

應用攝影量測技術觀測河川水位 與表面流速之研究

The Application of Photogrammetric Techniques to Measure Water Levels and Surface Water Velocities in Streams

國立聯合大學
土木與防災工程學系
教授兼研發長

柳 文 成*

Wen-Cheng Liu

國立聯合大學
土木與防災工程學系
碩士

楊 淑 媛

Shu-Yuan Yang

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

摘 要

臺灣現行的河川流速觀測方式大多採用入侵式，但於高流量時期河川水流湍急，只能使用浮標法進行河川流速量測，而攝影測量技術因為具有非接觸性之特性，較其他測量方法更安全且可靠，故被應用於測量河川表面流速，並發展出大尺度顆粒影像速度法(Large Scale Particle Image Velocimetry, LSPIV)。為簡化設站作業，多以二維方式量測表面流速，因此必須將攝影設施設置於水位站，由水位站提供實測水位資訊，方能進行表面流速量測。

本研究於石門水庫上游集水區玉峰水位站進行實驗，實驗共分為兩個部分，首先使用攝影測量技術量測河川水位，並與水位站實測水位進行比較；然後使用水位站實測水位及使用攝影測量技術量測之水位來分析表面流速，並與實測表面流速進行比較。於 3 次實驗結果中顯示，攝影測量技術量測之水位與水位站實測水位之均方根誤差(RMSE)介於 0.007 m 至 0.055 m；分別使用實測水位及使用攝影測量技術量測之水位來分析表面流速，與實測表面流速之平均相對誤差百分比(RE)差異為 1.55%。本研究證實以攝影測量技術量測水位再進行表面流速分析是可行的。

關鍵詞：水位，河川表面流速，攝影測量，大尺度顆粒影像速度法。

ABSTRACT

In Taiwan, an invasive method is popularly used to measure velocity in rivers during

*通訊作者，國立聯合大學土木與防災工程學系，36063 苗栗市南勢里聯大二號，wcliu@nuu.edu.tw

normal flow periods. During the high flow periods, velocity in rivers only can be measured using the buoy method. Photogrammetric technique possesses noncontact characteristic and is more secure and reliable than other methods of measurement. It is often applied to measure surface velocity of the river then Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) is developed. To simplify the operation in gauging station, a two-dimensional method is often used to measure the surface velocity. Therefore photogrammetric equipment must be established on gauging station where provides water level information to measure the surface velocity.

Study site is located at the Yufeng gauging station where is in the Shihmen Reservoir upstream catchment. Research of this study was divided into two parts: the first, photogrammetric technique solving water level was compared with measured water level, and then the measured surface velocity was compared with the analyzing surface velocity using the applications of measured water level and photogrammetric technique solving water level. In the three-time experiments, the results show that the Root Mean Square Error (RMSE) using photogrammetric techniques to solve water level and measured water level is between 0.007 m to 0.055 m. The difference of averaged relative error (RE) between the measured surface velocity and the analyzing surface velocity is 1.55%. We validated that the approach with photogrammetric techniques solving the water level is capable of analyzing and measuring river surface velocity.

Keywords: Water level, River surface velocity, Photogrammetry, Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).

一、前 言

表面流速量測的標準技術隨著量測水體的河寬、有無障礙特性及水力狀況而異。流速儀、化學追蹤劑及染料在大河川斷面及小型渠道都是常用的量測方法(Planchon *et al.*, 2005; Tazioli, 2011; Tauro *et al.*, 2012; deLima and Abrantes, 2014)。另一種量測表面流速知替代方法為聲波都普勒儀或遙感觀測(Fulton and Ostrowski, 2008; Alessandrini *et al.*, 2013; Tarpanelli *et al.*, 2013)，例如手持式雷達儀、微波量測儀及衛星。大部分的量測方法都有一些缺點，如需要昂貴的設備、花費很多時間、無法提供連續性的觀測、需要顆粒性物質及具有入侵性，僅有遙感觀測法不需要在河川中佈設儀器即可量測表面流速；而手持式雷達儀及微波量測儀則相當昂貴；衛星觀測則僅限於大型河川。這些量測方法的主要限制為流速

觀測時間與頻率不多，所以儀器能使用於大洪水期間的流速量測時間與頻率並不高。近幾年來，光學方法已經被使用於克服這些量測的缺點，光學方法可將流況的影像視為資料，應用相似辨視法則，將連續影像量化為流速(Quenot *et al.*, 1998; Creutin *et al.*, 2003; Hauet *et al.*, 2008; Hauet *et al.*, 2009; Hilgersom and Luxemburg, 2012; Gunawan *et al.*, 2012; Belchle *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013)。

光學方法是源自於流體力學實驗室，流體流動的資訊可由數位影像獲得量化的分析。用以量測水流特性的傳統方法為顆粒影像速度法(Particle Image Velocimetry, PIV)及顆粒追蹤速度法(Particle Tracking Velocimetry, PTV)。PIV 法是將拍攝之影像切割成數塊區域，擷取每個區域中的特徵圖像，由特徵圖像進行影像匹配，因此特徵圖像的移動速度即代表為這整塊區域的移動

