

文章编号: 0258-7025(2002)12-1096-05

# 彩色图像误差扩散多值量化滤波器的优化设计

隋永新, 杨怀江, 曹健林

(中科院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要** 在多值量化情况下, 因量化误差为白噪声的理想条件无法满足, 故实施误差扩散处理时仅单纯地进行高通滤波(误差蓝化)将损害图像固有的低频特性。误差扩散算法中较为理想的误差滤波器应在高频域具有较大增益, 而在低频域具有有限度衰减。在兼顾滤波器稳定性因素的同时对误差滤波器的脉冲响应进行了重新设计, 并以此构成了用于彩色图像颜色量化的多色调误差扩散优化处理算法。

**关键词** 颜色量化, 误差扩散, 滤波器

中图分类号 TN 713; O 438 文献标识码 A

## Optimized Design of Multilevel Quantization Filter in Color image Error Diffusion Alogrithm

SUI Yong-xin, YANG Huar-jiang, CAO Jian-lin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022)

**Abstract** Because the ideal condition which quantization error has a white power spectrum is never valid on the state of multilevel quantization, the intrinsic low frequency characteristic of image is inflected by the processing of error diffusion only dealt with highpass filter (error blue shift). In this paper, it is proposed that the ideal error filter of error diffusion alogrithm should have greater gains on the high frequency, and finite attenuation on the low frequency. Accoding to such idea, the impulse response of error filter is designed anew, and the stability of filter is taken into account. With the filter the optimized algorithm of multilevel error diffusion used for color image quantization is formed.

**Key words** color quantization, error diffusion, filter

## 1 引 言

颜色量化, 即利用较少的颜色表示一幅连续色调图像, 一直是计算机图形学领域中的一个基本问题。在理论上颜色量化属于颜色矢量集的  $K$  分类问题, 是矢量量化的一种特例。一个完整的颜色量化算法包括两个步骤, 首先是根据处理的图像具体特征优化出具有  $K$  个颜色的调色板, 其次在图像的每个像素与调色板之间建立起映射关系。过去十几年间, 有关颜色量化算法的研究已经取得了相当的进展, 其中较具有代表性的算法有  $k-d$  树分割<sup>[1,2]</sup>, LBG 优化<sup>[3]</sup>, 主元分析<sup>[4]</sup>, 自组织神经网络量化<sup>[5]</sup>

等等。

一般地, 在对连续色调图像进行颜色量化处理时, 由于存在量化误差, 图像的视觉质量都有不同程度的降低, 其中最为严重的是在均匀渐变区域出现的伪轮廓。为提高图像质量, Gentile 在颜色量化算法中引入了半色调技术<sup>[6]</sup>。所谓半色调技术是指在连续灰度图像二值量化输出时为了补偿量化误差对图像质量的负效应所采用的一种图像处理方法。目前颜色量化算法中最为常用的半色调技术为误差扩散技术。

误差扩散算法的核心是一个对量化误差进行频

收稿日期: 2001-09-20; 收到修改稿日期: 2001-11-09

作者简介: 隋永新(1970—), 男, 博士研究生, 主要从事混沌保密通讯、信息隐藏等方面的研究。E-mail: suiyx@263.net

谱整形的数字滤波器, 目前最具代表性的是 Floyd 和 Steinberg 所设计的滤波器( 以下简称为 FS 滤波器), 该滤波器在量化误差为白噪声时的应用效果最为理想。由于对彩色图像进行颜色量化属于多值量化过程( 即所谓的多色调处理), 上述 FS 滤波器的理想应用条件——量化噪声为白噪声无法满足, 因此, 直接使用 FS 滤波器进行多色调误差扩散虽可以在一定程度上提高量化图像的质量, 但处理后的彩色图像在某种程度上仍然存在图案化、颗粒噪声以及伪轮廓等影响图像质量的问题。

