

基於梯度特性之高動態範圍全域色調映射技術之研究

陳筠昀¹ 林展霈² 危永中¹ 蔡吉昌^{1*}

¹義守大學資訊管理系

²陸軍軍官學校電機系

摘要

色調映射(Tone Mapping)是將無法在呈像設備顯示的高動態範圍影像(High Dynamic Range Images; HDRI)轉換到可顯示的低動態範圍影像(Low Dynamic Range Images; LDRI)的一種技術。其映射的方法可分為兩大類：區域色調映射(Local Mapping)及全域色調映射(Global Mapping)。由於許多高動態範圍影像在全域映射後，其低動態範圍影像中的極亮及極暗區域的影像細節較無法顯示清楚，尤其是在極暗區的細節，因人眼的敏感度，更不容易看出內容為何。為解決此一問題，本論文引用了"最佳色調再現曲線運算子"所組合的線性映射(Linear Mapping)及直方圖均化(Histogram equalization)方法外，並額外加入影像梯度(Gradient)於映射方法中，以偵測極暗影像區域的邊緣並強化之。論文所提的方法簡單又有效，就是針對極暗影像區域的邊緣像素，以其梯度的大小來加權像素出現的次數，使得極暗影像區域中具有高邊緣的像素能與其鄰近的像素在映射時能映射到不同的值，如此就會呈現既有的邊緣差異。結果顯示，本論文所提的方法能有效的提升映射後的極暗影像區域細節，同時亦保有整體影像的主觀品質。

關鍵字：像素梯度，高動態範圍影像，色調映射，區域色調映射，全域色調映射

一、簡介

一般的取像設備所拍攝的影像是屬於低動態範圍影像，意指影像可呈現的色彩數是非常的有限。在設定好取像設備之曝光值後，在拍攝具有不同光線強度的環境下，其所取得的影像是無法將影像內容皆顯示清楚的，如圖一至圖三[13]顯示 3 種不同的光圈值設定之低動態範圍影像。在圖一中所顯示的是光圈值設定在-4 stop 之低動態範圍影像，影像呈現的內容是相當的暗且不清楚。圖二是光圈值設定在-2 stop 的低動態範圍影像，影像呈現的內容

是建築物清楚但四周不清楚。圖三是光圈值設定在+4 stop 的低動態範圍影像，影像呈現的內容是建築物過亮而不清楚，然而四周卻清楚。很明顯地，對於拍攝環境有不同的光線強度時，取像設備不論怎麼設定它的光圈值，總會使得影像中部份的區域細節看不清楚，這就是取像設備無法同時針對不同的光線強度做不同的曝光值設定之限制。為解決此一問題，高動態範圍影像技術被發展出來，相關論文也已陸續地被發表[1]~[4]，高動態範圍影像之技術是使用不同曝光值的影像去合成一個能呈

現當時環境的影像。但是高動態範圍影像並無法直接地以顯像設備顯示出來，因為高動態影像內的色彩數遠遠多出於顯像設備所能呈現的色彩數。表一是目前高動態影像所採用的格式，本論文實驗所採用的高動態影像是 HDR 格式，RGBE 編碼。

為能使高動態範圍影像能於一般的顯像設備上呈現，就必須將高動態範圍影像映射成低動態範圍影像，此映射就是將具有高範圍色彩數的高動態範圍影像轉換到具有低範圍色彩數的低動態範圍影像，並盡可能地能保有影樣中的細節品質，這過程就稱為色調映射。



圖一：光圈值設定在-4 stop[13]



圖二：光圈值設定在-2 stop[13]



圖三：光圈值設定在+4 stop[13]

表一：高動態範圍影像儲存格式

Format	Encoding	Color Space	Bits/Pixel
HDR	RGBE	Positive RGB	32
	XYZE	(CIE)XYZ	32
TIFF	IEEE RGB	RGB	96
	LogLuv24	LogY+(u', v')	24
	LogLuv24	LogY+(u', v')	24
EXR	Half RGB	RGB	48

