

全域映射之高動態範圍色調映射技術之研究

吳佳純¹ 危永中¹ 蔡吉昌¹ 黃安立¹

¹義守大學資訊管理系

摘要

高動態範圍影像(High Dynamic Range Images; HDRI)是紀錄真實環境的影像檔，但卻無法在顯示器中顯示其真實的內容，因為在真實的環境中，亮度範圍寬廣，若以數值來表示，其數值的種類為無限多，由於呈現影像裝置只能呈現有限種類數值的影像，所以高動態範圍影像若要呈現，就必須將其無限種類的數值轉換到有限種類的數值，這種轉換被稱之為色調映射(Tone Mapping)。

色調映射方法基本上可分為兩大類：區域色調映射(Local Mapping)及全域色調映射(Global Mapping)。全域色調映射的優點就是簡單、速度快，在應用上若想快速知道影像的內容為何或即時顯示，全域映射是不錯的選擇。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，論文中利用兩次映射的方法來完成高動態影像之色調映射，第一次映射是為了找出映射值只包含極少數像素的地方，此目的是防止過多的像素點映射在相同的地方，而使得影像中的細節喪失，因此有必要做適當的調整，調整後，就進行第二次映射。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。

關鍵字：高動態範圍影像，色調映射，區域色調映射，全域色調映射

壹、簡介

取像設備在設定好取像之曝光值後，在許多的情況中，所取得的影像無法將影像內容皆顯示清楚，如圖一顯示出3種不同的曝光值的低動態範圍影像(影像數值種類有限的影像)，在(a)圖中所顯示的是正常曝光之影像，室外清楚，室內不清楚。(b)圖是曝光短的影像，室內外接不清楚。(c)圖是曝光長的影像，室內清楚，室外不清楚。很明顯地，取像設備不論怎麼設定他的曝光值，總會使得影像中部份的區域看不清楚，這就是取像設備曝光能力之限制，為解決此一問題，使用多曝光影像合

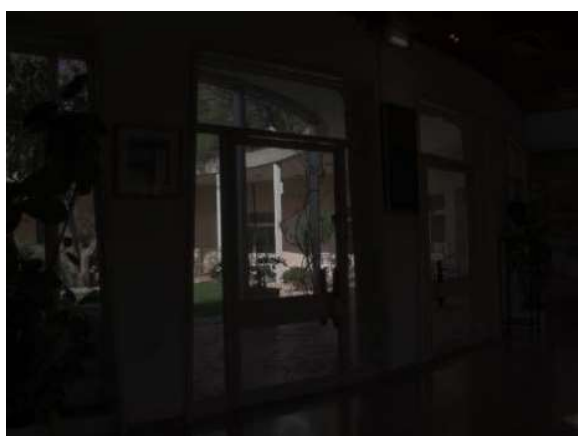
成的方法之相關論文已陸續地被發表出來[1]~[5]，此合成影像之影像數值以浮點值並依規定的格式紀錄，其目的是希望能真實地記錄真實環境之景象，此影像檔被稱為高動態範圍影像(High Dynamic Range Images; HDRI)，但此檔案無法直接的以影像設備顯示出來，因為影像設備無法顯示無限多種的數值。表一[6]是目前高動態影像所採用的格式，本論文實驗所採用的高動態影像是 HDR 格式，RGBE 編碼。

為能使高動態範圍影像於一般的顯像設備上呈現，就必須將高動態範圍影像做影像映射，使多種類的數值變為有現種類

的數值。



(a)正常曝光



(b)曝光短



(c)曝光長

圖一：低動態範圍影像

本論主要是研究第二階段的影像映射，也就是射調映射[7]～[14]。色調映射演算法可分為全域映射(Global Mapping)與區域映射(Local Mapping)等兩大類。

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相同的值，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不同的值，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。

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	$\text{LogY}+(u', v')$	24
	LogLuv24	$\text{LogY}+(u', v')$	24
EXR	Half RGB	RGB	48

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，論文中利用兩次映射的方法來完成高動態影像之色調映射，第一次映射是為了找出映射值只包含極少數像素的地方，此目的是防止過多

的像素點映射在相同的地方，而使得影像中的細節喪失，因此有必要做適當的調整，調整後，就進行第二次映射。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。

