

高等數位訊號處理期末書面報告

Retinex 圖像增強應用

系所：台灣大學電子所碩一

學號：R10943181

姓名：黃詩瑜

摘要

在光源不足、多雲或霧等惡劣環境下所拍攝的圖像嚴重降低圖像質量，經過圖像增強來改善清晰度，以滿足人眼視覺是圖像處理中的重要課題。此研究利用 Retinex 此應用廣泛的圖像增強算法針對光線不均圖像、航空圖、老照片等拍攝環境不佳的圖像進行處理，豐富信息量，加強圖像判讀。

目錄

| | |
|------------------------------|-----------|
| 摘要 | 2 |
| 第一章 RETINEX 演算法 | 4 |
| 1.1 單邊高斯濾波 | 4 |
| 1.2 雙邊高斯濾波 | 5 |
| 1.3 單邊與雙邊濾波器複雜度 | 7 |
| 第二章 實驗分析 | 7 |
| 1.1 單邊高斯濾波 | 7 |
| 1.2 雙邊高斯濾波 | 11 |
| 1.3 亮度標準差參數 | 13 |
| 1.4 空間標準差參數 | 15 |
| 第三章 實驗結果 | 16 |
| 3.1 主觀結果 | 16 |
| 3.2 客觀結果 | 18 |
| 第四章 結論 | 20 |
| 第五章 參考資料 | 21 |

第一章 Retinex 演算法

人眼觀察物體所看見的顏色並不只是由物體反射出來的光譜能量所構成，而是還有藉由與鄰近物體間做色彩和明度值的比較，得到色彩感覺。

Retinex 演算法是以顏色恆常性為基礎，以影像中任一像素(pixel)為中心，用擴散的概念尋找、比較中心像素的周圍環境。此演算法表示物體的顏色是由物體對短(藍)、中(綠)、長波(紅)光線的反射能力所決定，人眼看到的或是照相機接收到的物體圖像 S 是由物體表面對入射光 L 反射得到的，反射分量 R 由物體本身決定，帶有圖像細節訊息且不受入射光 L 變化影響。

公式表達如式 (1)，其中 S 為觀測到的圖像、 R 為反射圖像、 L 則是入射光圖像

$$S(x, y) = R(x, y)L(x, y) \quad (1)$$

將式 (1) 兩邊取對數整理後可得式 (2)

$$\log(R(x, y)) = \log(S(x, y)) - \log(L(x, y)) \quad (2)$$

$S(x, y)$ 是我們擁有的數據，與 $L(x, y)$ 做計算後即可得到原始圖像 $R(x, y)$ 。

1.1 單邊高斯濾波

一般而言光照變化緩慢，而反射分量變化較突出，尤其是不同物體的連接處，使得圖像取對數後的再經傅立葉轉換的低頻部分與光照較有關，而高頻則是與反射圖像更為相關。因此 Retinex 裡所需要的亮度值可以透過低通濾波的方式取得整張影像 $S(x, y)$ 的光源部分 $L(x, y)$ ，也就是 $L(x, y)$ 可通過圖像 $S(x, y)$ 與高斯周圍函數 $F(x, y)$ 進行卷積獲得。

式 (3) 將式 (2) 中的 $L(x, y)$ 改由 $S(x, y)$ 和 $F(x, y)$ 表示

$$\log(R(x, y)) = \log(S(x, y)) - \log(F(x, y) * S(x, y)) \quad (3)$$

其中 $F(x, y)$ 如式 (4) 所示

$$F(x, y) = \lambda e^{\frac{-(x^2+y^2)}{c^2}} \quad (4)$$

式 (4) 中 λ 為一常數，使 $F(x, y)$ 積分得到 $1 \cdot x^2 + y^2$ 是與中心點 $(0,0)$ 的距離， c 則是尺度。

當尺度 c 值越大時，包含的像素範圍就越大，可以保留較多的色彩資訊；相反的， c 值較小時，包含的像素範圍則較小，保留的色彩資訊較少，不過可以保留影像的邊緣資訊。利用式 (2) 得到 $\log(R(x, y))$ 後，再將其量化至 0~255 範圍內的像素值，得到最終的輸出。

