

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

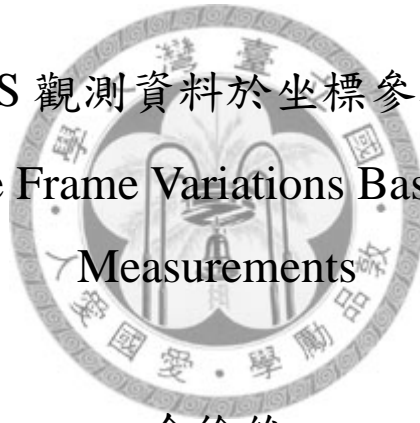
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

應用長期連續 GPS 觀測資料於坐標參考框架變異之研究

A Study on Reference Frame Variations Based on Long-term GPS  
Measurements



余徐維

Syu-Wei Yu

指導教授：韓仁毓 教授

Advisor: Prof. Jen-Yu Han

中華民國 98 年 1 月

Jan. 2009



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

應用長期連續 GPS 觀測資料於坐標參考框架變異之研究  
A Study on Reference Frame Variations Based on  
Long-term GPS Measurements

本論文係余徐維君 (R95521111) 在國立臺灣大學土木工程學系  
碩士班完成之碩士學位論文，於民國 97 年 12 月 26 日承下列考試委員  
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

韓 仁 毓

(簽名)

(指導教授)

趙 鍵 哲

徐 百 輝

林 老 忠

系主任、所長

張 國 鎮

(簽名)

## 誌謝

終於完成碩士論文了，心中的感動無可言喻，在這二年多的研究所生活中，經歷過許多的挑戰、伴隨著是多少個失眠的夜晚，想要放棄的聲音不曾停歇過，雖然過程中的苦悶多於歡樂，但是經過這段期間的磨練與洗禮後，著實令我成長不少。校園的生活即將告一段落，但內心的失落遠大於喜悅，除了校園內有我所懷念的人、事、物之外，另一個原因是即將邁向人生的另一條道路，未來是未知的，但只有自己可以選擇將來要走怎樣的路。

能夠完成碩士學位，首先要感謝我指導教授，韓仁毓老師。在學術研究上，他對我不辭辛勞地教導，我從他的身上學習到學術研究所應有之嚴謹態度；他同時給了我很大的空間及彈性，讓我可以依照自己的步調朝著目標前進；在生活上，老師經常分享他的人生經驗與生活態度，都深深地影響了我。在學業上他是我的良師，生活中更可謂是我的益友，由衷地感謝老師在研究所生活中對我的指導與鞭策，使我在研究與工作態度上皆有所進步與成長，您對我的付出與照顧，學生會謹記在心。同時也要感謝林老生教授、徐百輝教授與趙鍵哲教授三位口試委員給予我論文上的寶貴意見及建議，使學生的論文能更臻完善。還要感謝許榮欣老師在課業上的教導與人生態度的啟發。另外，我之所以能夠繼續念研究所，必須要感謝政大黃灝雄與詹進發教授，在大學時期帶領我從事許多關於測量相關的學術研究，並鼓勵我往研究所的目標邁進。感謝徐百輝老師與趙鍵哲老師在我剛進來時，教導我許多測量專業知識及在研究工作時所應注意之事項，使我獲益良多。

在研究所的生活中，首要感謝的是彭念學長以及信宏學長對我的照顧，不論是在課業上或是生活問題上，只要向學長請教，都可以獲得最有效的回應；感謝 Kevin 學長與子毅學長平時對我的照顧及關心；琇涵學姊總是能抽空幫我解決問

題；嘉玳學姊在我遇到困難時，也會義不容辭幫忙；正楷學長在研究室經常帶來歡樂氣氛，並謝謝你的腳踏車。此外，雅婷學姊、小個學長、匯智學長、永安學長及子龍學長在平時的關照。

感謝昱芸，因為有妳的大力協助，才能夠完成一年級時許多困難的報告，妳的功勞最大；感謝小花在平時課業或生活上的幫忙，並分享研究心情的苦與樂；君芸在學業上的認真態度，可作為學習的好榜樣。博涵總是在我遇到問題時，能夠友情相挺，很幸運能夠有你這樣的好夥伴，祝你順利畢業；奕婷學姊只要有妳在的地方，總是能夠充滿歡樂的氛圍，湘玲平常總是笑咪咪地，讓我也感染到妳的好心情；則元雖然平常沈默，但是也都很認真地進行研究工作；小樂、煒哲感謝你們在我口試時的情義相挺，研究團隊有你們的加入，相信將來可以更加茁壯；寧軒、鈺珊與璧華，雖然與妳們接觸的機會不多，但是看到妳們平常認真學習的態度，覺得將來測量組會愈來愈好。感謝韋翰，幫助我在 Linux 資料處理上所遇到的問題，使我能夠順利完成實驗；感謝冠豪、小原，每當我心情鬱悶時，你們總是可以給我精神上的支持。206 室的林國峰老師、李天浩老師、宗義學長、佑蓉與慧萱學妹，與你們在同一研究室共事，將會成為我研究生生活的美好回憶。感謝林謙如老師的耐心教導，讓我從原本的不會游泳，到現在可以學會三種泳式；感謝雅晴在我平淡無趣的研究所生活中增添美麗的色彩；還有感謝宏君、政諭、炳瑜、煥智、之聖、冠廷、琨懿與逸帆平時的關心，以及支持我的親朋好友們，祝大家一切順利。當然我能夠完成研究所的學業，最要感謝的就是我的家人，我的爸爸、媽媽和妹妹，感謝有你們的支持與陪伴，讓我可以專心完成碩士學位，將來我會盡我的努力，朝向目標邁進，不會讓你們失望。

# 摘要

根據板塊運動理論，地球表面可分為數個剛體板塊，板塊之間每年以數公厘至數公分不等之速率相互移動，因此由地表控制點位所定義之坐標參考框架也會隨時間而變動。以往透過傳統測量方式並無法得到地表點位之連續細微變化，但隨著現代科技的發展與衛星大地測量技術的進步，加上全球定位系統( Global Positioning System, GPS )的問世，可對地表點位進行長期連續的觀測，有效偵測地表動態行為，進而解算出點位空間資訊。而在不同時期或使用不同測量技術經觀測解算得到之坐標與速度場，其所依據之參考框架定義亦不盡相同，一般可透過以相似轉換為基礎之動態框架轉換模型，對不同坐標參考框架進行轉換，使其具有共同基準，以利後續應用。

本研究主要目的為建立一套完整的動態框架轉換模型參數估計程序，包含從 GPS 原始觀測資料的處理開始，透過完整的 GPS 定位解算以及序列資料處理流程，以獲得高品質的地表動態資料，作為後續應用之可靠依據；並採用嚴謹的參數估計平差模型(包含廣義平差模型與虛擬觀測平差模型)，選擇合適之動態框架轉換模型進行轉換參數估計，評估參數顯著性，在不設限參考框架變異行為的情況下，期望能夠透過這套流程有效建立變形框架間之動態轉換關係。

根據數值成果顯示，在以台灣 GPS 衛星追蹤站 2001 年至 2007 年 RINEX 資料作為分析基礎下，本研究所建立的序列資料處理流程能夠顯著地提升所獲得的地表動態行為估計品質，此外由於台灣地區地表點位存在不均勻的變形行為，若以現有動態相似轉換模型加以模式，將會降低坐標及速度場轉換品質，而動態仿射轉換模型則因為其可以有效處理非均勻變形場，對於台灣地區動態框架轉換參數

之顯著性以及坐標、速度場之轉換品質均將有明顯助益，可做為未來在變形區域建立動態坐標系統時之主要參考模型。

**關鍵字：**全球定位系統、坐標參考框架、變形分析、動態坐標框架轉換



# Abstract

According to the tectonic theory, the Earth's surface can be divided into several rigid plates which move with respect to each other with velocities from millimeters to centimeters per year. Consequently, the coordinates of ground control points defining a terrestrial reference frame will also vary with time. In the past, detecting the tiny surface movements using traditional surveying technique is not an easy task. In recent years, with the advance of space geodesy techniques and the application of the Global Positioning System ( GPS ), the dynamical behavior of the Earth's surface can be continuously observed and precisely determined. As soon as the time-variant coordinates and velocities of ground control points can be estimated, the geometric relations between terrestrial reference frames at different epochs can be established using a time-variant reference frame transformation model.

The purpose of this study is to develop a complete procedure for establishing a time-variant reference frame transformation model. First, the high quality information for the coordinates and velocities of ground control stations are obtained by an integrated GPS data processing and time-series improvement procedure. Then a rigorous parameter estimation approach ( including a general and a unified least-squares techniques ) is proposed for estimating the parameters of different time-variant transformation models. The estimated parameters are tested for their statistical significance and the actual geometric relations between time-variant reference frames can thus be identified.

In the numerical analysis, the RINEX data from 2001 to 2007 of seven GPS tracking stations in Taiwan area has been processed and analyzed. The results show that the quality of the velocity estimations can be significantly improved by applying the proposed time-series improvement approach. Furthermore, due to the non-uniform deformations in this area, a time-variant similarity transformation model does not provide an acceptable result. On the other hand, a time-variant affine transformation model can produce a coordinate and velocity transformation of a higher quality due to its capability on modeling non-uniform deformations. Consequently, a time-variant affine transformation model can serve as an eligible candidate model especially in establishing a time-variant reference system in a deforming area.

**Keywords:** Global positioning system, Reference Frame, Deformation Analysis, Time-variant Transformation.



# 目錄

口試委員審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iv
Abstract.....	vi
目錄 .....	vii
圖目錄 .....	ix
表目錄 .....	xi
第一章 緒論 .....	1
1-1 研究背景 .....	1
1-2 研究動機與目的 .....	9
1-3 研究方法 .....	10
1-4 論文架構 .....	12
第二章 動態框架轉換模型相關研究 .....	13
2-1 動態框架轉換模型 .....	13
2-2 全球性參考框架轉換之應用 .....	14
2-3 全球性與區域性參考框架轉換之應用 .....	14
第三章 動態框架轉換模型 .....	17
3-1 動態相似轉換模型( Time-variant similarity transformation model ).....	17
3-1-1 數學模型 .....	17
3-1-2 參數估計方式 .....	19
a. 參數估計 .....	20
b. 參數率估計 .....	22
c. 精度估計 .....	24
3-2 動態仿射轉換模型( Time-variant affine transformation model ).....	25
3-2-1 數學模型 .....	25
3-2-2 參數估計方法 .....	29
a. 參數估計 .....	29
b. 參數率估計 .....	29
c. 精度估計 .....	29
d. 主成分參數誤差傳播 .....	29
3-3 數值模擬實驗 .....	31
第四章 長期連續 GPS 資料處理與分析 .....	36
4-1 GPS 資料解算 .....	36

4-2 GPS 序列資料品質提升 .....	39
4-2-1 不連續運動偵測 .....	41
4-2-2 速度場估計 .....	42
4-2-3 粗差偵測 .....	43
4-2-4 週期訊號處理 .....	44
4-2-5 統計檢定 .....	45
4-3 序列資料品質提升範例說明 .....	47
第五章 實際資料數值分析成果 .....	53
5-1 台灣追蹤站坐標與速度場解算成果 .....	53
5-2 動態框架轉換模型參數估計 .....	57
5-2-1 動態框架轉換模型參數估計(全區) .....	57
5-2-2 動態框架轉換模型參數估計(五站) .....	61
5-3 數值成果分析 .....	67
第六章 結論與建議 .....	70
6-1 結論 .....	71
6-2 建議 .....	72
參考文獻 .....	74
附錄 .....	I
A.1 台灣追蹤站 GPS 序列資料處理詳細成果 .....	I
A.1.1 FLNM 站 .....	I
A.1.2 YMSM 站 .....	III
A.1.3 KDNM 站 .....	IV
A.1.4 KMNM 站 .....	V
A.1.5 MZUM 站 .....	VII
A.1.6 PKGM 站 .....	VIII
A.1.7 TMAM 站 .....	IX
A.2 台灣追蹤站資料品質提升前之速度場估計 .....	X
A.3 台灣追蹤站資料品質提升後之速度場估計 .....	XV

# 圖目錄

圖 1-1 地表參考系統與地表參考框架 .....	2
圖 1-2 全球板塊運動行為( UNAVCO 2008/online/ ) .....	7
圖 1-3 台灣地區相對於歐亞板塊之速度場( Yu & Kuo, 2001 ) .....	9
圖 1-4 台灣地區 1993 至 1999 年速度場( Hsu et al., 2003 ) .....	9
圖 1-5 研究流程圖 .....	11
圖 3-1-1 不同參考框架間之靜態坐標轉換 .....	18
圖 3-1-2 不同參考框架間之動態坐標轉換 .....	19
圖 3-2-1 原始點位(左)點位受到外力導致非均勻變形(右) .....	26
圖 3-3-1 模擬坐標參考框架含有變異行為之坐標與速度場 .....	32
圖 3-3-2 動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差向量(左)與速度場誤差向量(右) ..	34
圖 3-3-3 動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差向量(左)與速度場誤差向量(右) ..	34
圖 4-1-1 IGS 亞洲測站位置分佈圖 .....	37
圖 4-1-2 台灣追蹤站地理位置分佈圖 .....	38
圖 4-2-1 長期連續 GPS 序列資料處理流程圖 .....	40
圖 4-3-1 原始資料速度場估計 .....	47
圖 4-3-2 原始資料殘差 .....	47
圖 4-3-3 序列資料每二點斜率估計 .....	48
圖 4-3-4 斷點偵測 .....	48
圖 4-3-5 第一段資料殘差 .....	48
圖 4-3-6 第二段資料殘差 .....	48
圖 4-3-7 第三段資料殘差 .....	48
圖 4-3-8 分段估計速度場 .....	48
圖 4-3-9 分段計算資料殘差 .....	49
圖 4-3-10 剔除第一段資料粗差 .....	49
圖 4-3-11 剔除第二段資料粗差 .....	49
圖 4-3-12 剔除第三段資料粗差 .....	49
圖 4-3-13 分析處理後三段資料速度場估計 .....	49
圖 4-3-14 分析處理後三段資料殘差 .....	49
圖 4-3-15 直線擬合斜率及其精度曲線圖 .....	52
圖 5-1-1 台灣追蹤站 2003 至 2007 年水平速度場 .....	56
圖 5-1-2 台灣地區 2003 至 2007 年內插水平速度場 .....	56
圖 5-1-3 台灣追蹤站 2003 至 2007 年垂直速度場 .....	56
圖 5-1-4 台灣地區 2003 至 2007 年內插垂直速度場 .....	56

圖 5-2-1-1 經動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差(左)及速度場誤差(右).....	59
圖 5-2-1-2 經動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差(左)及速度場誤差(右).....	59
圖 5-2-2-1 經動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差(左)與速度場誤差(右).....	64
圖 5-2-2-2 經動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差(左)與速度場誤差(右).....	64
圖 5-2-2-3 台灣地區於 ECEF 坐標系統下之三個主變形量與變形方向 .....	65
圖 5-2-2-4 台灣地區二維平面上之變形行為 .....	67
圖 A-2-1 FLNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XI
圖 A-2-2 YMSM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XI
圖 A-2-3 KDNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XII
圖 A-2-4 KMNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XII
圖 A-2-5 MZUM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XIII
圖 A-2-6 PKGM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XIII
圖 A-2-7 TMAM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XIV
圖 A-3-1 FLNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XVI
圖 A-3-2 YMSM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XVI
圖 A-3-3 KDNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XVII
圖 A-3-4 KMNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XVII
圖 A-3-5 MZUM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XVIII
圖 A-3-6 PKGM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XVIII
圖 A-3-7 TMAM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列 .....	XIX



# 表目錄

表 1-1 地表參考系統與地表參考框架之比較.....	6
表 3-3-1 動態轉換模型參數估計成果 .....	33
表 3-3-2 二組模型轉換後之坐標與速度場誤差 .....	35
表 4-1-1 GPS 資料介紹 .....	39
表 4-3-1 KDNM 站在 2001 年至 2007 年 Y 方向速度場估計 .....	50
表 4-3-2 台灣追蹤站 2001 至 2007 年 GPS 序列資料分析處理前後精度比較表 ...	51
表 5-1-1 台灣追蹤站在 2003.2 與 2007.1 時刻下的坐標與速度場 .....	54
表 5-2-1-1 動態轉換模型參數估計成果(全區) .....	57
表 5-2-1-2 二組動態框架轉換模型轉換後之坐標與速度場誤差 .....	59
表 5-2-2-1 動態轉換模型參數估計成果(五站) .....	62
表 5-2-2-2 二組動態框架轉換模型轉換後之坐標與速度場差誤差 .....	64
表 A-1-1-1 FLNM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果 .....	I
表 A-1-1-2 FLNM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果 .....	I
表 A-1-1-3 FLNM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果.....	II
表 A-1-2-1 YMSM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果 .....	III
表 A-1-2-2 YMSM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果 .....	III
表 A-1-2-3 YMSM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果.....	III
表 A-1-3-1 KDNM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果 .....	IV
表 A-1-3-2 KDNM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果 .....	IV
表 A-1-3-3 KDNM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果.....	IV
表 A-1-4-1 KMNM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果.....	V
表 A-1-4-2 KMNM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果.....	V
表 A-1-4-3 KMNM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果 .....	VI
表 A-1-5-1 MZUM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果 .....	VII
表 A-1-5-2 MZUM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果 .....	VII
表 A-1-5-3 MZUM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果 .....	VII
表 A-1-6-1 PKGM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果.....	VIII
表 A-1-6-2 PKGM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果.....	VIII
表 A-1-6-3 PKGM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果 .....	VIII
表 A-1-7-1 TMAM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果 .....	IX
表 A-1-7-2 TMAM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果 .....	IX
表 A-1-7-3 TMAM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果 .....	IX

# 第一章 緒論

## 1-1 研究背景

大地測量的主要目的之一，是盡可能準確估計地表點位的空間位置，但由於地球並非一個規則球體，為了估計地表點位的三維空間資訊，必須要定義一個表示地球形狀的參考系統作為地表點位的參考依據，因此衍生地表參考系統 ( Terrestrial Reference System, TRS ) 的概念，用以描述地表點位的空間位置。然而地表參考系統本身為一抽象的概念，在實際套用地表參考系統定義時，則需要經由一些觀測方法及技術進而獲取控制點位的三維空間位置，並以數學模式和地表參考系統之基本定義作連結，此即為地表參考框架 ( Terrestrial Reference Frame, TRF )。換言之，地表參考框架乃是利用測量技術所求出的觀測量，將地表參考系統本身的抽象、不確定性予以具體化。地表參考系統與地表參考框架的示意圖如圖 1-1 所示。圖 1-1 中，紅色三角點代表空間中的待測定點位，藍色圓點代表根據地表參考系統定義，經測量技術所得到之地表控制點位，待測點位的空間位置決定，需藉由地表控制點位以測量的方式，進而估計待測點位的坐標。

由於地表參考框架是經由地表點位的觀測量而來，當點位變動時，所定義之框架亦會隨之改變，因此在考量地表實際動態行為的情況下，可透過全球定位系統 ( Global Positioning System, GPS ) 對地表控制點位進行長期連續觀測，獲取地表空間資訊，進而建立一組動態坐標參考框架用以描述框架之變動行為。然而依據不同參考系統或不同測量技術所定義之地表參考框架，彼此間通常存有系統性的差異，因此在實用上，可藉由動態框架轉換模型建立不同框架間之動態轉換關係。在不同參考框架下之地表點位坐標與速度場，可透過動態框架轉換模型估計轉換參數，經過轉換之後，而擁有共同的參考基準，進行後續之應用。

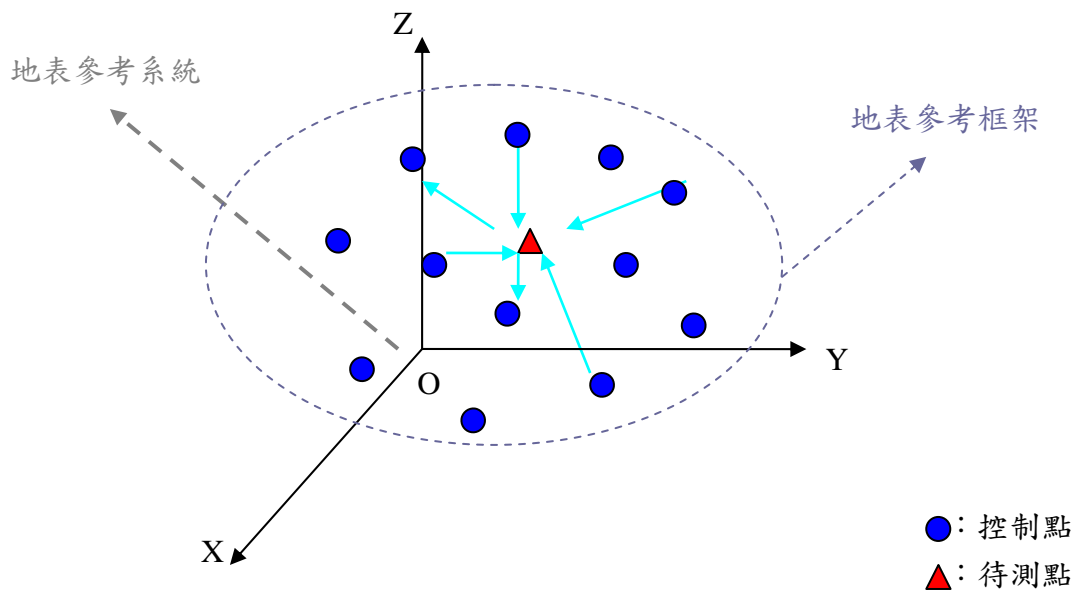


圖 1-1 地表參考系統與地表參考框架

地表參考框架和地表參考系統之間存在細微的差別，由於地表參考系統是定義一個恆定且抽象的系統，而地表參考框架則是可調整、具有彈性的架構，用來將參考系統實際體現。因此根據使用者所定義的參考系統只有一個，但是使用不同的測量定位技術或在不同的假設條件下，可以存在許多不同的參考框架來描述所定義之系統。

在分析使用大地測量技術所獲得的資料前，首先都要了解它本身地表參考系統的定義。根據不同之坐標參考系統定義或是在同一坐標參考系統定義下，但經由不同觀測技術的情況下，會衍生出各種不同的地表參考框架。而為使全球各地使用者能有一共同的參考基準，國際大地測量及地球物理協會( International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG )和國際大地測量協會( International Association of Geodesy, IAG )對在地球科學領域方面的應用上採用唯一的一組地表參考系統，稱為國際地表參考系統( International Terrestrial Reference System, ITRS )，ITRS 的原點定義在地球的質量中心，包括海洋與大氣；它的長度單位為公尺(SI 制)，對地心區域框架來說，尺度與 TCG ( Temps-coordonnée géocentrique )時間坐標一致 ( Altamimi et al., 2002 )。

除了 ITRS 之外，WGS84 ( World Geodetic System of 1984 )亦是定義地表空間位置的坐標參考系統。WGS84 坐標系統由美國國防部之 National Imagery and Mapping Agency ( NIMA )組織所建立及維護，其原點定義在地球質量中心，Z 軸與國際地球旋轉組織( International Earth Rotation Service, IERS )所定義之慣用地球北極( Conventional Terrestrial Pole, CTP )方向相平行，X 軸為 IERS 所定義之零子午圈(首子午圈)相平行之參考子午面與慣用地球北極赤道平面之交線方向，Y 軸則為與 X 軸垂直並在赤道面上而與 X、Z 軸形成右旋地心地固直角坐標系統之方向(東經 90 度之方向)(曾清涼、儲慶美，1999)。

在選定合適之地表參考系統後，便可透過地表參考框架將地表參考系統的概念予以實現。自 1980 年起，由於衛星大地測量技術的發展，地表點位的觀測精度大幅提昇，依據同一地表參考系統定義所建立但具有更新技術且高品質的地表參考框架已被逐步建立起來( Altamimi et al., 2002 )。目前最具代表性之一組動態參考框架是源自於 IERS 所提供之國際地表參考框架( International Terrestrial Reference Frame, ITRF )。在定義 ITRF 時是採用一組基本測站所組成之全球網，該類測站之坐標值須採用最精確之空間定位技術予以測定。在考慮點位會受地殼變動之影響而產生坐標改變之現象，ITRF 坐標參考框架除了公佈一組地面測站坐標值之外，還提供測站坐標變化速度場。ITRF 的基本概念是使用大地測量技術所得到的觀測值，結合測站位置和速度場的計算，加以綜合分析，定義出一個完整的資料組。由於測量定位技術的日益精進，如：極長基線干涉術( Very Long Baseline Interferometry, VLBI )、衛星雷射測距( Satellite Laser Ranging, SLR )、月球雷射測距( Lunar Laser Ranging, LLR )、全球定位系統( Global Positioning System, GPS )以及 DORIS ( Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite )等多項之高精度定位技術，其應用需要結合在一組定義良好之全球性坐標參考系統。如不同空間定位技術所建立之各組坐標資料( Sets of Station Coordinates, SSCs )，能予以綜合分析後，將各組之坐標成果資料合併形成一個單一之資料組，則此一包含



測站坐標與地球定向參數( Earth Orientation Parameters, EOP )之地球參考系統即可定義完成並視為一個大地應用所需之參考框架( reference frame ) ( Altamimi et al., 2002 ; 曾清涼、儲慶美，1999 )。

ITRF 可利用 IGS ( International GNSS Service ) 公佈之全球 GPS 測站之連續追蹤資料，而 IGS 分析中心亦可採用 ITRF 所公佈之坐標進行 GPS 之軌道計算 ( Boucher & Altamimi, 1996 )。現階段當利用 GPS 進行高精度之定位應用時，由於 GPS 能夠提供公分等級之全球性測站坐標資料，因此 ITRF 之採用便顯現出其必然性。ITRF 所使用的網形是由分佈在全球各地的測站所構成，計算出來為最準確且最廣大的解算成果，其中 ITRF2000 控制網的測站約 800 個，分佈在全球約五百處，其中精度比較高的測站主要分佈於北美與西歐。ITRF2000 全球框架下約有 50% 的測站位置精度優於  $\pm 1$  cm，以及大約 100 個測站之速度場精度在  $\pm 1$  mm/yr 以下 ( Altamimi et al., 2002 )。

此外，IGS 透過分佈世界各地的 GPS 測站所建構成之全球控制網，估計得到之每週解算成果 ( Ferland, 2004 )，以及 World Geodetic System ( WGS84 ) ( National Imagery and Mapping Agency, 2000 ) 所獲得之地表點位參考坐標，亦可視為全球性之坐標參考框架。

除了上述之全球參考框架外，區域性的地表參考框架也在世界各地逐漸建立起來。美國於 1974 至 1986 年間進行大量的測量施測計畫後，採用了 1,500,000 個以上之大地觀測量進行平差解算，根據解算得到之精密成果用以建立北美洲大地基準 ( North American Datum of 1983, NAD83 ) ( Schwarz ed., 1989 )；歐洲在 IAG 所屬之 EUREF ( European REference Frame ) 工作小組於 1989 年規劃 GPS 外業測量計畫，進行為期二週的觀測，藉此建構歐洲之三維大地基準，其最後解算成果用以定義 European Reference Frame 89 ( EUREF89 ) ( Overgaauw et al., 1994 )；澳洲在 1994 年對澳洲框架網 ( Australian Fiducial Network ) 及國家基本網 ( Australian

National Network)，利用 GPS 測定其在 ITRF92 框架下之坐標值，另外再加上於其它 GPS 控制網上施測 GPS 所得到之成果，共同進行平差計算，所獲得之精密坐標，作為澳洲大地基準(Geocentric Datum of Australia 1994, GDA94) ( Steed, 1995 )；台灣目前所採用之地表參考框架，是內政部於 1995 年至 1997 年之間，由台灣地區 8 個衛星追蹤站聯合 51 個分佈於全球之 IGS 國際追蹤站一起進行追蹤站網形分析，該坐標參考框架是架構於 ITRF94，並以這 8 個站的坐標作為框架，約制台灣 105 個一等衛星控制點進行網形平差，最後解算的坐標成果，用以建立台灣地區大地基準(Taiwan Datum 1997, TWD97) ( Chang & Tseng, 1999; 曾清涼、儲慶美，1999)。這些地表坐標參考框架之目的皆是希望能夠提供該地區最精確且符合現況之坐標參考框架，以作為求解地表空間資訊時之可靠依據。地表參考系統與地表參考框架基本定義整理如表 1-1 所示。



表 1-1 地表參考系統與地表參考框架之比較

地表參考系統	地表參考框架
<b>定義</b> 定義坐標系統之原點、三軸方向、單位長度，用來表示地球形狀作為地表點位之參考依據。	根據地表參考系統的定義，使用不同測量定位技術，觀測地表參考點位，解算得到之地表點位空間資訊。
<b>形態</b> 抽象、不確定的概念	實際應用之空間點位觀測值
<b>例子</b> ITRS WGS84	全球地表參考框架： - ITRF2000 - IGS 全球控制網 - WGS84 地表點位參考坐標 區域地表參考框架： - NAD83 - EUREF89 - GDA94 - TWD97



