

國立臺灣大學理學院地理環境資源學系



碩士論文

Department of Geography
College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

檢驗 SBAS-InSAR 於 2016 年美濃地震震後變形分析

Examining SBAS-InSAR Analysis for Postseismic

Deformation of 2016 Meinong Earthquake

劉婉姿

Wan-Tzu Liu

指導教授：莊昶勳 博士

Advisor: Ray Y. Chuang, Ph.D.

中華民國 109 年 1 月

January, 2020

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

檢驗 SBAS-InSAR 於 2016 年美濃地震震後變形分析

Examining SBAS-InSAR Analysis for Postseismic

Deformation of 2016 Meinong Earthquake

本論文係 劉婉姿 君 (R05228013) 在國立臺灣大學地理環境資源學系、所完成之碩士學位論文，於民國 109 年 1 月 20 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：

莊明敏

(指導教授)

葉國恩

林心儀

顏良壽

張午輝

謝辭



首先，感謝我的指導教授莊昀叡老師，讓我從原本完全不知道如何做學術研究，到現在可以生出一本碩士論文，教會我寫程式、文獻回顧以及如何試著自己解決問題，也讓我有機會可以去日本以及美國發表。感謝盧志恆學長的幫助，教會我許多 InSAR 的知識以及 GMTSAR。感謝老師以及學長在研究上不斷地與我討論，並且教會我要嚴謹地做研究，最終得以完成這本論文。謝謝口試委員張午龍老師、景國恩老師、林玉儂老師及顏君毅老師給予我研究上的建議，使這本論文更加完善。

也感謝荃敏在 GMT 作圖以及研究上的各種協助，還有一起去日本參加研討會，謝謝佩京在 GPS 時間序列上與我討論並且讓我問了許多問題，也謝謝童忻學姊讓我問了關於 GPS 的問題。感謝 303 研究室的大家，一起口試的依捷與亞嫻在我要印口試本的前一天，幫我把論文的格式調整的更自動化，以及一直聽我發牢騷，使我焦慮的心情得以釋放。毓芳是出國參加研討會的好夥伴，兩次研討會都與你一起去，給予研究以及行程上許多的幫助，還有嘉俞學姊在美國研討會上以及住宿上對我們的幫忙。謝謝向捷、品吟、秉宸、豐傑、冠榮、靜儀、嘉穎，在研究上以及日常生活中的幫助，晚上一起吃飯再一起回到研究室打拼。謝謝啟見在研究上以及寫 code 上的相助。謝謝耕需學長在我 GMTSAR 遇到卡關時，曾經試著幫我想解決辦法。

謝謝我的好友們，一起身陷研究苦海的邑孺、昀熹、文蕙，彼此互相加油打氣、吐苦水；北中女神湘茹、靜觀，雖然我常常沒空，但總是時不時地約我見面吃飯，給我信心；瑋庭、依錦也時常關心我的近況，尤其瑋庭家真是個放鬆的好地方；雅晴也在我研究生涯中聽了不少我的煩惱與困境，並且幫我紓壓；謝謝一起修專討一和專討二的美惠，在專討二上給我很多鼓勵；很開心研究生涯有你們的陪伴。

最後，感謝最重要的家人，謝謝爸爸、媽媽的支持，讓我能順利拿到碩士學位，沒有你們就沒有今天的我；感謝妹妹也在台北生活，讓我沒有宿舍時可以有住所；謝謝小時候養育我的奶媽家人，到現在依然持續關心我；有你們的支持我才能堅持下去。

三年半的時間，念了 2.5 年、休學半年接著再念半年，在最後一學期面臨著到底能不能修專討二時，等著老師簽名前一個禮拜奶奶過世，整個碩士生涯有太多的關卡、挫折、逆境，感謝自己挺了過來，也謝謝大家的幫助。如果沒有大家的鼎力相助，我絕對辦不到，衷心感謝大家！

劉婉姿 謹誌於
國立臺灣大學地理環境資源學系
2020.02

摘要



在干涉合成孔徑雷達的時間序列技術出現之後，由於干涉合成孔徑雷達提供了具有高空間分辨率和大覆蓋範圍的快速、例行觀測，因此地表變形監測的發展得到了顯著改善，干涉合成孔徑雷達時間序列技術的一項主要應用即是震後變形觀測。震後變形會呈現非線性的速率衰變，在 GPS 分析中是透過時間序列擬合將震後變形訊號獨立取出，然而許多使用干涉合成孔徑雷達時間序列技術對於震後研究則常有不同的估計震後變形的的方法。因此，本研究將小基線子集-干涉合成孔徑雷達技術應用於 2016 年的美濃地震，以檢驗干涉合成孔徑雷達時間序列應用於震後變形的過程。美濃地震是在 Sentinel-1 衛星發射後臺灣近年具有大範圍震後變形的地震之一。作為參考，本研究首先擬合 2007-2018 年的 GPS 時間序列，以確定每個 GPS 站的地震前和地震後訊號。接著檢驗大氣校正、空間校正和干涉合成孔徑雷達時間序列擬合等不同方法的結果。本研究比較 GMTSAR 和 GACOS 的大氣校正方法；線性擬合、超平面和插值的空間校正方法；以及使用 GPS 或 InSAR 震前速度進行的時間序列擬合。結果顯示干涉合成孔徑雷達時間序列過程中的不同方法將影響震後變形的訊號。GMTSAR 大氣校正結果比 GACOS 校正結果好，因為 GACOS 資料來源時間解析度差。內插空間校正的結果比線性擬合與超平面空間校正好，原因是區域的地表變形位移量並不相同。震前 GPS 速度因為資料時間較長得到的速率較穩定，因此較適合用來時間序列擬合。因此 GMTSAR 大氣校正，內插空間校正和使用震前 GPS 速度的 InSAR 時間序列擬合可以提供更合理的震後模式。

關鍵字：全球衛星導航系統、雷達、地震周期循環、地表速度

Abstract



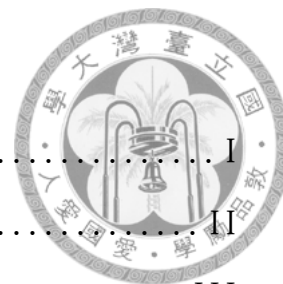
After the appearance of time-series techniques of interferometric synthetic aperture radar (InSAR), the development of surface deformation monitoring has significantly improved since InSAR provides fast, routine observations with high spatial resolution and coverage. One major application of the time-series InSAR techniques is postseismic deformation detection. Because postseismic deformation shows the pattern of non-linear velocity decay, in GPS analysis one can differentiate the postseismic signals by fitting GPS time series while in InSAR time series analysis the method to estimate the postseismic deformation varied in many studies. Therefore, this study uses the small baseline subset InSAR (SBAS-InSAR) technique for the 2016 Meinong earthquake, which is one of recent strong earthquakes in Taiwan with wide-ranging postseismic deformation after the operation of Sentinel-1 satellite, to examine the process of time-series InSAR for postseismic deformation. For reference, this study first fits GPS time series of 2007-2018 to determine preseismic and postseismic signals at each GPS stations, and examines the results of different methods for atmospheric correction, spatial correction and InSAR time-series fitting. This study compares atmospheric correction methods of GMTSAR and GACOS, spatial correction methods of linear fitting, hyperplane and interpolation, and time series fitting by using GPS or InSAR preseismic velocities. The results suggest that different methods in the procedure will influence the isolation of postseismic signals. The GMTSAR atmospheric correction results are better than GACOS correction results, because GACOS data sources have poor time resolution. The results of interpolation are better than the linear fitting and hyperplane, because the surface deformation in the study area is spatially inhomogenous. The preseismic GPS velocity is more stable than InSAR velocity because of longer observation time, so it is more suitable for time series fitting.

Therefore, the GMTSAR atmospheric correction, interpolation spatial correction, and time-series fitting with preseismic GPS velocities can provide more reasonable postseismic pattern.



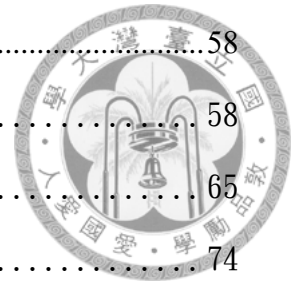
Key words: GNSS, radar, earthquake cycle, surface velocity

目錄



謝辭.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XIII
第一章、緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章、震後變形原理與測地學觀測.....	4
2.1 震後變形.....	4
2.2 震後變形的機制.....	5
2.3 震後變形的觀測.....	5
2.4 InSAR 於震後變形觀測.....	7
第三章、研究區域.....	13
3.1 美濃地震.....	13
3.2 研究區域地質特性.....	14
第四章、研究方法.....	23
4.1 研究概念.....	23
4.2 全球衛星定位系統.....	25
4.3 GPS 時間序列分析.....	26
4.4 干涉合成孔徑雷達.....	32
4.5 InSAR 時間序列處理.....	44
4.6 研究資料.....	55

第五章、	研究結果.....	58
5.1	GPS 時間序列.....	58
5.2	大氣校正後的 InSAR 累積位移.....	65
5.3	空間校正後的 InSAR 累積位移.....	74
5.4	InSAR 時間序列.....	94
5.5	InSAR 時間序列與 GPS 時間序列比較.....	98
5.6	空間校正後的 InSAR 與水準比較.....	106
第六章、	討論.....	111
6.1	InSAR 大氣校正.....	111
6.2	InSAR 空間校正.....	112
6.3	InSAR 與水準比較.....	113
6.4	空間校正後的地表變形與時間序列擬合後的震後變形比較.....	113
6.5	GPS 與 InSAR 比較.....	116
第七章、	結論.....	119
	參考文獻.....	120
	附錄一：雷達影像基線資料.....	130
	附錄二：GPS 時間序列.....	150



圖目錄

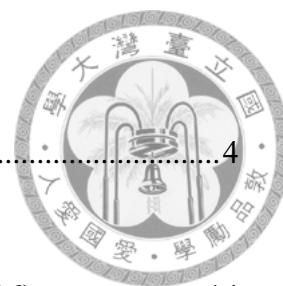


圖 2.1 地震循環圖(修改自 THATCHER, 1993)。	4
圖 3.1 SENTINEL 1A 干涉合成孔徑雷達的結果(HUANG ET AL., 2016)。	14
圖 3.2 臺灣地體構造圖 (CHING, HSIEH, ET AL., 2011)。	16
圖 3.3 臺灣活動斷層分布圖 (修改自中央地質調查所)。	21
圖 3.4 臺灣地震構造分布圖。	22
圖 4.1 研究概念圖。	24
圖 4.2 GS73 測站的 RMS 值。	29
圖 4.3 COMMON-MODE ERRORS。	31
圖 4.4 本研究所有測站 RMS 值。	32
圖 4.5 真實天線合成虛擬天線陣列概念圖(LILLESAND ET AL., 2015)。	33
圖 4.6 雷達干涉幾何示意圖(謝嘉聲, 2006)。	34
圖 4.7 橫軌式干涉幾何示意圖(GENS AND VAN GENDEREN, 1996)。	35
圖 4.8 沿軌式干涉幾何示意圖(GENS AND VAN GENDEREN, 1996)。	36
圖 4.9 重複軌道式干涉幾何示意圖(GENS AND VAN GENDEREN, 1996)。	37
圖 4.10 雷達差分干涉幾何示意圖(謝嘉聲, 2006)。	39
圖 4.11 數值高程模型與地形間差距示意圖。	41
圖 4.12 小基線子集法反演的數據與模型矩陣間的關係(SCHMIDT AND BÜRGMANN, 2003)。	45
圖 4.13 估算大氣相位示意圖。	49
圖 4.14 南北向距離線性擬合。	51
圖 4.15 GPS 內插出的升軌影像長期速率。	52
圖 4.16 GPS 內插出的降軌影像長期速率。	52

圖 4.17 INSAR 升軌震前速率圖。.....	53
圖 4.18 INSAR 降軌震前速率圖。.....	54
圖 4.19 GPS 測站圖。.....	55
圖 4.20 升軌影像基線圖。.....	57
圖 4.21 降軌影像基線圖。.....	57
圖 5.1 LNCH 測站時間序列。.....	58
圖 5.2 GS73 測站時間序列。.....	59
圖 5.3 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (30 天)。.....	60
圖 5.4 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (30 天)。.....	60
圖 5.5 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (90 天)。.....	61
圖 5.6 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (90 天)。.....	61
圖 5.7 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (180 天)。.....	62
圖 5.8 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (180 天)。圖中星號為參考點；圓點 表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。.....	62
圖 5.9 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (一年)。.....	63
圖 5.10 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (一年)。.....	63
圖 5.11 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (一年半)。.....	64
圖 5.12 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (一年半)。.....	64
圖 5.13 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (兩年)。.....	65
圖 5.14 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (兩年)。.....	65
圖 5.15 大氣校正後的升軌 INSAR 結果 (20160214、20160309)。.....	67
圖 5.16 大氣校正後的升軌 INSAR 結果 (20160414、20160824)。.....	68
圖 5.17 大氣校正後的升軌 INSAR 結果 (20160905、20161222)。.....	69
圖 5.18 大氣校正後的升軌 INSAR 結果 (20170421、20170726)。.....	70
圖 5.19 大氣校正後的降軌 INSAR 結果 (20160216、20160228)。.....	71

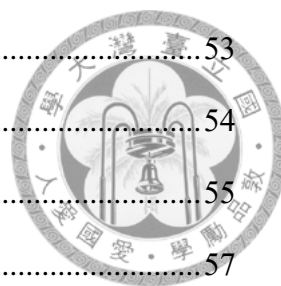
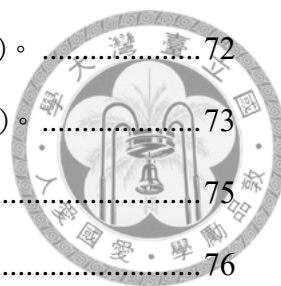


圖 5.20 大氣校正後的降軌 INSAR 結果 (20160416、20161118)。	72
圖 5.21 大氣校正後的降軌 INSAR 結果 (20170517、20170728)。	73
圖 5.22 差值內插方法 (升軌影像)。	75
圖 5.23 南北向的線性擬合方法 (升軌影像)。	76
圖 5.24 一階平面擬合方法 (升軌影像)。	77
圖 5.25 二階平面 (經度一次方, 緯度二次方) 擬合方法 (升軌影像)。	78
圖 5.26 二階平面 (經度二次方, 緯度一次方) 擬合方法 (升軌影像)。	79
圖 5.27 二階平面 (經度二次方, 緯度二次方) 擬合方法 (升軌影像)。	80
圖 5.28 三階平面 (經度二次方, 緯度三次方) 擬合方法 (升軌影像)。	81
圖 5.29 三階平面 (經度三次方, 緯度二次方) 擬合方法 (升軌影像)。	82
圖 5.30 三階平面 (經度三次方, 緯度三次方) 擬合方法 (升軌影像)。	83
圖 5.31 差值內插方法 (降軌影像)。	85
圖 5.32 南北向的線性擬合方法 (降軌影像)。	86
圖 5.33 一階平面擬合方法 (降軌影像)。	87
圖 5.34 二階平面 (經度一次方, 緯度二次方) 擬合方法 (降軌影像)。	88
圖 5.35 二階平面 (經度二次方, 緯度一次方) 擬合方法 (降軌影像)。	89
圖 5.36 二階平面 (經度二次方, 緯度二次方) 擬合方法 (降軌影像)。	90
圖 5.37 三階平面 (經度二次方, 緯度三次方) 擬合方法 (降軌影像)。	91
圖 5.38 三階平面 (經度三次方, 緯度二次方) 擬合方法 (降軌影像)。	92
圖 5.39 三階平面 (經度三次方, 緯度三次方) 擬合方法 (降軌影像)。	93
圖 5.40 2016.02.14 升軌震後變形。	95
圖 5.41 2016.02.16 降軌震後變形。	95
圖 5.42 2016.03.21 升軌震後變形。	95
圖 5.43 2016.03.23 降軌震後變形。	95
圖 5.44 2016.06.01 升軌震後變形。	95
圖 5.45 2016.06.03 降軌震後變形。	95



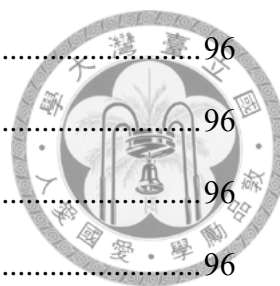


圖 5.46 2016.08.24 升軌震後變形。	96
圖 5.47 2016.09.07 降軌震後變形。	96
圖 5.48 2016.12.22 升軌震後變形。	96
圖 5.49 2017.01.05 降軌震後變形。	96
圖 5.50 2017.04.21 升軌震後變形。	96
圖 5.51 2017.04.23 降軌震後變形。	96
圖 5.52 2017.12.05 升軌震後變形。	97
圖 5.53 2017.12.07 降軌震後變形。	97
圖 5.54 2018.03.23 升軌震後變形。	97
圖 5.55 2018.03.25 降軌震後變形。	97
圖 5.56 GS30 測站位置圖。	99
圖 5.57 GS30 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。	99
圖 5.58 GS30 測站震後變形時間序列	99
圖 5.59 GS30 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。	99
圖 5.60 CKSV 測站位置圖。	100
圖 5.61 CKSV 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。	100
圖 5.62 CKSV 測站震後變形時間序列	100
圖 5.63 CKSV 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。	100
圖 5.64 ZEND 測站位置圖。	101
圖 5.65 ZEND 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。	101
圖 5.66 ZEND 測站震後變形時間序列	101
圖 5.67 ZEND 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。	101
圖 5.68 GS79 測站位置圖。	102
圖 5.69 GS79 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。	102
圖 5.70 GS79 測站震後變形時間序列	102
圖 5.71 GS79 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。	102

圖 5.72 GS81 測站位置圖。.....	103
圖 5.73 GS81 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。.....	103
圖 5.74 GS81 測站震後變形時間序列.....	103
圖 5.75 GS81 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。.....	103
圖 5.76 GS73 測站位置圖。.....	104
圖 5.77 GS73 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。.....	104
圖 5.78 GS73 測站震後變形時間序列.....	104
圖 5.79 GS73 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。.....	104
圖 5.80 GS89 測站位置圖。.....	105
圖 5.81 GS89 測站 GPS 與 INSAR 升軌影像時間序列位移量。.....	105
圖 5.82 GS89 測站震後變形時間序列.....	105
圖 5.83 GS89 測站 GPS 與 INSAR 降軌影像時間序列位移量。.....	105
圖 5.84 2016 年 03 月-2017 年 10 月 INSAR 垂直位移量。.....	107
圖 5.85 關廟-善化水準測線與 INSAR 垂直位移量剖面圖。.....	107
圖 5.86 2016 年 03 月-2017 年 05 月 INSAR 垂直位移量。.....	108
圖 5.87 安平-龍崎水準測線與 INSAR 垂直位移量剖面圖。.....	108
圖 5.88 2016 年 03 月-2017 年 02 月 INSAR 垂直位移量。.....	109
圖 5.89 路竹-茂林水準測線與 INSAR 垂直位移量剖面圖。.....	109
圖 5.90 2016 年 03 月-2017 年 05 月 INSAR 垂直位移量。.....	110
圖 5.91 岡山-安坡水準測線與 INSAR 垂直位移量剖面圖。.....	110
圖 6.1 2016 年 09 月 29 日升軌影像空間校正後地表變形圖。.....	114
圖 6.2 2016 年 09 月 29 日升軌影像時間序列擬合後的震後變形圖。.....	114
圖 6.3 2018 年 03 月 23 日升軌影像空間校正後地表變形圖。.....	115
圖 6.4 2018 年 03 月 23 日升軌影像時間序列擬合後的震後變形圖。.....	115
圖 6.5 西南部 GPS 長期水平速率。.....	115

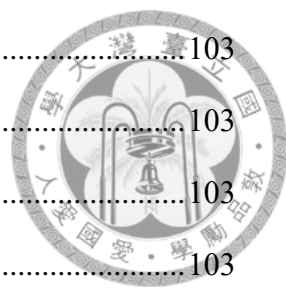
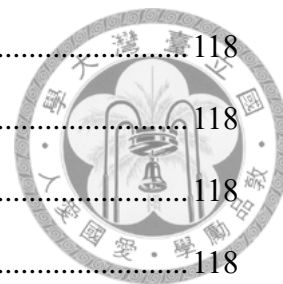


圖 6.6 未校正升軌影像與 GPS 的相關性圖	118
圖 6.7 大氣校正後升軌影像與 GPS 的相關性圖	118
圖 6.8 空間校正後升軌影像與 GPS 的相關性圖	118
圖 6.9 未校正降軌影像與 GPS 的相關性圖	118
圖 6.10 大氣校正後降軌影像與 GPS 的相關性圖	118
圖 6.11 空間校正後降軌影像與 GPS 的相關性圖	118



表目錄

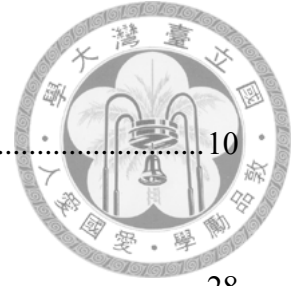


表 2.1 震後變形 INSAR 時間序列整理表.....	10
表 4.1 背景地震.....	28
表 5.1 升軌影像大氣校正方法的均方根。.....	66
表 5.2 降軌影像大氣校正方法的均方根。.....	66
表 5.3 升軌影像空間校正方法的均方根。.....	74
表 5.4 降軌影像空間校正方法的均方根。.....	84

第一章、緒論




1.1 研究動機

震後變形 (postseismic deformation) 是地震發生後所產生的地表位移，比起震前長期穩定的地表位移更加快速，持續時間可能為數月至數十年以上，此時期是地震週期循環 (earthquake cycle) 的其中一個階段(Thatcher, 1993)。觀測地震週期中各階段的地表變形 (surface deformation) 可以幫助我們了解斷層活動的行為。由於測地學技術 (geodetic techniques) 可施測的區域廣且持續時間長，因此可以為斷層活動造成不斷變形的地表提供許多觀測上的細節(Thatcher, 1984)。

震後變形的現象是在地震後地表會快速位移，此變形隨著時間常呈現指數性的消減，最終回到震前穩定的速率。90 年代以後，因為用於精密地表變形觀測的全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS) 的逐漸普及，震後變形隨著時間由快到慢的變形模式也被觀察到(Segall and Davis, 1997)。隨著 GPS 時間序列資料累積越來越長，可完整觀測到地震前穩定的間震速率 (interseismic velocity)、季節性變動、同震位移 (coseismic displacement)、震後變形等現象。Nikolaidis (2002) 發展了 GPS 時間序列擬合 (time-series fitting) 方式，透過線性的經驗式擬合長期 GPS 資料中的上述各現象。而震後變形的研究也可透過 GPS 時間序列擬合，將震後變形的訊號獨立出來(e.g. Yu et al., 2003)。

在合成孔徑雷達 (synthetic aperture radar, SAR) 與干涉合成孔徑雷達 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技術出現之後，因為雷達影像可以觀測大面積區域(Massonnet and Feigl, 1998)，因此也被用來觀測震後變形(Massonnet et al., 1994; Massonnet et al., 1996)。隨著技術的演進，InSAR 也發展出時間序列的方法(Berardino et al., 2002; Ferretti et al., 2000, 2001; Hooper et al., 2004)。然而區域的 InSAR 時間序列常會受到大氣對流的影響與電離層的干擾，使得觀測到的訊號產生誤差(Hanssen et al., 1999)，對流層中的水氣會使接收到的訊號延遲(Hanssen et al., 1999; Zebker et al., 1997)，電離層在白天的影響較大(ElGharbawi and



Tamura, 2014), 且會在空間上呈現趨勢, 因此在 InSAR 時間序列上通常會做大氣校正以及電離層校正來消除此兩種效應, 也有利用空間校正來消除區域的電離層效應(ElGharbawi and Tamura, 2014)。此外, 與常見的 GPS 觀測震後變形方式不同的是, 許多利用 InSAR 時間序列觀測震後變形的研究並沒有做時間序列擬合將震後變形訊號獨立出來, 而是將時間序列的觀測結果直接當作震後變形的訊號使用(Cetin et al., 2012)。或是沒有經過任何大氣校正處理, 直接將時間序列結果進行震後變形的擬合(Lanari et al., 2010)等。因此本研究將著重在 InSAR 時間序列觀測震後變形的的方法上, 檢驗 InSAR 時間序列的大氣校正、區域空間校正與時間序列擬合等環節, 比較不同處理方式的結果, 並探討這些方式對 InSAR 時間序列觀測震後變形結果的影響。

近年來美濃地震是台灣地區繼 1999 年 921 集集大地震以來, 最嚴重的一次地震災害。台灣南部台南地區亦是全台灣有高度地震潛勢的地方(Wang et al., 2016), 鄰近區域除了美濃地震, 還有 2010 年的甲仙地震的發生(Ching, Johnson, et al., 2011; Hsu et al., 2011)。除此之外, Huang et al. (2016) 利用差分干涉合成孔徑雷達技術 (differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR), 觀測美濃地震的同震變形, 可以看到雖然震央在美濃地區, 但在震央西方台南關廟、龍崎等地卻有顯著的同震地表變形。美濃地震之後, 此區域具有明顯的震後變形現象, 因此本研究選擇美濃地震震後變形作為研究區域, 期望透過探討不同 InSAR 時間序列的處理過程, 提供更精確的震後變形資料, 做為日後相關研究的依據。

1.2 研究目的

由於目前利用 InSAR 時間序列觀測震後變形的的方法不像 GPS 時間序列方法一致 (請參閱表 2-1), 這會使得到的震後變形結果可能包含了造成其他地表變動的因素, 因此本研究希望能透過檢驗並提供一套更適合 InSAR 時間序列觀測震後變形的流程方法, 以期得到更精確的 InSAR 震後變形資料。本研究針對大氣校正方

式、InSAR 結果在空間上的修正、以及 InSAR 時間序列擬合等三個環節，來探討這些環節在不同處理方法上所造成的成果差異，以及對擷取震後變形資訊的影響。



第二章、震後變形原理與測地學觀測



2.1 震後變形

地表變形是地表的位移變化，導致地表發生變化的原因可能有地殼長期移動速率、地表季節性的變化、地震的發生等(Nikolaidis, 2002)。地震變形循環 (earthquake deformation cycle) 依據地震發生的時間可以分成三個階段 (圖 2.1) (Thatcher, 1993)：一是同震變形 (coseismic deformation)，是指與地震同時發生的地表位移 (surface displacement)；二是間震變形 (interseismic deformation)，是同一區域發生在兩個大地震之間的地表變形，是由於較大深度的穩定斷層滑動引起的(Thatcher, 1993)；三是震後變形 (postseismic deformation)，是地震發生後地表的快速位移階段，由同震破裂的地方造成的滑動(Thatcher, 1993)。

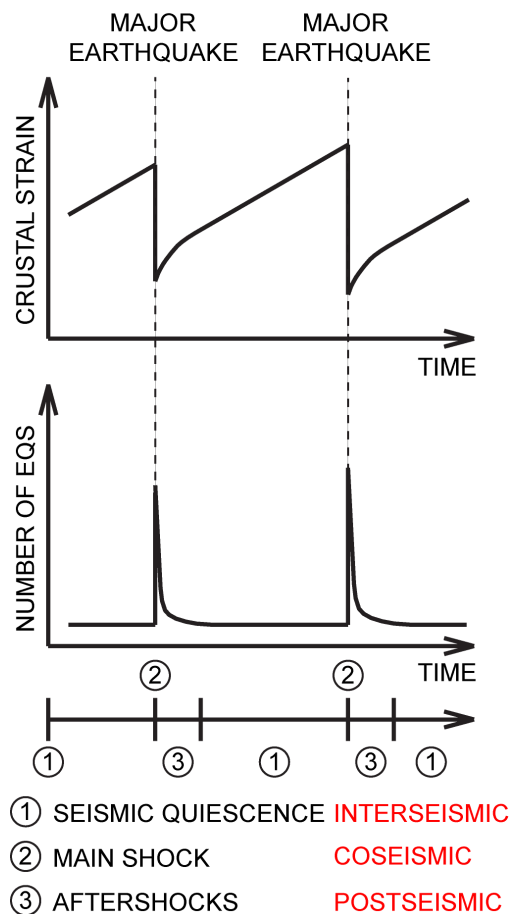


圖 2.1 地震循環圖(修改自 Thatcher, 1993)。



2.2 震後變形的機制

震後變形主要有三類：一是震後滑移 (afterslip)，上部地殼沿著原有主震斷層破裂帶連續滑移，或者沿其他延伸面持續滑移(Thatcher and Rundle, 1984)；二是黏彈性鬆弛 (viscoelastic relaxation)，在下部地殼及上部地函有黏彈性的介質，以黏彈性變形的的方式將地震增加的應力紓解並回歸至原來的狀態(Thatcher and Rundle, 1984)；三是孔隙彈性回跳 (poroelastic rebound)，是發生在斷層帶附近的岩石孔隙水壓變化造成的地表變形(Peltzer et al., 1996)。

震後滑移是地震後幾個月的一種重要震後變形機制，是同震應力的變化引起滑移的過程，通常被認為是斷層面上的蠕變 (creep)，震後滑移可能發生在沒有破裂的斷層表面上，或發生在斷層的延伸上，震後滑移的曲線與對數函數的擬合較一致(Marone et al., 1991)。震後滑移也可以用應力擾動來解釋，由於斷層面上的速度增強，摩擦隨著速度的增加而增加，使斷層運動不會造成額外的地震或不穩定地滑動(Perfettini and Avouac, 2004)。

黏彈性鬆弛是由於下地殼或上地幔無法維持所施加的同震應力變化而引起的，在地震破裂的時間尺度上，整個岩石圈以黏彈性方式回應地震。在更深的地區，同震應力變化無法持續，並且在地震發生後的數十年間，它們會持續鬆弛(Nur and Mavko, 1974; Pollitz et al., 2001)。

孔隙彈性回跳是由於同震應力的變化相對於流體擴散時間而言是迅速的，因此在地震發生後的短時間內，產生過大的流體壓力時，這種壓力變化驅動流體流動，引起地震後形變和應力變化(Peltzer et al., 1996)。

2.3 震後變形的觀測

震後變形的觀測最早可追溯至發生在 1927 年日本的北丹後 (Kita Tango) 地震 (Tsuboi, 1931) 以及發生在 1946 年的南海道 (Nankaido) (昭和南海地震) 地震 (Okada and Nagata, 1953)。Fitch and Scholz (1971) 則是利用水準測量觀測 1946 年的南海



道地震的震後變形，並且利用模型討論了在隱沒帶的震後變形。Kenner and Segall (2000)利用三角測量重新評估 1906 舊金山地震的震後變形，在 Point Arena 使用 1906-1907、1929-1930 及 1973-1975 的資料，在 Point Reyes-Petaluma arc 使用 1929-1930、1938-1939 及 1960-1961 的資料，計算此兩地的剪切應變率及平均速度，並利用指數擬合剪切應變率計算衰退時間。在 GPS 開始應用於地表變形監測之後，1989 年的 Loma Prieta 地震及 1992 年的 Landers 地震是最早使用 GPS 紀錄到的地震。Savage et al. (1994) 從地震後 3.3 年的 GPS 資料觀測到 Loma Prieta 地震的震後變形，利用指數函數 (exponential) 擬合 GPS 資料，發現 Loma Prieta 地震大約有 1.4 年的震後衰退現象。Bürgmann et al. (1997) 收集了 1989 年 Loma Prieta 地震後五年的 GPS 資料，認為震後變形包含了間震的資料，因此建立了一個間震模型 (interseismic model) 來移除 Loma Prieta 地震震後變形當中的間震變形。Shen et al. (1994) 利用 GPS 的密集網絡來觀測 Landers 地震的震後變形，利用三種公式(自然對數、指數、power-law) 的震後變形參數擬合 GPS 資料，得到比前人更密集的觀測資料，並且顯示此地震的震後變形發生在破裂帶和破裂帶地區。Heki et al. (1997)利用 16 個 GPS 站觀測 1994 年 Sanriku-Haruka-Oki 地震，認為此地震是震後滑移造成，因此使用對數函數 (logarithmic) 來擬合震後變形。

前述文章因為 GPS 資料累積的時間並不長，因此都是將地震後的 GPS 資料直接進行擬合，Nikolaidis (2002) 發展了 GPS 時間序列擬合方式，因為 GPS 資料累積的時間較長，因此可以觀察到地震前穩定的間震速率、季節性變動、同震位移及震後變形等現象。因此後續利用 GPS 觀測震後變形的文章，大多都是遵循此公式進行時間序列的擬合。Yu et al. (2003)利用此時間序列擬合公式對 1999 年集集地震的 GPS 資料進行擬合，震後變形是利用指數函數擬合，但因為資料只有 15 個月，因此認為不需要擬合季節性變動。Freed et al. (2006)利用時間序列擬合公式擬合了 2002 年 Denali 地震後兩年的 GPS 資料，震後變形是利用對數函數擬合。



2.4 InSAR 於震後變形觀測

在 InSAR 被用於觀測同震變形之後(Massonnet et al., 1993)，此技術也被用來觀測震後變形。大地測量只能得到單點的觀測值，而衛星雷達干涉圖可以提供本來測量不易的地方的大範圍地表資訊，透過雷達干涉圖發現在距離 Landers 地震主要破裂帶 100 公里處有幾公分的滑動(Massonnet et al., 1994)，也將 Landers 地震兩條剖面線的位移進行對數的擬合(Massonnet et al., 1996)。Pollitz et al. (2001) 利用三幅震後干涉圖觀測 Hector Mine 地震，並將其中一幅間隔九個月的干涉圖結果進行震後滑移與黏彈性鬆弛的模擬。Donnellan et al. (2002) 利用 GPS 及 InSAR 來研究 1994 年北嶺地震 (Northridge earthquake)，由於使用的雷達干涉圖的時間包含了同震位移與 2 年的震後變形，因此透過滑移分布模型 (slip distribution model) 計算 InSAR 的同震訊號，移除同震位移的訊號以留下震後變形，再透過指數和對數函數擬合 InSAR 震後變形，並認為使用對數函數擬合地震三天後至 1995 年 12 月的結果最好。

前述所提到的文獻都是利用一張或是若干張干涉圖進行震後變形的分析，2000 年後各種 InSAR 時間序列的方法被提出，例如永久散色體差分干涉(PS-InSAR) (Ferretti et al., 2000, 2001; Hooper et al., 2004)與小基線法差分干涉 (SBAS-InSAR)，因此利用 InSAR 時間序列觀測震後變形的文章陸續被發表。然而，各個文章對於震後變形的觀測方式各不相同，本研究將這些文章整理如表 2.1，並將這些文章分成七種方式來敘述。

第一種方式是沒有做大氣校正、空間校正以及擬合震後變形，直接將時間序列的結果當作震後變形討論(Cetin et al., 2012; Copley, 2014; Motagh et al., 2014)，此外，Cetin et al. (2012) 也將 InSAR 時間序列七年的位移量以及 GPS 七年的位移去做震後滑移模擬。

第二種方式是只做大氣校正處理的時間序列(Atzori et al., 2008; Wen et al., 2012; Zhou et al., 2018)。Atzori et al. (2008) 在震後線性模型 (postseismic linear modeling)




的部分，因為 InSAR 時間序列從 1992 到 2002 年，有經過同震的時間，因此將震後每一張影像都減掉同震位移，來消除同震位移的影響，並且也做了 APS filtering 消除大氣的影響。Wen et al. (2012) 在干涉圖中去除隨時間不變的恆定速率運動，並將大氣校正結合 SBAS-InSAR 處理組合成 InSAR TS + AEM (Atmospheric Estimation Model) 進行 InSAR 時間序列，並將得到的累積的視距方向 (line-of-sight, LOS) 位移量進行了黏彈性鬆弛模型和震後滑移模型以及兩者結合的模型。Zhou et al. (2018) 利用 ERS、Envisat 及 Sentinel-1A 觀測 1978 年伊朗的 Tabas-e-Golshan 地震，其所使用的 ERS 和 Envisat 影像都有做大氣校正處理，但並未詳細說明哪一種大氣校正方法，而其所用的 Sentinel-1A 則是把認為有大氣誤差 (atmospheric errors) 的影像直接移除不使用，並將這三種影像都做 SBAS-InSAR 處理。

第三種方式是只做空間校正的時間序列 (ElGharbawi and Tamura, 2015; Ryder et al., 2007)。Ryder et al. (2007) 處理了軌道的校正以及認為遠場的變形應該盡可能為零，因此擬合了一個平面並從干涉圖中移除區域上的趨勢，接著進行 SBAS 處理，雖然有將 SBAS 的結果進行指數擬合，但是是為了計算衰退時間，並沒有將指數擬合的結果進行模擬，而是將 SBAS-InSAR 的結果進行模擬。ElGharbawi and Tamura (2015) 利用一個 GPS 測站當作參考點，並且建立一個線性公式擬合震前位移以及一個 power model 公式擬合震後位移。並將此兩公式運用在每一張雷達干涉圖，並計算估計值與觀測值的殘差值，利用奇異值分解將殘差值做時間及空間的濾波，再利用一階平面擬合殘差值，以校正干涉圖，最後做 SBAS-InSAR 計算得到時間序列。

第四種方式是做了大氣以及空間校正，Biggs et al. (2009) 將干涉圖做了空間校正以及大氣校正，接著將 SBAS-InSAR 計算出的速率圖進行黏彈性模型，以及將 SBAS-InSAR 的速率圖及 GPS 的水平速率進行震後滑移模型。

第五種方式是沒做任何校正將時間序列結果直接進行震後變形的擬合，Lanari et al. (2010) 將 SBAS-InSAR 的結果進行震後變形指數擬合。

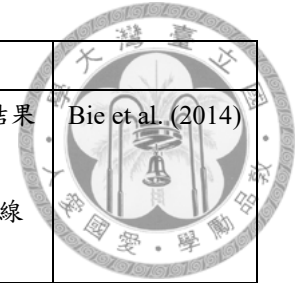


第六種方式是做完大氣校正的處理然後將時間序列結果進行震後變形的擬合 (Li et al., 2009; Wang et al., 2015)。Li et al. (2009) 將 SBAS 與 MERIS 水氣校正模型集成在一起用來校正干涉圖受到的大氣影響，並且將 SBAS-InSAR 結果進行對數、指數以及指數加對數的震後變形擬合。Wang et al. (2015) 通過對速度變化施加時間平滑來約束大氣影響，然後進行 SBAS，將 SBAS 結果進行指數擬合。第七種方式是進行空間校正以及震後變形擬合，Huang and Huang (2018)將 GPS 的同震位移轉換成 LOS 位移，利用線性平面消除 InSAR 同震位移的長波長的雜訊，並進行對數的震後變形擬合。



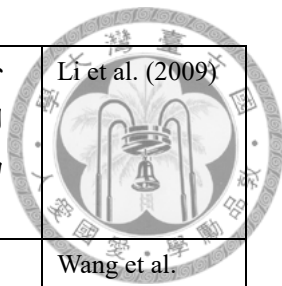
表 2.1 震後變形 InSAR 時間序列整理表

分類	地震事件	雷達影像	大氣校正	空間校正	時間序列擬合	文獻
1.No correction and no fitting	1978.09.16 Tabas-e-Golshan, Iran earthquake	ERS (1996.05.13-1999.05.20) Envisat (2003.05.20-2010.01.07)	x	x	x	Copley (2014)
	2003.05.21 Zemmouri earthquake	ENVISAT (2003.07.12-2010.09.18)	x	x	x	Cetin et al. (2012)
	2010.09.04 Darfield Earthquake, New Zealand	TerraSAR-X (2010.09.06-2010.10.09) ALOS (2010.09.11-2010.10.27) COSMO-SkyMed (2010.10.14-2011.02.19)	x	x	x	Motagh et al. (2014)
2. Atmospheric Correction	1978.09.16 Tabas-e-Golshan, Iran earthquake	ERS (1996–1999) Envisat (2003–2010) Sentinel-1A (2014–2017)	✓ ERS, Envisat 有做大氣校正，Sentinel1 挑掉受大氣影響的影像	x	x	Zhou et al. (2018)
	1999.09.07 Athens earthquake	ERS1 (1992-2000) ERS2 (1992-2002)	✓ APS filtering	x	x	Atzori et al. (2008)
	2001.11.14 Kokoxili earthquake	ENVISAT (2003.12-2007.11)	✓ Atmospheric Estimation Model，此外也在干涉圖移	x	x	Wen et al. (2012)

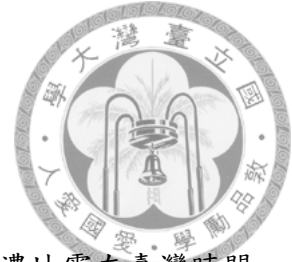


			除線性運動			
	2008.10.06 Damxung earthquake, Tibet	ENVISAT (2008.10.26-2010.08.22)	✓利用利用方位角與範圍及高度擬合平面	x	x 沒有將擬合的結果去模擬 ✓ 有擬合指數曲線看變形衰退時間	Bie et al. (2014)
3. Spatial Correction	1997.11.08 Manyi earthquake	ERS-2 (1997.11.16-2001.09.13)	x	✓擬合一個平面使遠場變形為零，並從干涉圖移去此趨勢	x 有擬合指數曲線看變形衰退時間但將沒有擬合的結果去模擬	Ryder et al. (2007)
	2011.03.11 Tohoku earthquake	ENVISAT (2010.11.21-2011.06.19)	x	✓一階平面擬合	x	ElGharbawi and Tamura (2015)
4. Atmospheric Correction and Spatial Correction	2002.11.03 Denali earthquake	Radarsat-1 (2003–2005，只有夏天的影像可以用，因為冬天積雪)	✓一維協方差函數	✓平面擬合	x	Biggs et al. (2009)
5. Fitting Postseismic Deformation	2009.04.06 L'Aquila earthquake	ENVISAT (2003.02.26-2009.10.07) COSMO-SkyMe (2009.04.12-2009.10.13)	x	x	✓ 擬合指數曲線	Lanari et al. (2010)

6. Atmospheric Correction and Fitting Postseismic Deformation	2003.12.26 Bam Earthquake	ENVISAT (2004.01.07- 2006.12.27)	✓ water-vapor correction model	x	✓ 擬合對數曲線、 指數曲線、以及同 時擬合指數對數曲 線	Li et al. (2009)
	2011.10.23 Van earthquake	TerraSAR-X (post 3 months)	✓ 對速度變化施加時 間平滑來約束大氣 影響	x	✓ 擬合對數曲線	Wang et al. (2015)
7. Spatial Correction and Fitting Postseismic Deformation	2018.02.06 Hualien Earthquake	Sentinel-1 (2018.01-2018.07)	x	✓ 線性擬合	✓ 擬合對數曲線	Huang and Huang (2018)



第三章、研究區域



3.1 美濃地震

依據中央氣象局 (<https://www.cwb.gov.tw/V8/C/>) 公告，美濃地震在臺灣時間 2016 年 2 月 6 日 3 時 57 分發生，震央位置是東經 120.544 度，北緯 22.922 度，位於屏東縣政府北偏東方，地震深度 14.6 公里，芮氏規模 6.6，共造成 117 人死亡與五百多人受傷，並造成建築物倒塌 (Lee et al., 2016)。依據中央地震矩張量 (centroid moment tensor, CMT)，美濃地震的發震斷層並不是目前已知的斷層，而是一條向西傾斜的逆衝斷層及一條東西走向，向北傾斜的中、低角度的斷層 (Lee et al., 2016)。

根據臺灣西南部高解析度速度構造，發現美濃地震的震源區位在西南部 P 波、S 波及泊松比 (Poisson's ratio) 水平和垂直方向都明顯變化的交界，在震源區下方有一個高泊松比的異常帶，暗示可能有流體的存在，流體可能為歐亞板塊脫水引起並從上部地函進入到地殼，推測流體觸發了美濃地震 (Toyokuni et al., 2016)。

美濃地震沒有造成地表明顯的破裂，但是透過干涉合成孔徑雷達的觀測結果，震央西邊有一南北向區域被抬升，震央周遭則下陷 (圖 3.1) (Huang et al., 2016)。Huang et al. (2016) 使用地震波形、GPS 及 InSAR 資料進行有限地震源反演模型 (finite source inversion model)，在深度 15-20 公里的斷層面上做斷層滑移的反演，發現地震波形跟水平的 GPS 資料擬合的成果較佳，但是單一主斷層面的模型無法解釋同震變形。因此提出兩個斷層模型，認為一條位在 15-20 公里的主斷層及一條位在 5-10 公里的淺層斷層才足以描述美濃地震的地表變形，所以在主斷層使用地震、GPS 資料及 InSAR 資料，接著再把 InSAR 資料的殘差用來擬合淺層斷層的斷層幾何，如此一來，測地資料可以吻合兩個斷層模型 (Huang et al., 2016)。

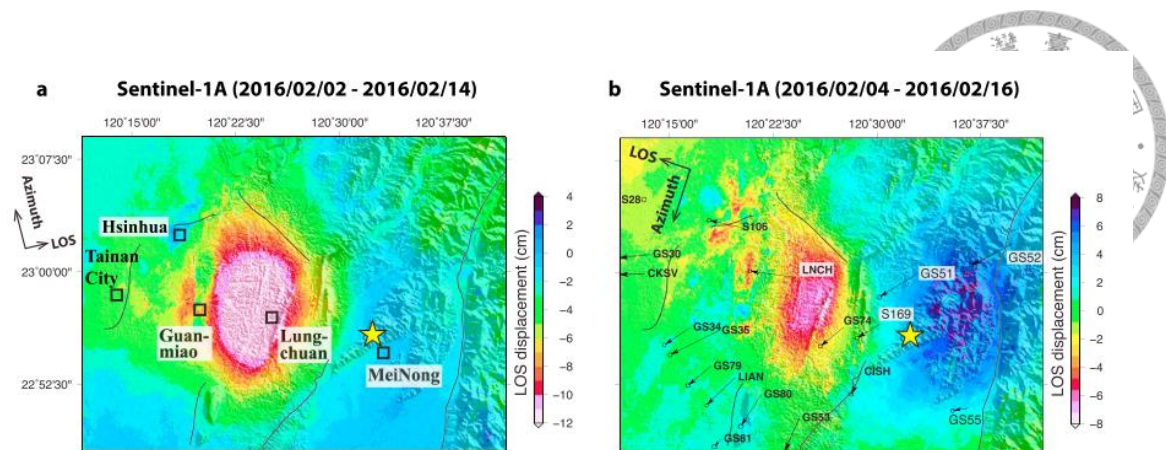


圖 3.1 Sentinel 1A 干涉合成孔徑雷達的結果(Huang et al., 2016)。

左邊為升軌影像，右邊為降軌影像，暖色系代表地表往衛星方向靠近，冷色系代表地表遠離衛星方向。

美濃地震發生後，多起餘震在臺南市內發生，但主震震央所在區域內卻無餘震活動，到 2 月 8 日才發生規模 4.3 的餘震，且在高雄市區域內的餘震深度多小於 20 公里，但在臺南市內的餘震則多分布於深度 20 - 30 公里的範圍內，與觀察到的同震地表變形沒有直接關聯，顯示淺層構造對同震變形量有較大的影響（饒瑞鈞，2017）。Wen et al. (2017) 利用強地動（strong-motion）資料反演震源破裂模型，以及重新定位餘震位置，得到美濃地震序列的震源機制和應力狀態，認為美濃地震觸發了多個先前存在的盲斷層。Le Béon et al. (2017) 根據 2016 年美濃地震期間的地表和地下地質以及大地測量觀測結果，建立了兩個東西方向的橫截面，來解釋地震期間可能被重新觸發的淺層構造，認為這些構造為一系列與向西傾斜的臺南滑脫構造（detachment）相連的背衝斷層（back-thrusts）。

3.2 研究區域地質特性

本研究經由觀測 GPS 資料，認為美濃地震震後變形較明顯的區域大約為東經 120.1-120.5 及北緯 22.7-23.1，為了觀測此區域的震後變形，因此我們將研究區域範圍往外設定在東經 120-120.8 及北緯 22.6-23.4 之間，以下介紹此研究區域的地

質、斷層與構造。



3.2.1 地質

臺灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，在臺灣東北部，菲律賓海板塊俯衝於歐亞板塊之下形成琉球弧溝系統，在臺灣南部海域，歐亞板塊邊緣的南中國海板塊隱沒到菲律賓海板塊下方形成馬尼拉弧溝系統 (Teng, 1990)。菲律賓海板塊以每年 8.2 公分的速度往西北方向歐亞板塊移動 (Yu et al., 1997)，至今仍然持續移動。臺灣的地體構造因為板塊碰撞而區分成五個構造地質區域 (Ho, 1986)，由西向東依序是 (圖 3. 2)：西部海岸平原 (Western Coastal Plain, WCP)、西部麓山帶 (Western Foothill)、雪山山脈 (Hsuehshan Range)、中央山脈 (Central Range)、海岸山脈 (Coastal Range)。西部海岸平原主要為沉積物沉積而成的前陸盆地，西部麓山帶由覆瓦狀的逆衝斷層系統組成，因為此處有許多逆斷層相互交疊，這種構造稱為覆瓦狀構造 (imbricate structure) (Ho, 1986; Lacombe et al., 1999)。在臺灣中部，西部海岸平原與西部麓山帶的邊界斷層為彰化斷層，是西部麓山帶中逆衝斷層系統的變形前緣 (deformation front) (Yu et al., 1997)。在臺灣北部及中部地區，西部麓山帶與雪山山脈之間由水里坑斷層分隔，雪山山脈與中央山脈之間由梨山斷層分隔，在中央山脈的中南部由中新世板岩組成 (Brown et al., 2012)。海岸山脈是由呂宋島弧的火山岩組成 (Ho, 1986)。

