
**應用 Sentinel-1 合成孔徑雷達影像
對舊有崩塌進行再發性評估**
**The Application of Sentinel-1 Synthetic
Aperture Radar (SAR) Imagery to the
Assessment of Landslide Reactivation**

執行 單位：國立中央大學

執行 期間：106 年 2 月 20 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人：中央大學太空及遙測研究中心姜壽浩助理教授

研究 人員：莊詠婷

行政院農業委員會水土保持局委託研究

中華民國 106 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

目次

目次.....	I
中文摘要.....	IV
英文摘要.....	V
第一章 緒論.....	1-1
第一節 背景說明.....	1-1
第二節 研究區概述.....	1-2
第二章 研究方法	2-1
第一節 雷達影像.....	2-1
第二節 雷達干涉測量.....	2-3
第三節 合成孔徑雷達影像前處理.....	2-8
第四節 Normalized Difference Sigma naught Index 分析.....	2-10
第五節 雷達干涉測量法.....	2-11
第六節 分析流程-複合式時間序列的雷達差分干涉法	2-15
第七節 無人飛行載具監測.....	2-16
第三章 研究成果與討論	3-1
第一節 建置雷達影像影像資料庫.....	3-1
第二節 舊有崩塌時序性變化分析.....	3-8
第四章 結論.....	4-1
附錄	
附錄一、 期中審查會議委員建議回覆.....	附一-1
附錄二、 期末審查會議委員建議回覆.....	附二-1
附錄三、 實地查核會議紀錄暨回覆辦理情形.....	附三-1
附錄四、 PS-InSAR 分析使用之 Sentinel-1 雷達衛星資料表.....	附四-1
參考書目	1

圖次

圖 1- 1 研究區位置圖與地質概況	1-3
圖 2- 1 Sentinel-1 不同的成像系統	2-2
圖 2- 2 PALSAR 感測器拍攝方式	2-3
圖 2- 3 應用永久散射體差分干涉法於舊金山灣地區所測得的地表變形場	2-6
圖 2- 4 加州長谷火山口地區平均地表位移量	2-6
圖 2- 5 加州長谷火山口地區於時間序列上之地表變形量	2-7
圖 2- 6 短基線長差分干涉影像對選取	2-8
圖 2- 7 相位解算(unwrapping)示意圖。	2-13
圖 2- 8 複合式時間序列的雷達差分干涉法(Multi-temporal InSAR)處理流程 ..	2-16
圖 3- 1 莫拉克颱風前期使用之福衛二號衛星影像	3-2
圖 3- 2 莫拉克颱風後期使用之福衛二號衛星影像	3-3
圖 3- 3 莫拉克颱風事件崩塌地判釋成果	3-4
圖 3- 4 ALOS 影像涵蓋範圍示意圖	3-5
圖 3- 5 Sentinel-1 影像涵蓋範圍示意圖	3-7
圖 3- 6 莫拉克颱風前後之 NDSI 影像	3-9
圖 3- 7 (a)莫拉克風災後之福衛二號影像 (b)以坡面單元進行紋理分析之成果	3-10
圖 3- 8 PS-InSAR 分析成果	3-11
圖 3- 9 (a)2015 年 SPOT 影像 (b)2016 年 SPOT 影像 (c)PS-InSAR 顯示河岸崩塌侵蝕的情形.....	3-12
圖 3- 10 (a)2014 年 SPOT 影像 (b)2016 年 SPOT 影像 (c)PS-InSAR 分析結果 .	3-12
圖 3- 11 無人機空拍調查位置	3-13
圖 3- 12 利用空拍資料建構三維立體模型	3-17

表次

表 2- 1 Sentinel-1A 軌道參數	2-1
表 2- 2 ALOS 軌道參數	2-2
表 2- 3 無人飛機資料表- Phantom 4 Pro	2-17
表 3- 1 ALOS PALSAR 影像資料列表	3-4
表 3- 2 Sentinel-1 雷達資料收集列表	3-6
表 3- 3 點位(1)之調查以空拍成果.....	3-14
表 3- 4 點位(2)之調查以空拍成果.....	3-15
表 3- 5 點位(3)之調查以空拍成果.....	3-16

摘要

相較於光學感測器，合成孔徑雷達影像觀測較不受天候影響，近年研究開始將其應用於山區崩塌之監測與預判工作，而過去的研究顯示相當多的崩塌災害事件乃是發生在舊有崩塌地上，亦或是與過去之崩塌事件有關，因此針對舊有崩塌之再發問題進行評估應為一重要課題。本研究運用多時序的雷達影像，包含 ALOS 以及免費可取得之 Sentinel-1，利用永久散射體差分干涉技術偵測舊有崩塌之坡面變化，以了解邊坡崩塌發生後其後續的活動狀況，並進行崩塌再發性之評估。本研究選取荖濃溪一子集水區作為研究區，針對 2009 年莫拉克颱風造成之舊有崩塌進行分析，並以無人飛行載具進行現地空拍，觀察崩塌地現況，以比對雷達影像之分析成果。結果發現，研究區內北部地區的舊有崩塌仍有持續侵蝕的情形，部分崩塌有擴大的現象，而南部多數崩塌並無變動。本研究期望相關研究成果更有助於精進現行崩塌災害的監測方法、對邊坡災害防治與減災措施能有所貢獻。

關鍵詞：合成孔徑雷達、ALOS、Sentinel-1、永久散射體差分干涉技術、舊有崩塌再發性

ABSTRACT

For an emergent monitoring task, Synthetic Aperture Radar (SAR) has been considered a suitable tool for detecting landslides in cloudy and rainy weather. In Taiwan, three quarters of the island comprises hilly and mountainous areas, with small drainage basins and steep stream gradients. Affected by active tectonics, frequent typhoons and storms, and human activities over mountainous ranges, landslides are frequently induced during typhoon seasons. In fact, landslide hazards are not only induced by newly triggered landslides, but also old, reactivated ones. However, the reactivation of old landslides haven not been fully studied. In this study ALOS SAR and free Sentinel-1 images were used to analyze the mobility of old landslides triggered by Morakot typhoon (August 2009), with using PS-InSAR (Persistent Scatterers-Interferometric Synthetic Aperture Radar) method. The result indicates significant erosions have been continued over the old landslides in northern part of the study area, meanwhile, in the south, no significant changes have been found. This finding was also confirmed with aerial photographs taken by UAV (Unmanned Aerial Vehicle). We suggest the proposed method has good potential in improving the assessment of landslide hazard.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), ALOS, Sentinel-1, PS-InSAR, Landslide Reactivation

第一章 緒論

第一節 背景說明

近年來，合成孔徑雷達影像已經開始應用於山區崩塌之監測與預判工作，如使用 ERS-2、ENVISAT、RADARSAT-2、TerraSAR 以及 ALOS PALSAR 等雷達影像資料等(Colesanti and Wasowski, 2006; Bovenga et al., 2012; Raspini et al., 2015)，主要為偵測潛在崩塌地區或崩塌事件前後地表的變異之訊號。此外因為合成孔徑雷達感測器屬於主動式微波感測器，相較於光學感測器，其波長較長可以穿透雲層，觀測較不受天候影響。運用雷達影像崩塌地的變形偵測上，主要概念為求算不同時期之雷達觀測回波之相位差，如 DInSAR(合成孔徑雷達差分干涉，Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)可用以界定具有明顯地表變形的位置，或是進行變形量的估計，如 PS-InSAR(永久散射體差分干涉技術，Persistent Scatterers InSAR)計算對衛星軌道方向之相對位移速率(Hopper et al., 2004)。

雷達影像在崩塌災害的應用上，可用於新增崩塌位置之判釋，或是利用地表變形資訊來對未發生之潛在崩塌風險進行評估，以提供事前崩塌災害防範之資訊。目前國內已有研究運用雷達影像於崩塌判釋或潛在崩塌地區的變形偵測上(王國隆、林俊廷，2014; 陳柔妃等，2015)。而過去的研究顯示臺灣山區崩塌之再發生(重現率)相當頻繁(許家銘、陳宏宇，2012)，相當多的崩塌災害事件乃是發生在舊有崩塌地上，或是與過去之崩塌事件有關(Samia et al., 2016)，因此對舊有崩塌之再發問題進行評估應為一重要課題。在方法上，本研究認為可運用多時序的雷達影像偵測舊有崩塌之變形及活動量之動態變化，並評估其他擾動事件(如降雨、地震)對其活動量之影響。

然而，過去對於合成孔徑雷達影像的應用限制的原因之一為影像費用較高(以 TerraSAR-X 為例，單幅影像收費約 2950 EUR; 緊急拍攝收費約為 3650 EUR)，因此使用多時序多張影像進行崩塌監測及判釋工作時，成本將相當高。為了銜接 ERS-2 及 ENVISAT 任務，歐洲太空總署已分別於 2014 年四月發射 Sentinel-1A 以及 2016 年 4 月發射 Sentinel-1B。目前 Sentinel-1 之雷達觀測產品包含兩個觀測衛星，兩者以同一軌道差 180 度運行，並且均已開始執行拍攝任務，歐洲太空總

署也已提供全球免費的 Sentinel-1 合成孔徑雷達影像。Sentinel-1 影像的空間解析度於臺灣地區約為 10 公尺，時間解析度為 12 天，此免費的雷達影像資源對於本研究進行多時序之雷達影像分析將有相當助益。

綜上所述，本研究之目的為針對過去已發生之崩塌利用 Sentinel-1 多時序的雷達影像進行持續監測與追蹤，以了解崩塌發生後，其後續的活動狀況，並進行崩塌再發性之評估。本研究選取荖濃溪上游一子集水區作為研究區，研究區於 2009 年莫拉克風災期間發生多處嚴重崩塌及土石流，且多處崩塌坡面仍存有明顯土砂堆積，可能仍具有發生土砂災害之風險。由於 Sentinel-1 雷達影像於研究區最早僅可追溯到 2014 年 11 月，因此本研究購置 2008-2011 年共 12 幅之日本 ALOS 雷達影像進行分析。此外本研究同時於六龜鄉新發村一帶山坡之舊有崩塌地以無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)進行現地監測，檢視其崩塌地變動情形，以驗證雷達影像之分析成果。

第二節 研究區概述

本計畫選定臺灣南部山區高屏溪流域上游作為研究區(圖 1- 1)，高屏溪發源於中央山脈西南麓，集水區內高山聳立、河道蜿蜒，地形高度落差大，大致由東北向西南遞減。研究區面積約為 11,600 公頃，處於中、低海拔，高程分布於 258~1,676 公尺，平均高度為 716 公尺，約有 82%之面積位於 1,000 公尺以下。坡度分布於 0~71.8 度，平均坡度為 26.9 度，地勢相當陡峭。研究區地屬熱帶海洋季風氣候，氣溫約在 19°C~21°C 間，以一月最低，七月最高。年降雨量約為 3,400 公釐，雨量集中於 5~10 月間，佔全年 90%，季節性豐枯明顯。

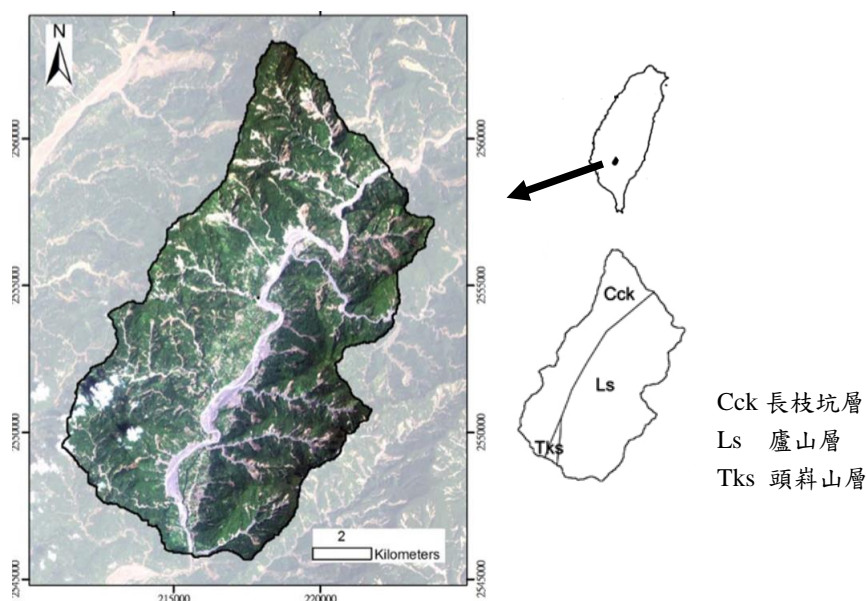


圖 1-1 研究區位置圖與地質概況

研究區內之岩層分布主要為中新紀至上新紀之砂岩與頁岩，高屏溪右岸主要為長枝坑層，左岸為廬山層，於集水區南部地帶則包含部分頭嵙山層礫岩(圖 1-1)。河流兩岸可見台地分布，主要為更新世之古河流沖積層，屬第四紀之階地堆積。丘陵低山地區為崩積土、黃壤及石質土等土壤，高山地區大部份為石質土。除部分河階台地分布有聚落建地外，其餘多為林地，佔研究區超過 85%。本研究區於 2009 年莫拉克颱風期間發生多處崩塌，傳出許多嚴重之土石流災情。而針對 2009 年莫拉克颱風誘發之崩塌地，本研究將利用雷達影像分析技術持續追蹤其後續坡面變形的活動狀況，並評估這些舊有崩塌的再發性與後續可能造成之危害。

本研究同時於六龜鄉新發村一帶山坡之舊有崩塌地以無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)進行實地空拍，作為比對雷達影像分析成果之用。無人飛行載具監測裝載的感測器包括照相機及攝影機，其中照相機用於一般用途的照相，攝影機則可用於連續攝影，是遙測資料獲取及實際應用上的另一可行性。以 UAV 機體搭配一般消費型相機，建置成本比傳統航空遙測攝影設備低廉；雖然消費型相機不是以量測功能為目的所開發，但目前相機的解析度高，當航高較低時(如 300 公尺航高)，其地面解析度可在 20 公分以內，對於地物判釋相當便利，倘加上控制點作業，其正射影像平面位置精度可達公分級，並建立三維模型。

第二章 研究方法

第一節 雷達影像

壹、Sentinel-1 影像

Sentinel-1 是歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)哥白尼計畫(GMES)中的地球觀測衛星。此計畫由兩顆衛星組成，主要目的是用於土地與海洋的監測，Sentinel-1 的目標是為了在 ERS-2 及 ENVISAT 退役後，持續提供 C-band 合成孔徑雷達資料。表 2- 1 為 Sentinel-1A 的軌道參數資料。

表 2- 1 Sentinel-1A 軌道參數

高度	傾角	太陽同步	再返週期
693 公里	98.1°	每天 14.58 個軌道	12 天

Sentinel-1 搭載四個不同的感測器：Stripmap Mode, Interferometric Wide Swath Mode, Extra Wide Swath Mode, Wave Mode (圖 2- 1)。

1. Stripmap Mode：延續 ERS 及 ENVISAT 提供的成像模式，其提供高空間解析度的影像，空間解析度為 5 公尺。
2. Interferometric Wide (IW) Swath Mode：Sentinel-1 預設陸地的影像皆為 IW mode，其解析度從 5 公尺至 20 公尺。
3. Extra Wide (EW) Swath Mode：EW mode 提供寬幅及再返週期高的影像，此模式通常提供海洋及兩極地區的影像。
4. Wave Mode：此模式的影像結合全球海浪模式，可以協助了解開放海域波浪的方向，波長及波浪高度。

Sentinel-1 最大的特點為影像可以於歐洲太空總署網站免費下載，雖然並非每一個地區皆提供全極化的資料，而臺灣地區只提供 VV 和 VH 極化的資料。Sentinel-1 於 2014 年升空後，便開始對球陸地及海洋進行監測，並釋放資料供使用者下載，臺灣地區的第一張影像是 2014 年的 10 月底。