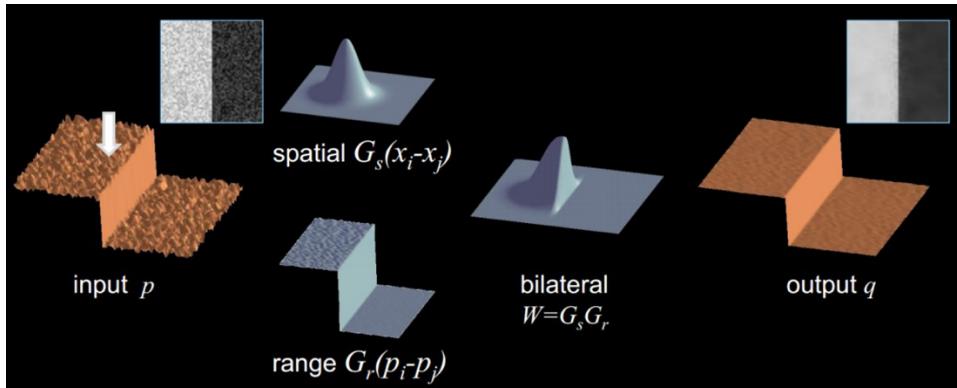
不過利用高斯函數進行照度估計有些缺點，因為只考慮了像素之間的空間幾何，且假設了光照變化是緩慢的，沒有考慮圖像明暗度差異較大的邊緣，使得明暗度差異較大的範圍內像素相互影響。較亮的像素其照度受相鄰較暗的像素影響，導致估計出的照度較低；相反的，較暗的像素的照度受相鄰較亮的像素影響，導致估計出的照度較高，進而造成光暈現象的產生。且利用高斯濾波器將圖像模糊後，還有邊界銳化不足，部分顏色出現偏差的問題。

1.2 雙邊高斯濾波

上述問題可利用雙邊濾波來彌補，相較於高斯濾波，雙邊濾波在平滑圖像的同時也保有了圖像邊緣，是一種各向異性(anisotropy)的濾波器，在處理相鄰像素的灰度值或者 RGB 值時，不但考慮了空間幾何的關係，還多考慮了亮度或色彩的差異性，限制當亮度或色彩差異較小時，圖像才能有平滑效果，以此達到邊緣

保存的目的，針對圖像中光照變化較大的情況有不同的處理，藉此克服光暈現象。

圖 1 表示將含有 Gaussian noise 的黑白圖像進行濾波時，雙邊濾波器的權重考慮了空間與色彩的差異性，在邊緣區域，臨近像素值的差值較大，對應的權重值就會改變，因此經過濾波後可以保有邊緣；非邊緣處，臨近像素值的差值較小，進行濾波時，權重與普通高斯濾波相似，濾波後的圖像就變平滑。



圖一

式 (5) 為雙邊濾波器公式，

$$f_b(x, y) = \frac{\sum_i \sum_j f(i, j) w(x, y, i, j)}{\sum_i \sum_j w(x, y, i, j)} \quad (5)$$

式 (5) 中， i, j 為鄰近的兩點像素， $w(x, y, i, j)$ 是雙邊濾波器的權重，為空間鄰近度因子 $d(x, y, i, j)$ 和亮度/色彩相似度因子 $r(x, y, i, j)$ 的乘積

空間鄰近度因子

$$d(x, y, i, j) = \exp\left(-\frac{(x - i)^2 + (y - j)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (6)$$

亮度/色彩相似度因子

$$r(x, y, i, j) = \exp\left(-\frac{|f(x, y) - f(i, j)|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (7)$$

$$w(x, y, i, j) = \exp\left(-\frac{(x-i)^2 + (y-j)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{|f(x, y) - f(i, j)|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (8)$$

(σ_d :空間標準差參數、 σ_r :亮度標準差參數)

空間鄰近度因子 $d(x, y, i, j)$ 為高斯濾波器係數，像素距離越遠，權重就越小，隨著 σ_d 增大，空間幾何函數的作用就會變得越大，平滑效果也越明顯，使圖像去噪效果增強，但 σ_d 過大會使圖像過度模糊。亮度相似度因子 $r(x, y, i, j)$ 與像素點的亮度或色彩差值相關， σ_r 較小則濾波器會考慮到像素差而突出邊緣訊息， σ_r 過大則濾波器就會近似於普通的濾波器，失去邊緣保持的功能，像素差值越大，權重則越小，越能保有邊緣訊息。

