



利用 邊坡活動性 反演崩塌滑動面 幾何型態

林冠璋* / 國立成功大學地球科學系 副教授

劉哲欣 / 國家災害防救科技中心 研究員

張志新 / 國家災害防救科技中心 研究員

郭賢立 / 國立成功大學地球科學系 博士生

本研究整合了數位影像相關法 (DIC) 與崩塌厚度反演方法，以分析桃園光華崩塌的滑動面幾何型態。反演所獲得的厚度模型進而可用於計算體積、流變性和滑動面形狀。兩期 UAV 正射影像的 DIC 分析結果顯示 2021 年 3 月至 8 月底，光華崩塌的地表水平位移最大值為 39.7 公尺，平均值為 7.8 公尺，與 GPS 觀測結果大致相符。此外，將 DIC 分析的水平位移分解，顯示光華崩塌以向東位移為主。為了反演崩塌厚度，使用了 2023 年 3 月 1 日和 8 月 17 日的兩期數值地型模型，結果可提供三維滑動面幾何型態，進而估算崩塌塊體體積。光華崩塌的活動塊體最大深度為 54 公尺，體積約 58.5 萬立方公尺。

前言

大規模崩塌是山區地形中主要的侵蝕作用之一，準確地估計其運動速率、體積或流變參數對於確定不安定土砂總量以及評估災害風險至關重要。其中，崩塌塊體的體積是控制土砂運動距離、受影響區域和損害程度的重要因素之一^[1,2]。在缺乏崩塌活動性資訊的情況下，崩塌體積可以藉由邊坡面積乘以平均深度進行估計。透過更多的現地活動性觀測則可以精進崩塌體積的估算。然而，地表和地下的活動性觀測數據通常僅限於點測量（例如，鑽孔）以及有限的時間範圍，而導致估算崩塌塊體體積並不容易。在本研究中，將利用高解析度遙測影像來計算潛在崩塌邊坡的地表變形速率，並利用這些地表變形數據反演為崩塌厚度、流變性和破壞面幾何型態。

從前人研究可以得知，對同一地點重複拍攝的光學影像可以分析大型緩慢變形邊坡的地表位移資訊

[3-7]。地表位移量則可以用於推斷崩塌滑動面的幾何型態^[8,9]，但普遍較少進行三維滑動面重建。過去在冰川科學的研究已經發現，冰川表面流動速度可以用於反演冰川厚度^[10,11]。Booth *et al.*^[12] 便參考了冰川厚度反演方法，利用三維地表變形量反演出崩塌厚度。本研究將此方法應用於桃園光華崩塌（桃園市－復興區－T002，圖 1），該大規模崩塌潛勢區面積約 3.4 公頃，在 2020 年底至 2021 年初出現快速的地表位移，反演所得到的厚度模型可用來計算塊體體積、流變性，以及滑動面的幾何型態。

數位影像相關法分析邊坡活動性

數位影像相關法 (Digital Image Correlation, DIC) 是一種影像測量技術，透過比較變形前和變形後的數位影像，可以提供物體的表面位移或變形資訊。在 DIC 分析中，被測量物體不需要安裝感應器或反射器，因此可視為一種遙測技術。因為變形前影像中單一像素的強度值通常可能對應到變形後影像中的不只一個像

* 通訊作者，gwlin@mail.ncku.edu.tw

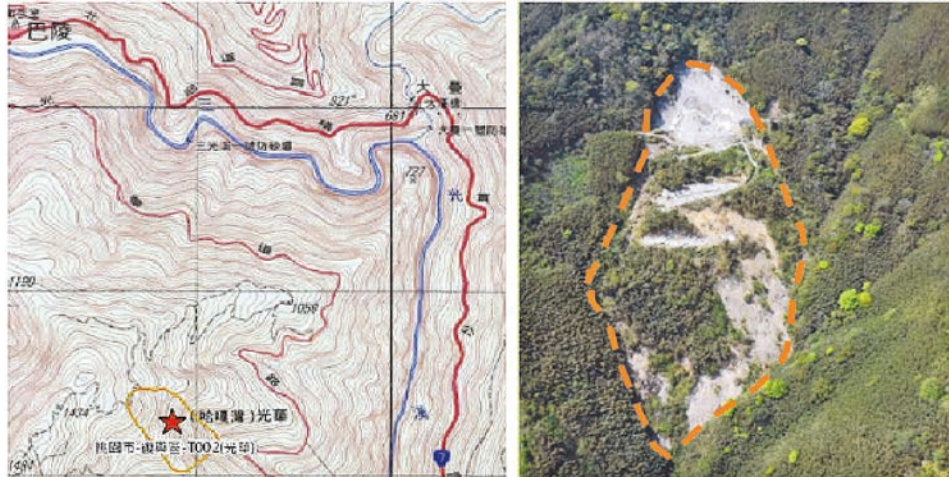


圖 1 光華崩塌位置圖及空拍圖
(引用自農村發展及水土保持署大規模崩塌開放資料專區)

