

第一章 導論

1-1 研究動機

人類的發展、城市的形成，都與江川河流息息相關，如：中國的黃河流域、西亞的兩河流域、埃及的尼羅河流域，皆是人類文明史上重要的發源地，可見河川在人類發展史中，有著舉足輕重的地位。然而水能載舟亦能覆舟，雖然河川促進人類文明的發展，但無情的洪氾，卻往往也造成人類生命財產之損失，像中國的黃河，有「三年兩決口，百年一改道。」之惡稱，中國歷代各朝無不想盡辦法治理它，而埃及的尼羅河，因亞斯文水壩的建造，才結束千百年來定期之氾濫，由此可知河川的治理，從古至今，都是一項極其重要課題。

而在河川治理工法方面，包括疏浚河道、修建堤防、堵塞決口、興建滯洪區、防砂壩、潛壩、丁壩、固床工及擋土設施等，材料皆以混凝土構築，強調安全性及耐久性，卻較少考量生態因素，以致工程常對原棲地之河川生態造成不利之影響。然而近幾年來，由於環境保育觀念的日漸抬頭，對於河川整治亦漸有減少人為設施之共識，新興工法—「生態工法」便是在此共識下孕育而生，其概念是在兼顧安全性與生態保育原則下，儘量師法自然、就地取材；例如在處理邊坡穩定上所用的打樁編柵、固網噴植等，或是於排水設施中採用草溝設計等，皆屬生態工法之範疇，而此類的設計理念，除了著重於植被的根系能改善土壤理化性質、增加土壤固結力外，其植株部分能保護地表、減緩逕流與沖蝕量亦是考量的因素之一，對此植被的應用便愈趨廣泛。以河川整治為例，在野溪中種植適當的植物取代水泥消波塊以期達到消能、減緩流速之效果，便是運用植被以達減緩水流流速的例子。

儘管運用植生於河川整治的情況日益頻繁，但有關植生對水流影響的相關研究中，大多從植生存在其本身之形狀阻力造成水流流動受阻的觀點著手；換言之，探討阻力來源影響程度與範圍為此類研究之重點。相對的，有關植生存在對水流流速變化影響之研究，過去似乎受到測量儀器功能限制，所以相關的研究不多，況且水流受到植生擾動，在近植生區域之速度變化非常急促，若利用傳統方法如皮托管、熱線、熱膜、LDV 等來量測此類流場將會十分困難，因此，本研究採用彩色質點影像測速法(color particle image velocimetry)，簡稱 CPIV 法，應用於植生渠道

流場流速變化之觀測。

1-2 研究目的

水流流經植生渠道時，植株之反應有直立、擺動及倒伏等三種現象，本研究著重在植株直立現象下，探討不同植生密度對流速變化之影響。由於水流受到植生擾動，其流場變化瞬息萬變，若使用單點的量測方法，對於植生間的水流情形，以及植生密度對流速變化之影響，則較缺乏全盤、具體的掌握。有鑑於此，本文應用 CPIV 來進行植生渠道流場之觀察，對水流流經植生之流況做一全域式量測，並探討水流、植生交互影響下之流速變化及渦度分佈，以期未來能在相關工程設計上提供參考。

1-3 文獻回顧

1-3-1 質點影像測速法

對於非入侵式流速量測技術之發展，可分為量測技術發展、影像分析演算發展、誤差分析三方面，茲說明如下：

一. 量測技術發展

對於非入侵式流速量測技術發展方面，從早期單點量測流速值，如 laser Doppler velocimetry (LDV)；到近十幾年來已發展二維非入侵式如質點影像測速法 (particle image velocimetry, 簡稱 PIV; Adrian, 1991) 及數位質點影像測速法 (digital particle image velocimetry, 簡稱 DPIV; Willert and Gharib 1991)、彩色質點影像測速法 (color particle image velocimetry, 簡稱 CPIV 法; Jaw and Wu, 2000) 進行流場量測，綜合上述之方法，其取像技巧可歸納為兩大類型：單一影像多重曝光及時序性影像單一曝光。

1. 單一影像多重曝光：其優點係於單張影像利用自相關函數法 (auto-correlation method) 得到質點位移量，再藉由曝光時間可得到質點之位移速度；其缺點為重複曝光會使質點顆粒較易發生重疊現象，影響精確度，且速度向量不易辨識，此方法如 PIV 法。
2. 時序性影像單一曝光：其優點可利用兩張具有時間差之影像，利用互相關函數法 (cross-correlation method) 得到速度向量，此方法如 DPIV

法。

二. 影像分析演算發展

對於影像分析方面，利用質問窗 (interrogation window) 為原理的互相關演算方法 (cross-correlation algorithm) 被廣泛地使用在 DPIV 的計算上，而 Keane and Adrian(1990)、Adrian (1991)、Willert and Gharib (1991)、Heckmann et al. (1994)、Westerweel et al. (1996) 等，亦針對相關函數法之演算加以討論與修正，且利用時序性單一曝光的影像採相同的質問窗求其位移量 (displacement)，其相關函數法如下式所示：

$$\Phi(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(i,j) \times g_2(i-m,j-n) \quad (1-1)$$

其中， $\Phi(m,n)$ 為相關函數之摺合積分； $g_1(i,j)$ 與 $g_2(i,j)$ 為時序性影像亮度值分佈；M 與 N 為質問窗大小；i 及 j 為兩張影像比對之初始位置；m 及 n 為 i 方向及 j 方向之位移量。

在影像演算技巧上利用質問窗的設定可分為固定質問窗演算 (correlation-based interrogation) 與質問窗追蹤演算 (correlation-based tracking algorithm) 與動態校正質問窗 (dynamic-adjusting interrogation) 等方法。

1. 固定質問窗演算：如圖 1-1 所示，早期 Willert and Gharib (1991) 所應用，以 image1 之質問窗為基礎，利用固定的質問窗大小尋找於 image2 附近較為相關之位置為影像質點之位移量，再利用影像之時間差求得質點速度。在此方法中，由於固定質問窗大小，使得在計算時容易造成質點離開質問窗現象 (out-of-pattern or out-of-cell effect) 如圖 1-1 中之 B、C 及 D 等位置，則保留在質問窗之有效質點會減少，可能導致質問窗內之質點配對誤差，這種現象可能造成質點位移之量測值比實際質點位移小 (Freek et al. 1996; Gui et al. 2000)，而造成量測誤差。針對此現象提出改善方法的學者，如 Willert (1996)、Cowen and Monismith (1997)、Westerweel et al. (1997)、Scarano and Riethmuller (1999) 利用質問窗的相對位置 (discrete offset) 位移一固定量與方向，降低質點離開質問窗現象，並對此配對誤差問題提出質問窗動態位移 (window shift technique)，進行等質問窗之影像追蹤比對 (image pattern tracking)，可降低質點脫離現象與計算誤差。
2. 質問窗追蹤演算：如圖 1-2 所示，為 image2 影像質點的尋找範圍加大，放大為 $M + 2\Delta$ 的大小 (Huang et al. 1993, 1997; Muste et al. 1998)，直接計算 image1 與 image2 之質問窗相關係數最有可能的位移量，可

降低質點離開計算質問窗現象。Westerweel et al.(1997)，利用 $g_1(i, j)$ 質問窗大小不變、影像比對過程中 $g_2(i, j)$ 質問窗大於 $g_1(i, j)$ 的 $M \times N$ 質問窗，降低計算誤差的產生，如圖 1-3 所示。

