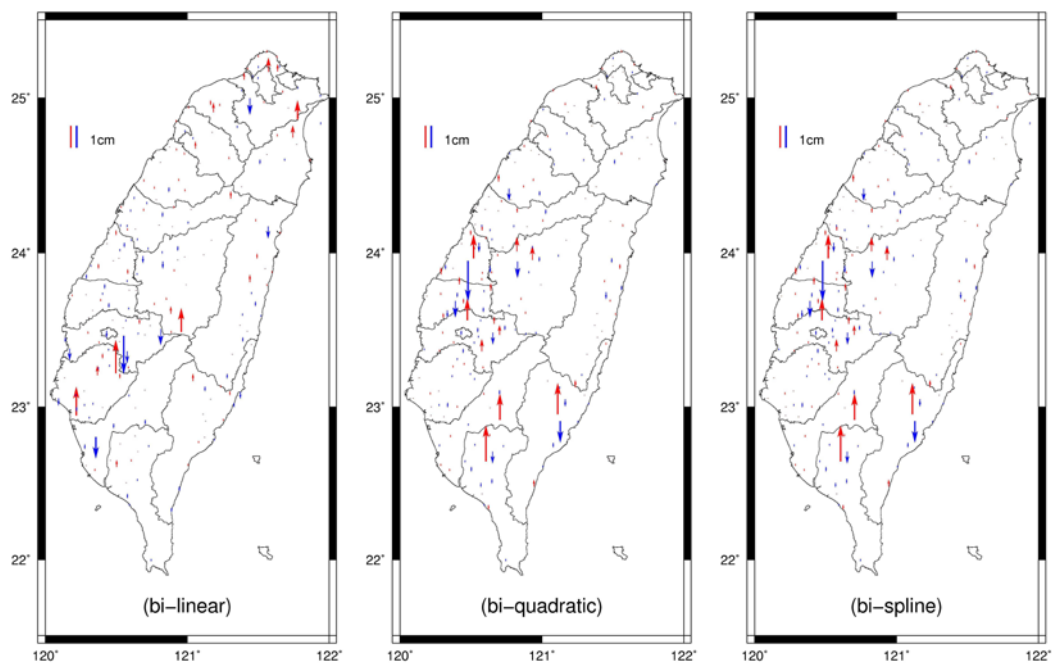


圖 3-32 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度橢球高分量較差圖

表 3-9 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度統計表 (單位:公尺)

| 內插方式 | 雙線性 | | | 雙二次曲線 | | | 雙雲形曲線 | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.002 | 0.003 | 0.014 | 0.002 | 0.004 | 0.015 | 0.002 | 0.004 | 0.015 |
| MIN | -0.004 | -0.003 | -0.016 | -0.004 | -0.003 | -0.017 | -0.004 | -0.003 | -0.017 |
| STD | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

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 3-10，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-33 及圖 3-34。
- (2) 3 種內插方法轉換後坐標與公告坐標各分量較差之平均值皆為 0.000 公尺，表示轉換模型無明顯系統差。
- (3) 3 種內插方法以雙線性內插成果最佳，中誤差在平面分量 N 方向為 0.001 公尺、E 方向為 0.001 公尺，橢球高分量為 0.01 公尺，表示轉換模型內部精度在平面及橢球高分量均優於 1 公分。
- (4) 由圖表發現，部分點位經雙雲形曲線內插之成果，其較差之最大與最小值明顯大於雙線性與雙二次曲線內插成果，表示雙雲形曲線內插方法在某些地區不適用，會有錯誤產生。

表 3-10 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度統計表 (單位:公尺)

| 內插方式 | 雙線性 | | | 雙二次曲線 | | | 雙雲形曲線 | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.023 | 0.001 | 0.002 | 0.020 |
| MIN | -0.002 | -0.002 | -0.010 | -0.006 | -0.005 | -0.031 | -0.003 | -0.011 | -0.011 |
| STD | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.002 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

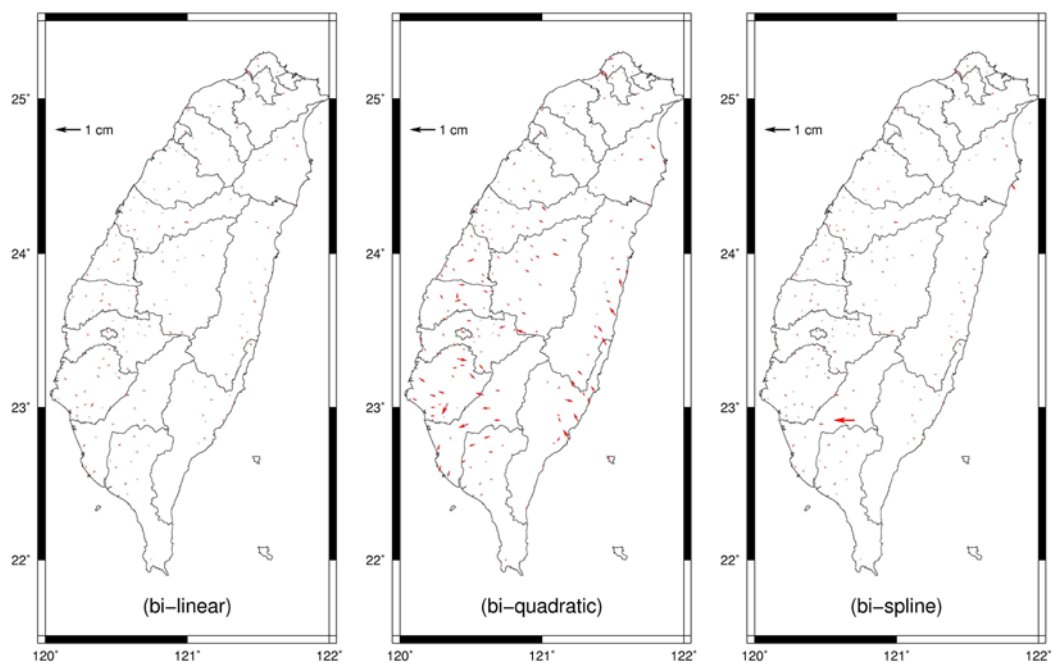


圖 3-33 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度平面分量較差圖

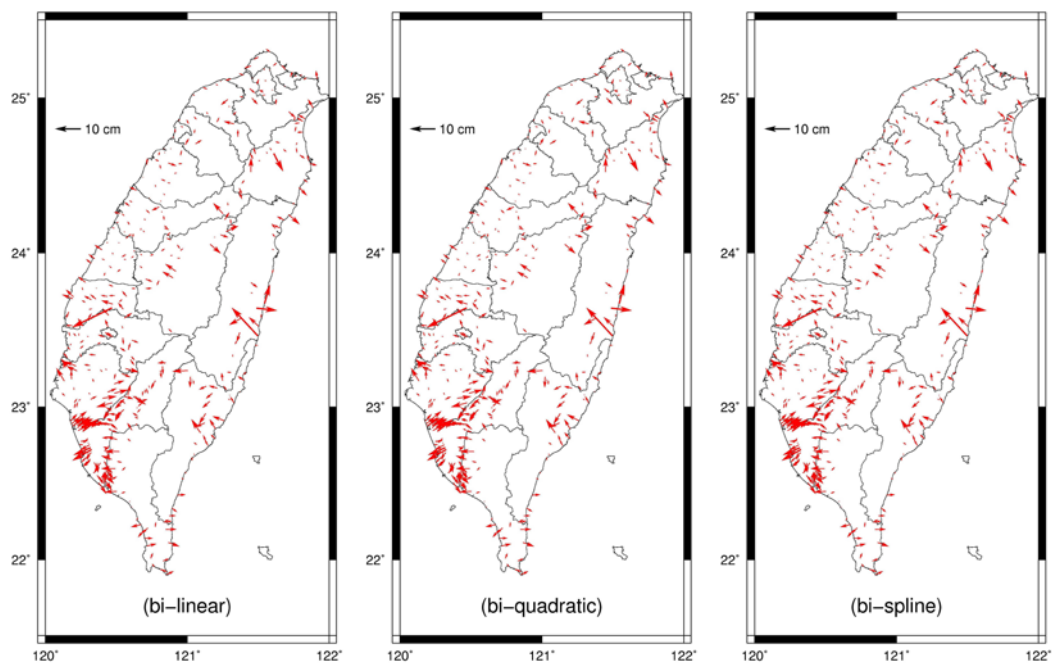


圖 3-34 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]內部精度橢球高分量較差圖

4. 小結

- (1) 諧和面法與距離反比權重法建置之坐標轉換模型，雙線性內插成果略優於雙二次曲線與雙雲形曲線內插成果；克利金法建置之坐標轉換模型在 3 種內插方法則無顯著差異。
- (2) 以雙線性內插成果比較 3 種方法建置之坐標轉換模型，克利金法與距離反比權重法精度差異不大，均略優於諧和面法。

(三) 外部精度驗證結果

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 3-11，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖 3-35 至圖 3-37。
- (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 N 方向為 0.027 公尺、E 方向為 0.034 公尺，橢球高分量為 0.068 公尺，正高分量約 0.079 公尺；平均值在平面分量 N 方向為 0.002 公尺，E 方向為 -0.003 公尺，橢球高分量為 -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 2009 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。

