

應用攝影測量技術量測灌溉渠道表面流速 與推估流量之研究

Application of Photogrammetric Techniques to Measure Surface Velocity and to Estimate Discharge in the Irrigation Channel

國立聯合大學
土木與防災工程學系
教授
國家實驗研究院
台灣颱風洪水研究中心
研究員兼副主任

柳文成*
Wen-Cheng Liu

國立聯合大學
材料與化學工程博士學位學程
博士班研究生

黃偉哲
Wei-Che Huang

國立聯合大學
土木與防災工程學系
碩士

毛培宇
Pei-Yu Mao

摘 要

台灣現行之渠道/河川於常流量時期量測流速時大多使用侵入式測量，量測人員進入水體中除了增加了量測任務之風險外，也增加了水體之擾動。於洪流量時期因人員無法進入水體中，渠道/河川皆使用浮標法來進行流速之量測，但因浮標法之操作方式會造成不確定之人為誤差。因此本研究使用非接觸性之攝影測量，進行渠道表面流速量測，進而推估流量。

本研究藉由顆粒影像速度法(Particle Image Velocimetry, PIV)及顆粒追蹤速度法(Particle Tracking Velocimetry, PTV)量測苗栗市境內一農業用灌溉渠道之表面流速，並搭配數值水流流速儀量測之斷面平均流速，建立指標流速法；並比較 PIV 及 PTV 兩種量測方法何者較適用於該渠道，結果顯示 PIV 法較適用於渠道之表面流速量測。影像量測之表面流速可透過指標流速法換算成斷面平均流速後，以獲得流量資料。另外，本研究亦使用雙相機來擷取渠道影像，希望透過提高影像之解析度，以增加影像量測之準確度，經與單相機量測結果比較，其均方根誤差相對百分比較單相機量測結果低，顯示使用雙相機所量測之表面流速較單相機量測結果為佳。

關鍵詞：灌溉渠道，顆粒影像速度法，顆粒追蹤速度法，指標流速法，雙相機。

*通訊作者，國立聯合大學土木與防災工程學系教授，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號，wcliu@nuu.edu.tw

ABSTRACT

In Taiwan, an invasive method is popularly used to measure velocity in rivers/channels during normal flow periods. Researchers/staffs come into the water not only to increase the potential risk, but also to disturb water body. During the high flow periods, velocity in rivers/channels only can be measured using the buoy method which easily results in errors and uncertainties due to the manual operations. Therefore, the utilization of noncontact photogrammetric technique is highly expected to measure surface velocity for estimating discharge.

In the present study, the Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV) were adopted to measure surface velocity in the irrigation channel of the Miaoli City. The flow current meter was also used to measure cross-sectional averaged velocity for building index-velocity. To find out which method is suitable for measure surface velocity in the irrigation channel, the measured results with PIV and PTV methods are compared. It showed that PIV method is suitable to measure surface velocity comparing to PTV method. Measured surface velocity with PIV method can be used to calculate the cross-sectional averaged velocity based on the index-velocity and then to obtain discharge. In addition, dual-camera system was used to catch images in the channel to increase image resolution and to enhance the accuracy of surface velocity. Comparing the measured results with single camera and dual-camera, the statistical values of relative root mean squared error using dual-camera system is lower than using single camera. The results indicated dual-camera system would be better for measuring surface velocity.

Keywords: Irrigation channel, Particle Image Velocimetry (PIV), Particle Tracking Velocimetry (PTV), Index-velocity method, Dual-camera.

一、前言

1.1 研究背景與目的

臺灣現行的河川/渠道流速觀測方式大多採用入侵式量測，量測人員於常流量時期進入河川/渠道中進行流速量測，但由於必須進入水體中，或多或少都會改變水體的水流狀況和行為，影響量測的準確性，且量測人員進入河川/渠道或多或少都存在著風險。於高流量時期，常伴隨著天候狀況嚴峻，例如颱風時期，或是因氣候變遷而導致越來越頻繁的極端降雨，所產生的大洪水，於惡劣的氣候條件下，將不允許量測人員進入河川/渠道中進行量測任務，現行方法為採用浮標法量測，但因浮標法會因人為操作因素容易造成過多

的誤差。因此為提升量測時的便利與正確性，本研究使用非接觸式之攝影測量來量測渠道表面之流速，並利用指標流速法來推求量測位置之流量。

本研究使用之攝影測量屬於非接觸式測量，其特點在於透過擷取所需量測範圍之連續影像即可計算出該範圍之表面流速，比起需要量測人員進入水中的侵入式測量，攝影測量量測到的是未受干擾之河川/渠道表面流速；且透過所拍攝的影像及以 Matlab 所撰寫之程式計算表面流速，再藉由指標流速法的建立，計算出量測時的渠道流量；本研究亦另行使用雙相機進行渠道表面流速之量測，其量測結果將與單相機進行比較與討論。

1.2 文獻回顧

近年來攝影測量技術時常被用於測量動態物體上，並發展出顆粒影像速度法(Particle Image Velocimetry, PIV)及顆粒追蹤速度法(Particle Tracking Velocimetry, PTV) (Fujita and Komura, 1994; Aya *et al.*, 1995; Lloyd *et al.*, 1995; Ettema *et al.*, 1997; Fujita *et al.*, 1998)。PIV 是將目標影像分割為數個區塊，利用區塊內特徵點進行匹配，匹配成功後每個區塊都會擁有各自的速度；PTV 法則是直接搜尋目標影像上的特徵點依照特徵點在整體影像上的位移量來計算其速度，如特徵點越多計算出的速度筆數也就越多；也有學者將攝影測量測流速與其他領域互相結合，利用影像進行河道旁的地形及植被狀況調查，這些資訊與流量流速結合後可用於河道狀況監測，以便了解河流旁環境及動態。國內使用攝影測量技術來進行河川量測的學者有：柳文成等(2008)利用雙相機於台北橋水位站量測漲潮及退潮之表面流速，進而推估流量；王昭賢(2012)於台灣七家灣溪設置影像量測系統，使用 PIV 法進行量測。最後將所量測之流速與實測流量比較並轉換為指標流速，但在常流量時期比較結果顯示表面流速低於平均流速，推測其常流量低水位時期，表面流速易受河床影響；高水位時期則與理想斷面平均流速狀況吻合；柳文成等(2014)於石門水庫上游集水區之稜角水位站以雙相機進行表面流速量測並推估河川流量，他們亦提出全自動化觀測系統及設站評估。國外的學者則有：Weitbrecht *et al.* (2002)建置人工設備模擬河川中流動區與死水區，並使用粒徑大小皆相同且利於 PIV 法辨識之人造目標物放置於水流，爾後使用 PIV 法進行其流場分析。Meselhe *et al.* (2004)於實驗室架設一低流量之水槽，並使用 LSPIV (Large Scale PIV) 法來進行量測，結果發現 LSPIV 法於流速 0.015 m/s 時為一個較佳的量測時機，此一流速低於現有之常規量測設備量測下限，因此 LSPIV 法若於現地量測低流速情況時是有潛力及可用性的。Hauet *et al.* (2008)於美國 Iowa River 進行長時間且連續之 PIV 法觀測河川之流量，將其計算之結果與美國地質調查所(USGS)所量測之流量資料

