

新北市政府 111 年度自行研究報告

利用多時相干涉雷達監測建物平面變形造成控制點位移之研究

研究機關：新北市政府淡水地政事務所

研究人員：劉維傑

研究期程：111/01/01 至 111/10/31

新北市政府 111 年度自行研究成果摘要表

計畫名稱	利用多時相干涉雷達監測建物平面變形造成控制點位移之研究
期程	自 1 1 1 年 0 1 月 0 1 日 至 1 1 1 年 1 0 月 3 1 日
經費	0
緣起與目的	控制點之管理及維護為土地複丈、建物測量業務重要任務。淡水所地籍圖重測至今 30 餘年，由於建物之新建、道路之翻修及人行道鋪設等，致控制點位移、滅失情事之發生，故對於現存控制點之監控管理尤為重要。
方法與過程	永久散射體合成孔徑雷達差分干涉(PS-InSAR)技術具有大規模、不需人力架設儀器等優勢，可大範圍監測控制點及建物長期之偏移量，精度可達毫米等級。利用 PS-InSAR 之優勢，本研究用以監控各控制點周遭區域位移情形。
研究發現及建議	透過 PS 點可算出各控制點於研究區域內之偏移量。高解像度之合成孔徑干涉雷達的長時間序列分析，可大範圍監測地表控制點變形，減少大量人力及時間之花銷。並建議透過不同波長及軌道方向之感測器，結合同時期不同軌道方向之 InSAR 變形成果，達到不同分量之控制點位移解算，更有助於更明瞭實際變形情形。
備註	

壹、 研究動機

測量課的業務職掌主要為土地複丈及建築改良物測量(全國法規資料庫，2022)，舉凡土地指界、鑑界、分割、合併、界址調整等，建物第一次登記、建物分割、合併、基地號勘查等都屬於地政事務所服務範圍，其中又有諸多業務與民眾息息相關。所有的測量業務要具有正確、精準的成果，才得以加深民眾對政府部門的信任，不外乎須具備良好的控制系統。

控制點是各項測量引用之根據點，但由於建物之新建、道路之翻修及人行道鋪設等，致控制點位移、滅失情事之發生，故對現存控制點之監控管理尤為重要。內政部國土測繪中心自 99 年至 102 年、105 年至 108 年間陸續進行基本控制點測量及管理維護作業，就最新一期基本控制點檢測工作而言，其利用用國際地球參考框架 ITRF2014，解算一九九七坐標系統(TWD97)之 2020 年成果，再對一、二及三等衛星控制點清查後進行觀測，方法是利用 8~12 部衛星定位接收儀，採蛙跳式靜態衛星定位測量，同一時段各點位共同觀測時間 6 小時，點位重複觀測率 30% (含) 以上，基線重複觀測率 10% (含) 以上，總計觀測 535 個時段(國土測繪中心，2022)。

以本所轄區為例，利用全國衛星追蹤站暨基本控制點查詢系統，對淡水區一、二及三等衛星控制點進行搜尋(全國衛星追蹤站暨基本控

制點查詢系統，2022)，計有 N306、N346、N367、N383、3100、F030、F039、F040、F041、F048、F049、F051、F052、F060、F061、F069、F070、F079、FP02、FP04、FP32、FP46 共 22 點；而細究 108 年基本控制點檢測計畫，有納入觀測、平差後改算坐標只有 N306、F060、FP02、FP32 共 4 隻(國土測繪中心，2022)。經實地考察，其中大部分控制點因位於建物樓頂，至今仍存在，卻已經停止對其進行維護；而有經過 108 年基本控制點檢測計畫觀測、平差並改算坐標的 4 隻控制點互不通視，且不足以涵蓋淡水測區，往後地政事務所進行圖根補建作業，大部分導線控制點必定是利用已停止維護之二、三等衛星控制點或是未經衛星維護之加密導線點進行擺站。台灣本身隸屬板塊變動帶，又有諸多人為因素可能造成控制點偏移，利用年久失修的控制點進行地籍測量業務，恐有精度下降之疑慮。

回顧前述控制點檢測工作，可以發現利用靜態 GPS 擺站雖然可以獲得極高精度，但是必須每年進行，且必須上控制點進行擺站，才有可能得知此控制點是否帶有過大的偏移量；又一、二及三等衛星控制點為獲取較佳觀測量、提高成果精度並且不容易被掩埋、破壞，絕大部分設置在大樓頂、山頂等制高點，這大大加深了設站的難度、點位的易達性，人員的消耗以及安全性。

為此，本研究擬訂定一個方法，對於控制點進行遠端監控、管理，

不必花費大量人力每年去監測，如果發現特定控制點有偏移之狀況發生，可以針對特定幾隻控制點進行後續的改正，並且在未修正之前避免誤用偏移的控制點，降低民眾因測量成果而導致產權糾紛的可能性。

本研究擬利用長時間序列之合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像，透過永久散射體合成孔徑雷達差分干涉(PS-InSAR)技術獲取研究區域內大範圍變形成果。由於利用 PS-InSAR 所獲取的 PS point 的一些特性，無法對於控制點點位直接進行偏差研討，但控制點的偏移時，一定具有空間上的同調性，意即：假設該控制點偏移，則該控制點周遭區域亦同時偏移，利用空間同調性，將 PS-InSAR 解算成果圖層與控制點圖層套疊，將偏移量設定一閾值，檢視超過該閾值之區域內是否有控制點，便可得知那些控制點具有過大之偏移量，進而對特定的控制點暫時停用並進行後續的改正及維護，以確保地籍測量成果之正確性。

貳、 文獻回顧

控制點周圍地表變形監測有許多方式，諸如全測站(Total Station, TS)、全球導航衛星系統(Global Positioning System, GPS)、影像、光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)及合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，第一節將對上述大地測量工具進行文獻回顧並比較其優劣，第二節將對合成孔徑雷達變形監測技術做進一步探討。

一、 大地測量工具

(一)、 全測站 (Total Station, TS)

全測站用於測量和建築施工。它是一種結合經緯儀與電子測距(EDM)的儀器，可測量垂直和水平角度以及儀器到特定點的斜距，並通過機載計算機收集並儲存數據後，進行三角測量計算(Kavanagh, 2006)。後又發展出機器式全測站(Robotic Total Station, RTS)，可自動追蹤稜鏡並收集數據，大幅增加觀測效率(Wagner, 2016)。但由於全測站需擺設在控制點或其他結構物上，在控制點缺損或是位移的情況下，我們無法得知待測控制點的真實位移情形；另利用全測站所獲得之數據為以點資料為基礎，較容易產生資料密度不足之問題，並且需耗費較多人力成本。

(二)、 全球導航衛星系統 (Global Positioning System, GPS)

GPS 系統擁有如下多種優點：使用低頻訊號，不會因為天氣不佳而產生嚴重的訊號衰減；高達 98% 的全球覆蓋率；高精度三維空間定位；快速、省時、高效率且可移動定位(維基百科，2022)。

內政部國土測繪中心基本控制點檢測計畫所採用的控制點檢核方式為靜態測量會，其原理使用雙頻(L1、L2)進行觀測以

消除或減弱衛星軌道誤差、衛星及接收機時錶誤差、對流層及電離層誤差，並計算出每個時刻的接收儀與控制點之間的三維基線向量(何維信，2012)。

利用 GPS 檢核控制點不須通視，並且可以大範圍進行監測。但其缺點是其數據仍以點為單位，且資料品質受到透空度影響，高樓、樹林等地行可能導致多路徑效應的發生(Rutledge et al., 2006, Knecht and Manetti, 2001)，且同樣需耗費較多人力成本。

(三)、 影像

影像變形監測是提取不同時間影像的資訊來比較、進行變形監測的一種技術，屬於攝影測量的範疇。如果以載具對攝影測量影像獲取的方式進行區分，又可分為航空攝影測量(Aerial Photogrammetry)、地面攝影測量(Tessestrial Photogrammetry)、太空攝影測量(Space Photogrammetry)、近景攝影測量(Close-range Photogrammetry)等(何維信，2012)。航空攝影測量所量測的目標為航測像片，是將精密的攝像機設置於航空器上並進行拍攝，透過數學模型獲取三維物空間座標及地面點座標後進行後續應用；地面攝影測量是將攝像機置於地面上，拍攝完畢透過數學公式解算後據以實施量測工作；太空攝影測量是

以外太空維攝影目標，攝像機可以固定於地球、人造衛星或是其他星球上；近景攝影測量與地面攝影測量類似，但通常攝像機與待測物體距離不大於 300 公尺，並且適合應用於三維重建及變形監測(Luhmann et al., 2013)。傳統攝影測量是以類比法(Analog Photogrammetry)進行解算，而現今以純數學模型的解析法(Analytical Photogrammetry)進行解算，又因數位相機的普及取代了傳統的膠卷相機，數值影像簡化了影像處理流程。現今相機率定、影像內外方位獲取、三維表面重建等皆透過軟體自動化處理(Sužiedelytė-Visockienė et al., 2015)，進而提升了解算的精度及效率。

目前利用近景攝影測量監測影像變形的解算方式主要分為以下三種：人工佈標法、面-點追蹤法、表面比較法。

人工佈標法可獲得較高精度的量測成果。其方式利用佈設人工黑白標於待測物體上，在拍攝相片時即可在不同像片之間獲得相同的點對進行匹配，原理是共線式，透過物點在影像及物空間坐標、內方位參數與外方位參數關係的方程式，再利用三維控制點(設人工黑白標)回復相機方位後，及可用前方交會原理交會出物點的空間坐標，並透過大量多餘觀測，提升成果精度(Fraser et al., 1996)。

面-點追蹤法主要應用影像匹配技術進行解算，又分為特徵匹配(Feature-based matching, FBM)及區域匹配(Area-based matching, ABM)。特徵匹配的方法是先找出特徵顯著的特徵點，然後再分別描述兩個特徵點，最後比較兩個描述的相似程度來判斷是否為同一個特徵，進而將多張影像進行套合，常見的方式有 Harris Corner、SIFT、SURF、BRIEF、BRISK 等，適用於影像中有明顯特徵點時。區域匹配則是找出一張主影像並切割成一小塊照窗，透過互相關函數去計算其他影像區域與該照窗區域相關程度，超過設定閾值即可視為兩張影像相同之區域，套合多張影像，常見的方式有協方差函數法、相關係數法、差平方和法、差絕對值和法、最小二乘法等(吉大純等人，2010)。如果地表變形在連續影像中較有規律，使用區域匹配較為合適，兩種方式皆能佈設地面控制點進行輔助。

