

影像分析方法應用於土石流表面速度計算之研究

Application of Image Velocimetry for the Surface Velocity of Debris Flow

國立成功大學
水利及海洋工程學系
副教授

呂 珍 謀

Jan-Mou Leu

致遠管理學院
電腦與通訊學系
助理教授

李 明 靜*

Ming-Ching Lee

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

賴 泉 基

Chan-Ji Lai

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士後研究

詹 勳 全

Hsun-Chuan Chan

國立成功大學
水利及海洋工程學系
碩士

林 國 暉

Kuo-Hui Lin

摘 要

本文利用影像分析法計算水面顆粒流移動的速度，以做為發展土石流影像監測系統之依據，以期低成本的監視影像除作為定性監視土石流動外，亦可作為定量分析土石流流速之依據。本文於實驗渠道以顆粒流實驗模擬土石流移動，並利用 Cross - Correlation、MQD、STDS 等影像演算法分析計算不同顆粒流密度移動時的表面流速，以探討適宜於土石流計算之演算法。實驗結果顯示 Cross - Correlation 適合於流場追蹤粒子密度較大之流場，STDS 則在大顆粒流場量測有較好的結果，將研究結果初步應用於水土保持局所提供的現場土石流影像計算亦獲得良好結果。

關鍵詞：土石流，影像監測，表面流速。

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present an analysis of image process for computing the surface velocity of the granular flow to develop the video monitoring system of the

*通訊作者，致遠管理學院電腦與通訊學系助理教授，72153 台南縣麻豆鎮南勢里 87 之 1 號，mikelee@dwu.edu.tw

debris flows, and the low cost commercial Video-base systems can be also used to measure the velocity of the debris flow. In order to study the suit image recognizing method for the debris flows, the experiments of the granular flow are simulated as the debris flows; moreover, image recognizing method, Cross – Correlation, MQD, and STDS are used to compute the surface velocity. According to the results, Cross – Correlation method is useful to compute the surface velocity in higher density of the granular particles, however, STDS method is good to measure the movement of the big particles. Lastly, the nature debris flow images from the monitor of Soil and Water Conservation Bureau are analyzed to obtain the surface velocity by the image process.

Keywords: Debris flows, Video monitoring system, Surface velocity.

一、前言

土石流災害長久以來一直威脅著人們生命與財產的安全，尤其台灣地形與氣候變遷等因素，使得土石流及洪水等天然災害的破壞力更為驚人且難以預測。因此從預警及工程安全設計上著手以期降低此類災害對人類的傷害更顯重要，然而預警模式的建立或規劃設計通常需要有正確的觀測資料為依據，例如流速、流量、含沙量及粒徑等等，才能獲得準確的資訊。但洪水流通常具有很大的危險性，其量測甚為不易，故發展遙測技術以作為預警及工程設計上之依據實為現今水文觀測現代化重要的工作。近年來由於微波都卜勒雷達、影像量測(Video-based)等技術精進，許多學者致力於發展遙測技術。Itakura and Suwa (1989)、Itakura *et al.* (1991)利用硬體式(hardware-based)空間濾波測速儀量測土石流的表面平均流速，而 Uddin *et al.* (1999)針對硬體式在濾波參數的設定上有不便之處，發展了軟體式(computer-based)空間濾波測速儀；Inaba *et al.* (1997, 2000)依據 Ando (1986)所發展之 STDS (Spatio-Temporal Derivative Space)影像處理技術量測土石流表面流速分布。此外，Fujita *et al.* (1998)、Kinoshita *et al.* (1992)等亦分別發展影像相關分析技術，計算漂浮物的移動以獲得表面流速分布。現階段由於影像監視技術發展快速，高階影像設備商業化的結果使其成本相對降低甚多，故許多河道或土石流可能發生區普

遍架設監視器。然而大量可貴的影像資料卻很少從事定量分析，通常僅從事定性化監看，缺乏影像量化參數的校正與率定，殊為可惜。

為進一步探討影像量測方法對於顆粒流動的適用性，以期進一步應用於戶外土石流量測，本文於實驗渠道以一般商用攝影機擷取顆粒流動行為，並利用 Cross-Correlation、MQD、STDS 等影像演算法分析探討顆粒流動速度，以做為日後以監視影像計算分析時之依據。

二、研究方法

2.1 影像前置處理

監視影像在資料擷取與視訊轉換時，易受系統取樣、環境因素及幾何變形影響對影像產生破壞，尤其是幾何變形。因此在進行影像分析之前需先從事影像增強與復原模型校正，以改善影像品質，增加視覺效果或欲突顯的訊號，以增加計算機處理的正確性。以下針對影像增強與復原、分割及辨識等前置處理方法加以說明之。

