

文章编号 1004-924X(2011)06-1421-08

12位图像数据的压扩变换显示

范赐恩¹, 吴敏渊^{1*}, 张立国², 邓德祥¹, 曹庆源¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430079;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要:利用数字通信的压扩变换原理,提出了12位图像数据到8位数据的16折线等比分区映射方法,来实现在8位显示器上显示12位图像数据的信息。推导出图像信号的线性量化和非线性量化信噪比公式,对3种不同量化方法的信噪比进行了比较。结果显示,在小于35 dB处,8位非线性量化信噪比和12位线性量化信噪比一致;而大于35 dB时,量化信噪比平缓稳定上升。实验表明该方法能有效改善图像的弱信号,在8位显示器上清晰地观察到低亮度图像细节。虽然对图像的高亮度部分进行了压缩,但对图像细节和信噪比影响不大。该方法不仅适用于灰度图像,而且适用于彩色图像,实验效果与理论预期完全一致。

关键词:图像显示;色阶映射;非线性量化;压扩变换

中图分类号:TP391.4;TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1421

Companding transformation display for 12 bit image data

FAN Ci-en¹, WU Min-yuan^{1*}, ZHANG Li-guo², DENG De-xiang¹, CAO Qing-yuan¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wmy@whu.edu.cn

Abstract: Based on the digital communication companding transformation principle, a 16-polygonal line geometric partition method which maps 12-bit image data to 8-bit data was proposed to display 12-bit image information on a 8-bit gray scale monitor. The formulas for calculating the linear and nonlinear quantization Signal to Noise Ratio (SNRs) were derived. By comparing SNRs of three different quantization methods, it was indicated that the SNR of 8-bit nonlinear quantization is consistent with that of 12-bit linear quantization at less than 35 dB and that is in the stable increase at large than 35 dB. Experiments show that this method can effectively improve the weak signal of the image, and the details of a low luminance image can be observed clearly on a 8-bit monitor. Although the high luminance part of the image is compressed, it has little affect on the image details and SNRs. The proposed method is applicable to gray images and color images. Experimental results are fully consistent with theoretical expectations.

Key words: image display; tone mapping; nonlinear quantization; companding transformation

1 引言

随着空间遥感探测技术的发展,人们对卫星遥感成像质量的要求越来越高,大面阵、高分辨率、高灰阶图像数据的获取已成为必然趋势。高灰阶的图像数据能更加精确细致地反映真实场景的细节,它可以通过 10 位、12 位甚至更高位数 A/D 采样的 CCD 传感器来获取,并以数字图像的形式保存下来^[1]。图像显示的目的是再现真实场景,使用户获得对真实场景最直接的感官体验,因此显示 12 位高灰阶图像并尽量反映图像信息非常重要。

为了识别 12 位图像的细微部分,可用 12 位的高分辨率显示器来显示,其图像清晰度会明显优于 8 位显示器的显示效果,此方案已在医学界和某些特殊部门采用^[2-3]。不过 12 位显示器价格昂贵,并需要专用的软件和硬件接口,如果图像质量第一,其它问题为次,此方案为首选。但是目前绝大多数领域,8 位低灰阶显示设备仍占主流,为在 8 位灰阶显示器上显示高灰阶(如 10 位)图像,多采用舍弃低两位或高两位的显示方法,前者无法显示图像低灰度细节,而后者使图像整体亮度下降呈灰暗状。因此,将高灰阶图像数据在 8 位显示器上显示,并尽量保持图像数据的细节是目前该领域的研究热点。