表面比較法利用密匹配(Dense Matching)將點雲轉化成物體表面 (Haala, 2013)，再進行不同時刻資料的變形量測分析。像片之間的套合主要取決於高精度的對準(Alignment)點雲。此方式之優勢在於不需在結構物上佈標並且可以自動化處理。但此方式之缺點高度仰賴良好的天氣條件、人工照明等，且須在百公尺內進行拍攝，所以無法大規模進行變形監測。

(四)、 光達 (Light Detection and Ranging, LiDAR)

光達是利用發射脈衝雷射並測量反射回到接收器的時間來計算距離或其他參數(Argusmedia, 2020)，依據不同載體，光達可以分為星載雷射雷達(spaceborne lidar)、機載雷射雷達(airbornelaser scanner, ALS)、無人機雷射雷達(drone laser scanner, DLS)、車載雷射雷達(vehicle-mounted laser scanner, VLS)和地基雷射雷達 (terrestrial laser scanner, TLS)(郭慶華，2018)，而地面光達又較為適合進行地表變形監測。光達所發射的雷射脈衝波頻率很高，可以在短時間內，快速且大量記錄一定範圍內之點位資訊，稱為點雲。地面雷射掃描儀基於密集之三維點雲及二維剖面，與傳統變形監測技術相比，只需使用少量的控制點即可獲取結構物表面之資訊 (Lindenbergh and Pietrzyk, 2015)。優勢在於不用接觸結構物本身、獲取大量的點、不依靠自然光線、不須在地面佈線等情況下獲得數據(Park et al., 2007)。但是其觀測受天候影響，一次只能獲取一定範圍之數據、不能大範圍進行監測，且資料量龐大，需要強大的處理器才得以進行運算，不適合運用於大範圍、大規模之地表變形監測。

(五)、 合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture Radar, SAR)

合成孔徑雷達是一種主動式、應用於測繪和遙感的雷達技術。其原理利用至少兩幅合成孔徑雷達影像圖，透由感測器發出雷達訊號反射至物體後紀錄其回波之相位及強度，可用來生成數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)或者地表形變圖(Massonnet and Feigl, 1998、Hanssen, 2001、Bürgmann et al., 2007)。此技術可以測定短期及長期、厘米級的地表形變，可以用於自然災害監測，例如地震、火山和滑坡，以及結構工程尤其是沉降監測和結構穩定性。

西元 2000 年左右，D. Tarchi 等人(1999)將雷達系統至於地面上，稱為地面雷達(Ground-based SAR, GB-SAR)。GB-SAR 是一種基於雷達的地面遙感成像系統。它由一組雷達傳感器組成，當傳感器沿軌移動時，不斷發射和接收微波。成像方式是利用合成孔徑雷達技術實現的。天線的長度決定了採集圖像的橫向分辨率：天線越長，橫向分辨率越高。GB-SAR 不僅測量接收到的雷達信號的振幅，還測量其相位。通過使用干涉測量技術，可利用相位測量來獲得施測場景的變形和地形信息，因此 GB-SAR 主要應用於變形監測(Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, 2022)。

GB-SAR 能克服衛載 SAR(Spaceborne SAR)固定觀測角度

的限制，並且可達毫米等級的精度(Dario Tarchi et al., 2003)；另不受到天氣條件的限制、觀測範圍可達 1~2 平方公里，具有較高的資料密度(Dario Tarchi et al., 2003)。然而，GB-SAR 干涉需要具有同調性高的目標，精度取決於目標物的反射強度，大氣延遲、一維的視衛星方向(Line of Sight, LOS)可變形量以及干涉相位會出現模糊相位的情況 (Rödelsperger, 2011)。

衛載 SAR 最主要利用合成孔徑干涉雷達(Differential Interferometric SAR, D-InSAR)作為地表變形監測技術，屬於一種微波成像雷達，需以長時間序列的雷達影像合成後獲得地表變形速率、時間序列的地表變形量以及像元點位高度(藍振維，2019)。衛載 SAR 的優勢在於可大範圍施測，並且不受天氣及日夜影響(Danklmayer et al., 2009)，但其需要多張同一地區之影像，且資料處理較為繁雜，且只有一維的視衛星方向變形量可取得，沒有多維變形量。以上的方式皆有其優勢及限制，但隨著高空間解像度 SAR 感測器的問世，將帶給我們更有效率的建物變形監測的解決方案，下一節將詳細介紹合成孔徑雷達變形監測技術。

二、 合成孔徑雷達

(一)、 合成孔徑雷達變形監測技術

1950 年代，當時科學家基於軍事用途，將雷達架設於飛機上探測目標物，即為航空側視雷達(Side-Looking Aperture Radar, 簡稱 SLAR)。SLAR 在空載(airborne)的應用上，解析度尚可接受，但在衛載 SAR 的情況下，為達到標準解析度，理論上需要數百公尺長的口徑長度，對硬體結構而言是無法達到的。但隨著利用雷達回波具有不同都卜勒頻率位移(Doppler frequency shifts)的原理，其通過發射電磁脈衝和接收目標回波之間的時間差測定距離，解析度與脈衝寬度或脈衝持續時間有關：脈寬越窄解析度越高，藉此達到提高軌向解析度之目的(Massonnet and Feigl, 1998)。

合成孔徑雷達訊號分為水平(Horizontal)與垂直兩偏極(Vertical Polarization)模式。成像方式通常為右視，為滿足地表兩側的資訊都被完整記錄，合成孔徑雷達的軌道設計為升軌(Ascending)及降軌(Descending)兩個航行方向。本節將回顧合成孔徑干涉雷達以及多時序序列變形之相關技術。

(二)、 合成孔徑干涉雷達(Interferometric SAR, InSAR)

InSAR 使用兩幅或多幅合成孔徑雷達影像圖，根據接收到的回波相位差來生成數值高程模型或者地表形變圖(Massonnet and Feigl, 1998、Hanssen, 2001、Bürgmann et al., 2007)。解算方

程可分為橫軌式干涉 (Across-Track Interferometry)、沿軌式干涉 (Along-Track Interferometry)、重複軌道干涉(Repeat-Pass Interferometry)三個模式 (Gens and VAN GENDEREN, 1996)。

市面上有諸如 GMTSAR、IMAGINE InSAR、ROI PAC、DORIS 等軟體可供生成干涉圖使用。

(三)、 合成孔徑差分干涉雷達(Differential InSAR, D-InSAR)

DInSAR 是以重複軌道的方式，於不同時間獲取同一地區的 SAR 影像，利用兩幅 SAR 影像進行差分的結果可得到該時段內的雷達波相位差，從而獲得變形相位(盧玉芳，2006)。除地形效應的相位後獲取該地表變形量。DInSAR 的流程又分為二軌跡法(Two-Pass Differential)及三軌跡法(Three-Pass Differential Interferogram)(謝嘉聲，2006)。如下圖 1，處理流程由下文進行介紹：

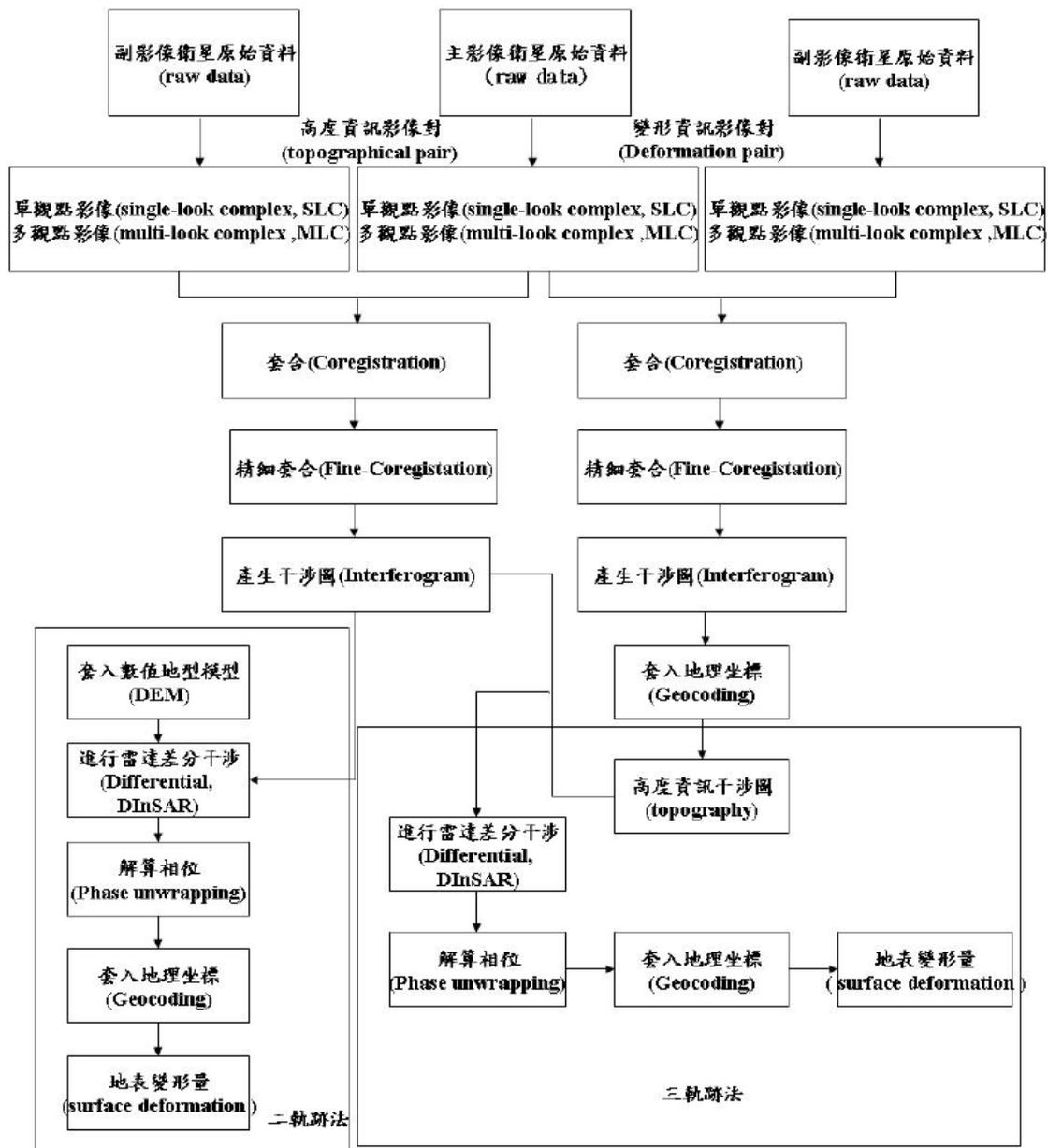


圖 1 DInSAR 處理流程

1. 影像前處理(Pre-processing)