進行比較，以驗證 PIV 法之流量觀測結果。Tang *et al.* (2008)於河道模型中進行 LSPTV (Large Scale PTV)之改良，以提高 LSPTV 分析後所呈現之速度向量與精度，最後將所改良後之 LSPTV 應用於表面流速量測，其結果相當良好。Hauet *et al.* (2009)將影像紀錄器材架設於機動車輛上建置 MLSPIV (Mobile Large-Scale Particle Image Velocimetry)影像量測系統，提升測站機動性，拍攝影像後將目標河道分割成各部件，如：河流表面(River surfaces)、氾濫區(Floodplains)、傾斜河岸(sloping banks)等，並將各部件影像轉為正交圖像並將之組合，以利分析影像中物體，如河岸沖積區、岩石、植被等圖像資訊，流速與流量則使用 LSPIV 進行分析，將其結果與正交圖像結合來觀測河道的改變，有了這些資訊可以對未來河道產生阻塞、嚴重侵蝕等情形來做防範。Sun *et al.* (2010)於英國 Blackwater River 使用 LSPIV 進行表面流速量測，並另外使用 ADV 與其結果進行比較，其結果良好顯示其可行性；團隊另於實驗室內架設一 1:5 之河川模型來進行量測，與現地量測結果比較流量誤差約為 5~7%。Tauro *et al.* (2012)使用螢光粒子球(fluorescent particles)置入天然河流中來作為影像判斷之入侵物，其光照使用紫外線燈來提高螢光粒子的判視程度，並使用 PTV 法來量測表面流速。Gunawan *et al.* (2012)於英國一小型河川進行研究，研究分為低水位、滿水位、暴漲水位等三種水位狀況，且河岸兩側及河中皆有植被，使用 LSPIV 法來分析其三種水位之流速，並探討流速是否會被其植被影響，且其結果是否適用。Bechle *et al.* (2012)於淡水河使用 LSPIV 影像量測系統量測淡水河表面流速，並與 ADP 量測之斷面垂直平均流速建立流速指標。Daigle *et al.* (2013)為驗證影像量測之靈活適用性，選擇了加拿大 Lawrence River 與 Montmorency River 兩條河川，使用 PIV 法來進行河川表面覆冰之流動速度之量測。Soares *et al.* (2013)使用雷射光束發射於水體之中，經由頻率調整，使雷射光產生動態的激光散斑圖案，如此一來可以給予 PIV 法進行流速分析，不需再由外部給予輔助影像分析之顆粒。Tauro *et al.* (2014)

使用桅杆支架架設 GO PRO 相機，使用兩旁的雷射光定位，平行於水面拍攝。當測量地點地形不利設置控制點或者是控制點在嚴苛的天氣下被水體或是土石遮蔽時，使用雷射光定位即可進行測量，架設於兩條河面狀況有著差異性的河川進行量測，且就量測結果遇到之設備問題，來進行後續討論與改善。Patalano *et al.* (2015) 引用三個研究案例，探討近期有關於 Eulerian 及 Lagrangian LSPIV 的發展，其中亦提到大尺度的顆粒追蹤速度法(LSPTV)，其實 LSPTV 即是 PTV，只是應用於現場河川的表面速度量測而已。

本研究嘗試以攝影測量技術之 PIV 法與 PTV 法量測苗栗市一農業灌溉渠道之表面流速，並比較何者量測方法較適用於該渠道，並建立攝影測量之表面流速與實測断面平均流速資料之迴歸方程式(即指標流速法)，進而推算出渠道流量。且為了增加後續研究之量測的精度，本研究使用了雙相機拍攝之影像，以增加影像解析度及量測之精度。

1.3 研究方法

本研究於苗栗市芒蒲五張犁圳之引水渠道進行表面流速之量測。於現地佈設控制點後，經由電腦解算相機之內外參數，然後使用顆粒影像速度法(Particle Image Velocimetry, PIV)與顆粒追蹤速度法 (Particle Tracking Velocimetry, PTV)進行表面流速之量測，再配合數值水流流速儀所量測之流速使用平均断面法(王如意、易任，1979)與全站儀(Total Station)所量測之渠道断面，換算成實際断面平均流速，建立指標流速法；有了指標流速法可推求出進行攝影測量時之渠道流量。

除了進行流速與流量的觀測外，本研究也將所量測之表面流速與手持式雷達波表面流速儀進行比較，找出 PIV 與 PTV 何者較適用於該渠道流速量測。因本研究流速觀測使用之單相機之方法量測渠道表面流速，爾後，也將比較單相機與雙相機之量測結果差異性。本研究之研究流程如圖 1 所示。

