

doi: 10.3788/gzxb20124102.0200

基于 Retinex 理论 JPEG2000 压缩图像增强方法

储昭辉¹, 汪荣贵², 张璇², 张新龙²

(1 合肥学院 数学与物理系, 合肥 230601)

(2 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要:在增强压缩图像过程中,采用传统图像增强方法存在细节恢复困难,易产生块状效应等局限性,针对此问题,本文将 Retinex 理论引入 JPEG2000 压缩框架中,提出一种新的 JPEG2000 压缩图像增强方法.它将小波变换后的低频系数看作入射光分量,高频系数看作反射光分量,通过对低频系数进行两次非线性映射,来调整场景光照的动态范围;通过调整高频系数,提高对比度,实现图像细节的整体拉升;通过判断各子块的活动性,自适应来修改亮度量化表,达到可以保留更多的细节,抑制块状效应的目的.实验结果表明,该算法在增强效果、压缩质量等方面都有着较好的优势.

关键词:图像增强;Retinex 理论;JPEG2000 压缩;小波变换;亮度量化表

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)02-0200-5

0 引言

图像增强是指有目的地强调图像的整体或局部特性,以改善图像的视觉效果或满足特殊分析的需要^[1].Retinex(视网膜“Retina”和大脑皮层“Cortex”的缩写)理论及相关算法是图像增强的新思路^[2-6].其理论基础是色彩的恒常性,即人眼对物体色彩的感知取决于物体表面的反射光特性,与入射光无关.Retinex 算法把待增强图像看成是由入射分量和反射分量两部分组成,通过像素之间的亮度比较得到入射分量,从而进一步得到反射分量,还原物体的本来面貌,实现对图像的增强.

图像在压缩过程中很多细节往往已经丢失,传统图像增强方法在增强压缩图像的过程中,存在细节恢复困难,易产生块状效应等局限性,因而压缩图像增强日渐成为图像增强中新的研究热点^[7].压缩图像增强方法不是单纯的通过离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)或离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)来处理图像,而是将图像增强融合进图像压缩流程中,综合考虑压缩过程中量化、编码等步骤对增强效果的影响,建立能够进行增强的图像压缩框架.其中采用怎样的增强算法是很多学者研究的重点.文献[8]提出了一种结合 Retinex 理论的 DCT 域图像增强方法;文献[9]提出了一种分频带对比度度量的 DWT 域图

像增强方法;而文献[10]则将 α -rooting(测试“Alpha”和生根“Rooting”的缩写)算法应用于 DWT 域,提出了一种新的对比度增强算法.

本文将 Retinex 理论引入 JPEG2000 压缩框架中,提出一种新的 JPEG2000 压缩图像增强方法,它根据小波变换系数的特性,分别对低频系数和高频系数进行动态范围调整和对比度增强操作,提高了图像的质量.由于量化操作导致图像信息丢失,为了减少增强后的细节丢失,通过改进量化表的方式来保留图像更多的细节信息,且可以抑制块状效应的产生.

1 JPEG2000 压缩框架

JPEG2000 被认为是未来取代 JPEG 的下一代图像压缩标准^[11],它与 JPEG 最大的不同在于放弃了 JPEG 所采用的以 DCT 变换为主的区域块编码方式,而改用以 DWT 变换为主的多解析编码方式.DWT 变换是 JPEG2000 码流具有分辨率可分级的基础,变换的目的是去除每个子图像内部像素之间的相关性,尽可能地将信息集中到少的变换系数上,而剩下的系数可以粗略的量化,或将其截短为零,以降低图像的失真.JPEG2000 采用 DWT 变换编码,能针对不同类型图像的不同,区域采用不同的空-频分辨率,从而有可能得到较高的压缩比,而且可以实现无损压缩的机制,其简化的编码结构框图如图 1.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60575023, No. 61075032)、安徽省自然科学基金(No. 070412054)、安徽省教育厅自然科学基金(No. KJ2009B043Z)和合肥学院科研发展基金(No. 11KY03ZR)资助

第一作者:储昭辉(1975-),男,副教授,硕士,主要研究方向为图像处理,机器视觉. Email: czh_2004@hfuu.edu.cn

通讯作者:汪荣贵(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为智能视频处理与分析、车载视觉增强增强系统等. Email: wangrgui@126.com