3. 動態校正質問窗：為了降低質點的流失及質問窗內多峰值 誤差的產生，將質問窗之邊長設為可動式，並對質問窗內之有效質點數做一門檻值設定，並進行動態比對方式，稱為動態校正質問窗。比對方式如圖 1-4 所示，先確定在 image1 之質問窗內有效質點數目，若有效質點數目比所設定之門檻值小，則質問窗再往外增大，直到大於所設定之門檻值為止，作為該質問窗的大小，再利用相關函數法於 image2 質問窗範圍內計算質點最相關位置，求得位移量(Jaw et al., 2000)。此法可以降低質點離開質問窗現象、以及流體剪應力、紊流所產生速度差異及量測之不確定因素。

三. 誤差分析

對於誤差分析方面，Westerweel(1994)指出二維 PIV 的量測數值資料可分為兩類：一為錯誤量測所產生之數值或因計算錯誤所產生不合理的速度向量數值，二為正確的量測數值帶有不確定因素之誤差。因此 Nogueira et al.(1997)針對錯誤量測的數值或因計算而產生不合理的速度向量數值，研究如何判斷數值資料的正確性，並對不合理之向量做修正。而 Huang et al.(1997)針對 DPIV 之影像計算誤差進行研究，歸納出二個主要計算誤差：方均根誤差(root-mean-square)及偏移誤差(bias error)，並將此二誤差做量化探討。

1-3-2 植生渠道流場相關研究

在考慮植生對水流之影響的相關研究中，以往多從植生存在其本身造成水流流動受阻之觀點著手，也就是從阻力的觀點探討：

游新福、黃宏斌(1992)以塑膠樹為植株模型進行試驗並藉由因次分析，提出植株倒伏高度 h_p' 與植株撓曲剛度 EI 之關係式，依據 Prandtl 所推導之折速律(velocity-deflect law)公式，推導出阻力係數 f、能量坡降 S_f 、植株倒伏高度 h_p' 及植株倒伏福祿數 N_f' 之間的關係式，並依據試驗數據繪製三種坡度下之 $f - \frac{y_0}{h_p'} - N_f'$ 曲線，配合植株倒伏高度與植株撓曲剛度之關係式，推估阻力係數 f 值。

黃明興(1993)為探討植生倒伏對水流阻力之影響，曾根據紊流理論之流速分佈對數律，配合阻力係數定義式，推導出矩形渠道之阻力係數公式，並以塑膠片模擬植生進行實驗驗證。

Dong et al.(2001)運用風洞實驗，量測在植生情形下之風速剖面圖，並以質量守恆方法估算位移高度(displacement height)，以迴歸方式分別推得阻力係數(drag coefficients)及粗糙長度(roughness length)與植生高度、密度間關係式。

Stone et al.(2002)以動量守恆為基礎，推導出植生阻力公式，並以木質直立圓柱為植生模型進行實驗，驗證其公式適合於水深漫過植生高及水深不及植生高兩種情況。

許煜聖(2003)探討水流流經植被地表之水理分析，並考慮土壤的滲透性，以水力學的觀點，運用那維爾-史托克斯方程式、雷諾方程式及孔隙介質流的相關理論，對整體流速分佈進行數值解析。

James et al.(2004)指出一般的阻力公式（如：Manning、Chezy 和 Darcy-Weisbach 等公式）並不適合有植生之渠道使用，因為水流阻力主要來源來自植生莖葉阻擋而非底床剪應力，故改以力平衡觀點，考慮水流之推進力（即水在主流方向之重量分量）與植生形狀阻力間之平衡，推導出新的阻力公式，並以實驗來驗證。

Choi and Kang(2004)應用 Reynolds stress model (RMS)模擬植生渠道流況，分別針對水深漫過植生高度及水深不及植生高度情況進行模擬，並與實際量測值及其它模式做準確度比較，且擴充模式運用於植生渠道具懸浮載之推估。

Kirby et al.(2005)於實驗渠道中佈置三種真實矮草類，在水深不及草高、水流雷諾數(Reynolds number)小於 10,000 情況下，量測出水力半徑與曼寧 n 值之間關係，並以回歸方式找出關係式。

綜合上述文獻回顧可知，以往對水流流經植生的相關研究中，大多著眼於「水流阻力」上進行探討，但對整體流速變化與植生關係之研究有所缺乏。然而水流流速剖面是研究明渠流運動機制之重要項目之一，不僅可表現出水流運動之微觀特性，更可進一步展示出水流運動之巨觀整體特性，況且若以生態工法角度觀之，植生除了應用在明渠水道設計上，更廣泛地應用於集水區經營、崩塌地治理及坡地保育等方面，其中植生對降低地表逕流進而減少沖蝕而言，有其一定的功效，因此探討植生對水流流速影響之機制有其必要性。因此，本文利用 CPIV 法之量測法來對植生流場做一全域式量測，分析其速度場、渦度場，並探討不同植生密度對植生流場速度變化之影響，以提供後人於實驗或數值模擬之參考。

1-4 研究方法

本研究主要分為兩部分，一部份是試驗部分，另一部分是影像分析部分。試驗部分是由 ARGON 雷射光束作為光源，利用反射鏡將光源導引至試驗水槽，再利用聚光鏡將光束聚光，經由旋轉八面鏡，形成一 3~4mm 厚之光頁，進入試驗水槽，作為試驗研究之光源。利用長 1 公尺，高及寬各為 0.2 公尺之玻璃水槽，放置不同排列密度之塑膠圓柱當作植株，進行植生渠道流場之研究，並根據不同流量及不同植生密度進行相關試驗。影像分析部分則利用由 Fortran 程式語言所撰寫之運算程式進行計算、並將結果做一完整之分析。

1-5 本文組織

本研究採用彩色質點影像測速 (CPIV) 法，應用於植生流場之研究。全文共分五章，茲簡述章節內容如下：

第一章為本文的研究動機、研究目的與相關文獻回顧，對前人於 PIV 法及植生流場之相關研究做一探討，並提出本實驗研究之方法。

第二章為 CPIV 法之原理、處理方法及計算程式之說明。

第三章為本實驗之研究方法，包括實驗設備、實驗程序，以及各實驗條件之介紹。

第四章為每個實驗案例之說明及實驗之結果，並由實驗結果分析植生密度與流速變化間之關係，以及渦度場之分佈。

第五章為結論與建議，將本研究所得之結果作一歸納陳述，並提出未來可以繼續研究之方向。

第二章 CPIV 法原理與影像處理流程

2-1 CPIV 法原理

早期流場量測方法，皆為入侵式，即放置儀器至流體中量測或感應，影響流體本身之結構，造成相當程度的誤差。近二十幾年，雖然有相當準確且非侵入式的雷射都卜勒測速儀 (LDV)，改善了入侵式量測之缺點，可以準確的量出單點的資料，然而這些儀器的量測範圍都侷限於單點，若要瞭解整個流場的流況須要耗費許多時間。因此，陸續發展出非入侵式之全域量測(nonintrusive whole field measurement)法，如數位質點影像測速法 (DPIV)、數位質點軌跡測速法 (digital particle tracking velocimetry, DPTV)，利用數位照相機或數位式攝影機，將流體運動過程擷取下來，再利用軟體將所擷取下來之影像進行分析，呈現二維流體運動過程現象。因此，收集近年來之文獻，利用單一影像多次曝光(PIV)及時序影像單一曝光 (DPIV)可視化之研究基礎及理論 (Hesselink, 1988 ; Adrain, 1991 ; Westweel, 1997)，擷取 PIV 法及 DPIV 法之優點發展出彩色質點影像測速法(CPIV)，具有如下兩者之優點：

