

一個新奇的兩階段熱燥點雜訊去除演算法

吳俊霖¹ 鄧瑋敦² 吳豐佑²

¹中興大學資訊網路與多媒體研究所

²中興大學資訊科學與工程學系

台中市南區 40227 國光路 250 號

摘要

數位感光元件相關技術在這幾年有了突破性的發展，這使得數位相機已經廣泛地應用在各領域中，例如天文攝影等。但是相對的，其也衍生出不少問題，其中比較嚴重的是雜訊，尤其在長時間曝光攝影時，由於 CCD (charge coupled device) 和相機電子元件的特性所使然，更可能會以隨機斑點的形式出現電子干擾或雜訊。曝光時間越長，此效果越明顯，此種雜訊我們通常稱為熱燥點 (hot pixels)。目前有些相機提供了雜訊抑制功能 (noise reduction) 來解決此一問題，但在實際經驗中發現，當曝光時間超過 3~10 秒時，雜訊會急速大量出現，此時雜訊抑制的效果就幫不上忙。在本研究中，我們將針對此種雜訊做詳細分析，並提出一個自動雜訊偵測演算法，並有效去除雜訊。

我們發現通常此種雜訊依其特性可以分為兩種，一種為近似脈衝雜訊的雜點，通常為 1 pixel 大小。另一種雜訊通常散佈在紅藍頻道，大小較大，可以達數 pixels。目前已有許多的線性或非線性的雜訊濾波器被提出，他們可以有效地去除雜訊，然而其卻也把影像中重要的細節也模糊化了。為了有效去除第一種雜訊，本論文提出一混合式向量濾波器，其結合了以脈衝雜訊偵測為基礎的向量中值濾波器與適應權向量濾波器。此濾波器能有效復原受雜訊干擾的數位彩色影像，而達成雜訊的移除和邊緣保存。其主要的優點有：(1) 所提改進之雜訊偵測演算法可以有效的降低在影像邊緣和細節部分的錯誤偵測，利用反覆的偵測雜訊而有較高的正確性；(2) 所提之適應權函數在於邊緣的像素有更為正確的權重值並可有效的移除高斯雜訊及保存影像中的邊緣和細節部分的資訊。實驗結果顯示，本論文所提出的方法可有效的移除脈衝雜訊和高斯雜訊並保存影像邊緣和細節部分的資訊。

第二種熱燥點比一般雜訊要大得多，所以前面所提濾波器將會失敗。也有人提出利用市面上的影像處理軟體，例如 Photoshop 的修復筆刷工具與 PhotoImapct 的修容工具等，來將熱燥點拿掉，但是類似這樣的工具，都必須自己手動選取要拿掉的熱燥點並自己找材質來填補，因此耗時耗力。而本篇論文的目的則是提出一個能夠自動偵測熱燥點的演算法，同時利用影像修補的技術，將影像上令人困擾的熱燥點去除，並且維持影像中的材質與線性結構的完整。實驗結果顯示，所提演算法能有效解決數位影像的熱燥點問題。

關鍵詞：熱燥點，雜訊抑制，向量濾波器，影像修補

A Two-Stage Algorithm for Hot-Pixel Noise Reduction

JIUNN-LIN WU¹, WEI-DUN TENG² and FONG-YOU WU²

¹ *Institute of Networking and Multimedia, National Chung Hsing University*

² *Department of Computer Science and Engineering, National Chung Hsing University
250 Kuokuang Rd, Taichung 40227, Taiwan*

ABSTRACT

As digital cameras have become increasingly popular in recent years, taking many digital photos is now very easy. However, images with long exposure times are usually affected by a type of serious noise called hot-pixel, which comes from individual CCD/CMOS (charge coupled device/complementary metal oxide semiconductor) sensors with higher than normal rates of charge leakage. Hot pixels can appear as small pixel-size bright points of light in longer exposures, in which there might be a few bright hot pixels, several intermediate ones, and many very faint ones, forming an entire spectrum of brightness. Some professional cameras provide a noise-reduction technique used on longer exposures that involves taking a duplicate exposure with the lens covered and subtracting the image from the main exposure. However, this procedure does not work well if the exposure time is long enough.

A two-stage noise-reduction algorithm for hot pixels is proposed in this study. In the first stage, the aim is to remove both the impulse and the Gaussian noises. Many linear or nonlinear filters have been proposed to suppress or reduce noises; however, these filters also smooth out the edges and details in the image. To overcome this problem, a hybrid vector filter for color-image noise reduction is proposed in this research. By combining the impulse-noise detection approach based on both a vector median filter and weight-adaptive vector filtering for edge preservation, the proposed method achieves effective noise removal and preservation of details.

The goal of the second stage is to remove the large hot pixels in the R and B channels. The size of hot-pixel noise is usually larger than 5-to-10 pixels. In this study, an automatic hot-pixel removal algorithm based on the inpainting technique is developed. First, a noise-detection algorithm to identify the hot pixels by using a Sobel filter and morphology operations is developed. A fast exemplar-based image-inpainting approach, which achieves accurate propagation of linear structures, is then used to fill dust-spot holes in the images. Several examples of actual images are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method, the main advantages of which include a first-stage noise-reduction algorithm that not only removes the impulse noise and effectively suppresses the Gaussian noise but also preserves the details and edges of the image; moreover, in the second stage, the hot pixels in the R and B channels are totally removed and the texture and structure information of the image also preserved.