收稿日期:2011-08-19; **修回日期:**2011-11-16

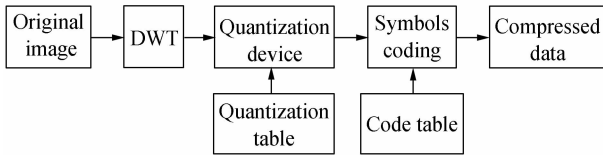


图 1 JPEG2000 编码器流程
Fig. 1 JPEG2000 code process

图像经过 DWT 变换后,低频分量集中在左上角,即子块左上角的元素 $d(0,0)$,称之为低频系数,其余的 63 个元素称之为高频系数,如图 2,从左上角到右下角空间频率依次增加。

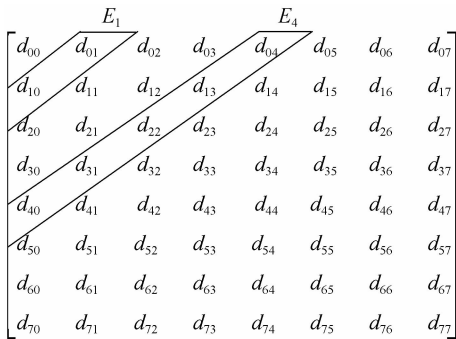


图 2 DWT 系数子块
Fig. 2 DWT coefficient block

2 基于 Retinex 的 JPEG2000 压缩图像增强算法

2.1 Retinex 算法

Retinex 理论是 Jobson 等人根据色彩恒常性理论提出的一种图像增强方法,该方法首先假设一副图像是由入射光分量和反射光分量组成,即

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

式中 $I(x,y)$ 表示待增强图像, $L(x,y)$ 表示入射分量, $R(x,y)$ 表示反射分量。

然后,采用高斯函数对入射分量进行估计得到照度估计 $\tilde{L}(x,y)$,再通过式(2)去除照度估计,进而得到反射估计 $\tilde{R}(x,y)$,即

$$\tilde{R}(x,y) = I(x,y) / \tilde{L}(x,y) \quad (2)$$

与现有的 Retinex 算法抛开入射光分量,将反射分量作为最终处理结果不同,本文算法兼顾入射光分量(低频系数)包含的低频信息和反射光分量(高频系数)包含的高频信息,分别对入射光及反射光分量进行处理.对入射光分量进行动态范围调整,改善图像的整体亮度效果,得到 $L_{out}(x,y)$

$$L_{out}(x,y) = G(\tilde{L}(x,y)) \quad (3)$$

对反射光分量进行细节增强处理,改善图像的清晰度,得到 $R_{out}(x,y)$

$$R_{out}(x,y) = F(\tilde{R}(x,y)) \quad (4)$$

最终将 $L_{out}(x,y)$ 和 $R_{out}(x,y)$ 相乘得到输出图像 $O(x,y)$,实现对图像的增强

$$O(x,y) = L_{out}(x,y) \cdot R_{out}(x,y) \quad (5)$$

算法基本流程如图 3 所示。

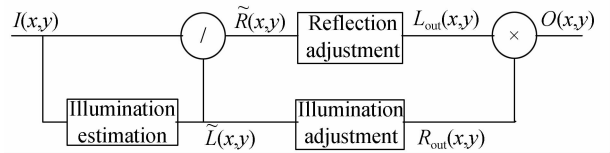


图 3 算法流程
Fig. 3 Algorithm flow chart

2.2 照度分量的动态范围调整

首先将原始图像进行 DWT 变换,然后调整 DWT 变换后图像各个子块的低频系数,来调整场景光照的动态范围,对图像的光照进行重新划分.进行动态范围调整的映射函数选取的途径很多,没有唯一的函数能适应于任何一幅图像并且提供最好的增强效果,本文选用比较简单的、易于实现、对黑暗区域和过亮区域都有较好的动态范围压缩效果的两组指数函数相继对低频系数 $d(0,0)$ 进行非线性映射来达到动态范围调整的目的,映射函数如图 4,图 4(a)所表示的函数为 $f = e^{x-1}$,图 4(b)所表示函数为 $f = e^{-x}$ 。