臺灣西南部由於位在板塊隱沒帶與碰撞造山帶之間的過渡帶，嘉南地區的地殼移動速率約每年 4 公分，高屏地區的移動速率約為每年 5 公分 (Hu et al., 1997)，是臺灣目前相當活躍的新構造區域。臺灣西南部由於斷層及褶皺影響，形成許多次盆地(李元希等，1997)。

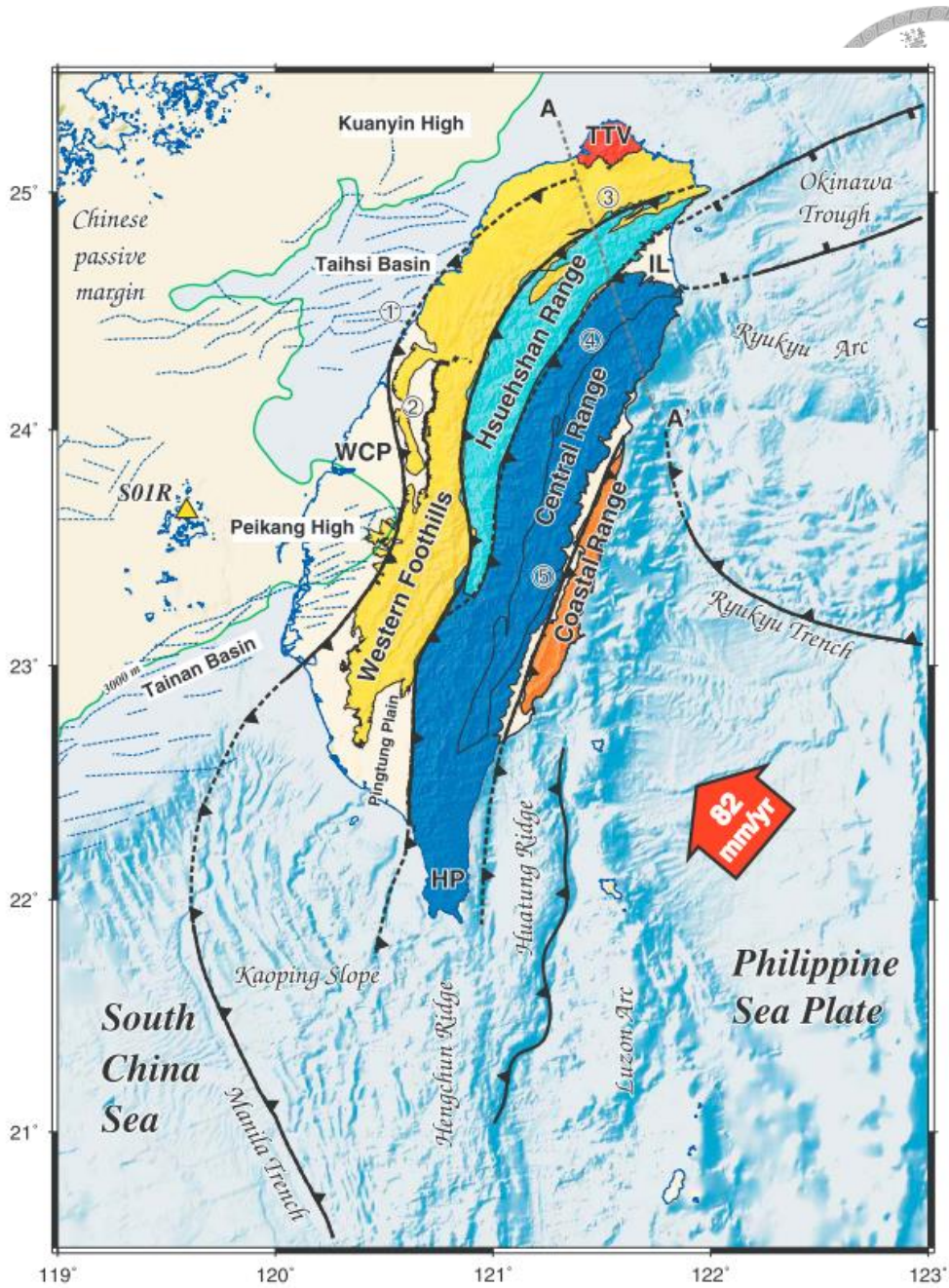


圖 3.2 臺灣地體構造圖 (Ching, Hsieh, et al., 2011)。



3.2.2 活動斷層

根據中央地質調查所活動斷層分布圖(2012年),本研究的研究區所涵蓋的主要斷層有(圖3.3):

1. 六甲斷層

六甲斷層由台南市白河區崁頭里的六重溪南岸向南延伸至台南市官田區社子里,呈現北北東轉南北走向,可能是沿著向斜軸部發育的逆移斷層,由大地測量的結果,斷層上下盤有壓縮量,且具有右移分量(林啟文等,2007)。由航照圖觀測到一向西凸出的線形崖,線形崖的東側出露上新世到更新世褶曲的岩層,線形崖的中心是一南北傾沒的牛山背斜(楊志成等,2005)。根據鑽井資料及野外露頭,六甲斷層向東傾約30度,斷層下盤有新營逆斷層,牛山背斜可能是斷層擴展的褶皺(楊志成等,2005)。六甲斷層位於西部麓山帶與西部海岸平原的交界,線形東邊為嘉義丘陵區,西邊為嘉南隆起海岸平原,地勢東高西低(經濟部中央地質調查所、社團法人中華民國地質學會,2017)。此地區出露的岩層為六重溪層、崁下寮層、二重溪層及六雙層,多是砂質泥岩或泥質砂岩為主(楊志成等,2005)。根據上下盤岩層對比與定年資料,六甲斷層的斷面滑移速率約11 mm/yr(楊志成等,2005)。地調所將六甲斷層列為第一類活動斷層。

2. 新化斷層

新化斷層為東北東走向,由台南市新化區那拔里向西延伸至北勢里,長度約6公里,根據斷層擦痕及歷史地震認為新化斷層是帶有垂直分量的右移斷層,是造成1946年芮氏規模6.3的新化地震的斷層(張麗旭等,1947)。根據鑽井資料顯示,岩芯所觀測到的剪切葉理暗示斷層的傾角很陡(陳文山等,2011)。根據Huang et al.(2004)的平衡剖面顯示,新化斷層是反向逆衝斷層,斷層傾角在淺處為70度,深處為17度,是一個上陡下緩的斷層面,並且向西與深度約3.5公里的滑脫面連接。依據GPS測量結果,新化斷層南北兩側的變形有極大的差異,南側相對於北



側以每年約 19 公厘的速率朝西南產生錯移；從淺層震測剖面顯示，新化斷層由數條正斷層構成數百公尺的變形帶，顯示新化斷層是拉張構造環境（陳文山等，2004）。地調所將新化斷層列為第一類活動斷層。


3. 後甲里斷層

後甲里斷層位於臺南台地東緣，沿台南市永康區向南延伸至虎山里，呈南北走向，長約 12 公里 (Sun, 1964)。依據地質鑽探結果，斷層向西傾斜，但並沒有斷層出露地表的證據，屬於盲斷層；根據大地測量結果，臺南台地的抬升可能與後甲里斷層有關 (林啟文等，2007)。根據 Lacombe et al. (1999) 鑽井資料及震測剖面的結果與 Huang et al. (2009) 都認為後甲里斷層是一條向西傾斜的背衝斷層，而且西側有一東傾且向西的逆衝斷層，因此臺南台地是一個逆衝斷層與背衝斷層所構成的上拱 (pop-up) 構造。依據大地測量結果，後甲里斷層是一兼具右移分量的斷層 (Huang et al., 2009)；依據全新世以來的海水面變化研究，臺南台地東側約以每年 4 公厘的速率抬升 (Chen and Liu, 2000)。地調所將後甲里斷層列為第二類活動斷層。

4. 左鎮斷層

左鎮斷層是一左移斷層，呈西北-東南走向，位置約於台南市山上區至南化區，尚未發現左鎮斷層截切更新世晚期地層的證據 (林啟文等，2007)。左鎮斷層最早是王鑫 (1988) 利用衛星影像發現地形上有落差，辨認出線形。Huang et al. (2004) 認為左鎮斷層是一個撕裂斷層 (tear fault)，且與新化斷層、那拔林背斜形成一個構造三角帶。左鎮斷層位於新化丘陵內，西北端被崙後斷層截切，東南端被龍船斷層截切，所以為撕裂斷層，斷層以西砂頁岩沉積為主，常形成惡地地形 (陳延宗，2007)。地調所將左鎮斷層列為第二類活動斷層。

5. 小崗山斷層



小崗山斷層可能為逆移斷層，呈北北東走向，由高雄市阿蓮區南蓮里向南延伸至燕巢區瓊林里 (Sun, 1964)，長約 8 公里。有地形崖特徵，但是未有地質證據證明斷層存在 (林啟文等，2007)。小崗山斷層的地表呈現撓曲現象，可能是因為前陸盆地位於變形前緣的逆衝斷層所造成，但斷層尖端未出露地表，因此屬於盲斷層；小崗山斷層地表下的構造型態可能是多組與層面略平行的斷層，因為岩層的差異滑移 (differential bedding slip) 造成地表淺部的撓曲，雖然很難將斷層的位置訂在特定的滑動面上，但是經由岩層截切的年代分析，小崗山斷層仍有活動潛勢 (林啟文等，2009)。地調所將小崗山斷層列為第二類活動斷層。

6. 旗山斷層

旗山斷層為逆移斷層，呈現東北走向，由高雄市旗山區附近向南延伸至高雄市仁武區附近，長約 35 公里 (林啟文等，2007)。以往的研究 (林啟文等，2000) 將北邊的內英斷層與旗山斷層合稱為旗山斷層，但陳文山、黃能偉等人 (2005) 認為南北兩斷層特性不同，因此將北邊稱為內英斷層，南邊稱為旗山斷層。旗山斷層的斷層面向東傾，其走向在甲仙東方呈北 35 度東，傾角向東 70 度，往南則轉為南北走向，傾角向東 80 度 (耿文溥，1967)。由地震及 GPS 資料顯示，臺灣南部存在一個旗山轉換斷層帶 (Chishan Transfer Fault Zone, CTFZ)，而旗山轉換斷層帶以南因為數條斷層個別的活動方式，發育成逃逸構造 (escape) (Lacombe et al., 2001)。根據淺層反射震測結果，顯示旗山斷層西側地層較東側破碎，可能是因為斷層下盤為古亭坑泥岩，缺乏明顯層面的地層所以沒有好的反射層特性 (張家鳳，2005)。根據擦痕判斷旗山斷層運動方式是兼具左移分量的逆移斷層，但旗山斷層具有許多分支斷層，一些分支斷層面的擦痕顯示為右移運動方向 (陳柏村，2005)。但根據大地測量結果，旗山斷層為帶有右移分量的逆衝斷層 (Ching et al., 2007; Hu et al., 2007; Lacombe et al., 2001)。陳柏村等人 (2009) 認為造成旗山斷層運動行為不同的原因是因為下盤的古亭坑泥岩較軟弱，容易反映大地構造作用力，產生右移運動，

但主斷層為鎖定狀態，所以未滑動。地調所將旗山斷層列為第一類活動斷層。



7.潮州斷層

潮州斷層為一具左移性質的逆移斷層，呈現南北走向，斷層北段由高雄市六龜區寶來里向南延伸至大津里，又稱土壟灣斷層或荖濃溪斷層；南段由大津里向南延伸至屏東縣枋寮鄉加祿村 (林啟文等，2007)。由航照圖判釋的結果顯現階地的變位量，說明潮州斷層近期曾經活動過 (Bonilla, 1975)。潮州斷層的火炎山相六龜礫岩，到最新的沖積層都有變位現象，證明潮州斷層持續間歇活動 (石再添、鄧國雄，1983)。潮州斷層是分隔中央山脈與西部麓山帶的邊界斷層，從地形特徵較難判斷北段的斷層位置，南段則有明顯的構造地形特徵，因為晚第四紀以來的地形尚未被大量侵蝕或受到構造變形(陳文山、陳勇全等人，2005)。潮州斷層為高角度向東傾斜的斷層，斷層北段被階地礫岩層或沖積扇礫石層覆蓋，是盲斷層；南段在屏東新埤附近的近地表有沖積扇礫石層的撓曲，板岩逆衝於礫石層上(林啟文等，2009)。地調所將潮州斷層列為第二類活動斷層。

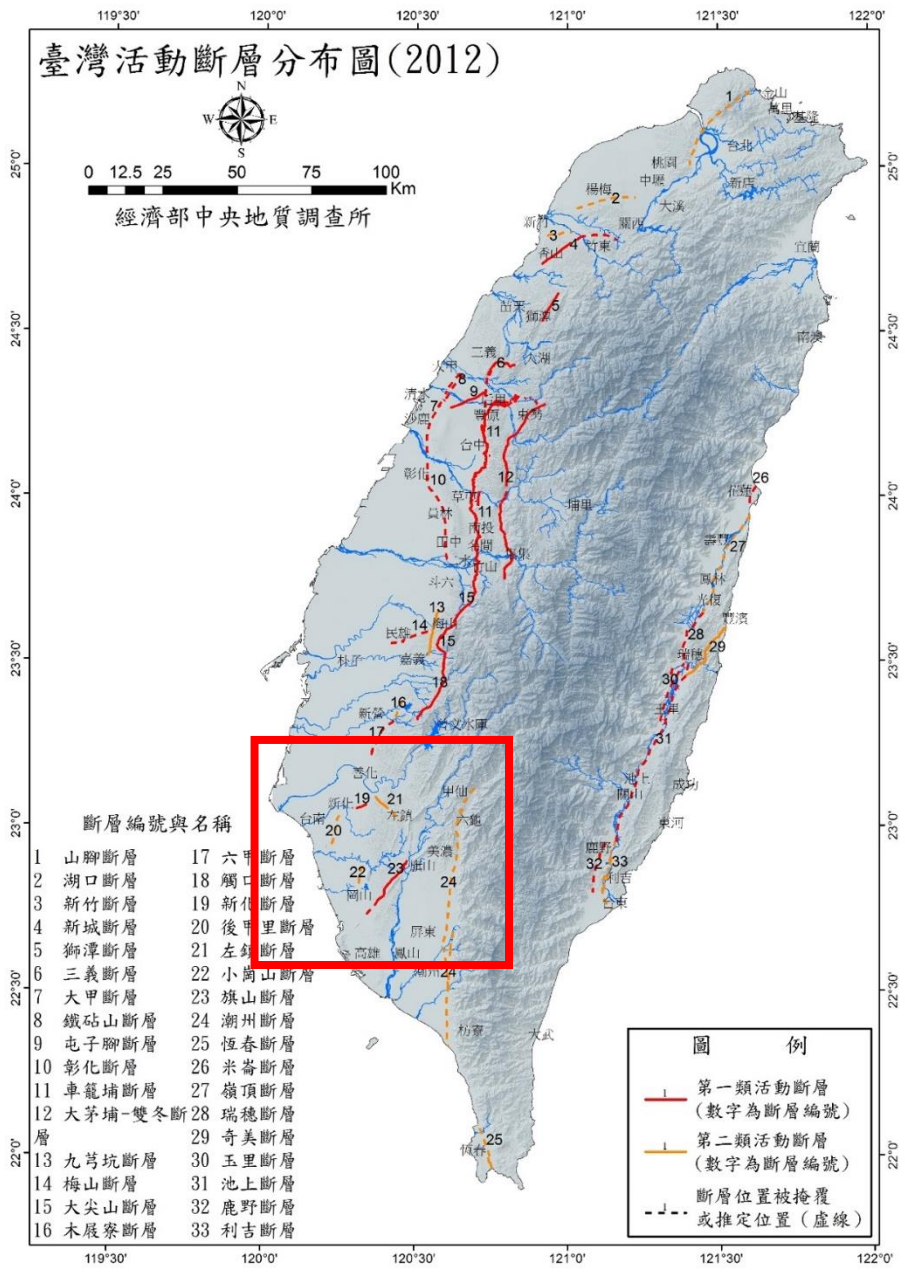


圖 3.3 臺灣活動斷層分布圖 (修改自中央地質調查所)。



除了以上地調所列的斷層之外，以下是未列入地調所的斷層圖裡面但可能有地表活動的潛勢，研究區範圍有以下三條活動構造（圖 3.4）：

1. 嘉義前緣構造

是在嘉義、台南沿海平原底下的一條盲斷層，長度是 44.3 公里，滑移速率大約是每年 $6.49 \pm 4.33\text{mm/yr}$ ，深度是 12 公里，構造傾角 15 度(Shyu et al., 2016)。

2. 中洲構造

位在台南市的東方，長度是 29.7 公里，傾角是 30 度，斷層深度 12 公里，滑移速率為每年 $12.2 \pm 0.60\text{mm/yr}$ (Shyu et al., 2016)。

3. 高屏溪構造

被認為是在高屏溪西側的一個線型隆起，長度是 29.2 公里，傾角 75 度，深度 12.3 公里，滑移速率每年 $0.61 \pm 0.41\text{mm/yr}$ (Shyu et al., 2016)。

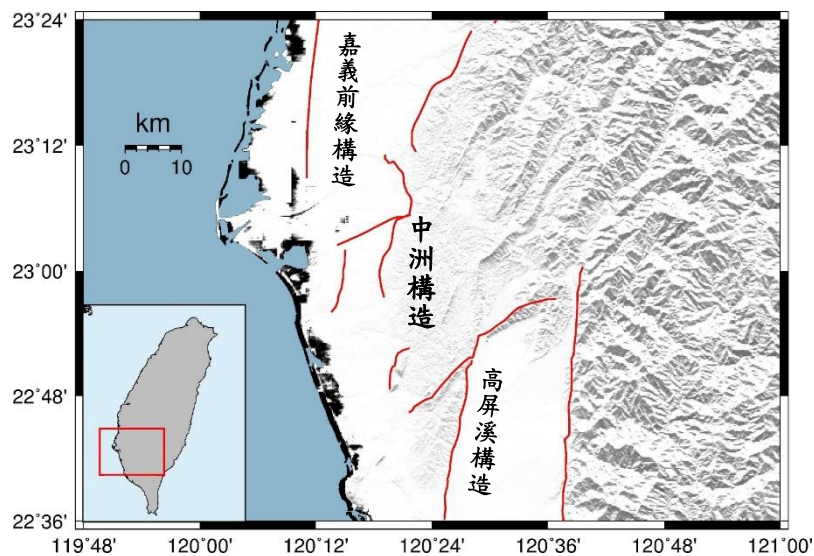


圖 3.4 臺灣地震構造分布圖。

第四章、 研究方法



4.1 研究概念

本研究的目的是為得到更精確的 InSAR 震後變形資料，因此先將 GPS 資料做時間序列擬合，利用 GPS 擬合後的資料當作地真資料 (ground truth)，利用它來校正 InSAR 資料。雷達波因為會經過大氣層，因此 InSAR 資料會受到大氣的影響，所以先將干涉後的雷達影像進行大氣校正的處理。本研究選擇兩種大氣校正的方法，並比較兩種校正方法的成效。在大氣校正之後，利用小基線子集法得到 InSAR 的位移時間序列。由於 InSAR 時間序列在空間與時間上皆需與 GPS 比對，因此本研究先將 InSAR 時間序列與 GPS 擬合後的地表位移量的差值進行空間上的校正。因為雷達資料除了受到大氣影響，還有電離層以及基線誤差等影響，因此本研究選擇三種空間上 InSAR 與 GPS 差異的校正方法進行 InSAR 資料的修正，一樣與 GPS 擬合後的地表位移量進行比較，透過計算均方根 (root mean square, RMS)，最後選擇均方根最小的空間校正方式。至此步驟所得到的 InSAR 資料稱為地震之後地表的變動量，並不是震後變形量，需要再進行 InSAR 時間序列的擬合才能得到震後變形量 (圖 4.1)。

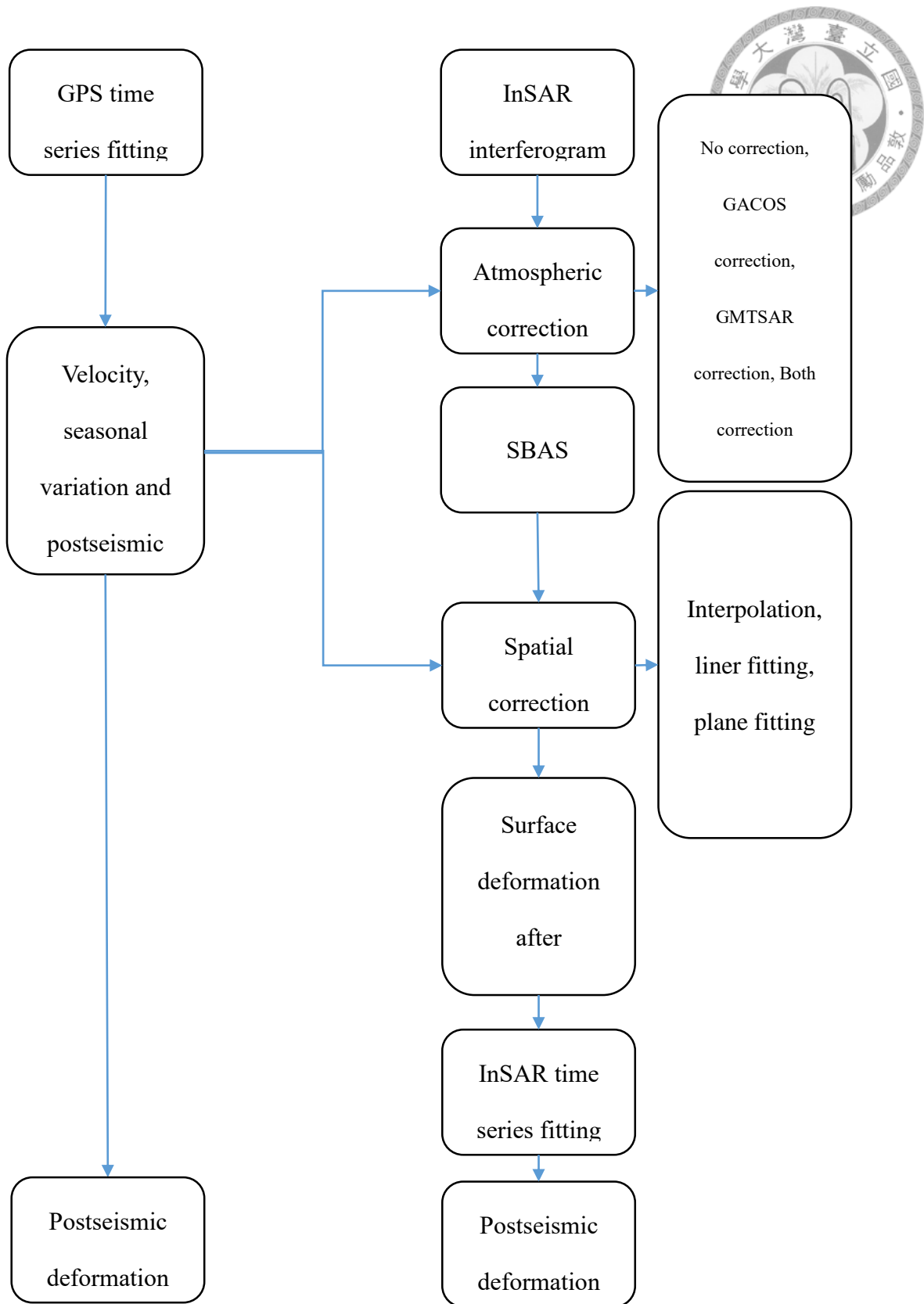


圖 4.1 研究概念圖。




4.2 全球衛星定位系統

全球衛星定位系統起初是美國國防部 1970 年代為了軍事及航空的需求開發研究，針對即時定位、導航與時間校準等功能而建立的，採用全球性地心座標系統，座標原點為地球質量中心，利用測量獲得地表觀測點與數顆衛星的距離，求得地表位置的座標。在全球衛星定位系統中原本設計包含 24 顆人造衛星，其中 21 顆為工作衛星，3 顆為備用衛星，24 顆平均分布在 6 個軌道面上，現在則增加至 31 顆工作衛星。軌道面與赤道之夾角為 55° ，衛星離地面高度約為 20200 公里，屬於中地球軌道 (Medium Earth Orbit, MEO)，衛星運行週期為 11 小時 58 分鐘，由於地球自轉，衛星需要 23 小時 56 分鐘後才會回到起始位置。位於地平線可以接收到的衛星顆數會隨時間及地點不同而有差異，最少可以接收 4 顆衛星的訊號，最多可以接收 11 顆衛星的訊號。每顆衛星持續發射載有衛星軌道及時間資料的無線電波，時間以原子鐘為基準，衛星送出具有時間訊號的電碼，地球上的接收器收到訊號後，利用三角定位法算出接收器所在位置的空間位置。理論上接收器收到 3 顆衛星訊號就可進行定位工作，但是需要修正接收器接收衛星訊號的時間延遲，因此需要再多加入一顆衛星修正誤差。

GPS 提供了單點三維座標的精確位置，三維指的是經度、緯度、高程，使得 GPS 在八零年代末期開始被大量應用在地殼變形的監測上 (Segall and Davis, 1997)。若想獲得高精度的定位結果，通常採用相對定位法，求解兩測站的相對位置，實際操作方法是利用兩部接收器，主站 (master station) 及移動站 (rover station)，將主站架在已知座標點，移動站架在待測座標點，觀測時可以得到兩測站的基線向量，待測點座標就可以利用主站座標得出。

在 GPS 測量中有一個重要的國際組織：國際 GNSS 組織 (International GNSS Service, IGS)，此組織由全球各地獨自設置的永久性連續 GNSS 觀測站組成，每天於格林威治 24 點開始收集資料，然後自動將資料送到全球的資料庫，再將資料處理中心獨自計算的各測站座標、衛星時鐘、精密軌道參數等做綜合比較，國際 GNSS



組織會將比較後的資料提供給全球使用者，各固定追蹤站的原始資料也會轉換成共同交換格式 (Receiver Independent Exchange format, RINEX) 作為標準格式提供給大家使用。國際 GNSS 組織結合超長基線干涉術 (Very-long-baseline interferometry, VLBI) 與衛星雷射測距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 重新計算各測站的精密座標及其平均移動速度，使全球 GNSS 固定站網成為一個實用的座標參考框架 (Reference Frame for Coordinates)。目前全球最重要的一組參考框架是由國際地球自轉服務 (International Earth Rotation Service, IERS) 所提供的國際地球參考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF)。國際地球參考框架是一個動態系統，會根據地球的實體變動量 (地球定向參數、三維地心座標位置) 來調整座標框架結構，因此能真實表達地球現況。國際 GNSS 組織與國際地球參考框架透過彼此的合作，國際地球參考框架可以利用國際 GNSS 組織公布的全球 GNSS 測站的連續追蹤資料，國際 GNSS 組織可以採用國際地球參考框架的座標進行 GNSS 軌道計算。

本研究 GPS 時間序列資料是使用台灣地震科學中心 GPS lab (<http://gps.earth.sinica.edu.tw/>) 解算後的資料，GPS lab 是利用 GIPSY 來求解精密的 GPS 測站座標。GIPSY 的解算方法為使用未差分的原始觀測量解算單站的座標，優點是每一站的解算結果不會受到資料較差的測站干擾，缺點是不能像雙差分法消除共同的誤差。GPS lab 所解算的時間序列結果目前是以 ITRF2008 為參考框架。

4.3 GPS 時間序列分析

4.3.1 時間序列擬合方法

為得到美濃地震震後變形，本研究由 GPS 時間序列來推估震後變形的量。由於時間序列是該測站每天的位置解，長期來說會包含許多種來源的訊號，因此以下列公式來擬合 GPS 時間序列 (Nikolaidis, 2002)：

$$x(t) = x_0 + v_0 t + a_1 \sin(2\pi t) + a_2 \cos(2\pi t) + b_1 \sin(4\pi t) + b_2 \cos(4\pi t) +$$



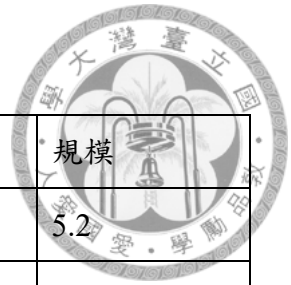
$$\sum_{i=1}^{N_s} s_i H(t - t_{eq}) + p_1 \ln(1 + \frac{t-t_{eq}}{p_2}) \dots\dots\dots (式 4-1)$$

第一項係數 x_0 為觀測測站初始座標；第二項係數 v_0 為長期地殼運動速率；第三項 a_1 、第四項 a_2 為年週期變化 (annual variations) 的係數；第五項 b_1 、第六項 b_2 為半年週期變化 (semiannual variations) 的係數，兩者所代表的為季節性變化；第七項係數 s_i 為地震造成的同震位移量，其中 H 為階層函數 (Heaviside step function)；第八項係數 p_1 為震後變形的位移量； t 代表時間； t_{eq} 代表地震的時間， p_1 為特徵時間 (characteristic time)。

本研究使用自行撰寫之 MATLAB 程式分析 GPS 時間序列，利用式 4-1 進行擬合，修正更換天線盤的變動，並且將其他背景地震 (表 4.1) 造成的位移去除，保留 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震的同震位移及震後變形。背景地震的篩選條件是規模大於 5、深度小於 30 公里、經度介於 120-121 度、緯度介於 22.5-23.5 度，符合這些條件的地震才會加入時間序列擬合並移除同震位移值。選取甲仙地震的原因是此地震為此區域除了美濃地震以外近年最大的地震，有些測站中有顯現甲仙地震同震及震後變形的訊號。

此外，在公式第八項的 p_2 值，它決定震後變形會衰退 (decay) 多久，所以本研究採用格點搜尋法 (grid search) 搜尋 0.01 到 1 之間的等差數列，公差為 0.01，分別代入三個向量 (南北 N、東西 E、垂直 U) 去計算，之後將原始值減掉每一個不同 p_2 值所計算出的擬合值得到殘差值，將每一個時間點的殘差值平方再相加，除以時間的數量再開根號，得到每一個測站三個向量不同 p_2 值的均方根 (圖 4.2)，最後三個向量各自選擇均方根最小的 p_2 值作為時間序列擬合公式的 p_2 值，這樣的作法可以讓時間序列擬合值更接近原始值。

表 4.1 背景地震



時間 (月/日/年)	經度	緯度	深度	規模
03/04/2008	120.705	23.206	10.80	5.2
12/23/2008	120.547	22.944	17.29	5.3
03/04/2010	120.701	22.965	22.43	6.4
03/04/2010	120.637	22.958	18.60	5.7
07/02/2010	120.687	22.851	18.58	5.1
07/25/2010	120.697	22.841	19.29	5.7
11/08/2010	120.411	23.205	17.65	5.2
12/30/2012	120.912	23.466	2.84	5.2
05/21/2016	120.61	22.9	18.1	5.3
02/10/2017	120.14	22.87	16.2	5.7
05/24/2017	120.51	23.42	12.4	5.1
11/03/2017	120.95	23.00	6.2	5.1
03/20/2018	120.54	23.30	11.2	5.3

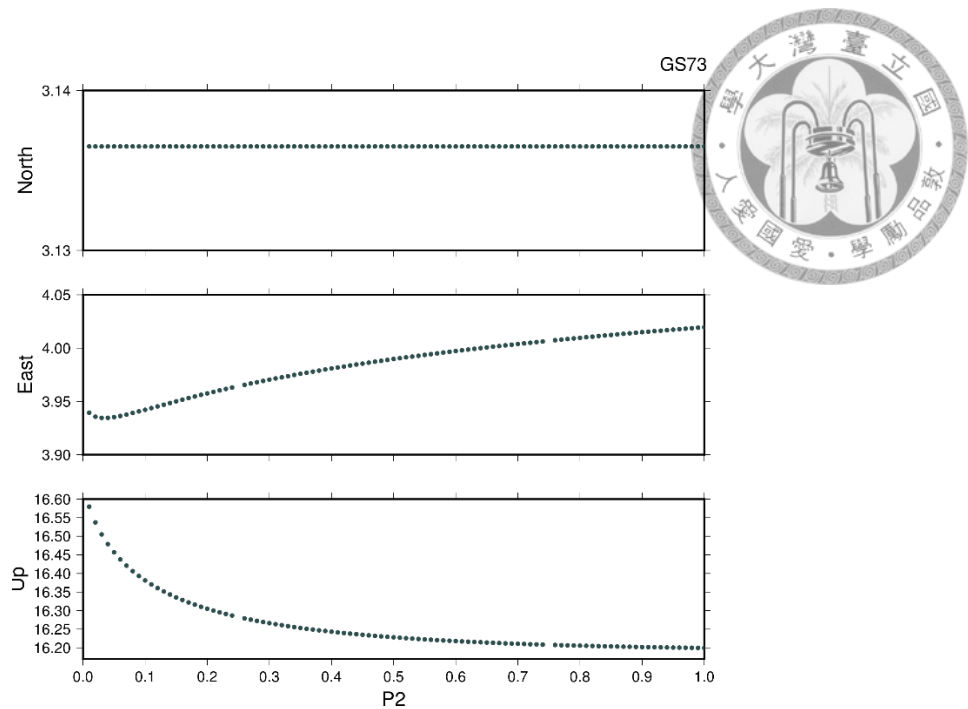


圖 4.2 GS73 測站的 RMS 值。

橫坐標是 p_2 值，縱坐標是三個向量各自的 RMS 值，本研究三個向量是各自選擇最小的 RMS 值的 p_2 值，此測站的 E、U 會分別選擇 0.03 以及 1.00 當作 p_2 值，至於北向量因為沒有震後變形所以沒有擬合震後變形這項，RMS 值不因 p_2 值改變，且 p_2 值不採用。

4.3.2 空間濾波 (spatial filtering)

空間濾波的目的是要移除此區域 GPS 訊號共同的誤差 (common-mode errors)。雖然 GIPSY 在解算 GPS 過程中各站具有獨立性，但缺點是無法消除區域性的共同誤差源，因此使用空間濾波來對研究區內所有測站做處理，為的是要濾除所有測站共同性的誤差 (圖 4.3)。空間濾波總共有三個階段，一為去趨勢 (detrending)；二為疊加 (stacking)；三為濾除 (filtering) (Wdowinski et al., 1997)：

1. 去趨勢：目的是將誤差的訊號獨立出來，計算每天觀測值與擬合值的差異。下列公式中 d 為每天的資料， s 為測站， $O^s(d)$ 為觀測資料， $C^s(d)$ 為經由時間序列擬合公式所計算出的擬合值， $\varepsilon^s(d)$ 為觀測資料與擬合值的殘差值，依據前面時間序列擬合公式分別得到各個測站 N、E、U 三個向量的觀測值及擬合值，在透過下



面公式算出殘差值 (式 4-2):

$$\varepsilon^s(d) = O^s(d) - C^s(d) \dots\dots\dots (式 4-2)$$

2. 疊加：目的是得到每天平均的殘差值大小，由式 4-2 得到每個時間的殘差值，再計算出每一個測站三個向量各自的標準差，將大於三個標準差的值視為極端值 (outlier) (Shiffler, 1988)，再將這些極端值剔除。接著針對每一天計算平均殘差值。式 4-3 的 ε 為每日平均殘差值，此殘差值是研究區內所有測站的共同誤差量， $\varepsilon^s(d)$ 為去趨勢公式中得到的觀測值與擬合值的殘差值，N 為測站數。

$$\varepsilon(d) = \frac{\sum_{s=1}^N \varepsilon^s(d)}{N} \dots\dots\dots (式 4-3)$$

3. 濾除：將新得到的每日平均殘差值扣除，式 4-4 的 $\widehat{O}^s(d)$ 為觀測資料減掉誤差後的新觀測值， $O^s(d)$ 為每日的觀測值， $\varepsilon(d)$ 是由疊加公式所求得的每日殘差值。

$$\widehat{O}^s(d) = O^s(d) - \varepsilon(d) \dots\dots\dots (式 4-4)$$

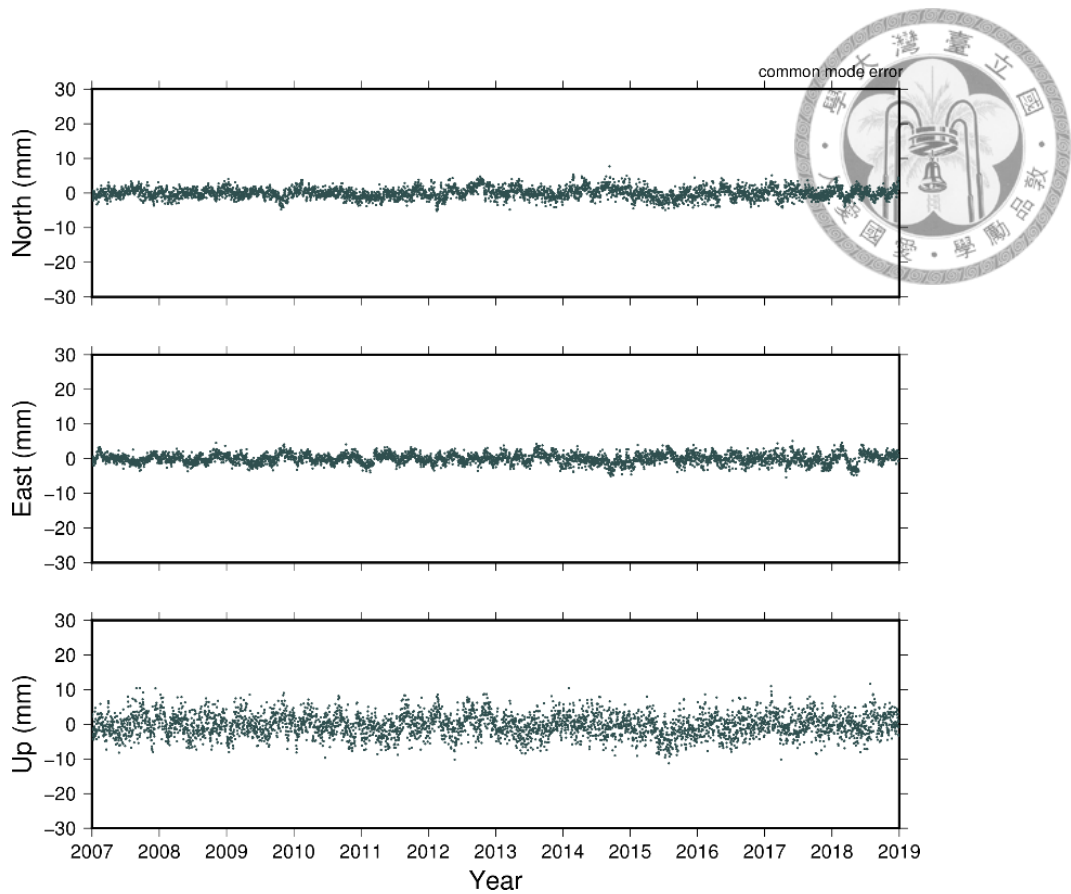


圖 4.3 common-mode errors。

經由上述方法計算出本研究所有測站的三個向量平均殘差值。

透過空間濾波得到新的觀測值，再將新的觀測值利用時間序列擬合公式（式 4-1）重新進行擬合，得到新的擬合趨勢線。圖 4.4 呈現出重新擬合前後的 RMS 值，黑色點是未進行空間濾波時的 RMS 值，紅色點則是進行完空間濾波後的 RMS 值，可以發現每一個測站的 RMS 值都降低了。

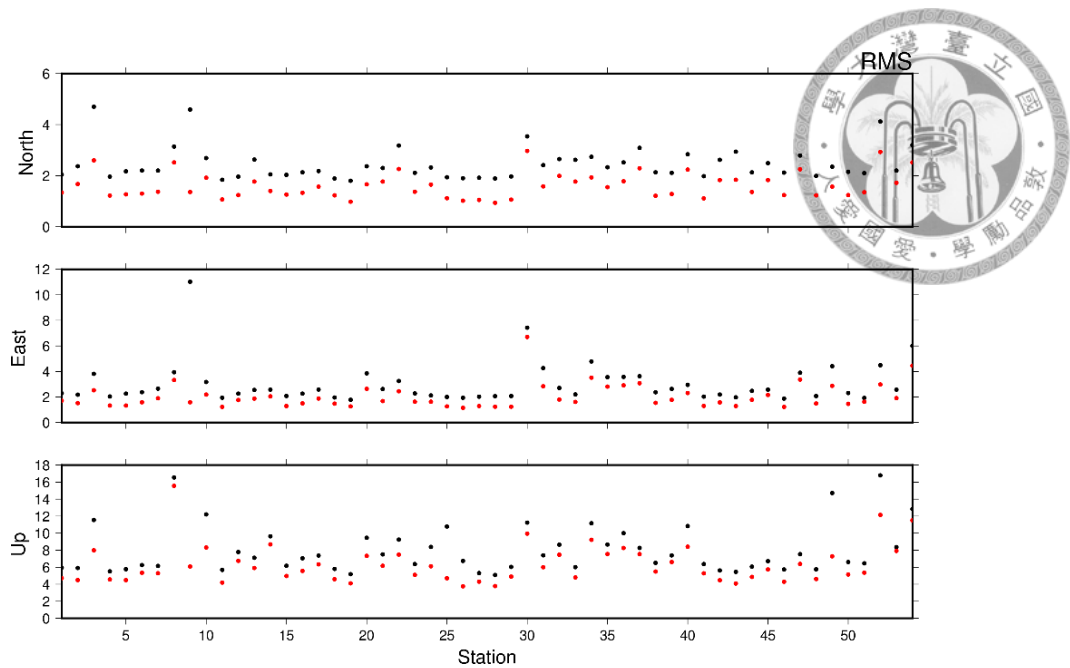


圖 4.4 本研究所有測站 RMS 值。

4.4 干涉合成孔徑雷達

4.4.1 SAR 原理

雷達 (radio detection and ranging, Radar) 是一種主動式觀測系統，利用電磁波對目標進行成像，透過天線可以自行發射及接收微波訊號，記錄訊號發射和回傳的時間，可以得到方向偵測和距離。雷達影像是由方位方向 (azimuth) 和發射電磁波的測距 (range) 方向所組成的上下相反、左右顛倒影像，座標系統是屬於 RA 系統，與一般經緯度座標系統不同。

在 1950 年代時，基於軍事用途將雷達架設於飛機上觀測目標，藉以提升方位方向的解析度，這樣的雷達系統稱為側視空載雷達 (Side-Looking Aperture Radar, SLAR)。由於雷達是由側向拍攝目標物，因此得到的影像為斜距影像 (slant range image)，優點是可以分辨目標物的距離遠近，缺點是側向拍攝會使目標物的地理位置產生變形。側視空載雷達在空載 (airborne) 的應用上，解析度尚可接受，但是在衛載 (spaceborne) 的應用上，要達到相同的解析度，則需要數百公尺長的天線長度，因此合成孔徑雷達的概念應運而生。



高空間解析度的影像一直是雷達影像追求的目標之一，但是影像解析度與天線孔徑大小有關，如果要得到高解析度的影像，天線需要數百公尺的長度，這樣會增加衛星的重量，使衛星發射的困難度提高。因此利用都卜勒頻率位移（Doppler frequency shifts）的原理，提高方位方向的解析度（Massonnet and Feigl, 1998）。圖 4.5 說明合成孔徑雷達如何將小天線合成虛擬大天線。雷達衛星沿著方位方向軌道前進，透過雷達不斷對同一地物發射脈衝，假設有五個位置能看到目標物，但是雷達到目標物的距離不同，因此會產生不同的相位（phase）差。系統將每一個位置的時間、頻率、能量記錄下來，因為都卜勒頻率位移原理，該地物會存有增頻、高頻與降頻等資訊，再透過相位平移器將相位差做修正後再經訊號處理合成新影像。

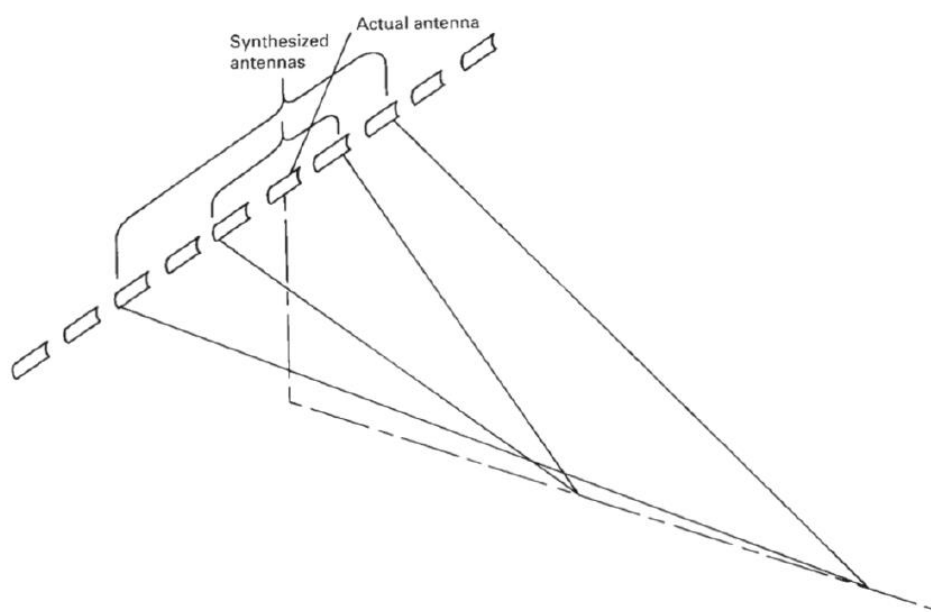


圖 4.5 真實天線合成虛擬天線陣列概念圖(Lillesand et al., 2015)。

4.4.2 InSAR 原理

干涉合成孔徑雷達首見於 1960 年代，Rogers and Ingalls (1969) 利用此技術觀測金星的面，為干涉雷達技術應用的先驅。Zisk (1972) 利用 InSAR 技術得到月球表面的地形數據。不過第一個將此技術用於地球地表探測的是 Graham (1974)，他利用搭載兩個天線的空載干涉合成孔徑雷達技術同時拍攝一個地區獲得地表高



程，並且說明此技術可以提供兩點製圖資訊，一為辨識重要的地物，例如道路、湖泊、山谷等，二為製作三維高程影像，並且能提供全天候的觀測資料，用來製作地形圖。美國噴射推進實驗室為解決影像資料量越來越大的問題，利用數位的方法記錄雷達的振幅（amplitude）和相位資訊，透過側視空載雷達製作出舊金山灣區的DEM資料（Zebker and Goldstein, 1986）。Gabriel and Goldstein (1988) 以單一天線重複軌跡的方式建立了與上述舊金山灣區同一區域的DEM資料。

干涉合成孔徑雷達是利用兩個不同位置的天線接收同一個目標的回波，獲得兩幅或多幅雷達複數資料（complex data），這些複數資料因為距離不同所以產生相位差，相位差可以再透過雷達和地表的幾何關係來計算目標與兩天線的距離差，進而推算出地表的高程資料。圖 4.6 為雷達干涉技術的示意圖， A_1 、 A_2 為獲取地表資訊時天線的空間位置， B 為兩天線間的距離，也就是基線長（baseline）， H 為航高， θ 為視角， r 為第一個天線至地面點的距離， δ 為第二個天線至地面點的距離與 r 的距離差值， α 為基線與水平線的夾角，只要確定軌道的參數值：航高、基線、視角及基線與水平線的夾角等資料，再配合雷達波長就可以計算點位的高程值。

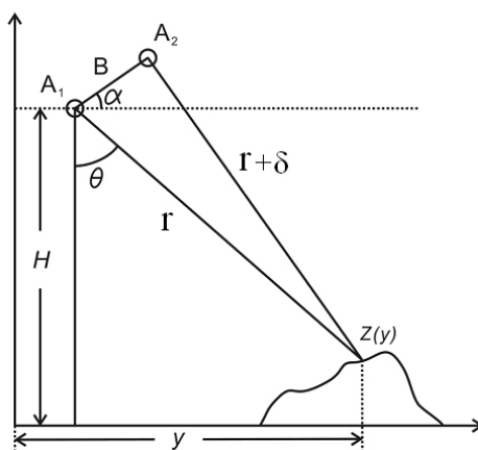


圖 4.6 雷達干涉幾何示意圖(謝嘉聲, 2006)。

干涉合成孔徑雷達由目標與兩天線的位置的幾何關係，在雷達影像上產生相位差，形成干涉條紋，干涉條紋包含斜距上的點與兩天線位置的精確資訊。雷達干涉技術依據天線接收位置的幾何關係可以分成橫軌式干涉（across-track

interferometry)、沿軌式干涉 (along-track interferometry) 及重複軌道式干涉 (repeat-track or multi pass interferometry) 等三種模式 (Gens and Van Genderen, 1996)。