貳、全域映射技術之探討

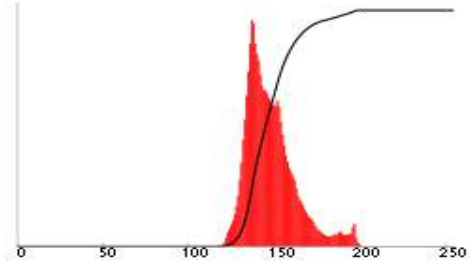
全域映射方法會將高動態範圍影像中的相同的像素值映射到相同的值，映射過程不受其他因素(如鄰近像素值或影像平均值等)所影響，一旦映射規則建立，輸出值只與當時的輸入值有關，本節將介紹兩種全域映射方法：直方圖均化法(Histogram Equalization) [13]與最佳色調再現曲線運算子[10]。

1. 直方圖均化法

直方圖均化法是一個典型的全域映射方法，原理簡單且有效，該方法將每一個新的映射值分配相同數量的輸入值。圖二是以直方圖均化法所映射的一個對比不強的影像，(a)圖是原始影像，(b)圖是原始影像的值方圖，(c)圖是直方圖均化後之影像。



(a)原影像



(b)原始影像之直方圖



(c)直方圖均化後之影像

圖二：直方圖均化法之影像處理

式子(1)是直方圖均化的公式：

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

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。

下例說明直方圖均化的計算，假設 $cdf_{min} = 0$ ， $M \times N = 100$ ， $L = 256$ ，影像的影像值如表二所示。

表三是各灰階值總數統計，將式子(1)應用於表三就可得到表四的結果，也就是原灰階值對映的新映射值。

表二：影像大小 10×10 之灰階值

123	94	84	112	122	81	101	127	105	84
118	121	123	105	102	89	115	106	90	83
129	111	119	105	118	83	129	124	109	121
100	124	125	99	82	127	112	92	81	119
86	81	114	122	116	118	99	105	108	95
80	110	97	115	84	105	92	112	96	81
81	124	90	125	91	111	128	99	121	106
111	101	89	103	100	116	117	107	88	87
109	110	88	112	106	90	103	83	119	118
123	82	98	104	115	83	127	81	92	105

表三：各灰階值總數統計

灰階值	總數	灰階值	總數	灰階值	總數	灰階值	總數	灰階值	總數
80	1	90	3	100	2	110	2	120	0
81	6	91	1	101	2	111	3	121	3
82	2	92	3	102	1	112	4	122	2
83	4	93	0	103	2	113	0	123	3
84	3	94	1	104	1	114	1	124	3
85	0	95	1	105	6	115	3	125	2
86	1	96	1	106	3	116	2	126	0
87	1	97	1	107	1	117	1	127	3
88	2	98	1	108	1	118	4	128	1
89	2	99	3	109	2	119	3	129	2

表四：各灰階值累積分布與對應之新的灰階值

灰階值	cdf	新灰階值	灰階值	cdf	新灰階值
80	1	2	105	51	130
81	7	17	106	54	137
82	9	22	107	55	140
83	13	33	108	56	142
84	16	40	109	58	147
85	16	40	110	60	153

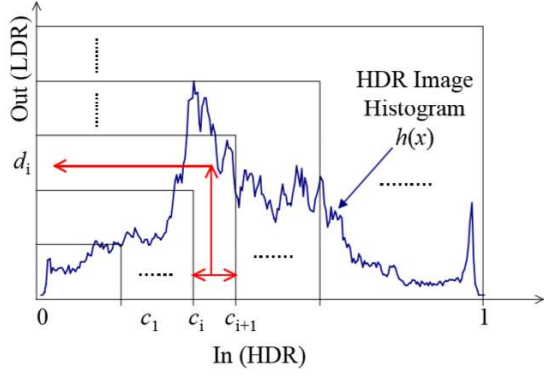
86	17	43	111	63	160
87	18	45	112	67	170
88	20	51	113	67	170
89	22	56	114	68	173
90	25	63	115	71	181
91	26	66	116	73	186
92	29	73	117	74	188
93	29	73	118	78	198
94	30	76	119	81	206
95	31	79	120	81	206
96	32	81	121	84	214
97	33	84	122	86	219
98	34	86	123	89	226
99	37	94	124	92	234
100	39	99	125	94	239
101	41	104	126	94	239
102	42	107	127	97	247
103	44	112	128	98	249
104	45	114	129	100	255

基本上當高動態範圍影像映射到低動態範圍影像時，為增加影像的對比，低動態影像的灰階值會將灰階範圍整個占滿，此時做直方圖均化可以使邊緣得到強化。

2. 最佳色調再現曲線運算子

最佳色調再現曲線運算子[10]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：

如圖三所示，此方法是先建立高動態範圍影像之直方圖，再由式子(2)求得 c_i ， $i = 0, 1, 2, \dots, 255$ ， $0 < c_1 < c_2 < \dots < c_{255} < 1$ 。