本文首先分析了多值量化情况下量化误差的频谱特性和误差滤波器的稳定性, 并在此基础上弄清了产生上述问题的基本原因, 即多值量化情况下直接实施 FS 滤波处理时的单纯高通滤波( 误差蓝化) 损害了图像固有的低频特性, 故而较为理想的误差滤波器应在高频域具有较大增益, 而在低频域具有有限度衰减。据此, 本文在兼顾滤波器稳定性因素的同时对 FS 误差滤波器的脉冲响应进行了重新设计, 并以此改进的 FS 滤波器进行误差扩散处理进而形成了一种用于彩色图像颜色量化的多色调误差扩散优化处理算法。实际测试结果表明, 利用本文所提出的多色调误差扩散优化算法处理的图像质量明显高于 FS 滤波器方法, 因而使误差扩散在多色调颜色量化处理中得到了更为有效的应用。

## 2 误差扩散算法原理

误差扩散算法由 Floyd 和 Steinberg 在 1975 年首次提出<sup>[7]</sup>, 其设计初衷是将图像单元的量化误差传递给与其相邻的单元, 从而使该单元的显示误差通过相邻单元来补偿。经误差扩散处理所得半色调图像的局域平均值等于原连续色调图像。误差扩散算法的原理如图 1 所示。

图 1 中  $s(n)$  为连续色调图像,  $n = (x, y)$  表示像素在图像中的位置,  $Q$  为量化器,  $G$  为误差滤波

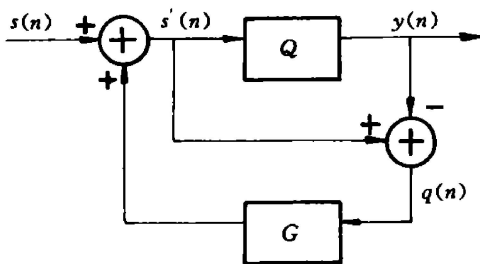


图 1 误差扩散算法的原理框图

Fig. 1 Block diagram of error diffusion algorithm

器, 其脉冲响应为  $g(n)$ 。

误差扩散算法可以等价为一个二维数字滤波器

$$s'(n) = s(n) + \sum g(n) \cdot q(n) \quad (1)$$

$$y(n) = Q[s'(n)] \quad (2)$$

$$q(n) = s'(n) - y(n) \quad (3)$$

式中  $q(n)$  为量化误差。将(1) 式代入(3) 可得

$$q(n) = s(n) - y(n) + \sum g(n) \cdot q(n) \quad (4)$$

式中  $e(n) = s(n) - y(n)$  为显示误差。对(4) 式做傅里叶变换可得

$$E(w) = [1 - G(w)] \cdot Q(w) \quad (5)$$

式中  $E(w)$ ,  $G(w)$  和  $Q(w)$  分别为  $e(n)$ ,  $g(n)$  和  $q(n)$  的傅里叶变换式,  $w = (u, v)$  表示二维的空间频率,  $D(w) = 1 - G(w)$  为误差扩散的传递函数。一般情况下,  $G(w)$  设计成低通滤波器, 则  $D(w)$  为高通滤波器, 因此当量化误差为白噪声时, 经此滤波后在低频段受到抑制高频获得增益, 从而使显示误差的能量转移到高频谱段, 这样的显示误差亦称为图像的蓝色噪声, 因而将显示误差频谱分布进行整形的过程称为误差蓝化。由于人类视觉系统对于图像的高频变化并不敏感, 因此进行误差扩散可获得较好的处理结果。在以下论述中滤波器均指  $D(w)$ 。

FS 滤波器的结构如图 2 所示,  $n$  为当前处理的图像单元, 0 为已处理的单元,  $g_{1,0}$ ,  $g_{1,1}$ ,  $g_{0,1}$ ,  $g_{-1,1}$  为未处理单元, 滤波器的脉冲响应  $g_{1,0} = 7/16$ ,  $g_{1,1} = 1/16$ ,  $g_{0,1} = 5/16$ ,  $g_{-1,1} = 3/16$ , 其滤波过程也就是将当前处理像素的量化误差以上述权重传递给未处理的像素。

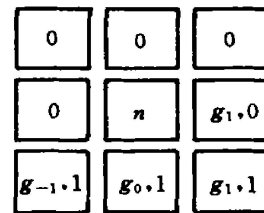


图 2 FS 滤波器结构

Fig. 2 Structure of FS filter

## 3 误差滤波器分析与设计

### 3.1 量化误差的频谱分析

设连续色调图像  $s(n)$  经过颜色量化后所得的图像为  $s_q(n)$ , 则量化误差  $q(n) = s(n) - s_q(n)$ 。对量化误差进行傅里叶分析, 可以获得量化误差的空间频率分布( 如图 3, 其中  $u, v$  为二维空间频率,  $I$

