

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

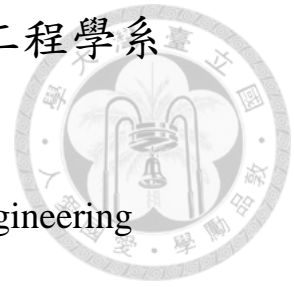
碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



運用影像處理技術分析數值模擬風剪驅動紊流場的表
面條痕結構

Using Image Processing Technique to Analyze Surface
Streaky Structure on Numerically Simulated
Wind-Driven Turbulent Flow

劉鴻煜

Hong-Yu Liu

指導教授：蔡武廷 博士

Advisor: Wu-Ting Tsai, Ph.D.

中華民國 107 年 7 月

July, 2018

致謝



在這碩士生涯中，首先感謝蔡武廷老師的指導，從老師做研究的方法及嚴謹態度，不僅僅讓我學到在研究上的知識，還有改變了我的生活態度，使我了解到每個小細節的重要性以及確實地將事情做好的精神。感謝口試委員戴璽恆老師及張恆華老師給予的指導與建議。感謝世明學長與冠鴻學長，不論是在研究上還是生活上遇到的難題，都能夠與學長們討論而啟發了我的思想，特別感謝冠鴻學長總是耐心地與我討論。感謝佑穎、政哲、柏丞、政榮、家宜、巧婷以及同學們的幫忙。

最後，感謝我的家人以及廷沂對我的鼓勵與支持，謝謝你們。

中文摘要



本研究運用影像處理技術分析風剪驅動自由液面紊流場之數值模擬資料，觀察流場水面的沿流向高速條痕，並探討條痕結構特性。首先透過自適應直方圖等化及伽瑪校正增強流場沿流向流速分佈影像之對比度，以凸顯影像中的高速條痕。接著說明各方法的參數之選取標準，並利用大津演算法自動擷取出每張影像的高速區域。進一步利用自動辨識條痕系統，於高速區域中進行條痕結構的辨識，並統計條痕於跨流向間距分佈的特性。發現隨著風速的增加，平均條痕間距隨之遞減。為客觀判斷條痕間距分佈符合何種理論分佈，在此亦使用了卡方適合度檢定，結果顯示於多種理論分佈中，對數常態分佈與條痕間距分佈較為吻合，此特性與前人在自由液面紊流邊界層的研究結果相同，且與無滑移邊界紊流邊界層的條痕結構特性相似。

關鍵字：紊流邊界層、高速條痕、影像處理、條痕間距、對數常態分佈

Abstract



In this thesis, the characteristics of streamwisely elongated streaky structures of numerical wind-driven free-surface turbulent shear flow are analyzed using image processing techniques. At first, adaptive histogram equalization and gamma correction are employed to enhance the contrast of image of streamwise velocity distribution. To segment the higher velocity regions, Otsu's method is applied to automatically determine the threshold of image, which separates the image into higher and lower velocity regions. A streak detection method is developed to identify streaks automatically from the higher velocity regions. Streak spacing and the corresponding distributions are then derived after the streak identifications. The result shows that the mean streak spacing decreases as the wind speed increases. By the analysis of chi-square goodness-of-fit test, it shows that, comparing to the other chosen theoretical probability distributions, lognormal distribution is closer to the distributions of streak spacing, which is similar to that of the no-slip wall turbulent boundary layer.

Keyword: turbulent boundary layer, high-speed streak, image processing, streak spacing, lognormal distribution

目錄



致謝.....	i
中文摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	xviii
第一章 前言.....	1
1.1 無滑移邊界紊流邊界層的條痕結構.....	1
1.2 風剪驅動自由液面紊流邊界層的條痕結構.....	3
1.3 研究動機及論文架構.....	9
第二章 數值模擬資料.....	10
2.1 數值模擬資料之產生.....	10
2.2 模擬流場流速資料.....	14
第三章 水面影像處理及自動辨識條痕結構.....	18
3.1 研究回顧：水面影像之條痕結構.....	18
3.2 利用大津演算法進行影像切割.....	27
3.3 影像增強.....	31

3.3.1 伽瑪校正 (Gamma Correction)	31
3.3.2 直方圖等化 (Histogram Equalization, HE)	37
3.3.3 自適應直方圖等化 (Adaptive Histogram Equalization, AHE)	40
3.4 自動辨識條痕結構.....	50
第四章 條痕間距特性探討	56
4.1 統計條痕間距.....	56
4.2 條痕間距分佈特性.....	66
4.2.1 機率密度函數.....	66
4.2.2 卡方適合度檢定.....	85
4.3 結果整理與討論.....	97
第五章 結論.....	101
參考文獻.....	102
附錄一、卡方分佈臨界值表	104

圖目錄



第一章

- 圖 1.1：流場可視化之影像。鉑線放置於跨流向且靠近水槽底部，流場的雷諾數 $Re\theta = 740$ ，跨流方向截取寬度 $z+= 100$ ，觀測位置距離牆面底部 $y+= 5$ ，影像中跨流向尺寸為 10.4 cm，影像左方之垂直白線為氫氣泡產生線(鉑線)，流場運動方向由左至右，觀察到氫氣泡匯聚形成條痕結構。【原圖來源：Smith 等(1983)】2
- 圖 1.2：實驗水面條痕結構演化之影像。實驗風速為 5 m/s，風向由左至右，影像尺寸為 85 × 57 cm。在初期先將反光粒子投入水面，粒子會匯聚在高速區域形成條痕；隨著時間發展，條痕結構會從整齊至擾亂。圖 a 至圖 h 為由風剪驅動水面 21.5 至 25 秒後所拍攝之影像，每間隔 0.5 秒依序拍攝一張影像。【原圖來源：Melville 等(1998)】4
- 圖 1.3：將追跡質點投入水面後的瞬時分佈。模擬風速為 5 m/s，追跡質點總個數為 1282 個，圖 a 至圖 f 為追跡質點隨時間的瞬時分佈，時間分別為 0.024s、0.671s、0.894s、1.788s、3.129s 及 5.364s，在初期追跡質點均勻分布，隨後追跡質點會逐漸匯集成條痕，再過一段時間，條痕排列混亂不易分辨條痕。【原圖來源：Tsai 等(2005)】5
- 圖 1.4：追跡質點與沿流向流速分佈之疊和圖。影像中顏色越紅代表其流速越高，顏色越藍則代表其流速越低，黑點為追跡質點，圖 a 為剛將追跡質點投入流場之影像，圖 b 為經過一段時間後，追跡質點聚集在影像的紅色區域，即為水面沿流向流速之高速區域。【原圖來源：Tsai 等(2005)】6
- 圖 1.5：不同風速驅動水面所形成的條痕結構。影像尺寸為 85 × 57 cm，試驗風向由左至右。圖 a、圖 b 和圖 c 之風速分別為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s，

觀察反光粒子匯集在高速區域形成條痕，隨著實驗風速越大，條痕結構越緊密。【原圖來源：Melville 等(1998)】 7

圖 1.6：不同風速驅動下，自由液面邊界層之條痕間距分佈和對數常態分佈曲線疊合，及無因次條痕間距之平均值和標準差。橫軸為無因次條痕間距；縱軸為機率密度。圖 a、圖 b 及圖 c 風速分別為 5 m/s、4 m/s 和 3 m/s。【原圖來源：Tsai 等(2005)】 8

第二章

圖 2.1：Melville 等(1998) 的實驗接近水面流速、風速與均方根斜率隨時間之變化。因量測器材的限制，只能量測深度 2.7 mm 以下之流速，故圖中的接近水面之流速為深度 2.7 mm 之流速。圖 a、圖 b 及圖 c 之風速分別為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s。圖中實線為接近水面之流速，點線為風速，虛線為均方根斜率。底下兩個實心倒三角形所包含之時段為條痕演化過程，此演化過程如圖 1.5 所示，略可看出當風速越快，條痕演化的時間則越短，垂直虛線標示出數值模擬開始的時間。【原圖來源：Melville 等(1998)】 13

圖 2.2：水面之沿流向流速平均值 u 和其標準差 σu 隨著時間之變化。圖 a、(c) 及 e 分別為風速為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s 流速平均值 u 隨時間之變化，圖 b、(d) 及 f 分別為風速為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s 流速標準差 σu 隨時間之變化。圖中的灰色區塊為平均值與標準差趨於穩定的時段。 16

圖 2.3：各風速之穩定時段中的水面沿流向流速分佈影像。圖 (a) 為風速 3 m/s 之水面影像，影像邊長為 52.33 cm；圖 (b) 為風速 4 m/s 之水面影像，影像邊長為 33.89 cm；圖 (c) 及 (d) 為風速 5 m/s 之水面影像，影像邊長為 21.46 cm。每個網格之速度值越高，其顏色越接近白色，速度值越低，其顏色越接近黑色，各風速之穩定時段中的水面影像皆發現在較高速區域具有一條條的結構。 17

第三章

圖 3.1：沿流向流速在跨流向上瞬時及頻均頻譜分佈圖例。圖 (a) 為六張沿流向流速在跨流向上瞬時頻譜分佈圖例，每張圖中曲線最大值對應之週長為最有可能的條痕間距；圖 (b) 之左圖為一時段中所有瞬時頻譜分佈圖中曲線最大值對應之週長及累計次數直方圖；圖 (b) 之右圖為所有瞬時頻譜的平均分佈，其最大值所對應之週長則代表該段時間內最有可能的平均條痕間距。【原圖來源：Kline 等(1967)】23

圖 3.2：模擬風速 4 m/s 及 3 m/s 之沿流向流速頻譜分佈圖。圖 (a) 為模擬風速 4 m/s 之沿流向流速頻譜分佈圖，取樣時間為 10.9 ~ 15.6 s，其頻譜分佈明顯看出有一強度特別高的代表週期，可視其值為條痕間距；圖 b 為模擬風速 3 m/s 之沿流向流速頻譜分佈圖，取樣時間為 15.4 ~ 22.0 s，其頻譜分佈卻有許多強度相近的代表週期。兩者皆平均取樣 60 個時間點做樣本平均，實線為整個水面計算截線上的平均流速之頻譜分佈函數，虛線為單一計算截線上的流速之頻譜分佈函數。風速 4 m/s 的頻譜分佈較單純，風速 3 m/s 的頻譜分佈較為複雜。【原圖來源：溫國暉(2004)】 24

圖 3.3：條痕辨識示意圖。條痕 (a)：條痕通過計算截線且其長度超過 $\Delta x += 100$ ，符合準則；條痕 (b)：條痕長度未超過 $\Delta x += 100$ ，不符合準則；條痕 (c)：條痕長度超過 $\Delta x += 100$ 但未通過計算截線，不符合準則；條痕 d 與條痕 e：兩條條痕通過計算截線且其長度超過 $\Delta x += 100$ ，雖然彼此十分接近，但條痕間最小間距並無限制，故皆符合準則。【原圖來源：溫國暉(2004)】25

圖 3.4：模擬風速 5 m/s，以沿流向流速 u 相對最高速點為進行自動辨識條痕之點為示意圖。風向由左至右，取樣時間為 6.3 s。圖 (a) 為該時刻水面上所有相對高速點為分佈情況；圖 (b) 為程式自動辨識出的條痕，以不同顏色表示不同條痕。【原圖來源：溫國暉(2004)】26

圖 3.5：圖 *a* 為模擬風速 5 m/s 且時間 $t = 5.4$ s 之流場水面影像，圖 (*b*) 為藉由
 大津演算法進行影像切割後的二值化影像，二值化影像中白色區域為影
 像中之高速區域，黑色區域為影像中之低速區域，圖 *c* 為流場水面影像
 直方圖，橫軸為影像灰階值，縱軸為機率，利用大津演算法所自動選取
 之門檻值為 $t^* = 156$ ，以黑粗直線表示其位置。.....30

圖 3.6：乘冪律轉換曲線。若 $\gamma = 1$ 則輸出影像 $g_{x,y}$ 等於輸入影像 $f(x,y)$ ，若
 $\gamma < 1$ ，較低的輸入強度值經過乘冪律轉換後，於輸出強度值中轉換至
 較寬範圍，對於較高的輸入強度值則於輸出灰階值中轉換成較窄範圍，
 此增強較低之強度值；若 $\gamma > 1$ 則會有相反的結果，增強較高之強度值。
33

圖 3.7：流場水面影像經由不同指數 γ 的伽瑪校正轉換的影像直方圖。模擬風速
 為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，橫軸為強度值，縱軸為機率密度。圖 *a* 為
 經由 $\gamma = 1$ 之伽瑪校正轉換的直方圖分佈，圖 *b* 為經由 $\gamma = 0.5$ 之伽瑪校
 正轉換的直方圖分佈，且直方圖分佈會向右移動，增加影像亮度，圖 *c* 為
 經由 $\gamma = 2$ 之伽瑪校正轉換的直方圖分佈，且直方圖分佈會向左移動，
 降低影像亮度。.....34

圖 3.8：流場水面影像經由不同指數 γ 的伽瑪校正轉換的影像。模擬風速為 5 m/s，
 取樣時間為 5.4 s，圖 *a* 為 $\gamma = 1$ 之伽瑪校正轉換的影像，圖 *b* 為 $\gamma = 0.5$
 之伽瑪校正轉換的影像，圖 *c* 為 $\gamma = 2$ 之伽瑪校正轉換的影像。.....35

圖 3.9：流場水面影像經由不同指數 γ 的伽瑪校正轉換的影像及影像切割後的二
 值化影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 *a* 及圖 *b* 為 $\gamma = 1$ ，
 圖 *c* 及圖 *d* 為 $\gamma = 2$ ，圖 *e* 及圖 *f* 為 $\gamma = 4$ 。.....36

圖 3.10：圖 (*a*) 流場水面影像與經由直方圖等化處理影像的轉換函數。圖 (*b*) 流
 場水面影像之直方圖分佈，圖 *c* 經過直方圖等化處理影像之直方圖分佈，
 直方圖分佈中在亮部及暗部的對比度有明顯提升。.....38

- 圖 3.11：流場水面影像和經過直方圖等化影像，以及影像切割之二值化影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 a 及圖 b 為流場水面影像及影像切割之二值化影像，圖 c 及圖 d 為經過直方圖等化影像及影像切割之二值化影像。經由直方圖等化處理後，影像整體對比度有效提升，而二值化影像中細部條痕仍難以辨識。.....39
- 圖 3.12：圖中白色框為矩形範圍，將於內部進行直方圖等化，矩形中心的像素點其值為直方圖等化處理後的值，自適應直方圖等化將會對於影像每個像素點都進行處理而使矩形範圍滑移過整張影像。.....41
- 圖 3.13：流場水面影像和不同矩形範圍之自適應直方圖等化處理影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 a 為流場水面影像，圖 b 為矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化處理影像，圖 c 為矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化處理影像。.....42
- 圖 3.14：流場水面影像和不同矩形範圍之自適應直方圖等化處理影像的直方圖分佈。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 a 為流場水面影像，圖 b 為矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化處理影像的直方圖分佈，圖 c 為矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化處理影像的直方圖分佈。.....43
- 圖 3.15：流場水面影像經由矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 a、圖 b、圖 c 及圖 d 之指數 γ 分別為 1、2、4、6。.....44
- 圖 3.16：流場水面影像經由矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像，其進行影像切割的二值化影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 a、圖 b、圖 c 及圖 d 之指數 γ 分別為 1、2、4、6。.....45

- 圖 3.17：流場水面影像經由矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像直方圖分佈。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 *a*、圖 *b*、圖 *c* 及圖 *d* 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。.....46
- 圖 3.18：流場水面影像經由矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 *a*、圖 *b*、圖 *c* 及圖 *d* 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。.....47
- 圖 3.19：流場水面影像經由矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像，其進行影像切割的二值化影像。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 *a*、圖 *b*、圖 *c* 及圖 *d* 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。.....48
- 圖 3.20：流場水面影像經由矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像直方圖分佈。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 *a*、圖 *b*、圖 *c* 及圖 *d* 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。.....49
- 圖 3.21：自動辨識條痕準則示意圖。圖 (*a*) 為二值化影像，其白色部分為高速區域。圖 (*b*) 篩選出二值化影像中沿流向長度超過 100 無因次長度單位 ($\Delta x > 100$) 的高速區域，並將通過計算截線之條痕以黃色圓點標示，計算截線位置為 $x = 0 \text{ (cm)}$ ，圖 (*c*) 為圖 (*b*) 部分放大圖，若條痕通過計算截線，取條痕在計算截線上之中點為代表位置。.....51
- 圖 3.22：模擬風速 3 m/s ，取樣時間為 15.4 s ，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0 \text{ (cm)}$ ，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。.....52
- 圖 3.23：模擬風速 4 m/s ，取樣時間為 10.9 s ，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕

辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。.....53

圖 3.24：模擬風速 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。.....54

圖 3.25：模擬風速 5 m/s，取樣時間為 9.4 s，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。.....55

第四章

圖 4.1：利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度，圖 a 為風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈，圖 b 為風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈，圖 c 為風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈，圖 a 為風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。.....62

圖 4.2：利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度，圖 a 為風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈，圖 b 為風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈，圖 c 為風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈，圖 a 為風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。.....63

圖 4.3: 利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後, 各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度, 圖 a 為風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈, 圖 b 為風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈, 圖 c 為風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈, 圖 a 為風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。.....64

圖 4.4: 利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後, 各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度, 圖 a 為風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈, 圖 b 為風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈, 圖 c 為風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈, 圖 a 為風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。.....65

圖 4.5: 模擬風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。.....69

圖 4.6: 模擬風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋

伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....70

圖 4.7：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....71

圖 4.8：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....72

圖 4.9：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....73

圖 4.10：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、

韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....74

圖 4.11：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....75

圖 4.12：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....76

圖 4.13：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....77

圖 4.14：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....78

佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....78

圖 4. 15: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。.....79

圖 4. 16: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。.....80

圖 4. 17: 模擬風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。.....81

圖 4. 18: 模擬風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分

佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。.....82

圖 4.19: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。.....83

圖 4.20: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 a 至圖 f 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。.....84

圖 4.21: 圖 (a) 自由度與卡方分佈關係圖。自由度分別為 5、10、15、20 及 25 之卡方分佈。圖 (b) 自由度為 20 之卡方分佈, 其臨界值為 $\chi_{0.052} = 31.410$, 臨界值右側為拒絕域, 臨界值左側為接受域。橫軸為卡方值, 縱軸為機率密度。.....96

圖 4.22: 平均條痕間距與風速之關係圖。橫軸為風速, 單位以 m/s 表示, 縱軸為平均條痕間距, 圖 a 單位以無因次表示, 圖 b 單位以 cm 表示, 紅色實心及空心圓形, 分別代表運用矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化和指數為 2 及 4 之伽瑪校正進行影像處理的結果; 藍色實心及空心方形, 分別代表運用矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化和指數為 2 及 4 之伽瑪校正進行影像處理的結果; 菱形、上三角形及下三角形分別代表 Melville 等 (1998)、Tsai 等 (2005) 及 溫國暉 (2004) 之結果。.....100

表目錄



第二章

表 2.1：數值模擬初始時間對應之實驗進行時間以及初始的水面平均流速..... 12

表 2.2：Tsai 數值模擬實驗參數表。..... 15

表 2.3：模擬風速所對應之穩定時段。..... 15

第四章

表 4.1：利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。..... 58

表 4.2：利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。..... 59

表 4.3：利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。..... 60

表 4.4：利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。..... 61

表 4.5：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。..... 88

表 4.6：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。..... 88

表 4.7：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。..... 89

表 4.8：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	89
表 4.9：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	90
表 4.10：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	90
表 4.11：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	91
表 4.12：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	91
表 4.13：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	92
表 4.14：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	92
表 4.15：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	93

表 4. 16：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	93
表 4. 17：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	94
表 4. 18：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	94
表 4. 19：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	95
表 4. 20：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。.....	95
表 4. 21：各風速利用不同影像處理技術所得的平均條痕間距，以及 Melville 等 (1998)、Tsai 等(2005)、溫國暉(2004) 之研究結果。.....	99

第一章 前言



1.1 無滑移邊界紊流邊界層的條痕結構

起初學者們大都認為紊流流場是毫無規則且複雜的系統，然而藉由各種方式將流場可視化後，觀測流場的運動狀態，發現紊流流場中存在組織性的條痕結構 (streaky structure)。Ferrell 等(1955) 將清水沖入充滿染色水體的圓管中，發現在接近管壁處留下清楚地一條條沿流向 (streamwise) 的染劑，其主要受到黏滯效應的影響，使存留在接近管壁的染色水體漸往流速較低的區域聚集，此稱為低速條痕 (low-speed streak)，而條痕與條痕之間的距離則為 (streak spacing)。Kline 等(1967) 以不同壓力梯度之條件下，藉由氫氣泡技術將流場可視化，觀察到流場亦存在條痕結構。Smith 等(1983) 亦利用氫氣泡技術將流場可視化，發現氫氣泡明顯匯聚於沿流向，形成數條氫氣泡之條痕結構，如圖 1.1 所示。

Runstadler 等(1963) 首次將無滑移邊界紊流邊界層流場之條痕結構進行有系統的辨識，並統計條痕間距，以及透過黏滯尺度 ν/u^* 將平均條痕間距 $\bar{\lambda}$ 進行無因次化，其中 ν 為水體之運動黏滯係數 (kinematic viscosity)， $u^* = \sqrt{\tau_s/\rho}$ 為摩擦速度，其因次與速度之因次相同， τ_s 為風剪驅動水面所產生之剪應力 (shear stress)， ρ 為水體密度，使在無滑移邊界紊流邊界層的不同流場，以不同流場可量化的方式所辨識的條痕結構，能夠以平均條痕間距進行比較。Smith 等(1983) 發現在雷諾數為 740 至 5830 的實驗中，於水槽底部所計算出的無因次平均條痕間距趨近於一定值 ($\bar{\lambda}^+ = 100$)，以及所統計出來的條痕間距分佈近似於對數常態分佈，而 Nakagawa 等(1981) 提出於在無滑移邊界紊流邊界層，跨流向的條痕間距分佈也近似於對數常態分佈，故條痕間距為觀測無滑移邊界紊流流場的重要參考資料。

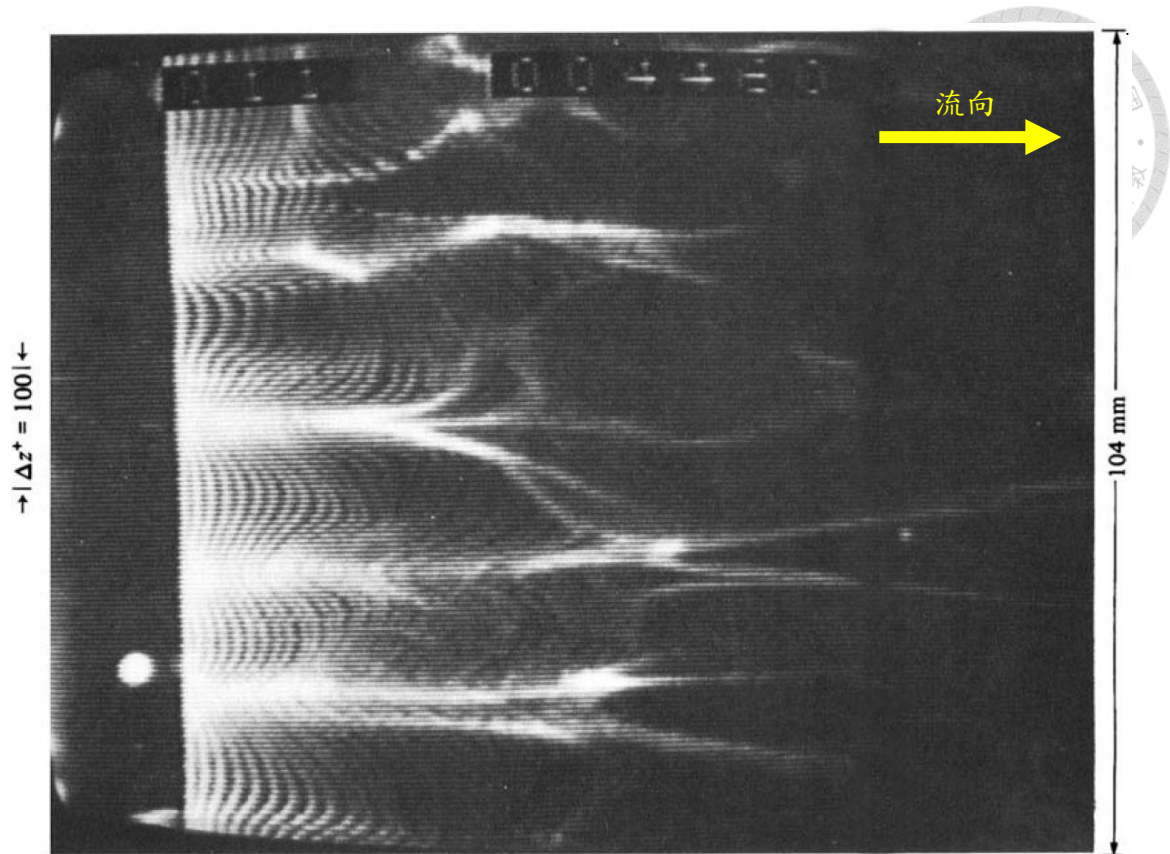


圖 1.1：流場可視化之影像。鉑線放置於跨流向且靠近水槽底部，流場的雷諾數 $Re_\theta = 740$ ，跨流方向截取寬度 $z^+ = 100$ ，觀測位置距離牆面底部 $y^+ = 5$ ，影像中跨流向尺寸為 10.4 cm，影像左方之垂直白線為氫氣泡產生線(鉑線)，流場運動方向由左至右，觀察到氫氣泡匯聚形成條痕結構。【原圖來源：Smith 等(1983)】



1.2 風剪驅動自由液面紊流邊界層的條痕結構

在風剪驅動自由液面紊流邊界層，亦具有類似的沿流向延伸條痕結構存在。Melville 等(1998) 在實驗水槽中灑下反光粒子以觀察風剪驅動水面下紊流邊界層的運動狀態，發現反光粒子一開始從隨意散布在水面，約過 1 至 2 秒，其逐漸排列成一條條與風向平行的條痕結構，粒子聚集於水面沿流向流速較高速的區域，再經過一段時間後，因為粒子過度聚集使條痕結構開始紊亂崩壞，如圖 1.2 所示。Tsai 等(2005) 運用數值模擬技術，模擬 Melville 等(1998) 實驗流場，並均勻灑下追跡質點以觀察流場的運動狀態，發現在流場中也有類似的條痕結構分佈，如圖 1.3 所示，且經過一段時間後，追跡質點會往水面沿流向流速之高速區域聚集，如圖 1.4 所示。

Melville 等(1998) 以不同風速驅動水面，風速分別為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s，觀察反光粒子的結構變化，從均勻分佈至在水面形成清楚的條痕結構，且發現隨著風速遞增，條痕結構的排列也隨著變得更緊密，其條痕間距隨之遞減，如圖 1.5 所示。Tsai 等(2005) 的數值模擬實驗結果顯示，隨著模擬風速的遞增，有因次平均條痕間距也隨之遞減，而無因次平均條痕間距並沒有隨之遞減，以及各風速之條痕間距分佈皆近似於對數常態分佈，如圖 1.6 所示。

本研究運用影像處理技術分析風剪驅動自由液面紊流邊界層的水面沿流向流速分佈影像，探討紊流流場的水面條痕結構特性，並與 Melville 等(1998) 利用反光粒子觀察流場條痕結構之實驗結果以及 Tsai 等(2005) 藉由追跡質點觀察流場條痕結構之數值模擬實驗結果進行比較。

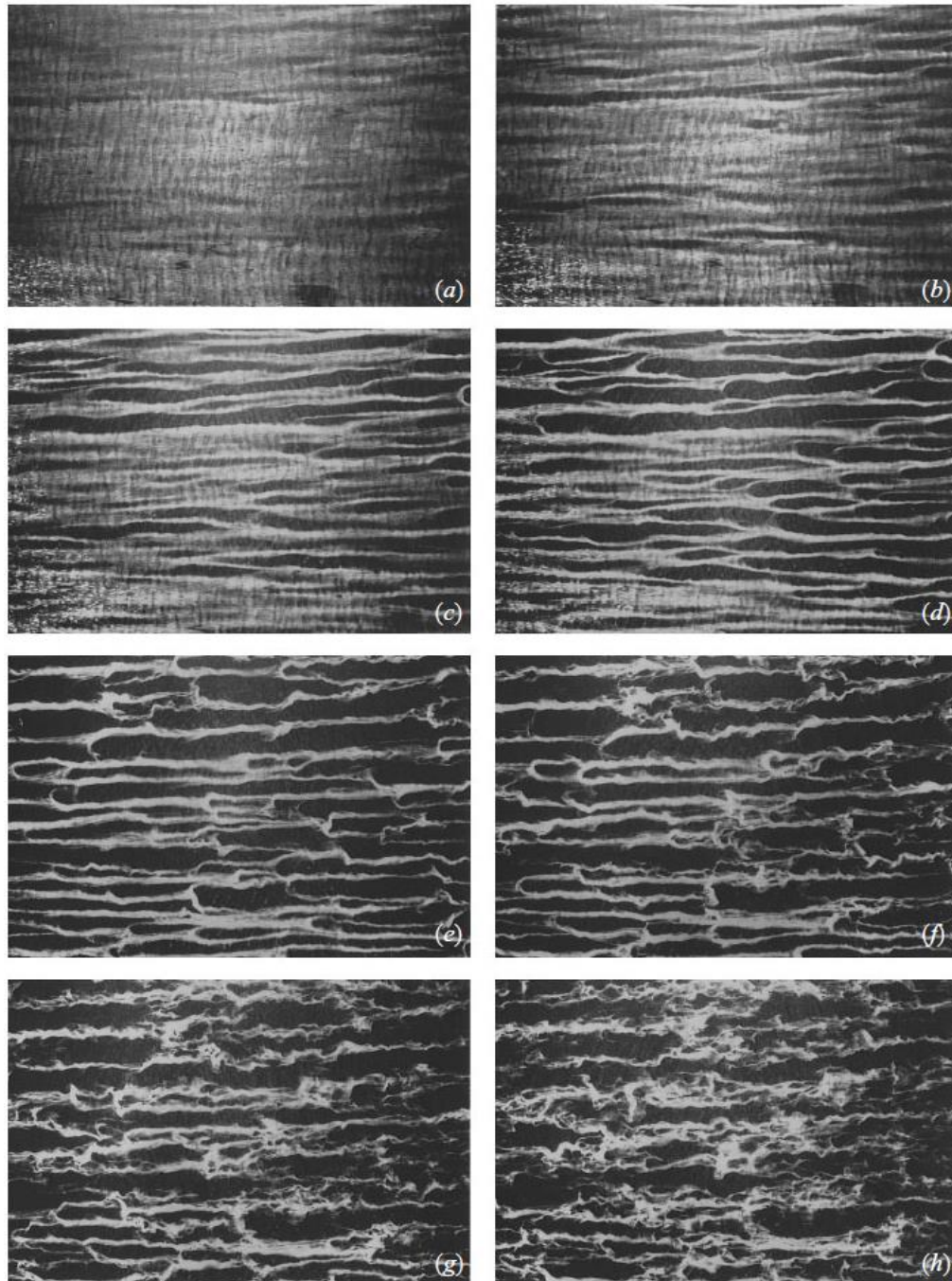


圖 1.2：實驗水面條痕結構演化之影像。實驗風速為 5 m/s，風向由左至右，影像尺寸為 85 × 57 cm。在初期先將反光粒子投入水面，粒子會匯聚在高速區域形成條痕；隨著時間發展，條痕結構會從整齊至擾亂。圖 (a) 至圖 (h) 為由風剪驅動水面 21.5 至 25 秒後所拍攝之影像，每間隔 0.5 秒依序拍攝一張影像。【原圖來源：Melville 等(1998)】

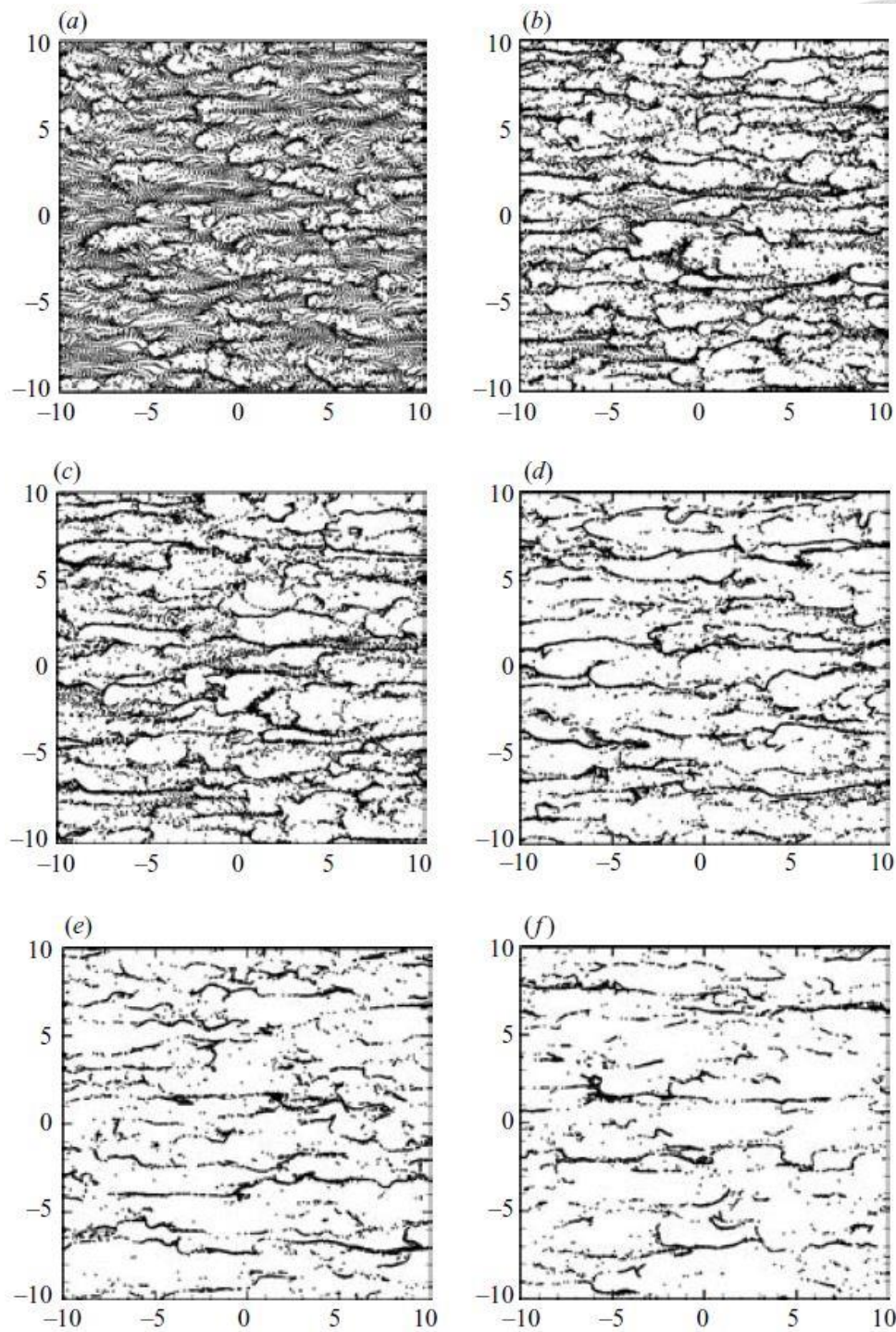


圖 1.3：將追跡質點投入水面後的瞬時分佈。模擬風速為 5 m/s，追跡質點總個數為 128^2 個，圖(a)至圖(f)為追跡質點隨時間的瞬時分佈，時間分別為 0.024s、0.671s、0.894s、1.788s、3.129s 及 5.364s，在初期追跡質點均勻分布，隨後追跡質點會逐漸匯集形成條痕，再過一段時間，條痕排列混亂不易分辨條痕。【原圖來源：Tsai 等(2005)】