圖三： HDR Image 亮度影像之直方圖

最佳色調再現曲線運算子的映射方程式如式子(2)，其目標是求式子最小化。
E =

$$\sum_{i=1}^{255} \left(c_i - \frac{i}{256} \right)^2 + \quad (2)$$

$$\lambda \sum_{i=1}^{255} \left(\int_0^{c_i} h(x) dx - \frac{i}{256} \right)^2$$

其中：

c_i ：高動態範圍影像之分割值。

$h(x)$ ：高動態範圍影像之累積分布函數。

λ ：Lagrange Multiplier。

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。

[10]為了簡化式子(2)計算，將式子(2)改寫成式子(3)，

$$\begin{aligned} E_b(c) &= \frac{(c - 0.5(L_{max} + L_{min}))^2}{L^2} \\ &+ \lambda \frac{((\sum_{x=0}^c h(x)) - 0.5N)^2}{N^2} \end{aligned} \quad (3)$$

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。

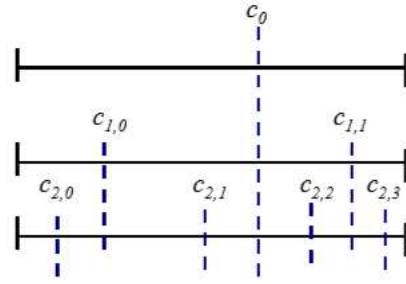
L_{max} 、 L_{min} ：直方圖某區間的最大值與最

小值。

計算 c_i 值，一開始先利用式子(3)計算 c_0 ，然後再利用式子(3)去計算 $c_{1,0}$ 、 $c_{1,1}$ ，接著再利用式子(3)去計算其它的 c_i ，直到255個 c_i 被求出，圖四顯示求 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(4)求低動態範圍彩色影像每一像素的RGB值。


 圖四：求 c_i 的方式與次序

$$\begin{aligned} R_{out} &= \left(\frac{R_{in}}{L_{in}} \right)^\gamma L_{out}, \\ G_{out} &= \left(\frac{G_{in}}{L_{in}} \right)^\gamma L_{out}, \\ B_{out} &= \left(\frac{B_{in}}{L_{in}} \right)^\gamma L_{out} \end{aligned} \quad (4)$$

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。

參、研究方法

本論文利用前節的“最佳色調再現曲線運算子”做為基礎，發展一個兩次映射的射調映射方法。

在研究中發現最佳色調再現曲線運算子的過程中，某些映射值只有少數幾個高動態像素值與其對映，這意味著其他的映射值會有極多的高動態像素值與其對映，這種現象會使得映射後的低動態影像會喪失許多的對比(細節)資訊，雖然設定式子(2)的 λ 值可改進此現象，但是會耗費許多的時間去針對每種不同的高動態範圍影像去求取適合於它們的 λ 值，因此，論文中提出兩次映射的方法來完成高動態影像之色調映射，第一次映射是為了找出映射值只包含極少數像素的地方，此目的是防止過多的像素點映射在相同的地方，而使得影像中的細節喪失，因此有必要做適當的調整，調整後，就進行第二次映射。本論文所提出的映射方法敘述如下：

- (a) 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(影像亮度的部分，也就是所謂的灰階影像)。
- (b) 設 $\lambda = 0.5$ ，以“最佳色調再現曲線運算子”做第一次的映射，並計算其直方圖。
- (c) 找出直方圖中連續的區域，在這些區域中的量值都低於 $N(=10)$ 。
- (d) 分別將各自區域所對映的高動態範圍影像之像素灰階值設為相同的值，使其在第二次映射時能映射在一起。
- (e) 再以“最佳色調再現曲線運算子”方法做第二次的映射。
- (f) 利用式子(4)將低動態範圍的 Y 影像格式轉換成 RGB 影像格式，設 $\gamma = 0.5$ 。

肆、實驗結果

目前高動態範圍影像映射至低動態影像的方法好壞之判定主要仍是以主觀的方式來決定，這主觀的感覺包含了下列的指標：

1. 影像的色彩是否自然。
2. 影像光線的明暗是否自然。
3. 影像的暗處與亮處對比度是否清晰

圖五到圖八是幾種不同性質影像處理的結果，原始影像包含極暗及極亮的影像。

圖五是整體偏暗的影像，(a)圖是原始影像，從影像中可看出橡樹區域因曝光不足而過暗看不清。(b)圖是最佳色調再現曲線運算子處理的結果，在橡樹區域已有明顯的改善，但對比度稍嫌不足。(c)圖是本論文提出的方法所處理的結果，在橡樹區域已有更明顯的改善。