1.3 單邊與雙邊濾波器複雜度

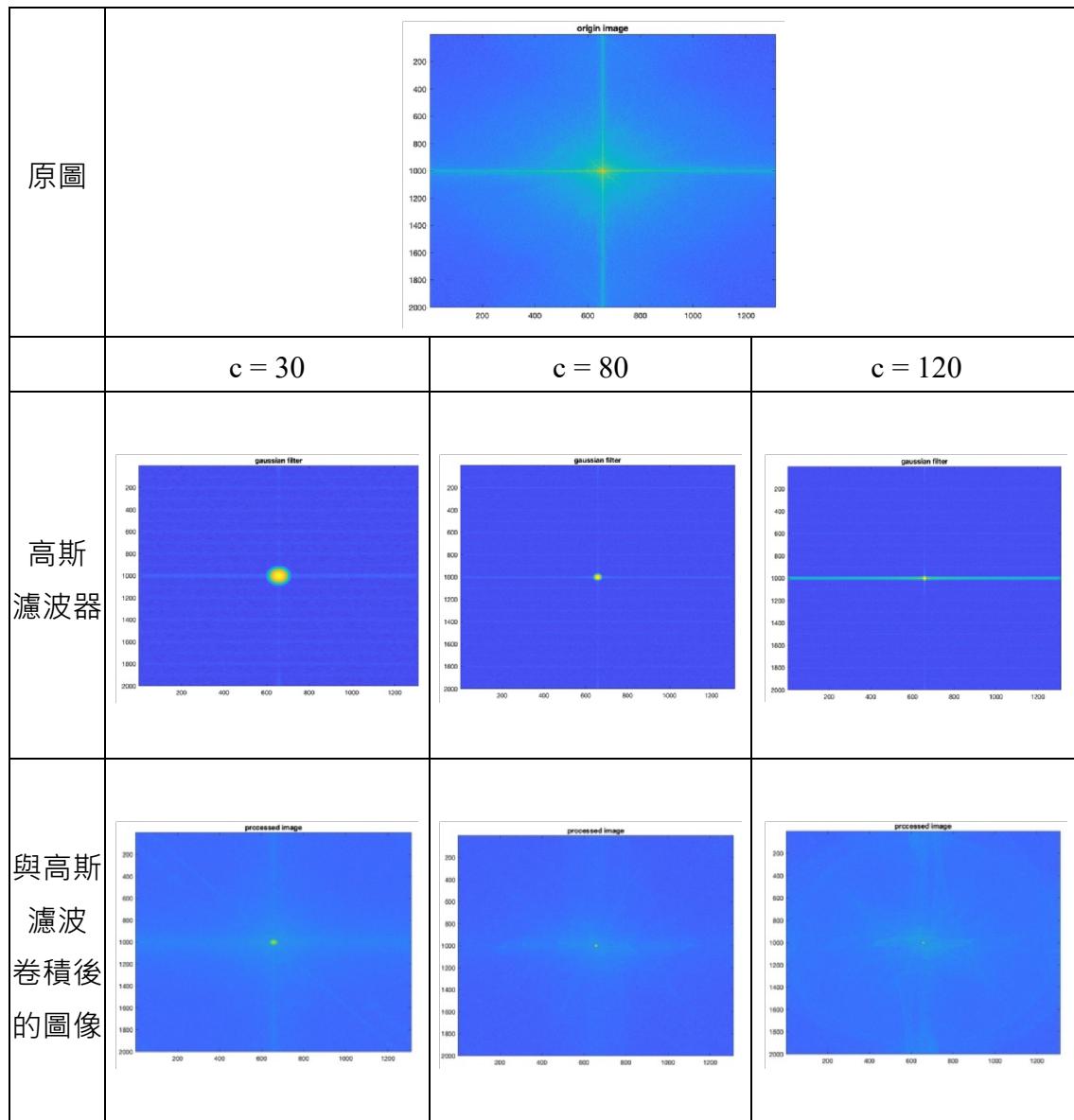
單邊高斯濾波與雙邊濾波器的複雜度因權重計算的不同有很大的差異，單邊高斯濾波因其線性性質，時間複雜度為 $O(N)$ ，而雙邊濾波器為非線性濾波，從上述公式可以看出其複雜度為 $O(wN^2)$ ，其中 N 為圖像的像素點， w 為濾波窗口大小，因此雙邊濾波器較為耗時。

第二章 實驗分析

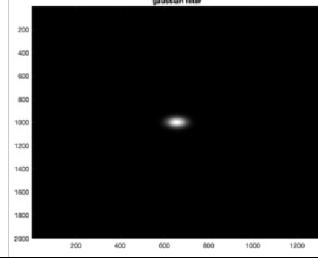
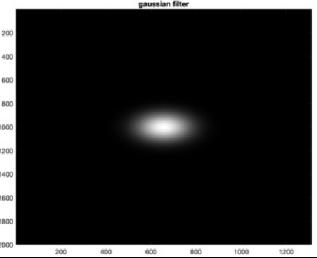
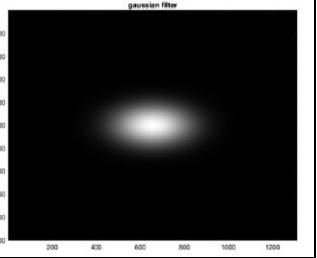
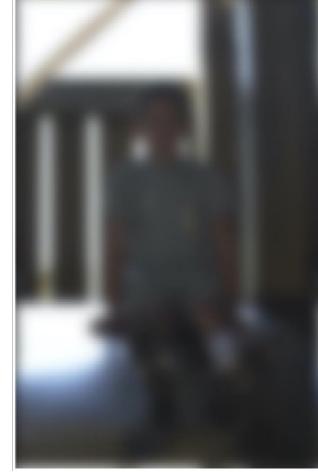
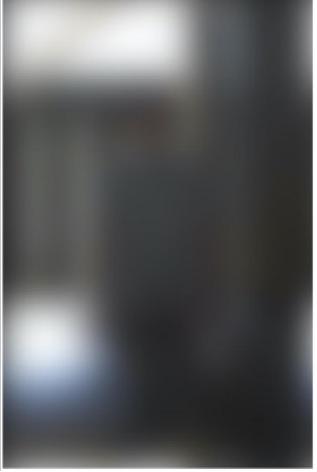
1.1 單邊高斯濾波