將影像匯入後，讀取主影像後以及其他從影像之原始資料(raw data)，經處理後轉換成單觀點影像(single-look complex, SLC)及多觀點影像(multi-look complex, MLC)格式資料，並利用精密軌道資料讀入其他相關輔助資料。目的

在於檢核 SAR 影像是否進行雷達干涉。

2. 套合(Co-registration)

檢視主影像與從影像的空間及波譜重疊狀況，再針對重疊區的平均分布格網點對從影像重新取樣，最後進行套合微調與基線微調。此步驟是為了避免過大的位移，導致無法生成干涉圖。

3. 產生干涉圖(Interferogram)

首先計算兩影像各像元之相位差，再剔除垂直及水平航向上的非相關性基線及波譜重疊，接著計算兩衛星位置至大地水準面上目標點之距離差並轉換為相位差，並減去其平行航向分量自原 SAR 複數影像對所計算之相位差，用以消除因地球曲率所造成之誤差。當兩束波長相同、相位相同或保持固定相位差的光線照射在同一目標上，會產生一系列亮暗相間干涉條紋，或兩束雷達波在特定條件下也會產生干涉現象，當干涉雷達使用兩套相距 X 基線長的天線在地面產生干涉現象，干涉條紋出現時代表變形呈現雷達波波長的相位循環，將相位還原後經計算即可偵測地表變形(盧玉芳，2006、王國隆等人，2018)。

(四)、永久散射體合成孔徑雷達差分干涉技術(Persistent

Scatter Interferometric SAR, PS-InSAR)

DInSAR 能產生數值高程模型及大範圍的地表變形量，但無法消除時間、空間不一致及大氣效應誤差，為消除上述所列誤差，又有學者提出 PS-InSAR 以及短基線差分雷達差分技術 (Small baseline subset, SBAS)，與 SBAS 相比，PS-InSAR 精度較高，可達毫米等級(Daniele Perissin and Wang, 2011)，並且高於 SBAS(藍振維，2019)，且 PS-InSAR 較常使用在城市地區 (Crosetto et al., 2016)，並且廣泛應用於監測各種人造建設、大地工程(李璟芳等人,2018)，如水壩 (Lazecký et al., 2015),(Sousa et al., 2016)、地鐵隧道 (Daniele Perissin et al., 2012)、橋墩 (Huang et al., 2017; Zhang et al., 2017)、高鐵(戴于恒等人，2018)。

透過文獻回顧，我們可以得知 PS-InSAR 應用於地表變形監測已有一定基礎背景，且毫米及精度符合控制點偏移偵測要求，PS-InSAR 又以城市地區為廣泛應用，故本研究擬利用 PS-InSAR 進行大範圍控制點偏移監控。

參、 研究方法

本章節主要探討控制點偏移監控之研究方法。第一節介紹研究區域，第二節選取使用之影像，第三節介紹本研究使用之 PS-InSAR 軟體

流程，第四節說明本研究分析成果。

一、 研究區域

本研究區域選定台北市全區，由於台北市位處斷層帶，又有土壤液化、抽地下水導致地層下陷之情形，故將本研究區域分為地質概況、地層下陷兩部分介紹。

(一)、 地質概況

台北盆地的地質概況(圖 2)，除山腳斷層與上盤陷落區的上部第四系沉積層之外，還包含周邊高區的地層構造。東側及南側第三系高區，其高度低於 1000 公尺，岩盤以褶曲的第三系沉積岩為主並夾少許火山岩(王執明等人，1978)。西側第四系高區，至高約 250 公尺，主要是質地疏鬆的下部更新統沉積岩，台地的下部更新統具有從東南到西北的岩相變化。北側火成岩高區，跨過山腳斷層，直到崁腳斷層西北側。這些火山的噴發物幾乎都是安山岩質，以熔岩流為主，並且本區大致以上部第四系沉積層覆蓋(台北市政府土壤液化潛勢查詢系統，2022)。

圖例 Legend

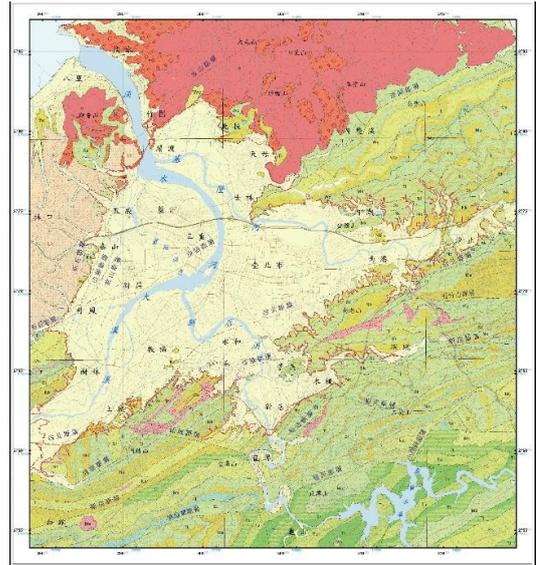
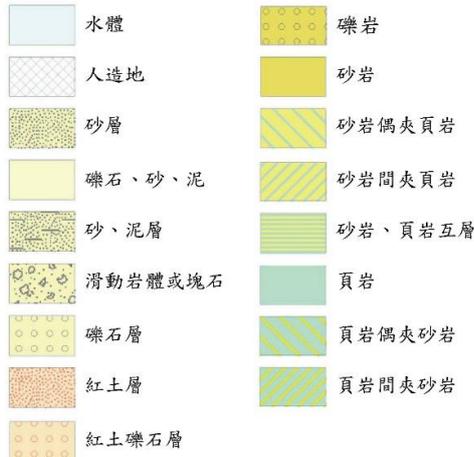


圖 2 台灣北部地質圖(台北市政府土壤液化潛勢查詢系統，2022)

台北的斷層部份，主要有西北側金山-新莊斷層、盆地西側之山腳斷層、中部之崁腳斷層與東南側的台北斷層(圖 3)，至今有些斷層仍處活躍狀態，未來有可能導致台北盆地位移情形發生。

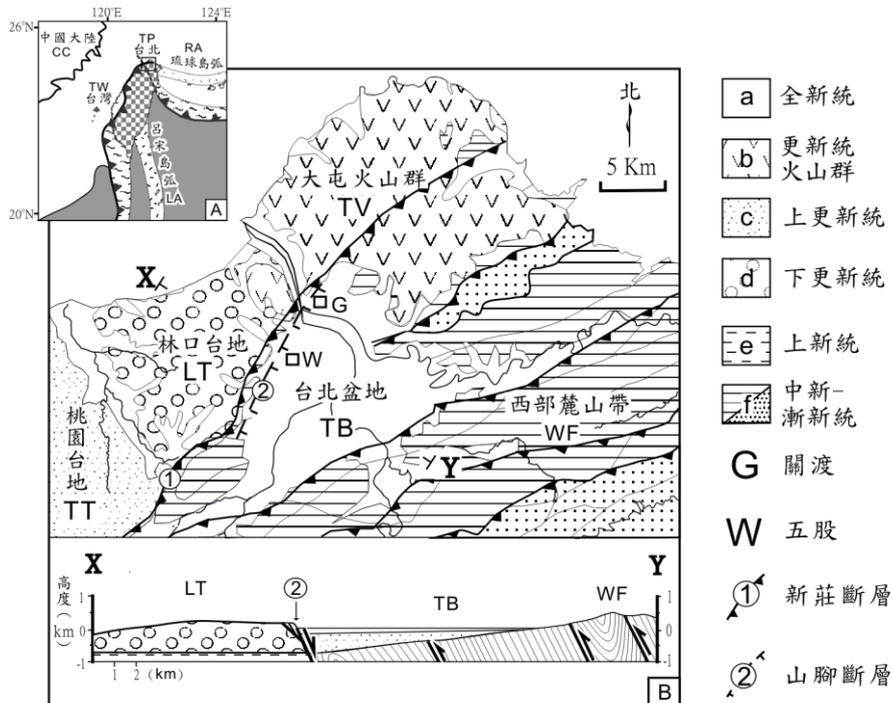


圖 3 台灣北部斷層圖(鄧屬予，2006)

