

比較 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術應用於監測山區地表變位 – 以仁愛鄉為例

施竣仁¹ 莊忠翰² 蔡慧萍^{3*}

摘要

傳統崩塌監測技術與儀器受空間限制，本研究應用遙感之合成孔徑雷達干涉技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)實現山區地表變位大範圍監測，採用永久散射體雷達干涉(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)與短基線子集差分干涉法(Small Baseline Subset-InSAR, SBAS-InSAR)，以臺灣南投縣仁愛鄉為示範區，透過2017年間Sentinel-1A衛星共30幅升軌雷達影像，比較兩種多時序InSAR成果於地表變位監測的適用性，並與全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)數據進行相關性分析。結果顯示，PS-InSAR及SBAS-InSAR在LSAN測站皆呈現顯著正相關，相關係數分別為0.486及0.399，均方根誤差為5.004 mm及7.685 mm。SBAS-InSAR能有效反映山區之實際崩塌空間分布與地表變位情況，顯示該技術對山區崩塌監測更具優勢。

關鍵詞：多時序合成孔徑干涉雷達、永久散射體雷達干涉、短基線子集差分干涉、地表變位

1. 前言

近年全球受到氣候變遷加劇影響，導致強降雨、颱風及嚴重乾旱等極端氣候事件頻率上升，進而使洪水、坡地災害及旱災成為常見的自然災害類型。其中，坡地上的土石為坡地災害的主要物質來源，當受到地震、孔隙水壓等外力作用下，易引發崩塌或液化，對當地生態環境、地表地形造成顯著不可逆轉的擾動(Wang *et al.*, 2024)。小規模的崩塌常伴隨地表覆蓋類型及植被的快速轉變(Promper *et al.*, 2014; Alcántara-Ayala *et al.*, 2006)，而大範圍的山體崩塌可能破壞區域生態系統的穩定性(Schuster & Highland, 2003)。根據美國國家航空太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)所建立的全球崩塌目錄(Global Landslide Catalog)指出，於2014年至2022年間共紀錄9,733起崩塌事件，對生命及經濟造成巨大損失(Froude &

Petle, 2018)，其中以亞洲地區所受影響最為嚴重(Abancó *et al.*, 2021; Ozturk *et al.*, 2022; Konishi & Suga, 2018; Lin & Wang, 2018; Nolasco-Javier & Kumar, 2018)。臺灣位處於環太平洋地震帶，崩塌潛勢極高，且地震頻繁造就複雜的地形與地質，島內山坡地面積佔總土地面積約74%，約2,683,770公頃(ha)。此外，臺灣屬於副熱帶季風氣候區，年平均降雨量達2,500毫米，且雨季集中於五月至九月的梅雨與颱風季節，降雨時空分布不均。受限於環境和氣候條件，臺灣山區常有小規模或大範圍的地表岩體、土石滑落的地質災害(Giletycz *et al.*, 2021)，對當地居民的財產和生命構成威脅。因此，針對山坡地災害之監測、預警和預測，已成為防災應變策略中不可或缺的重要目標。

傳統邊坡監測技術常根據破壞型態與監測目的選擇合適儀器與方法。邊坡監測儀器依照潛在災害類型進行規劃設計，常見的儀器包括傾斜觀測管、

¹ 國立中興大學土木工程學系 碩士

² 國立中興大學土木工程學系 博士生

³ 國立中興大學土木工程學系 副教授

* 通訊作者, E-mail: huiping.tsai@nchu.edu.tw

收到日期：民國114年05月16日

修改日期：民國114年06月30日

接受日期：民國114年07月18日

地表伸縮計、孔內伸縮計、地表傾斜計及裂縫計，以此直接量測地表的變形量。根據山坡地監測準則所述，監測方式可分為人工、半自動及全自動三種，主要考慮邊坡的危害性、預算和現地條件。儘管上述方法具高準確性，但受限於布設範圍有限且成本高，難以進行大面積監測，限制其應用的可能性。

隨著現代遙測技術進展與時空解析度的提升，結合遙感數據、數值模型和崩塌影響因子，成為克服傳統監測限制的策略。空載和地面平台已廣泛應用於監測地表變形與評估災害風險(Zhao & Lu, 2018)。其中，合成孔徑雷達干涉(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技術憑藉其全天候、遠程高精度獲取細微地表形變特性，克服傳統監測方法的局限，在崩塌監測中扮演重要角色(Zhou et al., 2025)；此外，衍生發展的合成孔徑雷達差分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)，利用雷達所採集的相位分析地表隨時間的變化，對於獲取地表垂直形變資訊具有貢獻(Maddahi et al., 2024)。D-InSAR 技術分析不同時間的 SAR 影像，以此估算合成孔徑雷達視距方向(Line of sight, LOS)的高精度地表形變量，於理想條件下其精度可達公分(cm)等級(Massonnet et al., 1995、Amelung et al., 2000、Hung et al., 2010)。然而，對於緩慢變形監測而言，基線時間過長及地表特徵劇烈變化，易導致影像同調性降低，影響干涉結果的準確性(Pathier et al., 2003、Hoffmann, et al., 2003)。

為克服上述限制，基於 D-InSAR 技術發展出永久散射體雷達干涉 (Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR) 技術(Ferretti et al., 2000)及短基線子集差分干涉法 (Small baseline subset-interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR) 技術(Berardino et al., 2002)。PS-InSAR 技術解算多時期影像中穩定且相關性高的永久散射點(persistent scatterer)，進行相位解纏(unwrapping)並分析其形變時間序列，已被證實其可有效降低非相關性及獲得具有更高可信度的長時間地表變形(Ferretti et al., 2004)。此外，Hooper et al. (2004)改進 PS-InSAR 技術，可不用加入當地的線性平均地表變形場，即可計算地表形變

量，亦對於地表變形較不規則的地區，仍可有效獲得地表變形量(Hooper et al., 2007)。SBAS-InSAR 技術則是選取相對較短的時空基線影像組合，以提升干涉精度與穩定性，同時降低相干性問題的影響，取得有效的時間序列形變量。Berardino et al. (2002)用 SBAS-InSAR 方法觀測義大利 Campi Flegrei 的火山，結果顯示地表變形量與 GNSS 資料高度相關。而 SBAS-InSAR 技術已逐漸成為提取時間序列地表形變最具代表性的技術之一(Tizzani et al., 2007、Dong et al., 2014、Zhao et al., 2016、Novellino et al., 2017)。

近年來，多項研究證實多時序合成孔徑雷達技術於地表變形與災害監測的可行性與應用潛力。Hussain et al. (2025)對巴基斯坦的公路山體滑坡進行災害監測，結合 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術，克服散射體分布稀疏與誤差累積的侷限性，結果顯示綜合兩種技術能有效識別出 36 處的潛在滑坡，年平均地表位移速率約從 57 mm(抬升)至-146 mm(下沉)。Crippa et al. (2021)整合 PS-InSAR 和 SqueezSAR 數據集，提出一種半自動分類法以識別緩慢變形的岩石邊坡區域；Shih et al. (2022)利用 PS-InSAR 識別流域大尺度的地形變形區。Deffontaines et al. (2019)結合無人飛行系統獲得的數值地型模型(Digital terrain model, DTM)以及 PS-InSAR 技術，監測 2007 至 2011 南恆春半島的斷層活動。Hsu et al. (2015)整合多項監測資料與 PS-InSAR 成果，指出雲林縣境內的下陷速率深度達 7.1 cm/year，並揭示降雨量顯著影響淺層的地下水位，且此現況與地層下陷密切相關。Yang et al. (2019)以 SBAS-InSAR 方法，觀測雲林地區 2016 年 4 月至 2017 年 4 月的地層下陷。Zhao et al. (2012)基於 SBAS-InSAR 方法使用多時相 ALOS/PALSAR 影像，監測美國加州北部和俄勒岡州南部的活動崩塌及其變形，結果表明崩塌與降水量有關。

本研究以崩塌災害頻仍的臺灣中部南投縣仁愛鄉為研究區域，該鄉鎮近年因諸多環境及自然災害備受關注。2009 年莫拉克颱風造成該鄉鎮 1.8% 崩塌率(Wu et al., 2011)，且統計報告指出，2015 年至 2017 年間的崩塌事件呈現快速上升趨勢，尤以

地質脆弱的投 89 線道力行產業道路為甚。此外，由於仁愛鄉地勢陡峭，傳統監測技術難以有效掌握地表形變，因此需結合其他科學化技術監測該區域的坡地變化，降低坡地災害的風險並強化人民對於自然災害的認知及應變能力和韌性措施。研究使用 Sentinel-1A 衛星於 2017 年間共 30 幅的雷達影像，並以永久散射體雷達干涉技術(PS-InSAR)及短基線子集差分干涉法(SBAS-InSAR)監測研究區域內的地表形變量。本研究的目的為：(1)以 PS-InSAR 及 SBAS-InSAR 獲取 2017 年間南投縣仁愛鄉的地表變位資訊；(2)分析 PS-InSAR 及 SBAS-InSAR 對於監測仁愛鄉的地表變化之異同，並將結果以現地之 GNSS 觀測量進行檢核，探討對於臺灣山區的地表變位情形及相關測量技術應用的可行性。

2. 材料與方法

2.1 研究流程

本研究流程如圖 1 所示。首先選定南投縣仁愛鄉作為研究區域，並蒐集研究區域內 2017 年 Sentinel-1 衛星之上升軌道雷達影像，以及設置於區域內的 GNSS 連續接收站長期監測數據。後續使用 ENVI SARscape v5.6.2(Exelis Visual Information Solutions, Boulder, CO, USA)軟體以兩種 InSAR 解算方法進行影像前處理，分別為 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR，並搭配 SRTM-1 的數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)進行影像數值地形對位(Co-registration)，進而獲得具有時間序列的地表形變量。接著，將 GNSS 連續接收站的三維位移數據以投影公式轉換與雷達衛星觀測一致之視衛星(Line of Sight, LOS)方向，並針對 InSAR 資料與轉換後的 GNSS 位移量進行相關性分析與誤差評估。最終，結合政府公開之崩塌事件驗證兩種 InSAR 解算技術應用於監測山區地表變位的適用性。