2.1.1 影像增強與復原

影像增強的處理方式，一般可分為空間域及頻率域二種。空間域的處理方法主要是經由對影像平面上圖元強度的調整去強化影像，即利用遮罩逐點對影像做處理。假設輸入影像為 f ，遮罩處理方式為 T ，則輸出影像 $g = T \cdot [f]$ 。頻率域的處理方式主要是利用傅立葉轉換及旋積計算去處理影像，當影像進行傅立葉轉換後，物體邊緣或灰階度變動較劇烈的部分反應在傅立葉係

數中高頻部分，平滑部分則反應在低頻部分。依據此原理，若要取低通濾波，則可降低高頻部分的係數，再對處理過之轉換係數取反傅立葉轉換，即可得到低通濾波之效果。反之，若降低低頻係數則可獲得高通濾波之效果。若假設二維平面影像坐標 $x、y$ ，其影像處理前、後之影像函數分別為 $f(x,y)$ 與 $g(x,y)$ ，其對應之頻率域函數分別為 $G(u,v)$ 與 $F(u,v)$ ， $H(u,v)$ 為濾波器的脈衝響應，則 $G(u,v) = H(u,v)F(u,v)$ ，再經反傅立葉轉換後即可獲得處理過之影像 $g(x,y)$ 。

影像復原主要是運用已知的破壞模型來重建或恢復影像，而戶外大尺度的影像破壞模型主要包括，攝影機拍攝位置、鏡頭畸變、地形畸變、地球曲率，其主要導源於未正射物體影像。現有之影像監視系統，大多數以側視擷取水面影像，故需將其校正為正射影像。若不考慮高差移位的狀況時，側視影像之投影校正方法可分為二種(a) 根據鏡頭視角參數及影像聚焦投影幾何特性進行校正影像 (b) 選取影像上地面控制點，代入座標轉換模型以進行校正影像；至於控制點的取得方式包括現地量測、參考向量影像或已校正影像。

a. 根據鏡頭參數及影像聚焦投影

側視影像之映射投影模型如圖 1 所示，圖 1(a) 顯示一般現場可供座標標定物之物件，圖 1(b) 為由攝影機鏡頭位置映射至 XY 平面上空間幾何特性，其中 h 為平面投影深度， $x_1 \sim x_4$ 為影像範圍邊界， θ 為投影仰角， ϕ 為水平方位角，利用以上投影參數配合鏡頭視角 2α 則可依據三角投影關係將側視影像轉換為正射影像。

b. 根據影像上地面控制點

經由地面控制點校正影像，首先須選擇正確的影像破壞模型，依據影像投影關係三次映射矩陣可表為

$$\begin{bmatrix} xw \\ yw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

上式中， (X,Y,Z) 為物理座標， (x,y) 為影像座

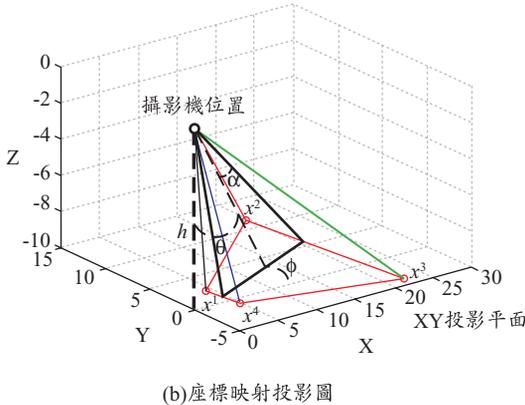
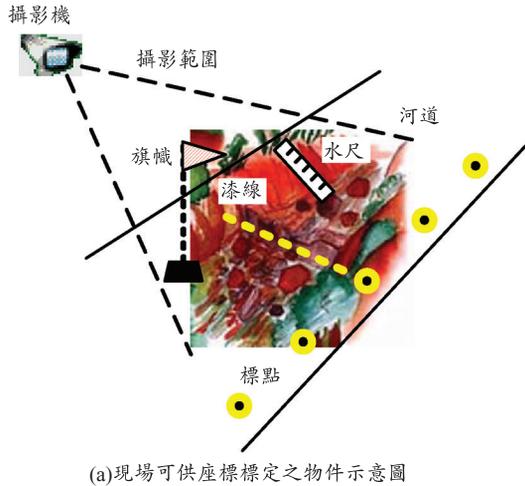


圖 1 側視影像可供座標標定物之示意圖及映射投影圖

標，係數 a_{12} 為座標間的尺度變換因數，若忽略尺度大小的改變可令其為 1， w 為非零數用以決定座標轉換的形式，重新整理上式，得

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -xX & -xY & -xZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -yX & -yY & -yZ \end{bmatrix} [a] = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