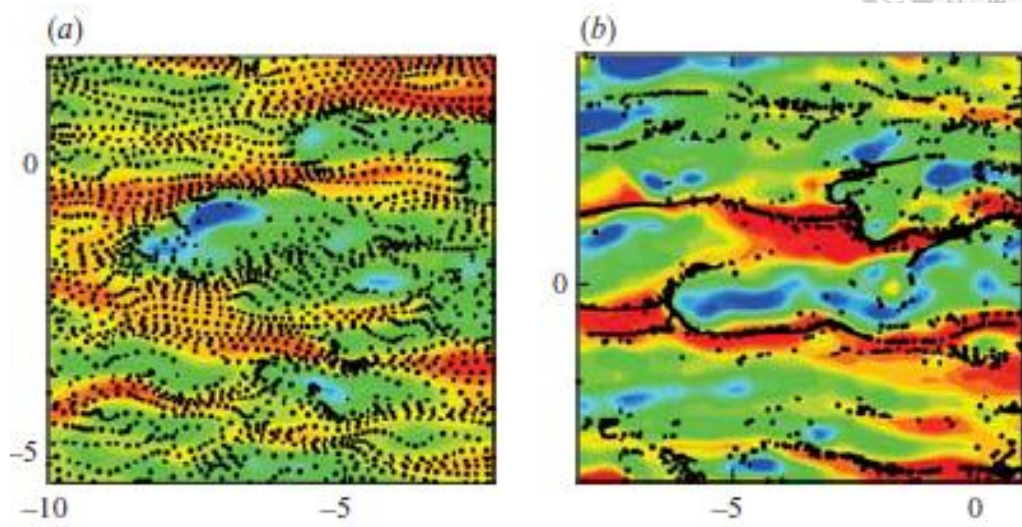
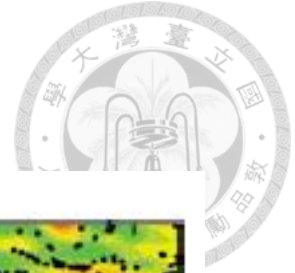


圖 1.4: 追跡質點與沿流向流速分佈之疊和圖。影像中顏色越紅代表其流速越高，顏色越藍則代表其流速越低，黑點為追跡質點，圖 (a) 為剛將追跡質點投入流場之影像，圖 (b) 為經過一段時間後，追跡質點聚集在影像的紅色區域，即為水面沿流向流速之高速區域。【原圖來源：Tsai 等(2005)】

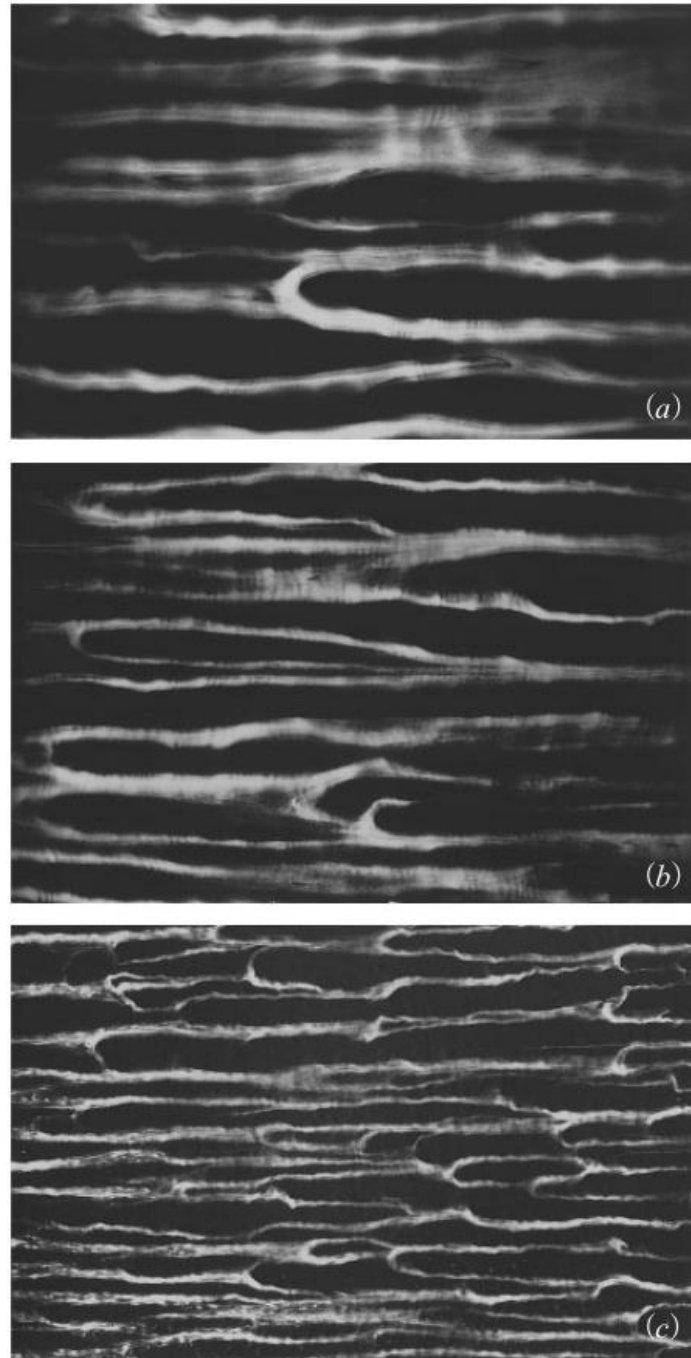


圖 1.5：不同風速驅動水面所形成的條痕結構。影像尺寸為 85×57 cm，試驗風向由左至右。圖(a)、圖(b)和圖(c)之風速分別為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s，觀察反光粒子匯集在高速區域形成條痕，隨著實驗風速越大，條痕結構越緊密。

【原圖來源：Melville 等(1998)】

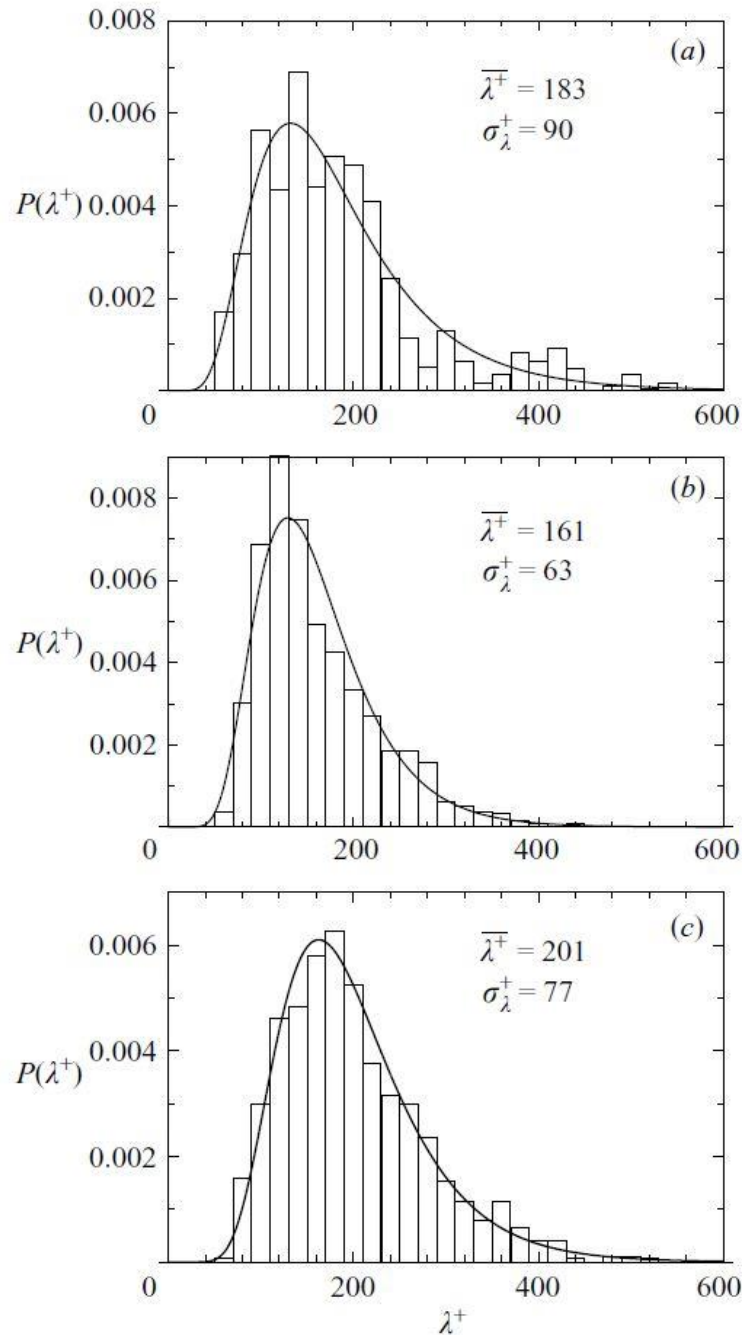


圖 1.6：不同風速驅動下，自由液面邊界層之條痕間距分佈和對數常態分佈曲線疊合，及無因次條痕間距之平均值和標準差。橫軸為無因次條痕間距；縱軸為機率密度。圖 (a)、圖 (b) 及圖 (c) 風速分別為 5 m/s、4 m/s 和 3 m/s。【原圖來源：Tsai 等(2005)】



1.3 研究動機及論文架構

一般觀念認為紊流流場是複雜、混亂且毫無規則的系統，於 1.1 和 1.2 節之文獻回顧，說明在紊流邊界層中，藉由將流場可視化，觀測到紊流流場具有組織性的條痕結構，並計算條痕間距及量化條痕結構，以利於比較不同實驗方式的結果，及探討流場行為及特性。

本研究參考前人對流場條痕結構的研究，運用影像處理技術分析 Tsai 等 (2005) 風剪驅動自由液面紊流邊界層的水面數值模擬資料，並建立自動辨識條痕步驟，以探討流場條痕結構特性，論文敘述安排如下：第二章說明研究資料的來源且進行檢視，於 2.1 節中介紹數值模擬資料的產生方式，於 2.2 節中說明流場流速分佈資料。

第三章首先回顧學者們所開發的辨識條痕方法，於 3.1 節說明 溫國暉(2004) 參照 Kline 等(1967)、Smith 等(1983) 的辨識條痕方法且自行編寫程式以進行自動辨識，再來介紹影像處理的方法，其目的為了增強影像並凸顯影像特性，及自動對於每筆資料進行影像切割，以利於後續辨識高速條痕及計算其間距，於 3.2 節說明利用大津演算法 (Otsu's method) 進行影像切割，於 3.3 節說明影像增強方法，於 3.3.1 說明伽瑪校正 (Gamma correction)，於 3.3.2 說明直方圖等化 (Histogram equalization)，於 3.3.3 節說明自適應直方圖等化 (Adaptive histogram equalization)，於 3.4 節說明自動辨識條痕步驟。

第四章說明如何統計條痕間距及探討條痕間距特性，於 4.1 節說明如何統計條痕間距，於 4.2 節探討條痕間距分佈特性，於 4.2.1 節說明本研究以理論分佈對條痕間距分佈進行最小平方擬合 (least squares fitting)，於 4.2.2 節說明利用卡方適合度檢定 (chi-square goodness-of-fit test) 判斷理論分佈與條痕間距分佈是否吻合，並於 4.3 節整理結果並加以討論。

第五章為結論。

第二章 數值模擬資料



本研究資料來源為 Tsai 等(2005) 之數值模擬資料，於 2.1 節說明數值模擬資料之產生，且於 2.2 節說明其流場流速數據資料。

2.1 數值模擬資料之產生

Tsai 等(2005) 之數值模擬資料是採用 Tsai (1998) 所發展的數值模式，並且引入 Melville 等(1998) 真實水槽實驗的物理參數進行數值模擬。此數值模式為直接數值模擬 (direct numerical simulation)，即在求解流場的過程中，未使用任何紊流模式來參數化尺度小於離散網格的流場運動，模擬流場為一自由液面流場，在不影響水面流場的深度有水平自由滑移邊界 (free-slip boundary)，並且在水面上設定固定的風剪力以驅動水體，形成風剪驅動水面紊流流場。水體在沿流向 (streamwise) 及跨流向 (spanwise) 上的邊界皆為週期條件，故此模式在水平方向採用偽頻譜法 (pseudo-spectral method) 近似流場方程式之微分項，而垂直方向採用有限差分法。因所考慮之流場為不可壓縮流，故求解非靜壓之 Poisson 方程式，以壓力修正滿足不可壓縮流之條件，時間積分方面則採用二階精確度低儲存量 (low-storage) 之 Runge-Kutta 法。

Melville 等(1998) 之實驗採用三種風速，分別為 3 m/s、4 m/s 與 5 m/s，此三風速所造成之接近水面流速、風速與均方根斜率隨時間之變化如圖 2.1 所示，因實驗風場從靜止開始運動，所驅動的水體流場亦為非穩態，在此非穩態的演化過程中，發現水面的反光粒子會逐漸往較高速的區域且平行於沿流方向聚集，在水面上形成高速條痕，並隨著時間的進行而越來越紊亂，條痕生成演化的時段(如圖 1.5 所示)分別以倒三角形標示於圖 2.1 中。為節省數值計算所需的時間，在 Tsai (2001) 的數值模擬實驗中，取水面高速條痕產生之前數秒的時間，當作數值模擬開始的時間點，在圖 2.1 以垂直虛線所示，並取該時間點水面的流速，作為

數值模擬初始水面的平均流速。而在之後的結果分析與討論中，根據風速的不同，數值模擬結果的時間原點對應到實驗進行的時間點也不同，例如在風速為 3 m/s 的實驗中，數值模擬時間 9 s 對應到實驗時間 59 s，而在風速為 5 m/s 的實驗中，數值模擬時間 9 s 對應到實驗時間 29 s，數值模擬初始時間對應之實驗進行時間以及數值模擬初始的水面平均流速整理如表 2.1 所示。

在數值模擬實驗中，為了減少計算量，將長度、時間及速度等物理量分別無因次化為特徵長度 L_s 、特徵時間 T_s 及特徵速度 U_s ，而特徵長度 $L_s = 2\sqrt{vt}$ ，其中 t 為表 2.1 中，數值模擬時間原點所對應之實驗進行時間點， v 為水體運動黏滯係數 (kinematic viscosity)，在數值模擬實驗中取 $v = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ ；特徵速度 U_s 取於表 2.1 中；特徵時間 T_s 則由特徵長度 L_s 及特徵速度 U_s 可得， $T_s = L_s/U_s$ ，並定義雷諾數 $Re = U_s L_s/v$ ，各個風速所對應之特徵長度 L_s 、特徵時間 T_s 、特徵速度 U_s 以及雷諾數整理如第 2.2 節之表 2.2 所示。



表 2.1：數值模擬初始時間對應之實驗進行時間以及初始的水面平均流速

實驗風速	數值模擬初始時間對應 之實驗進行時間	數值模擬初始的水面平 均流速
3 m/s	50 s	12.5 cm/s
4 m/s	30 s	15 cm/s
5 m/s	20 s	20 cm/s

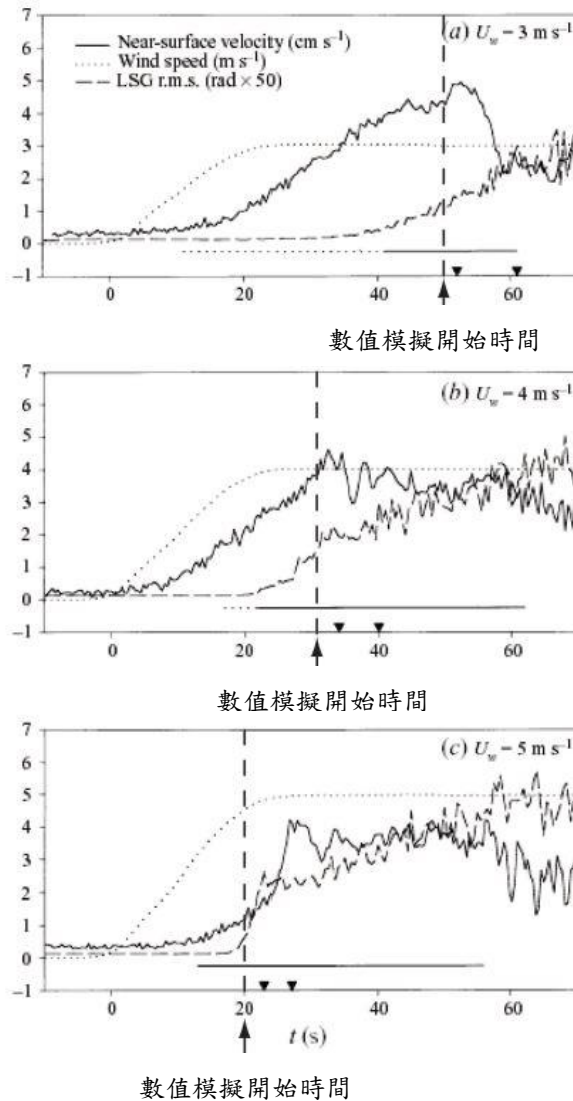


圖 2.1：Melville 等(1998) 的實驗接近水面流速、風速與均方根斜率隨時間之變化。因量測器材的限制，只能量測深度 2.7 mm 以下之流速，故圖中的接近水面之流速為深度 2.7 mm 之流速。圖 (a)、圖 (b) 及圖 (c) 之風速分別為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s。圖中實線為接近水面之流速，點線為風速，虛線為均方根斜率。底下兩個實心倒三角形所包含之時段為條痕演化過程，此演化過程如圖 1.5 所示，略可看出隨著風速越快，條痕演化的時間則越短，垂直虛線標示出數值模擬開始的時間。【原圖來源：Melville 等(1998)】



2.2 模擬流場流速資料

本節將說明 Tsai 等(2005) 之數值模擬資料的基本參數，數值模擬風剪驅動紊流場以三種風速驅動水面進行實驗，風速分別為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s，而數值模擬水面的水平方向(沿流向)為 128 個網格點，垂直方向(跨流向)亦為 128 個網格點，每個網格的速度值以灰階表示，速度值越高，其顏色越接近白色，速度值越低，其顏色越接近黑色，數值模擬資料相關參數整理於表 2.2。

而風剪驅動自由液面紊流場無法達到穩態，並非整個實驗的過程都適合分析和研究，需要選取實驗中適當的時段，模擬流場在經過一段時間後，會逐漸發展為足夠成熟且呈現穩定的狀態，此穩定時段的實驗資料則適合進行分析和研究。故從整個數值模擬水面的沿流向流速 u 的平均值 \bar{u} 與標準差 σ_u 來判斷數值模擬流場的發展狀態，各個風速驅動水面之沿流向流速平均值 \bar{u} 隨著時間之變化及沿流向流速標準差 σ_u 隨著時間之變化如圖 2.2 所示，從圖 2.2 中觀察到在實驗初期時，數值模擬水面的沿流向流速平均值 \bar{u} 與標準差 σ_u 皆呈現急劇地變化，實驗流場在經過一段時間發展後，會逐漸地趨於穩定，而高風速流場發展到穩定的時間會比低風速流場的還短。在風速為 5 m/s 的實驗中，發現當 $t = 5.4 \text{ s} \sim 8.1 \text{ s}$ 與 $t = 9.4 \text{ s} \sim 12.1 \text{ s}$ 這兩個時段的沿流向流速平均值 \bar{u} 與標準差 σ_u 隨時間之變化相對穩定，在風速為 4 m/s 的實驗中，發現當 $t = 10.9 \text{ s} \sim 15.6 \text{ s}$ 時段也呈現相對穩定的情況，而風速為 3 m/s 的實驗中，當 $t = 15.4 \text{ s} \sim 22.0 \text{ s}$ 時段亦可觀測到流場趨於穩定的狀態，其各風速所對應到的穩定時段整理於表 2.3。

各風速之穩定時段中的水面沿流向流速分佈影像皆發現在較高速區域具有一條條的結構，如圖 2.3 所示，本研究將選取上述這些時段的數值模擬資料進行分析及討論。

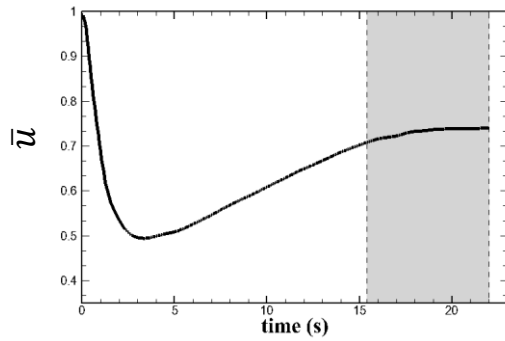
表 2.2：Tsai 數值模擬實驗參數表。

模擬風速	3 m/s	4 m/s	5 m/s
特徵長度 L_s (cm)	1.342	1.1	0.894
特徵時間 T_s (s)	0.11	0.073	0.045
特徵速度 U_s (cm/s)	12.15	15.0	20.0
雷諾數	1630	1650	1789
影像解析度 (px)	128×128	128×128	128×128
空間解析度 (cm/px)	0.4088	0.2648	0.1677
模擬水面邊寬 (cm)	52.33	33.89	21.46

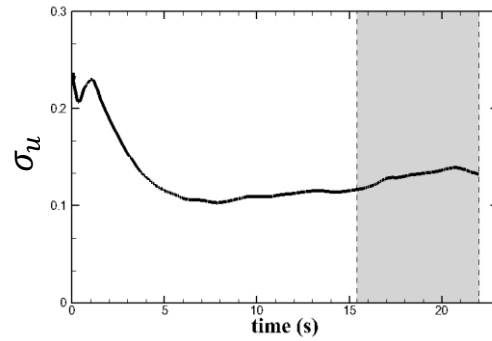
表 2.3：模擬風速所對應之穩定時段。

模擬風速	穩定時段
3 m/s	15.4 s ~ 22.0 s
4 m/s	10.9 s ~ 15.6 s
5 m/s	5.4 s ~ 8.1 s、9.4 s ~ 12.1 s

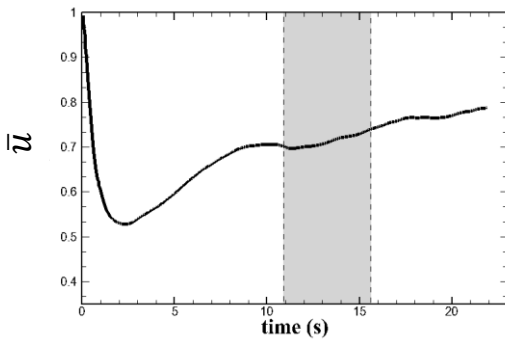
(a) Wind speed : 3 m/s



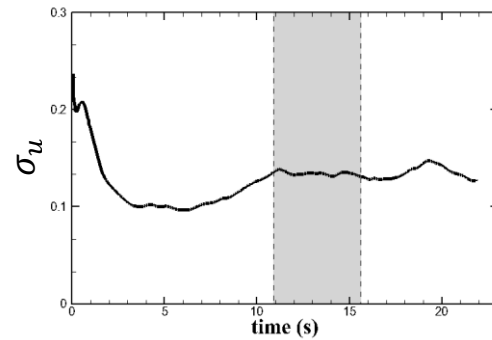
(b) Wind speed : 3 m/s



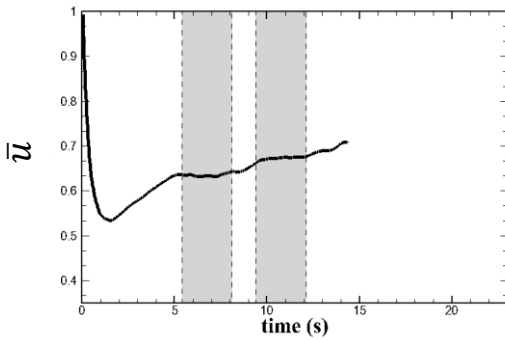
(c) Wind speed : 4 m/s



(d) Wind speed : 4 m/s



(e) Wind speed : 5 m/s



(f) Wind speed : 5 m/s

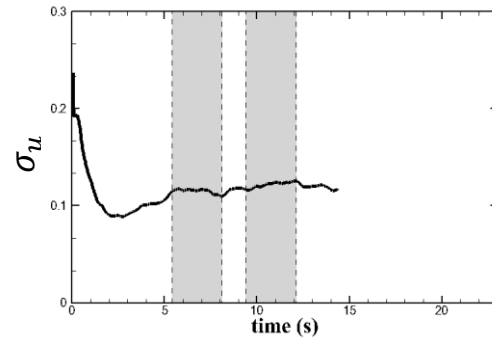
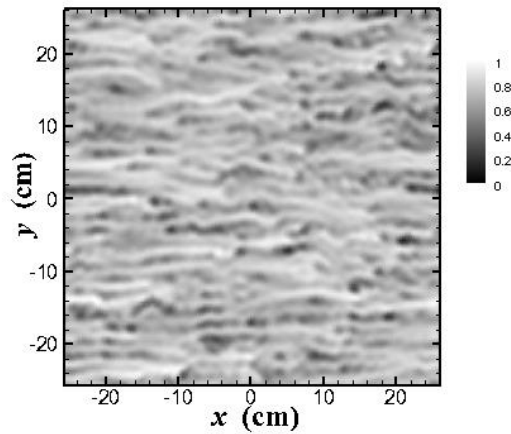
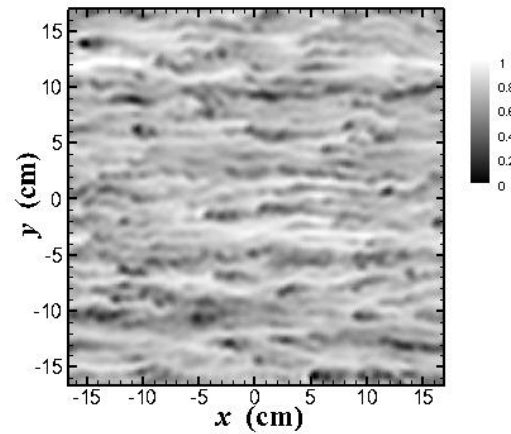


圖 2.2：水面之沿流向流速平均值 \bar{u} 和其標準差 σ_u 隨著時間之變化。圖 (a)、(c) 及 (e) 分別為風速為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s 流速平均值 \bar{u} 隨時間之變化，圖 (b)、(d) 及 (f) 分別為風速為 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s 流速標準差 σ_u 隨時間之變化。圖中的灰色區塊為平均值與標準差趨於穩定的時段。

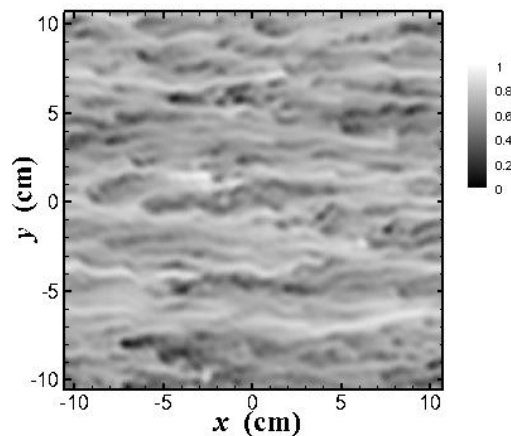
(a) Wind speed : 3 m/s, time : 15.4 s



(b) Wind speed : 4 m/s, time : 10.9 s



(c) Wind speed : 5 m/s, time : 5.4 s



(d) Wind speed : 5 m/s, time : 9.4 s

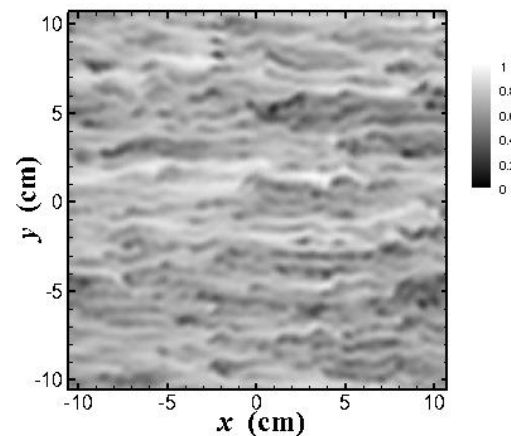


圖 2.3：各風速之穩定時段中的水面沿流向流速分佈影像。圖 (a) 為風速 3 m/s 之水面影像，影像邊長為 52.33 cm；圖 (b) 為風速 4 m/s 之水面影像，影像邊長為 33.89 cm；圖 (c) 及 (d) 為風速 5 m/s 之水面影像，影像邊長為 21.46 cm。每個網格之速度值越高，其顏色越接近白色，速度值越低，其顏色越接近黑色，各風速之穩定時段中的水面影像皆發現在較高速區域具有一條條的結構。

第三章 水面影像處理及自動辨識條痕結構

為了探討數值模擬資料中的水面條痕結構特性，須先辨識出水面影像中的高速條痕結構，並標記出其位置，進而統計條痕間距以及觀測其分佈特性。而對於無滑移邊界紊流邊界層或風剪驅動自由液面紊流邊界層之流場，學者們開發許多辨識條痕結構的方法。溫國暉(2004) 歸納 Kline 等(1967) 及 Smith 等(1983) 在無滑移邊界紊流邊界層流場中辨識流場結構的方法，並應用於數值模擬風剪驅動自由液面紊流邊界層之流場，進而根據 Smith 等(1983) 的辨識條痕準則，調整適合於其流場之辨識條痕準則，編寫程式以自動辨識條痕結構，且比較各種辨識方法其結果後，發現以沿流向流速在跨流向上相對最高速點所辨識結果最能代表流場之條痕結構。

本研究參考 溫國暉(2004) 之辨識條痕準則，並藉由影像處理技術以自動辨識水面條痕結構。首先回顧學者們所開發的辨識條痕結構方法，於 3.1 節說明 溫國暉(2004) 參照 Kline 等(1967)、Smith 等(1983) 的辨識條痕方法且自行編寫程式以進行自動辨識，於 3.2 節說明利用大津演算法進行影像切割，擷取出水面影像的高速區域，於 3.3 節說明三種影像增加方法，分別為伽瑪校正 (Gamma Correction)、直方圖等化 (Histogram Equalization) 及自適應直方圖等化 (Adaptive Histogram Equalization)，於 3.4 節說明自動辨識條痕步驟。

3.1 研究回顧：水面影像之條痕結構

溫國暉(2004) 引用 Kline 等(1967) 及 Smith 等(1983) 在無滑移邊界紊流邊界層流場中辨識流場結構的方法，應用於 Tsai (2001) 之風剪驅動自由液面紊流邊界層的水面數值模擬資料。

Kline 等(1967) 利用氫氣泡實驗技術觀測無滑移邊界紊流邊界層中流場結構，並以頻譜分析分析法推算條痕間距。而藉由下式對於某一實驗時間，計算氫氣泡

產生線上的沿流向流速 u 在跨流方向 z 上的自相關函數 R_{11} (autocorrelation function) :

$$R_{11}(z_0) = \frac{\int u'(z)u'(z+z_0)dz}{\int u'(z)^2 dz} \quad (3.1)$$

其中 $u'(z)$ 為沿流向流速 u 的瞬時擾動再跨流方向 z 上的分布函數，即 $u'(z) = u(z) - \bar{u}(z)$ ， $u(z)$ 為利用實驗水槽中固定深度，且平行於跨流方向 z 的氫氣泡產生線所量測而得， $\bar{u}(z)$ 為沿流向流速 u 在跨流方向 z 上的瞬時平均。將函數 R_{11} 利用下式進行的傅立葉級數轉換，以求得頻譜分析函數 $\hat{U}(l)$:

$$\hat{U}(l) = 4 \int_0^{\infty} R_{11} \cos\left(2\pi \frac{z_0}{l}\right) dz_0 \quad (3.2)$$

其中 l 為波長，即代表沿流向流速函數 $u(z)$ 在空間上的週期長度。圖 3.1 (a) 為六張頻譜分佈典型圖例，每張圖中曲線最高峰值所對應的週長，代表該流場瞬時流速分佈的最可能週期，即該時間條痕結構的最可能間距，由這六張例圖可發現，不同時間頻譜分佈曲線間的差異很大，無法顯現出流場在長時間中的變化，故以兩種方式處理，分別為計算一時段中所有頻譜分佈曲線峰值所對應的週期長度，依適當帶寬完成週長累計次數直方圖，累計次數最高的週期長度為該時段最可能的平均條痕間距，如圖 3.1 (b) 之左圖所示，以及將一段時間中所有頻譜分佈曲線疊加後平均，其平均曲線峰值所對應的週期長度，則代表該時段最可能的平均條痕間距，如圖 3.1 (b) 之右圖所示。

溫國暉(2004) 參照 Kline 等(1967) 之頻譜分析方法，對 Tsai (2001) 之數值模擬資料進行研究，發現單一截線之速度分佈跟取多個截線之平均流速分佈，其頻譜分佈曲線趨勢以及峰值位置非常接近，且都不受取樣個數所影響。實驗風速為 4 m/s 之頻譜分佈明顯看出有一強度特別高的代表週期，可以視其值為條痕間距，而實驗風速為 3 m/s 之頻譜分佈卻有許多強度相近的代表週期，如圖 3.2 所示。Kline 等(1967) 對無滑移邊界紊流邊界層進行頻譜分析之結果較為單純，如圖 3.1 (b) 之右圖所示，溫國暉(2004) 利用頻譜分析以推算風剪驅動自由液面

紊流邊界層中的高速條痕間距，其頻譜分佈函數卻相當紊亂，其原因可能為風剪驅動自由液面紊流場無法達到穩態，故對非穩態之流場進行頻譜分析，其結果為紊亂，或是因為模擬水面的計算寬度太短，在頻譜分佈函數中，沿流向流速在跨流向上的消長週期並無明顯的表示，亦或是因為風剪驅動自由液面紊流邊界層中高速條痕的生成機制，遠較於無滑移邊界紊流邊界層中低速條痕的生成機制複雜，使其無法利用沿流向流速分佈週期來推算條痕間距。

Smith 等(1983) 藉由氫氣泡技術將流場可視化，並制訂有系統的辨識準則，進而從流場影像中人工辨識慢速條痕以及統計其條痕間距。從拍攝的流場影像中，於氫氣泡線下游 $\Delta x^+ = 50$ 處作為計算截線，並根據以下三個準則辨識條痕：

1. 條痕長度須超過 $\Delta x^+ = 100$ 。
2. 條痕必須通過計算截線。
3. 條痕無最小間距限制，若非明顯重疊則各別計算。

條痕辨識之說明圖例如圖 3.3 所示，以人工方式辨識條痕，利用透明記錄板，在板上依相同間隔繪上與流場影像中計算截線等長的記錄直線並登記編號，再將流場影像中的計算截線與板上記錄直線疊合，並依照編號陸續疊合，且在記錄直線上以橫線標記出流場影像之計算截線上的條痕位置，為了避免辨識人員的個人主觀判斷，故請三位人員依據上述三個準則各別辨識影像資料，且核對並討論出一致的結果。

