



基於 差分干涉合成孔徑雷達分析 所得高程變形之 山坡地管理 模式 — 以 臺北市 為例

王國隆* / 國立暨南國際大學土木工程學系 教授

林俊廷 / 瑞模德科技有限公司 總經理

林士淵 / 臺北市政府工務局大地工程處 科長

謝旻希 / 臺北市政府工務局大地工程處 股長

廖陳侃 / 臺北市政府工務局大地工程處 幫工程司

近年合成孔徑雷達衛星的快速發展及部份合成孔徑雷達衛星可公開取得，使得利用雷達資料分析的可行性增加。臺北市在快速開發及市民遊憩需求的情形下，山坡地的使用檢討與滑動潛勢判斷成為重要課題。臺北市過去的災害與調查結果，顯示多數歷年發生的災害並非位於地調所公布之山崩與地滑地質敏感區域。為能對臺北市的山坡地進行全面性的篩選，本研究選擇以差分干涉合成孔徑雷達分析技術所得的地表變形為依據。透過分析所得的垂直地表變形速率結合斜坡單元，劃分臺北市各斜坡單元之變位潛勢。所得之各單元變位潛勢除長期結果以外，亦可取出每年或每次事件之變位結果，以利做為各機關後續規劃管理之用。

前言

臺北市位處臺北盆地，周邊被群山環繞，與市民的日常生活密不可分。根據統計數據，自 1959 年以來，臺北市已記錄約 1,066 起災害事件。根據臺北市坡地災害類型的統計結果顯示，淺層崩塌是最常見的災害類型，其次是落石和弧形滑動等類型的災害。歷史上的災害區位與地質調查所公布的臺北市山崩和地滑地質敏感區有 109 個重疊區域，僅佔 8.6%，這表示多數歷年來發生的災害並不處於山崩和地滑地質敏感區域之內。臺北市的坡地災害主要發生在盆地邊緣的山坡地，其中一部分區域鄰近市民經常活動的地區。

合成孔徑雷達訊號分析的發展從軍事用途為始，歷經數十年發展迄今，在各種不同波長感測器衛星及軌道控制條件均佳的情形下，加上各種演算法的發展，計算地表變形成為可信賴的技術。

臺北市政府自 2019 年起利用合成孔徑雷達及多期影像進行變形分析試辦調查標的邊坡 6 處區位，比對與觀測成果變形趨勢一致。為瞭解邊坡潛在滑移可能性，地表調查採用遙測技術全面性大範圍觀測，2020 年後採分期分區方式以遙測技術普篩臺北市行政區範圍，找尋變異區位、勘查及比對，至 2023 年完成全臺北市 2017 年迄今山坡地地表變形分析，針對變異的區位提出管理維護建議。

* 通訊作者，klwang@ncnu.edu.tw

差分干涉合成孔徑雷達分析發展與應用

遙感探測（以下簡稱遙測）區分很多種方法，感測器類型分為主動式與被動式，以衛星影像而言，多光譜衛星以太陽輻射能量為影像訊號來源產製多光譜影像，屬被動式遙測，其易受制於拍攝時間、天氣等條件限制。雷達衛星承載感測器主動發射雷達波後接受目標物反射訊號，其較不受日晝及天氣影響，週期性的獲取資料，目前已被廣泛應用於環境與災害觀測上。

雷達衛星於 1991 年由歐洲太空總署（European Space Agency, ESA）發射 ERS-1 衛星為第一顆民用雷達衛星，其後有加拿大航空局與美國合作的 RadarSat、日本 ALOS、義大利 CosmoSkyMed、德國（現由 AIRBUS 營運）TerraSAR-X、歐洲太空總署 Sentinel-1 衛星，現今也針對不同的應用需求，發展出不同再訪周期及波段的商用雷達衛星。

目前地球觀測衛星所使用的雷達波波長以 X、C、L 波段最為常見，一般而言，波長越長，穿透地物就越深，波長越短則相反，X 波段的波長約為 3.1 公分，C 波段約 5.6 公分，L 波段則約 23.4 公分，L 波段其長波長訊號對地物穿透性較佳，對於植被覆蓋區的地表監測能有較好較完整的資訊；C 波段雷達波，則可提供目標物表面或目標物以下的資訊。而 X 波段其短波長訊

號的特性，在都會區或植被稀少區域可處理出解析度高且資料點多的成果，以植被覆蓋區而言較適合用來對樹頂或樹葉的偵測。故選擇波段時應考慮偵測的目的與偵測地區的地表覆蓋情況，進行應用及分析，常見的衛星資訊如表 1 所示。