其中轉換係數 $a = [a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 a_9 a_{10} a_{11}]^T$ 。因此，欲解上式，至少需 6 個以上已知的實際座標標示點，以最小二乘法求解，可求得轉換係數 a 。通常影像座標在深度高差方向的投影解析度很小計算誤差較大，需使用二部攝影機才能有較理想的深度解析。本研究計畫擬利用現場

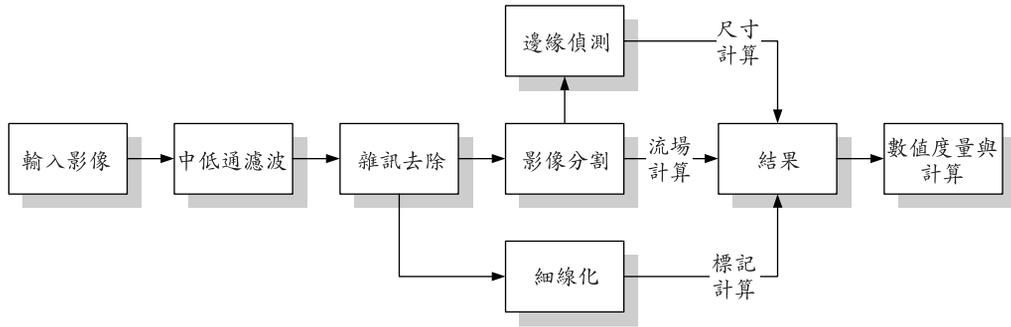


圖 2 影像分割圖形分析流程

地形量測配合數位攝影機，建立監視鏡頭的影像復原模型，以供後續數值影像分析。

2.1.2 分割及辨識

分析土石顆粒、底床粒徑或分割岸置標的物時，必須突顯目標物之影像，並將之與背景影像分割。因此當輸入原始數位影像後，首先對影像增強及幾何校正等前置處理後，接著利用影像分割方法分離背景。影像分割處理可以定義為各相類似的像素所相連而成，其處理方法包括臨界值法、邊界法、區域法、邊緣法等處理分析，臨界值法是一種以臨界值區分物體與背景的簡單方法，其執行效率最高，邊界法則是以尋找二區域間邊界的方法，區域法是一種僅認定某一個像素集合為一個物體或區域的方法，邊緣法則是辨認像素邊界，並將之連結在一起找出物體邊界的方法。本研究擬利用上述方法分離顆粒、標的物與背景，以獲得影像校正與復原參數，進而能藉由影像分析獲得顆粒或土石流表面資訊，圖 2 為影像分析之流程圖。

2.2 流速演算方法

影像流速測量法乃依據數位影像處理及質點影像量測(Particle Image Velocimetry, PIV)原理，利用追蹤流場中粒子的移動軌跡，計算全流場的速度分佈。一般而言在河川中可供追蹤之質點並不明確，或其追蹤的目標物呈現一污跡或不定區塊的型態存在時，則通常會利用統計平均法去計算影像流場的速度。在利用數位影像計算速度時，通常將整幅影像分割為若干子影像，再分別計算子影像中的位移量。假設連續擷取的影像

中，其追蹤粒子的影像強度保持穩定，即 $f(x, y, t) = f(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ ，則第一幅子影像 $f(x, y)$ 經過 Δt 後，流場因移動、雜訊或其他因素影響產生影像 $g(x, y)$ ，而影像流場速度計算的主要目的，即求出位移函數 $s(x, y)$ 。為進一步找出位移函數，可從統計的觀點出發，利用影像間的相關函數，分析計算流場速度。其計算方式，包括 Cross-Correlation (互相關演算法)、MQD (Minimum Quadric Differences, 最小二次微分演算法)、STDS 等等，以下分別就其計算原理加以說明之。

2.2.1 Cross-Correlation

互相關演算法的計算，主要利用二單一曝光的連續影像，假設一分割子區域(Interrogation Area) $M \times N$ ，其範圍內大部分流場質點皆未離開此區域且其質點均勻移動的情形下，依據統計原理計算該區域流場質點最可能移動之位置。若二連續子影像其灰階值 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ ，分析子區域內之統計平均位移量為 m 、 n ，則其離散化的相關係數可表為

$$\phi_{fg}(m, n) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)g(x+m, y+n) \dots (3)$$

經由擷取兩二連續影像並劃分子分析區域後，依據上式互相關函數計算，求出最大關係數 ϕ 值出現處所對應之 m 、 n ，即可知道流場質點的位移，進而獲得水面影像質點移動之方向與距離。而在實際的流場分析上，可利用傅立葉轉換計算相關係數，但理論上其取樣的分析區內最大的質點位移量為取樣區範圍的一半。而在實際計