溫國暉(2004) 參照 Smith 等(1983) 之人工條痕辨識方法，對 Tsai (2001) 之數值模擬資料進行研究，並對應不同特性的影像資料進行調整辨識條痕準則，例如以追跡質點觀測流場水面的運動狀態，發現追跡質點聚集成的高速條痕結構之長度較長，故將條痕長度限制調整至須超過 $\Delta x^+ = 150$ ，以及追跡質點於通過計算截線時，會有與計算截線多點相交的情況，故多增加一條準則為當有多點相交的情況發生時，則取其中點為代表位置。但以人工辨識條痕結構，需要耗費大量的人力跟時間，且因為人為主觀的意識，使其影響結果之客觀性，故發展電腦程

式執行自動辨識並取代人工辨識，藉由「點位」資料及辨識準則進行條痕辨識。而溫國暉(2004)利用三種點位進行條痕辨識，分別為追跡質點點位、沿流向流速 u 高速區塊點位及沿流向流速 u 相對高速點位。追跡質點分布資料即為點位座標資料，根據以下步驟和準則辨識條痕：

1. 讀取整個水面所有的點位座標，以供判別各點位所屬之群組。
2. 兩點位之間距若小於等於 $\sqrt{2}$ 倍計算網格邊寬，則該兩點位為同群組。
3. 將全部點位分群後，計算每群組沿流向 x 上之分佈長度 Δx ；若其分佈長度大於等於 150 個無因次長度單位 ($\Delta x^+ \geq 150$)，該群組則為一沿流向充分延伸之條痕。
4. 條痕通過計算截線或在截線上有點位分佈，根據以下兩準則判斷位置：
 - (a) 若條痕通過計算截線，且在計算截線上沒有點位分佈，則各取上下游兩側最接近計算截線之點位為代表點位；若兩側最接近計算截線之點位多於兩點，則取最遠兩點之中點為代表點位，並取上下游兩側代表點位連線，其連線與計算截線的交點即為條痕代表位置。
 - (b) 若條痕在計算截線上僅有一點位分佈，則取該點位為條痕代表位置；若條痕在截線上有兩點位以上，則取最遠兩點之中點為代表位置。
5. 記錄及輸出計算截線上條痕代表位置，並計算條痕間距。

而利用沿流向流速 u 高速區塊點位自動辨識條痕，首先須將影像中高速區塊轉換成點位座標，並根據追跡質點點位辨識的步驟及準則，再對影像進行條痕的自動辨識。影像中高速區定義為沿流向流速平均值 \bar{u} 加上一倍標準差 σ_u ，其結果與人工辨識之結果相當接近，但若降低高速區之標準，影像中會有較多網格點被視為高速條痕點位，條痕連結趨於塊狀，而條痕數量降低；若提高高速區之標準，影像中會有較少網格點被視為高速條痕點位，條痕連結不會趨於塊狀，卻會變得稀疏，而條痕數量降低。雖然沿流向流速 u 高速區塊點位分佈單純，適合進行條

痕辨識，但因高速區之標準不同，而對於其結果會有影響，故此辨識方法的問題為難以客觀地定義高速區。

溫國暉(2004) 觀察到追跡質點會往流場沿流向流速 u 相對較快的區域移動，進而聚集成高速條痕，故透過標記出沿流向流速 u 在跨流向的相對高速點位以辨識高速條痕，以模擬風速 5 m/s 為例，將影像中沿流向流速 u 在跨流向的相對高速點位以黑點標示，如圖 3.4 (a) 所示，而利用不同顏色標示出自動辨識之條痕，如圖 3.4 (b) 所示，發現兩者互相吻合且所展現出的條痕結構十分清楚。

頻譜分析法可能因為受限於模擬水面之計算寬度、風剪趨動自由液面紊流邊界層無法達到穩態以及其流場之條痕的生成機制較複雜，此三個原因使頻譜分析方難以推算條痕間距；人工辨識條痕容易受到人為主觀意識的影響，且需要大量的人力及時間；自動辨識條痕能夠克服人工辨識之缺點，但無法客觀地定義高速區之標準以及判定點位群組之範圍，為了能夠去除定義高速區時人為主觀意識的影響利用相對高速點位進行自動辨識。本研究將運用影像處理技術進行自動條痕辨識並與學者們比較。

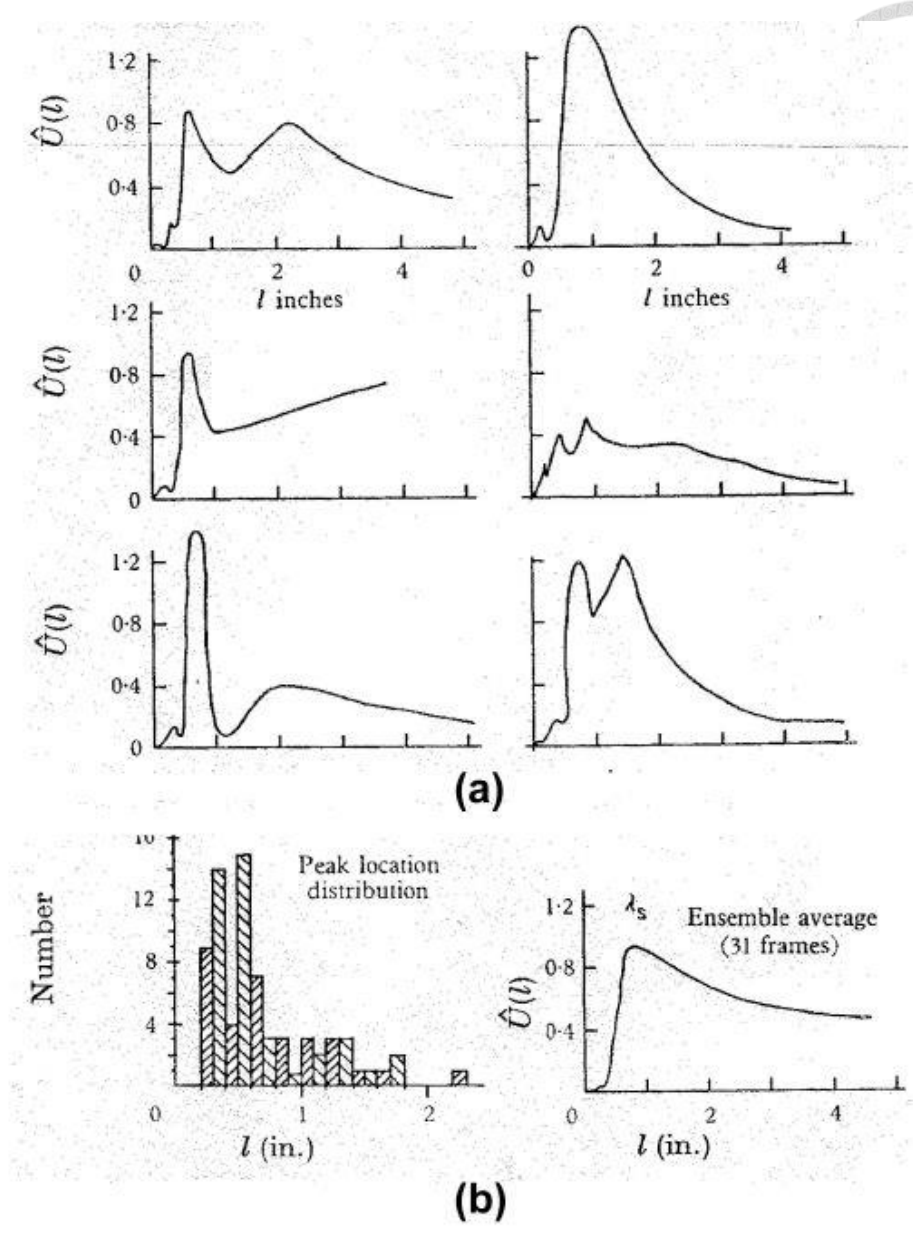


圖 3.1：沿流向流速在跨流向上瞬時及頻均頻譜分佈圖例。圖 (a) 為六張沿流向流速在跨流向上瞬時頻譜分佈圖例，每張圖中曲線最大值對應之週長為最有可能的條痕間距；圖 (b) 之左圖為一時段中所有瞬時頻譜分佈圖中曲線最大值對應之週長及累計次數直方圖；圖 (b) 之右圖為所有瞬時頻譜的平均分佈，其最大值所對應之週長則代表該段時間內最有可能的平均條痕間距。【原圖來源：Kline 等 (1967)】

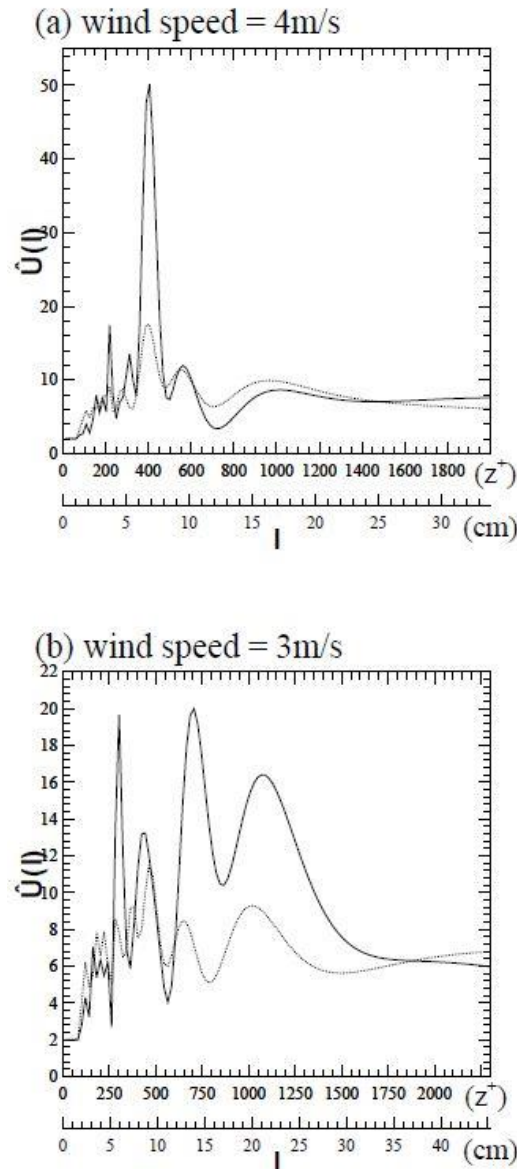


圖 3.2：模擬風速 4 m/s 及 3 m/s 之沿流向流速頻譜分佈圖。圖 (a) 為模擬風速 4 m/s 之沿流向流速頻譜分佈圖，取樣時間為 10.9 ~ 15.6 s，其頻譜分佈明顯看出有一強度特別高的代表週期，可視其值為條痕間距；圖 (b) 為模擬風速 3 m/s 之沿流向流速頻譜分佈圖，取樣時間為 15.4 ~ 22.0 s，其頻譜分佈卻有許多強度相近的代表週期。兩者皆平均取樣 60 個時間點做樣本平均，實線為整個水面計算截線上的平均流速之頻譜分佈函數，虛線為單一計算截線上的流速之頻譜分佈函數。風速 4 m/s 的頻譜分佈較單純，風速 3 m/s 的頻譜分佈較為複雜。【原圖來源：溫國暉(2004)】

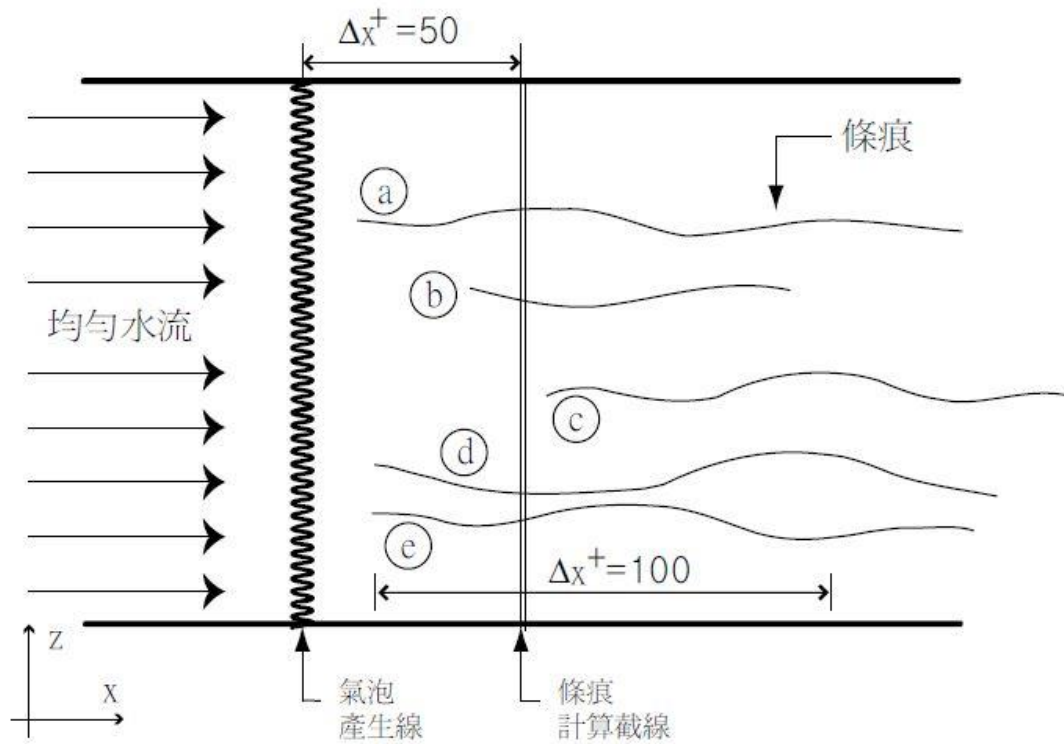


圖 3.3：條痕辨識示意圖。條痕 (a)：條痕通過計算截線且其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，符合準則；條痕 (b)：條痕長度未超過 $\Delta x^+ = 100$ ，不符合準則；條痕 (c)：條痕長度超過 $\Delta x^+ = 100$ 但未通過計算截線，不符合準則；條痕 (d) 與條痕 (e)：兩條條痕通過計算截線且其長度超過 $\Delta x^+ = 100$ ，雖然彼此十分接近，但條痕間最小間距並無限制，故皆符合準則。【原圖來源：溫國暉(2004)】

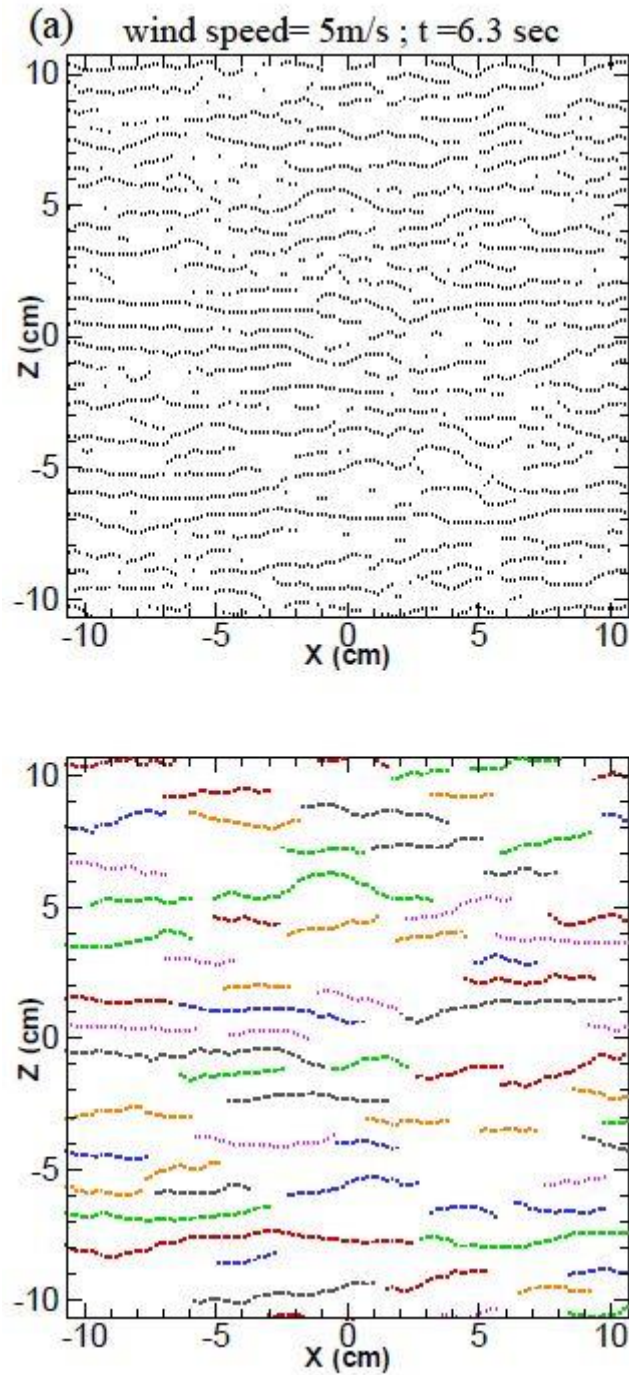


圖 3.4：模擬風速 5 m/s，以沿流向流速 u 相對最高速點為進行自動辨識條痕之點為示意圖。風向由左至右，取樣時間為 6.3 s。圖 (a) 為該時刻水面上所有相對高速點為分佈情況；圖 (b) 為程式自動辨識出的條痕，以不同顏色表示不同條痕。

【原圖來源：溫國暉(2004)】



3.2 利用大津演算法進行影像切割

根據 Tsai 等(2005) 利用追跡質點觀察風剪驅動自由液面紊流場，發現追跡質點會逐漸往流場水面中較高速區域聚集，進而形成高速條痕結構。為了擷取出水面影像中較高速之區域，本研究以門檻值法進行影像切割，將流場水面影像轉換為二值化影像，若流場水面影像中網格點之沿流向流速值超過某一門檻值 t ，則將該點設為強度極大值，若該點之沿流向流速值沒有超過某一門檻值 t ，則將該點設為強度極小值，進而使流場水面影像轉換為二值化影像，輸入影像為 $f(x,y)$ ，輸出影像為 $g(x,y)$ ，門檻值為 t ，則二值化影像如下表示：

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x,y) > t \\ 0, & \text{if } f(x,y) \leq t \end{cases} \quad (3.3)$$

本研究的各模擬風速之穩定時段皆有 120 張水面影像，由於影像數目龐大且為了避免人為主觀意識影響門檻值之選取，採用 Otsu (1979) 提出的大津演算法以自動化計算每張影像之最佳門檻值。大津演算法為一種統計式的門檻值演算法，以一個灰階影像為例，假設影像尺寸為 $M \times N$ ，影像灰階值範圍為 $[0, 1, \dots, L - 1]$ ，影像灰階值 i 出現之次數為 n_i ，其影像灰階值 i 對應之機率為 $P(i)$ ，如下式表示：

$$P(i) = \frac{n_i}{M \times N}, i = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (3.4)$$

整張影像之平均灰階值 (μ_T) 如下式表示：

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} iP(i) \quad (3.5)$$

藉由門檻值 t 將影像灰階值區分為兩個群組，分別是背景群 C_0 及目標群 C_1 ，而水面影像之高速區域即為目標群 C_1 ，其餘則歸類於背景群 C_0 ，且背景群 C_0 之影像灰階值範圍為 $[0, 1, \dots, t]$ ，而目標群 C_1 之影像灰階值範圍為 $[t + 1, \dots, L - 1]$ ，其這兩群之機率如下表示：

$$P_0 = \sum_{i=0}^t P(i) \quad (3.6)$$

$$P_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} P(i) \quad (3.7)$$



背景群機率 P_0 與目標群機率 P_1 之關係為：

$$P_0 + P_1 = 1 \quad (3.8)$$

背景群及目標群之平均值如下表示：

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^t \frac{iP(i)}{P_0} \quad (3.9)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{iP(i)}{P_1} \quad (3.10)$$

藉由計算背景群 C_0 及目標群 C_1 之間的群間變異數 σ_B^2 (between-class variance)，以作為自動挑選最佳門檻值之判斷準則，其兩群之間的群間變異數 σ_B^2 定義如下表示：

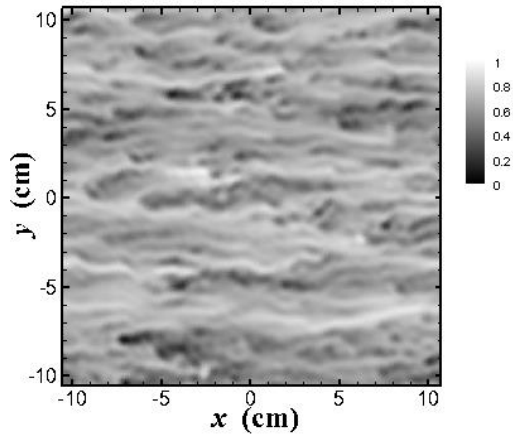
$$\sigma_B^2 = P_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + P_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (3.11)$$

此方法將會計算由各個門檻值 ($t = 0, 1, \dots, L - 2$) 所區分出的背景群及目標群之群間變異數 σ_B^2 ，當群間變異數 σ_B^2 為最大值時，該門檻值 t 即為最佳門檻值 t^* 。

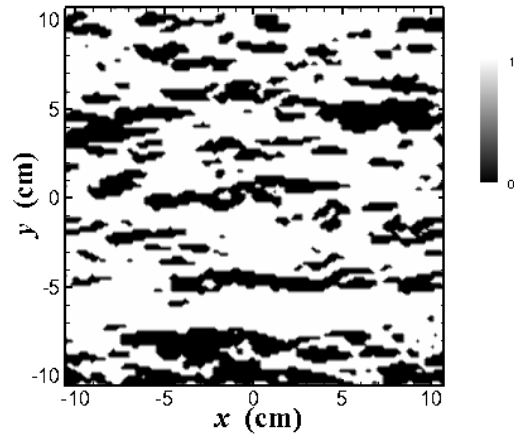
本研究利用大津演算法對流場之沿流向流速分佈影像進行影像切割，以模擬速度 5 m/s 且時間為 $t = 5.4$ s 之影像為例，圖 3.5 (a) 及 (b) 分別為流場水面影像及進行影像切割後的二值化影像，二值化影像中超過門檻值的部分為目標群，代表沿流向流速較高速的網格點，其顏色為白色，沒有超過門檻值的部分為背景群，代表較低速的網格點，其顏色為黑色，圖 3.5 (c) 為流場水面影像直方圖，橫軸為影像灰階值，縱軸為機率，大津演算法所自動選取的最佳門檻值為 $t^* = 156$ ，以

黑粗直線表示其位置。而風剪驅動自由液面紊流場之條痕產生於流場中高速區域，故觀察二值化影像中白色的部分，而從二值化影像中無法觀察到很明顯的條痕結構，如圖 3.5 (b) 所示，雖然從流場水面影像中觀察到條痕結構與周遭網格點的沿流向流速有明顯的差異，但影像切割後都將其歸類到目標群，原因可能為上述兩者沿流向流速相差不大且相對於整張影像皆是較高速的區域，故需要先對流場影水面像進行影像增強，提高條痕結構與周遭網格點之對比度，以利於辨識流場水面影像中的條痕結構。

(a)



(b)



(c)

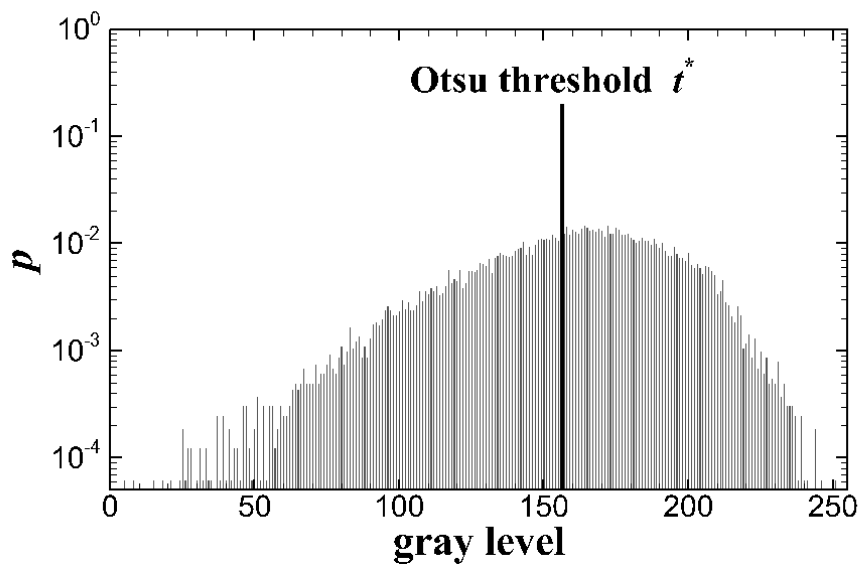


圖 3.5：圖 (a) 為模擬風速 5 m/s 且時間 $t = 5.4$ s 之流場水面影像，圖 (b) 為藉由大津演算法進行影像切割後的二值化影像，二值化影像中白色區域為影像中之高速區域，黑色區域為影像中之低速區域，圖 (c) 為流場水面影像直方圖，橫軸為影像灰階值，縱軸為機率，利用大津演算法所自動選取之門檻值為 $t^* = 156$ ，以黑粗直線表示其位置。



3.3 影像增強

為了準確地擷取出流場水面影像中高速條痕結構，藉由影像增強方法以提高條痕結構與周遭網格點的對比度。影像增強的方法分為兩類，分別為空間域方法及頻率域方法。空間域方法為直接處理影像中的像素；頻率域方法為藉由傅立葉轉換（Fourier transform）將輸入影像轉換至頻率域，然後直接在頻率域上處理。

本研究以空間域的影像處理方法為主，其中空間域主要分為全域性及區域性影像增強方法，全域性影像增強方法為針對整張影像做增強處理，區域性影像增強方法為考慮每一個像素及其周圍區域的相關特性進行增強處理。首先說明全域性影像增強方法，於 3.3.1 節介紹伽瑪校正，於 3.3.2 節介紹直方圖等化，再來說明區域性影像增強方法，於 3.3.2 節介紹自適應直方圖等化，並利用上述之方法執行影像增強處理且進行影像切割。

3.3.1 伽瑪校正（Gamma Correction）

伽瑪校正為一種全域性影像增強方法，將輸入影像 $f(x, y)$ 藉由乘冪律轉換（Power-Law Transformation）轉換成輸出影像 $g(x, y)$ ，調整指數 γ 以增強或減少影像整體亮度，則乘冪律轉換則如下表示：

$$g = cf^\gamma \quad (3.11)$$

其中 c 為常數，且一般情況時 $c = 1$ ，乘冪律轉換曲線如圖 3.6 所示。若 $\gamma < 1$ ，輸入強度值中較低值之狹窄範圍，經過乘冪律轉換後，於輸出強度值中轉換至較寬範圍，對於較高的輸入強度值則於輸出強度值中轉換成較窄範圍，且影像直方圖分佈會向右移動，故可提升影像亮度；若 $\gamma = 1$ 則輸出影像 $g(x, y)$ 等於輸入影像 $f(x, y)$ ；若 $\gamma > 1$ 則會有相反的結果，影像直方圖分佈會向左移動，降低影像亮度，如圖 3.7 所示，其橫軸為強度值，縱軸為機率密度，以模擬風速 5 m/s

之沿流向流速分佈影像為例，利用乘冪律轉換能夠調整影像亮度以利於觀察影像特性，若 $\gamma < 1$ 則影像變亮，增強低速區域之強度值，若 $\gamma > 1$ 則影像變暗，增強高速區域之強度值，影像中的高速區域變得更明顯，如圖 3.8 所示。

本研究為觀察流場水面影像中高速條痕結構，即為流場水面影像中白色之區域，故將流場水面影像變暗以凸顯高速區域，再進行二值化處理，當 $\gamma > 1$ 時且隨著 γ 的提高，流場水面影像的亮度也隨之降低，且高速區域的分佈也較容易區分，但伽瑪校正為增強流場水面影像中較大的強度值，讓其強度變得更強，若條痕結構與周遭網格點相差不大，則在其細節的部分依舊無法清楚地辨識，如圖 3.9 所示。

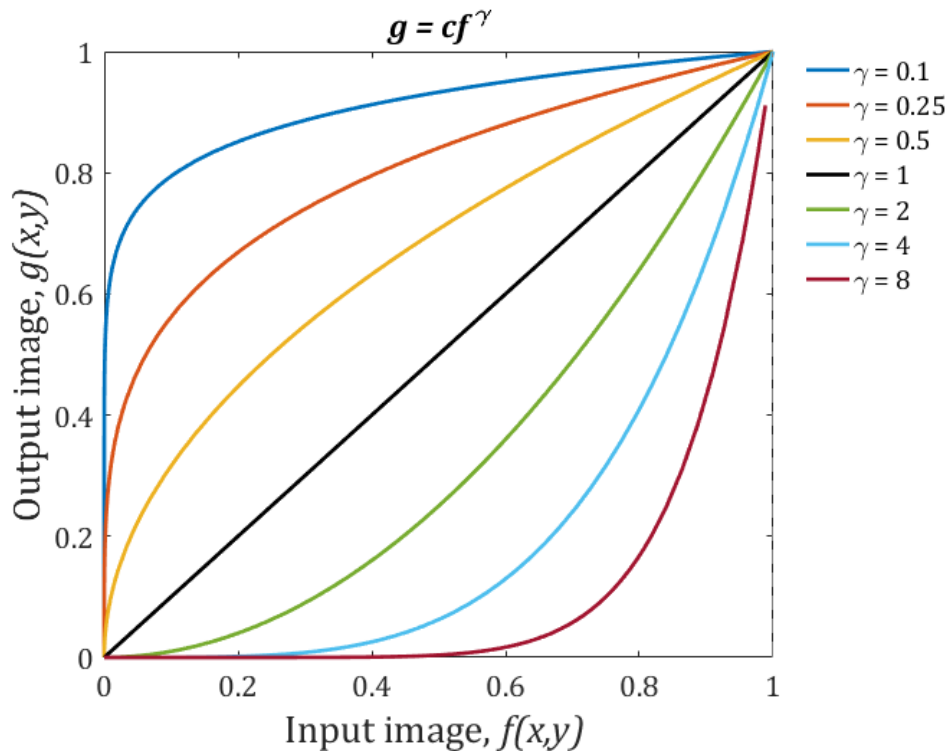
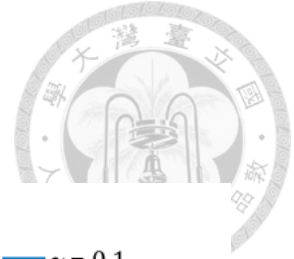
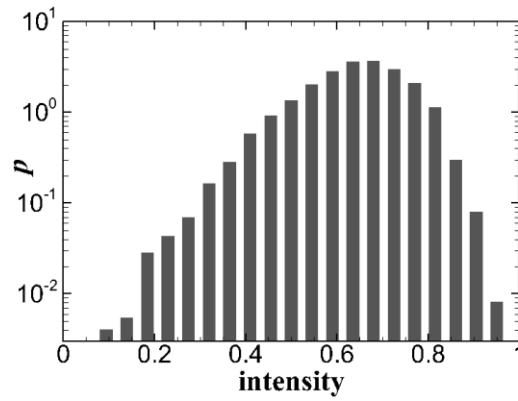


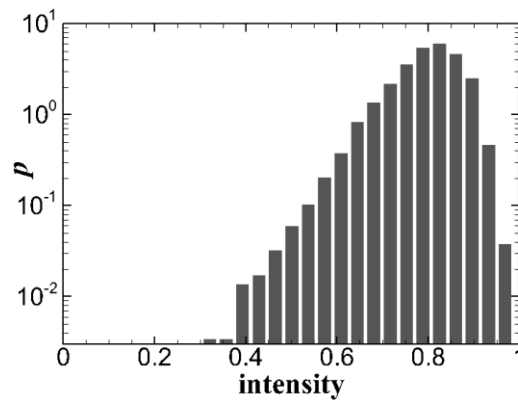
圖 3.6：乘幂律轉換曲線。若 $\gamma = 1$ 則輸出影像 $g(x,y)$ 等於輸入影像 $f(x,y)$ ，若 $\gamma < 1$ ，較低的輸入強度值經過乘幂律轉換後，於輸出強度值中轉換至較寬範圍，對於較高的輸入強度值則於輸出灰階值中轉換成較窄範圍，此增強較低之強度值；若 $\gamma > 1$ 則會有相反的結果，增強較高之強度值。



(a) $\gamma = 1$



(b) $\gamma = 0.5$



(c) $\gamma = 2$

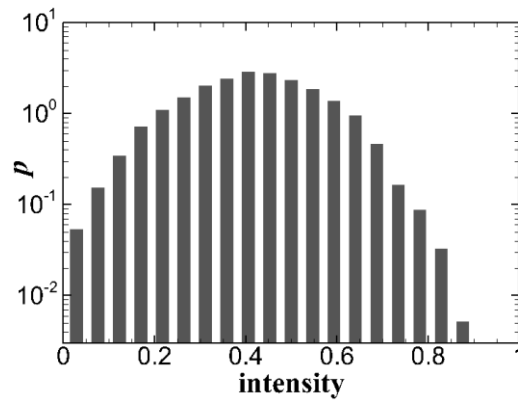


圖 3.7：流場水面影像經由不同指數 γ 的伽瑪校正轉換的影像直方圖。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，橫軸為強度值，縱軸為機率密度。圖 (a) 為經由 $\gamma = 1$ 之伽瑪校正轉換的直方圖分佈，圖 (b) 為經由 $\gamma = 0.5$ 之伽瑪校正轉換的直方圖分佈，且直方圖分佈會向右移動，增加影像亮度，圖 (c) 為經由 $\gamma = 2$ 之伽瑪校正轉換的直方圖分佈，且直方圖分佈會向左移動，降低影像亮度。

