

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

內政部國土測繪中心自行研究報告

中華民國 96 年 12 月

096301080000G2001

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

研究人員

企劃課專員 陳鶴欽

企劃課課長 曾耀賢

控制測量課測量員 林世賢

中心副主任 劉正倫

中心主任 林燕山

內政部國土測繪中心自行研究報告

中華民國 96 年 12 月

MINISTRY OF THE INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT

The Study of Using GPS Measuring Height to Survey
Subsidence in Changhua Area

By

Chen, He-Chin

Tseng, Yao-Hsien

Lin, Shih-Shien

Liu, Jeng-Lun

Lin, Yen-Shan

December 30, 2007

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

	目	次
第一章	前言	1
1-1	研究緣起及目的	1
1-2	研究方法	2
1-3	作業流程及預期成效	6
1-4	各章節概述	7
1-5	作業分工及作業期程	7
第二章	文獻回顧與前人研究	9
2-1	其他國家地層下陷現況	9
2-2	大陸地區地層下陷監測研究	11
2-3	水利署在彰化地區辦理之水準測量成果	13
2-4	彰化員林地區 InSAR 方法辦理地層下陷觀測	16
第三章	作業方法及原理	18
3-1	作業說明	18
3-2	外業資料蒐集	21
3-3	資料處理	28
第四章	成果計算與分析	35
4-1	連續追蹤站位移量	35
4-2	監測站成果分析	42
4-3	水準測量成果分析比較	48
第五章	結論與建議	52
5-1	結論	52
5-2	建議	53
參考文獻		54
附錄 1	本研究使用連續站時間序列	
附錄 2	中央研究院 GPSLAB 網站公佈時間序列	
附錄 3	本研究使用一等水準點監測時間序列	

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

圖 目 次

圖 1-1	INSAR 作業原理圖	3
圖 1-2	水準測量作業原理圖	5
圖 1-3	GPS 作業原理圖	6
圖 1-4	作業流程圖	7
圖 2-1	美國地質調查所在加州聖喬昆谷野外調查圖	9
圖 2-2	泰國寺廟受地層下陷影響淹水圖	10
圖 2-3	天津地區 ENVISAT 衛星 SAR 影像合成圖	11
圖 2-4	天津地區 INSAR 差分干涉圖	12
圖 2-5	西安地區 2005-2006 沉降速率圖	12
圖 2-6	彰化地區水利署 93 年度水準路線圖	15
圖 2-7	彰化地區水利署 90-92 年度平均下陷速度圖	15
圖 2-8	921 地震前 INSAR 干涉差分圖	16
圖 2-9	1999-2002 年間利用雷達差分干涉求員林地地區平均下陷速率	17
圖 3-1	TWD97 坐標系統點位分布圖	19
圖 3-2	台灣本島一等水準路線圖	20
圖 3-3	本研究使用之一等水準點及控制點分布圖	22
圖 3-4	一等水準點 I017 外業照片集點位近照	23
圖 3-5	一等水準點 X101 外業照片集點位近照	24
圖 3-6	94 年度一等水準網檢測工作施測水準路線圖	27
圖 3-7	LIECA AT502 天線盤及 ARP 量測位置示意圖	28
圖 3-8	相位中心變動示意圖	29
圖 3-9	NGS 相位中心率定成果網頁	29
圖 3-10	GPS 衛星資料處理流程圖	34
圖 4-1	使用 IGS 及國內約制站分布示意圖	36
圖 4-2	本研究使用中部地區連續水平及高程速度場	39
圖 4-3	中研院地球所網頁公布之二林所(VR02)時間序列圖	40
圖 4-4	本研究計算之二林所(VR02)時間序列圖	41
圖 4-5	嘉義節點(X201)時間序列圖及點位現場照片	44
圖 4-6	監測點年下陷量圖	45
圖 4-7	和美所(VR01)時間序列圖	46

圖 4-8	田中所 (VR03) 時間序列圖	47
圖 4-9	約制平差後一等水準點與公告高程較差圖	50
圖 4-10	清水甲南節點 (X101) 時間序列圖	51

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

表 目 次

表 1-1	一等水準網施測精度表	4
表 1-2	研究人員編組表	8
表 1-3	作業期程甘特圖	8
表 3-1	本研究蒐集連續站資料	25
表 3-2	一等水準點觀測時間及測站名稱	25
表 3-3	IGS 提供各式星曆精度及資料比較表	30
表 4-1	本研究使用台灣地區追蹤站成果	38
表 4-2	本研究中部地區連續與中研院成果高程方向差異與比值	38
表 4-3	本研究使用地區 GPS 監測點速度場成果	43
表 4-4	彰化縣境內連續站之下陷速度比較表	45
表 4-5	GPS 與一等水準觀測地層下陷之差值	49

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

摘 要

關鍵字：地層下陷、GPS、速度場、水準測量

彰化沿海地區位於濁水溪沖積扇平原之北部，依據經濟部水利署近年地層下陷監測井及地表水準點研究結果顯示 90、91、92 年間，最大年下陷速度分別為 17.6cm/yr、11.7cm/yr 及 10.4cm/yr，顯示地層下陷問題嚴重，政府部門需再投入研究，避免各項民生及重大工程（如高速鐵路、濱海工業區及東西向快速道路）遭受衝擊，並及早提出因應之道。而內政部國土測繪中心於 94 年設置 e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統時，經過求解 GPS 資料發現二林所 VR02 高程方向嚴重，經提供數據予彰化縣政府參考後遂有本研究之產生。

本次研究主要目的在於使用長期觀測監測方式配合數學線性迴歸原理，希望能夠得到與連續站方式類似成果及趨勢，但所需經費較為節省且作業更為便利。由監測成果分析，彰化沿海地區仍屬嚴重地層下陷地區，除 VR02 每年下陷約 80mm 最為嚴重外，本次監測其餘一等水準點每年下陷也約在 17-56mm 間。另研究成果顯示，採 GPS 監測與一等水準檢測方法，所分析點位下陷速度趨勢一致。

ABSTRACT

KEYWORD : Land subsidence、 Global Positioning System、 Velocity field、
Leveling Survey

The Changhua coastal area is located the north Jhuoshuei River alluvial plain. The velocities of Land subsidence during 2001, 2002, 2003 respectively were 17.6cm/yr, 11.7cm/yr and 10.4cm/yr, based on the study of Water Resources Bureau of the Ministry of Economic Affairs. Realizing this dire problem, we need to study land subsidence.

The goal of this research hoped to obtain similar achievement and the tendency, compare using long-term observation monitor and Linear Regression method with continuously stations method. And the method used in this research is cheaper and convenient. The achievement demonstrated that the Changhua coastal area was still the serious Land subsidence area. VR02 is the most series land subsidence point which the displacement was nearly 80mm every year. The displacements of 1st order bench marks were nearly 17~56mm every year during monitor period. The velocities of land subsidence of all most point were the same between GPS and leveling survey results.

運用 GPS 測高技術辦理彰化沿海地區地層下陷之研究

第一章 前言

1-1 研究緣起及目的

臺灣地區近年來因經濟快速發展，對於水資源需求甚為龐大，特別是在沿海地區常因養殖業及農業用水量，又地下水取得方便且成本便宜，有上述情形地區常有地層下陷現象發生，外加颱風期間海水倒灌排洪系統不法宣洩，造成社會付出巨大成本，其真正原因為何？經濟部與農委會已於民國 84 年起陸續推動「地層下陷防治執行方案」及近年來特別預算之「易淹水地區水患治理計畫」，期能更有效結合檢緩台灣地區地層下陷之嚴重性並結合國土規劃，流域整體規劃，促進水土永續使用。

彰化沿海地區位於濁水溪沖積扇平原之北部，依據經濟部水利署近年地層下陷監測井及地表水準點研究結果顯示 90、91、92 年，每年最大下陷速度分別為 17.6cm/yr、11.7cm/yr 及 10.4cm/yr（經濟部，2007），顯示地層下陷問題嚴重，政府部門需再投入研究，避免各項民生及重大工程（如高速鐵路、濱海工業區及東西向快速道路）遭受衝擊，並及早提出因應之道。對於國土保安而言，測繪機關首要就是提供快速且正確的各项測繪成果，以利其他部門做出正確的施政決策，在地層下陷的課題上，精確地表高程資訊為最重要的一環。

國家各項建設皆須仰賴高精度之國家基本控制測量系統為基礎，包含大地控制網、高程控制網及重力控制網，台灣地區因自然環境多變，且各項建設頻繁，為確保提供各界使用之各項基本控制點隨時維持在高精度狀態，須定期實施檢測、長期維護更新，以保持控制點系統完整。

彰化縣政府為積極有效提升該縣地政人員測量新技術，提高控制測量及土地鑑界精度，避免民眾對土地複丈成果之質疑，於 93 年 4 月 1 日委託建國科技大學針對「彰化縣 GPS 虛擬參考站(Virtual Reference Station，簡稱 VRS)技術」建置研究，經其研究報告評估對

提高測量精度與時程成效卓著確證其可行（彰化縣政府，2004）。

該縣配合內政部辦理『改進臺灣省各縣市政府暨地政事務所測量儀器及交通設備 3 年計畫』93 年度購置測量儀器設備時，分別於轄區和美（VR01）、二林（VR02）、田中（VR03）地政事務所屋頂上，架設衛星追蹤型基站全天候接收衛星訊號資料，然因經費有限，無法購置軟體自行監控，因此將接收之資料以網路傳輸方式傳送至內政部國土測繪中心（原土地測量局，以下簡稱本中心）進行監控並聯合解算；94 年度經本中心分析該縣轄區和美（VR01）、二林（VR02）、田中（VR03）等 3 站接收衛星訊號資料，發現二林（VR02）站高程年下陷速度約為 $-93.3 \pm 1.6 \text{mm/yr}$ （內政部土地測量局，2006），遂有辦理該縣二林濱海地區監測之構想。

內政部對於台灣地區高程系統的建立與維護，除在民國 64 年完成台灣地區一等水準點檢測作業，另於 89-91 年間使用精密直接水準測量方式，先後進行完成「一級水準網測量工作」及「二等水準網測量工作」，並於 92 年建置完成並公告台灣地區高程基準 TWVD2001 (TaiWan Vertical Datum 2001)，已為各界應用。礙於政府財政困難及預算爭取不易，目前內政部規劃 3-5 年重新施測一次，但這樣的施測頻率並無法滿足地層下陷區域的需求，遂有使用較快速且便宜的 GPS 測量方式，於二次直接水準作業間隔中，增加更多觀測次數，並透過數學線性回歸方式，掌握高程變化趨勢，提供更及時的預警成果。

1-2 研究方法

目前觀測地表高程變化技術多用下列三種方式，包含精密水準測量、GPS 衛星定位測量及合成口徑雷達干涉量測技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 等等方式來辦理外業測量作業，本次研究除辦理 GPS 外業觀測資料外，將另行蒐集研究區域內之 INSAR 及直接水準的資料，以作為比對資料。

運用合成口徑雷達干涉量測技術 (INSAR) 於地表測量時，觀測者可以不用親臨形變現場，僅利用三至四幅衛星雷達微波影像，經相

位干涉處理後，便可快速獲得測量地區面的地表形變量，為大地變形測量帶來革命性新技術。合成口徑雷達（SAR）是一種主動偵測的微波遙測感測系統，可安裝於飛機或衛星載台上，偵測時不受天氣影響，可全天候進行地表遙測，是資源遙測衛星發展的主流之一，目前太空軌道上載有 SAR 感測器的衛星較有名的有歐洲的 ERS1/2、加拿大的 Radarsat 及日本的 J-ERS1 等，而且陸續有更多的 SAR 衛星升空，為 INSAR 技術開拓更多更寬廣的研究應用空間。國立中央大學太遙中心及成功大學衛星資訊研究中心曾在 86-88 年間利用 InSAR 資料對於嘉南地區及台灣西南沿海地區地層進行微變量監測(王志添等, 2000, 陳卉瑄等, 2000)，初步成果都可在高程變化上達到公分級精度。另 2004 年 INSAR 也被利用在彰化員林鎮辦理地層下陷的監測活動，從 1995-2002 年平均每年約有 1 公分的下陷量，且在 921 大地震後 1 個月內被測量出約有 0.5-1 公分的下陷量(吳善薇, 2004)。InSAR 主要優勢在於可快速取得大面積的地形變資訊，但是精確度不如 GPS 或直接水準，但以一平方公里範圍內就有 3.125×10^4 個點位的高密集度，提供依各面的涵蓋而不僅是點的分布，對於大範圍的變形有不可取代之優勢。

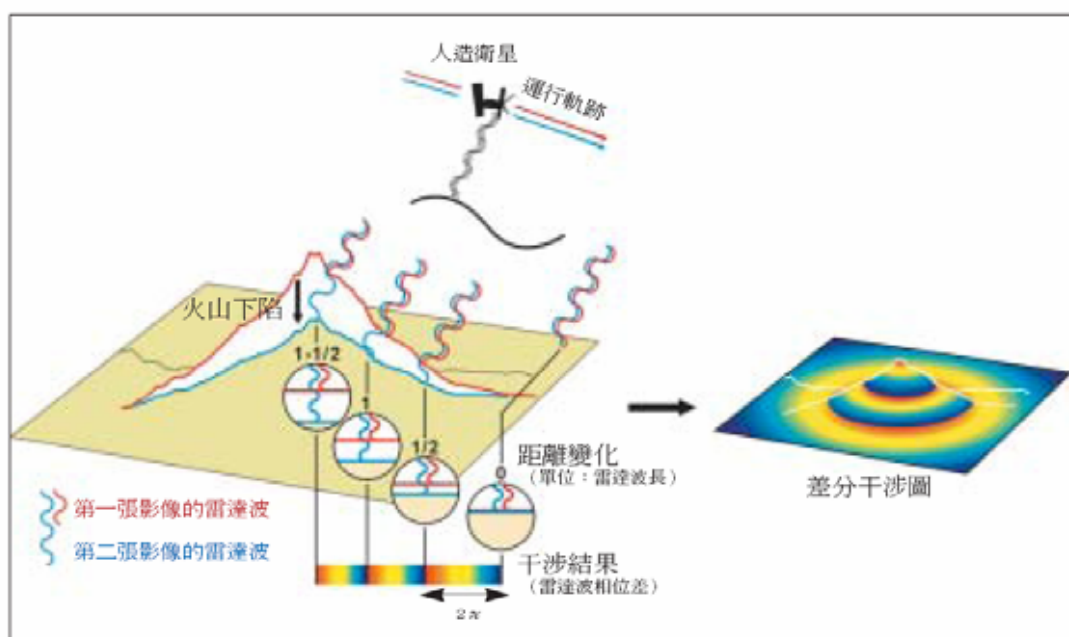


圖 1-1 INSAR 作業原理 (張中白, 2005)

水準測量的目的為量測土地的高低起伏變化，一般利用水準儀讀取前後兩點位上水準尺之讀數，再將兩個讀數相減，所得之差值即為兩點之高程差。所得精度最高但也最耗時且成本高，依據內政部「一等水準作業規範」(內政部, 2001) 規定，一等水準測量依精度區分為一等一級及一等二級二種，一等一級水準網測量應閉合於水準原點；一等二級水準網測量應閉合或附合於一等一級水準網之節點，施測精度如表 1-1，目前大都是在國家級高程控制點定期維護時會採用如此高精度、高成本的規格辦理，惟近年因部分特殊目的需求如高速鐵路下陷測量亦會採此規格。

表 1-1 一等水準網施測精度表

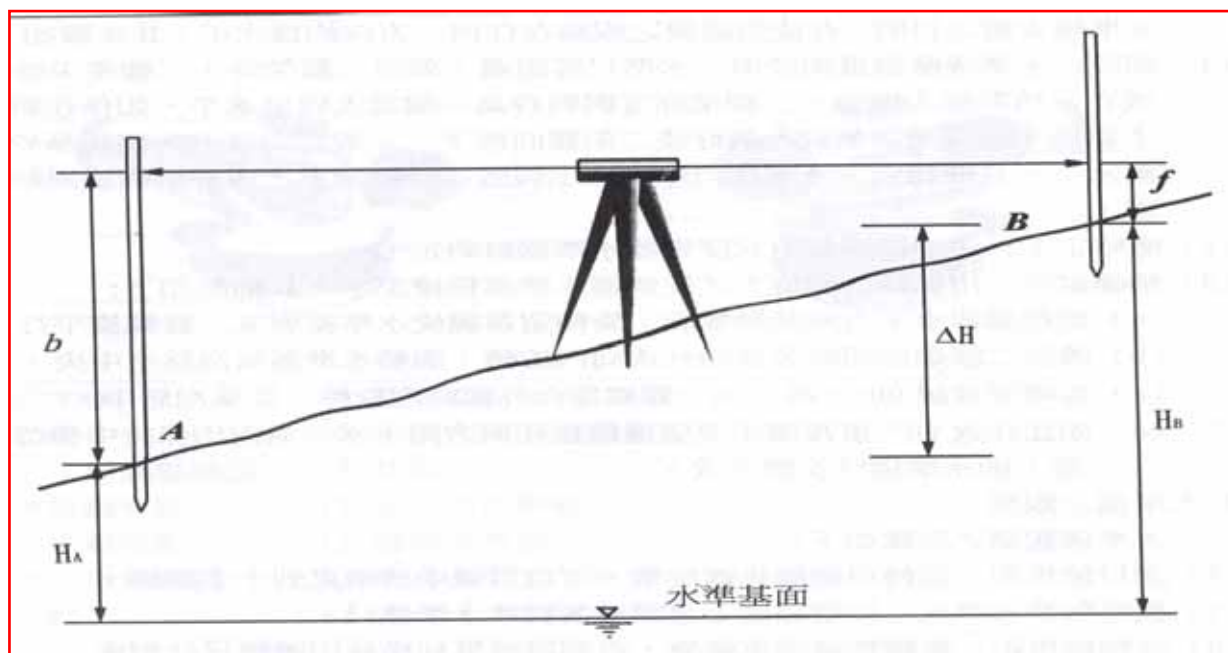
項目 等級	每測段往返 最大閉合差 (系統誤差 改正前)	附合水準路線 最大閉合差 (系統誤差 改正後)	閉合水準環線 最大閉合差 (系統誤差 改正後)
一等一級 水準網測量	$2.5^{\text{mm}}\sqrt{K}$	----	$2.0^{\text{mm}}\sqrt{F}$
一等二級 水準網測量	$3.0^{\text{mm}}\sqrt{K}$	$3.0^{\text{mm}}\sqrt{L}$	$2.5^{\text{mm}}\sqrt{F}$

註一：K—單一測段長度之公里數，L、F—為水準環線之總長度。

全球定位系統(Global Positioning System, GPS)是一套以衛星訊號為基礎的導航系統，具有全球性、全天候的精確三維導航與定位能力，是由美國國防部為了軍事上的需求，滿足海上、陸地和空中軍事應用進行高精度定位和導航所建立的系統。全球定位系統定位的過程，基本上是距離的量測，藉由接收 GPS 衛星所發射的電磁波訊號，

量測地面接收儀與衛星之間的瞬時距離，利用觀測至少 4 顆衛星所得到的瞬時距離，再配合幾何原理求解地面接收儀之三維坐標，由於其可以達到公分級之精度(曾清涼,1998)，且具有施測時不受天候影響、點位之間不必相互通視，只要透空度達 65 度以上即可、以及一天 24 小時皆可觀測等特質，故近年來 GPS 衛星定位技術已普遍地應用於各種測量作業之中。內政部地政司衛星測量中心於民國 81 年開始規劃設置 8 個衛星追蹤站，加上中研院國際聯測站(TAIW)共 9 個站，作為台灣一、二等衛星控制點的零級控制，並提供衛星資料給各界使用。目前各政府部門測量單位或私人公司均已大量採購 GPS 衛星接收儀，並廣泛應用於各項測量作業上，長時間平面觀測精度精度約在公分級，而高程精度約為平面的 2-3 倍。

本研究利用本中心在中部地區架設之 GPS 連續追蹤站及彰化縣政府地政局地籍測量隊蒐集之一等水準點上觀測 GPS 資料作一比較，嘗試在使用多次數測站資料在長時期觀測後，經由數學回歸出來的成果與連續站每日解的差異，分析其後續應用之可行性，另外並嘗試蒐集直接水準或 INSAR 觀測資料，作一比對。



$$H_b = H_a + d_h[f - b]$$

圖 1-2 水準測量作業原理 (內政部, 2003)

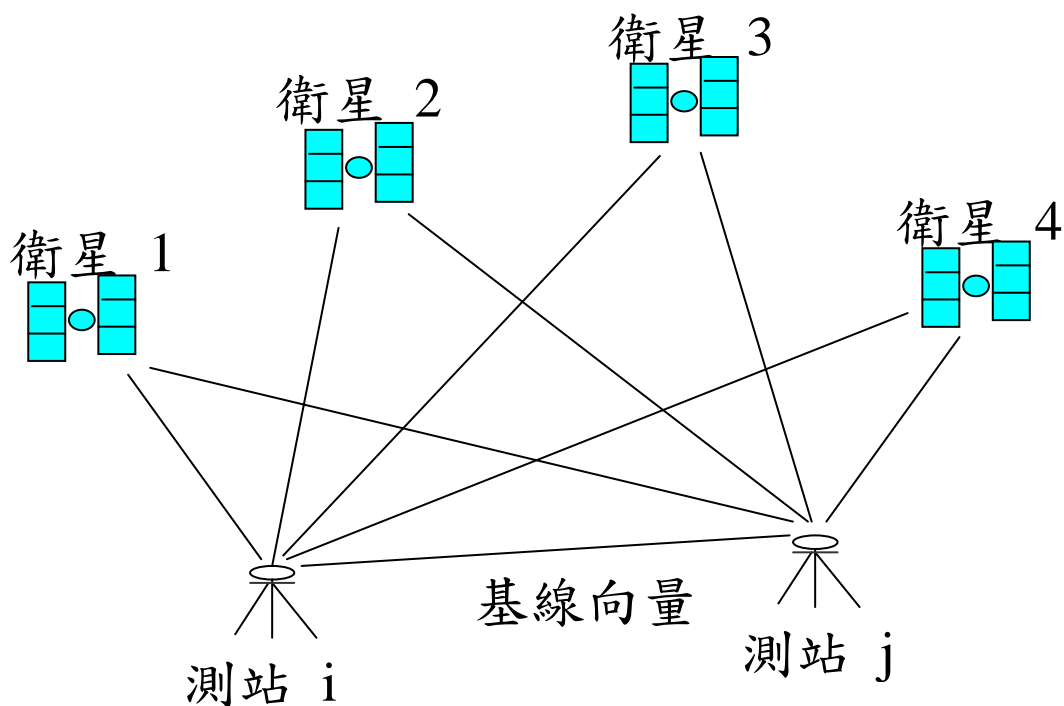


圖 1-3 GPS 作業原理 (曾清涼, 1999)

1-3 作業流程及預期成效

本次作業包含測區歷史資訊、水準點外業觀測、GPS 連續站蒐集及 GPS 資料處理計算等等，作業流程如圖 1-4。研究結果顯示，使用定期長時間監測點位的高程變化配合數學回歸公式所得結果，與連續站每日成果計算趨勢及數量級一致，以 VR01、VR02 及 VR03 三站為例，監測方式之高程變化成果值與連續站方式最大差值約 10mm，比值約 10%。而以 GPS 監測點與一等水準點（共計 5 點）監測成果比較，趨勢一致且下陷值相當，X111、C077 及 G027 等點差值均在 5mm 以內，比值亦約在 10% 以內。

成果顯示，雖然縣府測量單位沒有水準儀測量設備，但透過 GPS 監測方式，配合長時間的回歸分析所得結果與使用精密水準方式相當，可作為較節省成本且快速獲取地表變化成果之作業方式之一。

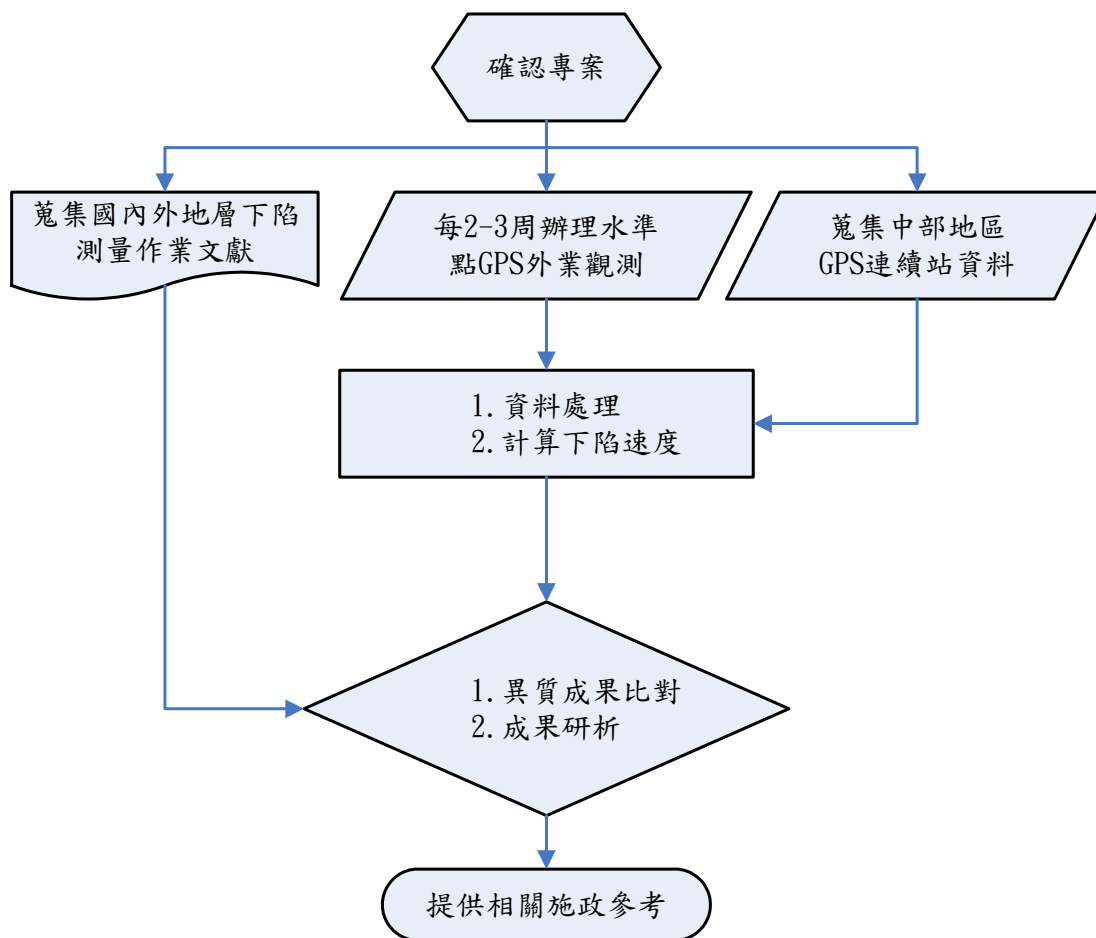


圖 1-4 作業流程圖

1-4 各章節概述

本研究計分五個章節進行討論，各章節概述如下：

第一章：說明本次研究目的、作業方法、初步成果及人員分工。

第二章：針對彰化沿海地區近年相關地層下陷研究作一討論。

第三章：說明本次 GPS 外業觀測作業過程及原理

第四章：針對本研究外業觀測成果使用 BERNESE 軟體做計算並分析與討論。

第五章：對於本次研究成果作結論與建議。

1-5 作業分工及作業期程

本次作業由彰化縣政府測量隊負責內政部一等水準點 C077（中興國小）、I017（自強大強北）、G027（新街橋）、G031（台西社區）、X111（王功）等五個點位辦理外業觀測，使用 Trimble 5800 儀器，

由 2006 年 5 月 4 日－2007 年 4 月 26 日期間每 2-3 周觀測一次。本中心負責提供中部地區連續 GPS 觀測站資料，及使用瑞士伯恩大學開發之 Bernese 軟體辦理 GPS 聯合解算作業。

表 1-2：研究人員職務作業分配表

姓名	現職	職等	電話	分工	備註
林燕山	主任	簡任第十一職等	04-22522966 #100	督導及綜理本計畫執行相關事宜	
劉正倫	副主任	簡任第十職等	04-22522966 #120	督導及綜理本計畫執行相關事宜	
曾耀賢	課長	薦任第九職等	04-22522966 #330	計畫進度控管、資料蒐集、成果分析及研究報告	
陳鶴欽	專員	薦任第八職等	04-22522966 #331	資料蒐集、資料計算處理分析、行政事務、撰寫研究報告	本案連絡人
林世賢	測量員	薦任第七職等	04-22522966 #331	資料計算處理分析、撰寫研究報告	

表 1-3：96 年度作業期程甘特圖

工作項目	96 01	96 02	96 03	96 04	96 05	96 06	96 07	96 08	96 09	96 10	96 11	96 12
外業觀測	—————											
資料處理			—————									
成果分析						—————						
撰寫研究報告									—————			
研究報告報部												—————