上述分析提到，當式 (4) 中尺度 c 值越大時，包含的像素範圍就越大，能保留較多的色彩資訊；相反的， c 值越小時，保留的色彩資訊變少，但可以強化影像的邊緣資訊，以下我們取尺度 $c = 30, 80, 120$ 來進行比較，下方表一的頻域分析中，根據 uncertainty principle，當在時域中的 duration 越大，在頻域中的 bandwidth 就越小，因此尺度 c 越大，與圖像相乘後，越多高頻被 cut off，造成圖

像越模糊，這個現象可以從表二的時域分析觀察到，與高斯濾波卷積後的圖像隨著尺度 c 越大就越模糊，而在最終圖像，尺度 c 值越小，邊緣較明顯，但包含到的像素範圍較少，色彩有嚴重失真的問題。



表一、 $c = 30, 80, 120$ 在頻域的比較

| | | | |
|-------------------------|---|--|---|
| 原圖 | |  | |
| | $c = 30$ | $c = 80$ | $c = 120$ |
| 高斯 濾波器 |  |  |  |
| 與高斯 濾波 卷積後 的圖像 |  |  |  |
| 最終 圖像 |  |  |  |

表二、 $c = 30, 80, 120$ 在時域的比較

我原本是將圖像分為 R/G/B 三個分量各別得到的反射分量 $\log(R(x,y))$ 直接帶入 exponential 轉回 $R(x,y)$ 再進行拉伸，但這樣會有些許顏色失真問題，如表二，後來參考 GIMP 的 Retinex 方法，在對數域時算出 $\log(R(x,y))$ 在 R/G/B 通道各自的均值(Mean)與均方差(Var)，再以一個動態參數(Dynamic)來獲得最大與最小值，公式為：

$$Min = Mean - Dynamic * var$$

$$Max = Mean + Dynamic * var$$

最後進行線性處理，而動態參數可以調整圖像的顏色飽和度，數值越大則飽和度越低。

| | 帶入 Exp | GIMP 方法 |
|------|---|--|
| 最終圖像 |  |  |

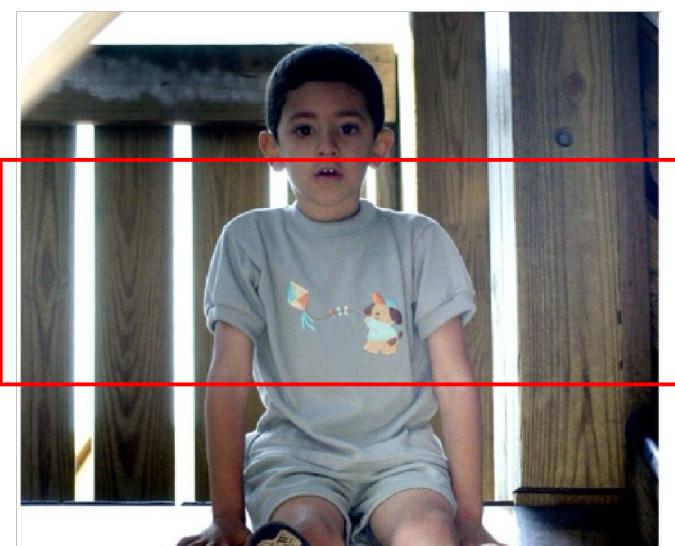
表三、帶入 $\text{Exp}(c=250)$ 與 GIMP 的圖像(Dynamic=1.2)的比較

| | | | |
|--|-------------|-------------|-----------|
| | Dynamic=0.8 | Dynamic=1.2 | Dynamic=2 |
|--|-------------|-------------|-----------|



表四、比較 Dynamic 參數($c=250$)