素，單一像素的強度值在兩個影像中出現唯一對應是不可能的。因此，DIC 是分析物體表面所出現的斑點圖案，而不僅是單一像素。透過定義變形前影像中的子集 (f)，並在變形後影像中尋找具有相似斑點圖案子集 (g) (圖 2)。在決定子集大小時必須小心，太小的子集可能無法正確搜尋較大的斑點圖案，而太大的子集無法描述大的變形，並且會導致準確性的下降。因此，子集大小至少應達到最大斑點圖案的尺寸。DIC 也必須在一個感興趣區域 (ROI) 中以特定的間隔進行分析，當採用的間隔較小時便會有較多的分析結果。

DIC 對變形前後影像中子集所進行的相關性分析有多種方式，目前主流即是採用常態化交叉相關分析 (NCC)，其方程式可表示為^[4]：

$$NCC = \frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x', y')^2}}$$

其中， $F(x, y)$ 和 $G(x', y')$ 分別代表變形前和變形後影像子集內的強度值； (x, y) 和 (x', y') 分別為變形前後某

子集的中心點座標。透過搜尋出最大 NCC 值所對應的 $(x, y), (x', y')$ 來獲得位移量。

本研究於農業部農村發展及水土保持署所建置的大規模崩塌開放資料專區 (<https://data.swcb.gov.tw/FieldSurvey/Landslide>) 申請取得 2021 年 3 月 5 日及 8 月 31 日所拍攝的兩幅 UAV 正射影像，以及國家災害防救科技中心所產製的兩期數值地形模型，並將其空間解析度重取樣統一為 1 公尺 (圖 3)。由於分析電腦資源的限制，進行 DIC 分析時正射影像解析度再重取樣為 10 公尺。



(a) 2021 年 3 月 5 日拍攝



(b) 2021 年 8 月 31 日拍攝

圖 3 本研究 DIC 分析所用之正射影像

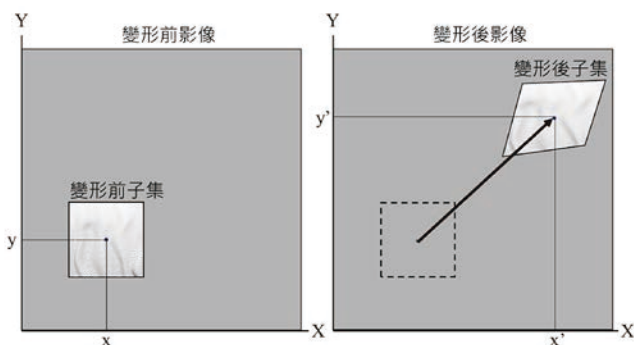


圖 2 數位影像相關法原理示意圖

崩塌滑動面幾何型態反演

Booth *et al.* [12] 根據 Farinotti *et al.* [10] 及 Morlighem *et al.* [11] 所提出的冰川厚度反演方法，修改為崩塌厚度反演方法。首先假設研究期間的滑動面沒有改變，表面速度代表了深度平均速度，且崩塌表面沒有顯著的侵蝕或沉積，因此崩塌材料的密度是均勻且恆定的。對於密度恆定且沒有侵蝕或沉積的崩塌，質量守恆的條件便能以方程式表達為：

$$v_u = -\nabla \cdot (\bar{u}h) + u_v \cdot \nabla z_{surf}$$

其中， v_u 為垂直向位移速率， h 為崩塌厚度， u_v 為水平向位移速率， \bar{u} 則為平均水平位移速率，而 z_{surf} 則是地表高程。另外， $\bar{u} = fu_v$ ，其中 f 為一個常數，與崩塌塊體的流變條件有關聯，用於描述滑動面上剪切帶厚度與崩塌厚度間的比例關係。若 f 值越接近 1，則表示崩塌沿著狹窄的剪切帶，以類似剛體的方式滑動。 f 通常也代表平均水平位移速率與地表水平位移速率的比值 [13]。因此方程式可改寫為：

