

# 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

### River Surface Velocity Estimation via Image Analysis and Microwave Radar Techniques

主管單位：國家實驗研究院儀器科技研究中心

廖泰杉<sup>1</sup>

湯雅雯<sup>1</sup>

權順忠<sup>2</sup>

楊耀奮<sup>3</sup>

康仕仲<sup>3</sup>

Liao, Tai-Shan Tang, Ya-Wen Tsung, Shun-Chung Yang, Yao-Yu Kang, Shih-Chung

<sup>1</sup>財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心

<sup>2</sup>財團法人國家實驗研究院颱風洪水研究中心

<sup>3</sup>台灣大學土木工程研究所

#### 摘要

颱風災害預警一直是國家發展中不可避免的一個議題，對於災害預警儀器與系統技術發展也不遺餘力，本計劃就是透過現有研發能量搭配國家實驗研究院颱風洪水中心共同發展河川流量觀測與分析平台。本研究目的在於正確估計與分析河川流量，因此，研究中利用影像觀測技術計算出正確的流速資訊，透過相關分析評估表面流速與流量之間的相互作用。在水面流速影像觀測技術開發上，本研究中開發以非接觸式量測儀器與技術為主之大尺度河川水面影像觀測技術，透過演算的撰寫與實際驗證，可正確估計表面流速。在相關性分析方面，經由微波雷達量測表面流速的變化，並搭配河川剖面資訊推估流量，並找出流速與流量之間的關係，證實兩者間存在線性與非線性的相互影響。預期此技術開發後，可對於國內先進防災預警水文分析，提供更有效的河川水流、水量資訊，降低災害預警之成本與時效性，支援政府之災害預警的準確性，並達成國內防災預警儀器相關需求。

**關鍵詞：**災害預警儀器、流量、影像觀測、表面流速、相關性分析

#### Abstract

Disaster warning system is always a serious topic of country development, especially for the typhoon and floods. So, the government spares no effort on the development of disaster warning instruments and systems, and this project is one of them. In this project, we try to set up a platform of flow monitoring and analyses by combining the knowledge of Taiwan Typhoon and Flood Research Institute (TTFRI) and Instrument Technology Research Center (ITRC) R & D capabilities. The aims of this project are to

develop the measurement modules, including image monitor method of river flow velocity, and the discharge estimation method. To correctly acquire the river discharge information, the particle image velocimetry method is involved and compared with commercial instruments. This method used contactless measurement instrument can be applied on large scale river image analysis. This method is verified with some on-site experiments, and the estimation capability of surface velocity is confirmed. Moreover, the interactive relationship between surface velocity and discharge is analyzed with linear and non-linear correlation estimation methods. The analyses results suggest that there is some linear and non-linear relationship existed between discharge and surface velocity. Combine all results of this project, the river discharge estimation can improve the advance disaster warning system, provide the accuracy river flow and discharge information, and lower the cost of disaster prevention. In the other words, this technique can lead to an accuracy and efficiency disaster estimation and prove the self-development capability of ITRC.

**Keywords : Disaster warning instruments, discharge, image monitor, surface velocity, correlation analyses, Particle image velocimetry.**

## 一、前言

台灣颱風災害多半是起因於持續性豪雨，因此颱風災害預警與應變效率提升是刻不容緩的議題。為此，儀科中心與颱風洪水中心等集合共同的研發能量，進行洪水災害預警儀器與系統技術的開發，並建立跨領域預報與災害預警應變管理平台，將有利於未來颱風洪水災害之預警與防範。在災害預警儀器與系統技術開發的課題上，本中心目前著力於河川水面流速影像觀測技術與表面流速與流量之估算，並獲得部分成果驗證。

## 二、表面流速觀測與分析系統開發

在水文觀測上，河川流量為重要水文資訊。目前河川流量量測主要根據水位及流量之率定曲線，但此法應用於河川大流量時，所得量測數據不可信賴，為解決高流量關測之不確定性，許多新量測方法應運而生，其中非接觸式量測法是日前廣為採行的方法之一。以非接觸式儀器觀測颱風洪流量時，可避免施測設備遭高速洪流拖曳，確保施測人員安全，並可防止儀器因接觸流體而損壞。一旦獲取河川流速資料後，即可搭配數值模型，計算河川流量。因此本計畫分別使用影像與雷達波方式進行流速觀測與相關分析，以期能夠更精確且安全的取得流速資訊。