依據板塊構造學說，地球表面可分為數個剛體板塊，地殼板塊會受到地球內部具流性的物質帶動而相互運動，並以每年數公厘至數公分不等之速率互相移動中，造成全球性的板塊運動，板塊之間的運動行為模式見圖 1-2，圖中紅色箭頭代表板塊運動的速度場。由板塊運動行為可以看出，在不同區域下所受到之板塊作用力並不一致，在不同地區的地表點位會依據所屬板塊運動的方式，而有不一樣的動態行為，導致地表上任一點位之空間位置的變動情形亦有所差異( DeMets et al., 1990 )。

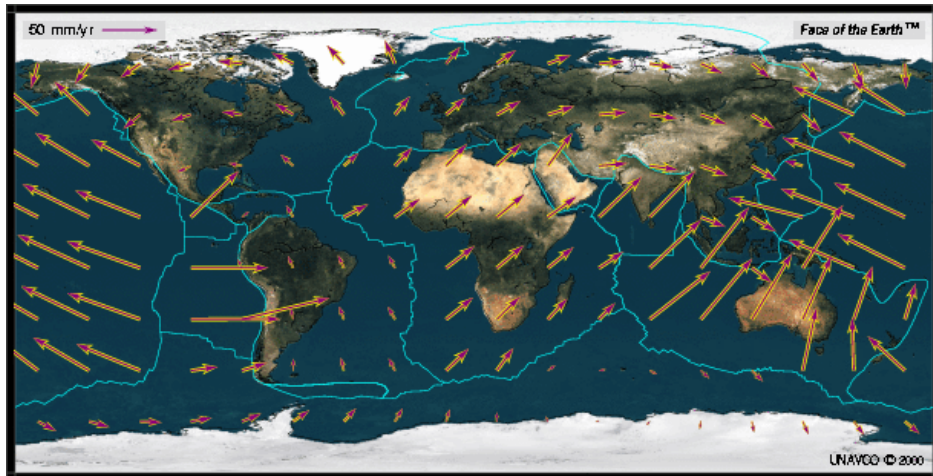


圖 1-2 全球板塊運動行為( UNAVCO 2008/online/ )

由於地表參考系統是透過地表參考框架之觀測量來予以體現，而地表參考框架通常是由觀測所得之參考點位坐標值來定義，然而地球板塊隨時都在運動，點位位置也隨時間而變化。近年來，由於高精度之大地測量技術應用，可偵測出地表點位的細微變動，因此在考慮地表參考點位移動的情況下，必須加以考量地表參考框架之時間變化，因此衍生出時間動態坐標參考框架之概念。自 1988 年起，依據 ITRS 所定義出之 ITRF88，即以點位坐標隨時間變動的觀念，加入參考點位坐標的速度場的動態坐標框架。ITRF 其中包含速度場的資料，也就是在構成 ITRF 網形中的每一測站都具有速度向量，用來表示它由於地殼板塊運動所造成的測站所在點位的時間相依( time-dependent )絕對位移( Soler, 1998 )。

隨著動態框架的建立，使用者可以藉由參考框架的動態行為進而推估在此參考框架下地表點位的動態行為。前述提到地表點位會受到全球性的板塊運動影響，導致點位位置的改變，尤其在一些板塊交接處，其地表因板塊運動導致之變形行為更為明顯。台灣地區位處西太平洋海域歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處，東南面對琉球弧溝系統( Ryukyu arc-trench system )，西臨呂宋島弧-馬尼拉海溝系統( Luzon arc-Manila Trench system )，板塊運動的結果造成菲律賓海板塊隱沒到歐亞板塊下方，而部分的歐亞板塊也隱沒在周遭附近因板塊運動而形成的地殼之下( Yu et al., 1997; McIntosh et al., 2005 )。此外由於板塊運動過程之相互擠壓作

用，導致此區域明顯地殼變形與斷層活動，依近年來相關研究結果顯示，台灣地區在東部縱谷區域每年有高達 20~30 mm 的相對運動( Yu et al., 1997 )；而在台灣西北部的苗栗三義地區，則是可明顯觀測到由板塊運動所造成的地形變化及斷層活動( Ota et al., 2006 )。另外從台灣本島和周圍區域所發生的規模大小不一的地震，亦可以看出地殼運動的現象，例如近年來所發生規模最大及損傷最嚴重的集集大地震( 1999 年 9 月 21 日， $M_w=7.6$ ，其中  $M_w$  代表地震矩規模( Moment Magnitude ) )，即在台灣的中部地區，沿車籠埔斷層約八十公里的周遭範圍造成顯著的地表破裂情形( Chen et al., 2007 )。

根據台灣地區關於地殼板塊運動的相關研究顯示，在不同區域下所受到之板塊作用力並不相同，導致地表變化有所差異，例如：在中央山脈區域每年有 18~35 mm 的相對運動，海岸山脈區域每年則有 28~68 mm 的相對運動( Yu & Kuo, 2001; Hsu et al., 2003 )。藉由台灣地區 GPS 觀測資料解算得到之測站速度場，可獲得台灣地區的地表運動行為模式，是屬於西北-東南方向夾縮的運動方式。圖 1-3 與圖 1-4 分別代表台灣地區相對於歐亞板塊的運動方向以及台灣地區在 1993 至 1999 年之間的 GPS 測站速度場，從圖 1-3 與圖 1-4 即可看出台灣地表點位運動的複雜程度，東、西部的速度場方向與大小皆有所差異。透過上述這些頻繁且活躍的板塊運動現象證實台灣地區存在複雜的地表變形行為，由於台灣地區地表點位變動行為顯著，連帶的，用來定義此區域地表坐標框架的參考點亦隨之變動，因此於台灣地區建立動態框架轉換模型有其必要性。

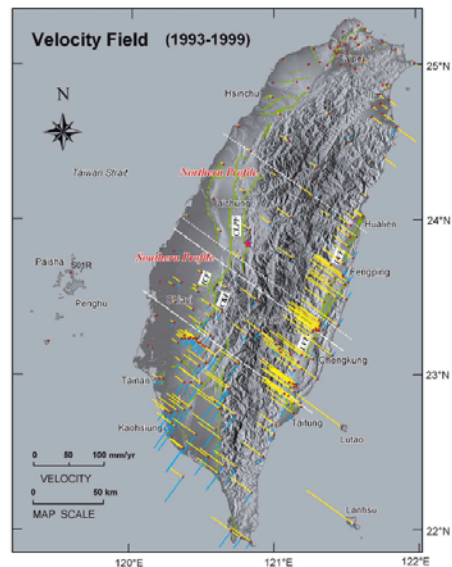
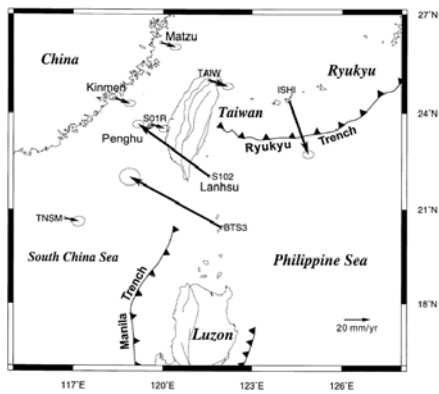


圖 1-3 台灣地區相對於歐亞板塊之速度場 (Yu & Kuo, 2001)

圖 1-4 台灣地區 1993 至 1999 年速度場 (Hsu et al., 2003)

## 1-2 研究動機與目的

一般在比較不同框架下的坐標與速度場時，可藉由動態框架轉換模型連結框架間之動態幾何關係，使其具有共同的參考基準。然而因板塊運動造成地表顯著變動的地區(如：台灣)，其所依據之地表參考框架，框架本身可能會含有因地殼變動導致地表產生不均勻的變形行為。因此，在坐標參考框架變異的情況下，如何建立一套完整、嚴謹的動態框架轉換參數估計的處理程序，藉由合適之動態框架轉換模型來模式框架的動態行為，進而建立框架間正確的動態幾何關係，是本研究所要探討的重點。

目前一般常用之動態框架轉換模型，大多是以相似轉換作為基礎 (如：Soler, 1998; Altamimi et al., 2002)，假設不同框架間僅有存在一個均勻尺度、旋轉和平移變化的關係。然而在實際應用上，框架之間並非都是均勻縮放的尺度變化關係，其中可能含有不同方向的非均勻變形，尤其是在因板塊運動造成地表劇烈變化的區域，例如位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交接處的台灣地區，或是北美板塊與太平洋板塊之間的區域，都會因板塊運動的關係，造成不同地殼板塊上的地表點位

產生相對運動( Yu et al., 1997; Snay, 2003 )，因而導致參考框架含有變形行為。因此，當框架間含有非均勻縮放的變形行為時，如果沒有藉由精確可靠的地表控制資訊，及選用合適之動態框架轉換模型進行參數估計，便無法有效描述出框架間的動態幾何關係，進而估計出正確的地表動態行為。本研究考慮實際地表可能發生的物理現象，造成影響框架動態行為的可能原因，透過完整的 GPS 觀測資料處理程序及嚴謹之數學模式進行動態框架轉換模型參數估計，過程中並不設限參考框架的變形行為，進而建立正確動態框架之間的轉換關係。

### 1-3 研究方法

本研究首先將建立動態框架轉換模型，其中包含傳統的動態相似轉換模型與適用於變形區域的動態仿射轉換模型，並針對 GPS 序列資料進行分析與處理，提升序列資料的品質，進而獲得較可靠之地表資訊，以應用於動態框架轉換模型估計轉換參數。目標為建立一套完整、嚴謹的方式，進行動態框架模型的參數估計，藉以獲得可靠的數值成果。在實際資料處理方面，以台灣追蹤站 2001 年至 2007 年的 RINEX 資料作為分析基礎，使用 GPS 資料處理軟體( GAMIT & GLOBK )進行處理，獲得台灣追蹤站於 IGS 框架下之初步成果，並對解算得到之序列資料，作進一步的分析，目的在提升資料品質與可靠性，作為後續參數估計之資料來源依據。最終處理解算獲得在不同時刻下之坐標與速度場，再用來進行動態框架轉換模型數值分析實驗，比較動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型的轉換參數估計成果，評估參數顯著性及轉換成果，藉此探討動態框架轉換模型的於變形框架下之適用性。在進行參數估計時，採用嚴密的數學模式來進行平差計算，包含廣義平差模型與虛擬觀測平差模型，避免因為使用不嚴謹之平差模式，造成參數估計成果的不正確。本研究所進行之研究流程如圖 1-5 所示

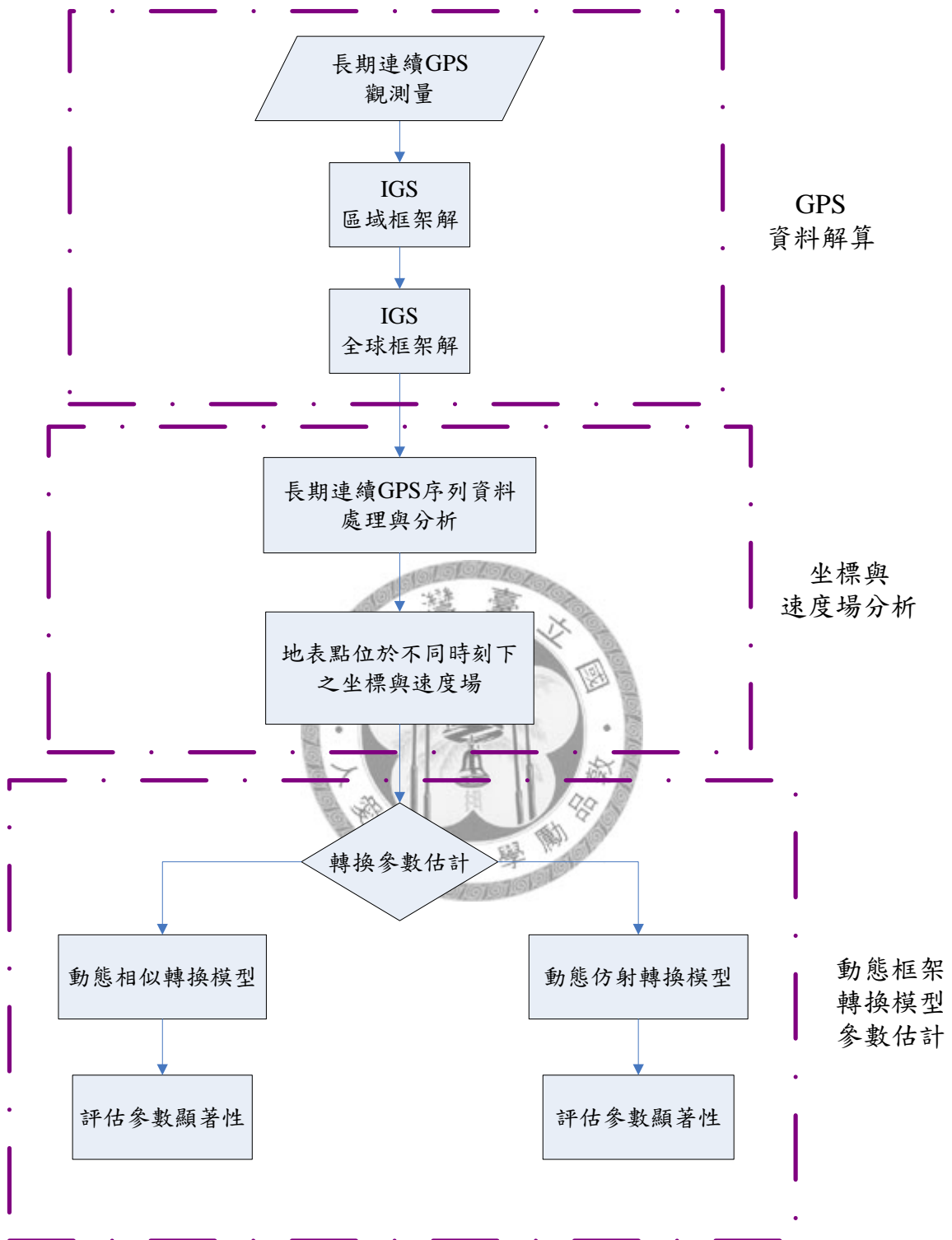


圖 1-5 研究流程圖



## 1-4 論文架構

本論文共分為六章。第一章緒論，介紹研究背景，研究動機與目的，並提出研究之方法。第二章為文獻回顧，介紹動態框架轉換模型的相關研究，包含目前常見的動態框架轉換模型及不同框架間之相關應用。第三章為動態框架轉換模型，介紹適用於均勻縮放框架行為之動態相似轉換模型以及適用於非均勻縮放框架變形行為之動態仿射轉換模型，以及說明參數估計時所採用之平差模式，包含廣義平差模型與虛擬觀測平差模型，並透過數值模擬實驗比較動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型之間的差異，驗證模型之可行性。第四章為 GPS 資料處理與分析，透過不連續運動、粗差偵測等方式，對長期連續 GPS 序列資料進行處理，以提升坐標與速度場的品質，並藉由實際資料的處理範例，說明整個分析處理流程。第五章為實際資料數值分析，針對台灣地區追蹤站在 2001 至 2007 年間 GPS 觀測資料為基礎，藉由不同動態框架轉換模型進行轉換參數估計，比較不同轉換模型之參數顯著性及轉換成果，探討在框架含有變異行為時的模型適用性。第六章為根據本研究的數值分析成果所作之結論及建議。

## 第二章 動態框架轉換模型相關研究

### 2-1 動態框架轉換模型

由於地球內部和外部之地質動態過程，引發地殼板塊運動，產生地殼表面的變形行為，點位位置隨著時間的變化及板塊運動的方向，而發生位置變化。一般傳統的靜態坐標轉換已經無法精確表達出點位坐標與地表參考框架之幾何關係。因而衍生出動態框架轉換的數學模型，即在原本的靜態模型參數外，另外加上原始參數的時間相依( time-dependent )變化，用來描述動態框架間坐標與速度場之轉換關係( Han & van Gelder, 2006 )。

然而動態相似轉換模型可能因為假設條件、或是參數估計方式之不同，而導致嚴密程度不一的轉換模型。如：Soler (1998) 假設框架間的旋轉是屬於微小變化的情況下，並且將地表點位之動態行為假設為一線性之運動過程，點位速度場為固定常數值，於此條件下推導轉換模型之數學式，因此在使用動態框架轉換模型估計參數率( Parameter Rate )時，以線性運動之方式進行參數率估計。Altamimi et al. (2002) 認為在一般正常情況下，板塊的運動過程屬於連續緩慢的行為。因此在地表沒有劇烈變化的情形下，假設框架間之尺度微變量和旋轉量皆為微小數值，在動態框架轉換模型的數學公式推導的過程中，將旋轉量與尺度微變量之乘積予以忽略，對於參數估計的結果並不影響，於是根據上述的假設條件，建立動態框架轉換模型。該模型在進行不同框架的轉換參數估計時，使用線性平差的方式，解算轉換參數。Han & van Gelder (2006) 考慮參考點位在不同框架、不同時刻及剛體運動情況下之動態框架轉換關係，對參數沒有進行任何假設，推導動態相似轉換模型的數學式，以嚴謹之數學模式連結不同坐標參考框架間之動態幾何關係，並提出不變函式( Invariant function )的概念應用於動態相似轉換模型的參數估計上，

其研究成果顯示，在嚴謹的數學模式下，不論轉換參數數值是否限定範圍，皆能正確估計轉換參數。

## 2-2 全球性參考框架轉換之應用

全球性的地表參考框架可提供使用者，考量全球性地表動態行為點位之坐標與速度場，進而獲取所需地表點位之空間資訊。依據不同測量定位技術或是不同時期所定義之全球性參考框架，可透過動態框架轉換模型，估計不同框架間之轉換參數，獲得框架之間的動態轉換關係。

ITRF2000 結合了從地殼板塊運動模型而來之空間大地解算成果。利用分佈全球大約 500 個地點，包含約 800 個測站所建構之 ITRF2000 參考框架，提供了高精度之測站資訊。近年來，國外學者透過動態框架轉換模型進行不同 ITRF 版本的轉換參數估計，針對 ITRF2000 和 ITRF97 以及 ITRF2005 與 ITRF2000 不同框架的轉換參數估計，獲得新舊框架之間的轉換關係( Altamimi et al., 2002; Altamimi et al., 2007 )。即便在不同參考框架下的坐標與速度場，也可以藉由轉換參數進行轉換，獲得精確之轉換成果，依附在共同的參考基準下，進行後續應用。

## 2-3 全球性與區域性參考框架轉換之應用

對於使用特定區域的地表空間資訊使用者來說，採用區域坐標參考框架有時會比全球參考框架更能夠描述該區域之地表空間資訊與動態行為模式，因為它是針對該地區的地表形狀、板塊的運動行為模式所定義之地表參考框架，在此定義下之地表的空間資訊，能夠比在全球框架的定義下所描述該區的地表資訊，更貼近實際的地表現況，例如：北美的 NAD83、歐洲的 EUREF89 等。動態框架轉換模型於全球性與區域性的地表參考框架的應用方面，如：Soler & Snay ( 2004 ) 針對 ITRF2000 與 NAD83 二個框架之間的坐標與速度場轉換，估計轉換參數，提供給使用者進行轉換的參考依據。

在全球性參考框架與區域性參考框架的轉換應用方面，主要是考量整體框架間的動態行為來進行轉換，因此框架的動態行為屬於大範圍區域。然而在框架中的部分區域，可能無法藉由整體框架間的轉換，獲得符合該區域的點位動態資訊。Snay (2003) 的研究中發現，位於太平洋中的小島，在水平速度場上，相對於北美板塊，每年有高達數公分之相對位移，但使用 NAD83 與 ITRF2000 之間所估計得到之轉換參數進行轉換，卻無法正確呈現太平洋區域中點位與北美板塊之相對運動情形。因此針對太平洋地區的框架轉換，提出分區轉換的方式，將太平洋區域分成二個地表參考框架，分別是位於太平洋地殼板塊( Pacific tectonic plate )的 NAD83 框架與馬里亞納地殼板塊( Mariana tectonic plate )的 NAD83 框架，之後再用這二個區域框架分別與 ITRF2000 進行轉換，估計不同框架間轉換參數，描述框架間之動態幾何關係。

除了大範圍的區域框架轉換外，動態框架轉換模型亦可應用於小範圍的區域框架上。如：台灣地區定義 TWD97 作為台灣大地參考基準，點位坐標參考於 ITRF94，屬於區域性的參考框架。沈三齊(2005)針對台灣地區中，陽明山(YMSM)、金門(KMNM)與馬祖(MZUM)三個台灣追蹤站，探討框架變換對台灣區域所造成之影響，使用 Molodensky-Badekas 動態框架轉換模式，估計 ITRF2000 與 TWD97 於 1997.0 時刻下之轉換參數，獲得二個框架間的轉換關係。邱元宏、史天元(2008)探討在不同版本之 ITRF 框架中的共同測站，點位絕對位置之變化情形，並就時間因素與台灣地區 GPS 衛星追蹤站於 TWD97 之坐標成果可能因不同框架版本而造成之系統誤差進行分析。

根據上述研究得知，動態框架轉換模型能夠有效連結不同參考框架間的動態幾何關係，進而推估框架下地表點位的運動行為趨勢，尤其是應用於大範圍區域的框架轉換方面，具有相當的成效。目前傳統上所採用之動態框架轉換模型大多以相似轉換為基礎，藉由一個尺度、三個旋轉與三個平移參數及其參數率，用以描述框架之間轉換關係。但是當地表內部發生相對不均勻的變動時，該區域所依

據之坐標參考框架，框架的動態行為勢必會跟著改變。此時，若使用動態相似轉換模型可能無法有效建立框架間的動態關係。因此，當參考框架含有非均勻的變形行為時，可以考慮採用適用於變形區域的動態框架轉換模型，例如：以仿射轉換為基礎的動態框架轉換模型，該模型同時考量地表點位的變形行為及框架之間的轉換關係，並透過主軸元素來描述不同方向的尺度變化，藉此模式框架間之變形行為，可用於非均勻之變形區域下，建立變形框架之間的轉換關係。



## 第三章 動態框架轉換模型

本章主要分成三個部分，第一個部分是介紹二種目前常見之動態框架轉換模型，第一種是適用於框架具有均勻變形行為之動態相似轉換模型，第二種是適用於非均勻變形區域之動態仿射轉換模型；第二個部分是參數估計的部分，說明在進行動態框架轉換模型參數估計時，所採用之嚴密平差數學模式，其中包含廣義平差模型與虛擬觀測平差模型，以及在動態仿射轉換模型中進行參數估計時的特徵值參數誤差傳播方式；第三部分為數值模擬實驗，假設在框架含有非均勻變形行為的情況下，估計不同動態框架轉換模型的參數估計成果及評估模型的適用性。

### 3-1 動態相似轉換模型 (Time-variant similarity transformation model)

#### 3-1-1 數學模型

雖然地表參考系統的定義屬於恆常不變，但依據不同觀測技術及實際體現方式所建立的地表參考框架之間仍會存在系統性的差異。目前在實用上多採用以相似轉換 (Similarity Transformation) 為基礎的坐標轉換模型，藉以建立兩種不同框架間之動態幾何關係。在典型的相似轉換公式中，利用七個獨立參數轉換描述在二個參考框架所定義的尺度、旋轉和平移的關係(圖 3-1-1)。在圖 3-1-1 中，TRF-A 與 TRF-B 分別代表二個不同的坐標參考框架，其中二個框架間的轉換關係可以透過一個均勻尺度參數、三軸的旋轉參數及二個框架原點之間的平移參數來描述。其轉換模式可表示如(3.1.1)式。

$$\bar{X}' = \sigma[R]\bar{X} + \bar{T}' \quad (3.1.1)$$

其中  $\bar{X}$  代表點位在原始框架下的坐標向量、 $\bar{X}'$  代表轉換後框架下的坐標向量， $\sigma$  代表兩框架間的尺度因子， $[R]$  代表具有三個獨立參數  $r_x$  (對 X 坐標軸旋轉)、

$r_y$ (對 Y 坐標軸旋轉)、 $r_z$ (對 Z 坐標軸旋轉)的旋轉矩陣， $\bar{T}' = \{T'_x, T'_y, T'_z\}^t$  代表在兩框架間原點的平移向量。

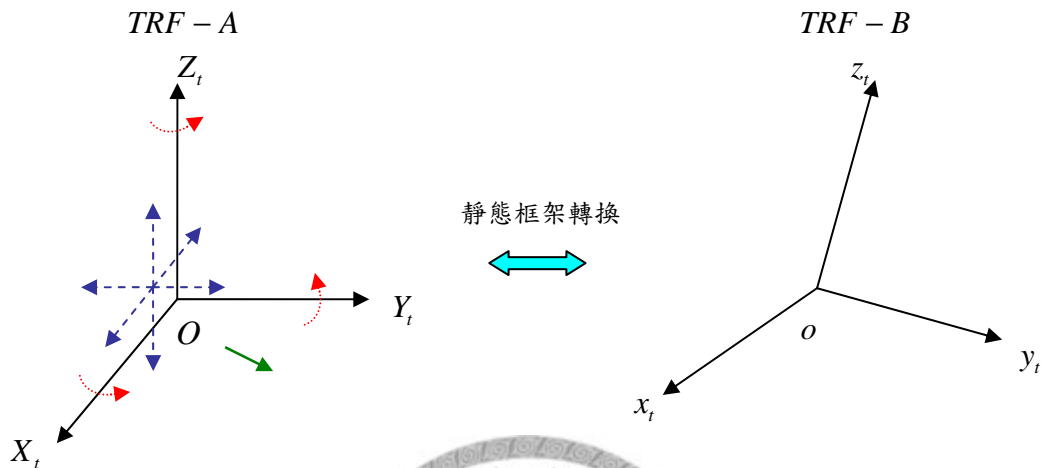


圖 3-1-1 不同參考框架間之靜態坐標轉換

靜態坐標轉換模型於實際應用上，可透過選取兩組坐標框架中之適當參考點，以求取彼此間之轉換參數，並利用這些參數進行不同框架間點位之坐標轉換。然而根據板塊運動理論，地表點位並非固定，會隨著時間而變動，因此其所依據之參考框架亦會跟著改變，原本框架間屬於靜態的轉換關係，會隨著地表行為的變動，轉變為動態框架。不同坐標參考框架之動態行為如圖 3-1-2 所示。在圖 3-1-2 中，TRF-A 與 TRF-B 分別代表不同之坐標參考框架，從  $t_0$  時刻到  $t$  時刻，TRF-A 框架與 TRF-B 框架皆有本身框架之動態行為。當考慮二個參考框架皆隨著時間而變動時，可透過動態框架轉換模型來連結二個參考框架的動態幾何關係。

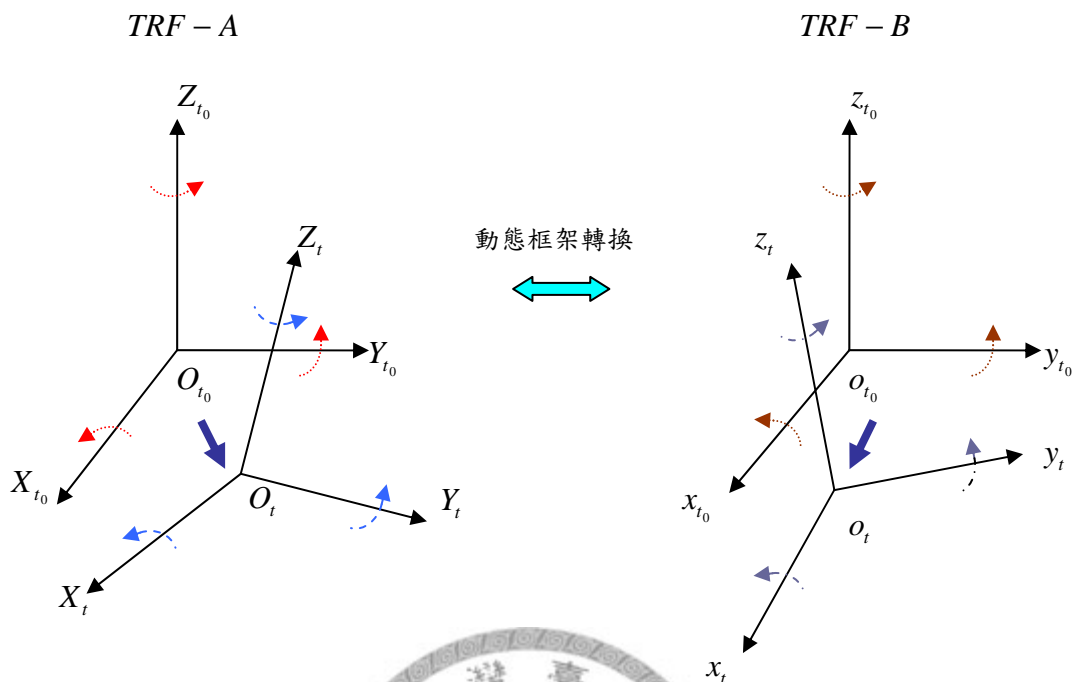


圖 3-1-2 不同參考框架間之動態坐標轉換

為了描述框架的動態行為，可藉由對坐標轉換公式中的參數進行偏微分，得到速度場轉換公式(3.1.2)式。

$$\bar{V}' = \dot{\bar{X}}' = (\dot{\sigma}[R] + \sigma[\dot{R}])\bar{X} + \sigma[R]\dot{\bar{X}} + \dot{T}' \quad (3.1.2)$$