以差分干涉合成孔徑雷達分析方法（Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR）分析地表變形時，圖 1 為計算地表變形之簡圖，藉由兩次衛星通過待測物上空時，對待測物發射並接收的雷達波訊號。利用參考數值地形，取得地表物理是否產生移動的物理量，計算的簡易公式如公式 (1)：

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_{los} \quad (1)$$

其中：

$\Delta\phi$ ：相位差，代表的是雷達波傳送到地面待測物與原有應接收波之間的相位差值

λ ：雷達波波長，例如使用的雷達波為 L 波段則約為 23.6 公分，C 波段則約為 5.6 公分

d_{los} ：待測物與衛星距離的變位值

因此從上述公式可以得知，使用雷達波長控制每次偵測的變位範圍，例如一個 2π 的相位差值表示待測物對衛星的變位為 1/2 波長，此時恰為解算後干涉條紋的一個循環，此一相位差循環可用來快速檢視可能變位的量。

表 1 常見雷達衛星資訊一覽表

波段	衛星	國家	發射時間	波長 (cm)	再訪天數	費用	備註
X	Cosmo-SkyMed	義大利	2010	3.1	16	1,750 歐元	
	TerraSAR-X/ TerraDEM-X	德/法	2007	3.1	11	1,750 歐元	
	SRTM	美國	1994	3.1	10	-	
	ICEYE	商業	2018~	3.1	< 1		衛星群
	Capella Space	商業	2018~	3.1			衛星群
C	Sentinel-1 A/B*	歐盟	2014~	5.4	12	免費	
	ERS-1	歐盟	1993~2000	5.6	35	免費	除役
	ERS-2	歐盟	1995~2011	5.6	35	免費	除役
	Envisat	歐盟	2003~2012	5.6	35	免費	除役
	RadarSat-1	加拿大	1995	5.6	24	免費	沒有或較少台灣地區資料
	RadarSat-2	加拿大	2007	5.6	24	免費	
	RADARSAT Constellation Mission (RCM)	加拿大	2019	5.6	4		
L	JERS-1	日本	1992~1998	24	44		沒有或較少台灣地區資料
	SEASAT	美國	1978~	23.5	-		沒有或較少台灣地區資料
	ALOS-1	日本	2006	19	46	5 千日圓	除役
	ALOS-2	日本	2014	22.9	14	24~40 萬日圓	

*：Sentinel-1B 於 2021 年 12 月發生故障，經搶修雖仍於軌道運行但已無法取像，ESA 緊急提前下一代 SAR 衛星發射計畫中。1A 下降軌於 2022/2/8 後停止供應，經作者與 ESA 申請臺灣地區由於山脈主要為南北走向，以及上升及下降軌併存對臺灣山區防災之重要性，經 ESA 同意於 2022/7 月開始恢復供應。

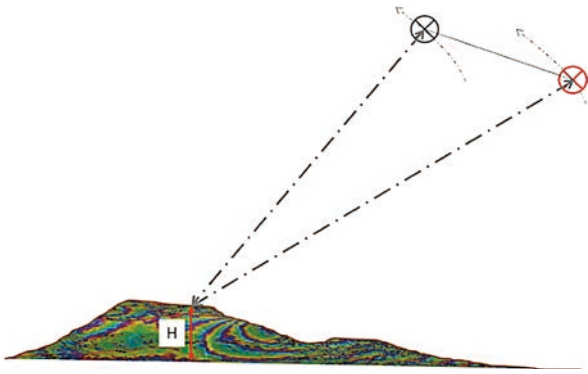


圖 1 差分干涉合成孔徑雷達地表變位偵測示意圖（以左視為例；王國隆等人^[1]）

採用合成孔徑雷達影像的地表位移訊號，使用差分干涉技術來取得衛星至地表變形量，此變形量也可用以監測地表或自然環境災害，然而單一組差分干涉技術所取得地表變形量可能存在多種誤差^[2-4]，利用時序性的合成孔徑雷達影像進行干涉分析時，主要產生的干涉相位資訊包含了地形、地表特徵變化、地表移動量以及大氣效應等，其中地形的相位變化資訊可以採用高精度數值地形及短基線長去除該項誤差，相干值的門檻調整則可以去除低相干區域的影響，以及副產品數值地形的精準度^[5]，大氣效應的誤差可以用長時間多影像的觀測降低，當消弭可能誤差來源後，僅剩下地表移動及雜訊相位差，可藉以取得較高精度且可信任之地表變形量^[6,7]。