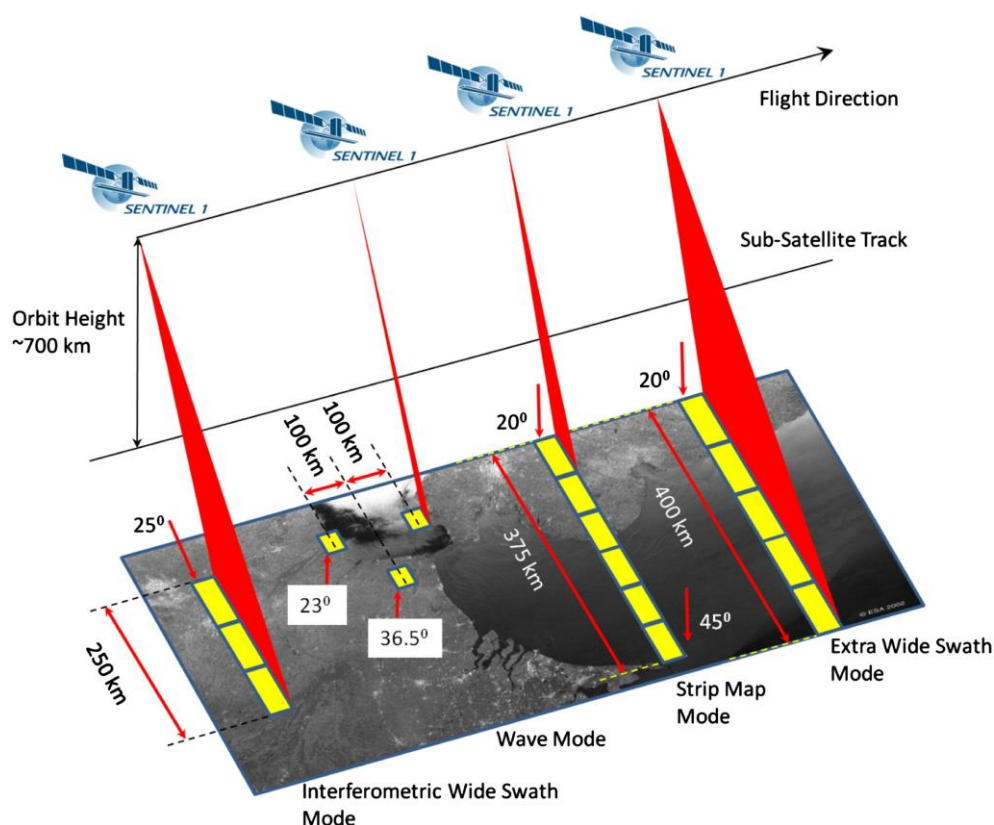


圖 2- 1 Sentinel-1 不同的成像系統

資料來源：歐洲太空總署(European Space Agency，ESA)，<https://sentinel.esa.int/>

貳、ALOS 雷達影像

本研究區之舊有崩塌主要為 2009 年 8 月莫拉克颱風期間所產生，由於 Sentinel-1 雷達為 2014 年 10 月開始進行監測，因此為收集更早期之雷達影像資料(2009 年莫拉克前颱風前)，本研究同時收集日本 ALOS 衛星資料之雷達資料。ALOS 衛星為日本宇宙航空研究開發機構(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星，於 2006 年 1 月 24 日發射成功，並於 2006 年 2 月 16 拍攝第一幅影像，主要用於製圖、環境監測、災害監測及自然資源調查等，已於 2011 年 5 月 12 日除役。表 2-2 為 ALOS 的軌道參數資料。

表 2- 2 ALOS 軌道參數

高度	傾角	再返週期
691 公里	98.2°	46 天

ALOS 搭載三個不同的衛星感測器：PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping)、AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2)及 PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)。本研究則是使用 PALSAR 資料進行研究。

PALSAR 是歷史上唯二的大型 L 波段星載合成孔徑雷達感測器之一(另一個是 JERS-1)，包含單偏極、多偏極及全偏極等，拍攝組態包含 Fine 模式、ScanSAR 模式及 Polarimetric 模式(圖 2-2)，可獲取全天候的影像，其影像可提供製作土地覆蓋分類圖，進行環境監測與災害觀測工作，空間解析度為 7~100 公尺。

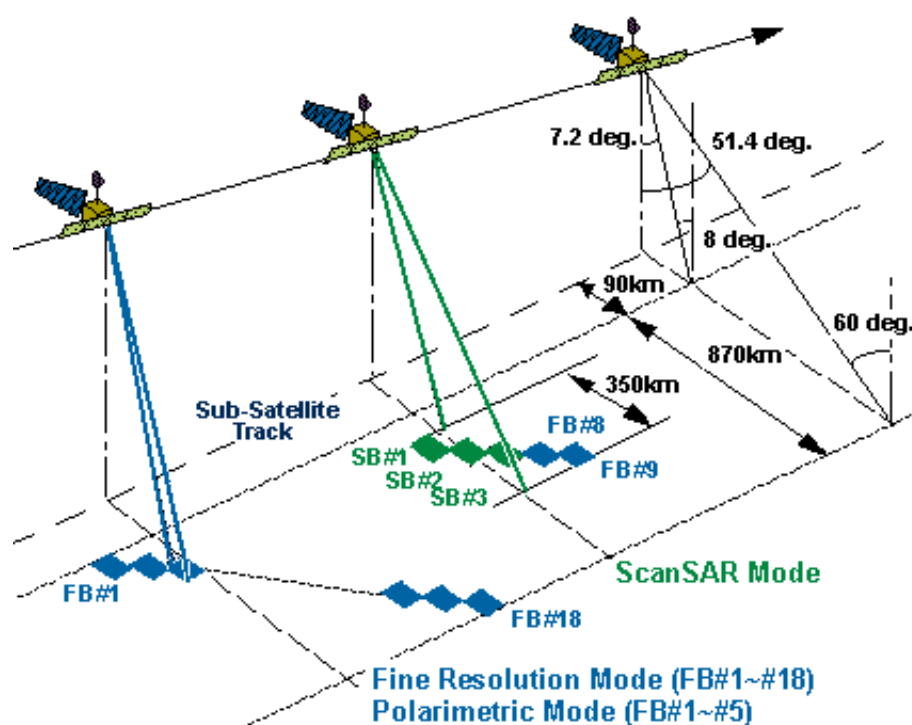


圖 2-2 PALSAR 感測器拍攝方式

資料來源：日本宇宙航空研究開發機構網站，<http://www.eorc.jaxa.jp/index.html>

第二節 雷達干涉測量

壹、合成孔徑雷達差分干涉法 (DInSAR)

DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)，即合成孔徑雷達差分干涉法，是現今已廣為使用於監測地表變形的干涉技術。DInSAR 是應用重複軌道的方式，於不同的時間獲取同一地區 SAR 影像，再利用此兩幅 SAR 影像進行差分干涉，可獲得此地區地表及衛星間於該時段的距離變化所造成的雷達

波相位差，並進行相位差解算，即可得到兩張影像間的地表變化量。若在兩張影像獲取的時段之中，發生地表位移的現象，則在干涉圖中會產生干涉條紋，其成因主要由地表變形及地形效應所組成，因此必須加入 DEM (Digital Elevation Model，數值高程模型) 處理以移除地形效應，獲得真實地表變形。

比起傳統的測量方式，雷達干涉技術主要有四項優勢：面狀資訊、主動式、穿透性及高觀測精度。從前的地表變形測量主要為點狀資訊為多(如 GPS，水準測量等)，雷達干涉法可於單次干涉提供大面積的地變資訊；雷達干涉法應用雷達波對地表做距離的測量，雷達波波長一般來說可直接穿越大氣，故不受天氣雲量影響；雷達干涉法使用主動式雷達波而非可見光，故無時段限制；雷達波一般約有公分級的波長，故其觀測精度可達公釐級以下。

儘管 DInSAR 於現今已經是非常成熟且廣泛地被使用，但在雷達差分干涉技術之中，許多因素會使得干涉結果產生雜訊及誤差而無法成像或形成干涉環。本研究將誤差來源主要分為空間性及時間性誤差兩方面來探討，並分述如下：

一、空間性誤差

在本研究之中，我們將空間性誤差的來源主要分為四項來做討論，分述如下：

(一)地表物特徵

在 SAR 影像之中，由於雷達波的回波強度正比於影像同調性，而地表在有植被的區域，像是山區、森林，對於雷達波容易形成散射的現象，使回波強度變弱；甚至在有水體的區域，如湖泊、水庫、灌溉後的農地，對雷達波會產生鏡反射，完全無法將雷達波反射回去。這樣的地表物都會使得影像同調性降低，訊雜比也同時下降，導致干涉無法成像，而無法獲得地表資訊。

(二)大氣效應

大氣中的粒子對於雷達波的傳遞有一定程度的散射，因此對於地表變形之相位的解算會產生誤差。雷達波訊號從感測器傳到目標物經過不同的大氣環境，像是電離層、對流層等，都會因大氣效應產生訊號延遲現象，使得相位值的量測及解算造成誤差。而不同大氣環境所造成的延遲應不同，所以這樣的誤差很難真實模擬呈現。

(三)基線長誤差

雷達干涉法是應用重覆軌跡的方式進行差分干涉，衛星兩次飛行間的距離稱

為基線(baseline)，而基線愈長影像於山區的變形也會愈扭曲，同樣地也會使得同調性降低，在做影像的套合(coregistration)時會造成誤差而無法成像。此外，基線於垂直方向也會提供相位變化，此相位值也是需被估算且消除的部份。

(四)數值高程模型誤差

在雷達干涉法之中，為了獲得地表變形資訊，需加入 DEM 來扣除地形效應，但實際上 DEM 與真實的地表高程會有些許差異，故在扣除地形效應時會有誤差產生。此外，我們所拿到的 DEM 可能與取得 SAR 影像當時的地形有所差距，也會使得干涉成果有所誤差。

(五)時間性誤差

若兩張 SAR 影像拍攝的時間相差太遠，地表上的特徵物可能會因時間關係而有所改變，如林地的開發、低窪地積水、建築物的建設破壞等，同樣地會使得影像同調性降低而無法成像。

本研究期望利用永久散射體差分干涉法，提高 DInSAR 干涉精度，將訊雜比較低的區域之地表資訊萃取出來，並且消除誤差，獲得真實地表變形資訊。

貳、永久散射體差分干涉法 (PS-InSAR)

儘管 DInSAR 技術於地表變形的測量上，與其他監測方法相比之下，有著不可忽視的優勢，然而一般來說僅只應用於平原都會地區，山區及植被較厚的地區，因地表特徵物會隨著時間而變化以及大氣效應，使得干涉結果的正確性仍有待評估。永久散射體最先由 Ferretti 於 2000 年提出(Permanent ScatterersTM, PS; Ferretti, 2000)，其基本概念是在多張 SAR 影像中尋找固定亮點，其亮點即為在各影像中高相關性的點位，也就是永久散射體，再將永久散射體的相位於一時間序列上的影像中萃取出來，並做相位解算(unwrapping)的動作，進而得到長時間地表位移量(圖 2- 3)。Ferretti 所提出的永久散射體差分干涉技術(Permanent Scatterers TechniqueTM)進行處理時必須加入當地線性的平均地表變形場，以求得非線性的地表變化量。此後，Hopper et al. (2004)年提出另一種永久散射體差分干涉技術(Persistent Scatterers InSAR)，此方法不需加入線性平均速度場，即使在變形非常不規則如火山地區，仍可得到於一時間序列上的地表位移量(圖 2- 4 及圖 2- 5)。

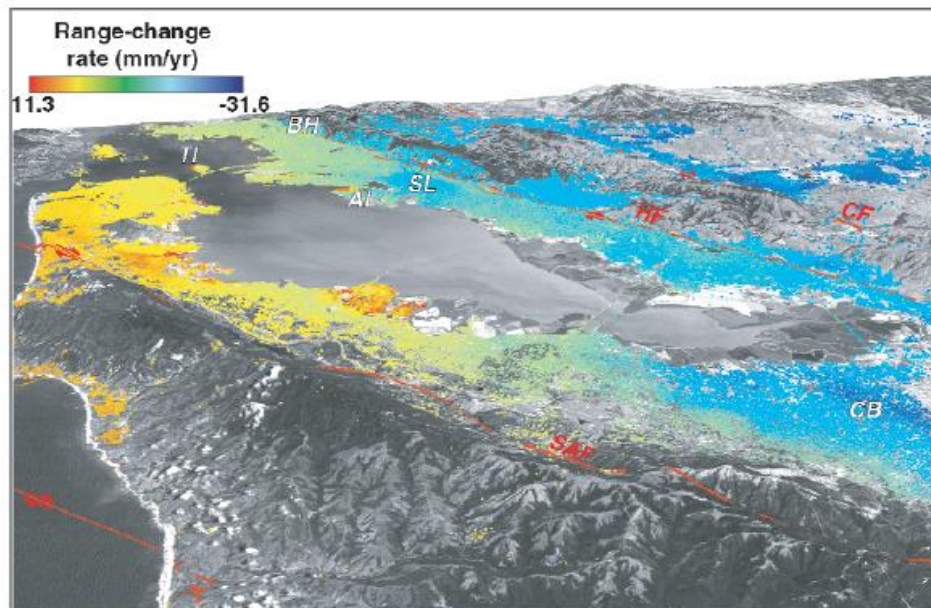


圖 2-3 應用永久散射體差分干涉法於舊金山灣地區所測得的地表變形場
圖中共辨識出 115487 個永久散射體，其顏色代表相對於人造衛星(ERS)視
角方向(Line-Of-Sight)的位移量。