将高灰阶图像显示在低灰阶的显示设备上,需要某种方式对动态范围进行压缩,这种方式称为色阶重建(Tone Reproduction)或者色阶映射(Tone Mapping)。近年来,人们对色阶重建做了不少研究,如基于人类视觉系统(HVS)的色阶重建算法^[4],自适应对数映射算法^[5],基于直方图均衡化的色阶重建算法^[6-8],基于摄影法的色阶重建算法^[9],基于局部线性窗的色阶重建算法^[10-12]以及基于梯度压缩的色阶重建算法等^[13]。这些色阶映射的算法从主观视觉上都取得了较好的图像整体效果,但是这些算法未能考虑图像质量评价中的一个重要指标——信噪比。信噪比越大,表明色阶映射后图像信息损失越少,图像质量越高,因此在色阶映射过程中保持高的信噪比非常重要。受数字通信理论中的非线性压扩变换原理的启发,本文提出了一种新的色阶映射算法。该算法将图像数据进行 16 折线等比压扩变换,推导出

变换后的图像数据信噪比与信号大小弱相关,在最大限度保持图像信息的同时,实现了高灰阶图像数据在低灰阶显示设备上的显示。实验结果表明该方法明显改善了图像弱信号部分的显示,同时保留了强信号部分的信息。

2 数字通信中的压扩变换

数字语音通信要求量化信噪比不低于 26 dB,相应要求线性量化为 11 位,CCITT 制定了 8 位非线性量化方案顶替 11 位线性量化的国际通用标准。用 8 位非线性量化顶替的依据是:线性量化信噪比的低端不足,高端多余,因此可寻找一种非线性压扩变换,使量化信噪比与信号大小无关,将高端多余的信噪比补到低端,使量化曲线接近水平线。数学推导表明,与幅度大小和概率密度分布都无关的压扩函数是自然对数律。数字语音通信中的 A 律和 μ 律都是用多段折线代替对数线,A 律和 μ 律的区别仅在第一第二段不同,其它各段完全相同,如表 1。

设 V_m 为临界电平,语音信号的动态范围是 $-V_m$ 至 $+V_m$,A 律和 μ 律中都要用 1 位表示极性。所以,实际上 A 律和 μ 律都只用了 7 位非线性量化顶替 11 位线性量化, μ 律想达到 12 位分辨率,但力不从心,第二段量化信噪比损失较大。虽然 CCITT 约定 A 律和 μ 律都可使用,但国际通信一律只用 A 律,我国国内长途也采用 A 律^[14]。

表 1 A 律和 μ 律性能比较

变换律	起始段宽度/	分辨率	第二段宽度/	分辨率
A 律	1/128;	1/2 048	1/128;	1/2 048
μ 律	1/256;	1/4 096	3/256;	3/4 096

图像灰度作为数字信号,与语音信号有相似的特征,保证小信号的量化信噪比即可提升信号的质量。但是图像灰度与语音信号不同的是,语音信号有负值,而图像灰度没有负值,因此,不能完全照搬 A 律的 13 折线或者 μ 律的 15 折线,需要对其进行修改。考虑图像灰度的动态范围是 0 至 V_m ,因此,可取消符号码,用 8 位非线性量化顶替 12 位线性量化。

8 位线性量化与 12 位线性量化相比,8 位量化信噪比少了 24 dB,根本不能达到 1/4 096 的分辨率,见图 1,而 8 位非线性量化在分辨率上能顶替 12 位线性量化,这将在第 4 节描述中进一步证实。

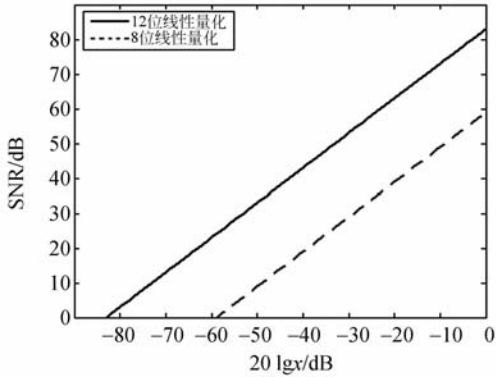


图 1 8 bit 线性量化与 12 bit 线性量化比较
Fig. 1 Comparison of 8 bit and 12 bit linear quantizations

