

應用影像處理技術發展雨滴譜儀偵測系統

Development of Image Processing Based Disdrometer System

陳志彥、黃政翰、謝奇文、鐘太郎

Chih-Yen Chen, Jeng-Han Huang, Chi-Wen Hsieh, Tai-Lang Jong

本研究結合影像處理技術發展雨滴譜儀，偵測雨滴降落特性，用來分析降雨型態和有效的天氣預報。由於受到攝影機偵幅限制，無法偵測到足夠的雨滴降落速度，因此特別在實驗中設計短曝光時間和長曝光時間測量，分別拍攝雨滴降落過程，作為計算雨滴粒徑、面積大小、降落位移和方向等用途。本文除介紹實驗系統架構外，不同的曝光時間設定，以及該如何應用不同的影像處理流程進行雨滴特性分析，也將一併介紹。最後，此系統將進行玻璃小球和灑水裝置的模擬實驗，作為驗證影像處理技術在雨滴譜一開發上之有效性，和測試系統之初步成果。

In this study, a disdrometer system which was based on imaging processing technique has been developed for the detection of raindrop to analyze the precipitation and forecast the weather. Due to the limitation of system frame rate, the raindrop velocity is hard to be detected, and therefore, two measurements, the short exposure time and long exposure time, were proposed to record the falling motion and compute the raindrop size, shift displacement, and directions. Furthermore, the details of how to apply the image processing procedures were also shown in the content. Finally, the simulated tests were implemented by using both the glass balls and water-spray apparatus for verifying the effectiveness and the performance of the proposed imaging processing technique based distrometer system.

一、前言

台灣島面積不大，位處於環太平洋地區，長年受到季風氣候影響。由於島上具有高達三、四千公尺中央山脈縱貫南北，使得地形變化陡峻、河川短促，一旦遭遇颱風和熱帶高壓影響，加上氣候複雜多變等因素，便容易造成雨勢過度集中，產生豪大

降雨災情，使得沿海低窪地區和排水設計不良都會區一片汪洋；此外，集水區和山坡地則有洪水、土石流等災情產生，不只嚴重影響居民生活，同時也造成人民生命財產的巨大損失。就災害防治實務觀點，若是能夠具備準確的監測預警系統，提供即時觀測資料，就能掌握劇烈天氣變化並發布預警、定量降水預報等重要訊息，有效提升預報準確率，進

而保障社會大眾安全，並降低生命和財產損失⁽¹⁻²⁾。

近年來，極端降雨問題影響全球氣候甚巨，故先後有針對熱帶地區進行觀測的衛星遙測技術 TRMM (tropical rainfall measuring mission) 計畫，用以改善降雨預報準確性，還有經整合多衛星觀測資訊的 GPM (global precipitation measurement) 計畫，也將降雨預報準確性再次往上提升。台灣目前的降雨預報大多是透過雷達回波，找出降雨率和雷達回波 Z-R 關係，作為降雨估測參考資訊。有關降雨對雷達回波影響的研究，是由 Moore 等學者觀察海上降雨時，意外發現會對雷達量測風速造成干擾，才開啟了降雨對雷達波散射觀測的深入探討。在研究過程中，Moore 還發現降雨率與雨滴大小也會影響雷達回波強度⁽³⁾，因此陸續發表了以 SIR-C 與 X-SAR 衛星資料來評估雨量⁽⁴⁾，並且測試在降雨環境中電磁波傳遞，造成回波強度改變的特性，以及在大氣中不同雨滴型態影響電磁波衰減程度，藉以分辨降雨量的多寡。

由於氣象雷達能夠即時並連續觀測天氣變化，同時也具有空間解析能力的優點，因此是目前最被廣泛使用作為降雨預報的測量工具之一。然而其缺點是無法清楚地呈現某一地區的降雨特色，容易忽略區域內因地形變化產生的影響，導致不均勻的降雨分布。幸而，降雨過程中雨滴粒徑分佈也能提供雨量估測，若能藉由長時間觀察該地區降雨型態，便能有效地收集降雨參數，作為有效的評估參考。而透過雨滴譜儀的測量，正好可以提供雨滴粒徑分佈、降雨積分常數，用於推估降雨量。舉例來說，冷鋒型會具有較小雨滴，相對應的降雨率也較小，而梅雨鋒面的雨滴粒徑屬於較大顆粒且分布也較廣，至於颱風季節的雨滴則為中大尺寸，但分布也較為集中。由此來看，估測降雨量仍需要綜合考量所有的降雨型態系統，無法僅僅雷達回波單一工具進行評估⁽⁵⁻⁷⁾。