$$v_u = -\nabla \cdot (fu_v h) + u_v \cdot \nabla z_{surf}$$

後續便可利用中心有限差分法對水平向位移速率進行離散化，重新改寫為非負的線性方程式：

$$\|Ah - b\|^2 + \alpha^2 \|\nabla^2 h\|^2$$

其中， A 為深度平均水平速度的對角優勢矩陣， b 為 $u_v \cdot \nabla z_{surf} - v_u$ ，為阻尼參數。對該方程式求最小值，以獲得

最佳解時的 h ，即為崩塌厚度。該方法所反演出的厚度值應視為最佳解，並僅與崩塌活躍的塊體有關 [14,15]。

本研究將 2021 年 3 月 5 日及 8 月 31 日所拍攝的兩幅 UAV 正射影像運用 DIC 獲得水平向位移速率 (u_v)，兩期數值地形模型相減後獲得垂直向位移速率 (v_u)，再利用上述反演方法求得崩塌厚度 (h) 的最佳解。

光華崩塌滑動面反演結果與討論

農村發展及水土保持署的桃園市復興區光華崩塌應變措施階段報告中提及位於頭部崩崖附近的 GPS 監測結果顯示，3 月至 8 月底的平面位移量約為 7.8 mm/d，也就是累積位移量約 1.4 公尺，而便道迴彎處 4 月至 8 月底的平面位移量約為 38.2 mm/d。光華崩塌邊坡 2021 年 3 月及 8 月兩幅 UAV 正射影像的 DIC 分析結果顯示，水平向位移量最大值为 39.7 公尺，平均值為 7.8 公尺 (圖 4)。DIC 分析結果與 GPS 監測結果不論是位移量數值的規模及分布狀態均相近，大呈現頭部崩崖位移量較小，而坡腹處位移較顯著。將 DIC 分析之水平向位移量分解為東西向及南北向分量 (圖 5)，可以觀察到光華崩塌以向東位移為主。以上說明均顯示，DIC 分析結果與崩塌邊坡的實際位移狀況一致，因此能運用於後續反演崩塌塊體厚度。

為了獲得垂直向位移量所使用的兩幅數值地形模型分別拍攝於 2021 年 3 月 1 日及 8 月 17 日的，雖拍攝日期與 DIC 分析用 UAV 正射影像不同，但差異不大，且用於反演崩塌厚度所需之數值為位移速率，因此仍能採

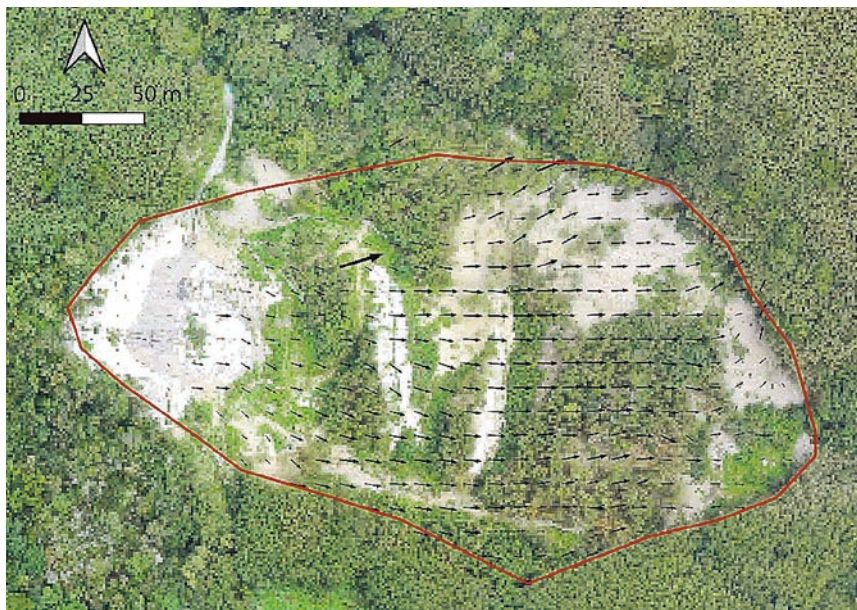
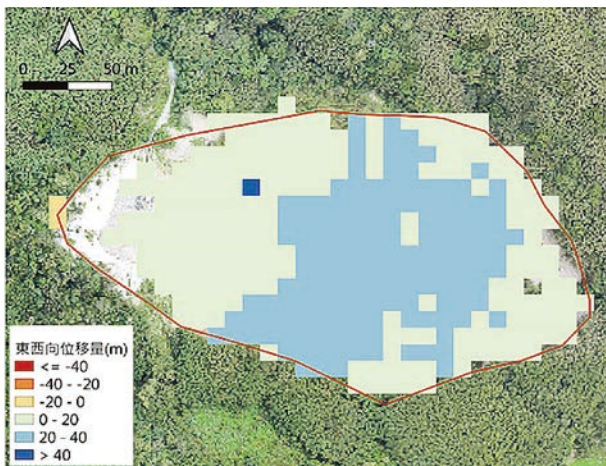