第二章 文獻回顧與前人研究

2-1 其他國家地層下陷現況

隨著人類對環境的過度開發與利用，近年來自然環境變遷速度加遽，地層下陷問題也愈受重視。最有名的例子就是美國地質調查所（USGS）人員在加州聖喬昆谷（San Joaquin Valley）的調查，照片中分別標註「1925」、「1955」、「1977」的數字，實際上是表示當年度該地點的地表高度（USGS, 2000），但從圖上顯示，1925-1977 年間當地約下陷 9 公尺（如圖 2-1），另外在佛州及拉斯維加斯也都有地層下陷情況，經由水準測量或 INSAR 等方式均可明顯看出其變化。另在美國佛州的溼地實驗室，原設計家門口是貼於地面因地層持續下陷造成出入不便故將房屋地面高程加高的實際遭受地層下陷危害事件。

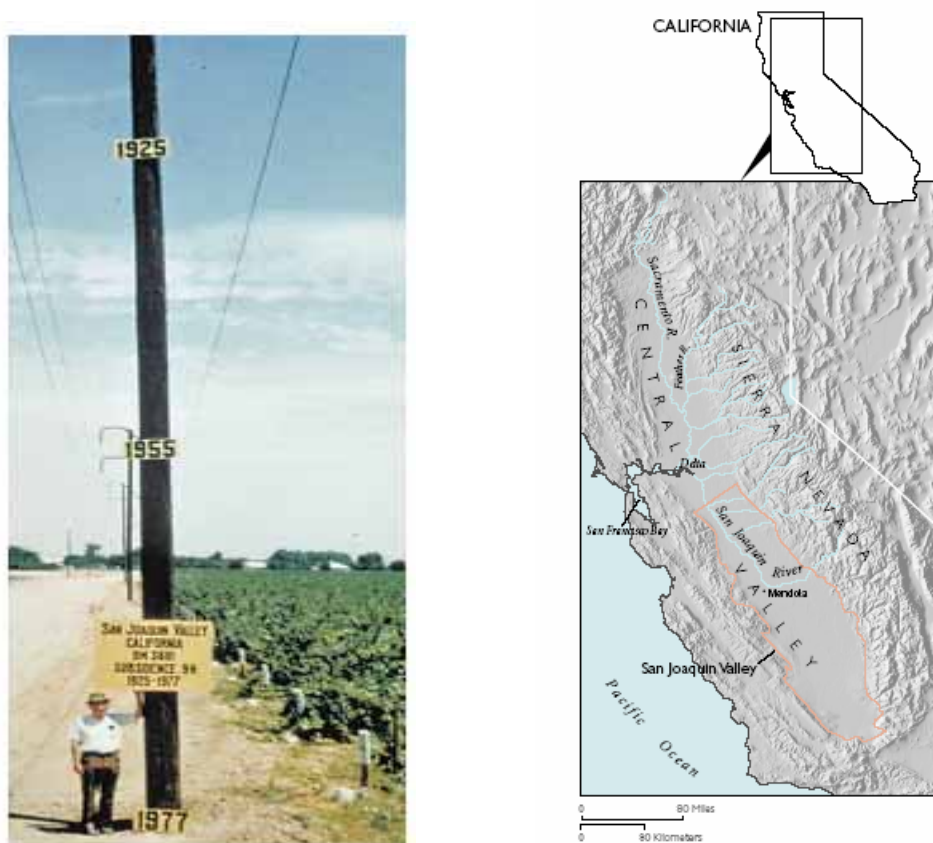


圖 2-1：美國地質調查所人員在加州聖喬昆谷（San Joaquin Valley）所作地層下陷紀錄，電線桿上的數字代表年份，從 1977-1925 年約共下陷 9 公尺（USGS, 2000）

在泰國曼谷有東方威尼斯美譽的泰國首都海平面上升再加上地層下陷，正面臨與威尼斯一樣的淹沒危機(美聯社, 曼谷 2007)，泰國灣附近地區每逢雨季便淪為水鄉澤國，當地村民與寺廟僧侶飽受水患之苦(圖 2-2)。據聯合國跨政府氣候變遷小組在曼谷開會所提出的警告，隨著海平面在未來數十年內上升，全球二十座大城中有三座城有滅頂之虞，其中包括曼谷。研究全球暖化的美國專家薛波在造訪遭淹沒的泰國灣寺廟後說，這是未來會在全球各地看到的景象。每年以逾 10 公分速度下陷，作為泰國經濟龍頭與重要區域觀光景點，無人能承受曼谷滅頂所造成的損失。泰國政府全國災難警報局主席史密斯就說，曼谷身為泰國心臟，一旦沉沒將導致一切停擺，「我們無暇在未來十五到二十年內遷都，我們現在就得保護好我們的心臟，只怕為時已晚。」

各項數據顯示，曼谷沉沒危機並非空穴來風。曼谷地勢僅高於南鄰的泰國灣 1-1.5 公尺，有些區域甚至低於海平面，而泰國灣水平面以每年 0.254 公分的速度上升。專家預言 15 到 20 年內沉沒。此外，由於曼谷地質為黏土而非岩床，隨著民眾非法抽取大量地下水，這座東方威尼斯便以每年逾十公分的速度下陷。包括泰國政府、科學家與環保人士，都同意曼谷面臨沉沒危機，但對何時沉沒卻無定論。



圖 2-2: 泰國寺廟受地層下陷影響，僧人需涉水而入(自由時報, 2007)

2-2 大陸地區地層下陷監測研究

天津位於半乾旱的華北平原北部和渤海灣西部，是現代構造的沉降地區，也是環渤海地區的經濟中心，同時也大陸地區地面標高最低的沿海城市，海拔高度約 3-5M，因過量開採地下水造成人為災害，李陶等人（李陶, 2007）利用合成孔徑雷達影像於 2004-2005 年在天津地區辦理地面沉降研究，結果顯示研究期間該地區下降量約 3-6 公分，地層下陷問題仍需加以進一步防治，如圖 2-3、2-4。

香港理工大學趙超英等人亦利用差分合成孔徑雷達干涉技術 (D-InSAR)，對大陸西安地區的地面沉降進行監測，公分 5 個階段，利用 InSAR 處理過程中的干涉圖率波及相位纏解法的處理，可得到合理的變形結果，並與水準及 GPS 測量監測結果比較，最大沉降速度大於 20cm/yr，其餘沉降中心速度也達 12cm/yr，而 1996 年後大部份市區的沉降量僅約 1.5cm/yr，與西安在 1996 年限採地下水及黑河引水工程實施的結果吻合（趙超英, 2007），詳如圖 2-5。



圖 2-3:天津地區 ENVISAT 衛星 SAR 影像合成圖（李陶, 2007）

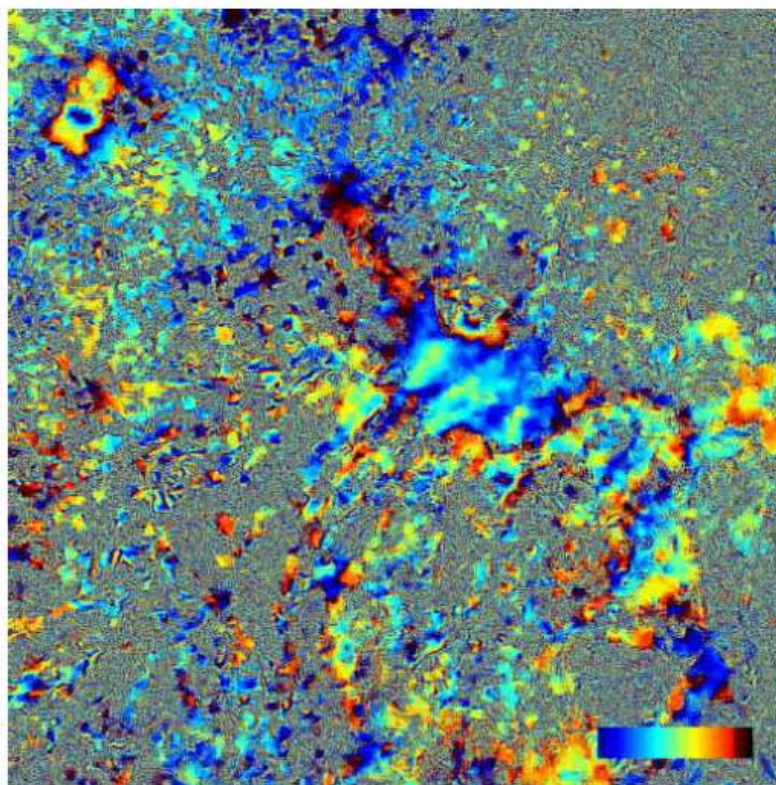


圖 2-4:天津地區 INSAR 差分干涉圖(軌道編號 14529-10521, 李陶, 2007)

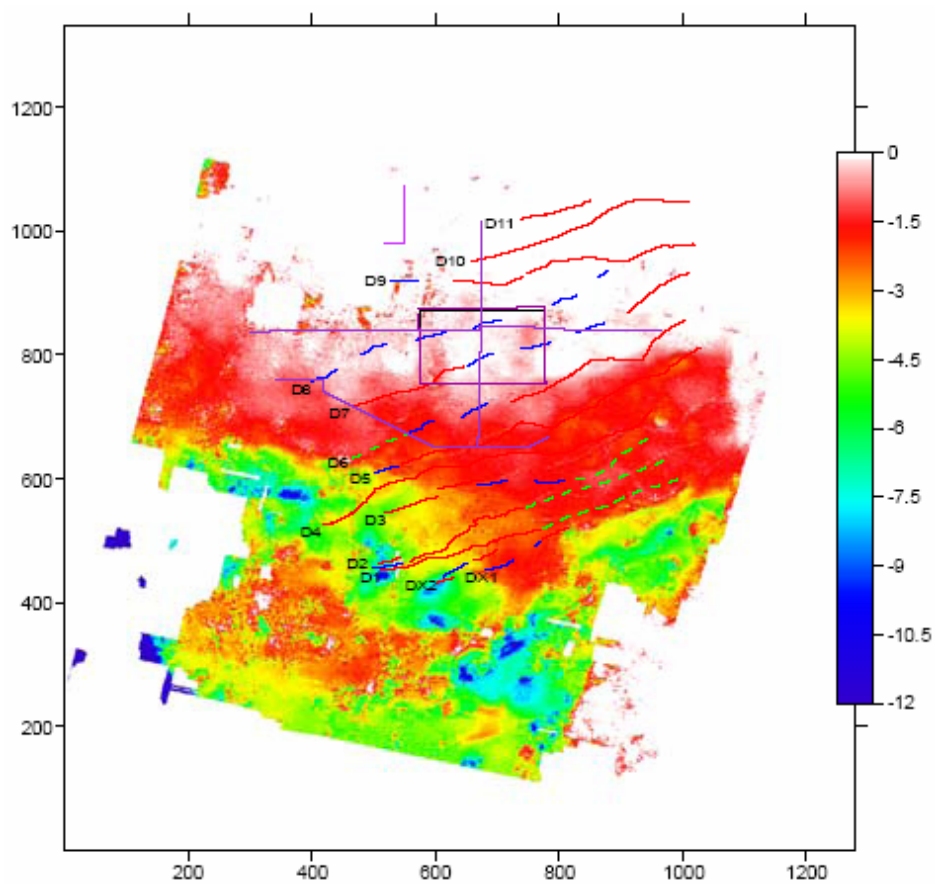


圖 2-5 西安地區 2005-2006 沉降速率圖 (趙超英, 2007)

2-3 水利署在彰化地區辦理之水準測量成果

水利署(含原台灣省水利局)在彰化地區系統性地層下陷水準測量,主要可分為下列時期:(1)民國76年~80年(2)民國80年~89年(3)民國89~92年(4)民國93-96年,大部份之年度檢測由當時之台灣省水利局規劃總隊負責執行。民國90年以後由經濟部、內政部及農委會再會銜提報「第二期地層下陷防治方案」,該工作主要由水利署委託工業技術研究院能資所執行。另外行政院也於94年1月19日第2924次院會核定通過國土復育策略方案暨行動計畫,將嚴重地層下陷地區納入實施泛衛,進行必要之復育工作。

(1) 民國76年~80年

民國76年至80年期間,彰化地區地層下陷檢測主要以沿海堤防為主,水準路線沿台17線呈直線分佈,檢測路線北起彰化市,沿途經和美、線西、伸港、鹿港、王功、西港、大城、竹塘、溪州、北斗,迄至田中。水準路線呈開放導線,彼此並無相接,水準觀測精度為 $7\text{mm}\sqrt{K}$ 。

(2) 民國80年~民國89年

89年民國80年至89年期間,彰化地區地層下陷水準測量的範圍北起烏溪南岸,南至濁水溪北岸,東至省道台1線,西至沿海地區。此階段水準測量路線成網形規劃,水準主線由田中經北斗、溪洲、竹塘、大城、西港、芳苑、王功、漢寶、鹿港、彰化、花壇、員林,迄至田中閉合。平差計算採階層式平差,水準觀測精度為 $7\text{mm}\sqrt{K}$ 。

(3) 民國89~民國92年

民國89年至民國92年期間,彰化地區地層下陷水準測量的範圍北起烏溪南岸,南至濁水溪北岸,東至省道台1線,西至沿海地區。全區共設47條水準測線,組成13個環線閉合網,水準里程數為324公里。平差計算採整體一次性平差,水準觀測精度為 $5\text{mm}\sqrt{K}$ 。

彰化測區目前之水準測量範圍北起烏溪南岸,南至濁水溪北岸之彰化平原地區,東至省道台1線,西至彰化沿海,總涵蓋的區域包含彰化縣伸港鄉、線西鄉、和美鎮、鹿港鎮、秀水鄉、花壇市、福

興鄉、埔鹽鄉、大村鄉、芳苑鄉、溪湖鎮、埔心鄉、員林鎮、社頭鄉、永靖鄉、田中鎮、北斗鎮、溪洲鎮、埤頭鄉、二林鎮、大城鄉及彰化市，檢測路線通過鄉鎮總面積 1023 平方公里。彰化沿海地區早在民國 64 年就發現鹿港地區因地下水位持續下降而引發地層下陷，但民國 70 年以後因水位回升已逐漸減緩；相反的，大城鄉西港地區之地下水位卻在此時開始下降，並在民國 79 年以後引發嚴重的地層下陷，總計民國 64~92 年西港之最大累積下陷量已達約 219 公分。

彰化大城地區之地層下陷原因主要以農漁業超量使用地下水有關，當地之地下水抽用主要以深度 94 公尺及 206 公尺附近之含水層為主，但其中 94 公尺附近之水位近幾年之變化小於深度 206 公尺處，且深層土壤亦有逐漸壓縮跡象，顯示當地之抽水深度已向深層延伸，並已引發深層下陷。彰化自民國 81 年以後，下陷即集中在芳苑以南地區，下陷範圍以大城鄉為中心向外輻射，年下陷速率超過 3 公分地區包含芳苑鄉、二林鎮、竹塘鄉、埤頭鄉等。

彰化地區之水準檢測顯示近二年之最大下陷速率已降至約 10 公分，持續下陷範圍亦略為減小；另根據設於西港國小之 GPS 固定接收站及分層式地陷監測井之觀測資料交叉比對，更確認最近二年之下陷速率約 9~11 公分，下陷情況與往年比較已明顯降低。因抽水深度延伸至深層，抽水集中情況較為分散及深地層較為緻密導致目前之壓縮量較小，詳如圖 2-6、2-7。

(3) 民國 93~民國 96 年

依據經濟部水利署委託工研院 96 年度期中報告指出，彰化地區主要下陷量集中在大城鄉與溪湖鎮。民國 92 年以前嚴重下陷地區中心主要集中在大城鄉，93-95 年主要下陷中心移往溪湖鎮，溪湖鎮最大下陷速度從 93、94、95 年分別為 14.2、11、8.9 cm/yr，已達嚴重下陷量級（年平均下陷速率超過 5 cm/yr 以上）。彰化地區下陷達 3cm/yr 以上者的鄉鎮包含溪湖鎮、二林鎮、芳苑鄉、竹塘鄉、大城鎮、埤頭鄉與溪州鄉等七個鄉鎮，持續下陷面積達 226 平方公里。目前水利署仍委託相關單位持續辦理各項成果觀測及資料分析。

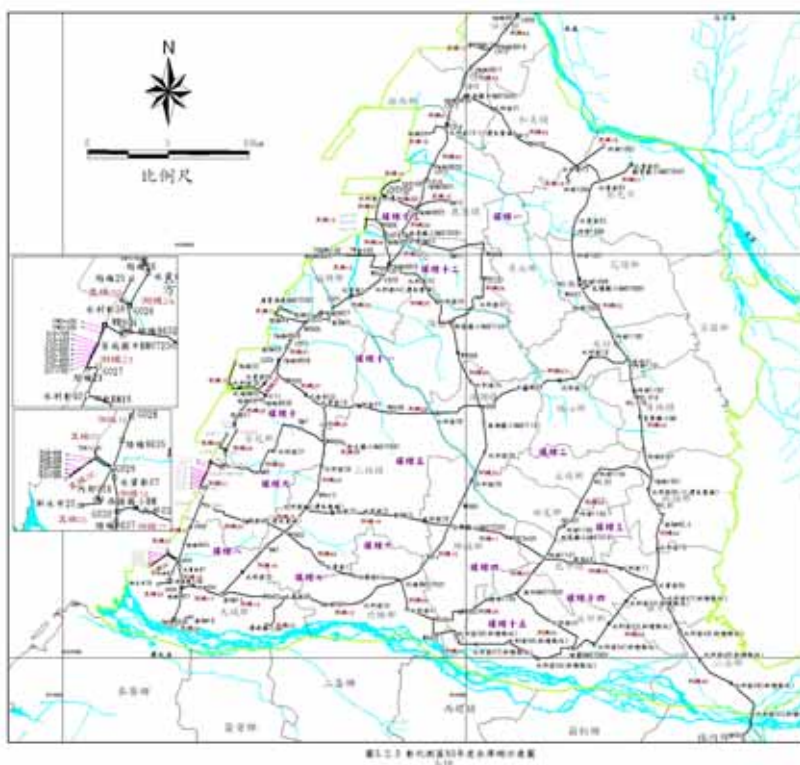


圖 2-6：彰化地區水利署 93 年度水準路線圖（水利署，2004）

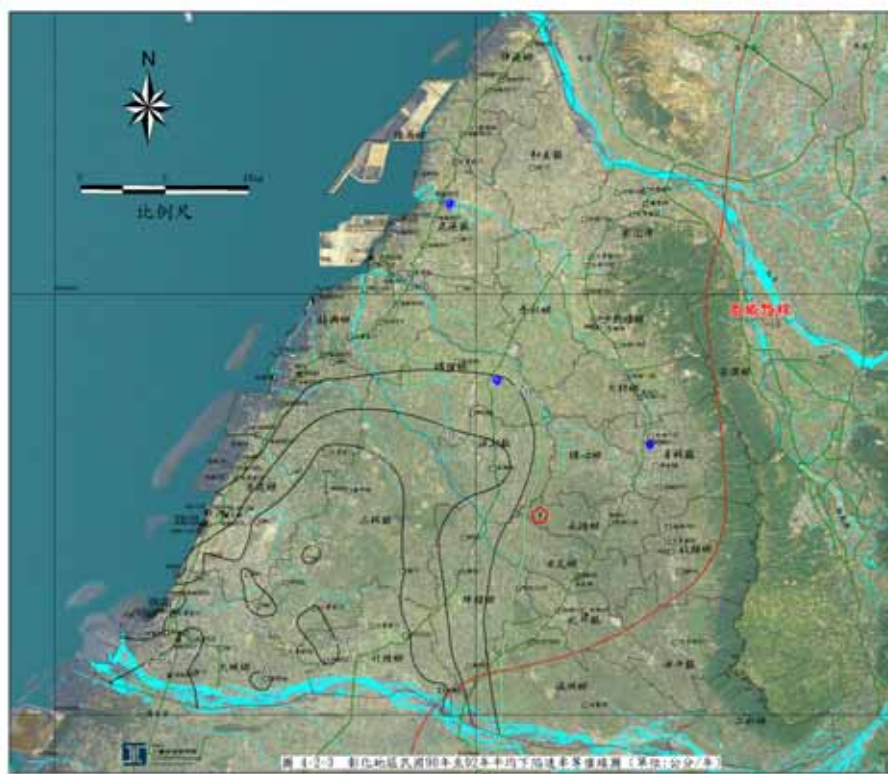


圖 2-7：彰化地區 90-92 年度平均下陷速度圖（水利署，2004）

2-4 彰化員林地區使用 InSAR 方法辦理地層下陷觀測

吳善薇等人(2004)研究顯示，利用衛星雷達干涉法量測彰化縣員林地區的地表變形行為，除了有效偵測該地區快速的地層下陷，同時也希望藉由密集的觀察，尋找地層下陷速率與人為作用以及自然因素之間的關係。研究中採用 11 幅不同時段擷取的衛星影像，時間從 1995 到 2002 年之間，組配成七組差分干涉圖。

研究成果顯示，員林地區自 1995 年以來就持續有地層下陷發生，平均下陷速率約為每年 1 公分；另外，在 921 地震前後，下陷速率則發生明顯的變化。大約在大地震發生前數個月，地層下陷的速率就有增加的情況，速度比平常大約增加兩倍；而大地震發生後的差分干涉結果更顯示，在地震後僅僅大約一個月的時間內，員林地區地表至少下陷了 0.5~1 公分。直到地震發生後大約一年，地層下陷速率才逐漸趨緩。本研究顯示，歷史性的地表變形，依然可以藉由調閱衛星影像，用差分干涉法測量出來。至於員林地區地層的下陷，根據初步結果可以推論，它不但受到人為活動的影響(如地下水抽取)，自然界的力應該也扮演重要的角色(如構造活動或大地應力的改變)。

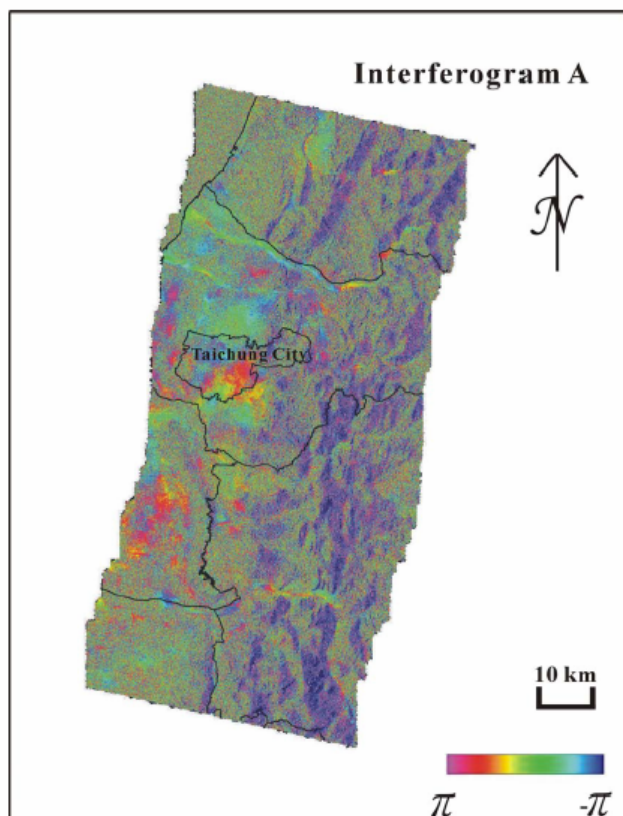


圖 2-8: 921 地震前差分干涉圖 (吳善薇, 2004)

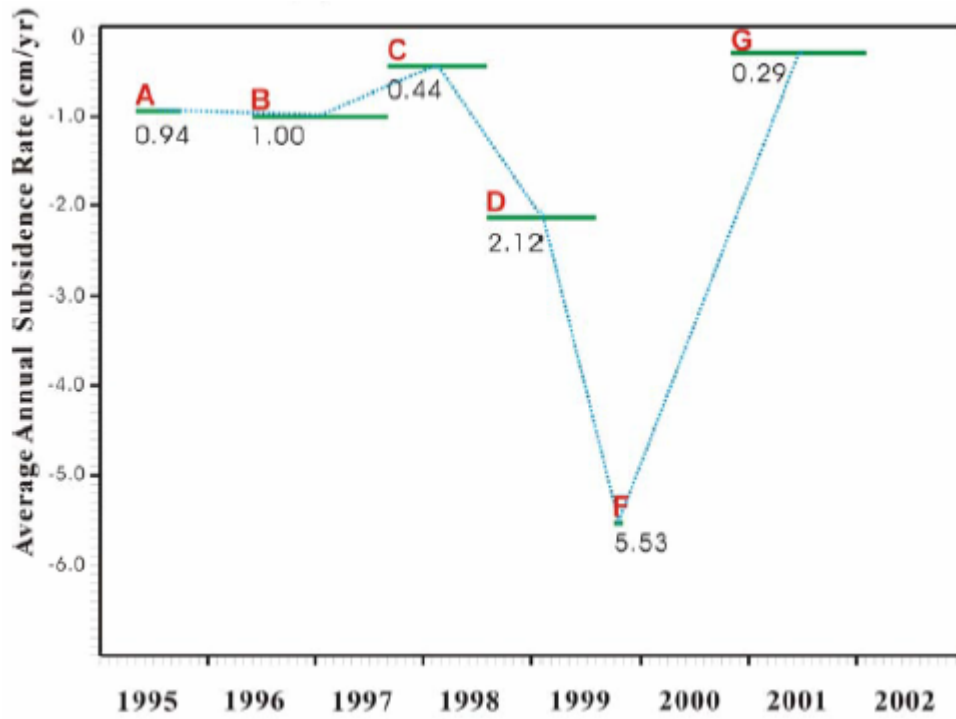


圖 2-9：1999-2002 年間利用 INSAR 求員林地區年平均下陷速率
(吳善薇, 2004)

第三章 作業方法及原理

3-1 作業說明

全球衛星定位系統(Gobal Positioning System,GPS)近年來已漸被應用在各項測量作業上，我國自 81 年開始採用全球衛星系統(Global Positioning System, GPS)技術進行國家基本測量，於台灣本島及金門、馬祖外島設立 8 個永久性 GPS 衛星追蹤站，陸續完成一、二、三等衛星控制點的測量工作，據以定義新的台灣大地基準(Taiwan Geodetic Datum 1997, TWD97)，點位分布詳如圖 3-1，並且於 89 年正式公告 TWD97 作為國家測量基準，TWD97 所測得成果共計 8 個衛星追蹤站，105 個一等衛星控制點及 621 個二等衛星控制點，包含三維坐標資訊，其在水準方向所求得為橢球高 (h)，一般研究認為 GPS 辦理外業觀測時，水平方向的精度依照觀測時間不同約可達數公釐到公分之間，高程方面精度約平面 3-5 倍。

另外在臺灣地區的高程控制系統，內政部先後分別進行「一等一級水準網測量工作」及「一等二級水準網測量工作」，已於 92 年建置完成並公告臺灣地區高程基準 TWVD2001，共計埋設 2065 點，一等水準網點位分布詳如圖 3-2，並以相對於基隆潮位站(BM07)之 K999 為水準原點，成果並已廣為社會各界運用。

水準測量所求得高程系統為正高系統 (以 H 表示)，為真實物理環境如前述 TWVD2001，而一般衛星測量所測量高程為橢球高，為使用數學定義所求得，如 GPS 測量之 WGS84 之幾何高程，通常以 h 表示之。而橢球高與正高系統在定義與物理意義上均不相同，其間差異為大地起伏 (N)，定義如下：

$$h=H+N$$

一般而言，我們使用 GPS 辦理幾何高觀測所需時間較快且經費便宜，以本中心委外施測三等控制點觀測精規範為 30mm+6ppm，需利用雙頻 GPS 儀器觀測 3 小時可達成，所需經費約 10,000 元，觀測所得為絕對位移量，而使用水準測量，以一等精密水準精度施測規範為 2.5mm \sqrt{K} (系統改正前，K 表示水準點間相距公里數)，精度高但

施測不易、費時且成本高，每公里約為 10000 元，每天觀測量約為 3-4 公里，觀測所得為相對位移量，且受天候影響工作較為辛苦，另依目前本中心經驗，一等水準外業應以夜間觀測較佳。另目前國內各市政府均尚無精密水準儀可親自辦理是項作業。本次研究除使用 GPS 辦理外業觀測外，推算地層下陷量外，也將搜集內政部近年所辦理一等水準點觀測成果，作一比對，以確認比對觀測成果差異。