Key Words: hot pixels, noise reduction, vector filter, image inpainting

一、前言

隨著科技進步與發展，數位相機在科學、工業、國防、航空、通訊、醫學等各領域上的應用已經越來越廣泛，甚至取代了傳統底片式取像設備。然而在實際應用上，我們方

面數位取像設備特別在低光源或慢速快門的情形下是相當容易產生雜訊的，而且 ISO 值設定越高，所產生的雜訊也愈多。而在許多需要長時間曝光的攝影應用上，例如天文攝影等，這更會產生許多嚴重的雜點。圖 1 所示為一張以高階

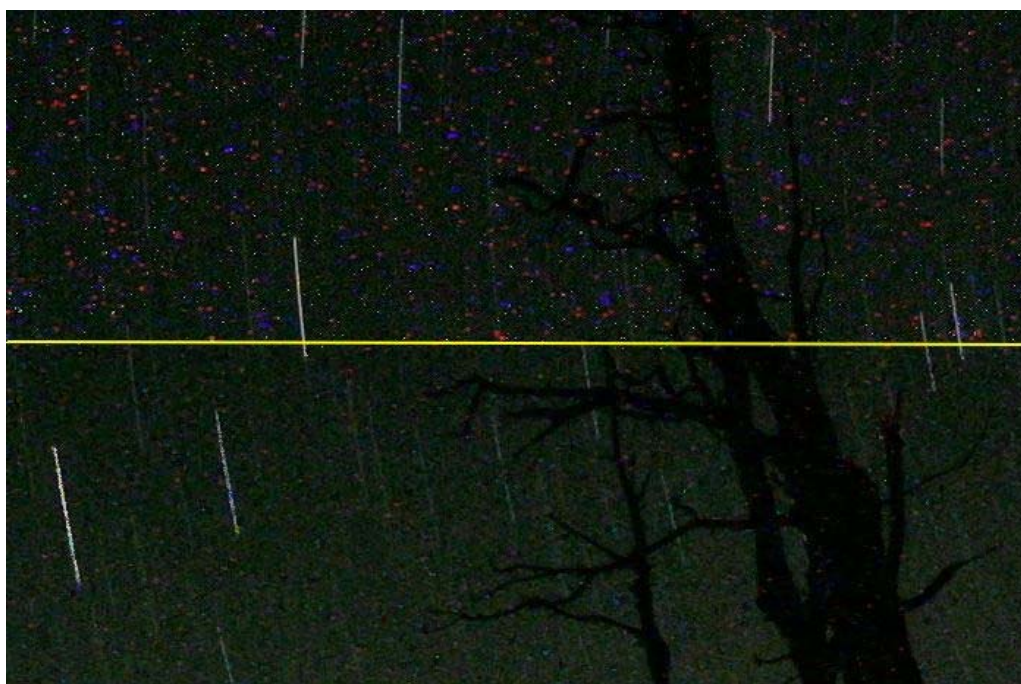


圖 1. 以高階數位單眼相機 Canon EOS 10D 拍攝星軌的影像，曝光時間為 980 秒；上半部為原始影像，下半部則為本論文所提演算法去除熱燥點雜訊的結果

數位單眼相機 Canon EOS 10D 拍攝星軌的影像，曝光時間為 980 秒。我們可以發現其受雜訊干擾相當嚴重，除了有類似脈衝雜訊（impulse noise）的小白點外，在紅與藍頻道更有許多較大的雜點產生，而嚴重影響影像的品質。這種由長時間曝光所造成的雜訊，我們通常稱之為熱燥點（hot pixels）。

熱燥點的產生只要是由於取代傳統底片的數位感光元件 CCD/CMOS（charge coupled device/complementary metal oxide semiconductor）所造成的。其本身是一個消耗能量與電力的設備，而有能源的消耗，自然就會產生熱量，『熱』導致晶片材質的電子活動加劇，受熱的電子不斷的運動而產生了電流，形成所謂的『暗電流』（black level）。理想的光感測器其暗電流應該是零，但現實世界裡這樣的理想材質還在研究階段。當然，還有其他因素同樣會影響暗電流的產生，然而『熱』卻是最顯著的影響因素。暗電流的存在，讓即使沒有光進入數位相機之中，卻因光電二極體自行釋放的電流，彷彿開了另一道『窗口』感應光線；當暗電流電壓與低亮度光的電壓相當時，感光原件的畫素就彷彿『看到了』景物，從而導致曝光，並將結果呈現在畫面上。當以慢速快門拍攝時，影像中即會顯示雜訊，它以隨機分佈的形式出

現。而在長時間曝光（通常 3-10 秒以上）下更會產生嚴重的熱燥點，產生原因是因為 CCD 等感光元件在長時間曝光所產生的高熱造成。這些雜訊使得影像的品質變差，而在這些品質不佳的影像上做處理往往得不到正確且理想的結果，為了改善影像的品質，以利於人眼的辨識或是後續的電腦分析，影像雜訊消除的技術就變成相當的重要的前處理步驟。

