



RTDT
技術研究發展小組
Research and Technology Development Team

質點影像量測技術之應用

報告者：林家興
2018年8月14日



大綱

1. 前言
2. PIV方法
3. 影像處理
4. 應用案例-Mobile-LSPIV
5. 應用案例-LSPIV to assess debris-flow velocity
6. 結論與建議

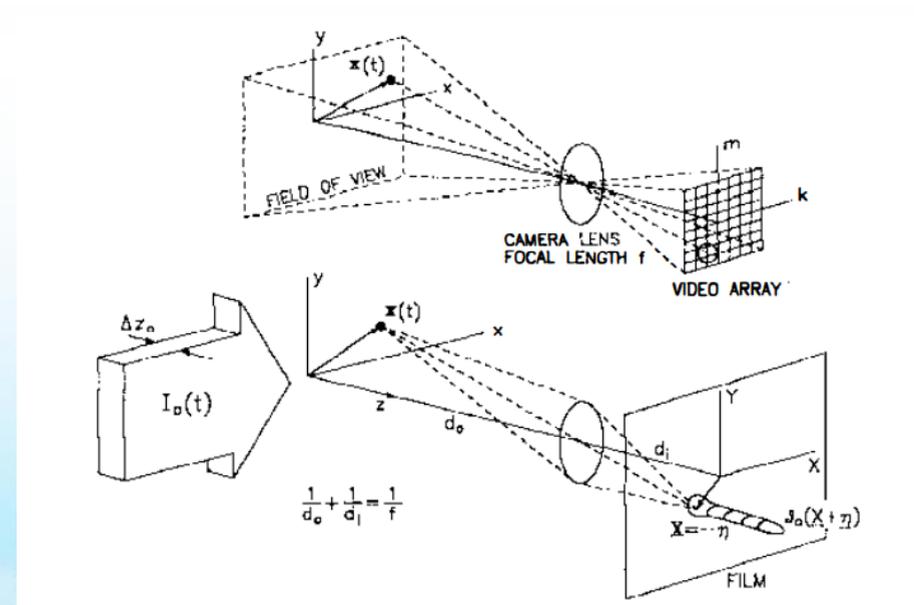
前言

- 在量測河川流速之量測方式有流速儀、都卜勒流速儀 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、微波雷達流速儀 (Microwave radar)、質點影像量測法 (Particle Image Velocimetry) 等。
- 在分辨的流速量測方法是接觸式或非接觸式，主要是以量測表面流速或是流速剖面兩種來區分。
- 近年來將PIV技術應用於現地河川表面流速量測，其好處為可以即時得到河川高空間解析、流況特性(流向與流速分布)、遠端操作及完全數位化，可避免測量儀器毀損及量測人員受傷風險。
- LSPIV可設置成單一測站，亦可整合成集水區觀察系統。量測之表面流速搭配地形資料，可以計算河川流量。

PIV 方法介紹

The fundamental idea behind the PIV technique is detection of movement of flow tracers in consecutive images.

- PIV (Particle Image Velocimetry)，是一種非接觸式流場量測技術。其特點為：
- 高空間解析 (high spatial resolution)
- 非接觸式 (non-instructive)
- 即時流速向量場 (real-time)
- 連續流速資料 (velocity at distribution successive time)



<https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

Adrian (1991), Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics. DOI: 10.1146/annurev.fluid.23.1.261

影像前處理

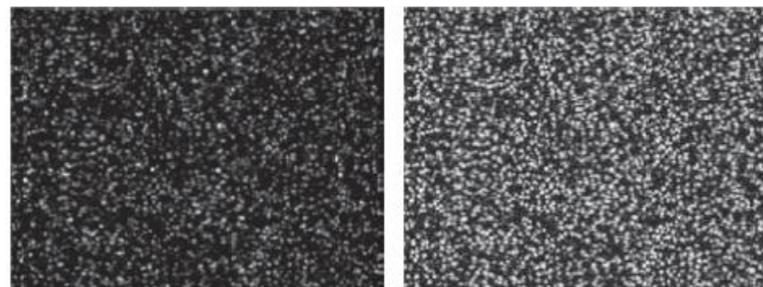
- 影像易受到取樣和自然環境影響，使質點訊號不夠明顯而造成計算誤差
- 透過影像前處理以影像濾波改善影像品質
- 限制對比適應化灰階值柱狀圖平均法(Contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)
- 高通濾波 (high-pass filter)
- 中值濾波
- 設定門檻值 (Intensity capping)

陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討要

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

影像前處理-限制對比適應化灰階值 柱狀圖平均法



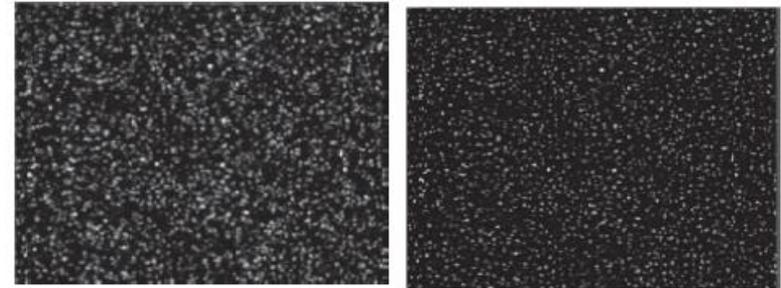
- 使用局部灰階值柱狀圖進行平均，加上限制對比度的條件，設定一門檻值，將超過門檻值的部分平均至下方，可增強影像對比度卻又不將雜訊放大。
- 此方法通常用來增加許多圖像的局部對比度，當圖像的對比度相當接近時，透過此方式亮度可以良好的分布在柱狀圖上，且不影響整體的對比度。

陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討要

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

影像前處理-高通濾波



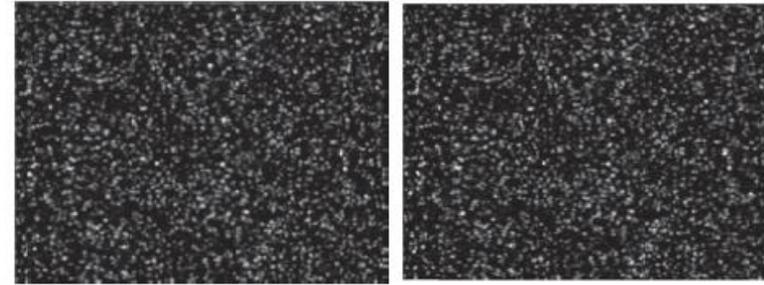
- 高通濾波用於將影像銳利化，使影像灰階變化大的部份提高影響，灰階變化平滑的部份降低其影響。
- 將欲增強之影像以傅立葉轉換後與濾波函數乘積，再取傅立葉反轉換即得增強後影像。
- 高通濾波能使追蹤質點之邊緣銳利，在影像分析上不會因質點邊緣模糊而將成群質點視為單一質點。
- 高通濾波功能是保持高頻部分，減少底頻部皆，使顆粒邊界變明顯。

陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討要

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

影像前處理-中值濾波



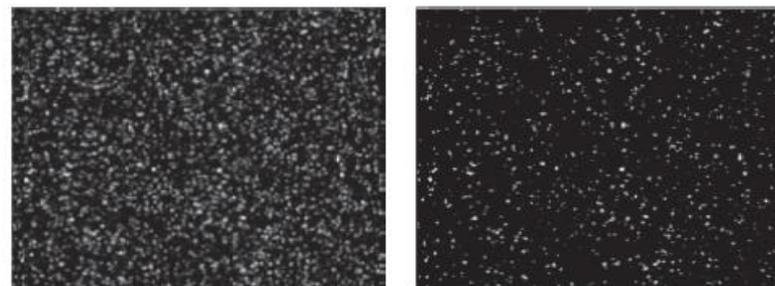
- 中值濾波的目的在於去除雜訊、減少突訊。
- 將正在運算的像素及其周邊像素，根據灰階值的數值大小按順序排列，將中間之灰階值取代成處理的像素的灰階值。
- 運用中值濾波能將原始影像之雜訊降低，在分析流場上，較不會產生異常流速向量。

陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討要

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

設定門檻值



- 設立影像灰階門值的門檻值，是影像前處理的最後步驟。影像經濾波處理後，再透過設定門檻值進行影像處理，可讓影像不會有過於突出(過高或過低)的訊號。
- 進行門檻值設定，讓PIV分析上，影像經由灰階門檻值設立，將不會產生極大或極小值的異常流速向量。
- 另不同影像因受取樣的環境影響，出現雜訊或是欲追蹤之質點訊號不清晰，透過影像前處理的濾波方法，可增加分析品質，減少計算流場誤差。

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

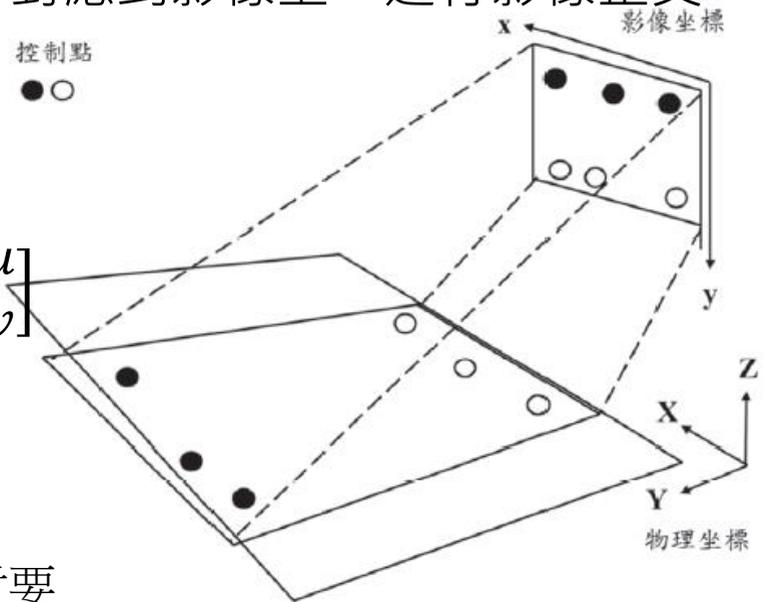
PIV計算之互相關函數(cross correlation function)

- 影像本身無法提供實際空間的尺度資訊，
- 影像上像素之間的距離與實際空間上的距離並不相同
- 透過現地參考點，得知相對空間坐標尺度，對應到影像上，進行影像正交轉換。

$$\bullet \quad u = \frac{L_1x + L_2y + L_3}{L_7x + L_8y + 1} \quad v = \frac{L_4x + L_5y + L_6}{L_7x + L_8y + 1}$$

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -vx & -vy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} L_1 - uL_7 & L_2 - uL_8 \\ L_4 - vL_7 & L_5 - vL_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_3 - u \\ L_6 - v \end{bmatrix}$$



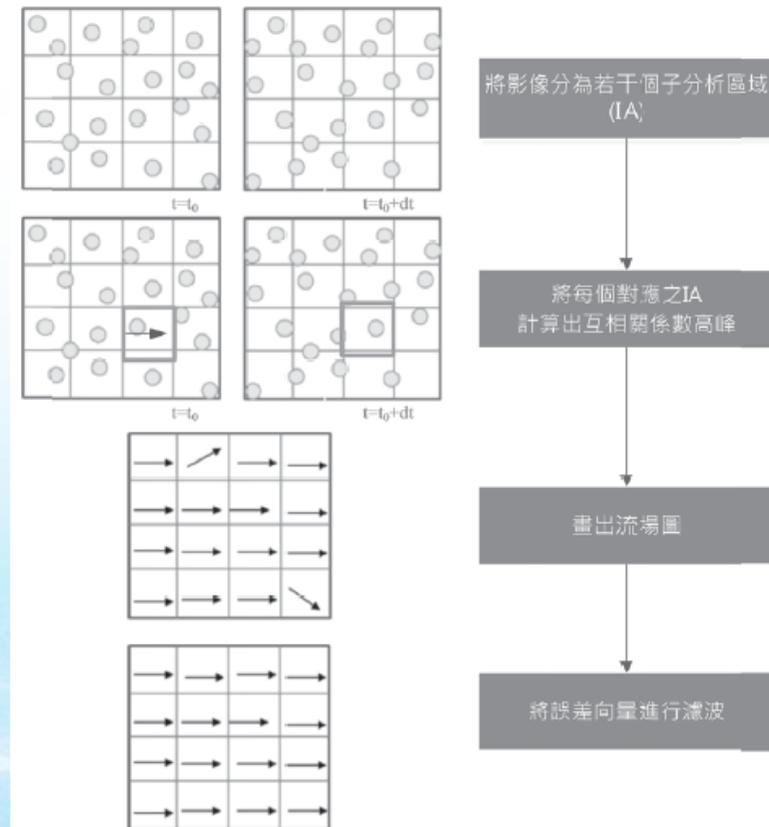
陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討要

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

PIV計算基本流程圖

- PIV的基本原理是由已知時間間隔 (Δt) 內量測流體顆粒的位移 (Δx)。
- 利用兩張影像進行位移量量測，將影像分割成小的分析區域 (grid of interrogation spots)。
- 利用離散數位影像相關性運算，將兩特定位置的IA分別做傅立葉轉換，計算出互相關函數之分析。可得到兩張連續影像的相特性隨空間分布的變化。
- 互相關係數的最大值位置與IA中心點的距離表示質點影像平均位移大小和方向，因此透過位移量除以兩張影像的間隔時間 Δt ，即可求出流速向量。



陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討

詹勳全等，2018，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試

賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析

應用案例-MLSPIV

- 行動式大尺度質點影像量測系統 (Mobile large-scale particle image velocimetry)
- 即時視覺化 (visualization)
- 量化流場特性(即時和平均)
- 高空間解析、即時、數位化 (high spatial resolution, real-time, fully digital)

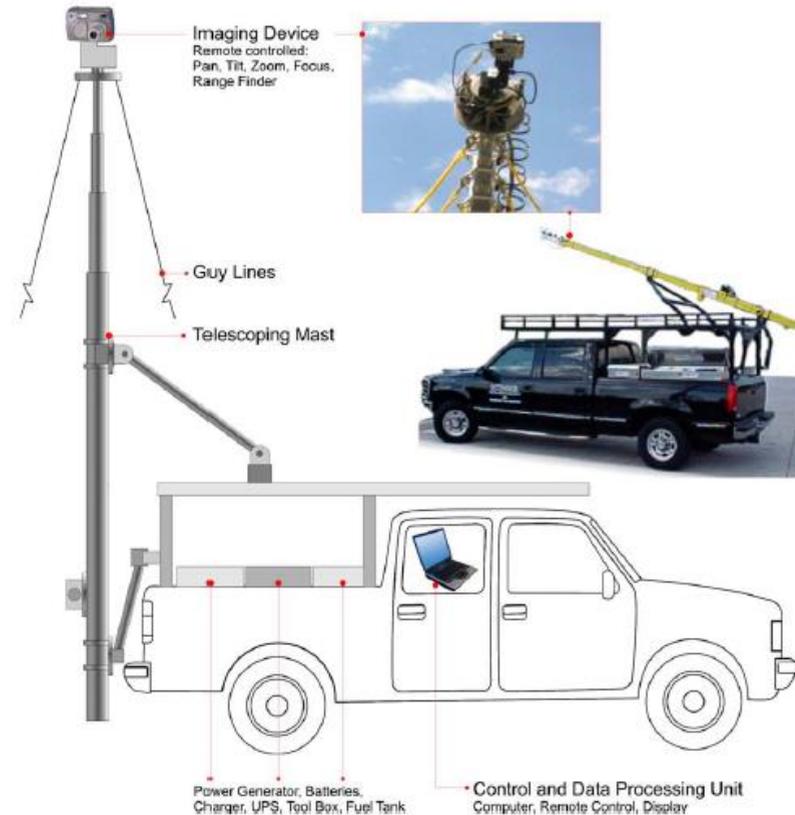
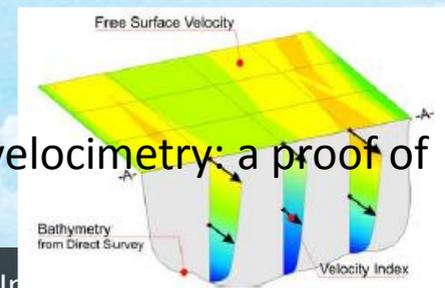
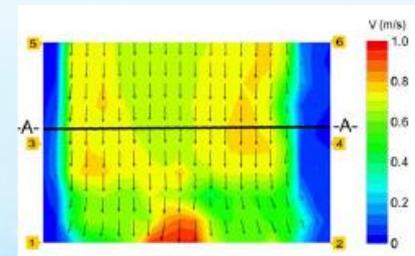
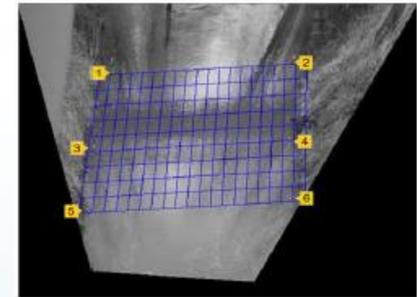


Figure 1. Schematic components of the mobile LSPIV system.

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, *Water Resour. Res.*, 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

應用案例-MLSPIV

- 1 設備及台車(setup the truck and peripherals)
- 2 攝影機位置及影像截取(Camera positioning and image acquisition)
- 3 影像處理流速及流量(Image processing to obtain the velocity fields and discharge)
- 無阻礙物條件-No obstructive conditions (topographic or vegetation)

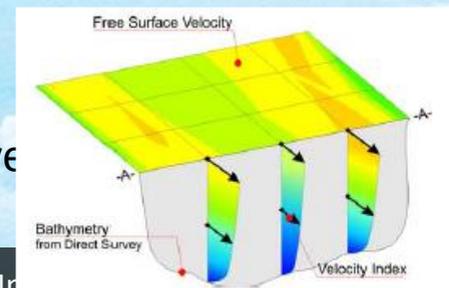
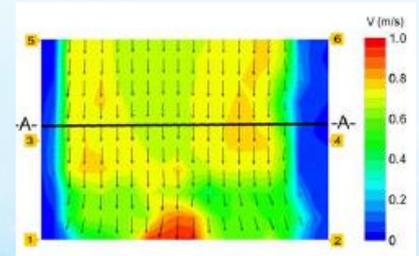
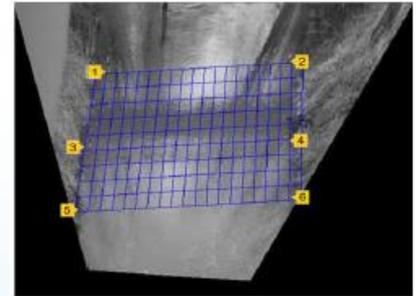


Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, *Water Resour. Res.*, 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

應用案例-MLSPIV

- 設置空間參考點 (oblique angle to the flow surface, perspective projection distortion)
- 由已知空間參考點進行幾何轉換，將影像扭曲校正(with a set of GRP of known locations, corrects for the distortion).
- 最少需設置4個空間參考點，宜靠近岸邊接近水面處。
- GRP的位置資訊可以藉由Total station 或是GPS快速取得。

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry concept, Water Resour. Res., 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.