臺灣近年來使用 SAR 進行地表變形之研究發展相當迅速，雖常有不一分析名詞出現，如 TCP-InSAR 或

ATI-InSAR 等方法，其主要分析架構仍以 PS（永久散射體法）及 SBAS（短基線法）為區隔，綜整臺灣近年有關連續式 SAR 分析區分為 PS（永久散射體法）及 SBAS（短基線法），使用之軟體也不一，將所整理之分析結果如表 2 所示。

為了能系統性的解算地表變形資料，茲將差分干涉合成孔徑雷達分析流程繪製如圖 2 所示，藉由兩幅跨事件時序的 SAR 資料，首先產製成品為同調性（coherence）圖，當兩幅資料間同一位置雷達波反射訊號強度一致時為高同調性，然反射訊號強度亦與雷達波的波長、地表地物類別及植生強度有密切關係；此外，由兩幅 SAR 資料與參考數值地形，可以獲得地表大面積的干涉解算成果，此時亦稱為干涉條紋（interferometric fringe），干涉條紋的表現一般以 R-G-B 的顏色循環表示，如前所述當完整的 R-G-B 循環出現時，可視為半個波長的變形量，然此時僅為地面物體對衛星之間的變位，不等同於三軸方向的變位量；當取得干涉解及同調性後，可藉由同調性門檻的調整及地面控制點的設定，產生經過校正後的差分干涉解，此時的解算成過拋棄過大的誤差並經過糾正，然仍僅代表相位差值並非真實變位，而真實變位可能存在數個甚至數十個 R-G-B 循環，故此時需將真實的相位差值計算出來，此一步驟稱之為相位還原或相位解纏（phase unwrapping）；將將相位還原的結果再經過公式轉換可獲得物體對衛星的變位量，再透過衛星入

表 2 臺灣近年使用之 SAR 分析方法及其標的（王國隆等人^[1]）

標的	方法	論文及使用軟體
地層下陷	PS	卜（2018） ^[8] 、林（2018） ^[9] 、陳（2019；StaMPS） ^[10]
	SBAS	魏（2021） ^[11] 、楊（2018） ^[12] 、阮（2018） ^[13] 阮蔡（2021；PCI-Geomatica） ^[14] 張（2021；GMT SAR） ^[15] 李（2020；GMT SAR） ^[16]
	PS, SBAS	歐（2018；StaMPS） ^[17]
邊坡變位	PS	王（2020） ^[18] 、戴（2016） ^[19]
	SBAS	謝（2020；GMT SAR） ^[20] 吳（2019；ISCE/ GIAnT /StaMPS） ^[21] 林（2021；SARscape） ^[22]
	PS, SBAS	努（2021；StaMPS） ^[23]
地表變位	PS	楊（2012；StaMPS） ^[24]
	SBAS	—
	PS, SBAS	洪（2012；StaMPS） ^[25]
其他	PS, SBAS	盧（2018；StaMPS） ^[26]

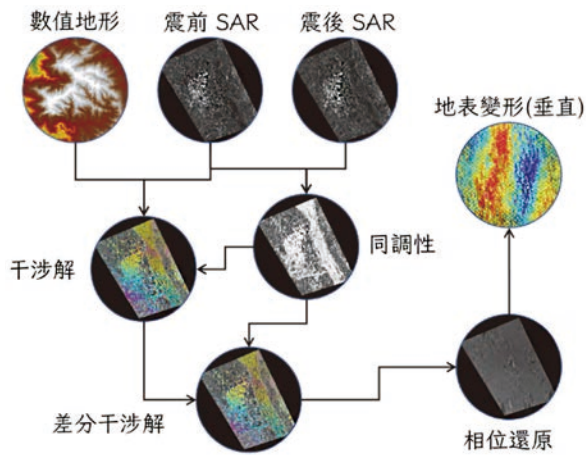


圖 2 差分干涉合成孔徑雷達解算分析流程^[1]

射角度與地面的方位角幾何關係，可將變位投影至三軸方向。

Fialko and Simons^[27] 提出將 line of sight 觀測資料轉換為三維觀測方法，其使用之方程式如公式 (2)：

$$[Un \sin \phi - Ue \cos \phi] \sin \lambda + Uu \cos \lambda + \delta los = d_{los} \quad (2)$$

其中， ϕ 為衛星運行方向方位角， λ 為衛星發射至地面點之傾斜角， Un , Ue , Uu 分別代表北南方向、東西方向及垂直方向變形， δlos 則是量測誤差，包含軌道誤差、大氣延遲、低同調性以及錯誤的數值地形等。