橫軌式干涉需要兩個雷達天線系統同時裝在同一個機載平台上，而且兩個天線所構成的直線方向與飛行方向垂直 (圖 4.7)。此模式只要相位回復 (phase unwrapping) 成功完成，即可獲得高程資料，但是無法區分飛機傾斜及地形坡度所引起的誤差。此模式的例子有太空梭雷達製圖任務 (Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM) 系統及空載地形合成孔徑雷達 (Topographic Synthetic Aperture Radar, TOPSAR) 系統。

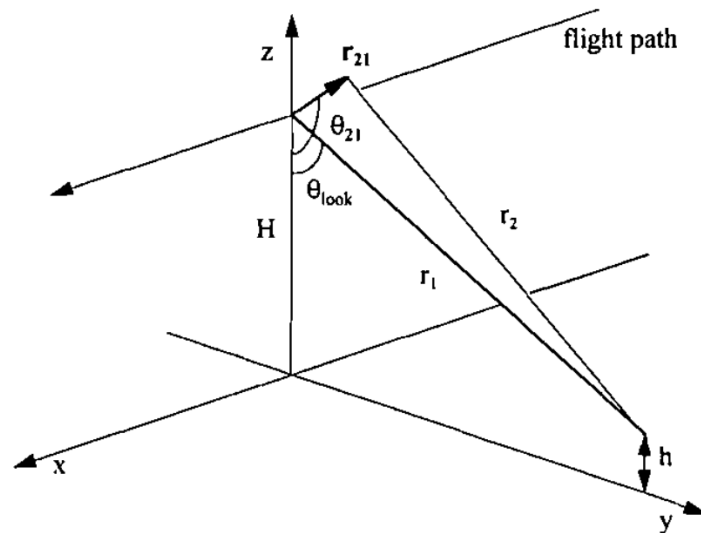


圖 4.7 橫軌式干涉幾何示意圖(Gens and Van Genderen, 1996)。

沿軌式干涉與橫軌式干涉一樣需要兩個雷達天線系統同時裝在同一個機載平台上，但差別是沿軌式干涉雷達天線的直線方向與飛行飛向是一樣的（圖 4.8）。其接收訊號產生的相位差主要為物體瞬間的變動量，如水流變動。由於物體移動會導致天線接收訊號產生都卜勒位移，所以利用都卜勒原理可以推算物體的變動量，但是此模式的天線無法區分固定物體的訊號。此模式的相位差是因為物體相對於感測器移動所導致的，而且載具的偏斜（yaw）與俯仰（pitch）也會影響相位差，所以必須先進行相位差的率定（calibration）才能獲得絕對的速度值。

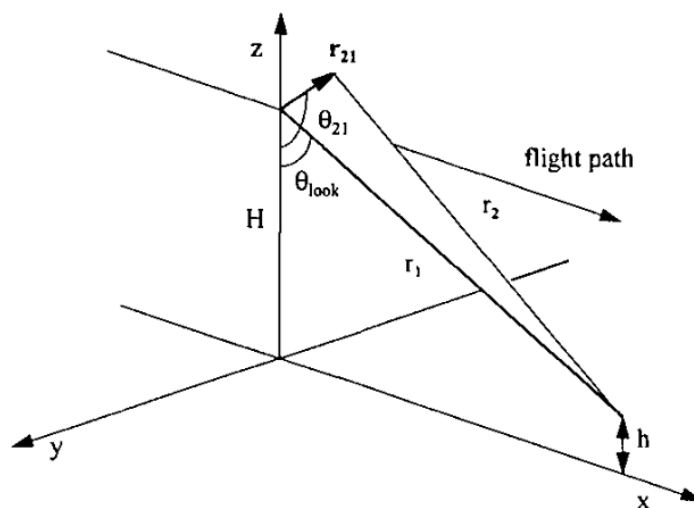


圖 4.8 沿軌式干涉幾何示意圖(Gens and Van Genderen, 1996)。



重複軌道式干涉僅在機載平台上配置一個天線（圖 4.9），所以需要利用載具飛行同一個地方兩次，因為飛行兩次導致取像的位置會有些微不同，所以為了能進行干涉處理，需要準確計算獲取影像的實際位置，此方法比較適合飛行軌道穩定的衛載系統，例如 ERS 及 Sentinel-1 衛星。

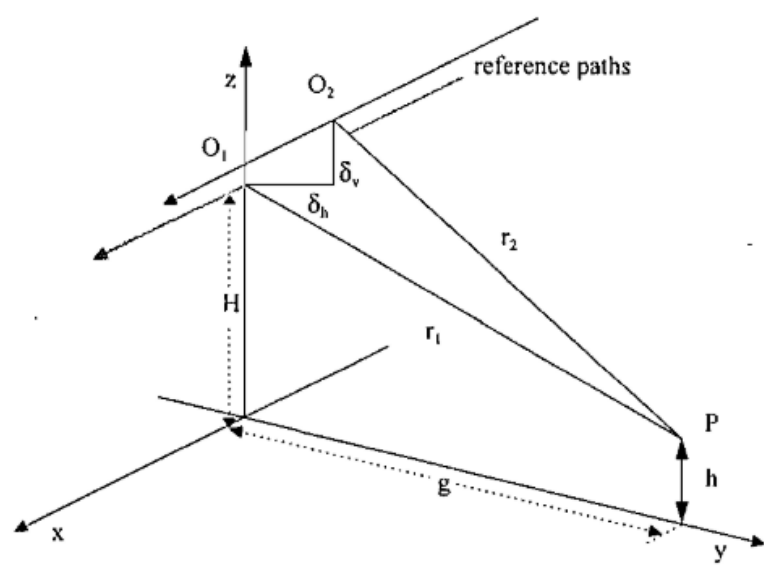


圖 4.9 重複軌道式干涉幾何示意圖(Gens and Van Genderen, 1996)。

在重複軌道干涉模式中，要獲得適合的干涉資訊必須符合三項條件：1.地形的散射情形沒有改變。2.穩定的幾何關係。3.在訊號的移動補償中，SAR 的處理器必須保持相位的一致性 (Gray and Farris-Manning, 1993)。

干涉合成孔徑雷達要取得可靠或品質好的相位資訊，兩張複數影像的地表相關性要夠高，兩張影像的相關性為同調性 (coherence)。同調性會隨著系統雜訊、物體散射與時間造成的地表物改變等原因下降，如風化作用、植被等，造成時間失相關 (temporal decorrelation)。同調性的計算如下：

$$\gamma = \frac{|\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_1(i,j)c_2(i,j)^*|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_1(i,j)c_1(i,j)^*} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_2(i,j)c_2(i,j)^*}} \dots\dots\dots (式 4-5)$$

C₁ 與 C₂ 為主影像 (master) 與副影像 (slave) 的複數資料，C(i,j)為複數影像中每

個像元的值， i 為斜距方向， j 為方位方向， N 為斜距方向多觀點數， M 為方位方向的多觀點數， $*$ 為共軛複數。同調性會介於 0~1 之間，數值越高表示同個點位在不同時間的回波值越一致；反之，同調性越低代表回波值越不相同。同調性可以作為操作差分干涉前的參考指標，同調性過低的地區，可以在差分干涉前先排除。



4.4.3 DInSAR 原理

Gabriel et al. (1989) 首次證實差分干涉合成孔徑雷達 (differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR) 在獲取地表變形量可以達到公分級的精度，其以三幅 SEASAT 雷達影像產生出兩幅干涉條紋圖 (interferogram)，再以此兩幅干涉條紋圖利用差分干涉技術推得地表的變形量。Massonnet et al. (1993) 以兩幅 ERS 地震前後的雷達影像產生干涉條紋，利用現有的 DEM 資料消除地形效應，使計算後的條紋為僅受地震影響的結果，有效地偵測出 1992 年 Landers 地震的變形量。Zebker et al. (1994) 利用三幅 ERS 影像進行差分處理產生兩幅干涉條紋圖，也成功計算出 Landers 地震變形量，此研究亦將雷達計算的地震變形量與 GPS 和電子測距 (electronic distance measurement, EDM) 的結果比對，相關係數高達 0.96。至此之後，利用 DInSAR 觀測地表變形的文章陸續被發表。

差分干涉合成孔徑雷達是用來量測地表變動的技術，藉由不同時期產生的干涉圖，其中一張干涉圖作為地形對，代表地形高程的資訊；另外一張作為變形對，變形對的資訊包含地形效應及地表變形效應，將干涉圖做差分處理，可以移除變形對的地形效應，得到純粹因地表變形所產生的相位差，此技術可以得到公分級或更小的相對精度。差分干涉合成孔徑雷達量測地表位移量的方向並非垂直方向，而是地表沿著雷達視距 (line of sight, LOS) 方向的變動量，其幾何示意圖如圖 4. 10：

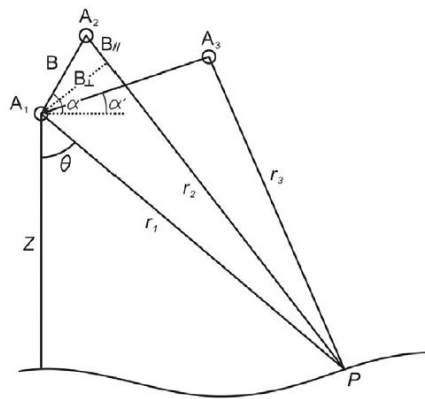


圖 4.10 雷達差分干涉幾何示意圖(謝嘉聲, 2006)。

A1、A2 和 A3 為三個不同時間的雷達天線位置，A1、A2 兩天線位置所獲得的影像可以形成地形干涉對，A1 到 A3 的影像可以形成變形干涉對，變形量產生在 A3 內，再利用 A1 到 A3 的變形對資料除去 A1、A2 地形對的地表資訊，即可得到因地表變動所導致的雷達視距方向變化而產生的干涉相位值，進而推算出變形量。

差分干涉合成孔徑雷達根據地形資料的獲得來源不同，有不同的處理方法，處理方法可以分為三種 (Zebker, 2000)，二軌跡法 (two-pass differential interferogram)、三軌跡法 (three-pass differential interferogram) 及四軌跡法 (four-pass differential interferogram)。

二軌跡法使用既有的數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 當作地形對，再選擇兩張含有地表變形量的合成孔徑雷達影像產生變形干涉對，再將數值高程模型的地形對與變形干涉對進行差分處理，即可得到地表變形量。此方法干涉結果的好壞取決於數值高程模型的品質，以及需要將雷達影像與數值高程模型的地形精確地套合。

三軌跡法(Zebker et al., 1994)使用三張合成孔徑雷達影像，首先，選擇第一張影像與第二張影像干涉後當作所謂的地形干涉對，假設此地形對是沒有地表變形的；而地表變形發生在第二張影像與第三張影像的拍攝時間之間，將第一張影像與



第三張影像進行干涉產生變形干涉對，此干涉對同時包含地形效應及地表變形所造成的相位值，再將此兩張干涉對進行差分處理，即可得到地表變形量。此方法的優點為不用使用既有的數值高程模型資料，因此不用擔心數值高程模型的品質，以及兩幅干涉對都是同一個參考坐標系統，所以不需要進行套合的處理(Zebker et al., 1994)。但是此方法必須先將地形對進行相位回復處理，地形對可能會因為有些地方相關性不好而沒有干涉條紋，導致處理問題(Massonnet and Feigl, 1998)。

四軌跡法使用四張合成孔徑雷達影像，此方法的地形對與變形對的影像是互相獨立的，第一張影像與第二張影像的干涉對作為地形對，假設此兩張影像拍攝期間沒有地表變形；第三張影像與第四張影像的干涉對作為變形對，且地表變形在此期間發生，接著一樣將兩幅干涉影像做差分處理，得到地表變形量。但是在第二張影像與第三張影像之間如果有產生地表變形時，可能會使獲得地表變形時有誤差。

以上三種處理方式皆必須與第一張主影像做套合處理，主要是為了使地形對與變形對有相同的幾何分佈，如此一來，後續進行差分干涉處理時，可以精確地找出對應像元的位置。

差分干涉合成孔徑雷達技術可以提供地表變形量，但是因為雷達訊號從發射到接收的過程中每一個過程都可能產生誤差，因此本研究將誤差分為空間性誤差及時間性誤差來做探討：

4.4.3.1 空間性誤差

造成空間性誤差的來源可以分為四種來討論：

(1) 地表物特徵

在合成孔徑雷達影像中，雷達回波強度(amplitude)與影像同調性呈現正相關，回波強度越強，同調性越好。都市裡的建物反射強，所以回波強度強；有植被覆蓋的區域，例如山區和森林，雷達波容易發生散射現象，因此回波強度弱；光滑筆直的道路，例如機場跑道，或是有水體的地方，例如水庫、湖泊和灌溉後的農地，雷



達波因為鏡反射的原因，無法將雷達波反射回接收器。回波強度弱的地表物會使得影像同調性降低，訊雜比也會降低，導致干涉無法成像。

(2) 大氣效應

雷達波傳遞訊號到地表的過程會經過不同的大氣環境，例如電離層、對流層等，大氣中的粒子會造成雷達波散射或是速度延遲，使得影像的雜訊增加，相位值解算出現誤差。不同的大氣環境所造成的延遲效應也不同，如果大氣分布均勻時，影像量可以忽略；但是分布不均勻時，需要考慮將大氣效應去除。

(3) 基線長誤差

雖然重覆軌道式的衛星每次飛行時會回到同一個地方，但是每次在飛行軌道上還是會有微小的差距，這個差距就稱為基線 (baseline)。當兩幅影像在進行差分干涉處理時，基線越長，影像的幾何變形越大，也會造成同調性降低，在做影像套合時就會產生誤差，而無法成像。

(4) 數值高程模型誤差

在差分干涉處理時，為了要消除地形效應，所以必須加入數值高程模型來移除地形效應，但是實際上數值高程模型與真實地表會有些許差異 (圖 4.11)，所以在干涉過程中會有誤差產生。此外，數值高程模型與合成孔徑雷達影像拍攝當時的地形可能也會有差異，這也會產生誤差。

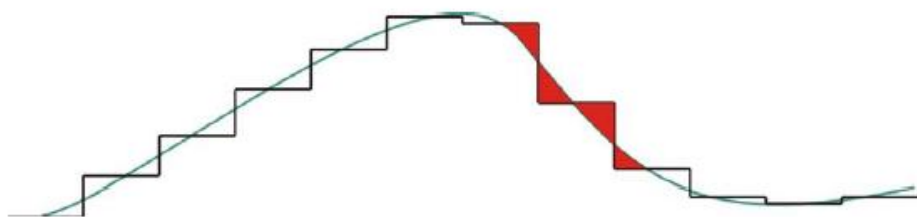


圖 4.11 數值高程模型與地形間差距示意圖。

圖中黑線為數值高程模型，綠色曲線為真實地表地形，紅色區塊為數值高程模型與真實地形的差距。(周鋒泯, 2009)



4.4.3.2 時間性誤差

如果兩張合成孔徑雷達影像拍攝的時間間隔太長，地表上的特徵物可能會因為時間的關係而改變，例如林地被砍伐、建築物的開發、植被的生長等，使得影像的同調性降低而無法成像。季節性的植被和土壤含水量變化也會造成時間性誤差，這類的變化在熱帶雨林比較明顯，在沙漠地區則沒有明顯變化 (Zebker and Villasenor, 1992)。

4.4.4 DInSAR 資料處理

本研究處理 DInSAR 的操作軟體是 GMTSAR (Generic Mapping Tools Synthetic Aperture Radar)，GMTSAR 是由美國加州大學聖地牙哥分校海洋工程學系開發的一套開放軟體，語法是利用 GMT (Generic Mapping Tools) 出圖軟體來控制衛星的干涉流程，而 GMT 的程式語言是 C 語言，目前 GMTSAR 只能在 Linux 和 Mac 的介面安裝與使用，可以處理的衛星影像有 ERS-1/2, Envisat, ALOS-1, TerraSAR-X, COSMOS-SkyMed, Radarsat-2, Sentinel-1A/B, and ALOS-2 (Sandwell et al., 2011)。

使用 GMTSAR 干涉雷達衛星程序總共有七個階段 (Sandwell et al., 2011)，分別是：

1. 前處理 (preprocess)：選取研究區域範圍，分別讀入主影像 (master image) 及副影像 (slave image) 衛星原始資料 (raw data) 以及精密軌道檔，接著會產生一個 ascii 參數文件，前處理會提取軌道位置和衛星的資訊，並估算原始資料的都卜勒中心頻率。

2. 聚焦 (focus)：將原始影像轉換成單觀點影像 (single look complex, SLC) 格式複



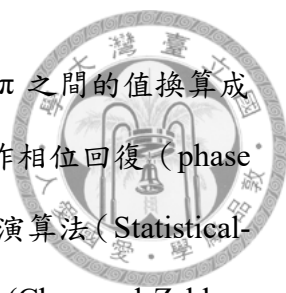
數資料。

3.對齊單觀點影像複數資料 (align SLC images) : SAR 影像需要非常精準地對齊才能進行干涉,透過前處理步驟中的精密軌道可以估計測距和方位角的偏移,再針對影像重疊區的平均分布網格點對主副影像進行對齊,對齊位置是影像的左上角,最後再進行主影像、副影像間相對應的嵌塊 (patch) 進行交叉相關分析 (cross-correlation),使影像對齊的誤差小於一個像元。

4.將 DEM 轉換成 RA (dem2topo_ra) : 將數值高程模型從經度、緯度轉換成測距和方位角。這是利用主影像的精密軌道檔來完成的。本研究使用 SRTM 提供的數值高程模型。

5.干涉 (interfere) : 計算兩影像各像元之相位差,再過濾垂直航向上的基線非相關性及平行航向上波譜重疊狀況,接著計算兩衛星位置至大地水準面上目標點之距離差,然後將該值轉換為相位差,並減去其平行航向方向分量源自 SAR 複數影像對所計算之相位差,來消除因地球曲率所造成之誤差 (盧玉芳, 2007)。

6.濾波/相位回復 (filter/snaphu) : 將干涉圖進行低通濾波 (low-pass filter),然後產生影像的回波強度、相位、同調性圖。低通濾波是為了減少雜訊及避免混疊效應 (aliasing effect) 現象的發生,混疊效應是訊號經過取樣後頻譜發生重疊的現象。GMTSAR 採用了高斯濾波 (Gaussian filter) 進行濾波,接著,再使用改進後的 Goldstein 濾波演算法 (modified Goldstein filter algorithm) (Goldstein and Werner, 1997) 進行濾波。但是前面五個步驟所獲得的相位影像,相位差值會形成所謂的雷達干涉圖的干涉條紋,這是尚未相位回復 (wrap) 的影像,所有的地面位移資訊皆被拆解成 0 至 2π , 影像中兩相鄰之干涉條紋表示 2π 相位差。為了要計算 SAR 影



像上每一個點的高度值或高度變化量，必須先將範圍介於 $-\pi$ 至 π 之間的值換算成實際相位值，換算方法是將主幅值加上 2π 的倍數，此步驟稱作相位回復 (phase unwrapping)。GMTSAR 採用目前較常見的價值統計及網路流程演算法 (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping, SNAPHU) (Chen and Zebker, 2002)來進行相位回復處理。

7.地理編碼 (geocode)：最後一個步驟是將所有影像從測距和方位角系統全部轉換成經緯度座標，進行地理編碼，並且利用 c-shell 語言生成 PS (postscript) 檔和 KML 檔，讓使用者可以觀看圖像及套疊在 google earth 上觀看。

4.5 InSAR 時間序列處理

4.5.1 小基線子集法 (SBAS)

雖然 DInSAR 技術對於監測地表變形能提供不錯的精度，但是它較適合應用在平原都會區，山區或植被較厚地區由於地物會隨時間變化，使得干涉的結果有待評估。因此 Ferretti et al. (2000) 提出永久散射體 (Permanent Scatterers, PS) 的概念，利用多幅影像對的干涉結果找出高相關性的點位，這些點定義為永久散射體。永久散射體具有穩定的雷達波散射特性，這些物體表面特性不會隨著時間輕易改變，得到的訊號可信度較高，例如：地面的建築物、郊外裸露的岩石、高壓電塔的基座等。但是 Ferretti et al. (2000) 提出的永久散射體必須加入當地線性的平均速度場，才得以求得非線性的地表變形量。因此 Hooper et al. (2004) 提出另一種永久散射體差分干涉技術 (Persistent Scatterers InSAR)，不須加入線性平均速度場，也能在變形不規則的火山地區得到時間序列的地表位移量和平均速度場。

PSInSAR 雖然可以在雷達影像中挑選出具有穩定雷達波散射特性的 PS 點，獲得地表變形的觀測結果，但是各幅影像之間軌道的基線長差異會降低雷達波訊號的相關性，對於穩定雷達波散射體密度較低的區域，進行 PS 點選取時，這些區域



的點容易被遺棄。因此小基線子集法 (small-baseline subset, SBAS) 被提出，它選擇基線長較短的圖幅進行干涉，能夠解決因為長基線造成的基線失相關問題，而且每一幅影像都可以當主影像，如此可以提高觀測時間的採集率，並且確保變形的時間序列分析有較高的空間密度，同時也適合非城市地區的地表變形分析(Berardino et al., 2002)。

為了得到美濃地震地震之後隨著時間變動的地表位移量，本研究利用小基線子集法作為處理 DInSAR 資料的時間序列方法，處理軟體一樣是 GMTSAR。此方法可以監測地表變形的時間演變，小基線子集法利用基線當作差分干涉圖的組合依據，如此可以限制空間失相關 (spatial decorrelation) 現象(Berardino et al., 2002)。

GMTSAR 的小基線子集法遵循了 Schmidt and Bürgmann (2003) 提出的演算法，利用最小二乘法反演差分干涉圖的時間序列，圖 4.12 呈現了小基線子集法的模式。

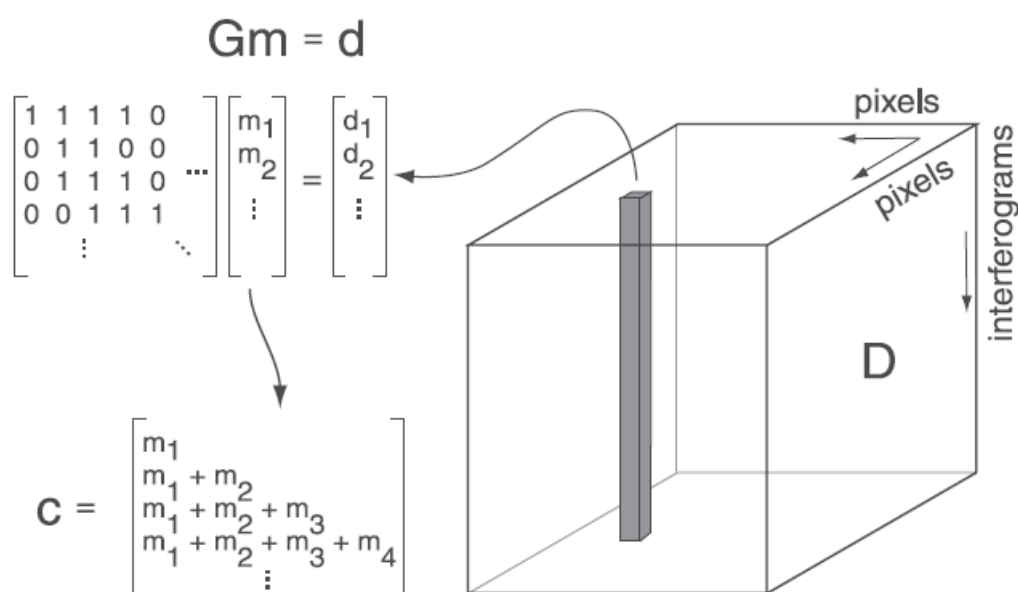


圖 4.12 小基線子集法反演的數據與模型矩陣間的關係(Schmidt and Bürgmann, 2003)。

G 是由 SAR 影像的時間分布所組成，而 SAR 影像的日期是按照時間順序組成 $1 \times S$ 的向量 L，H 是包含每一幅干涉對的起始與結束的日期的 $2 \times N$ 矩陣，S 是 SAR 影像的數量，N 是干涉對的數量，G 矩陣由 1 與 0 所組成，1 與 0 的判斷方式



如式 4-6：

$$G_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } H_{i1} \leq L_j \leq H_{i2} \\ 0 & \text{for } H_{i1} > L_j \text{ or } L_j \geq H_{i2} \end{cases} \dots\dots\dots \text{(式 4-6)}$$

m ($S \times 1$) 是在給定的像素位置 SAR 影像的增量距離 (range) 變化， d ($S \times 1$) 是在同樣的像素位置每一幅干涉對的距離變化， C 是累積的時間序列，由增量的距離變化總和所組成， D ($i \times j \times N$) 是由距離變化的資料所組成的矩陣， i 跟 j 是沿干涉圖寬度和長度的像素數量。

GMTSAR 的小基線演算法除了遵循以上的演算法之外，也改進了傳統小基線法將干涉圖有雜訊 (noisy data) 的部分丟棄，Tong and Schmidt (2016) 保留干涉圖的所有像素，並且利用干涉圖每個像素的同調性來做為加權矩陣，這種基於同調性的小基線技術對於輸入數據的雜訊較不敏感。此加權方法利用最小二乘法，計算方式如式 4-7：

$$W \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & \beta B_1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & \beta B_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda/\Delta t_1 & -\lambda/\Delta t_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda/\Delta t_2 & -\lambda/\Delta t_2 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_s \\ \Delta h \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots \text{(式 4-7)}$$

$$W = \text{diag}\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n\}$$

W 是包含同調性權重的對角矩陣， γ_i 是第 i 幅干涉對的同調性， m_j 是每一幅影像的增量位移， d_i 是第 i 幅干涉對的 LOS 相位， B_i 是第 i 幅干涉對的垂直基線 (perpendicular baseline)， β 是比例係數，由雷達波長、雷達波的入射角以及雷達到地面的距離決定， Δh 是 DEM 誤差， λ 是平滑係數，此方法利用平滑係數/影像時間間隔來控制 InSAR 大時間波動的特性。因此小基線子集法算出來的結果已經是平滑化的結果。



本研究在時間序列上使用的干涉對是以空間基線小於 100 公尺以及 ascending 的時間基線小於 60 天，descending 的時間基線小於 72 天為標準，如此一來可以減少空間及時間失相關的可能。Descending 因為在 2016 年到 2017 年中影像拍攝的時間間隔為 24 天，不像 ascending 為 12 天，因此影像幅數較少，為了使干涉的品質提高，因此將 descending 的時間基線拉長，以增加干涉對的數量。

雖然 GMTSAR 的小基線子集法保留干涉圖的所有像素，並且利用干涉圖每個像素的同調性來做為加權矩陣，但是即使如此山區因為植被茂盛因此干涉的結果並不好。所以本研究選擇將同調性 0.25 以下的點捨棄(Sowter et al., 2016)，如此一來植被較厚的區域的點都會被剔除。此外，GMTSAR 建議小基線子集法的平滑係數為 0.1 到 10，本研究選擇 10 當作平滑係數，原因是因為選擇 10 的結果比起選擇其他數字與 GPS 的結果相比 RMS 較小。

4.5.2 InSAR 大氣校正

由於雷達發射與接收均會通過大氣層，因此雷達訊號會受到大氣溫度、壓力、水氣的影響產生折射與散射，造成訊號衰減或延遲，因而會導致影像增加雜訊，以及相位的誤差。Zebker et al. (1997) 也提出大氣效應對相位量測值有影響，其中水氣的影響大於壓力與溫度。因此為了得到更精確的震後變形，本研究利用英國新堡大學 (Newcastle University) 所研發的 GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) (<http://ceg-research.ncl.ac.uk/v2/gacos/>) 及 GMTSAR 軟體使用的大氣校正方法來校正我們的干涉圖，再將校正後的干涉圖進行小基線子集法處理，最後將結果與 GPS 進行比較，再選擇較好的成果進行後續處理。

GACOS 利用迭代對流層分解模型(Iterative Tropospheric Decomposition Model) 來解決因為對流層總延遲 (tropospheric total delays) 而造成大氣的空間與時間的不確定模式(Yu et al., 2017)。對流層總延遲，特別是由大氣水蒸氣引起的部分，在垂直和橫向上都有所不同，通常被認為和與高度相關的分層訊號 (stratified signals)



以及由對流層中的擾動過程（例如，惡劣天氣）引起的紊流訊號（turbulent signals）有關。迭代對流層分解模型利用 GPS 算出的天頂總延遲（zenith total delay, ZTD）以及歐洲中期天氣預報中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供的水蒸氣資料，將分層和紊流訊號與對流層總延遲分離，並生成高空間解析度天頂總延遲圖，並且將之用於校正 InSAR 測量和其他應用(Yu, Li, and Penna, 2018; Yu, Li, Penna, et al., 2018; Yu et al., 2017)。

在小基線的處理過程中所需要的檔案是 unwrap.grd 這個檔案，此檔案是做完干涉後並且解完相位的檔案，而且是距離與方位角系統的影像，但是 GACOS 所提供的 ZTD 檔案是經緯度系統的，因此先將 unwrap.grd 這個檔案轉換成經緯度系統才能與 GACOS 的檔案進行校正。進行校正的步驟是先蒐集到 GACOS 提供的 ZPDDM（Zenith Path Delay Difference Map）檔，此檔案是將兩張 ZTD 檔案相減而得到的，第二個步驟：因為 InSAR 觀測不僅在時間上有所不同，在空間上也有所不同，所以先將 InSAR 影像與 ZPDDM 影像各自取參考點。本研究是將整張影像計算平均值，把此平均值當作參考點的平均值，因為假設整張影像都會受到大氣的影響，因此是選取整張影像的平均值，接著 InSAR 與 ZPDDM 再各自減去各自平均值。第三個步驟是將大氣造成的延遲減掉，就當作是校正完畢。我們認為大氣會對雷達造成延遲，所以得到的位移量會是增加的，因此需要減掉 ZPDDM，但是因為本研究的 InSAR 影像負值代表離衛星越來越遠，因此將減完平均值的 InSAR 與 ZPDDM 相加。本研究將 2016 年 2 月 14 日至 2017 年 7 月 28 日共 159 幅的升軌干涉影像對與 79 幅的降軌干涉影像對全數做校正，校正完後必須將 unwrap.grd 檔案轉回成距離與方位角系統，接著再進行小基線子集法作出時間序列。

GMTSAR 使用的大氣校正是直接從 SAR 影像計算大氣、電離層和軌道偽影雜訊的方法，Tymofyeyeva and Fialko (2015) 認為每一幅干涉圖中共享同樣日期的 SAR 影像都包含了相同的大氣影響，因此理論上共享有同樣日期的干涉圖會有同樣的大氣影響（圖 4.13）。假設大氣貢獻在時間上不相關，先計算每張干涉圖的

大氣雜訊係數 (atmospheric noise coefficient, ANC)，在下次迭代中，使用先前計算的大氣相位估計值來校正干涉圖，校正後再為每個干涉圖重新計算大氣相位估計值，直到迭代次數結束為止。GMTSAR 建議迭代次數 3 到 5 次為佳，因此本研究測試了 3 到 5 次的迭代，並將 GMTSAR 大氣校正後的 InSAR 時間序列的結果與 GPS 的差值計算均方根，選擇均方根最小的迭代次數。

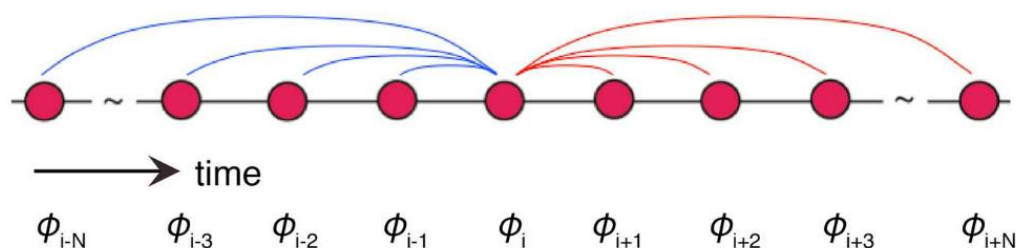


圖 4.13 估算大氣相位示意圖。

4.5.3 InSAR 空間校正

雷達影像除了受到大氣的影響之外，也會受到基線長及電離層的影響，因此本研究利用 GPS 擬合後的地表位移量與大氣校正後的 InSAR 時間序列位移的差值來進行空間上的校正。InSAR 的計算方式是以 GPS 測站座標為中心，向外取 500 公尺的正方形，將正方形裡面的 InSAR 值相加取平均，當作與 GPS 測站位置相同的 InSAR 位置的值。GPS 是將三維的值轉換成 LOS 方向，與 InSAR 進行相減。本研究測試了三種空間校正方法：第一種是將 GPS 與 InSAR 的差值利用 Matlab 的 V4 指令進行內插(Ge et al., 2000)；第二種是將 GPS 與 InSAR 的差值進行南北向的線性擬合；第三種是將 GPS 與 InSAR 的差值利用 Matlab 的 fit 指令進行平面的擬合。

在南北向線性擬合部分，先將 GPS 經緯度座標換算成 local 座標，再以 GPS 測站的 Y 座標當作南北向的距離，利用距離及差值來做線性擬合(圖 4.14)，透過這個擬合值來計算每一個 InSAR 點要校正的量。在平面擬合部分，本研究測試了一階的平面擬合(ElGharbawi and Tamura, 2014)、二階的平面擬合(Neely et al., 2019)



及三階的平面擬合。校正方法如式 4-8 及式 4-9：

$$r(lon, lat) = d^{GPS}(lon, lat) - d^{InSAR}(lon, lat) \dots\dots\dots (式 4-8)$$

$$correctedd^{InSAR}(lon, lat) = d^{InSAR}(lon, lat) + r(lon, lat) \dots\dots\dots (式 4-9)$$

d^{GPS} 為擬合後的地表位移量， d^{InSAR} 為大氣校正後的 InSAR 時間序列位移， r 為 GPS 擬合後的地表位移量與大氣校正後的 InSAR 時間序列位移的差值， $correctedd^{InSAR}$ 為空間校正後的 InSAR 時間序列位移。差值的算法如式 4-10 至 4-16：

一階： $r_{11}(lon, lat) = a + blon + clat \dots\dots\dots (式 4-10)$

二階：

$$r_{22}(lon, lat) = a + blon + clat + dlon^2 + elon * lat + flat^2 (式 4-11)$$

$$r_{21}(lon, lat) = a + blon + clat + dlon^2 + elon * lat \dots\dots\dots (式 4-12)$$

$$r_{12}(lon, lat) = a + blon + clat + dlon * lat + elat^2 \dots\dots\dots (式 4-13)$$

三階：

$$r_{33}(lon, lat) = a + blon + clat + dlon^2 + elon * lat + flat^2 + glon^3 + hlon^2lat + ilon lat^2 + jlat^3 \dots\dots\dots (式 4-14)$$

$$r_{23}(lon, lat) = a + blon + clat + dlon^2 + elon * lat + flat^2 + glon^2lat + hlon lat^2 + ilat^3 \dots\dots\dots (式 4-15)$$

$$r_{32}(lon, lat) = a + blon + clat + dlon^2 + elon * lat + flat^2 + glon^3 + hlon^2lat + ilon lat^2 \dots\dots\dots (式 4-16)$$

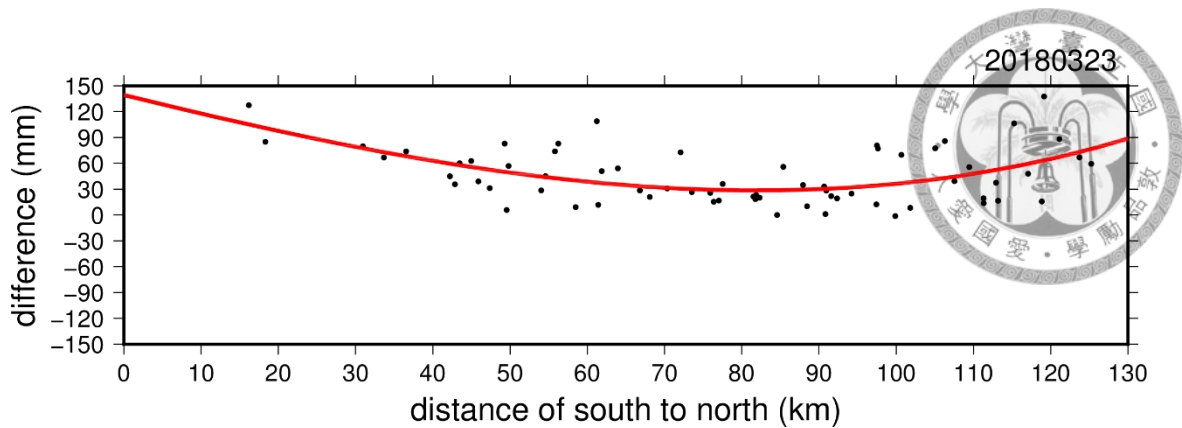


圖 4.14 南北向距離線性擬合。

4.5.4 InSAR 時間序列擬合

經過大氣校正及空間校正後的 InSAR 時間序列位移稱為地震之後地表的變動量，這是消除了 InSAR 各種可能的誤差之後的地表變動量，此時的地表變動量尚包含了地殼長期移動速率、地表的季節性變化及震後變形，因此本研究透過時間序列的擬合，萃取出 InSAR 的震後變形。

但在進行擬合之前，由於 Sentinel-1 衛星 2014 年才發射，所以地震之前的 SAR 影像只有不到 2 年的時間，由於時間太短，所以由 SAR 影像所計算出來的地殼長期速率並不穩定。因此本研究採用擬合了 12 年（2007-2018 年）的 GPS 資料所計算出來的地殼長期速率（圖 4.15、圖 4.16），先將 InSAR 時間序列位移減掉 GPS 擬合後的地殼長期速率，接著透過下列公式擬合 InSAR 時間序列：

$$x(t) = x_0 + a_1 \sin(2\pi t) + a_2 \cos(2\pi t) + b_1 \sin(4\pi t) + b_2 \cos(4\pi t) + p_1 \ln\left(1 + \frac{t-t_1}{p_2}\right) \dots \dots \dots \text{(式 4-17)}$$

第一項係數 x_0 為 InSAR 初始座標；第二、第三項 a_1 、 a_2 為年週期變化（annual variations）；第四、五項 b_1 、 b_2 為半年週期變化（semiannual variations）；第七項係數 p_1 為震後變形的位移量； t 代表時間； t_1 代表震後 InSAR 影像的第一個時間。

此外，在公式第七項的 p_2 值，與 GPS 相同，本研究一樣採用 0.01 到 1 之間的



等差數列，公差為 0.01，代入 LOS 向量去計算，之後將原始值減掉每一個不同 p_2 值所計算出的擬合值得到殘差值，將每一個時間點的殘差值平方再相加，除以時間的數量再開根號，得到每一個 InSAR 點不同 p_2 值的均方根，最後選擇均方根最小的 p_2 值作為時間序列擬合公式的 p_2 值。

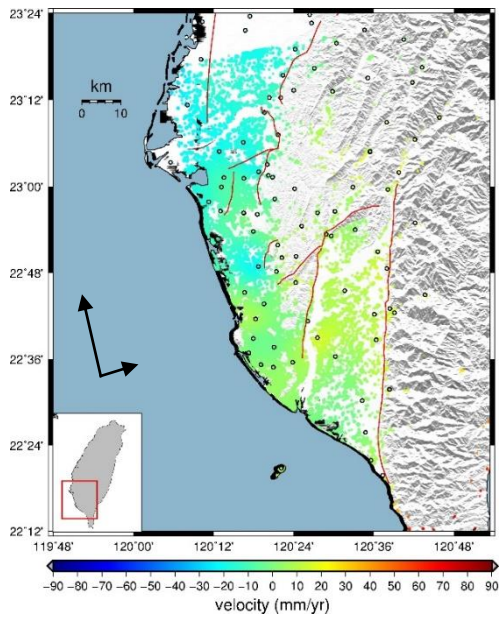


圖 4.15 GPS 內插出的升軌影像長期速率。

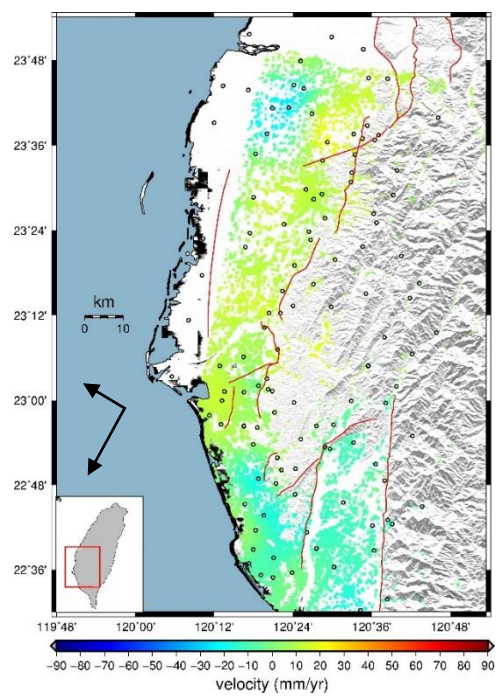


圖 4.16 GPS 內插出的降軌影像長期速率。

此外，本研究也將震前的雷達影像做了跟震後影像一樣的校正方式，先將每張干涉圖進行 GMTSAR 的大氣校正，再透過 GPS 計算出的長期速率以及短期速率（與震前 InSAR 相同時間 2014 年 10 月至 2016 年 2 月）來修正每一張時間序列的影像，再將時間序列影像擬合速率進而得到 InSAR 震前的速率圖。

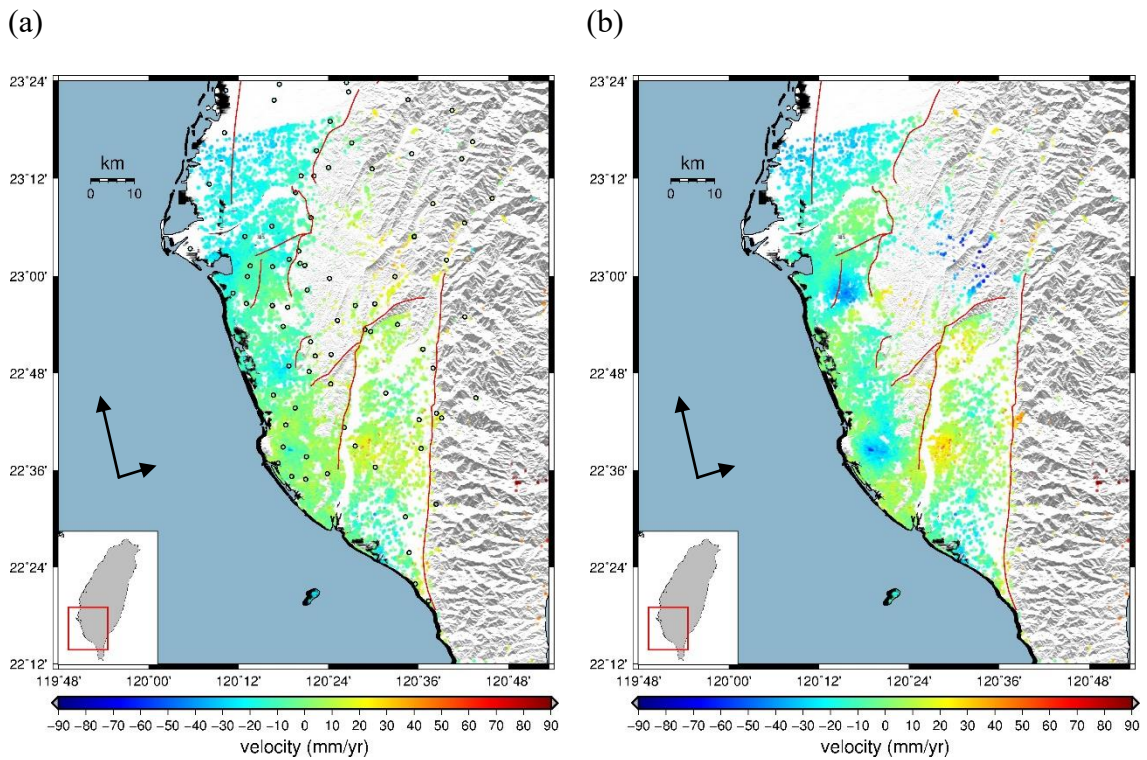


圖 4.17 InSAR 升軌震前速率圖。

(a)是 GPS 長期速率修正完後的結果，(b)是 GPS 短期速率修正完後的結果。

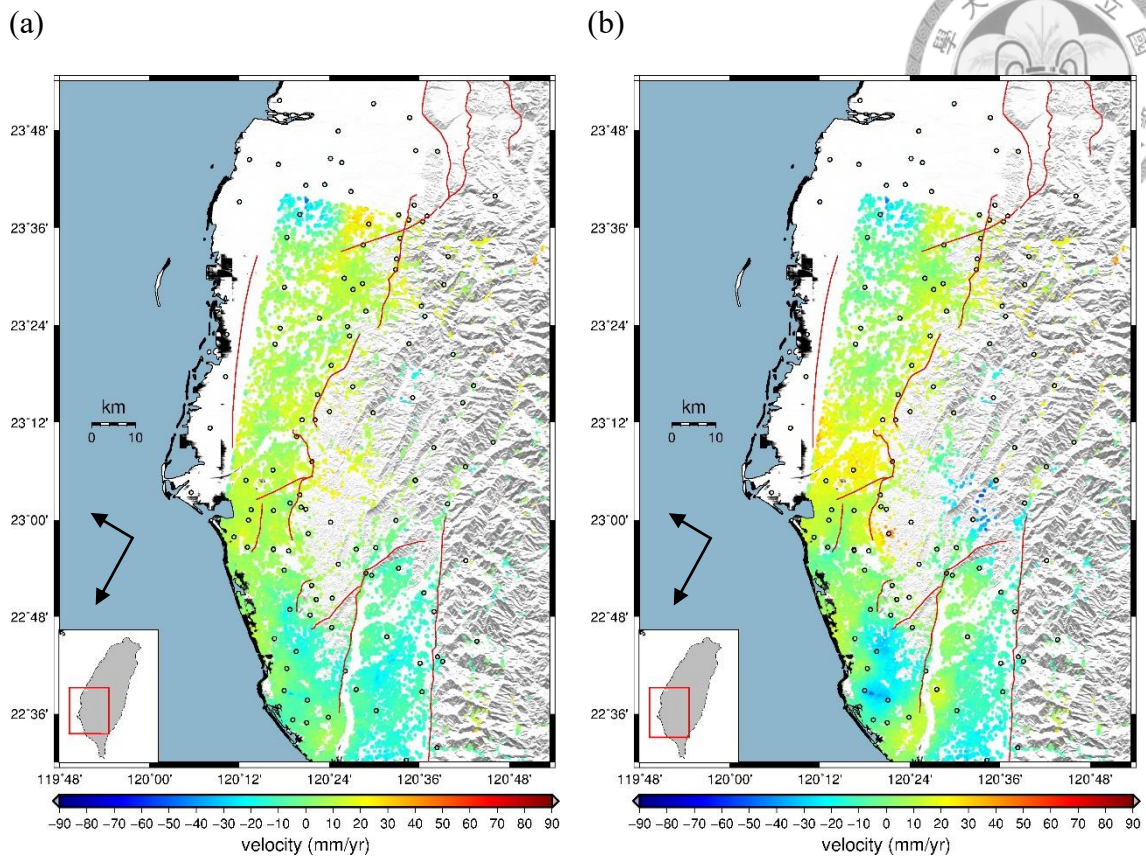


圖 4.18 InSAR 降軌震前速率圖。

(a)是 GPS 長期速率修正完後的結果，(b)是 GPS 短期速率修正完後的結果。

從圖 4.17 至圖 4.18 可以觀察出由 GPS 短期速率計算出的結果有幾處速率明顯比長期的結果來得大，以及由圖 4.15 及圖 4.16 的結果可以觀察出由 GPS 長期速率內插出的 InSAR 速率以及將 InSAR 時間序列的影像利用長期 GPS 速率校正後的 InSAR 速率（圖 4.17(a)及圖 4.18(a)）差異不大。



4.6 研究資料

4.6.1 GPS 資料

本研究選取了東經 120.0 度至 120.8 度、北緯 22.6 度至 23.4 度的 54 個 GPS 連續觀測站，這 54 個測站是從當時美濃地震發生時有顯著同震變形位移的測站再往四周搜尋，認為較有震後變形的測站。此外，本研究從這 54 個測站再往北往南總共再選取了 76 個 GPS 連續觀測站，這 76 個測站是為了進行空間上的內插而再多選取（圖 4.19）。