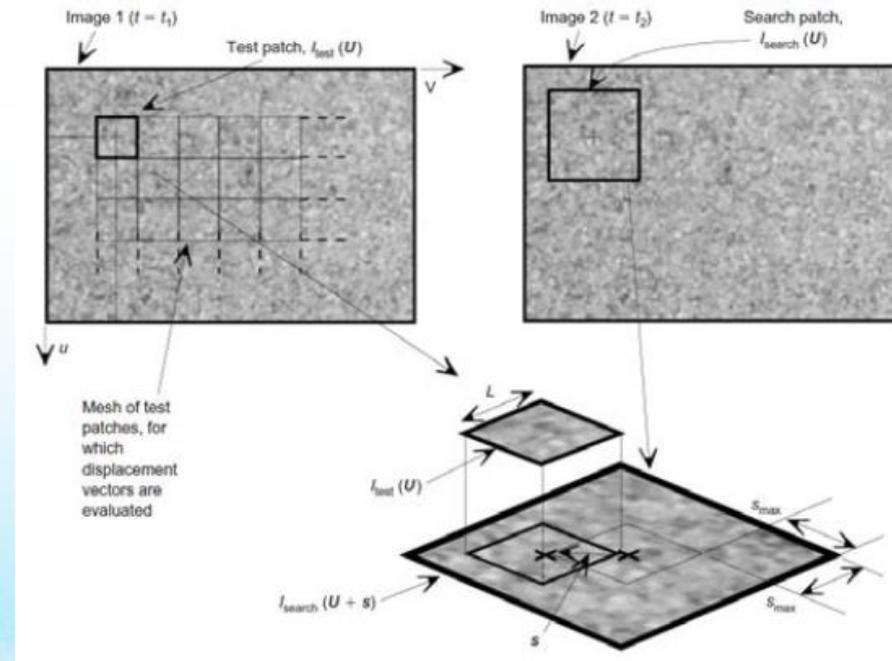
影像獲取 Image acquisition

- 使用自然可分解材料作為追蹤質點 Seeding of the flow with neutrally buoyant tracer particles
- 流場自然提作之泡沫或是漂浮物等作為追蹤質點 The field conditions provide natural seeding such as foam or floating debris.
- 自然質點定義為任何特別因子其產生視化圖型於自由液面 Natural seeding defines any particular combination of factors that produce visible patterns at the free surface.

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, *Water Resour. Res.*, 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

影像處理-Image processing

- 使用PIV技術，以成對影像進行流速估算 Using standard PIV techniques, a pair of images is processed to estimate surface velocity.
- 將影像分成數個分析及搜尋區域，且搜尋區域大於分析區域 The images are divided into several interrogation and search areas, and search areas are larger than interrogation areas. (Fujita et al. 1998)

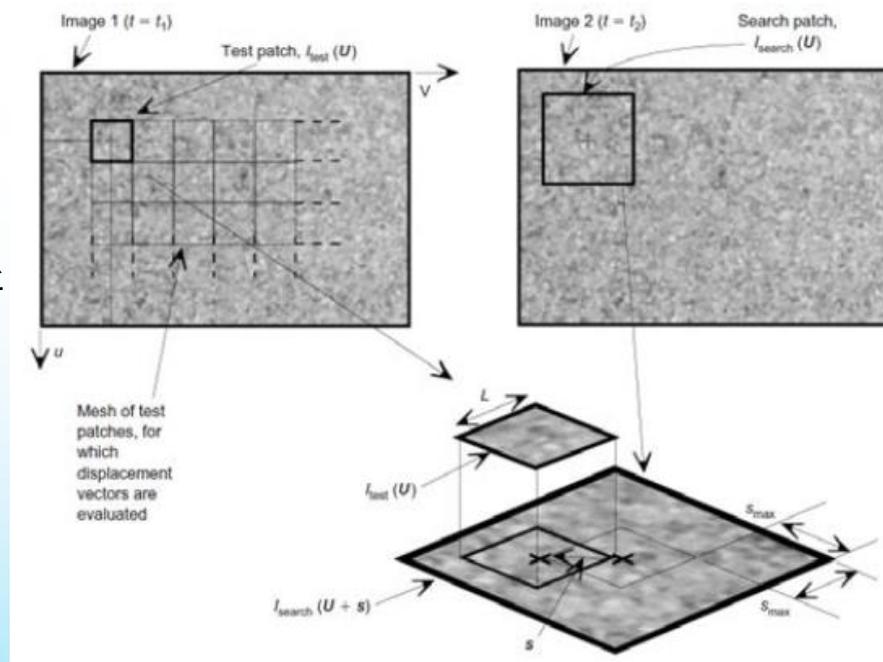


潘在祥等，2014，應用質點影像測速技術於崩塌地之滑動方向分析，2014 Taiwan Rock Engineering Symposium, Wufeng, Taichung, Taiwan.

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, Water Resour. Res., 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

影像處理-Image processing

- 藉由分析區域(interrogation area)求得最大互相關函數值以計算變動向量(displacement vector)。
- 整個流場的表面速度向量(surface velocity vector)由分析區域的尺度所決定的空間解析度計算出。
- 沿著斷面的表面流速藉由鄰近表面流速向量點資料進行線性內插計算而得。
- 藉由表面流速與河道底床地形資料，並配合適當的垂直流速分布，則可以估算出流量。



潘在祥等，2014，應用質點影像測速技術於崩塌地之滑動方向分析，2014 Taiwan Rock Engineering Symposium, Wufeng, Taichung, Taiwan.

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, Water Resour. Res., 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

Method Accuracy

- 誤差來源以照量測階段分為：照明(illumination)、質點粒子(seeding)、影像紀錄(recording)、轉換(transformation)、影像前處理(processing)、影像後處理(post-processing)。
- 全域誤差(Global errors)在影像面積裡是固定的，且影響到整個計算速度。
- 局部誤差(Local errors)影響從一個網格點到另一個另網格點。
- 整體上而言，估算之速度誤差大約在10%之內 (the errors were within 10% of the reference velocity)。
- 量測的正確性主要受到當地量測環境的影響，特性是照明和質點粒子的情況。

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, *Water Resour. Res.*, 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

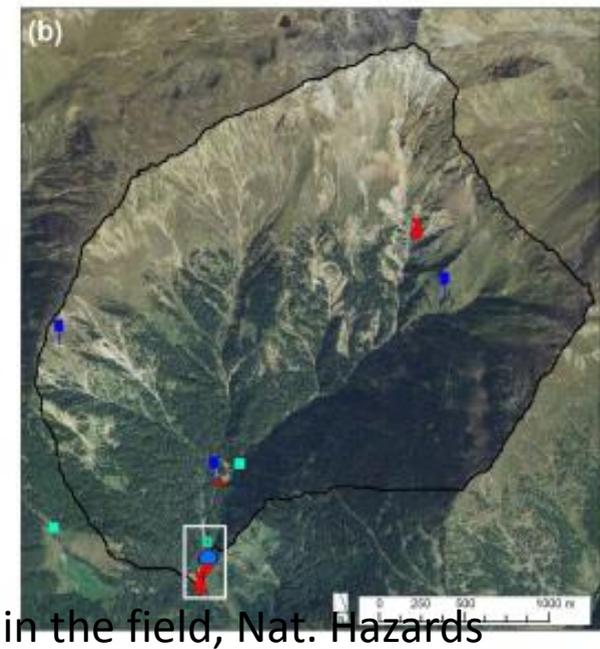
結語

- Mobile LSPIV 可以量測自由液面流速分布，適用白天時在小至中尺度河道系統中。
- 此系統的主要5個誤差來源：追蹤(tracing)，取樣時間(sampling time)，距離(distance)，明確參考點(GRP)，質點密度(seeding density)。
- 此研究案例量測流量與USGS實測值比較誤差約為-2% ($5.2\text{m}^3/\text{s} - 5.1\text{m}^3/\text{s}$)，而與使用StreamPro ADCP誤差約為-5.5% ($4.9\text{m}^3/\text{s} - 5.1\text{m}^3/\text{s}$)。

Kim et al. (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept, Water Resour. Res., 44, W09502, doi: 10.1029/2006WR005441.