算上，由於在取樣區內成對質點(image pairing)的數目會隨著位移量增加而減少，導致在最大互相關係函訊號計算時，訊號與雜訊比(Signal to Noise Ratio, SNR)亦隨著質點位移量增加而減少，故實際可量測的最大位移量更小於取樣區範圍的一半，Willert and Gharib(1991)的研究認為，可量測的最大位移量約僅為取樣區範圍的三分之一。

2.2.2 MQD

最小二次微分法的演算則是利用二次差分，計算每一個子區域內像素點的差異去獲得流場質點的位移量，其關係式可表為

$$\phi_C(m,n) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |f(x,y) - g(x+m,y+n)| \dots\dots (4)$$

其中 M 、 N 為子分析區域(Interrogation Area)的大小，函數計算時則求出最小 ϕ_C 值出現處所對應之 m 、 n ，即可知道流場質點的位移，利用上述方法配合前述幾何座標校正即可計算出河川中土石流的表面流速。

2.2.3 STDS

STDS 演算法則是常被利用於演算土石流表面速度的方法，Inaba *et al.* (2000)，依據 Ando 所推行之 STDS 法，令影像強度 $f(x,y,t)$ 且追蹤粒子的影像強度在影像擷取期間保持穩定，則

$$\begin{aligned} \frac{Df}{Dt} \Big|_{V=V(u,v)} &= \frac{f(x+udt, y+vdt, t+dt) - f(x,y,t)}{dt} \\ &= uf_x + vf_y + f_t = 0 \end{aligned} \dots\dots (5)$$

其中 $V(u,v)$ 為二維速度場，上式包含二未知數 u,v 故無法直接求解，但可利用最小二乘法求解之，Inaba *et al.* 假設了一個導數和 S_{ii} 和一個參數 J 如下：

$$S_{ij} = \iiint_{\Gamma} f_i(x,y,t) f_j(x,y,t) dx dy dt \quad \text{for } i, j \dots\dots (6)$$

$$J = \iiint_{\Gamma} (uf_x + vf_y + f_t)^2 dx dy dt \dots\dots (7)$$

此處 Γ 定義為觀測點的鄰近，亦即欲計算之子分析區域， i, j 為 x 、 y 或 t 其中之一，根據最小二乘法當 J 為零時達到最佳化的狀態，故令 J 為零

可得

$$uS_{xx} + vS_{xy} + S_{xt} = 0 \dots\dots (8)$$

$$uS_{xy} + vS_{yy} + S_{yt} = 0 \dots\dots (9)$$

從上面兩個方程式可得速度 u, v 為

$$\begin{aligned} u &= \frac{S_{yt}S_{xy} - S_{xt}S_{yy}}{S_{xx}S_{yy} - S_{xy}^2} \\ v &= \frac{S_{xt}S_{xy} - S_{yt}S_{xx}}{S_{xx}S_{yy} - S_{xy}^2} \end{aligned} \dots\dots (10)$$

計算速度時， Γ 的大小選擇甚為重要，當 Γ 大時，計算誤差小，但空間的解析度則變小。反之，則計算誤差大，但空間的解析度則變大。因此，Inaba *et al.* 利用 Multi Resolution STDS 法調整獲得最佳的 Γ 值。

三、實驗配置

本文之實驗渠道為玻璃渠道，其結構包含渠道主體，以及調整坡度的墊箱。渠道總長共 100 公分，寬度 20 公分，高度 42 公分，中間以 1 公分厚之玻璃板隔開，分成上下兩部，因此實際渠道斷面為寬度 20 公分，高度 20.5 公分。墊箱長度 60 公分，寬度 48 公分，高度 24 公分，可做為調整渠道坡度之用途。渠道的實驗段為渠道中心上下各約 8 公分處，攝影機即架設該處正上方以擷取影像，實驗設備配置如圖 3。實驗時以兩種粒徑的玻璃珠進行試驗，一為平均粒徑 2.5 公分的珠子，顏色為白色；另一則是平均粒徑 1.5 公分的珠子，顏色為藍黑色。由於此兩色互補性強，可增加程式辨識的準確度。實驗時採用混合粒徑的方式將粒徑 2.5 公分和粒徑 1.5 公分的珠子互相搭配施放，以模擬土石流顆粒組成不一的情形。影像則以一般商用攝影機 SONY DCR-VX2000 做為擷取設備，其有效動態像素 34 萬，擷取頻率 30Hz。玻璃渠道有別於天然渠道，為一光滑底床渠道，為了增加渠床粗糙度，故鋪設人工草皮，來模擬天然渠道之渠床狀況。該人工草皮是由兩張網格大小 1.2×1.2 平方公分的塑膠網中間夾以褐色之草皮，再利用黑色 PVC 繩從中穿插固定而成，寬度與長度和渠道底部相同。