### 2.1 河川水面流速影像觀測技術

非接觸影像方法在此計畫中使用的為大尺度質點影像測速法(Particle image velocimetry, PIV)作為河川水面流速影像觀測技術。大尺度質點影像測速法，是由在實驗室行之有年之質點影像測速法應用於現地而產生[1]，而影像法在現地應用則是由Fujita做為開端[2-3]，2008年開始質點影像測速法在水利工程上應用開始興盛，且河川面積廣大研究開始朝大尺度質點影像流速法發展[4-5]；在國內李明靜將流速相關非接觸式量測方法的發展與應用做了很詳盡的說明[6-7]，除此之外，亦有多位專家學者利用質點影像方法進行人工渠道以及溪流河川的流速測量。質點影像測速法通常必須取得良好之影像資訊方能夠進行後端演算分析。故選擇一可擷取高影像品質之相機為首要之務，也將有助於降低質點影像測速法開發可能面臨之困難。本計畫選擇之相機為市售高階單眼相機Canon 7D，透過該相機可擷取最高1920 x 1080 (30 fps)之影像畫素。當影像擷取成功後，若影像品質較差則可利用區域性影像直方圖均衡法(Local Histogram Equalization)讓水流區域對比增加，若使用非量測型相機且施測之河流範圍位於影像之邊緣，則扭曲程度影響流速大，則需透過相機之鏡頭率定作業，增加影像量測精度，下圖1為演算法流程圖。

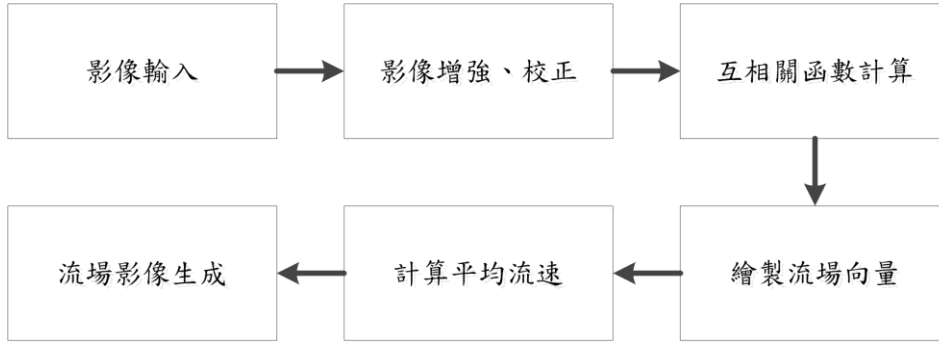


圖 1、演算法流程圖

影像本身並無法提供實際空間的尺度資訊，影像上的每一個像素之間的距離在實際空間上的距離並不會相同。因此為確立實際之影像空間尺度，必須在現地設置參考點，並標記參考點之間的相對空間坐標尺度，對應到拍攝的影像畫面上，再將影像進行正交轉換的運算，使得轉換後的影像每一像素點之間的距離在實際空間上是相同。在本研究中所使用的正交轉換方式為直接線性轉換(direct linear transform)，計算方式是將影像投影於現地的實際尺度上，定義 $u$ 與 $v$ 為影像畫素位置， $x$ 與 $y$ 為實際座標位置，以下方程式是假設水位不變，以在水面上四個參考點定出轉換矩陣，若考慮水位變化，轉換矩陣需要增加 $z$ 軸高程資訊，參考點則需要增加為六個點；

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

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -vx & -vy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ L_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_7 & L_2 - uL_8 \\ L_4 - vL_7 & L_5 - vL_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_3 - u \\ L_6 - v \end{bmatrix} \quad (3)$$

質點影像測速法原理是利用 FFT-互相關係數計算方法，如下式：

$$\phi_{fg}(m, n) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)g(x+m, y+n) \quad (4)$$

式中， $\phi_{fg}(m', n')$ 代表最大值的位置，即時間 $t$ 的特徵於時間 $(t+\Delta t)$ 的位置，如圖 2 所示； $f(x, y)$ 為時間 $t$ 的像素值； $g(x, y)$ 為時間 $(t+\Delta t)$ 的像素值。然而計算出的速度方向會因像素問題無法有準確的方向角度，因此必須使用次像素計算以增加位置的精準度，這部分使用一維二次密合曲線進行計算。