为归一化谱密度, 以下的频谱图坐标定义与此相同)。

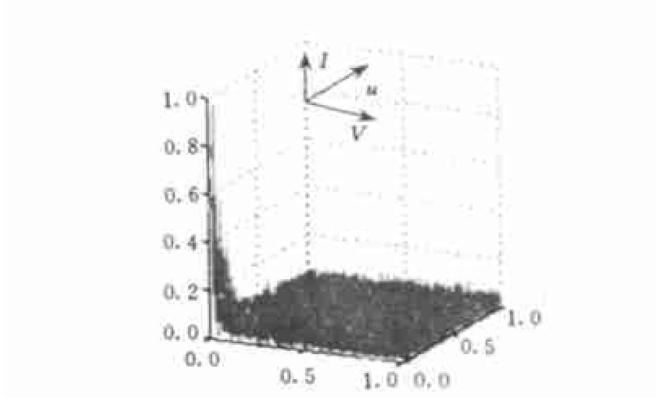


图3 量化误差的频谱分布

Fig. 3 Frequency distribute of quantization error

从频谱图可见, 在低频段内存在较大的峰值。一般而言, 自然图像都存在一定的空间相关性, 特别是在均匀缓变区域内这种相关性更大, 而经过颜色量化后此区域中的较大邻域内量化误差相差较小, 因而在频率域的低频段内将形成较大的能量分布。