二、相關工作

現在許多高階數位相機會設計雜訊抑制功能（noise reduction），讓您即使長時間的曝光後仍可得到最佳的影像品質，這項功能可以自動消除影像雜訊。但這個方法有兩個限制：1. 目前通常一般數位相機的極限在 3~10 秒，超過該感應器的極限，雜訊會急速大量出現，此時雜訊抑制的效果就幫不上忙。2. 由於完成此處理過程需要一定時間，因此當應用雜訊抑制功能時，拍攝影像所需的時間將增加約一倍。有些數位相機可以設定是否使用雜訊抑制功能，有的數位相機則是快門速度低於預設的速度時，或在特別的場景模式下就會自動啟動，因為使用雜訊抑制功能需經過大量的運算處理，因此對於連拍與拍照間格上必有影響。通常曝光時

間越長，雜訊抑制運算時間也越長，有時甚至運算時間會長達 20 秒。

許多影像處理軟體也提供雜訊抑制或雜訊移除的功能，圖 2 所示為分別以影像處理軟體 Photoshop 與 Photoimpact 去除雜訊的結果，可以發現其對圖 1 中脈衝雜訊有顯著的抑制效果，但是通常也會造成影像細節的模糊。另一更嚴重的問題是其對在紅與藍頻道所產生較大的熱燥點則幾乎完全沒有效用。

三、所提演算法

為了有效偵測並去除熱燥點雜訊，在本研究中我們提出一個兩階段的雜訊去除演算法，其能正確偵測出熱燥點雜訊位置，並且在保留影像細節與邊緣資訊的情況下將雜訊移除，所提演算法流程圖如圖 3 所示。首先針對脈衝式雜訊與可能存在的高斯雜訊，在多種消除雜訊的濾波器中 [2, 5-7, 9]，我們對向量中值濾波器 [2] 和適應資料濾波器 [5] 提出改進的方法，並結合此二種方法而提出一混合式向量濾波器演算法來解決混合有高斯和脈衝的雜訊的影像之雜訊去



(a) 以 Photoshop 的 median filter 濾波後的結果



(b) 以 Photoimpact 的 Reduce noise 去除雜訊的結果

圖 2. 以影像處理軟體去除雜訊的結果

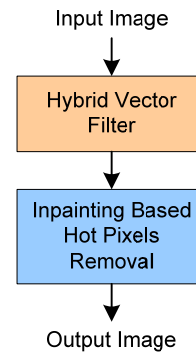


圖 3. 所提兩階段的雜訊去除演算法之流程圖

除問題。接著在第二階段，我們針對再紅藍頻道中較大的熱燥雜訊點提出一個有效的偵測方法，為了能有效維持影像中的材質與線性結構的完整，我們提出利用影像修補來把此種雜訊點去除。然而實驗中我們也發現當把此二階段雜訊去除演算法順序互換時，亦能得到滿意的結果。由於影像修補演算法當修補面積越多時，則所須計算時間會隨之增長，所以我們將影像修補導向的熱燥雜訊去除放在第二階段。實驗結果顯示，所提演算法能有效解決數位影像的感光元件在長曝光時間拍攝所產生的熱燥訊問題。

(一) 邊緣保存濾波器

為了有效移除高斯雜訊，我們提出修改適應資料濾波器的權重函數之方法，其定義如下：

$$w_i = \exp\left(\frac{\|X_i - X_j\|^2}{\sigma^2}\right)^{-\gamma} \quad (1)$$

其中 X_i 代表視窗的中心像素值， X_j 為視窗內其它像素值， σ 為一平滑參數而 γ 為一校正加權值的參數。由式 (1) 可知，若像素之間的相似度計算超過 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 的範圍則幾乎可以不考慮此像素。因此在計算位於邊界的像素時可有效的降低這些非相似的像素的權重值，利用此權重函數在於邊緣的像素有更正確的權值，而達到邊緣的保存。一般來說由實驗得知，當平滑參數 σ 設定在所受高斯雜訊標準差的 4 倍，校正加權值 γ 為 2，與濾波視窗大小為 5×5 時，所提邊緣保存濾波器能得到滿意的結果。

(二) 雜訊偵測演算法

對於脈衝雜訊 (impulse noise) 的消除，我們提出改良 [7] 的偵測雜訊演算法，其改良的向量中值濾波器 (vector

median filter, VMF) 偵測脈衝雜訊演算法之詳細步驟如下：

Step (1) 先將視窗中像素做排序，其相似度計算公式如式 (1) 所示，而其排序如下：

$$X_{(1)} \geq X_{(2)} \geq \dots \geq X_{(N)} \quad (2)$$

其中 N 為濾波視窗 W 中的像素總數。定義一線性函數 F_{X_i} 如下：

$$F_{X_i} = \alpha_1 X_{(1)} + \alpha_2 X_{(2)} + \dots + \alpha_N X_{(N)},$$

where $0 \leq \alpha \leq 1, \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$ (3)