應用案例-LSPIV to assess debris-flow velocities

- The Gadria catchment (Venosta Valley, South Tyrol, eastern Italian Alps)
- Area: 6.3 km² (EL: 1394~ 2945 m a. s. l.)
- Average Slope: 79.1%
- The catchment prone to rockfall, landslides, avalanches, and debris flows.
- Mean volume of debris flow: 14,000 m³.
- Sediment yield: 5200 m³km⁻²yr⁻¹.



Theule et al. (2008), Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 1-13, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1-2018>.



Setting

- 土石流堆積扇附近架設兩台攝影機: Cam 1 朝向上游方向, Cam 2則是朝向下游方向。
- 攝影機3則是位於較上游河道處。
- 攝影機4則是位於更上游河道處, 其由降雨所啟動 (triggered by a rain gauge)。
- LSPIV分析僅使用攝影機2 (MOBOTIX M12 video cameras)。
- 攝影機1及3則是因太靠近河道, 且其參考點不足, 加上空間疊合範圍太小, 不適合LSPIV分析使用。
- 攝影機2位於堤防上, 距分析之LSPIV區域約高12-46m左右, 且其且流向垂直。
- 攝影機4則是由於未渠道化河道, 加上攝影機與移動土砂過遠, 造成無法分析。
- Camera frequency: 2-3 fps; Resolution: 5cm/pixel;

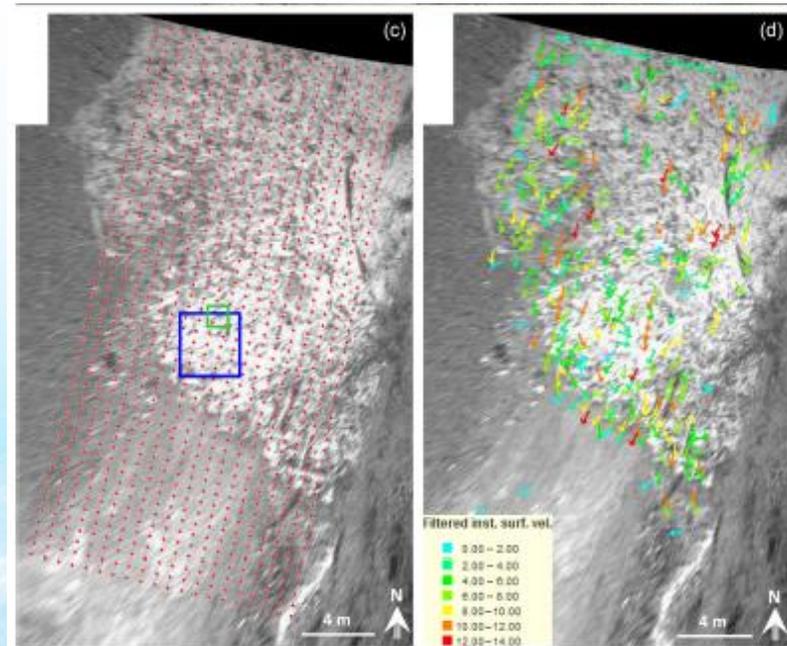
	2013	2014	2015
resolution	5 cm pixel ⁻¹		
alignment error near the flow plane	3-10 cm	4-7 cm	8-13 cm
# reference points	13	13	14
interrogation area	26 pixel (1.3 m)		
search area (pixels)	75-100 down; 5 up; 35-50 left; 30-50 right		
time step	0.333 s	0.5 s	0.5 s
grid	0.4-1.2 m		
area	28-35 m long and 7-32 m wide		



LSPIV calculation



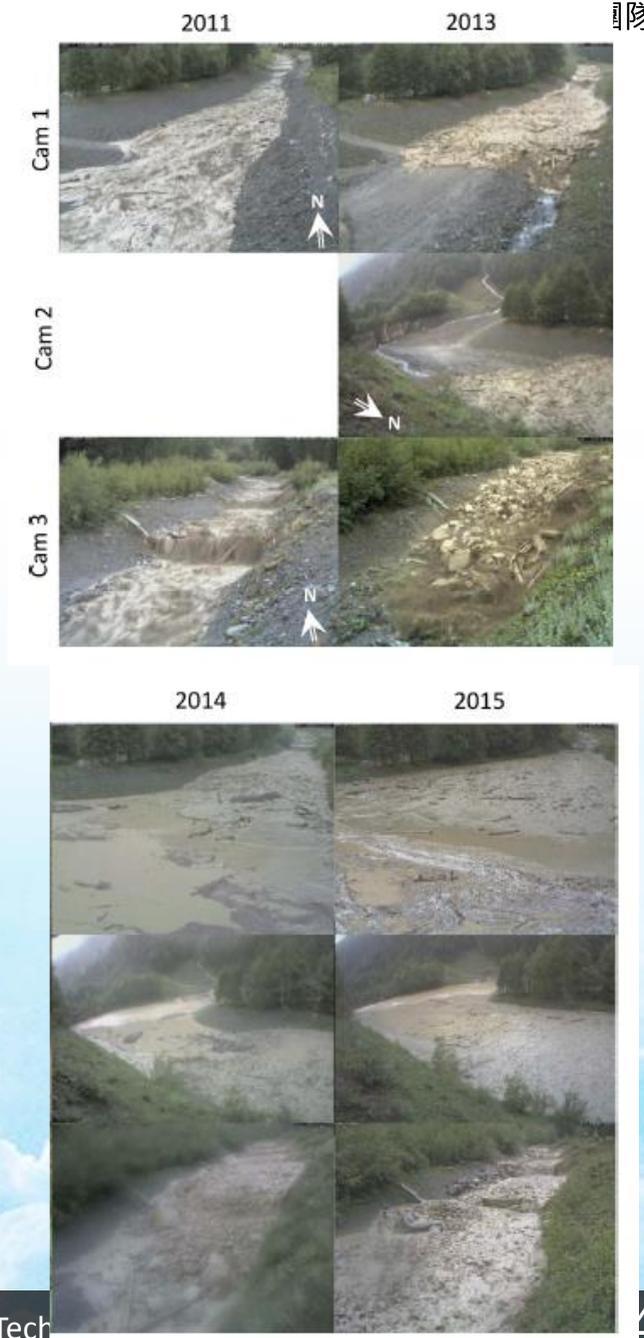
- 利用高解析點雲資料(High-resolution point clouds)與影像內參考點。
- 設定分析區域(interrogation area, IA)之邊界，進行互相關係數計算。
- 尋找每一個時間間隔裡的移動距離(travel distance)。
- IA設定為26x26 pixel (1.3x1.3m); search area設定為75-100 pixels (3.75-5m)。
- 網格空間約為0.7m。
- 受到降雨、風、及光線折射改變，造成雜訊產生(Noisy data)，利用手動處理及分辨不同雜訊予以去除，以獲得較正確之計算值。