色調映射演算法可分為全域映射 (Global Mapping) 與區域映射 (Local Mapping) 等[5] ~ [10]兩大類。

全域映射：此種映射方法會將高動態範圍影像中的相同的像素值映射到低動態範圍的相同值，映射過程不受其他因素(如鄰近像素值或影像平均值等)所影響，一旦映射規則建立，輸出值只與當時的輸入值有關。其優點為計算效率較為快速，因此可快速知道影像中的內容為何，且可用於即時裝置，其缺點是忽略了人類視覺系統

的真正感受。

區域映射：此種映射方法會將高動態範圍影像中的相同的像素值可能映射到低動態範圍的不同值，也就是其映射的結果常需要參考到鄰近像素的光源資訊。其優點可得到較多的細節；相對的缺點為計算量很大，而且會造成一些很明顯的不自然光暈(Halo)副效應。

本論文的主要目的就是提出一個優質且良好的全域色調映射技術，論文主要是改良論文[5]的方法，將影像的梯度資訊考量進色調映射中，以增加極暗的影像區域之細節能呈現出來，使得整體的影樣細節品質能再提升。結果顯示，本論文所提之方法能有效的提升映射後的影像細節及對比的主觀品質。

論文共有五節，在第二節中會探討基本的全域映射技術，第三節則介紹本論文所提出的新全域映射方法，第四節為實驗結果，第五節為結論。

二、全域映射技術之探討

全域映射方法會將高動態範圍影像中的相同的像素值映射到低動態範圍影像中的相同值，映射過程不受其他因素(如鄰近像素值或影像平均值等)所影響，一旦映射規則建立，輸出值只與當時的輸入值有關，本節將介紹兩種全域映射方法：直方圖均化法(Histogram Equalization)與最佳色調再現曲線運算子[5]。

1. 直方圖均化法

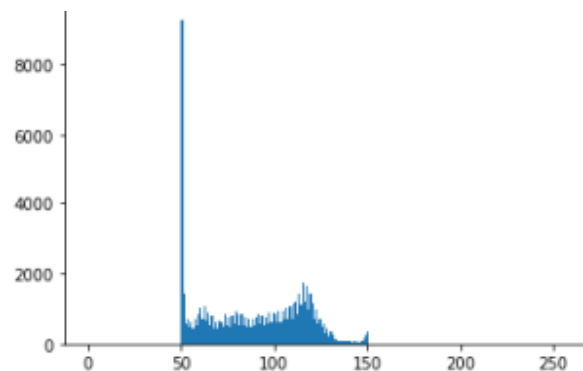
直方圖均化法是一個基礎又典型的全域映射方法，其原理就是將原影像的像素值範圍擴張到呈像設備能呈像的數值範圍，如此可以加大原數值之間的距離(差異)，達到增加對比的效果。此方法實作簡單且有效。因為會將相同的輸入值映射到相同的新的值，所以是屬於全域映射的方法。

全域映射在映射每一像素值時並不考量映射像素值四周其他像素的值。

圖四到圖七是以直方圖均化法映射一個對比不強的影像之過程，圖四是原始影像，圖五是原始影像的直方圖，可以很明顯地看出原始影像的像素值範圍侷限在某一段區間，若能將此範圍延伸擴展到能呈像的最大範圍就能增加像素值的距離而達到對比強化目的，圖六是直方圖均化後之影像，影像的對比增加不少，圖七是直方圖均化後之影像的直方圖，很明顯的可以看出，均化後的影像亮度值是散佈在整個亮度值空間，使得各亮度值的距離變大而有高對比的產生。