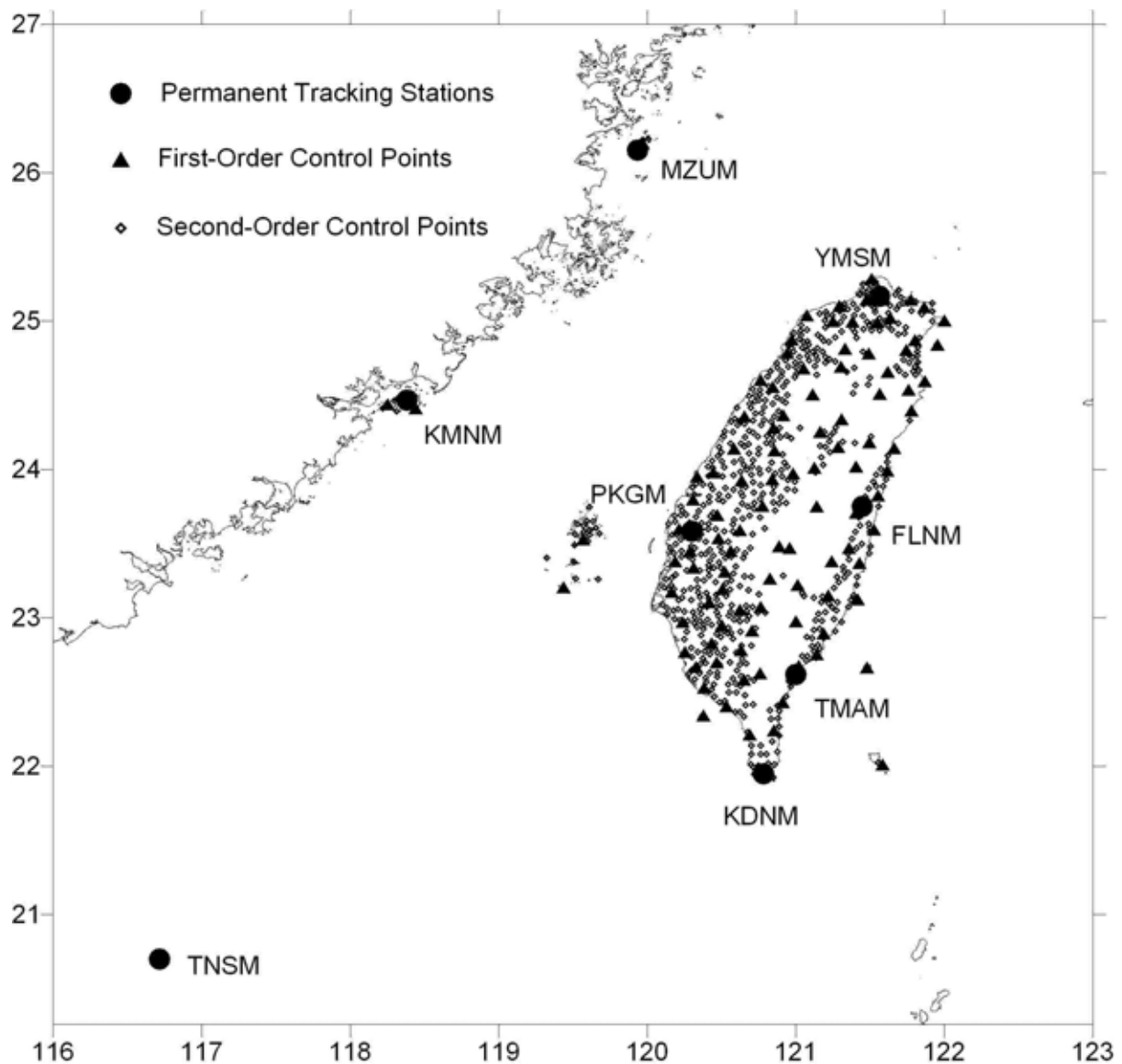


圖 3-1：TWD97 坐標系統點位分布示意圖，共計 8 個衛星追蹤站，105 個一等衛星控制點及 621 個二等衛星控制點

附圖一 臺灣本島水準路線圖

紅色線為一等一級水準路線
綠色線為一等二級水準路線
藍色字為已設節點位置及名稱
黑色字為預定節點位置及名稱

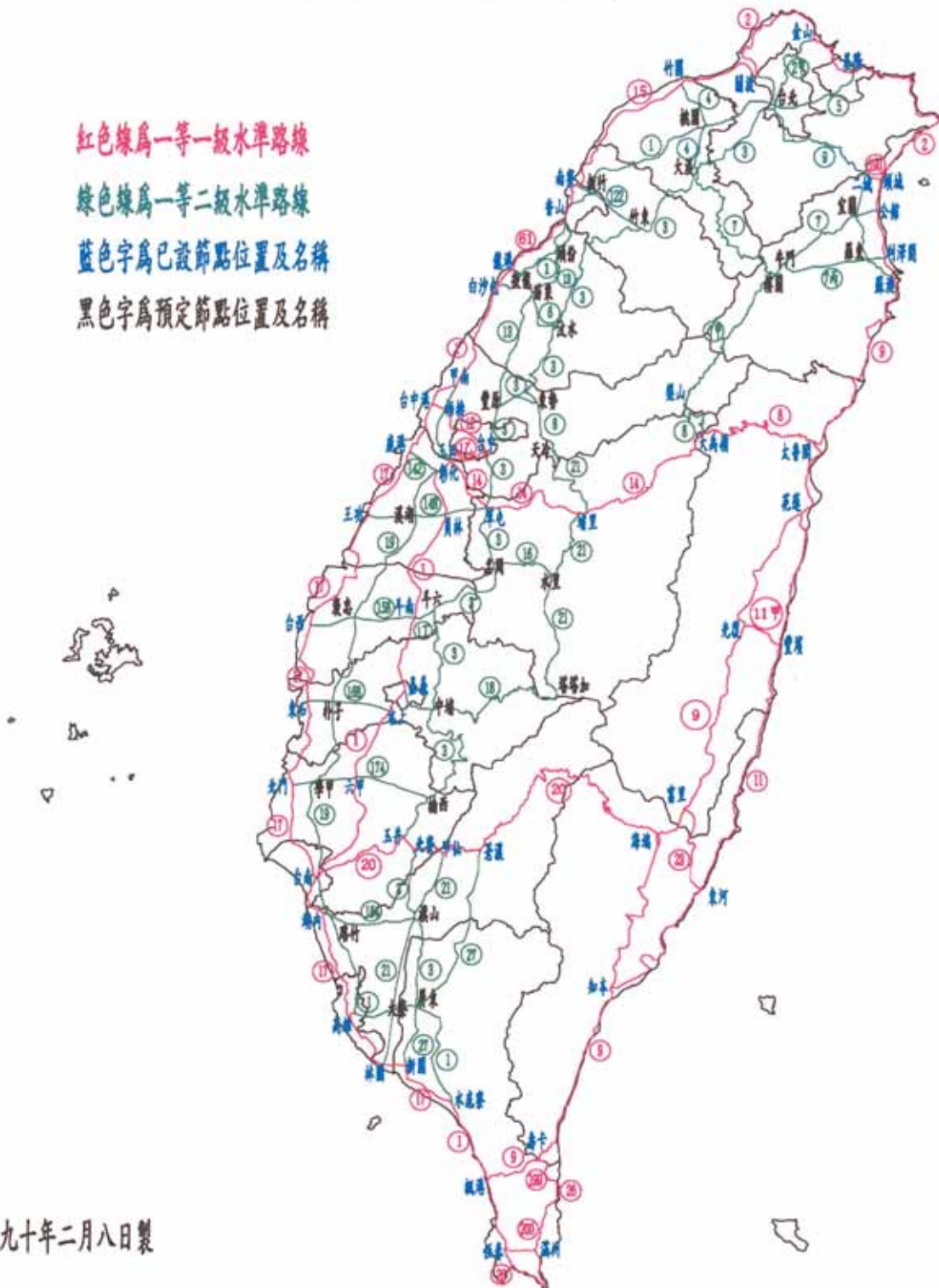


圖 3-2：台灣本島一等水準路線圖（內政部, 2001）

3-2 外業資料蒐集

為持續了解彰化沿海地區地層下陷狀況，我們首先蒐集本中心 eGPS 網內台灣中部地區連續站，共計選擇台中港站 (TACH)、台中東勢站 (DOSH)、南投草屯站 (CAOT)、嘉義東石站 (CHYI)、嘉義竹琦站 (JHCI)、彰化和美站 (VR01)、彰化二林站 (VR02)、彰化田中站 (VR03) 等 8 個連續追蹤站從 2005/1/1 至 2007/5/30 間約 2.5 年的觀測資料，並搭配內政部金門 (KMNM)、墾丁 (KDNM)、鳳林 (FLNM) 追蹤站、中央研究院澎湖白沙地殼變動監測站 (S01R) 及 IGS 在臺灣的工研院站 (TNML) 共同解算每日解。另外選擇內政部一等水準點 C077 (中興國小)、I017 (自強大強北)、G027 (新街橋)、G031 (台西社區)、X111 (王功) 等五個點位辦理外業觀測 (此 5 點環繞二林地政事務所)，使用 Trimble 5800 儀器，分別在 2006/5/4 至 2007/4/26 間由彰化縣政府測量隊自行派員辦理外業觀測蒐集資料，約每 2-3 周辦理一次共計 26 次，每日觀測 7 小時，其間也一併蒐集上開 14 個連續站的資料，點位分布狀況如圖 3-3。外業觀測情形如圖 3-4、3-5。

另外於本案外業觀測期間，本中心於 95 年 12 月舉行台灣西南部地區一等水準點檢測作業審查會議 (施測水準路線圖詳如圖 3-6)，審查會結論認為該次水準測量作業中，認為甲南節點 (X101)、嘉義節點 (X201) 等可視為不動點，該成果將約制在上開點位，與 91 年度公佈 TWVD2001 成果作一比對。為了解整體水準下陷量變化與 GPS 測高下陷量之絕對差異，自 95 年 12 月起由本中心加派 2 組人力，使用 TOPCON GB1000 型 GPS 衛星接收儀，對 X101 及 X201 一併辦理外業觀測作業，作業時間與原本觀測之 I017 等 5 個一等水準點相同。

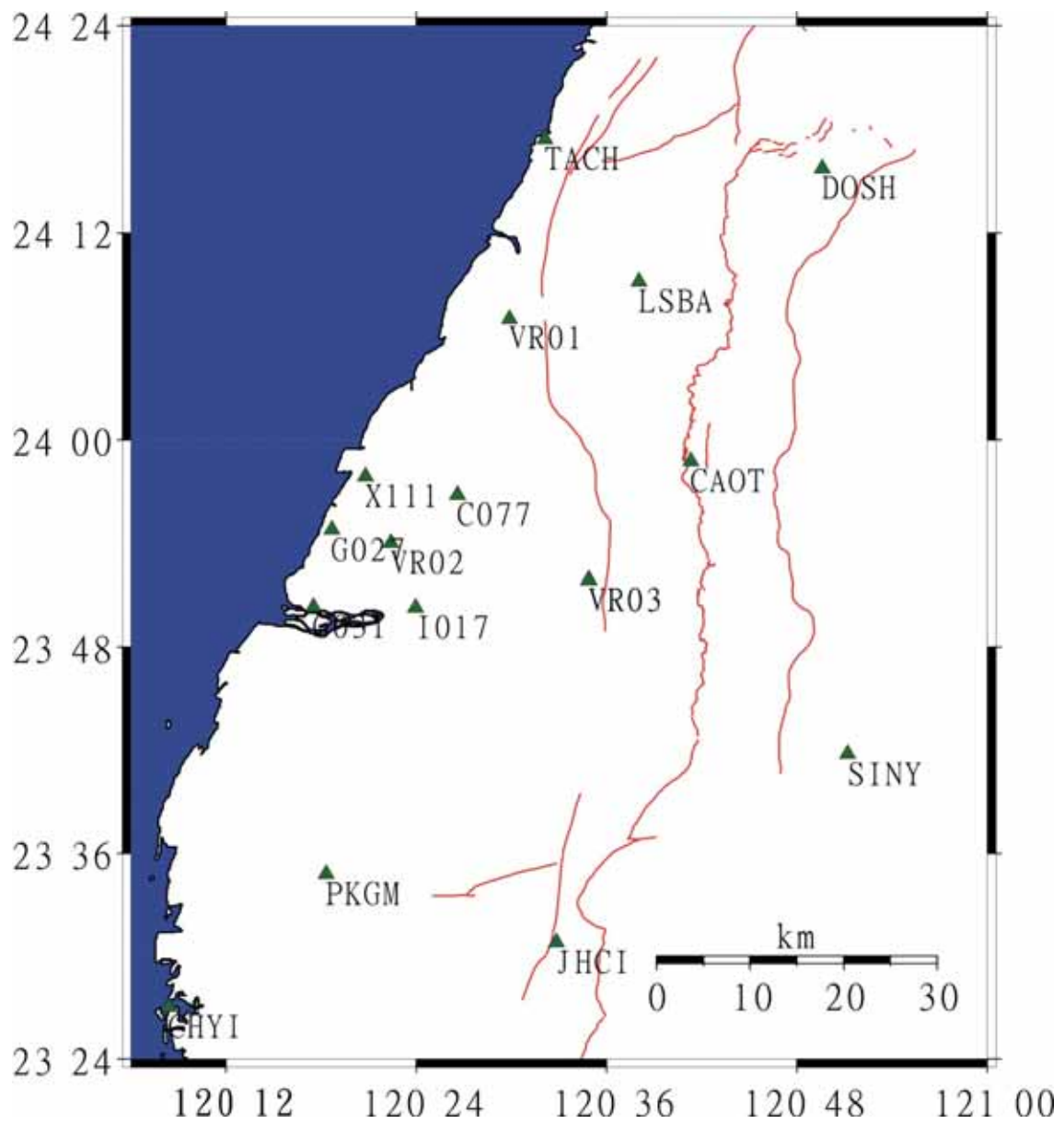


圖 3-3：本次研究範圍之一等水準點分布圖



圖 3-4：一等水準點 I017 GPS 外業觀測照片及點位近照



圖 3-5：一等水準點 X101 GPS 外業觀測照片及點位近照

表 3-1 本次研究蒐集連續站資料

點號	點名	備註
VR01	和美所	彰化縣政府建置
VR02	二林所	彰化縣政府建置
VR03	田中所	彰化縣政府建置
TACH	台中港站	內政部建置
DOSH	台中東勢站	內政部國土測繪中心建置
SINY	南投信義站	內政部國土測繪中心建置
JHCI	嘉義竹崎站	內政部國土測繪中心建置
PKGM	雲林北港站	內政部建置
CHYI	嘉義東石站	內政部建置
CAOT	南投草屯站	內政部國土測繪中心建置
LSBA	中心本部	內政部國土測繪中心建置
S01R	澎湖白沙	中央研究院建置
TNML	工研院	工業技術研究院量測中心建置
CK01	成功大學	成功大學建置

表 3-2 一等水準點觀測時間及測站名稱

項次	觀測日期	一等水準點
1	95.05.04	C077、I017、G027、G031、X111
2	95.05.22	C077、I017、G027、G031、X111
3	95.06.02	C077、I017、G027、G031、X111
4	95.06.15	C077、I017、G027、G031、X111
5	95.06.29	C077、I017、G027、G031、X111
6	95.07.20	C077、I017、G027、G031、X111
7	95.07.28	C077、I017、G027、G031、X111
8	95.08.11	C077、I017、G027、G031、X111
9	95.08.25	C077、I017、G027、G031、X111

10	95.09.07	C077、I017、G027、G031、X111
11	95.09.21	C077、I017、G027、G031、X111
12	95.10.05	C077、I017、G027、G031、X111
13	95.10.19	C077、I017、G027、G031、X111
14	95.11.02	C077、I017、G027、G031、X111
15	95.11.16	C077、I017、G027、G031、X111
16	95.11.30	C077、I017、G027、G031、X111
17	95.12.14	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
18	95.12.28	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
19	96.01.11	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
20	96.01.15	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
21	96.02.08	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
22	96.03.03	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
23	96.03.13	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
24	96.03.29	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
25	96.04.12	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201
26	96.04.26	C077、I017、G027、G031、X111、X101、X201

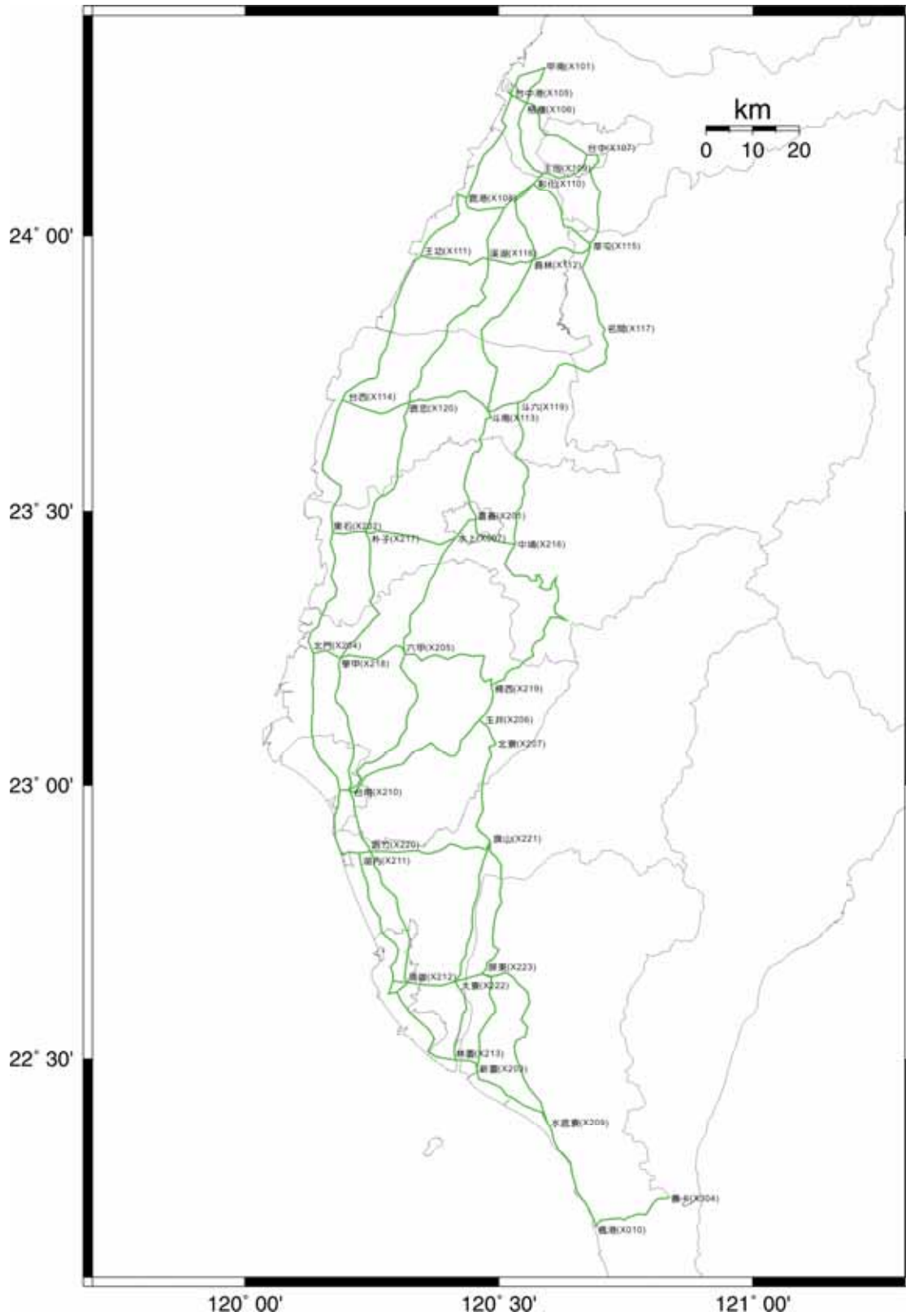


圖 3-6 94 年度一等水準網檢測工作施測水準路線圖

3-3 資料處理

一、資料格式轉換

外業獲得點位觀測資料檔為 Binary 格式，須轉換為 GPS 標準交換檔（RINEX，The Reciever Independent Exchange Format）格式之檔案（簡稱為 O 檔）以便利後續資料處理。RINEX 格式最重要需注意的是儀器點名（MARK NMAE）、儀器高、天線盤型式及量測位置，雖然儀器實際計算過程中係以相位中心（Phase Center）為主，但實際上外業過程中無法量測此一位置，故通常以量測至天線盤半徑外緣或者天線盤鎖螺絲處平面（俗稱 ARP，Antenna Reference Plane）詳如圖 3-7，另真正計算過程中，相位中心亦並非真實位於物理中心詳如圖 3-8，會依據衛星訊號所在方向（高程角和方位角）不同而有所差別，各種儀器廠牌天線盤改正值不一，故標準 O 檔中儀器高係以記載量測至 ARP 為主，而 ARP 至相位中心之改正參數則依美國國家大地測量局（NGS）網頁公佈資料為主，詳見網頁 <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> 如圖 3-9。

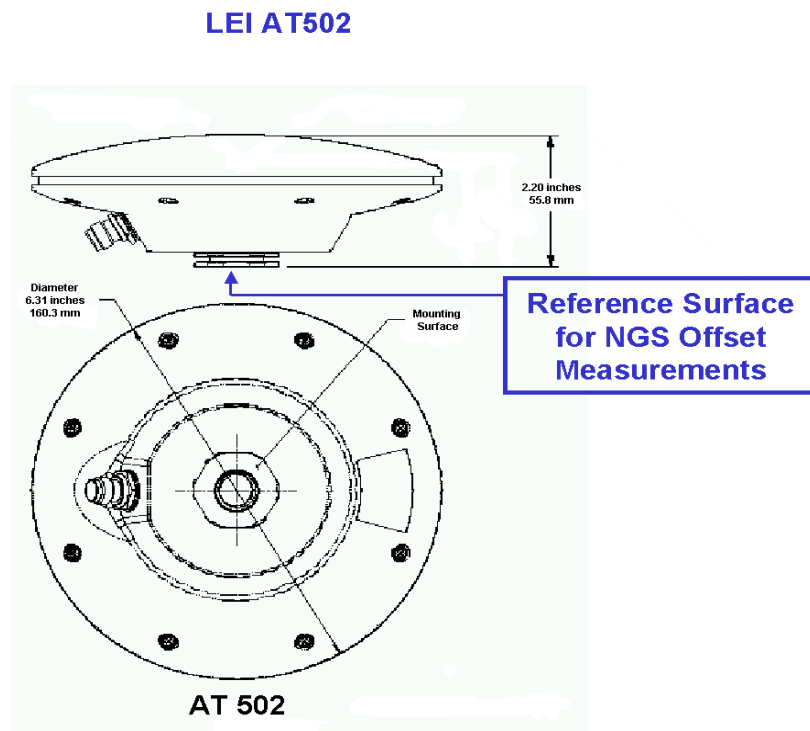


圖 3-7：LEICA AT502 天線盤及 ARP 量測位置示意圖

Phase Center Variation (mm)

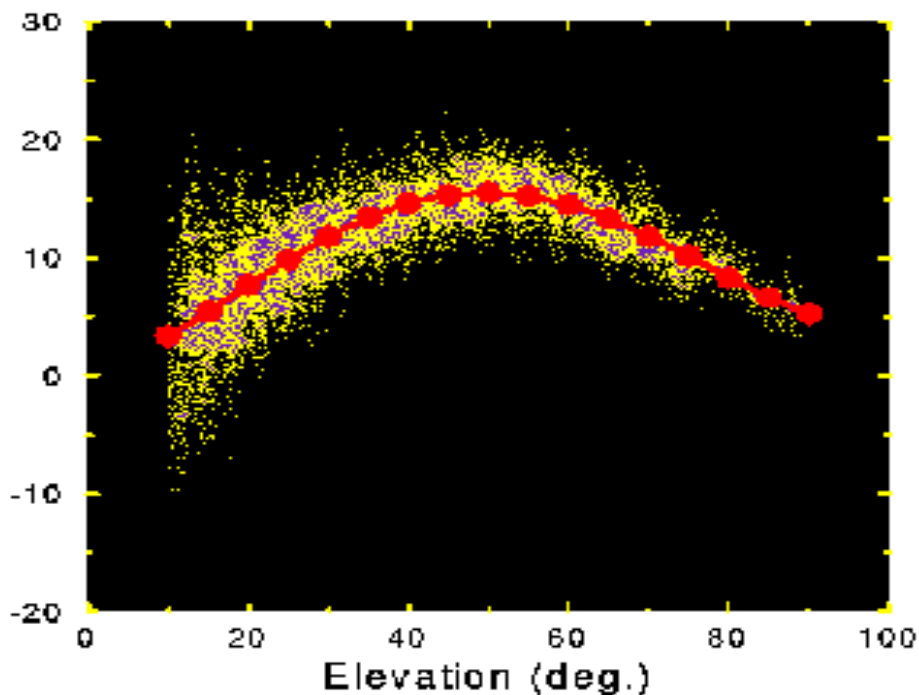


圖 3-8：相位中心變動示意圖 (NGS 網頁)

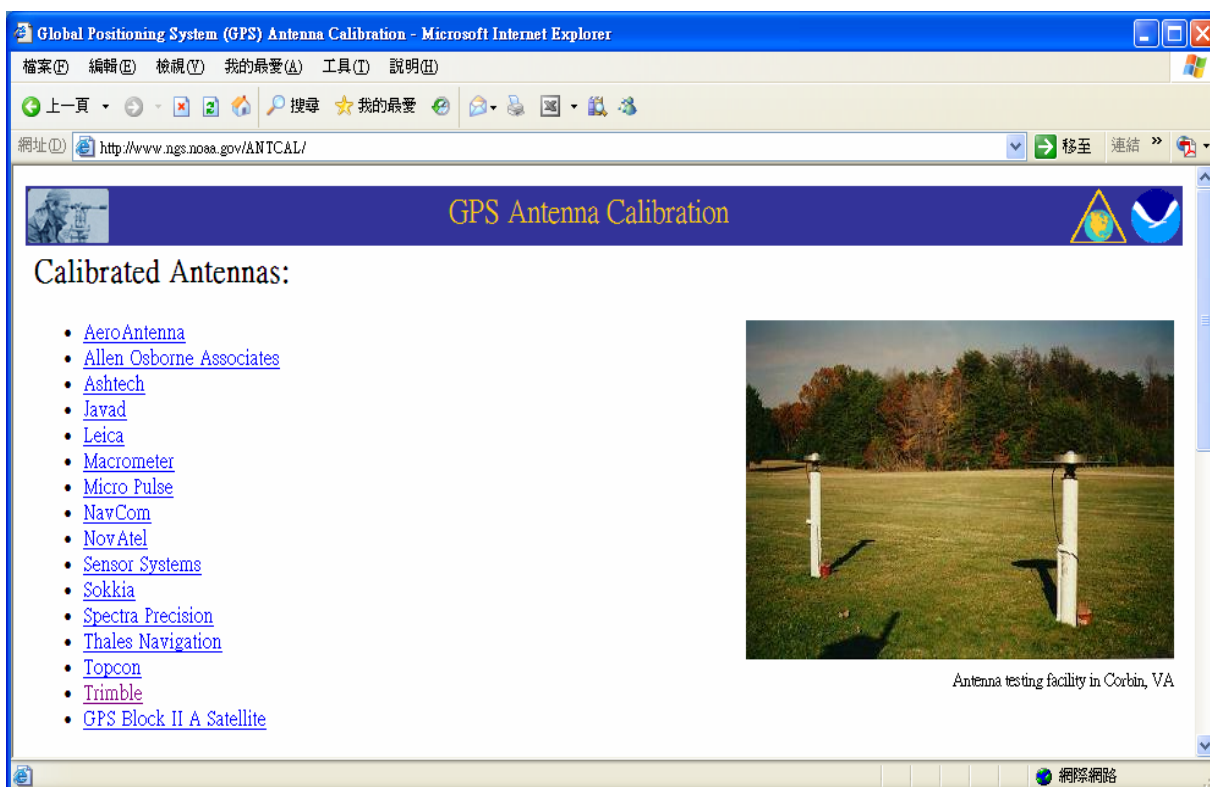


圖 3-9：NGS 相位中心率定成果網頁

二、精密星曆

衛星軌道的精度直接影響 GPS 定位成果的精度，目前隨儀器下載的資料為廣播星曆（預報星曆），是經由追蹤資料預估編算而來，而一般高精度測量則採用精密星曆（後處理星曆），是由已知地面坐標的衛星追蹤站，長期追蹤觀測衛星之數據整體推算所得，目前國際主要精密星曆資料由 IGS（International GNSS Service）彙整比對數個計算中心而成，提供產品包含廣播星曆、超快速星曆（2 種）、快速星曆及精密星曆等等，相關星曆資料精度如下表 3-3，本次作業採用最終精密星曆（igsXXXX#.sp3，其中 XXXX 表示 GPS Week，#表示星期內第幾天，星期天以 0 表示），至 IGS 所架設 FTP 站下載而得。

表 3-3 IGS 提供各式星曆精度及資料比較表（彙整自 IGS 網頁）

IGS GPS Product Table					
GPS 衛星星曆 /測站及衛星時鐘延遲		精度	發佈時間	更新頻率	取樣間隔
廣播星曆	軌道	~200 cm	real time	---	daily
	衛星時鐘	~7 ns			
超快速星曆[半預測] [igu]	軌道	~10 cm	real time	four times daily	15 min
	衛星時鐘	~5 ns			
超快速星曆[半預測] [igu]	軌道	<5 cm	3 hours	four times daily	15 min
	衛星時鐘	~0.2 ns			
快速星曆[igr]	軌道	<5 cm	17 hours	daily	15 min
	衛星時鐘	0.1 ns			5 min
精密星曆[igs]	軌道	<5 cm	~13 days	weekly	15 min
	衛星時鐘	<0.1 ns			5 min

三、GPS 衛星參數下載

在 Bernese 計算過程中，除需外業觀測資料檔及精密星曆資料外，還需要 GPS 衛星參數檔，包含 SATELLITE.TTT（記錄衛星的重量、第幾代衛星、天線偏移量、啟用及結束時間等等）、C04_2007.ERP（紀錄每天的極運動量、UT1-UTC 時間差及每天潤秒等等）及 SAT_2007.CRX（紀錄各類衛星資料品質不佳的原因、處置方式及期程）等等資訊，相關資料檔案可至瑞士伯恩大學所架設網站下載。