3 16 折线等比压扩变换

数学理论分析表明,量化信噪比与信号幅度大小和概率密度分布都无关的压扩函数是自然对数律,而工程实践表明等比分区所得折线最逼近自然对数线,因此,本文采用等比分区法。

解决 12 bit 线性量化到 8 bit 非线性量化的变换问题,方案有二:

方案一:利用 A 律,将不用的符号比特用于扩充段内电平分级数,分区数仍为 8 个,用 3 位表示,每个分区内 32 个电平,用 5 位表示。起始分区的分辨率为 1/4 096,达到了 12 位线性量化的分辨率。此方案美中不足的是,当信号电平 $u > 0.5V_m$ 时,量化信噪比损失较大。

方案二:借鉴 A 律的等比分区思想,在整个图像信号动态范围内严格采用等比分区法,将不用的符号比特用于扩充段号,改为 16 个分区号,用 4 位表示,每个分区内 16 个电平,用 4 位表示。起始分区的分辨率为 1/4 096,达到了 12 位线性量化的分辨率。当信号电平 $u > 0.5V_m$ 时,量化信噪比损失较少。

本文采用方案二,形成 16 折线等比压扩变换。

3.1 等比公式的建立

设第 i 号分区宽度为 Δx_i ,则相邻两区间的

宽度比为:

$$q = \Delta x_i / \Delta x_{i-1}, \tag{1}$$

要求起始区的分辨率达到 1/4 096,可导出等比公式:

$$q^{16} - 256q + 255 = 0, \tag{2}$$

$$\sum_{i=0}^{15} \Delta x_i = 1. \tag{3}$$

3.2 16 折线的形成

将二维坐标归一化得到 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 。 x 按 Δx_i 等比分区, y 按 16 等份均匀分区,对应的 x, y 两两相交,得出 16 折线,如图 2 所示。

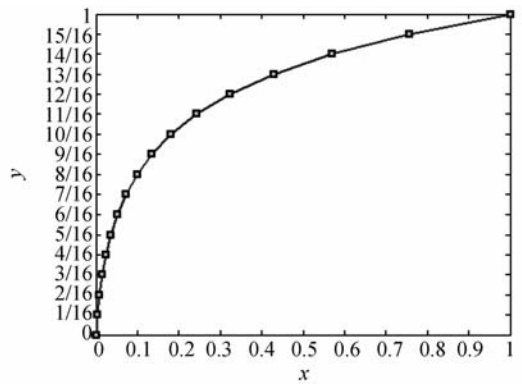


图 2 16 折线压扩曲线

Fig. 2 16 line pressure expansion curve

对每个分区宽度精密标定,工程计算结果

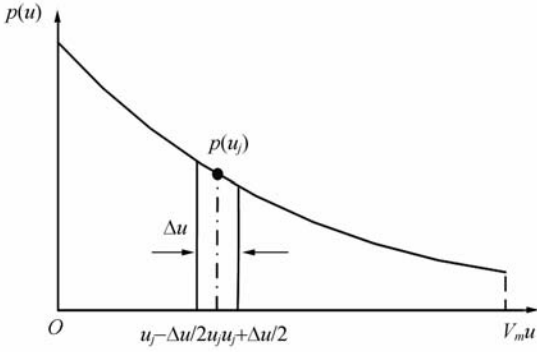
$$\sum_{i=0}^{15} \Delta x_i = 0.999\ 999\ 991, \text{表明分区累计误差小于 } 10^{-8}.$$

4 图像信号非线性量化信噪比计算

图像信号 u 的动态范围在 $0 < u < V_m$,无负值,所以不能照搬语音通信量化信噪比的计算公式。图像信号量化信噪比的计算公式与语音通信量化信噪比的计算公式不同之处在常数项。

