
精進雷達衛星 InSAR 技術於河道侵
淤高程變化測量

Advanced InSAR technique for
monitoring river morphological changes

執行 單位：國立中央大學

執行 期間：111 年 01 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：姜壽浩 中央大學太空及遙測研究中心 副教授

研究 人員：姚柏成

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 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)

摘要

台灣山區崩塌、土石流以及河岸侵蝕等造成之輸砂往往成為集水區管理之重大問題，山區野溪因不易到達且河道土砂變化快，本計畫提出一基於雷達衛星影像之方法，產製不同時期之數值地形資料，能即時、快速進行河川裸露面侵淤之監測。本研究於 110 年期創新研究計畫「應用雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性研究」中，主要為透過影像資料品質篩選的方法建立較為可靠的高程測量結果，結果則有可選擇應用之影像對較少，時間解析度受限的問題，且高程量測成果則建議較適用於有明顯變動的侵淤變化事件(大於 10 公尺)，本研究為增進雷達資料的應用價值，基於前期計畫之成果，引入機器學習技術整合地面控制點與雷達觀測資訊，提出一校正 InSAR 高程測量之方法，藉以縮小觀測誤差，以提升高程量測之精度。本計畫研究區為荖濃溪上游，根據上述方法產製過去 2015 至 2022 年間之河道高程資料，其 RMSE 約在 0.89 至 1.54 公尺之間，而於研究區寶來與復興兩河段比對空拍機產製之高程資料，發現若用 1.5 倍標準差、標準差以 2 公尺作為精度參考，其成果之高程測量精度約為 3 公尺，相比於 110 年度之成果，有明顯改善。總結應用本計畫提出之方法，可針對河道於上游裸露區域，針對高程變化 3 公尺以上之地貌進行監測，也就是說較適用於如暴雨、河岸崩塌、土石沖刷等能快速、明顯改變河道地貌之事件。相信本計畫提出之精進 InSAR 高程測量方法，對於集水區管理及土砂災害之防治能有相當的助益。

關鍵詞：河道侵淤監測、合成孔徑雷達、高程測量、InSAR、機器學習

ABSTRACT

In recent years, Synthetic Aperture Radar (SAR) has become a suitable tool for detecting disasters in cloudy and rainy weather. This study aims to evaluate the capability of applying radar imagery to monitor river morphological changes, for a long-term, continuous hillslope monitoring task. Elevation measurements before and after wet seasons were generated using InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique. However, measurement accuracy is an important issue when applied to monitoring morphological changes. Results obtained by our 2021 SWCB project show that the InSAR is suitable for monitoring significant morphological changes (>10 m). This study focuses on advancing the accuracy of elevation measurement by analyzing possible error sources using machine learning. The temporal InSAR elevations in the study area, the Laonung River, from 2015 to 2022 derived by the prospered method, achieve the RMSE of 0.89-1.54 m. Also, an accuracy of 3 m estimated by comparing the UAV-DSM in two river reaches suggests the applicability of the proposed method may be limited to monitoring river morphological changes due to significant erosion processes, such as landslides and floods. Overall, the proposed method is expected to serve as a part of a rapid response system of hazard monitoring when optical data is not available.

Keywords: River morphological monitoring, Synthetic Aperture Radar, Elevation measurement, InSAR, Machine learning

目次

摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 緒論.....	1-1
第一節 研究背景與目的	1-1
第二節 工作進度與交付項目	1-3
第二章 研究區與研究方法	2-1
第一節 研究區與汛期降雨事件	2-1
第二節 研究方法	2-4
第三章 研究資料	3-1
第一節 地面控制點與空拍資料	3-1
第二節 雷達影像資料應用	3-6
第四章 高程誤差校正模式	4-1
第一節 模式設計與架構	4-1
第二節 模式試驗	4-2
第三節 高程校正成果與驗證	4-6
第五章 河道高程與侵淤變化監測	5-1
第一節 多時序河道高程	5-1
第二節 河道侵淤變化	5-8
第三節 2021 年盧碧颱風侵淤變化驗證	5-12
第四節 InSAR 技術於河道侵淤監測之應用問題	5-17
第六章 結論與建議	6-1

參考文獻.....	參-1
附錄一、地面控制點測量成果	附-1
附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-4
附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-9
附錄四、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-13

表次

表 3-1 研究區內衛星追蹤站暨基本控制點資料來源	3-2
表 3-2 無人機空拍資料說明	3-3
表 3-3 INSAR 使用之 SENTINL-1 影像列表	3-8
表 4-1 INSAR 高程校正前後誤差統計	4-8
表 5-1 INSAR 使用之 SENTINL-1 影像列表	5-7
表 5-2 2018 至 2021 年河道侵淤測量成果	5-9
表 5-3 無人機 DSM 與 INSAR 高程變化測量比對	5-15
表 5-4 無人機 DSM 與 INSAR 河道侵淤變化比對	5-16

圖次

圖 2-1 研究區 SPOT 衛星影像(A)寶來河段(B)復興河段.....	2-2
圖 2-2 研究區復興河段 8 月 7 日降雨事件後現況.....	2-3
圖 2-3 隨機森林作用原理示意圖	2-9
圖 2-4 利用空拍資料建構寶來地區河道與鄰近邊坡之立體模型...	2-10
圖 3-1 無人機空拍調查位置	3-3
圖 3-2 空拍正射影像.....	3-4
圖 3-3 空拍建置 DSM.....	3-5
圖 3-4 INSAR 雷達影像對同調性 COHERENCE 分布情形圖	3-7
圖 3-5 寶來以及復興河段同調性分布情形	3-7
圖 4-1 隨機森林高程誤差校正模式架構	4-2
圖 4-2 內政部 5 公尺數值地形模型	4-3
圖 4-3 試驗影像(VV)同調性分布	4-4
圖 4-4 精度校正試驗	4-5
圖 4-5 RMSE 與控制點數量關係圖.....	4-6
圖 4-6 研究區 INSAR 高程校正初步成果	4-7
圖 5-1 地面控制點(56 點)分布情形.....	5-1
圖 5-2 寶來河段 16 個不同時期之校正 INSAR 高程分布情形	5-4
圖 5-3 復興河段 16 個不同時期之校正 INSAR 高程分布情形	5-6
圖 5-3 2018 年至 2021 年河道侵蝕分布圖	5-11
圖 5-4 2021 年寶來河段汛期前後無人機、INSAR 高程對照圖	5-13
圖 5-5 2021 年復興河段汛期前後無人機、INSAR 高程對照圖	5-14
圖 5-6 2021 年復興河段盧碧颱風前後河道侵蝕變化比較	5-15

第一章 緒論

第一節 研究背景與目的

台灣山區崩塌、土石流以及河岸侵蝕等造成之輸砂往往成為集水區管理之重大問題，山區野溪因不易到達且河道土砂變化快，本計畫提出一基於雷達衛星影像之方法，進行不同時期之高程測量工作，能即時、快速進行河川裸露面侵淤之監測。

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(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。運用雷達影像可用於監測地表變形，其方法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)、PS-InSAR(永久散射體差分干涉技術，Persistent Scatterers InSAR)等方法(Hopper et al., 2004)。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)。另外則是利用差分干涉結果中所含的地形干涉相位 (Topographic Interferometric Phase) 資訊來計算地表高程，並建置數值高程模型(吳彥誼等，2020)，利用不同時期建立之

DEM來計算地表變形量。

使用 InSAR 技術進行高程測量有許多先天性的優勢，相較於光學衛星，雷達影像的取得不受日夜及天氣的影響；相較於地測或光達，較無人力需求的考量且不耗費時間與金錢來取得，可在較短時間取得大面積的影像(吳彥誼等，2020)。

本研究於110年期創新研究計畫「應用雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性研究」中，主要為透過影像資料品質篩選的方法，利用InSAR技術建立較為可靠的高程測量結果，結果則有可選擇應用之影像對較少，時間解析度受限的問題，且高程量測成果則建議較適用於有明顯變動的侵淤變化事件(大於10公尺)，如強降雨導致之土石流事件。本研究為增進雷達資料的應用價值，本計畫則將基於前期計畫之成果，針對導致InSAR高程測量之誤差來源進行分析，本計畫使用C band的Sentinel-1以及L-band的ALOS-2/PALSAR-2，且引入機器學習技術嘗試縮小觀測誤差，以提升高程量測之精度，提高河川高程變化測量之精度。

本研究計畫針對2021年8月3日侵台之盧碧颱風為研究事件，該颱風於台灣本島中南部帶來超大豪雨，8月7日至9日連續三日中南部的降雨量高達800至1,200 mm，農業損失約4.3億(中央氣象局，2021)。選定研究區內復興地區河段，明霸克露橋遭到暴雨引發的土石流沖毀

(圖2-2a)，玉穗溪有大量土石堆積(圖2-2b)。2021年期間本研究利用空拍機建置汛期前後之數值地形。本計畫將針對研究區選定河道區段持續進行無人機拍攝並產製高解析度數值地形模型作為成果驗證之用，以評估雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性，對我國崩塌災害管理與減災措施能有具體貢獻。

第二節 工作進度與交付項目

本計畫主要工作項目為：(1)雷達影像收集與資料前處理、(2)雷達干涉方法產製DEM、(3)高程計算誤差分析以及(4)精進InSAR高程資料方法。上述工作項目均按進度順利完成。計畫之交付成果則為提出一精進InSAR高程測量方法，可應用於河道侵淤高程變化測量。

第二章 研究區與研究方法

第一節 研究區與汛期降雨事件

一、研究區概況

本計畫選定台灣南部荖濃溪上游南橫公路復興至寶來一帶河岸沿線作為研究區(圖2-1)，該區內兩岸多處崩塌、河道蜿蜒，地形高度落差大，大致由東北向西南遞減。研究區高程分布於250~2,500公尺之間，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公厘，雨量集中於5~10月間，佔全年90%，季節性豐枯明顯。研究區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%。在2009年莫拉克颱風期間，本研究區內發生多處崩塌，傳出許多嚴重之土石流災情，並於河道內造成大量砂石堆積，寶來一帶河道有堆高情形，且復興一帶由於大型崩塌持續堆積形成堰塞湖，河段由堆積造成之高程變動情形明顯，適合作為本研究之試驗區，以檢視雷達技術進行高程測量之可行性。



圖 2-1 研究區 SPOT 衛星影像(A)寶來河段(B)復興河段

二、8 月 7 日降雨事件

盧碧颱風 2021 年 8 月 3 日 8 時於南海北部海面生成後向東移動，於 8 月 5 日侵台，5 日午間於廣東沿海登陸後減弱為熱帶性低氣壓，隨後受西南氣流影響，台灣本島中南部發生超大豪雨，8 月 7 日至 9 日連續三日中南部的降雨量高達 800 至 1,200 mm，農業損失約 4.3 億 (中央氣象局，2021)。研究區內復興地區河段，明霸克露橋遭到暴雨引發的土石流沖毀(圖 2-2a)，玉穗溪有大量土石堆積(圖 2-2b)。本研究利用雷達影像分析技術監測該區域河道侵淤狀況，並以空拍機建置之數值地形資料檢視雷達監測成果之正確性。



圖 2-2 研究區復興河段 8 月 7 日降雨事件後現況。a)明霸克露橋毀壞後施工狀況，b)玉穗溪河床大量土石堆積情形(照片於 2021 年 10 月 24 日拍攝)

第二節 研究方法

一、雷達影像資料

本研究選用之雷達影像 Sentinel-1，為歐洲太空總署 (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(Sentinel-1A 及 Sentinel-1B)，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。Sentinel-1 搭載四個不同的感測器：Stripmap Mode, Interferometric Wide Swath Mode, Extra Wide Swath Mode, Wave Mode。各模式影像可於歐洲太空總署網站免費下載，臺灣地區可取得 VV 和 VH 極化影像。Sentinel-1 於 2014 年升空後，便開始對地球的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，本研究在 DEM 的產製作業上乃是使用 IW mode 產品。

二、雷達干涉方法進行高程測量與影像篩選

本研究使用合成孔徑雷達干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技術可以利用雷達資料的相位資訊來產製數值高程模型(DEM, Digital Elevation Model)，其原理為解算兩不同時期之干涉相位(interferometric phase) ψ ，並解析各項因素造成的干涉相位貢獻，包含數值高程(DEM)、大地基準(flat)、地形位移變形(displacement)、大氣效應(atmosphere)以及其他雜訊干擾(noise)，可以下式表之：

$$\phi = \phi_{\text{DEM}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}}$$

$$\left[-\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta} \right] \left[-\frac{\Delta q}{\sin \theta} \cdot \frac{B_n}{R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \right] \left[+\frac{4\pi}{\lambda} d \right] \quad (1)$$

其中 DEM 與 flat 的部分即為因地形表面起伏造成之干涉相位貢獻，因此，在假設地形位移變形(displacement)、大氣效應(atmosphere)以及其他雜訊干擾可以忽略的前提下，由地形高程貢獻之相位差可由下式表之：

$$\phi_{\text{DEM}} = \phi - \phi_{\text{flat}} - \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2)$$

在操作上，使用雷達資料需要兩時期之影像有較高的同調性(coherence)，而 EAS 針對此問題有下列建議可作為本研究進行雷達資料選取時的參考 (DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges, EAS, 2020)：

- 選取時間較為相近影像資料，可降低時間去相關性(temporal

decorrelation)問題，並較能確保由地形位移變形造成之相位差為可忽略的部分。

- 選取較適合之衛星觀測垂直基線(perpendicular baseline)：150m 到 300m 之間，其理由為若兩期影像之基線過短，則解算之相位差分干涉可能不足以表現出由地形造成之貢獻；反之，若基線過長則可能導致較大的去相關性(decorrelation)，同樣不利於 DEM 產製。
- 選取合適的大氣條件所取得之影像，其理由為大氣中的水氣有可能對訊號的相位產生影響，導致干涉相位的解算偏誤，因此建議選取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣狀況取下得之影像。

本研究使用 ESA-Snap 以及 Snaphu 軟體進行合成孔徑雷達干涉(InSAR)分析、以及相位解纏(unwrapping)來產製 DEM，其步驟包含影像對位(coristration)、干涉圖解算(interferogram)、去訊號重合高值(deburst)、取子集(subset)、影像濾波(filtering)、相位解纏(unwrapping)、相位轉高程(phase to elevation)與距離-都卜勒校正(range-doppler correction)等步驟。

三、機器學習技術—隨機森林(Random Forest)

本次研究選擇以隨機森林模型來關聯各項可能影響 InSAR 高程測量的參數，包含大氣、輻射、地形等參數，並分析各因子對測量誤差之貢獻。具體來說，便是以上述各項因子為基礎，機器學習對象則為 InSAR 測量之誤差。隨機森林是一種機器學習方法，其原理為根據決策樹(Decision Tree)演算法延伸而成。決策樹是使用樹狀結構處理分類問題的分析法，將資料依照不同的因子條件分類到對應的子集合，決策的起點為樹的根(root)，從根開始生長，以不同的分類特徵因子做為決策樹的節點，將資料進行二元分類，樹會持續分枝直到達到自訂的終止條件，並計算分類後兩個子集合資料的亂度(Entropy)或是不純度(Impurity)評估選擇的因子是否能提供最佳的分類結果，若分類後的資料一致性高，其亂度會呈現越低，得到的模擬成果越佳。為了避免模式僅反應出訓練資料的局部特徵而無法應用在其他資料的過度擬合現象(Overfitting)，決策樹演算法會修剪掉不穩定或是多餘的分支，常見的修剪包含事前修剪(Pre-pruning)與事後修剪(Post-pruning)，避免樹生長過多複雜分支影響模式精度。而隨機森林模型因為隨機的挑選訓練樣本和分類參數來產生許多決策樹模型進行分類模擬而命名，其操作包含以下幾個步驟(圖 2-3)：