其中 F_{X_i} 為影像在座標 i 的輸出值，係數 α 為一範圍為 $[0,1]$ 遞減的實數，本研究設定 $\alpha_1 = 0.5$ ； $\alpha_2 = 0.3$ ； $\alpha_3 = 0.2$ ；其它為 0 為濾波器之權重值。藉由使越靠近中心的像素有較高的權重，而將脈衝雜訊移除並有效的降低取代錯誤的影響而得較平滑的影像之結果。

Step (2) 計算有雜訊影像 X 與影像 F_X 差值之絕對值影像 I ，如下式所示：

$$I_i = |X_i - F_{X_i}| \quad (4)$$

此影像 I 即為純雜訊影像。

Step (3) 脈衝雜訊的偵測，使用一門檻值定義如下：

$$B_i = \begin{cases} 1 & \text{if } d(I_i) \geq T \\ 0 & \text{if } d(I_i) < T \end{cases} \quad (5)$$

函數 $d(\cdot)$ 為向量長度的計算，若雜訊值大於 T 判斷為脈衝雜訊以“1”表示否則以“0”表示。一般來說由實驗得知，門檻值 T 設為 10 時，可以得到不錯的結果。

Step (4) 脈衝雜訊的移除方法，使用偵測雜訊之果，若像素為脈衝雜訊則輸出 VMF 之結果，否則以原來像素為輸出之結果，如下式：

$$Y_i = B_i \cdot M_i + (1 - B_i) \cdot X_i \quad (6)$$

其中 M_i 為影像向量 X_i 經過 VMF 的結果，即 $M_i = VMF(X_i)$ 。為了改進偵測脈衝雜訊演算法在邊界的正確性，可將雜訊影像 I 再反覆的執行此演算法 Step (1) 與 Step (2)，其演算法公式改寫如下：

$$F_{X_i}^{(n+1)} = \alpha_1 I_1^{(n)} + \alpha_2 I_2^{(n)} + \dots + \alpha_N I_N^{(n)}$$

and $I_i^{(n+1)} = |I_i^{(n)} - F_{X_i}^{(n+1)}|$ (7)

其中 n 代表雜訊偵測的遞迴次數。利用此方法反覆的偵測雜訊影像，則可以有效的降低演算法在邊緣的錯誤偵測，而大大的提升脈衝雜訊偵測的正確性。

(三) 混合向量濾波器

對為混合雜訊的移除，結合了上述的二種雜訊移除方法，以雜訊偵測為基礎將偵測演算法 Step (4) 的式子改寫如下：

$$Y_i = B_i \cdot EPF(F_{X_i}) + (1 - B_i) \cdot EPF(X_i) \quad (8)$$

其中 $EPF(X_i)$ 為像素 X_i 經過所提邊緣保存濾波器 (edge-preserving filter) 之結果。 X_i 代表視窗的中心像素，則先偵測像素是否為脈衝雜訊，是則以式 (8) 將像素取代並以 $EPF(X_i)$ 將像素還原回來，否則直接以 $EPF(X_i)$ 來移除高斯雜訊。因此我們也可將其它向量濾波器結合到邊緣保存濾波器上，來消除混合式雜訊。

設 X 為含有雜訊影像，在大小為 N 的濾波視窗 W 之中的像素集合表示為 x_0, x_1, \dots, x_{N-1} ，其中 $x_{N/2}$ 代表為視窗中心像素，在原始的權重函數計算之方法中，我們是以每一個像素 $x_i, i=0, \dots, N-1$ 和視窗中心像素 $x_{N/2}$ 之間的距離關係，計算其相對應的權重值 $w_i, i=0, \dots, N-1$ ，但是如果 $x_{N/2}$ 是脈衝雜訊時將無法計算正確的權重值，因此我們可應用各種具有處理脈衝雜訊能力的濾波器之結果來取代視窗中心像素 $x_{N/2}$ ，如 VMF 和方向距離濾波器 (directional distance filter, DDF) 等，我們以 $VF(\cdot)$ 表示這些向量濾波器的結果，最後我們將權重函數改寫如下：

$$w_i = \exp\left(\|X_i - VF(X_i)\|^2 / \sigma^2\right)^{-\gamma} \quad (9)$$

其中 σ 為一平滑參數而 γ 為一校正加權值的參數。圖 4 為以雜訊偵測為基礎的混合向量濾波器之流程圖。

傳統的邊緣保存濾波器的權重函數，其對於處理混合式雜訊影像的缺點在於若濾波視窗之中心像素與周圍其它的像素極不相似也就是受到脈衝雜訊干擾時，則此權重函數將無法正確的計算其它像素的加權值，而無法有效的達到平滑雜訊的結果。若使用向量濾波器可以使得會有錯誤權重值的

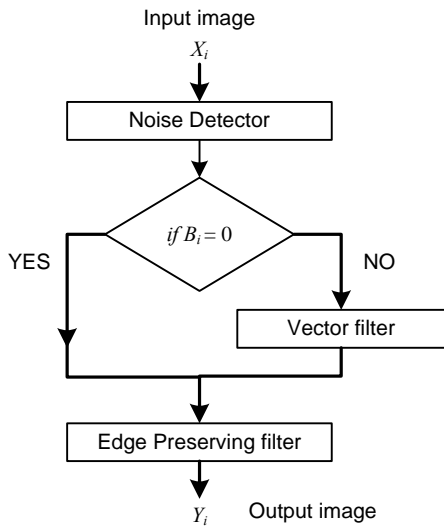


圖 4. 所提混合向量濾波器之流程圖

濾波視窗的中心像素運用前述各種的向量濾波器之結果取代，使得其有正確的權重值，而達到平滑雜訊的效果。圖 5 為所提演算法去除雜訊的結果比較，可以看出所提演算法在細節保留上有較好表現。圖 6 所示為以所提混合式向量濾波器去除圖 1 長曝光時間影像的結果，可以發現白色的脈衝雜訊與可能存在的高斯雜訊都已經被有效清除了。