1. 質點影像測速法 (PIV): 調整曝光之時間間距及藍、綠切換速度，為單一影像多次重複曝光。
2. 數位質點影像測速法 (DPIV): 單一曝光之時序性擷取瞬間影像。

因此 CPIV 法具有時序性之擷取影像，且每一張數位影像具有重複曝光之質點分佈，再由影像程式將數位影像訊號區分為藍色及綠色之亮度值，個別儲存藍色及綠色亮度值所分佈之檔案；將影像中的藍色亮度值及綠色亮度值分佈之檔案，以數位相關法配合質問窗之大小及運算方法及功能設定，計算出質點顆粒運動之位移及方向，再將位移量除以重複曝光之時間，即可得知該質問窗內質點運動的速度向量值 (Jaw et al., 2001 ; Gogineni et al., 1998)。

2-2 CPIV 法影像處理流程

彩色質點影像測速法 (CPIV) 之影像處理流程可分為數位影像擷取、影像前處理及程式運算分析三部分(楊, 2002)，茲說明如下：

2-2-1 數位影像擷取

彩色質點影像測速法 (CPIV) 之影像擷取是由多彩聲光調變器 (PCAOM) 搭配旋轉八面鏡及同步訊號控制器之功能，將 ARGON 雷射之

混合光束個別區分為藍色光束及綠色光束，並在旋轉八面鏡下形成一藍、綠間隔之光頁，再利用彩色攝影機(CCD)之電子快門進行重複曝光，並擷取數位影像，如圖 2-1 及 2-2 示意圖。

2-2-2 影像前處理

在 CPIV 法影像之前處理流程，首先將所擷取之數位影像檔進行處理，其分析方式分為二部份：

第一部份是利用 Matlab 程式，由於 CCD 所拍攝下來之影像，每一個畫素值皆由 RGB 三種顏色所組成，因此利用 Matlab 的功能將數位影像最原始的二維 RGB 數位訊號轉為實數格式檔，並將影像區分為藍色及綠色之實數格式兩個檔案。如圖 2-3。

第二部分利用 Fortran 程式將 Matlab 所轉換之實數格式轉為整數格式，此部分稱為亮度值之轉檔過程。所得之影像為整數格式如圖 2-4，將為程式計算所使用畫素之亮度值，其亮度值範圍為 0~255(0 為最暗，255 為最亮)，再進一步做影像分析及計算。

2-2-3 程式運算分析

原始影像經由 2-2-2 節初步處理過後，已成為影像數位化訊號，影像計算是根據數位化訊號進行分析，其流程如圖 2-5。在計算過程中，首先將影像劃分為數個小區塊 (small pattern)，這些小區塊稱為質問窗 (interrogating window)，並以質問窗為影像計算處理基準，其質問窗之劃分方法如下：

1. 先去除影像邊界：因邊界處亮度一般會比較不清楚，先加以濾除。
2. 再設定影像質問窗大小，以奇數為主，視影像品質及流場速度而定，一般採 21-31 個畫素。
3. 再設定質問窗移動大小，一般為質問窗大小之一半。
4. 再設定質問窗之最大位移量，亦視影像品質而定，一般須小於質問窗之大小，如 10 個畫素。
5. 再以質問窗為計算單位，進行影像質點位移量之比對。

質問窗劃分完畢後，就進入程式運算，本程式是以 Fortran 語言撰寫，所運用之理論如下：

互相關函數法(cross correlation)

影像分析的方式是依照影像訊號亮度值、及設定質問窗大小進行分析，步驟如下：

1. 以藍色影像訊號值，如圖 2-6 所示之 image1 為基礎，設定質問窗並決定其形心位置點。
2. 以綠色影像訊號值，如圖 2-6 所示之 image2，為影像訊號值位移 (m,n) 與 image1 進行比對，決定其質點之位移量，如圖 2-7。位移過程係利用互相關函數法之最大值視為最有可能之位移量 (m,n)，此位移量即代表該質問窗之平均位移量如圖 2-8。

其相關函數法之說明如下：

分離之互相關函數(discrete cross correlation function)計算，其定義為：

$$C(m,n) = \sum_i \sum_j image_1(i,j) \cdot image_2(i-m, j-n) \quad (1-1)$$

其中 image1 及 image2 為質問窗於第一張及第二張之影像檔；C(m,n)摺合積分值，其最大值為質點之最可能位移量；i 及 j 為兩張影像比對之初始位置，m 及 n 為影像一及影像二橫軸及縱軸之位移量，因此(i-m, j-n)為第二張影像與第一張影像相配(matching)的位置。

圖形比對正相關法

於 CPIV 法中兩張影像檔經由數位相關函數計算過後，將第一張影像質問窗內與第二張影像質問窗內之畫素值經由摺積計算，出現峰值(peak value)後，如圖 2-8 所示，得知 C(m,n)之最大值，並推算第一張與第二張之質問窗內質點亮度值之位移平均值，再利用相關係數法，設置一互相關係數值(cross correlation coefficient)，其值範圍介於 $-1 \leq \bar{C}(m,n) \leq 1$ 之間，其設定值可依取像之品質良窳加以設定，如設 $\bar{C}(m,n) \geq 0.6$ ，若高於此相關係數值，則可判定 C(m,n)之最大值所推算出之位移平均值是一有效平均位移量(Willert and Gharib, 1991 ; Gui and Merzkirch, 1998; Fincham and Spedding, 1997; Fincham and Delerce, 2000 ; Huang et al., 1997)，其方法如下所示：

$$\bar{C}(m,n) = \frac{\sum_i \sum_j \left[image_1(i,j) - \overline{image_1} \right] \left[image_2(i-m, j-n) - \overline{image_2} \right]}{\sqrt{\sigma_1(i,j) \sigma_2(i,j)}} \quad (2-1)$$

$$\sigma_1 = \sum_i \sum_j \left[image_1(i, j) - \overline{image_1} \right]^2 \quad (2-2)$$

$$\sigma_2 = \sum_i \sum_j \left[image_2(i - m, j - n) - \overline{image_2} \right]^2 \quad (2-3)$$

$$\overline{image_1} = \frac{1}{B_x B_y} \sum_i \sum_j image_1(i, j) \quad (2-4)$$

$$\overline{image_2} = \frac{1}{B_x B_y} \sum_i \sum_j image_2(i - m, j - n) \quad (2-5)$$

其中 $\overline{image_1}$ 為第一張 $image_1$ 質問窗內亮度強度平均值； $\overline{image_2}$ 為第二張 $image_2$ 質問窗內亮度強度平均值， m 及 n 為第二張與第一張影像之位移量， B_x 及 B_y 為質問窗在 x 及 y 方向之邊長。