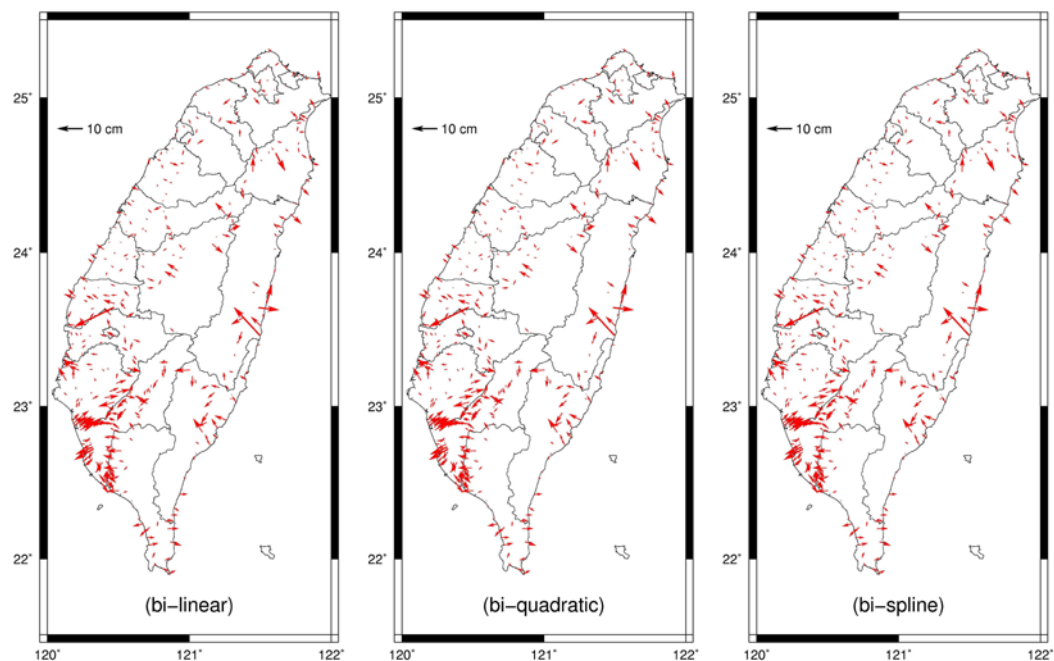


圖 3-35 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度平面分量較差圖

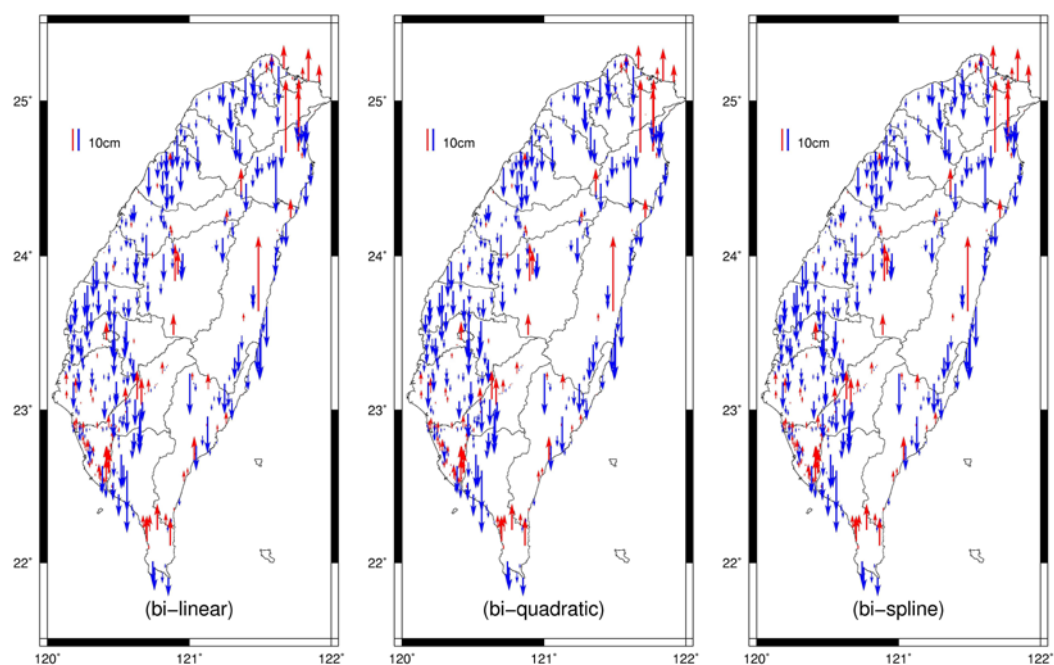


圖 3-36 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度橢球高分量較差圖

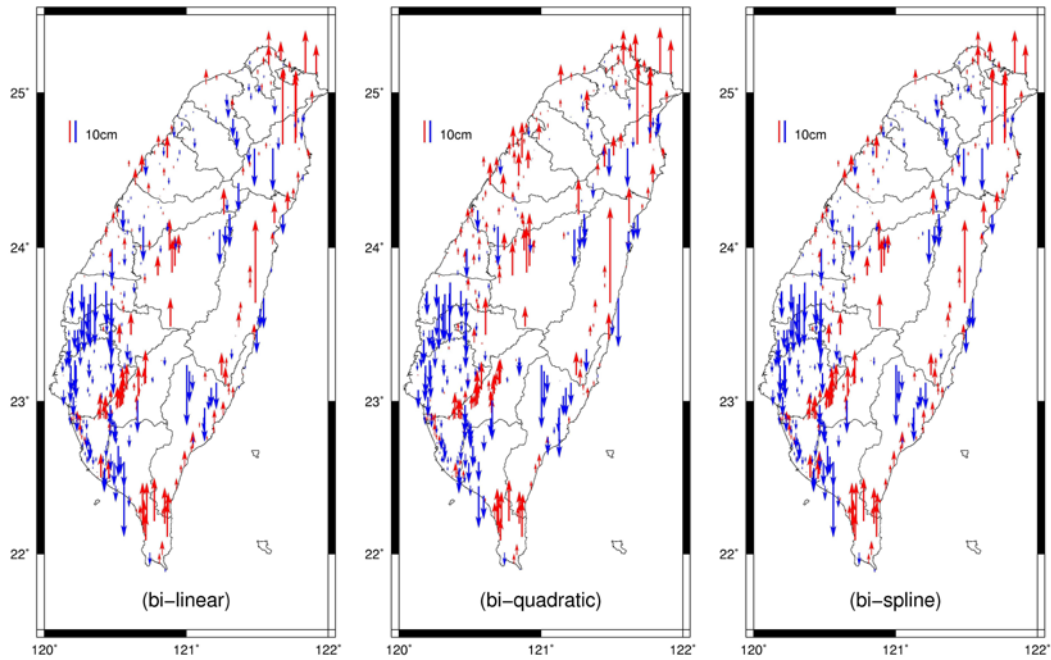


圖 3-37 諧和面法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度正高分量較差圖

表 3-11 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 | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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 3-12，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖 3-38 至圖 3-40。

(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 N 方向為 0.025 公尺、E 方向為 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 N 方向為 0.003 公尺、E 方向為 -0.002 公尺，橢球高分量為 -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。

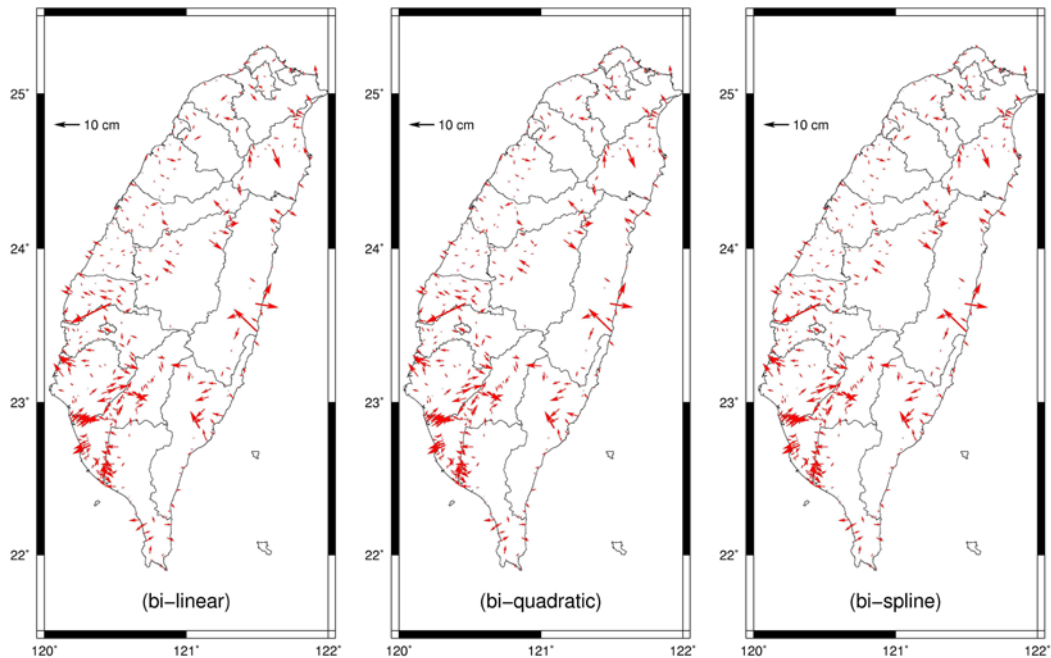


圖 3-38 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度平面分量較差圖

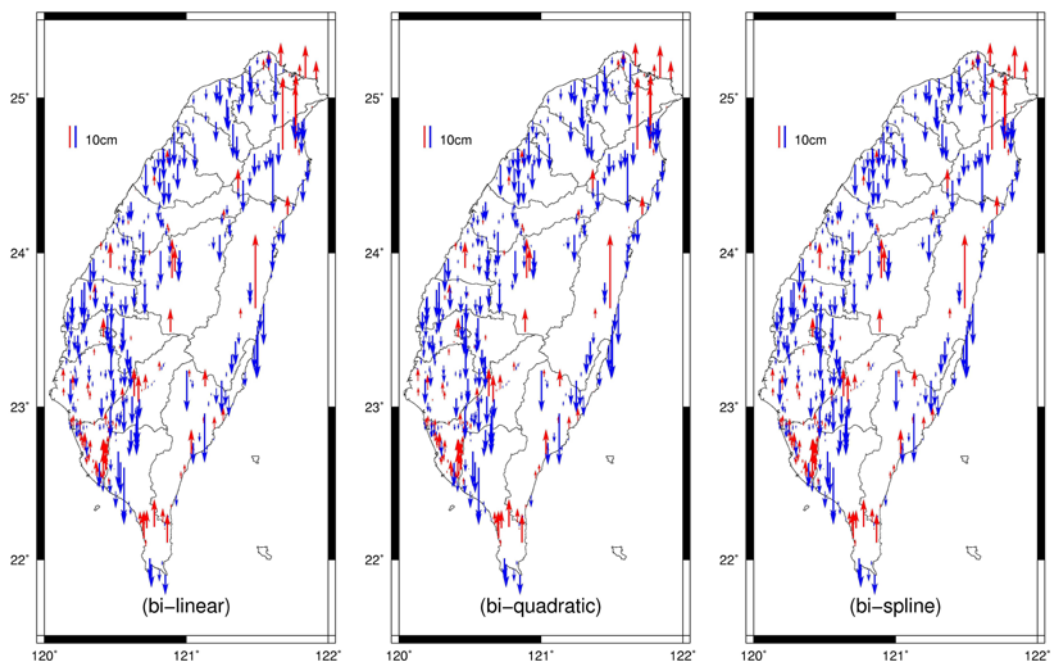


圖 3-39 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度橢球高分量較差圖

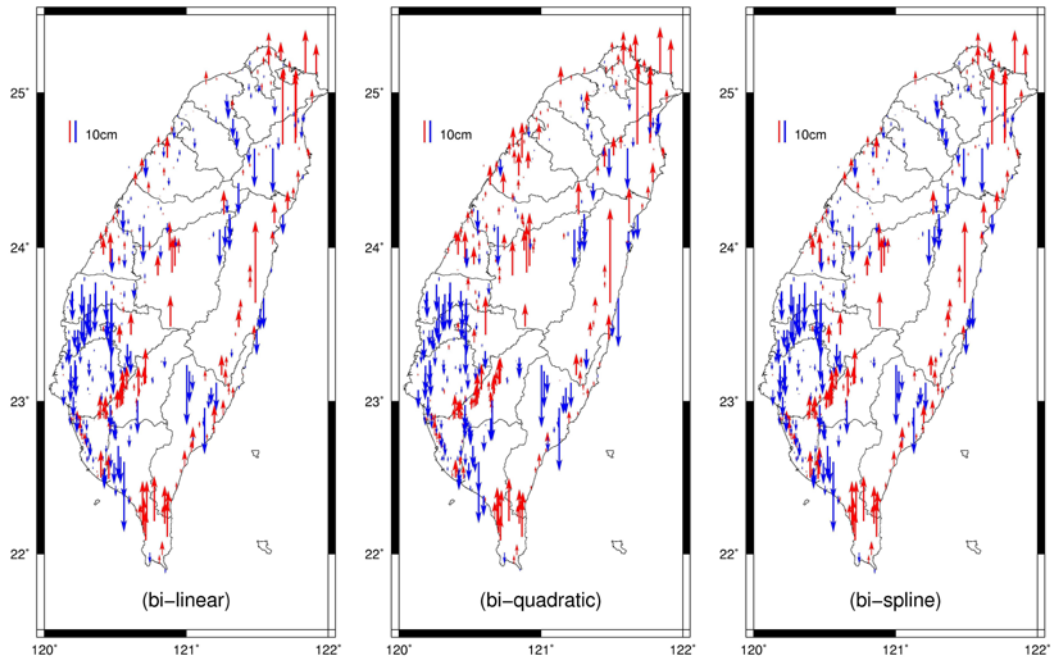


圖 3-40 克利金法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度正高分量較差圖

表 3-12 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 | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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 3-13，各點平面、橢球高與正高分量較差情形如圖 3-41 至圖 3-43。

(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 N 方向為 0.027 公尺、E 方向為 0.034 公尺，橢球高分量為 0.069 公尺，正高分量為 0.076 公尺；平均值在平面分量 N 方向為 0.001 公尺、E 方向為 -0.004 公尺，橢球高分量為 -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。