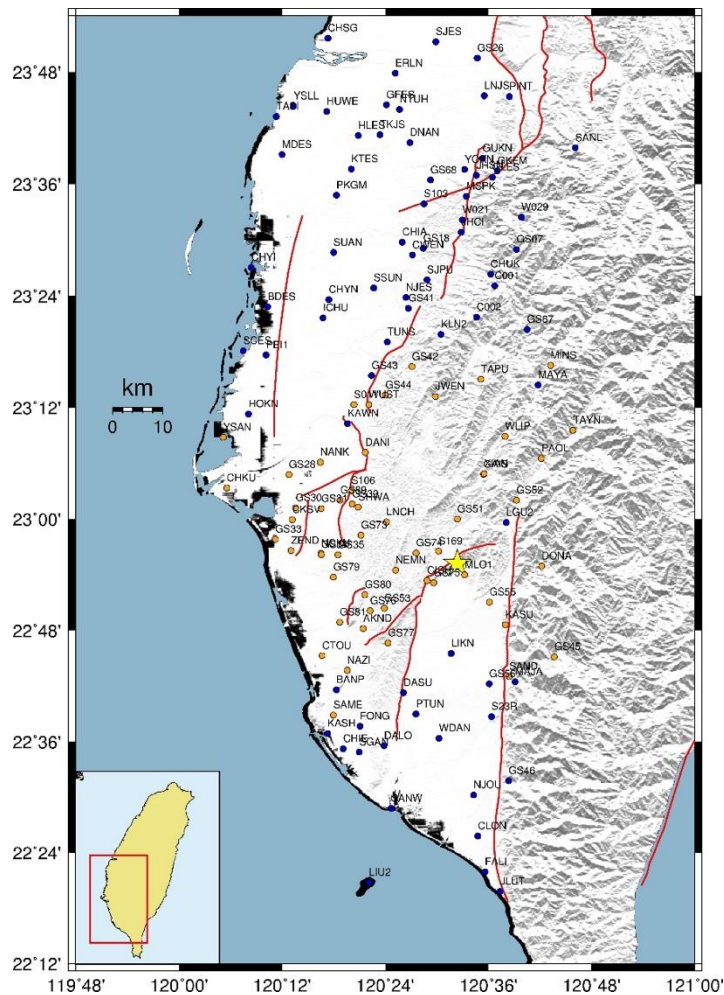


圖 4.19 GPS 測站圖。

橘色點是因為震後變形而選取的站，藍色點是為了進行空間上的內插而選取的站，星星為美濃地震震央。



4.6.2 SAR 資料

本研究 SAR 資料所使用的影像是歐洲太空總署 (ESA) 所發射的 Sentinel-1A 衛星，此雷達衛星於 2014 年 4 月發射，運行週期是 12 天，波段是 C-band，波長約為 5.5 公分，衛星高度為 693 公里，是一顆右視雷達衛星。衛星資料的讀取模式有四種，SM (stripmap)：一張影像範圍是 80 公里，空間解析度 5 公尺乘以 5 公尺，只在緊急情況下才能使用、IW (interferometric wide swath)：一張影像範圍是 250 公里，空間解析度 5 公尺乘以 20 公尺，主要用來觀測地表的變化、EW (extra-wide swath)：一張影像範圍是 400 公里，空間解析度 20 公尺乘以 40 公尺，主要用來觀測海冰、極區、WV (wave)：一張影像範圍是 20 乘以 20 公里，空間解析度 5 公尺乘以 5 公尺，每 100 公里會拍攝一張，主要提供海洋區域的資料。本研究是選取 IW 模式的衛星影像。

本研究在升軌影像選取了 2016 年 02 月 14 日到 2018 年 03 月 23 日的影像來做時間序列，總共 60 張影像，產生了 243 幅干涉圖 (圖 4. 20)；降軌影像選取了 2016 年 02 月 16 日到 2018 年 03 月 25 日的影像，總共 44 張影像，產生了 164 幅干涉圖 (圖 4. 21)。每幅干涉圖的日期與基線長請參閱附錄一。

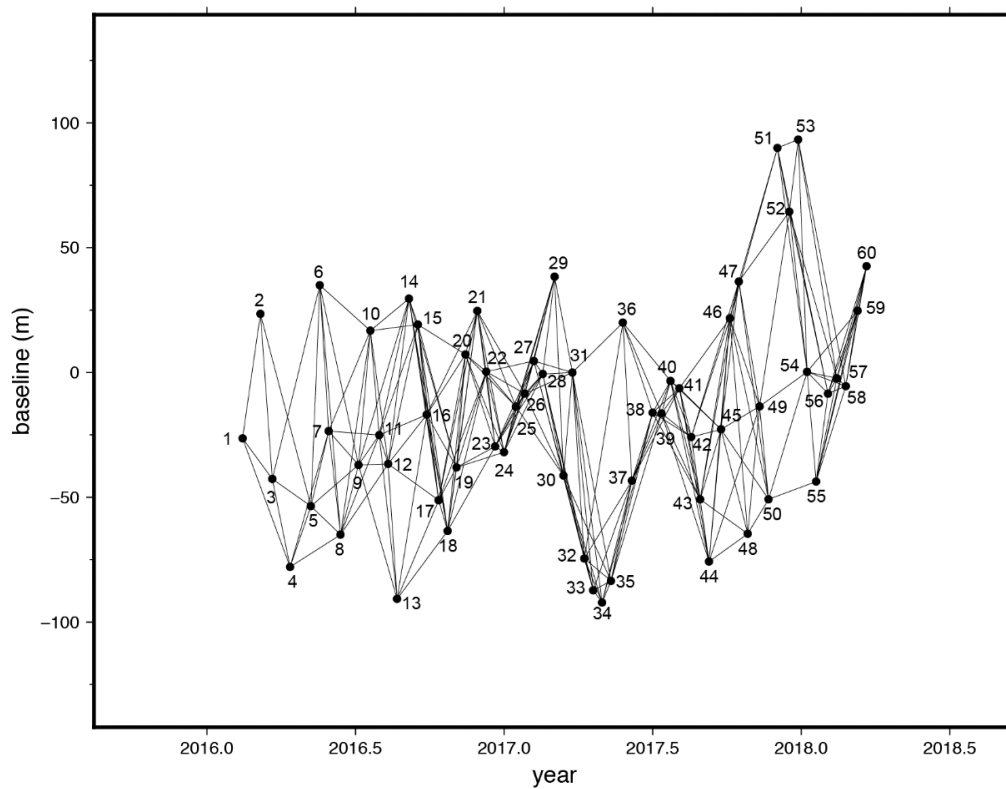
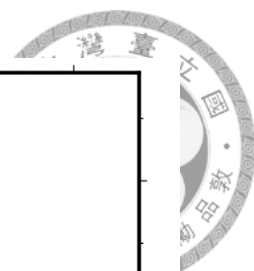


圖 4.20 升軌影像基線圖。

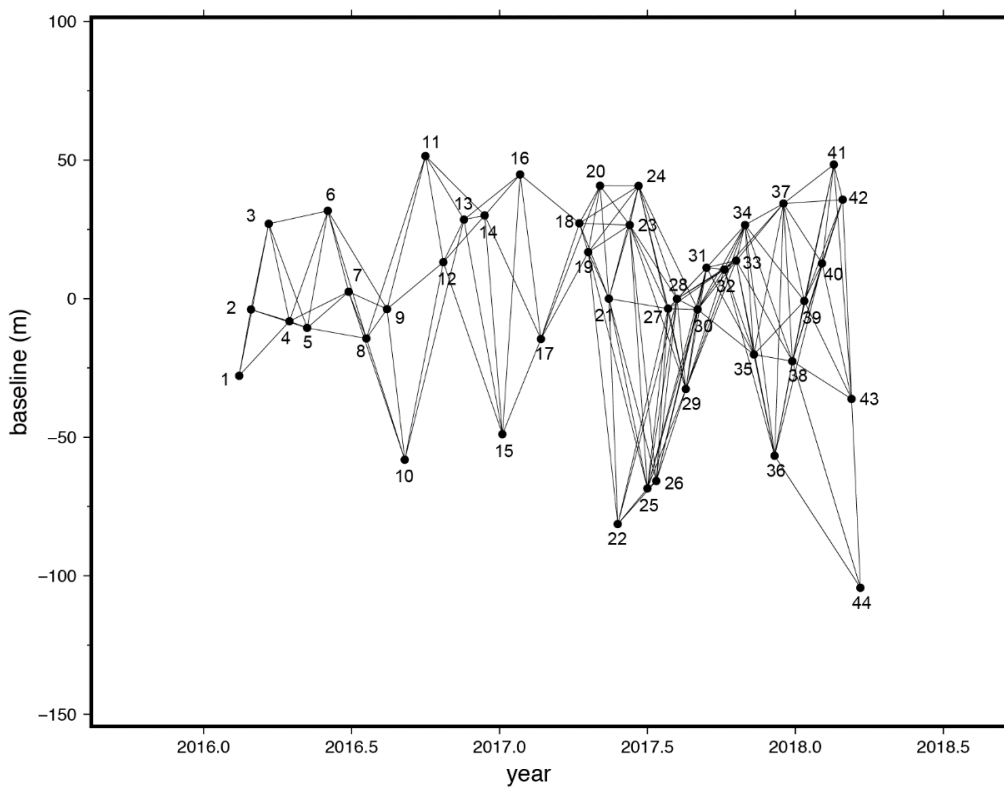


圖 4.21 降軌影像基線圖。

第五章、 研究結果



5.1 GPS 時間序列

經由前述時間序列公式擬合後，範例結果如圖 5.1 與圖 5.2 所示，圖 5.1 為 LNCH 測站的時間序列，左上角藍色時間序列為原始解算的位置解，右上角灰色時間序列為做完空間濾波後的位置解，左下角綠色時間序列為擬合空間濾波後之速度解，右下角的時間序列則為移除地殼運動速率、年週期變化、半年週期變化的結果，僅保留美濃地震同震及震後位移。LNCH 為同震位移最大的測站，其震後位移顯示此測站震後變形往西移動以及抬升，南北方向沒有明顯變動。

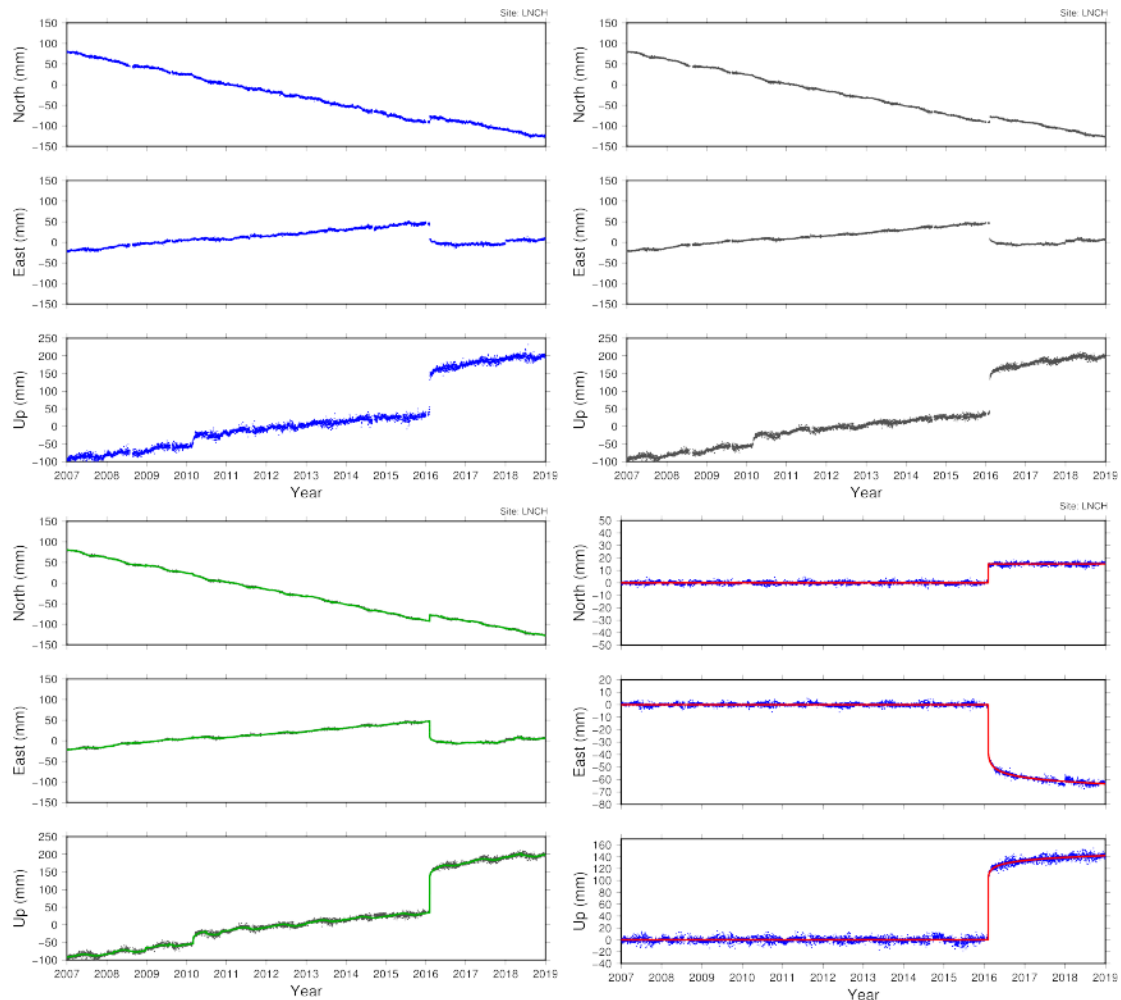
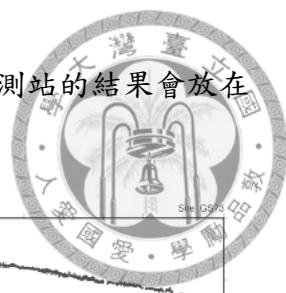


圖 5.1 LNCH 測站時間序列。

圖 5.2 為 GS73 測站，此測站為震後變形量最大的站，其震後位移顯示此



測站震後變形往西移動以及抬升，南北方向沒有明顯變動。其餘測站的結果會放在附錄二。

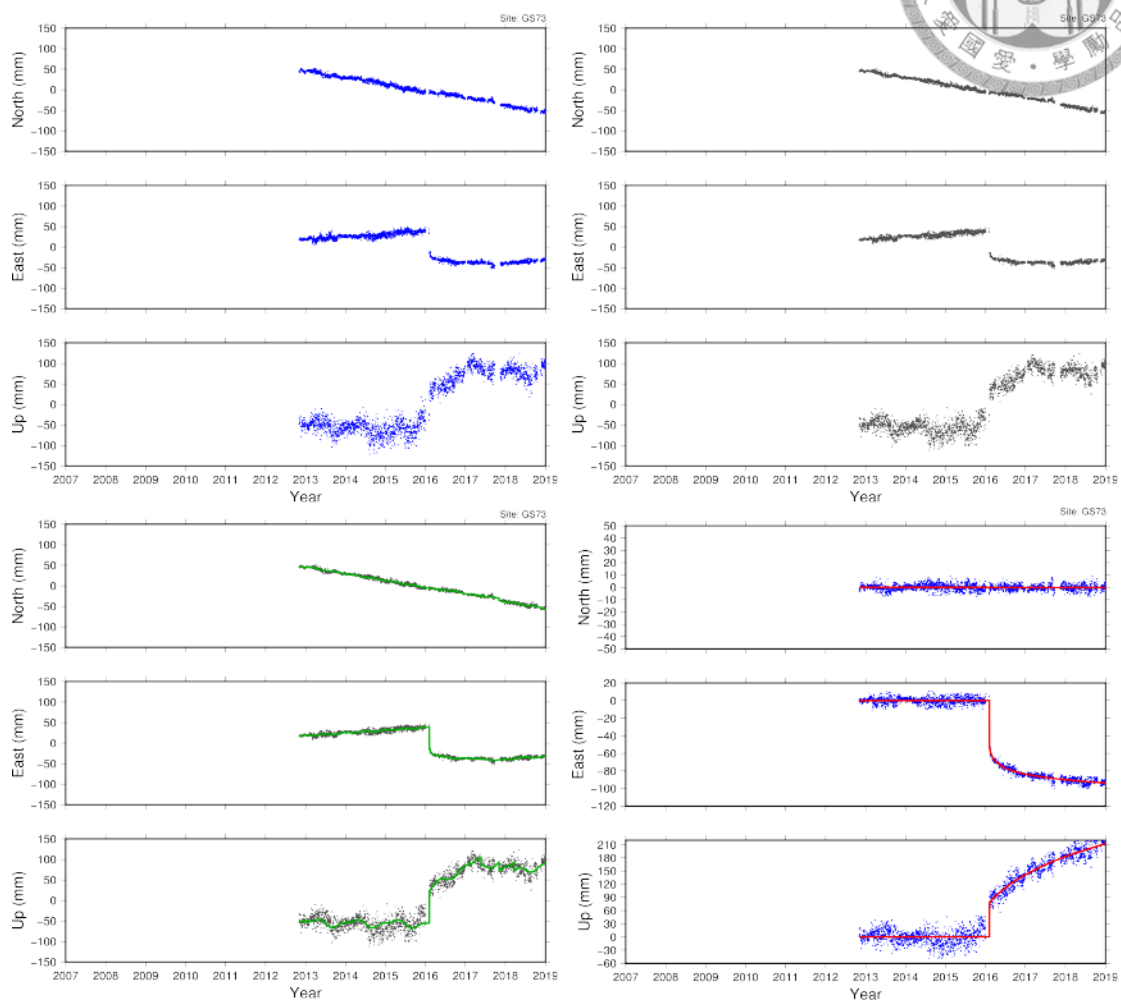


圖 5.2 GS73 測站時間序列。

由時間序列擬合的結果觀察到有較明顯震後變形的 GPS 測站大多位在新化斷層以南及旗山斷層以北，震後位移的方向大多為向西或西南，圖 5.3 到圖 5.14 為震後 30 天、震後 90 天、震後 180 天、震後一年、震後一年半及震後兩年的結果。

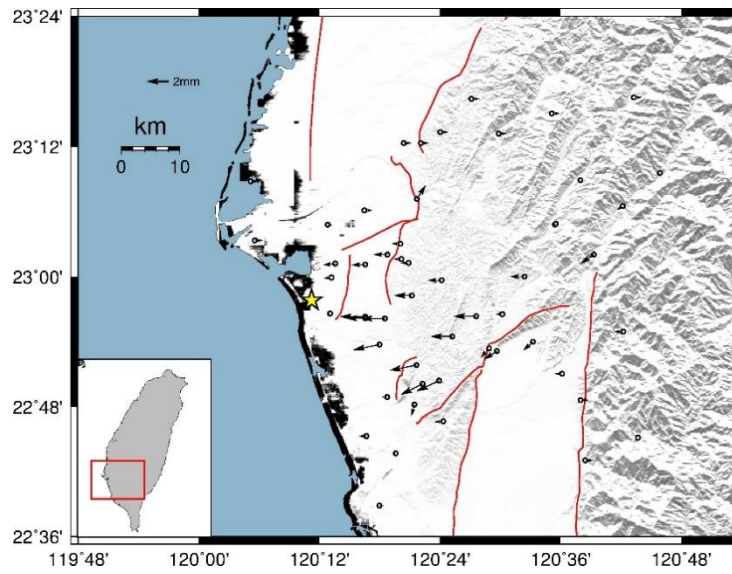
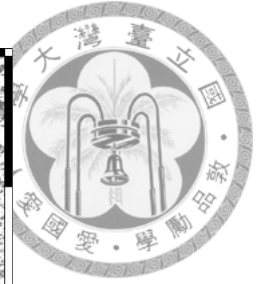


圖 5.3 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (30 天)。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

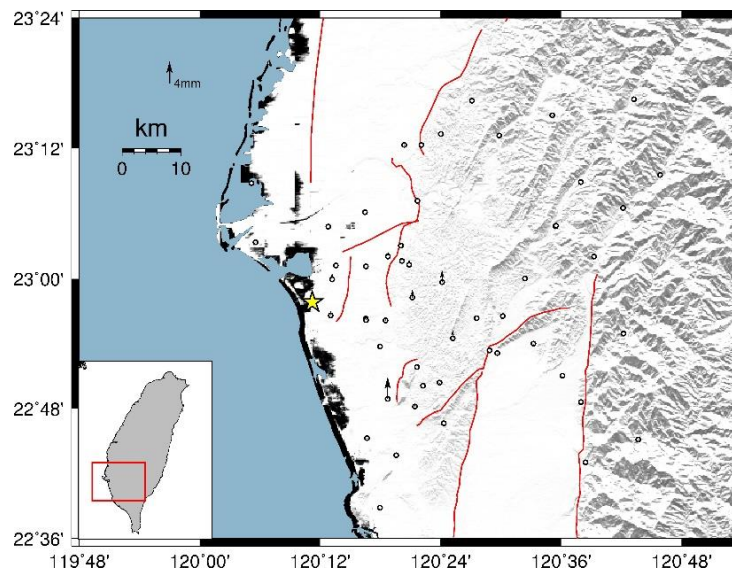


圖 5.4 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (30 天)。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

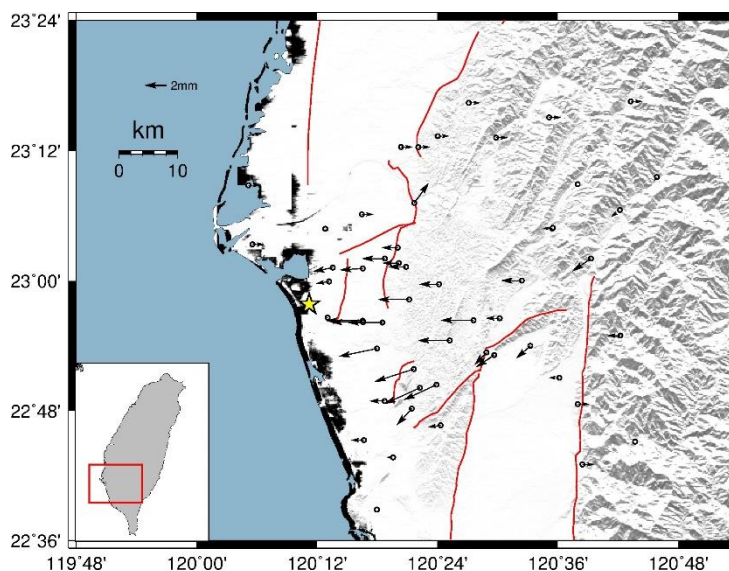
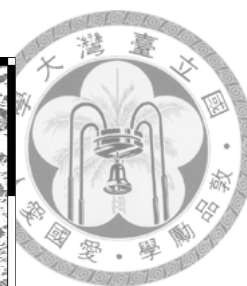


圖 5.5 美濃地震震後變形量水平向位移圖（90 天）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

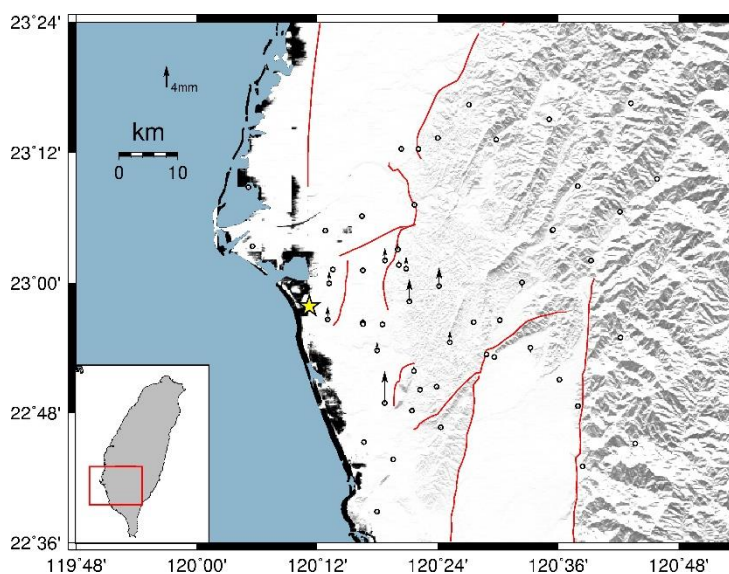


圖 5.6 美濃地震震後變形量垂直向位移圖（90 天）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

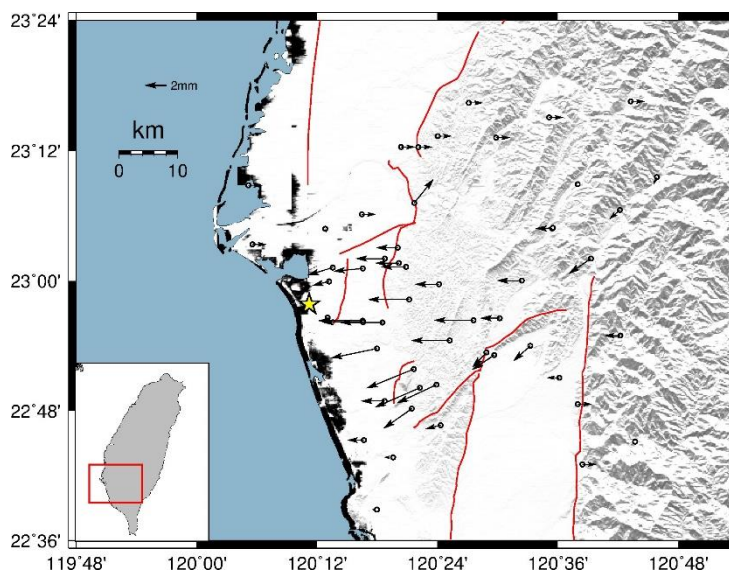
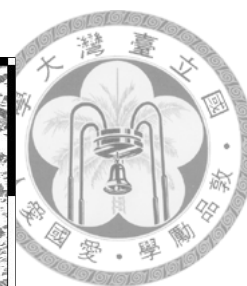


圖 5.7 美濃地震震後變形量水平向位移圖 (180 天)。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

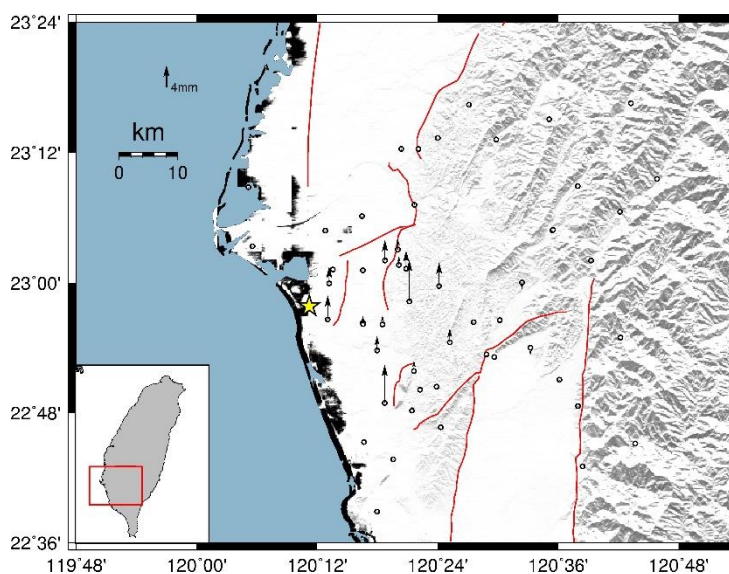


圖 5.8 美濃地震震後變形量垂直向位移圖 (180 天)。圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續

站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

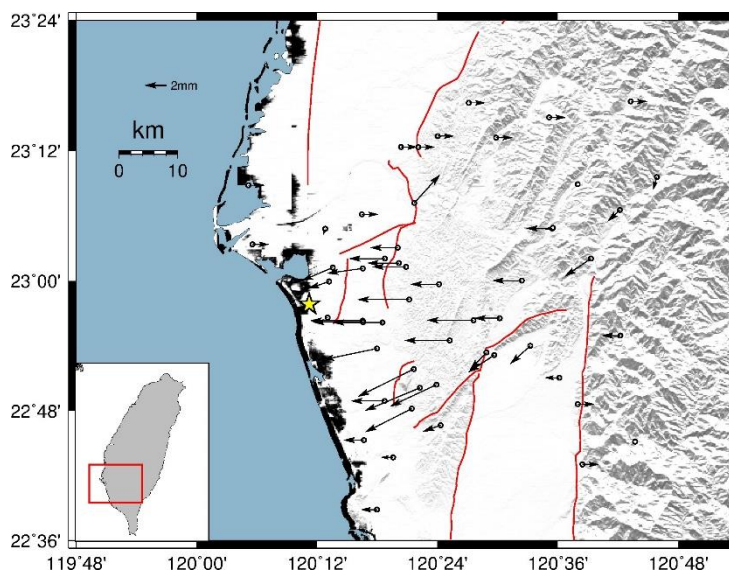
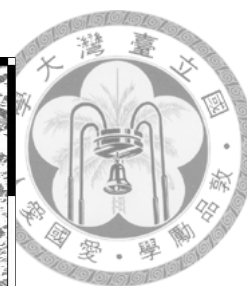


圖 5.9 美濃地震震後變形量水平向位移圖（一年）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

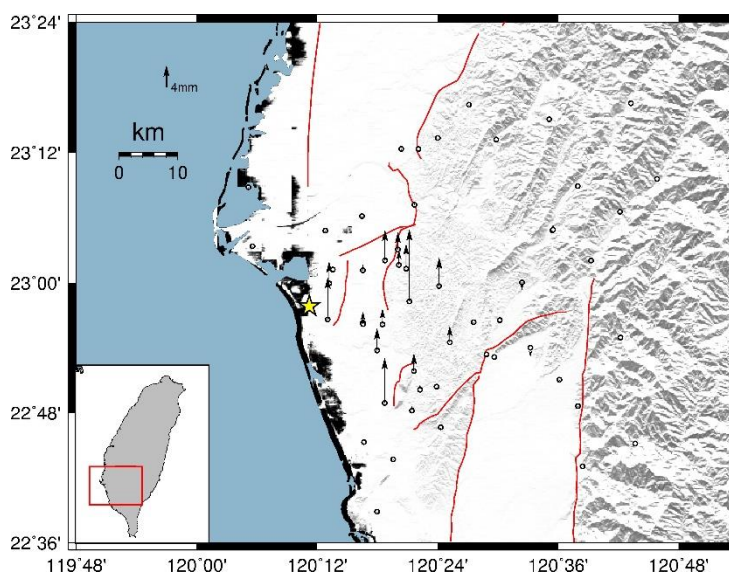


圖 5.10 美濃地震震後變形量垂直向位移圖（一年）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

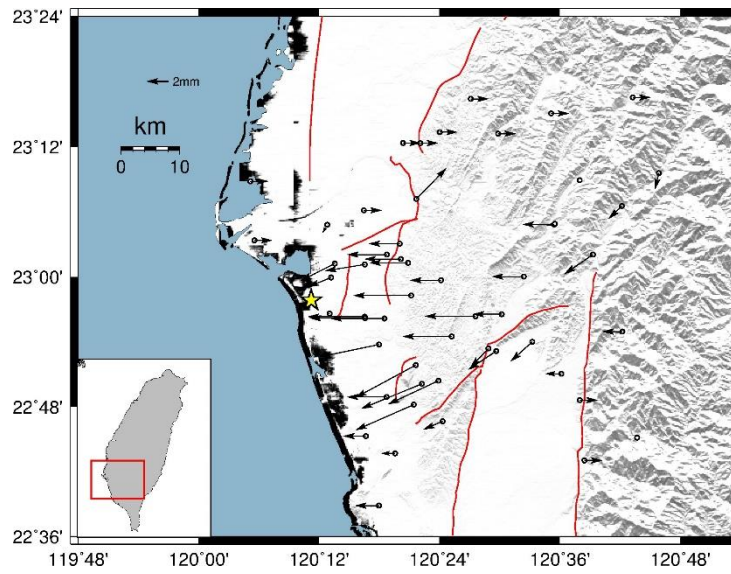
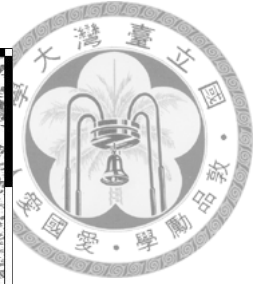


圖 5.11 美濃地震震後變形量水平向位移圖（一年半）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

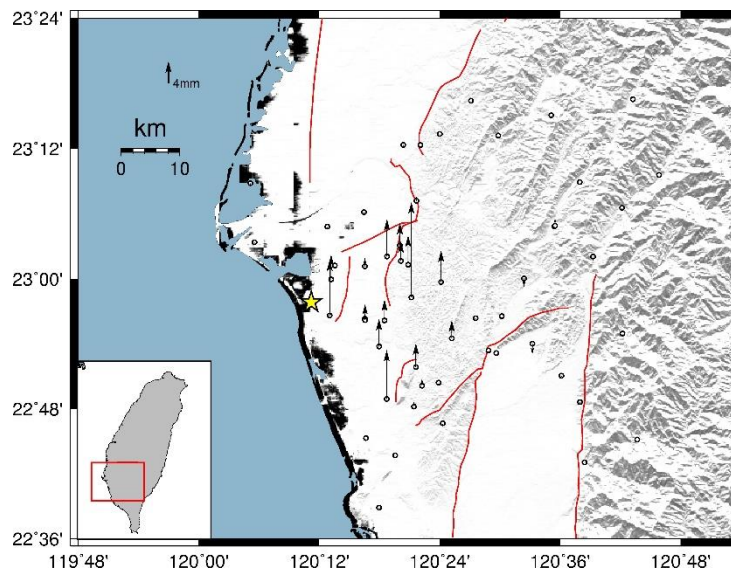


圖 5.12 美濃地震震後變形量垂直向位移圖（一年半）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

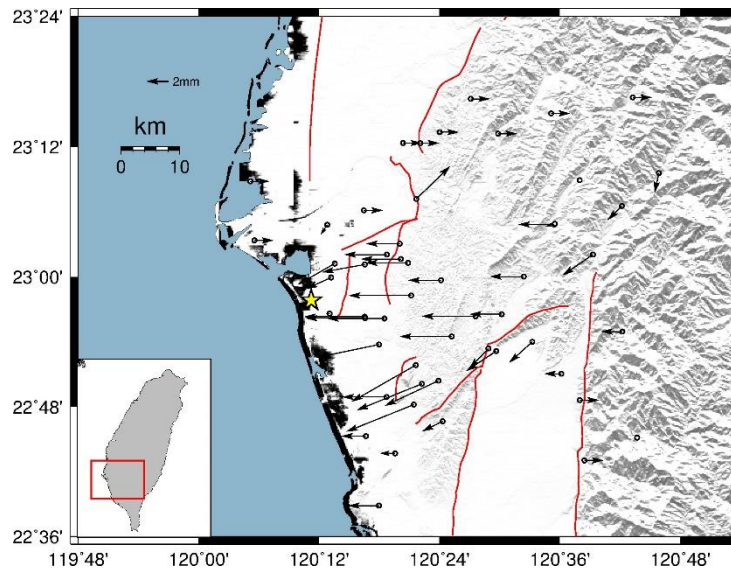
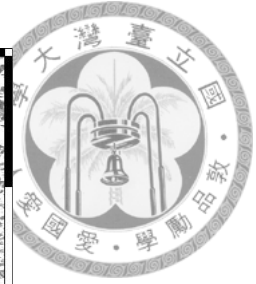


圖 5.13 美濃地震震後變形量水平向位移圖（兩年）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

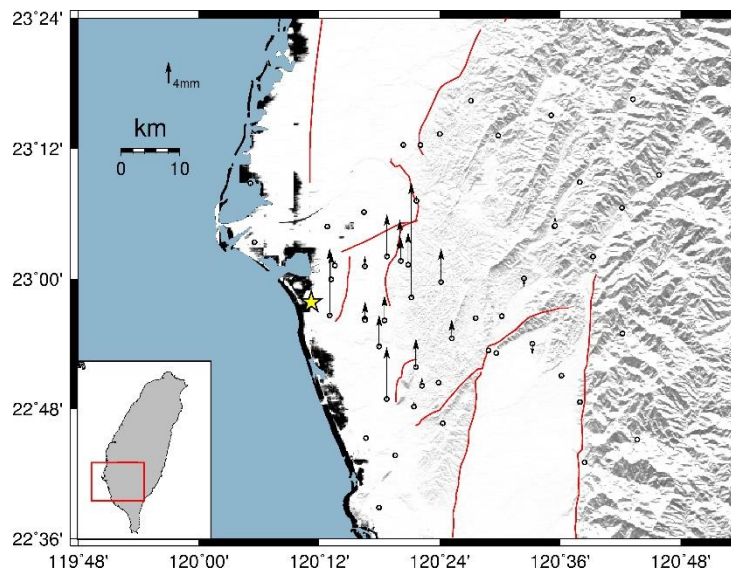


圖 5.14 美濃地震震後變形量垂直向位移圖（兩年）。

圖中星號為參考點；圓點表示 GPS 連續站；黑色向量表示個連續站位移的量值及運動方向。

5.2 大氣校正後的 InSAR 累積位移

透過 GACOS 與 GMTSAR 的大氣校正方法總共產生三種校正的結果，包含



使用 GMTSAR 的大氣校正方法、使用 GACOS 校正、兩種校正方法都使用以及兩種校正方法皆未使用的結果等四種結果。本研究針對升軌與降軌影像都做了這四種不同的處理，圖 5. 15 至圖 5. 18 呈現升軌影像的結果，圖 5. 19 至圖 5. 21 為降軌影像的結果。由左至右的順序分別是完全沒校正、GMTSAR 大氣校正、GACOS 校正以及兩種校正方法都使用，GPS 連續站 GS33 為參考點，InSAR 影像的此位置也是參考點，如此這兩種資料才能進行比較。本研究透過計算 GPS 與 InSAR 差值的均方根（表 5.1 和表 5.2），不管是升軌還是降軌影像，都是只做 GMTSAR 大氣校正方法結果的均方根最小，因此選擇只做 GMTSAR 大氣校正的結果進行空間校正。

表 5.1 升軌影像大氣校正方法的均方根。

大氣校正方法	均方根（單位：mm）
完全沒校正	126.9
GMTSAR 大氣校正	116.2
GACOS 校正	229.0
兩種校正方法	172.3

表 5.2 降軌影像大氣校正方法的均方根。

大氣校正方法	均方根（單位：mm）
完全沒校正	223.6
GMTSAR 大氣校正	189.7
GACOS 校正	315.4
兩種校正方法	245.5

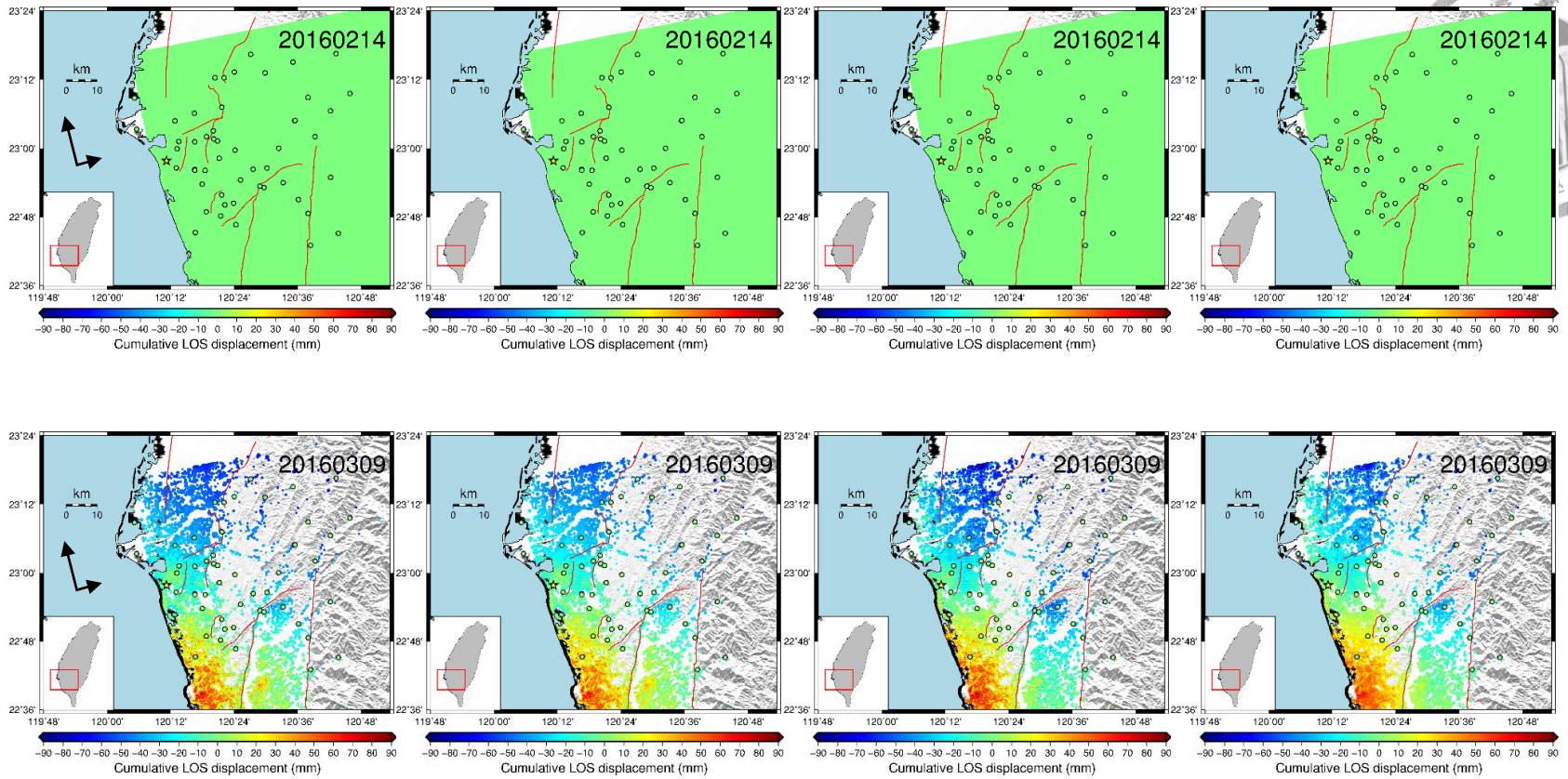


圖 5.15 大氣校正後的升軌 InSAR 結果 (20160214、20160309)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連

續站。

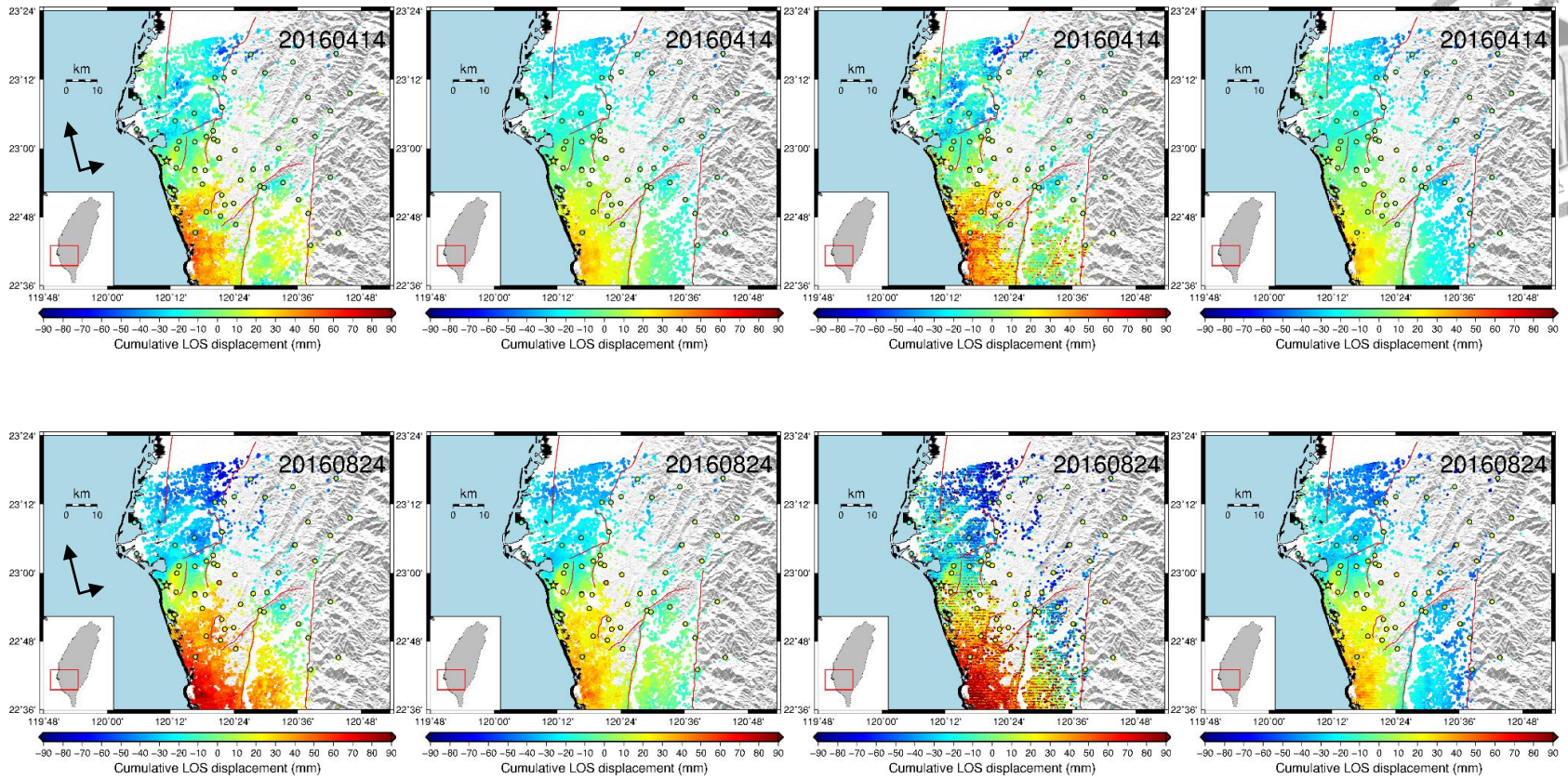


圖 5.16 大氣校正後的升軌 InSAR 結果 (20160414、20160824)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連續站。

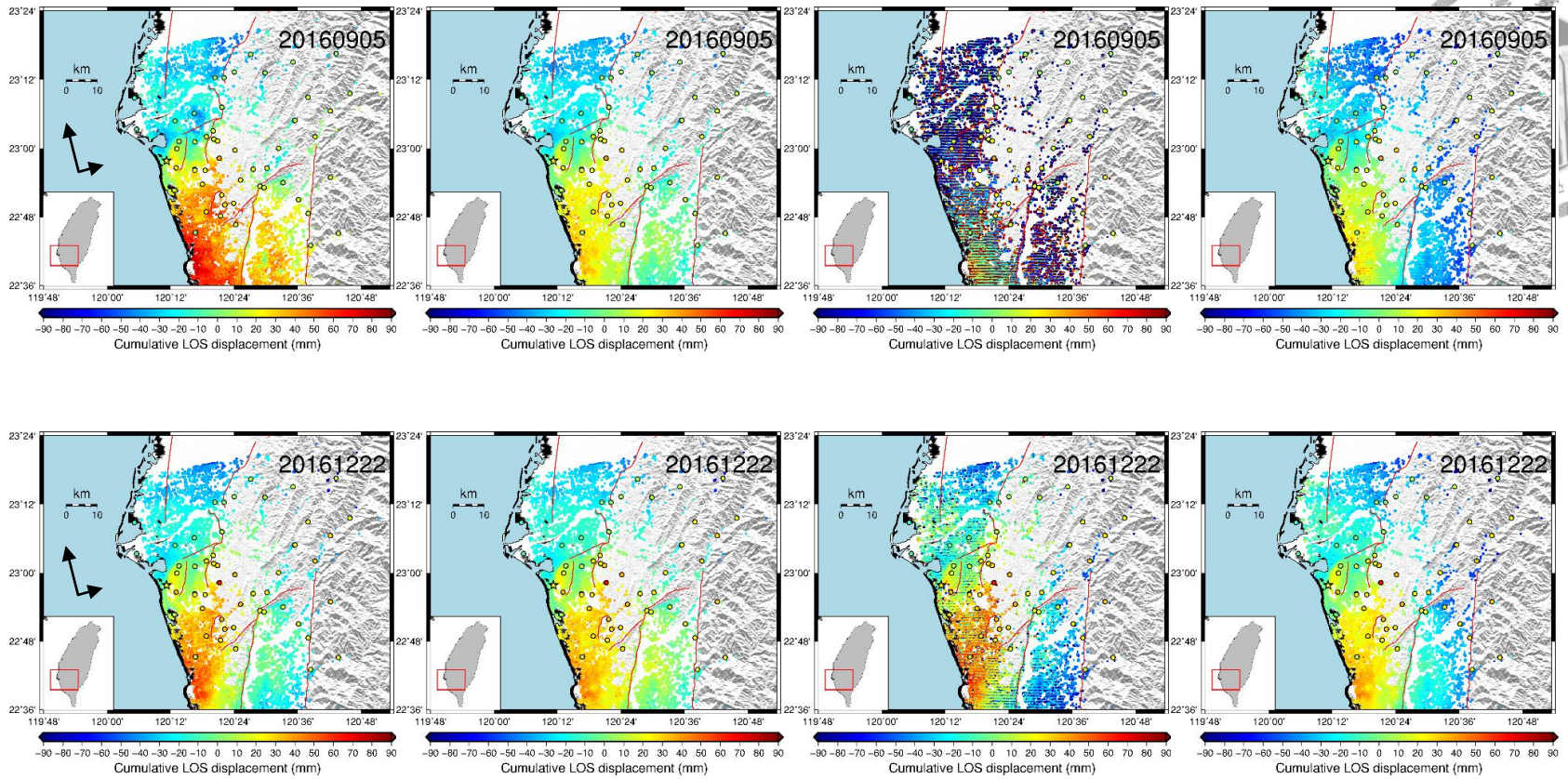


圖 5.17 大氣校正後的升軌 InSAR 結果 (20160905、20161222)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連