質問窗內質點之比對演算

為了降低質點的流失及質問窗內多峰值誤差的產生，將質問窗之邊長設為可動式，尋找質問窗內之質點，進行動態比對方式，稱為動態位移質問窗。其優點可降低在密度較高時多峰值所產生的誤差及質點比對的準確性。質問窗內質點的尋找方式如圖 2-9 所示，由每一個質問窗中心，以所設定的動態質問窗，如 $9(H) \times 9(V)$ 之小質問窗內之質點數進行比對，若於 9×9 之小質問窗內之質點數超過所設定之門檻值，則該質問窗即以 9×9 之尺寸進行相關函數運算，並做出位移量之判斷；若低於所設定值，則該小質問窗再往外增大，如 13×13 、 17×17 ，直到質問窗擴大至與原設定質問窗相同大小為止，因此，可改善質問窗在質點分佈密時，影像計算所造成之誤差量。

子畫素修正

子畫素修正之目的主要來自於在互相關計算時以整數畫素做運算，當質點顆粒位於兩個整數畫素間 ($i, i+1$)，質點在位移判斷上會有 ± 0.5 個畫素位移誤差值，為了降低此 ± 0.5 個畫素位移誤差值，使用子畫素來修正之，可更精確的表示出位移量。其方法有多種，如高斯曲線修正法 (Cowen and Monismith, 1997)、拋物線修正法 (parabolic curve)、Whittaker 修正法及形心修正法 (Lourenco and Krothapalli, 1995; Gui et al., 2000; Forliti et al., 2000)。在這些修正法中又以高斯修正法較廣被接受，主要原因是從影像分析中所得之質點強度分佈較接近高斯分佈，因此根據兩張影像之質點分佈情況，經由高斯分佈計算後之結果亦為高斯分佈。所

以，在子畫素修正法中利用高斯修正法較為合理。

其差分演算法是利用鄰近之質問窗所得之相關係數值作為差分修正，演算式如下：

$$x = x_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0 - 1, y_0) - \log \bar{C}(x_0 + 1, y_0)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0 - 1, y_0) + \log \bar{C}(x_0 + 1, y_0) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]} \quad (2-6)$$

$$y = y_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) - \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) + \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]} \quad (2-7)$$

其中， (x, y) 為修正後之位移量； (x_0, y_0) 為整數數位相關法所得峰度值之位置； $\bar{C}(m, n)$ 為數位相關計算所得之高斯分佈值。

不一致資料去除與資料補齊

在影像計算過程中，質點與質點之比對過程，有時會發生誤判，這些誤判會造成不一致結果，如圖 2-10 所示。因此須去除這些不一致之速度向量值，如圖 2-11 所示，去除之方法是利用周邊鄰近幾個質問窗內速度向量值加以判別，其方法如下：

1. 找出相對誤差值：

$$Vel = \frac{\sum_i |v_i - v_0|}{\sum_i |v_i|} \quad (2-8)$$

$$\theta_i = \frac{\sum_i |\theta_i - \theta_0|}{\sum_i \theta_0} \quad (2-9)$$

$$v_i(i, j) = \sqrt{u(i, j)^2 + v(i, j)^2} \quad (2-10)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{v(i, j)}{u(i, j)} + 360 \quad (2-11)$$

$$val(i, j) = \sqrt{Vel^2 + \theta_i^2} \quad (2-12)$$

其中， i 及 j 為質問窗位置， V_0 為每個位置之速度向量值； V_i 為 V_0 周邊八個速度向量，若周邊八個質問窗向量值為 0，則不予列入計算； Vel 為相對誤差值； θ 為速度向量與 x 軸之角度，加 360 度可使 θ_i 為正值； val 為判別有效之向量值。

2. 為判別 v_i 是否為有效值，即在 val 設一有效標準值，根據前人(Jaw and Chen, 2000; Jaw et al., 2001; Nogueira et al., 1997)建議，可依不同影像條件，設 val 值於 25-35% 以內為有效向量值，而本研究設 val 值為 30%。
3. 根據此方法重複 1 及 2 點，將影像全部向量值掃過，判斷有效速度向量值，將有效之速度向量留下，並將不一致資料去除。

經過以上判別後，可將不一致速度向量資料去除，因此在速度向量圖上有可能會出現幾個空白處。當有空白處時，須將所去除之向量值予以修補，係以數值差分方式，利用周邊有效之向量值修補空白處之向量；若影像中同一空白區域處未超過設定值，則予以差分補圖，反之則不加修補，如圖 2-12 所示。

2-3 CPIV 法之誤差來源

2-3-1 影像計算之誤差

影像計算之誤差約可分為三大類型：1. 質問窗內質點的脫離或配對錯誤；2. 隨機誤差 (random error) 或方均根誤差 (root-mean-square) 3. 系統誤差 (systematic error) 或偏移誤差 (bias error)，茲說明如下：

1. 質問窗內質點的脫離或配對錯誤：

如圖 2-6 所示，若 image1(藍色)影像訊號質問窗較小時，image2(綠色)影像訊號之質問窗比對過程可能質點位移較大或離開量測位置，造成質點不在質問窗範圍內而引起位移誤差，導致這類誤差之可能原因有速度過快、三維流場變化使質點離開觀測位置。此類誤差可清楚地辨識，因比鄰近周圍質問窗之位移有過大或過小之情況，此類誤差常大於 1 以上畫素之誤差，要降低此類誤差可利用 image1(藍色)與 image2(綠色)不同影像訊號之質問窗大小降低此類誤差，如後續之動態校正質問窗 (dynamic-adjusting interrogation) 方法為降低誤差方法之一。

2. 隨機誤差或方均根誤差：

係由隨機性之因素所造成，且測量值會產生隨機分佈之誤差，誤差來源可能由質點的比重與分佈密度、流體三維運動強烈、較大的速度梯度或剪力場、擷取影像之背景雜訊影響等因素，一般可增加量測次數來降低其誤差，此類誤差亦可稱為精確誤差 (precision error) 其分散

程度的大小則取決於測量值之標準差（standard deviation）或 RMS 誤差，示意圖如圖 2-13 所示。質問窗之位移平均值 d_m 定義如下：

$$d_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (2-13)$$

其中， d_i 為質問窗之位移量；而 RMS 誤差（ σ ）定義為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^2} \quad (2-14)$$

3. 系統誤差或偏移誤差：

係來自於一些已知之因素，如外在環境因素（溫度、電壓或 CCD 影像擷取、儲存傳輸過程）、人為操作不熟悉、或設計原理有失誤造成系統偏差，此類誤差不含有隨機分佈之誤差，其偏差量有一致性，此類偏差可經由修正方法降低其誤差量，此誤差亦稱為偏移誤差（bias error）。在影像分析上將忽略機械與影像訊號傳送過程所造成之誤差。而於影像分析計算過程中，偏移誤差與互相關函數法之峰度值鎖定

（peak-locking）有關，主要係因質問窗計算所得之峰度值（最有可能之位移值）與質問窗內之真實位移值無法完全的吻合。其定義偏移誤差（ d_b ）可利用已知之真實位移值（ d_a ）如位移 0 畫素（zero particle image displacement）或位移大於 1 畫素，與質問窗內計算所得之平均值（ d_m ）之差，如圖 2-14 所示，其公式如下：

$$d_b = d_m - d_a \quad (2-15)$$

因此，互相關函數法分析之整體誤差係包含質問窗的質點配對誤差、計算隨機誤差與偏移誤差，其中質問窗的質點配對誤差可由質問窗的動態校正比對過程而獲得改善，故影像位移之誤差分析將僅針對計算隨機誤差與偏移誤差進行探討。