4.1 量化噪声功率 σ^2

暂设图像信号幅度概率密度函数按拉普拉斯分布,如图 3 所示。设第 j 个被量化的幅值为 u_j ,量化单位的宽度为 Δu ,该处的概率密度为 $p(u_j)$,其概率图形是竖立直角梯形, $p(u_j)$ 是它的中线,该梯形面积是信号幅值为 u_j 时出现的概率 P_j 。

图 3 第 j 个被量化值 u_j 的概率Fig. 3 j -th probability of quantified value u_j

显然:

$$P_j = p(u_j) \Delta u, \quad (4)$$

当量化级数 $N \gg 1$, Δu 很窄时,幅值为 u_j 的量化噪声功率 σ_j^2 可表示为:

$$\sigma_j^2 = \int_{u_j - \Delta u/2}^{u_j + \Delta u/2} p(u_j) (u - u_j)^2 du = \frac{1}{12} p(u_j) \Delta u^3, \quad (5)$$

将公式(4)代入公式(5)可以得到:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{12} P_j \Delta u^2, \quad (6)$$

信号在全部动态范围内的量化噪声功率 σ^2 为:

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^N P_j \Delta u^2, \quad (7)$$

由于全概率 $\sum_{j=1}^N P_j = 1$, 代入公式(7)得到:

$$\sigma^2 = \frac{1}{12} \Delta u^2, \quad (8)$$

按全概率定义: 概率密度函数曲线和随机变量动态范围所包围的面积定义为 1, 与面积的绝对大小无关, 所以与概率密度函数曲线的形状无关, 公式(8)具有普适性。

图像信号 u 的动态范围在 $0 < u < V_m$, $N = 2^n$, 其中, n 为量化位数, 于是:

$$\Delta u = V_m / N = V_m / 2^n, \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(8)得到:

$$\sigma^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{V_m}{2^n} \right)^2, \quad (10)$$

公式(10)就是图像信号的非线性量化噪声功率。

4.2 线性量化信噪比 SNR_{line}

在讨论非线性量化信噪比前, 首先需计算线性量化噪声。以真值表示的线性量化信噪比 SNR 如下:

$$SNR = \frac{u^2}{\sigma^2} = 12 \times (4^n) \times u^2 / V_m^2, \quad (11)$$

令 $x = u/V_m$, 代入公式(11)可以得到线性量化信噪比:

$$\begin{aligned} SNR_{\text{line}} &= 10 \lg SNR = \\ &= 10 \{ \lg 12 + n \lg 4 + 2 \lg x \} = \\ &= 10.79 + 6.02n + 20 \lg x, \end{aligned} \quad (12)$$

由公式(12), 可以计算 $n=8$ 时, 最大信噪比 $SNR_{\text{line, max}}$ 为 59 dB。如要达到 1/4 096 分辨率, 最小信噪比 $SNR_{\text{line, min}}$ 为 -13.25 dB。同理, $n=12$ 时, 最大信噪比 $SNR_{\text{line, max}}$ 为 84 dB, 最小信噪比 $SNR_{\text{line, min}}$ 为 10.783 dB。由此可见无法用 8 位线性码达到 12 位的分辨率。

4.3 非线性量化信噪比 $SNR_{\text{non-line}}$

非线性量化是对整个动态范围而言, 对每个区间均是线性量化, 因此对每个区间可用线性量化信噪比公式计算量化信噪比。不同的区间折线的斜率不同, 等效的码位 n 不同, 所以非线性量化信噪比的计算可以在线性量化信噪比计算公式基础上改动 n 来完成, 即用公式(13)表示:

$$SNR_{\text{non-line}} = 10.79 + 6.02n_e + 20 \lg x, \quad (13)$$

n_e 是个可变量, 其计算方法如下:

设第 i 段的斜率为 k_i , 那么,

$$k_i = (1/16) / \Delta x_i, \quad (14)$$

令 $k_i = 2^{\Delta n}$, 于是:

$$\Delta n = \lg k_i / \lg 2, \quad (15)$$

n_e 可用公式(16)来表示:

$$n_e = n + \Delta n. \quad (16)$$

由此, 用公式(12)可以计算出 8 位线性量化信噪比和 12 位线性量化信噪比, 公式(13)至公式(16)可以算出 8 位非线性量化信噪比, 如表 2 和图 4 所示。

由表 2 和图 4 可知:

1) 8 位非线性量化的分辨率达到 1/4 096, 与 12 位的分辨率完全一样。

2) $20\lg x \leq -48$ dB 时 8 位非线性量化信噪比与 12 位线性量化信噪比完全一样。

3) $20\lg x = -48$ dB 时, $SNR_{non-line}$ 已达到 35 dB,明显高于数字通信对量化信噪比的要求。

4) $20\lg x > -48$ dB 时, $SNR_{non-line}$ 平稳增加,最大为 47 dB,基本上实现了量化信噪比与信号大小弱相关。

表 2 3 种不同量化方法的信噪比对比

Tab. 2 SNR comparison of three different quantification methods

段界 顺序号	$20\lg x_i$	8 位线性量	12 位线性量	8 位非线性
		化 SNR_{line} /dB	化 SNR_{line} /dB	量化 $SNR_{non-line}$ /dB
0	-72.247	-13.297	10.783	10.785
1	-48.165	10.785	34.865	34.867
2	-40.865	18.085	42.165	39.771
3	-36.010	22.94	47.02	42.236
4	-32.125	26.825	50.905	43.725
5	-28.749	30.201	54.281	44.711
6	-25.677	33.273	57.353	45.387
7	-22.801	36.149	60.229	45.867
8	-20.059	38.891	62.971	46.219
9	-17.410	41.54	65.62	46.472
10	-14.827	44.123	68.203	46.665
11	-12.292	46.658	70.738	46.804
12	-9.793	49.157	73.237	46.907
13	-7.326	51.624	75.704	46.984
14	-4.867	54.083	78.163	47.047
15	-2.428	56.522	80.602	47.091
16	-7.8×10^{-8}	58.95	83.03	47.128

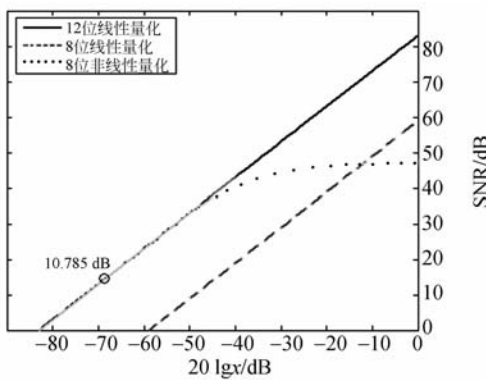


图 4 12 位线性量化和 8 位非线性量化信噪比特性曲线
Fig. 4 SNR characteristic curves of 12 bit linear quantification and 8 bit nonlinear quantification

5 色阶映射的实现

5.1 色阶映射查找表

上述分析发现,采用 16 折线等比压扩变化可以将 12 位或更高位数的图像数据转换为 8 位图像数据进行显示,转换后的图像数据信噪比与图像信号大小弱相关。为了实现图像数据的快速色阶映射,本文采用了色阶映射查找表的方式。首先进行精确分区,使等比折线逼近对数线,并确保公式(2)的解 q 达 10 位有效数,这样各区宽度累计和为:0.999 999 991,分区累计误差 $< 10^{-8}$ 。接着计算各分区的分界点,分区的最小量化单位是 $\Delta_0 = 1/4 096$,各分区误差保证在 $\pm \Delta_i/2$,以消除积累误差。最后,将 12 位的 4 096 个值分别对应到 8 位的 256 个值,完成色阶映射查找表。