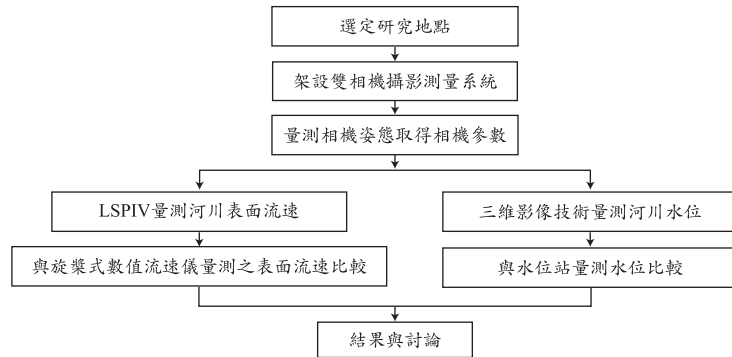


圖 1 研究流程圖。

速度，所以一個區塊只有一個速度值，當影像切割得越多，能得到的河川表面流速值越多，但也增加其計算之時間(Adrain, 2005; Raffel *et al.*, 2007; Peterson *et al.*, 2009); PTV 法係追蹤影像中的特徵點，可計算出每一個特徵點的移動速度，理論上越多特徵點可以計算越多的流速值，但如果有太多相同特徵的特徵點，在軟體自動化影像匹配中，很容易出現誤判的情況，因此 PTV 法僅能使用於水體中有低密度的移動性粒子(Kemp *et al.*, Rosentiel and Grigat, 2010)。

基於原先發展於實驗室的影像量測技術，目前已廣泛應用於現地環境，其中以大尺度顆粒影像速度法(Large-Scale Particle Tracking Velocimetry, LSPIV)最具有潛力的技術，此法可使用數位影像進行分析，為非侵入水體且有連續性的特性(Fujita *et al.*, 1998; Bradley *et al.*, 2002)。LSPIV 為延伸傳統的 PIV 法，用以量測瞬間的水體表面速度；LSPIV 的技術也已被於河川流量的量測(Harpold *et al.*, 2006; Jodeau *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2010; Fujita and Kunita, 2011; Tauro *et al.*, 2014)、湖泊生態系統水流特性(Kantoush and Schleiss, 2009)、及自然水體的水動力特性(Hauet *et al.*, 2009)。LSPIV 不需要於水體中植入物理性的粒子或人為的操作以獲得資料；此方法允許在廣闊的區域進行安全的量測(Kantoush *et al.*, 2011)，更適用於不同的流況，從低流量至高流量，甚至是颱風期間的流量

觀測(Meselhe *et al.*, 2004; Tsubaki *et al.*, 2011)。

因為 LSPIV 是以二維方式量測表面流速，所以必須提供水位，才能量測正確的表面流速。如果要進行全年 24 小時自動化量測，LSPIV 的攝影測量系統就需要設置於水位站，由水位站提供實測水位資料，方能進行表面流速量測。綜觀上述文獻中，未曾有研究探討以 LSPIV 自動計算水位並據以測得表面流速。因此本研究目的為應用攝影測量技術自動測得河川水位，並直接提供給 LSPIV 進行河川表面流速的分析。

二、研究地點與方法

本研究選定的量測地點為石門水庫上游集水區的玉峰水位站。於水位站架設雙相機系統，並量測相機姿態取得相機的內外方位參數後，再利用三維影像技術量測水位；爾後，結合 LSPIV 量測河川表面流速。本研究以影像技術所測得的水位將會與水位站所量測的水位進行比較；以 LSPIV 量測之表面流速則是與旋槳式數值流速儀量測結果進行比較。研究流程圖如圖 1 所示。

2.1 研究地點

本研究研究地點位於新竹縣尖石鄉玉峰村玉峰橋旁的玉峰水位站，如圖 2(a)所示。玉峰水位站海拔高程約 684 公尺，河川寬度於常流量時約為 15 公尺至 25 公尺寬，常流量時之實測流速介於 0.18 m/s 至 1.86 m/s 之間，實測流量不超過



圖 2 (a)玉峰水位站位置；(b)玉峰水位站與拍攝河寬之全景。



圖 3 玉峰水位站所設置之(a)雷達波水位計及(b)壓力式水位計。

40 m³/s。雙相機架設於水位站觀測平台上拍攝河川橫斷面，如圖 2(b)所示；紅圈處為雙相機架設位置。觀測平台至河川底部高程差約為 12 公尺，從水位站至河面觀測距離為 15 公尺至 60 公尺。水位站設有雷達波水位計與壓力式水位計用以觀測河川水位，如圖 3 所示，其中圖 3(b)紅圈處為壓力式水位計。

2.2 攝影測量原理

攝影測量原理所使用的方程式為共線式。共線式是由透視原理建構而成，其組成為三個座標點：物點 A、相機的透視中心 C、與物點對應到像片上的像點 B。在攝影瞬間由透視中心 C 到物點 A 的向量 A 與由透視中心 C 到像點 B 的向量 B 共線，這條件稱為共線條件，如圖 4 所示。