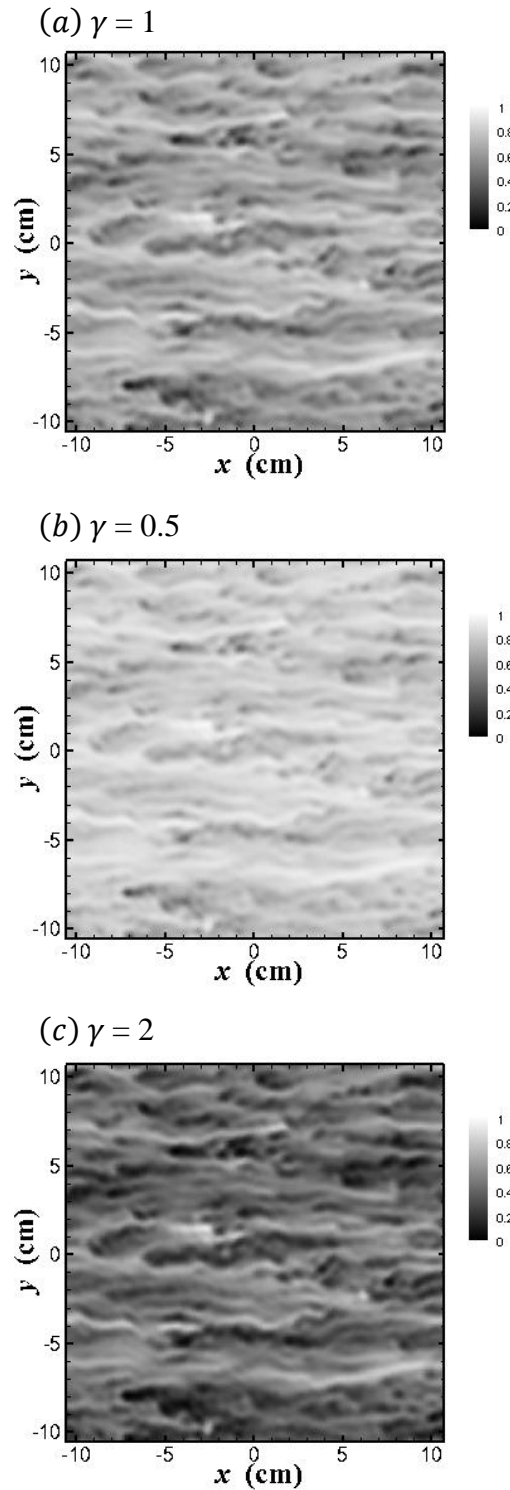


圖 3.8: 流場水面影像經由不同指數 γ 的伽瑪校正轉換的影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 (a) 為 $\gamma = 1$ 之伽瑪校正轉換的影像，圖 (b) 為 $\gamma = 0.5$ 之伽瑪校正轉換的影像，圖 (c) 為 $\gamma = 2$ 之伽瑪校正轉換的影像。

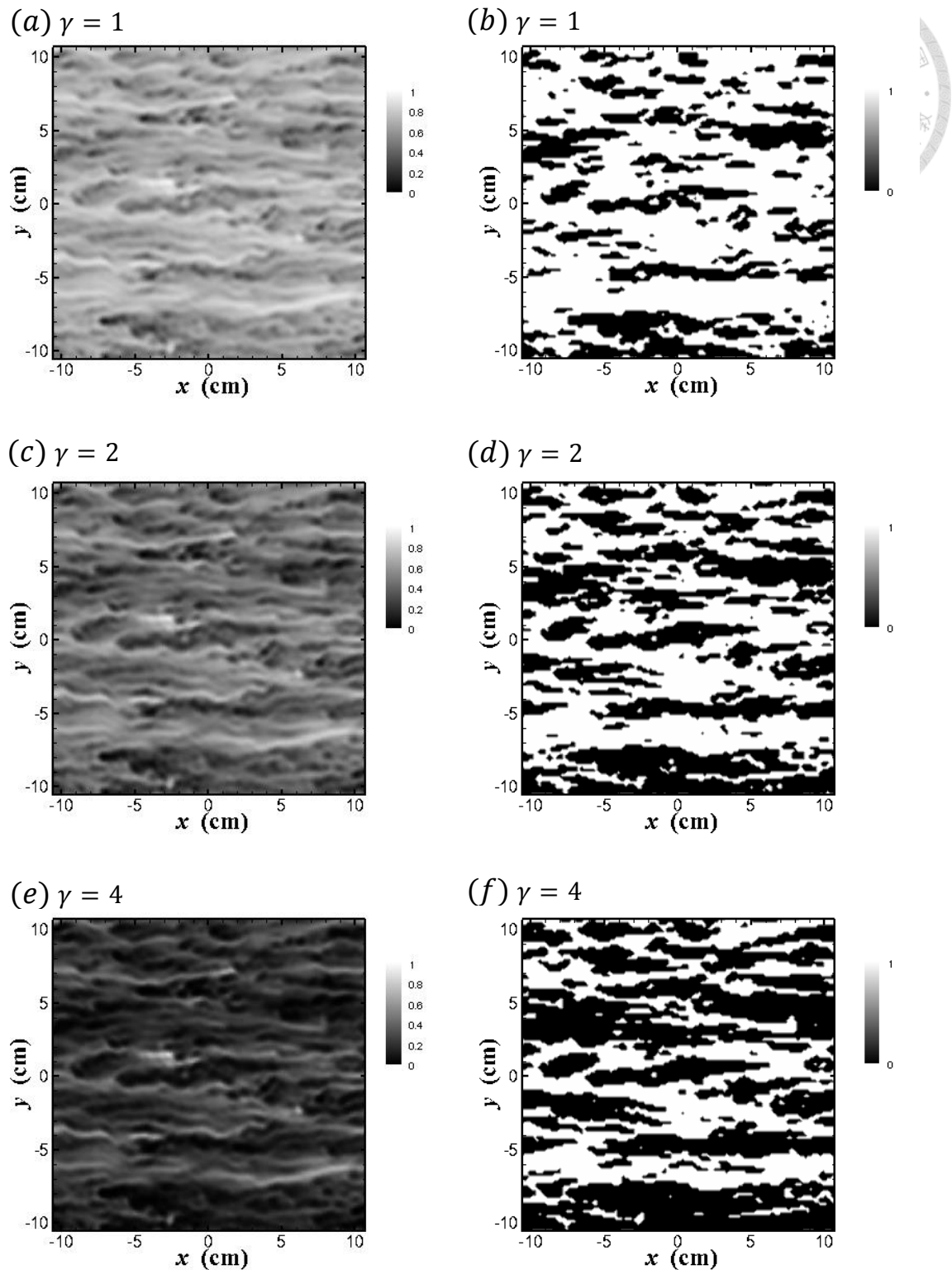


圖 3.9：流場水面影像經由不同指數 γ 的伽瑪校正轉換的影像及影像切割後的二值化影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 (a) 及圖 (b) 為 $\gamma = 1$ ，圖 (c) 及圖 (d) 為 $\gamma = 2$ ，圖 (e) 及圖 (f) 為 $\gamma = 4$ 。



3.3.2 直方圖等化 (Histogram Equalization, HE)

直方圖等化 (HE) 為增強影像對比度的方法，藉由統計整張影像之直方圖分佈，並利用累積密度函數 (cumulative distribution function, CDF) 做為轉換函數調整直方圖，將輸入影像為 $f(x, y)$ 轉換為輸出影像為 $g(x, y)$ ，假設影像尺寸為 $M \times N$ ，影像灰階值範圍為 $[0, 1, \dots, L - 1]$ ，影像灰階值 i 出現之次數為 n_i ，其影像灰階值 i 對應之機率為 $P(i)$ ，如下式表示：

$$P(i) = \frac{n_i}{M \times N}, i = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (3.3)$$

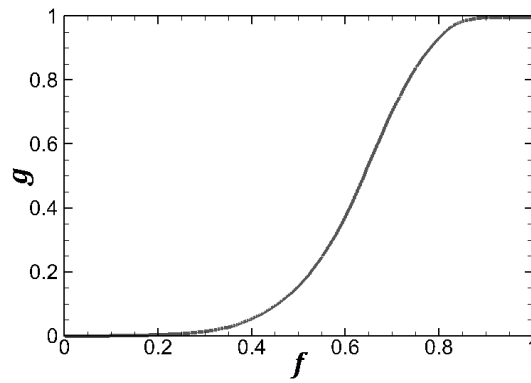
其轉換函數如下所示：

$$g_k = T[f_k] = \sum_{i=0}^k P(i), k = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (3.11)$$

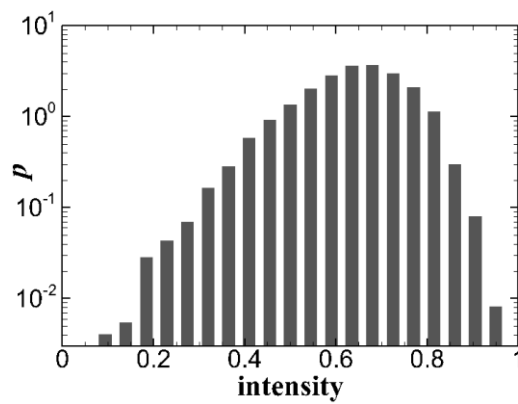
以流場水面影像為例，輸入與輸出之轉換函數如圖 3.10 (a) 所示，將灰階影像轉換至範圍 $[0, 1]$ ，由輸入影像之直方圖分佈發現峰值集中在 0.7，如圖 3.10 (b) 所示，經過直方圖等化處理後能明顯看出，輸出影像之直方圖分佈中在亮部及暗部的對比度有明顯提升，如圖 3.10 (c) 所示。輸出影像的對比度較輸入影像提高許多，但再利用大津演算法二值化影像後，依舊無法清楚地辨識全部條痕結構，如圖 3.11 所示，影像中某些較弱的條痕結構與周遭網格點的強度值相差不大，雖然直方圖等化有效地提升整張影像的對比度，但在部分區域其增強效果不足，故利用區域性影像增強方法，提升影像細節的對比度。



(a) 輸入影像與輸出影像之轉換函數



(b) 輸入影像之直方圖分佈



(c) 輸出影像之直方圖分佈

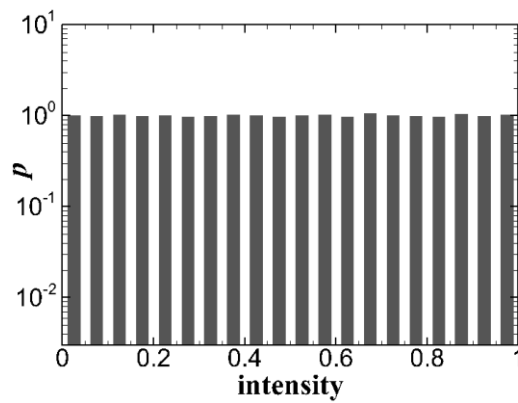


圖 3.10：圖 (a) 流場水面影像與經由直方圖等化處理影像的轉換函數。圖 (b) 流場水面影像之直方圖分佈，圖 (c) 經過直方圖等化處理影像之直方圖分佈，直方圖分佈中在亮部及暗部的對比度有明顯提升。

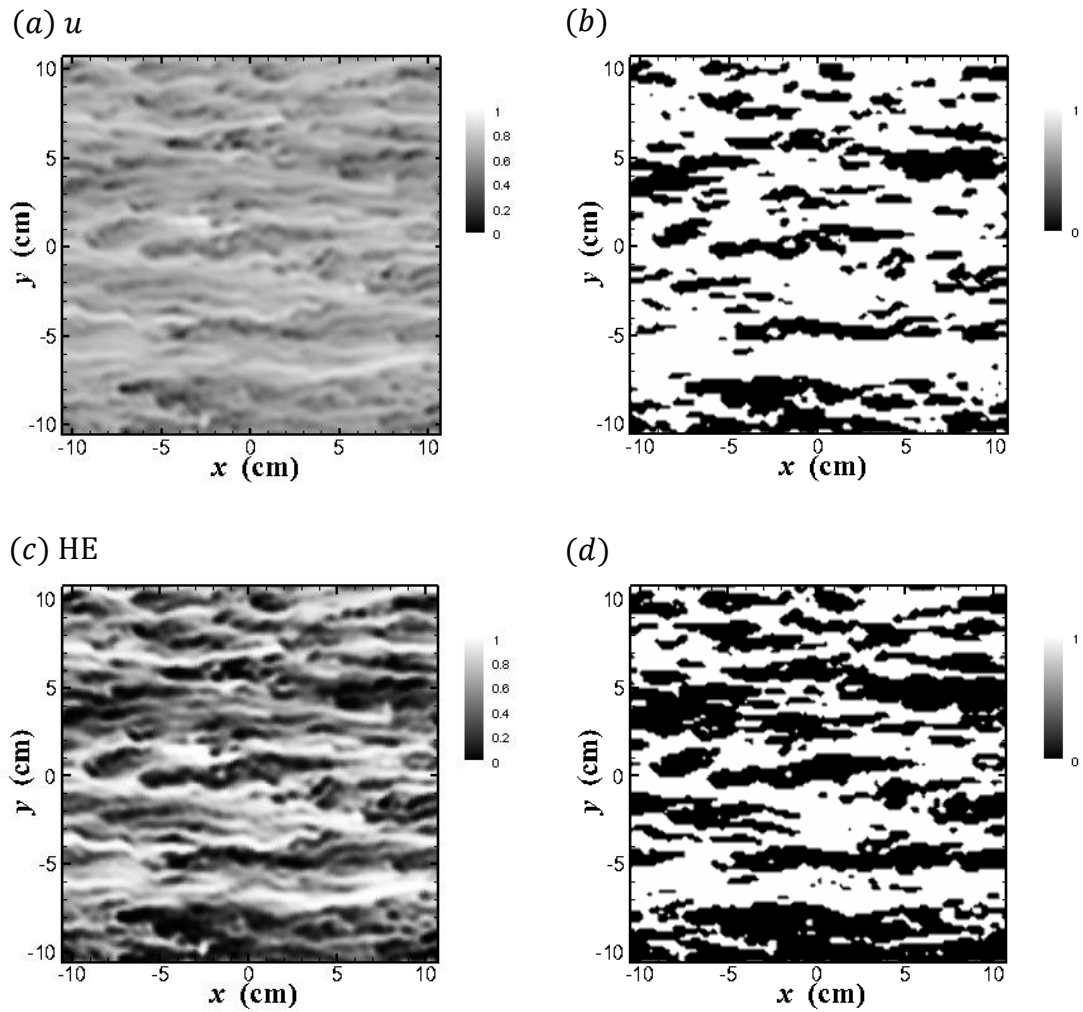
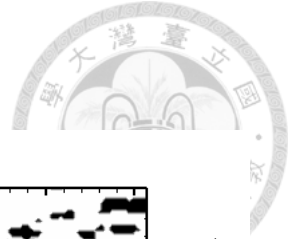


圖 3.11：流場水面影像和經過直方圖等化影像，以及影像切割之二值化影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 (a) 及圖 (b) 為流場水面影像及影像切割之二值化影像，圖 (c) 及圖 (d) 為經過直方圖等化影像及影像切割之二值化影像。經由直方圖等化處理後，影像整體對比度有效提升，而二值化影像中細部條痕仍難以辨識。

3.3.3 自適應直方圖等化 (Adaptive Histogram Equalization, AHE)

自適應直方圖等化 (AHE) 是針對影像中的像素點，以其為中心與周邊組成矩形範圍，並於範圍內進行直方圖等化，而矩形中心的像素值為經由直方圖等化後的值，且矩形範圍滑移過整張影像對每個像素點都進行增強處理，如圖 3.12 所示。

此方法能更增強影像細節的對比度，但相對計算量也較高，而根據所選取的矩形範圍大小有不同的效果，矩形範圍取的越小，其增強效果越強，而矩形範圍越大，每一點的計算量也會隨之增加。若選取矩形範圍遠小於條痕間距，則可能在矩形範圍內完全沒有條痕結構，從模擬風速 5 m/s 的流場影像中以人為主觀判斷條痕間距約為 1 公分，即約為影像中 7 個像素點，在模擬風速 3 m/s 及 4 m/s 所人為判斷的間距亦約為 7 個像素點，故本研究以矩形範圍為 7×7 個像素點及 11×11 個像素點進行自適應直方圖等化處理，矩形範圍越小，則影像增強的效果越強，如圖 3.13 所示，其處理後影像之直方圖分佈如圖 3.14 所示。利用自適應直方圖等化方法進行增強後，影像中某些條痕與條痕之間的區域也會被增強而影響高速區域的擷取，藉由伽瑪校正進行調整以凸顯影像中較強的像素點，隨著伽瑪的指數越大，影像亮度越低，高速區域越明顯，如圖 3.15 及圖 3.18 所示，利用大津演算法二值化影像，發現能更精確地辨識高速區域，而當指數為 6 時，其二值化影像中之高速區域呈現斷斷續續的現象，如圖 3.16 及圖 3.19 所示，其處理後影像之直方圖分佈如圖 3.17 及圖 3.20 所示，故本研究以指數為 2 及 4 進行伽瑪校正處理。

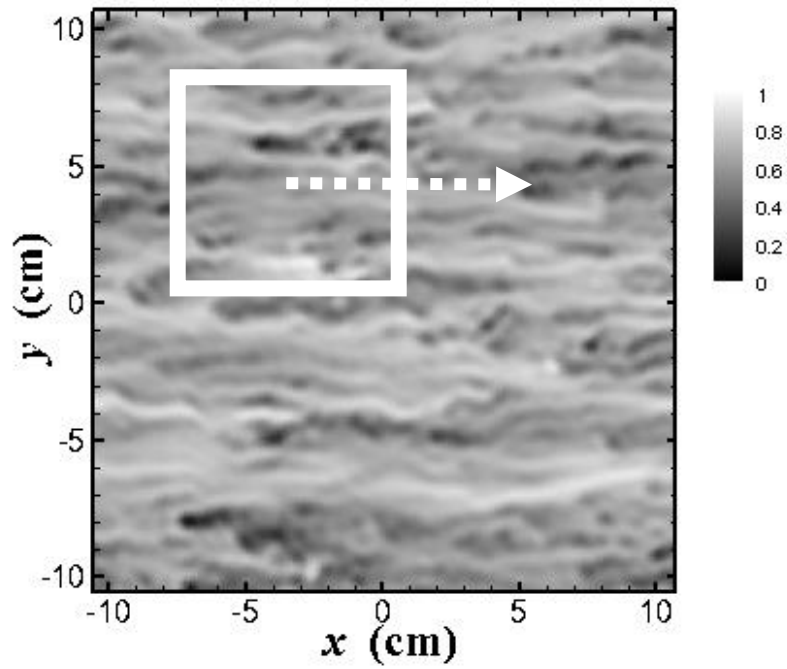


圖 3.12：圖中白色框為矩形範圍，將於內部進行直方圖等化，矩形中心的像素點其值為直方圖等化處理後的值，自適應直方圖等化將會對於影像每個像素點都進行處理而使矩形範圍滑移過整張影像。

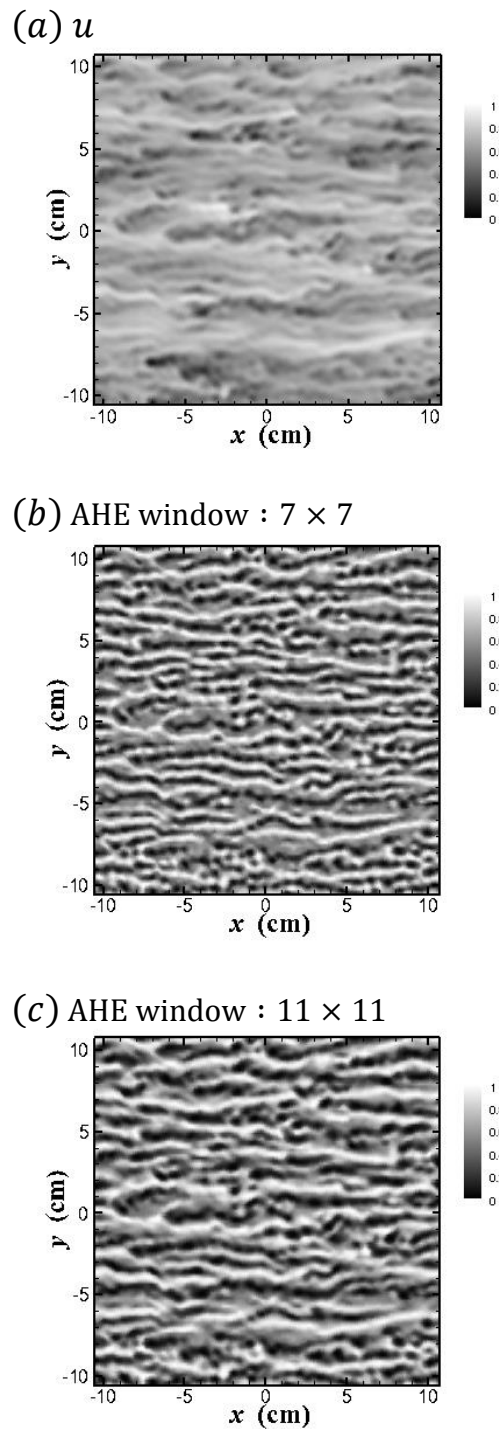
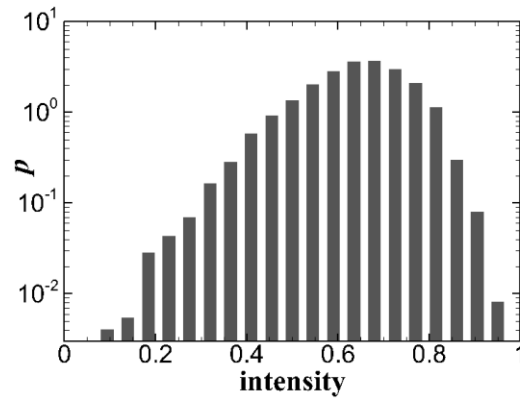


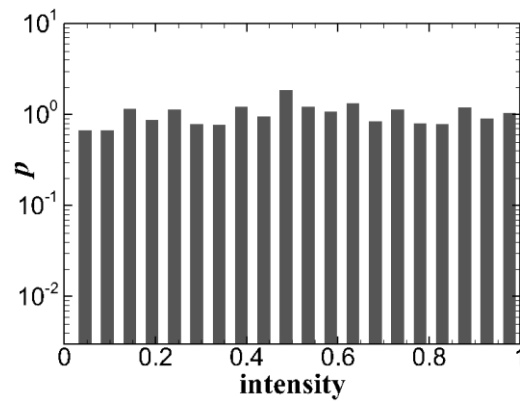
圖 3.13：流場水面影像和不同矩形範圍之自適應直方圖等化處理影像。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 (a) 為流場水面影像，圖 (b) 為矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化處理影像，圖 (c) 為矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化處理影像。



(a) u



(b) AHE window : 7×7



(c) AHE window : 11×11

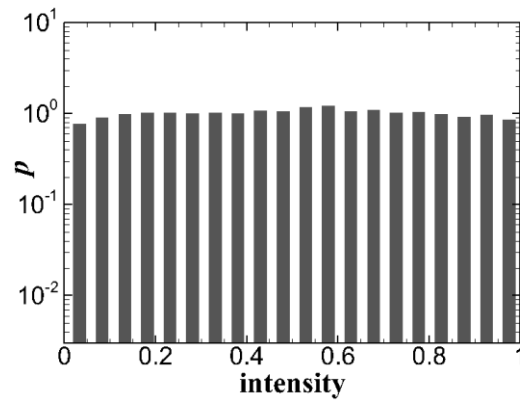
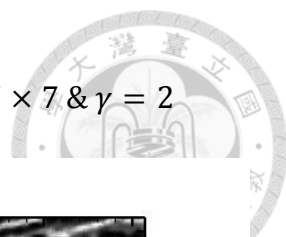
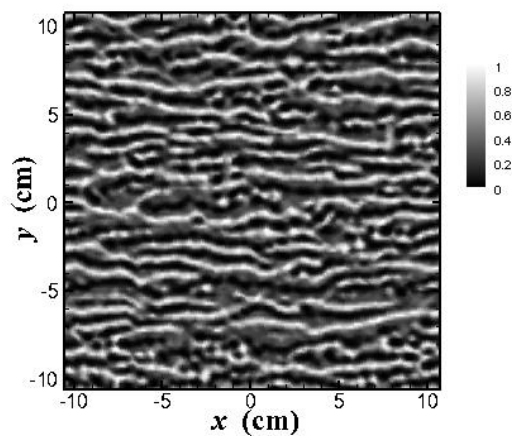
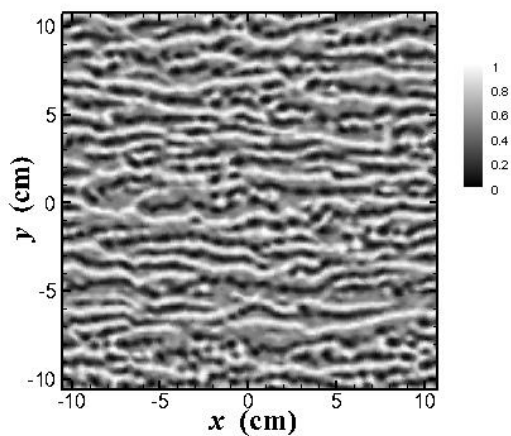


圖 3.14：流場水面影像和不同矩形範圍之自適應直方圖等化處理影像的直方圖分佈。模擬風速為 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，圖 (a) 為流場水面影像，圖 (b) 為矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化處理影像的直方圖分佈，圖 (c) 為矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化處理影像的直方圖分佈。



(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 1$

(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(c) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$

(d) AHE window : 7×7 & $\gamma = 6$

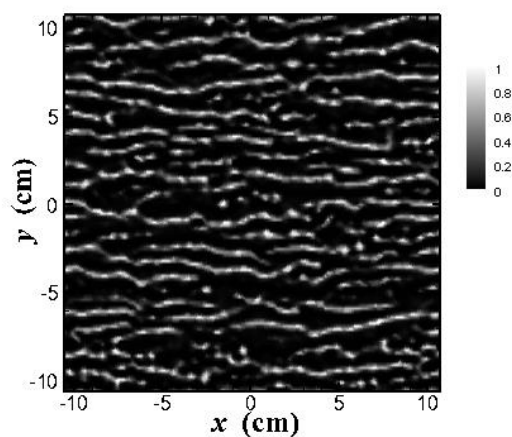
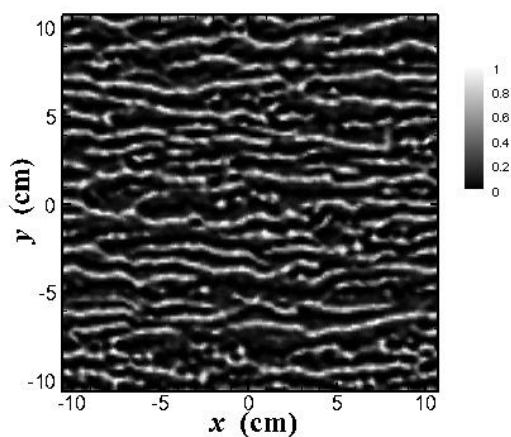
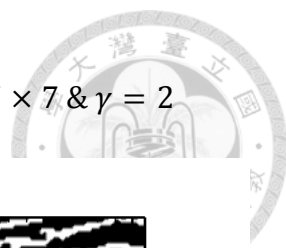
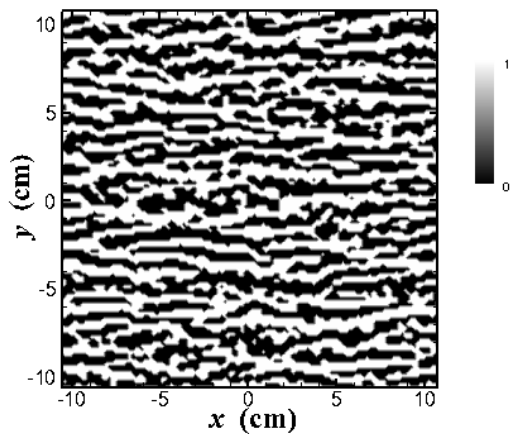


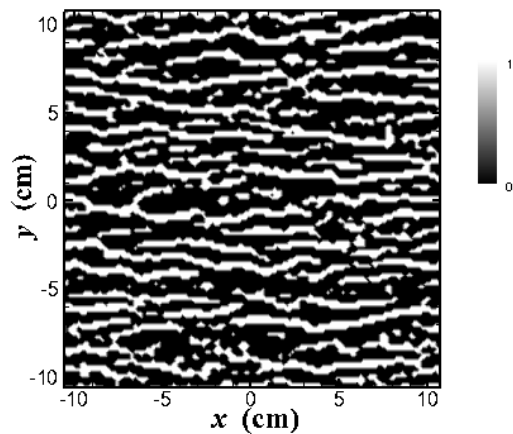
圖 3.15：流場水面影像經由矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 (a)、圖 (b)、圖 (c) 及圖 (d) 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。



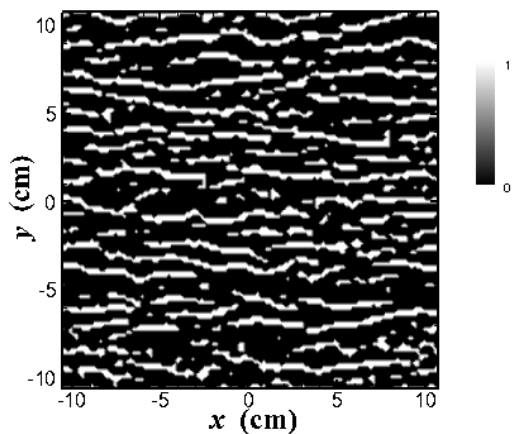
(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 1$



(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(c) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$



(d) AHE window : 7×7 & $\gamma = 6$

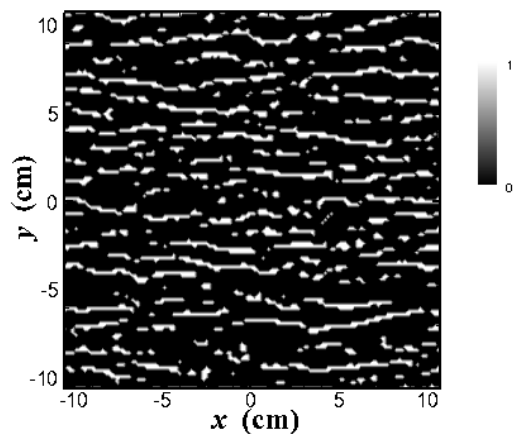
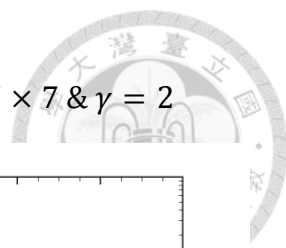
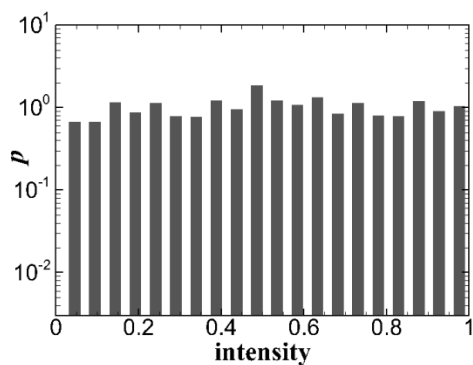


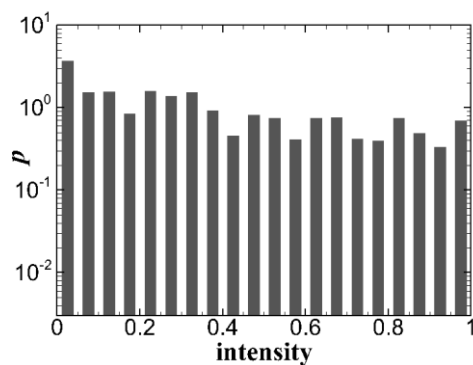
圖 3.16：流場水面影像經由矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像，其進行影像切割的二值化影像。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 (a)、圖 (b)、圖 (c) 及圖 (d) 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。



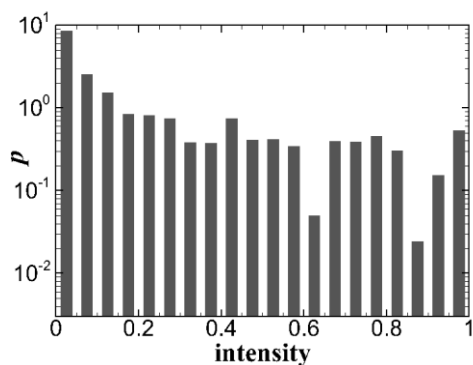
(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 1$



(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(c) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$



(d) AHE window : 7×7 & $\gamma = 6$

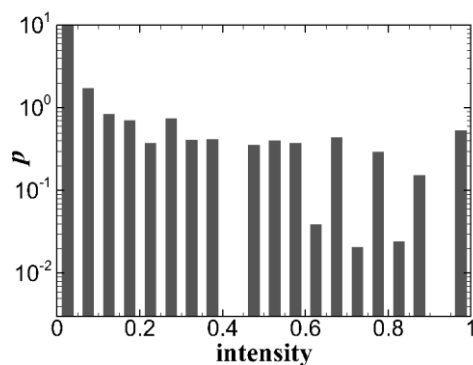
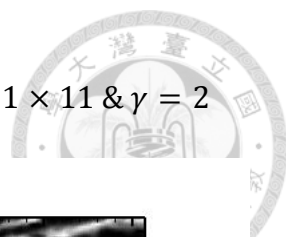
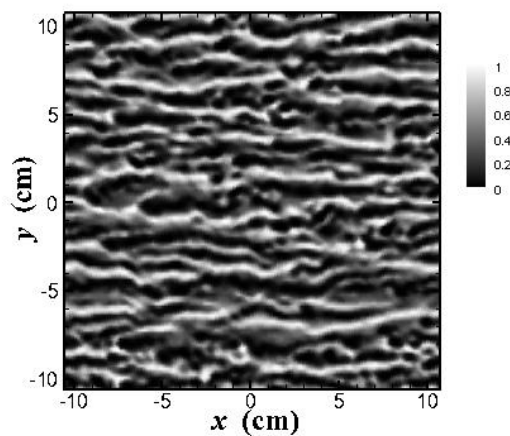
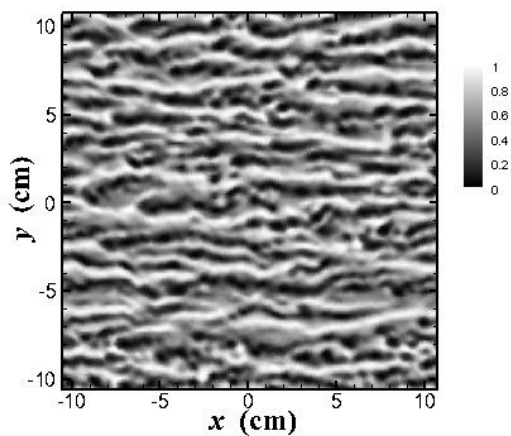


圖 3.17：流場水面影像經由矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像直方圖分佈。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 (a)、圖 (b)、圖 (c) 及圖 (d) 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。



(a) AHE window : 11×11 & $\gamma = 1$

(b) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 6$

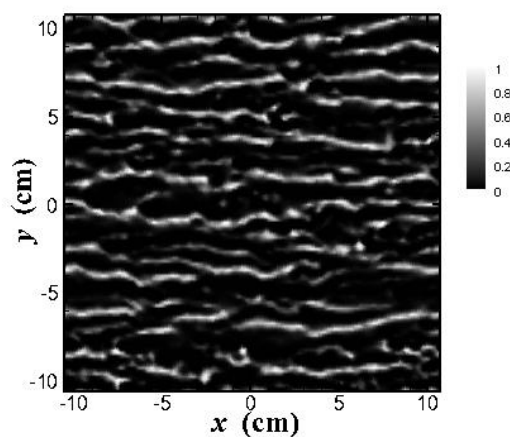
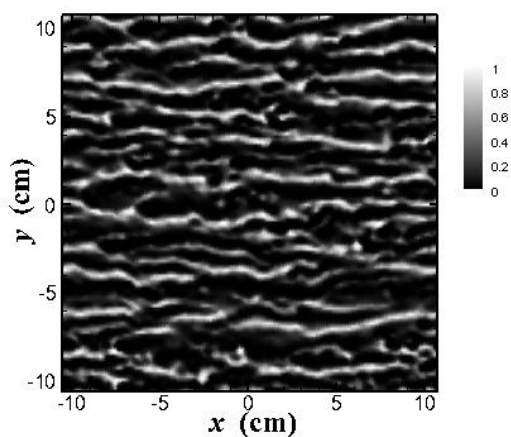
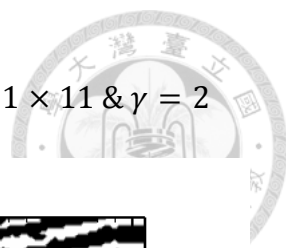
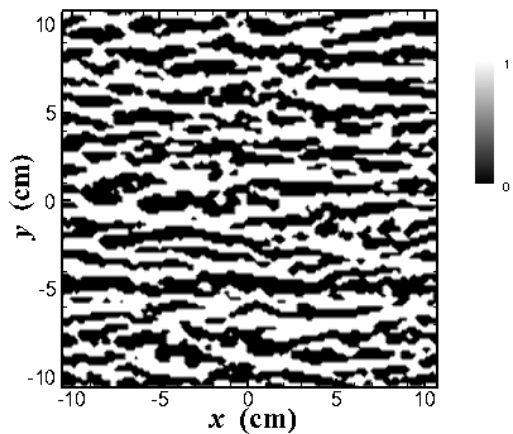