從上式可知，我們可以藉由多個不同角度觀測點利用上式解算出直角坐標變位。

Ng *et al.*^[28] 於 2011 年進一步依據 Fialko 方法重新將此一方法分離為兩種模式，由於 Fialko 當時所使用的 SAR 衛星為右視，故在右視情況下的三維變形計算可藉由公式 (3) 獲得：

$$[\cos\theta \quad -\sin\theta \cos\alpha \quad \sin\theta \sin\alpha] \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \\ D_n \end{bmatrix} = \Delta R \quad (3)$$

其中， θ 是衛星發射至地面點之傾斜角， α 為衛星運行方向之方位角， D_u , D_e , D_n 分別代表垂直方向、東西方向及北南方向之地表變形， ΔR 則為 line of sight 變形。

而當衛星為左視情形時，將其拆解為直角坐標三方向變形方程式則為公式 (4)：

$$[\cos\theta \quad \sin\theta \cos\alpha \quad -\sin\theta \sin\alpha] \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \\ D_n \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (4)$$

由以上兩式可知，欲解算三維方向變形，必須由至少三個不同方向的量測值才能取得。

另外，由於 SAR 衛星運行方向為南北方向運行並側向觀測，所以對於南北方向的變形較為不敏感，一般情況下可能計算所得變形小於真實變形量，故 Ng *et al.*^[28] 為了將在計算過程中最小平方誤差降低，亦提出忽略南北方向僅採用東西方向及垂直方向之計算方式公式 (5)：

$$[\cos\theta \quad \mp \sin\theta \cos\alpha] \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (5)$$

上式中負號為右視情形使用，正號為左視情形使用。

然水平投影時注意各分量轉換時的參數是否合宜正確，本文僅就投影至垂直向的地表變位說明。

本文使用之軟體為 SARscape，為一公開且容易取得之商程式，沒有存在方法取得技術障礙。

限制條件

合成孔徑雷達衛星軌道運行方向為南北方向，加上訊號發射與接收均為側向，造成南向或北向邊坡正確性稍差，尤有甚者可能造成完全相反的結果，Wang 等人^[29] 利用連續式 GNSS 解算成果與 Sentinel-1 解算之地表垂直位移進行比較，所得結果如圖 3 所示。Wang 等人^[29] 使用差分觀測 GNSS 方法，於平坦無坡地位移位置設置參考站，假設參考站變位為零解算移動站（連續式觀測站），歷經四年 GNSS 觀測成果與 DInSAR 成果比對。從圖中可以明顯看出 GNSS1 所在位置使用上升軌道所得結果相當符合，而下降軌道與

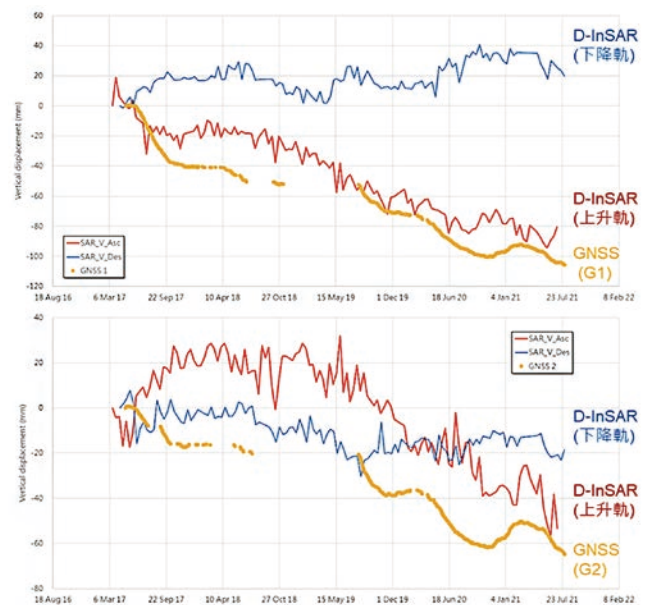


圖 3 GNSS 連續站觀測資料與 DInSAR 分析結果比對 (改編自 Wang 等人^[29])

表 3 GNSS 與 DInSAR 精度及相關性 (改自 Wang 等人 [29])

坡度 / 坡向	G1 GNSS 觀測站		G2 GNSS 觀測站	
	坡度 (度)	15.6	坡度 (度)	19.8
	坡向 (度)	88.9 (朝東)	坡向 (度)	169.8 (南偏東)
Sentinel-1 衛星上升 / 下降軌道	上升軌道	下降軌道	上升軌道	下降軌道
平均誤差 (mm)	13.21	84.74	24.43	25.76
標準誤差 (mm)	10.14	37.82	15.17	17.52
相關係數	0.95	-0.69	0.51	-0.20