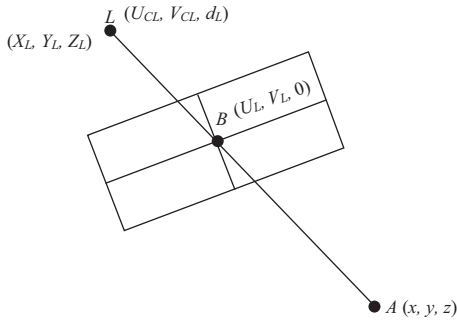


圖 4 攝影測量原理示意圖。

共線式基本公式為式(1)及(2)所示(Dobson *et al.*, 2014)：

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

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

式中： d ：焦距；

x_c, y_c, z_c ：透視中心在物空間座標系統中的座標值；

u_c, v_c, d ：透視中心在像空間座標系統的座標值；

$r_{11} \sim r_{33}$ ：係由 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。

其中 $x_c, y_c, z_c, u_c, v_c, d, \omega, \phi$ 及 κ 等，為共線式內、外方位參數，即表示攝影機於像空間與物空間之相對座標位置及姿態(三個軸向之旋轉角)，通常由已知控制點座標帶入共線式解算，本研究為提升 LSPIV 設站之便利性，簡化設站之程序，是使用尺及 U 型架(如圖 10 所示)上的水平角及俯角刻度，求得攝影機的姿態及與自訂座標系統原點之相對位置。

2.3 影像校正

因製造攝影機透鏡時，其透鏡製成不完善造成的誤差，稱為透鏡畸變差，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：

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

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

其中 Δu 及 Δv 為改正值，其方程式如下：

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

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

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。

本研究所使用之鏡頭畸變差率定結果，徑向畸變差係數分別為-0.1179 及 1.2770；切向畸變差係數分別為-0.00468 及-0.00284。其對拍攝影像之影響分別如下圖 5 及圖 6 所示。

2.4 空間交會模式

空間交會模式分為後方交會(Resection)與前方交會(Intersection)模式。後方交會模式是透過已知地面控制點與其對應的影像座標，如圖 7 所示，計算出單張影像中的內、外方位參數。每個控制點與對應的影像座標可以形成兩個方程式，因此要解 N 個參數就需要 $N/2$ 個地面控制點與對應的影像座標。共線式中共有 9 個參數要解，故至少需要有五個控制點提供 10 個方程式，以解算 9 個參數。前方交會模式則是透過後方交

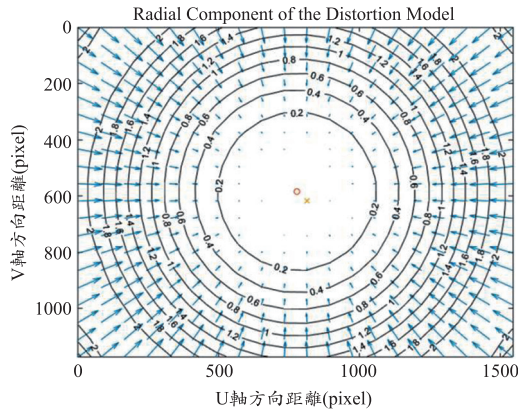


圖 5 徑向畸變差視覺化示意圖。

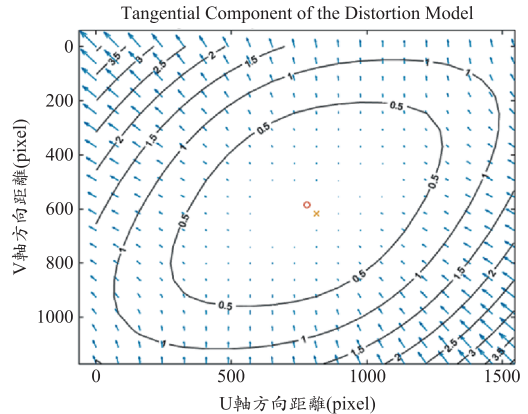


圖 6 切向畸變差視覺化示意圖。

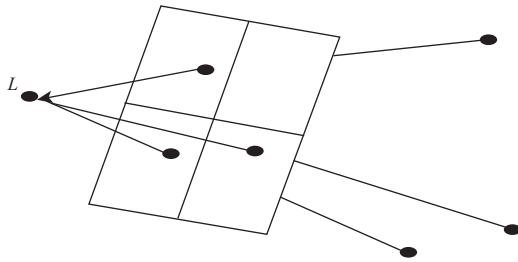


圖 7 後方交會模式示意圖。

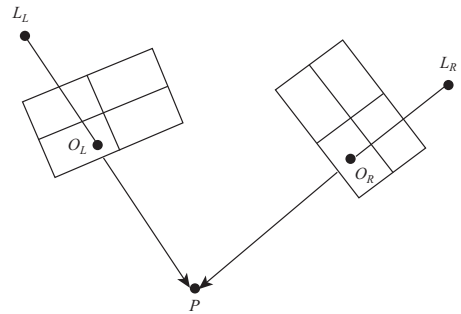


圖 8 前方交會模式示意圖。

會模式所求出之內、外方位參數，代回共線式方程式求得物空間之座標值，如圖 8 所示。

2.5 影像匹配

影像匹配是指在第二張(B)影像中尋找與第一張(A)影像相同的地面共軛點觀測量。傳統方法是人工指定在同一個地面點分別在兩張影像中的位置，但因現在數位化的進步，攝影測量已逐漸朝自動化演進。數位影像可切割成數個小區塊，每個小區塊都代表一個數值—像素，每個像素都有其灰度值與 RGB (Red-Green-Blue)值，透過數位影像上的數值計算，可得到 A 影像在 B 影像上的位置。得到地面未知點分別在兩張影像上的像點觀測量，才可以透過前方交會模式去計算地面未知點的座標值。影像匹配較常見的方法有