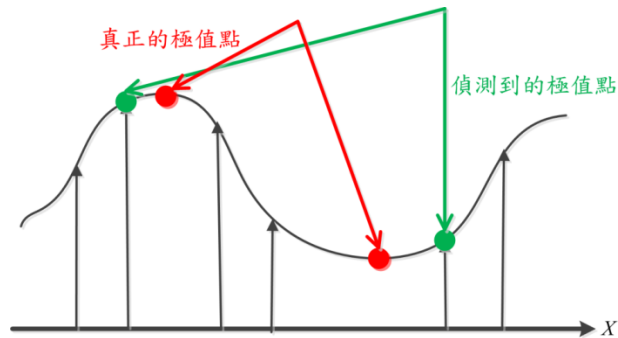


圖 2、離散空間與連續空間極值點的差別

利用 PIV 方法計算出流場後，可將每區塊所計算出的速度向量搭配區塊原點，就可繪製流場，也因為流場向量已彙整，因此繪製流場時可搭配不同箭頭繪製函式，顯示出適當流場圖。一般來說，選擇觀測點必須要達到幾個基本條件：

(a)若需測量不同水位之表面流速，則影像範圍必須包含不同高層六個以上的參考點，且此六個以上的參考點須能夠測得其相對位置；

(b)若只需測量同水位之表面流速，則影像範圍只要能包含水位面上，四個以上的參考點，且可測得其位置；

(c)攝影方向以看清楚表面波紋為主。

## 2.2 以微波雷達建立表面流速推估計算

研究中除採用河川水面流速影像觀測技術外，還透過微波雷達表面流速儀進行流速量測。透過架設於河道兩側之微波雷達表面流速儀，收集河道兩側之表面流速，藉此可改善河面流場寬廣情形。取得之兩側表面流速，再通過算數平均方式，推估出河道表面平均流速。由於偶有環境干擾造成資料異常，故透過資料篩選模式將異常資料濾除，以減少後續流量估計誤差。除透過平均表面流速與通水斷面積推估河川流量外，亦透過演算分析表面流速、水位與流量間之相關性，以期能增加流量推估之準確性。

流量計算主要是透過平均流速與通水斷面積相乘而得，但平均流速在實務上不易取得，所以多半採用表面流速測定來推估河川的平均流速。表面流速是透過微波雷達流速儀所測得，搭配給定之平均流速( $U$ )與表面流速比值(平均-表面流速比  $\alpha = U / u_s$ )，即可推估當時流場之平均流速。目前依照水利署公告的現行流量觀測作業建議值為 0.85 (手持式雷達測速槍)。所以流量的計算被重新定義為表面流速乘上平均-表面流速比與通水斷面積( $Q = u_s * \alpha * A$ )。

此種方法雖然計算上較為方便，但是也因為忽略了床面粗糙、橫向斷面位置之相對水深與垂向速度分布等問題，會造成很大的平均流速估計誤差，尤其常見於天然河川分析中。此外，國內外相關研究成果顯示測站河段水理特性、儀器裝設方式及水深等因素會影響平均-表面流速比，比值應為動態調整，方能降低誤差之影響。在本技術中，同時收集了表面流速與平均流速，由兩者之間的關係重新定義該河段之平均流速與表面流速比，約為 0.65。

本研究主要研究區域及對象為宜蘭河流域之中山橋段，透過雷達波水位站可測得河川水位，而微波雷達表面流速儀量測河川表面流速。雷達波水位計主要透過雷達反射波測定水位資訊，而表面流速量測原理則是以微波雷達偵測水表面微小水波之運動速度，因此測得之表面流速會受環境風場及河道幾何影響而具有場域獨特性。兩者的取樣頻率都為十分鐘一筆資料，主要記錄時間包含颱風期間的高水位與夏秋期的低水位情形，共取得一個水位資料與兩個表面流速資料，並將該資料儲存與進行後續離線分析。

表面流速感測器訊號會受到環境或外在因素干擾而產生離散的不連續資料，為了要降低這些不明干擾，本研究利用一次微分找出不連續訊號發生位置，判斷異常資料發生區間，並將異常資料予以去除，詳細訊號處理流程如圖 3 所示。雖然此種方法仍無法去除所有異常資料，但是可以大幅降低單側感測器發生資料異常情況發生，將有助於取得有意義之資料，方便後續資料分析與處理。