2.2 研究區域

本研究區域為臺灣中部的南投縣仁愛鄉。仁愛鄉位於南投縣東部，為全臺灣面積第三大的鄉鎮級行政區，北界臺中市和平區，東鄰花蓮縣萬榮鄉及

秀林鄉，西側接南投縣魚池鄉、埔里鎮和國姓鄉，南鄰南投縣信義鄉，其地理位置如圖 2 所示。該鄉鎮總面積約為 1273.5km^2 ，地勢起伏明顯，海拔介於 402 m 至 3570 m 間，其中約 52.8%的面積分布於 1000 m 至 2000 m 之間；坡度主要為三級坡和四級坡間，合計佔總面積的 74.22%；坡向分布平均，以北向(14.34%)及西南向(14.82%)所占比例最高。本研究針對仁愛鄉的土地利用狀況，使用 Impact Observatory 技術公司所開發的深度學習土地分類模型進行判釋，也比對國土測繪中心之土地利用圖，作為後續研究分析之參考依據；分類類別包含水體、森林、農作物、建物、裸露地和草地，其中以森林面積最廣，佔整個仁愛鄉總面積的 9 成(圖 3)。

2.3 GNSS 連續接收站觀測量

全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)可用於精確量測地理坐標位置，透過長期連續觀測資料提供地殼微量變動之定量資訊。本研究使用中央研究院地球科學研究所提供的 GNSS 連續接收站(以下稱 GNSS 測站)資料，該資料集已整合於臺灣 GNSS 連續觀測網平台上，目前總測站數超過 360 站。平台提供之 GNSS 觀測資料已完成去雜訊處理，解算出各測站每日 ITRF2005 坐標，可應用於偵測各地微小的地形變化。分析項目涵蓋年週期及半年週期變化量、同震位移量、震後變形與地殼運動速度及其誤差值。本研究選用仁愛鄉境內於 2017 年具有連續觀測資料的 6 處 GNSS 測站，分別為合歡山(HUAN)、惠蓀林場(HUYS)、梅峰(MFEN)、高峰(KFN2)、廬山(LSAN)、翠峰(FB02)，各接收站資訊如表 1 所示。

表 1 GNSS 連續接收站資訊

GNSS 測站 名稱	代號	提供單位
合歡山	HUAN	交通部中央氣象署
惠蓀林場	HUYS	交通部中央氣象署
梅峰	MFEN	交通部中央氣象署
高峰	KFN2	內政部國土測繪中心
廬山	LSAN	中央研究院地球科學研究所
翠峰	FB02	農業部林業及自然保育署

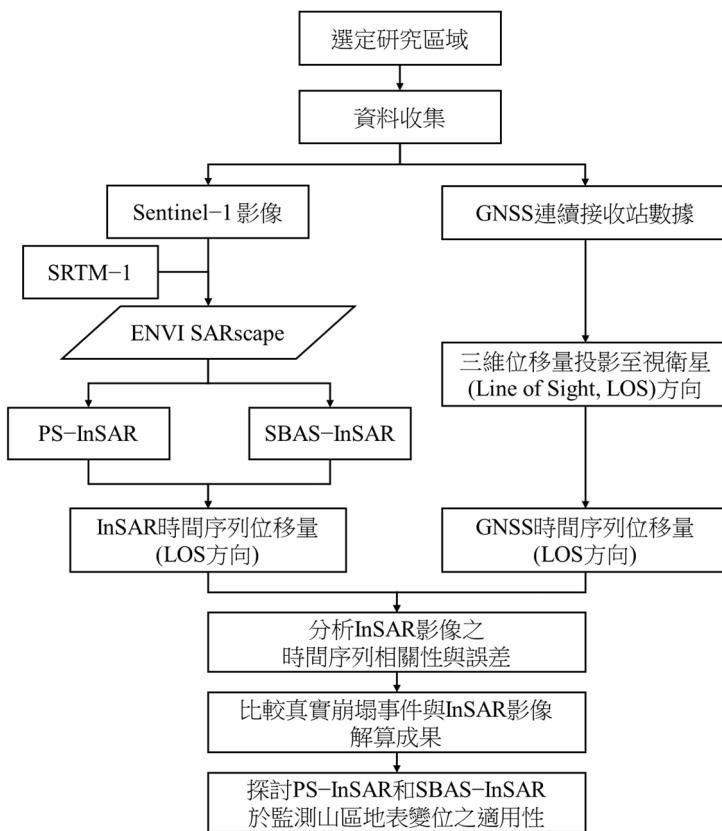


圖 1 研究流程圖

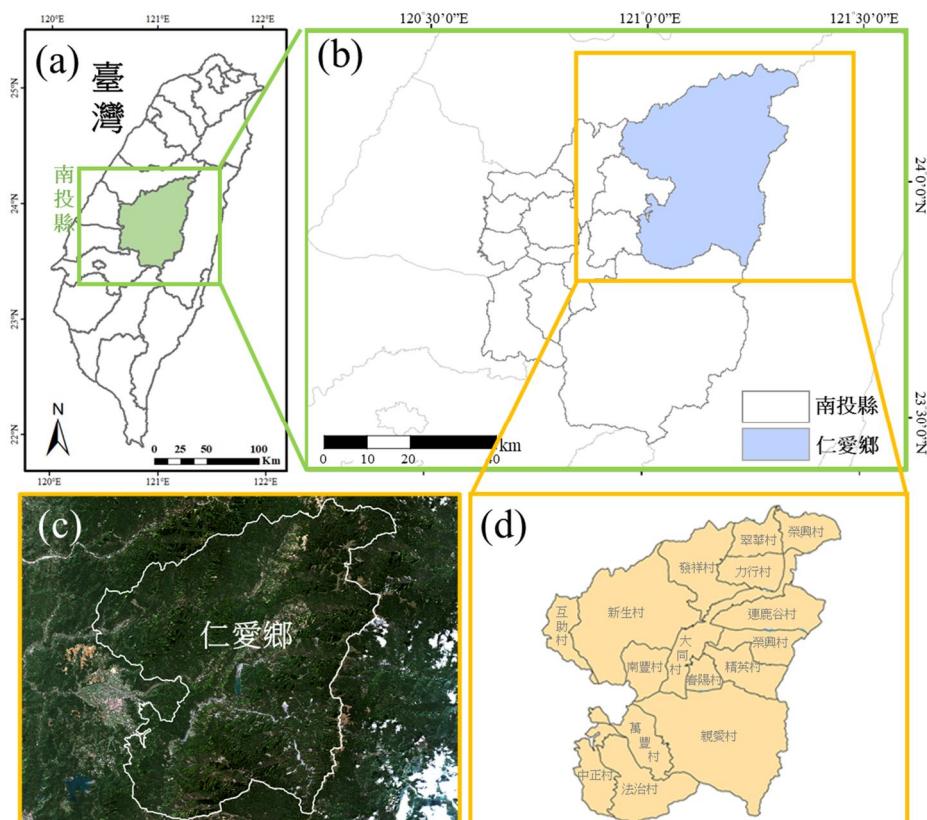


圖 2 南投縣仁愛鄉地理位置圖，(a)南投縣地理位置圖、(b)南投縣鄉鎮分布圖、(c)仁愛鄉之 Sentinel-2 衛星影像、(d)仁愛鄉之村里分布圖

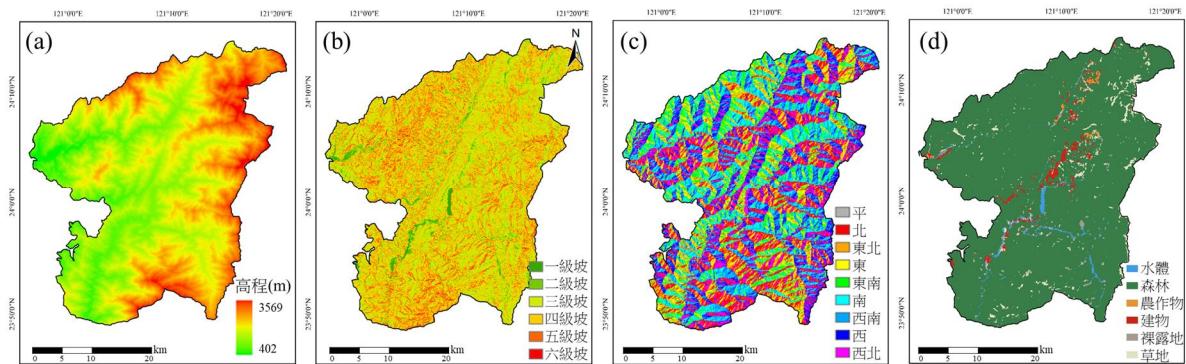


圖 3 南投縣仁愛鄉之(a)高程、(b)坡度、(c)坡向及(d)土地利用分布圖

GNSS 測站所測得之地表形變量由三個正交方向之位移組成，分別為東方(East, E)、北方(North, N)及垂直(Vertical, V)方向，水平與垂直方向的位移量可用於解釋和判讀地球表面之物理現象。然而，合成孔徑雷達干涉技術所衍生之地表位移是沿視衛星方向(LOS)的一維位移量，因此，為有效與 InSAR 和 GNSS 觀測資料進行一致性分析與驗證，須將 GNSS 觀測量轉換成 LOS 方向再與 InSAR 結果進行比較與分析，其投影公式如下：

$$GNSS_{LOS} = \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot N - \cos \alpha \cdot \sin \theta \cdot E + \cos \theta \cdot V \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

算式中 $GNSS_{LOS}$ 為視衛星方向的形變量， E 、 N 、 V 分別為東方、北方及垂直方向的形變量， α 及 θ 分別為沿軌道之方位角與衛星入射角。

2.4 Sentinel-1 衛星數據

Sentinel-1 衛星是由歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)和義大利泰雷茲阿萊尼亞空間公司(Thales Alenia Space)協同建造，旨在執行哥白尼計畫之地球觀測任務，對地球表面之地表運動、土地覆蓋變化、海洋環境進行長期的監測。此星座衛星由 Sentinel-1A 與 Sentinel-1B 組成，皆運行太陽同步軌道，軌道高度為 693 km，兩者位置間隔 180 度角運行。單一衛星可每 12 日重複觀測同一區域，若兩顆衛星同時運作，則可將觀測周期縮短至 6 日。

Sentinel-1 搭載 C 波段的合成孔徑雷達感測器，具備全天候全天時的觀測能力，並以超寬測繪帶(約

400 km)拍攝高空間解析度影像。衛星搭載四種操作模式收集不同空間解析度的影像，分別為 Stripmap Mode (SM)、Interferometric Wide Swath Mode (IW)、Extra Wide Swath Mode (EW)、Wave Mode (WV)。其中，前三者可提供單極化或雙極化影像，而 WV 僅提供單極化影像。參考前人研究，臺灣地區受地形與雷達視角影響，採用升軌影像產出 InSAR 成果品質較佳(楊苡絜, 2018)。本研究統整農業部產製之事件型崩塌目錄及農業部農村發展及水土保持署(以下簡稱水保署)之「土石流及大規模崩塌防災資訊網」統計資料，發現 2017 年為本研究區域山坡地災害通報件數高峰年度之一，災情分布與坡地密切重疊。因此，本研究使用 Sentinel-1A 的上升軌道雷達影像(圖 4)，並選擇 2017 年作為代表性年度之災害分析，雷達影像收集期間自 2017 年 1 月 3 日至 2017 年 12 月 29 日，影像獲取週期為 12 天，共計 30 幅影像。選用之影像產品為 Level-1 之 IW 模式的單一視角複數資料(Single Look Complex, SLC)，其產品規格如表 2 所示。