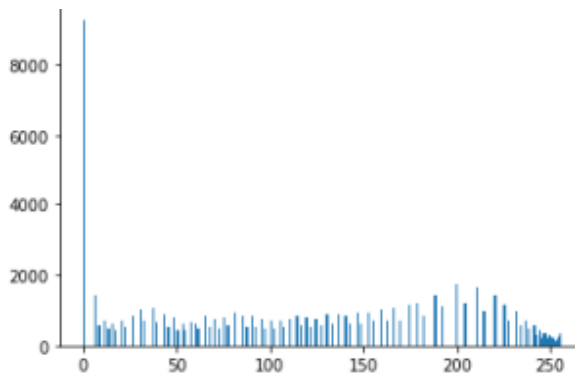
圖四：原始灰階影像



圖五：原始影像之直方圖



圖六：直方圖均化後之影像



圖七：均化後影像之直方圖

直方圖均化的公式[11]如式子(1)：

$$h(v) = R \left(\frac{cdf(v) - cdf_{min}}{(M \times N) - cdf_{min}} \times (L - 1) \right) \quad (1)$$

其中：

R ：四捨五入運算子。

L ：新亮度(灰階)值總數。

$M \times N$ ：影像的像素總數。

cdf_{min} ：累積分布函數最小值，不為 0。

$cdf(v)$ ：在 v 值時的累積分布函數。

$h(v)$ ：直方圖均化後之新灰階值。

v ：原灰階值。

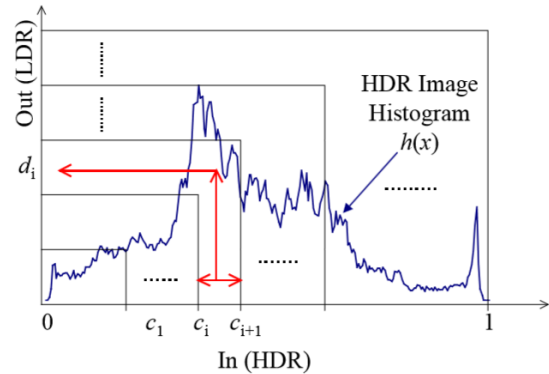
由式子(1)可以得知，影像要做直方圖均化必須先要算出影像亮度的累積分布統計量，並設定新亮度(灰階)值總數才可得到均化後的影像。此方法雖可快速地加強影像的對比，但是其最大的缺點就是主觀的品質相對於其他全域映射方法並不太好。

2. 最佳色調再現曲線運算子[5]

最佳色調再現曲線運算子是由 G. Qiu

與 J. Duan(2005)共同發表，此方法建立映射的過程敘述如下：

- (1) 計算高動態範圍影像之亮度影像(灰階影像)，並對其取對數值。
- (2) 建立亮度影像之統計量，如圖八所示。
- (3) 利用式子(2)求取低動態影像映射各區間的值 c_i 。



圖八：HDRI 亮度影像之直方圖

$$E_b(c) = \frac{(c - 0.5(L_{max} + L_{min}))^2}{L^2} + \lambda \frac{((\sum_{x=0}^c h(x)) - 0.5N)^2}{N^2} \quad (2)$$

其中：

λ ：Lagrange Multiplier。

$h(x)$ ：累積分布函數。

N ：高動態範圍影像像素數目。

L ：是直方圖某區間的長度。

L_{max} 、 L_{min} ：直方圖某區間的最大值與最小值。

在式子(2)中，如果 $\lambda = \infty$ ，式子(2)就變成直方圖均化映射。如果 $\lambda = 0$ ，式子(2)就變成線性調整映射。

求取低動態影像映射各區間的值 c_i 之計算過程如下：

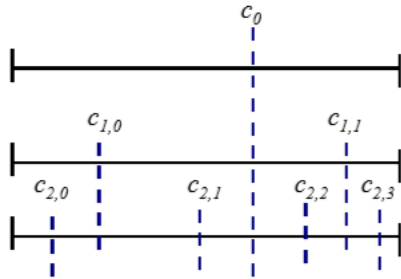
- (1) 利用式子(2)先計算 c_0 ，並得到 2 個分割的範圍。

(2) 然後再利用式子 (2) 去計算 2 個分割範圍的 $c_{1,0}, c_{1,1}$ ，如此就會產生 4 個分割範圍。

(3) 接著再利用式子(3)子去計算其它分割範圍的 c_i ，直到 255 個 c_i 被求出。

圖九顯示求 c_i 的方式與次序。當求出 255 個 c_i 之後，就可將高動態範圍亮度影像作映射處理，若高動態範圍亮度影像某像素值 v_k ，介於 $c_i \leq v_k < c_{i+1}$ ，則 v_k 被映射於 i 值。