其中  $\dot{\bar{X}}'$  代表轉換後框架下的速度場， $\sigma$  代表尺度速率， $[\dot{R}]$  代表旋轉速率， $\dot{\bar{X}}$  代表轉換前框架的速度場， $\dot{T}'$  代表平移速率。

(3.1.1)式與(3.1.2)式即代表動態相似轉換模型坐標與速度場轉換公式，作為不同參考框架之間轉換。

### 3-1-2 參數估計方式

在動態相似轉換模型中，一共包含 14 個參數( 7 個參數  $\sigma [R] \bar{T}$  加上 7 個參數率  $\dot{\sigma} [\dot{R}] \dot{\bar{T}}$  )，然而這 14 個參數並非全部獨立，因為參數率是由參數考量時間演變而來，參數與參數率之間具有相依性( Han & van Gelder, 2006 )。假如使用最小二乘平差法一次解算，用在(3.1.1)式與(3.1.2)式中，法方程式中的秩(rank)只有



7，而非 14。為了避免在求解參數和參數率時有秩虧的情形發生，在本研究中使用分段式的參數估計方式，先估計 7 個參數，再估計 7 個參數率。

#### a. 參數估計

根據動態相似轉換模型中的坐標轉換公式((3.1.1)式)和速度場轉換公式((3.1.2)式)，可用以進行轉換參數與參數率之估計。在坐標轉換公式中可看到等式左邊  $\bar{X}'$  為轉換後坐標向量，等式右邊的  $\bar{X}$  為轉換前坐標向量，二者分別代表在不同框架下的點位坐標觀測量。由於坐標觀測量是經過測量技術獲得，而觀測量本身具有誤差，因此在平差的過程中，應該考慮觀測量的精度，作為平差時權矩陣的參考依據。然而一般平差常用的間接平差模型，在處理觀測量時，其觀測量的偏微分係數矩陣須為單位矩陣，但是在動態相似轉換模型中，由於坐標轉換公式為觀測量的非線性函式，等式二邊都含有觀測量，使用間接平差模型，勢必會將等式右邊的觀測量視為常數，而不把它視作觀測量處理。因此從嚴謹的數學觀點來看，應於平差的過程中同時考慮等式左右二邊之觀測量精度。所以在參數估計時，採用廣義平差模型( General Least Squares Model ) ( Mikhail & Ackermann, 1976, pp. 110-115 )作為平差的數學模型。此模型是將轉換前後的坐標和速度場皆視為觀測量，並考慮其精度作為平差時觀測量權矩陣之依據。它有別於一般傳統平差的處理方式，將等式右邊的坐標觀測量視為常數，不考慮其精度，直接進行平差。廣義平差模型在進行參數估計時，可以更完整、嚴謹地描述觀測量在平差過程中的角色。

廣義平差模型之平差模式如下：

$$F(l, x) = 0 \quad (3.1.3)$$

其中  $l$  代表觀測量， $x$  代表參數。

(3.1.3)式經線性化後，可得

$$A(l + v) + B\Delta = d \quad (3.1.4)$$

其中  $A = \frac{\partial F}{\partial l}$ ，代表觀測量的偏微分係數矩陣， $B = \frac{\partial F}{\partial x}$ ，代表參數偏微分係數矩陣， $v$  代表觀測量的殘差(residuals)， $\Delta$  代表參數  $x$  的改正數， $d$  代表線性化之常數向量。

將(3.1.4)式重新整理後，可得到

$$Av + B\Delta = f \quad (3.1.5)$$

其中

$$f = d - Al \quad (3.1.6)$$

廣差平差模型中權矩陣的給定方式為

$$W_e = Q_e^{-1} = (AQA')^{-1} \quad (3.1.7)$$

其中  $Q$  代表觀測量的餘因子矩陣(cofactor matrix)。

根據最小二乘平差原理，令  $v'W_e v$  為最小，可推導出(3.1.8)式

$$(B'W_e B)\Delta = (B'W_e f) \quad (3.1.8)$$

上式可簡化為

$$N\Delta = t \quad (3.1.9)$$

其中  $N = B'W_e B$ ， $t = B'W_e f$ 。

$$\Delta = N^{-1}t \quad (3.1.10)$$

殘差的計算方式如(3.1.11)式

$$v = QA'W_e(-B\Delta + f) \quad (3.1.11)$$

後驗單位權中誤差計算式如下：

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^t W v}{r} = \frac{(f^t W_e f - \Delta^t t)}{r} \quad (3.1.12)$$

其中  $r$  代表自由度。

## b. 參數率估計

由於參數與參數率之間具有相依性，在平差的過程中，會造成法方程式秩虧 (rank deficiency) 問題，而無法一次估計所有參數與參數率 (Han & van Gelder, 2006)。因此在進行參數估計時，透過分段步驟的方式求解，先估計參數，待參數估計完成後，再估計參數率。因此在動態相似轉換模型進行參數率估計時，除了採用廣義平差模型，將轉換前後之速度場皆視為觀測量之外，另外再引入虛擬觀測平差模型 (Unified Least Squares Model) (Mikhail & Ackermann, 1976, pp. 333-342)，也就是將在先前估計得到之參數作為虛擬觀測量，在平差的過程中，考慮這些參數的精度。

虛擬觀測平差模型如下：

$$F(l, x) = 0 \quad (3.1.13)$$

其中  $l$  代表觀測量， $x$  代表參數。

上式經線性化，可得

$$A v + B \Delta = f \quad (3.1.14)$$

其中  $A$  代表觀測量  $l$  的偏微分係數矩陣， $B$  代表參數  $x$  的偏微分係數矩陣， $v$  代表觀測量的殘差， $\Delta$  代表參數  $x$  的改正數， $f = -[F(l^0, x^0) + A(l - l^0)]$ ，代表線性化後所留下之常數向量。

虛擬觀測方程式為

$$v_x - \Delta = x^0 - x = f_x \quad (3.1.15)$$

其中  $v_x$  代表參數的殘差， $\Delta$  代表參數  $x$  的改正數， $x^0$  代表參數的初始值。

(3.1.14)式與(3.1.15)式可合併改寫如(3.1.16)式

$$\bar{A}\bar{v} + \bar{B}\Delta = \bar{f} \quad (3.1.16)$$

其中  $\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$  ,  $\bar{v} = \begin{bmatrix} v \\ v_x \end{bmatrix}$  ,  $\bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ -I \end{bmatrix}$  ,  $\bar{f} = \begin{bmatrix} f \\ f_x \end{bmatrix}$  。

平差過程中的餘因子矩陣( cofactor matrix )為

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & Q_{xx} \end{bmatrix} \quad (3.1.17)$$

其中  $Q$  代表觀測量餘因子矩陣， $Q_{xx}$  代表參數的餘因子矩陣。

經過合併推導後，餘因子矩陣可以表示為

$$\bar{Q}_e = \bar{A}\bar{Q}\bar{A}^t = \begin{bmatrix} AQA^t & 0 \\ 0 & Q_{xx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_e & 0 \\ 0 & Q_{xx} \end{bmatrix} \quad (3.1.18)$$

根據最小二乘平差原理，令  $v^t W v$  為最小，經推導後可得

$$\bar{N} = \bar{B}^t \bar{W}_e \bar{B} = (B^t W_e B + W_{xx}) = (N + W_{xx}) \quad (3.1.19)$$

$$\bar{t} = \bar{B}^t \bar{W}_e \bar{f} = (B^t W_e f - W_{xx} f_x) = (t - W_{xx} f_x) \quad (3.1.20)$$

參數的改正數為(3.1.21)式

$$\Delta = \bar{N}^{-1} \bar{t} = (N + W_{xx})^{-1} (t - W_{xx} f_x) \quad (3.1.21)$$

其中  $N = B^t W_e B$  ,  $t = B^t W_e f$  ,  $W_{xx}$  代表參數的權矩陣。

殘差計算方式如(3.1.22)式

$$v = QA^t W_e (f - B\Delta) \quad (3.1.22)$$

其中  $Q_e = AQA'$  ,  $W_e = Q_e^{-1}$  。

後驗單位權中誤差為

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{(v'Wv + v'_xW_{xx}v_x)}{r} \quad (3.1.23)$$

其中  $r$  代表自由度。

### c. 精度估計

根據誤差傳播原理( Mikhail & Ackermann, 1976, pp. 72-87 ) , 方差-協方差矩陣 ( variances-covariances matrix ) 的計算方式如(3.1.24)式所示。

$$\Sigma_{yy} = J_{yx} \Sigma_{xx} J'_{yx} \quad (3.1.24)$$

其中  $\Sigma_{yy}$  代表  $y$  向量的方差-協方差矩陣 ,  $\Sigma_{xx}$  代表  $x$  向量的方差-協方差矩陣 ,  $J_{yx}$  代表  $y$  對  $x$  的全微分係數矩陣 ( Jacobian matrix ) 。

因此在廣義平差模型中的精度估計方面( Mikhail & Ackermann, 1976, pp. 116-118 ) , 分別如下 :

參數的餘因子矩陣如(3.1.25)式

$$\begin{aligned} Q_{\Delta\Delta} &= (-N^{-1}B'W_eA)Q(-A'W_eBN^{-1}) \\ &= N^{-1}B'W_eBN^{-1} \\ &= N^{-1} \end{aligned} \quad (3.1.25)$$

殘差的餘因子矩陣如(3.1.26)式

$$\begin{aligned} Q_{vv} &= QA'(W_e - W_eBN^{-1}B'W_e)AQ \\ &= QA'W_eAQ - QA'W_eBQ_{\Delta\Delta}B'W_eAQ \end{aligned} \quad (3.1.26)$$

平差後的觀測量餘因子矩陣計算如(3.1.27)式。

$$Q_{\hat{\hat{f}}} = Q_{ll} + Q_{lv} + Q_{vl} + Q_{vv} = Q - Q_{vv} \quad (3.1.27)$$

由於在虛擬觀測平差模型中，考慮了參數本身的精度，因此在估計參數精度時，需要加入考慮參數精度的權矩陣( Mikhail & Ackermann, 1976, pp. 349-352 )。參數的改正數見(3.1.21)式，經過誤差傳播公式所推導出的參數餘因子矩陣如(3.1.28)式。

$$Q_{\Delta\Delta} = (N + W_{xx})^{-1} \quad (3.1.28)$$

其中  $N$  代表法方程式矩陣、 $W_{xx}$  代表參數的權矩陣。

## 3-2 動態仿射轉換模型( Time-variant affine transformation model )

### 3-2-1 數學模型

假設一均勻材質的物體，因為受到外力導致非均勻( non-uniform )的變形，可以透過仿射模型來描述上述之變形行為。圖 3-2-1.代表原本規則排列的點位受到均勻外力而導致不等向之變形，其中圖左為原始點位，圖右為點位受一外力導致點位位置改變。從圖 3-2-1 上可以看出，原本為排列規則的點位，經過外力導致變形後，點位的位置即跟著改變，其中點位所受到三個不同之 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 變形量影響，變形方向分別用紅色、青綠色與綠色三個向量來表示(圖 3-2-1)。動態仿射轉換模型透過變形張量元素，描述沿著主軸方向的不同尺度變形來描述內部的變形行為，因此在描述變形行為上比相似轉換模型更具有彈性。

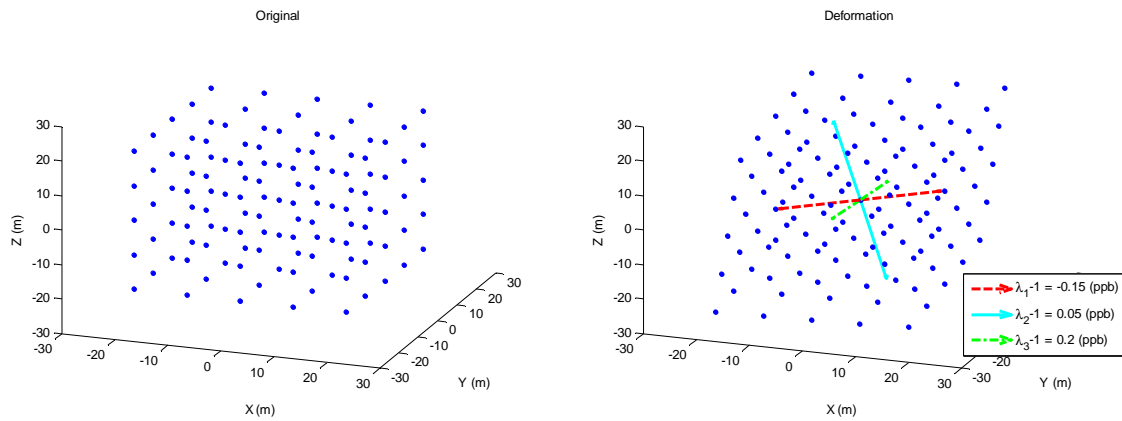


圖 3-2-1 原始點位(左)點位受到外力導致非均勻變形(右)

動態仿射轉換模型假設在一個均勻變形情況下，連結二個不同參考框架下的坐標與速度場。模型中同時考慮了主動運動( active motion )的變形行為和被動運動( passive motion )的參考框架轉換行為。

假設因外力造成地表變形的情况下，藉由沿著主軸方向的不同尺度變形來描述主動變形的行為。針對在均勻材質區域中的坐標向量，受到外力導致位置改變，可透過變位張量( displacement tensor )矩陣來描述其變形行為( Billington & Tate, 1981 )，如(3.2.1)式。

$$\bar{X}' = [A]\bar{X} \quad (3.2.1)$$

其中  $[A]$  代表變位張量矩陣，它是一個滿秩( full rank )矩陣； $\bar{X}$  代表變形前坐標向量， $\bar{X}'$  代表變形後坐標向量。

因為  $[A]$  為一個可逆矩陣，所以根據極分解理論( Polar decomposition theorem )，可分解成一個  $3 \times 3$  的對稱矩陣( symmetric matrix )，和一個正交矩陣( orthogonal matrix )的乘積，其物理意義表示點位的變形可藉由主動變形和剛體運動描述。

$$[A] = [\epsilon_A][R_A] \quad (3.2.2)$$

其中  $[\epsilon_A]$  代表  $3 \times 3$  對稱矩陣， $[R_A]$  代表正交矩陣。

將上式代入(3.2.1)式中，可得

$$\bar{X}' = [\varepsilon_A][R_A]\bar{X} \quad (3.2.3)$$

(3.2.3)式代表由主動運動所造成的均勻變形區域中的坐標。將變形前後的坐標視為在二個不同的框架下，套用相似轉換的公式，可得到(3.2.4)式

$$\bar{X}' = [\varepsilon_A][R_A]\{\sigma_s[R_s]\bar{X} + \bar{T}'_s\} \quad (3.2.4)$$

其中  $\sigma_s, [R_s], \bar{T}'_s$  代表連接二個不同框架的相似轉換參數。

將上式展開後，得

$$\begin{aligned} \bar{X}' &= [\varepsilon_A][R_A]\{\sigma_s[R_s]\bar{X} + \bar{T}'_s\} \\ &= \sigma_s[\varepsilon_A][R_A][R_s]\bar{X} + [\varepsilon_A][R_A]\bar{T}'_s \\ &= [\varepsilon][R]\bar{X} + \bar{T}' \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

其中  $[\varepsilon] = \sigma_s[\varepsilon_A]$ ， $[R] = [R_A][R_s]$ ， $\bar{T}' = [\varepsilon_A][R_A]\bar{T}'_s$ 。

(3.2.5)式代表連結具有均勻(homogeneous)變形行為的二個不同坐標參考框架的關係式。在此模型中，用一個單一的正交矩陣連結剛體旋轉和參考框架旋轉的關係。由於變形所包含的對稱變形張量矩陣和因為相似轉換所造成的尺度變化也結合在一起，變成一個對稱的張量矩陣。因此可利用上述模型的參數來描述主動運動(由於變形所造成的)與被動運動(由不同參考框架間之轉換)行為。

另外，由於(3.2.5)式中的  $[\varepsilon]$  為一個對稱矩陣，因此可利用特徵值分解方法，將它分解成主軸元素及其所對應之特徵向量乘積，如(3.2.6)式。

$$[\varepsilon] = [S]^T[\lambda][S] \quad (3.2.6)$$

其中  $[S]$  為一個  $3 \times 3$  的矩陣，它的列向量是  $[\varepsilon]$  的特徵向量， $[\lambda]$  是由  $[\varepsilon]$  的三個特徵值所構成的  $3 \times 3$  對角矩陣。將(3.2.6)式代入(3.2.5)式中，可得(3.2.7)式。



$$\begin{aligned}\bar{X}' &= [\varepsilon] [R] \bar{X} + \bar{T}' \\ &= [S]^T [\lambda] [S] [R] \bar{X} + \bar{T}'\end{aligned}\quad (3.2.7)$$

(3.2.7)式為參考框架線性轉換模型的通式，在此模型中，在二個不同坐標框架下的坐標不只有尺度、旋轉和平移的關係，同時還具有變形行為，由(3.2.1)式中的[A]來代表變形，分解後可得到， $[\lambda]$ 定義三軸的尺度變化， $[S]$ 定義三軸的方向。

根據(3.2.5)式，可將坐標向量對時間微分得到速度場的轉換公式。

$$\begin{aligned}\bar{V}' = \dot{\bar{X}}' &= ([\dot{\varepsilon}][R] + [\varepsilon][\dot{R}])\bar{X} + [\varepsilon][R]\dot{\bar{X}} + \dot{\bar{T}}' \\ &= ([\dot{\varepsilon}][R] + [\varepsilon][\dot{R}])\bar{X} + [\varepsilon][R]\bar{V} + \dot{\bar{T}}'\end{aligned}\quad (3.2.8)$$

其中 $\dot{\bar{X}}'$ 代表轉換後的速度場， $[\varepsilon]$ 代表變形張量， $[\dot{\varepsilon}]$ 代表變形張量參數率， $[R]$ 代表旋轉， $[\dot{R}]$ 代表旋轉參數率， $\bar{X}$ 代表轉換前的坐標， $\dot{\bar{X}}$ 代表轉換前的速度場， $\dot{\bar{T}}'$ 代表平移參數速率。

(3.2.5)式和(3.2.8)式分別代表動態仿射轉換模型的坐標與速度場轉換公式，形式上與相似轉換模型類似，但是動態仿射轉換模型用 $[\varepsilon]$ 中的6個參數及 $[\dot{\varepsilon}]$ 中的6個參數速率來描述受到外力導致非均勻縮放之變形行為。在此模型中總共有24個參數( $[\varepsilon], [R], \bar{T}', [\dot{\varepsilon}], [\dot{R}], \dot{\bar{T}}'$ )描述從原始框架經過仿射轉換到另一個框架的動態過程。

在動態仿射轉換模型中，含有24個參數(12個參數加上12個參數率)，因此在進行參數估計時，會遇到與動態相似轉換模型同樣的問題，即24個參數並非全部獨立，參數與參數率之間具有相依性。若一次解算24個參數，會造成法方程式矩陣有秩虧的現象，因為在動態仿射轉換模型中的秩只有12，而非24。為了避免在求解參數和參數率時有秩虧的情形發生，在此同樣採用分段式估計參數，先估計參數，再估計參數率。

### 3-2-2 參數估計方法

#### a. 參數估計

動態仿射轉換模型的參數估計方式，與動態相似轉換模型相同，在估計參數時，採用廣義平差模型(詳見 3-1-2 節)。

#### b. 參數率估計

動態仿射轉換模型估計參數率時，使用廣差平差模型與虛擬觀測平差模型。模型內容詳見動態相似轉換模型的參數估計方法(詳見 3-1-2 節)。

#### c. 精度估計

動態仿射轉換模型的在參數精度估計方面，大致與動態相似轉換模型相同，其中唯一不同的地方在於特徵值參數的精度估計部分，因為動態仿射轉換模型參數估計時，一開始求解得到是變形張量元素，而為了更明顯表示在不同方向的主要變形行為，需要將這些元素分解成特徵值與所對應之特徵向量，因此，需要將原本在變形張量元素的精度，傳播到特徵值與特徵向量上。

#### d. 主成分參數誤差傳播

在動態仿射轉換模型中，主變形行為可以由 $[\epsilon]$ 來表示，見(3.2.5)式所示。然而 $[\epsilon]$ 在三維的情況下為一個 $3 \times 3$ 的對稱矩陣，其中包含六個獨立元素，必須經由特徵值特徵向量分解法，將它分解成主成分元素 $[\lambda]$ 和所對應之特徵向量 $[S]$ ，其中 3 個獨立的特徵值代表三個主軸方向的變形量及其所對應之特徵向量代表三個主變形方向。也因為如此，在估計參數精度時，需將原本 6 個元素，傳播到 12 個元素上，即 3 個特徵值與 9 個特徵向量元素。因此在主軸元素的參數精度估計上，採用 Han et al. (2007) 所提出之特徵參數(包括特徵值與特徵向量)在三維上的對稱張量的協方差矩誤差傳播。

利用誤差傳播原理所推導出特徵參數的方差-協方差矩陣為

$$\Sigma_{\{\lambda, \text{vec}(S)\}} = K \Sigma_{\{\varepsilon\}} K^T \quad (3.2.9)$$

其中

$$\underset{(n^2+n) \times m}{K} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \underset{(n^2+n) \times m}{-(I \otimes S)D_\Omega} \end{bmatrix} \underset{m \times m}{\tilde{F}}^{-1} \quad (3.2.10)$$

其中  $S$  代表正交矩陣， $D_\Omega$  代表轉換運算子， $I$  代表單位矩陣， $\otimes$  表示 Kronecker Product，定義為  $A \otimes B = [a_{ij}B]$ ，其中  $A = [a_{ij}]$ 。

$$\begin{aligned} \underset{m \times m}{\tilde{F}} &= D_E (S^T \odot S^T \quad \vdots \quad -(D_S + I)(I \otimes (S^T \Lambda S))D_\Omega) \\ &= D_E (S^T \odot S^T \quad \vdots \quad -(D_S + I)(I \otimes E)D_\Omega) \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

其中  $D_E$  與  $D_S$  代表轉換運算子， $\odot$  表示 Khatri-Rao Product，定義為  $A \odot B = [A_1 \otimes B_1, \dots, A_p \otimes B_p]$ ， $A_j$  和  $B_j$  ( $j=1, \dots, p$ ) 分別是  $A$  和  $B$  矩陣中對應之欄向量。

在三維的特徵參數的誤差傳播中，各個轉換運算子的元素如下 (Han et al., 2007)。

$$D_E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.12)$$

$$D_S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.13)$$

$$D_\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.14)$$

### 3-3 數值模擬實驗

為探討當參考框架具有非均勻變形行為時，不同動態框架轉換模型的適用性。在此進行數值模擬實驗，模擬地表遭受外力導致不等向變形及受到剛體運動、參考框架的旋轉、平移等影響的情況下，使用不同之動態框架轉換模型進行參數估計，比較模型之間的轉換成果。實驗中模擬一組坐標參考框架含有非均勻變形行為之地表點位坐標與速度場(圖 3-3-1)，其中紅色三角形代表地表點位坐標，綠色向量代表點位的速度場，另外在坐標與速度場的觀測量上分別加入±5 mm 和±3 mm/yr 的隨機誤差，分別利用動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型進行轉換參數估計，比較二組模型之參數估計與轉換成果，進而評估模型之適用性。

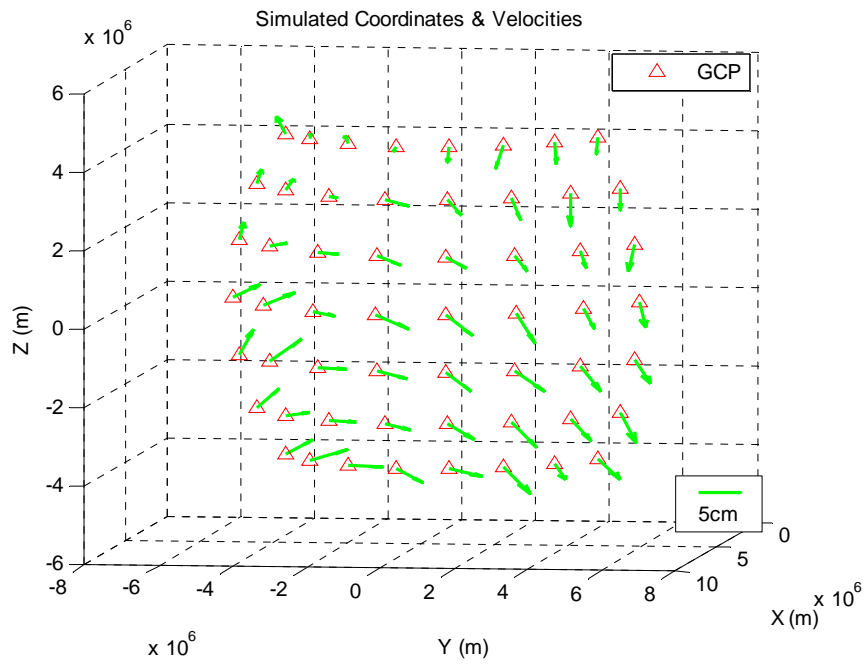


圖 3-3-1 模擬坐標參考框架含有變異行為之坐標與速度場



表 3-3-1 動態轉換模型參數估計成果

Parameters	Time-variant similarity transformation model		Parameters	Time-variant affine transformation model	
	Estimated	Std.		Estimated	Std.
$r_x(mas)$	-1.94	$\pm 0.49$	$r_x(mas)$	-2.87	$\pm 0.04$
$r_y(mas)$	-0.61	$\pm 0.71$	$r_y(mas)$	0.59	$\pm 0.09$
$r_z(mas)$	-3.11	$\pm 0.60$	$r_z(mas)$	0.94	$\pm 0.09$
$T_x(m)$	-0.01	$\pm 0.02$	$T_x(m)$	0.043	$\pm 0.004$
$T_y(m)$	-0.22	$\pm 0.02$	$T_y(m)$	-0.025	$\pm 0.004$
$T_z(m)$	0.09	$\pm 0.02$	$T_z(m)$	0.029	$\pm 0.004$
$\dot{r}_x(mas/yr)$	0.15	$\pm 0.18$	$\dot{r}_x(mas/yr)$	-0.22	$\pm 0.03$
$\dot{r}_y(mas/yr)$	1.48	$\pm 0.26$	$\dot{r}_y(mas/yr)$	0.31	$\pm 0.05$
$\dot{r}_z(mas/yr)$	1.87	$\pm 0.22$	$\dot{r}_z(mas/yr)$	0.15	$\pm 0.05$
$\dot{T}_x(m/yr)$	-0.005	$\pm 0.005$	$\dot{T}_x(m/yr)$	0.011	$\pm 0.002$
$\dot{T}_y(m/yr)$	0.079	$\pm 0.006$	$\dot{T}_y(m/yr)$	-0.005	$\pm 0.002$
$\dot{T}_z(m/yr)$	-0.052	$\pm 0.007$	$\dot{T}_z(m/yr)$	0.009	$\pm 0.002$
$s(ppb)$	4.94	$\pm 2.28$	$\lambda_1 - 1(ppb)$	-26.77	$\pm 0.44$
			$\lambda_2 - 1(ppb)$	-18.37	$\pm 0.64$
			$\lambda_3 - 1(ppb)$	43.12	$\pm 0.44$
$\dot{s}(ppb/yr)$	-0.61	$\pm 0.84$	$\dot{\lambda}_1(ppb/yr)$	-12.82	$\pm 0.38$
			$\dot{\lambda}_2(ppb/yr)$	-9.15	$\pm 0.21$
			$\dot{\lambda}_3(ppb/yr)$	16.74	$\pm 0.28$

( ppb = part per billion, mas = milli-arc second ,  $s = \sigma - 1$  )

表 3-3-1 為動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型的參數估計成果。在動態相似轉換模型的參數估計成果方面，所估計得到之三個旋轉參數分別為-1.94、-0.61 和-3.11 (mas)，精度範圍在 $\pm 0.49 \sim \pm 0.71$  (mas)之間；三個平移參數分別為-0.01、-0.22 和 0.09 (m)，精度範圍介於 $\pm 0.015 \sim \pm 0.019$  (m)；三個旋轉參數率分別為 0.15、1.48 和 1.87 (mas/yr)，精度在 $\pm 0.18 \sim \pm 0.26$  (mas/yr)間；三個平參數率分別為 -0.005、0.079 和-0.052，精度在 $\pm 6$  mm/yr 上下，尺度微變量為 4.94 ppb，精度為 $\pm 2.28$  ppb；尺度率為-0.61 ppb/yr，精度為 $\pm 0.84$  ppb/yr。

在動態仿射轉換模型的參數估計部分，三個旋轉參數分別為-2.87、0.59 與 0.94 (mas)，精度介於 $\pm 0.04 \sim \pm 0.09$  (mas)；三個平移參數分別為 0.043、-0.025 與 0.029

(m)，精度約為 $\pm 4$  mm；三個旋轉參數率為-0.22、0.31 與 0.15 (mas/yr)，旋轉參數率的精度範圍在 $\pm 0.025\sim\pm 0.051$ (mas/yr)之間；三個平移參數率分別為 0.011、-0.005 與 0.009 (m/yr)，參數精度約為 $\pm 2$ mm；三個主變形量分別為-26.77、-18.37 與 43.12 (ppb)，精度範圍在 $\pm 0.44\sim\pm 0.64$  (ppb)之間；三個特徵值參數率分別為-12.82、-9.15 與 16.74 (ppb/yr)，精度從 $\pm 0.21\sim\pm 0.38$  (ppb/yr)。