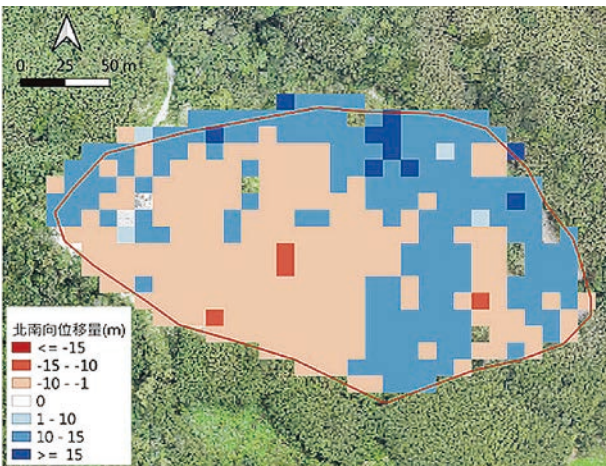
圖 4 DIC 分析之水平向地表位移

用。兩期數值地型模型的高程比較結果顯示（圖 5），光華崩塌上邊坡整體呈現高程下降的現象，最大下陷量約 7.6 公尺，而下邊坡則呈現高程上升的狀況，最大抬升量約 7.9 公尺。垂直向的變化表示崩塌塊體向下運動，導致上方塊體下陷，而下方塊體擠壓抬升。

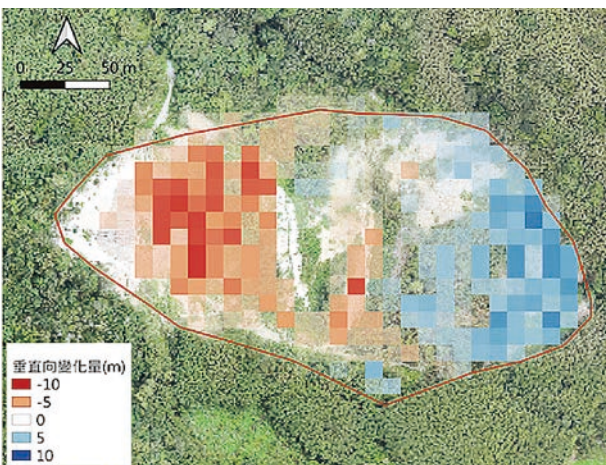
最後，將水平向位移分析結果與垂直向高程變化



(a) 東西向位移量



(b) 北南向位移量



(c) 垂直向變化量

圖 5 光華崩塌之三維地表變形

結果運用於反演光華崩塌的活動塊體厚度，其結果顯示最大崩塌深度達 54 公尺，平均深度約 13 公尺，體積約 58.5 萬立方公尺（圖 6）。比對 3 處孔內伸縮計觀察到的剪切深度，可以發現位於 K18-2BW 以及 K19-1BW 兩處的剪切深度與反演之塊體厚度一致，位於 K18-1BW 處的差異則較大。將崩塌厚度反演結果繪製成高程剖面，並與多種觀測資料所推估的崩塌機制進行比較，可以發現反演之崩塌滑動面高程可對應崩塌機制（圖 7）。其中主要滑動面型態可對應到崩塌機制中的破壞面 II（圖 7c），同時也可局部對應崩塌機制中的破壞面 III、IV 及 V。上述結果表示，崩塌厚度反演並不能取代現地觀測，但崩塌厚度反演有助於在缺乏或僅有少量的現地觀測狀況下，利用遙測影像及相關分析技術提供更細緻的三維滑動面幾何型態，同時提供崩塌塊體體積的推估量，也有助於選擇有效的現地監測點位。