當映射完所有的高動態範圍亮度影像之像素值之後，接著使用式子(3)求低動態範圍彩色影像每一像素的 RGB 值。



圖九：求 c_i 的方式與次序

$$\begin{aligned} R_{out} &= \left(\frac{R_{in}}{L_{in}} \right)^\gamma L_{out}, \\ G_{out} &= \left(\frac{G_{in}}{L_{in}} \right)^\gamma L_{out}, \\ B_{out} &= \left(\frac{B_{in}}{L_{in}} \right)^\gamma L_{out} \end{aligned} \quad (3)$$

其中：

γ ：控制顯示色彩之參數。

L_{in} ：高動態範圍影像之像素的亮度值。

L_{out} ：低動態範圍影像之像素的亮度值。

R_{in} 、 G_{in} 、 B_{in} ：高動態範圍影像之像素的紅色、綠色及藍色值。

R_{out} 、 G_{out} 、 B_{out} ：低動態範圍影像之像素的紅色、綠色及藍色值。

此方法雖然比直方圖方法可得到較好

的主觀品質，但是影像中極暗區域的細節表現仍不好。

三、研究方法

在實際的環境中，人眼可以輕易地同時看到眼前景象亮處與暗處的景物，但是取像設備並不容易做到。基本上影像中極暗處有時會有一些對比強烈的景物，但是因為光線太暗使得這一些具有強烈對比的景物無法在低動態影像中呈現。同時在研究中發現許多的全域射調映射對於低亮度中的影像細節呈現的並不明顯，如”最佳色調再現曲線運算子”[5]。為了解決此問題，本論文引入影像梯度(Gradient)因子來增加低亮度中的影像細節呈現。

本論文是利用前節所述的”最佳色調再現曲線運算子”做為基礎，並加入影像梯度因子於其中，其加入方法如下：

假設高動態範圍影像的亮度影像之統計值及影像梯度已被計算出。利用式子(4)去增加極暗且具有高梯度之像素出現的次數，這一種增加某像素在影像中出現的次數之作法等同於對該像素的出現次數有條件式的加權，以凸顯該像素的重要性。

$$H(l) = H(l) + d \times N, \quad (4)$$

如果

$$\begin{aligned} I(x,y) &= l < T_1 \\ G(x,y) &> T_2 \end{aligned}$$

其中

$H(l)$ ：統計函數

l ：像素亮度(灰階值)

N ：符合式子(3)條件的像素數

d ：每一像素額外加權的統計數

$I(x,y)$ ：影像位置 (x,y) 的亮度

$G(x,y)$ ：影像位置 (x,y) 的梯度

T_1 ：亮度臨界值

T_2 ：梯度臨界值

這種基於梯度而加入像素亮度統計量的方法，能增加符合式子(4)的像素點與其附近的像素點能映射到不同的映射值，增加對比強度。

本論文所使用的梯度公式如參考文獻[12]，該文獻是使用所貝爾運算子(Sobel Operator)來計算影像的梯度，其梯度計算現簡述如下：

影像中像素的梯度計算過程基本上有下列 3 個步驟：

- (1) 計算影像各像素水平方向邊緣強度，如式子(4)可以計算出影像各像素水平方向邊緣強度

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -2 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A \quad (5)$$

其中：

G_x ：影像各像素水平方向邊緣強度

$*$ ：迴旋計算(convolution)

A ：影像

- (2) 計算影像各像素垂直方向邊緣強度，如式子(5)可以計算出影像各像素垂直方向邊緣強度

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \quad (6)$$

其中：

G_y ：影像各像素垂直方向邊緣強度

$*$ ：迴旋計算(convolution)