表 2 本研究所使用 Sentinel-1 產品規格

項目	說明
軌道衛星	Sentinel-1A
影像等級	Level-1
飛行方向	上升軌道(Ascending)
採集模式	干涉寬幅模式(IW)
極化方式	VV 極化
影像波段	C 波段
回訪週期	12 天
軌道數據	69



圖 4 研究使用 Sentinel-1A 升軌影像擷取範圍

2.5 雷達影像前處理

本研究使用 ENVI 軟體的 SARscape v5.6.2 進行雷達影像前處理，並依據 PS-InSAR 和

SBAS-InSAR 地表變位提取技術進行說明。PS-InSAR 技術的處理過程可分為四個主要步驟，具體過程如圖 5 所示。首先，研究選用 2017 年 7 月 14 日之影像作為超級主影像(Super master image)，設定最大時間基線為 180 天，並由超級主影像生成 29 對干涉對之時空基線圖(圖 6)，產生的空間基線主要分布在 -80~115 m 之間。接著基於 PS 候選點的差分干涉處理，推導出線性變形和高程誤差，進而獲得殘差相位圖，並進行大氣延遲和軌道相位誤差校正，擷取出地表變形之時間序列，包含線性和非線性變形分量。於第一次反演階段，使用線性模型推估殘差高度和變形速度。根據振幅分散指數，從每個 25 km^2 子區域中選擇參考點，並將所有子區域的結果拼接，以建立完整之變形場。於第二次反演中，依前一階段成果估算大氣相位延遲，並使用時間高通濾波器(365 天)和空間低通濾波器(1200 m)去除大氣相位成分，最終獲得具時間序列之變形結果與速率圖層。

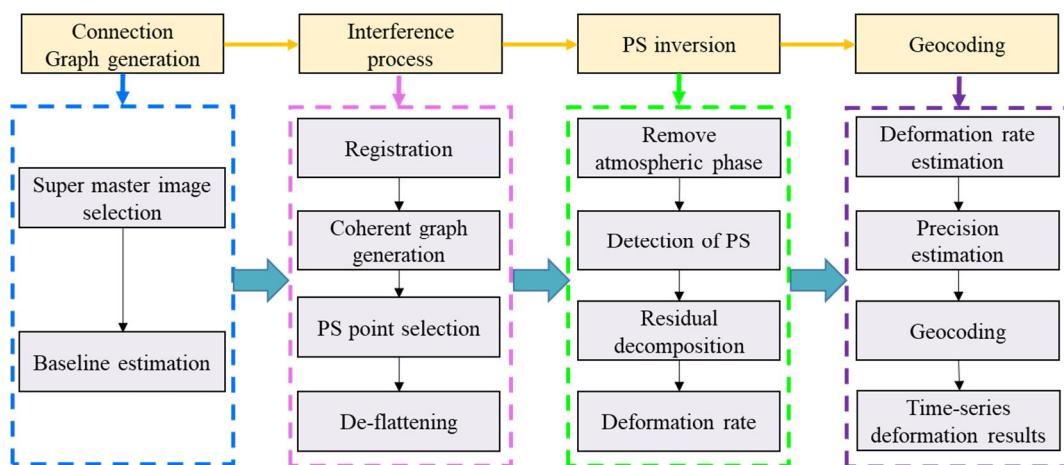


圖 5 PS-InSAR 基本流程圖 (改繪自 He et al., 2021)

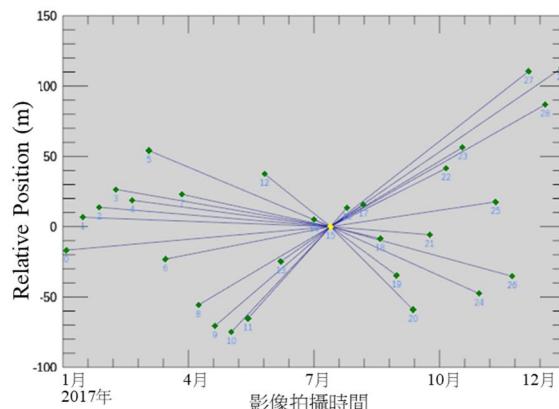


圖 6 以 PS-InSAR 生成之干涉對連接圖之時空基線圖

SBAS-InSAR 處理有四個主要步驟，詳細過程如圖 7 所示。首先，需進行基線估算並生成連接圖，本研究由系統自動選擇 2017 年 7 月 26 日的影像作為超級主圖像，設定最大時間基線為 180 天，進而生成各干涉對之空間與時間基線圖。接著需結合數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)進行地形校正以去除地形高程，獲得平坦地球相位。本研究選用 NASA 和國家地理空間情報局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)產製之太空梭雷達地形測量任務(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)，使用 SRTM-1 version 3 作為地形校準的 DEM，空間解析度為 1 弧秒(約 30 m)。隨後，於範圍和方位向採用 4×1 多視角干涉處理，應用 Goldstein 濾波方法(Zebker & Villasenor, 1992)提升干涉圖的訊噪比(Signal to noise ratio, SNR)，並對

相位信號進行相位展開，捨棄相干性低或相位展開誤差大的干涉圖對(Chen *et al.*, 2013)，共計生成 126 對差分干涉圖(圖 8)。在 SBAS-InSAR 的反演過程中，選取高穩定性的地面控制點(Ground control points, GCPs)計算殘餘相位和相位斜率。本研究根據展開相位選擇變形量趨近於零的 GCPs(Ghulam *et al.*, 2015)，共納入 20 個 GCPs 以修正軌道誤差和變形反演，並以線性模型估計初始變形去除殘餘地形效應；為去除殘餘的大氣擾動和噪聲成分，利用最小二乘法和奇異值分解進行殘差相位校正，再結合多組小基線數據以推算地表變形的時間序列。為進一步提高變形的監測精度，處理中亦採用時間域高通濾波和空間域低通濾波去除大氣影響。最終對第一次和第二次 SBAS-InSAR 反演結果進行地理編碼，去除虛擬值並對變形結果進行插值。

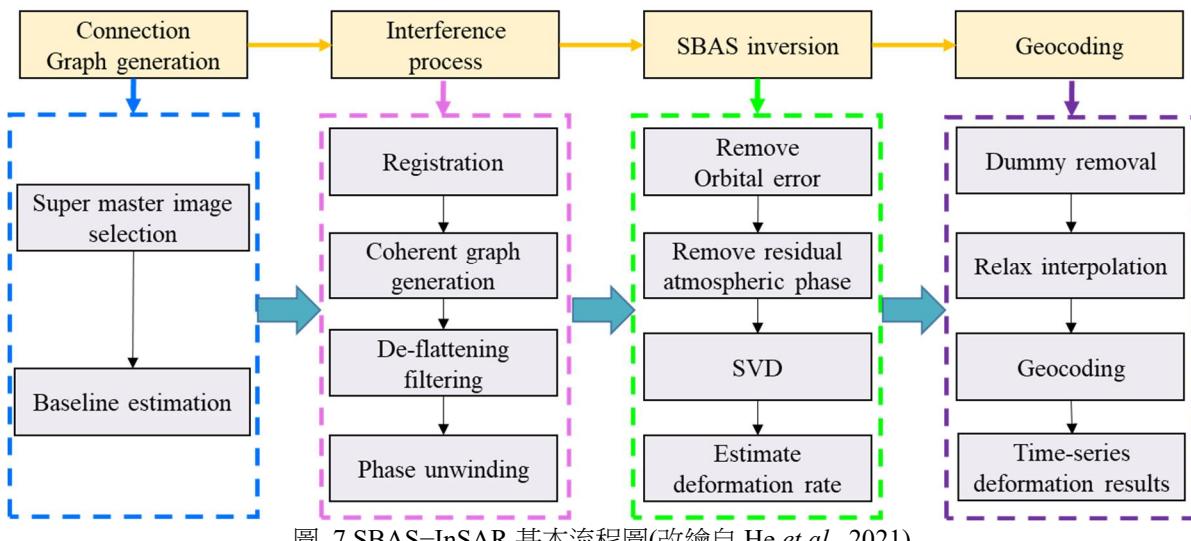


圖 7 SBAS-InSAR 基本流程圖(改繪自 He *et al.*, 2021)

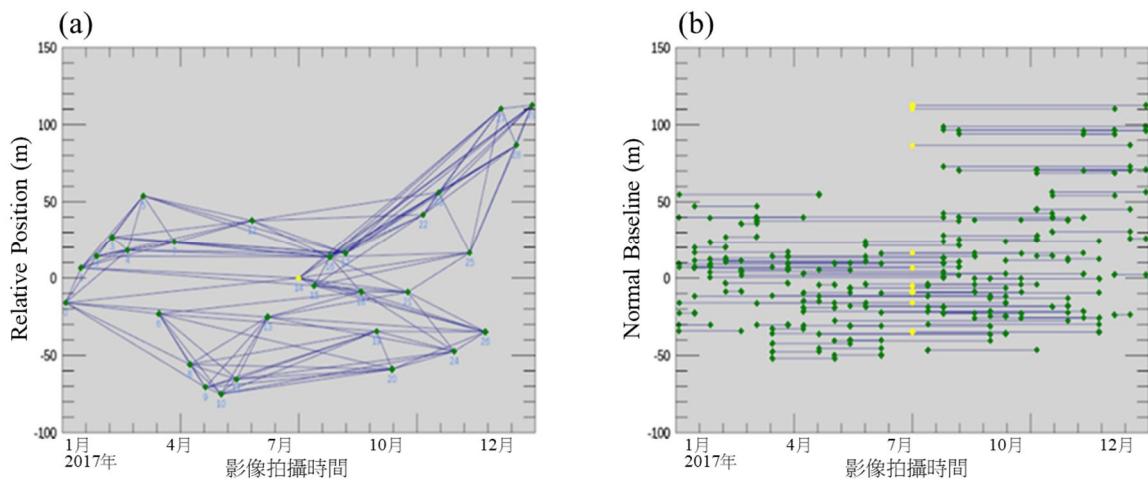


圖 8 以 SBAS-InSAR 生成之干涉對連接圖(a)時空基線圖及(b)時間基線圖

2.6 相關性分析及誤差指標

為分析 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 推估的地表位移量與 GNSS 測站所觀測之形變量的相關性，使用 IBM SPSS Statistics 20 (IBM, Armonk, New York, USA) 軟體將 InSAR 結果與各 GNSS 測站之觀測量進行皮爾森相關性分析。其用於探討兩連續變數間的線性相關性，若兩變數間得出之相關係數絕對值越大者，表示兩者之相互共變的程度亦較大。皮爾森相關係數計算公式為：

$$r(x, y) = \frac{COV(x, y)}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \dots\dots(2)$$