- 確認訓練資料的數量為 n 個，而每筆資料皆有 m 個分類特徵

因子。

- 使用拔靴法(Bootstrap)，從訓練資料隨機抽樣出要放入模型進行訓練的資料(training data)，以增加每顆決策樹的差異性。沒有被抽到的資料稱之為袋外資料(out of bag)，通常會有三分之一的訓練資料沒有被抽到，可作為後面檢驗模式正確性的驗證資料(testing data)。
- 決定要生成的決策樹總數量(ntry)，而每一個要生長決策樹的抽樣訓練資料隨機的挑選出 mtry 個分類特徵因子作為分支的節點，本次研究每個決策樹會隨機選出 $\sqrt{m}$ 個因子，不斷產出決策樹直到達到設定的樹木總量。
- 隨機森林的最後成果會根據每一顆決策樹的結果做計算，若應變數為連續型資料，成果將以所有樹木的結果取平均值作為預測成果；若應變數為類別型資料，最終成果則是根據決策樹的成果進行統計，出現最多次的數值為預測成果。
- 在產生每顆決策樹的過程，隨機森林會計算選取的因子是否有降低整體模式的不純度(Gini Impurity)，以及模式若移除該因子對整體模式的精度影響的程度，計算出各個因子的重要性。
- 以沒有被抽樣的資料進行模式的精度檢驗，將驗證資料輸入

模式後與地真資料進行比對，常見的模式表現衡量指標為產生出誤差矩陣(confusion matrix)，計算其整體精度(Overall Accuracy, OA)、Kappa 係數或接收者操作特徵曲線(Receiver Operating Characteristics, ROC)下的面積(Area Under Curve, AUC)作為檢驗隨機森林學習成果的評估指標。

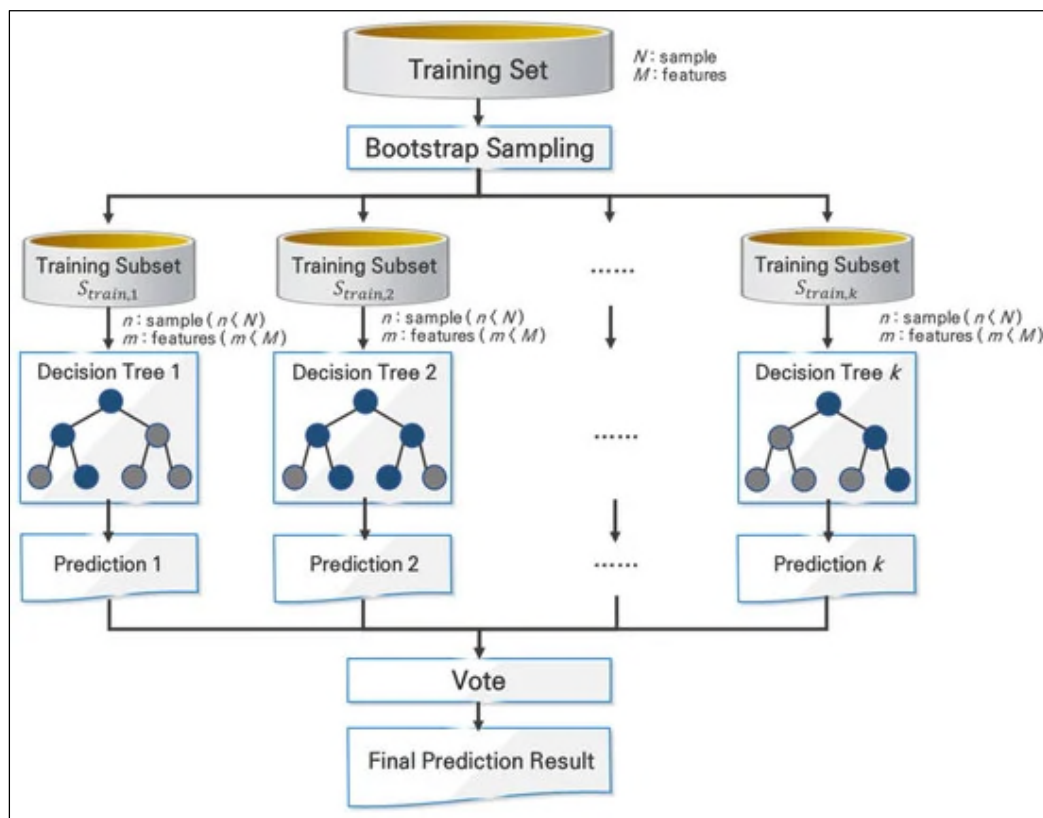


圖 2-3 隨機森林作用原理示意圖

四、成果驗證—無人機拍攝與數值地形產制

本計畫將採用電腦視覺技術 SFM(structure from motion)，使用無人機拍攝之影像來建構地表三維資料，再以三維資料為基礎產生地表數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)，本研究取得過去 2021 年於研究區內之拍攝之正射影像與 DSM 資料進行成果驗證。其資料來源資度為空間解析度可達 0.5 米，高程誤差 2 米。圖 2-4 為研究區寶來河段，利用正射影像套疊 DSM 之立體模型，有助於河道侵淤之計算與現況的研判。後續本計畫將使用此高解析度數值地形模型作為成果驗證之用，其目的乃是藉由比較雷達與無人機產製之數值地形模型，以評估雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性。



圖 2-4 利用空拍資料建構寶來地區河道與鄰近邊坡之立體模型

第三章 研究資料

第一節 地面控制點與空拍資料

1. 地面控制點測量

本計畫已於前期 110 年度創新計畫「應用雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性研究」中完成 Snetinel-1 資料於盧碧颱風事件前後之 InSAR 高程測量，為驗證測量成果並檢驗其精度，本研究於研究區內於較無變動疑慮之人工結構物鄰近區域進行地面控制點測量，完成 50 個點位測量(附錄一)，其水平精度約在 0.71 公分至 1.12 公分之間，高程精度則為 1.16 至 1.87 公分之間，可直接用於本計畫檢核高程測量成果。

此外，本研究也檢視我國內政部國土測繪中心之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>)進行地面控制點之查詢，並進行資料收集(表 3-1)。

表 3-1 研究區內衛星追蹤站暨基本控制點資料來源

公告類	點名	點號	縱坐標	橫坐標	橢球高
一等衛星控制點 (GNSS 連續站)	那瑪夏	MAYA	2570931	218967.789	608.343
一等衛星控制點	三民國中	S927	2570829	218985.653	593.421
三等衛星控制點	民族	SZ57	2568621	218637.136	581.204
三等衛星控制點	寶來梅子園	SZ15	2555733	222667.066	1122.6
三等衛星控制點	寶來國小	SZ58	2556359	219414.76	427.344
一等衛星控制點 (GNSS 連續站)	寶來	PAOL	2556342	219564.832	431.597

2. 盧碧颱風事件前後空拍資料

本研究於前期 110 年期計畫執行時於汛期前 5 月 4 日以及汛期後 8 月 24 日分別至研究區內復興至寶來一帶荖濃溪沿岸的崩塌地進行無人機拍攝，選取地點為利於無人機操作進行空拍，因此選擇兩處鄰近河道之大型崩塌地，監測此兩處大型崩塌對河道造成侵淤的情況。本計畫空拍日期整理於表 3-2，無人機拍攝位置如圖 3-1 所示，空拍正射影像如圖 3-2 所示。

另外，由無人機拍攝資料建置之數值地表模式(Digital Surface Model, DSM)可見圖 3-3，其中包含水保局提供之 8 月 11 日無人機產

製之數值高程資料，上述之無人機建置之 DSM 之空間解析度均為 0.5 公尺。

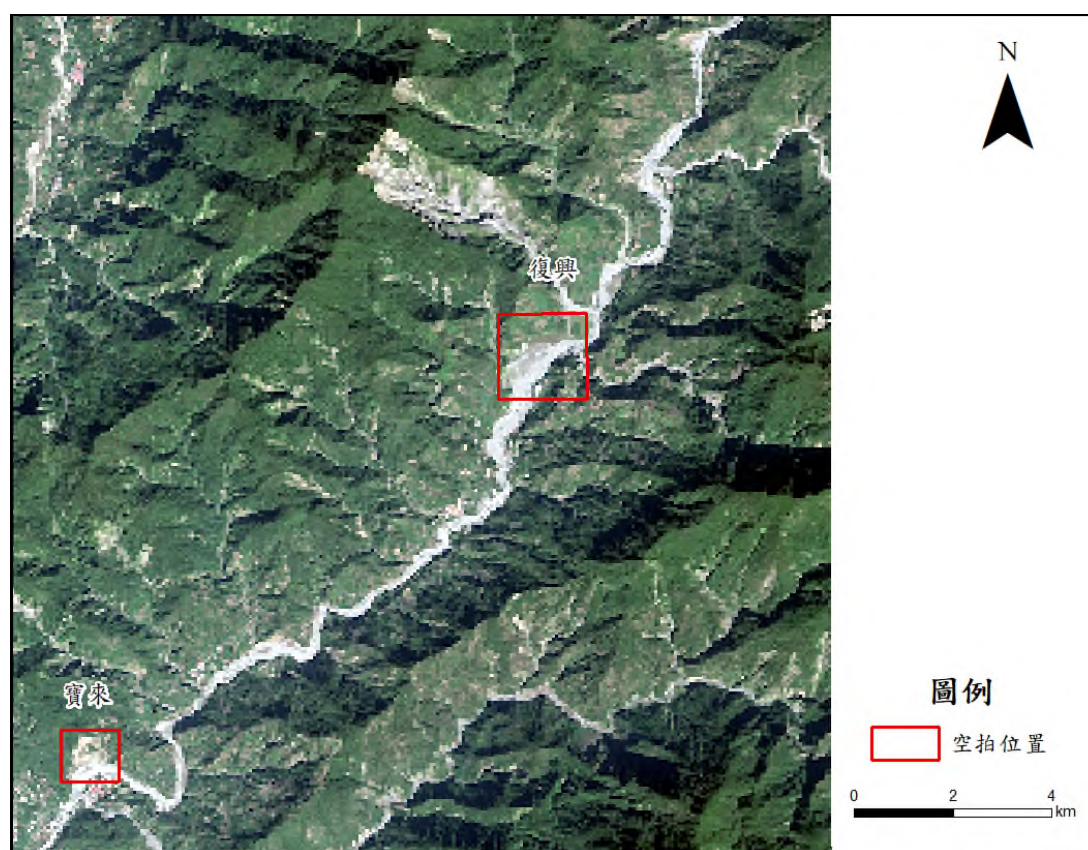


圖 3-1 無人機空拍調查位置

表 3-2 無人機空拍資料說明

日期	編號	空拍位置	備註
2021/03/11	a	寶來	
2021/03/11	b	復興	
2021/08/24	c	寶來	
2021/08/11	d	復興	水保局提供資料

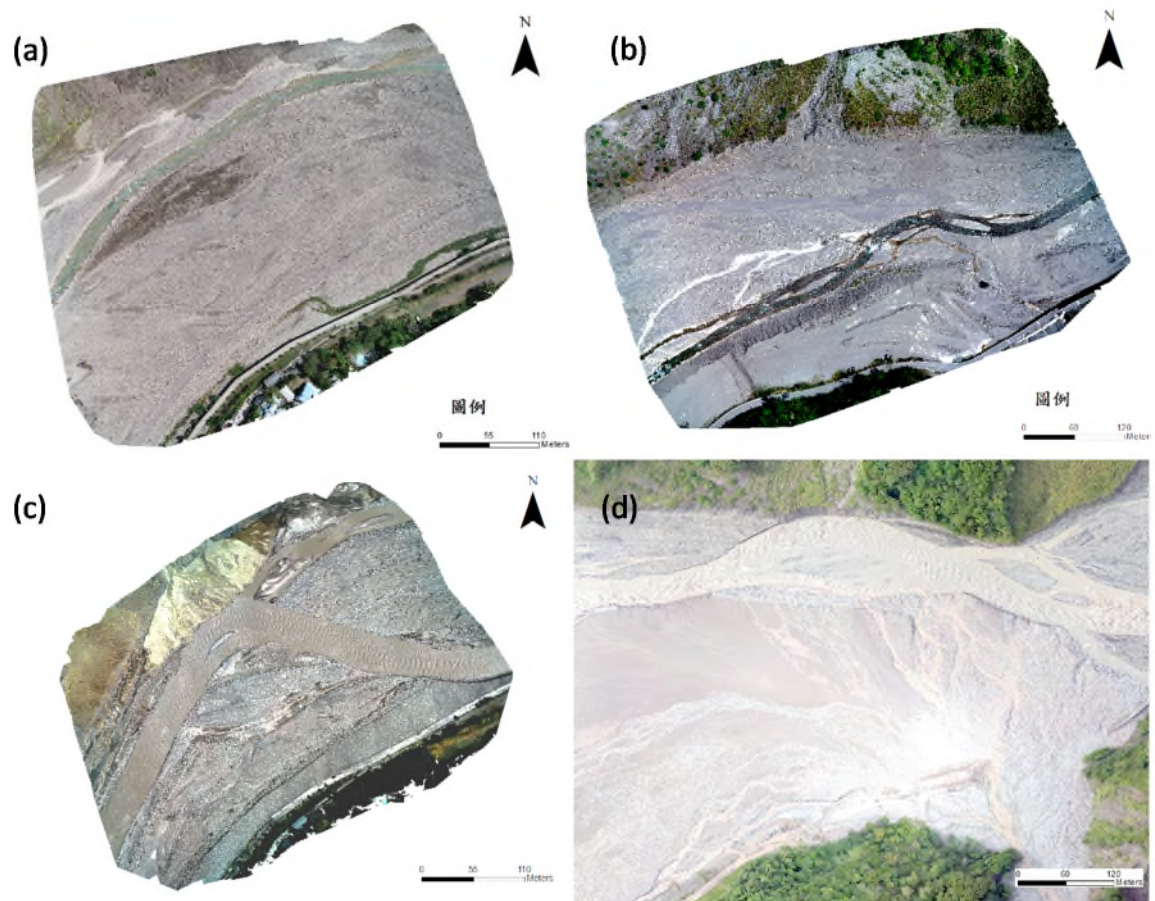


圖 3-2 空拍正射影像(a)汛期前寶來地區，(b)汛期前復興地區，(c)汛期後寶來地區，(d)汛期後復興地區(水保局提供)