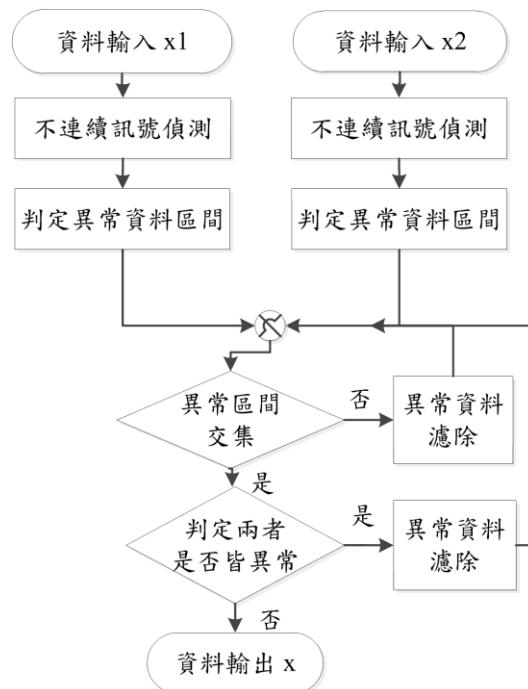


圖 3、流速異常資料濾除流程圖

### 三、研究成果

#### 3.1 河川水面流速影像觀測結果

基於觀測點之條件，此演算法發展初期以石門大圳進行量測與實驗。因石門大圳屬於人工渠道，渠道形狀固定，流況穩定，流速由上游至下游遞減。因此在石門大圳上游至下游六個觀測點架設攝影機並標定參考點，以進行水流影片的錄製，如圖 4 所示。石門大圳水流分析結果如圖 5 所示，測量結果彙整於表 1。結果顯示，石門大圳現場測得水流中間流速為 1.76 m/s，而由 PIV 演算法分析出的最高與最低

流速分別為 1.92 m/s 與 0 m/s，其平均流速為 1.2 m/s，與實際測得之差為 30%，其原因可能為未將流速邊差大之數值剔除所導致。

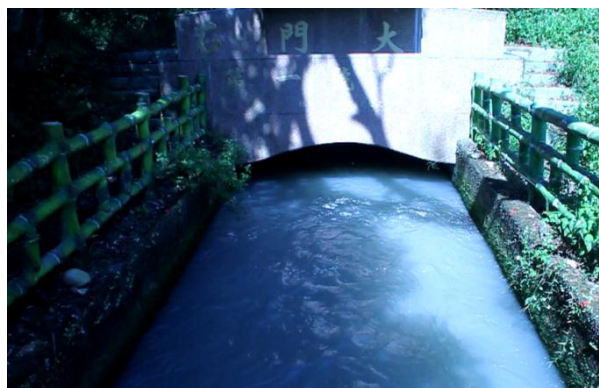


圖 4、石門大圳參考點標記位置

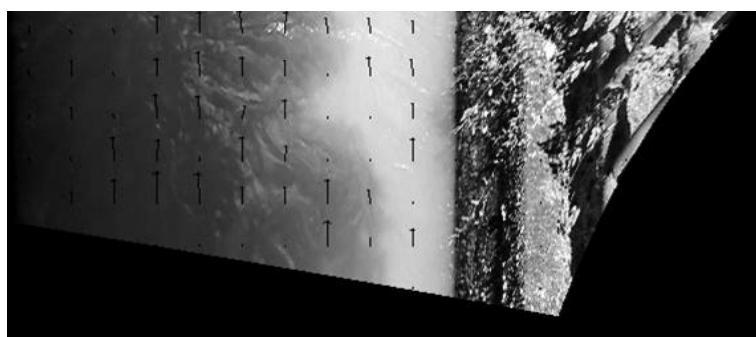


圖 5、石門大圳水流分析結果

表 1、石門大圳測量數據彙整

測站	座標	座標	溫度 °C	濕度 %	雷達波流速 m/s	平均風速 m/s
第一號隧道	274409	2746623	31.7	48	1.73	1.6
三坑段鐵馬道上	274659	2748540	32.9	48	1.20	N/A
三坑段鐵馬道下	274714	2748634	33.6	49	0.99	2.1
石門三號渡槽	275390	2755404	29.4	56	0.89	3.2
社子支渠下游段	275148	2755390	28.5	56	0.98	3.5
社子支渠上游段	273966	2757216	32.5	45	0.42	2.2

此外，除了於石門大圳進行觀測外，亦於宜蘭河員山大橋河床進行河面四點參考點標定，如圖 6 及圖 7 所示。宜蘭員山大橋當天雷達波測速器測得之數值為 0.7 m/s 左右，但由影像分析所得之數據除了有少數速度較大之訊號，流速幾乎為零，判斷其原因可能是水面無明顯波紋可觀測；另一原因為雨水波紋導致影像出現不同方向之訊號。