二、雨滴譜儀系統簡介

雨滴粒徑分佈通常用於氣象、水文研究等領域，因此研究此一特性即變得相當重要。一般而言，透過收集相同天氣系統在不同水平地點的雨滴

譜儀觀測資料，並且分析其降雨微物理結構特徵，有助於科學家或氣象觀測人員瞭解整個大氣系統的演變過程，也更能掌握天氣型態的變化。已知水滴落過程中，會受到空氣阻力的作用，使其達到終端速度，而這股作用力也同時會改變雨滴形狀，呈略微扁圓樣貌。通常較小的雨滴粒徑，較不易受氣流壓迫而變形，會維持正圓球形，一旦粒徑逐漸增大，變形現象將更加明顯⁽⁵⁾，而研究雨滴粒徑分佈 (drop size distribution)，是對雲及降雨型態觀測的重要項目之一。

傳統雨滴譜測量是指透過各種人工處理方式來獲得雨滴資料，再根據雨滴粒徑大小逐一分類計算。例如濾紙色斑法就是計算雨滴落在一定面積內，濾紙上的斑跡大小，再逐一計算雨滴個數，經過彙整後即可得到雨滴譜結果。然而傳統方法過於繁瑣，加上精確度差，因此已逐漸被各種新式雨滴譜儀儀器取代，例如有透過降落雨滴撞擊感應器的重力的撞擊式雨滴譜儀 (Joss-Waldvogel disdrometer, JWD)⁽⁸⁾、芬蘭 Vaisala 公司近年來所研發之新一代的聲波式雨滴譜儀⁽⁹⁾、利用雷射光發射光幕和透過光感測器偵測之一維光學式雨滴譜儀 (又稱為 Parsivel)⁽¹⁰⁾、以及相同原理延伸改良的二維光學式雨滴譜儀 (2D-video disdrometer, 2DVD)⁽¹¹⁾，相關儀器系統之優缺點比較列於表 1，提供參考比較。這些雨滴譜儀的發明，同時也補充雨滴粒徑的統計分析資料，增加了天氣預測的準確性。然而，上述產品是由國外廠商開發設計，其效能不一尚有待驗證，加上未考慮台灣島內特殊的極端降雨型態，也因此促成本研究的主要動機。

光學式雨滴譜儀可藉由雨滴粒子通過光幕遮蔽光感測器時，會隨著時間反應的訊號強度變化，重組出雨滴外型，如圖 1 之示意解說。本研究參考光學式雨滴譜儀偵測機制，經由完整面影像拍攝，可直接記錄雨滴掉落變化，最後再透過影像處理技術，求出對應的雨滴粒徑分佈。但受限於系統影像擷取偵率，無法有效計算雨滴落速，因此藉由兩種曝光時間 (100 μs 和 2000 μs) 的分析，分別拍攝不同雨滴型態，以求得降雨雨滴特性。由圖 2(a) 和 (b)，可以看出利用短曝光時間 100 μs 以及長曝光時間 2000 μs 時，所拍攝之玻璃小球影像特性，

表 1. 雨滴測量方法之優缺點比較。

測量方法	測量原理	優點	缺點
撞擊式	測量雨滴降落重力	適用在降雨雨滴均勻的降水測量	若降雨雨滴分佈較廣，則測量誤差大
聲波式	經雨滴降落產生震動音波，再由感測器接收	新式偵測雨滴技術，能監測較大的降落雨滴	易受相近雨滴和周遭環境影響，精確度不高
一維光學式	透過平行雷射光源，產生一偵測光幕區域，以偵測雨滴	能精確、靈敏偵測雨滴降落特性，目前最廣為使用	雨滴降落相近時容易產生誤判
二維式光學式	透過兩上下相間的平行交互垂直雷射光區域，偵測掉落雨滴	直接測量，能觀察雨滴大小、形狀、降落方向和速度，但價格昂貴	強風作用時，會使得兩上下相間的平行交互垂直雷射光區域不易匹配
影像式	透過影像攝影機紀錄，再經由影像處理找出雨滴參數	透過影像攝影機紀錄，硬體成本較低，且可彈性調整	影像擷取速率和解析度會影響雨滴譜儀的測量結果

其中短曝光時間拍攝中，由於曝光時間短暫，因此可以忽略下降過程中造成的移動拖曳現象，此一特性正好提供計算其雨滴之大小與形狀分布；相較之下，長曝光時間拍攝影像，則會造成移動拖曳的模糊效果，若能適當控制光圈和快門速度，再以一定頻率拍攝擷取雨滴影像，可用來計算其水平速度和垂直運動速度(降落速度及方向)。