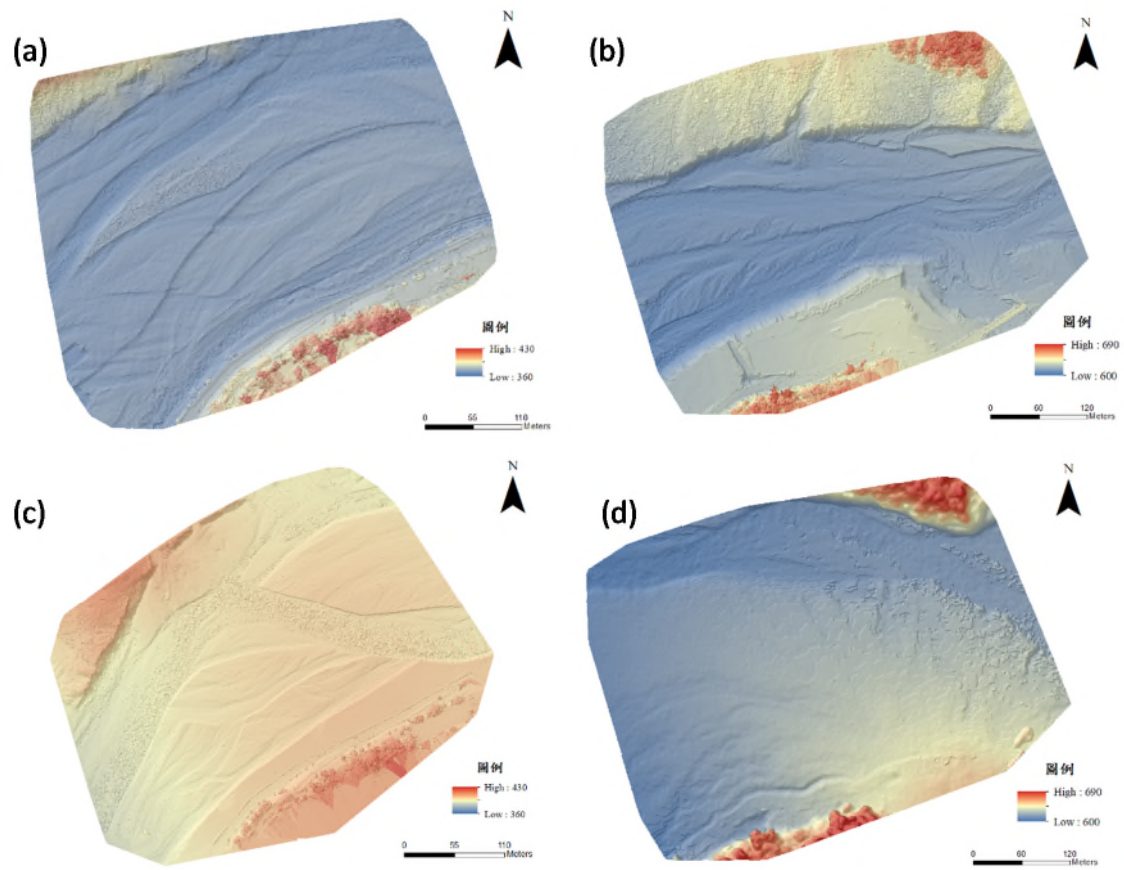


圖 3-3 空拍建置 DSM (a)汛期前寶來地區，(b)汛期前復興地區，(c) 汛期後寶來地區，(d)汛期後復興地區

第二節 雷達影像資料應用

本研究使用雷達資料需要兩時期之影像有較高的同調性(coherence)，本研究將選取時間較為相近影像資料、選取較適合之衛星觀測垂直基線(perpendicular baseline)，約為 150m 到 300m 之間，首先本研究匹配 Sentinel-1 雷達影像於研究區之拍攝日期，並確立進行 DInSAR 分析之影像對之時間間隔為兩個月以內，同時比對兩期影像間之觀測垂直基線是否介於 150-300 公尺之間，若符合上述所有條件即為本次研究選取可使用於 InSAR 分析之雷達影像。

InSAR 分析中，匹配影像的同調性(coherence)為相當關鍵的影響因素，在進行 InSAR 分析前，本計畫先行檢視不同極化觀測資料(VV 極化與 VH 極化資料)的同調性差異。首先，如圖 3-4 所示，高同調性的點位主要出現在地表的裸露面上，如河道、崩塌面、地表人工建物等地，特別是河道上的裸露面有較多的高同調性點位。另外，圖 3-4a 與圖 3-4b 分別顯示了 VH 以及 VV 之極化資料差異，就同調性問題上，VV 極化的雷達影像對有較佳的同調性，具有較多的高同調性匹配點位，較適合進行本研究進行高程量測。

圖 3-5 為高同調性點位($\text{coherence} \geq 0.7$)於寶來以及復興河段的分布情形，同樣也顯示出了 VV 極化資料有較多高同調性的點位，因此，本研究後續進行 InSAR 分析時，將使用 VV 極化資料進行分析。

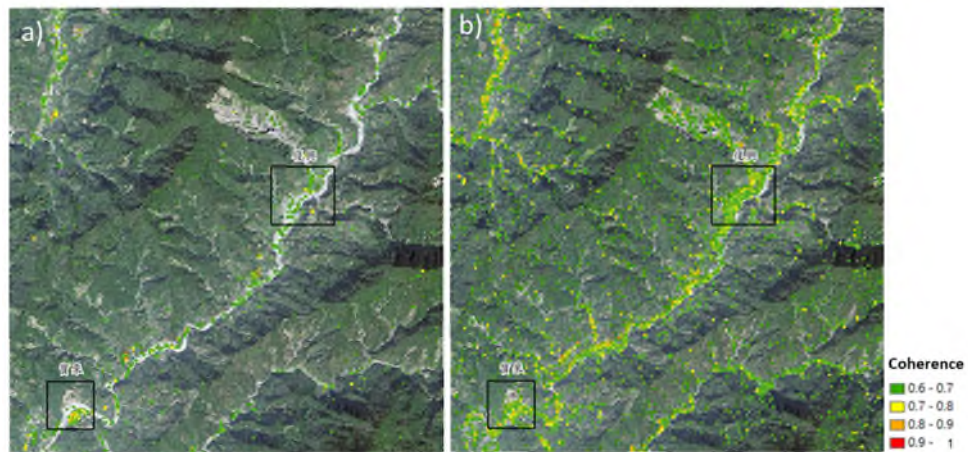


圖 3-4 InSAR 雷達影像對同調性 Coherence 分布情形圖，(a)VH 極化資料，(b)VV 極化資料。

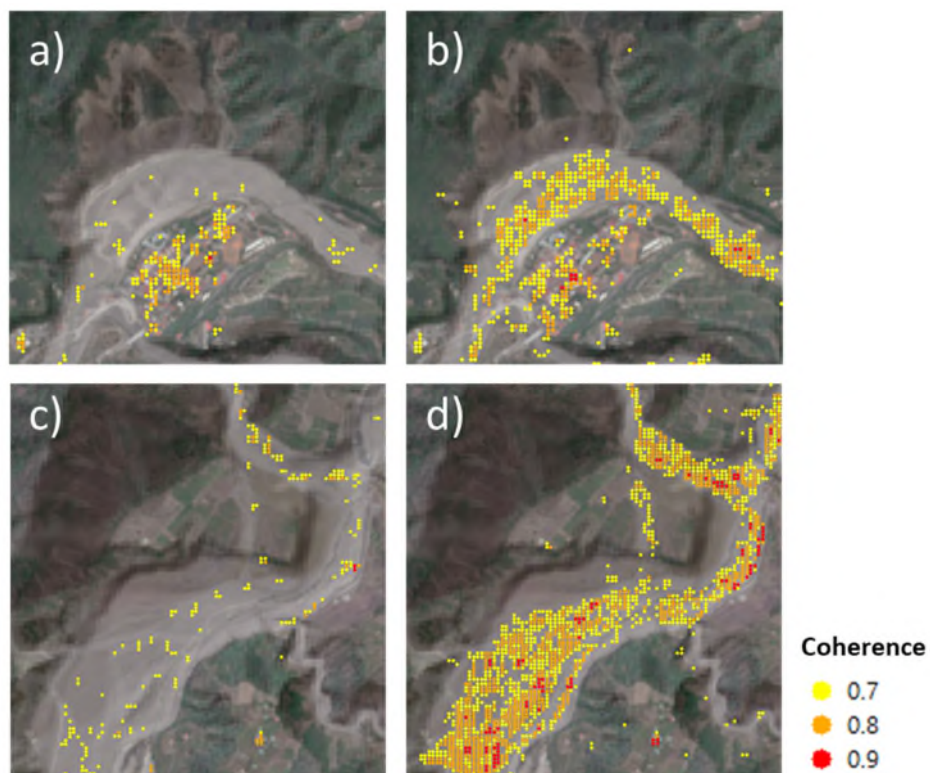


圖 3-5 寶來以及復興河段同調性分布情形。(a)為寶來河段 VH 極化資料，(b) 寶來河段 VV 極化資料，(c) 復興河段 VH 極化資料，(d) 復興河段 VV 極化資料。

最後，本研究選取出 32 幅共 16 對影像組合，並列出拍攝當天之天候狀況，整理如表 3-3。

表 3-3 InSAR 使用之 Sentinel-1 影像列表

年份	模式	前期影像	氣候條件	後期影像	氣候條件	垂直基線差 (m)
2015	Descending	04/23	有雲	05/17	無雲無雨	240
	Ascending	10/17	無雲無雨	11/10	無雲無雨	167
	Ascending	11/10	無雲無雨	12/04	有雲	151
2018	Descending	02/17	無雲無雨	03/25	無雲無雨	158
	Ascending	08/08	降雨 1mm	08/20	降雨 5mm	165
2019	Descending	06/01	降雨 8.5mm	06/13	降雨 22.5mm	155
	Descending	09/29	無雲無雨	10/23	無雲無雨	175
	Descending	10/23	無雲無雨	11/16	無雲無雨	162
	Ascending	10/26	無雲無雨	11/19	無雲無雨	160
	Ascending	06/04	無雲無雨	08/09	無雲無雨	174
2020	Ascending	06/04	無雲無雨	08/09	無雲無雨	174
2020- 2021	Descending	12/16	有雲	01/09	降雨 0.5mm	156
2021	Descending	01/21	無雲無雨	02/14	無雲無雨	188
	Ascending	09/21	降雨 3mm	10/03	無雲無雨	218
2022	Ascending	05/13	降雨 1mm	05/25	降雨 26.5mm	168
	Ascending	05/25	降雨 26.5mm	06/06	有雲	231
	Ascending	06/06	有雲	06/18	無雲無雨	153

第四章 高程誤差校正模式

第一節 模式設計與架構

本計畫針對 InSAR 測量之高程誤差校正其作法為利用機器學習方法來進行，本計畫採用隨機森林(random forest, RF)進行之，模式架構可見圖 4-1。具體來說 RF 之學習對象為計算高程誤差(dH)，而 RF 模式則利用雷達衛星常見可得之觀測資料作為輸入，包含影像同調性(Coh)、影像相位差(φ)以及 InSAR 兩幅影像之影像強度平均值(I)、衛星入射角坡度平均值(Θ)與坡度與入射角夾角平均值(δ)。根據 InSAR 量測之高程與實際高程之測量差異應存在系統性誤差之假設，本研究以控制點位高程也作為 RF 之輸入值。

在 RF 演算得到模式高程誤差(dh)後，可據此(加回)InSAR 高程(h)得到修正 InSAR 高程(h')，而此修正之高程值則將取代(原始)InSAR 高程值重新計算高程誤差(dH)，隨後本計畫則據此計算 RMSE，並給定期望 RMSE(k)作為標準，若能滿足 $RMSE < k$ 則得到最終修正高程(H')，若否則進入下一輪 RF 模式。若此循環之學習對象 dH 不為 0，則可期望能趨於收斂，致使 RMSE 越來越小，意即能提高最終修正高程(H')之精度。後續則將利用實際高程資料試驗是否可達預期模式收斂。

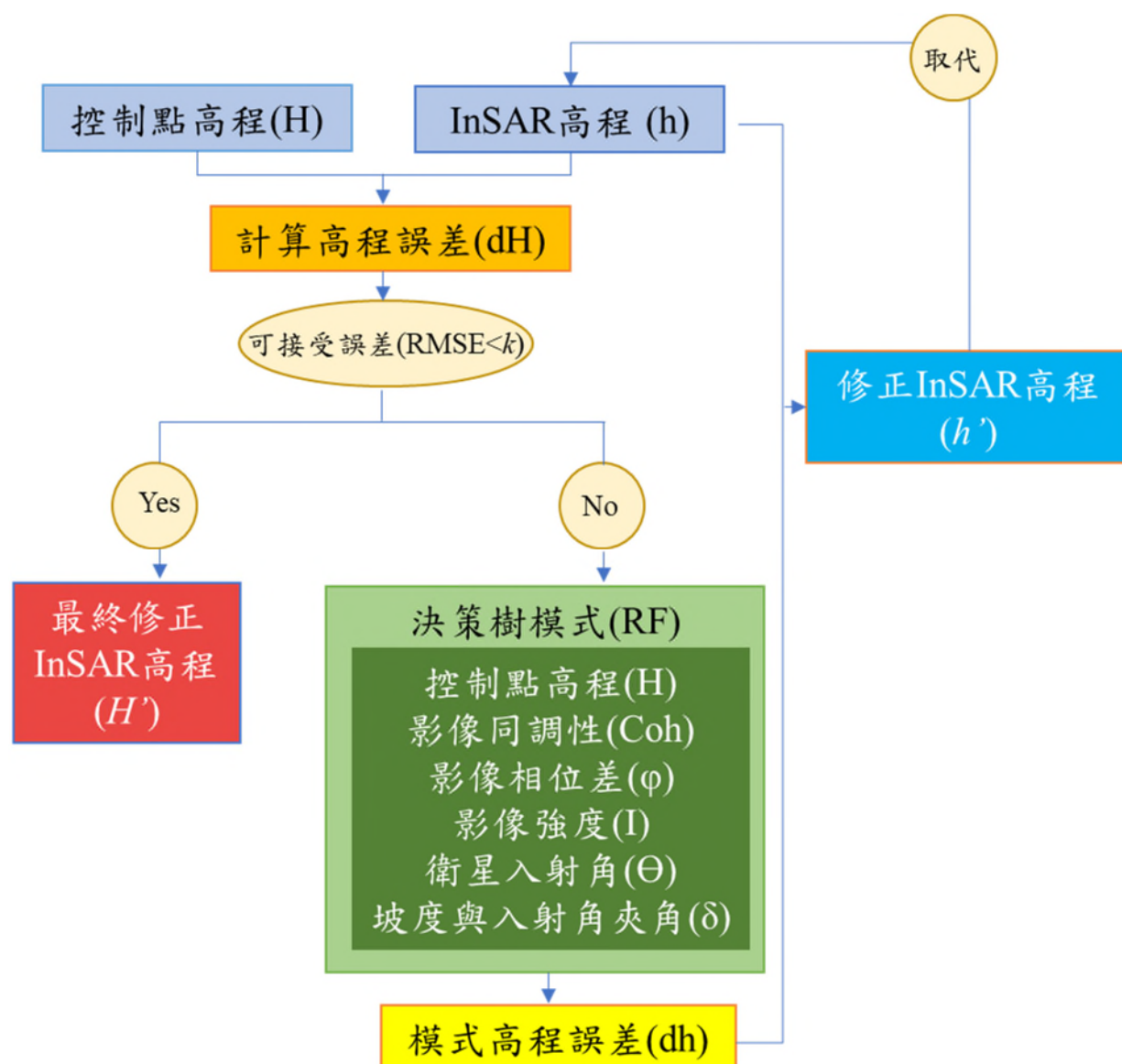


圖 4-1 隨機森林高程誤差校正模式架構

第二節 模式試驗

本計畫首先針對提出之高程誤差校正模式進行初步試驗，此試驗中之控制點高程資料乃是使用由內政部取得之 5 公尺數值高程資料(2017 年光達產製，圖 4-2)，InSAR 高程部分則是使用 2018 年 2 月 18 日以及 2018 年 3 月 26 日之兩幅 Sentinel-1A 之 VV 極化降軌影像

產製之高程資料，儘管兩高程資料在產製時間上無法完全一致，然而此為本研究可產製之最靠近內政部 5 公尺高程資料。透過使用內政部 5 公尺資料，本研究首先嘗試釐清下列問題：

- 本研究提出之模式架構是否可發生收斂以達降低模式誤差、提高模式精度之效果？
- 模式計算(或收斂)之 RMSE 與控制點數量之關係為何？

首先本研究以 InSAR 影像同調性(Coherence)>0.7 之點位作為控制點樣本進行試驗，樣本數為 37,370，佔影像總像元數(2,298,340)之 1.6%。圖 4-3 為影像同調性分布情形(VV 極化影像)，可以發現，同調性高的地區主要分布於河道以及裸露地區。