資料來源：Ferretti et al., 2000

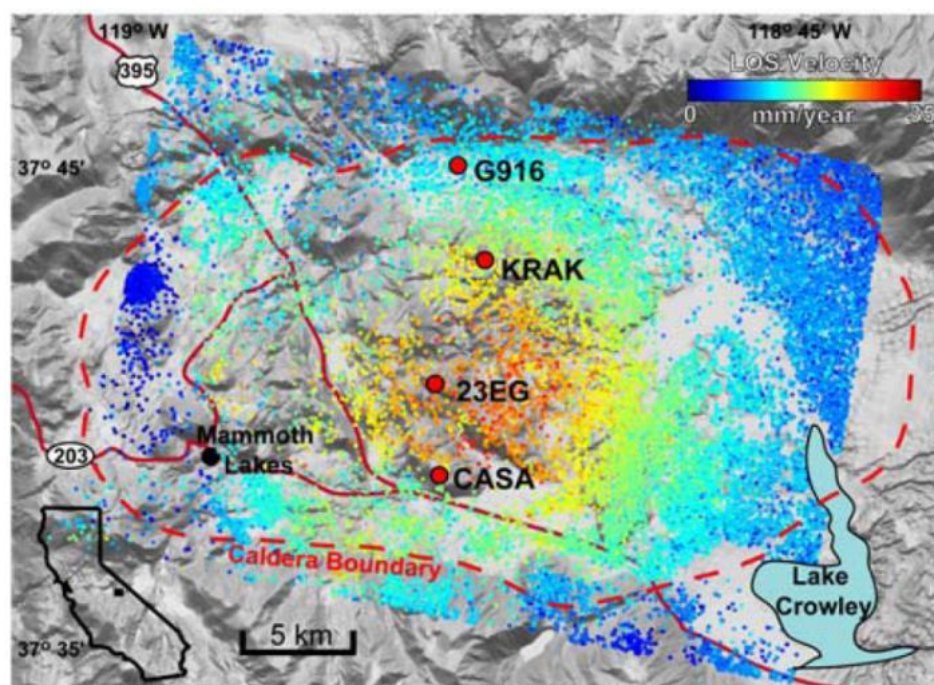


圖 2-4 加州長谷火山口地區平均地表位移量

資料來源：Hopper et al. et al., 2004

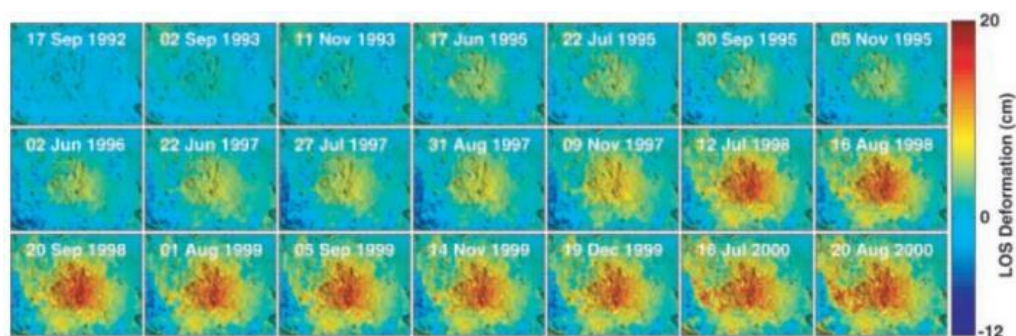


圖 2-5 加州長谷火山口地區於時間序列上之地表變形量

資料來源：Hopper et al., 2004

永久散射體的概念是利用雷達波對於地面各點位做檢測，再於雷達影像之中挑選出適當的點位，而這些點在儲存的雷達影像記錄中具有穩定的散射特性。在真實的地面中，這些點可能代表的是地面的建築物、郊外裸露的岩石、高壓電塔的基座等物體。由於這些物體有著不容易改變的表面特性並且對於雷達波的散射較不會隨著時改變，因此從這些點位所獲得的訊號有著遠超越其他地區(農田、湖泊、植被等)的可信度。在取出這些永久散射點於時間序列上的相位後，利用衛星基線與地形效應誤差相關的關係，以及假設在一個特徵尺度範圍內大氣效應應為一致的情況之下，可將對 DInSAR 結果影響最多的兩項因素從訊號中消除，而達到對於 PS 點的精密觀測。一般情況來說，PS 點位數量於城市區域每平方公里都可在數十個點以上，而郊區部份也可達每平方公里內有數個點，這樣的資料密度，已經遠超過臺灣的 GPS 站及日本等高 GPS 密度區域的站位密度。此外還可以將 PS 點位資料於空間上做內插以獲得全面性的資料。

參、短基線長(Small Baseline)差分干涉法

永久散射體差分干涉法可以在雷達影像之中挑選出具有穩定雷達波散射特性的 PS 點位，並且獲得較理想的地表變形觀測結果。但是各幅影像間的軌道基線長差異會降低雷達波訊號的相關性，對於穩定雷達波散射體密度較低的區域，在進行 PS 點位選擇時，這些區域的點位很容易遭遺棄。為了更加確認這些區域點位的真實性，本研究將在短時間間距裡進行空間上高相關性的濾波，通過的像素稱之為「SDFP 點位」(Slowly-decorrelation filtered phase pixels; Hopper, 2008)，並繼續應用 Hopper (2008)年所提出的 Small Baseline(SB)方法進行分析。

為了在干涉過程中增加影像間的相關性，必須減少兩幅 SAR 影像間物理效

應的誤差(此物理效應誤差包含垂直、時間和都普勒的基線長效應)，因此本研究使用短基線長差分干涉方法企圖減少物理效應誤差。將所有 SAR 影像進行短基線長的影像配對，必須確認所有影像對裡沒有孤立的群組(圖 2- 6)，並使用經過 PS 運算後的 SLC(simple look complex)影像進行干涉，在軌道方向(azimuth)上過濾並排除沒有部份重疊的都普勒波譜(doppler spectrum)，在側距方向(range)上減去幾何影像所形成的低相關性雜訊，設定一個檢驗影像對相素的門檻值，選出 SDPF 點位。雖然在軌道方向和側距方向上的濾波會增加部份的低相關性，但是絕大多數 PS 點位的低相關性非常小，這些 PS 點位可以通過 SDFP 的門檻值成為 SDFP 點位，儘管 SDPF 點位和 PS 點位是由兩種不同方法選取，但是對於穩定的點位來說仍然有可能被重複選取，這些被重複選取的點位則有更高的可信度。

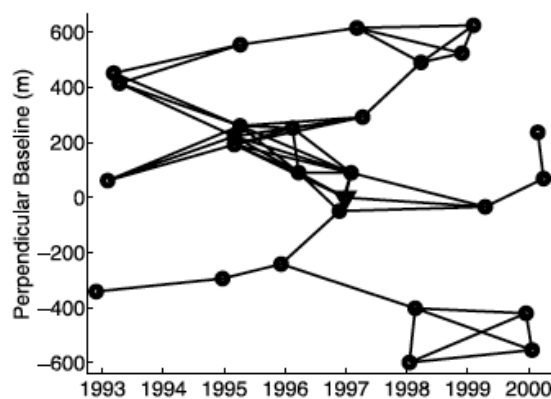


圖 2- 6 短基線長差分干涉影像對選取

資料來源：Hopper, 2008

PS 和 SB 這兩種互補的方法相互結合不但可以增加空間上地表變化訊號的解析度，也可提升相位解算時的可信度。本研究將同時應用永久散射體差分干涉技術和短基線長差分干涉技術，期望能更加精確掌握崩塌地時序上的變形情形。

第三節 合成孔徑雷達影像前處理

合成孔徑雷達影像前處理包含三個部分，包括輻射校正(Radiometric correction)、幾何校正(Geometric correction)及影像斑駁雜訊濾除(Speckle noise removal)等工作。針對 Sentinel-1 影像，利用歐洲太空總署所開發之 SNAP 軟體進行處理。第一個部分為輻射校正(Radiometric correction)。雷達影像訊號強度改

變的原因有雷達波波長、入射角度、地表坡度、地表粗糙度、極化現象(Polarization)及地物的複介電常數等的影響。而輻射校正是將影像中訊號強度去除攝像系統上斜距展度效應、天線圖形效應以及入射角效應，使得輻射校正過的影像，在訊號強度上較能真實反應出地表的反射特性，此外，也將原始影像的 Digital number(DN)值轉換為後向散射係數(Backscattering coefficient, σ)，轉換公式如下：

$$\sigma_j = \beta_j + 10 \times \log(\sin I_j) \quad (1)$$

(1)式中的 σ_j 表示 j 像元(Pixel)的後向散射係數， β_j 表示 j 像元的亮度(Brightness)，計算公式如(2)式，式中 DN_j^2 表示 j 像元的灰度值(Gray value)平方， $A3$ 表示偏移量(Offset)， $A2_j$ 表示 j 像元的增益值(Gain value)。

$$\beta_j = 10 \times \log[(DN_j^2 + A3)/A2_j] \quad (2)$$

I_j 表示 j 像元的入射角(Incidence angle)，計算公式如(3)式，式中 R_t 表示地球半徑， H 表示軌道高度(Track height)， Φ_j 表示 j 像元的球面角(Spherical angle)， R_j 表示 j 像元的斜距。

$$I_j = \arcsin[(R_t + H)\sin(\Phi_j)/R_j] \quad (3)$$

第二個部分為幾何校正(Geometric correction)。由於合成孔徑雷達是以側視(Side looking)的方式觀測目標物，成像原理為距離投影，其發出的脈衝以距離感測器漸行漸遠的方式和地面目標物產生交互作用，因為地形的影響，影像會有明顯的變形，所以必須糾正幾何變形，需要將影像從斜距(雷達到地面目標物的距離)轉換為地距(地面上的實際距離)。接續，則為利用數值高程模型進行校正，並將影像轉換坐標至 TWD97 以利後續進行分析。

第三個部分為斑駁雜訊濾除(Speckle noise removal)，在合成孔徑雷達影像中，當波長與地表粗糙度相近時，易造成干涉現象而產生斑駁雜訊，也就是回波相位在一個波長內的延遲，造成同一解析像元內很多物體回波的干涉現象。雷達回波訊號可能因為同相位(in-phase)加強像元的回波強度(Constructive Interference)，形成明亮的像元；反之，可能因為反相位(out-of-phase)造成回波強度相互抵消而減弱(Destructive Interference)，形成暗色的像元。所以雷達影像因為斑駁雜訊的緣故，使得影像會充滿許多顆粒(granule)，難以分辨地物的特徵。本研究為了進行較精確的地物判釋，每一張影像皆進行斑駁雜訊的濾除。

本研究使用李氏濾波器(Lee filter)進行斑駁雜訊的濾除，李氏濾波器是常見

的雷達雜訊濾波器，其特點在於利用八個方向的移動視窗(moving window) 進行雜訊濾除以保持邊界的銳利度。李氏濾波器可以使影像更為平滑且保有影像邊緣的特徵(Lee, 1981)。雷達的斑駁雜訊是一種散射的現象，所以在影像處理的觀點上視為相乘性的斑駁雜訊。李氏濾波器假設相乘性誤差近似線性，並以最小平方誤差應用於線性模型，計算公式如下：

$$R = I_c \times W + I_m \times (1 - W) \quad (4)$$

(4)式中的 I_c 為移動視窗的中心像元； W 為權重係數，計算如(4.6)式。 I_m 為移動視窗內的平均值。

$$W = 1 - \frac{C_u^2}{C_i^2} \quad (5)$$

(5)式中的 C_u 為估計雜訊的變異係數； C_i 為影像的變異係數。 C_u 與 C_i 可由(6)式與(7)式表示。

$$C_u = \sqrt{\frac{1}{NLook}} \quad (6)$$

(6)式中的 $NLook$ 為合成孔徑雷達影像對同一個點位的觀測數。

$$C_i = \frac{S}{I_m} \quad (7)$$

(7)式中的 S 為移動視窗中的標準差。

第四節 Normalized Difference Sigma naught Index 分析

合成孔徑雷達屬於主動式的感測器，不受天候的影響，雷達波發射後會與地物進行交互作用，如果地物的粗糙度(roughness)高，雷達波與地物的交互作用也較強，反射的能量也較多，反之，如果地物較光滑，雷達波則呈現鏡射(specular reflection)，反射能量也較少。

本研究利用崩塌事件前後期影像計算 Normalized Difference Sigma naught Index, NDSI，NDSI 是利用兩時期的後向散射係數影像進行計算，其值介於-1~+1，若 NDSI 的值趨近於 0 表示地表在兩時期的變化小，反之，若 NDSI 的值趨近於-1 或+1 時，表示兩時期的地表變化大(Furuta and Tomiyama, 2011)，計算公式如下：

$$DSI = \frac{\sigma_{master} - \sigma_{slave}}{\sigma_{master} + \sigma_{slave}} \quad (8)$$

(8)式中的 σ_{master} 表示 master(亦即後期)影像的後向散射係數， σ_{slave} 表示 slave(亦即前期)影像的後向散射係數。

第五節 雷達干涉測量法

壹、PS 點位選取

由於 PS 點是挑選於影像之中相位較穩定的點位，而相位的穩定性又與雷達波的回波強度及影像同調性有著正相關的關係，所以可以先從強度影像及同調性影像中分別挑選 PS 候選點(PS candidate, PSC)，並且做點位交集的動作，最後再分析其相位，篩選出在時間序列上相位穩定的點位(Hopper et al., 2004)。為了從強度影像之中挑選較適合的 PSC，可利用 Ferretti 於 2001 年提出的式子：

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (9)$$

其中： D_A 為影像中像素之強度分佈指標；

σ_A 為各像素在時間序列上強度的標準差；

μ_A 為各像素在所有影像中的平均強度；

為訂定一門檻值，本研究沿用 Hopper et al (2004)建議之標準 0.4，若像素的 D_A 小於門檻值，代表此像素於時間序列中是屬於強度較強且相對較穩定的像素，便定義此點為 PSC。同樣地，將同調性影像裡的像素也作一樣的分析，找出於時間序列中同調性較高且相對較穩定的點位，並且與應用強度影像挑選出的 PSC 做點位的交集。交集出的 PSC 仍不是真正的 PS 點，還必須做相位穩定度的分析，才能完整定義 PS 點。

從所有的相位影像之中擷取出 PSC 各點的相位資訊。然而從 DInSAR 結果所得到相位資訊並非只包含地表位移，當中還包括了大氣效應、軌道誤差及 DEM 誤差所造成的相位(Hopper et al., 2004)。以方程式簡單表示為：

$$\phi_{x,i} = \phi_{def,x,i} + \phi_{a,x,i} + \phi_{orb,x,i} + \phi_{\varepsilon,x,i} + n_{x,i} \quad (10)$$

其中： $\phi_{x,i}$ 為第 x 像素於第 i 組影像之相位；

$\phi_{def,x,i}$ 為地表於 LOS 方向的變形所提供的相位；

$\phi_{\alpha,x,i}$ 為大氣效應所提供的相位；

$\phi_{orb,x,i}$ 為衛星軌道誤差所提供的相位；

$\phi_{\varepsilon,x,i}$ 為 DEM 誤差所提供的相位；

$n_{x,i}$ 為雜訊，包含熱效應(thermal noise)、套合誤差(coregistration errors)等；

以 x 像素為中心，訂定一範圍，並將此範圍內的 PSC 一起算入分析。將之範圍內 PSC 的相位資訊平均，可得

$$\bar{\phi}_{x,i} = \bar{\phi}_{def,x,i} + \bar{\phi}_{\alpha,x,i} + \bar{\phi}_{orb,x,i} + \bar{n}_{x,i} \quad (11)$$

其中 $\phi_{\alpha,x,i}$ 於空間的分佈情況為一隨機分佈，故當範圍內的 PSC 點夠多時，DEM 誤差值便會在平均之後接近於零，故可忽略不計。將式(10)減去式(11)，可得：

$$\phi_{x,i} - \bar{\phi}_{x,i} = \phi_{\varepsilon,x,i} + n_{x,i} - \bar{n}'_{x,i} \quad (12)$$

其中 $\bar{n}' = \bar{n} + (\bar{\phi}_{def} - \phi_{def}) + (\bar{\phi}_{\alpha} - \phi_{\alpha}) + (\bar{\phi}_{orb} - \phi_{orb})$ 。由於短距離內地表變化、大氣效應以及軌道效應的變化量極小，且於強度及同調性皆穩定的情況下，雜訊的干擾也相當微弱，故 $\bar{n}'_{x,i}$ 值非常小並可忽略。而 DEM 的誤差應與衛星的空間垂直基線(B_{\perp})成一線性關係，故

$$\phi_{\varepsilon,x,i} = B_{\perp,x,i} K_{\varepsilon,x} \quad (13)$$

而 $K_{\varepsilon,x}$ 為一常數。將之帶回式子(4)可得

$$\phi_{x,i} - \bar{\phi}_{x,i} = B_{\perp,x,i} K_{\varepsilon,x} \quad (14)$$

其中 $\phi_{x,i}$ 及 $\bar{\phi}_{x,i}$ 都可以從相位影像資料中取得，而 $B_{\perp,x,i}$ 可從衛星軌道資訊中求得，故可計算出 $K_{\varepsilon,x}$ ，再將估算的 $K_{\varepsilon,x}$ 代回式(13)，可估算出 $\hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}$ ，並套入 Hopper et al. (2004) 所提出之公式：

$$\gamma_x = (1/N) \left| \sum_{i=1}^N \exp \left\{ \sqrt{-1} (\phi_{x,i} - \bar{\phi}_{x,i} - \hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}) \right\} \right| \quad (15)$$

其中 γ_x 為第 x 像素的相位於時間序列上的穩定程度， N 為干涉圖的數量。此後，便可訂定一門檻值 γ^* ，只要 PSC 的 γ 值小於 γ^* ，即可定義此 PSC 為真正的 PS 點。