下圖二可觀察到，使用單邊高斯濾波得到的圖中男孩的胸前有光暈現象，此為單邊高斯濾波的缺點，為了解決此問題我們採用雙邊濾波器做卷積。



圖二

1.2 雙邊高斯濾波

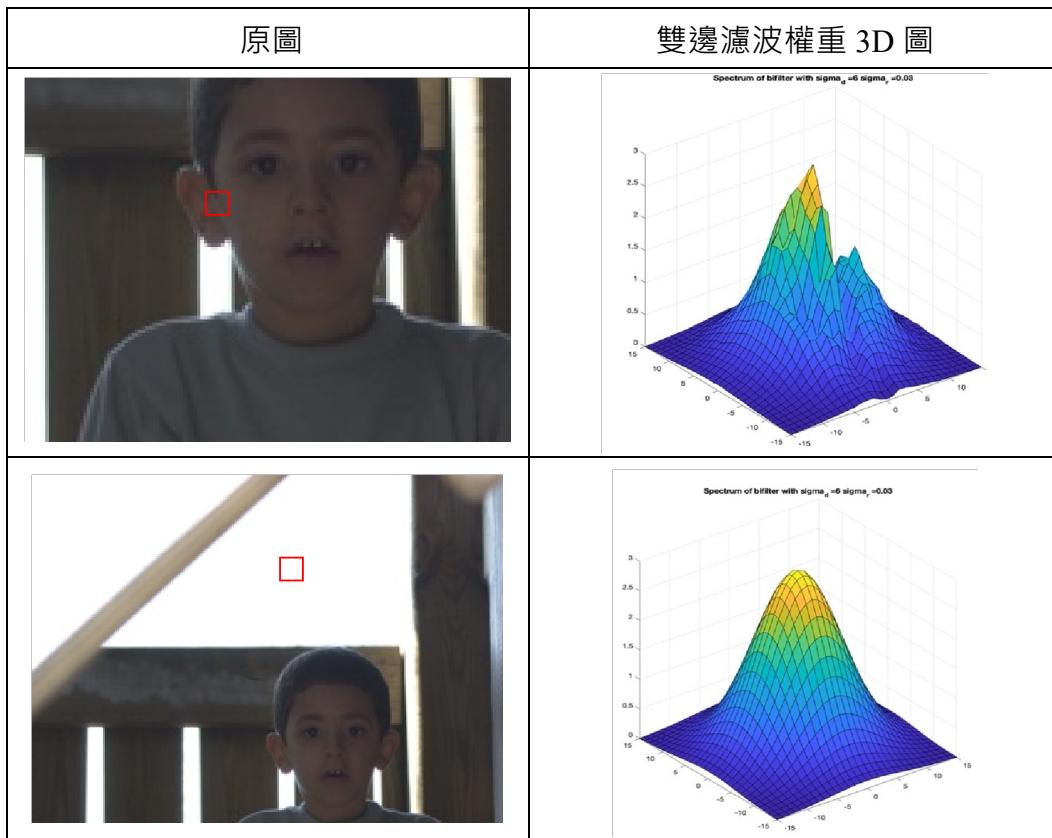
以雙邊濾波代替普通濾波器，表五為兩者的比較，與濾波器卷積後的圖像中，雙邊濾波除了實現模糊化，從木頭圍牆處可明顯看出保留了邊緣訊息，在最

終圖像的比較，可看到雙邊濾波減緩了光暈現象，整體顏色看起來更協調，彌補了單邊高斯濾波的缺點。

| | 單邊濾波($c=10$, Dynamic=1.8) | 雙邊濾波($w=15$, $\sigma_d=10$, $\sigma_r=0.1$) |
|------------|---|--|
| 與濾波器卷積後的圖像 |  |  |
| 最終圖像 |  |  |

表五、比較濾波器

下方表六為選一區塊觀察雙邊濾波權重，在鄰近像素點有差值時，濾波呈現不規則的圖形，這就是增加了亮度/色彩相似度因子造成的影響，也就是為何雙邊濾波能保邊的原因，若鄰近像素點值都相似，則濾波器與普通高斯濾波器沒什麼差別。

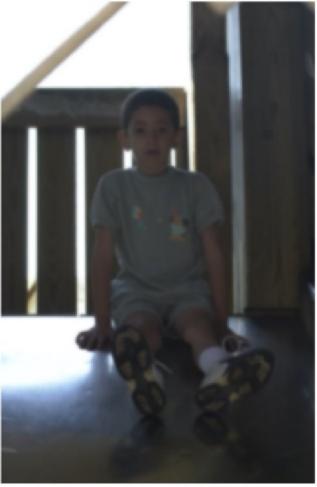
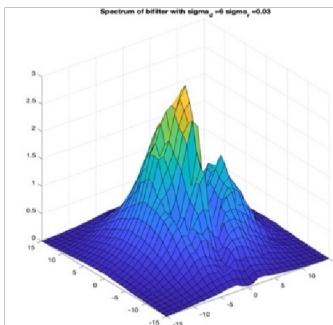
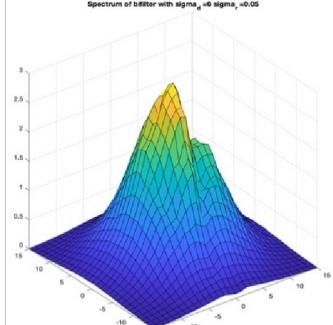
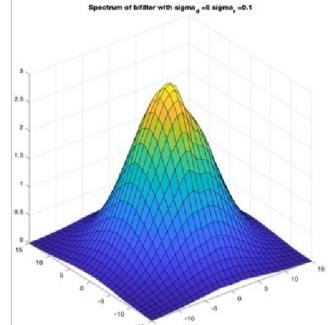