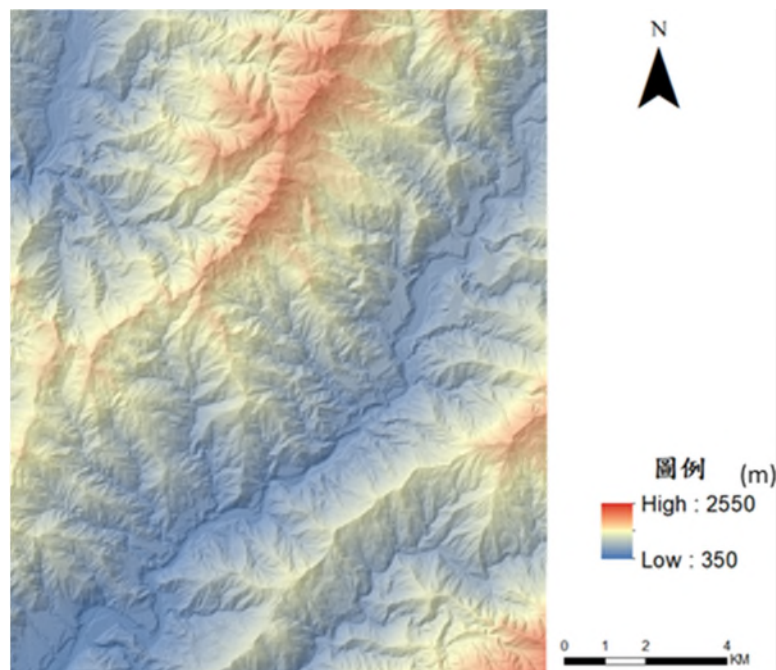


圖 4-2 內政部 5 公尺數值地形模型

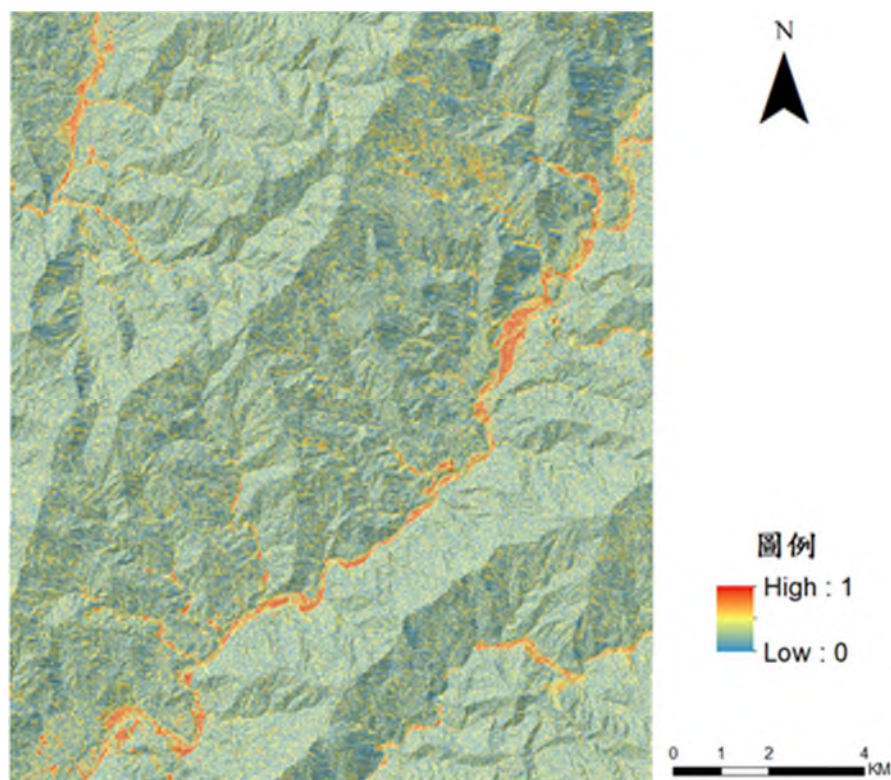


圖 4-3 試驗影像(VV)同調性分布

本計畫以下圖 4-4 為精度校正試驗成果，可以發現整體之 RMSE 呈現收斂趨勢，顯示透過此模式的確可提高 InSAR 之高程精度。圖中顯示，在模式疊代達 200 次以上後其 RMSE 之下降趨勢呈現平緩，以此試驗 1000 次疊代為例，最終可達 RMSE 為 4.42 公尺，最大值 18.2 公尺、誤差最小值-8.65 公尺、平均誤差<0.001 公尺(平均誤差為所有誤差不論正負之平均值)。

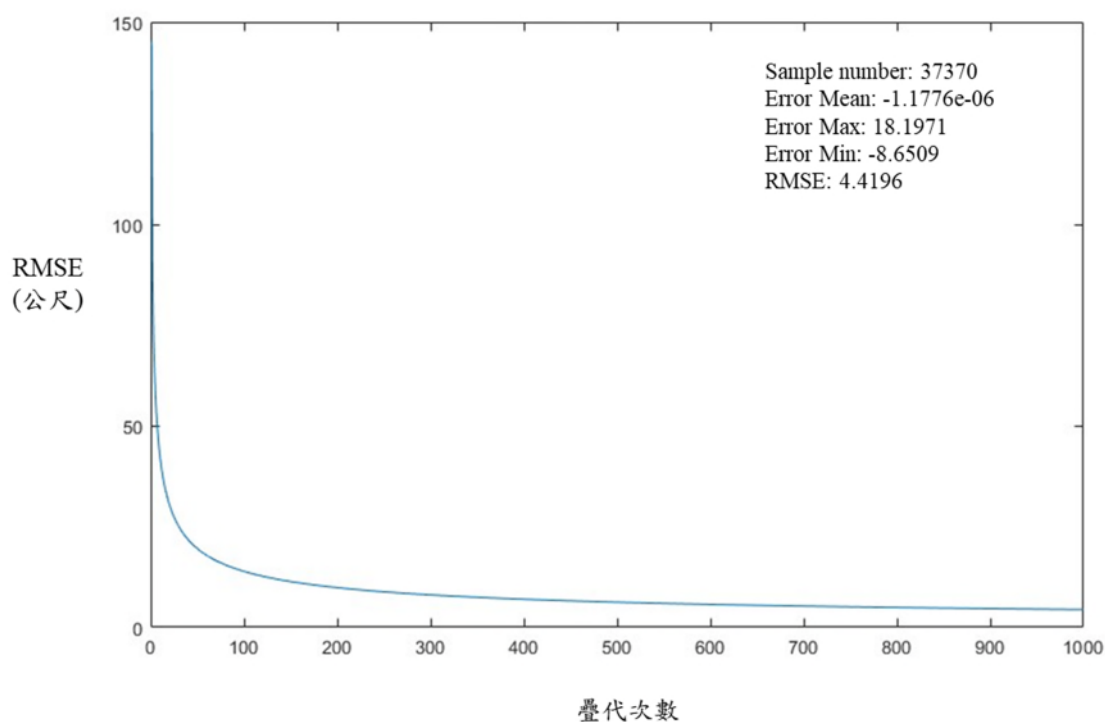


圖 4-4 精度校正試驗

進一步探討此試驗之精度提升程度，可發現從 RMSE 起始之 64.42 公尺降低至 4.42 公尺，校正程度達 93%，校正效果相當明顯。本計畫在此次試驗發現，在疊代次數增加後，RMSE 值仍可持續下降，在疊代次數達 15,000 後，RMSE 值可降至 1 公尺以下。

在針對控制點數量對此模次校正效益之影響進行分析時，本研究以 30 點、50 點、100 點、250 點、500 點分別進行試驗，期望能較為符合一般作業可取得之實際地面控制點數量。下圖 4-5 顯示，以本研究範例以 1000 次疊代計算成果而言，當控制點樣本數越大可以達到

較小的 RMSE 值。然而，當數量大於 100 時，其差異則相當微小。

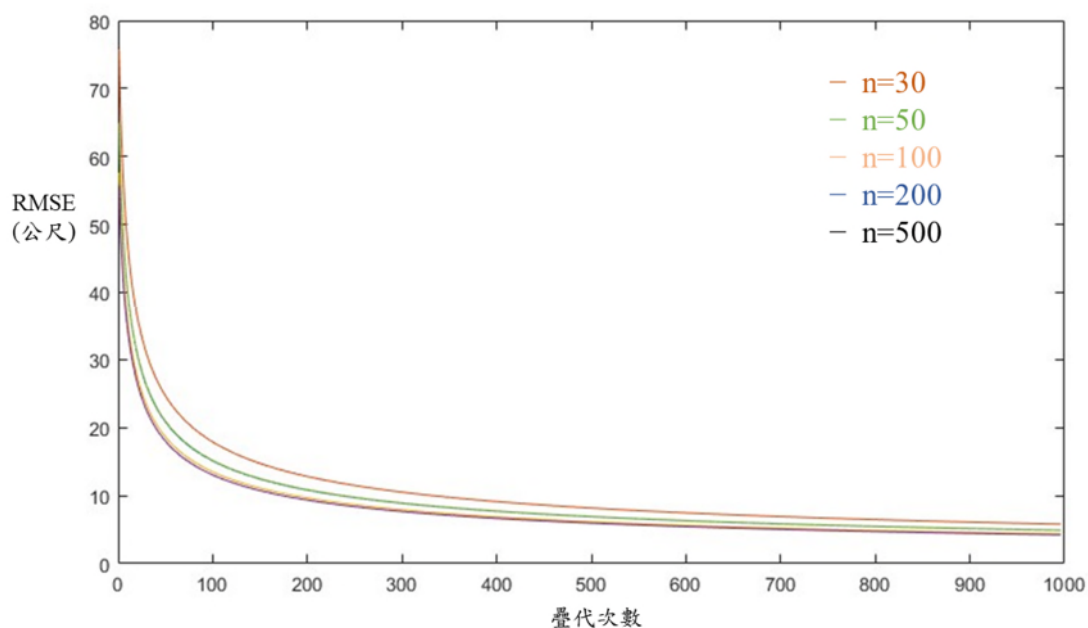


圖 4-5 RMSE 與控制點數量關係圖

第三節 高程校正成果與驗證

本計畫利用野外現地量測之 50 控制點(附錄一)以及表 3-1 中提供之 6 地面控制點資訊，共 56 點控制點資料中選取 30 點，配合 2018 年 2 月 18 日以及 2018 年 3 月 26 日之兩幅 Sentinel-1A 之 VV 極化降軌影像產製之高程資料進行高程校正，且後續以未使用之 26 點進行精度檢核。

在試驗疊代次數達 41,823 時(Intel(R) Core(TM) i7-11370H @ 3.30GHz/RAM:32G：耗時 4 分 11 秒)，RMSE 可達 1 公尺以下(以模式輸入之 30 點控制點計算)，成果如圖 4-6。

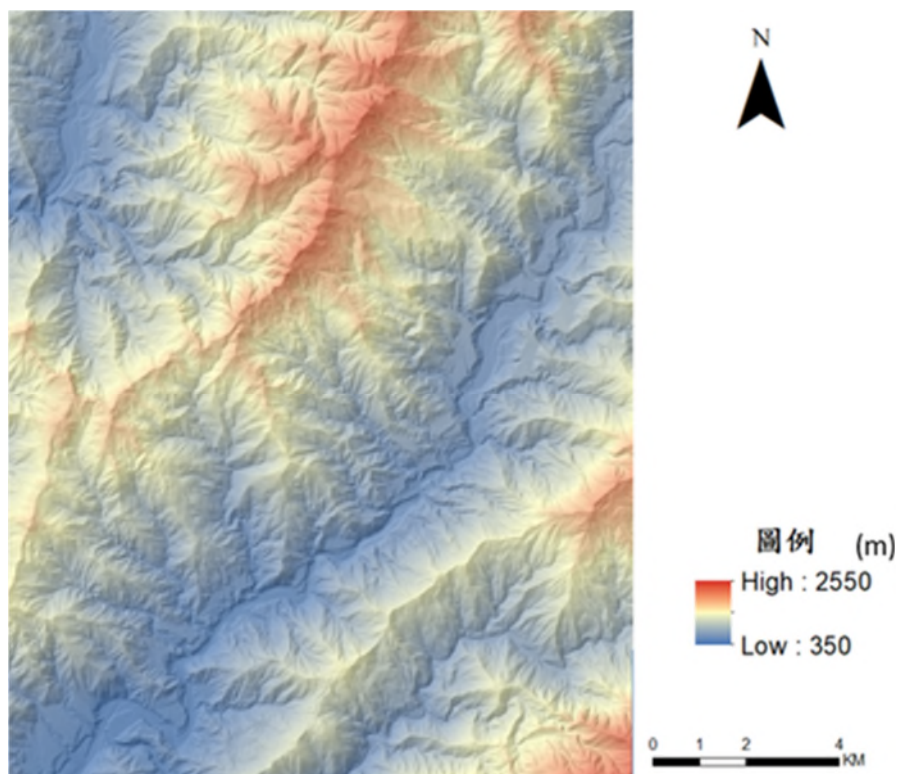


圖 4-6 研究區 InSAR 高程校正初步成果

同時，若將校正前與校正後之 InSAR 高程資料與內政部 5 公尺資料進行比對(圖 4-7)，可發現校正後之資料有較高之精度(內政部 5 公尺 DEM 減去 InSAR 之 DEM)，且可以發現原始(校正前)InSAR 高程資料在高程誤差有西(或西北)向東(或東南)、高至低的傾向，而且傾向則不見於校正後之 InSAR 高程資料，同時期高程誤差也有明顯降低的情形。儘管校正後 InSAR 資料之誤差有明顯的改善，但仍可以發現，校正後之 InSAR 高程資料於山區陵線位置有低估之嫌，而河道(低谷)則有高估之情形。具體之高程誤差量化情形可見表 4-1，表中顯

示 InSAR 高程校正前之 RMSE(以 26 點檢核點計算)為 12.8 公尺，校正後則可達 1.3 公尺，顯示高程精度有明顯的增加。

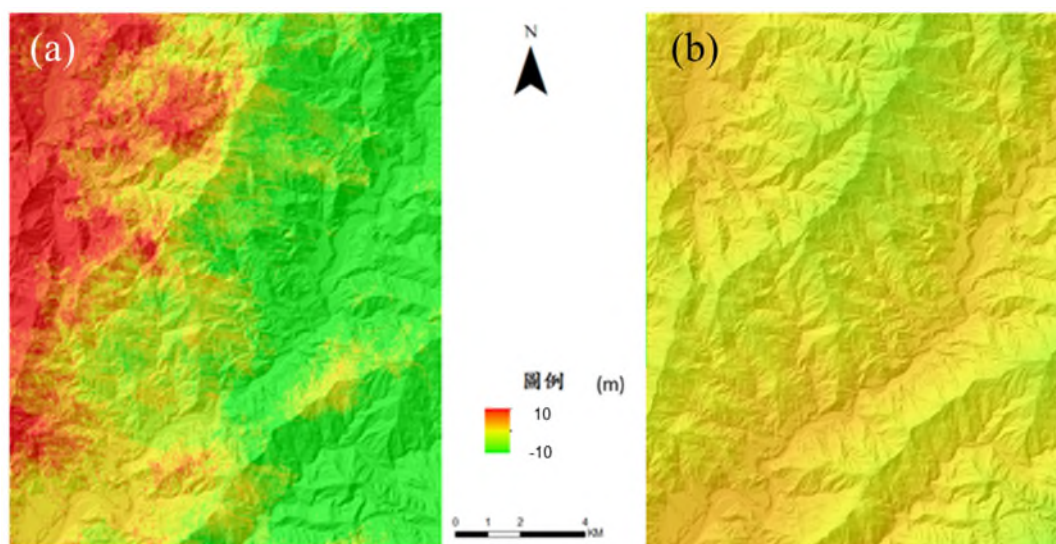


圖 4-7 InSAR 高程比對內政部 5 公尺 DEM 之高程誤差(內政部 5 公尺 DEM 減去 InSAR 之 DEM) (a)校正前(b)校正後

表 4-1 InSAR 高程校正前後誤差統計

高程誤差 (公尺)	樣本數	平均值	最大	最小	RMSE
未校正	30 輸入控制點	1.29	8.3	-17.6	10.3
	26 檢核控制點	2.3	12.6	-16.5	12.8
校正後	30 輸入控制點	-0.03	2.3	-1.8	0.99
	26 檢核控制點	-0.23	2.5	-2.7	1.3