從參數估計的成果得知，在參考框架含有非均勻變形行為的情況下，動態仿射轉換模型之參數精度優於動態相似轉換模型之參數，並且動態仿射轉換模型可透過變形張量元素描述三個不同方向的變形，而動態相似轉換模型僅有一個尺度參數可以描述變形行為。因此在參考框架含有變異行為之情況下，動態仿射轉換模型之適用性優於動態相似轉換模型。

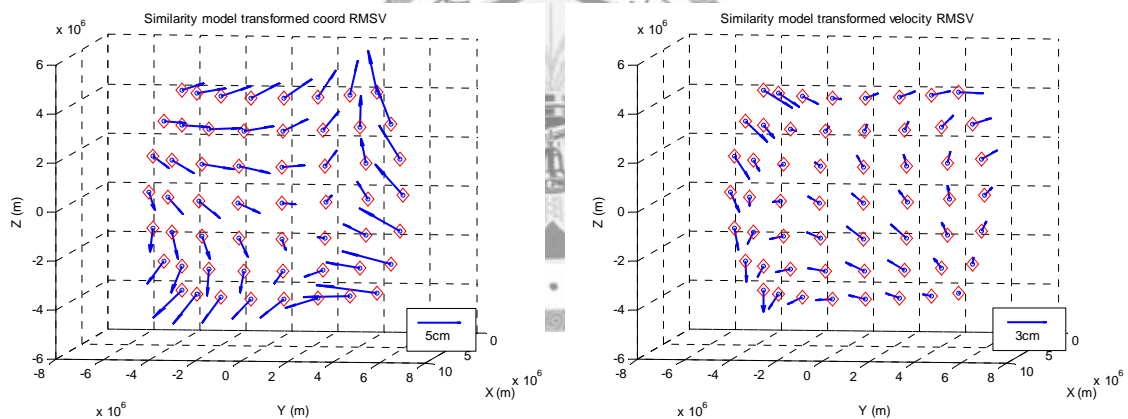


圖 3-3-2 動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差向量(左)與速度場誤差向量(右)

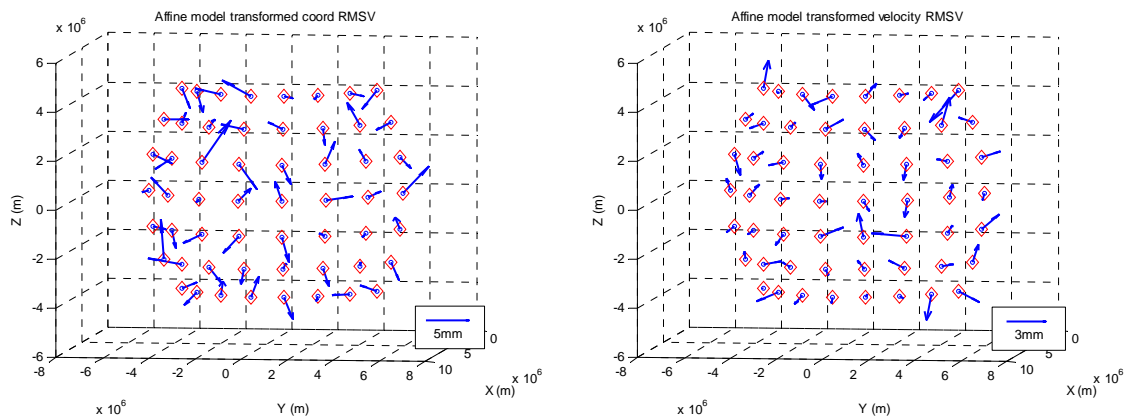


圖 3-3-3 動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差向量(左)與速度場誤差向量(右)

圖 3-3-2 為動態相似轉換模型的轉換後之坐標和速度場誤差向量，可明顯看出不論在坐標或是速度場，其誤差向量具有特定之方向，顯示在參考框架包含非均勻變形行為之情況下，使用動態相似轉換模型的轉換成果，在框架含有變形的情况下，無法正確描述框架間之動態幾何關係，所獲得之轉換後坐標與速度場，存有系統性之誤差。

動態仿射轉換模型的轉換後之坐標與速度場誤差向量(圖 3-3-3)，可看出動態仿射轉換模型的誤差向量呈現隨機分佈，不具有特定方向，顯示動態仿射轉換模型的轉換成果誤差屬於隨機性。

表 3-3-2 二組模型轉換後之坐標與速度場誤差

	動態相似轉換模型	動態仿射轉換模型
轉換後坐標 RMSV (m)	$\pm 0.0660$	$\pm 0.0057$
轉換後速度場 RMSV (m/yr)	$\pm 0.0244$	$\pm 0.0033$

表 3-3-2 為動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型轉換後之坐標與速度場誤差。從數值成果顯示，在動態相似轉換模型的部分，其轉換後之坐標誤差為 $\pm 0.0660$  (m)，轉換後之速度場誤差為 $\pm 0.0244$  (m/yr)；在動態仿射轉換模型方面，轉換後之坐標誤差為 $\pm 0.0057$  (m)，轉換後之速度場誤差為 $\pm 0.0033$  (m/yr)。二個模型比較後發現，動態仿射轉換模型不論在坐標或是速度場，其轉換後之誤差均小於動態相似轉換模型之轉換後誤差，由於本實驗中所加入的隨機誤差為坐標 $\pm 5$  mm、速度場 $\pm 3$  mm/yr，動態仿射轉換模型其轉換後之點位誤差約為 $\pm 5.7$  mm，速度場為 $\pm 3.3$  mm/yr，與原先觀測量所加入之誤差量級相符；而動態相似轉換模型，其轉換後之坐標與速度場之誤差分別為 $\pm 6.6$  cm 與 $\pm 2.4$  cm，誤差大於原先觀測量所加入之誤差。因此在參考框架含有非均勻縮放之變形行為時，動態仿射轉換模型相較於動態相似轉換模型，能夠獲得較合理之參數估計成果，正確建立框架間之動態幾何關係。



## 第四章 長期連續 GPS 資料處理與分析

GPS 追蹤站藉由長期連續接收衛星資料，與參考框架中控制點進行解算，進而獲得地面點位之空間資訊，解算得到之 GPS 序列資料可提供地表點位的動態連續行為，藉此估計速度場，獲得點位運動資訊。然而經長期連續觀測地表點位所得到之 GPS 序列資料，可能會因為自然環境（如：斷層活動導致地殼變動）或是人為因素（如：改變儀器天線位置、抽取地下水導致地層下陷），造成序列資料行為趨勢具有不連續性。一般的 GPS 資料處理軟體，在處理資料時，並無考慮資料的不連續性以及觀測量可能含有粗差等問題，直接估計速度場，如此會造成估計的速度場會與實際地表點位的動態行為有所差距，無法正確描述點位運動的趨勢。本章針對長期 GPS 序列資料可能存在之資料不連續性、觀測量含有粗差等問題，提出改善之方法，藉此提升速度場的品質。

### 4-1 GPS 資料解算

本研究以 IGS ( International GNSS Service ) 追蹤站作為坐標參考框架，依據 IGS 亞洲框架為基礎進行每日成果解算，接著再將這些每日解算成果與 IGS 全球框架控制網的成果進行合併，獲得測站於 IGS 全球框架下之點位空間資訊。選用 IGS 控制網作為參考框架的主要原因在於 IGS 提供分佈全球的 GPS 測站資訊，包含四百多個測站，並且每週進行成果解算，更新其測站資訊( Dow et al., 2005 )，相較於 ITRF 需經過較長的時間提供新的解算成果，以 IGS 測站作為參考框架的控制網，其測站資訊較能夠符合目前地表之動態行為。

以本研究所處理之台灣地區資料為例，實際資料處理中所使用到的 IGS 亞洲區域測站包括：GUAM、TSKB、DAEJ、SUWN、YMSM、FLNM、TWTF、PIMO、TMAM、TCMS、TNML、KDNM、PKGM、MZUM、KMNM、BJFS、WUHN、

NTUS、KUNM、IISC、KIT3、BAHR、NSSP、ZECK、ZWEN、TELA、NICO、ANKR、TUBI、SOFI、MATE，各站之地理位置如圖 4-1-1。

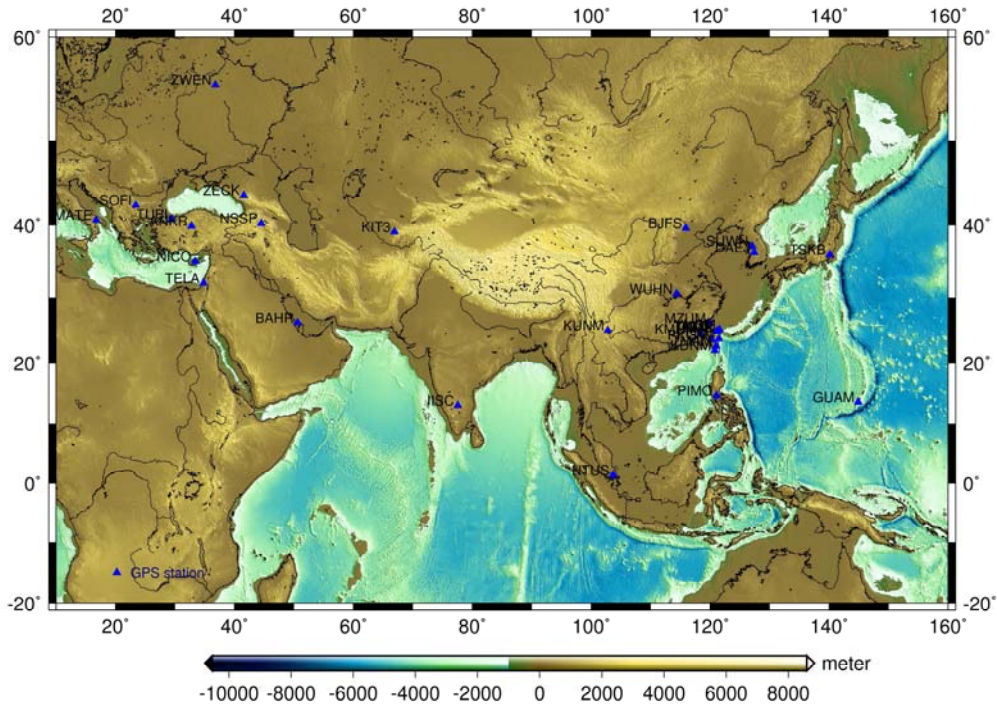


圖 4-1-1 IGS 亞洲測站位置分佈圖

實驗中台灣追蹤站的資料來源由內政部地政司衛星測量中心所提供，衛星追蹤站包含陽明山(YMSM)、鳳林(FLNM)、太麻里(TMAM)、墾丁(KDNM)、北港(PKGM)、金門(KMNM)和馬祖(MZUM)七站。資料類型為 RINEX (Receiver INdependent EXchange) 格式，資料時間從 2001 年第 1 日到 2007 年第 116 日，資料接收的時間為每 30 秒接收一筆衛星資料。台灣追蹤站的地理位置見圖 4-1-2，其中 YMSM 站、FLNM 站、TMAM 站、PKGM 站、KDNM 站位於台灣本島，KMNM 站與 MZUM 站屬於離島部分，分別位於台灣的西方與西北方。

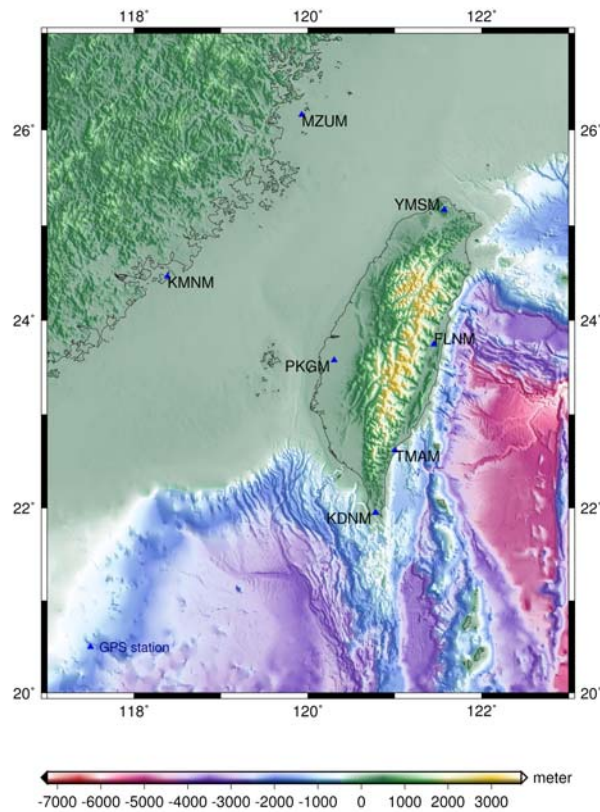


圖 4-1-2 台灣追蹤站地理位置分佈圖

GPS 資料的處理軟體採用美國麻省理工學院 ( Massachusetts Institute of Technology, MIT ) 所開發的 GPS 資料分析處理軟體 GAMIT ( GPS Analysis at MIT ) 和 GLOBK ( Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program ) ( Herring et al., 2006 ) 進行 GPS 觀測資料處理與解算的工作。首先使用 GAMIT 軟體解算衛星追蹤站於 IGS ( International GNSS Service ) 亞洲區域框架下的每日成果 ( 包括台灣地區七個追蹤站和 IGS 亞洲區域追蹤站 ) ，接著將解算的成果與在 IGS 全球框架下測站進行合併，之後藉由 GLOBK 軟體估計出代表該期間之最適坐標與速度場，進而獲得在 IGS 全球框架的動態行為模式下，台灣追蹤站的坐標和速度場。本研究所使用之資料介紹整理如表 4-1-1 。

表 4-1-1 GPS 資料介紹

資料來源	IGS 資料中心 & 內政部地政司衛星測量中心
資料時間	2001 年第 1 日到 2007 年第 116 日
資料接收時間間隔	30 秒
資料格式	RINEX
GPS 資料處理軟體	GAMIT & GLOBK ( MIT )
參考框架	IGS 全球參考框架
IGS 追蹤站	GUAM、TSKB、DAEJ、SUWN、TWTF、PIMO、TCMS、TNML、BJFS、WUHN、NTUS、KUNM、IISC、KIT3、BAHR、NSSP、ZECK、ZWEN、TELA、NICO、ANKR、TUBI、SOFI、MATE、
台灣追蹤站	YMSM、FLNM、TMAM、KDNM、PKGGM、KMNM、MZUM

#### 4-2 GPS 序列資料品質提升

一般從 GPS 資料處理軟體得到之 GPS 序列資料，會發現資料本身可能存有粗差，或是在經過長期連續觀測的地表點位得到之點位，其點位資料的行為趨勢並不連續。為了確保所獲得之 GPS 序列資料是具有可靠性，本研究將透過不連續運動偵測、粗差偵測與週期性訊號處理等方式，提升序列資料的品質。序列資料的處理方式包含不連續運動偵測、直線擬合、粗差偵測、週期性訊號處理等，處理流程如圖 4-2-1。

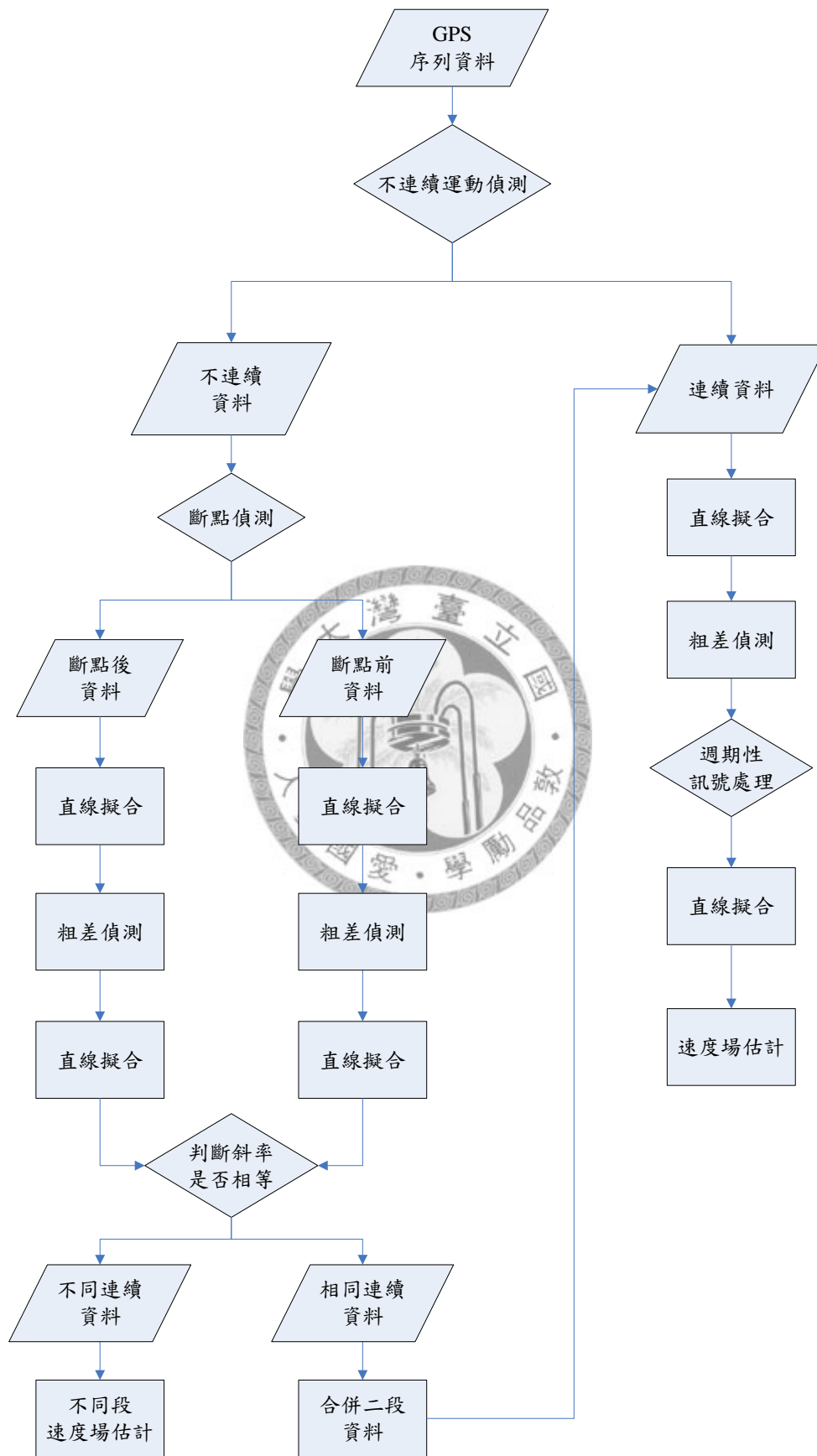


圖 4-2-1 長期連續 GPS 序列資料處理流程圖

#### 4-2-1 不連續運動偵測

經 GPS 軟體處理解算得到之序列資料，需判斷資料行為是否具有一致性，其速度場的運動趨勢是否具有連續的行為。因為地表點位在一般正常情況下，點位的速度場具有一定的行為模式，然而當地表因自然環境因素發生劇烈變化，如：斷層活動或地震，會造成點位速度場在方向及大小上有顯著變化，運動行為因而改變；或是由於人為因素調整 GPS 接收儀的天線位置，導致所得到之觀測資料在特定的方向產生位移的現象，上述因素皆會造成序列資料行為的不連續。在此藉由不連續運動偵測，判斷資料是否連續，找出資料不連續的斷點位置，之後再分別對連續資料的部分，進行分析處理的程序。斷點偵測的方式是將序列資料中，以每二筆資料計算一條直線斜率的方式，找出斜率變化劇烈的地方。

假設一共有  $n$  筆觀測資料，使用每二筆資料計算第  $j$  筆斜率  $m_j$  的計算方式為


$$m_j = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (4.2.1)$$

其中  $y$  代表坐標， $x$  代表資料時間， $i$  代表第  $i$  筆資料， $j$  代表所計算出的第  $i$  筆斜率。

當計算完每二筆資料的斜率後，接著計算斜率資料的平均值與標準差。

計算斜率資料的平均值  $\mu_m$ ，因為斜率的變化會有正負號的差別，在此取絕對值，以恆正的數值作計算。

$$\mu_m = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} |m_j|}{n-1} \quad (4.2.2)$$

計算斜率資料標準差  $S_m$

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n-1} (|m_j| - \mu_m)^2}{(n-1)-1}} \quad (4.2.3)$$

得到斜率資料的平均值與標準差後，即可根據所設定之門檻，決定斷點候選點，找出斜率變化劇烈的資料所在位置。在此設定斷點的門檻為當所計算的斜率數值超過三倍的標準差範圍以上，即視為可能之斷點，將這些斷點作為候選點，並以人工輔助，判定斷點位置，將資料分段處理。

#### 4-2-2 速度場估計

本研究對序列資料估計速度場，採用的直線擬合公式( Wolf & Ghilani, 1997, pp. 187-190 )為

$$y = mx + b \quad (4.2.4)$$

其中  $y$  為坐標值， $x$  為觀測資料時間， $m$  為直線斜率， $b$  為截距。

平差方式採用間接平差法( Adjustment of Indirect Observations ) ( Mikhail & Ackermann, 1976, pp. 159-161 )。間接平差法之數學模式如下：

$$F(l, x) = 0 \quad (4.2.5)$$

其中  $l$  代表觀測量， $x$  代表參數。

上式經過線性化後，可得

$$l + v + B\Delta = d \quad (4.2.6)$$

其中  $v$  代表殘差， $B$  代表參數  $x$  的偏微分係數矩陣， $\Delta$  代表參數  $x$  的改正數， $d$  代表常數向量。

上式經過整理後可寫成

$$v + B\Delta = (-l + d) = f \quad (4.2.7)$$

根據最小二乘平差原理，可得

$$(B'WB)\Delta = B'Wf \quad (4.2.8)$$

其中  $W$  為觀測量的權矩陣。

上式可簡化為

$$N\Delta = t \quad (4.2.9)$$

其中  $N = B'WB$ ， $t = B'Wf$ 。

解算參數改正數  $\Delta$

$$\Delta = N^{-1}t \quad (4.2.10)$$

殘差計算為

$$v = f - B\Delta \quad (4.2.11)$$

平差後的觀測量  $\hat{l}$

$$\hat{l} = l + v \quad (4.2.12)$$

後驗單位權中誤差為

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v'Wv}{r} \quad (4.2.13)$$

其中  $r$  代表自由度。



### 4-2-3 粗差偵測

由於一般 GPS 資料處理軟體，並沒有考慮資料本身是否含有粗差( blunders ) 的問題，可能會造成所估計之速度場品質不可靠。因此在本研究中，透過粗差偵測( Blunders Detection )，剔除序列資料中含有粗差的觀測量，藉此提升資料品質。在此所設定之粗差門檻有二項，只要符合二項門檻其中之一，即視為粗差。

第一種是計算序列資料的殘差( residuals )後驗方差，經過直線擬合步驟，根據平差後得到之殘差後驗方差作為判定粗差的門檻，當資料的殘差大於平差後之殘差，視為粗差。殘差的餘因子矩陣計算如下：

$$Q_{vv} = Q - Q_{ii} \quad (4.2.14)$$



其中  $Q$  代表觀測量的餘因子矩陣， $Q_{ii}$  的計算式如(4.2.15)式

$$Q_{ii} = BN^{-1}B^t \quad (4.2.15)$$

其中  $B$  代表參數的偏微分係數矩陣， $N^{-1}$  代表法方程式矩陣。

第二種是計算殘差資料中的平均值和標準差，在此設定當殘差數值位於三倍標準差以外，則視為粗差。將含有粗差的觀測量剔除後，再重新擬合直線，估計速度場。平均值與標準差的計算方式，可參考(4.2.2)式與(4.2.3)式。

#### 4-2-4 週期訊號處理

地表變動的原因除了由於地球內部能量所引發的力學過程造成板塊運動之外，地球亦會受到宇宙環境中各種因素的影響，例如：天文潮汐，即太陽、月球對地球的引潮力。根據地球物理與地質的相關研究 (Tanaka et al., 2006; Menten, 2008) 表示，地震與潮汐之間的關係確實存在。因此藉由長期連續觀測地表點位，其點位之動態資訊應含有天文潮汐因素對地表所造成之週期性影響。

在考慮觀測量中可能含有週期性訊號的情況下，對剔除粗差後的觀測量殘差，視情況進行週期性訊號處理。對於 GPS 解算得到之時間序列資料，Nikolaidis (2002) 的研究中以多個正弦波組成之多項式函數進行時間序列的資料擬合。在此採用正弦波 (sine wave) 週期函數進行觀測量殘差的週期性訊號擬合，並將擬合得到之週期訊號扣除，重新估計速度場。

所使用的正弦波函式為

$$y = A \times \sin(2\pi(x + o) / p) \quad (4.2.16)$$

其中  $A$  為正弦波的振幅， $p$  為一個正弦波的週期， $o$  代訊號的位移， $x$  為資料時間。

#### 4-2-5 統計檢定

當時間序列資料分段處理後，需判斷不同段的連續資料所擬合出來之速度場，是否為同一資料。因為在一般正常、地表沒有發生劇烈變化的情況下，地表的運動是連續且緩慢，因此經由長期連續觀測地表的點位資訊，所得到之序列資料，其資料行為應呈現穩定、連續且有一定的趨勢。若是因人為因素造成資料的不連續，如：人為改變 GPS 接收儀的天線位置，造成資料在特定方向產生位移的現象，但是速度場的趨勢應該與改變天線高前的趨勢相同，此時，這二群資料應該要合併起來，重新估計速度場。因為透過長期連續的資料所估計得到之速度場，比較可以展現點位實際之動態行為，若觀測的時期太短或是觀測資料量太少，所估計之速度場可能無法正確描述實際之地表運動行為。因此在本研究中判斷二群資料的速度場是否相同，採用分群的統計檢定方式，若通過統計檢定，則將二段直線的資料合併，重新擬合直線，估計速度場。檢定方式如下：

在此採用二個樣本的  $t$  檢定進行統計測試，檢定二條直線斜率是否相同。在檢定二條斜率前，需先檢定二條斜率的標準差是否相等，作為後續檢定時自由度大小的依據，這邊採用  $F$  檢定，判斷二組樣本的標準差是否相等 (Wolf & Ghilani, 1997, pp. 75-78)。

虛無假設：二組樣本的標準差相等。

$$H_0 : \frac{S_1^2}{S_2^2} = 1 \text{ (i.e., } S_1^2 = S_2^2 \text{)} \quad (4.2.17)$$

對立假設：二組樣本的標準差不相等。

$$H_1 : \frac{S_1^2}{S_2^2} \neq 1 \text{ (i.e., } S_1^2 \neq S_2^2 \text{)} \quad (4.2.18)$$

$F$  檢定統計量為

$$F = \frac{\text{larger sample variance}}{\text{smaller sample variance}} \quad (4.2.19)$$

當  $F > F_{\alpha/2, v_1, v_2}$ ，即拒絕虛無假設  $H_0$ 。

第二步進行二組直線的斜率檢定，採用二組樣本的  $t$  統計測試( Two-Sample  $t$  Test ) ( Maidment, 1993 )。

虛無假設：二組資料的平均值相等。

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (4.2.20)$$

對立假設：二組資料的平均值不相等。

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (4.2.21)$$

計算二組樣本資料的平均值  $\bar{x}, \bar{y}$  與標準偏差  $s_x, s_y$ ，其中  $x$  為第一變數，樣本數為  $n_1$ ； $y$  為第二變數，樣本數為  $n_2$ 。

計算測試的自由度。若通過  $s_x = s_y$  的統計假設檢定，則自由度為  $df = n_1 + n_2 - 2$ ；若二個樣本的標準偏差顯著不同，則使用(4.2.22)式四捨五入取整數計算自由度：

$$df = \frac{\left( \frac{s_x^2}{n_1} + \frac{s_y^2}{n_2} \right)^2}{\frac{(s_x^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_y^2/n_2)^2}{n_2 - 1}} \quad (4.2.22)$$

計算  $t$  統計值

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n_1} + \frac{s_y^2}{n_2}}} \quad (4.2.23)$$

若  $|t| > t_{1-\alpha/2, df}$ ，則拒絕二組樣本平均值相等的虛無假設。

若經檢定後，發現二條直線的斜率不相同，則判定為不連續資料；若經檢定後，發現二條直線的斜率相同，則判定為連續資料，表示二段資料應該要合併為同一資料。

### 4-3 序列資料品質提升範例說明

在此以台灣追蹤站中墾丁(KDNM)站於2001~2007年Y方向的GPS序列資料說明資料的處理流程。一開始對原始資料進行速度場估計(圖4-3-1)，計算原始資料殘差(圖4-3-2)，從原始的時間序列資料可看出在2003.0時刻與2005.5時刻有顯著變化，資料有不連續的現象，因此進行分析處理。首先接著計算資料中每二筆資料的斜率，畫出每筆資料的斜率(圖4-3-3)，接著進行斷點偵測(圖4-3-4)，找出斜率變化劇烈位置，視為斷點候選點，再輔以人工方式決定斷點位置，對資料分段處理，進行直線擬合，分段估計速度場(圖4-3-5至圖4-3-9)，之後分別對各段的資料進行粗差偵測，對各段剔除含有粗差的觀測量(圖4-3-10至圖4-3-12)，最後對三段資料分別估計速度場(圖4-3-13)，計算處理後資料之殘差(圖4-3-14)。將序列資料處理前後的殘差進行比較，可看出資料處理前的殘差分佈的範圍大約介在 $\pm 5$  cm到 $\pm 10$  cm，經過處理後資料之殘差較小，大部分殘差範圍都在 $\pm 3$  cm以內且分佈較一致，顯示處理後資料之直線擬合更精確，所估計之速度場品質較高。