圖 5. 雜訊去除結果比較



圖 6. 所提混合向量濾波器去除脈衝雜訊的結果

(四) 紅藍頻道熱燥訊雜點偵測

圖 1 與圖 6 中我們發現在紅藍頻道有很多面積較大的熱燥點產生，圖 7 為主要數位單眼相機的雜訊在不同頻道的表現，可以清楚看出，紅色與藍色頻道中的雜訊是最嚴重的，而且隨著 ISO 值愈大，雜訊強度更會大量增加。由於其面積遠大於 1 pixel，如果傳統去雜訊的方法將會失敗。在本研究中，我們提出一個基於 Sobel 濾波器與型態學的雜點偵測法來解決此問題。由於雜點面積大，為了能有效保留影像細節，我們提出以 patch 為主的影像修補 (image inpainting) 策略來移除偵測出來的雜點。其優點是能夠全自動化的針對有染塵的影像進行修補且即使粉塵落在影像中線性結構的地方，依然可以得到很好的結果。實驗結果顯示不管粉塵落在任何位置我們都可以將其移除，並不會破壞影像的結構。所提演算法詳細流程圖如圖 8 所示。

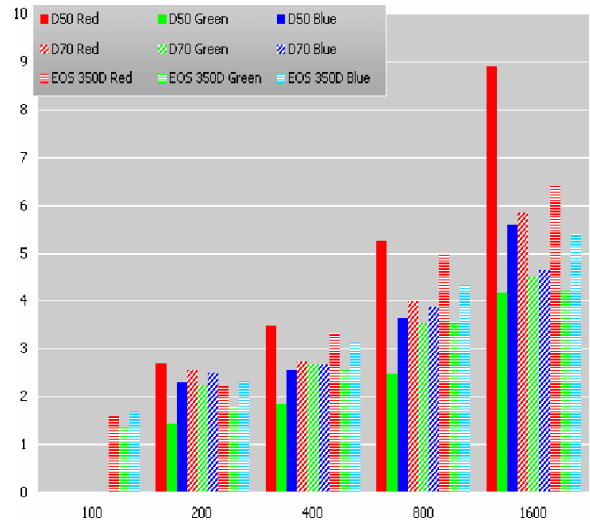


圖 7. 主要數位單眼相機的雜訊在不同頻道的表現

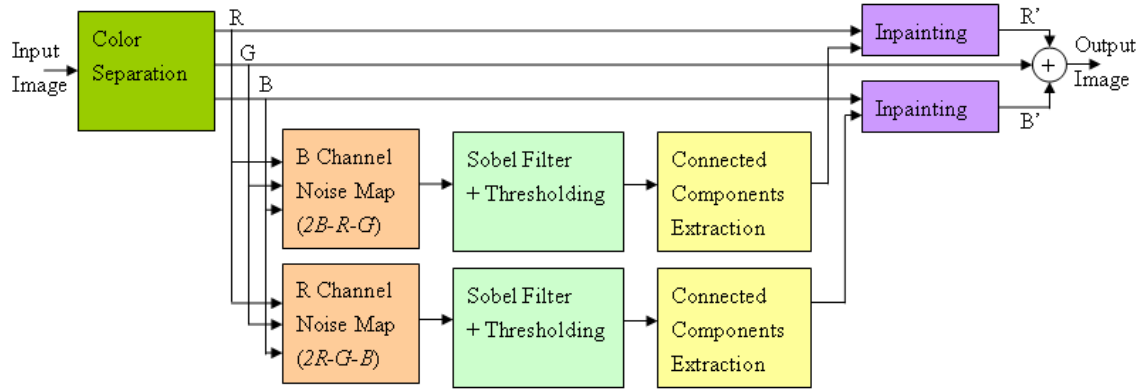


圖 8. 所提紅藍頻道熱燥訊雜點偵測移除演算法

為了有效偵測出紅藍頻道熱燥訊，我們提出先計算稱為 R 與 B 的雜訊地圖（noise map），計算方式如下：

$$\begin{aligned} R_NoiseMap &= 2R - G - B \\ B_NoiseMap &= 2B - R - G \end{aligned} \quad (10)$$