第五章 河道高程與侵淤變化監測

第一節 多時序河道高程

針對本研究關注之河段(荖濃溪上游復興至寶來河段，圖 3-2)，本計畫利用隨機森林高程誤差校正模式，針對 16 組 Sentinel-1 影像配對(表 3-3)，利用 InSAR 技術產製之高程資料進行效正。本研究提出之隨機森林高程誤差校正模式需進行多次疊代，而疊代之停止方式為利用控制點高程資料(附錄一，圖 5-1)，計算各次疊代之 $RMSE_i$ 值，當該次疊代計算之 $RMSE_i$ 與前次疊代計算之 $RMSE_{i-1}$ 其改進若低於 5%，並連續發生 10 次後，則停止疊代。此意義為當疊代演算對精度改進不顯著時，則無必要繼續進行 RF 之疊代計算。

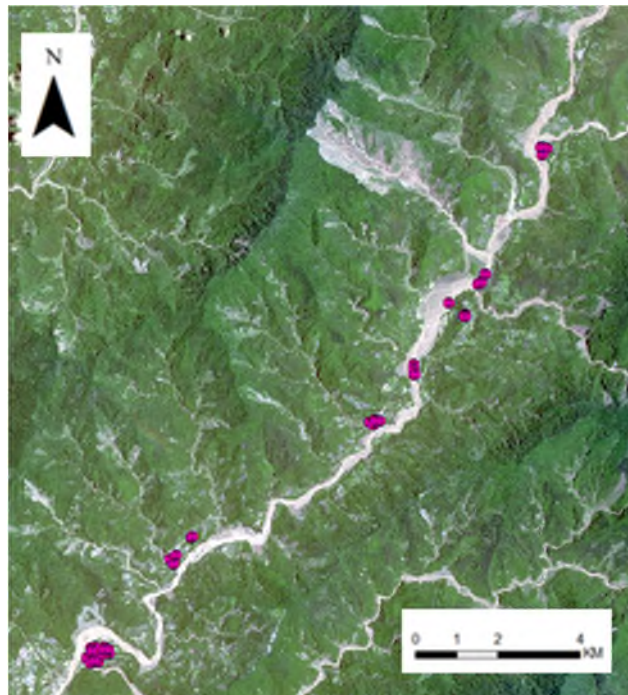
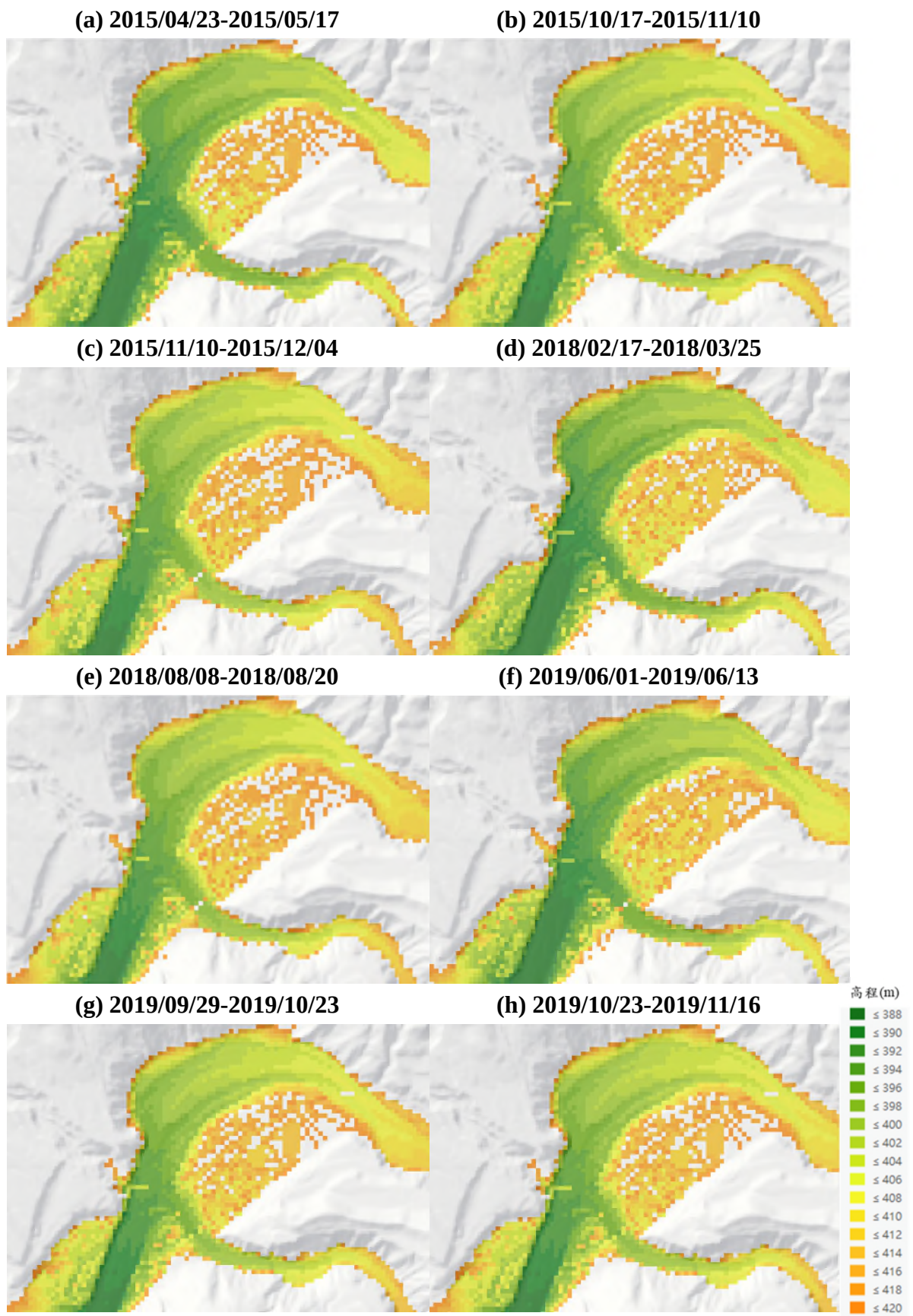


圖 5-1 地面控制點(56 點)分布情形

使用高程誤差校正模式所得之多時序高程資料可見圖 5-2 與圖 5-3，分別為本研究區寶來與復興河段 16 個不同時期之校正 InSAR 高程分布情形。寶來地區之各年期河道高程約在 388 公尺至 420 公尺之間，而復興為於上游，其高程範圍落於 590 公尺至 650 公尺。其河道各年期之侵淤變化於詳述於下節。另外，本研究將各期 InSAR 高程資料之校正成果(RMSE)列於表 5-1。表中顯示，本研究產製之 16 期校正 InSAR 高程之 RMSE 值在 0.89 至 1.54 公尺之間，其中 2019/0601—2019/06/13、2022/05/13—2022/05/25 以及 2022/05/25—2022/06/06 等三組資料之 RMSE 較其他時期為高，分別是 1.41 公尺、1.54 公尺以及 1.46 公尺，顯示 InSAR 影像對之取像當時之氣候條件，特別有降雨狀況下，其產出之高程資料品質較為不佳，此為日後進行 InSAR 高程資料應用時必須注意之問題。



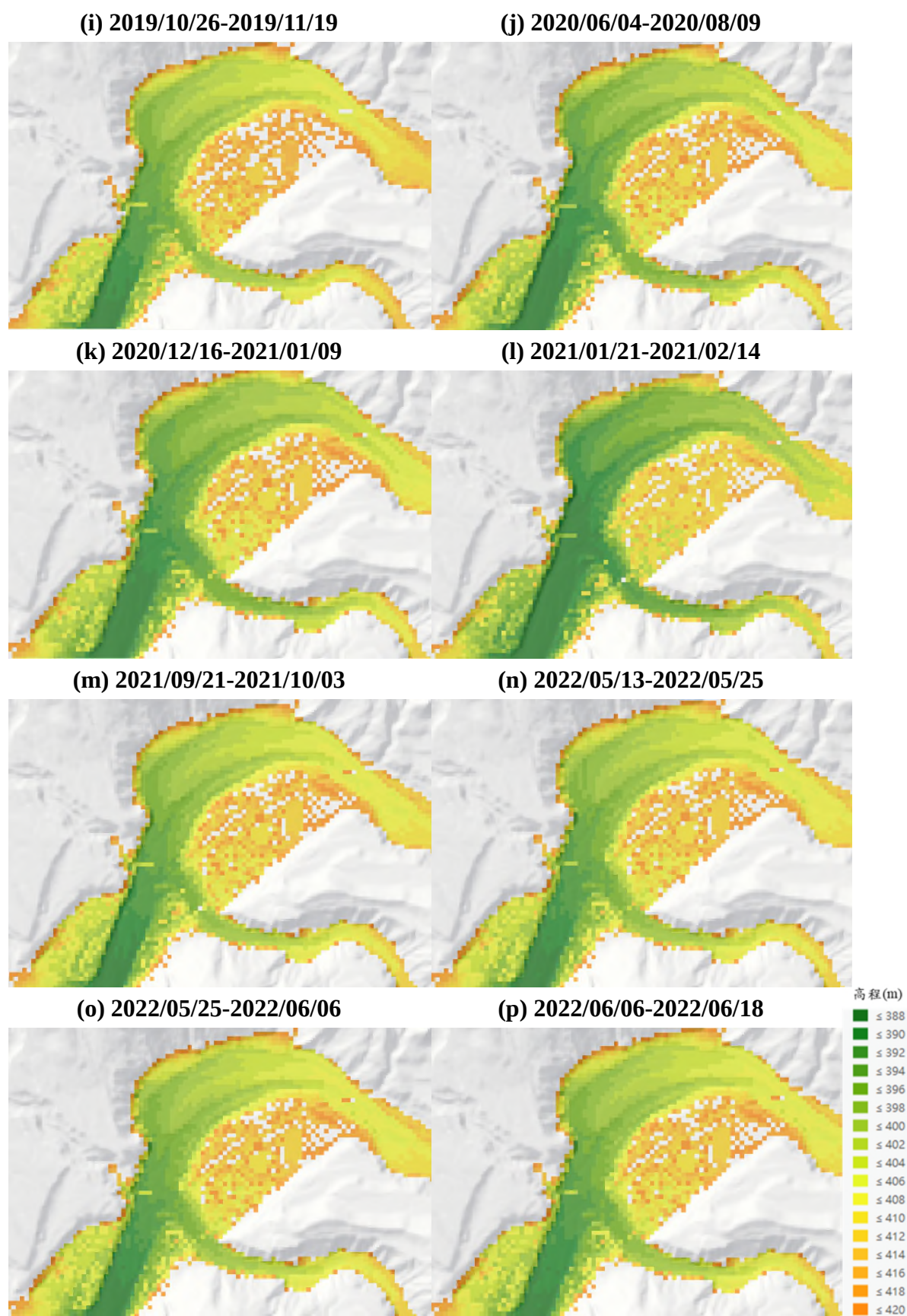
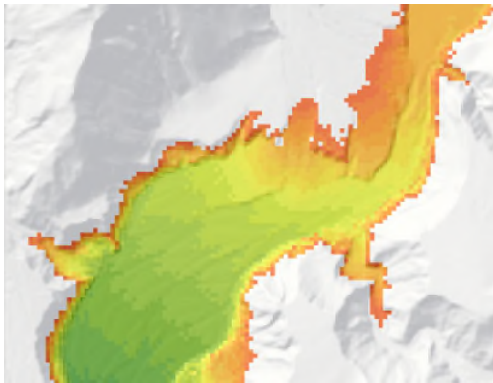
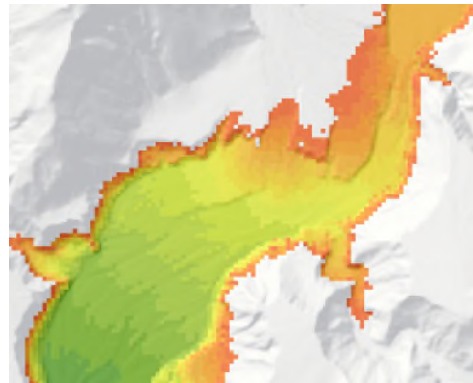