在相關參數的計算部分，則可以透過偵測影像中雨滴顆粒的位置，求得雨滴位移之變化量，其計算公式如下

$$\vec{d} = \sum_i (d_2[t_2] - d_1[t_1]) \quad (1)$$

其中 d_1 和 d_2 分別為雨滴在 t_1 和 t_2 時間，所在之位置。透過方程式 (1) 之計算後，能夠得到雨滴在掉落過程中之移動向量 \vec{d} 。接著，找出 \vec{d} 與 CCD 所設定曝光時間之比值，便可以求得雨滴降落速度 (\vec{v}_f)

$$\vec{v}_f = \frac{\vec{d}}{t_{\text{exposure}}} \quad (2)$$

此處 \vec{d} 的計算，是藉由長曝光時間影像中，顆粒掉落的拖曳長度而決定。另外在等校直徑 (D_{eq}) 的計算，則是分析短曝光時間所拍攝之雨滴影像，接著進行對雨滴顆粒所圈選出之物件，判斷其面積尺寸，並表示為

$$D_{eq} = 2 \times \sqrt{\frac{Area}{\pi}} \quad (3)$$

其中 $Area$ 代表雨滴顆粒大小。接著，等到累積一段時間計算影像中各顆粒體積後，即可推測此一測量區域範圍內所累積的降雨量。但在此之前，仍需計算掉落雨滴顆粒之有效通過機率大小，如公式 (4)

$$Prob = \frac{(W - d_x - v_{fy} \cdot t_{\text{exposure}}) \times (H - d_y - v_{fx} \cdot t_{\text{exposure}})}{v_{fx} \cdot v_{fy} \cdot t_{\text{frame}}^2} \quad (4)$$

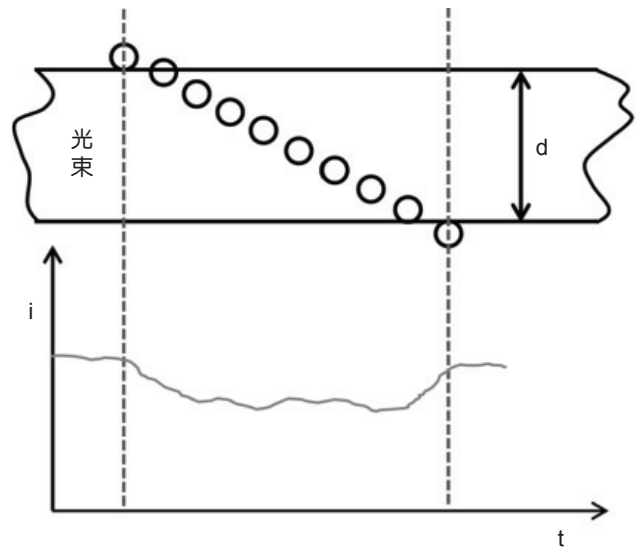


圖 1. 光學式雨滴譜的偵測機制，會隨著時間計算通過光幕的雨滴顆粒訊號強度。

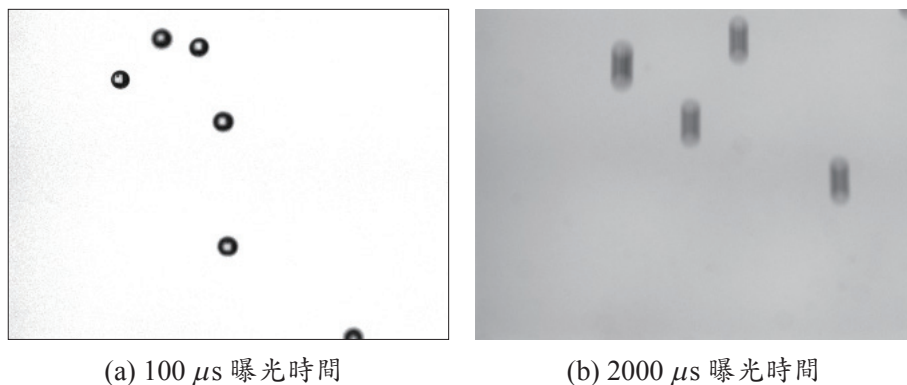


圖 2. 不同曝光時間下拍攝的玻璃小球掉落影像，其中 (a) 為 100 μs 曝光時間和 (b) 2000 μs 曝光時間。

其中 W 為偵測空間寬度、 H 為偵測空間高度、 d_x 和 d_y 分別為粒子水平和垂直方向大小、 v_{fx} 和 v_{fy} 各為水平與垂直方向速度、 t_{exposure} 是曝光時間設定，而 t_{frame} 則為擷取偵率之倒數。最後，降雨率 R 可經由下式計算而得，其單位為

$$R = \frac{3600}{\Delta t} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{A_i} \quad (5)$$

其中 V_i 與 A_i 為觀測第 i 顆粒之體積和有效的偵測面積。

三、量測方法

在實驗過程中，我們採用較高幀率之攝影機作為快速取像裝置，為了模擬水珠呈現透光特性，因此採用玻璃小球取代雨滴顆粒，同時分析玻璃小球前後顆粒間的變化差異，如圖 3 所之示意圖說明。