圖 6、宜蘭河員山大橋表面流速測試標定參考點



圖 7、宜蘭河員山大橋影像分析結果

### 3.2 微波雷達建立表面流速推估結果

宜蘭河中山橋資料分別為一個水位與兩個表面流速資料，其中，兩個表面流速訊號分別被標示於下圖 8，不難從訊號上看出，表面流速訊號容易受到外在因素影響，造成資料上的異常與不連續。透過提出的篩選法對表面訊號加以處理，可減少異常擾動訊號造成結果的誤判。經過處理過的表面流速訊號與記錄的水位資料分別被繪製於圖 9 (a)與 9 (b)上。由圖 9 所示，兩者在颱風期間都形成了一個連續性變化，而兩者間也存在一相位關係。但是從圖 9 的表面流速訊號上仍可發現低水位狀態下，流速資料仍存在有不少的異常資料。



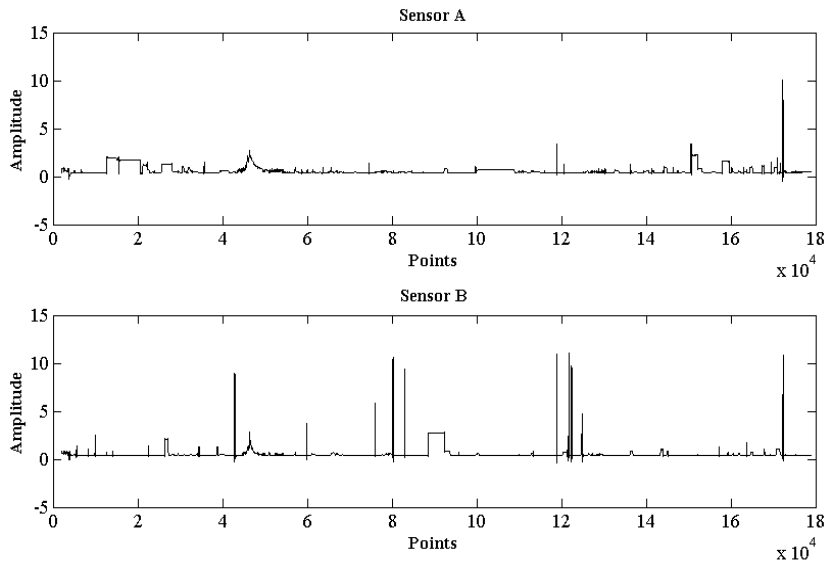


圖 8、觀測之表面流速資料

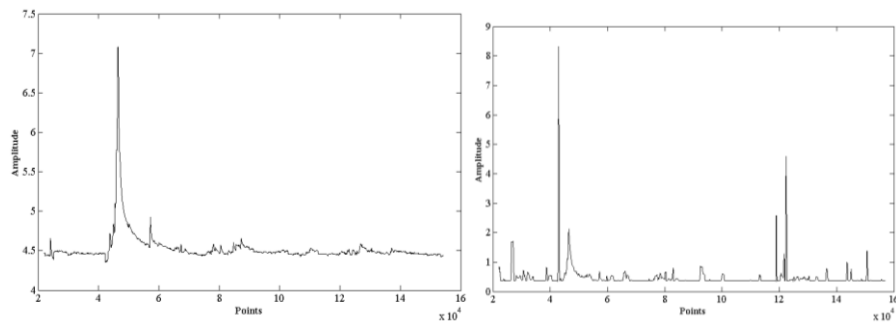
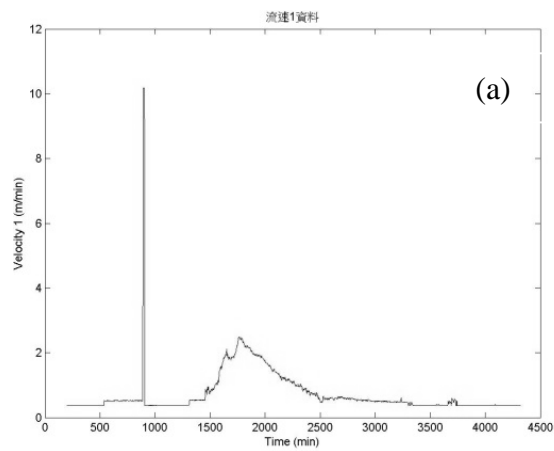