圖 5-2 寶來河段 16 個不同時期之校正 InSAR 高程分布情形

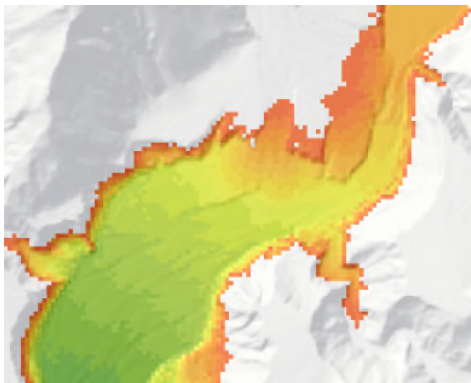
(a) 2015/04/23-2015/05/17



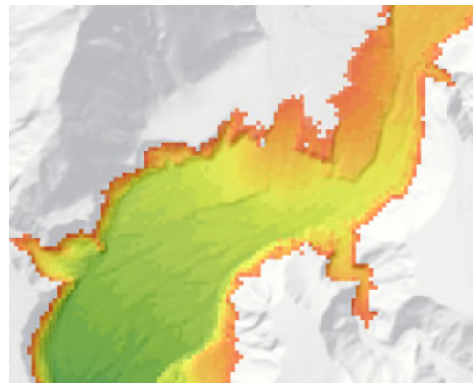
(b) 2015/10/17-2015/11/10



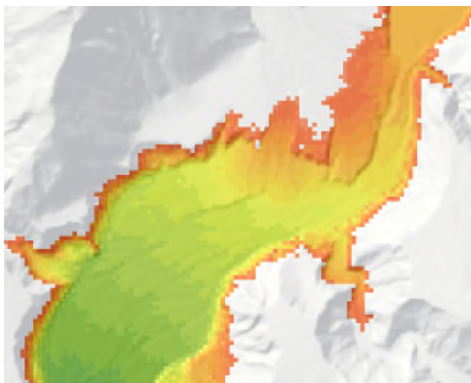
(c) 2015/11/10-2015/12/04



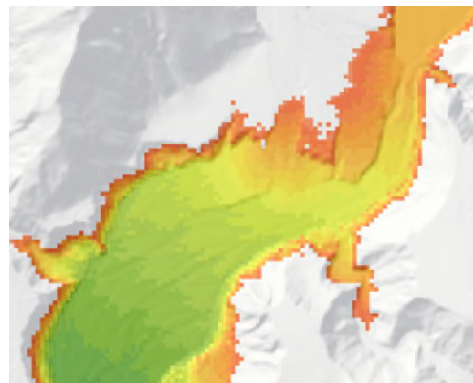
(d) 2018/02/17-2018/03/25



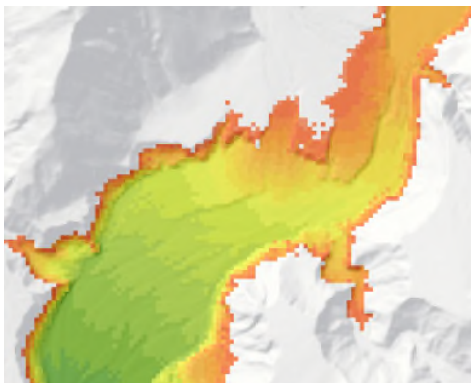
(e) 2018/08/08-2018/08/20



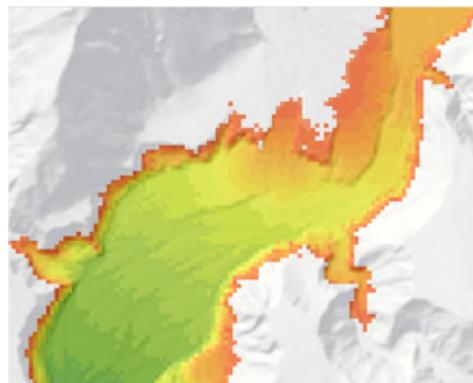
(f) 2019/06/01-2019/06/13



(g) 2019/09/29-2019/10/23



(h) 2019/10/23-2019/11/16



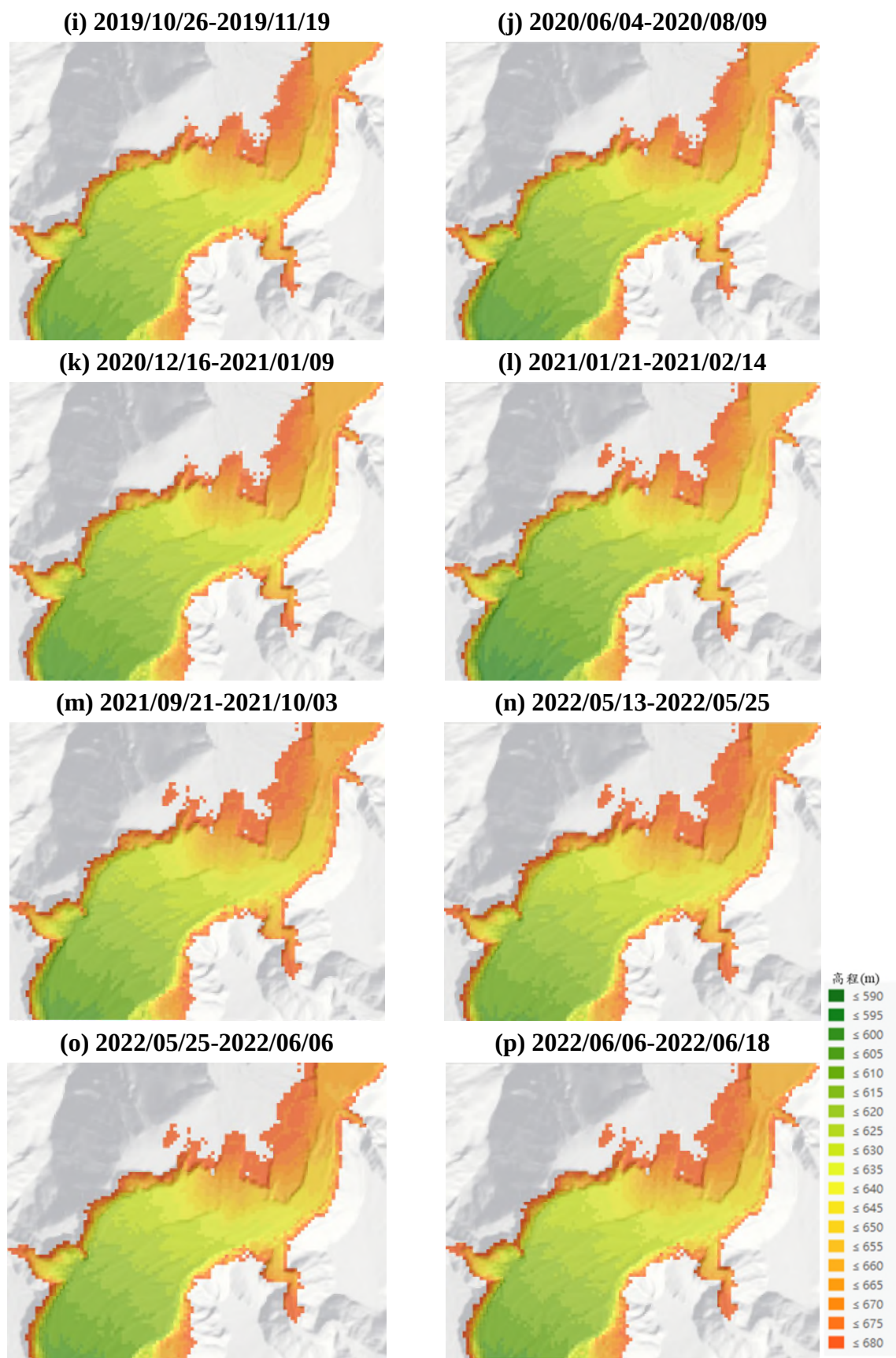


圖 5-3 復興河段 16 個不同時期之校正 InSAR 高程分布情形

表 5-1 InSAR 使用之 Sentinel-1 影像列表

年份	前期影像	氣候條件	後期影像	氣候條件	RMSE (m)
2015	04/23	有雲	05/17	無雲無雨	1.32
	10/17	無雲無雨	11/10	無雲無雨	1.04
	11/10	無雲無雨	12/04	有雲	1.09
2018	02/17	無雲無雨	03/25	無雲無雨	0.89
	08/08	降雨 1mm	08/20	降雨 5mm	1.22
2019	06/01	降雨 8.5mm	06/13	降雨 22.5mm	1.41
	09/29	無雲無雨	10/23	無雲無雨	1.00
	10/23	無雲無雨	11/16	無雲無雨	0.99
	10/26	無雲無雨	11/19	無雲無雨	0.99
2020	06/04	無雲無雨	08/09	無雲無雨	1.10
	12/16	有雲	(2021)/01/09	降雨 0.5mm	1.22
2021	01/21	無雲無雨	02/14	無雲無雨	1.0
	09/21	降雨 3mm	10/03	無雲無雨	1.26
2022	05/13	降雨 1mm	05/25	降雨 26.5mm	1.54
	05/25	降雨 26.5mm	06/06	有雲	1.46
	06/06	有雲	06/18	無雲無雨	1.15

第二節 河道侵淤變化

本研究於 2018 年至 2021 年之 InSAR 高程資料中，於各年選取二期之成果進行研究區河段於汛期前後之河道侵淤分析(汛期後高程減去汛期前高程)，成果可見圖 5-3。從圖中可見各年之侵淤分布均不相同，其侵淤之時序變化應為河道土砂遞移造成；研究區上游(布唐布納斯溪)之大型崩塌持續輸砂至河道，隨不同時節之降雨貢獻之河川流量搬運河道沉積物(如底移質)。其中 2021 年則有相當明顯之堆積狀況，為盧碧颱風期間其強降雨造成邊坡崩塌(玉穗溪上游)，並伴隨土石沖刷等作用，使得大量土砂堆積於河道。

表 5-2 為各年河道侵淤狀況之量化結果，表中可知 2021 年汛期前後有最大之侵淤變化，侵蝕達-1.81 公尺，堆積可達 13.26 公尺，主要位於位於上游(玉穗溪至明霸克露橋一帶)。其為 2021 年 8 月盧碧颱風造成之大量土石堆積所致(圖 2-2)，後續本研究將針對此事件，配合已收集之無人機產製之 DSM 與 InSAR 產製之高程測量成果進行比對，藉以驗證高程誤差校正模式之成果。

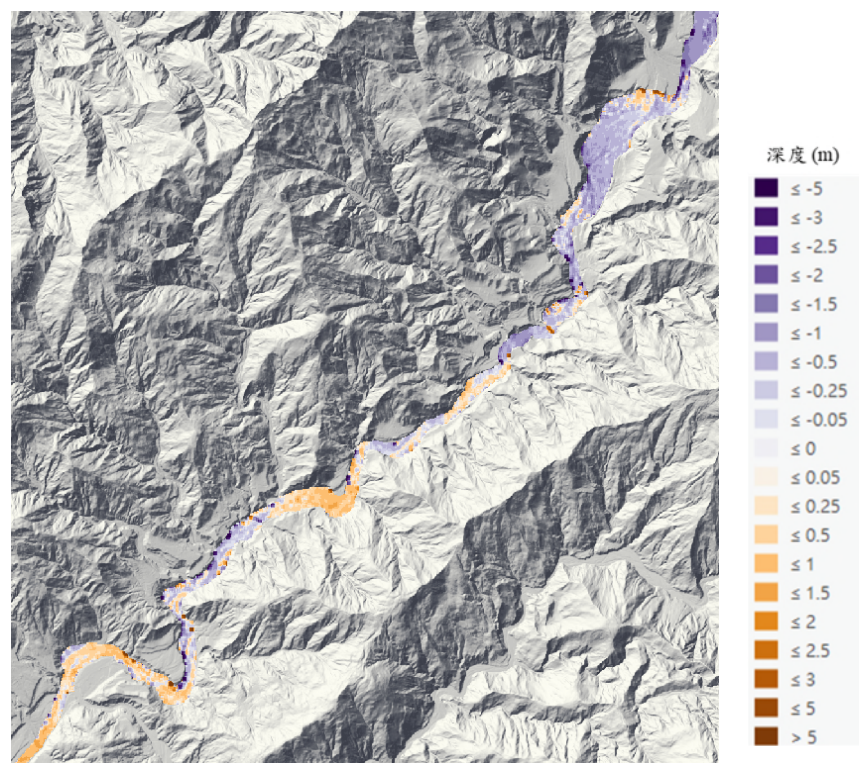
表 5-2 2018 至 2021 年河道侵淤測量成果

年份	汛期	前期影像 日期	後期影像 日期	最大堆積 深度(m)	最大侵蝕 深度(m)	平均高程 變化(m)	汛期降雨事件(日期) 累積雨量
2018	前	2/17	3/25	2.68	-1.55	0.53	豪雨事件(0618-0620) 累積降雨 240.5mm
	後	8/8	8/20				豪雨事件(0702-0704) 累積降雨 463.5mm
2019	前	6/1	6/13	2.62	-3.16	-0.12	豪雨事件(0611-0617) 累積降雨 429.5mm
	後	10/26	11/19				利奇馬颱風(0808-0818) 累積降雨 938mm
2020	前	6/4	8/9	5.67	-2.12	0.68	豪雨事件(0520-0531) 累積降雨 541mm
	後	12/16	1/9				
2021	前	1/21	2/14	13.26	-1.81	2.17	彩雲颱風(0604-0610) 累積降雨 317mm
	後	9/21	10/3				0731 豪雨暨盧碧颱風 (0731-0812)累積降雨 1210.5mm

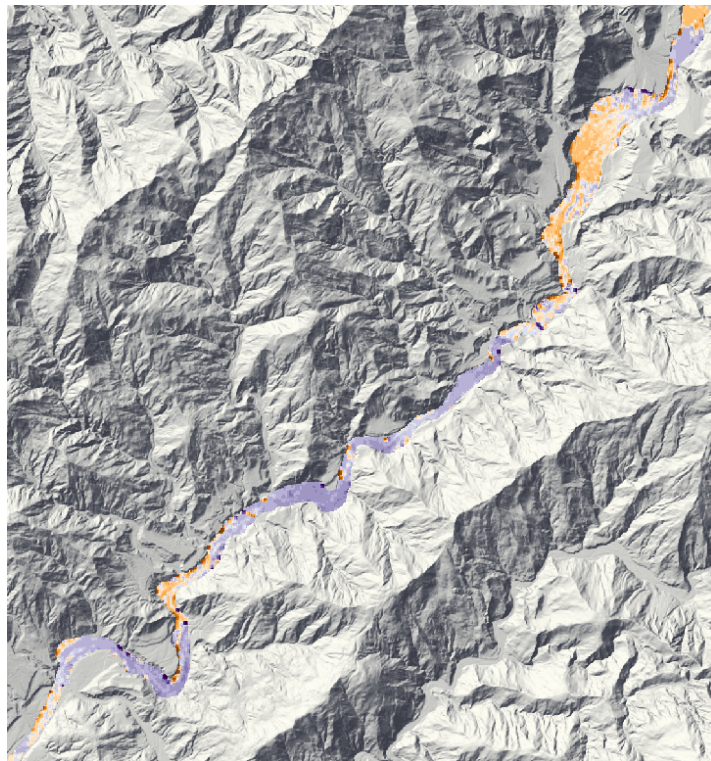
(a) 2018 年汛期前後河道侵淤變化



(b) 2019 年汛期前後河道侵淤變化



(c) 2020 年汛期前後河道侵淤變化



(d) 2021 年汛期前後河道侵淤變化

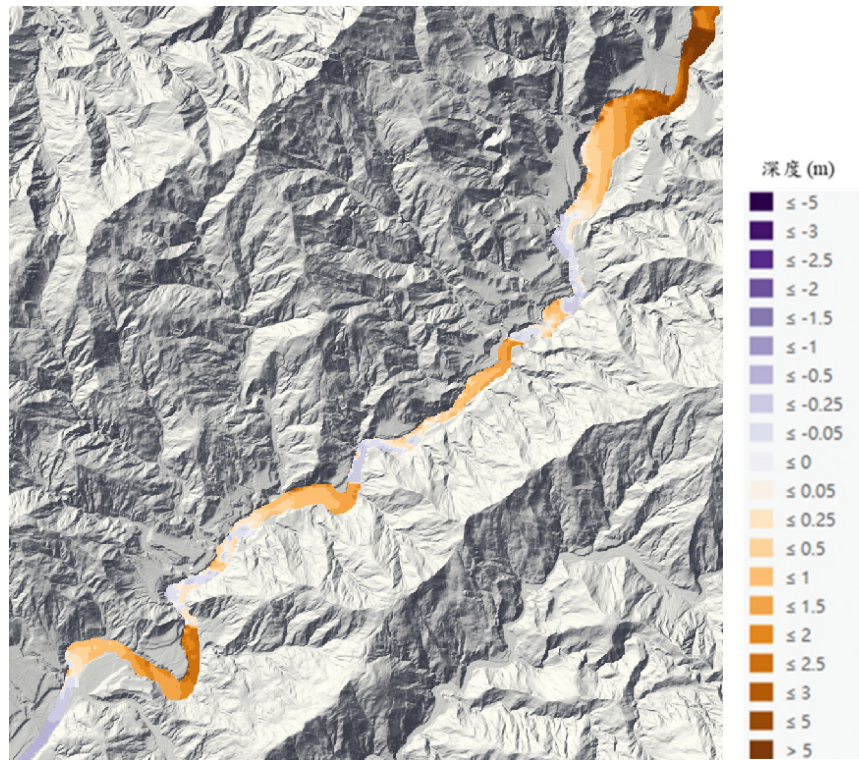


圖 5-3 2018 年至 2021 年河道侵淤分布圖

第三節 2021 年盧碧颱風侵淤變化驗證

本研究針對 2021 年盧碧颱風 8 月 7 日降雨事件造成河道堆積之高程 (說明如第二章第一節)，使用 2021 年汛期前後之 InSAR 高程資料(表 5-2)來比對由空拍機建置之數值高程資料以檢視 InSAR 高程之正確性。比對位置為寶來與復興河段，並分別比對汛期前後高程資料。圖 5-4 為寶來地區汛期前後利用無人機測量之 DSM、InSAR 測量之高程以及兩者相減(無人機減去 InSAR)之成果。圖 5-5 則為復興地區汛期前後利用無人機測量之 DSM、InSAR 測量之高程以及兩者相減(無人機減去 InSAR)之成果。