其中 R, G, B 分別為紅綠頻道影像。由於此種熱燥點顏色在影像中通常為紅與藍，所以我們主要的想法是想把影像中的 R 與 B 頻道的亮度值放大，以利偵測在 R 與 B 頻道上的熱燥點。但是若只有直接把 R 與 B 的亮度值放大，則原影像中的白色物體（ $R=255, G=255, B=255$ ）等也會被放大，而被視為熱燥點雜訊。所以藉由式（10）計算的優點是白色物體的 $R_NoiseMap=0$ 且 $B_NoiseMap=0$ ，這樣就不會被後續的偵測演算法視為熱燥點，而被影像修補法去除了。接著由於粉塵雜點在影像中其亮度相對是較小的，因此我們可以利用一階微分，也就是梯度運算（gradient operation），將粉塵雜點的邊緣偵測出來。原理就是利用梯度運算能夠增強微小且不連續點的能力以及能夠除去緩慢變化的背景。而 Prewitt 與 Sobel 則是實際計算梯度時最常使用的運算子，其中 Sobel 運算子藉由給予中心點較大的加權值來達到平滑的特性，因此其相對於 Prewitt 運算子有較優越的抗雜訊能力，所以本論文我們利用 Sobel 運算子來偵測影像中的粉塵邊緣在偵測粉塵部分，接著把影像經過一次模糊化處理後再用取臨界值（threshold）法將影像二值化，即可以有效地把熱燥點偵測出來。如果影像中有雜點或所偵測熱燥點有破洞，我們可以利用形態學（morphology）中的擴張（dilation）與侵蝕（erosion）來解決此問題。由於最後的結果有可能包含影像

的真正邊緣資訊，所以我們再利用形態學中的連通成分法（connected components）將過大的雜點去除。

（五）使用影像修補移除熱燥點

由於前一節所偵測出的熱燥點面積都相當大，為了能有效維持影像中的材質與線性結構的完整，本論文提出使用影像修補法來移除熱燥點。在偏微分方程及材質合成的影像修補演算法 [1, 3, 4, 8]，我們使用的方法是「基於範例影像修補」演算法 [4]。利用該方法來修補粉塵的優點是，假如粉塵落在影像中有線性結構的地方，那麼這個方法一樣可以修補的很好，這都是因為此演算法在計算 patch 的優先權時，加入了 data term 這一項，使得影像中的線性結構會優先被填補，以維持線性結構的完整性。然而我們亦觀察到此演算法有一些缺點：1. 由於原始演算法是針對整張影像作搜尋以尋找相似的 patch 填補目標區域，因此如果修補的區域是落在影像中重覆性的結構上，而且在這些重覆性的結構上又有其他物體存在的話，則很可能會造成錯誤的修補結果；2. 在尋找相似的 patch 以填補目標區域時，如果是針對整張影像作搜尋，則修補影像的計算時間也會隨著影像解析度變大而大幅成長。

基於上述兩點觀察，我們提出利用局部搜尋的方式來改善原始演算法的缺點，因此當我們計算出位在目標區域輪廓上且擁有最高優先權的 patch 之後，我們定義一塊以其 patch 為中心的局部區域來提供填補目標區域所需的樣本空間，其示意圖如圖 9 所示，其中所偵測出的熱燥點位置，而它就是我們將要修補的目標區域（ Ω ），把目標區域 Ω 的輪廓定義出來，我們把它標記為 $\delta\Omega$ 。並重複以下步驟：

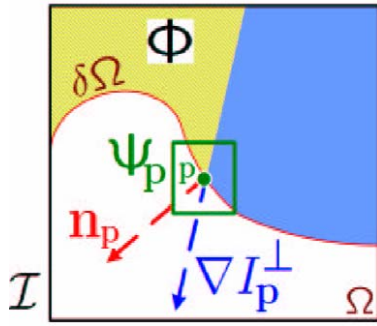


圖 9. 所提快速基於範例影像修補法的符號示意圖 [4]

Step (1) 初始化。在初始化的時候，會先給予每個像素一個 confidence value，以 $C(p)$ 表示，其規則是假如 p 點是在目標區域裡，則 $C(p) = 0$ ，否則 $C(p) = 1$ 。

Step (2) 計算 patch 優先權 $P(p)$ 。對於每個位在 $\delta\Omega$ 上的點 p ，我們定義一個以 p 點為中心的 9×9 大小的 patch，以符號 ψ_p 表示。之後計算每個位在輪廓上的 patch 優先權，計算公式為： $P(p) = C(p) \times D(p)$ ，其中 $C(p)$ 為 confidence term，計算方式如下：

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap (\mathcal{I} - \Omega)} C(q)}{|\Psi_p|} \quad (11)$$

其中， $|\Psi_p|$ 則是 patch ψ_p 的面積大小。而 $D(p)$ 為 data term，計算方式如下：

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha} \quad (12)$$

其中， ∇I_p^\perp 為等照度線，即垂直於梯度向量的向量， n_p 為垂直於輪廓的單位向量，而 α 為 255，對 $D(p)$ 做正規化的動作。很明顯的當該 patch 落在影像中有線性結構的地方時，也就是 $\nabla I_p^\perp \cdot n_p$ 會有較大的值，即該 patch 的優先權較高，應該先被修補之，藉此以維持影像中線性結構的完整性。