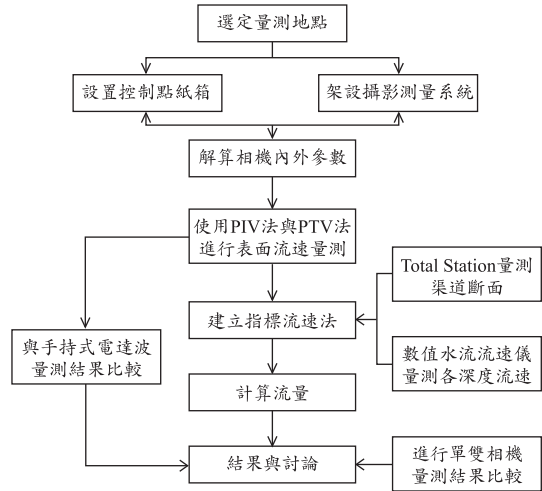


圖 1 研究流程圖

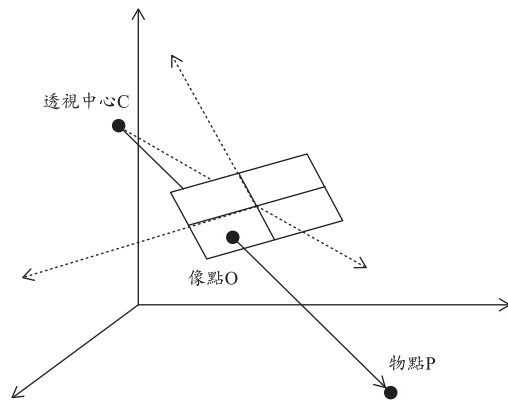


圖 2 透視中心示意圖

二、攝影量測理論

2.1 共線式

攝影測量基本理論為共線式方程式，由透視原理所建構而成，其中包含 3 項座標點，P 為物點，C 為相機之透視中心，O 為物點對應至相片上之像點；其特點為 3 點共同存在於同一條直線上，3 者於空間之關係如圖 2 所示。

共線式基本公式為方程式(1)及(2)所示

$$u - u_c = -d \frac{\begin{bmatrix} r_{11}(x - x_c) + r_{12}(y - y_c) + r_{13}(z - z_c) \\ r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c) \end{bmatrix}}{\dots\dots\dots} \quad (1)$$

$$v - v_c = -d \frac{[r_{21}(x - x_c) + r_{22}(y - y_c) + r_{23}(z - z_c)]}{[r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c)]} \dots\dots\dots(2)$$

其中，

x_c 、 y_c 、 z_c ：透鏡中心在物空間座標系統的座標值；

u_c 、 v_c 、 d ：透鏡中心在像空間座標系統的座標值；

$r_{11} \sim r_{33}$ ：旋轉角參數由 ω 、 ϕ 、 κ 組合而成；

x 、 y 、 z ：物點在物空間座標系統的座標值；

u 、 v ：對應像點在像空間座標系統的座標值。

在攝影測量中，透鏡畸變差是影響成像幾何的最重要因素之一，可分為徑向畸變差(Radial distortion)與切向畸變差(Tangential distortion)兩類，徑向畸變差是指透鏡沒有與成像之 CCD 平面平行所產生的誤差；切向畸變差則是透鏡中心與成像 CCD 中心沒有在同一個光軸上。如需進行徑向畸變差及切向畸變差之改正，則原共線方程式需更改為下式：

$$u - u_c - \Delta u = -d \frac{[r_{11}(x - x_c) + r_{12}(y - y_c) + r_{13}(z - z_c)]}{[r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c)]} \dots(3)$$

$$v - v_c - \Delta v = -d \frac{[r_{21}(x - x_c) + r_{22}(y - y_c) + r_{23}(z - z_c)]}{[r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c)]} \dots(4)$$

其中 Δu 及 Δv 為改正值，其方程式如下：

$$\Delta u = (u - u_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2(u - u_c)^2) + 2p_2(u - u_c)(v - v_c) \dots(5)$$

$$\Delta v = (v - v_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2(r^2 + 2(v - v_c)^2) + 2p_1(u - u_c)(v - v_c) \dots(6)$$

式中

r ：目標像點至像片中心之距離；

k_1 、 k_2 ：為徑向畸變差係數；

p_1 、 p_2 ：為切向畸變差係數。

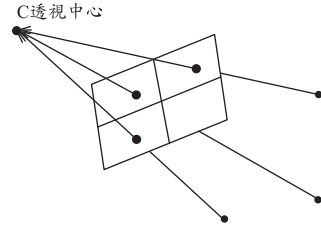


圖 3 空間後方交會模式示意圖

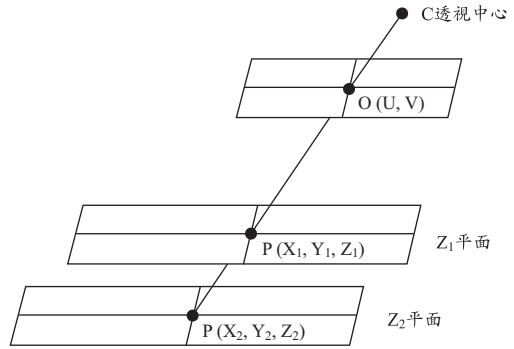


圖 4 空間前方交會模式示意圖

2.2 空間交會模式

空間交會模式分別有空間後方交會模式與空間前方交會模式，後方交會模式(見圖 3)是由已知控制點之物座標與對應像點之像座標，計算出影像中的內、外方位參數。每個控制點與所對應的像點可以形成 2 個方程式，共線式共 9 個參數，因此至少需要 5 個控制點提供 10 個方程式，方能解算 9 個參數。

空間前方交會模式則是透過空間後方交會模式所求出之相機內、外方位參數，代回共線方程式最後可以得出我們所求之物空間座標點。在空間前方交會模式中，要解算目標物之座標(X,Y,Z) 3 個變數，理應要有 2 台相機，因每個目標點於不同相機所拍攝影像中對應的像點可提供 2 個共線式方程式，2 台相機可提供 2 張影像即 2 個對應像點，因此可提供 4 個共線式方程式解算 3 個變數。但本研究只有使用 1 台相機只能解算 2 個變數，因此需另外輸入目標物與相機透視中心之高度差，因不同的高度差所計算之目標物之座標會不一樣，空間前方交會法之示意圖，如圖 4 所示。

2.3 影像匹配

影像匹配指的是，於 A 與 B 兩張影像中尋找相同之共軛像點。在傳統上是使用人工配對去指定同一物點分別在兩張影像上的位置，因此在攝影測量朝自動化演進的過程中，數位影像的發明是很重要的里程碑。數位影像是指將傳統影像切割成數千萬個像素區塊，並給予每個區塊一個數字，透過影像上的數字計算，可以計算出 A 影像上像點之目標物於 B 影像上對應像點之位置。像素之數字稱為灰度值或 RGB 值(Red-Green-Blue)。影像匹配較為常見方法共有三種(王樹根, 2009)為相關係數法、斜方差法及最小二乘匹配法。本研究採用相關係數法。