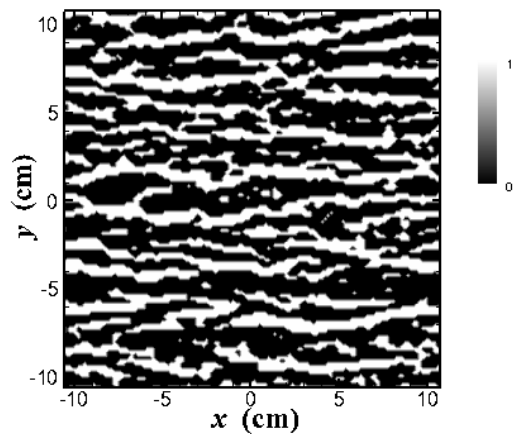
圖 3.18：流場水面影像經由矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 (a)、圖 (b)、圖 (c) 及圖 (d) 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。



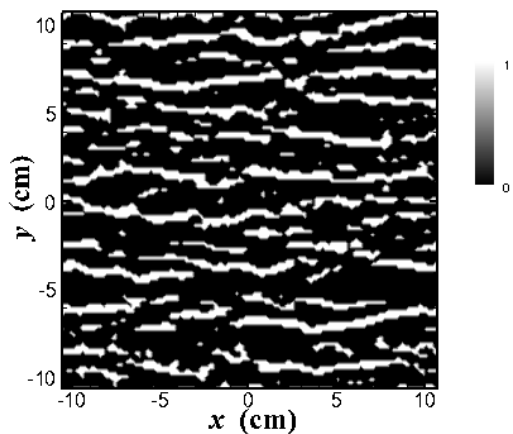
(a) AHE window : 11×11 & $\gamma = 1$



(b) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$



(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 6$

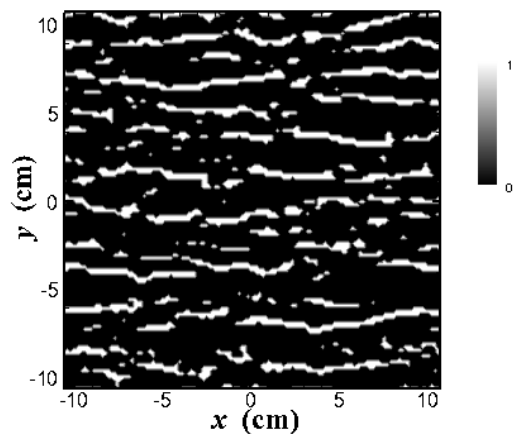
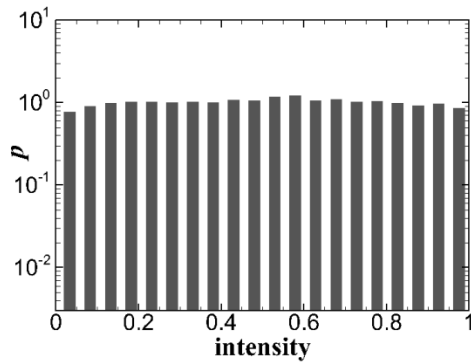
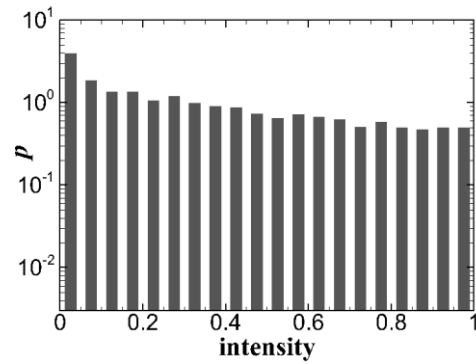


圖 3.19：流場水面影像經由矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像，其進行影像切割的二值化影像。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 (a)、圖 (b)、圖 (c) 及圖 (d) 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。

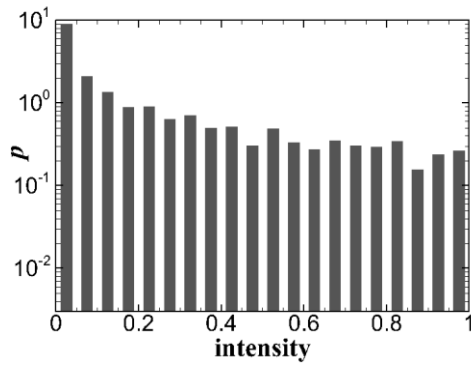
(a) AHE window : 11×11 & $\gamma = 1$



(b) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$



(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 6$

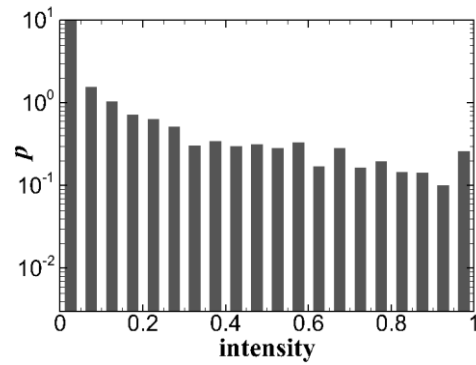


圖 3.20：流場水面影像經由矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化處理並利用不同指數 γ 的伽瑪校正之影像直方圖分佈。模擬風速為 5 m/s ，取樣時間為 5.4 s ，圖 (a)、圖 (b)、圖 (c) 及圖 (d) 之指數 γ 分別為 1 、 2 、 4 、 6 。



3.4 自動辨識條痕結構

本研究參考溫國暉 (2004) 分析風剪驅動紊流場之水面條痕結構的自動辨識條痕方法，並將其概念應用至影像處理後的二值化影像，二值化影像中白色區域即代表流場高速區域，進而根據辨識條痕準則辨識出流場中高速條痕之結構，辨識條痕準則如下所示：

1. 條痕長度須超過 $\Delta x^+ = 100$ 。
2. 條痕必須通過計算截線。
3. 條痕無最小間距限制，若非明顯重疊則各別計算。
4. 若條痕通過計算截線，取其在截線上之中點為代表位置。

以圖 3.21 說明自動辨識條痕之步驟，首先篩選出二值化影像中沿流向長度超過 100 個無因次長度單位（即 $\Delta x^+ > 100$ ）的高速區域，以不同顏色代表不同條痕，而計算截線為跨流方向並選取自流場影像中 $x = 0$ (cm) 之位置，且以黃色圓點標示出條痕代表位置，其代表位置為條痕在截線上之中點，兩相鄰黃色圓點之間的距離即為條痕間距 λ 。

觀測各風速之穩定時段流場水面影像，經由不同影像增強方法處理後，所自動辨識條痕之結果中發現自適應直方圖等化選取的矩形範圍越小，其所自動辨識出的條痕就越多，條痕間距則越小，矩形範圍越大所辨識出的條痕越少，條痕間距越大，以及伽瑪校正的指數越大，其所自動辨識出的條痕就越少，條痕間距則會越大，而指數越小，則辨識出的條痕就越多，條痕間距越小，如圖 3.22 至圖 3.25 表示。

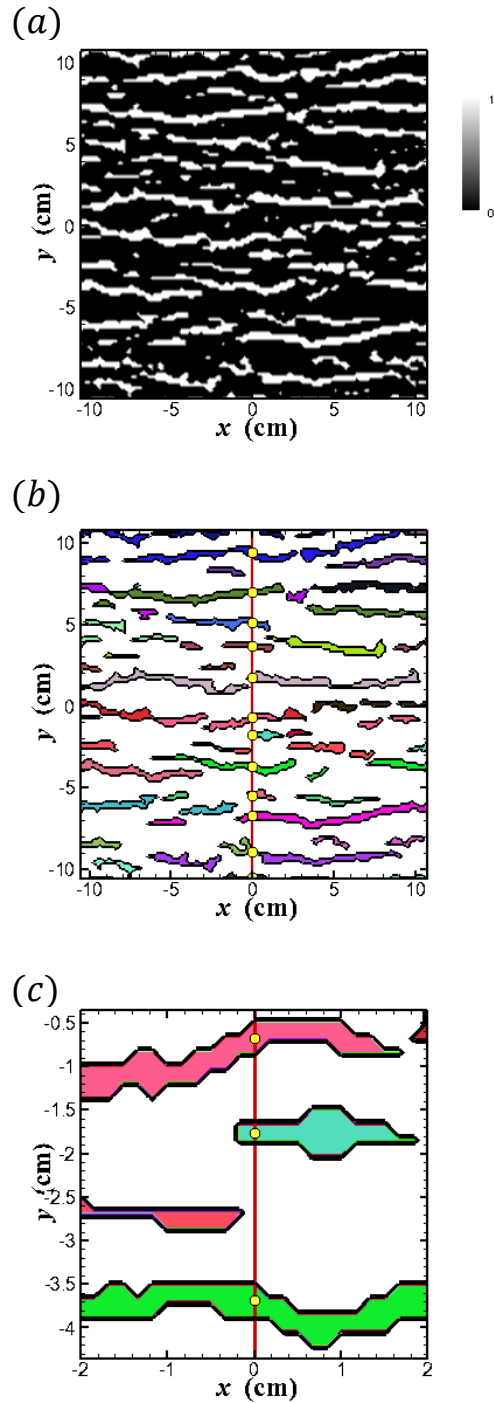
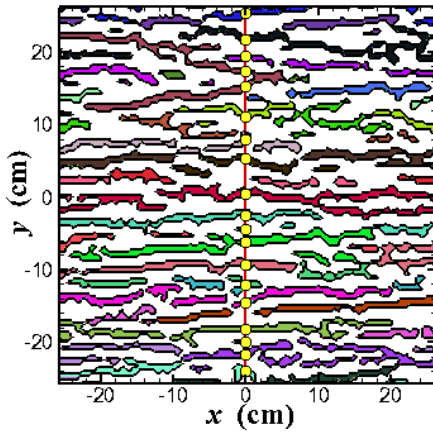
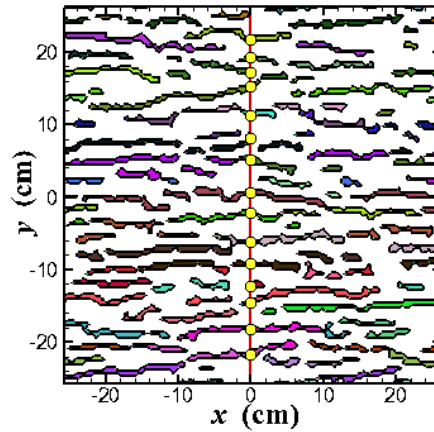


圖 3.21：自動辨識條痕準則示意圖。圖 (a) 為二值化影像，其白色部分為高速區域。圖 (b) 篩選出二值化影像中沿流向長度超過 100 無因次長度單位 ($\Delta x^+ > 100$) 的高速區域，並將通過計算截線之條痕以黃色圓點標示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，圖 (c) 為圖 (b) 部分放大圖，若條痕通過計算截線，取條痕在計算截線上之中點為代表位置。

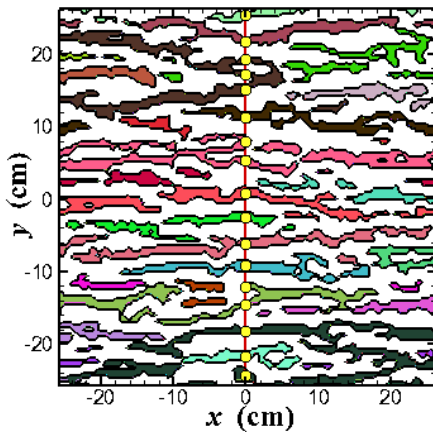
(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

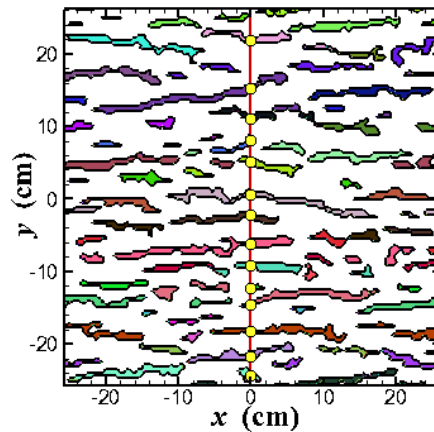
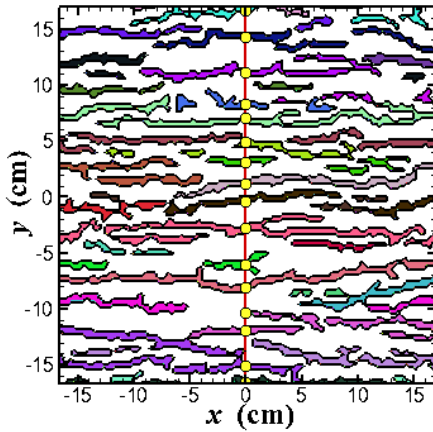
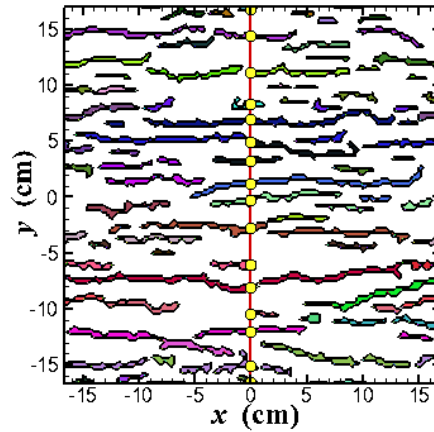


圖 3.22：模擬風速 3 m/s，取樣時間為 15.4 s，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。

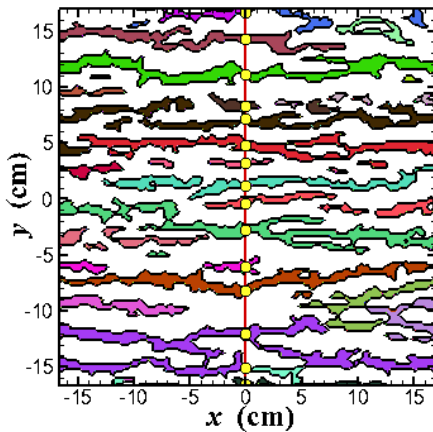
(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

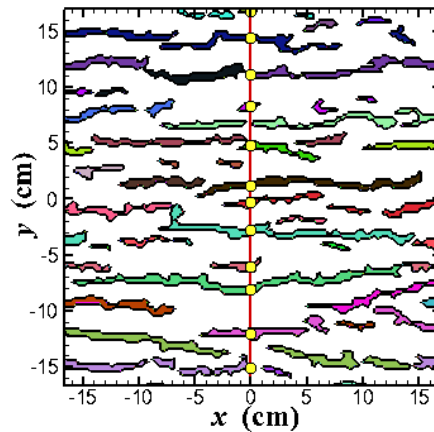
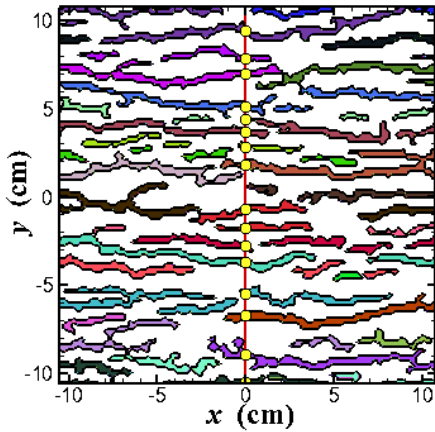
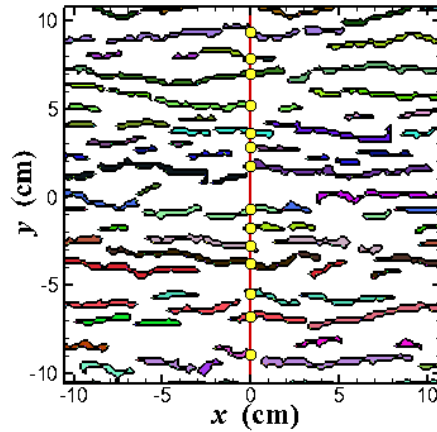


圖 3.23：模擬風速 4 m/s，取樣時間為 10.9 s，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。

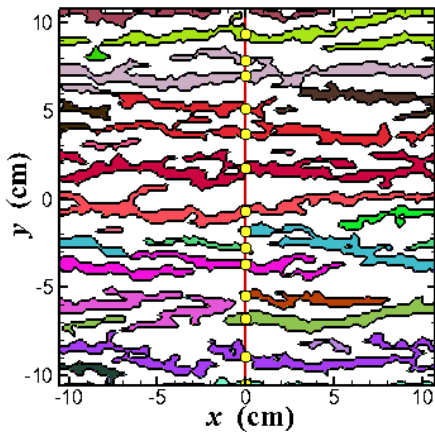
(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

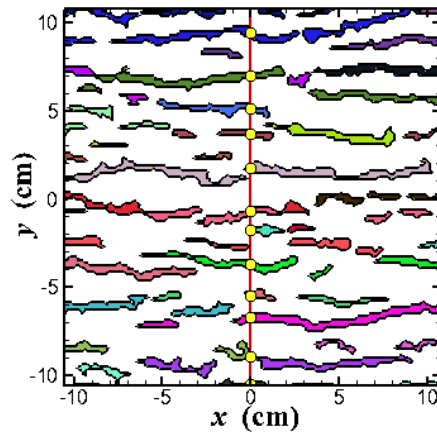
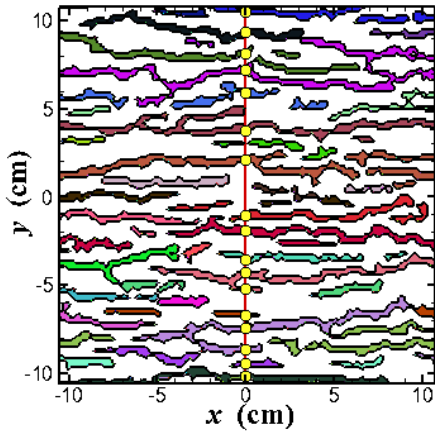
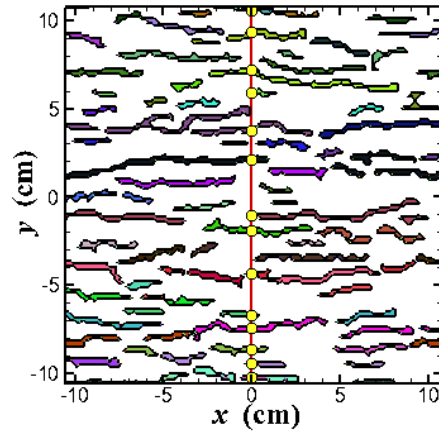


圖 3.24：模擬風速 5 m/s，取樣時間為 5.4 s，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。

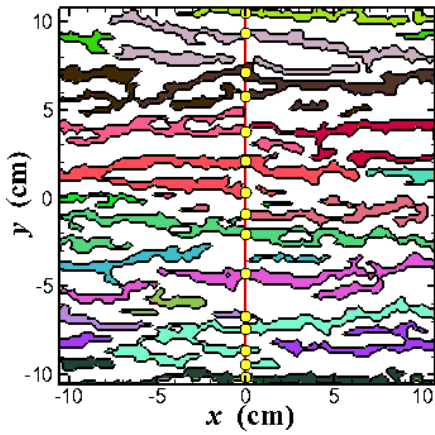
(a) AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$



(b) AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$



(c) AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$



(d) AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

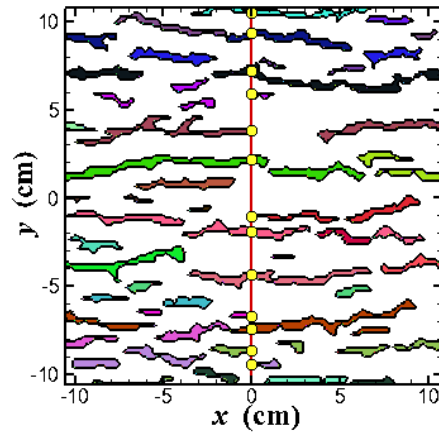


圖 3.25：模擬風速 5 m/s，取樣時間為 9.4 s，經由矩形範圍 7×7 和 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 和 4 之伽瑪校正處理的影像，其自動條痕辨識之結果。而不同條痕以不同顏色表示，計算截線位置為 $x = 0$ (cm)，以紅線表示，條痕代表位置以黃色圓點表示。

第四章 條痕間距特性探討



經由影像處理及自動辨識條痕步驟後，於本章節探討條痕間距的特性。在無滑移邊界紊流邊界層中，Smith 等(1983) 藉由氫氣泡技術將流場可視化，人工辨識條痕並對其進行條痕間距的統計，其研究結果發現條痕間距分佈近似對數常態分佈，且不論實驗雷諾數為多少，統計而得的無因次平均條痕間距皆趨於一定值 $\bar{\lambda}^+ \cong 100$ 。在風剪驅動自由液面紊流邊界層中，具有與無滑移邊界紊流邊界層類似的條痕結構，故於本章節統計條痕間距並分析其間距分佈之特性，於 4.1 節說明如何統計條痕之間的距離，並繪製成直方圖，於 4.2 節利用理論分佈及卡方適合度檢定分析條痕間距分佈的特性，於 4.3 節整理結果及討論。

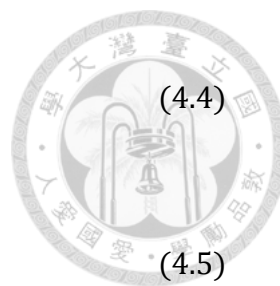
4.1 統計條痕間距

本研究分析四個穩定時段，且每個時段皆為一百二十張影像，每張影像經由影像處理及自動辨識高速條痕結構的步驟後，得到影像中跨流向計算截線上的條痕代表位置，兩相鄰條痕之間的距離，即為高速條痕間距 λ 。參考 Smith 等(1983) 之條痕間距統計方法，以計算條痕間距之平均值 $\bar{\lambda}$ 、標準差 σ_λ 、變異係數 ψ_λ (coefficient of variation)、偏度 S_λ (skewness) 及平度 F_λ (flatness)，其計算方式如下表示：

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (4.1)$$

$$\sigma_\lambda = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.2)$$

$$\psi_\lambda = \frac{\sigma_\lambda}{\bar{\lambda}}, \quad (4.3)$$



$$S_{\lambda} = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^3}{\sigma_{\lambda}^3} \quad (4.4)$$

$$F_{\lambda} = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^4}{\sigma_{\lambda}^4} \quad (4.5)$$

變異係數為條痕間距之標準差除上平均條痕間距，且為無因次參數，能表示資料的分散狀況，隨著變異係數越大，資料分散程度則越大，反之，隨著變異係數越小，資料分散程度也越小。偏度為描述資料分佈的對稱程度，亦為無因次參數，若偏度值大於零 $S_{\lambda} > 0$ 代表資料分佈情形集中於左側；若偏度值等於零 $S_{\lambda} = 0$ 代表資料分佈情形為對稱分佈；若偏度值小於零 $S_{\lambda} < 0$ 代表資料分佈情形為集中於右側，本研究之偏度值皆為 $S_{\lambda} > 0$ ，其代表資料分佈皆集中於左側。

平度為描述資料分佈的陡峭程度，亦為無因次參數，若平度值為 $F_{\lambda} > 3$ 代表資料分佈較集中，稱為高狹峰 (leptokurtic)，資料分佈較常態分佈高且窄，平度值愈大，資料分佈愈遠離常態分佈；若平度值為 $F_{\lambda} = 3$ 代表資料分佈為常態分佈，稱為常態峰 (mesokurtic)；若平度值為 $F_{\lambda} < 3$ 代表資料分佈較分散，稱為低闊峰 (platykurtic)，資料分佈情形較常態分佈低及寬，本研究之偏度值皆為 $F_{\lambda} > 3$ ，資料分佈的陡峭程度較常態分佈高。

利用矩形範圍為 7×7 跟 11×11 的自適應直方圖等化方法及指數為 2 跟 4 伽瑪校正進行影像增強後，再自動辨識條痕所得出的條痕間距統計結果，如表 4.1 至表 4.4 所示，並根據條痕間距統計結果繪製出直方圖，其橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度，如圖 4.1 至圖 4.4 所示。從結果中發現隨著模擬風速越大，無因次平均條痕間距及標準差越小，有因次平均條痕間距及標準差越小，條痕間距分佈之峰值也隨著往左移動。

表 4.1: 利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。

模擬風速	3 m/s	4 m/s	5 m/s	5 m/s
穩定時段 (s)	15.4 ~ 22.0	10.9 ~ 15.6	5.4 ~ 8.1	9.4 ~ 12.1
摩擦速度 u^* (cm/s)	0.493	0.609	0.764	0.791
間距總數 n	2270	2028	2022	2008
平均間距 $\bar{\lambda}^+$	128.146 (2.599 cm)	114.626 (1.882 cm)	92.024 (1.205 cm)	96.075 (1.215 cm)
標準差 σ^+	48.521 (0.984 cm)	46.339 (0.761 cm)	35.557 (0.465 cm)	39.922 (0.505 cm)
變異係數 ψ_λ	0.379	0.404	0.386	0.416
偏度 S_λ	1.573	1.452	1.1704	1.277
平度 F_λ	6.877	7.015	5.404	4.94

表 4.2: 利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。

模擬風速	3 m/s	4 m/s	5 m/s	5 m/s
穩定時段 (s)	15.4 ~ 22.0	10.9 ~ 15.6	5.4 ~ 8.1	9.4 ~ 12.1
摩擦速度 u^* (cm/s)	0.493	0.609	0.764	0.791
間距總數 n	1853	1549	1492	1552
平均間距 $\bar{\lambda}^+$	151.632 (3.076 cm)	145.021 (2.381 cm)	119.169 (1.559 cm)	119.109 (1.506 cm)
標準差 σ^+	72.663 (1.474 cm)	71.253 (1.170 cm)	62.197 (0.814 cm)	62.220 (0.787 cm)
變異係數 ψ_λ	0.479	0.491	0.522	0.522
偏度 S_λ	1.923	1.687	2.581	1.902
平度 F_λ	9.005	7.511	15.414	8.734

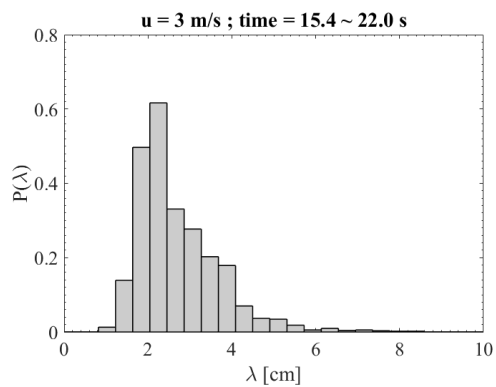
表 4.3: 利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。

模擬風速	3 m/s	4 m/s	5 m/s	5 m/s
穩定時段 (s)	15.4 ~ 22.0	10.9 ~ 15.6	5.4 ~ 8.1	9.4 ~ 12.1
摩擦速度 u^* (cm/s)	0.493	0.609	0.764	0.791
間距總數 n	1932	1794	1769	1745
平均間距 $\bar{\lambda}^+$	149.694 (3.036 cm)	127.372 (2.092 cm)	105.493 (1.381 cm)	109.688 (1.387 cm)
標準差 σ^+	56.641 (1.149 cm)	48.257 (0.792 cm)	40.499 (0.530 cm)	45.277 (0.572 cm)
變異係數 ψ_λ	0.378	0.379	0.384	0.413
偏度 S_λ	0.875	0.797	1.129	0.947
平度 F_λ	3.865	3.655	6.9	4.286

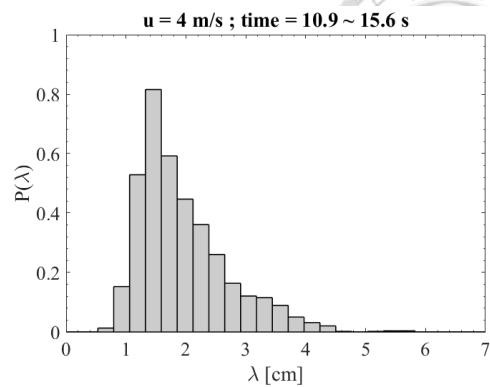
表 4.4: 利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，所得各風速穩定時段的條痕間距統計結果。

模擬風速	3 m/s	4 m/s	5 m/s	5 m/s
穩定時段 (s)	15.4 ~ 22.0	10.9 ~ 15.6	5.4 ~ 8.1	9.4 ~ 12.1
摩擦速度 u^* (cm/s)	0.493	0.609	0.764	0.791
間距總數 n	1512	1307	1290	1299
平均間距 $\bar{\lambda}^+$	187.971 (3.813 cm)	167.006 (2.742 cm)	140.721 (1.842 cm)	142.135 (1.797 cm)
標準差 σ^+	81.241 (1.648 cm)	80.114 (1.316 cm)	65.032 (0.851 cm)	62.695 (0.793 cm)
變異係數 ψ_λ	0.432	0.480	0.462	0.441
偏度 S_λ	1.021	2.195	1.663	1.154
平度 F_λ	4.564	13.171	7.696	5.434

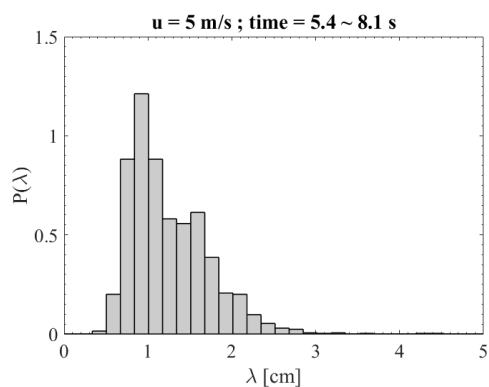
(a) Wind speed : 3 m/s



(b) Wind speed : 4 m/s



(c) Wind speed : 5 m/s



(d) Wind speed : 5 m/s

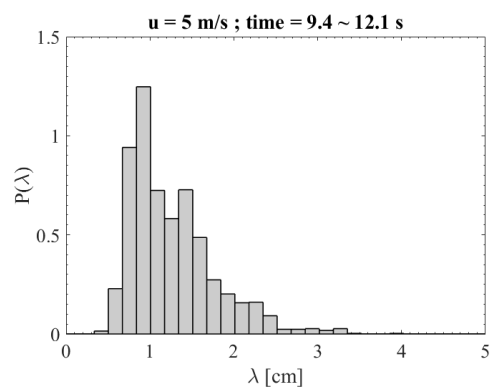
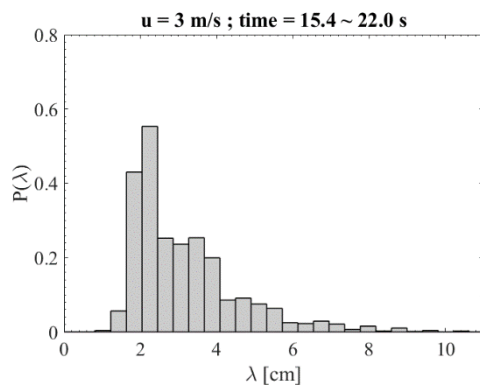
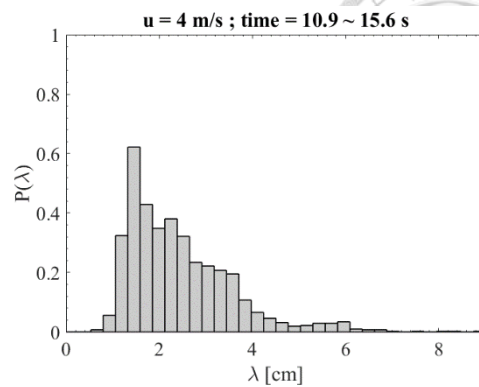


圖 4.1: 利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後, 各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度, 圖 (a) 為風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈, 圖 (b) 為風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈, 圖 (c) 為風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈, 圖 (d) 為風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。

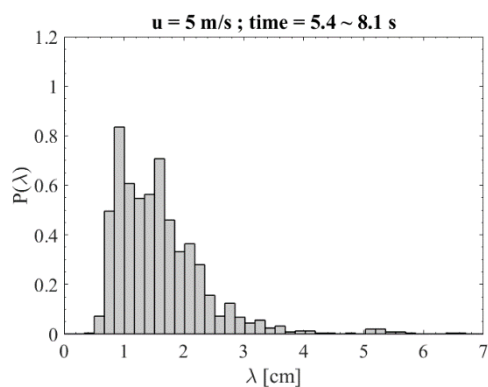
(a) Wind speed : 3 m/s



(b) Wind speed : 4 m/s



(c) Wind speed : 5 m/s



(d) Wind speed : 5 m/s

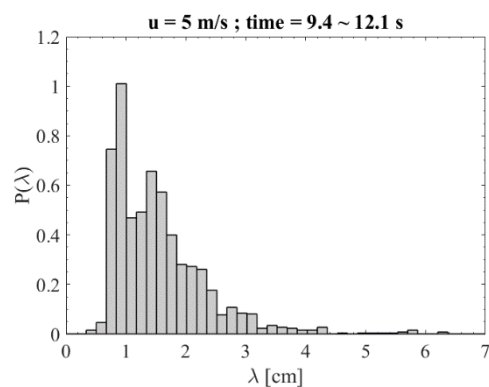


圖 4.2: 利用矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後, 各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度, 圖 (a) 為風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈, 圖 (b) 為風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈, 圖 (c) 為風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈, 圖 (d) 為風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。