訂定 γ^* 值的方式，是利用 PSC 穩定只受 $\phi_{n,x,i}$ 支配的特性，建立一個可能性

密度函數(probability density function, PDF) $P(\gamma_x)$ ，若 $\phi_{n,x,i}$ 值很大，定義此函數為 $P_r(\gamma_x)$ ，若 $\phi_{n,x,i}$ 很小，便定義為 $P_{ps}(\gamma_x)$ ，故

$$P(\gamma_x) = (1 - \alpha) P_r(\gamma_x) + \alpha P_{ps}(\gamma_x) \quad (16)$$

其中 α 為 0~1 的正數。若 γ_x 值相當小(<0.3)，則 $P_{ps}(\gamma_x) \approx 0$ ，且假設 $\int_0^{0.3} P(\gamma_x) = (1 - \alpha) \int_0^{0.3} P_r(\gamma_x) dx$ ，便可保守估計 α 且計算出 γ^* 。

在得到 γ^* 後，可持續提煉 PS 點，直至其數量收斂，獲得更為可信的 PS 點。

貳、相位解算

挑選 PS 點後，便需要進行相位解算(unwrapping)的動作以還原原始地變資訊(圖 2-7)。與傳統 DInSAR 不同，PS-InSAR 相位解算的困難在其資料為三維資訊，即平面空間 2-D 加上時間。因為還未發展出有效的演算法解算三維的相位，所以將其模擬成二維來做相位解算。首先計算出各 PS 點於時間上(各副影像的日期)的相位變化，接著應用最小均方根對同一點 PS(控制點)於各時間內反覆地做相位解算的動作，如此便可得到各 PS 點於各時間對於控制點的變化量，最後再扣除各點於時間上的相位變化，就能得到 PS 點於時間序列上的變化量。此方法已足夠處理變形較慢的區域，若有較大的位移量發生，甚至可以完整地解算出三維的相位資訊(Hopper et al., 2004)。

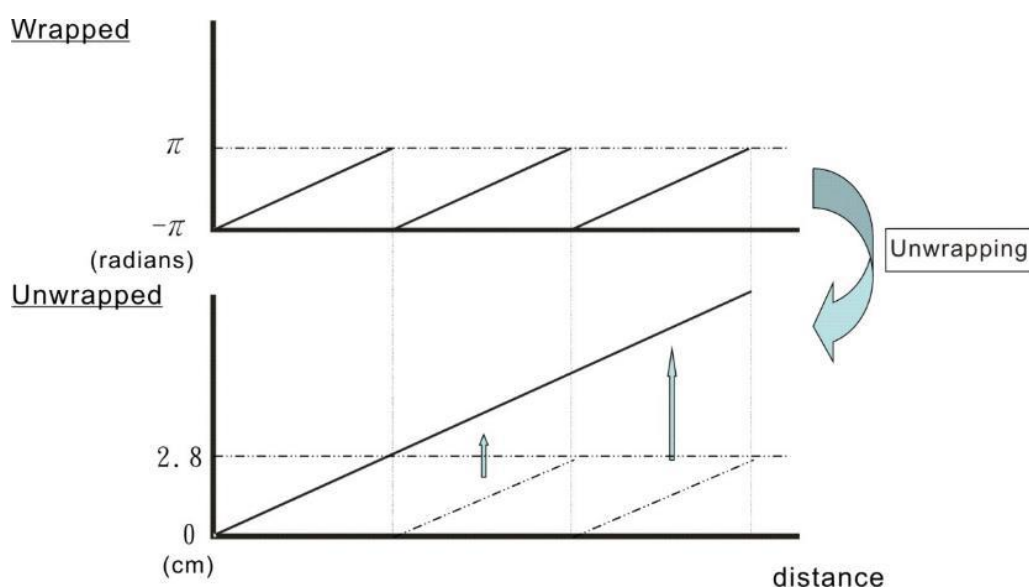


圖 2-7 相位解算(unwrapping)示意圖。

圖中以 ENVISAT 衛星為例，波長為 5.6 公分，從 π 到 $-\pi$ 代表 2.8 公分的地表變化量。

參、DEM 殘差估算

當挑出可信度較高的 PS 點之後，可得各點的 $\hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}$ ，將此項做相位解算便可獲得 DEM 誤差提供的變化量。但 $\hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}$ 是計算 $K_{\varepsilon,x}$ 所得到的估算值，與真實的 DEM 誤差所引起相位 $\phi_{\varepsilon,x,i}$ 還是有些許的不同，可以下式子表之：

$$\phi_{x,i} - \hat{\phi}_{\varepsilon,x,i} = \phi_{def,x,i} + \phi_{\alpha,x,i} + \phi_{orb,x,i} + \phi'_{\varepsilon,x,i} + n_{x,i} \quad (17)$$

其中 $\phi'_{\varepsilon,x,i}$ 即為 DEM 的殘差(residual DEM error)(Hopper et al., 2004)。因為在先前的相位分析時，已經把 $\hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}$ 估算得相當接近於 $\phi_{\varepsilon,x,i}$ ，所以基本上 $\phi'_{\varepsilon,x,i}$ 已經小到可以忽略不計，但此值可能會因為處理的範圍放大及時間的拉長而累積成較大的誤差值，而其值可於計算空間相關(spatially correlated)誤差一起估算且消除。

肆、大氣效應估算

在做相位解算的計算之後，與空間有相關的誤差依然存在。而此空間殘差(spatially correlated error)與我們所求的 ϕ_{def} 的差異在於 ϕ_{def} 主要是以時間相關(temporally correlated)為主，所以將解算後的相位在時間上做高通濾波(high-pass filtering)，在空間上做低通濾波(low-pass filtering)，便可將空間殘差估算出來(Hopper et al., 2004)，而剩餘與空間不相關的誤差則可歸類為雜訊。在此空間殘差之中， $\phi'_{\varepsilon,x,i}$ 及 $n_{x,i}$ 兩項已經於相位分析時逼近至很小、幾乎可忽略的值，而 $\phi_{orb,x,i}$ 部份可使用精確軌道(precise orbit)將之消除，故空間殘差主要由大氣效應 $\phi_{\alpha,x,i}$ 所提供，所以此步驟也等於是估算了大氣效應。最後，再將空間殘差扣除，便可得到 PS 點位的地表變形資訊 ϕ_{def} 。

伍、SDFP 點位選取

為了在短基線長的干涉影像上選取比較穩定的相位，我們使用 Hopper (2008) 所提出的強度差異分布(amplitude difference dispersion)檢驗：

$$D_{\Delta A} \equiv \frac{\sigma_{\Delta A}}{\mu_A} \quad (18)$$

其中： $\sigma_{\Delta A}$ 為主影像和副影像間的強度差異標準差

μ_A 為強度的平均值

此計算方式沿用 Hopper et al.於 2008 所設定的門檻值 0.6，若像素的 $D_{\Delta A}$ 小於門檻值，代表此像素於時間序列中是屬於比較穩定的像素。前述已假定尚未相位

解算的點位包含了空間上相關性資訊和空間上非相關性資訊，其中空間上相關性資訊包含地表變形、大氣所造成的時間延遲、軌道誤差和 DEM 的誤差，這些已被估算出來；而空間上非相關性資訊包含空間中非相關性的高程誤差和相位中心的物理誤差，這些也可透過最小垂直基線長的方法求得，因此減去這兩個空間上的資訊所得到的低相關性雜訊(decorrelation noise)，其特質非常相似同調性程度(coherence magnitude)，再套入 Hopper (2008)所提出的公式：

$$\gamma_x = (1/N) \left| \sum_{i=1}^N \exp \left\{ \sqrt{-1} \left(\psi_{x,i} - \bar{\psi}_{x,i} - \hat{\phi}_{\theta,x,i}^{\mu} \right) \right\} \right| \quad (19)$$

其中 $\psi_{x,i}$ 為第 i 幅干涉影像裡第 x 個像素的相位； $\bar{\psi}_{x,i}$ 為空間上所估算出的相關性數值； $\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{\mu}$ 為空間上所估算出的非相關性數值；N 為干涉影像的幅數。將所選擇點位的 γ_x 和 $D_{\Delta A}$ 數值進行統計的分析，可以求得一個門檻函數 $\gamma_x^{thresh}(D_{\Delta A})$ ，以此門檻函數反覆去提煉 SDFP 點位，直至其數量收斂，獲得更為可信的 SDFP 點位。

第六節 分析流程-複合式時間序列的雷達差分干涉法

本研究所使用 Andy Hopper 所開發的 StaMPS v3.1 版(可參考相關網址：[http://www.hi.is/~aHopper et al./stamps/index.html](http://www.hi.is/~aHopper%20et%20al./stamps/index.html))進行 PS-InSAR 和短基線長的分析，影像處理軟體 Doris v4.02 版進行 DInSAR，以及解相位軟體 SNAPHU 對差分干涉結果進行解相位。永久散射體差分干涉法處理流程大致可分為以下十個步驟(圖 2-8)，分述如下：

1. 將主副影像之單觀點影像經由干涉處理產生強度影像、同調性影像及相位影像。
2. 於強度影像及相位影像中挑選出 PS 候選點。
3. 加入數值高程模型及相位影像資訊精煉出 PS 點位。
4. 估算出 DEM 誤差所造成的相位。
5. 估算出大氣效應所造成的相位。
6. 挑選出短基線長差分干涉影像對並提煉出 SDFP 點位
7. 合併 PS 點位和 SDFP 點位
8. 將合併後的點位相位還原。

9. 產生地表位移影像(LOS 方向)。
10. 產生地表變形速度場(LOS 方向)。

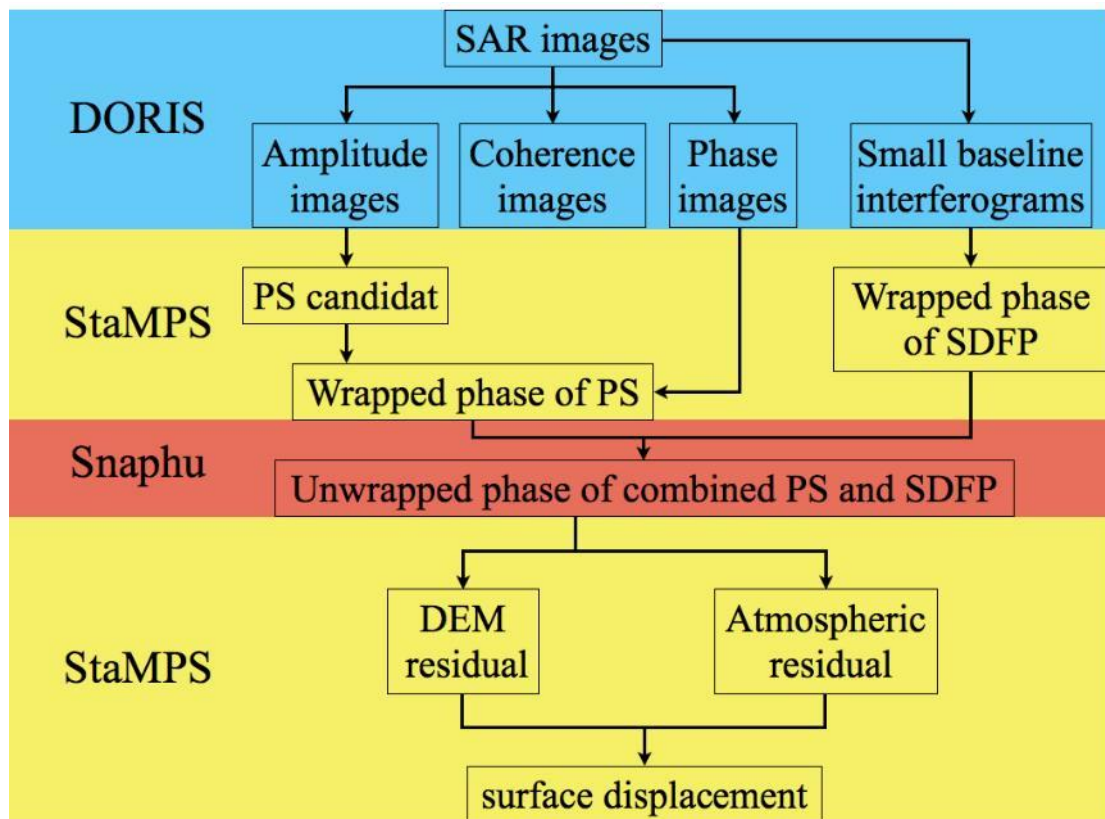


圖 2- 8 複合式時間序列的雷達差分干涉法(Multi-temporal InSAR)處理流程

第七節 無人飛行載具監測

衛星遙測資料雖具有大範圍、多時性、多光譜及數位化的特性，但在小面積高解析的監測及即時性方面，衛星遙測（如上述的衛星影像）有其實際的限制，因此衛星遙測之應用必須再輔以其他遙測工具才能收其整體性、完整性之效用，無人飛行載具(以下稱 UAS)，具有機動力強、即時迅速、高解析影像、時效性快、經費較廉、較寬鬆天氣條件及隨時可起降的優點，且可裝載的感測器包括照相機及攝影機，其中照相機用於一般用途的照相，攝影機則可用於連續攝影，是遙測資料獲取及實際應用上的另一可行性。以 UAS 機體搭配一般消費型相機，建置成本比傳統航空遙測攝影設備低廉；雖然消費型相機不是以量測功能為目的所開發，但目前相機的解析度高，當航高較低時（如 300 公尺航高），其地面解析度可在 20 公分以內，對於地物判釋相當便利，倘加上控制點作業，其正射影像平

面位置精度可達公分級。

在無人載具上面搭載了 GPS/INS/IMU 結合的感測器，及 CCD 與 DC 數位相機等設備，GPS/INS/IMU 感測器接收到資訊後，將資訊流透過轉頻器，並以無線電傳送訊號到地面站，途中為了不讓訊號受干擾，透過強波器來增強訊號強度，而在地面站接收到訊號後，將資料轉換成電腦可解析的訊號，顯示於控制圖台上；因此，GPS/INS/IMU 與 CCD 所接收到的資訊即可傳送到地面站，供操作者精準與輕易的進行操控。GPS/INS/IMU 與 CCD 接收到的資訊非但可即時傳送到控制圖台，更可將拍攝當時的角度、高度、時間等資訊回傳給後製處理人員，輔助影像校正，提高影像的精準度。

表 2-3 無人飛機資料表- Phantom 4 Pro

Phantom 4 Pro	
	
適用：即時性拍攝/正射影像拍攝/2000 萬畫素照片拍攝/4K 錄影 單趟飛行可拍攝 < 0.5 平方公里面積 (GSD < 10cm) 單趟最遠距拍攝錄影偵查可達 5km	

本計畫採用電腦視覺技術 Structure from motion，以 UAV 原始影像建構出地表三維資料，再以三維資料為底，產生地表數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)，再將 DSM 搭配鑲嵌演算法，從多張重疊的 UAV 影像產製高精度正射影像，再以高精度正射影像，產製數值地形資料。

第三章 研究成果與討論

過去針對舊有崩塌地追蹤研究相對少見，應用光學影像之研究較為普及，相對來說，使用雷達影像之相關研究仍相對較少。本研究應用 Sentinel-1 合成孔徑雷達影像，嘗試使用此免費影像資源，針對山區崩塌進行多時序雷達影像分析之可行性。具體之預期成果為：(1)收集 Sentinel-1 雷達影像，完成相關影像前處理，建立影像資料庫。(2)針對研究區舊有崩塌地進行 PS-InSAR 分析。(3)對舊有崩塌地進行再發性評估，並與無人機空拍資料比對，以了解其後續之影響及危害。

第一節 建置雷達影像影像資料庫

本研究分析使用影像包含福衛二號光學影像、ALOS PALSAR 雷達影像以及 Sentinel-1 雷達影像。福衛二號影像之使用目的為針對莫拉克颱風事件(2009 年 8 月 5 日-10 日)所產生之崩塌地進行監測，因此本研究收集莫拉克颱風前後期之福衛二號影像，以人工判釋之方法將本研究區之崩塌進行判釋，此工作為 105 年度本研究單位接受農委會水土保持局之成果之一(計畫編號 SWCB-105-122)。