式中 r 為相關係數，數值介於 -1 到 +1 之間， COV 為共變數， x_i 、 y_i 分別為 x 與 y 第 i 個參數數值， \bar{x} 為 x 的平均數， \bar{y} 為 y 的平均數。

此外，使用均方根誤差(Root mean square error, RMSE)評估 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 與 GNSS 測站之觀測量間差異。RMSE 可用於衡量模型預測值與實際觀測值間絕對偏差，提供以原變數為單位的平均模型誤差量。RMSE 為負向分數指標，數值越低表示擬合程度越佳。RMSE 公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad \dots\dots(3)$$

式中 y_i 為 GNSS 連續接收站之觀測值， \hat{y}_i 為 InSAR 的觀測值，而 n 表示觀測值之總數量。

2.7 仁愛鄉崩塌目錄

為驗證 InSAR 技術所推估之地表變位分布的準確性與適用性，本研究以兩種災害資料集做為參考依據並驗證其成果，分述如下：

- (1)彙整水保署之「土石流及大規模崩塌防災資訊網」統計資料，選取 2017 年造成仁愛鄉之重大災害事件，作為實際地質災害發生之時空依據，各災害事件時間與崩塌面積如表 3 所示。
- (2)套疊農業部產製 106 年事件型崩塌目錄，進行空間比對；該崩塌圖層是採用水保署災後衛星影像判釋崩塌地圖層和農業部林業及自然保育署衛星判釋全島崩塌地圖層所建置的災後崩塌圖所繪製而成，崩塌分布位置如圖 9 所示。

3. 結果與討論

3.1 GNSS 連續接收站之位移量轉換

Sentinel-1A 衛星於通過南投縣仁愛鄉上空進行影像擷取時，其升軌方向之入射角(θ)為 38.88° ，軌道方位角(α)為 347.569° 。依據衛星的幾何方位，代入投影公式計算東西向(E)、南北向(N)及垂直向(V)之三維方向的影響係數(表 4)。本研究選定 6 處位於仁愛鄉境內的 GNSS 測站，計算 E、N、V 三方向的年形變量，以及依投影公式換算 LOS 方向的觀測量，以利與 InSAR 結果進行比對，所統計之時間區間與 InSAR 影像資料之觀測時間一致，其結果如表 5 所示。

表 3 2017 年南投縣仁愛鄉崩塌事件

事件時間	事件名稱	崩塌面積 (公頃 ha)
06/01	0601 豪雨	91.72
06/13	0613 豪雨	61.83
07/29–07/31	尼莎颱風、海棠颱風	42.83
08/01	0801 豪雨	66.37
10/12	1012 豪雨	84.26

表 4 E、N、V 於 LOS 方向之影響係數

方向	投影公式	影響係數
E	$-\cos \alpha \cdot \sin \theta$	-0.613
N	$\sin \alpha \cdot \sin \theta$	-0.135
V	$\cos \theta$	0.778

表 5 GNSS 連續接收站三維方向於 LOS 方向之觀測量

接收站 代號	E 方向速率		N 方向速率		V 方向速率	
	原始觀測量	LOS 觀測量	原始觀測量	LOS 觀測量	原始觀測量	LOS 觀測量
HUAN	17.577	-10.775	7.172	-0.969	4.432	3.450
HUYA	9.903	-6.071	-0.555	0.075	0.433	0.337
MFEN	4.395	-2.694	5.483	-0.741	-2.229	-1.735
KFN2	-0.376	0.231	3.545	-0.479	6.246	4.862
LSAN	9.011	-5.524	-1.697	0.229	-2.601	-2.025
FB02	12.198	-7.477	3.049	-0.412	3.500	2.724

單位：mm/year

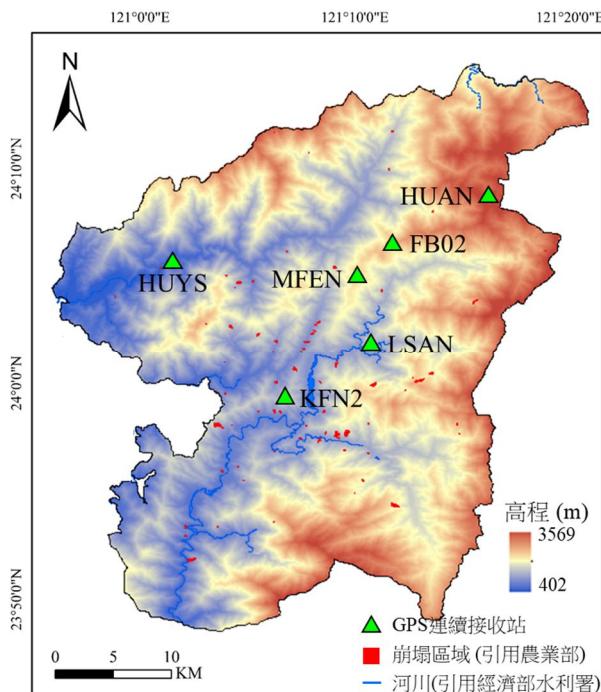


圖 9 南投縣仁愛鄉 2017 年崩塌事件分布圖

3.2 雷達影像地表位移平均速率

本研究分別應用 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術，收集 30 幅 Sentinel-1A 於 2017 年期間之南投縣仁愛鄉升軌雷達影像，並以 20 m 矩形之網格解析度計算地表位移平均速率，如圖 10 所示。PS-InSAR 解算結果顯示，研究區域內約有 49.3% 的像素呈現沉降趨勢，50.3% 的像素則顯示為抬升。其中，沉降速率較顯著的區域集中於仁愛鄉中部區域之建物區域，抬升則主要分布於河道周圍區域。相較之下，SBAS-InSAR 解算成果則顯示約有 44.4% 的像素呈現沉降，55.4% 的像素為抬升，沉降現象多分布於仁愛鄉中部及西北部之建物及草地區域，主要抬升區域則位於東北側和南部區域近河道地區。

3.3 時間序列比較

為便於觀察研究期間各時期的地表位移之變化趨勢，本研究以首幅影像(2017 年 1 月 3 日)作為基準，將其位移量設定為零，其餘影像則依此幅影像計算相對位移量。圖 11 為地表形變趨勢之方向持久性(directional persistence)指標，透過經驗設定感興趣的閾值，觀測 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術於時間序列累積變化方向的度量(Tsai *et al.*, 2014、Waylen *et al.*, 2014)，亦即當某一像素在某一時間的形變量為抬升，則該像素累加 1，反之為下沉則減 1，此分析方法有助於快速辨識研究區域內長期地表形變的主導方向(抬升或沉降)與趨勢強度。圖 12 則呈現每幅影像中抬升與沉降的像素總數量，以及兩種形變方向上之平均位移量。整體而言，兩種

InSAR 技術在仁愛鄉中部建成區，皆呈現一致且明顯的地表沉降趨勢，而在西南側與東南側河道，觀察到明顯的抬升情形，可能與沉積堆疊有關。然而，在大同村的東北側與互助村(村里位置參照圖 2)中部一帶，兩種 InSAR 技術之結果出現明顯的不一致，推測與兩種 InSAR 技術在偵測形變敏感度上之差異。PS-InSAR 於高變動或植被密集區易出現相干性不足，相較之下，SBAS-InSAR 更能擷取到 PS-InSAR 所忽略的形變訊號。綜合而言，兩種技術在空間的形變偵測能力，受到地表植被密度、環境擾動程度影響，仍可能出現結果歧異。此也揭示後續研究可收集地質、地下水等現地資料佐證，提升 InSAR 技術於地表變位監測的準確性與解釋力(圖 11)。

分析 PS-InSAR 技術之成果，在兩種形變方向上的平均像素數量約為 1330 ± 80 個，變位分布均勻，且平均位移量也呈現穩定的沉降與抬升，介於 -30mm 至 30mm 之間。其中，沉降幅度較大(-20mm 至 -30mm)的區域集中於仁愛鄉中部大同村和春陽村；抬升幅度較明顯(20mm 至 30mm)的地區則分布於仁愛鄉西部互助村。統計結果顯示，PS-InSAR 技術之抬升約佔 56%而沉降約佔 32%，其餘約 12%無明顯變形(圖 13)。在 SBAS-InSAR 技術的觀測結果中，2017 年 10 月前的沉降變動顯著且更為劇烈，沉降像素數量達 1619 個，抬升則為 406 個，此結果顯示 SBAS-InSAR 局部區域的形變更為敏感。沉降變化劇烈的區域位於仁愛鄉中部以北地區，數值範圍達 -30mm 至 -50mm ，而抬升幅度較大的地區則於仁愛鄉中部以南的地區(圖 14)。進一步觀察時間趨勢，發現仁愛鄉在 3 月過後的沉降速率具有持續增加的趨勢，推測此現象與臺灣進入梅雨與颱風季節有關，降雨的增加、地下水位變動與土壤含水率變化均可能造成地表變動越加顯著。Kim *et al.* (2017) 表示降雨強度與入滲、土壤基質吸力的變化，皆與非飽和土的沉降量具有顯著影響，亦即由本研究所觀測到的 InSAR 地表變位結果，可能反映降雨期間地下水位變化所引起的地層反應。建議後續研究中可綜合分析地下水位資料，以探討地下水位變化與地表變形之關係與潛在風險。

3.4 相關性與誤差分析

為探討 InSAR 技術所推估之地表形變量與 GNSS 測站所觀測位移量之關聯性，本研究以 GNSS 測站為中心，劃設半徑 800 m 範圍，擷取該範圍內各時間點的 InSAR 形變量並計算平均值，作為該測站對應之 InSAR 形變量，進一步與 GNSS 測站的位移量進行皮爾森相關性分析，並計算對應之均方根誤差(RMSE)，如表 6 所示。整體而言，兩種技術在 6 個測站中，共出現 3 次的顯著正相關與 4 次的顯著負相關，顯示 InSAR 技術在不同地形條件之變位趨勢與大小存在差異性。在 PS-InSAR 成果中，所有位於二級坡的測站(HUAN、LSAN 及 FB02)皆呈現顯著相關，且以東南坡向的 LSAN 測站具有最高的顯著正相關(r 為 0.486)，向北坡向的 FB02 測站也為顯著正相關(r 為 0.463)，兩者的 RMSE 分別為 5.004 mm 及 4.206 mm ；而 HUAN 測站為顯著負相關(r 為 -0.423)，RMSE 為 14.561 mm ，揭示該測站之 InSAR 形變量與 GNSS 位移量明顯背離，但仍存有一定的訊號關聯。在 SBAS-InSAR 成果中，一級坡的 MFEN 測站中呈現最高顯著負相關(r 為 -0.607)，RMSE 為 10.047 mm ，以及在二級坡的 FB02 與三級坡的 KFN2 測站呈輕微顯著負相關， r 分別為 -0.363 及 -0.378 ；此外，與 PS-InSAR 結果一致，LSAN 測站均呈現顯著正相關(r 為 0.399)，顯示該測站對兩種 InSAR 技術皆具高度匹配性。綜合而言，唯一未呈現顯著相關的測站為四級坡的 HUYS 測站，於 PS-InSAR 或 SBAS-InSAR 其相關係數接近於零(-0.070 與 -0.166)，推測可能係其森林茂密且地形坡度陡不利於雷達干涉觀測，難以從 InSAR 成果反映實際位移趨勢。