圖六是一般亮度的影像，(a)圖是原始影像，從影像中可看出在雪地的部分有對比不足的問題。(b)圖是最佳色調再現曲線運算子處理的結果，在雪地的部分有對比不足的問題已有改善。(c)圖是本論文提出的方法所處理的結果，在雪地的部分有對比不足的問題已有更明顯的改善。

圖七是偏亮的影像，(a)圖是原始影像，從影像中可看出在燈光周圍的樹葉與樹支因曝光過久造成過亮而看不清。(b)圖是最佳色調再現曲線運算子處理的結果，在燈光周圍的樹葉與樹枝已有明顯的改善。(c)圖是本論文提出的方法所處理的結果，在燈光周圍的樹葉與樹枝已有更明顯的改善。

圖八是偏暗的影像，(a)圖是原始影像，從影像中可看出牆壁的紋理因曝光不足而看不清。(b)圖是最佳色調再現曲線運算子處理的結果，牆壁的紋理已有的改善。(c)圖是本論文提出的方法所處理的結果，在

牆壁的紋理已有更明顯的改善。

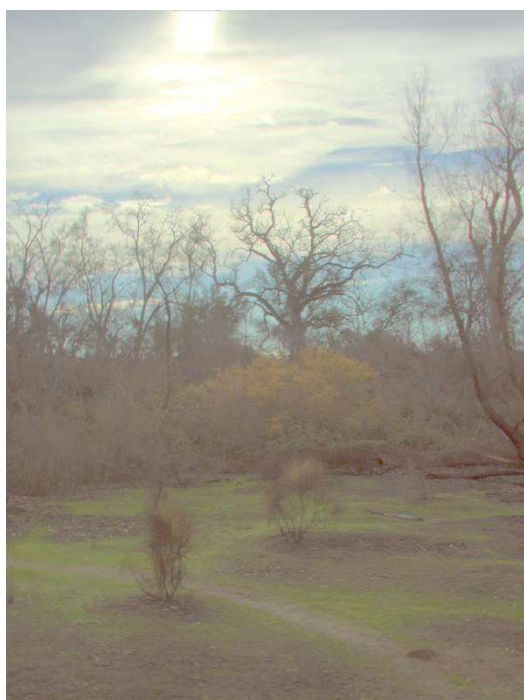


(a) 原始影像



(c) 本研究方法

圖五：影像 oaks



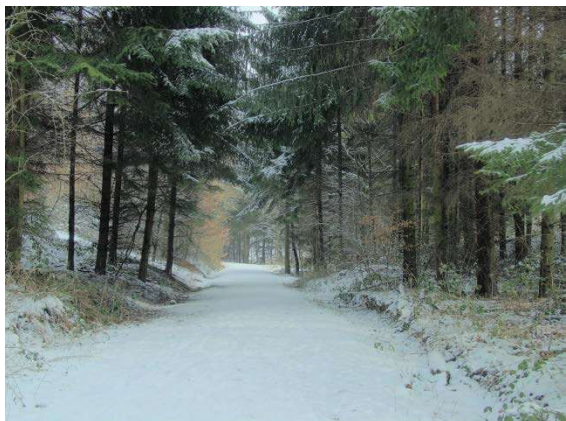
(b) 最佳色調再現曲線運算子



(a) 原始影像

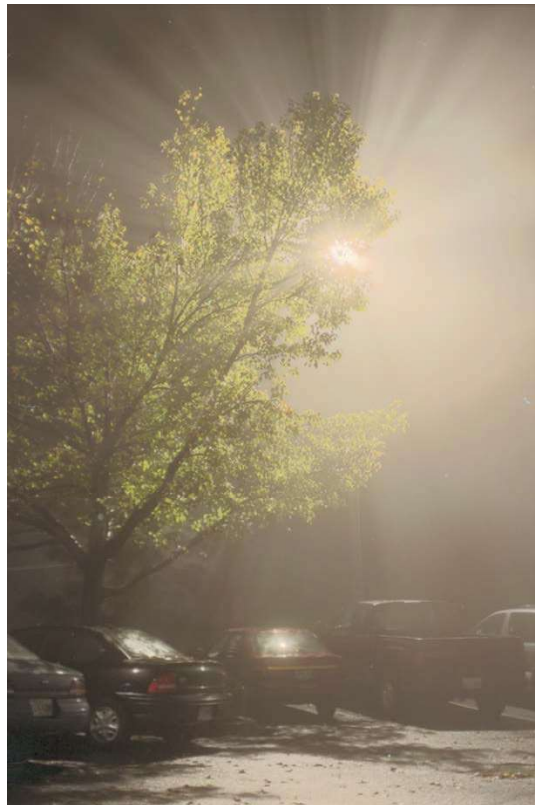


(b) 最佳色調再現曲線運算子



(c) 本研究方法

圖六：影像 forest_path



(b) 最佳色調再現曲線運算子



(a) 原始影像



(c) 本研究方法

圖七：影像 bigFogMap



(a) 原始影像



(c) 本研究方法

圖八：影像 tinterna



(b) 最佳色調再現曲線運算子

從圖五到圖八處理的結果來看，本論文所提的研究方法相對於最佳色調再現曲線運算子能有較好的主觀品質，不論原始影像是屬於極暗的影像(如圖五、圖八)，或是屬於極亮的影像(如圖七)，或是屬於一般亮度的影像(如圖六)都有較好的主觀品質，更重要的是相關的參數值只需要一次的設定即可的到良好的結果，節省了許多影像處理的時間。

伍、結論

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的細節及自然度，雖然需經兩次的映射過程，似乎比一次的映射過程來的方法來的較久，但是本方法無須再多次調整出適當的 λ 值，相對所需的時間而言，本方法反而可省較多的時間且可得到良好的結果。

參考文獻：

- [1] T. Mitsunaga and S. Nayar, "Radiometric self calibration", In Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference, volume 1, pp 374–380, 1999.
- [2] Paul E. Debevec, Jitendra Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", in: Proceedings of the SIGGRAPH 97 Conference, pp. 369–378, 1997.
- [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] T. Mertens, J. Kautz and F. V. Reeth, "Exposure Fusion," in IEEE Computer Society, pp. 382- 390, 2007.
- [5] 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.
- [6] http://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780123749147/02~Chapter_3.pdf, 2016.
- [7] R. K. Chaurasiya, Prof. K. R. Ramakrishnan, "High Dynamic Range Imaging", International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2013.
- [8] Y. Bando, G. Qiu, M. Okuda, S. Daly, T. Aach and Oscar C. AU, "Recent Advances in High Dynamic Range Imaging Technology", Proceedings of Sep. 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing, Hong Kong. D. Valentin, H. Abdi, A. J. O'Toole, and G. Cottrell, "Connectionist models of face processing: A survey", Pattern Recognition. 27, pp. 1209–1230, 1994.
- [9] J. Duan and G. Qiu, "Fast Tone Mapping for High Dynamic Range Images", Proc. ICPR2004, pp. 847-850, August 2004.