表 1 實驗條件比較表

實驗變數	第一組	第二組	第三組	第四組
整體顆粒分布(顆粒總數量)	密集(887)	密集(853)	鬆散(408)	鬆散(403)
粒徑 2.5 公分之顆粒分布 (大小顆粒數量比率)	個數較多 (1:19)	個數較少 (1:84)	有但少 (1:81)	無 (0)
渠床坡度	17/100	17/100	17/100	17/100
影像時間取樣(秒)	1/15	1/15	1/15	1/15

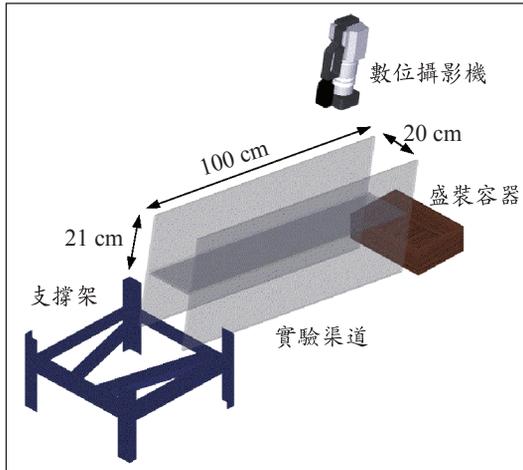


圖 3 實驗設備配置示意圖

本實驗為模擬土石流之顆粒流實驗，由於需要模擬土石流之流動，故須將渠道坡度設定成和土石流流動區的坡度相同，設備配置照片如圖 3 所示。一般而言，土石流流動區之渠床坡度為 10.5/100~26.8/100 之間，因此利用墊箱之高度將渠道坡度設定在此範圍。實驗中底床水平距離為 88 公分，垂直高度 15 公分，得渠床坡度為 17/100，符合土石流流動區範圍。

由於實驗渠道為玻璃材質，而實驗用之顆粒材質亦是玻璃，因而顆粒體在渠道上移動時在底床和兩側由於反射而產生另一移動之顆粒虛像，此外玻璃摩擦係數較低，顆粒體容易移動過快產生殘影導致影像分析不易的情形。為解決上述二問題，將渠道兩側以黑色壁紙覆蓋，去除玻璃反射產生之虛像，另以人工草皮鋪設於實驗渠床上，除了有去除虛像的效果，還能增加渠床粗糙度，藉此降低顆粒移動速度。人工草皮上有固

定大小之格網，可以利用此計算出顆粒體實際的速度大小，與程式所執行出來的結果相對照，可以獲得程式之誤差。

為模擬戶外影像本實驗採用自然光源，同時渠道兩側以黑色壁紙覆蓋，阻隔由兩側而來的光源。實驗中，數位攝影機架設於渠道上方且盡量使其鏡頭正視渠道表面，以減少影像變形產生量測誤差，然而要達到完全正視的情形相當困難，因此仍舊需要設定標示物供給影像前處理分析之坐標校正之用，本研究利用亮光紙固定於渠道四周作為標示物。顆粒施放時，利用一容器盛裝，將容器邊緣靠近渠道上游的底床，緩緩傾斜直至與渠道坡度接近平行，讓顆粒體自由落下，最後由下游處的容器盛裝落下之顆粒體，完成一次試驗。本研究一共進行四次試驗，取時間間距 $\Delta t = 1/15 \text{ sec}$ 之兩張影像為一組做分析，30 張影像共 29 組分析數據，分別將 29 組資料之 x 與 y 方向的速度分量取平均，計算流場之平均速度向量。就整體顆粒分布而言，分成密集和鬆散兩部分，而密集顆粒試驗又區分成粒徑 2.5 公分顆粒體的個數多或寡兩種，鬆散顆粒試驗區分成有或無粒徑 2.5 公分顆粒體兩種，所有試驗均在渠道坡度為 17/100 的情形下完成，如表 1 所示。

四、結果分析

4.1 影像演算法探討

圖 4 為三種不同演算法對於顆粒移動速度的分析結果，其中由於 MQD 乃根據區域內像素點的差異去計算流速，而大型顆粒移動時在分析區域內並無明顯的細微質點可供分析，因此 MQD 無法藉由差異值的計算分析流速，故產生明顯錯