GNSS 觀測結果結果並不一致；同樣於 GNSS2 位置之 GNSS 觀測成果與上升軌較為符合。

為求所得結果數值化，將坡度、坡向與不同軌道結果分別與 GNSS 觀測成果進行比對，將結果整理如表 3 所示。表中可以明顯看出在相關性方面，GNSS 安裝位置均以上升軌道要佳，當安裝位置 (DInSAR 觀測位置) 正確時，如 GNSS1 位置，其相關係數可達 0.95，四年間之平均誤差為 13.21 mm，如使用下降軌道進行分析，相關係數與誤差均顯示分析結果造成錯誤。另外，另處 GNSS2 位置，其所在坡向為接近南向但微偏向東邊，其上升軌道解算結果與 GNSS 相關係數仍較下降軌道佳，此時如僅以平均誤差分析，則難以分辨上升軌或下降軌孰佳。故檢討邊坡適用上升軌或下降軌時，除誤差外應計入相關性。

山區因地勢變化急遽，合成孔徑雷達的成像受到地形效應影響較大，在分析時雖可經過幅射校正減低影響，但仍需排除疊置及陰影效應的影響較嚴重區域，以避免將錯誤的地形變化值列入，影響統計結果。本文分析範圍為臺北市山坡地範圍，合成孔徑雷達衛星 Sentinel-1 為南北運行及左視觀測，部份陡峭地形及山凹可能無法觀測，將歐洲太空總署合成孔徑雷達衛星 Sentinel-1 通過臺北市之雷達衛星影像與 5 公尺

解析數值地形套疊分析，找出不能分析位置。

初步分析時先將臺北市可能無法分析區域列出，將平地排除僅以山坡地進行計算，所得上升軌道及下降軌道無法分析範圍分別為 8.19% 及 12.17%。南北坡偵測後，正確性較差。仍有小部份範圍無法分析，後續使用時宜參考不同坡向使用適當的軌道進行分析。實際分析時，計算每一斜坡單元主要坡向，由於上升或下降軌雷達波入射方向，比如上升軌道編號 69 入射方向約略為由東方入射，此時坡向朝東較為適合，而下降軌道編號 105 入射方向約略由西方入射，此時坡向朝西較為適合，但由於坡向並非單一，檢討時每一斜坡單元仍兩個入射方向皆加以考量。

臺北市變位基準之坡地管理模式

本研究基於差分干涉合成孔徑雷達分析流程，進一步擬定多時序坡體變位分析流程圖如圖 4 所示，加入地表變形模式模擬，由於分析像對較多且時間間隔僅 12 天，本研究中假設兩幅間之變形模式為線性，另短基線法 (SBAS) 連續處理中主要提升精度項目包含高精度參考數值地形、地面控制點以及大氣修正等步驟，藉由多時序的分析可以有效提升分析精度。

由圖 4 可獲得多時序之地表變形資料，然而大規

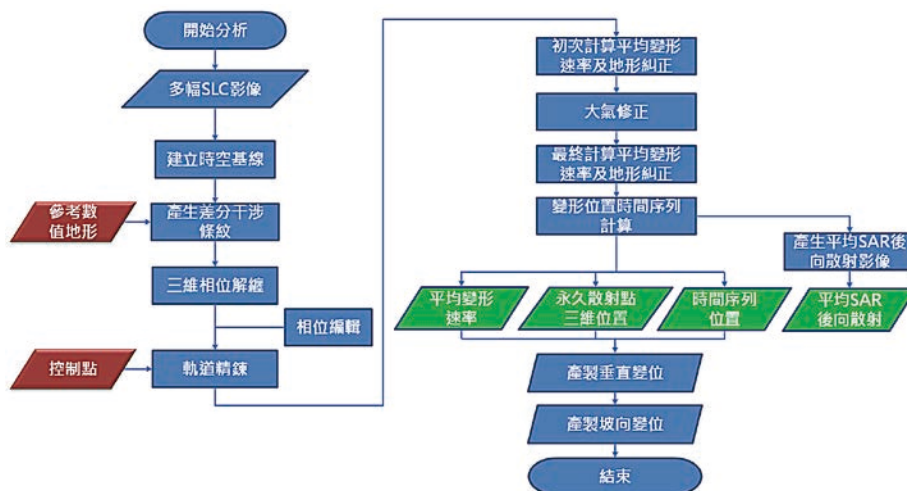


圖 4 多時序坡體變形分析使用短基線法之作業流程 (改繪自 SARscape [30])