相關係數法係透過分別在 2 張影像上所建立的視窗，去計算 2 者之相關係數 c (Wolf and DeWitt, 2001)如方程式(7)所示。相關係數 c 值介於 1-0 之間，當相關係數為 1 時，表示 2 張影像分別建立之視窗內之影像完全一致，相關係數 c 越接近 0 時，表示 2 張影像分別建立的視窗內之影像差異越大。

$$c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_{ij} - \bar{B})^2 \right]}} \dots (7)$$

式中，

c ：相關係數；

A_{ij} ：目標視窗中在第 i 行與第 j 列位置上像素的數值；

B_{ij} ：搜尋視窗中在第 i 行與第 j 列位置上像素的數值；

\bar{A} ：目標視窗中所有像素的數值之平均值；

\bar{B} ：搜尋視窗中所有像素的數值之平均值。

2.4 顆粒影像流速法(PIV)與顆粒追蹤流速法(PTV)

影像量測系統可分為顆粒影像流速法(PIV)及顆粒追蹤流速法(PTV)兩種方法。其中顆粒影像流速法(PIV)是將於量測範圍所拍攝之影像切割成數個區塊，擷取每個區塊中之特徵圖像，由

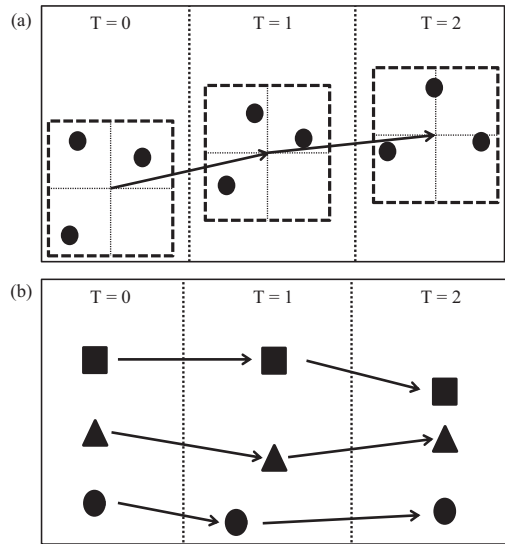


圖 5 (a)顆粒影像流速法(PIV)原理示意圖；(b)顆粒追蹤流速法(PTV)原理示意圖

特徵圖像進行影像匹配，因此由特徵圖像所計算出之移動速度即代表其單一區塊之移動速度，也就是說一個區塊只會有一個速度值，亦影像如果切割之區域越多，所計算出速度值也會越多，但其計算時間也會越長。顆粒影像流速法(PIV)之原理示意圖，如圖 5(a)所示。本研究以 PIV 法量測表面流速時，若遇到分析區域因匹配失敗而無流速時，於平均流速計算中並無修正。但有設立門檻值，如超過 30%網格無法進行分析計算表面流速時，則重新拍攝影像，重新分析計算表面流速。

顆粒追蹤流速法(PTV)其原理是追蹤影像中之特徵點(如：泡沫、落葉、人為丟入物等)，其可以計算出每一個特徵點的移動速度，也就是說當影像中的特徵點越多時，可得出越多的速度值，但如果太多相同特徵的特徵點在影像匹配中會容易出現誤判之情形。顆粒追蹤流速法(PTV)原理示意圖，如圖 5(b)所示。

本研究將會使用 PIV 與 PTV 兩種方法進行渠道之流速量測，於量測現場，若渠道表面無明顯目標物，或水面過於平靜，將採取人工將落葉撒入渠道，以方便 PTV 進行量測。然後會將兩種方法量測結果進行比較，並探討其適用性。

2.5 統計分析方法

本研究將比較 PIV 法及 PTV 法與雷達波流速儀量測表面流速之比較，及 PIV 法及 PTV 法量測表面平均流速後，透過指標流速法推算渠道流量，並與實測流量進行比較。於比較及討論過程中將使用三種統計分析方法，分別為相關係數 (correlation coefficient, R)、均方根誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 及均方根誤差相對百分比 (Relative Root Mean Squared Error, Relative RMSE)，其方程式如下所述：

$$1. \text{相關係數} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots (8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$2. \text{均方根誤差} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \dots \dots \dots (9)$$

3. 均方根誤差百分比 (%) =

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} / \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \times 100\% \dots (10)$$

式中

- n：樣本數；
- y：見圖 7 至圖 11 於 y 軸所示之數據；
- x：見圖 7 至圖 11 於 x 軸所示之數據。

三、實驗地點與實驗設備

本研究選定之實驗地點為位於苗栗市新東大橋下之灌溉人工渠道，位於台 6 線道路旁，其流向約為南北向，渠道結構為鋼筋混凝土，斷面呈梯形形狀，本研究將相機架設於橫跨人工渠道左右兩岸之小型橋梁中央，其渠道左側有凸起之混凝土護岸，方便放置進行量測時所需的電腦、電源等(如照片 1 所示)。人工渠道水源由後龍溪引入，最後引入市區之五張犁圳供市區內農田作為灌溉水源使用。

本研究使用之相機為德國 Basler 公司所製造之彩色工業相機 ICDA-acA1600-20gc(如照片 2 所



照片 1 實驗地點與攝影測量設備圖



照片 2 Basler 彩色工業相機



照片 3 紙箱控制點

示)，與一般消費型數位相機不同處在於，工業相機可以使用程式控制相機之動作(開始拍攝或是停止拍攝)。相機置於保護殼內，架設於 U 型架上，使相機可水平、垂直轉動，U 型架底部有一水平氣泡，可進行定平工作。最後將 U 型架裝設於三腳架上(如照片 1 所示)。因為研究區域周圍屬苗栗市親水公園之範圍，受限於研究場地現況，若於現地佈設固定控制點是不太可行之方法，因此本研究使用便於攜帶之紙箱(如照片 3

所示)設置量測時所需要的控制點。

因控制點只是建立攝影系統內、外方位參數，其目的為建立物空間座標系統與像空間座標系統尺度上的轉換，以及相機於物空間座標系統的姿態。因此透過自訂座標系統建立紙箱上控制點，其自訂座標系統的尺度單位為公尺，即可透過控制點座標及控制點在影像上的座標解算攝影系統之內、外方位參數。攝影系統於實驗中採用的參數分別為：影像匹配視窗大小(IA)為 100×100 pixel；取像時間間隔(dt)為 0.05 秒；水位則是每次進行量測時，需重新量測。本研究中已考慮透鏡畸變差，但在進行影像分析計算表面流速時，並未將影像轉製成正交影像。