續站。

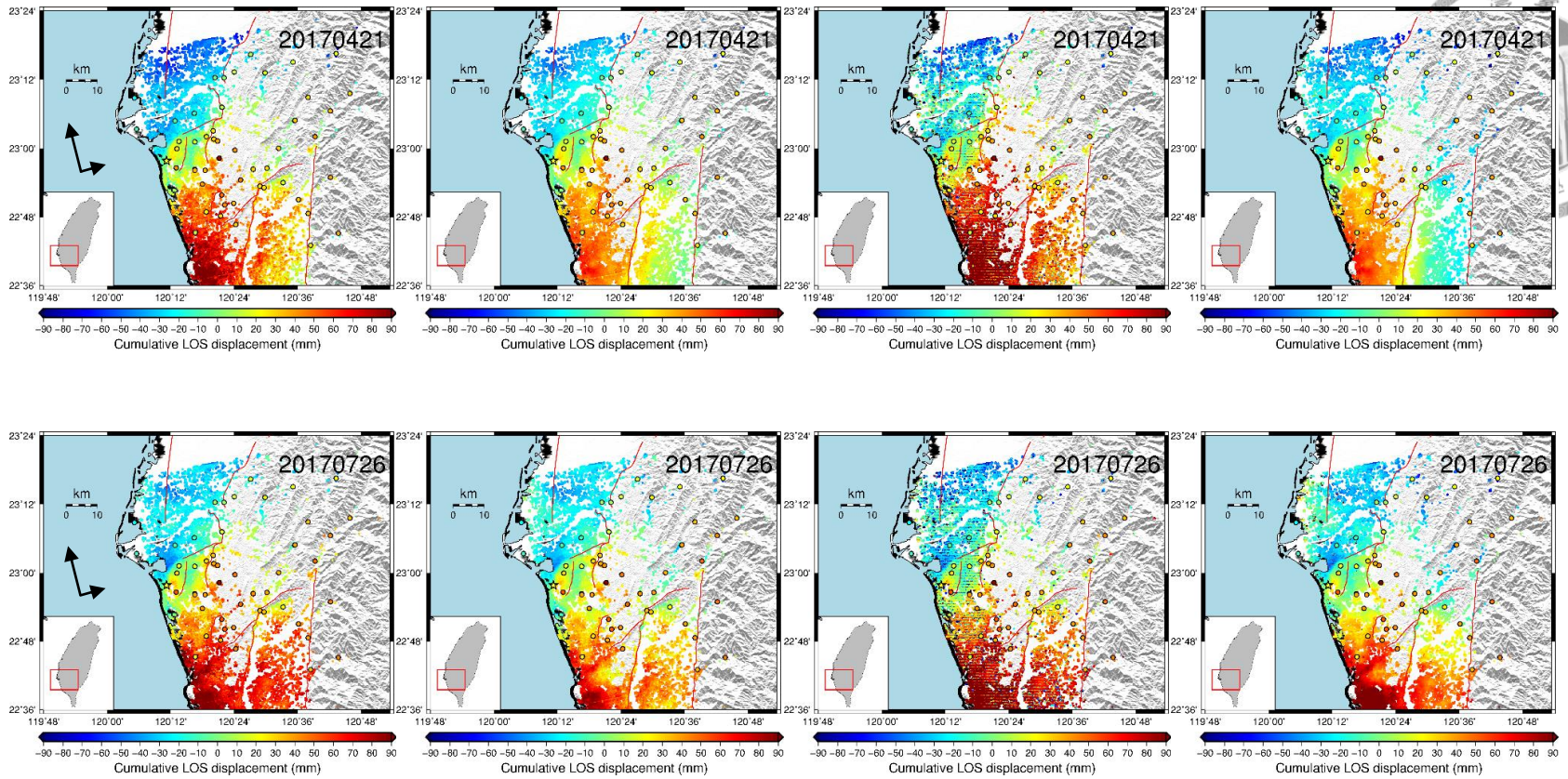


圖 5.18 大氣校正後的升軌 InSAR 結果 (20170421、20170726)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連續站。

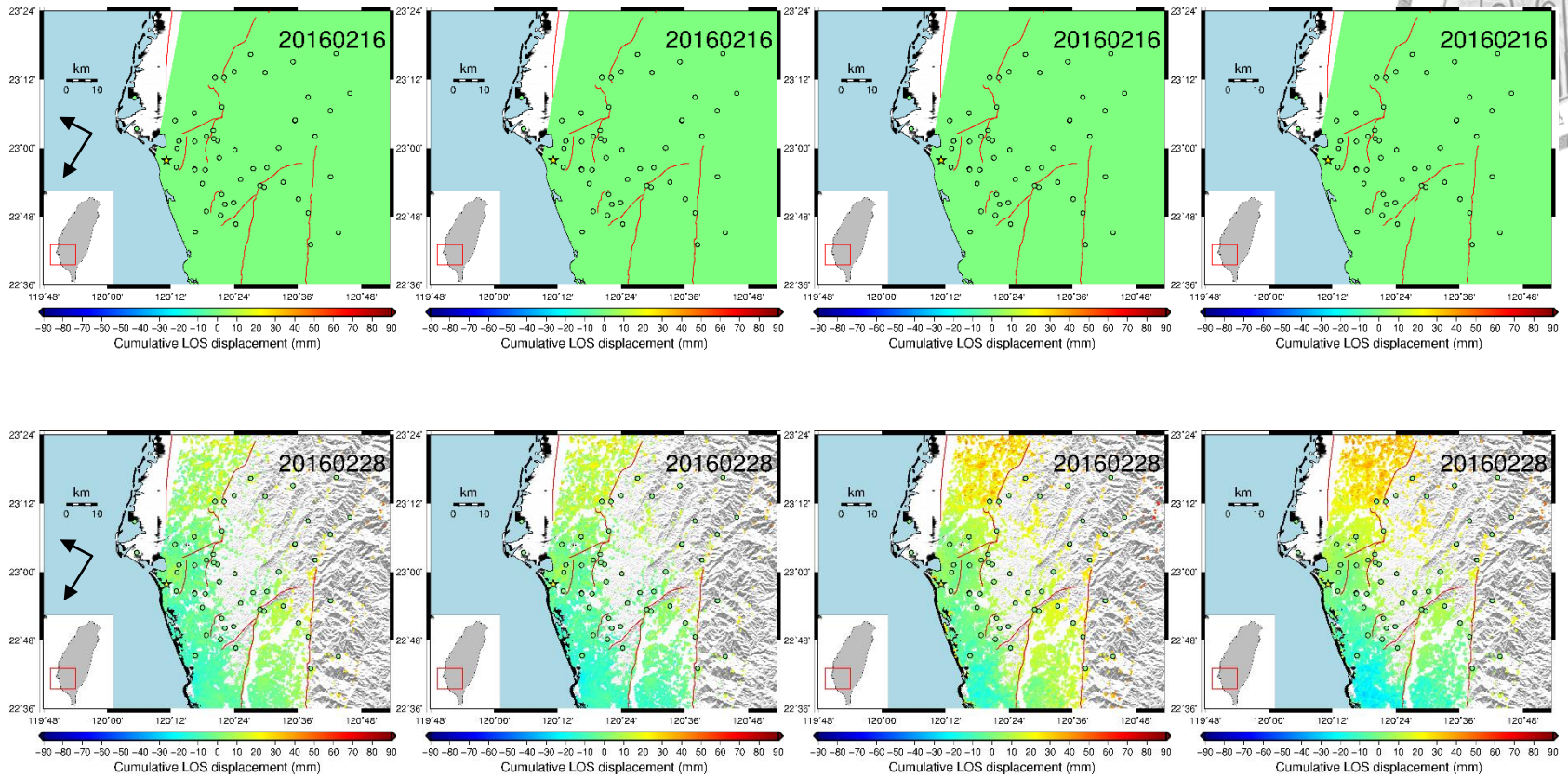
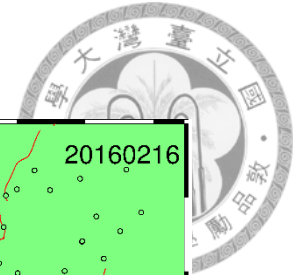


圖 5.19 大氣校正後的降軌 InSAR 結果 (20160216、20160228)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連續站。

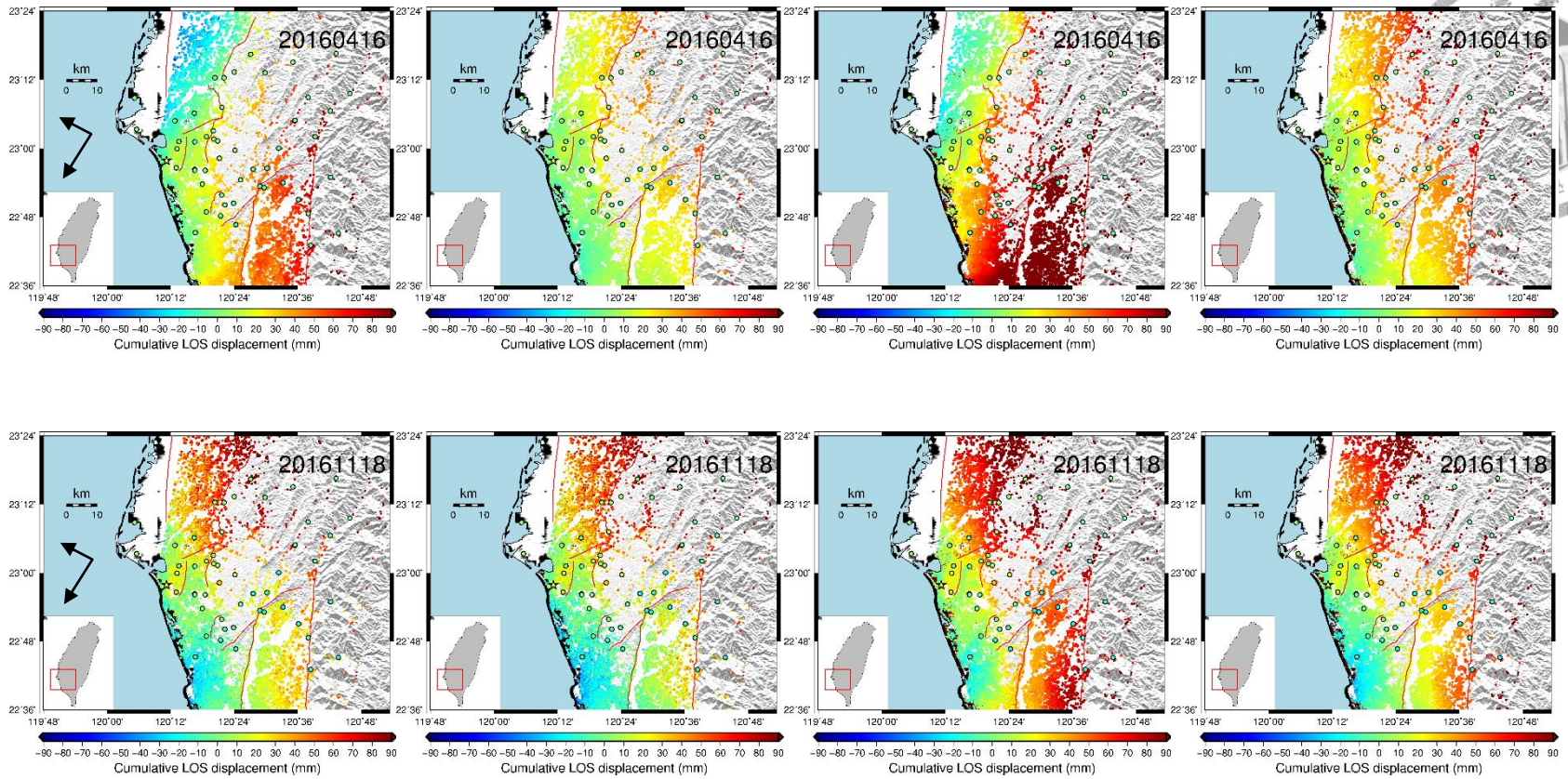


圖 5.20 大氣校正後的降軌 InSAR 結果 (20160416、20161118)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連續站。

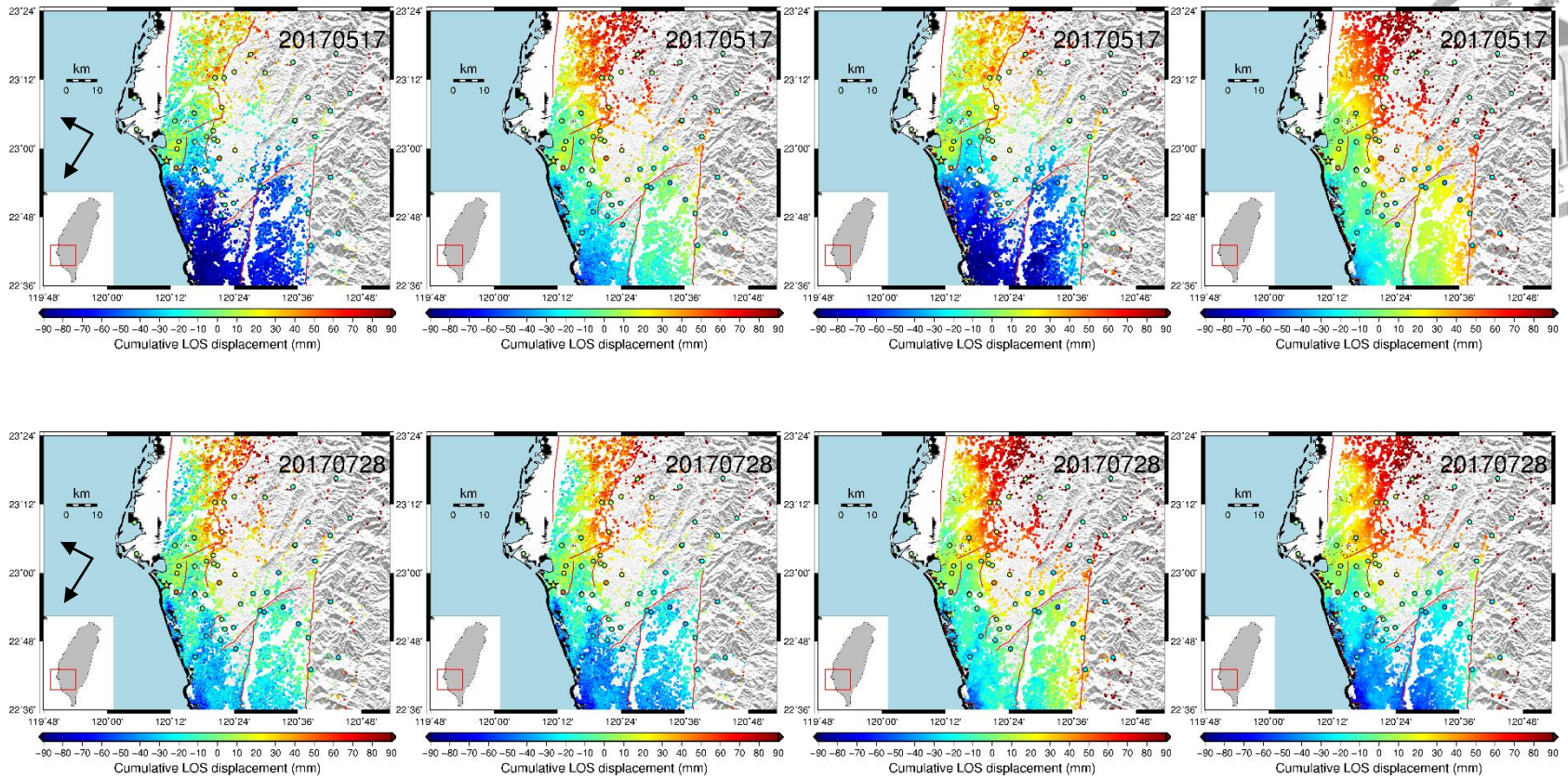


圖 5.21 大氣校正後的降軌 InSAR 結果 (20170517、20170728)。

由左至右分別是完全沒校正的結果、GMTSAR 的大氣校正方法結果、GACOS 校正的結果、兩種校正方法都使用的結果。星號是參考點，圓圈是 GPS 連續站。



5.3 空間校正後的 InSAR 累積位移

本研究將 GMTSAR 大氣校正後的結果再進行三種空間校正上的處理，由於大氣校正完後降軌影像的北邊明顯與 GPS 結果有差異，為了修正及呈現此差異，故利用更北邊的 GPS 站結果來幫助校正，因此接下來的圖呈現的範圍會比研究區還大。圖 5.22 呈現升軌影像 2016 年 3 月 09 日差值內插方法的結果，圖 5.23 呈現升軌影像 2016 年 3 月 09 日南北向的線性擬合的結果，圖 5.24 至圖 5.30 呈現升軌影像 2016 年 3 月 09 日超平面擬合的結果。將 GPS 與升軌影像空間校正的結果的差值計算均方根（表 5.3），將均方根最小的結果進行後續的時間序列擬合。

從升軌影像均方根的結果來看，利用差值內插的結果是最小的，南北向線性擬合是最大的。超平面擬合的結果則是次方數越高，均方根越小；此外，在二階與三階平面擬合，當緯度的次方數比經度大時，均方根結果也較小。

表 5.3 升軌影像空間校正方法的均方根。

空間校正方法	均方根（單位：mm）
差值內插	104.3
南北向線性擬合	144.8
一階平面	138.0
二階平面（經度一次方，緯度二次方）	129.7
二階平面（經度二次方，緯度一次方）	134.9
二階平面（經度二次方，緯度二次方）	126.4
三階平面（經度二次方，緯度三次方）	120.9
三階平面（經度三次方，緯度二次方）	125.5
三階平面（經度三次方，緯度三次方）	120.8

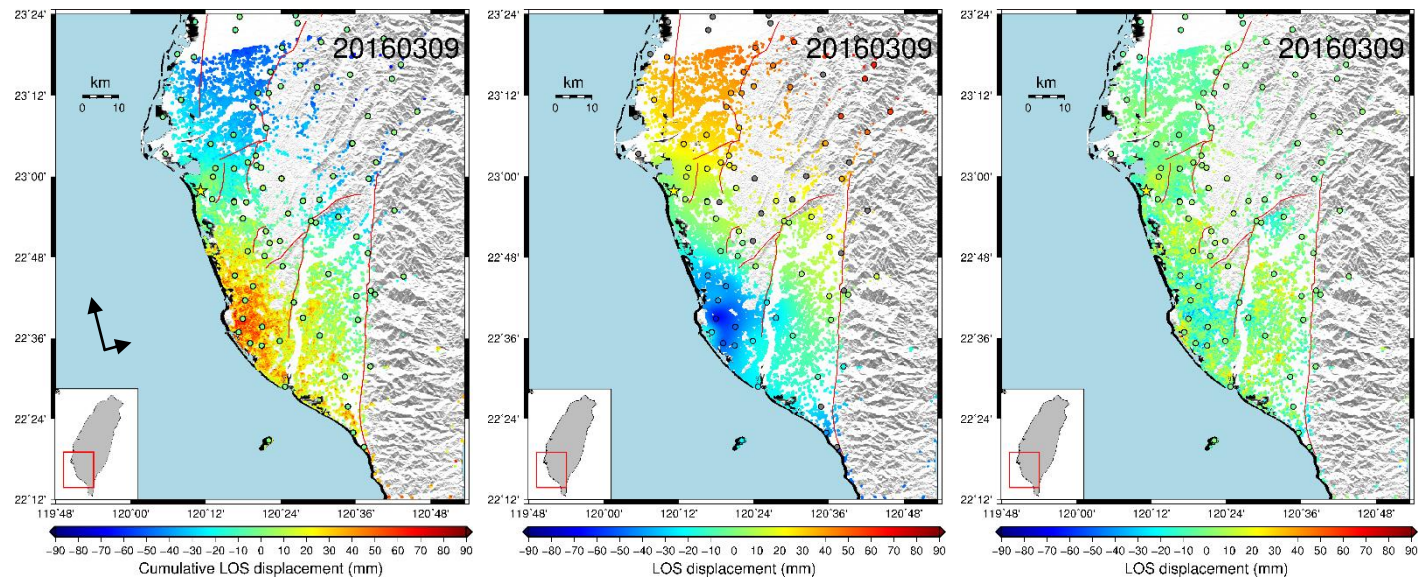


圖 5.22 差值內插方法（升軌影像）。

由左至右分別是升軌影像經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、差值內插量、差值內插校正後的結果。

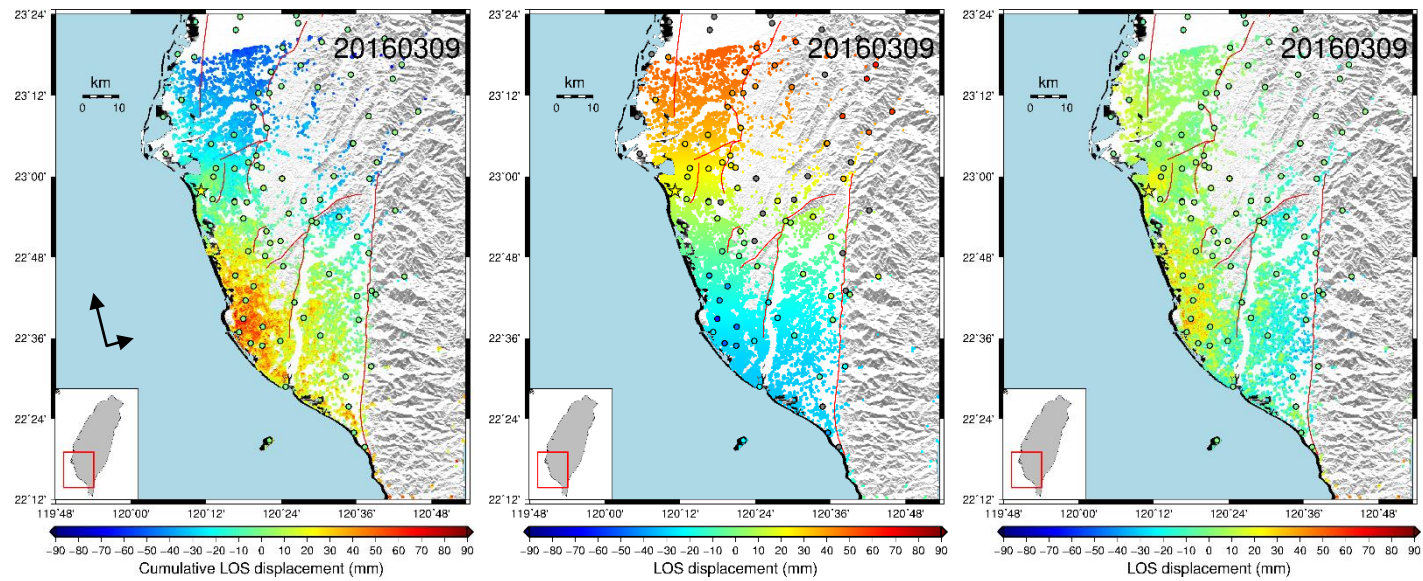


圖 5.23 南北向的線性擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、南北向的線性擬合量、南北向的線性擬合校正後的結果。

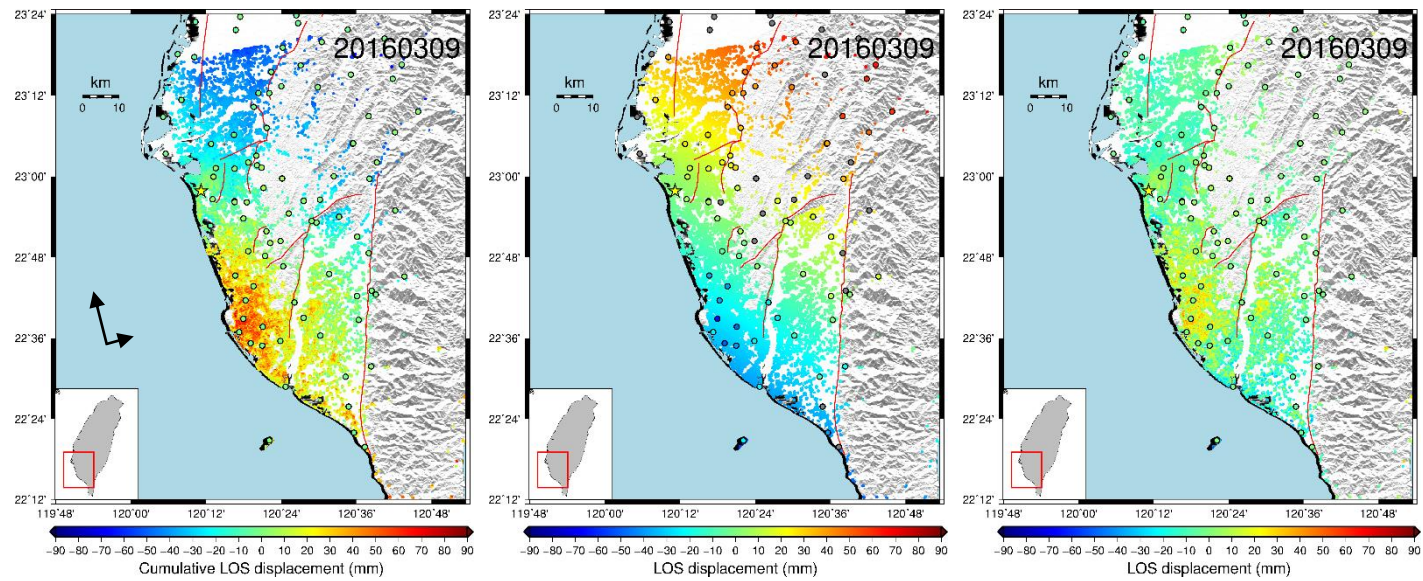


圖 5.24 一階平面擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、一階平面擬合量、一階平面擬合校正後的結果。

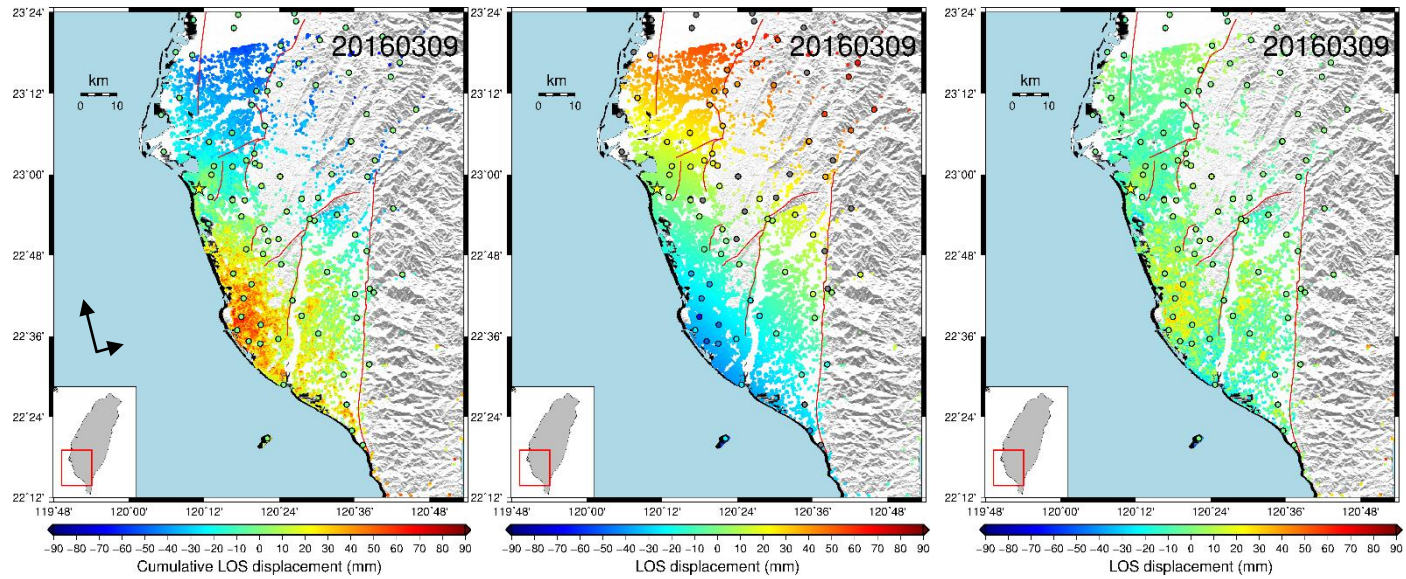


圖 5.25 二階平面（經度一次方，緯度二次方）擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、二階平面擬合量、二階平面擬合校正後的結果。

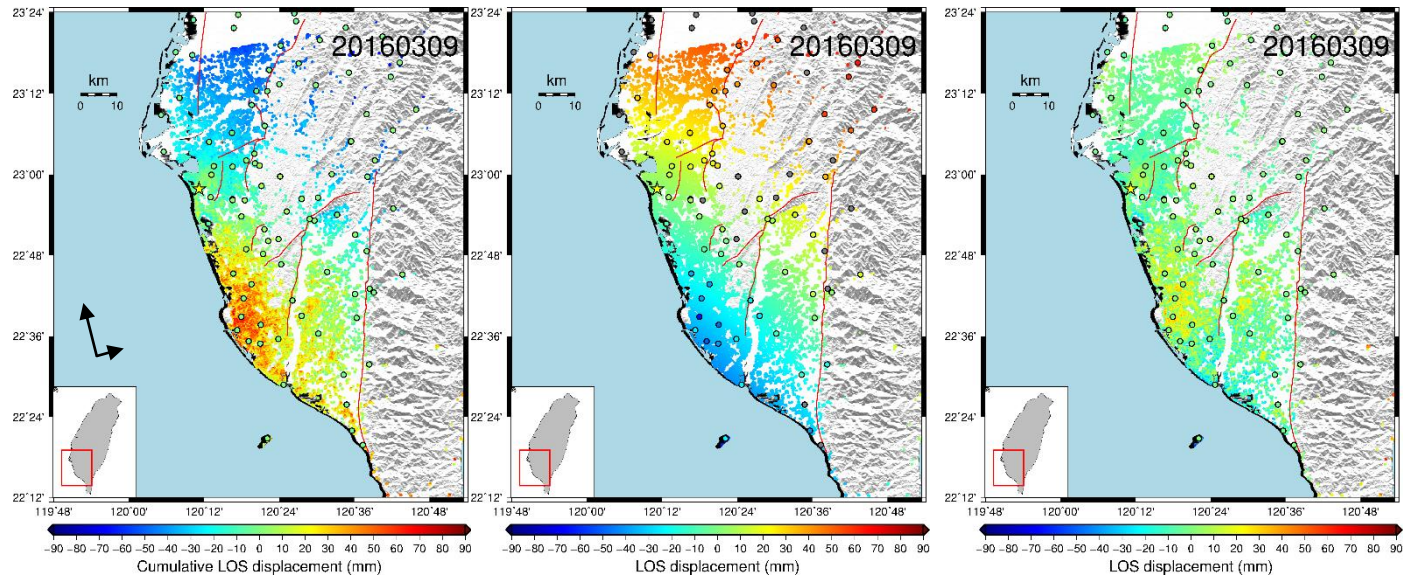
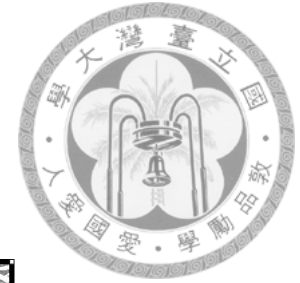


圖 5.26 二階平面（經度二次方，緯度一次方）擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、二階平面擬合量、二階平面擬合校正後的結果。

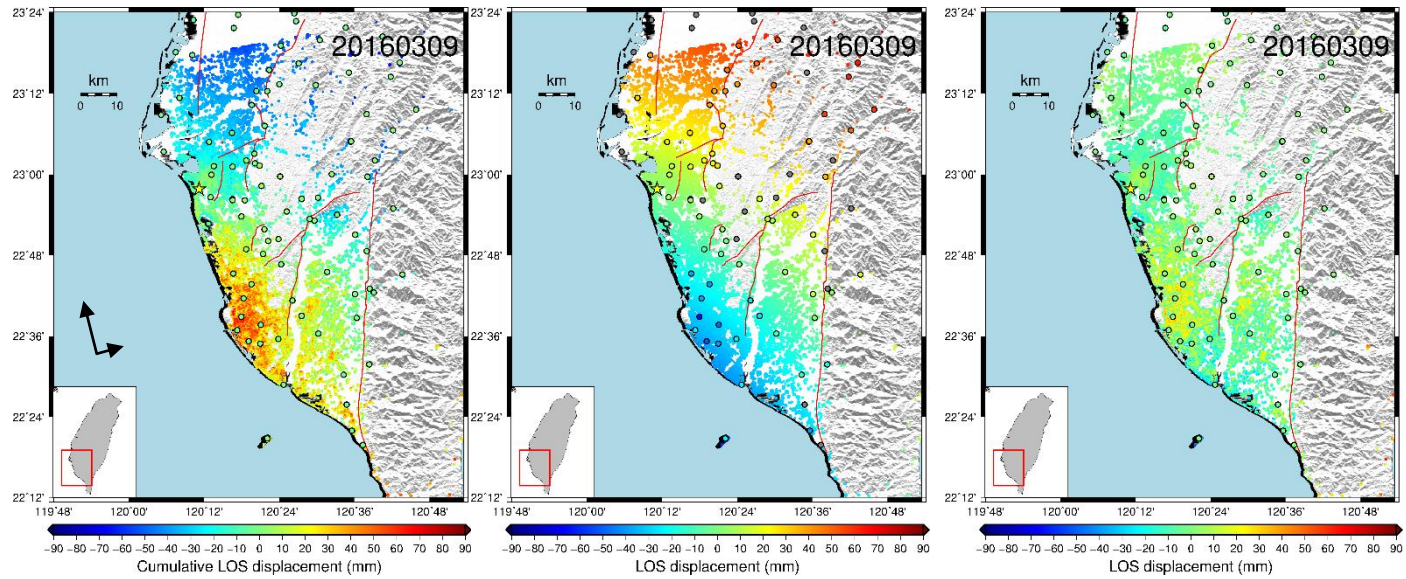


圖 5.27 二階平面（經度二次方，緯度二次方）擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、二階平面擬合量、二階平面擬合校正後的結果。

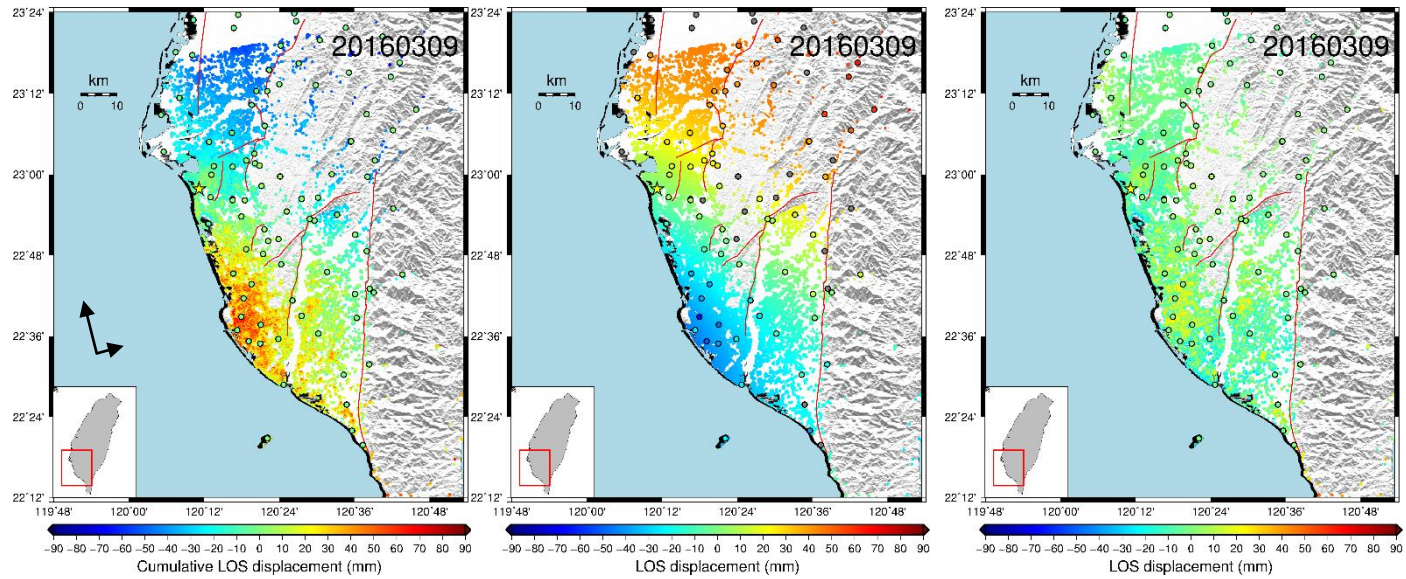
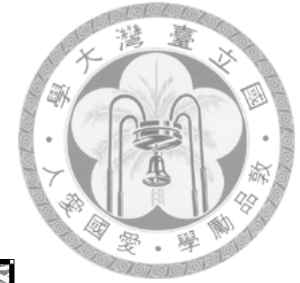


圖 5.28 三階平面（經度二次方，緯度三次方）擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、三階平面擬合量、三階平面擬合校正後的結果。

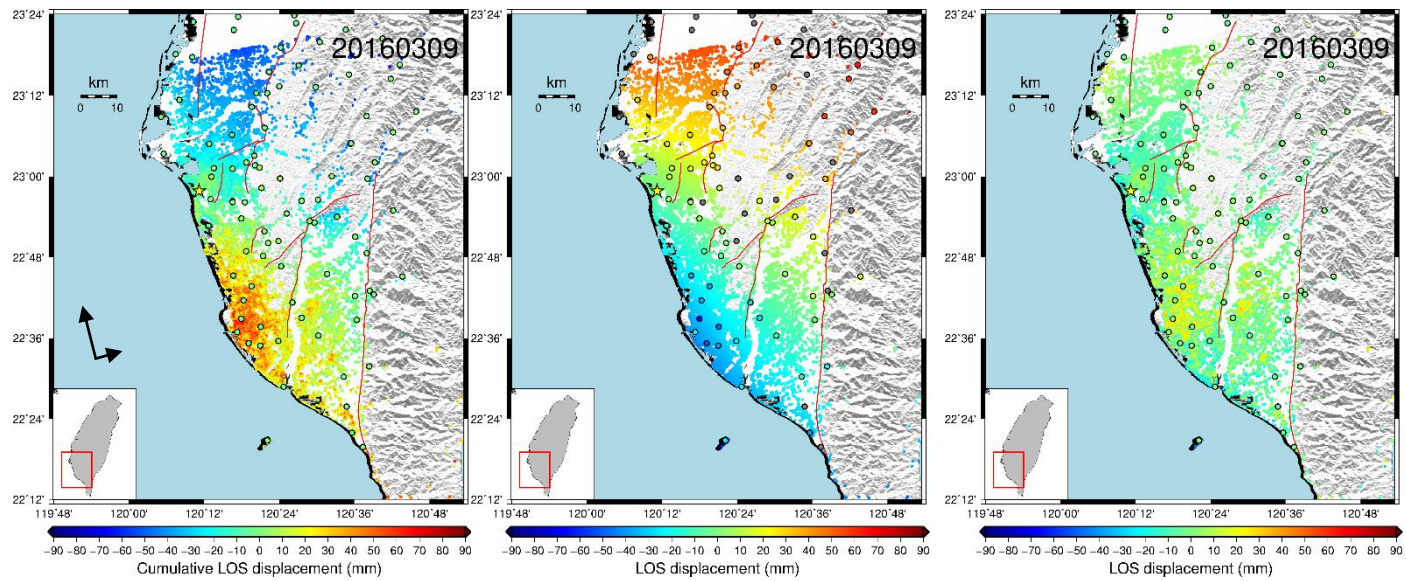
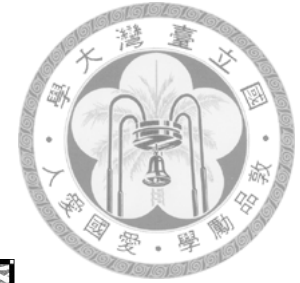


圖 5.29 三階平面（經度三次方，緯度二次方）擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、三階平面擬合量、三階平面擬合校正後的結果。

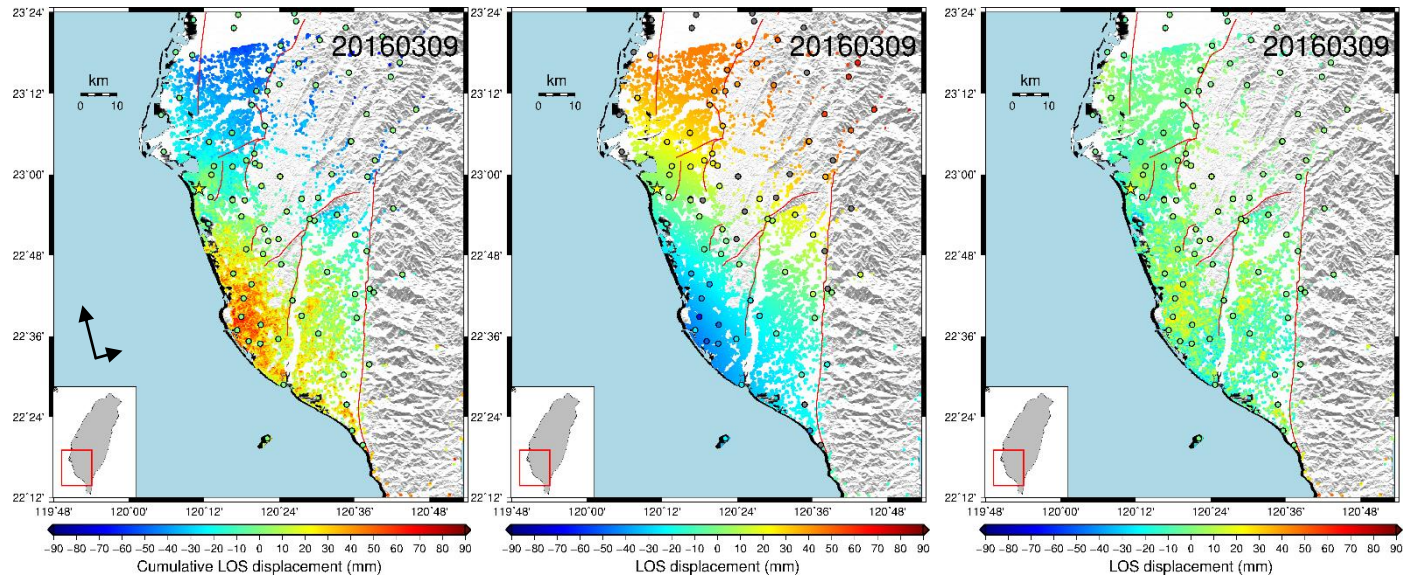


圖 5.30 三階平面（經度三次方，緯度三次方）擬合方法（升軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、三階平面擬合量、三階平面擬合校正後的結果。



圖 5.31 呈現降軌影像 2018 年 3 月 01 日差值內插方法的結果，圖 5.32 呈現降軌影像 2018 年 3 月 01 日南北向的線性擬合的結果，圖 5.33 至圖 5.39 呈現降軌影像 2018 年 3 月 01 日超平面擬合的結果。表 5.4 為 GPS 與降軌影像空間校正結果的差值均方根。

從降軌影像均方根的結果來看，一樣是利用差值內插的結果是最小的，南北向線性擬合是最大的。超平面擬合的結果一樣是次方數越高，均方根越小。

表 5.4 降軌影像空間校正方法的均方根。

空間校正方法	均方根 (單位: mm)
差值內插	94.7
南北向線性擬合	161.4
一階平面	139.1
二階平面 (經度一次方, 緯度二次方)	114.7
二階平面 (經度二次方, 緯度一次方)	134.8
二階平面 (經度二次方, 緯度二次方)	113.7
三階平面 (經度二次方, 緯度三次方)	113.5
三階平面 (經度三次方, 緯度二次方)	113.1
三階平面 (經度三次方, 緯度三次方)	113.3

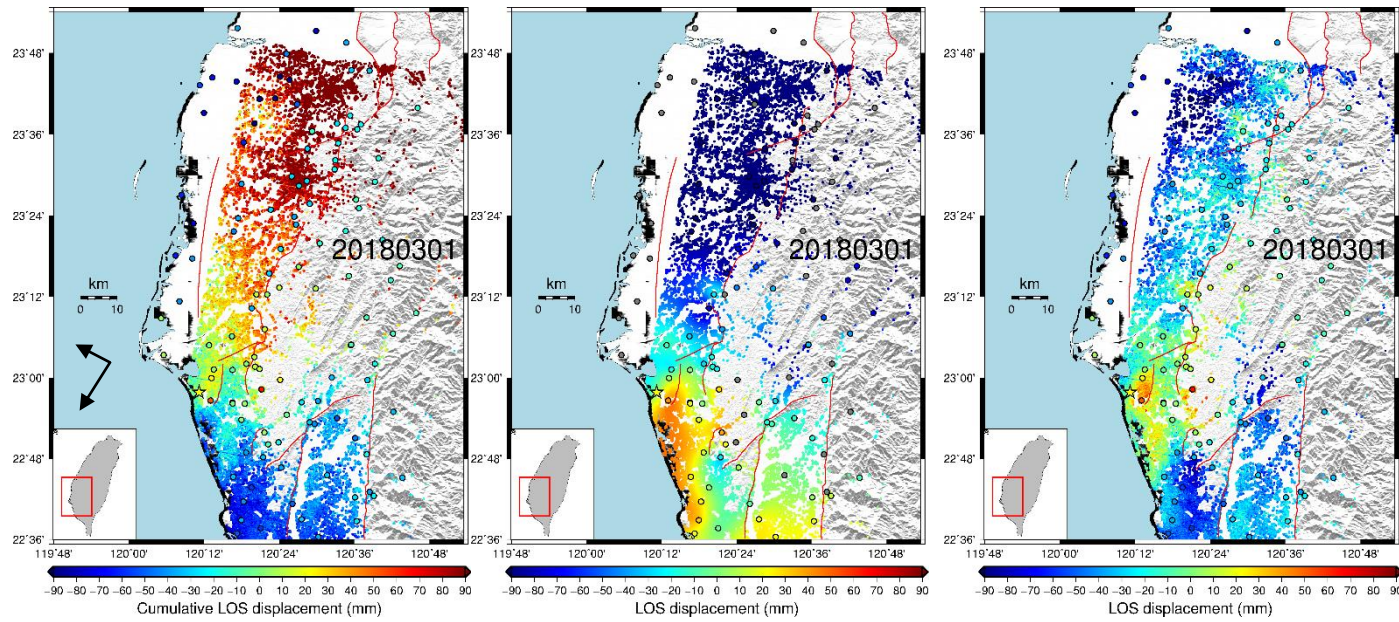


圖 5.31 差值內插方法 (降軌影像)。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、差值內插量、差值內插校正後的結果。

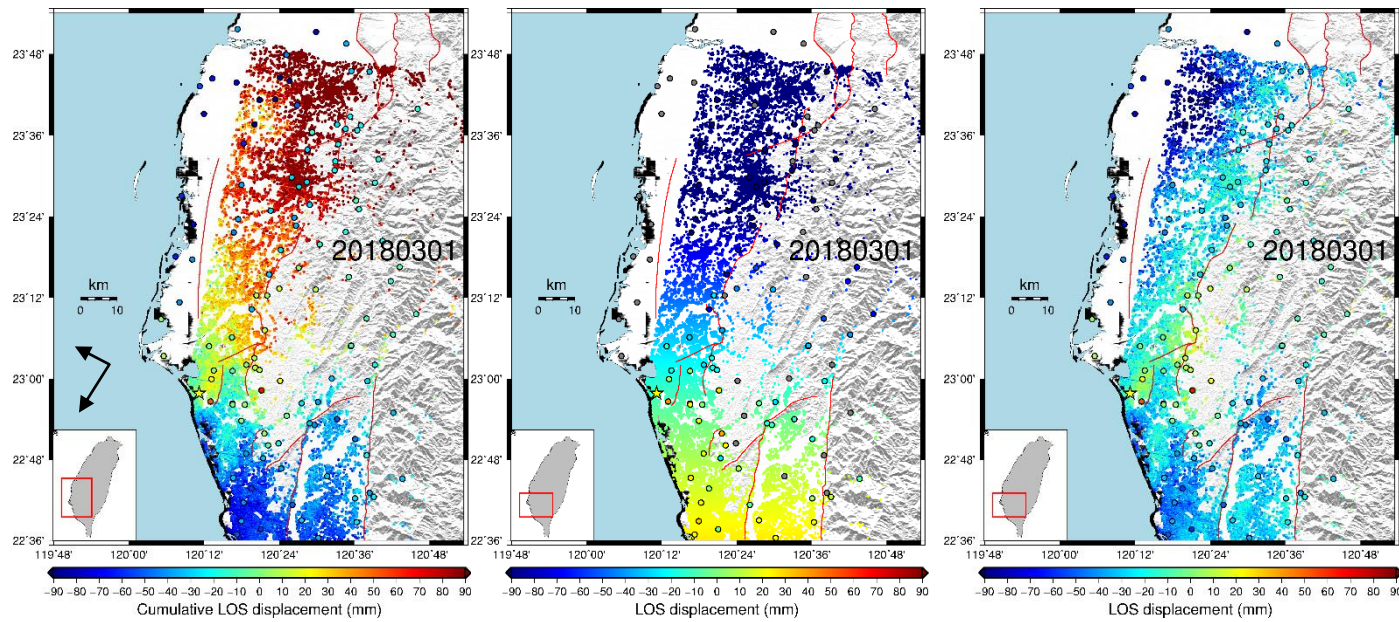


圖 5.32 南北向的線性擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、南北向的線性擬合量、南北向的線性擬合校正後的結果。