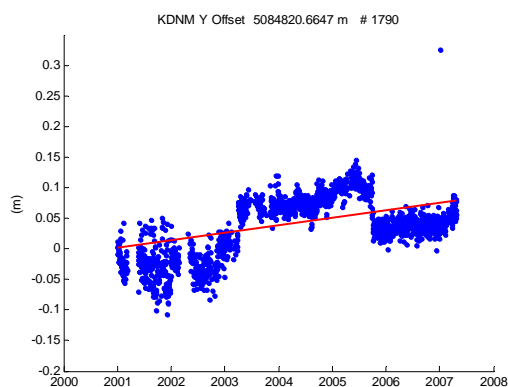


圖 4-3-1 原始資料速度場估計

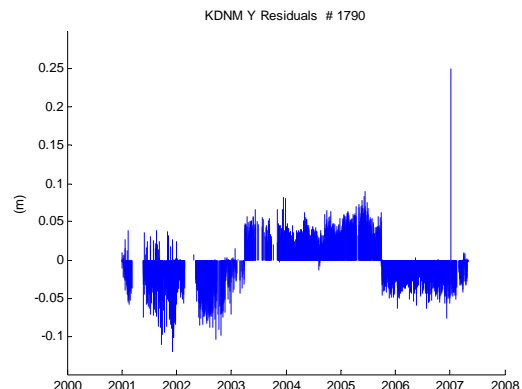


圖 4-3-2 原始資料殘差

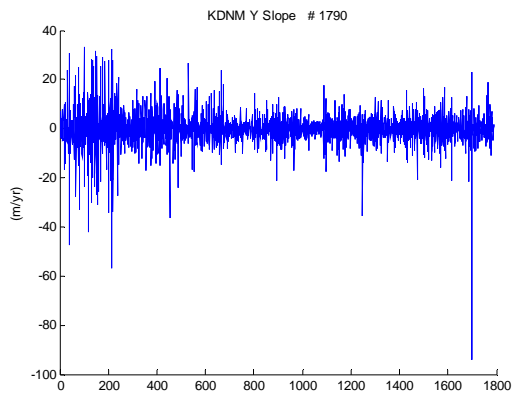


圖 4-3-3 序列資料每二點斜率估計

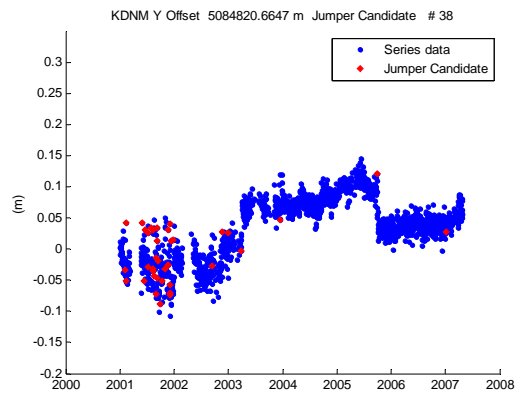


圖 4-3-4 斷點偵測

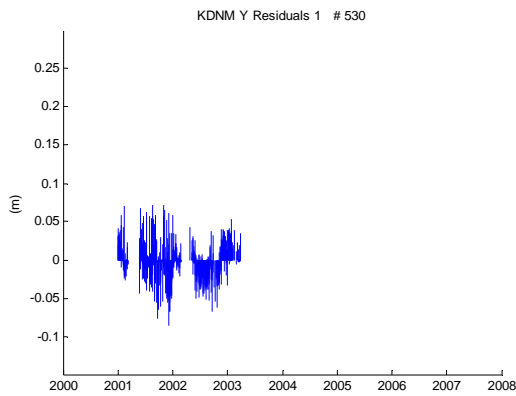


圖 4-3-5 第一段資料殘差

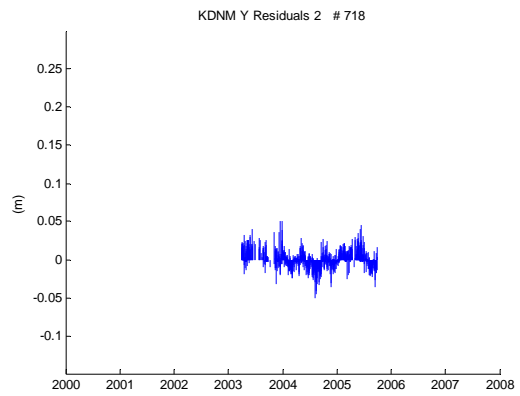


圖 4-3-6 第二段資料殘差

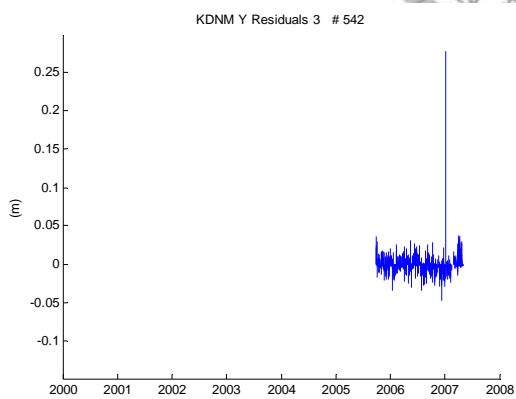


圖 4-3-7 第三段資料殘差

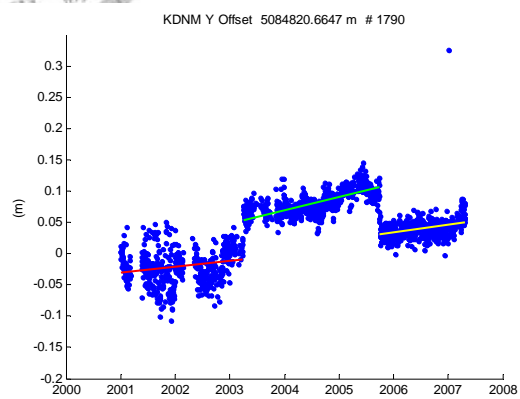


圖 4-3-8 分段估計速度場

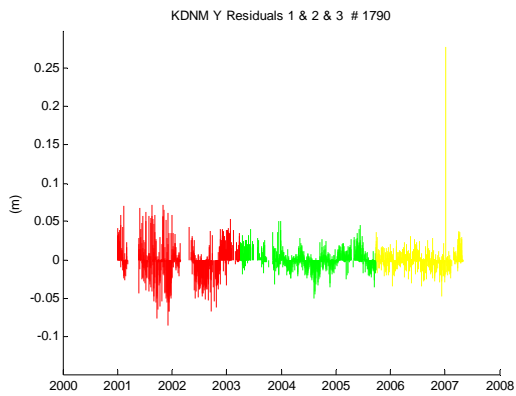


圖 4-3-9 分段計算資料殘差

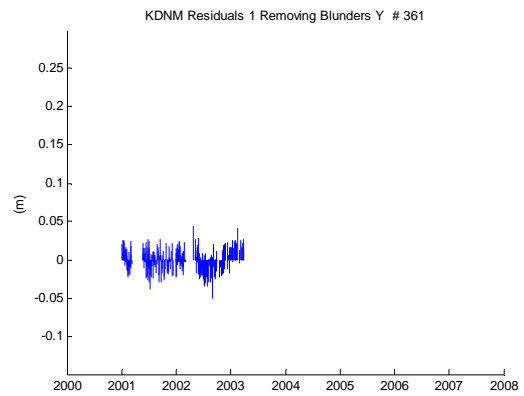


圖 4-3-10 剔除第一段資料粗差

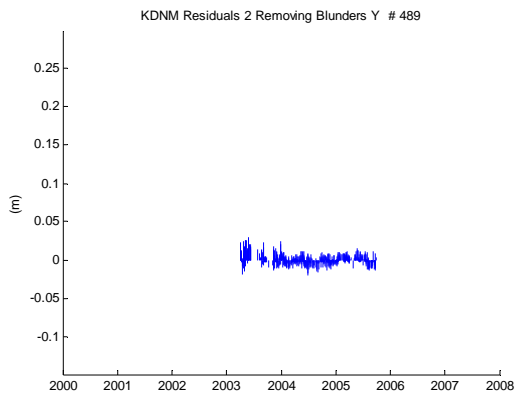


圖 4-3-11 剔除第二段資料粗差

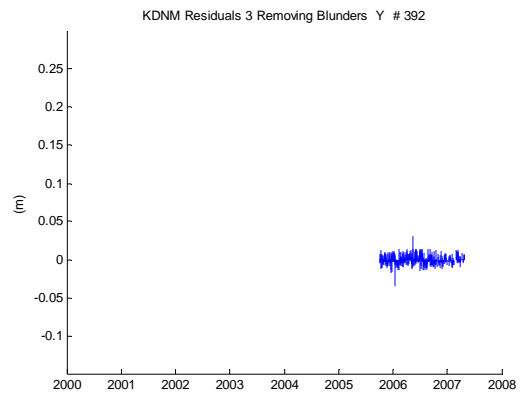


圖 4-3-12 剔除第三段資料粗差

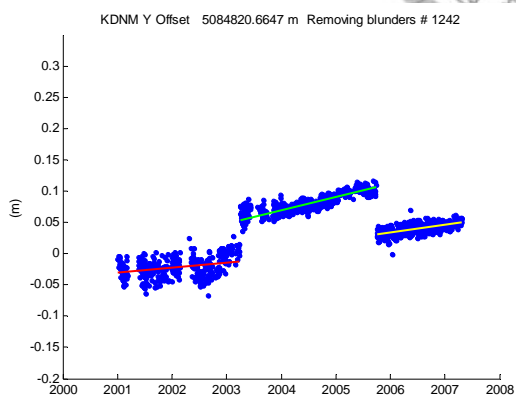


圖 4-3-13 分析處理後三段資料速度場估計

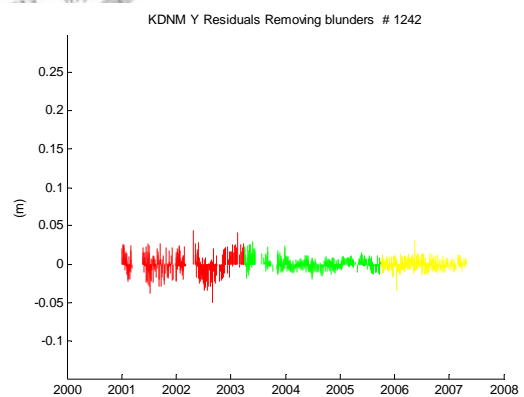


圖 4-3-14 分析處理後三段資料殘差

當序列資料經判定為不連續資料，以分段處理的方式，對各段進行粗差偵測及速度場估計後，須決定分段後之資料所估計之速度場是否相同，在此根據估計

得到之斜率與斜率精度，依照 4-2-5 節所述之統計檢定方式，作為處理後之不同段資料是否連續的依據。

首先檢定第一段資料和第二段資料的斜率標準差是否相等，來決定自由度。利用  $F$  檢定來判斷，在此  $F$  統計量為 5.1540，查表得  $F_{0.975,df_1,df_2}$  為 1.2112，因為  $F > F_{\alpha/2,df_1,df_2}$ ，所以二段資料的斜率標準差不相等，因此採用(4.2.22)式計算自由度。第二步，檢定第一段資料和第二段資料的斜率是否相等。在此， $t$  檢定統計量計算為-187.0934，查表得  $t_{0.975,df}$  為 1.9651，因為  $|t| > t_{1-\alpha/2,df}$ ，所以經過統計檢定後，二段的平均值不相等，因此二段資料不予合併。檢定第二段和第三段斜率標準差是否相等，來決定自由度的計算方式。 $F$  統計量為 1.8727，查表得  $F_{0.975,df_1,df_2}$  為 1.2064，因為  $F > F_{\alpha/2,df_1,df_2}$ ，所以檢定結果為二段的斜率標準差不相等，因此採用(4.2.22)式，作為自由度計算的依據。接下來檢定第二段資料和第三段資料的斜率是否相等，在此  $t$  檢定統計量計算為 213.6711，查表得  $t_{0.975,df}$  為 1.9634，經過統計檢定後， $|t| > t_{1-\alpha/2,df}$ ，所以二段的平均值不相等，因此二段資料不予合併。

表 4-3-1 為 KDNM 站 2001 年至 2007 年序列資料分析處理成果，可以得知經分段處理後的速度場估計其精度優於分段處理前的速度場。

表 4-3-1 KDNM 站在 2001 年至 2007 年 Y 方向速度場估計

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	0.0122 ± 0.0005	-24.4245 ± 1.0818	± 3.0704	1790
分析處理前				
第一段	0.0089 ± 0.0019	-17.8883 ± 3.7437	± 1.7940	530
第二段	0.0211 ± 0.0008	-42.1889 ± 1.6060	± 1.0808	718
第三段	0.0130 ± 0.0012	-25.9561 ± 2.3210	± 1.1209	542
分析處理後				
第一段	0.0084 ± 0.0012	-16.8481 ± 2.4261	± 0.9295	361
第二段	0.0212 ± 0.0005	-42.3418 ± 1.0701	± 0.5715	489
第三段	0.0117 ± 0.0007	-23.5218 ± 1.4657	± 0.5748	392

台灣地區七個追蹤站在 XYZ 三個方向的 GPS 序列資料分析處理成果，詳見附錄 A.1；七個追蹤站在 XYZ 三個方向之原始資料時間序列，請見附錄 A.2；七個追蹤站經分析處理後的時間序列，請見附錄 A.3。

表 4-3-2 台灣追蹤站 2001 至 2007 年 GPS 序列資料分析處理前後精度比較表

Stations	原始資料之速度場精度(mm/yr)				資料分析處理後速度場精度(mm/yr)			
	X 方向	Y 方向	Z 方向	平均精度	X 方向	Y 方向	Z 方向	平均精度
FLNM	±0.19	±0.31	±0.24	±0.25	±0.12	±0.35	±0.29	±0.25
YMSM	±0.24	±0.49	±0.29	±0.34	±0.22	±0.43	±0.28	±0.31
KDNM	±0.32	±0.54	±0.32	±0.39	±0.22	±0.53	±0.30	±0.35
KMNM	±0.31	±0.72	±0.47	±0.50	±0.20	±0.32	±0.41	±0.31
MZUM	±0.28	±0.62	±0.48	±0.46	±0.14	±0.32	±0.26	±0.24
PKGGM	±0.16	±0.33	±0.25	±0.25	±0.12	±0.27	±0.30	±0.23
TMAM	±0.23	±0.27	±0.26	±0.25	±0.15	±0.27	±0.28	±0.23

表 4-3-2 為台灣追蹤站 2001 年至 2007 年 GPS 序列資料以原始資料所估計得到之速度場精度，以及資料經過分析處理後之速度場精度成果。由數值成果顯示，經過處理後之資料，在速度場估計方面，品質大部分都有提升，僅有少數幾個方向的速度場精度未提升。如：FLNM 站的 Y 與 Z 方向，PKGGM 站的 Z 方向及 TMAM 站的 Z 方向，其中精度未提升之原因可能在於原始資料數量過多，而資料分析後因為採取分段處理的關係，造成該期間之資料量與原始資料差異太大，導致二者的自由度有所差距。因為在進行直線擬合時，當觀測量數量愈多，所擬合出來的直線斜率精度就愈高。由擬合直線的斜率與斜率精度的曲線圖(圖 4-3-15)即可得知這樣的趨勢。圖中藍色線代表斜率，紅色線代表斜率精度，從圖上顯示隨著觀測量個數增加，直線斜率愈趨穩定，斜率精度的曲線亦逐漸降低(意即精度愈高)。因此當觀測量個數有所差異時，會以擁有較大自由度者獲得較高之精度。

從七個追蹤站之平均速度場精度顯示，速度場的精度範圍從原本的±0.3 mm/yr~±0.5 mm/yr 間，經過處理之後，精度範圍提升在±0.2 mm/yr ~±0.4 mm/yr 間，顯示 GPS 序列資料經分析處理後，能夠有效提升速度場的品質。



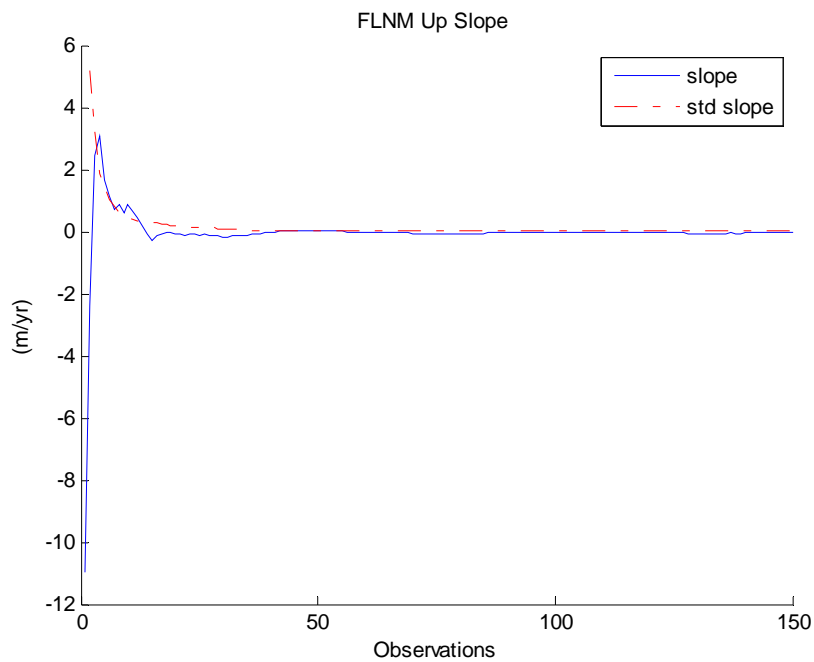


圖 4-3-15 直線擬合斜率及其精度曲線圖

一般 GPS 資料處理軟體，直接根據解算得到之序列資料估計速度場，並沒有考慮資料是否含有粗差及資料連續性的問題。本研究建立一套 GPS 序列資料分析處理流程，透過不連續運動偵測、粗差偵測、週期性訊號處理等方式，藉以提升速度場的品質。根據實際資料的數值成果顯示，經過分析處理後之序列資料，所估計之速度場相較於原始資料，精度有所提升，並且能夠考慮到資料的連續性，獲得較可靠之速度場，以利後續之應用。

## 第五章 實際資料數值分析成果

本章以台灣追蹤站 2001 年至 2007 年的序列資料為基礎，進行實際資料的數值成果分析，主要分為二個部分，第一部分為序列資料的坐標及速度場成果，第二部分為動態框架轉換模型的參數估計成果。在序列資料成果部分，根據第四章所介紹之 GPS 序列資料處理方法，估計台灣追蹤站於 IGS 框架下 2003.2 與 2007.1 時刻下之坐標及該期間之速度場，藉此分析台灣地區地表的運動行為。在動態框架轉換模型的數值分析成果方面，使用第三章所介紹之二種動態框架轉換模型進行參數估計，比較不同動態框架轉換模型的參數估計成果，探討不同動態框架轉換模型於變形框架下的適用性。

### 5-1 台灣追蹤站坐標與速度場解算成果

根據本研究所進行的 GPS 序列資料的處理與分析後，可提升測站序列資料的品質。而在處理台灣追蹤站於 2001 年到 2007 年間之 GPS 序列資料的時候，發現在 2001~2002 年這段時間與 2003 年後的序列資料，其資料行為之連續性較不一致，因此在估計實驗中所需之坐標和速度場時，便將 2001 年與 2002 年的資料剔除，採用之 GPS 資料時間從 2003 年第 1 日到 2007 年第 116 日，以資料一致性較高之序列資料作為估計測站坐標與速度場的參考依據。將 2003~2007 年台灣追蹤站於 IGS 框架下之 GPS 序列資料處理後所估計得到之坐標與速度場如表 5-1。

表 5-1-1 台灣追蹤站在 2003.2 與 2007.1 時刻下的坐標與速度場

Coordinates at epoch 2003.2						
Stations	$X$ (m)	$Y$ (m)	$Z$ (m)	$Std._X$ (m)	$Std._Y$ (m)	$Std._Z$ (m)
FLNM	-3048091.3192	4983134.3043	2552644.9667	$\pm 0.0093$	$\pm 0.0153$	$\pm 0.0115$
KDNM	-3028999.6049	5084820.7181	2369241.4062	$\pm 0.0088$	$\pm 0.0147$	$\pm 0.0108$
KMNM	-2761837.6252	5110347.1796	2625150.9958	$\pm 0.0166$	$\pm 0.0302$	$\pm 0.0177$
MZUM	-2858574.8690	4964558.3170	2794722.3162	$\pm 0.0078$	$\pm 0.0130$	$\pm 0.0107$
PKGM	-2951343.6201	5049506.2315	2535725.2788	$\pm 0.0069$	$\pm 0.0115$	$\pm 0.0100$
TMAM	-3034565.2523	5048871.0111	2437550.6788	$\pm 0.0089$	$\pm 0.0145$	$\pm 0.0109$
YMSM	-3024807.8197	4921747.0751	2696033.5944	$\pm 0.0067$	$\pm 0.0111$	$\pm 0.0101$

Coordinates at epoch 2007.1						
Stations	$X$ (m)	$Y$ (m)	$Z$ (m)	$Std._X$ (m)	$Std._Y$ (m)	$Std._Z$ (m)
FLNM	-3048091.3028	4983134.2275	2552644.9895	$\pm 0.0058$	$\pm 0.0097$	$\pm 0.0092$
KDNM	-3028999.4965	5084820.7950	2369241.3321	$\pm 0.0065$	$\pm 0.0109$	$\pm 0.0093$
KMNM	-2761837.7503	5110347.1454	2625150.9567	$\pm 0.0051$	$\pm 0.0089$	$\pm 0.0086$
MZUM	-2858574.9427	4964558.1961	2794722.2125	$\pm 0.0052$	$\pm 0.0091$	$\pm 0.0089$
PKGM	-2951343.6572	5049506.0598	2535725.1582	$\pm 0.0047$	$\pm 0.0093$	$\pm 0.0086$
TMAM	-3034565.2117	5048870.9654	2437550.5973	$\pm 0.0062$	$\pm 0.0103$	$\pm 0.0092$
YMSM	-3024807.9006	4921747.0413	2696033.4907	$\pm 0.0058$	$\pm 0.0099$	$\pm 0.0092$

Velocities in 2003~2007						
Stations	$V_x$ (m/yr)	$V_y$ (m/yr)	$V_z$ (m/yr)	$Std._V_x$ (m/yr)	$Std._V_y$ (m/yr)	$Std._V_z$ (m/yr)
FLNM	0.0042	-0.0197	-0.0058	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0002$
KDNM	0.0278	0.0197	-0.0190	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0003$
KMNM	-0.0321	-0.0088	-0.0100	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0004$	$\pm 0.0003$
MZUM	-0.0189	-0.0310	-0.0266	$\pm 0.0001$	$\pm 0.0003$	$\pm 0.0003$
PKGM	-0.0095	-0.0440	-0.0309	$\pm 0.0001$	$\pm 0.0003$	$\pm 0.0003$
TMAM	0.0104	-0.0117	-0.0209	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0002$
YMSM	-0.0208	-0.0087	-0.0266	$\pm 0.0001$	$\pm 0.0002$	$\pm 0.0003$

從表 5-1-1 的成果顯示，根據本研究的資料進行分析處理後，解算得到之台灣地區七個追蹤站的坐標精度大約介在  $\pm 0.5$  mm ~  $\pm 3$  cm 之間，其中大部分的坐標精度在  $\pm 1$  cm 上下；速度場的精度則是介於  $\pm 0.1$  mm/yr ~  $\pm 0.3$  mm/yr 間，精度在次厘米的量級。

圖 5-1-1 為台灣追蹤站在 2003~2007 年期間於 IGS 全球框架下之水平速度場。在台灣地區西部區域中的 YMSM、PKGM、KMNM 和 MZUM 四站，速度場

方向都是由西北往東南方向移動，四站之速度場量級接近，大約在 35 mm/yr 左右；而東部區域中的 FLNM、TMAM 與 KDNM 三站，其速度之運動方向則並不一致，FLNM 站的水平速度場是從東南往西北移動，TMAM 站的水平速度場由東北往西南方向移動，接近南北垂直的方向，KDNM 站之水平速度場則是由東北往西南方向移動，三站之水平速度亦不相同，其中 KDNM 站的水平速度最大，約為 20 mm/yr，TMAM 站次之，大約 14 mm/yr，FLNM 站的水平速度場最小，約 7 mm/yr。由內插水平速度場(圖 5-1-2)，可以更明顯看出來台灣地區在水平速度場的運動趨勢，大致呈現為西北與東南夾縮的運動行為，在不同區域下之速度場大小與方向也不相同。

台灣追蹤站的垂直速度場(圖 5-1-3)，看出 FLNM、PKGM、TMAM 和 KMNM 四站之垂直速度場呈現下降的現象，其中 FLNM 站和 PKGM 站之垂直速度約為 18 mm/yr，TMAM 站之垂直速度約為 22 mm/yr，KMNM 站之垂直速度約為 3 mm/yr；而 KDNM、MZUM 和 YMSM 三站是上升的，其中 KDNM 站垂直速度場約為 2 mm/yr，MZUM 站之垂直速度場約為 5 mm/yr，YMSM 站之垂直速度場約為 3 mm/yr。從台灣地區內插垂直速度場(圖 5-1-4)，顯示台灣地區垂直速度的運動行為呈現西北方往東南方下降的趨勢。

由於台灣地區因位處歐亞板塊與菲律賓海板塊的交接處，板塊間的擠壓造成台灣地區地表動態行為複雜，不論是在水平或是垂直的方向，在不同區域下其地表點位之運動行為皆有所差異。從速度場的運動趨勢可看出台灣地區所處在之坐標參考框架具有非均勻縮放的變形行為。

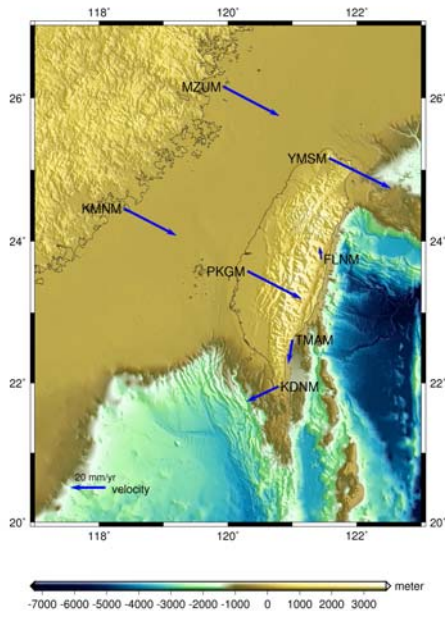


圖 5-1-1 台灣追蹤站 2003 至 2007 年水平速度場

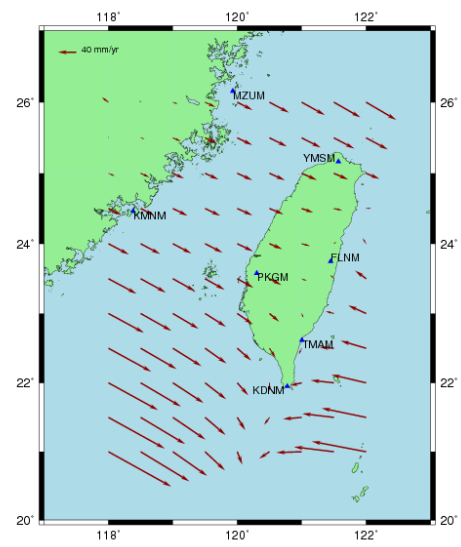


圖 5-1-2 台灣地區 2003 至 2007 年內插水平速度場

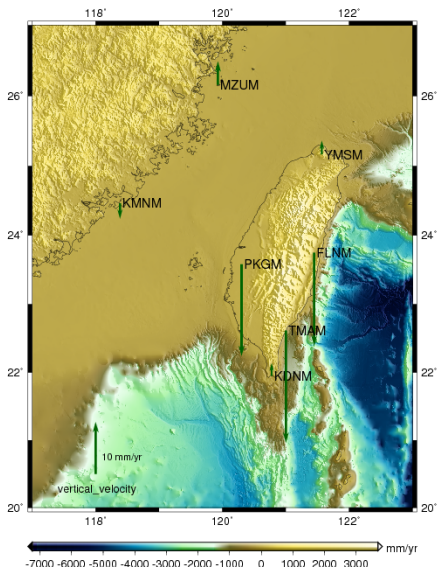


圖 5-1-3 台灣追蹤站 2003 至 2007 年垂直速度場

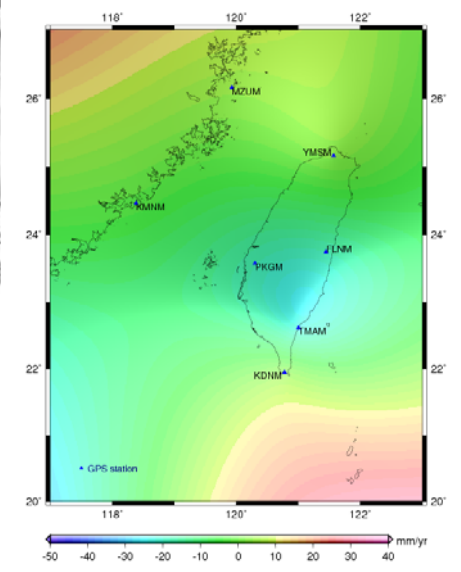
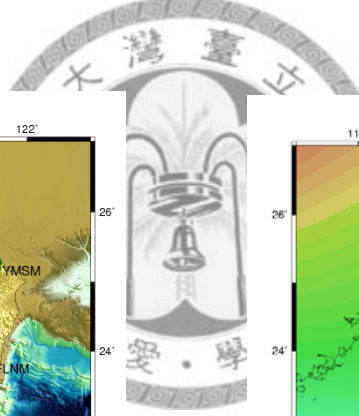