由上述結果顯示，兩種 InSAR 技術於各 GNSS 測站的相關程度並不一致，揭示其可能受限於地形因子、資料時序長度、局部相干性、資料反映的形變範圍。本研究僅對 2017 年單一年度資料進行分析，致使影像反演的地表形變量尚難以顯現穩定關聯。此外，值得關注的是，GNSS 測站測得的位移量為單點精確的變化，InSAR 訊號為平均的面域訊號，兩者在空間解析度上存在根本差異。因此，本

實驗反映兩者數據在短期觀測情境下之匹配程度限制；然而，此結果亦反映出 InSAR 技術在空間尺度觀測的優勢。後續建議可延長收集多年份的連續

資料進行驗證與比對，並納入地下水位、累積降雨等外部因子，進行深度探討與統計分析。

表 6 各 GNSS 接收站地形因子與分析成果

InSAR 方法	接收站代號	坡向	坡度等級	相關係數	RMSE (mm)
PS	HUAN	西北	二	-0.423*	14.561
	HUYS	東北	四	-0.070	5.758
	MFEN	西	一	0.213	7.181
	KFN2	東北	三	-0.290	7.464
	LSAN	東南	二	0.486**	5.004
	FB02	北	二	0.463**	4.206
SBAS	HUAN	西北	二	0.097	12.337
	HUYS	東北	四	-0.166	10.001
	MFEN	西	一	-0.607***	10.047
	KFN2	東北	三	-0.378*	8.119
	LSAN	東南	二	0.399*	7.685
	FB02	北	二	-0.363*	15.052