(二)、地層下陷

從下面兩張圖中(圖 4、圖 5)，我們可以發現每年下沉量，在不同區域下沉幅度不一致，屬於動態的變化，是有對地表位移監測之必要性。

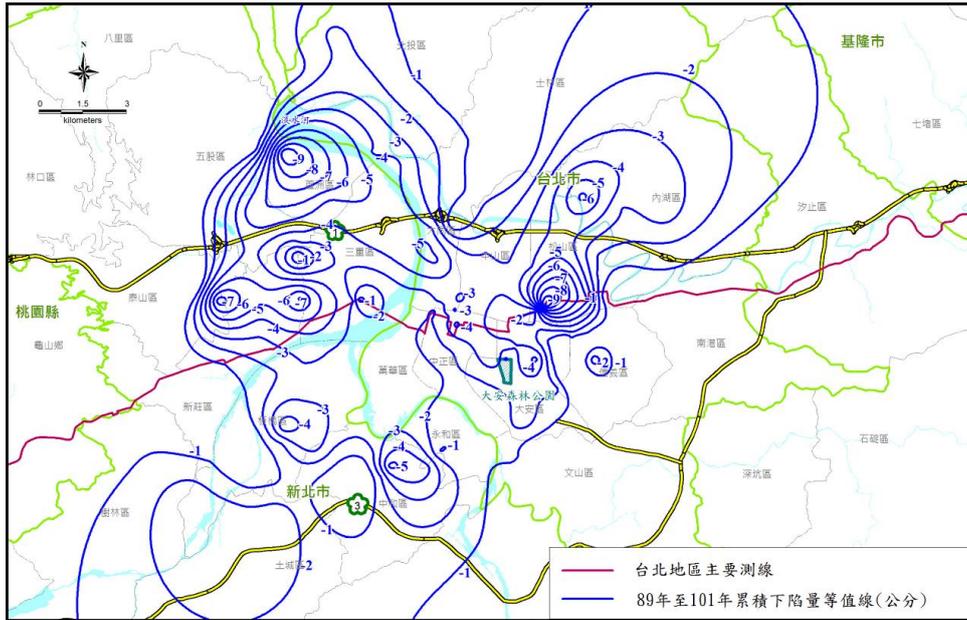


圖 5 2010-2012 年台北市累積下陷等值線圖(經濟部水利署，2022a)

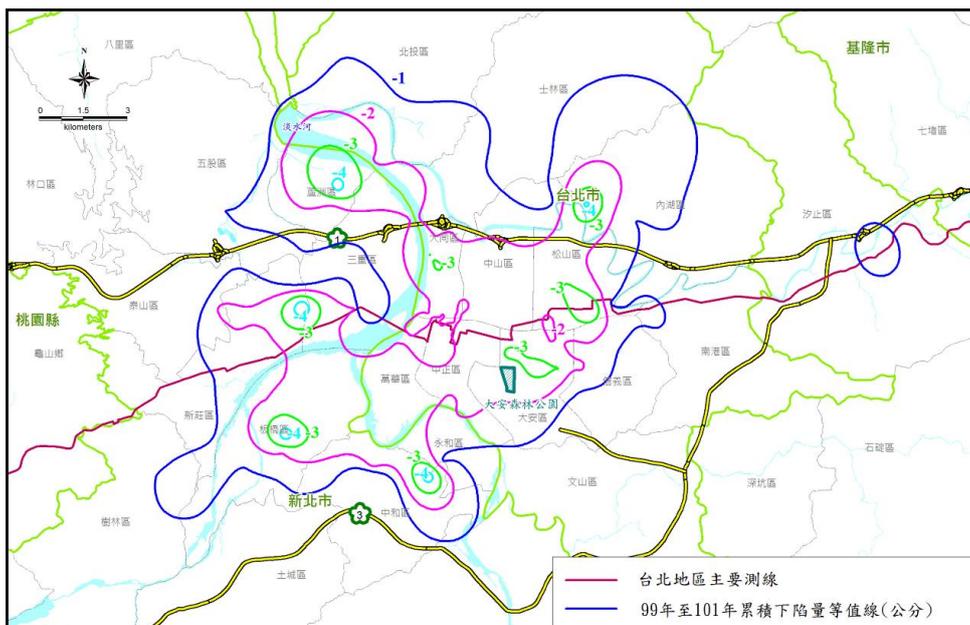


圖 5 2010-2012 年台北市累積下陷等值線圖(經濟部水利署，2022b)

二、 影像選取

本研究使用 COSMO-SkyMed 雷達衛星進行控制點位移監測。是由義大利航太中心(Italian Space Agency, ASI)資助及研發。衛星發射日期於 2007、2008 及 2010 年開始運行，波長為 X-band 的 3.1 公分。本研究所使用的影像為 COSMO-SkyMed 中 Stripmap Himage 之升軌(Ascending)模式影像，雷達影像之年份為 2011 年至 2013 年，空間解析度在 Azimuth 方向約為 2.2 公尺、range 方向為 1 公尺，右視紀錄地表資訊，衛星軌道方位角 191.0606 度，入射角為 26.61 度，偏極化為 HH。

三、 PS-InSAR 軟體流程

本研究處理 PS-InSAR 之軟體使用 SARPROZ。其能應用於處理 SAR、InSAR 及多時相 PS-InSAR 技術，其特點在於易懂的圖形界面，使用者不需要具備高水準的程式語言能力；並且該軟體使用 Matlab 編程，使用者可用 Matlab 進行補丁開發；並且 SARPROZ 與 Unix、PC、Mac 系統皆相容，且支援大多數衛星/數據格式，故本研究將 COSMO-SkyMed 匯入 SARPROZ 後進行後續 PS-InSAR 分析處理。

PS-InSAR 主要提取影像中穩定之像元，並以點為基礎分析，分離出大氣相位予以濾除，以獲得較高精度之變形成果。SARPROZ

軟體處理原理流程與 Ferretti et al. (2001)大致相符，詳如流程圖 6(D Perissin, 2016)。

- (一)、 影像前處理：匯入影像後，選取主影像後，將其他從影像套和(Co-registration)至主影像，計算影像強度圖及離差指標。
- (二)、 影像前地理對位：選取地表控制點，將外部 DEM 再取樣至雷達坐標系統以利後續干涉地形效應評估。
- (三)、 大氣相位處理 (Atmosphere Phase Scene Processing, APS)使用星形圖進行干涉配對之計算，選取較高門檻值之 PS 點，組成三角網計算差分相位後選取參考點進行大氣相位反演。
- (四)、 稀疏點位處理：使用較低之門檻值選擇 PS 點後，匯入前項之大氣相位進行二次解算獲得最終各 PS 點速度與時間序列變形量。

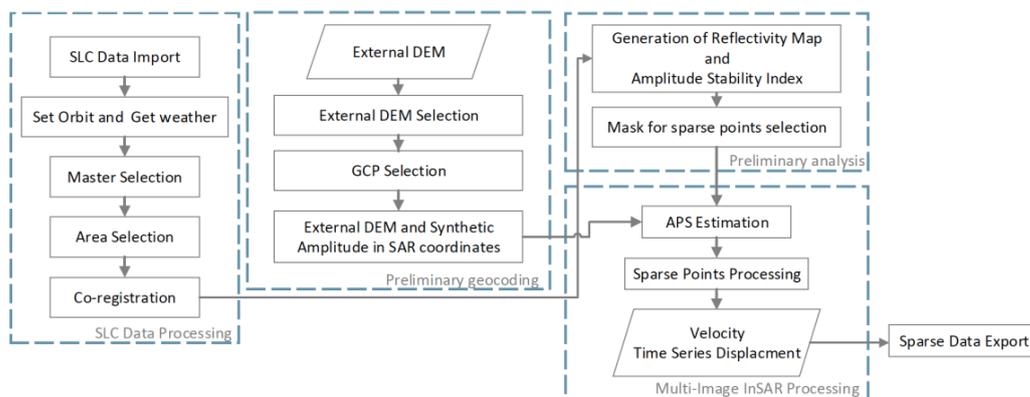


圖 6 SARPROZ PS-InSAR 處理流程

四、 PS-InSAR 處理成果

本研究使用 2012 年 4 月 5 日之 COSMO-SkyMed 影像作為主影像，其餘影像皆與該影像配對進行干涉，各影像時間基線與垂直基線關係如圖 7。

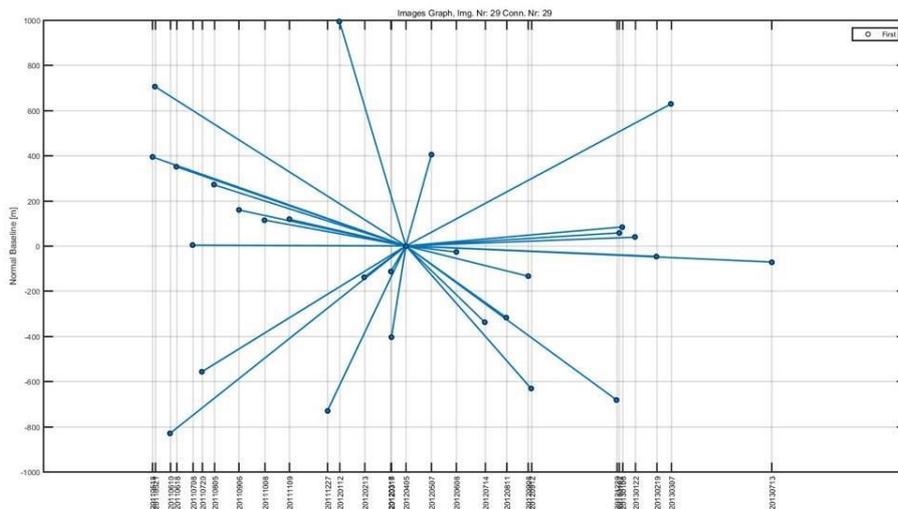


圖 7 使用影像像對時間及垂直基線連結圖

在 SARPROZ 的處理中，影像前處理完後，共有兩步驟來獲取最終地表變形。首先須先使用較穩定且稀疏的點進行大氣相位的解算，稱為大氣相位處理 (Atmosphere Phase Scene Processing, APS)，從而得到每幅從影像與主影像間的大氣相位，並消除各影像的大氣相位。最終再進行較低門檻值之選點進行變形速度解算，稱為 Sparse Point Processing。以下將分別介紹處理過程及成果。