四、作業流程

GPS 資料的處理是採用 Bernese 4.2 版，此軟體是由瑞士伯恩大學天文研究所所開發的。除一般性 GPS 處理功能外，另有計算軌道參數、極運動(Polar motion)參數、電離層模式推求、對流層折射附加參數與模擬 GPS 資料之功能 (Rothacher, 1996)。在本研究中，對 GPS 資料之處理可分為前處理(Pre-Processing)與後處理(Post-Processing)。前處理之概略流程如下：

- (1) 將原始資料轉成 RINEX 格式，再轉成 Bernese 格式。
- (2) 自精密星曆中萃取出各衛星之時錶修正量以供後續處理之用。
- (3) 將精密星曆轉成表列型式，再組成 Bernese 格式之軌道。其中組軌道之原則：利用每天之精密星曆，組成—24 小時之軌道，包括 6 個刻卜勒軌道元素與 2 個 ROCK4/42 模式之太陽輻射參數。作為資料修編與後處理之用。
- (4) 進行電碼資料之檢查，剔除錯誤觀測量。
- (5) 利用電碼資料進行單點定位，計算測點坐標及接收儀時間誤差量，並將時間修正於相位資料中，以便接收儀之時間能準確至 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 秒左右。
- (6) 組成獨立的基線網一次差觀測量，即將所有測站依最短基線與最多觀測量之原則，組成線性獨立的一次差觀測量。
- (7) 利用精密星曆與衛星時錶資料進行資料之修編、跳週之補正(Cycle slip editing)、時錶差修正、錯誤觀測量或觀測量不能使用之標示(Mark)。對於跳週之處理，採自動偵測與補償。

而後處理之流程與採用的模式敘述如下：

- (1) 軌道部份：採用 IGS 精密星曆。所有軌道參數視為已知，

- 固定之而不加以求解。
- (2) 極運動改正：採用 IERS (International Earth Rotation Service) Bulitine B 公佈值，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正之，並將坐標值由瞬間極之坐標系修正至 2000 平均極(CIO)坐標系上。
 - (3) 引力位模式：採用 GEM-T 3(8×8) ，其中；
 $C_{21} = -0.17 \times 10^{-9}$ ， $S_{21} = 1.19 \times 10^{-9}$ ， $GM = 398600.4415$
 km^3/s^2 ，日、月引力及地球固體潮(Solid earth tide)也加以考慮。
 - (4) 坐標系以蔡旻穎等所發展出固定站方式求解模式，從 IGS 固定站推算台灣地區 S01R (澎湖，中研院建置)、TNML (新竹，工研院建置)、CK01 (台南，成功大學建置)、KDNM (墾丁，內政部建置)、KMNM (金門，內政部建置) 等5站坐標及速度場，本研究資料解算均約制在上開點位成果。
 - (5) 對流層折射修正：採用 Saastamoinan 模式以該月份海平面平均氣象值推算至測點，再加以修正；並利用附加參數，以各測站每2小時增加1個參數之方式，加以吸收殘留的對流層折射誤差。
 - (6) 觀測資料選定仰角15度以上部份才用之於計算，此乃為避免在低仰角度觀測時伴隨的較大雜訊(Noise及 multipath)所造成之影響。
 - (7) 相位未定值求解之過程，乃先利用實數解求得一精確之坐標(或利用以前計算過之坐標值)，然後採用 QIF (Quasi Ionosphere-Free) 方法，求得 L_1 和 L_2 的整數週波未定值，再組成"ionosphere free" L_3 ，並將解得 L_1 和 L_2 的整數週波未定值代入無電離層效應之觀測方程式中(L_3)，開始求解其餘各未知參數。

五、速度場及時間序列

為了解本次研究區各固定站及水準測點的下陷速度及變形行為，我們利用每次 GPS 觀測坐標的成果，進行各個測站速度之評估。因為這段時間內並無明顯地震發生，在不考慮地震對地表位移所造成之影響下，根據時間序列的型態，利用下列方程式，針對第 n 個測站的第 i 個坐標分量之時間序列進行擬合。

$$X_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + v_n^i$$

其中 a_n^i 為截距， b_n^i 為測站速率， v_n^i 為殘差值， t 為時間點。利用最小二乘法原理 ($\sum v v = \min$)，我們將上述方法應用到各個測站的各個座標分量，評估各測站的速度場。

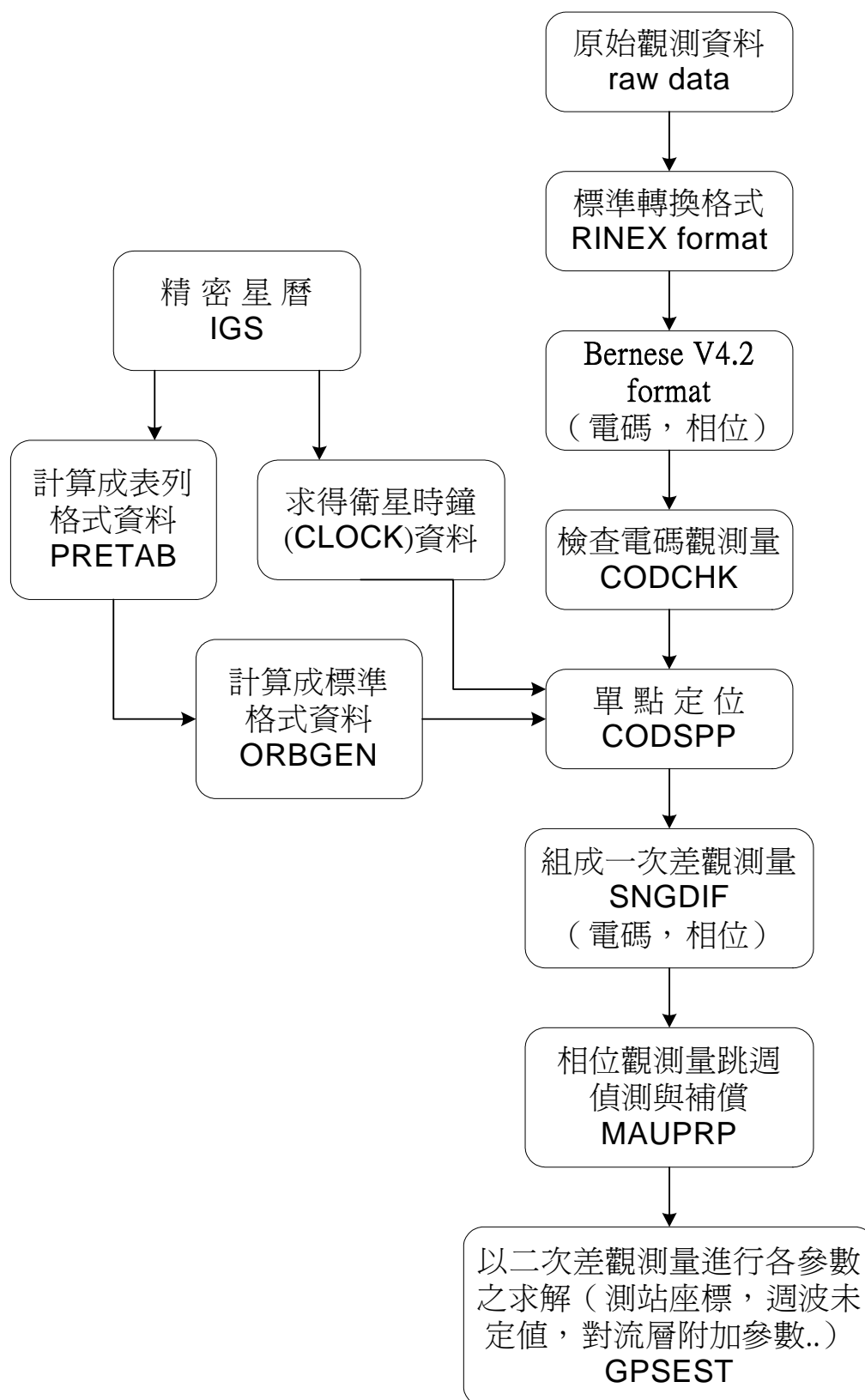


圖 3-10: GPS 衛星資料之處理流程

第四章 成果計算與分析

4-1 固定站成果分析

為確認台灣中部地區的絕對下陷情形，我們蒐集本中心所設置之「eGPS 即時動態定位系統」中部份 GPS 連續站資料，來分析其變化情形，參考蔡旻穎等（2007）利用 1995-2005 年間，選擇 IRKT（俄羅斯）、PERT（西澳）、TSKB（日本）、IISC（印度）及 GUAM（關島）等國際 IGS 站資料作為國際約制站（圖 4-1），求解出國內約制站的速度場及坐標，共計求解出 CK01（成大）、KDNM（墾丁）、KMNM（金門）、TNML（新竹工研院）及 S01R（澎湖白沙）國內約制站，其所考量係指較穩定且連續觀測資料。後續國內站追蹤站成果則採上述 5 站成果資料約制計算。

其中因為 TNML 雖然 2001 年才有資料，但其為目前台灣在 IGS 國際追蹤站網之連續站（國內目前僅 2 站加入，另一站為國家標準時間實驗室 TWTF，位於中壢），仍納入計算。成果顯示在外島的金門(KMNM)在高程方向每年約抬升 2.43mm，墾丁(KDNM)每年約抬升 3.88mm，台南成大(CK01)每年約下降 0.56mm，新竹工研院(TNML)每年約下降 8.32mm。

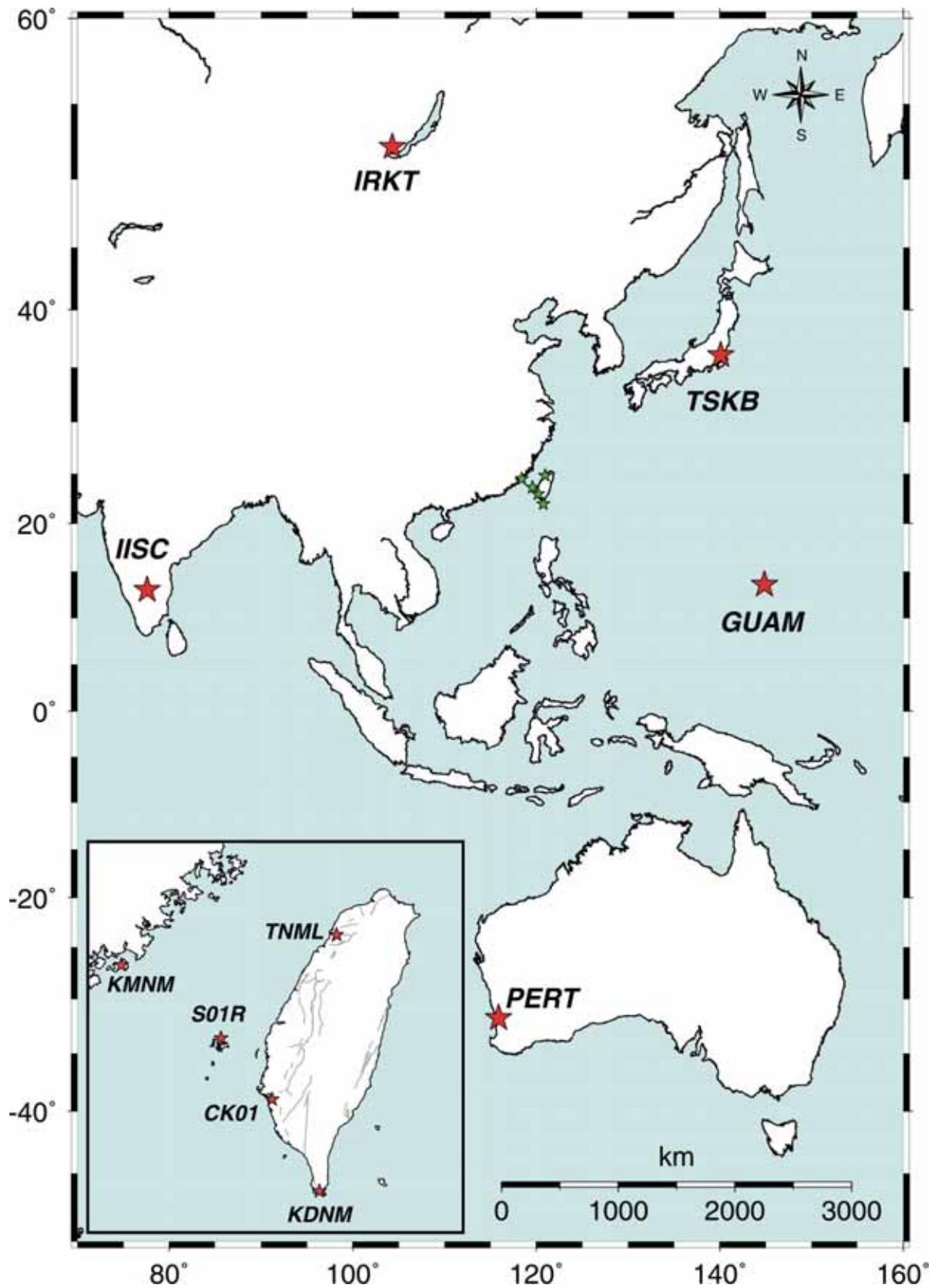


圖 4-1 使用 IGS 及國內約制站分布示意圖

根據前述所提蒐集之本中心布設之 eGPS 即時動態定位系統之固定站資料，由 2005 年 1 月 1 日到 2007 年 5 月 30 日約 2 年半的時間計算所得，約制在前述推算之 CK01、KMNM、KDNM、S01R 及 TNML 坐標及速度場，求解中部地區連續站測站之每日坐標解，再經由 (3-1) 式所述方程式，利用最小二乘法原理 ($\sum v v = \min$)，我們將上述方法應用到各個測站的各個坐標分量，評估各測站的速度場，經求解成果如下表 4-1 及圖 4-2。

成果顯示台灣中部地區從以彰化縣境內之二林地政事務所 (VR02) 下限量達 77.65mm/yr 最大，其餘點位變化量多在 10mm/yr 以下。另位於山區點位如 DOSH (東勢所)、KAFN (南投高峰)、PLIM (埔里)、SINY (南投信義) 及 WULI (武陵農場) 等點位均處車籠埔斷層上盤者，高程方向均為抬升，此結果與陳鶴欽等 (2005) 年之研究相符。

另外我們參考中央研究院地球科學研究所郭隆晨博士架設網站結果顯示 (如表 4-2)，除埔里 (PLIM) 趨勢不一致 (惟差值僅 4.4mm)，其餘趨勢均一致且最大差值不超過 5mm，顯示本研究使用連續觀測計算出之水平速度場及高程方向變化量與其相符，成果可靠。

表 4-1 本研究使用台灣地區追蹤站速度場成果 單位:mm

sta	位置處	Ve	Vn	Vh	σ_e	σ_n	σ_h
CAOT	草屯所	23.80	-9.16	-0.99	0.01	0.01	0.02
DOSH	東勢所	24.15	-6.45	2.56	0.01	0.01	0.02
FCU1	逢甲大學	17.29	-10.33	-2.02	0.05	0.04	0.13
FLNM	鳳林所	2.09	10.70	-5.17	0.01	0.01	0.01
KAFN	南投高峰	-9.36	2.90	8.67	0.01	0.01	0.02
KDNM	墾管處	-14.81	-3.29	-0.04	0.01	0.01	0.01
KMNM	金門	31.32	-10.43	-1.63	0.01	0.01	0.01
MZUM	馬祖	30.14	-11.07	-3.87	0.01	0.02	0.02
PLIM	埔里	-5.26	-3.61	0.45	0.03	0.03	0.06
S01R	澎湖	30.68	-13.44	2.67	0.00	0.00	0.01
SINY	南投信義	1.60	-1.14	8.42	0.01	0.01	0.03
TIAN	苗栗泰安	-17.03	-43.60	-8.46	5.51	6.89	18.37
TNML	新竹工研院	30.42	-7.05	-1.11	0.00	0.01	0.01
VR01	和美所	27.98	-12.19	-4.98	0.01	0.01	0.02
VR02	二林所	26.94	-12.34	-77.65	0.01	0.01	0.02
VR03	田中所	29.14	-11.44	-1.17	0.01	0.01	0.02
WULI	武陵農場	25.90	0.19	11.64	0.01	0.01	0.03
YMSM	陽明山	33.93	-12.24	-3.52	0.01	0.01	0.01

表 4-2 本研究中部地區連續站與中研院成果高程方向差異與比值

單位:mm

sta_CORIS	Vh_NLSC	Vh_SINICA	較差值	比值
CAOT	-3.7	-6.2	2.54	0.59
DOSH	-0.1	-1.8	1.69	0.06
FCU1	-4.7	-7.1	2.41	0.66
FLNM	-7.8	-9.7	1.86	0.81
KAFN	6.0	4	2.00	1.50
PLIM	-2.2	2.2	-4.42	-1.01
SINY	5.8	5.1	0.65	1.13
TNML	-3.8	-2.4	-1.38	1.58
VR01	-7.7	-7.1	-0.55	1.08
VR02	-80.3	-79.3	-1.02	1.01
VR03	-3.8	-6.8	2.96	0.56
WULI	9.0	3.9	5.07	2.30

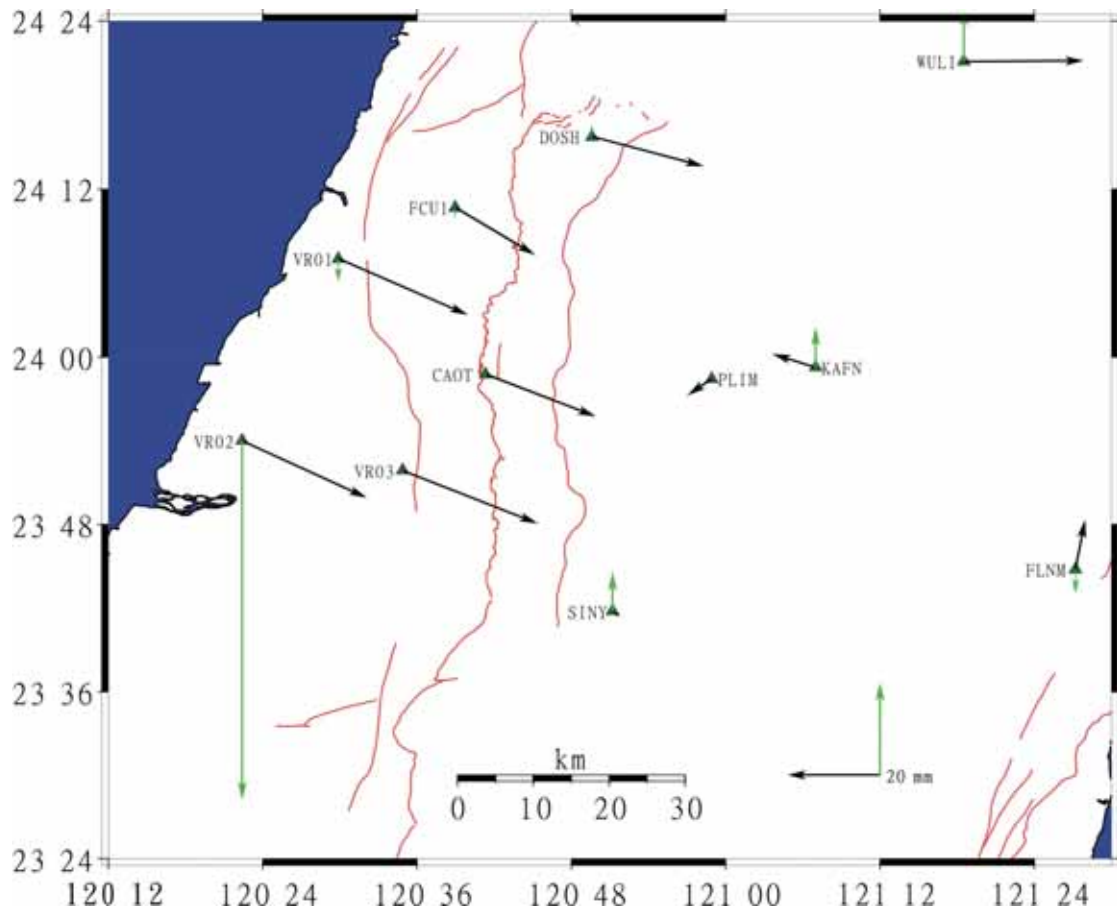
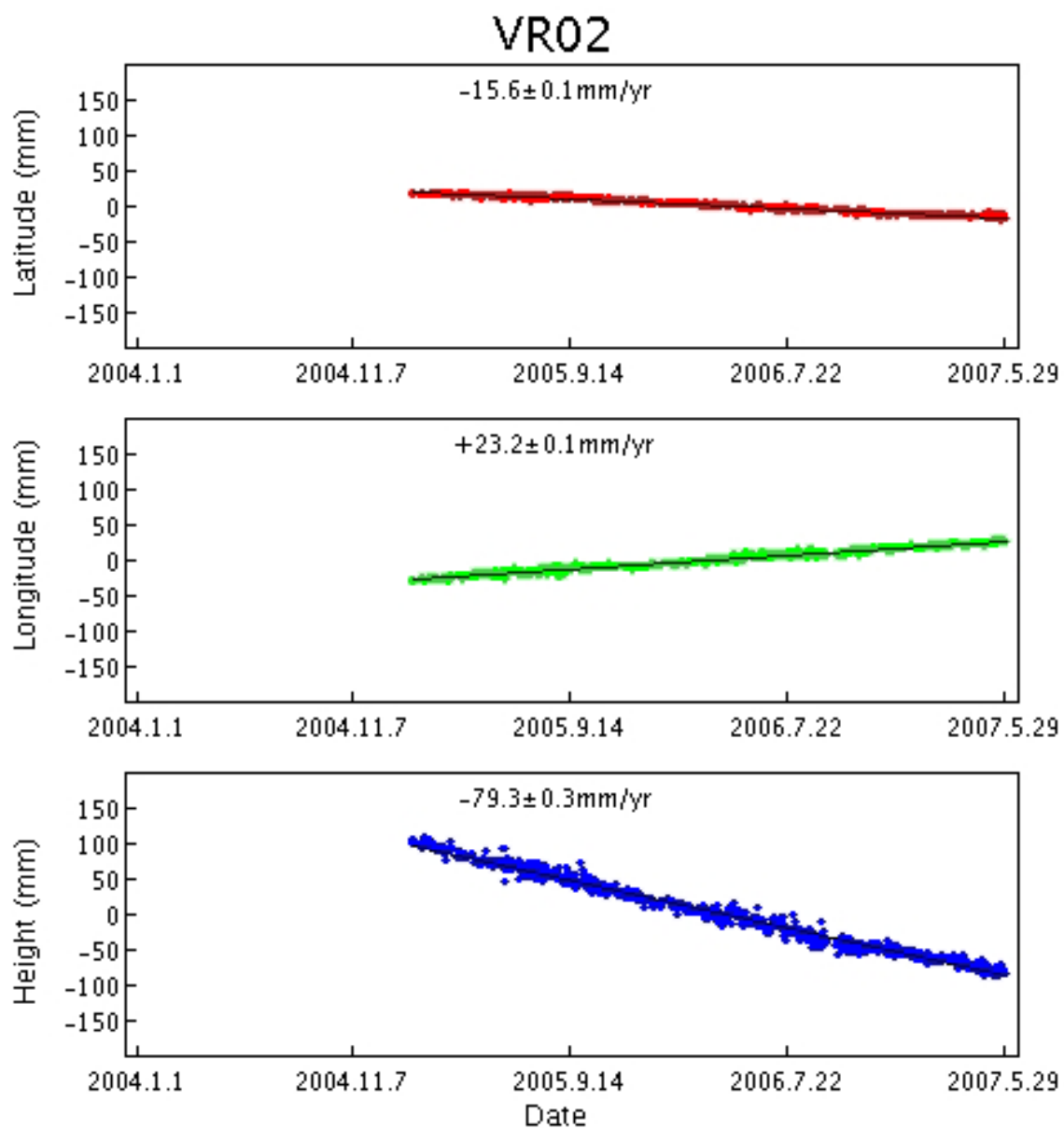


圖 4-2 本研究使用中部地區部分連續站速度場，其中黑色線代表水平速度場及方向，綠色線代表高程方向速度場，往上表抬升。



© IESAS-2006 <http://gps.earth.sinica.edu.tw>

圖 4-3 中研究地球所網頁公布之二林所 (VR02) 之時間序列，顯示高程方向速度量約為 -79.3 mm/yr (郭隆晨, 2007)

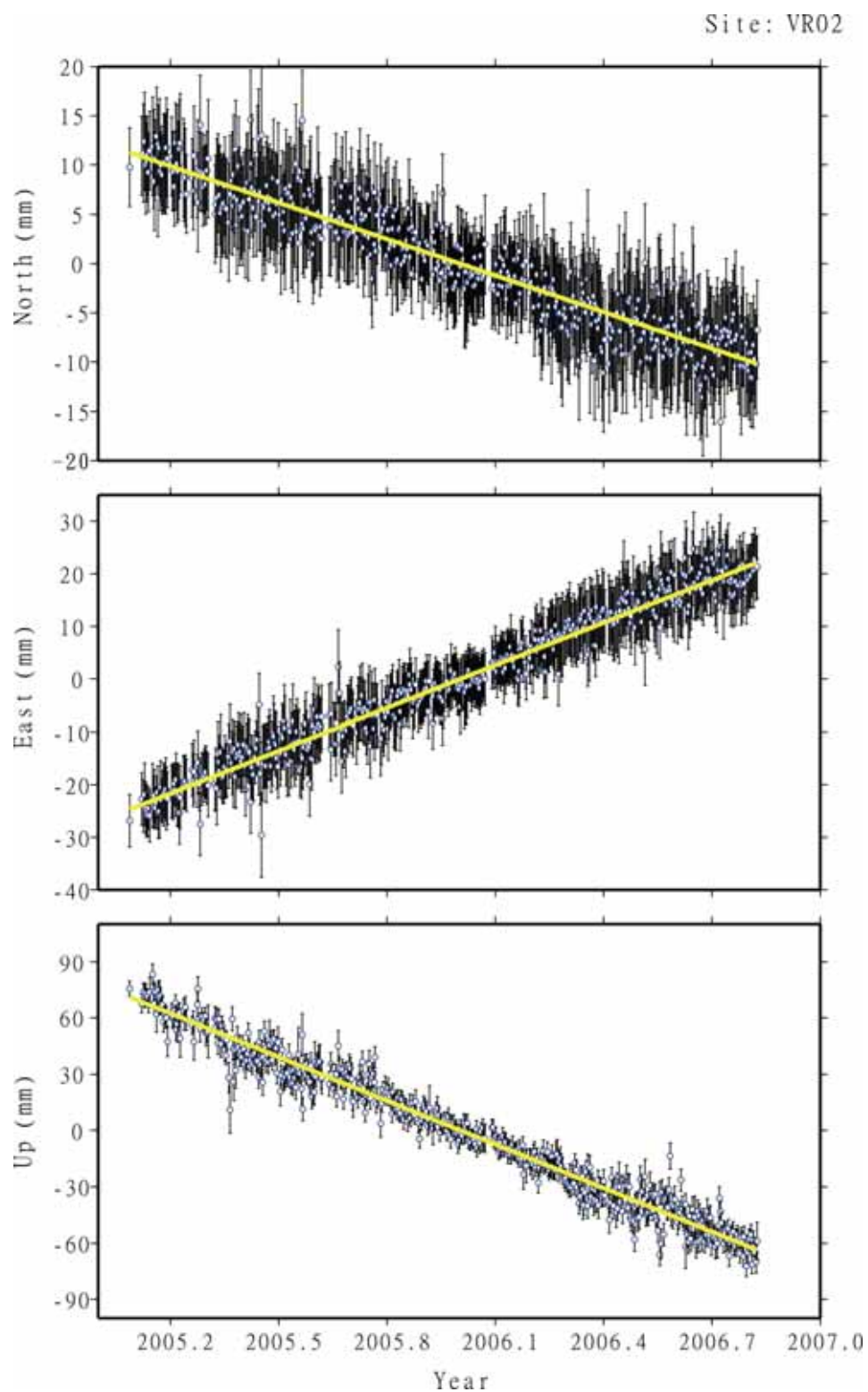


圖 4-4 本研究計算之二林所 (VR02) 之時間序列，顯示高程方向速度量約為 -80.3 mm/yr 。

4-2 監測站成果分析

本研究所安排觀測之一等水準點均環繞二林所 (VR02)，起因乃中央研究院於 2003-2004 年之連續站資料發現 VR02 之下陷速率甚快約 10mm/yr，促使彰化縣政府測量隊在抽調現有儀器設備及人力，以期了解轄區內之土地變化情形。實際上，本次研究所監測之一等水準點，因為相關點位尚須配合內政部一等水準點測量檢測作業、平面視為三等衛星控制點及提供水準測量已知點引測作業，無法架設 GPS 連續固定站供使用及計算，僅能依據前述作業，定期辦理監測作業，希望能夠利用長時間觀測及數學線性迴歸的原理，能取得與連續站一致或達同等級的監測成果。另外在我們本次監測過程中，恰逢內政部國土測繪中心辦理台灣西南部地區一等水準點檢測作業進行中，在 95 年 12 月的審查會中認定「以甲南(X101)及嘉義(X201)可當作約制點(不動點)」(內政部土地測量局，2006)，所以本次研究之外業於 95 年 12 月起增加觀測 X101 及 X201，經過初步計算嘉義節點(X201)因點位附近有栽植闊葉木且被放置一廢棄大型花燈，肇致在高程方向精度不佳，經考量後不納入後續計算討論(如圖 4-5)。