2-3-2 有限質問窗尺寸所致誤差

有限質問窗尺寸之 PIV 法在準確性與空間解析度上須尋求一個適當的平衡點。較小的質問窗可提供較高的空間解析度，但所包含的資訊較少且較易受影響而產生計算誤差。如圖 2-6 所示，當質點的位移增加時，若 image1（藍色）與 image2（綠色）影像之質問窗為相同大小，則保留在 image2（綠色）上質問窗之有效質點會減少，係因部分質點離開計算之有效區塊，可能導致質問窗內之質點配對誤差。早期 Keane and Adrain (1993)、

Willert (1996)、Cowen and Monismith (1997)、Westerweel et al. (1997)對此配對誤差問題提出質問窗動態位移 (window shift technique) 以解決質點脫離現象。此方法係將 image1(藍色)質問窗大小固定，於 image2(綠色)設定之質問窗放大兩倍，進行等質問窗之影像追蹤比對 (image pattern tracking)，可降低質點脫離現象與計算誤差。此方法解決質點脫離現象之問題時，如質問窗的質點追蹤比對未針對質點數量進行限制，則於質點密度高時容易產生多峰值之計算誤差現象，因此，對質問窗內之質點應有所限制，可有效地降低計算誤差。

動態校正質問窗係利用質問窗動態位移之觀念，更有效地判別質問窗內之質點比對過程，並將質問窗內有效質點數目進行設定，其優點可避免質問窗內之質點脫離現象、以及峰值鎖定效應 (peak locking effects) 之誤差，並可降低質問窗內質點密度較高時多峰值所產生之誤差，其演算步驟如下：

1. 於 image b 影像之質問窗內尋找有效質點，如圖 2-9 所示，如設定有效質點數為 6 個，從小質問窗 $9(H) \times 9(V)$ 之質點數開始找尋，若小質問窗內之有效質點高過所設定之質點顆粒數，則該小質問窗內之質點數即可代表該質問窗之有效質點，並進行影像之互相關函數之計算。
2. 若質問窗內之有效質點數低於所設定值，則該小質問窗需再往外增大，如 13×13 、 17×17 ，直到質問窗擴大至與原設定質問窗相同大小為止，以改善質問窗內出現多峰值在影像計算所造成之誤差。

第三章 試驗儀器與佈置規劃

3-1 儀器設備

儀器設備可分為光學、訊號控制、影像系統及試驗渠槽與植生材料等，茲說明如下：

(一) 光學設備系統

本試驗中之光學設備系統包括 ARGON 雷射、聚光凸透鏡、PCAOM 分光及旋轉八面鏡四個部分，茲說明如下：

1. ARGON 雷射:雷射光源為 4 瓦之氬氖雷射，其中綠光為 1.4 瓦(波長 514nm)，藍光為 1.3 瓦(波長 418nm)，經由反射鏡將光束射至 PCAOM 及旋轉八面鏡上，形成藍綠相間之光頁。
2. 聚光凸透鏡:由於雷射光束經過反射鏡及光束路徑，使雷射光束減弱，利用兩片聚光凸透鏡，將光束聚集後再射至 PCAOM 切光，使雷射光功率不至於減弱。
3. PCAOM:多彩聲光調變器(polychromatic acousto-optic modulator)，可將 ARGON 雷射分成藍光及綠光，係由二氧化碲(TeO_2)製成，其晶體的排列方式會隨外在電壓之大小而改變，以通過特定波長之光束，且輸入此元件之電壓必須小於 5.0V，如此才可達到實驗所需之切換功能。
4. 旋轉八面鏡:主要是由八面鏡之變速控制器驅動，採磁浮式馬達，其轉速頻率相當穩定，並配合光頁之頻率調整快慢。其轉速可由內部及外部控制，內部控制主要是固定轉速進行試驗，而外部控制為訊號產生器控制，配合同步訊號控制器一起操作使用，以達到同步功能。

(二) 訊號控制系統

同步訊號控制系統主要是由同步訊號控制器及示波器兩種儀器所組成而成，同步訊號控制系統主要控制 PCAOM 切換藍綠光的頻率，切換的好壞是決定結果優劣的關鍵。儀器功能說明如下：

1. 同步訊號控制器:此部分為利用 NI (National Instruments)公司所製之 PCI-6601 訊號控制卡如圖 3-1，控制 PCAOM 之切換頻率，此卡安裝於 PC 上，可穩定送出四道頻率，訊號可分為進入及輸出，進入之部分由控制卡透過軟體產生一穩定之訊號，再將此訊號送至 PCAOM 切換

藍綠光束，但由於 PCAOM 可以承受之電壓為 5.0V，而由 PCI-6601 所產生之訊號為 5.8V，因此必須再透過自製的電路板降壓如圖 3-2，方可達到合適的訊號。

2. 示波器：主要功能是顯示出由訊號產生器所輸出至同步訊號控制器內部訊號穩定性之監視，包括波形穩定性、脈衝電壓(類比訊號)之穩定性、頻譜顯示及週期之監視功能，以確定訊號在同步處理中。

(三) 影像系統

影像系統主要是由 SONY DXC-9000 數位攝影機 (3-CCD, 3-chip change coupled device) 及影像擷取卡兩部分所組成，茲說明如下：

1. 數位攝影機：為三顏色之固態感光面，各有 680(H)×480(V)個畫素，每個畫素有 0-255 之亮度值，並備有電子快門可使影像之曝光時間做靈活之調整及其他影像之功能鍵。
2. 影像擷取卡：可將所擷取之影像即時的顯示在電腦影幕上，此卡本身不具備有任何記憶體，因此需要電腦上之記憶體來搭配，且擷取之影像數目可記錄至電腦之硬碟儲存空間，適於連續畫面之擷取。

(四) 實驗渠槽

本實驗係於國立交通大學土木工程學系輸砂力學實驗室的循環水槽內進行。循環水槽長 6m、寬 0.2m、高 0.2m，渠槽兩側及底床採用三面透明強化玻璃以利流場可視化實驗之進行。另外，為了加強畫面對比效果及阻截散射光源，於取像範圍內以黑色壁報紙覆蓋為背景。

(五) 植生模型

本實驗是以圓柱狀之聚稀系樹脂(俗稱：熱熔膠)為植株模型，其直徑 0.7cm、高 3cm，以三排平行排列，前後植株間距採 3cm 固定間距如圖 3-3，左右植株間距介於 0.2cm~2.0cm 之間，如圖 3-4 所示，將其黏著於壓克力板上，表面為了防止雷射光發生散射，利用黑色噴漆加以處理，然後再將壓克力板放置於實驗渠槽上。

3-2 實驗程序

實驗進行步驟可分為四大部分，第一部份為模型之佈置，第二部份為雷射之啟動光束路徑之安排，第三部分為操作同步訊號控制器，使訊號能穩定輸出，並控制 PCAOM 切換光束，第四部分為操控 CCD 擷取影像，其儀器架設之示意圖如圖 3-5 所示。

第一部份：模型之佈置

1. 先將黏好於壓克力板上的植生模型放入實驗渠槽，渠槽為一循環式水槽，坡度調為水平，渠道三面為強化玻璃材質。
2. 調整渠槽水位，並開啟抽水馬達，控制流量並等待流場穩定。
3. 於循環水槽中加入顯影質點顆粒，密度為 1.1g/cm^3 之塑膠顆粒，其粒徑小於 $75\mu\text{m}$ ，於雷射光頁下質點表面散射形成一光點，於影像中佔據面積約 3 至 5 個畫素。