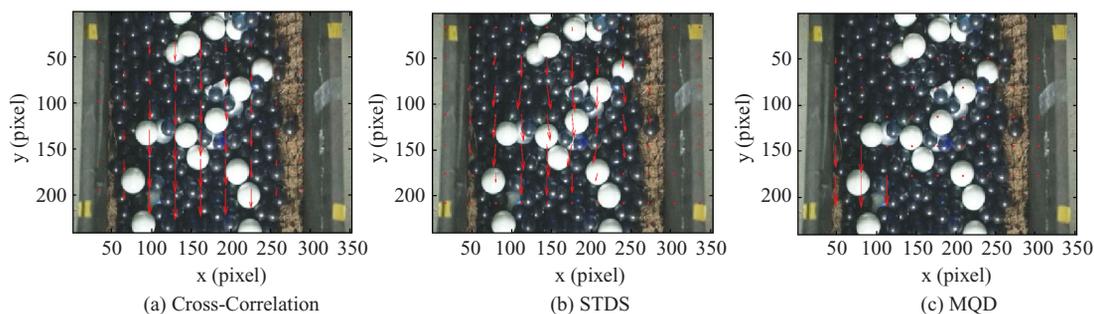


圖 4 影像演算法計算顆粒流之結果比較(比例尺度 $\Delta x = \Delta y = 0.0726 \text{ cm/pixel}$)

誤或無速度值，如圖 4(c)所示。而圖 4(a)、(b) Cross-Correlation 及 STDS 的計算分析則呈現相似且正確的結果，就分析方法而言 Cross-Correlation 乃藉由統計分析計算質點粒子於分析區域內的移動，但亦可計算區域內大型區塊或污跡的相對移動，故在此可獲得正確結果。而 STDS 則是藉由分析光流的變化計算速度，適合於計算大型顆粒的移動，在此亦得到較準確的流場。再者，若將 Cross-Correlation 及 STDS 方法應用於實際戶外影像分析時，除追蹤粒子的大小或密度外，則必須進一步考慮光源的穩定性，由於 Cross-Correlation 利用分析質點相關性計算流速，故區域內若有明顯區塊或污跡的相對移動時則可容許些微的光源不穩定現象或陰影存在，但 STDS 建立在穩定光源且照度不變的理論基礎上，因此對陰影晃動或光源不穩定較為敏感，故此二方法對於戶外監視影像的適用性尚需進一步探討。

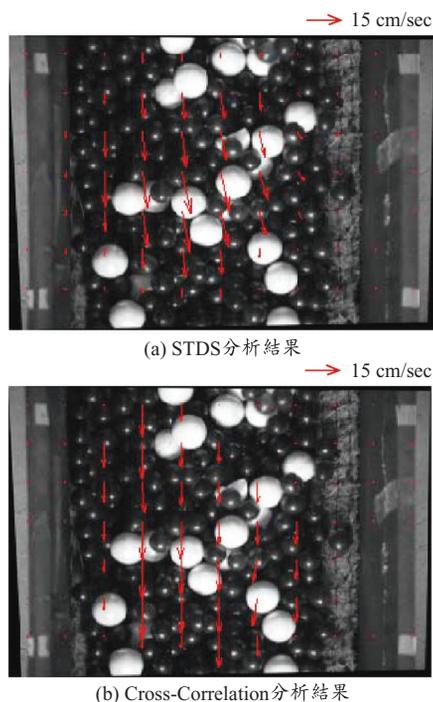


圖 5 量測之顆粒流流速分布與影像

4.2 試驗結果分析

圖 5 分別為利用 STDS 及 Cross-Correlation 分析第一組實驗影像所得結果，圖 5(a)中可以觀察出影像之中央區塊平均速度值約 16.25 cm/sec ，而利用人工草皮之網格和連續影像時間差估測之顆粒流瞬時速度約 18 cm/sec ，二者差異為 9.72% ，圖 5(b)則為 Cross-Correlation 分析結果，圖中可以看到影像中央的部分速度較快，速度分佈與 STDS 得到的結果相似，其平均速度值約 18.42 cm/sec ，與真實流速相比誤差為 2.30% 。除系統誤差外，由於顆粒移動時，影像

陰影也會隨之移動，而 STDS 建立在在外在光源維持恆定亦即週遭陰影不移動的條件下，受到陰影之干擾會產生數值上的偏差，因而產生計算上的誤差。渠道兩側速度近乎為零，與實際流況相符。但影像上下兩邊界的速度值很小甚至趨近於零則不合理，造成此種現象的原因，在於分析時間內可供分析之顆粒影像不足所致。