為了與顆粒影像流速法(PIV)和顆粒追蹤流速法(PTV)所量測之表面流速結果進行比較，本研究使用美國 Stalker 公司所生產之手持式雷達波流速儀量測渠道之表面流速，將其量測結果分別與 PIV 法與 PTV 法進行比較後，並探討 PIV 法與 PTV 法何者較適用於渠道表面流速量測。

本研究最終目的是建立指標流速法，為了取得實測之斷面平均流速，本研究使用美國 GLOBAL WATER 公司所生產之 FP111 數值水流流速儀，以取得不同深度之流速，並用以求得渠道的實測流量，除以量測區域之通水斷面，以獲得斷面平均流速進而與攝影測量量測之表面流速建立指標流速關係。

四、實驗數據分析與討論

4.1 PIV 法與 PTV 法量測結果比較

本研究使用顆粒影像流速法(PIV)與顆粒追蹤流速法(PTV)來進行渠道表面流速之分析。PIV 法除了可分析渠道表面平均流速外，也會呈現出渠道表面水流之方向和匹配成功之位置(見圖 6(a))，方格內無白點與箭頭之方格代表此區域匹配失敗，此方格區域無流速與流向，反之有白點與箭頭之方格區域為匹配成功之資料點。與 PIV 法相同，PTV 法也會呈現出匹配成功之流速及流向，但與 PIV 法不同的是 PTV 法所量測之流速不是代表該區域內之數值，PTV 法所匹配成功的是該特徵點之流速與流向，如圖 6(b)中所呈現的

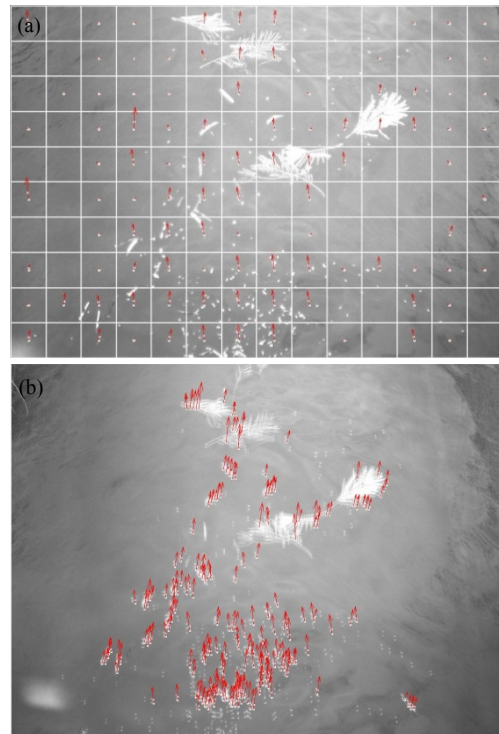


圖 6 (a)PIV 法匹配成功之流向圖；(b)PTV 法匹配成功之流向圖

流向皆為水面上之特徵物(樹葉)之流向，因特徵物漂流於水中，所以亦等同於水流之流向。

PTV 法量測之表面流速，以圖 6(b)為例，圖中表面流速量測結果多集中於渠道中心位置，所以其平均流速是整張影像的局部區域平均而求得。其原因為 PTV 法是追蹤漂流物進行表面流速之量測，這是 PTV 法於使用上的侷限性。

將所量測的 40 個場次所計算出以 PIV 法與 PTV 法量測之表面平均流速製作成散布圖，以表示兩者間之關係(如圖 7 所示)，經由散布圖顯示 PIV 與 PTV 之結果並沒有完全的吻合，可以看出大部分的數據較集中於散布圖右下方的三角形中，表示藉由 PTV 法所量測出之表面平均流速是較 PIV 法為大，其原因為 PIV 法為整個擷取畫面範圍之流速值的平均，PTV 法則是藉由匹配目標物來計算出流速值，當目標物漂浮於水面上時，正常狀況下皆會向水流較快之區域集中，因此 PTV 所量測到之流速會較 PIV 法所量測之流速大。

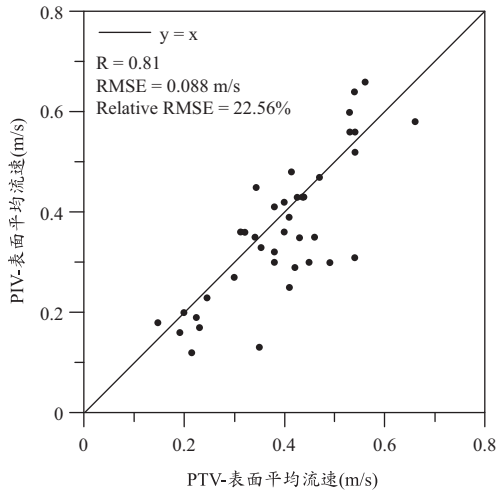


圖 7 PTV 法與 PIV 法所量測表面平均流速之比較

4.2 PIV、PTV 法與手持式雷達波流速儀量測結果比較

本研究於每場次攝影測量並擷取影像後，即使用手持式雷達波表面流速儀進行表面流速量測，為了量測之準確度，本研究進行手持式雷達波表面流速儀進行表面流速量測時會將渠道斷面分為 5 個等分進行表面流速量測，測得沿渠道斷面方向之 5 筆表面流速資料後，再將計算得到之表面平均流速，與 PIV 法和 PTV 法量測結果進行比較，並討論此兩方法(PIV 法與 PTV 法)，何者較適合使用於渠道表面流速量測。

將 PIV 法與 PTV 法之量測結果分別與手持式雷達波表面流速儀進行比較，並繪製成散布圖(見圖 8)。其中 PIV 法與手持式雷達波流速儀進行比較如圖 8(a)所示，其相關係數(R)為 0.87，RMSE 值為 0.072 m/s，Relative RMSE 值為 19.18%；PTV 法與手持式雷達波流速儀進行比較如圖 8(b)所示，其相關係數(R)為 0.87，RMSE 值為 0.075 m/s，Relative RMSE 值為 20.04%。由圖 8 可看出 PIV 法及 PTV 法量測結果與手持式雷達波流速儀量測結果皆具有高度相關，且 RMSE 及 Relative RMSE 統計誤差結果相近，但 PIV 法較低於 PTV 法，由此可以得知 PIV 法用於量測渠道表面流速之結果較 PTV 法之量測結果為佳。