LSPIV calculation

- 河段速度向量的空間分布提供了檢驗其方向及速度波動(direction and velocity fluctuation) , 且可歸納不同土石流波峰紊流的特性(turbulence of the various debris-flow surges.)。
- 二維水平紊流指標 : directional variation (T_d) and velocity variation (T_v).
- Small T_v and T_d characterize laminar flow conditions
- High T_v and T_d characterize more turbulent flows
- 由於受到土石流淤積及再啟動(deposition and remobilization)等特性影響 , 此研究無量測土石流流量。



Analyzed events

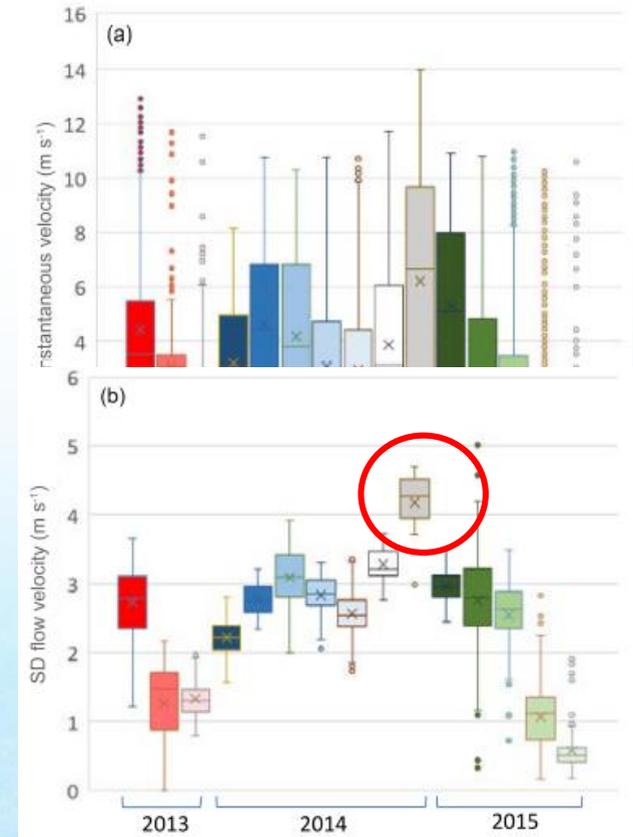
- 2011至2015共計有4場事件
- 2011 event: hyper concentrated flow
- 2013 event: debris-flow; 2014 event: debris-flow
- 2015 event: woody debris, muddier flow, visco-plastic flow

Event	Surge	Time	LSPIV				Visual		Radar sensors (70 and 150 m upstream from LSPIV)	
			velocity (m s^{-1})	width (m)	T_d ($^\circ$)	T_v (m s^{-1})	sediment concentration	velocity (m s^{-1})	velocity (m s^{-1})	average height (m)
2011	HF surge	18:00–18:30	–	–	–	–	low	–	2.6	
2013	S1 front	17:23:10–17:23:26	4.4	19	24.5	2.7	high	4.4	5.7	1.9
	S1 inter.	17:23:35–17:23:42	3.1	18	15.2	1.3	medium	2.4	–	1.6
	S1 tail	17:23:43–17:24:05	1.9	17	24.6	1.3	medium	2.6	–	1.0
2014	Pre-surge	17:13:45–17:15:13	3.2	7	33.8	2.2	low	2.7	–	0.4
	S1*	17:22:01–17:22:17	4.6	23	36.0	2.8	medium	5.6	5.3	1
	S1 tail*	17:22:20–17:22:49	4.2	13	32.6	3.1	medium	4.4	4.8	0.5
	S2	17:25:43–17:26:04	3.1	22	32.3	2.8	high	3.3	4.1	0.9
	S2 tail	17:26:10–17:27:00	2.9	15	34.1	2.6	high	2.8	3.6	0.7
	S3	17:29:24–17:29:40	3.9	14	32.3	3.3	high	4.4	4.8	0.9
	S4 (wave)	17:30:13–17:30:21	6.2	8	31.3	4.2	low	6.9	3.5	0.7
2015	S1	17:16:52–17:17:15	5.6	14	33.2	3.0	low	4.9	–	0.8
	S2	17:20:05–17:21:02	2.5	17	30.7	2.8	high	3.0	3.5	0.8
	S3	17:23:30–17:24:01	2.2	22	29.2	2.5	high	1.5	3.5	1.25
	S4	17:24:25–17:25:12	0.6	20	21.5	1.1	very high	0.7	–	0.6
	S5	17:26:54–17:27:39	0.8	16	9.4	0.6	very high	1.0	–	0.8

* The first actual debris-flow surge stopped between the LSPIV and the radar. It remobilized with S1.

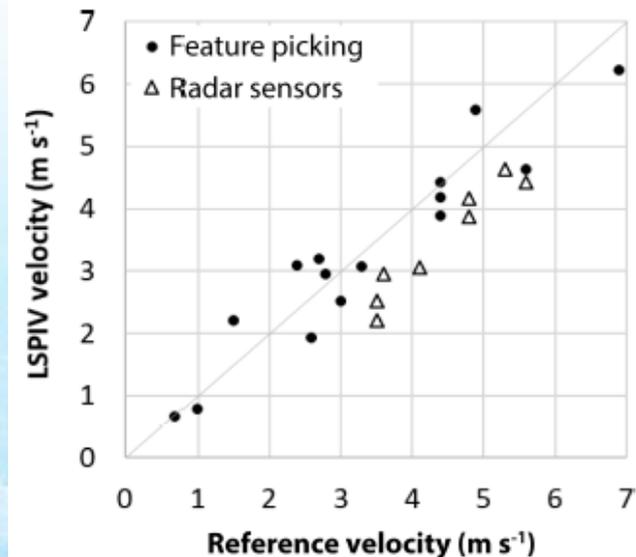
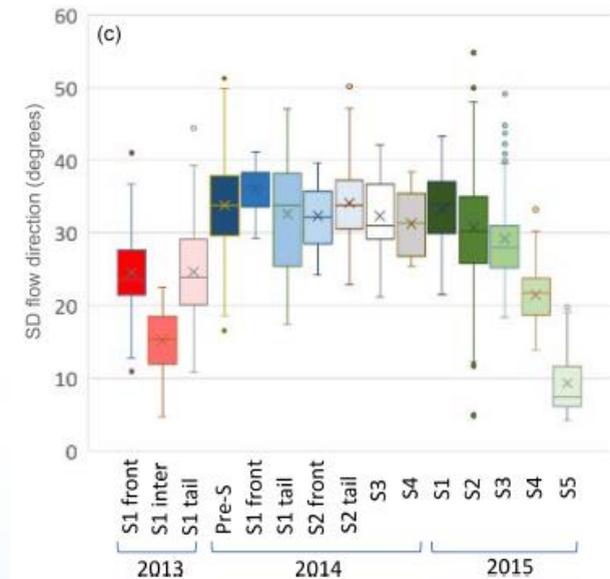
Surface flow velocities