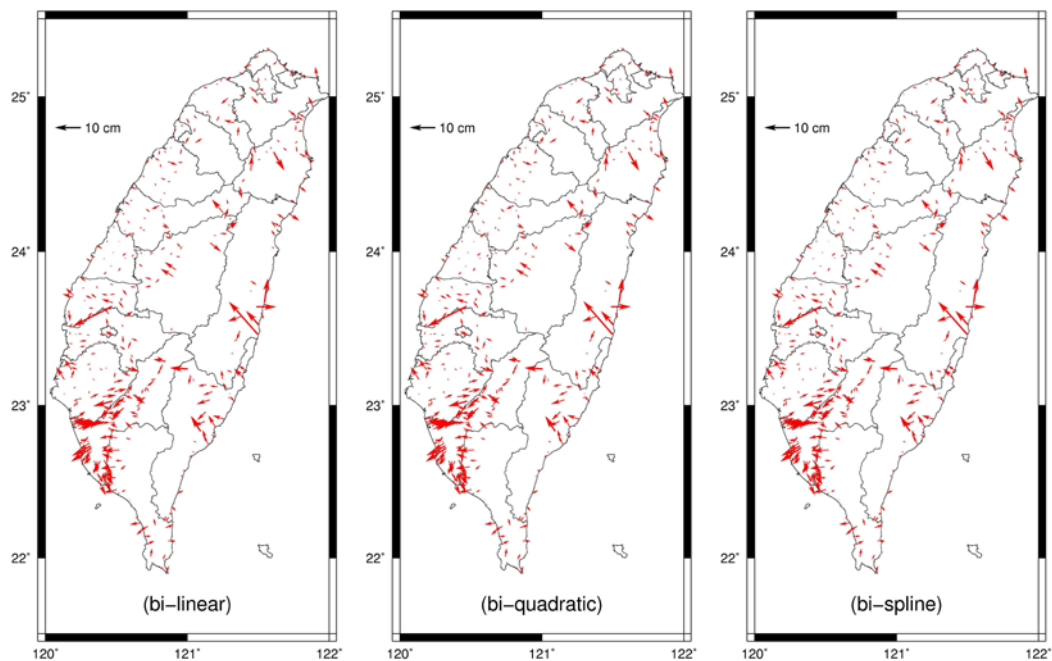


圖 3-41 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度平面分量較差圖

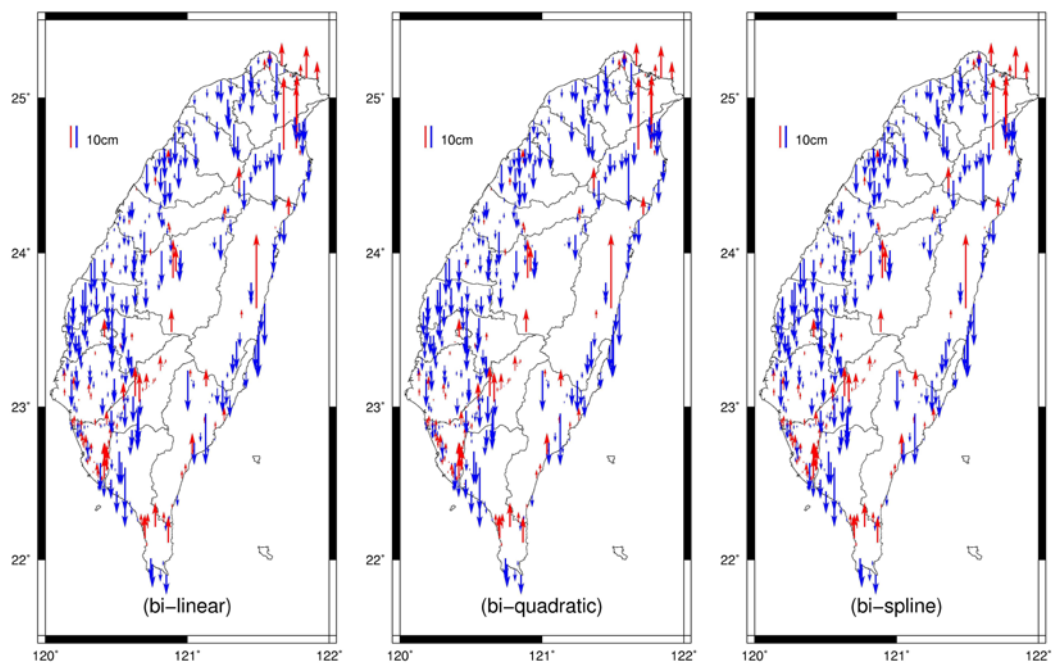


圖 3-42 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度橢球高分量較差圖

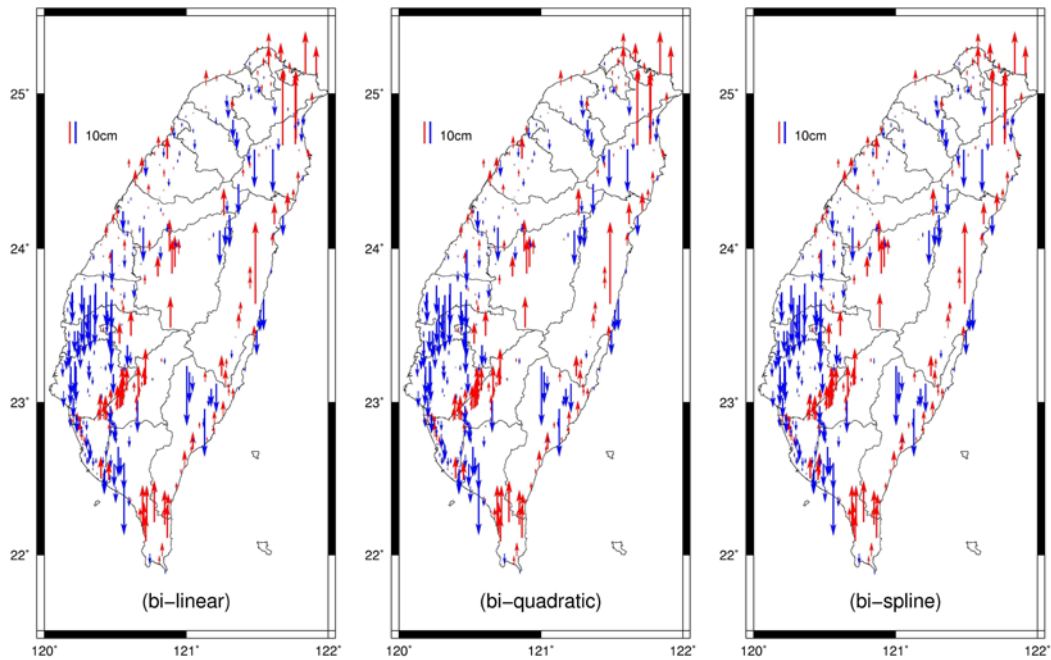


圖 3-43 距離反比權重法 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度正高分量較差圖

表 3-13 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 | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 |

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快速且複雜有關；正高分量較差相較於 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]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。

(四) 基本控制點外部精度驗證

考量一等水準點與基本控制點公告 TWD97[2010]坐標在部分地區有系統差，如利用一等水準點公告 TWD97[2010]坐標來檢核基本控制點建置之坐標轉換模型，其精度指標較不可靠。故另使用本中心 2013 年基本控制點檢測成果，以克利金法坐標轉換模型及雙線性內插進行外部精度驗證，計算結果如表 3-14，各點平面與橢球高分量較差情形如圖 3-44。

由表 3-12 及表 3-14 之數據比較一等水準點及基本控制點外部精度驗證結果，轉換後坐標與公告坐標較差之中誤差，在平面分量 N 方向由 0.025 公尺降為 0.016 公尺、E 方向由 0.033 公尺降為 0.019 公尺，橢球高分量由 0.072 公尺降為 0.046 公尺，外部精度驗證結果證實一等水準點與基本控制點間確實存在系統差。

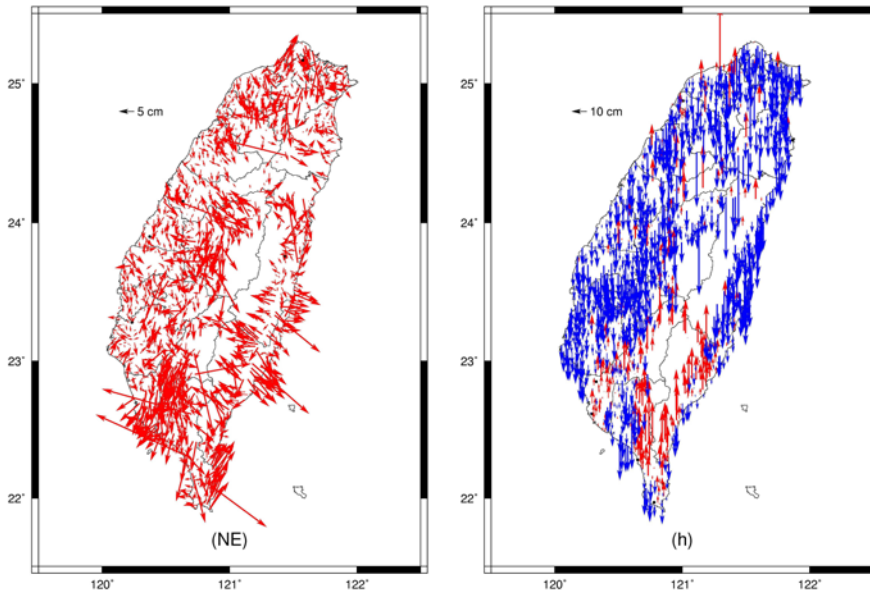


圖 3-44 基本控制點 e-GNSS[2013]→TWD97 外部精度驗證圖

表 3-14 基本控制點 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]外部精度統計表 (單位：公尺)

| 分量 | N | E | h |
|------|--------|--------|--------|
| MAX | 0.100 | 0.118 | 0.208 |
| MIN | -0.160 | -0.163 | -0.253 |
| STD | 0.016 | 0.019 | 0.046 |
| MEAN | -0.001 | -0.008 | -0.026 |

三、最佳建置模型與內插方法

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 之內外部精度，並以一等水準點及基本控制點分別進行外部精度驗證，可獲得以下結論：

- (一) 在內部精度方面，雙線性內插成果優於雙二次曲線與雙雲形曲線內插成果；克利金法與距離反比權重法建置之坐標轉換模型精度差異不大，均略優於諧和面法。
- (二) 在外部精度方面，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。

- (三) 基本控制點外部精度驗證結果略優於一等水準點，主要係因一等水準點公告坐標在部分地區與基本控制點有系統差，驗證結果符合預期。

第四節 網格解析度對模型精度影響

本研究第三章第二節各種研究建置之殘差網格修正模型網格解析度為 30 秒，本節為研究網格解析度對坐標轉換成果之影響，利用第三章第二節 e-GNSS[2013]轉 TWD97 及 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]相同建置模型與精度驗證資料，以克利金法分別建置網格解析度為 30 秒、60 秒及 120 秒之殘差網格修正模型，再以雙線性內插計算坐標轉換成果，分析比較不同網格解析度之殘差網格修正模型對轉換成果之影響。

一、e-GNSS[2013]轉 TWD97 及 TWVD2001

(一) 內部精度驗證結果

1. 3 種不同網格解析度內部精度驗證結果如表 3-15，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-45 及圖 3-46。
2. 網格解析度越高，內部精度越好，網格解析度每提高 1 倍，各分量中誤差約降低 1 半，主要應與進行內部精度驗證之點位即為建置殘差網格修正模型之點位，兩者間高相關所致。