如果是 12 位灰度图像显示,那么利用图像中各像素的灰度值为索引查找色阶映射查找表,就可以得到 8 位显示器显示所需的灰度值,完成色阶映射。

5.2 彩色图像的色阶映射

对 12 位彩色图像,首先需要用公式(17)计算彩色图像的亮度信息 L_{in} ,然后根据亮度 L_{in} 查找色阶映射查找表,得到输出亮度值,最后用公式(18)调整 R, G, B 的值。由公式(18)可知,在调整 R, G, B 三色前,需要进行 γ 校正, γ 值一般取 0.6~0.8 之间。

$$L_{in} = 0.299R + 0.587G + 0.114B, \quad (17)$$

$$\begin{cases} R_{out} = \left(\frac{R_{in}}{L_{in}}\right)^\gamma L_{out} \\ G_{out} = \left(\frac{G_{in}}{L_{in}}\right)^\gamma L_{out} \\ B_{out} = \left(\frac{B_{in}}{L_{in}}\right)^\gamma L_{out} \end{cases} \quad (18)$$

6 实验结果与分析

本文以实验室自行研制的 CMOS 相机为测试对象,该相机的 CMOS 芯片选用了 Micron 公司的 MT9P031,该芯片 A/D 采样位数为 12 位。分别对低亮度、正常亮度、高亮度 3 种情况拍摄了 3 组灰度图像,如图 5、图 6、图 7 所示。图 5(a)直接采用线性变换显示,可以发现人眼无法观察到

图像的细节,但是采用本文提出的非线性 16 折线色阶映射方法,低亮度的图像细节清晰可见,如图 5(b)。图 6 和图 7 的图像经过色阶映射后,图像细节基本没有损失。可见,该方法对暗照度图



(a)线性映射
(a)Linear tone mapping



(b)本文方法
(b) Proposed method

图 5 低亮度图像显示结果

Fig. 5 Display results for low luminance image



(a)线性映射
(a)Linear tone mapping



(b)本文方法
(b) Proposed method

图 6 正常亮度图像显示结果

Fig. 6 Display results for normal luminance image



(a)线性映射
(a)Linear tone mapping



(b)本文方法
(b)Proposed method

图 7 高亮度图像显示结果

Fig. 7 Display results for high luminance image

像起到了灰度拉伸的作用,而对正常亮度、高亮度的图像起到了一定的灰度压缩作用,但是压缩不

明显,因此仍能保留图像的细节和相当高的信噪比。本文还对图(5)、图(6)、图(7)3幅图像从信噪比(SNR)、均方误差(MSE)、峰值信噪比(PNSR)和结构相似度(SSIM)^[15]4个方面进行了客观评价,评价结果如表3所示。不难发现,压扩变换后的图像和变换前的图像信噪比符合量化信噪比规律,即低亮度图像的量化信噪比较低,高亮度图像的量化信噪比较高,同样,PSNR也证明了这个结论。SSIM参数可以反映色调映射算法对图像的亮度、纹理细节以及空间位置变化的影响,从表3可知,SSIM都超过了0.9,说明该算法处理后的图像和原图像结构非常相似。实验结果表明,客观评价和主观评价非常一致。

表3 客观评价结果

Tab. 3 Results of objective evaluation

图像	参数			
	SNR	MSE	PSNR	SSIM
低亮度图像	2.795 5	0.098 9	10.04 6	0.985
正常亮度图像	30.299	0.000 4	33.816	0.999
高亮度图像	36.024	0.000 2	37.407	0.999

本文提出的非线性色阶映射算法不仅应用于灰度图像,对彩色图像也适用。为此,拍摄了一幅彩色图像,如图(8)所示。首先根据公式(17)求取



(a)线性映射

(a) Linear tone mapping



(b)本文方法

(b) Proposed method

图8 彩色图像显示结果

Fig. 8 Display results of color image

该彩色图像的亮度,对该亮度运行本文提出的非线性色阶映射算法,然后按公式(18)对R,G,B三色进行变换,最后得到图8(b)所示的显示结果,本实验中取 γ 值为0.7。图8(b)可以发现,彩色图像的亮度较之图8(a)有了明显的改善,并且保持一定的色彩保真度。