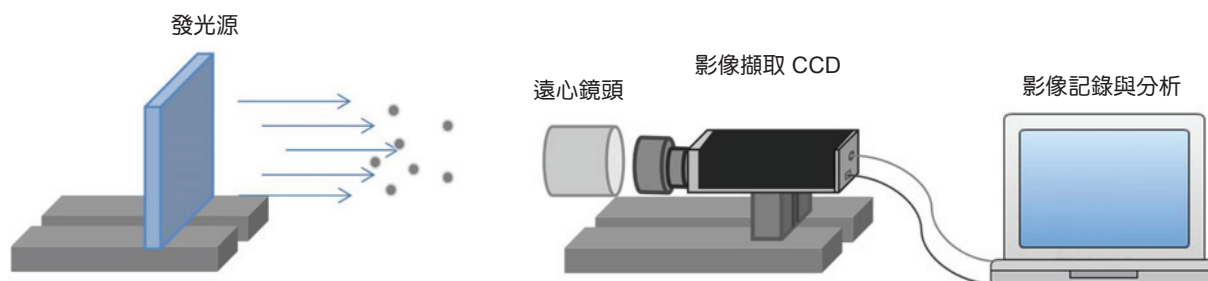


圖 3. 影像式雨滴譜儀量測架構，其中由左至右分別包含發光源、遠心鏡頭、影像擷取攝影機，最後再將拍攝顆粒掉落影像傳送至電腦內，進行後續分析處理。

1. 系統架構

欲呈現清晰、容易辨識的雨滴影像，可以設置一藍色 LED 背光源作為取像背景，用以提供穩定、均勻的照射光源，照射掉落之顆粒小球，當雨滴通過此一量測區域時，就能清楚地凸顯顆粒輪廓，有利於邊緣偵測進行。另外，由於雨滴顆粒呈現透光特性，會使得投影幕上的投影影像模糊，因此需要根據不同曝光時間加以調整光源強度、曝光時間和增益參數，以提高影像對比度。接著，將取像之 CCD 放置於光源對面，並加入遠心鏡頭，藉由遠心鏡頭擁有不易失真以及廣大景深的特色，可以使得物體不易失焦，或者即便失焦也不會讓物體有劇烈的大小變化，達到偵測雨滴顆粒的目的。此鏡頭所能對應到實際的視野大小大約為 6.5 cm × 4.8 cm，使得每一像素大小為 0.01 × 0.01cm、景深大約為 15 cm。而所選用的攝影機能夠以每秒 90 的幀率，直接拍攝並透過網路 GigE 介面將影像訊

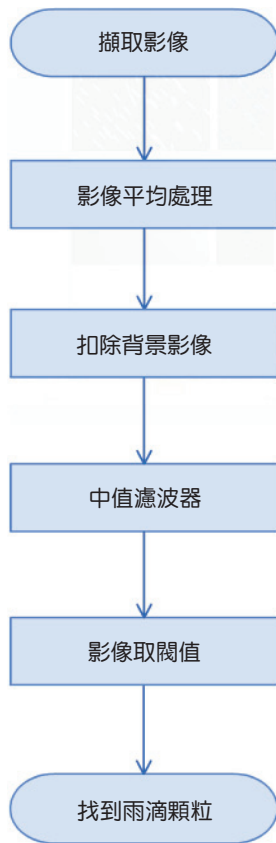


圖 4. 影像前處理流程，找出雨滴顆粒。

號傳輸至電腦中記錄影像，待取像完畢後，進行一連串的后續分析處理。

2. 雨滴影像處理流程

經由上述之雨滴顆粒取像系統之說明，在拍攝雨滴降落過程中，仍有可能會因不均勻背光源、散射光，或是解析度不足等問題，影響到分析的結果，因此我們提出一系列影像前處理加以調整，以因應此種變化，如圖 4。首先，我們設定分析五秒內擷取的所有影像，並計算所有影像在每個座標位置之平均，作為影像的基本背景值；接著，再依序對每張影像進行此一基本背景值扣除，以突顯雨滴顆粒。一旦扣除背景後，再加入中值濾波器，以濾除影像中可能產生的雜訊，或因碰撞產生的小雨滴等不合理情形。針對影像中各雨滴分布，我們會根據不同曝光時間選用不同的切割方法。另外，由於曝光時間會影響攝影機拍攝的進光量，因此我們對