圖 5-1-4 台灣地區 2003 至 2007 年內插垂直速度場



## 5-2 動態框架轉換模型參數估計

本節針對在 2003.2 與 2007.1 時刻下的台灣追蹤站的坐標與該期間之速度場，分別利用動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型估計轉換參數，並比較不同模型的參數顯著性與轉換成果，評估模型適用性。

### 5-2-1 動態框架轉換模型參數估計(全區)

使用台灣地區七個衛星追蹤站在 2003 年到 2007 年於 IGS 框架下估計得到之坐標與該期間之速度場(表 5-1-1)，進行動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型之轉換參數估計，比較參數估計成果。

表 5-2-1-1 動態轉換模型參數估計成果(全區)

Parameters	Time-variant similarity transformation model		Parameters	Time-variant affine transformation model	
	Estimated	Std.		Estimated	Std.
$r_x(mas)$	-42.84	$\pm 37.86$	$r_x(mas)$	-1637.00	$\pm 1426.44$
$r_y(mas)$	55.05	$\pm 31.74$	$r_y(mas)$	645.22	$\pm 981.15$
$r_z(mas)$	0.25	$\pm 48.94$	$r_z(mas)$	-2987.05	$\pm 1464.23$
$T_x(m)$	0.18	$\pm 1.41$	$T_x(m)$	113.25	$\pm 99.05$
$T_y(m)$	1.29	$\pm 1.21$	$T_y(m)$	208.50	$\pm 99.04$
$T_z(m)$	0.09	$\pm 1.08$	$T_z(m)$	-18.55	$\pm 99.05$
$\dot{r}_x(mas/yr)$	-0.0000007	$\pm 0.0000031$	$\dot{r}_x(mas/yr)$	-0.007	$\pm 0.010$
$\dot{r}_y(mas/yr)$	0.0000064	$\pm 0.0000026$	$\dot{r}_y(mas/yr)$	0.003	$\pm 0.007$
$\dot{r}_z(mas/yr)$	-0.0000003	$\pm 0.0000040$	$\dot{r}_z(mas/yr)$	-0.013	$\pm 0.011$
$\dot{T}_x(m/yr)$	0.00000014	$\pm 0.00000012$	$\dot{T}_x(m/yr)$	0.0005	$\pm 0.0007$
$\dot{T}_y(m/yr)$	-0.00000009	$\pm 0.00000010$	$\dot{T}_y(m/yr)$	0.0009	$\pm 0.0007$
$\dot{T}_z(m/yr)$	0.00000003	$\pm 0.00000009$	$\dot{T}_z(m/yr)$	-0.0001	$\pm 0.0007$
$s(ppb)$	-161.63	$\pm 139.04$	$\lambda_1 - 1(ppb)$	-26932.60	$\pm 13208.78$
			$\lambda_2 - 1(ppb)$	-211.25	$\pm 274.10$
			$\lambda_3 - 1(ppb)$	10286.05	$\pm 8193.58$
			$\dot{\lambda}_1(ppb/yr)$	-0.11336	$\pm 0.09607$
$\dot{s}(ppb/yr)$	0.00002	$\pm 0.00001$	$\dot{\lambda}_2(ppb/yr)$	-0.00002	$\pm 0.00104$
			$\dot{\lambda}_3(ppb/yr)$	0.04524	$\pm 0.05961$

( ppb = part per billion, mas = milli-arc second,  $s = \sigma - 1$  )

表 5-2-1-1 為動態框架轉換模型參數估計成果。在動態相似轉換模型參數估計成果方面，得知尺度微變量為-161.63 ppb，三個旋轉參數分別是-42.84、55.05 和 0.25 (mas)，三個平移參數分別為 0.18、1.29 和 0.09 (m)，在參數率的部分，尺度微變率為 0.00002 ppb/yr，三個旋轉參數率分別為-0.0000007、0.0000064 和 -0.0000003 (mas/yr)，三個平移參數率分別為 0.00000014、-0.00000009、0.00000003 (m/yr)；參數精度的部分，尺度微變量的精度為±139.04，旋轉參數精度分別為±31.86、±31.74 和±48.94 (mas)，平移參數精度為±1.41、±1.21、±1.08 (m)，尺度微變率的精度為±0.00001 (ppb/yr)，三個旋轉參數率的精度在±0.0000026~±0.0000040 (mas/yr)之間，平移參數率精度約為±0.0000001 (m/yr)。從參數估計的成果顯示動態相似轉換模型估計之參數並不顯著。

在動態仿射轉換模型參數估計部分，三個主變形量分別為-26932.60、-211.25 和 10286.05 (ppb)，三個旋轉參數分別為-1637.00、645.22 和-2987.05 (mas)，三個平移參數分別為 113.25、208.50 和-18.55 (m)，在參數率的部分，三個變形參數率分別為-0.11336、-0.00002 和 0.04524 (ppb/yr)，三個旋轉參數率分別為-0.007、0.003 和 -0.013 (mas/yr)，三個平移參數率為 0.0005、0.0009 和-0.0001 (m/yr)；在參數精度方面，三個變形參數精度分別為±13208.78、±274.10 和±8193.58 (ppb)，三個旋轉參數精度分別為±1426.44、±98.15 和±1464.23 (mas)，三個平移參數精度約為±99 (m)，三個主變形參數率精度為±0.09607、±0.00104 和±0.05961 (ppb/yr)，三個旋轉參數率精度為±0.010、±0.007 和±0.011 (mas/yr)，三個平移參數率精度為±0.0007 m。由動態仿射轉換模型之參數估計成果顯示，大部分的參數並不顯著。

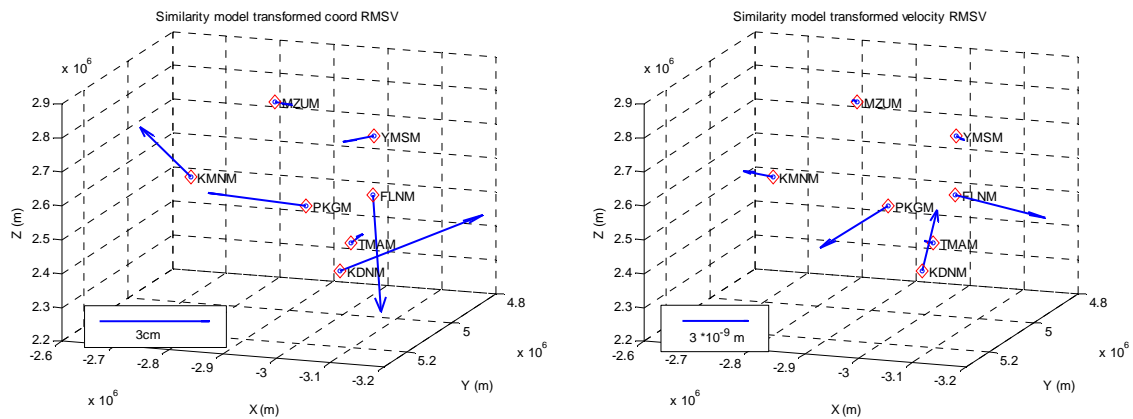


圖 5-2-1-1 經動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差(左)及速度場誤差(右)

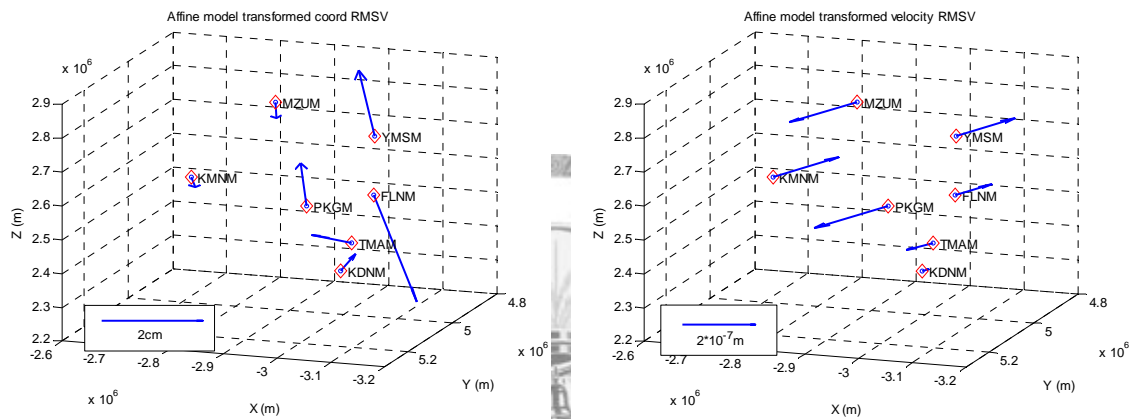


圖 5-2-1-2 經動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差(左)及速度場誤差(右)

圖 5-2-1-1 為經動態相似轉換模型進行轉換之坐標與速度場誤差向量圖。從轉換後的誤差向量圖看出，不論在坐標或是速度場方面，其誤差向量皆呈現隨機性。動態仿射轉換模型進行轉換之坐標與速度場誤差向量，如圖 5-2-1-2。從轉換後的誤差向量得知，不論在坐標或是速度場方面，其誤差向量同樣呈現隨機分佈。

表 5-2-1-2 二組動態框架轉換模型轉換後之坐標與速度場誤差

	動態相似轉換模型	動態仿射轉換模型
轉換後之坐標 RMSV (m)	$\pm 0.0470$	$\pm 0.0327$
轉換後之速度場 RMSV (m/yr)	$\pm 3.84E-09$	$\pm 2.38E-07$

但從二組動態框架轉換模型轉換後之誤差(表 5-2-1-2)得知，在坐標誤差的部分，動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差約為 $\pm 5$  cm 左右，動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差約為 $\pm 3$  cm 上下，二組模型轉換後之坐標誤差量級接近，但是動



態仿射轉換模型的誤差略小於動態相似轉換模型；在轉換後之速度場誤差方面，二組動態框架轉換模型的速度場誤差皆接近於0。

因此在使用台灣追蹤站全區(七站)作為坐標參考框架的情況下，進行不同動態框架轉換模型之參數估計。從數值成果顯示，動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型所估計出之參數並不顯著；在轉換成果方面，動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差約 $\pm 5$  cm，動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差約 $\pm 3$  cm，二組模型的轉換後之成果接近，但動態仿射轉換模型的誤差小於動態相似轉換模型的誤差。



### 5-2-2 動態框架轉換模型參數估計(五站)

由於在前一節的動態框架轉換模型參數估計實驗中，以台灣地區七個追蹤站作為參考框架的情況下，二組動態框架轉換模型所得到之參數估計成果並不顯著，因此經實驗測試，改採用台灣地區五個衛星追蹤站作為坐標參考框架，其中包括陽明山(YMSM)、太麻里(TMAM)、墾丁(KDNM)、金門(KMNM)、馬祖(MZUM)，刪除鳳林(FLNM)與金門(KMNM)二站，分別進行動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型之轉換參數估計。刪除 FLNM 與 KMNM 二站的主要因為，在以七個追蹤站作為參考框架的轉換成果顯示，以 FLNM 與 KMNM 二站轉換後之誤差最大，表示這二站的點位行為最不符合動態轉換模型所能模式之行為，在此將這二站刪除，以五站作為參考框架進行動態框架轉換模型的參數估計。然而從嚴謹的觀點，應該考慮實際各個測站的地質構造及所受到板塊作用力的影響，選擇屬於在同樣的均勻材質區域下及受到均勻外力產生變形行為的測站，作為定義之參考框架進行轉換。



表 5-2-2-1 動態轉換模型參數估計成果(五站)

Parameters	Time-variant similarity transformation model		Parameters	Time-variant affine transformation model	
	Estimated	Std.		Estimated	Std.
$r_x(mas)$	-18.07	$\pm 38.79$	$r_x(mas)$	-956.88	$\pm 618.02$
$r_y(mas)$	28.04	$\pm 39.77$	$r_y(mas)$	1154.67	$\pm 424.15$
$r_z(mas)$	144.57	$\pm 86.22$	$r_z(mas)$	-3148.42	$\pm 634.04$
$T_x(m)$	-3.45	$\pm 2.48$	$T_x(m)$	114.18	$\pm 42.87$
$T_y(m)$	-1.46	$\pm 1.73$	$T_y(m)$	240.06	$\pm 42.87$
$T_z(m)$	0.10	$\pm 0.94$	$T_z(m)$	50.23	$\pm 42.87$
$\dot{r}_x(mas/yr)$	-0.000011	$\pm 0.000007$	$\dot{r}_x(mas/yr)$	-0.006	$\pm 0.005$
$\dot{r}_y(mas/yr)$	-0.000008	$\pm 0.000007$	$\dot{r}_y(mas/yr)$	0.007	$\pm 0.003$
$\dot{r}_z(mas/yr)$	0.000010	$\pm 0.000015$	$\dot{r}_z(mas/yr)$	-0.020	$\pm 0.005$
$\dot{T}_x(m/yr)$	-0.0000002	$\pm 0.0000004$	$\dot{T}_x(m/yr)$	0.0007	$\pm 0.0003$
$\dot{T}_y(m/yr)$	-0.0000003	$\pm 0.0000003$	$\dot{T}_y(m/yr)$	0.0016	$\pm 0.0003$
$\dot{T}_z(m/yr)$	-0.0000005	$\pm 0.0000002$	$\dot{T}_z(m/yr)$	0.0003	$\pm 0.0003$
$s(ppb)$	-91.54	$\pm 137.97$	$\lambda_1 - 1(ppb)$	-33979.28	$\pm 5974.78$
			$\lambda_2 - 1(ppb)$	-76.11	$\pm 78.45$
			$\lambda_3 - 1(ppb)$	8881.44	$\pm 3098.96$
$\dot{s}(ppb/yr)$	0.00006	$\pm 0.000003$	$\dot{\lambda}_1(ppb/yr)$	-0.22236	$\pm 0.04452$
			$\dot{\lambda}_2(ppb/yr)$	0.00002	$\pm 0.00047$
			$\dot{\lambda}_3(ppb/yr)$	0.05296	$\pm 0.02309$

(ppb = part per billion, mas = milli-arc second,  $s = \sigma - 1$ )

從動態相似轉換模型的參數估計成果(表 5-2-2-1)可看出，尺度參數值為-91.54 (ppb)，三個旋轉參數為-18.07，28.04 和 144.57 (mas)，三個平移參數分別是-3.45、-1.46 和 0.10 m；參數率的部分，尺度微變率為 0.00006 (ppb/yr)，三個旋轉參數率為-0.000011、-0.000008 和 0.000010 (mas/yr)，三個平移參數率為-0.0000002、-0.0000003 和-0.0000005。參數精度的部分，尺度微變量的精度為 $\pm 137.97$  ppb，三個旋轉參數的精度是 $\pm 38.79$ 、 $\pm 39.77$  和 $\pm 86.22$ ，三個平移參數精度為 $\pm 2.48$ 、 $\pm 1.73$  和 $\pm 0.94$  m；在參數率精度的部分，尺度微變率精度為 $\pm 0.00003$ 、三個旋轉率分別是 $\pm 0.000007$ 、 $\pm 0.000007$  和 $\pm 0.000015$ ，三個平移參數率為 $\pm 0.0000004$ 、 $\pm 0.0000003$  和 $\pm 0.0000002$  m/yr。以台灣地區五個衛星追蹤站作為參考框架的情況

下，動態相似轉換模型所估計之參數及參數率，大部分的參數估計成果並不顯著，只有尺度微變率顯著，其餘參數皆不顯著。

在動態仿射轉換模型之參數估計部分， $\lambda_1 - 1$ 、 $\lambda_2 - 1$ 和 $\lambda_3 - 1$ 分別為-33979.28、-76.11 和 8881.44 (ppb)，估計得到之三個旋轉參數分別為-956.88、1154.67 和 -3148.42 (mas)，三個平移參數為 114.18、240.06 和 50.23 (m)，三個主變形參數率分別為-0.22236、0.00002 和 0.05296，三個旋轉參數率為-0.006 和 0.007 和-0.020 (mas/yr)，平移參數率為 0.0007、0.0016 與 0.0003 (m/yr)；參數精度方面，三個主變形量參數精度為 $\pm 5971.78$ 、 $\pm 78.45$  和 $\pm 3098.96$  (ppb)，旋轉參數率精度為 $\pm 618.02$ 、 $\pm 424.15$  和 $\pm 634.04$  (mas)，平移參數精度約為 $\pm 42.87$  (m)，三個主變形參數率精度為 $\pm 0.04452$ 、 $\pm 0.00047$  和 $\pm 0.02309$  (ppb/yr)，三個旋轉參數率精度範圍在 $\pm 0.003 \sim \pm 0.005$  (mas/yr)之間，三個平移參數率精度為 $\pm 0.3$  mm/yr。

表 5-2-2-1 中具有顯著的參數表格底部用黃色來標示，可以看出三個主變形的參數估計可以看出有二個主變形參數顯著，分別是 $\lambda_1$ 和 $\lambda_3$ ，其中 $\lambda_1$ 是壓縮的變形行為，而 $\lambda_3$ 是伸長之變形行為，顯示此框架具有非均勻的變形行為，另外在 Y 和 Z 方向的旋轉參數與 X 與 Y 方向的平移參數顯著，以及 Z 方向的旋轉率、Y 方向的平移率與尺度率 $\dot{\lambda}_1$ 顯著。選取台灣地區五個追蹤站資料得到之動態仿射轉換模型參數估計成果，相較於動態相似轉換模型，大部分參數估計成果呈現顯著的情形。

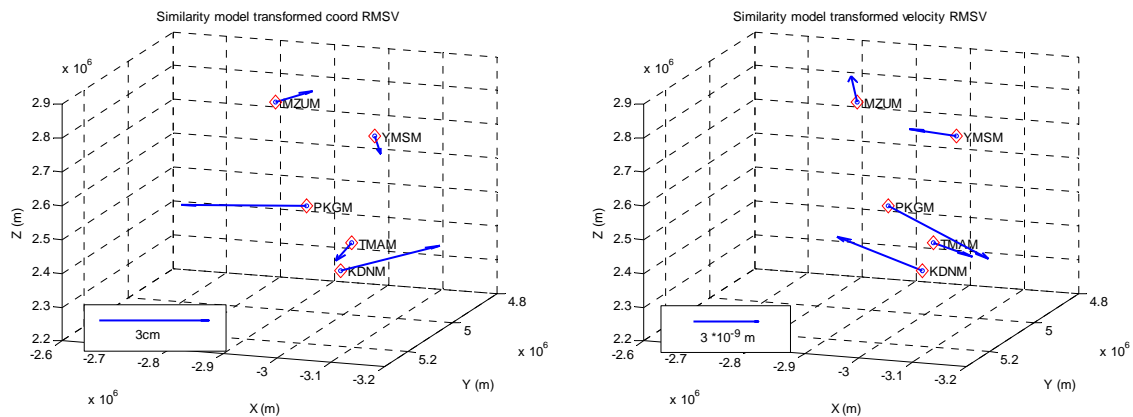


圖 5-2-2-1 經動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差(左)與速度場誤差(右)

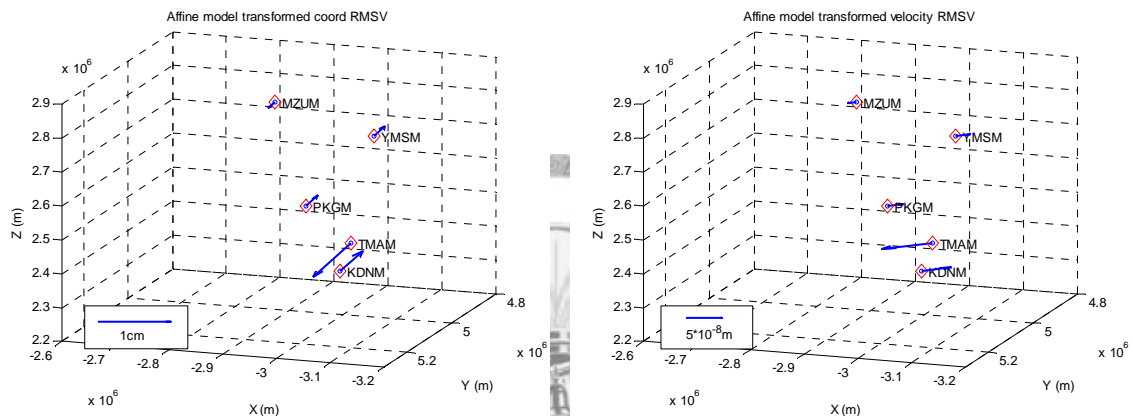


圖 5-2-2-2 經動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差(左)與速度場誤差(右)

圖 5-2-2-1 為在使用台灣追蹤站五站作為參考框架的情況下，經動態相似轉換模型進行轉換之坐標與速度場誤差向量圖。從轉換後的誤差向量圖看出，不論在坐標或是速度場方面，動態相似轉換模型之誤差向量皆呈現隨機性。在動態仿射轉換模型的部分(圖 5-2-2-2)，從轉換後坐標與速度場的誤差向量分佈情況看來，同樣呈現隨機分佈的情形。

表 5-2-2-2 二組動態框架轉換模型轉換後之坐標與速度場差誤差

	動態相似轉換模型	動態仿射轉換模型
轉換後之坐標 RMSV (m)	0.0356	0.0091
轉換後之速度場 RMSV (m/yr)	6.34E-09	6.79E-08

從轉換後之坐標與速度場的誤差數值成果(表 5-2-1-2)顯示，在坐標誤差的部分，動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差約為±3.6 cm 左右，而動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差約為±9 mm 上下，動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差小於動

態相似轉換模型，顯示動態仿射轉換模型的轉換成果優於動態相似轉換模型；在轉換後之速度場誤差方面，二組動態框架轉換模型的速度場誤差皆接近於 0。

將動態仿射轉換模型所估計得到之三個變形量與變形方向，以向量的方向呈現在地心地固坐標系統( Earth Centered Earth Fixed, ECEF )上，如圖 5-2-2-3。

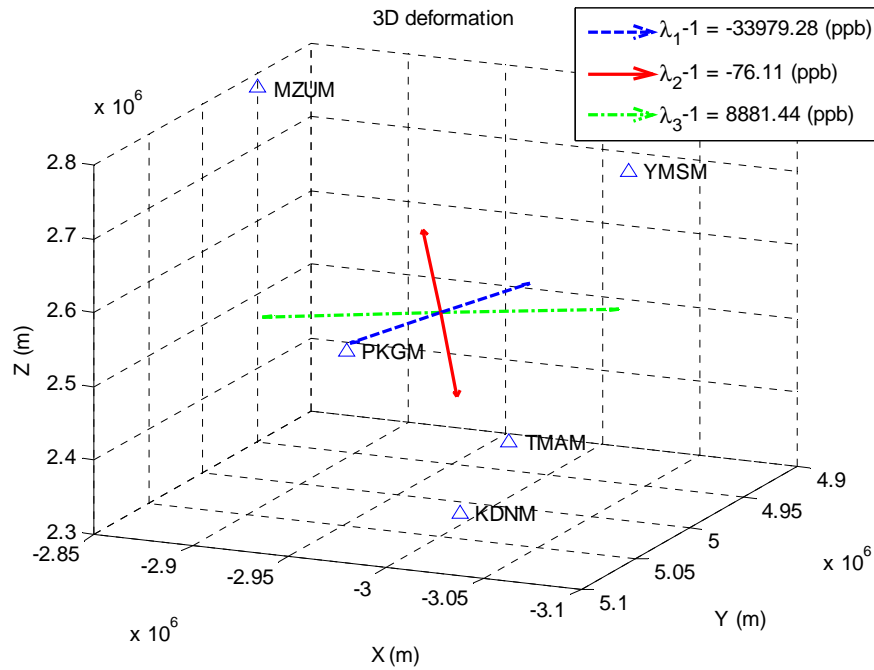


圖 5-2-2-3 台灣地區於 ECEF 坐標系統下之三個主變形量與變形方向

由於在三維空間中不易看出變形行為對實際地表所造成之影響，在此透過地心地固(ECEF)坐標系與區域坐標系(local Cartesian coordinate system)之間的轉換公式((5.2.1)式)，將原本在 ECEF 坐標系中的變形張量矩陣，轉換到區域坐標系中，進而解算在區域坐標系統下之二維平面的變形行為。地心地固坐標系與區域坐標系之轉換公式表示如(5.2.1)式。

$$X_{enu} = RX_{xyz} \quad (5.2.1)$$

其中  $X_{enu}$  代表點位在區域坐標系中的 ENU 坐標向量， $X_{xyz}$  代表點位在 ECEF 坐標系中的 XYZ 坐標向量， $R$  代表由 ECEF 坐標系中心到區域坐標系中心的旋轉矩陣，是由對  $y$  軸與  $z$  軸的旋轉矩陣所組成，如(5.2.2)式所示

$$R = R_y \cdot R_z \quad (5.2.2)$$

其中  $R_y$  與  $R_z$  矩陣的元素分別如下

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - \phi) & 0 & -\sin(90^\circ - \phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90^\circ - \phi) & 0 & \cos(90^\circ - \phi) \end{bmatrix} \quad (5.2.3)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & \sin(\lambda) & 0 \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2.4)$$

在(5.2.3)式與(5.2.4)式中， $\phi$ 與 $\lambda$ 分別代表區域中心所在之緯度與經度。

在 ECEF 坐標系統下的張量矩陣，可以表示成

$$X' = EX \quad (5.2.5)$$

其中  $X'$  代表變形後坐標向量， $X$  代表變形前坐標向量， $E$  代表張量矩陣。

藉由變形前後的坐標向量經由(5.2.1)式的轉換公式，可推導出

$$U' = E_{enu} U \quad (5.2.6)$$

其中

$$E_{enu} = RER^T \quad (5.2.7)$$

在(5.2.6)式中  $U'$  代表在區域坐標系中變形後的坐標向量， $U$  代表在區域坐標系中變形前的坐標向量， $E_{enu}$  代表在區域坐標系中的張量矩陣。在(5.2.7)式中， $E_{enu}$  代表在區域坐標系中的張量矩陣， $R$  代表 ECEF 坐標系統中心到區域坐標系中心的旋轉矩陣， $E$  代表在 ECEF 坐標系統中的張量矩陣。

經由(5.2.6)式獲得在區域坐標系中的張量矩陣 $E_{enu}$ 後，可透過特徵值分解法，獲得在 EN 平面上的特徵值與特徵向量，進而求得到二維平面上的變形行為。

藉由上述之轉換公式，所得到台灣地區於區域坐標系統下之二維變形量與變形方向，如圖 5-2-2-4 所示。

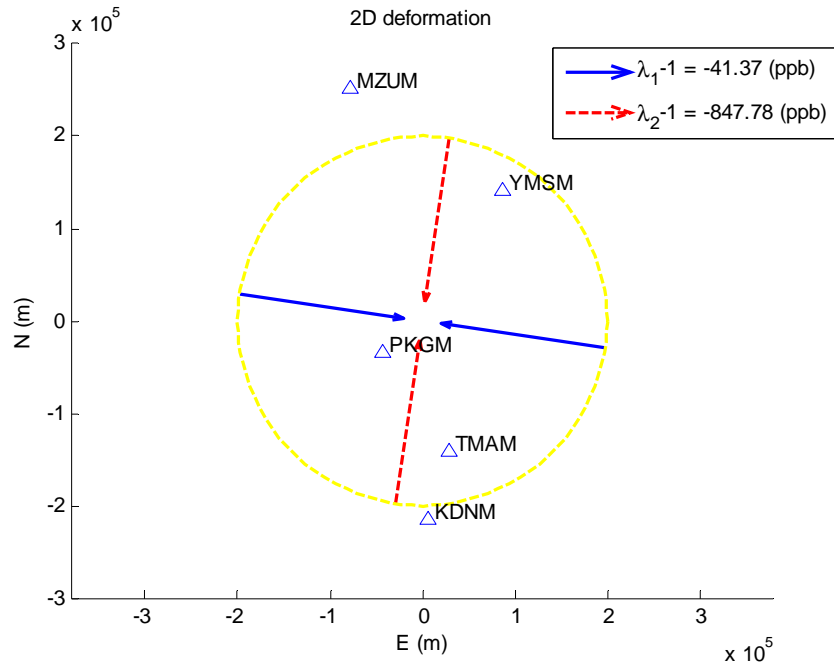


圖 5-2-2-4 台灣地區二維平面上之變形行為

根據台灣地區水平速度場運動行為，在水平方向運動行為呈現東南-西北方向的擠壓，從台灣地區在區域坐標系下的二維變形行為(圖 5-2-2-4)看出， $\lambda_1$ 的變形行為是呈現東南-西北方向夾縮， $\lambda_2$ 則是呈現是東北-西南方向的夾縮。因此 $\lambda_1$ 所顯示之變形行為與實際上之水平方向的運動一致。