經過計算發現，僅使用 26 次外業觀測時間約 1 年期的監測點計算成果，其結果顯示與連續站約 880 天(約 2 年 5 個月)所求的成果在趨勢方面是正確，但在量值上稍嫌不足，以 VR02 為例，固定站相對於澎湖 S01R 的年下陷率約為 80.32mm/yr (S01R 的絕對下陷量為 2.67mm/yr)，而以定期外業監測為例，其下陷速率約 70.60mm/yr，約為 87.9%，但是所節省成本及後續點位應用更為靈活，詳如表 4-3，圖 4-6、圖 4-7、圖 4-8。另外分析發現一等水準點 X111 及 X101 之高程方向中誤差均超過 10mm，其中 X101 高程中誤差更高達 32mm，將不利於後續成果分析。

表 4-3 本研究使用中部地區 GPS 監測點成果 單位:mm

sta	Ve	Nn	Vh	σ_e	σ_n	σ_h
S01R	0	0	0	0	0	0
TNML	8.83	5.56	-2.39	2.06	1.19	1.72
KDNM	-97.98	19.74	-20.70	6.20	1.85	2.98
KMNM	10.09	0.59	-2.86	2.96	1.59	2.63
PKGGM	6.03	10.66	-14.05	2.27	1.32	6.33
CK01	-8.54	-0.60	-1.91	2.30	1.19	6.86
C077	8.69	6.10	-56.11	3.42	1.41	9.26
CAOT	1.74	3.82	-7.26	2.66	1.32	4.26
CHYI	9.60	1.45	-25.22	2.25	1.06	5.68
DOSH	5.66	9.28	-1.16	2.88	1.39	3.77
G027	9.12	-1.55	-47.37	3.02	1.58	8.01
G031	7.89	2.18	-38.87	2.37	1.64	7.47
I017	7.15	10.48	-17.20	3.36	1.30	5.43
JHCI	-5.38	8.11	3.95	2.60	1.39	4.10
LSBA	7.50	8.39	-3.44	2.76	1.19	5.24
SINY	-19.06	16.71	10.19	3.14	1.48	5.95
TACH	4.44	4.73	-0.29	2.24	1.34	3.97
VR01	3.88	4.88	-5.43	5.75	3.58	7.70
VR02	2.82	3.64	-70.60	2.41	1.10	3.98
VR03	4.88	5.98	-5.71	2.64	1.01	4.40
X111	6.75	1.39	-30.87	2.58	1.36	10.83
X101	2.83	6.08	-85.28	9.82	6.72	32.31

※將澎湖白沙 (S01R) 是為不動點，以其為參考

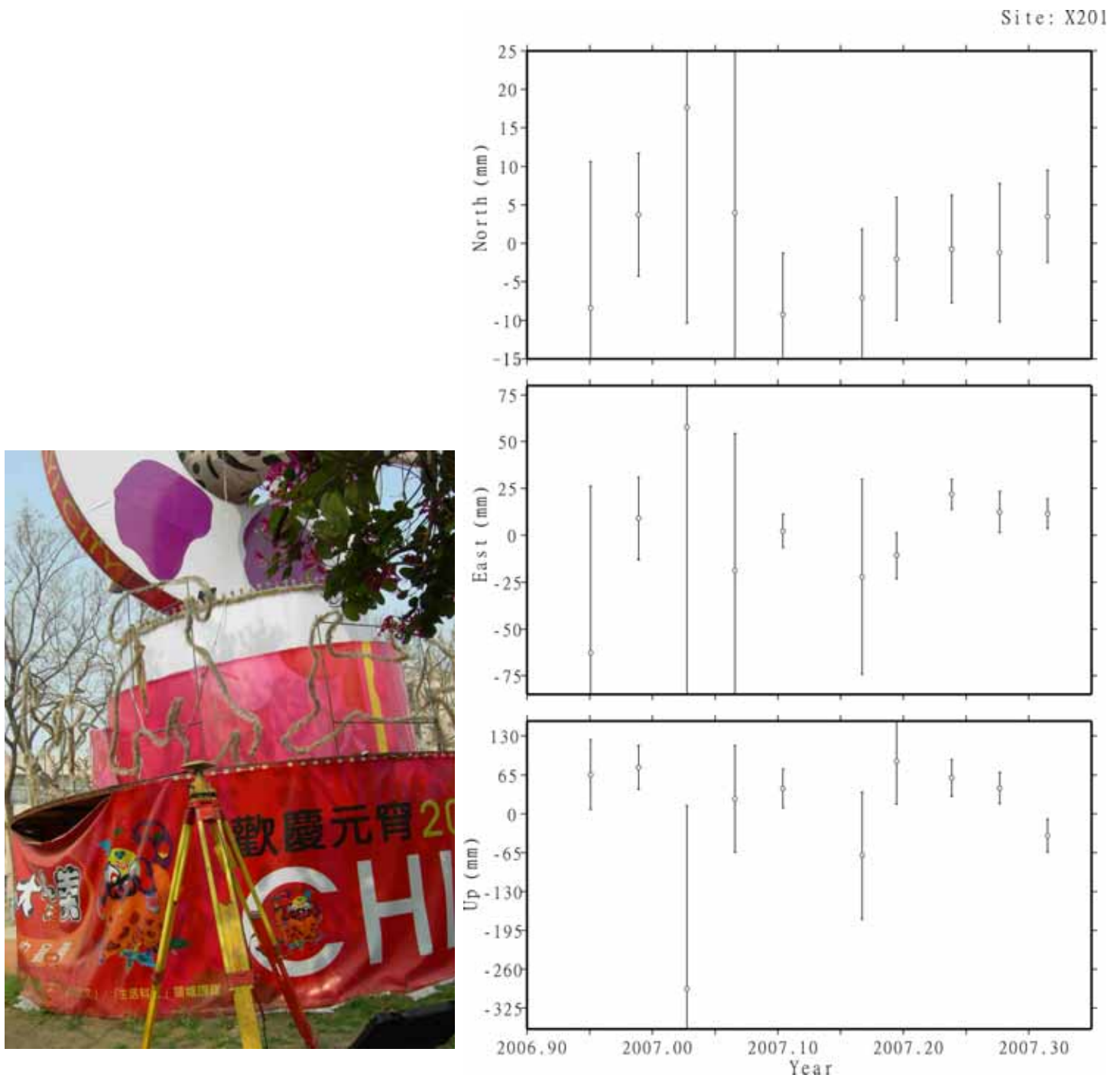


圖 4-5 嘉義節點 (X201) 時間序列圖，高程方向差值約達 32 公分，現場因有廢棄大型花燈，影響高程方向定位成果。X201， $V_e=11.89 \text{ mm/yr}$ ， $V_n=22.28 \text{ mm/yr}$ ， $V_h= -196.72 \text{ mm/yr}$ 。

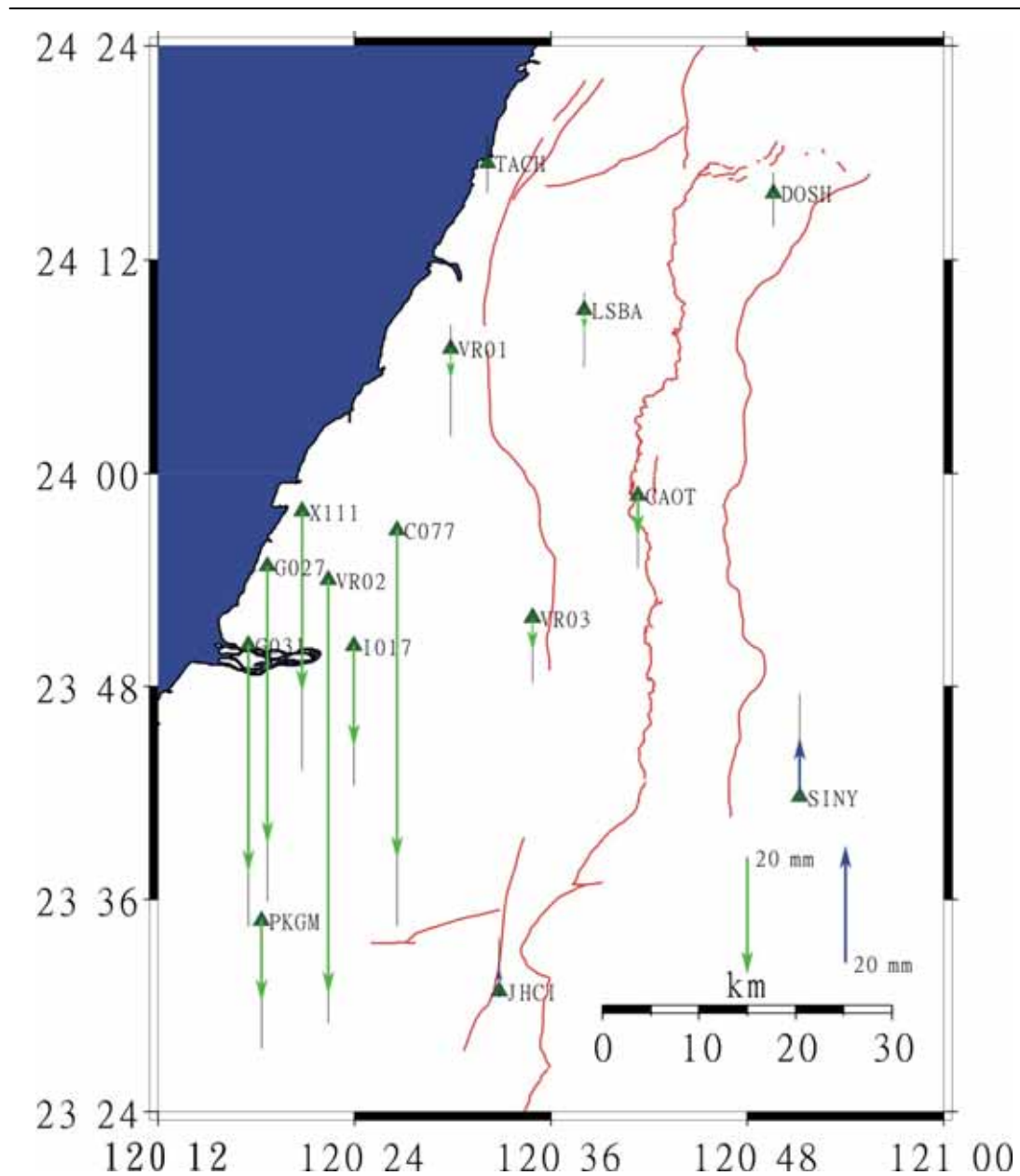


圖 4-6 監測點年下陷量，綠色表示下陷量，藍色表示上升

表 4-4 彰化縣境內連續站之下陷速度比較表

單位:mm

sta_CORS	Vh_880	σ h_880	Vh_26	σ h_26	比值(26/880)
VR01	-7.65	0.02	-5.43	7.70	0.71
VR02	-80.32	0.02	-70.60	3.98	0.88
VR03	-3.84	0.02	-5.71	4.40	1.49

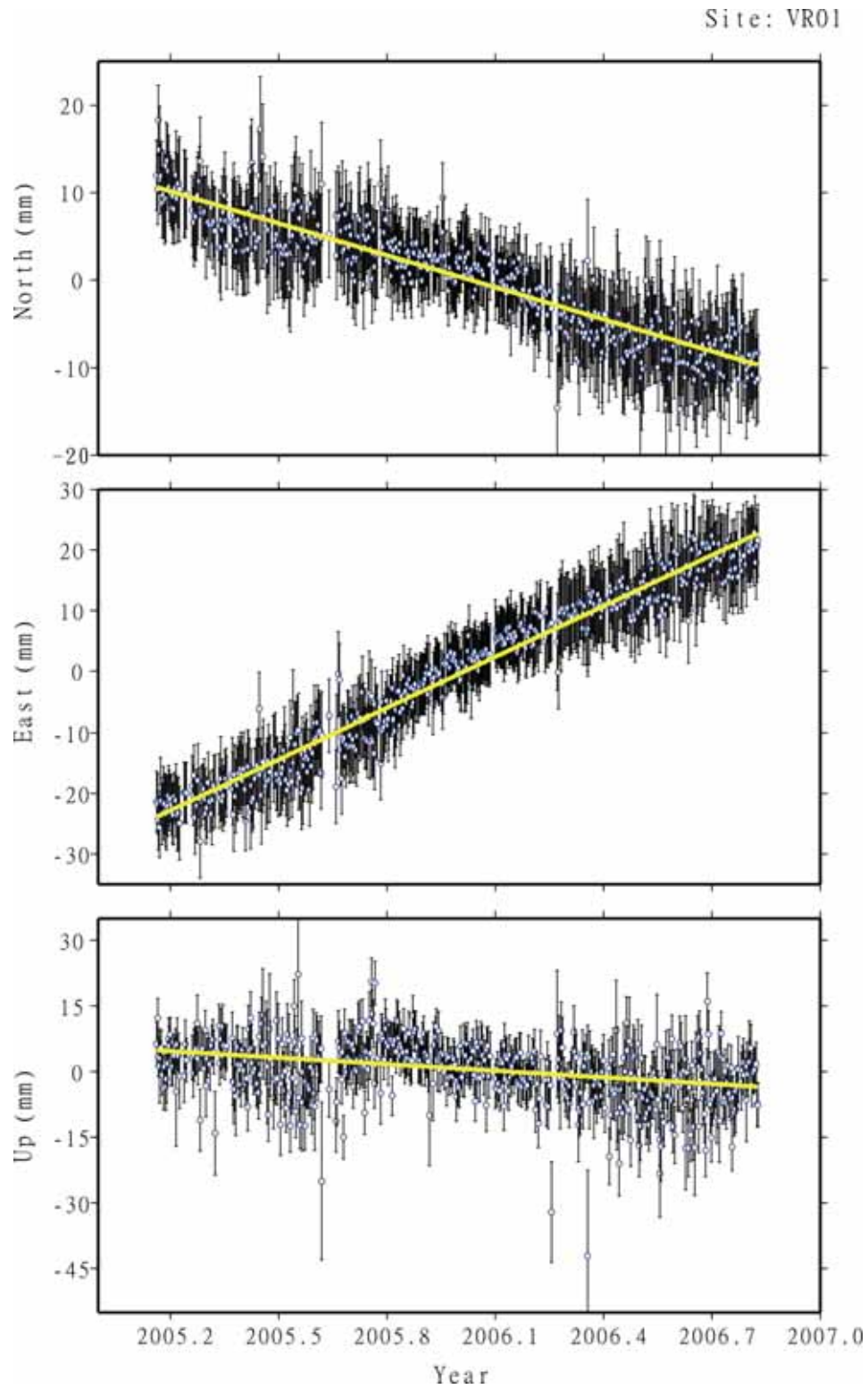


圖 4-7 和美所(VR01)時間序列圖，線性迴歸後求得 $V_e=27.98$ mm/yr， $V_n=-12.19$ mm/yr， $V_h= -4.98$ mm/yr，

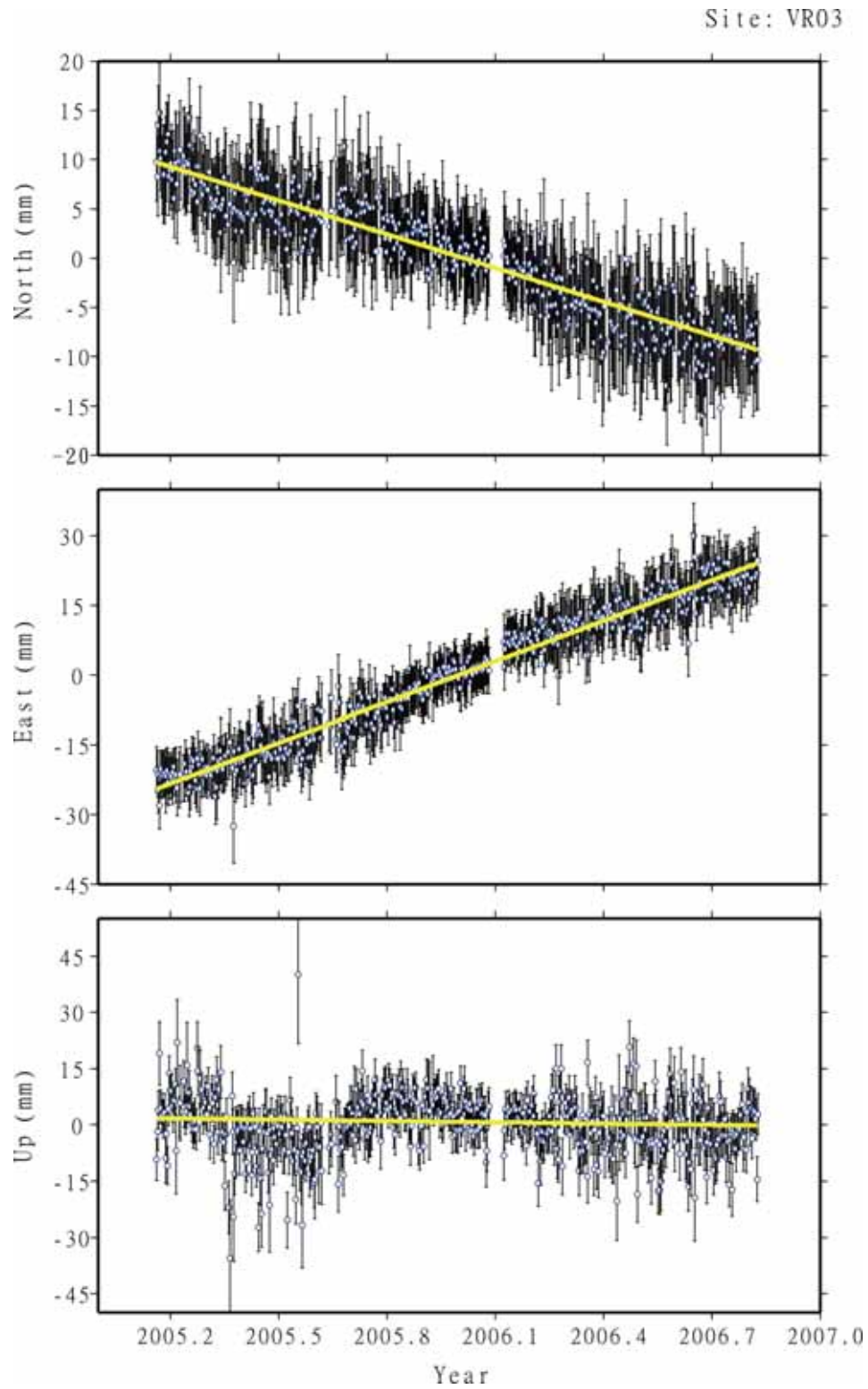


圖 4-8 田中所(VR03)時間序列圖，線性迴歸後求得 $V_e=29.14$ mm/yr， $V_n=-11.44$ mm/yr， $V_h= -1.17$ mm/yr。

4-3 水準測量成果分析比較

在本次作業中，同步蒐集國土測繪中心使用一等精密水準方式辦理台灣西南地區一等水準點檢測作業（如圖 3-7）所測得成果以作為比較，其作業過程簡述如下（詳細算式請參見「94 年度一等水準點檢測報告」，內政部土地測量局 2006）：

- (1) 使用 Zeiss Dini 11/12 電子式精密水準儀及鈹鋼尺。
- (2) 使用精度達 0.2 度（最小讀數 0.1 度）之溫度計，並量測水準尺 0.5m 及 2.5m 處之氣溫。
- (3) 依照一等水準測量要求方式辦理外業觀測，並定期檢校儀器。
- (4) 測段往返測之閉合差 $< 2.5\text{mm}\sqrt{K}$ (K: 單一測段之公里數)。
- (5) 辦理包含視準軸誤差、折射誤差、地球曲率、水準尺溫度、水準尺刻畫及正高改正之各項系統誤差改正。
- (6) 測段往返閉合差分析，檢核均值期望值是否為零且趨於常態分布。
- (7) 環線閉合差分析，在完成系統誤差及人為誤差檢測分析後，環線閉合差應符合 $2.0\text{mm}\sqrt{F}$ (F: 水準環線之總公里數)。
- (8) 水準網最小約制平差計算。
- (9) 水準點沉陷分析。

經過成果分析後，在本次作業中所得之後驗權單位中誤差為 1.398，顯示給予的先驗精度 $\pm 0.63\text{mm}$ 過於樂觀估計，經過調整後，可求得本次水準網每公里觀測精度約為 $\pm 0.88\text{mm}$ ，而點位高程標準偏差最大值位於水準點 X304，其值為 $\pm 9.06\text{mm}$ ；最小值位於水準點 T9798，其值為 $\pm 0.79\text{mm}$ 。水準網約制平差計算中，經高程變動量分析後，37 個已知節點中共有 17 個節點，其高程變動量不顯著作為約制平差之約制點位，總觀測量為 773，水準點數為 745，多餘觀測數為 45，後驗單位權中誤差為 3.216。其約在平差後之結果詳如圖 4-9。

另外我們將本次觀測所使用到一等水準點點位之 GPS 觀測結果 (2006.4–2007.5) 與水準測量 (2003–2006) 結果做比較如表 4-6，X111、C077 及 G027 等三點的下陷速度差都在 10% 以內，惟依據內政部報告之水準成果約制在 X101 (甲南) 及 X201 (嘉義) 等節點，而 GPS 是源自 IGS 等站，可視為高程方向絕對變化，倘以此觀點，水準點 X101 在 GPS 觀測中為下陷 85.28 mm/yr，若將其他一等水準點依此值平移則將全數轉為抬升，此與現況不符，推論 X101 因觀測時間僅約 5 個月，如圖 4-11 (2006.12–2007.4)，所回歸時間仍不足完全表現其真實狀況，應再延長觀測時間週期 (例如其他點位至少為 1 年)。

表 4-5 中 G031 (台西社區) 一等水準與 GPS 監測下陷速度差約 14.5mm/yr 約 30%，及 I017 (自強大強北) 一等水準與 GPS 監測下陷速度差約 40mm/yr 約 337%，上開 2 點均位於彰化縣西南濱海地區，且鄰近濁水溪，是否受其他地下水層或水系影響，需再蒐集其他資訊並配合地下水及地質等專業領域知識，再作進一步分析與討論。

表 4-5 GPS 與一等水準觀測地層下陷之差值

	V(mm/yr)		
	一等水準	GPS 監測	比值 Level/GPS
X111	-30.14	-30.87	0.98
C077	-54.40	-56.11	0.97
I017	-57.97	-17.20	3.37
G027	-51.71	-47.37	1.09
G031	-50.39	-38.87	1.30

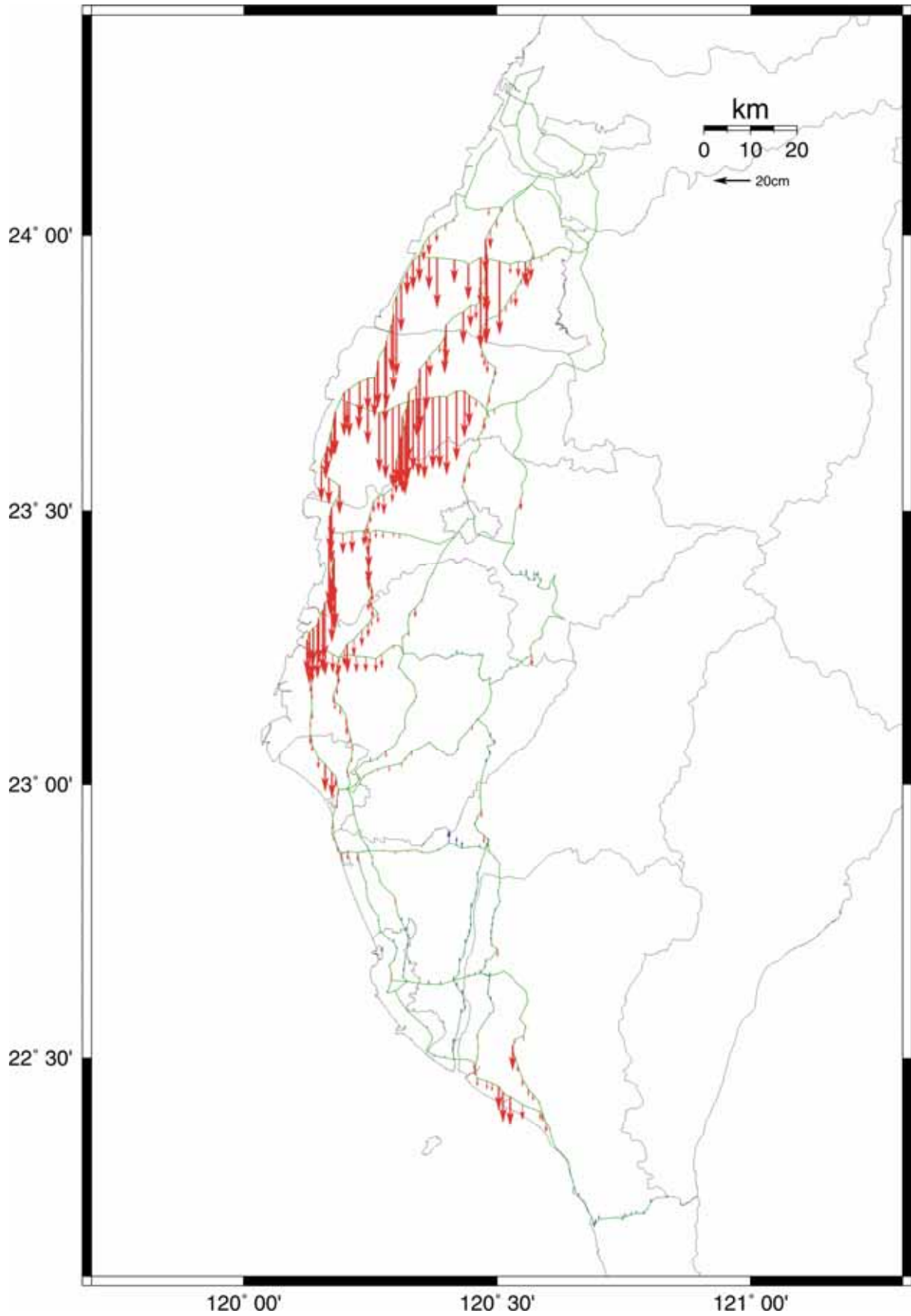


圖 4-9 約制平差後一等水準點與公告高程較差圖

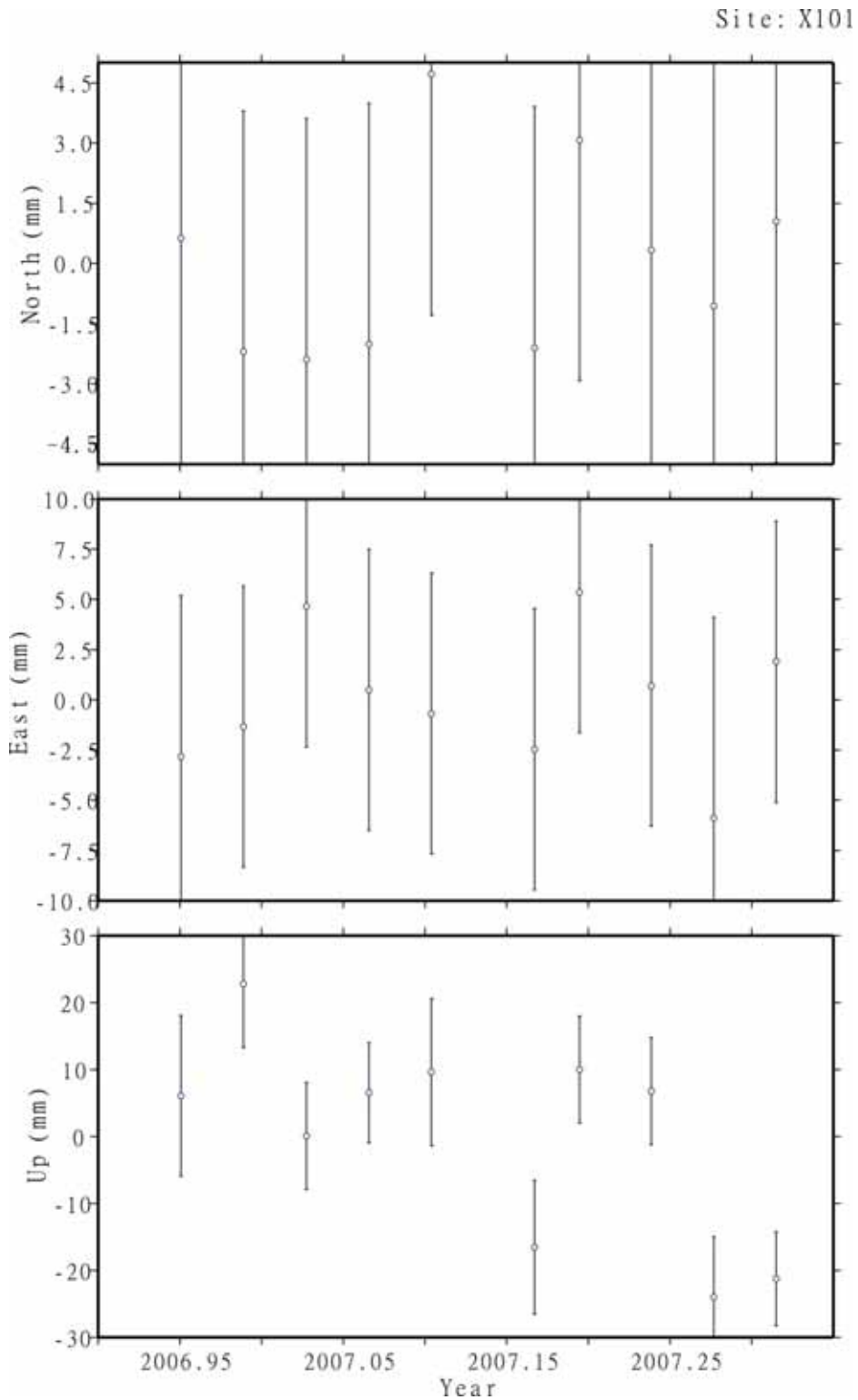


圖 4-10 甲南節點 (X101) 時間序列圖，高程方向差值約達 40 公分以上。X101, $V_e=2.83$ mm/yr, $V_n=6.08$ mm/yr, $V_h= -85.28$ mm/yr