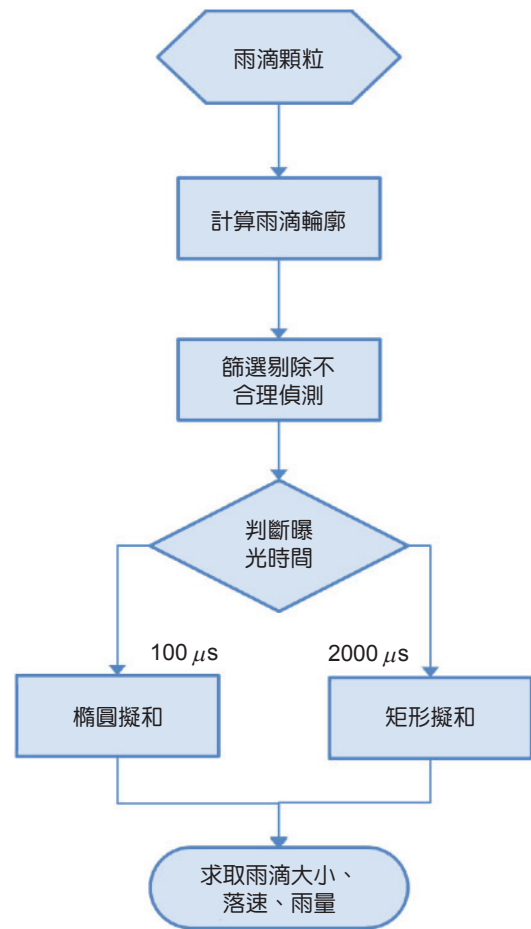


圖 5. 不同曝光時間下雨滴影像處理流程。

短曝光時間影像使用 Max Entropy 演算法切割，而使用 Adaptive Threshold 演算法來切割長曝光時間的影像。最後，由於各影像中，同時存在大量雨滴資訊，因此針對不同曝光影像，分別進行不同的處理步驟以獲得我們所關注的參數。一旦完成上述有步驟，將可以進行各種雨滴參數，和降雨滴量等計算。

在降落雨滴參數的計算處理中，其處理流程列於圖 5 中。首先，將每張二值化的影像都進行封閉輪廓尋找，短曝光時間影像的封閉輪廓會呈現完整的雨滴顆粒，而長曝光時間影像的封閉輪廓則會有雨滴拖曳軌跡。接著，加入篩選條件，若是封閉輪廓的物件之後，該物件的封閉輪廓太小，則會被剔除不算；若是該物件有部分超出畫面邊界，也會被剔除不算。接下來根據該影像的曝光時間，決定後

續的處理流程。例如，針對長曝光時間的拖曳軌跡，可以利用外接矩形在各角度之旋轉計算，找到最小外接矩形以圈選出各雨滴及其軌跡，其高度與寬度可以作為重要的雨滴顆粒參考數據。另一方面，在短曝光時間的影像處理上，由於雨滴的形狀會被保持，因此我們對各物件使用橢圓擬合的方式來找出雨滴顆粒。一旦完成上述所有步驟，將可以計算各種雨滴參數，和雨滴粒徑分布等重要資訊。

四、模擬雨滴影像實驗和測試結果

為驗證本實驗架構與影像處理流程，我們也進行了玻璃小球實驗，並測試在長短兩種曝光時間下，其影像處理結果。圖 6 與圖 7 分別為偵測玻璃小球在 $100\ \mu\text{s}$ 和 $2000\ \mu\text{s}$ 所得到的處理結果，經過使用去除背景及二值化閾值切割，已大約呈現所要分析的區域。為進一步濾除雜訊造成的影響，和