圖 9、(a) 水位訊號與 (b) 表面平均流速訊號

下圖 10 為兩表面流速，根據兩者之間的關係，重新定義該河段之平均流速與表面流速比，約為 0.65。



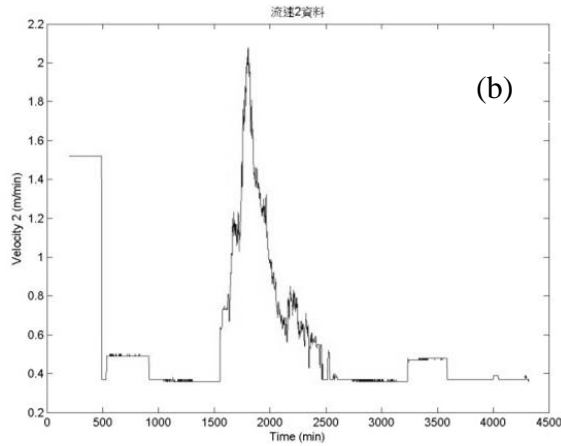


圖 10、(a)表面流速訊號 1 與(b)表面流速訊號 2。

另外，圖 11 顯示兩側流速與流量之間存在有不同程度的相關性，甚至在高低流速下也有不同程度的相關係數。在低流速下，表面流速與流量間存在較高的相關程度；反之，在一定程度的流速以上，相關程度會下降至另外一個固定值，此種現象在流速較高的一側更加的明顯。從另外一個觀點來看，當觀察表面之幾何平均流速與平均流量的關係時，也可發現相同的情況。

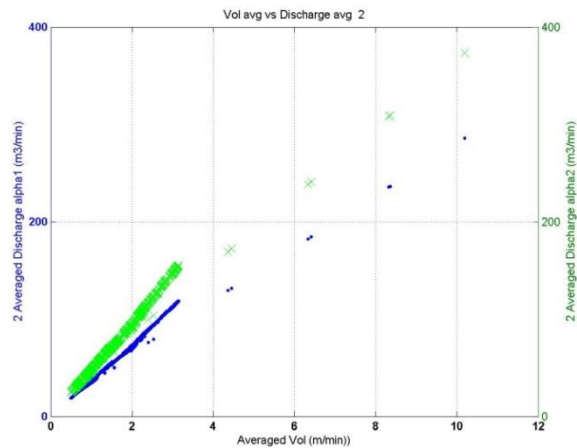


圖 11、幾何平均流速與平均流量之相對作圖

篩選後的水位與表面流速訊號先進行基本特徵萃取，並用來估計兩者間相關性，透過相關係數分析能進一步確認兩者之間領先落後關係，其中，流速相位領先 16.7 分鐘，表示水位會在表面流速變快後 16.7 分鐘之後水位會有連動變化，表示當時颱風帶來了不小的雨量，快速增加了水位。未來可搭配時雨量等資訊作進一步的分析與探討。由另一種相對作圖的方式來觀察水位與流量的關係，如下圖 12 所示：

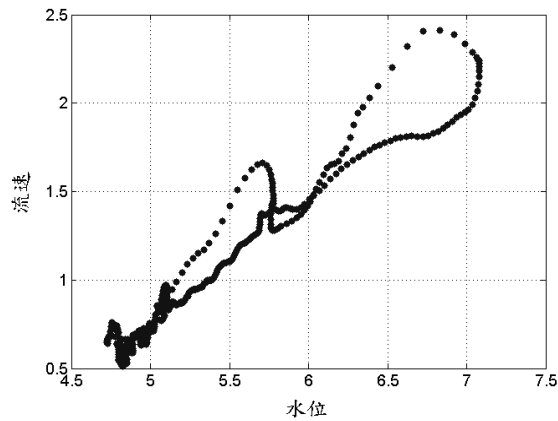


圖 12、水位訊號與表面平均流速之相對作圖

由結果可以發現，水位訊號與流速訊號之間存在不同程度的相關性，在颱風帶來的水量快速增加時，水位與流速形成兩階段的高度相關。此次颱風並未造成該河段的潰堤或破壞，所以在第二次水位快速上升到 6.7 公尺以上時，因為水量增加幅度趨緩，開始產生非線性行為。最後颱風過後，水位慢慢下降，水位與流速之間存在一個較小的相關性，此相關性代表著該流域之水位與流速的線性相關。水位逐漸下降的部份所造成的線性相關，就是一個重要的資訊，可以建構該段高水位資訊，方便後續資料的分析與推估。