利用 FS 滤波器实现的误差扩散算法其传递函数  $D(w)$  之幅频特性如图 4(a) 所示。

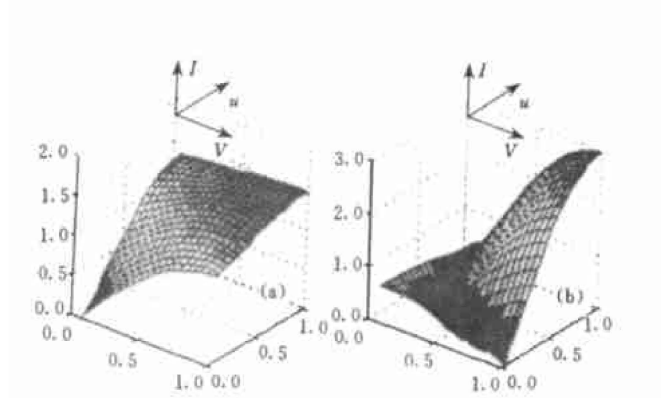


图4 传递函数的幅频特性

(a) FS 滤波器; (b) 多值量化优化滤波器

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic of transfer function

(a) FS filter

$$g_{1,0} = 7/16, g_{1,1} = 1/16, g_{0,1} = 5/16, g_{-1,1} = 3/16;$$

(b) multilevel quantization optimized filter

$$g_{1,0} = 0.68, g_{1,1} = -0.87, g_{0,1} = 0.49, g_{-1,1} = 0.05$$

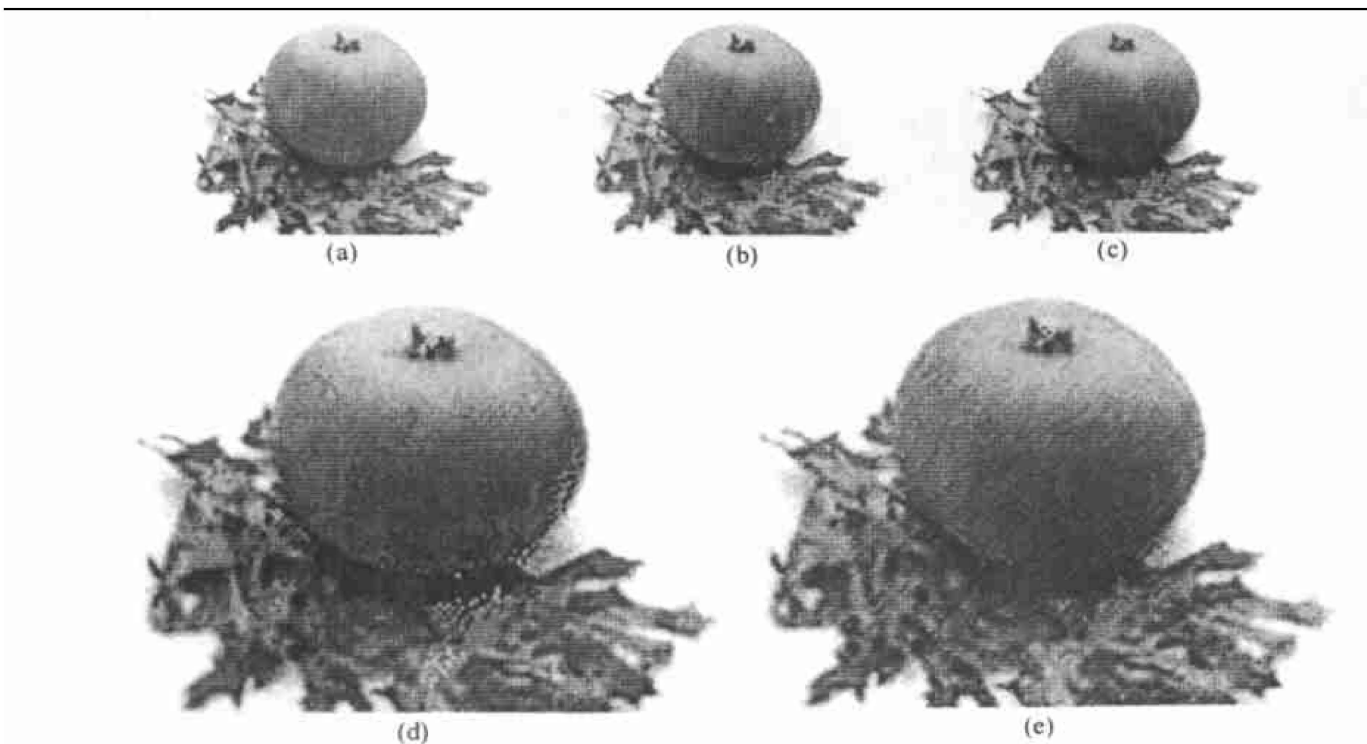


图5 测试图像效果图

(a) 原始测试图像; (b) FS 滤波器处理后的图像; (c) 多值量化优化滤波器处理后的图像;

(d) FS 滤波器处理后的放大效果图; (e) 多值量化优化滤波器处理后的放大效果图

Fig. 5 Test image and result

(a) original test image; (b) the image dealt with FS filter; (c) the image dealt with multilevel quantization optimized filter;

(d) the amplificatory image dealt with FS filter; (e) the amplificatory image dealt with multilevel quantization optimized filter

由图可见该传递函数是一个典型的高通滤波器, 对标准测试图像(图 5(a)) 的处理结果如图 5

(b), (d) 所示(其中(d)为(b)的放大效果图), 伪轮廓现象得到了较大的改善, 图像质量得到提高, 然而尚存在一定的问题, 如仍然可以看出伪轮廓的痕迹, 并且因在均匀区域存在一定程度的颗粒噪声而使图像的视觉效果显得较为粗糙。造成这些现象的主要原因是 FS 滤波器的传递函数  $D(w)$  之幅频特性低频衰减过大、高频增益不够。由于低频衰减过大, 破坏了图像本身所具有的空间相关性, 使部分均匀区域出现强度较大的高频颗粒噪声; 而伪轮廓的出现是误差蓝化程度不足的直接结果, 其根本原因是滤波器的高频增益不够。