- 平均表面流速約為 0.6 to 6.2 m/s。
- 紊流速度(T_v)變動約為 0.6 to 4.6 m/s。
- 紊流方向(T_d)變動約為 9.4 to 36°。
- 2013影像頻率為3fps; 2014及2015影像頻率為2fps。
- 2014 S4階段其紊流速度(T_v)特別高，可能是由於表面波動影響(wave passing through slurry)。
- LSPIV較輕微低估表面流速，其差誤約為0.1m/s，標準差為0.54 m/s。
- LSPIV估算表面流速較穩定，由於其大範圍取樣尺度關係。
- 但由正射影像手動選取特徵點(feature picking)進行表面流速計算時，其結果不太能正確代表表面流速。



Surface flow velocities

- The LSPIV velocities vs radar sensors (70-150m upstream) vs feature picking (orthorectified image).
- LSPIV量測表面流速與雷達微波量測，其差誤約為0.9m/s，標準差為0.25 m/s。
- 雷達微波有時量測不到事件流速，特別是在2015年的事件，其為粘滯性流體(visco-plastic surges)，因此當其流動停止或尚未受到下一波峰推動時，雷達微波量測無法將所有波峰追蹤到。



Pattern of flow velocities from the 2013 debris flow

- Debris flow front: 整個分析河道呈現高度分散的平均流速(high scattered average velocities)狀態。
- Debris flow intermediate: 在中期時，表面流速降低且呈現明顯的均勻分布。
- Debris flow tail: 在尾期時，量測到較低表面流速是受到礫石沉積影響，其流動呈現層流 (laminar flow) 狀態。

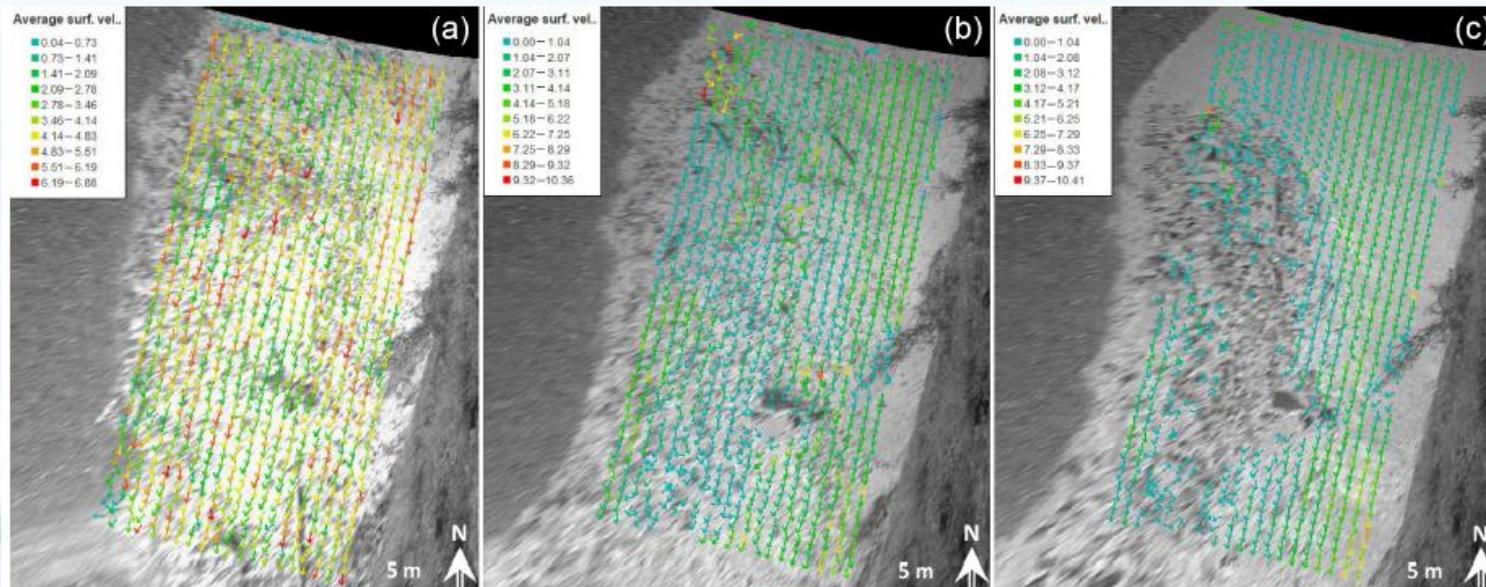
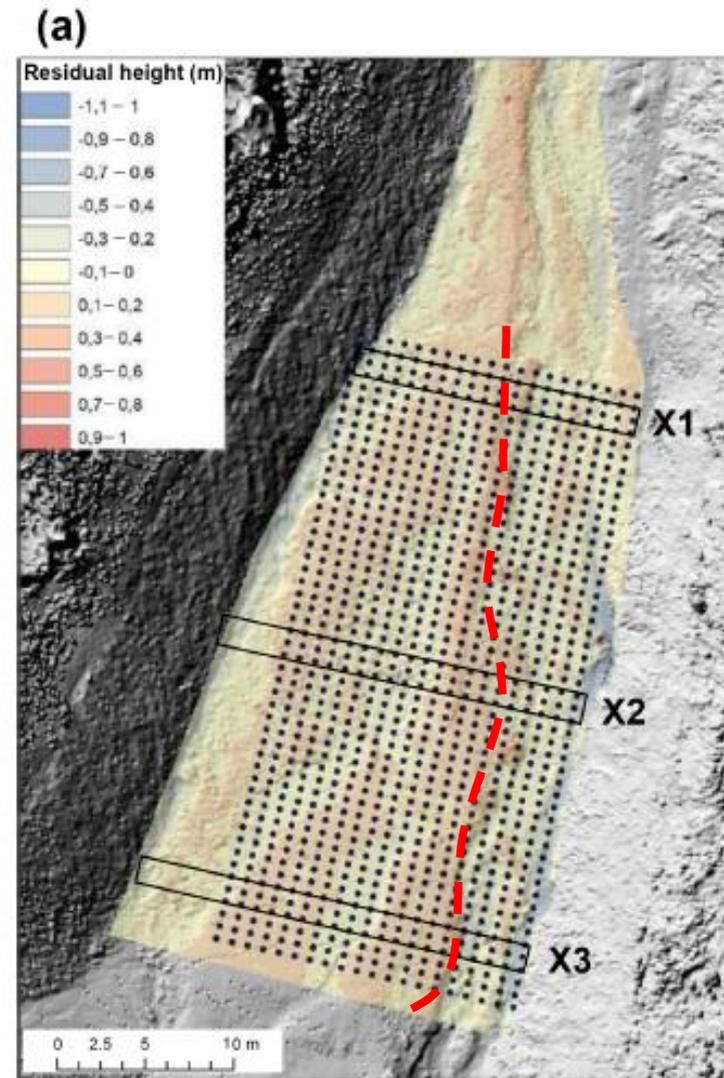


Figure 6. Average LSPIV velocities (m s^{-1}) for the 2013 debris-flow front (a), intermediate (b), and tail (c).