結論

本研究將數位影像相關法（DIC）及崩塌厚度反演方法結合，分析光華崩塌滑動面的形態，得出厚度模型並計算活動塊體體積。在比對現地觀測資料後，得出以下結論：

1. 桃園光華崩塌的 GPS 監測指出，3 月至 8 月期間頭部崩崖附近的平面位移量約 1.4 公尺，迴彎處為 38.2 mm/d。DIC 分析顯示水平位移最大 39.7 公尺，平均 7.8 公尺。
2. 兩期數值地型模型分析可知，光華崩塌上邊坡高程下降 7.6 公尺，下邊坡上升 7.9 公尺，反映塊體運動導致上方下陷、下方擠壓。

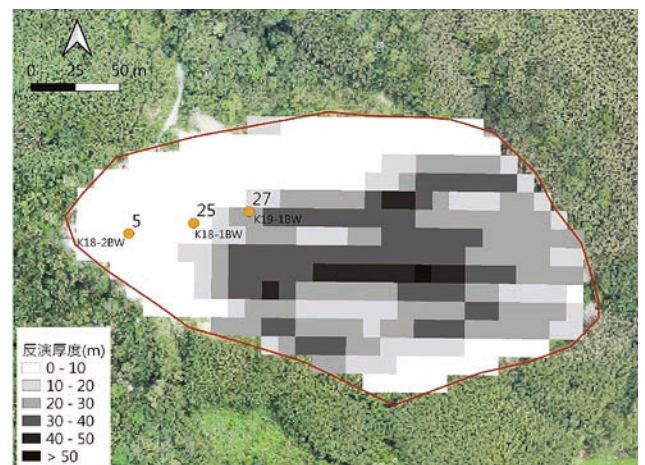


圖 6 崩塌厚度反演結果（圖中橘色點為孔內伸縮計觀測點及破壞深度）

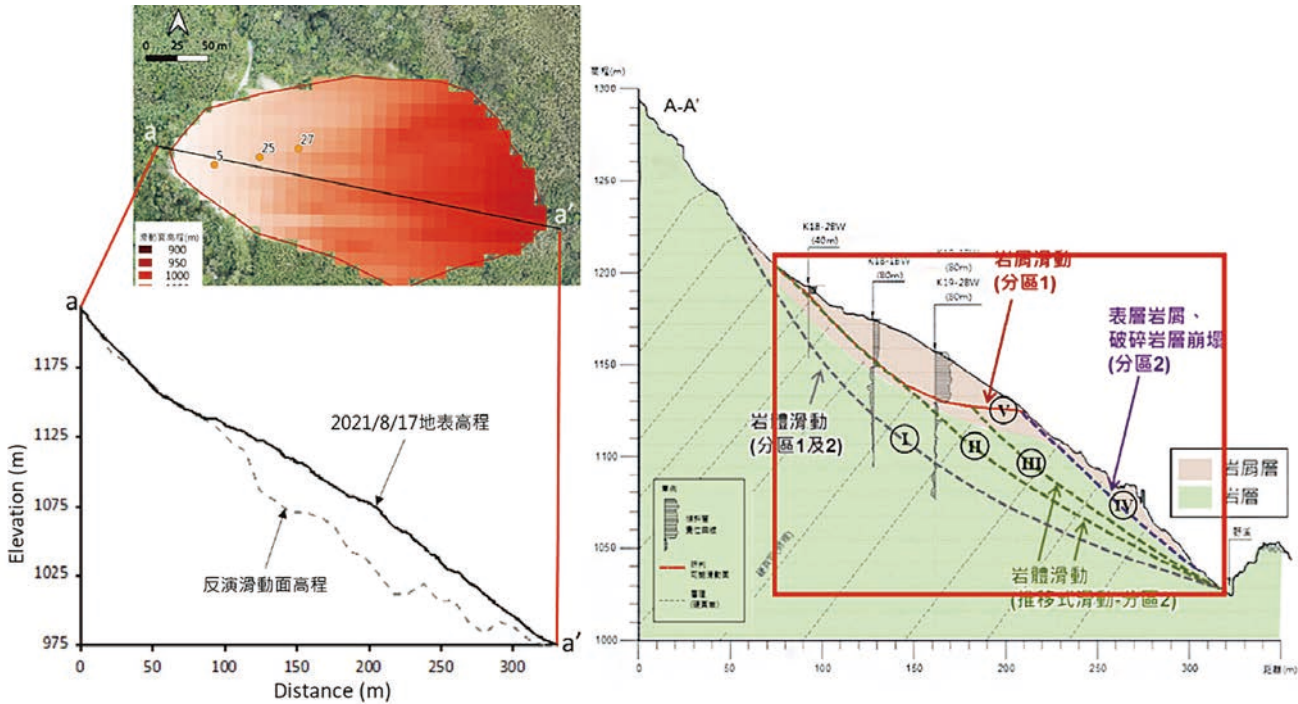


圖 7 反演滑動面與綜合多種觀測結果推測之崩塌機制比較，(a) 本研究反演之三維滑動面高程，(b) aa' 剖面之反演滑動面高程，(c) 光華崩塌崩塌機制示意圖（引用自農村發展及水土保持署大規模崩塌開放資料專區，紅色框為對應反演滑動面高程剖面的範圍，羅馬數字為推測之滑動面編號）。

3. 綜合水平位移與垂直高程變化，反演顯示最大崩塌深度 54 公尺，平均 13 公尺，體積約 58.5 萬立方公尺。反演結果與實際觀測相符，並且提供更細緻的滑動面形態及體積推估。

參考文獻

1. Jakob, M. (2005), "A size classification for debris flows." *Eng. Geol.* 79 (3), 151-161.
2. von Ruette, J., Lehmann, P., Or, D. (2016), "Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances." *Landslides* 13, 1097-1107.
3. Bontemps, N., Lacroix, P., and Marie-Pierre, D. (2018), "Inversion of deformation fields time-series from optical images, and application to the long term kinematics of slow-moving landslides in Peru." *Remote Sensing of Environment*, 210, 144-158.
4. Caporossi, P., Mazzanti, P., and Bozzano, F. (2018), "Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata, Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation." *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 7, 372.
5. Türk, T. (2018), "Determination of mass movements in slow-motion landslides by the Cosi-Corr method." *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9:1, 325-336.
6. Ali, E., Xu, W., and Ding, X. (2020), "Improved optical image matching time series inversion approach for monitoring dune migration in North Sinai Sand Sea: Algorithm procedure, application, and validation." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 106-124.