三種(王樹根，2009)為相關係數法、斜方差法、最小二成匹配法。本研究採用相關係數法。

相關係數法是透過分別在兩張影像上所建立的視窗，去計算兩者間之相關係數 c (Fujita *et al.*, 1998; Wolf and DeWitt, 2001)，如式(7)所示。相關係數 c 介於 $1 \sim 0$ 之間，當相關係數 c 為 1 時，表示兩張影像選取的像點與周遭數位影像完全一致；相關係數 c 越接近 0，表示兩張影像分別選取的像點與周遭影像差異越大。

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

c : 相關係數 ;

A_{ij} : 目標視窗中在第 i 行與第 j 列位置上像

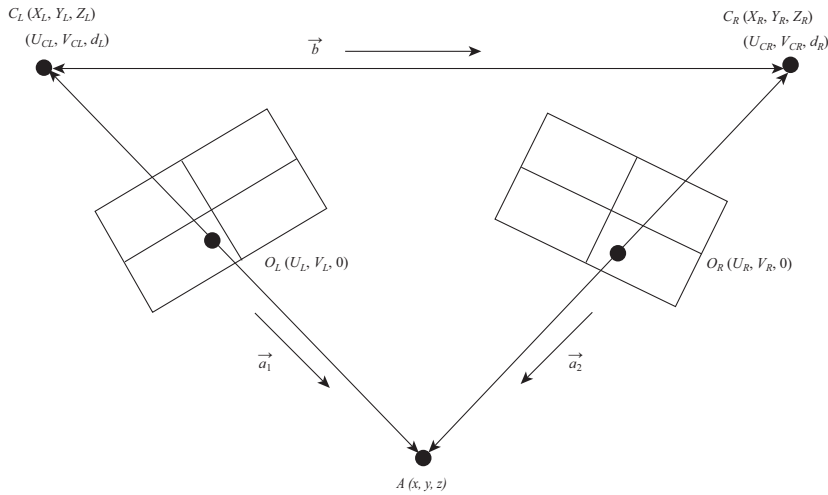


圖 9 五點共平面示意圖。

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。

現今影像技術越來越好，相機畫素也變高，就算以兩百萬畫素的影像進行影像匹配，以 10×10 大小的搜尋視窗，至少也要進行 190 萬次以上的匹配運算。儘管是用電腦運算也需要花費大量的時間，因此為了節省運算時間，本研究除了相關係數法之外也運用了核線制約的方法。核線制約即共平面條件，意指目標影像的透視中心 C_L 、搜尋影像的透視中心 C_R 、物空間的目標點 P 、目標點在目標影像上的像點 O_L 及目標點在搜尋影像上的像點 O_R ，此五點共平面，其關係如圖 9 所示。當五點共平面時，會滿足式(8)條件：

$$F = \begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ x_L & y_L & z_R \\ x_R & y_R & z_R \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

由 \vec{a}_1 、 \vec{a}_2 及 \vec{b} 三者所組成的平面 F ，分別會與左邊影像及右邊影像相交在一條直線上。在計算地面未知點座標時，左邊影像的透視中心 C_L 、右邊影像的透視中心 C_R 與地面未知點在左邊影

像上的像點觀測量 O_L 都已知，而地面未知點在右邊影像上的像點觀測量 O_R 未知，因此 \vec{a}_1 、 \vec{b} 為已知，而 \vec{a}_2 中的 U_R 、 V_R 為未知數。這條直線方程式會通過所求的右邊影像上的共軛像點 O_R ，故而在使用相關係數法進行影像匹配時，不必計算右邊影像所有的像素點，只需要沿著右邊影像與平面 F 相交的直線方程式去尋找所求點 O_R 即可。

2.6 實驗儀器

本研究拍攝像片所使用的相機為德國 Basler 公司所製造之工業相機 ICDA-acA1600-20gc(如圖 10 所示)，其影像畫素為 200 萬像素，與一般數位相機不同的在於工業相機可以使用程式控制相機開始或者停止拍攝，其規格如表 1 所示。因量測距離為 15 公尺至 40 公尺，因此像素投影至量測區域之解析度介於 $\pm 2.18\text{mm}$ 至 $\pm 5.81\text{mm}$ 。因攝影機取像間隔為 0.05 秒，因此對 LSPIV 量測表面流速之精度為 0.044 m/s 至 0.116m/s。拍攝像片時會把相機置於保護殼內，接上傳輸線，並架設於 U 型架上，使相機可於水平方向與垂直方向轉動。U 型架底部有水準氣泡以進行定平。之後會將 U 型架置於三腳架上，並將腳架架設於測量場地進行拍攝。



圖 10 (a)工業相機 ICDA-acA1600-20gc；(b) U 型架與水準氣泡。

表 1 Basler 工業相機 ICDA-acA1600-20gc 規格

相機規格	
照片解析度(pixel)	1600 × 1200
單位像素大小(pixel)	4.4 × 4.4
影像感測器大小	1/1.8"
每秒連拍張數(fps)	20
鏡頭焦距(mm)	15
光圈	f/2.0



圖 11 旋槳式數值流速儀。

為了與大尺度顆粒影像速度法(LSPIV)所分析出的表面平均流速結果進行比較，本研究使用美國 GLOBAL WATER 公司所生產之 FP111 旋槳式數值流速儀，如圖 11，其量測精度為 ± 0.1 m/s，量測流速範圍為 0.1 m/s 至 6.1 m/s。量測河川表面流速用以與 LSPIV 所分析的表面流速結果進行比較。旋槳式數值流速儀並非傳統式旋槳式流速儀，其量測流速之儀器探測頭直徑只有 5 公分，雖然無法如 LSPIV 是量測真正的河川表面，但應可用於比較 LSPIV 之準確性。