判釋崩塌地所使用之前期影像之拍攝時間為 2009 年 5 月 9 日(圖 3-1)，後期影像為 2009 年 8 月 24 日(圖 3-2)。崩塌地判釋成果可見圖 3-3。依據此判釋成果，本研究將針對這些崩塌地進行再發性之評估。

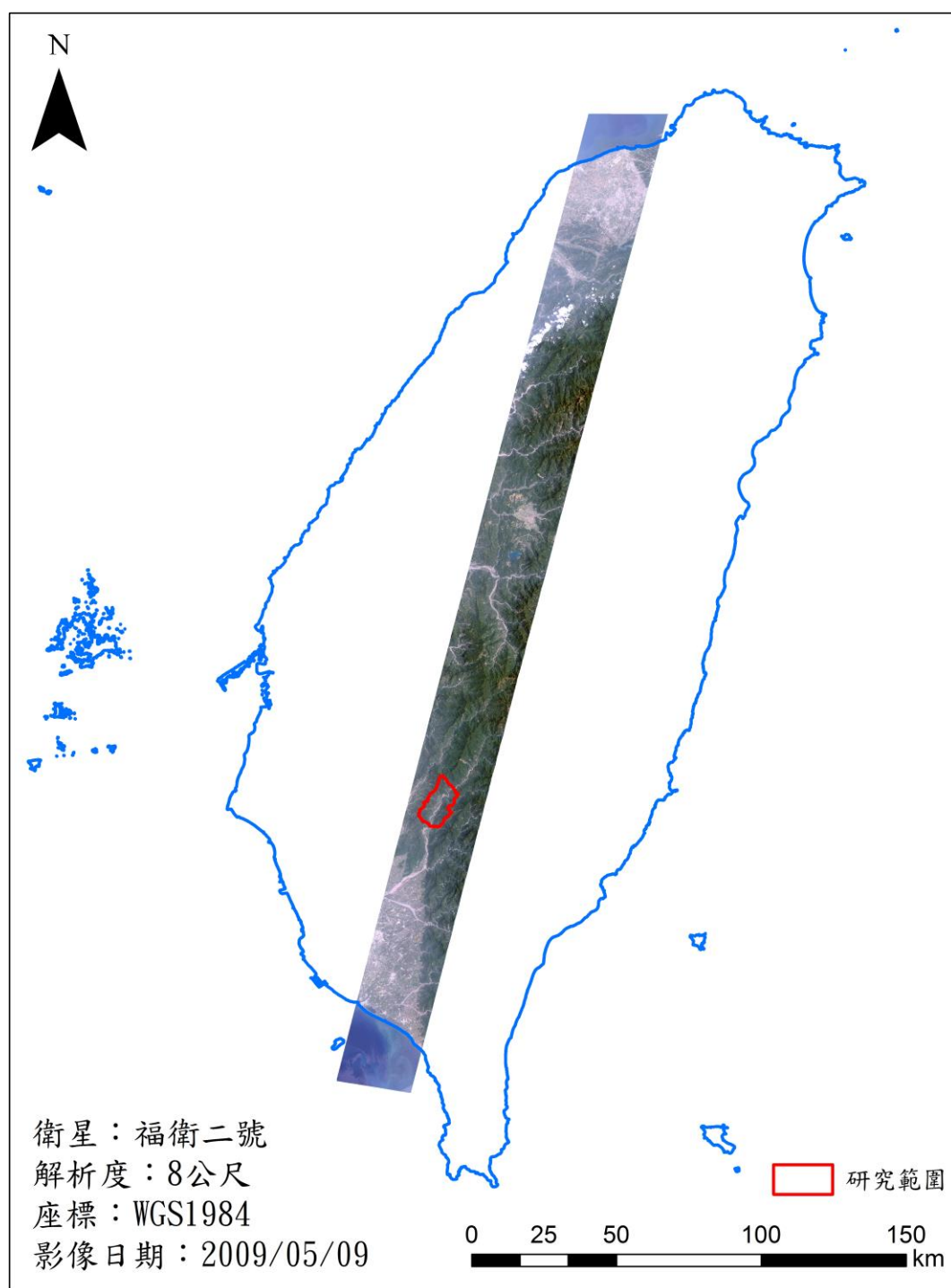


圖 3-1 莫拉克颱風前期使用之福衛二號衛星影像

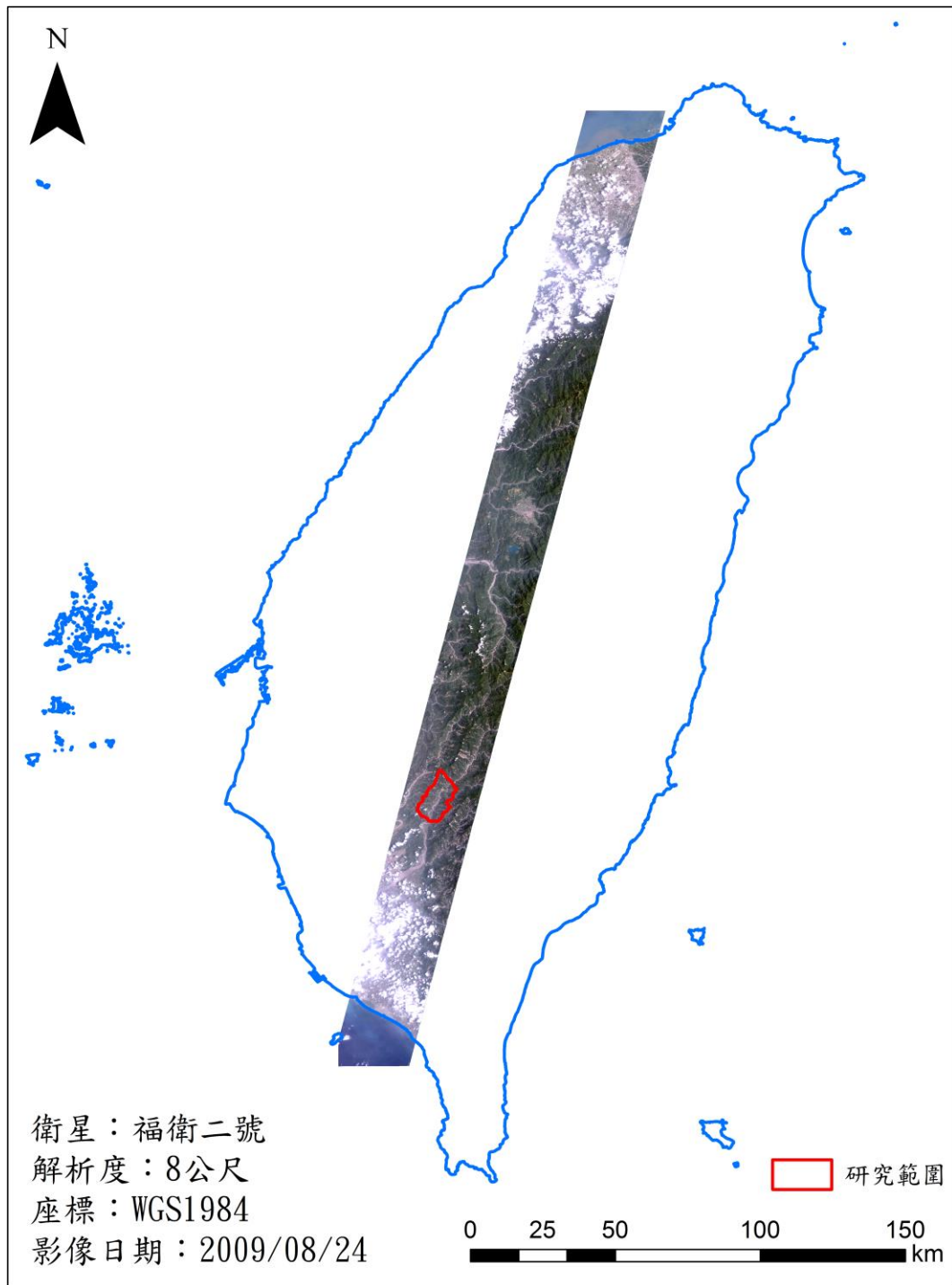


圖 3-2 莫拉克颱風後期使用之福衛二號衛星影像

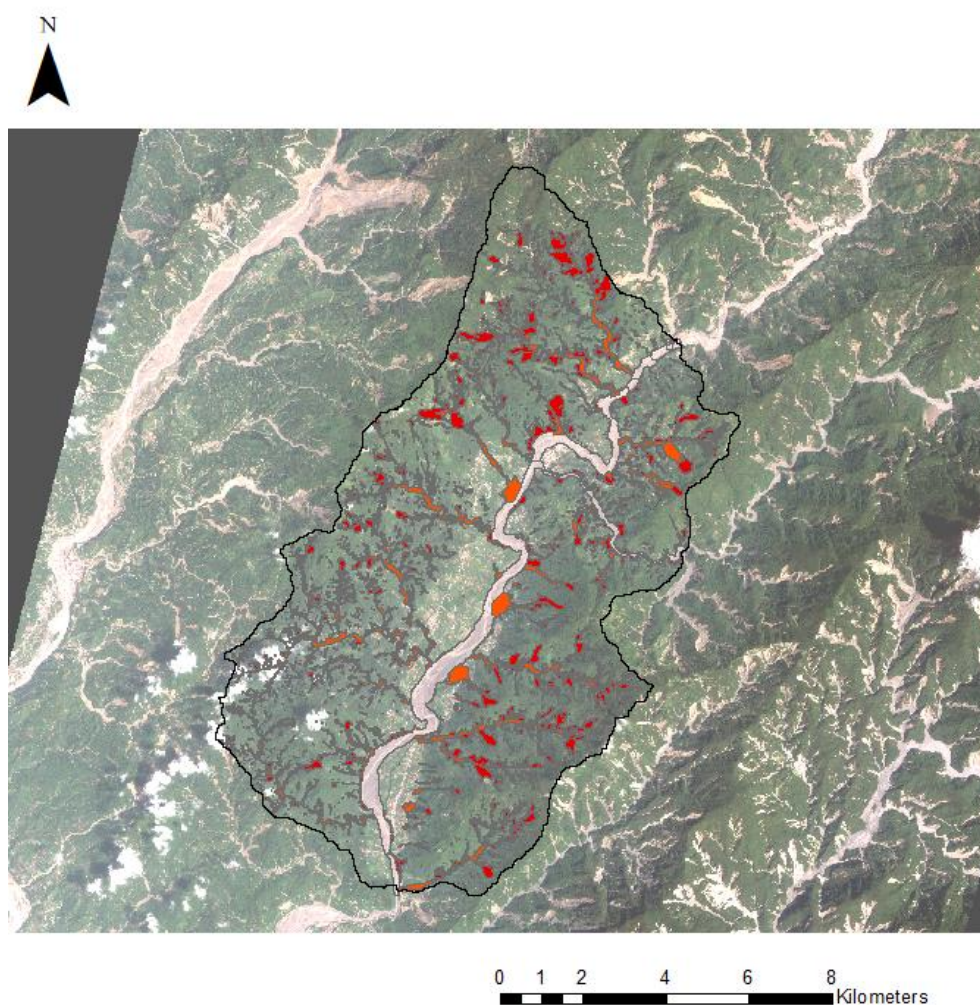


圖 3-3 莫拉克颱風事件崩塌地判釋成果

本研究使用雷達資料進行崩塌再發性評估所使用之衛星資料來源有二：ALOS 衛星以及 Sentinel-1 衛星資料。其中 ALOS 之 PALSAR 影像總共收集 5 幅，在進行影像前處理後，地面解析度為 7 公尺，主要涵蓋臺灣南部地區，包含高、屏部分山區，如圖 3- 4 所示，時間涵蓋 2008 年 1 月 3 日至 2011 年 2 月 26 日，如表 3- 1 所列。

表 3- 1 ALOS PALSAR 影像資料列表

日期	影像資料	極化
2009/08/23	ALPSRP190730450	HH
2009/10/08	ALPSRP197440450	HH
2010/08/26	ALPSRP244410450	HH
2010/10/11	ALPSRP251120450	HH
2010/11/26	ALPSRP257830450	HH

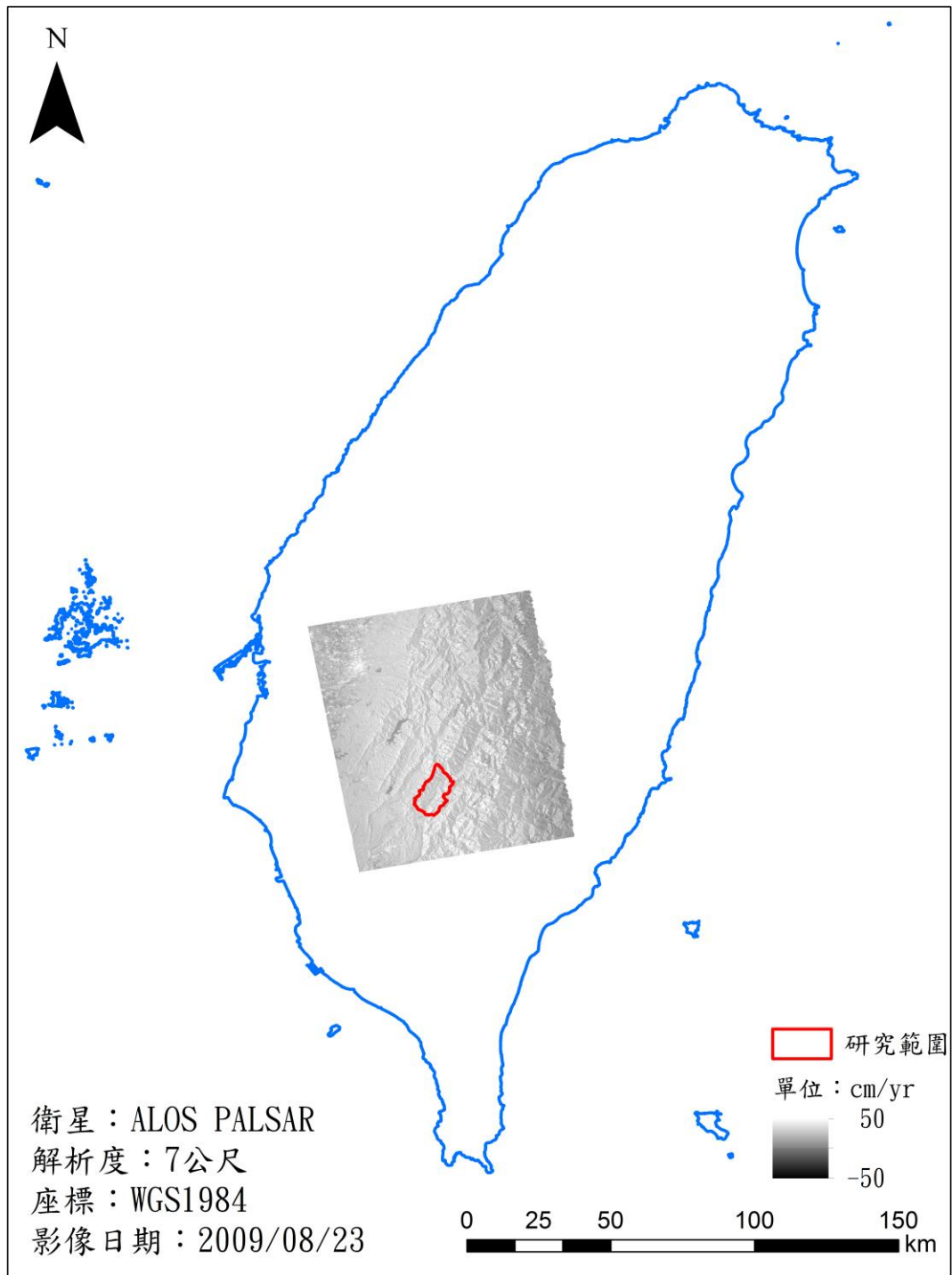


圖 3-4 ALOS 影像涵蓋範圍示意圖

Sentinel-1 影像資料部分，主要涵蓋範圍為臺灣南部地區(見圖 3-5)，影像進行前處理後可得地面解析度為 10 公尺之影像資料，時間則是則從 2014 年 10 月 22 日至 2017 年 7 月 4 號，而且包含升軌(68 幅)及降軌模式(44 幅)資料，共計 112 幅(表 3-2)。