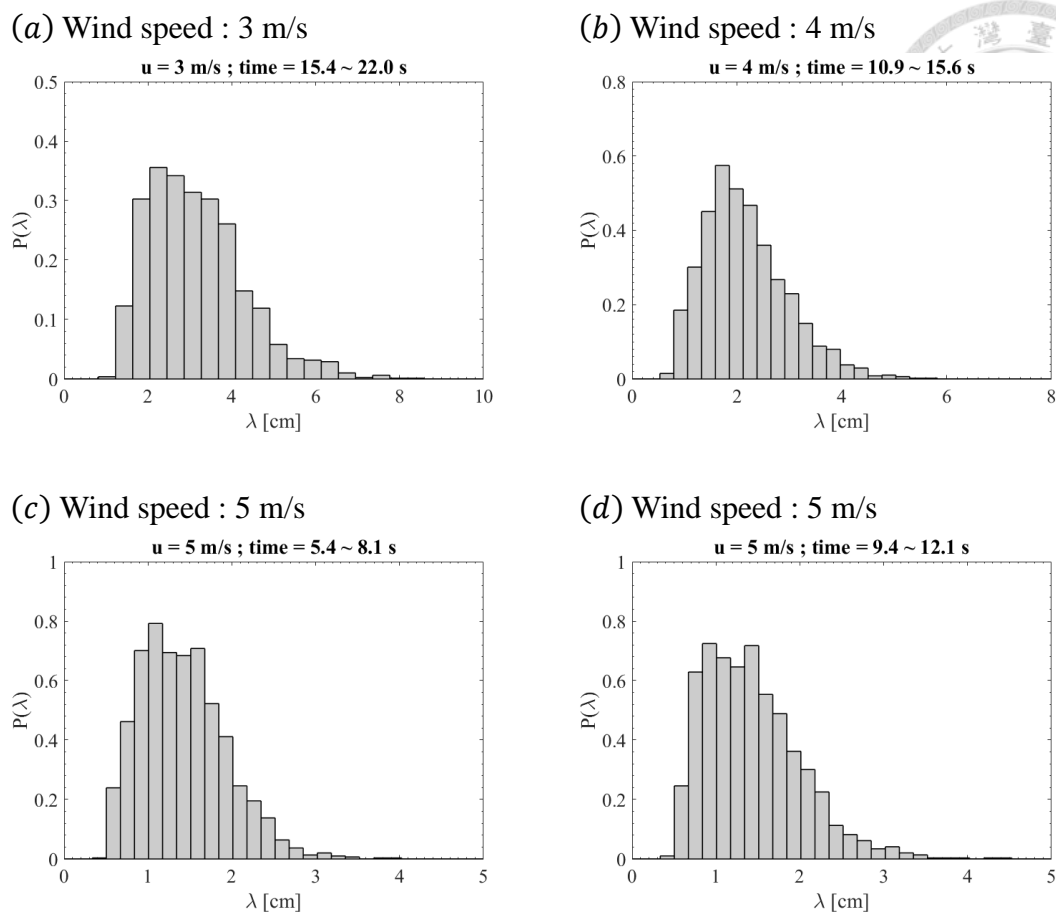


圖 4.3: 利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度，圖 (a) 為風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈，圖 (b) 為風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈，圖 (c) 為風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈，圖 (d) 為風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。

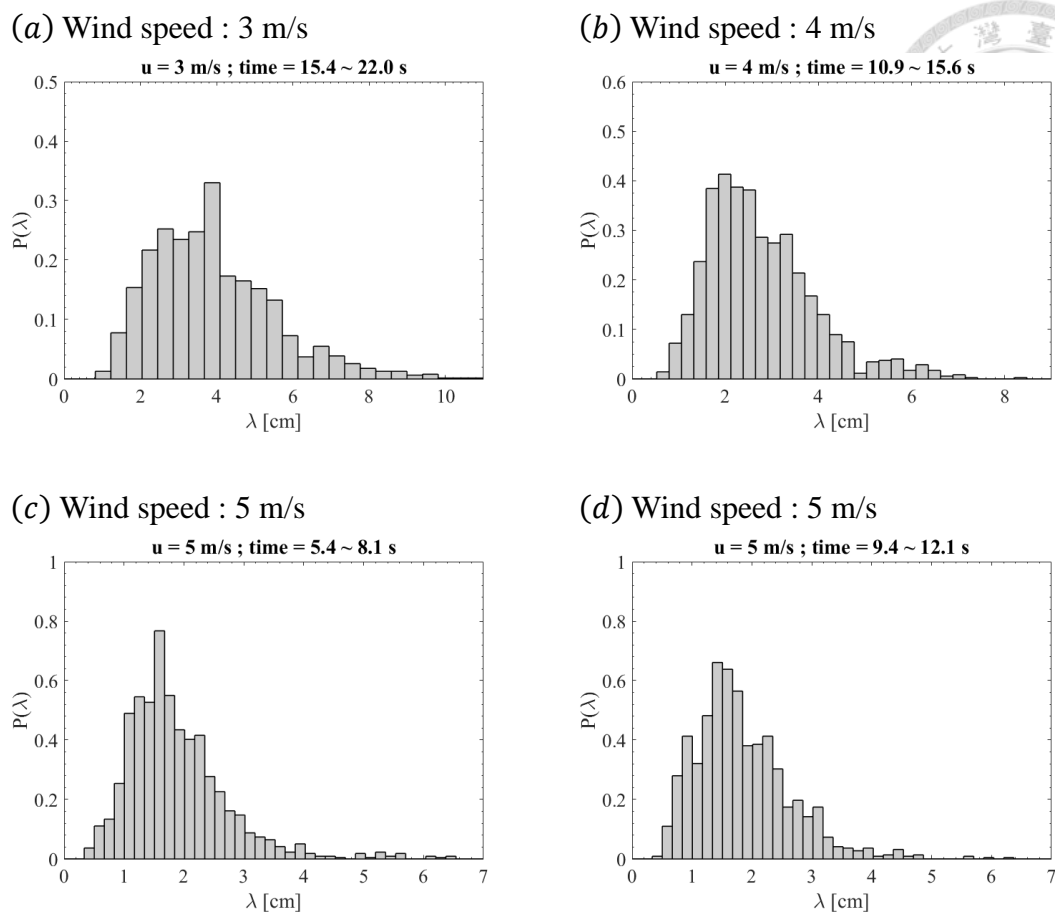


圖 4.4: 利用矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，各風速穩定時段之條痕間距分佈。橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度，圖 (a) 為風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之條痕間距分佈，圖 (b) 為風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之條痕間距分佈，圖 (c) 為風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之條痕間距分佈，圖 (d) 為風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之條痕間距分佈。



4.2 條痕間距分佈特性

在前人的研究中，不論是在無滑移邊界紊流邊界層，或是在風剪驅動自由液面邊界層，其條痕間距分佈皆近似於對數常態分佈，如 Nakagawa 等(1981) 及 Smith 等(1983) 在無滑移邊界紊流邊界層中研究發現此現象，以及 Tsai 等(2005) 在風剪驅動自由液面邊界層之研究發現條痕間距分佈近似於對數常態分佈，而 Ryanzhin 等(2005) 利用六種理論分佈與條痕間距分佈進行擬和，並以卡方適合度檢定理論分佈與條痕間距分佈是否吻合，發現對數常態分佈與大多數截果吻合。

本研究參考 Ryanzhin 等(2005) 以六種理論分佈與條痕間距分佈進行擬和，並以卡方適合度檢定理論分佈與條痕間距分佈是否吻合。

4.2.1 機率密度函數

首先說明六種理論分佈，分別為：指數分佈 (exponential distribution)、伽瑪分佈 (gamma distribution)、對數常態分佈 (lognormal distribution)、馬克士威分佈 (Maxwell distribution)、雷利分佈 (Rayleigh distribution)、韋伯分佈 (Weibull distribution)：

1. 指數分佈，其機率密度函數如下表示：

$$P(\lambda|A) = \frac{1}{A} \exp\left(-\frac{\lambda}{A}\right) \quad (4.5)$$

2. 伽瑪分佈，其機率密度函數如下表示：

$$P(\lambda|A, B) = \frac{\lambda^{B-1} \exp\left(-\frac{\lambda}{A}\right)}{A^B \Gamma(B)} \quad (4.6)$$

3. 對數常態分佈，其機率密度函數如下表示：

$$P(\lambda|A, C) = \frac{\exp\left[-\frac{(\ln \lambda - C)^2}{2A^2}\right]}{\sqrt{2\pi}A\lambda} \quad (4.7)$$

4. 馬克士威分佈，其機率密度函數如下表示：

$$P(\lambda|A) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\lambda^2 \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2A^2}\right)}{A^3} \quad (4.8)$$

5. 雷利分佈，其機率密度函數如下表示：

$$P(\lambda|A) = \frac{\lambda}{A^2} \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2A^2}\right) \quad (4.9)$$

6. 韋伯分佈，其機率密度函數如下表示：

$$P(\lambda|A, B) = \frac{B}{A} \left(\frac{\lambda}{A}\right)^{B-1} \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{A}\right)^B\right] \quad (4.10)$$

其中 λ 為條痕間距； A 表示尺度參數（scale parameter）與隨機變數為冪次方或開冪次方關係，影響機率密度函數分佈之散佈程度； B 表示形狀參數（shape parameter）與隨機變數為乘除關係，影響機率密度函數分佈之陡峭程度； C 表示位置參數（location parameter）與隨機變數為加減關係，影響機率密度函數隨水平軸之平移程度； Γ 為伽瑪函數（gamma function）如下所示：

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (4.11)$$

將理論分佈與條痕間距分佈進行最小平方擬合（least squares fitting），如

圖 4.5 至

圖 4.20 所示，圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分（cm），縱軸為機率密度。圖 4.5 至圖 4.8 分別為四個時段的流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合；圖 4.9 至圖 4.12 分別為四個時段的流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計



而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合；圖 4.13 至圖 4.16 分別為四個時段的流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合；圖 4.17 至圖 4.20 分別為四個時段的流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。

從這六種理論分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合中，發現對數常態分佈及伽瑪分佈近似於條痕間距分佈，而指數分佈、馬克士威分佈、雷利分佈和韋伯分佈與條痕間距分佈有蠻大的差異。而為了客觀地討論條痕間距特性，將藉由卡方適合度檢定判斷理論分佈是否與條痕間距分佈相互吻合。