三、量測結果分析與討論

因攝影測量技術在進行二維量測河川表面流速時，須提供河川水位資料，所以 3.1 節為利用攝影測量技術，進行三維量測河川水位之結果，並與玉峰水位站壓力式水位計實測河川水位

之結果進行比較與討論；3.2 節則為利用攝影測量技術進行二維量測河川表面流速之量測結果，與使用旋槳式數值流速儀實測之河川表面流速結果進行比較與討論。其中利用攝影測量技術進行二維量測河川表面流速所使用之水位資料，分別使用玉峰水位站壓力式水位計實測之河川水位，與於 3.1 節中應用攝影測量技術所量測之河川水位。

本研究分別在 2016 年 4 月 21 日、2016 年 5 月 13 日及 2016 年 5 月 22 日，於石門水庫上游集水區玉峰水位站，進行三次實驗，其量測成果分析與討論如後所述。其中統計誤差分析所採用之方法有均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)如式(9)，平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)如式(10)，相對誤差百分比(Relative Error, RE)如式(11)。



圖 12 左、右相機所拍攝之影像。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VO_i - VS_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |VO_i - VS_i| \dots\dots\dots(10)$$

式中：

VO_i ：水位計實際觀測值；

VS_i ：LSPIV 量測之水位值；

n ：量測數量。

$$RE = \left| \frac{V_1 - V_2}{V_1} \right| \times 100\% \dots\dots\dots(11)$$

式中：

V_1 ：LSPIV 量測之表面流速；

V_2 ：旋槳式數值流速儀實測表面流速。

3.1 水位量測之結果分析與討論

本研究進行左、右相機所拍攝之兩張影像量測水位時，以河岸線為基準點來量測水位。為了使影像匹配更加快速，使用了核線制約，因為使用核線制約時，其中的地面控制點的座標與像點觀測量皆有誤差存在，所求得之直線方程式，無法每次都穿過所求點，所以進行影像匹配時需要在右邊影像與平面相交的直線，往上與往下各數個像素，本研究將往上與往下之像素偏移值設為 50 pixel。影像匹配時會利用相關係數(c)在右邊影像與平面相交的直線往上與往下之像素偏移值

為 50 pixel 之範圍內之像素進行逐一匹配。本研究將相關係數門檻值設為 0.7，如果經過計算後相關係數高於 0.7 代表匹配成功，低於 0.7 代表匹配失敗。

本研究於 2016 年 4 月 21 日現地實驗時擷取 16 組的影像、2016 年 5 月 14 日現地實驗時擷取 19 組的影像、2016 年 5 月 22 日現地實驗時擷取 16 組的影像，每組影像間隔 10 分鐘，每一組拍攝 10 張連續影像進行分析，因每 2 張影像連續影像即可計算 1 筆表面流速，因此每一組影像可計算 9 筆表面流速，9 筆表面流速取平均，可代表拍攝該組影像時間下之真實表面流速。因為實驗期間是於白天進行量測，所以無光線的問題存在，若於夜間進行 LSPIV 的量測，則需要補充足夠光源才能進行量測。圖 12 為在玉峰水位站架設左、右相機所拍攝之影像圖。

圖 13 為攝影測量技術量測之水位與玉峰水位站壓力式水位計量測之水位之時序比較，三場量測結果之統計誤差分析，含均方根誤差(RMSE)與平均絕對誤差(MAE)，如表 2 所示。由圖 13(a)、圖 13(b)及圖 13(c)可知，攝影測量技術所量測之水位與玉峰水位站壓力式水位計量測之水位皆非常接近。由表 2 之統計誤差分析結果亦可知，攝影測量技術所量測之水位與玉峰水位站壓力式水位計量測之水位統計誤差分析皆小於 0.055m，顯示以攝影測量技術量測水位是可行的。