表 3-2 Sentinel-1 雷達資料收集列表

Sentinel-1 影像數目		
年份	ascending	descending
2014	4	3
2015	22	14
2016	27	16
2017	15	11
合計	68	44

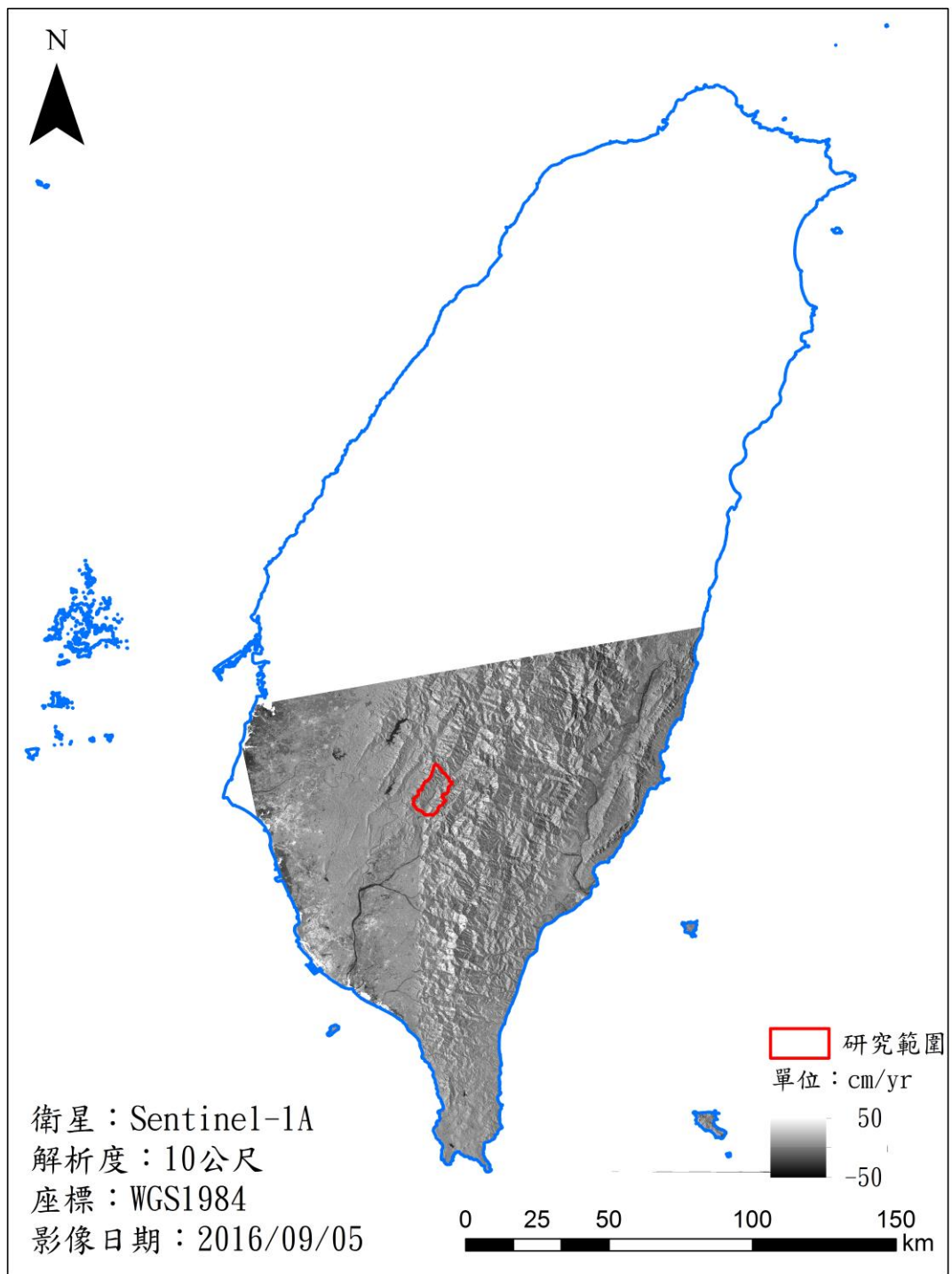


圖 3- 5 Sentinel-1 影像涵蓋範圍示意圖

第二節 舊有崩塌時序性變化分析

本研究雷達影像之分析可分為兩部分，首先本研究嘗試使用 NDSI 分析(分析雷達訊後向散射係數之變化)檢測其偵測新生崩塌之能力，其次為利用永久散射體差分干涉法(PS-InSAR) 分析舊有崩塌地之變動情形。

壹、NDSI 分析

本研究使用 2009 年 7 月 8 日以及 2009 年 8 月 23 日所拍攝的 ALOS PARSAR 資料計算 NDSI，如圖 3-6 所示。圖中可見，黃色框線內有明顯的紋理變化(亮暗差距明顯)，顯示雷達迴波於事件前後有明顯之變化，主要表現在訊號紋理的改變，由於日期相隔僅約一個半月，應不為植生復育所造成，固可相信此紋理變化主要為新生崩塌造成。NDSI 影像中的極端值主要為較光滑、粗糙度較低之表面形成，且主要與衛星觀測方面及地表結構有關，產生極強或極弱的反射訊號。圖 3-6 中左上方框線內為小林村位置，最上方框線內為南橫公路往梅山方向最大一處崩塌地。

本研究認為分析 NDSI 訊號的紋理有助於偵測因崩塌造成的地表變化，但 NDSI 於坡面的空間對位像元-像元尺度上的對位不甚精準，有時有訊號外插的情形，因此本研究在 NDSI 分析採用小集水單元進行坡面尺度分析，據此集水單元計算其內部 NDSI 訊號的紋理，用以偵測坡面的變動。建立此單元之方法為使用 ArcGIS 商用軟體，根據 20 公尺(內政部)之數值高層模型，配合 D-8 流向演算進行水系萃取，取得最小集水區單元約為 0.1 公頃。在紋理計算上，本研究計算坡單元內訊號之熵(Entropy)，其計算方法如下：

$$\text{Entropy} = -[p \times \log(p) + (1-p) \times \log(1-p)] \quad (20)$$

使用 Entropy 做為表現崩塌地內紋理的量化指標其原理在於 Entropy 可度量崩塌紋理的亂度情形，當集水單元內 NDSI 分布均勻時，Entropy 小，反之當 NDSI 分布差異大，有差異很大之極值時 Entropy 較大。

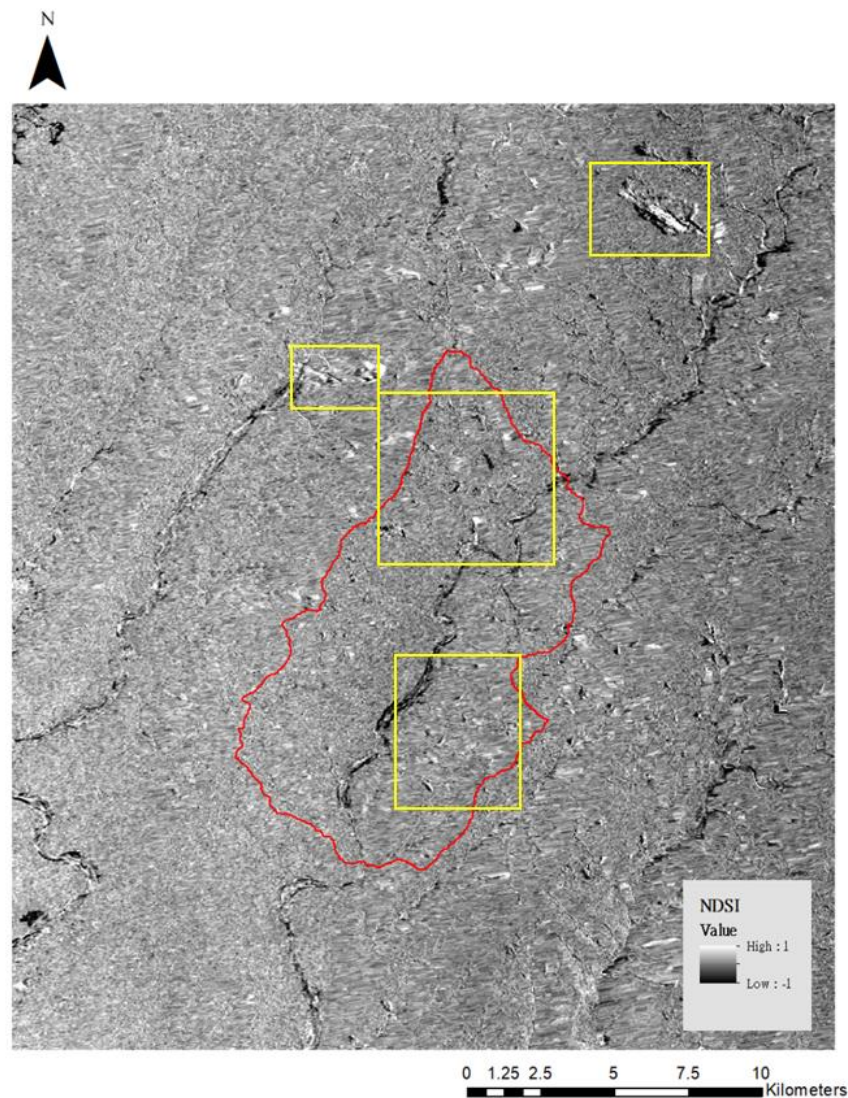


圖 3-6 莫拉克颱風前後之 NDSI 影像

黃色框線內可見明顯的紋理變化(亮暗差距明顯)，主要為崩塌造成。左上方框線內為小林村位置，最上方框線內為南橫公路往梅山方向最大一處崩塌地。

圖 3-7 為 Entropy 分析結果(a)，比對衛星影像(b)可以發現裸露的崩塌坡面可以對應到 Entropy 值較高的坡面。經試驗後，若以 0.46 作為門檻值去判釋崩塌地，研究區內 589 個崩塌地，有 424(72%)個落於高 Entropy 之坡面，若考慮大於 1 公頃之崩塌地，191 中有 180(94%)落於高 Entropy 之坡面，大於 3 公頃共 56 處崩塌地則全數落於高 Entropy 之坡面。顯示坡面 NDSI 訊號之 Entropy 可用來判釋由莫拉克事件產生的新增崩塌，尤其對大型之崩塌更具有良好的偵測效果。

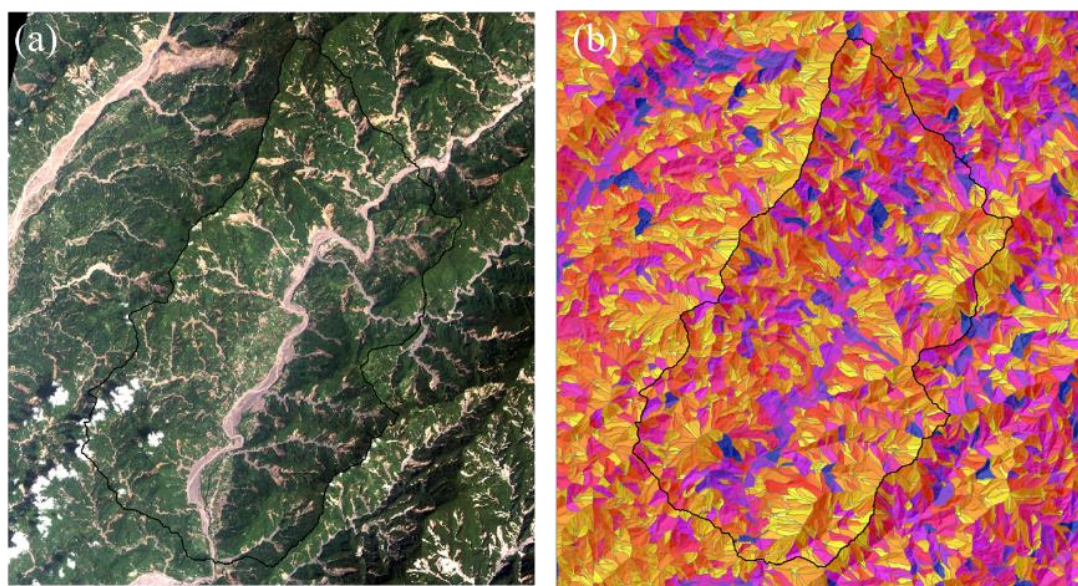


圖 3- 7 (a)莫拉克風災後之福衛二號影像 (b)以坡面單元進行紋理分析之成果

貳、PS-InSAR 試驗

本計畫利用 PS-InSAR 檢視舊有崩塌之活動情形，偵測時程約為 3 年，自 2014 年 10 月 22 至 2017 年 11 月 1 日，以每隔約 3 個月為間距，使用 12 組 Sentinel-1A VV 降軌及 12 組 VV 升軌模式(使用影像資料見附錄四)來進行 PS-InSAR 分析。

為使計算向位差之兩時期影像其觀測衛星位置較位相近，使得兩幅影像有較高的同調性以增加估計變異量之可靠性，因此選取衛星之基線距離不超過 100 公尺之影像進行計算。永久散射體主要為多張 SAR 影像中尋找固定亮點，其亮點即為在各影像中高相關性的點位。由於崩塌坡面可能有較高的變動性，本研究在選取永久散射點時進行檢視，主要選取不會移動之建物或地標。而崩塌地坡面(或地表其他位置)之位移解算則是依照 D-InSAR 方法進行計算，之後再計算坡面與永久散射點之相對位移。在分析上，本研究將升軌觀測之影像以及降軌觀測之影像分開進行 PS-InSAR 之分析，最後將兩者觀測之衛星觀測方向變形量之平均值作為最後的變形量估計值，其中若兩者之觀測值之差異超過其分布之 $\pm 95\%$ 時，則將此觀測點予以剔除。

儘管本研究應用之 PS-InSAR 技術可用來觀測非線性的地表變動，但為求觀測數據之可靠性，將同一位置上所有配對影像計算之變形與時間(以第一幅影像日期為起始時間，單位為日)進行線性相關性分析(皮爾森相關係數)，最後成果僅

選取相關性大於 0.7 且顯著程度 $p\text{-value} < 0.05$ 之變動位置，並剔除崩塌地以外之觀測點，以檢視舊有崩塌目前的變動情形，因此顯示之崩塌變化為持續性之單向變化(持續侵蝕或持續堆積)，成果如圖 3-8 所示。