Step (3) 選擇一個有最高優先權的 patch (以符號 $\psi_{\hat{p}}$ 表示) 來被填補，然後在來源 (source) 區域 (Φ)，針對 9×9 大小的 patch (以符號 ψ_q 表示)，利用 RGB 三色的 Sum of Squared Differences (SSD) 來比對兩個 patch 相似程度，公式如下：

$$SSD = \sum \left\{ \begin{aligned} &(R_{\hat{p}}(p) - R_q(p))^2 + \\ &(G_{\hat{p}}(p) - G_q(p))^2 + \\ &(B_{\hat{p}}(p) - B_q(p))^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中， $R_{\hat{p}}$ 、 $G_{\hat{p}}$ 、 $B_{\hat{p}}$ 分別表示 patch $\psi_{\hat{p}}$ 內像素 p 的 RGB 三色，而 R_q 、 G_q 、 B_q 則分別表示 patch ψ_q 內像素 p 的 RGB 三色。而 SSD 值最小的那塊 patch 即與 patch $\psi_{\hat{p}}$ 最為相似的 patch (以符號 $\psi_{\hat{q}}$ 表示)。找出最相似的 patch 之後，就針對 patch $\psi_{\hat{p}}$ 未填滿的像素對應於 patch $\psi_{\hat{q}}$ 的像素位置，一個像素對一個像素貼補過去即可。

Step (4) 更新剛剛被貼補區域的 confidence value。更新方式為把 Step (2) 計算出來的 $C(p)$ 值給予剛被貼補的每個 pixel，作為它們的 confidence value。

Step (5) 如果目標區域 Ω 存在，則重複 Steps (2) ~ (4)，直到整各區域都被填滿為止。

而一般來說，局部區域不能定的太小，以免無法提供足夠的樣本來貼補目標區域；因此理想上，我們應該觀察要被填補 patch 的所在位置而動態調整局部區域的大小。在本論文中裡的所有實驗結果，其局部區域大小我們均設定為 patch 大小的 6 至 8 倍即可得到滿意的結果。實驗數據也證明，所提影像修補所需的計算時間的確大幅地減少。

四、實驗結果與討論

為了評估所提第一階段混合向量濾波器的結果，我們用 PSNR 值作為評估影像品質的依據，並與常見的濾波器作比較。測試影像為大小 512×512 的 24-bit Lena 彩色影像。表 1 與表 2 分別為針對不同強度的高斯雜訊與脈衝雜訊的去除效果比較。由此可見所提演算法能有效地去除脈衝雜訊與高斯分佈雜訊。

圖 6 為以所提混合式向量濾波去除脈衝雜訊與高斯雜訊的結果，我們可以發現影像中明顯的白色小雜點都已經被清除了，而且影像細節也都保留住，並沒有被模糊化。在面積較大的紅藍頻道熱燥點方面，圖 11 所示為計算後的 R 頻道雜訊地圖 (noise map)，與其經過 Sobel 濾波器尋邊，二值化後經過形態學的擴張、侵蝕與連接成份處理後所偵測出的熱燥點位置圖。我們可以發現影像受此種熱燥點干擾相當嚴重，而他們也都能被所提演算法正確偵測出來。圖 12 所

表 1. 附加標準差為 10、20、30 高斯雜訊的 Lena 影像復原之 PSNR (dB) 之比較

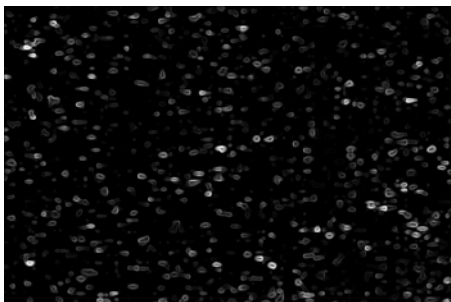
Guassian Noise 強度	$\sigma = 10$	$\sigma = 20$	$\sigma = 30$
Image Lena	28.74	22.84	19.36
Vector median filter	30.14	27.35	25.36
Data adaptive filter	31.56	28.74	27.61
The proposed method	34.18	30.81	28.70

表 2. 分別加入 10%、20%、30% 脈衝雜訊的 Lena 影像復原之 PSNR (dB) 之比較

Impulse Noise 強度	10%	20%	30%
Image Lena	18.62	15.60	13.83
Vector Median Filter	32.48	31.12	30.33
Data Adaptive Filter	32.80	31.40	30.58
The proposed method	38.01	34.95	32.81