A ：影像

- (3) 計算影像各像素梯度

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (7)$$

其中：

G ：影像各像素梯度強度

圖十[12]是原始的彩色影像。圖十一[12]是利用式子(7)所計算出來的影像梯度強度

之影像。



圖十：原始的彩色影像[12]



圖十一：影像梯度強度之影像[12]

為提升影像中極暗區域的細節，本論文將梯度因子加入至論文[5]，提出一個新的高動態範圍影像全域映射方法，作法敘述如下：

- (1) 將高動態範圍影像 RGBE 格式轉成高動態範圍影像 YUV 格式，取出 Y 分量並取對數值(影像亮度的部分，也就是所謂的灰階影像)。
- (2) 計算最小、最大及平均亮度(灰階)值。
- (3) 利用 Sobel 運算子，如式子(7)，計算灰階影像各像素的梯度大小及梯度平均值。
- (4) 對於具有高梯度但灰階值相對又太暗的像素，利用式子(4)來增加該像素在統計量(直方圖)中的出現次數，如此可以增加該像素與其鄰近的像素映射在不同的值。
- (5) 最後，再利用論文[5]的方法將高動態影像轉換為低動態影像。

四、實驗結果

在下列的實驗中，各參數的設定如下：

設式子(2)中的 $\lambda = 0.5$ ，

設式子(3)中的 $\gamma = 0.5$ 。

設式子(4)中的 $d = 2$ 或 4 ，

$$T_1 = \frac{L_{avg} + L_{min}}{2}$$

$$T_2 = \frac{G_{avg}}{2}$$

其中

L_{min} ：最小亮度值

L_{avg} ：亮度平均值

G_{avg} ：梯度平均值

圖十二到圖二十一是最佳色調再現曲線運算子[5]與本方法針對不同影像處理的結果，影像中都包含極暗的區域。



圖十三：論文[5]方法



圖十二：原始影像



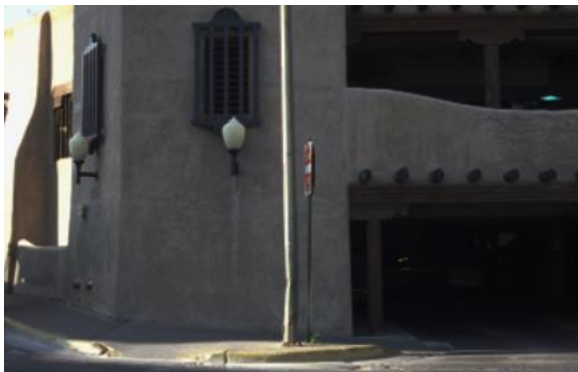
圖十四：本研究方法



圖十五：論文[5]影像極暗區截圖



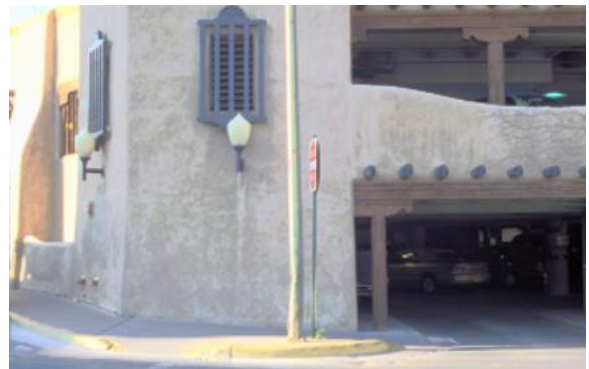
圖十六：本研究方法影像極暗區截圖



圖十七：原始影像



圖十八：論文[5]方法



圖十九：本研究方法



圖二十：論文[5]影像極暗區截圖



圖二十一：本研究方法影像極暗區截圖

從圖十二到圖二十一處理的結果來看，本論文所提的研究方法相對於最佳色調再現曲線運算子在影像的黑暗區確實能有較好的主觀品質，同時在影像的其他區域也有不錯的視覺品質。

五、結論

許多的影像會包含有極亮及極暗的區域，在極亮地方的影像，基本上影像的細節上會比極暗的影像來的好，主要是因為人類的視覺對極暗的影像比較不敏感，所以針對極暗區域的影像加強處理是有其必要性的。從實驗結果可知，本論文所提的方法能有效的提升高動態範圍影像在映射後所得之低動態範圍影像在極暗區域能獲得較多的細節。