第五章 結論與建議

5-1 結論

本次研究主要目的在於使用長期觀測監測方式配合數學線性迴歸原理，希望能夠得以較經濟及便利的作業方法，得到與連續站方式類似成果及趨勢。另外利用 GPS 成果可以和水準觀測上作一比較，並能夠快速得知國土變化情形，以利國土保安之政策規劃與預防措施，所得結論分析如下：

- (1) 彰化地區之連續站相對於澎湖之高程方向變化量約為 VR01 (和美地政事務所) -7.65mm/yr (下陷)、VR02 (二林地政事務所) -80.32mm/yr (下陷)、VR03 (田中地政事務所) -3.84mm/yr (下陷)。
- (2) 使用 GPS 長期監測作業方式 (一年 26 次) 與連續站每日 24 小時連續觀測方式 (約 2 年 5 個月) 所得成果相當且趨勢一致，如上述 VR01 及 VR03 差值約為 2mm 、VR02 差值約為 10mm ，可節省大量設置連續站所需成本，且不影響點位作有效率且多目標之運用，如提供 TWD97 三維成果及 TWVD2001 正高成果。
- (3) 成果顯示彰化沿海地區確屬嚴重地層下陷地區，除 VR02 每年下陷約 80mm 最為嚴重外，本次監測之其餘一等水準點每年下陷也約在 $17-56\text{mm}$ 間。
- (4) 分析 GPS 監測與一等水準點檢測成果比較顯示，多數點位年下陷速度趨勢一致，下陷量略為相當。如 X111、C077 及 G027 等三點的下陷速度差值都在 5mm 以內，比值約在 10% 以內，顯示 GPS 監測地層下陷應為可行之技術。
- (5) 由 X101、X201 高程精度不佳，可見以 GPS 測量方式辦理高程監測作業，在點位透空度及長時間監測周期均較高，後續辦理各項 GPS 測量作業時，對於點位透空度應確實遵行作業規範要求。

5-2 建議

- (1) 彰化沿海大城、二林地區仍屬嚴重地層下陷地區，有關機關應提出政策如何減緩地層下陷速度，如加強自來水供應，禁止地下水抽取、...等等措施，以維護國土安全及民眾財產。
- (2) 國家測繪單位除對高程系統定期維護外，對於如本研究地區這樣快速變化地區應縮短更新週期，以適時提供正確空間資訊予施政決策支援應用。
- (3) 使用 GPS 長期監測方式監視地層下陷變化，雖無法達到精度水準之精度，但確實可達到與水準測量方式趨勢一致成果，且觀測方法較快速及便利。
- (4) 高速鐵路為國家重大交通建設，VR03（田中地政事務所）位於台灣高速鐵路彰化站附近，每年高程變化量約 1-2mm 雖不致立即影響高速鐵路營運，但應可納入長期監控，以確保臺灣高鐵安全營運及週遭民眾生命財產安全。

第六章 參考文獻

王志添、王顯達、陳滌清、陳乃宇, 2000, , 第 19 屆測量學術研討會, 建國技術學院, p511-519。

陳卉瑄, 2000, 差分合成孔徑干涉雷達應用於偵測集集地震地形變之研究, 碩士論文, 國立成功大學, 105pp。

吳善薇, 2004, 應用雷達干涉法在彰化縣員林地區地層下陷研究, 碩士論文, 國立中央大學, 78pp。

張中白, 2005, 從空中診斷大地-合成孔徑雷達篇, 科學發展月刊, 行政院國家科學委員會, No 390, p18-23。

曾清涼、儲慶美, 1999, GPS 衛星定位測量理論與應用, 國立成功大學衛星資訊中心。

蔡旻穎, 2007, 臺灣 GPS 連續觀測站坐標時間序列分析方法研究, 碩士論文, 國立成功大學, 97pp。

內政部, 2000, 一等水準測量作業規範。

內政部, 2001, 一等一級水準網測量工作總報告書。

內政部, 2003, 一等二級水準網測量工作總報告書。

彰化縣政府, 2004, GPS 虛擬參考站技術研究計劃報告書。

內政部土地測量局, 2006, 'e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統

VBS-RTK 定位測試成果報告。

陳鶴欽、曾耀賢、劉正倫，2005，台灣中部地區基本控制點變位監測之研究，內政部土地測量局，80pp。

經濟部水利署，2004，台灣地區地層下陷之監測、調查及分析(4/4)。

經濟部水利署，2007，96 年度地層下陷水準測量檢測及其相關分析期中報告。

內政部土地測量局，2005，93 年度離島一等水準點埋設及其水準、衛星定位、重力測量工作水準測量工作報告。

內政部土地測量局，2006，94 年度一等水準網檢測工作委外測量工作報告。

美聯社，曼谷 2007，自由時報 96 年 10 月 22 日 A6 版轉載。

蘇哲民，2003，TWVD2001 一等水準觀測資料之系統誤差分析，國立成功大學測量工程學系碩士論文。

李陶、刘经南、张诗玉、周春霞、夏耶，2007，合成孔径雷达干涉測量監測天津地區地面沉降對比研究，第五屆海峽兩岸測繪發展研討會，國立交通大學，台灣新竹，光碟 C09，18pp。

趙超英、丁曉利、張勤、李志傳、陳永奇、路中，2007，採用 InSAR 技術研究西安地區地面沉降和地裂縫，第五屆海峽兩岸測繪發展研討會，國立交通大學，台灣新竹，光碟 H03，8pp。

Amelung, F., Galloway, D.L., Bell, J.W., Zebker, H.A., and Lacznia, R.J., 1999, Sensing the ups and downs of Las Vegas—InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation: *Geology*, v. 27, p. 483-486. °

D.L. Galloway, D.R. Jones, S.E. Ingebritsen, December 2000, Land Subsidence in the United States, *Ground-Water Resources for the Future*, USGS Fact Sheet-165-00 °

Hugentobler, U., S. Schaer, and P. Fridez, (Eds.), 2001, Bernese GPS Software Version 4.2, Astronomical Institute, University of Berne, 515 pp

美國地質調查局網頁,

<http://water.usgs.gov/ogw/subsidence.html>

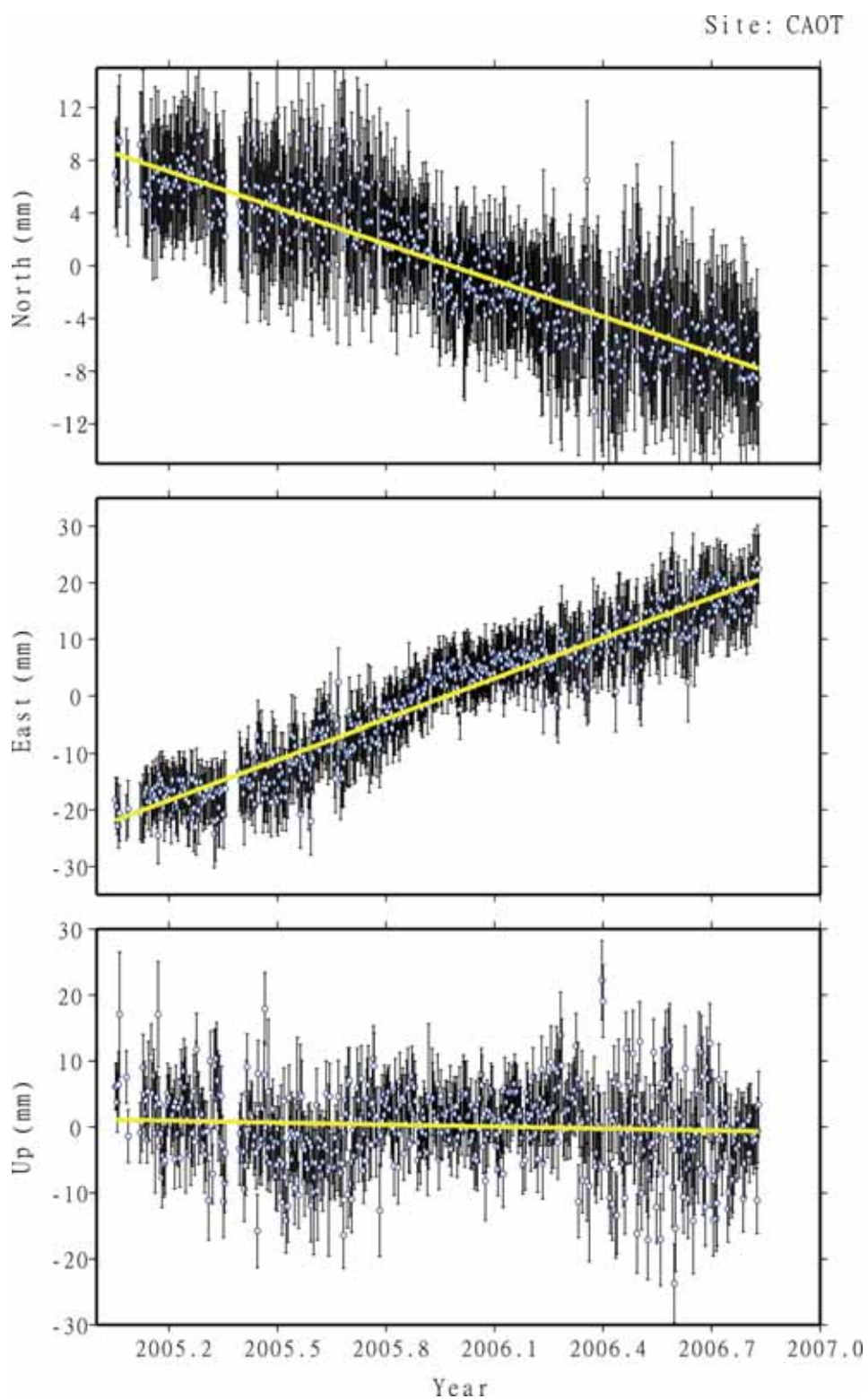
內政部國土測繪中心網頁, <http://www.nlsc.gov.tw/>

內政部地政司衛星中心網頁, <http://www.gps.moi.gov.tw/>

美國大地測量局網頁, <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>

瑞士伯恩大學天文研究所, <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/>

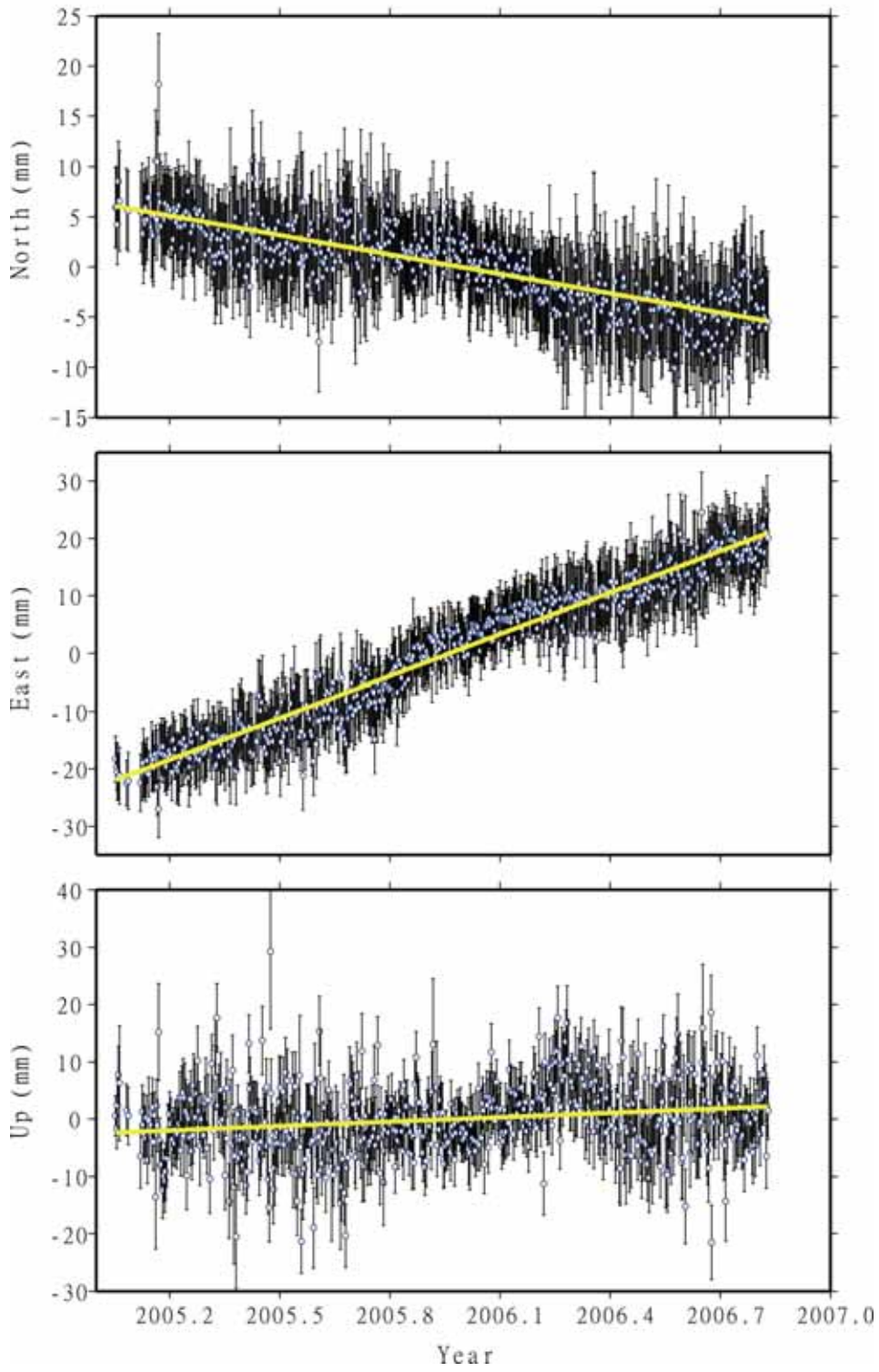
附錄 1：本研究中部地區固定站之時間序列圖



附圖 1-1 草屯 (CATO) 時間序列圖

$$V_e=23.80\text{mm/yr} \quad V_n=-9.16\text{mm/yr} \quad V_h=-0.99\text{mm/yr}$$

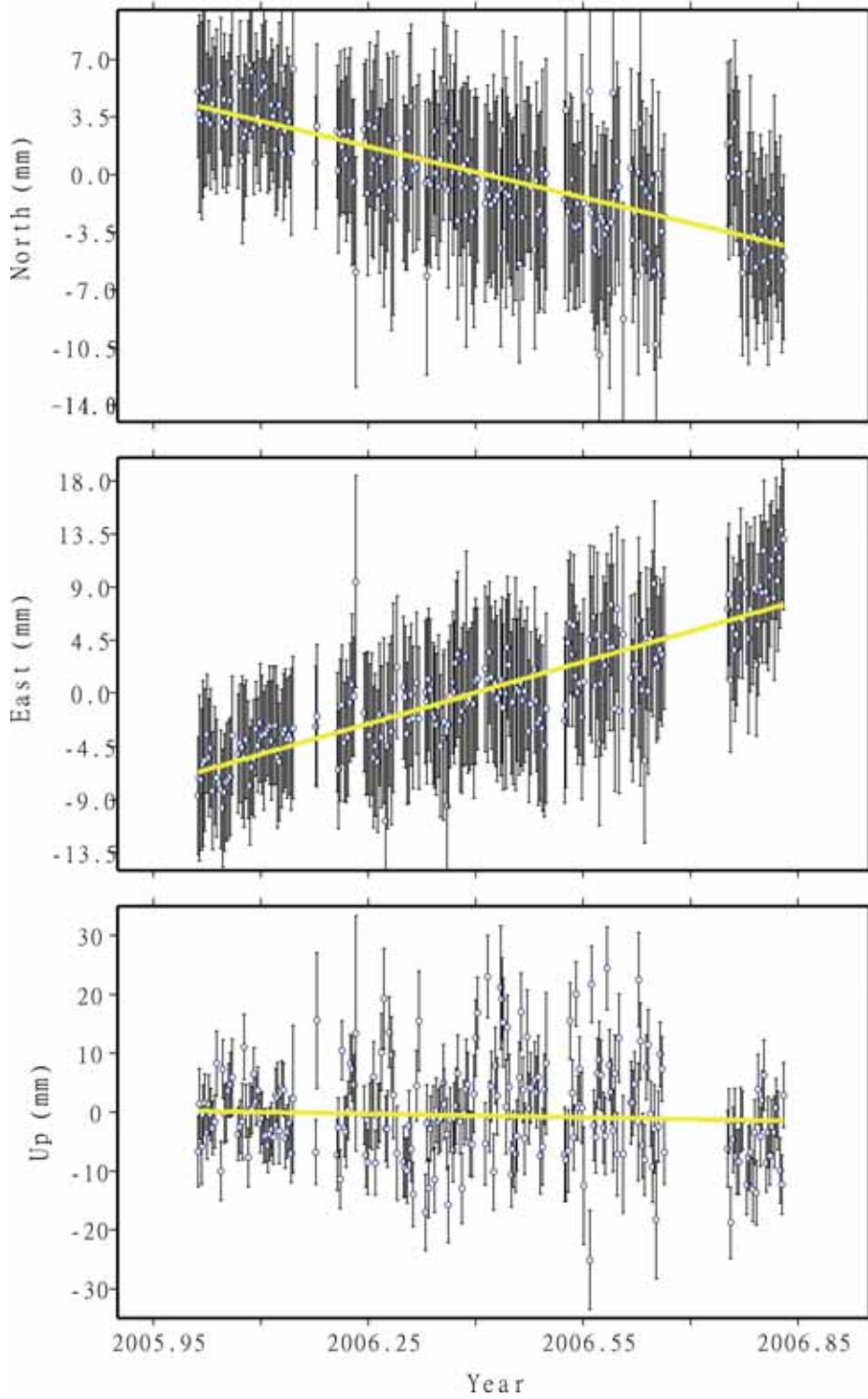
Site: DOSH



附圖 1-2 東勢 (DOSH) 時間序列圖

$$V_e=24.15\text{mm/yr} \quad V_n=-6.45\text{mm/yr} \quad V_h=2.56\text{mm/yr}$$

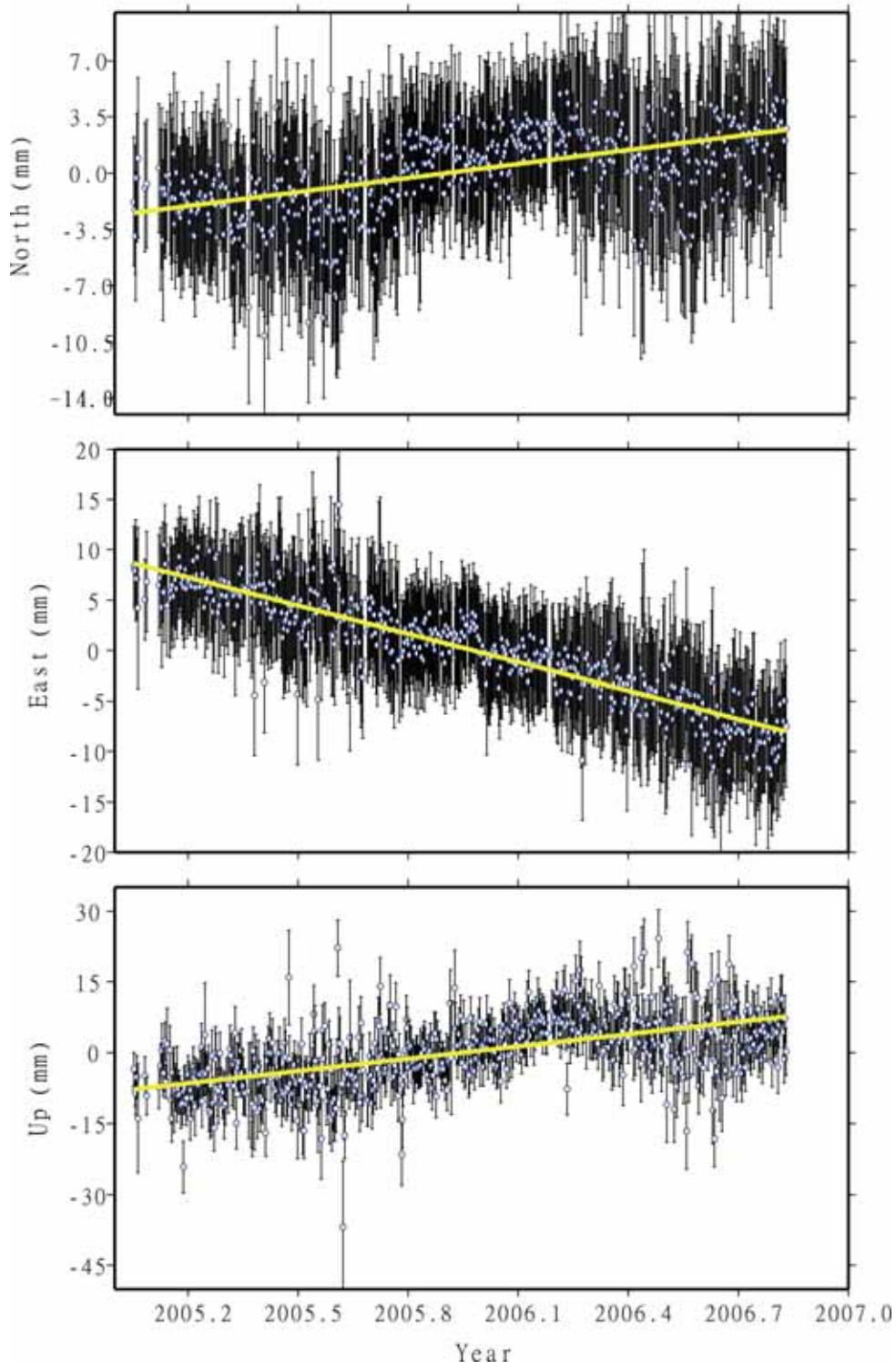
Site: FUC1



附圖 1-3 逢甲大學 (FUC1) 時間序列圖

$V_e=17.29\text{mm/yr}$ $V_n=-10.33\text{mm/yr}$ $V_h=-2.02\text{mm/yr}$

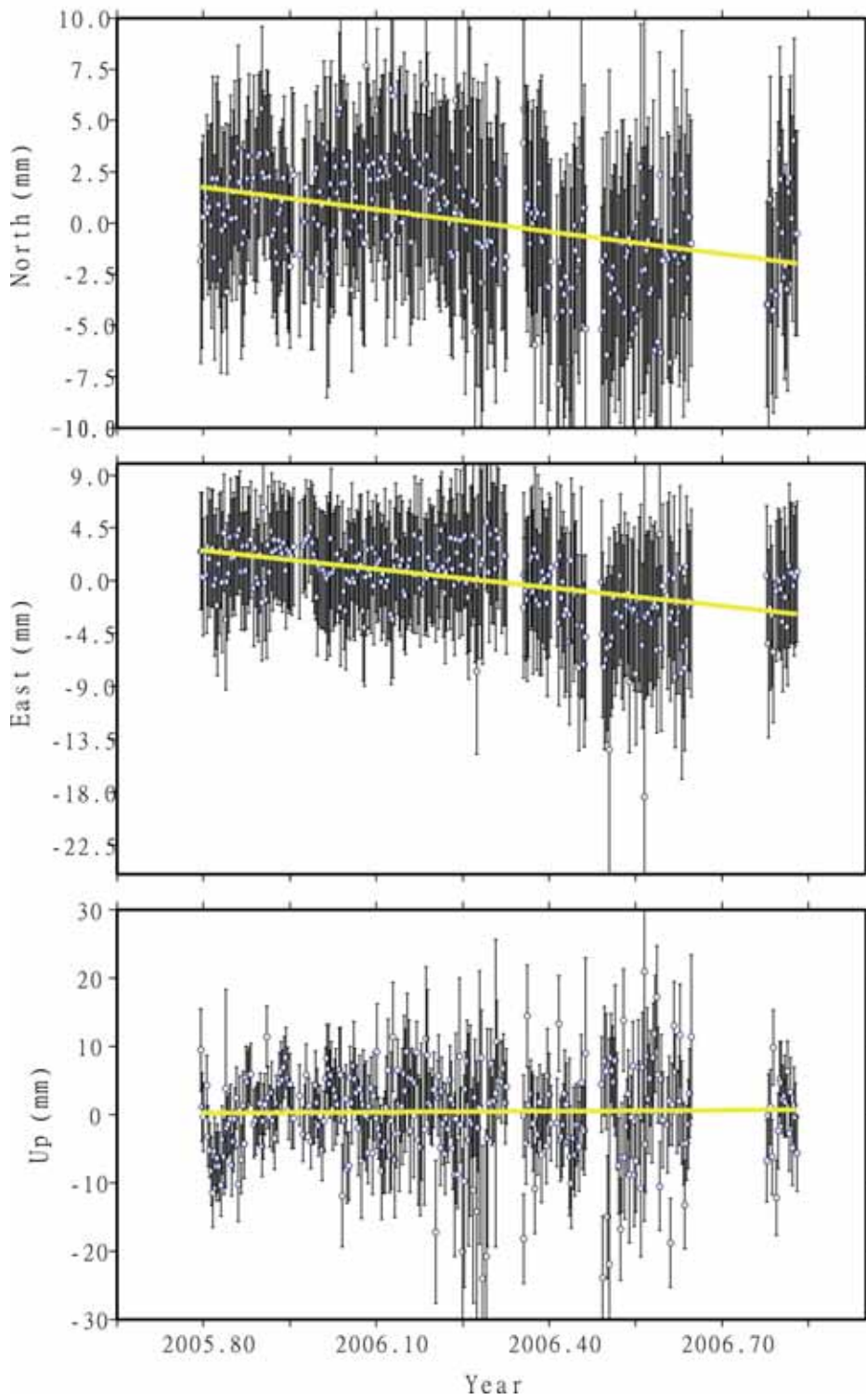
Site: KAFN



附圖 1-4 南投仁愛高峰 (KAFN) 時間序列圖

$$V_e = -9.36 \text{ mm/yr} \quad V_n = 2.90 \text{ mm/yr} \quad V_h = 8.67 \text{ mm/yr}$$