表六、雙邊濾波權重比較

1.3 亮度標準差參數

分析中亦提及 σ_d 和 σ_r 會影響雙邊濾波的效果，以下我們固定 $\sigma_d = 6$ ，改變 $\sigma_r = 0.03, 0.05, 0.1$ 來進行比較。

| | | | |
|--|-------------------|-------------------|------------------|
| | $\sigma_r = 0.03$ | $\sigma_r = 0.05$ | $\sigma_r = 0.1$ |
|--|-------------------|-------------------|------------------|

| | | | |
|------------|---|---|---|
| 與濾波器卷積後的圖像 |  |  |  |
| 某點雙邊濾波權重 |  |  |  |
| 最終圖像 |  |  |  |

表七、雙邊濾波的 σ_r 標準差參數比較

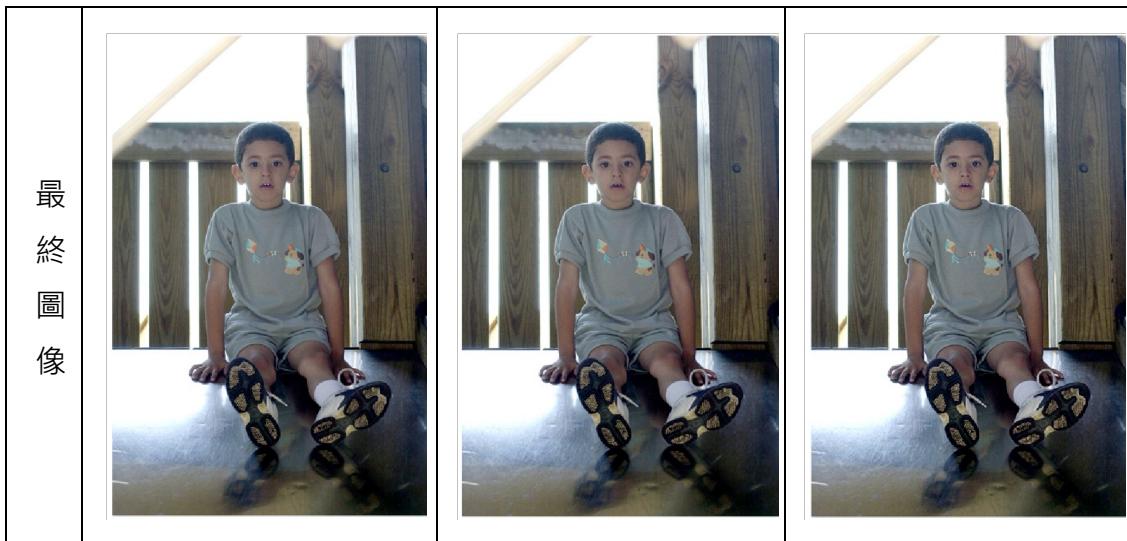
從表七可看到，隨著 σ_r 減小，像素差異對濾波器影響越大，與雙邊高斯濾波卷積後的圖像更能保有邊緣訊息，而 σ_r 變大，像素差異對濾波器影響變小，

與雙邊高斯濾波卷積後的圖像就越平滑，但在最終圖像上並沒有太大差異，都還是有減少光暈的效果。

1.4 空間標準差參數

表八為固定 $\sigma_r = 0.1$ ，改變 $\sigma_d = 3, 6, 10$ 來進行比較，隨著 σ_d 增大，空間幾何函數的作用就會變得越大，平滑效果也越明顯，與濾波器卷積後的圖像越模糊，但在最終圖像上並沒有太大的差異，都能減少光暈現象。

| | $\sigma_d = 3$ | $\sigma_d = 6$ | $\sigma_d = 10$ |
|------------|----------------|----------------|-----------------|
| 與濾波器卷積後的圖像 | | | |
| 某點雙邊濾波權重 | | | |



表八、雙邊濾波的 σ_d 標準差參數比較

第三章 實驗結果

以下為圖像進行 Retinex 處理前後的比較，使用的為雙邊高斯濾波，分別以主觀及客觀來呈現。

3.1 主觀結果

以下圖像左邊為原圖，右邊則經過 Retinex 處理

第一組：



達成去霧的效果，且飽和度、對比度皆有所提升，不僅每輛車都顯示的更為清楚，圖片左上的招牌也能更輕鬆的辨認。

第二組:



原圖因光源不足，將螢幕亮度調至最高也只能勉強看出輪廓，但經過處理後，雖然色彩有些失真，多出許多綠色色塊，但已能夠清楚得看出圖像中原本的物體。

第三組:



過曝的原圖經過處理後亮度較為適中，圖像中遠處的物體也變得較清楚，整體對比度有所提高，但飽和度降低。

第四組:



和原圖相較，右圖亮度有所提高、對比度降低，看起來更柔和，另外髮尾的清晰度也高了不少，不再和背景融在一起，整體效果近似於手機修圖 app 中添加濾鏡的效果。

主觀評價為最直觀的評價方法，以我們人眼來辨別圖像處理前後的差異。從以上四組圖像可看出經過 Retinex 處理後，圖像的細節能更清楚的被顯示，亮度、飽和度和對比度也更為適中。

3.2 實驗結果

我們以峰值信噪比(PSNR)作為客觀數據的代表，PSNR 為一種用來表示訊號最大可能功率和影響它表示精度的破壞性雜訊功率的比值，單位為分貝，在影像上可用來判斷影像的失真程度，PSNR 越大表示影像失真越小。PSNR 定義如下：

$$PSNR = 10 * \log\left(\frac{MAX_I^2}{MSE}\right) = 20 * \log\left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}}\right) \quad (9)$$

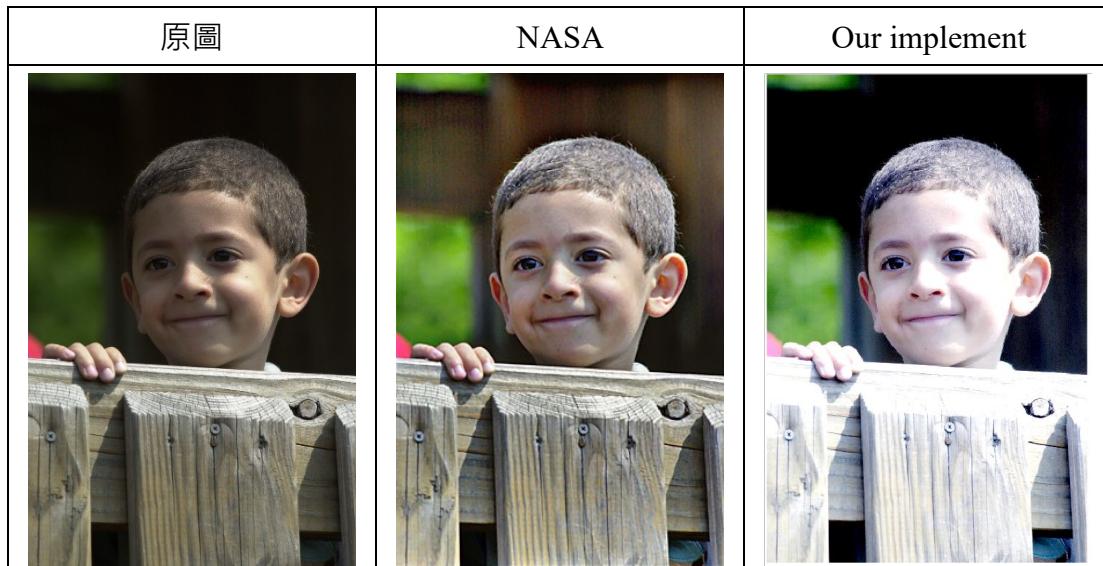
其中 MAX_I 表示訊號的最大強度，這裡帶入 255，MSE 則為均方誤差(mean-square error)，定義如下：