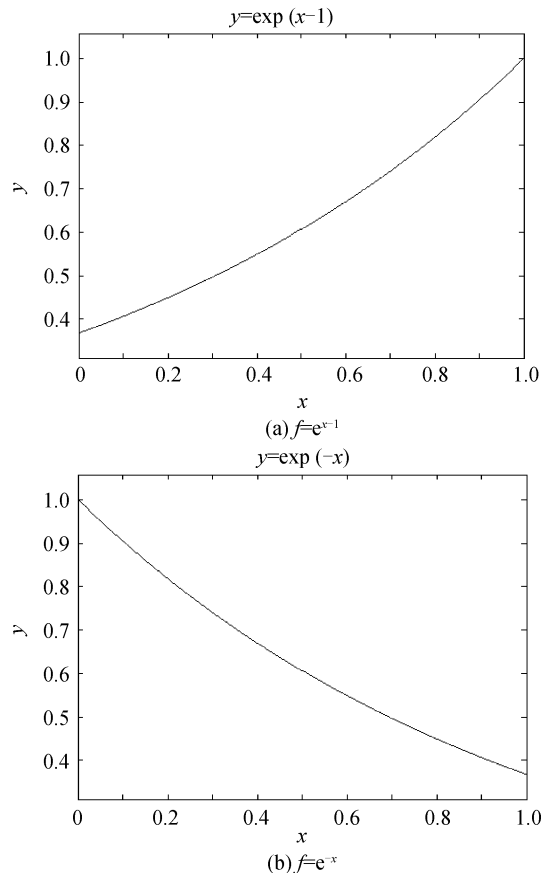


图 4 低频系数映射函数
Fig. 4 Lower frequency transfer function

假设当前图像的最大亮度为 I_{max} ,利用在区间 $[0,1]$ 内单调递增的函数 $f = e^{x-1}$ 将 $d(0,0)$ 映射到 $\bar{d}(0,0)$,即

$$\bar{d}(0,0) = I_{\max} \cdot e^{\frac{d(0,0)}{I_{\max}} - 1} \quad (6)$$

经过式(6)处理后,可以提高图像中较暗部分的亮度,然后利用在区间 $[0,1]$ 内单调递减的函数 $f = e^{-x}$ 将 $\bar{d}(0,0)$ 映射到 $\tilde{d}(0,0)$,即

$$\tilde{d}(0,0) = I_{\max} \cdot e^{-\frac{\bar{d}(0,0)}{I_{\max}}} \quad (7)$$

经过式(7)处理后,可以降低图像中过亮部分的亮度,这样一来,图像中场景的动态范围得到了调整,且不会损失暗处的细节,也不会出现过曝光的现象。

2.3 反射分量校正

反射光分量包含了大量图像细节,对其进行增强能够提高图像的对比度,增强场景中观看者感兴趣的细节部分.而人类视觉模型中对图像细节的感知基于高频和低频信息之比,利用图像的这种空间频率特性可以将 64 个 DWT 系数划分为 15 个频带,如图 2 所示,记作 E_n ($0 \leq n \leq 14$),其中每个频带向量 E_n 由 DWT 系数 $d(u, v)$ 组成, u 和 v 满足 $u + v = n$,即

$$E_n = [d(u, v)], u + v = n, 0 \leq u, v \leq 7 \quad (8)$$

然后根据子块所处的不同位置和人眼的视觉敏感性来调整高频系数以增强图像对比度.即当子块处于图像的平坦区域时,减小增强强度,以避免过度增强,产生过大的灰度差,产生块状效应;处于图像的纹理区域时,增大增强强度,凸显图像细节;处于图像的边界区域时,根据邻域子块的性质来决定增强强度.可通过计算子块的梯度信息来判定该子块处于平坦区域还是边界区域,具体做法如下^[12]

$$\text{grad_H}(u, v) = \sum \sum d_H(u, v) \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} d_H(u, v) = 1, |p(u, v) - p(u-1, v)| > \text{Th} \\ d_H(u, v) = 0, \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{grad_V}(u, v) = \sum \sum d_V(u, v) \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} d_V(u, v) = 1, |p(u, v) - p(u, v-1)| > \text{Th} \\ d_V(u, v) = 0, \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{grad} = \max(\text{grad_H}, \text{grad_V}) \quad (13)$$

式中 $p(u, v)$ 为子块的像素值, grad_H 为水平梯度信息, grad_V 为垂直梯度信息, Th 为人眼所能感觉到的亮度变化门限值.若 $\text{grad} < 125$,则该子块属于平坦区域;若 $\text{grad} > 300$,该子块属于边界区域;否则属于一般纹理区域。

记增强后的第 n 个频带为 \tilde{E}_n ,定义

$$H_n = \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{E}_i / \sum_{i=0}^{n-1} E_i \quad (n \geq 1) \quad (14)$$