7. Mazzanti, P., Caporossi, P., and Muzi, R. (2020), "Sliding Time Master Digital Image Correlation Analyses of CubeSat Images for landslide Monitoring: The Rattlesnake Hills Landslide (USA)." *Remote Sens.* 2020, 12, 592.
8. Carter, M. and Bentley, S.P. (1985), "The geometry of slip surfaces beneath landslides: Predictions from surface measurements." *Can. Geotech. J.*, 22, 234-238.
9. Bishop, K.M. (1999), "Determination of translational landslide slip surface depth using balanced cross sections." *Environ. Eng. Geosci.*, 2, 147-156.
10. Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Truffer, M. (2009), "A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers." *J. Glaciol.*, 55(191), 422-430.
11. Morlighem, M., Rignot, E., Seroussi, H., Larour, E., Ben Dhia, H., and Aubry, D. (2011), "A mass conservation approach for mapping glacier ice thickness." *Geophys. Res. Lett.*, 38, L19503.
12. Booth, A.M., Lamb, M.P., Avouac, J., and Delacourt, C. (2013), "Landslide Velocity, Thickness, and Rheology from Remote Sensing: La Clapiere Landslide, France." *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4299-4304.
13. Delbridge B.G., Bürgmann, R., Fielding, E., Hensley, S., and Schulz, W.H. (2016), "Three-dimensional surface deformation derived from airborne interferometric UAVSAR: Application to the Slumgullion Landslide." *Journal of geophysical research*, 121(5), 3951-3977.
14. Hu, X., Lu, Z., Pierson, T.C., Kramer, R., and George, D.L. (2018), "Combining InSAR and GPS to determine transient movement and thickness of a seasonally active low gradient translational landslide." *Geophysical Research Letters*, 45, 1453-1462. <https://doi.org/10.1002/2017GL076623>
15. Handwerger, A.L., Fielding, E.J., Sangha, S.S., and Bekaert, P.S. (2022), "Landslide Sensitivity and Response to Precipitation Changes in Wet and Dry Climates." *Geophysical research letters*, 49(13).