表 2 和表 3 為四組實驗的分析結果，由表中可了解：STDS 適合用於尋找粒徑較大之顆粒移動，而 PIV 適用在多顆粒且粒徑較小的情形。在

表 2 實驗第一組與第四組顆粒流速度驗證比較表

影像分析方法	第一組實驗		第四組實驗	
	STDS	Cross-Correlation	STDS	Cross-Correlation
影像分析值(cm/sec)	16.25	18.42	17.04	17.99
實際估算值(cm/sec)	18	18	18	18
誤差百分比(%)	9.72	2.30	5.33	0.05

表 3 實驗第二組與第三組粒徑 2.5 公分顆粒速度驗證比較表

影像分析方法	第二組實驗		第三組實驗	
	STDS	Cross-Correlation	STDS	Cross-Correlation
影像分析值(cm/sec)	16.86	16.58	17.01	16.46
實際估算值(cm/sec)	18	18	18	18
誤差百分比(%)	6.33	7.89	5.50	8.56

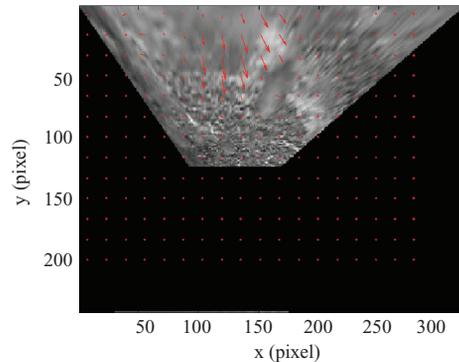
表 4 STDS 與 Cross-Correlation 比較表

	Cross-Correlation 量測法	STDS 量測法
追蹤粒子數量	適用於粒子較多的流場	粒子多或少的流場均可適用
追蹤粒子大小	適用於粒子較小的流場	可觀測粒子較大的流場
光源與陰影	若能清楚描述粒子移動軌跡，則可允許部分陰影存在於影像當中	基本理論建立在穩定光源且陰影不移動，故對非穩定光源及陰影移動較為敏感
土石流流況	含砂、礫石量高之流況	含有巨石、大型移動物之流況

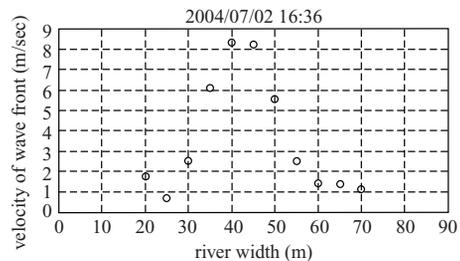
第一和第四個實驗當中，因為第一組實驗顆粒體密度較高且整體移動形式明顯，而第四組實驗並沒有加入粒徑 2.5 公分之顆粒體，因此分析角度偏重於整體流速分布；而在第二和第三個實驗當中，粒徑 2.5 公分之顆粒體的數量較少，而且土石流當中巨大石塊的移動情形是值得探討的問題，因此分析角度著重於大粒徑顆粒之動向。經由上述實驗結果顯示，STDS 及 Cross-Correlation 影像分析方法對於顆粒流場計算之分析特性如表 4 所示。

4.3 土石流影像分析

本研究選擇民國 93 年 7 月 2 日神木村土石流發生時之影像監視影像作為初步分析的範例，由於此時洪水夾帶泥石漫煙河道，可供分析之影像質點較小且光源較為不穩定，根據表 4 本文採用 Cross-Correlation 法分析計算表面流速。再者，透過現場調查，利用紅外線測距儀和皮捲尺量測砌石護岸、混土護岸等之相對距離，作為初步之尺度校正因子，計算結果如圖 6 所示。



(a) 土石流影像流場圖



(b) 橫向流速分布圖

圖 6 利用 Cross-Correlation 法分析計算民國 93 年 7 月 2 日神木村土石流影像之表面流速

圖 6(a)流場圖中可明顯看出速度較大之波前位置，但因鏡頭附著雨滴導致部份位置產生變形及誤差。為了解波前速度，我們將波前速度與河道位置之關係會於圖 6(b)，由圖上可以最大速度接近河道中間，約 8.3 m/sec。由於此時土石流已漫淹，故比水土保持局所提供之最大鋒前速度約 10 m/sec 略低。上述分析雖可獲得表面流速及粒徑分布之資料，但因影像投影仰角大、校正參數不足，且因影像已經過重新壓縮使其原始的尺度產生變形、光源穩定性不足等因素，故可能產生較大的誤差值，本研究後續將針對上述之問題進一步修正速度計算及影像復原方法，以期能獲得更準確的流速資料。