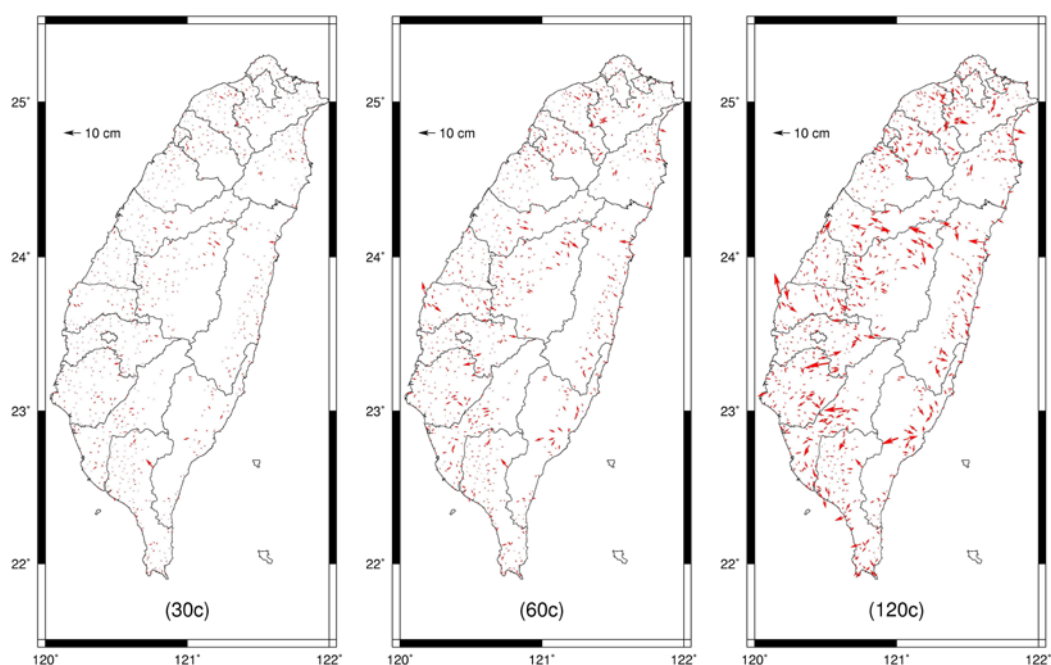


圖 3-45 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度內部精度平面分量較差圖

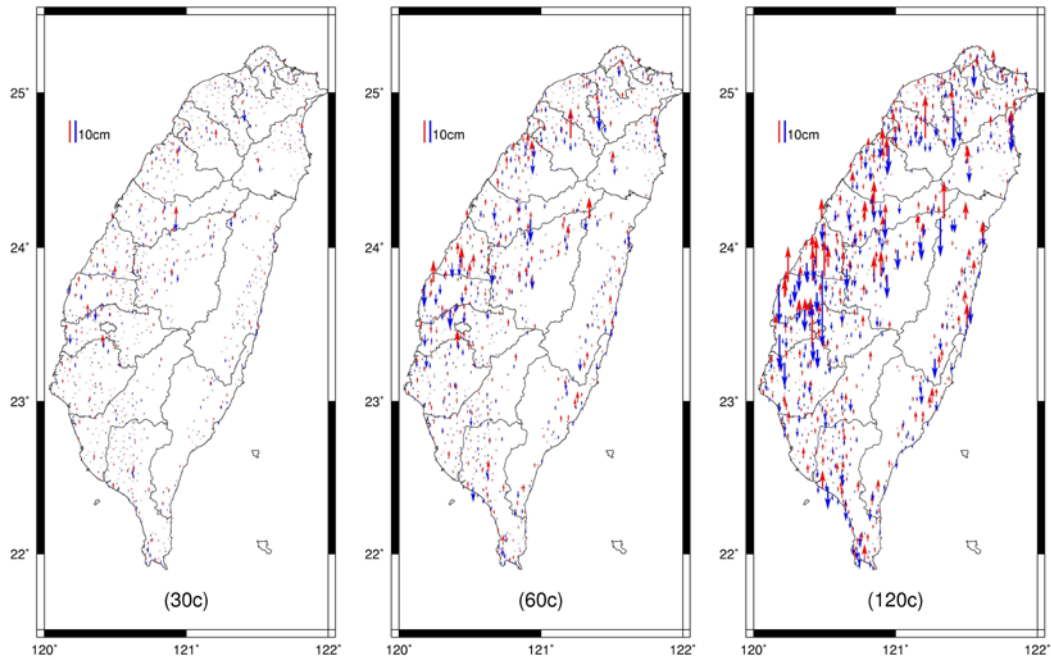


圖 3-46 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度內部精度橢球高分量較差圖

表 3-15 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度內部精度統計表 (單位：公尺)

| 網格解析度 | 30 秒 | | | 60 秒 | | | 120 秒 | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 分量 | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.044 | 0.029 | 0.160 | 0.065 | 0.047 | 0.160 | 0.110 | 0.084 | 0.181 |
| MIN | -0.023 | -0.038 | -0.050 | -0.037 | -0.059 | -0.097 | -0.072 | -0.110 | -0.321 |
| STD | 0.005 | 0.005 | 0.011 | 0.008 | 0.009 | 0.020 | 0.015 | 0.017 | 0.035 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

(二) 外部精度驗證結果

1. 3 種不同網格解析度外部精度驗證結果如表 3-16，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-47 至圖 3-49。
2. 提升網格解析度對外部精度幾乎沒有影響，主要應與進行外部精度驗證之點位與建置殘差網格修正模型之點位無相關性，且建置模型之點位數量遠小於網格格點數量，故不影響外部精度。

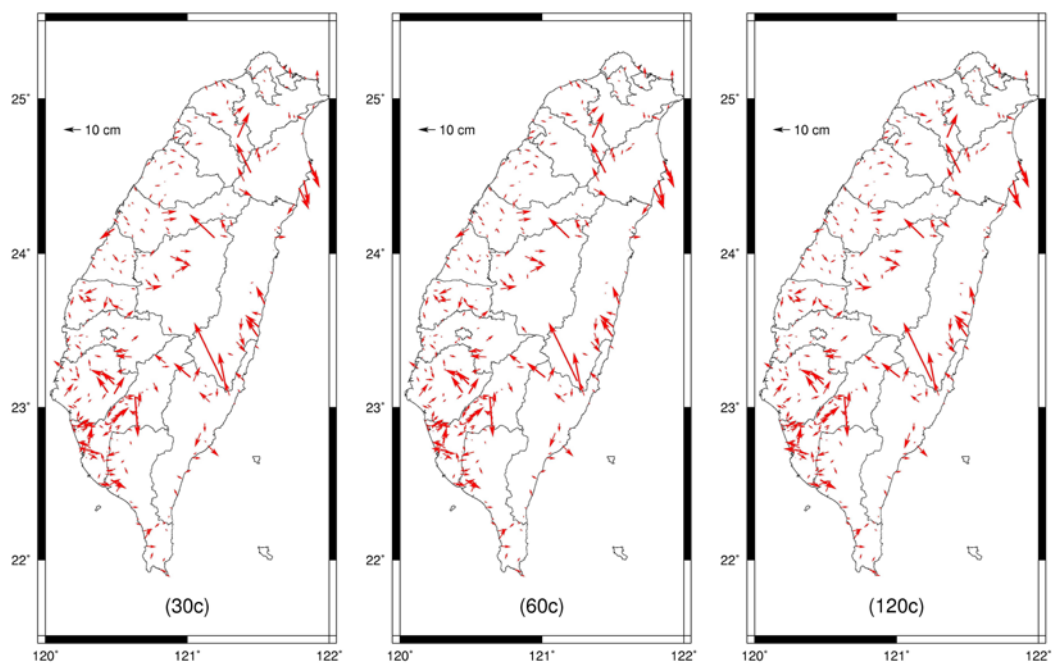


圖 3-47 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度平面分量較差圖

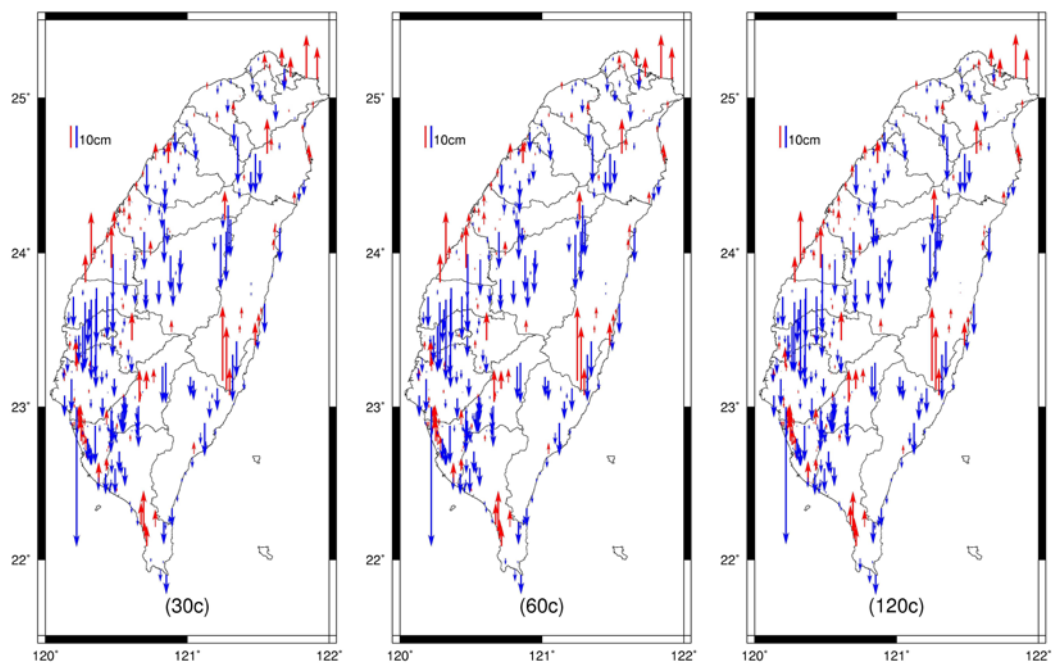


圖 3-48 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度橢球高分量較差圖

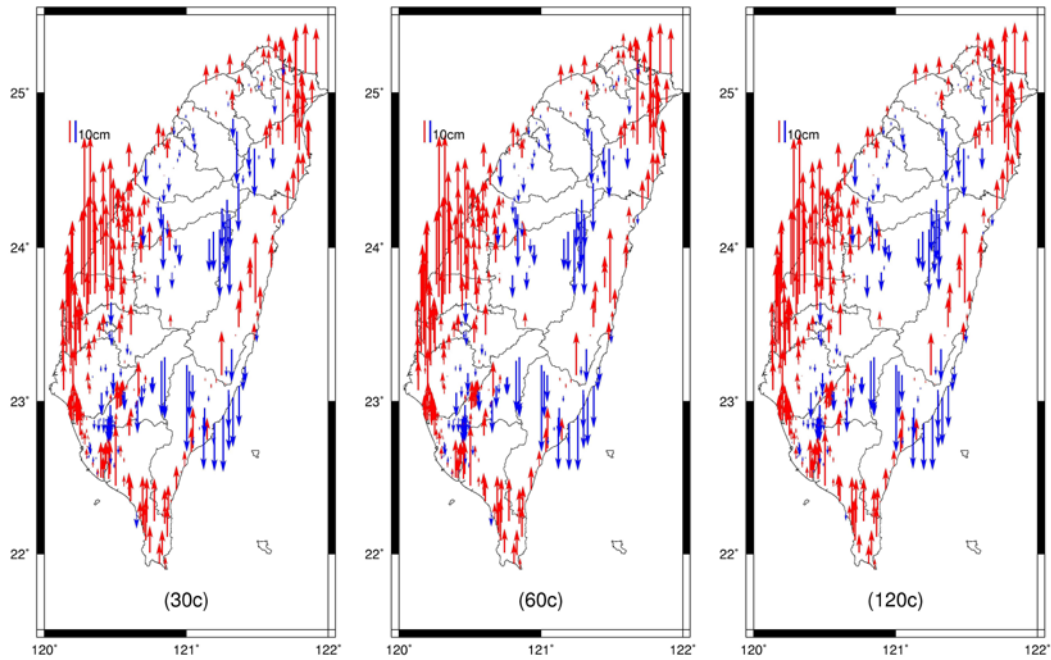


圖 3-49 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度正高分量較差圖

表 3-16 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度統計表 (單位:公尺)

| 網格解析度 | 30 秒 | | | | 60 秒 | | | | 120 秒 | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | H | N | E | h | H | N | E | h | H |
| MAX | 0.309 | 0.101 | 0.318 | 0.589 | 0.308 | 0.101 | 0.318 | 0.595 | 0.309 | 0.096 | 0.321 | 0.585 |
| MIN | -0.213 | -0.179 | -0.589 | -0.365 | -0.213 | -0.177 | -0.588 | -0.367 | -0.213 | -0.174 | -0.579 | -0.366 |
| STD | 0.040 | 0.035 | 0.094 | 0.130 | 0.040 | 0.035 | 0.094 | 0.130 | 0.040 | 0.035 | 0.094 | 0.128 |
| MEAN | 0.007 | 0.004 | -0.021 | 0.046 | 0.007 | 0.004 | -0.021 | 0.046 | 0.007 | 0.004 | -0.021 | 0.046 |