第二部份：雷射之啟動光束路徑之安排

1. 先將雷射冷卻水打開，使雷射冷卻水壓能穩定流量進入，打開電源 (220V) 暖機 3-5 分鐘，開啟雷射開關。等待雷射光束輸出後約 2 分鐘，方可再將雷射功率微調增加，於本水槽試驗中約 3 瓦即可。
2. 將光束經由反射鏡，使光束導引至試驗斷面，其中經過三個反射鏡、兩個凸透鏡將光束聚光再射至 PCAOM 調變器，於 PCAOM 處再將藍光及綠光光束分開，再射至旋轉八面鏡而形成藍綠切換光頁。
3. PCAOM 調變器：在微調分光過程中會出現零階 (zero order) 及一階 (first order) 光束，如圖 3-6 所示，微調時將雷射強度設在 1 瓦，並選用強度較強的一階光束作為試驗所需要之光束。
4. 開啟旋轉八面鏡控制器，將電流轉至 40 毫安培，利用粗調及微調將八面鏡調至試驗時所需要之轉數，所需之轉數為切換頻率之 1/8 倍，以達到與同步訊號控制器同步之效果。

第三部分：訊號控制

本實驗之同步訊號控制主要由 NI 公司之 PCI-6601 卡控制，此卡可穩定送出四道頻率，在此只用前二頻控制 PCAOM 儀器之藍、綠光切換，如訊號輸送為 250Hz，即完成一次藍、綠切換時間，時間差為 1/500 秒。切換頻率控制由電腦內之軟體控制並輸出至控制卡。

第四部分：影像擷取

擷取部分由 SONY DXC-9000 型之 CCD 攝影機擷取通過雷射光頁下之質點，所擷取之影像為 640×480 畫素之彩色數位影像。每個影像皆由藍綠光所組成，亮度值範圍為 0~255 (0 為最暗，255 最亮)。

3-3 實驗條件

本研究探討不同植生密度下對水流流速變化之影響，因此改變不同植生密度、上游入流量來探討植生密度對流速剖面之影響，本研究之植株佈置採三排平行排列，前後植株間距採 3cm 之固定間距，左右植株間距介於 0.2cm~2.0cm 之間，並以 0.3cm 為遞增間距，共 7 種排列密度，如圖 3-7~圖 3-14，表 3-1 為各案例之實驗條件，其中特徵體積比(m')定義為單位水體積中含有植株體積之比值，為一無因次量。

在取像方面，本研究將取像位置劃分為三區，即上游入流區、流經植生區及下游出流區，如圖 3-15 所示，而各案例之各影像擷取區尺寸大小如表 3-2，然而在影像之計算上，由於計算程式有補圖之功能，為避免第二區影像中之植株，被補上不該有之速度向量，所以在計算上，將第二區影像分成三小區計算，如圖 3-16 所示。



第四章 結果與討論

本章將實驗所得之流場速度向量、流場流線圖並將所得到之結果作一分析討論。由於植生流場受植株干擾，其流況變化急促，單憑幾張影像之結果並不足以代表整個流況，而須利用時均化平均多張影像之結果，故本研究所得之速度分佈及渦流分佈均是時均化之結果。且為了解植生流場渦流結構之分佈情況，本文計算空間中各點之渦度進行分析，渦度場之定義為 $2\omega = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ ，代表速度分量 u 、 v 之速度梯度總和，由此定義可知，渦度值越大等於速度梯度總和越大。利用 CPIV 法所量測之速度分佈，並利用中央差分的方式得到流場中的渦度分佈值。以下為相關結果之分析與討論。

4-1 CPIV 法誤差分析及驗證

為了驗證 CPIV 法應用於植生流場之準確性及適用性，本研究以 2-3 節之誤差探討為分析依據，來分析 CPIV 法之誤差量，並以黃明興(1993)之實驗案例為對照組，來驗證 CPIV 法之適用性。其分析步驟如下：

1. 將擷取於植生流場之原始影像，利用 2-2-2 節的方法將影像轉成整數格式，如圖 4-1 所示。
2. 利用人為方式將圖 4-1 影像資料位移 1pixel，成為圖 4-2 影像資料，並將此兩張影像資料進行影像分析計算，即可得知真值為 1pixel 位移量。
3. 計算結果如圖 4-3 所示，圖中之縱軸個數代表流場中各位置計算位移量之統計值。
4. 利用 2-3 節方法，計算得到方均根誤差(σ)為 0.0167、偏差(d_b)為 0.0000222。

經由上述分析結果，偏移誤差相對於方均根誤差相差一個級數 (order) 以上，因此，對於 CPIV 法其主要誤差量來自於方均根誤差，且偏差量對計算誤差影響不大。

接著，為測試有效資料判別及 CPIV 法之適用性，本研究以黃(1993)之實驗案例為對照組，在黃(1993)的研究中，是以電磁式三維流速儀來量測流速，然而黃(1993)所使用之實驗渠槽之渠寬為 1m，但本研究使用之渠槽只有 0.2m 寬，所以必須做模型比例轉換，本研究以福祿數(Fr)

為模型比例轉換之參數，轉換前後實驗之各物理量如表 4-1；圖 4-4 為水槽佈置簡圖。由於受限於三維流速儀之功能，所以黃(1993)量測之速度剖面僅從水面到植生頂端，為了便於比較，本研究所量測之範圍也從水面到植生頂端，其範圍如圖 4-4 紅色虛框處。

經由實驗計算得到如圖 4-5 之速度剖面圖，由圖中之速度向量可明顯發現，速度由左往右漸增，其原因為由左往右植生數目越多，造成植生頂至底床間通水斷面越往右受植生阻力越大所以流速減小，使得植生頂至水表面間之流速必須加大，以維持一定流量。將圖 4-5 最右端之速度剖面值擷出，與黃(1993)所量測之斷面流速做比較，如圖 4-6，其中虛線為本研究所量得之速度值所延伸之曲線，從中可以發現 CPIV 法所量得之速度剖面與黃(1993)所量測之斷面流速其趨勢相符，亦符合粗糙表面之流速為對數律分佈之趨勢。

綜合以上分析，CPIV 法可適用於植生渠道流場之研究。

4-2 案例結果分析

4-2-1 不同量測斷面之流速比較

由於受到植株之干擾，在相同的通水斷面其流速變化亦隨所在位置距植株遠近而有所差異，因此本研究以案例 VII 為觀測對象，在相同的實驗條件下，將雷射光頁打在不同的位置上如圖 4-7，即縱向斷面 1(植株本身)和縱向斷面 2(植株間距中央)，探討此二位置在 B 區(即植株上方流場)之流速變化情形。

經影像分析及時均化計算結果，量測位置在縱向斷面 2(植株間距中央)之 B 區速度變化，如圖 4-8 所示，由圖 4-8 可看出，縱向斷面 2(植株間距中央)之 B 區速度有明顯增加，將圖 4-8 中之速度剖面平均，位於第一排植生處之平均速度為 12.8cm/s，而第三排植生處之平均速度為 15.6cm/s，由此可見，縱向斷面 2(植株間距中央)之流動亦受到植生阻力之影響，使得 B 區(植生上方流場)必須加快流速，以維持一定的流量。