五、結 論

本研究以程式檢測和顆粒流實驗方式實現 STDS 分析方法，取得二維流場瞬時速度分布，並與 Cross-Correlation 的計算結果互相比較，探討此量測法於分析土石流表面流場之可行性和正確性。另外將此分析法應用至民國 93 年 7 月 2 日的土石流影像，影像擷取頻率為 15Hz，得到土石流之波前速度。將本研究主要的結果歸納，可得到以下結論：

1. STDS 分析法在顆粒流實驗中，對於粒徑較大顆粒之動向能夠獲得較好的估算結果，因此應用在現地土石流表面流場上有巨大石塊的流況時，能發揮其效用，計算出巨大石塊的速度和移動方向。
2. 就追蹤粒子數量而言，Cross-Correlation 適用在粒子較多的流況，而 STDS 並不受限制；就追蹤粒子大小而言，Cross-Correlation 適用在粒子較小的流況，而 STDS 可用在粒子較大的流況。
3. 若能清楚描述顆粒邊界及其移動情形，則 Cross-Correlation 允許部分陰影存在，STDS 建立在穩定光源且照度不變的理論基礎上，因此對陰影晃動或光源不穩定較為敏感。
4. 四組顆粒流實驗之結果誤差均在 10% 以內，且與 Cross-Correlation 分析方法比較之後兩者的估算能力相去不遠，而在粒徑 2.5 公分顆粒體的分析上，STDS 與 Cross-Correlation 相比

則有較佳的結果，顯示 STDS 應用於土石流表面流速估算的可行性。兩者相較之下，Cross-Correlation 適用在可追蹤粒子較多的情況，亦即土石流表面夾帶大量小顆粒礫石時，Cross-Correlation 能夠得到良好的結果，而當遇到土石流夾帶巨石的情況，或是可追蹤粒子較少時，STDS 分析方法的適用性則較 Cross-Correlation 為理想。

5. 本研究將七二水災發生期間自神木土石流觀測示範站所得到之土石流影像擷取兩張連續影像進行分析，得到該場土石流之波前速度 8.3 m/sec，與略低於水土保持局所估算最大波前速度約 10 m/sec，可供作一參考數據。

誌 謝

本研究承蒙行政院國科會專題研究計畫經費補助(NSC94-2116-M-434-001)，與農委會水土保持局提供土石流影像，僅此致謝。

參考文獻

1. Ando, S., "A velocity vector field measurement system based on spatio-temporal image derivative," Trans. Soc. Instrum. Control Eng., Vol. 22, pp. 1330-1336, 1986.
2. Fujita I., M. Muste, and A. Kruger, "Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications," J. of Hydraul. Res., Vol. 36, No. 3, pp. 397-414, 1998.
3. Inaba, H., M. S. Uddin, Y. Itakura, and M. Kasahara, "Surface velocity vector field measurement of debris flow based on spatio temporal derivative space method," Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, pp. 757-766, 1997.
4. Inaba, H., Y. Itakura, and M. Kasahara, "Surface velocity computation of debris flows by vector field measurements," Phys. Chem. Earth(B), Vol. 25, No. 9, pp. 741-744, 2000.
5. Itakura, Y., and H. Suwa, "Measurement of surface

- velocity of debris flows by spatial filtering velocimetry,” Landslides and Debris-Flows, edited by S. Tochiki, Proc. The Japan-China Symp., 3 Oct., Niigata and 5 Oct., Tokyo, Japan, 1989, published by The Japan Landslide Soc. and The Japan Soc. Erosion Control Eng., pp. 199-203, 1989.
6. Itakura, Y., and M. Takeuchi, M. Kasahara, and H. Ogura, “Spatial filtering velocimetry: computer simulation by the artificial random moving image and application to the measurement of the surface velocity of debris-flow,” Trans. Soc. Instrument Control Eng., 27, pp. 1092-1098, 1991.
7. Kinoshita, R., T. Utami, and T. Ueno, “Flood Analysis by the Picture Processing of Aerial Photographs – on the parallel Cycloidal Flow in the Agano River,” Pro Hydraul. Eng., Vol.36, pp. 181-186, 1992.
8. Uddin, M. S., Y. Itakura, Y. Yoshida, and M. Kasahara, “Adaptive computer-based spatial-filtering method for more accurate estimation of the surface velocity of debris flow,” Appl. Opt. Vol. 38, No. 32, pp. 6714-6721, 1999.
9. Willert, C. E. and M. Gharib, “Digital Particle Image Velocimetry”, Exp. Fluids 10, pp. 181-193, 1991.

收稿日期：民國 96 年 06 月 06 日

修正日期：民國 96 年 11 月 22 日

接受日期：民國 96 年 11 月 27 日