- [10] 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
- [11] F. Durand and J. Dorsey, "Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic- range images," ACM Trans. on Graphics, pp. 257–266, 2002.
- [12] R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman, "Gradient domain high dynamic range compression," ACM Trans. on Graphics, pp. 249–256, 2002.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Histogram_equalization, July 21, 2106
- [14] 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。

A Study on Global Tone Mapping for High Dynamic Range Images

Chia-Chun Wu¹, Yung-Chung Wei¹, Jyi-Chang Tsai¹, An-Li Huang¹

¹ **Department of Information Management, I-Shou University**

Abstract

High dynamic range images (HDRI) are the images that can record real scenarios, but HDRI can't be shown in the display device directly. In a real environment, the range of brightness is very broad, and the number of expressing the brightness of environment is uncountable. So, HDRI recording real scenarios have to be mapped into low dynamic range images (LDRI) which have countable value and can be shown in general display device. The mapping is called tone mapping.

Tone mapping methods can basically be divided into two categories: local tone mapping and global tone mapping. Advantages of global tone mapping is simple, fast. Therefore, it is the best choice if anyone wants to know the contents of HDR quickly. The main goal of this paper is to propose a high-quality global tone mapping method. In the paper, the new tone mapping consists of two mappings. The first mapping is to find the pixels that have the same mapped value and have very low number ratio relative to other pixels in the HDRI. The purpose of the mapping is to prevent excessive pixels from mapping into the same value. Because too many pixels are mapped into the same value, the loss of image detail will be increased. It is necessary to make the appropriate adjustments. After the adjustment, the second mapping goes on. The results show that the proposed method in this paper can effectively enhance the detail and contrast of subjective quality of LDRI.

Key words: high dynamic range images, tone mapping, local mapping region, global tone mapping