進一步將縱向斷面 1(植株本身)和縱向斷面 2(植株間距中央)在 B 區的速度變化做比較，如圖 4-9 所示，其比較的速度剖面位在第三排植生處，由圖 4-9 之速度剖面可看出，流速受植株之影響越靠近植株越大。

由以上之分析可知，速度變化較大之處在縱向斷面 1(即植株本身)，所以本研究其它案例之量測縱斷面皆以植株本身之縱斷面為量測斷面，來探討不同的植生密度下，速度變化之情形。

4-2-2 實驗案例結果說明

以案例 I 為列，說明各位置之實驗結果。此案例植株橫向間距 0.2cm，縱向間距 3cm，植生高度 3cm，植生總根數 66 根，特徵面積比 0.856，上游入流量 70 L/min，上游水深 5cm。

1. 位置 A 區實驗結果

取像大小為 6.67cm*5cm、藍綠光切換頻率 1000Hz，利用 CCD 擷取流場數位影像，如圖 4-10 所示，經由影像分析及時均化計算結果，其速度向量分佈如圖 4-11 所示。圖 4-12 為流場之流線圖，由流線圖可看出，近底床部分由於受到底床及植生雙重干擾，所以呈現出不穩定之流況，而上半部水流部分，由於受到植生阻礙，造成往下游之通水斷面束縮，以致水流被迫往上流動，所以造成上半部流線有上揚之現象。另將距植生 5.8cm 及 0.3cm 處之水深與速度關係擷取出來分析，如圖 4-13 所示，可看出近底床處由於受到底床之影響，造成速度有減慢之現象，且以植生高度(3cm)為分界點，而離植生越近，植生高度(3cm)以下之水流速度減慢現象越明顯，相對造成植生高度以上之速度變快，可見是受到植生阻礙之影響。圖 4-14 為渦度場之分佈圖，可看出渦度較強的地方發生在水面、底床及植生頂端。

2. 位置 B 區實驗結果

此區為植生正上方之通水斷面區，由於下方通水斷面遭到植生阻力影響流速減緩，所以為保有一定之流量，此區的流速會增快許多，且水面坡降明顯，在第三排植生處之水深降至 4.6cm。此區流場數位影像與 C、D 區同一張，如圖 4-15 所示，取像大小為 8.1cm*6.08cm、藍綠光切換頻率 1000Hz，然而在計算上，為避免植株處被計算程式補上不該有之速度向量，所以將一張數位影像圖分成 B、C、D 三區分開算，而經由影像分析及時均化計算結果，其速度向量分佈如圖 4-16 所示。圖 4-17 為流場之流線圖，從流線圖可以看出，由於此區下方近植生頂端處，受到植生之影響，所以流線呈現出震盪現象，進而將位於位置 0.2cm、4.0cm、7.8cm（即位第一、二、三排植生處）之水深與速度關係擷取出來分析，如圖 4-18 所示，由圖可以看出，此區下方近植株處，速度受到植生影響而有減慢的現象，進而分析垂線平均速度，可發現平均速度有增快之趨勢，探究其原因，是因為水流由左往右流經植生數目越多，造成在植生頂至底床之通水斷面越往右受植生阻力越大所以流速越小，使得此區之流速必須越來越大，以維持一定之流量。圖 4-19 為渦度場之分佈圖，可

看出渦度較強的地方，在水面及與植生交匯之處。

3. 位置 C 區實驗結果

此區位於 B 區下方，第一、二排植生之間，由於受到第一排植株之影響，在 B 區之水流，會有一部分如堰流般往此區流動，加上從植生間隙流入此區的側流，及第二排植生之影響，故在此區形成一渦流迴流區。此區流場數位影像與 B 區同一張，故藍綠光切換頻率與 B 區相同，經由影像分析及時均化計算結果，其速度向量分佈如圖 4-20 所示。而圖 4-21 為其流場之流線圖，由流線圖可以看出，有一渦流產生，由於受渦流干擾影響，其流速變化大且無規律性，所以此區不探討其速度分佈。而渦度之分佈如圖 4-22 所示，由渦度圖可以看出，渦度較強的地方，發生在速度變化較大之地方，即 B、C 區之交界處、渦流產生處、近底床、植株處。

4. 位置 D 區實驗結果

此區位於 B 區下方，二、三排植生之間，此區與 C 區有相似之結果，同樣為渦流迴流區。此區流場數位影像與 B、C 區同一張，故藍綠光切換頻率與 B、C 區相同，經由影像分析及時均化計算結果，其速度向量分佈如圖 4-23 所示，而圖 4-24 為其流場流線圖，渦度強度之分佈如圖 4-25 所示。

5. 位置 E 區實驗結果

此區為下游出流區，此區之取像大小為 8.1cm*6.08cm，數位影像原圖如圖 4-26 所示，經由影像分析及時均化計算結果，其速度向量分佈，如圖 4-27 所示。由速度向量分佈圖可以看出，以植生高為界(3cm)，流況呈現二層現象，上層緊接於 B 區之後，流速明顯較快，水流從 B 區以射流方式流入本區，而下層由於受到植生阻力干擾，流速明顯比上層緩慢，因此在圖 4-27 下方呈現出似空白狀態。為展示下層流速分佈，故用放大效果顯示速度向量，如圖 4-28 所示。而圖 4-29 為流場流線圖，由流線圖可以看出，下層流場受到植株之影響，流況呈現紊亂狀，且有二個渦流產生，進而再分析其渦度強度分佈，如圖 4-30 所示，可看出渦度較大之處產生在以植生高(3cm)為界之交界之處。

其餘案例相關結果如圖 4-31~圖 4-154 所示，並將各案例在 A、B 兩區之相關速度量測結果與 B 區中位於第三排植生處水深整理成表 4-2。

4-2-3 水流速度變化與植生密度關係

本研究針對表 4-2 中，A 至 B 區速度變化與植生密度關係做一綜合分析，相關探討如下所述：

1. B 區平均速度變化與植生密度關係：先針對位於第一、三排植生位置之平均速度變化與植生特徵體積比 (m') 做比較，並以半指數迴歸方式找出關係式，如圖 4-155 所示，發現植生特徵體積比越大(即植生密度越密)，其平均速度增加越快，而速度增加率($V_{b3,av}/V_{b1,av}$)與特徵體積比(m')之關係式為：

$$V_{b3,av}/V_{b1,av} = 0.8908e^{6.1128m'} \quad (4-1)$$

2. B 區速度剖面最大值與植生密度關係：將位於第一、三排植株處之速度剖面最大值之變化與植生特徵體積比 (m') 做比較，並以半指數迴歸方式找出關係式，如圖 4-156 所示，可以發現其變化趨勢跟平均速度與特徵體積比 (m') 之趨勢相同，而最大值之增加率($V_{b3,max}/V_{b1,max}$)與特徵體積比 (m') 之關係式為：

$$V_{b3,max}/V_{b1,max} = 0.9432e^{6.0964m'} \quad (4-2)$$

3. A 區至 B 區速度剖面最大值之變化與植生密度關係：將位於 A 區最上游端速度剖面最大值 ($V_{a,max}$) 與 B 區位於第三排植生處之速度剖面最大值 ($V_{b3,max}$) 擷取出來做比較，並以半指數迴歸方式，找出與特徵體積比 (m') 之關係式，如圖 4-157 所示，發現植生特徵體積比 (m') 越大，其速度增加率越快，而其增加率($V_{b3,max}/V_{a,max}$)與特徵體積比 (m') 之關係式為：