### 3.2 误差滤波器的稳定性分析

Fan 对误差扩散中滤波器的稳定性进行了分析<sup>[8]</sup>, 并依据  $\sum_{x,y} g(x,y)$  将滤波器分为三种类型: 当  $\sum_{x,y} g(x,y) < 1$  时, 属于类型 iv, 此类型滤波器使每个像素的量化误差部分地进行传播, 因而总是稳定的; 当  $\sum_{x,y} g(x,y) > 1$  时, 属于类型 ㉔ 如此传播的误差要大于实际存在的量化误差, 因而总是不稳定的; 当  $\sum_{x,y} g(x,y) = 1$  时, 属于类型 ㉕ 其稳定性条件是必须保证输入值的范围, 使其经过误差扩散后的输出限定在有效色域之内。由于当今所有的输出设备其他色域都是有限的, 因而不能普遍地满足此条件。实际上, 由于误差扩散使某一像素超出有效色域, 将导致量化误差在其邻域内无法得到补偿, 必然要传递给后续的像素, 从而造成误差的累积效应, 一旦这种现象在一块区域内频繁出现, 则处理后的图像将出现亮度相差较大的色斑振荡, 严重地影响着图像的质量。FS 滤波器便属于该类型。

### 3.3 误差滤波器的优化设计

在误差扩散算法中误差滤波器的脉冲响应取值是至关重要的, 将直接关系到多色调处理的效果。通过以上分析可知, 多值量化与二值量化后误差信号特性相差迥异, 一方面多值量化后的量化误差不再是白噪声, 在低频段有较大能量的分布; 另一方面该量化误差的幅值较小, 因此针对多值量化的误差扩散需要重新设计误差滤波器的脉冲响应。本文在设计过程中主要考虑了频率特性和稳定性两方面的要求, 所设计的滤波器称为多值量化优化滤波器。

#### 3.3.1 频率特性设计

要实现误差蓝化则误差扩散的传递函数必然是高通类型, 而且在高频段其增益与 FS 滤波器的增益相比要有较大的提高, 以此强化误差蓝化。同时, 为了保证图像本身固有的空间相关性, 在低频段的衰减不能太小, 因为在误差滤波过程中对量化误差

之低频分量抑制的同时亦将损害图像信号的低频特性, 而人类视觉系统恰恰对此谱段的变化最为敏感。误差扩散的实质是在误差蓝化过程中尽量保证图像低频特性, 然而这两方面又是相互矛盾的, 因此必须在二者之间构成一种折衷关系。综上所述, 较为理想的滤波器在低频段其幅频响应与量化误差在低频段的频谱分布具有相似的曲线, 即随着频率的增大而迅速减小, 在达到最小值后又随着频率增大而逐渐增大, 当然此滤波器仍然属于高通类型, 即低频衰减高频增益。

#### 3.3.2 稳定性设计

考虑到多值量化的量化误差较小这一实际情况, 滤波器的稳定性也是比较重要的, 如果滤波器由于不稳定而产生误差累积, 将对处理结果产生极为严重的影响。为了保证稳定性故而采用类型 iv 滤波器, 即  $\sum_{x,y} g(x,y) < 1$ 。

多值量化滤波器仍然采用 FS 滤波器的结构, 因而设计工作的核心是确定滤波器的结构参数, 即其脉冲响应。本文采用限定区间搜索并结合试验验证的方法进行优化设计, 其具体过程如下: 首先选定四个参数的区间为  $[-1, 1]$ , 以  $\sum g = 0.35$  为约束条件, 每个参数以 0.05 为步长对限定区间进行搜索, 同时根据上述对幅频响应特性的讨论, 人为地构造一个评价函数, 每次搜索均计算其幅频响应并与评价函数进行比较, 保存 20 个结果最为相似的参数, 最后经过试验与参数微调确定的脉冲响应为

$$\begin{aligned} g_{1,0} &= 0.68, g_{1,1} = -0.87, \\ g_{0,1} &= 0.49, g_{-1,1} = 0.05 \end{aligned} \quad (6)$$

该多值量化滤波器的幅频响应如图 4(b) 所示, 与 FS 滤波器相比在高频段增益更大, 在低频段衰减随着频率的降低而减小, 达到了预期的结果。

## 4 算法实现与测试结果

彩色图像多色调处理首先要选择适当的颜色空间, 较为常用的颜色空间包括 sRGB, CIERGB, CIEXYZ, CIELAB, YIQ 等空间。在误差扩散算法中的误差滤波器是一个线性系统, 因而要求其处理的信号亦属于线性空间, 即该空间满足线性可加性。根据色度学理论可知 CIERGB 是线性空间, sRGB, CIERGB, CIEXYZ, YIQ 空间可以利用线性变换由 CIERGB 转换, 而 CIELAB 与 CIELUV 是经过对 CIEXYZ 的非线性变换而得, 误差满足线性可加性, 因而不适合于误差扩散。为此选用 CIERGB 作为