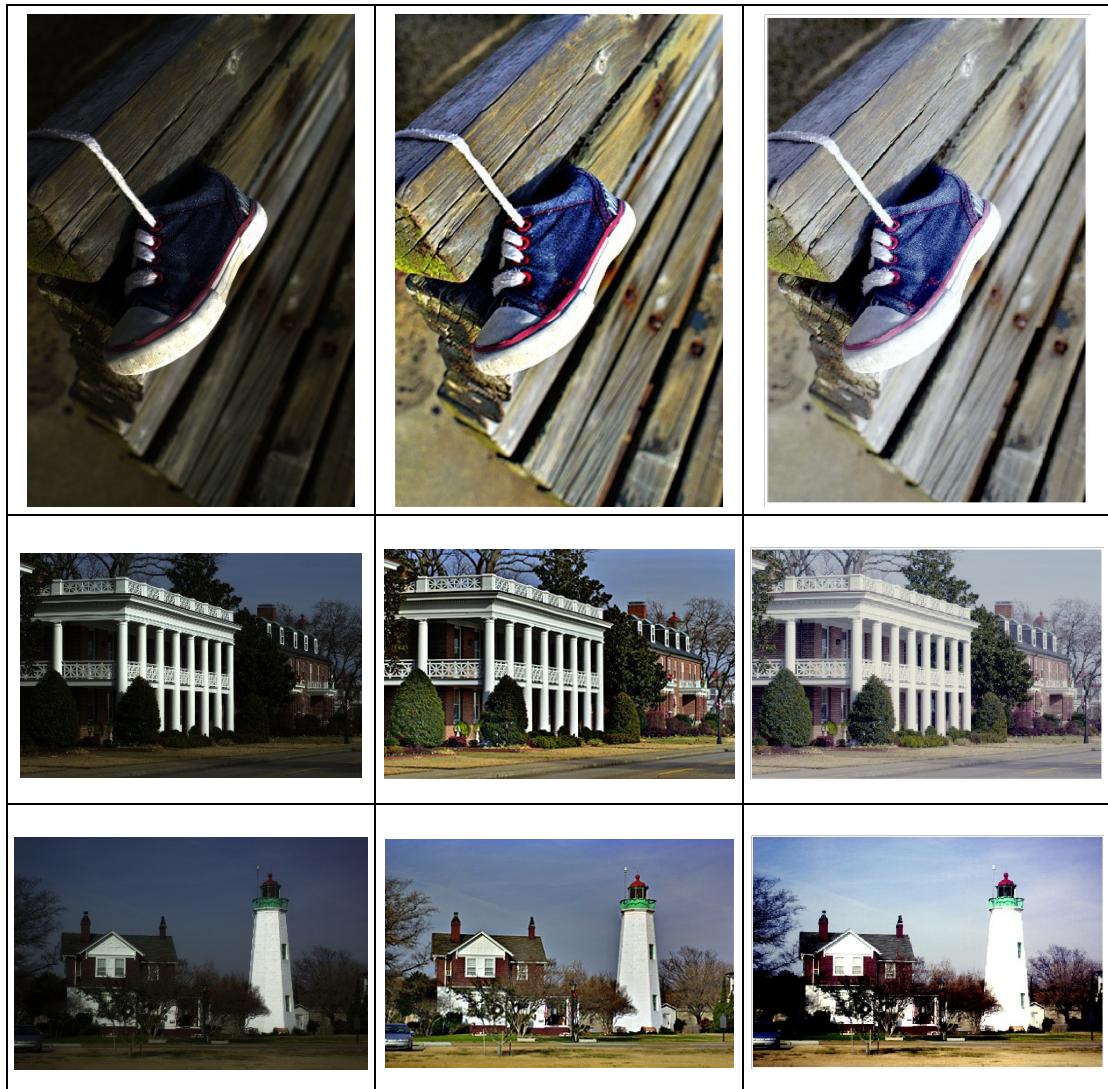
$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (10)$$

通常 PSNR 越大表示效果越好，但 PSNR 和人眼感受，也就是主觀感受並無絕對關係，會有 PSNR 雖然高，但圖像看起來並沒有比 PSNR 較低的圖像來的好的情形出現。以下是我們的實作與 NASA 提供的 Retinex 演算法對同一張圖的 PSNR 比較。

| 圖像 | NASA | Our implement |
|-------|---------|---------------|
| Child | 16.2429 | 14.2819 |
| Shoe | 11.9744 | 10.0247 |
| House | 16.0014 | 11.5654 |
| Tower | 14.0744 | 11.9886 |

表九、PSNR(dB)比較





上方比較可看出 NASA 的圖片細節更好的被保留，我們實作的結果亮度則較高一些，這些差異和參數的選擇有很大的關聯，上述已提過參數與圖像的關聯，這裡就不再重複說明。PSNR 的部分雖然整體較 NASA 的來的小，但與其他算法，例如 MSR(multi-scale Retinex)相較，相同圖片下約 7、8db，我們的 PSNR 是有比較大的。

第四章 結論

透過 Retinex 圖像增強不僅能平衡過暗或過亮圖像，也有去霧、加強圖像細節等效果，使圖像在主觀上能更好的呈現。其中利用的濾波器我選擇使用雙邊高

斯濾波，雙邊高斯濾波可解決單邊高斯濾波帶來的光暈、邊緣銳化不足、色彩失真等問題，和其他 Retinex 的做法相較下，雖然客觀數據上並不是最好，但也是有所進步；主觀上與原圖相較也有達到足夠好的增強效果。

第五章 參考資料

- [1] <https://www.ipol.im/pub/art/2014/107/>
- [2] https://de.wikipedia.org/wiki/Bilaterale_Filterung
- [3] <https://zh.wikipedia.org/wiki/雙邊濾波器>
- [4] <https://users.cs.duke.edu/~tomasi/papers/tomasi/tomasiIccv98.pdf>
- [5] <https://dragon.larc.nasa.gov/retinex/pao/news/>