$$V_{b3,max}/V_{a,max} = 0.9472e^{10.938m'} \quad (4-3)$$

4-2-4 曼寧 n 值與植生密度關係

植株之存在會產生阻力進而影響流速，本研究採用曼寧 n 值來探討植生密度與阻力間之關係，而曼寧 n 值之求取是以能量公式配合曼寧公式來求解，公式如下所示：

$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_3 + h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h'_L \quad (4-4)$$

$$S_f = \frac{h'_L}{L} \quad (4-5)$$

$$v_3 = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (4-6)$$

其中， z_1 ：上游底床高程； z_3 ：第三排植株處底床高程； h_1 ：上游水位； h_3 ：第三排植株處水位； v_1 ：上游流速； v_3 ：第三排植株處流速； h'_L ：總水頭損失； S_f ：總能量坡降； L ：沿主流方向植生分佈距離； R ：水力半徑。

經由上述之分析，結果如表 4-2 及圖 4-158 所示，發現植生特徵體積比(m')越大，曼寧 n 值也越大，其曼寧 n 值與特徵體積比(m')之關係式為：

$$n = 0.004e^{19.891m'} \quad (4-7)$$

4-2-5 B 區速度剖面最大值距水面距離與植生密度關係

此區為植生正上方之通水斷面區，由於下方通水斷面遭到植生阻力影響流速減緩，所以為保有一定之流量，此區的流速會增快許多，而且隨著水流由左往右流經的植生數目越多，速度剖面最大值所在之位置亦有所變動，因此本研究擷取位於第一排及第三排植株處之速度剖面最大值距水面之距離，來與植生密度做一綜合分析，結果如表 4-3 及圖 4-159 所示，發現植生特徵體積比(m')越大，其速度剖面最大值發生位置距水面距離之比值也越大，其比值(h_{b1}/h_{b3})與特徵體積比(m')之關係式為：

$$h_{b1}/h_{b3} = 0.8327e^{5.8213m'} \quad (4-8)$$

第五章 結論與建議

5-1 結論

本研究利用 CPIV 法來進行植生渠道流場之量測，並改變不同植生排列密度、上游入流量來探討植生密度對流速剖面之影響。本研究之植株佈置採三排平行排列，前後植株間距採 3cm 之固定間距，左右植株間距介於 0.2cm~2.0cm 之間，並以 0.3cm 為遞增間距，共 7 種排列密度，雷諾數控制在 5810~7470 之間，同時以時均化平均多張影像推得流場之速度變化，茲將所得結果敘述如下：

- (1) 本研究以 2-3 節所提之誤差探討為分析依據，來分析 CPIV 法之誤差量，實驗條件如表 4-1 之第三欄所示，測試結果於方均根 (σ) 為 0.0167，平均偏差量 (d_b) 約為 0.0000222。因此在計算誤差分析時，影像之平均偏差量相較於方均根誤差可忽略。
- (2) 在相同實驗條件下，植生正上方流場之速度增加率，隨距植株遠近而有所差異，離植株越近速度增加越快，越遠速度增加越慢。
- (3) 在植生上游入流區 (A 區)，此區越近植株，其速度剖面以植生高為界，下方受植生阻力影響流速減慢，進而造成上方流速加快以維持一定之流量，且由於受到植生阻礙，造成往下游之通水斷面束縮，以致水流被迫往上流動，所以造成流線有上揚之現象，在渦度分佈方面，渦度較強之地方發生在水面、近底床處及植生頂。
- (4) 在植生上方流場 (B 區)，此區在植生之正上方，由於下方流場受植生影響，流速減慢，造成本區流速須加快以維持一定之流量，從各案例之 B 區速度比較圖可以看出，從流入 B 區到流出 B 區，不論是平均速度或最大速度都呈現相當幅度之增加，而在渦度方面，渦度較強之地方發生在水面及與植生交界處。
- (5) 植生間流場 (C、D 區)，此二區均位在植生間，同為渦流迴流區，由於受渦流干擾，流速變化大且無規律性，因此不探討其速度分佈，而由各案例在 C、D 之流線圖可以看出，有一至二個渦流產生，在渦度之分佈上，渦度較強之地方，發生在 B、C 區交界處、渦流產生處、近底床及植株處。
- (6) 下游出流區 (E 區)，此區接續在植生區之後，以植生高為界，流況呈現二層現象，上層緊接於 B 區之後，流速明顯較快，水流從 B 區以

射流方式流入本區，而下層由於受到植生阻力干擾，流速明顯比上層緩慢，且有渦流產生，在渦度分部方面，渦度較大之處產生在以植生高為界之交界處。

- (7) 整合各案例 A 至 B 區間速度變化與植生密度關係，發現植生特徵體積比 (m') 越小，速度增加率也越小，且兩者之間呈指數關係變化。

如下列關係式：

$$V_{b3,av} / V_{b1,av} = 0.8908e^{6.1128m'}$$

$$V_{b3,max} / V_{b1,max} = 0.9432e^{6.0964m'}$$

$$V_{b3,max} / V_{a,max} = 0.9472e^{10.938m'}$$

其中， $V_{b3,av}$ ：B 區位於第三排植生處之平均速度； $V_{b1,av}$ ：B 區位於第一排植生處之平均速度； $V_{b3,max}$ ：B 區位於第三排植生處之最大速度； $V_{b1,max}$ ：B 區位於第一排植生處之最大速度；及 $V_{a,max}$ ：A 區最上游端最大速度。

- (8) 綜合各案例曼寧 n 與植生密度關係，發現植生特徵體積比 (m') 越大，曼寧 n 也越大，且二者呈現出指數關係，其關係式如下：

$$n = 0.004e^{19.891m'}$$

- (9) 綜合各案例 B 區速度剖面最大值距水面距離與植生密度關係，發現植生特徵體積比 (m') 越大，其速度剖面最大值距水面距離之比值也越大，其關係式如下：

$$h_{b1} / h_{b3} = 0.8327e^{5.8213m'}$$

其中， h_{b1} ：B 區位於第一排植生處之速度剖面最大值距水面距離；
 h_{b3} ：B 區位於第三排植生處之速度剖面最大值距水面距離。

5-2 建議

- (1) 本實驗所使用之 CPIV 法，雷射光頁是由上往下形成，當水面有較大之波動時，將影響到水面下之光頁而形成散射，因此對於此類流場建議可以將雷射光頁方向由渠底往上產生。
- (2) 本研究之案例設計均為水深漫過植生高度，未來可以朝向水深不及植生高度進行研究。

- (3)水流流經植生渠道時，植株之反應有直立、擺動及倒伏等三種現象，本研究著重在直立情況下，改變植生密度進行流況研究，往後可針對植株擺動及倒伏所造成之流況變化進行研究。
- (4)本研究所選用之植株材料為聚稀系樹脂，並非真實植生，往後可選擇植生護岸或保護渠床之草類來進行研究，以得到更真實之流況變化。
- (5)植生流場為三維流況，而本 CPIV 法為二維量測法，故對側向流況變化無法量測到，建議未來可發展三維量測技術，同步對主流及側向流況做一整體量測，以呈現真實三維流況變化。