对处于纹理区域的子块,增强处理方式为

$$\tilde{d}(u, v) = k H_{u+v} d(u, v), u + v \geq 1 \quad (15)$$

其中增强因子 k 为

$$k = \tilde{d}(0,0) / d(0,0) \quad (16)$$

$d(0,0)$ 为初始低频系数, $\tilde{d}(0,0)$ 为照度分量映射后的低频系数。

对处于平坦区域的子块,由于其小波系数基本集中于低频部分,保持频带 E_1 的系数不变,其余频带按式(15)进行处理,可以更加有效地消除块状效应。

对处于边界区域的子块,如果相邻子块大部分处于平坦区域,应考虑边界的块效应问题,保持频带 E_1 不作增强,其余频带可按式(17)进行处理

$$\tilde{d}(u, v) = k d(u, v) \quad (17)$$

如果相邻子块大部分处于边界区域或纹理区域,频带 E_1 仍不作增强,其余频带按式(15)进行处理。

2.4 亮度量化表的改进

现有 JPEG2000 图像增强算法一般是在 JPEG2000 压缩流程中添加增强部分,没有对 JPEG2000 标准亮度量化表进行改进,重建图像时有可能造成主观失真,导致增强后的细节可能重新丢失.本文通过对子块活动性的判断以及第 2.3 节中对子块所处位置的划分,对标准亮度量化表进行了修改,尽可能的保持增强后的细节,又不会引起压缩比的显著下降。

子块的活动性反映了子块的复杂程度,活动性越高,人眼视觉感知能力越小,相对地可以采用较大的量化步长进行量化;反之,则减小量化步长.在 MPEG-2 TM5 中,子块的活动性则是以 4 个亮度子块的像素方差最小值作为度量标准的.本文为减少计算量,采用直接计算 4 个亮度子块 DWT 中高频系数的绝对值之和的最小值作为该子块活动性水平的统计标准。

$$\text{act} = \min_{k=0,1,2,3} (\text{abs_sum}) \quad (18)$$

式中

$$\text{abs_sum} = \sum_{u=1}^7 \sum_{v=1}^7 |d(u, v)| \quad (19)$$

子块的平均活动性则以所有亮度子块的高频系数的绝对值之和的平均值来表示,即

$$\text{avg_act} = \text{mean}(\text{abs_sum}) \quad (20)$$

根据所计算的子块的活动性,参考 MPEG-2 TM5 中计算子块复杂性的方法,可得归一化活动性函数为

$$N_{\text{act}} = \frac{(2 \times \text{act}) + \text{avg_act}}{\text{act} + (2 \times \text{avg_act})} \quad (21)$$

子块的活动性函数反映了人眼的视觉特性.当块的内容复杂、包含高频成分较多、子块活动性较高

时,人眼对此不敏感,可以采用较大的量化步长.相反,对于平坦区等活动性较低,人眼视觉相对敏感的子块则进行细量化.同时,考虑到不同的子块类别,最后定义的量化矩阵为

$$Q = N_{act} \times Q_{def} + Q_{sub} \quad (22)$$

式中 Q 为量化矩阵, Q_{def} 为 JPEG2000 推荐的标准量化表, Q_{sub} 为根据不同类型的子块而产生的量化调整矩阵. 图 5 是本文算法所产生的两种具有代表性的亮度量化表,图 5(a)所示量化表适用于细节较少的图像,图 5(b)所示量化表适用于细节较多的图像.

16	11	10	16	24	40	51	61	16	13	14	25	41	72	97	122
12	12	14	19	26	58	60	55	15	17	22	32	47	110	120	114
14	13	16	24	40	57	69	56	20	22	27	43	76	114	143	120
14	17	22	29	51	87	80	62	22	29	39	55	102	180	172	137
18	22	37	56	68	109	103	77	30	39	70	112	141	234	229	176
24	35	55	64	81	104	113	92	43	66	110	133	174	231	258	216
49	64	78	87	103	121	120	101	93	128	162	187	229	277	282	243
72	92	95	98	112	100	103	99	144	191	204	217	256	235	248	244

图 5 改进的亮度量化表

Fig. 5 Improved brightness table

3 实验结果与分析

将本文算法与 α -rooting 算法进行比较,然后从客观评价标准来进行分析,从而验证本文算法的有效性.