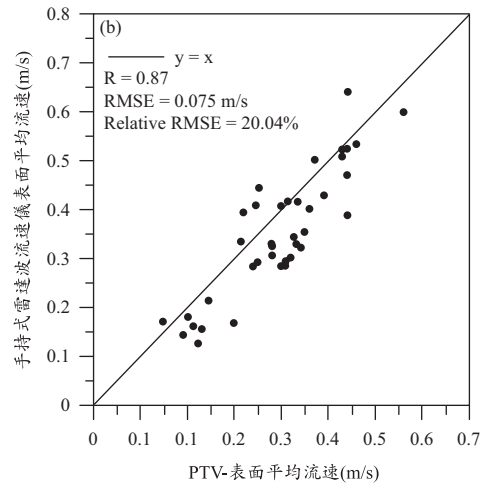
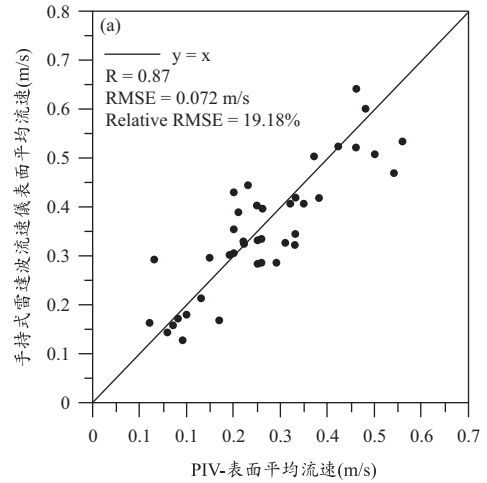


圖 8 (a)PIV 法與雷達波流速儀量測表面流速之比較；(b)PTV 法與雷達波流速儀量測表面流速之比較

4.3 指標流速法推求渠道流量

在建立指標流速之前，我們必須取得該渠道的實測斷面平均流速。本研究使用數值水流流速儀來取得不同深度之流速資料，其量測方向及點位與手持式雷達波流速儀相同，並透過平均斷面法之公式(王如意、易任，1979)，配合全站儀(Total Station)所量測之渠道斷面，計算得到實測斷面平均流速。

將所量測到之實測斷面平均流速與攝影測量所量測到之表面平均流速繪製成散布圖並進行迴歸計算，獲得斷面平均流速(y)與 PIV 法量測

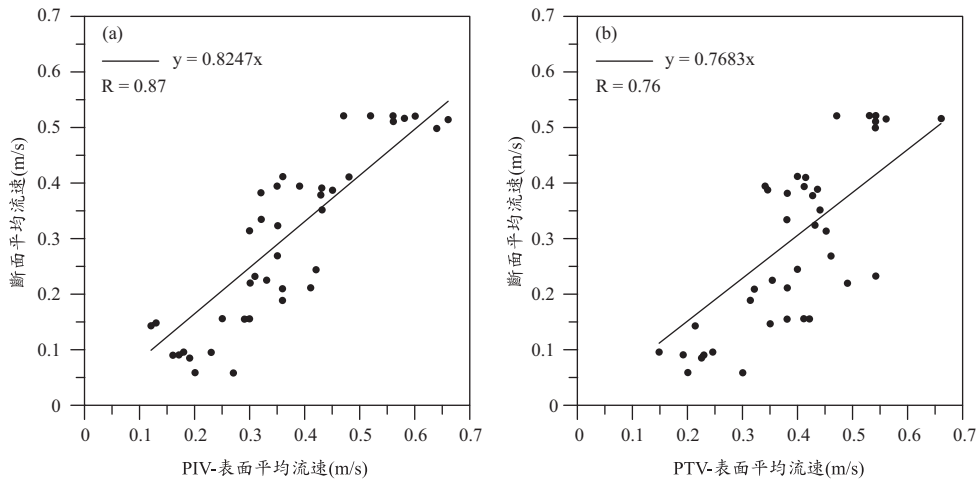


圖 9 (a)斷面平均流速與 PIV 法量測之表面平均流速之關係圖(即指標流速)；(b)斷面平均流速與 PTV 法量測之表面平均流速之關係圖

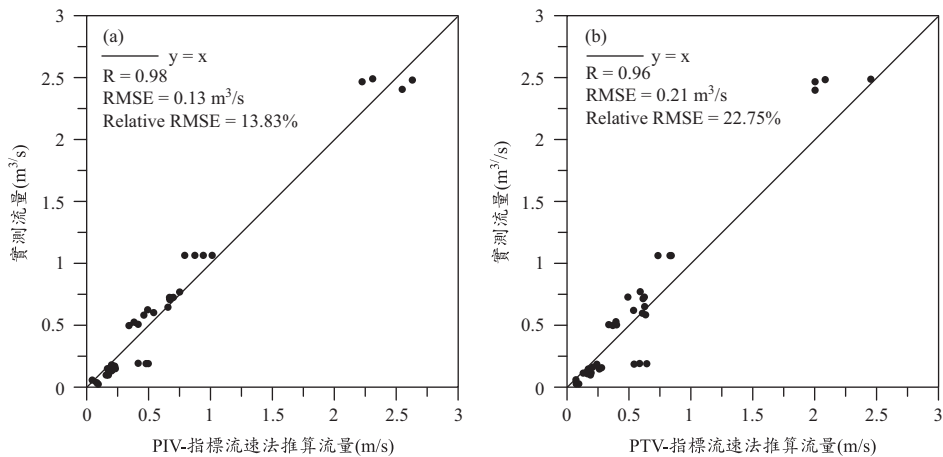


圖 10 (a)PIV 法推估渠道流量與實測流量之比較；(b)PTV 法推估渠道流量與實測流量之比較

之表面平均流速(x)兩者之線性關係斜率為 0.8247，相關係數(R)為 0.87(如圖 9(a)所示)；斷面平均流速(y)與 PTV 法量測之表面平均流速(x)兩者之線性關係斜率為 0.7683，相關係數(R)為 0.76(如圖 9(b)所示)。藉由所計算出的關係式，即可將攝影測量所量測到之表面平均流速換算為渠道斷面平均流速。經由相關係數(R)的比較，可得知以 PIV 法量測表面平均流速與斷面平均流速之相關性較高。