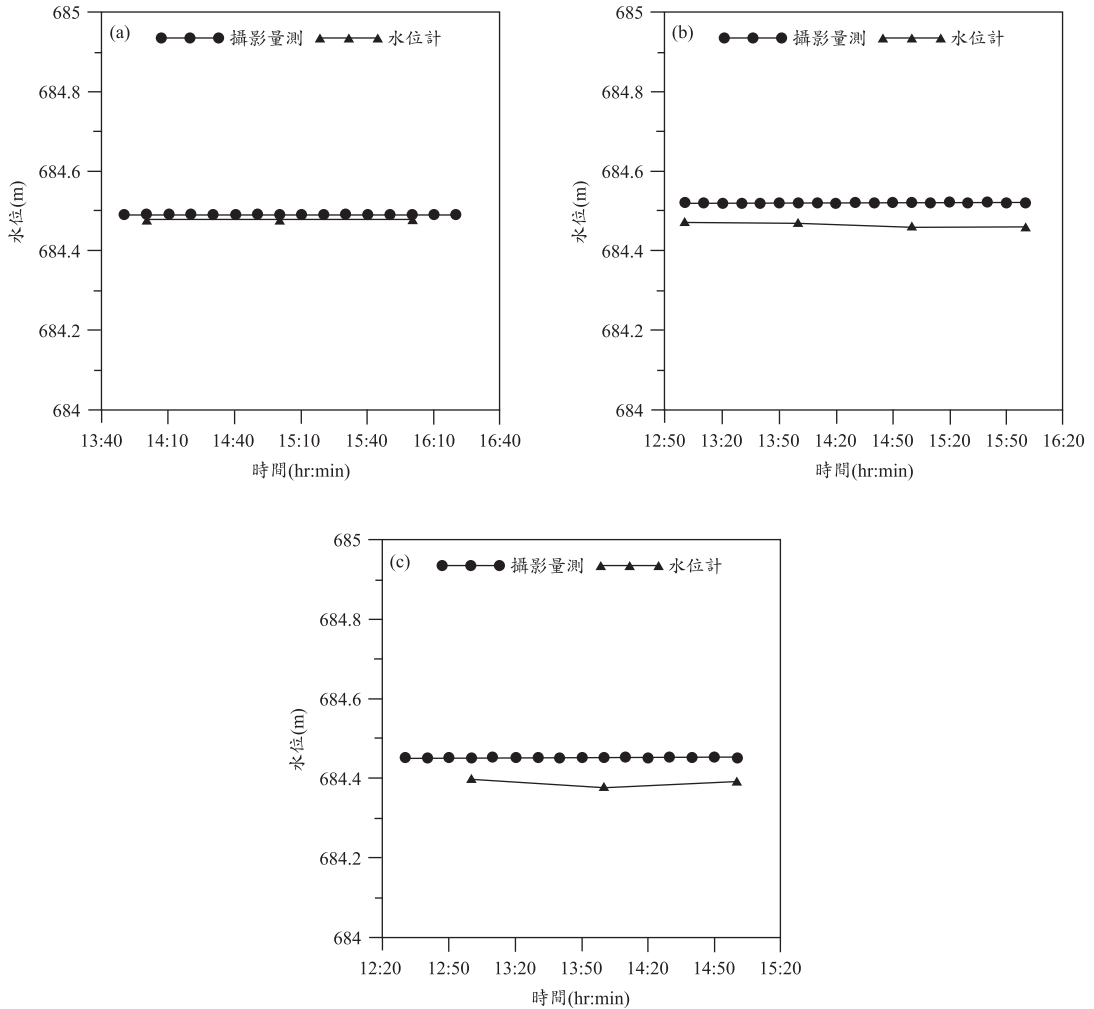


圖 13 LSPIV 量測之水位與玉峰水位站壓力式水位計之實測水位隨時間變化圖：(a) 2016 年 4 月 21 日；(b) 2016 年 5 月 14 日；(c) 2016 年 5 月 22 日。

表 2 攝影測量技術量測之水位與玉峰水位站壓力式水位計量測之水位之統計誤差分析

實驗日期	RMSE (m)	MAE (m)
4 月 21 日	0.007	0.007
5 月 14 日	0.055	0.055
5 月 22 日	0.048	0.047

LSPIV 於水位量測結果顯示均大於真實水位，其原因在於本研究為提升 LSPIV 設站之便利性，簡化設站之程序，因此 LSPIV 之 9 個內外方

位參數，是用尺及 U 型架(如圖 10 所示)上的水平角及俯角刻度，求得攝影機的姿態及與自訂座標系統原點之相對位置。因 U 型架上刻度精度只至 1 度，因此造成系統性誤差，導致 LSPIV 的水位量測結果顯示均大於真實水位。

Wanek and Wu (2006)曾發展三維立體影像觀測系統，並應用於量測三維波浪特性，其量測的波高與實測波高比較，顯示該系統所測的之波高與實測波高相近。本研究則證實立體影像測量系統亦可應用於水位的觀測。