7 结论

为将12位图像信息尽可能多地显示在8位显示器上,本文提出了16折线非线性压扩变换的色阶映射算法。该算法的量化信噪比基本上不受信号大小的影响,因此在对图像数据进行压扩显示的同时保持了较高的图像质量。实验结果表明,本文提出的方法对12位图像数据在8位显示器上的显示效果有了明显改善。由于实验条件的限制,本文只对12位图像数据进行了实验仿真,但是本文提出的色阶映射方法并不局限于12位图像的显示,色阶映射公式具有通用性,对更高位灰阶的图像数据仍然适用。

参考文献:

- [1] 杨克虎,姬靖,郭建军,等.高动态范围图像和色阶映射算子[J].自动化学报,2009,35(2):114-122.

- YANG K H, JI J, GUO J J, et al.. High dynamic range images and tone mapping operator[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(2):114-122. (in Chinese)

- [2] 严涛,陈钧,王冰. 医用专业显示器应用与选型[J]. 中国数字医学, 2007,2(8):35-40.
YAN T, CHEN J, WANG B. Application and selection of professional medical monitor[J]. *China Digital Medicine*, 2007,2(8):35-40. (in Chinese)
- [3] Eizo datasheet[OL]. available: <http://www.eizo.com.cn/eizo/index.asp>, 2010.
- [4] JACK T, HOLLY E R. Toner reproduction for realistic images[J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1993,13(6):42-48.
- [5] DRAGO F, MYSZKOWSKI K, ANNEN T, *et al.*. Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003,22(3):419-426.
- [6] QIU G P, JIANG D. An optimal tone reproduction curve operator for the display of high dynamic range images[C]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2005,6:6276-6279.
- [7] JIANG D, QIU G. Fast tone mapping for high dynamic ranges[C]. *Pattern Recognition, CPR2004, 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, United Kingdom*, 2004:23-26.
- [8] JIANG D, MARCO B, CHRIS D, *et al.*. Tone-mapping high dynamic range images by novel histogram adjustment[J]. *Pattern Recognition*, 2010,43(5):1847-1862.
- [9] ERIK R, MICHAEL S, PETER S, *et al.*. Photographic tone reproduction for digital images[C]. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM Press/ACM SIGGRAPH*, 2002:1-10.
- [10] RAANAN F, DANI L, MICHEAL W. Gradient domain high dynamic range compression[C]. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002 Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM Press/ACM SIGGRAPH*, 2002:1-8.
- [11] SHEN J B, FANG SH F, ZHAO H L, *et al.*. Fast approximation of trilateral filter for tone mapping using a signal processing approach[J]. *Signal Process*, 2009,89(5):901-907.
- [12] 刘冬梅,赵宇明. 高动态范围图像梯度压缩算法[J]. 计算机工程, 2009,35(20):210-215.
LOI D M, ZHAO Y M. Gradient compression algorithm of high dynamic range image[J]. *Computer Engineering*, 2009,35(20):210-215. (in Chinese)
- [13] QI SH, JIA Y A, MICHAEL S B. Globally optimized linear windowed tone mapping[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010,16(4):663-675.
- [14] 曹庆源. 数字通信原理及应用[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 1996.
CAI Q Y. *Digital Communication Principle and Application*[M]. Wuhan: Wuhan technical university of surveying and mapping publishing company, 1996. (in Chinese)
- [15] ZHOU W, ALAN C B, HAMID R S, *et al.*. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004,13(4):600-612.

作者简介:



范赐恩(1975—),女,浙江慈溪人,博士研究生,讲师,2001年于武汉大学获得硕士学位,主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: fce@whu.edu.cn



邓德祥(1961—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师,主要从事空间图像处理,片上系统等方面的研究。E-mail: ddx@whu.edu.cn