3.1 增强后图像效果对比

首先,将本文算法处理的结果与 α -rooting 算法处理结果进行对比,如图 6 和图 7.



图 6 Building 处理结果比较

Fig. 6 Comparison of building processing result

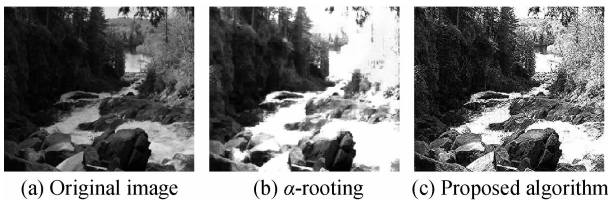


图 7 River 处理结果比较

Fig. 7 Comparison of river processing result

由实验结果可以看出,本文算法不仅可以提高较暗的亮度,凸显细节部分,而且对于场景中较亮部分处理后也不会出现过度曝光的现象,而 α -rooting 算法在处理较亮部分时往往很容易出现过度曝光现象.

3.2 压缩质量对比

采用常用的 JPEG 压缩图像质量评价标准 JPEG Quality Metric (JPQM) 来进行比较分析,其计算过程

为:

定义输入图像 $I(x, y)$, 其水平方向的灰度差为 $d_h(x, y) = I(x, y+1) - I(x, y)$ $y \in [1, Y-1]$ (23)

子块间的水平平均灰度值差异为

$$\beta_h = \frac{1}{X \left[\left(\frac{Y}{8} - 1 \right) \right]} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^{\frac{Y}{8}-1} |d_h(i, 8j)| \quad (24)$$

块内绝对灰度值差的平均值为

$$\alpha_h = \frac{1}{7} \left[\frac{8}{X(Y-1)} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^{Y-1} |d_h(i, j)| - \beta_h \right] \quad (25)$$

计算水平 Zero-Rating 率 (ZC 率), ZC 率的物理意义为计算当前子块的平坦程度,公式为

$$\xi_h = \frac{1}{X(Y-2)} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^{Y-2} \zeta_h(x, y) \quad (26)$$

式中

$$\zeta_h(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{horizontal ZC at } d_h(x, y) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

同理计算垂直方向,得到

$$\beta_v = \frac{\beta_h + \beta_v}{2}, \alpha_v = \frac{\alpha_h + \alpha_v}{2}, \xi_v = \frac{\xi_h + \xi_v}{2} \quad (28)$$

则

$$JPQM = \rho + \eta \beta^{\tau_1} \alpha^{\tau_2} \xi^{\tau_3} \quad (29)$$

式中 $\rho = -245.9$, $\eta = 261.9$, $\tau_1 = -0.024$, $\tau_2 = 0.0160$, $\tau_3 = 0.0160$.

当 JPQM 的值越接近于 10, 说明该压缩图像的质量越高. 表 1、表 2 给出实验结果各项对比数据.

表 1 Building 的评价标准比较

Table 1 Comparison of building evaluation criterion

	JPQM	Compression rate	PSNR
Original image	7.698 1	—	38.870 3
α -rooting	6.766 7	19.361 9 : 1	37.863 9
Proposed algorithm	8.097 8	15.535 6 : 1	38.056 3

表 2 River 的评价标准比较

Table 2 Comparison of river evaluation criterion

	JPQM	Compression rate	PSNR
Original image	9.832 8	—	38.414 8
α -rooting	7.441 0	7.304 5 : 1	37.795 9
Proposed algorithm	9.283 2	7.201 2 : 1	37.904 1

由以上两表可以看出,经过本文算法所提出的改进量化表压缩后的图像在压缩质量上要优于 α -rooting 算法,而且其压缩比也没有显著的下降.

4 结论

本文将 Retinex 理论应用于 JPEG2000 压缩图像,提出了一种新的 JPEG2000 压缩图像增强方法,主要分为两个部分:Retinex 增强和改进亮度量化表.首先以 Retinex 理论为基础,将小波变换的低频系数看作入射光分量,高频系数看作反射光分量,通

通过对低频系数进行两次的非线性映射,来调整场景光照的动态范围,通过调整高频系数,提高对比度,实现图像细节的整体拉升;然后通过判断各子块的活动性,自适应来修改亮度量化表,达到可以保留更多的细节,抑制块状效应的目的.实验结果表明,该算法在压缩比没有显著下降的情况下,可以显著提高压缩图像质量.