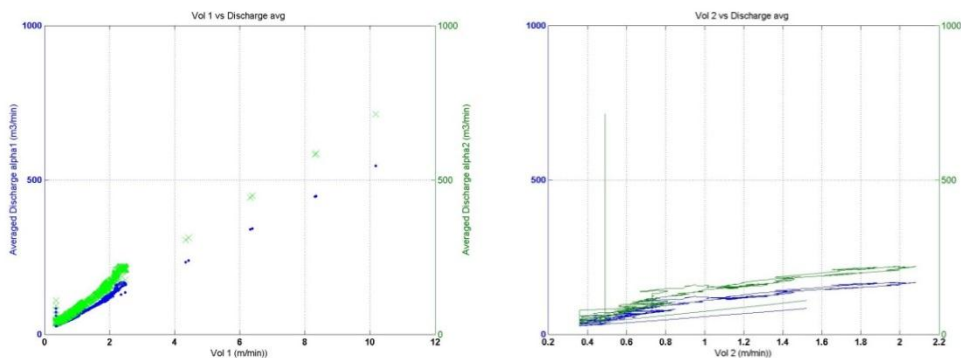
在流量估計上，雖然都是採用表面流速、平均-表面流速比與通水斷面積的乘機計算而得，但是考量河川兩側流速不同而造成的估計誤差，所以在兩點的表面流速與平均流速之間的換算上，出現了三種不同的作法，分別為：

(1) 利用個別的表面流速乘上平均-表面流速比與通水斷面積得出兩側之流量，並透過幾何平均的方式來得出平均流量。

(2) 利用兩表面流速的平均值推估平均流量。

(3) 利用兩表面流速之幾何平均數來推算平均流量。雖然三種方法的作法有些許的差異，但是不影響兩者之間的相關性分析。

針對這三種計算方式作了一個比較，得到的結果分別顯示如下：



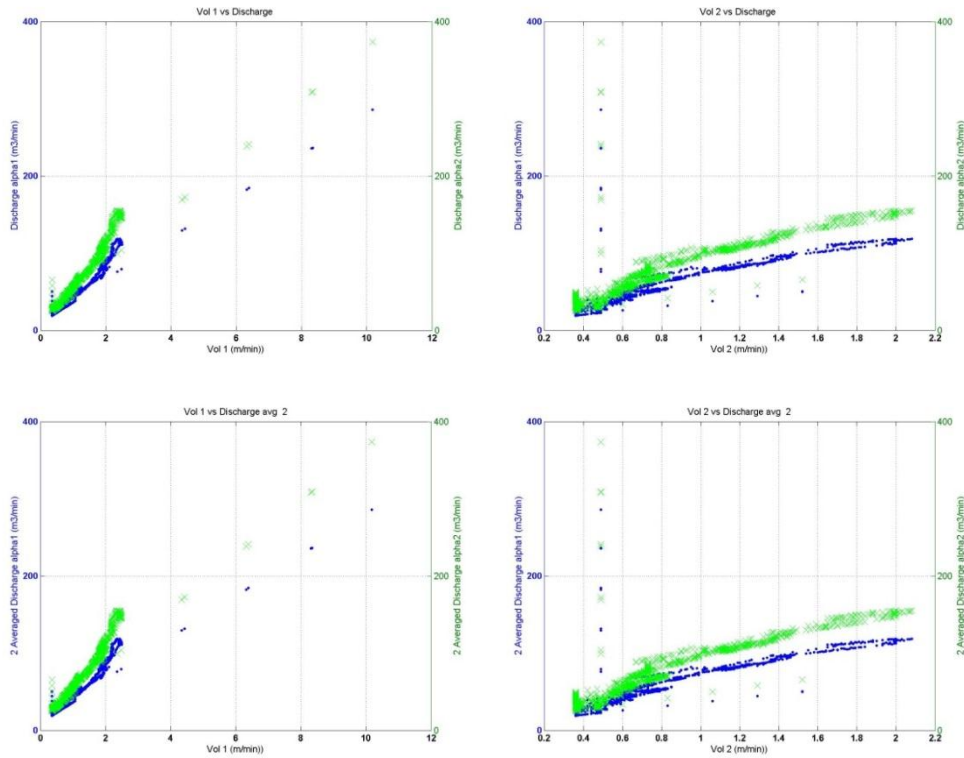


圖 13、利用量測水位及河川表面流速推估河川流量之程序

從圖 13 的結果可以發現，兩側的流速與流量之間存在有不同程度的相關性，甚至在高低流速下也有不同程度的相關係數。在低流速下，表面流速與流量間存在較高的相關程度；反之，在一定程度的流速以上，相關程度會下降至另外一個固定值，此種現象在流速較高的一側更加的明顯。從另外一個觀點來看，當觀察表面之幾何平均流速與平均流量的關係時，也可發現相同的情況。此種狀況可能是河川實際的現象，但也不排除是因為表面流速與平均流速間比值的變動所造成，要正確的找出兩者之間的關係，需要進一步的研究與探討。