分析成果顯示，研究區內主要為侵蝕持續發生，主要發生在北部，南部地區並無明顯變動，而在此 3 年間的平均侵蝕量為在 20 公分/年~1 公尺/年之間。

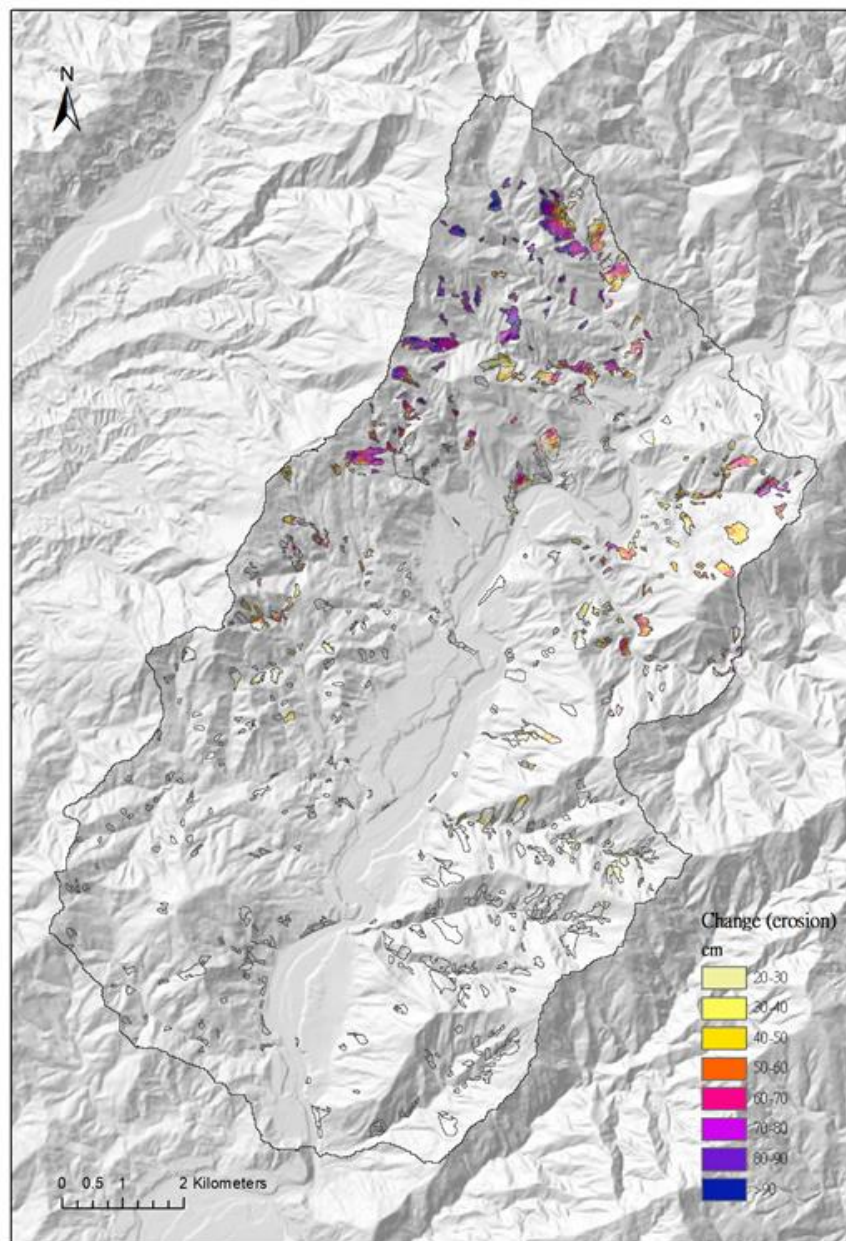


圖 3- 8 PS-InSAR 分析成果

圖中顯示研究區內舊有崩塌主要為侵蝕持續發生，以北部為主，南部則無明顯變動。

本研究先以過去之歷史 SPOT 衛星影像(中央大學太遙中心介接 SPOT 影像)比對此 PS-InSAR 之分析成果，分為兩個區域比對。首先為一河岸崩塌處(如圖 3-9 所示)，於圖 3-9(a)中 2015 年與圖 3-9(c)2016 比對後發現，該處河岸崩塌，其上部有侵蝕擴大的情形，與 PS-InSAR 分析結果圖 3-9(c)吻合。

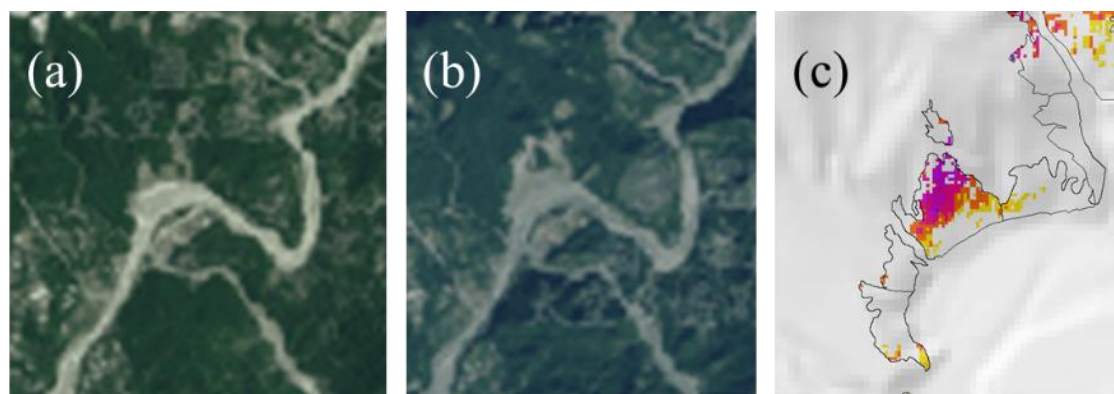


圖 3-9 (a)2015 年 SPOT 影像 (b)2016 年 SPOT 影像 (c)PS-InSAR 顯示河岸崩塌侵蝕的情形

在研究區北部的崩塌多有侵蝕的情形，選取部分區域比對歷年 SPOT 影像的結果可參考圖 3-10。圖 3-10(a)為 2014 年 SPOT 影像，圖 3-10(b)為 2016 年 SPOT 影像，圖 3-10(c)為 PS-InSAR 分析結果。儘管在 PS-InSAR 成果則顯示出在崩塌冠部有較明顯的侵蝕情形，而此種垂直方向的變化，在 SPOT 中無法觀察到，另外，此兩期 SPOT 影像亦無發現明顯的面積變化情形。

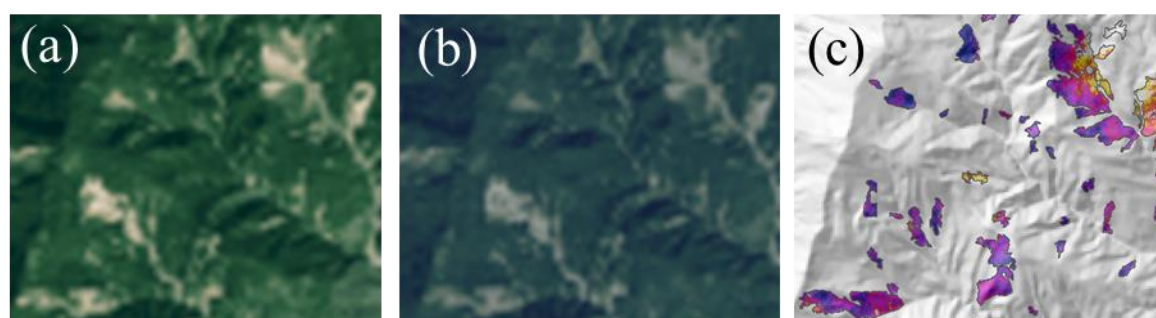


圖 3-10 (a)2014 年 SPOT 影像 (b)2016 年 SPOT 影像 (c)PS-InSAR 分析結果

參、無人飛機空拍比對

為更進一步比對 PS-InSAR 與現場情形，本研究進行野外現勘於現地進行無人機進行空拍，建立正射影像，以比對崩塌地現況。選取地點之須為利於無人機

操作進行空拍，因此選擇三處崩塌，(1)北部靠近寶來之河岸崩塌處(圖 3-9)、(2)南部六龜大佛以及(3)新發國小鄰近之舊崩塌，見下圖 3-11。其中北部(1)處為以知可能有持續侵蝕狀況之崩塌，而(2)及(3)處為 PS-InSAR 估計無明顯變動情形之舊崩塌。調查成果如下表 3-3、表 3-4 及表 3-5 所示。

由於本研究執行空拍機調查的數量及時間有限，因此主要以觀察以及描述的方式進行比對。此三處的現地評估成果顯示，均與 PS-InSAR 的分析成果相符，顯示 PS-InSAR 技術應有相當高的應用價值。



圖 3-11 無人機空拍調查位置

表 3-3 點位(1)之調查以空拍成果

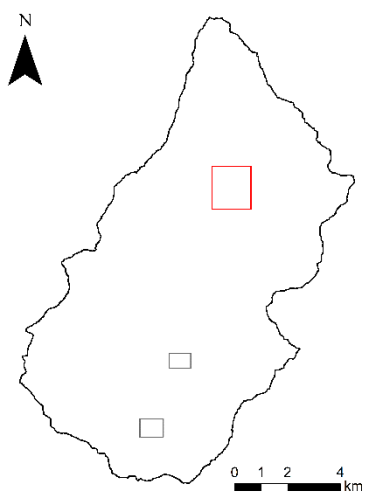


<p>記錄點：(1) X：218983.588 Y：2557018.369 寶來遊客中心附近之荖濃溪河岸</p> <p>描述： 寶來遊客中心附近之荖濃溪河岸，為一河岸侵蝕造成之崩塌，且目前持續向上邊坡擴大瀾，崩塌面蝕溝發育發達，且有持續侵蝕的情形，深度大約可達 3-5 公尺，此狀況與 PS-InSAR 之分析結果大致相符。</p>	
衛星影像	
 <p>解析度:1.5 公尺 拍攝時間:2016 拍攝衛星:SPOT6/7 座標系統:TWD97</p>	
無人機空拍正射影像	
 <p>0 0.2 0.4 0.8 km</p>	

表 3-4 點位(2)之調查以空拍成果

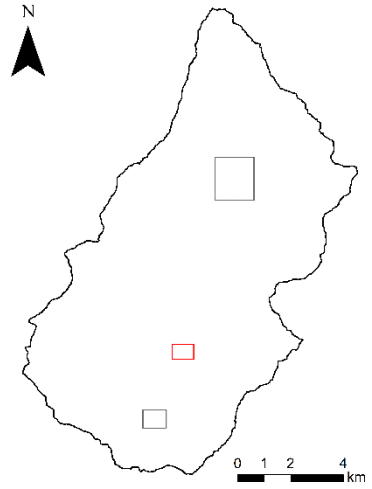


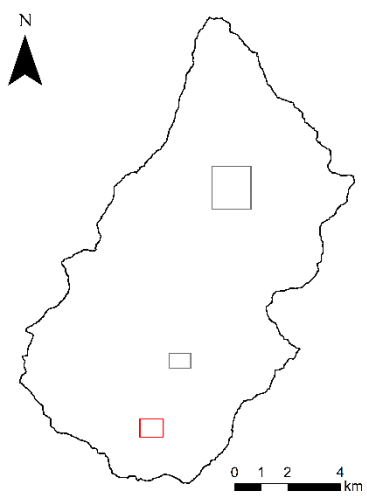

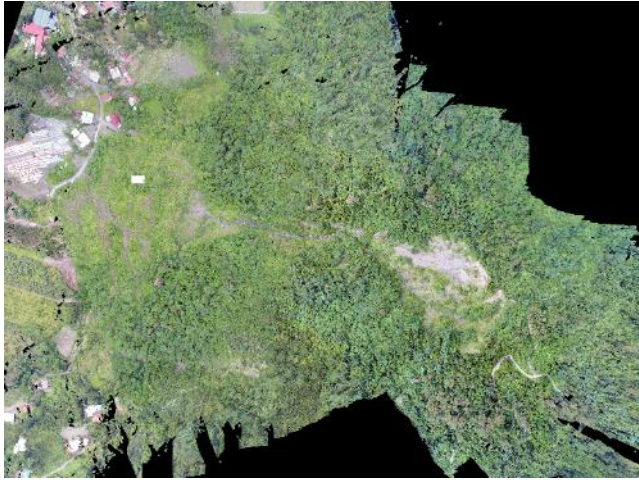
<p>記錄點：(2) X：217473.598 Y：2550330.346 六龜大佛後邊坡</p> <p>描述： 為莫拉克事件造成之崩塌地，於 2009 年產生大量土石，掩埋下方大佛。目前崩塌面並無土石堆積，且有植生恢復的情形，即此崩塌面無明顯的變動。</p>	
<p>衛星影像</p>	
 <p>解析度:1.5 公尺 拍攝時間:2016 拍攝衛星:SPOT6/7 座標系統:TWD97</p>	
<p>無人機空拍正射影像</p>	
 <p>0 0.1 0.2 0.4 km</p>	

表 3-5 點位(3)之調查以空拍成果

<p>記錄點：(3) X：216370.368 Y：2547760.219 新發國小後邊坡</p> <p>描述： 為 2009 年莫拉克事件造成之崩塌地，並於崩塌下方堆積大量土石。目前崩塌面並無土石堆積，且有植生恢復的情形，即此崩塌面無明顯的變動。</p>	
衛星影像	
 <p>解析度:1.5 公尺 拍攝時間:2016 拍攝衛星:SPOT6/7 座標系統:TWD97</p>	
無人機空拍正射影像	
 <p>0 0.1 0.2 0.4 km</p>	

除野外調查及無人機拍攝外，本研究利用無人機拍攝之影像資料建立數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，其空間解析度 0.5 米，高程誤差 2 米，並套體正射影像建立三維立體模型(圖 3- 12)，以助於崩塌面現況的研判。



圖 3- 12 利用空拍資料建構三維立體模型

肆、舊有崩塌再發性評估

評估本研究區內之舊有崩塌再發可能性，依據本研究分析之崩塌活動性來看(研究區內主要為持續侵蝕)，研究區內北部之崩塌有較高之再發可能性，而相對來說，南部則較穩定，再發可能性較小(參考圖 3- 8)。

本研究透過野外調查以及檢視三維立體模型後，大致歸納出下列幾項可能使崩塌地再發的條件：(1)崩塌坡面面積較大，崩塌面持續裸露，並仍殘留土石堆積，較易再發；(2)坡度過陡使植生難以恢復；(3)位於河岸攻擊坡，坡腳持續遭到侵蝕。

崩塌地的再發性除崩塌自身的活動性外，仍應考慮外在的驅動因子，例如強降雨、地震等，因此本研究評估之再發性為一相對情形，也就是說，若有相當強的降雨事件發生，本研究所指之相對穩定之崩塌地未必不會再次發生。本研究認為，若能增加分析之事件樣本與崩塌個案，則可建立更加完善之評估模式。

第四章 結論

本研究成果顯示，分析 NDSI 之紋理變化能有效地偵測事件新生之崩塌，且對大面積的崩塌地有相當好的判釋成效；另外，以 PS-InSAR 分析本研究區之舊有崩塌動態，結果顯示研究區北部舊有崩塌坡面仍有持續侵蝕的情形，而南部則無明顯的變動。藉由歷史 SPOT 影像以及現場無人機空拍比對，顯示 PS-InSAR 之分析成果與現況相符。本研究評估研究區內之舊有崩塌地之再發性發現：研究區內之可能再發之舊崩塌主要為持續侵蝕，且主要分布於區內北部，相對來說，南部則較穩定，再發可能性較小。此外，本研究歸納下列崩塌地再發的可能條件：(1)崩塌坡面面積較大，崩塌面持續裸露，並仍殘留土石堆積，較易再發；(2)坡度過陡使植生難以恢復；(3)位於河岸攻擊坡，坡腳持續遭到侵蝕。

由於本研究執行無人空拍機調查之能力有限，無法進行全區全面的調查以及高精度地表變遷之分析以及驗證工作(如分析不同時期之高精度地表數值地形)，因此主要是利用現場空拍之影像進行描述式的觀察比對。此外，崩塌地的再發性除崩塌自身的活動性外，仍應考慮外在的驅動因子，例如強降雨、地震等，若能增加分析之事件樣本與崩塌個案，則可建立更加完善之評估模式。

根據研究成果，本研究相信雷達影像分析技術在崩塌動態調查上有相當高的應用價值，若能建立一連續性之雷達影像監測方法，則可應用雷達資料建立一個大範圍、持續性的坡地監測系統，可具體精進我國邊坡災害防治與減災措施。