二、e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]及 TWVD2001

(一) 內部精度驗證結果

1. 3 種不同網格解析度內部精度驗證結果如表 3-17，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-50 及圖 3-51。
2. 網格解析度越高，內部精度越好，網格解析度每提高 1 倍，各分量中誤差約降低 1 半，與 e-GNSS[2013]轉 TWD97 模型驗證結果相符。

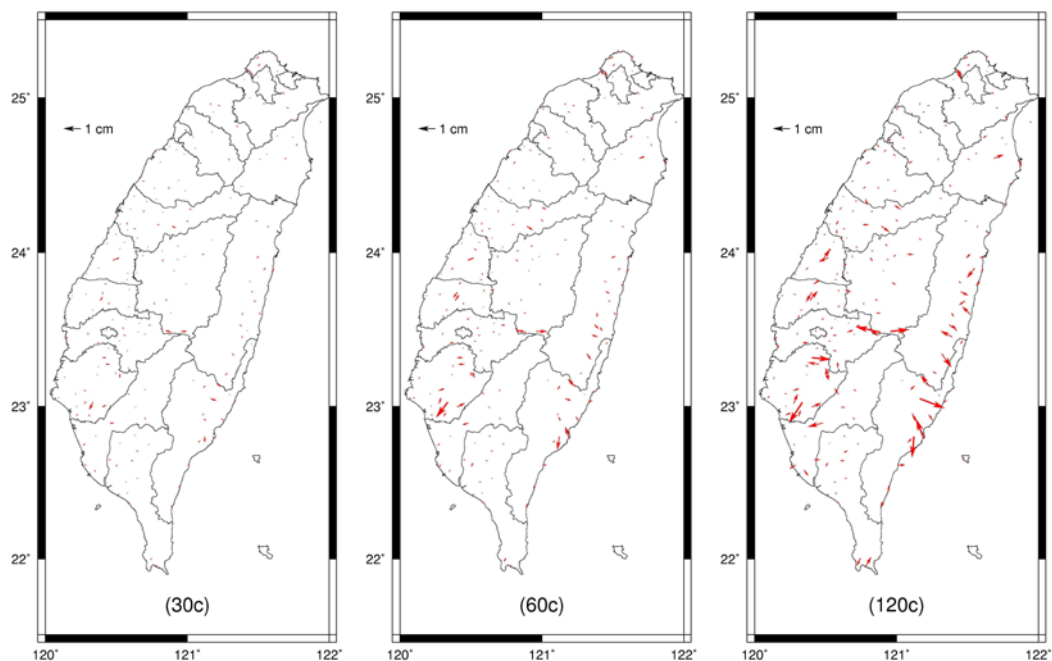


圖 3-50 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度內部精度平面分量較差圖

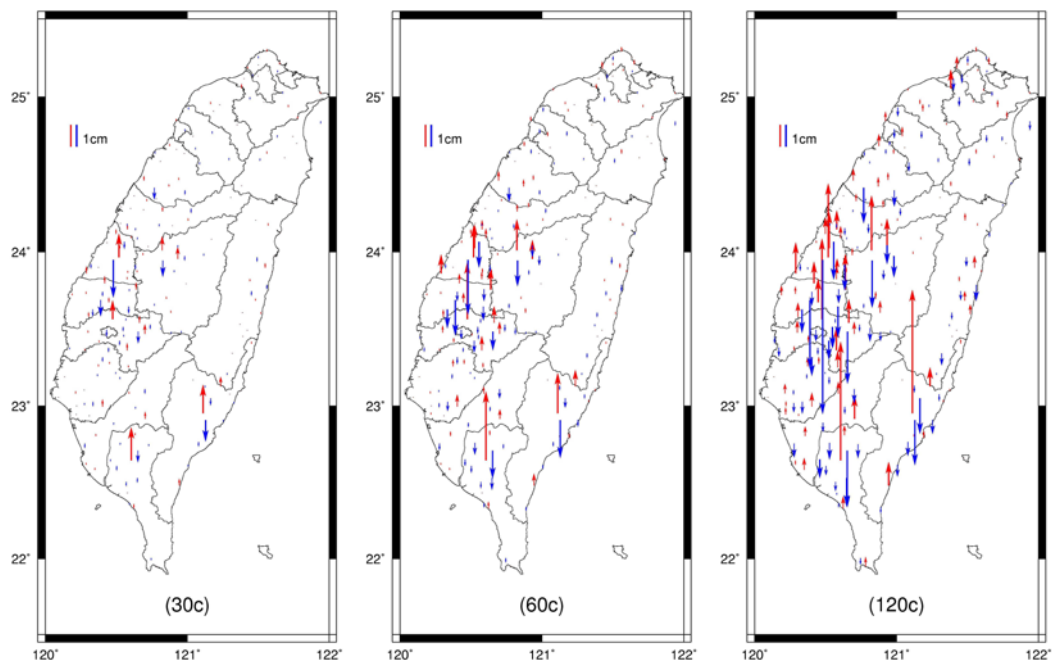


圖 3-51 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度內部精度橢球高分量較差圖

表 3-17 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度內部精度統計表(單位:公尺)

| 網格解析度 | 30 秒 | | | 60 秒 | | | 120 秒 | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | N | E | h | N | E | h |
| MAX | 0.002 | 0.003 | 0.014 | 0.006 | 0.006 | 0.029 | 0.010 | 0.013 | 0.052 |
| MIN | -0.004 | -0.003 | -0.016 | -0.008 | -0.006 | -0.023 | -0.011 | -0.013 | -0.065 |
| STD | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.010 |
| MEAN | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

(二) 外部精度驗證結果

1. 3 種不同網格解析度外部精度驗證結果如表 3-18，各點平面及橢球高分量較差情形如圖 3-52 及圖 3-54。
2. 提升網格解析度對外部精度幾乎沒有影響，與 e-GNSS[2013]轉 TWD97 模型驗證結果相符。

表 3-18 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度統計表(單位:公尺)

| 網格解析度 | 30 秒 | | | | 60 秒 | | | | 120 秒 | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 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 | 0.344 | 0.118 | 0.120 | 0.311 | 0.344 |
| MIN | -0.104 | -0.214 | -0.307 | -0.336 | -0.104 | -0.214 | -0.307 | -0.330 | -0.104 | -0.214 | -0.308 | -0.331 |
| STD | 0.025 | 0.033 | 0.072 | 0.076 | 0.025 | 0.033 | 0.071 | 0.076 | 0.025 | 0.033 | 0.071 | 0.076 |
| MEAN | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 |