模分析時獲得的地表變形資訊可能包含地表下陷及隆起，為先確認潛在滑動塊體區位，先取地表下陷位置進行篩選，如隆起區位在地表下陷區高程下邊坡，則可明顯區別地滑範圍，於此之前則暫以地表下陷做為潛在滑動塊體篩選依據；取得大規模地表變形下陷資料後，接著進行滑移原因研判。由於台灣山坡地產生滑移時常為連續式潛變，此一變形難以判斷是否可能產生破壞性災害，因此本研究將篩選變形速率於多時序資料中產生加速位置，此一加速情形可能因豪雨或地震等外力因素產生之滑動如圖 5 所示。變化斜率門檻值經檢討後採用 1.1 倍，詳圖 6。本研究使用 2017 年起之 Sentinel-1 影像，因每 12 天有一幅影像且為避免如圖中之雜訊條件產生斜率變化，採移動視窗法檢查為主，可有效降低誤判機會。

為利於統一辨識臺北市各區變位潛勢，對於連續變動之坡地，以每月 4 mm 為確認變動條件，惟此條件並非每個月均偵測出 4 mm 之變動量，其意義為長期變動狀態下平均每月達 4 mm。故使用每月 4 mm 之同向變位累積後達 288 mm 為基準。另 288 mm 代表意義有二，為相對活躍點位，但經篩選後單元較少時，可繼

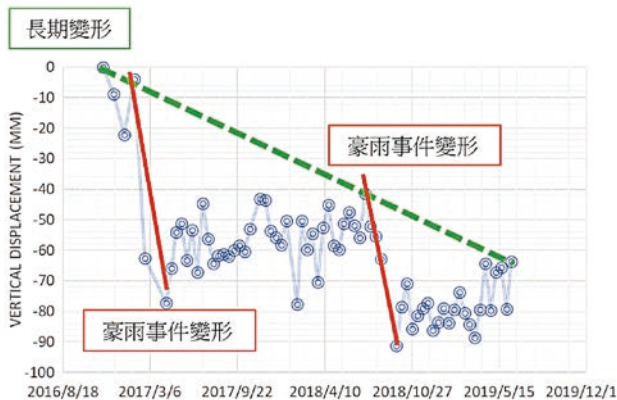


圖 5 事件變形與長期變形速率示意圖

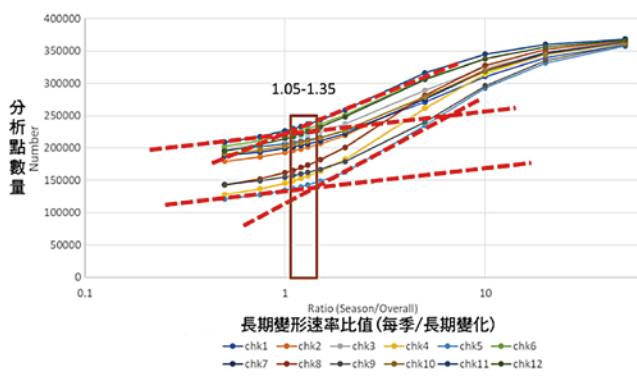


圖 6 變化斜率門檻值

表 4 分析結果之變位潛勢分類

變位潛勢	長期總變位 (mm)
高變位潛勢	> -288
中高變位潛勢	-288 至 -144
中變位潛勢	-144 至 -72
中低變位潛勢	-72 至 -36
低變位潛勢	-36 至 0

續往下排序其他坡單元進行檢視。依據分析結果提出表 4 之分類，分類之變位計算為使用每月 4 mm 變形量，於 6 年期間達 288 mm 設定為高變位潛勢，其後各分類則取半分類之。

解算後之點位依移動視窗法進行潛在滑動塊體偵測，偵測出滑動事件位置之點位篩選留下，篩選後之點位計算於坡單元內之平均變形量，萃取最後留下之單元內平均變形量，以前述變位速率將長期（2017.03 ~ 2023.05）變位潛勢分別繪製如圖 7 所示。由圖中可知臺北市山坡地多數為中低及低變位潛勢，但仍有中變位潛勢以上邊坡區位，所在位置分布於各行政區內之山坡地。此法之計算基準並無假設條件，僅以實際計算之地表垂直變位及活躍性程度篩選而來，可做為邊坡巡檢或巡勘之參考，提供潛在危險標之用途。