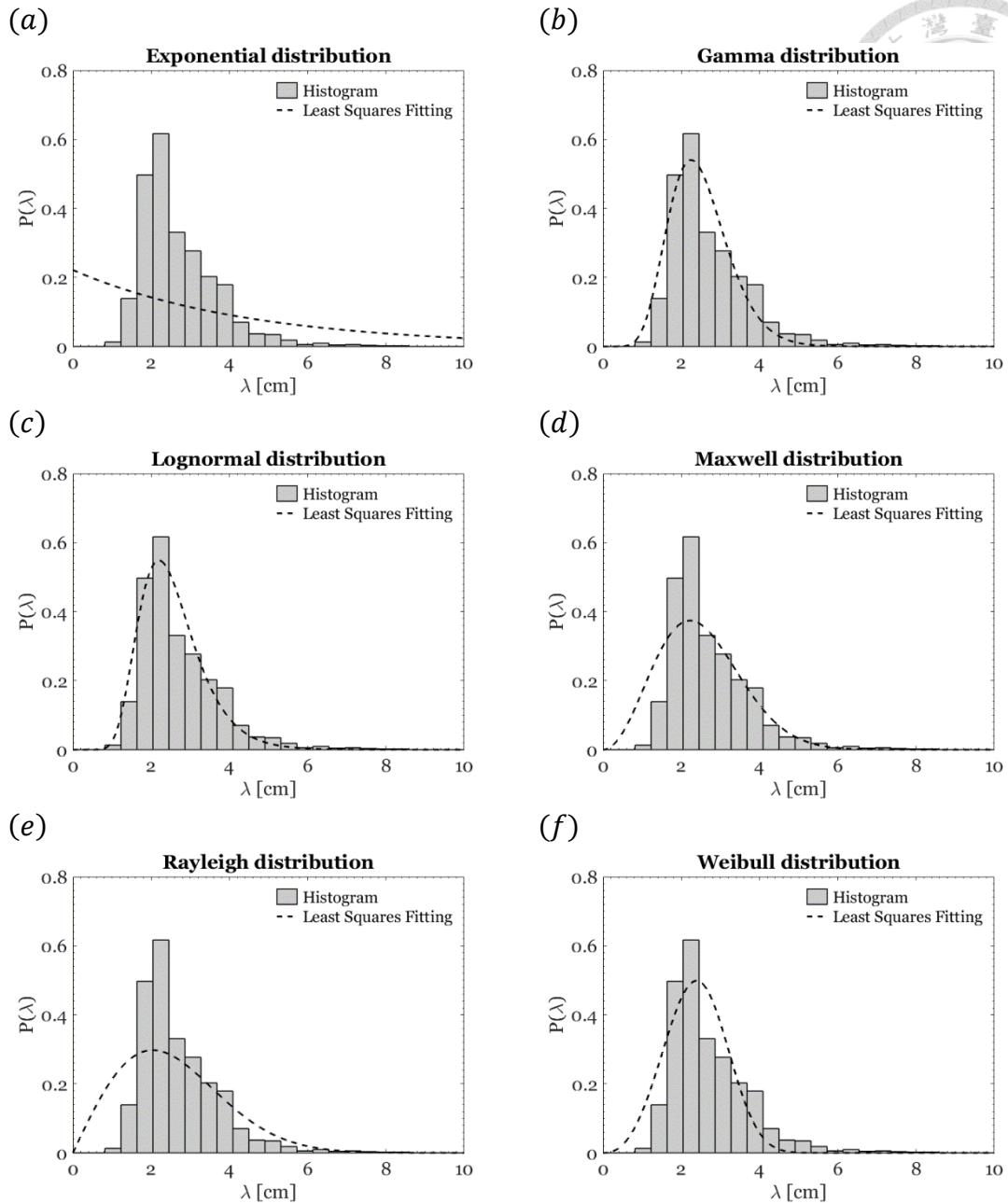


圖 4.5: 模擬風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。

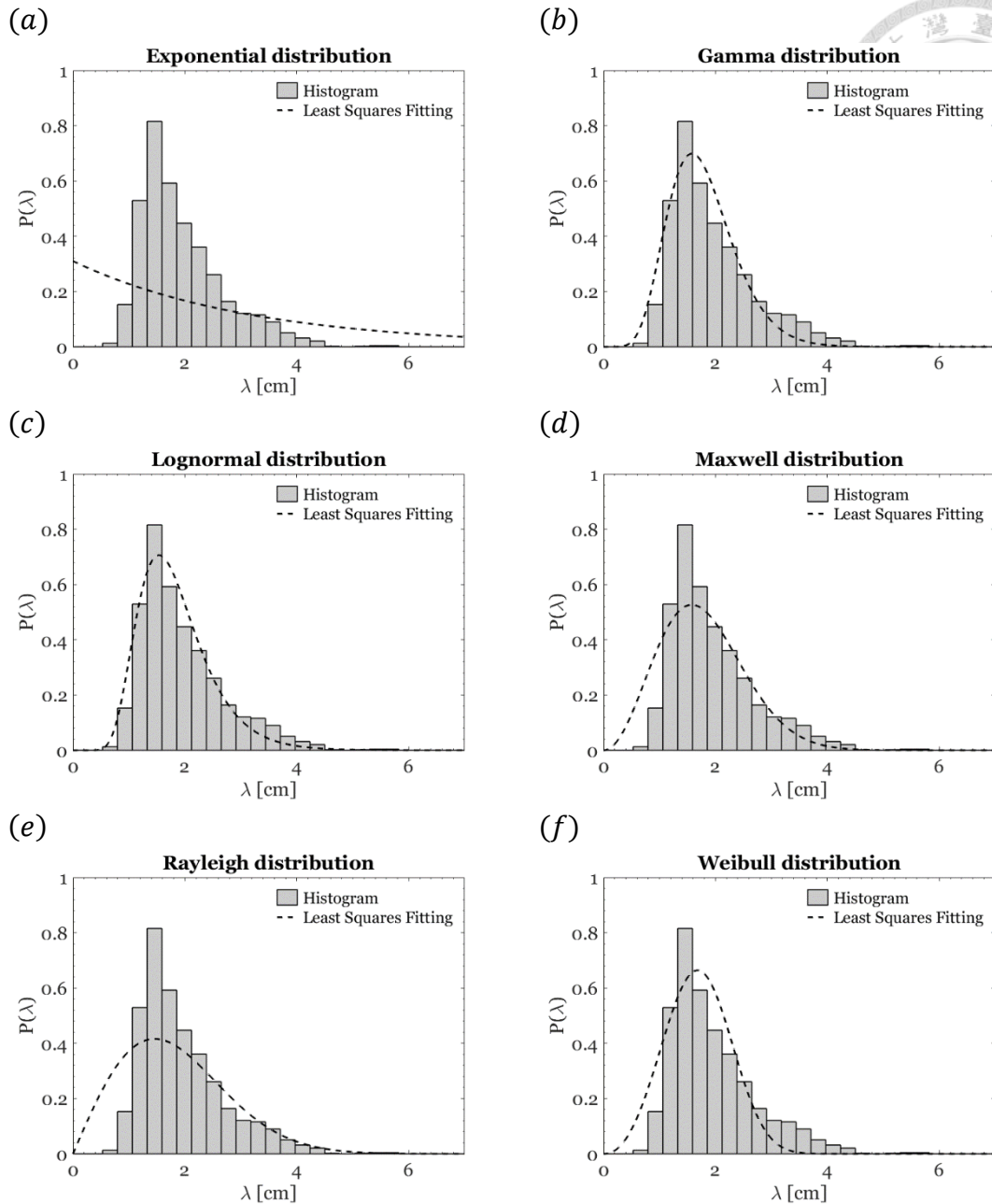


圖 4.6: 模擬風速 4 m/s, 穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。

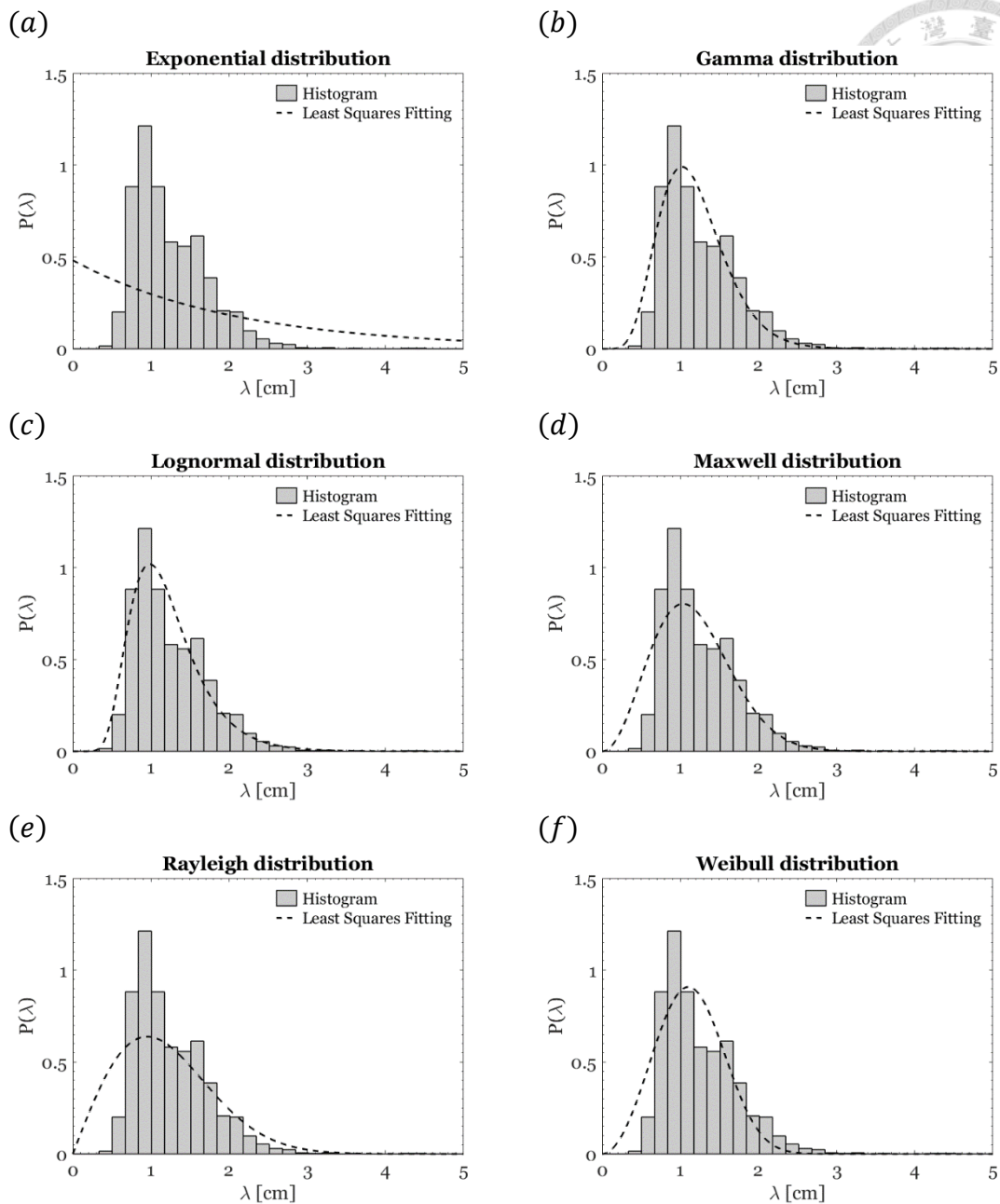


圖 4.7：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

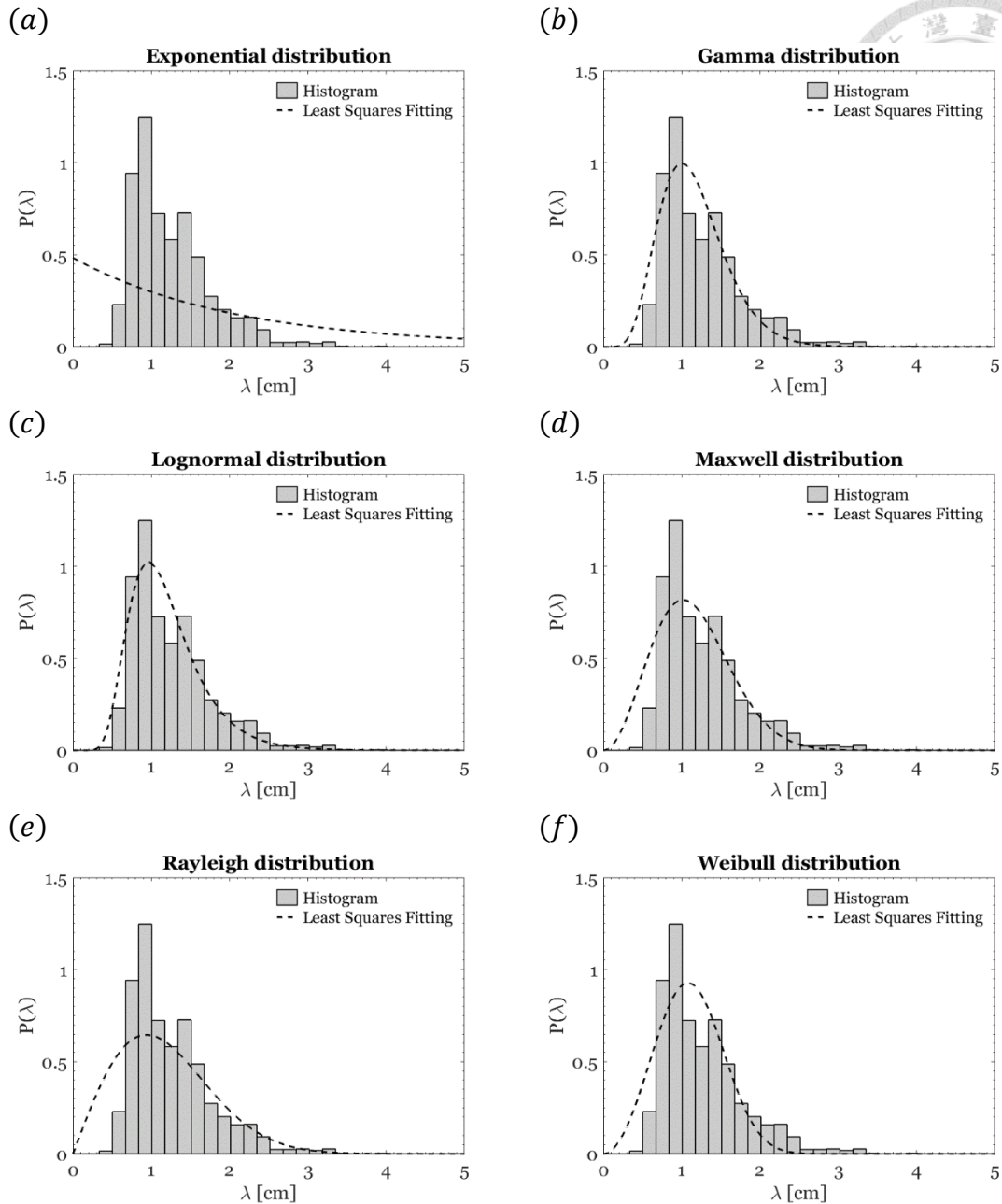


圖 4.8：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

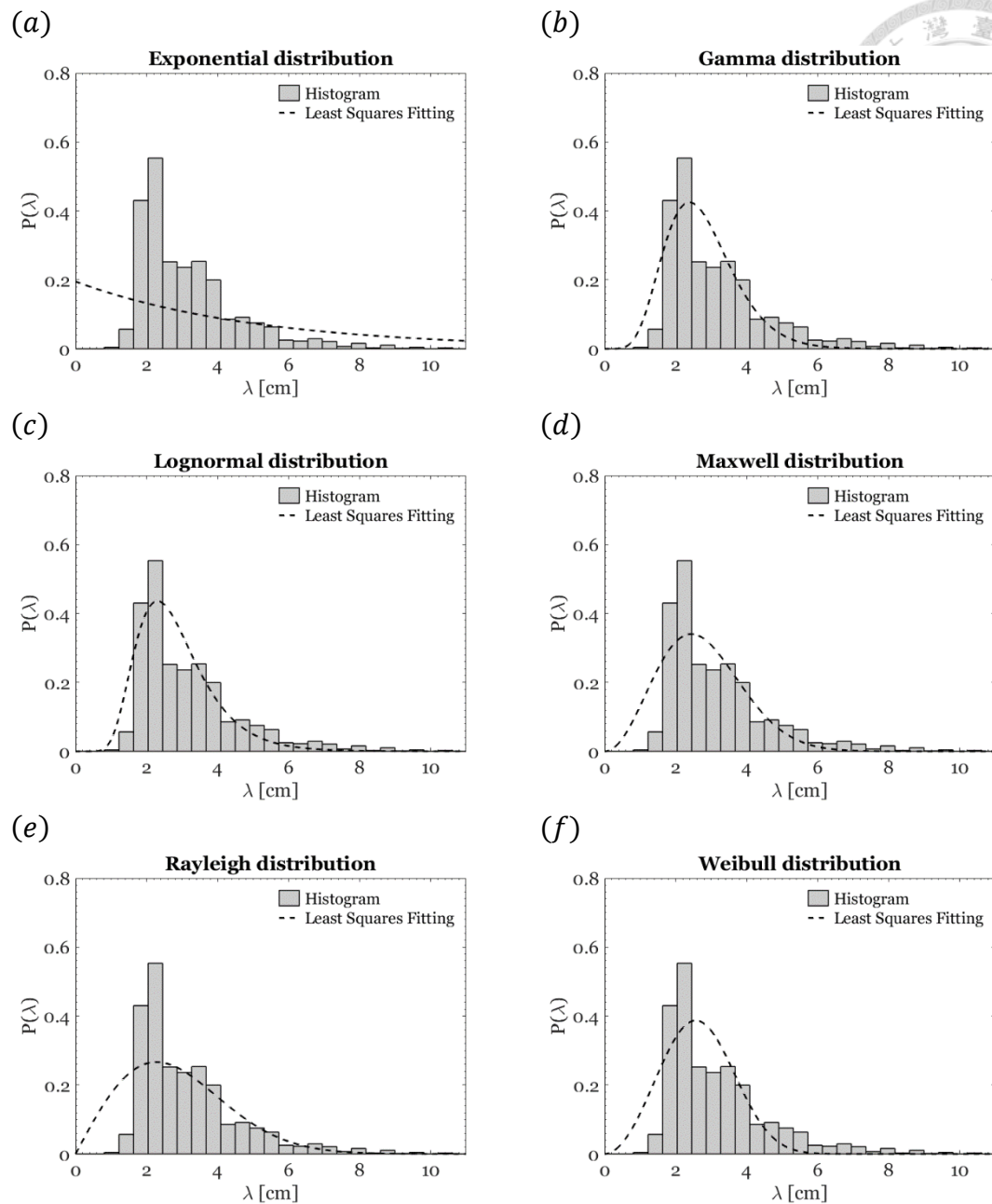


圖 4.9: 模擬風速 3 m/s, 穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。

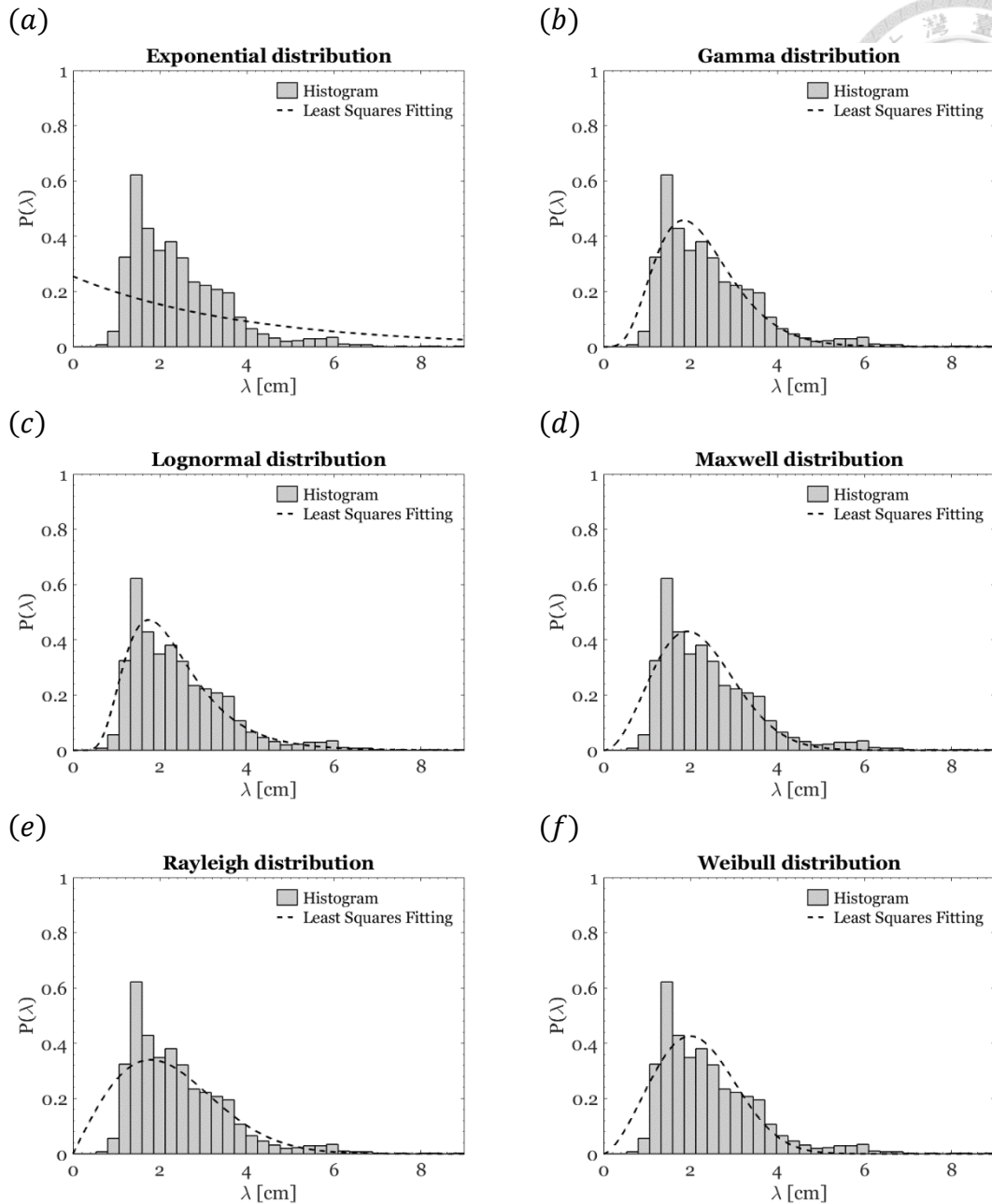


圖 4.10：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

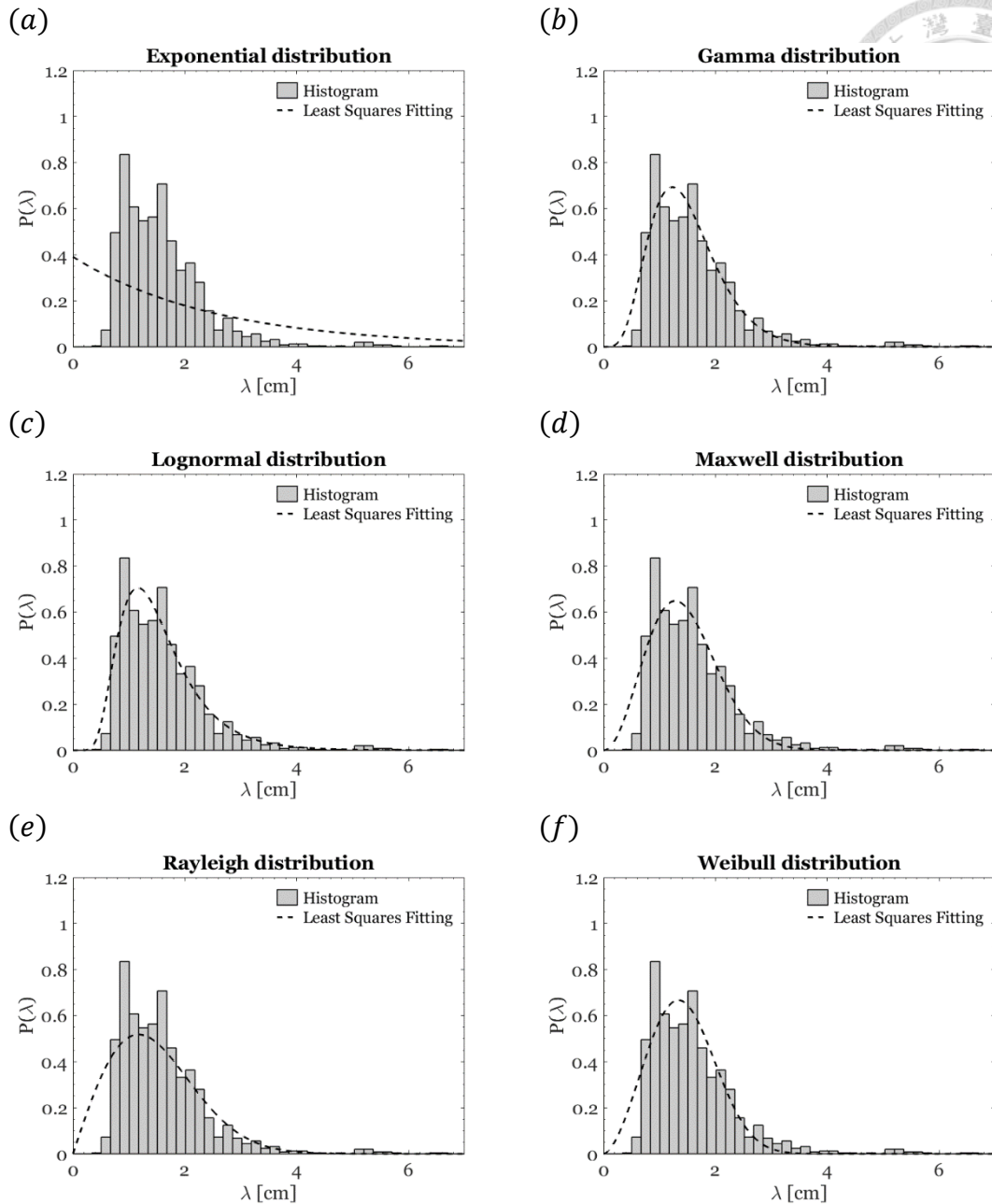


圖 4.11：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

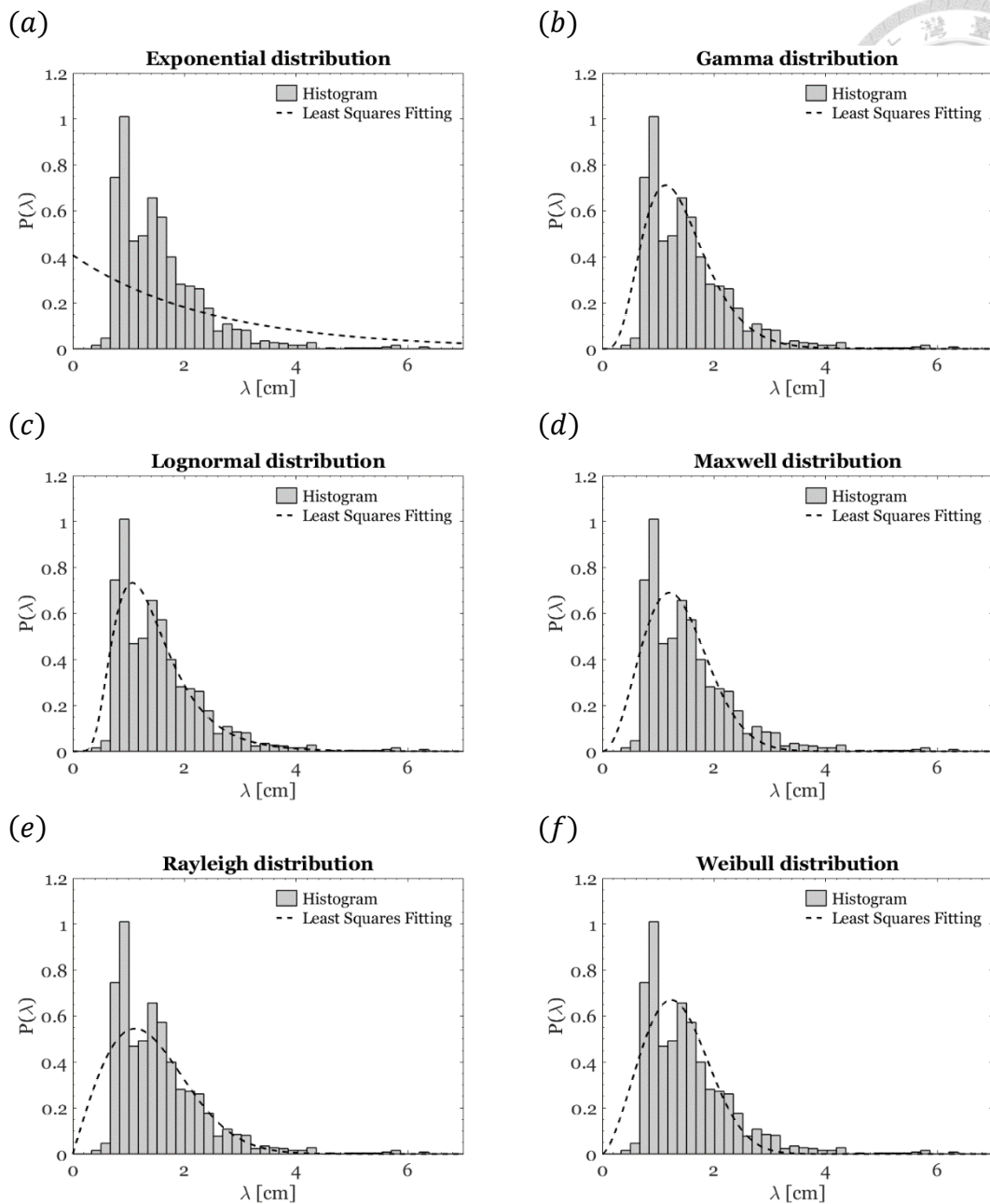


圖 4.12: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。

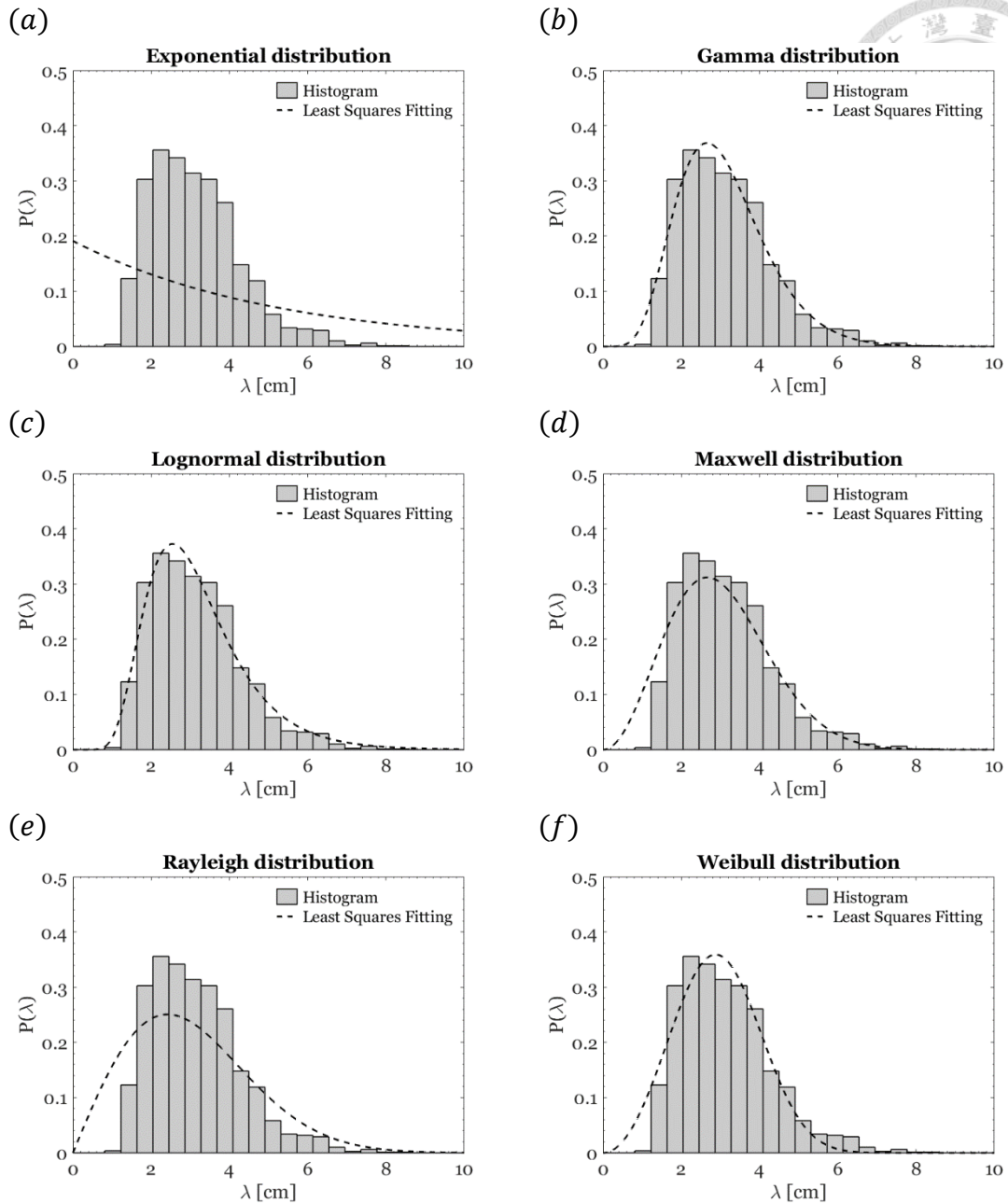


圖 4.13：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

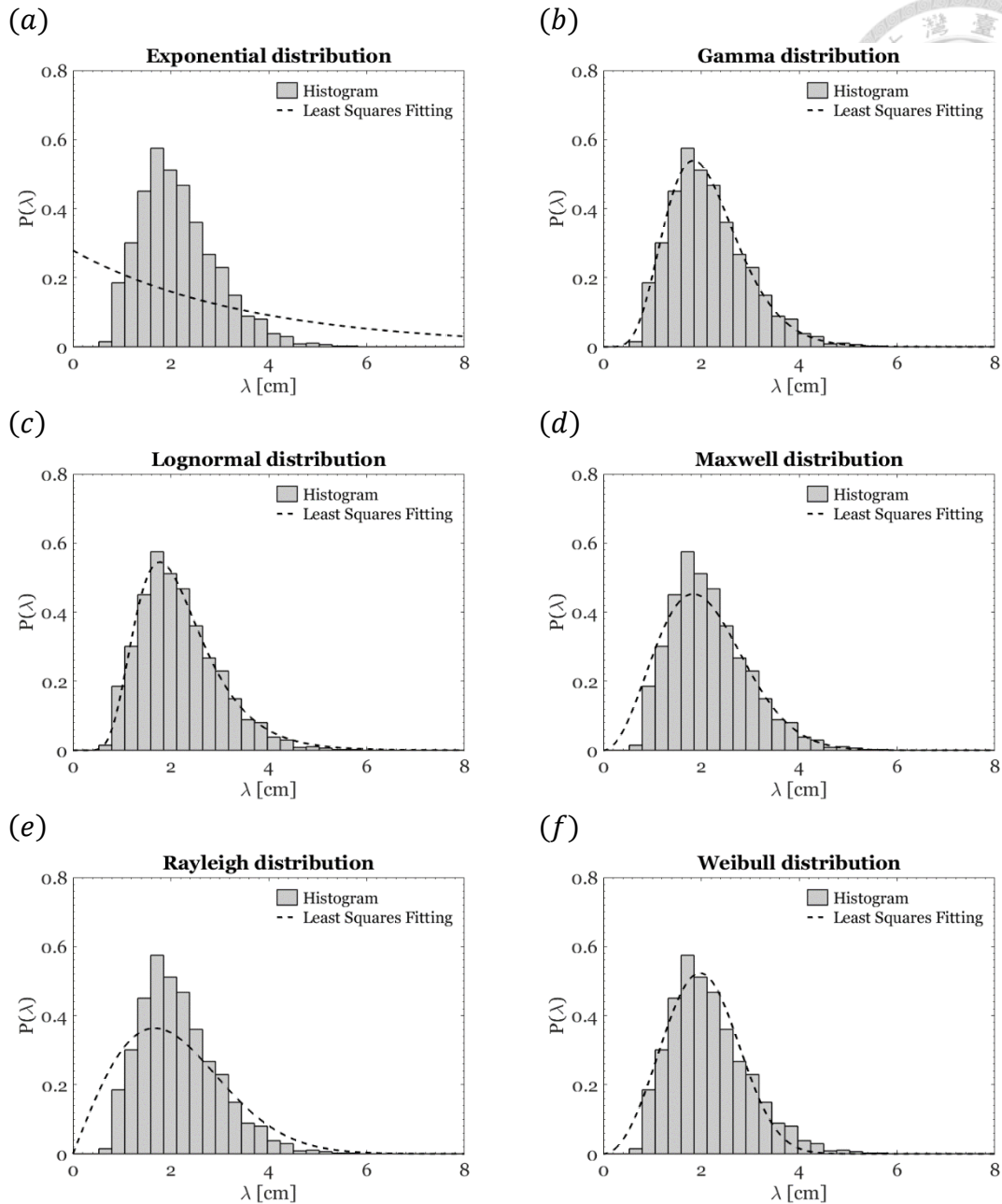


圖 4.14：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

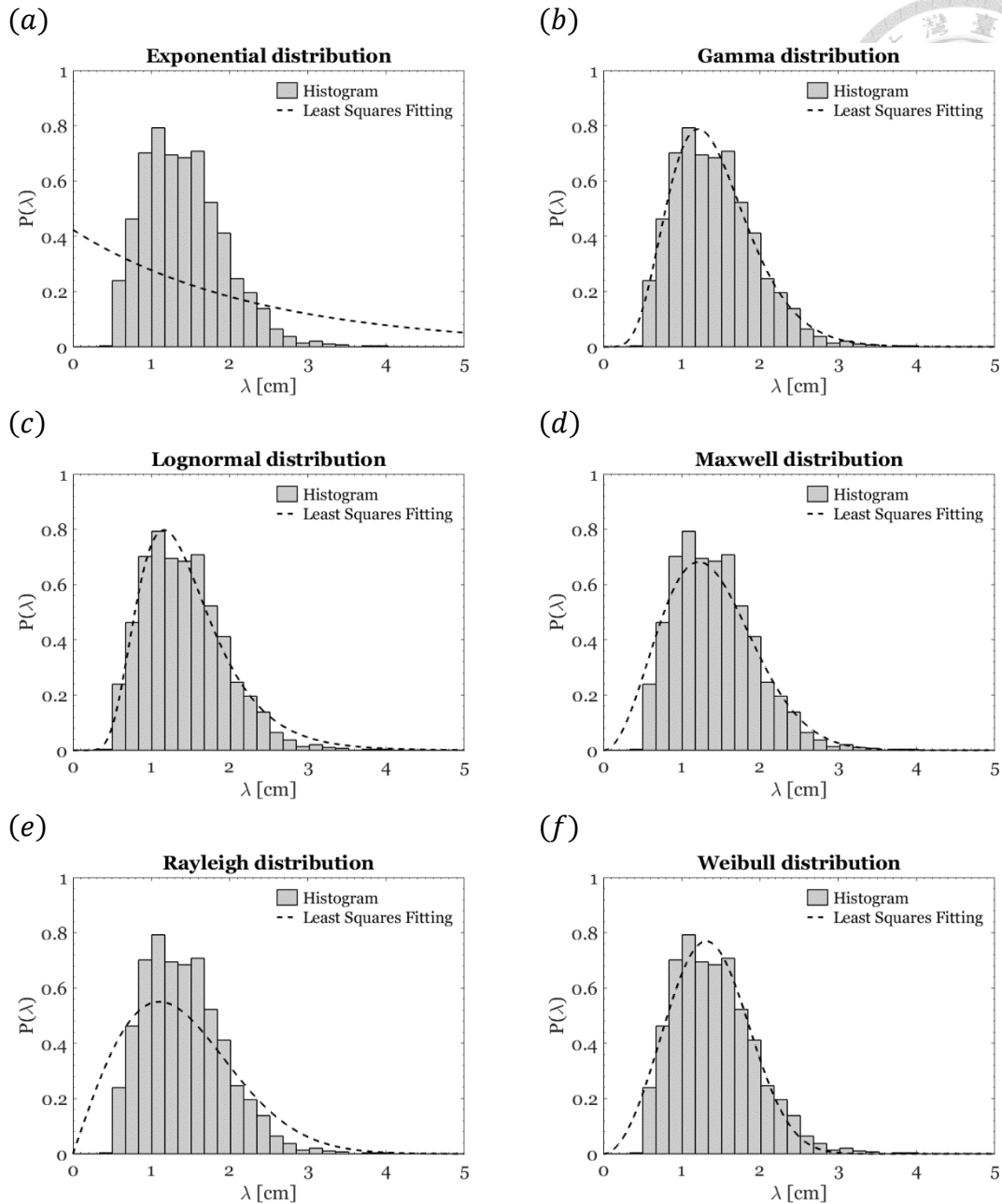


圖 4.15: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。

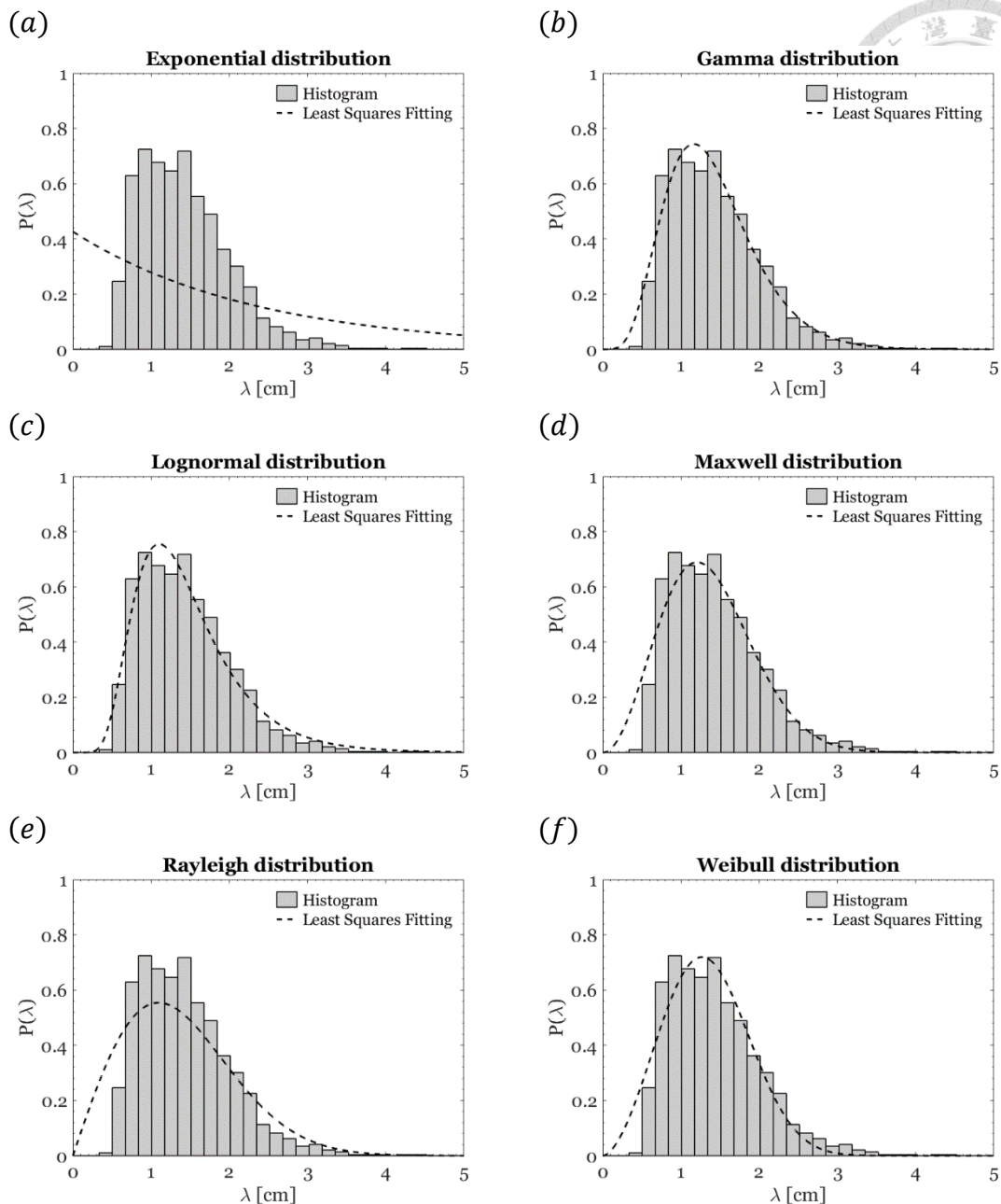


圖 4.16：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

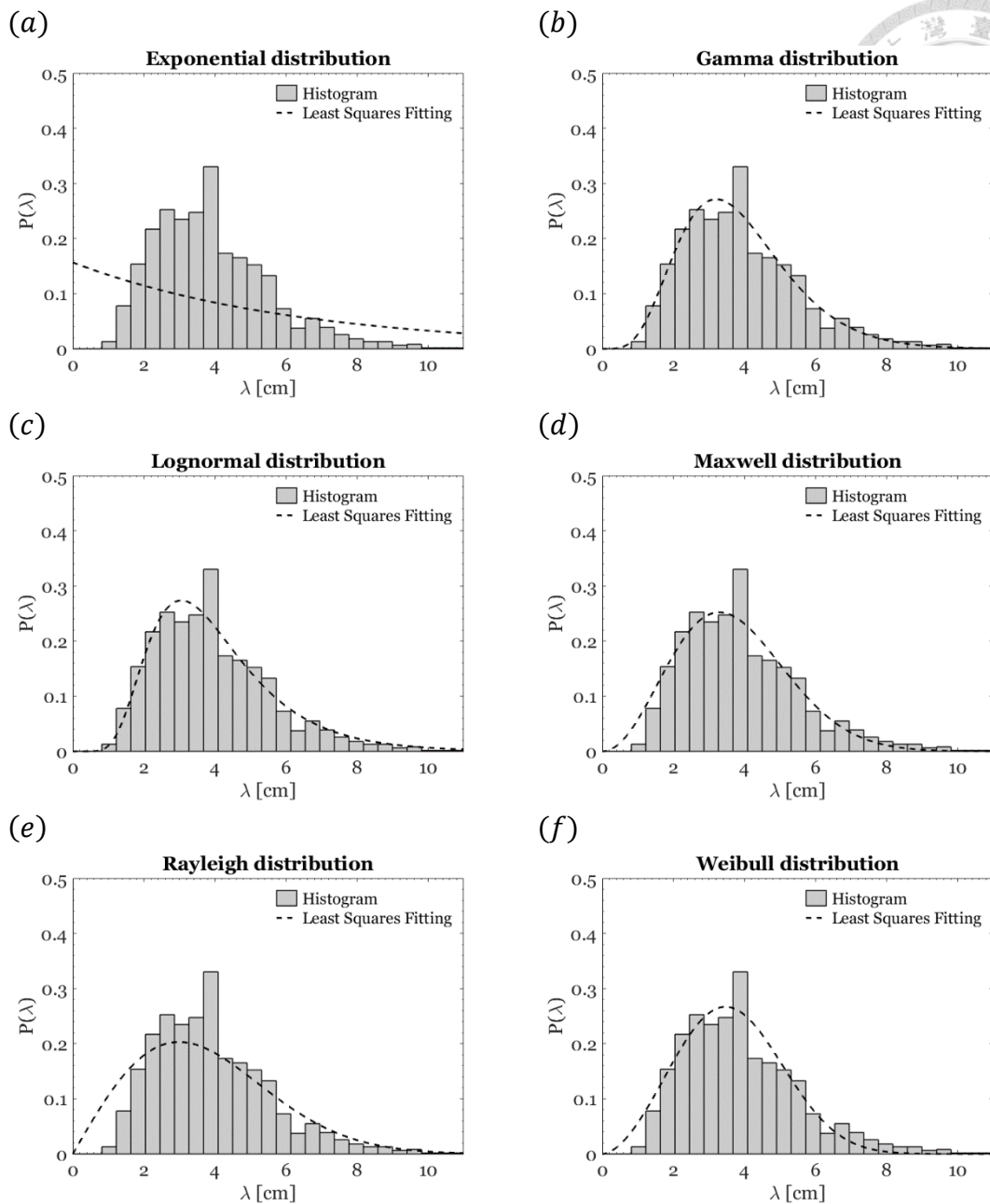


圖 4.17：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

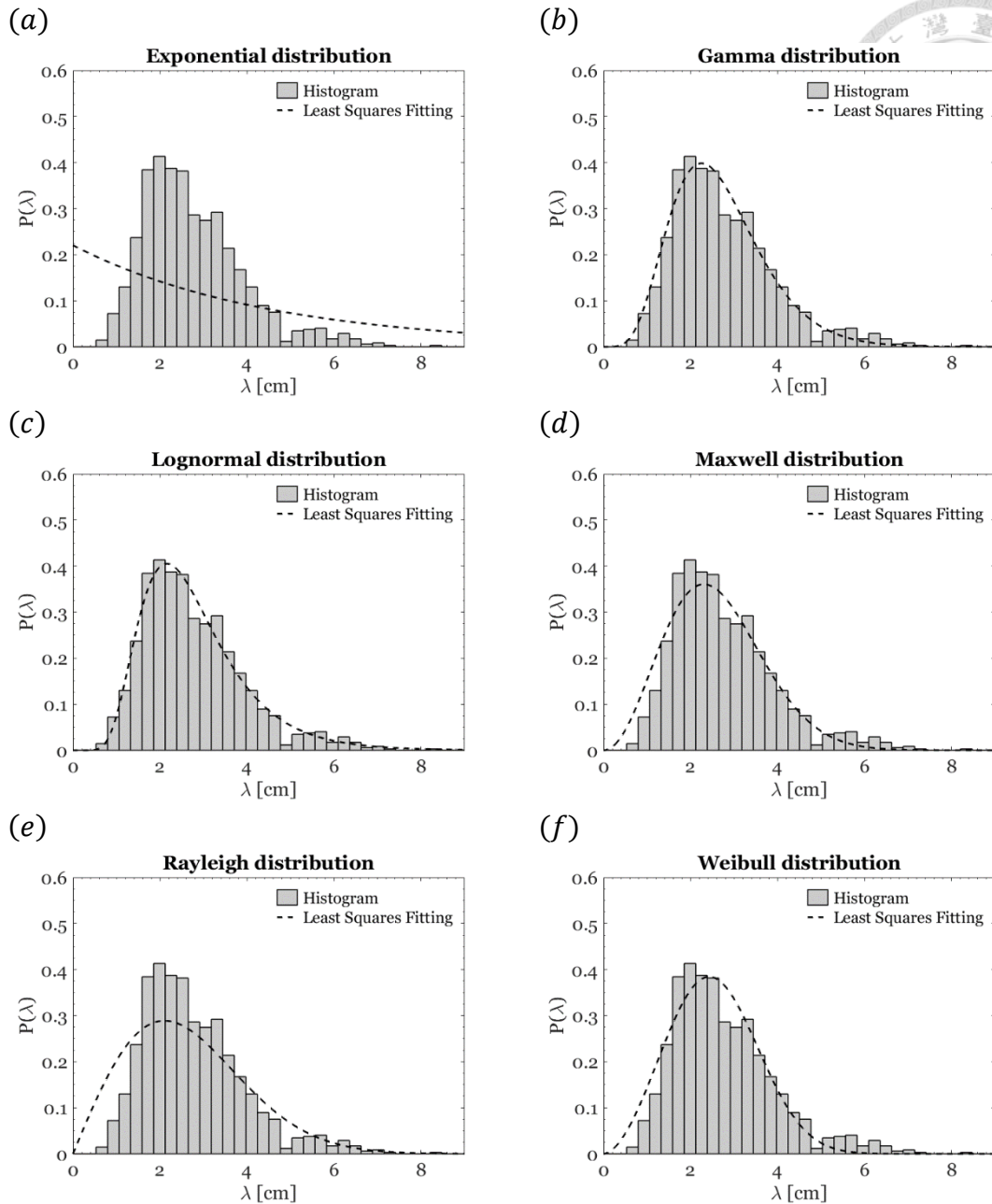


圖 4.18：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。

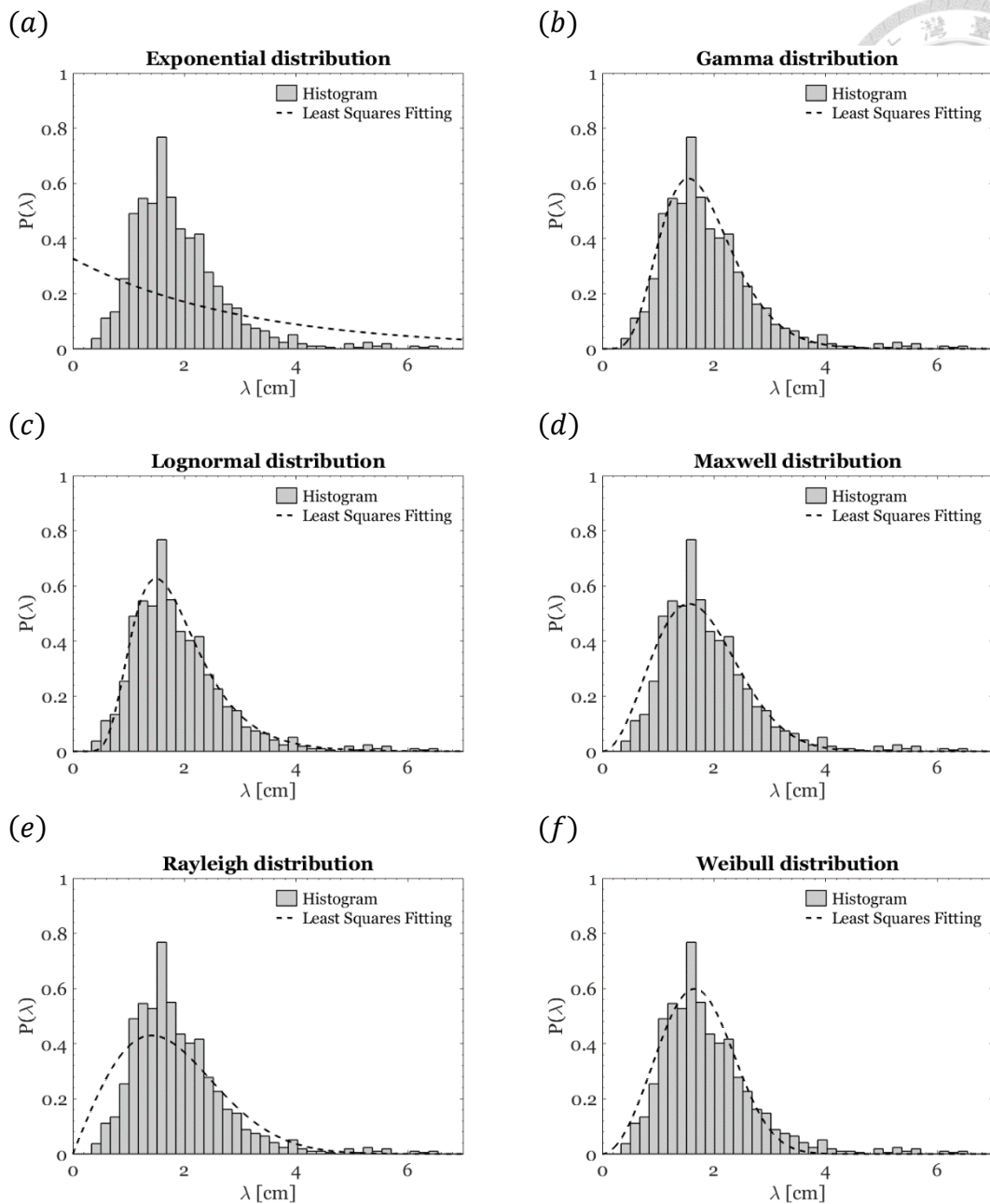


圖 4.19: 模擬風速 5 m/s, 穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之流場影像, 藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強, 統計而得條痕間距直方圖, 並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合, 並以黑虛線表示, 橫軸為有因次之條痕間距, 單位為公分 (cm), 縱軸為機率密度。

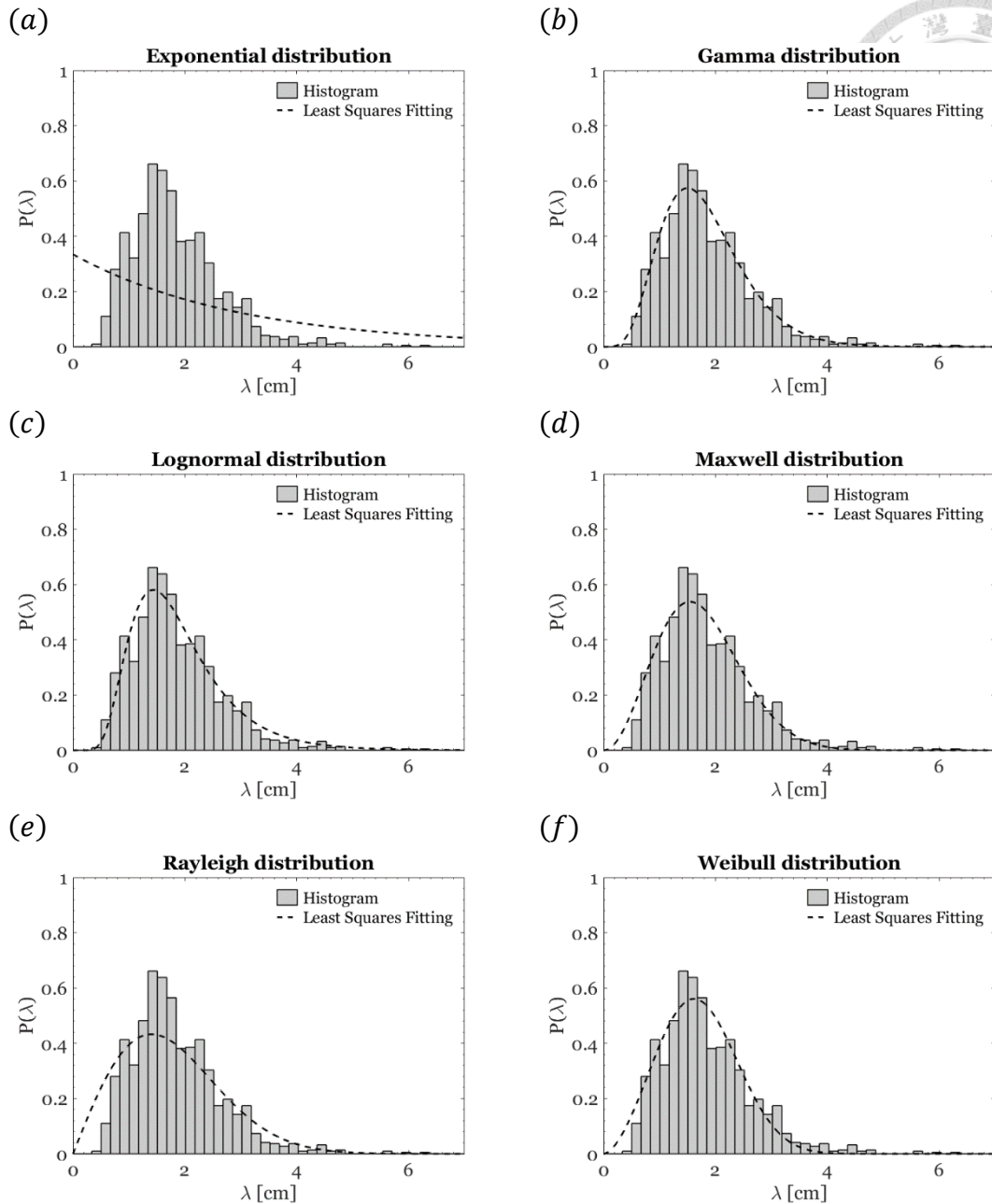


圖 4.20：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之流場影像，藉由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強，統計而得條痕間距直方圖，並與六種理論分佈進行最小平方擬合。圖 (a) 至圖 (f) 分別為指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈、韋伯分佈與條痕間距分佈之最小平方擬合，並以黑虛線表示，橫軸為有因次之條痕間距，單位為公分 (cm)，縱軸為機率密度。



4.2.2 卡方適合度檢定

藉由卡方適合度檢定以進一步了解理論分佈與條痕間距分佈的吻合程度，此為西元 1900 年英國數學家卡爾·皮爾森 (Karl Pearson) 所發展的方法，透過比較觀測數目及期望數目，計算得到卡方檢定統計量 (chi-square test statistic) χ^2 ，並客觀地設定某一信心水準來判斷，理論分佈與條痕間距分佈是否吻合。以下說明本研究卡方適合度檢定之流程：