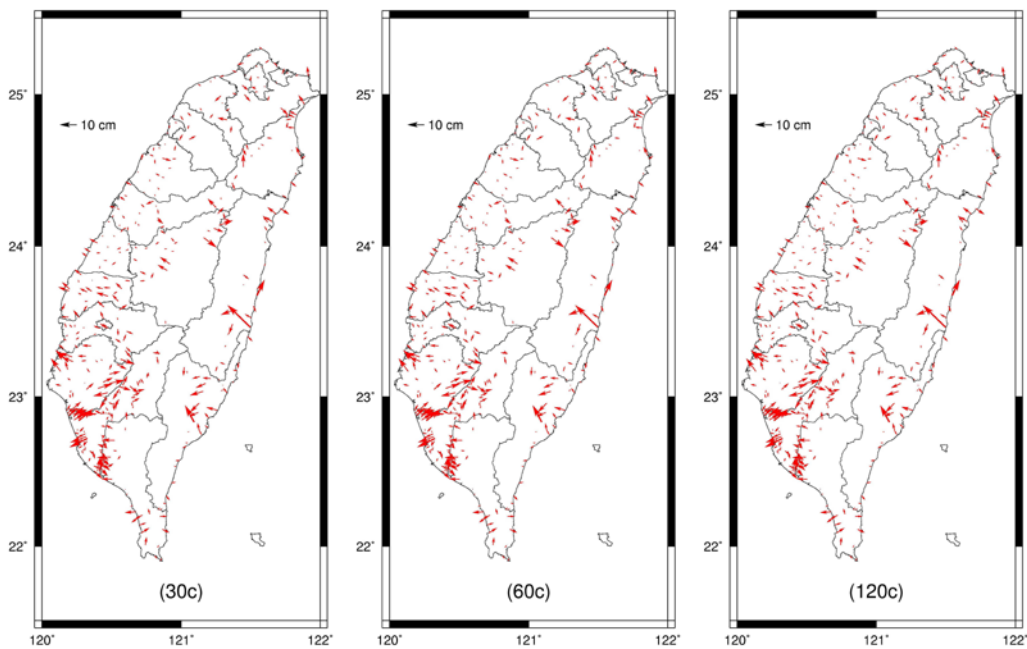


圖 3-52 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度平面分量較差圖

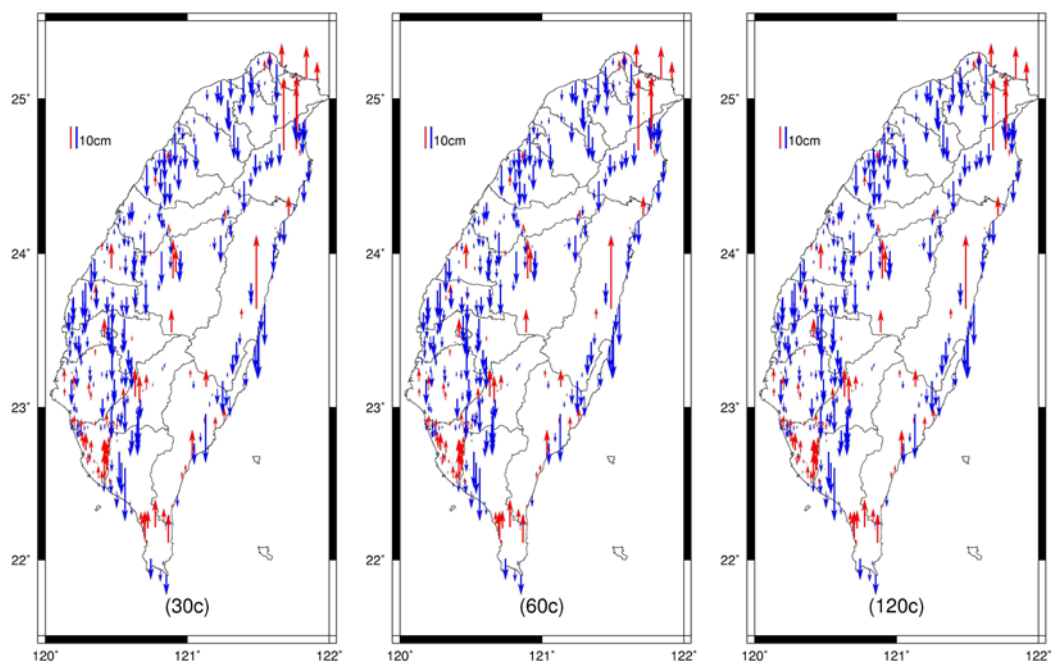


圖 3-53 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度橢球高分量較差圖

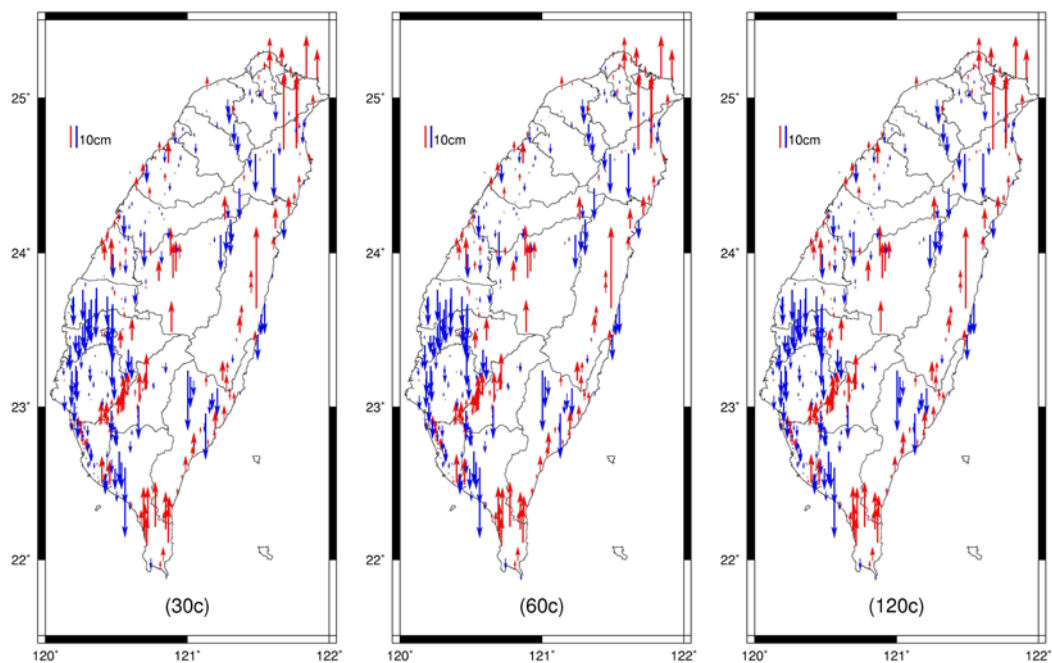


圖 3-54 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度正高分量較差圖

三、小結

- (一) 網格解析度越高，內部精度越好，網格解析度每提高 1 倍，內部精度亦提升約 1 倍，主要應與進行內部精度驗證之點位即為建置殘差網格修正模型之點位，兩者間高相關所致。
- (二) 提升網格解析度對外部精度幾乎沒有影響，主要應與進行外部精度驗證之點位與建置殘差網格修正模型之點位完全不相關，且建置模型之點位數量遠小於網格格點數量，故不影響外部精度。
- (三) 網格解析度 30 秒與 60 秒之坐標轉換模型，其外部精度驗證結果沒有差異，內部精度驗證結果在 e-GNSS[2013]轉 TWD97 坐標轉換模型之平面分量 N 方向分別為 0.005 公尺與 0.008 公尺、E 方向分別為 0.005 公尺與 0.009 公尺，橢球高分量分別為 0.011 公尺與 0.020 公尺；在 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010] 坐標轉換模型平面分量均為 0.001 公尺，橢球高分量分別為 0.003 公尺與 0.005 公尺，其量級在平面分量均小於 1 公分，在高程分量均小於 2 公分，表示即便再提高網格解析度至 15 秒或 5 秒，對於提升坐標轉換模型之內部精度有限，亦無法提升外部精度，故建議爾後依本研究方法建置坐標轉換模型，網格解析度以 30 秒為最佳選擇。

第五節 轉換控制點數量對模型精度影響

本研究利用 1,060 點本中心 2013 年基本控制點檢測資料，建置 e-GNSS[2013]轉 TWD97 坐標轉換模型；利用 210 個基準站資料，建置 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]坐標轉換模型，建置兩模型的轉換控制點數量差距甚多。為研究轉換控制點數量對坐標轉換成果之影響，本節將原 e-GNSS[2013]轉 TWD97 坐標轉換模型的轉換控制點數量由 1,060 點減少為 610 點（點位分布情形如圖 3-55）；將原 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]坐標轉換模型的轉換控制點數量由 210 個基準站變更為 1,374 點基本控制點（點位分布情形如圖 3-56），以克利金法建置殘差網格修正模型，以雙線性內插計算坐標轉換成果，分析比較轉換控制點數量對轉換成果之影響。

由本研究第三章第二節及第三節之數據，已充分顯示出利用克利金法建置 30 秒殘差網格修正模型，並以雙線性內插計算坐標轉換成果之方法為可行，故本節僅就外部精度進行分析，不再比較內部精度。

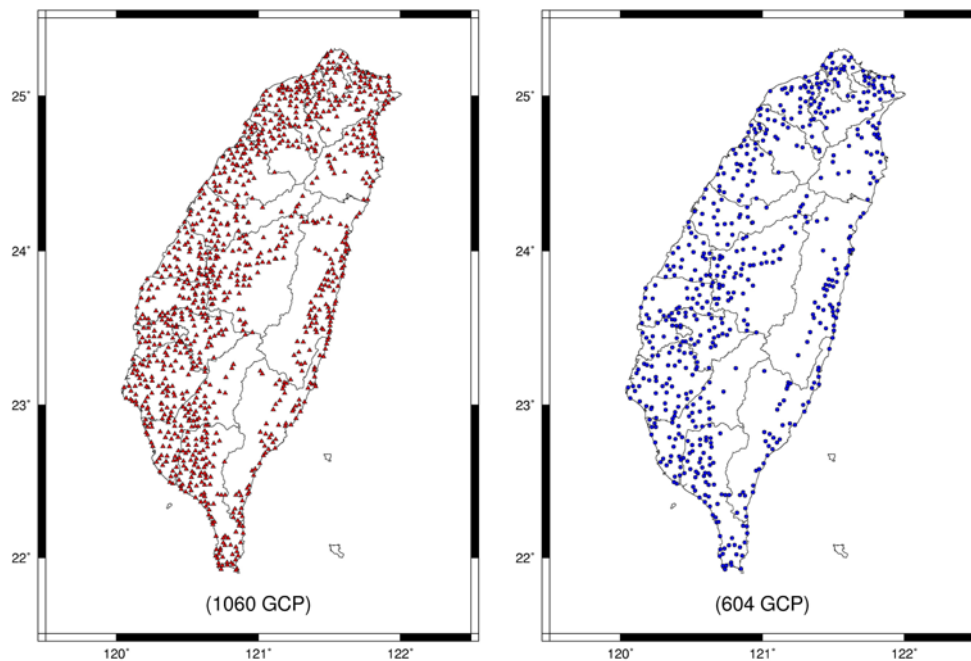


圖 3-55 e-GNSS[2013]→TWD97 調整前後轉換控制點分布圖

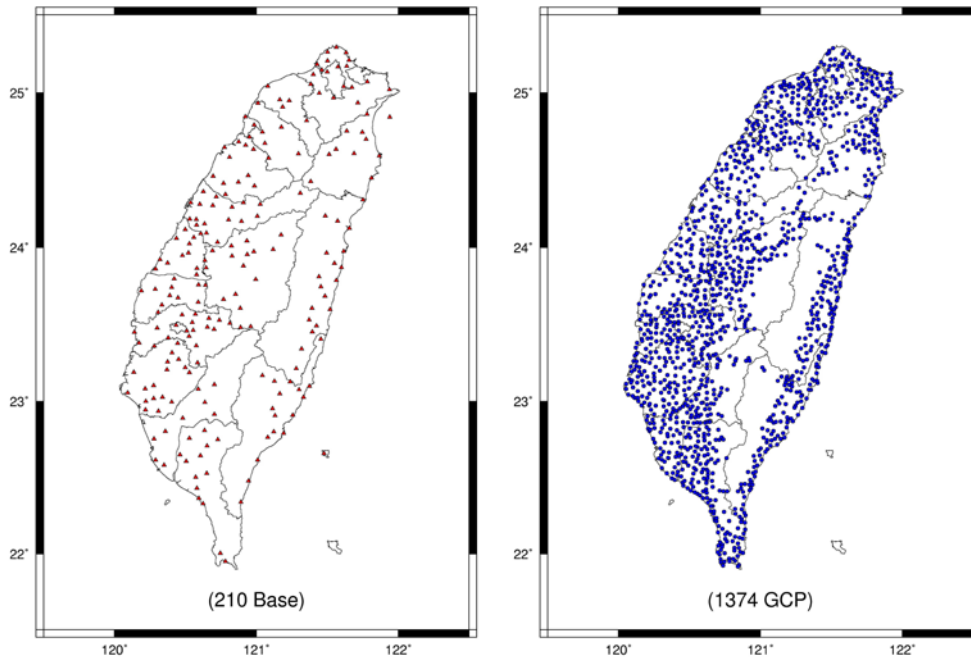


圖 3-56 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]調整前後轉換控制點分布圖

一、e-GNSS[2013]轉 TWD97 及 TWVD2001 外部精度驗證結果

- (一) 2 組不同轉換控制點數量外部精度驗證結果如表 3-19，各點平面、橢球高及正高分量較差情形如圖 3-57 至圖 3-59。
- (二) 轉換控制點數量越多，外部精度越高，惟轉換控制點數量增加約 1 倍，中誤差在平面及橢球高分量僅增加 0.006 公尺，在正高分量減少 0.003 公尺，提升精度有限。

表 3-19 e-GNSS[2013]→TWD97 不同網格解析度外部精度統計表 (單位：公尺)

| 轉換控制點數量 | 1060 點基本控制點 | | | | 604 點基本控制點 | | | |
|---------|-------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | H | N | E | h | H |
| 分量 | | | | | | | | |
| MAX | 0.309 | 0.101 | 0.318 | 0.589 | 0.311 | 0.128 | 0.313 | 0.563 |
| MIN | -0.213 | -0.179 | -0.589 | -0.365 | -0.196 | -0.178 | -0.589 | -0.361 |
| STD | 0.040 | 0.035 | 0.094 | 0.130 | 0.043 | 0.041 | 0.100 | 0.127 |
| MEAN | 0.007 | 0.004 | -0.021 | 0.046 | 0.005 | 0.004 | -0.026 | 0.043 |