(一)、 APS 反演成果

為扣除大氣相位之誤差，SARPROZ 會分別進行兩次變形解

算；第一次解算較穩定的 PS 點以分離出大氣相位，第二次扣除大氣相位後再進行最終的變形速度解算。

本研究使用強度離差指數(Amplitude Disperse Index, ADI) 0.8 為門檻值，由於大氣相位於空間分布中較為平滑，以 20x20 相元範圍進行稀疏選點，並使用 Delaunay 三角網進行各點位間的連結進行差分干涉相位解算，並將熱膨脹係數納入考量。圖 8 代表此次解算的成果，並以不同的圖表類型進行展示。(a)長條圖之橫軸為時域同調性，縱軸則為在該同調性中連結次數，可發現大部分連結都趨近時域同調性 1，然而約在時域同調性 0.62 又有另一峰值；圖(b)將三角網連結以顏色線段來表示時域同調性之分布，可從圖中得知盆地內之連結普遍皆為紅色，時域同調性高，周遭之連結則較低，綜合兩者得知，盆地內之連結解算良好，盆地外圍之連結則較為不良。圖(c)表示各解算參數之標準差 (相位噪聲、速度、高度差、熱膨脹係數)與時域同調性之關係，可知時域同調性越低、標準差解算會變大，故使用時域同調性 0.8 作為閾值，在 SARPROZ 軟體中稱為 non-linear weighting。

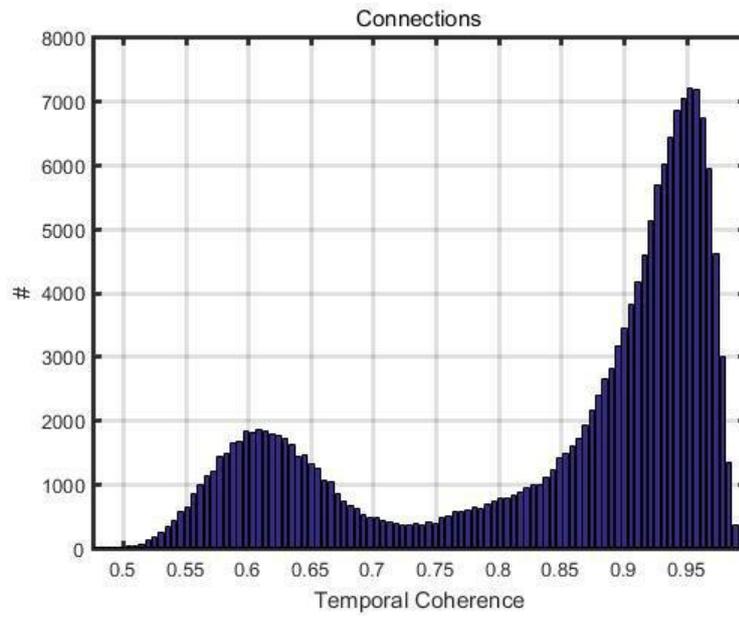


圖 8 APS 解算成果 (a)三角網連結以長條圖方式表示同調性

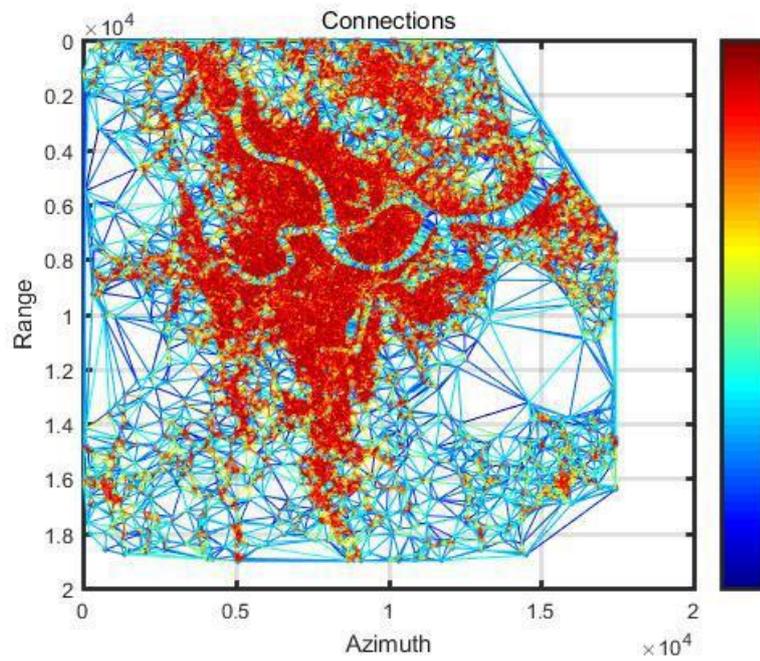


圖 8 APS 解算成果 (b)以空間表示三角網同調性高低

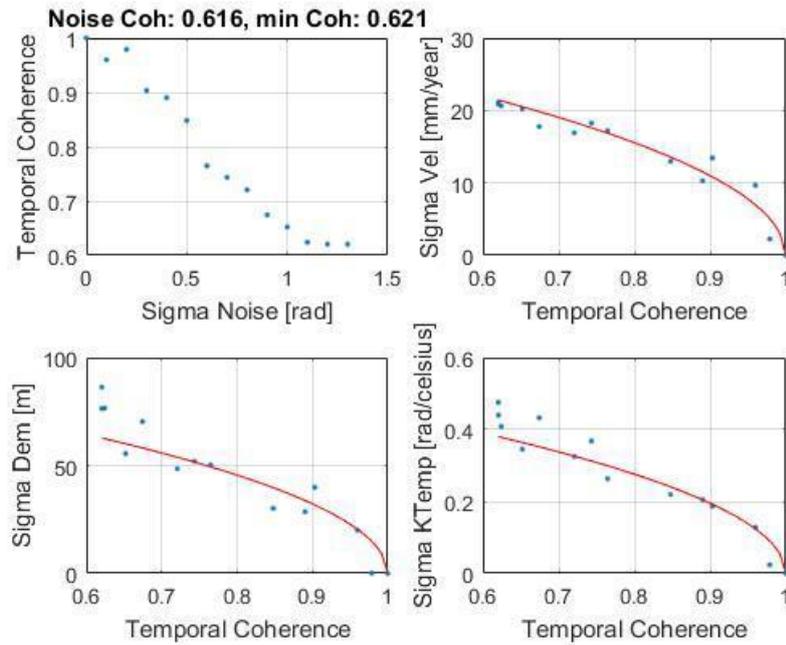


圖 8 APS 解算成果 (c)同調性與參數標準差之關係

前面為 PS 點各點之間的評估成果，還需將各 PS 點皆換算至參考點為基準。本研究利用各 PS 點之累積變形量、變形速度、高程、高程殘差等參數的直條分布圖來判斷本研究所選定之參考點是否穩定。在選擇良好的參考點後，因 APS 連結可視為隨機相連，為常態分布，圖 9 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)為本研究 APS 點整體解算成果直條分布圖。