参考文献

- [1] 冈萨雷斯 R C. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,等译. 2版.北京:电子工业出版社,2003:460-521.
- [2] JOHNSON D J, RAHMAN Z U, WOODRILL G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(3): 451-462.
- [3] WANG Rong-gui, ZHU Jing, YANG Wan-ting, et al. An improved local multi-scale retinex algorithm based on illuminance image segmentation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(5): 1181-1186.
汪荣贵,朱静,杨万挺,等.基于照度分割的局部多尺度 Retinex 算法[J].电子学报,2010,**38**(5):1181-1186.
- [4] JIANG Xing-fang, JIN Long, HE Long-hua, et al. Research of the color remote sensing image fusing method based on retinex and edge extraction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 555-567.
江兴方,金龙,何隆华,等.基于 Retinex 彩色图像增强及其闭合区域提取的研究[J].光子学报,2007,**36**(3):555-567.
- [5] LIU Wei-hua, SUI Qing-mei. An hue preserving MSR algorithm of image enhancement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 642-646.
刘伟华,隋青美.基于色调恒定的 MSR 图像增强算法[J].光子学报,2011,**40**(4):642-646.
- [6] CHU Zhao-hui, WANG Rong-gui, FANG Shuai. Enhancement algorithm of misty image based on retinex theory in the wavelet domain [J]. *Computer Engineer and Applications*, 2011, **47**(15): 175-179.
储昭辉,汪荣贵,方帅.基于 Retinex 理论的小波域雾天图像增强方法[J].计算机工程与应用,2011,**47**(15):175-179.
- [7] WANG Rong-gui, ZHANG Xin-long, ZHANG Xuan, et al. Image enhancement in the compressed domain based on retinex theory[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, **48**(2): 259-270.
汪荣贵,张新龙,张璇,等.基于 Retinex 理论的压缩域图像增强方法研究[J].计算机研究与发展,2011,**48**(2):259-270.
- [8] SANGKEUN L. An efficient content based image enhancement in the compressed domain using retinex theory [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, **17**(2): 199-213.
- [9] ABDELWAHAB A A, AHMED M K, HASHEM S H, et al. Image enhancement using a contrast measure in the discrete wavelet transform [C]. Radio Science Conference, Cairo Egypt: 24th National, 2007: 1-11.
- [10] WANG Zheng-you, HU Guo-sheng, WU Hai-yan. New alpha-rooting image contrast enhancement method based on discrete wavelet transform[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2009, **30**(5): 996-999.
王正友,胡国胜,吴海燕.基于 DWT 的 Alpha-Rooting 图像增强[J].小型微型计算机系统,2009,**30**(5):996-999.
- [11] LIU Fang-min, WU Yong-hui, YU Jian-xin. Image compression process and principle of JPEG2000[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2002, **14**(10): 905-911.
刘方敏,吴永辉,俞建新. JPEG2000 图像压缩过程及原理概述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002,**14**(10):905-911.
- [12] TANG Yue-lin, XIAO Sha-li, YAO Fu-guang, et al. A JPEG compressed code reflection human visual characteristics [J]. *Microcomputer & its Applications*, 2004, **23**(2): 49-50.
唐跃林,肖沙里,姚富光,等.一种反映人眼视觉特性的 JPEG 压缩编码[J].微型机与应用,2004,**23**(2):49-50.

Enhancement Method of JPEG2000 Compression Image Based on Retinex Theory

CHU Zhao-hui¹, WANG Rong-gui², ZHANG Xuan², ZHANG Xin-long²

(1 Department of Mathematics and Physics, Hefei University, Hefei 230601, China)

(2 School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the process of enhancing the image compression, the traditional image enhancement method has some difficulties in the details recovery and generates blocky effect easily. A new method of JPEG2000 compressed image enhancement is proposed by applying the theory of Retinex into JPEG2000 compact frame. The dynamic range of scene illumination is adjusted through two low-frequency coefficients non-linear mapping with the low frequency coefficients as the wavelet transform and the high-frequency coefficients as the reflected light. By adjusting the high frequency coefficient, image contrast is enhanced, so that the image detail is trended overall. Then illumination quantity table is modified and more details is retained and block effect is controled through judging activities of each sub-block and adaptive quantization. The experimental results show that this algorithm performed well in the reinforcing effect and the compressed quality, etc.

Key words: Image enhancement; Retinex theory; JPEG2000; DWT; illumination quantity table