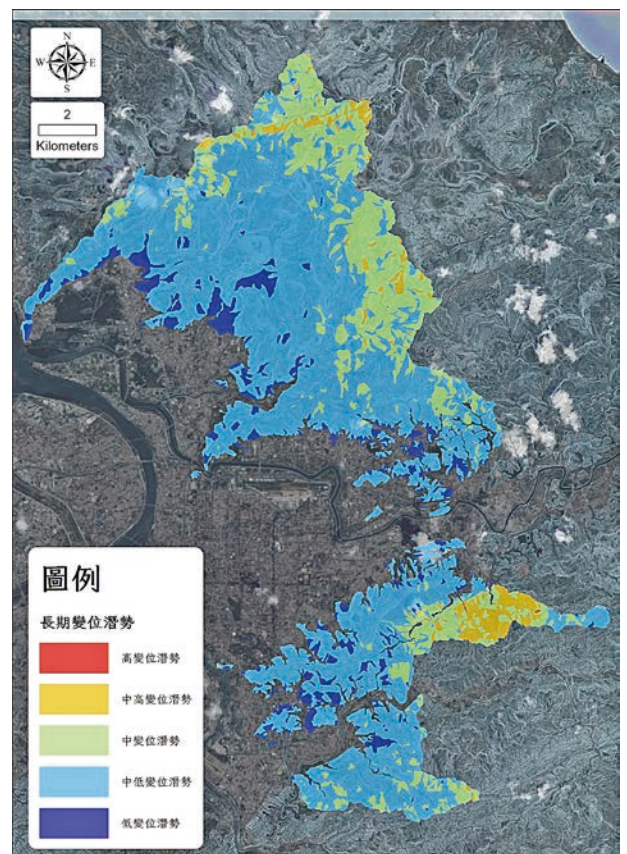


圖 7 臺北市長期地表變位潛勢分級圖 (2017.03 ~ 2023.05)

結論與建議

本研究分析臺北市涵蓋 2017 年 3 月至 2023 年 5 月間資料，總計逾 6 年，且完成臺北市長期地表變位潛勢分級圖，分析方法開發及流程開發過程中所得結論與建議簡列如下：

1. 為利於統一辨識臺北市各區變位潛勢，依據分析結果提出變形量分類方法，分類之變位計算為使用每月 4 mm 變形量，於 6 年期間達 288 mm 設定為高變位潛勢，其後各分類則取半分類之。
2. 雖於本文中未說明，但分析過程中曾考量 2023 年尼莎颱風及降雨量較過去幾年較高，故將取得之災點現勘點位與短期變位潛勢套繪，發現現勘點位多數位於道路旁之小崩塌或落石事件，部份落於中變位潛勢坡單元內，由於大部份現勘結果災害面積較小，與本法適用情形存在面積可判大小之差異，亦即過小之崩塌無法由本法取得變位潛勢。
3. 潛勢圖成果顯示短期變位潛勢明顯高於長期變位潛勢，考量變位分類值為相對值，仍可滾動修正變位區間調整變位潛勢，取得更合理之短期變位潛勢結果。