### 5-3 數值成果分析

從台灣地區追蹤站的數值分析實驗中，以台灣地區 2003 年到 2007 年的 GPS 觀測資料為基礎，解算得到台灣追蹤站於 IGS 框架下，2003.2 時刻與 2007.1 時刻的坐標與該期間之速度場，分別使用動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型進行參數估計，比較不同動態框架轉換模型的參數估計成果，並探討模型之適用性。



在使用台灣地區七個追蹤站作為坐標參考框架的情況下，動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型的參數估計成果並不顯著，動態相似轉換模型的轉換後之坐標誤差約 $\pm 5$  cm，動態仿射轉換模型的轉換後之坐標誤差約 $\pm 3$  cm，二組動態框架轉換模型轉換成果接近，但動態仿射轉換模型略優於動態相似轉換模型。

在刪除鳳林(FLNM)與金門(KMNM)二站後，選取五個追蹤站作為坐標參考框架的情況下。在動態相似轉換模型的參數估計部分，大部分的參數都不顯著，只有尺度參數和在Z方向的平移參數率顯著；在動態仿射轉換模型的參數部分，參數的顯著性則大幅提升，大部分的參數估計顯著。在參數方面，有二個尺度變形量顯著，二個旋轉參數顯著，二個平移參數顯著；在參數率方面，有二個尺度參數率顯著，二個旋轉參數率顯著和二個平移參數率顯著。在轉換成果的部分，動態相似轉換模型轉換後坐標的誤差約為 $\pm 3.6$  cm，而動態仿射轉換模型轉換後的坐標誤差約為 $\pm 9$  mm，與觀測量的精度一致(台灣追蹤站的坐標精度大部分在 $\pm 1$  cm上下)，顯示經過動態仿射轉換模型轉換後之坐標點位，可以反應出與原始觀測量相同量級的精度，而動態相似轉換模型轉換後的誤差大於觀測量的精度，表示使用動態相似轉換模型來進行轉換，會獲得會比原始觀測量精度更低的點位資訊，模型中含有系統誤差存在，無法正確描述變形框架的轉換關係。因此動態仿射轉換模型能夠模式框架間的變形行為，建立變形框架間的動態幾何關係。

台灣地區位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交接處，因為二個板塊之間的作用力影響，導致地殼板塊產生擠壓、聚合與張裂等行為，地表經常有劇烈變化。在不同區域所受到的作用力也不同，從台灣地區速度場顯示，在東、西部地表點位的運動方向並不一致，導致所定義之框架含有非均勻之變形行為。以台灣追蹤站作為參考框架的情況下，使用動態相似轉換模型估計轉換參數，其參數估計成果並不顯著，因為框架的動態行為並不符合一個均勻縮放的數學模式，無法藉由一個均勻尺度來描述變形行為；使用動態仿射轉換模型進行參數估計，雖然在全區七站的情況下，參數估計成果並不顯著，但是藉由選取合適之測站作為坐標參考

框架，動態仿射轉換模型的參數估計成果，與動態相似轉換模型相比，參數顯著性明顯提升，主要的原因在於動態仿射轉換模型適用於非均勻縮放的區域，其假設條件是在一均勻材料上受到外力導致非均勻的變形行為。台灣地區地層構造複雜，東、西部所受到的作用力不同，即使是在東部縱谷區域，位於斷層附近區域點位與位於海岸山脈區域點位的速度場也有所不同，因此若考慮全區的轉換，單靠一個動態仿射轉換模型仍不足符合各個點位之行為，因為該區域之變形行為不符合仿射模型中數學模式的最初假設。但是藉由選取合適之測站，使框架之變形行為較符合動態仿射轉換模型所描述之變形行為，動態仿射轉換模型能夠描述框架間之不等向變形行為，且轉換後之誤差能反應出與觀測量同等量級之精度，顯示在非均勻的變形框架下，動態仿射轉換模型相較於動態相似轉換模型獲得較合理成果。



## 第六章 結論與建議

全球板塊運動造成地表點位之空間位置隨時間改變，連帶造成地表控制點位亦跟著變動，為了考慮點位受到地殼變動而產生坐標改變之現象，國際組織因此定義了動態參考框架，藉此描述地表的動態空間資訊。台灣地區位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交接處，板塊活動頻繁，從地質方面的相關研究顯示，台灣地區地表變化顯而易見，對台灣地區而言，建立適合之動態框架轉換模型，作為連結不同框架下之空間資訊，有其必要性。

目前應用於動態框架轉換的數學模型有二種，分別是以相似轉換以及以仿射轉換為基礎之動態框架轉換模型。動態相似轉換模型主要適於大範圍之參考框架間，框架間沒有不均勻的變形存在，應用於框架內部沒有變形行為之整體框架轉換，具有相當的成效。然而在若應用於板塊相對運動明顯之區域，動態相似轉換模型便無法正確描述框架的關係。動態仿射轉換模型考慮了點位的主動變形與框架之間的轉換關係，並透過變形張量元素，描述在不同方向的尺度變化，藉以模式框架間之非均勻變形行為，能夠彌補動態相似轉換模型不足之處。

GPS 可對地表點位進行長期連續觀測，所解算得到之序列資料，可提供地表點位的空間資訊，進而獲得地表點位的動態行為趨勢，然而觀測資料本身可能含有粗差，或是因為自然或人為因素導致序列資料行為產生不一致性，直接使用這樣的資料進行後續之應用並不可靠，可能會造成對地表動態行為的誤判。

地表點位之速度場是透過 GPS 序列資料所估計而得，當資料品質愈好時，所獲得之速度場愈可靠。除了資料本身的品質之外，觀測量之數目亦是影響速度場估計的重要因素，當觀測資料愈多時，所估計之速度場會愈趨穩定；反之，若觀測資料很少、或是使用不連續的觀測資料，所解算得到之速度場並不穩定，其精

度亦較差，增加速度場的不確定性，因而無法獲得正確的地表動態資訊。因此唯有透過長期連續的觀測，並將解算得到之序列資料經過分析、處理，始能獲得品質可靠之速度場。

本研究根據台灣追蹤站 2001 年至 2007 年 RINEX 資料作為基礎，以一套完整資料處理流程及採用嚴密的數學模型的情況下，建構動態框架轉換模型的參數估計方法，獲得可靠的參數估計成果。從一開始使用 GAMIT 與 GLOBK 軟體處理資料，獲得台灣追蹤站於 IGS 框架下的解算成果，另外再針對序列資料進行處理與分析，包括不連續運動、粗差偵測等方式，提升資料品質，進而作為後續參數估計的可靠依據。並使用動態框架轉換模型進行轉換參數估計，其中包含動態相似轉換模型與動態仿射轉換模型。根據本研究所得之數值分析成果可獲得以下的結論與建議。

## 6-1 結論

(1) 本研究以 2003 年~2007 年台灣追蹤站的 GPS 序列資料作為分析基礎下，透過不連續運動、粗差偵測等方式對序列資料進行處理與分析，能夠獲得品質較高之速度場。從數值分析成果顯示，經分析處理後之序列資料，所估計之速度場精度從原本的  $\pm 0.3 \text{ mm/yr} \sim \pm 0.5 \text{ mm/yr}$ ，提升到  $\pm 0.2 \text{ mm/yr} \sim \pm 0.4 \text{ mm/yr}$  之間，顯示經過分析處理後之資料，具有更高之品質。

(2) 以台灣追蹤站作為參考框架的情況下，進行動態框架轉換模型的參數估計。根據實驗成果顯示，在選取適當測站作為坐標參考框架的情況下，在參數估計方面，動態仿射轉換模型的參數顯著性，優於動態相似轉換模型；在轉換成果方面，動態相似轉換模型轉換後之坐標誤差約為  $\pm 3.6 \text{ cm}$ ，動態仿射轉換模型轉換後之坐標誤差約為  $\pm 9 \text{ mm}$ ，與觀測量的精度一致，獲得較合理的轉換成果。

(3) 從動態仿射轉換模型於區域坐標系統下所估計之二維變形量與變形方向，得到在東南-西北夾縮的變形行為，與台灣地區實際地表運動行為一致，顯示於框架變異的情況下，動態仿射轉換模型可以模式框架的非均勻變形行為，比動態相似轉換模型更有彈性。

(4) 動態仿射轉換模型並非適用於所有的非均勻變形框架，因為它的數學模型是建立在一個均勻材質受到外力導致之非均勻變形行為。如果參考框架所在之區域屬於非均質的情況下，動態仿射轉換模型並沒有辦法正確模式該框架的變形行為。

## 6-2 建議

(1) 依據本研究之成果顯示，在考慮資料行為一致性的情況下，經過分析處理之 GPS 資料品質能夠有所提升，獲得可靠的速度場。然而發現序列資料中有不連續的行為發生時，應該要進行實地調查，探究導致資料行為趨勢產生不連續的原因，分析屬於自然或是人為因素所造成。此外，由於台灣地區地震頻繁，因此當資料行為具有不連續性時，可與中央氣象局的地震測報中心進行資料比對，確認當造成資料行為分段的期間是否有發生地震，進而確保所估計的速度場能符合實際地表的行為。

(2) 由台灣追蹤站的速度場的運動趨勢得知，在東、西部的運動方向並不一致，顯示台灣地區所定義之參考框架含有非均勻之變形行為，因此在選用動態框架轉換模型時，需考慮能夠模式非均勻變形行為的模型，若採用傳統的動態相似轉換模型，在估計參數時可能會含有系統誤差，無法正確描述框架間之動態幾何關係。動態仿射轉換模型能夠模式框架間之不等向變形，然而必須假設是在均質區域受到外力導致之非均勻變形行為。由於仿射轉換模型仍無法適用於框架所有可能的變異情況，因此若在一个非均勻材質受外力導致變形的框架下，採用動態

仿射轉換模型，可以先將欲轉換之區域進行切割，透過分區轉換的方式，使在轉換的區域框架屬於在同一均勻材質，藉此符合動態仿射轉換模型之數學定義。

(3) 使用分區進行轉換參數的估計，需要藉由足夠之 GPS 測站提供坐標與速度場資訊。就本研究中所使用之台灣追蹤站，因為只有七個測站，在分區估計無法提供足夠之資訊。從長期的觀測來看，地表的運動行為是一個連續、緩慢的運動過程，因此需要具有長久性的測站，對地表點位進行長期連續的觀測，進而估計正確可靠的地表點位空間資訊。未來可以考慮加入其它單位所建置之 GPS 追蹤站如：中央氣象局、中央研究院或中央地質調查所之 GPS 連續觀測站、或是內政部國土測繪中心所建構之高精度之電子化全球衛星即時動態定位系統(e-GPS)，提供長期連續的觀測資料，並配合該區域之地質構造選擇合適之分區，以進行後續的應用。



## 參考文獻

- Abusali PAM, Schutz BE, Tapley BD, and Bevis M (1995) Transformation between SLR/VLBI and WGS-84 reference frames. *Bulletin Géodésique* 69:61-72.
- Altamimi Z, Sillard P, and Boucher C (2002) ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* 107(B10): 2214. doi: 10.1029/2001JB000561.
- Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, Garayt B, and Boucher C (2007) ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research* 112(B09401). doi:10.1029/2007JB004949.
- Billington EW and Tate A (1981) *The Physics of Deformation and Flow*. McGraw-Hill Inc, New York, pp 52-54.
- Boucher C, Altamimi Z (1989) The initial IERS Terrestrial Reference Frame. IERS Technical Note 1, Observatoire de Paris, Paris, France.
- Boucher C and Altamimi Z (1996) International Terrestrial Reference Frame. *GPS World* 7: 71-74.
- Chang CC, Tseng CL (1999) A geocentric system in Taiwan. *Survey Review* 273: 195-203.
- Chen CC, Chi SC, Chen CS, and Yang CH (2007) Electrical structures of the source area of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Spatial correlation between crustal conductors and aftershocks. *Tectonophysics*. doi:10.1016/j.tecto.2007.01.018.
- DeMets C, Gordon RG, Argus DF, and Stein S (1990) Current plate motions. *Geophysical Journal International* 101: 425-478.
- Dow JM, Neilan RE, and Gendt G (2005) The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade, *Adv. Space Res.* 36(3): 320-326. doi:10.1016/j.asr.2005.05.125
- Ferland R (2004) Reference frame working group technical report (International GPS Service 2001-2002 Technical Report) IGS Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA.

- Han JY and van Gelder BHW (2006) Stepwise parameter estimations in a time-variant similarity transformation. *Journal of Surveying Engineering* 132(4): 141-148.
- Han JY, van Gelder BHW, and Soler T (2007) On covariance propagation of eigenparameters of symmetric n-D tensors. *Geophysical Journal International* 170(2): 503-510
- Herring TA, King RW, and McClusky SC (2006) GAMIT Reference Manual Release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology.
- Herring TA, King RW, and McClusky SC (2006) GLOBK Reference Manual Release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology.
- Hsu RS (2005) Adjustment Treatments of Surveying Measurements. Department of Civil Engineering. National Taiwan University.
- Hsu YJ, Simons M, Yu SB, Kuo LC, and Chen HY (2003) A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. *Earth and Planetary Science Letters* 211: 287-294. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00203-6
- Hu JC, Angelier J, and Yu SB (1997) An interpretation of the active deformation of southern Taiwan based on numerical simulation and GPS studies. *Tectonophysics* 274: 145-169.
- Kotsakis C (2008) A study on the reference frame consistency in recent Earth gravitational models. *Journal of Geodesy*. doi:10.1007/s00190-008-0227-8
- Maidment DR (1993) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, pp. 17.21-17.23.
- McIntosh K, Nakamura Y, Wang TK, Shih RC, Chen A, and Liu CS (2005) Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine Sea. *Tectonophysics* 401: 23-54.
- Mentes G (2008) Observation of recent tectonic movements by extensometers in the Pannonian Basin. *Journal of Geodynamics* 45: 169-177.
- Mikhail EM and Ackermann F (1976) *A United Approach to Least Squares adjustment, Observations and Least Squares*. IEP-A Dun-Donnelley, New York.



- National Imagery and Mapping Agency, Department of Defense (2000) World Geodetic System 1984. Its definition and relationships with local geodetic systems. DMA Technical Report 8350.2 Third Edition.
- Nikolaidis R (2002) Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Univ. of Calif. San Diego, pp. 249.
- Ota Y, Nina LY, Chen YG, Chang HC, Hung JH (2006) Newly found Tunglo Active Fault System in the fold and thrust belt in northwestern Taiwan deduced from deformed terraces and its tectonic significance. *Tectonophysics*. 417: 305-323.
- Overgaauw B, Ambrosius BAC, and Wakker KF (1994) Analysis of the EUREF-89 GPS data from the SLR/VLBI sites. *Bulletin Géodésique* 68:19-28.
- Snay RA (2003) Introducing two spatial reference frames for regions of the Pacific ocean. *Surveying and Land Information Science* 63(1): 5-12.
- Soler T (1998) A compendium of transformation formulas useful in GPS work. *Journal of Geodesy* 72(7-8): 482-490.
- Soler T and Snay RA (2004) Transforming positions and velocities between the International Terrestrial Reference Frame of 2000 and North American Datum of 1983. *Journal of surveying engineering*: 49-55. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(49)
- Steed JB (1995) Geocentric Datum of Australia. *Surveying World* 4: 14-17.
- Schwarz CR (1989) North American Datum of 1983. NOAA Professional Paper NOS2. U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, M.D.
- Smith WHF and Wessel P (1990) Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics* 55 (3): 293-305.
- Tanaka S, Sato H, Matsumura S, and Ohtake M (2006) Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippine Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan. *Tectonophysics* 417: 69-80.
- UNAVCO (2008) UNAVCO Facility: Plate Motion Calculator. [http://sps.unavco.org/crustal\\_motion/dxdt/nnrcalc/](http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/nnrcalc/). Cited December 2008.
- Wessel P and Smith WHF (1998) New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS, Trans. Amer. Geophys. U.* 79(47): 579.

Wolf PR and Ghilani CD (1997) Adjustment Computations Statistics and Least Squares in Surveying and GIS. John Wiley & Sons, New York.

Yu SB, Chen HY, and Kuo LC (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics 274: 41-59.

Yu SB and Kuo LC (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics 333: 199-217.

沈三齊 (2005) ITRF2000 下台灣追蹤站框架之建立與探討 TWD97 坐標系統之變化，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，台南。

余徐維，韓仁毓 (2007) 建立台灣地區動態地面座標參考框架之可行性研究，第五屆海峽兩岸測繪研討會。

邱元宏，史天元 (2008) 參考框架及時刻與動態基準之初探。第二十七屆測量及空間資訊研討會論文集，pp. 665-673。

黃惠琪 (2004) 依動態基準概念估測位移速度場區域函數之研究。國防大學中正理工學院，軍事工程研究所碩士論文，中壢。

曾清涼，儲慶美 (1999) GPS 衛星測量原理與應用。國立成功大學衛星資訊研究中心，第二版，台南。



# 附錄

## A.1 台灣追蹤站 GPS 序列資料處理詳細成果

根據本研究對序列資料分析處理後，所估計得到台灣地區追蹤站在 XYZ 三個方向的速度場成果如下所示，其中  $m$  代表速度場， $b$  代表截距， $\hat{\sigma}_0$  代表後驗單位權中誤差， $obs\#$  代表資料天數。

### A.1.1 FLNM 站

表 A-1-1-1 FLNM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	$obs\#$
原始資料	$0.0068 \pm 0.0002$	$-13.5610 \pm 0.3814$	$\pm 1.5909$	1734
剔除粗差	$0.0065 \pm 0.0001$	$-12.9319 \pm 0.2357$	$\pm 0.8293$	1254
剔除訊號	$0.0067 \pm 0.0001$	$-13.4897 \pm 0.2674$	$\pm 0.9405$	1254

表 A-1-1-2 FLNM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	$obs\#$
原始資料	$-0.0019 \pm 0.0003$	$3.7811 \pm 0.6216$	$\pm 1.6022$	1734
分析處理前				
第一段	$-0.0057 \pm 0.0008$	$11.3841 \pm 1.5491$	$\pm 1.4644$	865
第二段	$-0.0193 \pm 0.0005$	$38.6890 \pm 1.0875$	$\pm 1.0750$	869
分析處理後				
第一段	$-0.0057 \pm 0.0005$	$11.3247 \pm 1.0599$	$\pm 0.7798$	592
第二段	$-0.0195 \pm 0.0003$	$39.0060 \pm 0.6978$	$\pm 0.5730$	630

表 A-1-1-3 FLNM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$0.0075 \pm 0.0002$	$-15.0987 \pm 0.4861$	$\pm 1.5568$	1734
分析處理前				
第一段	$0.0117 \pm 0.0010$	$-23.4886 \pm 2.0588$	$\pm 1.5441$	568
第二段	$0.0050 \pm 0.0005$	$-9.9446 \pm 0.9594$	$\pm 1.5318$	1166
分析處理後				
第一段	$0.0117 \pm 0.0006$	$-23.4618 \pm 1.2919$	$\pm 0.8007$	407
第二段	$0.0055 \pm 0.0003$	$-10.9361 \pm 0.5873$	$\pm 0.7904$	823



### A.1.2 YMSM 站

表 A-1-2-1 YMSM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0292 \pm 0.0002$	$58.3082 \pm 0.4886$	$\pm 2.4916$	1729
分析處理前				
第一段	$-0.0451 \pm 0.0035$	$90.1651 \pm 6.9687$	$\pm 2.0474$	255
第二段	$-0.0328 \pm 0.0004$	$65.5701 \pm 0.7841$	$\pm 1.7794$	963
第三段	$-0.0222 \pm 0.0008$	$44.4484 \pm 1.6642$	$\pm 1.3491$	511
分析處理後				
第一段	$-0.0478 \pm 0.0018$	$95.5978 \pm 3.6273$	$\pm 0.9409$	189
第二段	$-0.0310 \pm 0.0002$	$61.9405 \pm 0.4466$	$\pm 0.7966$	733
第三段	$-0.0218 \pm 0.0005$	$43.5066 \pm 0.9494$	$\pm 0.6724$	385

表 A-1-2-2 YMSM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0151 \pm 0.0005$	$30.2909 \pm 0.9876$	$\pm 3.0969$	1729
分析處理前				
第一段	$-0.0523 \pm 0.0056$	$104.7319 \pm 11.1182$	$\pm 2.0539$	254
第二段	$0.0062 \pm 0.0006$	$-12.3608 \pm 1.2916$	$\pm 1.7907$	964
第三段	$-0.0165 \pm 0.0010$	$33.0902 \pm 2.0483$	$\pm 0.9907$	511
分析處理後				
第一段	$-0.0563 \pm 0.0035$	$112.5802 \pm 7.0781$	$\pm 1.0558$	182
第二段	$0.0060 \pm 0.0004$	$-12.1314 \pm 0.8616$	$\pm 0.9033$	700
第三段	$-0.0164 \pm 0.0006$	$32.7963 \pm 1.2898$	$\pm 0.5138$	351

表 A-1-2-3 YMSM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0175 \pm 0.0003$	$35.0764 \pm 0.5833$	$\pm 2.1265$	1729
分析處理前				
第一段	$-0.0117 \pm 0.0011$	$23.3883 \pm 2.2706$	$\pm 1.8204$	574
第二段	$-0.0291 \pm 0.0005$	$58.1813 \pm 0.9293$	$\pm 1.7239$	1155
分析處理後				
第一段	$-0.0093 \pm 0.0007$	$18.5390 \pm 1.3082$	$\pm 0.9118$	403
第二段	$-0.0290 \pm 0.0003$	$58.1276 \pm 0.5666$	$\pm 0.9167$	799

### A.1.3 KDNM 站

表 A-1-3-1 KDNM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$0.0200 \pm 0.0003$	$-40.1511 \pm 0.6470$	$\pm 3.0059$	1790
分析處理前				
第一段	$-0.0048 \pm 0.0038$	$9.6261 \pm 7.5568$	$\pm 2.0098$	242
第二段	$0.0252 \pm 0.0004$	$-50.4131 \pm 0.7549$	$\pm 2.7359$	1548
分析處理後				
第一段	$-0.0080 \pm 0.0020$	$15.9430 \pm 4.0066$	$\pm 0.9072$	169
第二段	$0.0238 \pm 0.0002$	$-47.7389 \pm 0.4359$	$\pm 1.1985$	1172

表 A-1-3-2 KDNM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$0.0122 \pm 0.0005$	$-24.4245 \pm 1.0818$	$\pm 3.0704$	1790
分析處理前				
第一段	$0.0089 \pm 0.0019$	$-17.8883 \pm 3.7437$	$\pm 1.7940$	530
第二段	$0.0211 \pm 0.0008$	$-42.1889 \pm 1.6060$	$\pm 1.0808$	718
第三段	$0.0130 \pm 0.0012$	$-25.9561 \pm 2.3210$	$\pm 1.1209$	542
分析處理後				
第一段	$0.0084 \pm 0.0012$	$-16.8481 \pm 2.4261$	$\pm 0.9295$	361
第二段	$0.0212 \pm 0.0005$	$-42.3418 \pm 1.0701$	$\pm 0.5715$	489
第三段	$0.0117 \pm 0.0007$	$-23.5218 \pm 1.4657$	$\pm 0.5748$	392

表 A-1-3-3 KDNM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0059 \pm 0.0003$	$11.7169 \pm 0.6341$	$\pm 2.3146$	1790
分析處理前				
第一段	$0.0076 \pm 0.0011$	$-15.2147 \pm 2.1614$	$\pm 1.7071$	626
第二段	$-0.0207 \pm 0.0005$	$41.4448 \pm 0.9773$	$\pm 1.7780$	1164
分析處理後				
第一段	$0.0098 \pm 0.0006$	$-19.6856 \pm 1.2839$	$\pm 0.8719$	447
第二段	$-0.0211 \pm 0.0003$	$42.2376 \pm 0.5991$	$\pm 0.9503$	807

### A.1.4 KMNМ 站

表 A-1-4-1 KMNМ 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	-0.0348±0.0003	69.4874±0.6130	±1.6676	1720
分析處理前				
第一段	-0.0388±0.0395	77.7423±79.0221	±0.6107	181
第二段	-0.0583±0.0015	116.5628±2.9605	±1.4519	635
第三段	-0.0276±0.0003	54.9639±0.6291	±1.2197	904
分析處理後				
第一段	-0.0221±0.0281	44.3641±56.1943	±0.3344	117
第二段	-0.0587±0.0010	117.4232±1.9528	±0.7190	400
第三段	-0.0274±0.0002	54.7456±0.4035	±0.6377	619

表 A-1-4-2 KMNМ 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	-0.0009±0.0007	2.0195±1.4360	±2.2021	1720
分析處理前				
第一段	0.0185±0.0655	-37.1608±131.0086	±0.6094	181
第二段	0.0678±0.0031	-135.6105±6.2444	±1.6749	636
第三段	-0.0218±0.0005	44.0321±1.0299	±1.1402	903
分析處理後				
第一段	0.0949±0.0447	-189.9237±89.5602	±0.3432	114
第二段	0.0740±0.0021	-148.1195±4.2177	±0.8261	406
第三段	-0.0218±0.0003	44.0062±0.6327	±0.5895	641

表 A-1-4-3 KMNM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0049 \pm 0.0005$	$10.0222 \pm 0.9383$	$\pm 1.8744$	1720
分析處理前				
第一段	$0.0261 \pm 0.0346$	$-52.3136 \pm 69.2471$	$\pm 0.6529$	181
第二段	$0.0345 \pm 0.0017$	$-68.9765 \pm 3.4226$	$\pm 1.4203$	591
第三段	$-0.0159 \pm 0.0006$	$31.9583 \pm 1.2971$	$\pm 1.6423$	948
分析處理後				
第一段	$0.0414 \pm 0.0251$	$-82.8233 \pm 50.2792$	$\pm 0.3764$	109
第二段	$0.0364 \pm 0.0011$	$-72.8440 \pm 2.2244$	$\pm 0.7482$	400
第三段	$-0.0167 \pm 0.0004$	$33.5503 \pm 0.8233$	$\pm 0.8198$	658





### A.1.5 MZUM 站

表 A-1-5-1 MZUM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0211 \pm 0.0003$	$42.0049 \pm 0.5562$	$\pm 2.0864$	1753
分析處理前				
第一段	$-0.0427 \pm 0.0129$	$85.3446 \pm 25.7212$	$\pm 1.2919$	323
第二段	$-0.0201 \pm 0.0002$	$40.0406 \pm 0.4321$	$\pm 1.6080$	1430
分析處理後				
第一段	$-0.0566 \pm 0.0065$	$113.1863 \pm 12.9741$	$\pm 0.6151$	255
第二段	$-0.0195 \pm 0.0001$	$38.6651 \pm 0.2724$	$\pm 0.8297$	969

表 A-1-5-2 MZUM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0233 \pm 0.0006$	$47.0614 \pm 1.2478$	$\pm 2.7689$	1753
分析處理前				
第一段	$-0.0252 \pm 0.0220$	$50.3912 \pm 44.1133$	$\pm 1.2674$	320
第二段	$-0.0250 \pm 0.0006$	$50.3828 \pm 1.1541$	$\pm 2.5420$	1433
分析處理後				
第一段	$-0.0096 \pm 0.0107$	$19.1923 \pm 21.3441$	$\pm 0.5910$	255
第二段	$-0.0297 \pm 0.0003$	$59.8396 \pm 0.6432$	$\pm 1.1992$	1000

表 A-1-5-3 MZUM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0211 \pm 0.0005$	$42.3906 \pm 0.9542$	$\pm 2.3191$	1753
分析處理前				
第一段	$-0.0041 \pm 0.0163$	$8.2097 \pm 32.6568$	$\pm 1.3587$	287
第二段	$-0.0233 \pm 0.0004$	$46.8106 \pm 0.8211$	$\pm 1.9609$	1466
分析處理後				
第一段	$-0.0141 \pm 0.0073$	$28.2022 \pm 14.6425$	$\pm 0.5841$	229
第二段	$-0.0248 \pm 0.0003$	$49.8789 \pm 0.5266$	$\pm 1.0171$	956

### A.1.6 PKGM 站

表 A-1-6-1 PKGM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0113 \pm 0.0002$	$22.6466 \pm 0.3220$	$\pm 1.7978$	1834
分析處理前				
第一段	$-0.0332 \pm 0.0032$	$66.4427 \pm 6.4512$	$\pm 2.1429$	257
第二段	$-0.0102 \pm 0.0002$	$20.3607 \pm 0.3916$	$\pm 1.6607$	1577
分析處理後				
第一段	$-0.0375 \pm 0.0018$	$75.1310 \pm 3.6744$	$\pm 1.0692$	187
第二段	$-0.0098 \pm 0.0001$	$19.5539 \pm 0.2354$	$\pm 0.8456$	1113