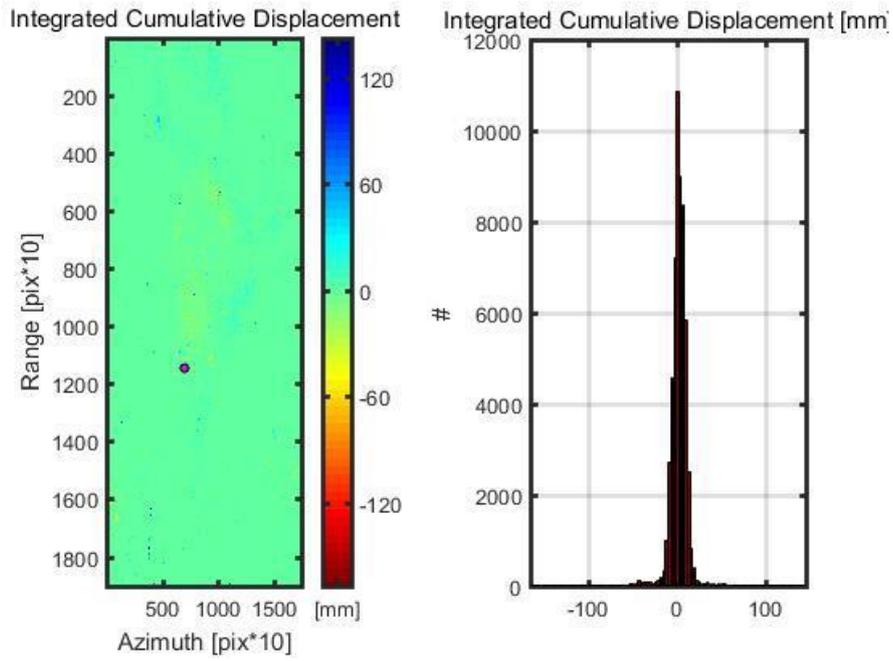


圖 9 APS 點整體解算成果直條分布圖 (a)累積變形量

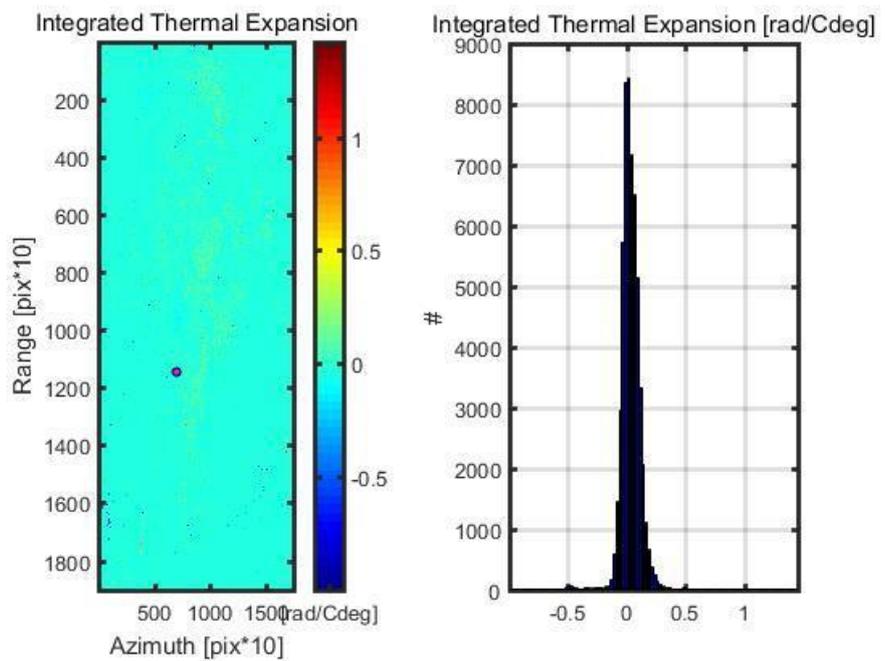


圖 9 APS 點整體解算成果直條分布圖 (b)熱膨脹係數

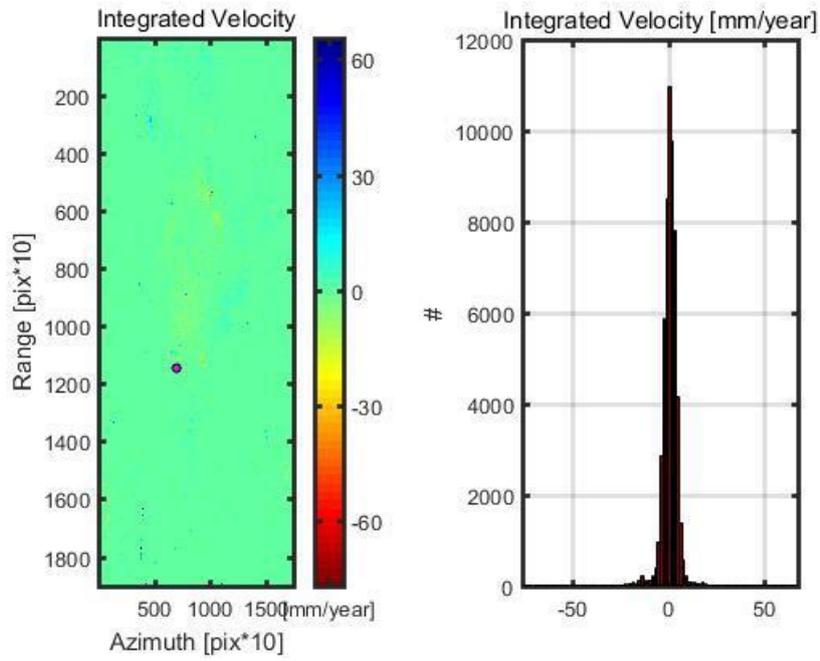


圖 9 APS 點整體解算成果直條分布圖 (c)變形速度

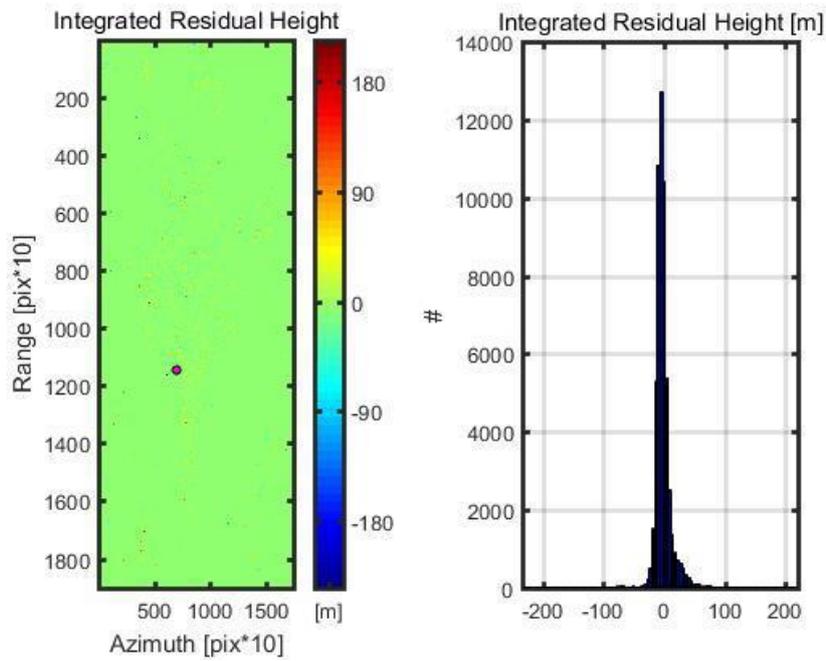


圖 9 APS 點整體解算成果直條分布圖 (d)高程殘差

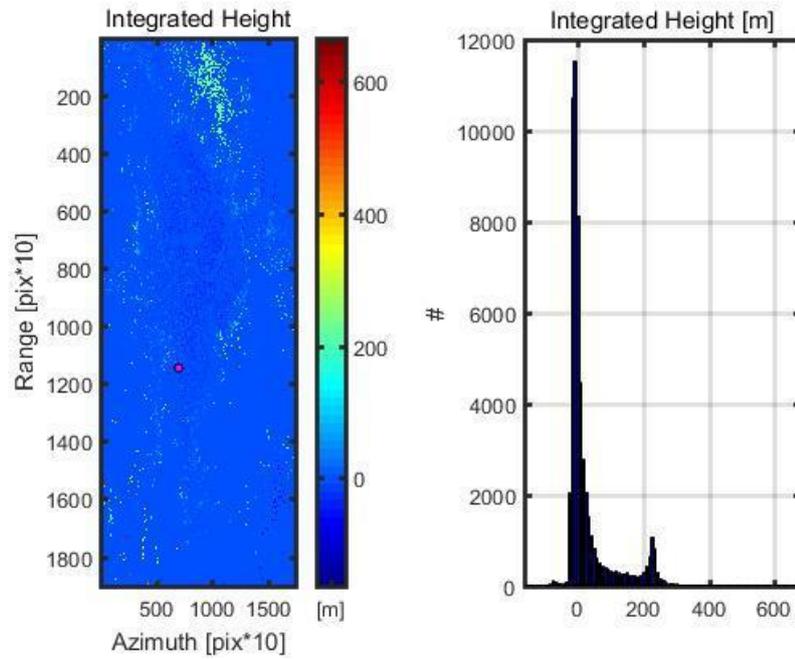


圖 9 APS 點整體解算成果直條分布圖 (e)高程

有了變形速度及高程誤差之後，剩下的殘餘相位即可認為大氣相位，本研究使用殘差相位倒數 (Inverted Residual) 為權，使用 Kriging 內插法內插出各影像日期與主影像間的大氣相位差。最後再使用此大氣相位做一次反演，測試各 APS 點在消除大氣相位後，是否同樣具有相當高的時域同調性，如果該區域具有高度同調性，則二次解算時該區域的解算結果則較為可信。從圖 10(a)可知，大部分的 APS 都具有非常高的時域同調性；由圖 10(b)長條圖可知，大部分的 APS 點時域同調性皆大於 0.8。

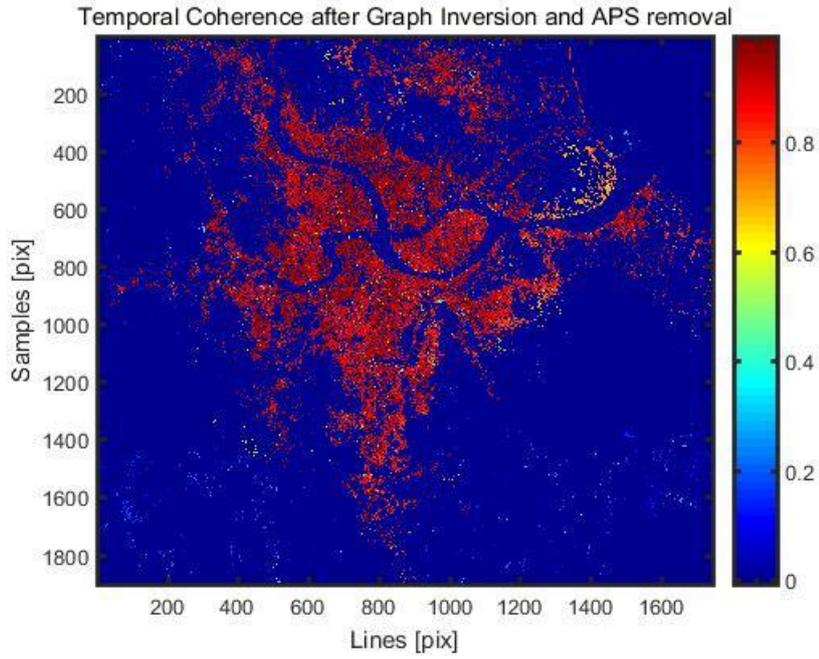


圖 10 扣除大氣相位反演解算成果

(a)APS 去除大氣相位後之時域同調性

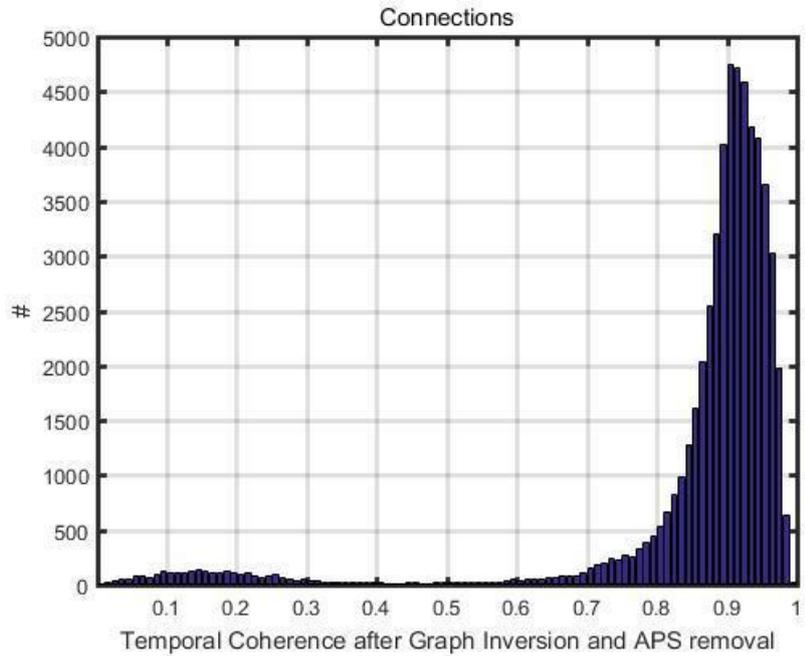


圖 10 扣除大氣相位反演解算成果

(b)以長條圖方式表示同調性高低分布

(二)、 Sparse Point 處理

在大氣相位確定後，可以重新選點並重新解算變形速度，並考慮熱膨脹效應的情況下，本研究選擇以時域同調性大於 0.7 作為最終篩選依據。圖 11、12 為 PS 點之同調性分布。