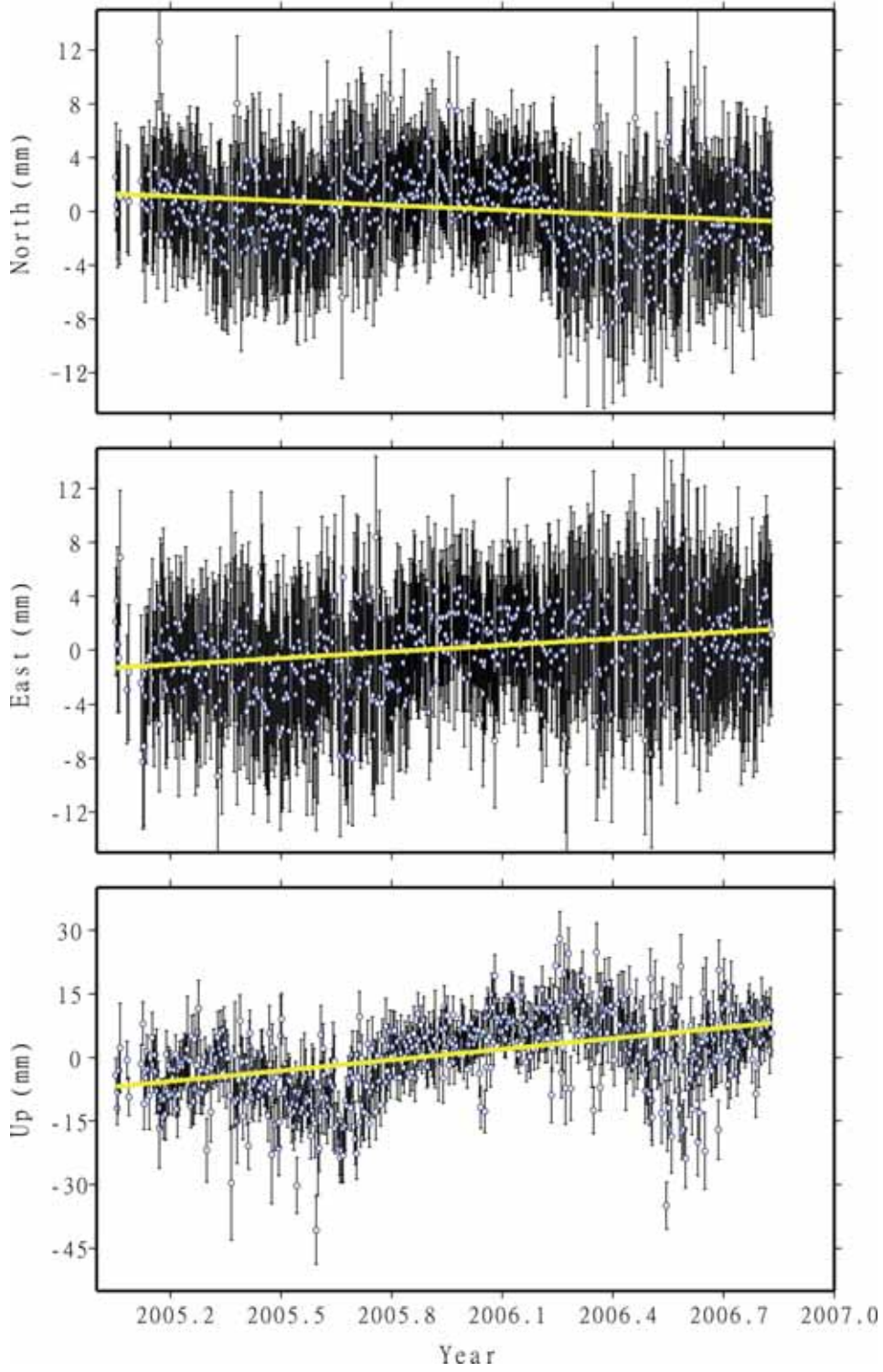
Site: PLIM



附圖 1-5 南投埔里地理中心 (PLIM) 時間序列圖

$$V_e = -5.26 \text{ mm/yr} \quad V_n = -3.61 \text{ mm/yr} \quad V_h = 0.45 \text{ mm/yr}$$

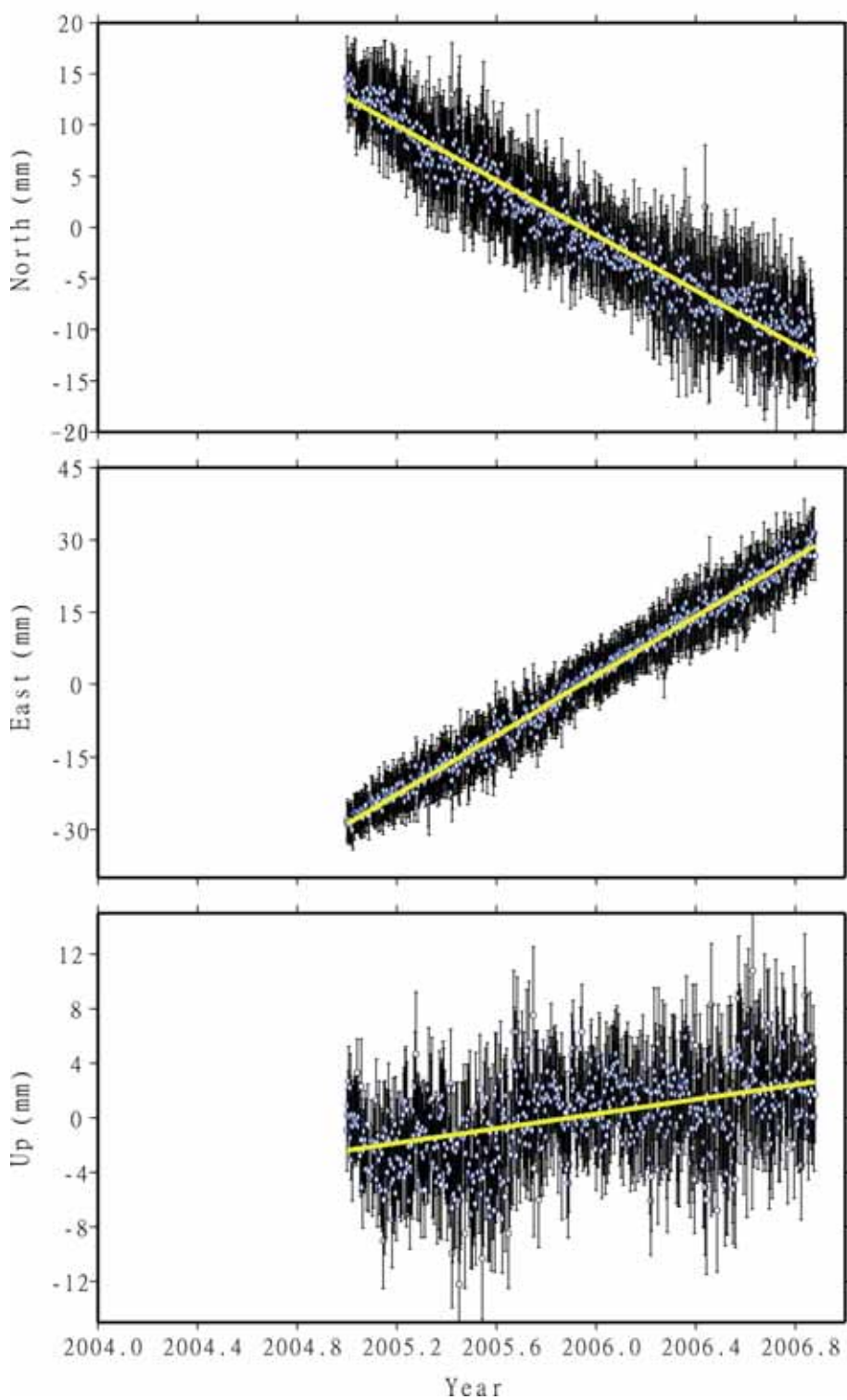
Site: SINY



附圖 1-6 南投信義 (SINY) 時間序列圖

$V_e=1.60\text{mm/yr}$ $V_n=-1.14\text{mm/yr}$ $V_h=8.42\text{mm/yr}$

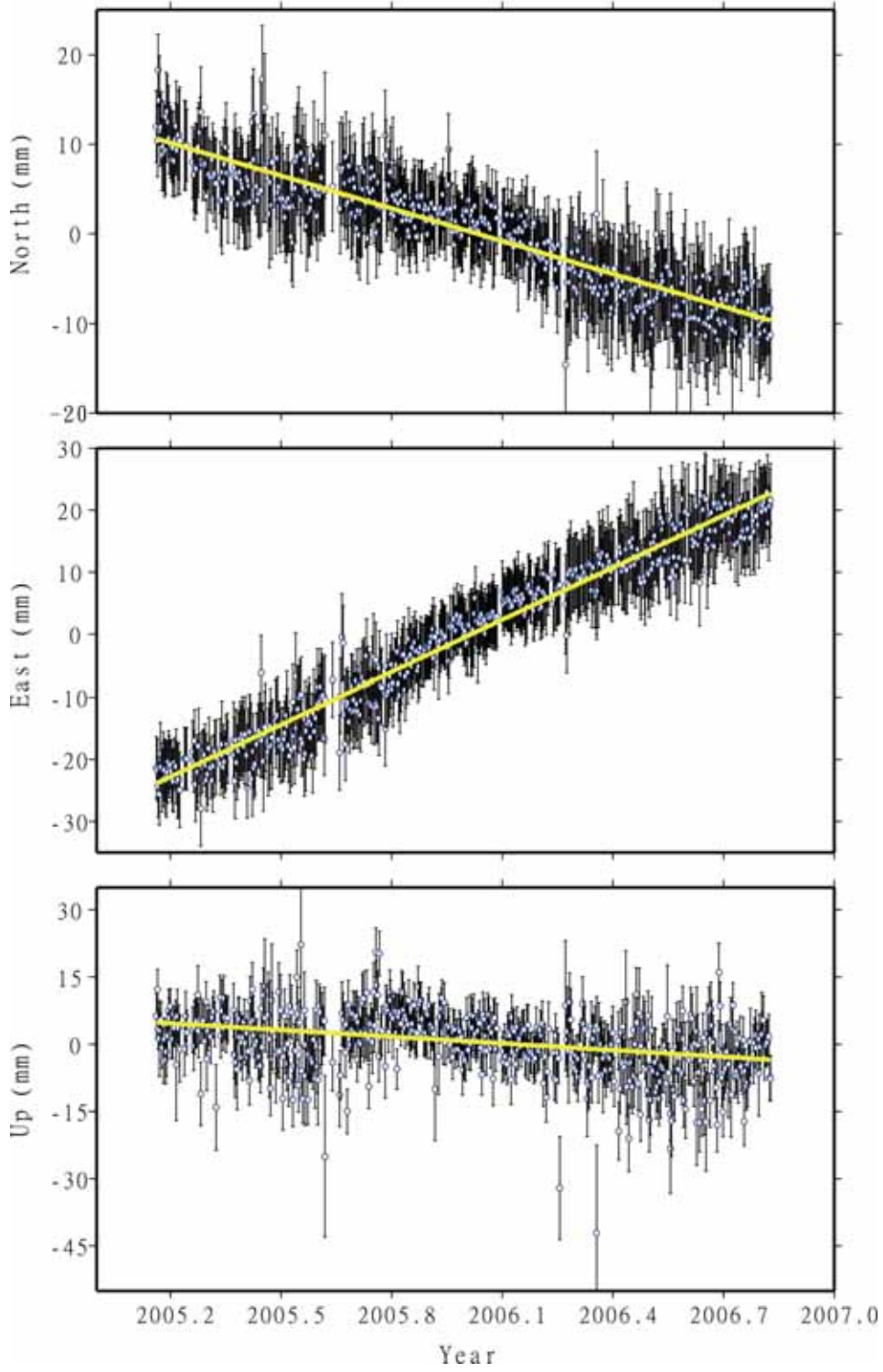
Site: S01R



附圖 1-7 澎湖白沙 (S01R) 時間序列圖

$V_e=30.68\text{mm/yr}$ $V_n=-13.44\text{mm/yr}$ $V_h=2.67\text{mm/yr}$

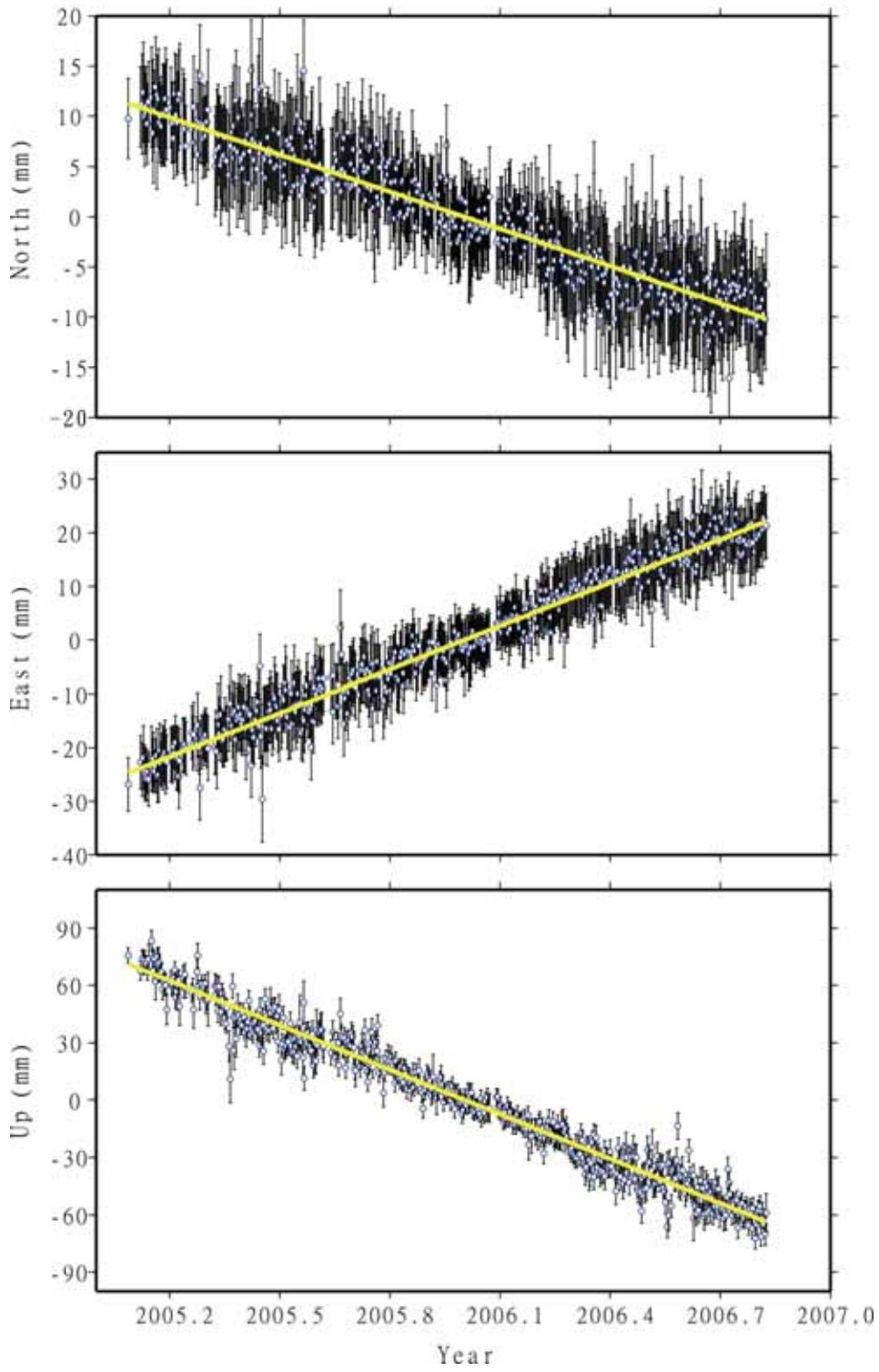
Site: VR01



附圖 1-8 和美所 (VR01) 時間序列圖

$V_e=27.98\text{mm/yr}$ $V_n=-12.19\text{mm/yr}$ $V_h=-4.98\text{mm/yr}$

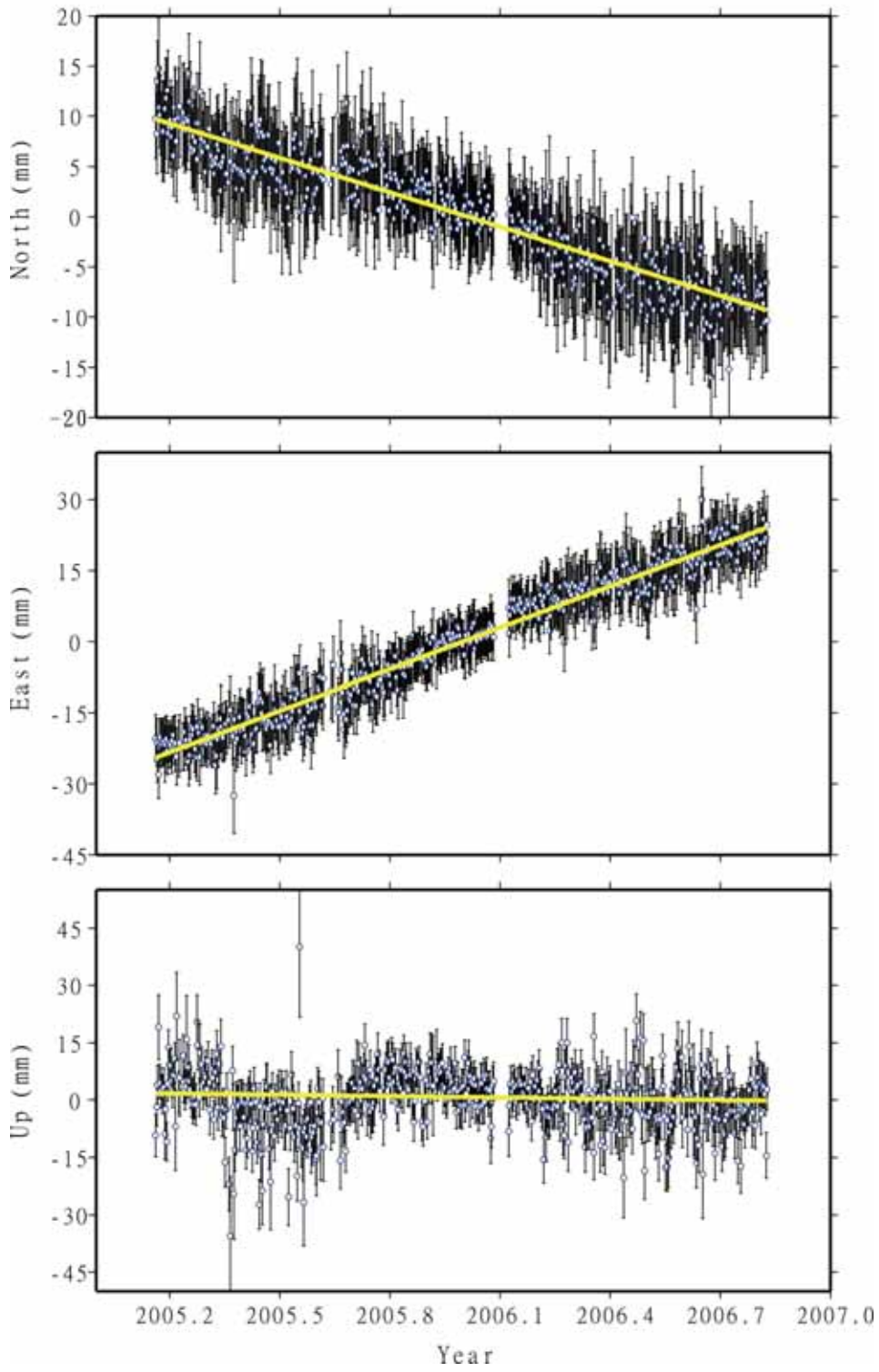
Site: VR02



附圖 1-9 二林所 (VR02) 時間序列圖

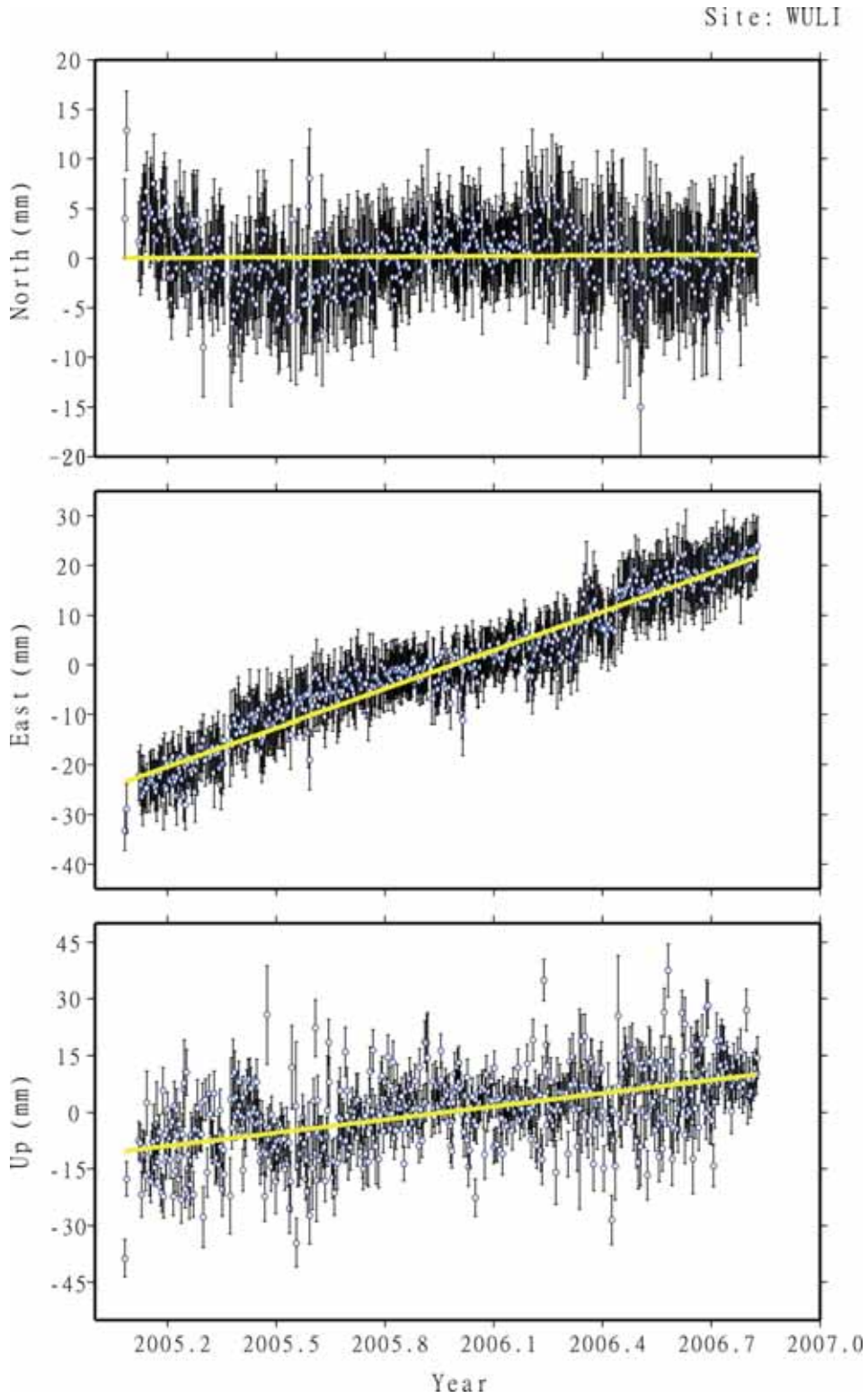
$V_e=26.94\text{mm/yr}$ $V_n=-12.34\text{mm/yr}$ $V_h=-77.65\text{mm/yr}$

Site: VR03



附圖 1-10 田中所 (VR03) 時間序列圖

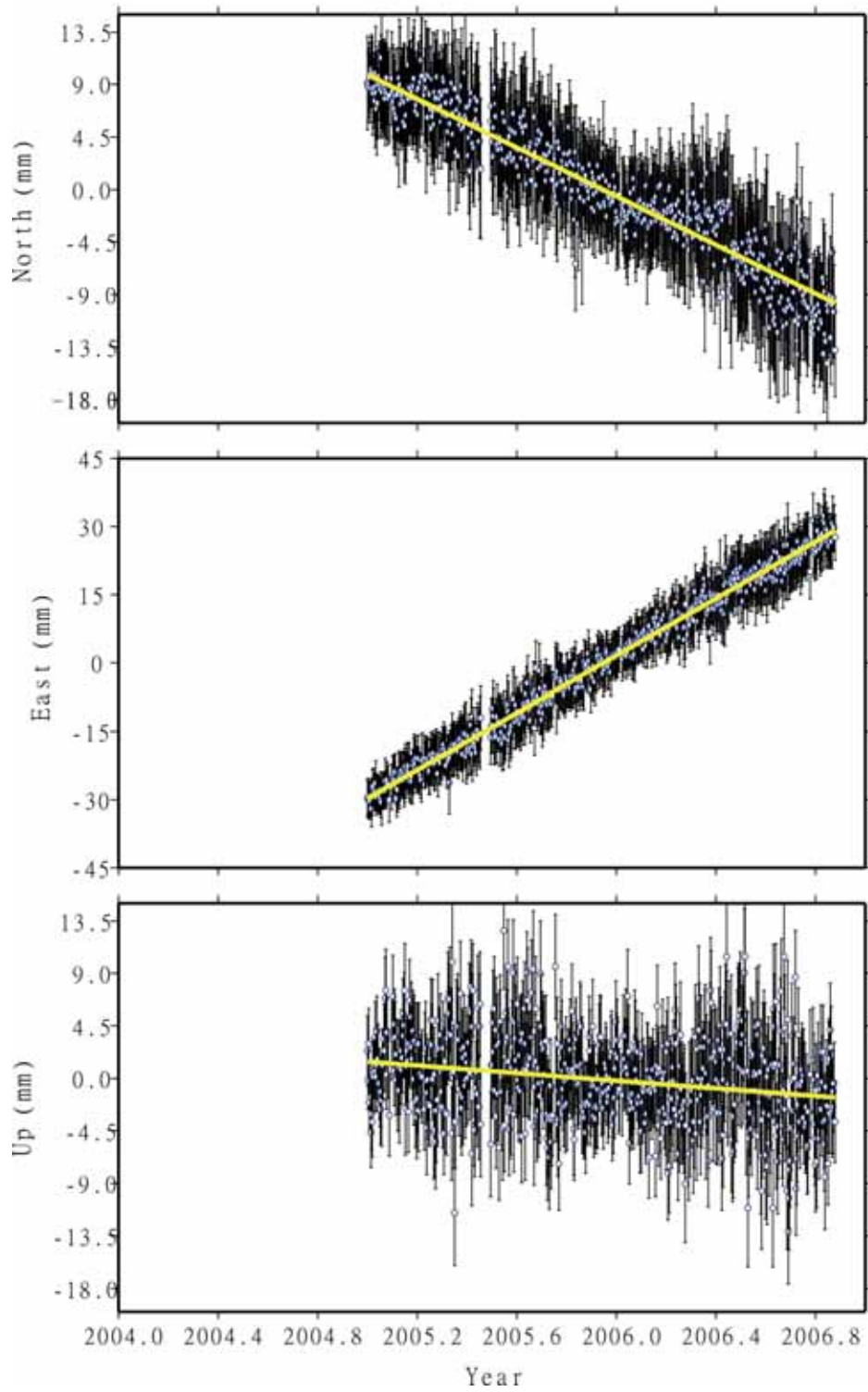
$V_e=29.14\text{mm/yr}$ $V_n=-11.44\text{mm/yr}$ $V_h=-1.17\text{mm/yr}$