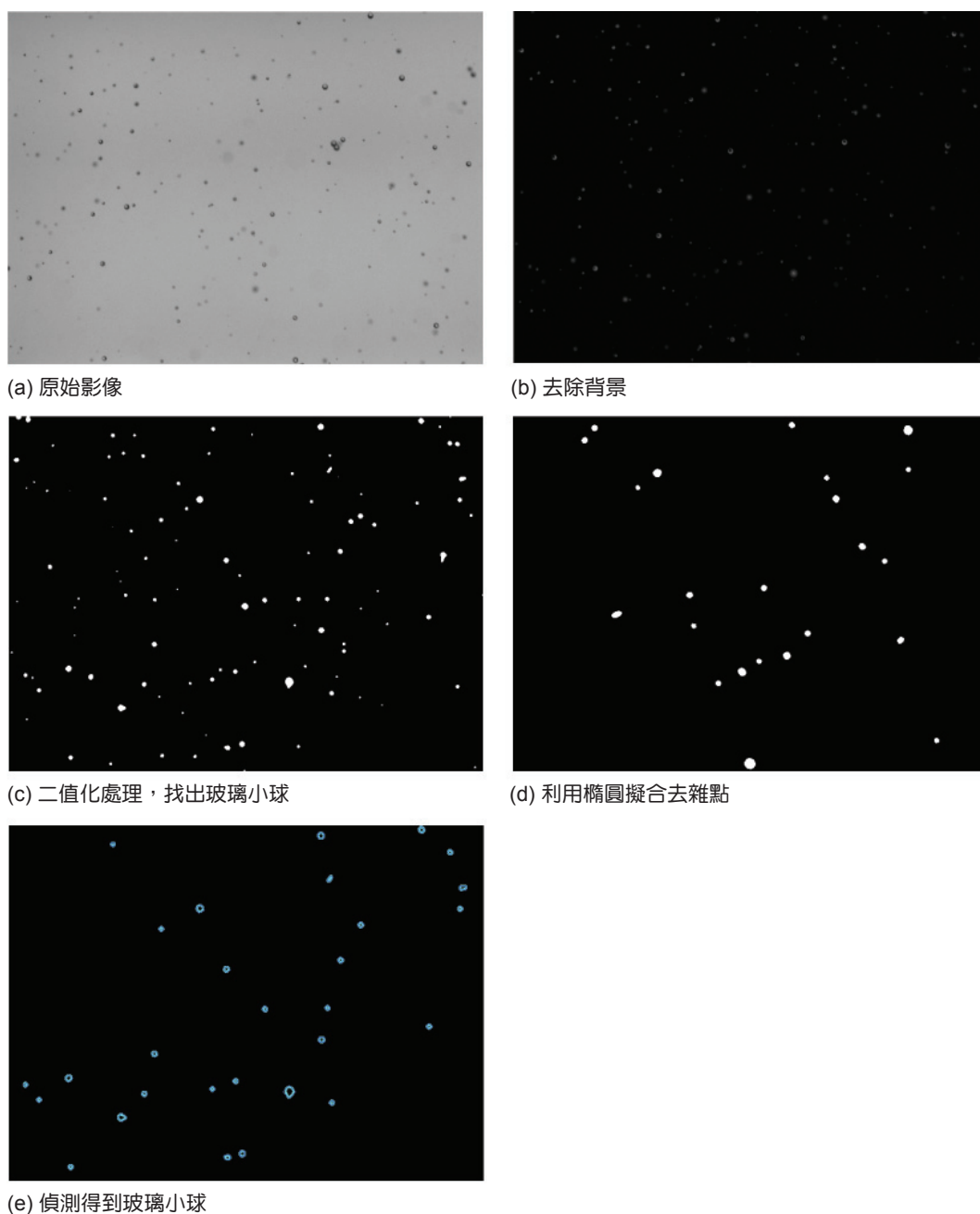


圖 6. 在曝光時間 $100\ \mu\text{s}$ 下的玻璃小球掉落影像，其偵測影像處理流程。

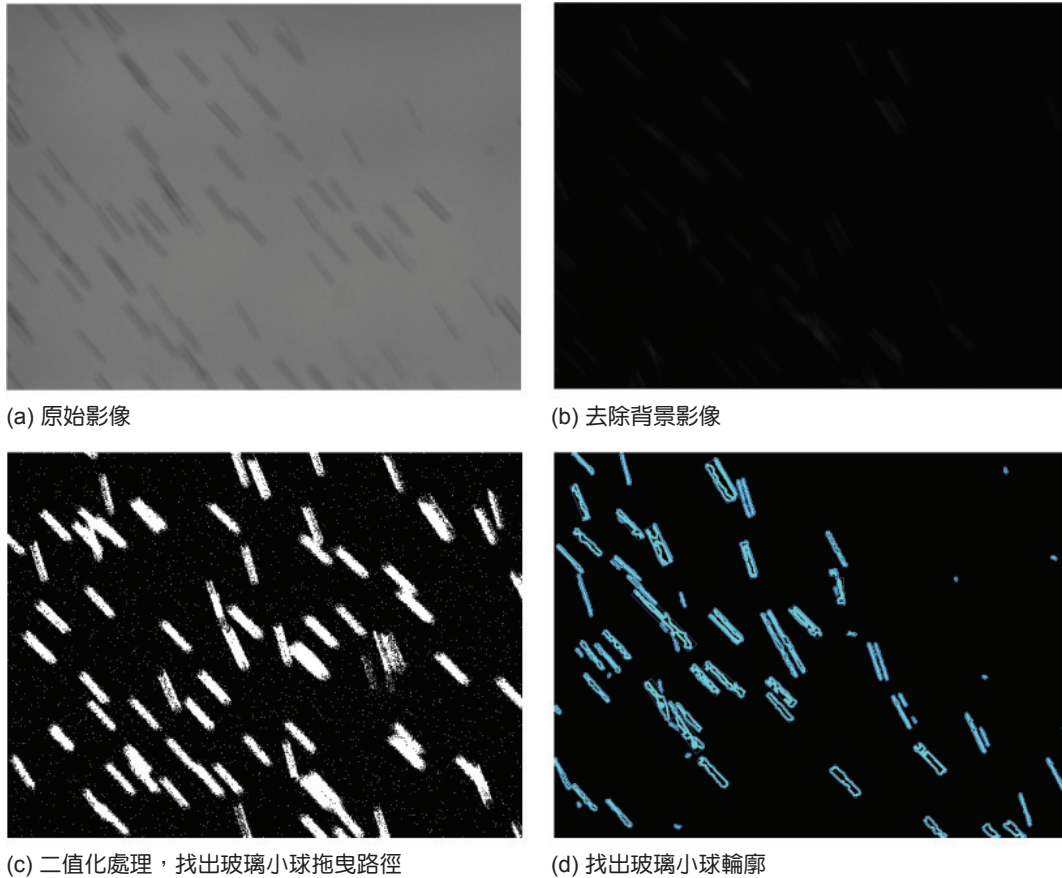


圖 7. 在曝光時間 $2000 \mu\text{s}$ 下的玻璃小球掉落影像，其偵測影像處理流程。

分析曝光時間產生的顆粒影像，因此加入橢圓擬合與矩形擬合步驟，以分別保留玻璃小球原始影像和拖曳軌跡路徑。分析短曝光時間影像，由於會維持玻璃小球原始形狀，因此可以直接計算封閉輪廓內像素總數，得到玻璃小球面積，以及等效的體積。在影像分析上，我們透過篩選長短軸比介於 0.4 與 1.2 之間，作為辨識玻璃小球之條件，避免有雜訊造成的干擾。在長曝光時間下，由於玻璃小球會有拖曳效果，可以用來判斷玻璃小球的掉落位移，並用來計算位移量和速度等參數。影像處理中所獲得之擬合矩形，其矩形寬度可視為玻璃小球粒徑大小，而在長度部分則是被用來進行與曝光時間比值計算，求得顆粒的掉落速度。

最後，我們嘗試以灑水裝置，進行降雨的模擬實驗，測試本系統對於水滴的偵測能力。透過實驗分析，灑水產生的水滴粒徑多分布在 $0-2 \text{ mm}$ 之間，如圖 8 所示。另外，在圖 9 中所呈現結果，是

分析水滴掉落和對應之水滴粒徑關係，我們也透過長曝光時間計算各水滴對應之降落速度，可以發現隨著粒徑增加，其掉落速度也有增加的現象，而且也與 Atlas 在 1973 年所提出的雨滴粒徑和終端速度的關聯趨勢⁽¹²⁾，具有非常一致的結果。

五、結論

本研究證實利用影像處理方式，透過玻璃小球和灑水水滴模擬雨滴特性，搭配不同曝光時間設定下，能夠有效達成偵測水滴顆粒、降落速度之位移與方向等功能，並且與經驗公式有很一致的接近趨勢。接下來，將規劃應用至戶外環境之降雨測量，驗證系統應用於雨滴偵測之穩定性和有效性，以增進對於大氣物理特性之研究。