1. 提出虛無假設 (null hypothesis) 及對立假設 (alternative hypothesis)，其中虛無假設為理論分佈與條痕間距分佈相互吻合；對立假設為理論分佈與條痕間距分佈沒有相互吻合。
2. 參考 Ryanzhin 等(2005) 設定檢定之信心水準 (confidence level) 為 0.95，顯著水準 α (significant level) 為 0.05。
3. 以條痕間距分佈得出觀測數目 O_i ，理論分佈得出 E_i ，計算卡方檢定統計量 χ^2 ，如下所示：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4.12)$$

其中 N 為區間總數目， O_i 為在第 i 區間之觀測數目 (observed counts)，由低溫條痕之間距分佈所推得， E_i 為在第 i 區間之期望數目 (expected counts)，由理論分佈所推得。由上式可推得若觀測分佈符合理論分佈，則觀測數目和期望數目應相差不大，故 χ^2 值甚小；反之，若觀測分佈不符合理論分佈，則觀測數目和期望數目差異大，故 χ^2 值甚大。

4. 計算假設檢定之自由度 ν (degree of freedom)，如以下所示：

$$\nu = \text{nbins} - \text{nparams} - 1 \quad (4.13)$$

其中nbins 為區間總數目，nparams 為理論分佈之參數估計數目。本研究繪製條痕間距之直方圖，其上限和下限分別為 0 和 100 個網格，區間寬度為 1 個網格，預設區間總數目為 100。當區間之期望次數太低，會使機率分配無法近似於卡方分佈 (chi-square distribution)，故本研究中每區間的期望數目過小 (< 5)，則向左右兩旁合併，直到區間中的期望數目足夠 (> 5)，減少受極端值之影響，計算區間總數目 nbins。

5. 根據顯著水準 α 為 0.05 及自由度 ν 去查表 (附錄一)，以得出卡方分佈臨界值 $\chi_{0.05}^2$ 並確定拒絕區域，卡方分佈如下所示：

$$f(\chi^2) = \frac{(\chi^2)^{(\nu-2)/2} \exp\left[-\frac{\chi^2}{2}\right]}{2^{\nu/2} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \quad (4.14)$$

其中 $\chi^2 > 0$ ； ν 表示自由度 (degrees of freedom)，為形狀參數； Γ 表示伽瑪函數。卡方分佈與自由度之關係圖，如圖 4.21 (a) 所示。橫軸為卡方值 χ^2 ；縱軸為機率密度 $f(\chi^2)$ 。分別繪製自由度為 5、10、15、20 及 25 之卡方分佈，由圖形分佈發現：當自由度愈大，曲線分佈愈平緩，愈近似於常態分佈。自由度為 20 之卡方分佈臨界值 $\chi_{0.05}^2 = 31.410$ ，臨界值右方為拒絕域 (rejection region)，其面積總合 0.05；臨界值左方為接受域 (acceptance region)，其面積總合 0.95，如圖 4.21 (b) 所示。

6. 比較卡方檢定統計量 χ^2 和卡方分佈臨界值 $\chi_{0.05}^2$ 之大小以判斷是否通過檢定。

本研究利用右尾檢定法 (right-tailed test)，藉由比較卡方檢定統計量 χ^2 和卡方分佈臨界值 $\chi_{0.05}^2$ 以判斷假設檢定之結果。若觀測數目和期望數目兩者之差異過大，卡方值大於臨界值 ($\chi^2 > \chi_{0.05}^2$)， χ^2 落在拒絕域，則拒絕虛無假設，接受對立假設，理論分佈與條痕間距分佈沒有吻合；若觀測數目和期望數目兩者之差異甚小，卡方值小於臨界值 ($\chi^2 < \chi_{0.05}^2$)，則拒絕對立假設，無法拒絕 (接受) 虛無假設，理論分佈與條痕間距分佈吻合。

卡方適合度檢定結果、自由度 ν 、卡方值 χ^2 及卡方臨界值 $\chi_{0.05}^2$ 整理至表 4.5 至表 4.20，其中 p -value 為用來衡量虛無假設的顯著性，計算方式如下所示：

$$p\text{-value} = p(\chi^2) = \int_{\chi^2}^{\infty} f(\chi^2) d\chi^2 \quad (4.15)$$

而當 p -value 比原先設定的顯著水準還小時，則拒絕虛無假設，且其值介於 0 到 1 之間，此值小於 10^{-10} 則以 0 表示，且 p -value 越小則代表吻合程度越低，若 p -value 大於顯著水準，則無法拒絕虛無假設，即為理論分佈與條痕間距分佈吻合，且 p -value 越大則代表吻合程度越高。

在各風速之四個穩定時段中經由自適應直方圖等化及伽瑪校正處理後的影像，其條痕間距分佈與理論分佈進行最小平方擬和，以人為主觀察理論分佈與條痕間距分佈的吻合程度，觀察到伽瑪分佈與對數常態分佈十分近似條痕間距分佈，而藉由卡方適合度檢定卻發現並無任何理論分佈與條痕間距分佈吻合，從表 4.5 至表 4.20 中可看出，指數分佈、馬克士威分佈、雷利分佈及韋伯分佈之卡方值與臨界值相差極大，且 p -value 趨近於零，代表吻合程度低，但伽瑪分佈與對數常態分佈之卡方值卻與臨界值相差不大，且 p -value 較為接近顯著水準 0.05，代表此兩種分佈與條痕間距分佈相對於其他四種理論分佈是較為近似的。

表 4.5：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 3 m/s ; time : 15.4 ~ 22.0 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	41	4248.212	56.933	0	未通過
伽瑪分佈	8	636.383	15.507	0	未通過
對數常態分佈	10	243.425	18.307	0	未通過
馬克士威分佈	13	562.868	22.362	0	未通過
雷利分佈	16	957.178	26.296	0	未通過
韋伯分佈	7	1340.911	14.067	0	未通過

表 4.6：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 4 m/s ; time : 10.9 ~ 15.6 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	43	3225.824	59.282	0	未通過
伽瑪分佈	10	656.922	18.307	0	未通過
對數常態分佈	12	172.956	21.026	0	未通過
馬克士威分佈	14	436.742	23.685	0	未通過
雷利分佈	17	636.752	27.587	0	未通過
韋伯分佈	9	3653.031	16.919	0	未通過

表 4.7：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 5.4 ~ 8.1 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	43	3199.098	59.282	0	未通過
伽瑪分佈	13	230.949	22.362	0	未通過
對數常態分佈	14	144.296	23.685	0	未通過
馬克士威分佈	15	352.022	24.996	0	未通過
雷利分佈	18	647.141	28.869	0	未通過
韋伯分佈	10	646.402	18.307	0	未通過

表 4.8：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 9.4 ~ 12.1 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	43	3086.813	59.282	0	未通過
伽瑪分佈	13	455.849	22.362	0	未通過
對數常態分佈	14	186.793	23.685	0	未通過
馬克士威分佈	15	521.007	24.996	0	未通過
雷利分佈	18	637.824	28.869	0	未通過
韋伯分佈	10	1573.921	18.307	0	未通過

表 4.9：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 3 m/s ; time : 15.4 ~ 22.0 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	43	2963.885	59.282	0	未通過
伽瑪分佈	12	1412.653	21.026	0	未通過
對數常態分佈	13	618.982	22.362	0	未通過
馬克士威分佈	14	1131.981	23.685	0	未通過
雷利分佈	17	794.29	27.587	0	未通過
韋伯分佈	10	4367.172	18.307	0	未通過

表 4.10：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 4 m/s ; time : 10.9 ~ 15.6 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	46	1876.158	62.806	0	未通過
伽瑪分佈	17	447.361	27.587	0	未通過
對數常態分佈	18	147.903	28.869	0	未通過
馬克士威分佈	17	938.148	27.587	0	未通過
雷利分佈	21	449.494	32.671	0	未通過
韋伯分佈	16	1180.079	26.296	0	未通過

表 4. 11：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 5.4 ~ 8.1 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	46	1834.796	62.806	0	未通過
伽瑪分佈	17	244.263	27.587	0	未通過
對數常態分佈	19	113.616	30.144	0	未通過
馬克士威分佈	17	492.443	27.587	0	未通過
雷利分佈	21	351.129	32.671	0	未通過
韋伯分佈	15	762.575	24.996	0	未通過

表 4. 12：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 7×7 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 9.4 ~ 12.1 s, AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	45	1919.211	61.632	0	未通過
伽瑪分佈	17	427.573	27.587	0	未通過
對數常態分佈	18	212.899	28.869	0	未通過
馬克士威分佈	16	922.867	26.296	0	未通過
雷利分佈	16	505.029	26.296	0	未通過
韋伯分佈	16	1427.011	26.296	0	未通過

表 4. 13：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 3 m/s ; time : 15.4 ~ 22.0 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	44	2772.527	60.457	0	未通過
伽瑪分佈	13	69.345	22.362	1.059×10^{-9}	未通過
對數常態分佈	15	60.914	24.996	1.755×10^{-7}	未通過
馬克士威分佈	15	183.683	24.996	0	未通過
雷利分佈	19	464.845	30.144	0	未通過
韋伯分佈	11	476.557	19.675	0	未通過

表 4. 14：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 4 m/s ; time : 10.9 ~ 15.6 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	45	2485.398	61.632	0	未通過
伽瑪分佈	14	27.008	23.685	0.0192	未通過
對數常態分佈	16	34.1458	26.296	0.0052	未通過
馬克士威分佈	16	125.944	26.296	0	未通過
雷利分佈	20	384.047	31.41	0	未通過
韋伯分佈	12	351.33	21.026	0	未通過

表 4. 15：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 5.4 ~ 8.1 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	46	2441.512	62.806	0	未通過
伽瑪分佈	14	40.258	23.685	2.235×10^{-4}	未通過
對數常態分佈	14	52.624	23.685	2.204×10^{-6}	未通過
馬克士威分佈	17	125.345	27.587	0	未通過
雷利分佈	20	384.947	31.41	0	未通過
韋伯分佈	13	157.628	22.362	0	未通過

表 4. 16：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 2 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 9.4 ~ 12.1 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	45	2118.711	61.632	0	未通過
伽瑪分佈	17	62.488	27.587	4.059×10^{-5}	未通過
對數常態分佈	18	62.621	28.869	7.664×10^{-7}	未通過
馬克士威分佈	17	141.864	27.587	0	未通過
雷利分佈	20	293.231	31.41	0	未通過
韋伯分佈	14	342.078	23.685	0	未通過

表 4. 17：模擬風速 3 m/s，穩定時段為 15.4 ~ 22.0 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 3 m/s ; time : 15.4 ~ 22.0 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	47	1805.744	63.981	0	未通過
伽瑪分佈	18	56.358	28.869	7.823×10^{-6}	未通過
對數常態分佈	19	58.485	30.144	6.703×10^{-6}	未通過
馬克士威分佈	18	157.763	28.869	0	未通過
雷利分佈	22	239.628	33.924	0	未通過
韋伯分佈	15	371.141	24.996	0	未通過

表 4. 18：模擬風速 4 m/s，穩定時段為 10.9 ~ 15.6 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 4 m/s ; time : 10.9 ~ 15.6 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	48	1560.494	65.156	0	未通過
伽瑪分佈	18	88.245	28.869	0	未通過
對數常態分佈	19	34.498	30.144	0.016	未通過
馬克士威分佈	20	215.301	31.41	0	未通過
雷利分佈	23	225.251	35.173	0	未通過
韋伯分佈	17	748.694	27.587	0	未通過

表 4. 19：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 5.4 ~ 8.1 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	48	1622.197	65.156	0	未通過
伽瑪分佈	18	126.321	28.869	0	未通過
對數常態分佈	19	44.028	30.144	9.359×10^{-6}	未通過
馬克士威分佈	21	240.674	32.671	0	未通過
雷利分佈	25	257.247	37.653	0	未通過
韋伯分佈	17	618.198	27.587	0	未通過

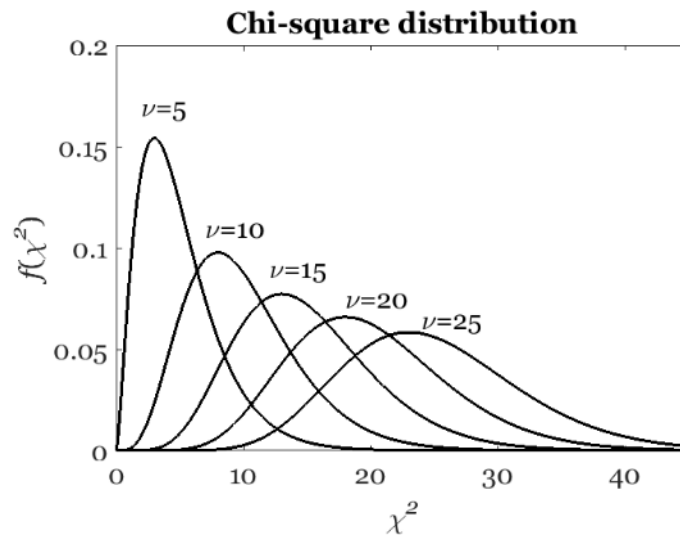
表 4. 20：模擬風速 5 m/s，穩定時段為 9.4 ~ 12.1 s 之影像，經由矩形範圍 11×11 之自適應直方圖等化及指數為 4 之伽瑪校正進行影像增強後，其條痕間距分佈與理論分佈之卡方適合度檢定結果。

Wind speed : 5 m/s ; time : 9.4 ~ 12.1 s, AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$

機率密度函數	ν	χ^2	$\chi_{0.05}^2$	p -value	結果
指數分佈	49	1514.421	66.330	0	未通過
伽瑪分佈	20	56.953	31.41	2.087×10^{-5}	未通過
對數常態分佈	21	64.402	32.671	2.694×10^{-6}	未通過
馬克士威分佈	21	144.435	32.671	0	未通過
雷利分佈	25	205.654	37.653	0	未通過
韋伯分佈	18	278.691	28.869	0	未通過



(a)



(b)

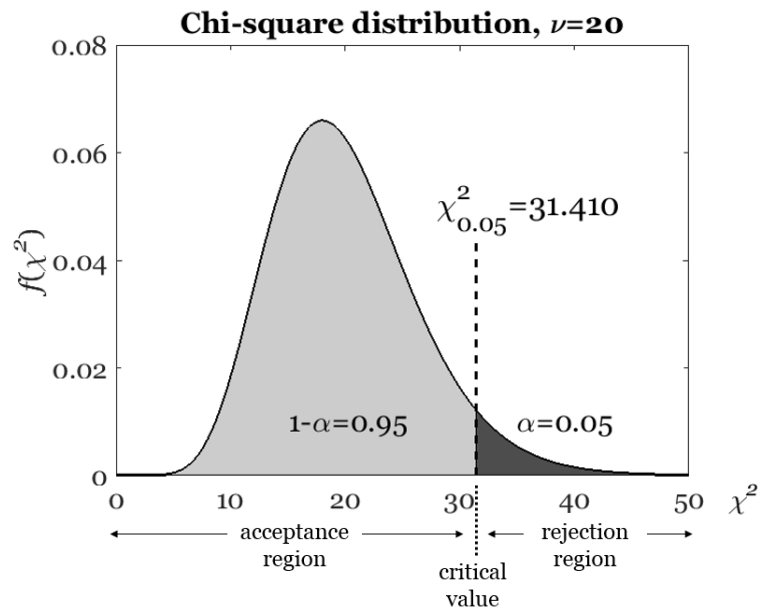


圖 4.21：圖 (a) 自由度與卡方分佈關係圖。自由度分別為 5、10、15、20 及 25 之卡方分佈。圖 (b) 自由度為 20 之卡方分佈，其臨界值為 $\chi^2_{0.05} = 31.410$ ，臨界值右側為拒絕域，臨界值左側為接受域。橫軸為卡方值，縱軸為機率密度。



4.3 結果整理與討論

本研究分析的資料來源為 Tsai 等(2005) 引入 Melville 等(1998) 水槽實驗之物理參數進行的數值模擬資料，並利用影像處理技術：自適應直方圖等化 (AHE)、伽瑪校正及大津演算法，且參考 Smith 等(1983) 及 溫國暉(2004) 之辨識條痕準則以執行自動辨識流場水面影像之高速條痕結構，並統計高速條痕間距及探討其特性。

將模擬風速 3 m/s、4 m/s 及 5 m/s 穩定時段之流場水面資料，經由影像處理及自動條痕辨識步驟所得的無因次平均條痕間距 $\overline{\lambda^+}$ 和有因次平均條痕間距 $\overline{\lambda}$ ，單位為公分 (cm)，以及 Melville 等(1998) 之實驗結果、Tsai 等(2005) 之數值模擬結果、溫國暉(2004) 之研究結果整理至表 4. 21，其中模擬風速 5 m/s 以穩定時段為 5.4 ~ 8.1 s 之結果為代表，前四列為經由各別矩形範圍之自適應直方圖等化及不同指數之伽瑪校正處理的結果，溫國暉(2004) 所分析的資料與本研究同為 Tsai(2001) 之數值模擬資料，並以利用相對高速點位進行條痕辨識的結果為代表，並將各個結果繪製成圖 4. 22 進行比較。

從表 4. 21 及圖 4. 22 中觀察到自適應直方圖等化之矩形範圍越小，其平均條痕間距則越小，伽瑪校正之指數越大，其平均條痕間距則越大，而經由不同影像處理所得之結果皆具有相同特性，即為隨著模擬風速的增加，無因次平均條痕間距及有因次平均條痕間距皆隨之縮減，此統計特性與 溫國暉(2004) 之結果相同。

本研究的每個資料穩定時段皆有 120 張影像，藉由影像處理技術，以大津演算法自動計算每一張流場影像之最佳臨界值，進而執行影像切割，擷取出影像中的高速區域，並依照辨識準則自動辨識條痕結構，其統計而得的條痕間距分佈，與六種理論分佈進行最小平方擬和，觀察條痕間距分佈之直方圖，發現多數結果與對數常態分佈近似，且有少數結果也與伽瑪分佈近似，而利用卡方適合度檢定

卻發現其六種理論分佈皆沒有通過檢定，即皆沒有與條痕間距分佈相互吻合，但觀察對數常態分佈及伽碼分佈之 p -value，與顯著水準相差不遠，其代表觀測分佈與理論期望分佈差異不大，另外四種理論分佈分別為指數分佈、馬克士威分佈、雷利分佈及韋伯分佈，其 p -value 趨近於零，代表觀測分佈與理論分佈差異甚大，故無論以人為的主觀判斷，或是以較客觀地卡方適合度檢定，這四種理論分佈皆不吻合本研究之條痕間距分佈。

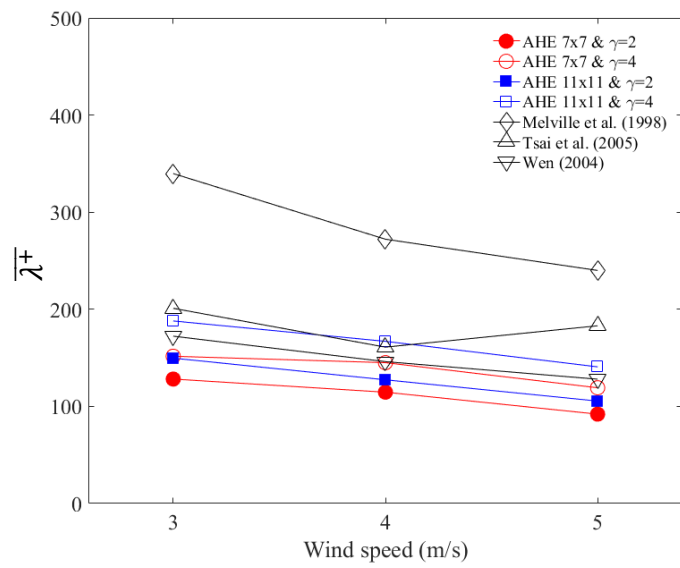
運用多種影像增強方法處理流場水面資料所獲得之結果，皆具有兩種統計特性，分別為隨著風速增加，平均條痕間距隨之縮減，以及條痕間距分佈近似於對數常態分佈。

表 4. 21：各風速利用不同影像處理技術所得的平均條痕間距，以及 Melville 等 (1998)、Tsai 等(2005)、溫國暉(2004) 之研究結果。

模擬風速		3 m/s	4 m/s	5 m/s
AHE window : 7×7 & $\gamma = 2$	$\bar{\lambda}^+$	128.146	114.626	92.024
	$\bar{\lambda}$ (cm)	2.599	1.882	1.205
AHE window : 7×7 & $\gamma = 4$	$\bar{\lambda}^+$	151.632	145.021	119.169
	$\bar{\lambda}$ (cm)	3.076	2.381	1.559
AHE window : 11×11 & $\gamma = 2$	$\bar{\lambda}^+$	149.694	127.372	105.493
	$\bar{\lambda}$ (cm)	3.036	2.092	1.381
AHE window : 11×11 & $\gamma = 4$	$\bar{\lambda}^+$	187.971	167.006	140.721
	$\bar{\lambda}$ (cm)	3.813	2.742	1.842
Melville 等(1998)	$\bar{\lambda}^+$	339.75	272.16	239.98
	$\bar{\lambda}$ (cm)	7.55	4.86	3.38
Tsai 等(2005)	$\bar{\lambda}^+$	201	161	183
	$\bar{\lambda}$ (cm)	4.28	2.64	2.47
溫國暉(2004)	$\bar{\lambda}^+$	172.3	146.1	128
	$\bar{\lambda}$ (cm)	3.6	2.3	1.6



(a)



(b)

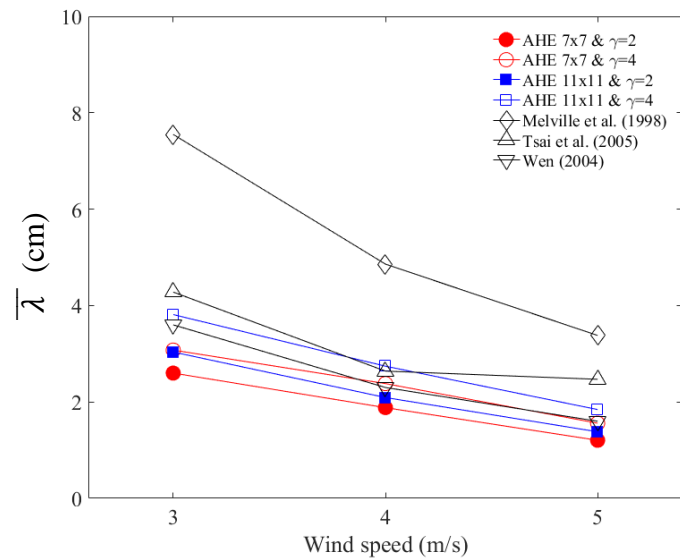


圖 4.22：平均條痕間距與風速之關係圖。橫軸為風速，單位以 m/s 表示，縱軸為平均條痕間距，圖 (a) 單位以無因次表示，圖 (b) 單位以 cm 表示，紅色實心及空心圓形，分別代表運用矩形範圍 7×7 自適應直方圖等化和指數為 2 及 4 之伽瑪校正進行影像處理的結果；藍色實心及空心方形，分別代表運用矩形範圍 11×11 自適應直方圖等化和指數為 2 及 4 之伽瑪校正進行影像處理的結果；菱形、上三角形及下三角形分別代表 Melville 等(1998)、Tsai 等(2005)及溫國暉(2004) 之結果。

第五章 結論



本研究運用影像處理技術分析風剪驅動自由液面紊流場之數值模擬資料，並計算各影像辨識而得的條痕間距，統計各風速之條痕間距分佈，以探討水面條痕結構特性。

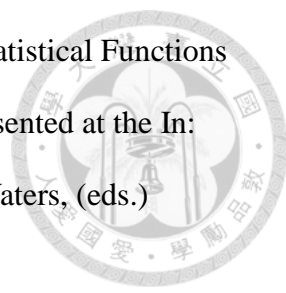
從數值模擬資料之水面沿流向流速分佈影像觀察到在較高流速區域有沿流向延伸且呈現長條狀之條痕結構，利用自適應直方圖等化及伽瑪校正對影像中的高速區域進行增強，再藉由大津演算法自動從每筆資料計算出最佳門檻值，將水面流速分佈影像轉換成二值化影像，高速區域則為二值化影像中的強度極大值，並從其中自動辨識條痕結構，統計各模擬風速資料經由不同影像增強方法所辨識而得條痕間距。若自適應直方圖等化之矩形範圍越小，其影像增強後所辨識出的平均條痕間距與標準差則越小；若伽瑪校正之指數越大，其影像增強後所辨識出的平均條痕間距與標準差則越大。將六種理論分佈：指數分佈、伽瑪分佈、對數常態分佈、馬克士威分佈、雷利分佈及韋伯分佈，與條痕間距分佈進行最小平方擬合，且進行卡方適合度檢定，從檢定結果發現此六種皆未吻合，但對數常態分佈與伽瑪分佈之 p -value 與顯著水準相差不遠，其他四種理論分佈卻相差甚遠，代表對數常態分佈與伽瑪分佈相較於其他四種理論分佈更近似於條痕間距分佈，而從人為主觀判斷亦為對數常態分佈近似於大多數結果，此與前人之研究具有相同的統計特性。

影像處理技術能夠幫助在流場中辨識條痕結構，以利於進行條痕結構特性的分析，由本研究可得知在風剪驅動自由液面紊流場中，隨著剪動風速的增加而平均條痕間距會隨之遞減。於研究內容中詳細地記錄影像處理技術、自動辨識條痕步驟及條痕間距統計特性，盼以作為後人對風剪驅動自由液面紊流場進行研究的參考資料。

參考文獻



- [1] Ferrell, J. K., Richardson, F. M. and Beatty, K. O., "Dye Displacement Technique for Velocity Distribution Measurements," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 47, no. 1, pp. 29-33, 1955.
- [2] Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., "Digital Image Processing," 3rd ed., Prentice Hall, 2007.
- [3] Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Runstadler, P. W., "Structure of Turbulent Boundary Layers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 30, pp. 741-773, 1967.
- [4] Melville, W. K., Shear, R. and Veron, F., "Laboratory Measurements of the Generation and Evolution of Langmuir Circulations," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 364, pp. 31-58, Jun 1998.
- [5] Nakagawa, H. and Nezu, I., "Structure of Space-Time Correlations of Bursting Phenomena in an Open-Channel Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 104, pp. 1-43, 1981.
- [6] Otsu, N., "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 9, pp. 62-66, 1979.
- [7] Pizer, S. M., Amburn, E. P., Austin, J. D., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., Romeny, B. H., Zimmerman, J. B. and Zuiderveld, K., "Adaptive histogram equalization and its variations," *Comp. Vis. Graph. Image Process.*, vol. 39, no. 3, pp. 355-368, 1987.
- [8] Runstadler, P. W., Kline, S. J., and Reynolds, W. C., "An Experimental Investigation of the Flow Structure of the Turbulent Boundary Layer," DTIC Document, 1963.

- 
- [9] Ryanzhin, S. V., Kochkov, N. V., Chu, P. and Karlin, L. N., "Statistical Functions of Distribution for Spacing of Langmuir Circulation (Lc)," presented at the In: Proc. 9th Intern. Workshop on Physical Processes in Natural Waters, (eds.) A.Folkard, I.Jones, Lancaster UK, pp.71-77, 2005.
- [10] Smith C. R., and Metzler, S. P., "The Characteristics of Low-Speed Streaks in the near-Wall Region of a Turbulent Boundary-Layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 129, pp. 27-54, 1983.
- [11] Thompson, C. M., "Table of Percentage Points of the X(2) Distribution," *Biometrika*, vol. 32, pp. 187-191, Oct 1941.
- [12] Tsai, W.-T., "A Numerical Study of the Evolution and Structure of a Turbulent Shear Layer Under a Free Surface," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 354, pp. 239-276, 1998.
- [13] Tsai, W.-T., "On the Formation of Streaks on Wind-Driven Water Surfaces," *Geophysical research letters*, vol. 28, no.20, pp. 3959-3962, 2001.
- [14] Tsai, W.-T., Chen, S.-M. and Moeng, C.-H., "A Numerical Study on the Evolution and Structure of a Stress-Driven Free-Surface Turbulent Shear Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 545, pp. 163-192, 2005.
- [15] 溫國暉,「風剪趨動水體紊流邊界層水面高速條痕結構特徵之探討」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所, 2004。
- [16] 簡佑穎,「風浪表面熱圖像的條痕結構特性」, 碩士論文, 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系, 2017。

附錄一、卡方分佈臨界值表



【原表來源：Thompson (1941)】

TABLE OF PERCENTAGE POINTS OF THE χ^2 DISTRIBUTION

ν \ P	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.750
1	392704.10 ⁻¹⁰	157088.10 ⁻⁹	982069.10 ⁻⁸	393214.10 ⁻⁸	0.0157908	0.1015308
2	0.0100251	0.0201007	0.0506356	0.102587	0.210720	0.575364
3	0.0717212	0.114832	0.215795	0.351846	0.584375	1.212534
4	0.206990	0.297110	0.484419	0.710721	1.063623	1.92255
5	0.411740	0.554300	0.831211	1.145476	1.61031	2.67460
6	0.675727	0.872085	1.237347	1.63539	2.20413	3.45460
7	0.989265	1.239043	1.68987	2.16735	2.83311	4.25485
8	1.344419	1.646482	2.17973	2.73264	3.48954	5.07064
9	1.734928	2.087912	2.70039	3.32511	4.16816	5.89883
10	2.15585	2.55821	3.24697	3.94030	4.86518	6.73720
11	2.60321	3.05347	3.81575	4.57481	5.57770	7.58412
12	3.07382	3.57056	4.40379	5.22603	6.30380	8.43842
13	3.56503	4.10691	5.00874	5.89186	7.04150	9.29006
14	4.07468	4.66043	5.62872	6.57063	7.78953	10.1653
15	4.60094	5.22935	6.26214	7.26004	8.54675	11.0365
16	5.14224	5.81221	6.90766	7.96164	9.31223	11.9122
17	5.69724	6.40776	7.56418	8.67176	10.0852	12.7919
18	6.26481	7.01491	8.23075	9.39046	10.8649	13.6753
19	6.84398	7.63273	8.90655	10.1170	11.6509	14.5620
20	7.43386	8.26040	9.59083	10.8508	12.4426	15.4518
21	8.03366	8.89720	10.28293	11.5913	13.2396	16.3444
22	8.64272	9.54249	10.9823	12.3380	14.0415	17.2396
23	9.26042	10.19567	11.6885	13.0905	14.8479	18.1373
24	9.88623	10.8564	12.4011	13.8484	15.6587	19.0372
25	10.5197	11.5240	13.1197	14.6114	16.4734	19.9393
26	11.1603	12.1981	13.8439	15.3791	17.2919	20.8434
27	11.8076	12.8786	14.5733	16.1513	18.1138	21.7494
28	12.4613	13.5648	15.3079	16.9270	18.9392	22.6572
29	13.1211	14.2565	16.0471	17.7083	19.7677	23.5666
30	13.7887	14.9535	16.7908	18.4926	20.5992	24.4776
40	20.7085	22.1643	24.4331	26.5093	29.0505	33.6603
50	27.9907	29.7067	32.3574	34.7642	37.6886	42.0421
60	35.5346	37.4848	40.4817	43.1879	46.4589	50.8923
70	43.2752	45.4418	48.7576	51.7393	55.3290	60.1083
80	51.1720	53.5400	57.1532	60.3915	64.2778	70.1445
90	59.1983	61.7541	65.6466	69.1260	73.2912	80.6247
100	67.3276	70.0648	74.2219	77.9295	82.3581	90.5312
y_P	-2.5758	-2.3263	-1.9600	-1.6449	-1.2816	-0.6745

附錄一、卡方分佈臨界值表 (續)



【原表來源：Thompson (1941)】

TABLE OF PERCENTAGE POINTS OF THE χ^2 DISTRIBUTION (continued)

$\nu \backslash P$	0.500	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1	0.454937	1.32330	2.70554	3.84146	5.02389	6.63490	7.87944
2	1.38629	2.77259	4.60517	5.99147	7.37776	9.21034	10.5966
3	2.36597	4.10835	6.25139	7.81473	9.34840	11.3449	12.8381
4	3.35670	5.38527	7.77944	9.48773	11.1433	13.2767	14.8602
5	4.35146	6.62568	9.23635	11.0705	12.8325	15.0863	16.7496
6	5.34812	7.84080	10.6446	12.5916	14.4494	16.8119	18.5476
7	6.34581	9.03715	12.0170	14.0671	16.0128	18.4753	20.2777
8	7.34412	10.2188	13.3616	15.5073	17.5346	20.0902	21.9550
9	8.34283	11.3887	14.6837	16.9190	19.0228	21.6660	23.5893
10	9.34182	12.5489	15.9871	18.3070	20.4831	23.2093	25.1882
11	10.3410	13.7007	17.2750	19.6751	21.9200	24.7250	26.7569
12	11.3403	14.8454	18.5494	21.0261	23.3367	26.2170	28.2995
13	12.3398	15.9839	19.8119	22.3621	24.7356	27.6883	29.8194
14	13.3393	17.1170	21.0642	23.6848	26.1190	29.1413	31.3193
15	14.3389	18.2451	22.3072	24.9958	27.4884	30.5779	32.8013
16	15.3385	19.3688	23.5418	26.2962	28.8454	31.9999	34.2672
17	16.3381	20.4887	24.7690	27.5871	30.1910	33.4087	35.7185
18	17.3379	21.6049	25.9894	28.8693	31.5264	34.8053	37.1564
19	18.3376	22.7178	27.2036	30.1435	32.8523	36.1908	38.5822
20	19.3374	23.8277	28.4120	31.4104	34.1696	37.5662	39.9968
21	20.3372	24.9348	29.6151	32.6705	35.4789	38.9321	41.4010
22	21.3370	26.0393	30.8133	33.9244	36.7807	40.2894	42.7956
23	22.3369	27.1413	32.0069	35.1725	38.0757	41.6384	44.1813
24	23.3367	28.2412	33.1863	36.4151	39.3641	42.9798	45.5585
25	24.3366	29.3389	34.3816	37.6525	40.6465	44.3141	46.9278
26	25.3364	30.4345	35.5631	38.8852	41.9232	45.6417	48.2809
27	26.3363	31.5284	36.7412	40.1133	43.1944	46.9630	49.6449
28	27.3363	32.6205	37.9159	41.3372	44.4607	48.2782	50.9933
29	28.3362	33.7109	39.0875	42.5569	45.7222	49.5879	52.3356
30	29.3360	34.7998	40.2560	43.7729	46.9792	50.8922	53.6720
40	39.3354	45.6160	51.8050	55.7585	59.3417	63.6907	66.7659
50	49.3349	56.3336	63.1671	67.5048	71.4202	76.1539	79.4900
60	59.3347	66.9814	74.3970	79.0819	83.2976	88.3794	91.9517
70	69.3344	77.5766	85.5271	90.5312	95.0231	100.425	104.215
80	79.3343	88.1303	96.5782	101.879	106.629	112.329	116.321
90	89.3342	98.6499	107.565	113.145	118.136	124.116	128.299
100	99.3341	109.141	118.498	124.342	129.561	135.807	140.169
y_r	0.0000	+0.6745	+1.2816	+1.6449	+1.9600	+2.3263	+2.5758