針對寶來地區，其誤差值在 2.29 公尺至-4.86 公尺(汛期前)以及 3.31 公尺至-2.36 公尺之間(汛期後)，平均誤差為-0.78 公尺至 0.82 公尺之間，而標準差則在 1.37 公尺至 2.03 公尺之間；而復興地區其誤差在 3.32 公尺至-5.50 公尺(汛期前)以及 3.69 公尺至-4.22 公尺之間(汛期後)，平均誤差為 1.12 公尺至-0.71 公尺之間，標準差則在 1.54 公尺至 1.83 公尺之間 (表 5-3)。另外，無人機與 InSAR 進行侵淤變化的測量成果的比較可見圖 5-6，圖中之侵淤變化為針對復興河段於盧碧颱風事件前後進行高程測量之成果，相關統計可見表 5-4。可以發現颱風後堆積可達(12-13 公尺)，而比較兩者之測量差異，其標準差為 1.46 公尺。

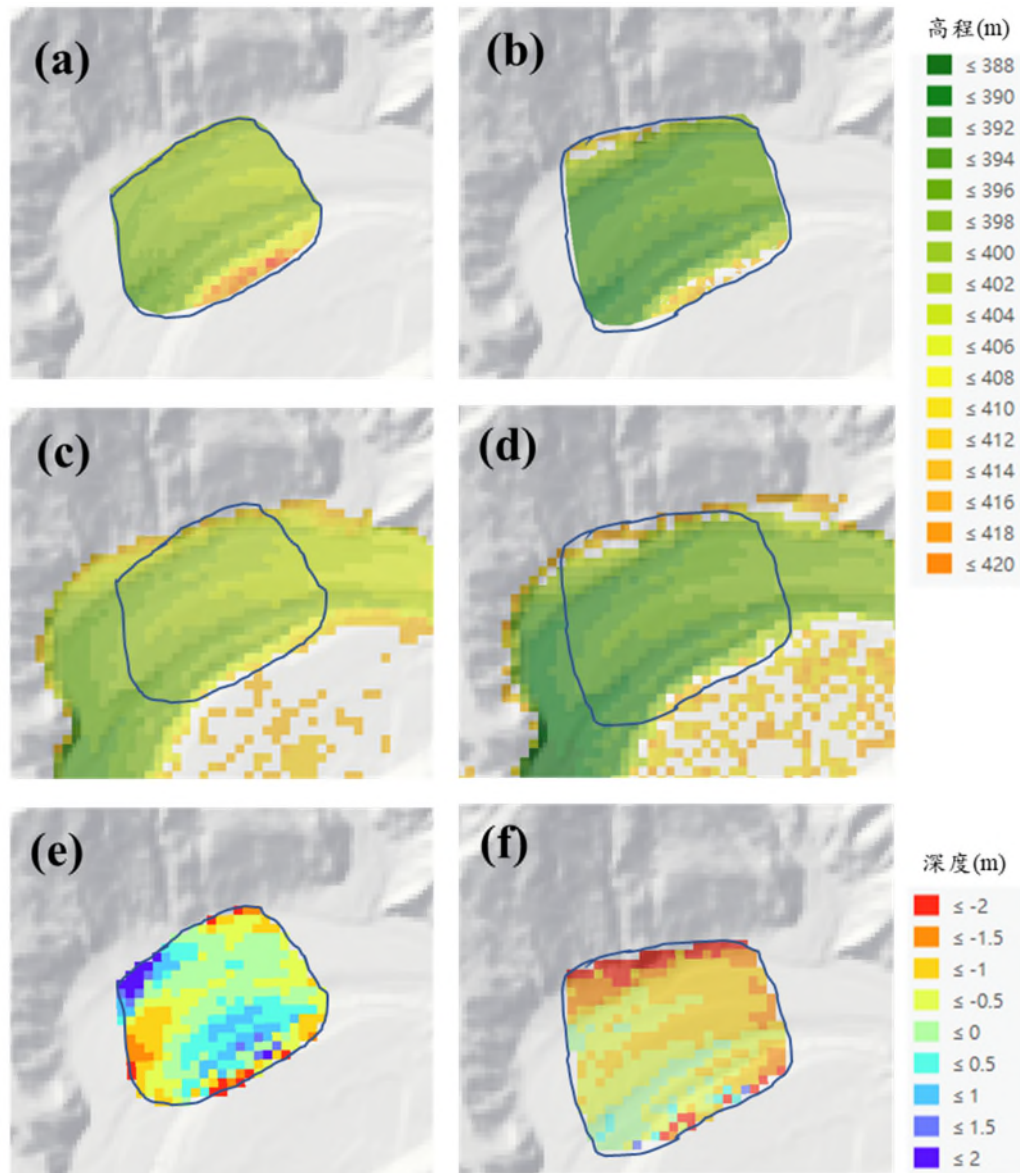


圖 5-4 2021 年寶來河段汛期前後無人機、InSAR 高程對照圖。(a) 汛期前無人機 DSM，(b)汛期後無人機 DSM，(c)汛期前 InSAR 高程，(d)汛期後 InSAR 高程，(e)汛期前無人機 DSM 與 InSAR 高程差值，(f)汛期後無人機 DSM 與 InSAR 高程差值

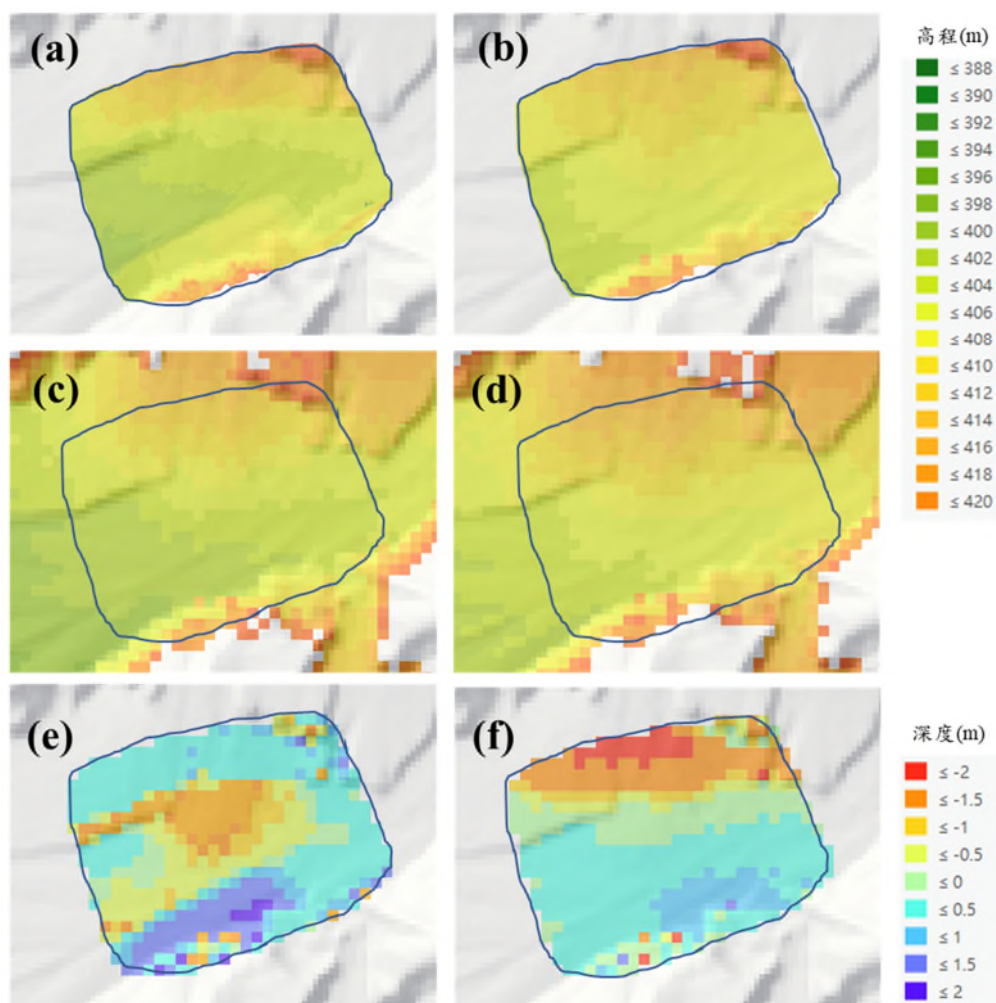


圖 5-5 2021 年復興河段汛期前後無人機、InSAR 高程對照圖。(a) 汛期前無人機 DSM，(b)汛期後無人機 DSM，(c)汛期前 InSAR 高程，(d)汛期後 InSAR 高程，(e)汛期前無人機 DSM 與 InSAR 高程差值，(f)汛期後無人機 DSM 與 InSAR 高程差值

表 5-3 無人機 DSM 與 InSAR 高程變化測量比對

	統計值(公尺)	寶來	復興
汛期前	最大值	2.29	3.32
	最小值	-4.68	-5.50
	平均值	-0.78	1.12
	標準差	1.37	1.54
汛期後	最大值	3.31	3.69
	最小值	-2.36	-4.22
	平均值	0.82	-0.71
	標準差	2.03	1.83

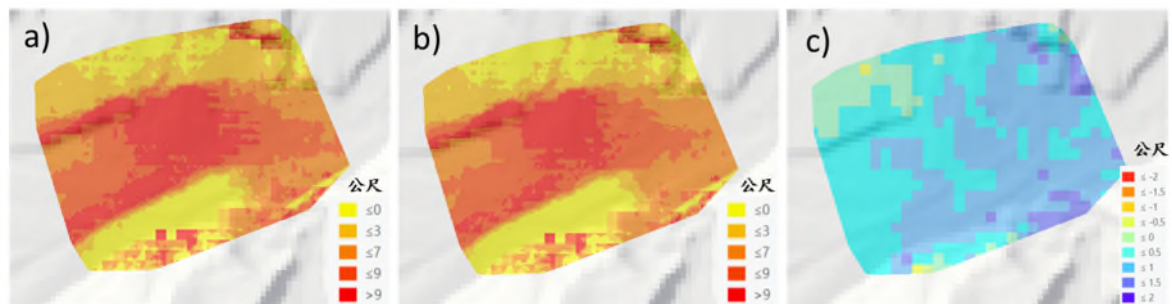


圖 5-6 2021 年復興河段盧碧颱風前後河道侵淤變化比較。(a)無人機 DSM 高程之侵淤變化，(b) InSAR 高程之侵淤變化，(c)無人機 DSM 與 InSAR 之變化差距(a)-(b)

表 5-4 無人機 DSM 與 InSAR 河道侵淤變化比對

統計值(公尺)	無人機 DSM(a)	InSAR 高程(b)	(a)-(b)
最大值	13.08	12.12	2.32
最小值	0.26	0.53	-1.35
平均值	7.11	6.83	0.88
標準差	3.59	4.01	1.46

綜上所述，本計畫在研究區的試驗成果若以 1.5 倍標準差作為誤差參考(標準差以 2 公尺為估計)，估計之高程變化需達 3 公尺方可任為具有顯著之變化，因此本研究現階段之研究成果較適用於監測因暴雨、河岸崩塌、土石沖刷等能快速、明顯改變河道地貌之事件。

第四節 InSAR 技術於河道侵淤監測之應用問題

本研究利用機器學習技術(隨機森林)為基礎，建構一方法來提升 InSAR 高程測量之精度，目的在於提升 InSAR 高程測量之應用性，如河道之侵淤監測。透過本研究分析，影響此應用成果之主要因素有下列四點：

- 首先為 InSAR 技術之應用條件，其核心問題為 InSAR 影像對之去相關性(decorrelation)問題，應避免影像對具有過長之觀測基線長度(例如 ESA 建議之>300 公尺)、過久的觀測時間差距可能造成預期或無預期之地表變動等，這些問題都限制了可應用之影像對數量，另外，天候因素如影像取像時間於大雨時則有可能造成 InSAR 高程估計之不確定性。就本計畫之應用經驗來看(包含本計畫 110 年之計畫成果)，以台灣地區為主研究對象時，每年可取得 2-4 幅影像對來產製高程資料，也就是說每年 2-4 次即為使用 Sentinel-1 免費資料約可以達致之監測頻率。
- 其次，就研究區空間範圍來說，使用衛星資料可以較低成本進行大範圍之監測。Sentinel-1 為例，僅約 2-3 幅影像及可覆蓋全島範圍，應用性極高。同樣地，當範圍越大，其資料分析時間也就越長，以本研究為例，6-8 小時內完成一幅影像之分析。另外，就地表特性而言，相較於植生表面容易具有較強的散射而言，InSAR

技術較適用於裸露地區，可以有較高的同調性，較能保證 InSAR 計算的可靠性，也就是說此方法不適用於林地區域之高程估計。

- 第三點則為本計畫提出之 InSAR 高程精進之技術應用問題，除影像自身的觀測特性如回波強度、同調性、觀測角度等，主要為仰賴地面控制點來校正原始之 InSAR 高程值，因此控制點之測量精度與分布將影響高程資料的校正成果。
- 最後，本研究現階段之 InSAR 高程校正方法進行河道監測，較適用具有相對明顯高程變動之侵淤事件(其高程變化達 3 公尺)，也就是說，一般微小之地形變化並不是適用於本研究提出之監測技術，較適用於如暴雨、河岸崩塌、土石沖刷等能快速、明顯改變河道地貌之事件。

第六章 結論與建議

本研究之創新工作主要提出一研究方法來提升 InSAR 高程測量之精度。其概念為透過機器學習技術(隨機森林)來架構精進高程精度之模式評估，提升 InSAR 高程測量之應用性。計畫所列之工作項目與計畫交付事項均按進度順利完成。

本計畫收集 2015 年至 2022 年 32 幅共 16 組 Sentinel-1 影像對，可用於 InSAR 高程資料產製，配合影像分析，本研究於寶來至復興地區於較無變動疑慮之人工結構物鄰近區域進行地面控制點測量，完成 50 個點位測量，成果如附件一所示，其水平精度約在 0.71 公分至 1.12 公分之間，高程精度則為 1.16 至 1.87 公分之間。另外，為增加分析 InSAR 高程測量誤差來源之依據，也收集衛星追蹤站暨基本控制點資料(如表 3-1)。另外，為進行細部的河道侵淤監測成果驗證，本研究收集盧碧颱風事件前(5 月 4 日)以及事件後(8 月 24 日)之空拍 DSM 資料，包含水保局提供之 8 月 24 日無人機建置之數值高程資料。

在計畫成果方面，本計畫提出一 InSAR 高程精進模式之架構，配合地面控制點進行 InSAR 高程校正，其 RMSE 約在 0.89 至 1.54 公尺之間，相較於未校正之高程之 RMSE 值 12.8 公尺相比，有相當明顯

的改進。此方法於本計畫中應用於產製過去(2015 至 2022 年間)之河道高程資料，以及計算各年汛期前後之侵淤情形，並能進行河道高程資料之產製，應用於監測河道之侵淤情形，若用 1.5 倍標準差、標準差以 2 公尺作為精度參考，其成果之高程測量精度約為 3 公尺。

總結應用本計畫提出之方法進行河道侵淤監測時，若使用 Sentinel-1 免費影像的情形下，可針對河道於上游裸露區域，以極低的成本完成大範圍(甚至全島)、每年 2-4 次之監測頻率，由於其高程變化 3 公尺之範圍，適用於判釋如暴雨、河岸崩塌、土石沖刷等能快速、明顯改變河道地貌之事件。相信本計畫提出之精進 InSAR 高程測量方法，對於集水區管理及土砂災害之防治能有相當的助益。

參考文獻

1. 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。
2. 吳彥誼、林士淵、任玄（2020）合成孔徑雷達干涉產製數值高程模型影響因素評估—以季節像對與多視處理為例，航測及遙測學刊，255(2)：115-128。
2. 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。
3. 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.
4. Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G., Del Conte, S., Friedl, B., Schneiderbauer, S., Iasio, C., Vlcko, J., Greif, V., Proske, H., Granica, K., Falco, S., Lozzi, S., Morak, O., Arnaud, A., Novali, F., Bianchi, M., 2016. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4: 92-108.
5. Chiang SH., and Chang KT, 2011. The Potential Impact of Climate Change on Typhoon-Triggered Landslides in Taiwan, 2010-2099. *Geomorphology*, 133: 143-151.