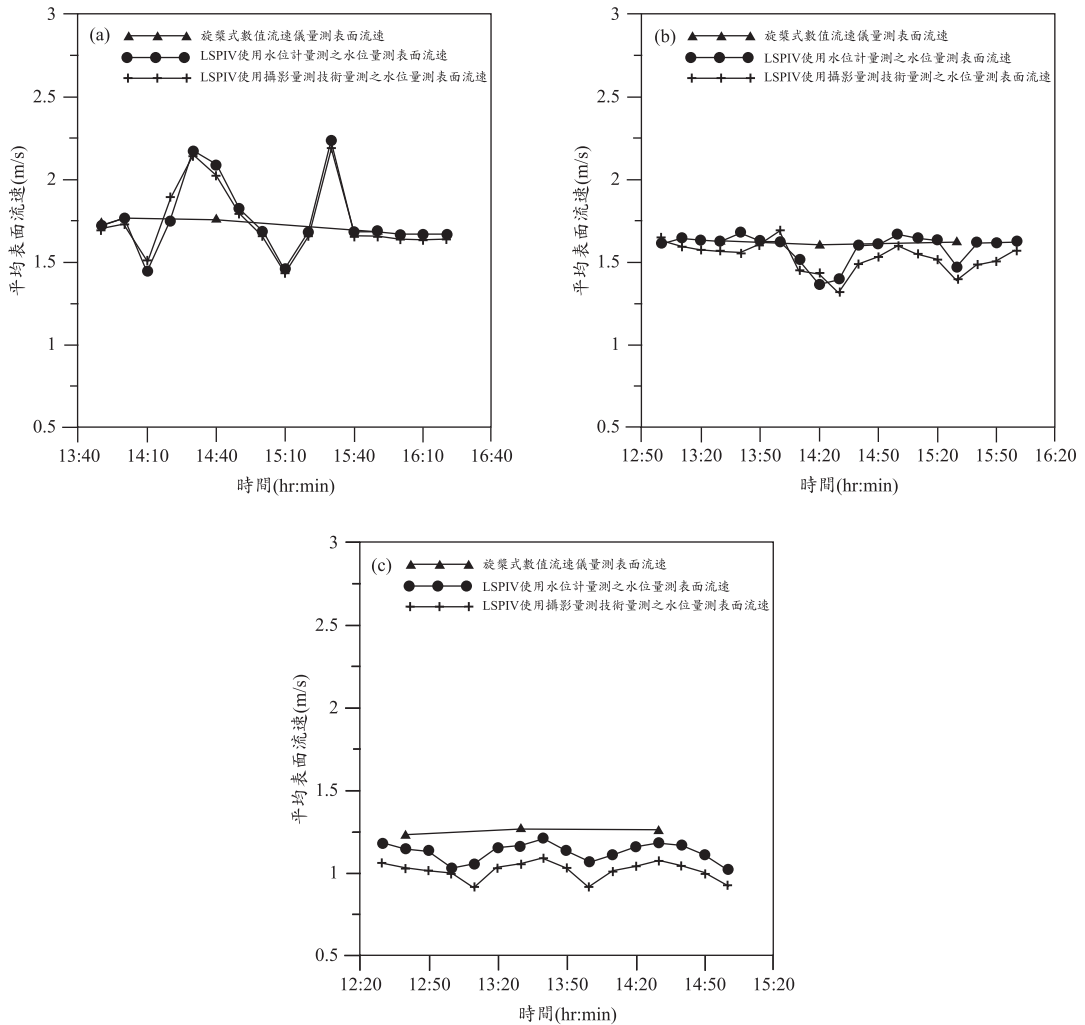


圖 14 分別使用攝影測量技術量測之水位及實測水位分析之表面流速與實測表面流速隨時間變化圖：(a) 2016 年 4 月 21 日；(b) 2016 年 5 月 14 日；(c) 2016 年 5 月 22 日。

3.2 表面流速量測之成果分析與討論

上一節證實攝影測量技術具有潛力取代水位站所量測得水位，本節將探討表面流速量測的結果。因此使用玉峰水位站壓力式水位計實測水位與使用攝影測量技術量測之水位進行表面流速之分析，並與旋槳式數值流速儀實測之表面流速隨時間變化圖，如圖 14 所示。使用玉峰水位站壓力式水位計實測水位及使用攝影測量技術量測之水位分析表面流速，與旋槳式數值流速儀實測表面流速比較之相對誤差百分比(RE)，如表

表 3 LSPIV 分別使用實測水位及使用攝影測量技術量測水位分析表面流速，並與旋槳式數值流速儀實測表面流速比較之相對誤差百分比(RE)

實驗日期	使用水位計 實測水位	使用攝影測量技術 量測水位
	RE (%)	RE (%)
4 月 21 日	1.99	1.26
5 月 14 日	1.87	5.68
5 月 22 日	10.15	11.73
平均值	4.67	6.22

3 所示。

表 3 中顯示，使用實測水位來分析表面流速，與旋槳式數值流速儀實測表面流速比較之相對誤差百分比介於 1.87% ~ 10.15% 之間，平均誤差百分比為 4.67%；使用攝影測量技術量測之水位來分析表面流速，與旋槳式數值流速儀實測表面流速比較之相對誤差百分比介於 1.26% ~ 11.73% 之間，平均相對誤差百分比為 6.22%，兩者平均相對誤差百分比相差 1.55% (= 6.22% - 4.67%)，兩者相差甚小，故本研究驗證使用攝影測量技術量測之水位可實際應用於分析表面流速。

Dramais *et al.* (2011) 使用移動式的 LSPIV 進行洪水流量觀測，於該文中提到水位誤差會影響影像的正交校正程序，進而影響流速及流量的結果，因此將全站儀(Leica TC305)及 DGPS 系統(Leica GP1200)量測之實測水位，增加及減少 50 公分，在假設水位有 50 公分的誤差情況下，表面流速誤差可達到 18%。於 3.1 節中，攝影測量技術所量測之水位與玉峰水位站壓力式水位計量測之水位，平均誤差小於 0.055 m (5.5 cm)，若以玉峰水位站壓力式水位計實測水位與使用攝影測量技術量測之水位進行表面流速，所得的誤差約為 1.55%，本研究的結果與 Dramais *et al.* (2011) 的研究結果，若採用正比關係，即水位誤差達 5.5 公分，表面流速誤差約為 1.98%，兩者頗為相近，亦證明本研究結果的正確性。

四、結論

本研究使用攝影測量技術量測河川之水位，並與實測之水位比較，用以證明攝影測量技術能用於量測河川之水位。並將實測之河川水位及攝影測量技術量測之河川水位用於分析河川之表面流速，用以證明攝影測量技術量測之河川水位能實際應用於分析河川之表面流速。經研究可獲得以下結論：

1. 使用攝影測量技術量測之水位與實測水位之統計誤差分析，均方根誤差(RMSE)及平均絕對誤差(MAE)介於 0.007 ~ 0.055 m 之間，顯示攝影測量技術應可實際應用於量測