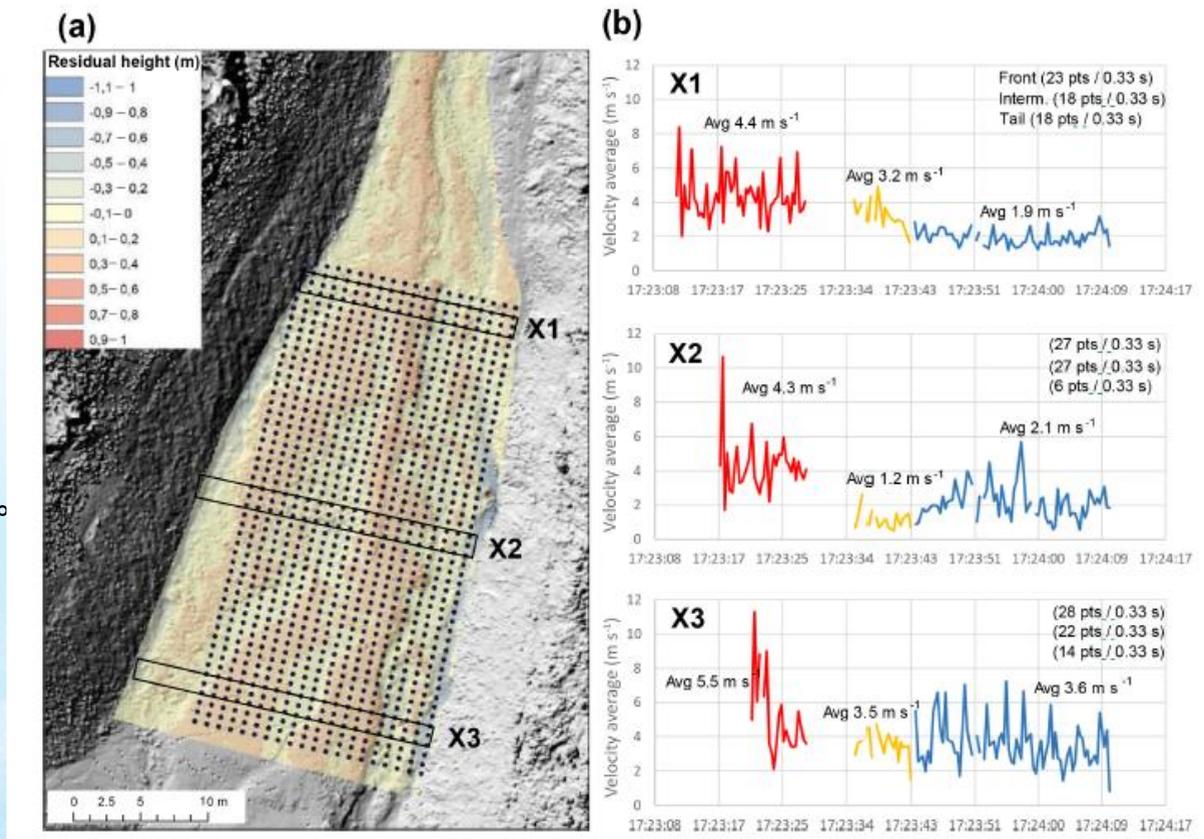
Pattern of flow velocities from the 2013 debris flow

- The residual height(difference between SfM DEM and Smoothed mean DEM):
- 沿著左岸呈現束縮型態河道
- 大量堆積在右岸及中間河道
- 礫石前緣堆積在凸岸處
- 這些河道地形特徵亦反應到流動變化上，如當水流經過堆積前緣和束縮河道時的流速變化。



Pattern of flow velocities from the 2013 debris flow

- 利用X1, X2, X3斷面檢驗流速隨時間變化。
- 在初始時尖峰流速隨時間逐漸降低。
- 在中期時，由於受到礫石堆積影響，造成流速明顯下降。
- 在後期，流速些微增加，是由於受到河道堆積束縮河寬所致。



Conclusions

- 使用LSPIV量測3場土石流事件，並與正射校正影像特徵點判釋流速和雷達量測速流進行比對，其平均流速差異分別為0.1 m/s 及0.9 m/s。
- 建議：(1) 要確保攝影機的最小幀幅數是足夠捕抓到流動狀態; (2) 攝影機要架設在足夠高的位置，且與流向垂直; (3) 於低流速時，以現地材料如樹葉當成質點以利量測; (4) 避免相機反射過大，造成影像扭曲變形(distortion)過大。
- 未來在研究LSPIV所量測流速時，可以著重在量測表面流速受河道糙度及河道地形變動的影響。

參考文獻

- Y. Kim, M. Muste, A. Hauet, W.F. Wrajeski, A. Kruger, A. Bradley (2008), Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry, Water Resources Research, Vol. 44, W09502.
- Ryota Tsubaki, Ichiro Fujita, Kwonkyu Yu, Marian Muste (2015), Development of LSPIV system utilizing smartphone, 河川流量觀測新時代，第5卷，頁38-42。
- Theule et al. (2008), Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 1-13, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1-2018>.
- Adrian (1991), Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics. DOI: 10.1146/annurev.fluid.23.1.261
- <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>
- 廖泰杉等，2013，災害預警儀器與系統技術發展-透過影像與微波雷達技術推估河川表面流速
- 陸珺華，2016，粒子影像測速法於複合流體行為之探討要，碩士論文，成大，台南。
- 詹勳全等，2016，無人載具大尺度質點影像量測系統研發與初步測試，臺灣水利，64(1)。
- 賴進松等，2015，UAV影像技術應用於河道洪水水位及流場之模擬分析，中國土木水利工程學刊，27(3)。
- 潘在祥等，2014，應用質點影像測速技術於崩塌地之滑動方向分析，2014 Taiwan Rock Engineering Symposium, Wufeng, Taichung, Taiwan.



RTDT

技術研究發展小組

Research and Technology Development Team

Thank you for your attention

水保局技研小組 林家興

聯絡資訊：lin0710@mail.swcb.gov.tw