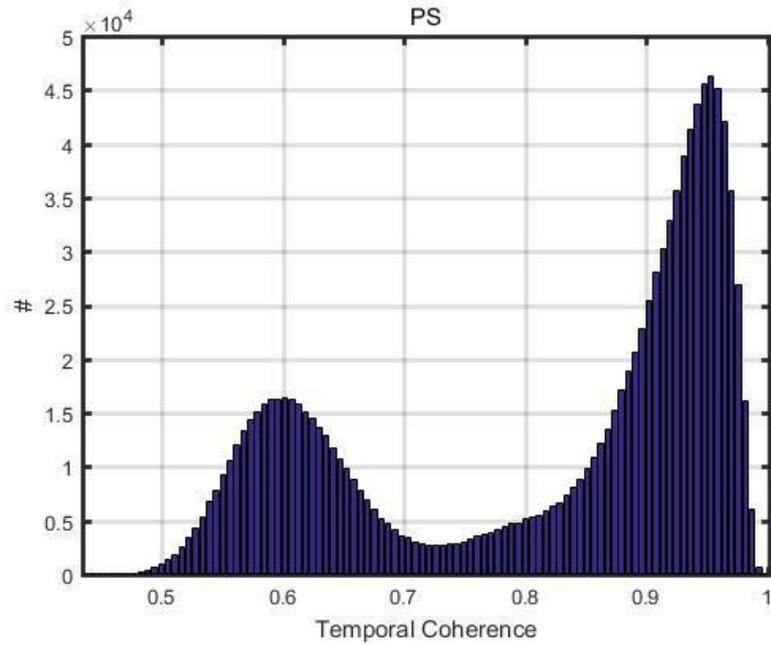


圖 11 PS 點之同調性分布(長條圖)

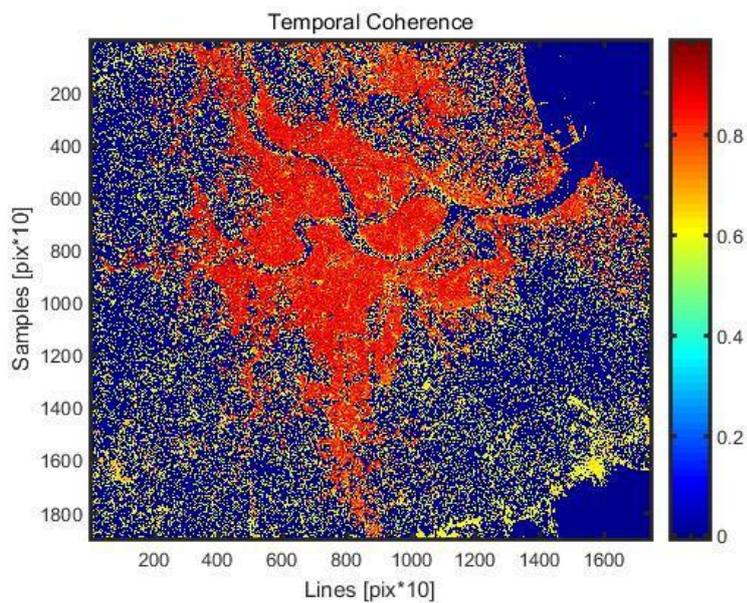


圖 12 PS 點之同調性分布(空間分布)

肆、 Sparse Point 解算成果

以下為臺北市內的 PS-InSAR 變形成果(圖 13)，以大範圍之成果而言，臺北盆地內相對於周圍山區下沉，主要抬升區域位於北投區溫泉及火山區域。內湖科技園區為主要下沉區域，餘下沉區域則較為零星。並將成果圖匯入 Google Earth，如圖 14、15，可發現 PS 點隨之高樓、結構物分布情形。