氣象儀器光學系統的測量，往往容易受到自然環境變化的影響，加上近來的極端氣候的變異，

也使得開發過程容易遇到測量值變異過大等問題發生，造成降雨預報的不確定性，或是無法及時反應某一地區的降雨量。相較於光學式雨滴譜儀之偵測，容易因多個雨滴粒子掉落於偵測區內而使得影像發生重疊，使得系統誤判而產生的測量誤差，本系統係透過高解析度 CCD 取像，可以篩選多個重疊雨滴顆粒，並進行不同的影像處理方式達到偵測雨滴特性的目的，有較好的判斷效果。

另外，水滴顆粒在掉落的過程中也容易受到風的影響，使得速度和形狀產生變化，造成粒子下降的路徑傾斜，此一部分在 CCD 取像時，長曝光時間即考慮到受風影響產生的位移變化，這也是影像分析雨滴譜儀系統的偵測優勢。然而在分析影像過程中，仍舊會遭遇到小粒子等雜訊造成的干擾影響，或是不合理的速度相對於粒徑比值，推測此一原因可能為大的水滴粒子掉落至儀器外殼上，所引起的小粒子散射所引起。這些問題透過偵測尺寸的設定，和雨滴顆粒輪廓在短曝光時間之圓形擬合、長曝光時間之矩形擬合來判斷，已經能篩選濾除多數不合理的降落顆粒。

目前，系統中仍有一部分尚待調整之處，例如雨滴落速的分析結果與影像中的雨滴粒徑尺寸有絕對關係，而我們所提出利用拖曳軌跡分析技術則無法完全適用於此，因此仍需要增加擷取影像視野範圍，或是考慮使用更高幀率攝影機來取代，才能獲得雨滴譜的分析資訊，提供更為精確的降雨估測系統。再來就是模擬雨滴測試實驗，由於和實際降雨特性仍有差異，尚無法利用目前的降雨數據進行雨滴體積與速度關係，或是評估降雨量或降雨率等數據，此一部份也有待日後工作補足。關於分析雨滴降落變化過程，容易受到仍有許多未知因素，仍需要透過實驗的持續進行，並加以改善，以降低現場架設或調整儀器的複雜度。

誌謝

感謝行政院科技部的支持，使得本計劃得以順利進行，特此致上感謝之意。計劃編號 MOST 103-2221-E-492 -025和 MOST 104-2221-E-492-038。