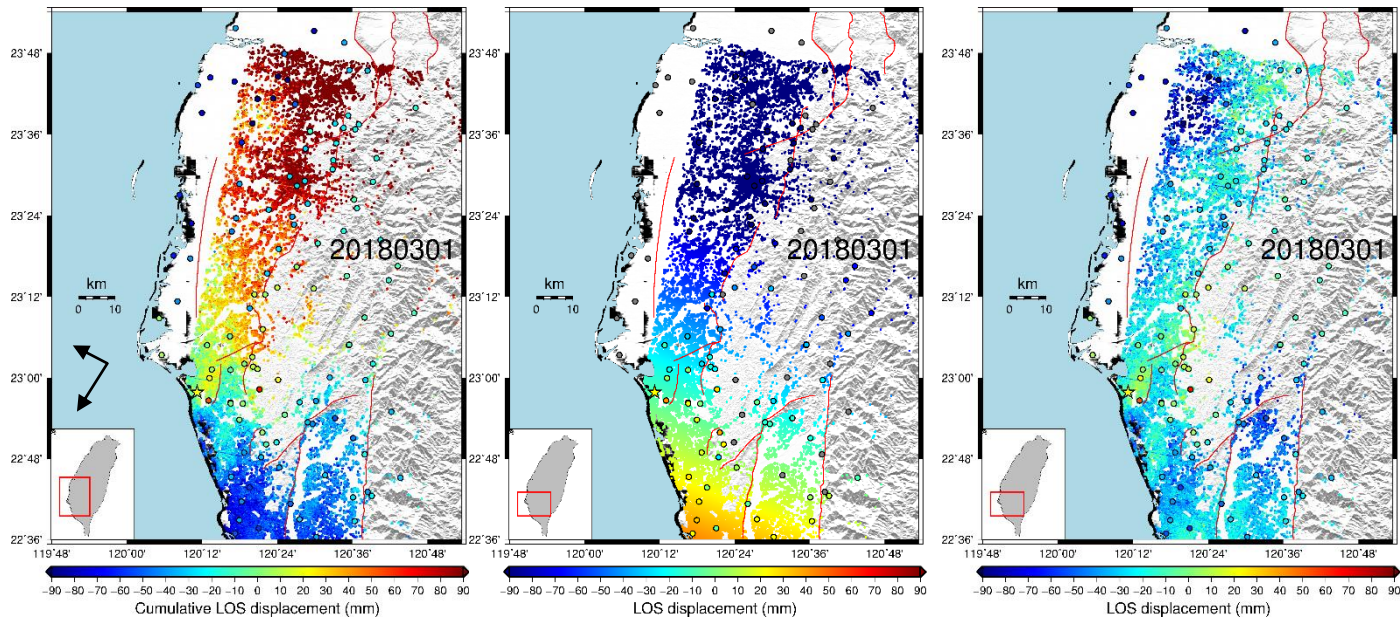


圖 5.33 一階平面擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、一階平面擬合量、一階平面擬合校正後的結果。

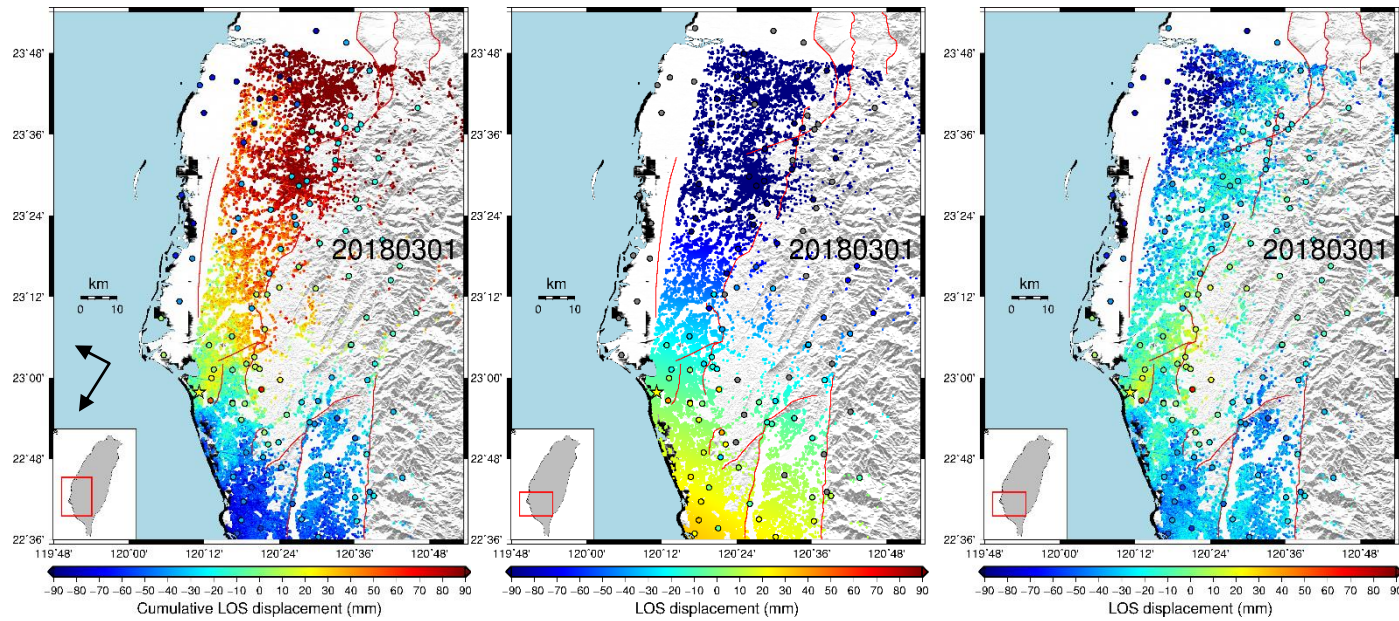


圖 5.34 二階平面（經度一次方，緯度二次方）擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、二階平面擬合量、二階平面擬合校正後的結果。

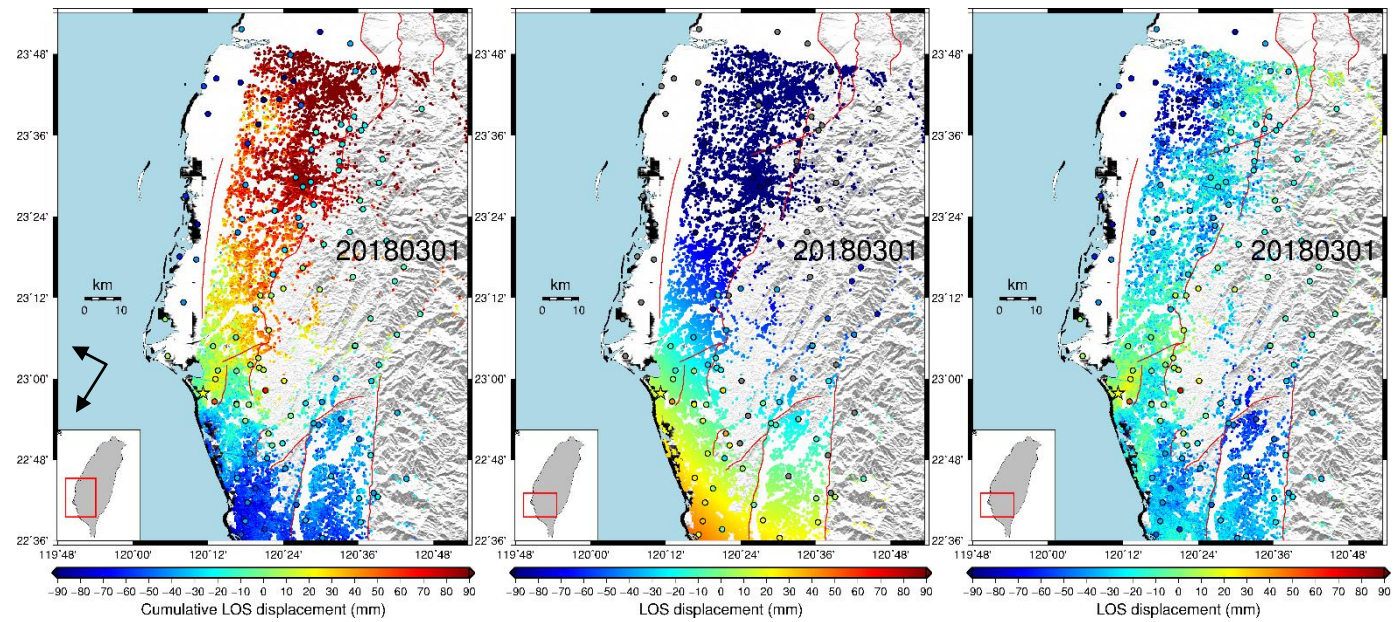


圖 5.35 二階平面（經度二次方，緯度一次方）擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、二階平面擬合量、二階平面擬合校正後的結果。

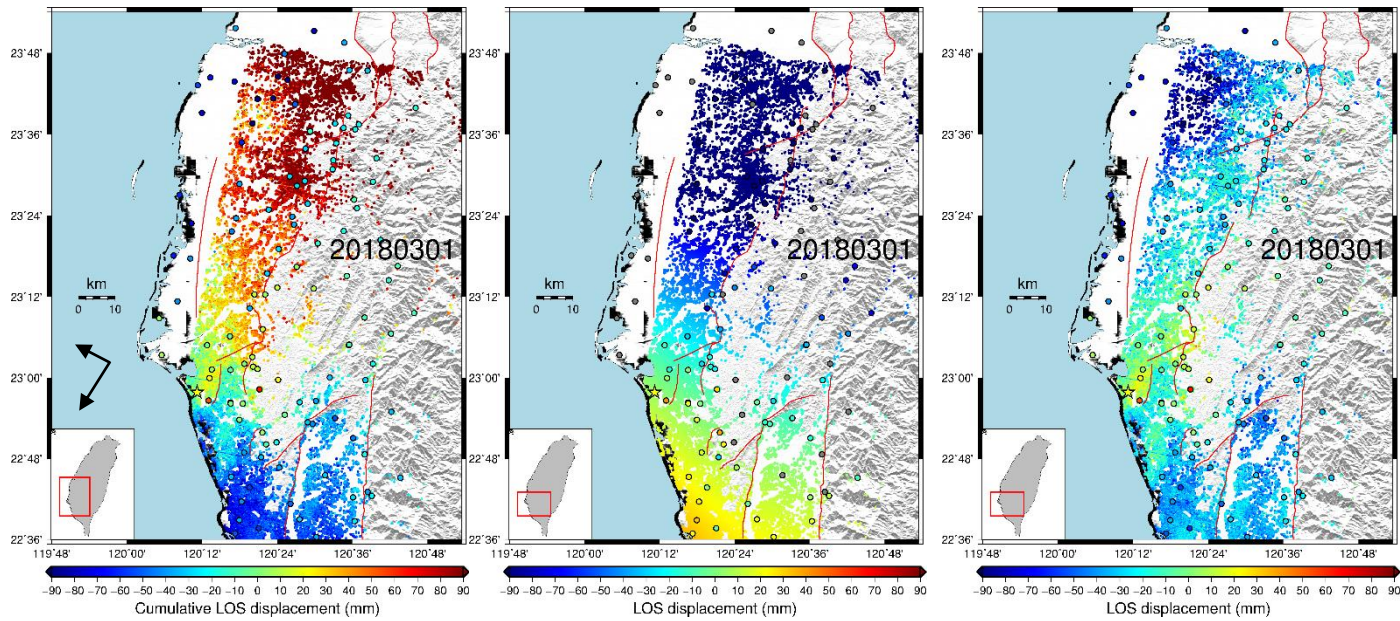


圖 5.36 二階平面（經度二次方，緯度二次方）擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、二階平面擬合量、二階平面擬合校正後的結果。

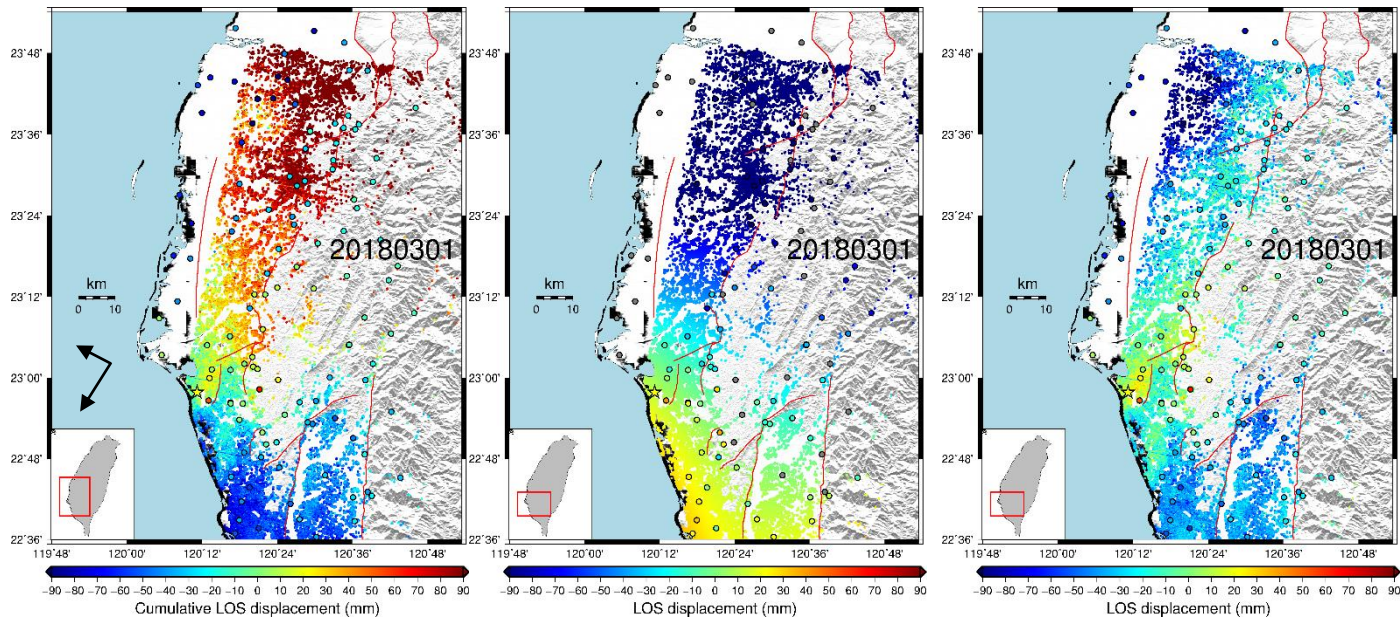


圖 5.37 三階平面（經度二次方，緯度三次方）擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、三階平面擬合量、三階平面擬合校正後的結果。

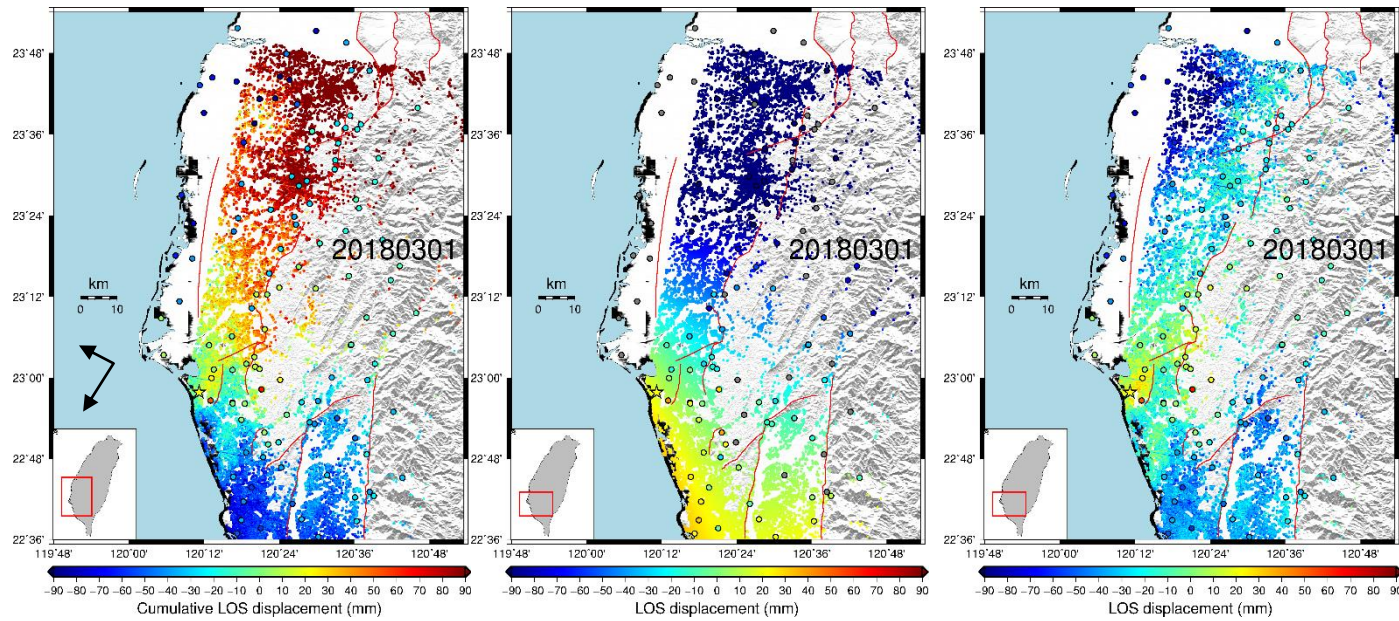


圖 5.38 三階平面（經度三次方，緯度二次方）擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、三階平面擬合量、三階平面擬合校正後的結果。

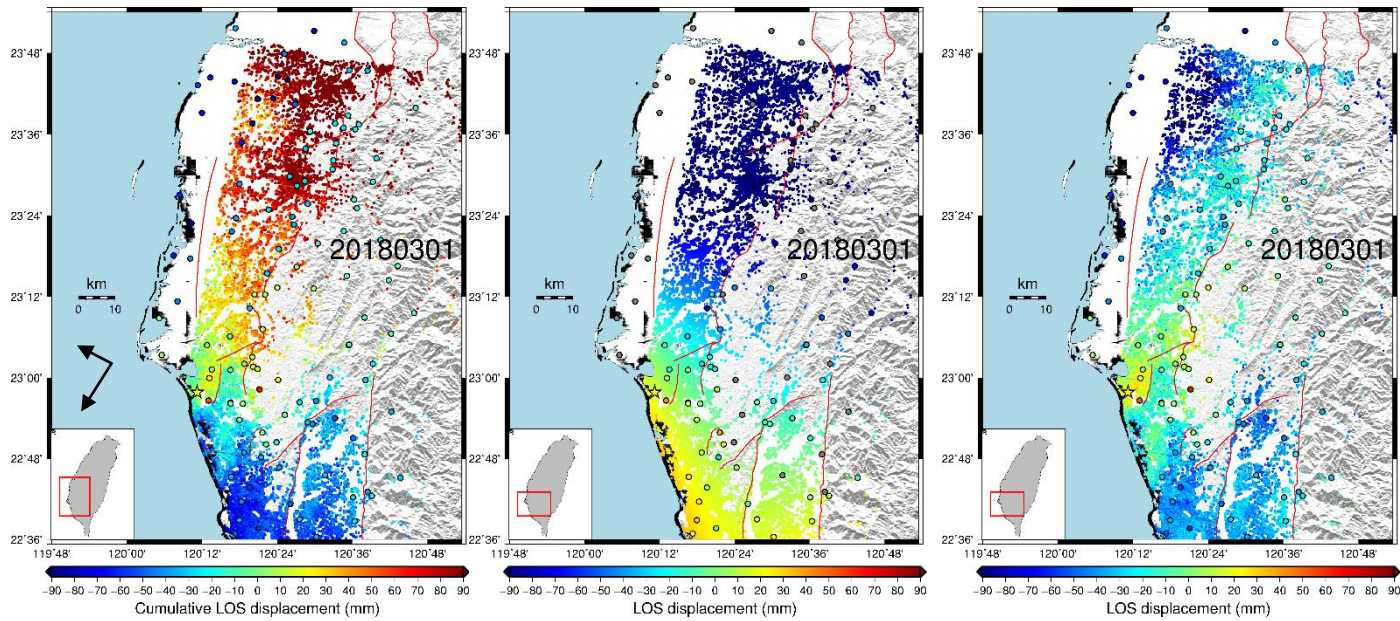


圖 5.39 三階平面（經度三次方，緯度三次方）擬合方法（降軌影像）。

由左至右分別是經過 GMTSAR 大氣校正後而未進行空間校正的結果、三階平面擬合量、三階平面擬合校正後的結果。



5.4 InSAR 時間序列

本研究將美濃地震之後的地表變形經由時間序列擬合萃取出震後變形，圖 5.40 至圖 5.55 呈現升軌及降軌的震後變形。從升軌及降軌影像的研究結果都顯示震後變形發生的區域在新化斷層及旗山斷層之間，較明顯的變動區域在台南台地、小崗山斷層以西以及中洲構造周圍。

升軌及降軌影像的山區及南邊的兩年總位移量以及 GPS 位移量都大約是 10 公厘，顯示此兩區沒有什麼震後變形。

從降軌影像的結果觀察，在旗山斷層與小崗山斷層之間的區域 InSAR 顯示負 50 公厘，代表遠離衛星，但此處的 GPS 卻沒什麼位移量。

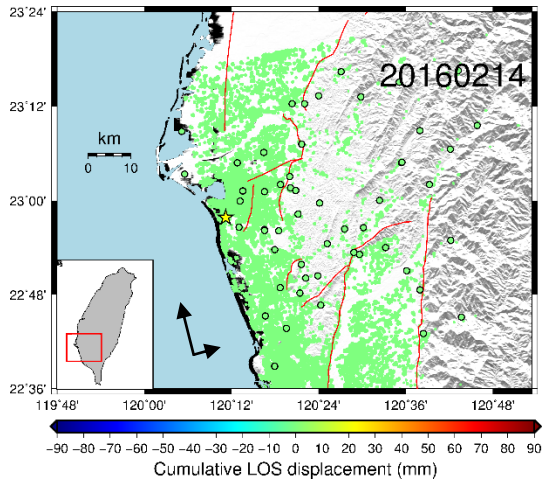


圖 5.40 2016.02.14 升軌震後變形。

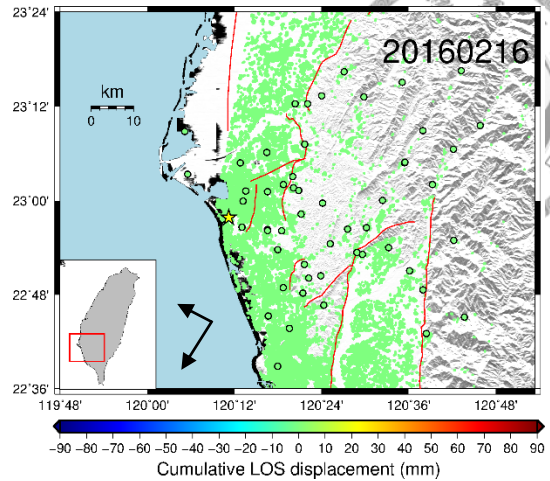


圖 5.41 2016.02.16 降軌震後變形。

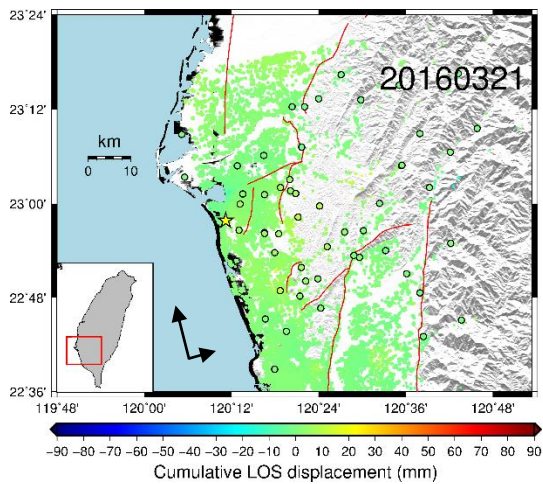


圖 5.42 2016.03.21 升軌震後變形。

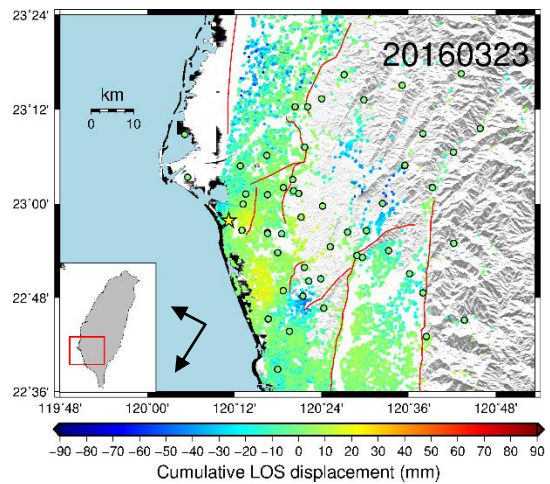


圖 5.43 2016.03.23 降軌震後變形。

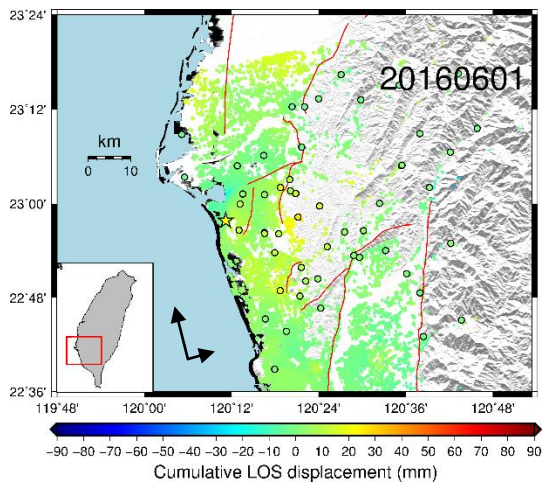


圖 5.44 2016.06.01 升軌震後變形。

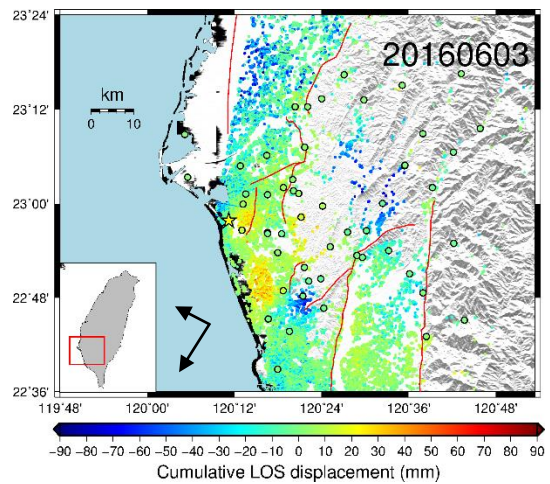


圖 5.45 2016.06.03 降軌震後變形。

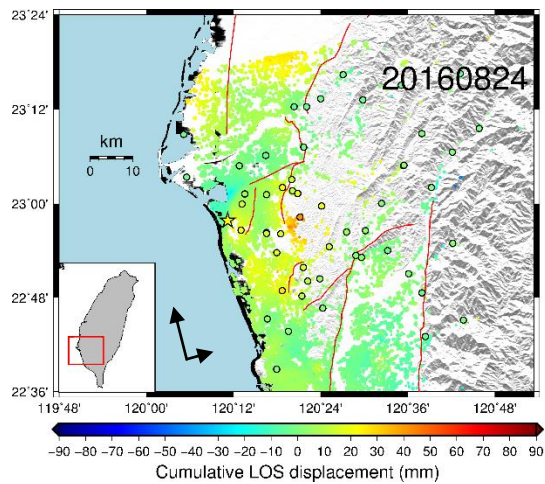


圖 5.46 2016.08.24 升軌震後變形。

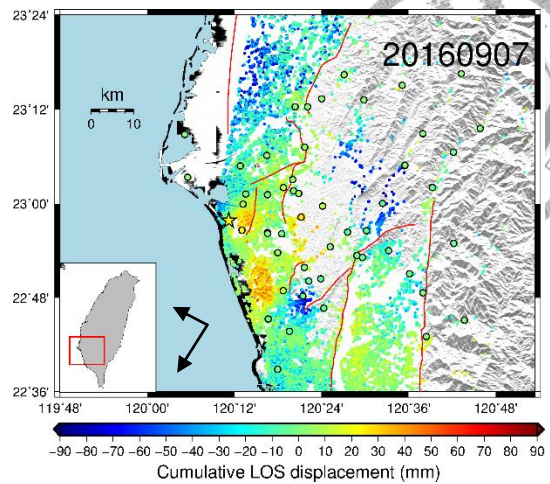


圖 5.47 2016.09.07 降軌震後變形。

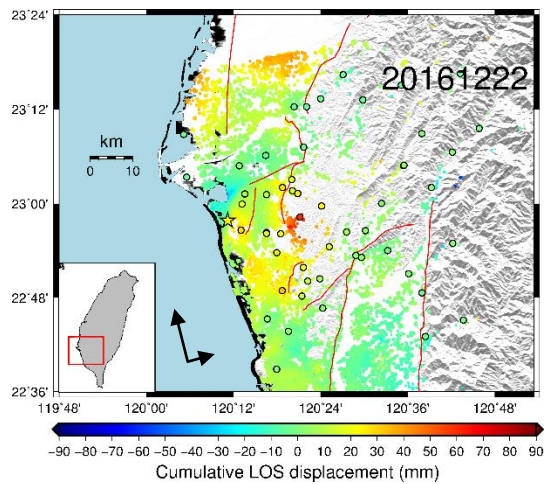


圖 5.48 2016.12.22 升軌震後變形。

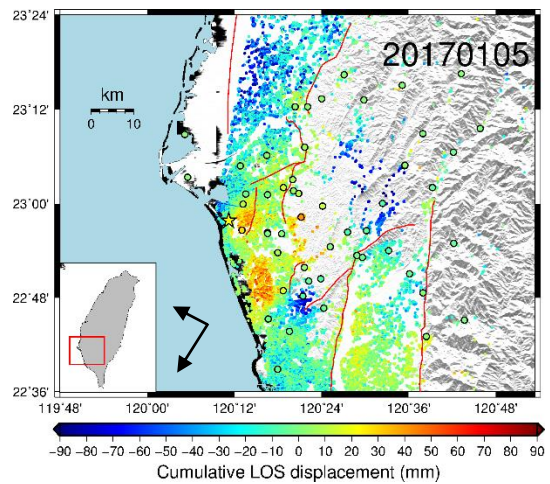


圖 5.49 2017.01.05 降軌震後變形。

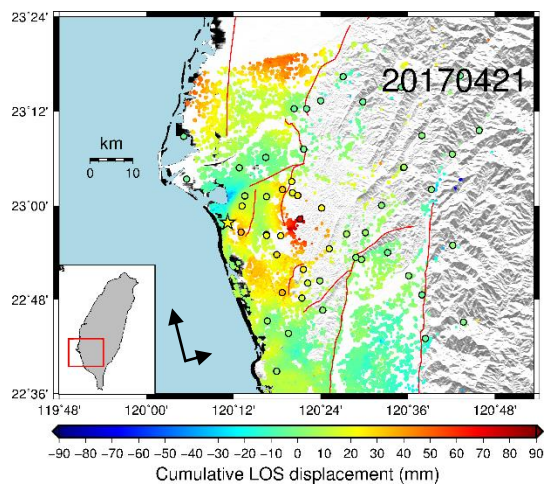


圖 5.50 2017.04.21 升軌震後變形。

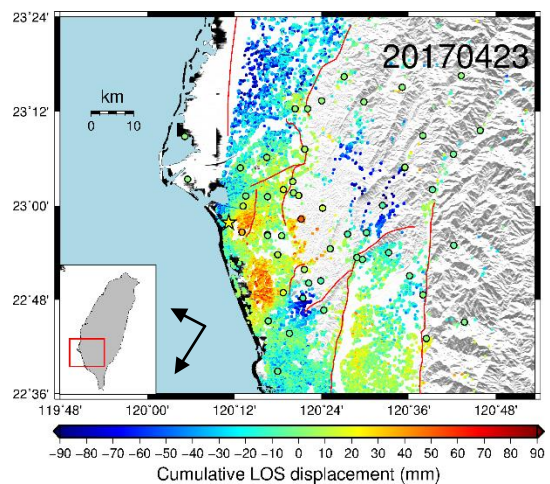


圖 5.51 2017.04.23 降軌震後變形。

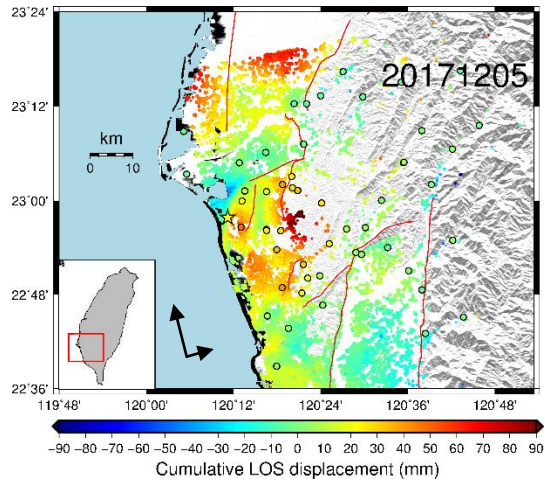


圖 5.52 2017.12.05 升軌震後變形。

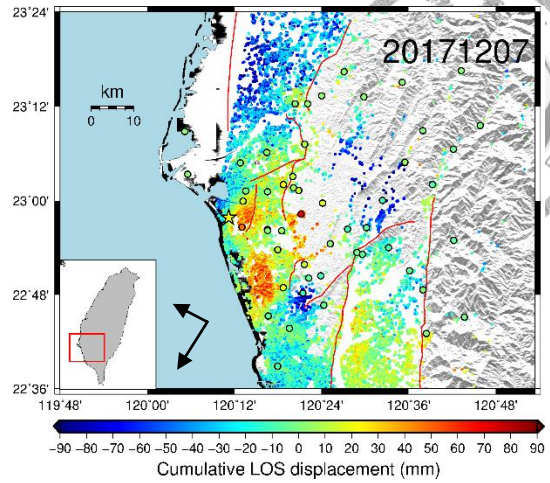


圖 5.53 2017.12.07 降軌震後變形。

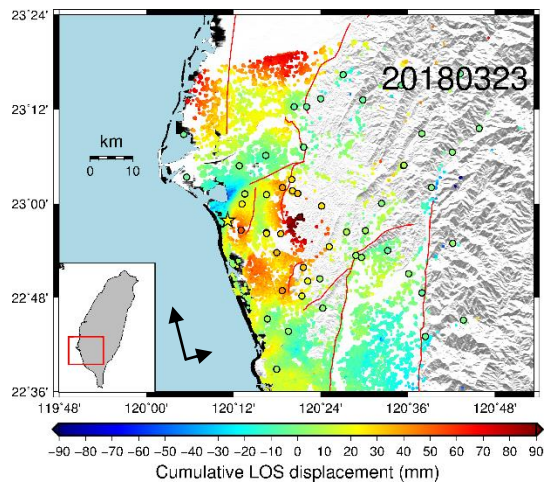


圖 5.54 2018.03.23 升軌震後變形。

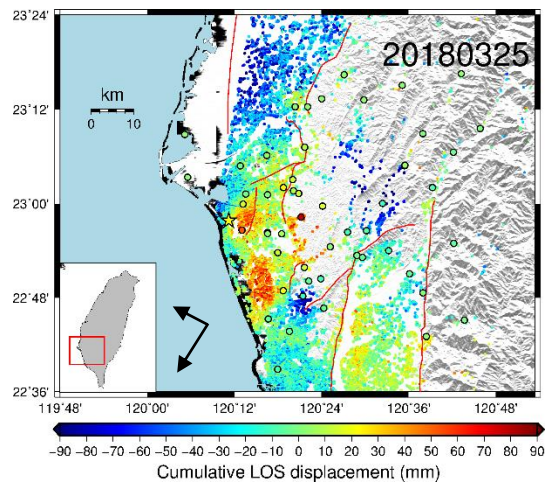


圖 5.55 2018.03.25 降軌震後變形。



5.5 InSAR 時間序列與 GPS 時間序列比較

台南台地北邊的 GS30 測站 (圖 5. 56) 在升軌影像方面兩年間的變動量約 10 公厘 (圖 5. 57), 降軌影像方面較無變動 (圖 5. 59); 台南台地的中段 CKSV 測站 (圖 5. 60), 2016 年的震後變形量較大, 到了 2017 年中震後變形逐漸趨緩, 在升軌影像方面兩年間的變動量約 25 公厘 (圖 5. 61), 降軌影像方面約 15 公厘 (圖 5. 63); 台南台地的南邊 ZEND 測站 (圖 5. 64), 升軌與降軌影像兩年間的變動量都約 55 公厘 (圖 5. 65 及圖 5. 67)。為幫助了解升軌與降軌影像的 LOS 方向的 GPS, 因此放上 GS30、CKSV 及 ZEND 測站 GPS 三維方向的震後變形時間序列 (圖 5. 58、圖 5. 62 及圖 5. 66)。

小崗山斷層以西到沿海地帶這個區域也有明顯的震後變形, GS79 測站 (圖 5. 68) 及 GS81 測站 (圖 5. 72) 為在此區域的 GPS 連續站。GS79 測站在升軌影像方面兩年間的變動量介於 30-40 公厘 (圖 5. 69), 降軌影像介於 10-15 公厘 (圖 5. 71); GS81 測站升軌影像大約 40 公厘左右 (圖 5. 73), 降軌影像約 20 公厘 (圖 5. 75)。為幫助了解升軌與降軌影像的 LOS 方向的 GPS, 因此放上 GS79 及 GS81 測站 GPS 三維方向的震後變形時間序列 (圖 5. 70 及圖 5. 74)。

中洲構造周圍有幾處有明顯的震後變形, 像是 GS73 測站 (圖 5. 76) 周圍以及 GS89 測站 (圖 5. 80)。GS73 測站在升軌影像方面兩年間的變動量約 100 公厘 (圖 5. 77), 降軌影像介於 60-70 公厘 (圖 5. 79); GS89 測站升軌影像大約 40 公厘左右 (圖 5. 81), 降軌影像約 10-20 公厘 (圖 5. 83)。為幫助了解升軌與降軌影像的 LOS 方向的 GPS, 因此放上 GS73 及 GS89 測站 GPS 三維方向的震後變形時間序列 (圖 5. 78 及圖 5. 82)。

台南台地區域：

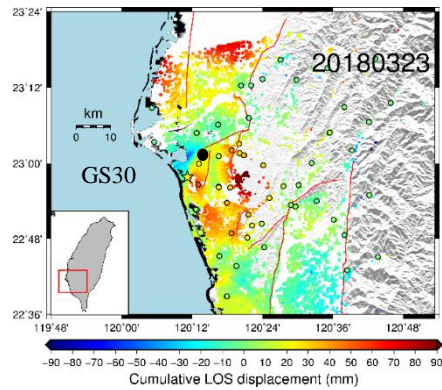


圖 5.56 GS30 測站位置圖。

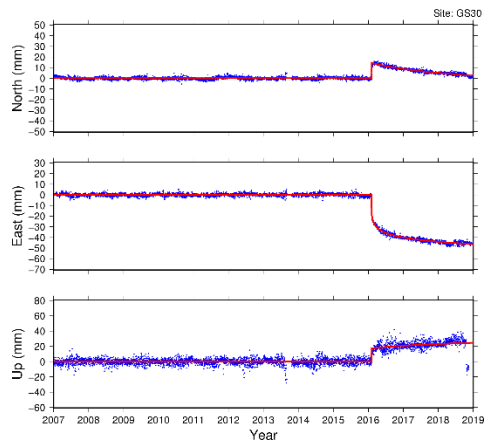


圖 5.58 GS30 測站震後變形時間序列

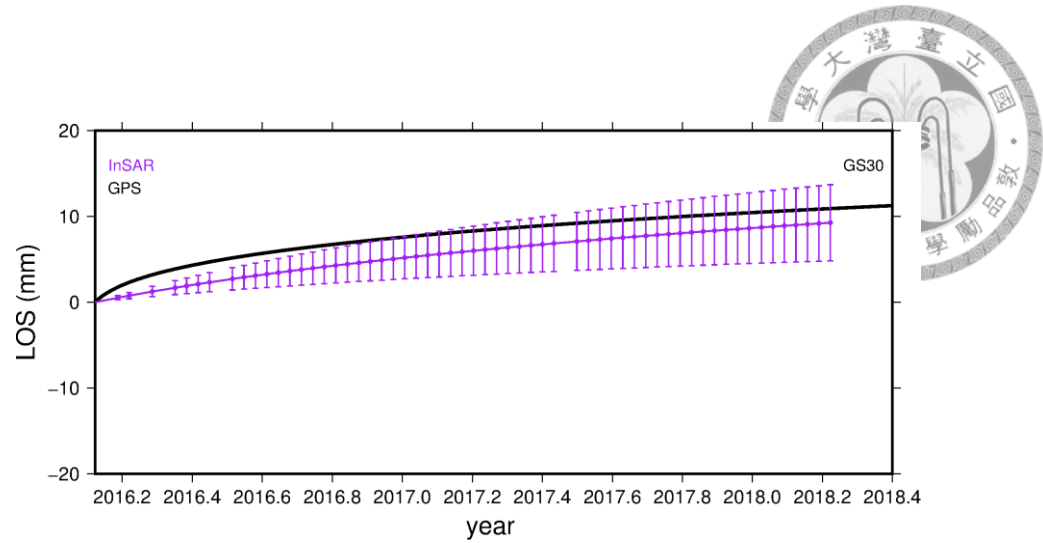


圖 5.57 GS30 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

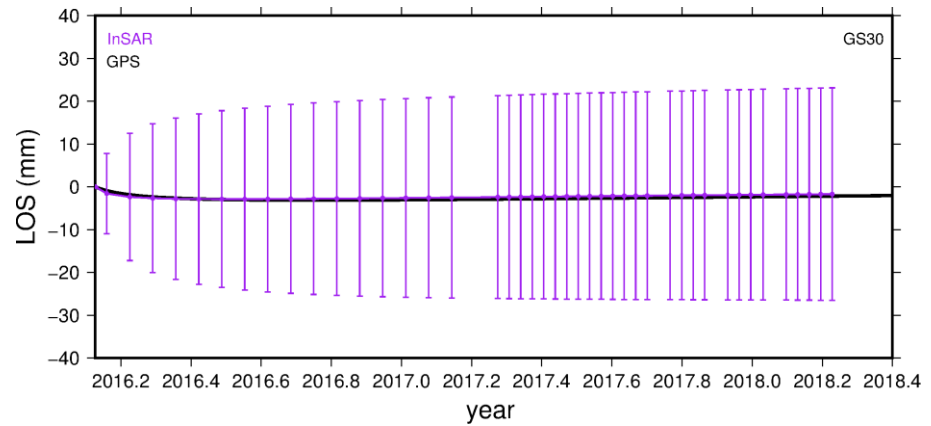


圖 5.59 GS30 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。

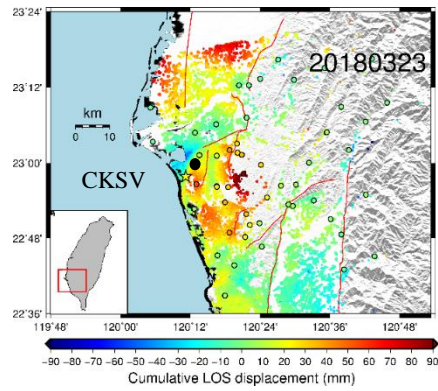


圖 5.60 CKSV 測站位置圖。

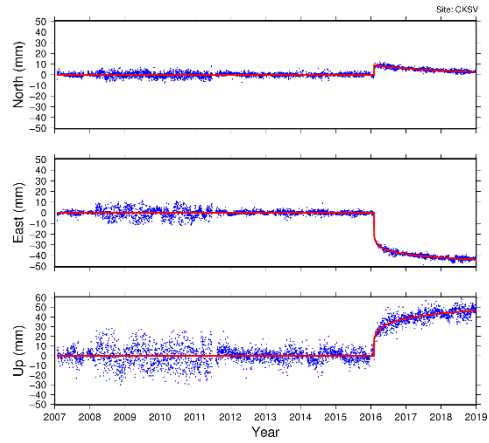


圖 5.62 CKSV 測站震後變形時間序列

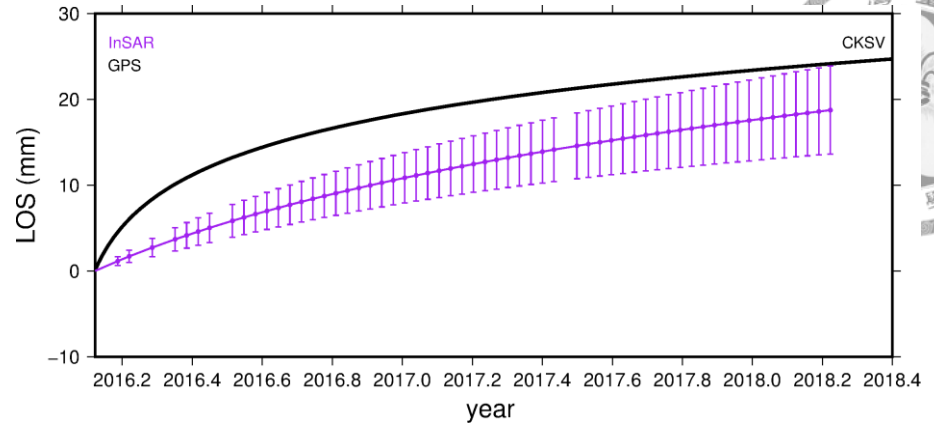


圖 5.61 CKSV 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

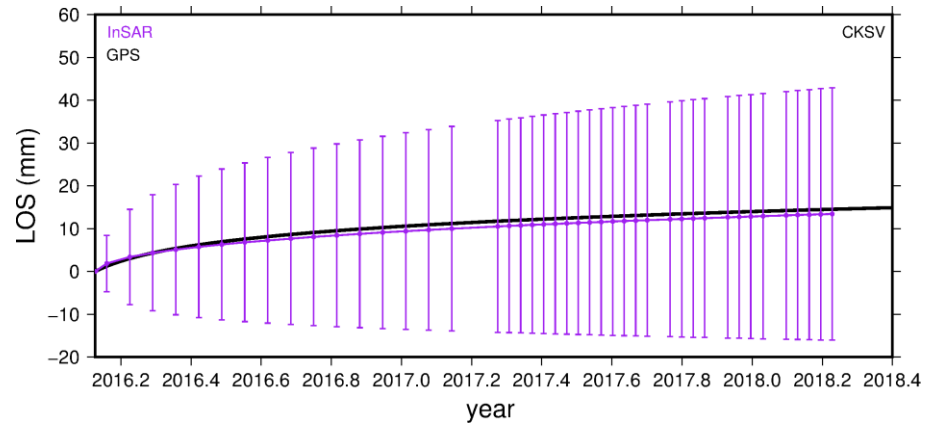


圖 5.63 CKSV 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。

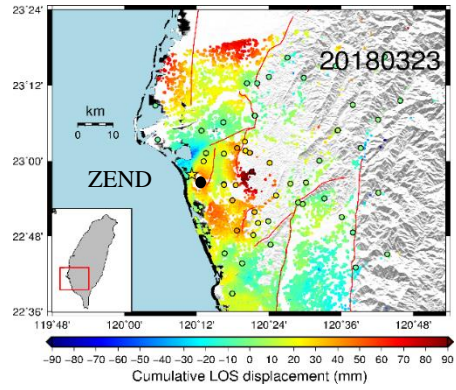


圖 5. 64 ZEND 測站位置圖。

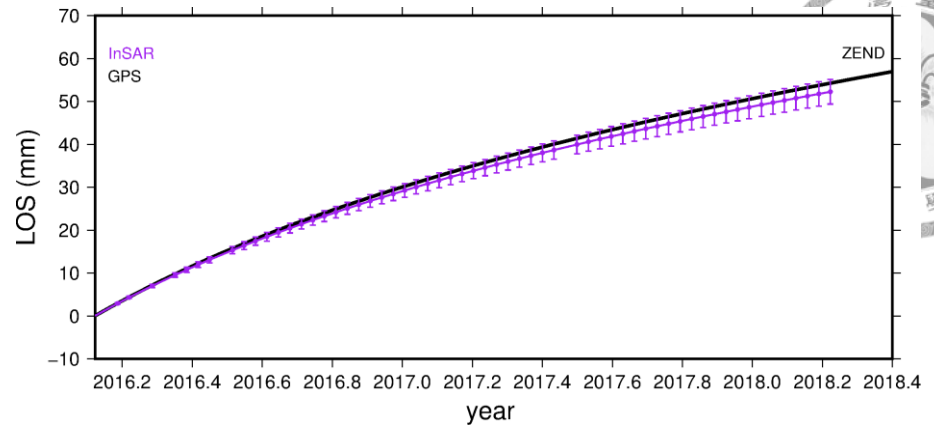


圖 5. 65 ZEND 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

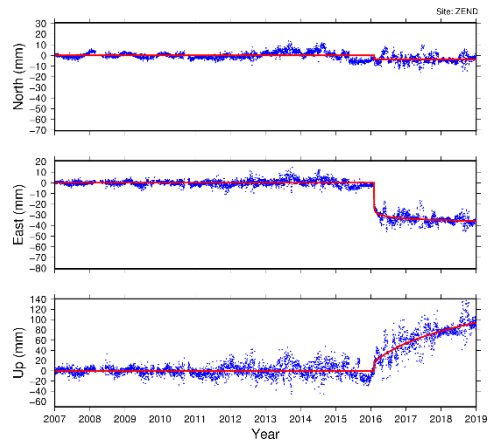


圖 5. 66 ZEND 測站震後變形時間序列

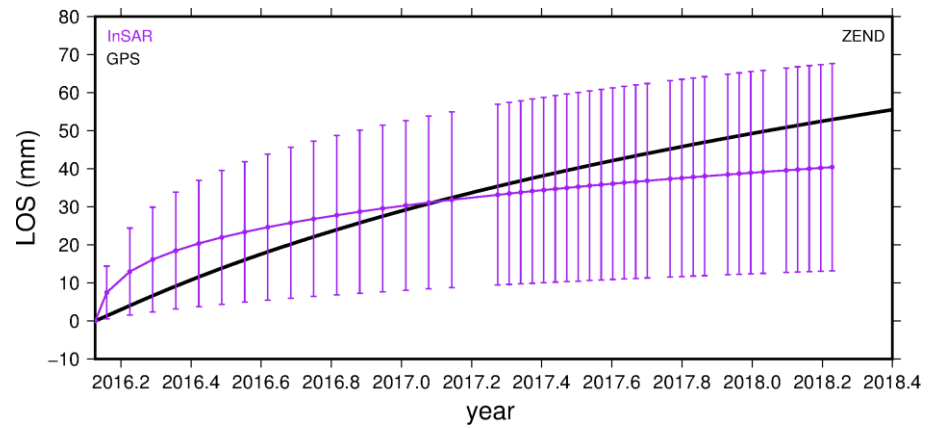


圖 5. 67 ZEND 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。

小崗山斷層以西：

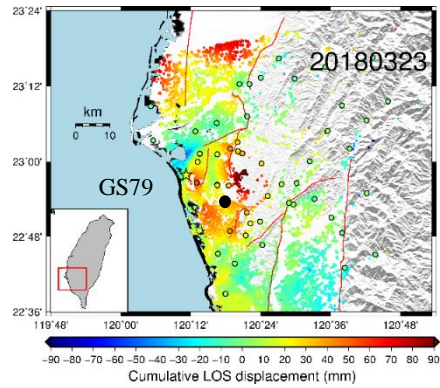


圖 5. 68 GS79 測站位置圖。

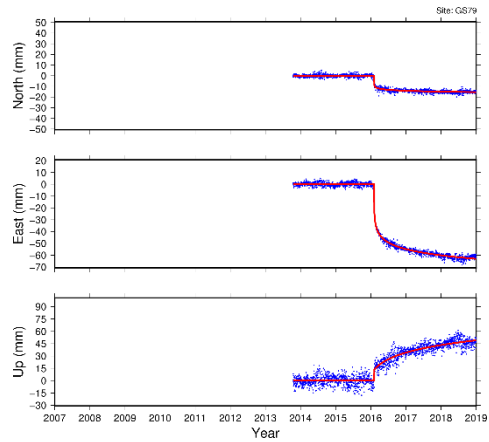


圖 5. 70 GS79 測站震後變形時間序列

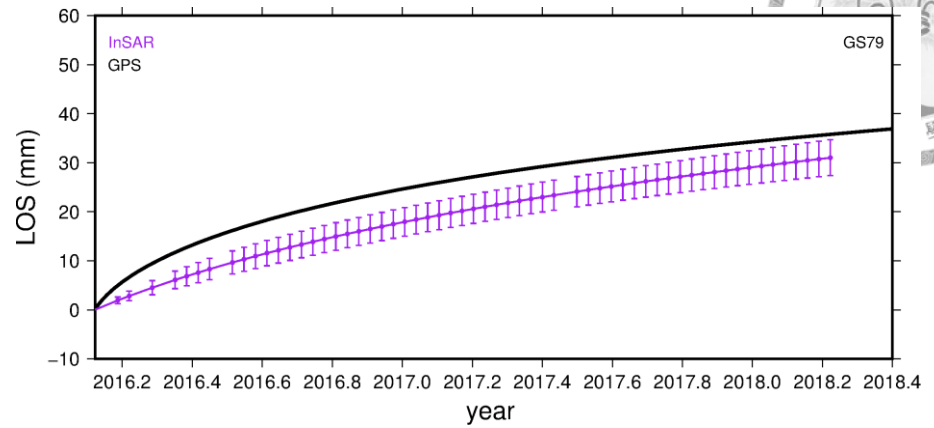


圖 5. 69 GS79 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

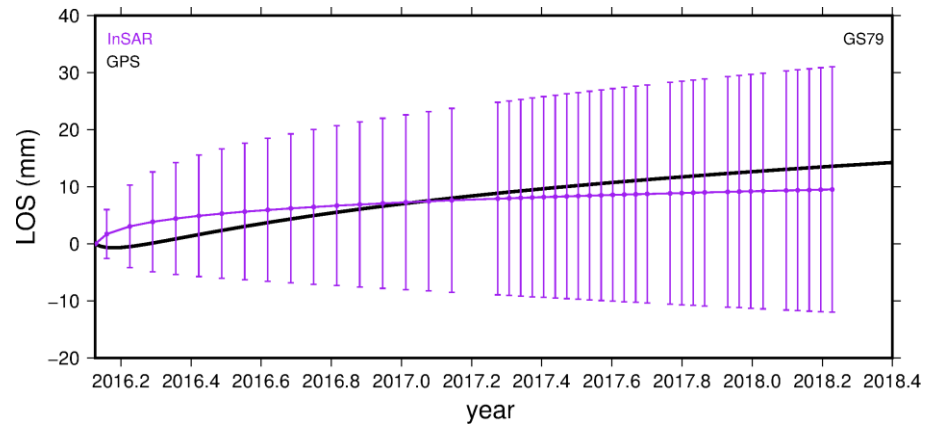
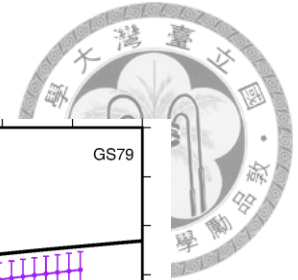