附圖 1-11 臺中武陵農場 (WULI) 時間序列圖

$V_e=25.90\text{mm/yr}$ $V_n=0.19\text{mm/yr}$ $V_h=11.64\text{mm/yr}$

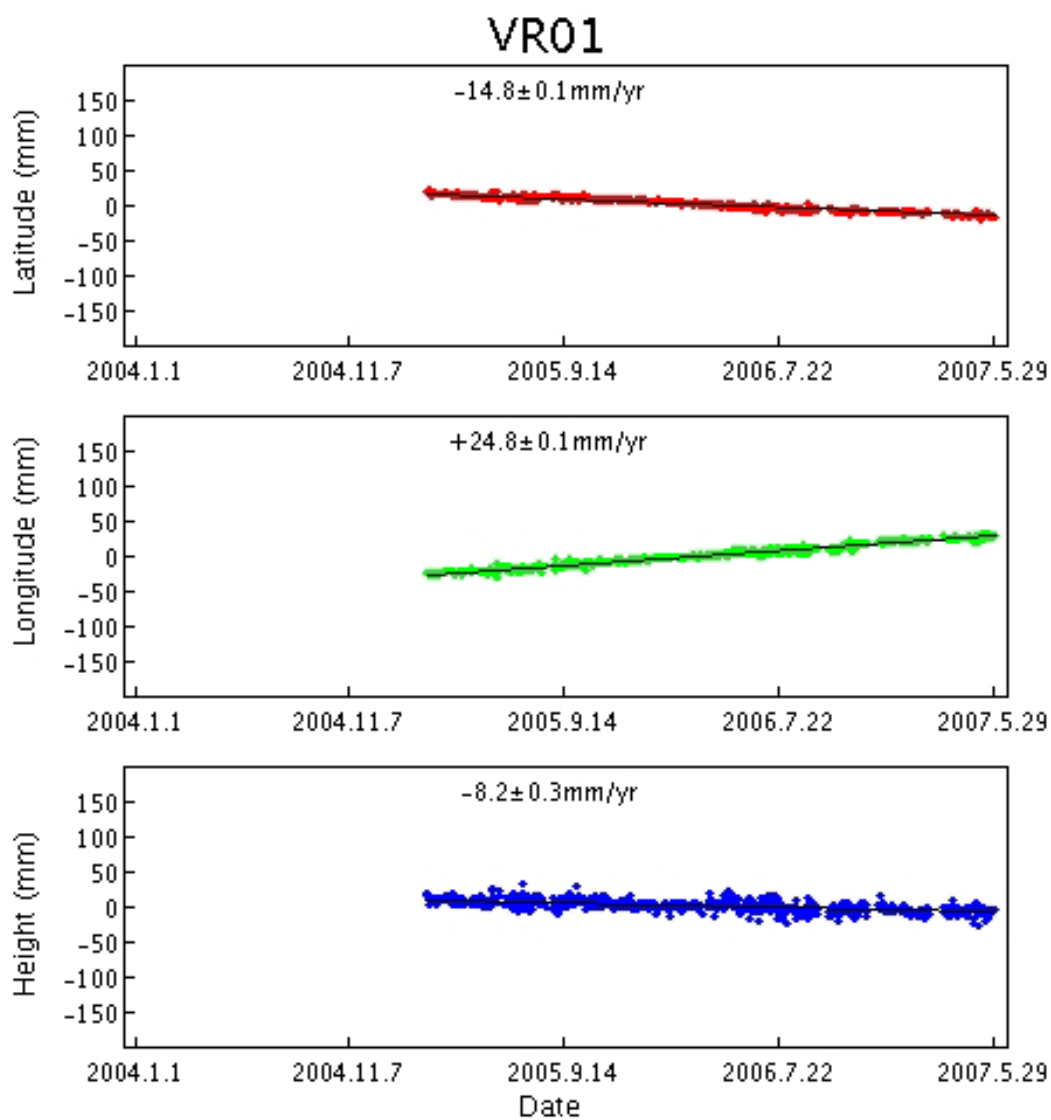
Site: KMNM



附圖 1-12 金門 (KMNM) 時間序列圖

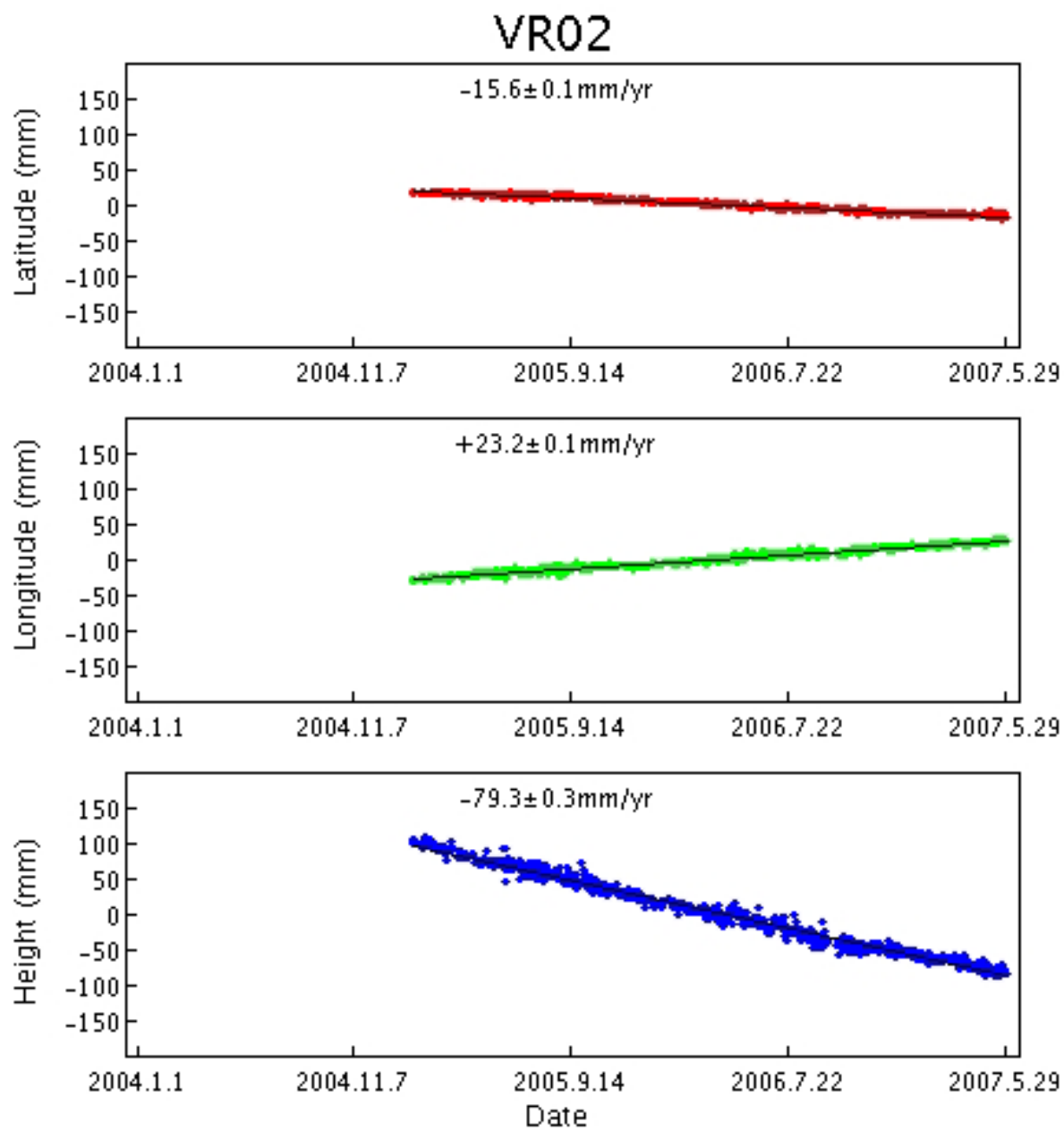
$$V_e=31.32\text{mm/yr} \quad V_n=-10.43\text{mm/yr} \quad V_h=-1.63\text{mm/yr}$$

附錄 2：中央研究院地球所計算彰化縣 GPS 固定站之時間序列圖



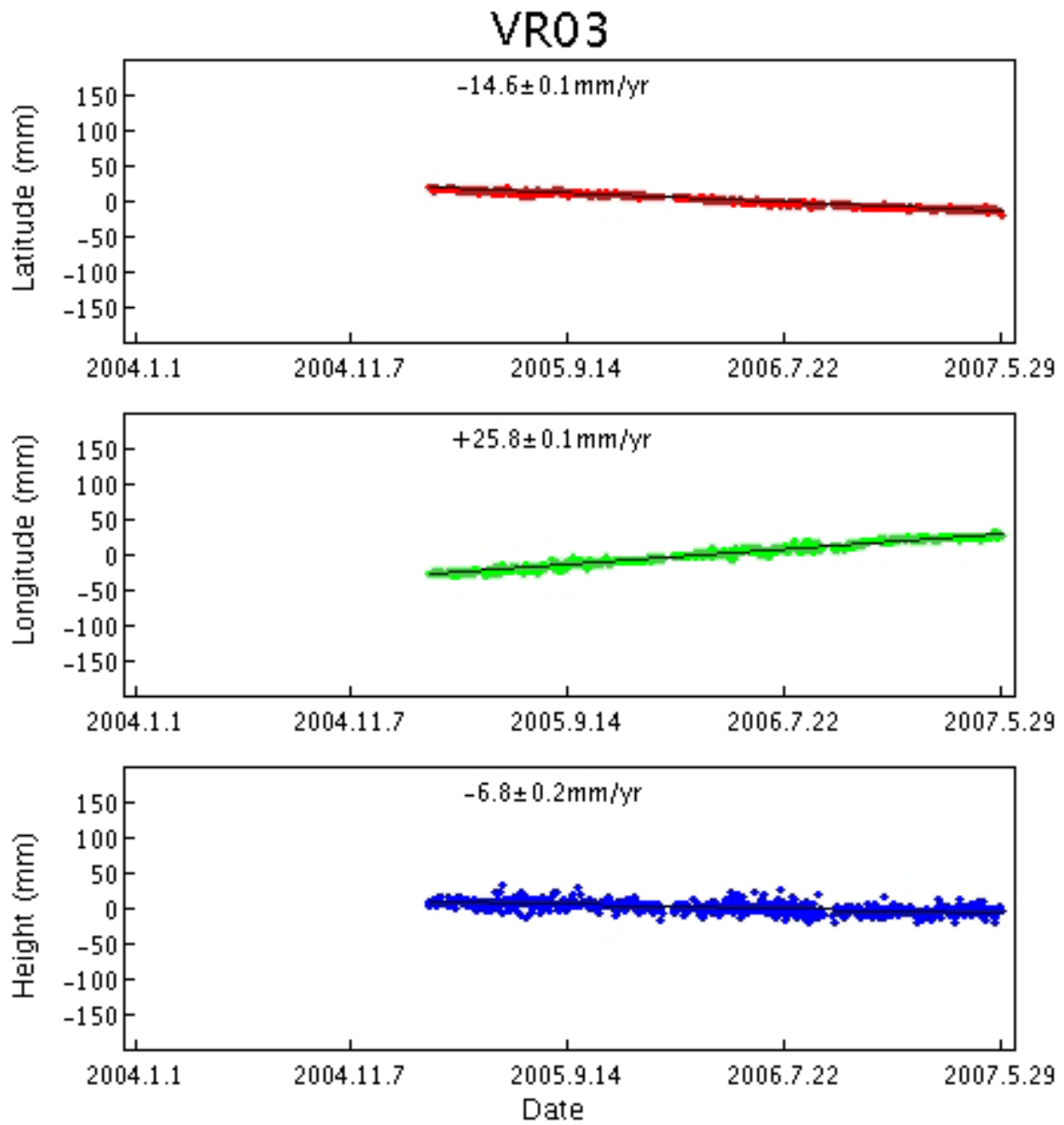
© IESAS-2006 <http://gps.earth.sinica.edu.tw>

附圖 1-13 和美所 (VR01) 時間序列圖



© IESAS-2006 <http://gps.earth.sinica.edu.tw>

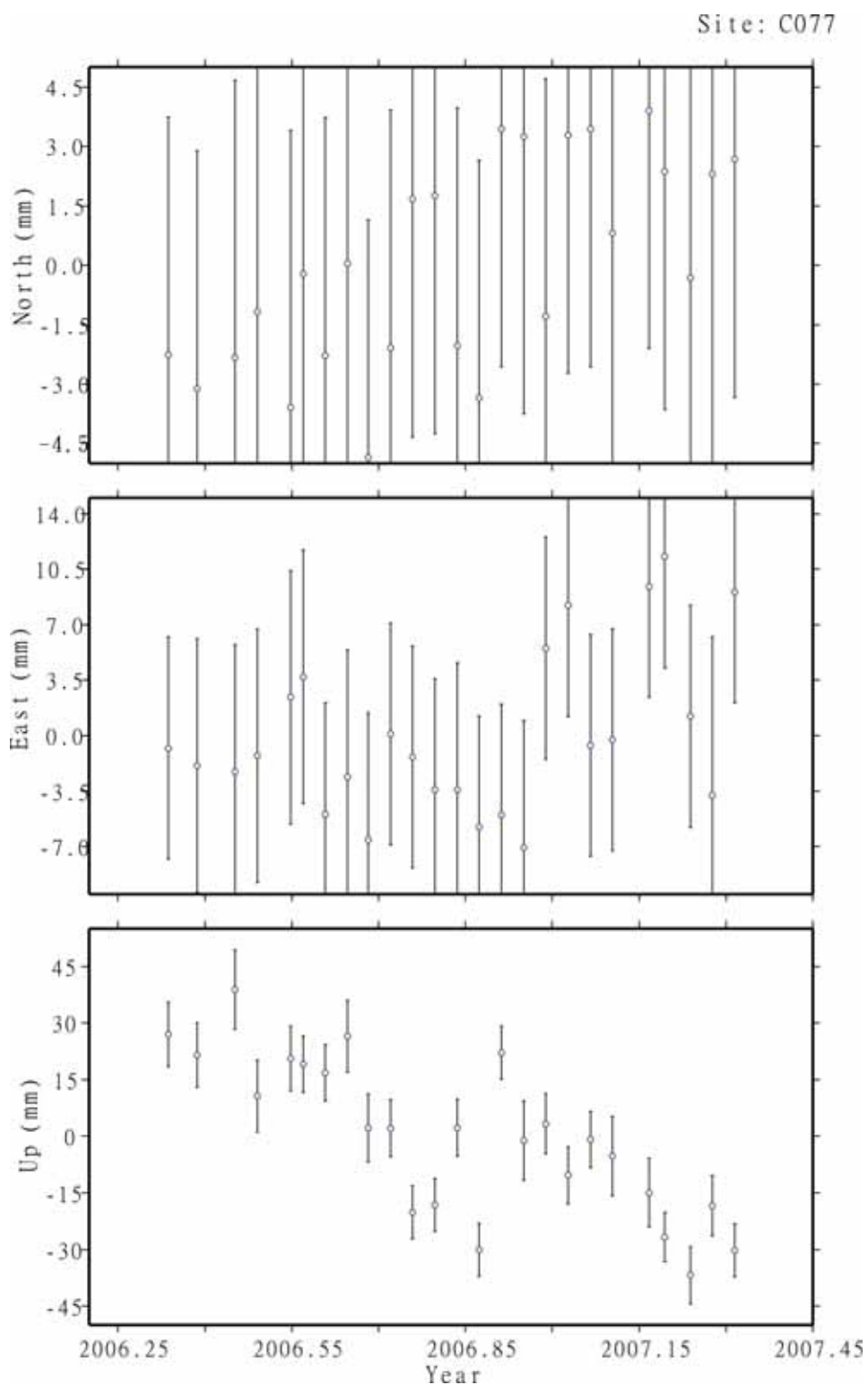
附圖 1-14 二林所 (VR02) 時間序列圖



© IESAS-2006 <http://gps.earth.sinica.edu.tw>

附圖 1-15 田中所 (VR03) 時間序列圖

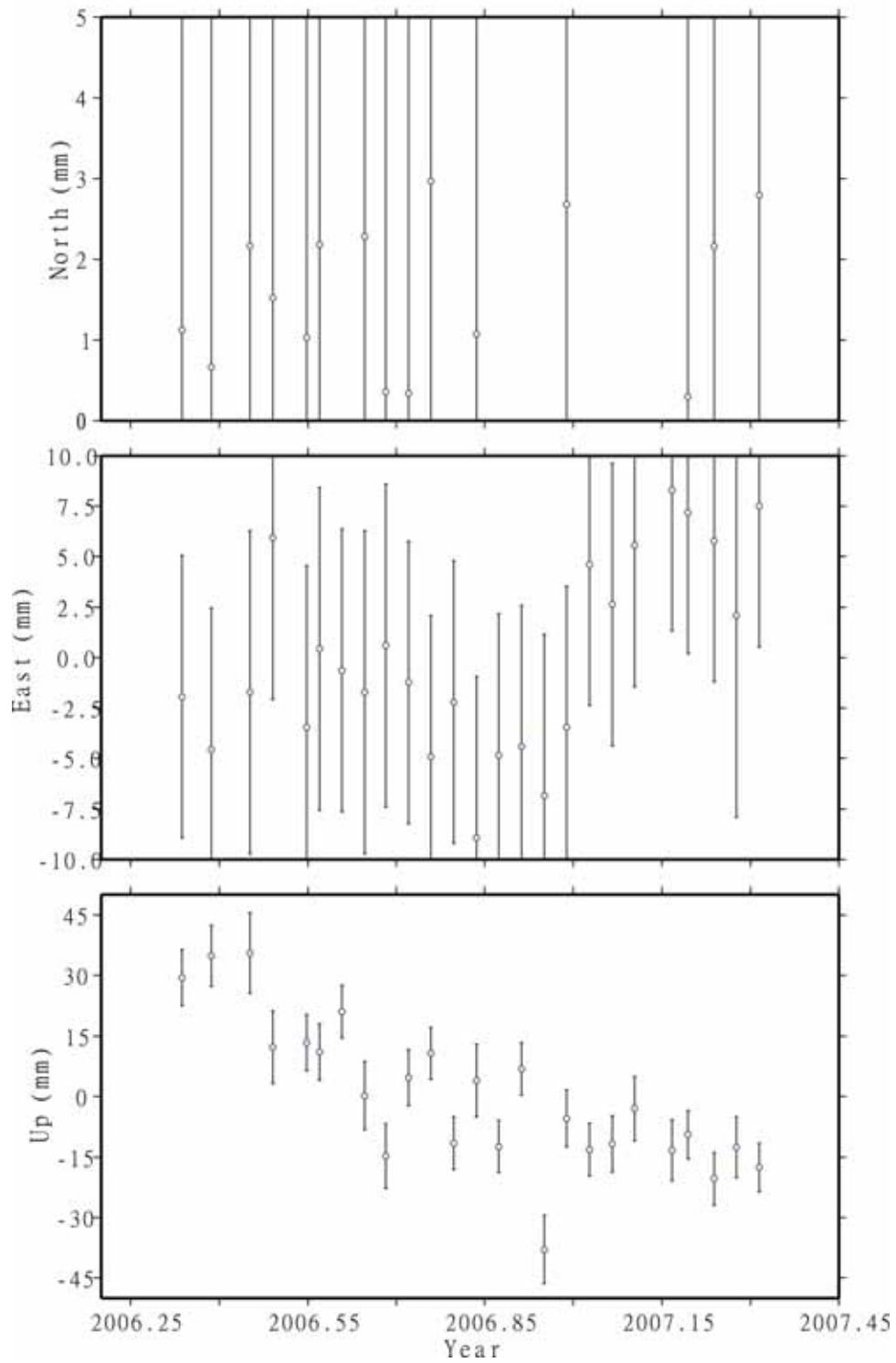
附錄 3：本研究觀測之一等水準點時間序列圖



附圖 1-16 中興國小 (C077) 時間序列圖

$V_e=8.69\pm3.42\text{mm/yr}$ $V_n=6.10\pm1.41\text{mm/yr}$ $V_h=-56.11\pm9.26\text{mm/yr}$

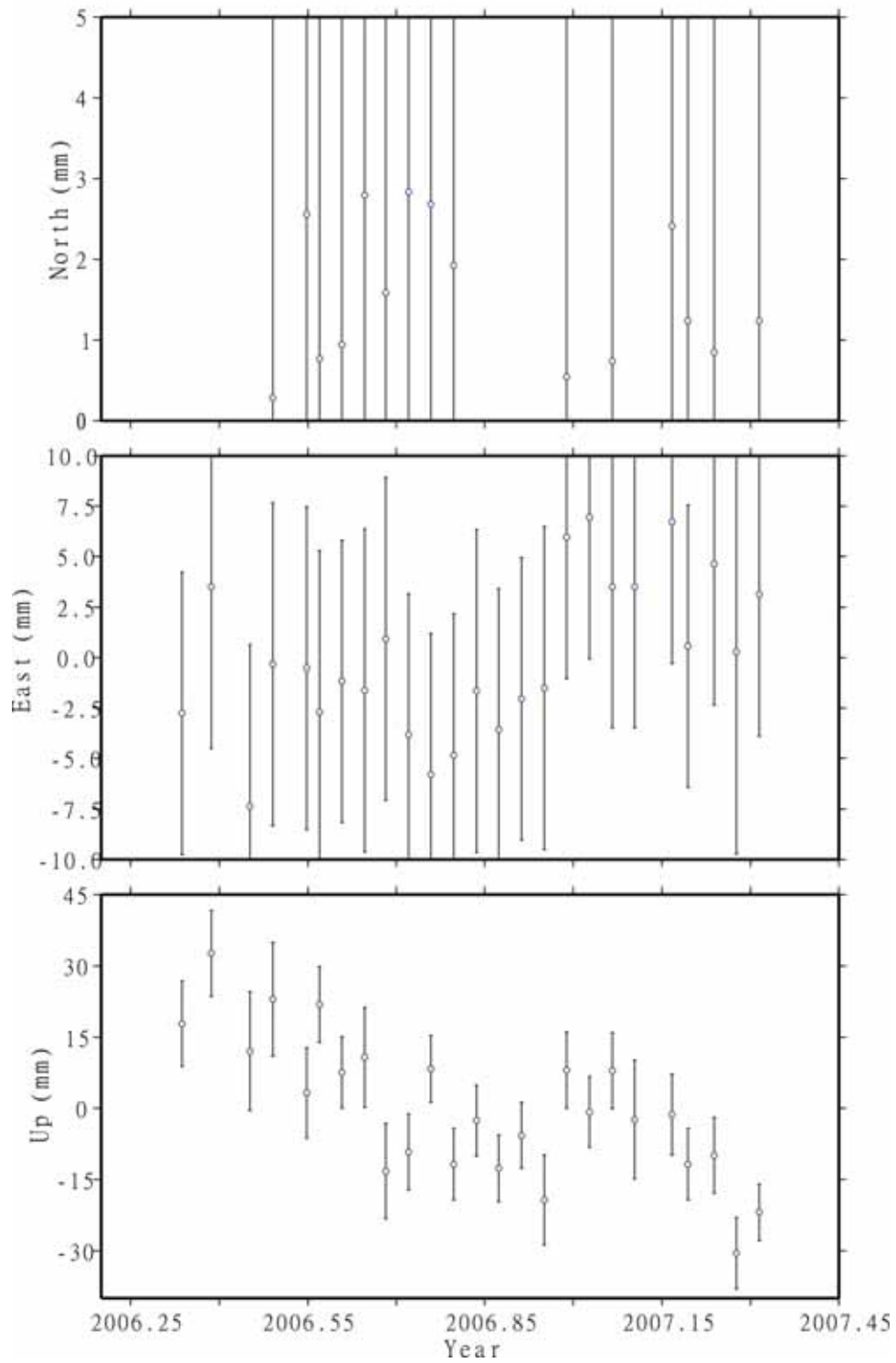
Site: G027



附圖 1-17 新街橋 (G027) 時間序列圖

$V_e=9.12\pm3.02\text{mm/yr}$ $V_n=-1.55\pm1.58\text{mm/yr}$ $V_h=-47.37\pm8.01\text{mm/yr}$

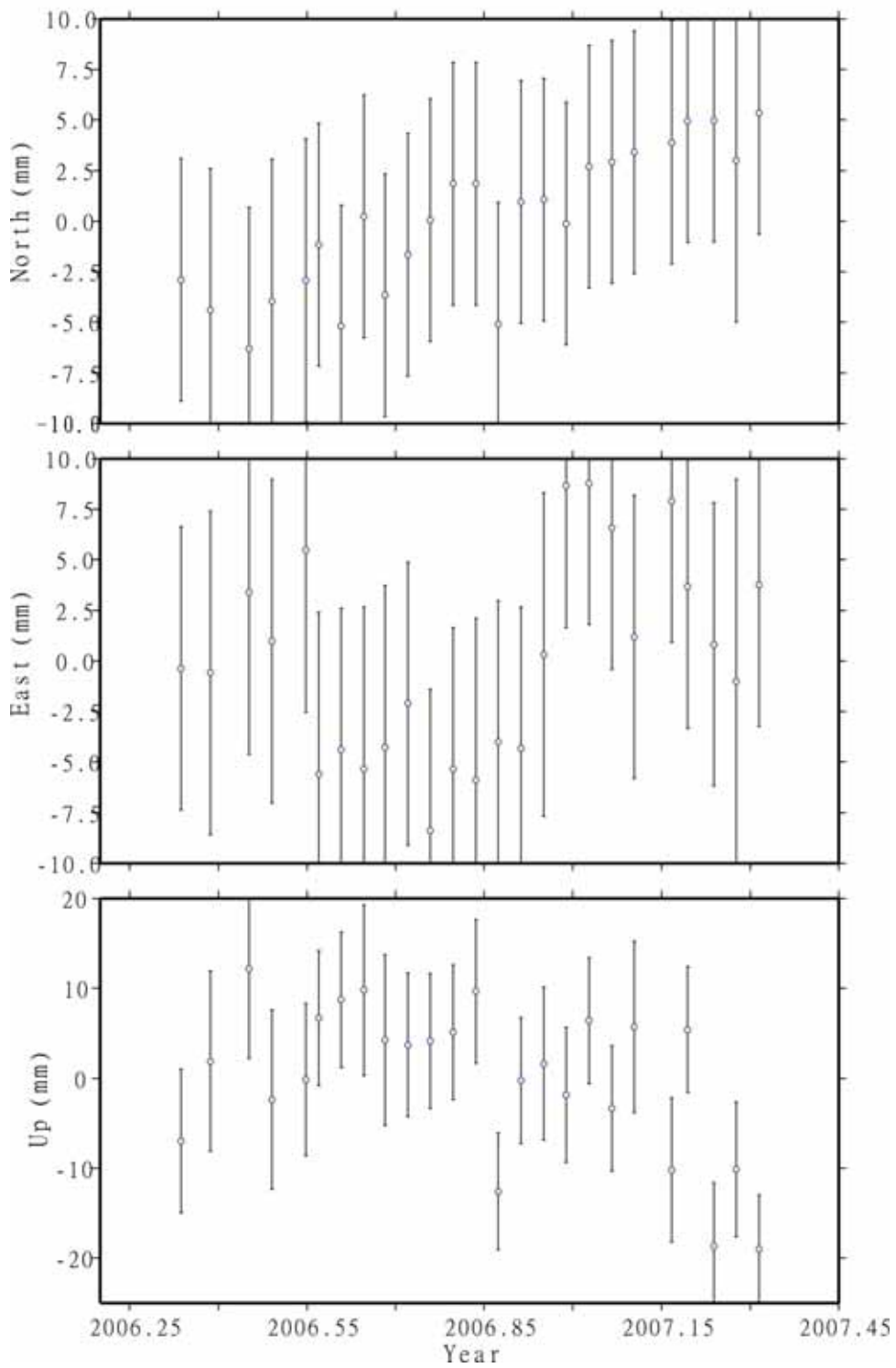
Site: G031



附圖 1-18 台西社區 (G031) 時間序列圖

$V_e=7.89\pm 2.37\text{mm/yr}$ $V_n=2.18\pm 1.64\text{mm/yr}$ $V_h=-38.87\pm 7.47\text{mm/yr}$

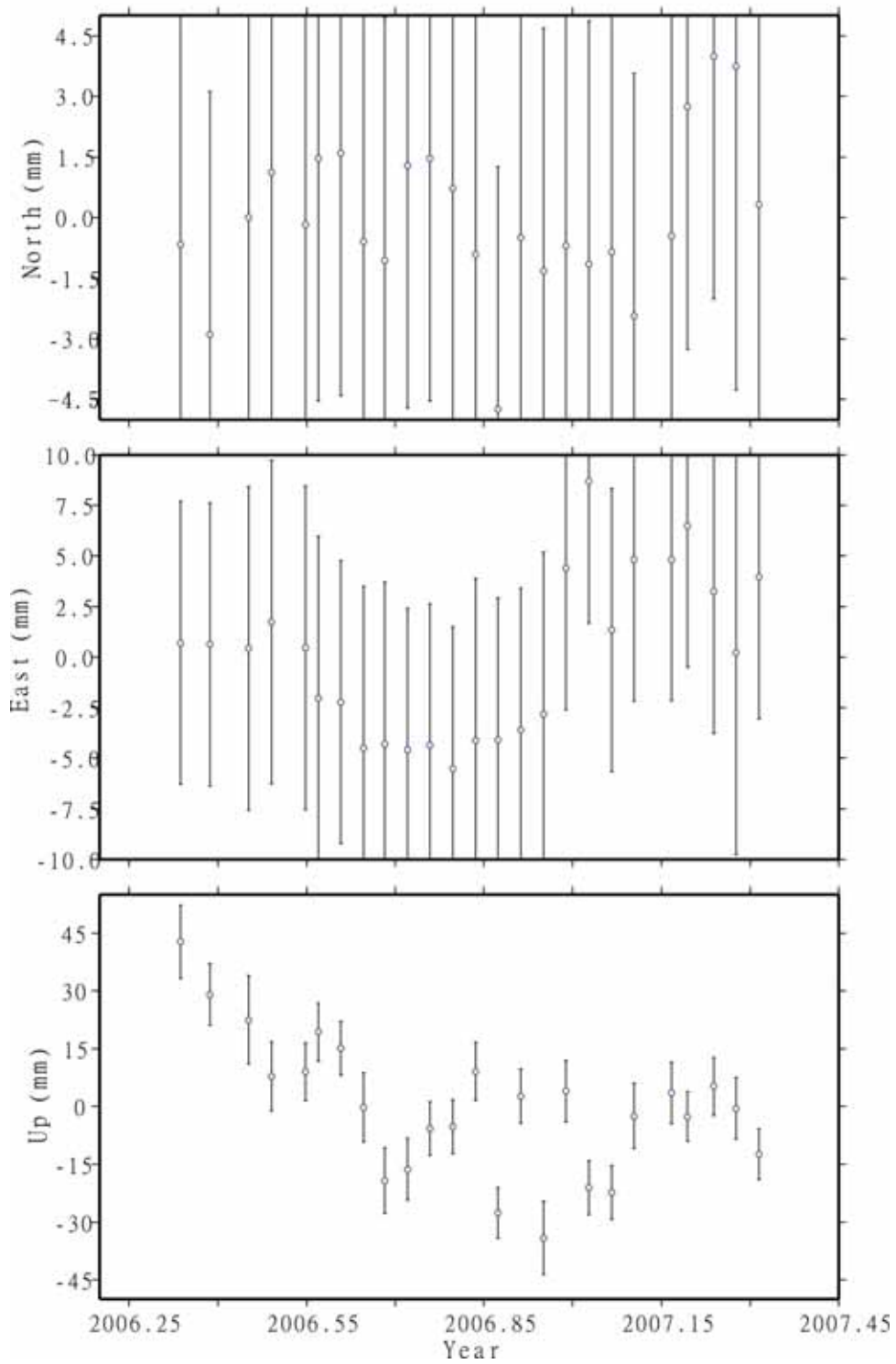
Site: I017



附圖 1-19 自強大橋北 (I017) 時間序列圖

$V_e=7.15\pm 3.36\text{mm/yr}$ $V_n=10.48\pm 1.30\text{mm/yr}$ $V_h=-17.20\pm 5.43\text{mm/yr}$

Site: X111



附圖 1-12 王功 (X111) 時間序列圖

$V_e=6.75\pm 2.58\text{mm/yr}$ $V_n=1.39\pm 1.36\text{mm/yr}$ $V_h=-30.87\pm 10.83.01\text{mm/yr}$