$p > 0.05$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

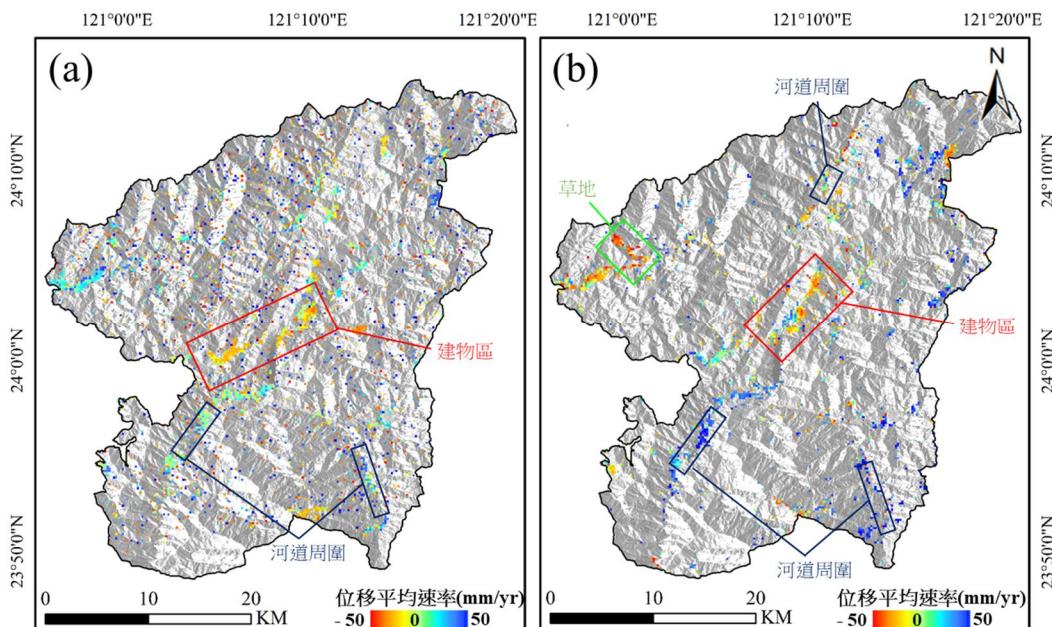


圖 10 南投縣仁愛鄉 2017 年之(a)PS-InSAR 與(b)SBAS-InSAR 地表位移平均速率

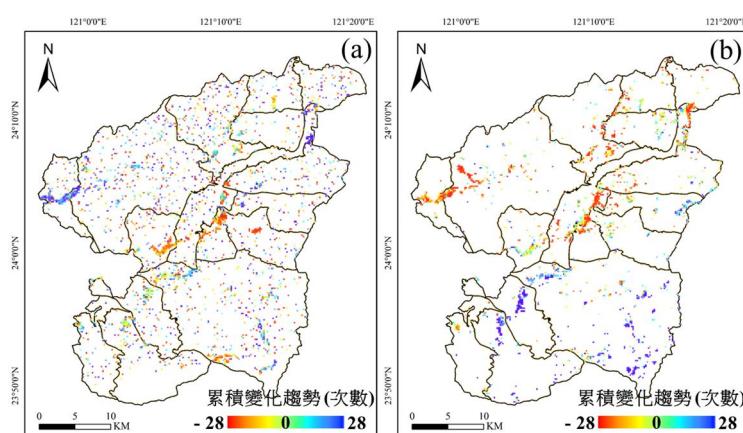


圖 11 (a)PS-InSAR 與(b)SBAS-InSAR 之 2017 年累積變化趨勢空間分布圖

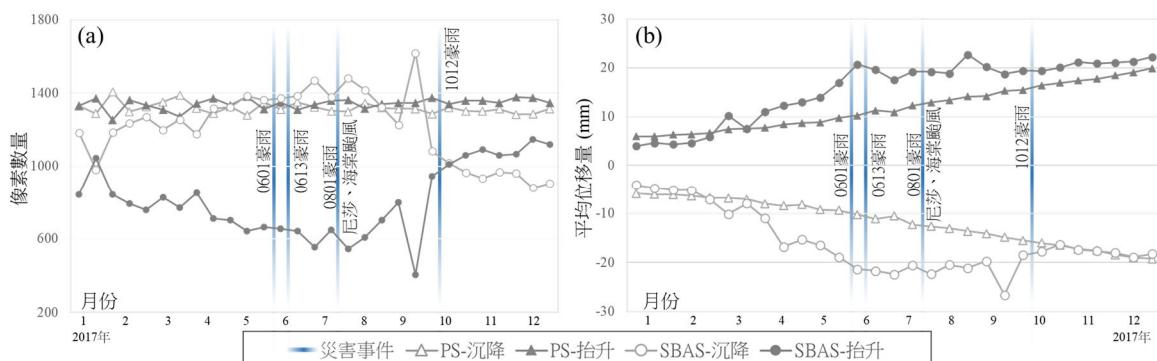


圖 12 研究期間每幅影像沉降與抬升之(a)像素數量與(b)平均位移量

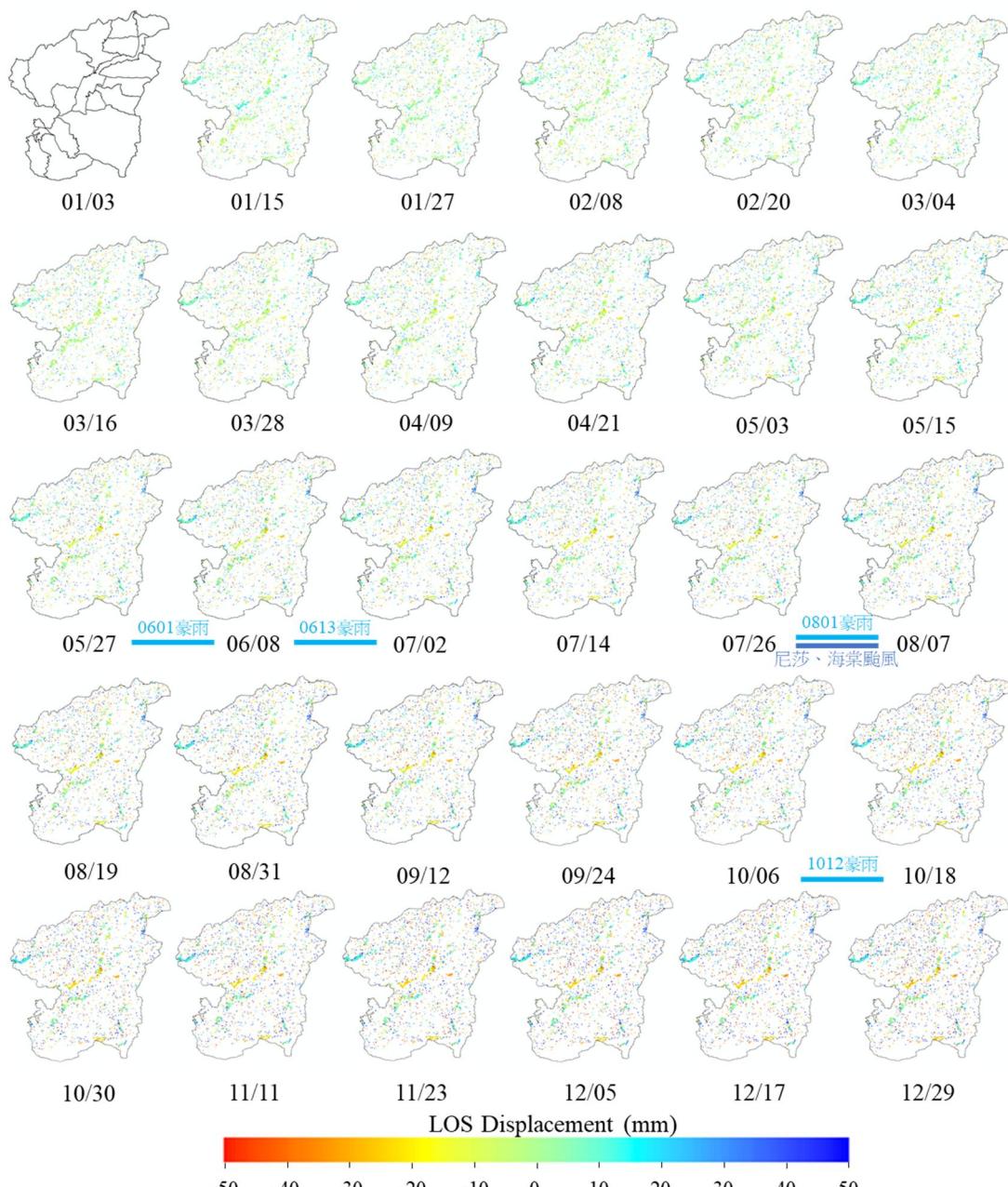


圖 13 南投縣仁愛鄉 2017 年 PS-InSAR 之間序列成果圖

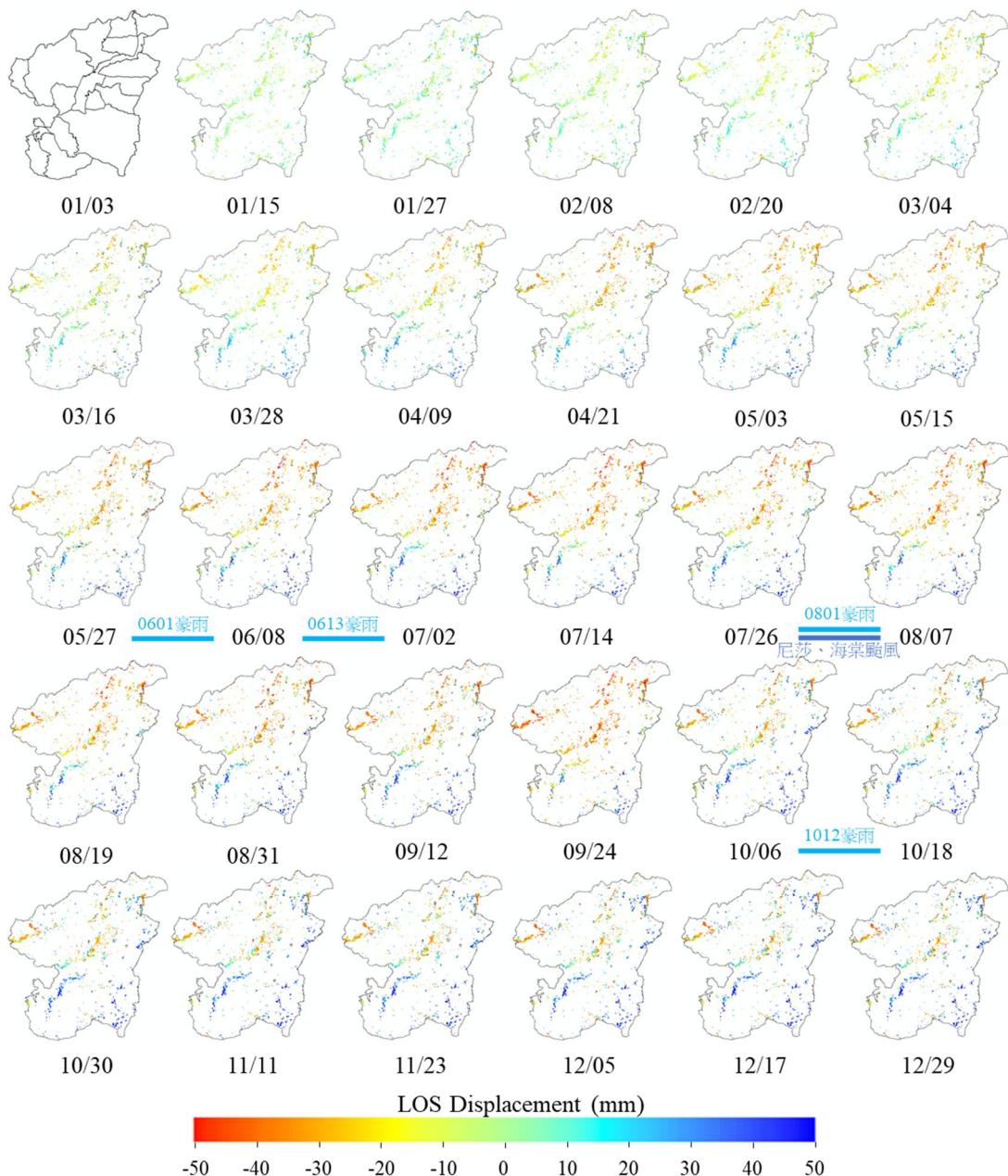


圖 14 南投縣仁愛鄉 2017 年 SBAS-InSAR 之時間序列成果圖

3.5 比較 InSAR 變位成果與事件型崩塌目錄

本研究將 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術所解算出的 2017 年地表形變資料，對各時間點之形變量取其平均值，以建立全年之平均形變分布圖，並與 2017 年事件型崩塌目錄進行空間套疊分析(圖 15)，以探討兩種 InSAR 技術對實際崩塌事件的空間偵測能力。崩塌目錄所判識範圍皆為明確可辨識之地表下陷或沉降位置，因此本研究僅提取出影像

中之沉降區域計算空間重疊面積與百分比(表 7)。統計結果顯示，2017 年事件型崩塌目錄共計判識出 92 處事件型崩塌，總崩塌面積達 131.198 ha。其中，與 PS-InSAR 所推估的沉降區域之重疊面積為 9.102 ha，重疊百分比為 6.938 %；而與 SBAS-InSAR 重疊面積則達 33.475 ha，重疊百分比為 25.515 %，明顯高於 PS-InSAR 技術。兩者成果差異推測與兩種 InSAR 技術本身的演算法特性有關，PS-InSAR 追蹤時序內穩定目標點的長期變化，對於非穩定之植被遮蔽區偵測能力弱；SBAS-InSAR 藉由放寬相

干性門檻，捕捉低穩定性之地表變化，因此在崩塌監測之空間敏感度更具優勢。

3.6 比較 InSAR 變位成果與重大災害事件-0601 豪雨

本研究進一步針對事件型崩塌目錄與 InSAR 技術之空間交集進行分析，旨在評估兩種技術對實際崩塌事件之偵測能力。為此，本研究提出三種情境進行比較：(1)同時被 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 偵測到的崩塌區域 ($PS \cap SBAS \cap$ 崩塌目錄)；(2)僅被 PS-InSAR 偵測到的崩塌範圍 ($PS \cap$ 崩塌目錄 - SBAS)；(3)僅被 SBAS-InSAR 偵測到的崩塌範圍 ($SBAS \cap$ 崩塌目錄 - PS)。統計結果顯示，兩種技術成功偵測出兩處崩塌事件，總覆蓋面積為 2.934 ha；而單一 InSAR 技術偵測部分，SBAS-InSAR 所偵測的獨立崩塌區面積明顯大於 PS-InSAR，多偵測出的面積達 5.76 ha，顯示 SBAS-InSAR 在監測山區崩塌具有更高的偵測能力(表 8)。

本研究針對 2017 年 6 月 1 日豪雨事件(0601 豪雨)所造成仁愛鄉春陽村與榮興村之重大崩塌進行個案分析。春陽村位在南投仁愛鄉中部地區，面積為 21.886 km²，村落聚集於北側，南側為森林，境內中部則有濁水溪流經。此次豪雨造成的災情發生於部落的聯外道路台 14 線 87 km 處，當時該地區

累積降雨達 300mm(廬山雨量站)，造成道路邊坡受張力裂縫與沖蝕作用影響而滑動，周邊擋土牆與路基毀損。本研究分析 2017 年 6 月 8 日春陽村鄰近之 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 位移量影像顯示，SBAS-InSAR 於春陽村崩塌區成功反演出顯著下沉變形，與崩塌事件報告之崩塌位置重疊；反之，PS-InSAR 在該區域未能有效解算(圖 16)。

榮興村位於南投縣仁愛鄉東北側，面積為 40.890 km²，大部分的土地利用類別皆為森林，零星農田散落於該村落中部地區，延台 8 線分布。0601 豪雨事件於大禹嶺雨量站量測得累積降雨達 240mm，造成碧綠溪支流上游右岸邊坡崩塌，大量土石流入河道並沖毀台 8 線 97.7 km 處之道路。分析 2017 年 6 月 8 日榮興村周圍的 InSAR 位移量可見，SBAS-InSAR 有效解算出榮興村周圍下沉之變位區；同樣地，PS-InSAR 技術在榮興村亦無法有效解算出位移量(圖 17)。

針對春陽村與榮興村兩處災害案例，分別擷取 SBAS-InSAR 解算影像於崩塌範圍內之時間序列變形成果(圖 18)，結果顯示兩村落在經歷 0601 豪雨事件後的 5 月 27 日至 6 月 8 日影像，皆出現明顯的下沉趨勢，與實際災情具有一致性，進一步驗證 SBAS-InSAR 技術於重大災後變形監測之應用潛力。

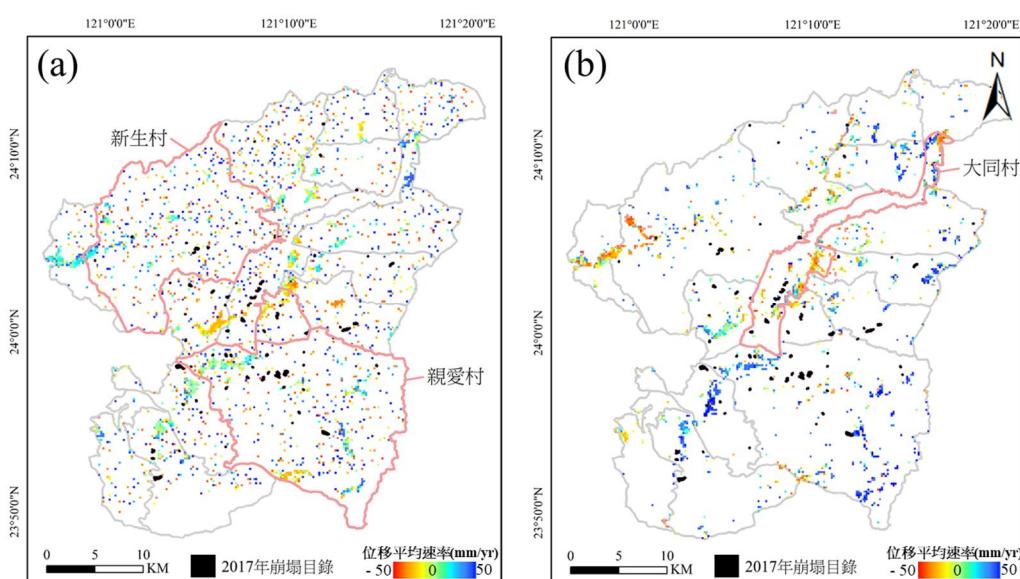


圖 15 崩塌目錄與(a)PS-InSAR 及(b)SBAS-InSAR 之地表變位套疊成果

表 7 兩種 InSAR 技術獲得的沉降變位量與崩塌目錄之重疊面積與百分比

InSAR 技術	面積 (ha)	與崩塌目錄之重疊百分比 (%)
PS	9.102	6.94
SBAS	33.475	25.52

表 8 三種情境下與崩塌目錄之重疊面積與個數

情境	面積 (ha)	崩塌位置個數
PS \cap SBAS \cap 崩塌目錄	2.934	2
PS \cap 崩塌目錄 - SBAS	7.630	9
SBAS \cap 崩塌目錄 - PS	13.390	6