圖 5. 71 GS79 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。



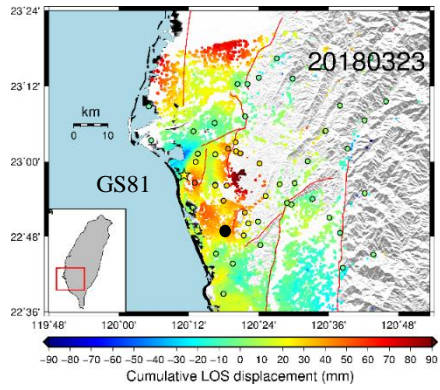


圖 5.72 GS81 測站位置圖。

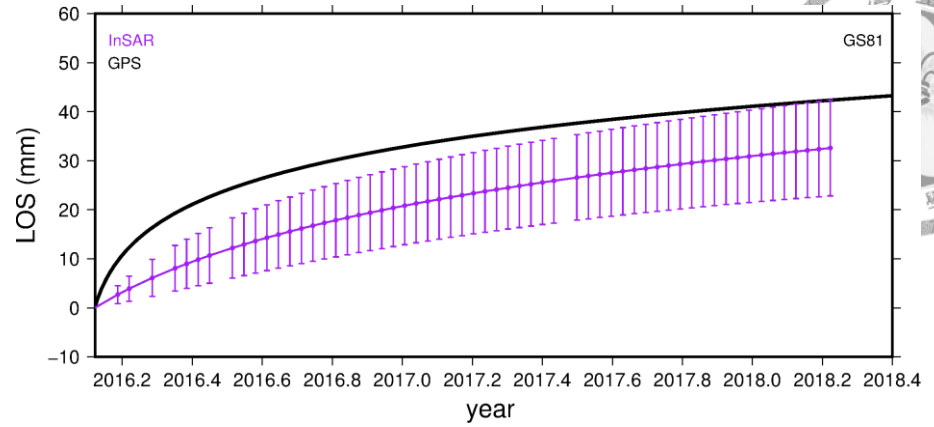


圖 5.73 GS81 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

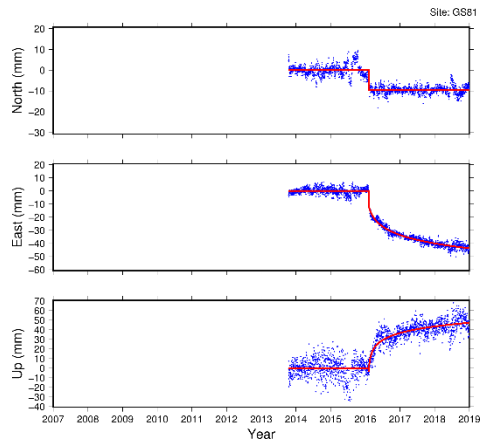


圖 5.74 GS81 測站震後變形時間序列

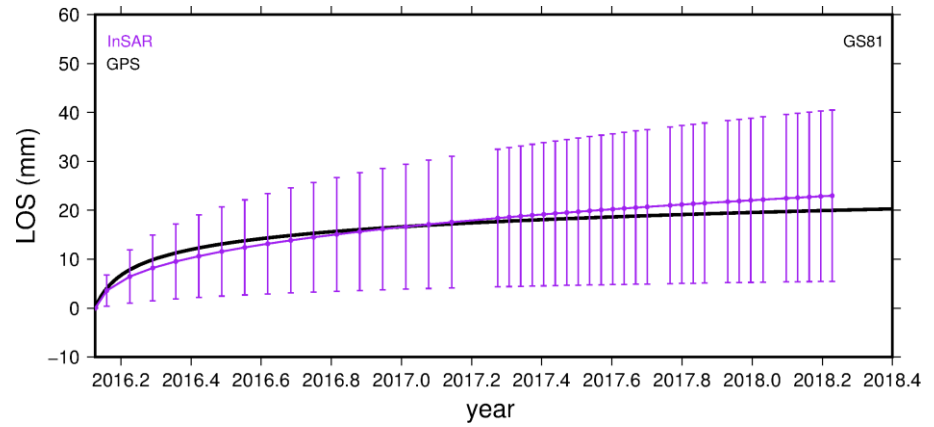


圖 5.75 GS81 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。

中洲構造周圍：

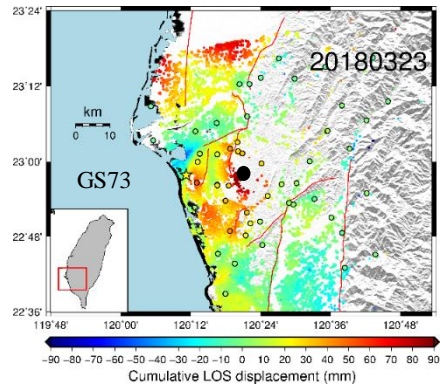


圖 5.76 GS73 測站位置圖。

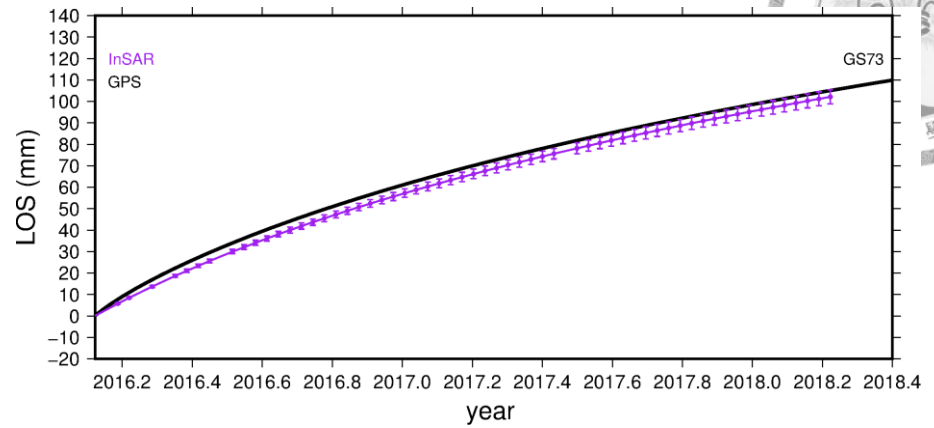


圖 5.77 GS73 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

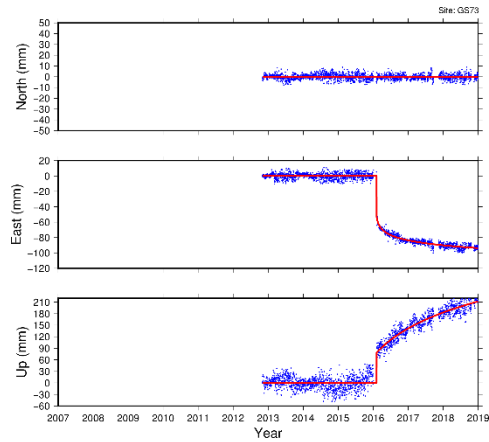


圖 5.78 GS73 測站震後變形時間序列

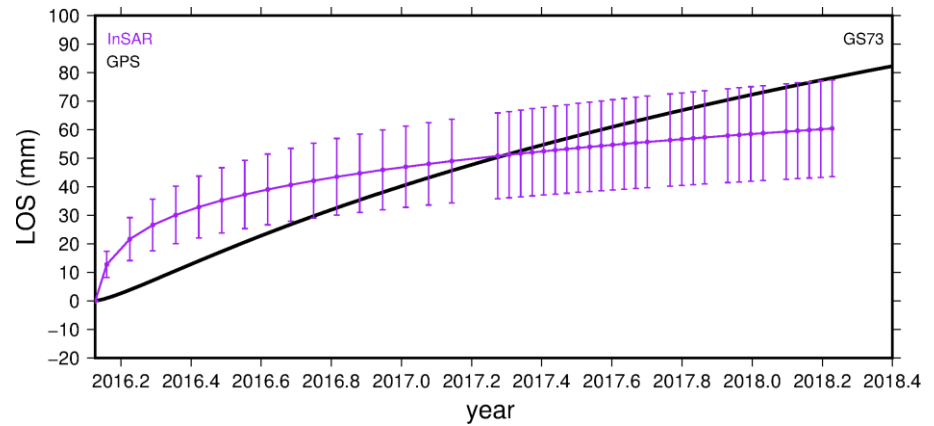


圖 5.79 GS73 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。

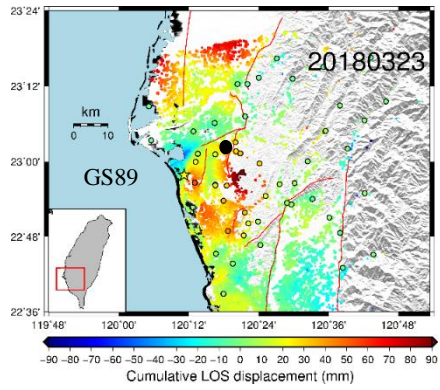


圖 5. 80 GS89 測站位置圖。

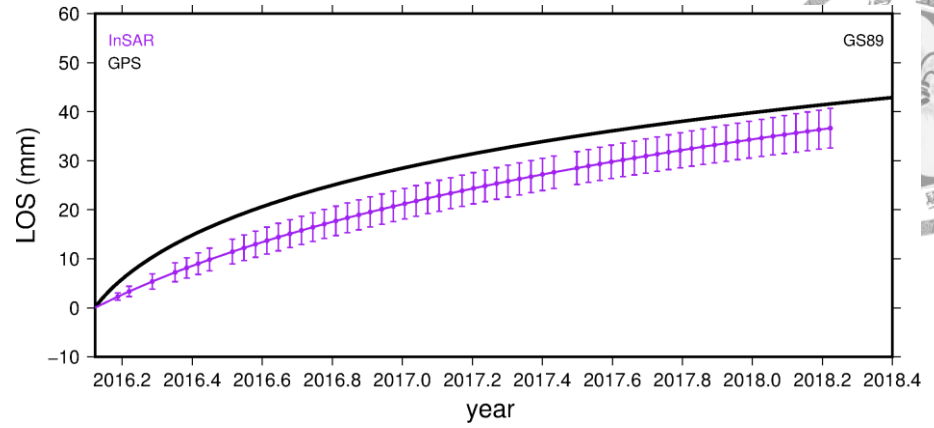


圖 5. 81 GS89 測站 GPS 與 InSAR 升軌影像時間序列位移量。

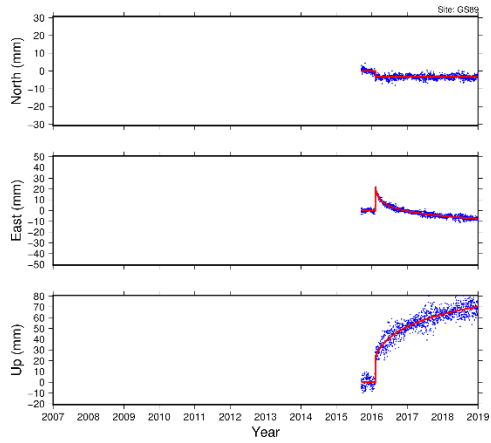


圖 5. 82 GS89 測站震後變形時間序列

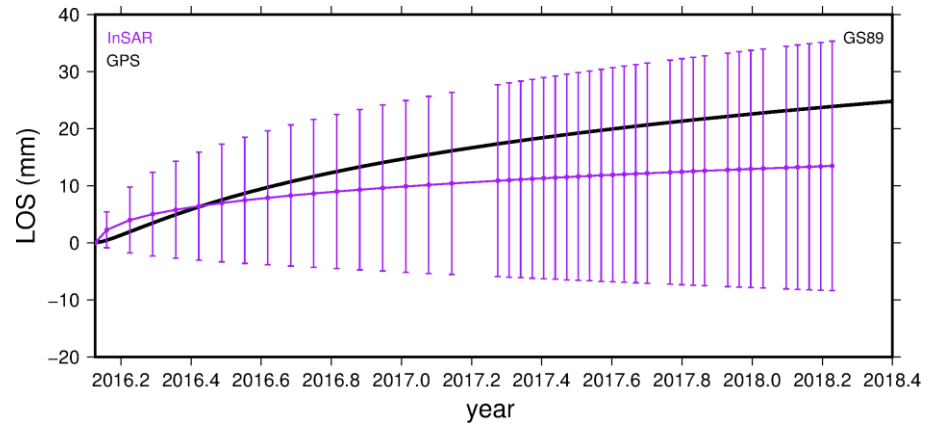


圖 5. 83 GS89 測站 GPS 與 InSAR 降軌影像時間序列位移量。



5.6 空間校正後的 InSAR 與水準比較

為了交叉驗證 InSAR 的結果，因此本研究將空間校正後的 InSAR 結果與水準測量的結果進行比較，水準的資料來源為地調所。將與水準施測時間相近的空間校正後的 InSAR 結果拆解成二維方向：東西向及垂直向，再將垂直向結果與水準進行比對。研究區有四條水準測線，分別為編號 29、30、31 及 33，以下就這四條測線結果依序說明。

編號 29 的關廟善化測線為一條南北向的測線（圖 5.84），圖 5.84 的 InSAR 結果為 2016 年 03 月至 2017 年 10 月的垂直位移量。從水準與 InSAR 垂直剖面圖（圖 5.85）來看，北緯 23.01 度以北的水準與 InSAR 結果滿吻合的，北緯 23.01 度以南兩者的結果大約差距 20 公厘。

編號 30 的安平龍崎測線為一條東西向的測線（圖 5.86），圖 5.86 的 InSAR 結果為 2016 年 03 月至 2017 年 05 月的垂直位移量。從水準與 InSAR 垂直剖面圖（圖 5.87）的結果來看，在東經 120.2 度以西的結果較相近，東經 120.2 至 120.25 這段的水準與 InSAR 趨勢相反，120.25 至結尾這段雖然 InSAR 的位移量大於水準約 30 至 50 公厘，但變動趨勢相近。

圖 5.88 為編號 31 的路竹茂林測線，InSAR 結果為 2016 年 03 月至 2017 年 02 月的垂直位移量。從圖 5.89 來看，東經 120.23 度至 120.37 度水準與 InSAR 結果近似，東經 120.54 度至結尾這段水準與 InSAR 變動趨勢相同，但位移量差距了約 30 公厘。東經 120.19 至 120.23 度及東經 120.37 至 120.54 度這兩段兩者的趨勢與位移量都不相符。

圖 5.90 為編號 33 的岡山安坡測線，InSAR 結果為 2016 年 03 月至 2017 年 05 月的垂直位移量。從圖 5.91 的結果顯示，參考點以西水準與 InSAR 的位移量相近，但參考點以東，兩者的位移量與趨勢都不相同。

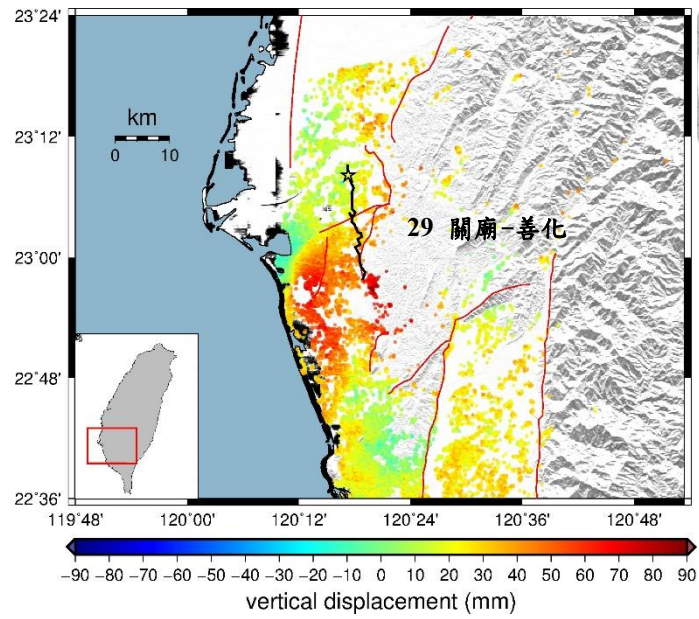


圖 5.84 2016 年 03 月-2017 年 10 月 InSAR 垂直位移量。

黑線為關廟-善化水準測線，星號為水準及 InSAR 參考點。

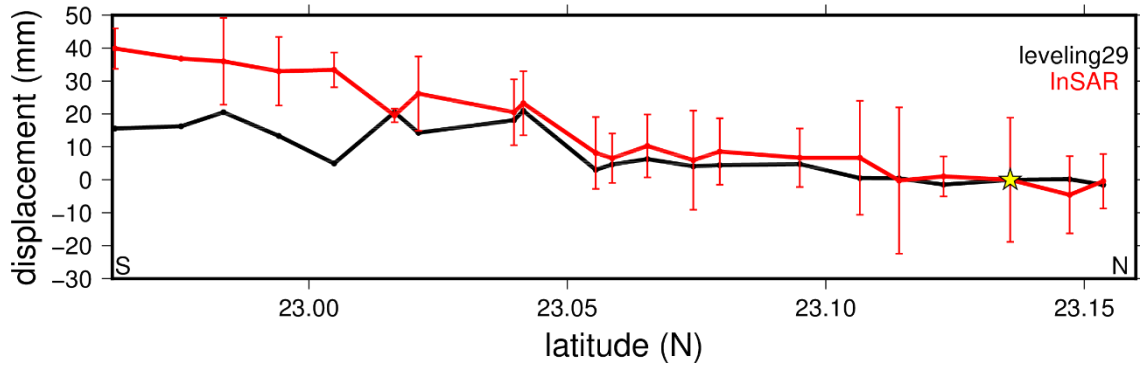


圖 5.85 關廟-善化水準測線與 InSAR 垂直位移量剖面圖。

星號為參考點。

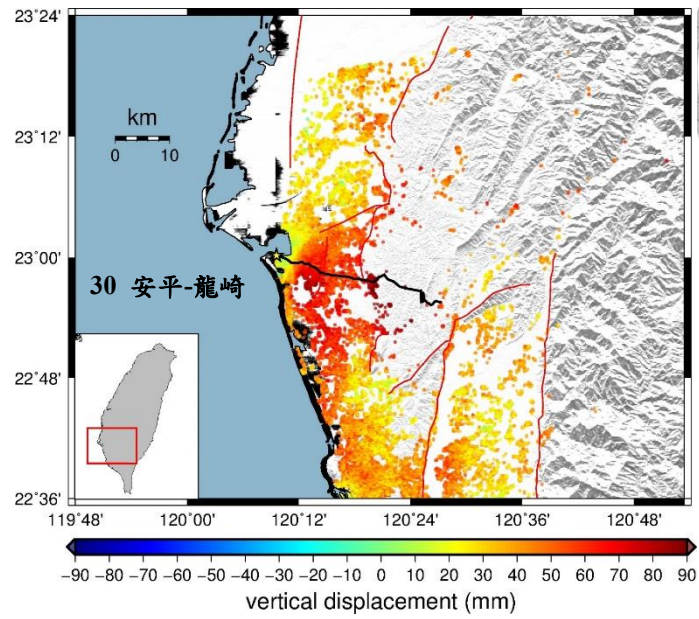
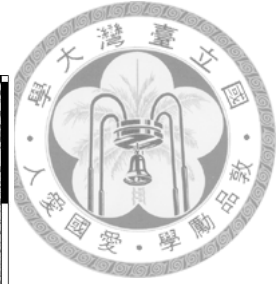


圖 5.86 2016 年 03 月-2017 年 05 月 InSAR 垂直位移量。

黑線為安平-龍崎水準測線，星號為水準及 InSAR 參考點。

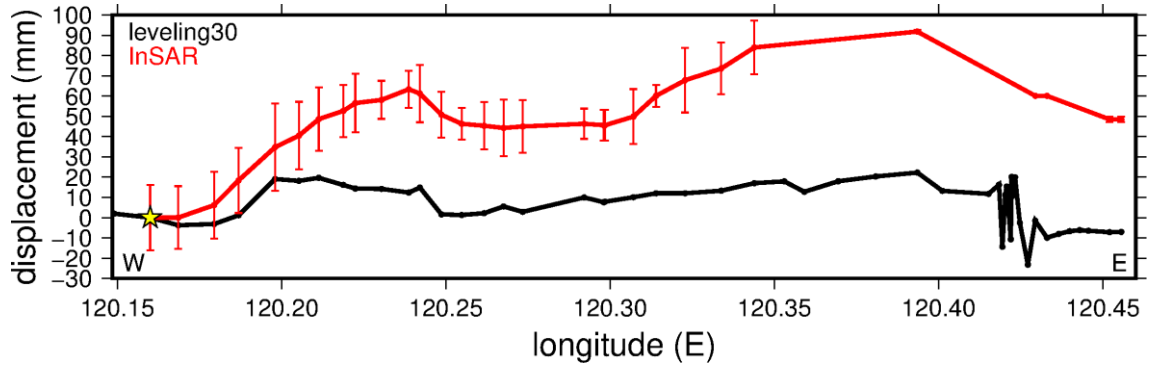


圖 5.87 安平-龍崎水準測線與 InSAR 垂直位移量剖面圖。

星號為參考點。

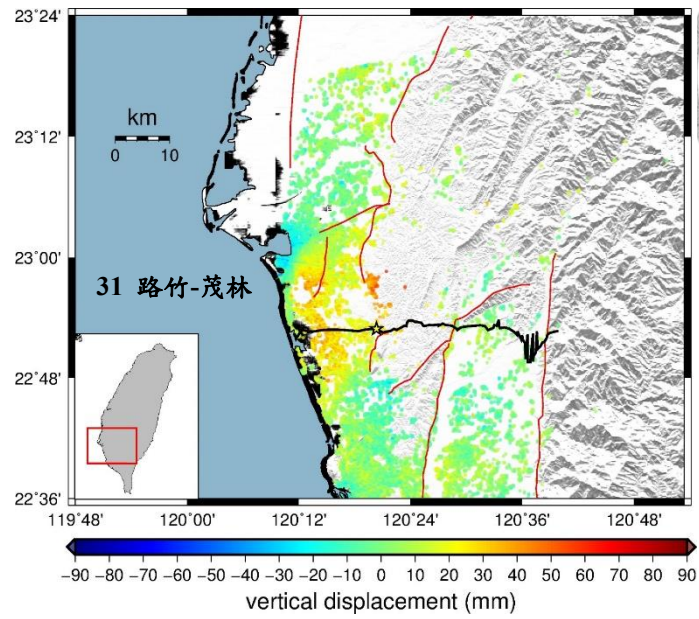


圖 5.88 2016 年 03 月-2017 年 02 月 InSAR 垂直位移量。

黑線為路竹-茂林水準測線，星號為水準及 InSAR 參考點。

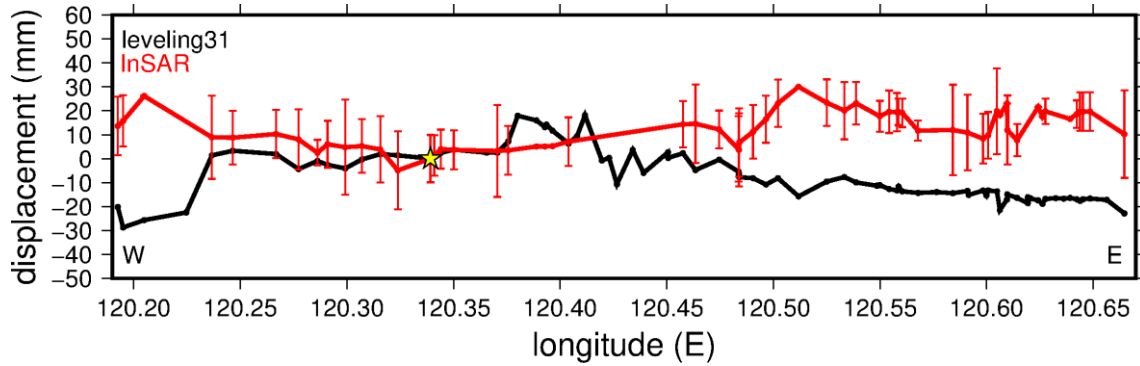


圖 5.89 路竹-茂林水準測線與 InSAR 垂直位移量剖面圖。

星號為參考點。

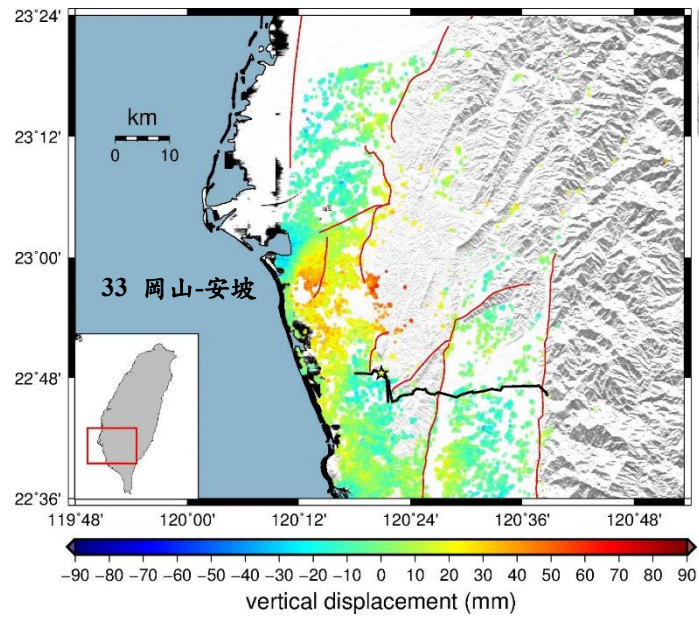
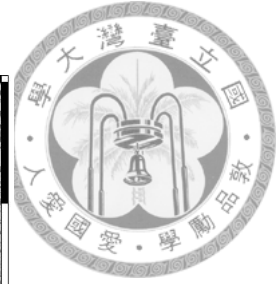


圖 5.90 2016 年 03 月-2017 年 05 月 InSAR 垂直位移量。

黑線為岡山-安坡水準測線，星號為水準及 InSAR 參考點。

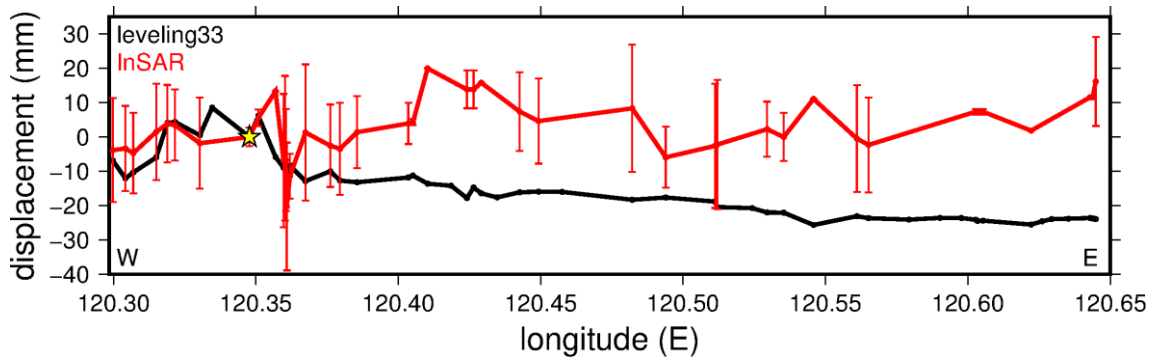


圖 5.91 岡山-安坡水準測線與 InSAR 垂直位移量剖面圖。

星號為參考點。



第六章、 討論

6.1 InSAR 大氣校正

GACOS 的大氣資料取得方式是利用歐洲中期天氣預報中心的資料以及 GPS 得到的天頂總延遲來作為大氣校正的依據，但是 GACOS 並沒有臺灣的 GPS 資料，因此臺灣的大氣資料來源是來自歐洲中期天氣預報中心。歐洲中期天氣預報中心的資料時間尺度是 6 小時，雖然 GACOS 可以提供到分鐘等級的資料，卻是透過這 6 小時的資料內插得到的，因此離 3、9、15、21 時越遠的資料越不準確。

GMTSAR 的大氣校正方法是利用每幅干涉影像來計算，同樣日期的影像如果干涉圖幅越多，計算的結果會越準確，所以越靠近中心日期的影像會越準確，起始影像與結束影像越不精準。

大氣中的水氣對於雷達影像的影響較大，天氣的變化每個小時可能都不太相同。以 2016 年 09 月 05 日的升軌影像為例，做完 GACOS 校正的結果非常不好，原因可能是因為當時臺灣西南部位於低壓帶，有降雨發生，而且 2016 年 09 月 06 日台南站的降雨高達 250 毫米，是台南站近 60 年來最大的日降雨量。由於 GACOS 的資料是透過內插得到，因此 6 日的降雨資訊可能對於 5 日的降雨資訊有過度放大的結果。

由於 GACOS 在資料來源上時間解析度較不好，因此導致整體的校正結果沒有 GMTSAR 的大氣校正結果來得好。GMTSAR 的大氣校正方法是透過每張影像來計算，而且認為大氣的影響時間上不相關，因此可以得到較好的大氣校正結果。此外，GMTSAR 的大氣校正方法不只是針對對流層的誤差，也包括了電離層以及軌道誤差，這可能也是為什麼 GMTSAR 的大氣校正方式能使 InSAR 與 GPS 的均方根較小的原因之一。



6.2 InSAR 空間校正

從升軌影像及降軌影像得到的結果都是利用差值內插所修正的均方根最小。以 2018 年 03 月 01 日的降軌影像為例，在新化斷層以南的地區地表變形較明顯，但是每一個 GPS 測站各自的地表變形位移量並不相同，因此透過南北向線性擬合以及超平面擬合，較無法看到每個區域細微的變化。加上這兩種方式擬合出來的校正量，幾乎都是由南往北遞減，因此導致在新化斷層以南及旗山斷層以北之間的區域，南北向線性擬合以及超平面擬合校正後的結果與 GPS 測站較不符。

南北向線性擬合的均方根比其他七種超平面空間校正方法大，這可能也說明電離層、軌道及基線在區域上不只是造成南北向的誤差，在東西方向上也會造成誤差。全球電離層的位置主要受太陽以及地球磁場所控制，因此空間上電離層在低緯度地區電子含量較多(Liang et al., 2019)。根據 Liang et al. (2019)的圖 1.b 電離層的影響範圍是條帶狀的，因此不管是南北向還是東西向都會受到電離層影響。

本研究測試的空間校正方法限制是必須在具有 GPS 測站的區域才適用。差值內插方法的均方根最小，但是此方法有侷限性，例如在 GPS 測站沒這麼密集的區域可能就不適用，因此超平面方法就適合用在具有 GPS 測站但站點沒這麼密集的區域。ElGharbawi and Tamura (2014)使用一階平面擬合，Neely et al. (2019)使用二階平面擬合，但兩者都未測試其他階數，也未說明為何採用一階或二階。本研究除了測試一階及二階，再多測試了三階平面擬合，發現三階的結果與 GPS 的均方根是最小的，因此認為三階平面擬合是次於差值內插的選擇。雖然階數越高，擬合的結果可能越好，但是基於電腦的計算能力以及資料過於龐大，因此測試到三階為止。

本研究的空間校正方法是基於 GPS 去校正的，因此可能的誤差來源會有：GPS 的解算及 GPS 時間序列的擬合。如果原始解算的結果不好，可能會導致位移資料出現錯誤；時間序列的擬合的成果有誤，也會導致數值上的不正確。



6.3 InSAR 與水準比較

InSAR 與水準的位移量較相近的區域大致上分布在新化斷層以北、台南台地以西及小崗山斷層以西，這些區域 InSAR 與水準較一致的原因可能是因為都位在 InSAR 相關性較好的地區，因此 InSAR 的點數量較多。InSAR 在岡山安坡、路竹茂林及安平龍崎測線的山區部分位移量都大於水準，可能原因是因為山區 InSAR 點資料較少，因此無法呈現真實的地表變動。

衛星視角可能也是造成誤差的原因之一。由於 Sentinel-1 衛星的入射角介於 29.1° - 46.0° ，但本研究將視衛星方向轉為垂直向時入射角是使用 32° ，因此推測影像的邊緣位置與水準的誤差也會較大。這可能也是為什麼在測線 30、31 及 33 的東邊以及測線 31 的西邊一小區域，InSAR 的誤差較大。

水準測量的施測時間與雷達影像的拍攝時間可能也是造成兩者有差異的原因。水準測線即使是同一條測線但起始點與結尾點的施測時間可能有差距，雷達影像要將視衛星方向轉成垂直向也同時需要升軌與降軌影像，但升軌與降軌影像的拍攝時間基本上會差距兩天。因此就算已經選取與水準施測時間相近的雷達影像，但是三者資料在施測上無法是同一天，所以會造成 InSAR 與水準資料比對的差異。

除此之外，雖然本研究已利用 GPS 來做 InSAR 空間校正，但是 GPS 本身垂直精度較水準精度低，所以導致即便已經利用 GPS 進行內插，但與水準資料相比，位移量還是不相同。

6.4 空間校正後的地表變形與時間序列擬合後的震後變形比較

本研究認為空間校正後的地表變形與時間序列擬合後的震後變形最大的差異在於地表長期速率，由圖 6.1 至圖 6.4 可以看出此區別。圖 6.1 與圖 6.2 兩者看起來並沒有較明顯的區別，但是在圖 6.3 與圖 6.4 可以觀察到圖 6.3 在旗山斷層以南區域的位移量比圖 6.4 多了將近 20 公厘。

這是由於西南部區域地殼長期速率（圖 6.5）所導致，因此做過時間序列擬合

的震後變形沒有此位移量。由圖 6.1 及圖 6.3 也可以明顯看出隨著時間的增長，長期速率造成的位移量也越大。因此如果未將地表長期速率移除的話，觀測的時間序列越長，速率所造成的位移也越大，將會誤判旗山斷層以南的區域也有震後變形。

ElGharbawi and Tamura (2015)利用 InSAR 時間序列觀測 2011 年日本 311 地震，在干涉圖中利用線性擬合震前位移、power model 進行震後位移的擬合，最後再利用一階平面擬合殘差值進行空間校正。經由本研究的結果認為在震後位移的擬合需要考慮移除地表長期速率，否則可能會誤判震後變形的區域或是位移量。

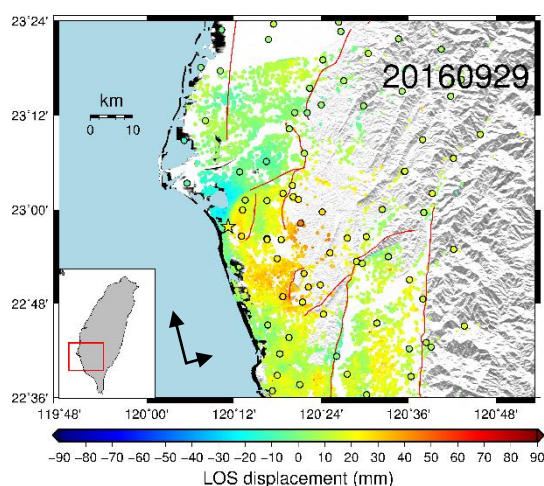


圖 6.1 2016 年 09 月 29 日升軌影像空間校正後地表變形圖。

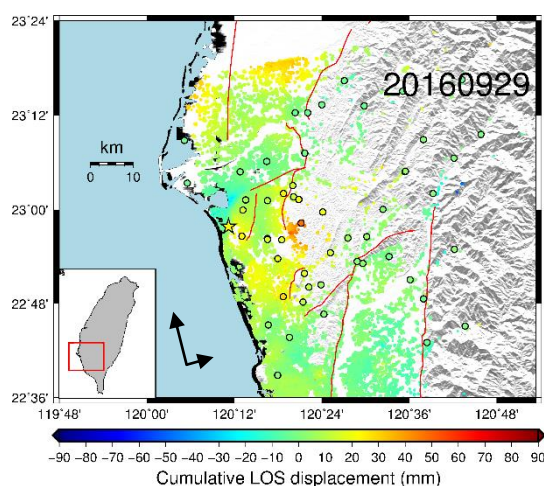


圖 6.2 2016 年 09 月 29 日升軌影像時間序列擬合後的震後變形圖。

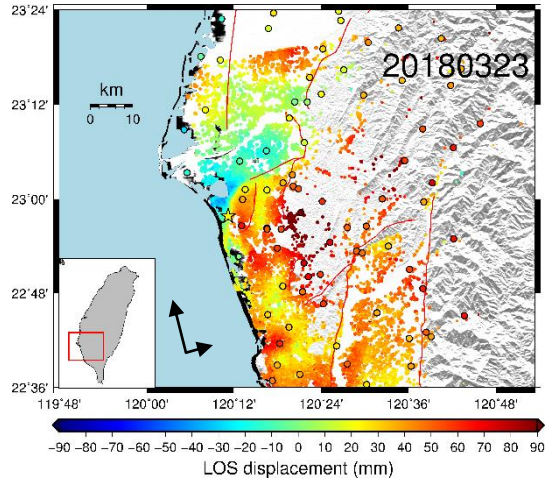


圖 6.3 2018 年 03 月 23 日升軌影像空間校正後地表變形圖。

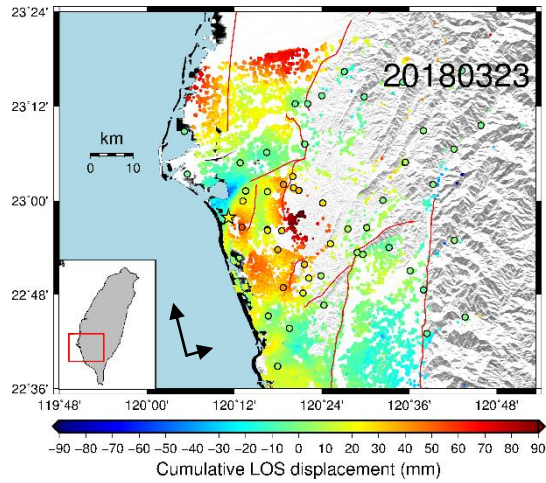


圖 6.4 2018 年 03 月 23 日升軌影像時間序列擬合後的震後變形圖。

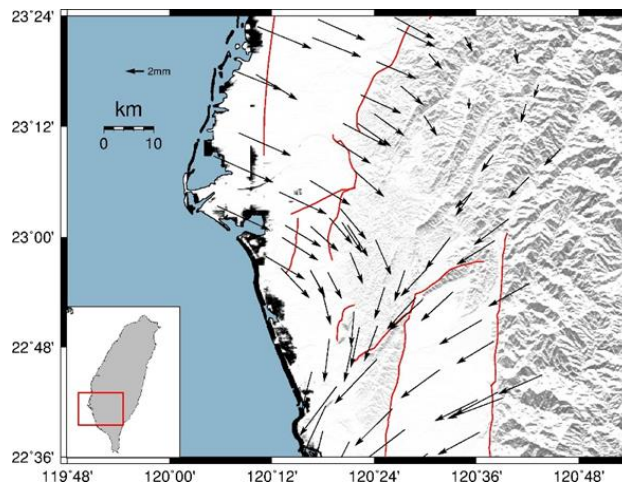


圖 6.5 西南部 GPS 長期水平速率。



6.5 GPS 與 InSAR 比較

圖 6.6 為未校正升軌影像與 GPS 的相關性圖，R 平方為 0.1248；圖 6.7 為大氣校正後升軌影像與 GPS 的相關性圖，R 平方為 0.0888；圖 6.8 為空間校正後升軌影像與 GPS 的相關性圖，R 平方為 0.9988。

圖 6.9 為未校正降軌影像與 GPS 的相關性圖，R 平方為 0.3990；圖 6.10 為大氣校正後降軌影像與 GPS 的相關性圖，R 平方為 0.3296；圖 6.11 為空間校正後降軌影像與 GPS 的相關性圖，R 平方為 0.9742。這四張圖的位移量為兩年的總位移量。

不管是升軌還是降軌影像，做完大氣校正後的 R 平方都較未校正的 R 平方還低，但做完空間校正後的 R 平方都有極高的相關性。不過，R 平方是意味著兩個資料之間有顯著的直線關係，所以並不代表大氣校正是無效的，空間校正因為是利用 GPS 內插去修正，因此相關性顯著是合理的。不過由於 InSAR 的計算方式是以 GPS 測站為中心取半徑 500 公尺的正方形內的點平均，所以即使已經透過 GPS 內插修正 InSAR 結果，但是平均之後的值可能與 GPS 會有些微的差距，因此才會造成空間校正後的 InSAR 與 GPS 的相關性不是 1。

本研究所擬合的 InSAR 時間序列震後變形從 5.5 節的結果來看，整體而言，升軌影像的標準差都比降軌影像小。原因可能是因為升軌影像在同樣的兩年時間裡影像數量較多，因此干涉幅數多；降軌影像間隔日期較長，影像數量較少，干涉幅數就少，因此導致降軌影像的標準差較大。此外，還有一個可能原因是降軌影像的時間基線是 72 天，升軌影像是 60 天，放寬降軌影像的時間基線門檻值可能也造成較多的誤差。

InSAR 時間序列震後變形與 GPS 時間序列震後變形，在 GS30 測站與 CKSV 測站兩者結果滿相似，原因可能是因為不管在升軌影像與降軌影像，此兩測站的 InSAR 點數量都有超過 100 個點。在 GS73 測站升軌影像結果與 GPS 較相似，但降軌影像有些差距，原因是因為此處升軌影像 InSAR 點資料有 33 個點，但降軌影

像卻只有 3 個點，因此與 GPS 的差異較大。

在資料處理上，由於 GPS 是每日解，而 SAR 影像是 12 天一張，SAR 影像在時間尺度上本就比 GPS 差，因此這可能是造成兩者在時間序列上差異的原因。此外，單張 SAR 影像被干涉的幅數越多，此張 SAR 影像所得到的結果也會越準確。因此在 InSAR 時間序列的時間段裡，越靠近起始與結束日期的影像會越不準確。例如降軌影像的 ZEND 與 GS79 測站越靠近中間的結果與 GPS 的結果較相近，可能是由此原因導致。