經由圖 9 之指標流速法即可求得渠道斷面平

均流速，再乘以通水斷面積，即可以攝影測量推求渠道流量。將所量測到之實測流量與攝影測量(PIV 法與 PTV 法)推求之流量繪製成散布圖如圖 10 所示。圖中顯示 PIV 法推算之流量與實測流量之相關係數(R)為 0.98，RMSE 值為 0.13 m³/s，Relative RMSE 為 13.83%(圖 10(a))；PTV 法推算之流量與實測流量之相關係數(R)為 0.96，RMSE 值為 0.21 m³/s，Relative RMSE 為 22.75%(圖 10(b))。PIV 法及 PTV 法透過指標流速法推算流量與實測流量之比較，皆具有高度相關性，但於



照片 4 單相機與雙相機相對位置

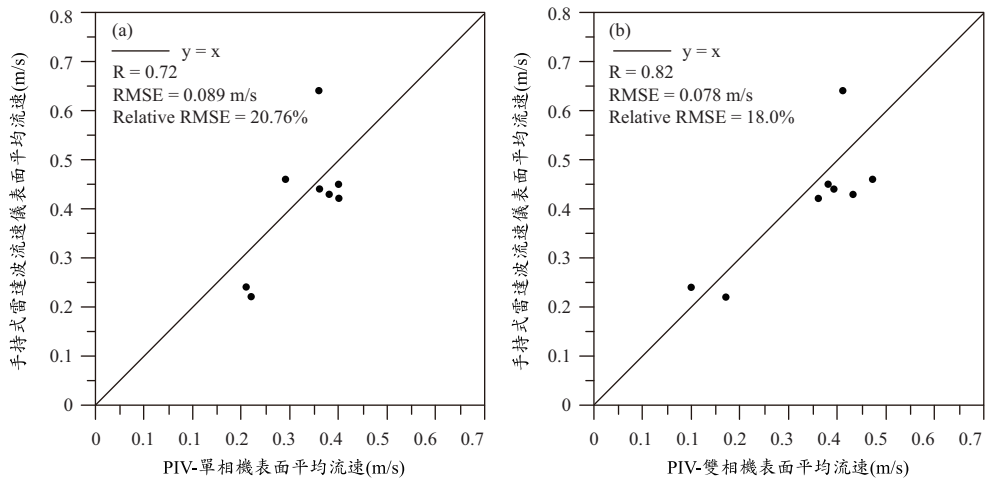


圖 11 PIV 法量測之表面平均流速與雷達波流速儀量測表面平均流速之散布圖(a)單相機；(b)雙相機

統計誤差分析 RMSE 及 Relative RMSE 之比較中，PIV 法透過指標流速推算的渠道流量較佳。

4.4 單相機與雙相機量測結果比較

在指標流速法建立完成後，便可以利用攝影測量的表面流速來估算渠道之流量。因此我們使用兩台相機(如照片 4 所示)來進行渠道影像的拍攝，並藉由雙相機所拍攝影像的合併，提高相同拍攝範圍之影像解析度，並提高攝影測量表面流速量測之精度。兩台相機所拍攝到之影像分別為渠道左半邊影像，與渠道右半邊影像，經由將左右兩張影像疊合，使得渠道影像之解析度提高，其中單相機拍攝之影像的解析度為 0.6 mm/pixel；

雙相機拍攝之影像的解析度為 0.34 mm/pixel。提高影像解析度可量測更細微的流速變化，因取像間隔為 0.05 秒，所以單相機量測最小表面流速為 12 mm/s，而雙相機可達 6.8 mm/s。在影像辨識上，提高影像解析度也意味著在相同的量測區域中，可提供更多的影像變化資訊以進行影像匹配。

為了比較雙相機與單相機之量測精度較高，本研究仍使用雷達波流速儀量測之表面流速與攝影測量結果進行比較。本研究於單相機與雙相機量測結果之比較，共進行 8 個場次的實驗，並將量測結果繪製成散布圖，如圖 11 所示。由統計誤差分析顯示以單相機 PIV 法量測之表面平均流速與雷達波流速儀量測表面平均流速之相

關係數(R)為 0.72，RMSE 值為 0.089 m/s，Relative RMSE 值為 20.76%；以雙相機 PIV 法量測之表面平均流速與雷達波流速儀量測表面平均流速之相關係數(R)為 0.82，RMSE 值為 0.78 m/s，Relative RMSE 值為 18.0%。其結果顯示以雙相機 PIV 法測得之統計誤差 RMSE 及 Relative RMSE 均低於單相機 PIV 法量測結果，顯示使用雙相機可提高影像量測之精度。

Wang *et al.* (2013)亦曾使用單相機與雙相機進行量測與比較，但本研究與其主要的不同的是量測地點的尺度與單相機所擺設之位置。因 Wang *et al.* (2013)所選定之研究範圍為大尺度之河川，單相機若需涵蓋整個河道斷面，需架設於河岸旁，以斜拍之姿態來擷取河道影像，但這會造成離相機(河岸)越遠之河道範圍，因影像對河道之解析度越來越低，造成影像匹配時之困難，因而其精度隨著離相機(河岸)越遠而降低。所以使用雙相機涵蓋整個河道斷面，進行影像的擷取與分析，其所呈現之成果相當良好，整體數據精度雙相機遠大於單相機，且在距離河岸最遠處雙相機之精度高於單相機 60%。

因本研究之量測區域尺度較小，使用單相機即可涵蓋整個渠道斷面，不會發生 Wang *et al.* (2013)在單相機量測上所遭遇的問題。所以本研究使用雙相機之目的只著重於探討同一範圍中增加影像之解析度是否會提高量測精度，就所分析之數據來看，提高解析度增加渠道量測精度是可行的，這個結果也與 Wang *et al.* (2013)使用雙相機來提高河川量測精度相同，但因本研究之量測現地尺度較小，且相機與水面位置較近，因此量測精度差異不大，若於範圍較大之區域進行與本研究相同之單雙相機架設，並進行長時間之量測，其結果雙相機之精度應會明顯的優於單相機。

五、結 論

本研究使用攝影測量之顆粒追蹤流速法(PTV)與顆粒影像流速法(PIV)來量測渠道之表面平均流速，進而推估灌溉渠道之流量。經研究可獲得以下的結論：

1. PIV 法與 PTV 法之量測結果與雷達波表面流

速儀量測數據比較後，PIV 法之相關係數(R)為 0.87，RMSE 值為 0.072 m/s，Relative RMSE 值為 19.18%；PTV 法之相關係數(R)為 0.87，RMSE 值為 0.075 m/s，Relative RMSE 值為 20.04%。以 PIV 法與 PTV 法之統計誤差分析及現地實驗環境相互比較下，顯示 PIV 法較適用於渠道表面流速量測。