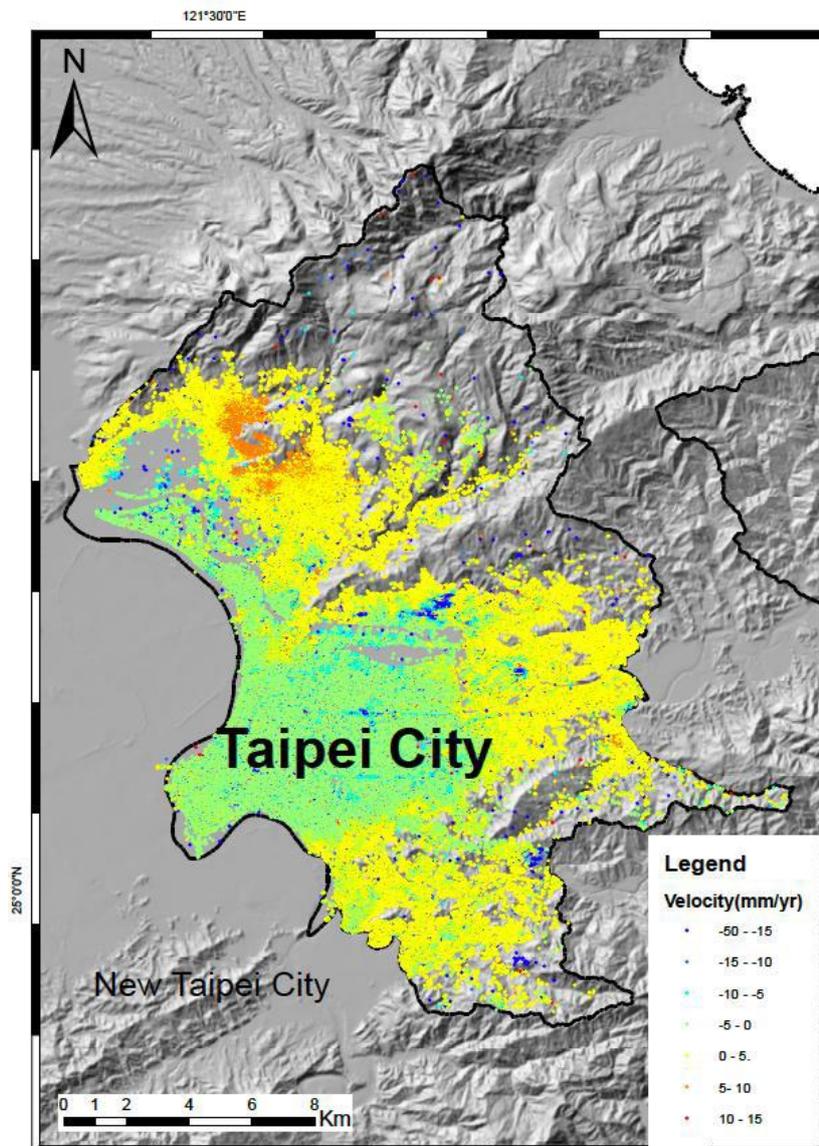


圖 13 PS-InSAR 於臺北市解算成果

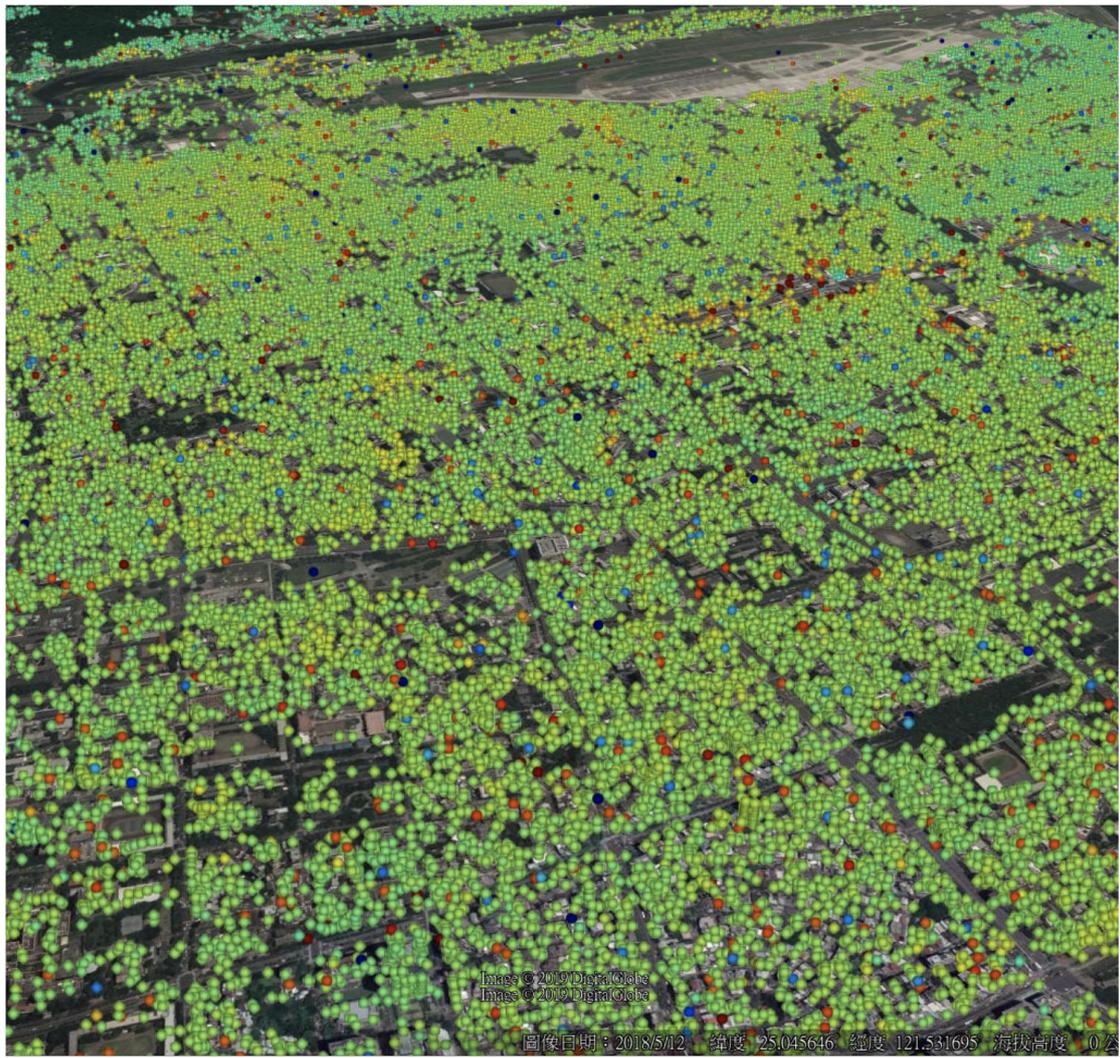


圖 14 PS 點於臺北市內之分布概況



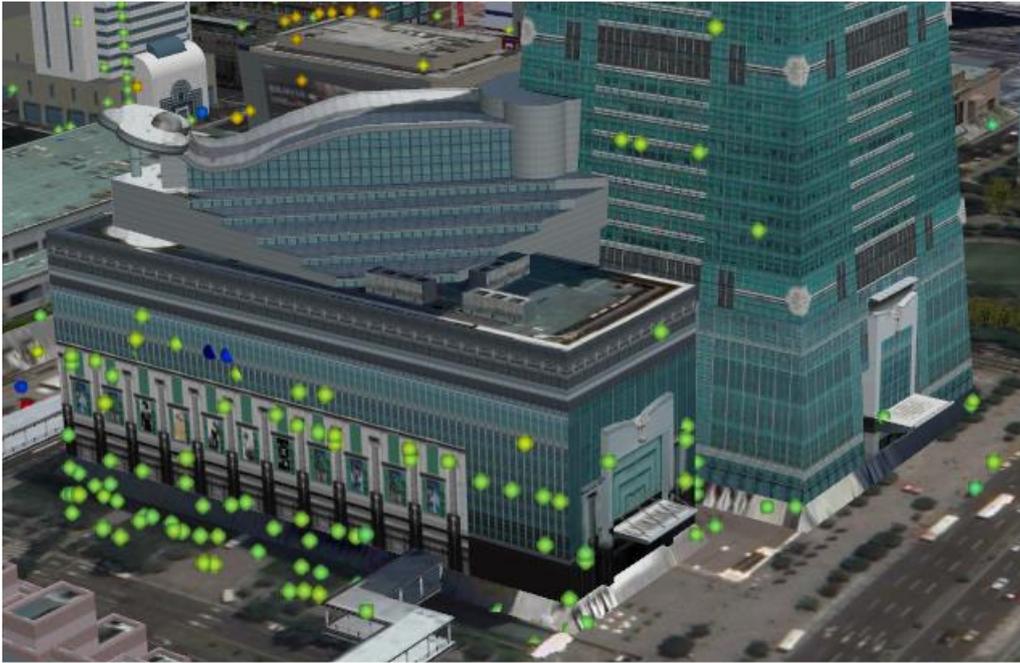


圖 15 PS 點於結構物上之分布

伍、 結論與建議

一、 結論

透過 PS 點於台北市內之分布狀況，再透過內插模型，即可獲得整體研究區域任一點位之偏移量，以此便可算出各控制點於研究區域內之偏移量。高解像度之合成孔徑干涉雷達的長時間序列分析，可大範圍監測地表控制點變形，並透過軟體的內業計算，即可達到控制點之管理及維護，減少大量人力及時間之花銷。

二、 建議

合成孔徑雷達之差分干涉技術之變形量為視衛星(Line Of Sight, LOS)方向，其所偵測之變形向量方向為地表指向衛星感測器，造成 InSAR 所偵測的變形並非完全垂直於地表，可能造成與測量系

統之間的隔閡。建議透過不同波長及軌道方向之感測器，結合同時期不同軌道方向之 InSAR 變形成果，達到不同分量之控制點位移解算，更有助於更明瞭實際變形情形。

參考文獻

網頁文獻

維 基 百 科 ，
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A8%E7%90%83%E5%AE%9A%E4%BD%8D%E7%B3%BB%E7%BB%9F>

台 北 市 政 府 土 壤 液 化 潛 勢 查 詢 系 統 ，
https://soil.taipei/Taipei/Main/pages/history_strata.html

全 國 法 規 資 料 庫 ，
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0060053>

國土測繪中心，<https://www.nlsc.gov.tw/cp.aspx?n=1482>

全 國 衛 星 追 蹤 站 暨 基 本 控 制 點 查 詢 系 統 ，
<https://track.nlsc.gov.tw/CORS/Portal/map.aspx>

經 濟 部 水 利 署 ，
https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/AccIndex/63#tab89-101

經 濟 部 水 利 署 ，
https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/AccIndex/63#tab99-101

Argusmedia,<https://www.argusmedia.com/en/news/2229445-adoption-of-gallium-based-lidar-sensors-gathers-pace>

Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya,
<http://geomatics.cttc.es/remote-sensing/gbsar/>

Perissin, D. (2016). SARPROZ software manual. Retrieved December 5, 2018 from <http://ihome.cuhk.edu.hk/~b122066/manual/index.html>

中文文獻

王執明、鄭穎敏、王源，1978。台北盆地之地質及沉積物研究，台北市政府養護工程處委託台北市地盤沉陷研究工作。

- 王國隆、林俊廷、賴正儒，2018。差分干涉合成孔徑雷達方法偵測活躍地表變形- 以地震、地層下陷、坡體活動為例，大地技師 16 期。
- 吉大純、李學軍、侯金寶，2010。影像匹配中的若干基本問題研究，電腦技術與發展，20(5)，246-249。
- 何維信，2012。測量學，宏泰出版社。
- 郭慶華，2018。雷射雷達森林生態應用：理論，方法及實例。高等教育出版社。
- 盧玉芳，2006。以雷達干涉技術監測雲林地層下陷。
- 李璟芳、林士淵，2018。星載干涉合成孔徑雷達觀測技術於大地工程之應用，地工技術 157 期。
- 謝嘉聲，2006。以雷達干涉技術偵測地表變形之研究。博士論文-國立交通大學土木工程系所國立交通大學土木工程系博士論文。
- 戴于恒、蔡富安、林立哲、李訢卉、吳錫賢，2018。InSAR 技術於工程結構形變分析之應用，中華技術 120 期。
- 藍振維，2019。多時相干涉雷達監測建物變形及評估驅動因素—以臺北市為例。
- 藍振維、李璟芳、林士淵、林玉菁，2021。新世代合成孔徑雷達影像評估技術-ATS-InSAR 研發與應用，中興工程第 153 期。

英文文獻

- Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1), 169-209.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B., 2016, "Persistent Scatterer Interferometry: A review", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115 78-89.
- Danklmayer, A., Doring, B. J., Schwerdt, M., Chandra, M. J. I. T. o. G., & Sensing, R., 2009, "Assessment of atmospheric propagation effects in SAR images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(10): 3507-3518.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F., 2001, "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20.
- Fraser, C., Shao, J. J. I. A. o. P., & Sensing, R., 1996, "Exterior orientation determination of MOMS-02 three-line imagery: experiences with the Australian testfield data", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 207-214.
- Gens, R., & VAN GENDEREN, J. L., 1996, "Review Article SAR94 interferometry-issues, techniques, applications", *International Journal of Remote Sensing*, 17(10): 1803-1835.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- Huang, Q., Crosetto, M., Monserrat, O., & Crippa, B., 2017, "Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128(Supplement C): 204-211.
- Kavanagh, B. F. (2006). *Surveying: Principles and applications*.
- Knecht, A., & Manetti, L., 2001, "Using GPS in structural health monitoring", *Smart Structures and Materials 2001: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, 4328: 122-129
- Lazecký, M., Perissin, D., Zhiying, W., Ling, L., & Yuxiao, Q. (2015). Observing Dam's Movements with Spaceborne SAR Interferometry. In G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, & F. Luino (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory -*

- Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation (pp. 131-136). Cham: Springer International Publishing.
- Lindenbergh, R., & Pietrzyk, P., 2015, "Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning", *Applied Geomatics*, 7(2): 65-74.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2013). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*: Walter de Gruyter.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its applications to changes in the earth's surface, *Rev.*
- Park, H. S., Lee, H. M., Adeli, H., & Lee, I., 2007, "A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1): 19-30.
- Perissin, D., & Wang, T., 2011, "Time-series InSAR applications over urban areas in China", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations Remote Sensing*, 4(1): 92-100.
- Perissin, D., Wang, Z., & Lin, H., 2012, "Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73(Supplement C): 58-67.
- Rödelsperger, S. (2011). *Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements*: Techn. Univ., Geodätisches Inst.
- Rutledge, D. R., Meyerholtz, S. Z., Brown, N. E., & Baldwin, C. S. J. G. W., 2006, "INNOVATION-Dam Stability-Assessing the Performance of a GPS Monitoring System-A precise and modernized monitoring program is an important component of the US Army Corps of Engineers", 17(10): 26-33.
- Sousa, J. J., Ruiz, A. M., Bakoň, M., Lazecky, M., Hlaváčová, I., Patrício, G., . . . Perissin, D., 2016, "Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring", *Procedia Computer Science*, 100 1103-1114.
- Sužiedelytė-Visockienė, J., Bagdžiūnaitė, R., Malys, N., Maliene, V. J. E. e., & journal, m., 2015, "Close-range photogrammetry enables documentation of environment-induced deformation of architectural heritage", 14(6): 1371-1381.
- Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D. D., Luzi, G., Pasuto, A., . . . Silvano, S., 2003, "Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy", *Engineering Geology*, 68(1): 15-30.

- Tarchi, D., Rudolf, H., Luzi, G., Chiarantini, L., Coppo, P., & Sieber, A. J., 1999, "SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam", Paper presented at the IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293), 28 June-2 July 1999
- Wagner, A. (2016). A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+ D images. *Measurement*, 82, 64-74.
- Zhang, Y., Erbertseder, T., Chrysoulakis, N., Heldens, W., Infante, D., Russo, G., . . . Tessitore, S. (2017). Multitemporal synthetic aperture radar for bridges monitoring. Paper ed at the Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments II.