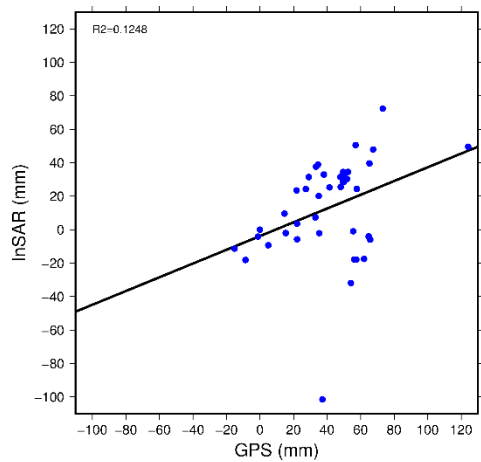


圖 6.6 未校正升軌影像與 GPS 的相關性圖

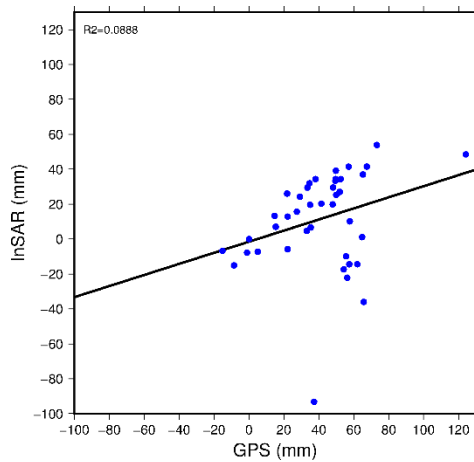


圖 6.7 大氣校正後升軌影像與 GPS 的相關性圖

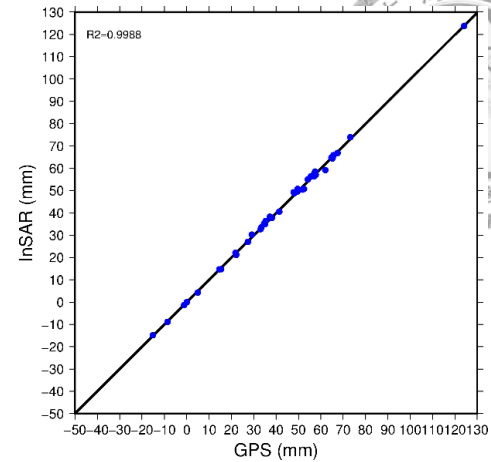


圖 6.8 空間校正後升軌影像與 GPS 的相關性圖

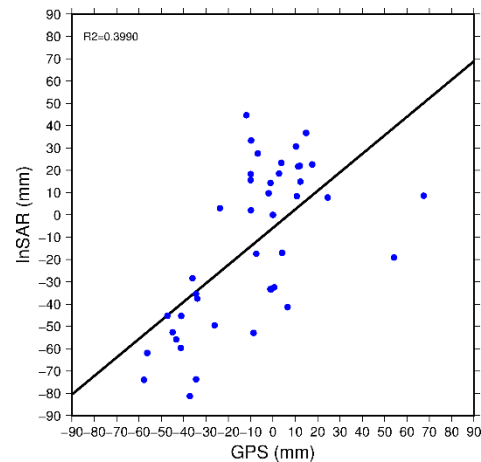


圖 6.9 未校正降軌影像與 GPS 的相關性圖

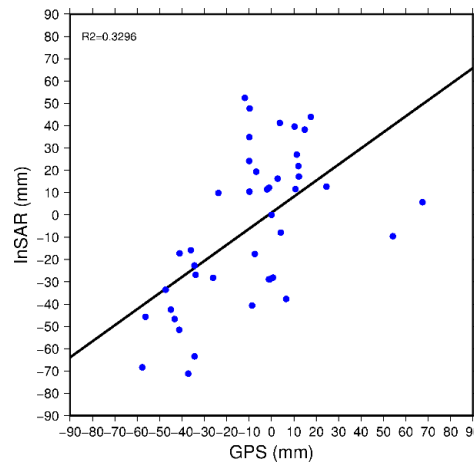


圖 6.10 大氣校正後降軌影像與 GPS 的相關性

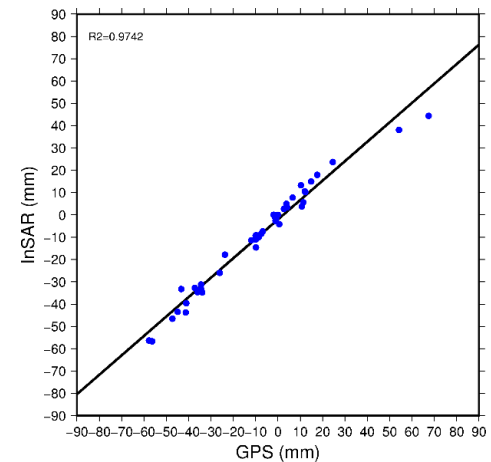


圖 6.11 空間校正後降軌影像與 GPS 的相關性

圖

圖

第七章、 結論



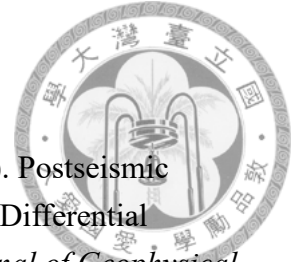
震後變形對於了解斷層活動行為非常重要，但是前人對於利用 InSAR 時間序列觀測震後變形的的方法不一。本研究整理了近 20 年的 InSAR 時間序列觀測震後變形的文獻，將前人的研究方法歸納成七大類，認為前人所得到的 InSAR 震後變形其實不一定是所謂的震後變形。

因此本研究透過美濃地震的震後變形，針對大氣校正方式、InSAR 結果在空間上的修正、以及 InSAR 時間序列擬合三個環節，進行檢驗。在大氣校正方式，透過 GMTSAR 的大氣校正方法所得到的 InSAR 結果與 GPS 的均方根最小，因此認為 GMTSAR 大氣校正方法能有效減低大氣的效應。

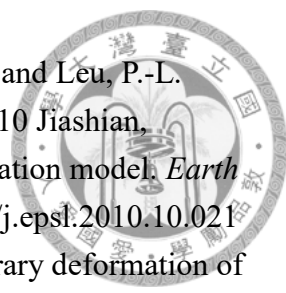
在空間上的修正，利用與 GPS 的差值進行內插、線性與超平面的校正，結果是透過差值內插的均方根最小，因此認為透過差值內插的空間校正方法可以減少電離層的效應及基線與軌道誤差。


在 InSAR 時間序列擬合部分，先將時間序列結果減掉地表長期速率，再擬合季節性變化及震後變形，最後萃取出 InSAR 震後變形與 GPS 震後變形進行比較。最後由 GPS 與 InSAR 震後變形結果認為，震後變形發生在台南台地、小崗山斷層以西及左鎮斷層周圍。整體而言，GPS 與 InSAR 的結果極為相似，因此本研究認為 GMTSAR 的大氣校正方法、差值內插的空間校正方法與時間序列擬合，是可以得到更精確的 InSAR 震後變形。

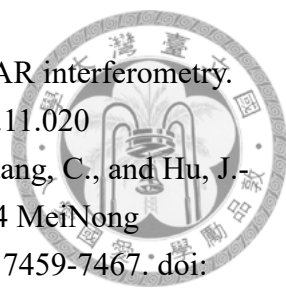
參考文獻




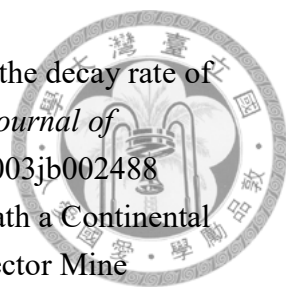
- Atzori, S., Manunta, M., Fornaro, G., Ganas, A., and Salvi, S. (2008). Postseismic displacement of the 1999 Athens earthquake retrieved by the Differential Interferometry by Synthetic Aperture Radar time series. *Journal of Geophysical Research*, 113(B9). doi: 10.1029/2007jb005504
- Bürgmann, R., Segall, P., Lisowski, M., and Svarc, J. (1997). Postseismic strain following the 1989 Loma Prieta earthquake from GPS and leveling measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 4933-4955. doi: 10.1029/96jb03171
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383. doi: 10.1109/tgrs.2002.803792
- Biggs, J., Burgmann, R., Freymueller, J. T., Lu, Z., Parsons, B., Ryder, I., Schmalzle, G., and Wright, T. (2009). The postseismic response to the 2002 M7.9 Denali Fault earthquake: constraints from InSAR 2003-2005. *Geophysical Journal International*, 176(2), 353-367. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03932.x
- Bonilla, M. G. (1975). A Review of Recently Active Faults in Taiwan. *U.S. Geological Survey Open-File Report*.
- Brown, D., Alvarez-Marron, J., Schimmel, M., Wu, Y. M., and Camanni, G. (2012). The structure and kinematics of the central Taiwan mountain belt derived from geological and seismicity data. *Tectonics*, 31(5), n/a-n/a. doi: 10.1029/2012tc003156
- Cetin, E., Meghraoui, M., Cakir, Z., Akoglu, A. M., Mimouni, O., and Chebbah, M. (2012). Seven years of postseismic deformation following the 2003 Mw = 6.8 Zemmouri earthquake (Algeria) from InSAR time series. *Geophysical Research Letters*, 39(10), n/a-n/a. doi: 10.1029/2012gl051344
- Chen, C. W., and Zebker, H. A. (2002). Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709-1719.
- Chen, Y.-G., and Liu, T.-K. (2000). Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan. *Quaternary Science Reviews*, 19, 923-930.
- Ching, K.-E., Hsieh, M.-L., Johnson, K. M., Chen, K.-H., Rau, R.-J., and Yang, M. (2011). Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. *Journal of Geophysical Research*, 116(B8). doi: 10.1029/2011jb008242

- 
- Ching, K.-E., Johnson, K. M., Rau, R.-J., Chuang, R. Y., Kuo, L.-C., and Leu, P.-L. (2011). Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1-2), 78-86. doi: 10.1016/j.epsl.2010.10.021
- Ching, K.-E., Rau, R.-J., Lee, J.-C., and Hu, J.-C. (2007). Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995–2005. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4), 601-619. doi: 10.1016/j.epsl.2007.08.017
- Copley, A. (2014). Postseismic afterslip 30 years after the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake: observations and implications for the geological evolution of thrust belts. *Geophysical Journal International*, 197(2), 665-679. doi: 10.1093/gji/ggu023
- Donnellan, A., Parker, J. W., and Peltzer, G. (2002). Combined GPS and InSAR models of postseismic deformation from the Northridge earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 159(10), 2261–2270.
- ElGharbawi, T., and Tamura, M. (2014). Measuring deformations using SAR interferometry and GPS observables with geodetic accuracy: Application to Tokyo, Japan. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 88, 156-165.
- ElGharbawi, T., and Tamura, M. (2015). Coseismic and postseismic deformation estimation of the 2011 Tohoku earthquake in Kanto Region, Japan, using InSAR time series analysis and GPS. *Remote Sensing of Environment*, 168, 374-387. doi: 10.1016/j.rse.2015.07.016
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2000). Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 8-20.
- Fitch, T. J., and Scholz, C. H. (1971). Mechanism of underthrusting in southwest Japan: a model of convergent plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 76, 7260-7292.
- Freed, A. M., Bürgmann, R., Calais, E., Freymueller, J., and Hreinsdóttir, S. (2006). Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research*, 111(B1). doi: 10.1029/2005jb003894
- Gabriel, A. K., and Goldstein, R. M. (1988). Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, 9(5), 857-872. doi: 10.1080/01431168808954901
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., and Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation

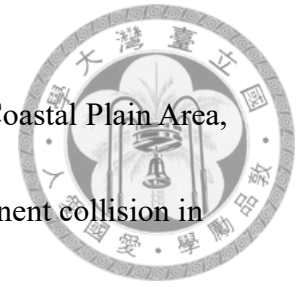
- 
- changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183-9191. doi: 10.1029/JB094iB07p09183
- Ge, L., Han, S., and Rizos, C. (2000). Interpolation of GPS results incorporating geophysical and InSAR information. *Earth Planets Space*, 52, 999-1002.
- Gens, R., and Van Genderen, J. L. (1996). Review Article SAR interferometry—issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1803-1835. doi: 10.1080/01431169608948741
- Goldstein, R. M., and Werner, C. L. (1997). Radar ice motion interferometry. in *Proc. 3rd ERS Symposium*, 2, 969-972.
- Graham, L. C. (1974). Synthetic interferometric radar for topographic Mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62(6), 763-768.
- Gray, A. L., and Farris-Manning, P. J. (1993). Repeat-Pass Interferometry with Airborne Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(1), 180-191.
- Hanssen, R. F., Weckwerth, T. M., Zebker, H. A., and Klees, R. (1999). High-Resolution Water Vapor Mapping from Interferometric Radar Measurements. *Science*, 283(5406), 1297-1299.
- Heki, K., Miyazaki, S., and Tsuji, H. (1997). Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench. *Nature*, 386.
- Ho, C. S. (1986). A synthesis of the geologic evolution of Taiwan. *Tectonophysics*, 125, 1-16.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23). doi: 10.1029/2004gl021737
- Hsu, Y.-J., Yu, S.-B., Kuo, L.-C., Tsai, Y.-C., and Chen, H.-Y. (2011). Coseismic deformation of the 2010 Jiashian, Taiwan earthquake and implications for fault activities in southwestern Taiwan. *Tectonophysics*, 502(3-4), 328-335. doi: 10.1016/j.tecto.2011.02.005
- Hu, J.-C., Angelier, J., and Yu, S.-B. (1997). An interpretation of the active deformation of southern Taiwan based on numerical simulation and GPS studies. *Tectonophysics*, 274, 145-169.
- Hu, J.-C., Hou, C.-S., Shen, L.-C., Chan, Y.-C., Chen, R.-F., Huang, C., Rau, R.-J., Chen, K. H.-H., Lin, C.-W., Huang, M.-H., and Nien, P.-F. (2007). Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(3), 287-302. doi: 10.1016/j.jseaes.2006.07.020
- Huang, M.-H., Hu, J.-C., Ching, K.-E., Rau, R.-J., Hsieh, C.-S., Pathier, E., Fruneau, B., and Deffontaines, B. (2009). Active deformation of Tainan tableland of

- 
- southwestern Taiwan based on geodetic measurements and SAR interferometry. *Tectonophysics*, 466(3-4), 322-334. doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.020
- Huang, M.-H., Tung, H., Fielding, E. J., Huang, H.-H., Liang, C., Huang, C., and Hu, J.-C. (2016). Multiple fault slip triggered above the 2016 Mw6.4 Meinong earthquake in Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7459-7467. doi: 10.1002/2016gl069351
- Huang, M. H., and Huang, H. H. (2018). The Complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake in East Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 45(24), 13,249-213,257. doi: 10.1029/2018gl080821
- Huang, S.-T., Yang, K.-M., Hung, J.-H., Wu, J.-C., Ting, H.-H., Mei, W.-W., Hsu, S.-H., and Lee, M. (2004). Deformation Front Development at the Northeast Margin of the Tainan Basin, Tainan–Kaohsiung Area, Taiwan. *Marine Geophysical Researches*, 25(1-2), 139-156. doi: 10.1007/s11001-005-0739-z
- Kenner, S. J., and Segall, P. (2000). Postseismic deformation following the 1906 San Francisco earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B6), 13195-13209. doi: 10.1029/2000jb900076
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Angelier, J., and Deffontaines, B. (2001). Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan. *Tectonophysics*, 333(1), 323-345.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Deffontaines, B., Angelier, J., Chu, H. T., and Lee, C. T. (1999). Geometry and Quaternary kinematics of fold-and-thrust units of southwestern Taiwan. *Tectonics*, 18(6), 1198-1223. doi: 10.1029/1999tc900036
- Lanari, R., Berardino, P., Bonano, M., Casu, F., Manconi, A., Manunta, M., Manzo, M., Pepe, A., Pepe, S., Sansosti, E., Solaro, G., Tizzani, P., and Zeni, G. (2010). Surface displacements associated with the L'Aquila 2009 Mw 6.3 earthquake (central Italy): New evidence from SBAS-DInSAR time series analysis. *Geophysical Research Letters*, 37(20), n/a-n/a. doi: 10.1029/2010gl044780
- Le Béon, M., Huang, M.-H., Suppe, J., Huang, S.-T., Pathier, E., Huang, W.-J., Chen, C.-L., Fruneau, B., Baize, S., Ching, K.-E., and Hu, J.-C. (2017). Shallow geological structures triggered during the Mw 6.4 Meinong earthquake, southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(5), 663-681. doi: 10.3319/tao.2017.03.20.02
- Lee, S. J., Yeh, T. Y., and Lin, Y. Y. (2016). Anomalously Large Ground Motion in the 2016ML 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake: A Synergy Effect of Source Rupture and Site Amplification. *Seismological Research Letters*, 87(6), 1319-1326. doi: 10.1785/0220160082
- Li, Z., Fielding, E. J., and Cross, P. (2009). Integration of InSAR Time-Series Analysis and Water-Vapor Correction for Mapping Postseismic Motion After the 2003

- 
- Bam (Iran) Earthquake. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(9), 3220-3230. doi: 10.1109/tgrs.2009.2019125
- Liang, C., Agram, P., Simons, M., and Fielding, E. J. (2019). Ionospheric Correction of InSAR Time Series Analysis of C-band Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9), 6755-6773. doi: 10.1109/tgrs.2019.2908494
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., and Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation. *John Wiley & Sons*.
- Marone, C. J., Scholtz, C. H., and Bilham, R. (1991). On the mechanics of earthquake afterslip. *Journal of Geophysical Research*, 96(B5), 8441-8452.
- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., and Adragna, F. (1994). Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 369, 227-230.
- Massonnet, D., and Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36, 441-500.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T. (1993). The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- Massonnet, D., Thatcher, W., and Vadon, H. (1996). Detection of postseismic fault-zone collapse following the Landers earthquake. *Nature*, 382, 612-616.
- Motagh, M., Beavan, J., Fielding, E. J., and Haghshenas, M. (2014). Postseismic Ground Deformation Following the September 2010 Darfield, New Zealand, Earthquake From TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, and ALOS InSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1), 186-190. doi: 10.1109/lgrs.2013.2251858
- Neely, W. R., Borsa, A. A., and Silverii, F. (2019). GInSAR: A cGPS Correction for Enhanced InSAR Time Series. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-11. doi: 10.1109/tgrs.2019.2934118
- Nikolaidis, R. (2002). Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system. *Ph.D. dissertation, UC San Diego*.
- Nur, A., and Mavko, G. (1974). Postseismic Viscoelastic Rebound. *Science*, 183(4121), 204-206.
- Okada, A., and Nagata, T. (1953). Land Deformation of the Neighbourhood of Muroto Point after the Ncnkaido Great Earthquake in 1946. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 31(2), 169 - 177.
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F., and Hudnut, K. (1996). Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow. *Science*, 273(5279), 1202-1204.
- Perfettini, H., and Avouac, J. P. (2004). Postseismic relaxation driven by brittle creep: A

- 
- possible mechanism to reconcile geodetic measurements and the decay rate of aftershocks, application to the Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B2). doi: 10.1029/2003jb002488
- Pollitz, F. F., Wicks, C., and Thatcher, W. (2001). Mantle Flow Beneath a Continental Strike-Slip Fault: Postseismic Deformation After the 1999 Hector Mine Earthquake. *Science*, 293(5536), 1814-1818. doi: 10.1126/science.1061361
- Rogers, A. E. E., and Ingalls, R. P. (1969). Venus: mapping the surface reflectivity by radar interferometry. *Science*, 165(3895), 797-799. doi: 10.1126/science.165.3895.797
- Ryder, I., Parsons, B., Wright, T. J., and Funning, G. J. (2007). Post-seismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations and modelling. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1009-1027. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03312.x
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., and Wessel, P. (2011). GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. *Scripps Institution of Oceanography Technical Report, UC San Diego*.
- Savage, J. C., Lisowski, M., and Svarc, J. L. (1994). Postseismic deformation following the 1989 (M= 7.1) Loma Prieta, California, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B7), 13757-13765. doi: 10.1029/94jb00507
- Schmidt, D. A., and Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9). doi: 10.1029/2002jb002267
- Segall, P., and Davis, J. L. (1997). GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 301-336.
- Shen, Z.-K., Jackson, D. D., Feng, Y., Cline, M., Kim, M., Fang, P., and Bock, Y. (1994). Postseismic Deformation Following the Landers Earthquake, California, 28 June 1992. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 780-791.
- Shiffler, R. E. (1988). Maximum Z scores and outliers. *The American Statistician*, 42(1), 79-80. doi: 10.1080/00031305.1988.10475530
- Shyu, J. B. H., Chuang, Y.-R., Chen, Y.-L., Lee, Y.-R., and Cheng, C.-T. (2016). A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(3). doi: 10.3319/tao.2015.11.27.02(tem)
- Sowter, A., Bin Che Amat, M., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., and Alshammari, L. (2016). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 230-242. doi:

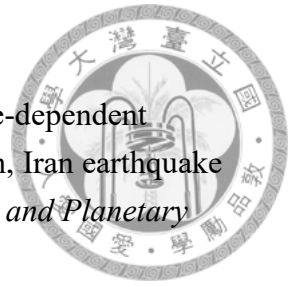
- 10.1016/j.jag.2016.06.015
- Sun, S.-C. (1964). Photogeologic Study Of The Tainan-Kaohsiung Coastal Plain Area, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, 3, 39-51.
- Teng, L. S. (1990). Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 183, 57-76.
- Thatcher, W. (1984). The earthquake deformation cycle at the Nankai Trough, southwest Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B5), 3087-3101. doi: 10.1029/JB089iB05p03087
- Thatcher, W. (1993). The earthquake cycle and its role in the long-term deformation on the continental lithosphere. *Annals of Geophysics*, 36(2), 13-24.
- Thatcher, W., and Rundle, J. B. (1984). A viscoelastic coupling model for the cyclic deformation due to periodically repeated Earthquakes at subduction zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B9), 7631-7640. doi: 10.1029/JB089iB09p07631
- Tong, X., and Schmidt, D. (2016). Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing of Environment*, 186, 405-415. doi: 10.1016/j.rse.2016.09.008
- Toyokuni, G., Zhao, D., and Chen, K. H. (2016). Tomography of the source zone of the 2016 South Taiwan earthquake. *Geophysical Journal International*, 207(1), 635-643. doi: 10.1093/gji/ggw304
- Tsuboi, C. (1931). Investigation on the Deformation of the Earth's Crust in the Tango District Connected with the Tango Earthquake of 1927. (Part III). *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*, 9(4), 423 - 434.
- Tymofyeyeva, E., and Fialko, Y. (2015). Mitigation of atmospheric phase delays in InSAR data, with application to the eastern California shear zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(8), 5952-5963. doi: 10.1002/2015jb011886
- Wang, C., Ding, X., Li, Q., Shan, X., Zhu, W., Guo, B., and Liu, P. (2015). Coseismic and postseismic slip models of the 2011 Van earthquake, Turkey, from InSAR, offset-tracking, MAI, and GPS observations. *Journal of Geodynamics*, 91, 39-50. doi: 10.1016/j.jog.2015.08.006
- Wang, Y.-J., Chan, C.-H., Lee, Y.-T., Ma, K.-F., Shyu, J. B. H., Rau, R.-J., and Cheng, C.-T. (2016). Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(3). doi: 10.3319/tao.2016.05.03.01(tem)
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., and Genrich, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8),




- 18057-18070. doi: 10.1029/97jb01378
- Wen, S., Yeh, Y.-L., Chang, Y.-Z., and Chen, C.-H. (2017). The seismogenic process of the 2016 Meinong earthquake, southwest Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(5), 651-662. doi: 10.3319/tao.2017.02.17.01
- Wen, Y., Li, Z., Xu, C., Ryder, I., and Bürgmann, R. (2012). Postseismic motion after the 2001 MW7.8 Kokoxili earthquake in Tibet observed by InSAR time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B8), n/a-n/a. doi: 10.1029/2011jb009043
- Yu, C., Li, Z., and Penna, N. T. (2018). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, 204, 109-121. doi: 10.1016/j.rse.2017.10.038
- Yu, C., Li, Z., Penna, N. T., and Crippa, P. (2018). Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi: 10.1029/2017jb015305
- Yu, C., Penna, N. T., and Li, Z. (2017). Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 2008-2025. doi: 10.1002/2016jd025753
- Yu, S.-B., Chen, H.-Y., and Kuo, L.-C. (1997). Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274, 41-59.
- Yu, S.-B., Hsu, Y.-J., Kuo, L.-C., Chen, H.-Y., and Liu, C.-C. (2003). GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 108(B11). doi: 10.1029/2003jb002396
- Zebker, H. A. (2000). Studying the earth with Interferometric Radar. *COMPUTING IN SCIENCE and ENGINEERING*, 2(3), 52 - 60. doi: 10.1109/5992.841796
- Zebker, H. A., and Goldstein, R. M. (1986). Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91(B5), 4993-4999. doi: 10.1029/JB091iB05p04993
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., and Werner, C. L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10), 19617-19634. doi: 10.1029/94jb01179
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., and Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), 7547-7563. doi: 10.1029/96jb03804
- Zebker, H. A., and Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 950 - 959. doi:

10.1109/36.175330

- Zhou, Y., Thomas, M. Y., Parsons, B., and Walker, R. T. (2018). Time-dependent postseismic slip following the 1978 M w 7.3 Tabas-e-Golshan, Iran earthquake revealed by over 20 years of ESA InSAR observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 483, 64-75. doi: 10.1016/j.epsl.2017.12.005
- Zisk, S. H. (1972). A new, earth-based radar technique for the measurement of lunar topography. *The moon*, 4(3-4), 296-306.
- 王鑫 (1988)。地形學。聯經出版社，共 356 頁。
- 石再添、鄧國雄 (1983)。潮州斷層帶的活斷層與地形。國立臺灣師範大學地理學研究，17-34。
- 李元希、謝凱旋、黃敦友、何信昌、陳華玟、張徽正 (1997)。臺灣西南部前陸盆地的演化。第四屆地層研討會-臺灣西南部地區地質研討會大會手冊。
- 周鋒泯 (2009)。應用永久散射體差分干涉法觀測台灣北部地區之地表變形。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 91 頁。
- 林啟文、張徽正、陳勉銘、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000)。活動斷層概論，五十萬分之一台灣活動斷層分佈圖說明，第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 頁。
- 林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009)。臺灣東部與南部的活動斷層，二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號，共 178 頁。
- 林啟文、陳文山、饒瑞鈞 (2007)。臺灣活動斷層調查的近期發展。經濟部中央地質調查所特刊，第 18 號，85-110 頁。
- 耿文溥 (1967)。臺灣南部甲仙及旗山間之地質。臺灣省地質調查所彙刊，第 19 號，1-13 頁。
- 張家鳳 (2005)。旗山斷層之淺層震測探勘。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 68 頁。
- 張麗旭、周敏、陳培源 (1947)。民國三十五年十二月五日之台南地震。臺灣省地質調查所彙刊，1，11-23 頁。
- 陳文山、李錫堤、石瑞銓、楊小青、楊志成、顏一勤、劉力豪、張徽正、侯進雄 (2004)。新化斷層的構造特性與古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，111-119 頁。
- 陳文山、陳勇全、游能悌、顏一勤、楊志成、石同生 (2005)。潮州斷層沿線的地層與地形特性—重新檢討斷層的構造特性與位置。經濟部中央地質調查所特刊，第 16 期，75-90 頁。
- 陳文山、黃能偉、游能悌、周飛宏、顏一勤、宋時驊、楊志成、楊小青 (2005)。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫—槽溝開挖與古地震研究計畫 (4/5)—旗山與龍船斷層條帶地質圖說明書。經濟部中央地質調查所報告第 94-08-2 號，共 48 頁。



- 
- 陳文山、黃能偉、楊志成 (2011)。臺灣西南部更新世沉積層序特性與前陸盆地演化。經濟部中央地質調查所特刊，第 25 號，1-38 頁。
- 陳延宗 (2007)。以反射震測法研究左鎮斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 90 頁。
- 陳柏村 (2005)。旗山斷層南段變形特性研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 125 頁。
- 陳柏村、林啟文、江婉綺、劉彥求、林慶偉 (2009)。臺灣南部旗山斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 22 號，63-98 頁。
- 楊志成、顏一勤、宋時驊、黃能偉、陳勇全、陳文山、陳于高、吳樂群、張徽正、侯進雄、林啟文 (2005)。六甲斷層近萬年來滑移速率之探討。經濟部中央地質調查所特刊，第 16 期，1-16 頁。
- 經濟部中央地質調查所、社團法人中華民國地質學會 (2017)。重要活動斷層構造特性調查二期—活動斷層近地表構造特性調查(3/4)。經濟部中央地質調查所期末報告，共 108 頁。
- 盧玉芳 (2007)。以雷達干涉技術監測雲林地層下陷。國立交通大學土木工程學系碩士論文，共 106 頁。
- 謝嘉聲 (2006)。以雷達干涉技術偵測地表變形之研究。國立交通大學土木工程學系博士論文。
- 饒瑞鈞 (2017)。2016 年高雄美濃地震-震後科學調查。科技部，共 202 頁。

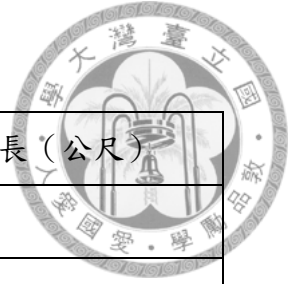
附錄一：雷達影像基線資料



表 A.1 升軌影像日期

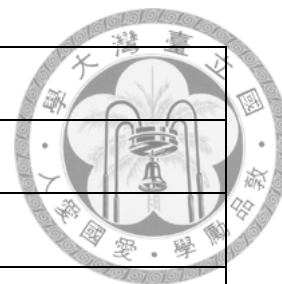
代號	日期	代號	日期	代號	日期
1	20160214	21	20161128	41	20170807
2	20160309	22	20161210	42	20170819
3	20160321	23	20161222	43	20170831
4	20160414	24	20170103	44	20170912
5	20160508	25	20170115	45	20170924
6	20160520	26	20170127	46	20171006
7	20160601	27	20170208	47	20171018
8	20160613	28	20170220	48	20171030
9	20160707	29	20170304	49	20171111
10	20160719	30	20170316	50	20171123
11	20160731	31	20170328	51	20171205
12	20160812	32	20170409	52	20171217
13	20160824	33	20170421	53	20171229
14	20160905	34	20170503	54	20180110
15	20160917	35	20170515	55	20180122
16	20160929	36	20170527	56	20180203
17	20161011	37	20170608	57	20180215
18	20161023	38	20170702	58	20180227
19	20161104	39	20170714	59	20180311
20	20161116	40	20170726	60	20180323

表 A.2 升軌影像基線長表

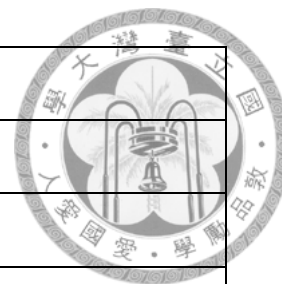


主影像日期 (年月日)	副影像日期 (年月日)	垂直基線長 (公尺)
20160214	20160309	49.5064
20160214	20160321	-16.5892
20160214	20160414	-51.3890
20160309	20160321	-66.0950
20160309	20160508	-77.0605
20160321	20160414	-34.7997
20160321	20160508	-10.9654
20160321	20160520	77.4968
20160414	20160508	23.8332
20160414	20160601	53.9453
20160414	20160613	12.7779
20160508	20160520	88.4596
20160508	20160601	30.1121
20160508	20160613	-11.0553
20160508	20160707	16.6641
20160520	20160601	-58.3493
20160520	20160613	-99.5178
20160520	20160707	-71.7971
20160520	20160719	-17.9254
20160601	20160613	-41.1687
20160601	20160707	-13.4478
20160601	20160719	40.4242
20160601	20160731	-1.4398

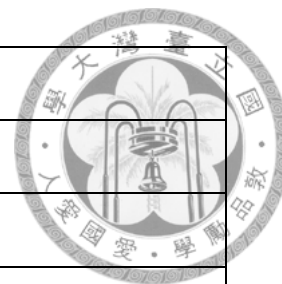
20160613	20160707	27.7207
20160613	20160719	81.5924
20160613	20160731	39.7287
20160613	20160812	28.4258
20160707	20160719	53.8706
20160707	20160731	12.0082
20160707	20160812	0.7048
20160707	20160824	-53.3969
20160707	20160905	66.6958
20160719	20160731	-41.8614
20160719	20160812	-53.1652
20160719	20160905	12.8251
20160719	20160917	2.3254
20160731	20160812	-11.3021
20160731	20160824	-65.4056
20160731	20160905	54.6898
20160731	20160917	44.1434
20160731	20160929	7.9917
20160812	20160824	-54.1006
20160812	20160905	65.9900
20160812	20160917	55.7566
20160812	20160929	19.2946
20160812	20161011	-14.7710
20160824	20160929	73.3950



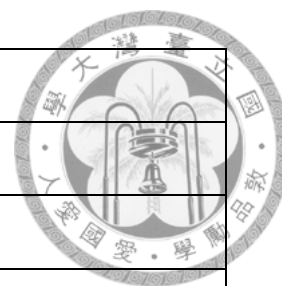
20160824	20161011	39.3296
20160824	20161023	27.2023
20160905	20160917	-10.3814
20160905	20160929	-46.6968
20160905	20161011	-80.7637
20160905	20161104	-67.7494
20160917	20160929	-35.9566
20160917	20161011	-70.2309
20160917	20161023	-82.5117
20160917	20161104	-57.0967
20160917	20161116	-11.8089
20160929	20161011	-34.0669
20160929	20161023	-46.1951
20160929	20161104	-21.0527
20160929	20161116	24.2029
20160929	20161128	41.5110
20161011	20161023	-12.1286
20161011	20161104	13.0141
20161011	20161116	58.2703
20161011	20161128	75.5786
20161011	20161210	51.4941
20161023	20161104	25.1430
20161023	20161116	70.3998
20161023	20161128	87.7081



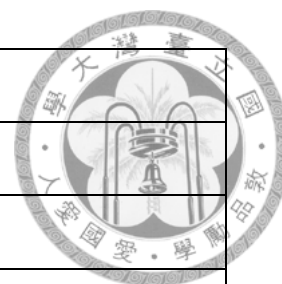
20161023	20161210	63.6233
20161023	20161222	33.7024
20161104	20161116	45.2571
20161104	20161128	62.5654
20161104	20161210	38.4805
20161104	20161222	8.5594
20161104	20170103	6.2257
20161116	20161128	17.3083
20161116	20161210	-6.7767
20161116	20161222	-36.6981
20161116	20170103	-39.0317
20161116	20170115	-20.9632
20161128	20161210	-24.0853
20161128	20161222	-54.0072
20161128	20170103	-56.3406
20161128	20170115	-38.2720
20161128	20170127	-33.1781
20161210	20161222	-29.9218
20161210	20170103	-32.2551
20161210	20170115	-14.1866
20161210	20170127	-9.0926
20161210	20170208	4.0475
20161222	20170103	-2.3333
20161222	20170115	15.7352



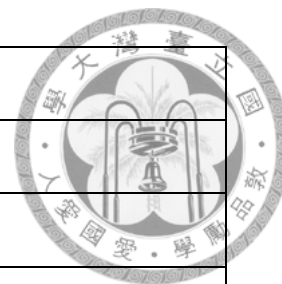
20161222	20170127	20.8292
20161222	20170208	33.9694
20161222	20170220	29.1613
20170103	20170115	18.0684
20170103	20170127	23.1624
20170103	20170208	36.3023
20170103	20170220	31.4945
20170103	20170304	70.6051
20170115	20170127	5.0939
20170115	20170208	18.2340
20170115	20170220	13.4261
20170115	20170304	52.6072
20170115	20170316	-27.6238
20170127	20170208	13.1401
20170127	20170220	8.3322
20170127	20170304	47.5134
20170127	20170316	-32.8206
20170127	20170328	8.5122
20170208	20170220	-4.8078
20170208	20170304	34.3730
20170208	20170316	-45.9336
20170208	20170328	-4.6009
20170208	20170409	-79.1685
20170220	20170304	39.1812

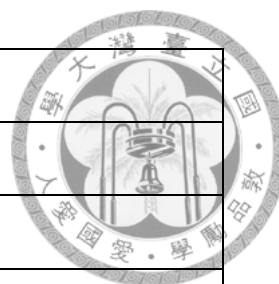


20170220	20170316	-40.7340
20170220	20170328	0.5990
20170220	20170409	-73.9686
20170220	20170421	-86.7097
20170304	20170316	-79.7120
20170304	20170328	-38.3787
20170316	20170328	41.3326
20170316	20170409	-33.2348
20170316	20170421	-45.9758
20170316	20170503	-50.8307
20170316	20170515	-42.1556
20170328	20170409	-74.5675
20170328	20170421	-87.3085
20170328	20170503	-92.1636
20170328	20170515	-83.4883
20170328	20170527	19.9590
20170409	20170421	-12.7402
20170409	20170503	-17.5937
20170409	20170515	-8.9208
20170409	20170527	94.5193
20170409	20170608	31.2430
20170421	20170503	-4.8534
20170421	20170515	3.8193
20170421	20170608	43.9833



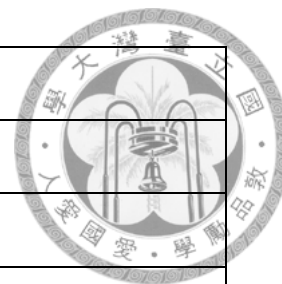
20170503	20170515	8.6736
20170503	20170608	48.8381
20170503	20170702	76.0365
20170515	20170608	40.1636
20170515	20170702	67.3614
20170515	20170714	67.0921
20170527	20170608	-63.2753
20170527	20170702	-36.0776
20170527	20170714	-36.3468
20170527	20170726	-23.3191
20170608	20170702	27.1981
20170608	20170714	26.9286
20170608	20170726	39.9567
20170608	20170807	37.0288
20170702	20170714	-0.2695
20170702	20170726	12.7586
20170702	20170807	9.8289
20170702	20170819	-9.7479
20170702	20170831	-34.7187
20170714	20170726	13.0284
20170714	20170807	10.0987
20170714	20170819	-9.4785
20170714	20170831	-34.4493
20170714	20170912	-59.3510



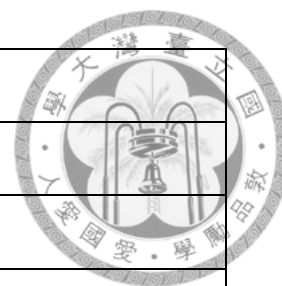


20170726	20170807	-2.9297
20170726	20170819	-22.5067
20170726	20170831	-47.4775
20170726	20170912	-72.3790
20170726	20170924	-19.4121
20170807	20170819	-19.5767
20170807	20170831	-44.5475
20170807	20170912	-69.4487
20170807	20170924	-16.4821
20170807	20171006	27.9952
20170819	20170831	-24.9707
20170819	20170912	-49.8724
20170819	20170924	3.0946
20170819	20171006	47.5724
20170819	20171018	62.2893
20170831	20170912	-24.9006
20170831	20170924	28.0654
20170831	20171006	72.5420
20170831	20171018	87.2589
20170831	20171030	-13.7963
20170912	20170924	52.9663
20170912	20171006	97.4433
20170912	20171030	11.1039
20170912	20171111	62.1543

20170924	20171006	44.4779
20170924	20171018	59.1948
20170924	20171030	-41.8640
20170924	20171111	9.1872
20170924	20171123	-28.0481
20171006	20171018	14.7169
20171006	20171030	-86.3427
20171006	20171111	-35.2910
20171006	20171123	-72.5267
20171006	20171205	68.2668
20171018	20171111	-50.0089
20171018	20171123	-87.2452
20171018	20171205	53.5501
20171018	20171217	28.0180
20171030	20171111	51.0522
20171030	20171123	13.8159
20171111	20171123	-37.2369
20171111	20171217	78.0281
20171111	20180110	13.8264
20171123	20180110	51.0633
20171123	20180122	7.1051
20171205	20171217	-25.5329
20171205	20171229	3.3559
20171205	20180110	-89.7354



20171205	20180203	-98.4412
20171217	20171229	28.8889
20171217	20180110	-64.2024
20171217	20180203	-72.9082
20171217	20180215	-66.7477
20171229	20180110	-93.0919
20171229	20180215	-95.6370
20171229	20180227	-98.8133
20180110	20180122	-43.9585
20180110	20180203	-8.7055
20180110	20180215	-2.5449
20180110	20180227	-5.7212
20180110	20180311	24.5151
20180122	20180203	35.2526
20180122	20180215	41.4132
20180122	20180227	38.2370
20180122	20180311	68.4731
20180122	20180323	86.3164
20180203	20180215	6.1605
20180203	20180227	2.9843
20180203	20180311	33.2206
20180203	20180323	51.0641
20180215	20180227	-3.1762
20180215	20180311	27.0602



20180215	20180323	44.9037
20180227	20180311	30.2364
20180227	20180323	48.0800
20180311	20180323	17.8435

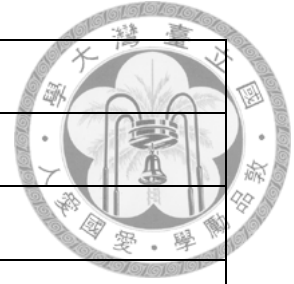
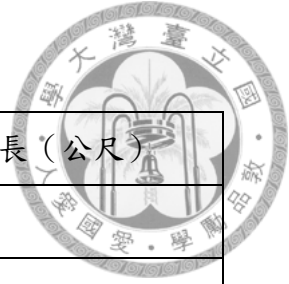


表 A.3 降軌影像日期



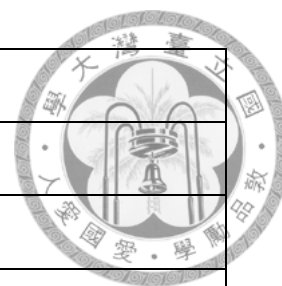
代號	日期	代號	日期
1	20160216	23	20170610
2	20160228	24	20170622
3	20160323	25	20170704
4	20160416	26	20170716
5	20160510	27	20170728
6	20160603	28	20170809
7	20160627	29	20170821
8	20160721	30	20170902
9	20160814	31	20170914
10	20160907	32	20171008
11	20161001	33	20171020
12	20161025	34	20171101
13	20161118	35	20171113
14	20161212	36	20171207
15	20170105	37	20171219
16	20170129	38	20171231
17	20170222	39	20180112
18	20170411	40	20180205
19	20170423	41	20180217
20	20170505	42	20180301
21	20170517	43	20180313
22	20170529	44	20180325

表 A.4 降軌影像基線長表

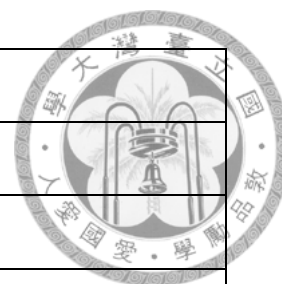


主影像日期 (年月日)	副影像日期 (年月日)	垂直基線長 (公尺)
20160216	20160228	23.9071
20160216	20160323	54.8417
20160216	20160416	19.6588
20160228	20160323	30.9406
20160228	20160416	-4.2471
20160228	20160510	-6.6511
20160323	20160416	-35.1860
20160323	20160510	-37.5897
20160323	20160603	4.6740
20160416	20160510	-2.4037
20160416	20160603	39.8608
20160416	20160627	10.8012
20160510	20160603	42.2666
20160510	20160627	13.2052
20160510	20160721	-3.8046
20160603	20160627	-29.0615
20160603	20160721	-46.0731
20160603	20160814	-35.4609
20160627	20160721	-16.8581
20160627	20160814	-6.2500
20160627	20160907	-60.6167
20160721	20160814	10.6128
20160721	20160907	-43.7498

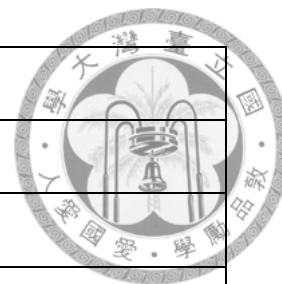
20160721	20161001	65.8672
20160814	20160907	-54.3628
20160814	20161001	55.2543
20160814	20161025	16.9165
20160907	20161025	71.2787
20160907	20161118	86.6535
20161001	20161025	-38.3385
20161001	20161118	-22.9632
20161001	20161212	-21.4423
20161025	20161118	15.3752
20161025	20161212	16.8963
20161025	20170105	-62.1078
20161118	20161212	1.5210
20161118	20170105	-77.4832
20161118	20170129	16.2885
20161212	20170105	-79.0041
20161212	20170129	14.7670
20161212	20170222	-44.6026
20170105	20170129	93.7707
20170105	20170222	34.4020
20170129	20170222	-59.3686
20170129	20170411	-17.6123
20170222	20170411	41.7553
20170222	20170423	31.3111



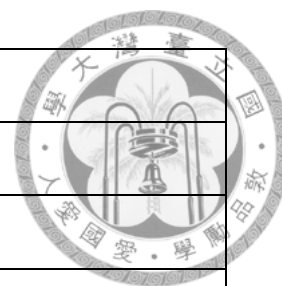
20170222	20170505	55.2894
20170411	20170423	-10.4441
20170411	20170505	13.5353
20170411	20170517	-27.2047
20170411	20170610	-0.6363
20170411	20170622	13.4622
20170423	20170505	23.9794
20170423	20170517	-16.7597
20170423	20170529	-98.1233
20170423	20170610	9.8073
20170423	20170622	23.9058
20170423	20170704	-85.2490
20170505	20170517	-40.7401
20170505	20170610	-14.1718
20170505	20170622	-0.0736
20170517	20170529	-81.3646
20170517	20170610	26.5676
20170517	20170622	40.6660
20170517	20170704	-68.4899
20170517	20170716	-65.7898
20170517	20170728	-3.5932
20170529	20170704	40.6660
20170529	20170716	15.5747
20170529	20170728	77.7706



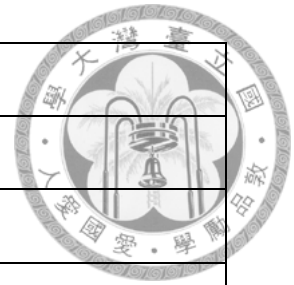
20170529	20170809	81.2753
20170610	20170622	14.0983
20170610	20170704	-95.0575
20170610	20170716	-92.3573
20170610	20170728	-30.1614
20170610	20170809	-26.6580
20170610	20170821	-59.2127
20170622	20170728	-44.2605
20170622	20170809	-40.7557
20170622	20170821	-73.3110
20170622	20170902	-44.5696
20170704	20170716	2.6998
20170704	20170728	64.8950
20170704	20170809	68.3981
20170704	20170821	35.8448
20170704	20170902	64.5852
20170704	20170914	79.6339
20170716	20170728	62.1950
20170716	20170809	65.6993
20170716	20170821	33.1464
20170716	20170902	61.8865
20170716	20170914	76.9350
20170728	20170809	3.5042
20170728	20170821	-29.0509

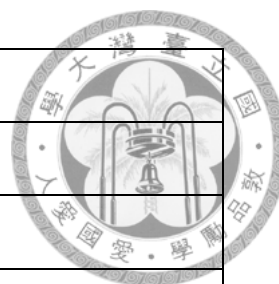


20170728	20170902	-0.3094
20170728	20170914	14.7393
20170728	20171008	14.1143
20170809	20170821	-32.5546
20170809	20170902	-3.8134
20170809	20170914	11.2173
20170809	20171008	10.6102
20170809	20171020	13.8098
20170821	20170902	28.7415
20170821	20170914	43.7904
20170821	20171008	43.1654
20170821	20171020	46.3656
20170821	20171101	59.2364
20170902	20170914	15.0488
20170902	20171008	14.4239
20170902	20171020	17.6240
20170902	20171101	30.4949
20170902	20171113	-16.2461
20170914	20171008	-0.6249
20170914	20171020	2.5752
20170914	20171101	15.4461
20170914	20171113	-31.2955
20171008	20171020	3.2001
20171008	20171101	16.0711



20171008	20171113	-30.6705
20171008	20171207	-67.2387
20171008	20171219	23.8172
20171020	20171101	12.8711
20171020	20171113	-33.8708
20171020	20171207	-70.4392
20171020	20171219	20.6171
20171020	20171231	-36.3066
20171101	20171113	-46.7420
20171101	20171207	-83.3105
20171101	20171219	7.7460
20171101	20171231	-49.1778
20171101	20180112	-27.3953
20171113	20171207	-36.5683
20171113	20171219	54.4879
20171113	20171231	-2.4357
20171113	20180112	19.3466
20171113	20180325	-84.2046
20171207	20171219	91.0561
20171207	20171231	34.1325
20171207	20180112	55.9149
20171207	20180205	69.4376
20171207	20180325	-47.6363
20171219	20171231	-56.9247





20171219	20180112	-35.1417
20171219	20180205	-21.6186
20171219	20180217	14.0373
20171219	20180301	1.3904
20171231	20180112	21.7826
20171231	20180205	35.3056
20171231	20180217	70.9607
20171231	20180301	58.3137
20171231	20180313	-13.6218
20171231	20180325	-81.7687
20180112	20180205	13.5229
20180112	20180217	49.1784
20180112	20180301	36.5314
20180112	20180313	-35.4044
20180205	20180217	35.6554
20180205	20180301	23.0084
20180205	20180313	-48.9272
20180217	20180301	-12.6472
20180217	20180313	-84.5820
20180301	20180313	-71.9331
20180313	20180325	-68.1436

附錄二：GPS 時間序列