附錄

附錄一、 期中審查會議委員建議回覆

開會地點：水土保持局第一會議室

開會時間：106 年 8 月 2 日(星期三)上午 9 時

主持人：柯總工程司燦堂

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	NDSI 影像之極端值既然在空間對位不甚精準，何以能以之判釋地形之差異？同理，以之分析崩塌發生之大致區位，卻未能精確掌握其範圍，何以可判釋其再發之可能？	NDSI 於坡面的空間對位問題在像元-像元尺度上的對位確有顧慮，因此本研究在 NDSI 分析改採分析小集水區單元進行坡面尺度分析，也同時可據此單元分析其內部 NDSI 訊號的紋理，用以偵測坡面的變動。
二	舊有崩塌再發性之條件如何？依據何在？	儘管本研究主要依據 PS-InSAR 分析成果來檢視舊有崩塌坡面的變動性(侵蝕或堆積)，而透過野外調查有本研究歸納幾項可能的條件說明於報告書 P3-17。
三	以 SAR 對就有崩塌地作影像分析，對其再發生理應有其可能性，重點應在其解析能力，影像可考慮增加對崩塌後堆積土石的長期演變，有利於後續的防災應變。	本計畫嘗試進行堆積土石區域的分析，已 ALOS 資料對莫拉克風災後的分系案例顯示，NDSI 在河道上之土石堆積有明顯之反應，顯示其可應用性。
四	如 P31 的圖地震造成地表變形，判釋結果應符合地質作用造成的效應，在整體地形的研判要注意。	謝謝委員建議，本研究在成果判釋上將套疊地形起伏資訊以利地形研判。
五	DinSAR 在美濃地震後的分析結果良好，因為坡度變化不大。	如委員指出，InSAR 技術在平地一般有較良好的分析結果，而在坡面上若要進行驗證，在本計畫之研究其程內較有利之方法乃採取質性描述來進行說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	研究範圍內的地形起伏變化大，如果單用一大幅影像來做全區的地表位移，經常有無法解釋的地區。	本計畫使用 PS-InSAR，為整合多騎 SAR 影像的分析結果，使之避免單一影像進行詮釋而造成偏誤。
七	建議篩選這一系列影像能表達的地方做解釋，不要用一張影像解釋全部的現象。	謝謝委員意見，本研究採重點地區觀察並輔以野外觀察來進行說明。
八	崩塌地再發生，如何去找到那個參考 PS 的點？	PS 永久散射點的選取為影像內之永久固定點，一般可為反射較強的建物或固定地標，坡面的變動則為參考此固定點進行計算。
九	P14 有關 NDSI 的計算結果出現高極端值與低極端值的情況是否受地表崩塌區植生覆育的影響，而影響的程度是否易造成誤判。	NDSI 的極端值主要為較光滑、粗糙度較低之表面形成，且主要與衛星觀測方面及地表結構有關，產生極強或極弱的反射訊號。本研究計算的 NDSI 莫拉克前後 2009 年 7 月 8 日到 8 月 23 日之間的變化，應不為植生復育所造成。
十	Sentinel-1 衛星影像解析度為何？可以研判的崩塌區域最小規模可到達多少？宜於期末報告中補充說明。	謝謝委員建議，Sentinel-1 地面解析度約為 10 公尺，本研究為考慮影像於坡面對位不精確的問題，乃採用以小集水區單元進行坡面尺度分析，最小坡面單元約為 0.1 公頃。
十一	如何由目前研究的成果回饋到崩塌再發性的評估，宜加強說明。	謝謝委員建議，已補充分析方法及說明於現地調查成果。
十二	依目前所取得的 SAR 影像(2007-2017 年)如何評估舊有崩塌再發性？評估方式為何？	儘管本研究主要依據 PS-InSAR 分析成果來檢視舊有崩塌坡面的變動性(侵蝕或堆積)，而透過野外調查有本研究歸納幾項可能的條件說明於報告書 P3-17。
十三	目前 SAR 影像是否與 DEM 資料作驗證？如以 UAV 所製作之 DSM 去做比較，二者尺度差異甚大，是否只能作定性評估？	本研究由於無人機設備以及地面控制點精度，以及僅能產製 DSM，兩者的確難以直接比較，故目前確實是以定性之描述方式來進行比對。

附錄二、 期末審查會議委員建議回覆

開會地點：水土保持局第一會議室

開會時間：106 年 11 月 29 日(星期三)上午 9 時

主持人：柯總工程司燦堂

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	本案屬技術改進之計畫，其應用性仍有待考驗。	謝謝委員意見，本計畫未來將增強其應用性。
二	本案屬新技術開發，確有助於跨域技術整合及將來可能產業應用。	謝謝委員意見，本計畫未來將增強其應用性。
三	本案研究對學術展有很大的空間，值得投入尤其在精度等的精進。	謝謝委員意見，本計畫未來將致力於精度的驗證與改進。
四	在研究完成到可實用的階段，可納入現行規定有助策略擬定。	謝謝委員意見。
五	對於崩塌地復發或擴大、或減少除直接看變化外，應佐以降雨事件或地質條件等進一步的分析。	本計畫未來將嘗試研究樣本，將降雨以及地質條件等因素納入分析。
六	對於崩塌地的變化，建議未來拉長時間來追蹤。	由於本計畫主要使用免費之 Sentinel-1 影像進行試驗，因此可取得使間僅有 2014 年底至今，未來可考慮加入不同影像產品以增加研究時程。
七	本研究應用各種影像來分析，提高技術能量，但在一個小計畫案中建議聚焦仔細分析細節。	謝謝委員意見。
八	成果要能更聚焦在 Sentinel-1 及舊崩塌地評估。	謝謝委員意見，本計畫加強說明於報告書 P3-17。
九	應用 Sentinel-1 技術偵測新舊崩塌區位的作法已於本計畫中得到具體可行的成果，但對於舊有崩塌再發性評估之可行性與否則未見論述。	謝謝委員意見，本計畫加強說明於報告書 P3-17。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十	宜逐漸轉向再發性的評估而減少對於地形判釋的著力。	謝謝委員意見，本計畫加強說明於報告書 P3-17。
十一	倘若 Sentinel-1 的技術可用於舊有崩塌再發生的評估上，且可靠度高，則將有助於崩塌潛勢區劃定的擬訂。	謝謝委員意見。
十二	此技術未來可否應用於集水區土砂生產量之評估，可再加以說明。	本計畫相信在應用 PS-InSAR 時，若能將地面控制點納入，配合 D-InSAR 技術，無須尋求坡面永久散射點時，並使用波長更小的雷達資料時，就技術上則有望對坡面或河(岸)道之土砂移動情形進行監測，從而推算其遞移率及可能產量。
十三	使用 NDSI 紋理變化可判釋新生崩塌、速度與設定上是否合理，可再說明。	本研究計算的 NDSI 莫拉克前後 2009 年 7 月 8 日到 8 月 23 日之間的變化，日期相隔約為一個半月，應不為植生復育所造成，固可相信此紋理變化主要為新生崩塌造成，以補充說明於報告書 P3-8。
十四	相關技術有無可能轉移本局同仁？	可以進行教育訓練以踐行技術轉移。
十五	遙測技術為未來趨勢，期待進一步發展。	謝謝委員意見。
十六	應用 Sentinel-1 合成影像進行舊有崩塌評估，有助於掌控災害潛勢。	謝謝委員意見。
十七	利用 PS-INSAR 其永久散射體選擇為後續解算之關鍵，請說明本研究之選取方法及遭遇之問題。	永久散射體主要為多張 SAR 影像中尋找固定亮點，其亮點即為在各影像中高相關性的點位。由於崩塌坡面可能有較高的變動性，本研究在選取永久散射點時進行檢視，主要選取不會移動之建物或地標。而崩塌地坡面(或地表其他位置)之位移解算則是依照 D-InSAR 方法進行計算，之後再計算坡面與永久散射點之相對位移。此方法以補充說明於報告書 P3-10。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十八	連續性之雷達影像觀測建議本研究可提供長期時間之崩塌變化情形，以了解其時間序列變化，並進行分析與說明。	由於本計畫主要使用免費之 Sentinel-1 影像進行試驗，因此可取得使間僅有 2014 年底至今，未來可考慮加入不同影像產品以增加研究時程。

附錄三、 實地查核會議紀錄暨回覆辦理情形

開會地點：國立中央大學

開會時間：106 年 11 月 4 日(星期二)下午 1 時

主持人：連主任秘書榮吉(兼任領隊)

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	經查，部分科目流入數額達原預算數額 20%，流出數額達原預算數額 30%；依據「行政院農業委員會主管計畫經費處理作業規定」第 13 條規定應辦理變更預算事宜。	執行單位將配合辦理。
二	於細部計畫報告書核定本內，已表列購買日本衛星影像 6 幅，共 72,000 元尚未核銷，請盡快辦理。	執行單位將配合辦理。
三	建議可應用本計畫技術進行 153 處大規模崩塌及水庫集水區崩塌再發性評估。	感謝委員建議。
四	建議以量化方式比較不同影像之辨識方法(如利用航空正射影像、雷達影像、UAV 影像等)。	感謝委員建議。
五	於計畫內除使用 Sentinel-1 之雷達影像，亦採用 ALOS 衛星影像之目的？	因莫拉事件發生時間為 2009 年 8 月，故往前追溯使用 ALOS 雷達影像(2008-2011 年)與 Sentinel-1 雷達影像(2014 年至今)。衛星影像之管理方式主要為由本中心接收站之影像倉儲進行收集並編列目錄。
六	計畫書中所提期刊發表，是否已進行？	去年計畫成果已發表，而今年的初步成果已於研討會發表。
七	於計畫內使用之坡面單元切分方法為何？	本計畫使用數值地形模型，於 ArcGIS 軟體的水文分析模組進行小集水區的萃取，成果的最小單元約為 0.1 公頃。此集水區單元可繼續供給其他雷達影像資料，應用於坡面的訊號紋理的分析，因此未來可供相關的研究繼續使用。

附錄四、 PS-InSAR 分析使用之 Sentinel-1 雷達衛星資料表

拍攝日期	影像編號	垂直基線 (公尺)
2014/10/22	S1A_IW_SLC__1SSV_20141105T215216_20141105T215251_003152_0039F8_FE73	0
2015/1/14	S1A_IW_SLC__1SSV_20150114T100019_20150114T100049_004166_0050D6_E5CA	-20.87
2015/5/2	S1A_IW_SLC__1SSV_20150502T100021_20150502T100050_005741_0075EF_3DBC	-105.98
2015/7/13	S1A_IW_SLC__1SDV_20150713T100024_20150713T100054_006791_009211_A48D	4.11
2015/10/29	S1A_IW_SLC__1SDV_20151029T100027_20151029T100057_008366_00BCF8_8F41	30.71
2016/2/2	S1A_IW_SLC__1SDV_20160202T100019_20160202T100049_009766_00E469_0A1E	-25.44
2016/4/14	S1A_IW_SLC__1SDV_20160414T100020_20160414T100050_010816_0102D1_695B	-96.35
2016/7/19	S1A_IW_SLC__1SDV_20160719T100025_20160719T100055_012216_012F6C_1DDE	-1.08
2016/11/4	S1A_IW_SLC__1SDV_20161104T100028_20161104T100058_013791_016281_AAD9	-55.25
2017/1/27	S1A_IW_SLC__1SDV_20170127T100025_20170127T100055_015016_018875_8ED9	-24.86
2017/3/28	S1A_IW_SLC__1SDV_20170328T100022_20170328T100052_015891_01A318_14D2	-16.01
2017/7/26	S1A_IW_SLC__1SDV_20170726T100029_20170726T100059_017641_01D877_C432	-21.95
2017/10/6	S1A_IW_SLC__1SDV_20171006T100032_20171006T100101_018691_01F888_5922	6.39
2014/11/5	S1A_IW_SLC__1SSV_20141105T215216_20141105T215251_003152_0039F8_FE73	0
2015/1/16	S1A_IW_SLC__1SDV_20150116T215214_20150116T215249_004202_0051A6_1FE0	-54.98
2015/5/16	S1A_IW_SLC__1SDV_20150516T215216_20150516T215251_005952_007AB4_AEC9	8.51
2015/8/20	S1A_IW_SLC__1SDV_20150820T215221_20150820T215256_007352_00A198_E029	24.94
2015/10/31	S1A_IW_SLC__1SDV_20151031T215222_20151031T215258_008402_00BDE5_2A9E	41.16
2016/2/16	S1A_IW_SLC__1SDV_20160216T215208_20160216T215236_009977_00EA91_3CE5	-21.38
2016/5/10	S1A_IW_SLC__1SDV_20160510T215219_20160510T215255_011202_010ED4_A44D	-1.83
2016/8/14	S1A_IW_SLC__1SDV_20160814T215225_20160814T215300_012602_013C26_FBF2	5.27
2016/10/25	S1A_IW_SLC__1SDV_20161025T215226_20161025T215302_013652_015E26_5DCF	22.53
2017/1/5	S1A_IW_SLC__1SDV_20170105T215223_20170105T215259_014702_017EC6_23C2	-46.69
2017/4/23	S1A_IW_SLC__1SDV_20170423T215224_20170423T215259_016277_01AECA_2D9F	27.51
2017/7/28	S1A_IW_SLC__1SDV_20170728T215229_20170728T215305_017677_01D988_6A8C	6.22
2017/11/1	S1A_IW_SLC__1SDV_20171101T215232_20171101T215308_019077_02044B_0580	35.45

參考書目

壹、圖書：

Hooper, A.; Zebker, H.A.; Segall, P.; Kampes, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31, L23611.

Hopper, A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 35, L16302.

Samia, J.; Temme, A.; Bregt, A. Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. *Landslides*. 2016, doi:10.1007/s10346-016-0739-x

貳、研究報告：

中央地質調查所（2012）20160206 地震地質調查報告。

陳柔妃等（2015）運用雷達影像進行莫拉克颱風災區大規模潛勢區位之可行性評估，經濟部農委會水土保持局，計畫編號：SWCB-104-069。

參、期刊：

王國隆、林俊廷（2014）運用ALOS PALSAR雷達影像之差分干涉成果於潛在崩塌地調查—以眉溪流域為例，*航測及遙測學刊*，19(3)：253-265。

許家銘、陳宏宇（2012）濁口溪流域的地表作用與曲流地形間之相對應關係，*中華水土保持學報*，43(3)：227-238。

Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, 40, 2375–2383.

Bovenga, F.; Wasowski, J.; Nitti, D.O.; Nutricato, R.; Chiaradia, M.T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sens. Environ.* 2012, 119, 272–285.

Colesanti, C.; Wasowski, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 2006, 88, 173–199.

Covello, F.; Battazza, F.; Coletta, A.; Lopinto, E.; Fiorentino, C.; Pietranera, L.; Valentini, G.; Zoffoli, S. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth. *J. Geodyn.* 2010, 49, 171–180.

Crosetto, M.; Monserrat, O.; Iglesias, R.; Crippa, B. Persistent scatterer interferometry: Potential, limits and initial C-and X-band comparison. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2010, 76, 1061–1069.

Ferretti, A.; Fumagalli, A.; Novali, F.; Prati, C.; Rocca, F.; Rucci, A. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR™. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, 49, 1–11.

Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. 38, 2202–2212.

Raspini, F.; Moretti, S.; Fumagalli, A.; Rucci, A.; Novali, F.; Ferretti, A.; Prati, C.; Casagli, N. The COSMO-SkyMed constellation monitors the Costa Concordia wreck. *Remote Sens.* 2014, 6, 3988–4002.

肆、會議論文：

Furuta, R., Tomiyama, N., A Study of Detection of Landslide Disasters due to the Pakistan Earthquake using ALOS data, 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia, April 10-15, 2011.

伍、網路資源：

EAS Sentinel 1 web: <https://sentinel.esa.int/>

StaMPS v3.1 [http://www.hi.is/~aHopper et al./stamps/index.html](http://www.hi.is/~aHopper%20et%20al./stamps/index.html)