误差扩散的颜色空间。

表示彩色图像的信号均为多维矢量, 因为所选用的颜色空间是线性空间, 所以误差扩散可在颜色矢量的各个分量上独立进行, 然后将各个分量上处理结果合成为颜色矢量以备输出。

多色调处理算法包括颜色量化和误差扩散两个基本步骤。颜色量化采用 Wu 提出的主元分析方法<sup>[4]</sup>, 包括调色板优化与像素映射两个步骤, 经此处理后形成具有  $K$  个颜色的调色板, 并且每个像素均建立起与该调色板的映射关系。误差扩散过程采用式(6)作为滤波器的结构参数, 处理过程采用光栅扫描方式。

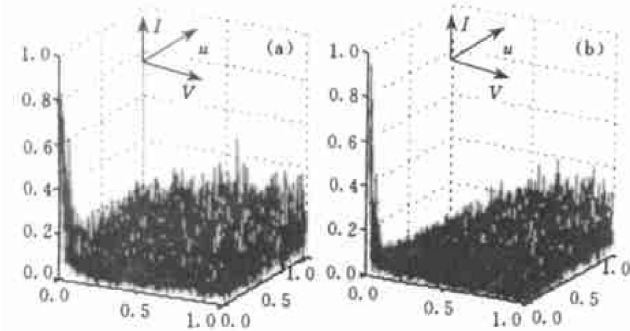


图 6 显示误差的频谱分布

(a) FS 滤波器; (b) 多值量化优化滤波器

Fig. 6 Frequency distribute of display error

(a) FS filter

$$g_{1,0} = 7/16, g_{1,1} = 1/16, g_{0,1} = 5/16, g_{-1,1} = 3/16$$

(b) multilevel quantization optimized filter

$$g_{1,0} = 0.68, g_{1,1} = -0.87, g_{0,1} = 0.49, g_{-1,1} = 0.05$$

利用上述算法对测试图像的处理结果如图 5 (c), (e) 所示, 其中量化的颜色数为 32, 图像的尺寸为  $128 \times 128$ , 与 FS 滤波器的处理结果相比伪轮廓与颗粒噪声的现象得到明显的改善。图 6 分别给出了两种滤波器所处理图像的显示误差频谱分布, 由

此可见对应多值量化滤波器的显示误差在低频的能量大大减少, 因而更符合人类视觉系统对空间频率的低通特性。

## 5 结 论

多值量化与二值量化相比量化误差的性质发生了较大变化, 主要表现在低频段出现较大的能量分布, 而对量化误差进行高通滤波的同时亦损害了图像所固有的低频特性, 同时在高频谱段的增益不够将导致误差蓝化的程度不足。另外量化误差的幅值比较小对滤波器的稳定性要求严格。基于上述观点重新设计了多值量化滤波器的结构参数, 获得较好的处理结果。

## 参 考 文 献

- 1 P. Heckbert. Color image quantization for frame buffer display [J]. *Computer Graphics*, 1982, **16**(3): 297~ 307
- 2 M. Orchard, C. Bounman. Color quantization of images [J]. *IEEE Trans. on Signal Proc.*, 1991, **39**(12): 2677 ~ 2690
- 3 Y. Linde, A. Buzo, R. Gray. An algorithm for vector quantizer design [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1980, **28**(1): 84~ 95
- 4 X. Wu. Color quantization by dynamic programming and principal analysis [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1992, **11**(4): 348~ 372
- 5 A. Dekker. Kohonen neural networks for optimal colour quantization [J]. *Network: Computation in Neural Systems*, 1994, **5**: 351~ 367
- 6 R. S. Gentile, E. Walowitz, J. P. Allebach. Quantization and multilevel halftoning of color images for near original image quality [C]. *SPIE*, 1990, **1249**: 249~ 260
- 7 R. W. Floyd, L. Steinberg. An adaptive algorithm for spatial grayscale [C]. *Proc. SID*, 1976, **17**(2): 75~ 77
- 8 Zhigang Fan. Stability analysis for color error diffusion [C]. *SPIE*, 2000, **3963**: 483~ 488