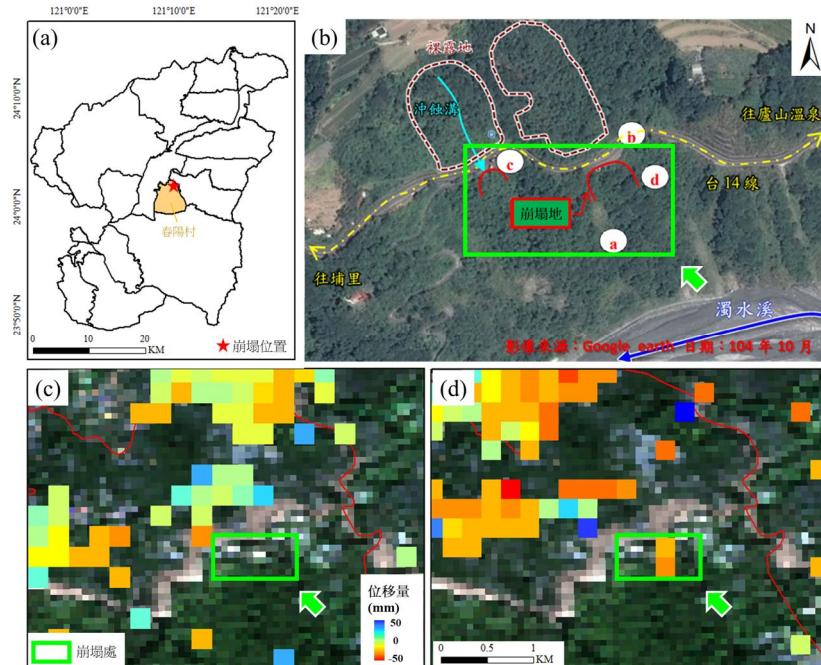


圖 16 春陽村 0601 豪雨事件成果，(a)春陽村地理位置圖、(b)崩塌位置分布圖(農業部農村發展及水土保持署，2017)、(c)與(d)分別為 2017 年 6 月 8 日影像反演之 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 位移分布

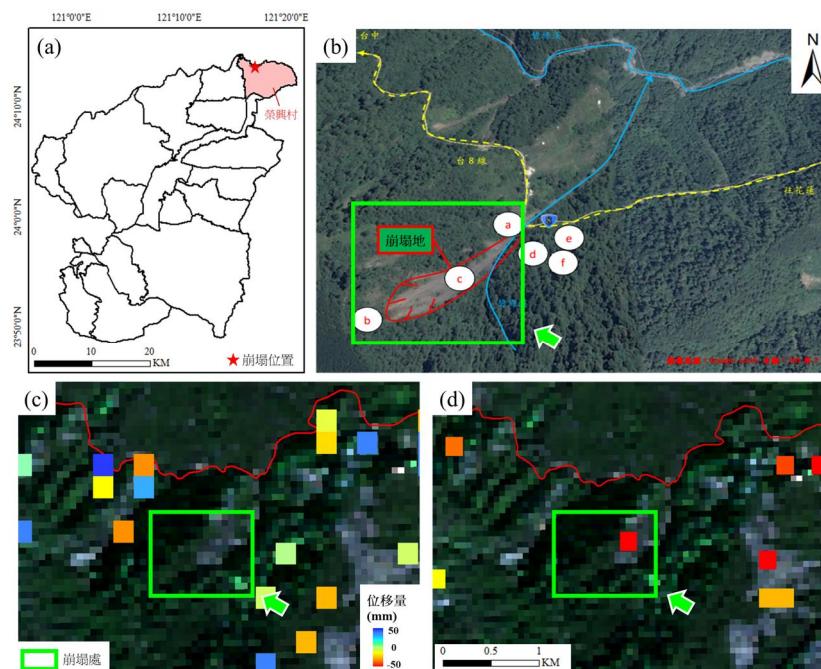


圖 17 榮興村 0601 豪雨事件成果，(a)榮興村地理位置圖、(b)崩塌位置分布圖(農業部農村發展及水土保持署，2017)、(c)與(d)分別為 2017 年 6 月 8 日影像反演之 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 位移分布

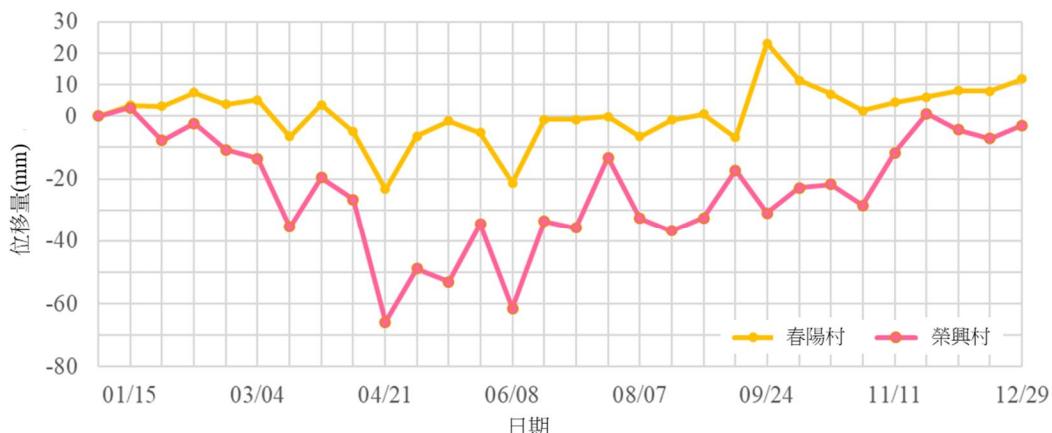


圖 18 春陽村與榮興村於崩塌處之 SBAS-InSAR 時間序列位移量

4. 結論與建議

本研究以臺灣中部南投縣仁愛鄉為研究場域，應用 2017 年間 30 幅 Sentinel-1A 升軌多時序雷達影像，分別透過 PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術監測其地表形變量，探討適用於山區地表變位監測之實務方法。為驗證兩種解算地表變位技術之準確性，將 GNSS 測站所量測之變形量投影至 LOS 方向作為實際地表觀測量，並進行相關性與誤差分析。本研究分析結果顯示，GNSS 觀測量在三維投影至 LOS 方向後，各分量間對變形的貢獻比例有所差異，其中垂直分量影響來源，突顯地表變位機制對地表變形解釋的重要性。在解算成果方面，PS-InSAR 與 SBAS-InSAR 技術在仁愛鄉中部建築區與南部的河道周圍呈現一致的地表變位成果，然推測受地表環境影響，仍有部分地區反演結果出現不一致的現象；此外，在將 InSAR 成果與 GNSS 實際地表位移量進行相關性分析發現，僅有一個測站未在兩種技術上呈現顯著相關，然相關性的趨勢仍有相反的情況。故本研究推測造成此種現象可能源於兩種技術在偵測非穩定區域或高植被區域之敏感度差異，SBAS-InSAR 技術可藉由多時影像隻小基線組合提升低相干性區域的訊號。而在空間分布特徵方面，沉降區集中於在建物及草地區域，抬升則主要分布在河道兩側之河床區域。兩種解算方式皆觀測到雨季期間，仁愛鄉的沉降持續增加，可能與豪雨集中時期相關。本研究以「事件型崩塌目錄」及「重大災害事件統計」評估 InSAR 技術之適用性，結果顯

示，在兩種災害事件圖層之套疊分析中，SBAS-InSAR 技術皆表現出較佳的地表變位捕捉能力，呈現此技術對仁愛鄉崩塌動態更為敏感，更具空間偵測與崩塌災害判識能力。整體而言，本研究結果可作為評估地表變形潛勢與制定山區災防應變措略之參考，亦對地震活動、豪雨災害之監測具重要應用潛力。然而，地表變形機制複雜，研究中採用 C 波段雷達影像，未來建議可針對不同地表植被覆蓋度程度的區域，嘗試採用其他波長雷達影像，拓展 InSAR 技術於不同地貌下的應用範疇。此外，建議未來可延長觀測時間和擴大研究範圍，整合其他地球觀測資料，以提升分析結果的解釋力與精確性。

參考文獻

楊苡絜，2018。以 Sentinel-1A SAR 及 SBAS 方法監測雲林地層下陷，國立交通大學土木工程學系碩士論文。[Yang, Y.J., 2018. Monitoring land subsidence in Yunlin County using Sentinel-1A SAR by SBAS, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]

農業部農村發展及水土保持署，2017。重大災害事件：土石流及大規模崩塌防災資訊網，<https://246.ardswc.gov.tw/Achievement/MajorDisasters>，引用 2023/3/15。[Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA, 2017. Majon Disaster Events: Debris Flow and Large-scale Landslide Disaster Prevention