參考文獻：

- [1] Takao Jinno and Masahiro Okuda, Member, IEEE “Multiple Exposure Fusion for High Dynamic Range Image Acquisition”, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 21, No. 1, January 2012.
- [2] S. Kausar Banu, D.K. Jawad and D.Venkatesh, “HDRI (High Dynamic Range Image) Acquisition by Multiple Exposure Fusion”, International Journal of Research Communication Technology, Vol. 2, Issue 8, August 2013.
- [3] Xiaojun Wu, Zhan Song, Gang Yu, “A Novel Multiple Exposure Merging Method for High Dynamic Range Image Generation” 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), 2010.
- [4] Wen-Chung Kao, “High Dynamic Range Imaging by Fusing Multiple Raw Images and Tone Reproduction”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 54, No. 1, Feb. 2008.
- [5] G. Qiu and J. Duan, "An optimal tone reproduction curve operator for the display of high dynamic range images", ISCAS2005, Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 6, pp. 6276- 6279, Kobe, Japan, 23 - 26 May 2005.
- [6] 吳佳純、危永中、蔡吉昌、黃安立，"全域映射之高動態範圍色調映射技術之研究"，黃埔學報，vol. 71，pp. 9-19，2016.12
- [7] R. K. Chaurasiya, Prof. K. R. Ramakrishnan, “High Dynamic Range Imaging”, International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2013.
- [8] J. Duan and G. Qiu, "Fast Tone Mapping for High Dynamic Range Images", Proc. ICPR2004, pp. 847-850, August 2004.
- [9] F. Durand and J. Dorsey, “Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images,” ACM Trans. on Graphics, pp. 257–266, 2002.
- [10] 郭忠民，吳保樹，“以內容為基礎的高動態範圍影像色調映射”，碩士論文，義守大學，2014。
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Histogram_equalization, 2022
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator, 2022.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-exposure_HDR_capture, 2022.

A Study on Global Tone Mapping of High Dynamic Range Images Based on Gradient Characteristics

Lisa Y. Chen¹, Zhan P. Lin², Yung-Chung Wei¹, Jyi-Chang Tsai^{1*}

¹ Department of Information Management, I-Shou University

²Department of Electrical Engineering, Chinese Military Academy, Taiwan

Abstract

Tone Mapping is a technology that converts high dynamic range images (HDRI) that cannot be displayed on imaging devices to displayable low dynamic range images (LDRI). The mapping methods can be divided into two categories: local tone mapping and global tone mapping. Since many high dynamic range images are globally mapped, the image details of the extremely bright and extremely dark areas in the low dynamic range images cannot be displayed clearly. Especially in the details in extremely dark areas, due to the sensitivity of the human eye, it is even more difficult to see what the content is. In order to solve this problem, in addition to using linear mapping and histogram equalization combined by the "Best Tone Reproduction Curve Operator", the image gradient is additionally added to the mapping method to detect the edges of the image in extremely dark areas and enhance them. The tone mapping method proposed in the paper is simple and effective. For the edge pixels in the extremely dark image area, the number of occurrences of the pixels is weighted by their gradient, so that the pixels with the high edge in the extremely dark image area can be mapped to the values that differ from the values of their adjacent pixels. This will present the existing marginal differences. The results show that the method proposed in this paper can effectively improve the details of the extremely dark image area after mapping while maintaining the subjective quality of the overall image.

Key words: pixel gradient, high dynamic range image, tone mapping, local tone mapping, global tone mapping