(a) R 頻道雜訊地圖



(b) 經過 Sobel 運算子的結果

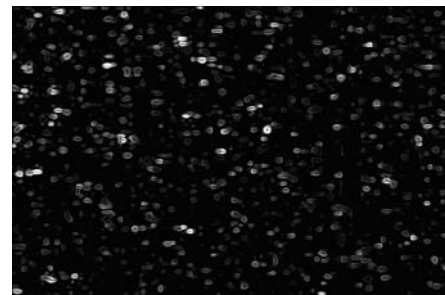


(c) 二值化後並經形態學處理的結果

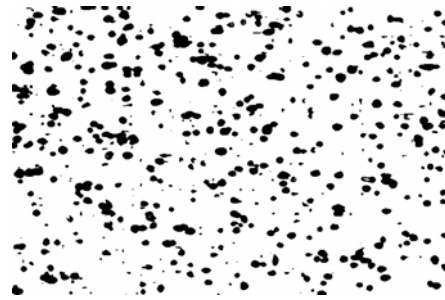
圖 11. 所提熱燥點偵測演算法在 R 頻道的結果



(a) B 頻道雜訊地圖



(b) 經過 Sobel 運算子的結果



(c) 二值化後並經形態學處理的結果

圖 12. 所提熱燥點偵測演算法在 B 頻道的結果

示為所提熱燥點偵測演算法針對 B 頻道熱燥點的偵測結果，一樣的，所提演算法確能得到很好的結果。

接著我們把圖 11(c) 與圖 12(c) 當做影像修補的 Mask，即把黑色部分挖空以 R 與 B 影像其他部分修補之。最後再把 RGB 影像結合回原來的全彩影像，即可得到去除熱燥點的結果，如圖 1 的下半部所示。可以看出所提演算法確能有效消除長曝光影像中的脈衝雜訊、高斯雜訊與面積較大的熱燥點，重要的是所提演算法能保留原影像中的細節與線性結構。

圖 13 與 14 為另外兩組長曝光測試影像以所提兩階段熱燥點去除演算法的處理結果，其中圖 13 為 Canon EOS 10D 所拍攝，曝光時間為 980 秒；圖 14 為 Canon EOS 300D 所拍攝，曝光時間為 649 秒。可以發現所提演算法確能得到滿意的結果。

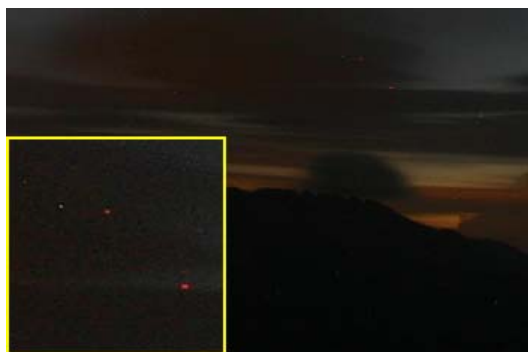


(a) 長曝光時間之數位影像 (曝光時間為 980 秒)

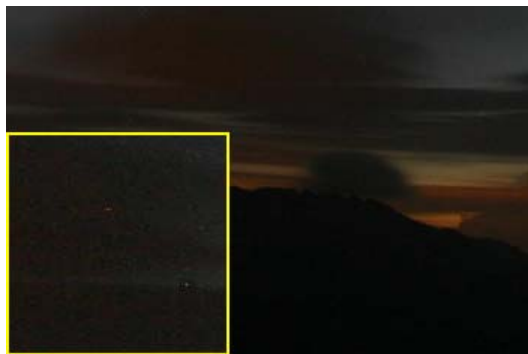


(b) 所提演算法去除熱燥點雜訊的結果

圖 13. 所提兩階段熱燥點去除演算法的結果



(a) 長曝光時間之數位影像 (曝光時間為 649 秒)



(b) 所提演算法去除熱燥點雜訊的結果

圖 14. 所提兩階段熱燥點去除演算法的結果

五、結論

本論文提出一個兩階段的熱燥點雜訊去除演算法來消除長曝光數位影像中的各種雜訊，包含脈衝雜訊、高斯雜訊，與感光元件過熱所產生的熱燥點。在第一階段的雜訊去除演算法，我們先對向量中值濾波器與適應資料濾波器提出改進，並結合此二種方法而提出一混合式向量濾波器演算法來解決混合有高斯和脈衝的雜訊的影像之雜訊去除問題。在第二階段的雜訊去除演算法，我們則提出計算所謂的雜訊地圖 (noise map)，並利用 Sobel 濾波器與型態學的運算來正確偵測雜訊位置。由於該雜訊面積都相當大，本研究提出使用影像修補來把此種雜點去除，如此一來便能有效維持影像中的材質與線性結構的完整。實驗結果顯示，所提演算法能有效解決長曝光數位影像的熱燥點雜訊問題。

參考文獻

1. Alexandru, T. (2004) An image inpainting technique based on the fast marching method. *Journal of Graphics Tools*, 9(1), 25-36.
2. Astola, J., P. Haavisto and Y. Neuov (1990) Vector median filter. *Proceedings of the IEEE*, 78(4), 678-689.
3. Bertalmio, M., G. Sapiro, V. Caselles and C. Ballester (2000) Image inpainting. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, 417-424.
4. Criminisi, A., P. Pérez and K. Toyama (2004) Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(9), 1200-1212.
5. Eng, H. L. and K. K. Ma (2001) Noise adaptive soft-switching median filter. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(2), 242-251.
6. Lukac, R., K. N. Plataniotis, K. Martin, A. N. Venetsanopoulos and B. Smolka (2005) Vector filter for color imaging. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(1), 74-86.
7. Luo, W. (2005) A new efficient impulse detection algorithm for the removal of impulse noise. *IEICE Transactions on Fundamentals*, E88-A(11), 2579-2586.
8. Sun, J., L. Yuan, J. Jia and H. Y. Shum (2005) Image completion with structure propagation. *Proceedings of SIGGRAPH 2005*, 861-868.
9. Trahanias, P. E. and A. N. Venetsanopoulos (1993) Vector

directional filters: A new class of multichannel image processing filter. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2(4), 528–534.

收件：96.09.13 修正：96.10.24 接受：96.12.26