頻率響應是一種常見的頻域分析工具，從頻率的觀點來觀察兩表面流速訊號，其個別的頻率響應與平滑後的頻譜分佈被繪製在下圖 14 中。本研究中採用動態平均方法來凸顯頻率特徵，可知兩者在 0.2 ~ 0.5 Hz 有相近頻率成分組成，但是低頻部份，則受到不同流場的影響，有其獨特頻率成分組成。交越頻譜是一種用來分析兩者之間共同頻率成分的方法，本研究中採用此方法來量化兩頻譜訊號之相關程度。從計算得到的交越相關頻譜響應結果上可以發現 0.15、0.30 和 0.6 Hz 的地方會有共同的頻率組成。

透過微波雷達流速儀所測得之表面流速及聲波都卜勒流速剖面儀提供的流量計算參數，進而所推估流量與聲波都卜勒流速剖面儀實際量測取得流量有所差距，兩者所推估或量測之流量皆無法完整反應量測站點之特性，故未來將持續進行不同量測事件，以期建立完整之站點流量趨勢圖。

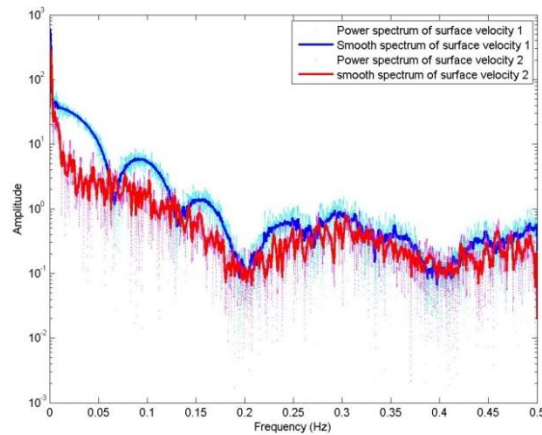


圖 14、兩表面流速之頻譜與其平滑化頻譜

#### 四、結論與建議

流速與河流截面積都是目前推估流量不可或缺的重要參數。本研究中透過兩種不同的方式來取得表面流速的資訊，正確且快速的取得表面流速資訊。兩種方法分別為大尺度質點影像測速法與微波雷達，其中質點影像測速法是透過自行設置之取向裝置與影像分析軟體，透過影像分析方法推測表面流速。經實驗驗證，測得的流速與實際的測速器有一定程度的相似，但因為流速較低或反射造成影像判定失誤。因此在宜蘭河水流量少時，水面平緩如鏡面，反射光強，造成鏡頭內部鏡片間漫反射，影響影像品質，未來將於取像數據時，加裝偏光鏡，以強化特徵點，利於質點影像測速法。

另一方面，透過兩種方式取得的流速資訊可透過開發的相關性分析方法來找出兩者間關連性，並藉以歸納出兩者之相關模式。研究中主要分析宜蘭河流域的水文資料，採用線性相關性分析方法來分析水位與流速資訊的相互關係。但因表面流速易受到其他外在因素如風速、漂流物影響，容易造成資料異常。本研究中透過演算法判定異常資料並加以排除，得到平均流速資料。在線性分析結果中可觀察到，兩者間存在一個強烈的相依程度，但此相關性會隨著水位高低變化而產生不同相依程度。因此未來希望能夠增加多項非線性分析，進一步瞭解水位與表面流速間關係，取得更多隱含訊息，以利後續流量之分析與估計。

#### 參考文獻

1. Adrian, R. J. (1991). "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics." *Annual Review Fluid Mechanics*23: 261-304.
2. Fujita, I., et al. (1998). "Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications." *Journal of Hydraulic Research*36(3): 397-414.
3. I Fujita, S. K. (1994). "Application of video image analysis for measurements of river-surface flows." *Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE*.
4. Muste, M., et al. (2008). "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments." *Water Resources Research*44(4): W00D19.

5. Markus Raffel, C. E. W., Steve T. Wereley, Jurgen Kompenhans (1998). Particle Image Velocimetry-A Practical Guide. Springer.
6. Jan-Mou Leu, C.-J. L., Wei-Che Huang, Ming-Ching Lee (2006). "Studying of Irrigation Canal Discharge Measurement by Using Local Image Remote Sensing System." Journal of Taiwan Water Conservancy 54(3).
7. 李明靜 (2003). 河川表面流速與流量非接觸式量測方法之發展及應用.