參考文獻

1. 王國隆、林俊廷、李苡宣、張為光、郭安妮 (2023), 關山池上地震地表變形遙測觀察與衍生分析。地工技術, 第 176 期, 第 33-42 頁。
2. Wang, K.L., Dowman, I., and Lin, M.L. (2007a), "Estimation of Crustal Deformation From Newmark's Displacement and InSAR – The Case of Chi-Chi Earthquake", International Workshop – Applications of SAR Data in Taiwan, Taoyuan, Taiwan.
3. Wang, K.L., Lin, M.L., and Dowman, I. (2007b), "The observation of landslide coupling uplift of earthquake with Interferometric Synthetic Aperture Radar – the case study of Chi-Chi earthquake and Ju-Fen-Err mountain area", EGU General Assembly, Vienna, Austria.
4. Wang, K.L., Lin, M. L., Dowman, I., and Muller, J.P. (2005), "Assessment of Landslides Caused by Earthquake – Case Study of Chi-Chi Earthquake in Taiwan, 1999", The 2nd EGU General Assembly, Vienna, Austria.
5. 謝嘉聲、史天元 (1999), 以雷達干涉量測技術產生數值高程模型資料實作探討, 地圖第十期, 第 69-82 頁。
6. Lu, Ping, Casagli, Nicola, Catani, Filippo, Tofani, Veronica et al., Persistent scatterers interferometry hotspot and cluster analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides, International Journal of Remote Sensing 33(2), 466-489, (2012).
7. Greif, V. and J. Vlcko, (2012), Monitoring of post-failure landslide deformation by the PS-InSAR technique at Lubietova in Central Slovakia, Environmental Earth Sciences 66(6), pp 1585-1595.
8. 卜艾西 (2018), 「利用 SAR 干涉測量研究菲律賓賓雷伊泰 Tongonan 地熱場抽提地熱水引起的地面沉降」, 碩士論文, 國立臺灣大學地質科學研究所。
9. 林紹弘 (2018), 「利用持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術與數值模型探討臺北盆地地下水引起的地表變形與水力參數」, 碩士論文, 國立臺灣大學地質科學研究所。
10. 陳郁琪 (2019), 「PS-InSAR 技術於台灣山區地形變化偵測誤差因素分析」, 碩士論文, 國立成功大學資源工程學系。
11. 魏祥鴻 (2021), 「利用雷達測高衛星 Cryosat-2 及 ICESat 監測雲林及加州高鐵沿線嚴重地層下陷區: 與水準、GPS 及 Sentinel-1A SAR 結果比較」, 博士論文, 國立陽明交通大學土木工程系。
12. 楊苡潔 (2018), 「以 Sentinel-1A SAR 及 SBAS 方法監測雲林地層下陷」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程系。
13. 阮銘 (2018), 「應用 Sentinel-1 衛星 TOPS 合成孔徑雷達及最小基線長分析技術監測越南河內的地層下陷」, 碩士論文, 國立中央大學遙測科技碩士學位學程。
14. 阮蔡榮長 (2021), 「應用 SBAS-DInSAR 技術分析濁水溪沖積扇沈陷型態與地下水及降雨變化之關聯性」, 碩士論文, 國立中央大學應用地質研究所。
15. 張育璋 (2021), 「利用雷達干涉測定雲林地區地層下陷和儲水係數」, 碩士論文, 國立陽明交通大學土木工程系。
16. 李恩誠 (2020), 「應用 Sentinel-1A 影像與 SBAS 方法監測屏東沿海地區地層下陷」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程系。
17. 歐司瓦 (2018), 「應用多時域雷達干涉技術於台灣屏東平原沿海區域測量抽水引致地層下陷」, 碩士論文, 國立中央大學應用地質研究所。
18. 王倍紋 (2020), 「應用 Sentinel-1A 合成孔徑雷達影像於邊坡變位監測之研究」, 碩士論文, 國立中興大學水土保持學系。
19. 戴于恒 (2016), 「應用合成孔徑雷達差分干涉技術監測山崩之潛移現象—以九份及烏來地區為例」, 碩士論文, 國立中央大學地球科學學系。
20. 謝渝棋 (2020), 「以 SBAS-InSAR 技術監測土壤沖蝕變化」, 碩士論文, 國立中興大學水土保持學系。
21. 吳笙緯 (2019), 「應用短基線集干涉技術探討六龜地區地表形變」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程系。
22. 林俊廷 (2021), 「以衛載雷達影像分析進行崩塌潛勢及潛在量體評估」, 博士論文, 國立暨南國際大學土木工程學系。
23. 努巴迪 (2021), 「用於滑坡監測的 PS- 和 SBAS-InSAR 處理的參數研究—以阿里山為例」, 碩士論文, 國立中央大學土木工程學系。
24. 楊豐毓 (2012), 「多元衛星雷達影像於臺灣北部執行 PS-InSAR 之研究」, 碩士論文, 國立政治大學地政研究所。
25. 洪翊甯 (2012), 「應用 PS-InSAR 於大屯火山地形形變之長期監測」, 碩士論文, 國立政治大學地政研究所。
26. 盧志恒 (2018), 「應用雷達影像分析地質災害的特性與時空分佈」, 博士論文, 國立中央大學應用地質研究所。
27. Fialko Y. and Simons M. (2001), The complete (3-D) surface displacement in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. Geophysical Research Letters, vol. 28, no 16, pp 3063-3066
28. Ng, Alex Hay-Man, et al. "Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR—Southern highland coalfield in New South Wales, Australia." International Journal of Remote Sensing 32.22 (2011): 7227-7256.
29. Wang, K.L., Lin, J.T., Chu, H.K., Chen, C.W., Lu, C.H., Wang, J.Y., Lin, H.H., and Chi, C.C. (2021), "High-resolution LiDAR digital elevation model referenced landslide slide observation with differential interferometric radar, GNSS, and Underground measurements," Applied Sciences, 11(23), 11389.
30. SARscape (2010), SBAS tutorial, http://www.sarmap.ch/tutorials/sbas_tutorial.pdf 