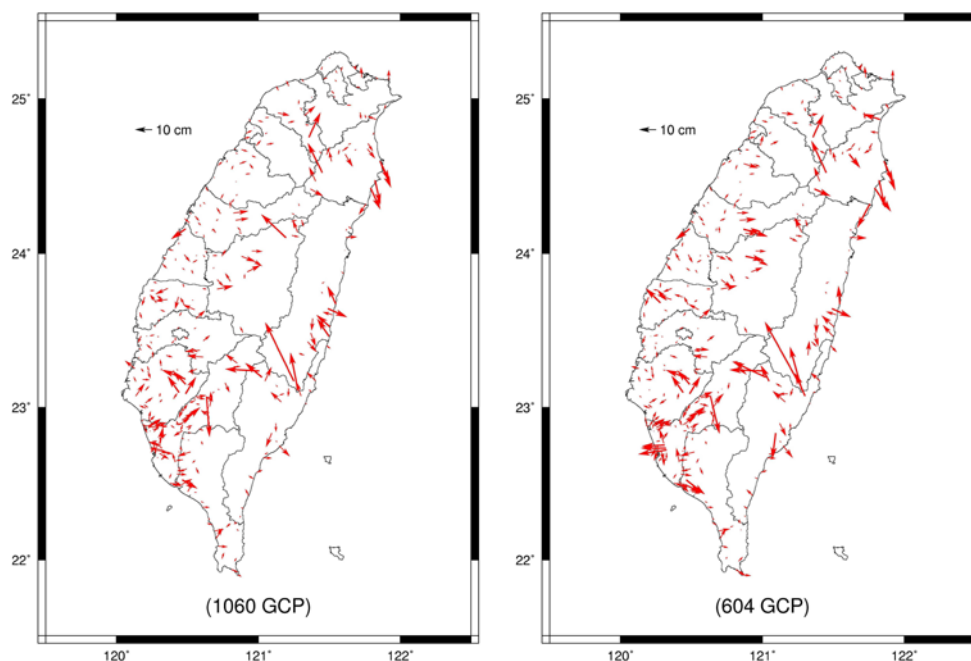


圖 3-57 e-GNSS[2013]→TWD97 不同轉換控制點數量外部精度平面分量較差圖

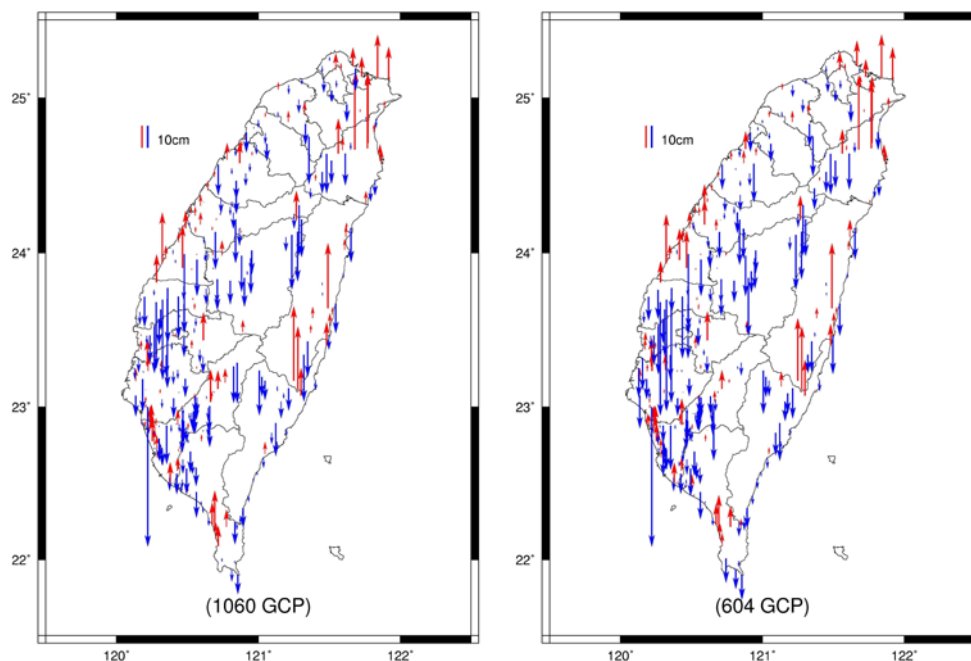


圖 3-58 e-GNSS[2013]→TWD97 不同轉換控制點數量外部精度橢球高分量較差

圖

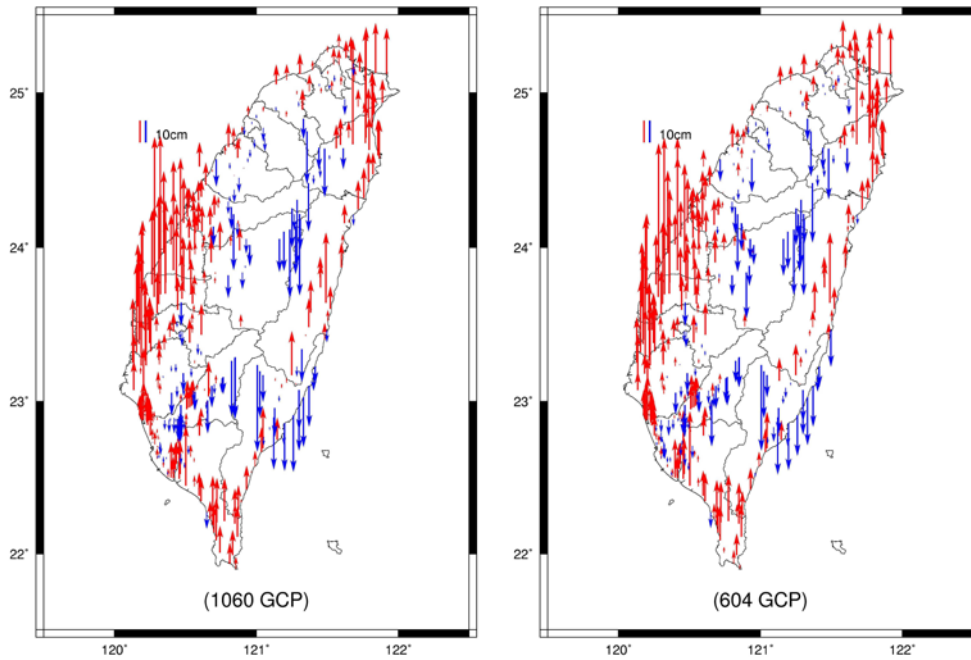


圖 3-59 e-GNSS[2013]→TWD97 不同轉換控制點數量外部精度正高分量較差圖

二、e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]及 TWVD2001 外部精度驗證結果

- (一) 2 組不同轉換控制點數量外部精度驗證結果如表 3-20，各點平面、橢球高及正高分量較差情形如圖 3-60 至圖 3-62。
- (二) 轉換控制點數量越多，外部精度在平面及正高分量反而越差，僅橢球高分量在平均值增加 0.019 公尺，中誤差增加 0.004 公尺，未必能提升精度。

表 3-20 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同網格解析度外部精度統計表(單位:公尺)

| 轉換控制點數量 | 210 個基準站 | | | | 1374 點基本控制點 | | | |
|---------|----------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | H | N | E | h | H |
| 分量 | | | | | | | | |
| MAX | 0.118 | 0.121 | 0.311 | 0.344 | 0.118 | 0.117 | 0.355 | 0.388 |
| MIN | -0.104 | -0.214 | -0.307 | -0.336 | -0.105 | -0.202 | -0.246 | -0.329 |
| STD | 0.025 | 0.033 | 0.072 | 0.076 | 0.026 | 0.034 | 0.068 | 0.078 |
| MEAN | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 | 0.005 | 0.007 | -0.006 | 0.017 |

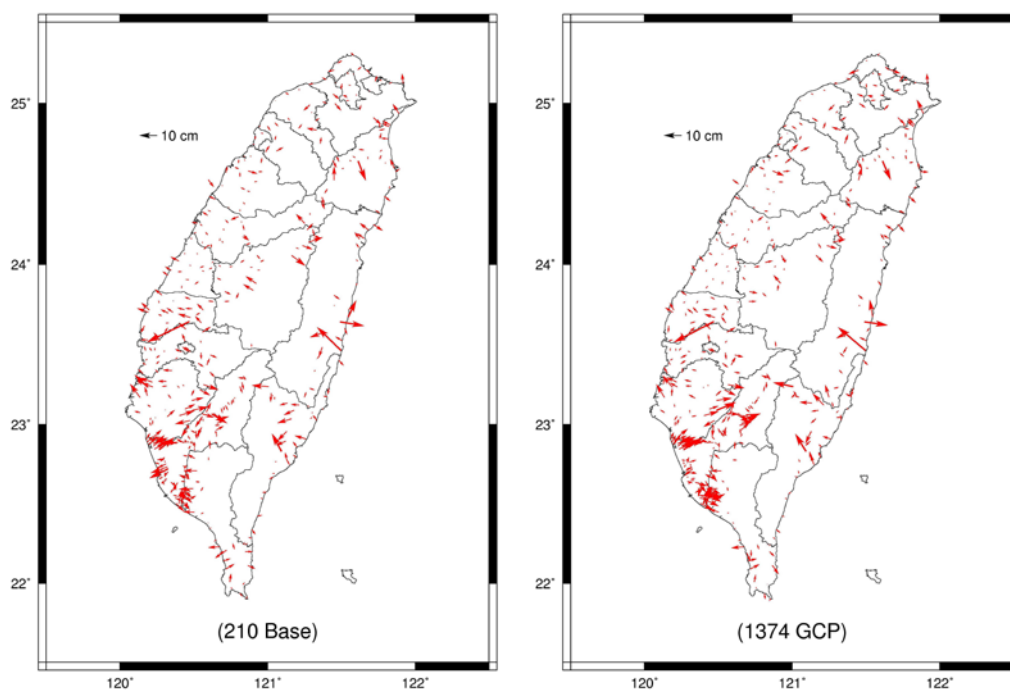


圖 3-60 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同轉換控制點數量外部精度平面分量較差圖

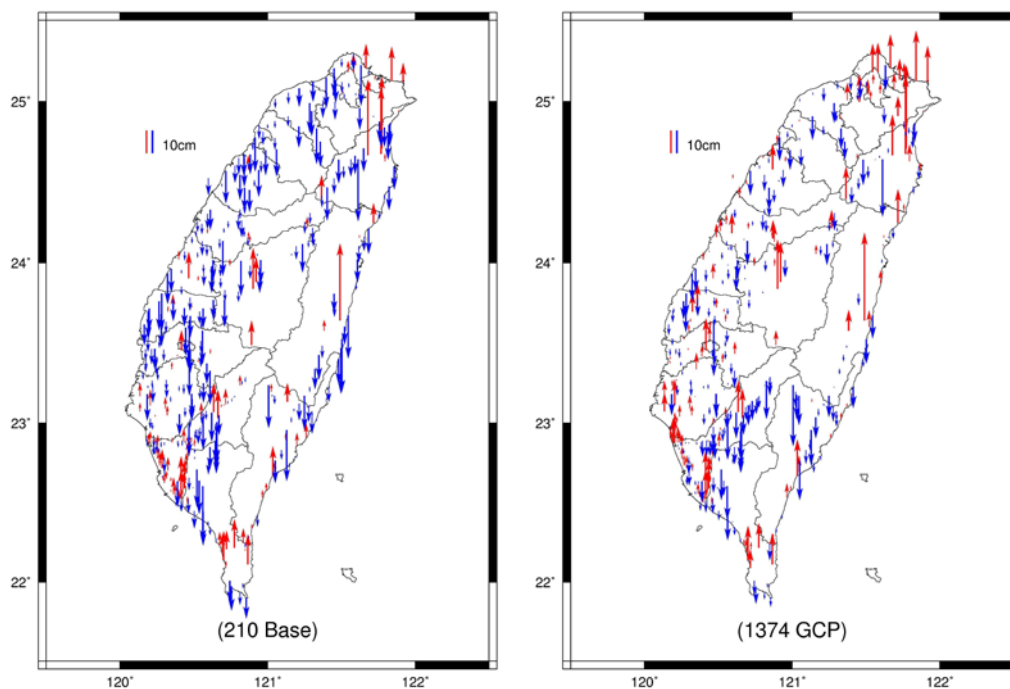


圖 3-61 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同轉換控制點數量外部精度橢球高分量較差圖

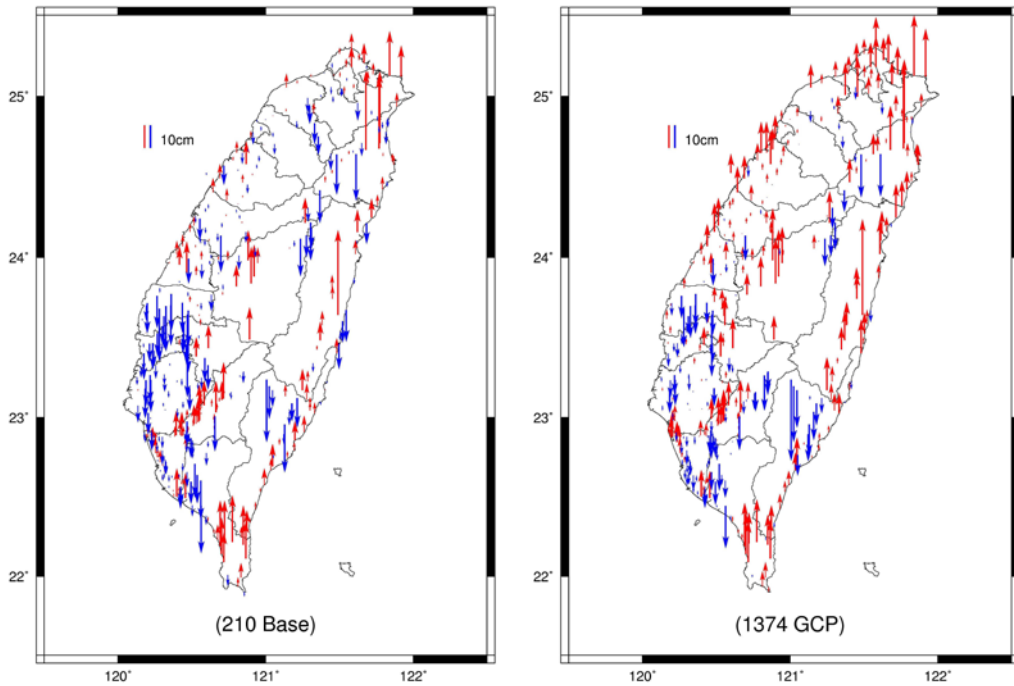


圖 3-62 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同轉換控制點數量外部精度正高分量較差圖

三、小結

- (一) e-GNSS[2013]轉 TWD97 坐標轉換模型中，轉換控制點數量越多，外部精度越高，惟轉換控制點數量增加約 1 倍，提升的精度不到 0.010 公尺。
- (二) e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]坐標轉換模型中，轉換控制點數量越多，外部精度在平面及正高分量反而越差，僅橢球高分量提升約 0.020 公尺。
- (三) 轉換控制點數量越多，未必可提升坐標轉換模型精度。若轉換控制點轉換前後坐標的相對關係正確且分布夠均勻，則增加轉換控制點數量，對提升坐標轉換模型精度幫助有限。如本研究 e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]坐標轉換模型僅使用 210 個基準站作為轉換控制點，其外部精度與使用 1,374 點基本控制點作為轉換控制點之坐標轉換模型差異不大。