表 A-1-6-2 PKGM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0354 \pm 0.0003$	$70.7376 \pm 0.6675$	$\pm 2.2702$	1834
分析處理前				
第一段	$-0.0617 \pm 0.0051$	$123.5131 \pm 10.1673$	$\pm 1.8738$	234
第二段	$-0.0359 \pm 0.0004$	$71.7689 \pm 0.8707$	$\pm 2.3073$	1600
分析處理後				
第一段	$-0.0602 \pm 0.0036$	$120.3673 \pm 7.2354$	$\pm 1.0363$	157
第二段	$-0.0390 \pm 0.0003$	$78.0753 \pm 0.5418$	$\pm 1.2142$	1058

表 A-1-6-3 PKGM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0249 \pm 0.0002$	$49.7663 \pm 0.4983$	$\pm 1.9737$	1834
分析處理前				
第一段	$-0.0171 \pm 0.0010$	$34.1036 \pm 2.0467$	$\pm 1.7923$	648
第二段	$-0.0325 \pm 0.0005$	$64.9711 \pm 0.9333$	$\pm 1.8000$	1186
分析處理後				
第一段	$-0.0160 \pm 0.0006$	$32.0776 \pm 1.2106$	$\pm 0.9138$	457
第二段	$-0.0323 \pm 0.0003$	$64.6442 \pm 0.5978$	$\pm 0.9819$	807

### A.1.7 TMAM 站

表 A-1-7-1 TMAM 站 2001 年到 2007 年 X 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$0.0088 \pm 0.0002$	$-17.6654 \pm 0.4543$	$\pm 1.7697$	1617
剔除粗差	$0.0092 \pm 0.0001$	$-18.4164 \pm 0.2919$	$\pm 0.8597$	1229
剔除訊號	$0.0095 \pm 0.0001$	$-19.0428 \pm 0.2943$	$\pm 0.8667$	1229

表 A-1-7-2 TMAM 站 2001 年到 2007 年 Y 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0054 \pm 0.0003$	$10.7436 \pm 0.5337$	$\pm 1.3182$	1617
分析處理前				
第一段	$0.0010 \pm 0.0015$	$-2.1051 \pm 2.9801$	$\pm 1.4046$	466
第二段	$-0.0118 \pm 0.0005$	$23.6451 \pm 0.9176$	$\pm 1.1508$	1151
分析處理後				
第一段	$0.0015 \pm 0.0011$	$-2.9896 \pm 2.1355$	$\pm 0.7702$	303
第二段	$-0.0122 \pm 0.0003$	$24.3615 \pm 0.5462$	$\pm 0.5948$	856

表 A-1-7-3 TMAM 站 2001 年到 2007 年 Z 方向序列資料處理成果

	$m \pm \sigma_m$ (m/yr)	$b \pm \sigma_b$ (m)	$\hat{\sigma}_0$	obs#
原始資料	$-0.0146 \pm 0.0003$	$29.2799 \pm 0.5296$	$\pm 1.6646$	1617
分析處理前				
第一段	$0.0017 \pm 0.0011$	$-3.4264 \pm 2.1569$	$\pm 1.5487$	534
第二段	$-0.0212 \pm 0.0005$	$42.4719 \pm 0.9476$	$\pm 1.4342$	1083
分析處理後				
第一段	$0.0006 \pm 0.0006$	$-1.1443 \pm 1.2771$	$\pm 0.7706$	395
第二段	$-0.0219 \pm 0.0003$	$43.8657 \pm 0.5582$	$\pm 0.7217$	794

## A.2 台灣追蹤站資料品質提升前之速度場估計

圖 A.2.1.為 FLNM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A.2.2.分別為 YMSM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A.2.3.為 KDNM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A.2.4.為 KMNM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A.2.5 為 MZUM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A.2.6 為 PKGM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A.2.7.為 TMAM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列。



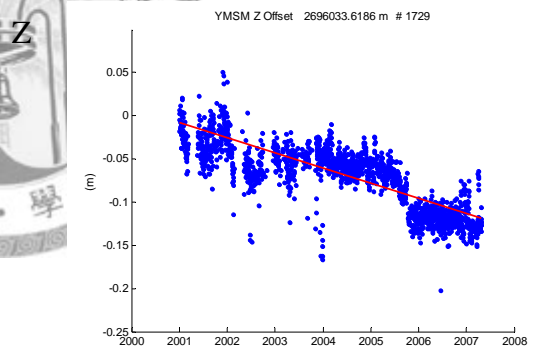
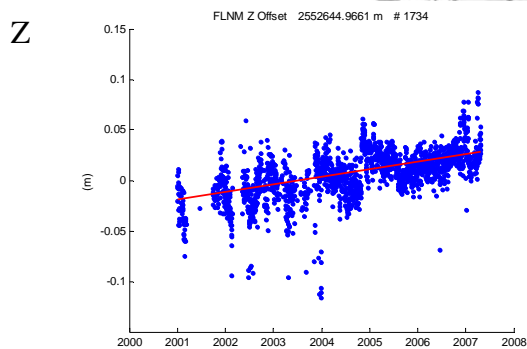
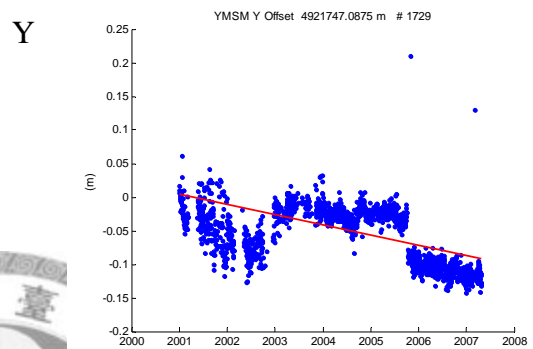
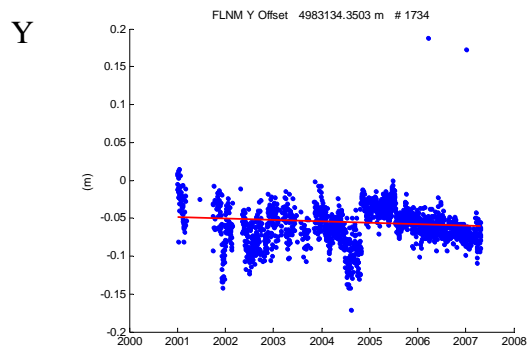
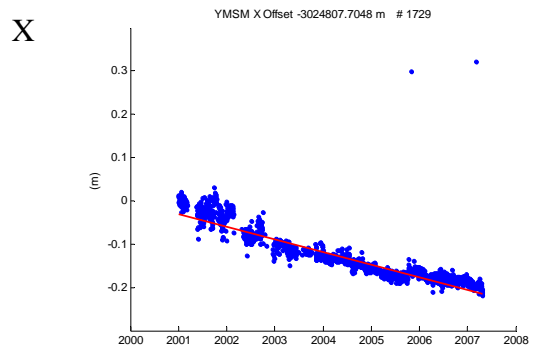
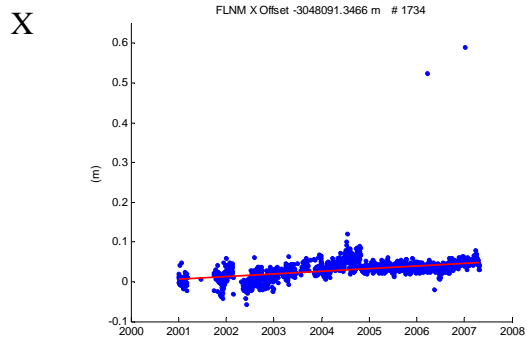
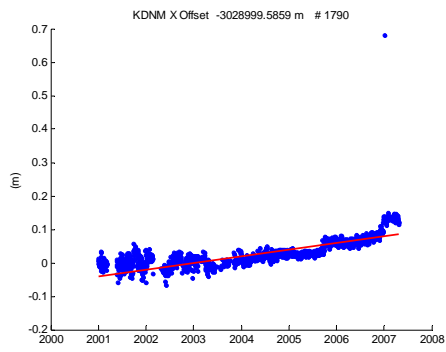


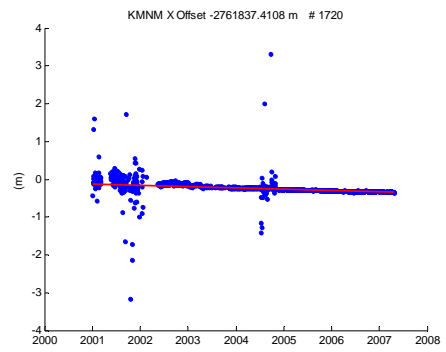
圖 A-2-1 FLNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

圖 A-2-2 YMSM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

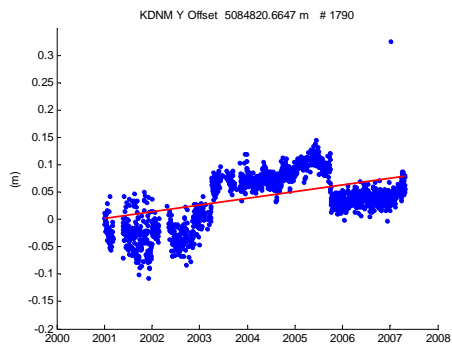
X



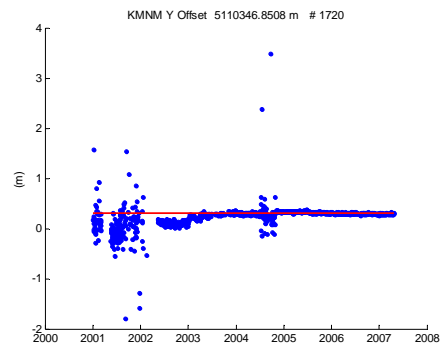
X



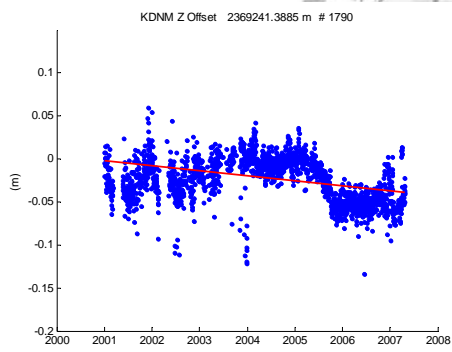
Y



Y



Z



Z

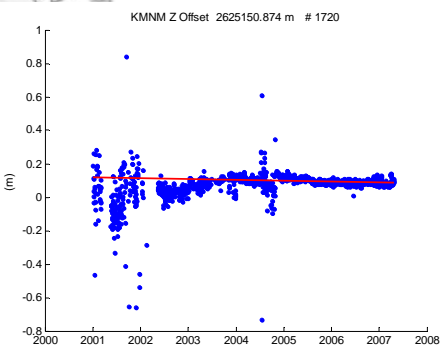
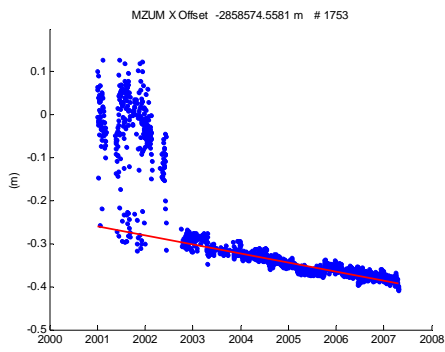


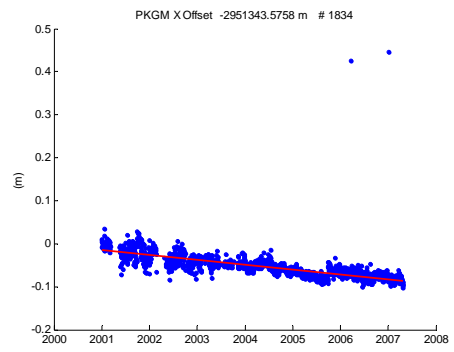
圖 A-2-3 KDNM 站於 2001 年至 2007 年  
之 XYZ 時間序列

圖 A-2-4 KMNM 站於 2001 年至 2007 年  
之 XYZ 時間序列

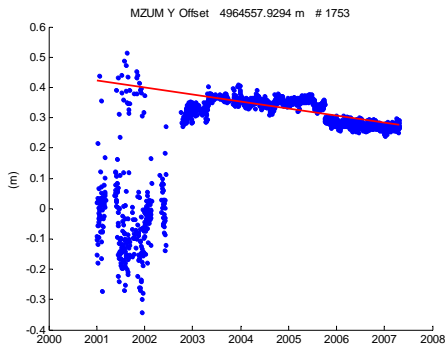
X



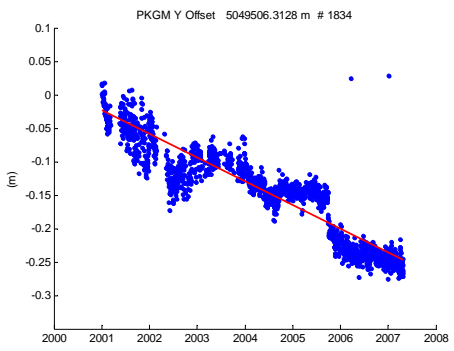
X



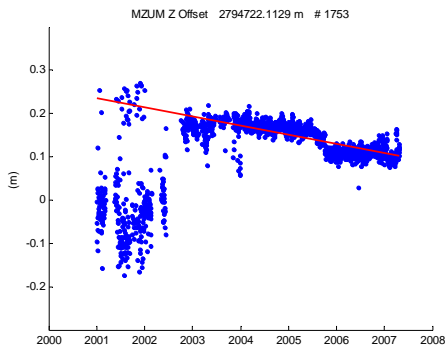
Y



Y



Z



Z

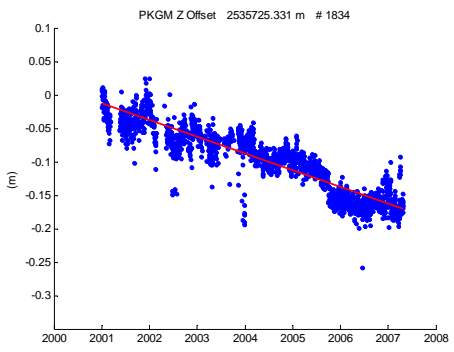
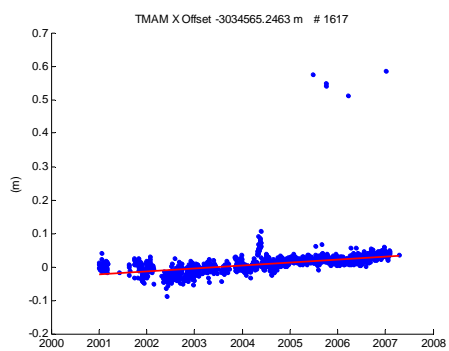


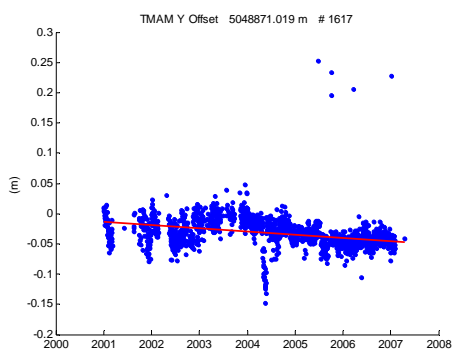
圖 A-2-5 MZUM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

圖 A-2-6 PKGM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

X



Y



Z

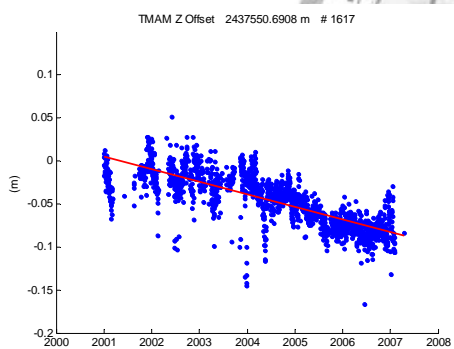


圖 A-2-7 TMAM 站於 2001 年至 2007 年  
之 XYZ 時間序列



### A.3 台灣追蹤站資料品質提升後之速度場估計

圖 A-3-1.為 FLNM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A-3-2.為 YMSM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A-3-3.分別為 KDNM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A-3-4.分別為 KMNM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A-3-5 分別為 MZUM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A-3-6 分別為 PKGM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列；圖 A-3-7.分別為 TMAM 站 2001~2007 年 X、Y、Z 三個方向的時間序列。



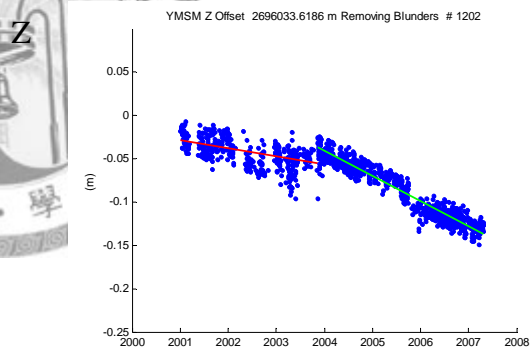
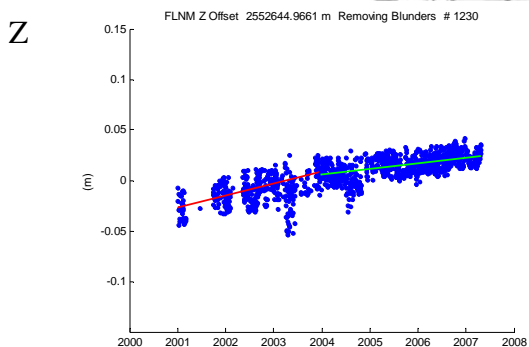
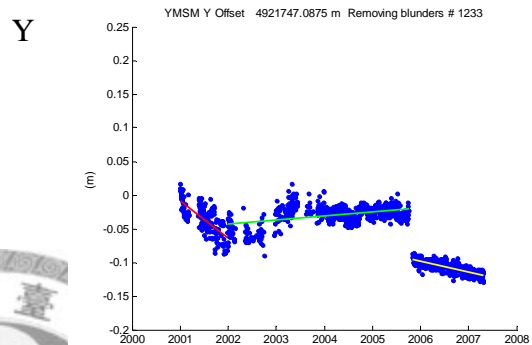
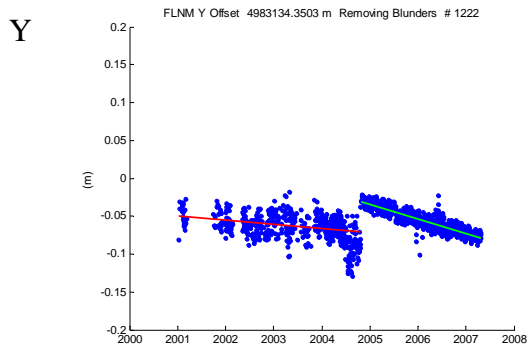
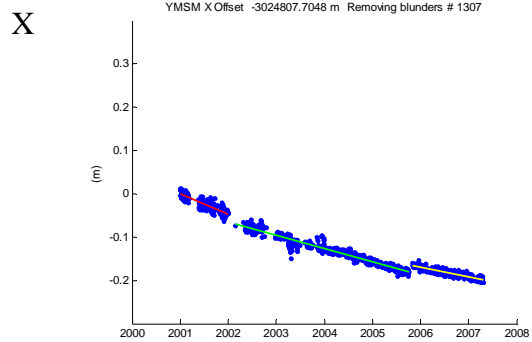
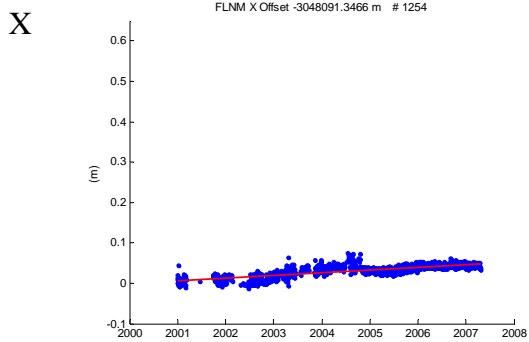


圖 A-3-1 FLNM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

圖 A-3-2 YMSM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

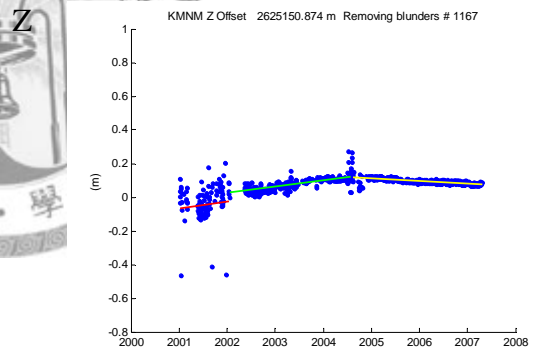
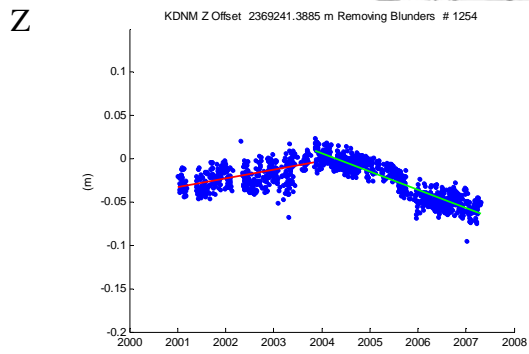
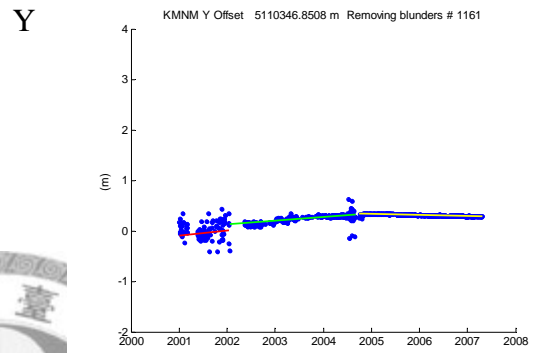
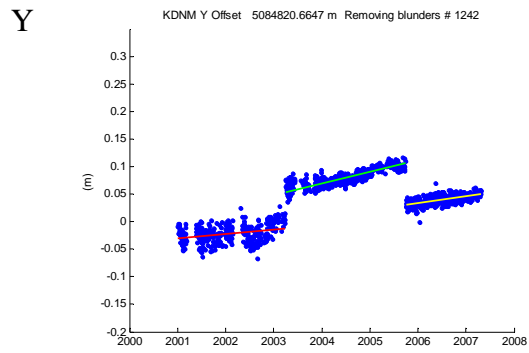
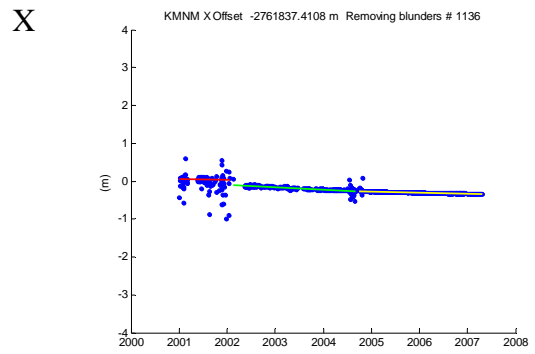
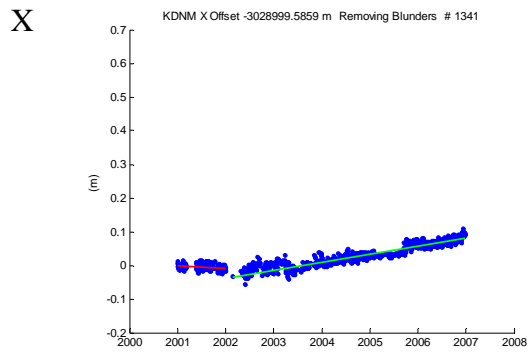
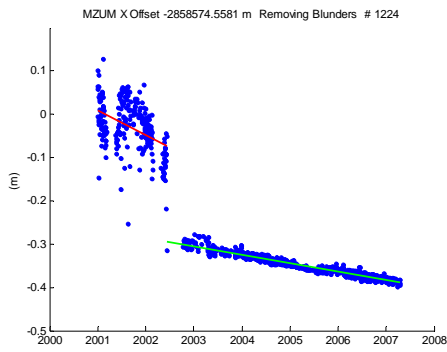


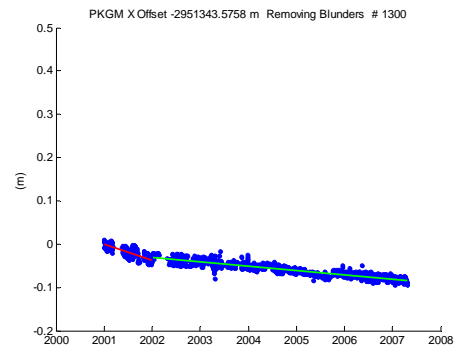
圖 A-3-3 KDNM 站於 2001 年至 2007 年  
之 XYZ 時間序列

圖 A-3-4 KMNM 站於 2001 年至 2007 年  
之 XYZ 時間序列

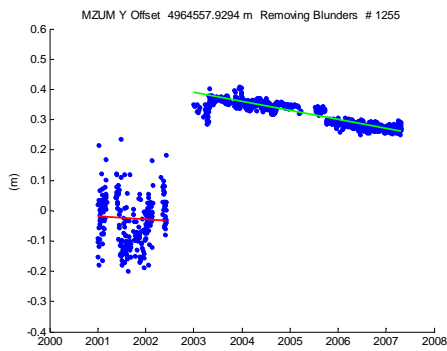
X



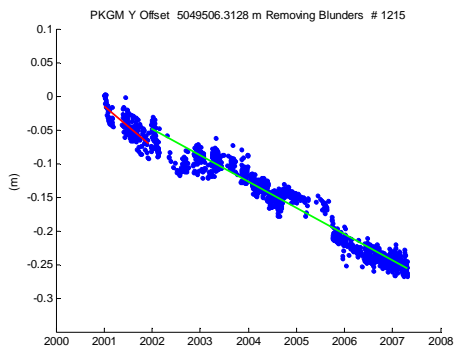
X



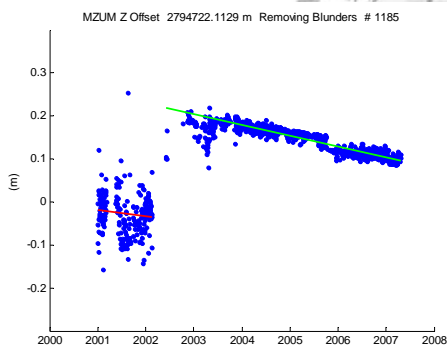
Y



Y



Z



Z

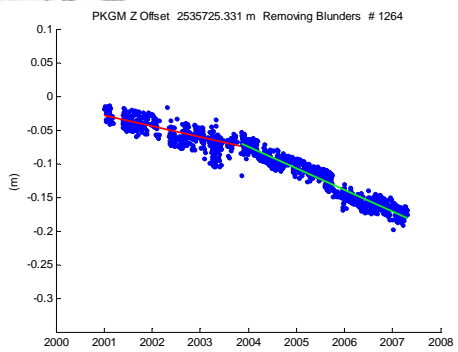
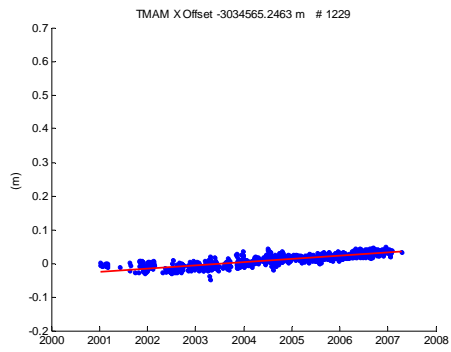


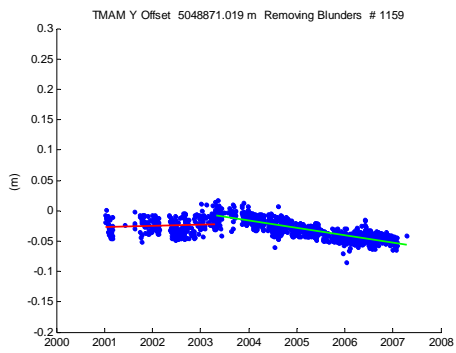
圖 A-3-5 MZUM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

圖 A-3-6 PKGM 站於 2001 年至 2007 年之 XYZ 時間序列

X



Y



Z

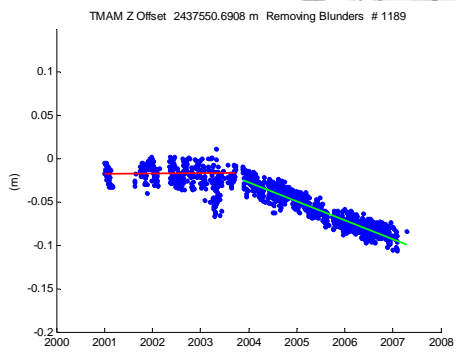


圖 A-3-7 TMAM 站於 2001 年至 2007 年  
之 XYZ 時間序列

## 作者簡歷



姓 名： 余徐維

出生地： 台灣 台北市

生 日： 民國 72 年 11 月 4 日

學 歷： 國立新店高級中學畢業

國立政治大學地政學系土地測量與資訊組畢業

國立台灣大學土木工程研究所畢業

電子信箱： r95521111@ntu.edu.tw