河川之水位。

2. 使用玉峰站實測水位及攝影測量技術量測之水位來分析表面流速，與旋槳式數值流速儀實測表面流速之平均誤差百分比差異為 1.55%，故顯示攝影測量技術量測之水位可實際應用於分析河川表面流速上。
3. 攝影測量技術可用於量測河川之水位，因此攝影測量設備不必設置於水位站，再由水位站提供水位資訊方能進行表面流速分析，可直接使用攝影測量技術所量測之水位來分析河川之表面流速，對於無水位站提供水位資料之測站，本研究提供量測河川水位及表面流速之最佳技術。

參考文獻

1. Adrian, R. J., "Twenty years of particle image velocimetry," *Experiments in Fluids*, 39(2), 159-169, 2005.
2. Alessandrini, V., Bernardi, G., Todini, E., "An operational approach to real-time dynamic measurement of discharge," *Hydrology Research*, 44(6), 953-964, 2013.
3. Bechle, A., Wu, C. H., Liu, W. C., Kimura, N., "Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system," *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(4), 327-339, 2012.
4. Bradley, A. A., Kruger, A., Meselhe, E. A., Muste, M., "Flow measurement in streams using video imagery," *Water Resources Research*, 38(12), 1-8, 2002.
5. Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A., Kim, S. C., Kruger, A., "River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River," *Journal of Hydrology*, 277(3-4), 182-194, 2003.
6. deLima, J. L. M. P., Abrantes, J. R. C. B., "Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities," *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1293-1300, 2014.

7. Dobson, D. W., Holland, K. T., Calantoni, J., "Fast, large-scale, particle image velocimetry-based estimations of river surface velocity," *Computers & Geosciences*, 70, 35-43, 2014.
8. Dramais, G., Coz, J. L., Camenen, B., Hauet, A., "Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves," *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), 301-312, 2011.
9. Fujita, I., Kunita, Y., "Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera," *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), 323-331, 2011.
10. Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., "Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications," *Journal of Hydraulic Research*, 38(3), 397-414, 1998.
11. Fulton, J., Ostrowski, J., "Measuring real-time stream flow using emerging technologies: radar, hydroacoustics, and the probability concept," *Journal of Hydrology*, 357(1-2), 1-10, 2008.
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 ovetbank flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, 1-12, 2012.
13. Harpold, A. A., Mostaghimi, S., Vlachos, P. P., Brannan, K., Dillaha, T., "Stream discharge measurement using a large-scale particle image velocimetry (LSPIV) prototype," *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49, 1791-1805, 2006.
14. Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J., Wilson, M., "Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method," *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 105-110, 2008.
15. 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.
16. Hilgersom, K. P., Luxemburg, W. M. J., "Technical notes: how image processing facilitates the rising bubble techniques for discharge measurement," *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(2), 345-356, 2012.
17. Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G., "Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions," *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), 117-127, 2008.
18. Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., "Channel formation during flushing of large shallow reservoirs with different geometries," *Environmental Technology*, 30(8), 855-863, 2009.
19. Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., Sumi, T., Murasaki, M., "LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases," *Journal of Hydro-environmental Research*, 5(4), 263-276, 2011.
20. Kemp, L., Jamieron, E. C., Gaskin, S. J., "Phosphorescent tracer particles for Lagrangian flow measurement and particle tracking velocimetry," *Experiments in Fluids*, 48(5), 927-931, 2010.
21. Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A., Bradley, A., "Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept," *Water Resources Research*, 44, W09502, 2008.
22. Meselhe, E. A., Pvea, 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.
23. Peterson, S. D., Porfiri, M., Rovardi, A., "A

- particle image velocimetry study of vibrating ionic polymer metal composites in aqueous environments,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(4), 474-483, 2009.
24. Planchon, O., Silvera, N., Gimenez, R., Favis-Mortlock, D., Wainwright, J., Le Bissonnais, Y., Govers, G., “An automated salt-tracing gauge for flow-velocity measurement,” *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(7), 833-844, 2005.
 25. Quenot, G. M., Pakleza, J., Kowalewski, T. A., “Particle image velocimetry with optical flow,” *Experiments in Fluids*, 25(3), 177-189, 1998.
 26. Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. T., Kompenhans, J., *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. New York, Springer, 2007.
 27. Rosenstiel, M., Grigat, R. R., “Segmentation and classification of streaks in a large-scale particle streak tracking system,” *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(1), 1-7, 2010.
 28. 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.
 29. Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L., Moramarco, T., “River discharge estimation by using altimetry data and simplified flood routing modeling,” *Remote Sensing*, 5(9), 4145-4162.
 30. Tauro, F., Grimaldi, S., Petroselli, A., Porfiri, M., “Fluorescent particle tracers in surface hydrology: a proof of concept in a natural stream,” *Water Resource Research*, 48(6): W06528, 2012.
 31. 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.
 32. Tazioli, A., “Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter,” *Hydrological Sciences Journal*, 56(7), 1314-1324, 2011.
 33. Tsubaki, R., Fujita, I., Tsutsumi, S., “Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system,” *Journal of Hydro-environmental Research*, 5(4), 313-321, 2011.
 34. Wanek, J. M., Wu, C. H., “Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements,” *Ocean Engineering*, 33(5-6), 723-747, 2006.
 35. 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.
 36. Wolf, P., Witt, D., *Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS*. McGraw-Hill, Boston, 608, 2011.
 37. 王樹根：攝影測量原理與應用，武漢大學出版社，49-51，2009。

收稿日期：民國 106 年 1 月 2 日
修正日期：民國 106 年 1 月 9 日
接受日期：民國 106 年 1 月 23 日