第六節 VBS-RTK 觀測時間對轉換精度影響

本研究第三章第三節至第五節有關外部精度檢核資料，係使用本中心 2013 年 12 月於 489 點一等水準點辦理 e-GNSS 系統 VBS-RTK 測量成果，觀測資料頻率 1Hz，每個點位觀測 2 測回，每測回至少接收 180 筆固定解，將每測回 180 筆固定解以 3 倍中誤差偵錯取平均後，再取 2 測回平均獲得 e-GNSS[2013]坐標成果。考量部分測量工作無法在單一點位長時間觀測，為研究 VBS-RTK 觀測時間對轉換精度之影響，本節將上述外部精度檢核資料，由原本每測回 180 筆固定解，調整為僅取每測回前 30 筆及前 10 筆固定解，以本研究第三章第三節克利金法建置之殘差網格修正模型及雙線性內插進行坐標轉換精度檢核。

一、e-GNSS[2013]轉 TWD97 及 TWVD2001 坐標轉換精度檢核結果

- (一) 3 組不同 VBS-RTK 觀測時間坐標轉換精度檢核結果如表 3-21。
- (二) VBS-RTK 觀測 180 筆固定解之轉換成果，與觀測 30 筆或 10 筆固定解之轉換成果差異不大，平均值在平面及橢球高分量差 0.001 公尺，正高分量沒有差異；中誤差在平面分量差 0.002 公尺，橢球高及正高分量差 0.001 公尺。

表 3-21 e-GNSS[2013]→TWD97 不同觀測時間轉換精度統計表 (單位：公尺)

| 觀測量 | 180 筆固定解 | | | | 30 筆固定解 | | | | 10 筆固定解 | | | |
|------|----------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | H | N | E | h | H | N | E | h | H |
| MAX | 0.309 | 0.101 | 0.318 | 0.589 | 0.323 | 0.099 | 0.331 | 0.583 | 0.323 | 0.098 | 0.333 | 0.585 |
| MIN | -0.213 | -0.179 | -0.589 | -0.365 | -0.225 | -0.175 | -0.602 | -0.340 | -0.212 | -0.178 | -0.607 | -0.314 |
| STD | 0.040 | 0.035 | 0.094 | 0.130 | 0.040 | 0.037 | 0.095 | 0.131 | 0.041 | 0.036 | 0.095 | 0.129 |
| MEAN | 0.007 | 0.004 | -0.021 | 0.046 | 0.006 | 0.003 | -0.022 | 0.046 | 0.007 | 0.003 | -0.022 | 0.046 |

二、e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]及 TWVD2001 坐標轉換精度檢核結果

- (一) 3 組不同 VBS-RTK 觀測時間坐標轉換精度檢核結果如表 3-22。
- (二) VBS-RTK 觀測 180 筆固定解之轉換成果，與觀測 30 筆或 10 筆固定解之轉換成果差異不大，平均值在各分量均沒有差異；中誤差在平面及正高分量沒有差異，橢球高分量差 0.001 公尺。

表 3-22 e-GNSS[2013]→TWD97[2010]不同觀測時間轉換精度統計表 (單位：公尺)

| 網格解析度 | 30 秒 | | | | 60 秒 | | | | 120 秒 | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N | E | h | H | N | E | h | H | N | E | h | H |
| 分量 | | | | | | | | | | | | |
| MAX | 0.118 | 0.121 | 0.311 | 0.344 | 0.118 | 0.120 | 0.311 | 0.344 | 0.118 | 0.120 | 0.311 | 0.344 |
| MIN | -0.104 | -0.214 | -0.307 | -0.336 | -0.104 | -0.214 | -0.307 | -0.330 | -0.104 | -0.214 | -0.308 | -0.331 |
| STD | 0.025 | 0.033 | 0.072 | 0.076 | 0.025 | 0.033 | 0.071 | 0.076 | 0.025 | 0.033 | 0.071 | 0.076 |
| MEAN | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 | 0.003 | -0.002 | -0.027 | -0.005 |

三、小結

- (一) VBS-RTK 觀測 180 筆固定解之轉換成果，與觀測 30 筆或 10 筆固定解之轉換成果差異不大。
- (二) VBS-RTK 觀測時間越長，獲得固定解之觀測量越多，但對轉換精度無明顯幫助。

第四章 結論與建議

第一節 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：

- 一、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。
- 二、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。
- 三、為研究網格解析度對模型精度之影響，本研究以克利金法分別建置網格解析度為 30 秒、60 秒及 120 秒之殘差網格修正模型，再以雙線性內插計算坐標轉換成果，分析比較不同網格解析度之殘差網格修正模型對轉換成果之影響。研究結果顯示，網格解析度越高，內部精度越好，但對外部精度影響則不明顯，主要應與精度驗證點位和建置模型點位之相關性有關。
- 四、為研究轉換控制點數量對模型精度之影響，本研究利用不同轉換控制點數

量，以克利金法建置殘差網格修正模型，以雙線性內插計算坐標轉換成果，分析比較轉換控制點數量對轉換成果之影響。研究結果顯示，轉換控制點數量越多，未必可提升坐標轉換模型精度，若轉換控制點轉換前後坐標的相對關係正確且分布夠均勻，則增加轉換控制點數量，對提升坐標轉換模型精度幫助有限。

五、考量部分測量工作無法在單一點位長時間觀測，為研究 VBS-RTK 觀測時間對轉換精度之影響，本研究將 VBS-RTK 測量成果分別取前 10 筆、前 30 筆及前 180 筆固定解，以克利金法建置之殘差網格修正模型及雙線性內插進行坐標轉換精度檢核，分析 VBS-RTK 觀測時間對轉換精度之影響。研究結果顯示，VBS-RTK 觀測時間長短對轉換精度無顯著影響，即 VBS-RTK 觀測 10 筆固定解之精度與觀測 180 筆固定解之精度無顯著差異。

六、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：

（一） e-GNSS[2013]轉 TWD97 及 TWVD2001

1. 以一等水準點驗證三維 (N,E,h) 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. 以基本控制點驗證三維 (N,E,h) 坐標轉換精度為 0.026、0.033 及 0.087 公尺。

（二） e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]及 TWVD2001

1. 以一等水準點驗證三維 (N,E,h) 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。
2. 以基本控制點驗證三維 (N,E,h) 坐標轉換精度為 0.027、0.034 及 0.069 公尺。

（三） e-GNSS[2013]轉 TWD97[2010]及 TWVD2001 之轉換精度略優於 e-GNSS[2013]轉 TWD97 及 TWVD2001，主要應係 e-GNSS[2013]與 TWD97[2010]兩坐標系統間之時間差距較短，坐標轉換模型較可反應地表真實變化情況；e-GNSS[2013]與 TWD97 兩坐標系統間之時間差距較長，部分地表變化較不一致之地區，坐標轉換模型無法真實反應修正，故其精度較差。

第二節 建議

- 一、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。
- 二、本研究係以臺灣本島為範圍，選用基準站或基本控制點作為轉換控制點，計算建置坐標轉換模型，並將其精度控制在一定範圍內，確保維持坐標轉換後平面精度優於 5 公分，高程精度優於 10 公分。因控制測量作業選用連測的控制點位及數量不同，經強制附合約制計算的成果就會有些許系統差存在。對於以往已經測設之小範圍測量工作，如利用 e-GNSS 系統及本研究成果檢測已測設之坐標成果，在不考量測量錯誤的情況下，檢測與原測設成果兩者間亦會存在系統差，系統差之大小與方向，則與選用連測控制點之相對關係有關。有關小範圍測量工作且精度需求高於本研究成果精度者，建議參考圖 4-1 之作業方式，先檢測測區外圍已知控制點，並比較檢測與已知控制點坐標之相對關係，如果較差量級與方向性一致，表示檢測與已知控制點間僅存在系統差，可透過直接平移的方式，獲得符合精度需求之法定坐標系統測量成果；如較差量級與方向性不一致，表示檢測與已知控制點間除了存在系統差，尚包含已知控制點位移量，則建議採用坐標轉換與最小二乘配置之方法，先把有問題的已知控制點找出來，再進行坐標轉換與套合，亦可獲得符合精度需求之法定坐標系統測量成果。

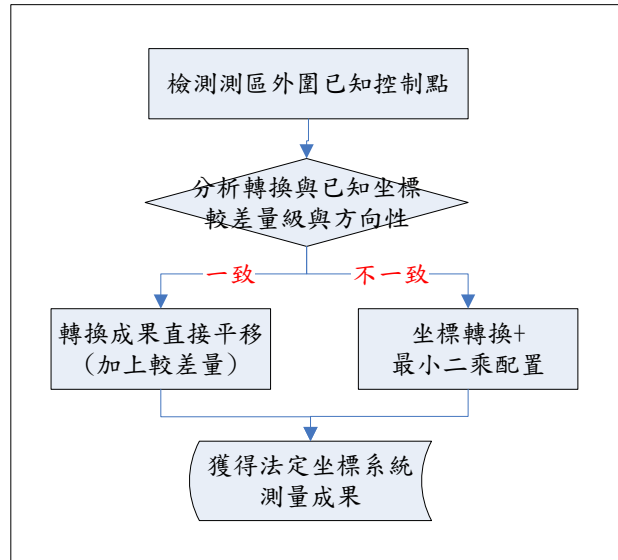


圖 4-1 精度需求高於研究成果之建議作業方式

三、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。

四、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。

五、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。

參考書目

- (1) 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。臺中。
- (2) 內政部國土測繪中心。2012。大地基準及一九九七坐標系統 2010 年成果工作總報告。臺中。
- (3) 內政部國土測繪中心。2012。e-GPS 即時動態定位系統坐標轉換最佳化之研究。自行研究報告。臺中。
- (4) 內政部國土測繪中心。2013。VBS-RTK 應用於界址測量之探討。自行研究報告。臺中。
- (5) 內政部國土測繪中心e-GNSS即時動態定位系統入口網站。2014。網址：<http://www.egnss.nlsc.gov.tw>。臺中。
- (6) 交通部中央氣象局。2009。應用克利金法建立高解析度網格點氣象數據之研究。委託研究計劃成果報告。臺北。
- (7) 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。碩士論文。新竹：國立交通大學土木工程學系。
- (8) Fritzensmeier, K., Kloth, G., Niemeier, W., and Eichholz, K..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 Vermessungswaen.
- (9) Mohamed Eleiche. 2008. RTCM 3.1 Transformation Messages In RTK GNSS Networks.
- (10) Rapp, R. H..1993.“Geometric Geodesy Part II”, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, U.S.A., pp. 57-93.