- Information, Available at: <https://246.ardswc.gov.tw/Achievement/MajorDisasters>, Accessed March 15, 2023. (in Chinese)]
- Abancó, C., Bennett, G.L., Matthews, A.J., Matera, M.A.M., and Tan, F.J., 2021. The role of geomorphology, rainfall and soil moisture in the occurrence of landslides triggered by 2018 Typhoon Mangkhut in the Philippines, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5):1531-1550, DOI: 10.5194/nhess-21-1531-2021.
- Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., and Parrot, J.F., 2006. Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico, *Catena*, 65(2): 152-165, DOI: 10.1016/j.catena.2005.11.006.
- Amelung, F., Jónsson, S., Zebker, H., and Segall, P., 2000. Widespread uplift and ‘trapdoor’ faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry, *Nature*, 407(6807): 993-996, DOI: 10.1038/35039604.
- 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.
- Chen, F., Lin, H., Zhou, W., Hong, T., and Wang, G., 2013. Surface deformation detected by ALOS PALSAR small baseline SAR interferometry over permafrost environment of Beiluhe section, Tibet Plateau, China, *Remote Sensing of Environment*, 138: 10-18, DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.006.
- Crippa, C., Valbusza, E., Frattini, P., Crosta, G.B., Spreafico, M.C., and Agliardi, F., 2021. Semi-automated regional classification of the style of activity of slow rock-slope deformations using PS InSAR and SqueeSAR velocity data, *Landslides*, 18(7): 2445-2463, DOI: 10.1007/s10346-021-01654-0.
- Deffontaines, B., Chang, K.J., Lee, C.T., Magalhaes, S., and Serries, G., 2019. Neotectonics of the Southern Hengchun Peninsula (Taiwan): Inputs from high resolution UAS Digital Terrain Model, updated geological mapping and PSInSAR techniques, *Tectonophysics*, 767: 128149, DOI: 10.1016/j.tecto.2019.06.019.
- Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S., and Cao, Y., 2014. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method, *Environmental Earth Sciences*, 72: 677-691, DOI: 10.1007/s12665-013-2990-y.
- Ferretti, A., Novali, F., Bürgmann, R., Hilley, G., and Prati, C., 2004. InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San Francisco Bay Area, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(34): 317-324, DOI: 10.1029/2004EO340002.
- 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, DOI: 10.1109/36.868878.
- Froude, M.J., and Petley, D.N., 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8): 2161-2181, DOI: 10.5194/nhess-18-2161-2018.
- Ghulam, A., Grzovic, M., Maimaitijiang, M., and Sawut, M., 2015. InSAR monitoring of land subsidence for sustainable urban planning, *Remote Sensing for Sustainability*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

- Giletycz, S.J., Kot-Giletycz, O., and Brown, D., 2021. Regional geology, extreme weather events and natural disasters: Environmentally-forced, involuntary settlement migrations of the indigenous people of southern Taiwan, *Tectonophysics*, 806: 228796, DOI: 10.1016/j.tecto.2021.228796.
- He, Y., Chen, Y., Wang, W., Yan, H., Zhang, L., and Liu, T., 2021. TS-InSAR analysis for monitoring ground deformation in Lanzhou New District, the loess Plateau of China, from 2017 to 2019, *Advances in Space Research*, 67(4):1267-1283, DOI: 10.1016/j.asr.2020.11.004.
- Hoffmann, J., Roth, A., and Voigt, S., 2003. Detecting coal fires in China using differential interferometric synthetic aperture radar (InSAR), *Proceedings of the FRINGE 2003 Workshop (ESA SP-550)*, Frascati, Italy.
- Hooper, A., Segall, P., and Zebker, H., 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07407, DOI: 10.1029/2006JB004763.
- 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): L23611, DOI: 10.1029/2004GL021737.
- Hsu, W.C., Chang, H.C., Chang, K.T., Lin, E.K., Liu, J.K., and Liou, Y.A., 2015. Observing land subsidence and revealing the factors that influence it using a multi-sensor approach in Yunlin County, Taiwan, *Remote Sensing*, 7(6): 8202-8223, DOI: 10.3390/rs70608202.
- Hung, W.C., Hwang, C., Chang, C.P., Yen, J.Y., Liu, C.H., and Yang, W.H., 2010. Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan, *Environmental Earth Sciences*, 59(7): 1535-1548, DOI: 10.1007/s12665-009-0139-9.
- Hussain, S., Pan, B., Hussain, W., Sajjad, M.M., Ali, M., Afzal, Z., Abdullah-Al-Wadud, M., and Tariq, A., 2025. Integrated PSInSAR and SBAS-InSAR analysis for landslide detection and monitoring, *Physics and Chemistry of the Earth*, 139: 103956, DOI: 10.1016/j.pce.2025.103956.
- Kim, Y., Park, H., and Jeong, S., 2017. Settlement behavior of shallow foundations in unsaturated soils under rainfall, *Sustainability*, 9(8): 1417, DOI: 10.3390/su9081417.
- Konishi, T., and Suga, Y., 2018. Landslide detection using COSMO-SkyMed images: A case study of a landslide event on Kii Peninsula, Japan, *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 205-221, DOI: 10.1080/22797254.2017.1418185.
- Lin, Q., and Wang, Y., 2018. Spatial and temporal analysis of a fatal landslide inventory in China from 1950 to 2016, *Landslides*, 15(12): 2357-2372, DOI: 10.1007/s10346-018-1037-6.
- Maddahi, S., Tasan, M., and Haji-Aghajany, S., 2024. Enhancing InSAR accuracy: Unveiling more accurate displacement fields through 3-D troposphere tomography, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 256: 106207, DOI: 10.1016/j.jastp.2024.106207.
- Massonnet, D., Briole, P., and Arnaud, A., 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375(6532): 567-570, DOI: 10.1038/375567a0.
- Nolasco-Javier, D., and Kumar, L., 2018. Deriving the

- rainfall threshold for shallow landslide early warning during tropical cyclones: A case study in northern Philippines, *Natural hazards*, 90(2): 921-941, DOI: 10.1007/s11069-017-3081-2.
- Novellino, A., Cigna, F., Sowter, A., Ramondini, M., and Calcaterra, D., 2017. Exploitation of the Intermittent SBAS (ISBAS) algorithm with COSMO-SkyMed data for landslide inventory mapping in north-western Sicily, Italy, *Geomorphology*, 280: 153-166, DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.12.009.
- Ozturk, U., Bozzolan, E., Holcombe, E.A., Shukla, R., Pianosi, F., and Wagener, T., 2022. How climate change and unplanned urban sprawl bring more landslides, *Nature*, 608(7922): 262-265, DOI: 10.1038/d41586-022-02141-9.
- Pathier, E., Fruneau, B., Deffontaines, B., Angelier, J., Chang, C.P., Yu, S.B., and Lee, C.T., 2003. Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault caused by the 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake from InSAR and GPS data, *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1-2): 73-88, DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00244-9.
- Promper, C., Puissant, A., Malet, J.P., and Glade, T., 2014. Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios, *Applied Geography*, 53: 11-19, DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.05.020.
- Schuster, R.L., and Highland, L.M., 2003. Impact of landslides and innovative landslide-mitigation measures on the natural environment, Proceedings of the International Conference on Slope Engineering, Hong Kong, China (Vol. 8, No. 10).
- Shih, D.S., Shih, S.S., Hsu, S.M., Lin, S.Y., Lin, Y., Hung, C.T., and Wang, K., 2022. A Framework for the Sustainable Risk Assessment of In-river Hydraulic Structures: A Case Study of Taiwan's Daan River, *Journal of Hydrology*, 129028, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.129028.
- Tizzani, P., Berardino, P., Casu, F., Euillades, P., Manzo, M., Ricciardi, G.P., Zeni, G., and Lanari, R., 2007. Surface deformation of Long Valley Caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach, *Remote Sensing of Environment*, 108(3): 277-289, DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.015.
- Tsai, H., Southworth, J., and Waylen, P., 2014. Spatial persistence and temporal patterns in vegetation cover across Florida, 1982–2006, *Physical Geography*, 35(2): 151-180, DOI: 10.1080/02723646.2014.898126.
- Wang, X., Fan, X., Fang, C., Dai, L., Zhang, W., Zheng, H., and Xu, Q., 2024. Long-term landslide evolution and restoration after the Wenchuan earthquake revealed by time-series remote sensing images, *Geophysical Research Letters*, 51(2): e2023GL106422, DOI: 10.1029/2023GL106422.
- Waylen, P., Southworth, J., Gibbes, C., and Tsai, H., 2014. Time series analysis of land cover change: Developing statistical tools to determine significance of land cover changes in persistence analyses, *Remote Sensing*, 6(5): 4473-4497, DOI: 10.3390/rs6054473.
- Wu, C.H., Chen, S.C., and Chou, H.T., 2011. Geomorphologic characteristics of catastrophic landslides during typhoon Morakot in the Kaoping Watershed, Taiwan, *Engineering Geology*, 123(1-2): 13-21, DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.04.018.
- Yang, Y.J., Hwang, C., Hung, W.C., Fuhrmann, T., Chen, Y.A., and Wei, S.H., 2019. Surface deformation from Sentinel-1A InSAR: Relation to seasonal groundwater extraction and rainfall in Central Taiwan, *Remote Sensing*, 11(23): 2817, DOI: 10.3390/rs11232817.

- 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.
- Zhao, C., and Lu, Z., 2018. Remote sensing of landslides—A review, *Remote Sensing*, 10(2): 279, DOI: 10.3390/rs10020279.
- Zhao, C., Lu, Z., Zhang, Q., and de La Fuente, J., 2012. Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA, *Remote Sensing of Environment*, 124: 348-359, DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.025.
- Zhao, R., Li, Z.W., Feng, G.C., Wang, Q.J., and Hu, J., 2016. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: With emphasis on climatic factors modeling, *Remote Sensing of Environment*, 184: 276-287, DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.019.
- Zhou, C., Ye, M., Xia, Z., Wang, W., Luo, C., and Muller, J.P., 2025. An interpretable attention-based deep learning method for landslide prediction based on multi-temporal InSAR time series: A case study of Xinpu landslide in the TGRA, *Remote Sensing of Environment*, 318: 114580, DOI: 10.1016/j.rse.2024.114580.

Comparison of PS–InSAR and SBAS–InSAR Techniques in Monitoring Surface Deformation in Mountainous Areas: A Case Study in Ren'ai Township

Jun-Ren Shi¹ Zhong-Han Zhuang² Hui-Ping Tsai^{3*}

Abstract

Traditional landslide monitoring techniques and instruments are limited by spatial constraints. This study applies remote sensing-based Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology to enable large-scale surface displacement monitoring in mountainous areas. Two multi-temporal InSAR approaches—Persistent Scatterer InSAR (PS–InSAR) and Small Baseline Subset–InSAR (SBAS–InSAR)—were adopted. Ren'ai Township in Nantou County, Taiwan, was selected as the demonstration area. A total of 30 ascending Sentinel-1A radar images from 2017 were used to compare the applicability of these two methods for surface displacement monitoring, and correlation analysis was conducted with Global Navigation Satellite Systems (GNSS) data. Both PS–InSAR and SBAS–InSAR exhibited statistically significant positive correlations at the LSAN GNSS station, with correlation coefficients of 0.486 and 0.399, and root mean square errors of 5.004 mm and 7.685 mm, respectively. The SBAS–InSAR results effectively captured the spatial distribution of actual landslides and surface deformation in the mountainous area, indicating that this technique may offer greater advantages for landslide monitoring in such complex terrains.

Keywords: MT–InSAR, PS–InSAR, SBAS–InSAR, Surface Displacement

¹ Master, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

² PhD Student, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

* Corresponding Author, E-mail: huiping.tsai@nchu.edu.tw

Received Date: May 16, 2025

Revised Date: Jun. 30, 2025

Accepted Date: Jul. 18, 2025