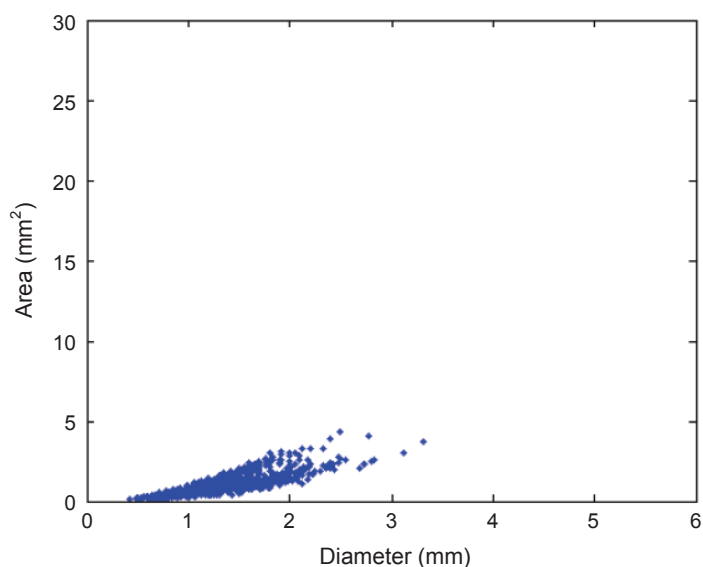


圖 8. 利用灑水裝置產生之水滴粒徑大小分布圖。

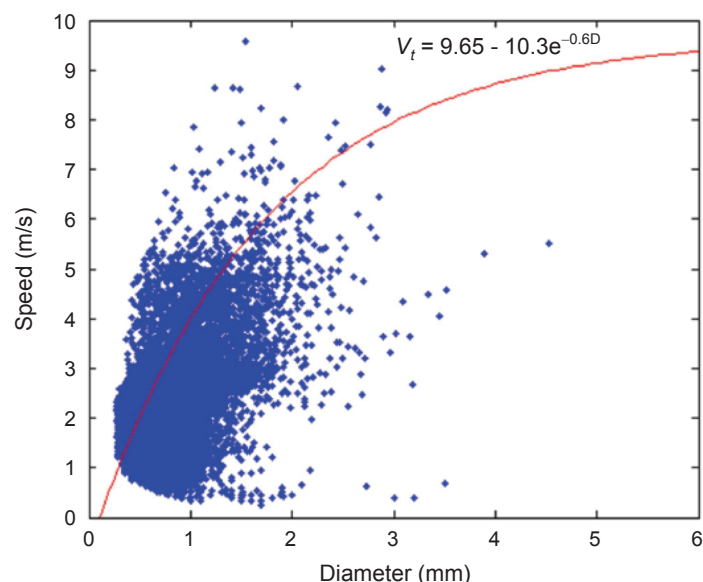


圖 9. 水滴速度和粒徑之分布。

參考文獻

1. 邱昌宏, 中華大學土木工程研究所碩士論文 (2008).
2. C. E. Chang and W. C. Liu, *Journal of Taiwan Water Conservancy*, **61** (3), 41 (2013).
3. R. K. Moore, Y. S. Yu, A. K. Fung, D. Kaneko, G. J. Dome and R. E. Werp, *IEEE J. Oceanic Eng.*, **OE-4** (1), 31 (1979).
4. 高家俊, 吳立中, 董東環與楊曜存, 第二十六屆海洋工程研討會, 785 (2004)。
5. E. A. Brands, G. Zhang and J. Vivekanandan, *J. Appl. Meteorol.*, **42**, 652, (2003).

6. V. N. Bringi, V. Chandrasekar, J. Hubbert, E. Gorgucci, W. L. Randeu, and M. Schoenhuber, *J. Atmos. Sic.*, **60**, 354 (2003).
7. A. Tokay, A. Kruger, and W. F. Krajewski, *J. Appl. Meteorol.*, **40** (11), 2083 (2001).
8. A. Tokay, D. B. Wolff, K. R. Wolff, and P. Bashor, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **20** (1), 460 (2003).
9. A. Salmi, J. Ikonen, and V. Oyj, In WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2005), 4, (2005).
10. A. Tokay, A. Kruger, W. F. Krajewski, *J. Appl. Meteorol.*, **40** (11), 2083 (2001).
11. A. Kruger, W. F. Krajewski, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **19** (5), 602, (2002)
12. D. Atlas, R. C. Srivastava, R. S. Sekhon, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 1 (1973).



陳志彥先生為國立陽明大學醫學工程研究所博士，現任儀器科技研究中心助理研究員。

Chih-Yen Chen received his PhD degree in biomedical engineering from National Yang-Ming University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃政翰先生現為國立清華大學電機工程研究所碩士班生。

Jeng-Han Huang is currently a MS student in the department of Electrical Engineering at National Tsing Hua University.



謝奇文先生為國立嘉義大學為國立清華大學電機工程博士，現任國立嘉義大學電機工程學系副教授。

Chi-Wen Hsieh received Ph.D. degree from the department of Electrical Engineering, National Tsing Hua University. He is currently an associate professor in the department of Electrical Engineering at National Chiayi University (NCYU)



鐘太郎先生為美國德州理工大學電機工程博士，現任國立清華大學電機工程學系副教授。

Tai-Lang Jong received his Ph.D. degree in electrical engineering from Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA. He is currently an associate professor in the department of Electrical Engineering at National Tsing Hua University (NTHU).