6. Colesanti, C., Wasowski, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 2006, 88, 173–199.
7. Correa-Muñozl, N. A., Murillo-Feo, C. A., 2018. Detection of Landslides with SAR Polarimetry: Case Study of South-eastern Colombia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W4, GeoInformation for Disaster Management. Istanbul, Turkey.
8. EAS Sentinel 1 web: <https://sentinel.esa.int/>
9. Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K. T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem, *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66
10. Hopper, A., Zebker, H. A., Segall, P., Kampes, B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23611.
11. Konishi, T., Suga, Y., 2018. Landslide detection using COSMOSkyMed 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
12. Lee, J.S.,1981. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.17:24-32.
13. Mondini, A. C., 2017. Measures of Spatial Autocorrelation Changes in Multitemporal SAR Images for Event Landslides Detection, *Remote Sensing*, 9(6), 554; doi:10.3390/rs9060554.

14. Mondini, A. C., Chang, K. T., Chiang, S. H., Schlögel, R., Notarnicola, C., Saito, H., 2017. Automatic mapping of event landslides at basin scale in Taiwan using a Montecarlo approach and synthetic land cover fingerprints. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63: 112-121.
15. 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.
16. Shibayama, T., Yamaguchi, Y., Yamada, H., 2015. Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle. *Remote Sens.* 7, 15424-15442; doi:10.3390/rs71115424.
17. Shimada, M., Watanabe, M., Kawano, N., Ohki, M., Motooaka, T., 2014. Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* Vol. 12, No. ists29, pp. 9-15.
18. Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., Yamada, H. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43, 1699–1706.

附錄一、地面控制點測量成果

Point ID	Y	X	高程	地點備註
107012401	2556486.423	219612.8099	430.3284	寶來國中
107012501	2558538.065	221174.6539	549.4437	興中國小
107012502	2558538.065	221174.6539	629.1122	綜合運動場
107012503	2556487.443	219617.6372	430.8974	寶來國中
107012504	2556278.794	219105.266	425.4903	民宿
107012505	2556279.032	219107.0618	427.1878	民宿
110082401	2556224.546	219302.5904	416.0115	寶來建地
110082402	2556307.217	219319.486	418.0025	寶來建地
110082402	2556428.478	219439.0955	419.9935	寶來建地
110082402	2558668.82	221100.4745	538.458	高中里建地
110082402	2561907.12	225980.1681	616.107	綜合運動場
110082402	2561987.708	226040.7578	624.071	桃源區建地
110082402	2561943.787	225880.9491	621.0845	桃源區公所
110082402	2565506.033	228677.366	647.605103	明霸克露橋道路
110082402	2565521.908	228680.541	647.770203	明霸克露橋道路
110082402	2564526.015	228160.8983	825.065186	復興崩塌附近建物

110082402	2564532.528	228187.2004	825.659485	復興崩塌附近 建物
110082402	2568505.52	230101.7292	716.6525	復興里建物
110082402	2568446.013	230059.5694	715.657	復興里建物
110082402	2568545.232	230060.8924	717.648	復興里建物
110082402	2556471.362	219235.0953	407.519318	寶來建地
110082402	2556559.788	219286.9314	391.098602	寶來河岸堤防 道路
110082402	2556524.723	219219.8494	389.798676	寶來河岸堤防 道路
110082402	2556567.411	219520.7017	423.9755	寶來建地
110082402	2556506.936	219540.0132	422.98	寶來建地
110082402	2556265.034	219202.0626	418.0025	寶來建地
110082402	2556164.411	219200.538	416.0115	寶來建地
110082402	2556206.592	219379.4231	417.007	寶來建地
110082402	2556346.854	219438.8821	418.0025	寶來建地
110082402	2556407.256	219640.1172	425.9665	寶來國中
110082402	2558767.239	221240.7702	542.44	高中里道路
110082402	2559205.709	221640.7549	573.3005	高中里道路
110082402	2559183.22	221619.5882	573.3005	高中里道路
110082402	2561984.667	226141.3264	618.098	桃源區道路
110082402	2562027	226001.7584	628.053	桃源區建地
110082402	2563326.68	226960.919	594.206	勤和里建地

110082402	2563089.613	226958.8023	589.2285	勤和里建地
110082402	2563102.313	226982.0857	589.2285	勤和里建地
110082402	2568367.532	230021.3605	712.6705	復興里建物
110082402	2568546.126	230001.5167	717.648	復興里建物
110082402	2568523.901	230161.0608	736.5625	復興里道路
110082402	2564803.751	227784.8186	618.369263	南橫公路近復興崩塌
110082402	2565304.807	228545.2723	642.605347	明霸克露橋道路
110082402	2565258.372	228488.519	643.56604	明霸克露橋道路
110082402	2565325.682	228581.7848	644.587402	明霸克露橋道路
110082402	2563224.886	226940.8357	592.215	勤和里建地
110082402	2564493.39	228186.9375	822.509766	復興崩塌附近建物
110082402	2556405.281	219319.8724	419.9935	寶來建物
110082402	2556484.954	219479.3173	420.989	寶來建物
110082402	2556518.292	219207.0605	390.311768	寶來河岸堤防道路

附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本案研發設計是否針對任何地區的河道侵淤高程變化？如果是，要說明適用條件，或者針對不同影像來源做出對應比較表單。如果不是，要說明本範例除了變化值大、地形開闊等個性的其他條件。	本計畫針對荖濃溪上游復興至寶來河段進行河道侵淤變化監測，目前工作為建構數值地形精度之數值方法，後續便會針對上述河段地形高程變化監測並進行驗證，並歸納本方法之適用條件。
二	雷達InSAR技術的誤差源，在任何河道，不同波長訊號，不同坡度，坡向，植生狀況等對於河道侵淤高程變化測量的影響應該討論，也該具體提出對策。	感謝委員意見，本計畫將嘗試配合比對 InSAR 產製之數值地形比對內政部提供之 5 公尺光達產製之數值地形進行相關分析。
三	InSARLOS 位移量要轉到高程變異值測量，水平位移量如何決定？如何降低這部分的干擾。是否都需要UAV或是其他的DEM輔助才能取得的高程變異值測量。	感謝委員意見，本計畫應用之方法並非計算地形位移量，而是利用兩短期距之觀測資料計算高程。本計畫提出之方法必須基於已知控制點進行分析。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	影響InSAR影像性質除了地面外，基線距離、時間間隔、波長等因素也該納入評估與建議。	感謝委員意見，後續將嘗試納入分析進行評估。
五	以變異量快速量測為工作目標，請提供建議方法與對策。	感謝委員意見，後續將歸納相關應用成果提供相關技術應用之應用建議。
六	請問SAR影像特性，在山區受地形效應影響下其精度所受影響如何因應，另建議敘明不同條件下精度可能變化，以利未來實務應用。	感謝委員意見，後續將嘗試納入分析進行評估。
七	目前執行狀況以空拍成果產製之DSM之高程誤差約2M，另InSAR之高程誤差約8.2M，請問為符合河道侵淤變化測量之需求，計畫目標預期達到精度為何？未來如何精進以達成目標。	本計畫目標為利用誤差分析方法來校正 InSAR 高程測量以提高觀測精度；而在精度提升能力為此計畫主要探索的問題，因此並未設置確切之目標；期望能以最後試驗結果客觀說明使用 InSAR 技術可達至之合理精度。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	雷達資料恐受地形遮蔽影響，本計畫主要應用於集水區河道監測，建議可在今年分析過程中也納入未來可能使用之限制條件整理分析。	感謝委員意見，後續將嘗試納入今年(2022 年)觀測結果進行分析。
九	UAV請依相關規定、證照操作；使用DJI無人機拍攝影像，如何解決資料傳輸之安全性，請予說明以提供其他計畫參考。	感謝委員意見，經查本校規定，DJI 無人機為限制使用之設備，本計畫將購入符合資安規定之 UAV 進行後續研究。
十	建議將各期之三維立體模型，加以定位後製作成動態影像，以利河道變動監測。	感謝委員意見，後續將納入三維資料製作動態影像。
十一	使用 NDVI 及 NDMI 來降低 InSAR的系統誤差，此部分在分析時間尚需耗時多久？時效性或其限制為何？	就本實驗區而言分析時間約為 10 分鐘以內可得成果，而其限制性則為必須配合無雲之光學影像，因此本計畫後續將同時基於無加入光學資料之分析試驗進行誤差校正。
十二	使用SAR的情境多期待於天候不佳造成光學影響無法使用時，惟目前的方式似仍需仰賴光學影像校正誤差。在此情	感謝委員意見，本計畫後續將另外設計基於雷達資料、無加入光學資料之分析試驗進行誤差校正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	境下，能否比純用光學影像在更短時間完成判識？	
十三	目前高雄桃源區南橫公路上的明霸克露橋附近河道正要進行相關清淤工程，建議本計畫以InSAR技術完整記錄下清淤過程中之河道DSM變化情形，同時和清淤工程之現地測量資料及相關土石方移除量進行對比，以了解目前計畫方式之精確度。	感謝委員意見，後續將嘗試納入分析進行評估。
十四	本計畫驗證InSAR DSM精確度過程中，建議可考慮選擇相關重點區域，該區域具有地調所建立之1m DEM及多期無人機空拍影像製作之高精度DSM進行比對分析，以獲得較明確之誤差驗證成果。	感謝委員意見，本計畫針對荖濃溪上游復興至寶來段進行河道侵淤變化監測，該河段除已有前期計畫建製之高解析度DSM(0.5公尺)外，也收集水保局提供之無人機建置之DSM(0.5公尺)資料。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十五	應用雷達衛星InSAR技術於山區，易生定位不易之問題，目前有用角反器改善，此部分是否有考量？	感謝委員意見，就本研究無設置角反射器之考量。
十六	本案如可達到河道侵淤高程變化，除用圖型化展示外，是否訂定相關之量化值供使用或定義沖淤段等資訊。	感謝委員意見，後續將嘗試訂定相關之量化值供使用或定義沖淤段等資訊。

附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	圖2-4是三維影像或是立體模型？	圖 2-4 為空拍點雲資料建構之數值地表模型套合正射影像之立體模型。
二	P3-6考慮垂直基線，水平基線是否不需要考慮？	本計畫針對高程方向觀測主要針對兩期衛星觀測位置之垂直基線，不需考慮水平基線。
三	P3-9，200018年應是筆誤。	感謝委員提醒，內文已修正。
四	內政部5M DTM之製作時間與2018年之時間差異引起之地形變化區應該去除掉後再行比較。	由於在實際執行上無法得到各年之高精度 DTM，為避免高程點控制有明顯差異，故選取兩期影像 Coherence 大於 0.7 之點進行高程控制。
五	P3-11，平均誤差<0.001公尺有誤導的意思，建議加以解釋。	已增加說明，平均誤差為所有誤差不論正負之平均值。
六	P3-11，20018年也是筆誤。	感謝委員提醒，內文已修正。
七	P4-1，sentinel-1應是筆誤。	感謝委員提醒，內文已修正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	請討論地面控制點數量與分布對於高程值校正的影響。	感謝委員意見，本計畫於第四章第二節進行討論控制點資料數量之影響，而本研究受限於控制點資料之分布僅能進行討論，後續應針對此問題健行實作試驗探討。
九	未來針對大面積區域，若考慮以衛星雷達影像InSAR 產製DEM 時，建議進行成本效益的詳細分析，並將其成果與光達Lidar 及無人機產製之成果進行分析比較，最後提出具體的建議，以做為水土保持局未來施政應用之參考。	感謝委員意見，本計畫完成了河道位置之 InSAR 高程資料與無人機產製 DSM(0.5 米)之比對，並於研究成果完成了InSAR 測量與無人機資料之比對工作。
十	本計畫除比對InSAR 產製DEM 與內政部5 米DEM 成果外，建議考慮比對莫拉克風災後地質調查所產製之1 米DEM 成果，以務實的態度分析本計畫方法之優劣點及未來可應用的範圍。	感謝委員意見，由於本計畫為專注於河道侵淤造成之高程變化，因此本計畫在河道位置之高程資料比對為使用精度更高之無人機產製 DEM(0.5 米)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十一	由於近來水土保持局關注部分大規模崩塌地區的變化情形，包括新竹尖石的秀巒崩塌地及桃園復興的光華崩塌地等，建議本計畫考慮針對上述2 區域進行DEM 隨時間變遷的分析，並和現場監測及其它遙測所得資訊進行比對，以測試本計畫開發之技術其效能與實用性。	感謝委員意見，本計畫開發之高程精度之模式應能於後續針對崩塌地高程變化進行多時序監測。基於計畫內容、研究標的與計畫經費等規畫問題，目前為主要關注荖濃溪上游河段之河道侵蝕造成之高程變化。
十二	本研究之成果未來是否可於災後利用兩期 sentinel-1 影像，即可快速製作出災後 DSM？如是，約需要多長的時間，且有無相關限制條件？(如區域、地形、水域等)	感謝委員意見，利用 Sentinel-1 影像與本研究提出之高程修正方案，理論上可於災後影像取得後立即製作災後高程資料，其主要限制為控制點之精度與數量將影響成果之品質。
十三	P3-15，表3-4 校正後之最大及最小誤差仍有6.3 至-3.8m，實務應用上似乎仍顯不足，有無再提升之空間？	感謝委員意見，本計畫在增加兩項影像變數(衛星入射角平均值以及入射角與坡度夾角平均值)後可改進至 2.3~-1.8 公尺。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十四	InSAR 受限其波長限制，若河道因暴雨事件而有較大變動時，是否會限制此方法之適用性？	本計畫之 InSAR 分析為利用 InSAR 技術分別產製事件前後之高程資料，非利用事件前後影像資料進行 InSAR 分析，由此避免因事件(如暴雨)造成之去相關性問題。
十五	建議補充說明終止 RF 疊代之標準，可接受 RMSE(k) 的選定原則或參考。	感謝委員建議，本計畫利用獨立檢核點計算各次疊代之 RMSE 值，當 RMSE 與前次疊代計算之改進低於 5% 連續 10 次後，則停止疊代。此意義為當疊代演算對精度改進不顯著時，則無必要繼續進行 RF 之疊代計算。

附錄四、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	研究過程、成果完整，有助於瞭解廣域集水區土砂變動、運移。	感謝委員意見。
二	第五章第三節建議可探討兩期InSAR相減之河床變化量與UAV拍攝之DSM變化量進行比較。	感謝委員意見，相關比較結果已加入第五章第三節。
三	第五章第三節標題盧碧颱風應為2021年請修正。	感謝委員提醒，內文已修正。
四	圖5-4、5-5圖標題請修正格式方便閱讀。	感謝委員建議，圖標題已修正。