2. 透過攝影測量量渠道之表面平均流速與數值水流流速儀量得之數據，建立其關係式，以期能利用關係式之公式來推算渠道流量。PIV 法量測之表面平均流速與斷面平均流速所得的迴歸公式為 $y = 0.8247x$ ，相關係數(R)值為 0.87；PTV 法量測之表面平均流速與斷面平均流速所得的迴歸公式為 $y = 0.7683x$ ，相關係數(R)為 0.76，PIV 法與 PTV 法兩者比較下，以使用 PIV 法與斷面平均流速建立之指標流速法之關係較佳。
3. 經由 PIV 法與 PTV 法量測表面平均流速，再透過指標流速法推算渠道流量，並與實測流量之比較結果顯示，PIV 法推算之流量與實測流量之相關係數(R)為 0.98，RMSE 值為 0.13 m³/s，Relative RMSE 為 13.83%；PTV 法推算之流量與實測流量之相關係數(R)為 0.96，RMSE 值為 0.21 m³/s，Relative RMSE 為 22.75%。因此使用 PIV 法透過指標流速推算之渠道流量較佳。
4. 使用雙相機擷取渠道表面影像，將左右兩相機影像疊合後，增加拍攝範圍之影像解析度，來進行影像流速解算，將其量測結果與雷達波表面流速儀量測數據進行比較，相關係數(R)為 0.82，RMSE 值為 0.078 m/s，Relative RMSE 值為 18.0%；單相機與雷達波表面流速儀量比較，相關係數(R)為 0.72，RMSE 值為 0.089 m/s，Relative RMSE 值為 20.76%。由統計誤差分析結果顯示增加影像之解析度將有助於提高影像量測之準確度。

參考文獻

1. 王昭賢：「影像分析於河川流速之應用」，國立成功大學碩士論文，2012。

2. 王如意、易任：《應用水文學》，國立編譯館，pp. 318-329, 1979。
3. 王樹根：《攝影測量原理與應用》，武漢大學出版社，49-51，2009。
4. 柳文成、吳俊賢等：「即時三維立體影像技術量測河川高流量研究計畫(1/2)」，經濟部水利署第十河川局，2008。
5. 柳文成、楊智傑、黃偉哲：「以三維立體影像技術量測石門水庫集水區河川表面流速及流量研究計畫」，經濟部水利署北區水資源局，2014。
6. Aya, S., Fujita, I., Yagyu, M., "Field-observation of flood in a river by video image analysis," *Proceeding of Hydraulic Engineering, JSCE*, 39, 447-452, 1995.
7. Bechle, J., Wu, C. H., Liu, W. C., Kimura, N., "Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(4), 327-339, 2012.
8. Daigle, A., Bérubé, F., Bergeron, N., Matte, P., "A methodology based on particle image velocimetry for river ice velocity measurement," *Cold Regions Science and Technology*, 89, 36-47, 2013.
9. Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., "Particle-image velocimetry for whole-field measurement of ice velocities," *Cold Regions Science and Technology*, 26(2), 97-112, 1997.
10. Fujita, I., Komura, S., "Application of video image analysis for measurements of river- surface flows," *Proceeding of Hydraulic Engineering, JSCE*, 38, 733-738, 1994.
11. Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., "Large-scale image velocimetry for flow analysis in hydraulic application," *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414, 1998.
12. Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., Knight, D.W., Chandler, J.H., Tang, X., Fujita, I., "The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, 1-12, 2012.
13. Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W. F., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J. D., Wilson, M., "Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method," *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 13(2), 105-110, 2008.
14. Hauet, A., Muste, M., Ho, H. C., "Digital mapping of riverine waterway hydrodynamic and geomorphic features," *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(2), 242-252, 2009.
15. Lloyd, M. P., Ball, D. J., Stansby, P. K., "Unsteady surface-velocity field measurement using particle tacking velocimetry," *Journal of Hydraulic Research*, 33(4), 519-534, 1995.
16. Meselhe, E. A., Peeva, T., Muste, M., "Large Scale Particle Image Velocimetry for low velocity and shallow water flows," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(9), 937-940, 2004.
17. Patalano, P., Garcia, C. M., Brevis, W., Bleninger, T., Guillen, N., Moreno, L., Rodriguez, A., "Recent advances in Eulerian and Lagrangian large-scale particle velocimetry," *Proceedings of the 36th IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands, 6 pages, 2015.
18. Sun, X., Shiono, K., Chandler, J. H., Rameshwaran, P., Sellin, R. H. J., Fujita, I., "Discharge estimation in small irregular river using LSPIV," *Proceedings of the ICE-Water Management*, 163(5), 247-254, 2010.
19. Soares, R. R., Barbosa, H. C., Braga, R. A., Botega, J. V. L., Horgan, G. W., "Biospeckle PIV (Particle Image Velocimetry) for analyzing fluid flow," *Flow Measurement and Instrumentation*, 30, 90-98, 2013.
20. Tang, H. W., Chen, C., Chen, H., Huang, J. T., "An improved PTV system for large-scale physical river model," *Journal of Hydrodynam-*

- ics, 20(6), 669-679, 2008.
21. Tauro, F., Grimaldi, S., Petroselli, A., Porfiri, M., “Fluorescent particle tracers for surface flow measurements: A proof of concept in a natural stream,” *Water Resources Research*, 48(6), W06528, 2012.
 22. Tauro, F., Porfiri, M., Grimaldi, S., “Orienting the camera and firing lasers to enhance large-scale particle image velocimetry for streamflow monitoring,” *Water Resources Research*, 50(9), WR015952, 2014.
 23. Wang, F., Xu, B., Xu, M., Shi, J., Jia, L., Li, C., “A Large-scale particle image velocimetry system based on dual-camera field of view stitching,” *Sensors & Transducers*, 157(10), 234-239, 2013.
 24. Wolf, P. R., Dewitt, B. A., Element of Photogrammetry: with Application in GIS. McGraw-Hill Higher Education, Chapter 15-6, 334-341, ISBN: 0-07-292454-3, 2001.
 25. Weitbrecht, V., Kuhn, G., Jirka, G. H., “Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows,” *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 237-245, 2002.

收稿日期：民國 104 年 12 月 14 日

修正日期：民國 105 年 1 月 6 日

接受日期：民國 105 年 1 月 13 日